

第 3 章 在内压或外压作用下壳体和封头的开孔补强 接管上外部静载荷作用下圆筒球形封头的强度计算

第 1 节 概述

本章的内容是 ГОСТ Р 52857.3—2007，是以极限平衡（极限载荷）理论为基础推导出的计算公式，与 ГОСТ 24755-89 比较，新增的内容是，除考虑压力载荷外，还考虑圆筒和球形封头的接管上作用的轴向力和弯矩载荷，除开孔补强计算外，须进一步计算许用轴向力和许用弯矩，并给出联合载荷下的静强度条件。仅有压力载荷时，圆筒锥壳的开孔率为 1.0，考虑接管上的轴向力和弯矩载荷作用时，圆筒开孔率为 0.8，开孔率最大。

重点关注下列计算问题：

1 本标准一一给出具有圆形横截面的接管与壳体在各种相贯型式下的开孔计算直径的计算公式（见汇总表 3.4-1）；

2 在壳体的计算壁厚（没有多余壁厚）的情况下，存在一个不要补强的开孔计算直径，并从所需补强面积中减去它所占据的面积；

3 完成静载荷下的开孔补强计算之后，若已知圆筒和球形封头的正交接管上作用的轴向力和弯矩载荷时，须计算许用轴向力和许用弯矩，并进行联合载荷下的静强度校核。

第 3 节的例题，给出 HDPE 产品出料罐的锥壳斜接管和椭圆形封头上中心部位的正交接管和非中心部位的轴向接管与正交接管的开孔补强计算的全过程。

GB150 不能解决的开孔补强型式，在这里可以找到相应的解决方法。

第 2 节 标准正文

ГОСТ Р 52857.3—2007

俄 罗 斯 联 邦 国 家 标 准

容器及设备

强度计算的规范和方法

在内压或外压作用下壳体和封头的开孔补强
接管上外部静载荷作用下圆筒球形封头的强度计算

实施日期：2008-04-01

1 应用范围

本标准规定了在化工、石油天然气加工和相邻的工业部门中使用的，受内压或外压的容器及设备的圆筒、锥壳、锥形过渡段和凸形封头开孔补强计算的规范和方法。

本标准中列入了在接管上的外部静载荷作用下圆筒和球形封头强度计算的方法。

本标准与 ГОСТ Р 52857.1, ГОСТ Р 52857.2 联合使用。

2 引用标准

本标准引用下列标准:

ГОСТ Р 52630—2006 钢制焊接容器及设备 通用技术条件

ГОСТ Р 52857.1—2007 容器及设备强度计算的规范和方法
一般要求

ГОСТ Р 52857.2—2007 容器及设备强度计算的规范和方法
圆筒、锥壳、凸形封头和平盖的计算

3 符号

A —被开孔切除的截面中所需补强的计算面积, 见图 A.1 (附录 A), mm^2 ;

A_1 —接管外侧部分参与补强的截面积, mm^2 ;

A_2 —补强圈的横截面积, mm^2 ;

A_3 —接管内侧部分参与补强的截面积, mm^2 ;

b —沿被补强元件外表面测量的两个相邻接管外表面之间的最小距离, 见图 A.2, 图 A.3 (附录 A), mm ;

c —圆筒、锥壳过渡段和封头的计算壁厚总附加量, mm ;

c_s, c'_s, c''_s —接管的计算壁厚总附加量, mm ;

$c_{s1}, c'_{s1}, c''_{s1}$ —接管的腐蚀裕量, mm ;

D —圆筒或凸形封头的内径, mm ;

D_K —需要补强的开孔中心处的锥壳(过渡段或封头)内径, 见图 A.4 中 δ (附录 A), mm ;

D_p, D'_p, D''_p —需要补强元件的计算内直径, mm ;

D_c —开孔处圆筒的平均直径, mm ;

D_2 —补强圈的外径, mm ;

d, d', d'' —接管内径, mm ;

d_0 —不要求额外补强的单个开孔最大计算直径, mm ;

d_{op} —不要补强的开孔计算直径, mm ;

d_1 —椭圆孔的长轴, mm ;

d_2 —椭圆孔的短轴, mm ;

d_p —开孔计算直径, mm ;

d_c —接管的平均直径, mm ;

e —接管外边缘至封头外边缘在底面上的投影距离, 见图 A.5 中 a, δ (附录 A), mm ;

F_z, F_x —作用到接管上的轴向力和横向力, N ;

K_1, K_2, K_3 —系数;

L_0 —在没有补强圈的条件下, 从接管外壁算起的补强区宽度, 见图 A.1 (附录 A), mm ;

L_K —从接管外表面至最邻近的承载结构元件的距离, 见图 A.4 (附录 A), mm ;

L_2 —对于两个开孔采用公用补强圈时, 补强区的计算宽度, mm ;

l —折边式嵌入环或焊接环的名义宽度, mm ;

- l_p —在接管或折边式嵌入环周围补强区的计算宽度, mm;
 $l_1, l_1', l_1'', l_3, l_3', l_3''$ —接管的名义长度, 见图 A.6, A.7 (附录 A), mm;
 H —椭圆形封头的内曲面高度, mm;
 $l_{1p}, l_{1p}', l_{1p}'', l_{3p}, l_{3p}', l_{3p}''$ —接管的计算长度, mm;
 l_2 —补强圈的名义宽度, mm;
 l_{2p} —补强圈的计算宽度, mm;
 M_x, M_y, M_z —作用到接管上的弯矩和扭矩, N·mm;
 p —容器及设备的计算压力, MPa;
 $[p]$ —容器及设备元件的许用压力, MPa;
 $[p]_n$ —塑性范围内的许用压力, MPa;
 $[p]_E$ —弹性范围内的许用压力, MPa;
 R —半球形封头和碟形封头球面部分的最大内半径, mm;
 R_n —采用联合补强时, 圆形补强圈的半径, 见图 A.8 (附录 A), mm;
 R' —直径为 d' 的开孔周围非对称补强圈的半径, 见图 A.8 (附录 A), mm;
 R'' —直径为 d'' 的开孔周围非对称补强圈的半径, 见图 A.8 (附录 A), mm;
 R_c —接管处圆筒或球形封头的平均半径, mm;
 r —壳体翻边或折边式嵌入环折边部分的外半径, 见图 A.9, A.10 中 a (附录 A), mm;
 s —圆筒、锥壳过渡段或封头的名义壁厚, mm;
 s_p —圆筒、锥壳过渡段或封头的计算壁厚, mm;
 s_1, s_1', s_1'' —壳体外侧接管的名义壁厚, mm;
 $s_{1p}, s_{1p}', s_{1p}''$ —壳体外侧接管的计算壁厚, mm;
 s_2, s_2', s_2'' —补强圈的名义壁厚, mm;
 s_3, s_3', s_3'' —壳体内侧接管的名义壁厚, mm;
 t —圆周上的开孔长度, 见图 A.11 中 θ, φ (附录 A), mm;
 V —强度降低系数;
 x —椭圆形封头上需要补强的开孔中心至椭圆形封头中心线的水平距离, mm;
 α —锥壳的半顶角, 度;
 β —两个相互有影响的开孔中心的连线与筒体母线的夹角, 见图 A.3 中 a (附录 A), 度;
 γ —圆筒、锥壳和凸形封头上斜接管中心线与开孔处壳体表面法线间的夹角, 见图 A.5 中 a , 图 A.11 中 θ (附录 A), 度;
 $\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_1', \chi_2', \chi_3', \chi_1'', \chi_2'', \chi_3''$ —许用应力的比值;
 ρ —修正系数;
 $[\sigma]$ —计算温度下圆筒、锥壳过渡段和封头材料的许用应力, MPa;
 $[\sigma]_1$ —计算温度下壳体外侧接管材料的许用应力, MPa;
 $[\sigma]_2$ —计算温度下补强圈材料的许用应力, MPa;
 $[\sigma]_3$ —计算温度下壳体内侧接管材料的许用应力, MPa;
 $[\tau]$ —许用剪应力, MPa;
 ϕ —圆筒、锥壳过渡段和封头的焊接接头的强度系数;

$\phi_1, \phi_1', \phi_1''$ —接管纵向焊接接头的强度系数;

ψ —通过接管纵焊缝和其中心线的平面与通过圆筒或锥壳中心线的纵向截面的平面间的夹角, 见图 A.12 (附录 A), 度;

ψ', ψ'' —通过接管纵焊缝和其中心线的平面与通过两个相邻接管开孔中心连线的平面形成的中心角, 见图 A.12 (附录 A), 度;

ω —椭圆孔长轴与通过筒体纵轴中心线的平面所成的角, 见图 A.13 (附录 A), 度。

4 一般规定

4.1 本标准给出的计算方法是以极限平衡 (极限载荷) 理论为基础。极限平衡理论要求操作条件下容器及设备材料是塑性材料。列入ГОСТ P 52630 中的钢号及其最低使用温度, 都能保证所需的塑性能。其他相应力学数据列入有色金属——铝、铜、钛、镍及其合金制容器及设备标准文件中。

当采用非塑性材料, 或按任何其他参数和操作条件, 均不满足本标准应用条件的那种情况下, 应按ГОСТ P 52857.9, 或专门的计算方法进行计算。

4.2 计算公式适用范围的限制条件见表 1。

表 1

参数名称	开孔补强计算公式的适用条件			
	圆筒	锥壳, 锥壳过渡段 或锥形封头	椭圆形封头	半球形封头 碟形封头
直径比*	$\frac{d_p - 2c_s}{D} \leq 1.0$	$\frac{d_p - 2c_s}{D_k} \leq 1.0$	$\frac{d_p - 2c_s}{D} \leq 0.6$	$\frac{d_p - 2c_s}{D} \leq 0.6$
壳体或封头壁厚 与其直径比	$\frac{s - c}{D} \leq 0.1$	$\frac{s - c}{D_k} \leq \frac{0.1}{\cos \alpha}$	$\frac{s - c}{D} \leq 0.1$	$\frac{s - c}{D} \leq 0.1$
* 接管上外部静载荷作用下, 壳体和封头强度计算时, 对于圆筒, $d/D \leq 0.8$; 对于半球形封头封头, $d/D \leq 0.6$ 。				

4.3 当在圆筒上设置具有圆形横截面的倾斜接管时, 开孔补强计算方法的适用条件是, γ (见图 A.11 中 δ) 不超过 45° , 而椭圆孔 d_1 轴和 d_2 轴 (见图 A.11 a) 之比满足下列条件:

$$\frac{d_1}{d_2} \leq 1 + 2 \frac{\sqrt{D_p(s-c)}}{d_2} \quad (1)$$

接管中心线位于圆筒横截平面上的切向接管 (见图 A.11 中 δ) 和斜接管 (见图 A.11 中 ϵ), 不受此限制。

对于椭圆形封头上非中心部位的接管 (见图 A.5), γ 不超过 60° 。

4.4 接管外边缘至无折边球形封头或碟形封头外表面边缘在封头底面上母线投影距离 $e \geq \max\{0.10(D+2s); 0.09(D+s)\}$ 。

小孔直径满足下列条件:

$$d_p \leq \max\{(s-c); 0.2\sqrt{D_p(s-c)}\} \quad (2)$$

允许在凸形封头的边缘区域开设, 不须专门计算或实验论证。

在圆筒和锥壳边缘区域开孔，必须考虑 5.1.5.4 的限制。

在椭圆形封头和半球形封头的边缘区域开孔，无限制条件。

4.5 在外部静载荷作用下的强度计算适用于垂直圆筒或球形封头表面的接管。

5 内压或外压下的开孔补强计算

5.1 基本的计算公式

5.1.1 计算直径

需要补强元件的计算直径，按下列各式计算：

对于圆筒

$$D_p = D \quad (3)$$

对于锥壳、过渡段和锥形封头

$$D_p = \frac{D_k}{\cos \alpha} \quad (4)$$

对于椭圆形封头

$$D_p = \frac{D^2}{2H} \sqrt{1 - 4 \frac{(D^2 - 4H^2)}{D^4} \cdot x^2} \quad (5)$$

对于 $H = 0.25D$ 的椭圆形封头

$$D_p = 2D \sqrt{1 - 3 \left(\frac{x}{D} \right)^2} \quad (6)$$

对于球形封头，以及碟形封头的球面部分

$$D_p = 2R \quad (7)$$

式中 R —对于碟形封头，按 ГОСТ P 52857.2 确定。

5.1.1.1 在圆筒、锥壳过渡段和封头壁上开孔，设置具有圆形横截面的接管，且接管中心线与开孔中心处的壳体表面法线重合 [见图 A.4，图 A.5b，图 A.6 (附录 A)]，或没有接管的圆形开孔，开孔计算直径均按下式计算：

$$d_p = d + 2c_s \quad (8)$$

接管中心线位于圆筒或锥壳横截面上 [见图 A.11b，c (附录 A)] 的切向接管、斜接管，开孔的计算直径按下式确定：

$$d_p = \max \{d; 0.5t\} + 2c_s \quad (9)$$

对于椭圆形封头上非中心部位的接管 [见图 A.5a (附录 A)]，开孔的计算直径按下式计算：

$$d_p = \frac{d + 2c_s}{\sqrt{1 - \left(\frac{2x}{D_p} \right)^2}} \quad (10)$$

5.1.1.2 设置具有圆形横截面的倾斜接管，当开椭圆孔的长轴与圆筒的母线成 ω 角 [见图 A.11a (附录 A)] 时，开孔的计算直径按下式计算：

$$d_p = (d + 2c_s)(1 + \tan^2 \gamma \cos^2 \omega) \quad (11)$$

对于接管 [见图 A.11b (附录 A)] 中心线位于圆筒和锥壳的纵向截面上的情况 ($\omega=0$)，

以及对半球形封头和碟形封头球面部分的所有开孔, 开孔的计算直径均按下式计算:

$$d_p = \frac{d + 2c_s}{\cos^2 \gamma} \quad (12)$$

对于垂直壳体表面布置的椭圆形开孔的计算直径按下式计算:

$$d_p = (d_2 + 2c_s) \left[\sin^2 \omega + \frac{(d_1 + 2c_s)(d_1 + d_2 + 4c_s)}{2(d_2 + 2c_s)^2} \cos^2 \omega \right] \quad (13)$$

对于凸形封头, $\omega = 0$ 。

对于设置具有圆形横截面的接管, 接管中心线与开孔中心处壳体表面的法线重合, 当采用壳体翻边或折边式嵌入环时, 开孔的计算直径按下式计算:

$$d_p = d + 1.5(r - s_p) + 2c_s \quad (14)$$

5.1.2 焊接接头的强度系数

若接管外表面远离壳体(封头)焊缝中心线的距离大于需要补强元件壁厚的 3 倍 [$3s$, 见图 A.4 (附录 A)], 则开孔补强计算时, 应取这条焊接接头的强度系数 $\varphi=1$ 。当壳体焊缝通过开孔, 或接管外表面离开壳体焊缝中心的距离小于 $3s$ 的例外情况下, 依焊缝形式和焊缝质量, 取 $\varphi \leq 1$ 。

若通过焊接管的纵焊缝和该管中心线的平面与通过圆筒或锥壳纵向中心线的截面平面形成的 ψ 角不小于 60° [见图 A.12 (附录 A)], 则取接管纵向焊接接头的强度系数 $\varphi_1=1$ 。在其他情况下, 应依接管焊缝形式和焊缝质量取 $\varphi_1 \leq 1$ 。

5.1.3 计算壁厚

5.1.3.1 需要补强元件的计算壁厚按 ГОСТ P 52857.2 确定。对于内压椭圆形封头, 其计算壁厚 s_p 按下式确定:

$$s_p = \frac{pD_p}{4\varphi[\sigma] - p} \quad (15)$$

式中系数 φ 按 5.1.2 确定。

5.1.3.2 无论受内压还是受外压的接管, 其计算壁厚均按下式计算:

$$s_{lp} = \frac{p(d + 2c_s)}{2[\sigma]_1 \varphi_1 - p} \quad (16)$$

式中系数 φ_1 按 5.1.2 确定。

对于椭圆形接管, 上式中取 $d = d_1$ 。

5.1.4 接管的计算长度

参与开孔补强计算的圆形接管在壳体内、外侧所考虑的计算长度 [见图 A.6 (附录 A)], 分别按下式计算:

$$l_{lp} = \min \left\{ l_1; 1.25\sqrt{(d + 2c_s)(s_1 - c_s)} \right\} \quad (17)$$

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0.5\sqrt{(d + 2c_s)(s_3 - c_s - c_{s1})} \right\} \quad (18)$$

对于椭圆形接管 [见图 A.13 (附录 A)], 在上式中, 取 $d = d_2$ 。

在内伸式接管的情况下 [见图 A.7 (附录 A)], 取 $s_3 = s_1$ 。

5.1.5 计算宽度

5.1.5.1 在圆筒、锥壳过渡段和封头上补强区域的宽度按下式计算：

$$L_0 = \sqrt{D_p(s-c)} \quad (19)$$

5.1.5.2 当存在折边式嵌入环或焊接环 [见图 A.10 (附录 A)] 时，接管周围的圆筒、过渡段和封头壳壁中补强区域的计算宽度，按下式确定：

$$l_p = \min\{l; L_0\} \quad (20)$$

当有壳体翻边结构 [见图 A.9 (附录 A)]，以及没有折边式嵌入环或焊接环的条件下，补强区域的计算宽度为：

$$l_p = L_0 \quad (21)$$

5.1.5.3 补强圈的计算宽度按下式确定：

$$l_{2p} = \min\{l_2; \sqrt{D_p(s_2 + s - c)}\} \quad (22)$$

5.1.5.4 对于离开其他结构元件的距离 $L_k < L_0$ 的开孔 [见图 A.4 (附录 A)]，计算宽度 l_p ， l_{2p} 确定如下：

对于圆筒与刚性环，平盖和管板的连接区域 [见图 A.4 中 a (附录 A)]，按式 (20)，或式 (21)，或式 (22) 计算。

对于锥壳与另一圆筒，圆筒与锥形封头或凸形封头 [见图 A.4 中 δ (附录 A)]，以及圆筒与容器法兰或鞍座的连接区域，按下式计算：

$$l_p = L_k; \quad l_{2p} = \min\{l_2; L_k\} \quad (23)$$

5.1.6 许用应力的比值

对于接管的外侧部分

$$\chi_1 = \min\left\{1.0; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]}\right\}$$

对于补强圈

$$\chi_2 = \min\left\{1.0; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]}\right\}$$

对于接管的内侧部分

$$\chi_3 = \min\left\{1.0; \frac{[\sigma]_3}{[\sigma]}\right\}$$

5.1.7 不要补强的开孔计算直径

不要补强的开孔计算直径按下式确定：

$$d_{0p} = 0.4\sqrt{D_p(s-c)} \quad (24)$$

作者注：在有多余壁厚的条件下，即在计算壁厚（没有圆整）条件下不要补强的开孔计算直径。

5.2 容器及设备的单个开孔

如果相邻两个接管 [见图 A.2 (附录 A)] 外表面之间的距离满足下列条件：

$$b \geq \sqrt{D_p'(s-c)} + \sqrt{D_p''(s-c)} \quad (25)$$

最近的两个开孔彼此不产生影响，则认为发生上述的开孔为单个开孔。

5.2.1 不要求额外补强的内压力容器单个开孔的计算直径

在容器存在多余壁厚的条件下, 不要求额外补强的单个开孔计算直径, 按下式计算:

$$d_0 = 2 \left(\frac{s-c}{s_p} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D_p(s-c)} \quad (26)$$

若单个开孔的计算直径满足下列条件:

$$d_p \leq d_0 \quad (27)$$

则后续的开孔补强计算不必进行。

如果不满足式 (27) 的条件, 则开孔补强计算按 5.2.2 和 5.2.3 进行。

5.2.2 单个开孔的补强条件

5.2.2.1 采用增加容器或接管壁厚, 或采用补强圈, 或用折边式嵌入环, 或采用在开孔处壳体翻边等补强结构时, 均应满足下列补强条件:

$$l_{1p}(s_1 - s_{1p} - c_s)\chi_1 + l_{2p}s_2\chi_2 + l_{3p}(s_3 - c_s - c_{s1})\chi_3 + l_p(s - s_p - c) \geq 0.5(d_p - d_{0p})s_p \quad (28)$$

5.2.2.2 采用任意形状的开孔补强 [见图 A.1 (附录 A)] 时, 补强条件的一般形式为:

$$A_1 + A_3 \geq A = 0.5(d_p - d_{0p})s_p \quad (29)$$

式中确定 A_1 和 A_3 面积, 已经扣除附加量 c 和 c_s 及接管的计算壁厚 s_{1p} 与壳体的计算壁厚 s_p 。

计算 A_1 和 A_3 所需计入的接管计算长度确定如下: l_{1p} 按式 (17) 计算; l_{3p} 按式 (18) 计算。

5.2.2.3 采用补强圈的开孔补强计算, 需要确定补强圈的面积时, 可按下式计算:

$$A_2 \geq \frac{1}{\chi_2} \{ 0.5(d_p - d_{0p})s_p - l_p(s - s_p - c) - l_{1p}(s_1 - s_{1p} - c_s)\chi_1 - l_{3p}(s_3 - c_s - c_{s1})\chi_3 \} \quad (30)$$

式中 $A_2 = l_{2p}s_2$ — 补强圈的面积。

若 $s_2 > 2s$, 则推荐将补强圈分设在容器及设备的外壁和内壁上, 外侧补强圈厚度取 $0.5s_2$, 内侧补强圈厚度取 $(0.5s_2 + c)$ 。

5.2.3 许用内压力

许用内压力按下式计算:

$$[p] = \frac{2K_1(s-c)\varphi[\sigma]}{D_p + (s-c)V} \quad (31)$$

式中 $K_1 = 1$ — 对于圆筒和锥壳; $K_1 = 2$ — 对于凸形封头。

$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p}(s_1 - c_s)\chi_1 + l_{2p}s_2\chi_2 + l_{3p}(s_3 - c_s - c_{s1})\chi_3}{l_p(s-c)}}{1 + 0.5 \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \frac{d + 2c_s}{D_p} \frac{\varphi}{\varphi_1} \frac{l_{1p}}{l_p}} \right\} \quad (32)$$

对椭圆形接管, 在上式中取 $d = d_1$ 。

5.3 内压力容器及设备相互有影响的开孔补强计算

如果不满足式 (25) 的条件, 则这些相互有影响的开孔 [见图 A.2 和 A.3 (附录 A)] 补强计算按下述方法完成:

首先对这些开孔中的每一个开孔均按 5.2 单独进行补强计算, 然后校核孔桥补强的足够程度。

为此, 应按下式计算孔桥的许用压力:

$$[p] = \frac{2K_1(s-c)\varphi[\sigma]}{0.5 \cdot (D'_p + D''_p) + (s-c)V} V \quad (33)$$

式中强度降低系数 V 按下列两种情况分别计算。

当两个相互有影响的开孔采用各自补强圈补强时

$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l'_{1p}(s'_1 - c'_s)\chi'_1 + l'_{2p}s'_2\chi'_2 + l'_{3p}(s'_3 - c'_s - c'_{s1})\chi'_3 + l''_{1p}(s''_1 - c''_s)\chi''_1 + l''_{2p}s''_2\chi''_2 + l''_{3p}(s''_3 - c''_s - c''_{s1})\chi''_3}{b \cdot (s-c)}}{K_3 \left(0.8 + \frac{d'_p + d''_p}{2b} \right) + K_1 \left(\frac{d' + 2c'_s}{D'_p} \frac{\varphi}{\phi'_1} \frac{l'_{1p}}{b} + \frac{d'' + 2c''_s}{D''_p} \frac{\varphi}{\phi''_1} \frac{l''_{1p}}{b} \right)} \right\} \quad (34)$$

当两个相互有影响的开孔采用公用补强圈联合补强 [见图 A.8 (附录 A)] 时

$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l'_{1p}(s'_1 - c'_s)\chi'_1 + l'_{3p}(s'_3 - c'_s - c'_{s1})\chi'_3 + L_2 s_2 \chi_2 + l''_{1p}(s''_1 - c''_s)\chi''_1 + l''_{3p}(s''_3 - c''_s - c''_{s1})\chi''_3}{b \cdot (s-c)}}{K_3 \left(0.8 + \frac{d'_p + d''_p}{2b} \right) + K_1 \left(\frac{d' + 2c'_s}{D'_p} \frac{\varphi}{\phi'_1} \frac{l'_{1p}}{b} + \frac{d'' + 2c''_s}{D''_p} \frac{\varphi}{\phi''_1} \frac{l''_{1p}}{b} \right)} \right\} \quad (35)$$

式中 $L_2 = \min \{b; l'_{2p} + l''_{2p}\}$ 。

对于椭圆形接管, 在式 (34) 和式 (35) 中取 $d' = d'_1$ 和 $d'' = d''_1$ 。

如果两个相邻接管的外表面均远离圆筒、锥壳和封头上焊缝中心线的距离大于需要补强元件壁厚的 3 倍, 且焊缝不通过孔桥, 则在式 (33)、式 (34) 和式 (35) 中取该条焊接接头的强度系数 $\varphi=1$ 。在其他情况下, 依焊缝形式和质量取 $\varphi \leq 1$ 。

若两个相邻接管各自的纵焊缝分别和其开孔中心在接管圆周上的连线与通过两个开孔中心的连线形成的中心角 (图 A.12) ψ' 和 ψ'' 不小于 60° , 则两个接管的纵焊缝强度系数 $\phi'_1 = 1$ 和 $\phi''_1 = 1$ 。在其他情况下, 依焊缝形式和质量取 $\phi'_1 \leq 1$ 和 $\phi''_1 \leq 1$ 。

对于圆筒和锥壳, 系数 K_3 按下式计算:

$$K_3 = \frac{1 + \cos^2 \beta}{2} \quad (36)$$

角 β 按图 A.3 (附录 A) 确定。

对于凸形封头, $K_3 = 1$ 。

排列靠近的两个相邻开孔需要采用其他方法补强时, 对于纵向截面补强 [见图 A.2 (附录 A)] 所需面积的一半应布置在这两个开孔之间。

对于排孔 [见图 A.14 (附录 A)], 强度降低系数 V 按下式确定:

$$V = \min \left\{ 1; \frac{2b_1 + 4l_{1p} \left(\frac{(s_1 - c_s)}{(s-c)} \right) \chi_1}{(1 + \cos^2 \beta_1)(0.8b_1 + d + 2c_s) + 4l_{1p} \frac{(d + 2c_s)}{D_p}} \right\};$$

$$\left. \frac{2b_2 + 4l_{1p} \left(\frac{s_1 - c_s}{s - c} \right) \chi_1}{(1 + \cos^2 \beta_2)(0.8b_2 + d + 2c_s) + 4l_{1p} \frac{(d + 2c_s)}{D_p}} \right\} \quad (37)$$

如果存在相互有影响的开孔, 且其中之一按图 A.10 (附录 A) 配置, 则按 5.3 计算不适用于此种情况。

5.4 外压容器及设备上的开孔补强计算

许用外压力按下式确定:

$$[p] = \frac{[p]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_n}{[p]_E} \right)^2}} \quad (38)$$

式中 $[p]_n$ — 塑性范围内的许用外压力, 按式 (31) 确定, 与带有单个开孔的容器及设备在 $\varphi=1.0$ 时的许用内压力相同。

$[p]_E$ — 弹性范围内的许用外压力, 按 ГОСТ P 52857.2 对相应的无开孔壳体和封头确定。

当存在相互有影响的开孔时, 首先单独对每一个开孔和每一孔桥按 5.3 计算许用内压力 $[p]$; 然后取所得值的较小值作为 $[p]_n$ 。

对于带有加强圈的壳体, 仅对相邻两个加强圈之间带有开孔的每一段进行单独计算。

6 接管上的外部静载荷作用下圆筒和球形封头的强度计算 (见图 A.15, 附录 A)

6.1 圆筒

6.1.1 计算公式的适用条件

公式适用于下列条件:

1) $0.001 \leq s/D_c \leq 0.1$;

2) $\lambda_c = \frac{d_c}{\sqrt{D_c s_3}} \leq 10$;

式中 s_3 — 圆筒和补强圈的当量壁厚。

3) 接管边缘至其他任何结构元件的距离, 可能有应力集中, 应不小于 $\sqrt{R_c s_3}$;

4) 在不小于 $\sqrt{d_c s_1}$ 的长度上, 接管各义壁厚 s_1 不变。

6.1.2 接管周围圆筒当量壁厚的确定

接管周围圆筒当量壁厚按下式计算:

1) 若没有补强圈, 则

$$s_3 = s;$$

2) 如果设置补强圈, 则

当 $l_2 \geq \sqrt{R_c(s + s_2)}$ 时, $s_3 = s + s_2 \chi_2$;

当 $l_2 < \sqrt{R_c(s + s_2)}$ 时, $s_3 = s + \min \left\{ s_2 \frac{l_2}{\sqrt{D_c(s + s_2)}}, s_2 \right\} \chi_2$

6.1.3 许用载荷的确定

许用压力、许用轴向力和许用弯矩, 须各自单独确定。为了评定嵌入接管的节点强度,

在联合载荷作用下,应采用极限状态曲线。

6.1.3.1 单个开孔的许用压力,按 5.2.3 确定。

6.1.3.2 没有补强圈时,作用到接管上的许用轴向力按下式确定:

$$[F_z] = [\sigma](s-c)^2 \max\{C_1; 1.81\} \quad (39)$$

C_1 按图 A.16 (附录 A) 确定,或按下式计算:

$$C_1 = a_0 + a_1\lambda_c + a_2\lambda_c^2 + a_3\lambda_c^3 + a_4\lambda_c^4 \quad (40)$$

计算参数 λ_c 时,取 $s_g = (s-c)$ 。

系数 $a_0 - a_4$ 按表 2 查取。

表 2 确定 C_1 的各系数值

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
0.60072181	0.95196257	0.0051957881	-0.001406381	0

6.1.3.3 存在补强圈 ($s_1/s_g \geq 0.5$) 时,作用到接管上的许用轴向力 $[F_z]$ 按下式确定:

$$[F_z] = \min\{[F_{z1}]; [F_{z2}]\} \quad (41)$$

式中 $[F_{z1}]$ —接管与圆筒相贯处由强度条件确定的许用轴向力,按下式计算:

$$[F_{z1}] = [\sigma](s + \lambda_2 s_2 - c)^2 \max\{C_1; 1.81\} \quad (42)$$

计算参数 λ_c 时, s_g 按 6.1.2 确定。

$[F_{z2}]$ —补强圈外边缘处由强度条件确定的许用轴向力,在 $s_1/s_g \geq 0.5$ 条件下按下式计算:

$$[F_{z2}] = [\sigma](s-c)^2 \max\{C_1; 1.81\} \quad (43)$$

计算参数 λ_c 时,取 $d_c = D_2$ 和 $s_g = (s-c)$ 。

C_1 按图 A.16 (附录 A) 确定,或按下式计算:

$$C_1 = a_0 + a_1\lambda_c + a_2\lambda_c^2 + a_3\lambda_c^3 + a_4\lambda_c^4 \quad (44)$$

系数 $a_0 - a_4$ 按表 2 确定。

6.1.3.4 位于垂直圆筒中心线的平面内,作用到接管上的许用弯矩 $[M_x]$,没有补强圈时,按下式计算:

$$[M_x] = [\sigma](s-c)^2 \frac{d_c}{4} \max\{C_2; 4.9\} \quad (45)$$

C_2 按图 A.17 (附录 A) 确定,或按下式计算:

$$C_2 = a_0 + a_1\lambda_c + a_2\lambda_c^2 + a_3\lambda_c^3 + a_4\lambda_c^4 \quad (46)$$

计算参数 λ_c 时,取 $s_g = (s-c)$ 。

系数 $a_0 - a_4$ 按表 3 查取。

表 3 确定 C_2 的各系数值

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
4.526315	0.064021889	0.15887638	-0.021419298	0.0010350407

6.1.3.5 存在补强圈 ($s_1/s_g \geq 0.5$) 时,许用弯矩 $[M_x]$,按下式计算:

$$[M_x] = \min\{[M_{x1}]; [M_{x2}]\} \quad (47)$$

接管与圆筒相贯处由强度条件确定的许用弯矩 $[M_{x1}]$ ，按下式计算：

$$[M_{x1}] = [\sigma](s + \chi_2 s_2 - c)^2 \frac{d_c}{4} \max\{C_2; 4.9\} \quad (48)$$

计算参数 λ_c 时， s_3 按 6.1.2 确定。

补强圈外边缘处由强度条件确定的许用弯矩 $[M_{x2}]$ ，在 $s_1/s_3 \geq 0.5$ 条件下按下式计算：

$$[M_{x2}] = [\sigma](s - c)^2 \frac{d_c}{4} \max\{C_2; 4.9\} \quad (49)$$

计算参数 λ_c 时，取 $d_c = D_2$ 和 $s_3 = (s - c)$ 。

C_2 按图 A.17（附录 A）确定，或按下式计算：

$$C_2 = a_0 + a_1 \lambda_c + a_2 \lambda_c^2 + a_3 \lambda_c^3 + a_4 \lambda_c^4 \quad (50)$$

系数 $a_0 - a_4$ 按表 3 查取。

6.1.3.6 位于通过圆筒中心线的纵向截面内，作用到接管上的许用弯矩 $[M_y]$ ，没有补强圈时，按下式计算：

$$[M_y] = [\sigma](s - c)^2 \frac{d_c}{4} \max\{C_3; 4.9\} \quad (51)$$

C_3 依 λ_c 按图 A.18（附录 A）确定，或按下式计算：

$$C_3 = a_0 + a_1 \lambda_c + a_2 \lambda_c^2 + a_3 \lambda_c^3 + a_4 \lambda_c^4 \quad (52)$$

计算参数 λ_c 时，取 $s_3 = (s - c)$ 。

系数 $a_0 - a_4$ 按表 4 查取。

表 4 确定 C_3 的各系数值

s_1/s_3	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
≤ 0.2	4.8844124	-0.071389214	0.79991259	-0.024155709	0
≥ 0.5	6.3178075	-3.6618209	4.5145391	-0.83094839	0.050698494

如果 s_1/s_3 位于 0.2 和 0.5 之间，则系数 C_3 在图 A.18（附录 A）上按线性内插法确定。

6.1.3.7 存在补强圈（ $s_1/s_3 \geq 0.5$ ）时，许用弯矩 $[M_y]$ ，按下式计算：

$$[M_y] = \min\{[M_{y1}]; [M_{y2}]\} \quad (53)$$

接管与圆筒相贯处由强度条件确定的许用弯矩 $[M_{y1}]$ ，按下式计算：

$$[M_{y1}] = [\sigma](s + \chi_2 s_2 - c)^2 \frac{d_c}{4} \max\{C_3; 4.9\} \quad (54)$$

C_3 按图 A.18（附录 A）确定，或按下式计算：

$$C_3 = a_0 + a_1 \lambda_c + a_2 \lambda_c^2 + a_3 \lambda_c^3 + a_4 \lambda_c^4 \quad (55)$$

计算参数 λ_c 时，取 $s_3 = s + \chi_2 s_2 - c$ 。

系数 $a_0 - a_4$ 按表 4 查取。

补强圈外边缘处由强度条件确定的许用弯矩 $[M_{y2}]$ ，按下式计算：

$$[M_{y2}] = [\sigma](s - c)^2 \frac{d_c}{4} \max\{C_3; 4.9\} \quad (56)$$

C_3 按图 A.18（附录 A）确定，或按下式计算：

$$C_3 = a_0 + a_1 \lambda_c + a_2 \lambda_c^2 + a_3 \lambda_c^3 + a_4 \lambda_c^4 \quad (57)$$

计算参数 λ_c 时, 取 $d_c = D_2$ 和 $s_3 = (s - c)$ 。

系数 $a_0 - a_4$ 按表 4 查取。

如果 s_1/s_3 位于 0.2 和 0.5 之间, 则系数 C_3 在图 A.18 (附录 A) 上按线性内插法确定。

6.1.4 载荷的联合作用

对每一载荷, 均要单独地完成下列强度条件的初步校核:

$$\Phi_p = \left| \frac{p}{[p]} \right| \leq 1 \quad (58)$$

$$\Phi_z = \left| \frac{F_z}{[F_z]} \right| \leq 1 \quad (59)$$

$$\Phi_b = \sqrt{\left(\frac{M_x}{[M_x]} \right)^2 + \left(\frac{M_y}{[M_y]} \right)^2} \leq 1 \quad (60)$$

此外, 在载荷联合作用下, 应满足下列强度条件:

$$\sqrt{\left[\max \left\{ \left| \frac{\Phi_p}{C_4} + \Phi_z \right|, \left| \Phi_z \right|, \left| \frac{\Phi_p}{C_4} - 0.2 \Phi_z \right| \right\} \right]^2 + \Phi_b^2} \leq 1 \quad (61)$$

如果确定的载荷考虑了温度变形的限制, 则取 C_4 等于 1.1, 在所有其他情况下, $C_4 = 1$ 。

确定的 Φ_z 考虑了轴向载荷的方向, 如果轴向力的方向由器壁指向外侧, 则 Φ_z 应取 “+” 号。在相反方向时, 则式 (61) 中 Φ_z 应取 “-” 号。

6.1.5 接管强度校核

接管中最大纵向拉应力应满足下列条件:

$$\frac{p(d + s_1)}{4(s_1 - c_s)} + \frac{4\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi(d + s_1)^2(s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi(d + s_1)(s_1 - c_s)} \leq [\sigma]_1 \quad (62)$$

如果轴向载荷产生压应力, 应取 F_z 等于零。

除强度计算外, 还应按下式进行接管的稳定计算:

$$\frac{p}{[p]} + \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} \leq 1 \quad (63)$$

式中 $[M]$, $[F]$ —分别为许用弯矩和许用纵向压缩力 (作者注: 接管方向);

$[p]$ —由稳定条件确定的许用外压力。

$[M]$, $[F]$ 和 $[p]$, 均对接管圆筒按 ГОСТ P 52857.2 确定。

如果 F_z 为纵向拉伸力, 而 p 为内压力, 则公式 (63) 中的 F_z , p 应取等于零。

6.2 球形封头^①

6.2.1 计算公式的适用条件

公式适用于下列条件:

① 如果接管外边缘至椭圆形封头中心按弦长测量的距离不大于封头外直径的 0.4 倍, 本计算可用于椭圆形封头, 平均半径 R_c 取其顶点的平均半径。

$$1) 0.001 \leq s/R_c \leq 0.1;$$

如果球形封头的壁厚不超过圆筒壁厚的一半, 则薄壁的下限 $s/R_c < 0.001$, 应适用。

$$2) \lambda_s = \frac{d_c}{\sqrt{R_c s_3}} \leq 10;$$

式中 s_3 —球形封头和补强圈的当量壁厚。

3) 接管边缘至其他任何结构元件的距离, 可能有应力集中, 应不小于 $\sqrt{R_c s_3}$;

4) 在不小于 $\sqrt{d_c s_1}$ 的接管长度上, 应保持接管名义壁厚 s_1 不变。

6.2.2 接管周围球壳当量壁厚的确定

接管周围球壳当量壁厚按下式计算:

1) 若没有补强圈, 则

$$s_3 = s$$

2) 如果设置补强圈, 则

$$\text{当 } l_2 \geq \sqrt{R_c(s+s_2)} \text{ 时, } s_3 = s + s_2 \chi_2$$

$$\text{当 } l_2 < \sqrt{R_c(s+s_2)} \text{ 时, } s_3 = s + \min[s_2 \frac{l_2}{\sqrt{D_c(s+s_2)}}; s_2] \chi_2$$

6.2.3 许用载荷的确定

许用压力、许用轴向力和许用弯矩, 须各自单独确定。为了评定嵌入接管的节点强度, 在联合载荷作用下, 应采用线性累积损伤。

6.2.3.1 辅助参数

$$\lambda_s = \frac{d_c}{\sqrt{R_c s_3}}; \quad K_4 = \min \left\{ \frac{2[\sigma]_1(s_1 - c_s)}{[\sigma]s_3} \sqrt{\frac{s_1 - c_s}{d_c}}; 1 \right\}$$

6.2.3.2 单个开孔的许用压力, 按 5.2.3 确定。

6.2.3.3 没有补强圈时, 作用到接管上的许用轴向力按图 A.19 (附录 A) 或按下式确定:

$$[F_z] = [\sigma](s - c)^2 (1.82 + 2.4\sqrt{1 + K_4} \lambda_s + 0.91K_4 \lambda_s^2) \quad (64)$$

计算 λ_s 和 K_4 时, 应取 $s_3 = s - c$ 。

6.2.3.4 存在补强圈时, 作用到接管上的许用轴向力按下式确定:

$$[F_z] = \min\{[F_{z1}]; [F_{z2}]\} \quad (65)$$

式中 $[F_{z1}]$ —接管与球壳相贯处由强度条件确定的许用轴向力, 按图 A.19 (附录 A) 或按下式确定:

$$[F_{z1}] = [\sigma](s + \chi_2 s_2 - c)^2 (1.82 + 2.4\sqrt{1 + K_4} \lambda_s + 0.91K_4 \lambda_s^2) \quad (66)$$

计算 λ_s 和 K_4 时, 按 6.2.2 确定, 取 $s_3 = s + \chi_2 s_2 - c$ 。

$[F_{z2}]$ —补强圈外边缘处由强度条件确定的许用轴向力, 按下式计算:

$$[F_{z2}] = [\sigma](s - c)^2 (1.82 + 2.4\sqrt{1 + K_4} \lambda_s + 0.91K_4 \lambda_s^2) \quad (67)$$

计算 λ_s 时, 取 $s_3 = s - c$ 和 $d_c = D_2$, 而参数 $K_4 = 1$ 。

6.2.3.5 没有补强圈时, 许用弯矩 $[M_b]$ 按图 A.20 (附录 A) 或按下式确定:

$$[M_b] = [\sigma](s - c)^2 \frac{d_c}{4} (4.9 + 2.0\sqrt{1 + K_4} \lambda_s + 0.91K_4 \lambda_s^2) \quad (68)$$

式中计算 λ_s 和 K_4 时, 取 $s_3 = s - c$ 。

6.2.3.6 存在补强圈时, 许用弯矩 $[M_b]$ 按下式确定:

$$[M_b] = \min \{ [M_{b1}]; [M_{b2}] \} \quad (69)$$

式中 $[M_{b1}]$ —接管与球形封头相贯处由强度条件确定的许用弯矩, 按图 A.20 (附录 A) 或按下式确定:

$$[M_{b1}] = [\sigma](s + \chi_2 s_2 - c)^2 \frac{d_c}{4} (4.9 + 2.0\sqrt{1 + K_4} \lambda_s + 0.91K_4 \lambda_s^2) \quad (70)$$

计算 λ_s 和 K_4 时, s_3 按 6.2.2 确定。

$[M_{b2}]$ —补强圈外边缘处由强度条件确定的许用弯矩, 按图 A.20 (附录 A) 或按下式确定:

$$[M_{b2}] = [\sigma](s - c)^2 \frac{d_c}{4} (4.9 + 2.0\sqrt{1 + K_4} \lambda_s + 0.91K_4 \lambda_s^2) \quad (71)$$

式中计算 λ_s 时, 取 $s_3 = s - c$ 和 $d_c = D_2$, 而参数 $K_4 = 1$ 。

6.2.4 载荷的联合作用

对每一载荷, 均要单独地完成下列强度条件的初步校核:

$$\Phi_p = \frac{p}{[p]} \leq 1 \quad (72)$$

$$\Phi_z = \frac{F_z}{[F_z]} \leq 1 \quad (73)$$

$$\Phi_b = \frac{M_b}{[M_b]} \leq 1 \quad (74)$$

此外, 在载荷联合作用下, 应满足下列强度条件:

$$\max \{ |\Phi_p + \Phi_z|; |\Phi_z|; |\Phi_p - 0.2\Phi_z| \} + |\Phi_b| \leq 1.0 \quad (75)$$

6.2.5 接管的强度校核

接管中最大的纵向拉应力, 应满足下列条件:

$$\frac{p(d + s_1)}{4(s_1 - c_s)} + \frac{4M_b}{\pi(d + s_1)^2(s_1 - c_s)} + \frac{F_z}{\pi(d + s_1)(s_1 - c_s)} \leq [\sigma]_1 \quad (76)$$

若 F_z 产生压应力, 则应取 F_z 等于零。

当 $p = 0$ 时, 应按下式进行接管的稳定校核:

$$\frac{M_b}{[M]} + \frac{|F_z|}{[F]} \leq 1 \quad (77)$$

如果 F_z 为纵向拉伸力, 则公式 (77) 中 F_z 应取等于零。

$[M]$ 和 $[F]$ 分别为许用弯矩和纵向压缩力, 按 ГОСТ P 52857.2 由稳定条件确定。

附录 A

(必须遵守的)

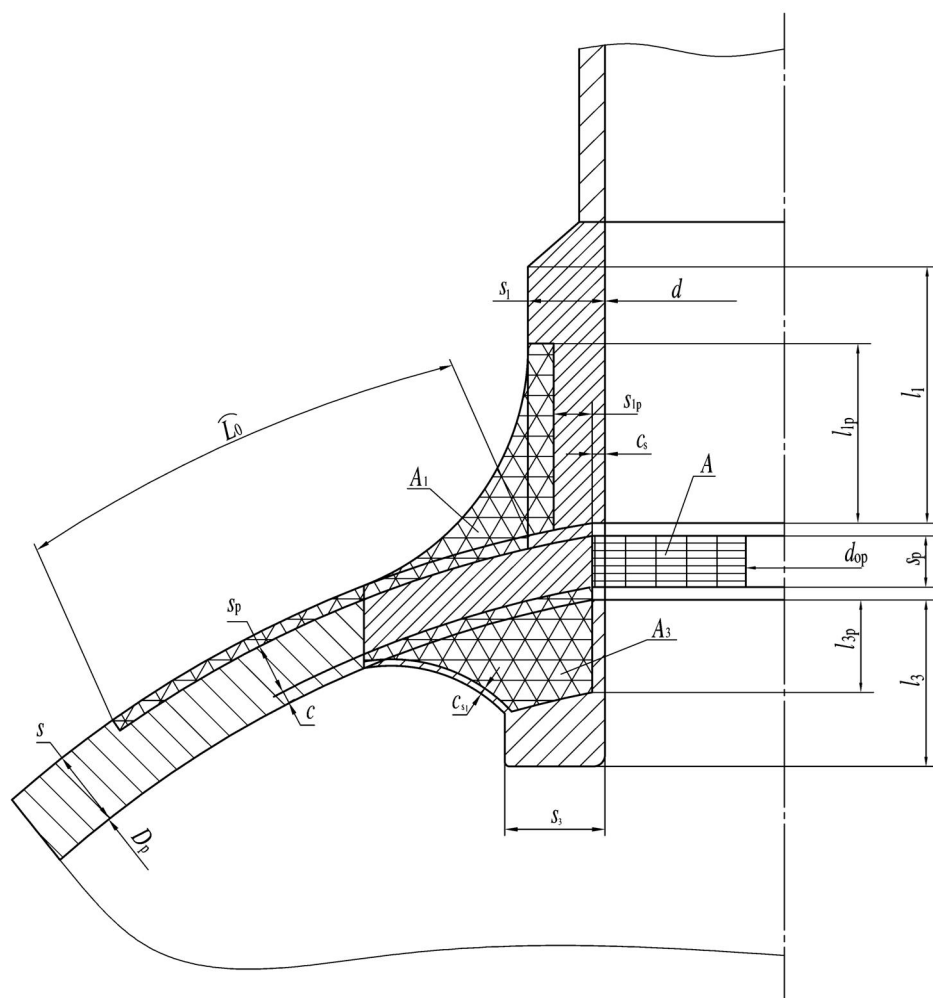


图 A.1 由任意形状的接管切出壳体截面的补强

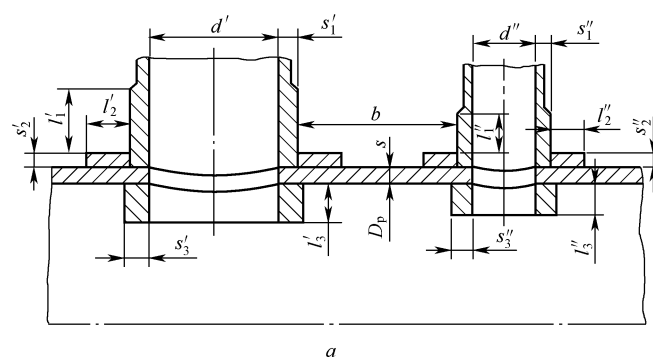


图 A.2 相互有影响的开孔补强

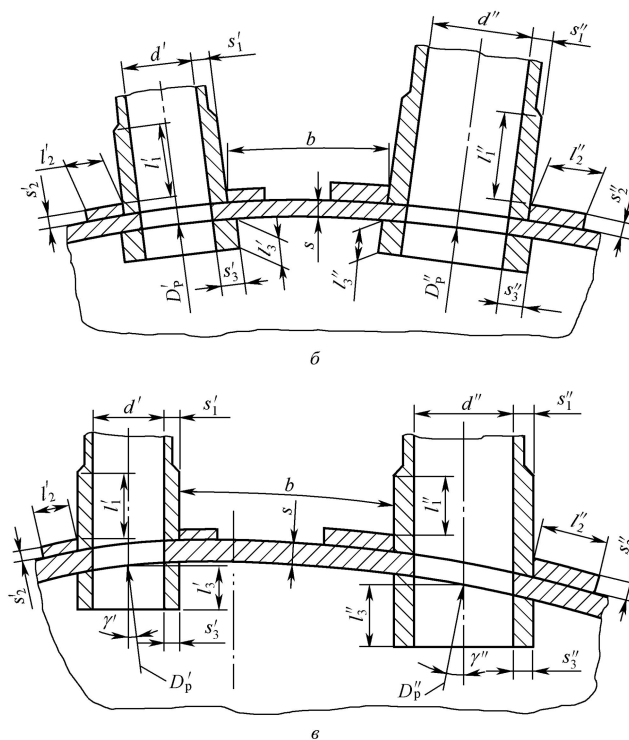


图 A.2 相互有影响的开孔补强 (续图)

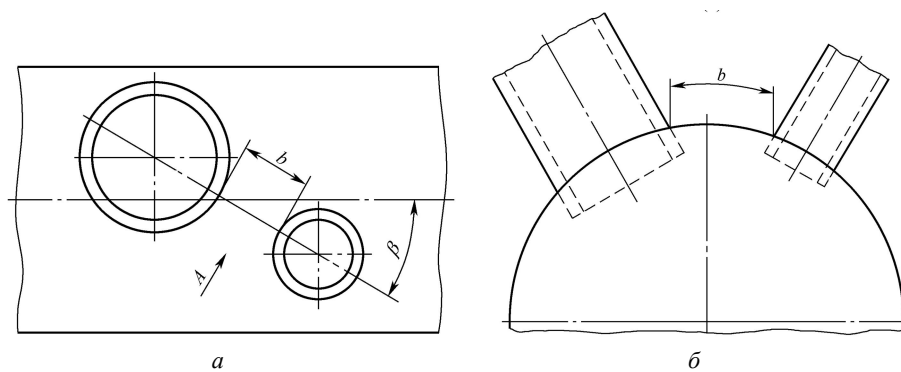


图 A.3 相互有影响的两个开孔布置的一般情况

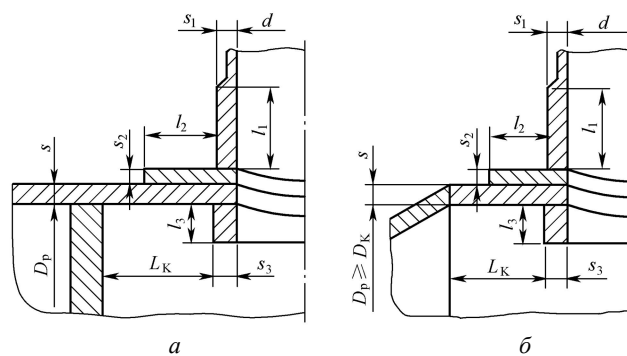


图 A.4 靠近结构元件布置的开孔补强 (非内伸式接管)

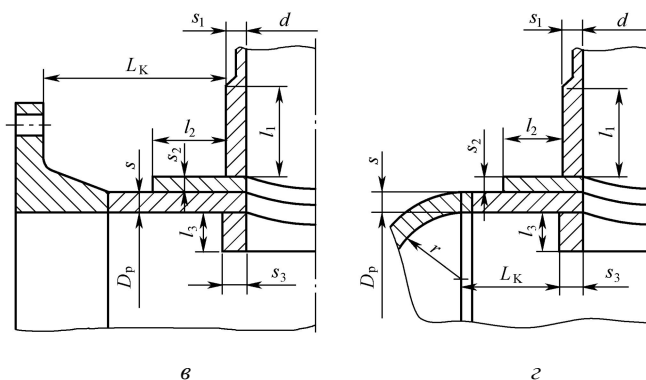


图 A.4 靠近结构元件布置的开孔补强（非内伸式接管）（续图）

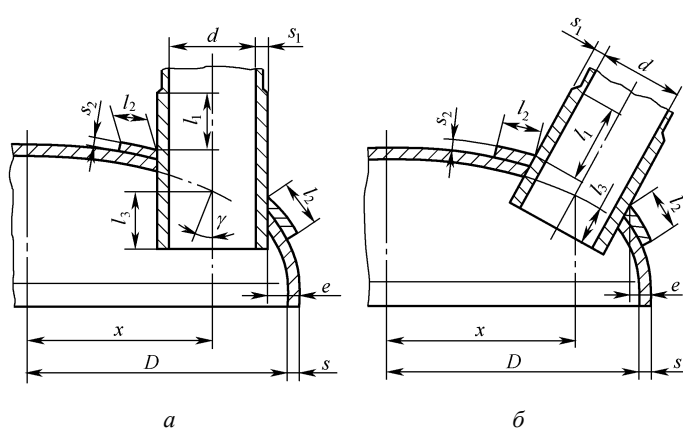


图 A.5 凸形封头上非中心部位的接管

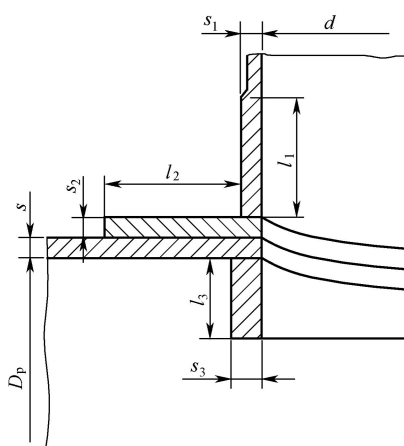


图 A.6 接管与补强圈、壳体连接的基本计算简图

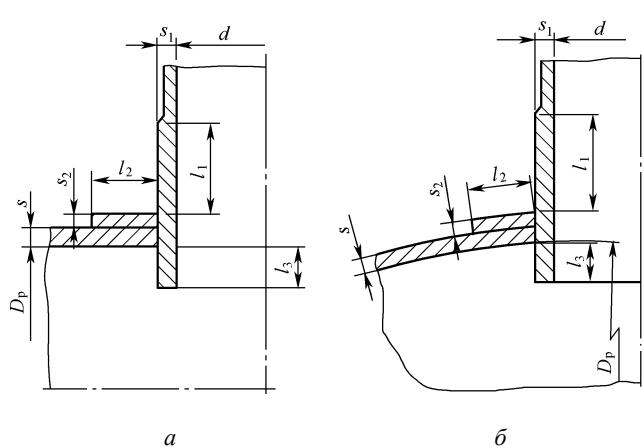
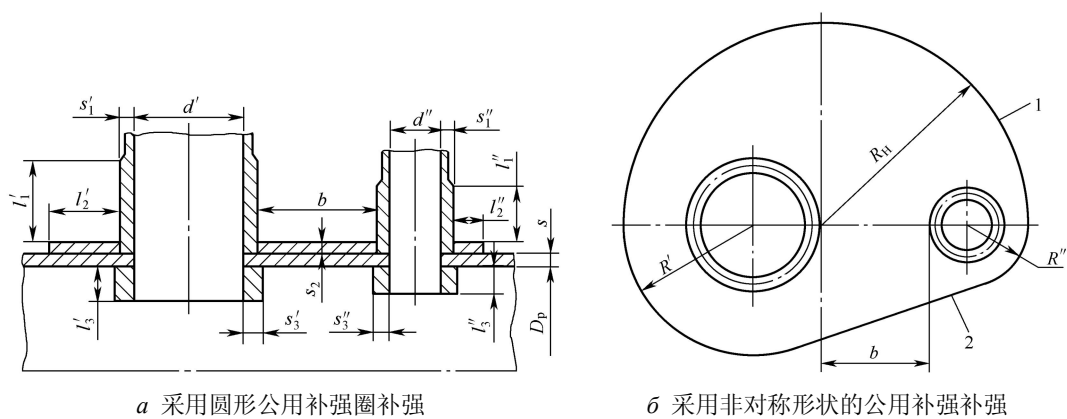


图 A.7 有内伸式接管的开孔补强



a 采用圆形公用补强圈补强

b 采用非对称形状的公用补强圈补强

1—采用圆形公用补强圈补强，2—采用非对称形状的公用补强圈补强

图 A.8 相互影响的两个开孔联合补强结构

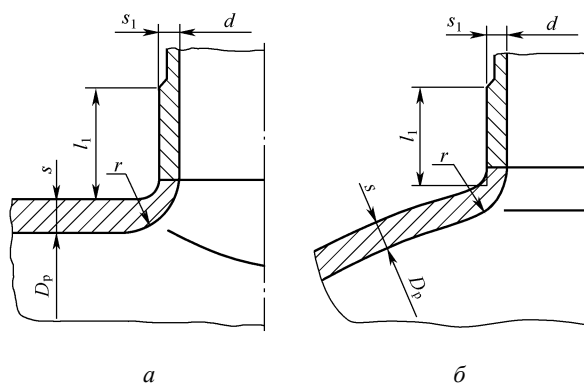


图 A.9 开孔处壳体翻边补强结构

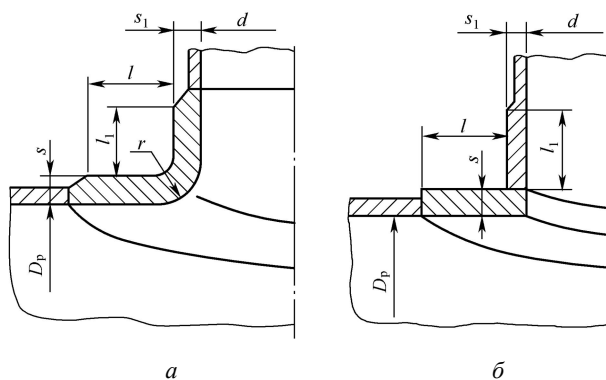


图 A.10 折边式嵌入环或焊接环的开孔补强

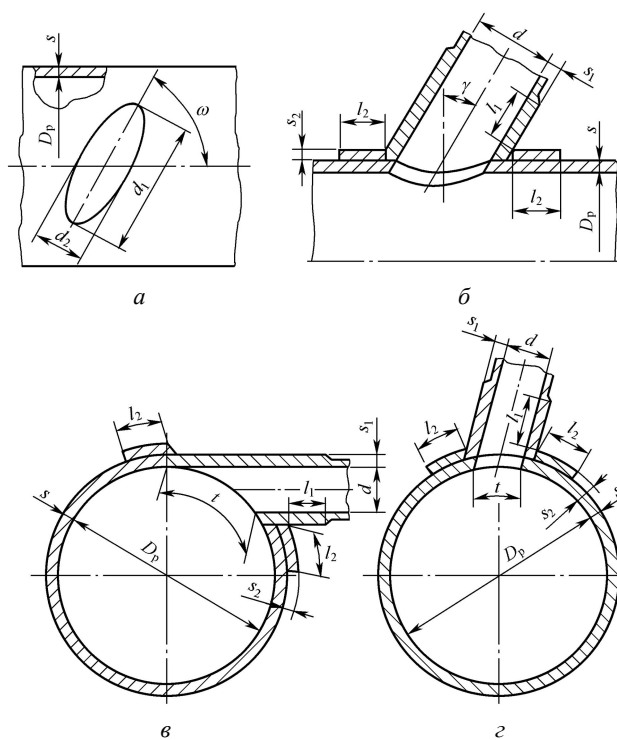


图 A.11 圆筒上的斜接管

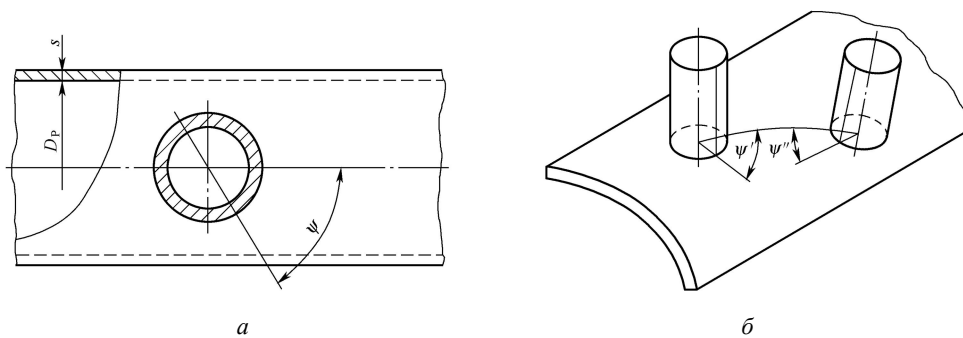


图 A.12 考虑接管纵焊缝的影响

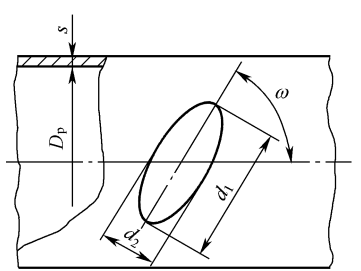


图 A.13 垂直圆筒表面椭圆形接管的开孔

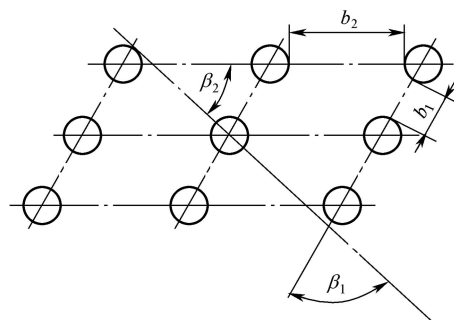
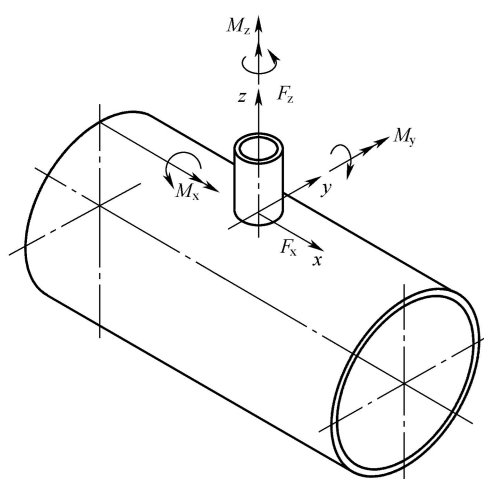
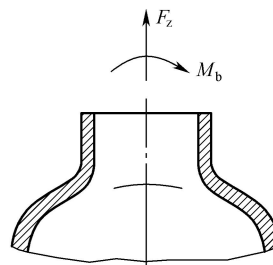


图 A.14 排孔



a 接管上的外部静载荷作用下的圆筒



b 接管上的外部静载荷作用下的球形封头

图 A.15

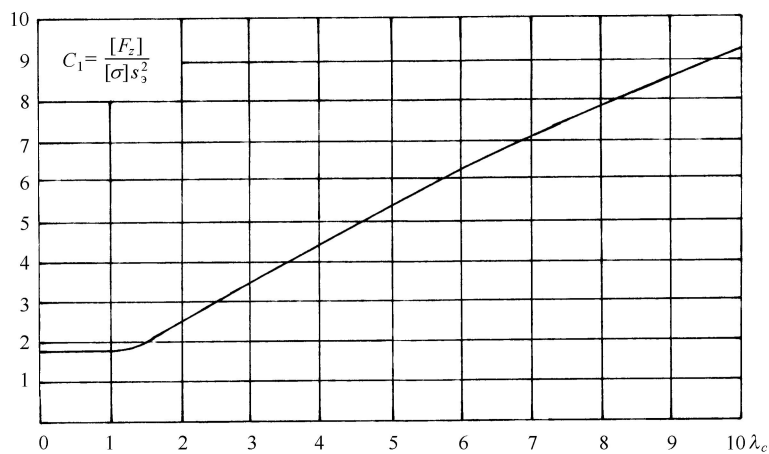


图 A.16 C_1 计算图

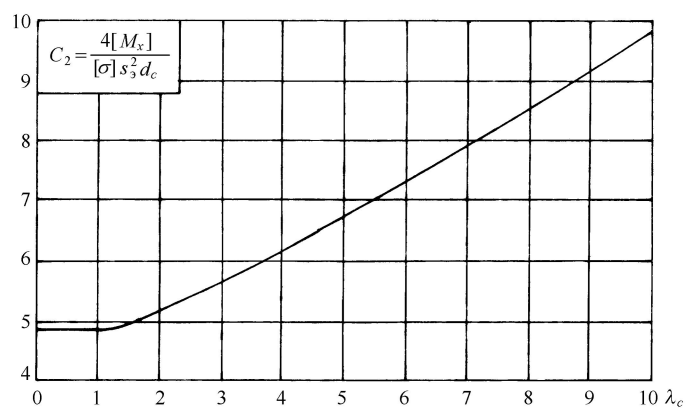


图 A.17 C_2 计算图

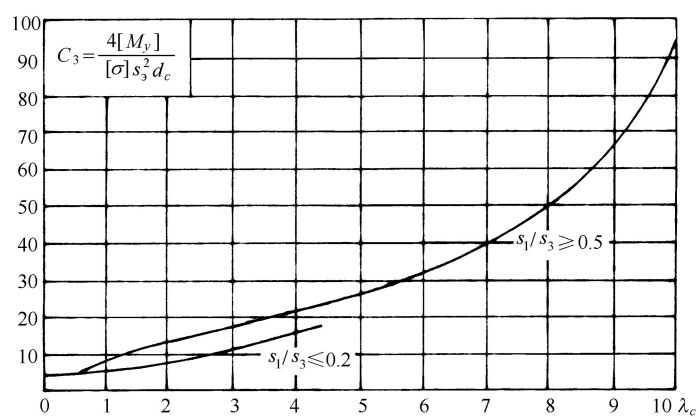


图 A.18 C_3 计算图

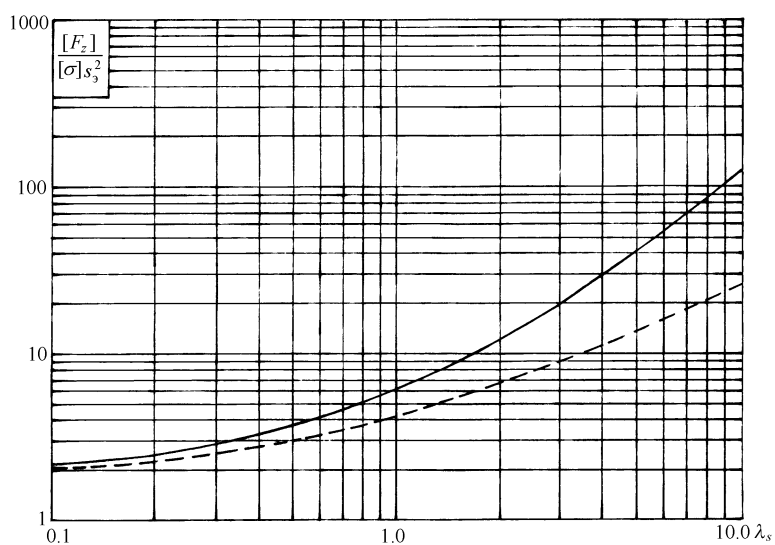


图 A.19 $[F_z]$ 计算图

($K_4=1$ 时, 用上面的曲线; $K_4<1.0$ 时, 用下面的曲线—最小值)

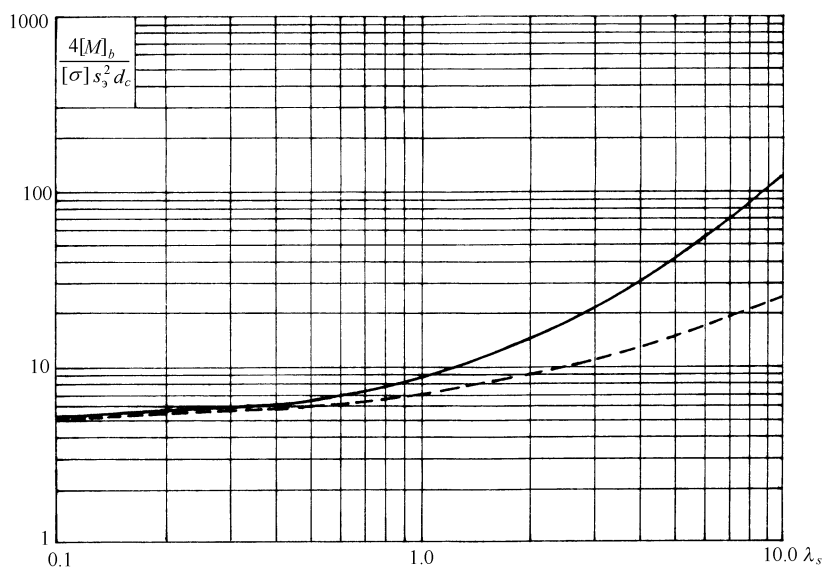


图 A.20 $[M_b]$ 计算图

($K_4=1$ 时, 用上面的曲线; $K_4<1.0$ 时, 用下面的曲线—最小值)

关键词: 容器及设备 强度计算的规范和方法 开孔补强 许用载荷 接管

第 3 节 计算例题

【例 3.3-1】HDPE 产品出料罐, 计算压力 2.365MPa, 设计温度 150℃, 圆筒内径 900mm, 材质 16MnR, 其许用应力 $[\sigma]=163\text{MPa}$, 接管 16Mn (GB6479), 其许用应力 $[\sigma]=163\text{MPa}$, 计算锥壳上的斜接管 $\phi 219\times 12$ 的开孔补强, 锥壳半顶角为 30°, 附加量 2mm, 结构见图 3.3-1。

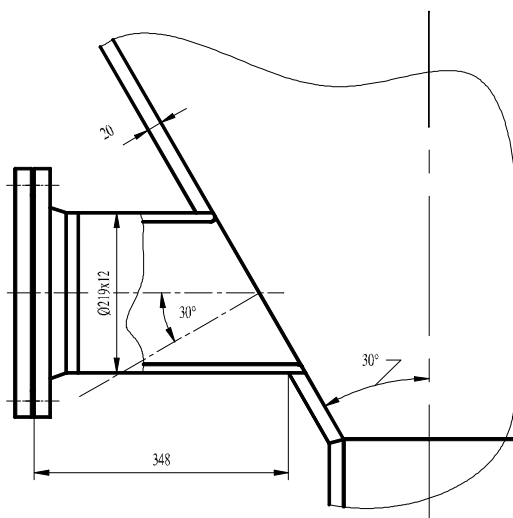


图 3.3-1 锥壳上的斜接管

【解】因为 GB150 没有给出在锥壳上开斜接管的开孔计算直径的计算方法, 且本例的开

孔直径超出了 GB150 8.2.3 关于开孔最大直径 $d \leq 1/3 D_i$ 的规定, 属于超标大开孔。因此, 本例的开孔补强计算按本标准进行, 为了给疲劳分析留有裕量, 接管按 $\phi 219 \times 10$, 锥壳壁厚 20 mm 按 $s_k = 16$ mm 考虑。

1 开孔中心处的锥壳计算直径, 按式 (4) 计算:

$$D_p = \frac{D_k}{\cos \alpha} = \frac{464}{\cos 30^\circ} = 535.8 \text{ mm}$$

式中开孔中心处的锥壳内径 $D_k = 464$ mm (注: 由 AutoCAD 标注得到)。

2 开孔的计算直径, 按式 (12) 计算:

$$d_p = \frac{d + 2c_s}{\cos^2 \gamma} = \frac{199 + 2 \cdot 2}{\cos^2 30^\circ} = 270.6 \text{ mm}$$

3 需要补强的锥壳元件的计算壁厚

见【例 2.3-2】, 内压光滑锥壳的壁厚为:

$$s_{kp} = \frac{p D_k}{2 \varphi_p [\sigma] - p} \cdot \frac{1}{\cos \alpha_1} = \frac{2.365 \cdot 821.83}{2 \cdot 1.0 \cdot 163 - 2.365} \cdot \frac{1}{\cos 30^\circ} = 6.93 \text{ mm}$$

$$s_k \geq s_{kp} + c = 6.93 + 2 = 8.93 \rightarrow 10 \text{ mm}$$

4 接管的计算壁厚, 按式 (16) 计算:

$$s_{lp} = \frac{p(d + 2c_s)}{2[\sigma]_l \varphi_l - p} = \frac{2.365 \cdot (199 + 2 \cdot 2)}{2 \cdot 163 \cdot 1.0 - 2.365} = 1.48 \text{ mm}$$

5 接管的外侧计算长度, 按式 (17) 计算:

$$l_p = \min \{l_1; 1.25 \sqrt{(d + 2c_s)(s_1 - c_s)}\} = \min \{l_1; 1.25 \cdot \sqrt{(199 + 4) \cdot (10 - 2)}\} \\ = 50.4 \text{ mm}$$

6 补强区域的计算宽度, 按式 (19) 计算:

$$l_p = L_0 = \sqrt{D_p(s - c)} = \sqrt{535.8 \cdot (16 - 2)} = 86.6 \text{ mm}$$

7 不要补强的开孔计算直径 (在计算壁厚条件下), 按式 (24) 计算:

$$d_{0p} = 0.4 \sqrt{D_p(s - c)} = 0.4 \cdot \sqrt{535.8 \cdot 6.93} = 24.3 \text{ mm}$$

8 不要求额外补强的单个开孔的计算直径 (锥壳存在多余壁厚的条件下), 按式 (26) 计算:

$$d_0 = 2 \left(\frac{s - c}{s_p} - 0.8 \right) \sqrt{D_p(s - c)} = 2 \cdot \left(\frac{16 - 2}{6.93} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{535.8(16 - 2)} = 211.3$$

9 单个开孔的计算直径须按式 (27) 进行校核:

$$d_p = 270.6 > d_0 = 211.3 \text{ mm}$$

所以要进行后继的补强计算。

10 单个开孔的补强条件, 按式 (28) 计算:

$$l_{lp}(s_1 - s_{lp} - c_s) \chi_1 + l_p(s - s_p - c) \geq 0.5(d_p - d_{0p})s_p \\ 50.4 \cdot (10 - 1.48 - 2) \cdot 1.0 + 86.6 \cdot (16 - 6.93 - 2) \geq 0.5 \cdot (270.6 - 24.3) \cdot 6.93$$

则 $940.9 \text{ mm}^2 \geq 853.4 \text{ mm}^2$

结论: 满足补强条件。

11 许用内压力, 按式 (31) 计算:

$$[p] = \frac{2K_1(s-c)\phi[\sigma]}{D_p + (s-c)V} V = \frac{2 \cdot 1 \cdot (16-2) \cdot 1.0 \cdot 163}{535.8 + (16-2) \cdot 0.5} \cdot 0.5 = 4.2 > 2.365 \text{ MPa}$$

式中强度降低系数, 按式 (32) 计算:

$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p}(s_1 - c_s)\chi_1 + l_{2p}s_2\chi_2 + l_{3p}(s_3 - c_s - c_{s1})\chi_3}{l_p(s-c)}}{1 + 0.5 \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \frac{d + 2c_s}{D_p} \frac{\phi}{\phi_1} \frac{l_{1p}}{l_p}} \right\}$$

$$= \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{50.4 \cdot (10-2) \cdot 1.0}{86.6 \cdot (16-2)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{270.6 - 24.3}{86.6} + 1 \cdot \frac{199 + 2 \cdot 2}{535.8} \cdot \frac{1.0}{1.0} \cdot \frac{50.4}{86.6}} \right\} = 0.5$$

许用内压力校核通过。

【例 3.3-2】HDPE 产品出料罐, 设计条件同【例 3.3-1】, 计算 DN900×20 的椭圆形封头上中心接管 $\phi 219 \times 12$, 非中心部位的 $\phi 168 \times 12$ 、两个 $\phi 83 \times 11$ 和 $\phi 35 \times 6$ 共 5 个开孔补强, 附加量 2mm, 结构见图 3.3-2。

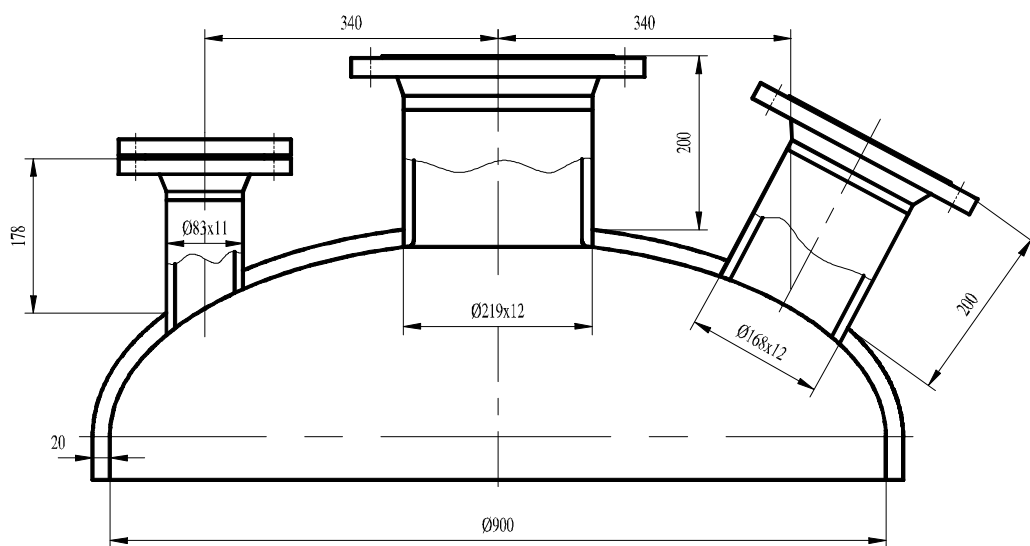


图 3.3-2 椭圆形封头上的接管

【解】

1 对于 $H = 0.25D$ 的椭圆形封头计算直径, 按式 (6) 计算:

$$D_p = 2D \sqrt{1 - 3 \left(\frac{x}{D} \right)^2}$$

(1) 对于 $x = 0$ 的中心部位接管

$$D_p = 2D \sqrt{1 - 3 \left(\frac{x}{D} \right)^2} = 2D \sqrt{1 - 3 \left(\frac{0}{D} \right)^2} = 2D = 2 \cdot 900 = 1800 \text{ mm}$$

(2) 对于 $x=340$ 的非中心部位接管

$$D_p = 2D \sqrt{1 - 3 \left(\frac{x}{D} \right)^2} = 2 \cdot 900 \sqrt{1 - 3 \left(\frac{340}{900} \right)^2} = 1361.2 \text{ mm}$$

2 内压椭圆形封头的计算壁厚, 按式 (15) 计算

(1) 对于 $x=0$ 的中心部位

$$s_p = \frac{pD_p}{4[\sigma] - p} = \frac{2.365 \cdot 1800}{4 \cdot 1.0 \cdot 163 - 2.365} = 6.55 \text{ mm}$$

(2) 对于 $x=340$ 的非中心部位

$$s_p = \frac{pD_p}{4[\sigma] - p} = \frac{2.365 \cdot 1361.2}{4 \cdot 1.0 \cdot 163 - 2.365} = 4.95 \text{ mm}$$

作者注: 由于中心部位和非中心部位计算直径不同, 所以计算壁厚也不同。不能取同一值。

3 无论内压还是外压的接管计算壁厚, 按式 (16) 计算

(1) $\phi 219 \times 12$, 按 $\phi 219 \times 6$ 考虑

$$s_{lp} = \frac{p(d + 2c_s)}{2[\sigma]_l \phi_1 - p} = \frac{2.365(207 + 4)}{2 \cdot 163 \cdot 1.0 - 2.365} = 1.54 \text{ mm}$$

(2) $\phi 168 \times 12$, 按 $\phi 168 \times 6$ 考虑

$$s_{lp} = \frac{p(d + 2c_s)}{2[\sigma]_l \phi_1 - p} = \frac{2.365(156 + 4)}{2 \cdot 163 \cdot 1.0 - 2.365} = 1.17 \text{ mm}$$

(3) $\phi 83 \times 11$, 按 $\phi 83 \times 4$ 考虑

$$s_{lp} = \frac{p(d + 2c_s)}{2[\sigma]_l \phi_1 - p} = \frac{2.365(75 + 4)}{2 \cdot 163 \cdot 1.0 - 2.365} = 0.577$$

(4) $\phi 35 \times 6$, 按 $\phi 35 \times 4$ 考虑

$$s_{lp} = \frac{p(d + 2c_s)}{2[\sigma]_l \phi_1 - p} = \frac{2.365(27 + 4)}{2 \cdot 163 \cdot 1.0 - 2.365} = 0.23 \text{ mm}$$

4 开孔计算直径

(1) 对于接管中心线与开孔中心处的曲面法线重合的有 $\phi 219 \times 12$ 和 $\phi 168 \times 12$ 的两个正交接管, 开孔计算直径按式 (8) 计算。

1) 中心部位的接管 $\phi 219 \times 12$, 按 $\phi 219 \times 6$ 考虑

$$d_p = d + 2c_s = 207 + 4 = 211 \text{ mm}$$

2) 非中心部位的接管 $\phi 168 \times 12$, 按 $\phi 168 \times 6$ 考虑

$$d_p = d + 2c_s = 168 - (2 \cdot 6) + 2 \cdot 2 = 160 \text{ mm}$$

(2) 对于椭圆形封头上非中心部位的接管, 开孔的计算直径按式 (10) 计算。

1) $\phi 83 \times 11$ 的接管, 按 $\phi 83 \times 4$ 考虑

$$d_p = \frac{d + 2c_s}{\sqrt{1 - \left(\frac{2x}{D_p} \right)^2}} = \frac{75 + 4}{\sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot 340}{1361.2} \right)^2}} = 91.2 \text{ mm}$$

2) $\phi 35 \times 6$ 的接管, 按 $\phi 35 \times 4$ 考虑

$$d_p = \frac{d + 2c_s}{\sqrt{1 - \left(\frac{2x}{D_p}\right)^2}} = \frac{27 + 4}{\sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot 340}{1361.2}\right)^2}} = 35.78 \text{ mm}$$

5 接管外侧的计算长度, 按式 (17) 计算:

(1) $\phi 219 \times 12$, 按 $\phi 219 \times 6$ 考虑

$$l_p = \min \left\{ l_1; 1.25 \sqrt{(d + 2c_s)(s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ l_1; 1.25 \sqrt{211 \cdot 4} \} = 36.3 \text{ mm}$$

(2) $\phi 168 \times 12$, 按 $\phi 168 \times 6$ 考虑

$$l_p = \min \left\{ l_1; 1.25 \sqrt{(d + 2c_s)(s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ l_1; 1.25 \sqrt{160 \cdot 4} \} = 31.6 \text{ mm}$$

(3) $\phi 83 \times 11$, 按 $\phi 83 \times 4$ 考虑

$$l_p = \min \left\{ l_1; 1.25 \sqrt{(d + 2c_s)(s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ l_1; 1.25 \sqrt{79 \cdot 2} \} = 15.7 \text{ mm}$$

(4) $\phi 35 \times 6$, 按 $\phi 35 \times 4$ 考虑

$$l_p = \min \left\{ l_1; 1.25 \sqrt{(d + 2c_s)(s_1 - c_s)} \right\} = \min \{ l_1; 1.25 \sqrt{31 \cdot 2} \} = 9.8 \text{ mm}$$

6 椭圆形封头的名义厚度取 $s=12 \text{ mm}$

7 椭圆形封头补强区的计算宽度

(1) 对于 $x=0$ 的中心部位

$$l_p = \sqrt{D_p(s - c)} = \sqrt{1800 \cdot (12 - 2)} = 134 \text{ mm}$$

(2) 对于 $x=340$ 的非中心部位

$$l_p = \sqrt{D_p(s - c)} = \sqrt{1361.2 \cdot (12 - 2)} = 116.6 \text{ mm}$$

8 不要补强的开孔计算直径 (封头没有多余壁厚, 即计算壁厚的条件下), 按式 (24) 计算

(1) $\phi 219 \times 12$, 按 $\phi 219 \times 6$ 考虑

$$d_{0p} = 0.4 \sqrt{D_p(s - c)} = 0.4 \sqrt{1800 \cdot 6.55} = 43.43 \text{ mm}$$

(2) $\phi 168 \times 12$, 按 $\phi 168 \times 6$ 考虑

$$d_{0p} = 0.4 \sqrt{D_p(s - c)} = 0.4 \sqrt{1361.2 \cdot 4.95} = 32.8 \text{ mm}$$

(3) $\phi 83 \times 11$, 按 $\phi 83 \times 4$ 考虑

$$d_{0p} = 0.4 \sqrt{D_p(s - c)} = 0.4 \sqrt{1361.2 \cdot 4.95} = 32.8 \text{ mm}$$

(4) $\phi 35 \times 6$, 按 $\phi 35 \times 4$ 考虑

$$d_{0p} = 0.4 \sqrt{D_p(s - c)} = 0.4 \sqrt{1361.2 \cdot 4.95} = 32.8 \text{ mm}$$

9 相邻两个接管 [见图 A.2 (附录 A)] 外表面之间的距离, 按式 (25) 计算

$$b \geq \sqrt{D'_p(s - c)} + \sqrt{D''_p(s - c)} = \sqrt{1800 \cdot 10} + \sqrt{1361.2 \cdot 10} = 250.8 \text{ mm}$$

$$b = 340 \geq 250.8 \text{ mm}$$

满足单个开孔条件。

10 在容器存在多余壁厚的条件下, 不要求额外补强的单个开孔计算直径, 按式 (26) 计算

(1) $\phi 219 \times 12$, 按 $\phi 219 \times 6$ 考虑

$$d_0 = 2 \left(\frac{s-c}{s_p} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D_p(s-c)} = 2 \left(\frac{12-2}{6.55} - 0.8 \right) \sqrt{1800 \cdot 10} = 195 \text{ mm}$$

(2) $\phi 168 \times 12$, 按 $\phi 168 \times 6$ 考虑

$$d_0 = 2 \left(\frac{s-c}{s_p} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D_p(s-c)} = 2 \left(\frac{12-2}{4.95} - 0.8 \right) \sqrt{1361.2 \cdot 10} = 285 \text{ mm}$$

(3) $\phi 83 \times 11$, 按 $\phi 83 \times 4$ 考虑

$$d_0 = 2 \left(\frac{s-c}{s_p} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D_p(s-c)} = 2 \left(\frac{12-2}{4.95} - 0.8 \right) \sqrt{1361.2 \cdot 10} = 285 \text{ mm}$$

(4) $\phi 35 \times 6$, 按 $\phi 35 \times 4$ 考虑

$$d_0 = 2 \left(\frac{s-c}{s_p} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D_p(s-c)} = 2 \left(\frac{12-2}{4.95} - 0.8 \right) \sqrt{1361.2 \cdot 10} = 285 \text{ mm}$$

11 单个开孔的计算直径须满足式 (27) 的条件

$$d_p \leq d_0$$

(1) $\phi 219 \times 12$, 按 $\phi 219 \times 6$ 考虑

$$d_p = 211 > d_0 = 195 \text{ mm}$$

不满足规定条件, 补强的后续计算须要进行。

(2) $\phi 168 \times 12$, 按 $\phi 168 \times 6$ 考虑

$$d_p = 160 \leq d_0 = 285 \text{ mm}$$

满足规定条件, 补强的后续计算不必进行。

(3) $\phi 83 \times 11$, 按 $\phi 83 \times 4$ 考虑

$$d_p = 91.2 \leq d_0 = 285 \text{ mm}$$

满足规定条件, 补强的后续计算不必进行。

(4) $\phi 35 \times 6$, 按 $\phi 35 \times 4$ 考虑

$$d_p = 35.78 \leq d_0 = 285 \text{ mm}$$

满足规定条件, 补强的后续计算不必进行。

12 $\phi 219 \times 12$, 按 $\phi 219 \times 6$ 考虑的单个开孔的补强条件, 按式 (28) 计算

$$\begin{aligned} l_{1p}(s_1 - s_{1p} - c_s)\chi_1 + l_p(s - s_p - c) &\geq 0.5(d_p - d_{0p})s_p \\ 36.3 \cdot (6 - 1.54 - 2) \cdot 1.0 + 134 \cdot (12 - 6.55 - 2) &\geq 0.5 \cdot (211 - 43.43) \cdot 6.55 \\ 551.59 \text{ mm}^2 &\geq 548.79 \text{ mm}^2, \text{ 满足补强条件。} \end{aligned}$$

13 许用内压力, 按式 (31) 校核

$$[p] = \frac{2K_1(s-c)\phi[\sigma]V}{D_p + (s-c)V} = \frac{2 \cdot 2(12-2) \cdot 1.0 \cdot 163}{1800 + (12-2)0.656} 0.656 = 2.367 > 2.365 \text{ MPa}$$

式中强度降低系数, 按式 (32) 计算:

$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_p(s_1 - c_s)\chi_1 + l_{2p}s_2\chi_2 + l_{3p}(s_3 - c_s - c_{s1})\chi_3}{l_p(s - c)}}{1 + 0.5 \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \frac{d + 2c_s}{D_p} \frac{\varphi}{\varphi_1} \frac{l_p}{l_p}} \right\}$$

$$= \min \left\{ 1; \frac{1 + 36.3(6 - 2)1.0/134(12 - 2)}{1 + 0.5 \cdot \frac{211 - 43.43}{134} + 2 \frac{211 + 4}{1800} \frac{1.0}{1.0} \frac{36.3}{134}} \right\} = 0.656$$

许用内压力校核通过。

14 计算结果见表 3.3-1

表 3.3-1

计算项目	φ219×6	φ168×6	φ83×4	φ35×4
椭圆形封头计算直径 D_p , mm	1800	1361.2	1361.2	1361.2
内压椭圆形封头计算壁厚, mm	6.55	4.95	4.95	4.95
接管计算壁厚, mm	1.54	1.17	0.577	0.23
开孔计算直径, mm	211	160	91.2	35.78
接管的计算长度, mm	36.3	31.6	15.7	9.8
椭圆形封头的名义厚度, mm	12			
椭圆形封头补强区计算宽度, mm	134	116.6		
不要补强的开孔计算直径, mm	43.43	32.8		
不要求额外补强计算直径, mm	195	285		
$d_p \leq d_0$	211 > 195	160 < 285	91.2 < 285	35.78 < 285
开孔的补强条件, mm ²	551.59 > 548.79	后续补强计算不必进行		
校核许用内压力, MPa	$[p] > p$	—	—	—

第 4 节 小结

1 开孔率

按表 1 的限制条件, 圆筒或锥壳上的开孔率实现 1.0。除考虑压力载荷外, 圆筒和球形封头的正交接管上还作用有轴向力和弯矩条件下, 圆筒开孔率达 0.8, 这两项技术在世界各国的压力容器开孔补强规范中开孔率达到了最大值。

2 开孔接管型式

本标准给出接管开孔补强型式见附录 A (必须遵守的)。开孔计算直径见汇总表 3.4-1。

相互有影响的且与圆筒成正交的, 或非正交的带单独补强圈的接管见图 A.2。

相互有影响的, 带公用补强圈联合补强的正交接管见图 A.8。

排孔见图 A.14。

3 计算直径

在内压或外压的开孔补强计算中将涉及到 4 种计算直径, 注意其计算方法。

表 3.4-1

开孔接管型式	开孔的计算直径 d_p
圆筒、锥壳和凸形封头上的正交接管（开孔中心线与开孔中心处的壳体表面法线重合）图 A.4, 图 A.5b, 图 A.6, 没有接管的圆形开孔	$d_p = d + 2c_s$
接管中心线位于圆筒或锥壳横截面上的切向接管, 斜接管, 图 A.11b, c	$d_p = \max\{d; 0.5t\} + 2c_s$
椭圆形封头上的非中心部位（或边缘区域）的轴向接管, 图 A.5a	$d_p = (d + 2c_s) / \sqrt{1 - (2x/D_p)^2}$
圆筒上存在一具有圆形横截面的斜接管, 椭圆形开孔的长轴与圆筒母线成 ω 角, 图 A.11a	$d_p = (d + 2c_s)(1 + \tan^2 \gamma \cos^2 \omega)$
对于接管 [见图 A.11b (附录 A)] 中心线位于圆筒和锥壳的纵向截面上的情况 ($\omega=0$), 以及对半球形封头和碟形封头球面部分的所有开孔	$d_p = (d + 2c_s) / \cos^2 \gamma$
采用壳体翻边或折边式嵌入环结构, 具有圆形横截面的正交接管, 图 A.9, 图 A.10	$d_p = d + 1.5(r - s_p) + 2c_s$
垂直壳体表面的椭圆形接管的开孔 (图 A.13) 对于凸形封头, $\omega=0$	$d_p = (d_2 + 2c_s)[\sin^2 \omega + (d_1 + 2c_s) \times \frac{(d_1 + d_2 + 4c_s)}{2(d_2 + 2c_s)^2} \cos^2 \omega]$

(1) 需要补强元件的计算直径见表 3.4-2。

表 3.4-2

需要补强元件的计算直径	计算公式
圆筒	$D_p = D$
锥壳、过渡段和锥形封头	$D_p = D_k / \cos \alpha$
对于 $H=0.25D$ 的椭圆形封头	$D_p = 2D\sqrt{1 - 3(x/D)^2}$
球形封头或碟形封头球面部分	$D_p = 2R$

作者注：表中 x —需要补强的开孔中心至椭圆形封头中心线的水平距离。

(2) 开孔的计算直径见表 3.4-1。

(3) 壳体不存在多余壁厚（即计算壁厚）的情况下，不要补强的开孔计算直径按式 (24) 计算：

$$d_{0p} = 0.4\sqrt{D_p(s-c)}$$

所需补强面积要扣除不要补强的开孔计算直径 d_{0p} 所占有的面积，可降低补强金属的消耗量，对此，GB150 没有考虑。

(4) 在壳体存在多余壁厚（即名义壁厚）的条件下，不要求额外补强的单个开孔计算直径按 (26) 计算：

$$d_0 = 2\left(\frac{s-c}{s_p} - 0.8\right) \cdot \sqrt{D_p(s-c)}$$

如果单个开孔计算直径 $d_p < d_0$ 时, 则后续的补强计算不必进行。

4 对于单个开孔, 必须满足式 (28) 的补强条件。

5 对于相互有影响的开孔补强计算, 首先对其中每一开孔均按 5.2 单个开孔补强条件进行计算, 然后再按式 (33) 校核孔桥的许用内压力并通过。

6 对于受外压的单个开孔补强计算, 需要补强元件的壁厚按 ГОСТ P 52857.2 计算, 接管壁厚按式 (16) 计算, 按式 (28) 完成补强条件计算后, 按式 (38) 计算许用外压力, 其中由塑性范围内的强度条件确定的许用外压力 $[p]_n$ 按式 (31) 计算, 而由弹性范围内稳定条件确定的许用外压力 $[p]_E$ 按 ГОСТ P 52857.2 对无孔的壳体或封头的相应公式计算, 如对圆筒, 按式 (9) 计算, 对椭圆形封头和半球形封头, 按式 (48) 计算。

7 对于相互有影响的受外压的开孔补强计算, 前几步同上, 按式 (38) 计算许用外压力时, 其中由塑性范围内的强度条件确定的许用外压力 $[p]_n$ 取式 (31) 和式 (33) 两值中的较小值。

8 根据 В.И.Рачков 强度专家提示: 当存在排孔的情况下, 许用压力按式 (31) 计算。

9 接管上的外部静载荷作用下圆筒的强度计算的实质内容是, 除满足压力载荷下单个开孔补强要求外, 必须进行下列扩展计算:

(1) 作用到圆筒上的正交接管的外部静载荷有轴向力 F_z (与接管中心线重合)、纵向弯矩 M_y (位于通过圆筒中心线的纵向平面内)、横向弯矩 M_x (位于垂直圆筒中心线的横向平面内) 均为已知, 标准给出没有补强圈或存在补强圈两种情况下许用轴向力 $[F_z]$ 、许用弯矩 $[M_y]$ 和 $[M_x]$ 计算公式, 其中存在补强圈时, 考虑了由接管与圆筒相贯处的强度条件和补强圈外边缘的强度条件确定的许用载荷值;

(2) 首先单独对每一载荷按式 (58)、式 (59) 和式 (60) 进行初步强度校核, 许用内压力按式 (31) 计算, 然后按式 (61) 进行联合载荷下的强度校核;

(3) 按式 (62) 对接管单独进行最大纵向拉应力校核;

(4) 在外压力、轴向压缩力和弯矩作用下, 须对接管按式 (63) 进行稳定校核;

(5) 系数 C_1 , C_2 , C_3 可查表或按相应公式计算。

10 接管上的外部静载荷作用下球形封头的强度计算的实质内容是, 除满足压力载荷下单个开孔补强要求外, 必须进行下列扩展计算:

(1) 作用到球形封头上的正交接管的外部静载荷有轴向力 F_z (与接管中心线重合)、弯矩 M_b , 均为已知。标准给出没有补强圈或存在补强圈两种情况下许用轴向力 $[F_z]$ 、许用弯矩 $[M_b]$ 的计算方法, 其中存在补强圈时, 考虑了由接管与球形封头相贯处的强度条件和补强圈外边缘的强度条件确定的许用载荷值;

(2) 首先单独对每一载荷按式 (72)、式 (73) 和式 (74) 进行初步强度校核, 许用内压力按式 (31) 计算, 然后按式 (75) 进行联合载荷下的强度校核。

(3) 按式 (76) 对接管单独进行最大纵向拉应力校核;

(4) 在轴向压缩力和弯矩作用下, 须对接管按式 (77) 进行稳定校核。

ГОСТ 24755—89^[16] 没有此部分规定。这部分新规范也是对圆筒或球形封头上的正交接管在完成开孔补强计算之后, 在已知正交接管上作用有轴向力和弯矩的条件下, 必须进行的强度校核和稳定校核。这样的扩展计算更能保证压力容器开孔补强的安全可靠。