

中华人民共和国国家标准

GB 150. 3—20XX

部分代替GB 150—1998

压力容器 第3部分：设计

Pressure Vessels

Part3: Design

(报批稿)

2011-××-××发布

2011-××-××实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

目 次

| | |
|------------------------------------|-----|
| 前言 | II |
| 1 范围 | 1 |
| 2 规范性引用文件 | 1 |
| 3 内压圆筒和内压球壳 | 1 |
| 4 外压圆筒和外压球壳 | 3 |
| 5 封头 | 24 |
| 6 开孔与开孔补强 | 63 |
| 7 法兰 | 98 |
| 附录 A (规范性附录) 非圆形截面容器 | 135 |
| 附录 B (规范性附录) 钢带错绕筒体 | 165 |
| 附录 C (资料性附录) 密封结构 | 168 |
| 附录 D (资料性附录) 焊接接头结构 | 213 |
| 附录 E (规范性附录) 关于低温压力容器的基本设计要求 | 239 |

前 言

GB 150《压力容器》分为以下4个部分：

- 第1部分：通用要求；
- 第2部分：材料；
- 第3部分：设计；
- 第4部分：制造、检验和验收。

本部分为GB 150《压力容器》的第3部分：设计。

本部分在GB 150—1998第5章至第9章、附录C、附录D、附录G和附录J的基础上，结合压力容器基本受压元件设计的实际需要及相关标准修订提案，同时为满足《固定式压力容器安全技术监察规程》的要求，进行修订编制。与GB 150—1998相比，主要变化如下：

- 对应于原GB 150—1998第5章：内压圆筒和内压球壳，本部分第3章增加了按外径进行壁厚设计计算的相应公式。
- 对应于原GB 150—1998第6章：外压圆筒与外压球壳，本部分第4章主要变化内容为：
 - a) 修订了外压曲线图，增加了对应于高强度材料的外压曲线；
 - b) 增加了相对应的应力系数 B 曲线图选用表；
 - c) 加强圈的结构设计作了部分修改。
- 对应于原GB 150—1998第7章：封头，本部分第5章中主要变化内容为：
 - a) 增加了偏心锥壳、低压折边平封头、带筋平封头和拉撑结构的设计计算方法；
 - b) 调整了部分平盖的结构特征系数 K ；
 - c) 增加了适用于平封头与筒体全焊透连接结构的塑性分析设计方法；
 - d) 增加了 $\delta/R < 0.002$ 时，球冠形封头与锥壳的设计方法。
- 对应于原GB 150—1998第8章：开孔和开孔补强，本部分第6章对开孔和开孔补强设计计算方法内容进行了扩充，引入了筒体径向接管的整体补强设计方法，开孔率适用范围可达0.9。
- 对应于原GB 150—1998第9章：法兰，本部分第7章中主要内容变化为：
 - a) 增加了整体法兰和按整体法兰计算的任意法兰的刚度校核计算要求；
 - b) 增加了波齿垫片设计选用参数。
- 将GB 150—1998附录C“低温压力容器”中与设计相关的内容调整为本部分的附录E。
- 将GB 150—1998附录D、附录G和附录J内容纳入本部分的附录A、附录C和附录D。主要调整或变化内容为：
 - a) 增加附录B“钢带错绕筒体设计”；
 - b) 附录C扩大了双锥密封的适用范围；
 - c) 附录D焊接结构根据实际情况进行了整理和补充。

本部分的附录A、附录B、附录E为规范性附录，附录C、附录D为资料性附录。

本部分由全国锅炉压力容器标准化技术委员会（SAC/TC 262）提出并归口。

本部分负责起草单位：中国特种设备检测研究院

本部分参加起草单位：中国石化工程建设公司、清华大学、浙江大学、浙江工业大学、中国石化集团上海工程有限公司、中国石油寰球工程公司。

本部分主要起草人：寿比南、杨国义、李世玉、薛明德、徐锋、郑津洋、高增梁、桑茹苞、秦叔经、叶日新、冯清晓、陈朝晖、陈志伟、陈冰冰、张迎恺、朱国栋。

本部分所代替标准的历次版本发布情况为：GB 150—1989、GB 150—1998。

压力容器

第3部分：设计

1 范围

GB 150.3 规定了压力容器基本受压元件的设计要求。

本部分适用于内压圆筒和内压球壳、外压圆筒和外压球壳、封头、开孔和开孔补强以及法兰的设计计算。

本部分给出了非圆形截面容器（规范性附录 A）、钢带错绕筒体（规范性附录 B）、常用密封结构（资料性附录 C）和焊接接头结构（资料性附录 D）的基本设计要求。

本部分还给出了关于低温压力容器的基本设计要求（规范性附录 E）。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB 150.1 压力容器 第1部分：通用要求
- GB 150.2 压力容器 第2部分：材料
- GB 150.4 压力容器 第4部分：制造、检验和验收
- JB/T 4700 压力容器法兰与技术条件
- JB/T 4701 甲型平焊法兰
- JB/T 4702 乙型平焊法兰
- JB/T 4703 长颈对焊法兰
- JB/T 4704 非金属软垫片
- JB/T 4705 缠绕垫片
- JB/T 4706 金属包垫片
- JB/T 4707 等长双头螺柱

3 内压圆筒和内压球壳

3.1 本章计算公式适用于单层、多层包扎、套合圆筒和球壳的计算。钢带错绕筒体设计计算按附录 B 进行。

3.2 术语、定义和符号

3.2.1 GB 150.1 中的术语和定义适用于本部分。

3.2.2 符号

C ——厚度附加量（按 GB 150.1），mm；对多层包扎圆筒和套合圆筒只考虑内筒的 C 值；

D_i ——圆筒或球壳的内直径，mm；

D_o ——圆筒或球壳的外直径（ $D_o = D_i + 2\delta_n$ ），mm；

p_c ——计算压力，MPa；

$[p_w]$ ——圆筒或球壳的最大允许工作压力，MPa；

δ ——圆筒或球壳的计算厚度，mm；

δ_e ——圆筒或球壳的有效厚度，mm；

δ_i ——多层包扎圆筒内筒或套合圆筒内筒的名义厚度，mm；

δ_n ——圆筒或球壳的名义厚度，mm；

δ_o ——多层包扎圆筒层板层和套合圆筒套合层总厚度，mm；

σ^t ——设计温度下圆筒或球壳的计算应力，MPa；

$[\sigma]^t$ ——设计温度下圆筒或球壳材料的许用应力（按 GB 150.2），MPa；

$[\sigma_i]^t$ ——设计温度下多层包扎圆筒内筒或套合圆筒内筒材料的许用应力（按 GB 150.2），MPa；

$[\sigma_o]^t$ ——设计温度下多层包扎圆筒层板层或套合圆筒套合层材料的许用应力，MPa；

\square ——焊接接头系数；

\square_i ——多层包扎圆筒和套合圆筒内筒的焊接接头系数；

\square_o ——多层包扎圆筒层板层和套合圆筒套合层的焊接接头系数。

3.3 圆筒计算

本节公式的适用范围为 $p_c \leq 0.4[\sigma]^t \phi$ 。设计温度下圆筒的计算厚度按式（3-1）或（3-2）计算：

$$\delta = \frac{p_c D_i}{2[\sigma]^t \phi - p_c} \quad \dots\dots\dots (3-1)$$

$$\delta = \frac{p_c D_o}{2[\sigma]^t \phi + p_c} \quad \dots\dots\dots (3-2)$$

圆筒的计算应力按式（3-3）或（3-4）计算：

$$\sigma^t = \frac{p_c (D_i + \delta_e)}{2\delta_e} \quad \dots\dots\dots (3-3)$$

$$\sigma^t = \frac{p_c (D_o - \delta_e)}{2\delta_e} \quad \dots\dots\dots (3-4)$$

σ^t 值应小于或等于 $[\sigma]^t \phi$ 。

多层包扎圆筒及套合圆筒的 $[\sigma]^t \phi$ 值按式（3-5）计算：

$$[\sigma]^t \phi = \frac{\delta_i}{\delta_n} [\sigma_i]^t \phi_i + \frac{\delta_o}{\delta_n} [\sigma_o]^t \phi_o \quad \dots\dots\dots (3-5)$$

公式中 $\phi_i=1.0$ ， $\phi_o=0.95$ 。

设计温度下圆筒的最大允许工作压力按式（3-6）或（3-7）计算：

$$[p_w] = \frac{2\delta_e [\sigma]^t \phi}{D_i + \delta_e} \quad \dots\dots\dots (3-6)$$

$$[p_w] = \frac{2\delta_e [\sigma]^t \phi}{D_o - \delta_e} \quad \dots\dots\dots (3-7)$$

3.4 球壳计算

本节公式的适用范围为 $P_c \leq 0.6[\sigma]^t \phi$ 。设计温度下球壳的计算厚度按式 (3-8) 或 (3-9) 计算:

$$\delta = \frac{p_c D_i}{4[\sigma]^t \phi - p_c} \quad \dots\dots\dots (3-8)$$

$$\delta = \frac{p_c D_o}{4[\sigma]^t \phi + p_c} \quad \dots\dots\dots (3-9)$$

球壳的计算应力按式 (3-10) 或 (3-11) 计算:

$$\sigma^t = \frac{p_c (D_i + \delta_e)}{4\delta_e} \quad \dots\dots\dots (3-10)$$

$$\sigma^t = \frac{p_c (D_o - \delta_e)}{4\delta_e} \quad \dots\dots\dots (3-11)$$

σ_t 值应小于或等于 $[\sigma]^t \phi$ 。

设计温度下球壳的最大允许工作压力按式 (3-12) 或 (3-13) 计算:

$$[p_w] = \frac{4\delta_e [\sigma]^t \phi}{D_i + \delta_e} \quad \dots\dots\dots (3-12)$$

$$[p_w] = \frac{4\delta_e [\sigma]^t \phi}{D_o - \delta_e} \quad \dots\dots\dots (3-13)$$

4 外压圆筒和外压球壳

4.1 本章规定适用于外压圆筒 (包括管子) 和外压球壳的设计。

4.2 术语、定义和符号

4.2.1 GB 150.1 中的术语和定义适用于本章。

4.2.2 符号

A ——外压应变系数;

A_s ——加强圈的横截面积, mm^2 ;

B ——外压应力系数, MPa;

C ——厚度附加量 (按 GB 150.1), mm;

D_i ——圆筒内直径, mm;

D_o ——圆筒外直径 ($D_o = D_i + 2\delta_n$), mm;

E^t ——设计温度下材料的弹性模量, MPa;

h_i ——封头曲面深度, mm;

I ——加强圈与圆筒组合段所需惯性矩, mm^4 ;

I_s ——加强圈与圆筒起加强作用的有效段的组合截面对通过与圆筒轴线平行的该截面形心轴的惯性矩, mm^4 ;

L ——圆筒计算长度, 应取圆筒两相邻支撑线之间的距离 (见图 4-1), mm;

p_c ——计算外压力 (按 GB 150.1 的通用要求), MPa;

$[p]$ ——许用外压力, MPa;

R_o ——球壳外半径, mm;

δ_n ——圆筒或球壳的名义厚度，mm；

δ_e ——圆筒或球壳的有效厚度，mm；

$[\sigma]^t$ ——圆筒或管子材料在设计温度下的许用应力（按 GB 150.2 材料），MPa；

R_{eL} ($R_{p0.2}$) ——圆筒或管子材料标准在室温下的屈服强度（或 0.2%非比例延伸强度），MPa；

R_{eL}^t ($R_{p0.2}^t$) ——圆筒或管子材料在设计温度下的屈服强度（或 0.2%非比例延伸强度），MPa。

4.3 外压圆筒的稳定性校核

4.3.1 计算长度的确定

圆筒计算长度，应取圆筒上两相邻支撑线之间的距离，见图 4-1。

- 如图 4-1 a) 所示，当圆筒部分没有加强圈（或可作为加强的构件）时，取圆筒的总长度加上每个凸形封头曲面深度的 1/3；
- 如图 4-1 c) 所示，当圆筒部分有加强圈（或可作为加强的构件）时，取相邻加强圈中心线间的最大距离；
- 如图 4-1 d) 所示，取圆筒第一个加强圈中心线与凸形封头切线间的距离加凸形封头曲面深度的 1/3；
- 如图 4-1 b)、e)、f) 所示，当圆筒与锥壳相连接，若连接处可作为支撑线时，取此连接处与相邻支撑线之间的最大距离；图 4-1 f) 中的 L_x 系指锥壳段的轴向长度，其外压计算长度取当量长度 L_e 见 5.6.6。
- 如图 4-1 g) 所示，对带夹套的圆筒，则取承受外压的圆筒长度；若带有凸形封头，还应加上封头曲面深度的 1/3；若有加强圈（或可作为加强的构件）时，则按图 4-1 c)、d) 计算。

注：支撑线系指该处的截面有足够的惯性矩，以确保外压作用下该处不出现失稳现象。

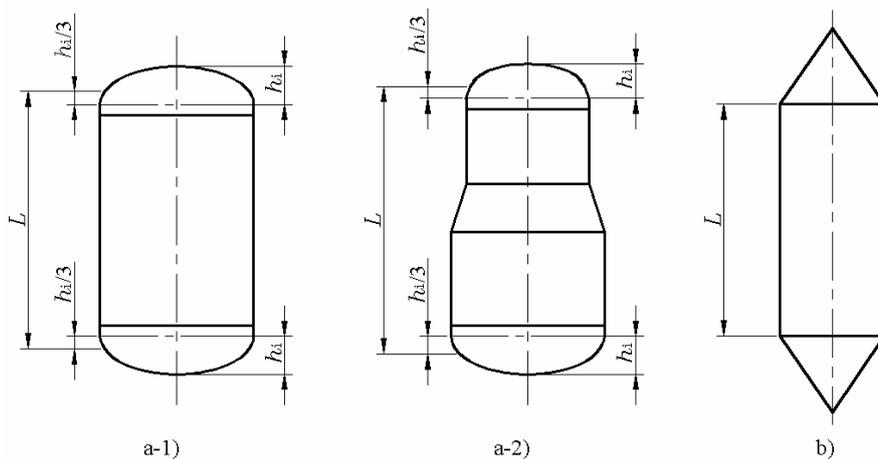
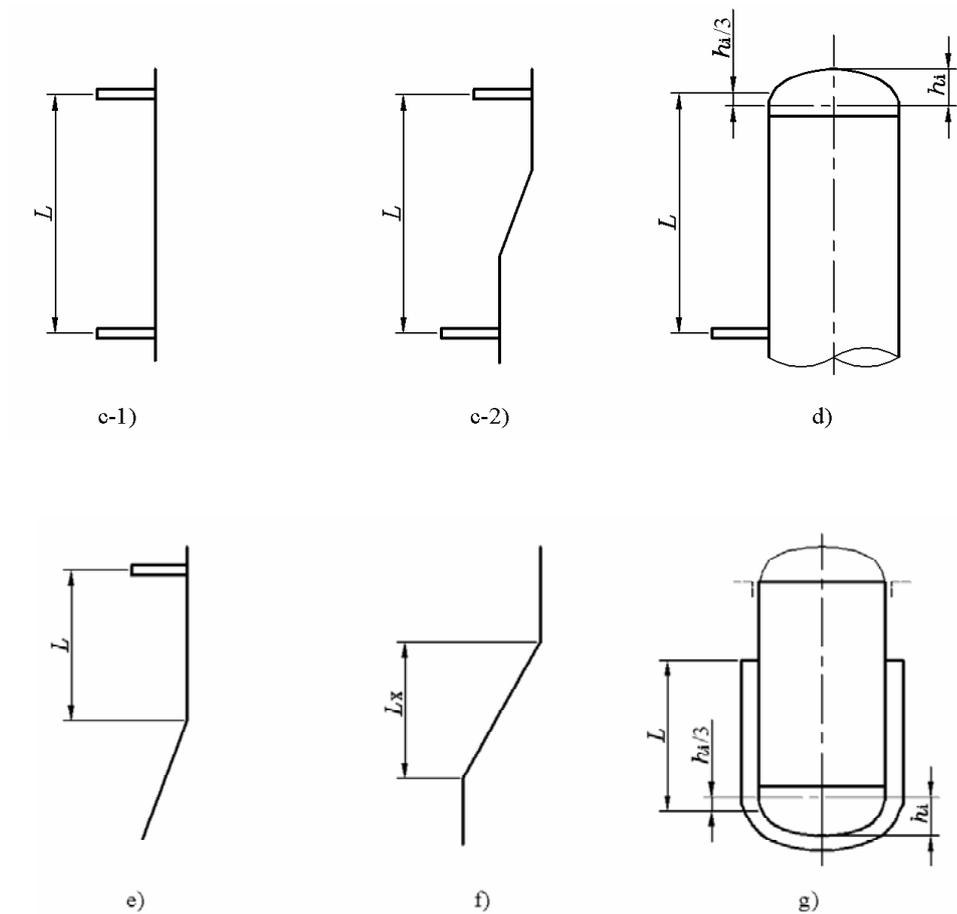


图 4-1 外压圆筒的计算长度



- 注：1.图 a-2) 和 c-2) 中锥壳或折边段的厚度不得小于相连接圆筒的厚度。
 2.图 b)、e) 和 f) 中锥壳与圆筒的连接处的惯性矩，按 5.6.6 的规定。
 3.计算时应采用图示的 L 、各段直径和相应的厚度。

图 4-1 (续)

4.3.2 $D_o/\delta_e \geq 20$ 的圆筒

4.3.2.1 确定外压应变系数 A

- a) 根据 L/D_o 和 D_o/δ_e 由图 4-2 或表 4-2 查取外压应变系数 A 值(遇中间值用内插法);
- b) 若 L/D_o 值大于 50, 则用 $L/D_o=50$ 查图; 若 L/D_o 值小于 0.05, 则用 $L/D_o=0.05$ 查图。

4.3.2.2 确定外压应力系数 B

- a) 按所用材料, 查表 4-1 确定对应的外压应力系数 B 曲线图(图 4-3~图 4-11), 由 A 值查取 B 值(遇中间值用内插法);
- b) 若 A 值超出设计温度曲线的最大值, 则取对应温度曲线右端点的纵坐标值为 B 值;
- c) 若 A 值小于设计温度曲线的最小值, 则按式 (4-1) 计算 B 值:

$$B = \frac{2AE^t}{3} \dots\dots\dots (4-1)$$

表 4-1 外压应力系数 B 曲线图选用表

| 序号 | 钢号 | $R_{eL} (R_{p0.2})$ (MPa) | 设计温度范围 (°C) | 适用 B 曲线图 |
|----|------------------------|---------------------------|-----------------------|----------------|
| 1 | 10 | 205 | ≤ 475 | 图 4-3 |
| 2 | 20 | 245 | ≤ 475 | 图 4-5 |
| 3 | Q245R | 245 | ≤ 475 | 图 4-5 |
| 4 | Q345R | 345 | ≤ 475 | 图 4-4 |
| 5 | Q370R | 370 | ≤ 150 150~350 | 图 4-6 图 4-5 |
| 6 | 12CrMo | 205 | ≤ 475 | 图 4-3 |
| 7 | 12Cr1MoVG 12Cr1MoVR | 225 | ≤ 475 | 图 4-5 |
| 8 | 15CrMo | 235 | ≤ 475 | 图 4-5 |
| 9 | 15CrMoR | 295 | ≤ 150 150~400 | 图 4-6 图 4-5 |
| 10 | 1Cr5Mo | 195 | ≤ 475 | 图 4-3 |
| 11 | 09MnD | 270 | ≤ 150 | 图 4-6 |
| 12 | 09MnNiD | 280 | ≤ 150 | 图 4-6 |
| 13 | 08Cr2AlMo | 250 | ≤ 300 | 图 4-5 |
| 14 | 09CrCuSb | 245 | ≤ 200 | 图 4-5 |
| 15 | 18MnMoNbR | 390 | ≤ 150 150~475 | 图 4-6 图 4-5 |
| 16 | 13MnNiMoR | 390 | ≤ 150 150~400 | 图 4-6 图 4-5 |
| 17 | 14Cr1MoR | 300 | ≤ 150 150~475 | 图 4-6 图 4-5 |
| 18 | 12Cr2Mo1 | 280 | ≤ 150 150~475 | 图 4-6 图 4-5 |
| 19 | 12Cr2Mo1R | 310 | ≤ 150 150~475 | 图 4-6 图 4-5 |
| 20 | 12Cr2Mo1VR | 415 | ≤ 150 150~475 | 图 4-6 图 4-5 |
| 21 | 16MnDR | 315 | ≤ 150 150~350 | 图 4-6 图 4-5 |
| 22 | 15MnNiDR | 325 | ≤ 150 150~200 | 图 4-6 图 4-5 |
| 23 | 15MnNiNbD | 370 | ≤ 150 150~200 | 图 4-6 图 4-5 |
| 24 | 09MnNiDR | 300 | ≤ 150 150~350 | 图 4-6 图 4-5 |
| 25 | 08Ni3DR | 320 | ≤ 100 | 图 4-6 |
| 26 | 06Ni9DR | 575 | ≤ 100 | 图 4-7 |
| 27 | 07MnMoVR | 490 | ≤ 200 | 图 4-7 |
| 28 | 07MnNiVDR | 490 | ≤ 200 | 图 4-7 |

表 4-1 (续)

| 序号 | 钢号 | R_{eL} ($R_{p0.2}$) (MPa) | 设计温度范围/°C | 适用 B 曲线图 |
|----|--------------------------|-------------------------------|-----------|------------|
| 29 | 12MnNiVR | 490 | ≤200 | 图 4-7 |
| 30 | 07MnNiMoDR | 490 | ≤200 | 图 4-7 |
| 31 | S11348 | 170 | ≤400 | 图 4-3 |
| 32 | S11306 | 205 | ≤400 | 图 4-5 |
| 33 | S11972 | 275 | ≤350 | 图 4-5 |
| 34 | S30403 00Cr19Ni10 | 180 | ≤425 | 图 4-10 |
| 35 | S30408 0Cr18Ni9 | 205 | ≤650 | 图 4-8 |
| 36 | S30409 | 205 | ≤650 | 图 4-8 |
| 37 | S31608 0Cr17NiRMo2 | 205 | ≤650 | 图 4-9 |
| 38 | S31603 00Cr17Ni14Mo2 | 180 | ≤425 | 图 4-11 |
| 39 | S31668 0Cr18Ni12Mo2Ti | 205 | ≤450 | 图 4-9 |
| 40 | S31008 0Cr25Ni20 | 205 | ≤650 | 图 4-9 |
| 41 | S31708 0Cr19Ni13Mo3 | 205 | ≤650 | 图 4-9 |
| 42 | S31703 00Cr19Ni13Mo3 | 205 | ≤425 | 图 4-11 |
| 43 | S32168 0Cr18Ni10Ti | 205 | ≤650 | 图 4-9 |
| 44 | S39042 | 220 | ≤650 | 图 4-9 |
| 45 | S21953 | 440 | ≤300 | 图 4-12 |
| 46 | S22253 | 450 | ≤300 | 图 4-12 |
| 47 | S22053 | 450 | ≤300 | 图 4-12 |
| 48 | S25073 | 550 | ≤300 | 图 4-12 |
| 49 | 1Cr19Ni9 | 205 | ≤650 | 图 4-9 |

4.3.2.3 确定许用外压力 $[p]$

根据 B 值, 按式 (4-2) 计算许用外压力 $[p]$:

$$[p] = \frac{B}{D_o / \delta_e} \quad \dots\dots\dots (4-2)$$

计算得到的 $[p]$ 应大于或等于 p_c , 否则须调整设计参数, 重复上述计算, 直到满足设计要求。

4.3.3 $D_o / \delta_e < 20$ 的圆筒

4.3.3.1 确定外压应变系数 A

- 对 $D_o / \delta_e \geq 4.0$ 的圆筒, 用与 4.3.2.1 相同的步骤得到系数 A 值;
- 对 $D_o / \delta_e < 4.0$ 的圆筒, 按式 (4-3) 计算系数 A 值:

$$A = \frac{1.1}{(D_o / \delta_e)^2} \quad \dots\dots\dots (4-3)$$

系数 $A > 0.1$ 时, 取 $A = 0.1$ 。

4.3.3.2 确定外压应力系数 B

用与 4.3.2.2 条相同的步骤得到系数 B 值。

4.3.3.3 确定许用外压力 $[p]$

按式 (4-4) 计算许用外压力 $[p]$ 值:

$$[p] = \min \left\{ \left(\frac{2.25}{D_o/\delta_e} - 0.0625 \right) B, \quad \frac{2\sigma_0}{D_o/\delta_e} \left(1 - \frac{1}{D_o/\delta_e} \right) \right\} \dots\dots\dots (4-4)$$

式中, σ_0 应力, 取以下两值中的较小值:

$$\sigma_0 = 2[\sigma]^t$$

$$\sigma_0 = 0.9R_{cl}^t \text{ 或 } 0.9R_{p0.2}^t$$

计算得到的 $[p]$ 应大于或等于 p_c , 否则须调整设计参数, 重复上述计算, 直到满足设计要求。

4.4 外压球壳的计算

4.4.1 确定外压应变系数 A

根据 R_o/δ_e , 用式 (4-5) 计算系数 A 值:

$$A = \frac{0.125}{(R_o/\delta_e)} \dots\dots\dots (4-5)$$

4.4.2 确定外压应力系数 B

- a) 按所用材料, 查表 4-1 确定对应的外压应力系数 B 曲线图, 由 A 值查取 B 值 (遇中间值用内插法);
- b) 若 A 值超出设计温度曲线的最大值, 则取对应温度曲线右端点的纵坐标值为 B 值;
- c) 若 A 值小于设计温度曲线的最小值, 则按式 (4-1) 计算 B 值。

4.4.3 确定许用外压力 $[p]$

根据 B 值, 按式 (4-6) 计算许用外压力 $[p]$ 值:

$$[p] = \frac{B}{(R_o/\delta_e)} \dots\dots\dots (4-6)$$

计算得到的 $[p]$ 应大于或等于 p_c , 否则须调整设计参数, 重复上述计算, 直到满足设计要求。

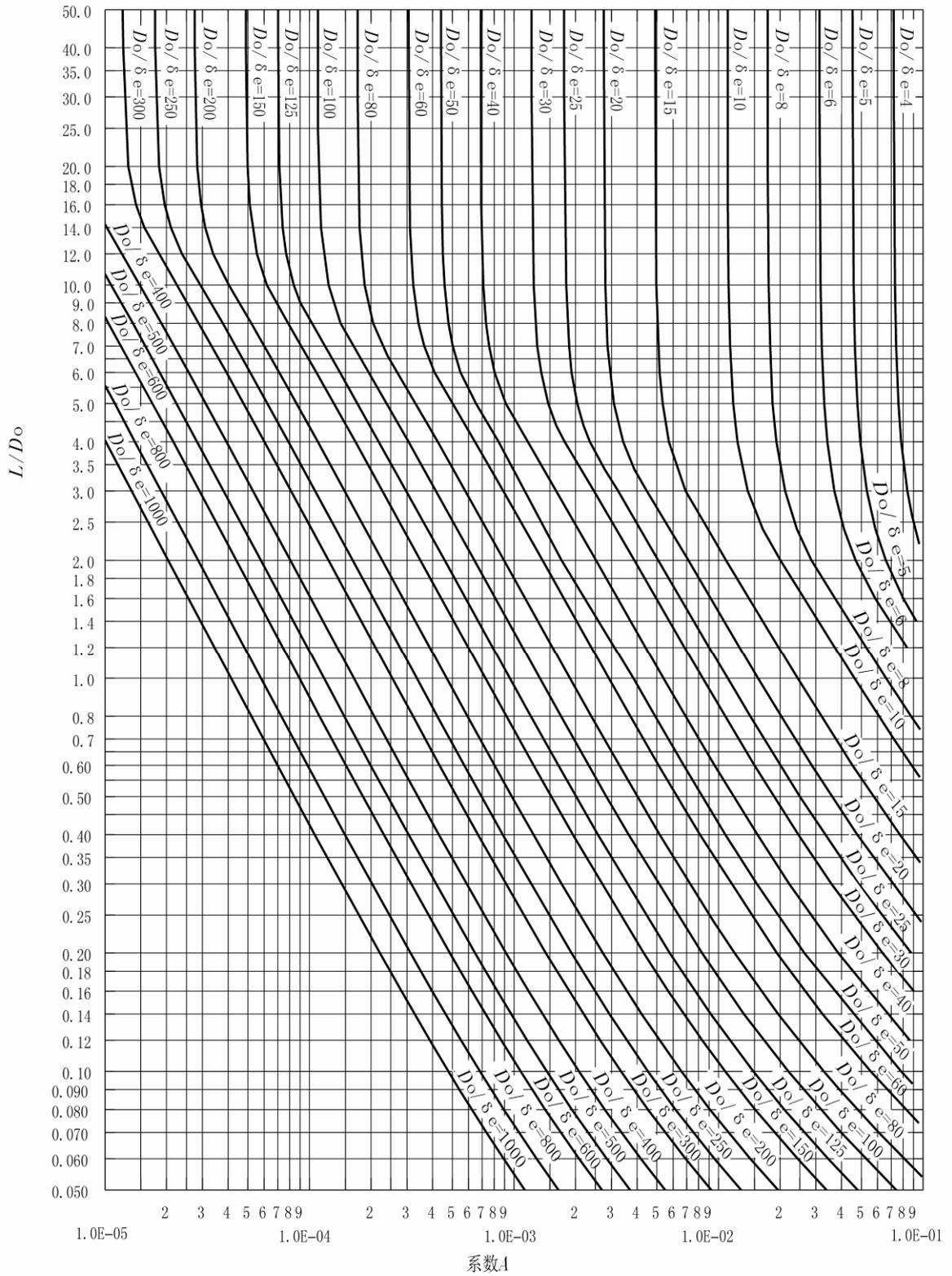
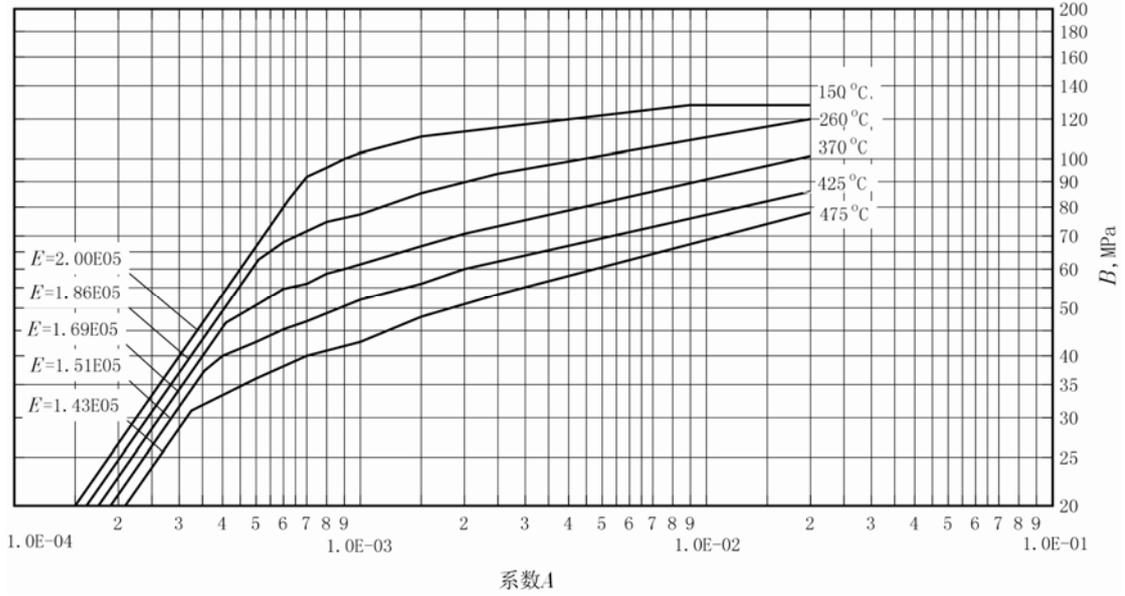
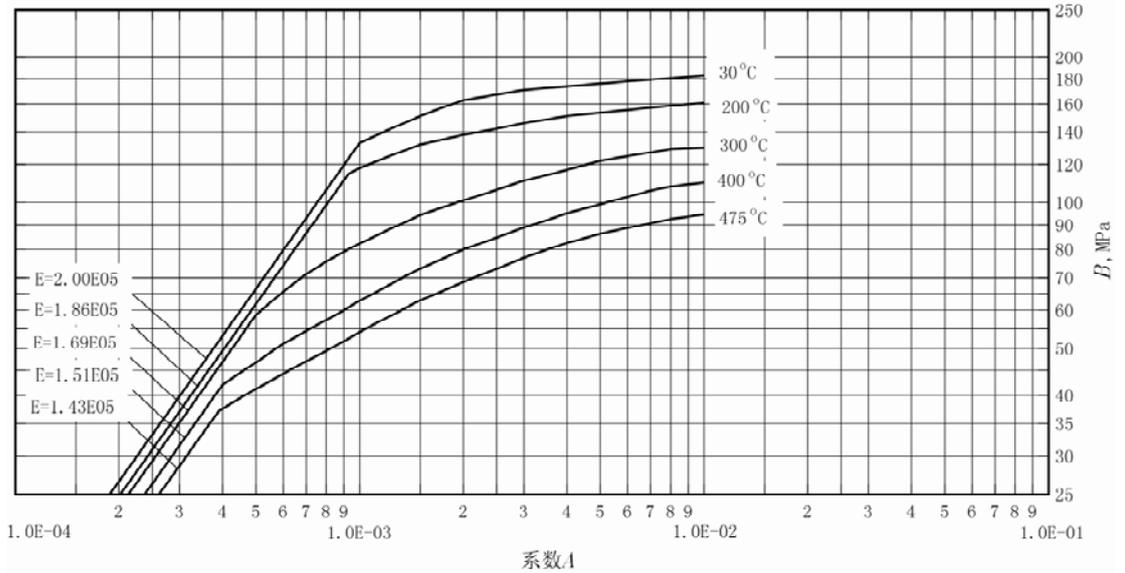


图 4-2 外压应变系数 A 曲线



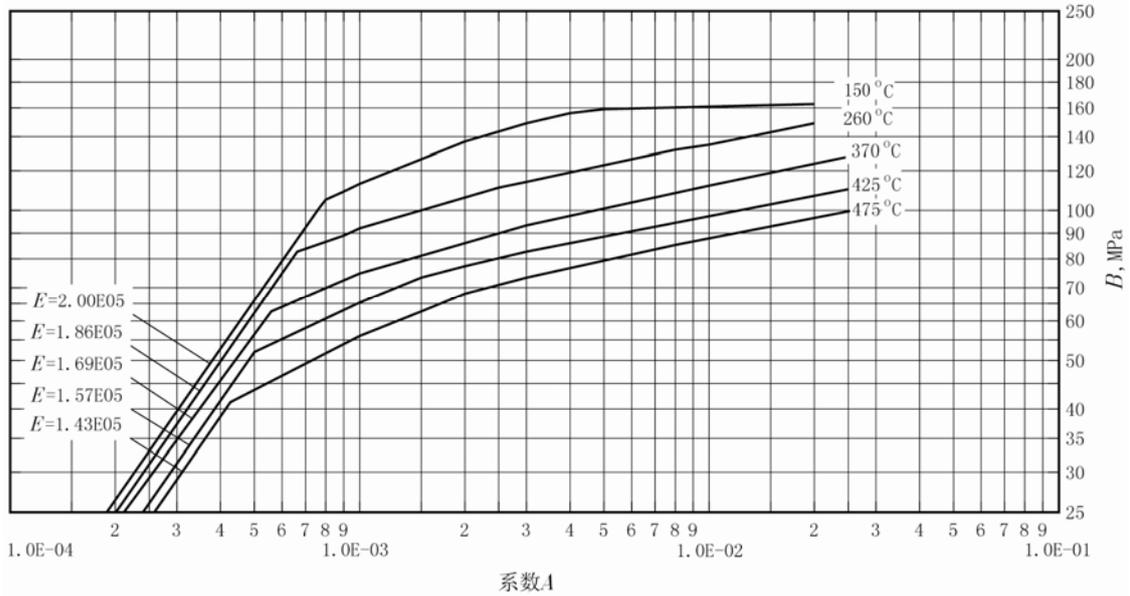
注：用于屈服强度 $R_{eL} < 207\text{MPa}$ 的碳素钢和 S11348 钢等。

图 4-3 外压应力系数 B 曲线



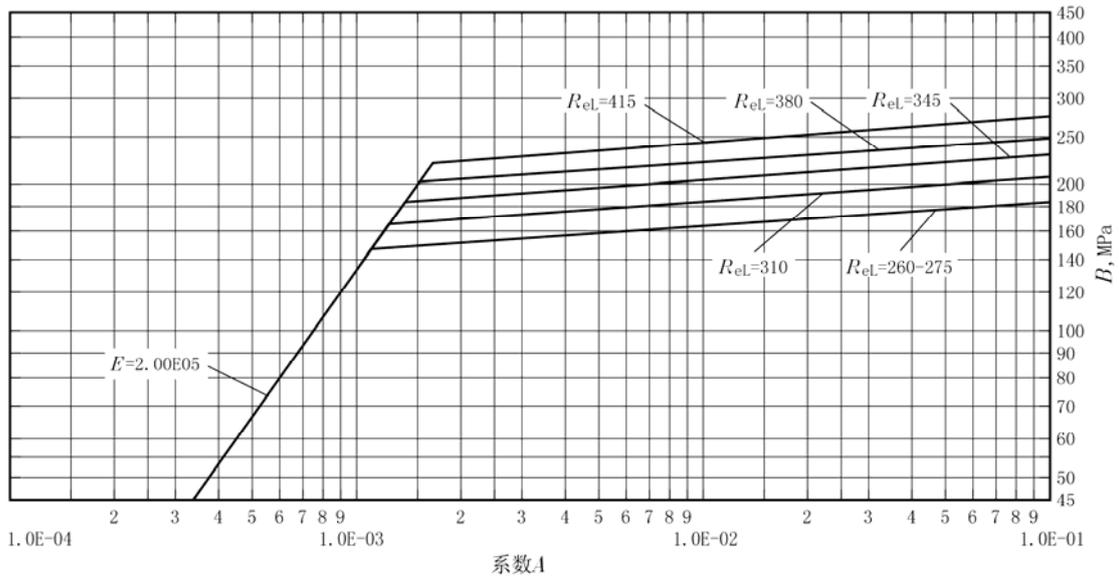
注：用于 Q345R 钢。

图 4-4 外压应力系数 B 曲线



注：用于除图 4-4 注明的材料外，材料的屈服强度 $R_{eL} > 207\text{MPa}$ 的碳钢、低合金钢和 S11306 钢等。

图 4-5 外压应力系数 B 曲线



注：用于除图 4-4 注明的材料外，材料的屈服强度 $R_{eL} > 260\text{MPa}$ 的碳钢、低合金钢等。

图 4-6 外压应力系数 B 曲线

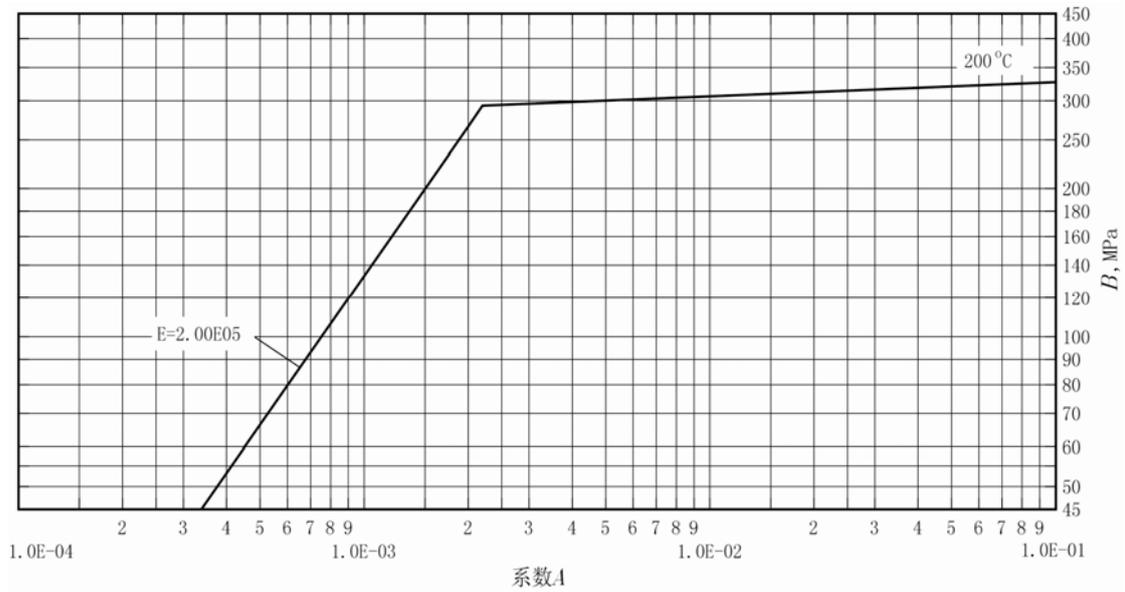
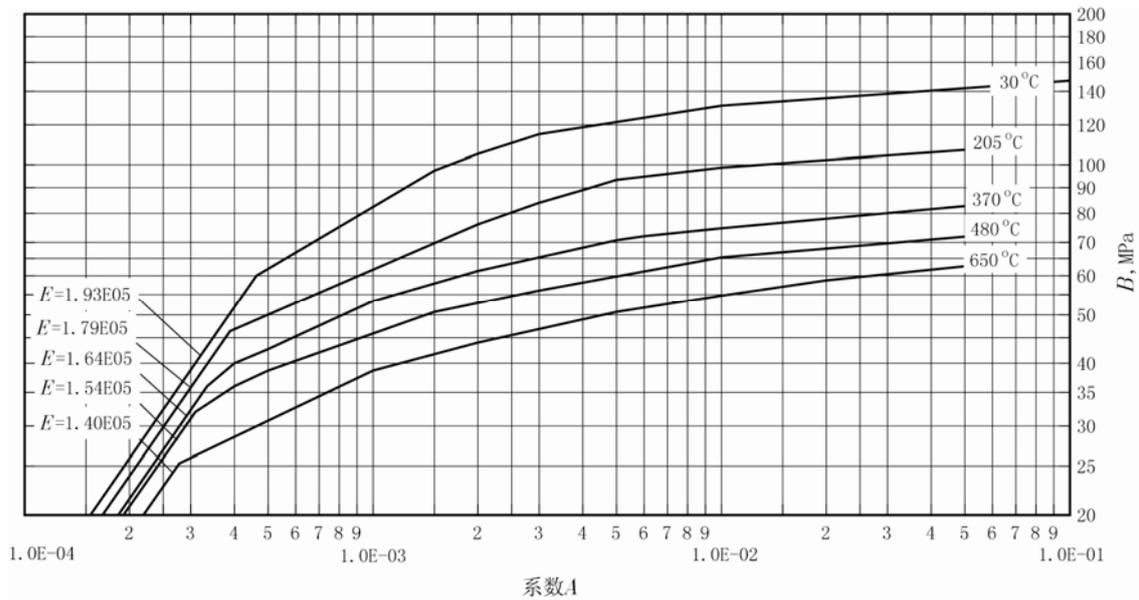
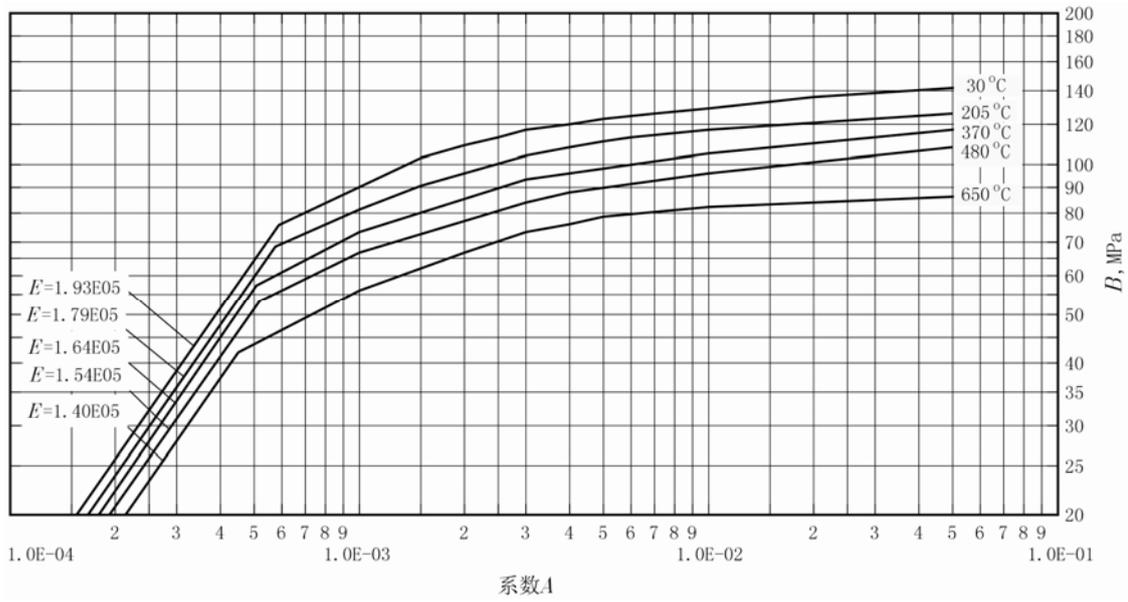


图 4-7 外压应力系数 B 曲线



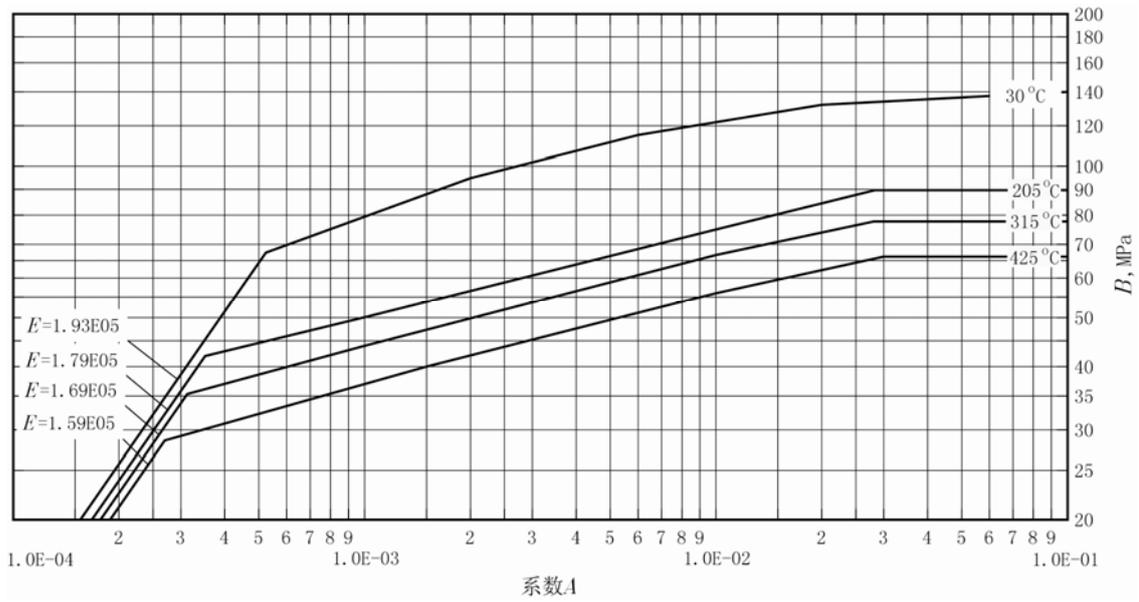
注：用于 S30408 钢等。

图 4-8 外压应力系数 B 曲线



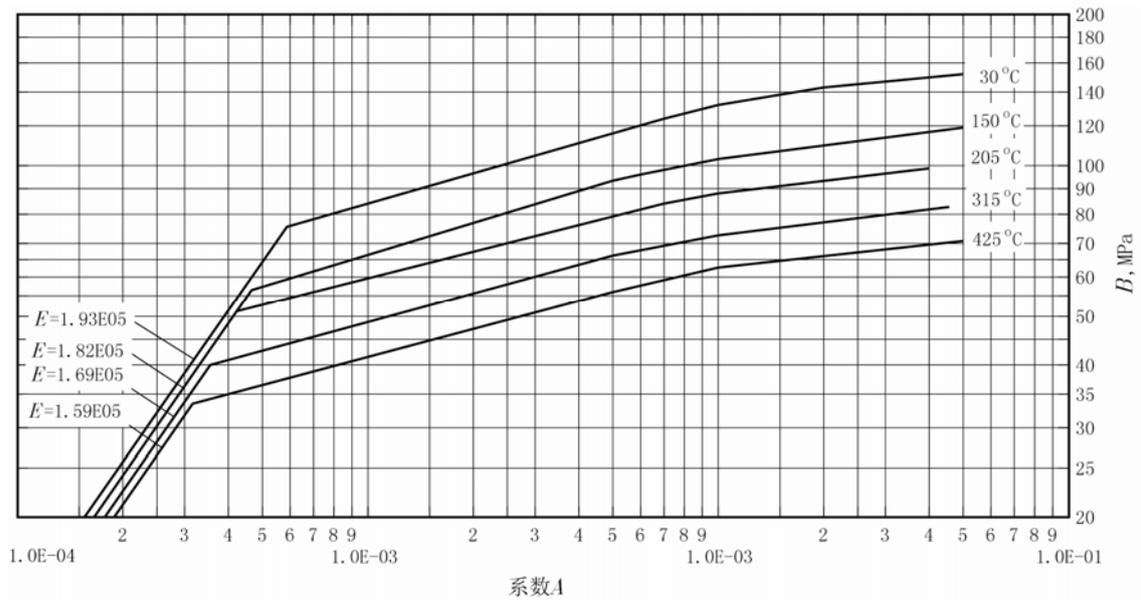
注：用于 S31608 钢等。

图 4-9 外压应力系数 B 曲线



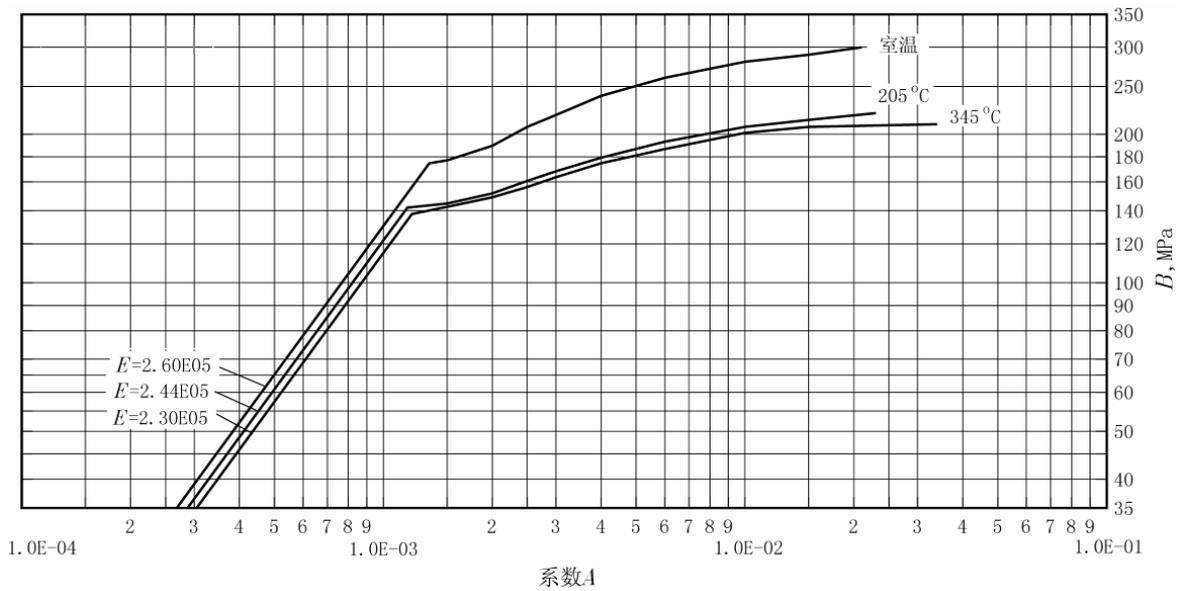
注：用于 S30403 钢等。

图 4-10 外压应力系数 B 曲线



注：用于 S31603 钢等。

图 4-11 外压应力系数 B 曲线



注：用于 S21953 钢等。

图 4-12 外压应力系数 B 曲线

4.5 外压圆筒加强圈的设计

4.5.1 加强圈的计算

4.5.1.1 惯性矩计算

选定加强圈材料与截面尺寸，计算其横截面积 A_s 和加强圈与圆筒有效段组合截面的惯性矩 I_s ，圆筒有效段系指在加强圈中心线两侧有效宽度各为 $0.55\sqrt{D_o\delta_e}$ 的壳体；

若加强圈中心线两侧圆筒有效宽度与相邻加强圈的圆筒有效宽度相重叠, 则该圆筒的有效宽度中相重叠部分每侧按一半计算。

4.5.1.2 确定外压应力系数 B

按式 (4-7) 计算 B 值:

$$B = \frac{p_c D_o}{\delta_e + (A_s / L_s)} \quad \dots\dots\dots (4-7)$$

式中:

L_s ——从加强圈中心线到相邻两侧加强圈中心线距离之和的一半, 若与凸形封头相邻, 在长度中还应计入封头曲面深度的 1/3, mm。

4.5.1.3 确定外压应变系数 A

- a) 按所用材料, 查表 4-1 确定对应的外压应力系数 B 曲线图, 由 B 值查取 A 值 (遇中间值用内插法);
- b) 若 B 值超出设计温度曲线的最大值, 则取对应温度曲线右端点的横坐标值为 A 值;
- c) 若 B 值小于设计温度曲线的最小值, 则按式 (4-8) 计算 A 值:

$$A = \frac{3B}{2E^t} \quad \dots\dots\dots (4-8)$$

4.5.1.4 确定所需的惯性矩 I

按式 (4-9) 计算加强圈与圆筒组合段所需的惯性矩 I 值:

$$I = \frac{D_o^2 L_s (\delta_e + A_s / L_s)}{10.9} A \quad \dots\dots\dots (4-9)$$

I_s 应大于或等于 I , 否则选用较大惯性矩的加强圈, 重复上述步骤, 直到 I_s 大于且接近 I 为止。

4.5.2 加强圈的设置

4.5.2.1 加强圈可设置在容器的内部或外部, 应整圈围绕在圆筒的圆周上。加强圈两端的接合形式应按图 4-13 中 A 、 B 所示。

4.5.2.2 容器内部的加强圈, 若布置成图 4-13 中 C 、 D 、 E 或 F 所示的结构时, 则应取具最小惯性矩的截面进行计算。

4.5.2.3 在加强圈上需要留出如图 4-13 中 D 、 E 及 F 所示的间隙时, 则不应超过图 4-14 规定的弧长, 否则须将容器内部和外部的加强圈相邻两部分之间接合起来, 采用如图 4-13 中 C 所示的结构。但若能同时满足以下条件者可以除外:

- a) 每圈只允许一处无支撑的壳体弧长;
- b) 无支撑的壳体弧长不超过 90° ;
- c) 相邻两加强圈的不受支撑的圆筒弧长相互交错 180° ;
- d) 圆筒计算长度 L 应取下列数值中的较大者:
 - 相间隔加强圈之间的最大距离;
 - 从封头切线至第二个加强圈中心的距离再加上 1/3 封头曲面深度。

4.5.2.4 容器内部的构件如塔盘等, 若设计成起加强作用时, 也可作加强圈用。

4.5.2.5 加强圈与圆筒之间可采用连续或间断的焊接, 当加强圈设置在容器外面时, 加强圈每侧间断焊接的总长, 应不少于圆筒外圆周长的 1/2, 当设置在容器里面时, 应不少于圆筒内圆周长的 1/3。焊脚尺寸不得小于相焊件中较薄件的厚度。

间断焊缝的布置与间距可参照图 4-15 所示的型式，间断焊缝可以相互错开或并排布置。最大间隙 t ，对外加强圈为 $8\delta_n$ ，对内加强圈为 $12\delta_n$ 。

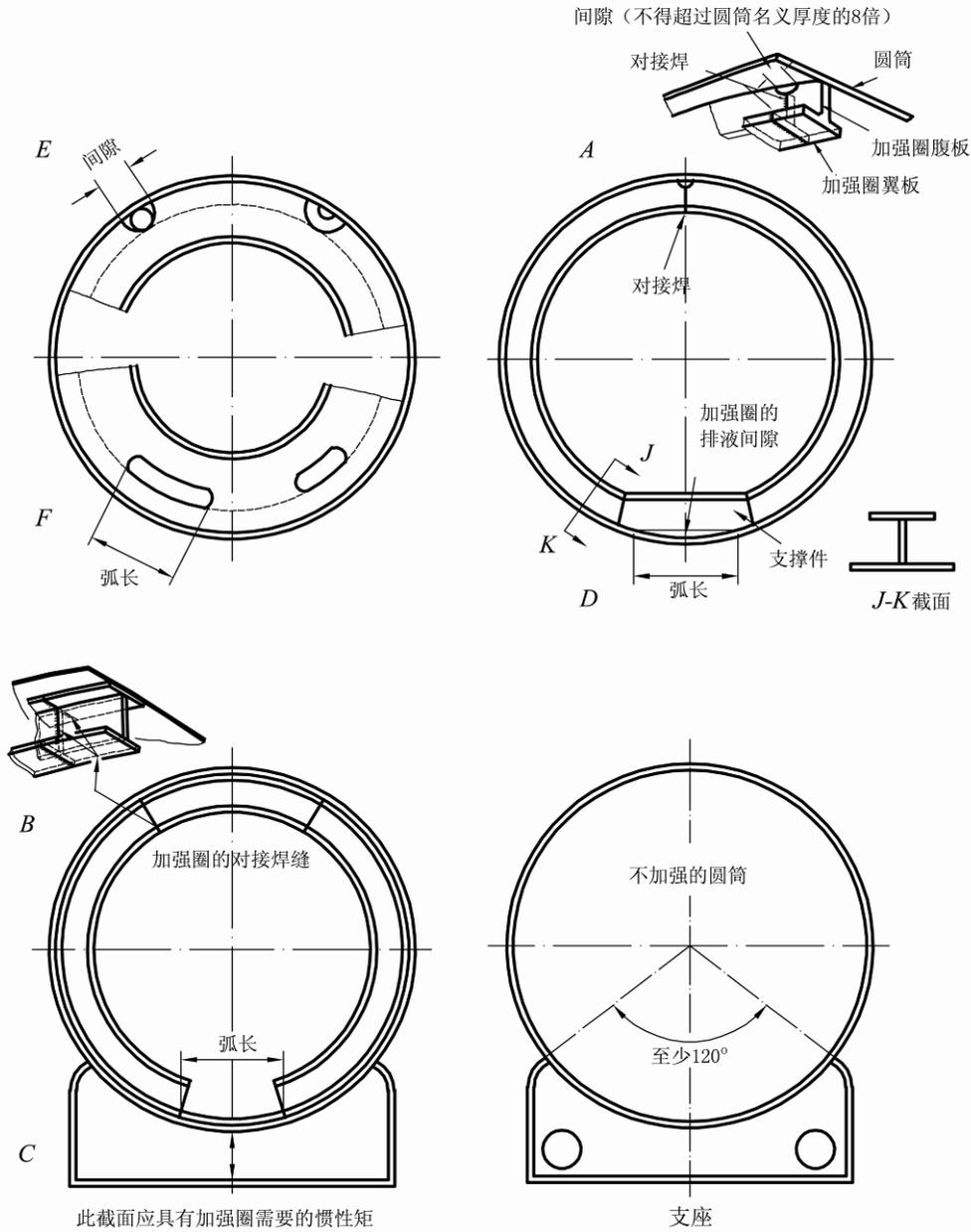


图 4-13 外压容器加强圈的各种布置图

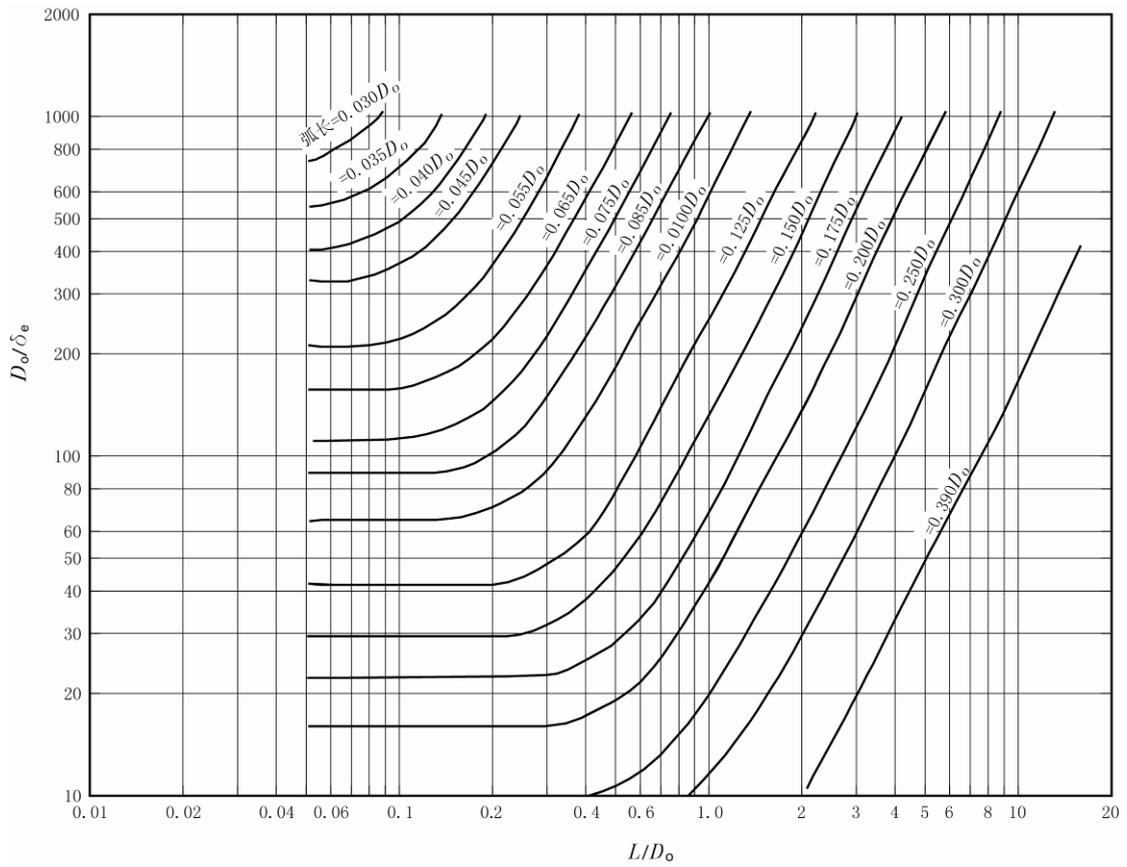


图 4-14 圆筒上加强圈允许的间断弧长值

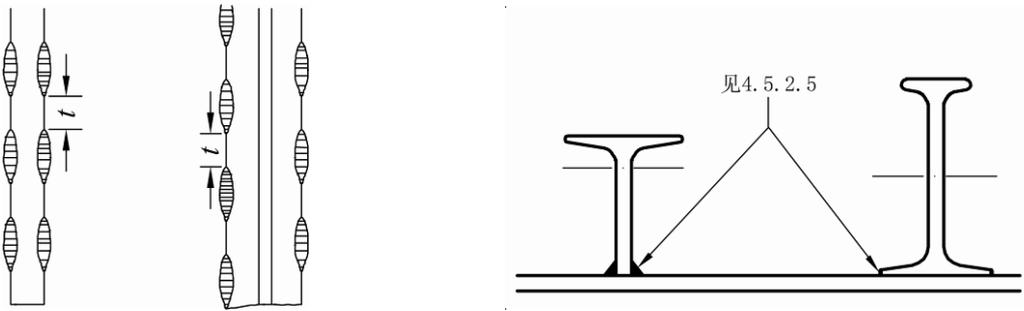


图 4-15 加强圈与圆筒的连接

表 4-2 图 4-2 的曲线数据表

| D_o/δ_e | L/D_o | A 值 | D_o/δ_e | L/D_o | A 值 | D_o/δ_e | L/D_o | A 值 |
|----------------|---------|----------|----------------|----------|----------|----------------|----------|----------|
| 4 | 2.2 | 9.59E-02 | 8 | 20 | 1.74 | 20 | 40 | 2.75 |
| | 2.6 | 8.84 | | 50 | 1.74 | | 50 | 2.75 |
| | 3 | 8.39 | 10 | 0.56 | 9.64E-02 | 25 | 0.2 | 8.77E-02 |
| | 4 | 7.83 | | 0.7 | 7.20 | | 0.3 | 4.84 |
| | 5 | 7.59 | | 1 | 4.63 | | 0.5 | 2.50 |
| | 7 | 7.39 | | 1.2 | 3.71 | | 0.8 | 1.43 |
| | 10 | 7.29 | | 2 | 2.01 | | 1 | 1.11 |
| | 30 | 7.20 | | 2.4 | 1.65 | | 1.2 | 9.02E-03 |
| 50 | 7.20 | 3 | | 1.39 | 2 | | 5.08 | |
| | | 4 | | 1.24 | 3 | | 3.23 | |
| 5 | 1.4 | 9.29E-02 | 5 | 1.18 | 30 | 3.4 | 2.78 | |
| | 1.6 | 8.02 | 7 | 1.14 | | 4 | 2.35 | |
| | 2 | 6.58 | 10 | 1.12 | | 4.4 | 2.19 | |
| | 2.4 | 5.86 | 16 | 1.11 | | 5 | 2.04 | |
| | 3 | 5.32 | 50 | 1.11 | | 6 | 1.91 | |
| | 4 | 4.94 | 15 | 0.34 | | 9.68E-02 | 7 | 1.86 |
| | 5 | 4.78 | | 0.4 | | 7.70 | 10 | 1.80 |
| | 7 | 4.65 | | 0.6 | | 4.53 | 30 | 1.76 |
| | 10 | 4.59 | | 1 | | 2.44 | 50 | 1.76 |
| | 30 | 4.54 | | 1.2 | | 1.97 | 40 | 0.16 |
| 50 | 4.53 | 2 | | 1.09 | 2 | 6.35 | | |
| 6 | 1.2 | 8.37E-02 | 2.4 | 8.90E-03 | 0.3 | 3.57 | | |
| | 1.6 | 5.84 | 3 | 6.91 | 0.4 | 2.46 | | |
| | 2 | 4.69 | 4 | 5.73 | 0.6 | 1.50 | | |
| | 2.4 | 4.11 | 5 | 5.34 | 0.8 | 1.08 | | |
| | 3 | 3.69 | 6 | 5.16 | 1 | 8.38E-03 | | |
| | 4 | 3.41 | 10 | 4.97 | 1.2 | 6.83 | | |
| | 5 | 3.29 | 40 | 4.90 | 2 | 3.88 | | |
| | 7 | 3.20 | 50 | 4.90 | 3 | 2.46 | | |
| | 10 | 3.16 | 20 | 0.24 | 9.82E-02 | 4 | 1.77 | |
| | 30 | 3.12 | | 0.4 | 4.77 | 4.4 | 1.61 | |
| 50 | 3.12 | 0.6 | | 2.86 | 5 | 1.47 | | |
| 8 | 0.74 | 9.68E-02 | | 0.8 | 2.03 | 6 | 1.36 | |
| | 0.8 | 8.75 | | 1 | 1.56 | 7 | 1.30 | |
| | 1 | 6.60 | | 1.2 | 1.27 | 10 | 1.25 | |
| | 1.6 | 3.72 | 2 | 7.13E-03 | 30 | 1.22 | | |
| | 2 | 2.85 | 3 | 4.46 | 50 | 1.22 | | |
| | 2.4 | 2.42 | 3.4 | 3.88 | 40 | 0.12 | 8.64E-02 | |
| | 3 | 2.12 | 4 | 3.42 | | 0.2 | 3.85 | |
| | 4 | 1.92 | 5 | 3.08 | | 0.3 | 2.22 | |
| | 5 | 1.84 | 7 | 2.87 | | 0.4 | 1.55 | |
| | 7 | 1.79 | 10 | 2.80 | | 0.6 | 9.58E-03 | |
| 10 | 1.76 | | | | | | | |

表 4-2 (续)

| D_o/δ_e | L/D_o | A 值 | D_o/δ_e | L/D_o | A 值 | D_o/δ_e | L/D_o | A 值 | |
|----------------|---------|----------|----------------|----------|----------|----------------|----------|----------|------|
| 40 | 0.8 | 6.91 | 40 | 4 | 6.45 | 100 | 25 | 1.10 | |
| | 1 | 5.39 | | 6 | 4.09 | | 50 | 1.10 | |
| | 1.2 | 4.41 | | 7 | 3.64 | 125 | 0.05 | 4.80E-02 | |
| | 2 | 2.52 | | 8 | 3.41 | | 0.06 | 3.44 | |
| | 4 | 1.17 | | 10 | 3.22 | | 0.08 | 2.10 | |
| | 5 | 9.12E-04 | | 14 | 3.10 | | 0.1 | 1.48 | |
| | 6 | 8.04 | | 40 | 3.06 | | 0.14 | 9.17E-03 | |
| | 7 | 7.56 | | 50 | 3.06 | | 0.2 | 5.78 | |
| | 8 | 7.31 | | 80 | 0.054 | | 9.90E-02 | 0.4 | 2.57 |
| | 10 | 7.08 | | | 0.07 | | 6.08 | 0.6 | 1.65 |
| | 16 | 6.92 | 0.09 | | 3.91 | | 0.8 | 1.21 | |
| | 40 | 6.88 | 0.1 | | 3.28 | | 1 | 9.55E-04 | |
| | 50 | 6.88 | 0.14 | | 1.96 | 2 | 4.59 | | |
| | 50 | 0.088 | 9.30E-02 | | 0.2 | 1.20 | 4 | 2.20 | |
| 0.1 | | 7.82 | 0.24 | | 9.50E-03 | 6 | 1.41 | | |
| 0.2 | | 2.63 | 0.4 | | 5.16 | 9 | 9.04E-05 | | |
| 0.3 | | 1.54 | 0.6 | | 3.28 | 10 | 8.37 | | |
| 0.4 | | 1.08 | 0.8 | | 2.39 | 12 | 7.70 | | |
| 0.6 | | 6.77E-03 | 1 | 1.88 | 14 | 7.40 | | | |
| 0.8 | | 4.90 | 2 | 8.95E-04 | 20 | 7.13 | | | |
| 1 | | 3.84 | 4 | 4.24 | 40 | 7.04 | | | |
| 2 | | 1.71 | 6.6 | 2.41 | 50 | 7.04 | | | |
| 4 | | 8.42E-04 | 8 | 2.05 | 150 | 0.05 | 3.38E-02 | | |
| 5 | | 6.52 | 10 | 1.86 | | 0.06 | 2.44 | | |
| 6 | | 5.48 | 14 | 1.76 | | 0.08 | 1.51 | | |
| 7 | | 5.02 | 30 | 1.72 | | 0.1 | 1.08 | | |
| 8 | | 4.78 | 50 | 1.72 | | 0.12 | 8.33E-03 | | |
| 10 | 4.58 | 100 | 0.05 | 7.41E-02 | | 0.16 | 5.69 | | |
| 12 | 4.49 | | 0.07 | 3.98 | | 0.2 | 4.31 | | |
| 16 | 4.44 | | 0.1 | 2.20 | | 0.4 | 1.94 | | |
| 40 | 4.40 | | 0.14 | 1.33 | | 0.6 | 1.25 | | |
| 50 | 4.40 | | 0.2 | 8.31E-03 | | 1 | 7.26E-05 | | |
| 60 | 0.074 | | 9.54E-02 | 0.4 | 3.64 | 2 | 3.49 | | |
| | 0.1 | | 5.56 | 0.5 | 2.83 | 4 | 1.68 | | |
| | 0.14 | | 3.23 | 0.8 | 1.70 | 6 | 1.08 | | |
| | 0.2 | | 1.93 | 1 | 1.34 | 8 | 7.87E-05 | | |
| | 0.4 | | 8.12E-03 | 2 | 6.41E-04 | 10 | 6.19 | | |
| | 0.6 | 5.10 | 4 | 3.05 | 12 | 5.53 | | | |
| | 0.8 | 3.71 | 6 | 1.95 | 16 | 5.10 | | | |
| | 1 | 2.91 | 8 | 1.42 | 20 | 4.98 | | | |
| | 2 | 1.38 | 10 | 1.24 | 40 | 4.89 | | | |
| | 3 | 8.86E-04 | 14 | 1.14 | 50 | 4.89 | | | |

表 4-2 (续)

| D_o/δ_e | L/D_o | A 值 | D_o/δ_e | L/D_o | A 值 | D_o/δ_e | L/D_o | A 值 |
|----------------|---------|----------|----------------|----------|----------|----------------|----------|----------|
| 200 | 0.05 | 1.96E-02 | 300 | 0.05 | 9.23E-03 | 500 | 0.12 | 1.16 |
| | 0.06 | 1.43 | | 0.06 | 6.90 | | 0.16 | 8.30E-04 |
| | 0.08 | 9.09E-03 | | 0.08 | 4.52 | | 0.2 | 6.45 |
| | 0.1 | 6.59 | | 0.1 | 3.34 | | 0.4 | 3.05 |
| | 0.14 | 4.21 | | 0.12 | 2.64 | | 0.6 | 1.99 |
| | 0.2 | 2.72 | | 0.2 | 1.43 | | 0.8 | 1.48 |
| | 0.3 | 1.71 | | 0.4 | 6.66E-04 | | 1 | 1.18 |
| | 0.5 | 9.76E-04 | | 0.6 | 4.33 | | 2 | 5.79E-05 |
| | 0.8 | 5.92 | | 0.8 | 3.21 | | 4 | 2.82 |
| | 1 | 4.69 | | 1 | 2.54 | | 6 | 1.85 |
| | 2 | 2.27 | | 2 | 1.24 | | 8 | 1.37 |
| | 4 | 1.10 | | 4 | 6.02E-05 | | 10 | 1.07 |
| | 6 | 7.11E-05 | | 6 | 3.93 | 12 | 8.80E-06 | |
| | 8 | 5.20 | | 8 | 2.87 | 600 | 0.05 | 2.70E-03 |
| | 10 | 4.03 | | 10 | 2.25 | | 0.06 | 2.08 |
| | 12 | 3.38 | | 14 | 1.56 | | 0.08 | 1.42 |
| | 14 | 3.09 | | 16 | 1.42 | | 0.1 | 1.08 |
| | 16 | 2.95 | | 20 | 1.30 | | 0.12 | 8.68E-04 |
| | 20 | 2.83 | | 40 | 1.23 | | 0.16 | 6.24 |
| | 40 | 2.75 | | 50 | 1.22 | | 0.2 | 4.86 |
| 50 | 2.75 | 400 | 0.05 | 5.49E-03 | 0.4 | | 2.31 | |
| 250 | 0.05 | | 1.29E-02 | 0.06 | 4.17 | | 0.6 | 1.51 |
| | 0.06 | | 9.55E-03 | 0.08 | 2.78 | | 0.8 | 1.12 |
| | 0.08 | | 6.17 | 0.1 | 2.08 | | 1 | 8.94E-05 |
| | 0.1 | | 4.52 | 0.12 | 1.66 | | 2 | 4.39 |
| | 0.14 | | 2.93 | 0.16 | 1.18 | 4 | 2.16 | |
| | 0.2 | | 1.91 | 0.2 | 9.14E-04 | 6 | 1.41 | |
| | 0.4 | | 8.81E-04 | 0.4 | 4.29 | 8 | 1.04 | |
| | 0.6 | | 5.72 | 0.6 | 2.80 | 8.4 | 9.88E-06 | |
| | 0.8 | | 4.22 | 0.8 | 2.07 | 800 | 0.05 | 1.65E-03 |
| | 1 | | 3.35 | 1 | 1.65 | | 0.06 | 1.29 |
| | 2 | | 1.63 | 2 | 8.08E-05 | | 0.08 | 8.92E-04 |
| | 4 | 7.89E-05 | 4 | 3.93 | 0.1 | | 6.82 | |
| | 6 | 5.13 | 6 | 2.57 | 0.12 | | 5.51 | |
| | 8 | 3.77 | 8 | 1.89 | 0.16 | | 3.98 | |
| | 10 | 2.93 | 10 | 1.48 | 0.2 | | 3.12 | |
| | 12 | 2.38 | 14 | 1.02 | 0.4 | | 1.49 | |
| | 14 | 2.10 | 16 | 8.82E-06 | 0.6 | | 9.80E-05 | |
| | 16 | 1.96 | 500 | 0.05 | 3.70E-03 | | 0.8 | 7.28 |
| | 20 | 1.84 | | 0.06 | 2.84 | | 1 | 5.80 |
| | 40 | 1.76 | | 0.08 | 1.92 | | 2 | 2.86 |
| 50 | 1.76 | 0.1 | | 1.45 | 4 | 1.40 | | |

表 4-2 (续)

| D_o/δ_e | L/D_o | A 值 | D_o/δ_e | L/D_o | A 值 | D_o/δ_e | L/D_o | A 值 |
|----------------|---------|----------|----------------|---------|------|----------------|---------|----------|
| 800 | 5 | 1.12 | 1000 | 0.09 | 5.41 | 1000 | 0.7 | 5.96E-05 |
| | 5.6 | 9.92E-06 | | 0.12 | 3.88 | | 1 | 4.14 |
| 1000 | 0.05 | 1.13E-03 | | 0.16 | 2.82 | | 2 | 2.04 |
| | 0.06 | 8.91E-04 | | 0.2 | 2.21 | | 4 | 1.01 |
| | 0.07 | 7.33 | | 0.4 | 1.06 | | 4.2 | 9.57E-06 |
| | | | | | | | | |

表 4-3 图 4-3 的曲线数据表

| 温度, °C | A 值 | B 值, MPa | 温度, °C | A 值 | B 值, MPa | 温度, °C | A 值 | B 值, MPa | |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| 150 | 1.00E-05 | 1.33 | 260 | 2.00E-02 | 120 | 425 | 5.00 | 42.7 | |
| | 6.20E-04 | 82.7 | | 1.00E-01 | 120 | | 6.00 | 45.3 | |
| | 7.00 | 92.0 | 370 | 1.00E-05 | 1.14 | | 7.00 | 47.0 | |
| | 8.00 | 96.0 | | 4.09E-04 | 46.7 | | 1.00E-03 | 52.0 | |
| | 9.00 | 100 | | 5.00 | 50.7 | | 1.50 | 56.0 | |
| | 1.00E-03 | 103 | | 6.00 | 54.7 | | 2.00 | 60.0 | |
| | 1.50 | 111 | | 7.00 | 56.0 | | 2.00E-02 | 86.0 | |
| | 2.00 | 113 | | 8.00 | 58.7 | | 1.00E-01 | 86.0 | |
| | 9.00 | 128 | | 9.00 | 60.0 | | 475 | 1.00E-05 | 0.956 |
| | 1.00E-01 | 128 | | 1.00E-03 | 61.3 | | | 3.25E-04 | 31.0 |
| 260 | 1.00E-05 | 1.24 | 1.50 | 66.7 | 5.00 | 36.0 | | | |
| | 5.08E-04 | 62.7 | 2.00 | 70.7 | 7.00 | 40.0 | | | |
| | 6.00 | 68.0 | 2.00E-02 | 101 | 1.00E-03 | 42.7 | | | |
| | 8.00 | 74.7 | 1.00E-01 | 105 | 1.50 | 48.0 | | | |
| | 1.00E-03 | 77.3 | 425 | 1.00E-05 | 1.05 | 2.50 | 53.3 | | |
| | 1.50 | 85.3 | | 3.54E-04 | 37.3 | 2.00E-02 | 78.0 | | |
| 2.50 | 93.3 | 4.00 | 40.0 | 1.00E-01 | 78.0 | | | | |

表 4-4 图 4-4 的曲线数据表

| 温度, °C | A 值 | B 值, MPa | 温度, °C | A 值 | B 值, MPa | 温度, °C | A 值 | B 值, MPa | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| 30 | 1.00E-05 | 1.33 | 300 | 1.00E-03 | 82.4 | 400 | 5.00 | 99.2 | |
| | 1.00E-03 | 133 | | 1.50 | 94.4 | | 7.00 | 106 | |
| | 1.50 | 151 | | 2.00 | 101 | | 8.00 | 108 | |
| | 2.00 | 163 | | 3.00 | 111 | | 1.00E-02 | 110 | |
| | 3.00 | 171 | | 4.00 | 117 | | 475 | 1.00E-05 | 0.977 |
| | 1.00E-02 | 183 | | 5.00 | 122 | | | 3.90E-04 | 37.2 |
| 200 | 1.00E-05 | 1.24 | | 8.00 | 129 | 5.00 | | 41.3 | |
| | 9.30E-04 | 115 | | 1.00E-02 | 130 | 6.00 | | 44.3 | |
| | 1.00E-03 | 118 | | 400 | 1.00E-05 | 1.05 | 7.00 | 47.1 | |
| | 1.50 | 132 | | | 4.00E-04 | 42.1 | 8.00 | 49.4 | |
| | 2.00 | 138 | 5.00 | | 46.8 | 9.00 | 51.8 | | |
| | 2.50 | 142 | 6.00 | | 51.2 | 1.00E-03 | 54.1 | | |
| | 3.00 | 146 | 7.00 | | 54.4 | 1.50 | 62.9 | | |
| | 4.00 | 151 | 8.00 | | 57.2 | 2.00 | 68.6 | | |
| 1.00E-02 | 161 | 9.00 | 60.0 | | 3.00 | 77.0 | | | |
| 300 | 1.00E-05 | 1.17 | 1.00E-03 | | 62.8 | 4.00 | 82.6 | | |
| | 5.00E-04 | 58.7 | 1.50 | 73.2 | 5.00 | 86.3 | | | |
| | 6.00 | 65.6 | 2.00 | 80.0 | 6.00 | 88.7 | | | |
| | 7.00 | 71.2 | 3.00 | 88.8 | 8.00 | 92.6 | | | |
| | 8.00 | 75.7 | 4.00 | 95.2 | 1.00E-02 | 94.7 | | | |

表 4-5 图 4-5 的曲线数据表

| 温度, °C | A 值 | B 值, MPa | 温度, °C | A 值 | B 值, MPa | 温度, °C | A 值 | B 值, MPa | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| 150 | 1.00E-05 | 1.33 | 260 | 3.00 | 114 | 425 | 1.00E-03 | 65.3 | |
| | 7.65E-04 | 101 | | 8.00 | 132 | | 1.50 | 73.3 | |
| | 8.00 | 105 | | 1.00E-02 | 135 | | 2.00 | 77.3 | |
| | 9.00 | 109 | | 1.50 | 143 | | 3.00 | 82.7 | |
| | 1.00E-03 | 113 | | 2.00 | 149 | | 3.00E-02 | 113 | |
| | 2.00 | 137 | | 2.72 | 156 | | 1.00E-01 | 113 | |
| | 3.00 | 149 | | 1.00E-01 | 156 | | 475 | 1.00E-05 | 0.956 |
| | 4.00 | 156 | | 1.00E-05 | 1.39 | | | 4.27E-04 | 41.3 |
| | 5.00 | 159 | | 5.59E-04 | 62.7 | | | 1.00E-03 | 56.0 |
| | 2.50E-02 | 164 | | 1.00E-03 | 74.7 | | | 1.50 | 62.7 |
| 1.00E-01 | 164 | 3.00 | 93.3 | 2.00 | 68.0 | | | | |
| 260 | 1.00E-05 | 1.24 | 1.00E-02 | 112 | 3.00 | 73.3 | | | |
| | 6.63E-04 | 82.2 | 2.50 | 128 | 8.00 | 85.3 | | | |
| | 9.00 | 89.0 | 1.00E-01 | 128 | 3.00E-02 | 102 | | | |
| | 1.00E-03 | 93.3 | 425 | 1.00E-05 | 1.05 | 1.00E-01 | | 102 | |
| | 2.50 | 111 | | 5.00E-04 | 52.0 | | | | |

表 4-6 图 4-6 的曲线数据表

| 屈服强度 MPa | A 值 | B 值 MPa | 屈服强度 MPa | A 值 | B 值 MPa | 屈服强度 MPa | A 值 | B 值 MPa |
|----------|----------|---------|----------|----------|---------|------------|----------|---------|
| 415MPa | 4.00E-05 | 5.33 | 380MPa | 1.00E-01 | 248 | 310MPa | 1.24 | 165 |
| | 1.00E-03 | 133 | 345MPa | 4.00E-05 | 5.33 | | 1.00E-01 | 207 |
| | 1.66 | 220 | | 1.00E-03 | 133 | 260-275MPa | 4.00E-05 | 5.33 |
| | 1.00E-01 | 276 | | 1.38 | 184 | | 1.00E-03 | 133 |
| 380MPa | 4.00E-05 | 5.33 | 1.00E-01 | 229 | 1.10 | | 147 | |
| | 1.00E-03 | 133 | 310MPa | 4.00E-05 | 5.33 | | 1.00E-01 | 184 |
| | 1.52 | 207 | | 1.00E-03 | 133 | | | |

表 4-7 图 4-7 的曲线数据表

| A 值 | B 值, MPa | A 值 | B 值, MPa | A 值 | B 值, MPa |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 4.00E-04 | 53.3 | 1.00E-03 | 133 | 3.00E-02 | 303 |
| 6.00 | 80.0 | 2.00 | 266 | 6.00 | 313 |
| 8.00 | 106 | 2.20 | 293 | 1.00E-01 | 327 |

表 4-8 图 4-8 的曲线数据表

| 温度, °C | A 值 | B 值, MPa | 温度, °C | A 值 | B 值, MPa | 温度, °C | A 值 | B 值, MPa |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 30 | 1.00E-05 | 1.29 | 370 | 1.00E-05 | 1.07 | 480 | 1.50E-03 | 50.7 |
| | 4.63E-04 | 60.0 | | 3.34E-04 | 36.0 | | 3.00 | 56.0 |
| | 1.50E-03 | 97.3 | | 4.00 | 40.0 | | 1.00E-02 | 65.3 |
| | 2.00 | 105 | | 5.00 | 42.7 | | 2.00 | 68.0 |
| | 3.00 | 115 | | 6.00 | 45.3 | | 7.00 | 73.3 |
| | 1.00E-02 | 131 | | 1.00E-03 | 53.3 | | 1.00E-01 | 73.3 |
| | 1.00E-01 | 147 | | 2.00 | 61.3 | 650 | 1.00E-05 | 0.933 |
| 205 | 1.00E-05 | 1.20 | 5.00 | 70.7 | 2.78E-04 | | 25.3 | |
| | 3.86E-04 | 46.4 | 6.00 | 72.0 | 1.00E-03 | | 38.7 | |
| | 2.00E-03 | 76.0 | 1.00E-02 | 74.7 | 2.00 | | 44.0 | |
| | 3.00 | 84.0 | 5.00 | 82.7 | 5.00 | | 50.7 | |
| | 4.00 | 89.3 | 1.00E-01 | 82.7 | 1.00E-02 | | 54.7 | |
| | 5.00 | 93.3 | 480 | 1.00E-05 | 1.07 | | 2.00 | 58.7 |
| | 1.00E-02 | 98.7 | | 3.09E-04 | 32.0 | 5.00 | 62.7 | |
| | 5.00 | 107 | | 4.00 | 36.0 | 1.00E-01 | 62.7 | |
| | 1.00E-01 | 107 | | 5.00 | 38.7 | | | |

表 4-9 图 4-9 的曲线数据表

| 温度, °C | A 值 | B 值, MPa | 温度, °C | A 值 | B 值, MPa | 温度, °C | A 值 | B 值, MPa |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 30 | 1.00E-05 | 1.29 | 205 | 3.00 | 104 | 480 | 6.00 | 56.0 |
| | 5.88E-04 | 75.7 | | 4.00 | 108 | | 1.00E-03 | 66.7 |
| | 1.50E-03 | 103 | | 5.00 | 111 | | 3.00 | 84.0 |
| | 2.00 | 109 | | 6.00 | 113 | | 4.00 | 88.0 |
| | 2.50 | 113 | | 1.00E-02 | 117 | | 1.00E-02 | 96.0 |
| | 3.00 | 117 | | 5.00 | 126 | | 5.00 | 108 |
| | 4.00 | 120 | | 1.00E-01 | 126 | 1.00E-01 | 108 | |
| | 5.00 | 123 | 370 | 1.00E-05 | 1.07 | 650 | 1.00E-05 | 0.933 |
| | 7.00 | 128 | | 5.07E-04 | 57.3 | | 4.50E-04 | 42.0 |
| | 1.00E-02 | 129 | | 1.00E-03 | 73.3 | | 1.00E-03 | 56.0 |
| | 2.00 | 136 | | 3.00 | 93.3 | | 2.00 | 66.7 |
| | 7.00 | 144 | | 4.00 | 96.0 | | 3.00 | 73.3 |
| | 1.00E-01 | 144 | | 1.00E-02 | 105 | | 4.00 | 76.0 |
| 205 | 1.00E-05 | 1.20 | 5.00 | 117 | 5.00 | | 78.7 | |
| | 5.75E-04 | 68.6 | 6.00 | 120 | 1.00E-02 | 82.3 | | |
| | 1.00E-03 | 81.3 | 1.00E-01 | 120 | 7.00 | 87.1 | | |
| | 1.50 | 90.7 | 1.00E-05 | 1.07 | | | | |
| | 2.00 | 96.0 | 480 | 5.19E-04 | 53.3 | | | |

表 4-10 图 4-10 的曲线数据表

| 温度, °C | A 值 | B 值, MPa | 温度, °C | A 值 | B 值, MPa | 温度, °C | A 值 | B 值, MPa |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|----------|----------|
| 30 | 1.00E-05 | 1.29 | 205 | 1.00E-03 | 50.1 | 315 | 1.00E-01 | 77.7 |
| | 5.24E-04 | 67.4 | | 1.00E-02 | 74.9 | 425 | 1.00E-05 | 1.06 |
| | 2.00E-03 | 94.7 | | 2.83 | 89.6 | | 2.70E-04 | 28.6 |
| | 6.00 | 115 | 1.00E-01 | 89.6 | 1.50E-03 | | 40.0 | |
| | 205 | 2.00E-02 | 132 | 315 | 1.00E-05 | 1.13 | 1.00E-02 | 56.0 |
| | | 1.00E-01 | 140 | | 3.13E-04 | 35.3 | 1.00E-01 | 66.2 |
| 1.00E-05 | | 1.20 | 1.00E-03 | | 44.0 | | | |
| | 3.52E-04 | 42.0 | | 1.00E-02 | 66.7 | | | |

表 4-11 图 4-11 的曲线数据表

| 温度, °C | A 值 | B 值, MPa | 温度, °C | A 值 | B 值, MPa | 温度, °C | A 值 | B 值, MPa |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 30 | 1.00E-05 | 1.29 | 150 | 1.00E-02 | 103 | 315 | 5.00E-03 | 66.2 |
| | 5.87E-04 | 75.5 | | 5.00 | 119 | | 1.00E-02 | 72.6 |
| | 7.00E-03 | 124 | | 1.00E-01 | 119 | | 4.56 | 82.7 |
| | 150 | 1.00E-02 | 132 | 205 | 1.00E-05 | 1.2 | 1.00E-01 | 86.7 |
| | | 2.00 | 143 | | 4.02E-04 | 50.7 | 1.00E-05 | 1.06 |
| | | 5.00 | 152 | | 7.00E-03 | 84.0 | 3.06E-04 | 33.5 |
| 1.00E-01 | | 152 | 1.00E-02 | | 88.0 | 5.00E-03 | 56.0 | |
| 30 | 1.00E-05 | 1.20 | 315 | 4.00 | 98.7 | 425 | 1.00E-02 | 62.7 |
| | 4.46E-04 | 56.5 | | 1.00E-01 | 98.7 | | 5.00 | 70.8 |
| | 5.00E-03 | 93.3 | 425 | 1.00E-05 | 1.13 | | 1.00E-01 | 70.8 |
| | 6.00 | 96.0 | | 3.55E-04 | 40.0 | | | |

表 4-12 图 4-12 的曲线数据表

| 温度, °C | A 值 | B 值, MPa | 温度, °C | A 值 | B 值, MPa | 温度, °C | A 值 | B 值, MPa |
|--------|----------|----------|--------|----------|----------|--------|----------|----------|
| 室温 | 1.41E-04 | 18.4 | 205 | 1.51E-04 | 18.4 | 345 | 1.60E-04 | 18.4 |
| | 1.34E-03 | 175 | | 1.17E-03 | 142 | | 1.20E-03 | 138 |
| | 1.50 | 177 | | 1.50 | 145 | | 1.50 | 143 |
| | 2.00 | 189 | | 2.00 | 152 | | 2.00 | 149 |
| | 2.50 | 207 | | 2.50 | 161 | | 2.50 | 156 |
| | 3.00 | 219 | | 3.00 | 168 | | 3.00 | 164 |
| | 4.00 | 239 | | 4.00 | 179 | | 4.00 | 175 |
| | 6.00 | 260 | | 6.00 | 193 | | 6.00 | 187 |
| | 1.00E-02 | 280 | | 1.00E-02 | 207 | | 1.00E-02 | 201 |
| | 1.50 | 289 | | 1.50 | 214 | | 1.50 | 207 |
| | 2.10 | 300 | | 2.30 | 221 | | 3.40 | 210 |

5 封头

5.1 范围

本章规定了受内压或外压的凸形封头、平盖、锥形封头（含偏心锥壳）、变径段、紧缩口以及内压元件的拉撑结构设计方法。其中，凸形封头包括椭圆形封头、碟形封头、球冠形封头（见图 5-1、

图 5-2、图 5-3) 和半球形封头。

半球形封头按第 3 章或第 4 章计算。

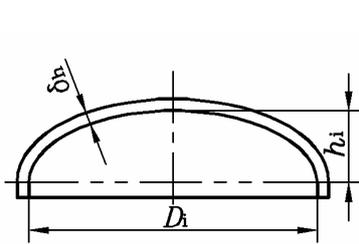


图 5-1 椭圆形封头

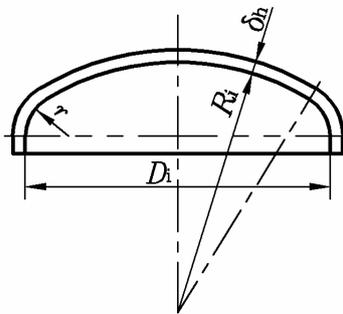


图 5-2 碟形封头

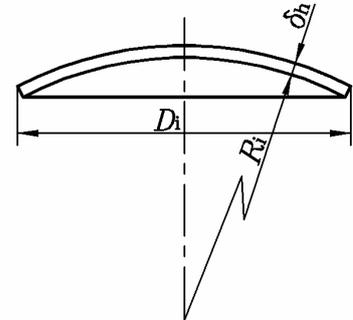


图 5-3 球冠形封头

5.2 术语、定义和符号

5.2.1 GB 150.1 中界定的术语和定义适用于本章。

5.2.2 符号

D_i ——封头内径或与其连接的圆筒内直径，mm；

D_o ——封头外径或与其连接的圆筒外径，mm；

h_i ——凸形封头内曲面深度，mm；

p_c ——计算压力，MPa；

$[p_w]$ ——封头的最大允许工作压力，MPa；

δ ——与封头连接的圆筒计算厚度，mm；

δ_e ——与封头连接的圆筒有效厚度，mm；

δ_{eh} ——凸形封头有效厚度，mm；

δ_h ——凸形封头计算厚度，mm；

δ_n ——与封头连接的圆筒名义厚度，mm；

δ_{nh} ——凸形封头名义厚度，mm；

δ_r ——与封头和圆筒连接的加强段或过渡段计算厚度，mm；

$[\sigma]^t$ ——设计温度下封头材料的许用应力（按 GB 150.2），MPa；

ϕ ——焊接接头系数（按 GB 150.1）。

5.3 椭圆形封头

5.3.1 椭圆形封头一般采用长短轴比值为 2 的标准型。

5.3.2 受内压（凹面受压）椭圆形封头

封头计算厚度按式（5-1）或（5-2）计算：

$$\delta_h = \frac{K p_c D_i}{2[\sigma]^t \phi - 0.5 p_c} \dots\dots\dots (5-1)$$

$$\delta_h = \frac{K p_c D_o}{2[\sigma]^t \phi + (2K - 0.5) p_c} \dots\dots\dots (5-2)$$

式中：

K ——椭圆形封头形状系数， $K = \frac{1}{6} \left[2 + \left(\frac{D_i}{2h_i} \right)^2 \right]$ ，其值见表 5-1。

表 5-1 系数 K 值

| | | | | | | | | | |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\frac{D_i}{2h_i}$ | 2.6 | 2.5 | 2.4 | 2.3 | 2.2 | 2.1 | 2.0 | 1.9 | 1.8 |
| K | 1.46 | 1.37 | 1.29 | 1.21 | 1.14 | 1.07 | 1.00 | 0.93 | 0.87 |
| $\frac{D_i}{2h_i}$ | 1.7 | 1.6 | 1.5 | 1.4 | 1.3 | 1.2 | 1.1 | 1.0 | |
| K | 0.81 | 0.76 | 0.71 | 0.66 | 0.61 | 0.57 | 0.53 | 0.50 | |

$D_i/2h_i \leq 2$ 的椭圆形封头的有效厚度应不小于封头内直径的 0.15%， $D_i/2h_i > 2$ 的椭圆形封头的有效厚度应不小于封头内直径的 0.30%。但当确定封头厚度时已考虑了内压下的弹性失稳问题，可不受此限制。

椭圆形封头的最大允许工作压力按式 (5-3) 计算：

$$[p_w] = \frac{2[\sigma]^t \phi \delta_{eh}}{KD_i + 0.5\delta_{eh}} \quad \dots\dots\dots (5-3)$$

5.3.3 受外压（凸面受压）椭圆形封头

凸面受压椭圆形封头的厚度计算应采用本部分第 4 章外压球壳设计方法，其中 R_o 为椭圆形封头的当量球壳外半径， $R_o = K_1 D_o$ 。

K_1 ——由椭圆形长短轴比值决定的系数，见表 5-2。

表 5-2 系数 K_1 值

| | | | | | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\frac{D_o}{2h_o}$ | 2.6 | 2.4 | 2.2 | 2.0 | 1.8 | 1.6 | 1.4 | 1.2 | 1.0 |
| K_1 | 1.18 | 1.08 | 0.99 | 0.90 | 0.81 | 0.73 | 0.65 | 0.57 | 0.50 |
| 注：1 中间值用内插法求得； 2 $K_1=0.9$ 为标准椭圆形封头； 3 $h_o = h_i + \delta_{nh}$ 。 | | | | | | | | | |

5.4 碟形封头

5.4.1 碟形封头球面部分的内半径应不大于封头的内直径，通常取 0.9 倍的封头内直径。封头转角内半径应不小于封头内直径的 10%，且不得小于 3 倍的名义厚度 δ_{nh} 。

5.4.2 受内压（凹面受压）碟形封头

封头计算厚度按式 (5-4) 或 (5-5) 计算：

$$\delta_h = \frac{Mp_c R_i}{2[\sigma]^t \phi - 0.5p_c} \quad \dots\dots\dots (5-4)$$

$$\delta_h = \frac{Mp_c R_o}{2[\sigma]^t \phi + (M - 0.5)p_c} \quad \dots\dots\dots (5-5)$$

式中：

R_i ——碟形封头球面部分内半径，mm；

R_o ——碟形封头球面部分外半径，($R_o=R_i+\delta_{nh}$)，mm；

M ——碟形封头形状系数， $M = \frac{1}{4} \left(3 + \sqrt{\frac{R_i}{r}} \right)$ 其值见表 5-3；

r ——碟形封头过渡段转角内半径，mm。

表 5-3 系数 M 值

| | | | | | | | | |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\frac{R_i}{r}$ | 1.0 | 1.25 | 1.50 | 1.75 | 2.0 | 2.25 | 2.50 | 2.75 |
| M | 1.00 | 1.03 | 1.06 | 1.08 | 1.10 | 1.13 | 1.15 | 1.17 |
| $\frac{R_i}{r}$ | 3.0 | 3.25 | 3.50 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0 |
| M | 1.18 | 1.20 | 1.22 | 1.25 | 1.28 | 1.31 | 1.34 | 1.36 |
| $\frac{R_i}{r}$ | 6.5 | 7.0 | 7.5 | 8.0 | 8.5 | 9.0 | 9.5 | 10.0 |
| M | 1.39 | 1.41 | 1.44 | 1.46 | 1.48 | 1.50 | 1.52 | 1.54 |

对于 $R_i/r \leq 5.5$ 的碟形封头，其有效厚度应不小于封头内直径的 0.15%，其他碟形封头的有效厚度应不小于封头内直径的 0.30%。但当确定封头厚度时已考虑了内压下的弹性失稳问题，可不受此限制。

碟形封头的最大允许工作压力按式 (5-6) 计算：

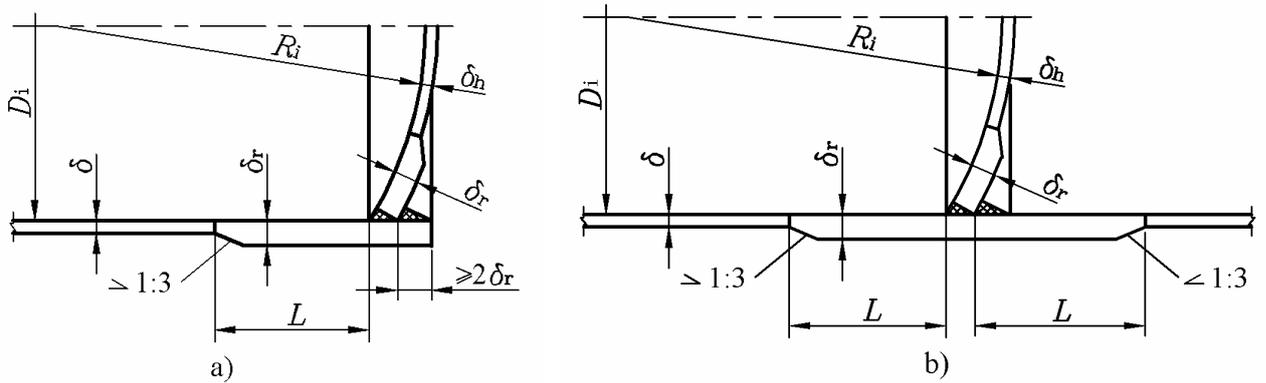
$$[p_w] = \frac{2[\sigma]^t \phi \delta_{ch}}{MR_i + 0.5\delta_{ch}} \quad \dots\dots\dots (5-6)$$

5.4.3 受外压（凸面受压）碟形封头

凸面受压碟形封头的厚度计算应采用本部分第 4 章外压球壳设计方法，其中 R_o 为碟形封头球面部分外半径。

5.5 球冠形封头

5.5.1 球冠形封头可用作端封头，也可用作容器中两独立受压室的中间封头，如采用加强段结构，其形式如图 5-4 所示。



注：1.图中 R_i ——球冠形封头内半径，mm；
2.封头与圆筒连接的 T 形接头应采用全焊透结构。

图 5-4 球冠形封头

5.5.2 球冠形封头的计算厚度

受内压（凹面受压）球冠形封头的计算厚度 δ_h 按第 3 章内压球壳计算；受外压（凸面受压）球冠形封头的计算厚度 δ_h 按第 4 章外压球壳计算。对于中间封头，应考虑封头两侧最苛刻的压力组合工况。如能保证在任何情况下封头两侧的压力同时作用，可按封头两侧的压力差进行计算。

5.5.3 球冠形端封头加强段厚度

封头加强段的计算厚度按式（5-7）计算：

$$\delta_i = Q\delta \quad \dots\dots\dots (5-7)$$

式中：

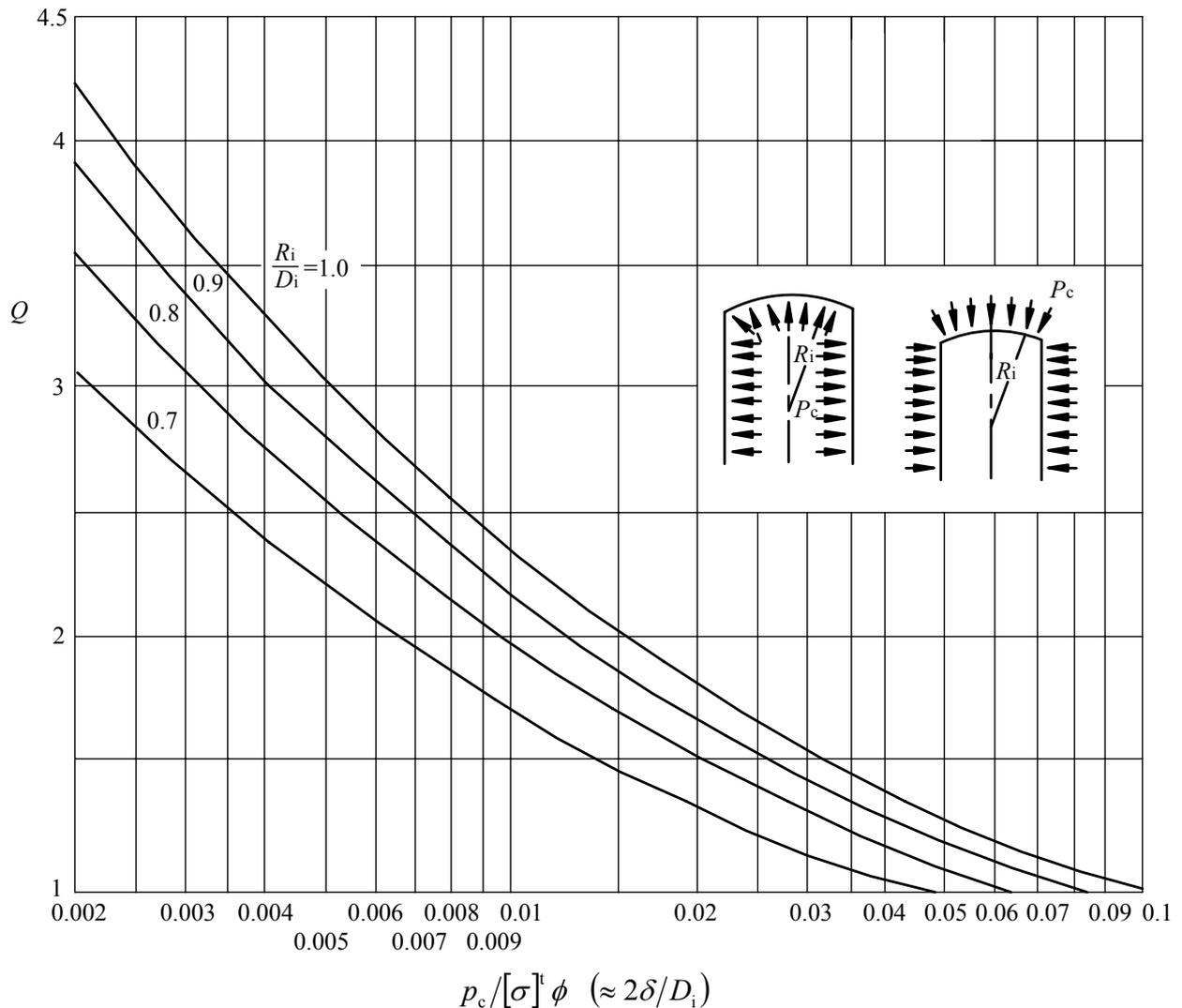
δ ——圆筒的计算厚度，按式（3-1）计算；

Q ——系数，由图 5-5 查取。

凸面受压时，封头加强段的厚度应同时不小于按 5.5.2（即按第 4 章外压球壳计算）确定的球壳厚度。

当 $2\delta/D_i < 0.002$ 时，加强段厚度按 5.5.5 计算。

要求与封头连接的圆筒端部厚度不得小于球冠形封头加强段厚度，否则应在圆筒端部设置加强段过渡连接。圆筒加强段计算厚度一般取封头加强段计算厚度，封头加强段长度和圆筒加强段长度均应不小于 $\sqrt{2D_i\delta_r}$ 。

图 5-5 球冠形端封头 Q 值图

5.5.4 球冠形中间封头加强段厚度

球冠形中间封头加强段厚度的计算应考虑封头两侧最苛刻的压力组合工况，按式（5-7）确定。如果凹面侧受压， Q 值由图 5-6 查取。如果凸面侧受压， Q 值由图 5-7 查取，此外还应不小于按 5.5.2（即按第 4 章外压球壳计算）确定的球壳厚度。

当 $2\delta/D_i < 0.002$ 时，加强段厚度按 5.5.5 计算。

要求与封头连接处的圆筒厚度不得小于球冠形封头加强段厚度，否则应设置圆筒加强段过渡连接。如图 5-4 所示。圆筒加强段计算厚度一般取等于封头加强段计算厚度，封头加强段长度和两侧圆筒加强段长度均应不小于 $\sqrt{2D_i\delta_r}$ 。

5.5.5 $2\delta/D_i < 0.002$ 时加强段厚度计算

对于需要加强的球冠形端封头与球冠形中间封头，当按照式（3-1）计算得到的 δ ，使得 $2\delta/D_i < 0.002$ 时，按以下步骤计算加强段厚度：

- 取 $\delta = 0.001D_i$ ；
- 由 $p_c / ([\sigma]^t \phi) = 0.002$ 分别查图 5-5（或图 5-6、图 5-7）得到 Q 值；
- 将 a)、b) 得到的 δ 、 Q 代入式（5-7）（即 $\delta_r = Q\delta$ ）计算加强段厚度。

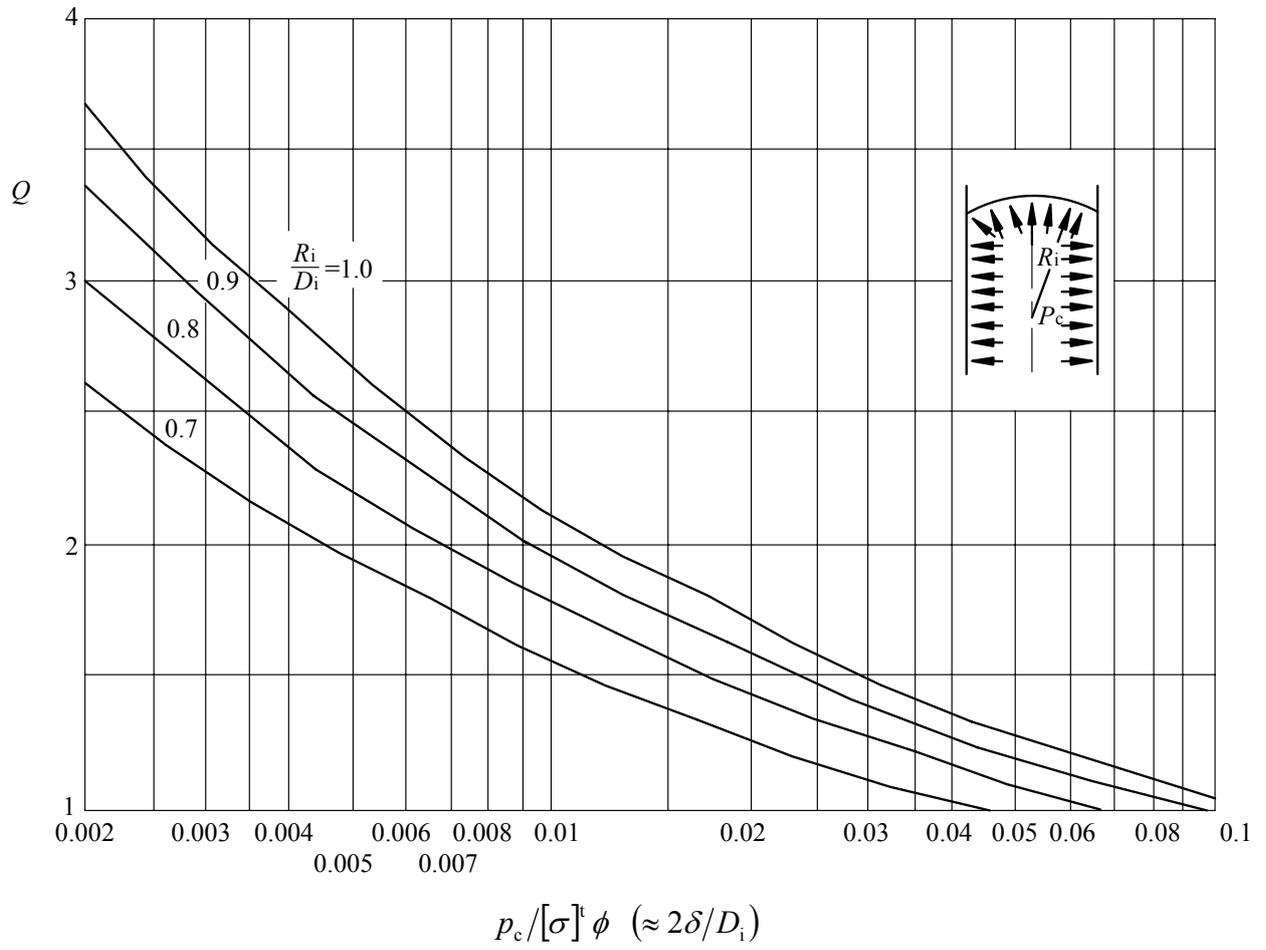
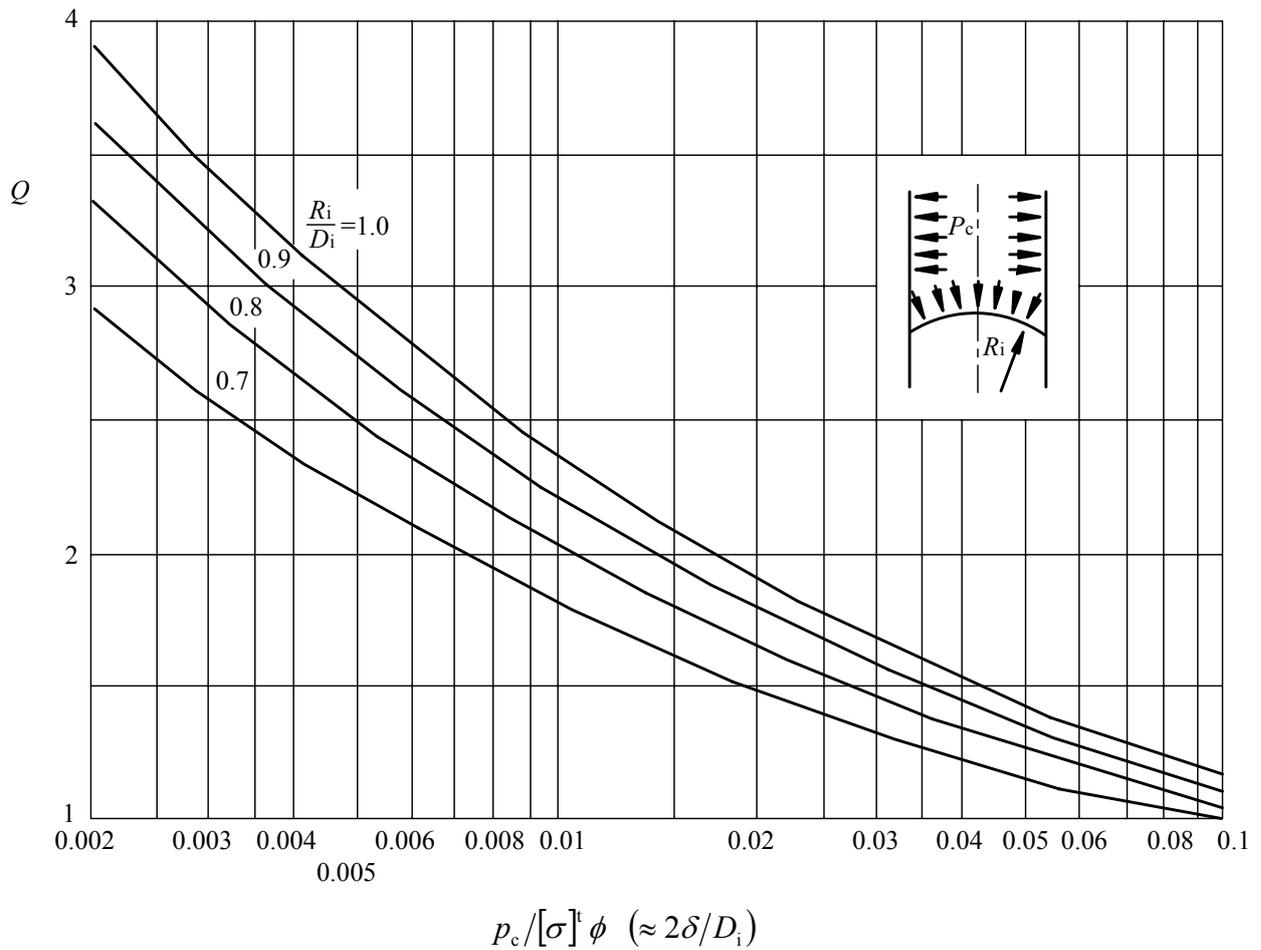


图 5-6 球冠形中间封头 Q 值图

图 5-7 球冠形中间封头 Q 值图

5.6 锥形封头

5.6.1 一般要求

5.6.1.1 本节规定仅适用于锥壳半顶角 $\alpha \leq 60^\circ$ 的轴对称无折边或折边锥形封头，锥形封头可以有以下几种形式：

- a) 单一厚度的锥壳，见图 5-8；
- b) 同一半顶角不同厚度的多段锥壳的组合；
- c) 大端或小端带有折边（圆环壳）和直边段（圆筒壳）的锥壳，见图 5-9、图 5-10；
- d) 大端或小端带有加强段的无折边锥壳，见图 5-12、图 5-14。

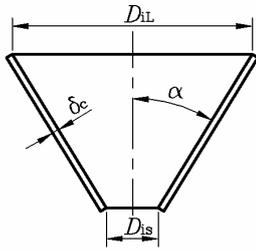


图 5-8 无折边锥壳

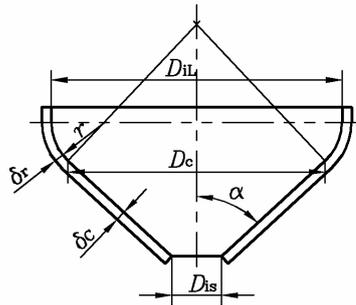


图 5-9 大端折边锥壳

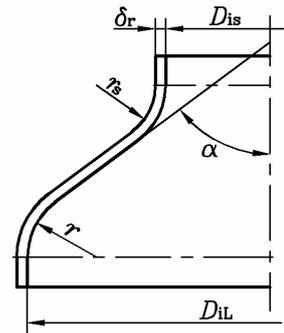


图 5-10 两端折边锥壳

5.6.1.2 结构要求

锥形封头的结构设计要求按表 5-4:

表 5-4 锥形封头折边设置要求

| 锥封头半顶角, α | $\leq 30^\circ$ | $\leq 45^\circ$ | $\leq 60^\circ$ | $> 60^\circ$ |
|------------------|-----------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------|
| 锥壳大端 | 允许无折边 | 应有折边 ($r \geq 10\%D_{iL}$ 且 $\geq 3\delta_c$) | | 按平盖 (或应力分析) |
| 锥壳小端 | 允许无折边 | | 应有折边 ($r_s \geq 5\%D_{is}$ 且 $\geq 3\delta_r$) | |

5.6.1.3 锥形封头的厚度

当锥壳大端或大、小端同时具有加强段或过渡段时, 应按 5.6.3、5.6.4、5.6.5 分别确定锥形封头各部分厚度。若考虑只由一种厚度组成时, 则应取上述各部分厚度中的最大值作为锥形封头的厚度。

在任何情况下, 过渡段或加强段的厚度不得小于与其连接的锥壳厚度并不小于圆筒内直径的 0.3%。

对于承受外压的锥形封头应首先满足该设计条件下的强度要求。

5.6.1.4 锥壳与圆筒的连接应采用全焊透结构。

5.6.2 符号

A ——外压计算应变系数;

A_{eL} ——外压计算时, 锥壳大端与圆筒连接处的有效加强截面积, mm^2 ;

A_{es} ——外压计算时, 锥壳小端与圆筒连接处的有效加强截面积, mm^2 ;

A_{TL} ——锥壳大端需要加强的截面积, mm^2 ;

A_{Ts} ——锥壳小端需要加强的截面积, mm^2 ;

A_s ——加强圈横截面积, mm^2 ;

A_T ——圆筒、锥壳和加强圈的当量截面积, 大端为 A_{TL} 见式 (5-26), 小端为 A_{Ts} 见式 (5-31), mm^2 ;

B ——外压计算应力系数, MPa;

C ——厚度附加量 (按 GB 150.1), mm;

D_c ——锥壳计算内直径, mm;

D_i ——圆筒内直径, mm;

D_{iL} ——锥壳大端直边段内直径, mm;

D_{is} ——锥壳小端直边段内直径, mm;

D_L ——外压计算时, 所考虑锥壳段大端外直径 (见图 5-16), mm;

D_{oL} ——锥壳大端直边段外直径, mm;

D_{os} ——锥壳小端直边段外直径, mm;

D_s ——外压计算时, 所考虑锥壳段小端外直径 (见图 5-16), mm;

E_c 、 E_r 、 E_s ——材料在设计温度下的弹性模量, 下标 c、r、s 分别表示锥壳、加强圈及圆筒, MPa;

f_1 ——除压力载荷外, 由外载荷在锥壳大端产生的单位圆周长度上轴向力, N/mm;

f_2 ——除压力载荷外, 由外载荷在锥壳小端产生的单位圆周长度上轴向力, N/mm;

I ——圆筒—锥壳或加强圈—圆筒—锥壳组合段所需的惯性矩, mm^4 ;

I_s ——圆筒—锥壳或加强圈—圆筒—锥壳组合段有效横截面对平行于壳体轴线的形心轴的惯性矩, mm^4 ;

k ——系数, 见式 (5-13);

L_c ——沿锥壳表面度量的锥壳上两加强圈之间的长度, mm;

L_e ——锥壳当量长度, mm;

L_L ——与锥壳大端相连圆筒的计算长度, mm;

L_{sm} ——与锥壳小端相连圆筒的计算长度, mm;

L_x ——锥壳段轴向长度 (见图 5-16), mm;

Q_L —— $\frac{1}{4} p_c D_L$ 和 f_1 的代数和, N/mm;

Q_s —— $\frac{1}{4} p_c D_s$ 和 f_2 的代数和, N/mm;

R ——圆筒中面半径, mm;

R_L ——锥壳大端直边段中面半径, mm;

R_{oL} ——锥壳大端直边段外半径, mm;

R_{os} ——锥壳小端直边段外半径, mm;

R_s ——锥壳小端直边段中面半径, mm;

r ——折边锥壳大端过渡段转角半径 (见图 5-10), mm;

r_s ——折边锥壳小端过渡段转角半径 (见图 5-10), mm;

α ——锥壳半顶角, ($^\circ$);

Δ ——锥壳端部与圆筒连接处需要加强的指数值, 当 $\Delta \geq \alpha$ 时, 该连接处不需要加强 (见表 5-5, 表 5-8), ($^\circ$);

δ_c ——锥壳计算厚度, mm;

δ_{ec} ——锥壳当量有效厚度, mm;

δ_{nc} ——锥壳名义厚度, mm;

$[\sigma]_c^t$ ——设计温度下锥壳所用材料的许用应力 (按 GB 150.2), MPa;

$[\sigma]_r^t$ ——设计温度下加强圈所用材料的许用应力 (按 GB 150.2), MPa;

$[\sigma]_s^t$ ——设计温度下圆筒所用材料的许用应力 (按 GB 150.2), MPa;

ϕ ——焊接接头系数（按 GB 150.1）。

5.6.3 受内压锥壳厚度

锥壳的计算厚度按式（5-8）计算：

$$\delta_c = \frac{p_c D_c}{2[\sigma]_c^t \phi - p_c} \cdot \frac{1}{\cos \alpha} \quad \dots\dots\dots (5-8)$$

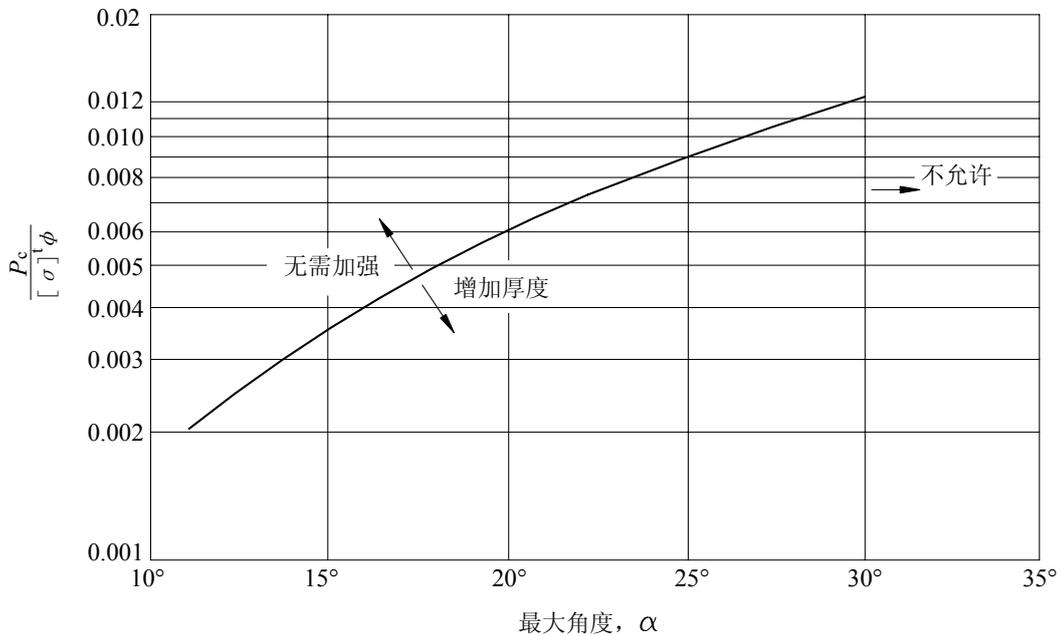
当锥壳由同一半顶角的几个不同厚度的锥壳段组成时，式中 D_c 分别为各锥壳段大端内直径。

5.6.4 受内压无折边锥壳

5.6.4.1 受内压无折边锥壳大端厚度

无折边锥壳大端与圆筒连接时，应按以下步骤确定连接处锥壳大端的厚度：

按图 5-11 确定是否需要在连接处进行加强；



注：曲线系按最大等效应力（主要为轴向弯曲应力）绘制，控制值为 $3[\sigma]_c^t$ 。

图 5-11 确定锥壳大端连接处的加强图

无需加强时，锥壳大端厚度按式（5-8）计算；

需要增加厚度予以加强时，应在锥壳与圆筒之间设置加强段，锥壳加强段与圆筒加强段应具有相同的厚度 δ_r ，步骤如下：

- a) 按照式（3-1）计算与锥壳相连接的圆筒厚度 δ ，该式中的 D_i 取锥壳大端内直径 D_{iL} ；
- b) 按式（5-9）计算：

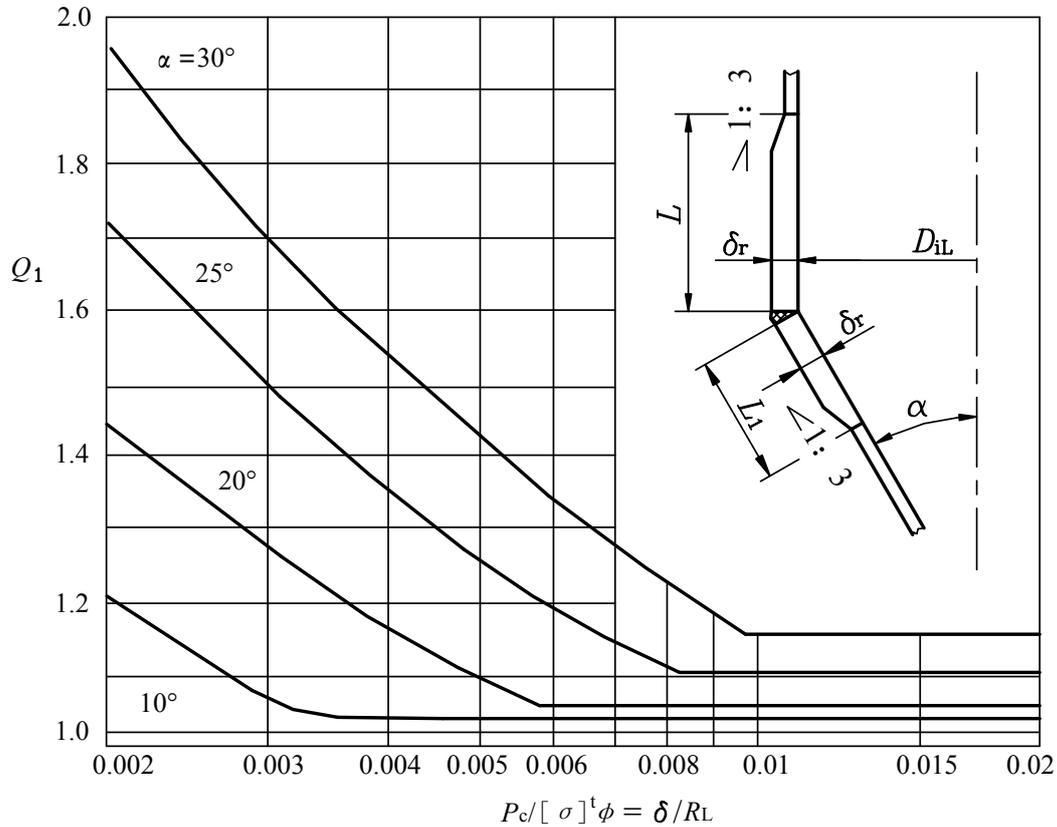
$$\delta_r = Q_1 \delta \quad \dots\dots\dots (5-9)$$

式中：

Q_1 ——大端应力增值系数，由图 5-12 查取。

当 $\delta/R_L < 0.002$ 时，按 5.6.4.3 确定加强段厚度。

在任何情况下，加强段的厚度不得小于相连接的锥壳厚度。锥壳加强段的长度 L_1 应不小于 $\sqrt{\frac{2D_{iL}\delta_r}{\cos\alpha}}$ ；圆筒加强段的长度 L 应不小于 $\sqrt{2D_{iL}\delta_r}$ 。



注：曲线系按最大等效应力绘制，控制值为 $3[\sigma]^t$ 。

图 5-12 锥壳大端连接处的 Q_1 值图

5.6.4.2 受内压无折边锥壳小端厚度

无折边锥壳小端与圆筒连接时，应按以下步骤确定连接处锥壳小端的厚度：

按图 5-13 确定是否需要在连接处进行加强；

无需加强时，锥壳小端厚度按式 (5-8) 计算；

需要增加厚度予以加强时，则应在锥壳与圆筒之间设置加强段，锥壳加强段与圆筒加强段应具有相同的厚度 δ_r ，步骤如下：

a) 按照式 (3-1) 计算与锥壳相连接的圆筒厚度 δ ，该式中的 D_i 取锥壳小端内直径 D_{is} ；

b) 按式 (5-10) 计算：

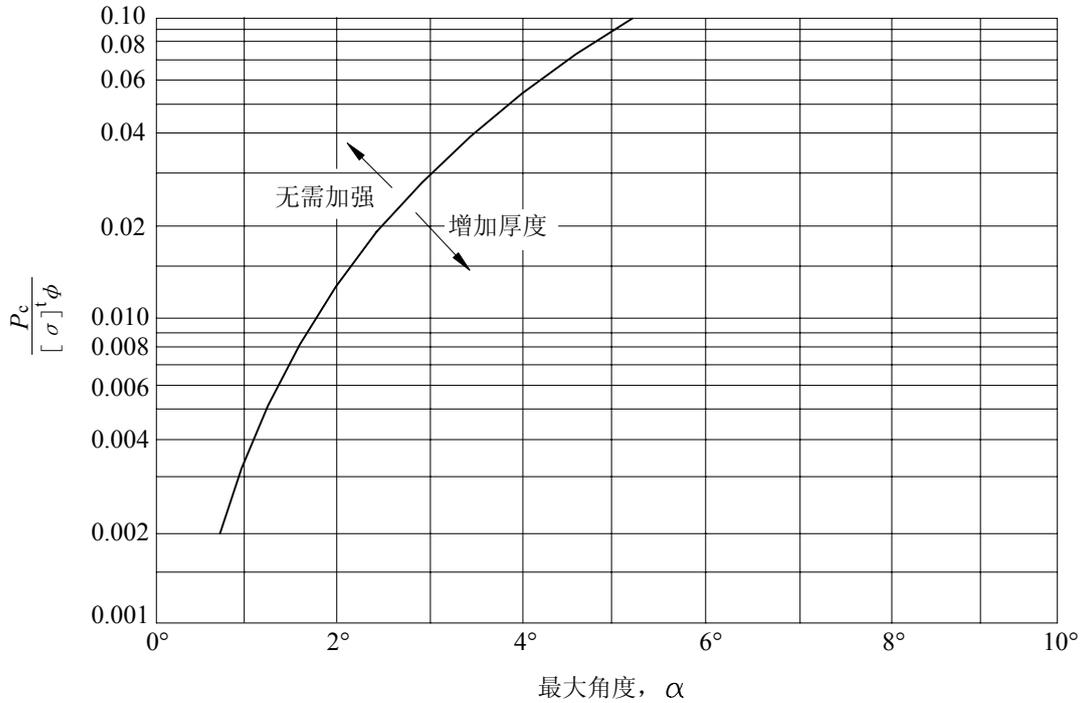
$$\delta_r = Q_2 \delta \dots\dots\dots (5-10)$$

式中：

Q_2 ——小端应力增值系数，由图 5-14 查取。

当 $\delta/R_s < 0.002$ 时，按 5.6.4.3 确定加强段厚度。

在任何情况下，加强段的厚度不得小于相连接的锥壳厚度。锥壳加强段的长度 L_1 应不小于 $\sqrt{\frac{2D_{is}\delta_r}{\cos\alpha}}$ ；圆筒加强段的长度 L 应不小于 $\sqrt{2D_{is}\delta_r}$ 。



注：曲线系按连接处的等效局部薄膜应力（由平均环向拉应力和平均经向压应力计算所得）绘制，控制值为 $1.1[\sigma]^t$ 。

图 5-13 确定锥壳小端连接处的加强图

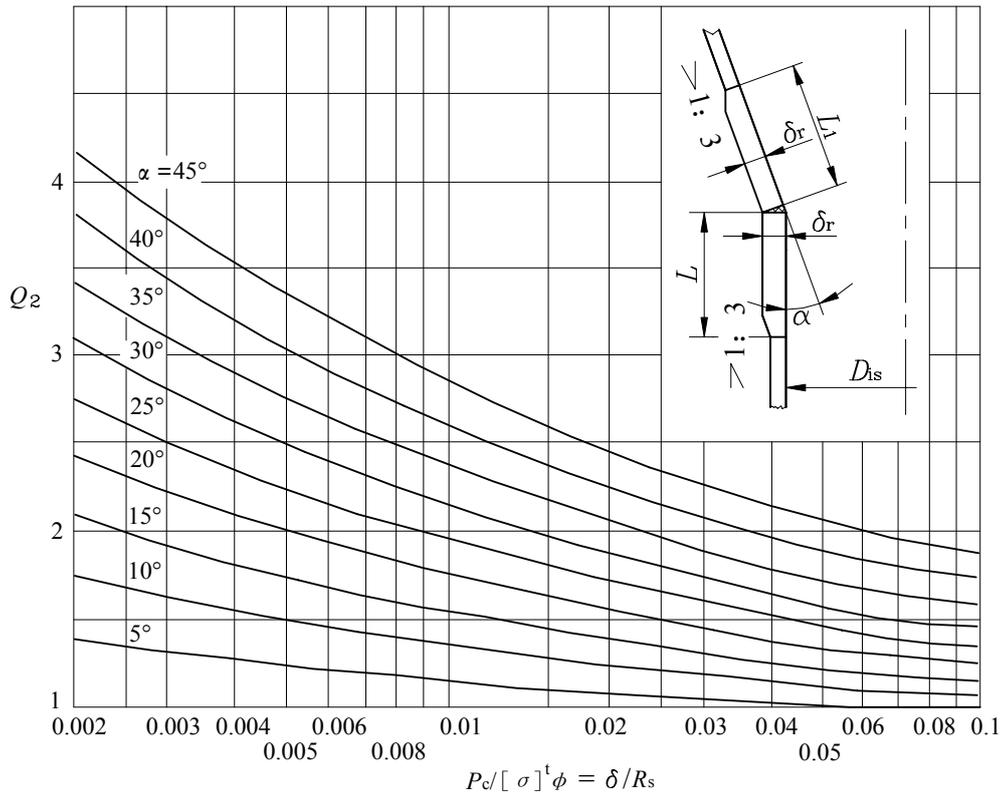
5.6.4.3 当 $\delta/R < 0.002$ 时，无折边锥壳加强段的计算。

对于需要加强的无折边锥壳，当 $\delta/R_L < 0.002$ 或 $\delta/R_s < 0.002$ 时，在计算无折边锥壳加强段时，应按式（5-11）或（5-12）分别计算大端或小端加强段厚度：

$$\delta_r = 0.001 Q_1 D_{iL} \quad \dots\dots\dots (5-11)$$

$$\delta_r = 0.001 Q_2 D_{is} \quad \dots\dots\dots (5-12)$$

上两式中的 Q_1 与 Q_2 由 $p_c / [\sigma]^t \phi = 0.002$ 分别查图 5-12 与图 5-14 得到。



注：曲线系按连接处的等效局部薄膜应力（由平均环向拉应力和平均经向压应力计算所得）绘制，控制值为 $1.1[\sigma]^t$ 。

图 5-14 锥壳小端连接处的 Q_2 值图

5.6.4.4 在内压和轴向载荷共同作用下无折边锥壳与圆筒连接处的加强设计

本节计算方法适用于半顶角 $\alpha \leq 30^\circ$ 的无折边锥壳、在内压与其他轴向载荷（如偏心重量、风载荷、地震载荷等）共同作用时，与圆筒连接处的结构应力校核计算。

在进行锥壳与圆筒连接处的加强结构设计时，首先应分别满足按 5.6.3、5.6.4.1~5.6.4.3 计算的锥壳厚度。考虑加强圈、锥壳、圆筒间材料不同对加强计算的影响，引入系数 k ，见式(5-13)。

$$k = \begin{cases} 1 & \text{不需要增加加强面积时} \\ y/([\sigma]^t E_r) \text{ 且不小于} 1 & \text{需要增加加强面积时} \end{cases} \dots\dots\dots (5-13)$$

式中：

y ——锥壳与圆筒连接系数，

加强圈设置在圆筒上： $y = [\sigma]^t E_s$ ；

加强圈设置在锥壳上： $y = [\sigma]^t E_c$ 。

本节内压加强设计仅适用于 Q_L 、 Q_s 为拉伸载荷的情况（即二者为正值）；同时， f_1 、 f_2 为轴向拉伸时取正值，反之取负值。

5.6.4.4.1 锥壳大端与圆筒连接处的加强设计

用 $p_c / [\sigma]^t \phi$ 的比值从表 5-5 查得 Δ 值，若 Δ 值小于锥壳半顶角 α 时，应进行加强设计（中间值用内插法）。

需要的加强面积最小值按式（5-14）确定。

$$A_{rL} = \frac{kQ_L D_{iL} \tan \alpha}{2[\sigma]_s^t \phi} \left(1 - \frac{\Delta}{\alpha}\right) \dots\dots\dots (5-14)$$

式中， $\phi=1.0$ 。

锥壳大端与圆筒连接处的有效加强截面积可按式（5-15）计算，如设置加强圈，还应计入加强圈截面积。

$$A_{eL} = 0.55(\delta_n - \delta - C)\sqrt{D_{iL}\delta_n} + 0.55(\delta_{nc} - \delta_c - C)\sqrt{\frac{D_{iL}\delta_{nc}}{\cos \alpha}} \dots\dots\dots (5-15)$$

校核条件： $A_{eL} \geq A_{rL}$ 。

表 5-5 $\alpha \leq 30^\circ$ 锥壳端部与圆筒连接处 Δ 值

| | | | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 大端 | $p_c / [\sigma]_s^t \phi$ | 0.002 | 0.003 | 0.004 | 0.005 | 0.006 | 0.007 | 0.008 | 0.009 |
| | Δ (°) | 11 | 13.5 | 16 | 18 | 19.5 | 21.5 | 23 | 24.5 |
| | $p_c / [\sigma]_s^t \phi$ | 0.010 | 0.012 | 0.013 | | | | | |
| | Δ (°) | 26 | 29 | 30 | | | | | |
| 小端 | $p_c / [\sigma]_s^t \phi$ | 0.002 | 0.005 | 0.010 | 0.02 | 0.04 | 0.08 | 0.1 | 0.125 |
| | Δ (°) | 4 | 6 | 9 | 12.5 | 17.5 | 24 | 27 | 30 |
| 注：对于更大的 $p_c / [\sigma]_s^t \phi$ 值，取 $\Delta=30^\circ$ 。 | | | | | | | | | |

锥壳与圆筒上所有能用于加强的截面都应在距锥壳与圆筒连接处为 $\sqrt{D_{iL}\delta_n} / 2$ 的范围之内，并且要求加强面积的形心应在距连接处 $0.25\sqrt{D_{iL}\delta_n} / 2$ 的范围之内。

5.6.4.4.2 锥壳小端与圆筒连接处的加强设计

用 $p_c / [\sigma]_s^t \phi$ 的比值从表 5-5 查得 Δ 值，若 Δ 值小于锥壳半顶角 α 时，应进行加强设计（中间值用内插法）。

需要的加强面积最小值按式（5-16）计算：

$$A_{rs} = \frac{kQ_s D_{is} \tan \alpha}{2[\sigma]_s^t \phi} \left(1 - \frac{\Delta}{\alpha}\right) \dots\dots\dots (5-16)$$

锥壳小端与圆筒连接处的有效加强截面积可按式（5-17）计算，如设置加强圈，还应计入加强圈截面积。

$$A_{es} = 0.55(\delta_n - \delta - C)\sqrt{D_{is}\delta_n} + 0.55(\delta_{nc} - \delta_c - C)\sqrt{\frac{D_{is}\delta_{nc}}{\cos \alpha}} \dots\dots\dots (5-17)$$

校核条件： $A_{es} \geq A_{rs}$ 。

锥壳及圆筒上所有能用于加强的面积都应在距锥壳与圆筒连接处为 $\sqrt{D_{is}\delta_n} / 2$ 的范围之内，并且要求加强截面积的形心在距连接处 $0.25\sqrt{D_{is}\delta_n} / 2$ 的范围内。

5.6.5 受内压折边锥壳

5.6.5.1 受内压折边锥壳大端厚度

折边锥壳大端厚度按式（5-18）、（5-19）计算，取其较大值：

a) 过渡段厚度:

$$\delta_r = \frac{K p_c D_{iL}}{2[\sigma]_c^t \phi - 0.5 p_c} \dots\dots\dots (5-18)$$

式中:

K——系数, 见表 5-6。

表 5-6 系数 K 值

| α | r/D_{iL} | | | | | |
|----------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.30 | 0.40 | 0.50 |
| 10° | 0.6644 | 0.6111 | 0.5789 | 0.5403 | 0.5168 | 0.5000 |
| 20° | 0.6956 | 0.6357 | 0.5986 | 0.5522 | 0.5223 | |
| 30° | 0.7544 | 0.6819 | 0.6357 | 0.5749 | 0.5329 | |
| 35° | 0.7980 | 0.7161 | 0.6629 | 0.5914 | 0.5407 | |
| 40° | 0.8547 | 0.7604 | 0.6981 | 0.6127 | 0.5506 | |
| 45° | 0.9253 | 0.8181 | 0.7440 | 0.6402 | 0.5635 | |
| 50° | 1.0270 | 0.8944 | 0.8045 | 0.6765 | 0.5804 | |
| 55° | 1.1608 | 0.9980 | 0.8859 | 0.7249 | 0.6028 | |
| 60° | 1.3500 | 1.1433 | 1.0000 | 0.7923 | 0.6337 | |

注: 中间值用内插法。

b) 与过渡段相接处的锥壳厚度:

$$\delta_r = \frac{f p_c D_{iL}}{[\sigma]_c^t \phi - 0.5 p_c} \dots\dots\dots (5-19)$$

式中:

f——系数, $f = \frac{1 - \frac{2r}{D_{iL}}(1 - \cos\alpha)}{2\cos\alpha}$, 其值见表 5-7。

表 5-7 系数 f 值

| α | r/D_{iL} | | | | | |
|----------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.30 | 0.40 | 0.50 |
| 10° | 0.5062 | 0.5055 | 0.5047 | 0.5032 | 0.5017 | 0.5000 |
| 20° | 0.5257 | 0.5225 | 0.5193 | 0.5128 | 0.5064 | |
| 30° | 0.5619 | 0.5542 | 0.5465 | 0.5310 | 0.5155 | |
| 35° | 0.5883 | 0.5773 | 0.5663 | 0.5442 | 0.5221 | |
| 40° | 0.6222 | 0.6069 | 0.5916 | 0.5611 | 0.5305 | |
| 45° | 0.6657 | 0.6450 | 0.6243 | 0.5828 | 0.5414 | |
| 50° | 0.7223 | 0.6945 | 0.6668 | 0.6112 | 0.5556 | |
| 55° | 0.7973 | 0.7602 | 0.7230 | 0.6486 | 0.5743 | |
| 60° | 0.9000 | 0.8500 | 0.8000 | 0.7000 | 0.6000 | |

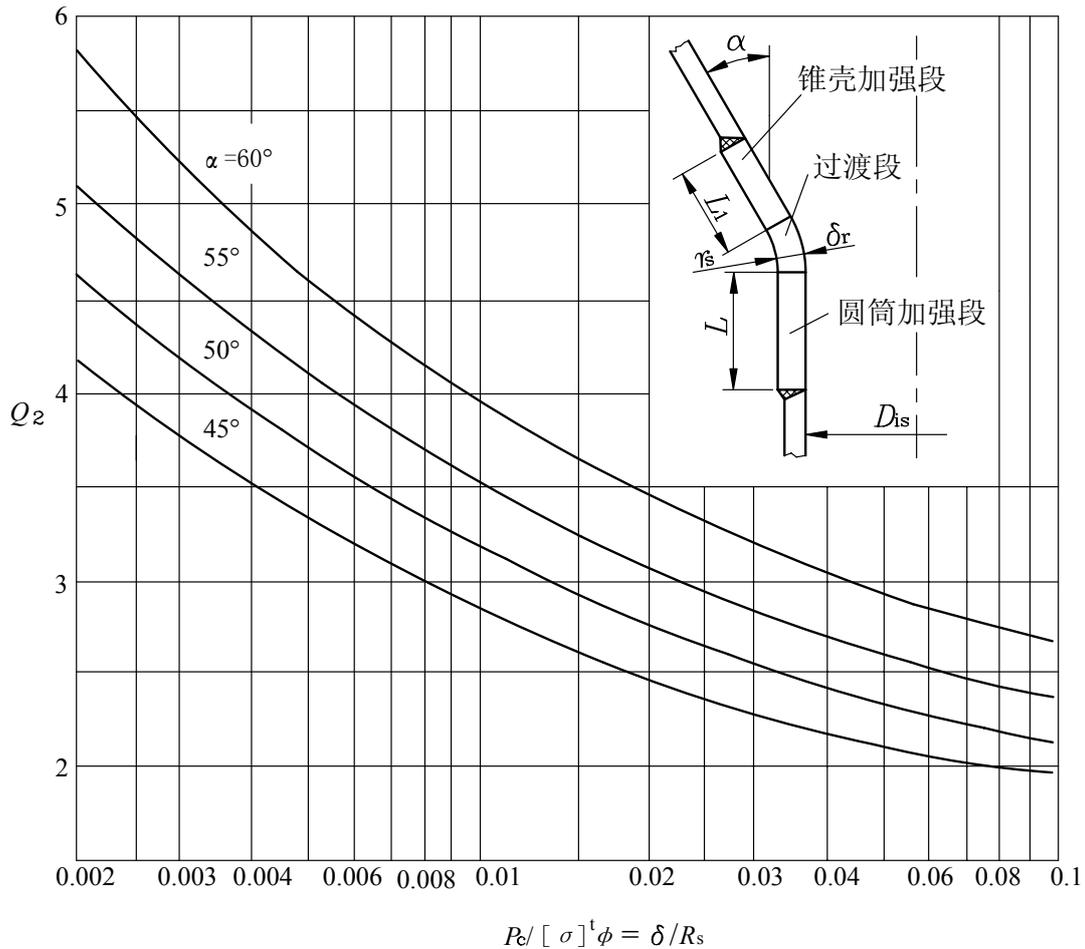
注: 中间值用内插法。

5.6.5.2 受内压折边锥壳小端厚度

当锥壳半顶角 $\alpha \leq 45^\circ$ 时，如需采用折边，其小端过渡段厚度按式 (5-10) 计算，式中 Q_2 值由图 5-14 查取。

当锥壳半顶角 $\alpha > 45^\circ$ 时，小端过渡段厚度仍按式 (5-10) 计算，但式中 Q_2 值由图 5-15 查取。

与过渡段相接的锥壳和圆筒的加强段厚度应与过渡段厚度相同。锥壳加强段的长度 L_1 应不小于 $\sqrt{D_{is}\delta_r/\cos\alpha}$ ；圆筒加强段的长度 L 应不小于 $\sqrt{D_{is}\delta_r}$ 。



注：曲线系按连接处的等效局部薄膜应力（由平均环向拉应力和平均径向压应力计算所得）绘制，控制值为 $1.1[\sigma]^t$ 。

图 5-15 锥壳小端带过渡段连接的 Q_2 值图

5.6.6 受外压锥壳

5.6.6.1 锥壳承受外压作用时，锥壳的计算长度取当量长度 L_e ，其计算如下：

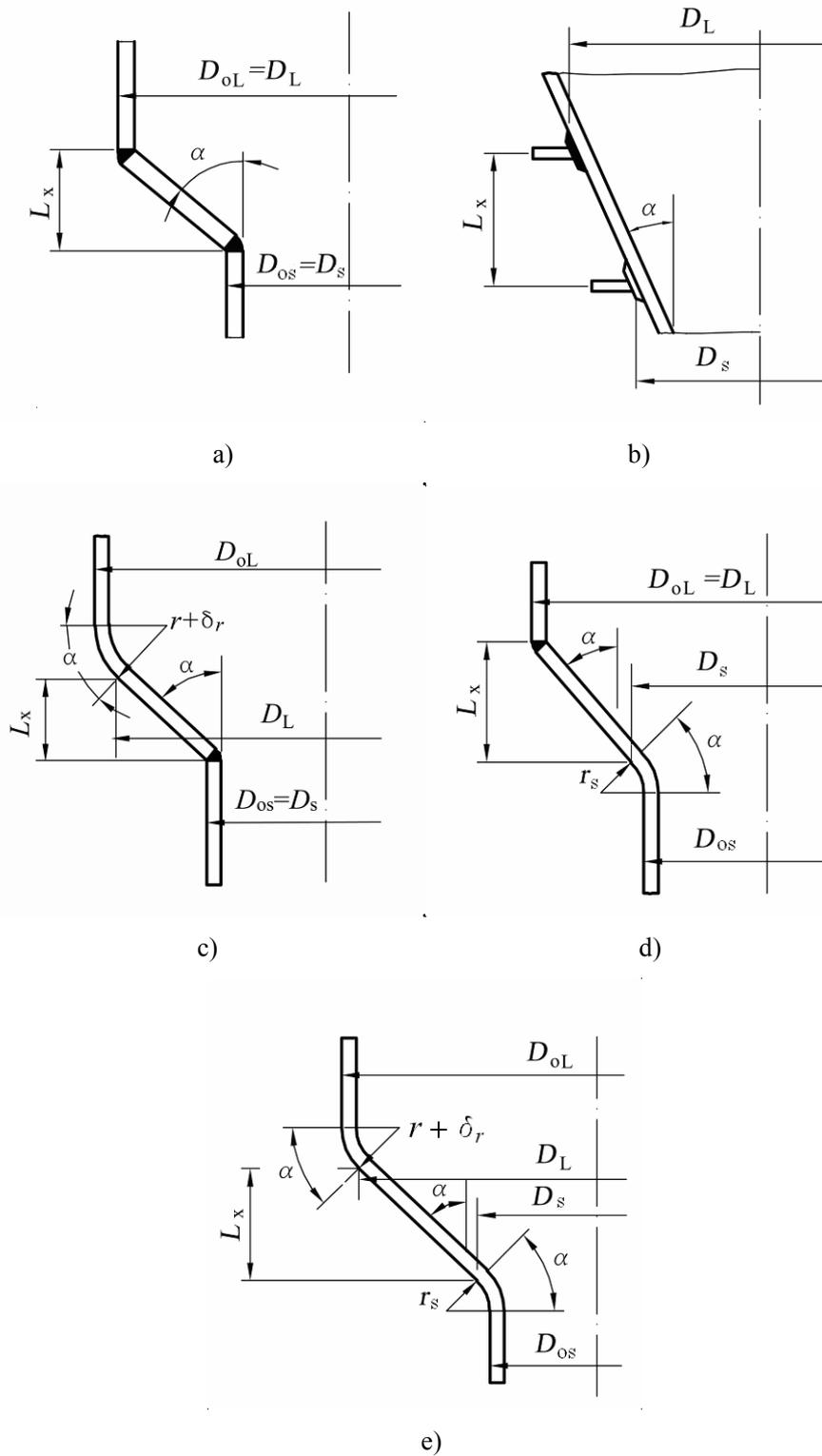


图 5-16 锥壳的当量长度

- a) 无折边锥壳或锥壳上相邻两加强圈之间锥壳段(见图 5-16 a)和 b))的当量长度按式(5-20)计算:

$$L_e = \frac{L_x}{2} \left(1 + \frac{D_s}{D_L}\right) \dots\dots\dots (5-20)$$

b) 大端折边锥壳 (见图 5-16 c)) 的当量长度按式 (5-21) 计算:

$$L_e = (r + \delta_r) \sin \alpha + \frac{L_x}{2} \left(1 + \frac{D_s}{D_L}\right) \dots\dots\dots (5-21)$$

c) 小端折边锥壳 (见图 5-16 d)) 的当量长度按式 (5-22) 计算:

$$L_e = r_s \frac{D_s}{D_L} \sin \alpha + \frac{L_x}{2} \left(1 + \frac{D_s}{D_L}\right) \dots\dots\dots (5-22)$$

d) 折边锥壳 (见图 5-16 e)) 的当量长度按式 (5-23) 计算:

$$L_e = (r + \delta_r) \sin \alpha + r_s \frac{D_s}{D_L} \sin \alpha + \frac{L_x}{2} \left(1 + \frac{D_s}{D_L}\right) \dots\dots\dots (5-23)$$

5.6.6.2 外压锥壳的计算

锥壳 (见图 5-16) 承受外压, 所需的有效厚度按下述方法和步骤确定:

a) 假设锥壳的名义厚度 δ_{nc} ;

b) 计算 $\delta_{ec} = (\delta_{nc} - C) \cos \alpha$;

c) 按 4.3 的规定进行外压校核计算, 并以 L_e/D_L 代替 L/D_o , D_L/δ_{ec} 代替 D_o/δ_e ;

d) 在外压锥壳计算中, 设计外压力 p_c 取正值; 外压加强计算方法仅适用于 Q_L 、 Q_s 为压缩载荷的情况 (即二者为正值); f_1 , f_2 为轴向压缩载荷时, 取正值, 反之取负值。

5.6.6.3 锥壳与圆筒连接处的外压加强设计一般要求

半顶角 $\alpha \leq 60^\circ$ 的锥壳承受外压, 其与圆筒连接处的结构应按 5.6.6.4 和 5.6.6.5 进行计算, 以确定是否需要加强。

锥壳与圆筒连接处加强材料一般与壳体材料相同, 若加强材料许用应力小于壳体材料许用应力, 则加强面积应按壳体材料与加强材料许用应力之比增加。若加强材料许用应力大于壳体材料许用应力, 则所需加强面积不得减少。

加强圈的设置应满足 4.5.2 的规定。

5.6.6.4 锥壳大端与圆筒连接处的加强设计

5.6.6.4.1 无折边锥壳大端与圆筒连接处加强面积校核

用 $p_c / [\sigma]_s \phi$ 的比值从表 5-8 查 Δ 值, 若 Δ 值小于锥壳半顶角 α 时, 应进行加强设计 (中间值用内插法)。

需要的加强面积最小值按式 (5-24) 计算:

$$A_{TL} = \frac{kQ_L D_{oL} \tan \alpha}{2[\sigma]_s \phi} \left[1 - \frac{1}{4} \left(\frac{p_c D_{oL} - 2Q_L}{2Q_L} \right) \Delta \right] \dots\dots\dots (5-24)$$

式中:

k ——系数, 同式 (5-13)。

锥壳大端与圆筒连接处的有效加强截面积可按式 (5-25) 计算, 如设置加强圈, 还应计入加强圈截面积。

$$A_{eL} = 0.55(\delta_n - C)\sqrt{D_{oL}\delta_n} + 0.55(\delta_{nc} - C)\sqrt{\frac{D_{oL}\delta_{nc}}{\cos\alpha}} \dots\dots\dots (5-25)$$

校核条件: $A_{eL} \geq A_{rL}$ 。

表 5-8 $\alpha \leq 60^\circ$ 锥壳大端与圆筒连接处 Δ 值

| | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------|------|-------|-------|------|------|------|------|
| $p_c/[\sigma]_s^t \phi$ | 0 | 0.002 | 0.005 | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.08 |
| $\Delta, (^\circ)$ | 0 | 5 | 7 | 10 | 15 | 21 | 29 |
| $p_c/[\sigma]_s^t \phi$ | 0.10 | 0.125 | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 |
| $\Delta, (^\circ)$ | 33 | 37 | 40 | 47 | 52 | 57 | 60 |
| 注: $p_c/[\sigma]_s^t \phi > 0.35$ 时取 $\Delta=60^\circ$ 。 | | | | | | | |

锥壳与圆筒上所有能用于加强的截面都应在距锥壳与圆筒连接处为 $\sqrt{D_L\delta_n}/2$ 的范围之内, 并且要求加强面积的形心应在距连接处 $0.25\sqrt{D_L\delta_n}/2$ 的范围之内。

5.6.6.4.2 锥壳大端与圆筒连接处作为支撑线的判定

- a) 当锥壳大端与圆筒连接处不作为支撑线时, 应按图 4-1 c-2) 所示确定外压计算长度; 否则按图 4-1 b)、e)、f) 确定;
- b) 选取锥壳大端与圆筒连接处的加强结构, 确定与锥壳连接的外压圆筒计算长度 L_L (见图 5-17);
- c) 按以下步骤计算锥壳大端与圆筒连接处惯性矩:

1) 确定外压应力系数 B

由锥壳大端与圆筒连接处的当量截面积 A_{TL} , 按式 (5-26) 计算系数 B 值:

$$B = \frac{F_L D_L}{A_{TL}} \dots\dots\dots (5-26)$$

式中:

$$A_{TL} = \frac{1}{2}L_L(\delta_n - C) + \frac{1}{2}L_c(\delta_{nc} - C) + A_s$$

$$L_c = \sqrt{L_x^2 - \frac{(D_L - D_s)^2}{4}}$$

$$F_L = p_c M + f_1 \tan\alpha$$

$$M = -\frac{D_L \tan\alpha}{4} + \frac{L_L}{2} + \frac{D_L^2 - D_s^2}{6D_L \tan\alpha}$$

2) 确定外压应变系数 A

按所用材料, 查表 4-1 确定对应的外压应力系数 B 曲线图, 由 B 值查取 A 值; 若 B 值超出设计温度下曲线的最大值, 则取对应温度曲线右端点的横坐标值为 A 值; 若 B 值小于设计温度曲线的最小值, 则按式 (5-27) 计算 A 值:

$$A = 1.5B/E_T \dots\dots\dots (5-27)$$

3) 确定所需的惯性矩 I

按式(5-28)计算锥壳—圆筒或锥壳—加强圈—圆筒组合截面所需的惯性矩 I 值:

$$I = \frac{AD_L^2 A_{TL}}{10.9} \dots\dots\dots (5-28)$$

d) 计算锥壳大端与筒体连接处组合结构的有效惯性矩 I_s , 应满足 $I_s \geq I$; 否则应选取更大惯性矩的组合加强结构重新计算 I_s 直至满足要求。

有效惯性矩 I_s 的计算应计入圆筒与锥壳连接线两侧各为 $0.55\sqrt{D_{oL}\delta_n}$ 的壳体, 若两侧壳体有效宽度与相邻加强圈的壳体有效宽度相重叠, 则重叠部分每侧各按一半计算。

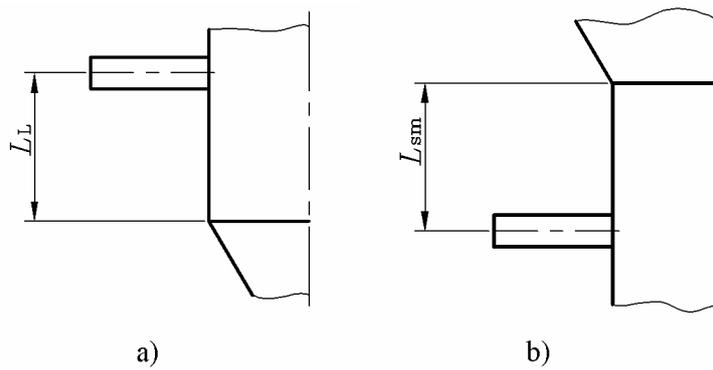


图 5-17 计算长度示意图

5.6.6.5 锥壳小端与圆筒连接处的加强设计

5.6.6.5.1 无折边锥壳小端与圆筒连接处加强面积校核

需要的加强面积最小值按式(5-29)计算:

$$A_{rs} = \frac{kQ_s D_{os} \tan \alpha}{2[\sigma]_s^t \phi} \dots\dots\dots (5-29)$$

式中, $\phi=1.0$ 。

锥壳小端与圆筒连接处的有效加强截面积可按式(5-30)计算, 如设置加强圈, 还应计入加强圈截面积。

$$A_{es} = 0.55(\delta_n - \delta - C)\sqrt{D_{os}\delta_n} + 0.55(\delta_{nc} - \delta_c - C)\sqrt{\frac{D_{os}\delta_{nc}}{\cos \alpha}} \dots\dots\dots (5-30)$$

校核条件: $A_{es} \geq A_{rs}$ 。

锥壳及圆筒上所有能用于加强的面积都应在距锥壳与圆筒连接处为 $\sqrt{D_s\delta_n}/2$ 的范围之内, 并且要求加强截面积的形心在距连接处 $0.25\sqrt{D_s\delta_n}/2$ 的范围内。

5.6.6.5.2 锥壳小端与圆筒连接处作为支撑线的判定

- a) 当锥壳小端与圆筒连接处不作为支撑线时, 应按图 4-1 c-2)所示确定外压计算长度; 否则按图 4-1 b)、e)、f) 确定。
- b) 选取锥壳小端与圆筒连接处的加强结构, 确定与锥壳连接的外压圆筒计算长度 L_{sm} (见图 5-17)。
- c) 按以下步骤计算锥壳小端与圆筒连接处惯性矩:
 - 1) 确定外压应力系数 B

由锥壳小端与圆筒连接处的当量截面积 A_{Ts} ，按式 (5-31) 计算系数 B 值：

$$B = \frac{F_s D_s}{A_{Ts}} \quad \dots\dots\dots (5-31)$$

式中：

$$A_{Ts} = \frac{1}{2} L_{sm} (\delta_n - C) + \frac{1}{2} L_c (\delta_{nc} - C) + A_s$$

$$F_s = p_c N + f_2 \tan \alpha$$

$$N = \frac{D_s \tan \alpha}{4} + \frac{L_{sm}}{2} + \frac{D_L^2 - D_s^2}{12 D_s \tan \alpha}$$

2) 确定外压应变系数 A

按所用材料，查表 4-1 确定对应的外压应力系数 B 曲线图，由 B 值查取 A 值；若 B 值超出设计温度下曲线的最大值，则取对应温度曲线右端点的横坐标值为 A 值；若 B 值小于设计温度曲线的最小值，则按式 (5-27) 计算 A 值；

3) 确定所需的惯性矩 I

按式 (5-32) 计算锥壳—圆筒或锥壳—加强圈—圆筒组合截面所需的惯性矩 I 值：

$$I = \frac{A D_s^2 A_{Ts}}{10.9} \quad \dots\dots\dots (5-32)$$

- d) 计算锥壳小端与筒体连接处组合结构的有效惯性矩 I_s ，应满足 $I_s \geq I$ ；否则应选取更大惯性矩的组合加强结构重新计算 I_s 直至满足要求。

有效惯性矩 I_s 的计算可计入圆筒与锥壳连接线两侧各为 $0.55 \sqrt{D_{os} \delta_n}$ 的壳体，若两侧壳体有效宽度与相邻加强圈的壳体有效宽度相重叠，则重叠部分每侧各按一半计算。

5.6.6.6 锥壳与圆筒相连的外压计算框图见图 5-18。

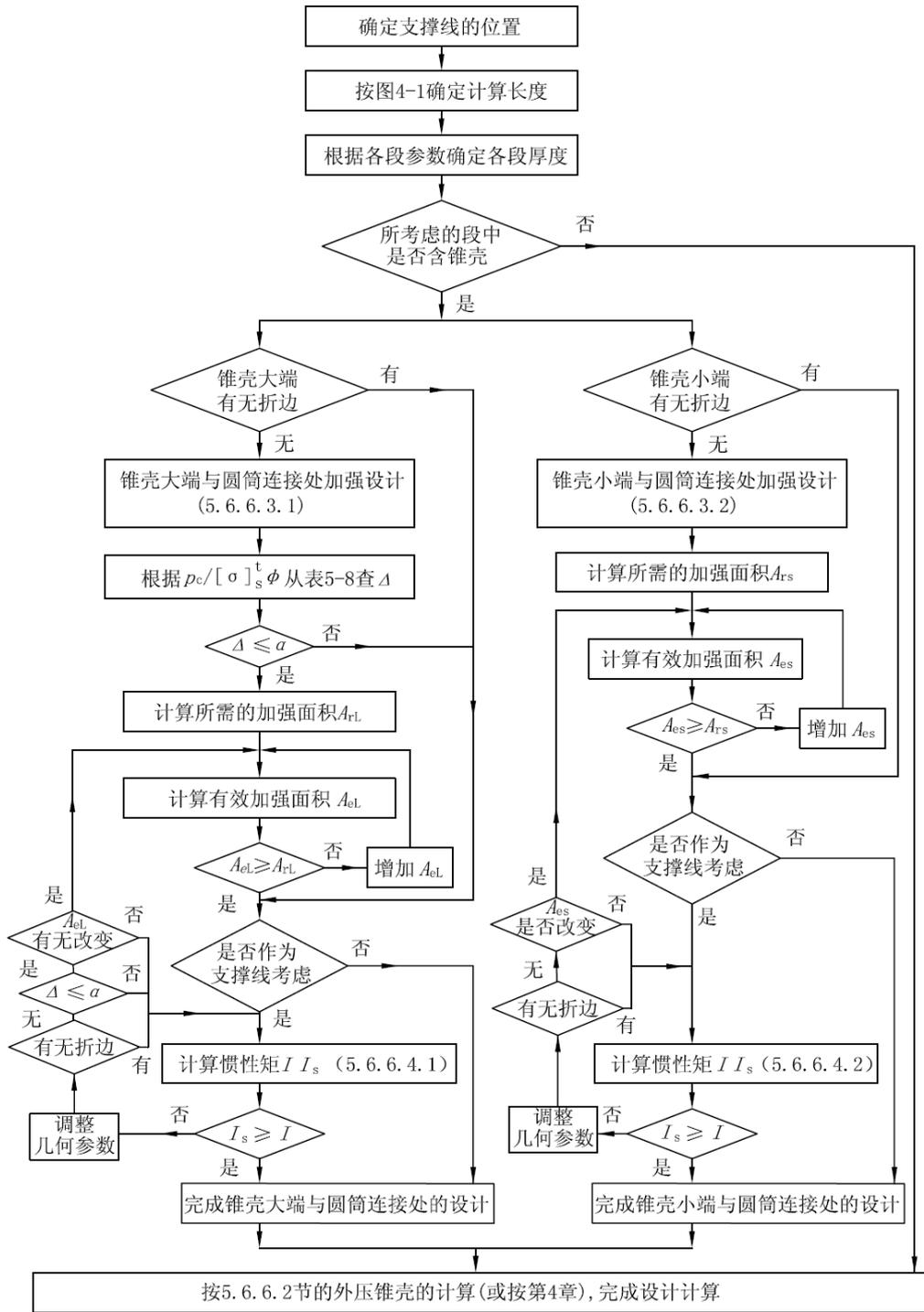


图 5-18 锥壳与圆筒连接处外压计算框图

5.7 偏心锥壳

5.7.1 本节适用于连接具有平行轴线两圆筒的非轴对称偏心锥壳(见图 5-19),同时满足以下要求:

- a) 两筒体轴线间距 L 应不大于两筒体内直径差值的 1/2;

- b) 对内压情况偏心锥壳与筒体间夹角大值 $\alpha_1 \leq 30^\circ$ ，对于外压情况 $\alpha_1 \leq 60^\circ$ ；

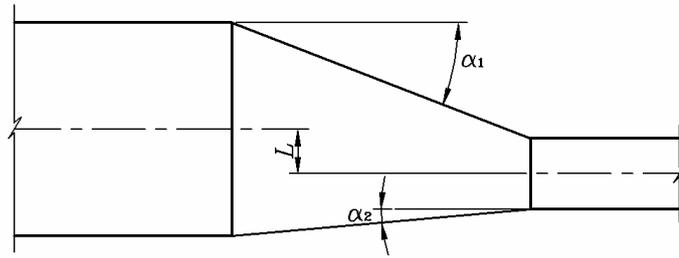


图 5-19 偏心锥壳

5.7.2 受内压偏心锥壳厚度计算

- 锥壳半顶角 α 取偏心锥壳与筒体间夹角 α_1 、 α_2 的大值；
- 按 5.6.3 要求确定偏心锥壳厚度；
- 按 5.6.4.1 要求确定偏心锥壳大端厚度；
- 按 5.6.4.2 要求确定偏心锥壳小端厚度；
- 取上述 b)、c)、d) 的大值作为偏心锥壳的厚度。

5.7.3 受外压偏心锥壳厚度计算

受外压偏心锥壳的厚度确定、与圆筒连接处的外压加强设计参照 5.6.6，锥壳半顶角 α 分别取 α_1 、 α_2 进行设计，分别满足二者的要求并取大值作为偏心锥壳的厚度。

5.8 变径段

5.8.1 以折边锥壳或无折边锥壳作为变径段时，应按 5.6 的相应规定进行变径段设计。

5.8.2 当变径段为反向曲线的形式时，见图 5-20，则应按 5.6 的相应规定分别确定各部分厚度，取较大值作为变径段厚度。

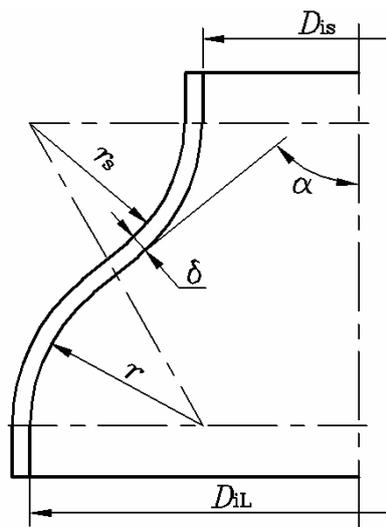


图 5-20 反向曲线变径段

5.9 平盖

5.9.1 本条计算公式适用于受内压或外压的无孔或有孔但已被加强的平盖设计。平盖的几何形状包括：圆形、椭圆形、长圆形、矩形及正方形。平盖与圆筒连接型式及其结构见表 5-9、表 5-10。其中表 5-10 对应的设计方法是基于塑性分析导出的，适用于封头与筒体全焊透连接结构。

5.9.2 符号

- a ——非圆形平盖的短轴长度，mm；
- b ——非圆形平盖的长轴长度，mm；
- D_c ——平盖计算直径，mm；
- K ——结构特征系数；
- L ——非圆形平盖螺栓中心连线周长，mm；
- r ——平盖过渡区圆弧半径，mm；
- L_G ——螺栓中心至垫片压紧力作用中心线的径向距离（见表 5-9 中简图），mm；
- W ——预紧状态时或操作状态时的螺栓设计载荷（按第 7 章），N；
- Z ——非圆形平盖的形状系数；
- δ_p ——平盖计算厚度，mm；
- δ_{ep} ——平盖有效厚度，mm；
- $[\sigma]^t$ ——设计温度下平盖材料的许用应力（按 GB 150.2 的规定），MPa；

5.9.3 圆形平盖厚度

平盖的厚度，按式（5-33）计算：

$$\delta_p = D_c \sqrt{\frac{K p_c}{[\sigma]^t \phi}} \dots\dots\dots (5-33)$$

对于表 5-9 中序号 9、10 所示平盖，应分别取其操作状态及预紧状态的 K 值代入式（5-33）进行计算，取较大值。对预紧状态， $[\sigma]^t$ 取常温的许用应力。

对于表 5-10 中序号 11、12、13、14 所示平盖宜采用锻件加工制造。如采用轧制板材直接加工制造，则应提出抗层状撕裂性能的附加要求。

表 5-9 平盖系数 K 选择表

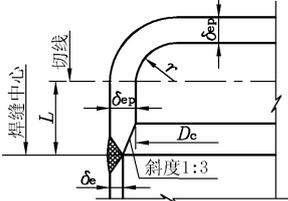
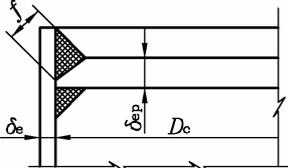
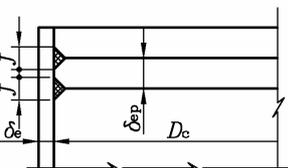
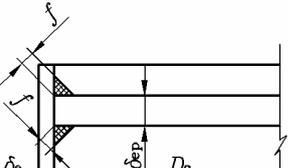
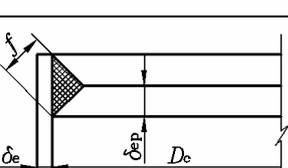
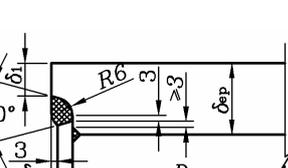
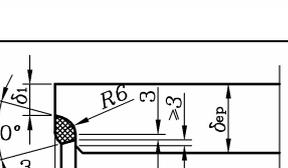
| 固定方法 | 序号 | 筒图 | 结构特征系数 K | 备注 |
|------------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 与圆筒一体或对焊 | 1 |  | 0.145 | 仅适用于圆形平盖 $P_c \leq 0.6 \text{MPa}$ $L \geq 1.1\sqrt{D_i \delta_e}$ $r \geq 3\delta_{ep}$ |
| 角焊缝或组合焊缝连接 | 2 |  | 圆形平盖 $0.44m$ ($m=\delta/\delta_e$), 且不小于 0.3; 非圆形平盖 0.44 | $f \geq 1.4\delta_e$ |
| | 3 |  | 圆形平盖: $0.44m$ ($m=\delta/\delta_e$), 且不小于 0.3 非圆形平盖: 0.44 | $f \geq \delta_e$ |
| | 4 |  | 圆形平盖: $0.5m$ ($m=\delta/\delta_e$), 且不小于 0.3 非圆形平盖: 0.5 | $f \geq 0.7\delta_e$ |
| | 5 |  | | $f \geq 1.4\delta_e$ |
| | 锁底对接焊缝 | 6 |  | $0.44m$ ($m=\delta/\delta_e$), 且不小于 0.3 |
| 7 | |  | 0.5 | |

表 5-9 (续)

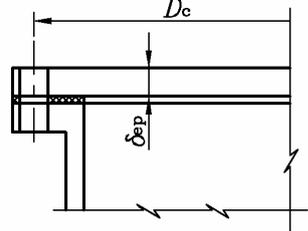
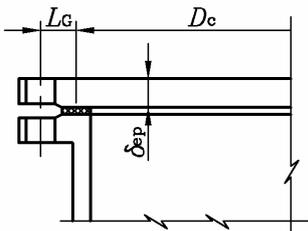
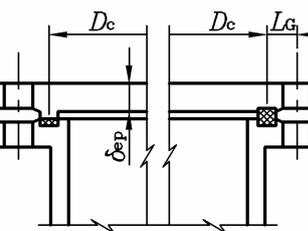
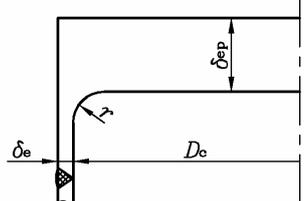
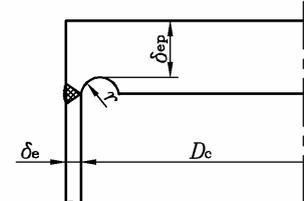
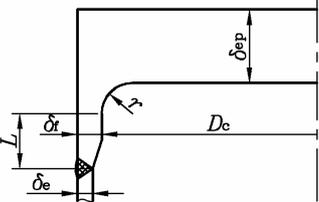
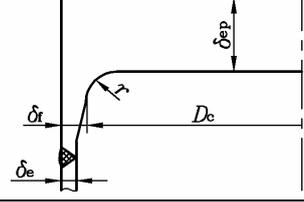
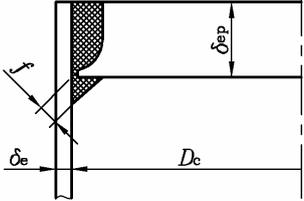
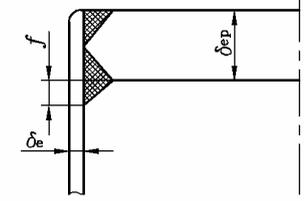
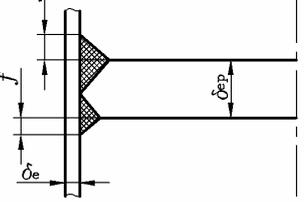
| 固定方法 | 序号 | 简图 | 结构特征系数 K | 备注 |
|------|----|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 螺栓连接 | 8 |  | <p>圆形平盖或非圆形平盖 0.25</p> | |
| | 9 |  | <p>圆形平盖： 操作时，$0.3 + \frac{1.78WL_G}{P_c D_c^3}$ 预紧时，$\frac{1.78WL_G}{P_c D_c^3}$</p> <p>非圆形平盖： 操作时，$0.3Z + \frac{6WL_G}{P_c L \alpha^2}$ 预紧时，$\frac{6WL_G}{P_c L \alpha^2}$</p> | |
| | 10 |  | <p>圆形平盖： 操作时，$0.3 + \frac{1.78WL_G}{P_c D_c^3}$ 预紧时，$\frac{1.78WL_G}{P_c D_c^3}$</p> <p>非圆形平盖： 操作时，$0.3Z + \frac{6WL_G}{P_c L \alpha^2}$ 预紧时，$\frac{6WL_G}{P_c L \alpha^2}$</p> | |

表 5-10 平盖系数 K 选择表

| 序号 | 简图 | 结构参数要求 | 系数 K | |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|
| 11 |  | $\delta_e \leq 38\text{mm}$ 时, $r \geq 10\text{mm}$; $\delta_e > 38\text{mm}$ 时, $r \geq 0.25 \delta_e$, 且不超过 20mm | | |
| 12 |  | | | 查图 5-21 |
| 13 |  | $r \geq 3 \delta_r$ $L \geq 2\sqrt{D_c \delta_e}$ 注: 查图 5-21 时, 以 δ_r 作为与平盖相连接的圆筒有效厚度 δ_e | | |
| 14 |  | $\delta_r \geq 2 \delta_e$ $r \geq 3 \delta_r$ | | |
| 15 |  | 要求全截面熔透接头 $f \geq \delta_e$ | 查图 5-22 | |
| 16 |  | | | |
| 17 |  | | | |

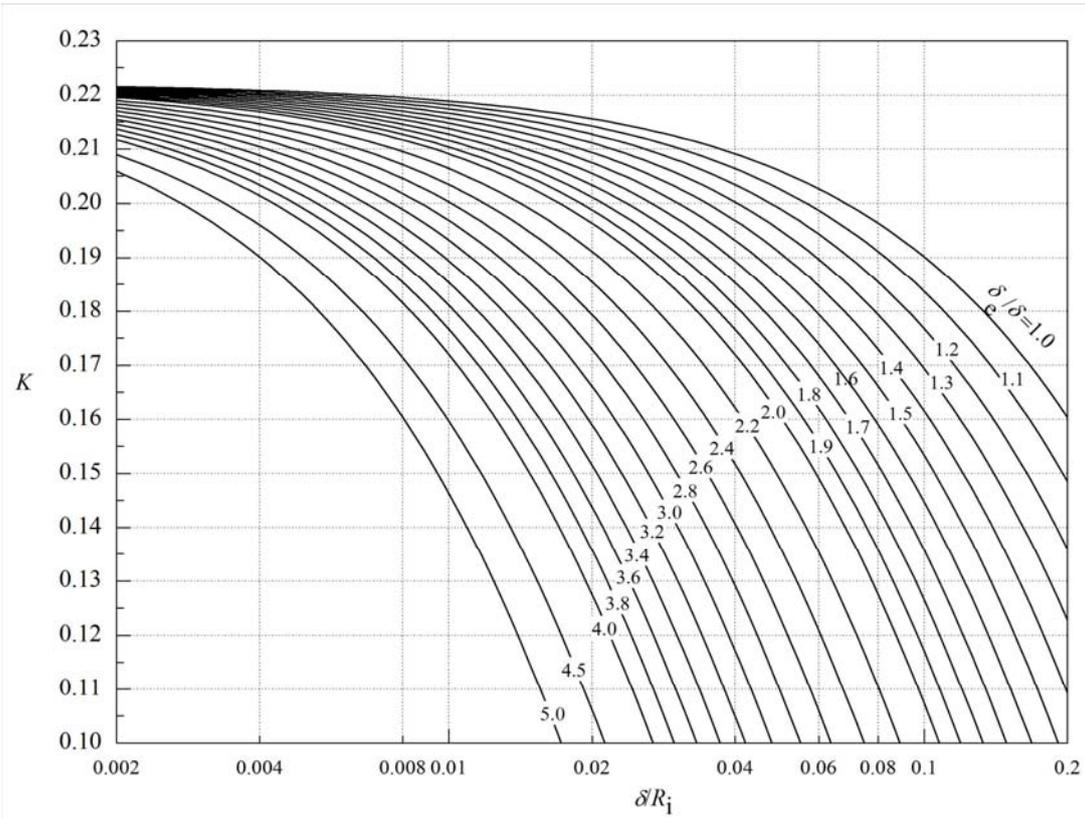


图 5-21 平封头结构特征系数

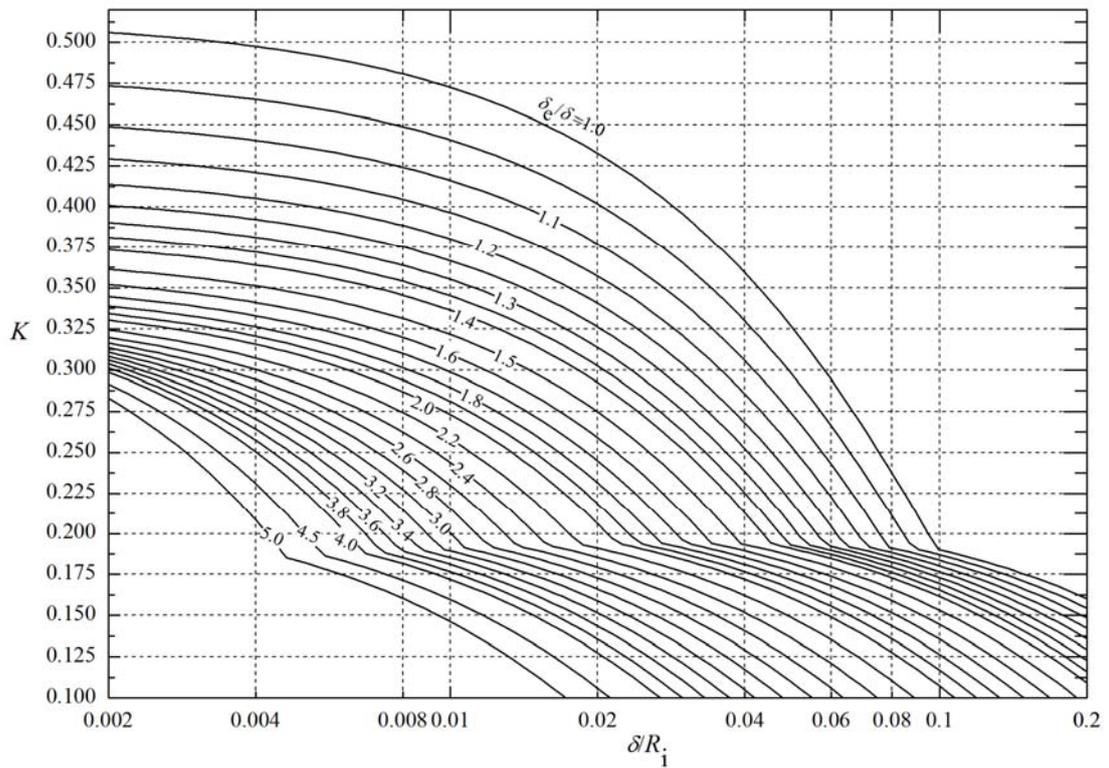


图 5-22 平封头结构特征系数

5.9.4 非圆形平盖厚度

a) 对于表 5-9 中序号 2、3、4、5、8 所示平盖，按式 (5-34) 计算：

$$\delta_p = a \sqrt{\frac{KZp_c}{[\sigma]^t \phi}} \quad \dots\dots\dots (5-34)$$

式中， $Z = 3.4 - 2.4a/b$ ，且 $Z \leq 2.5$ 。

b) 对于表 5-9 中序号 9、10 所示平盖，按式 (5-35) 计算：

$$\delta_p = a \sqrt{\frac{Kp_c}{[\sigma]^t \phi}} \quad \dots\dots\dots (5-35)$$

注：当预紧时 $[\sigma]^t$ 取常温的许用应力。

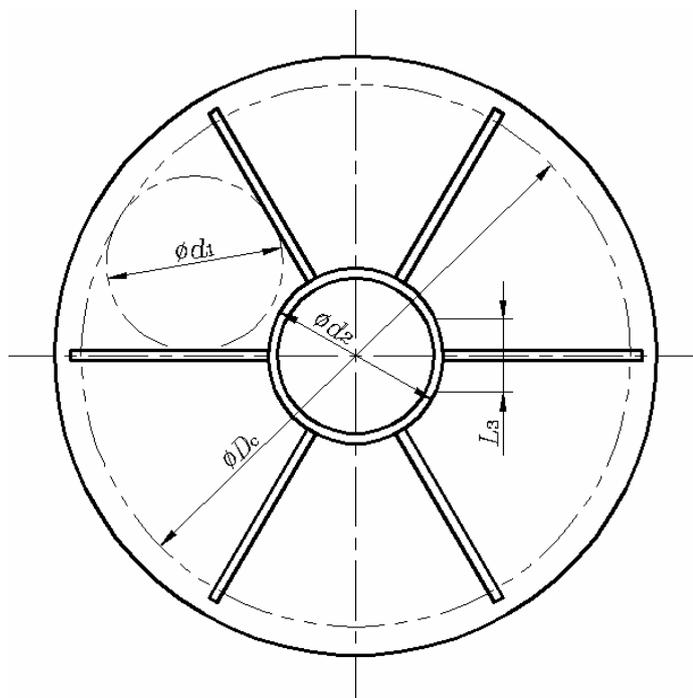
5.9.5 加筋圆形平盖厚度

对于如图 5-23 所示的加筋平盖厚度按式 (5-36) 计算，且平盖厚度值不小于 6mm。

$$\delta_p = 0.55d \sqrt{\frac{p_c}{[\sigma]^t \phi}} \quad \dots\dots\dots (5-36)$$

式中，当量直径 d 取图 5-23 所示 d_1 和 d_2 中较大者。

$$d_1 \approx \frac{\sin(180^\circ/n)}{1 + \sin(180^\circ/n)} D_c \quad \dots\dots\dots (5-37)$$



注：①筋板数 $n \geq 6$ ；②宜使 $d_1 \approx d_2$ ；③ L_3 取相邻径向筋板间的最小间距。

图 5-23 加筋平盖结构示意图

筋板与平盖之间应采用双面焊；

如采用矩形截面筋板，其高厚比一般为 5~8，且筋板与平盖组合截面（平盖有效宽度见图 5-23 L₃）抗弯模量 W 应满足式 5-38：

$$W \geq 0.08 \frac{p_c D_c^3}{n[\sigma]_t} \dots\dots\dots (5-38)$$

式中， $[\sigma]_t$ 为筋板材料设计温度下的许用应力，MPa。

平盖中心加强圆环截面的抗弯模量不小于加强筋板的截面抗弯模量。

5.10 锻制紧缩口封头

5.10.1 范围及一般要求

紧缩口封头的结构形式见图 5-24，直边段的厚度按式 (3-1) 计算，但其有效厚度不得小于与之对接的圆筒有效厚度；直边段长度 l 一般应不小于 50mm。其余尺寸一般可按结构要求确定。此形式封头可按图 5-25 所示范围及内容进行强度校核。

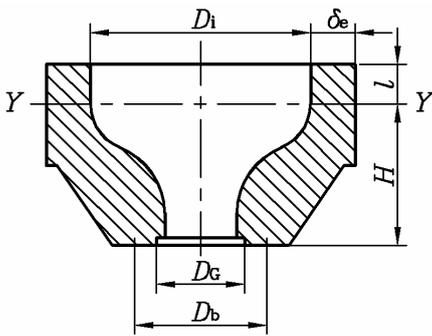


图 5-24 带直边的紧缩口封头

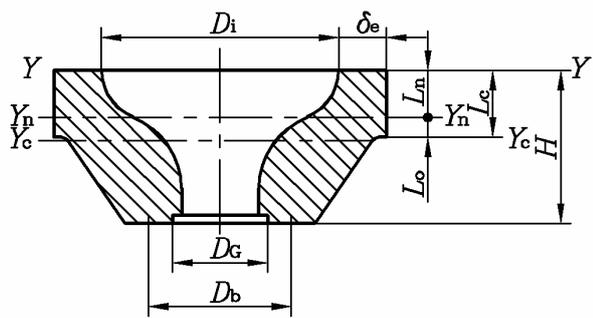


图 5-25 不带直边的紧缩口封头

5.10.2 符号

- A ——轴线一侧纵向截面的面积， mm^2 ；
- $A = \sum A_i$
- A_i ——轴线一侧纵向截面各分区的面积， mm^2 ；
- A_n ——内腔纵向截面的面积， mm^2 ；
- A_{ni} ——内腔纵向截面各分区的面积， mm^2 ；
- b ——垫片有效密封宽度（见第 7 章）， mm ；
- D_b ——螺栓孔中心圆直径， mm ；
- D_G ——垫片压紧力作用中心圆直径， mm ；
- D_i ——封头内直径， mm ；
- F ——流体静压总轴向力， N ；
- F_D ——作用于法兰内径截面上的流体静压轴向力， N ；
- F_p ——需要的最小垫片压紧力， N ；
- H ——不包括直边段的封头高度， mm ；
- I ——纵向截面的惯性矩， mm^4 ；
- I_i ——轴线一侧纵向截面各分区的惯性矩， mm^4 ；

- l ——封头直边高度, mm;
- M ——作用于纵向截面的弯矩, N·mm;
- m ——垫片系数 (见表 7-2);
- P_c ——计算压力 (见 GB 150.1), MPa;
- r ——封头的内腔圆弧半径, mm;
- L_c ——纵向截面的形心离 Y-Y 轴的距离, mm;
- L_{ci} ——纵向截面各分区的形心离 Y-Y 轴的距离, mm;
- L_i ——轴线一侧纵向截面各分区形心离纵向截面中性轴 Yc-Yc 的距离, mm;
- L_n ——内腔纵向截面的形心离 Y-Y 轴的距离, mm;
- L_o ——纵向截面中性轴 Yc-Yc 与内腔纵向截面中性轴 Yn-Yn 之间的距离, mm;
- W ——轴线一侧纵向截面对 Y-Y 轴的静矩, mm³;
 $W = \sum L_{ci} A_i$
- Z ——纵向截面的截面系数, mm³;
- δ_e ——封头与圆筒连接处的有效厚度, mm;
- σ_m ——纵向截面的弯曲应力, MPa;
- $[\sigma]^t$ ——材料在设计温度下的许用应力 (见 GB 150.2), MPa。

5.10.3 弯矩计算

作用于纵向截面的弯矩按式 (5-39) 计算:

$$M = \frac{1}{6.28} \left[\left(\delta_e + \frac{1}{3} D_i \right) F_D - \left(D_b - \frac{2}{3} D_G \right) F - (D_b - D_G) F_p \right] - P_c A_n L_o \dots\dots\dots (5-39)$$

式中:

$$F_D = 0.785 D_i^2 P_c$$

$$F = 0.785 D_G^2 P_c$$

$$F_p = 6.28 D_G b m P_c$$

$$L_o = L_c - L_n$$

$$A_n = \sum A_{ni}$$

5.10.4 截面系数计算

- a) 当 $L_c \geq \frac{H}{2}$ 时, 纵向截面的截面系数按式 (5-40) 计算:

$$Z = \frac{I}{L_c} \dots\dots\dots (5-40)$$

- b) 当 $L_c < \frac{H}{2}$ 时, 纵向截面的截面系数按式 (5-41) 计算:

$$Z = \frac{I}{H - L_c} \dots\dots\dots (5-41)$$

式中：

$$I = 2[\sum I_i + \sum(L_i^2 A_i)]$$

$$L_c = \frac{W}{A}$$

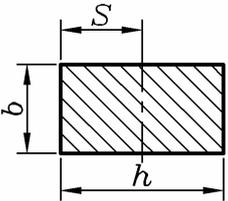
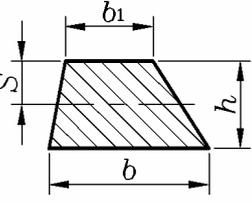
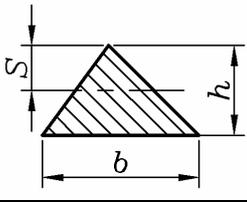
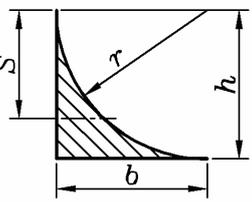
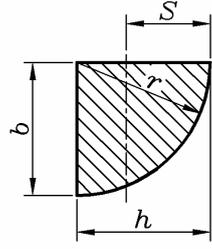
几种常用截面的特性见表 5-11。

5.10.5 弯曲应力校核计算

弯曲应力的校核按式 (5-42) 进行：

$$\sigma_m = \frac{M}{Z} \leq 0.8[\sigma]^t \quad \dots\dots\dots (5-42)$$

表 5-11 几种截面的特性

| 截面 | 截面面积 A_i | 由中性轴至截面 最末端距离 S | 惯性矩 I_i |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|
|  | bh | $\frac{h}{2}$ | $\frac{bh^3}{12}$ |
|  | $\frac{(b_1 + b)h}{2}$ | $\frac{(b_1 + 2b)h}{3(b_1 + b)}$ | $\frac{(b_1^2 + 4b_1b + b^2)h^3}{36(b_1 + b)}$ |
|  | $\frac{bh}{2}$ | $\frac{2h}{3}$ | $\frac{bh^3}{36}$ |
|  | $(b=h=r)$ $0.2146r^2$ | $(b=h=r)$ $0.7767r$ | $(b=h=r)$ $0.0075 r^4$ |
|  | $(b=h=r)$ $\frac{\pi r^2}{4}$ | $(b=h=r)$ $0.5754r$ | $(b=h=r)$ $0.0552r^4$ |

5.11 带法兰的凸形封头

5.11.1 适用范围

本条适用于带法兰凸形封头的设计，封头形式如图 5-26 所示。

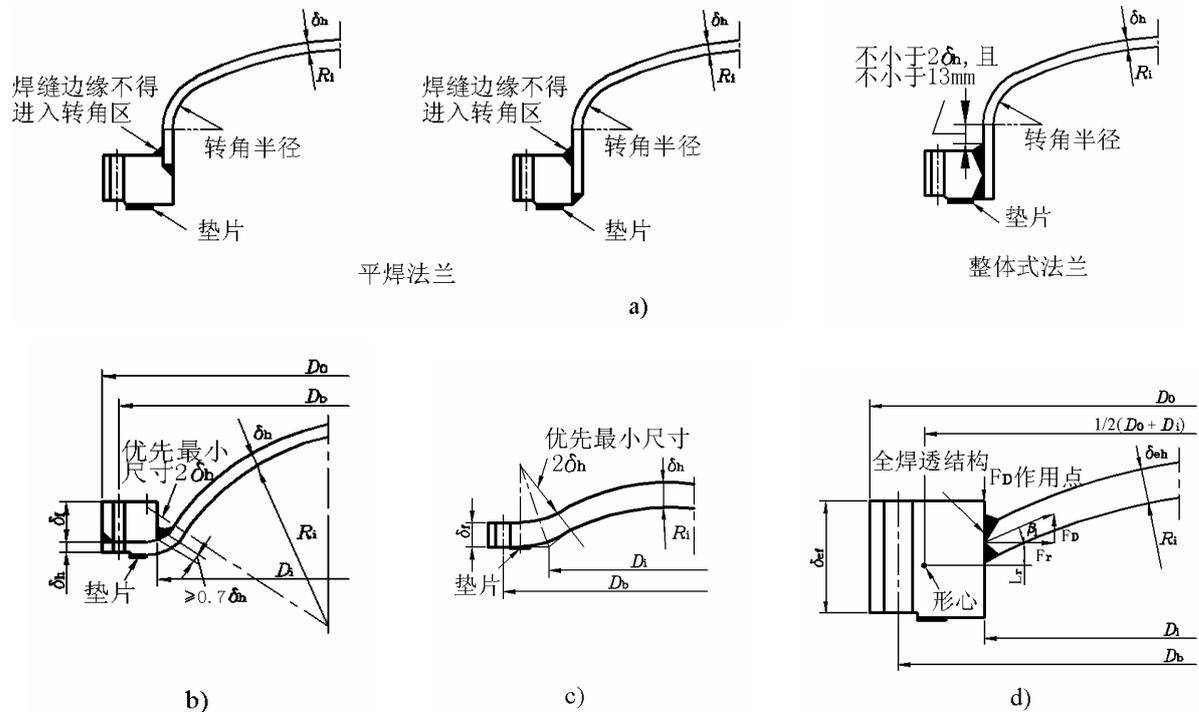


图 5-26 带法兰凸形封头

5.11.2 符号

- D_o ——法兰外直径，mm；
- D_b ——螺栓中心圆直径，mm；
- D_G ——垫片压紧力作用中心圆直径，mm；
- D_i ——法兰内直径，mm；
- F_D ——封头压力载荷引起的作用在法兰环内直径上的轴向分力 ($F_D = 0.785D_i^2 P_c$)，N；
- F_r ——封头压力载荷引起的作用在法兰环内直径上的径向分力 (见表 5-12)，N；
- M_o ——总力矩，N·mm；
- R_i ——封头球面部分内半径，mm；
- L_D —— F_D 对螺栓中心的力臂，mm；
- L_r —— F_r 对法兰环截面形心的力臂，mm；
- β_1 ——封头边缘处球壳中面切线与法兰环直径的夹角 (见表 5-12)，(°)；
- δ_{ef} ——法兰有效厚度，mm；
- δ_f ——法兰计算厚度，mm；
- δ_{eh} ——封头有效厚度，mm；
- δ_h ——封头计算厚度，mm；
- δ_{nh} ——封头名义厚度，mm。

5.11.3 受内压带法兰凸形封头

除以下另有规定外，对凹面受压封头总力矩 M_o 见 7.5.3。

5.11.3.1 图 5-26 a) 所示封头结构的计算

封头计算厚度 δ_h 按 5.3.2 或 5.4.2 计算；法兰设计按第 7 章进行。

5.11.3.2 图 5-26 b) 所示封头结构的计算

a) 封头计算厚度按式 (5-43) 计算：

$$\delta_h = \frac{5P_c R_i}{6[\sigma]^t} \dots\dots\dots (5-43)$$

b) 法兰计算厚度 δ_f 按式 (5-44) 或式 (5-45) 计算：

对于窄面法兰

$$\delta_f = \sqrt{\frac{M_o}{[\sigma]_f^t D_i} \left(\frac{D_o + D_i}{D_o - D_i} \right)} \dots\dots\dots (5-44)$$

式中： M_o 按 7.5.3 计算。

对于宽面法兰

$$\delta_f = 0.6 \sqrt{\frac{p_c}{[\sigma]_f^t} \left[\frac{D_i (D_o + D_i) (D_b - D_i)}{D_o - D_i} \right]} \dots\dots\dots (5-45)$$

5.11.3.3 图 5-26 (c) 所示封头结构的计算：

a) 封头计算厚度按式 (5-43) 计算；

b) 圆形螺栓孔窄面法兰计算厚度按式 (5-46) 分操作和预紧两种状态计算，且取较大值：

$$\delta_f = Q + \sqrt{\frac{1.875 M_o (D_b + D_i)}{[\sigma]_f^t D_i (7D_b - 5D_i)}} \dots\dots\dots (5-46)$$

操作状态 Q 按式 (5-47) 计算， M_o 取 M_p 按式 (7-14) 计算；

$$Q = \frac{p_c R_i}{4[\sigma]_f^t} \left(\frac{D_b + D_i}{7D_b - 5D_i} \right) \dots\dots\dots (5-47)$$

预紧状态 $Q=0$ ， M_o 取 $M_a [\sigma]_f^t / [\sigma]_f$ ，其中 M_a 按式 (7-11) 计算；

c) 槽形螺栓孔窄面法兰计算厚度按式 (5-48) 分操作和预紧两种状态计算，且取较大值：

$$\delta_f = Q + \sqrt{\frac{1.875 M_o (D_b + D_i)}{[\sigma]_f^t D_i (3D_b - D_i)}} \dots\dots\dots (5-48)$$

操作状态 Q 按式 (5-49) 计算， M_o 取 M_p 按式 (7-14) 计算；

$$Q = \frac{P_c R_i}{4[\sigma]_f^t} \left(\frac{D_b + D_i}{3D_b - D_i} \right) \dots\dots\dots (5-49)$$

预紧状态 $Q=0$, M_0 取 $M_a[\sigma]_f^t/[\sigma]_f$, 其中 M_a 按式 (7-11) 计算;

d) 圆形螺栓孔宽面法兰计算厚度按式 (5-50) 计算:

$$\delta_f = Q + \sqrt{Q^2 + \frac{3D_i Q(D_b - D_i)}{R_i}} \dots\dots\dots (5-50)$$

式中: Q 值按式 (5-47) 计算;

e) 开槽螺栓孔宽面法兰计算厚度, 按式 (5-50) 计算, 其中 Q 值按式 (5-49) 计算;

f) 在任何情况下, 要求法兰厚度不得小于封头厚度。

5.11.3.4 图 5-26 d) 所示的封头结构的计算

a) 封头厚度按式 (5-43) 计算;

b) 法兰应力按表 5-12 校核。

5.11.4 受外压 (凸面受压) 的带法兰凸形封头

a) 封头厚度按 4.4 计算;

b) 除另有规定外, 总力矩 M_0 按 7.5.4 确定; 对图 5-26 d) 所示封头结构的法兰力矩计算中

$$M_p = F_D(L_D - L_G) + F_T(L_T - L_G) - F_r L_r; \text{ 式中 } L_r \text{ 的计算同表 5-12。}$$

c) 图 5-26 所示各种形式, 除图 5-26 a) 的法兰按第 7 章计算外, 其他的法兰厚度分别按式 (5-44)、式 (5-45)、式 (5-46)、式 (5-48) 及式 (5-50) 计算。

表 5-12 受内压带法兰无折边球面封头的法兰计算表

| 设计条件 | | 垫片及螺栓计算 | | | |
|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 计算压力 $P_c =$ MPa | | 垫片 | 材料 | $N =$ mm | $y =$ MPa |
| 设计温度 $t =$ °C | | | 外径×内径×厚度 | $b =$ mm | $m =$ |
| 法兰 | 材料 | 假设法兰有效厚度 $\delta_{ef} =$ mm | 封头有效厚度 $\delta_{eh} =$ mm | | |
| | 许用应力 | $[\sigma]_f =$ MPa $[\sigma]_f^t =$ MPa | $F = 0.785 D_G^2 P_c =$ N $W_a = 3.14 b D_G y =$ N | $F_p = 6.28 D_G b m p_c =$ N $F + F_p =$ N | |
| 螺栓 | 材料 | 螺栓直径 $d_B =$ mm | 螺栓数量 $n =$ 个 | | |
| | 许用应力 | $[\sigma]_b =$ MPa $[\sigma]_b^t =$ MPa | $A_{m1} = (F + F_p)/[\sigma]_b^t =$ mm ² $A_m = \text{Max}\{A_{m1}, A_{m2}\} =$ mm ² | $A_{m2} = W_a/[\sigma]_b =$ mm ² $A_b =$ mm ² | |
| $\beta_1 = \arcsin \frac{0.5 D_i}{R_i + 0.5 \delta_{eh}} =$ (°) | | $W = 0.5(A_m + A_b)[\sigma]_b =$ N | 假设 $l =$ mm (l 见图) | | |
| 预紧情况 | 法兰受力 | 力 臂 | | 力 矩 | |
| | $F_G = W =$ N | $L_G = 0.5(D_b - D_G) =$ mm | $M_a = F_G L_G =$ N·mm | | |
| 操作情况 | $F_D = 0.785 D_i^2 p_c =$ N | $L_D = 0.5(D_b - D_i) =$ mm | $M_D = F_D L_D =$ N·mm | | |
| | $F_G = F_p =$ N | $L_G = 0.5(D_b - D_G) =$ mm | $M_G = F_G L_G =$ N·mm | | |
| | $F_r = F - F_D =$ N | $L_T = 0.5(L_D + L_G) =$ mm | $M_T = F_r L_T =$ N·mm | | |
| | $F_r = F_p \text{ctg} \beta_1 =$ N | $L_r = \frac{\delta_{ef}}{2} - \frac{\delta_{eh}}{2 \cos \beta_1} - l =$ mm | $M_r = F_r L_r =$ N·mm | | |
| 操作情况下法兰总力矩 $M_p = M_D + M_G + M_T - M_r =$ | | N·mm | | | |

表 5-12 (续)

| 设计条件 | | 垫片及螺栓计算 | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| $J_a = \frac{M_a}{[\sigma]_f D_i} \left[\frac{D_o + D_i}{D_o - D_i} \right] =$ mm ² | $J_p = \frac{M_p}{[\sigma]_f^t D_i} \left[\frac{D_o + D_i}{D_o - D_i} \right] =$ mm ² | $L = \frac{p_c D_i \sqrt{4R_i^2 - D_i^2}}{8[\sigma]_f^t (D_o - D_i)} =$ mm | |
| | | 法兰厚度 假设的法兰有效厚度 $\delta_{ef} \geq \max\{\delta_{fa}, \delta_{fp}\}$ 且 $\delta_{ef} \geq 2\delta_{eh}$, 否则应重新假设 δ_{ef} , 直至满足要求。 $\delta_{fa} = \sqrt{J_a} =$ mm $\delta_{fp} = L + \sqrt{J_p + L^2} =$ mm | |
| 注：表中符号及其值的取法凡未列入本节的符号说明者均按第 7 章。 | | | |

5.12 拉撑结构

5.12.1 范围

本节适用于以棒材、管材或板材支撑（以下简称“拉撑”）的凸型封头、平封头（平板）及筒体的设计。拉撑结构包括焊接与非焊接两种结构。常用结构型式如表 5-13。

5.12.2 符号

- a —— 单根拉撑所需截面面积, mm²;
- d —— 拉杆直径, mm;
- d_c —— 拉撑杆间当量圆直径, mm;
- K —— 系数, 按表 5-13 由拉撑的连接方法选取;
- L —— 拉撑的间距, mm;
- W —— 单根拉撑所受轴向载荷, N;
- δ_p —— 平板计算厚度, mm;
- δ_{ep} —— 平板名义厚度, mm;
- $[\sigma]_g^t$ —— 设计温度下拉撑材料的许用应力, MPa;
- $[\sigma]_p^t$ —— 设计温度下被支撑板材料的许用应力, MPa。

5.12.3 受拉撑的板厚计算

计算厚度按式 (5-51) 计算:

$$\delta_p = L \sqrt{\frac{p_c}{[\sigma]_p^t K}} \dots\dots\dots (5-51)$$

对于带夹套容器进行拉撑设计时, 夹套及容器的壁厚还需考虑相应的内外压计算要求。
 对非焊接拉撑连接的平封头, 其厚度不得小于 8mm。

5.12.3.1 规则拉撑布置的 L , K 取值

如图 5-27 所示, 规则布置拉撑时, 拉撑的间距 L , 取水平方向、垂直方向、斜向间距 L_1 、 L_2 、 L_3 三者的最大值。拉撑常数 K 按表 5-13 取值。

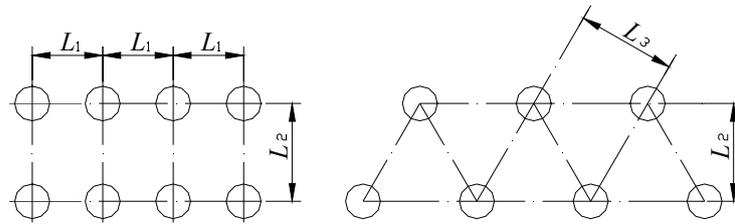
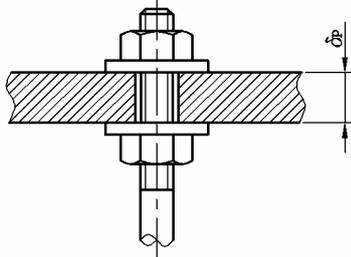


图 5-27 规则的拉撑布置

表 5-13 典型拉撑结构型式及参数

| 序号 | 结构型式 | K | 适用条件 |
|----|------|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | | 2.2 | 夹套设计压力 $p \leq 1.6\text{MPa}$; 夹套板厚 $\leq 12\text{mm}$; 角焊缝根部完全熔合, 焊脚尺寸不小于夹套壁厚。 |
| 2 | | 2.2 | 适用于焊接棒状或板状拉撑, 且板厚 $\delta_p \leq 30\text{mm}$; 角焊缝的轴向受剪面积不小于拉杆横截面积的 1.4 倍。 |
| 3 | | 2.0 | 角焊缝的轴向受剪面积不小于拉杆横截面积的 1.4 倍。 |

表 5-13 (续)

| 序号 | 结构型式 | K | 适用条件 |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4 |  | 3.2 | 可在壁板、垫圈、螺母、拉杆的接触面之间加装密封材料或涂料。适用于可能出现渗漏的低压场合。 贯穿平封头的螺纹结构拉撑，平封头内外侧均有螺母和垫圈，垫圈厚度不小于 6mm。垫圈外径不小于螺栓直径的 2.5 倍 |
| | | 2.8 | 内外均有螺母，但仅外侧有垫圈(其余条件同上) |

5.12.3.2 不规则拉撑布置的 L , K 取值

如图 5-28 所示，不规则的拉撑布置时， L 、 K 分别按照下列方法求取：

- a) 取通过任意 3 个相邻支撑点的最大当量圆（其内部无拉撑）直径为 d_c ，则支撑的间距 $L = d_c / \sqrt{2}$ ；
- b) 系数 K 按表 5-14 选取，支撑点类型按最大当量圆通过的支撑结构确定；一个当量圆具有不同支撑点类型时， K 取平均值。

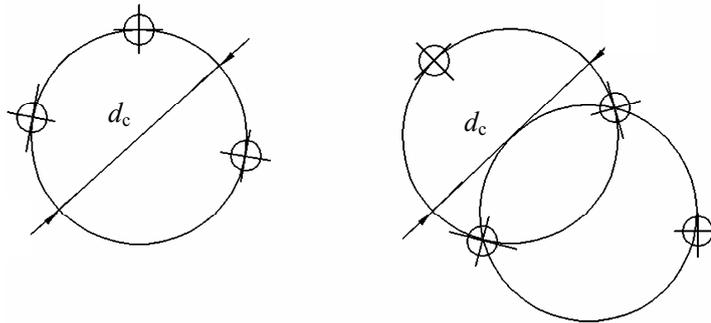


图 5-28 不规则支撑设置

表 5-14 与支撑点类型相关的系数 K

| 支撑点类型 | K |
|---------------|---------|
| 支撑点在封头圆弧过渡的起点 | 3.2 |
| 管板外周的固定线 | 3.2 |
| 管排中心线 | 2.0 |
| 管状支撑 | 2.6 |
| 其他支点 | 按表 5-13 |

5.12.4 拉撑的支承载荷 W

- a) 无孔板的支承载荷：拉杆与其相邻的所有支撑中心连线的垂直平分线所围成的面积为该拉

杆的支撑面积，其上承受的计算压力载荷为该拉杆所承受的支承载荷；

- b) 多孔板的支撑载荷：由一根支撑管（杆）的支撑面积减去该面积内的管孔总面积，其上承受的计算压力载荷为该管状拉撑所承受的支承载荷。

5.12.5 单根拉撑所需截面面积

$$a = \frac{1.1W}{[\sigma]_g} \dots\dots\dots (5-52)$$

5.12.6 拉撑的设置

- a) 采用角接头设置斜拉撑时，焊接接头的焊缝截面面积，以及平行于筒体轴线方向测得的角接头焊缝截面面积不得小于拉撑所需最小断面面积的 1.4 倍。
选择斜拉撑结构，封头凹面内不得采用角接头。
- b) 拉撑间距一般不大于 30 倍拉杆直径。

5.13 焊接结构

封头与筒体的焊接结构除满足前述要求外，不允许采用如图 5-29 所示结构：

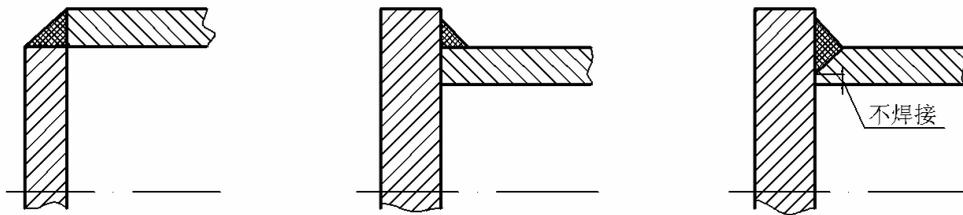


图 5-29 不允许采用的焊接结构

6 开孔与开孔补强

6.1 范围及一般要求

本章规定适用于容器本体的开孔及其补强计算，包括等面积法和分析法。

6.1.1 等面积法适用范围

等面积法适用于壳体和平封头上的圆形、椭圆形或长圆形开孔。当在壳体上开椭圆形或长圆形孔时，孔的长径与短径之比应不大于 2.0。本方法的适用范围：

- a) 当圆筒内径 $D_i \leq 1500 \text{ mm}$ 时，开孔最大直径 $d_{op} \leq D_i/2$ ，且 $d_{op} \leq 520 \text{ mm}$ ；当圆筒内径 $D_i > 1500 \text{ mm}$ 时，开孔最大直径 $d_{op} \leq D_i/3$ ，且 $d_{op} \leq 1000 \text{ mm}$ ；
- b) 凸形封头或球壳开孔的最大允许直径 $d_{op} \leq D_i/2$ ，开孔位于封头中心 $80\%D_i$ 范围内；
- c) 锥形封头开孔的最大直径 $d_{op} \leq D_i/3$ ， D_i 为开孔中心处的锥壳内直径。

注：开孔最大直径 d_{op} 对椭圆形或长圆形开孔指长轴尺寸。

6.1.2 分析法适用范围

本方法是根据弹性薄壳理论得到的应力分析法，用于内压作用下具有径向接管圆筒的开孔补强设计，其适用范围如下：

$$d \leq 0.9D \text{ 且 } \text{MAX}[0.5, d/D] \leq \delta_{et}/\delta_e \leq 2$$

本方法与等面积法适用的开孔率范围比较见图 6-1。

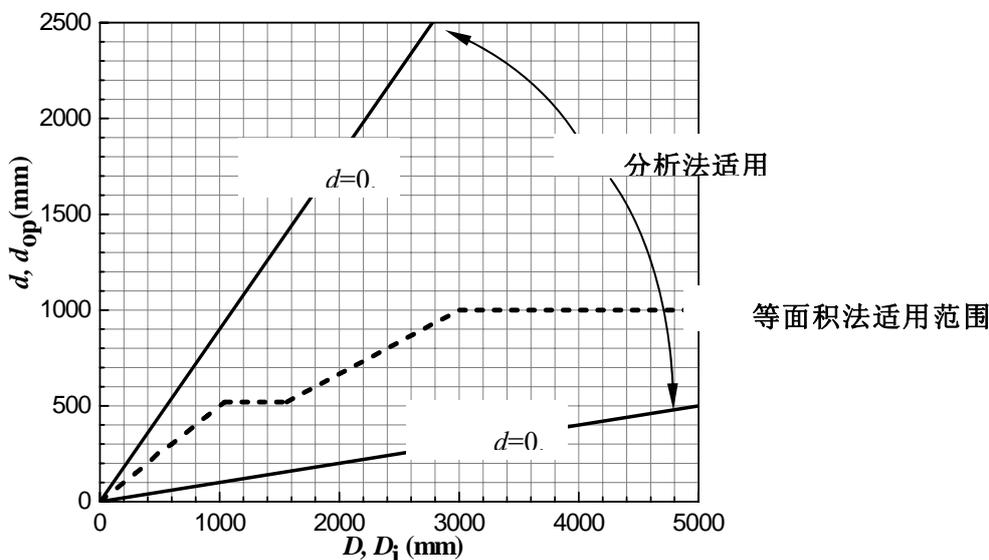


图 6-1 圆筒开孔补强分析法与等面积法适用范围

6.1.3 不另行补强的最大开孔直径

壳体开孔满足下述全部要求时，可不另行补强：

- a) 设计压力 $p \leq 2.5$ MPa；
- b) 两相邻开孔中心的间距（对曲面间距以弧长计算）应不小于两孔直径之和；对于 3 个或以上相邻开孔，任意两孔中心的间距（对曲面间距以弧长计算）应不小于该两孔直径之和的 2.5 倍；
- c) 接管外径小于或等于 89 mm；
- d) 接管壁厚满足表 6-1 要求；
- e) 开孔不得位于 A、B 类焊接接头上。

表 6-1

单位为毫米

| | | | | | | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----|----|------|----|------|----|------|----|
| 接管外径 | 25 | 32 | 38 | 45 | 48 | 57 | 65 | 76 | 89 |
| 接管壁厚 | ≥3.5 | | | ≥4.0 | | ≥5.0 | | ≥6.0 | |
| 注：1 钢材的标准抗拉强度下限值 $R_m \geq 540$ MPa 时，接管与壳体的连接宜采用全焊透的结构型式。 2 表中接管壁厚的腐蚀裕量为 1 mm，需要加大腐蚀裕量时，应相应增加壁厚。 | | | | | | | | | |

6.1.4 开孔附近的焊接接头

容器上的开孔宜避开容器焊接接头。当开孔通过或邻近容器焊接接头时，则应保证在开孔中心的 $2d_{op}$ 范围内的接头不存在有任何超标缺陷。

6.2 术语、定义和符号

6.2.1 GB 150.1 通用要求中界定的术语和定义适用于本章。

6.2.2 符号

A——开孔削弱所需要的补强截面积， mm^2 ；

- B ——补强有效宽度, mm;
 C ——厚度附加量 (按 GB 150.1 规定), mm;
 C_s ——圆筒厚度附加量, mm;
 C_t ——接管厚度附加量, mm;
 D ——圆筒中面直径, mm;
 D_i ——圆筒内直径, mm;
 D_o ——平盖直径, mm;
 d_{op} ——开孔直径, mm;
 d ——接管中面直径, mm;
 d_o ——接管外直径, mm;
 f_r ——强度削弱系数;
 g ——接管补强系数;
 h ——圆筒补强系数;
 h_1 ——外伸接管有效补强高度, mm;
 h_2 ——内伸接管有效补强高度, mm;
 K ——等效总应力集中系数;
 K_m ——等效薄膜应力集中系数;
 n_{II} ——等效薄膜应力校核系数;
 n_{IV} ——等效总应力校核系数;
 p ——设计压力, MPa;
 p_c ——计算压力 (按第 3 章), MPa;
 R ——圆筒中面半径, mm;
 R_t ——球壳或半球形封头内半径, 椭圆形封头当量球面或碟形封头球面内半径, mm;
 R_m ——钢材标准抗拉强度下限值, MPa;
 R_{eL} ——钢材标准屈服强度, MPa;
 r ——接管中面半径, mm;
 S_1 ——管孔的轴向节距, mm;
 S_2 ——孔带的单位长度 (见图 6-6、图 6-7), mm;
 S_3 ——管孔的对角向节距, mm;
 S_{II} ——等效薄膜应力, MPa;
 S_{IV} ——等效总应力, MPa;
 δ ——壳体开孔处的计算厚度, mm;
 δ_e ——壳体开孔处的有效厚度, mm;
 δ_{et} ——接管有效厚度, mm;
 δ_n ——壳体开孔处的名义厚度, mm;
 δ_{nt} ——接管名义厚度, mm;
 δ_p ——平盖计算厚度, mm;
 δ_t ——接管计算厚度, mm;
 ϕ ——焊接接头系数 (按 GB 150.1 规定);

v_1 ——纵向排孔削弱系数；

v_2 ——当量纵向排孔削弱系数；

v_3 ——对角向排孔削弱系数；

θ ——两相邻开孔中心线与壳体轴线之夹角，(°)；

ρ ——开孔率， $\rho = d/D$ ；

$[\sigma]^t$ ——设计温度下壳体材料的许用应力（按第 GB 150.2 规定），MPa；

$[\sigma]_t^t$ ——设计温度下接管材料的许用应力（按第 GB 150.2 规定），MPa。

6.3 单个开孔补强的等面积法

6.3.1 单个开孔的适用范围

在等面积法的适用范围（见 6.1.1）内，满足下列条件的多个开孔均按单个开孔分别设计：

- a) 壳体上有两个开孔，开孔中心间距（对曲面间距以弧长计算）不小于两孔直径之和；壳体上有 3 个或以上开孔，任意两孔中心的间距（对曲面间距以弧长计算）不小于两孔直径之和的 2 倍；
- b) 平封头（平板）上有多个开孔，任意两开孔直径之和不超过封头直径的 0.5 倍，任意两相邻开孔中心的间距不小于两孔直径之和。

6.3.2 补强结构型式与补强件材料

6.3.2.1 补强圈补强

补强圈与接管、壳体的焊接结构参见附录 D 和 JB/T 4736。采用该结构补强时，应符合下列规定：

- a) 低合金钢的标准抗拉强度下限值 $R_m < 540$ MPa；
- b) 补强圈厚度小于或等于 $1.5\delta_n$ ；
- c) 壳体名义厚度 $\delta_n \leq 38$ mm。

若条件许可，推荐以厚壁接管代替补强圈进行补强，其 δ_{nt}/δ_n 宜控制在 0.5~2。

6.3.2.2 整体补强

增加壳体的厚度，或用全截面焊透的结构型式将厚壁接管或整体补强锻件与壳体相焊。结构可参见附录 D。

6.3.2.3 补强件材料

补强材料宜与壳体材料相同。若补强材料许用应力小于壳体材料许用应力，则补强面积应按壳体材料与补强材料许用应力之比而增加。若补强材料许用应力大于壳体材料许用应力，则所需补强面积不得减少。

对于接管材料与壳体材料不同时，引入强度削弱系数 $f_t = [\sigma]_t^t / [\sigma]^t$ ，表示设计温度下接管材料与壳体材料许用应力的比值，当 $f_t > 1.0$ 时，取 $f_t = 1.0$ 。

6.3.3 壳体开孔补强

6.3.3.1 开孔补强的计算截面选取

所需的最小补强面积应在下列规定的截面上求取：对于圆筒或锥壳开孔，该截面通过开孔中心点与筒体轴线；对于凸形封头或球壳开孔，该截面通过封头开孔中心点，沿开孔最大尺寸方向，且垂直于壳体表面。

对于圆形开孔 d_{op} 取接管内直径加 2 倍厚度附加量，对于椭圆形或长圆形孔 d_{op} 取所考虑截面上的尺寸（弦长）加 2 倍厚度附加量。

6.3.3.2 内压力容器

壳体开孔所需补强面积按式(6-1)计算:

$$A = d_{op} \delta + 2\delta\delta_{et}(1 - f_r) \quad \dots\dots\dots (6-1)$$

式中:

对安放式接管取 $f_r=1.0$ 。

δ ——计算厚度, mm。按下述方法确定:

- a) 对于圆筒或球壳开孔, 为开孔处的壳体计算厚度;
- b) 对于锥壳(或锥形封头)开孔, 由式(5-8)计算, 式中 D_c 取开孔中心处锥壳内直径;
- c) 若开孔位于椭圆形封头中心 80%直径范围内, δ 按式(6-2)计算, 否则按式(5-1)计算。

$$\delta = \frac{p_c K_1 D_i}{2[\sigma]^t \phi - 0.5 p_c} \quad \dots\dots\dots (6-2)$$

式中:

K_1 ——椭圆形长短轴比值决定的系数, 由表 5-2 查得;

- d) 若开孔位于碟形封头球面部分内, δ 按式(6-3)计算, 否则按式(5-4)计算。

$$\delta = \frac{p_c R_i}{2[\sigma]^t \phi - 0.5 p_c} \quad \dots\dots\dots (6-3)$$

6.3.3.3 外压力容器

壳体开孔所需补强面积按式(6-4)计算:

$$A = 0.5[d_{op} \delta + 2\delta\delta_{et}(1 - f_r)] \quad \dots\dots\dots (6-4)$$

式中:

对安放式接管取 $f_r=1.0$;

δ ——按外压计算确定的开孔处壳体的计算厚度, mm。

6.3.3.4 容器存在内压与外压两种设计工况时, 开孔所需补强面积应同时满足 6.3.3.2 和 6.3.3.3 的要求。

6.3.4 平盖开孔补强

6.3.4.1 平盖开单个孔, 且开孔直径 $d_{op} \leq 0.5 D_o$ (D_o 取平盖计算直径, 对非圆形平盖取短轴长度) 时, 所需最小补强面积按式(6-5)计算:

$$A = 0.5 d_{op} \delta_p \quad \dots\dots\dots (6-5)$$

式中:

δ_p ——平盖计算厚度, 按第 5 章计算, mm。

6.3.4.2 平盖开单个孔, 且开孔直径 $d_{op} > 0.5 D_o$ 时, 其设计计算按 6.5 的要求。

6.3.5 有效补强范围及补强面积

计算开孔补强时, 有效补强范围及补强面积按图 6-2 中矩形 $WXYZ$ 范围确定。

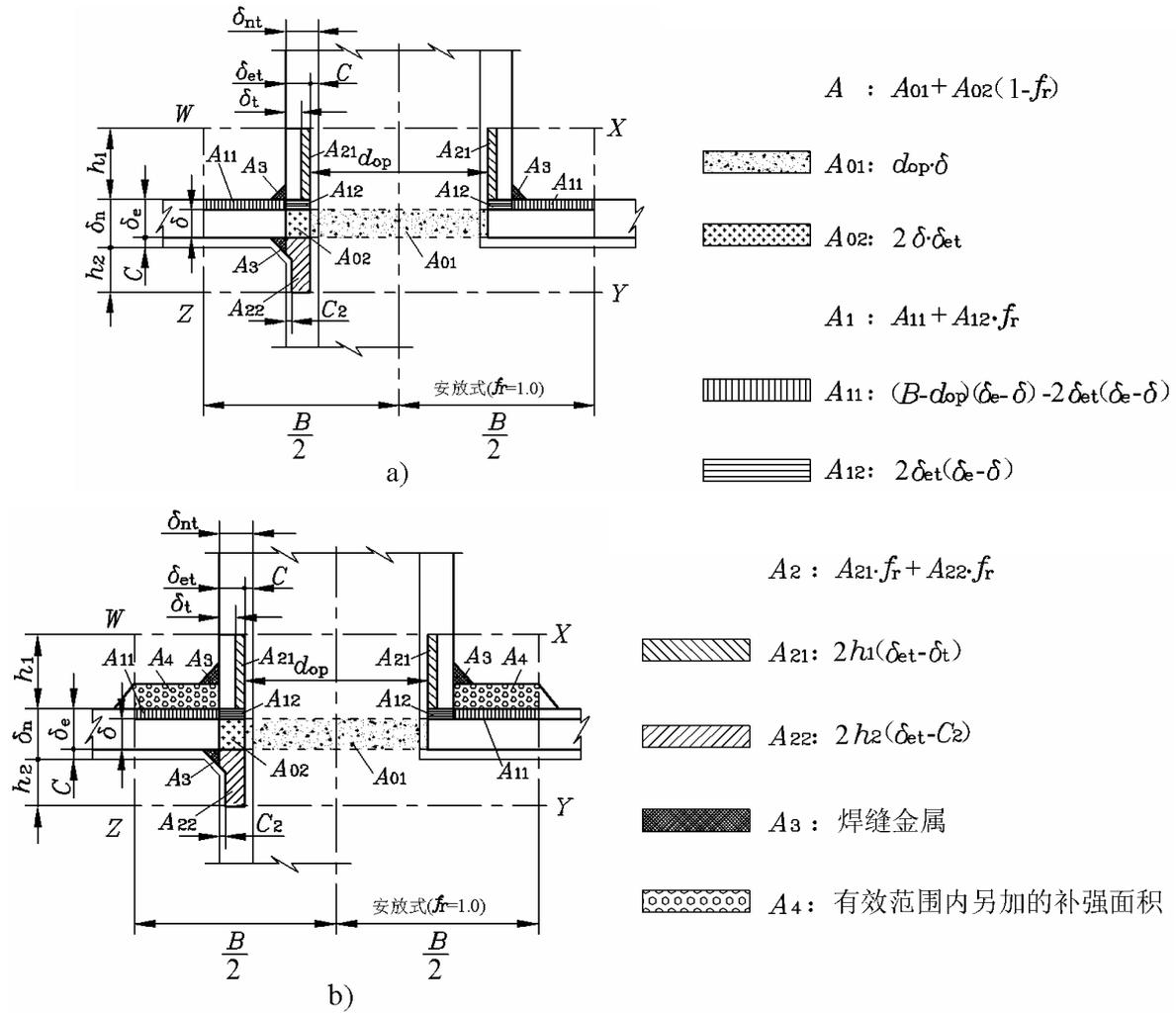


图 6-2 有效补强范围

6.3.5.1 有效补强范围

a) 有效宽度 B 按式 (6-6) 计算, 取二者中较大值;

$$B = \begin{cases} 2d_{op} \\ d_{op} + 2\delta_n + 2\delta_{nt} \end{cases} \dots\dots\dots (6-6)$$

b) 有效高度按式 (6-7) 和式 (6-8) 计算, 分别取式中较小值。

外伸接管有效补强高度:

$$h_1 = \begin{cases} \sqrt{d_{op}\delta_{nt}} \\ \text{接管实际外伸高度} \end{cases} \dots\dots\dots (6-7)$$

内伸接管有效补强高度:

$$h_2 = \begin{cases} \sqrt{d_{op}\delta_{nt}} \\ \text{接管实际内伸高度} \end{cases} \dots\dots\dots (6-8)$$

6.3.5.2 补强面积

在有效补强范围内，可作为补强的截面积按式（6-9）计算：

$$A_e = A_1 + A_2 + A_3 \quad \dots\dots\dots (6-9)$$

式中：

A_e ——补强面积， mm^2 ；

A_1 ——壳体有效厚度减去计算厚度之外的多余面积，按式（6-10）计算， mm^2 ；

$$A_1 = (B - d_{\text{op}})(\delta_e - \delta) - 2\delta_{\text{et}}(\delta_e - \delta)(1 - f_r) \quad \dots\dots\dots (6-10)$$

注：对安放式接管取 $f_r=1.0$ 。

A_2 ——接管有效厚度减去计算厚度之外的多余面积，按式（6-11）计算， mm^2 ；

$$A_2 = 2h_1(\delta_{\text{et}} - \delta_i)f_r + 2h_2(\delta_{\text{et}} - c_2)f_r \quad \dots\dots\dots (6-11)$$

A_3 ——焊缝金属截面积（见图 6-2）， mm^2 。

若 $A_e \geq A$ ，则开孔不需另加补强；

若 $A_e < A$ ，则开孔需另加补强，其另加补强面积按式（6-12）计算：

$$A_4 \geq A - A_e \quad \dots\dots\dots (6-12)$$

式中：

A_4 ——有效补强范围内另加的补强面积（见图 6-2）， mm^2 。

6.4 多个开孔补强的等面积法

6.4.1 壳体多个开孔补强

a) 当任意两个相邻开孔的中心距小于两孔直径之和，而使其补强范围彼此重叠时（见图 6-3），在通过两孔中心点连线的壳体法截面内采用联合补强。联合补强的总面积应不小于各孔单独补强所需面积（按 6.3.3 和 6.3.5 计算）之和，且两孔之间的补强面积不小于两孔所需总补强面积的 50%。

在计算联合补强面积时，任何截面不得重复计入。

多个开孔中心连线在同一直线上时，按逐次配对的开孔处理，重叠部分的面积应按该相邻两孔的直径比分摊。

b) 对 3 个及以上开孔，若两两相邻开孔的中心距小于该两孔直径之和，且采用联合补强时（见图 6-4），则这些相邻开孔的中心距应至少等于其平均直径的 4/3 倍。任意相邻两孔之间的补强面积应至少等于该两孔所需总补强面积的 50%。

若任意两相邻开孔中心距小于其平均直径的 4/3 倍，则该两孔之间的任何金属均不得用作补强，这些开孔必须按 c) 的方法进行补强。

c) 任何数量并以任意方式排列的相邻开孔，均可作为一个假想孔（其直径包括所有靠近的开孔）进行补强。假想孔的直径不得超过 6.1.1 规定，所有接管金属均不得用作补强。

d) 圆筒上一系列规则排列的开孔，其每个开孔又无法进行单独补强时，应采用 6.4.2 的方法补强。

e) 多个开孔的补强结构型式与补强件材料，参照 6.3.2 要求。

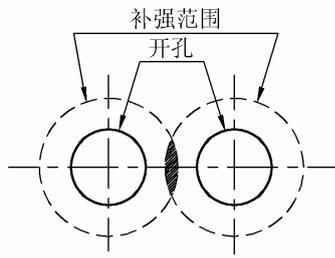


图 6-3 相邻开孔

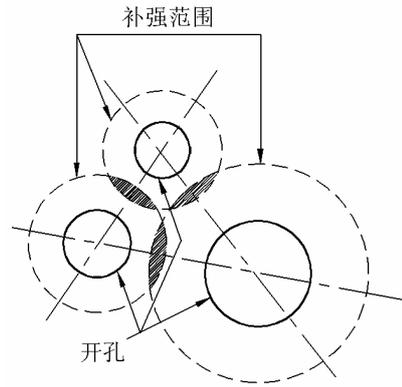


图 6-4 多个开孔

6.4.2 排孔的补强要求

圆筒全长（或部分）范围内开设排孔时，应用排孔削弱系数代替式（3-1）中的焊接接头系数 ϕ ，对该圆筒（或该部分）厚度进行校核。

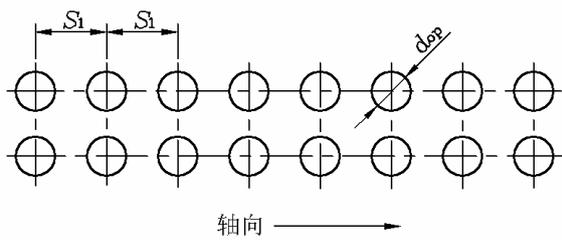


图 6-5 每排孔节距都相等示例

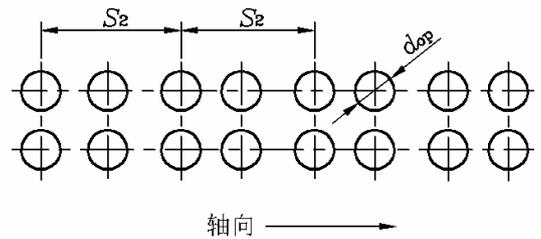


图 6-6 每第二排孔节距不等示例

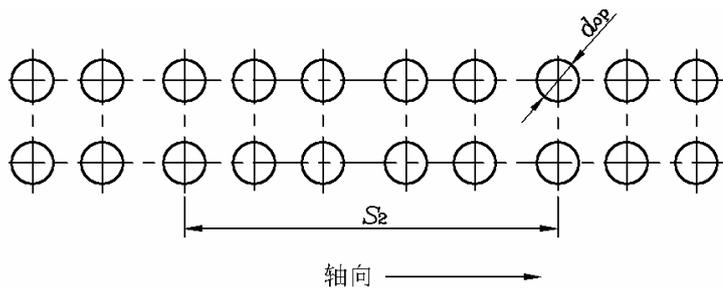


图 6-7 每第二、第三排孔节距不等示例

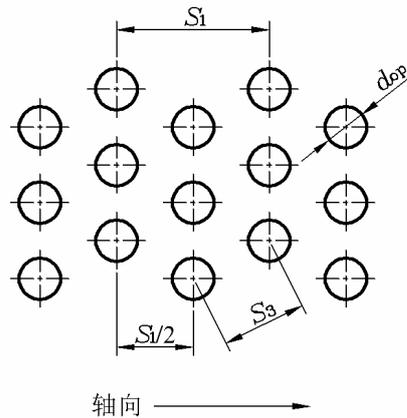


图 6-8 对角线排列示例

- a) 排孔沿轴向规则分布，管孔节距每排相等时（见图 6-5），轴向排孔削弱系数 v_1 按式（6-13）计算；任意一排管孔节距不均匀时（见图 6-6、图 6-7），平均排孔削弱系数 v_1 按式（6-14）计算。

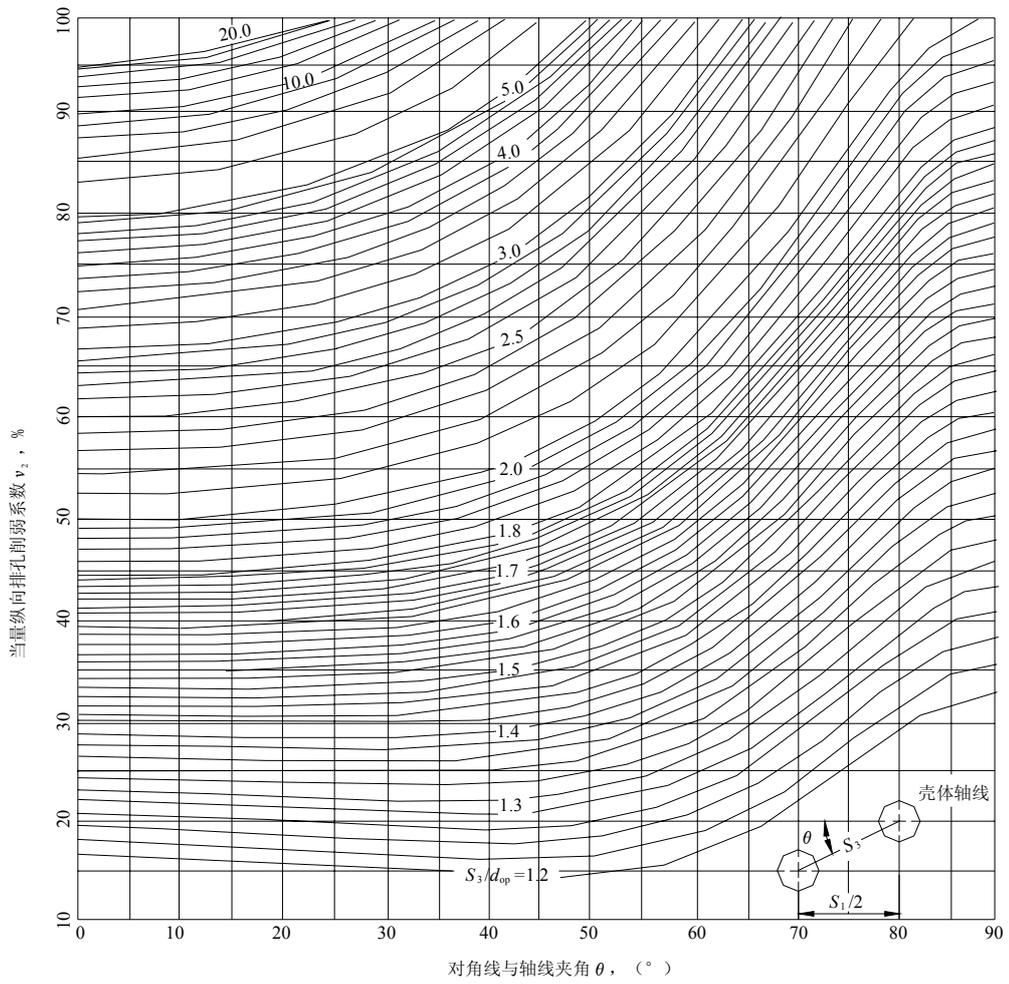
$$v_1 = \frac{S_1 - d_{op}}{S_1} \dots\dots\dots (6-13)$$

$$v_1 = \frac{S_2 - nd_{op}}{S_2} \dots\dots\dots (6-14)$$

式中：

n —— S_2 长度内的管孔数。

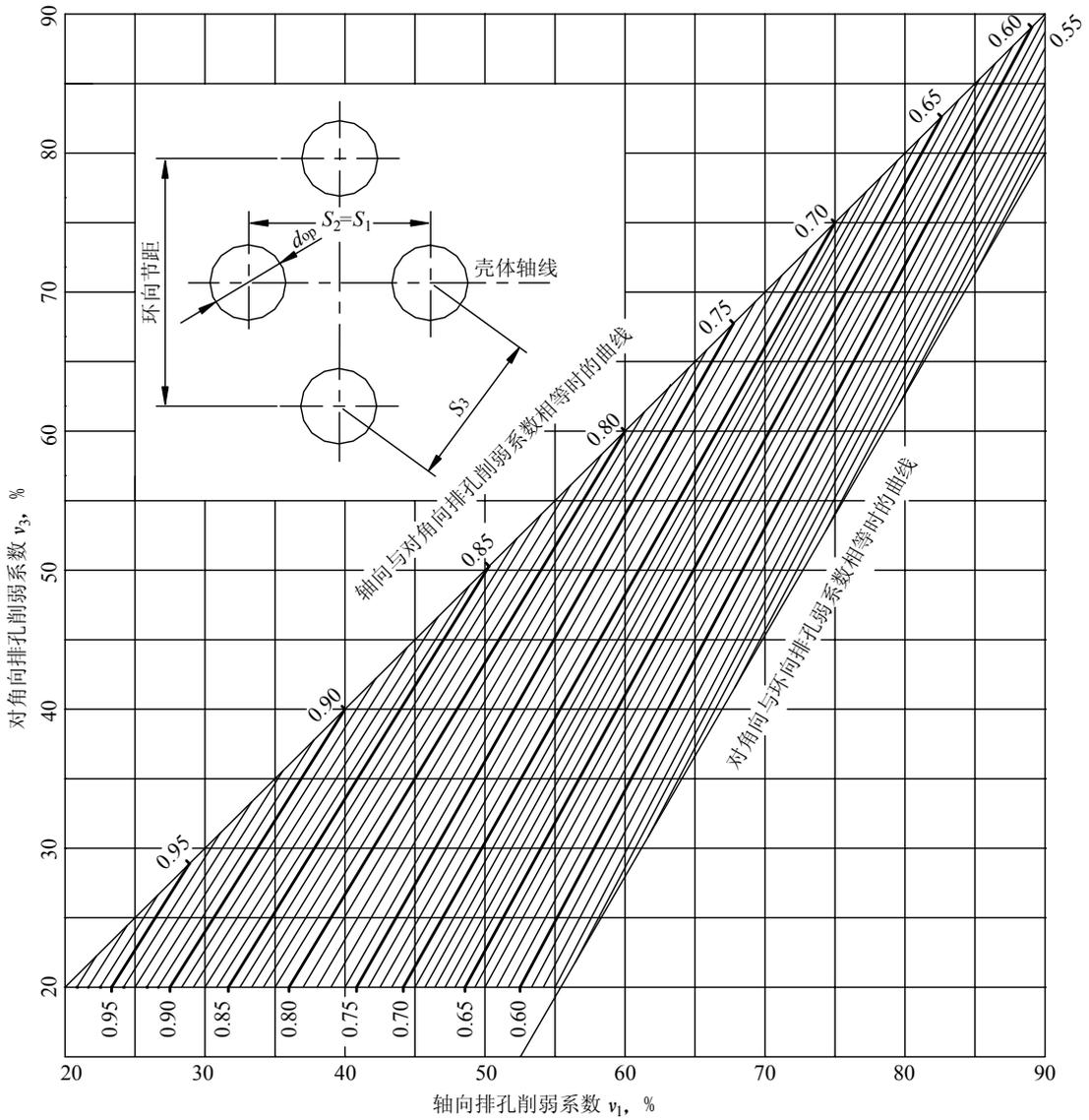
- b) 对规则的多排轴向开孔或对角线孔带（见图 6-8），还应校核当量轴向排孔削弱与对角向排孔削弱：
- 1) 当量轴向排孔削弱系数 v_2 根据 θ 角与 S_3/d_{op} 由图 6-9 确定；
 - 2) 按式（6-13）计算轴向排孔削弱系数 v_1 ，对角向排孔削弱系数 v_3 按图 6-10 由 S_3/S_2 和 v_1 值查取；
 - 3) 取 v_1 、 v_2 、 v_3 中的最小值。
- c) 排孔沿轴向不规则分布时，平均排孔削弱系数应取以下小值：
- 1) 在长度等于圆筒内直径（当圆筒内直径超过 1500mm，按 1500mm）的任意排孔段，计算各段孔排削弱系数，取最小者作为平均排孔削弱系数；
 - 2) 在长度等于圆筒内半径（当圆筒内半径超过 750mm，按 750mm）的任意排孔段，计算各段孔排削弱系数，取最小者的 1.25 倍作为平均排孔削弱系数；
- d) 在圆筒上非轴向单排开孔布置，当量轴向排孔削弱系数 v_2 根据 θ 角与 S_3/d_{op} 由图 6-9 确定。
- e) 必要时，还应校核：圆筒环向排孔间承受的轴向应力不得超过圆筒排孔间承受环向应力的一半。



注：1.当量纵向排孔削弱系数也可用注 2 的公式计算,但不允许超出图中横坐标及纵坐标所示范围。

$$2. \text{当量纵向排孔削弱系数 } v_2 = \frac{\sec^2 \theta + 1 - \left(\frac{\sec \theta}{S_3 / d_{op}} \right) \sqrt{3 + \sec^2 \theta}}{1.5 + 0.5 \sec^2 \theta}。$$

图 6-9 对角向排孔当量纵向排孔削弱系数计算图



注：1. v_3 也可用注 2 和注 3 中公式计算，并允许超出图中所规定的范围。

$$2. v_3 = \frac{J + 0.25 - (1 - v_1)\sqrt{0.75 + J}}{0.375 + 0.5J}$$

其中 $J = \left(\frac{S_3}{S_2}\right)^2$ 。

3. 对角向与环向排孔削弱系数相等时，对角向排孔削弱系数的计算式为：

$$v_3 = \frac{2M + 1 - 2(1 - v_1)\sqrt{1 + M}}{1 + M}$$

其中 $M = \left[\frac{(1 - v_1)}{(2 - 0.5v_1)}\right]^2$ 。

图 6-10 对角向排孔削弱系数计算图

6.4.3 平盖上开多个孔

采用增加平盖厚度进行补强的方法适用于：平盖危险径向截面上各开孔宽度总和不超过 $D_i/2$ ，任意相邻两孔中心距大于两孔平均直径的 1.5 倍且小于或等于 2 倍。

若平盖厚度按式(5-33)~式(5-35)计算，式中平盖结构特征系数 K 应考虑开孔削弱。按式(6-15)计算削弱系数 ν ：

$$\nu = \frac{D_c - \sum b}{D_c} \quad (6-15)$$

式中：

D_c ——平盖计算直径，见表 5-9 或表 5-10，mm；

$\sum b$ ——平盖危险径向截面上各开孔宽度之总和，mm。

按表 5-9 或表 5-10 查取 K 后确定系数 K_1 ：

$$K_1 = \begin{cases} K & \text{当 } K < 0.3 \\ 0.3 & \text{当 } K \geq 0.3 \end{cases}$$

当 $K_1/\nu \leq 0.5$ 时，则以 K_1/ν 代替式(5-33)~式(5-35)中的 K 计算平盖厚度；当 $K_1/\nu \geq 0.5$ 时，应采用其他设计方法。

6.5 平盖中心单个圆形开孔 ($d_{op} \geq 0.5D_o$)

6.5.1 用螺栓连接的平盖按第 7 章作为法兰结构进行计算。

6.5.2 表 5-9 序号 2~7，表 5-10 所示平盖（若与圆筒对接焊接连接，应是全焊透结构），开孔带有接管的平盖（平盖与接管连接处应是整体结构或用全焊透连接）或无接管（见图 6-11）的平盖，均按以下步骤进行计算，其各项应力及其开口结构需满足相应要求（计算中未注明符号的定义同 7.3）。

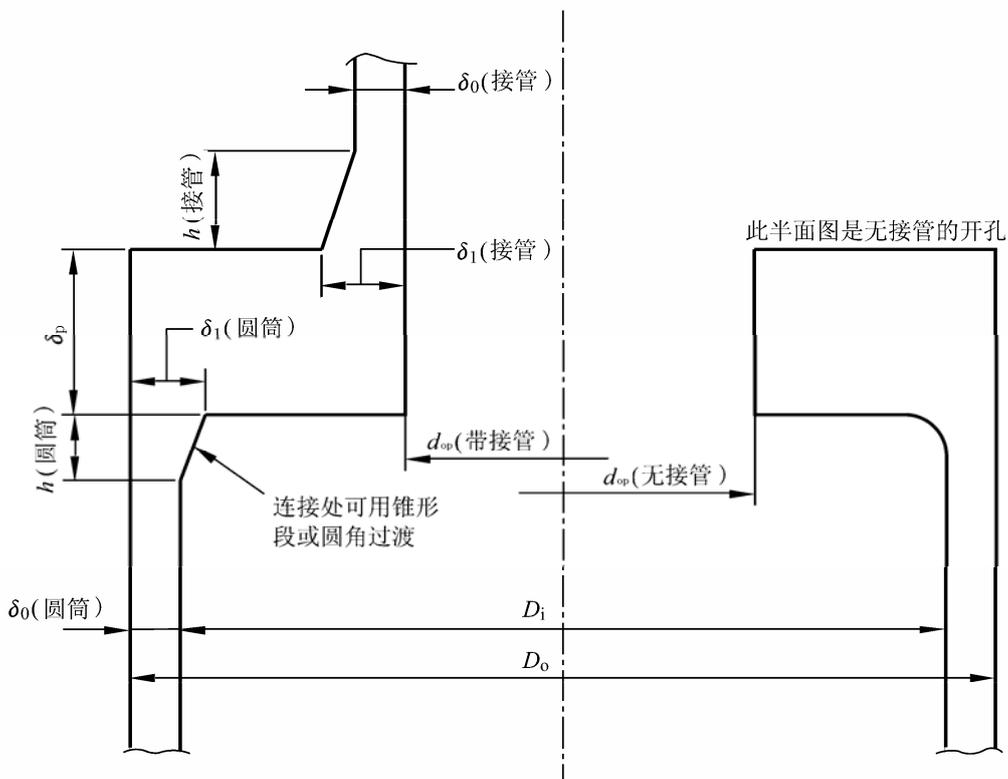


图 6-11 中心大开孔的整体平盖示意图

6.5.2.1 略去与平盖连接的圆筒，根据法兰计算的原理，确定平盖的计算力矩和计算应力。

a) 计算力矩按式 (6-16) 计算：

$$M_o = F_D S_D + F_T S_T \quad \dots\dots\dots (6-16)$$

式中：

M_o ——计算力矩，N·mm；

F_D ——作用力，按式 (6-17) 计算，N；

$$F_D = 0.785 d_{op}^2 p_c \quad \dots\dots\dots (6-17)$$

S_D ——力臂，按式 (6-18) 计算，mm；

$$S_D = \frac{D_i - (d_{op} + \delta_1)}{2} \quad \dots\dots\dots (6-18)$$

δ_1 ——厚度（取接管处，见图 6-11），mm；

F_T ——作用力，按式 (6-19) 计算，N；

$$F_T = 0.785 p_c (D_i^2 - d_{op}^2) \quad \dots\dots\dots (6-19)$$

S_T ——力臂，按式 (6-20) 计算，mm；

$$S_T = \frac{D_i - d_{op}}{4} \quad \dots\dots\dots (6-20)$$

b) 取 $K=D_o/d$ ，计算应力按式 (6-21) ~ 式 (6-23) 计算：

$$\sigma_H = \frac{f M_o}{\lambda \delta_1^2 d_{op}} \quad \dots\dots\dots (6-21)$$

$$\sigma_R = \frac{(1.33 \delta_p e + 1) M_o}{\lambda \delta_p^2 d_{op}} \quad \dots\dots\dots (6-22)$$

$$\sigma_T = \frac{Y M_o}{\delta_p^2 d_{op}} - Z \sigma_R \quad \dots\dots\dots (6-23)$$

式中：

σ_H 、 σ_R 、 σ_T ——计算应力，MPa；对不带接管的开孔平盖，其 $\sigma_H = \sigma_R = 0$ ；

f 、 λ 、 e 、 Y 、 Z ——见 7.3， f 、 λ 、 e 按照平盖开孔处的接管参数确定， Y 、 Z 查相应图表得到；

δ_1 ——厚度（取接管处，见图 6-11），mm。

6.5.2.2 按下列步骤计算圆筒与平盖连接处的应力。

a) 按式 (6-24) 或式 (6-25) 计算 ($E\theta$)：

带接管：

$$(E\theta) = \frac{0.91 \left(\frac{\delta_1}{\delta_o} \right)^2 D_{ii} V_1}{f h_o} \sigma_H \quad \dots\dots\dots (6-24)$$

无接管

$$(E\theta) = \frac{d_{op}}{\delta_p} \sigma_T \dots\dots\dots (6-25)$$

式中:

$$D_{il} = \begin{cases} D_i + \delta_1 & (f < 1.0) \\ D_i + \delta_0 & (f \geq 1.0) \end{cases};$$

$(E\theta)$ ——参数, MPa;

δ_1 、 δ_0 ——厚度(取接管处, 见图 6-11), mm;

V_1 、 f 、 h_o ——由平盖开孔处的接管参数确定, (见 7.3)。

b) 按式(6-26)计算 M_H :

$$M_H = \frac{(E\theta)}{\frac{1.74h_oV_1}{\delta_0^3D_{il}} + \frac{(E\theta)}{M_o} \left(1 + \frac{F_1\delta_p}{h_o}\right)} \dots\dots\dots (6-26)$$

式中:

σ_{Hs} ——作用在平封头外径与圆筒连接处的力矩, N·mm;

h_o 、 V_1 、 D_{il} 、 F_1 ——由平盖外径处圆筒的参数确定, (见 7.3);

δ_0 ——厚度(取圆筒处, 见图 6-11), mm。

c) 按式(6-27)计算 x_1 :

$$x_1 = \frac{M_o - M_H \left(1 + \frac{F_1\delta_p}{h_o}\right)}{M_o} \dots\dots\dots (6-27)$$

式中:

x_1 ——参数;

F_1 、 h_o ——由平盖外径处圆筒的参数确定, (见 7.3)。

d) 按式(6-28)~式(6-30)计算平盖和圆筒连接处的圆筒颈部轴向应力 σ_{Hs} 、平盖外径处的径向应力 σ_{Rs} 和环向应力 σ_{Ts} :

$$\sigma_{Hs} = x_1(E\theta) \frac{1.1h_of}{\left(\frac{\delta_1}{\delta_0}\right)^2 D_1 V_1} \dots\dots\dots (6-28)$$

$$\sigma_{Rs} = \frac{1.91M_H \left(1 + \frac{F_1\delta_p}{h_o}\right)}{D_i \delta_p^2} + \frac{0.64F_1 M_H}{D_i h_o \delta_p} \dots\dots\dots (6-29)$$

$$\sigma_{Ts} = \frac{x_1(E\theta)\delta_p}{D_i} - \frac{0.57 \left(1 + \frac{F_1\delta_p}{h_o}\right) M_H}{D_i \delta_p^2} + \frac{0.64F_1 Z_1 M_H}{D_i h_o \delta_p} \dots\dots\dots (6-30)$$

式中:

h_o 、 V_1 、 f 、 F_1 ——由平盖外径处圆筒的参数确定, (见 7.3);

δ_1 、 δ_0 ——厚度(取圆筒处, 见图 6-11), mm。

Z_1 ——系数，按式（6-31）计算；

$$Z_1 = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} \quad \dots\dots\dots (6-31)$$

K ——系数，按式（6-32）计算；

$$K = D_o / d_{op} \quad \dots\dots\dots (6-32)$$

6.5.2.3 计算平盖开孔处的应力

平盖开孔处接管的颈部轴向应力 σ_{Ho} 、开孔处平盖的径向应力 σ_{Ro} 和环向应力 σ_{To} ，按式（6-33）~式（6-35）计算：

$$\sigma_{Ho} = x_1 \sigma_H \quad \dots\dots\dots (6-33)$$

$$\sigma_{Ro} = x_1 \sigma_R \quad \dots\dots\dots (6-34)$$

$$\sigma_{To} = x_1 \sigma_T + \frac{0.64 F_1 Z_2 M_H}{D_i h_o \delta_p} \quad \dots\dots\dots (6-35)$$

式中：

F_1 、 h_o ——由平盖外径处圆筒的参数确定，（见7.3）；

Z_2 ——系数。

$$Z_2 = \frac{2K^2}{K^2 - 1} \quad \dots\dots\dots (6-36)$$

6.5.2.4 应力校核

上述计算中平盖与圆筒连接处的应力 σ_{Hs} 、 σ_{Rs} 和 σ_{Ts} 以及平盖开孔处的应力 σ_{Ho} 、 σ_{Ro} 和 σ_{To} 均应满足7.5.3.4的要求。

6.6 圆筒径向接管开孔补强设计的分析法

本节给出了内压作用下圆筒具有径向平齐接管开孔补强设计的另一种方法，本计算方法是根据弹性薄壳理论得到的圆筒开孔补强的应力分析法，力学模型如图6-12 a)。在本方法涵盖的补强适用范围内，与前述等面积补强法具有同样的设计可靠性。

本计算方法可保守地用于带有径向内伸接管的补强计算。

本节给出两种等效的补强计算途径，根据需要可任择其一：

- a) 等效应力校核；
- b) 补强结构尺寸设计。

有特殊要求（如核能装置中可按本标准进行设计的容器）的压力容器圆筒开孔补强计算，仅可采用等效应力校核方法。

对于内压与接管外载荷共同作用下的圆筒接管开孔补强计算分析方法，将另行单独发布。

6.6.1 适用范围

- a) 适用于内压作用下具有单个径向接管的圆筒；
- b) 当圆筒具有两个或两个以上开孔时，相邻两开孔边缘的间距不得小于 $2\sqrt{D_i \delta_n}$ ；
- c) 圆筒、接管或补强件的材料，其标准室温屈服强度与标准抗拉强度下限值之比 $R_{eL}/R_m \leq 0.8$ ；

- d) 接管或补强件与壳体应采用截面全熔透焊缝，从而确保补强结构的整体性；
- e) 对圆筒或接管进行整体补强，应满足补强范围尺寸（自接管、圆筒交线至补强区边缘的距离：对于圆筒 $l > \sqrt{D_1 \delta_n}$ ，对于接管 $l_1 > \sqrt{d_0 \delta_{nt}}$ ），或整体加厚圆筒体；补强范围内的 A、B 类焊接接头不得有任何超标缺陷，必要时应对此提出无损检测要求；
- f) 圆筒与接管之间角焊缝的焊脚尺寸应分别不小于 $\delta_n/2$ 和 $\delta_{nt}/2$ ，接管内壁与圆筒内壁交线处圆角半径在 $\delta_n/8$ 和 $\delta_n/2$ 之间，见图 6-12 b)；
- g) 本设计方法适用下列参数范围：

$$\rho \leq 0.9$$

$$\text{MAX} [0.5, \rho] \leq \delta_{et}/\delta_e \leq 2$$

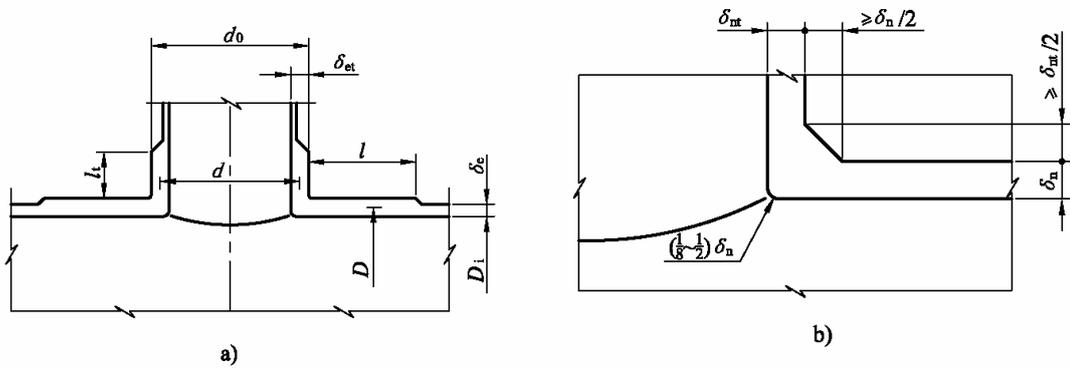


图 6-12 开孔补强设计分析法力学模型

6.6.2 等效应力校核

6.6.2.1 计算步骤

- a) 按式 (6-37) 和式 (6-38) 计算圆筒与接管中面直径 D , d ：

$$D = D_1 + \delta_e + 2C_s \quad \dots\dots\dots (6-37)$$

$$d = d_0 - \delta_{et} \quad \dots\dots\dots (6-38)$$

- b) 令开孔参数 $\lambda = \rho \sqrt{D/\delta_e} = d/\sqrt{D\delta_e}$ ，计算 ρ , λ , δ_{et}/δ_e ；

- c) 由 ρ , λ , δ_{et}/δ_e 查曲线图组 6-13，得 K_m 和 K ；

- d) 按式 (6-39) 和式 (6-40) 计算等效薄膜应力 S_{II} 和等效总应力 S_{IV} ：

$$S_{II} = K_m \frac{pD}{2\delta_e} \quad \dots\dots\dots (6-39)$$

$$S_{IV} = K \frac{pD}{2\delta_e} \quad \dots\dots\dots (6-40)$$

- e) 校核，按式 (6-41) 和式 (6-42) 计算：

$$S_{II} \leq n_{II} [\sigma]^t \quad \dots\dots\dots (6-41)$$

$$S_{IV} \leq n_{IV} [\sigma]^t \quad \dots\dots\dots (6-42)$$

式中:

n_{II} ——取 2.2 (对于特殊要求的压力容器, 可取 1.5~2.2);

n_{IV} ——取 2.6;

$[\sigma]^t$ ——设计温度下材料许用应力, MPa, 圆筒、接管和补强件的材料不同时, 取其中较小者;

$[\sigma]_s^t$ ——设计温度下圆筒材料许用应力, MPa;

$[\sigma]_t^t$ ——设计温度下接管材料许用应力, MPa。

6.6.2.2 厚度调整

当不能满足 6.6.2.1 等效应力校核条件时, 考虑结构设计的合理性, 有以下两种可能方式调整接管或圆筒厚度:

a) 直接适当增加圆筒厚度, 按 6.6.2.1 步骤重新计算, 直到满足校核条件。

b) 首先增加接管厚度, 必要时再增加圆筒厚度:

1) 确定圆筒计算厚度 δ :

$$\delta = \frac{pD}{2[\sigma]_s^t} \quad \dots\dots\dots (6-43)$$

2) 针对不满足校核条件的 S_{II} (或 S_{IV}) 计算:

$$K'_m = n_{II} \frac{\delta_e}{\delta} \cdot \frac{[\sigma]^t}{[\sigma]_s^t} \quad (\text{或} \quad K' = 2.6 \frac{\delta_e}{\delta} \cdot \frac{[\sigma]^t}{[\sigma]_s^t}) \quad \dots\dots\dots (6-44)$$

3) 在曲线图组 6-13 中, 在开孔率 $\rho = d/D$ 的曲线纵坐标 K_m (或 K) 上找到 K'_m (或 K') 值, 过此点沿水平线向右移与对应的 λ 值竖直线相交, 由交点得到该族曲线参数 $[\delta_{et}/\delta_e]$ 值, 遇中间值时采用内插法;

4) 以 $[\delta_{et}/\delta_e]$ 比例增加接管厚度;

5) 在 3) 中, 如果交点超出了 $[\delta_{et}/\delta_e]$ 曲线族的范围, 不允许外延取值, 应考虑增加圆筒厚度 δ_e , 再按 6.6.2.1 重新计算, 直到满足校核条件。

6.6.2.3 等效应力校核计算表 (见表 6-2)

表 6-2 圆筒开孔补强等效应力校核计算表

| | | | | | |
|------------------------------------|------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------|
| 一、已知条件 | | | | | |
| 设计压力 | MPa | $p=$ | | | |
| 设计温度 | ℃ | | | | |
| | | 圆筒 | | 接管 | |
| 材料许用应力 | MPa | $[\sigma]_s^t =$ | | $[\sigma]_i^t =$ | |
| 内径(外径) | mm | $D_i =$ | | $d_0 =$ | |
| 名义厚度 | mm | $\delta_n =$ | | $\delta_{nt} =$ | |
| 厚度附加量 | mm | $C_s =$ | | $C_t =$ | |
| 二、参数计算 | | | | | |
| | | 圆筒 | | 接管 | |
| 有效厚度 | mm | $\delta_e =$ | $\delta_n - C_s$ | $\delta_{et} =$ | $\delta_{nt} - C_t$ |
| 中面直径 | mm | $D =$ | $D_i + \delta_e + 2 C_s$ | $d =$ | $d_0 - \delta_{et}$ |
| 环向薄膜应力 | MPa | $\sigma_0 =$ | $pD/2\delta_e$ | | |
| 材料许用应力 | MPa | $[\sigma]^t =$ | $\min([\sigma]_s^t, [\sigma]_i^t)$ | | |
| 参数 | | $\delta_{et}/\delta_e =$ | | | |
| 参数 | | $D/\delta_e =$ | | | |
| 开孔率 | | $\rho =$ | d/D | | |
| 三、查图 | | | | | |
| | | 路径一 | | 路径二 | |
| 向下、上圆整至 | | (1) | (2) | (1) | (2) |
| $\lambda = \rho \sqrt{D/\delta_e}$ | | $\lambda_{(1)} = \rho_{(1)} \sqrt{D/\delta_e}$ | $\lambda_{(2)} = \rho_{(2)} \sqrt{D/\delta_e}$ | $\lambda = d / \sqrt{D \times \delta_e}$ | |
| 查图, $K_m =$ | | $K_{m(1)}$ | $K_{m(2)}$ | $K_{m(1)}$ | $K_{m(2)}$ |
| 查图, $K =$ | | $K_{(1)}$ | $K_{(2)}$ | $K_{(1)}$ | $K_{(2)}$ |
| K_m (按 内插) | | | | | |
| K (按 内插) | | | | | |
| 四、结果及校核 | | | | | |
| 等效薄膜应力 | MPa | $S_{II} =$ | K_m | K_m | |
| 等效总应力 | MPa | $S_{IV} =$ | K | K | |
| 许用值 $[S_{II}]$ | MPa | $[S_{II}] =$ | $n_{II} [\sigma]^t$ | $n_{II} [\sigma]^t$ | |
| 许用值 $[S_{IV}]$ | MPa | $[S_{IV}] =$ | $2.6 [\sigma]^t$ | $2.6 [\sigma]^t$ | |
| 校核 | $S_{II} \leq [S_{II}]$ | | | | |
| | $S_{IV} \leq [S_{IV}]$ | | | | |
| 注: 表中并列路径一、路径二, 可任择其一。 | | | | | |

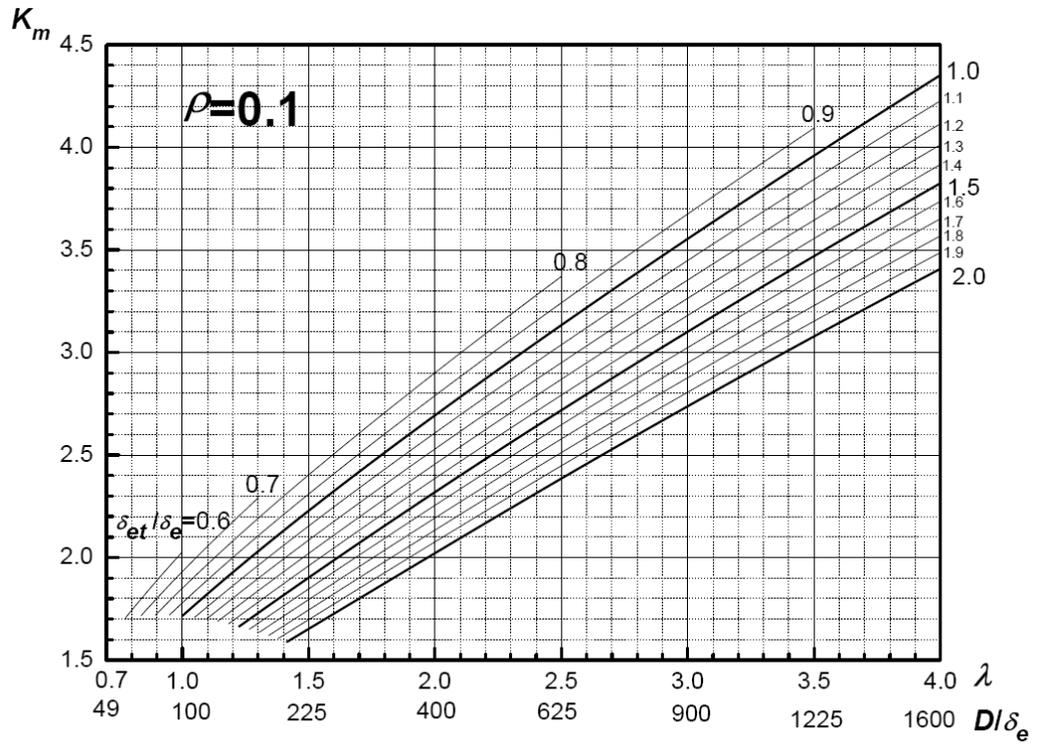


图 6-13 (1)

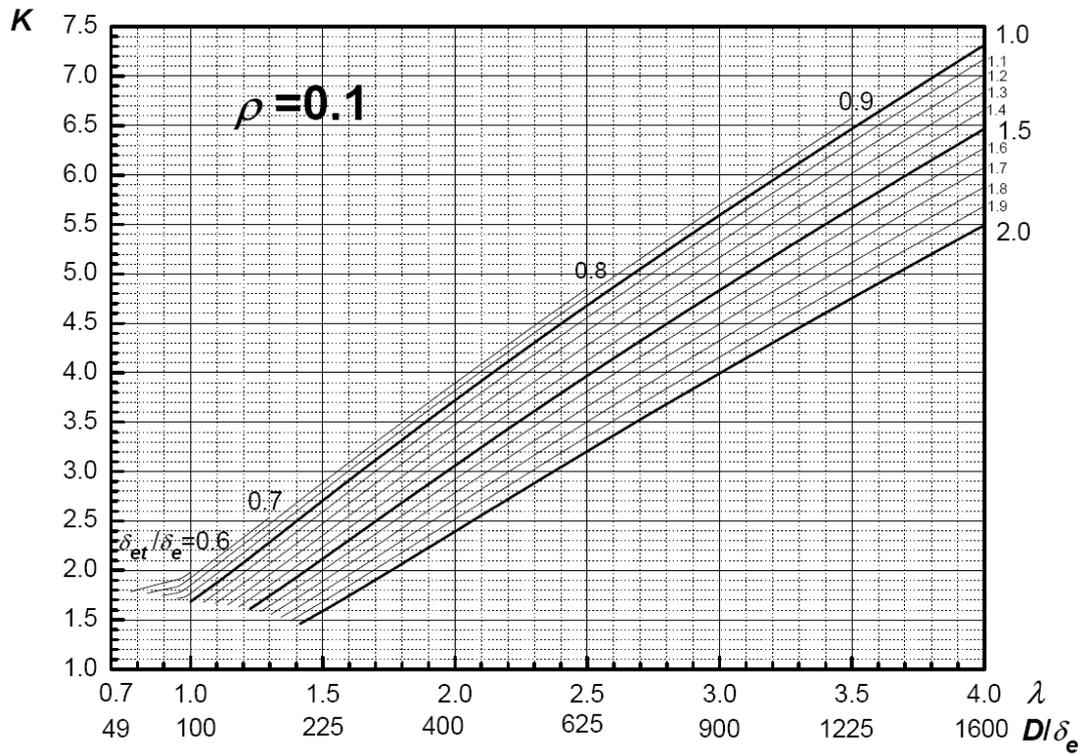


图 6-13 (2)

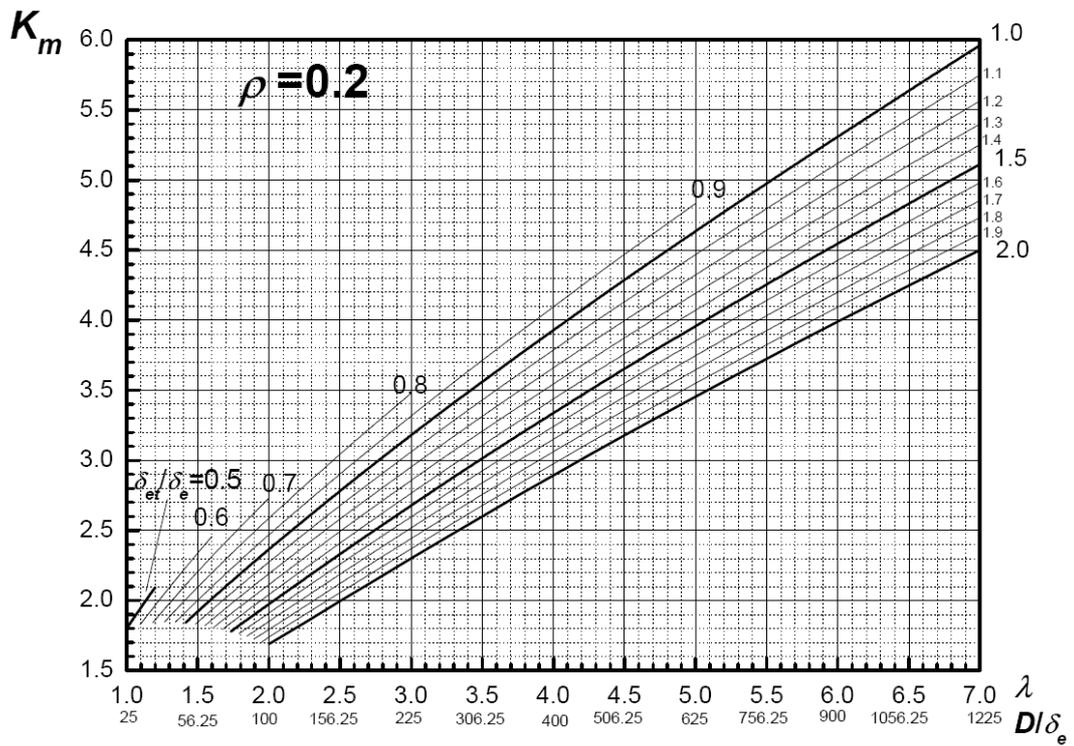


图 6-13 (3)

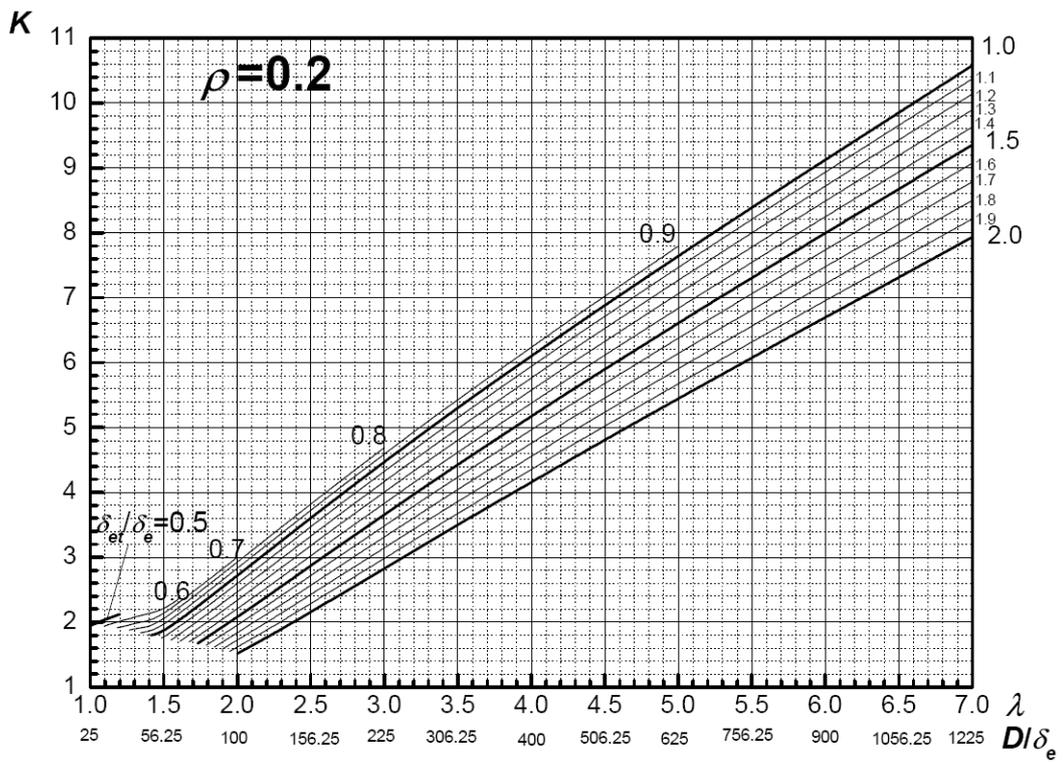


图 6-13 (4)

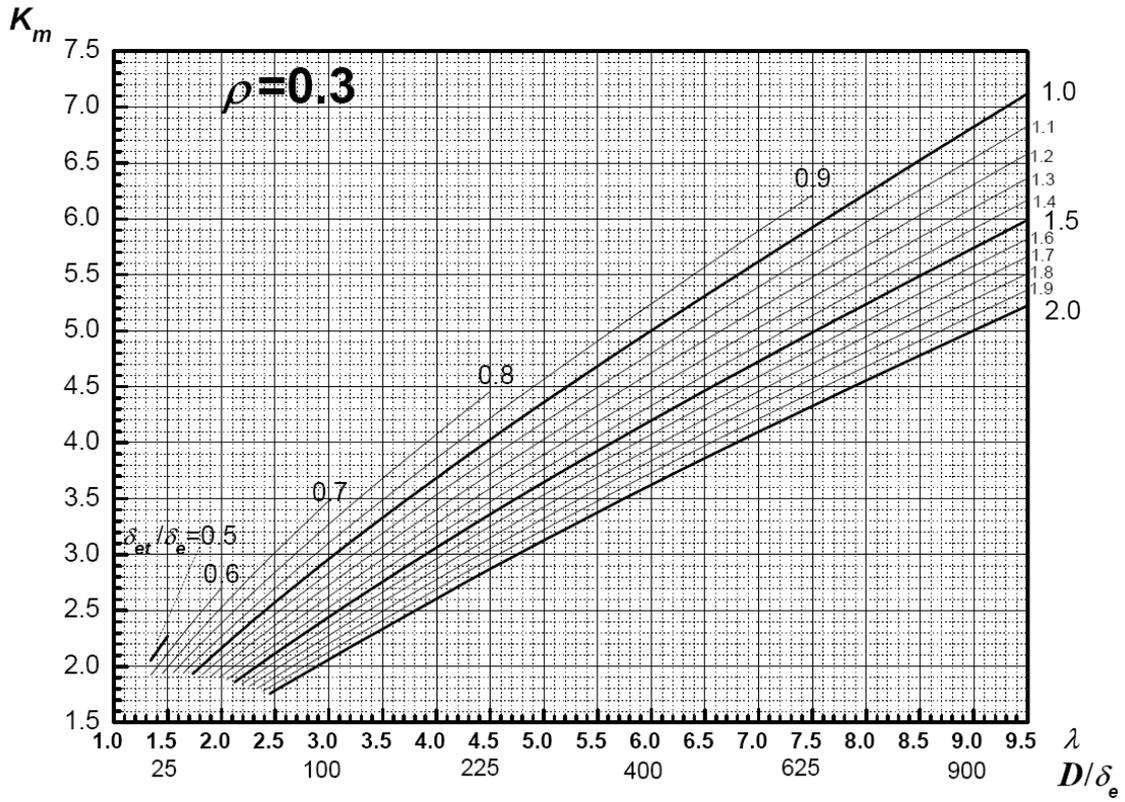


图 6-13 (5)

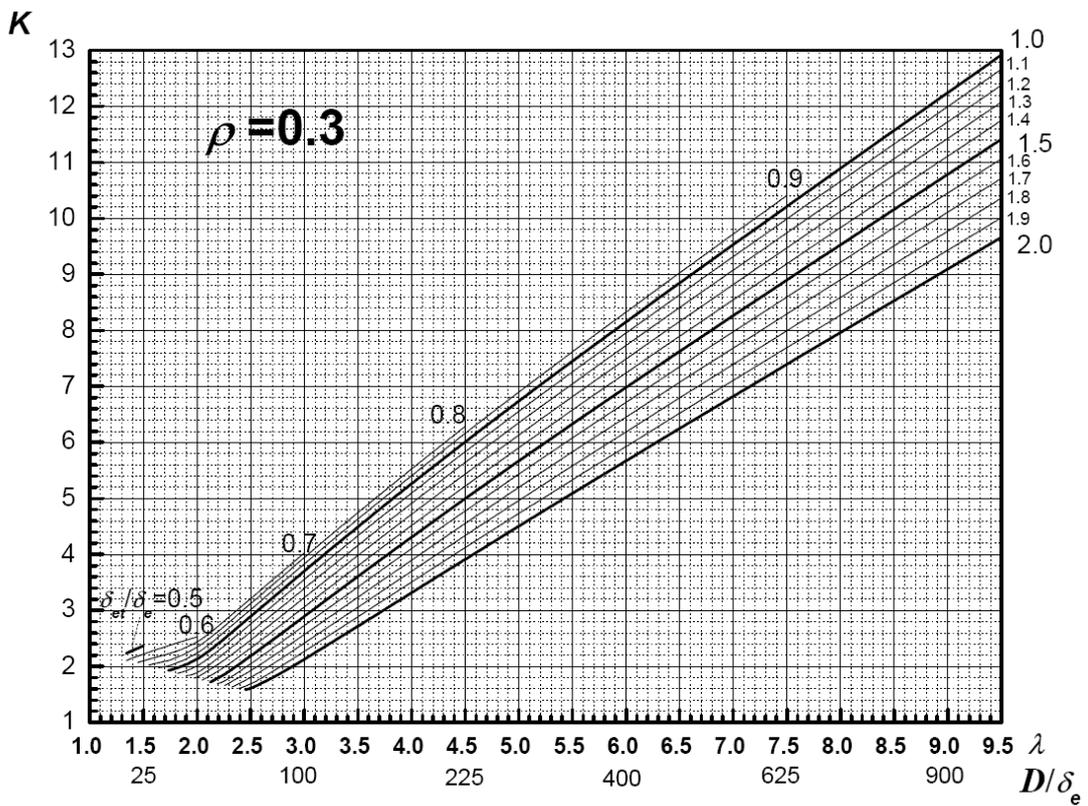


图 6-13 (6)

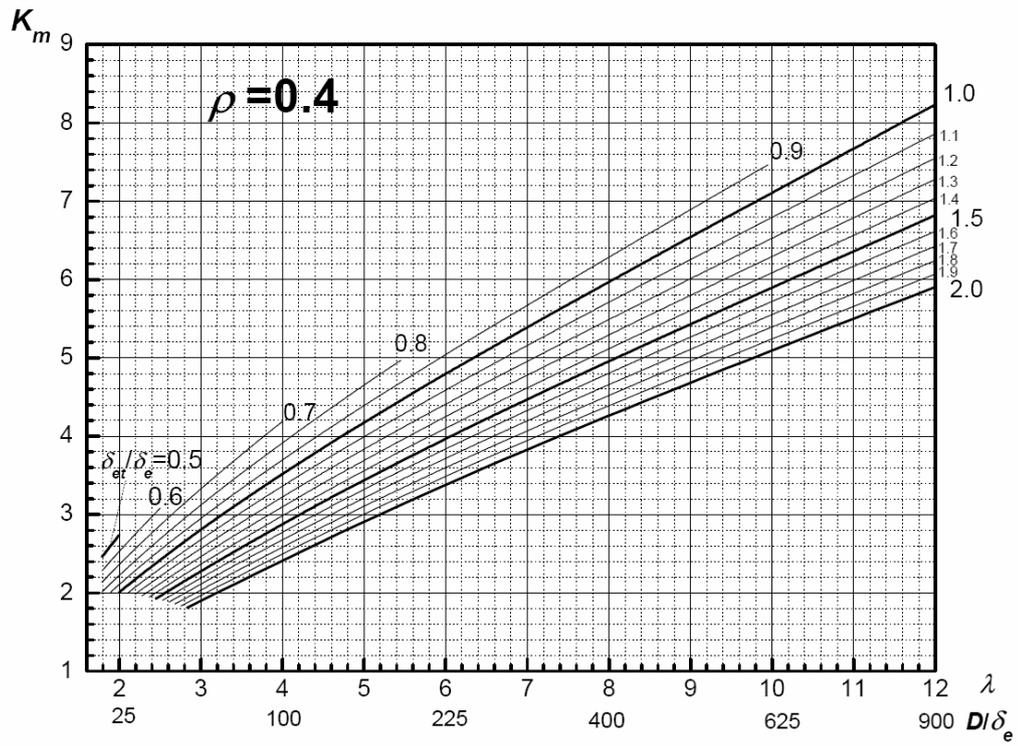


图 6-13 (7)

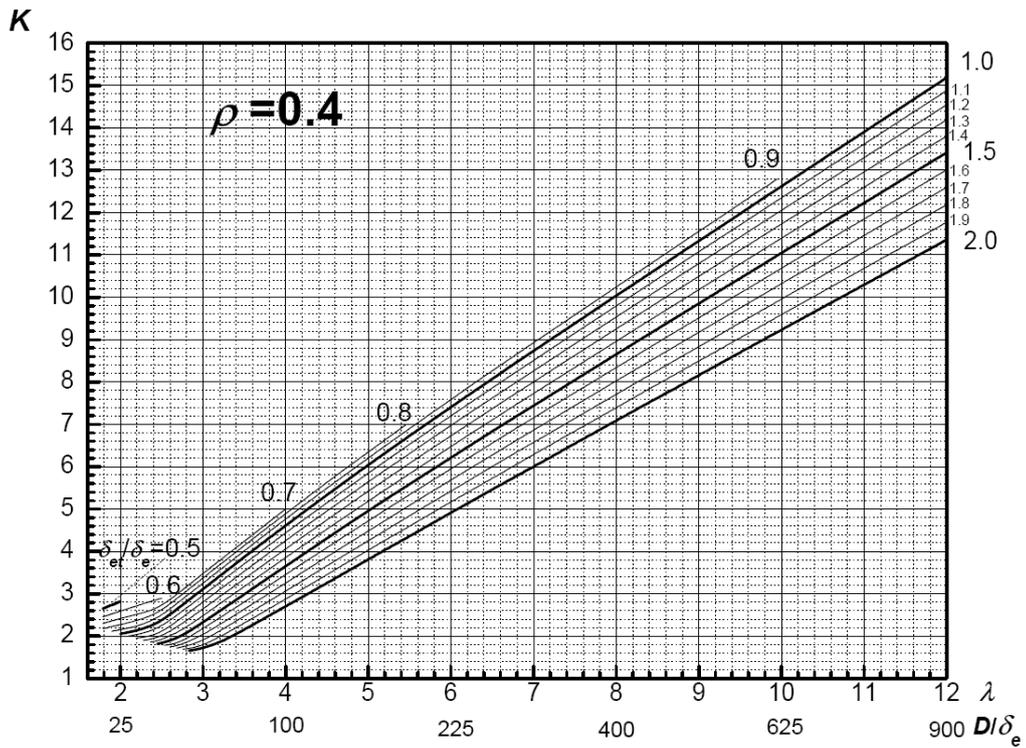


图 6-13 (8)

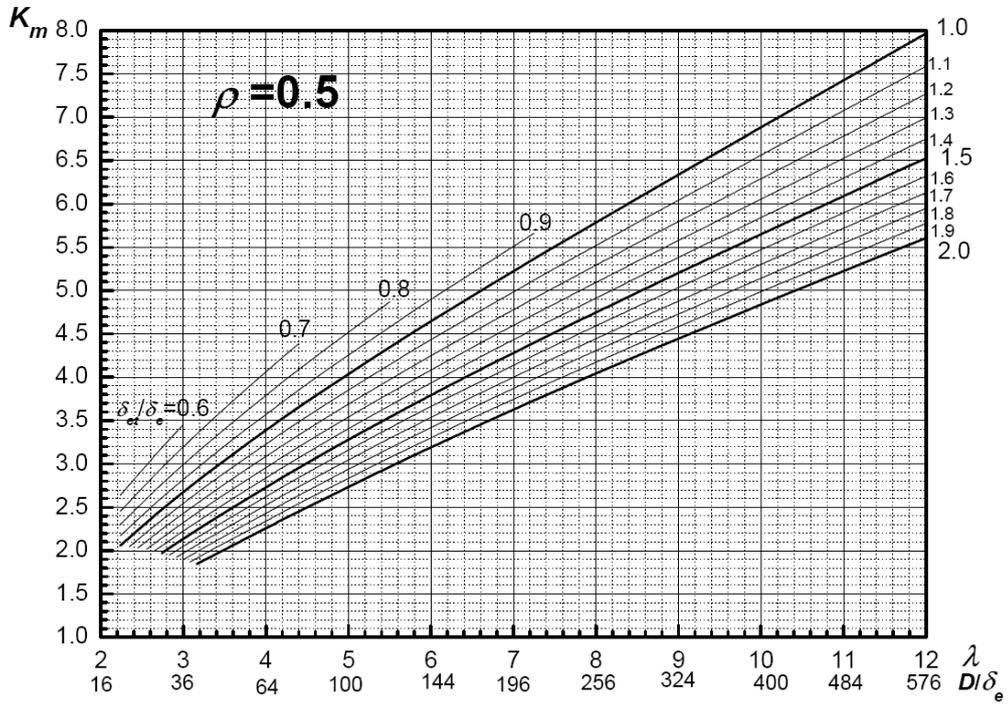


图 6-13 (9)

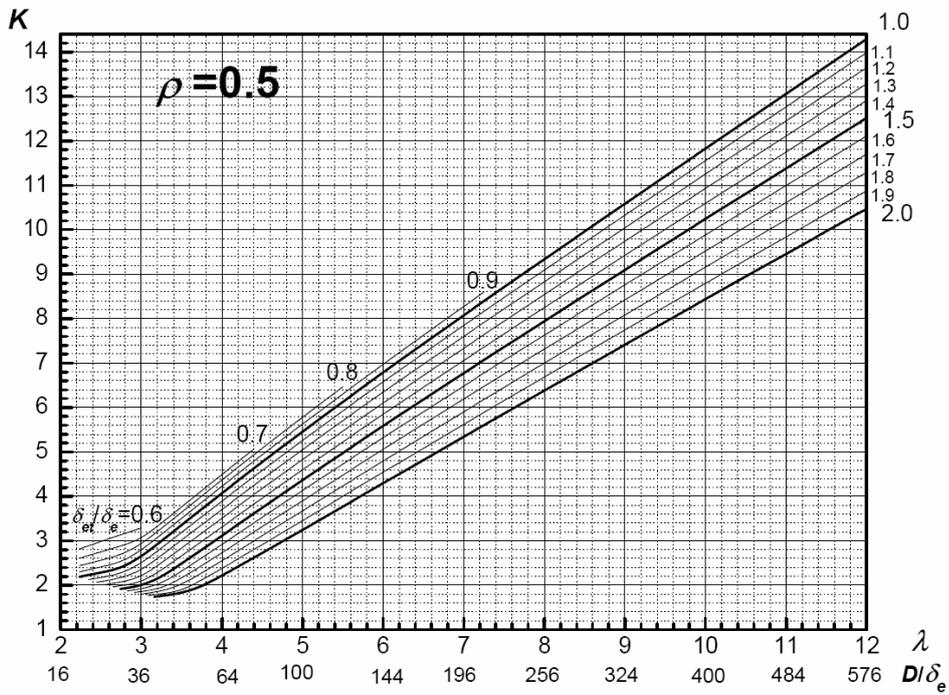


图 6-13 (10)

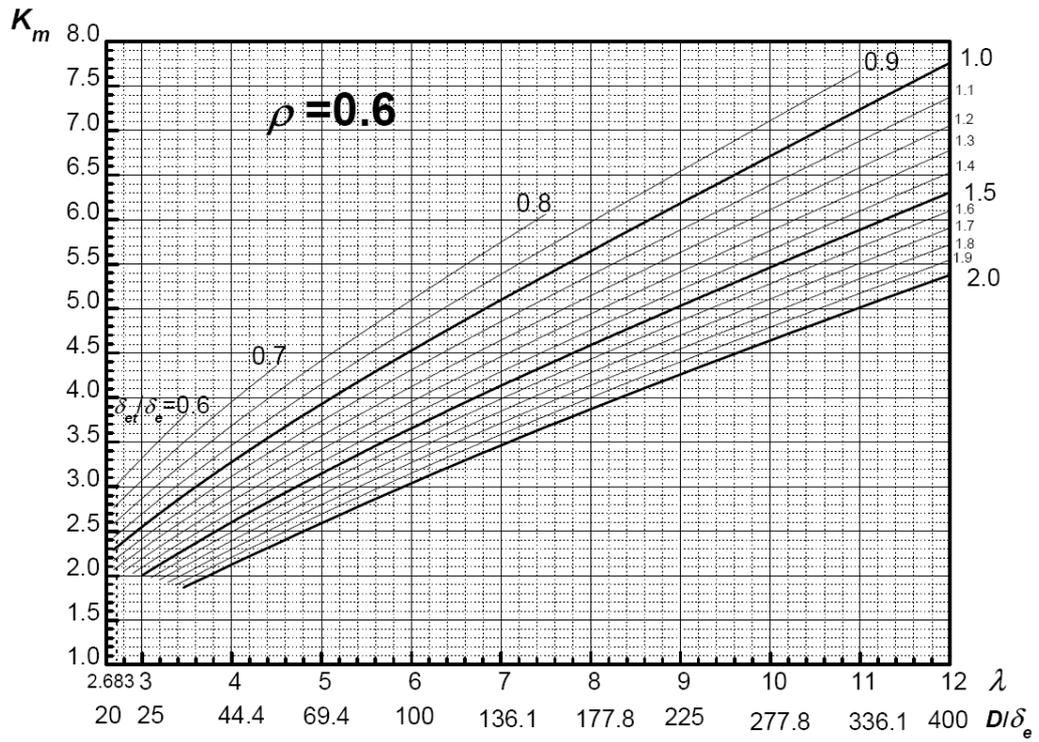


图 6-13 (11)

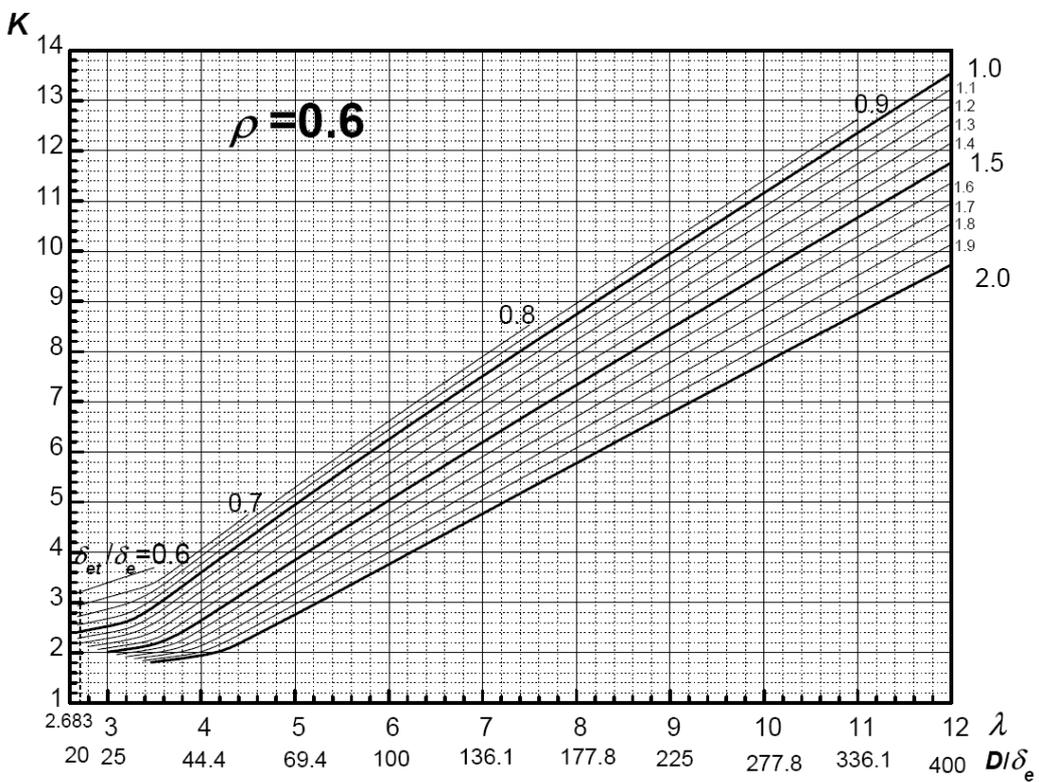


图 6-13 (12)

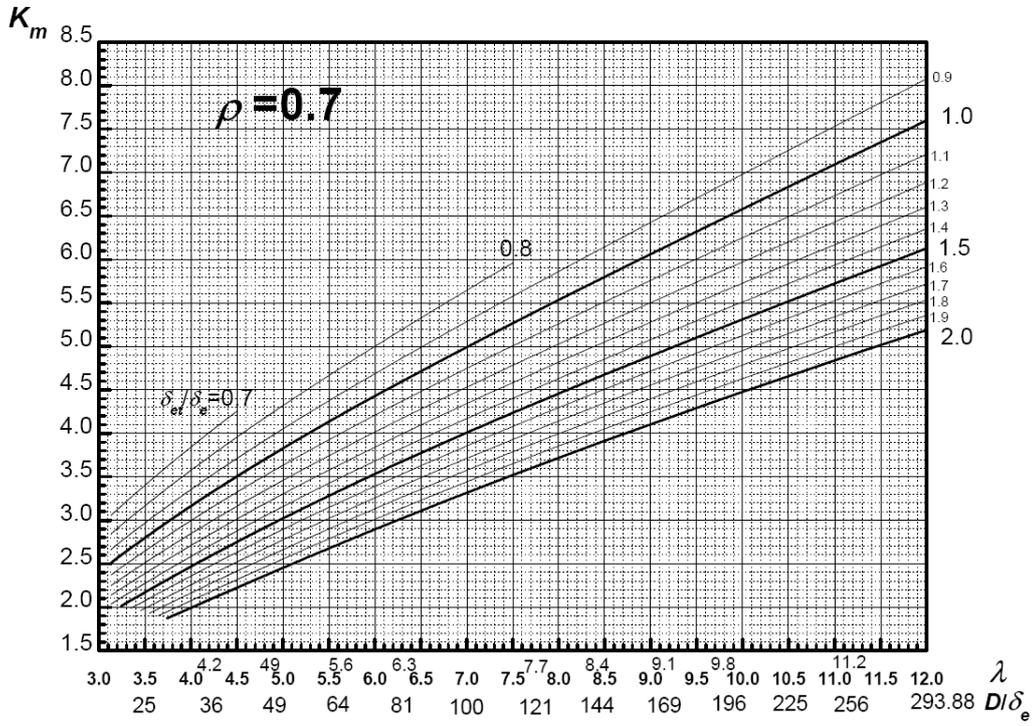


图 6-13 (13)

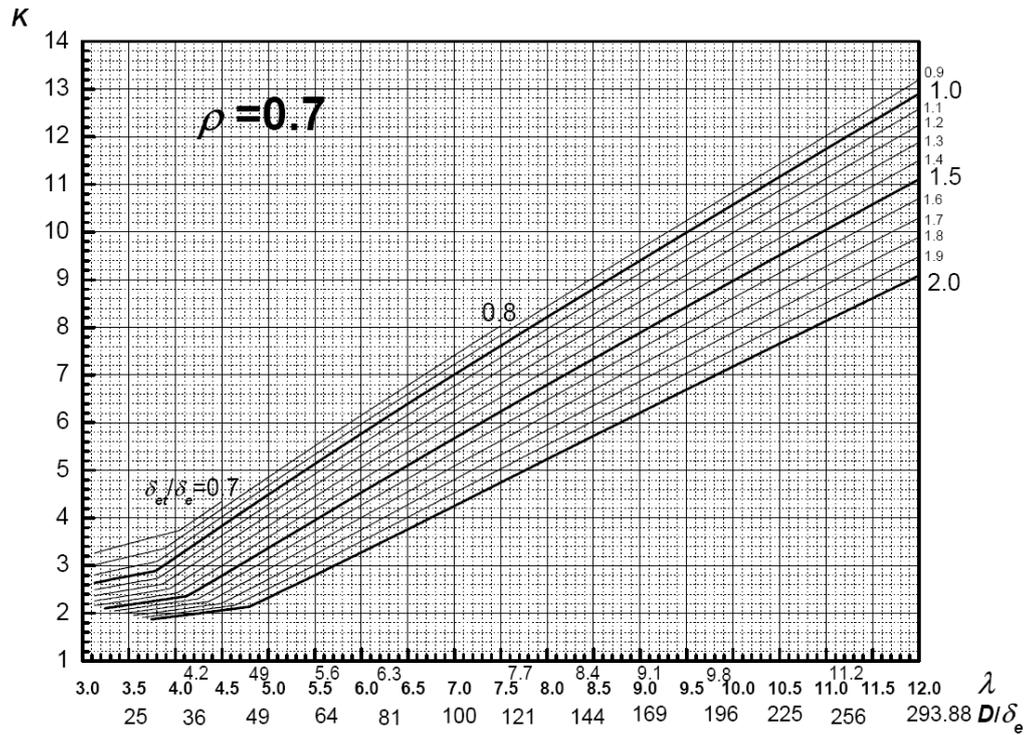


图 6-13 (14)

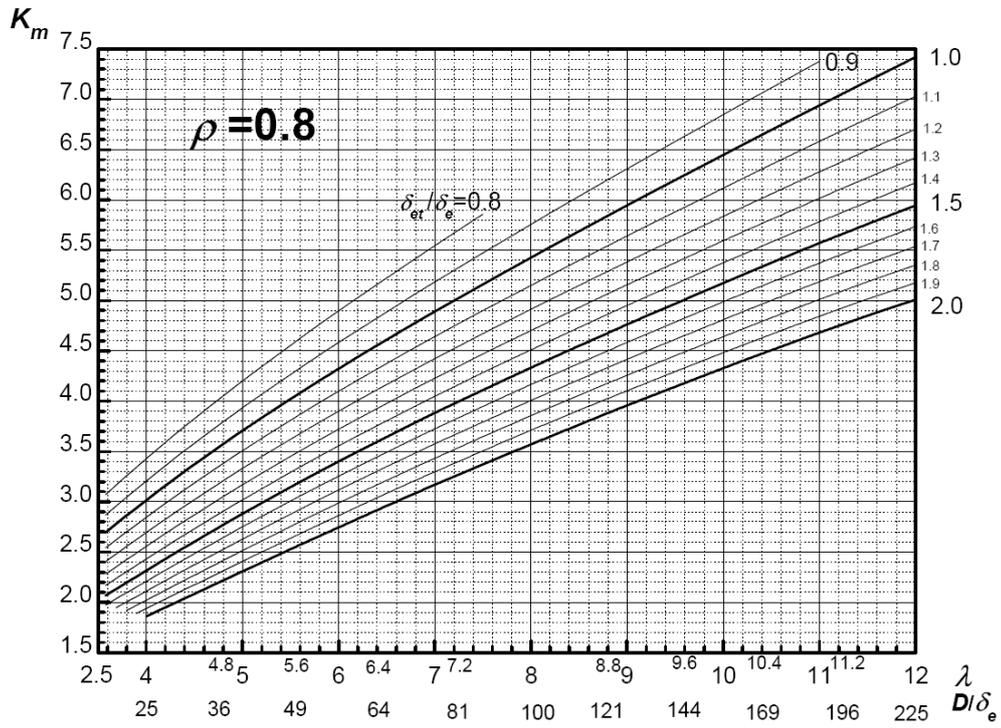


图 6-13 (15)

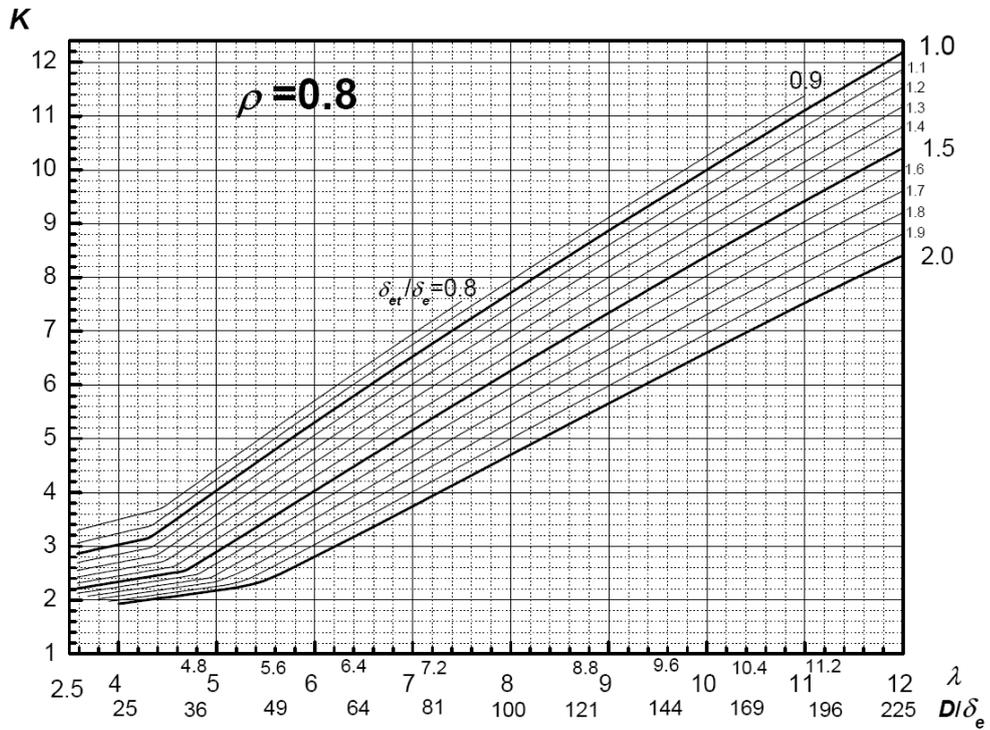


图 6-13 (16)

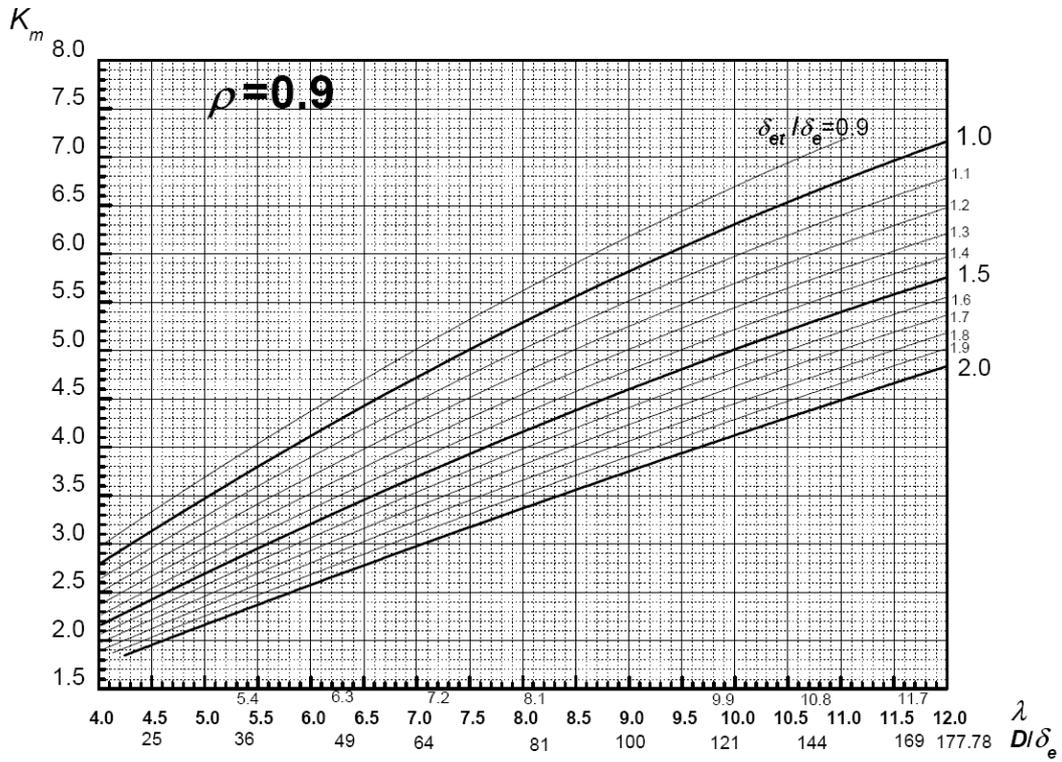


图 6-13 (17)

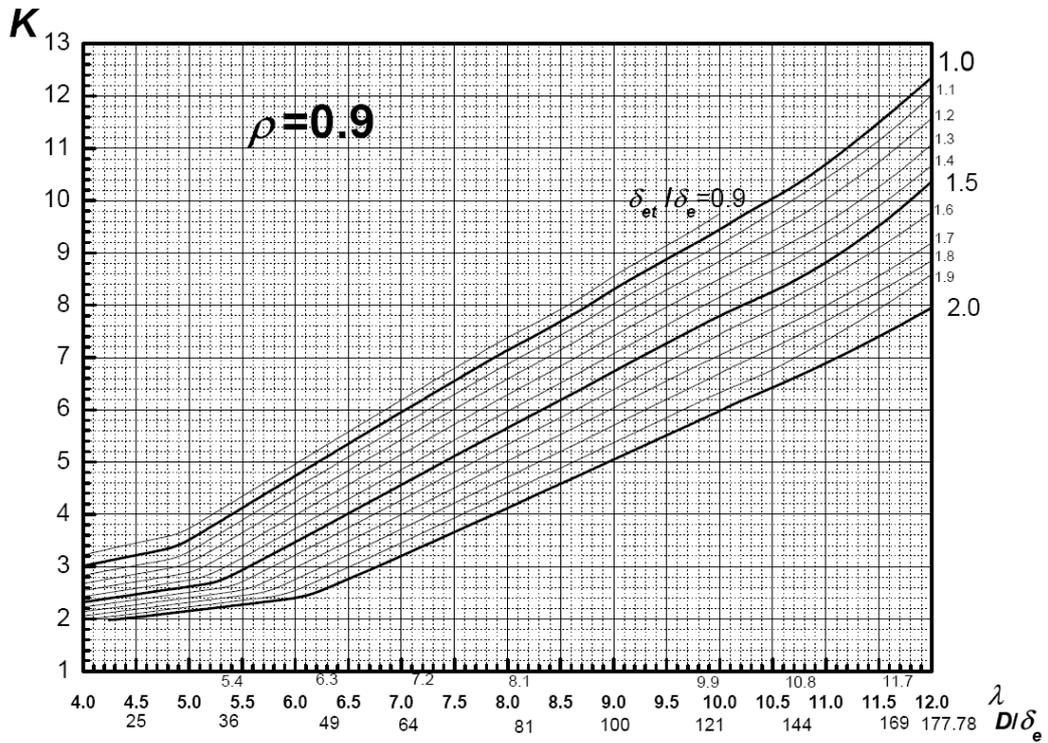


图 6-13 (18)

6.6.3 补强结构尺寸设计

6.6.3.1 设计计算步骤

- a) 根据强度与结构设计初步设定圆筒与接管的初始厚度 $\delta_e^{(0)}$ 、 $\delta_{et}^{(0)}$ ；
 b) 计算圆筒与接管中面半径 R 、 r ：

$$R = D / 2 = (D_i + \delta_e^{(0)}) / 2 + C_s$$

$$r = d / 2 = (d_0 - \delta_{et}^{(0)}) / 2$$

- c) 计算开孔率：

$$\rho = d / D = r / R$$

- d) 计算中间参数：

$$U = [\sigma]^t / p \quad (= R / \delta = r / \delta_t)$$

- e) 求取圆筒与接管的计算厚度：

$$\delta = R / U$$

$$\delta_t = r / U$$

- f) 计算初始补强系数：

$$h^{(0)} = \delta_e^{(0)} / \delta$$

$$g^{(0)} = \delta_{et}^{(0)} / \delta_t$$

- g) 考虑结构设计的合理性，从以下两种可能方式（见表 6-3 中方式一和方式二）中任选一种，求取接管或圆筒所需厚度：

1) 方式一

令 $h = h^{(0)}$ ，由 ρ 、 U 、 h 查曲线图组 6-14，遇中间值采用内插法，得到 g_{\min} （超出曲线的取值范围时，不得外延取值，应改变 $h^{(0)}$ 取值，重新进行计算）。

$$\text{计算：} (\delta_t)_{\min} = g_{\min} \delta_t$$

$$\text{校核：} (\delta_t)_{\min} \leq \delta_{et}^{(0)}$$

2) 方式二

令 $g = g^{(0)}$ ，由 ρ 、 U 、 g 查图组 6-14，遇中间值采用内插法，步骤如下：在插值区间的两开孔率端点处 $\rho_{(1)}$ 、 $\rho_{(2)}$ ，分别计算得到相应的接管中径 $d_{(1)}$ 、 $d_{(2)}$ 和计算厚度 $\delta_{t(1)}$ 、 $\delta_{t(2)}$ ，进而计算相应的接管补强系数：

$$g_{(1)} = \delta_{et}^{(0)} / \delta_{t(1)}$$

$$g_{(2)} = \delta_{et}^{(0)} / \delta_{t(2)}$$

查图，由 $\rho_{(1)}$ 、 U 、 $g_{(1)}$ 得到 $h_{(1)}$ ，由 $\rho_{(2)}$ 、 U 、 $g_{(2)}$ 得到 $h_{(2)}$ ；

再以 ρ 在 $h_{(1)}$ 、 $h_{(2)}$ 之间插值，得到 h_{\min} （超出曲线的取值范围时，不得外延取值，应改变 $g^{(0)}$ 取值，重新进行计算）；

$$\text{计算：} \delta_{\min} = h_{\min} \delta$$

$$\text{校核：} \delta_{\min} \leq \delta_e^{(0)}$$

- h) 当不能满足上述校核条件时，应适当增加接管或圆筒有效厚度，重新计算至满足校核条件。

6.6.3.2 补强结构尺寸设计表（见表 6-3）

表 6-3 圆筒开孔补强结构尺寸设计计算表

| | | | | | |
|---------------------------|-------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| 一、已知条件 | | | | | |
| 设计压力 | MPa | $p=$ | | | |
| 设计温度 | ℃ | | | | |
| | | 圆筒 | | 接管 | |
| 材料许用应力 | MPa | $[\sigma]_s^t =$ | | $[\sigma]_t^t =$ | |
| 内径(外径) | mm | $D_i =$ | | $d_0 =$ | |
| 名义厚度 | mm | $\delta_n =$ | | $\delta_{nt} =$ | |
| 壁厚附加量 | mm | $C_s =$ | | $C_t =$ | |
| 二、参数计算 | | | | | |
| | | 圆筒 | | 接管 | |
| 有效厚度 | mm | $\delta_e^{(0)} =$ | $\delta_n - C_s$ | $\delta_{et}^{(0)} =$ | $\delta_{nt} - C_t$ |
| 中面直径 | mm | $D =$ | $D_i + \delta_e^{(0)} + 2C_s$ | $d =$ | $d_0 - \delta_{et}^{(0)}$ |
| 材料许用应力 | MPa | $[\sigma]^t =$ | $\min([\sigma]_s^t, [\sigma]_t^t)$ | | |
| 中间参数 | MPa | $U =$ | S_m/p | | |
| 计算厚度 | mm | $\delta =$ | R/U | $\delta_t =$ | r/U |
| 补强系数 | | $h^{(0)} =$ | $\delta_e^{(0)}/\delta$ | $g^{(0)} =$ | $\delta_{et}^{(0)}/\delta_t$ |
| 开孔率 | | $\rho =$ | d/D | | |
| 三、查图及结果 | | | | | |
| 向下、上圆整至 | | $\rho_{(1)} =$ | | $\rho_{(2)} =$ | |
| 方式一 令 $h = h^{(0)}$ | 由 ρ, U, h 查曲线得 g | | | | |
| 查图, 由 U, h 查得 g | | $g_{(1)} =$ | $g[U, h, \rho_{(1)}]$ | $g_{(2)} =$ | $g[U, h, \rho_{(2)}]$ |
| 按 ρ 内插得 g_{\min} | | $g_{\min} =$ | | | |
| 需接管最小壁厚 $(\delta)_{\min}$ | mm | $(\delta)_{\min} =$ | $g_{\min} \delta_t$ | | |
| 校核 | | 要求 $\delta_{et}^{(0)} \geq (\delta)_{\min}$ | | | |
| 方式二 令 $g = g^{(0)}$ | 由 ρ, U, g 查曲线得 h | | | | |
| 接管中径 $d_{(n)}$ | mm | $d_{(1)} =$ | $D \rho_{(1)}$ | $d_{(2)} =$ | $D \rho_{(2)}$ |
| 接管计算厚度 $\delta_{(n)}$ | mm | $\delta_{t(1)} =$ | $d_{(1)}/2U$ | $\delta_{t(2)} =$ | $d_{(2)}/2U$ |
| 计算 $g_{(n)}$ | | $g_{(1)} =$ | $\delta_{et}^{(0)}/\delta_{t(1)}$ | $g_{(2)} =$ | $\delta_{et}^{(0)}/\delta_{t(2)}$ |
| 查图, 由 $U, g_{(n)}$ 查得 h | | $h_{(1)} =$ | $h[U, g_{(1)}, \rho_{(1)}]$ | $h_{(2)} =$ | $h[U, g_{(2)}, \rho_{(2)}]$ |
| 按 ρ 内插得 h_{\min} | mm | $h_{\min} =$ | | | |
| 需筒体最小厚度 δ_{\min} | | $\delta_{\min} =$ | $h_{\min} \delta$ | | |
| 校核 | | 要求 $\delta_e^{(0)} \geq \delta_{\min}$ | | | |

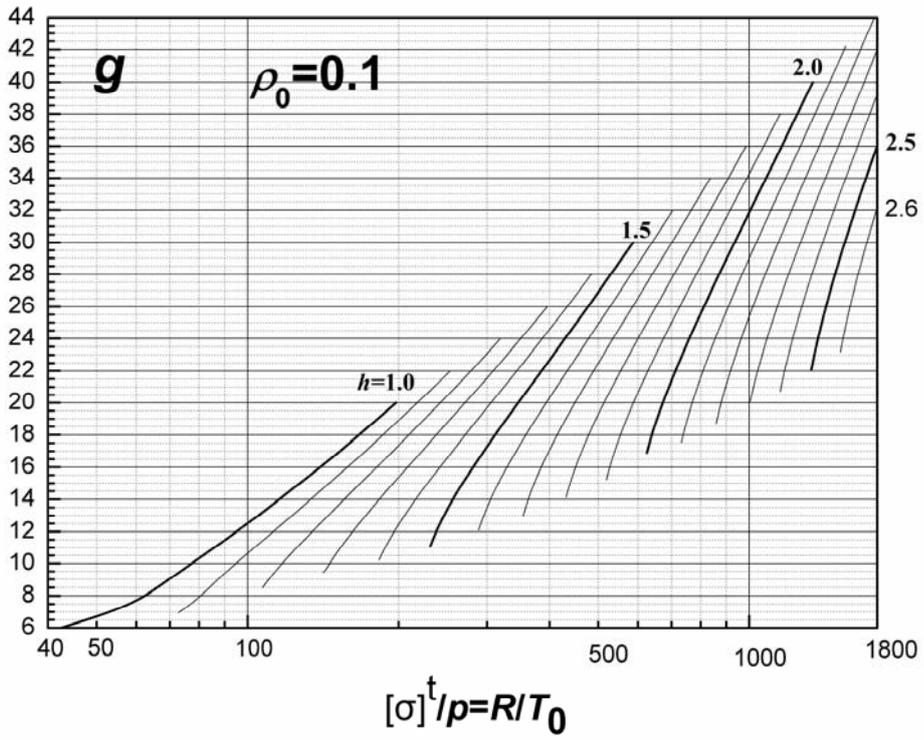


图 6-14 (1)

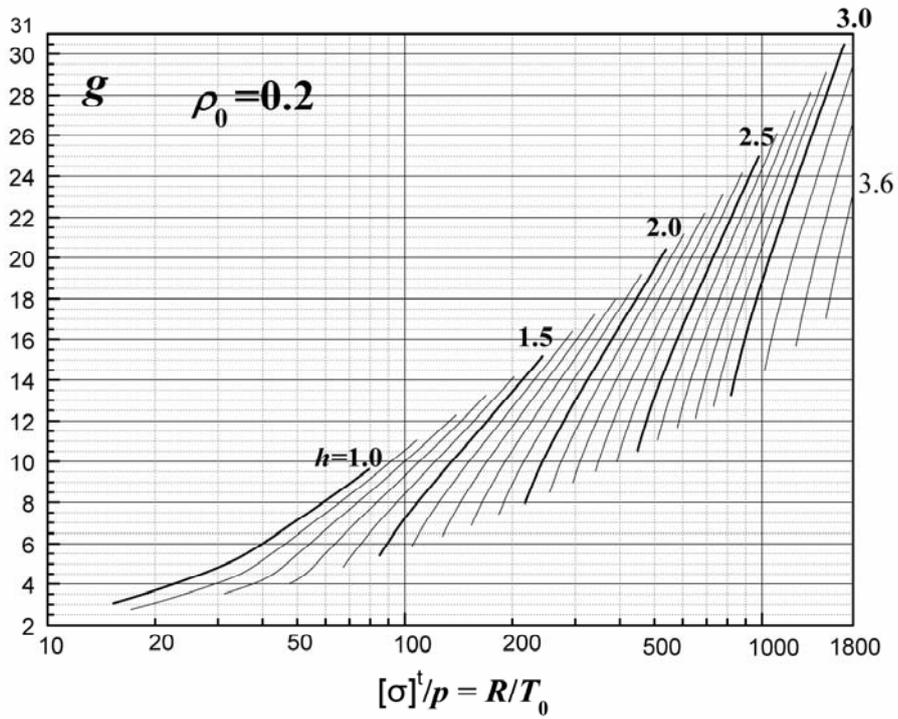


图 6-14 (2)

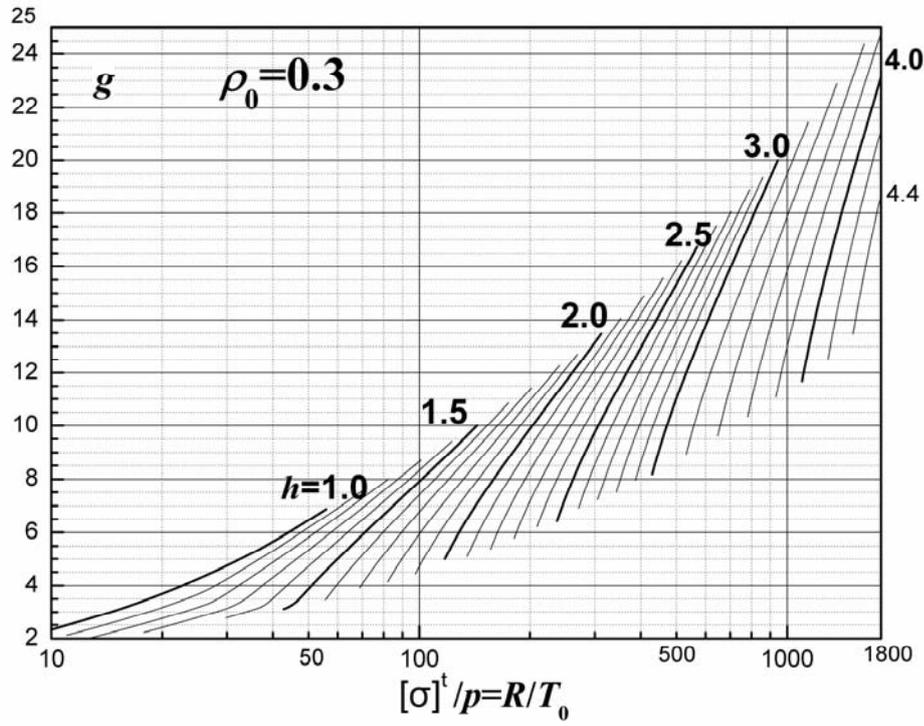


图 6-14 (3)

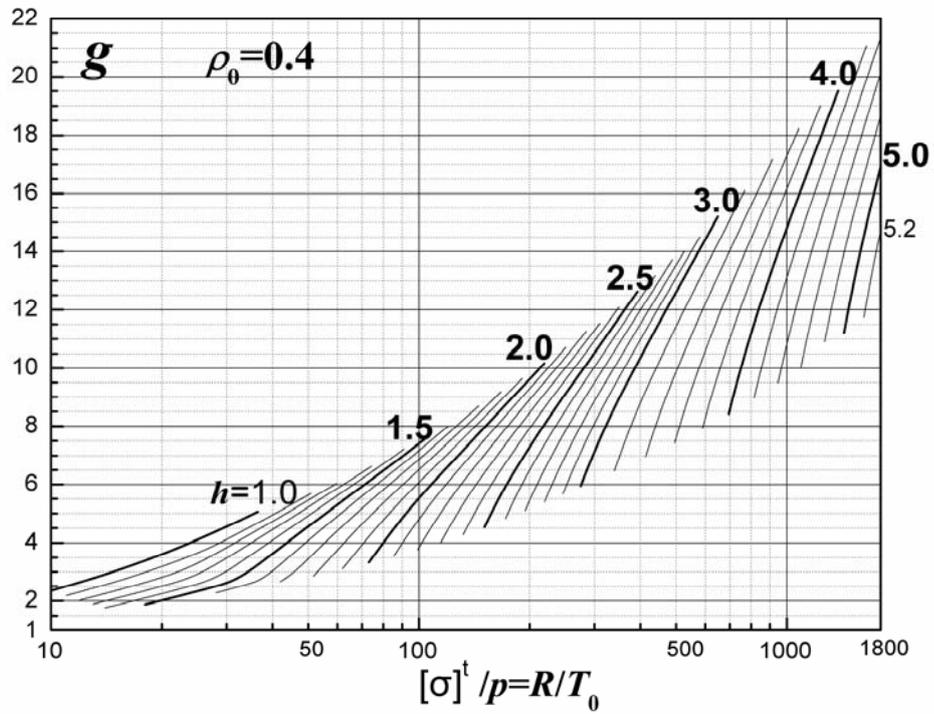


图 6-14 (4)

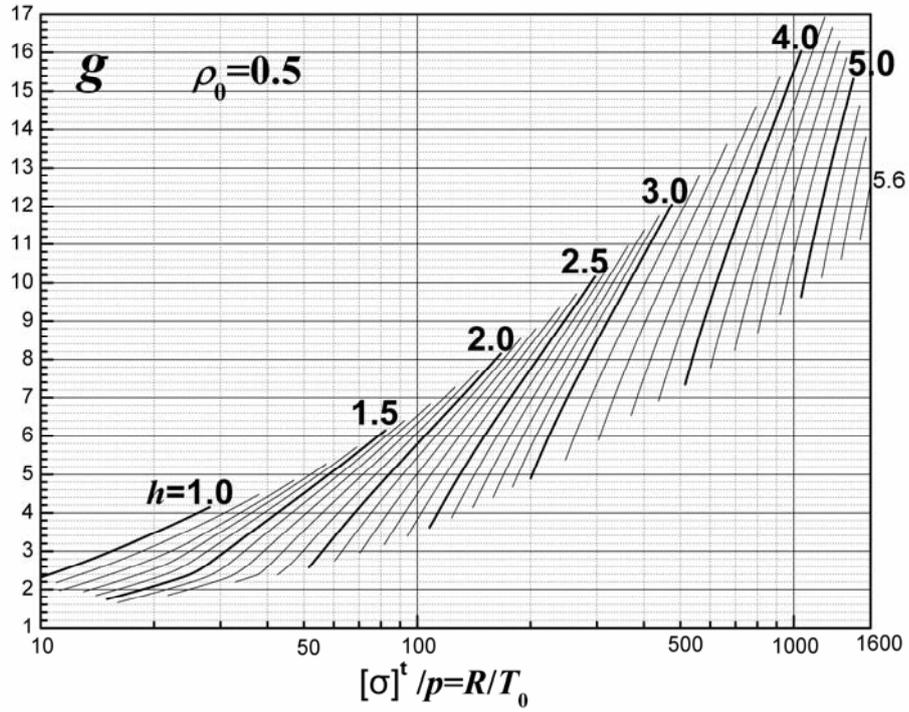


图 6-14 (5)

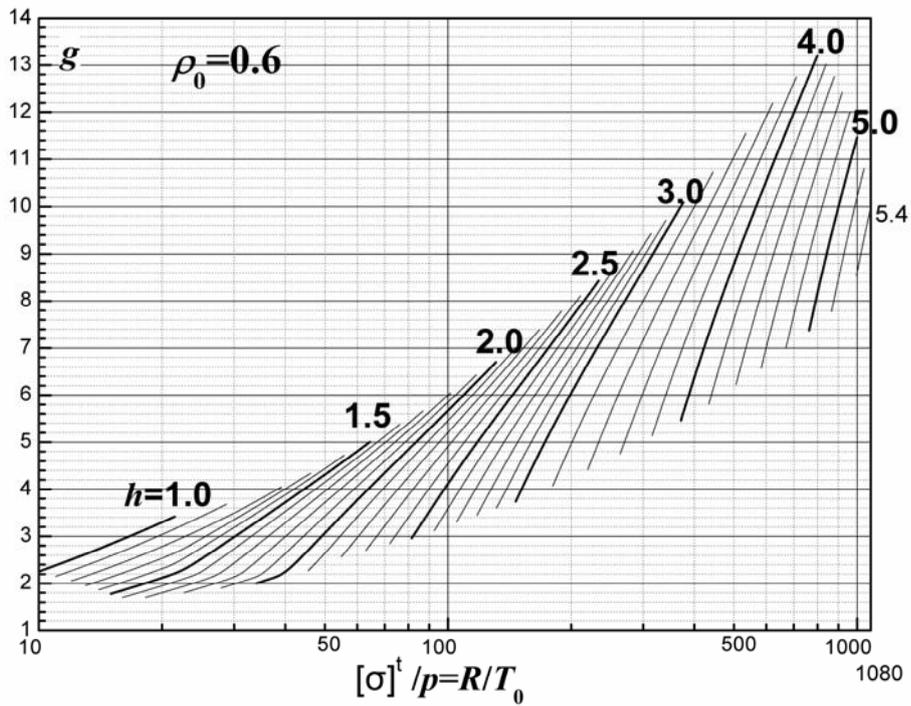


图 6-14 (6)

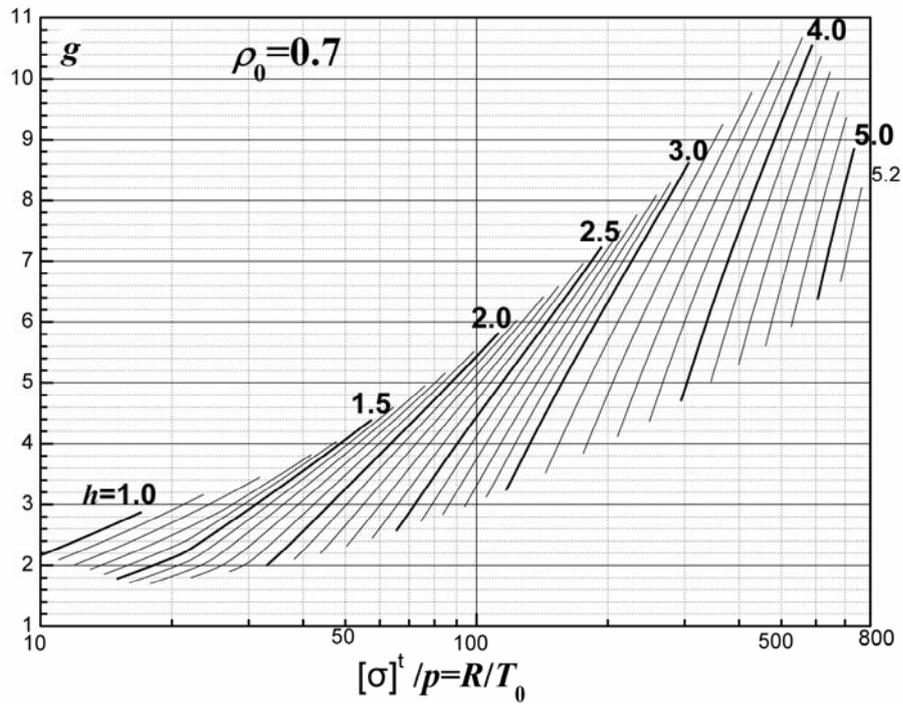


图 6-14 (7)

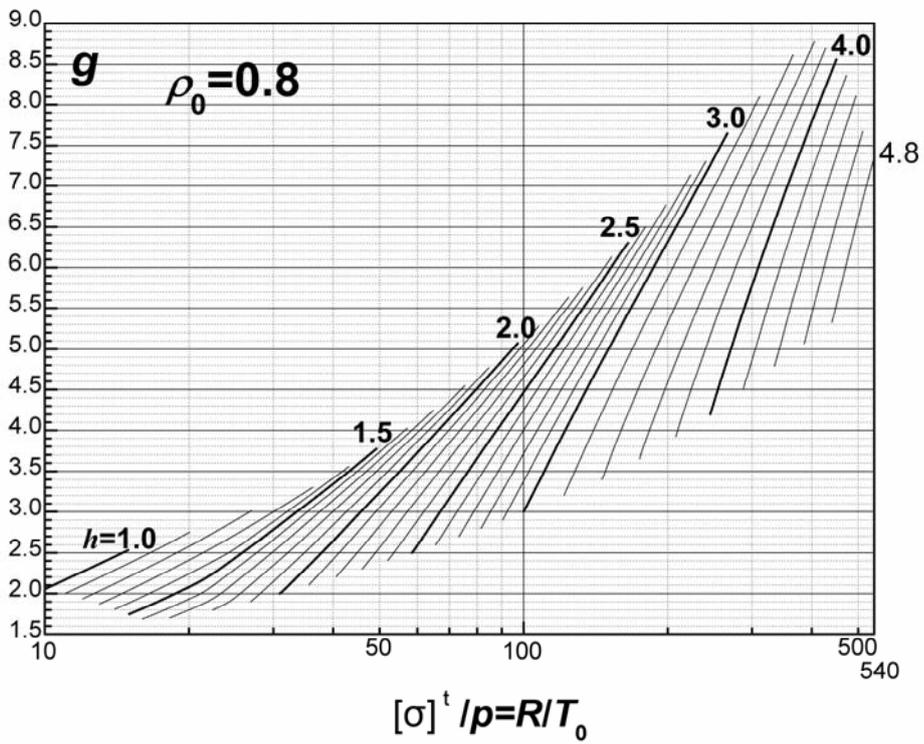


图 6-14 (8)

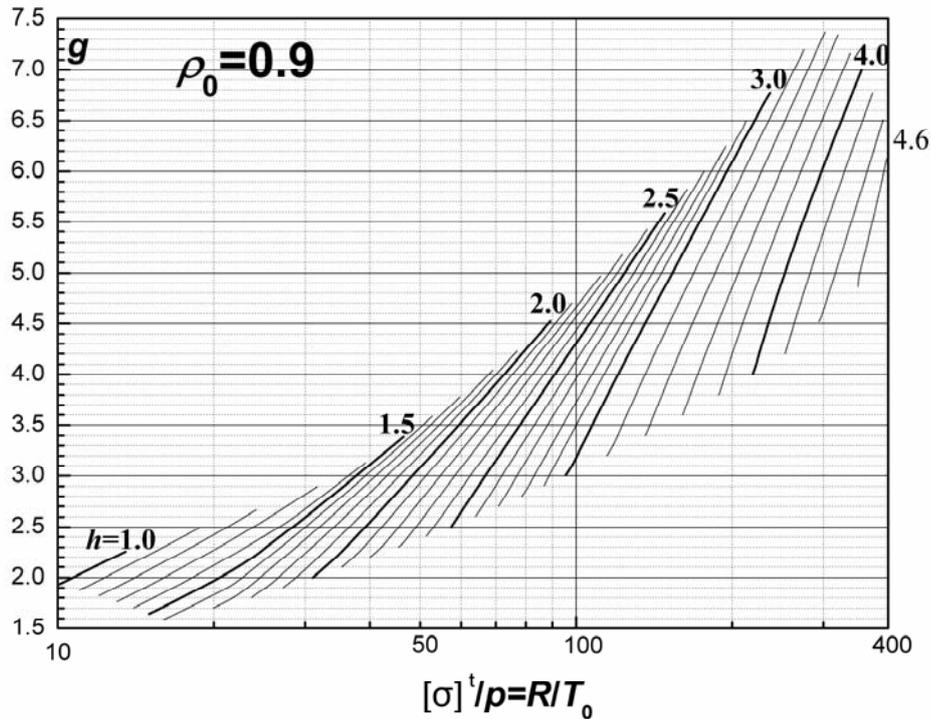


图 6-14 (9)

7 法兰

7.1 总则

7.1.1 本章适用于承受流体静压力及垫片压紧力作用的螺栓法兰连接的设计。当选用 JB/T 4700~4707 标准时，可免除本章计算。

7.1.2 螺栓法兰连接设计包括：

- a) 确定垫片材料、型式及尺寸；
- b) 确定螺栓材料、规格及数量；
- c) 确定法兰材料、密封面型式及结构尺寸；
- d) 进行应力校核，计算中所有尺寸均不包括腐蚀裕量；
- e) 对承受内压的窄面整体法兰和按整体法兰计算的窄面任意式法兰进行刚度校核。

7.1.3 螺栓、法兰的选材应符合 GB 150.2 的规定。

7.1.4 带颈法兰应采用热轧或锻件经机加工制成，加工后的法兰轴线须与原热轧件或锻件的轴线平行。采用钢板制造带颈法兰时，应符合下列要求：

- a) 钢板应经超声检测，无分层缺陷；
- b) 应沿钢板轧制方向切割出板条，经弯制，对焊成为圆环，并使钢板表面成为环的侧面；
- c) 圆环的对接接头应采用全焊透结构；
- d) 圆环对接接头应经焊后热处理及 100%射线或超声检测，合格标准按 JB/T 4700 的规定。

7.1.5 碳素钢或低合金钢制法兰在下列任一情况下应经正火热处理：

- a) 法兰断面厚度大于 50 mm;
- b) 锻制法兰。

7.1.6 用碳素钢或低合金钢板材或型材制造的法兰环对接接头、焊制整体法兰(见图 7-1 g), 应经焊后热处理。

7.1.7 螺栓的公称直径应不小于 M12, 当公称直径大于 M48 时, 应采用细牙螺纹。

7.2 法兰分类

7.2.1 窄面法兰: 垫片的接触面位于法兰螺栓孔包围的圆周范围内, 常用的窄面法兰结构型式见图 7-1、图 7-2, 计算方法按 7.5;

对于特殊结构形式的窄面法兰, 如反向法兰计算方法按 7.6; 筒体端部结构计算按 7.7。

7.2.2 宽面法兰: 垫片的接触面分布于法兰螺栓中心圆的内外两侧, 计算方法按 7.8。

7.3 术语、定义和符号

7.3.1 GB 150.1 通用要求中的术语和定义适用于本章。

7.3.2 符号

A_a ——预紧状态下, 需要的螺栓总截面积, mm^2 ;

A_b ——实际使用的螺栓总截面积, mm^2 ;

A_m ——需要的螺栓总截面积, mm^2 ;

A_p ——操作状态下, 需要的螺栓总截面积, mm^2 ;

b ——垫片有效密封宽度, mm;

b_o ——垫片基本密封宽度(见表 7-1), mm;

D_b ——螺栓中心圆直径, mm;

D_G ——垫片压紧力作用中心圆直径(见图 7-1), mm;

D_i ——法兰或筒体端部结构内直径(应扣除腐蚀裕量), mm;

D_{i1} ——法兰计算直径, mm;

D_o ——法兰外直径(对使用活节螺栓槽形螺栓孔的法兰, 则为槽孔底部圆直径。对筒体端部结构, 则为筒体端部外径), mm;

D_2 ——筒体端部密封面外直径, mm;

d_1 ——参数, 见式 7-16 或表 7-5, mm^3 ;

d_B ——螺栓公称直径, mm;

d_b ——螺栓孔直径, mm;

E ——法兰材料的弹性模量(见 GB 150.2), MPa;

e ——参数, 见式 (7-16) 或表 7-5, mm^{-1} ;

F ——内压引起的总轴向力, N;

f ——整体法兰颈部应力校正系数(法兰颈部小端应力与大端应力的比值);

F_a ——预紧状态下, 需要的最小垫片压紧力, N;

F_D ——内压引起的作用于法兰内径截面上的轴向力, N;

F_G ——窄面法兰垫片压紧力, 包括 F_a 、 F_p 、 W (预紧)三种情况, N;

F_L ——整体法兰系数, 由图 7-3、表 7-8 查得或按表 7-7 计算;

F_L ——带颈松式法兰系数, 由图 7-5 查得或按表 7-7 计算;

F_p ——操作状态下, 需要的最小垫片压紧力, N;

- F_T ——内压引起的总轴向力 F 与 F_D 之差, N;
 h ——法兰颈部高度, 对筒体端部结构为端部圆柱段的高度, mm;
 h_0 ——参数, 见式 (7-16) 或表 7-5, mm;
 J ——法兰刚度指数;
 K ——法兰外径与内径的比值;
 \widehat{L} ——相邻螺栓间距 (见表 7-3), mm;
 L_A ——螺栓中心至法兰颈部 (或焊缝) 与法兰背面交点的径向距离 (见表 7-3), mm;
 L_D ——螺栓中心至 F_D 作用位置处的径向距离 (见图 7-1), mm;
 L_e ——螺栓中心至法兰外径处的径向距离 (见表 7-3), mm;
 L_G ——螺栓中心至 F_G 作用位置处的径向距离 (见图 7-1), mm;
 L_T ——螺栓中心至 F_T 作用位置处的径向距离 (见图 7-1), mm;
 M ——作用于筒体端部纵向截面的弯矩, N·mm;
 m ——垫片系数, (见表 7-2);
 M_a ——法兰预紧力矩, N·mm;
 M_0 ——法兰设计力矩, N·mm;
 M_p ——法兰操作力矩, N·mm;
 N ——垫片接触宽度, (见表 7-1), mm;
 n ——螺栓数量;
 p_c ——计算压力, MPa;
 T ——与 K 相关系数, 由图 7-8 或表 7-9 查得;
 U ——与 K 相关系数, 由图 7-8 或表 7-9 查得;
 V_1 ——整体法兰系数, 由图 7-4 查得或按表 7-7 和表 7-8 计算;
 V_L ——带颈松式法兰系数, 由图 7-6 查得或按表 7-7 计算;
 W ——螺栓设计载荷, N;
 W_a ——预紧状态下, 需要的最小螺栓载荷 (即预紧状态下, 需要的最小垫片压紧力 F_a), N;
 W_p ——操作状态下, 需要的最小螺栓载荷, N;
 Y ——与 K 相关系数, 由表 7-9 或图 7-8 查得;
 y ——垫片比压力, 由表 7-2 查得, MPa;
 Z ——与 K 相关系数, 由表 7-9 或图 7-8 查得;
 Z_g ——筒体端部纵向截面的抗弯截面模量, mm³;
 β ——系数, 按表 7-5 计算;
 γ ——系数, 按表 7-5 计算;
 δ_f ——法兰有效厚度, mm;
 δ_0 ——法兰颈部小端有效厚度, mm;
 δ_1 ——法兰颈部大端有效厚度, mm;
 η ——系数, 按表 7-5 计算;
 λ ——系数, 见式 (7-16) 或表 7-5;
 σ_H ——法兰颈部轴向应力, MPa;
 σ_R ——法兰环的径向应力, MPa;

- σ_T ——法兰环的切向应力，MPa；
- $[\sigma]_b$ ——室温下螺栓材料的许用应力（按 GB 150.2），MPa；
- $[\sigma]_b^t$ ——设计温度下螺栓材料的许用应力（按 GB 150.2），MPa；
- $[\sigma]_f$ ——室温下法兰材料的许用应力（按 GB 150.2），MPa；
- $[\sigma]_f^t$ ——设计温度下法兰材料的许用应力（按 GB 150.2），MPa；
- $[\sigma]_n$ ——室温下圆筒材料的许用应力（按 GB 150.2），MPa；
- $[\sigma]_n^t$ ——设计温度下圆筒材料的许用应力（按 GB 150.2），MPa；
- τ ——切（剪）应力，MPa；
- ψ ——系数，按表 7-5 计算。

7.4 法兰型式

7.4.1 法兰按其整体性程度，分为三种型式（见图 7-1）。

7.4.2 松式法兰：法兰未能有效地与容器或接管连接成一整体，不具有整体式连接的同等结构强度。

松式法兰及其载荷作用位置见图 7-1 a-1)、b-1)，典型的松式法兰——活套法兰结构如图 7-1 a-1) 不带颈的型式（即实线部分），其计算按表 7-6 进行。对带颈的松式法兰可按整体法兰（表 7-5）计算，但其中系数 V_1 、 F_1 应以 V_L 、 F_L 代替， f 取 1.0。

7.4.3 整体法兰：法兰、法兰颈部及容器或接管三者能有效地连接成一整体结构。

各种型式整体法兰及载荷作用位置见图 7-1 c)、d)、e)、f)、g)，其计算按表 7-5 进行。

7.4.4 任意式法兰，如图 7-1h)、i)、j)、k) 的焊接法兰，其计算按整体法兰（表 7-5），但为了简便，当满足下列条件时也可按活套法兰（表 7-6）计算：

- a) $\delta_0 \leq 15\text{mm}$ ， $D_1/\delta_0 \leq 300$ ；
- b) $p \leq 2\text{MPa}$ ；
- c) 设计温度小于或等于 370°C 。

松式法兰

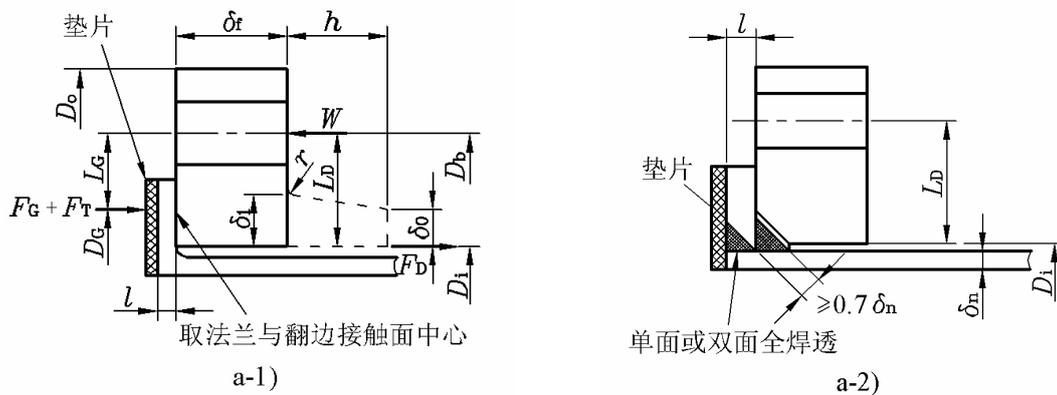
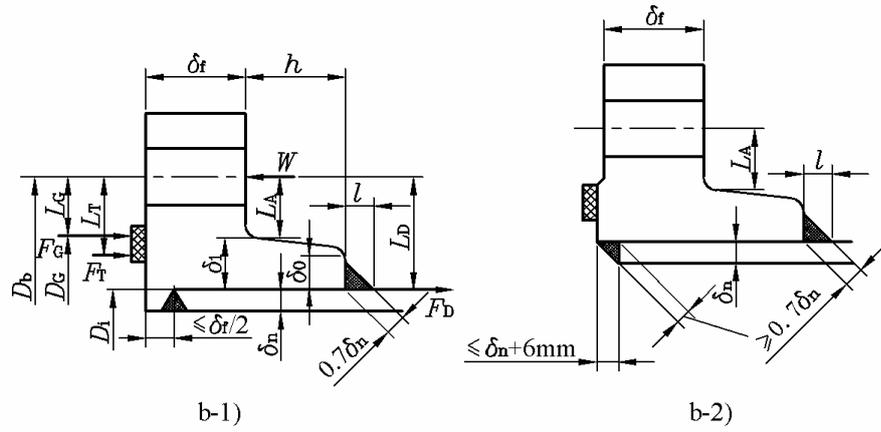


图 7-1 法兰型式



整体法兰

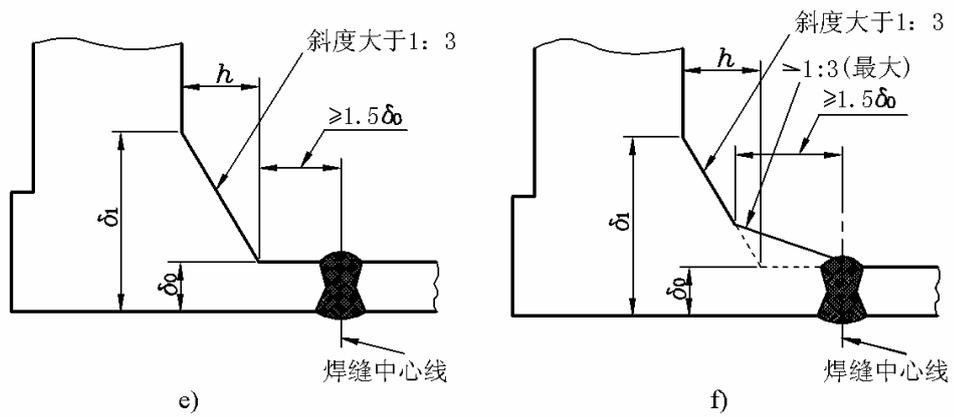
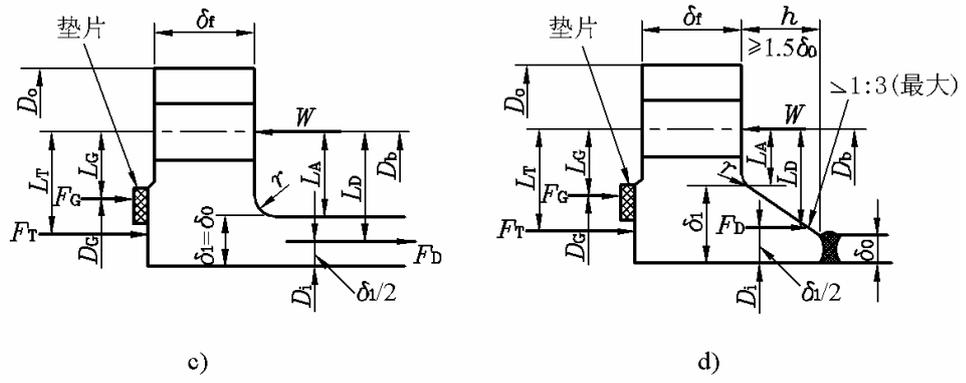
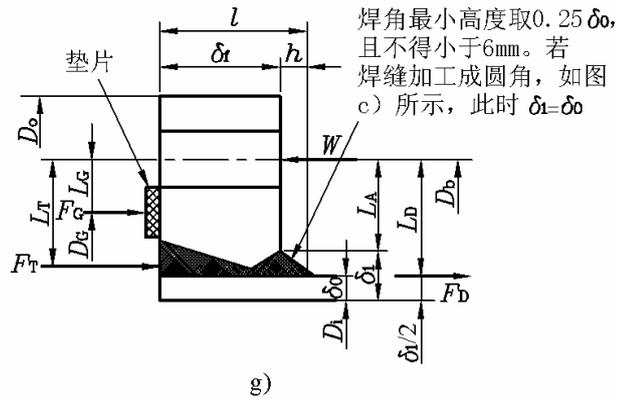
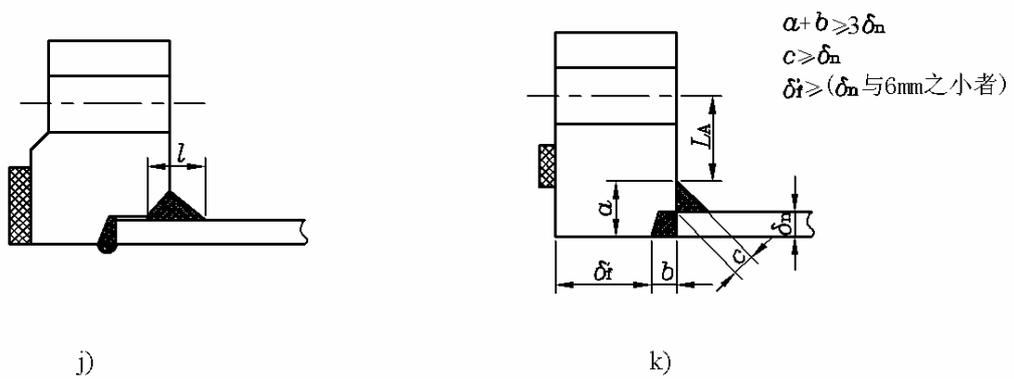
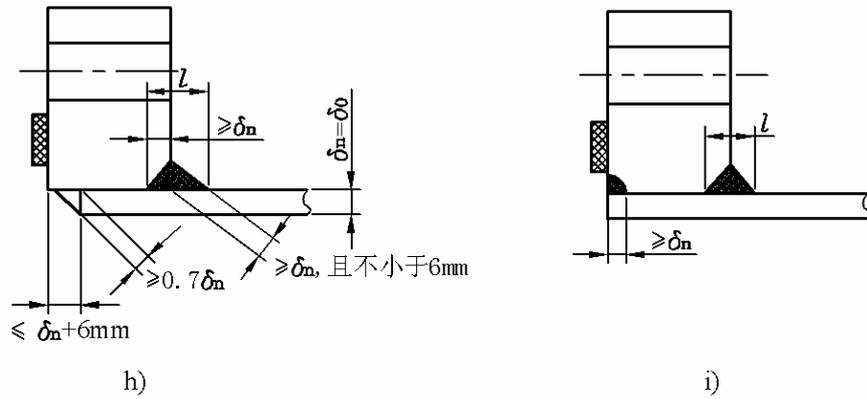


图 7-1 (续)

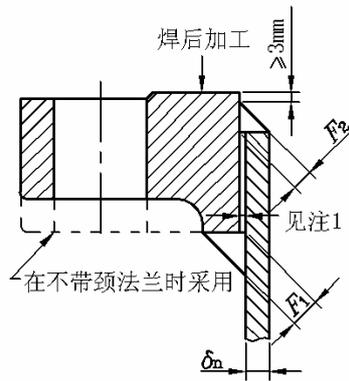


任意式法兰



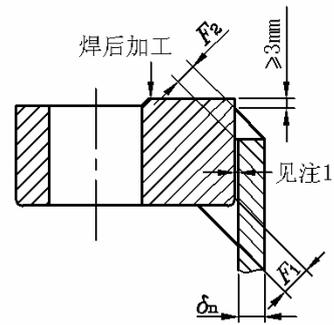
- 注：1.带颈松式法兰，当颈部斜度不大于 6° 时，计算中取 $\delta_1 = \delta_0$ 。
2.带颈整体法兰，当颈部斜度大于 $1:3$ 时，应采用图中e)、f)所示结构。
3.圆角半径 $r \geq 0.25 \delta_1$ ，且不小于 4.5mm 。
4.榫槽、凹凸面及平面密封面的台肩高度不包括在法兰有效厚度内。

图 7-1 (续)



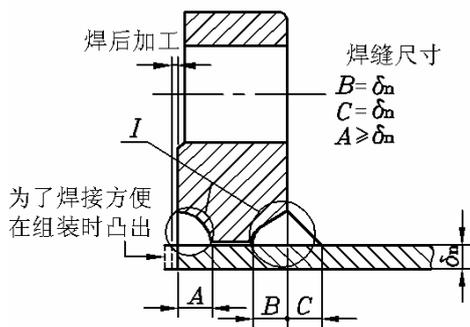
$F_2 \geq 0.75 \delta_n$
 $F_1 = 1.0 \delta_n$, 但不大于16mm

a-1) 带颈平焊法兰

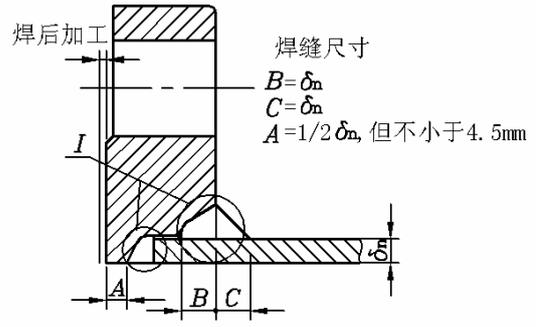


$F_2 \geq 0.7 \delta_n$
 $F_1 = 1.0 \delta_n$, 但不大于10mm

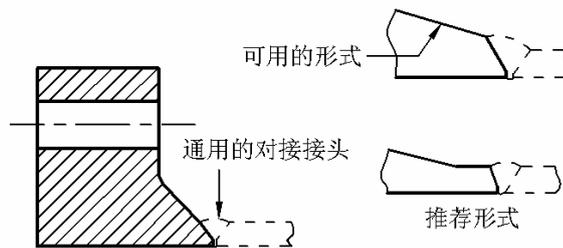
a-2) 平焊法兰



b-1) 正面和反面焊接的法兰

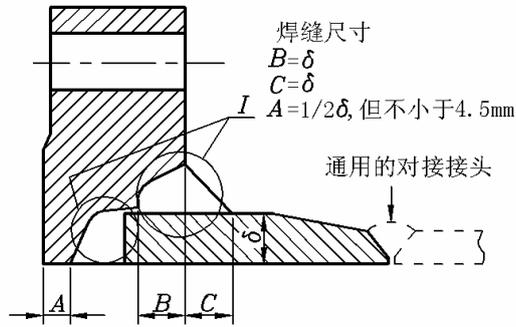


b-2) 内侧和背面焊接的法兰

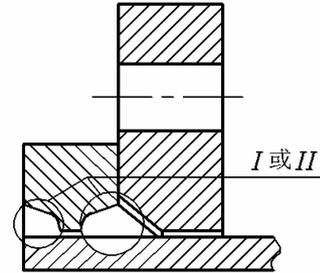


c-1) 对焊法兰

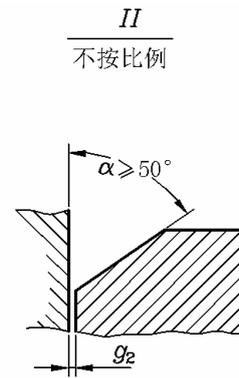
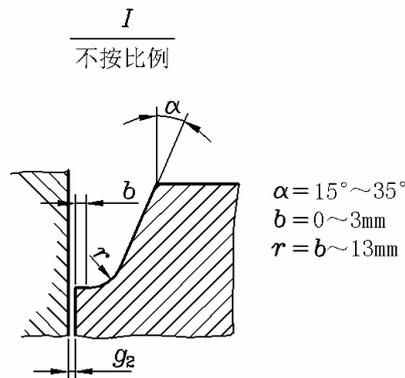
图 7-2 法兰结构



c-2) 对焊法兰(由板材制成)



c-3) 焊环活套法兰



注：1.图 a-1)、a-2)、b-1)、b-2) 法兰内径与圆筒外径间的间隙不得大于 3 mm，且两侧径向间隙之和不得大于 4.5mm。

2. g_2 的最大和最小尺寸根据施焊焊接工艺（例如焊条种类和尺寸）及施焊位置确定。 $g_2 \leq 3\text{mm}$ ，且两侧径向间隙之和不得大于 4.5mm。

图 7-2 (续)

表 7-1 垫片基本密封宽度

| 序号 | 压紧面形状(简图) | 垫片基本密封宽度 b_0 | |
|-----------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| | | I | II |
| 1a | | $\frac{N}{2}$ | $\frac{N}{2}$ |
| 1b | | | |
| 1c | | $\frac{\omega + \delta_g}{2}$ $\left(\frac{\omega + N}{4} \text{最大}\right)$ | $\frac{\omega + \delta_g}{2}$ $\left(\frac{\omega + N}{4} \text{最大}\right)$ |
| 1d | | | |
| 2 | | $\frac{\omega + N}{4}$ | $\frac{\omega + 3N}{8}$ |
| 3 | | $\frac{N}{4}$ | $\frac{3N}{8}$ |
| 4 ¹⁾ | | $\frac{3N}{8}$ | $\frac{7N}{16}$ |
| 5 ¹⁾ | | $\frac{N}{4}$ | $\frac{3N}{8}$ |
| 6 | | $\frac{\omega}{8}$ | |

注：1) 当锯齿深度不超过 0.4mm，齿距不超过 0.8mm 时，应采用 1b 或 1d 的压紧面形状。

表 7-2 常用垫片特性参数

| 垫片材料 | | 垫片系数 $m^1)$ | 比压力 $y^1)$ MPa | 简图 | 压紧面形状 (见表 7-1) | 类别 (见表 7-1) |
|--------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------|----|-------------------|---------------------------------------------------------------|
| 无织物或含少量石棉纤维的合成橡胶; 肖氏硬度低于 75 肖氏硬度大于等于 75 | | 0.50 1.00 | 0 1.4 | | 1(a、b、c、d) 4、5 | II |
| 具有适当加固物的石棉(石棉橡胶板) | | 2.00 2.75 3.50 | 11 25.5 44.8 | | | |
| 内有棉纤维的橡胶 | | 1.25 | 2.8 | | | |
| 内有石棉纤维的橡胶, 具有金属加强丝或不具有金属加强丝 | | | | | | |
| 3 层 | | 2.25 | 15.2 | | | |
| 2 层 | | 2.50 | 20 | | | |
| 1 层 | | 2.75 | 25.5 | | | |
| 植物纤维 | | 1.75 | 7.6 | | 1(a、b、c、d) 4、5 | |
| 内填石棉缠绕式金属 | 碳钢 不锈钢或蒙乃尔 | 2.50 3.00 | 69 69 | | 1(a、b) | |
| 波纹金属板类壳内包石棉或波纹金属板内包石棉 | 软铝 软铜或黄铜 铁或软钢 蒙乃尔或 4%~6%铬钢 不锈钢 | 2.50 2.75 3.00 3.25 3.50 | 20 26 31 38 44.8 | | | |
| 波纹金属板 | 软铝 软铜或黄铜 铁或软钢 蒙乃尔或 4%~6%铬钢 不锈钢 | 2.75 3.00 3.25 3.50 3.75 | 25.5 31 38 44.8 52.4 | | | |
| 平金属板内包石棉 | 软铝 软铜或黄铜 铁或软钢 蒙乃尔 4%~6%铬钢 不锈钢 | 3.25 3.50 3.75 3.50 3.75 3.75 | 38 44.8 52.4 55.2 62.1 62.1 | | | 1a、1b、1c ²⁾ 、 1d ²⁾ 、2 ²⁾ |
| 槽形金属 | 软铝 软铜或黄铜 铁或软钢 蒙乃尔或 4%~6%铬钢 不锈钢 | 3.25 3.50 3.75 3.75 4.25 | 38 44.8 52.4 62.1 69.6 | | | 1(a、b、c、d)、 2、3 |
| 复合柔性石墨波齿金属板 | 碳钢 不锈钢 | 3.0 | 50 | | 1(a、b) | |

表 7-2 (续)

| 垫片材料 | | 垫片系数 $m^{1)}$ | 比压力 $y^{1)}$ MPa | 简图 | 压紧面形状 (见表 7-1) | 类别 (见表 7-1) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|------------------|------------------------|----|-----------------------|----------------|
| 金属平板 | 软铝 | 4.00 | 60.7 | | 1(a、b、c、d) 2、3、4、5 | I |
| | 软铜或黄铜 | 4.75 | 89.6 | | | |
| | 铁或软钢 | 5.50 | 124.1 | | | |
| | 蒙乃尔或 4%~6%铬钢 | 6.00 | 150.3 | | | |
| | 不锈钢 | 6.50 | 179.3 | | | |
| 金属环 | 铁或软钢 | 5.50 | 124.1 | | 6 | |
| | 蒙乃尔或 4%~6%铬钢 | 6.00 | 150.3 | | | |
| | 不锈钢 | 6.50 | 179.3 | | | |
| <p>注：1) 本表所列各种垫片的 m、y 值及适用的压紧面形状，均属推荐性资料。采用本表推荐的垫片参数 (m、y) 并按本章规定设计的法兰，在一般使用条件下，通常能得到比较满意的使用效果。但在使用条件特别苛刻的场合，如在诸如氟化物介质中使用的垫片，其参数 m、y，应根据成熟的使用经验谨慎确定。</p> <p>2) 垫片表面的搭接接头不应位于凸台侧。</p> | | | | | | |

7.5 窄面法兰

7.5.1 垫片

7.5.1.1 各种常用垫片的特性参数 (m 、 y) 按表 7-2 查取。

7.5.1.2 垫片有效密封宽度

选定垫片尺寸，按表 7-1 确定垫片接触宽度 N 和基本密封宽度 b_0 ，并按以下规定计算垫片有效密封宽度 b ：

当 $b_0 \leq 6.4\text{mm}$ 时， $b = b_0$ ；

当 $b_0 > 6.4\text{mm}$ 时， $b = 2.53\sqrt{b_0}$ 。

7.5.1.3 垫片压紧力作用中心圆直径

垫片压紧力作用中心圆直径按下列规定确定：

- a) 对于图 7-1 a-1)、a-2) 所示活套法兰，垫片压紧力作用中心圆直径 D_G 即是法兰与翻边接触面的平均直径。
- b) 对于其他型式法兰，则按下述规定计算 D_G ：
 当 $b_0 \leq 6.4\text{mm}$ 时， D_G 等于垫片接触的平均直径；
 当 $b_0 > 6.4\text{mm}$ 时， D_G 等于垫片接触的外径减去 $2b$ ；
- c) 对筒体端部结构， D_G 等于密封面平均直径。

7.5.1.4 垫片压紧力

垫片压紧力按下列规定计算：

- a) 预紧状态下需要的最小垫片压紧力按式 (7-1) 计算：

$$F_a = 3.14D_Gby \dots\dots\dots (7-1)$$

- b) 操作状态下需要的最小垫片压紧力按式 (7-2) 计算：

$$F_p = 6.28D_G b m p_c \dots\dots\dots (7-2)$$

7.5.1.5 垫片宽度

垫片在预紧状态下受到最大螺栓载荷的作用，当压紧过度将失去密封性能。垫片应有足够的宽度，其值可按经验确定。

7.5.2 螺栓

7.5.2.1 螺栓的布置

螺栓的布置一般按下列规定确定：

- a) 法兰径向尺寸 L_A 、 L_e 及螺栓间距 \hat{L} 的最小值可按表 7-3 选取；
- b) 螺栓最大间距 \hat{L}_{max} 不宜超过式 (7-3) 的计算值：

$$\hat{L}_{max} = 2d_B + \frac{6\delta_f}{m + 0.5} \dots\dots\dots (7-3)$$

表 7-3 L_A 、 L_e 、 \hat{L} 的最小值

| 螺栓公称 直径 d_B | L_A | | L_e | \hat{L} | 螺栓公称 直径 d_B | L_A | | L_e | \hat{L} |
|------------------|-------|-----|-------|-----------|------------------|-------|-----|-------|-----------|
| | A 组 | B 组 | | | | A 组 | B 组 | | |
| 12 | 20 | 16 | 16 | 32 | 30 | 44 | 35 | 30 | 70 |
| 16 | 24 | 20 | 18 | 38 | 36 | 48 | 38 | 36 | 80 |
| 20 | 30 | 24 | 20 | 46 | 42 | 56 | | 42 | 90 |
| 22 | 32 | 26 | 24 | 52 | 48 | 60 | | 48 | 102 |
| 24 | 34 | 27 | 26 | 56 | 56 | 70 | | 55 | 116 |
| 27 | 38 | 30 | 28 | 62 | | | | | |

注：1、表中 A 组数据适用于 a) 图所示的带颈法兰结构。表中 B 组数据适用于 b) 图所示的焊制法兰结构。
2、对图 7-1 中 a-1)、a-2) 所示的活套法兰，其径向尺寸 L_D 也应满足 A 组 L_A 最小尺寸的要求。

7.5.2.2 螺栓载荷

螺栓载荷按下列规定计算：

- a) 预紧状态下需要的最小螺栓载荷按式 (7-4) 计算：

$$W_a = F_a \dots\dots\dots (7-4)$$

- b) 操作状态下需要的最小螺栓载荷计算：

内压引起的总轴向力 F ，按式 (7-5) 计算：

$$F = 0.785D_G^2 p_c \dots\dots\dots (7-5)$$

最小螺栓载荷按式 (7-6) 计算：

$$W_p = F + F_p \dots\dots\dots (7-6)$$

注：对于类似 U 形管式换热器管板两侧成对法兰的设计中，由于两侧的压力和温度及所用垫片可能不同，因此在螺栓的设计中应兼顾两侧的条件，要求以较大的螺栓载荷和较高的设计温度进行设计，且对法兰设计力矩应以此为基础进行计算。

7.5.2.3 螺栓面积

螺栓面积按下列规定确定：

a) 预紧状态下需要的最小螺栓面积按式 (7-7) 计算：

$$A_a = \frac{W_a}{[\sigma]_b} \dots\dots\dots (7-7)$$

b) 操作状态下需要的最小螺栓面积按式 (7-8) 计算：

$$A_p = \frac{W_p}{[\sigma]_b^t} \dots\dots\dots (7-8)$$

c) 需要的螺栓面积 A_m 取 A_a 与 A_p 中的大值；

d) 实际螺栓面积 A_b 应不小于需要的螺栓面积 A_m ；

e) 最小螺栓截面积以螺纹小径及无螺纹部分的最小直径分别计算，取小值。

7.5.2.4 螺栓设计载荷

螺栓设计载荷按下列规定确定：

a) 预紧状态螺栓设计载荷按式 (7-9) 计算：

$$W = \frac{A_m + A_b}{2} [\sigma]_b \dots\dots\dots (7-9)$$

b) 操作状态螺栓设计载荷按式 (7-10) 计算：

$$W = W_p \dots\dots\dots (7-10)$$

7.5.3 法兰

7.5.3.1 法兰力矩

法兰力矩按下列规定计算：

a) 预紧状态的法兰力矩按式 (7-11) 计算：

$$M_a = \frac{A_m + A_b}{2} [\sigma]_b L_G \dots\dots\dots (7-11)$$

b) 操作状态的法兰力矩计算：

作用于法兰内径截面上的内压引起的轴向力 F_D ，按式 (7-12) 计算：

$$F_D = 0.785 D_i^2 p_c \dots\dots\dots (7-12)$$

内压引起的总轴向力 F 与内径截面上的轴向力 F_D 之差 F_T ，按式 (7-13) 计算：

$$F_T = F - F_D \dots\dots\dots (7-13)$$

法兰力矩按式 (7-14) 计算：

$$M_p = F_D L_D + F_T L_T + F_G L_G \dots\dots\dots (7-14)$$

式中： L_D 、 L_T 、 L_G 按表 7-4 计算；

表 7-4 法兰力矩的力臂

单位为毫

米

| | L_D | L_T | L_G |
|-----------------------------------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------|
| 整体法兰：图 7-1 中 c)、d)、e)、f)、g) | | | |
| 任意式法兰（按整体法兰计算时）： 图 7-1 中 h)、i)、j)、k) | $L_A + 0.5\delta_1$ | $\frac{L_A + \delta_1 + L_G}{2}$ | $\frac{D_b - D_G}{2}$ |
| 松式法兰：图 7-1 中 b-1)、b-2) | | | |
| 任意式法兰（按活套法兰计算时）： 图 7-1 中 h)、i)、j)、k) | $\frac{D_b - D_i}{2}$ | $\frac{L_D + L_G}{2}$ | $\frac{D_b - D_G}{2}$ |
| 活套法兰：图 7-1 中 a-1)、a-2) | $\frac{D_b - D_i}{2}$ | $\frac{D_b - D_G}{2}$ | $\frac{D_b - D_G}{2}$ |

7.5.3.2 法兰设计力矩

法兰设计力矩取式 (7-15) 大值：

$$M_o = \begin{cases} M_a \frac{[\sigma]_f^t}{[\sigma]_f} \\ M_p \end{cases} \dots\dots\dots (7-15)$$

7.5.3.3 法兰应力

7.5.3.3.1 整体法兰、带颈松式法兰以及按整体法兰计算的任意式法兰应力按下列规定计算：

a) 轴向应力按式 (7-16) 计算：

$$\sigma_H = \frac{fM_o}{\lambda\delta_1^2 D_i} \dots\dots\dots (7-16)$$

式中：

$$\lambda = \frac{\delta_f e + 1}{T} + \frac{\delta_f^3}{d_1}$$

$$e = \frac{F_1}{h_o}$$

$$h_o = \sqrt{D_i \delta_o}$$

$$d_1 = \frac{U}{V_1} h_0 \delta_0^2$$

当 $D_i < 20\delta_1$ 时, 以 D_{i1} 代替 D_i ;

对带颈松式法兰及 $f < 1$ 的整体法兰, $D_{i1} = D_i + \delta_1$; 对 $f \geq 1$ 的整体法兰, $D_{i1} = D_i + \delta_0$;

系数 T 、 U 根据参数 K 由图 7-8 或表 7-9 查得, 或按图 7-8 所给公式计算;

整体法兰系数 F_1 由表 7-8 或图 7-3 查得, 或按表 7-7 计算;

整体法兰系数 V_1 由表 7-8 或图 7-4 查得, 或按表 7-7 计算;

整体法兰颈部应力校正系数 f 由图 7-7 查得, 或按表 7-7 计算, 当 $f < 1$ 时, 取 $f=1$ 。

b) 径向应力按式 (7-17) 计算:

$$\sigma_R = \frac{(1.33\delta_f e + 1)M_0}{\lambda \delta_f^2 D_i} \quad \dots\dots\dots (7-17)$$

c) 环向应力按式 (7-18) 计算:

$$\sigma_T = \frac{YM_0}{\delta_f^2 D_i} - Z\sigma_R \quad \dots\dots\dots (7-18)$$

式中: 系数 Y 、 Z 根据参数 K 由图 7-8 或表 7-9 查得, 或按图 7-8 所给公式计算。

7.5.3.3.2 活套法兰以及按活套法兰计算的任意式法兰应力按下列规定计算:

轴向应力: $\sigma_H = 0$;

径向应力: $\sigma_R = 0$;

环向应力按式 (7-19) 计算:

$$\sigma_T = \frac{YM_0}{\delta_f^2 D_i} \quad \dots\dots\dots (7-19)$$

式中: 系数 Y 同 7.5.3.3.1。

7.5.3.3.3 切应力

对如图 7-1 中 a-1)、a-2) 的活套法兰, 其翻边部分的切应力及图 7-1 中的 b-1)、b-2)、g)、h)、i)、j) 的焊接法兰焊缝的切应力应按下列规定进行计算。

a) 剪切载荷 W

1) 预紧状态的剪切载荷 W 按式 (7-9) 计算;

2) 操作状态的剪切载荷 W 按式 (7-10) 计算。

b) 剪切面积

1) 对图 7-1 中 a-1)、a-2) 所示的法兰, 按式 (7-20) 计算:

$$A_\tau = 3.14D_i l ; \quad \dots\dots\dots (7-20)$$

2) 对其他法兰, 按式 (7-21) 计算:

$$A_\tau = 3.14D_\tau l ; \quad \dots\dots\dots (7-21)$$

式中:

A_τ ——剪切面积, mm^2 ;

D_{τ} ——剪切面计算直径，取圆筒外径，mm；

l ——剪切面计算高度，见图 7-1 所示尺寸，mm。

c) 切应力

以预紧和操作两种状态分别按式 (7-22) 计算切应力 τ ：

$$\tau = \frac{W}{A_{\tau}} \quad \dots\dots\dots (7-22)$$

7.5.3.4 应力校核

应力校核应符合下列规定：

a) 轴向应力

1) 对图 7-1 中 d)、e)、f) 所示的整体法兰：

$$\sigma_H \leq \min (1.5[\sigma]_f^t , 2.5[\sigma]_h^t)$$

2) 对按整体法兰计算的任意法兰及图 7-1 g) 所示的整体法兰：

$$\sigma_H \leq \min (1.5[\sigma]_f^t , 1.5[\sigma]_h^t)$$

3) 对图 7-1 c) 所示的整体法兰及图 7-1 的 b-1)、b-2) 所示的带颈松式法兰：

$$\sigma_H \leq 1.5[\sigma]_f^t$$

b) 径向应力

$$\sigma_R \leq [\sigma]_f^t$$

c) 环向应力

$$\sigma_T \leq [\sigma]_f^t$$

d) 组合应力

$$(\sigma_H + \sigma_R)/2 \leq [\sigma]_f^t$$

$$(\sigma_H + \sigma_T)/2 \leq [\sigma]_f^t$$

e) 切应力

预紧和操作两种状态下的切应力应分别小于或等于翻边（或圆筒）材料在常温和设计温度下的许用应力的 0.8 倍。

7.5.3.5 法兰刚度校核

当法兰在相同的操作条件下有成功的使用经验时，可以免除刚度校核。否则：

对整体法兰和按整体法兰计算的任意法兰，刚度指数按式 (7-23) 计算：

$$J = \frac{52.14V_1M_0}{\lambda E \delta_0^2 K_1 h_0} \quad \dots\dots\dots (7-23)$$

式中：

K_1 ——刚度系数，取 0.3；

E ——法兰材料的弹性模量，MPa；当法兰设计力矩 M_0 为预紧控制时， E 取常温下的弹性模量，当法兰设计力矩 M_0 为操作控制时，取设计温度下的弹性模量；

其他系数同 7.5.3.3.1。

校核条件：刚度指数应满足 $J \leq 1$ 。

7.5.4 外压法兰

外压法兰可按内压法兰计算，但螺栓面积仅需按预紧状态考虑，按式 (7-7) 计算。此外，操作状态下的法兰力矩须按式 (7-24) 确定：

$$M_p = F_D(L_D - L_G) + F_T(L_T - L_G) \quad \dots\dots\dots (7-24)$$

计算中计算外压力取正值，MPa。

法兰在操作过程中，若分别承受内压和外压的作用，则法兰应按两种压力工况单独进行设计，且应同时满足要求。

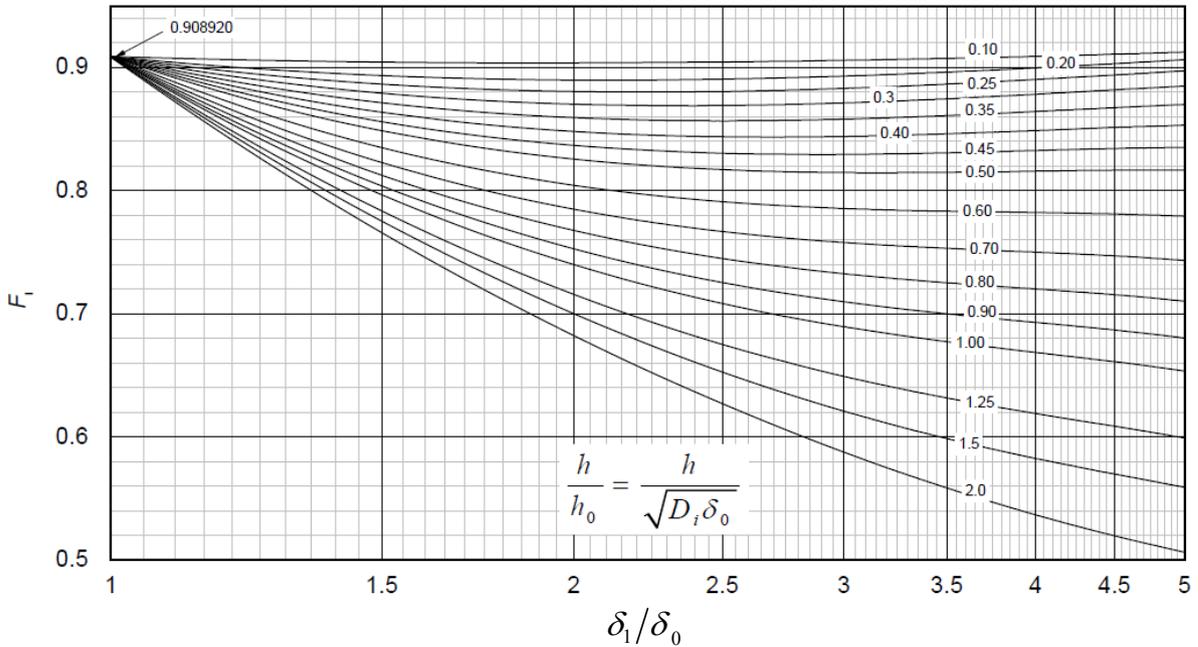
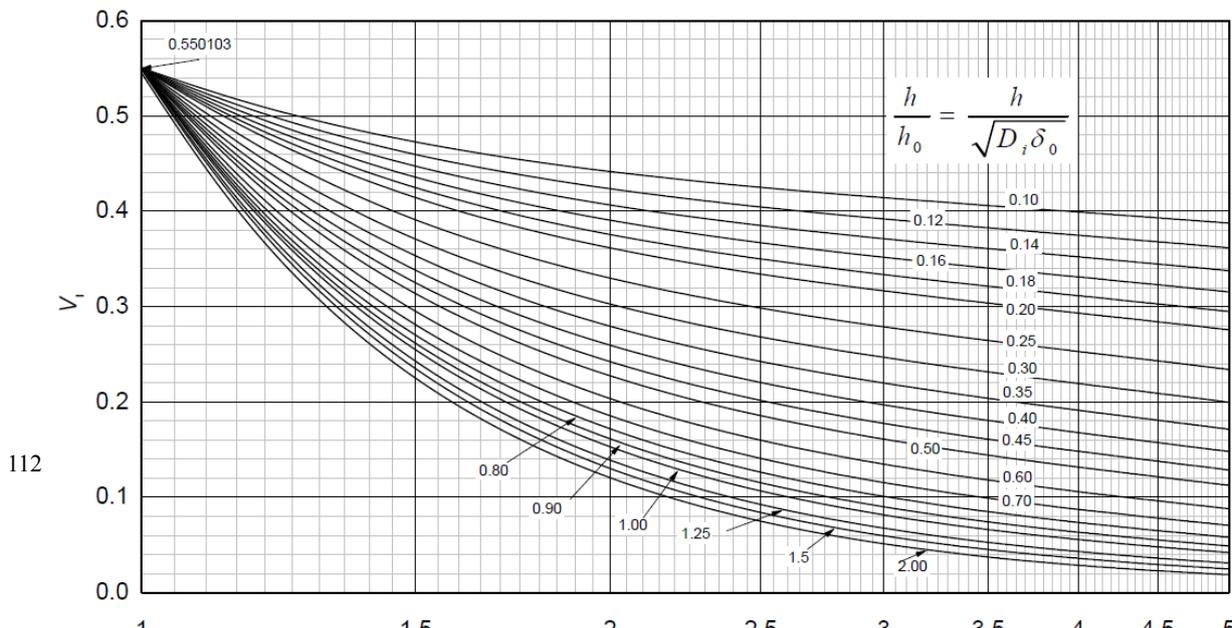


图 7-3 F_1 值图



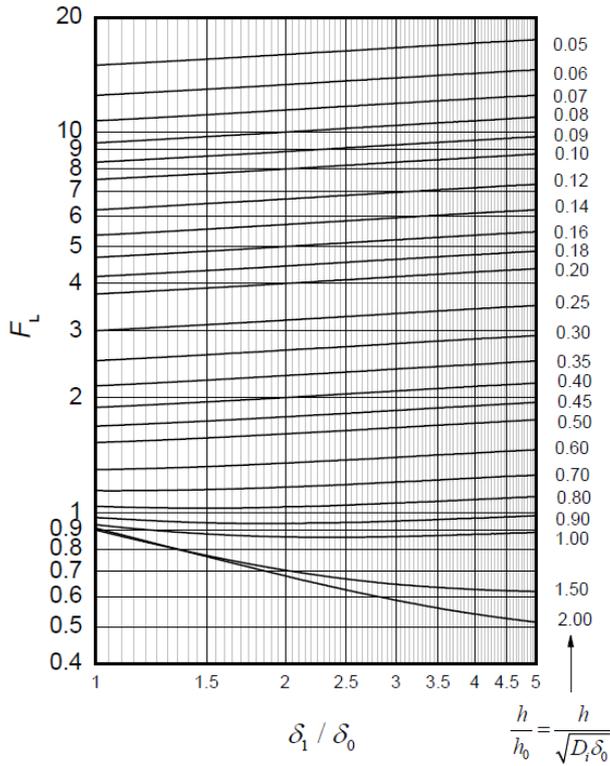


图 7-5 F_L 值图

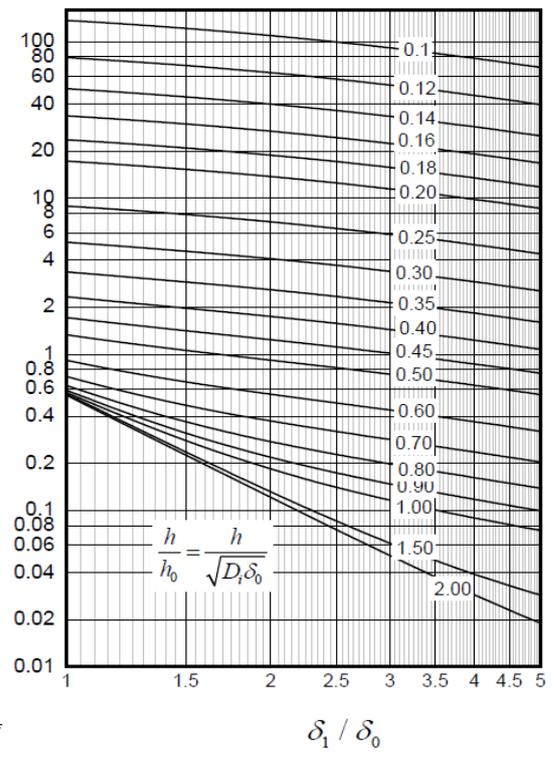


图 7-6 V_L 值图

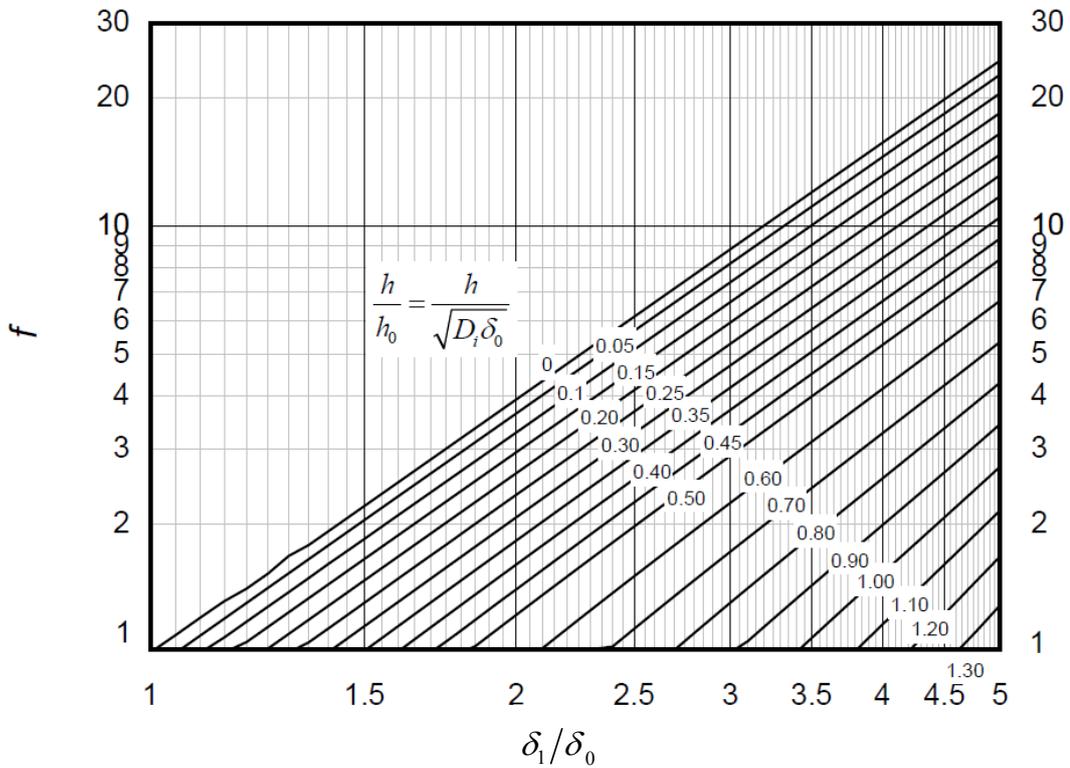
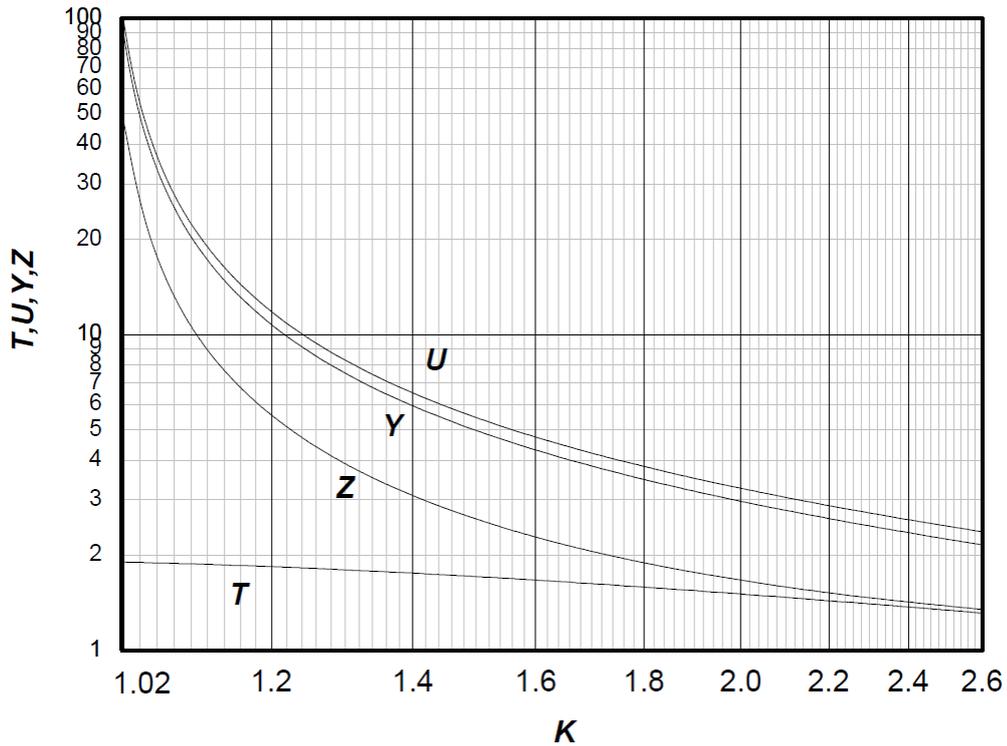


图 7-7 f 值图



$$\text{注: } T = \frac{K^2(1+8.55246\log K)-1}{(1.04720+1.9448K^2)(K-1)} \quad U = \frac{K^2(1+8.55246\log K)-1}{1.36136(K^2-1)(K-1)}$$

$$Y = \frac{1}{K-1} \left(0.66845 + 5.71690 \frac{K^2 \log K}{K^2-1} \right) \quad Z = \frac{K^2+1}{K^2-1} \quad K = D_o / D_i$$

图 7-8 T、U、Y、Z 值图

7.6 反向法兰

7.6.1 本条计算方法适用于 $K_r \leq 2$ 的反向法兰。垫片设计按 7.5.1 规定，螺栓设计按 7.5.2 规定，法兰力矩、法兰应力计算按 7.6.3 和 7.6.4 进行。本条采用符号除 7.6.2 规定外，其余同 7.3。

7.6.2 符号

- D_i ——反向法兰颈部小端内直径，mm；
- D_f ——反向法兰环内直径，mm；
- D_o ——反向法兰环外直径，mm；
- d_r ——参数， mm^3 ；
- e_r ——参数， mm^{-1} ；
- F_D ——内压引起的作用于法兰颈部小端内径截面上的轴向力，N；
- F_G ——窄面法兰垫片压紧力，N；
- F_r ——系数；
- F_T ——内压引起的总轴向力与 F_D 之差，N；
- f_r ——系数；
- h_{or} ——参数，mm；
- L_D ——螺栓中心至 F_D 作用位置处的径向距离（见图 7-9），mm；

L_G ——螺栓中心至 F_G 作用位置处的径向距离（见图 7-9），mm；
 L_T ——螺栓中心至 F_T 作用位置处的径向距离（见图 7-9），mm；
 K_f ——反向法兰外径 D_o 与内径 D_f 之比；
 T_f ——系数；
 U_f ——系数；
 V_f ——系数；
 Y_f ——系数；
 λ_f ——系数；
 ψ_f ——系数；
 σ_{Hf} ——法兰颈部轴向应力，MPa；
 σ_{Tf} ——法兰外径处环向应力，MPa；
 σ_{Rf} ——法兰外径处径向应力，MPa；
 $\sigma_{Tf'}$ ——法兰内径处环向应力，MPa。

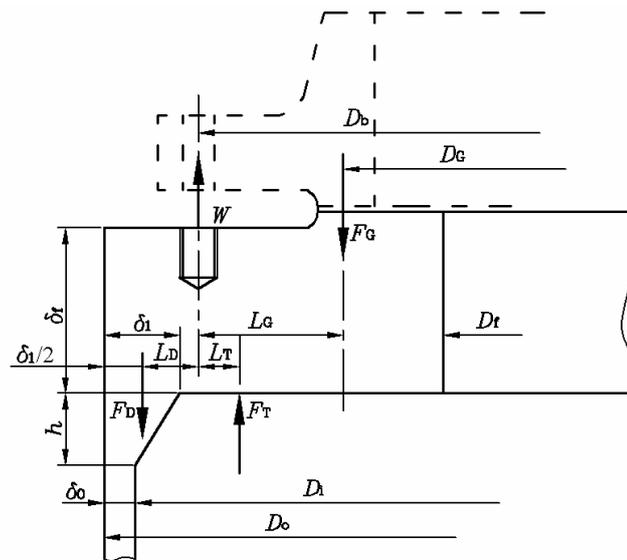


图 7-9 反向法兰

7.6.3 法兰力矩

7.6.3.1 法兰预紧力矩按式 (7-11) 计算，其中，螺栓中心至 F_G 作用位置处的径向距离 L_G （见图 7-9）按式(7-25)计算：

$$L_G = (D_b - D_G) / 2 \quad \dots\dots\dots (7-25)$$

7.6.3.2 法兰操作力矩按式 (7-26) 计算：

$$M_p = |F_D L_D + F_T L_T - F_G L_G| \quad \dots\dots\dots (7-26)$$

式中：

$$F_D = 0.785 D_i^2 p_c$$

$$F_G = 6.28D_G b m p_c$$

$$F_T = 0.785(D_i^2 - D_G^2)p_c$$

$$L_D = (D_o - D_b - \delta_1)/2$$

$$L_T = \left(D_b - \frac{D_i + D_G}{2} \right) / 2$$

当 L_T 为负值时，表示 F_T 作用圆直径大于螺栓中心圆直径 D_b ，此时力矩 $F_T L_T$ 为负值。

7.6.3.3 法兰设计力矩取式 (7-27) 大值：

$$M_o = \begin{cases} M_p \\ M_a \frac{[\sigma]_f^t}{[\sigma]_f} \end{cases} \dots\dots\dots (7-27)$$

7.6.4 法兰应力

法兰应力按下列规定计算：

a) 法兰颈部轴向应力按式 (7-28) 计算：

$$\sigma_{Hr} = \frac{f_r M_o}{\lambda_r \delta_1^2 D_f} \dots\dots\dots (7-28)$$

式中：

$$\lambda_r = \frac{\delta_f e_r + 1}{T_r} + \frac{\delta_f^3}{d_r}$$

$$e_r = F_r / h_{or}$$

$$h_{or} = \sqrt{D_o \delta_0}$$

$$d_r = U_r h_{or} \delta_0^2 / V_r$$

$$U_r = \psi_r U$$

$$\psi_r = \left[1 + \frac{0.668(K_r + 1)}{Y} \right] \frac{1}{K_r^2}$$

$$K_r = \frac{D_o}{D_f}$$

$$T_r = \left(\frac{Z + 0.3}{Z - 0.3} \right) \psi_r T$$

系数 F_r 是以 h_{or} 代替 h_o ，由图 7-3 或表 7-8 查得、或按表 7-7 计算的 F_1 值；

系数 V_r 是以 h_{or} 代替 h_o ，由图 7-4 或表 7-8 查得、或按表 7-7 计算的 V_1 值；

系数 f_r 是以 h_{or} 代替 h_o ，由图 7-7 查得或按表 7-7 计算的 f 值，当 $f_r < 1$ 时，取 $f_r = 1$ ；

系数 T 、 U 、 Y 、 Z 以 K_r 代替 K ，由图 7-8（或按图注公式计算）或表 7-9 查取。

b) 法兰外径处径向应力按式 (7-29) 计算：

$$\sigma_{Rr} = \frac{(1.33\delta_f e_r + 1)M_o}{\lambda_r \delta_f^2 D_f} \quad \dots\dots\dots (7-29)$$

c) 法兰外径处环向应力按式 (7-30) 计算：

$$\sigma_{Tr} = \frac{Y_r M_o}{\delta_f^2 D_f} - Z \sigma_{Rr} \frac{0.67\delta_f e_r + 1}{1.33\delta_f e_r + 1} \quad \dots\dots\dots (7-30)$$

式中： $Y_r = \psi_r Y$

d) 法兰内径处环向应力按式 (7-31) 计算：

$$\sigma'_{Tr} = \frac{M_o}{\delta_f^2 D_f} \left[Y - \frac{2K_r^2 \left(\frac{2\delta_f e_r}{3} + 1 \right)}{(K_r^2 - 1)\lambda_r} \right] \quad \dots\dots\dots (7-31)$$

7.6.5 应力校核

σ_{Hr} 、 σ_{Rr} 、 σ_{Tr} 按 7.5.3.4 σ_H 、 σ_R 、 σ_T 的相应规定， $\sigma'_{Tr} \leq [\sigma]_f$ 。

7.7 筒体端部

7.7.1 符号

- a ——主螺母高度，mm；
 - C_2 ——腐蚀裕量，mm；
 - D ——主螺母外接圆直径，mm；
 - D_o ——端部结构外直径，mm；
 - d_o ——主螺栓无螺纹部分直径，mm；
 - H_g ——筒体端部总高度，mm；
 - h ——筒体端部外缘长度，mm；
 - h_s ——螺孔深度，mm；
 - L ——筒体端部直边长度，mm；
 - r ——过渡圆角半径，mm；
 - α ——倾角（见图 7-11），(°)；
 - δ_n ——筒体端部厚度，mm；
 - σ_m ——筒体端部纵向截面弯曲应力，MPa；
- 其他符号见 7.3。

7.7.2 主螺栓

主螺栓无螺纹部分直径 d_0 按式 (7-32) 计算：

$$d_0 \geq \sqrt{\frac{4A_m}{3.14n}} \dots\dots\dots (7-32)$$

式中：

A_m ——需要的螺栓面积，按 7.5.2.3 确定；

n ——螺栓数量，取偶数。

螺栓的螺纹小径应大于等于 d_0 ，推荐采用细牙螺纹 M64×4，M80×4，M105×4，M125×4。

螺纹旋入端结构型式见图 7-10。

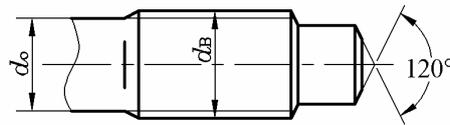


图 7-10 主螺栓旋入端

7.7.3 主螺母

主螺母的硬度应略低于主螺栓的硬度。

主螺母高度 a 按式 (7-33) 计算：

$$a = (1.0 \sim 1.1)d_B \dots\dots\dots (7-33)$$

主螺母外接圆直径 D 按式 (7-34) 计算：

$$D = (1.70 \sim 1.75)d_B \dots\dots\dots (7-34)$$

7.7.4 筒体端部

7.7.4.1 端部厚度

端部厚度 δ_n (见图 7-11)，不得小于按内压确定的圆筒的名义厚度。

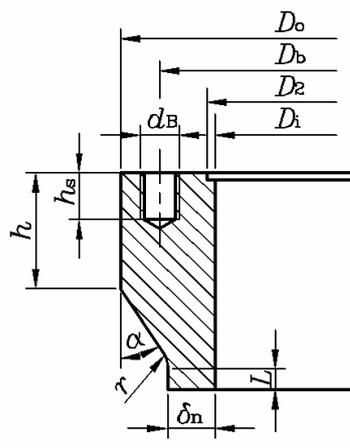


图 7-11 筒体端部结构

7.7.4.2 端部结构

筒体端部的结构可按下列要求确定 (见图 7-11)：

a) 主螺栓中心圆直径，按式 (7-35) 计算：

$$D_b \geq D_2 + 1.5d_B \quad \dots\dots\dots (7-35)$$

b) 筒体端部外径, 按式(7-36)计算:

$$D_o \geq D_b + 1.8d_B \quad \dots\dots\dots (7-36)$$

c) 螺孔有效螺纹深度, 按式(7-37)计算:

$$h_1 \geq (1.3 \sim 1.5)d_B \quad \dots\dots\dots (7-37)$$

d) 螺孔深度:

h_s 等于 h_1 加上螺孔加工工艺所需的无效螺纹长度, mm;

e) 过渡圆角 $r \geq 0.8\delta_n$, mm;

f) 直边长度 $L=50$ mm;

g) 端部外缘长度 h , mm;

当 $\alpha=30^\circ$ 时, 按式(7-38)计算:

$$h \geq h_s + 0.5d_B \quad \dots\dots\dots (7-38)$$

当 $\alpha=45^\circ$ 时, 按式(7-39)计算:

$$h \geq h_s + d_B \quad \dots\dots\dots (7-39)$$

7.7.4.3 应力校核

7.7.4.3.1 作用于筒体端部纵向截面的弯矩, 按式(7-40)计算:

$$M = \frac{1}{6.28} \left[\left(\delta_n - C_2 + \frac{1}{3}D_i \right) F_D - \left(D_b - \frac{2}{3}D_G \right) F - (D_b - D_G)F_p \right] - p_c D_i H_g J_o \quad \dots\dots\dots (7-40)$$

式中:

J_o ——参数, $J_o = J_c - H_g/2$, mm;

J_c ——尺寸, 见图 7-12, mm。

7.7.4.3.2 筒体端部纵向截面的抗弯截面系数(见图 7-12)按式(7-41)计算:

$$Z_g = \frac{I_c}{J_c} \quad \dots\dots\dots (7-41)$$

式中:

$$I_c = 2[I_1 + A_1 a_1^2 + I_s + A_s a_s^2], \text{ mm}^4;$$

$$J_c = \frac{A_1 J_1 + A_s J_s}{A_1 + A_s}, \text{ mm};$$

$$A_1 = hB, \text{ mm}^2;$$

$$A_s = \frac{(H_g - h)(\delta_e + B)}{2}, \text{ mm}^2;$$

$$a_1 = J_1 - J_c, \text{ mm};$$

$$a_s = J_c - J_s, \text{ mm};$$

$$B = \frac{(D_o - D_i)}{2} - C_2, \text{ mm};$$

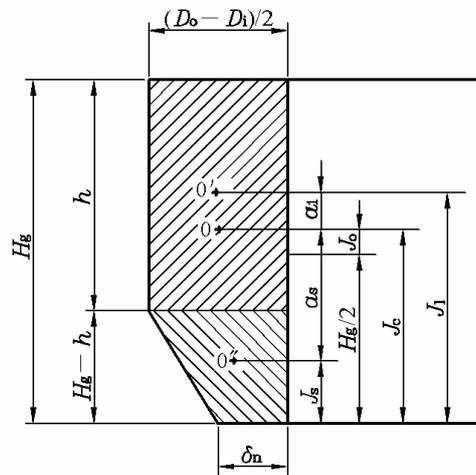
$$I_1 = \frac{Bh^3}{12}, \text{ mm}^4;$$

$$I_s = \frac{(H_g - h)^3 (\delta_e^2 + 4\delta_e B + B^2)}{36(\delta_e + B)}, \text{ mm}^4;$$

$$J_1 = H_g - \frac{h}{2}, \text{ mm};$$

$$J_s = \frac{(H_g - h)(\delta_e + 2B)}{3(\delta_e + B)}, \text{ mm};$$

$$\delta_e = \delta_n - C_2, \text{ mm}。$$



0—筒体端部计算截面形心；0'—计算截面矩形部分形心；0''—计算截面梯形部分形心

图 7-12 筒体端部计算图

7.7.4.3.3 筒体端部纵向截面的弯曲应力按式 (7-42) 校核:

$$\sigma_m = \frac{M}{Z_g} \leq [\sigma]_f^t \dots\dots\dots (7-42)$$

7.8 宽面法兰

7.8.1 本条适用于采用厚度不小于 1.5mm 非金属软垫片的宽面法兰(见图 7-13)。

7.8.2 符号

- b'_0 ——预紧状态垫片基本密封宽度, mm;
- b' ——预紧状态垫片有效密封宽度, mm;
- $2b''$ ——操作状态垫片有效密封宽度, mm;
- D'_G ——垫片压紧力作用中心圆直径, mm;
- D ——垫片外径或法兰外径, 取两者之小值, mm;
- F' ——内压引起的总轴向力, N;

F'_a ——预紧状态需要的最小垫片压紧力, N;
 F'_T ——内压引起的总轴向力 F' 与作用于法兰内径截面上的内压引起的轴向力 F_D 之差, N;
 F'_p ——操作状态需要的最小垫片压紧力, N;
 F_R ——作用在螺栓中心圆外侧, 为平衡 F_D 、 F'_p 、 F'_T 产生的力矩所需的轴向力, N;
 其他符号见 7.3。

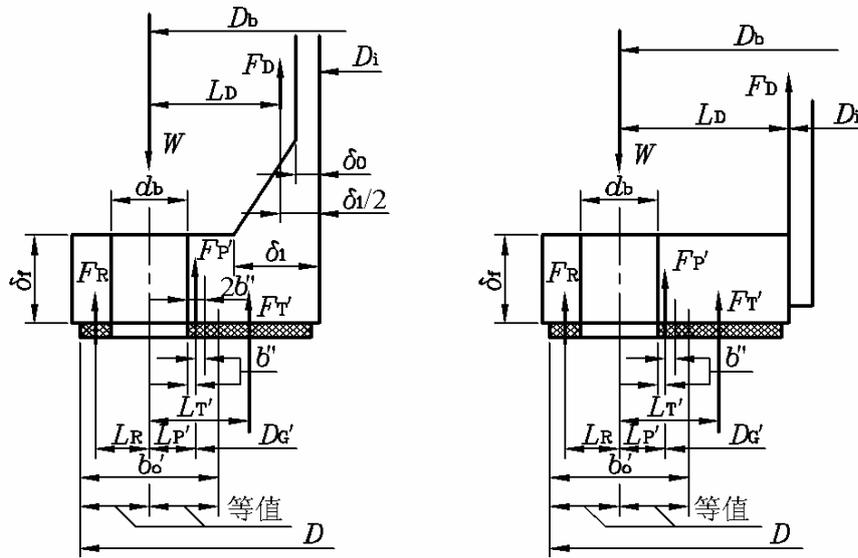


图 7-13 宽面法兰

7.8.3 垫片

常用软垫片的特性参数 (m , y) 按表 7-2 查取。

7.8.3.1 垫片有效密封宽度

垫片有效密封宽度按下列规定计算:

a) 预紧状态有效密封宽度按式 (7-44) 计算:

$$b'_0 = D - D_b \quad \dots\dots\dots (7-43)$$

$$b' = 4\sqrt{b'_0} \quad \dots\dots\dots (7-44)$$

b) 操作状态垫片有效密封宽度: $2b'' = 5 \text{ mm}$ 。

7.8.3.2 垫片压紧力作用中心圆直径 D'_G (见图 7-13) 按式 (7-45) 计算:

$$D'_G = D_b - (d_b + 2b'') \quad \dots\dots\dots (7-45)$$

7.8.3.3 垫片压紧力

垫片压紧力按下列规定计算:

a) 预紧状态需要的最小垫片压紧力按式 (7-46) 计算:

$$F'_a = 3.14D_b b' y \quad \dots\dots\dots (7-46)$$

b) 操作状态需要的最小垫片压紧力按式 (7-47) 计算:

$$F'_p = 6.28D'_G b'' m p_c \quad \dots\dots\dots (7-47)$$

7.8.4 螺栓

7.8.4.1 螺栓布置

螺栓的布置一般按下列规定确定：

- a) 法兰径向尺寸 L_A 、 L_c 及螺栓间距 \widehat{L} 的最小值可按表 7-3 选取；
- b) 螺栓最大间距 \widehat{L}_{\max} 不宜超过式 (7-48) 的计算值：

$$\widehat{L}_{\max} = 3d_B + 2\delta_f \quad \dots\dots\dots (7-48)$$

7.8.4.2 螺栓载荷

螺栓载荷按下列规定计算：

- a) 预紧状态螺栓载荷按式 (7-49) 计算：

$$W_a = F'_a \quad \dots\dots\dots (7-49)$$

- b) 操作状态螺栓载荷按式 (7-50) 计算：

$$W_p = F' + F'_p + F_R \quad \dots\dots\dots (7-50)$$

式中：

$$F' = 0.785(D_b - d_b)^2 p_c$$

$$F_R = \frac{F_D L_D + F'_p L'_p + F'_T L'_T}{L_R}$$

$$F'_T = F' - F_D$$

$$L'_T = \frac{(D_b + d_b + 2b'') - D_i}{4}$$

$$L'_p = \frac{d_b + 2b''}{2}$$

$$L_R = \frac{D - (D_b + d_b)}{4} + \frac{d_b}{2}$$

7.8.4.3 螺栓面积

需要的螺栓面积和实际的螺栓面积按 7.5.2.3 确定。

7.8.5 法兰

7.8.5.1 法兰设计力矩

法兰设计力矩按式 (7-51) 计算：

$$M_o = F_R L_R \quad \dots\dots\dots (7-51)$$

7.8.5.2 法兰厚度

法兰厚度按式 (7-52) 确定：

$$\delta_f = \sqrt{\frac{6M_o}{[\sigma]_f^t (3.14D_b - nd_b)}} \quad \dots\dots\dots (7-52)$$

表 7-5 整体法兰计算表

| | | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------|---------|--|--|
| 计算压力 p_c | | MPa | (垫片简图) | 当 $b_0 \leq 6.4\text{mm}$ 时 $b=b_0$ | N | mm | | |
| 设计温度 t | | °C | | 当 $b_0 > 6.4\text{mm}$ 时 $b=2.53\sqrt{b_0}$ | b_0 | mm | | |
| 法兰材料 | | | 法兰压紧面形状 垫片外径 | | b | mm | | |
| 螺栓材料 | | | | | y | MPa | | |
| 腐蚀裕量 C_2 | | mm | | | m | | | |
| 螺栓许用应力 | 设计温度 $[\sigma]_b^t$ | MPa | $W_a = 3.14bD_G y =$ N | | | | | |
| | 室温 $[\sigma]_b$ | MPa | $F_p = 6.28bD_G m p_c =$ N | | | | | |
| 法兰许用应力 | 设计温度 $[\sigma]_f^t$ | MPa | $F = 0.785D_G^2 p_c =$ N | $F_p + F =$ N | | | | |
| | 室温 $[\sigma]_f$ | MPa | $A_m = \text{Max}(W_a/[\sigma]_b, (F_p + F)/[\sigma]_b^t) =$ mm ² | | | | | |
| 法兰材料弹性模量 E | | MPa | $A_b =$ mm ² | | | | | |
| 所有尺寸均不包括腐蚀裕量 | | | $W = (A_m + A_b)[\sigma]_b / 2 =$ N | | | | | |
| 预紧螺栓情况 | | | | | | | | |
| $F_G = W =$ | | N | $L_G = (D_b - D_G)/2 =$ mm | | $M_a = F_G L_G =$ N·mm | | | |
| 操作情况 | | | | | | | | |
| $F_D = 0.785D_1^2 p_c =$ | | N | $L_D = L_A + 0.5\delta_1 =$ mm | | $F_D L_D =$ N·mm | | | |
| $F_G = F_p =$ | | N | $L_G = (D_b - D_G)/2 =$ mm | | $F_G L_G =$ N·mm | | | |
| $F_T = F - F_D =$ | | N | $L_T = (L_A + \delta_1 + L_G)/2 =$ mm | | $F_T L_T =$ N·mm | | | |
| $M_p = F_D L_D + F_G L_G + F_T L_T =$ | | | | | | N·mm | | |
| $M_o = \text{Max}(M_p, M_a [\sigma]_f^t / [\sigma]_f) =$ | | | | | | N·mm | | |
| | | | 形状常数 | | | | | |
| | | | $h_o = \sqrt{D_1 \delta_o} =$ | | $h/h_o =$ | | | |
| | | | $K = D_o/D_1 =$ | | $\delta_1/\delta_o =$ | | | |
| | | | 查表 7-9 | $T =$ | 查图 7-3 | $F_1 =$ | | |
| | | | | $Z =$ | 查图 7-4 | $V_1 =$ | | |
| | | | | $Y =$ | 查图 7-7 | $f =$ | | |
| | | | | $U =$ | $e = F_1/h_o =$ | | | |
| | | | $d_1 = (U/V_1)h_o\delta_o^2 =$ | | | | | |
| | | | δ_f (假设) = | | mm | | | |
| | | | $\psi = \delta_f e + 1$ | | | | | |
| $\beta = 1.33\delta_f e + 1$ | | | | | | | | |
| $\gamma = \psi/T$ | | | | | | | | |
| $\eta = \delta_f^3/d_1$ | | | | | | | | |
| $\lambda = \gamma + \eta$ | | | | | | | | |
| 许用值 | 应力计算 | | | | | | | |
| $1.5[\sigma]_f^t$ 或 $2.5[\sigma]_H^t$ | 轴向应力 $\sigma_H = fM_o/(\lambda\delta_f^2 D_1)$ | MPa | | | | | | |
| $[\sigma]_R^t =$ | 径向应力 $\sigma_R = \beta M_o/(\lambda\delta_f^2 D_1)$ | MPa | | | | | | |
| $[\sigma]_T^t =$ | 切向应力 $\sigma_T = \gamma M_o/(\delta_f^2 D_1) - Z\sigma_R$ | MPa | | | | | | |
| $[\sigma]_f^t =$ | $\text{Max}\{(\sigma_H + \sigma_T)/2, (\sigma_H + \sigma_R)/2\}$ | MPa | | | | | | |
| 刚度指数 $J \leq 1$ | $J = 52.14V_1 M_o/(\lambda E \delta_o^2 K_1 h_o)$ | | | | | | | |

注：对于带颈的松式法兰，表中系数 V_1 、 F_1 应以 V_L 、 F_L 代替， f 取 1.0。

表 7-6 活套法兰计算表

| | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------|---------------------|--|-----|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 计算压力 p_c | | | MPa | (垫片简图) | 当 $b_0 \leq 6.4\text{mm}$ 时 $b=b_0$ 当 $b_0 > 6.4\text{mm}$ 时 $b=2.53\sqrt{b_0}$ | N | mm |
| 设计温度 t | | | °C | | | b_0 | mm |
| 法兰材料 | | | | | | b | mm |
| 螺栓材料 | | | | | | y | MPa |
| 腐蚀裕量 C_2 | | | mm | $W_a = 3.14bD_G y =$ | N | m | |
| 螺栓许用应力 | 设计温度 $[\sigma]_b^t$ | | MPa | $F_p = 6.28bD_G m p_c =$ | | | N |
| | 室温 $[\sigma]_b$ | | MPa | $F = 0.785D_G^2 p_c =$ | $F_p + F =$ | | N |
| 法兰许用应力 | 设计温度 $[\sigma]_f^t$ | | MPa | $A_m = \text{Max}(W_a/[\sigma]_b, (F_p + F)/[\sigma]_b) =$ | | | mm ² |
| | 室温 $[\sigma]_f$ | | MPa | $A_b =$ | | | mm ² |
| 所有尺寸均不包括腐蚀裕量 | | | | $W = (A_m + A_b)[\sigma]_b / 2 =$ | | | N |
| 预紧螺栓情况 | | | | | | | |
| $F_G = W =$ | | | N | $L_G = (D_b - D_G) / 2 =$ | mm | $M_a = F_G L_G =$ | N·mm |
| 操作情况 | | | | | | | |
| $F_D = 0.785D_i^2 p_c =$ | | | N | $L_D = (D_b - D_i) / 2 =$ | mm | $F_D L_D =$ | N·mm |
| $F_G = F_p =$ | | | N | $L_G = (D_b - D_G) / 2 =$ | mm | $F_G L_G =$ | N·mm |
| $F_T = F - F_D =$ | | | N | $L_T = (L_D + L_G) / 2 =$ | mm | $F_T L_T =$ | N·mm |
| $M_p = F_D L_D + F_G L_G + F_T L_T =$ | | | | | | N·mm | |
| $M_o = \text{Max}(M_p, M_a [\sigma]_f^t / [\sigma]_f) =$ | | | | | | N·mm | |
| | | | | | | 形状常数: $K = D_o / D_i =$ $Y =$ 法兰厚度: $\delta_f = \sqrt{Y M_o / ([\sigma]_f^t D_i)}$ = mm | |
| 注: 本表中 a)图所示法兰, $L_G=L_T=(D_b-D_G)/2$ 。 | | | | | | | |

表 7-7 法兰系数 F_1 、 V_1 、 f 、 F_L 、 V_L 计算式

| 整体法兰 | 带颈松式法兰 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $F_1 = -\frac{E_6}{\left(\frac{C}{2.73}\right)^{1/4} \frac{(1+A)^3}{C}}$ $V_1 = \frac{E_4}{\left(\frac{2.73}{C}\right)^{1/4} (1+A)^3}$ $f = C_{36} / (1+A) .0$ <p>当 $\delta_1 = \delta_0$ 时, $F_1 = 0.908920$, $V_1 = 0.550103$, $f = 1$</p> | $F_L = -\frac{C_{18}\left(\frac{1}{2} + \frac{A}{6}\right) + C_{21}\left(\frac{1}{4} + \frac{11A}{84}\right) + C_{24}\left(\frac{1}{70} + \frac{A}{105}\right) - \left(\frac{1}{40} + \frac{A}{105}\right)}{\left(\frac{C}{2.73}\right)^{1/4} \frac{(1+A)^3}{C}}$ $V_L = \frac{\frac{1}{4} - \frac{C_{24}}{5} - \frac{3C_{21}}{2} - C_{18}}{\left(\frac{2.73}{C}\right)^{1/4} (1+A)^3}$ $f = 1$ |
| <p>以上公式中系数:</p> <p>(1) $A = (\delta_1 / \delta_0) - 1$ (2) $C = 43.68(h/h_0)^4$ (3) $C_1 = 1/3 + A/12$</p> <p>(4) $C_2 = 5/42 + 17A/336$ (5) $C_3 = 1/210 + A/360$ (6) $C_4 = 11/360 + 59A/5\ 040 + (1+3A)/C$</p> <p>(7) $C_5 = 1/90 + 5A/1\ 008 - (1+A)^3/C$ (8) $C_6 = 1/120 + 17A/5\ 040 + 1/C$</p> <p>(9) $C_7 = 215/2\ 772 + 51A/1\ 232 + (60/7 + 225A/14 + 75A^2/7 + 5A^3/2)/C$</p> <p>(10) $C_8 = 31/6\ 930 + 128A/45\ 045 + (6/7 + 15A/7 + 12A^2/7 + 5A^3/11)/C$</p> <p>(11) $C_9 = 533/30\ 240 + 653A/73\ 920 + (1/2 + 33A/14 + 39A^2/28 + 25A^3/84)/C$</p> <p>(12) $C_{10} = 29/3\ 780 + 3A/704 - (1/2 + 33A/14 + 81A^2/28 + 13A^3/12)/C$</p> <p>(13) $C_{11} = 31/6\ 048 + 1\ 763A/665\ 280 + (1/2 + 6A/7 + 15A^2/28 + 5A^3/42)/C$</p> <p>(14) $C_{12} = 1/2\ 925 + 71A/300\ 300 + (8/35 + 18A/35 + 156A^2/385 + 6A^3/55)/C$</p> <p>(15) $C_{13} = 761/831\ 600 + 937A/1\ 663\ 200 + (1/35 + 6A/35 + 11A^2/70 + 3A^3/70)/C$</p> <p>(16) $C_{14} = 197/415\ 800 + 103A/332\ 640 - (1/35 + 6A/35 + 17A^2/70 + A^3/10)/C$</p> <p>(17) $C_{15} = 233/831\ 600 + 97A/554\ 400 + (1/35 + 3A/35 + A^2/14 + 2A^3/105)/C$</p> <p>(18) $C_{16} = C_1 C_7 C_{12} + C_2 C_8 C_3 + C_3 C_8 C_2 - (C_3^2 C_7 + C_8^2 C_1 + C_2^2 C_{12})$</p> <p>(19) $C_{17} = [C_4 C_7 C_{12} + C_2 C_8 C_{13} + C_3 C_8 C_9 - (C_{13} C_7 C_3 + C_8^2 C_4 + C_{12} C_2 C_9)] / C_{16}$</p> <p>(20) $C_{18} = [C_5 C_7 C_{12} + C_2 C_8 C_{14} + C_3 C_8 C_{10} - (C_{14} C_7 C_3 + C_8^2 C_5 + C_{12} C_2 C_{10})] / C_{16}$</p> <p>(21) $C_{19} = [C_6 C_7 C_{12} + C_2 C_8 C_{15} + C_3 C_8 C_{11} - (C_{15} C_7 C_3 + C_8^2 C_6 + C_{12} C_2 C_{11})] / C_{16}$</p> <p>(22) $C_{20} = [C_1 C_9 C_{12} + C_4 C_8 C_3 + C_3 C_{13} C_2 - (C_3^2 C_9 + C_{13} C_8 C_1 + C_{12} C_4 C_2)] / C_{16}$</p> <p>(23) $C_{21} = [C_1 C_{10} C_{12} + C_5 C_8 C_3 + C_3 C_{14} C_2 - (C_3^2 C_{10} + C_{14} C_8 C_1 + C_{12} C_5 C_2)] / C_{16}$</p> <p>(24) $C_{22} = [C_1 C_{11} C_{12} + C_6 C_8 C_3 + C_3 C_{15} C_2 - (C_3^2 C_{11} + C_{15} C_8 C_1 + C_{12} C_6 C_2)] / C_{16}$</p> <p>(25) $C_{23} = [C_1 C_7 C_{13} + C_2 C_9 C_3 + C_4 C_8 C_2 - (C_3 C_7 C_4 + C_8 C_9 C_1 + C_2^2 C_{13})] / C_{16}$</p> <p>(26) $C_{24} = [C_1 C_7 C_{14} + C_2 C_{10} C_3 + C_5 C_8 C_2 - (C_3 C_7 C_5 + C_8 C_{10} C_1 + C_2^2 C_{14})] / C_{16}$</p> <p>(27) $C_{25} = [C_1 C_7 C_{15} + C_2 C_{11} C_3 + C_6 C_8 C_2 - (C_3 C_7 C_6 + C_8 C_{11} C_1 + C_2^2 C_{15})] / C_{16}$</p> <p>(28) $C_{26} = -(C/4)^{1/4}$ (29) $C_{27} = C_{20} - C_{17} - 5/12 + C_{17} C_{26}$ (30) $C_{28} = C_{22} - C_{19} - 1/12 + C_{19} C_{26}$</p> <p>(31) $C_{29} = -(C/4)^{1/2}$ (32) $C_{30} = -(C/4)^{3/4}$ (33) $C_{31} = 3A/2 - C_{17} C_{30}$</p> | |

表 7-7 (续)

| | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| (34) $C_{32}=1/2-C_{19}C_{30}$ | (35) $C_{33}=0.5C_{26}C_{32}+C_{28}C_{31}C_{29}-(0.5C_{30}C_{28}+C_{32}C_{27}C_{29})$ | |
| (36) $C_{34}=1/12+C_{18}-C_{21}-C_{18}C_{26}$ | (37) $C_{35}=C_{18}C_{30}$ | (38) $C_{36}=(C_{28}C_{35}C_{29}-C_{32}C_{34}C_{29})/C_{33}$ |
| (39) $C_{37}=[0.5C_{26}C_{35}+C_{34}C_{31}C_{29}-(0.5C_{30}C_{34}+C_{35}C_{27}C_{29})]/C_{33}$ | (40) $E_1=C_{17}C_{36}+C_{18}+C_{19}C_{37}$ | |
| (41) $E_2=C_{20}C_{36}+C_{21}+C_{22}C_{37}$ | (42) $E_3=C_{23}C_{36}+C_{24}+C_{25}C_{37}$ | (43) $E_4=1/4+C_{37}/12+C_{36}/4-E_3/5-3E_2/2-E_1$ |
| (44) $E_5=E_1(1/2+A/6)+E_2(1/4+11A/84)+E_3(1/70+A/105)$ | | |
| (45) $E_6=E_5-C_{36}(7/120+A/36+3A/C)-1/40-A/72-C_{37}(1/60+A/120+1/C)$ | | |

表 7-8 F_1 、 V_1 系数

| δ_1/δ_0 | h/h_0 | F_1 | V_1 | δ_1/δ_0 | h/h_0 | F_1 | V_1 |
|---------------------|---------|----------|----------|---------------------|---------|----------|----------|
| 1.00 | 0.01 | 0.908 92 | 0.550 10 | 3.00 | 0.06 | 0.908 07 | 0.463 27 |
| 1.00 | 0.02 | 0.908 92 | 0.550 10 | 3.00 | 0.07 | 0.907 67 | 0.450 37 |
| 1.00 | 0.03 | 0.908 92 | 0.550 10 | 3.00 | 0.08 | 0.907 17 | 0.437 90 |
| 1.00 | 0.04 | 0.908 92 | 0.550 10 | 3.00 | 0.09 | 0.906 58 | 0.425 83 |
| 1.00 | 0.05 | 0.908 92 | 0.550 10 | 3.00 | 0.10 | 0.905 88 | 0.414 15 |
| 1.00 | 0.06 | 0.908 92 | 0.550 10 | | | | |
| 1.00 | 0.07 | 0.908 92 | 0.550 10 | 3.50 | 0.01 | 0.908 94 | 0.533 41 |
| 1.00 | 0.08 | 0.908 92 | 0.550 10 | 3.50 | 0.02 | 0.908 97 | 0.517 27 |
| 1.00 | 0.09 | 0.908 92 | 0.550 10 | 3.50 | 0.03 | 0.908 99 | 0.501 66 |
| 1.00 | 0.10 | 0.908 92 | 0.550 10 | 3.50 | 0.04 | 0.908 98 | 0.486 56 |
| | | | | 3.50 | 0.05 | 0.908 92 | 0.471 96 |
| 1.50 | 0.01 | 0.908 87 | 0.541 33 | 3.50 | 0.06 | 0.908 80 | 0.457 85 |
| 1.50 | 0.02 | 0.908 72 | 0.532 80 | 3.50 | 0.07 | 0.908 60 | 0.444 21 |
| 1.50 | 0.03 | 0.908 48 | 0.524 49 | 3.50 | 0.08 | 0.908 32 | 0.431 03 |
| 1.50 | 0.04 | 0.908 15 | 0.516 42 | 3.50 | 0.09 | 0.907 94 | 0.418 29 |
| 1.50 | 0.05 | 0.907 74 | 0.508 57 | 3.50 | 0.10 | 0.907 45 | 0.405 97 |
| 1.50 | 0.06 | 0.907 24 | 0.500 93 | | | | |
| 1.50 | 0.07 | 0.906 66 | 0.493 51 | 4.00 | 0.01 | 0.908 97 | 0.532 55 |
| 1.50 | 0.08 | 0.906 00 | 0.486 29 | 4.00 | 0.02 | 0.909 08 | 0.515 58 |
| 1.50 | 0.09 | 0.905 27 | 0.479 27 | 4.00 | 0.03 | 0.909 22 | 0.499 20 |
| 1.50 | 0.10 | 0.904 47 | 0.472 45 | 4.00 | 0.04 | 0.909 37 | 0.483 37 |
| | | | | 4.00 | 0.05 | 0.909 50 | 0.468 08 |
| 2.00 | 0.01 | 0.908 87 | 0.537 74 | 4.00 | 0.06 | 0.909 58 | 0.453 31 |
| 2.00 | 0.02 | 0.908 71 | 0.525 73 | 4.00 | 0.07 | 0.909 60 | 0.439 06 |
| 2.00 | 0.03 | 0.908 46 | 0.514 08 | 4.00 | 0.08 | 0.909 54 | 0.425 29 |
| 2.00 | 0.04 | 0.908 09 | 0.502 76 | 4.00 | 0.09 | 0.909 39 | 0.412 00 |
| 2.00 | 0.05 | 0.907 63 | 0.491 78 | 4.00 | 0.10 | 0.909 14 | 0.399 17 |
| 2.00 | 0.06 | 0.907 06 | 0.481 12 | | | | |
| 2.00 | 0.07 | 0.906 40 | 0.470 78 | 4.50 | 0.01 | 0.909 00 | 0.531 77 |
| 2.00 | 0.08 | 0.905 63 | 0.460 74 | 4.50 | 0.02 | 0.909 19 | 0.514 07 |
| 2.00 | 0.09 | 0.904 77 | 0.451 01 | 4.50 | 0.03 | 0.909 47 | 0.496 99 |
| 2.00 | 0.10 | 0.903 82 | 0.441 56 | 4.50 | 0.04 | 0.909 78 | 0.480 50 |
| | | | | 4.50 | 0.05 | 0.910 09 | 0.464 60 |
| 2.50 | 0.01 | 0.908 88 | 0.535 76 | 4.50 | 0.06 | 0.910 38 | 0.449 25 |
| 2.50 | 0.02 | 0.908 77 | 0.521 85 | 4.50 | 0.07 | 0.910 62 | 0.434 45 |
| 2.50 | 0.03 | 0.908 58 | 0.508 37 | 4.50 | 0.08 | 0.910 79 | 0.420 17 |
| 2.50 | 0.04 | 0.908 30 | 0.495 31 | 4.50 | 0.09 | 0.910 87 | 0.406 40 |
| 2.50 | 0.05 | 0.907 92 | 0.482 65 | 4.50 | 0.10 | 0.910 84 | 0.393 12 |
| 2.50 | 0.06 | 0.907 45 | 0.470 37 | | | | |
| 2.50 | 0.07 | 0.906 88 | 0.458 48 | 5.00 | 0.01 | 0.909 03 | 0.531 03 |
| 2.50 | 0.08 | 0.906 20 | 0.446 96 | 5.00 | 0.02 | 0.909 31 | 0.512 65 |
| 2.50 | 0.09 | 0.905 43 | 0.435 80 | 5.00 | 0.03 | 0.909 71 | 0.494 92 |
| 2.50 | 0.10 | 0.904 55 | 0.424 99 | 5.00 | 0.04 | 0.910 19 | 0.477 83 |
| | | | | 5.00 | 0.05 | 0.910 69 | 0.461 35 |
| 3.00 | 0.01 | 0.908 91 | 0.534 43 | 5.00 | 0.06 | 0.911 19 | 0.445 47 |
| 3.00 | 0.02 | 0.908 86 | 0.519 26 | 5.00 | 0.07 | 0.911 64 | 0.430 17 |
| 3.00 | 0.03 | 0.908 77 | 0.504 57 | 5.00 | 0.08 | 0.912 04 | 0.415 42 |
| 3.00 | 0.04 | 0.908 61 | 0.490 35 | 5.00 | 0.09 | 0.912 34 | 0.401 21 |
| 3.00 | 0.05 | 0.908 38 | 0.476 59 | 5.00 | 0.10 | 0.912 54 | 0.387 52 |

表 7-9 系数 K 、 T 、 Z 、 Y 、 U

| K | T | Z | Y | U | K | T | Z | Y | U |
|-------|------|---------|---------|---------|-------|------|-------|--------|--------|
| 1.001 | 1.91 | 1000.50 | 1899.43 | 2078.85 | 1.016 | 1.90 | 63.00 | 120.56 | 132.49 |
| 1.002 | 1.91 | 500.50 | 951.81 | 1052.80 | 1.017 | 1.90 | 59.33 | 111.98 | 124.81 |
| 1.003 | 1.91 | 333.83 | 637.56 | 700.80 | 1.018 | 1.90 | 56.06 | 107.36 | 118.00 |
| 1.004 | 1.91 | 250.50 | 478.04 | 525.45 | 1.019 | 1.90 | 53.14 | 101.72 | 111.78 |
| 1.005 | 1.91 | 200.50 | 383.67 | 421.72 | 1.020 | 1.90 | 50.51 | 96.73 | 106.30 |
| 1.006 | 1.91 | 167.17 | 319.71 | 351.42 | 1.021 | 1.90 | 48.12 | 92.21 | 101.33 |
| 1.007 | 1.91 | 143.36 | 274.11 | 301.30 | 1.022 | 1.90 | 45.96 | 88.04 | 96.75 |
| 1.008 | 1.91 | 125.50 | 239.95 | 263.75 | 1.023 | 1.90 | 43.98 | 84.30 | 92.64 |
| 1.009 | 1.91 | 111.61 | 213.40 | 234.42 | 1.024 | 1.90 | 42.17 | 80.81 | 88.81 |
| 1.010 | 1.91 | 100.50 | 192.19 | 211.19 | 1.025 | 1.90 | 40.51 | 77.61 | 85.29 |
| 1.011 | 1.91 | 91.41 | 174.83 | 192.13 | 1.026 | 1.90 | 38.97 | 74.70 | 82.09 |
| 1.012 | 1.91 | 83.84 | 160.38 | 176.25 | 1.027 | 1.90 | 37.54 | 77.97 | 79.08 |
| 1.013 | 1.91 | 77.43 | 148.06 | 162.81 | 1.028 | 1.90 | 36.22 | 69.43 | 76.30 |
| 1.014 | 1.91 | 71.93 | 137.69 | 151.30 | 1.029 | 1.90 | 34.99 | 67.11 | 73.75 |
| 1.015 | 1.91 | 67.17 | 128.61 | 141.33 | 1.030 | 1.90 | 33.84 | 64.91 | 71.33 |
| 1.031 | 1.90 | 32.76 | 62.85 | 69.06 | 1.081 | 1.88 | 12.87 | 24.81 | 27.27 |
| 1.032 | 1.90 | 31.76 | 60.92 | 66.94 | 1.082 | 1.88 | 12.72 | 24.52 | 26.95 |
| 1.033 | 1.90 | 30.81 | 59.11 | 63.95 | 1.083 | 1.88 | 12.57 | 24.24 | 26.65 |
| 1.034 | 1.90 | 29.92 | 57.41 | 63.08 | 1.084 | 1.88 | 12.43 | 24.00 | 26.34 |
| 1.035 | 1.90 | 29.08 | 55.80 | 61.32 | 1.085 | 1.88 | 12.29 | 23.69 | 26.05 |
| 1.036 | 1.90 | 28.29 | 54.29 | 59.66 | 1.086 | 1.88 | 12.15 | 23.44 | 25.57 |
| 1.037 | 1.90 | 27.54 | 52.85 | 58.08 | 1.087 | 1.88 | 12.02 | 23.18 | 25.48 |
| 1.038 | 1.90 | 26.83 | 51.50 | 56.59 | 1.088 | 1.88 | 11.89 | 22.93 | 25.02 |
| 1.039 | 1.90 | 26.15 | 50.21 | 55.17 | 1.089 | 1.88 | 11.76 | 22.68 | 24.93 |
| 1.040 | 1.90 | 25.51 | 48.97 | 53.82 | 1.090 | 1.88 | 11.63 | 22.44 | 24.66 |
| 1.041 | 1.90 | 24.90 | 47.81 | 53.10 | 1.091 | 1.88 | 11.52 | 22.22 | 24.41 |
| 1.042 | 1.90 | 24.32 | 46.71 | 51.33 | 1.092 | 1.88 | 11.40 | 21.99 | 24.16 |
| 1.043 | 1.90 | 23.77 | 45.64 | 50.15 | 1.093 | 1.88 | 11.28 | 21.76 | 23.91 |
| 1.044 | 1.90 | 23.23 | 44.64 | 49.05 | 1.094 | 1.88 | 11.16 | 21.54 | 23.67 |
| 1.045 | 1.90 | 22.74 | 43.69 | 48.02 | 1.095 | 1.88 | 11.05 | 21.32 | 23.44 |
| 1.046 | 1.90 | 22.05 | 42.75 | 46.99 | 1.096 | 1.88 | 10.94 | 21.11 | 23.20 |
| 1.047 | 1.90 | 21.79 | 41.87 | 46.03 | 1.097 | 1.88 | 10.83 | 20.91 | 22.97 |
| 1.048 | 1.90 | 21.35 | 41.02 | 45.09 | 1.098 | 1.88 | 10.73 | 20.71 | 22.75 |
| 1.049 | 1.90 | 20.92 | 40.21 | 44.21 | 1.099 | 1.88 | 10.62 | 20.51 | 22.39 |
| 1.050 | 1.89 | 20.51 | 39.43 | 43.34 | 1.100 | 1.88 | 10.52 | 20.31 | 22.18 |
| 1.051 | 1.89 | 20.12 | 38.68 | 42.51 | 1.101 | 1.88 | 10.43 | 20.15 | 22.12 |
| 1.052 | 1.89 | 19.74 | 37.96 | 41.73 | 1.102 | 1.88 | 10.33 | 19.94 | 21.92 |
| 1.053 | 1.89 | 19.38 | 37.27 | 40.69 | 1.103 | 1.88 | 10.23 | 19.76 | 21.72 |
| 1.054 | 1.89 | 19.03 | 36.60 | 40.23 | 1.104 | 1.88 | 10.14 | 19.58 | 21.52 |
| 1.055 | 1.89 | 18.69 | 35.96 | 39.64 | 1.105 | 1.88 | 10.05 | 19.38 | 21.30 |
| 1.056 | 1.89 | 18.38 | 35.34 | 38.84 | 1.106 | 1.88 | 9.96 | 19.33 | 21.14 |
| 1.057 | 1.89 | 18.06 | 34.74 | 38.19 | 1.107 | 1.87 | 9.87 | 19.07 | 20.96 |
| 1.058 | 1.89 | 17.76 | 34.17 | 37.56 | 1.108 | 1.87 | 9.78 | 18.90 | 20.77 |
| 1.059 | 1.89 | 17.47 | 33.92 | 36.95 | 1.109 | 1.87 | 9.70 | 18.74 | 20.59 |
| 1.060 | 1.89 | 17.18 | 33.64 | 36.34 | 1.110 | 1.87 | 9.62 | 18.55 | 20.38 |
| 1.061 | 1.89 | 16.91 | 32.55 | 35.78 | 1.111 | 1.87 | 9.54 | 18.42 | 20.25 |
| 1.062 | 1.89 | 16.64 | 32.04 | 35.21 | 1.112 | 1.87 | 9.46 | 18.27 | 20.08 |
| 1.063 | 1.89 | 16.40 | 31.55 | 34.68 | 1.113 | 1.87 | 9.38 | 18.13 | 19.91 |
| 1.064 | 1.89 | 16.15 | 31.08 | 34.17 | 1.114 | 1.87 | 9.30 | 17.97 | 19.75 |
| 1.065 | 1.89 | 15.90 | 30.61 | 33.65 | 1.115 | 1.87 | 9.22 | 17.81 | 19.55 |
| 1.066 | 1.89 | 15.67 | 30.17 | 33.17 | 1.116 | 1.87 | 9.15 | 17.68 | 19.43 |
| 1.067 | 1.89 | 15.45 | 29.74 | 32.69 | 1.117 | 1.87 | 9.07 | 17.54 | 19.27 |
| 1.068 | 1.89 | 15.22 | 29.32 | 32.22 | 1.118 | 1.87 | 9.00 | 17.40 | 19.12 |
| 1.069 | 1.89 | 15.02 | 28.91 | 31.79 | 1.119 | 1.87 | 8.94 | 17.27 | 18.98 |
| 1.070 | 1.89 | 14.80 | 28.51 | 31.34 | 1.120 | 1.87 | 8.86 | 17.13 | 18.80 |
| 1.071 | 1.89 | 14.61 | 28.13 | 30.92 | 1.121 | 1.87 | 8.79 | 17.00 | 18.68 |
| 1.072 | 1.89 | 14.41 | 27.76 | 30.51 | 1.122 | 1.87 | 8.72 | 16.87 | 18.54 |
| 1.073 | 1.89 | 14.22 | 27.39 | 30.11 | 1.123 | 1.87 | 8.66 | 16.74 | 18.40 |
| 1.074 | 1.88 | 14.04 | 27.04 | 29.72 | 1.124 | 1.87 | 8.59 | 16.62 | 18.26 |
| 1.075 | 1.88 | 13.85 | 26.69 | 29.34 | 1.125 | 1.87 | 8.53 | 16.49 | 18.11 |
| 1.076 | 1.88 | 13.68 | 26.36 | 28.96 | 1.126 | 1.87 | 8.47 | 16.37 | 17.99 |
| 1.077 | 1.88 | 13.56 | 26.03 | 28.69 | 1.127 | 1.87 | 8.40 | 16.25 | 17.86 |
| 1.078 | 1.88 | 13.35 | 25.72 | 28.27 | 1.128 | 1.87 | 8.34 | 16.14 | 17.73 |
| 1.079 | 1.88 | 13.18 | 25.40 | 27.92 | 1.129 | 1.87 | 8.28 | 16.02 | 17.60 |
| 1.080 | 1.88 | 13.02 | 25.10 | 27.59 | 1.130 | 1.87 | 8.22 | 15.91 | 17.48 |

表 7-9 (续)

| <i>K</i> | <i>T</i> | <i>Z</i> | <i>Y</i> | <i>U</i> | <i>K</i> | <i>T</i> | <i>Z</i> | <i>Y</i> | <i>U</i> |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1.131 | 1.87 | 8.16 | 15.79 | 17.35 | 1.181 | 1.85 | 6.07 | 11.76 | 12.92 |
| 1.132 | 1.87 | 8.11 | 15.68 | 17.24 | 1.182 | 1.85 | 6.04 | 11.70 | 12.86 |
| 1.133 | 1.86 | 8.05 | 15.57 | 17.11 | 1.183 | 1.85 | 6.01 | 11.64 | 12.79 |
| 1.134 | 1.86 | 7.99 | 15.46 | 16.99 | 1.184 | 1.85 | 5.98 | 11.58 | 12.73 |
| 1.135 | 1.86 | 7.94 | 15.36 | 16.90 | 1.185 | 1.85 | 5.95 | 11.50 | 12.64 |
| 1.136 | 1.86 | 7.88 | 15.26 | 16.77 | 1.186 | 1.85 | 5.92 | 11.47 | 12.61 |
| 1.137 | 1.86 | 7.83 | 15.15 | 16.65 | 1.187 | 1.85 | 5.89 | 11.42 | 12.54 |
| 1.138 | 1.86 | 7.78 | 15.05 | 16.54 | 1.188 | 1.85 | 5.86 | 11.36 | 12.49 |
| 1.139 | 1.86 | 7.73 | 14.95 | 16.43 | 1.189 | 1.85 | 5.83 | 11.31 | 12.43 |
| 1.140 | 1.86 | 7.68 | 14.86 | 16.35 | 1.190 | 1.84 | 5.81 | 11.26 | 12.37 |
| 1.141 | 1.86 | 7.62 | 14.76 | 16.22 | 1.191 | 1.84 | 5.78 | 11.20 | 12.31 |
| 1.142 | 1.86 | 7.57 | 14.66 | 16.11 | 1.192 | 1.84 | 5.75 | 11.15 | 12.25 |
| 1.143 | 1.86 | 7.53 | 14.57 | 16.01 | 1.193 | 1.84 | 5.73 | 11.10 | 12.20 |
| 1.144 | 1.86 | 7.48 | 14.48 | 15.91 | 1.194 | 1.84 | 5.70 | 11.05 | 12.14 |
| 1.145 | 1.86 | 7.43 | 14.39 | 15.83 | 1.195 | 1.84 | 5.67 | 11.00 | 12.08 |
| 1.146 | 1.86 | 7.38 | 14.29 | 15.71 | 1.196 | 1.84 | 5.65 | 10.95 | 12.03 |
| 1.147 | 1.86 | 7.34 | 14.20 | 15.61 | 1.197 | 1.84 | 5.62 | 10.90 | 11.97 |
| 1.148 | 1.86 | 7.29 | 14.12 | 15.51 | 1.198 | 1.84 | 5.60 | 10.85 | 11.92 |
| 1.149 | 1.86 | 7.25 | 14.03 | 15.42 | 1.199 | 1.84 | 5.57 | 10.80 | 11.87 |
| 1.150 | 1.86 | 7.20 | 13.95 | 15.34 | 1.200 | 1.84 | 5.55 | 10.75 | 11.81 |
| 1.151 | 1.86 | 7.16 | 13.86 | 15.23 | 1.201 | 1.84 | 5.52 | 10.70 | 11.76 |
| 1.152 | 1.86 | 7.11 | 13.77 | 15.14 | 1.202 | 1.84 | 5.50 | 10.65 | 11.71 |
| 1.153 | 1.86 | 7.07 | 13.69 | 15.05 | 1.203 | 1.84 | 5.47 | 10.61 | 11.66 |
| 1.154 | 1.86 | 7.03 | 13.61 | 14.96 | 1.204 | 1.84 | 5.45 | 10.56 | 11.61 |
| 1.155 | 1.86 | 6.99 | 13.54 | 14.87 | 1.205 | 1.84 | 5.42 | 10.52 | 11.56 |
| 1.156 | 1.86 | 6.95 | 13.45 | 14.78 | 1.206 | 1.84 | 5.40 | 10.47 | 11.51 |
| 1.157 | 1.86 | 6.91 | 13.37 | 14.70 | 1.207 | 1.84 | 5.38 | 10.43 | 11.46 |
| 1.158 | 1.86 | 6.87 | 13.30 | 14.61 | 1.208 | 1.84 | 5.35 | 10.38 | 11.41 |
| 1.159 | 1.86 | 6.83 | 13.22 | 14.53 | 1.209 | 1.84 | 5.33 | 10.34 | 11.36 |
| 1.160 | 1.86 | 6.79 | 13.15 | 14.45 | 1.210 | 1.84 | 5.31 | 10.30 | 11.32 |
| 1.161 | 1.85 | 6.75 | 13.07 | 14.36 | 1.211 | 1.83 | 5.29 | 10.25 | 11.27 |
| 1.162 | 1.85 | 6.71 | 13.00 | 14.28 | 1.212 | 1.83 | 5.27 | 10.21 | 11.22 |
| 1.163 | 1.85 | 6.67 | 12.92 | 14.20 | 1.213 | 1.83 | 5.24 | 10.16 | 11.17 |
| 1.164 | 1.85 | 6.64 | 12.85 | 14.12 | 1.214 | 1.83 | 5.22 | 10.12 | 11.12 |
| 1.165 | 1.85 | 6.60 | 12.78 | 14.04 | 1.215 | 1.83 | 5.20 | 10.09 | 11.09 |
| 1.166 | 1.85 | 6.56 | 12.71 | 13.97 | 1.216 | 1.83 | 5.18 | 10.04 | 11.03 |
| 1.167 | 1.85 | 6.53 | 12.64 | 13.89 | 1.217 | 1.83 | 5.16 | 10.00 | 10.99 |
| 1.168 | 1.85 | 6.49 | 12.58 | 13.82 | 1.218 | 1.83 | 5.14 | 9.96 | 10.94 |
| 1.169 | 1.85 | 6.46 | 12.51 | 13.74 | 1.219 | 1.83 | 5.12 | 9.92 | 10.90 |
| 1.170 | 1.85 | 6.42 | 12.43 | 13.66 | 1.220 | 1.83 | 5.10 | 9.89 | 10.87 |
| 1.171 | 1.85 | 6.39 | 12.38 | 13.60 | 1.221 | 1.83 | 5.07 | 9.84 | 10.81 |
| 1.172 | 1.85 | 6.35 | 12.31 | 13.53 | 1.222 | 1.83 | 5.05 | 9.80 | 10.77 |
| 1.173 | 1.85 | 6.32 | 12.25 | 13.46 | 1.223 | 1.83 | 5.03 | 9.76 | 10.73 |
| 1.174 | 1.85 | 6.29 | 12.18 | 13.39 | 1.224 | 1.83 | 5.01 | 9.72 | 10.68 |
| 1.175 | 1.85 | 6.25 | 12.10 | 13.30 | 1.225 | 1.83 | 5.00 | 9.69 | 10.65 |
| 1.176 | 1.85 | 6.22 | 12.06 | 13.25 | 1.226 | 1.83 | 4.98 | 9.65 | 10.60 |
| 1.177 | 1.85 | 6.19 | 12.00 | 13.18 | 1.227 | 1.83 | 4.96 | 9.61 | 10.56 |
| 1.178 | 1.85 | 6.16 | 11.93 | 13.11 | 1.228 | 1.83 | 4.94 | 9.57 | 10.52 |
| 1.179 | 1.85 | 6.13 | 11.87 | 13.05 | 1.229 | 1.83 | 4.92 | 9.53 | 10.48 |
| 1.180 | 1.85 | 6.10 | 11.79 | 12.96 | 1.230 | 1.83 | 4.90 | 9.50 | 10.44 |

表 7-9 (续)

| K | T | Z | Y | U | K | T | Z | Y | U |
|-------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|
| 1.231 | 1.83 | 4.88 | 9.46 | 10.40 | 1.281 | 1.81 | 4.12 | 7.98 | 8.77 |
| 1.232 | 1.83 | 4.86 | 9.43 | 10.36 | 1.282 | 1.81 | 4.11 | 7.96 | 8.74 |
| 1.233 | 1.83 | 4.84 | 9.39 | 10.32 | 1.283 | 1.80 | 4.10 | 7.93 | 8.71 |
| 1.234 | 1.83 | 4.83 | 9.36 | 10.28 | 1.284 | 1.80 | 4.08 | 7.91 | 8.69 |
| 1.235 | 1.83 | 4.81 | 9.32 | 10.24 | 1.285 | 1.80 | 4.07 | 7.89 | 8.66 |
| 1.236 | 1.82 | 4.79 | 9.29 | 10.20 | 1.286 | 1.80 | 4.06 | 7.86 | 8.64 |
| 1.237 | 1.82 | 4.77 | 9.25 | 10.17 | 1.287 | 1.80 | 4.05 | 7.84 | 8.61 |
| 1.238 | 1.82 | 4.76 | 9.22 | 10.13 | 1.288 | 1.80 | 4.04 | 7.81 | 8.59 |
| 1.239 | 1.82 | 4.74 | 9.18 | 10.09 | 1.289 | 1.80 | 4.02 | 7.79 | 8.56 |
| 1.240 | 1.82 | 4.72 | 9.15 | 10.05 | 1.290 | 1.80 | 4.01 | 7.77 | 8.53 |
| 1.241 | 1.82 | 4.70 | 9.12 | 10.02 | 1.291 | 1.80 | 4.00 | 7.75 | 8.51 |
| 1.242 | 1.82 | 4.69 | 9.08 | 9.98 | 1.292 | 1.80 | 3.99 | 7.72 | 8.48 |
| 1.243 | 1.82 | 4.67 | 9.05 | 9.95 | 1.293 | 1.80 | 3.98 | 7.70 | 8.46 |
| 1.244 | 1.82 | 4.65 | 9.02 | 9.91 | 1.294 | 1.80 | 3.97 | 7.68 | 8.43 |
| 1.245 | 1.82 | 4.64 | 8.99 | 9.87 | 1.295 | 1.80 | 3.95 | 7.66 | 8.41 |
| 1.246 | 1.82 | 4.62 | 8.95 | 9.84 | 1.296 | 1.80 | 3.94 | 7.63 | 8.39 |
| 1.247 | 1.82 | 4.60 | 8.92 | 9.81 | 1.297 | 1.80 | 3.93 | 7.61 | 8.36 |
| 1.248 | 1.82 | 4.59 | 8.89 | 9.77 | 1.298 | 1.80 | 3.92 | 7.59 | 8.33 |
| 1.249 | 1.82 | 4.57 | 8.86 | 9.74 | 1.299 | 1.80 | 3.91 | 7.57 | 8.31 |
| 1.250 | 1.82 | 4.56 | 8.83 | 9.70 | 1.300 | 1.80 | 3.90 | 7.55 | 8.29 |
| 1.251 | 1.82 | 4.54 | 8.80 | 9.67 | 1.301 | 1.80 | 3.89 | 7.53 | 8.27 |
| 1.252 | 1.82 | 4.52 | 8.77 | 9.64 | 1.302 | 1.80 | 3.88 | 7.50 | 8.24 |
| 1.253 | 1.82 | 4.51 | 8.74 | 9.60 | 1.303 | 1.80 | 3.87 | 7.48 | 8.22 |
| 1.254 | 1.82 | 4.49 | 8.71 | 9.57 | 1.304 | 1.80 | 3.86 | 7.46 | 8.20 |
| 1.255 | 1.82 | 4.48 | 8.68 | 9.54 | 1.305 | 1.80 | 3.84 | 7.44 | 8.18 |
| 1.256 | 1.82 | 4.46 | 8.65 | 9.51 | 1.306 | 1.80 | 3.83 | 7.42 | 8.16 |
| 1.257 | 1.82 | 4.45 | 8.62 | 9.47 | 1.307 | 1.80 | 3.82 | 7.40 | 8.13 |
| 1.258 | 1.81 | 4.43 | 8.59 | 9.44 | 1.308 | 1.79 | 3.81 | 7.38 | 8.11 |
| 1.259 | 1.81 | 4.42 | 8.56 | 9.41 | 1.309 | 1.79 | 3.80 | 7.36 | 8.09 |
| 1.260 | 1.81 | 4.40 | 8.53 | 9.38 | 1.310 | 1.79 | 3.79 | 7.34 | 8.07 |
| 1.261 | 1.81 | 4.39 | 8.51 | 9.35 | 1.311 | 1.79 | 3.78 | 7.32 | 8.05 |
| 1.262 | 1.81 | 4.37 | 8.49 | 9.32 | 1.312 | 1.79 | 3.77 | 7.30 | 8.02 |
| 1.263 | 1.81 | 4.36 | 8.45 | 9.28 | 1.313 | 1.79 | 3.76 | 7.28 | 8.00 |
| 1.264 | 1.81 | 4.35 | 8.42 | 9.25 | 1.314 | 1.79 | 3.75 | 7.26 | 7.98 |
| 1.265 | 1.81 | 4.33 | 8.39 | 9.23 | 1.315 | 1.79 | 3.74 | 7.24 | 7.96 |
| 1.266 | 1.81 | 4.32 | 8.37 | 9.19 | 1.316 | 1.79 | 3.73 | 7.22 | 7.94 |
| 1.267 | 1.81 | 4.30 | 8.34 | 9.16 | 1.317 | 1.79 | 3.72 | 7.20 | 7.92 |
| 1.268 | 1.81 | 4.29 | 8.31 | 9.14 | 1.318 | 1.79 | 3.71 | 7.18 | 7.89 |
| 1.269 | 1.81 | 4.28 | 8.29 | 9.11 | 1.319 | 1.79 | 3.70 | 7.16 | 7.87 |
| 1.270 | 1.81 | 4.26 | 8.26 | 9.08 | 1.320 | 1.79 | 3.69 | 7.14 | 7.85 |
| 1.271 | 1.81 | 4.25 | 8.23 | 9.05 | 1.321 | 1.79 | 3.68 | 7.12 | 7.83 |
| 1.272 | 1.81 | 4.24 | 8.21 | 9.02 | 1.322 | 1.79 | 3.67 | 7.10 | 7.81 |
| 1.273 | 1.81 | 4.22 | 8.18 | 8.99 | 1.323 | 1.79 | 3.67 | 7.09 | 7.79 |
| 1.274 | 1.81 | 4.21 | 8.15 | 8.96 | 1.324 | 1.79 | 3.66 | 7.07 | 7.77 |
| 1.275 | 1.81 | 4.20 | 8.13 | 8.93 | 1.325 | 1.79 | 3.65 | 7.05 | 7.75 |
| 1.276 | 1.81 | 4.18 | 8.11 | 8.91 | 1.326 | 1.79 | 3.64 | 7.03 | 7.73 |
| 1.277 | 1.81 | 4.17 | 8.08 | 8.88 | 1.327 | 1.79 | 3.63 | 7.01 | 7.71 |
| 1.278 | 1.81 | 4.16 | 8.05 | 8.85 | 1.328 | 1.78 | 3.62 | 7.00 | 7.69 |
| 1.279 | 1.81 | 4.15 | 8.03 | 8.82 | 1.329 | 1.78 | 3.61 | 6.98 | 7.67 |
| 1.280 | 1.81 | 4.13 | 8.01 | 8.79 | 1.330 | 1.78 | 3.60 | 6.96 | 7.65 |

表 7-9 (续)

| K | T | Z | Y | U | K | T | Z | Y | U |
|-------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|
| 1.331 | 1.78 | 3.59 | 6.94 | 7.63 | 1.381 | 1.76 | 3.20 | 6.17 | 6.79 |
| 1.332 | 1.78 | 3.58 | 6.92 | 7.61 | 1.382 | 1.76 | 3.20 | 6.16 | 6.77 |
| 1.333 | 1.78 | 3.57 | 6.91 | 7.59 | 1.383 | 1.76 | 3.19 | 6.14 | 6.75 |
| 1.334 | 1.78 | 3.57 | 6.89 | 7.57 | 1.384 | 1.76 | 3.18 | 6.13 | 6.74 |
| 1.335 | 1.78 | 3.56 | 6.87 | 7.55 | 1.385 | 1.76 | 3.18 | 6.12 | 6.73 |
| 1.336 | 1.78 | 3.55 | 6.85 | 7.53 | 1.386 | 1.76 | 3.17 | 6.11 | 6.72 |
| 1.337 | 1.78 | 3.54 | 6.84 | 7.51 | 1.387 | 1.76 | 3.16 | 6.10 | 6.70 |
| 1.338 | 1.78 | 3.53 | 6.82 | 7.50 | 1.388 | 1.76 | 3.16 | 6.08 | 6.68 |
| 1.339 | 1.78 | 3.52 | 6.81 | 7.48 | 1.389 | 1.76 | 3.15 | 6.07 | 6.67 |
| 1.340 | 1.78 | 3.51 | 6.79 | 7.46 | 1.390 | 1.76 | 3.15 | 6.06 | 6.66 |
| 1.341 | 1.78 | 3.51 | 6.77 | 7.44 | 1.391 | 1.76 | 3.14 | 6.05 | 6.64 |
| 1.342 | 1.78 | 3.50 | 6.76 | 7.42 | 1.392 | 1.76 | 3.13 | 6.04 | 6.63 |
| 1.343 | 1.78 | 3.49 | 6.74 | 7.41 | 1.393 | 1.76 | 3.13 | 6.02 | 6.61 |
| 1.344 | 1.78 | 3.48 | 6.72 | 7.39 | 1.394 | 1.76 | 3.12 | 6.01 | 6.60 |
| 1.345 | 1.78 | 3.47 | 6.71 | 7.37 | 1.395 | 1.76 | 3.11 | 6.00 | 6.59 |
| 1.346 | 1.78 | 3.46 | 6.69 | 7.35 | 1.396 | 1.76 | 3.11 | 5.99 | 6.58 |
| 1.347 | 1.78 | 3.46 | 6.68 | 7.33 | 1.397 | 1.76 | 3.10 | 5.98 | 6.56 |
| 1.348 | 1.78 | 3.45 | 6.66 | 7.32 | 1.398 | 1.75 | 3.10 | 5.96 | 6.55 |
| 1.349 | 1.78 | 3.44 | 6.65 | 7.30 | 1.399 | 1.75 | 3.09 | 5.95 | 6.53 |
| 1.350 | 1.78 | 3.43 | 6.63 | 7.28 | 1.400 | 1.75 | 3.08 | 5.94 | 6.52 |
| 1.351 | 1.78 | 3.42 | 6.61 | 7.27 | 1.401 | 1.75 | 3.08 | 5.93 | 6.50 |
| 1.352 | 1.78 | 3.42 | 6.60 | 7.25 | 1.402 | 1.75 | 3.07 | 5.92 | 6.49 |
| 1.353 | 1.77 | 3.41 | 6.58 | 7.23 | 1.403 | 1.75 | 3.07 | 5.90 | 6.47 |
| 1.354 | 1.77 | 3.40 | 6.57 | 7.21 | 1.404 | 1.75 | 3.06 | 5.89 | 6.46 |
| 1.355 | 1.77 | 3.39 | 6.55 | 7.19 | 1.405 | 1.75 | 3.05 | 5.88 | 6.45 |
| 1.356 | 1.77 | 3.38 | 6.53 | 7.17 | 1.406 | 1.75 | 3.05 | 5.87 | 6.44 |
| 1.357 | 1.77 | 3.38 | 6.52 | 7.16 | 1.407 | 1.75 | 3.04 | 5.86 | 6.43 |
| 1.358 | 1.77 | 3.37 | 6.50 | 7.14 | 1.408 | 1.75 | 3.04 | 5.84 | 6.41 |
| 1.359 | 1.77 | 3.36 | 6.49 | 7.12 | 1.409 | 1.75 | 3.03 | 5.83 | 6.40 |
| 1.360 | 1.77 | 3.35 | 6.47 | 7.11 | 1.410 | 1.75 | 3.02 | 5.82 | 6.39 |
| 1.361 | 1.77 | 3.35 | 6.45 | 7.09 | 1.411 | 1.75 | 3.02 | 5.81 | 6.38 |
| 1.362 | 1.77 | 3.34 | 6.44 | 7.08 | 1.412 | 1.75 | 3.01 | 5.80 | 6.37 |
| 1.363 | 1.77 | 3.33 | 6.42 | 7.06 | 1.413 | 1.75 | 3.01 | 5.78 | 6.35 |
| 1.364 | 1.77 | 3.32 | 6.41 | 7.04 | 1.414 | 1.75 | 3.00 | 5.77 | 6.34 |
| 1.365 | 1.77 | 3.32 | 6.39 | 7.03 | 1.415 | 1.75 | 3.00 | 5.76 | 6.33 |
| 1.366 | 1.77 | 3.31 | 6.38 | 7.01 | 1.416 | 1.75 | 2.99 | 5.75 | 6.32 |
| 1.367 | 1.77 | 3.30 | 6.37 | 7.00 | 1.417 | 1.75 | 2.98 | 5.74 | 6.31 |
| 1.368 | 1.77 | 3.30 | 6.35 | 6.98 | 1.418 | 1.75 | 2.98 | 5.72 | 6.29 |
| 1.369 | 1.77 | 3.29 | 6.34 | 6.97 | 1.419 | 1.75 | 2.97 | 5.71 | 6.28 |
| 1.370 | 1.77 | 3.28 | 6.32 | 6.95 | 1.420 | 1.75 | 2.97 | 5.70 | 6.27 |
| 1.371 | 1.77 | 3.27 | 6.31 | 6.93 | 1.421 | 1.75 | 2.96 | 5.69 | 6.26 |
| 1.372 | 1.77 | 3.27 | 6.30 | 6.91 | 1.422 | 1.75 | 2.96 | 5.68 | 6.25 |
| 1.373 | 1.77 | 3.26 | 6.28 | 6.90 | 1.423 | 1.75 | 2.95 | 5.67 | 6.23 |
| 1.374 | 1.77 | 3.25 | 6.27 | 6.89 | 1.424 | 1.74 | 2.95 | 5.66 | 6.22 |
| 1.375 | 1.77 | 3.25 | 6.25 | 6.87 | 1.425 | 1.74 | 2.94 | 5.65 | 6.21 |
| 1.376 | 1.77 | 3.24 | 6.24 | 6.86 | 1.426 | 1.74 | 2.94 | 5.64 | 6.20 |
| 1.377 | 1.77 | 3.23 | 6.22 | 6.84 | 1.427 | 1.74 | 2.93 | 5.63 | 6.19 |
| 1.378 | 1.77 | 3.22 | 6.21 | 6.82 | 1.428 | 1.74 | 2.92 | 5.62 | 6.17 |
| 1.379 | 1.77 | 3.22 | 6.19 | 6.81 | 1.429 | 1.74 | 2.92 | 5.61 | 6.16 |
| 1.380 | 1.77 | 3.21 | 6.18 | 6.80 | 1.430 | 1.74 | 2.91 | 5.60 | 6.15 |

表 7-9 (续)

| K | T | Z | Y | U | K | T | Z | Y | U |
|-------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|
| 1.431 | 1.74 | 2.91 | 5.59 | 6.14 | 1.481 | 1.72 | 2.68 | 5.11 | 5.60 |
| 1.432 | 1.74 | 2.90 | 5.58 | 6.13 | 1.482 | 1.72 | 2.67 | 5.10 | 5.59 |
| 1.433 | 1.74 | 2.90 | 5.57 | 6.11 | 1.483 | 1.72 | 2.67 | 5.10 | 5.59 |
| 1.434 | 1.74 | 2.89 | 5.56 | 6.10 | 1.484 | 1.72 | 2.66 | 5.09 | 5.58 |
| 1.435 | 1.74 | 2.89 | 5.55 | 6.09 | 1.485 | 1.72 | 2.66 | 5.08 | 5.57 |
| 1.436 | 1.74 | 2.88 | 5.54 | 6.08 | 1.486 | 1.72 | 2.66 | 5.07 | 5.56 |
| 1.437 | 1.74 | 2.88 | 5.53 | 6.07 | 1.487 | 1.72 | 2.65 | 5.06 | 5.55 |
| 1.438 | 1.74 | 2.87 | 5.52 | 6.05 | 1.488 | 1.72 | 2.65 | 5.06 | 5.55 |
| 1.439 | 1.74 | 2.87 | 5.51 | 6.04 | 1.489 | 1.72 | 2.64 | 5.05 | 5.54 |
| 1.440 | 1.74 | 2.86 | 5.50 | 6.03 | 1.490 | 1.72 | 2.64 | 5.04 | 5.53 |
| 1.441 | 1.74 | 2.86 | 5.49 | 6.02 | 1.491 | 1.72 | 2.64 | 5.03 | 5.52 |
| 1.442 | 1.74 | 2.85 | 5.48 | 6.01 | 1.492 | 1.72 | 2.63 | 5.02 | 5.51 |
| 1.443 | 1.74 | 2.85 | 5.47 | 6.00 | 1.493 | 1.71 | 2.63 | 5.02 | 5.51 |
| 1.444 | 1.74 | 2.84 | 5.46 | 5.99 | 1.494 | 1.71 | 2.62 | 5.01 | 5.50 |
| 1.445 | 1.74 | 2.84 | 5.45 | 5.98 | 1.495 | 1.71 | 2.62 | 5.00 | 5.49 |
| 1.446 | 1.74 | 2.83 | 5.44 | 5.97 | 1.496 | 1.71 | 2.62 | 4.99 | 5.48 |
| 1.447 | 1.73 | 2.83 | 5.43 | 5.96 | 1.497 | 1.71 | 2.61 | 4.98 | 5.47 |
| 1.448 | 1.73 | 2.82 | 5.42 | 5.95 | 1.498 | 1.71 | 2.61 | 4.98 | 5.47 |
| 1.449 | 1.73 | 2.82 | 5.41 | 5.94 | 1.499 | 1.71 | 2.60 | 4.97 | 5.46 |
| 1.450 | 1.73 | 2.81 | 5.40 | 5.93 | 1.500 | 1.71 | 2.60 | 4.96 | 5.45 |
| 1.451 | 1.73 | 2.81 | 5.39 | 5.92 | 1.501 | 1.71 | 2.60 | 4.95 | 5.44 |
| 1.452 | 1.73 | 2.80 | 5.38 | 5.91 | 1.502 | 1.71 | 2.59 | 4.94 | 5.43 |
| 1.453 | 1.73 | 2.80 | 5.37 | 5.90 | 1.503 | 1.71 | 2.59 | 4.94 | 5.43 |
| 1.454 | 1.73 | 2.80 | 5.36 | 5.89 | 1.504 | 1.71 | 2.58 | 4.93 | 5.42 |
| 1.455 | 1.73 | 2.79 | 5.35 | 5.88 | 1.505 | 1.71 | 2.58 | 4.92 | 5.41 |
| 1.456 | 1.73 | 2.79 | 5.34 | 5.87 | 1.506 | 1.71 | 2.58 | 4.91 | 5.40 |
| 1.457 | 1.73 | 2.78 | 5.33 | 5.86 | 1.507 | 1.71 | 2.57 | 4.90 | 5.39 |
| 1.458 | 1.73 | 2.78 | 5.32 | 5.85 | 1.508 | 1.71 | 2.57 | 4.90 | 5.39 |
| 1.459 | 1.73 | 2.77 | 5.31 | 5.84 | 1.509 | 1.71 | 2.57 | 4.89 | 5.38 |
| 1.460 | 1.73 | 2.77 | 5.30 | 5.83 | 1.510 | 1.71 | 2.56 | 4.88 | 5.37 |
| 1.461 | 1.73 | 2.76 | 5.29 | 5.82 | 1.511 | 1.71 | 2.56 | 4.87 | 5.36 |
| 1.462 | 1.73 | 2.76 | 5.28 | 5.80 | 1.512 | 1.71 | 2.56 | 4.86 | 5.35 |
| 1.463 | 1.73 | 2.75 | 5.27 | 5.79 | 1.513 | 1.71 | 2.55 | 4.86 | 5.35 |
| 1.464 | 1.73 | 2.75 | 5.26 | 5.78 | 1.514 | 1.71 | 2.55 | 4.85 | 5.34 |
| 1.465 | 1.73 | 2.74 | 5.25 | 5.77 | 1.515 | 1.71 | 2.54 | 4.84 | 5.33 |
| 1.466 | 1.73 | 2.74 | 5.24 | 5.76 | 1.516 | 1.71 | 2.54 | 4.83 | 5.32 |
| 1.467 | 1.73 | 2.74 | 5.23 | 5.74 | 1.517 | 1.71 | 2.54 | 4.82 | 5.31 |
| 1.468 | 1.72 | 2.73 | 5.22 | 5.73 | 1.518 | 1.71 | 2.53 | 4.82 | 5.31 |
| 1.469 | 1.72 | 2.73 | 5.21 | 5.72 | 1.519 | 1.70 | 2.53 | 4.81 | 5.30 |
| 1.470 | 1.72 | 2.72 | 5.20 | 5.71 | 1.520 | 1.70 | 2.53 | 4.80 | 5.29 |
| 1.471 | 1.72 | 2.72 | 5.19 | 5.70 | 1.521 | 1.70 | 2.52 | 4.79 | 5.28 |
| 1.472 | 1.72 | 2.71 | 5.18 | 5.69 | 1.522 | 1.70 | 2.52 | 4.79 | 5.27 |
| 1.473 | 1.72 | 2.71 | 5.18 | 5.68 | 1.523 | 1.70 | 2.52 | 4.78 | 5.27 |
| 1.474 | 1.72 | 2.71 | 5.17 | 5.67 | 1.524 | 1.70 | 2.51 | 4.78 | 5.26 |
| 1.475 | 1.72 | 2.70 | 5.16 | 5.66 | 1.525 | 1.70 | 2.51 | 4.77 | 5.25 |
| 1.476 | 1.72 | 2.70 | 5.15 | 5.65 | 1.526 | 1.70 | 2.51 | 4.77 | 5.24 |
| 1.477 | 1.72 | 2.69 | 5.14 | 5.64 | 1.527 | 1.70 | 2.50 | 4.76 | 5.23 |
| 1.478 | 1.72 | 2.69 | 5.14 | 5.63 | 1.528 | 1.70 | 2.50 | 4.76 | 5.23 |
| 1.479 | 1.72 | 2.68 | 5.13 | 5.62 | 1.529 | 1.70 | 2.49 | 4.75 | 5.22 |
| 1.480 | 1.72 | 2.68 | 5.12 | 5.61 | 1.530 | 1.70 | 2.49 | 4.74 | 5.21 |

表 7-9 (续)

| <i>K</i> | <i>T</i> | <i>Z</i> | <i>Y</i> | <i>U</i> | <i>K</i> | <i>T</i> | <i>Z</i> | <i>Y</i> | <i>U</i> |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1.531 | 1.70 | 2.49 | 4.73 | 5.20 | 1.556 | 1.69 | 2.41 | 4.57 | 5.02 |
| 1.532 | 1.70 | 2.48 | 4.72 | 5.19 | 1.557 | 1.69 | 2.40 | 4.56 | 5.01 |
| 1.533 | 1.70 | 2.48 | 4.72 | 5.19 | 1.558 | 1.69 | 2.40 | 4.56 | 5.00 |
| 1.534 | 1.70 | 2.48 | 4.71 | 5.17 | 1.559 | 1.69 | 2.40 | 4.55 | 4.99 |
| 1.535 | 1.70 | 2.47 | 4.70 | 5.17 | 1.560 | 1.69 | 2.40 | 4.54 | 4.99 |
| 1.536 | 1.70 | 2.47 | 4.69 | 5.16 | 1.561 | 1.69 | 2.39 | 4.54 | 4.98 |
| 1.537 | 1.70 | 2.47 | 4.68 | 5.15 | 1.562 | 1.69 | 2.39 | 4.53 | 4.97 |
| 1.538 | 1.69 | 2.46 | 4.68 | 5.15 | 1.563 | 1.68 | 2.39 | 4.52 | 4.97 |
| 1.539 | 1.69 | 2.46 | 4.67 | 5.14 | 1.564 | 1.68 | 2.38 | 4.51 | 4.96 |
| 1.540 | 1.69 | 2.46 | 4.66 | 5.13 | 1.565 | 1.68 | 2.38 | 4.51 | 4.95 |
| 1.541 | 1.69 | 2.45 | 4.66 | 5.12 | 1.566 | 1.68 | 2.38 | 4.50 | 4.95 |
| 1.542 | 1.69 | 2.45 | 4.65 | 5.11 | 1.567 | 1.68 | 2.37 | 4.50 | 4.94 |
| 1.543 | 1.69 | 2.45 | 4.64 | 5.11 | 1.568 | 1.68 | 2.37 | 4.49 | 4.93 |
| 1.544 | 1.69 | 2.45 | 4.64 | 5.10 | 1.569 | 1.68 | 2.37 | 4.48 | 4.92 |
| 1.545 | 1.69 | 2.44 | 4.63 | 5.09 | 1.570 | 1.68 | 2.37 | 4.48 | 4.92 |
| 1.546 | 1.69 | 2.44 | 4.63 | 5.08 | 1.571 | 1.68 | 2.36 | 4.47 | 4.91 |
| 1.547 | 1.69 | 2.44 | 4.62 | 5.07 | 1.572 | 1.68 | 2.36 | 4.47 | 4.91 |
| 1.548 | 1.69 | 2.43 | 4.62 | 5.07 | 1.573 | 1.68 | 2.36 | 4.46 | 4.90 |
| 1.549 | 1.69 | 2.43 | 4.61 | 5.06 | 1.574 | 1.68 | 2.35 | 4.46 | 4.89 |
| 1.550 | 1.69 | 2.43 | 4.60 | 5.05 | 1.575 | 1.68 | 2.35 | 4.45 | 4.89 |
| 1.551 | 1.69 | 2.42 | 4.60 | 5.05 | 1.576 | 1.68 | 2.35 | 4.44 | 4.88 |
| 1.552 | 1.69 | 2.42 | 4.59 | 5.04 | 1.577 | 1.68 | 2.35 | 4.44 | 4.88 |
| 1.553 | 1.69 | 2.42 | 4.58 | 5.03 | 1.578 | 1.68 | 2.34 | 4.43 | 4.87 |
| 1.554 | 1.69 | 2.41 | 4.58 | 5.03 | 1.579 | 1.68 | 2.34 | 4.42 | 4.86 |
| 1.555 | 1.69 | 2.41 | 4.57 | 5.02 | 1.580 | 1.68 | 2.34 | 4.42 | 4.86 |

附 录 A
(规范性附录)
非圆形截面容器

A.1 总则

A.1.1 本附录适用于非圆形截面单层焊接容器的设计、制造和验收。除了本附录规定的条款之外，按本附录设计和制造的容器还应符合本部分其他部分的有关条款要求。

A.1.2 本附录给出的设计方法所适用的容器其截面形状为矩形、长圆形和椭圆形，如图 A.1~图 A.8、图 A.10~图 A.13 所示。其他形状截面的非圆形容器可采用其他方法计算薄膜应力和弯曲应力，然后按本附录的强度条件进行校核。

A.1.3 本附录的计算公式仅考虑内压载荷引起的薄膜应力和弯曲应力，对于由其他机械载荷（如支座、接管或其他构件产生的反作用力）引起的局部应力以及热应力应按其他合适的方法进行计算，强度条件可按 A.3 确定。

A.1.4 本附录的计算公式适用于容器纵横比（容器长度与横截面内侧长边长度或长轴之比）大于 4 的情况。对于纵横比小于 4 的容器，仍可用本附录的公式进行计算，但结果将偏于保守。若考虑端盖的加强作用，也可采用更精确的方法进行设计计算。

A.1.5 按本附录进行容器的设计计算时，应先确定结构尺寸（如厚度、加强件尺寸等），然后按要求进行应力计算和校核，直至满足强度要求为止。

A.2 符号

A —— 参数，见表 A.1，mm；

A_1 —— 短边侧板上加强件的横截面积， mm^2 ；

A_2 —— 长边侧板上加强件的横截面积， mm^2 ；

A_3 —— 参数，见表 A.1，mm；

a —— 椭圆截面中面长轴半径（见图 A.5），mm；

B —— 参数，见表 A.1， mm^2 ；

b —— 椭圆截面中面短轴半径（见图 A.5），mm；

c —— 板截面或板与加强件组合截面中性轴至计算截面内表面的距离 c_i 或至计算截面外表面的距离 c_o 。在对内、外表面的弯曲应力计算中，应分别以 c_i 或 c_o 代入，mm；

C_1 —— 参数，见表 A.1， mm^2 ；

C_2 —— 参数，见表 A.1， mm^2 ；

D_1 —— 参数，见表 A.1， mm^3 ；

D_2 —— 参数，见表 A.1， mm^3 ；

d_j —— 焊缝至中心线的距离（见图 A.1~A.4，A.6~A.8），mm；

E —— 常温时材料的弹性模量，MPa；

E^t —— 设计温度下材料的弹性模量，MPa；

- F —— 参数, 见表 A.1;
- H —— 矩形容器短边内侧长度, mm;
- H_1 —— 矩形容器短边加强件中心线长度 (见图 A.6), mm;
- h —— 矩形容器长边内侧长度, mm;
- h_1 —— 矩形容器长边加强件中心线长度 (见图 A.6), mm;
- I_1 、 I_2 —— 短边侧板和长边侧板截面的惯性矩, 计算式见表 A.1, mm⁴;
- I_{11} —— 在有效宽度 W 范围内, 厚度为 δ_1 的侧板与加强件组合截面惯性矩, mm⁴;
- I_{21} —— 在有效宽度 W 范围内, 厚度为 δ_2 的侧板与加强件组合截面惯性矩, mm⁴;
- I_{22} —— 非对称矩形截面容器中厚度为 δ_2 的侧板的惯性矩, mm⁴;
- J —— 应力参数, 见表 A.3;
- J_2 —— 应力参数, 见表 A.2;
- J_3 —— 应力参数, 见表 A.2;
- K —— 参数, 见表 A.1;
- K_1 —— 参数, 见表 A.1;
- K_2 —— 参数, 见表 A.1;
- k —— 参数, 见表 A.1;
- k_1 —— 参数, 见表 A.1;
- k_2 —— 参数, 见表 A.1;
- L —— 无外加强或外加强的长圆形截面容器 (见图 A.4 和图 A.8) 以及无外加强带圆角矩形截面容器 (见图 A.3) 的长边侧板半长, mm;
- L_0 —— 外加强带圆角矩形截面容器长边上加强件的半长 (见图 A.7), mm;
- L_1 —— 容器轴向长度, mm;
- L_{11} —— 外加强带圆角矩形截面容器长边上加强件边缘到圆角边缘的距离 (见图 A.7), mm;
- L_h —— 孔中心距, mm;
- L_s —— 加强件起加强作用的有效宽度, 对非加强容器取 1, mm;
- l_0 —— 外加强带圆角矩形截面容器短边上加强件的半长 (见图 A.7), mm;
- l_1 —— 无外加强带圆角矩形截面容器 (见图 A.3) 的短边侧板半长, mm;
- l_{11} —— 外加强带圆角矩形截面容器短边上加强件边缘到圆角边缘的距离 (见图 A.7), mm;
- M_A 、 M_r —— 弯矩, N·mm;
- N —— 参数, 见表 A.1;
- p_c —— 计算压力, MPa;
- R —— 椭圆形截面容器大圆弧区中面半径 (见图 A.5 和图 A.10), 计算式见表 A.1, mm;
- r —— 长圆形截面容器内半径 (见图 A.4) 或椭圆形截面容器小圆弧区中面半径 (见图 A.5 和图 A.10)。当为椭圆形截面容器小圆弧区中面半径时, 计算式见表 A.1, mm;
- W —— 有效板宽, mm;
- α —— 参数, 见表 A.1;
- α_1 —— 参数, 见表 A.1;
- α_2 —— 参数, 见表 A.1;
- α_3 —— 参数, 见表 A.1;

- β ——系数，见表 A.1；
 δ_1 ——容器短边侧板的有效厚度，mm；
 δ_2 ——容器长边侧板的有效厚度，mm；
 δ_3 、 δ_4 ——拉撑板的有效厚度，mm；
 δ_{22} ——非对称矩形截面容器长边侧板中较厚件的有效厚度，mm；
 γ ——参数，见表 A.1；
 γ_1 ——参数，见表 A.1；
 η_b ——针对弯曲应力的开孔削弱系数；
 η_m ——针对薄膜应力的开孔削弱系数；
 σ_b ——弯曲应力，MPa；
 σ_m ——薄膜应力，MPa；
 σ_T ——总应力，MPa；
 $[\sigma]^t$ ——设计温度下材料的许用应力，MPa；
 R_{eL} 、 $R_{p0.2}$ ——常温下材料屈服点，MPa；
 R_{eL}^t 、 $R_{p0.2}^t$ ——设计温度下材料屈服点，MPa；
 ϕ ——焊接接头系数；
 φ ——参数，见表 A.1。

表 A.1 计算参数表

| 序号 | 计算参数表达式 | 单位 |
|----|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 1 | $A = r(2\gamma + \pi\alpha_2)$ | mm |
| 2 | $A_3 = r_1(2\gamma_1 + \pi)$ | mm |
| 3 | $B = r^2(\gamma^2 + \pi\gamma\alpha_2 + 2\alpha_2)$ | mm ² |
| 4 | $C_1 = r^2(2\gamma^2 + 3\pi\gamma\alpha_2 + 12\alpha_2)$ | mm ² |
| 5 | $C_2 = r_1^2(2\gamma_1^2 + 3\pi\gamma_1 + 12)$ | mm ² |
| 6 | $D_1 = r^3(\gamma^3 + 2\pi\gamma^2\alpha_2 + 12\gamma\alpha_2 + 2\pi\alpha_2)$ | mm ³ |
| 7 | $D_2 = r^3(4\gamma^3 + 6\pi\gamma^2\alpha_2 + 24\gamma\alpha_2 + 3\pi\alpha_2)$ | mm ³ |
| 8 | $F = (3AD_1 - 2BC_1)/(AD_2 - 6B^2)$ | |
| 9 | $I_1 = L_s \cdot \delta_1^3 / 12$ | mm ⁴ |
| 10 | $I_2 = L_s \cdot \delta_2^3 / 12$ | mm ⁴ |
| 11 | $K = (I_2 / I_1)\alpha$ | |
| 12 | $K_1 = 2k_2 + 3$ | |
| 13 | $K_2 = 3k_1 + 2k_2$ | |
| 14 | $k = (I_{21} / I_{11})\alpha$ | |
| 15 | $k_1 = (I_{22} / I_2)$ | |
| 16 | $k_2 = (I_{22} / I_1)\alpha$ | |

表 A.1 (续)

| 序号 | 计算参数表达式 | 单位 |
|----|----------------------------------------------------------------|----|
| 17 | $N = K_1 K_2 - k_2^2$ | |
| 18 | $R = \frac{\sqrt{a^2 + b^2} [\sqrt{a^2 + b^2} + (a - b)]}{2b}$ | mm |
| 19 | $r = \frac{\sqrt{a^2 + b^2} [\sqrt{a^2 + b^2} - (a - b)]}{2a}$ | mm |
| 20 | $\alpha = H/h$ | |
| 21 | $\alpha_1 = H_1/h_1$ | |
| 22 | $\alpha_2 = I_2/I_1$ | |
| 23 | $\alpha_3 = L/l_1$ | |
| 24 | $\beta = h/L_s$ 或 H/L_s | |
| 25 | $\gamma = L/r$ | |
| 26 | $\gamma_1 = L/r_1$ | |
| 27 | $\varphi = r/l_1$ | |

A.3 非圆形截面容器设计的强度条件

A.3.1 本附录要求对非圆形截面容器中的薄膜应力和弯曲应力进行计算和校核。压力和机械载荷引起的薄膜应力应不大于 $[\sigma]^t \phi$ ；压力和机械载荷引起的总应力(即薄膜应力与弯曲应力之和)应不超过以下数值：

- a) 无加强容器(图 A.1~A.5)的侧板或外加强带圆角矩形截面容器上无加强圆角处,(图 A.7)取 $1.5[\sigma]^t \phi$ ；
- b) 外加强容器的组合截面处，

1) 碳素钢、低合金钢、铁素体不锈钢取： $\frac{R_{el}^t}{1.5} \phi$ ；

2) 奥氏体不锈钢取： $0.9R_{p0.2}^t \cdot \phi$ 和 $\frac{R_{p0.2}}{1.5} \phi$ 两者中小值。

A.3.2 在对焊缝处的应力进行校核时，A、B类接头的焊接接头系数按 GB 150.1 的规定。C、D类焊缝的结构和焊脚尺寸应符合附录 D 中图 D11 和图 D13 规定的要求，其焊接接头系数可取为 1.0。

A.3.3 应力校核原则

- a) 对无加强容器，只需计算侧板的薄膜应力和总应力，然后对该薄膜应力和两个总应力按 A.3.1 进行校核。
- b) 有加强但加强件的许用应力和屈服点与容器壳体相同时，只需计算侧板、侧板与加强件组合截面的薄膜应力以及侧板与加强件组合截面内、外表面的总应力，然后对该薄膜应力和两个总应力按 A.3.1 进行校核。
- c) 当有加强且加强件的许用应力和屈服点与容器壳体不同时，应对壳体和加强件分别计算和

校核其薄膜应力以及内、外壁处的总应力。

A.3.4 计算得到的总应力应为薄膜应力与弯曲应力的代数和。薄膜应力与弯曲应力的正、负号规定如下：

- a) 薄膜应力以拉应力为正，以压应力为负；
- b) 计算内压作用下的弯曲应力，对于 A.3.3a) 和 b) 的情况， c_o 取负号， c_i 取正号；对于 A.3.3c) 的情况，如应力计算点在组合截面中性轴的内侧，则 c_o 或 c_i 取正号，否则， c_o 或 c_i 取负号。

A.4 无加强的非圆形截面容器

A.4.1 对称矩形截面容器

A.4.1.1 结构

本节计算公式适用的对称矩形截面容器如图 A.1 所示。容器的两对边侧板厚度应相等，但相邻侧板的厚度可以不相等。

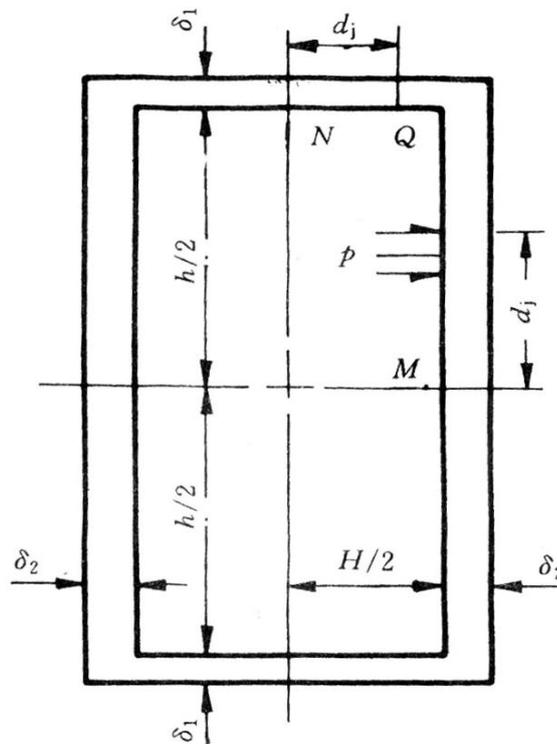


图 A.1 对称矩形截面容器

A.4.1.2 应力计算

a) 短边侧板

侧板上 N 点和 Q 点的薄膜应力按式 (A-1) 计算：

$$\sigma_m^N = \sigma_{m(1)}^Q = \frac{p_c \cdot h}{2\delta_1} \dots\dots\dots (A-1)$$

侧板上 N 点和 Q 点的弯曲应力分别按式 (A-2)、式 (A-3) 计算：

$$\sigma_b^N = \frac{p_c \cdot c \cdot h^2 \cdot L_s}{12I_1} \left(-1.5\alpha^2 + \frac{1+\alpha^2 K}{1+K} \right) \dots\dots\dots (A-2)$$

$$\sigma_{b(1)}^Q = \frac{p_c \cdot c \cdot h^2 \cdot L_s}{12I_1} \left(\frac{1+\alpha^2 K}{1+K} \right) \dots\dots\dots (A-3)$$

N 点和 Q 点的总应力分别按式 (A-4)、式 (A-5) 计算:

$$\sigma_T^N = \sigma_m^N + \sigma_b^N \dots\dots\dots (A-4)$$

$$\sigma_{T(1)}^Q = \sigma_{m(1)}^Q + \sigma_{b(1)}^Q \dots\dots\dots (A-5)$$

b) 长边侧板

侧板上 M 点和 Q 点的薄膜应力按式 (A-6) 计算:

$$\sigma_m^M = \sigma_{m(2)}^Q = \frac{p_c \cdot H}{2\delta_2} \dots\dots\dots (A-6)$$

侧板上 M 点和 Q 点的弯曲应力分别按式 (A-7)、式 (A-8) 计算:

$$\sigma_b^M = \frac{p_c \cdot c \cdot h^2 \cdot L_s}{12I_2} \left(-1.5 + \frac{1+\alpha^2 K}{1+K} \right) \dots\dots\dots (A-7)$$

$$\sigma_{b(2)}^Q = \frac{p_c \cdot c \cdot h^2 \cdot L_s}{12I_2} \left(\frac{1+\alpha^2 K}{1+K} \right) \dots\dots\dots (A-8)$$

M 点和 Q 点的总应力分别按式 (A-9)、式 (A-10) 计算:

$$\sigma_T^M = \sigma_m^M + \sigma_b^M \dots\dots\dots (A-9)$$

$$\sigma_{T(2)}^Q = \sigma_{m(2)}^Q + \sigma_{b(2)}^Q \dots\dots\dots (A-10)$$

c) 考虑封头的加强作用

当容器纵横比 (L_1/H 或 L_1/h) 小于 2 时, 设计中可考虑封头的加强作用, 侧板中点 N 和 M 处的弯曲应力为式 (A-2) 和式 (A-7) 的计算值分别乘以表 A.2 中的系数 J_2 ; 容器拐角 Q 点的弯曲应力为式 (A-3) 和式 (A-8) 的计算值分别乘以表 A.2 中的系数 J_3 。

表 A.2 系数 J_2 和 J_3

| L_1/H 或 L_1/h | J_2 | J_3 |
|-------------------|-------|-------|
| 1.0 | 0.56 | 0.62 |
| 1.1 | 0.64 | 0.70 |
| 1.2 | 0.73 | 0.77 |
| 1.3 | 0.79 | 0.83 |
| 1.4 | 0.85 | 0.88 |
| 1.5 | 0.89 | 0.91 |
| 1.6 | 0.92 | 0.94 |
| 1.7 | 0.95 | 0.96 |
| 1.8 | 0.97 | 0.98 |
| 1.9 | 0.99 | 0.99 |
| 2.0 | 1.0 | 1.0 |

A.4.2 非对称矩形截面容器

A.4.2.1 结构

本节计算公式适用的非对称矩形截面容器如图 A.2 所示。其中一对对边侧板厚度相同，而另一对侧板的厚度不等。

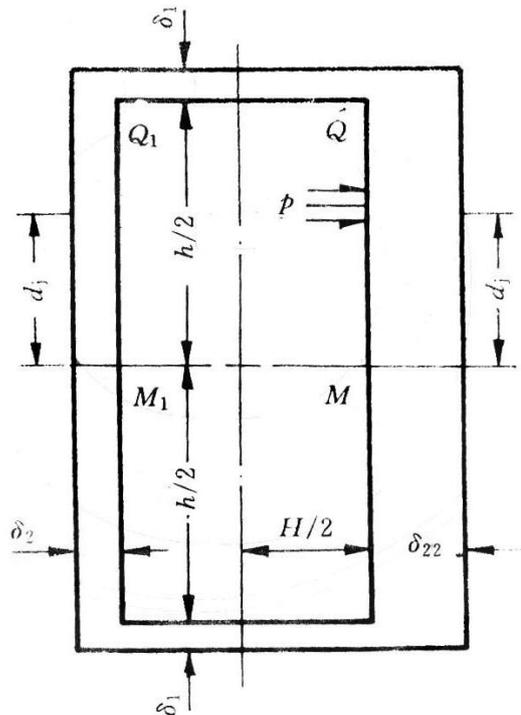


图 A.2 非对称矩形截面容器

A.4.2.2 应力计算

a) 短边侧板

侧板上 Q 点和 Q₁ 点的薄膜应力按式 (A-11) 计算:

$$\sigma_{m(1)}^Q = \sigma_{m(1)}^{Q_1} = \frac{p_c \cdot h}{2\delta_1} \dots\dots\dots (A-11)$$

侧板上 Q 点和 Q₁ 点的弯曲应力分别按式 (A-12)、式 (A-13) 计算:

$$\sigma_{b(1)}^Q = \frac{p_c \cdot c \cdot h^2 \cdot L_s}{4N \cdot I_1} [(K_2 - k_1 \cdot k_2) + \alpha^2 k_2 (K_2 - k_2)] \dots\dots\dots (A-12)$$

$$\sigma_{b(1)}^{Q_1} = \frac{p_c \cdot c \cdot h^2 \cdot L_s}{4N \cdot I_1} [(K_1 \cdot k_1 - k_2) + \alpha^2 k_2 (K_1 - k_2)] \dots\dots\dots (A-13)$$

Q 点和 Q₁ 点的总应力分别按式 (A-14)、式 (A-15) 计算:

$$\sigma_{T(1)}^Q = \sigma_{m(1)}^Q + \sigma_{b(1)}^Q \dots\dots\dots (A-14)$$

$$\sigma_{T(1)}^{Q_1} = \sigma_{m(1)}^{Q_1} + \sigma_{b(1)}^{Q_1} \dots\dots\dots (A-15)$$

b) 长边侧板

侧板上 M₁ 和 Q₁ 点的薄膜应力按式 (A-16) 计算:

$$\sigma_m^{M_1} = \sigma_{m(2)}^{Q_1} = \frac{p_c \cdot h}{4\alpha \cdot N \cdot \delta_2} [2\alpha^2 \cdot N - (K_2 + k_2) + k_1(K_1 + k_2) - \alpha^2 \cdot k_2(K_2 - K_1)] \dots\dots\dots (A-16)$$

侧板上 M 和 Q 点的薄膜应力按式 (A-17) 计算:

$$\sigma_m^M = \sigma_{m(2)}^Q = \frac{p_c \cdot h}{4\alpha \cdot N \cdot \delta_{22}} [2\alpha^2 \cdot N + (K_2 + k_2) - k_1(K_1 + k_2) + \alpha^2 \cdot k_2(K_2 - K_1)] \dots\dots\dots (A-17)$$

侧板上 M、M₁、Q、Q₁ 点的弯曲应力分别按式 (A-18) ~ (A-21) 计算:

$$\sigma_b^M = \frac{p_c \cdot c \cdot h^2 \cdot L_s}{8N \cdot I_{22}} \{2[(K_2 - k_1 \cdot k_2) + \alpha^2 \cdot k_2(K_2 - k_2)] - N\} \dots\dots\dots (A-18)$$

$$\sigma_b^{M_1} = \frac{p_c \cdot c \cdot h^2 \cdot L_s}{8N \cdot I_2} \{2[(K_1 \cdot k_1 - k_2) + \alpha^2 \cdot k_2(K_1 - k_2)] - N\} \dots\dots\dots (A-19)$$

$$\sigma_{b(2)}^Q = \frac{p_c \cdot c \cdot h^2 \cdot L_s}{4N \cdot I_{22}} [(K_2 - k_1 \cdot k_2) + \alpha^2 \cdot k_2(K_2 - k_2)] \dots\dots\dots (A-20)$$

$$\sigma_{b(2)}^{Q_1} = \frac{p_c \cdot c \cdot h^2 \cdot L_s}{4N \cdot I_2} [(K_1 \cdot k_1 - k_2) + \alpha^2 \cdot k_2(K_1 - k_2)] \dots\dots\dots (A-21)$$

侧板 M、M₁、Q、Q₁ 点的总应力分别按式 (A-22) ~ (A-25) 计算:

$$\sigma_T^M = \sigma_m^M + \sigma_b^M \dots\dots\dots (A-22)$$

$$\sigma_T^{M_1} = \sigma_m^{M_1} + \sigma_b^{M_1} \dots\dots\dots (A-23)$$

$$\sigma_{T(2)}^Q = \sigma_{m(2)}^Q + \sigma_{b(2)}^Q \quad \dots\dots\dots (A-24)$$

$$\sigma_{T(2)}^{Q_1} = \sigma_{m(2)}^{Q_1} + \sigma_{b(2)}^{Q_1} \quad \dots\dots\dots (A-25)$$

c) 考虑封头的加强作用

当容器纵横比 (L_1/H 或 L_1/h) 小于 2 时, 设计中可考虑封头的加强作用, 短边侧板 Q 和 Q_1 点的弯曲应力为式 (A-12) 和式 (A-13) 的计算值分别乘以表 A.2 中的系数 J_3 ; 长边侧板 M 和 M_1 点的弯曲应力为式 (A-18) 和式 (A-19) 的计算值分别乘以表 A.2 中的系数 J_2 ; 长边侧板 Q 和 Q_1 点的弯曲应力为式 (A-20) 和式 (A-21) 的计算值分别乘以表 A.2 中的系数 J_3 。

A.4.3 带圆角的矩形截面容器

A.4.3.1 结构

本节计算公式适用的带圆角的矩形截面容器如图 A.3 所示。容器侧板与圆角的厚度相同; 圆角半径 r 应不小于侧板厚度的 3 倍。

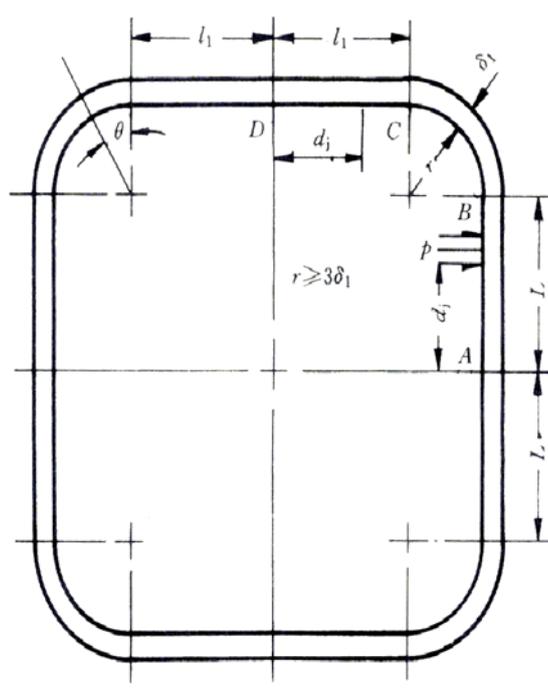


图 A.3 带圆角的矩形截面容器

A.4.3.2 应力计算

a) 短边侧板

侧板上 C 点和 D 点的薄膜应力按式 (A-26) 计算:

$$\sigma_m^C = \sigma_m^D = \frac{p_c(r+L)}{\delta_1} \quad \dots\dots\dots (A-26)$$

侧板上 C 点和 D 点的弯曲应力分别按式 (A-27) 和式 (A-28) 计算:

$$\sigma_b^C = \frac{c}{2I_1} [2M_A + p_c L_s (L^2 + 2r \cdot L - 2r \cdot l_1)] \quad \dots\dots\dots (A-27)$$

$$\sigma_b^D = \frac{c}{2I_1} [2M_A + p_c L_s (L^2 + 2r \cdot L - 2r \cdot l_1 - l_1^2)] \quad \dots\dots\dots (A-28)$$

式中:

$$M_A = p_c \cdot K_3 \cdot L_s, \text{ N}\cdot\text{mm};$$

$$K_3 = \frac{-l_1^2 [3\varphi^2 (2\alpha_3 - \pi + 2) - 6\varphi(1 - \alpha_3) + \alpha_3^2 (\alpha_3 + 3 + 1.5\pi \cdot \varphi) - 2]}{3(2\alpha_3 + \pi \cdot \varphi + 2)}, \text{ mm}^2$$

侧板上 C 点和 D 点的总应力分别按式 (A-29) 和式 (A-30) 计算:

$$\sigma_T^C = \sigma_m^C + \sigma_b^C \quad \dots\dots\dots (A-29)$$

$$\sigma_T^D = \sigma_m^D + \sigma_b^D \quad \dots\dots\dots (A-30)$$

b) 长边侧板

侧板上 A 点和 B 点的薄膜应力按式 (A-31) 计算:

$$\sigma_m^A = \sigma_m^B = \frac{p_c (r + l_1)}{\delta_1} \quad \dots\dots\dots (A-31)$$

侧板上 A 点和 B 点的弯曲应力分别按式 (A-32) 和式 (A-33) 计算:

$$\sigma_b^A = \frac{M_A \cdot c}{I_1} \quad \dots\dots\dots (A-32)$$

$$\sigma_b^B = \frac{c}{2I_1} (2M_A + p_c \cdot L^2 \cdot L_s) \quad \dots\dots\dots (A-33)$$

侧板上 A 点和 B 点的总应力分别按式 (A-34) 和式 (A-35) 计算:

$$\sigma_T^A = \sigma_m^A + \sigma_b^A \quad \dots\dots\dots (A-34)$$

$$\sigma_T^B = \sigma_m^B + \sigma_b^B \quad \dots\dots\dots (A-35)$$

c) 圆角区

薄膜应力按式 (A-36) 计算:

$$\sigma_m = \frac{p_c}{\delta_1} (\sqrt{L^2 + l_1^2} + r) \quad \dots\dots\dots (A-36)$$

弯曲应力按式 (A-37) 计算:

$$\sigma_b = \frac{c}{2I_1} (2M_A + p_c \cdot L_s \{2r[L \cdot \cos \theta - l_1(1 - \sin \theta)] + L^2\}) \dots\dots\dots (A-37)$$

式中:

$$\theta = \arctg (l_1/L) \text{ (见图 A.3), } (^\circ).$$

总应力按式 (A-38) 计算:

$$\sigma_T = \sigma_m + \sigma_b \quad \dots\dots\dots (A-38)$$

A.4.4 长圆形截面容器

A.4.4.1 结构

本节计算公式适用的长圆形截面容器如图 A.4 所示。容器侧板厚度需相等, 两半圆部分厚度也需相等, 但侧板与半圆部分的厚度可以不同。

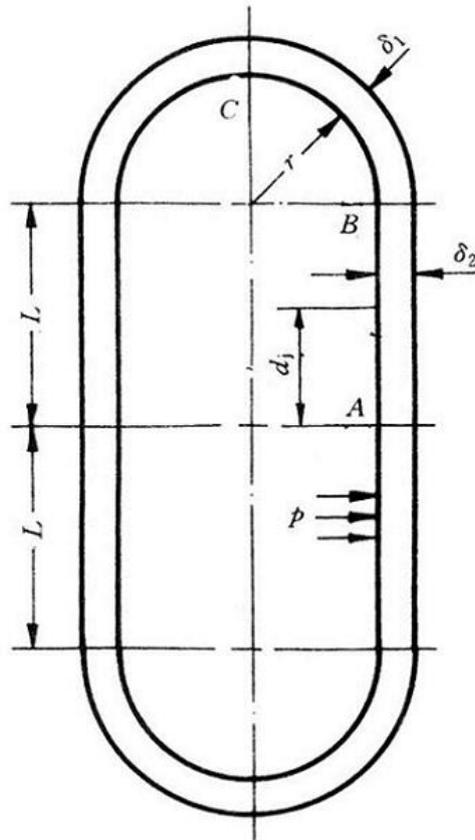


图 A.4 长圆形截面容器

A.4.4.2 应力计算

a) 半圆部分

B 点和 C 点的薄膜应力分别按式 (A-39) 和式 (A-40) 计算:

$$\sigma_{m(1)}^B = \frac{p_c \cdot r}{\delta_1} \dots\dots\dots (A-39)$$

$$\sigma_m^C = \frac{p_c(r+L)}{\delta_1} \dots\dots\dots (A-40)$$

B 点和 C 点的弯曲应力分别按式 (A-41) 和式 (A-42) 计算:

$$\sigma_{b(1)}^B = \frac{p_c \cdot L \cdot L_s \cdot c}{6I_1} \left(3L - \frac{C_1}{A} \right) \dots\dots\dots (A-41)$$

$$\sigma_b^C = \frac{p_c \cdot L \cdot L_s \cdot c}{6I_1} \left[3(L+2r) - \frac{C_1}{A} \right] \dots\dots\dots (A-42)$$

B 点和 C 点的总应力分别按式 (A-43) 和式 (A-44) 计算:

$$\sigma_{T(1)}^B = \sigma_{m(1)}^B + \sigma_{b(1)}^B \dots\dots\dots (A-43)$$

$$\sigma_T^C = \sigma_m^C + \sigma_b^C \dots\dots\dots (A-44)$$

b) 直侧板

侧板上 A 点和 B 点的薄膜应力分别按式 (A-45) 计算:

$$\sigma_m^A = \sigma_{m(2)}^B = \frac{p_c \cdot r}{\delta_2} \quad \dots\dots\dots (A-45)$$

侧板 A 点和 B 点的弯曲应力分别按式 (A-46) 和式 (A-47) 计算:

$$\sigma_b^A = \frac{p_c \cdot L \cdot L_s \cdot c}{6I_2} \left(\frac{C_1}{A} \right) \quad \dots\dots\dots (A-46)$$

$$\sigma_{b(2)}^B = \frac{p_c \cdot L \cdot L_s \cdot c}{6I_2} \left(3L - \frac{C_1}{A} \right) \quad \dots\dots\dots (A-47)$$

侧板 A 点和 B 点的总应力分别按式 (A-48) 和式 (A-49) 计算:

$$\sigma_T^A = \sigma_m^A + \sigma_b^A \quad \dots\dots\dots (A-48)$$

$$\sigma_{T(2)}^B = \sigma_{m(2)}^B + \sigma_{b(2)}^B \quad \dots\dots\dots (A-49)$$

A.4.5 椭圆形截面容器

A.4.5.1 结构

本节计算公式适用的椭圆形截面容器如图 A.5 所示。容器横截面为中面半径为 R 的大圆弧区和
中面半径为 r 的小圆弧区组成，大圆弧区与小圆弧区的厚度可以相等，也可以不相等。

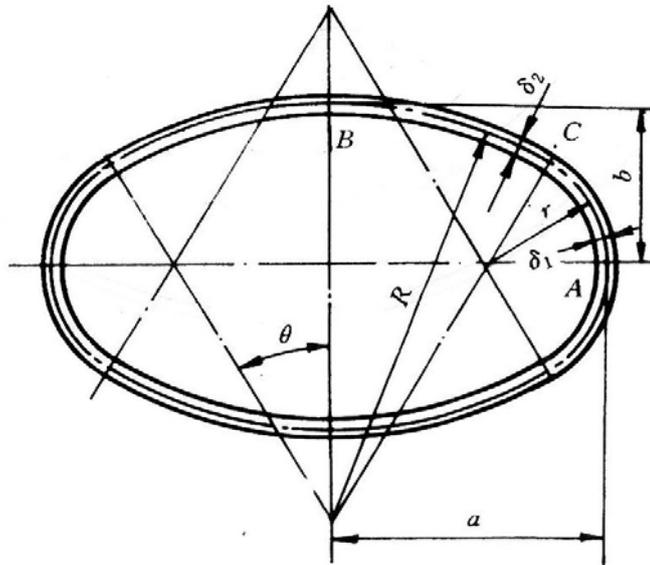


图 A.5 椭圆形截面容器

A.4.5.2 应力计算

a) 小圆弧区

A 点和 C 点的薄膜应力分别按式 (A-50) 和式 (A-51) 计算:

$$\sigma_m^A = \frac{p_c \cdot a}{\delta_1} \quad \dots\dots\dots (A-50)$$

$$\sigma_{m(1)}^C = \frac{p_c}{\delta_1} (R \sin^2 \theta + r \cos^2 \theta) \quad \dots\dots\dots (A-51)$$

式中:

$$\theta = \arctg(b/a), (\text{°}).$$

A 点和 C 点的弯曲应力分别按式 (A-52) 和式 (A-53) 计算:

$$\sigma_b^A = \frac{M_A \cdot c}{I_1} \dots\dots\dots (\text{A-52})$$

$$\sigma_{b(1)}^C = \frac{c}{2I_1} [2M_A - L_s \cdot p_c (a^2 - R^2 \cdot \sin^2 \theta - r^2 \cdot \cos^2 \theta)] \dots\dots\dots (\text{A-53})$$

式中:

$$M_A = \frac{p_c \cdot a^2 \cdot L_s}{2} - \frac{p_c \cdot L_s}{2(\alpha_2 \cdot r \cdot \psi + R \cdot \theta)} \left\{ [r^2 + (R-r)^2 \sin^2 \theta] \cdot \alpha_2 \cdot r \cdot \psi + [R^2 + (R-r)^2 \cos^2 \theta] \cdot R \cdot \theta - (R-r)(R^2 - \alpha_2 \cdot r^2) \sin 2\theta \right\} \quad \text{N} \cdot \text{mm}$$

$$\psi = \frac{\pi}{2} - \theta, \text{ rad}.$$

A 点和 C 点的总应力分别按式 (A-54) 和式 (A-55) 计算:

$$\sigma_T^A = \sigma_m^A + \sigma_b^A \dots\dots\dots (\text{A-54})$$

$$\sigma_{T(1)}^C = \sigma_{m(1)}^C + \sigma_{b(1)}^C \dots\dots\dots (\text{A-55})$$

b) 大圆弧区

B 点和 C 点的薄膜应力分别按式 (A-56) 和式 (A-57) 计算:

$$\sigma_m^B = \frac{p_c \cdot b}{\delta_2} \dots\dots\dots (\text{A-56})$$

$$\sigma_{m(2)}^C = \frac{p_c}{\delta_2} (R \sin^2 \theta + r \cos^2 \theta) \dots\dots\dots (\text{A-57})$$

B 点和 C 点的弯曲应力分别按式 (A-58) 和式 (A-59) 计算:

$$\sigma_b^B = \frac{c}{2I_2} [2M_A - p_c \cdot L_s (a^2 - b^2)] \dots\dots\dots (\text{A-58})$$

$$\sigma_{b(2)}^C = \frac{c}{2I_2} [2M_A - L_s \cdot p_c (a^2 - R^2 \cdot \sin^2 \theta - r^2 \cdot \cos^2 \theta)] \dots\dots\dots (\text{A-59})$$

B 点和 C 点的总应力分别按式 (A-60) 和式 (A-61) 计算:

$$\sigma_T^B = \sigma_m^B + \sigma_b^B \dots\dots\dots (\text{A-60})$$

$$\sigma_{T(2)}^C = \sigma_{m(2)}^C + \sigma_{b(2)}^C \dots\dots\dots (\text{A-61})$$

A.5 外加强的非圆形截面容器

A.5.1 外加强的对称矩形截面容器

A.5.1.1 结构

本节计算公式适用的外加强对称矩形截面容器如图 A.6 所示。加强件设置在容器的外表面,且垂直于容器轴线的平面内。加强件与容器侧板可采用连续焊或间断焊。当采用间断焊时,间断焊缝可以互相错开或并排布置,间断焊缝的焊缝间距不得大于所加强板厚的 8 倍。每对加强件每侧间断

焊的焊缝长度不少于加强件外表面长度的 1/2，侧板上的加强件应对称布置且具有相同的惯性矩，加强件之间的间距可以不同。

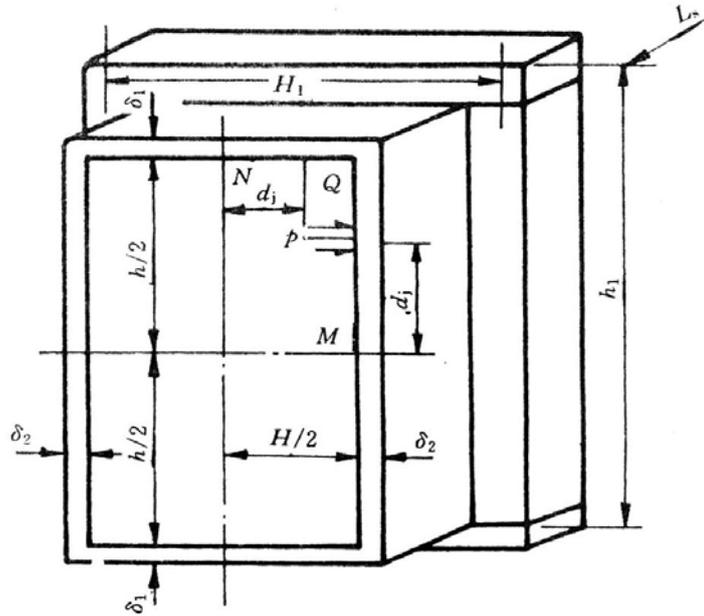


图 A.6 外加强的对称矩形截面容器

A.5.1.2 加强件的允许最大间距

任意两相邻加强件之间的间距^[1]应不大于以下式 (A-62) ~ 式 (A-66) 确定的 $L_s \sim L_{s2}$ 中的最小值。

$$L_s = \frac{\delta}{\sqrt{\frac{p_c}{[\sigma]^t \cdot Z}}} \dots\dots\dots (A-62)$$

式中：

δ —— 侧板计算厚度，取 δ_1 和 δ_2 中的小值，mm；

Z —— 系数， $\delta \leq 11$ mm 时， $Z = 2.1$ ； $\delta > 11$ mm 时， $Z = 2.2$ 。

用式 (A-62) 得到的 L_s 分别计算短边和长边的 β 值，然后按式 (A-63) ~ 式 (A-66) 计算 L_{s1} 和 L_{s2} ：

$$H \geq L_s \text{ 时, } L_{s1} = \delta_1 \cdot \sqrt{\frac{[\sigma]^t \cdot J}{p_c}} \dots\dots\dots (A-63)$$

$$H < L_s \text{ 时, } L_{s1} = \left(\frac{\delta_1}{\beta}\right) \cdot \sqrt{\frac{[\sigma]^t \cdot J}{p_c}} \dots\dots\dots (A-64)$$

$$h \geq L_s \text{ 时, } L_{s2} = \delta_2 \cdot \sqrt{\frac{[\sigma]^t \cdot J}{p_c}} \dots\dots\dots (A-65)$$

$$h < L_s \text{ 时, } L_{s2} = \left(\frac{\delta_2}{\beta} \right) \cdot \sqrt{\frac{[\sigma] \cdot J}{p_c}} \dots\dots\dots (\text{A-66})$$

注 1: 包括平盖到第一个加强件的距离。

表 A.3

| β 或 $1/\beta$ (取其中较大值) | 应力参数 J |
|------------------------------|----------|
| 1.0 | 4.9 |
| 1.1 | 4.3 |
| 1.2 | 3.9 |
| 1.3 | 3.6 |
| 1.4 | 3.3 |
| 1.5 | 3.1 |
| 1.6 | 2.9 |
| 1.7 | 2.8 |
| 1.8 | 2.6 |
| 1.9 | 2.5 |
| 2.0 | 2.4 |
| 3.0 | 2.1 |
| ≥ 4.0 | 2.0 |

表 A.4

| 材料 | 有效宽度系数 Δ ¹⁾ $\sqrt{\text{MPa}}$ |
|-----------------------|------------------------------------------------------|
| 碳素钢 (C \leq 0.30%) | 483 |
| 碳素钢 (C $>$ 0.30%) | 500 |
| 碳锰钢 | |
| 碳钼钢、低铬钼钢 (Cr3Mo) | 500 |
| 中铬钼钢 (Cr5Mo~Cr9Mo) | 479 |
| 奥氏体钢 (至 Cr25Ni20) | 487 |

注: 1) 当设计温度非 20℃ 时, Δ 应按下式修正:

$$\Delta = \Delta \cdot \sqrt{E' / E}$$

A.5.1.3 有效宽度

计算组合截面惯性距 I_{11} 、 I_{21} 以及应力值时, 加强件起加强作用的有效宽度 L_s 按以下取值:

a) 按式 (A-67) 计算 W :

$$W = \frac{\delta \cdot \Delta}{\sqrt{R'_{el}}} \dots\dots\dots (\text{A-67})$$

式中:

δ —— 侧板有效厚度, mm;

Δ —— 系数, 查表 A.4。

- b) 取加强件两侧间距之和的一半;
- c) 取 a) 和 b) 得到的两个值中的小值。

A.5.1.4 应力计算

a) 短边组合件

N 点和 Q 点的薄膜应力按式 (A-68) 计算:

$$\sigma_m^N = \sigma_{m(1)}^Q = \frac{p_c \cdot h \cdot L_s}{2(A_1 + \delta_1 \cdot L_s)} \dots\dots\dots (A-68)$$

N 点和 Q 点的弯曲应力分别按式 (A-69) 和式 (A-70) 计算:

$$\sigma_b^N = \frac{p_c \cdot h^2 \cdot L_s \cdot c}{24I_{11}} \left[-3\alpha^2 + 2 \left(\frac{1 + \alpha_1^2 \cdot k}{1 + k} \right) \right] \dots\dots\dots (A-69)$$

$$\sigma_{b(1)}^Q = \frac{p_c \cdot h^2 \cdot L_s \cdot c}{12I_{11}} \left(\frac{1 + \alpha_1^2 \cdot k}{1 + k} \right) \dots\dots\dots (A-70)$$

N 点和 Q 点的总应力分别按式 (A-71) 和式 (A-72) 计算:

$$\sigma_T^N = \sigma_m^N + \sigma_b^N \dots\dots\dots (A-71)$$

$$\sigma_{T(1)}^Q = \sigma_{m(1)}^Q + \sigma_{b(1)}^Q \dots\dots\dots (A-72)$$

b) 长边组合件

M 点和 Q 点的薄膜应力按式 (A-73) 计算:

$$\sigma_m^M = \sigma_{m(2)}^Q = \frac{p_c \cdot H \cdot L_s}{2(A_2 + \delta_2 \cdot L_s)} \dots\dots\dots (A-73)$$

M 点和 Q 点的弯曲应力分别按式 (A-74) 和式 (A-75) 计算:

$$\sigma_b^M = \frac{p_c \cdot h^2 \cdot L_s \cdot c}{24I_{21}} \left[-3 + 2 \left(\frac{1 + \alpha_1^2 \cdot k}{1 + k} \right) \right] \dots\dots\dots (A-74)$$

$$\sigma_{b(2)}^Q = \frac{p_c \cdot h^2 \cdot L_s \cdot c}{12I_{21}} \left(\frac{1 + \alpha_1^2 \cdot k}{1 + k} \right) \dots\dots\dots (A-75)$$

M 点和 Q 点的总应力分别按式 (A-76) 和式 (A-77) 计算:

$$\sigma_T^M = \sigma_m^M + \sigma_b^M \dots\dots\dots (A-76)$$

$$\sigma_{T(2)}^Q = \sigma_{m(2)}^Q + \sigma_{b(2)}^Q \dots\dots\dots (A-77)$$

A.5.2 外加强带圆角的矩形截面容器

A.5.2.1 结构

本节计算公式适用的外加强带圆角矩形截面容器如图 A.7 所示。加强件设置在侧板外表面宽度方向上、且垂直于容器轴线的平面内, 容器圆角区不设置加强件。每对侧板上的加强件应对称布置且具有相同的惯性矩, 加强件与容器的连接焊缝应符合 A.5.1.1 的规定。

A.5.2.2 加强件最大允许间距

加强件最大允许间距按 A.5.1.2 确定, 但式 (A-63)~式 (A-66) 以及 β 的计算式中, 应以 $2l_s$ 代替 H , 以 $2l_L$ 代替 h (见图 A.7)。

A.5.2.3 有效宽度

组合截面惯性矩与应力计算时, 加强件起加强作用的有效宽度按 A.5.1.3 确定。

A.5.2.4 应力计算

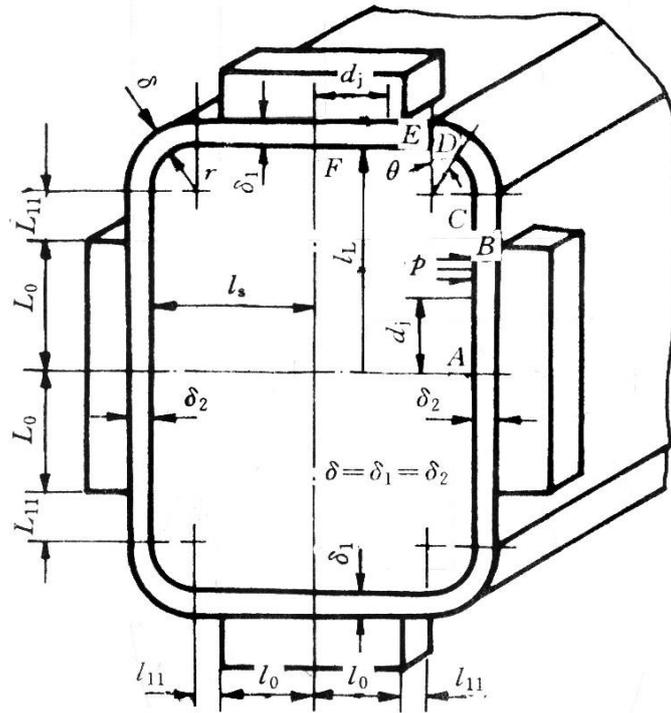


图 A.7 外加强带圆角的矩形截面容器

a) 短边组合件

D 点、E 点和 F 点的薄膜应力按式 (A-78) 计算:

$$\sigma_m^D = \sigma_m^E = \sigma_m^F = \frac{p_c(L_0 + L_{11} + r)}{\delta_1} \dots\dots\dots (A-78)$$

D 点、E 点和 F 点的弯曲应力分别按式 (A-79)~式 (A-81) 计算:

$$\sigma_b^D = \frac{c}{I_1} \left\{ M_A + p_c \cdot L_s \left[\frac{(L_0 + L_{11})^2}{2} + r \cdot (L_0 + L_{11} - l_0 - l_{11}) \right] \right\} \dots\dots\dots (A-79)$$

$$\sigma_b^E = \frac{c}{I_1} \left\{ M_A + \frac{p_c \cdot L_s}{2} \left[L_0^2 + 2L_0 \cdot L_{11} + L_{11}^2 - 2l_0 \cdot l_{11} - l_{11}^2 + 2r(L_0 + L_{11} - l_0 - l_{11}) \right] \right\} \dots\dots\dots (A-80)$$

$$\sigma_b^F = \frac{c}{I_{11}} \left\{ M_A + \frac{p_c \cdot L_s}{2} \left[(L_0 + L_{11})^2 + 2r(L_0 + L_{11} - l_0 - l_{11}) - (l_0 + l_{11})^2 \right] \right\} \dots\dots\dots (A-81)$$

式中:

$$M_A = p_c \cdot L_s \cdot K_4, \text{ N}\cdot\text{mm};$$

$$\begin{aligned}
 K_4 = & [-3rL_0(4r + \pi \cdot L_0) - L_{11}(12r^2 + 3\pi \cdot r \cdot L_{11} + 2L_{11}^2) + 12r \cdot l_{11}^2 \\
 & - 6L_0 \cdot L_{11}(L_0 + L_{11} + \pi \cdot r + 2l_{11}) - 6L_0l_{11}(2r + L_0) - 6L_{11} \cdot l_{11}(2r + L_{11}) \\
 & + 6l_0 \cdot l_{11}(2r + l_{11}) + 6r^2(\pi - 2)(l_0 + l_{11}) + 4l_{11}^3 - 2L_0^3(I_1 / I_{21}) \\
 & - 2(I_1 / I_{11})(6L_0 \cdot L_{11} \cdot l_0 + 3L_0^2 \cdot l_0 + 3L_{11}^2 \cdot l_0 - 6l_0^2 \cdot l_{11} - 3l_0 \cdot l_{11}^2 - 6r \cdot l_0^2 - 2l_0^3 \\
 & + 6r \cdot L_0 \cdot l_0 + 6r \cdot L_{11} \cdot l_0 - 6r \cdot l_0 \cdot l_{11})] \cdot \{6[2L_{11} + 2l_{11} + \pi \cdot r + 2l_0(I_1 / I_{11}) \\
 & + 2L_0(I_1 / I_{21})]\}^{-1}, \text{ mm}^2;
 \end{aligned}$$

D 点、E 点和 F 点的总应力分别按式 (A-82) ~ 式 (A-84) 计算:

$$\sigma_T^D = \sigma_m^D + \sigma_b^D \quad \dots\dots\dots (\text{A-82})$$

$$\sigma_T^E = \sigma_m^E + \sigma_b^E \quad \dots\dots\dots (\text{A-83})$$

$$\sigma_T^F = \sigma_m^F + \sigma_b^F \quad \dots\dots\dots (\text{A-85})$$

b) 长边组合件

A 点、B 点和 C 点的薄膜应力按式 (A-86) 计算:

$$\sigma_m^A = \sigma_m^B = \sigma_m^C = \frac{p_c(l_0 + l_{11} + r)}{\delta_2} \quad \dots\dots\dots (\text{A-86})$$

A 点、B 点和 C 点的弯曲应力分别按式 (A-87) ~ 式 (A-89) 计算:

$$\sigma_b^A = \frac{M_A \cdot c}{I_{21}} \quad \dots\dots\dots (\text{A-87})$$

$$\sigma_b^B = \frac{c}{I_2} \left(M_A + \frac{p_c \cdot L_s \cdot L_0^2}{2} \right) \quad \dots\dots\dots (\text{A-88})$$

$$\sigma_b^C = \frac{c}{I_2} \left[M_A + \frac{p_c \cdot L_s}{2} (L_0 + L_{11})^2 \right] \quad \dots\dots\dots (\text{A-89})$$

A 点、B 点和 C 点的总应力分别按式 (A-90) ~ 式 (A-92) 计算:

$$\sigma_T^A = \sigma_m^A + \sigma_b^A \quad \dots\dots\dots (\text{A-90})$$

$$\sigma_T^B = \sigma_m^B + \sigma_b^B \quad \dots\dots\dots (\text{A-91})$$

$$\sigma_T^C = \sigma_m^C + \sigma_b^C \quad \dots\dots\dots (\text{A-92})$$

c) 圆角区

薄膜应力按式 (A-93) 计算:

$$\sigma_m = \frac{p_c}{\delta_1} \left[\sqrt{(L_0 + L_{11})^2 + (l_0 + l_{11})^2} + r \right] \quad \dots\dots\dots (\text{A-93})$$

弯曲应力按式 (A-94) 计算:

$$\sigma_b = \frac{M_T \cdot c}{I_1} \quad \dots\dots\dots (\text{A-94})$$

式中:

$$M_r = M_A + p_c \cdot L_s \left\{ (L_0 + L_{11}) \left(\frac{L_0 + L_{11}}{2} + r \cdot \cos \theta \right) + (1 - \sin \theta) [r^2 - r(l_0 + l_{11} + r)] \right\}, \text{ N}\cdot\text{mm};$$

$$\theta = \arctg \left(\frac{l_0 + l_{11}}{L_0 + L_{11}} \right), \text{ (}^\circ \text{)}。$$

A5.3 外加强的长圆形截面容器

A5.3.1 结构

本节计算公式适用的外加强长圆形截面容器如图 A.8 所示。侧板和半圆部分的厚度应相等，加强件应整圈围绕在容器的周边。加强件与容器的连接焊缝应符合 A.5.1.1 的规定。

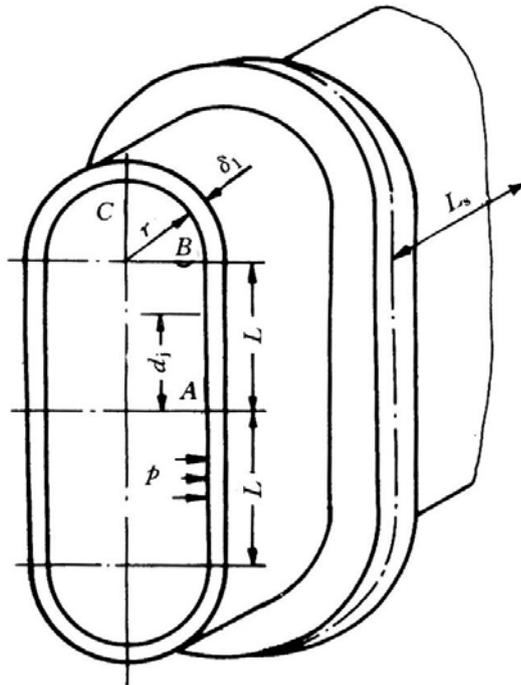


图 A.8 外加强的长圆形截面容器

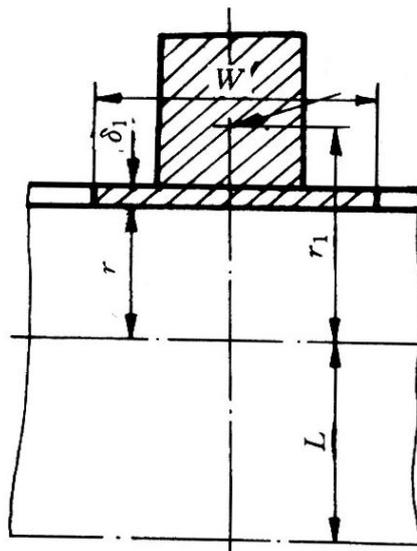


图 A.9 加强件与壳体组合截面形心

A.5.3.2 加强件最大允许间距

加强件最大允许间距按 A.5.1.2 确定,但式 (A-63)~式 (A-66) 以及 β 的计算式中,应以 $2r$ 代替 H ,以 $2(L+r)$ 代替 h (见图 A.8)。

A.5.3.3 有效宽度

组合截面惯性矩与应力计算时,加强件起加强作用的有效宽度按 A.5.1.3 确定。

A.5.3.4 应力计算

a) 半圆筒组合件

B 点和 C 点的薄膜应力分别按式 (A-95) 和式 (A-96) 计算:

$$\sigma_m^B = \frac{p_c \cdot r \cdot L_s}{A_1 + \delta_1 \cdot L_s} \dots\dots\dots (A-95)$$

$$\sigma_m^C = \frac{p_c \cdot (r+L) \cdot L_s}{A_1 + \delta_1 \cdot L_s} \dots\dots\dots (A-96)$$

式中:

A_1 ——加强件的横截面面积, mm^2 ;

B 点和 C 点的弯曲应力分别按式 (A-97) 和式 (A-98) 计算:

$$\sigma_b^B = \frac{p_c \cdot L \cdot L_s \cdot c}{6I_{11}} \left(3L - \frac{C_2}{A_3} \right) \dots\dots\dots (A-97)$$

$$\sigma_b^C = \frac{p_c \cdot L \cdot L_s \cdot c}{6I_{11}} \left[3(L + 2r_1) - \frac{C_2}{A_3} \right] \dots\dots\dots (A-98)$$

式中:

r_1 ——长圆形截面容器的加强件与壳体组合截面形心轴半径 (见图 A.9), mm ;

B 点和 C 点的总应力分别按式 (A-99) 和式 (A-100) 计算:

$$\sigma_T^B = \sigma_m^B + \sigma_b^B \dots\dots\dots (A-99)$$

$$\sigma_T^C = \sigma_m^C + \sigma_b^C \dots\dots\dots (A-100)$$

b) 侧板组合件

A 点的薄膜应力按式 (A-101) 计算:

$$\sigma_m^A = \frac{p_c \cdot r \cdot L_s}{A_1 + \delta_1 \cdot L_s} \dots\dots\dots (A-101)$$

A 点的弯曲应力按式 (A-102) 计算:

$$\sigma_b^A = \frac{p_c \cdot L \cdot L_s \cdot c}{6I_{11}} \left(-\frac{C_2}{A_3} \right) \dots\dots\dots (A-102)$$

A 点的总应力按式 (A-103) 计算:

$$\sigma_T^A = \sigma_m^A + \sigma_b^A \dots\dots\dots (A-103)$$

A.5.4 外加强的椭圆形截面容器

A.5.4.1 结构

本节计算公式适用的外加强椭圆形截面容器如图 A.10 所示。容器横截面为中面半径为 R 的大圆弧区和中面半径为 r 的小圆弧区组成，大圆弧区与小圆弧区的厚度相等，加强件整圈围绕在容器的周边。加强件与容器的连接焊缝应符合 A.5.1.1 的规定。

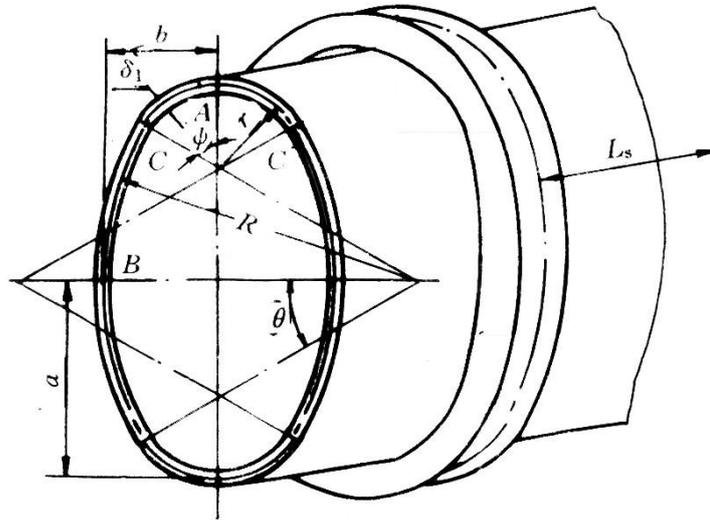


图 A.10 外加强的椭圆形截面容器

A.5.4.2 加强件最大允许间距

加强件最大允许间距按 A.5.1.2 确定，但式 (A-63) ~ 式 (A-66) 以及 β 的计算式中，应以 $2b$ 代替 H ，以 $2a$ 代替 h (见图 A.10)。

A.5.4.3 有效宽度

组合截面惯性矩与应力计算时，加强件起加强作用的有效宽度按 A.5.1.3 确定。

A.5.4.4 应力计算

a) 小圆弧区

A 点和 C 点的薄膜应力分别按式 (A-104) 和式 (A-105) 计算：

$$\sigma_m^A = \frac{p_c \cdot a \cdot L_s}{A_1 + \delta_1 \cdot L_s} \dots\dots\dots (A-104)$$

$$\sigma_m^C = \frac{p_c \cdot L_s}{A_1 + \delta_1 \cdot L_s} (R \cdot \sin^2 \theta + r \cdot \cos^2 \theta) \dots\dots\dots (A-105)$$

式中：

A_1 —加强件的横截面面积， mm^2 。

$$\theta = \arctg\left(\frac{b}{a}\right), (\text{°})。$$

A 点和 C 点的弯曲应力分别按式 (A-106) 和式 (A-107) 计算：

$$\sigma_b^A = \frac{M_A \cdot c}{I_{11}} \dots\dots\dots (A-106)$$

$$\sigma_b^C = \frac{c}{2I_{11}} (2M_A - L_s \cdot p_c \{ [a^2 + 2A_4(a-r)] - [R^2 + 2A_4(R-r)] \sin^2 \theta - r^2 \cos^2 \theta \}) \dots\dots (A-107)$$

式中：

$$M_A = \frac{p_c \cdot a^2 \cdot L_s}{2} - \frac{p_c \cdot L_s}{2(r \cdot \psi + R \cdot \theta)} \left\{ r^2 + (R-r)^2 \sin^2 \theta - 2A_4(a-r) \right\} \cdot r \cdot \psi + \left[R^2 + (R-r)^2 \cos^2 \theta + 2A_4(R-a) \right] \cdot R \cdot \theta - (R+r+A_4)(R-r)^2 \cdot \sin 2\theta$$

$$\psi = \frac{\pi}{2} - \theta, \text{ rad};$$

$$A_4 = a_1 - a, \text{ mm};$$

a_1 —— 加强件与壳体组合截面中性线椭圆长轴半径, mm。

A 点和 C 点的弯曲应力分别按式 (A-108) 和式 (A-109) 计算:

$$\sigma_T^A = \sigma_m^A + \sigma_b^A \dots\dots\dots (A-108)$$

$$\sigma_T^C = \sigma_m^C + \sigma_b^C \dots\dots\dots (A-109)$$

b) 大圆弧区

B 点的薄膜应力按式 (A-110) 计算:

$$\sigma_m^B = \frac{p_c \cdot b \cdot L_s}{A_1 + \delta_1 \cdot L_s} \dots\dots\dots (A-110)$$

B 点的弯曲应力按式 (A-111) 计算:

$$\sigma_b^B = \frac{c}{2I_{11}} \left\{ 2M_A - p_c \cdot L_s \left[a^2 - b^2 + 2A(a-b) \right] \right\} \dots\dots\dots (A-111)$$

B 点的总应力按式 (A-112) 计算:

$$\sigma_T^B = \sigma_m^B + \sigma_b^B \dots\dots\dots (A-112)$$

A.6 拉撑加强的非圆形截面容器

A.6.1 单拉撑加强的对称矩形截面容器

A.6.1.1 结构

本节计算公式适用的单拉撑加强的对称矩形截面容器见图 A.11 所示。拉撑板位于容器长边侧板的中点, 拉撑板可以是沿容器侧板全长焊接的平板, 但拉撑板不应承受压力的横向作用, 否则应作为独立受压室的侧板进行计算。

A.6.1.2 应力计算

a) 短边侧板

N 点和 Q 点的薄膜应力按式 (A-113) 计算:

$$\sigma_m^N = \sigma_{m(1)}^Q = \frac{p_c \cdot h}{4\delta_1} \left[4 - \frac{2+K(5-\alpha^2)}{1+2K} \right] \dots\dots\dots (A-113)$$

N 点和 Q 点的弯曲应力分别按式 (A-114) 和式 (A-115) 计算:

$$\sigma_b^N = \frac{p_c \cdot h^2 \cdot c \cdot L_s}{24I_1} \left[-3\alpha^2 + 2 \left(\frac{1+2\alpha^2 K}{1+2K} \right) \right] \dots\dots\dots (A-114)$$

$$\sigma_{b(1)}^Q = \frac{p_c \cdot h^2 \cdot c \cdot L_s}{12I_1} \left(\frac{1+2\alpha^2 K}{1+2K} \right) \dots\dots\dots (A-115)$$

N 点和 Q 点的总应力分别按式 (A-116) 和式 (A-117) 计算:

$$\sigma_T^N = \sigma_m^N + \sigma_b^N \quad \dots\dots\dots (A-116)$$

$$\sigma_{T(1)}^Q = \sigma_{m(1)}^Q + \sigma_{b(1)}^Q \quad \dots\dots\dots (A-117)$$

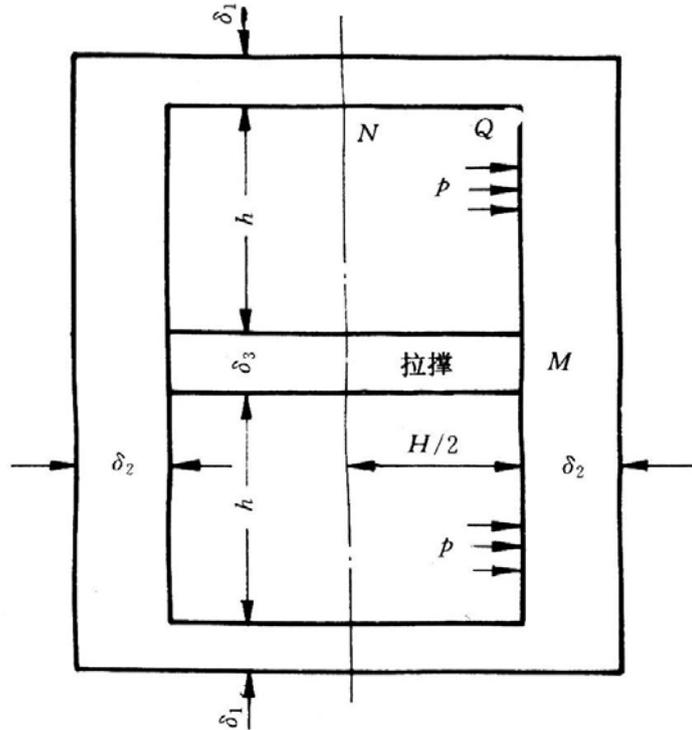


图 A.11 单拉撑加强的对称矩形截面容器

b) 长边侧板

M 点和 Q 点的薄膜应力按式 (A-118) 计算:

$$\sigma_m^M = \sigma_{m(2)}^Q = \frac{p_c \cdot H}{2\delta_2} \quad \dots\dots\dots (A-118)$$

M 点和 Q 点的弯曲应力分别按式 (A-119) 和式 (A-120) 计算:

$$\sigma_b^M = \frac{p_c \cdot h^2 \cdot c \cdot L_s}{12I_2} \left[\frac{1+K(3-\alpha^2)}{1+2K} \right] \quad \dots\dots\dots (A-119)$$

$$\sigma_{b(2)}^Q = \frac{p_c \cdot h^2 \cdot c \cdot L_s}{12I_2} \left(\frac{1+2\alpha^2 K}{1+2K} \right) \quad \dots\dots\dots (A-120)$$

M 点和 Q 点的总应力分别按式 (A-121) 和式 (A-122) 计算:

$$\sigma_T^M = \sigma_m^M + \sigma_b^M \quad \dots\dots\dots (A-121)$$

$$\sigma_{T(2)}^Q = \sigma_{m(2)}^Q + \sigma_{b(2)}^Q \quad \dots\dots\dots (A-122)$$

c) 拉撑板

拉撑板的薄膜应力按式 (A-123) 计算:

$$\sigma_m = \frac{p_c \cdot h}{2\delta_3} \left[\frac{2 + K(5 - \alpha^2)}{1 + 2K} \right] \dots\dots\dots (A-123)$$

A.6.2 双拉撑加强的对称矩形截面容器

A.6.2.1 结构

本节计算公式适用的双拉撑加强的对称矩形截面容器见图 A.12 所示。两拉撑板沿长边侧板均布，两拉撑板厚度可相同也可不同。拉撑板可以是沿容器侧板全长焊接的平板，但拉撑板不应承受压力的横向作用，否则应作为独立受压室的侧板进行计算。

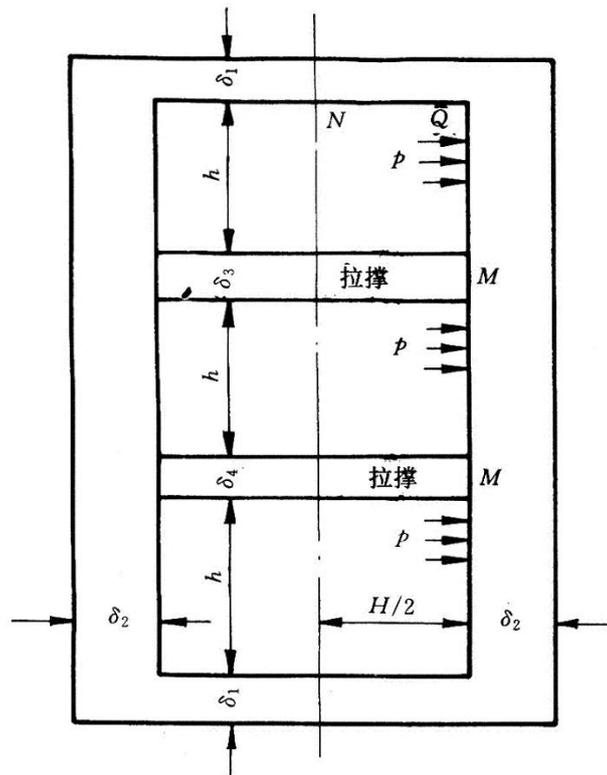


图 A.12 双拉撑加强的对称矩形截面容器

A.6.2.2 应力计算

a) 短边侧板

N 点和 Q 点的薄膜应力按式 (A-124) 计算：

$$\sigma_m^N = \sigma_{m(1)}^Q = \frac{p_c \cdot h}{2\delta_1} \left\{ 3 - \left[\frac{6 + K(11 - \alpha^2)}{3 + 5K} \right] \right\} \dots\dots\dots (A-124)$$

N 点和 Q 点的弯曲应力分别按式 (A-125) 和式 (A-126) 计算：

$$\sigma_b^N = \frac{p_c \cdot h^2 \cdot c \cdot L_s}{24I_1} \left[-3\alpha^2 + 2 \left(\frac{3 + 5\alpha^2 K}{3 + 5K} \right) \right] \dots\dots\dots (A-125)$$

$$\sigma_{b(1)}^Q = \frac{p_c \cdot h^2 \cdot c \cdot L_s}{12I_1} \left(\frac{3 + 5\alpha^2 K}{3 + 5K} \right) \dots\dots\dots (A-126)$$

N 点和 Q 点的总应力分别按式 (A-127) 和式 (A-128) 计算:

$$\sigma_T^N = \sigma_m^N + \sigma_b^N \quad \dots\dots\dots (A-127)$$

$$\sigma_{T(1)}^Q = \sigma_{m(1)}^Q + \sigma_{b(1)}^Q \quad \dots\dots\dots (A-128)$$

b) 长边侧板

M 点和 Q 点的薄膜应力按式 (A-129) 计算:

$$\sigma_m^M = \sigma_{m(2)}^Q = \frac{p_c \cdot H}{2\delta_2} \quad \dots\dots\dots (A-129)$$

M 点和 Q 点的弯曲应力分别按式 (A-130) 和式 (A-131) 计算:

$$\sigma_b^M = \frac{p_c \cdot h^2 \cdot c \cdot L_s}{12I_2} \left[\frac{3 + K(6 - \alpha^2)}{3 + 5K} \right] \quad \dots\dots\dots (A-130)$$

$$\sigma_{b(2)}^Q = \frac{p_c \cdot h^2 \cdot c \cdot L_s}{12I_2} \left(\frac{3 + 5\alpha^2 K}{3 + 5K} \right) \quad \dots\dots\dots (A-131)$$

M 点和 Q 点的总应力分别按式 (A-132) 和式 (A-133) 计算:

$$\sigma_T^M = \sigma_m^M + \sigma_b^M \quad \dots\dots\dots (A-132)$$

$$\sigma_{T(2)}^Q = \sigma_{m(2)}^Q + \sigma_{b(2)}^Q \quad \dots\dots\dots (A-133)$$

c) 拉撑板

拉撑板的薄膜应力按式 (A-134) 计算:

$$\sigma_m = \frac{p_c \cdot h}{2\delta} \left[\frac{6 + K(11 - \alpha^2)}{3 + 5K} \right] \quad \dots\dots\dots (A-134)$$

式中, δ 取 δ_3 和 δ_4 中之小值。

A.6.3 单拉撑加强的长圆形截面容器

A.6.3.1 结构

本节计算公式适用的单拉撑加强长圆形截面容器见图 A.13 所示。拉撑板可以是沿容器侧板全长焊接的平板, 但拉撑板不应承受压力的横向作用, 否则应作为独立受压室的侧板进行计算。

A.6.3.2 应力计算

a) 半圆筒部分

B 点和 C 点的薄膜应力分别按式 (A-135) 和式 (A-136) 计算:

$$\sigma_{m(1)}^B = \frac{p_c \cdot r}{\delta_1} \quad \dots\dots\dots (A-135)$$

$$\sigma_m^C = \frac{p_c}{2\delta_1} [2(r + L) - L \cdot F] \quad \dots\dots\dots (A-136)$$

B 点和 C 点的弯曲应力分别按式 (A-137) 和式 (A-138) 计算:

$$\sigma_{b(1)}^B = \frac{p_c \cdot L \cdot c \cdot L_s}{2I_1 \cdot A} \left[F(B - A \cdot L) - \frac{C_1}{3} + A \cdot L \right] \quad \dots\dots\dots (A-137)$$

$$\sigma_b^C = \frac{p_c \cdot L \cdot c \cdot L_s}{2I_1 \cdot A} \left[F(B - A \cdot L - A \cdot r) + A(L + 2r) - \frac{C_1}{3} \right] \quad \dots\dots\dots (A-138)$$

B 点和 C 点的总应力分别按式 (A-139) 和式 (A-140) 计算:

$$\sigma_{T(1)}^B = \sigma_{m(1)}^B + \sigma_{b(1)}^B \quad \dots\dots\dots (A-139)$$

$$\sigma_T^C = \sigma_m^C + \sigma_b^C \quad \dots\dots\dots (A-140)$$

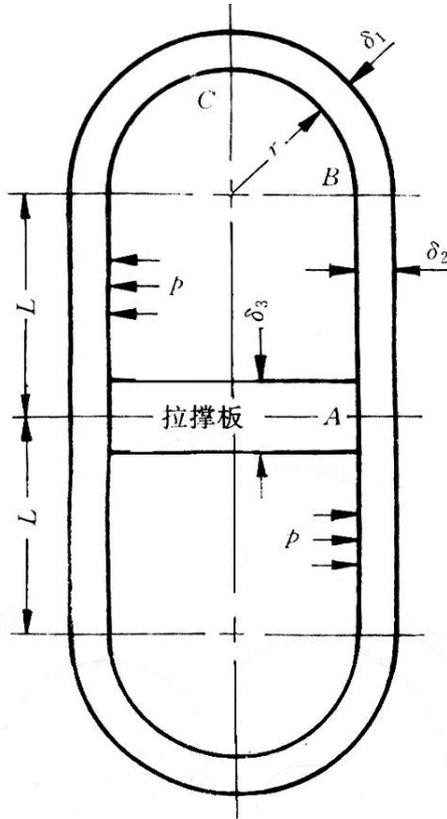


图 A.13 单拉撑加强的长圆形截面容器

b) 侧板

A 点和 B 点的薄膜应力按式 (A-141) 计算:

$$\sigma_m^A = \sigma_{m(2)}^B = \frac{p_c \cdot r}{\delta_2} \quad \dots\dots\dots (A-141)$$

A 点和 B 点的弯曲应力分别按式 (A-142) 和式 (A-143) 计算:

$$\sigma_b^A = \frac{p_c \cdot L \cdot c \cdot L_s}{2I_2 \cdot A} \left(B \cdot F - \frac{C_1}{3} \right) \quad \dots\dots\dots (A-142)$$

$$\sigma_{b(2)}^B = \frac{p_c \cdot L \cdot c \cdot L_s}{2I_2 \cdot A} \left[F(B - A \cdot L) - \frac{C_1}{3} + A \cdot L \right] \quad \dots\dots\dots (A-143)$$

A 点和 B 点的总应力分别按式 (A-144) 和式 (A-145) 计算:

$$\sigma_T^A = \sigma_m^A + \sigma_b^A \quad \dots\dots\dots (A-144)$$

$$\sigma_{T(2)}^B = \sigma_{m(2)}^B + \sigma_{b(2)}^B \quad \dots\dots\dots (A-145)$$

c) 拉撑板

拉撑板的薄膜应力按式 (A-146) 计算:

$$\sigma_m = \frac{p_c \cdot L \cdot F}{\delta_3} \dots\dots\dots (A-146)$$

A.7 开孔补强

A.7.1 侧板上的单孔补强

A.7.1.1 本节单孔补强计算方法的适用范围为开孔直径不大于容器横截面开孔所在侧板长度的一半。

A.7.1.2 侧板上的单孔无需另行进行补强的条件同第 6 章的有关条款。

A.7.1.3 单孔的补强计算和校核方法按第 6 章的规定, 但开孔削弱所需的最小补强面积按式 (A-147) 确定:

$$A = 0.5d \cdot \delta + 2\delta \cdot \delta_t(1 - f_r) \dots\dots\dots (A-147)$$

式中:

A —— 开孔削弱所需的最小补强面积, mm^2 ;

d —— 腐蚀后的开孔直径, mm ;

δ —— 侧板开孔处的计算厚度, mm ;

δ_t —— 侧板开孔接管的计算厚度, mm ;

f_r —— 强度削弱系数, 等于设计温度下接管材料与壳体材料许用应力之比值, 当比值大于 1.0 时, 取该值为 1.0。

A.7.2 侧板上的排孔补强

A.7.2.1 排孔对侧板强度的削弱通过应力计算中引入开孔削弱系数 η_m 和 η_b 来考虑。当 η_m 和 η_b 的值小于焊接接头系数 ϕ 时, 按无排孔计算得到的薄膜应力和弯曲应力应分别除以 η_m 和 η_b , 然后, 在按 A.3.1 的强度条件进行应力校核时, 取 $\phi = 1.0$; 当 η_m 和 η_b 的值大于焊接接头系数 ϕ 时, 薄膜应力和弯曲应力均应按无排孔的情况进行计算和校核, 而不必考虑开孔削弱系数的影响。

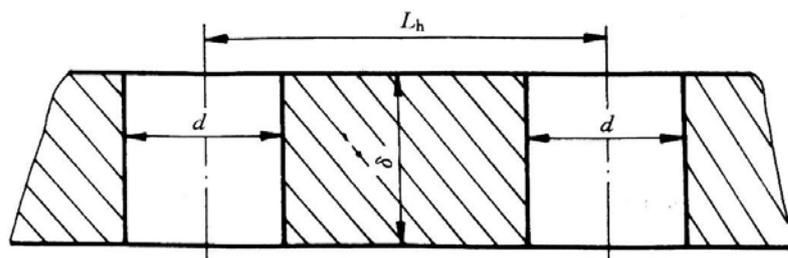


图 A.14 等间距等直径开孔

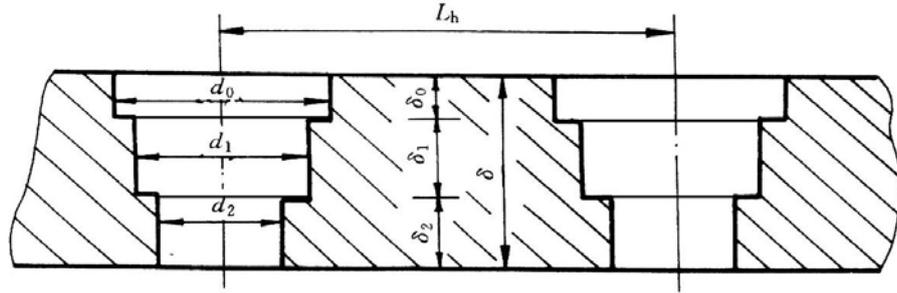


图 A.15 等间距变直径开孔

A.7.2.2 开孔削弱系数的计算

A.7.2.2.1 等间距等直径开孔（见图 A.14）的削弱系数

计算薄膜应力和弯曲应力时的开孔削弱系数按式（A-148）计算：

$$\eta_m = \eta_b = \frac{L_h - d}{L_h} \quad \dots\dots\dots (A-148)$$

A.7.2.2.2 等间距变直径开孔（见图 A.15）的削弱系数

a) 薄膜应力的开孔削弱系数按式（A-149）计算：

$$\eta_m = \frac{L_h - D_e}{L_h} \quad \dots\dots\dots (A-149)$$

式中：

D_e —— 变径孔当量直径，mm；

$$D_e = \frac{1}{\delta} (d_0 \cdot \delta_0 + d_1 \cdot \delta_1 + \dots + d_n \cdot \delta_n) ;$$

d_0, d_1, \dots, d_n —— 孔直径（见图 A.15），mm；

$\delta_0, \delta_1, \dots, \delta_n$ —— 孔直径为 d_0, d_1, \dots, d_n 处的厚度（见图 A.15），mm。

b) 弯曲应力的开孔削弱系数按式（A-150）计算：

$$\eta_b = \frac{6I}{\delta^2 \cdot c \cdot L_h} \quad \dots\dots\dots (A-150)$$

式中：

$$I = \frac{1}{12} (b_0 \cdot \delta_0^3 + b_1 \cdot \delta_1^3 + \dots + b_n \cdot \delta_n^3) + b_0 \cdot \delta_0 \left(\frac{\delta_0}{2} + \delta_1 + \dots + \delta_n - x \right)^2 + b_1 \cdot \delta_1 \left(\frac{\delta_1}{2} + \delta_2 + \dots + \delta_n - x \right)^2 + \dots\dots\dots + b_n \cdot \delta_n \left(x - \frac{\delta_n}{2} \right)^2, \text{ mm}^4 \quad \dots\dots\dots (A-151)$$

$b_0 = L_h - d_0, \text{ mm};$

$b_1 = L_h - d_1, \text{ mm};$

$b_2 = L_h - d_2, \text{ mm};$

.....

$$b_n = L_n - d_n, \text{ mm};$$

$$x = \left[\begin{aligned} &b_0 \cdot \delta_0 \left(\frac{\delta_0}{2} + \delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n \right) \\ &+ b_1 \cdot \delta_1 \left(\frac{\delta_1}{2} + \delta_2 + \delta_3 + \dots + \delta_n \right) \\ &+ b_1 \cdot \delta_1 \left(\frac{\delta_1}{2} + \delta_2 + \delta_3 + \dots + \delta_n \right) \\ &\dots \dots \\ &+ b_n \cdot \delta_n \cdot \frac{\delta_n}{2} \end{aligned} \right] (b_0 \cdot \delta_0 + b_1 \cdot \delta_1 + b_2 \cdot \delta_2 + \dots + b_n \cdot \delta_n)^{-1}, \text{ mm}$$

$$c_i = x \quad \dots \dots \dots (\text{A-152})$$

$$c_o = \delta - x \quad \dots \dots \dots (\text{A-153})$$

$$c = \begin{cases} c_i \\ c_o \end{cases} \text{ 中的大值, mm。}$$

c) 弯曲应力计算时, 应按式 (A-151) ~ (A-153) 确定 I 、 c_i 、 c_o 等值。

A. 8 焊接接头或排孔处的应力计算和校核

A. 8.1 A.4~A.6 节给出的应力公式是用来计算容器横截面上最大弯矩处的应力, 当焊接接头或排孔不在最大弯矩处而在侧板的其他部位时, 应对该焊缝处或排孔处的应力另行进行计算和校核。表 A.5 给出了各种非圆形截面容器 (不包括椭圆形截面容器) 直边上任意位置处的弯曲应力计算公式, 可利用表 A.5 计算得到的应力, 然后按 A.3.1 的强度条件进行校核。

A. 8.2 薄膜应力的计算同 A.4~A.6 节中的方法, 计算应力处有排孔时, 应按 A.7.2.1 考虑开孔削弱系数 η_m 的影响。

A. 8.3 弯曲应力的计算按表 A.5, 表 A.5 中没有包括的非圆形截面容器上有关位置的弯曲应力可采用其他的应力分析方法进行计算。计算应力处有排孔时, 应按 A.7.2.1 考虑开孔削弱系数 η_b 的影响。

A. 8.4 总应力的计算同前述各条规定。薄膜应力和总应力的校核方法按 A.3.1 的规定。

A. 9 端盖

端盖的设计可按第 5 章的有关规定。

A. 10 制造与验收

A. 10.1 非圆形截面容器的圆弧区 (长圆形截面容器的半圆、椭圆形截面容器的大小圆弧区), 其横截面上最大和最小成品内半径之差应不大于设计内半径的 1%, 且不大于 15mm。

A. 10.2 成形后矩形截面容器横截面上两对角线长度之差应不大于对角线设计长度的 1%, 且不大于 30mm。侧板宽度及其他尺寸的极限偏差按 GB 150.4 的规定。

A. 10.3 容器的直线度不大于 2‰, 且在容器总体长度上偏移量不大于 20mm。

A. 10.4 A、B 类焊缝的无损检测要求见 GB 150.4; 不带圆角矩形截面容器相邻两侧板转角处的焊接接头表面应进行磁粉或渗透检测。

表 A.5 侧板上焊接接头处弯曲应力计算公式

| 图号 | 焊接接头位置 | 接头处的弯曲应力 (σ_b), MPa |
|-----|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A.1 | M 和 Q 之间 | $\frac{p_c \cdot c \cdot h^2 \cdot L_s}{12I_2} \left[-1.5 + \left(\frac{1 + \alpha^2 \cdot K}{1 + K} \right) + 6 \frac{d_j^2}{h^2} \right]$ |
| | N 和 Q 之间 | $\frac{p_c \cdot c \cdot h^2 \cdot L_s}{12I_2} \left[-1.5\alpha^2 + \left(\frac{1 + \alpha^2 \cdot K}{1 + K} \right) + 6 \frac{d_j^2}{h^2} \right]$ |
| A.2 | M 和 Q 之间 | $\frac{p_c \cdot c \cdot h^2 \cdot L_s}{12I_{22}} \left\{ \frac{1}{2N} \left[(K_2 - k_1 \cdot k_2) + \alpha^2 \cdot k_2 (K_2 - k_2) \right] - \frac{1}{4} + \frac{d_j^2}{h^2} \right\}$ |
| | M ₁ 和 Q ₁ 之间 | $\frac{p_c \cdot c \cdot h^2 \cdot L_s}{12I_2} \left\{ \frac{1}{2N} \left[(K_1 \cdot k_1 - k_2) + \alpha^2 \cdot k_2 (K_1 - k_2) \right] - \frac{1}{4} + \frac{d_j^2}{h^2} \right\}$ |
| A.3 | A 和 B 之间 | $\frac{c}{I_1} \left(M_A + \frac{p_c \cdot d_j^2 \cdot L_s}{2} \right)$ |
| | D 和 C 之间 | $\frac{c}{I_1} \left[M_A + \frac{p_c \cdot L_s}{2} (L^2 + 2r \cdot L - 2r \cdot l_1 - l_1^2 + d_j^2) \right]$ |
| A.4 | A 和 B 之间 | $\frac{p_c \cdot c \cdot L_s}{I_2} \left(\frac{-LC_1}{6A} + \frac{d_j^2}{2} \right)$ |
| A.6 | M 和 Q 之间 | $\frac{p_c \cdot c \cdot h^2 \cdot L_s}{24I_{21}} \left[-3 + 2 \left(\frac{1 + \alpha_1^2 \cdot k}{1 + k} \right) + 12 \frac{d_j^2}{h^2} \right]$ |
| | N 和 Q 之间 | $\frac{p_c \cdot c \cdot h^2 \cdot L_s}{24I_{11}} \left[-3\alpha + 2 \left(\frac{1 + \alpha_1^2 \cdot k}{1 + k} \right) + 12 \frac{d_j^2}{h^2} \right]$ |
| A.7 | A 和 B 之间 | $\frac{c}{I_{21}} \left(M_A + \frac{p_c \cdot d_j^2 \cdot L_s}{2} \right)$ |
| | B 和 C 之间 | $\frac{c}{I_2} \left(M_A + \frac{p_c \cdot d_j^2 \cdot L_s}{2} \right)$ |
| | F 和 E 之间 | $\frac{c}{I_{11}} \left\{ M_A + p_c \cdot \frac{L_s}{2} \left[(L_0 + L_{11})^2 + 2r(L_0 + L_{11} - l_0 - l_{11}) - (l_0 + l_{11})^2 + d_j^2 \right] \right\}$ |
| | E 和 D 之间 | $\frac{c}{I_1} \left\{ M_A + p_c \cdot \frac{L_s}{2} \left[(L_0 + L_{11})^2 + 2r(L_0 + L_{11} - l_0 - l_{11}) - 2l_0 \cdot l_{11} - l_{11}^2 + d_j^2 \right] \right\}$ |
| A.8 | A 和 B 之间 | $\frac{p_c \cdot c \cdot L_s}{I_{11}} \left(\frac{-LC_2}{6A_2} + \frac{d_j^2}{2} \right)$ |

附 录 B
(规范性附录)
钢带错绕筒体

B.1 总则

本附录适用于内直径大于等于 500mm 的钢带错绕筒体设计。

B.2 术语、定义和符号

B.2.1 GB150.1 通用要求中界定的术语和定义适用于本标准本章的本部分。

B.2.2 符号

- B ——钢带宽度, mm;
 C_2 ——内筒腐蚀裕量, mm;
 D_i ——筒体内直径, mm;
 D_k ——第 k 层钢带层平均直径, mm;
 e_k ——第 k 层钢带的带间间隙, mm;
 j ——内筒名义厚度与钢带错绕筒体名义厚度之比;
 K_1 ——内筒外直径与内直径之比;
 K_2 ——钢带层外直径与内直径之比;
 m ——钢带设计层数;
 m_c ——钢带计算层数;
 m_k ——第 k 层钢带根数;
 p_c ——计算压力, MPa;
 R_i ——内筒内半径, mm;
 R_j ——内筒外半径, mm;
 R_{mi} ——内筒材料标准常温抗拉强度下限值, MPa;
 R_{mw} ——钢带材料标准常温抗拉强度下限值, MPa;
 R_o ——钢带层外半径, mm;
 y ——系数;
 α ——相对于筒体环向的钢带平均缠绕倾角, (°);
 α_k ——第 k 层钢带的缠绕倾角, (°);
 δ ——钢带错绕筒体计算厚度, mm;
 δ_i ——内筒设计厚度, mm;
 δ_n ——钢带错绕筒体名义厚度, mm;
 δ_{ni} ——内筒名义厚度, mm;
 δ_{nw} ——钢带层名义厚度, mm;
 δ_r ——钢带厚度, mm;

ϕ ——焊接接头系数;

λ ——钢带缠绕平均导程, mm;

λ_c ——钢带缠绕计算导程, mm;

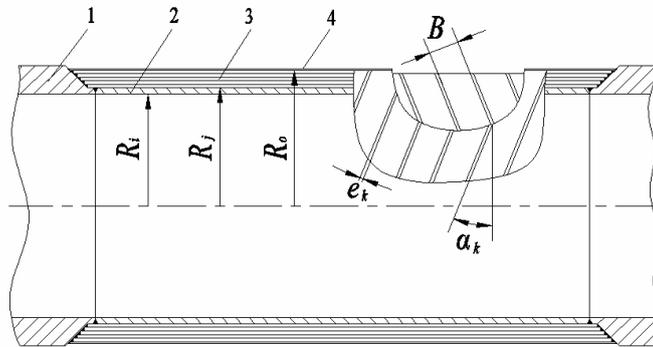
$[\sigma]^t$ ——设计温度下钢带错绕筒体材料的许用应力, MPa;

$[\sigma]_i^t$ ——设计温度下内筒材料的许用应力, MPa;

$[\sigma]_w^t$ ——设计温度下钢带材料的许用应力, MPa。

B.3 结构

钢带错绕筒体由内筒、钢带层和保护壳组成, 见图 B.1。保护壳的厚度为 3mm~6mm, 不承受内压作用。



1—端部法兰; 2—内筒; 3—钢带层; 4—保护壳

图 B.1 钢带错绕筒体结构

B.4 钢带错绕筒体厚度

B.4.1 钢带错绕筒体计算厚度按式 (B-1) 计算:

$$\delta = \frac{p_c D_i}{2[\sigma]^t \phi - p_c} \dots\dots\dots (B-1)$$

设计温度下钢带错绕筒体材料的许用应力按式 (B-2) 计算:

$$[\sigma]^t \phi = j[\sigma]_i^t + y(1-j)[\sigma]_w^t \dots\dots\dots (B-2)$$

式中 $y=0.98$, $j = \frac{1}{8} \sim \frac{1}{4}$ 。

B.4.2 内筒设计厚度按式 (B-3) 计算:

$$\delta_1 = j\delta + C_2 \dots\dots\dots (B-3)$$

将 δ_1 向上圆整至钢材标准规格的厚度得到 δ_{ni} 。

B.4.3 钢带计算层数按式 (B-4) 计算:

$$m_c = \frac{(1-j)\delta}{\delta_r} \dots\dots\dots (B-4)$$

式中 $\delta_r = 4\text{mm} \sim 8\text{mm}$ 。将 m_c 向上圆整至最近的偶数得到 m 。

B.4.4 钢带层的名义厚度按式 (B-5) 计算:

$$\delta_{nw} = m\delta_r \dots\dots\dots (B-5)$$

B.4.5 钢带错绕筒体名义厚度按式 (B-6) 计算:

$$\delta_n = \delta_{ni} + \delta_{nw} \dots\dots\dots (B-6)$$

B.5 钢带缠绕参数

B.5.1 钢带平均缠绕倾角

钢带平均缠绕倾角按式 (B-7) 计算:

$$\alpha = \arccos \sqrt{\frac{0.95(K_2^2 - 1)R_{mw} + R_{mi} [0.95(K_1^2 - 1)/K_1^2 - 2 \ln K_1 / \sqrt{3}]}{R_{mw} [\ln K_2 + 0.83125(K_2^2 - 1)]}} \dots\dots\dots (B-7)$$

B.5.2 钢带缠绕平均导程

钢带缠绕计算导程按式 (B-8) 计算:

$$\lambda_c = 2\pi \left(\frac{R_o + R_i}{2} \right) \tan \alpha \dots\dots\dots (B-8)$$

在绕带机床的导程中, 选择与 λ_c 最接近的值作为 λ 。

B.5.3 钢带缠绕倾角

第 k 层钢带的缠绕倾角按式 (B-9) 计算:

$$\alpha_k = \arctan(\lambda / \pi D_k) \dots\dots\dots (B-9)$$

B.5.4 同层钢带根数

第 k 层钢带的根数按式 (B-10) 计算:

$$m_k = (\pi D_k / B) \sin \alpha_k \dots\dots\dots (B-10)$$

m_k 向上圆整至最近的整数。

B.5.5 带间间隙

第 k 层钢带的带间间隙按式 (B-11) 计算:

$$e_k = (\pi D_k / m_k) \sin \alpha_k - B \dots\dots\dots (B-11)$$

式中取 $B = 80\text{mm} \sim 160\text{mm}$, e_k 应小于等于 3mm 。否则应调整 λ , 重新计算。

附 录 C
(资料性附录)
密封结构

C.1 总则

本附录规定了圆筒形压力容器用金属平垫密封、双锥密封、伍德密封、卡扎里密封、八角垫和椭圆垫密封、卡箍紧固结构的设计方法。各密封结构型式的适用范围见表 C.1。

表 C.1 适用范围

| 密封结构型式 | 设计温度, °C | 设计压力, MPa | 内直径 D_i , mm |
|--------------------------------------|----------|--------------|----------------|
| 金属平垫密封 | 0~200 | ≤ 16 | $\leq 1\ 000$ |
| | | $>16\sim 22$ | ≤ 800 |
| | | $>22\sim 35$ | ≤ 600 |
| 双锥密封 | 0~400 | 6.4~35 | 400~3200 |
| 伍德密封 卡扎里密封 八角垫和椭圆垫密封 卡箍紧固结构 | | ≤ 35 | |

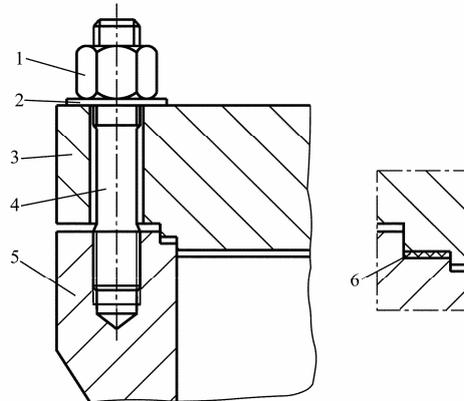
C.2 金属平垫密封

C.2.1 符号

- b ——平垫片宽度, mm;
- D_i ——内直径, mm;
- δ ——平垫片厚度, mm;
- δ_p ——平盖厚度, mm。

C.2.2 结构

金属平垫密封的结构见图 C.1。



1—主螺母；2—垫圈；3—平盖；4—主螺栓；
5—筒体端部；6—平垫片

图 C.1 金属平垫密封结构

C.2.3 平垫片材料和尺寸

C.2.3.1 平垫片材料

- a) 退火铝（硬度为 15~30HBW10/250）；
- b) 退火紫铜（硬度为 30~50HBW10/500）；
- c) 10 钢。

C.2.3.2 平垫片的宽度 b 和厚度 δ 按表 C.2 和表 C.3 选取。

C.2.4 密封面

密封面尺寸按表 C.4 确定。平盖和筒体端部的密封面上应各有 2 条深 1mm 的三角形沟槽。密封面配合公差见图 C.2。

表 C.2 平垫片宽度 b

| 设计压力 MPa | 内直径 D_1 , mm | | | | | | | | |
|-------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| | ≤ 100 | >100~ 200 | >200~ 300 | >300~ 400 | >400~ 500 | >500~ 600 | >600~ 700 | >700~ 800 | >800~ 1 000 |
| | 平垫片宽度, mm | | | | | | | | |
| ≤ 16 | 6 | 6 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 10 | 12 |
| >16~22 | 6 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 10 | 12 | — |
| >22~35 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 12 | — | — | — |

表 C.3 平垫片厚度 δ

单位为毫米

| 宽度 b | 厚度 δ |
|--------|-------------|
| 6 | 3 |
| 7~9 | 5 |
| 10~12 | 6 |

表 C.4 密封面尺寸

单位为毫米

| D_i | D_1 | h_1 | h_2 |
|--------------------|----------|-------------|-------------|
| ≤ 100 | D_i+6 | $2\delta+1$ | 2.5δ |
| $> 100\sim 200$ | D_i+8 | | |
| $> 200\sim 400$ | D_i+10 | | |
| $> 400\sim 600$ | D_i+12 | | |
| $> 600\sim 800$ | D_i+12 | | |
| $> 800\sim 1\ 000$ | D_i+12 | | |

C.2.5 筒体端部

筒体端部和主螺栓、主螺母的设计按第 7 章 7.7 的规定。

C.2.6 平盖

平盖的结构见图 C.3，其厚度 δ_p 按第 5 章式 (5-33) 计算。

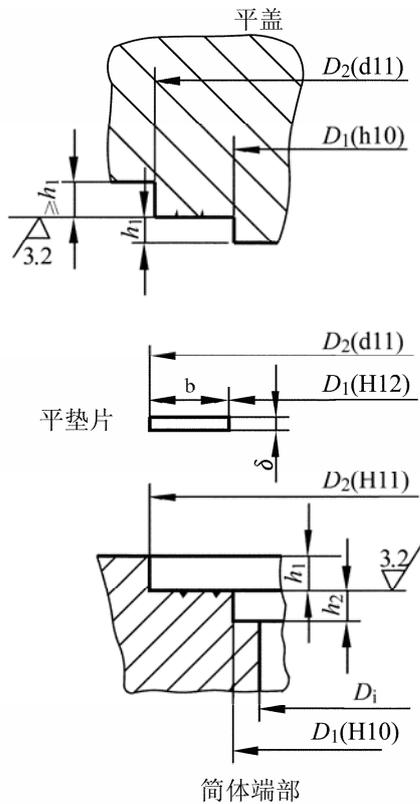


图 C.2 密封面配合公差

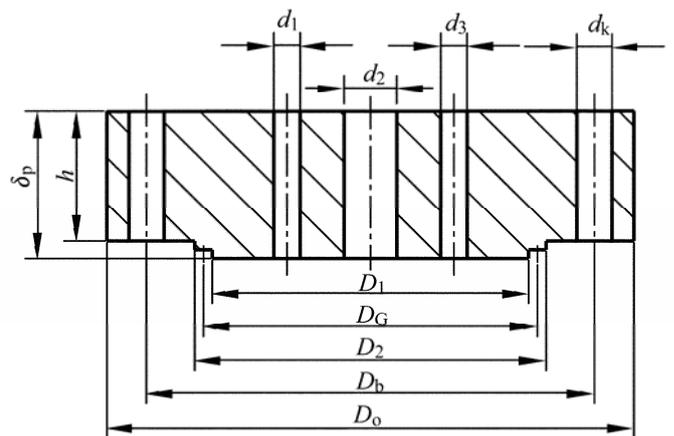


图 C.3 平盖

C.3 双锥密封

C.3.1 符号

- A——双锥环高度，mm；
- B——双锥环厚度，mm；
- b——双锥环的有效高度，mm；
- C——双锥环外侧面高度，mm；
- D_b ——螺栓孔中心圆直径，mm；

D_G ——密封面平均直径, mm;
 D_i ——内直径, mm;
 D_T ——平盖支撑面直径, mm;
 D_1 ——双锥环内圆柱面直径, mm;
 E ——设计温度下材料的弹性模量, MPa;
 F ——内压引起的轴向力, N;
 F_c ——双锥环回弹力的轴向分力, N;
 F_p ——双锥环自紧作用的轴向分力, N;
 f ——双锥环的截面积, mm²;
 g ——单侧径向间隙(见图 C.4), mm;
 h_1 ——厚度(见图 C.5), mm;
 p_c ——计算压力, MPa;
 W ——主螺栓总载荷, N;
 W_a ——预紧状态的螺栓载荷, N;
 W_p ——操作状态的螺栓载荷, N;
 y ——密封比压, MPa;
 α ——双锥环密封面锥角, (°);
 ρ ——摩擦角;
 τ_a —— a — a 环向截面的切应力, MPa;
 σ_m ——双锥环中点处的弯曲应力, MPa;
 σ_{ma} —— a — a 环向截面的弯曲应力, MPa;
 σ_{oa} —— a — a 环向截面的当量应力, MPa;
 $[\sigma]^t$ ——设计温度下元件材料的许用应力, MPa。

C.3.2 结构

C.3.2.1 双锥密封结构见图 C.4。

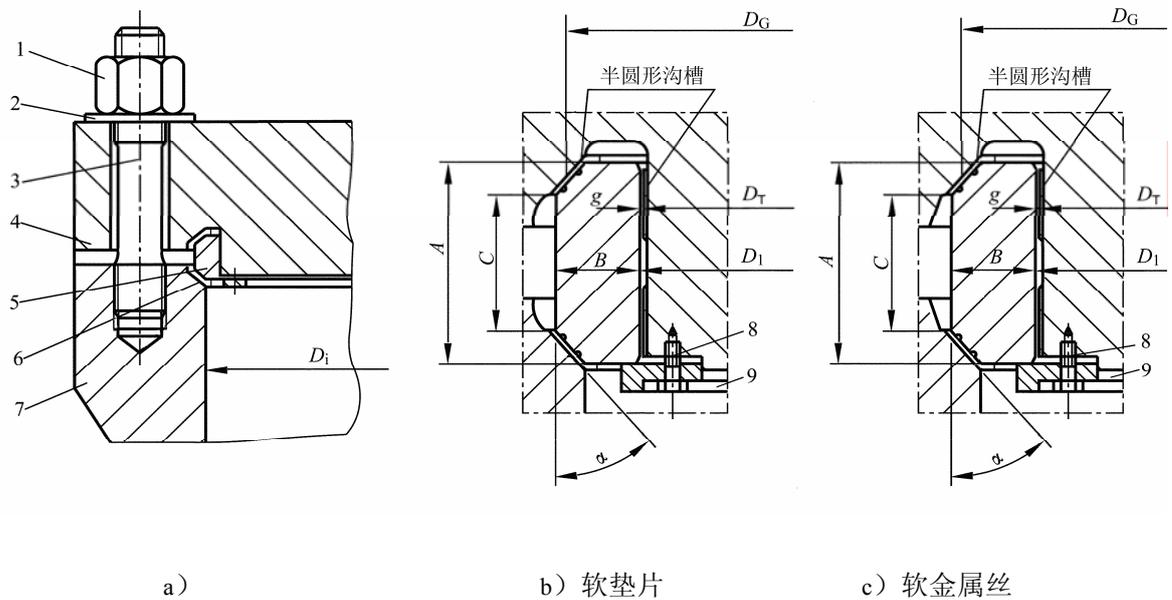
C.3.2.2 双锥环用托环、螺栓固定在平盖上。双锥环的内圆柱面与平盖的圆柱支承面之间的单侧径向间隙($g = (D_1 - D_T)/2$)应控制在双锥环内圆柱面直径的 0.075%~0.125%。

C.3.2.3 平盖的圆柱支承面上应开几条纵向的半圆形沟槽。

C.3.2.4 密封面之间的软金属垫片厚度约 1mm, 密封特性参数按表 7-2。非金属垫片厚度为 0.5mm~1mm, 软金属丝直径 d_s 为 2mm~5mm, 其密封特性参数和摩擦角按经验确定。

C.3.2.5 图 C.4 b) 所示双锥环的两个密封面上应各开 2 条半径为 1mm~1.5mm, 深 1mm 的半圆形沟槽或深 1mm 的三角形沟槽, 沟槽槽口圆角半径约 0.5mm; 图 C.4 c) 所示双锥环的两个密封面上应各开 1 条或 2 条半圆形沟槽, 沟槽直径为 $d_s^{+0.1}$ mm。

C.3.2.6 双锥环密封面锥角 $\alpha = 30^\circ_{-15'}$, 粗糙度 R_a 为 3.2 μm~1.6 μm。平盖及筒体端部密封面锥角 $\alpha = 30^\circ_{+15'}$, 粗糙度 R_a 为 3.2 μm~1.6 μm。



1—主螺母；2—垫圈；3—主螺栓；4—平盖；5—双锥环；
6—软垫片或金属丝；7—筒体端部；8—螺栓；9—托环

图 C.4 双锥密封结构

C.3.3 双锥环、软垫片和软金属丝材料

C.3.3.1 双锥环应选用 35、16Mn、20MnMo、15CrMo、S30408 和 S32168 等的 III 级或 IV 级压力容器用锻件。

C.3.3.2 软垫片和软金属丝材料按表 C.5 选用。

表 C.5 软垫片和软金属丝材料

| 软垫片 | 软金属丝 |
|---------------------------------------------------------------------|------|
| 退火铝（硬度为 15~30HBW10/250） 退火紫铜（硬度为 30~50HBW10/500） 纯铁 奥氏体不锈钢 | |
| 柔性石墨 | 银 |

C.3.4 双锥环结构尺寸

双锥环结构尺寸按式 (C.1) ~式 (C.3) 计算：

$$A = 2.7\sqrt{D_i} \dots\dots\dots (C-1)$$

$$C = (0.5 \sim 0.6)A \dots\dots\dots (C-2)$$

$$B = \frac{A+C}{2} \sqrt{\frac{0.75p_c}{\sigma_m}} \dots\dots\dots (C-3)$$

式中双锥环中点处的弯曲应力 $\sigma_m = 50\text{MPa} \sim 100\text{MPa}$ 。

推荐的双锥环的系列结构尺寸见表 C-6。

表 C.6 双锥环的系列结构尺寸

| 封口内径 D_1 , mm | 设计压力, MPa | A , mm | B , mm | C , mm | D_1 , mm | |
|-----------------|-----------|----------|----------|----------|------------|-------|
| 1 000 | 6.4 | 85 | 23 | 48 | 975 | |
| 1 200 | | 94 | 26 | 54 | 1 171 | |
| 1 400 | | 101 | 28 | 58 | 1 369 | |
| 1 600 | | 108 | 29 | 62 | 1 569 | |
| 1 800 | | 115 | 31 | 66 | 1 766 | |
| 2 000 | | 121 | 33 | 69 | 1 964 | |
| 2 200 | | 127 | 34 | 72 | 2 164 | |
| 2 400 | | 132 | 36 | 75 | 2 361 | |
| 2 600 | | 138 | 38 | 79 | 2 558 | |
| 2 800 | | 143 | 39 | 82 | 2 757 | |
| 3 000 | | 148 | 40 | 84 | 2 957 | |
| 3 200 | | 153 | 42 | 87 | 3 154 | |
| 1 000 | | 10 | 85 | 25 | 47 | 972 |
| 1 200 | | | 94 | 27 | 52 | 1 170 |
| 1 400 | 101 | | 30 | 56 | 1 366 | |
| 1 600 | 108 | | 31 | 59 | 1 566 | |
| 1 800 | 115 | | 33 | 63 | 1 764 | |
| 2 000 | 121 | | 35 | 67 | 1 961 | |
| 2 200 | 127 | | 37 | 70 | 2 159 | |
| 2 400 | 132 | | 39 | 73 | 2 356 | |
| 2 600 | 138 | | 40 | 76 | 2 556 | |
| 2 800 | 143 | | 42 | 79 | 2 753 | |
| 3 000 | 148 | | 43 | 81 | 2 953 | |
| 3 200 | 153 | | 45 | 84 | 3 150 | |
| 600 | 20 | | 66 | 23 | 33 | 573 |
| 800 | | | 76 | 27 | 38 | 768 |
| 1 000 | | 85 | 30 | 43 | 964 | |
| 1 200 | | 94 | 33 | 47 | 1 161 | |
| 1 400 | | 101 | 36 | 51 | 1 357 | |
| 1 600 | | 108 | 38 | 54 | 1 555 | |
| 1 800 | | 115 | 40 | 58 | 1 753 | |
| 2 000 | | 121 | 43 | 61 | 1 949 | |
| 2 200 | | 127 | 45 | 64 | 2 146 | |
| 2 400 | | 132 | 46 | 66 | 2 346 | |
| 2 600 | | 138 | 48 | 69 | 2 544 | |
| 2 800 | | 143 | 50 | 72 | 2 741 | |
| 3 000 | | 148 | 52 | 74 | 2 939 | |
| 3 200 | | 153 | 54 | 77 | 3 136 | |
| 400 | 35 | 54 | 22 | 27 | 372 | |
| 500 | | 60 | 24 | 30 | 469 | |
| 600 | | 66 | 27 | 33 | 565 | |
| 700 | | 71 | 29 | 36 | 662 | |
| 800 | | 76 | 31 | 38 | 760 | |
| 1 000 | | 85 | 34 | 43 | 956 | |
| 1 200 | | 94 | 38 | 47 | 1 151 | |
| 1 400 | | 101 | 41 | 51 | 1 347 | |
| 1 600 | | 108 | 44 | 54 | 1 543 | |
| 1 800 | | 115 | 46 | 58 | 1 741 | |
| 2 000 | | 121 | 49 | 61 | 1 937 | |
| 2 200 | | 127 | 51 | 64 | 2 134 | |
| 2 400 | | 132 | 53 | 66 | 2 332 | |
| 2 600 | | 138 | 56 | 69 | 2 528 | |
| 2 800 | | 143 | 58 | 72 | 2 725 | |
| 3 000 | | 148 | 60 | 74 | 2 923 | |
| 3 200 | 153 | 62 | 77 | 3 120 | | |

C.3.5 筒体端部

筒体端部、主螺栓和主螺母的设计按 7.7 的规定。但确定 A_m 时，式 (7-4) 和式 (7-5) 中螺栓载荷 W_a 、 W_p 分别按式 (C-4) 和式 (C-6) 计算。

C.3.5.1 预紧状态的主螺栓载荷按式 (C-4) 计算：

$$W_a = 1.57D_G(A-C)y \frac{\sin(\alpha + \rho)}{\cos \alpha \cos \rho} \dots\dots\dots (C-4)$$

双锥环的密封面平均直径按式 (C-5) 计算：

$$D_G = D_1 + 2B - \frac{A-C}{2} \tan \alpha \dots\dots\dots (C-5)$$

C.3.5.2 操作状态的主螺栓载荷按式 (C-6) 计算：

$$W_p = F + F_p + F_c \dots\dots\dots (C-6)$$

内压引起的轴向力按式 (C-7) 计算：

$$F = 0.785D_G^2 p_c \dots\dots\dots (C-7)$$

双锥环自紧作用的轴向分力按式 (C-8) 计算：

$$F_p = 1.57D_G b p_c \tan(\alpha - \rho) \dots\dots\dots (C-8)$$

双锥环的有效高度按式 (C-9) 计算：

$$b = \frac{1}{2}(A+C) \dots\dots\dots (C-9)$$

双锥环回弹力的轴向分力按式 (C-10) 计算：

$$F_c = 3.14f \frac{2g}{D_1} E \tan(\alpha - \rho) \dots\dots\dots (C-10)$$

式中单侧径向间隙 $g=(0.075\% \sim 0.125\%)D_1$ 。钢与钢接触时 $\rho=8^\circ 30'$ ，钢与铜接触时 $\rho=10^\circ 31'$ ，钢与铝接触时 $\rho=15^\circ$ 。

双锥环的截面积按式 (C-11) 计算：

$$f = AB - \left(\frac{A-C}{2} \right)^2 \tan \alpha \dots\dots\dots (C-11)$$

C.3.6 平盖

平盖结构见图 C.5。其厚度 δ_p 按第 5 章式 (5-33) 计算，式中 D_c 以 D_G 代入。

作用于平盖 $a-a$ 环向截面的当量应力应按式 (C-12) 校核：

$$\sigma_{oa} = \sqrt{\sigma_{ma}^2 + 3\tau_a^2} \leq 0.7[\sigma]^t \dots\dots\dots (C-12)$$

$a-a$ 环向截面的弯曲应力按式 (C-13) 计算：

$$\sigma_{ma} = \frac{3W(D_b - D_G)}{3.14D_G h_1^2} \dots\dots\dots (C-13)$$

$a-a$ 环向截面的切应力按式 (C-14) 计算：

$$\tau_a = \frac{W}{3.14D_G h_1} \dots\dots\dots (C-14)$$

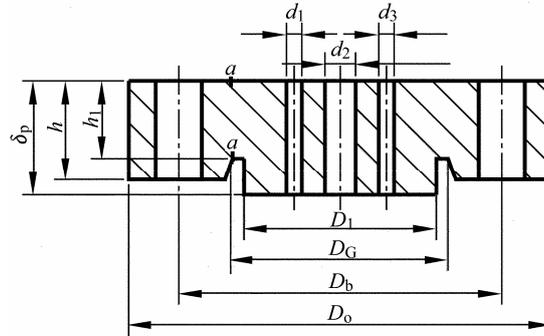


图 C.5 平盖

C.4 伍德密封

C.4.1 符号

- C——计算系数（见式 C-44）；
- D_a —— a — a 环向截面的直径，mm；
- D_b ——螺栓孔中心圆直径，mm；
- D_c ——密封接触圆直径，mm；
- D_n ——筒体端部中性面 Y — Y 的直径，mm；
- D_o ——外直径，mm；
- D_1 ——牵制环内径，mm；
- D_3 ——牵制环外径，mm；
- D_5 ——顶盖 a — a 环向截面的平均直径，mm；
- D_6 ——直径(见图 C.9)，mm；
- D_7 ——直径(见图 C.10)，mm；
- d_k ——螺栓孔或螺孔直径，mm；
- F ——内压引起的轴向力，N；
- F_a ——密封垫密封力的轴向分力，N；
- H ——力臂（见图 C.10），mm；
- h ——厚度（见图 C.7），mm；
- h_1 ——厚度（见图 C.8），mm；
- h_2 ——厚度（见图 C.9），mm；
- h_3 ——厚度（见图 C.10），mm；
- I_c ——纵向截面惯性矩， mm^4 ；
- L ——特征长度（见图 C.9），mm；
- l ——特征长度（见图 C.9），mm；
- l_1 、 l_2 ——特征长度（见图 C.10），mm；

- M ——纵向截面的弯矩, N·mm;
 M_{\max} ——作用于 $a-a$ 环向截面单位长度上的最大弯矩, N·mm/mm;
 M_r ——单位长度弯矩, N·mm/mm;
 M_1 ——中性面单位长度的弯矩, N·mm/mm;
 M_3 、 M_4 ——单位长度弯矩, N·mm/mm;
 n ——拉紧螺栓数量;
 p_c ——计算压力, MPa;
 Q_r ——密封反力引起的径向载荷, N;
 q_r ——沿中性面 $Y-Y$ 单位长度上的径向载荷, N/mm;
 q_1 ——线密封比压, N/mm;
 S —— $a-a$ 环向截面处厚度, mm;
 S_0 ——筒体端部中性面 $Y-Y$ 离直径 D_7 的距离, mm;
 Z ——纵向截面抗弯截面系数, mm^3 ;
 Z_c ——纵向截面形心离截面最外端距离, mm;
 α ——压垫的锥角, ($^\circ$);
 β ——计算系数, mm^{-1} ;
 δ ——牵制环厚度, mm;
 δ_1 ——顶盖厚度, mm;
 ρ ——摩擦角;
 μ ——平均壁温下材料的泊松比;
 τ_a —— $a-a$ 环向截面的切应力, MPa;
 τ_b —— $b-b$ 环向截面的切应力, MPa;
 σ_a —— $a-a$ 环向截面拉应力, MPa;
 σ_m ——弯曲应力, MPa;
 σ_{ma} —— $a-a$ 环向截面的弯曲应力, MPa;
 σ_{mb} —— $b-b$ 环向截面的弯曲应力, MPa;
 σ_{oa} —— $a-a$ 环向截面的当量应力, MPa;
 σ_{ob} —— $b-b$ 环向截面的当量应力, MPa;
 $[\sigma]^t$ ——设计温度下元件材料的许用应力, MPa。

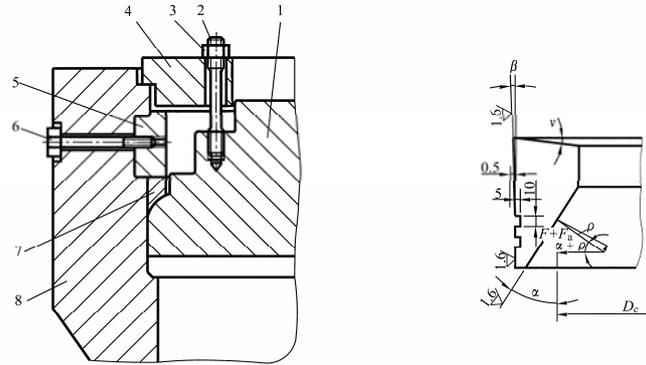
C.4.2 结构

伍德密封的结构见图 C.6。

顶盖和压垫之间按线接触密封设计。为防止密封力过大把密封面压溃, 设计中应注意选配适当强度的材料。

压垫的外锥面上应开 1~2 条环形沟槽。压垫的锥角分别为:

$$\alpha=30^\circ \sim 35^\circ ; \beta=5^\circ ; \nu=5^\circ \sim 10^\circ 。$$



1—顶盖；2—牵制螺栓；3—螺母；4—牵制环；5—四合环；
6—拉紧螺栓；7—压垫；8—筒体端部

图 C.6 伍德密封结构

C.4.3 载荷

C.4.3.1 内压引起的轴向力按式 (C-15) 计算：

$$F = 0.785D_c^2 p_c \dots\dots\dots (C-15)$$

C.4.3.2 预紧状态时，压垫密封力的轴向分力，即牵制螺栓的载荷按式 (C-16) 计算：

$$F_a = 3.14D_c q_1 \frac{\sin(\alpha + \rho)}{\cos \rho} \dots\dots\dots (C-16)$$

式中对于碳素钢、低合金钢的线密封比压 $q_1=200 \text{ N/mm} \sim 300 \text{ N/mm}$ 。钢与钢接触时 $\rho=8^\circ 30'$ ，钢与铜接触时 $\rho=10^\circ 31'$ ，钢与铝接触时 $\rho=15^\circ$ 。

C.4.4 牵制环

确定牵制环的结构尺寸 (见图 C.7)，并对作用于纵向截面的弯曲应力和 $a-a$ 环向截面的当量应力进行强度校核。

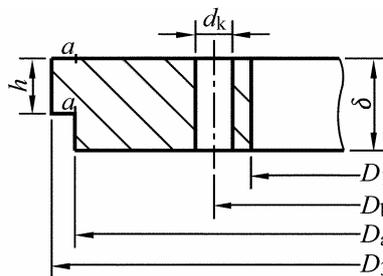


图 C.7 牵制环

C.4.4.1 纵向截面的弯曲应力按式 (C-17) 校核：

$$\sigma_m = \frac{3F_a(D_a - D_b)}{3.14(D_3 - D_1 - 2d_k)\delta^2} \leq 0.9[\sigma]^t \dots\dots\dots (C-17)$$

C.4.4.2 $a-a$ 环向截面的当量应力按式 (C-18) 校核：

$$\sigma_{\text{oa}} = \sqrt{\sigma_{\text{ma}}^2 + 3\tau_a^2} \leq 0.9[\sigma]^t \quad \dots\dots\dots (\text{C-18})$$

a — a 环向截面的弯曲应力 σ_{ma} 按式 (C-19) 计算:

$$\sigma_{\text{ma}} = \frac{3F_a(D_a - D_b)}{3.14D_a h^2} \quad \dots\dots\dots (\text{C-19})$$

a — a 环向截面的切应力 τ_a 按式 (C-20) 计算:

$$\tau_a = \frac{F_a}{3.14D_a h} \quad \dots\dots\dots (\text{C-20})$$

式中厚度 h 见图 C.7 标注部分。

C.4.5 四合环

四合环系由四块元件组成, 每块元件均有一个径向螺孔 (见图 C.8)。计算时视为一个圆环, 对作用于 a — a 环向截面的切应力按式 (C-21) 校核:

$$\tau_a = \frac{F + F_a}{3.14D_a h_1 - 0.785nd_k^2} \leq 0.9[\sigma]^t \quad \dots\dots\dots (\text{C-21})$$

式中厚度 h_1 见图 C.8 标注部分。

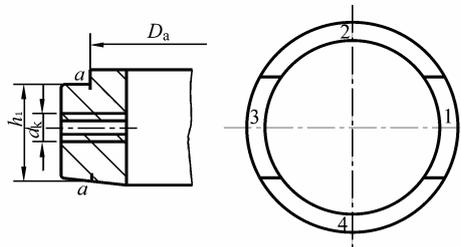


图 C.8 四合环

C.4.6 牵制螺栓

牵制螺栓设计按第 7 章 7.7 的规定, 其中 A_m 取预紧状态需要的螺栓面积, 即 $A_m = A_a$, 式 (7-7) 中螺栓载荷 W_a 等于 F_a , F_a 按式 (C-16) 计算。

C.4.7 顶盖

确定顶盖的结构尺寸 (见图 C.9), 并对作用于纵向截面的弯曲应力和 a — a 环向截面的当量应力进行强度校核。

C.4.7.1 纵向截面的弯曲应力按式 (C-22) 校核:

$$\sigma_m = \frac{M}{Z} \leq 0.7[\sigma]^t \quad \dots\dots\dots (\text{C-22})$$

纵向截面的弯矩 M 按式 (C-23) 计算:

$$M = \frac{1}{6.28} \left[\left(D_c - \frac{2}{3} D_c \right) F + (D_c - D_b) F_a \right] \quad \dots\dots\dots (\text{C-23})$$

纵向截面抗弯截面系数 Z 按式 (C-24) 选取:

$$\begin{cases} \text{当 } Z_c \geq \frac{\delta_1}{2} \text{ 时, } Z = \frac{I_c}{Z_c} \\ \text{当 } Z_c < \frac{\delta_1}{2} \text{ 时, } Z = \frac{I_c}{\delta_1 - Z_c} \end{cases} \dots\dots\dots (C-24)$$

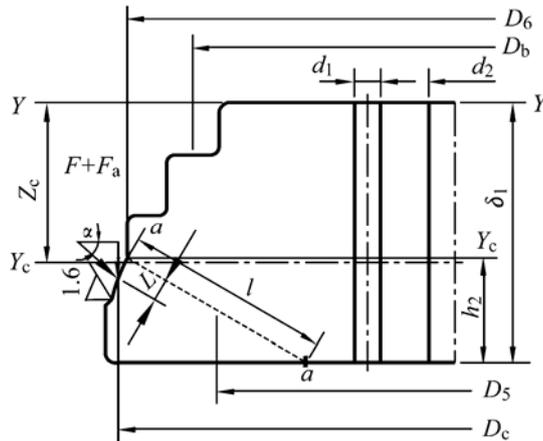


图 C.9 顶盖

C.4.7.2 a—a 环向截面的当量应力按式 (C-25) 校核:

$$\sigma_{oa} = \sqrt{\sigma_{ma}^2 + 3\tau_a^2} \leq 0.7[\sigma]^t \dots\dots\dots (C-25)$$

弯曲应力 σ_{ma} 按式 (C-26) 计算:

$$\sigma_{ma} = \frac{6(F + F_a)L}{3.14D_5l^2 \sin \alpha} \dots\dots\dots (C-26)$$

切应力 τ_a 按式 (C-27) 计算:

$$\tau_a = \frac{F + F_a}{3.14D_5l \sin \alpha} \dots\dots\dots (C-27)$$

顶盖 a—a 环向截面的平均直径 D_5 按式 (C-28) 计算:

$$D_5 = D_6 - \frac{h_2}{\tan \alpha} \dots\dots\dots (C-28)$$

其他符号见图 C.9。

C.4.8 筒体端部

确定筒体端部的结构尺寸 (见图 C.10), 并对作用于 a—a 和 b—b 环向截面的当量应力进行强度校核。

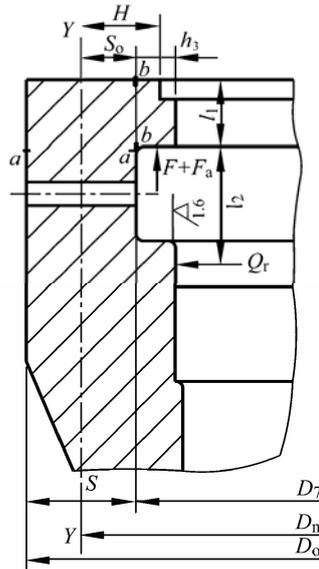


图 C.10 筒体端部

C.4.8.1 a—*a* 环向截面的当量应力按式 (C-29) 校核:

$$\sigma_{oa} = \sigma_a + \sigma_{ma} \leq 0.9[\sigma]^t \quad \dots\dots\dots (C-29)$$

筒体端部 *a*—*a* 环向截面拉应力 σ_a 按式 (C-30) 计算:

$$\sigma_a = \frac{4(F + F_a)}{3.14(D_0^2 - D_7^2)} \quad \dots\dots\dots (C-30)$$

D_7 见图 C.10 标注部分。

弯曲应力 σ_{ma} 按式 (C-31) 计算:

$$\sigma_{ma} = \frac{6M_{max}}{S^2} \quad \dots\dots\dots (C-31)$$

式中:

a—*a* 环向截面单位长度上的最大弯矩 M_{max} 的计算见 C4.8.3;

a—*a* 环向截面处厚度 S 按式 (C-32) 计算:

$$S = \frac{D_0 - D_7}{2} \quad \dots\dots\dots (C-32)$$

C.4.8.2 *b*—*b* 环向截面的当量应力按式 (C-33) 校核:

$$\sigma_{ob} = \sqrt{\sigma_{mb}^2 + 3\tau_b^2} \leq 0.9[\sigma]^t \quad \dots\dots\dots (C-33)$$

b—*b* 环向截面的弯曲应力 σ_{mb} 按式 (C-34) 计算:

$$\sigma_{mb} = \frac{3(F + F_a)h_3}{3.14D_7l_1^2} \quad \dots\dots\dots (C-34)$$

b—*b* 环向截面的切应力 τ_b 按式 (C-35) 计算:

$$\tau_b = \frac{F + F_a}{3.14D_7l_1} \quad \dots\dots\dots (C-35)$$

其他符号见图 C.10。

C.4.8.3 最大弯矩 M_{\max}

C.4.8.3.1 $F+F_a$ 引起的弯矩 M 按式 (C-36) 计算:

$$M = (F + F_a)H \quad \dots\dots\dots (C-36)$$

式中力臂 H 按式 (C-37) 计算:

$$H = S_0 + 0.5h_3 \quad \dots\dots\dots (C-37)$$

筒体端部中性面 $Y-Y$ 离直径 D_7 的距离 S_0 按式 (C-38) 选取:

$$\begin{cases} \text{当 } \frac{D_0}{D_7} \leq 1.45 \text{ 时, } S_0 = \frac{D_0 - D_7}{4} \\ \text{当 } \frac{D_0}{D_7} > 1.45 \text{ 时, } S_0 = \frac{D_0 - D_7}{6} \frac{2D_0 + D_7}{D_0 + D_7} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (C-38)$$

C.4.8.3.2 中性面单位长度的弯矩 M_1 按式 (C-39) 计算:

$$M_1 = \frac{M}{3.14D_n} \quad \dots\dots\dots (C-39)$$

筒体端部中性面 $Y-Y$ 的直径 D_n 按式 (C-40) 计算:

$$D_n = D_7 + 2S_0 \quad \dots\dots\dots (C-40)$$

C.4.8.3.3 计算系数 β 按式 (C-41) 计算:

$$\beta = 4 \sqrt{\frac{12(1 - \mu^2)}{D_n^2 S^2}} \quad \dots\dots\dots (C-41)$$

C.4.8.3.4 根据 βl_1 值查图 C-11, 得 $\left(\frac{M_3}{M_1}\right)$ 值和 $\left(\frac{M_4}{M_1}\right)$ 值, 则:

$$M_3 = \left(\frac{M_3}{M_1}\right) M_1 \quad \dots\dots\dots (C-42)$$

$$M_4 = \left(\frac{M_4}{M_1}\right) M_1 \quad \dots\dots\dots (C-43)$$

C.4.8.3.5 系数 C 按式 (C-44) 计算:

$$C = \frac{l_2}{l_1} \quad \dots\dots\dots (C-44)$$

式中宽度 l_2 见图 C.10。

C.4.8.3.6 根据 βl_1 及 C 值查图 C.12 得 $\left(\frac{\beta M_r}{q_r} \times 10\right)$ 值。

C.4.8.3.7 单位长度弯矩 M_r 按式 (C-45) 计算:

$$M_r = \left(\frac{\beta M_r}{q_r} \times 10\right) \frac{q_r}{10\beta} \quad \dots\dots\dots (C-45)$$

式中沿中性面 Y—Y 单位长度上的径向载荷 q_r 按式 (C-46) 计算:

$$q_r = \frac{Q_r}{3.14D_n} \quad \dots\dots\dots (C-46)$$

密封反力引起的径向载荷 Q_r 按式 (C-47) 计算:

$$Q_r = \frac{F + F_a}{\tan(\alpha + \rho)} \quad \dots\dots\dots (C-47)$$

C.4.8.3.8 最大弯矩 M_{\max} 取式 (C-48) 中绝对值较大者。

$$M_{\max} = \begin{cases} M_r + M_3 \\ M_r - M_4 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (C-48)$$

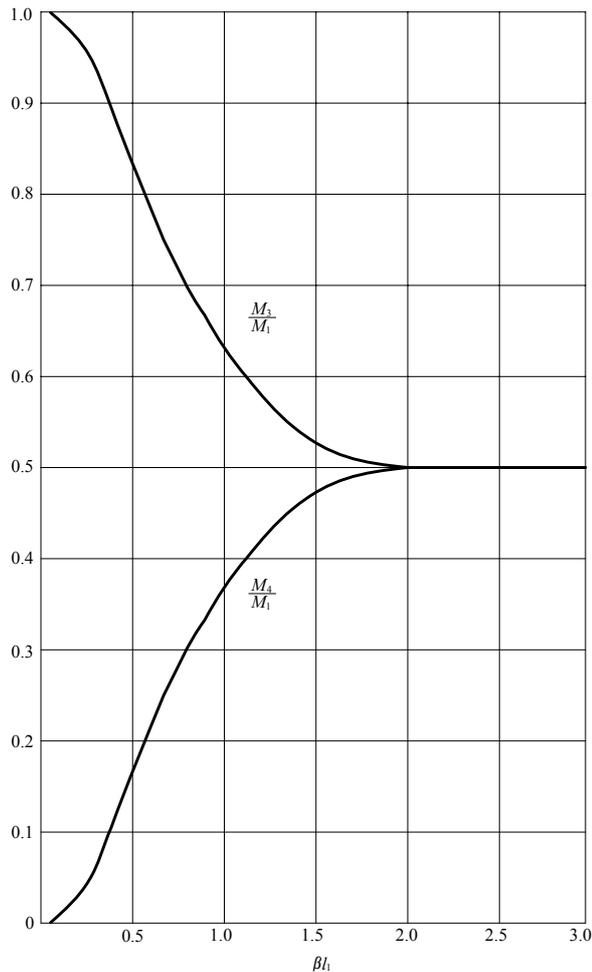


图 C.11

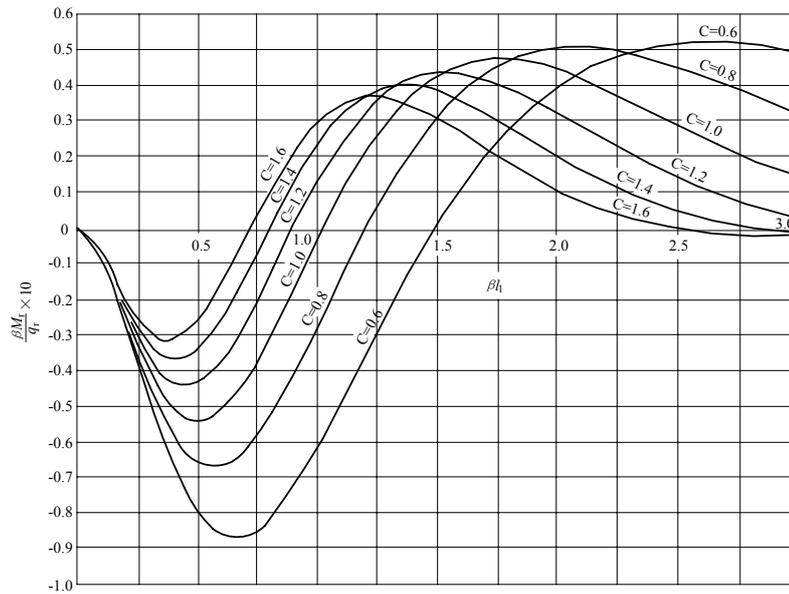


图 C. 12

C. 5 卡扎里密封

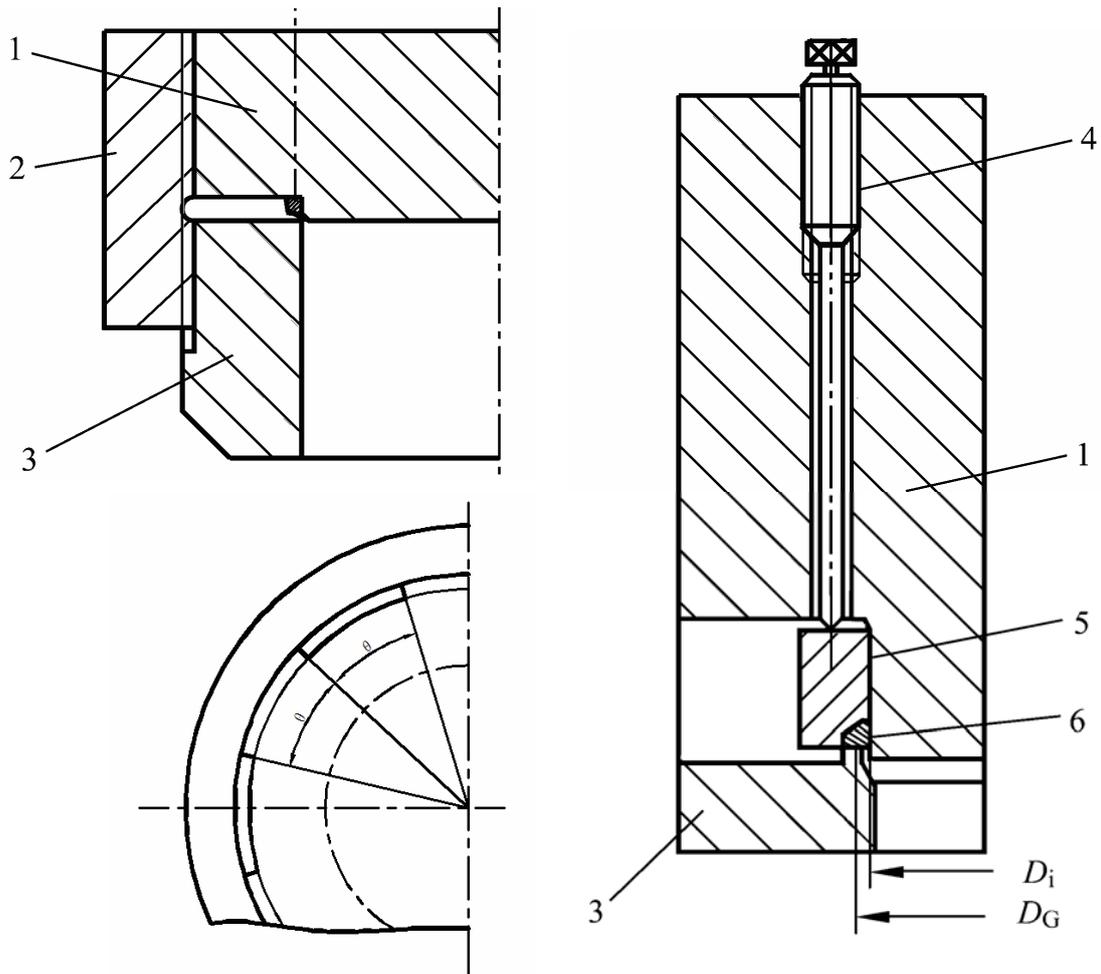
C. 5.1 符号

- b ——密封垫宽度, mm;
- C ——计算系数 (见式 C-86);
- D_b ——螺栓孔中心圆直径, mm;
- D_G ——密封面平均直径, mm;
- D_i ——密封垫内径, mm;
- D_n ——中性面的直径, mm;
- D ——螺纹套筒外径, mm;
- D_o ——平盖螺纹大径, mm;
- D_1 ——压环内径, mm;
- D_2 ——压环外径, mm;
- d_i ——平盖螺纹小径, mm;
- d_k ——螺栓孔或螺孔直径, mm;
- F ——内压引起的轴向力, N;
- F_a ——密封垫密封力的轴向分力, N;
- H ——压环厚度, mm;
- H_1 ——力臂 (见图 C.18), mm;
- H_2 ——力臂 (见图 C.18), mm;
- H_3 ——力臂 (见图 C.21), mm;
- h ——密封垫高度, mm;
- h_1 ——螺纹齿高度 (见图 C.17), mm;

- h_2 ——厚度（见图 C.16），mm；
 k ——计算系数（见式 C-85）；
 l_1 、 l_2 、 l_3 ——特征长度，mm；
 M —— $(F+F_a)$ 引起的弯矩，N·mm；
 M_{\max} ——环向截面单位长度上最大弯矩，N·mm/mm；
 M_1 ——沿中性面单位长度上的弯矩，N·mm/mm；
 M_2 —— F_a 引起的弯矩，N·mm/mm；
 M_5 ——由 F_a 引起的作用于 a — a 环向截面单位长度上的弯矩，N·mm/mm；
 m ——沿 l_1 单位长度上的弯矩，N·mm/mm；
 n ——螺纹圈数；
 p_c ——计算压力，MPa；
 S ——厚度（见图 C.18），mm；
 S_0 ——筒体端部中性面 Y — Y 离直径 d_i 的距离，mm；
 S_{01} ——螺纹套筒中性面 Y — Y 离直径 D_0 的距离，mm；
 S_1 ——厚度（见图 C.21），mm；
 t_1 ——厚度（见图 C.17），mm；
 W_a ——预紧状态的螺栓载荷，N；
 y ——密封比压，MPa；
 α ——楔形角，(°)；
 β ——系数，mm⁻¹；
 δ_p ——平盖厚度，mm；
 μ ——平均壁温下材料的泊松比；
 ρ ——摩擦角；
 τ ——切应力，MPa；
 σ ——拉伸应力，MPa；
 σ_a —— a — a 环向截面拉应力，MPa；
 σ_m ——弯曲应力，MPa；
 σ_{ma} —— a — a 环向截面弯曲应力，MPa；
 σ_o ——当量应力，MPa；
 σ_{oa} —— a — a 环向截面当量应力，MPa；
 $[\sigma]^t$ ——设计温度下元件材料的许用应力，MPa。

C.5.2 结构

卡扎里密封结构见图 C.13。



1—平盖；2—螺纹套筒；3—筒体端部；4—顶紧螺栓；
5—压环；6—密封垫

图 C.13 卡扎里密封结构

螺纹套筒内壁的上下两段是锯齿形螺纹。为便于与平盖相互连接和快拆，上段用间断锯齿形螺纹，间断部分夹角 θ 应取 $10^\circ \sim 30^\circ$ 。

C.5.3 载荷

C.5.3.1 内压引起的轴向力按式 (C-49) 计算：

$$F = 0.785D_G^2 p_c \dots\dots\dots (C-49)$$

C.5.3.2 密封垫结构见图 C.14。密封力的轴向分力取式 (C-50) 中计算值较大者。

$$F_a = \begin{cases} 3.14y(D_G b + D_i h \tan \rho) \\ 3.14y(D_i h + D_G b \tan \rho) \tan(\alpha + \rho) \end{cases} \dots\dots\dots (C-50)$$

式中楔形角 α 可取 30° 、 45° 、 60° 。钢与钢接触时 $\rho=8^\circ 30'$ ，钢与铜接触时 $\rho=10^\circ 31'$ ，钢与铝接触时 $\rho=15^\circ$ 。

C.5.4 压环

确定压环的结构尺寸（见图 C.15），并对作用于纵向截面的弯曲应力按式 (C-51) 进行校核：

$$\sigma_m = \frac{3F_a(D_b - D_G)}{3.14(D_2 - D_1)H^2} \leq 0.9[\sigma]^t \quad \dots\dots\dots (C-51)$$

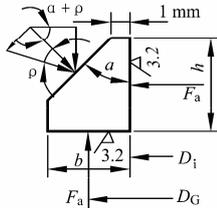


图 C.14 密封垫

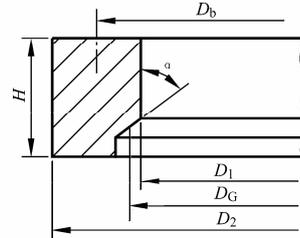


图 C.15 压环

C.5.5 顶紧螺栓

顶紧螺栓的设计按第7章7.7的规定,其中 A_m 取预紧状态下需要的螺栓面积,即 $A_m = A_a$, 式(7-7)中螺栓载荷 W_a 等于 F_a , F_a 按式(C-50)计算。

C.5.6 平盖

确定平盖的结构尺寸(见图 C.16),并对作用于纵向截面的弯曲应力和间断锯齿形螺纹的当量应力进行强度校核。

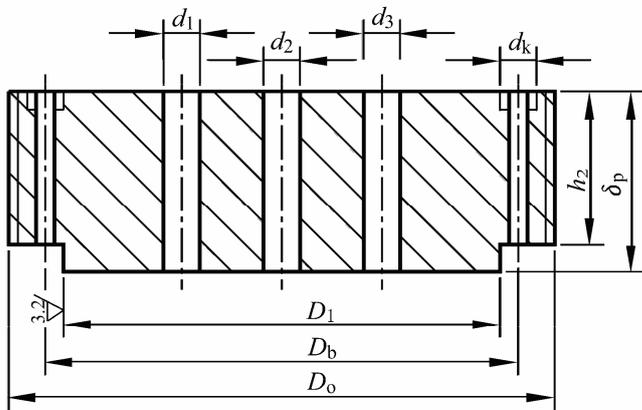


图 C.16 平盖

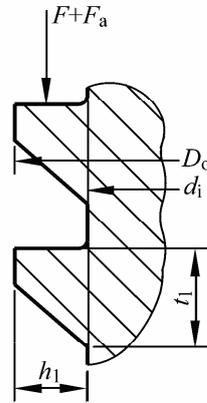


图 C.17 锯齿形螺纹

C.5.6.1 纵向截面弯曲应力按式(C-52)校核:

$$\sigma_m = \frac{3 \left[\left(D_o - \frac{2}{3} D_1 \right) F + (D_o - D_b) F_a \right]}{3.14 \left[(D_1 - \sum d_i) \delta_p^2 + (D_o - D_1 - 2d_k) h_2^2 \right]} \leq 0.7[\sigma]^t \quad \dots\dots\dots (C-52)$$

式中: $\sum d_i = d_1 + d_2 + d_3 + \dots$, mm;

厚度 h_2 见图 C.16。

C.5.6.2 间断锯齿形螺纹的当量应力按式(C-53)校核:

$$\sigma_o = \sqrt{\sigma_m^2 + 3\tau^2} \leq 0.7[\sigma]^t \quad \dots\dots\dots (C-53)$$

弯曲应力 σ_m 按式 (C-54) 计算:

$$\sigma_m = \frac{3(F + F_a)(D_o - d_i)}{3.14d_i t_1^2 n} \quad \dots\dots\dots (C-54)$$

厚度 t_1 见图 C.17。

切应力 τ 按式 (C-55) 计算:

$$\tau = \frac{2(F + F_a)}{3.14d_i t_1 n} \quad \dots\dots\dots (C-55)$$

C.5.7 筒体端部

确定筒体端部结构尺寸 (见图 C.18), 并对作用于 $a-a$ 环向截面的当量应力进行强度校核。

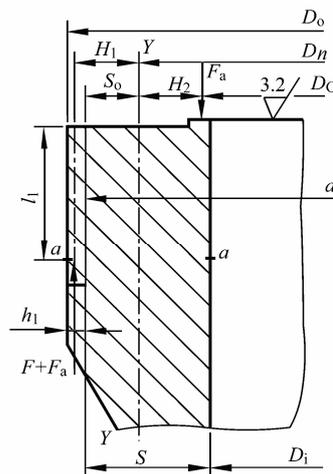


图 C.18 筒体端部

C.5.7.1 拉应力按式 (C-56) 计算:

$$\sigma_a = \frac{4(F + F_a)}{3.14(d_i^2 - D_i^2)} \quad \dots\dots\dots (C-56)$$

C.5.7.2 弯曲应力 σ_{ma}

C.5.7.2.1 由 $F+F_a$ 引起的, 作用于 $a-a$ 环向截面单位长度上最大弯矩 M_{max} 。

C.5.7.2.1.1 $F+F_a$ 引起的弯矩按式 (C-57) 计算:

$$M = (F + F_a)H_1 \quad \dots\dots\dots (C-57)$$

力臂 H_1 按式 (C-58) 计算:

$$H_1 = S_o + 0.5h_1 \quad \dots\dots\dots (C-58)$$

筒体端部中性面 $Y-Y$ 离直径 d_i 的距离 S_o 按式 (C-59) 选取:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{当 } \frac{d_i}{D_i} \leq 1.45 \text{ 时, } S_0 = \frac{d_i - D_i}{4} \\ \text{当 } \frac{d_i}{D_i} > 1.45 \text{ 时, } S_0 = \frac{d_i - D_i}{6} \frac{d_i + 2D_i}{d_i + D_i} \end{array} \right. \dots\dots\dots (C-59)$$

C.5.7.2.1.2 沿中性面单位长度上的弯矩按式 (C-60) 计算:

$$M_1 = \frac{M}{\pi D_n} \dots\dots\dots (C-60)$$

筒体端部中性面 Y—Y 的直径 D_n 按式 (C-61) 计算:

$$D_n = d_i - 2S_0 \dots\dots\dots (C-61)$$

C.5.7.2.1.3 沿 l_1 单位长度上的弯矩 m 按式 (C-62) 计算:

$$m = \frac{M_1}{l_1} \dots\dots\dots (C-62)$$

式中长度 l_1 见图 C.18。

C.5.7.2.1.4 计算系数 β 按式 (C-63) 计算:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{12(1-\mu^2)}{D_n^2 S^2}} \dots\dots\dots (C-63)$$

式中厚度 S 见图 C.18。

C.5.7.2.1.5 根据 βl_1 查图 C.19 得 $\left(\frac{\beta}{m} M_{\max}\right)$ 值。

C.5.7.2.1.6 最大弯矩 M_{\max} 按式 (C-64) 计算:

$$M_{\max} = \left(\frac{\beta}{m} M_{\max}\right) \frac{m}{\beta} \dots\dots\dots (C-64)$$

C.5.7.2.2 由 F_a 引起的, 作用于 a — a 环向截面单位长度上弯矩 M_2 。

C.5.7.2.2.1 F_a 引起的弯矩按式 (C-65) 计算:

$$M_2 = F_a H_2 \dots\dots\dots (C-65)$$

式中力臂 H_2 按式 (C-66) 计算:

$$H_2 = \frac{D_n - D_G}{2} \dots\dots\dots (C-66)$$

C.5.7.2.2.2 沿中性面单位长度上的弯矩按式 (C-67) 计算:

$$M_1 = \frac{M_2}{3.14 D_n} \dots\dots\dots (C-67)$$

C.5.7.2.2.3 按式 (C-63) 计算系数 β 值。

C.5.7.2.2.4 根据 βl_1 值查图 C.20 得系数 φ 值。

C.5.7.2.2.5 由 F_a 引起的作用于环向截面单位长度上的弯矩 M_5 按式 (C-68) 计算:

$$M_5 = M_1 \varphi \quad \dots\dots\dots (C-68)$$

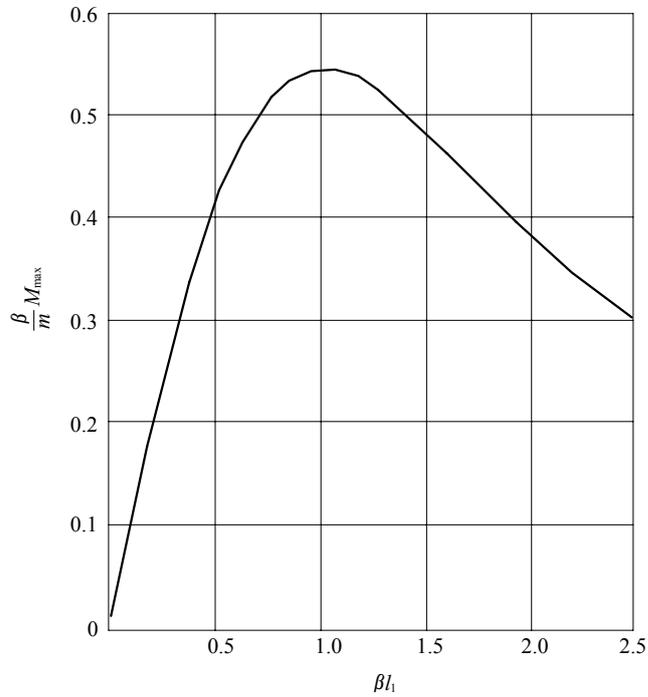


图 C. 19

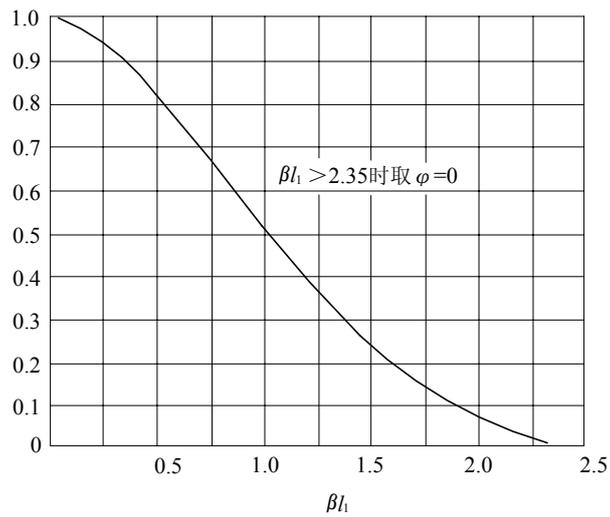


图 C. 20

C.5.7.2.3 弯曲应力 σ_{ma} 按式 (C-69) 计算:

$$\sigma_{ma} = \frac{6(M_{max} + M_s)}{S^2} \dots\dots\dots (C-69)$$

C.5.7.3 a — a 环向截面的当量应力按式 (C-70) 校核:

$$\sigma_{oa} = \sigma_{ma} + \sigma_a \leq 0.9[\sigma]^t \dots\dots\dots (C-70)$$

C.5.8 螺纹套筒

确定螺纹套筒的结构尺寸(见图 C.21), 并对作用于环向截面的当量应力和下段锯齿形螺纹(见图 C.22)的当量应力进行强度校核。

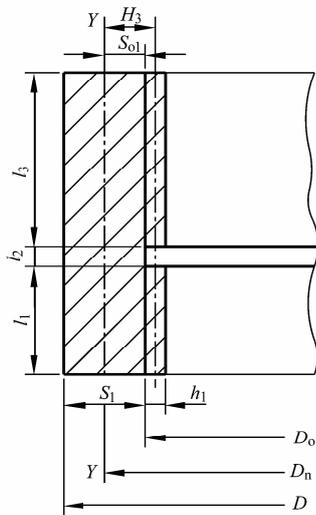


图 C.21 螺纹套筒

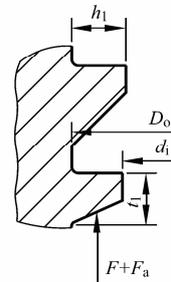


图 C.22 锯齿形螺纹

C.5.8.1 环向截面的当量应力按式 (C-71) 校核:

$$\sigma_o = \sigma_m + \sigma \leq 0.9[\sigma]^t \dots\dots\dots (C-71)$$

式 (C-71) 中拉应力按式 (C-72) 计算:

$$\sigma = \frac{4(F + F_a)}{3.14(D^2 - D_0^2)} \dots\dots\dots (C-72)$$

弯曲应力 σ_m 按式 (C-73) 计算:

$$\sigma_m = \frac{6M_{max}}{S_1^2} \dots\dots\dots (C-73)$$

厚度 S_1 按式 (C-74) 计算:

$$S_1 = \frac{D - D_0}{2} \dots\dots\dots (C-74)$$

环向截面单位长度上最大弯矩 M_{max} , 计算见 C.5.8.3。

C.5.8.2 螺纹套筒下段锯齿形螺纹的当量应力按式 (C-75) 校核:

$$\sigma_o = \sqrt{\sigma_m^2 + 3\tau^2} \leq 0.9[\sigma] \quad \dots\dots\dots (C-75)$$

弯曲应力 σ_m 按式 (C-76) 计算:

$$\sigma_m = \frac{3(F + F_a)(D_o - d_i)}{6.28D_o t_1^2 n} \quad \dots\dots\dots (C-76)$$

切应力 τ 按式 (C-77) 计算:

$$\tau = \frac{F + F_a}{3.14D_o t_1 n} \quad \dots\dots\dots (C-77)$$

内径 d_i 和厚度 t_1 见图 C.22。

C.5.8.3 环向截面单位长度上最大弯矩 M_{\max} 。

C.5.8.3.1 $F+F_a$ 引起的弯矩按式 (C-78) 计算:

$$M = (F + F_a)H_3 \quad \dots\dots\dots (C-78)$$

力臂 H_3 按式 (C-79) 计算:

$$H_3 = S_{o1} + 0.5h_1 \quad \dots\dots\dots (C-79)$$

螺纹套筒中性面 Y—Y 离直径 D_o 的距离 S_{o1} 按式 (C-80) 选取:

$$\begin{cases} \text{当 } \frac{D}{D_o} \leq 1.45 \text{ 时, } S_{o1} = \frac{D - D_o}{4} \\ \text{当 } \frac{D}{D_o} > 1.45 \text{ 时, } S_{o1} = \frac{D - D_o}{6} \frac{2D + D_o}{D + D_o} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (C-80)$$

C.5.8.3.2 沿中性面单位长度上的弯矩按式 (C-81) 计算:

$$M_1 = \frac{M}{3.14D_n} \quad \dots\dots\dots (C-81)$$

螺纹套筒中性面 Y—Y 的直径 D_n 按式 (C-82) 计算:

$$D_n = D_o + 2S_{o1} \quad \dots\dots\dots (C-82)$$

C.5.8.3.3 沿轴向 l_1 单位长度上弯矩 m 按式 (C-83) 计算:

$$m = \frac{M_1}{l_1} \quad \dots\dots\dots (C-83)$$

式中 l_1 见图 C.21。

C.5.8.3.4 计算系数 β 按式 (C-84) 计算:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{12(1 - \mu^2)}{D_n^2 S_1^2}} \quad \dots\dots\dots (C-84)$$

C.5.8.3.5 根据 βl_1 和 k 、 C 值查图 C.23 a) ~C.23 e) 得 $\left(\frac{\beta}{m} M_{\max}\right)$ 值。

其中 k 、 C 值分别按式 (C-85) 和 (C-86) 计算:

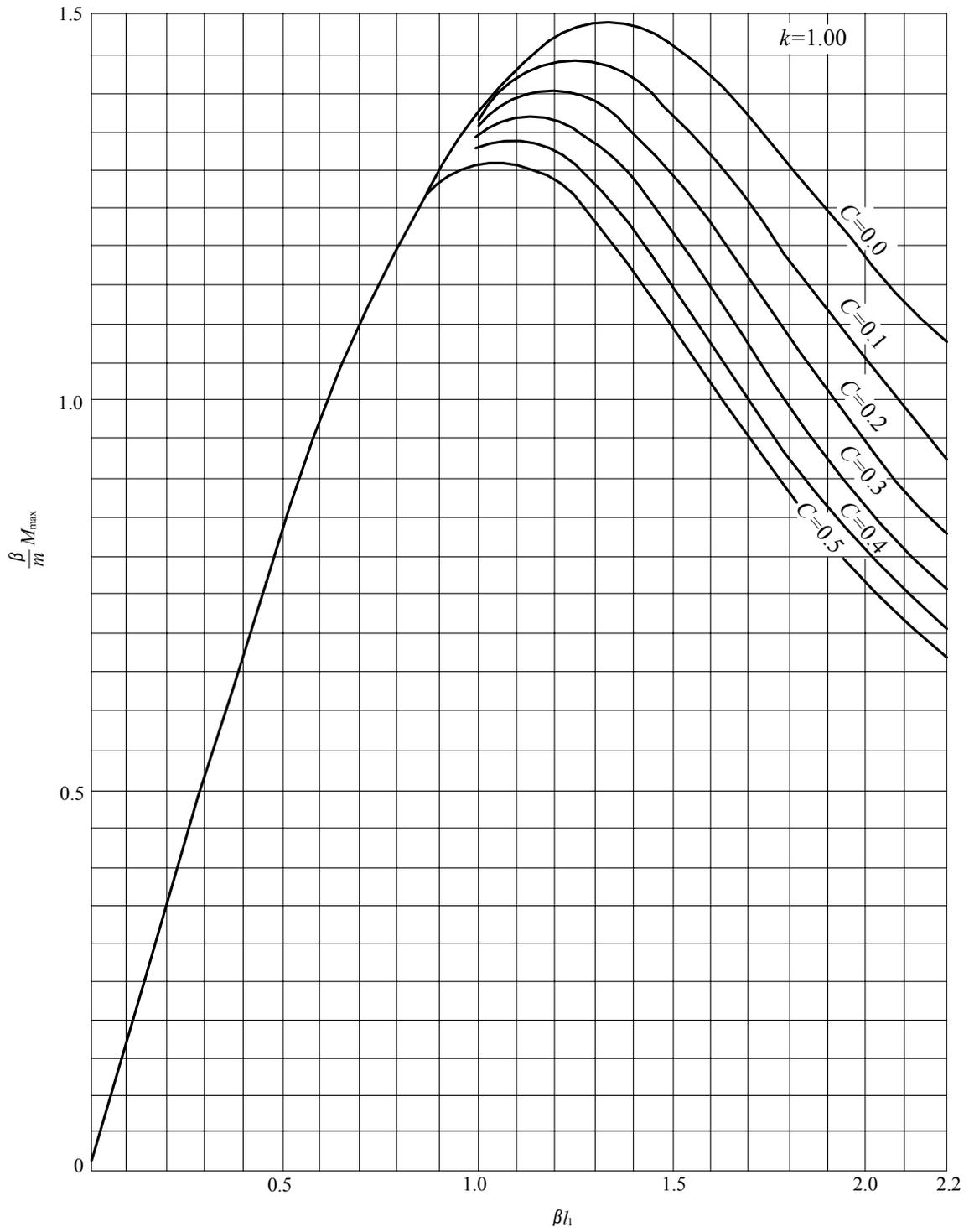
$$k = \frac{l_3}{l_1} \dots\dots\dots (C-85)$$

$$C = \frac{l_2}{l_1} \dots\dots\dots (C-86)$$

式中 l_2 和 l_3 见图 C.21。

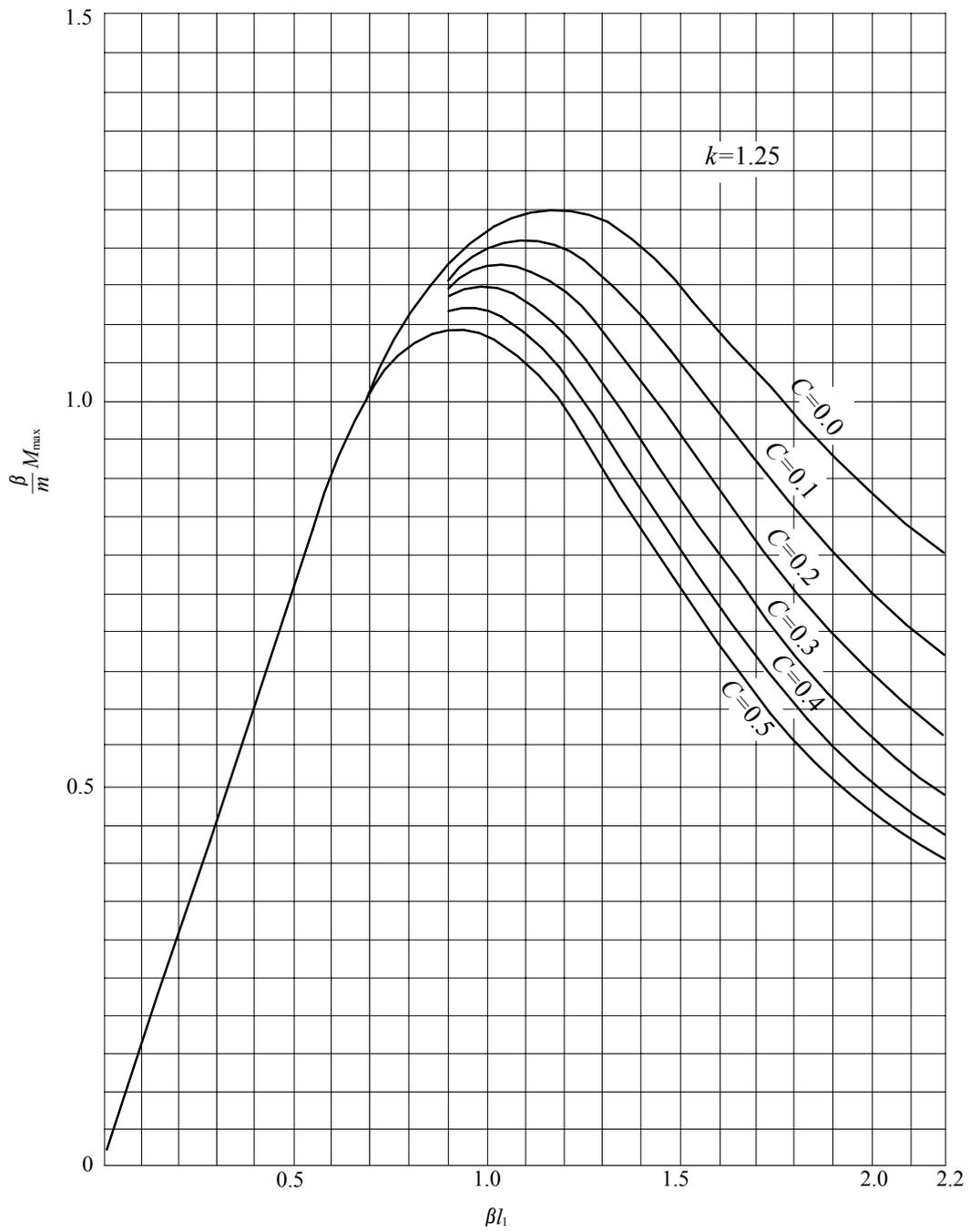
C.5.8.3.6 最大弯矩 M_{\max} 按式 (C-87) 计算:

$$M_{\max} = \left(\frac{\beta}{m} M_{\max} \right) \frac{m}{\beta} \dots\dots\dots (C-87)$$



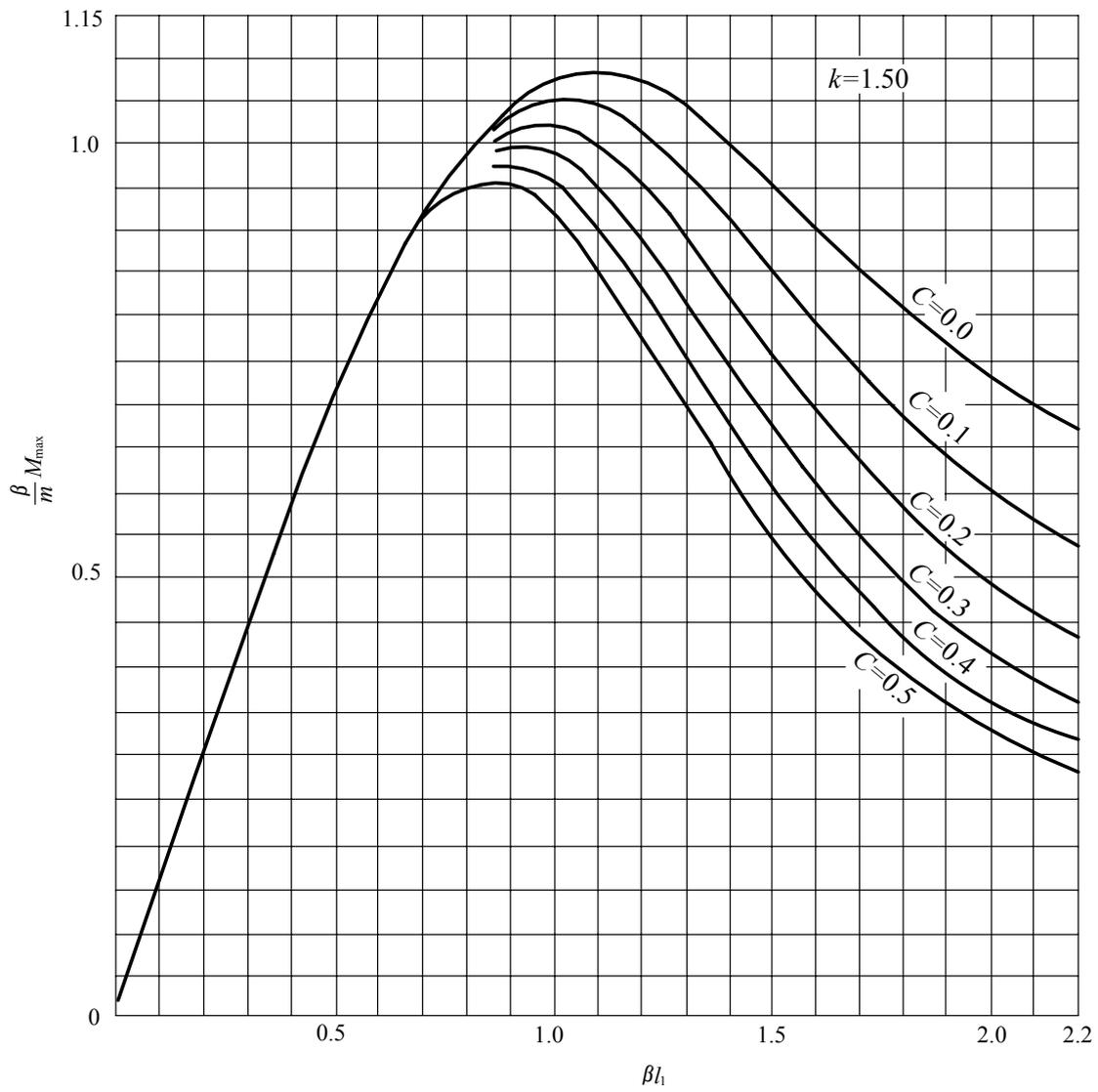
a)

图 C. 23



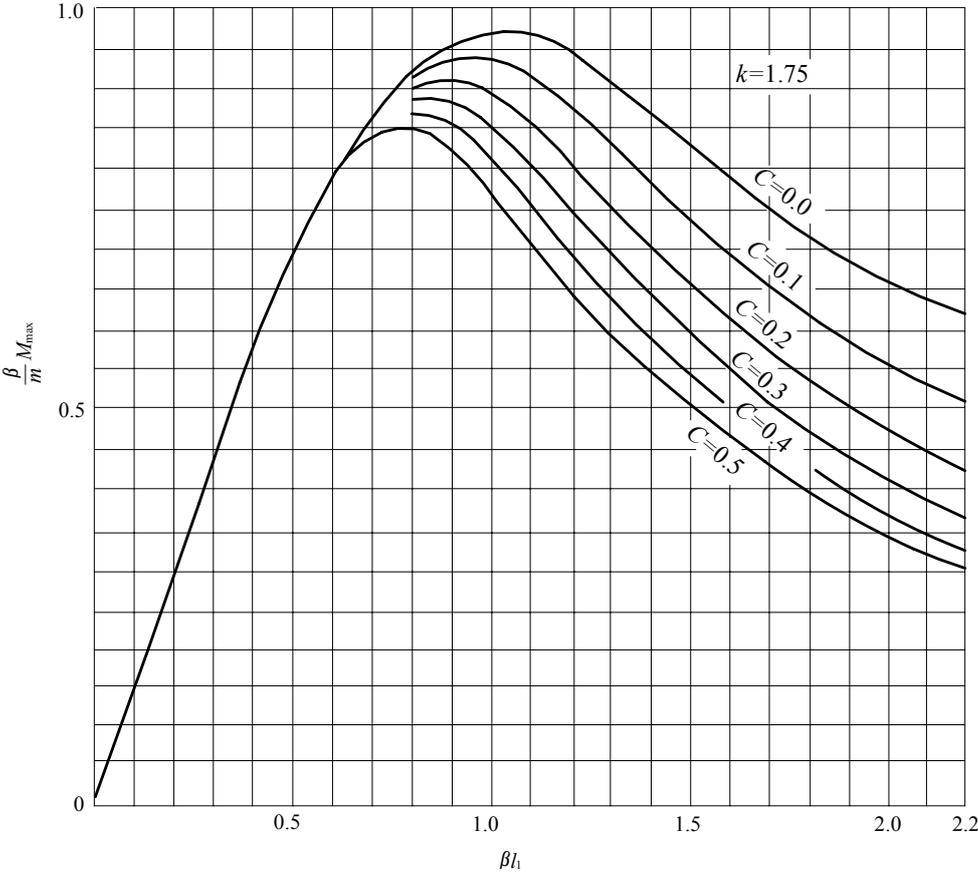
b)

图 C. 23 (续)



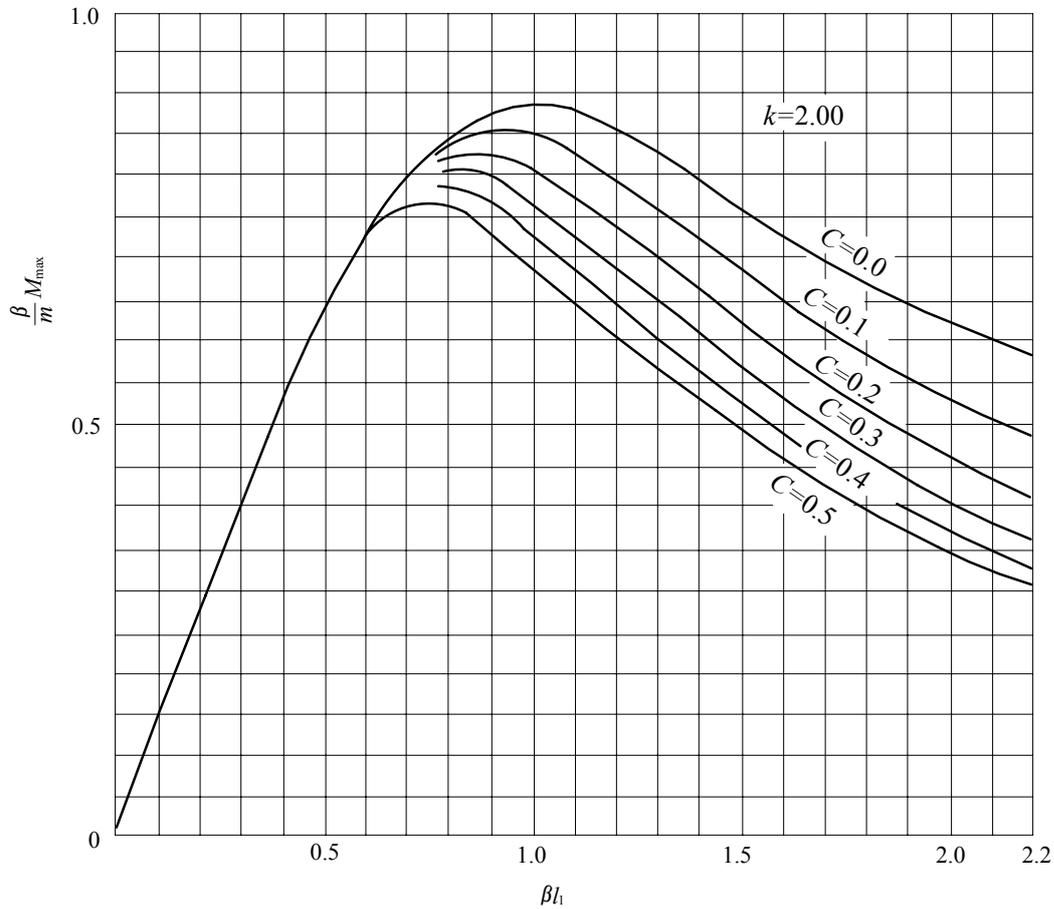
c)

图 C.23 (续)



d)

图 C. 23 (续)



e)

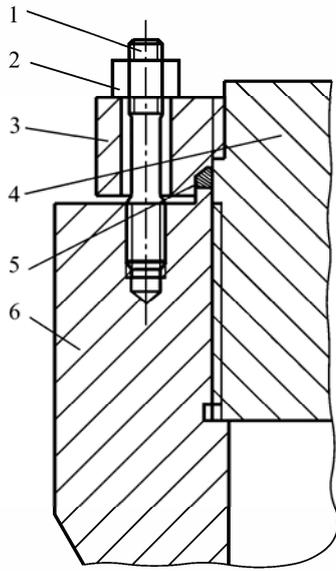
图 C.23 (续)

C.5.9 卡扎里密封的另外两种结构形式见图 C.24 和图 C.25。

C.5.9.1 内螺纹卡扎里密封各元件的设计同卡扎里密封，但应考虑载荷分别为：

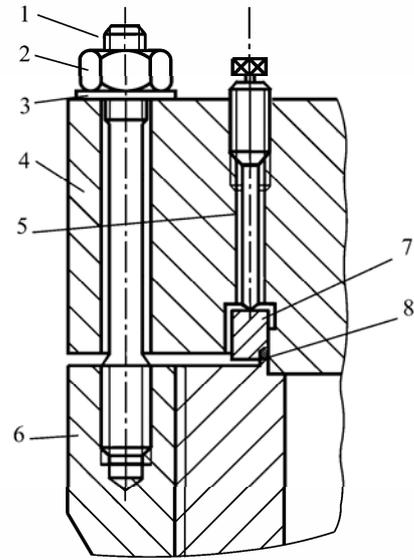
- a) 螺栓、压环的载荷只考虑轴向力 F_a ，按 C.5.3.2 计算；
- b) 平盖、筒体端部的载荷只考虑轴向力 F ，按 C.5.3.1 计算。

C.5.9.2 改良卡扎里密封各元件的设计计算同卡扎里密封，但主螺栓设计按第 7 章 7.7 的规定，其中 A_m 取操作状态下需要的螺栓面积，即 $A_m = A_p$ ，螺栓载荷 W_a 按 $F + F_a$ 进行计算。



1—螺栓；2—螺母；3—压环；4—平盖；
5—密封垫；6—筒体端部

图 C.24 内螺纹卡扎里密封



1—主螺栓；2—主螺母；3—垫圈；4—平盖；
5—预紧螺栓；6—筒体端部法兰；
7—压环；8—密封垫

图 C.25 改良卡扎里密封

C.6 八角垫和椭圆垫密封

C.6.1 符号

- b ——垫片有效密封宽度，mm；
- D_G ——密封面平均直径，mm；
- m ——垫片系数，mm；
- p_c ——计算压力，MPa；
- W_a ——预紧状态的螺栓载荷，N；
- W_p ——操作状态的螺栓载荷，N；
- y ——密封比压，MPa。

C.6.2 结构

八角垫密封结构见图 C.26，椭圆垫密封结构见图 C.27。八角垫环、椭圆垫环及环槽结构见图 C.28。

八角垫和椭圆垫密封的系列结构尺寸见表 C.7。

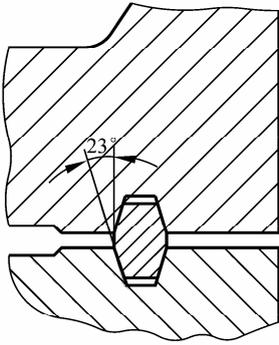


图 C.26 八角垫

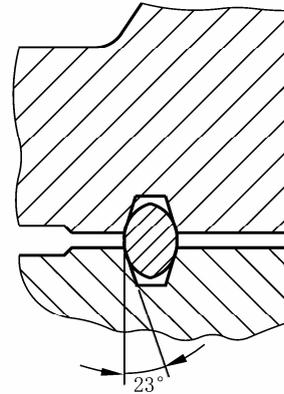


图 C.27 椭圆垫

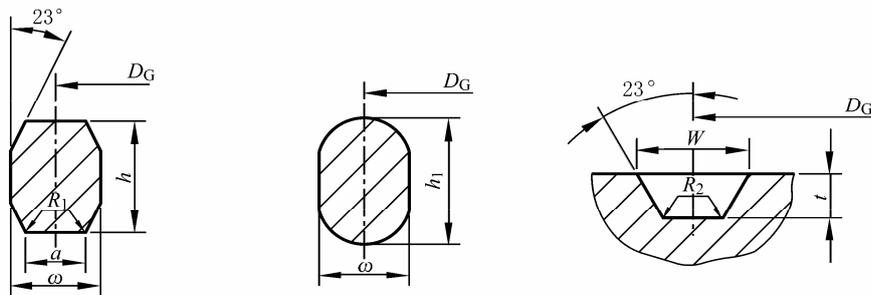


图 C.28 结构尺寸图

C.6.3 垫环材料的硬度应比环槽元件材料的硬度低 30~40HBW。垫环材料推荐使用 III 级或者 IV 级压力容器锻件，其硬度要求见表 C.8。

C.6.4 垫环、垫环槽的公差要求见表 C.9。

C.6.5 螺栓载荷

C.6.5.1 操作状态的螺栓载荷按式 (C-88) 计算：

$$W_p = 0.785D_G^2 p_c + 6.28bD_G m p_c \quad \dots\dots\dots (C-88)$$

式中垫片有效密封宽度 b 见第 7 章 7.5.1.2；垫片系数 m 见第 7 章表 7-2。

C.6.5.2 预紧状态的螺栓载荷按式 (C-89) 计算：

$$W_a = 3.14bD_G y \quad \dots\dots\dots (C-89)$$

C.6.6 平盖设计见第 5 章 5.9。

C.6.7 法兰设计见第 7 章。

C.6.8 筒体端部、螺栓及螺母的设计见第 7 章 7.7。

表 C.7 八角垫和椭圆垫系列结构尺寸

mm

| 垫环号 | 垫环和槽中径 D_G | 垫环宽 ω | 垫环高 | | 八角形平面垫环宽度 a | 八角形垫环圆角半径 R_1 | 槽深 t | 槽宽 W | 槽内圆角半径 R_2 |
|-----|-----------------|-----------------|--------------|------------|------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------------|
| | | | 椭圆形 h_1 | 八角形 h | | | | | |
| R11 | 34.14 | 6.35 | 11.11 | 9.53 | 4.32 | 1.6 | 5.54 | 7.14 | 0.8 |
| R12 | 39.67 | 7.94 | 14.29 | 12.70 | 5.23 | 1.6 | 6.35 | 8.74 | 0.8 |
| R13 | 42.88 | 7.94 | 14.29 | 12.70 | 5.23 | 1.6 | 6.35 | 8.74 | 0.8 |
| R14 | 44.45 | 7.94 | 14.29 | 12.70 | 5.23 | 1.6 | 6.35 | 8.74 | 0.8 |
| R15 | 47.63 | 7.94 | 14.29 | 12.70 | 5.23 | 1.6 | 6.35 | 8.74 | 0.8 |
| R16 | 50.80 | 7.94 | 14.29 | 12.70 | 5.23 | 1.6 | 6.35 | 8.74 | 0.8 |
| R17 | 57.15 | 7.94 | 14.29 | 12.70 | 5.23 | 1.6 | 6.35 | 8.74 | 0.8 |
| R18 | 60.33 | 7.94 | 14.29 | 12.70 | 5.23 | 1.6 | 6.35 | 8.74 | 0.8 |
| R19 | 65.07 | 7.94 | 14.29 | 12.70 | 5.23 | 1.6 | 6.35 | 8.74 | 0.8 |
| R20 | 68.27 | 7.94 | 14.29 | 12.70 | 5.23 | 1.6 | 6.35 | 8.74 | 0.8 |
| R22 | 82.55 | 7.94 | 14.29 | 12.70 | 5.23 | 1.6 | 6.35 | 8.74 | 0.8 |
| R23 | 82.55 | 11.11 | 17.46 | 15.88 | 7.75 | 1.6 | 7.92 | 11.91 | 0.8 |
| R24 | 95.25 | 11.11 | 17.46 | 15.88 | 7.75 | 1.6 | 7.92 | 11.91 | 0.8 |
| R25 | 101.60 | 7.94 | 14.29 | 12.70 | 5.23 | 1.6 | 6.35 | 8.74 | 0.8 |
| R26 | 101.60 | 11.11 | 17.46 | 15.88 | 7.75 | 1.6 | 7.92 | 11.91 | 0.8 |
| R27 | 107.95 | 11.11 | 17.46 | 15.88 | 7.75 | 1.6 | 7.92 | 11.91 | 0.8 |
| R29 | 114.30 | 7.94 | 14.29 | 12.70 | 5.23 | 1.6 | 6.35 | 8.74 | 0.8 |
| R31 | 123.83 | 11.11 | 17.46 | 15.88 | 7.75 | 1.6 | 7.92 | 11.91 | 0.8 |
| R35 | 136.53 | 11.11 | 17.46 | 15.88 | 7.75 | 1.6 | 7.92 | 11.91 | 0.8 |
| R36 | 149.23 | 7.94 | 14.29 | 12.70 | 5.23 | 1.6 | 6.35 | 8.74 | 0.8 |
| R37 | 149.23 | 11.11 | 17.46 | 15.88 | 7.75 | 1.6 | 7.92 | 11.91 | 0.8 |
| R39 | 161.93 | 11.11 | 17.46 | 15.88 | 7.75 | 1.6 | 7.92 | 11.91 | 0.8 |
| R40 | 171.45 | 7.94 | 14.29 | 12.70 | 5.23 | 1.6 | 6.35 | 8.74 | 0.8 |
| R41 | 180.98 | 11.11 | 17.46 | 15.88 | 7.75 | 1.6 | 7.92 | 11.91 | 0.8 |
| R43 | 193.68 | 7.94 | 14.29 | 12.70 | 5.23 | 1.6 | 6.35 | 8.74 | 0.8 |
| R44 | 193.68 | 11.11 | 17.46 | 15.88 | 7.75 | 1.6 | 7.92 | 11.91 | 0.8 |
| R45 | 211.12 | 11.11 | 17.46 | 15.88 | 7.75 | 1.6 | 7.92 | 11.91 | 0.8 |

表 C.7 (续)

| 垫环号 | 垫环和槽中径 D_G | 垫环宽 ω | 垫环高 | | 八角形平面垫环宽度 a | 八角形垫环圆角半径 R_1 | 槽深 t | 槽宽 W | 槽内圆角半径 R_2 |
|-----|-----------------|-----------------|--------------|------------|------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------------|
| | | | 椭圆形 h_1 | 八角形 h | | | | | |
| R46 | 211.14 | 12.70 | 19.05 | 17.46 | 8.66 | 1.6 | 9.53 | 13.49 | 1.5 |
| R48 | 247.65 | 7.94 | 14.29 | 12.70 | 5.23 | 1.6 | 6.35 | 8.74 | 0.8 |
| R49 | 269.88 | 11.11 | 17.46 | 15.88 | 7.75 | 1.6 | 7.92 | 11.91 | 0.8 |
| R50 | 269.88 | 15.88 | 22.23 | 20.64 | 10.49 | 1.6 | 11.13 | 16.66 | 1.5 |
| R52 | 304.80 | 7.94 | 14.29 | 12.70 | 5.23 | 1.6 | 6.35 | 8.74 | 0.8 |
| R53 | 323.85 | 11.11 | 17.46 | 15.88 | 7.75 | 1.6 | 7.92 | 11.91 | 0.8 |
| R54 | 323.85 | 15.88 | 22.23 | 20.64 | 10.49 | 1.6 | 11.13 | 16.66 | 1.5 |
| R56 | 381.00 | 7.94 | 14.29 | 12.70 | 5.23 | 1.6 | 6.35 | 8.74 | 0.8 |
| R57 | 381.00 | 11.11 | 17.46 | 15.88 | 7.75 | 1.6 | 7.92 | 11.91 | 0.8 |
| R58 | 381.00 | 22.23 | 28.58 | 26.99 | 14.81 | 1.6 | 14.27 | 23.01 | 1.5 |
| R59 | 396.88 | 7.94 | 14.29 | 12.70 | 5.23 | 1.6 | 6.35 | 8.74 | 0.8 |
| R61 | 419.10 | 11.11 | 17.46 | 15.88 | 7.75 | 1.6 | 7.92 | 11.91 | 0.8 |
| R62 | 419.10 | 15.88 | 22.23 | 20.64 | 10.49 | 1.6 | 11.13 | 16.66 | 1.5 |
| R63 | 419.10 | 25.40 | 33.34 | 31.75 | 17.30 | 2.4 | 15.88 | 26.97 | 2.4 |
| R64 | 454.03 | 7.94 | 14.29 | 12.70 | 5.23 | 1.6 | 6.35 | 8.74 | 0.8 |
| R65 | 469.90 | 11.11 | 17.46 | 15.88 | 7.75 | 1.6 | 7.92 | 11.91 | 0.8 |
| R66 | 469.90 | 15.88 | 22.23 | 20.64 | 10.49 | 1.6 | 11.13 | 16.66 | 1.5 |
| R67 | 469.90 | 28.58 | 36.51 | 34.93 | 19.81 | 2.4 | 17.48 | 30.18 | 2.4 |
| R68 | 517.53 | 7.94 | 14.29 | 12.70 | 5.23 | 1.6 | 6.35 | 8.74 | 0.8 |
| R69 | 533.40 | 11.11 | 17.46 | 15.88 | 7.75 | 1.6 | 7.92 | 11.91 | 0.8 |
| R70 | 533.40 | 19.05 | 25.40 | 23.81 | 12.32 | 1.6 | 12.70 | 19.84 | 1.5 |
| R71 | 533.40 | 28.58 | 36.51 | 34.93 | 19.81 | 2.4 | 17.48 | 30.18 | 2.4 |
| R72 | 558.80 | 7.94 | 14.29 | 12.70 | 5.23 | 1.6 | 6.35 | 8.74 | 0.8 |
| R73 | 584.20 | 12.70 | 19.05 | 17.46 | 8.66 | 1.6 | 9.53 | 13.49 | 1.5 |
| R74 | 584.20 | 19.05 | 25.40 | 23.81 | 12.32 | 1.6 | 12.70 | 19.84 | 1.5 |
| R75 | 584.20 | 31.75 | 36.69 | 38.10 | 22.33 | 2.4 | 17.48 | 33.32 | 2.4 |
| R76 | 673.10 | 7.94 | 14.29 | 12.70 | 5.23 | 1.6 | 6.35 | 8.74 | 0.8 |
| R77 | 692.15 | 15.88 | 22.23 | 20.64 | 10.49 | 1.6 | 11.13 | 16.66 | 1.5 |
| R78 | 692.15 | 25.40 | 33.34 | 31.75 | 17.30 | 2.4 | 15.88 | 26.97 | 2.4 |

表 C.7 (续)

| 垫环号 | 垫环和槽中径 D_G | 垫环宽 ω | 垫环高 | | 八角形平面垫环宽度 a | 八角形垫环圆角半径 R_1 | 槽深 t | 槽宽 W | 槽内圆角半径 R_2 |
|------|-----------------|-----------------|--------------|------------|------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------------|
| | | | 椭圆形 h_1 | 八角形 h | | | | | |
| R79 | 692.15 | 34.93 | 44.45 | 41.28 | 24.82 | 2.4 | 20.62 | 36.53 | 2.4 |
| R82 | 57.15 | 11.11 | — | 15.88 | 7.75 | 1.6 | 7.92 | 11.91 | 0.8 |
| R84 | 63.50 | 11.11 | — | 15.88 | 7.75 | 1.6 | 7.92 | 11.91 | 0.8 |
| R85 | 79.38 | 12.70 | — | 17.46 | 8.66 | 1.6 | 9.53 | 13.49 | 1.5 |
| R86 | 90.49 | 15.88 | — | 20.64 | 10.49 | 1.6 | 11.13 | 16.66 | 1.5 |
| R87 | 100.01 | 15.88 | — | 20.64 | 10.49 | 1.6 | 11.13 | 16.66 | 1.5 |
| R88 | 123.83 | 19.05 | — | 23.81 | 12.32 | 1.6 | 12.70 | 19.84 | 1.5 |
| R89 | 114.30 | 19.05 | — | 23.81 | 12.32 | 1.6 | 12.70 | 19.84 | 1.5 |
| R90 | 155.58 | 22.23 | — | 26.99 | 14.81 | 1.6 | 14.27 | 23.01 | 1.5 |
| R91 | 260.35 | 31.75 | — | 38.10 | 22.33 | 2.4 | 17.48 | 33.32 | 2.4 |
| R93 | 749.30 | 19.50 | — | 23.90 | 12.32 | 1.6 | 12.70 | 19.84 | 1.5 |
| R94 | 800.10 | 19.50 | — | 23.90 | 12.32 | 1.6 | 12.70 | 19.84 | 1.5 |
| R95 | 857.25 | 19.50 | — | 23.90 | 12.32 | 1.6 | 12.70 | 19.84 | 1.5 |
| R96 | 914.40 | 22.22 | — | 26.90 | 14.81 | 1.6 | 14.27 | 23.01 | 1.5 |
| R97 | 965.20 | 22.22 | — | 26.90 | 14.81 | 1.6 | 14.27 | 23.01 | 1.5 |
| R98 | 1022.35 | 28.58 | — | 26.90 | 14.81 | 2.4 | 14.27 | 23.01 | 1.5 |
| R99 | 234.95 | 11.11 | — | 15.88 | 7.75 | 1.6 | 7.92 | 11.91 | 0.8 |
| R100 | 749.30 | 31.75 | — | 35.10 | 19.81 | 2.4 | 17.48 | 30.18 | 2.3 |
| R101 | 800.10 | 31.75 | — | 38.10 | 22.33 | 2.4 | 17.48 | 33.32 | 2.3 |
| R102 | 857.25 | 31.75 | — | 38.10 | 22.33 | 2.4 | 17.48 | 33.32 | 2.3 |
| R103 | 914.40 | 31.75 | — | 38.10 | 22.33 | 2.4 | 17.48 | 33.32 | 2.3 |
| R104 | 965.20 | 34.92 | — | 41.10 | 24.82 | 2.4 | 20.62 | 36.53 | 2.3 |
| R105 | 1022.35 | 34.92 | — | 41.10 | 24.82 | 2.4 | 20.62 | 36.53 | 2.3 |

表 C.8 垫环材料及硬度

| 材 料 | 钢锻件标准 | 最高硬度 | |
|--------|-----------|------|-----|
| | | HBW | HRB |
| 碳素钢 | JB/T 4726 | 120 | 70 |
| 1Cr5Mo | JB/T 4726 | 130 | 74 |
| S11306 | JB/T 4728 | 170 | 87 |
| S30408 | JB/T 4728 | 160 | 84 |
| S30403 | JB/T 4728 | 150 | 81 |
| S31608 | JB/T 4728 | 160 | 84 |
| S31603 | JB/T 4728 | 150 | 81 |

表 C.9 公差范围

单位为毫米

| 尺寸名称 | | 公差范围 |
|----------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------|
| 垫环宽 | ω | ± 0.20 |
| 垫环高 | h 和 h_1 | ± 0.50 |
| 八角形平面垫环宽度 | a | ± 0.20 |
| 槽深 | t | +0.40 0 |
| 槽宽 | W | ± 0.20 |
| 垫环的平均中径 | D_G | ± 0.18 |
| 槽的平均中径 | D_G | ± 0.13 |
| 垫环圆角半径 | R_1 | ± 0.50 |
| 槽内圆角半径 R_2 | $R_2 \leq 2$ | +0.80 0 |
| | $R_2 > 2$ | ± 0.80 |
| 环槽角度 | 23° | $\pm 0.5^\circ$ |
| 注 1: 槽和八角垫环接触斜面 (23° 表面) 的表面粗糙度 R_a 不高于 $3.2\mu\text{m}$ 。 | | |
| 注 2: 允许环高有 1.9mm 的正偏差, 但在整个圆周上任何部位的垫环高度差应不大于 0.5mm。 | | |

C.7 卡箍紧固结构

C.7.1 符号

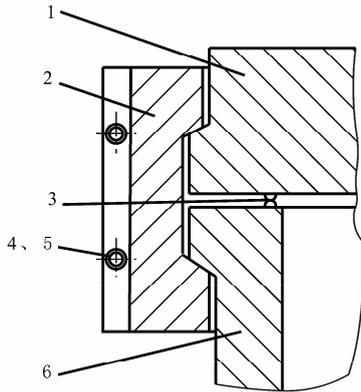
- C ——计算系数 (见式 C-108);
 D_b ——直径 (见图 C.30 和 C.34), mm;
 D_c ——密封接触圆直径, mm;
 D_G ——密封面平均直径, mm;

- D_i ——内直径, mm;
 D_n ——中性面直径, mm;
 D_o ——外直径, mm;
 D_1 ——直径(见图 C.30), mm;
 D_2 ——直径(见图 C.31), mm;
 D_3 ——直径(见图 C.33), mm;
 d_i ——螺纹小径, mm;
 F ——内压引起的轴向力, N;
 F_a ——密封垫密封力的轴向分力, N;
 H ——力臂(见图 C.31), mm;
 H_1 ——力臂(见图 C.33), mm;
 H_2 ——力臂(见图 C.33), mm;
 h ——高度(见图 C.30), mm;
 h_1 ——高度(见图 C.30), mm;
 h_2 ——高度(见图 C.31), mm;
 h_3 ——高度(见图 C.33), mm;
 l_1 、 l_2 ——特征长度, mm;
 M ——($F+F_a$)引起的弯矩, N·mm;
 M_{\max} ——单位长度上最大弯矩, N·mm/mm;
 M_1 ——沿中性面单位长度上的弯矩, N·mm/mm;
 M_2 —— F_a 引起的弯矩, N·mm;
 M_3 ——单位长度上的弯矩(见式 C-122), N·mm/mm;
 M_5 ——单位长度上的弯矩(见式 C-127), N·mm/mm;
 n ——螺栓数量;
 p_c ——计算压力, MPa;
 S ——厚度(见图 C.31), mm;
 S_0 ——卡箍中性面 $Y-Y$ 离直径 D_2 的距离, mm;
 S_{01} ——筒体端部中性面 $Y-Y$ 离直径 D_3 的距离, mm;
 S_1 ——厚度(见图 C.33), mm;
 W ——紧固螺栓载荷, N;
 α ——角度(见图 C.34), ($^\circ$);
 β ——系数, mm^{-1} ;
 δ_p ——平盖厚度, mm;
 μ ——平均壁温下材料的泊松比;
 τ_a —— $a-a$ 环向截面的切应力, MPa;
 τ_b —— $b-b$ 环向截面的切应力, MPa;
 σ_a ——筒体端部 $a-a$ 环向截面拉应力, MPa;
 σ_m ——弯曲应力, MPa;
 σ_{ma} —— $a-a$ 环向截面的弯曲应力, MPa;

σ_{mb} —— b — b 环向截面的弯曲应力, MPa;
 σ_{oa} —— a — a 环向截面的当量应力, MPa;
 σ_{ob} —— b — b 环向截面的当量应力, MPa;
 $[\sigma]^t$ ——设计温度下元件材料的许用应力, MPa。

C.7.2 结构

卡箍紧固结构见图 C.29。密封环应具有自紧功能。



1—平盖; 2—卡箍; 3—密封环;
 4, 5—紧固螺栓和螺母
 6—筒体端部

图 C.29 卡箍紧固结构

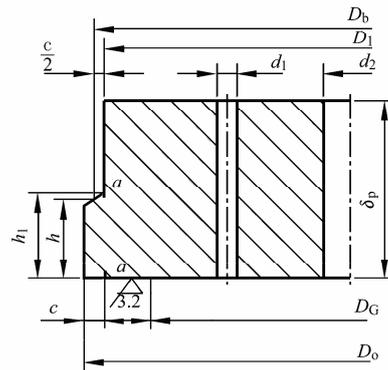


图 C.30 平盖

C.7.3 载荷

C.7.3.1 内压引起的轴向力按式 (C-90) 计算:

$$F = 0.785D_G^2 p_c \dots\dots\dots (C-90)$$

C.7.3.2 预紧状态密封环的密封轴向力 F_a , 其值根据密封环的形式确定。

C.7.4 平盖

确定平盖的结构尺寸 (见图 C.30), 并对作用于纵向截面的弯曲应力和作用于 a — a 环向截面的当量应力进行强度校核。

C.7.4.1 纵向截面的弯曲应力按式 (C-91) 校核:

$$\sigma_m = \frac{3 \left[\left(D_b - \frac{2}{3} D_G \right) F + (D_b - D_G) F_a \right]}{3.14 [(D_1 - \sum d_i) \delta_p^2 + (D_o - D_1) h^2]} \leq 0.7 [\sigma]^t \dots\dots\dots (C-91)$$

式中 $\sum d_i = d_1 + d_2 + d_3 + \dots\dots$;

其他符号见图 C.30。

C.7.4.2 a — a 环向截面的当量应力按式 (C-92) 校核:

$$\sigma_{oa} = \sqrt{\sigma_{ma}^2 + 3\tau_a^2} \leq 0.7 [\sigma]^t \dots\dots\dots (C-92)$$

弯曲应力 σ_{ma} 按式 (C-93) 计算:

$$\sigma_{\text{ma}} = \frac{3(F + F_a)(D_b - D_1)}{3.14D_1h_1^2} \dots\dots\dots (\text{C-93})$$

切应力 τ_a 按式 (C-94) 计算:

$$\tau_a = \frac{F + F_a}{3.14D_1h_1} \dots\dots\dots (\text{C-94})$$

C. 7. 5 卡箍

确定卡箍结构尺寸 (见图 C.31), 并对作用于 $a-a$ 和 $b-b$ 环向截面的当量应力进行强度校核。

C. 7. 5. 1 $a-a$ 环向截面的当量应力按式 (C-95) 校核:

$$\sigma_{\text{oa}} = \sigma_{\text{ma}} + \sigma_a \leq 0.9[\sigma]^t \dots\dots\dots (\text{C-95})$$

弯曲应力 σ_{ma} 按式 (C-96) 计算:

$$\sigma_{\text{ma}} = \frac{6M_{\text{max}}}{S^2} \dots\dots\dots (\text{C-96})$$

$a-a$ 环向截面单位长度上最大弯矩 M_{max} 计算见 C.7.5.3;

拉应力 σ_a 按式 (C-97) 计算:

$$\sigma_a = \frac{4(F + F_a)}{3.14(D_0^2 - D_2^2)} \dots\dots\dots (\text{C-97})$$

其他符号见图 C.31。

C. 7. 5. 2 $b-b$ 环向截面的当量应力按式 (C-98) 校核:

$$\sigma_{\text{ob}} = \sqrt{\sigma_{\text{mb}}^2 + 3\tau_b^2} \leq 0.9[\sigma]^t \dots\dots\dots (\text{C-98})$$

弯曲应力 σ_{mb} 按式 (C-99) 计算:

$$\sigma_{\text{mb}} = \frac{3(F + F_a)h_2}{3.14D_2l_1^2} \dots\dots\dots (\text{C-99})$$

切应力 τ_b 按式 (C-100) 计算:

$$\tau_b = \frac{F + F_a}{3.14D_2l_1} \dots\dots\dots (\text{C-100})$$

其他符号见图 C.31。

C. 7. 5. 3 最大弯矩 M_{max}

C. 7. 5. 3. 1 $F+F_a$ 引起的弯矩按式 (C-101) 计算:

$$M = (F + F_a)H \dots\dots\dots (\text{C-101})$$

力臂 H 按式 (C-102) 计算:

$$H = S_0 + 0.5h_2 \dots\dots\dots (\text{C-102})$$

卡箍中性面 $Y-Y$ 离直径 D_2 的距离 S_0 按式 (C-103) 选取:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{当 } \frac{D_0}{D_2} \leq 1.45 \text{ 时, } S_0 = \frac{D - D_0}{4} \\ \text{当 } \frac{D}{D_0} > 1.45 \text{ 时, } S_0 = \frac{D_0 - D_2}{6} \frac{2D_0 + D_0}{D + D_0} \end{array} \right. \dots\dots\dots (C-103)$$

其他符号见图 C.31。

C.7.5.3.2 沿中性面单位长度上的弯矩按式 (C-104) 计算:

$$M_1 = \frac{M}{3.14D_n} \dots\dots\dots (C-104)$$

中性面直径 D_n 按式 (C-105) 计算:

$$D_n = D_2 + 2S_0 \dots\dots\dots (C-105)$$

C.7.5.3.3 计算系数 β 按式 (C-106) 计算:

$$\beta = 4 \sqrt{\frac{12(1 - \mu^2)}{D_n^2 S^2}} \dots\dots\dots (C-106)$$

厚度 S 按式 (C-107) 计算:

$$S = \frac{D_0 - D_2}{2} \dots\dots\dots (C-107)$$

C.7.5.3.4 计算系数 C 按式 (C-108) 计算:

$$C = \frac{l_2}{l_1} \dots\dots\dots (C-108)$$

式中长度 l_1 、 l_2 见图 C.31。

C.7.5.3.5 根据 βl_1 和 C 值查图 C.32 得 $\left(\frac{M_{\max}}{M_1}\right)$ 值。

C.7.5.3.6 最大弯矩 M_{\max} 按式 (C-109) 计算:

$$M_{\max} = \left(\frac{M_{\max}}{M_1}\right) M_1 \dots\dots\dots (C-109)$$

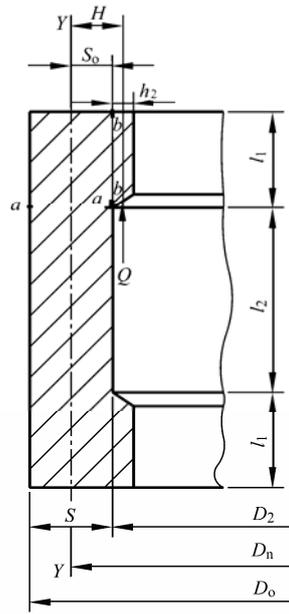


图 C.31 卡箍

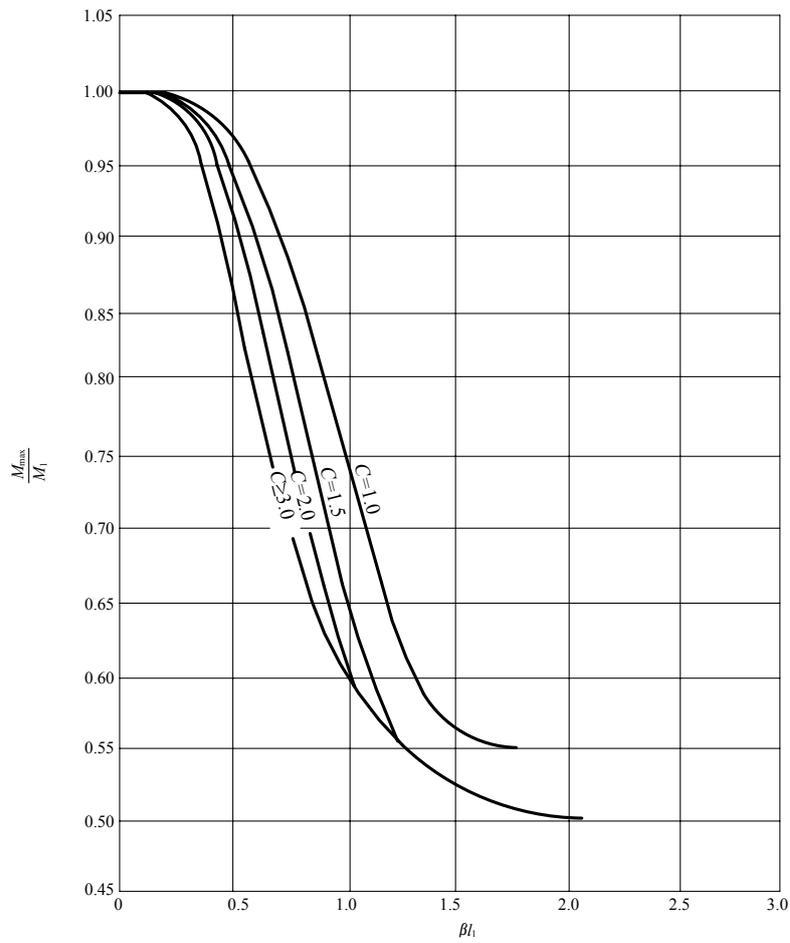


图 C.32

C.7.6 筒体端部

确定筒体端部的结构尺寸（见图 C.33），并对作用于 a — a 和 b — b 环向截面的当量应力进行强度校核。

C.7.6.1 a — a 环向截面的当量应力按式 (C-110) 校核：

$$\sigma_{oa} = \sigma_{ma} + \sigma_a \leq 0.9[\sigma]^t \quad \text{..... (C-110)}$$

弯曲应力 σ_{ma} 按式 (C-111) 计算：

$$\sigma_{ma} = \frac{6(M_3 + M_5)}{S_1^2} \quad \text{..... (C-111)}$$

弯矩 M_3 计算见 C7.6.3；

弯矩 M_5 计算见 C7.6.4。

拉应力 σ_a 按式 (C-112) 计算：

$$\sigma_a = \frac{4(F + F_a)}{3.14(D_3^2 - D_1^2)} \quad \text{..... (C-112)}$$

其他符号见图 C.33。

C.7.6.2 b — b 环向截面的当量应力按式 (C-113) 校核：

$$\sigma_{ob} = \sqrt{\sigma_{mb}^2 + 3\tau_b^2} \leq 0.9[\sigma]^t \quad \text{..... (C-113)}$$

弯曲应力 σ_{mb} 按式 (C-114) 计算：

$$\sigma_{mb} = \frac{3(F + F_a)h_3}{3.14D_3l_1^2} \quad \text{..... (C-114)}$$

切应力 τ_b 按式 (C-115) 计算：

$$\tau_b = \frac{F + F_a}{3.14D_3l_1} \quad \text{..... (C-115)}$$

其他符号见图 C.33。

C.7.6.3 弯矩 M_3 C.7.6.3.1 $F+F_a$ 引起的弯矩按式 (C-116) 计算：

$$M = (F + F_a)H_1 \quad \text{..... (C-116)}$$

力臂 H_1 按式 (C-117) 计算：

$$H_1 = S_{o1} + 0.5h_3 \quad \text{..... (C-117)}$$

筒体端部中性面 Y — Y 离直径 D_3 的距离 S_{o1} 按式 (C-118) 选取：

$$\begin{cases} \text{当 } \frac{D_3}{D_1} \leq 1.45 \text{ 时, } S_{o1} = \frac{D_3 - D_1}{4} \\ \text{当 } \frac{D_3}{D_1} > 1.45 \text{ 时, } S_{o1} = \frac{D_3 - D_1}{6} \frac{D_3 + 2D_1}{D_3 + D_1} \end{cases} \quad \text{..... (C-118)}$$

其他符号见图 C.33。

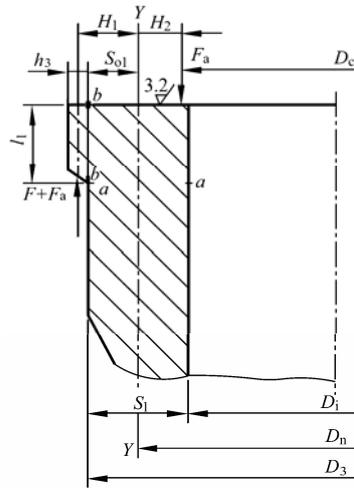


图 C.33 筒体端部

C.7.6.3.2 沿中性面单位长度上的弯矩按式 (C-119) 选取:

$$M_1 = \frac{M}{3.14D_n} \dots\dots\dots (C-119)$$

中性面直径 D_n 按式 (C-120) 计算:

$$D_n = D_3 - 2S_{01} \dots\dots\dots (C-120)$$

C.7.6.3.3 计算系数 β 按式 (C-121) 计算:

$$\beta = 4 \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{D_n^2 S_1^2}} \dots\dots\dots (C-121)$$

C.7.6.3.4 根据 βl_1 查图 C.11 得 $\left(\frac{M_3}{M_1}\right)$ 值。

C.7.6.3.5 弯矩 M_3 按式 (C-122) 计算:

$$M_3 = \left(\frac{M_3}{M_1}\right) M_1 \dots\dots\dots (C-122)$$

C.7.6.4 弯矩 M_5

C.7.6.4.1 F_a 引起的弯矩按式 (C-123) 计算:

$$M_2 = F_a H_2 \dots\dots\dots (C-123)$$

力臂 H_2 按式 (C-124) 计算:

$$H_2 = \frac{D_n - D_c}{2} \dots\dots\dots (C-124)$$

C.7.6.4.2 沿中性面单位长度上的弯矩按式 (C-125) 计算:

$$M_1 = \frac{M_2}{3.14D_n} \dots\dots\dots (C-125)$$

C.7.6.4.3 计算系数 β 按式 (C-126) 计算:

$$\beta = 4 \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{D_n^2 S_1^2}} \dots\dots\dots (C-126)$$

C.7.6.4.4 根据 βl_1 查图 C.20 得系数 φ 值。

C.7.6.4.5 弯矩 M_5 按式 (C-127) 计算:

$$M_5 = M_1 \varphi \dots\dots\dots (C-127)$$

C.7.7 紧固螺栓

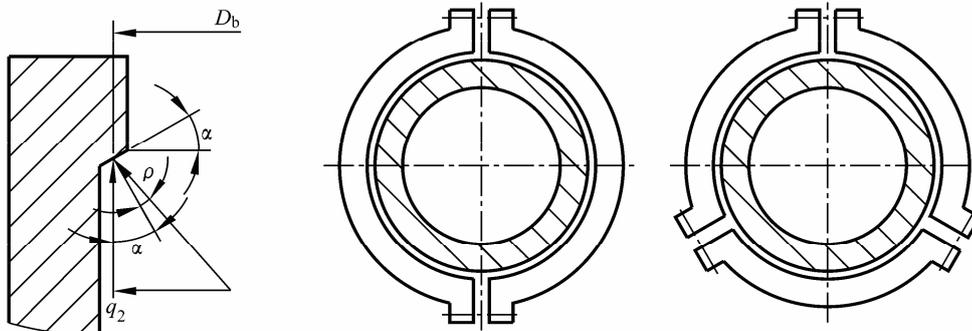


图 C.34 卡箍和紧固螺栓

卡箍上每个紧固端的螺栓数量按式 (C-128) 计算:

$$n = \frac{4W}{3.14[\sigma]_b d_i^2} \dots\dots\dots (C-128)$$

式中紧固螺栓载荷 W 取式 (C-129) 中计算值较大者:

$$W = \begin{cases} D_b q_2 \tan(\alpha + \rho) \\ M_1 \beta^2 D_2 l_2 \frac{\text{sh}2\theta - \sin\theta}{\text{sh}2\theta + \sin\theta} \end{cases} \dots\dots\dots (C-129)$$

$$q_2 = \frac{F_a}{3.14D_G} \dots\dots\dots (C-130)$$

$$\theta = \frac{\beta l_2}{2} \dots\dots\dots (C-131)$$

$$\text{sh}2\theta = \frac{e^{2\theta} - e^{-2\theta}}{2} \dots\dots\dots (C-132)$$

直径 D_b 见图 (C.34);

GB 150.3—2011

直径 D_2 见图 (C.31);

长度 l_2 见图 (C.31);

弯矩 M_1 见式 (C-104);

角度 α 见图 (C.34), 一般取 $\alpha=5^\circ\sim 7^\circ$;

系数 β 见式 (C-106)。

设计温度下螺栓材料的许用应力 $[\sigma]_b^t$ 按 GB 150.2 选取。

C.7.8 螺母设计按第 7 章 7.7 的规定。

附 录 D
(资料性附录)
焊接接头结构

D.1 附录中给出的焊接接头和坡口的形式及尺寸均基于等强度原则确定。

本附录仅给出一些常用焊接接头结构，供设计及制造时参考选用，焊缝坡口的基本形式及尺寸仅为推荐内容，本附录中各类焊接接头的施焊工艺必须按 JB 4708 评定合适后采用。

在保证焊接质量的前提下，焊接接头设计应遵循以下原则：

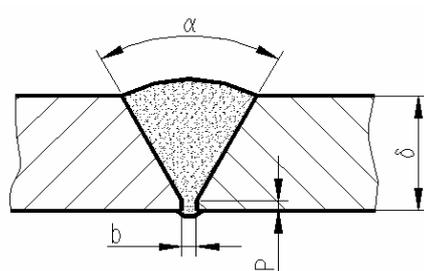
- a) 焊缝填充金属尽量少；
- b) 焊接工作量应尽量少，且操作方便；
- c) 合理选择坡口角度、钝边高、根部间隙等结构尺寸，使之有利于坡口加工及焊透，以减少各种缺陷产生的可能；
- d) 有利于焊接防护；
- e) 合理选择焊材，至少应保证对接焊接接头的抗拉强度不低于母材标准规定的下限值；
- f) 焊缝外形应尽量连续、圆滑，减少应力集中。

D.2 A、B 类焊接接头结构

D.2.1 常见 A、B 类对接接头

A、B 类对接接头，当两侧钢材厚度相等时，可采用图 D.1 的连接型式。

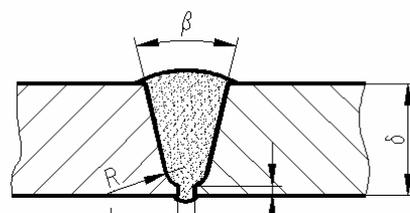
B 类焊接接头，当两侧钢材厚度不等时，可单面或双面削薄厚板边缘，或采用堆焊方法将薄板边缘焊成斜面，具体见 GB/T 150.4 的相关规定。



| | | |
|----------|------------------------|------------------------|
| δ | 5~10 | 12~20 |
| α | $60^\circ \pm 5^\circ$ | $50^\circ \pm 5^\circ$ |
| b | 1 ± 1 | 2 ± 1 |
| P | 1^{+1} | 2^{+1} |

适用范围：钢板拼接，筒体纵、环焊缝

a)

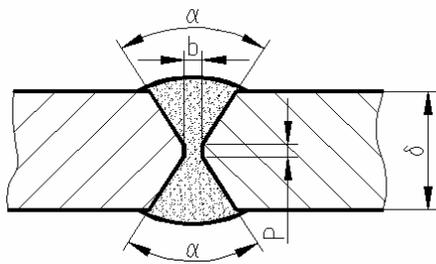


| | |
|----------|------------------------|
| δ | 20~60 |
| β | $12^\circ \pm 4^\circ$ |
| b | 2^{+1} |
| P | 2 ± 1 |
| R | 6^{+2} |

适用范围：厚壁筒体的环焊缝

b)

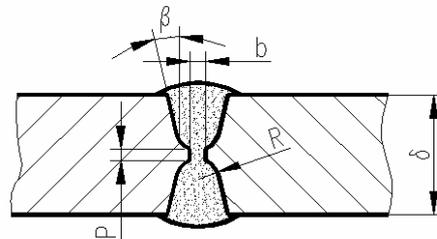
图 D.1



| | |
|----------|---------------------------|
| δ | 16~60 |
| α | $55^{\circ}\pm 5^{\circ}$ |
| b | 2 ± 1 |
| P | 2^{+1} |

适用范围：钢板拼接，筒体的纵焊缝

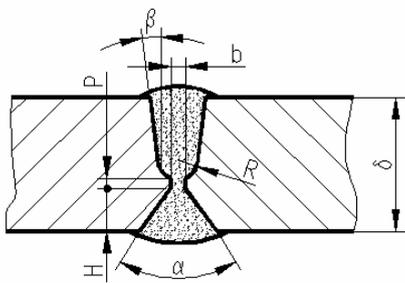
c)



| | | |
|----------|--------------------------|--------------------------|
| δ | 30~90 | 92~150 |
| β | $6^{\circ}\pm 2^{\circ}$ | $4^{\circ}\pm 2^{\circ}$ |
| b | 1 ± 1 | |
| P | 2 ± 1 | |
| R | 6^{+1} | |

适用范围：钢板拼接，筒体的纵焊缝

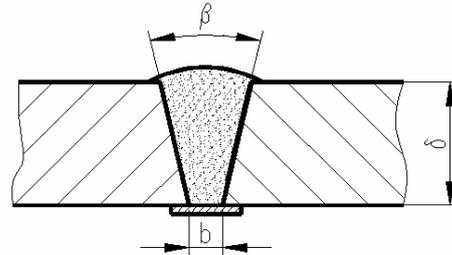
d)



| | | | |
|----------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| δ | 30~60 | 65~90 | 95~130 |
| β | $10^{\circ}\pm 2^{\circ}$ | $8^{\circ}\pm 2^{\circ}$ | $6^{\circ}\pm 2^{\circ}$ |
| α | $70^{\circ}\pm 5^{\circ}$ | | |
| b | 0^{+2} | | |
| P | 3 ± 1 | | |
| H | 10 ± 1 | | |
| R | 10 ± 1 | | |

适用范围：筒体的环焊缝

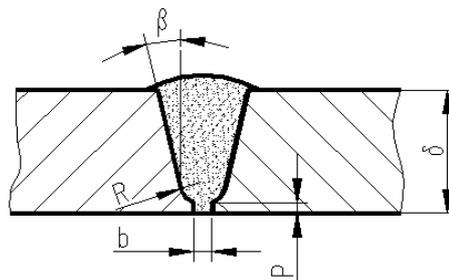
e)



| | |
|----------|---------------------------|
| δ | 5~30 |
| β | $40^{\circ}\pm 5^{\circ}$ |
| b | 7^{+1} |

适用范围：不能进行双面焊的且有焊透要求的环向焊缝

f)



| | |
|----------|---------------------------|
| δ | ≥ 22 |
| β | $10^{\circ}\pm 2^{\circ}$ |
| b | $2^{+0.5}$ |
| P | $1^{+0.5}$ |
| R | 5 ± 1 |

适用范围：不能进行双面焊且要求全焊透的纵、环向焊缝

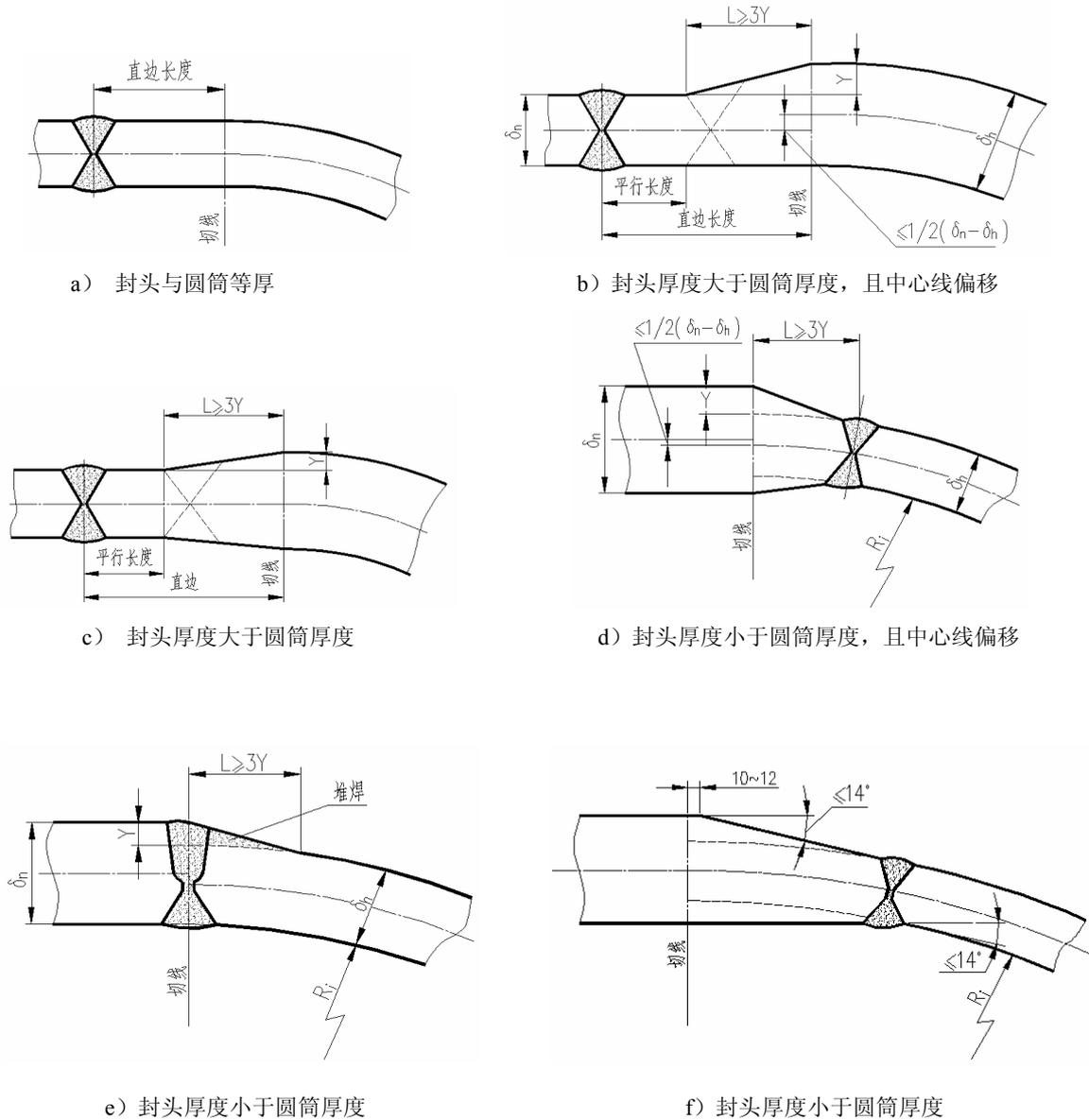
g)

注：图 g) 适用于氩弧焊打底或类似焊接方法打底的单面手工电弧焊的焊接接头，一般能达到全焊透的要求。

图 D.1 (续)

D.2.2 圆筒与封头的连接

圆筒与封头的对接接头，可采用图 D.2 的连接型式。



注：1. 图 b)、c)、d) 削薄可在内或在外，内侧或外侧的斜度可不对称，但两中心线偏差应小于或等于 $\frac{1}{2}(\delta_h - \delta_n)$ 。

2. 图 b)、c) 对接接头可位于锥形截面内或锥形过渡区。所需锥形长度 L 不应超过封头切线。
3. 图 e) 可采用堆焊形成锥形过渡，后加工坡口。对堆焊金属熔敷的整个表面需按要求进行磁粉或渗透检测。
4. 接头的坡口形式由设计确定，图中表示的坡口仅为说明用。
5. 图 d) 中的锥形过渡区起始点距切线的距离也可参照图 f) 留 10mm~12mm 的直边段。

图 D.2

D.3 接管、凸缘与壳体的连接

本节图中所示为接管、凸缘与壳体的连接常用的接头尺寸，也可根据焊接方法、焊接参数、加工条件以及施焊位置等的具体情况另行确定。

坡口形式的选择应考虑到元件结构、厚度以及材料焊接性等因素的影响。

D.3.1 插入式接管

插入式接管与壳体的连接，如图 D.3~图 D.5 所示。接管与壳体之间的间隙应不大于 3 mm。在下列使用条件下，接管内径边角处应倒圆，圆角半径一般取 $\delta_{nt}/4$ 或 19mm 两者中的较小值。

- a) 承受交变载荷的压力容器；
- b) 低温压力容器；
- c) 标准抗拉强度下限值 $R_m \geq 540$ MPa 的低合金钢制容器；
- d) 图样注明有应力腐蚀的容器。

D.3.1.1 无补强圈的接管

无补强圈接管与壳体的连接，如图 D.3、图 D.4 所示。其中截面全焊透的焊接接头（通称全焊透焊接接头），见图 D.3，不适用于有急剧温度梯度的场合以及其他法规中规定的禁用场合。图 D.4 为全焊透 T 型接头。

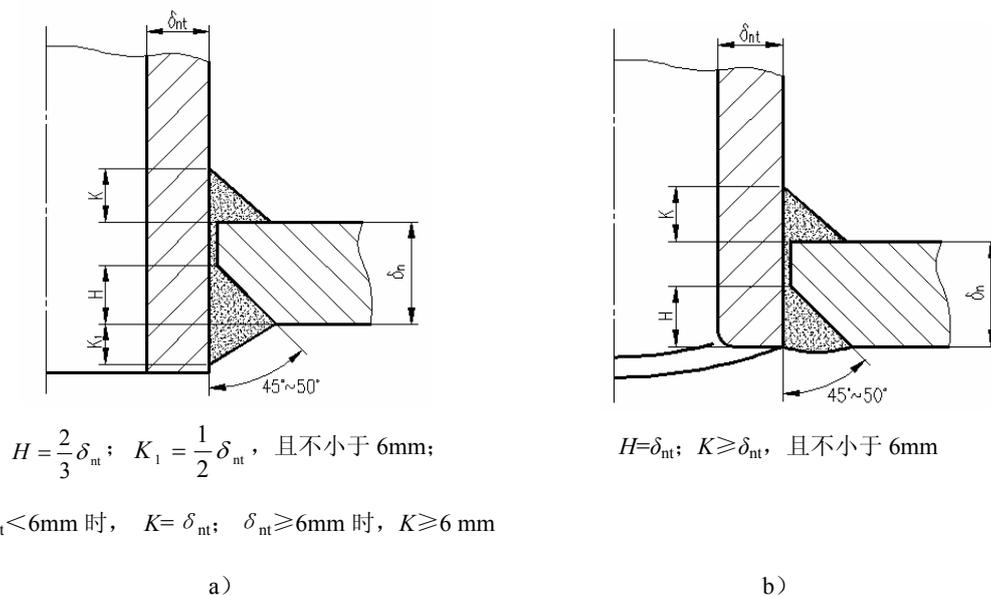
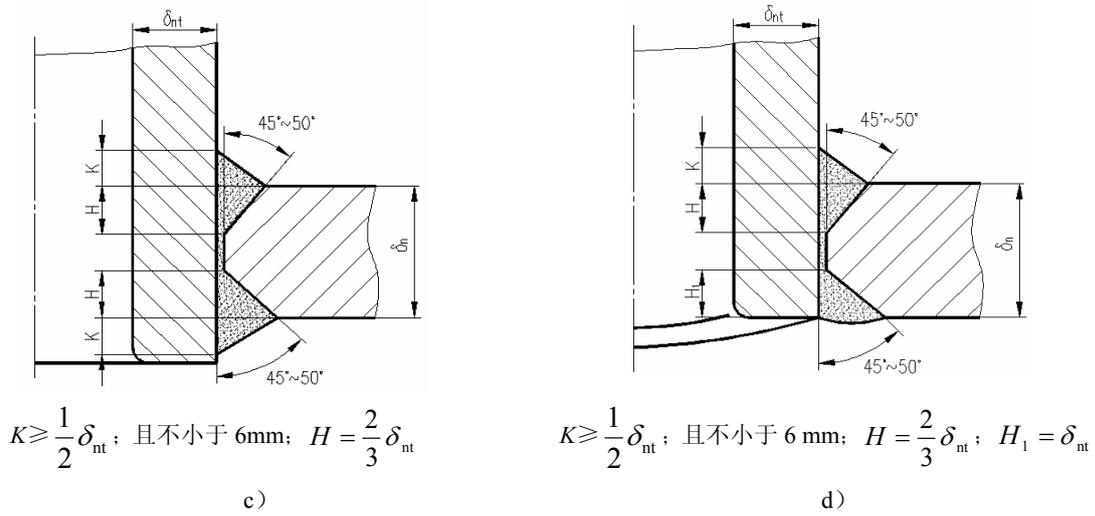


图 D.3



- 注：1. 图 a)、b) 适用于壳体厚度 $\delta_n \leq 16 \text{ mm}$ 的碳钢和碳锰钢，或 $\delta_n \leq 25 \text{ mm}$ 的奥氏体钢，且 $\delta_{nt} < \frac{\delta_n}{2}$ 。
2. 图 c)、d) 一般适用于 $\delta_{nt} \approx \frac{\delta_n}{2}$ ，且 $\delta_n \leq 50 \text{ mm}$ 。

图 D.3 (续)

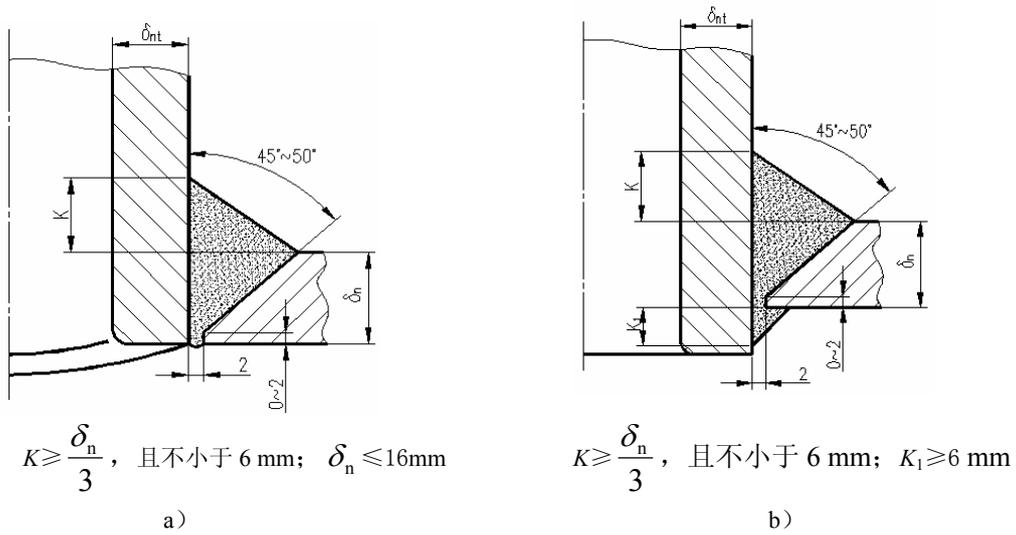


图 D.4

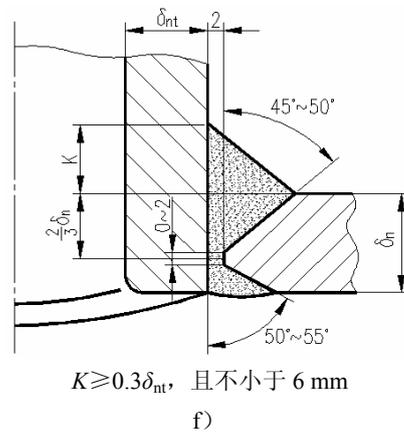
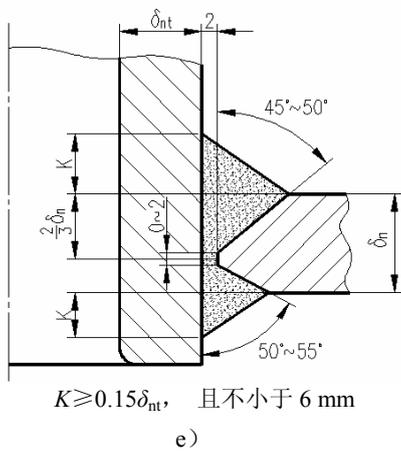
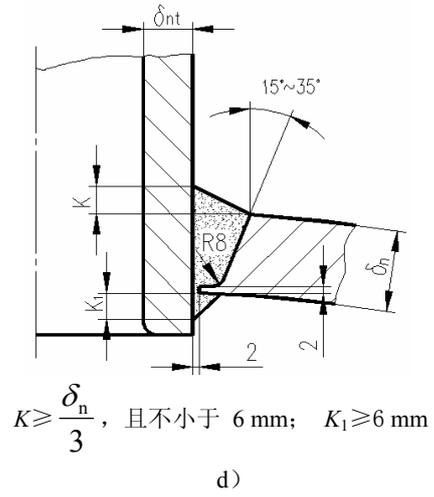
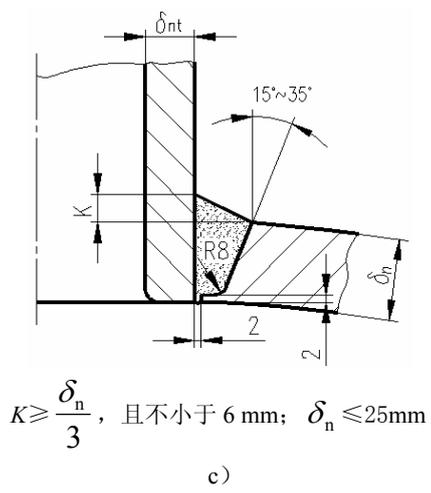
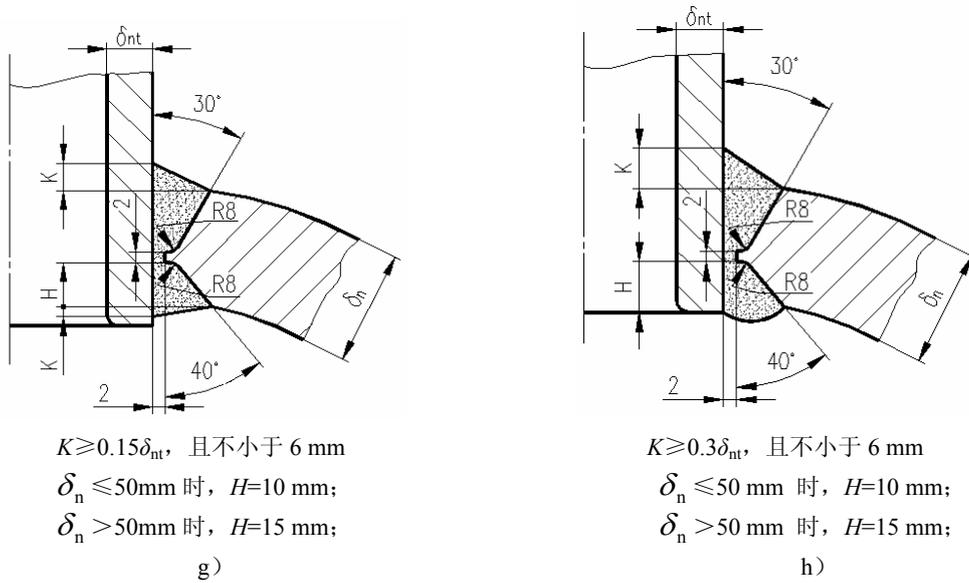


图 D.4 (续)



注：1. 插入式接管采用全焊透的连接时，应具备从内侧清根及施焊条件。只有采用保证焊透的焊接工艺时，方可采用图 a)、c) 所示的单面焊焊缝。

2. 图所示接头一般用于 $\delta_{nt} \geq \frac{1}{2}\delta_n$ 。

3. 焊接接头有效厚度超过 16 mm 时，则应优先选择单边 J 形坡口形式。

图 D.4 (续)

D.3.1.2 带补强圈的接管

带补强圈接管与壳体的连接如图 D.5 所示。这些结构不适用于有急剧温度梯度的场合。补强圈应与壳体紧密贴合，并开设讯号孔。

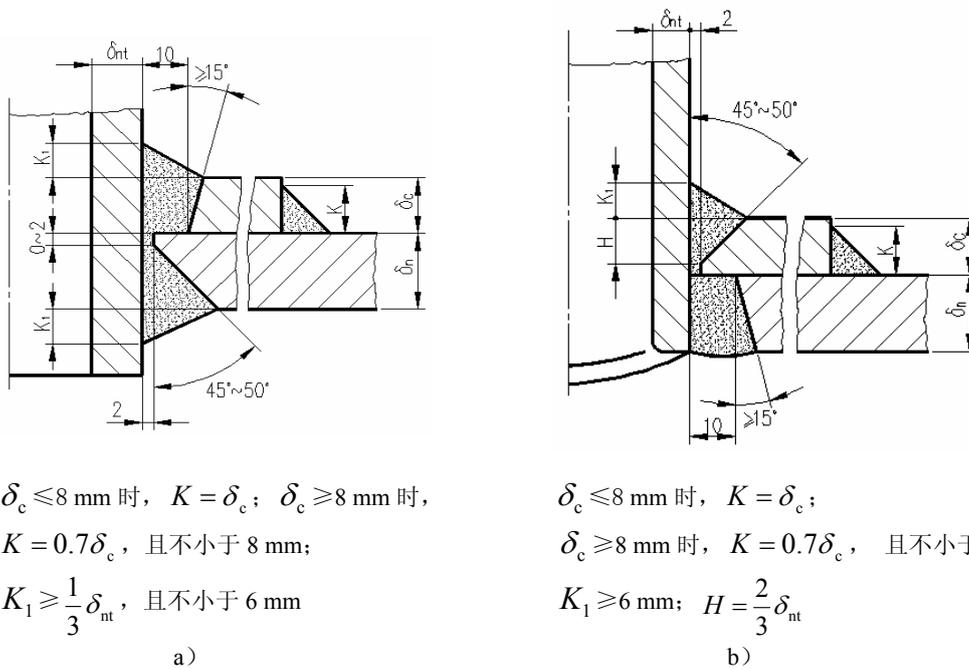
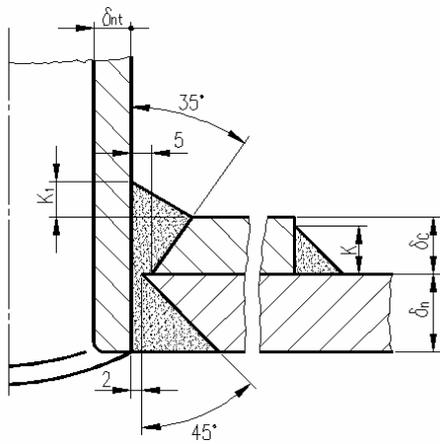
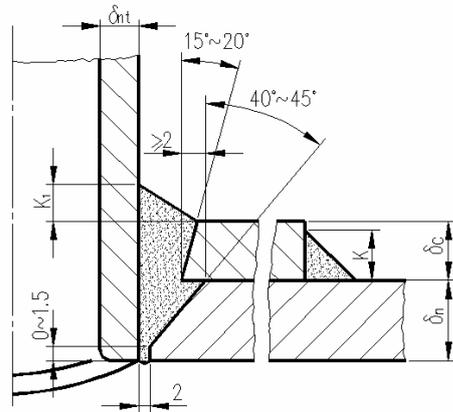


图 D.5



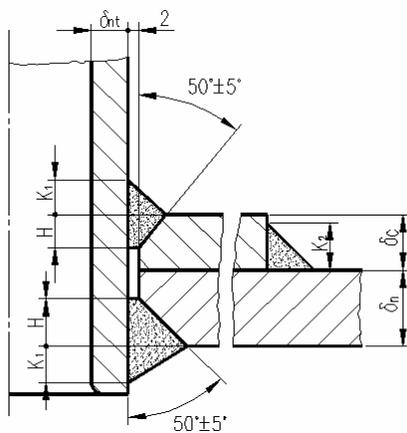
$\delta_c \leq 8 \text{ mm}$ 时, $K = \delta_c$; $\delta_c > 8 \text{ mm}$ 时,
 $K = 0.7\delta_c$, 且不小于 8 mm; $K_1 \geq 6 \text{ mm}$

c)



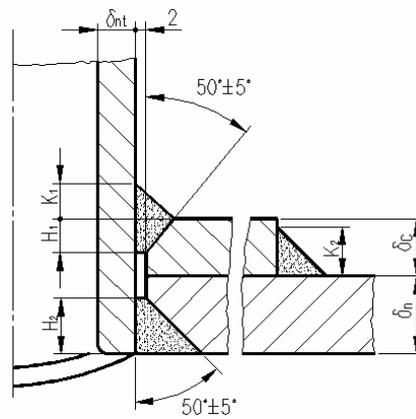
$\delta_c \leq 8 \text{ mm}$ 时, $K = \delta_c$;
 $\delta_c > 8 \text{ mm}$ 时, $K = 0.7\delta_c$,
 且不小于 8 mm; $K_1 \geq \frac{\delta_{nt}}{3}$; 且不小于 6mm
 采用焊透的焊接工艺

d)



$K_1 = \delta_{nt}$, 且不小于 6 mm;
 $\delta_c \leq 8 \text{ mm}$ 时, $K_2 = \delta_c$;
 $\delta_c > 8 \text{ mm}$ 时, $K_2 = \max(0.7\delta_c, 8)$;
 $H = 0.7\delta_{nt}$

e)



$K_1 = \delta_{nt}$, 且不小于 6 mm;
 $\delta_c \leq 8 \text{ mm}$ 时, $K_2 = \delta_c$;
 $\delta_c > 8 \text{ mm}$ 时, $K_2 = \max(0.7\delta_c, 8)$;
 $H_1 = 0.7\delta_{nt}$, $H_2 = \delta_{nt}$

f)

图 D.5 (续)

D.3.2 嵌入式接管

嵌入式接管与壳体的连接如图 D.6 所示。图 D.5 a) 一般适用于球形封头、椭圆封头中心部位的接管与封头或其他特殊部位的连接。

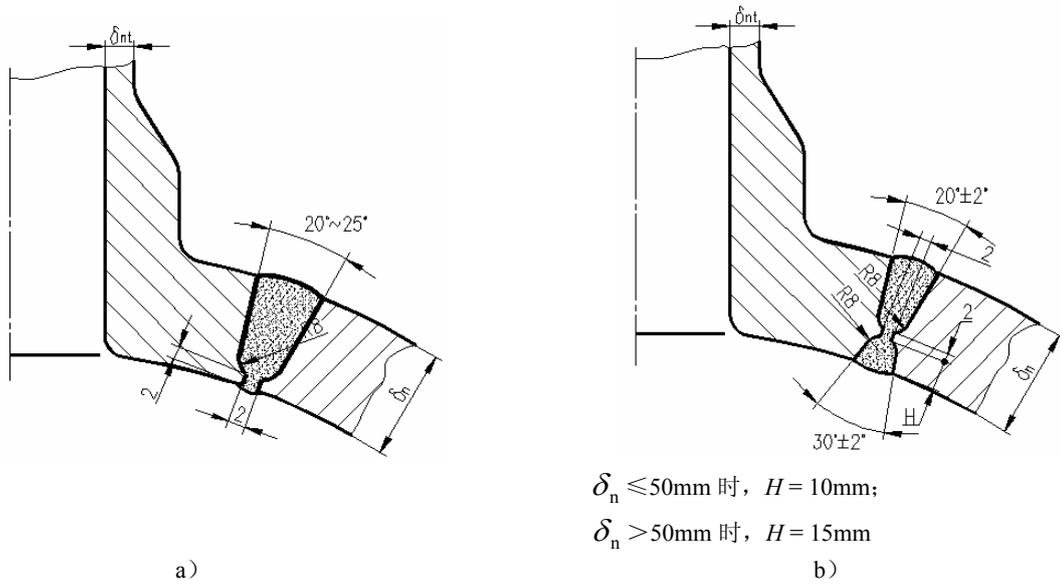


图 D. 6

D. 3.3 安放式接管

安放式接管的结构如图 D.7 所示。采用此结构时，壳体开孔处的钢板截面上应无分层现象。

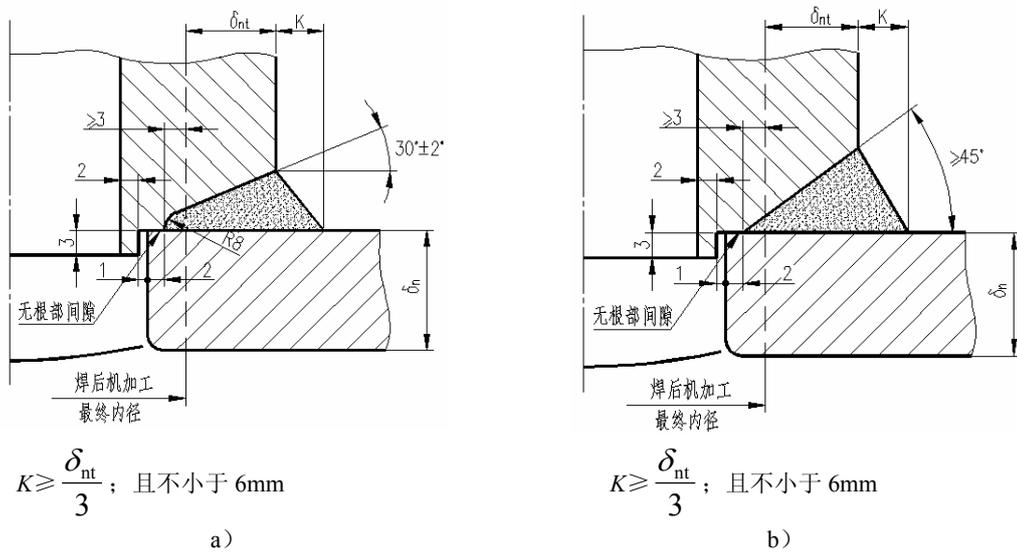
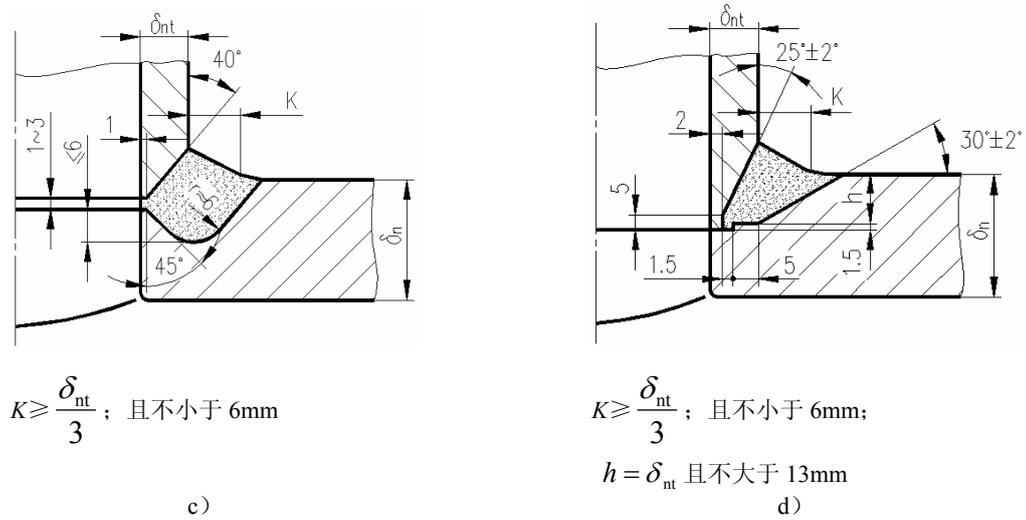


图 D. 7



注：1. 当接管直径与壳体直径之比较小时，一般采用图 a)、b) 的型式。

2. 图 c) 一般适用于接管内径小于或等于 100 mm。

3. 图 d) 适用于壳体厚度 $\delta_n \leq 16\text{mm}$ 的碳钢和碳锰钢，或 $\delta_n \leq 25\text{mm}$ 的奥氏体钢容器。对图 d)，接管内径应大于 50 mm，且小于或等于 150mm，壁厚 $\delta_{nt} > 6\text{mm}$ 。

4. 图 c)、d) 一般适用于平盖开孔，也可用于筒体上的开孔。

图 D.7 (续)

D.3.4 凸缘

D.3.4.1 角焊缝连接

角焊缝连接的凸缘如图 D.8 所示。此结构不适用于承受脉动载荷的容器。焊角尺寸取决于传递载荷的大小，并考虑制造和使用要求，一般情况下，角焊缝的腰高不小于两相焊件中较薄者厚度的 0.7 倍，在任何情况下均不得小于 6 mm。

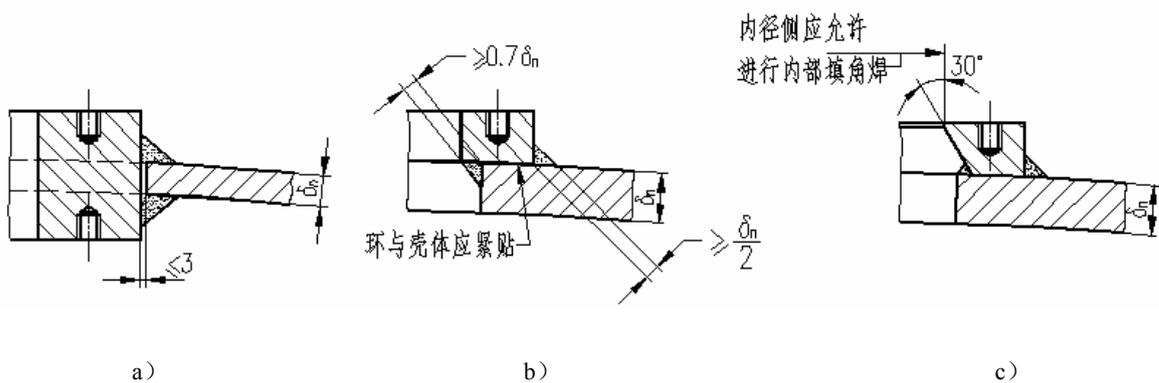


图 D.8

D.3.4.2 对接接头连接

对接接头连接的凸缘如图 D.9 所示。适用于承受脉动载荷的容器。

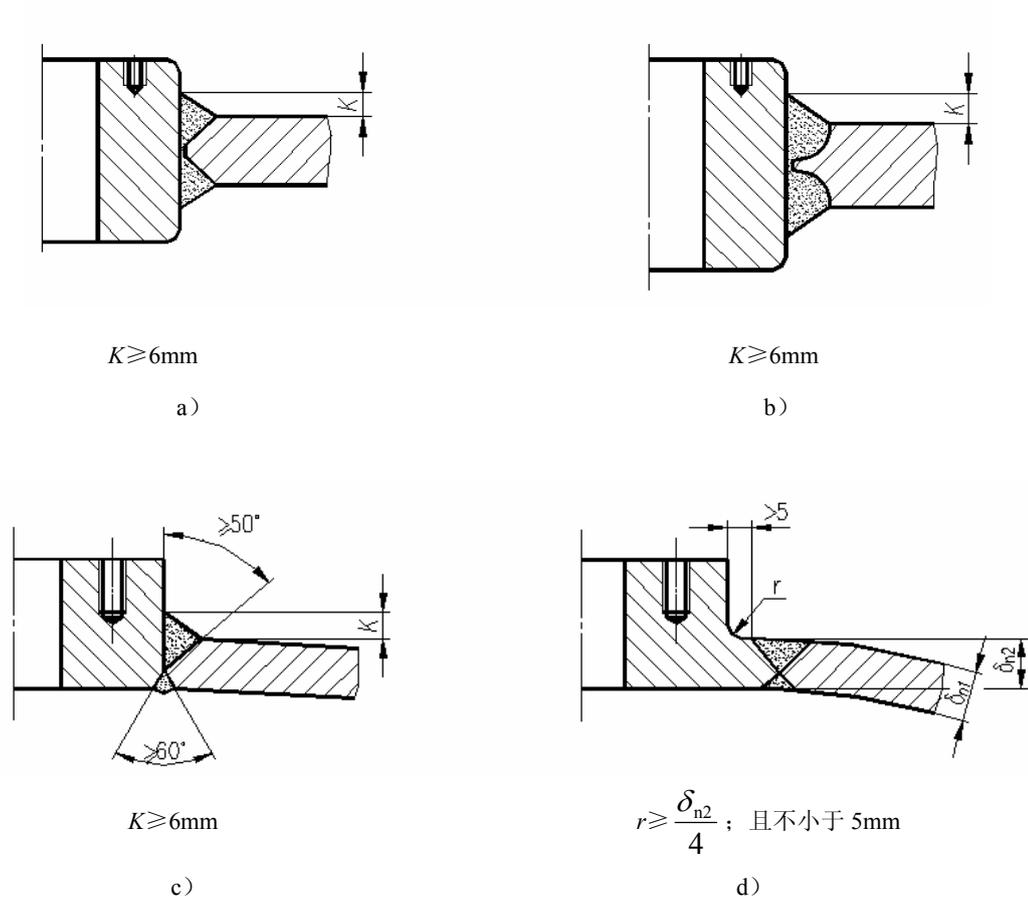


图 D.9

D.3.4.3 小直径凸缘和接管

小直径凸缘和接管的结构如图 D.10 所示。与壳体直接连接的凸缘和接管的公称直径应等于或小于 50 mm。其中图 b)、c)、d) 一般适用于壳体厚度 $\delta_n \leq 16\text{mm}$ 的碳钢和碳锰钢，或 $\delta_n \leq 25\text{mm}$ 的奥氏体钢容器。图 a) 中壳体与堆焊层的总厚度，应满足螺纹数的要求。

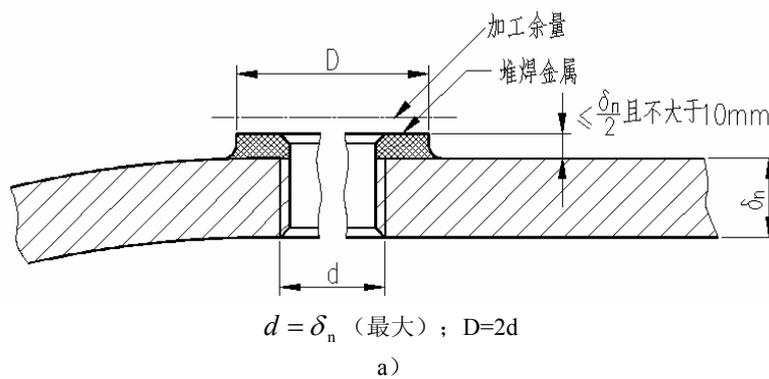
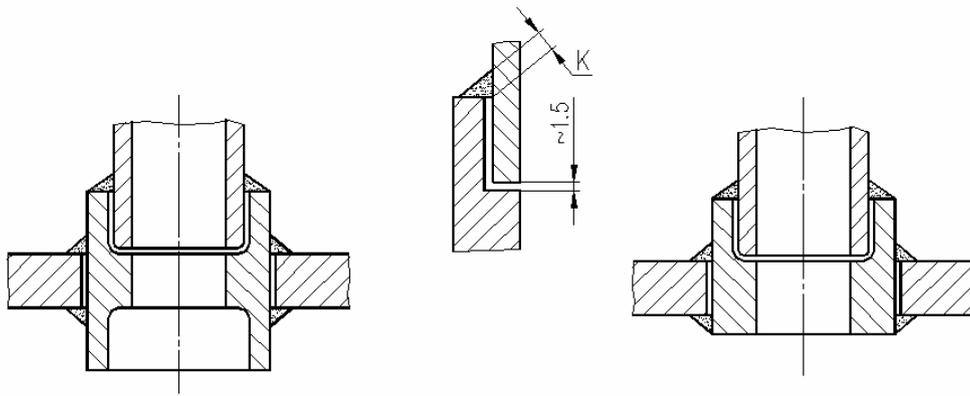
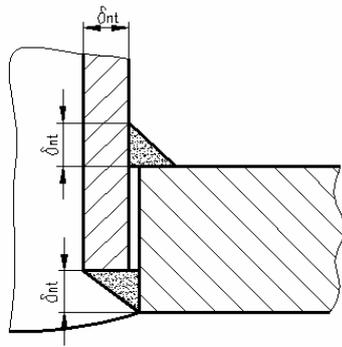


图 D.10

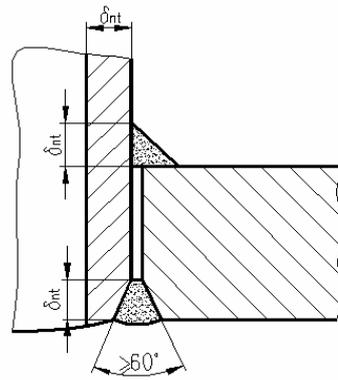


K 不小于相焊件较薄者厚度的 1.0 倍

b)



c)

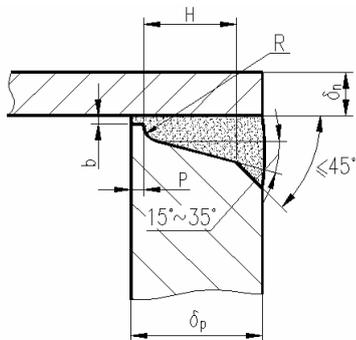


d)

图 D.10 (续)

D.4 平封头与受压元件的连接

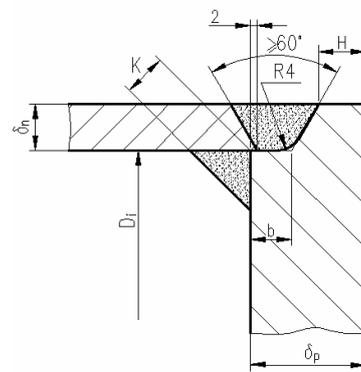
平封头与受压元件的连接如图 D.11 中 a) ~1) 所示。



$H \geq 1.25 \delta_n \text{ mm}$; $P = 2 \text{ mm} \sim 3 \text{ mm}$;

$R = 6 \text{ mm} \sim 13 \text{ mm}$; $b \leq 3 \text{ mm}$

a)

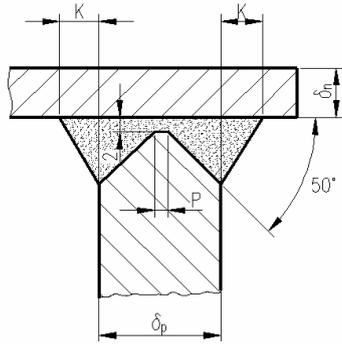


$K \geq 0.25 \delta_n$, 且 $K \geq 5 \text{ mm}$; $b \geq 6 \text{ mm}$;

且 $H \geq \delta_n$ 或 6 mm 中较小者

b)

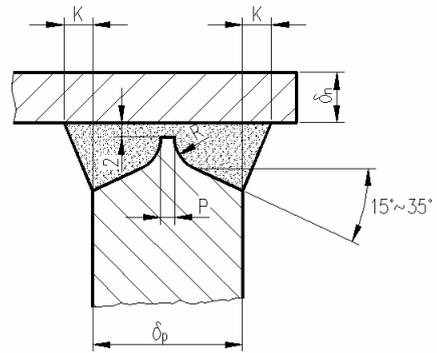
图 D.11



$K = \frac{\delta_n}{3}$, 且不小于 6 mm;

$P = 2 \text{ mm} \sim 3 \text{ mm}$

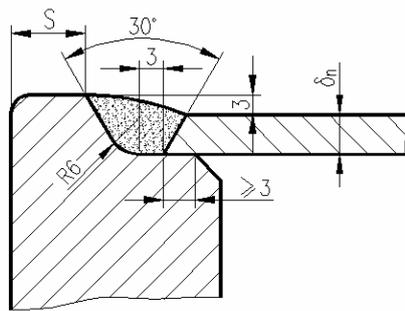
(c)



$K = \frac{\delta_n}{3}$, 且不小于 6 mm;

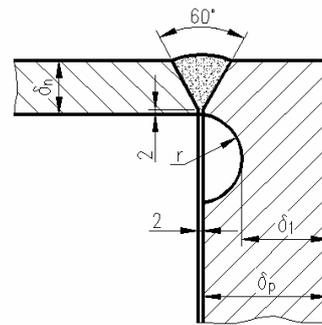
$P = 2 \text{ mm} \sim 3 \text{ mm}$, $R = 6 \text{ mm} \sim 10 \text{ mm}$

(d)



$S \geq \delta_n + 3$, 且不大于 6mm 30度改为 60度

e)

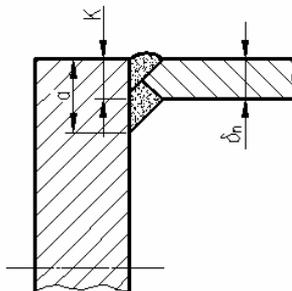


$\delta_1 \geq \frac{2}{3} \delta_p$, 同时 $\delta_1 \geq \delta_n$, 且不小于 5mm;

$r \geq 1.5 \delta_n$

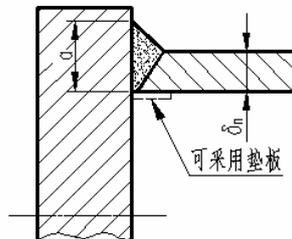
采用焊透的焊接工艺

f)



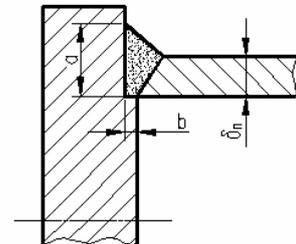
$a \geq 2\delta_n$; $K \geq \delta_n$

g)



$a \geq 2\delta_n$

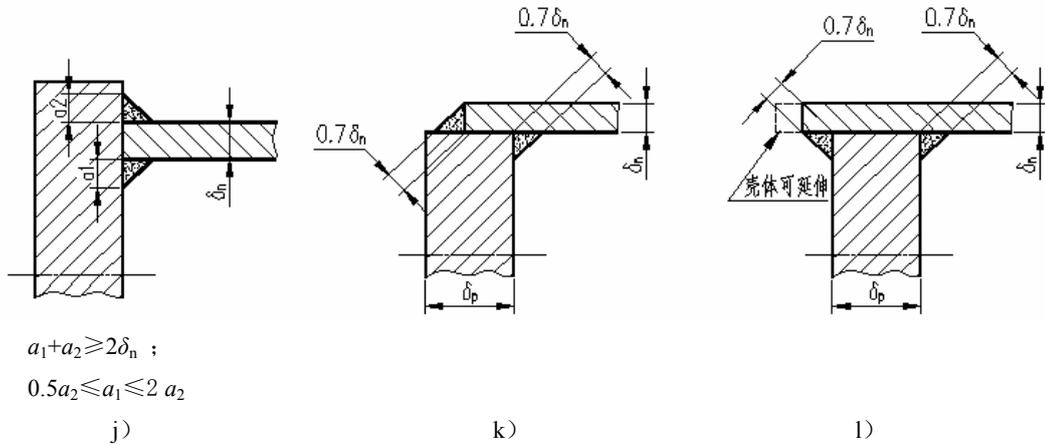
h)



$a+b \geq 2\delta_n$; $a \geq \delta_n$

i)

图 D.11 (续)

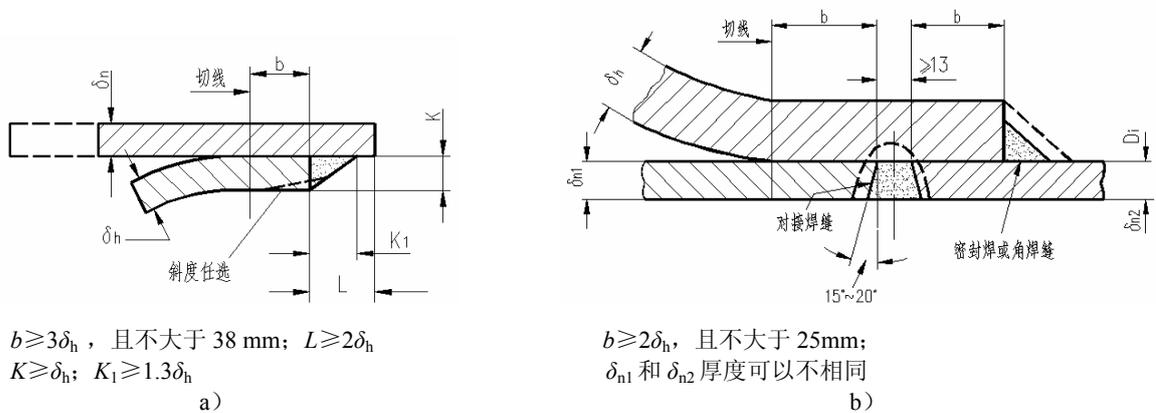


注：图 e) 适用于 $\delta_n \leq 16$ 的抗拉强度不超过 432MPa 的碳钢和碳锰钢，不推荐使用在有腐蚀和疲劳工况的容器上。

图 D.11 (续)

D.5 凸形封头与圆筒的搭接连接

凸面或凹面受压的椭圆形、碟形封头，其直边长度应不小于图 D.12 中的要求。套装在圆筒内、外侧的封头，直边段应与圆筒紧密贴合。



$b \geq 3\delta_n$ ，且不大于 38 mm； $L \geq 2\delta_n$
 $K \geq \delta_n$ ； $K_1 \geq 1.3\delta_n$
 a)

$b \geq 2\delta_n$ ，且不大于 25mm；
 δ_{n1} 和 δ_{n2} 厚度可以不相同
 b)

注：对图 b) 结构，设计时取剪应力为两侧可能出现的最大压力差的 1.5 倍。对接焊缝的许用应力为圆筒材料许用应力的 70%，角焊缝的许用应力为圆筒材料许用应力的 55%。

图 D.12

D.6 矩形容器侧板间的连接

矩形容器侧板间的连接见图 D.13。

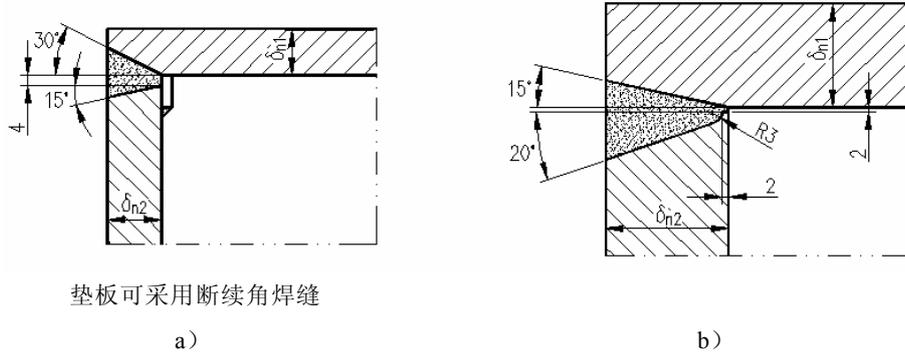


图 D.13

D.7 裙座与封头的连接

立式容器的裙座与封头的连接如图 D.14 所示。

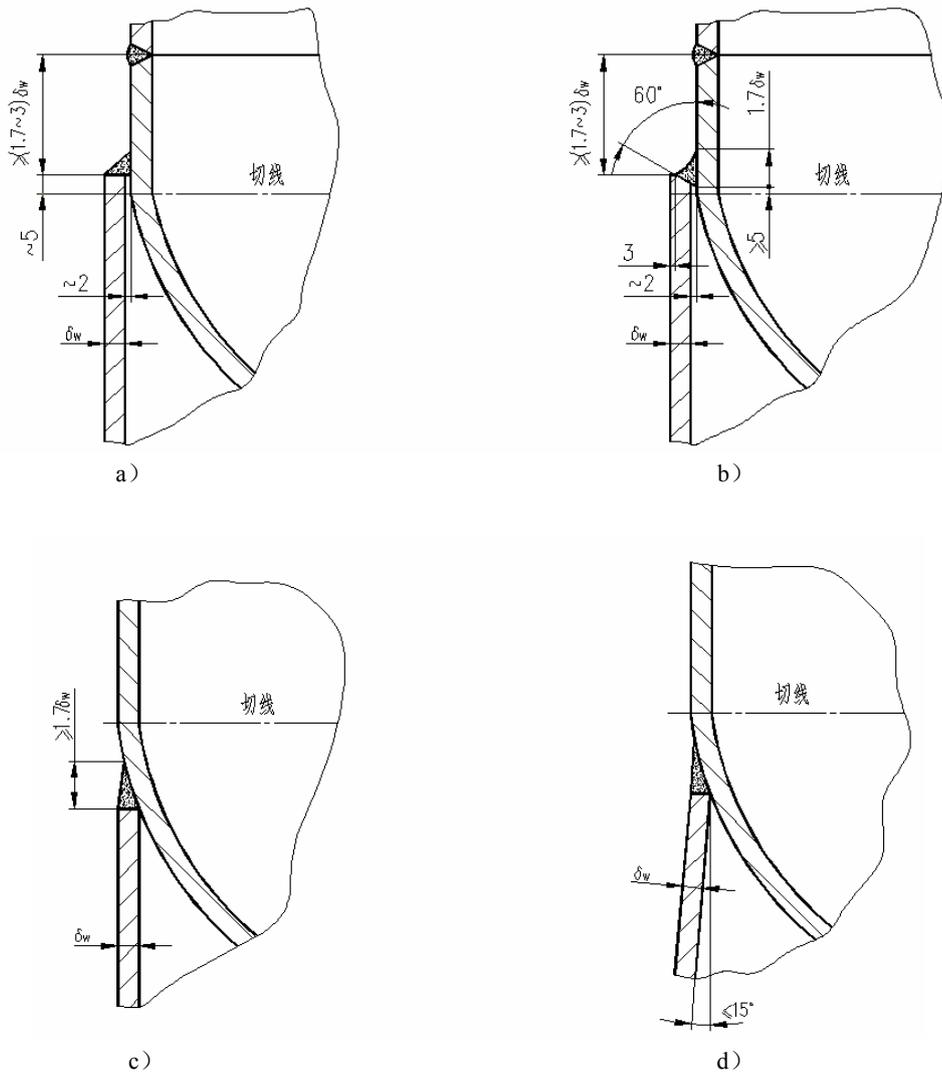
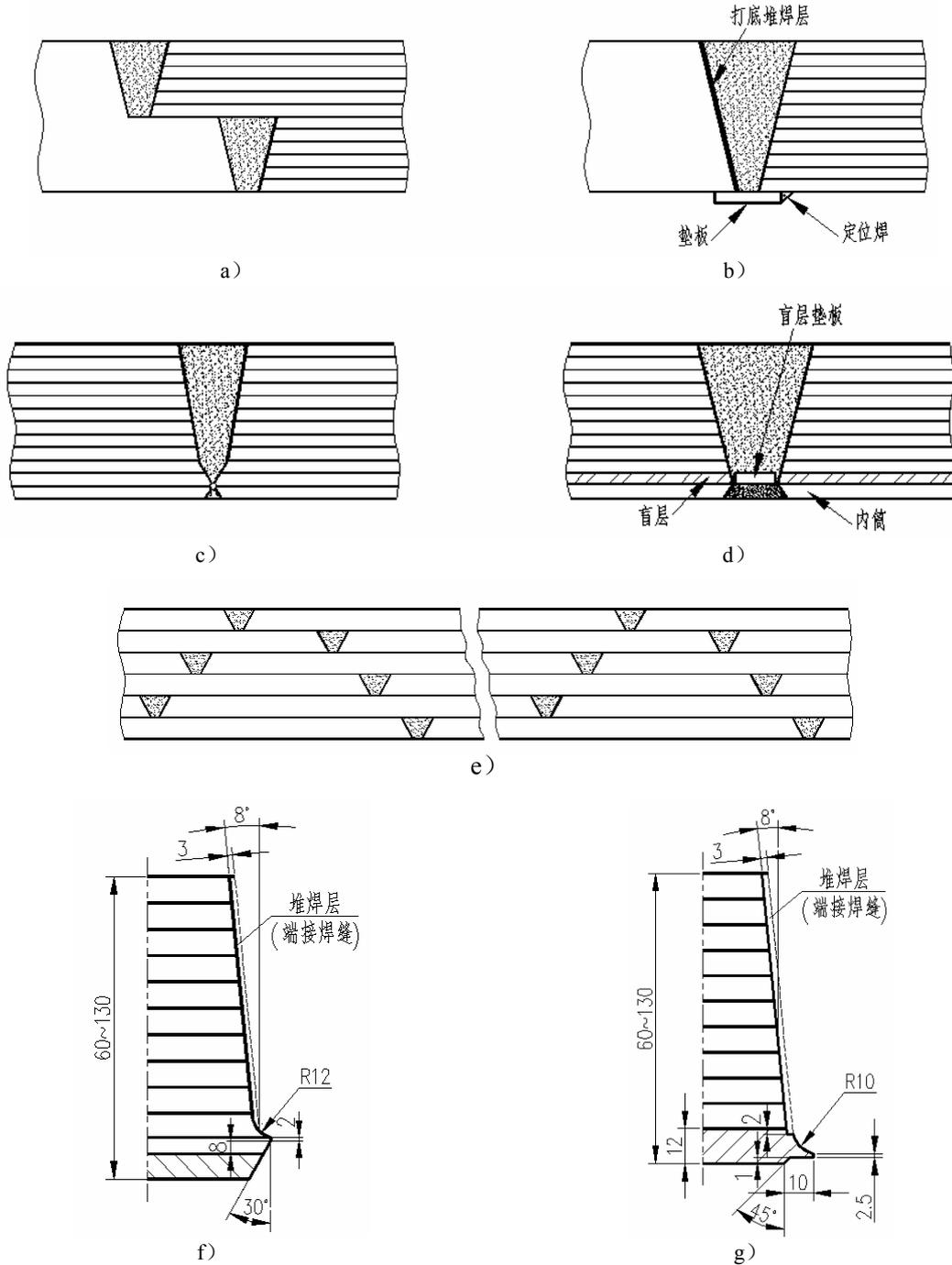


图 D.14

D.8 多层容器

D.8.1 等厚度圆筒间的 B 类焊接接头见图 D.15。

图 D.15 a)、b) 为多层圆筒与单层圆筒的连接, 图 c)、d)、e)、f)、g) 为多层圆筒间的连接;
图 h)、i) 为具有不锈钢内筒的多层圆筒间的连接。



注: 对图 b) 结构, 当单层圆筒要求进行焊后热处理时, 为避免对此环缝作焊后消除应力热处理, 一般应在加工后的坡口面上堆焊一层厚度等于或大于 3mm 的不需焊后热处理的焊接材料, 先将堆焊后的单层圆筒进行热处理, 其后再与多层圆筒相焊。但上述要求不包括多层圆筒需作焊后热处理的情况。

图 D.15

D.8.2 不等厚圆筒间的 B 类焊接接头见图 D.16。

不等厚圆筒间的连接采用图 D.16 所示的过渡型式。其中图 a)、b) 为厚度不等的多层圆筒间的连接；图 c)、d)、e)、f) 为多层圆筒与厚度不等的单层圆筒间的连接。过渡段的斜边长度 $L \geq 3Y$ 。过渡部分可在筒壁的一侧或两侧。

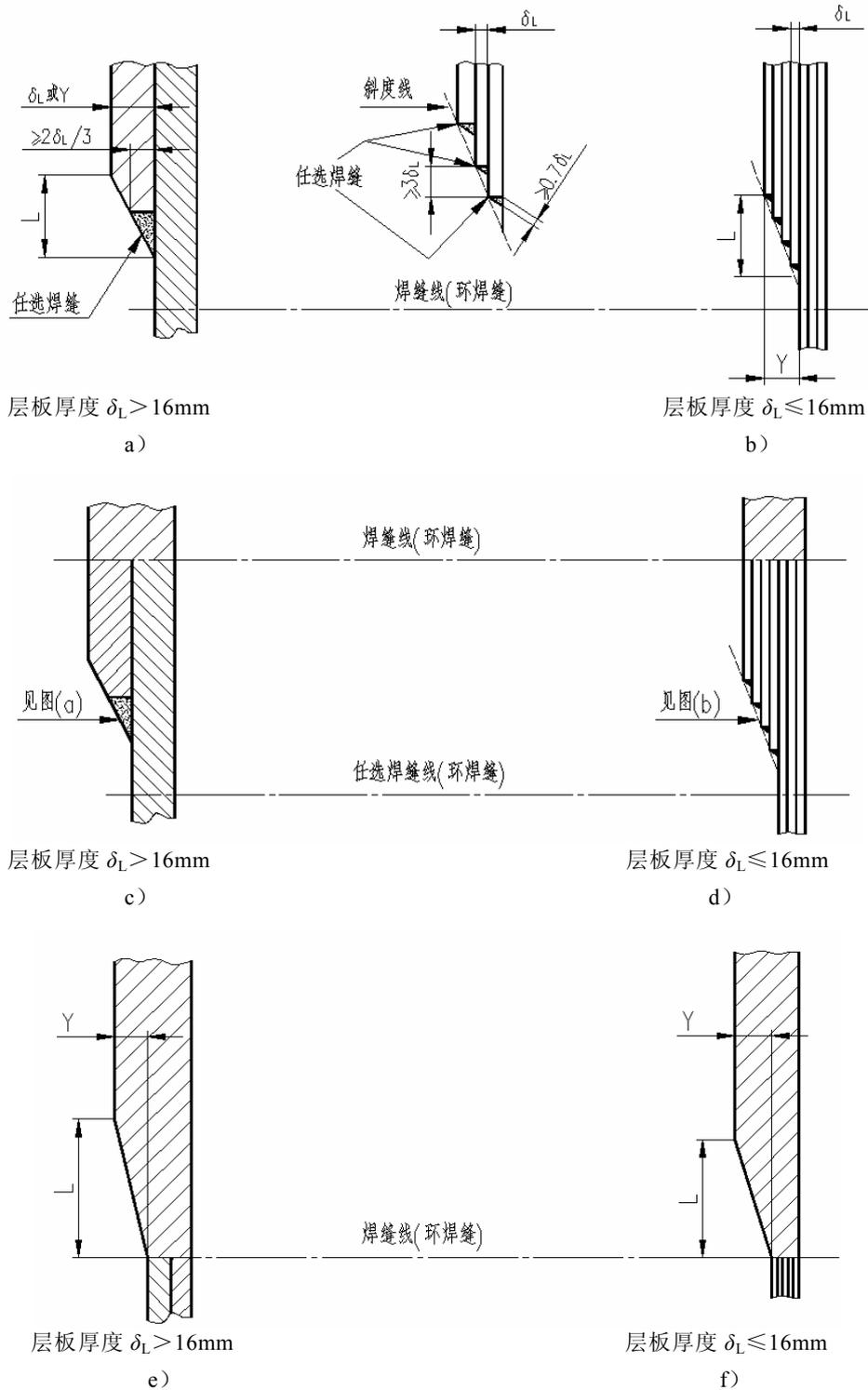


图 D.16

D.8.3 多层圆筒与封头的连接，见图 D.17。

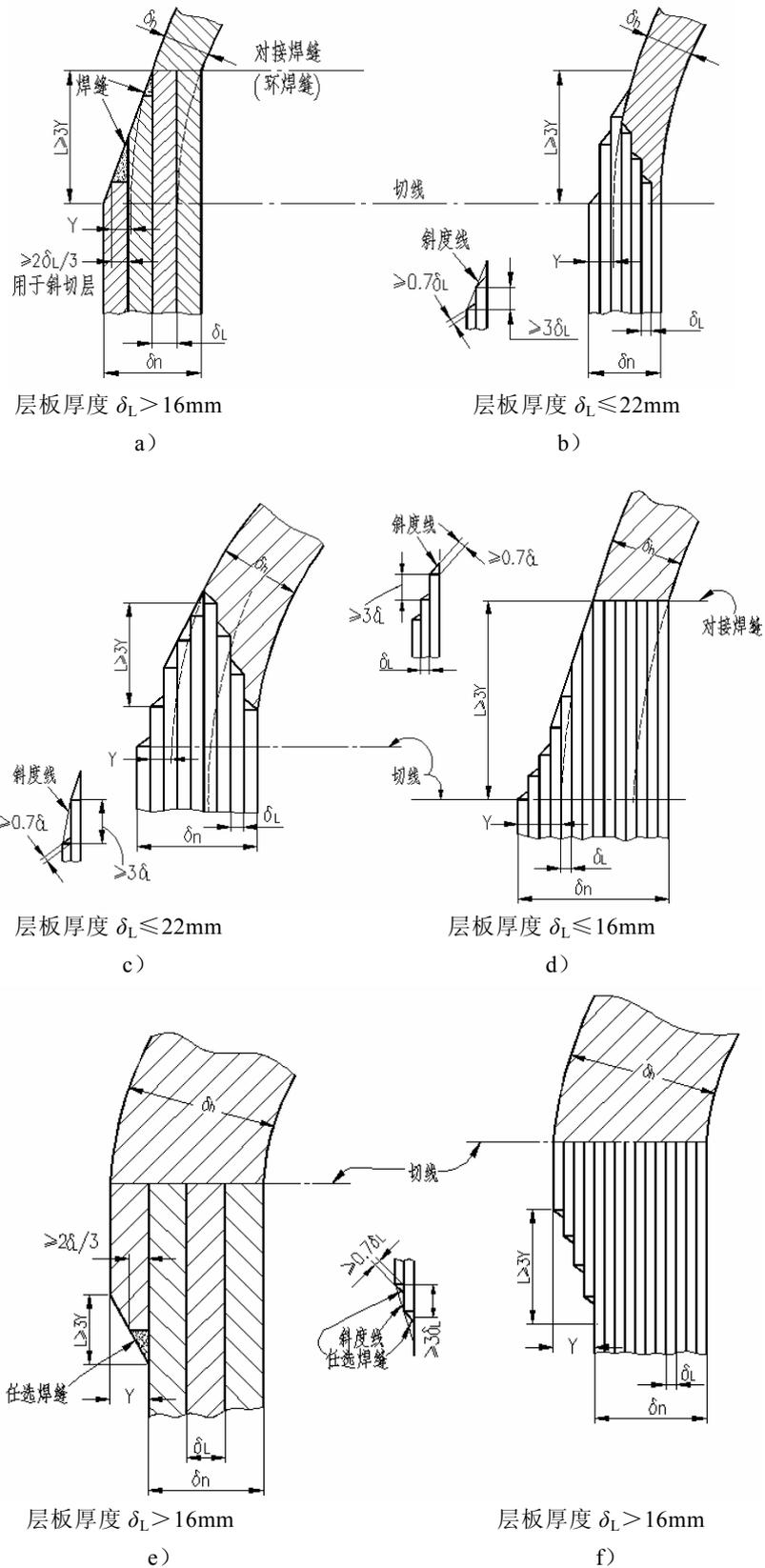
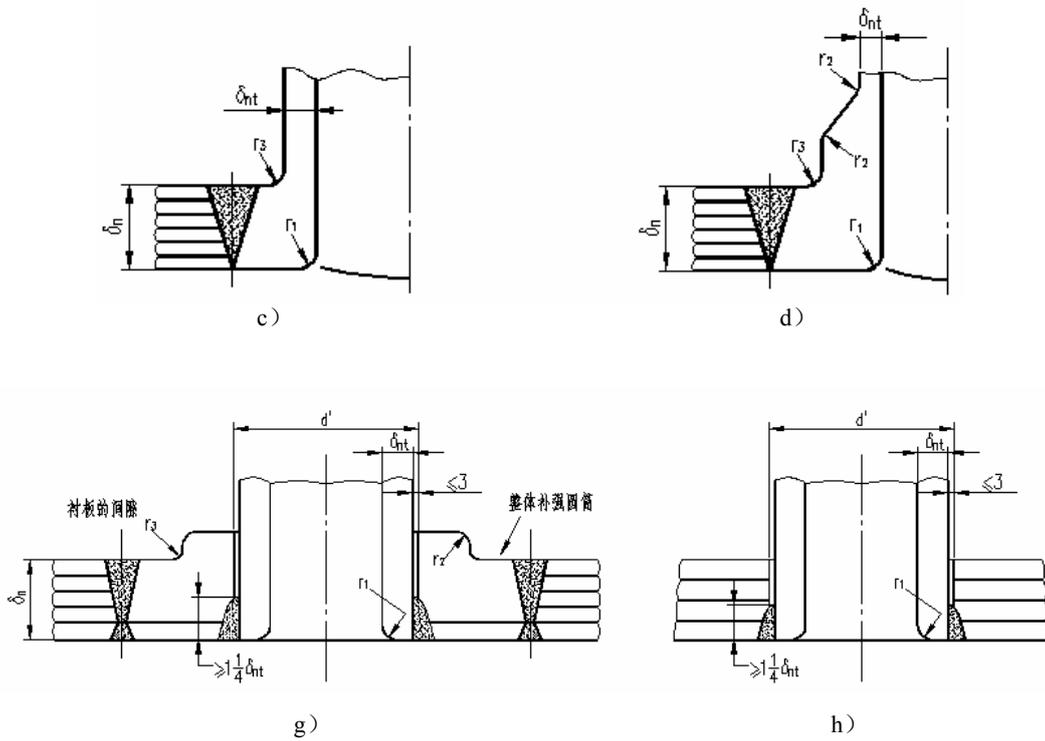


图 D.17



- 注：1. 圆角半径 r_{1min} 取 $\delta_{nt}/4$ 或 19mm 两者中的较小值； $r_2 \geq 6\text{mm}$ ； $r_{3min} = r_{1min}$ ； $t_c \geq 6\text{mm}$ ，或不小于 δ_{nt} 和 19mm 两者中较小值的 0.7 倍。
2. 对图 g)、h) 应设法防止外界杂物进入层板与接管外径间的间隙，但不准用密封焊。
3. 对图 g) 结构，一般适用于公称管径大于 DN50mm 的开孔。

图 D.19 (续)

D.8.6 支座，见图 D.20。

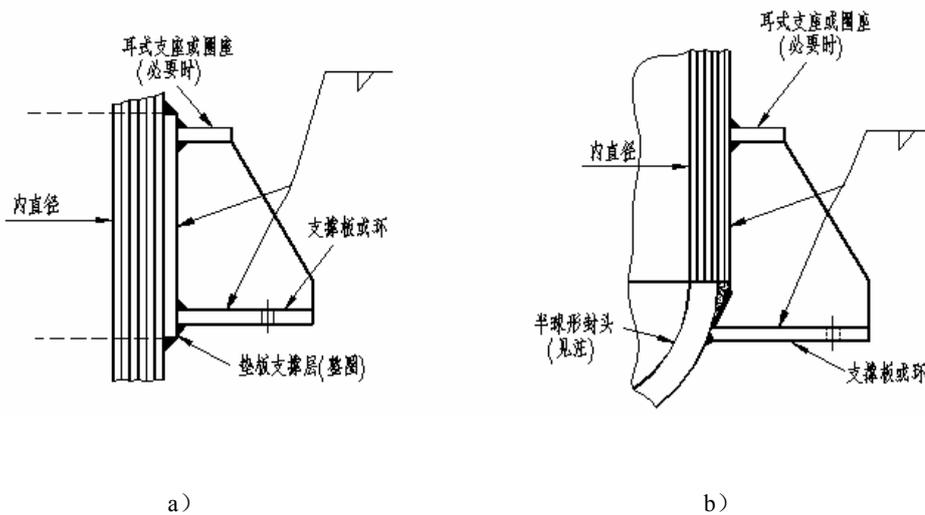
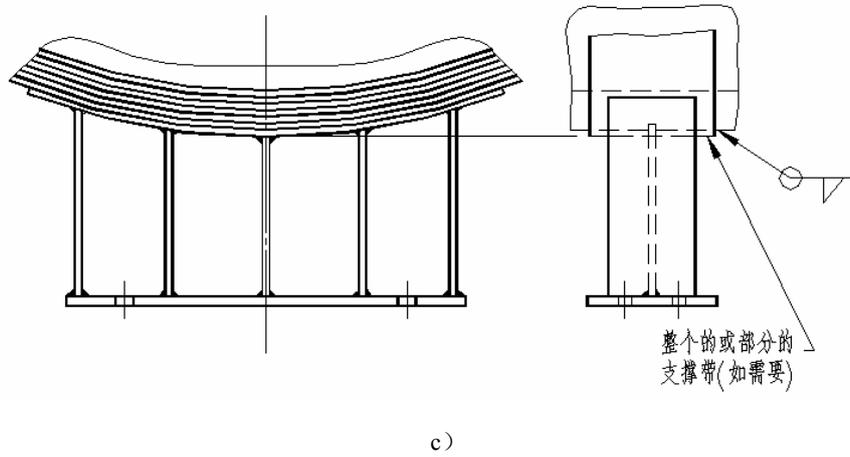


图 D.20



注：对非半球形封头，应特别考虑不连续应力的作用。

图 D. 20 (续)

D.9 钢带错绕容器端部焊接结构

钢带错绕容器端部焊接结构见图 D.21。此结构的适用范围等要求见 GB/T 150.3 附录 B。

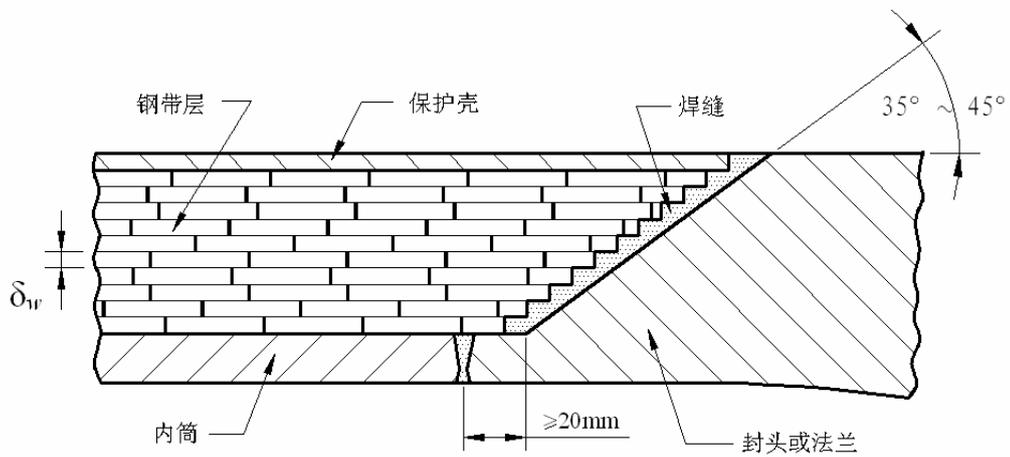
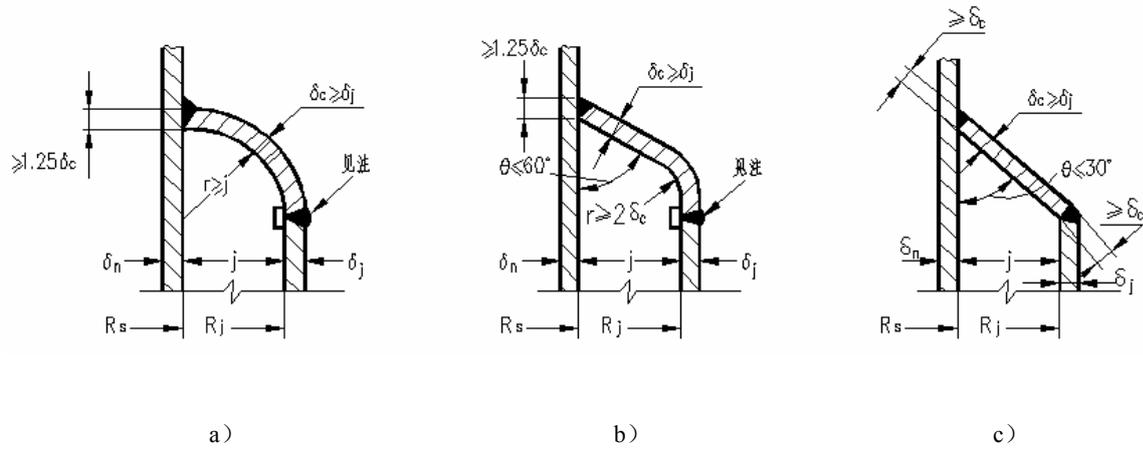


图 D. 21

D.10 夹套封闭件结构

D.10.1 夹套封闭件与内容器的连接见图 D.22~图 D.24。



注：1.封闭件可以与夹套壳体为整体结构或用全焊透的结构（可以使用垫板）。
2.图仅适用于圆筒形容器的夹套。

图 D. 22

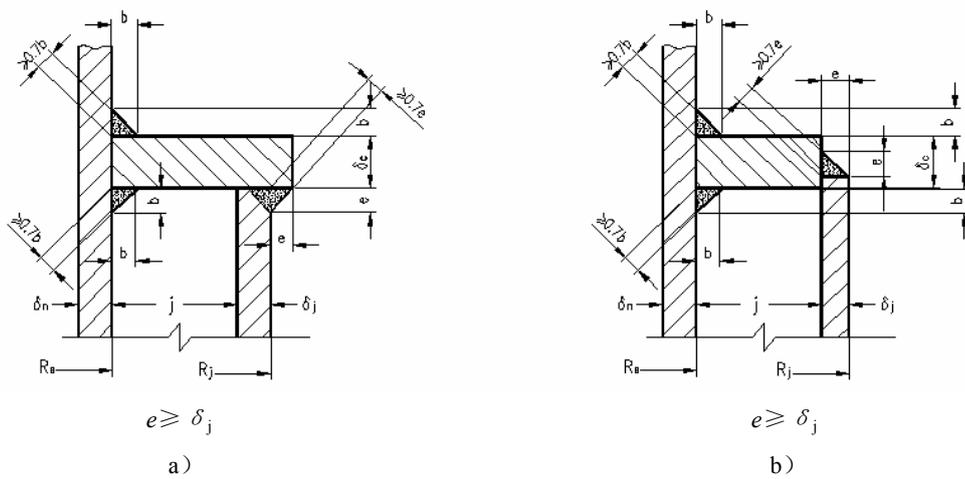
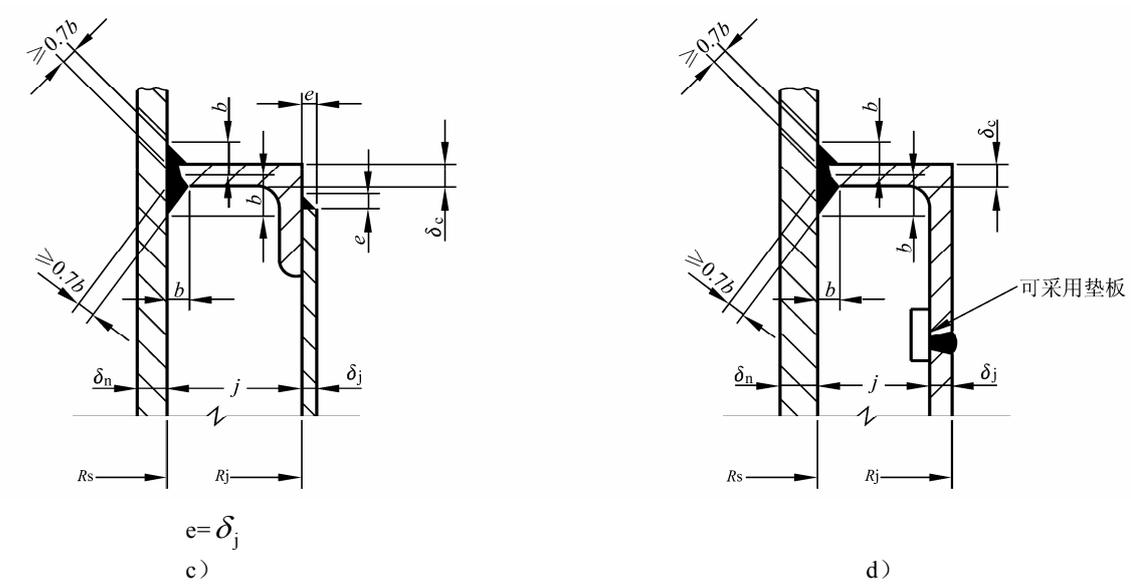


图 D. 23

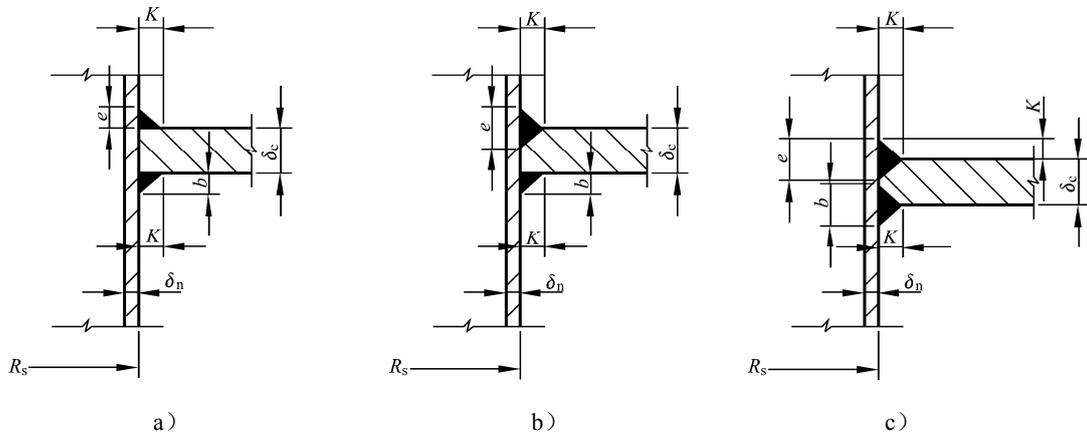


注：1. $b \geq 0.75\delta_c$ 或 $0.75\delta_n$ ，取较小值。

2. 图 a)、b)、c)、d) 仅适用于焊在圆筒部分的夹套。

3. 图中： $\delta_j - C \leq 16\text{mm}$ ； δ_c 等于 $2\delta_j$ 或 $0.707j\sqrt{\frac{p_c}{[\sigma]} + C}$ 两者中的较大值。

图 D.23 (续)



注：1. $b + e \geq 1.5\delta_n$ 或 $1.5\delta_c$ 取较小值。

2. 对于仅用于圆筒部分的夹套，封闭环厚度 δ_c 按图 23 中注 3 计算。

3. 对于封头部分也带夹套的夹套容器，封闭环厚度和最大许用的夹套间隔宽度应由下列公式确定：

$$\delta_c \geq 1.414 \sqrt{\frac{p_c R_s j}{[\sigma]}} + C$$

$$j = \frac{2[\sigma] \delta_n^2}{p_c R_j} - 0.5(\delta_n + \delta_j)$$

4. 为使 $(b+e)$ 保证所需的最小值而用坡口焊或角焊连接时所需的最小焊角尺寸。

图 D.24

D.10.2 管口、凸缘穿过夹套封闭件的连接见图 D.25。

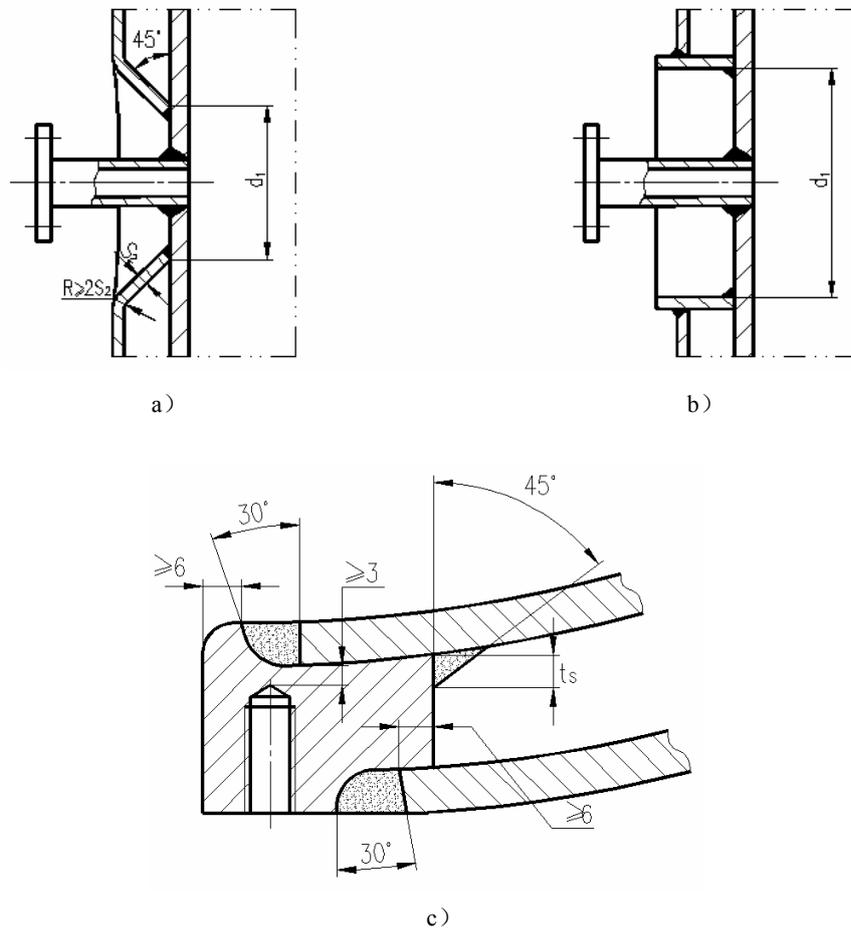


图 D.25

D.11 非受压附件与受压元件的连接

非受压附件与受压元件的连接一般应采用连续焊，根据具体情况可采用角焊缝、部分焊透、全焊透等结构型式。

T型连接的角焊缝高度及部分焊透的深度 a 应不小于附件连接件厚度 S 的 $1/4$ ，如图 D.26 a)、b) 所示。图 D.26 a) 中角焊缝焊脚高度 a 也可取相焊件中较薄者的厚度。

垫板与容器壁的搭接角焊缝焊脚高度及部分焊透的深度 b 应不小于垫板厚度 S 的 $1/2$ ，如图 D.26 c)、d) 所示。图 D.26 c) 中，对于补强圈的焊脚高度 b ，当补强圈的厚度不小于 8mm 时，其值可取补强圈厚度的 70% ，且不小于 8mm 。

T型连接的全焊透焊接结构见图 D.26 e)，一般适用于承受较大载荷的设备吊耳等附件与容器壁或其垫板的连接。

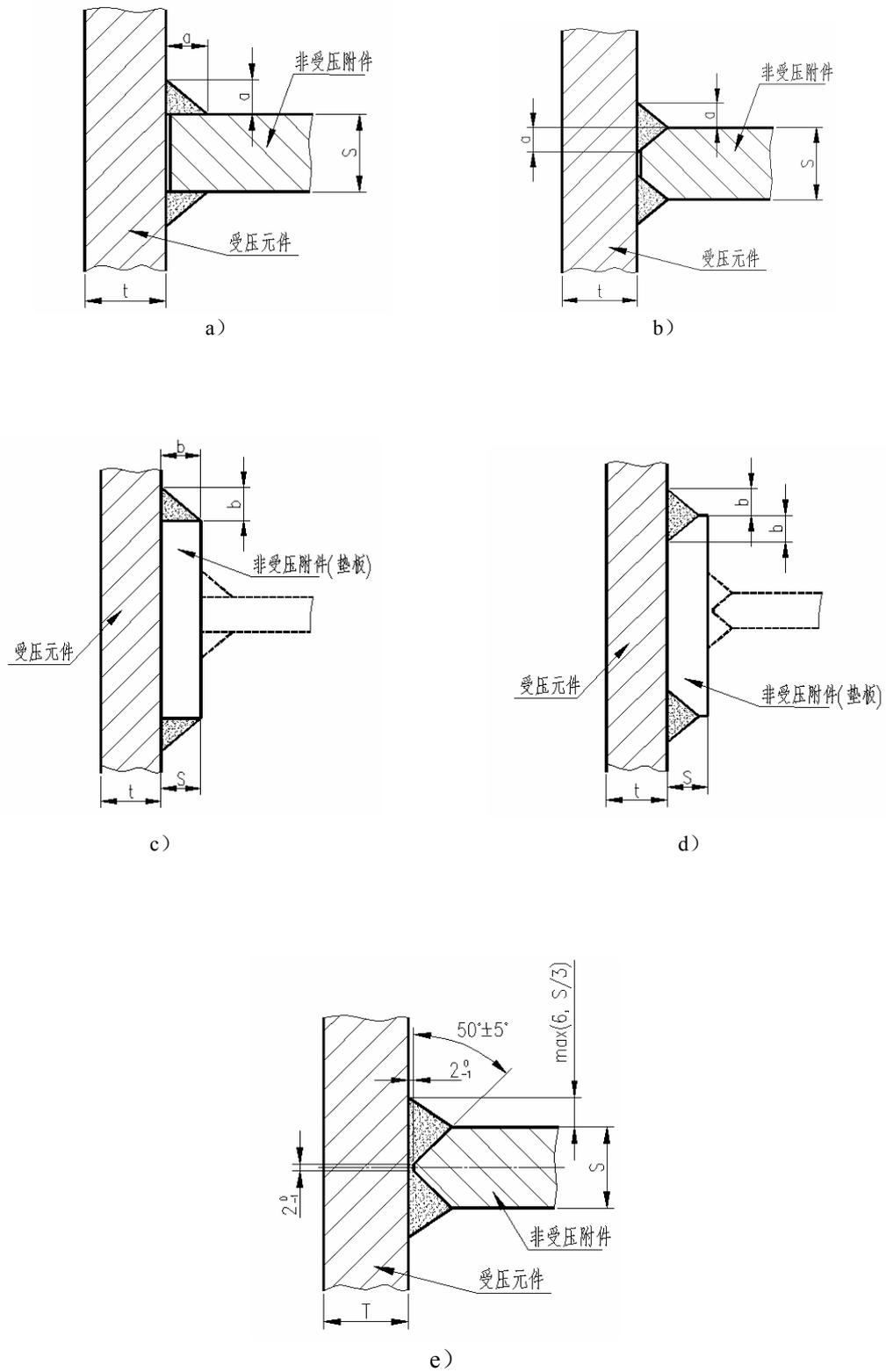


图 D. 26

D.12 其他

本附录未给出的焊缝坡口的基本形式及尺寸可参照 GB/T 985.1 和 GB/T 985.2 的规定。

制造单位可根据所采用的焊接方法等具体情况，在保证焊接质量和设计要求的前提下，对已给出的焊接接头坡口的基本形式及尺寸进行适当的修正。

对于管板与筒体的连接参见 GB 151，法兰与筒体的连接及复合板焊接接头的连接结构尺寸参见相关标准规范。

附 录 E (规范性附录)

关于低温压力容器的基本设计要求

E.1 总则

E.1.1 本附录适用于碳素钢和低合金钢制低温容器（设计温度低于 -20°C ）的设计。对于奥氏体型钢材制低温压力容器（设计温度低于 -196°C ）的设计，按相关规范标准处理。

E.1.2 对本附录未作规定者，应符合本标准各有关章节的要求。

E.1.3 对于碳素钢和低合金钢制容器，由于环境温度的影响导致操作条件下容器壳体的金属温度低于 -20°C 时，也应遵循本附录的规定。

注：环境温度系指容器使用地区历年来“月平均最低气温的最低值”。“月平均最低气温”系按当月各天的最低气温相加后除以当月的天数。

E.1.4 对于碳素钢和低合金钢制容器，当壳体或其受压元件使用在“低温低应力工况”下，若其设计温度加 50°C （对于不要求焊后热处理的容器，加 40°C ）后不低于 -20°C ，除另有规定外不必遵循关于低温容器的规定。

“低温低应力工况”系指壳体或其受压元件的设计温度虽然低于 -20°C ，但设计应力（在该设计条件下，容器元件实际承受的最大一次总体薄膜和弯曲应力）小于或等于钢材标准常温屈服强度的 $1/6$ ，且不大于 50 MPa 时的工况。

注：一次应力是为平衡压力与其他机械载荷所必须的法向应力或切应力。

E.2 设计

E.2.1 低温容器用钢材要求应符合 GB 150.2 的相关规定，其许用应力按相应材料在 20°C 时的许用应力选取，或按 4.5 确定。

E.2.2 当壳体或受压元件使用在“低温低应力工况”下，可以按设计温度加 50°C （对于不要求焊后热处理的容器，加 40°C ）后的温度值选择材料，但不适用于 Q235 系列钢板。

“低温低应力工况”不适用于钢材标准抗拉强度下限值 $R_m \geq 540\text{ MPa}$ 的材料。

“低温低应力工况”不适用于螺栓材料；螺栓材料的选用应计及螺栓和壳体设计温度间的差异。

E.2.3 容器的结构设计应充分考虑以下因素：

- a) 结构应尽量简单，减少约束；
- b) 避免产生过大的温度梯度；
- c) 应尽量避免结构形状的突然变化，以减小局部应力；
- d) 接管与壳体连接部位应圆滑过渡，接管端部内壁处倒圆；
- e) 容器的支座或支腿不得直接焊在壳体上，需设置垫板。

E.2.4 容器焊接接头应按下列要求选用：

- a) A 类、B 类焊接接头应采用双面焊或相当于双面焊的全焊透对接接头。
- b) 对于 B 类焊接接头，因结构限制不能采用双面焊时，允许采用焊后不拆除垫板的单面对接接头。

- c) C类焊接接头可采用下列形式：
 - 1) 平盖与圆筒的连接，应采用全截面焊透的对接接头或 T 型接头结构形式；
 - 2) 平焊法兰或法兰短节与圆筒的连接应采用全截面焊透的结构；若采用非全截面焊透的结构，仅适用于以下范围：
 - 设计温度 $t \geq -30^{\circ}\text{C}$ 或者设计压力 $p \leq 1.0\text{MPa}$ ；
 - 钢材的标准抗拉强度下限值 $R_m < 540\text{MPa}$ ；
 - 3) 球冠形封头、半顶角大于 30° 的锥壳、平盖、管板等部件与壳体的连接：均应采用全截面焊透结构。
- d) D类焊接接头可采用下列形式：
 - 1) 插入式接管、安放式接管、凸缘等与壳体的连接，带补强圈的接管与壳体连接焊缝均采用全截面焊透结构；
 - 2) 补强圈与壳体搭接的角焊缝不允许存在未焊透。
- e) E类焊接接头除结构要求外应避免间断焊和点焊。
- f) 壳体拼接不得采用十字焊缝。