

ICS 27.060.30  
J 98



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 16507.4—××××  
代替GB/T 16507—1996

## 水管锅炉 第4部分：受压元件强度计算

Water-tube Boilers  
(Part 4: Strength calculation of pressure parts)

(征求意见稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局  
中国国家标准化管理委员会 发布



## 目 次

前言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 通用要求 .....	3
5 需用应力 .....	3
6 计算壁温 .....	3
7 计算压力 .....	5
8 减弱系数 .....	5
9 元件厚度 .....	10
10 计算厚度 .....	11
11 开孔补强 .....	17
12 确定元件最高允许工作压力的验证法 .....	22
13 附加厚度 .....	25
14 最高允许工作压力 .....	26
15 附加应力校核 .....	28
16 结构限制和要求 .....	30
附录 A (规范性附录) 锅筒低周疲劳寿命计算 .....	37
附录 B (资料性附录) 一般情况工艺附加厚度 $C_2$ 的选取 .....	45
附录 C (资料性附录) 开孔减弱截面的抗弯截面模量 $W$ 的近似算法 .....	47
附录 D (资料性附录) $\Delta P_a$ 的选取方法 .....	49

## 前 言

GB/T 16507《水管锅炉》分为八个部分：

- 第1部分：总则；
- 第2部分：材料；
- 第3部分：结构设计；
- 第4部分：受压元件强度计算；
- 第5部分：制造；
- 第6部分：检验、试验和验收；
- 第7部分：安全附件和仪表；
- 第8部分：安装与运行。

本部分为 GB/T 16507 的第 4 部分。

本部分按照 GB/T 1.1-2009《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

本部分部分代替 GB/T 16507—1996，与 GB/T 16507—1996 相比，主要技术变化如下：

——  
——  
——

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。

本部分由全国锅炉压力容器标准化技术委员会锅炉分技术委员会（SAC/TC 262/TC1）组织起草并审查。

本部分负责起草单位：上海发电设备成套设计研究院。

本部分参与起草单位：哈尔滨锅炉厂有限责任公司、东方锅炉股份有限公司、上海锅炉厂有限公司、武汉锅炉股份有限公司、发电设备国家工程研究中心、无锡华光锅炉股份有限公司、杭州锅炉集团股份有限公司、西安热工研究院、北京巴布科克威尔科克斯有限公司、四川川锅锅炉有限责任公司、上海四方锅炉厂、济南锅炉集团有限公司。

本部分主要起草人：

本部分所代替标准的历次版本发布情况为：

- GB/T 16507—1996。

## 水管锅炉

### 第4部分：受压元件强度计算

#### 1 范围

GB/T 16507 的本部分规定了水管锅炉受压元件的强度计算方法、材料的设计许用应力和确定元件最高允许工作压力的验证方法。

本部分适用于额定压力不低于 0.10 MPa(表压)的固定式水管蒸汽锅炉和固定式水管热水锅炉的受压元件，包括锅筒筒体、集箱筒体、管子、锅炉范围内的管道、凸形封头、平端盖及盖板和三通等异形元件。

#### 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过 GB/T 16507 的本部分的引用而成为本部分的条款。凡是注明日期的引用文件，其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本部分，然而，鼓励根据本部分达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注明日期的引用文件，其最新版本适用于本部分。

GB 150	钢制压力容器
GB/T 16507.2	水管锅炉 第2部分：材料
DL/T 5366	火力发电厂汽水管道应力计算技术规程
JB/T 6734	锅炉角焊缝强度计算方法

#### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于 GB/T 16507 的本部分。

##### 3.1

##### 额定压力 **rated pressure**

锅炉铭牌压力或蒸汽锅炉在规定的给水压力和负荷范围内长期连续运行时应予保证的出口蒸汽压力。

##### 3.2

##### 工作压力 **operating pressure**

在正常设计运行工况条件下，受压元件所承受的最高压力。

##### 3.3

##### 计算压力 **calculation pressure**

在计算温度下，用以确定受压元件计算厚度的压力。

##### 3.4

##### 水压试验压力 **hydrostatic test pressure**

在工艺性水压试验时，受压元件所承受的压力。

##### 3.5

##### 计算壁温 **calculation temperature**

GB/T 16507.4—××××

用以确定钢材基本许用应力的受压元件金属壁温。

3.6

**腐蚀附加厚度 corrosion allowance thickness**

受压元件设计使用期内考虑腐蚀减薄需要附加的厚度。

3.7

**厚度负偏差 minus tolerance of thickness**

钢材出厂时允许厚度负偏差的下限值的绝对值。

3.8

**工艺厚度减薄值 processing thinning of thickness**

受压元件在制造过程中产生的厚度减薄值。

3.9

**计算厚度 calculation thickness**

受压元件考虑计算压力等载荷,由标准计算公式确定的受压元件厚度。

3.10

**最小需要厚度 minimum required thickness**

受压元件考虑计算压力等载荷及腐蚀减薄所需厚度。

3.11

**设计厚度 design thickness**

受压元件考虑计算压力等载荷、腐蚀减薄、厚度负偏差、工艺厚度减薄所需厚度。

3.12

**名义厚度 ordered thickness**

简称“厚度”，系设计厚度向上圆整至某一钢材标准规格后选用的订货厚度，即图样标注厚度。

3.13

**有效厚度 effective thickness**

用于承载的厚度。

3.14

**元件尺寸 component size**

除特别指定外，均表示图样标注尺寸。

3.15

**热挤压三通 hot extrusion tee**

用无缝钢管经多套模具热挤压成型的直型三通和鼓型三通。

3.16

**直型三通 straight tee**

支管直径不大于主管直径，主流通道成直线形的三通。

3.17

**鼓型三通 drum tee**

支管直径大于主管直径，由等径直型三通圆滑过渡锻缩而成，主流通道成鼓型的三通。

3.18

**纵截面 vertical section**

过接管回转轴线且与主管回转轴线平行的平面。

**3.19**

**横截面 cross section**

与圆筒体或主管等回转体轴线垂直的平面。

**4 通用要求**

**4.1** 按 GB/T 16507 的本部分计算的锅炉受压元件，其材料、设计、制造、安装、使用、修理及改造，应符合国家有关法规及本系列标准。

**4.2** 用于调峰负荷等参数波动较大机组的锅炉，受压元件应进行疲劳强度校核。锅筒疲劳强度校核按附录 A 计算。

**5 许用应力**

**5.1 符号**

$\eta$  ——基本许用应力的修正系数；

$[\sigma]$  ——许用应力，MPa；

$[\sigma]_{bs}$  ——基本许用应力，MPa。

**5.2** 钢材许用应力按式（1）计算：

$$[\sigma] = \eta[\sigma]_{bs} \dots\dots\dots (1)$$

**5.3 基本许用应力**

钢材基本许用应力应按 GB/T 16507.2 选取。

**5.4 基本许用应力修正系数**

修正系数根据元件结构特点和工作条件，按表 1 规定选取。

表 1 基本许用应力修正系数  $\eta$

元件名称	工作条件和结构形式	$\eta$
锅筒和集箱筒体、三通、等径叉形管	烟温 $\leq 600^\circ\text{C}$ 、透过管束的低辐射热流且壁面无烟气的强烈冲刷	0.95
	烟温 $> 600^\circ\text{C}$	0.90

**6 计算壁温**

**6.1 符号**

$J$  ——热流均流系数；

$p_r$  ——锅炉额定压力，MPa；

$q_{max}$  ——最大热流密度， $\text{kW/m}^2$ ；

$t_d$  ——计算壁温， $^\circ\text{C}$ ；

$t_m$  ——平均介质温度， $^\circ\text{C}$ ；

$t_s$  ——计算压力对应的介质饱和温度(热水锅炉为出口出水温度)， $^\circ\text{C}$ ；

$\Delta t$  ——温度偏差， $^\circ\text{C}$ ；

GB/T 16507.4—××××

- $X$  ——介质混合系数；
- $\alpha_h$  ——内壁对介质的换热系数， $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ；
- $\beta$  ——按名义厚度确定的外径与内径的比值；
- $\delta$  ——圆筒体、焊制和锻造三通主管、等径叉形管或凸形封头的名义厚度， $\text{mm}$ ；
- $\lambda$  ——钢材导热系数， $\text{kW}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

- 6.2 计算壁温取受压元件上内外壁温算术平均值中的最大值。
- 6.3 确定计算壁温时，锅炉出口过热蒸汽温度在允许范围内的波动不予考虑。
- 6.4 元件计算壁温确定
  - 6.4.1 受压元件的计算壁温由传热计算确定，一般可按式（2）计算：

$$t_d = t_m + J \times q_{\max} \left( \frac{\beta}{\alpha_h} + \frac{\delta}{1000\lambda\beta + 1} \right) + X\Delta t \quad \dots\dots\dots (2)$$

- 6.4.2 锅筒取  $X = 0$ ；管子取  $X = 1$ ；集箱一般可取  $X = 0.5$ ，当介质从集箱端部进入时取  $X = 0$ 。
- 6.4.3 集箱和管子取  $\Delta t \geq 10^\circ\text{C}$ ；不受热过热蒸汽集箱取  $X\Delta t \geq 10^\circ\text{C}$ 。
- 6.4.4 锅筒和集箱取  $J = 1$ 。
- 6.4.5 管子和管道、集箱和防焦集箱、锅筒的计算壁温也可分别按表 2、表 3 和表 4 选取。

表 2 管子和管道的计算壁温  $t_d$   $^\circ\text{C}$

元件	条件	计算公式
沸腾管	$p_r \leq 13.7\text{MPa}$ 及 $q_{\max} \leq 407\text{kW}/\text{m}^2$	$t_d = t_s + 60$
省煤器管	对流式省煤器	$t_d = t_m + 30$
	辐射式省煤器	$t_d = t_m + 60$
过热器管	对流式过热器	$t_d = t_m + 50$
	辐射式或半辐射式（屏式）过热器	$t_d = t_m + 100$
管道	在烟道外	$t_d = t_m$

表 3 集箱和防焦箱计算壁温  $t_d$   $^\circ\text{C}$

内部介质	工作条件		计算公式
水或汽水混合物	不受热	烟道外	$t_d = t_m$
	绝热	烟道内	$t_d = t_m + 10$
	不绝热	对流烟道内，烟温 $\leq 600^\circ\text{C}$	$t_d = t_m + 30$
		对流烟道内， $600^\circ\text{C} < \text{烟温} < 900^\circ\text{C}$	$t_d = t_m + 50$
饱和蒸汽	不受热	烟道外	$t_d = t_s$
	绝热	烟道内	$t_d = t_s + 25$
	不绝热	对流烟道内，烟温 $\leq 600^\circ\text{C}$	$t_d = t_s + 40$
		对流烟道内， $600^\circ\text{C} < \text{烟温} < 900^\circ\text{C}$	$t_d = t_s + 60$
过热蒸汽	不受热	烟道外	$t_d = t_m + X\Delta t$
	绝热	烟道内	$t_d = t_m + 25 + X\Delta t$
	不绝热	对流烟道内，烟温 $\leq 600^\circ\text{C}$ 的	$t_d = t_m + 40 + X\Delta t$

	对流烟道内, 600℃ < 烟温 < 900℃	$t_d = t_m + 60 + X\Delta t$
注: 对于受热的汽水混合物集箱和防焦箱筒体, $t_m$ 系指不出现自由水面时的温度。		

表 4 锅筒计算壁温  $t_d$  °C

工作条件		计算公式
不受热	在烟道外	$t_d = t_m$
绝热	在烟道内	$t_d = t_m + 10$
	在炉膛内	$t_d = t_m + 40$
透过管束的辐射热流不大, 而且筒体壁面不受烟气的强烈冲刷		$t_d = t_m + 20$
不绝热	对流烟道内, 烟温 ≤ 600℃	$t_d = t_m + 30$
	对流烟道内, 600℃ < 烟温 < 900℃	$t_d = t_m + 50$
	对流烟道或炉膛内, 烟温 ≥ 900℃	$t_d = t_m + 90$
注 1: 对于受热的锅筒, $t_m$ 系指水空间温度。		
注 2: 当介质为饱和温度时 $t_m = t_s$ 。		

## 7 计算压力

### 7.1 符号

- $p$  ——计算压力, 它不低于与元件相关的安全阀整定压力, MPa;
- $p_o$  ——工作压力, MPa;
- $p_r$  ——锅炉额定压力, MPa;
- $\Delta p_f$  ——介质流动阻力, MPa;
- $\Delta p_h$  ——液柱静压力, MPa;
- $\Delta p_a$  ——安全阀开启压力对于设置安全阀处元件工作压力的压差, MPa。

### 7.2 工作压力按式 (3) 计算:

$$p_o = p_r + \Delta p_f + \Delta p_h \quad \dots\dots\dots (3)$$

- 7.2.1 介质流动阻力附加压力取最大流量时计算元件至锅炉出口之间的压力降。
- 7.2.2 当所受液柱静压力不大于  $(p_r + \Delta p_a + \Delta p_f)$  的 3% 时, 则取所受液柱静压力等于零。

### 7.3 计算压力按式 (4) 确定:

$$p \geq p_o + \Delta p_a \quad \dots\dots\dots (4)$$

$\Delta p_a$  的选取方法参见附录 D。

### 7.4 再热蒸汽集箱、管子和管道的计算压力, 取锅炉在额定压力时介质工作压力的 1.15 倍。

## 8 减弱系数

### 8.1 符号

- $a$  ——斜向孔桥两孔间在圆筒体内外壁平均直径圆周方向上的弧长, mm;

GB/T 16507.4—××××

$b$  ——斜向孔桥两孔间在圆筒体轴线方向上的距离, mm;

$C_x$ 、 $C_y$  ——三通结构系数;

$d$  ——开孔直径 mm;

$d'$  ——凹座开孔的沉孔直径、或密封人孔用密封面凹槽直径, mm;

$d_a$  ——三通支管的平均直径, mm;

$d_{ae}$  ——相邻两孔平均当量直径, mm;

$d_e$  ——孔的当量直径, mm;

$d_i$  ——孔的直径 ( $i=1, 2, 3, \dots$ ), mm;

$d_{1e}$  ——第一孔的当量直径, mm;

$d_{2e}$  ——第二孔的当量直径, mm;

$D_a$  ——三通主管的平均直径, mm;

$D_c$  ——盖板的计算直径, mm;

$D_i$  ——圆筒体、封头、三通主管、等径叉形管的内径, mm;

$D_o$  ——圆筒体、封头、三通主管、等径叉形管的外径, mm;

$h$  ——具有凹座开孔的沉孔深度、或平端盖加工钝边高度, mm;

$h_i$  ——封头内高度, mm;

$K$  ——斜向孔桥的换算系数;

$N$  ——孔桥减弱系数线算图中的参数;

$n$  ——斜向孔桥两孔间在圆筒体轴线方向上的距离  $b$  与两孔间在圆筒体内外壁平均直径圆周方向上的弧长  $a$  的比值;

$p_r$  ——锅炉额定压力, MPa;

$s$  ——纵向(轴向)相邻两孔的节距, mm;

$s'$  ——横向(环向)相邻两孔的节距, mm;

$s''$  ——斜向相邻两孔的节距, mm;

$s_c$  ——相邻两孔的临界节距, mm;

$\alpha$  ——孔的轴线与圆筒体径向在横截面内的夹角, ( $^\circ$ );

$\beta$  ——按名义厚度确定的外径与内径的比值;

$\beta_i$  ——按计算厚度确定的外径与内径的比值;

$\delta$  ——圆筒体、焊制和锻造三通主管、等径叉形管或凸形封头的名义厚度, mm;

$\delta_b$  ——接管或三通支管名义厚度, mm;

$\delta_{be}$  ——接管或三通支管的有效厚度, mm;

$\delta_e$  ——圆筒体、焊制和锻造三通主管、热挤压三通过渡区、等径叉形管或凸形封头的有效厚度, mm;

$[\sigma]$  ——许用应力, MPa;

$[\sigma]_b$  ——补强接管的许用应力, MPa;

$\varphi$  ——孔桥减弱系数;

$\varphi_c$  ——校核部位的减弱系数;

$\varphi_{cmin}$  ——校核截面的最小减弱系数;

$\varphi_h$  ——封头开孔减弱系数;

批注 [wxp1]: “锅筒筒体和集箱筒体” 改为了“圆筒体”。

- $\varphi_{ht}$  ——水压试验时的最小减弱系数;
- $\varphi_{min}$  ——最小减弱系数;
- $\varphi_{nr}$  ——孔桥未补强前的孔桥减弱系数;
- $\varphi_i$  ——焊制和锻造三通、等径叉形管的减弱系数;
- $\varphi_w$  ——焊缝减弱系数。

**8.2 最小减弱系数**

- 8.2.1 圆筒体最小减弱系数取纵向焊缝减弱系数、孔桥减弱系数中的最小值。
- 8.2.2 孔桥与焊缝重叠，减弱系数取孔桥减弱系数和焊缝减弱系数的乘积。
- 8.2.3 凸形封头、焊制或锻造三通、等径叉形管等元件，应考虑相应的结构减弱系数。
- 8.2.4 凸形封头顶部开孔中心与焊缝边缘距离不大于  $(0.5d+12)$  mm 时，最小减弱系数取开孔减弱系数和焊缝减弱系数的乘积。

**8.3 焊缝减弱系数**

- 8.3.1 焊缝质量应符合锅炉制造技术条件。
- 8.3.2 对接焊缝减弱系数应根据焊缝形式及无损检测比例确定，一般可按表 5 选取。

表 5 对接焊缝减弱系数  $\varphi_w$

焊缝形式	无损检测范围	$\varphi_w$
双面坡口焊缝	100%无损检测	1.00
	局部无损检测	0.90
单面坡口焊缝	100%无损检测	0.90
	局部无损检测	0.80

- 8.3.3 基本许用应力由持久强度确定，且  $\varphi_w > 0.80$ ，焊缝减弱系数  $\varphi_w$  取 0.80。

**8.4 凸形封头开孔减弱系数**

- 8.4.1 凸形封头顶部中心开孔，封头开孔减弱系数按式 (5) 计算：

$$\varphi_h = 1 - \frac{d}{D_i} \dots\dots\dots (5)$$

- 8.4.2 封头顶部中心开孔为椭圆时， $d$  取椭圆长轴。

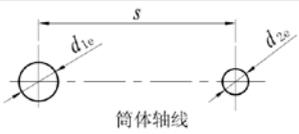
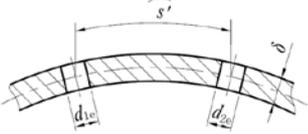
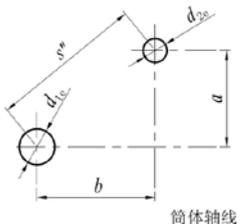
**8.5 孔桥减弱系数**

- 8.5.1 相邻两孔直径均不大于未补强孔最大允许直径，且两孔的节距(纵向、横向或斜向)小于孔桥相邻两孔的临界节距时，按本章计算孔桥减弱系数。
- 8.5.2 孔桥相邻两孔的临界节距按式 (6) 计算：

$$s_c = d_{ac} + 2\sqrt{(D_i + \delta)\delta} \dots\dots\dots (6)$$

- 8.5.3 相邻两孔的孔桥减弱系数按表 6 计算。计算的孔桥减弱系数大于 1 时，取  $\varphi = 1$ 。

表 6 孔桥减弱系数  $\varphi$

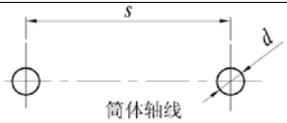
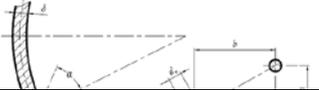
孔桥型式	孔桥示意图	$\varphi$
纵向		$\frac{s - d_{ae}}{s}$
横向		$2 \frac{s' - d_{ae}}{s'}$ ( $s'$ 取圆筒体平均直径圆周上的弧长)
斜向		$K \frac{s'' - d_{ae}}{s''}$ $K = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{0.75}{(1+n^2)^2}}} \leq 1$

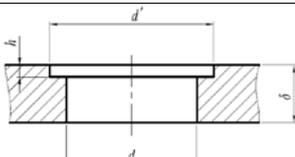
8.5.4 相邻两孔平均当量孔径  $d_{ae}$  按式 (7) 计算。

$$d_{ae} = \frac{d_{1e} + d_{2e}}{2} \dots\dots\dots (7)$$

8.5.5 当量孔径  $d_{1e}$  和  $d_{2e}$  按表 7 计算：

表 7 当量孔径

形式	示意图	当量孔径		
等直径		$d_{1e} = d_{2e} = d$		
横截面 非径向 孔		纵向孔桥	横向孔桥	斜向孔桥
		$d_c = d$	$d_c = \frac{d}{\cos \alpha}$	$d_c = d \sqrt{\frac{n^2 + 1}{n^2 + \cos^2 \alpha}}$

具有凹座的孔		$\alpha \leq 45^\circ$
		$d_e = d + \frac{h}{\delta}(d' - d)$ <p>(未熔合阶梯形管孔的 <math>d_e</math> 等于阶梯形管孔的纵向截面积除以圆筒体名义厚度。)</p>

8.5.6 斜向孔桥减弱系数亦可由图 1 直接查取。图中  $N = (d_{1e} + d_{2e}) / (2a)$ ，虚线为各条曲线极小值的连线。

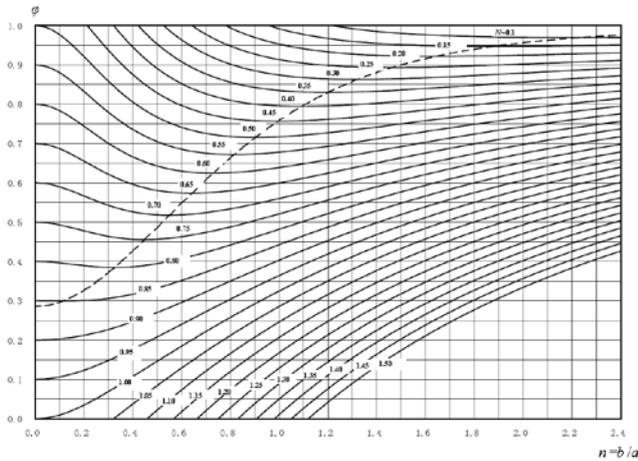


图 1 斜向孔桥减弱系数线算图

8.5.7 开孔直径确定:

- a) 椭圆孔在孔桥两孔中心连线上的投影尺寸;
- b) 插入式整体焊或双面角焊 (仅  $p_r \leq 2.5\text{MPa}$  的不受热锅筒) 接管的接管内径。

8.5.8 插入式整体焊或双面角焊 (仅  $p_r \leq 2.5\text{MPa}$  的不受热锅筒) 接管(或孔圈) 的钢材许用应力  $[\sigma]_b$  小于圆筒体钢材的许用应力  $[\sigma]$  时, 减弱系数计算中的  $d$  应取接管(或孔圈)内径与  $2\delta_b[1 - ([\sigma]_b/[\sigma])]$  之和。

8.5.9 孔桥减弱系数可由接管厚度补强提高, 补强条件和方法见 11.6。

8.6 焊制和锻造正交三通的减弱系数

8.6.1 无缝钢管焊制三通的减弱系数按表 8 确定。

8.6.2 锻造三通减弱系数  $\varphi_t$  按式(8)计算:

$$\varphi_t = \frac{1}{1.20 \left[ 1 + C_x \frac{\sqrt{1 + C_y^2}}{2C_y} \right]} \dots\dots\dots (8)$$

$$C_x = \frac{d^2}{D_a d_a} \quad C_y = 4.05 \frac{\delta_e^3 + \delta_{be}^3}{\delta_e^2 \sqrt{D_a} \delta_e} \dots\dots\dots (9)$$

表 8 焊制三通减弱系数  $\varphi_t$

计算壁温	结构参数	补强型式	$\varphi_t$	
低于由持久强度确定基本许用应力温度	$1.05 \leq \beta < 1.10$	蝶式	0.90	
	$p_t \leq 2.5\text{MPa}$ 、 $1.05 \leq \beta < 1.10$ 、 $D_o \leq 273\text{mm}$	厚度	取式(8)计算值的三分之二	
		$1.10 \leq \beta$ 且 $\beta_t \leq 1.50$	蝶式	0.90
			单筋	0.80
			厚度	按式(8)计算
不低于由持久强度确定基本许用应力温度	$1.05 \leq \beta < 1.10$	蝶式	按式(8)计算	
	$p_t \leq 2.5\text{MPa}$ 、 $1.05 \leq \beta < 1.10$ 、 $D_o \leq 273\text{mm}$	厚度	取式(8)计算值的三分之二	
		$1.10 \leq \beta < 1.25$ 且 $273\text{mm} < D_o \leq 813\text{mm}$	蝶式或单筋	按式(8)计算
	$1.10 \leq \beta < 1.25$ 且 $D_o \leq 273\text{mm}$	蝶式或单筋	0.70	
	$1.25 < \beta$ 且 $\beta_t \leq 2.00$	厚度	按式(8)计算	
	$1.25 < \beta$ 且 $\beta_t \leq 1.50$	蝶式或单筋	0.70	

### 8.7 等径叉形管减弱系数

8.7.1 等径叉形管的减弱系数按表 9 确定。

表 9 等径叉形管减弱系数

计算壁温	$\varphi_t$
低于由持久强度确定基本许用应力温度	0.7
等于或高于由持久强度确定基本许用应力温度	0.6

## 9 元件厚度

### 9.1 符号

- $C$  ——附加厚度, mm;
- $C_1$  ——腐蚀附加厚度, mm;
- $\delta$  ——圆筒体、焊制和锻造三通主管、等径叉形管或凸形封头的名义厚度, mm;
- $\delta_b$  ——接管或三通支管名义厚度, mm;
- $\delta_{be}$  ——接管或三通支管的有效厚度, mm;
- $\delta_{dc}$  ——设计厚度, mm;
- $\delta_e$  ——有效厚度, mm;
- $\delta_{min}$  ——最小需要厚度, mm;
- $\delta_t$  ——计算厚度, mm;

$\delta_1$  ——平端盖或盖板的名义厚度，mm。

9.2 最小需要厚度

最小需要厚度按式（10）计算：

$$\delta_{\min} = \delta_t + C_1 \dots\dots\dots (10)$$

9.3 设计厚度

设计厚度按式（11）计算：

$$\delta_{dc} = \delta_t + C \dots\dots\dots (11)$$

9.4 名义厚度

名义厚度应满足：

$$\begin{aligned} \delta &\geq \delta_{dc} \dots\dots\dots (12) \\ \delta_b &\geq \delta_{dc} \\ \delta_1 &\geq \delta_t \end{aligned}$$

9.5 有效厚度

有效厚度按式（13）计算：

$$\begin{aligned} \delta_e &= \delta - C \dots\dots\dots (13) \\ \delta_{be} &= \delta_b - C \end{aligned}$$

10 计算厚度

10.1 符号

- $D_c$  ——盖板的计算直径，mm；
- $D_i$  ——圆筒体、封头、三通主管、等径叉形管的内径，mm；
- $D_o$  ——圆筒体、封头、三通主管、等径叉形管的外径，mm；
- $d$  ——开孔直径 mm；
- $d'$  ——密封人孔用密封面凹槽直径，mm；
- $d_o$  ——接管、三通支管的外径，mm；
- $[d]_{i\max}$  ——热挤压三通满足过渡区强度要求的支管最大允许内径，mm；
- $h_i$  ——封头内高度，mm；
- $h_{\min}$  ——锻造三通支管最小高度，mm；
- $K_c$  ——盖板结构特性系数；
- $K_f$  ——平端盖结构特性系数；
- $K_i$  ——弯管内弧形状系数；
- $K_o$  ——弯管外弧形状系数；
- $K_s$  ——凸形封头结构形状系数；
- $l$  ——平端盖直段部分的长度，mm。
- $L_1$  ——热挤压和锻造三通主管半长，mm；
- $p$  ——计算压力，MPa；

批注 [w xp2]: “热挤压和锻造三通支管最小高度”改为“锻造三通支管最小高度”。由于热挤压三通支管最小高度  $h_{\min}$ ，改为了热挤压三通支管高度  $h$ 。

批注 [w xp3]: “最小半长”为了“半长”。

GB/T 16507.4—××××

$P_r$  —— 锅炉额定压力, MPa;

$r$  —— 平端盖和三通的內转角过渡圆弧半径、或锻造三通主管和支管外壁过渡圆弧半径, mm;

$R$  —— 弯管中心线的曲率半径、或热挤压三通外壁肩部最大过渡半径, mm;

$R'_1$  —— 不等厚圆筒体薄壁处內半径, mm;

$R''_1$  —— 不等厚圆筒体厚壁处內半径, mm;

$Y_c$  —— 盖板形状系数;

$\alpha$  —— 等径叉形管主管与接管中心轴线夹角, (°);

$\beta_t$  —— 按计算厚度确定的外径与內径的比值;

$\delta$  —— 圆筒体、焊制和锻造三通主管、等径叉形管或凸形封头的名义厚度, mm;

$\delta_0$  —— 强度未减弱圆筒体的计算厚度, mm;

$\delta_1$  —— 平端盖或盖板的內名义厚度, mm;

$\delta_2$  —— 平端盖环形凹槽处的最小厚度, mm;

$\delta_3$  —— 盖板螺栓连接部位或密封面处环状部位的厚度, mm;

$\delta_b$  —— 三通支管名义厚度, mm;

$\delta_c$  —— 有效厚度, mm;

$\delta_{\min}$  —— 最小需要厚度, mm;

$\delta_t$  —— 计算厚度, mm;

$[\sigma]$  —— 许用应力, MPa;

$\varphi_{\min}$  —— 最小减弱系数;

$\varphi_t$  —— 焊制和锻造三通、等径叉形管的减弱系数;

$\varphi_w$  —— 焊缝减弱系数。

10.2 直圆筒体

10.2.1 直圆筒体的计算厚度按式(14)计算:

$$\delta_t = \frac{pD_o}{2\varphi_{\min}[\sigma] + p} \dots\dots\dots(14)$$

或

$$\delta_t = \frac{pD_i}{2\varphi_{\min}[\sigma] - p} \dots\dots\dots(15)$$

10.2.2 承受外压的管子, 计算厚度参照 GB 150 标准计算。

10.2.3 中径相等的不同厚度锅筒筒体, 薄壁与厚壁部分的强度分别按本节计算, 薄壁  $D_i = 2R'_1$ , 厚壁  $D_i = 2R''_1$ 。

10.2.4 直圆筒体厚度计算公式应在表 10 的  $\beta_t$  范围内使用。

表 10 直圆筒体厚度计算公式适用的  $\beta_t$  范围

元件名称	$\beta_t$	范围
锅筒	$\beta_t = 1 + 2 \frac{\delta_t}{D_i}$	$\beta_t \leq 1.30$

集箱	$\beta_t = \frac{D_o}{D_o - 2\delta_t}$	$\beta_t \leq 1.50$
管子和管道		$\beta_t \leq 2.00$ (过热蒸汽)
		$\beta_t \leq 2.00$

10.3 凸形封头

10.3.1 椭球和球形封头结构见图 2。

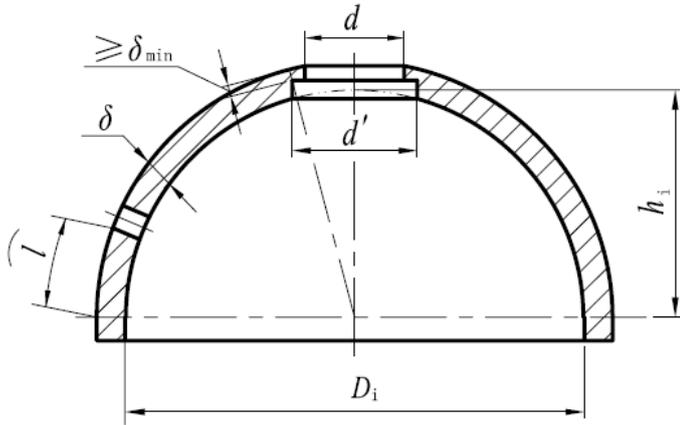


图 2 椭球和球形封头结构示意图

10.3.2 封头顶部中心开孔为椭圆时， $d$  取椭圆长轴。

10.3.3 椭球和球形封头的计算厚度按式 (16) 计算：

$$\delta_t = K_s \frac{pD_i}{2\varphi_{\min}[\sigma] - p} \dots\dots\dots(16)$$

$$K_s = \frac{1}{6} \left[ 2 + \left( \frac{D_i}{2h_i} \right)^2 \right] \dots\dots\dots(17)$$

10.3.4 椭球和球形封头的计算厚度公式的适用范围：

$$\frac{h_i}{D_i} \geq 0.2; \quad \frac{\delta_t}{D_i} \leq 0.15; \quad \frac{d}{D_i} \leq 0.6$$

10.3.5 热旋压管制缩口封头顶端工艺开孔  $d \geq 80\text{mm}$ ，计算厚度可按本节计算。

10.3.6 热旋压管制缩口封头的  $\delta_0/\delta_c < 0.5$  且  $p_r \leq 2.5\text{MPa}$ ，计算厚度公式适用范围中的  $d/D_i$  可按式 (18) 控制：

$$\frac{d}{D_i} \leq 0.8 \dots\dots\dots(18)$$

10.3.7 凸形封头直段的计算厚度按式 (19) 计算：

$$\delta_t = \frac{pD_i}{2\varphi_w[\sigma] - p} \dots\dots\dots(19)$$

10.4 平端盖

10.4.1 平端盖的计算厚度按式(20)计算:

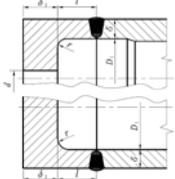
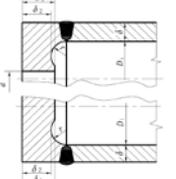
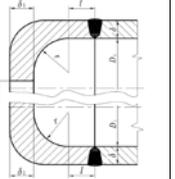
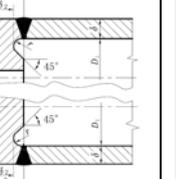
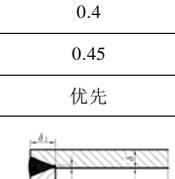
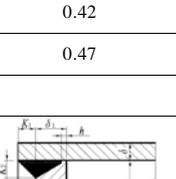
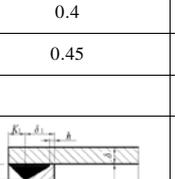
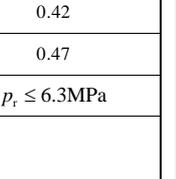
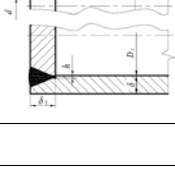
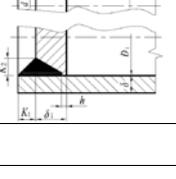
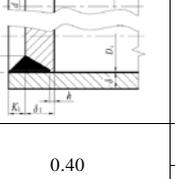
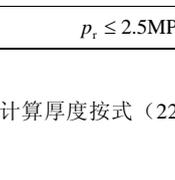
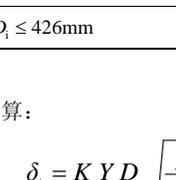
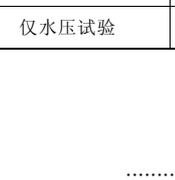
$$\delta_t = K_f D_i \sqrt{\frac{p}{[\sigma]}} \dots\dots\dots(20)$$

10.4.2 平端盖直段的计算厚度按式(21)计算:

$$\delta_t = \frac{pD_o}{2[\sigma] + p} \dots\dots\dots(21)$$

10.4.3 平端盖的结构特性系数  $K_f$  按表 11 选取。

表 11 平端盖的结构特性系数  $K_f$

型式					
					
$K_f$	无孔	0.4	0.42	0.4	0.42
	有孔	0.45	0.47	0.45	0.47
推荐范围	优先			$p_r \leq 6.3\text{MPa}$	
型式					
					
$K_f$	无孔	0.65		0.40	
	有孔	0.76			
推荐范围	$p_r \leq 2.5\text{MPa}$ 且 $D_i \leq 426\text{mm}$		仅水压试验		

10.5 盖板

10.5.1 盖板计算厚度按式(22)计算:

$$\delta_t = K_c Y_c D_c \sqrt{\frac{P}{[\sigma]}} \dots\dots\dots(22)$$

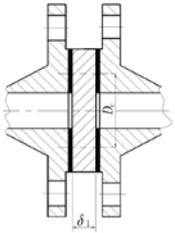
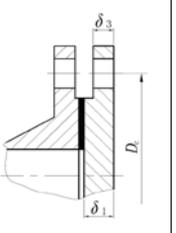
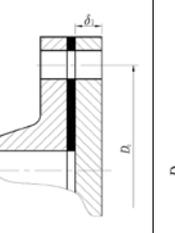
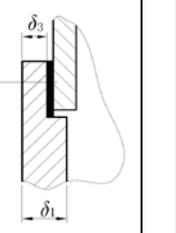
10.5.2 盖板形状系数  $Y_c$  按表 12 选取。

表 12 盖板形状系数  $Y_c$

$b/a$	1.00	0.75	0.50
$Y_c$	1.00	1.15	1.30
注: $b/a$ 为孔的长短轴比, 相邻 $b/a$ 之间 $Y_c$ 值可用算术内插法确定, 小数点后第三位四舍五入。			

10.5.3 盖板结构特性系数  $K_c$  和计算直径  $D_c$  按表 13 规定选取:

表 13 盖板结构特性系数  $K_c$  和计算直径  $D_c$

型式和 $D_c$ 确定				
$K_c$	0.50	0.55	0.45	0.55

10.5.4 盖板的连接处的厚度  $\delta_3$  应满足:

$$\delta_3 \geq 0.8\delta_1 \quad (23)$$

10.6 弯管或弯头和内、外弧无开孔的圆弧形集箱筒体

10.6.1 弯管或弯头和圆弧形集箱筒体外弧计算厚度按式 (24) 计算:

$$\delta_t = K_o \frac{pD_o}{2\varphi_w[\sigma] + p} \quad \dots\dots\dots(24)$$

$$K_o = \frac{4R + D_o}{4R + 2D_o} \quad \dots\dots\dots(25)$$

10.6.2 弯管或弯头和圆弧形集箱筒体内弧计算厚度按式 (26) 计算:

$$\delta_t = K_i \frac{pD_o}{2\varphi_w[\sigma] + p} \quad \dots\dots\dots(26)$$

$$K_i = \frac{4R - D_o}{4R - 2D_o} \quad \dots\dots\dots(27)$$

10.6.3 弯管或弯头直段和中弧的计算厚度按式 (28) 计算:

$$\delta_t = \frac{pD_o}{2\varphi_w[\sigma] + p} \quad \dots\dots\dots(28)$$

10.6.4 圆弧形集箱筒体中弧的计算厚度按式 (29) 计算:

$$\delta_t = \frac{pD_o}{2\varphi_{\min}[\sigma] + p} \dots\dots\dots(29)$$

10.6.5 外径  $D_o \leq 100\text{mm}$  的弯管或弯头,可不校核内弧计算厚度。

10.7 焊制、锻造三通和等径叉形管

10.7.1 焊制、锻造三通和等径叉形管的结构示意图见图3。

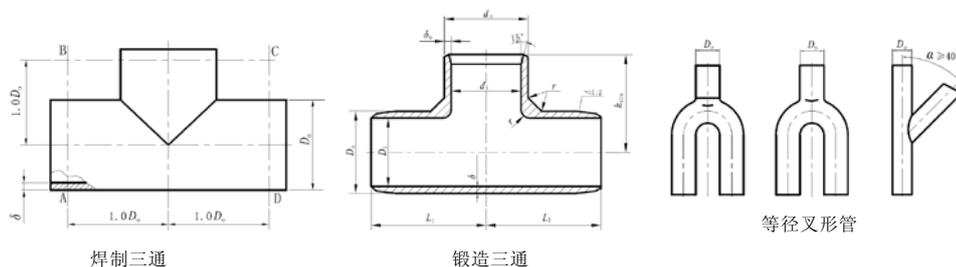


图3 焊制、锻造三通和等径叉形管结构示意图

10.7.2 焊制、锻造三通主管和等径叉形管的计算厚度按式(30)计算:

$$\delta_t = \frac{pD_o}{2\varphi_t[\sigma] + p} \dots\dots\dots(30)$$

10.7.3 焊制和锻造三通支管的计算厚度按式(31)计算:

$$\delta_t = \frac{pd_o}{2\varphi_t[\sigma] + p} \dots\dots\dots(31)$$

10.7.4 焊制和锻造三通上若有允许开孔的孔桥,则在采用式(30)、式(31)确定三通理论计算壁厚时,  $\varphi_t$  取 8.6 确定的  $\varphi_t$  与 8.5 规定求得的最小孔桥减弱系数  $\varphi_{\min}$  中的小者。

10.7.5 无缝钢管焊制三通的计算厚度计算公式适用范围:

$$d_i/D_i \geq 0.8 \text{ 且 } d_o \leq 813\text{mm}。$$

10.7.6 等径叉形管的计算厚度计算公式适用范围:

$$D_o \leq 108\text{mm} \text{ 且 } 1.05 \leq \beta_t \leq 2.00。$$

10.8 热挤压三通

10.8.1 热挤压三通主管圆筒体的计算厚度按式(32)计算:

$$\delta_t = \frac{pD_o}{2\varphi_{\min}[\sigma] + p} \dots\dots\dots(32)$$

10.8.2 热挤压三通支管圆筒体的计算厚度按式(33)计算:

$$\delta_t = \frac{pd_o}{2\varphi_{\min}[\sigma] + p} \dots\dots\dots(33)$$

10.8.3 热挤压三通过渡区计算厚度及支管最大允许内径按表 14 计算：

表 14 热挤压三通过渡区计算厚度及支管最大允许内径 mm

主管外径	≤ 660mm		> 660mm	
过渡区计算厚度及支管最大允许内径	直型三通	$\delta_t = \frac{1.3pD_o}{1.9[\sigma] + p} + 2$	直型三通	$\delta_t = \frac{1.3pD_o}{2[\sigma] + p} + 10$
	鼓型三通	$\delta_t = \frac{1.3pd_o}{1.9[\sigma] + p} + 2$	鼓型三通	$\delta_t = \frac{1.3pd_o}{2[\sigma] + p} + 10$
	$[d]_{i\max} = d_o + 2R - 2\sqrt{(R + \delta_t + C_1)^2 - R^2}$ 当 $R > 2.42(\delta_t + C_1)$ 时, 取 $[d]_{i\max} = d_o - 2(\delta_t + C_1)$		$[d]_{i\max} = d_o - 2(\delta_t + C_1)$	
过渡区 (ABCD) 范围及相关尺寸示意图				

11 开孔补强

11.1 符号

- $A_0, A'_0, A''_0$  ——纵截面上补强需要的面积,  $\text{mm}^2$ ;
- $A_1, A'_1, A''_1$  ——纵截面内起补强作用的焊缝面积,  $\text{mm}^2$ ;
- $A_2, A'_2, A''_2$  ——纵截面内起补强作用的接管面积,  $\text{mm}^2$ ;
- $A_3$  ——纵截面内起补强作用的垫板面积,  $\text{mm}^2$ ;
- $A_4$  ——纵截面内 (除接管外) 起补强作用的圆筒体的面积,  $\text{mm}^2$ ;
- $b$  ——圆筒体上开孔有效补强宽度, mm;
- $D_i$  ——圆筒体内径, mm;
- $D_o$  ——圆筒体外径, mm;
- $d$  ——开孔直径或插入式整体焊接接管内径, mm;
- $d_{ae}$  ——相邻两孔平均当量直径, mm;
- $d_i$  ——接管内径, mm;

## GB/T 16507.4—××××

- $d_o$  ——接管外径, mm;  
[ $d$ ] ——未补强孔的最大允许直径, mm;  
[ $d$ ]<sub>e</sub> ——孔桥补强计算时的最大允许当量直径, mm;  
 $e$  ——焊缝高度, mm;  
 $h$  ——接管补强有效高度, mm;  
 $h_1$  ——补强接管伸出圆筒体内壁的尺寸, mm;  
 $k$  ——圆筒体开孔结构特性系数;  
 $K$  ——斜向孔桥的换算系数;  
 $P$  ——计算压力, MPa;  
 $s$  ——纵向(轴向)相邻两孔的节距, mm;  
 $s'$  ——横向(环向)相邻两孔的节距, mm;  
 $s''$  ——斜向相邻两孔的节距, mm;  
 $\delta$  ——圆筒体名义厚度, mm;  
 $\delta_0$  ——强度未减弱圆筒体的计算厚度, mm;  
 $\delta_b$  ——接管名义厚度, mm;  
 $\delta_{be}$  ——接管有效厚度, mm;  
 $\delta_{b0}$  ——接管计算厚度, mm;  
 $\delta_e$  ——圆筒体有效厚度, mm;  
 $\delta_r$  ——补强垫板的厚度, mm;  
[ $\sigma$ ] ——许用应力, MPa;  
[ $\sigma$ ]<sub>b</sub> ——补强接管的许用应力, MPa;  
[ $\sigma$ ]<sub>2</sub> ——垫板的许用应力, MPa;  
 $\varphi_{nr}$  ——孔桥未补强前的孔桥减弱系数;  
[ $\varphi$ ] ——允许最小减弱系数。

### 11.2 范围

11.2.1 本章规定仅适用于  $d/D_1 < 0.8$ , 且  $d < 600\text{mm}$  的径向开孔。若为椭圆孔, 则仅适用于长轴与短轴之比不大于 2 的开孔, 此时  $d$  为椭圆孔长轴尺寸。

11.2.2 相邻两孔的节距等于或大于孔桥相邻两孔的临界节距, 开孔当量孔径大于未补强孔最大允许直径, 圆筒体开孔结构特性系数  $k > 0.40$ , 按本章单孔补强规定计算补强; 圆筒体开孔结构特性系数  $k \leq 0.40$  时, 不必进行补强。

11.2.3 相邻两孔的节距小于孔桥相邻两孔的临界节距, 两孔当量孔径均小于或等于未补强孔的最大允许直径时, 按本章孔桥补强规定计算补强。

11.2.4 相邻两孔的节距小于孔桥相邻两孔的临界节距, 其中一孔当量孔径大于未补强孔的最大允许直径时, 在满足本章孔桥补强条件基础上, 按本章单孔补强规定对大孔计算补强, 补强条件满足后, 该孔在该孔桥中按无孔处理。

11.2.5 相邻两孔的节距小于孔桥相邻两孔的临界节距, 两孔当量孔径均大于未补强孔的最大允许直径时, 不能按本章规定计算补强。

### 11.3 未补强孔及其最大允许直径

11.3.1 胀接孔、螺丝孔和其它不施焊的孔均为未补强孔。

11.3.2 接管与圆筒体焊接结构型式为非补强结构，或不满足开孔补强条件的孔均视为未补强孔。

11.3.3 插入式整体焊接接管、双面角焊接管(或孔圈)，接管(或孔圈)钢材的许用应力 $[\sigma]_b$ 小于筒体钢材的许用应力 $[\sigma]$ ，补强计算时， $d$ 应取接管(或孔圈)内径与 $2\delta_b[1-([\sigma]_b/[\sigma])]$ 之和。

11.3.4 圆筒体上的未补强孔，其直径不应超过按未补强孔的最大允许直径曲线图(图4)或式(34)所确定的 $[d]$ 值，且当 $[d]>200\text{mm}$ 时，取 $[d]=200\text{mm}$ 。

$$[d] = 8.1\sqrt[3]{D_i\delta_c(1-k)} \quad \dots\dots\dots(34)$$

11.3.5 锅筒筒体结构特性系数 $k$ 按式(35)计算：

$$k = \frac{pD_i}{(2[\sigma] - p)\delta_c} \quad \dots\dots\dots(35)$$

11.3.6 集箱筒体结构特性系数 $k$ 按式(36)计算：

$$k = \frac{p(D_o - 2\delta_c)}{(2[\sigma] - p)\delta_c} \quad \dots\dots\dots(36)$$

当 $D_i\delta_c > 130 \times 10^3 \text{mm}^2$ 时，按 $D_i\delta_c = 130 \times 10^3 \text{mm}^2$ 查取。

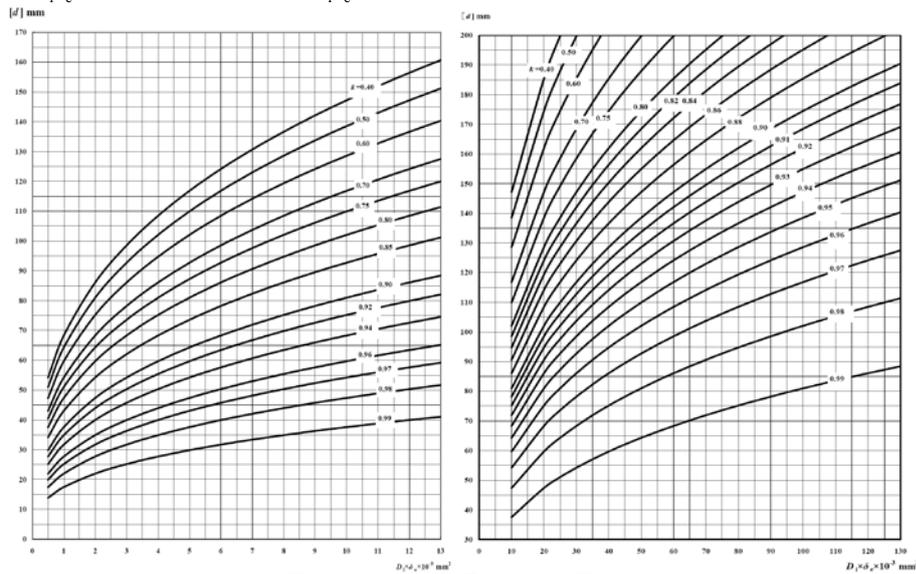


图4 未补强孔的最大允许直径

11.4 孔的补强结构

11.4.1 孔的补强结构型式见图5。

11.4.2 结构型式 a)、b)、c)仅适用于锅炉额定压力不大于 2.5MPa 的锅炉。

11.4.3 结构型式 a)仅适用于圆筒体不受热锅筒，其补强计算方法视同 d)型。

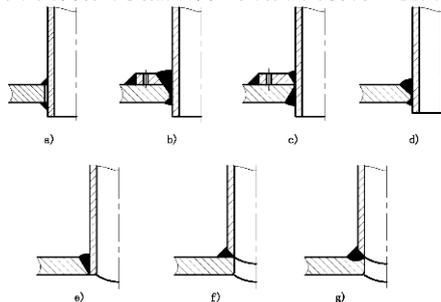


图 5 孔的补强结构型式

- 11.4.4 仅 d)、e)、f)、g) 接管焊接结构适用于孔桥补强。
- 11.4.5 补强元件与圆筒体的角焊缝强度可按 JB/T 6734 进行验算。

11.5 单孔补强

11.5.1 开孔补强应满足以下条件：

$$A_1 + A_2 + A_3 + A_4 \geq A_0 \quad \dots\dots\dots(37)$$

- 11.5.2 补强所需面积的三分之二应分布在孔边四分之一孔径的范围内。
- 11.5.3 当补强元件钢材的许用应力大于被补强元件钢材的许用应力时，则按被补强元件钢材的许用应力计算。
- 11.5.4 开孔补强有效范围（ABCD）内的补强面积按表 15 确定。
- 11.5.5 强度未减弱圆筒体的计算厚度  $\delta_0$  按式（38）或式（39）计算：

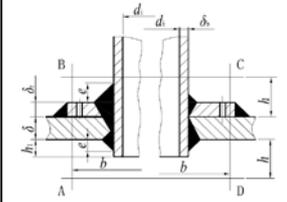
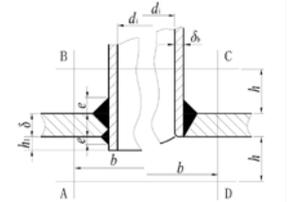
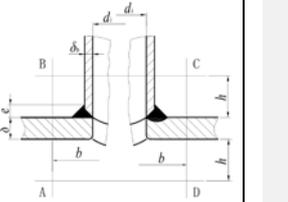
$$\delta_0 = \frac{pD_i}{2[\sigma] - p} \quad \dots\dots\dots(38)$$

$$\delta_0 = \frac{p(D_o - 2\delta_e)}{2[\sigma] - p} \quad \dots\dots\dots(39)$$

11.5.6 补强接管的计算厚度  $\delta_{b0}$  按式（40）计算：

$$\delta_{b0} = \frac{p(d_o - 2\delta_{be})}{2[\sigma] - p} \quad \dots\dots\dots(40)$$

表 15 孔的补强面积范围及计算

补强尺寸 和范围	 <p style="text-align: center;"><math>\delta_r &lt; \delta, h_1 \leq h</math></p>	 <p style="text-align: center;"><math>h_1 \leq h</math></p>	
$A_0$	$\left[ d_i + 2\delta_{be} \left( 1 - \frac{[\sigma]_b}{[\sigma]} \right) \right] \delta_0$	$\left[ d_i + 2\delta_{be} \left( 1 - \frac{[\sigma]_b}{[\sigma]} \right) \right] \delta_0$	$d_i \delta_0$

$A_1 A_1' A_1''$	$2e^2$	$2e^2$ (或 $e^2$ )	$e^2$
$A_2 A_2' A_2''$	$[2h(\delta_{bc} - \delta_{b0}) + 2h_1\delta_{bc}] \frac{[\sigma]_b}{[\sigma]}$	$[2h(\delta_{bc} - \delta_{b0}) + 2h_1\delta_{bc}] \frac{[\sigma]_b}{[\sigma]}$	$2h(\delta_{bc} - \delta_{b0}) \frac{[\sigma]_b}{[\sigma]}$
$A_3$	$0.8\delta_r(b - d_i - 2\delta_b) \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]}$	0	0
$A_4$	$[b - d_i - 2\delta_{bc}(1 - \frac{[\sigma]_b}{[\sigma]})](\delta_c - \delta_0)$	$[b - d_i - 2\delta_{bc}(1 - \frac{[\sigma]_b}{[\sigma]})](\delta_c - \delta_0)$	$(b - d_i)(\delta_c - \delta_0)$

11.5.7 有效补强范围和尺寸按以下规定选取:

- a)  $\delta_b/d_i \leq 0.19$  时,  $h$  取  $2.5\delta$  和  $2.5\delta_b$  的较小者;
- b)  $\delta_b/d_i > 0.19$  时, 取  $h = \sqrt{(d_i + \delta_b)\delta_b}$ ;
- c)  $b = 2d_i$ ;  $s < 2d_{ac}$  时,  $b = 2(s - d_{ac})$ ;
- d) 非插入式接管,  $d_i$  取圆筒体开孔直径  $d$ ;
- e) 椭圆孔,  $d_i$  取纵截面上的尺寸,  $d_o$  系指长轴尺寸;
- f) 补强焊缝计算高度取焊脚高度。

11.6 孔桥补强计算

11.6.1 圆筒体纵向、横向或斜向孔桥可用接管多余厚度 (见图 6), 进行孔桥补强提高孔桥减弱系数。

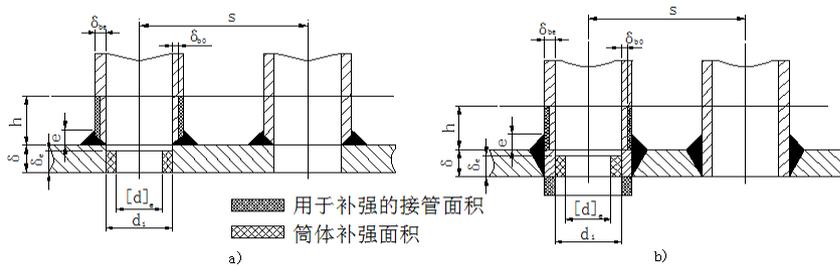


图 6 孔桥补强的接管

11.6.2 孔桥补强应满足以下要求:

- a) 采用本章所规定的接管焊接结构。
- b) 允许最小减弱系数应满足条件:

$$[\varphi] < \frac{4}{3} \varphi_{nr}$$

11.6.3 孔桥补强的最大允许当量孔径  $[d]_e$  按下列公式计算:

- a) 纵向孔桥:

$$[d]_e = (1 - [\varphi])s \dots\dots\dots(41)$$

- b) 横向孔桥:

$$[d]_e = \left(1 - \frac{[\varphi]}{2}\right) s' \dots\dots\dots(42)$$

c) 斜向孔桥:

$$[d]_e = \left(1 - \frac{[\varphi]}{K}\right) s'' \dots\dots\dots(43)$$

11.6.4 按外径计算圆筒体允许最小减弱系数按式(44)计算:

$$[\varphi] = \frac{p(D_1 + \delta_e)}{2[\sigma]\delta_e} \dots\dots\dots(44)$$

11.6.5 按内径计算圆筒体允许最小减弱系数按式(45)计算:

$$[\varphi] = \frac{p(D_o - \delta_e)}{2[\sigma]\delta_e} \dots\dots\dots(45)$$

11.6.6 孔桥补强的有效范围和面积计算, 参照表 15 单孔补强的规定。

11.6.7 孔桥补强条件:

a) 接管结构和尺寸相同的孔桥:

$$A_1 + A_2 \geq \left(\frac{A_0}{\delta_0} - [d]_e\right) \delta_e \dots\dots\dots(46)$$

b) 接管结构或尺寸不同的孔桥:

$$A'_1 + A'_2 + A''_1 + A''_2 \geq \left(\frac{A'_0 + A''_0}{\delta_0} - 2[d]_e\right) \delta_e \dots\dots\dots(47)$$

## 12 确定元件最高允许工作压力的验证法

### 12.1 符号

- $p_t$  —— 试验爆破压力, MPa;
- $p_i$  —— 试验温度时的验证压力 ( $i = 1, 2, 3, 4$ ), MPa;
- $p_{\min}$  —— 试验温度下最小验证压力, MPa;
- $p_y$  —— 试验温度时最薄弱部位达到屈服时的压力, MPa;
- $[p]$  —— 最高允许工作压力, MPa;
- $R_a$  —— 圆筒体等回转壳体结构不连续部位的内外壁平均半径, mm;
- $R_{aa}$  —— 圆筒体等回转壳体两相邻高应力区之间内外壁平均曲率半径的平均值, mm;
- $R'_e$  —— 试验元件钢材在试验温度时的实际屈服强度或规定非比例延伸强度 ( $R'_{p0.2}$ ), MPa;
- $R_m$  —— 钢材在 20℃ 时的抗拉强度, MPa;
- $R_{mt}$  —— 试验元件钢材在 20℃ 时的实际抗拉强度, MPa;
- $\delta'_{amin}$  —— 相邻两高应力区的最小厚度的平均值, mm;
- $\delta'_{\min}$  —— 结构不连续处的最小厚度, mm;
- $\delta_{pc}$  —— 实用元件对应于试验元件  $\delta_e$  处的实际厚度, mm ;

- $\delta_{tc}$  ——验证试验的元件最薄弱处的厚度，mm；
- $\Delta$  ——试验测量相对误差，%；
- $\sigma_1$  ——第一主应力，MPa；
- $\sigma_3$  ——第三主应力，MPa；
- $\sigma_e$  ——筒体的当量应力，MPa。
- $[\sigma]$  ——许用应力，MPa；
- $[\sigma]_{bs}$  ——基本许用应力，MPa；
- $[\sigma]_{bst}$  ——试验温度下基本许用应力，MPa；
- $\phi_w$  ——焊缝减弱系数。

**12.2 通用要求**

- 12.2.1 本章提供了用于决定元件最高允许工作压力的验证试验和有限元计算方法，这些方法包括：应力验证法；屈服验证法；爆破验证法；应力分析验证法。
- 12.2.2 本章提供的方法可用于不能按本标准前述各章规定进行计算的受压元件。
- 12.2.3 元件的所有转角处应有适当的圆角。圆角半径应大于10mm 或较厚部分厚度的四分之一。

**12.3 应力及应力分类**

- 12.3.1 本章的当量应力强度采用最大剪应力强度理论，当量应力按式（48）计算：

$$\sigma_e = \sigma_1 - \sigma_3 \dots\dots\dots(48)$$

- 12.3.2 一次应力由机械载荷产生，满足元件内力与外力平衡的应力，无自限性。
- 12.3.3 一次薄膜应力为沿截面厚度的平均一次应力。
- 12.3.4 一次弯曲应力为沿截面径向变化，平均合力为零的一次应力。
- 12.3.5 在回转壳体经线方向上，内、外壁平均或截面平均当量应力值不小于 $1.1[\sigma]$ 的尺寸范围不大于 $\sqrt{R_a \delta'_{min}}$ ，并且相邻两个这样区域的边缘间距不小于 $2.5\sqrt{R_{aa} \delta'_{amin}}$ ，则此应力属于一次局部薄膜应力。
- 12.3.6 二次应力为满足整体变形协调条件，在结构不连续或相邻元件连接部位及其邻近区域产生的附加应力，具自限性。

**12.4 应力验证法**

- 12.4.1 应力验证法步骤如下：
  - a) 区分一次应力（一次薄膜应力、一次局部薄膜应力）和二次应力区域。
  - b) 分别在各区域的内、外壁对应点布置粘贴应变片。
  - c) 确定最高试验压力，控制元件各点应力低于验证试验温度时材料的屈服限。
  - d) 按最高试验压力，将压力分成若干升压和降压级。
  - e) 反复分级升压和降压，记录各级压力值及其各应变测点的应变值，直至重复性满意要求为止。
  - f) 建立一次应力区最大内、外壁平均当量应力与试验压力的线性关系，在该线性关系下，1倍许用应力对应的压力定义为试验验证压力  $P_1$ 。
  - g) 建立一次应力区最大当量应力与试验压力的线性关系，在该线性关系下，1.5倍许用应力对应的压力定义为试验验证压力  $P_2$ 。

- h) 建立二次应力区最大内、外壁平均当量应力与试验压力的线性关系，在该线性关系下，1.5 倍许用应力对应的压力定义为试验验证压力  $P_3$ 。
- i) 建立二次应力区最大当量应力与试验压力的线性关系，在该线性关系下，3 倍许用应力对应的压力定义为试验验证压力  $P_4$ 。
- j) 取  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$  中的最小值为  $P_{\min}$ 。
- k) 分析确定验证试验的相对误差  $\Delta$ 。

12.4.2 应力验证法的元件最高允许工作压力按式 (49) 确定：

$$[p] = \frac{P_{\min}}{1 + \Delta} \dots\dots\dots(49)$$

12.4.3 本节确定的元件最高允许工作压力，用于未经试验验证的相同元件时，应按实际情况考虑温度和厚度差异，对最高允许工作压力进行修正。

**12.5 屈服验证法**

12.5.1 本节只适用于工作温度小于该钢材持久强度对基本许用应力起控制作用的温度的元件。

12.5.2 试验温度时，元件钢材的屈服强度与抗拉强度之比不大于 0.6。

12.5.3 试验元件应未受过液压试验，没有形变硬化和内应力。

12.5.4 屈服验证法的最高允许工作压力按式 (50) 确定：

$$[p] = 0.75 \frac{p_y [\sigma]_{bs} \varphi_w}{R'_e} \dots\dots\dots(50)$$

12.5.5 投入运行后，能对元件内外壁作定期检查，最高允许工作压力可放大至  $1.25[p]$ 。

12.5.6 本节确定的最高允许工作压力用于未经验证试验验证的相同元件时，应按实际情况考虑厚度差异进行修正。

12.5.7 元件的屈服压力  $p_y$  可用应变测量法确定，确定步骤如下：

- a) 确定二次应力区部位，在该应力区的外壁布置应变片。
- b) 缓慢分级升压，记录每级压力值及相应的每个测点的应变值，建立最大应变点的应变与试验压力的关系曲线（见图 7），取相应残余应变量为 0.2% 的压力为  $p_y$ 。

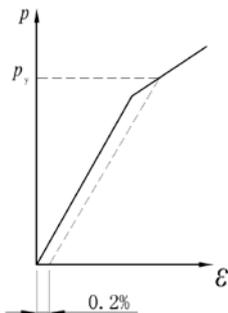


图 7 试验确定  $p_y$  的应变与压力的关系曲线

**12.6 爆破验证法**

12.6.1 本方法试件不应少于三个，且取试验的最小值。

12.6.2 爆破验证法最高允许工作压力按式 (51) 确定：

$$[p] = \frac{p_b \delta_{pc} [\sigma]_{bs} R_m}{4 \delta_{lc} [\sigma]_{bst} R_{mt}} \phi_w f \dots\dots\dots (51)$$

**12.7 应力分析验证法**

12.7.1 设计单位的职责如下：

- a) 设计单位应对分析设计的条件的准确性和完整性予以确认。
- b) 设计单位应对设计文件的条件的准确性和完整性负责。
- c) 设计文件至少应包括应力分析报告书、设计简图、计算简化模型图。
- d) 采用分析设计技术的部件总图应有应用本标准的设计单位批准标识。

12.7.2 应力分析计算应符合下列规定：

- a) 所采用的有限元计算分析程序应具有完整的程序说明文件，用户手册，标准考题。
- b) 计算结果应与已有的解析解，数值解或实验结果相比较，以证明计算程序的可靠性。

12.7.3 最高允许工作压力应力分量控制原则：

- a) 一次应力区，最大内、外壁平均或截面平均当量应力 1 倍的许用应力。
- b) 一次应力区，最大当量应力或截面平均应力与弯曲应力之和的当量应力小于 1.5 倍许用应力。
- c) 二次应力区，最大内外壁平均应力或截面平均当量应力小于 1.5 倍许用应力。
- d) 二次应力区，最大当量应力或截面平均应力与弯曲应力之和的当量应力小于 3 倍许用应力。

**13 附加厚度**

**13.1 符号**

- $C$  ——附加厚度，mm；
- $C_1$  ——腐蚀附加厚度，mm；
- $C_2$  ——工艺附加厚度，mm；
- $C_3$  ——厚度负偏差附加厚度，mm；
- $m$  ——钢管厚度负偏差的百分比值，%；
- $\alpha$  ——弯管工艺厚度变化率，%；
- $\delta$  ——名义厚度，mm；
- $\delta_t$  ——计算厚度，mm；

13.2 附加厚度  $C$  按式 (52) 计算：

$$C = C_1 + C_2 + C_3 \dots\dots\dots (52)$$

**13.3 腐蚀减薄附加厚度  $C_1$**

- 13.3.1 腐蚀减薄附加厚度  $C_1$  应根据实际腐蚀情况确定。一般情况，取  $C_1 = 0.5\text{mm}$ 。
- 13.3.2 锅筒筒体的厚度  $\delta > 20\text{mm}$ ，可取  $C_1 = 0$ 。
- 13.3.3 凸形封头的  $C_1$  取值与相连圆筒体相同。

**13.4 工艺附加厚度  $C_2$**

- 13.4.1 工艺附加厚度  $C_2$  应根据元件的实际制造工艺情况确定，一般情况按附录 B 选取。
- 13.4.2 外径  $D_o \leq 100\text{mm}$  的弯管或弯头，不校核内弧计算厚度时，弯管工艺附加厚度  $C_2$  应按附录

GB/T 16507.4—××××

B 选取，弯管工艺厚度变化率  $a$  应按式 (B.5) 计算。

### 13.5 厚度负偏差的附加厚度 $C_3$

13.5.1 钢管厚度负偏差的附加厚度  $C_3$  取钢板标准规定厚度负偏差。

13.5.2 钢管厚度负偏差的附加厚度  $C_3$  按式 (53) 或式 (54) 计算：

$$C_3 = \frac{m}{100-m}(\delta_1 + C_1 + C_2) \dots\dots\dots(53)$$

$$C_3 = \frac{m}{100} \delta \dots\dots\dots(54)$$

## 14 最高允许工作压力

### 14.1 符号

- $D_c$  ——盖板的计算直径，mm；
- $D_i$  ——圆筒体、封头、三通主管、等径叉形管的内径，mm；
- $D_o$  ——圆筒体、封头、三通主管、等径叉形管的外径，mm；
- $K_c$  ——盖板结构特性系数；
- $K_f$  ——平端盖结构特性系数；
- $K_i$  ——弯管内弧形状系数；
- $K_o$  ——弯管外弧形状系数；
- $K_s$  ——凸形封头结构形状系数；
- $[p]$  ——最高允许工作压力，MPa；
- $[p]_h$  ——水压试验最高允许压力，MPa；
- $[p]_i$  ——弯管或弯头和圆弧形集箱内弧最高允许工作压力，MPa；
- $[p]_m$  ——弯管或弯头和圆弧形集箱中弧最高允许工作压力，MPa；
- $[p]_o$  ——弯管或弯头和圆弧形集箱外弧最高允许工作压力，MPa；
- $R_e$  ——钢材在 20℃ 时的屈服强度或规定非比例延伸强度 ( $R_{p0.2}$ )，MPa；
- $Y_c$  ——盖板形状系数；
- $\beta_e$  ——按有效厚度确定的外径与内径的比值；
- $\delta_e$  ——圆筒体、焊制和锻造三通主管、热挤压三通过渡区、凸形封头的有效厚度，mm；
- $\delta_1$  ——平端盖或盖板的名义厚度，mm；
- $[\sigma]$  ——许用应力，MPa；
- $\varphi_{\min}$  ——最小减弱系数；
- $\varphi_1$  ——焊制和锻造三通、等径叉形管的减弱系数；
- $\varphi_w$  ——焊缝减弱系数。

### 14.2 直圆筒体

14.2.1 直圆筒体最高允许工作压力按式 (55) 或式 (56) 计算：

$$[p] = \frac{2\varphi_{\min}[\sigma]\delta_e}{D_i + \delta_e} \dots\dots\dots(55)$$

或

$$[p] = \frac{2\varphi_{\min}[\sigma]\delta_e}{D_o - \delta_e} \dots\dots\dots(56)$$

14.2.2 直圆筒体最高允许工作压力还应满足孔的补强章节的条款要求。

**14.3 凸形封头**

14.3.1 凸形封头最高允许工作压力按式(57)计算:

$$[p] = \frac{2\varphi_{\min}[\sigma]\delta_e}{K_s D_i + \delta_e} \dots\dots\dots(57)$$

14.3.2 凸形封头最高允许工作压力还应考虑封头直段最高允许工作压力,凸形封头直段最高允许工作压力按本章圆筒体计算。

**14.4 弯管或弯头和圆弧形集箱筒体**

14.4.1 弯管或弯头和圆弧形集箱筒体最高允许工作压力取(58)、(59)、(60)三式中的较小值:

外弧:

$$[p]_o = \frac{2\varphi_w[\sigma]\delta_e}{K_o D_o - \delta_e} \dots\dots\dots(58)$$

内弧:

$$[p]_i = \frac{2\varphi_w[\sigma]\delta_e}{K_i D_o - \delta_e} \dots\dots\dots(59)$$

中弧:

$$[p]_m = \frac{2\varphi_w[\sigma]\delta_e}{D_o - \delta_e} \dots\dots\dots(60)$$

14.4.2 式(58)、(59)、(60)中的 $\delta_e$ 取计算处的有效厚度。

14.4.3 圆弧形集箱筒体,式(65)中的 $\varphi_w$ 用 $\varphi_{\min}$ 替代。

**14.5 平端盖**

14.5.1 平端盖的最高允许工作压力按式(61)计算:

$$[p] = \left( \frac{\delta_i}{K_f D_i} \right)^2 [\sigma] \dots\dots\dots(61)$$

14.5.2 平端盖的最高允许工作压力同时还应考虑平端盖直段最高允许工作压力,平端盖直段最高允许工作压力按本章直圆筒体计算。

**14.6 盖板**

盖板的最高允许工作压力按式(62)计算:

$$[p] = 3.3 \left( \frac{\delta_i}{Y_c D_c} \right)^2 [\sigma] \dots\dots\dots(62)$$

**14.7 焊制、锻造三通和等径叉形管**

14.7.1 焊制、锻造三通和等径叉形管的最高允许工作压力按式(63)计算:

$$[p] = \frac{2\varphi_t[\sigma]\delta_e}{D_o - \delta_e} \dots\dots\dots(63)$$

14.7.2 焊制和锻造三通上若有允许开孔的孔桥，则在采用式(60)确定三通最高允许工作压力时， $\varphi_t$ 取由 8.6 确定的  $\varphi_t$  及参照 8.5 规定求得的最小孔桥减弱系数  $\varphi_{\min}$  中的小者。

**14.8 热挤压三通**

14.8.1  $D_o \leq 660\text{mm}$  的热挤压三通最高允许工作压力按式(64)计算：

$$[p] = \frac{1.9[\sigma](\delta_e - 2)}{1.3D_o - (\delta_e - 2)} \dots\dots\dots(64)$$

14.8.2  $D_o > 660\text{mm}$  的热挤压三通最高允许工作压力按式(65)计算：

$$[p] = \frac{2[\sigma](\delta_e - 10)}{1.3D_o - (\delta_e - 10)} \dots\dots\dots(65)$$

**14.9 水压试验压力**

14.9.1 设备水压试验压力按有关锅炉制造技术条件取用，但不应大于该设备各元件水压试验最高允许压力。

14.9.2 直圆筒体、焊制或锻造三通、等径叉形管水压试验最高允许压力按式（66）计算：

$$[p]_h = 0.45 \frac{\beta_e^2 - 1}{\beta_e^2} \varphi_{\min} R_e \dots\dots\dots(66)$$

14.9.3 凸形封头水压试验最高允许压力按式（67）计算：

$$[p]_h = \frac{0.9(\beta_e^3 - 1)}{(2 + \beta_e^3)K_h + (\beta_e^3 - 1)} \varphi_{\min} R_e \dots\dots\dots(67)$$

14.9.4 平端盖的水压试验最高允许压力按式（68）计算：

$$[p]_h = 0.9 \left( \frac{\delta_1}{K_f D_i} \right)^2 R_e \dots\dots\dots(68)$$

14.9.5 盖板的水压试验最高允许压力按式（69）计算：

$$[p]_h = 0.9 \left( \frac{\delta_1}{K_c Y_c D_c} \right)^2 R_e \dots\dots\dots(69)$$

14.9.6 水压试验最高允许压力计算的有效直圆筒体外径与内径比按式（70）或式（71）计算：

$$\beta_e = 1 + \frac{2\delta_e}{D_i} \dots\dots\dots(70)$$

或

$$\beta_e = \frac{D_o}{D_o - 2\delta_e} \dots\dots\dots(71)$$

15 附加应力校核

15.1 符号

- $A_e$  ——管子的有效横截面积,  $\text{mm}^2$ ;
- $D_i$  ——圆筒体内径,  $\text{mm}$ ;
- $D_o$  ——圆筒体外径,  $\text{mm}$ ;
- $F$  ——附加轴向力,  $\text{kN}$ ;
- $M$  ——校核截面的弯曲力矩,  $\text{kN}\cdot\text{mm}$ ;
- $M_t$  ——校核截面的扭转力矩,  $\text{kN}\cdot\text{mm}$ ;
- $P$  ——计算压力,  $\text{MPa}$ ;
- $W$  ——校核截面的抗弯截面模量,  $\text{mm}^3$ ;
- $\delta_e$  ——圆筒体、焊制和锻造三通主管、热挤压三通过渡区、等径叉形管或凸形封头的有效厚度,  $\text{mm}$ ;
- $\sigma_{aa}$  ——校核截面的附加轴向应力,  $\text{MPa}$ ;
- $\sigma_{ab}$  ——校核截面的附加弯曲应力,  $\text{MPa}$ ;
- $[\sigma]$  ——许用应力,  $\text{MPa}$ ;
- $\tau$  ——校核截面的附加扭转应力,  $\text{MPa}$ ;
- $\varphi_{\text{cmin}}$  ——校核截面的最小减弱系数;
- $\varphi_w$  ——焊缝减弱系数。

15.2 圆筒体弯曲应力

15.2.1 圆筒体各校核截面的最大弯曲应力按式(72)计算:

$$\sigma_{ab} = \frac{1000M}{W\varphi_w} \dots\dots\dots(72)$$

15.2.2 抗弯截面模量 $W$ 计算应考虑由于开孔对截面的减弱。 $W$ 的近似计算方法见附录C。

15.2.3 如圆筒体无较大的局部荷重,圆筒体荷重可按均布荷重考虑。

15.2.4 圆筒体荷重应包括:圆筒体及相连元件的金属重量、满水的水重以及绝热材料的重量等。

15.2.5 圆筒体弯矩 $M$ 计算力学模型,可采用两端外伸筒支梁。

15.3 圆筒体弯曲应力校核

15.3.1 当锅筒筒体支点间距大于10m或者最小孔桥减弱系数为横向孔桥时,应进行最大弯曲应力校核。最大弯曲应力应满足以下条件:

$$\sigma_{ab} \leq [\sigma] - \frac{P(D_i + \delta_e)}{4\varphi_{\text{cmin}}\delta_e} \dots\dots\dots(73)$$

15.3.2 集箱筒体最大弯曲应力应满足以下条件:

$$\sigma_{ab} \leq [\sigma] - \frac{p(D_o - 2\delta_e)^2}{4\varphi_{\text{cmin}}\delta_e(D_o - \delta_e)} \dots\dots\dots(74)$$

15.4 圆筒体弯曲应力校核的减弱系数

GB/T 16507.4—××××

15.4.1 校核截面最小减弱系数  $\varphi_{cmin}$  为所校核截面上最大弯曲应力部位的横向孔桥减弱系数和环向焊缝减弱系数的较小者。

15.4.2 横向孔桥与环向焊缝减弱重叠，则取两者的乘积。

15.5 管子或管道轴向管壁附加应力校核

15.5.1 由重力载荷引起的管子或管道轴向管壁附加应力(轴向应力、弯曲应力和扭转应力)可按式(75)进行校核：

$$\sigma_{aa} + \sqrt{\sigma_{ab}^2 + 4\tau^2} \leq [\sigma] - \frac{p(D_o - 2\delta_c)^2}{4\delta_c\varphi_w(D_o - \delta_c)} \dots\dots\dots(75)$$

$$\sigma_{aa} = \frac{1000F}{A_c\varphi_w} \dots\dots\dots(76)$$

$$\sigma_{ab} = \frac{1000M}{W\varphi_w} \dots\dots\dots(77)$$

$$\tau = \frac{500M_t}{W\varphi_w} \dots\dots\dots(78)$$

只有在校核断面上有环向焊缝时，才考虑环向焊缝减弱系数  $\varphi_w$ ，其值可按表 5 选取。

15.5.2 管道系统热应力可按 DL/T 5366 的要求进行校核。

16 结构限制和要求

16.1 符号

$C_1$  ——腐蚀附加厚度，mm；

$d_i$  ——接管、三通支管的内径，mm；

$[d]_{i,max}$  ——热挤压三通满足过渡区强度要求的支管最大允许内径，mm；

$D_i$  ——圆筒体、封头、三通主管、等径叉形管的内径，mm；

$D_o$  ——圆筒体、封头、三通主管、等径叉形管的外径，mm；

$D_{omax}$ 、 $D_{omin}$  ——分别为圆弧形集箱筒体、弯管或弯头同一截面上的最大外径和最小外径，mm；

$d$  ——开孔直径、或插入式整体焊接接管内径，mm；

$d_o$  ——接管、三通支管的外径，mm；

$h$  ——平端盖加工钝边高度、或热挤压三通支管高度，mm；

$h_i$  ——封头内高度，mm；

$h_{min}$  ——锻造三通支管最小高度，mm；

$h_r$  ——焊制三通补强板高度，mm；

$K_i$  ——焊角高度( $i=1, 2$ )，mm；

$l$  ——平端盖直段部分的长度，mm。

$L$  ——热挤压三通主管限制开孔最小长度，mm；

$L_1$  ——热挤压和锻造三通主管半长，mm；

$p_r$  ——锅炉额定压力，MPa；

$q_{\max}$  ——最大热流密度，kW/m<sup>2</sup>；

$r$  ——平端盖和三通的內转角过渡圆弧半径、或锻造三通主管和支管外壁过渡圆弧半径，mm；

$R$  ——弯管中心线的曲率半径、或热挤压三通外壁肩部最大过渡半径，mm；

$\alpha$  ——热挤压三通支管限制开孔区中心角，(°)；

$\delta$  ——圆筒体、焊制和锻造三通主管、等径叉形管或凸形封头的名义厚度，mm；

$\delta_{1d}$  ——热挤压鼓型三通缩口后主管圆筒部分的纵截面无接管侧最小需要厚度，mm；

$\delta_{1u}$  ——热挤压鼓型三通缩口后主管圆筒部分的纵截面试接管侧最小需要厚度，mm；

$\delta_b$  ——接管或三通支管名义厚度，mm；

$\delta_{dc}$  ——圆筒体、焊制和锻造三通主管、等径叉形管或凸形封头的设计厚度，mm；

$\delta_{bp}$  ——热挤压三通支管的最小需要厚度，mm；

$\delta_d$  ——热挤压直型三通主管圆筒部分的纵截面无接管侧最小需要厚度、或热挤压鼓型三通缩口前主管圆筒部分的纵截面无接管侧最小需要厚度，mm；

$\delta_{\min}$  ——最小需要厚度，mm；

$\delta_i$  ——计算厚度，mm；

$\delta_u$  ——热挤压直型三通主管圆筒部分的纵截面试接管侧最小需要厚度、或热挤压鼓型三通缩口前主管圆筒部分的纵截面试接管侧最小需要厚度，mm。

## 16.2 最大允许厚度

16.2.1  $p_r \leq 2.5\text{MPa}$  的不绝热锅筒筒体，其厚度不应大于表 16 所规定的值。

表 16 不绝热锅筒筒体的最大允许厚度 mm

工 作 条 件	最 大 允 许 厚 度
烟道内，烟温 > 600℃	30
烟道或炉膛内，烟温 > 900℃	26

16.2.2  $p_r > 2.5\text{MPa}$  的不绝热集箱筒体、焊制或热挤压三通厚度不应大于表 17 所规定的值。

表 17 不绝热集箱筒体和焊制三通的最大允许厚度 mm

工 作 条 件	最 大 允 许 厚 度
烟道内，烟温 > 600℃	45
烟道或炉膛内，烟温 > 900℃	30

16.2.3  $p_r \leq 2.5\text{MPa}$  的不绝热、防焦集箱筒体、焊制或热挤压三通厚度不应大于表 18 所规定的值。

表 18 不绝热集箱和防焦箱筒体焊制三通的最大允许厚度 mm

工 作 条 件	最 大 允 许 厚 度
烟道内，烟温 > 600℃	20
烟道或炉膛内，烟温 > 900℃	15

16.2.4  $q_{\max} \geq 580\text{kW/m}^2$  的受热面管子，名义厚度应满足以下条件：

$$\delta \leq \frac{D_o}{1 + \frac{D_o q_{\max}}{10^5 \lambda}} \dots\dots\dots(79)$$

**16.3 开孔等结构限制**

- 16.3.1 锅筒胀接管孔的孔桥减弱系数不宜小于 0.30。
- 16.3.2 锅筒集中下降管的管孔不应开在焊缝上。其它焊接管孔亦不宜开在焊缝上。
- 16.3.3 不等厚度锅筒筒体过渡区及以外一个厚度长度的区域不应开孔，过渡区的斜度不应超过 1:4。
- 16.3.4 额定压力大于 2.5MPa 的锅炉，接管（连接受热面管子的除外）的名义厚度  $\delta_b \geq 0.015d_o + 3.2\text{mm}$ 。
- 16.3.5 凸形封头除中心人孔外，若有  $d > 38\text{mm}$  的开孔时，在任意两孔中心的连线上，两孔边缘距离的投影长度不应小于两孔径投影之和的 1/3。
- 16.3.6 凸形封头除中心人孔外，若有  $d \leq 38\text{mm}$  的开孔时，在任意两孔中心的连线上，两孔边缘距离的投影长度不应小于较小的孔径投影长度。
- 16.3.7  $h_i/D_i \leq 0.35$  的凸形封头，开孔边缘至封头外壁边缘之间的投影距离不应小于  $0.1D_i + \delta$ 。
- 16.3.8  $h_i/D_i > 0.35$  的凸形封头，开孔边缘至封头与直段交接处的弧长不应小于  $\sqrt{D_i \delta_i}$ 。
- 16.3.9 凸形封头开孔边缘与扳边人孔扳边起弯点（或与焊接圈焊缝）的距离不小于  $\delta$ 。
- 16.3.10 凸形封头扳边人孔不应与焊缝重合。
- 16.3.11 凸形封头人孔密封面切口部位，径向最小剩余厚度不应小于封头最小需要厚度  $\delta_{\min}$ 。
- 16.3.12 平端盖中心孔的直径或椭圆孔长轴尺寸与受压直径之比值不应大于 0.8。
- 16.3.13 平端盖任意两孔边缘之间的距离不应小于其中小孔的直径。
- 16.3.14 平端盖开孔边缘至平端盖外边缘之间的距离不应小于  $2\delta_{dc}$ 。
- 16.3.15 平端盖上的孔不应开在内转角圆弧处。
- 16.3.16 焊制三通单筋、蝶式补强和厚度补强结构型式见图 8。
- 16.3.17 焊制三通单筋、蝶式补强元件的材质应与焊制三通主管的材质相同，其尺寸应满足表 23 要求值。

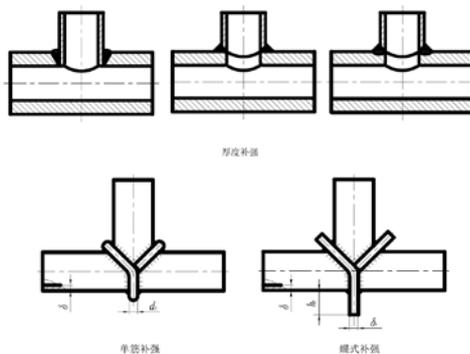


图 8 焊制三通补强结构型式

表 19 焊制三通单筋、蝶式补强元件的尺寸要求 mm

补强型式	补强元件尺寸	
	$\delta \leq 20$	$\delta > 20$
蝶式	$\delta_r = \delta ; h_r = 6\delta$	$\delta_r = \delta ; h_r = 120$
单筋	$d_r = 1.5\delta$	

16.3.18 焊接或锻造三通的主管和支管中心线向两侧偏移一个  $D_o$  距离为三通区域。三通区域应尽量避免开孔。若必须开孔，则应布置在非支管侧，开孔与主管焊缝边缘间距应大于 20mm，开孔的直径不应大于  $D_o/4$  和 60mm。

16.3.19 锻造三通内壁过渡转角圆弧半径  $r$  取转角处厚度的四分之一，但不大于 10mm。

16.3.20 锻造三通外壁过渡倒角的宽度和高度均取主管的最小需要厚度  $\delta_{min}$ ，但不大于 50mm。主管和支管外壁的过渡圆弧半径取  $r = 10\text{mm}$ 。

16.3.21 一般情况下，锻造三通主管外壁过渡段锥度取 1:2，支管端部内壁锥度取  $15^\circ$ 。

16.3.22 锻造三通主管半长  $L_1$  和支管最小高度  $h_{min}$  均不应小于  $1.15D_o$ 。

16.3.23 热挤压直型三通的厚度应符合表 24 要求。

16.3.24 热挤压鼓型三通的厚度应符合表 25 要求。

16.3.25 热挤压鼓型三通，当  $0.5D_o - \delta_{ld} > 0.5d_o - \delta_d$  时，应增大  $\delta_{ld}$ ，以防有用金属被切削。

表 20 热挤压直型三通的厚度要求 mm

	$\delta_d \geq 0.8\delta_1 + C_1$
	$\delta_d \geq \delta_{min}$ (主管圆筒体)
	$\delta_u \geq \delta_d$
	$\delta_u \geq \delta_{min}$ (过渡区)
	$\delta_{bp} \geq 0.5(d_o - [d]_{i\max})$
$\delta_{bp} \geq \delta_{min}$ (支管圆筒体)	

表 21 热挤压鼓型三通的厚度要求 mm

	$\delta_d \geq 0.8\delta_1 + C_1$
	$\delta_d \geq \delta_{min}$ (主管圆筒体)
	$\delta_u \geq \delta_d$
	$\delta_u \geq \delta_{min}$ (过渡区)
	$\delta_{ld} \geq \delta_{min}$ (主管圆筒体)

GB/T 16507.4—××××

	$\delta_{1u} \geq \delta_{\min}$ (主管圆筒体)
	$\delta_{bp} \geq 0.5(d_o - [d]_{i\max})$
	$\delta_{bp} \geq \delta_{\min}$ (支管圆筒体)

16.3.26 热挤压鼓型三通，当  $0.5D_o - \delta_{1u} > 0.5d_o - \delta_u$  时，应增大  $\delta_{1u}$ ，以防有用金属被切削。

16.3.27 热挤压直型三通的  $h$ 、 $R$ 、 $L$ 、 $L_1$  应符合表 26 的规定。

表 22 直型三通的  $h$ 、 $R$ 、 $L$ 、 $L_1$  规定值 mm

三通公称规格尺寸	$h$	$R$	$L = L_1$
254×254×203	203	46	216
273×273×219			
254×254×254	216	51	216
273×273×273			
305×305×203	229	51	254
305×305×254	241	62	254
324×324×273			
305×305×305	254	61	254
324×324×324			
356×356×254	257	61	279
356×356×305	270	72	279
356×356×324	279	72	279
356×356×324			
356×356×356	279	67	279
406×406×305	295	67	304
406×406×356	305	71	304
406×406×406	305	76	304
457×457×356	330	71	343
457×457×406	330	75	343
457×457×457	343	86	343
508×508×457	368	84	381
508×508×508	381	95	381
559×559×508	406	92	419
559×559×559	419	105	419

610×610×559	432	102	432
610×610×610	457	114	432
660×660×660	495	124	495
711×711×711	520	133	520
762×762×762	559	143	559
813×813×813	597	152	597
864×864×864	635	162	635
914×914×914	673	171	673

16.3.28 热挤压鼓型三通的高度  $h$ 、 $R$ 、 $L$ 、 $L_1$ 应符合表 27 的规定。

表 23 鼓型三通  $h$ 、 $R$ 、 $L$ 、 $L_1$  规定值 mm

三通公称尺寸	$h$	$R$	$L$	$L_1$
203×203×254	216	51	330	355
219×219×273				
254×254×305	254	61	330	355
273×273×324				
254×254×356	279	67	413	438
273×273×356				
305×305×356	279	67	305	330
324×324×356				
305×305×406	305	76	362	387
325×325×377	305	76	362	387
324×324×406				
356×356×406	305	76	362	387
356×356×457	343	86	462	489
356×356×508	381	95	529	558
356×356×559	419	105	716	743
356×356×610	457	114	716	743
406×406×457	343	86	360	387
406×406×508	381	95	451	476
406×406×559	419	105	652	679
406×406×610	457	114	652	679
457×457×508	381	95	406	431
457×457×559	419	105	581	610
457×457×610	457	114	581	610
450×450×635				
508×508×559	419	105	502	527
508×508×610	457	114	502	527
508×508×660	495	124	591	616
508×508×711	521	133	591	616

GB/T 16507.4—××××

559×559×610	457	114	461	482
559×559×660	495	124	591	616
559×559×711	521	133	591	616
610×610×660	495	124	505	533
610×610×711	521	133	505	533
660×660×711	521	133	402	431
注：选用非表列规格的三通时，其结构尺寸可参照表中相近三通尺寸。				

16.3.29 热挤压直型和鼓型三通分区示意图 9。

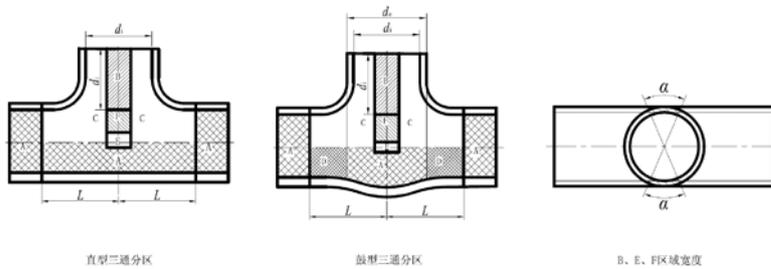


图 9 热挤压直型和鼓型三通分区示意图

16.3.30 热挤压三通 B、F、E 区域的宽度所对应的中心角  $\alpha$  与三通支管外径有关，支管外径与  $\alpha$  角的关系见表 24。

表 24 热挤压三通支管外径与  $\alpha$  角的关系

支管外径 mm	$\alpha$	支管外径 mm	$\alpha$
203、219	27°	508	40°
254、273	32°	559	39°
305、324	36°	610	38°
356、377	41°	660、711	37°
406	43°	762、813	36°
457	41°	864、914	35°

16.3.31 热挤压 E 区域的高度为三通主管中心线向支管侧偏移 20°；向无支管侧偏移 10° 范围内的弧长距离。

16.3.32 热挤压直型三通允许在 A 区域开孔。

16.3.33 热挤压鼓型出口三通允许在 A 区域开孔，入口三通只能开在内径为常数 A 区域开孔。

16.3.34 热挤压直型和鼓型三通的 C、E 区域不应开孔。

16.3.35 热挤压直型和鼓型 B、F 区域不宜开孔，在无法避免的情况下，允许在各种三通的 F 区域和入口三通的 B 区域开一沿支管轴向的孔排。

16.3.36 热挤压鼓型入口三通和辐射再热器出口三通的 D 区域不应开孔，其它三通允许开孔。

GB/T 16507.4—××××

16.3.37 热挤压三通区域的开孔直径不应大于  $D_o/4$  和 60mm。

附 录 A  
(规范性附录)  
锅筒低周疲劳寿命计算

## A.1 符号

- $a$  ——接管翻边开孔成型结构的内投影的长半轴, mm;
- $a_t$  ——材料热扩散率,  $\text{mm}^2/\text{min}$
- $b$  ——接管翻边开孔成型结构的内投影短半轴, mm;
- $C_r$  ——径向温差热应力结构系数;
- $C_t$  ——径向内外壁温差结构系数;
- $D_i$  ——圆筒体内径, mm;
- $e$  ——自然对数的底;
- $E$  ——钢材弹性模量, MPa;
- $E_0$  ——低周疲劳曲线的钢材弹性模量, MPa;
- $K_{1n}$  ——内压引起的环向应力集中系数;
- $K_{1r}$  ——内压引起的法向应力集中系数;
- $K_{1z}$  ——内压引起的轴向应力集中系数。
- $K_{2n}$  ——径向温差引起的环向热应力集中系数, 推荐  $K_{2n}=1.6$ ;
- $K_{2z}$  ——径向温差引起的轴向热应力集中系数, 推荐  $K_{2z}=1.6$ ;
- $K_{3n}$  ——周向温差引起的环向热应力集中系数, 推荐  $K_{3n}=-1$ ;
- $K_{3z}$  ——周向温差引起的轴向热应力集中系数, 推荐  $K_{3z}=-1$ ;
- $m$  ——总设计循环工况数;
- $n_i$  ——给定设计循环工况的预期循环次数;
- $N$  ——低周疲劳设计曲线图中的循环次数;
- $N_i$  ——给定设计循环工况的允许循环次数;
- $p$  ——计算压力, MPa;
- $p_m$  ——给定设计循环工况锅筒介质的最高、最低工作压力, MPa;
- $t$  ——介质升温或降温所经历的时间, min;
- $t_C$  ——给定设计循环工况计算壁温, °C;
- $t_H$  ——给定设计循环工况的最高壁温, °C;
- $t_i$  ——内壁温度, °C;
- $t_L$  ——给定设计循环工况的最低壁温, °C;
- $t_o$  ——外壁温度, °C;
- $\alpha$  ——材料线膨胀系数,  $1/^\circ\text{C}$ ;
- $\beta$  ——按名义厚度确定的外径与内径的比值;
- $\beta_1$  ——温度阻尼系数的参数;

- $\mu$  ——材料的泊松比,  $\mu=0.3$ ;  
 $\delta$  ——圆筒体名义厚度, mm;  
 $\delta_e$  ——圆筒体有效厚度, mm;  
 $\Delta p$  ——压力波动范围, MPa;  
 $\Delta t_{\max}$  ——最大周向外壁温差, °C;  
 $\Delta t_1$  ——径向内外壁温差, °C;  
 $\Delta t_2$  ——周向外壁温差, °C;  
 $\Delta \sigma$  ——交变应力范围, MPa;  
 $\Delta \sigma_{12}$ 、 $\Delta \sigma_{23}$ 、 $\Delta \sigma_{31}$  ——主应力差的波动范围, MPa;  
 $\sigma_a$  ——应力幅, MPa;  
 $\sigma'_a$  ——修正应力幅, MPa;  
 $\sigma_e$  ——锅筒筒体的当量薄膜应力, MPa。  
 $\sigma_{np}$  ——内压引起的环向应力分量, MPa;  
 $\sigma_{nr1}$  ——径向内外壁温差引起的环向应力分量, MPa;  
 $\sigma_{nr2}$  ——周向外壁温差引起的环向应力分量, MPa;  
 $\sigma_{pi}$  ——给定循环工况的峰值主应力 ( $i=1, 2, 3$ ), MPa;  
 $\sigma_{p12}$ 、 $\sigma_{p23}$ 、 $\sigma_{p31}$  ——峰值主应力的差值, MPa;  
 $\sigma_{rp}$  ——内压引起的法向应力分量, MPa;  
 $\sigma_{r1}$  ——径向内外壁温差引起的法向应力分量, MPa;  
 $\sigma_{r2}$  ——周向外壁温差引起的法向应力分量, MPa;  
 $\sigma_{vi}$  ——给定循环工况的谷值主应力 ( $i=1, 2, 3$ ), MPa;  
 $\sigma_{v12}$ 、 $\sigma_{v23}$ 、 $\sigma_{v31}$  ——谷值主应力的差值, MPa;  
 $\sigma_{zp}$  ——内压引起的轴向应力分量, MPa。  
 $\sigma_{z1}$  ——径向内外壁温差引起的轴向应力分量, MPa;  
 $\sigma_{z2}$  ——周向外壁温差引起的轴向应力分量, MPa;  
 $\sigma_1$  ——合成第一主应力, MPa;  
 $\sigma_2$  ——合成第二主应力, MPa;  
 $\sigma_3$  ——合成第三主应力, MPa;  
 $[\sigma]$  ——许用应力, MPa;  
 $\tau$  ——时间常数, min;  
 $\nu$  ——锅筒介质温度变化速率, °C/min;  
 $\chi$  ——温度阻尼系数。

## A.2 范围

本附录适用于强度计算、制造、检验满足 GB/T 16507 要求的锅筒设计疲劳计算, 在役锅筒可参照使用。

## A.3 结构要求和考核点

A.3.1 锅筒的焊接接管应采用整体结构, 翻边接管开孔成型结构的内投影长短半轴  $a$ 、 $b$  之比为

GB/T 16507.4—××××

2:1, 适用的接管结构见图A.1。

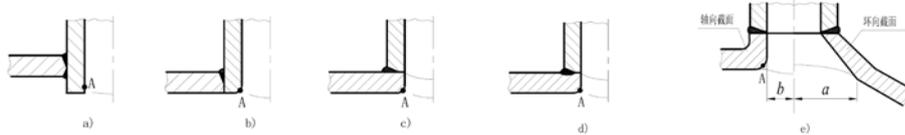


图 A.1 适用的接管结构

A.3.2 疲劳寿命计算首先应确定考核点,通常,锅筒疲劳寿命计算考核点位于较大开孔接管内转角处见图 A.1 中的 A 点,锅筒疲劳寿命计算其它考核点还包括孔桥、结构不连续处等应力集中部位。

A.4 应力计算原则

- A.4.1 应力计算是建立在线弹性的基础上的。
- A.4.2 假定考核点的主应力方向在载荷循环中不变化。
- A.4.3 应力集中系数可取本附录表 A.1 给出的推荐值,也可采用试验或数值计算获得的实际值。
- A.4.4 各接管型式考核点 A 处的内压应力集中系数推荐值见表 A.1。

表 A.1 考核点 A 处的内压应力集中系数

内压应力集中系数	结构型式	
	图 A.1.a)~d)	图 A.1.e)
$K_{In}$	3.1	2.5
$K_{Iz}$	-0.2	0.5
$K_{Ir}$	$-\frac{2\delta_e}{D_i + \delta_e}$	$-\frac{2\delta_e}{D_i + \delta_e}$

A.4.5 计算壁温按式(A.1)确定。

$$t_c = 0.75t_H + 0.25t_L \dots\dots\dots(A.1)$$

A.4.6 计算中钢材线膨胀系数 $\alpha$ 、弹性模量 $E$ 和热扩散率 $a_t$ 等参数均取计算壁温对应的值。

A.5 疲劳计算的判别条件

- A.5.1 调峰负荷机组的锅炉锅筒,应进行低周疲劳寿命计算。
- A.5.2 基本负荷机组的锅炉锅筒,可不进行低周疲劳寿命计算。
- A.5.3 在设计寿命期间,各设计工况的累计损伤满足式(A.38)条件,可不进行低周疲劳寿命计算。疲劳损伤的应力幅值 $\sigma_a$ 按 A.5.4 确定。
- A.5.4 压力和温度波动等工况的应力幅值 $\sigma_a$ 简化确定方法:

a) 对全幅度压力循环(包括启动-停炉)工况

$$\sigma_a = 3[\sigma] \dots\dots\dots(A.2)$$

b) 对预计压力波动范围  $\Delta p$  不小于 20% 计算压力  $p$  的循环工况

$$\sigma_a = 3 \frac{\Delta p}{p} [\sigma] \dots\dots\dots (A.3)$$

c) 对筒体径向内外壁温差  $\Delta t_1$  不小于 20℃ 的温差循环工况

$$\sigma_a = 2\alpha E \Delta t_1 \dots\dots\dots (A.4)$$

d) 对筒体周向外壁温差  $\Delta t_2$  不小于 40℃ 的温差循环工况

$$\sigma_a = \alpha E \Delta t_2 \dots\dots\dots (A.5)$$

**A.6 载荷及工况匹配**

A.6.1 载荷至少应包括：

- a) 锅筒介质内压。
- b) 锅筒筒体厚度方向径向温差。
- c) 锅筒筒体的周向温差。

A.6.2 运行工况至少应包括：

- a) 冷态启停
- b) 温态启停
- c) 热态启停
- d) 极热态启停
- e) 水压试验

A.6.3 根据机组的运行方式，确定循环工况的匹配组合。

**A.7 考核点的应力计算**

A.7.1 内压应力

A.7.1.1 考核点由内压力引起的三个主应力分量按式式 (A.6)、(A.7)、(A.8) 计算：

$$\sigma_{np} = K_{1n} \sigma_c \dots\dots\dots (A.6)$$

$$\sigma_{zp} = K_{1z} \sigma_c \dots\dots\dots (A.7)$$

$$\sigma_{rp} = K_{1r} \sigma_c \dots\dots\dots (A.8)$$

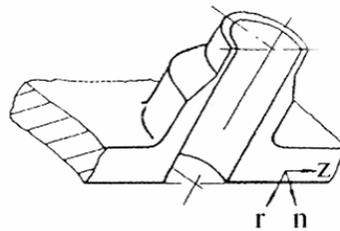


图 A.2 应力分量方向示意图

GB/T 16507.4—××××

A.7.1.2 锅筒筒体的当量薄膜应力 $\sigma_e$ 按式(A.9)计算:

$$\sigma_e = \frac{D_i + \delta_e}{2\delta_e} p_m \quad \dots\dots\dots(A.9)$$

A.7.2 径向温差热应力

A.7.2.1 锅筒筒体径向内外壁温差按式(A.10)计算:

$$\Delta t_1 = t_o - t_i = -\frac{C_t \delta^2 v}{a_t} (1 - e^{-\chi t / \tau}) \quad \dots\dots\dots(A.10)$$

$$C_t = \frac{2\beta^2 \ln \beta - \beta^2 + 1}{4(\beta - 1)^2} \quad \dots\dots\dots(A.11)$$

$$\chi = \sqrt{\frac{\beta - 1}{\beta_1}} \quad \dots\dots\dots(A.12)$$

$$\beta_1 = \frac{\beta^5 - 1}{5} - 4\beta^2 \left( \frac{\beta^3 \ln \beta}{3} - \frac{\beta^3 - 1}{9} \right) + 4\beta^4 [\beta(\ln \beta - 1)^2 + \beta - 2] \\ + 2 \left\{ 2\beta^2 [\beta(\ln \beta - 1) + 1] - \frac{\beta^3 - 1}{3} \right\} + \beta - 1 \quad \dots\dots\dots(A.13)$$

$$\tau = \frac{D_i^2}{16a_t} \quad \dots\dots\dots(A.14)$$

若  $|\Delta t_1| > |vt|$

$$\Delta t_1 = -vt \quad \dots\dots\dots(A.15)$$

A.7.2.2 径向温差热应力按下列公式计算:

环向热应力:

$$\sigma_{\theta 1} = K_{2n} \frac{\alpha E}{C_t (1 - \mu)} \Delta t_1 \quad \dots\dots\dots(A.16)$$

轴向热应力:

$$\sigma_{z1} = \begin{cases} 0 \\ K_{2z} \frac{\alpha E}{C_t (1 - \mu)} \Delta t_1 \quad (\text{图A.1.e接管型式}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots(A.17)$$

$$C_t = \frac{4\beta^2 (\beta^2 - 1) \ln \beta - 2(\beta^2 - 1)^2}{4\beta^4 \ln \beta - (3\beta^2 - 1)(\beta^2 - 1)} \quad \dots\dots\dots(A.18)$$

法向热应力:

$$\sigma_{rr1} = 0 \quad \dots\dots\dots (A.19)$$

A.7.3 周向温差热应力

周向温差热应力按式 (A.20)、(A.21)、(A.22) 计算:

环向热应力:

$$\sigma_{nr2} = 0.4K_{3n} \alpha E \Delta t_{\max} \quad \dots\dots\dots (A.20)$$

轴向热应力:

$$\sigma_{zt2} = \begin{cases} 0 \\ 0.4K_{3z} \alpha E \Delta t_{\max} \quad (\text{图A.1.e)接管型式}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (A.21)$$

法向热应力:

$$\sigma_{rr2} = 0 \quad \dots\dots\dots (A.22)$$

一般情况, 谷值应力计算时  $\Delta t_{\max}$  可取 40℃, 峰值应力计算时  $\Delta t_{\max}$  可取 10℃。

A.7.4 合成主应力

内压和温差引起的合成主应力按式 (A.23)、(A.24)、(A.25) 计算:

$$\sigma_1 = \sigma_{ip} + \sigma_{nr1} + \sigma_{nr2} \quad \dots\dots\dots (A.23)$$

$$\sigma_2 = \sigma_{zp} + \sigma_{zt1} + \sigma_{zt2} \quad \dots\dots\dots (A.24)$$

$$\sigma_3 = \sigma_{rp} + \sigma_{rr1} + \sigma_{rr2} \quad \dots\dots\dots (A.25)$$

A.8 给定循环工况的低周疲劳寿命计算

A.8.1 峰、谷值主应力和主应力差值

A.8.1.1 峰值主应力  $\sigma_{pi}$  和谷值主应力  $\sigma_{vi}$  分别按 A.6.2 条~A.6.5 条的规定计算。

A.8.1.2 峰值主应力差值按式 (A.26)、(A.27)、(A.28) 计算:

$$\sigma_{p12} = \sigma_{p1} - \sigma_{p2} \quad \dots\dots\dots (A.26)$$

$$\sigma_{p23} = \sigma_{p2} - \sigma_{p3} \quad \dots\dots\dots (A.27)$$

$$\sigma_{p31} = \sigma_{p3} - \sigma_{p1} \quad \dots\dots\dots (A.28)$$

A.8.1.3 谷值主应力差值按式 (A.29)、(A.30)、(A.31) 计算:

$$\sigma_{v12} = \sigma_{v1} - \sigma_{v2} \quad \dots\dots\dots (A.29)$$

$$\sigma_{v23} = \sigma_{v2} - \sigma_{v3} \quad \dots\dots\dots (A.30)$$

$$\sigma_{v31} = \sigma_{v3} - \sigma_{v1} \dots\dots\dots (A.31)$$

A.8.2 主应力差波动范围、交变应力范围及应力幅值

A.8.2.1 主应力差波动范围按式 (A.32)、(A.33)、(A.34) 计算:

$$\Delta\sigma_{12} = |\sigma_{p12} - \sigma_{v12}| \dots\dots\dots (A.32)$$

$$\Delta\sigma_{23} = |\sigma_{p23} - \sigma_{v23}| \dots\dots\dots (A.33)$$

$$\Delta\sigma_{31} = |\sigma_{p31} - \sigma_{v31}| \dots\dots\dots (A.34)$$

A.8.2.2 交变应力范围按式 (A.35) 计算:

$$\Delta\sigma = \max\{\Delta\sigma_{12}, \Delta\sigma_{23}, \Delta\sigma_{31}\} \dots\dots\dots (A.35)$$

A.8.2.3 应力幅值按式 (A.36) 计算:

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} \dots\dots\dots (A.36)$$

A.8.2.4 修正的应力幅值按式 (A.37) 计算:

$$\sigma'_a = \sigma_a \frac{E_0}{E^t} \dots\dots\dots (A.37)$$

A.8.3 允许循环次数

由  $\sigma'_a$  值在低周疲劳设计曲线(图 A.3)上查取  $N$  值, 此值即为该工况的允许循环次数  $N_i$ 。

A.9 累积损伤安全准则

累积损伤的安全准则为:

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \dots\dots\dots (A.38)$$

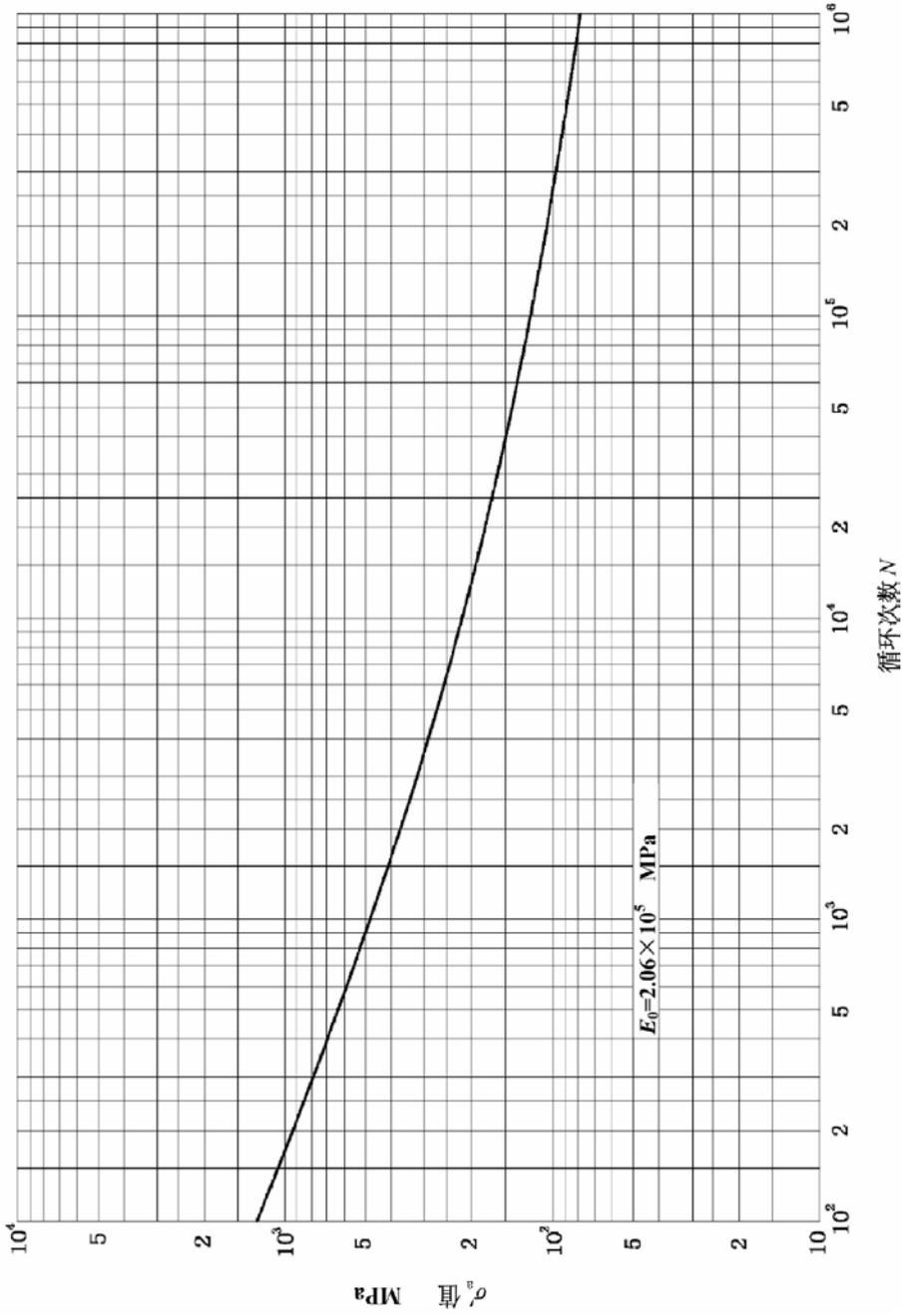


图 A.3 适用于工作温度低于 375℃ 锅筒常用钢材的低周疲劳设计曲线

附 录 B  
(资料性附录)  
—般情况工艺附加厚度  $C_2$  的选取

B.1 符号

- $C_1$  ——腐蚀附加厚度, mm;
- $C_2$  ——工艺附加厚度, mm;
- $C_3$  ——厚度负偏差附加厚度, mm;
- $D_i$  ——封头、管子内径, mm;
- $D_o$  ——封头、管子外径, mm;
- $h_i$  ——封头内高度, mm;
- $p_r$  ——锅炉额定压力, MPa;
- $R$  ——弯管中心线的曲率半径, mm;
- $\alpha$  ——弯管工艺厚度变化率, %;
- $\delta$  ——名义厚度, mm;
- $\delta_t$  ——计算厚度, mm;

B.2 一般情况工艺附加厚度  $C_2$

B.2.1 锅筒筒体厚度  $\delta \leq 100\text{mm}$ , 卷制工艺附加厚度可按表 B.1 选取。

表 B.1 卷制工艺减薄值 mm

卷制工艺	热 卷		冷 卷	
	$p_r \geq 9.8\text{MPa}$	$p_r < 9.8\text{MPa}$	热 校	冷 校
减 薄 值	4	3	1	0

B.2.2 管制弯管、弯头和圆弧形集箱筒体外弧的工艺附加厚度  $C_2$  按式 (B.1) 或式 (B.2) 计算:

$$C_2 = \frac{\alpha}{100 - \alpha} (\delta_t + C_1) \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

$$C_2 = \frac{\alpha}{100} (\delta - C_3) \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

B.2.3 管制的弯管、弯头和圆弧形集箱筒体内弧的工艺附加厚度  $C_2$  按式 (B.3) 或式 (B.4) 计算:

$$C_2 = \frac{\alpha}{100 + \alpha} (\delta_t + C_1) \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

$$C_2 = -\frac{\alpha}{100} (\delta - C_3) \quad \dots\dots\dots (B.4)$$

B.2.4 直管、直集箱筒体与管制弯管、弯头和圆弧形集箱筒体中弧的工艺附加厚度  $C_2 = 0$ 。

B.2.5 弯管工艺厚度变化率  $\alpha$ ，可按实际弯管工艺确定。

B.2.6 无实际弯管工艺厚度变化率时，弯管工艺厚度变化率可按式（B.5）计算：

$$\alpha = \frac{25D_0}{R} \dots\dots\dots (B.5)$$

B.2.7 凸形封头冲压工艺附加厚度  $C_2$  可按表 B.2 选取：

表 B. 2 冲压工艺附加厚度 mm

结构参数	凸形封头	直段
椭球封头 ( $0.20 \leq h_1/D_1 \leq 0.35$ )	$0.10(\delta_1 + C_1)$ 或 $0.09(\delta - C_3)$	0
深椭球或球形封头 ( $0.35 < h_1/D_1 \leq 0.5$ )	$0.15(\delta_1 + C_1)$ 或 $0.13(\delta - C_3)$	0

附录 C  
(资料性附录)

开孔减弱截面的抗弯截面模量  $W$  的近似算法

C.1 符号

- $D_i$  ——圆筒体、封头、三通主管、等径叉形管的内径, mm;
- $D_o$  ——圆筒体、封头、三通主管、等径叉形管的外径, mm;
- $d_i$  ——孔的直径 ( $i=1, 2, 3, \dots$ ), mm;
- $I_{x1}$  ——开孔减弱截面对圆筒体截面重心水平轴线的惯性矩, mm<sup>4</sup>;
- $R_a$  ——圆筒体等回转壳体结构不连续部位的内外壁平均半径, mm;
- $W_{x1}$  ——圆筒体开孔减弱截面对截面重心水平轴线抗弯截面模量, 简称“抗弯截面模量”, mm<sup>3</sup>;
- $y_b$  ——圆筒体开孔减弱截面重心与截面水平轴线之间的垂直距离, mm;
- $\alpha_i$  ——接管中心线与圆筒体水平中心轴线之间的夹角 ( $i=1, 2, 3, \dots$ ), (°);
- $\delta$  ——圆筒体、焊制和锻造三通主管、等径叉形管或凸形封头的名义厚度, mm;

C.2 开孔减弱截面的抗弯截面模量的计算公式

开孔减弱截面的抗弯截面模量按式 (C.1) 计算:

$$W_{x1} = \frac{I_{x1}}{D_o/2 + y_b} \dots\dots\dots (C.1)$$

$$y_b = \frac{-\delta R_a \sum d_i \sin \alpha_i}{\pi(D_o^2 - D_i^2)/4 - \sum \delta d_i} \dots\dots\dots (C.2)$$

$$I_{x1} = \frac{\pi}{64}(D_o^4 - D_i^4) - \sum \left( \frac{\delta d_i^3}{12} \cos^2 \alpha_i + \frac{d_i \delta^3}{12} \sin^2 \alpha_i + d_i \delta R_a^2 \sin^2 \alpha_i \right) - y_b^2 \left[ \frac{\pi}{4}(D_o^2 - D_i^2) - \sum \delta d_i \right] \dots\dots\dots (C.3)$$

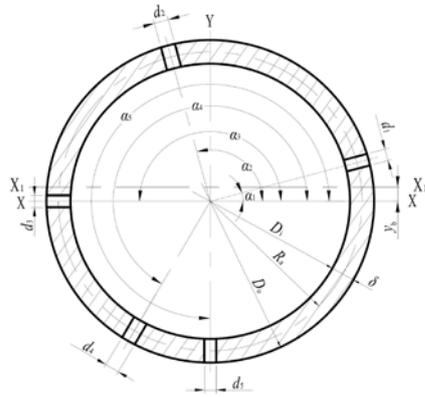


图 C.1 锅筒筒体截面图

C.3 开孔减弱截面的抗弯截面模量的近似计算

抗弯截面模量可按式 (C.4) 近似计算:

$$W_{x1} \approx \frac{\pi (D_o^4 - D_i^4) - \sum d_i \delta R_a^2 \sin^2 \alpha_i}{D_o/2 + y_b} \dots\dots\dots (C.4)$$

附录 D  
(资料性附录)  
 $\Delta P_a$  的选取方法

D.1 符号

- $\Delta P_a$ ——安全阀开启压力对于设置安全阀处元件工作压力的压差, MPa;
- $\Delta P_{op}$ ——安全阀的启闭压差, 取作安全阀整定压力 P 的百分数, MPa;
- $\Delta P_{set}$ ——安全阀整定压力的极限偏差, 取作安全阀整定压力 P 的百分数, MPa。

D.2  $\Delta P_a$  的选取方法

$$\Delta P_a = \Delta P_{op} + \Delta P_{set} \dots \dots \dots (D.1)$$

其中安全阀启闭压差  $\Delta P_{op}$  按表 D.1 中选取, 安全阀整定压力的极限偏差  $\Delta P_{set}$  按表 D.2 中选取:

表 D.1 蒸汽用安全阀的启闭压差  $\Delta P_{op}$  单位: MPa

整定压力	启闭压差	
	蒸汽动力锅炉用	直流锅炉、再热器和其他蒸汽设备用
≤0.4	≤0.003	≤0.04
>0.4	≤7%整定压力 (≤4%整定压力)	≤10%整定压力

注: 供需双方可协商采用本表中括号内的数值

表 D.2 蒸汽锅炉用安全阀的整定压力的极限偏差  $\Delta P_{set}$  单位: MPa

整定压力	整定压力极限偏差
≤0.5	±0.015
>0.5~2.3	±3%整定压力
>2.3~7.0	±0.07
>7.0	±1%整定压力