

UDC 621.181.02: 620.1  
J 98



中华人民共和国国家标准

GB 9222—88

---

## 水管锅炉受压元件强度计算

Strength calculation of pressure parts  
for watertube boilers

1988-06-06 发布

1989-01-01 实施

---

国家技术监督局 发布

# 目 次

1 材料和许用应力 .....	(1)
2 锅筒筒体的计算 .....	(6)
3 圆筒形集箱筒体的计算 .....	(17)
4 管子和锅炉范围内的管道的计算 .....	(20)
5 凸形封头的计算 .....	(24)
6 平端盖、平堵头及盖板的计算 .....	(27)
7 孔的加强计算 .....	(32)
8 异形元件的计算 .....	(39)
9 决定元件最高允许计算压力的验证试验 .....	(45)
附录 A 非常用锅炉钢材在不同计算壁温下的基本许用应力 $(\sigma)$ , (补充件) .....	(50)
附录 B 开孔减弱断面的抗弯断面系数 $W$ 的近似计算方法(参考件) .....	(52)
附录 C 例题(参考件) .....	(54)

# 中华人民共和国国家标准

## 水管锅炉受压元件强度计算

GB 9222—88

Strength calculation of pressure  
parts for watertube boilers

本标准规定了水管锅炉用材料及其许用应力；并规定了有关受压元件如锅筒筒体、集箱筒体、管子、封头和异形元件的强度计算方法及决定最高允许计算压力的验证试验方法。

本标准适用于额定压力不低于 0.10MPa 的固定式水管蒸汽锅炉和固定式水管热水锅炉。

对于调峰负荷机组及其它频繁启动、参数波动较大的锅炉，可按本标准计算，但必须进行疲劳强度校核。

锅炉的设计、制造、安装、使用、修理及改造，应符合国家劳动人事部颁布的《蒸汽锅炉安全技术监察规程》、《热水锅炉安全技术监察规程》及有关锅炉制造的技术条件及标准。

### 1 材料和许用应力

#### 1.1 符号说明

本章所用符号的意义和单位如下：

$\sigma_b$ ——材料在 20℃ 的抗拉强度，MPa；

$\sigma_s$ ——材料在 20℃ 的屈服限或条件屈服限(残余变形为 0.2%)，MPa；

$\sigma'_s$ ——材料在计算壁温时的屈服限或条件屈服限(残余变形为 0.2%)，MPa；

$\sigma'_D$ ——材料在计算壁温时 10<sup>5</sup>h 的持久强度，MPa；

$\delta_5$ ——材料在 20℃ 的延伸率，%；

$[\sigma]$ ——许用应力，MPa；

$[\sigma]$ ——基本许用应力，MPa；

$n_b$ ——对应于抗拉强度的安全系数；

$n_s$ ——对应于屈服限或条件屈服限的安全系数；

$n_D$ ——对应于 10<sup>5</sup>h 持久强度的安全系数；

$\eta$ ——基本许用应力的修正系数；

$t_{bi}$ ——计算壁温，℃；

$t_j$ ——介质额定平均温度，℃；

$t_b$ ——对应于计算压力下的介质饱和温度，℃；(热水锅炉为介质平均温度，℃)

$X$ ——介质混合程度系数；

$\Delta t$ ——温度偏差，℃；

$\beta$ ——锅筒筒体、集箱筒体及管子的外径与内径的比值；

$S$ ——壁厚，mm；

$\lambda$ ——钢材导热系数，kW/(m·℃)；

$q_{max}$ ——最大热流密度，kW/m<sup>2</sup>；

$\alpha_2$ ——内壁对介质的放热系数，kW/(m<sup>2</sup>·℃)；

$J$ ——均流系数。

#### 1.2 材料

1.2.1 水管锅炉受压元件的材料应符合国家或冶金工业部有关锅炉钢材现行标准的规定。

使用本标准未列入的材料应符合《蒸汽锅炉安全技术监察规程》或《热水锅炉安全技术监察规程》的有关规定。

1.2.2 用于制造锅炉受压元件的板材应具有良好的塑性，其延伸率  $\delta_5$  应不小于 18%。

### 1.3 许用应力

1.3.1 本章和附录 A 有关钢材的许用应力规定，仅适用于水管式锅炉受压元件。

许用应力按下式计算：

$$[\sigma] = \eta [\sigma]_j \dots\dots\dots(1)$$

基本许用应力按下列公式计算并取其中最小值：

$$[\sigma]_j \leq \frac{\sigma_b}{n_b} \dots\dots\dots(2)$$

$$[\sigma]_j \leq \frac{\sigma_s^t}{n_s} \dots\dots\dots(3)$$

$$[\sigma]_j \leq \frac{\sigma_D^t}{n_D} \dots\dots\dots(4)$$

计算时， $\sigma_b$  和  $\sigma_s^t$  取钢材(板材和管材)大量试验结果的统计下限值； $\sigma_D^t$  取钢材大量试验结果的 10<sup>5</sup>h 持久强度的平均值；安全系数取：

$$\left. \begin{array}{l} n_b = 2.7 \\ n_s = 1.5 \\ n_D = 1.5 \end{array} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

国内常用锅炉钢材的基本许用应力 $[\sigma]_j$  应取表 1 给出的值，非常用钢材的基本许用应力 $[\sigma]_j$  应取附录 A 给出的值。

修正系数  $\eta$  根据元件结构特点和工作条件，一般可按表 2 的推荐值选取。

1.3.2 对于表 1 和附录 A 所未列入的材料，如符合 1.2 条中的有关规定，它的基本许用应力 $[\sigma]_j$  应按式(2)至(5)计算。计算时， $\sigma_b$ 、 $\sigma_s^t$  及  $\sigma_D^t$  应取相应钢号的最低保证值；只有在没有保证值时，才可用钢材抽样试验，并将试验所得  $\sigma_b$  和  $\sigma_s^t$  的最小值及 10<sup>5</sup>h 的  $\sigma_D^t$  的平均值乘以 0.90 作为计算取值。抽样和试验应按有关标准进行。

1.3.3 锅炉低碳钢、低碳锰钢及低碳锰钒钢在 350℃ 以下，其它低合金热强钢在 400℃ 以下，其基本许用应力一般只需按式(2)和(3)计算，不必考虑式(4)。

表 1 常用锅炉钢材在不同计算壁温下的基本许用应力  $[\sigma]$  MPa

钢号 与 标准号	10	20	20g	20G	16Mng	15CrMo	12Cr1MoV	12Cr2MoWV	12Cr3MoVSi	
	GB 3087 —82	GB 3087 —82	GB 713 —86	GB 5310 —85	GB 713 —86	GB 5310 —85	GB 5310 —85	TiB*(102) GB 5310 —85	TiB*(T11) GB 5310 —85	
$\sigma_b$	333	392	400	402	470	441	441	540	608	
$\sigma_s$	196	226	225	216	305	226	255	343	441	
计 算 壁 温 $t_w$	20	124	145	148	148	174	150	163	200	232
	250	104	125	125	125	149	148	156		
	260	101	123	123	123	146	147	155		
	280	96	118	118	118	140	145	153		
	300	91	113	113	113	135	143	151		
	320	89	109	109	109	132	140	148		
	340	84	102	102	102	130	136	144		
	350	80	100	100	100	129	135	143		
	360	78	97	97	97	127	132	141		
	380	75	92	92	92	122	131	138		
	400	70	87	87	87	117	128	135		
	410	68	83	83	83		127	133		
	420	66	78	78	78		126	132		
	430	61	75	75	75		125	131		
	440	55	66	66	66		124	130		
	450	49	57	57	57		123	128		
	460	45	50		50		122	126		
	470	40	43		43		120	125		
	480	37	38		38		119	124		
	490						112	121		
500						96	118			
510						82	110			
520						69	98			
530						59	86			
540						49	77	90	110	

续表 1

钢号 与 标准号	10	20	20g	20G	16Mng	15CrMo	12Cr1MoV	12Cr2MoWV TiB <sup>*</sup> (102)	12Cr3MoVSi TiB <sup>*</sup> (111)
	GB 3087 —82	GB 3087 —82	GB 713 —86	GB 5310 —85	GB 713 —86	GB 5310 —85	GB 5310 —85	GB 5310 —85	GB 5310 —85
计 算 壁 温	550					40	71	84	97
	560						65	79	87
	570						57	74	75
	580						50	69	65
	590							64	58
	600							59	51
	610							(52)	(45)
	620							(43)	(39)

注:①采用括号内的 $[\sigma]$ 计算壁厚时,必须考虑氧化损失。

②碳钢制成的集箱,其计算壁温不应超过 430℃,对于 20G 钢,若要求使用寿命在 20 年内,可提高至 450℃。

③板厚适用范围:20g,  $S \leq 60\text{mm}$ ; 16Mng,  $S \leq 36\text{mm}$ 。

④相邻计算壁温数值之间的 $[\sigma]$ ,可用算术内插法确定,但需舍弃小数点后的数字。

⑤铸钢件的 $[\sigma]$ 取表中相应数值的 0.70 倍,锻钢件的基本许用应力,当用型钢锻造时,可取表中相应钢号的数值;当用钢锭锻造时,可取表中相应钢号数值的 0.90 倍。

⑥表中粗线下方的数据系按持久强度 $\sigma_b^t$ 计算的,与此数据相对应的温度表示该钢种持久强度对基本许用应力起控制作用的温度,对于带\*的钢号,此粗线并不表示按持久强度计算基本许用应力的起始温度。

表 2 修正系数  $\eta$ 

元 件 型 式 和 工 作 条 件	$\eta$
锅筒和集箱筒体	
不受热(在烟道外或可靠绝热)	1.00
受热(烟温不超过 600℃)	0.95
受热(烟温超过 600℃)	0.90
管子(包括管接头)和锅炉范围内的管道	1.00
凸形封头	1.00
圆形平端盖	见表 18
圆形平堵头、圆形盖板或椭圆盖板	1.00
异形元件	
不受热(在烟道外或可靠绝热)	1.00
受热(烟温不超过 600℃)	0.95
受热(烟温超过 600℃)	0.90

注:①对于被密集管束所遮挡的锅筒, $\eta$ 值按烟温不超过 600℃处理。

②对于额定压力不小于 13.7MPa 的锅炉锅筒, $\eta$ 值取为 0.90。

#### 1.4 计算壁温

1.4.1 用于强度计算的计算壁温,取元件温度最高部位内外壁温的算术平均值。

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。

在任何情况下, 锅炉受压元件的计算壁温不应取得低于 250℃。

#### 1.4.2 锅筒筒体、集箱筒体及管子的计算壁温应按表 3 至 5 确定。

表 3 锅筒筒体计算壁温<sup>1)</sup>  $t_{bi}$       ℃

工 作 条 件		计 算 公 式
不受热(在烟道外)		$t_{bi} = t_b$
采取可靠绝热措施	在烟道内	$t_{bi} = t_b + 10$
	在炉膛内	$t_{bi} = t_b + 40$
被密集管束所遮挡 <sup>2)</sup>		$t_{bi} = t_b + 20$
不绝热	在烟温不超过 600℃ 的对流烟道内	$t_{bi} = t_b + 30$
	在烟温为 600~900℃ 的对流烟道内 <sup>2)</sup>	$t_{bi} = t_b + 50$
	在烟温为 900℃ 以上的对流烟道内或炉膛内 <sup>3)</sup>	$t_{bi} = t_b + 90$

注: 1) 对于受热的锅筒筒体, 本表给出的计算公式, 系指水空间受热情况。

2) 指透过管束的辐射热流不大, 而且锅筒筒体壁面不受烟气的强烈冲刷。

3) 不绝热锅筒筒体的壁厚应满足表 8 的要求。

表 4 集箱和防焦箱筒体<sup>1)</sup> 计算壁温  $t_{bi}$       ℃

内 部 介 质	工 作 条 件	计 算 公 式
水或汽水混合物	在烟道外(不受热)	$t_{bi} = t_j$
	在烟道内, 采取可靠绝热措施, 防止受辐射和燃烧产物的直接作用	$t_{bi} = t_j + 10$
	在烟温不超过 600℃ 的对流烟道内, 不绝热	$t_{bi} = t_j + 30$
	在烟温为 600~900℃ 的对流烟道内, 不绝热 <sup>2)</sup>	$t_{bi} = t_j + 50$
	在炉膛内, 不绝热 <sup>2)</sup>	$t_{bi} = t_j + 110$
饱和蒸汽	在烟道外(不受热)	$t_{bi} = t_b$
	在烟道内, 采取可靠绝热措施, 防止受辐射和燃烧产物的直接作用	$t_{bi} = t_b + 25$
	在烟温不超过 600℃ 的对流烟道内, 不绝热	$t_{bi} = t_b + 40$
	在烟温为 600~900℃ 的对流烟道内, 不绝热 <sup>2)</sup>	$t_{bi} = t_b + 60$
过热蒸汽	在烟道外(不受热)	$t_{bi} = t_j + X\Delta t$
	在烟道内, 采取可靠绝热措施, 防止受辐射和燃烧产物的直接作用	$t_{bi} = t_j + 25 + X\Delta t$
	在烟温不超过 600℃ 的对流烟道内, 不绝热	$t_{bi} = t_j + 40 + X\Delta t$
	在烟温为 600~900℃ 的对流烟道内, 不绝热 <sup>2)</sup>	$t_{bi} = t_j + 60 + X\Delta t$

注: 1) 对于受热的汽水混合物集箱和防焦箱筒体, 本表给出的计算公式, 系指不出现自由水面的情况。

2) 不绝热集箱筒体的壁厚应满足 3.6 条的要求。

表 5 管子和管道的计算壁温  $t_{bi}$ 

℃

元 件	条 件	计 算 公 式
沸 腾 管	锅炉额定压力不超过 13.7MPa 及 $q_{max}$ 不超过 407kW/m <sup>2</sup>	$t_{bi} = t_b + 60$
	其它情况	式(8)
省 煤 器	对流式省煤器	$t_{bi} = t_j + 30$
	辐射式省煤器	$t_{bi} = t_j + 60$
过 热 器	所有情况 如无热力计算资料, 在结构及布置合理前提下, 可按下述方式处理: 对流式过热器	式(8)
	辐射式或半辐射式(屏式)过热器	$t_{bi} = t_j + 50$ $t_{bi} = t_j + 100$
管 道	在烟道外(不受热)	$t_{bi} = t_f$

1.4.3 对于表 3 至表 5 所没有包括进去的情况, 可按下列公式确定计算壁温:

a. 锅筒筒体

$$t_{bi} = t_b + \frac{\beta q_{max}}{\alpha_2} + \frac{q_{max} S}{1000 \lambda} \frac{\beta}{\beta + 1} \dots\dots\dots(6)$$

b. 集箱筒体

$$t_{bi} = t_j + \frac{\beta q_{max}}{\alpha_2} + \frac{q_{max} S}{1000 \lambda} \frac{\beta}{\beta + 1} + X \Delta t \dots\dots\dots(7)$$

c. 管子

$$t_{bi} = t_f + J \left( \frac{\beta q_{max}}{\alpha_2} + \frac{q_{max} S}{1000 \lambda} \frac{\beta}{\beta + 1} \right) + \Delta t \dots\dots\dots(8)$$

1.4.4 表 3 至表 5 及式(6)至(8)中的  $t_j$ 、 $t_b$ 、 $q_{max}$ 、 $X$ 、 $\Delta t$  及  $J$  应取锅炉热力计算及水动力计算所确定的数值, 其中:

温差偏差  $\Delta t$ , 在任何情况下不应小于 10℃。

介质混合程度系数  $X$ , 对于集箱, 一般可取 0.50; 当介质从集箱端部进入时, 允许取为零; 对于不受热的过热蒸汽集箱, 即使完全混合, 也应取  $X \Delta t = 10℃$ 。

导热系数  $\lambda$  按有关手册选取。

## 2 锅筒筒体的计算

### 2.1 符号说明

本章所用符号的意义和单位如下:

$S_l$ ——锅筒筒体理论计算壁厚, mm;

$S_{min}$ ——锅筒筒体最小需要壁厚, mm;

$S$ ——锅筒筒体取用壁厚<sup>1)</sup>(简称“壁厚”), mm;

$S_y$ ——锅筒筒体有效壁厚, mm;

$S_l$ ——管接头取用壁厚, mm;

- $C$ ——考虑腐蚀减薄、钢板下偏差的负值和工艺减薄的附加壁厚, mm;  
 $C_1$ ——考虑腐蚀减薄的附加壁厚, mm;  
 $C_2$ ——考虑钢板下偏差的负值和工艺减薄的附加壁厚, mm;  
 $D_w$ ——锅筒筒体外径, mm;  
 $D_n$ ——锅筒筒体内径, mm;  
 $d_w$ ——锅筒管接头外径, mm;  
 $\beta_f$ ——按锅筒筒体理论计算壁厚算出的外径与内径的比值;  
 $\beta$ ——按锅筒筒体有效壁厚算出的外径与内径的比值;  
 $P$ ——计算压力(表压), MPa;  
 $[P]$ ——校核计算最高允许计算压力(表压), MPa;  
 $P_g$ ——工作压力(表压), MPa;  
 $P_c$ ——锅炉额定压力(锅炉铭牌压力, 表压), MPa;  
 $\Delta P_n$ ——锅炉出口安全阀较低始启压力与额定压力之差值, MPa;  
 $\Delta P_z$ ——最大流量时计算元件至锅炉出口之间的压力降, MPa;  
 $\Delta P_{sz}$ ——计算元件所受液柱静压力值, MPa;  
 $P_{sw}$ ——水压试验最高允许压力(表压), MPa;  
 $[\sigma]$ ——许用应力, MPa;  
 $\sigma_s$ ——材料在 20℃ 的屈服限或条件屈服限(残余变形为 0.2%), MPa;  
 $\varphi$ ——纵向孔桥减弱系数;  
 $\varphi'$ ——横向孔桥减弱系数;  
 $\varphi''$ ——斜向孔桥减弱系数;  
 $\varphi_d$ ——斜向孔桥当量减弱系数;  
 $\varphi_h$ ——焊缝减弱系数;  
 $\varphi_{\min}$ ——最小减弱系数;  
 $[\varphi]$ ——允许最小减弱系数;  
 $\varphi_j$ ——校核部位的减弱系数;  
 $\varphi_{rw}$ ——水压试验时的最小减弱系数;  
 $K$ ——斜向孔桥的换算系数;  
 $t_0$ ——不考虑孔间影响的相邻两孔的最小节距, mm;  
 $t$ ——纵向(轴向)相邻两孔的节距, mm;  
 $t'$ ——横向(环向)相邻两孔的节距, mm;  
 $t''$ ——斜向相邻两孔的节距, mm;  
 $d$ ——孔的直径、插入式整体焊接管接头的内径<sup>2)</sup>、椭圆孔在相应节距方向上的尺寸, mm;  
 $d_d$ ——孔的当量直径, mm;  
 $d_p$ ——相邻两孔直径的平均值, mm;  
 $\sigma_w$ ——校核断面的最大弯曲应力, MPa;  
 $M$ ——校核断面的弯曲力矩, kN·mm;  
 $W$ ——校核断面的抗弯断面系数, mm<sup>3</sup>。

注: 1)指根据原材料规格所取用的壁厚, 即锅炉图纸上所标注的壁厚。

2)当管接头材料的许用应力 $[\sigma]_1$ 小于筒体材料的许用应力 $[\sigma]$ 时, 则 $d$ 应取为管接头内径与

$$2S_1 \left(1 - \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]}\right) \text{ 之和。}$$

## 2.2 计算公式

### 2.2.1 锅筒筒体理论计算壁厚按下式计算:

$$S_l = \frac{PD_n}{2\varphi_{\min} [\sigma] - P} \dots\dots\dots (9)$$

锅筒筒体最小需要壁厚按下式计算:

$$S_{\min} = S_l + C \dots\dots\dots (10)$$

锅筒筒体取用壁厚应满足:

$$S \geq S_{\min}$$

### 2.2.2 锅筒筒体允许最小减弱系数按下式计算:

$$[\varphi] = \frac{P(D_n + S_y)}{2[\sigma] S_y} \dots\dots\dots (11)$$

$S_y$  按下式计算:

$$S_y = S - C \dots\dots\dots (12)$$

### 2.2.3 校核计算时, 锅筒筒体最高允许计算压力按下式计算:

$$[P] = \frac{2\varphi_l [\sigma] S_y}{D_n + S_y} \dots\dots\dots (13)$$

式(13)中的有效壁厚  $S_y$  按式(12)计算, 此时  $\varphi_l$  等于  $\varphi_{\min}$ ;  $S_y$  也可取为对应于  $\varphi_l$  处实际测量壁厚减去以后可能的腐蚀减薄值, 此时应以  $S_y$  和  $\varphi_l$  两者乘积的最小值代入式(13)中。此外, 由式(13)算得的锅筒筒体最高允许计算压力还应满足第7章开孔加强的要求。

### 2.2.4 式(9)、(11)及(13)适用于 $\beta_l \leq 1.2$ 的范围, $\beta_l$ 值按下式计算:

$$\beta_l = 1 + 2 \frac{S_l}{D_n} \dots\dots\dots (14)$$

## 2.3 计算压力与工作压力

### 2.3.1 锅筒筒体的计算压力按下式计算:

$$P = P_c + \Delta P_n \dots\dots\dots (15)$$

工作压力  $P_w$  按下式计算:

$$P_w = P_c + \Delta P_n + \Delta P_w \dots\dots\dots (16)$$

当锅筒筒体所受液柱静压力值不大于  $(P_c + \Delta P_n + \Delta P_w)$  的 3% 时, 则取  $\Delta P_w$  等于零。

## 2.4 减弱系数

2.4.1 式(9)中的最小减弱系数  $\varphi_{\min}$  取为纵向焊缝减弱系数  $\varphi_n$ 、纵向孔桥减弱系数  $\varphi$ 、两倍横向孔桥减弱系数  $2\varphi'$  及斜向孔桥当量减弱系数  $\varphi_d$  中的最小值。若孔桥位于焊缝上, 应按 2.10.3 条的有关规定取用。

2.4.2 按锅炉制造技术条件检验合格的焊缝, 其减弱系数  $\varphi_n$  可按表 6 选取。

表 6 焊缝减弱系数  $\varphi_b$ 

焊接方法	焊缝型式	$\varphi_b$
手工电焊或气焊	双面焊接有坡口对接焊缝	1.00
	有氩弧焊打底的单面焊接有坡口对接焊缝	0.90
	无氩弧焊打底的单面焊接有坡口对接焊缝	0.75
	在焊缝根部有垫板或垫圈的单面焊接有坡口对接焊缝	0.80
熔剂层下的自动焊	双面焊接对接焊缝	1.00
	单面焊接有坡口对接焊缝	0.85
	单面焊接无坡口对接焊缝	0.80
电渣焊		1.00

注：在基本许用应力按持久强度确定的情况下，对于  $\varphi_b < 0.80$  的焊缝， $\varphi_b$  取表中数值；对于  $\varphi_b > 0.80$  的焊缝， $\varphi_b$  取 0.80。

2.4.3 相邻两孔的节距（纵向、横向或斜向）大于或等于按式（17）计算的节距时，不必按孔桥计算：

$$t_0 = d_0 + 2\sqrt{(D_n + S)S} \dots\dots\dots (17)$$

但若开孔直径大于按 7.2.2 条确定的未加强孔最大允许直径，应按 7.4.1 至 7.4.4 条的规定进行加强。

2.4.4 相邻两孔的节距小于按式（17）确定的值，且两孔直径均小于未加强孔最大允许直径时，应按 2.4.5 至 2.4.12 条的规定计算孔桥减弱系数。

若相邻两孔中一个孔的直径大于按 7.2.2 条确定的未加强孔的最大允许直径，应在满足 7.5.1 条要求的条件下，按 7.4.1 至 7.4.4 条的规定进行加强，加强后，该孔按无孔处理。

2.4.5 等直径纵向相邻两孔（图 1）的孔桥减弱系数按下式计算：

$$\varphi = \frac{t-d}{t} \dots\dots\dots (18)$$

2.4.6 等直径横向相邻两孔（图 2）的孔桥减弱系数按下式计算：

$$\varphi' = \frac{t'-d}{t'} \dots\dots\dots (19)$$

式中，横向节距  $t'$  应取筒体平均直径  $(D_n + S)$  圆周上的节距。



图 1 纵向孔桥

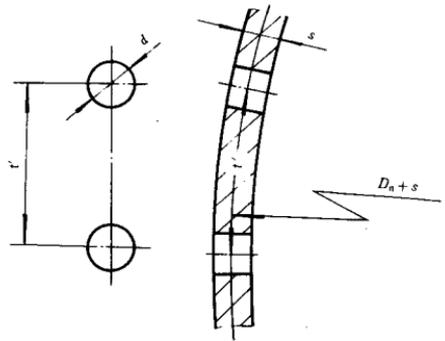


图 2 横向孔桥

2.4.7 等直径斜向相邻两孔 (图 3) 的孔桥当量减弱系数按下式计算:

$$\varphi_d = K\varphi^n \dots\dots\dots (20)$$

式中, 斜向孔桥的换算系数  $K$  按下式计算:

$$K = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{0.75}{(1+n^2)^2}}} \dots\dots\dots (21)$$

式中:  $n = \frac{b}{a}$

$a$ ——计算斜向孔桥减弱系数时的两孔间在筒体平均直径圆周方向上的距离;

$b$ ——计算斜向孔桥减弱系数时的两孔间在筒体轴线方向上的距离。

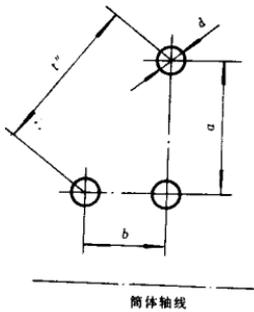


图 3 斜向孔桥

当  $n \geq 2.4$  时, 可取  $K=1$ , 此时  $\varphi_d = \varphi''$ 。

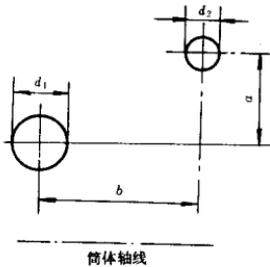
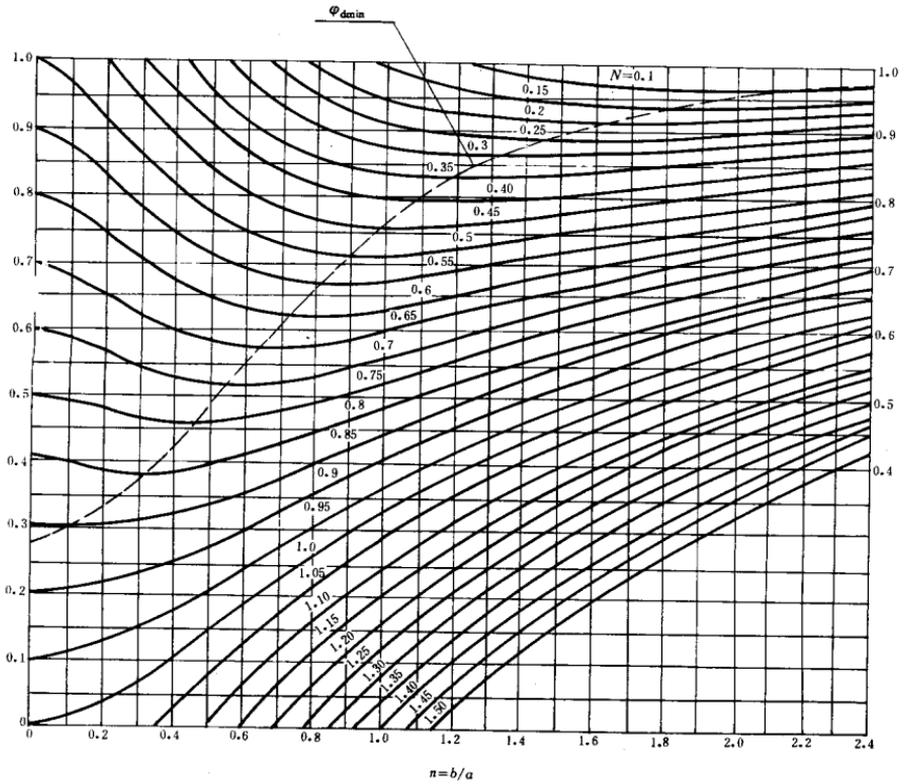
斜向孔桥减弱系数  $\varphi''$  按下式计算:

$$\varphi'' = \frac{t'' - d}{t''} \dots\dots\dots (22)$$

式中:  $t'' = a\sqrt{1+n^2}$

当  $\varphi_d > 1$  时, 均取  $\varphi_d = 1$ 。

$\varphi_d$  亦可按线算图 (图 4) 直接查取。



$$N = \frac{(d_1 + d_2)/2}{a}$$

$$n = b/a$$

图 4 确定  $\varphi_d$  值的线算图

注：图中虚线为各条曲线极小值的连线。

2.4.8 若相邻两孔直径不同,计算孔桥减弱系数时,式(18)、(19)及(22)中的直径 $d$ 应以相邻两孔直径的平均值 $d_p$ 代入, $d_p$ 按下式计算:

$$d_p = \frac{d_1 + d_2}{2} \dots\dots\dots (23)$$

2.4.9 具有凹座的开孔(图5)的当量直径 $d_d$ 按下式计算:

$$d_d = d_1 + \frac{h}{s} (d'_1 - d_1) \dots\dots\dots (24)$$

在计算孔桥减弱系数时,式(18)、(19)及(22)中的直径 $d$ 应以当量直径 $d_d$ 代入。

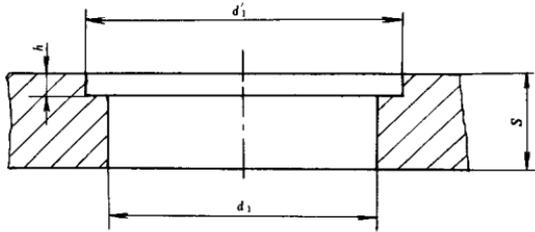


图5 具有凹座的孔

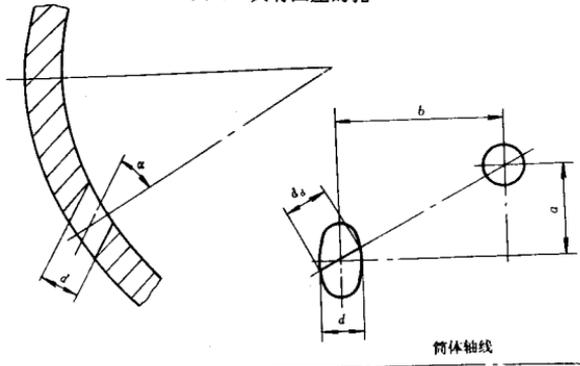


图6 非径向孔

2.4.10 对于筒体横截面上的非径向孔(图6),计算孔桥减弱系数时,当量直径 $d_d$ 按下述原则确定:

纵向孔桥:  $d_d = d$

横向孔桥:  $d_d = \frac{d}{\cos \alpha}$

斜向孔桥按下式计算:

$$d_d = d \sqrt{\frac{n^2 + 1}{n^2 + \cos^2 \alpha}} \dots\dots\dots (25)$$

式中:  $\alpha$  为孔的轴线偏离筒体径向的角度,其值不应大于 $45^\circ$ 。

$n = \frac{b}{a}$ ,  $a$  应取筒体平均直径圆周上的距离。

非径向孔必须经机械加工。

在计算孔桥减弱系数时，式(18)、(19)及(22)中的直径 $d$ 应以当量直径 $d_0$ 代入。

2.4.11 对于椭圆孔，计算孔桥减弱系数时，孔径 $d$ 按该孔沿相应节距方向的尺寸确定。

2.4.12 孔桥减弱系数可借助整体焊接结构的管接头多余壁厚的加强作用予以提高，计算方法见7.5.1至7.5.3条。

## 2.5 附加壁厚

2.5.1 锅筒筒体的附加壁厚 $C$ 按下式计算：

$$C = C_1 + C_2 \dots \dots \dots (26)$$

2.5.2 考虑腐蚀减薄的附加壁厚 $C_1$ ，一般取为0.5mm；若 $S > 20\text{mm}$ 时，则可不考虑。但若腐蚀较严重，应根据实际可能情况确定 $C_1$ 值。

2.5.3 考虑钢板下偏差的负值和工艺减薄的附加壁厚 $C_2$ ，取钢板的下偏差的负值与各锅炉制造厂卷制时的实际工艺减薄值之和。一般情况下，卷制工艺减薄值可按表7选取。钢板下偏差的负值当 $S \leq 20\text{mm}$ 时取为0.5mm，当 $S > 20\text{mm}$ 时可不考虑。如钢板下偏差的负值超过0.5mm，则在附加壁厚中还应加上此超出值。

表7 卷制工艺减薄值

卷 制 工 艺		mm
		减 薄 值
热 卷	高压或超高压锅筒筒体	4
	中压锅炉筒体	3
冷 卷	热 校	1
	冷 校	0

## 2.6 对壁厚的限制

2.6.1 任何情况下，锅筒筒体的取用壁厚应不小于6mm。采用胀管连接时，锅筒筒体的取用壁厚一般不应小于12mm。

2.6.2 锅炉额定压力不大于2.45MPa的不绝热锅筒筒体，允许置于烟温超过600℃的烟道或炉膛内，其壁厚不应大于表8所规定的值。

表8 不绝热锅筒筒体的最大允许壁厚

工 作 条 件	mm
	最 大 允 许 壁 厚
在烟温超过900℃的烟道或炉膛内	20
在烟温为600~900℃之间的烟道内	30

## 2.7 水压试验

2.7.1 锅筒筒体的水压试验最高允许压力按锅炉制造技术条件取用，且不超过按下式确定的值：

$$P_{w} = 0.45 \frac{\beta^2 - 1}{\beta^2} \varphi_{w} \sigma_s \dots \dots \dots (27)$$

式中:  $\beta = 1 + \frac{2S_y}{D_n}$

$\varphi_{w}$  取水压试验时纵向焊缝减弱系数  $\varphi_h$ 、孔桥减弱系数  $\varphi$ 、 $2\varphi'$  及  $\varphi_d$  中的最小值。

确定锅筒的水压试验最高允许压力时, 还应考虑到锅筒封头的水压试验最高允许压力 (见 5.2.11 条)。

## 2.8 弯曲应力的校核

2.8.1 当锅筒筒体支点间距大于 10m 或者  $2\varphi'$  不大于最小  $\varphi$  或  $\varphi_d$  时, 应进行重量载荷引起的弯曲应力校核。

2.8.2 锅筒筒体各校核断面的最大弯曲应力按下式计算:

$$\sigma_w = \frac{1000M}{W\varphi_h} \dots \dots \dots (28)$$

校核断面的弯曲力矩  $M$  按自由支点的梁处理。如无较大的局部荷重, 梁上的荷重可按均布荷重考虑。产生弯曲力矩的荷重应包括: 锅筒及相连元件的金属重量、锅筒及相连元件内滴水的水重以及绝热材料的重量等。

计算校核断面的抗弯断面系数  $W$  时, 应考虑由于开孔对断面的减弱。 $W$  的近似计算方法见附录 B。

环向焊缝减弱系数  $\varphi_h$ , 只有在校核断面上有环向焊缝时才考虑。 $\varphi_h$  按表 6 选取。

如筒体上的最大弯曲力矩与最小抗弯断面系数不在同一断面上, 则应按几个可能发生危险的断面分别计算, 以找出整个筒体的最大弯曲应力。

2.8.3 按 2.8.2 条算出的最大弯曲应力应满足以下条件:

$$\sigma_w \leq [\sigma] - \frac{P(D_n + S_y)}{4\varphi_x S_y} \dots \dots \dots (29)$$

减弱系数  $\varphi_x$  为所校核断面上最大弯曲应力部位的横向孔桥减弱系数或环向焊缝减弱系数; 如横向孔桥与环向焊缝重迭, 则应按 2.10.3 条的规定处理; 如该部位无孔桥和焊缝减弱时, 则取  $\varphi_x = 1$ 。

## 2.9 中径相等的不等壁厚锅筒筒体的计算

2.9.1 薄壁与厚壁部分的强度分别按式 (9) 至 (29) 计算。上述公式中,  $D_n$  用  $2R_n'$  与  $2R_n''$  (图 7) 代入。

水压试验的最高允许压力, 取厚壁与薄壁部分按式 (27) 的计算值中的较小值。

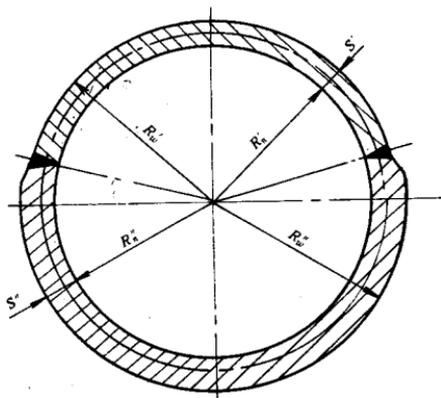


图 7 不等壁厚锅筒

## 2.10 结构要求

2.10.1 锅筒筒体同一断面最大内径与最小内径之差应不大于表 9 规定的值。

表 9 锅筒筒体同一断面最大内径与最小内径之差值

mm

公称内径 $D_n$	中 低 压 锅 炉			高压锅炉
	$\leq 1000$	$> 1000 \sim 1500$	$> 1500$	不 限
热 卷	6	7	9	0.007 $D_n$
冷 卷	4	6	8	

2.10.2 对于胀接管孔，孔桥减弱系数  $\varphi$ 、 $\varphi'$  及  $\varphi''$  一般不宜小于 0.3。

在焊缝上不应有胀接管孔，胀接管孔中心与焊缝边缘的距离不应小于  $0.8d$ ，且不小于  $0.5d+12\text{mm}$ 。

2.10.3 焊接管孔应避免开在焊缝上；不得已需开孔时，应满足锅炉制造技术条件的要求，此时该部位的减弱系数取孔桥减弱系数和焊缝减弱系数的乘积。

2.10.4 管接头（连接受热面管子的除外）的最小壁厚  $S_1^j$  在任何情况下不得小于  $0.04d_w+2.5\text{mm}$ 。

注：1) 若管接头是有螺纹的，厚度按螺纹根部量取。

2.10.5 不等壁厚锅筒筒体过渡梯度应符合图 8 的要求，并且在 a—a 至 b—b 的区域内不允许开孔。

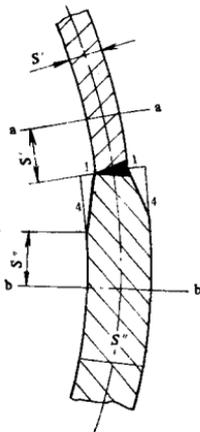


图 8 对过渡区段的要求

### 3 圆筒形集箱筒体的计算

#### 3.1 符号说明

本章所用符号的意义和单位如下:

$S_t$ ——集箱筒体理论计算壁厚, mm;

$S_{\min}$ ——集箱筒体最小需要壁厚, mm;

$S$ ——集箱筒体取用壁厚, (简称“壁厚”), mm;

$S_y$ ——集箱筒体有效壁厚, mm;

$C$ ——考虑腐蚀减薄、钢管或钢板下偏差的负值和工艺减薄等的附加壁厚, mm;

$C_1$ ——考虑腐蚀减薄的附加壁厚, mm;

$C_2$ ——考虑钢管或钢板下偏差的负值和工艺减薄等的附加壁厚, mm;

$D_w$ ——集箱筒体外径, mm;

$\beta_t$ ——按集箱筒体理论计算壁厚算出的外径与内径的比值;

$\beta$ ——按集箱筒体有效壁厚算出的外径与内径的比值;

$P$ ——计算压力(表压), MPa;

$[P]$ ——校核计算最高允许计算压力(表压), MPa;

$P_{wv}$ ——水压试验最高允许压力(表压), MPa;

$[\sigma]$ ——许用应力, MPa;

$\varphi_j$ ——校核部位的减弱系数;

$\varphi_{\min}$ ——最小减弱系数;

$[\varphi]$ ——允许最小减弱系数;

$R$ ——环形集箱中心线的半径, mm;

$\sigma_w$ ——校核断面的附加弯曲应力, MPa;

$m$ ——下偏差(为负值时)与壁厚的百分比值。

#### 3.2 计算公式

##### 3.2.1 集箱筒体理论计算壁厚按下式计算:

$$S_i = \frac{PD_w}{2\varphi_{\min}[\sigma] + P} \dots\dots\dots (30)$$

集箱筒体最小需要壁厚按下式计算:

$$S_{\min} = S_i + C \dots\dots\dots (31)$$

集箱筒体取用壁厚应满足:

$$S \geq S_{\min}$$

3.2.2 集箱筒体允许最小减弱系数按下式计算:

$$[\varphi] = \frac{P(D_w - S_y)}{2[\sigma]S_y} \dots\dots\dots (32)$$

$S_y$  按下式计算:

$$S_y = S - C \dots\dots\dots (33)$$

3.2.3 校核计算时, 集箱筒体最高允许计算压力按下式计算:

$$[P] = \frac{2\varphi_j [\sigma] S_y}{D_w - S_y} \dots\dots\dots (34)$$

式(34)中的有效壁厚  $S_y$  按 2.2.3 条所述原则确定。

此外, 由式(34)算得的集箱筒体最高允许压力还应满足第 7 章开孔加强的要求。

3.2.4 式(30)、(32)及(34)的适用范围如下:

对于水、汽水混合物或饱和蒸汽集箱筒体:  $\beta_t \leq 1.5$

对于过热蒸汽集箱筒体:  $\beta_t \leq 2.0$

$\beta_t$  值按下式计算:

$$\beta_t = \frac{D_w}{D_w - 2S_i} \dots\dots\dots (35)$$

### 3.3 计算压力与工作压力

3.3.1 集箱筒体的计算压力和工作压力按 2.3 条的规定计算。

对于再热蒸汽集箱筒体, 计算压力  $P$  取锅炉额定负荷时再热蒸汽集箱中介质工作压力的 1.15 倍。

### 3.4 减弱系数

3.4.1 集箱筒体的减弱系数按 2.4.1 至 2.4.12 条确定。

### 3.5 附加壁厚

3.5.1 集箱筒体的附加壁厚按式(26)计算。

3.5.2 考虑腐蚀减薄的附加壁厚  $C_1$  一般取为 0.5mm, 若集箱在设计运行期限内, 腐蚀和氧化减薄值超过 0.5mm, 则应取实际减薄值。

3.5.3 对于由钢管制成的直集箱筒体, 考虑钢管下偏差的负值的附加壁厚  $C_2$  按下式计算:

$$C_2 = AS_1 \dots \dots \dots (36)$$

系数  $A$  按表 10 确定

表 10 系数  $A$

$m$	15	10	5	0
$A$	0.18	0.11	0.05	0

3.5.4 对于由钢管弯成的环形集箱, 考虑钢管下偏差的负值, 弯管减薄和环形集箱应力区别于直集箱应力的附加壁厚  $C_2$  按 4.5.4 条确定。

3.5.5 校核计算时, 直集箱筒体的附加壁厚  $C$  按下式计算:

$$C = \frac{AS + C_1}{1 + A} \dots \dots \dots (37)$$

由钢管弯成的环形集箱的附加壁厚  $C$  按式(45)计算。

### 3.6 对壁厚的限制

3.6.1 对于额定压力大于 2.45MPa 的锅炉, 不绝热集箱筒体的壁厚不应大于表 11 所规定的值。

表 11 不绝热集箱筒体的最大允许壁厚 mm

工 作 条 件	最 大 允 许 壁 厚
在烟温超过 900℃ 的烟道或炉膛内	30
在烟温为 600~900℃ 之间的烟道内	45

3.6.2 对于额定压力不大于 2.45MPa 的锅炉, 不绝热集箱和防焦箱筒体的壁厚不应大于表 12 所规定的值。

表 12 不绝热集箱和防焦箱筒体的最大允许壁厚 mm

工 作 条 件	最 大 允 许 壁 厚
在烟温超过 900℃ 的烟道或炉膛内	10
在烟温为 600~900℃ 之间的烟道内	15

### 3.7 水压试验

3.7.1 集箱筒体的水压试验最高允许压力按锅炉制造技术条件取用, 且不应超过按式(27)所确定的值, 但计算时该式中的  $\beta$  为:

$$\beta = \frac{D_w}{D_w - 2S_y}$$

在确定集箱水压试验最高允许压力时, 还应考虑集箱封头或平端盖的水压试验最高允许压力(见 5.2.11 和 6.2.6 条)。

### 3.8 弯曲应力的校核

3.8.1 对重量载荷较大的集箱应按下式进行弯曲应力校核计算:

$$\sigma_w \leq [\sigma] - \frac{P(D_w - 2S_y)^2}{4\phi_s S_y (D_w - S_y)} \dots \dots \dots (38)$$

$\sigma_w$ 、 $\varphi_x$  按 2.8.2 和 2.8.3 条的原则处理。

### 3.9 结构要求

3.9.1 由管子弯成的环形集箱的断面圆度不应大于表 13 规定的值。

表 13 环形集箱的断面最大允许圆度

工 作 压 力 MPa	≥ 9.8	< 9.8
圆 度 $\frac{D_{wmax} - D_{wmin}}{D_w} \times 100$	6	7

注:  $D_{wmax}$ 、 $D_{wmin}$  分别为同一断面上的最大外径和最小外径。

3.9.2 关于最小允许减弱系数和管孔位置的要求, 见 2.10.2 和 2.10.3 条的规定。

3.9.3 管接头(连接受热面管子的除外)的最小壁厚按 2.10.4 条规定处理。

## 4 管子和锅炉范围内的管道的计算

### 4.1 符号说明

本章所用符号的意义和单位如下:

$S_t$ ——管子或管道的理论计算壁厚, mm;

$S_{min}$ ——管子或管道的最小需要壁厚, mm;

$S$ ——管子或管道的取用壁厚(简称“壁厚”), mm;

$S_y$ ——管子或管道的有效壁厚, mm;

$C$ ——考虑腐蚀减薄、钢管下偏差的负值和工艺减薄等的附加壁厚, mm;

$C_1$ ——考虑腐蚀减薄的附加壁厚, mm;

$C_2$ ——考虑钢管下偏差的负值和工艺减薄等的附加壁厚, mm;

$D_w$ ——管子或管道的外径, mm;

$D_n$ ——管子或管道的内径, mm;

$\beta_t$ ——按管子或管道理论计算壁厚算出的外径与内径的比值;

$P$ ——计算压力(表压), MPa;

$[P]$ ——校核计算最高允许计算压力(表压), MPa;

$[\sigma]$ ——许用应力, MPa;

$\varphi_b$ ——焊缝减弱系数;

$R$ ——弯头中心线的半径, mm;

$q_{max}$ ——最大热流密度, kW/m<sup>2</sup>;

$\lambda$ ——钢材导热系数, kW/(m·°C);

$\sigma_z$ ——校核断面的附加轴向应力, MPa;

$\sigma_w$ ——校核断面的附加弯曲应力, MPa;

$\tau$ ——校核断面的附加扭转应力, MPa;

$N$ ——附加轴向力, kN;

$M$ ——校核断面的弯曲力矩, kN·mm;

$M_n$ ——校核断面的扭转力矩, kN·mm;

$F$ ——管子的横断面积, mm<sup>2</sup>;

$W$ ——校核断面的抗弯断面系数, mm<sup>3</sup>;

$m$ ——下偏差(为负值时)与壁厚的百分比值。

## 4.2 计算公式

4.2.1 管子或管道的理论计算壁厚按下式计算:

$$S_l = \frac{PD_w}{2\varphi_b [\sigma] + P} \dots\dots\dots(39)$$

管子或管道的最小需要壁厚按下式计算:

$$S_{\min} = S_l + C \dots\dots\dots(40)$$

管子或管道的取用壁厚应满足:

$$S \geq S_{\min}$$

4.2.2 校核计算时, 管子或管道的最高允许计算压力按下式计算:

$$[P] = \frac{2\varphi_b [\sigma] S_y}{D_w - S_y} \dots\dots\dots(41)$$

 $S_y$  按下式计算:

$$S_y = S - C \dots\dots\dots(42)$$

 $S_y$  也可取实际测量最小壁厚减去以后可能的腐蚀减薄值。4.2.3 式(39)和(41)适用于  $\beta_1 \leq 2.0$  的范围,  $\beta_1$  值按式(35)计算。

## 4.3 计算压力与工作压力

4.3.1 管子或管道的计算压力和工作压力按 2.3 条的规定计算。

对于再热蒸汽管子或管道, 计算压力  $P$  取锅炉额定负荷时管子或管道中介质的最大工作压力的 1.15 倍。

## 4.4 减弱系数

4.4.1 焊缝减弱系数  $\varphi_b$ : 对于无缝钢管, 取为 1.00; 对于压制的焊接弯头按表 6 选取。

## 4.5 附加壁厚

4.5.1 管子或管道的附加壁厚  $C$  按式(26)计算。4.5.2 考虑腐蚀和氧化减薄的附加壁厚  $C_1$  按 3.5.2 条原则处理。4.5.3 对于直管段, 考虑钢管下偏差的负值的附加壁厚  $C_2$  按 3.5.3 条的规定计算。4.5.4 对于由钢管弯成的弯头, 考虑钢管下偏差的负值, 弯管减薄和弯头应力区别于直管应力的附加壁厚  $C_2$  按下式计算:

$$C_2 = A_1 S_f \dots\dots\dots(43)$$

系数  $A_1$  按下述规定选取:

- a. 当  $1.8 \leq \frac{R}{D_w} \leq 3.5$  时,  $A_1$  按表 14 确定。

表 14 系数  $A_1$

$m$	15	10	5	0
$A_1$	0.22	0.15	0.09	0.03

- b. 当  $\frac{R}{D_w} < 1.8$  时,  $A_1$  按下式计算:

$$A_1 = \frac{50}{100 - m} + m \dots\dots\dots(44)$$

式中:  $n = \frac{R}{D_w}$

- c. 当  $\frac{R}{D_w} > 3.5$  时,  $A_1$  按表 10 选取。

4.5.5 对于由钢板压制的焊接弯头 ( $\frac{R}{D_w} > 3.5$ ), 考虑钢板下偏差的负值和工艺减薄的附加壁厚  $C_2$  取钢板的下偏差的负值和压制时的实际工艺减薄值之和。

4.5.6 校核计算时, 直管段的附加壁厚  $C$  按式(37)计算; 由钢管弯成的弯头的附加壁厚  $C$  按下式计算:

$$C = \frac{A_1 S + C_1}{1 + A_1} \dots\dots\dots(45)$$

4.5.7 铸造弯头的附加壁厚  $C$  按下式计算:

$$C = A_2 S_f + 2 \dots\dots\dots(46)$$

系数  $A_2$  按下式计算:

$$A_2 = \frac{1}{4\left(\frac{R}{D_w}\right) - 2} \dots\dots\dots(47)$$

校核计算时, 铸造弯头的附加壁厚  $C$  按下式计算:

$$C = \frac{A_2 S + 2}{1 + A_2} \dots\dots\dots(48)$$

#### 4.6 对壁厚的限制

4.6.1 对于热流密度很高(约达  $580 \text{ kW/m}^2$  以上)的超高压锅炉受热面管子, 按 4.2.1 条确定的取用壁厚<sup>1)</sup>应满足以下规定:

$$S \leq \frac{D_w}{1 + \frac{D_w q_{\max}}{10^3 \lambda}} \dots\dots\dots(49)$$

注: 1)对于内螺纹管, 厚度按螺纹根部量取。

#### 4.7 由重量载荷引起的应力校核

4.7.1 由重量载荷引起的管壁附加应力(轴向应力、弯曲应力和扭转应力)可按下式进行校核:

$$\sigma_z + \sqrt{\sigma_z^2 + 4\tau^2} \leq [\sigma] - \frac{P(D_w - 2S_f)^2}{4S_f \phi_h (D_w - S_f)} \dots\dots\dots(50)$$

附加轴向应力  $\sigma_z$  按下式计算:

$$\sigma_z = \frac{1000N}{F\phi_h} \dots\dots\dots(51)$$

附加弯曲应力  $\sigma_w$  按下式计算:

$$\sigma_w = \frac{1000M}{W\phi_h} \dots\dots\dots(52)$$

附加扭转应力  $\tau$  按下式计算:

$$\tau = \frac{500M_t}{W\phi_h} \dots\dots\dots(53)$$

环向焊缝减弱系数  $\phi_h$ , 只有在校核断面上有环向焊缝时才考虑, 其值可按表 6 选取。

式(50)中的  $\sigma_z$ 、 $\sigma_w$  及  $\tau$  应为作用在同一断面上的值, 若三者各自最大值不在同一断面上, 则应对可能发生危险的断面分别进行校核。

#### 4.8 结构要求

4.8.1 受热面管子弯头的圆度不应大于表 15 规定的值。

表 15 受热面管子弯头的最大允许圆度

%

弯头中心线的曲率半径 $R$	$1.4D_w < R < 2.5D_w$	$R \geq 2.5D_w$
圆度 $\frac{D_{w\max} - D_{w\min}}{D_w} \times 100$	12	10

注:  $D_{w\max}$ 、 $D_{w\min}$  分别为同一断面上的最大外径和最小外径。

4.8.2 对于不受热的管道, 当管子外径  $D_w > 76\text{mm}$  时, 弯头圆度不应大于表 13 规定的值; 当管子外径  $D_w \leq 76\text{mm}$  时, 弯头圆度不应大于表 15 规定的值。

#### 4.9 承受外压力的管子计算

4.9.1 承受外压力作用, 且管子外径  $D_w \leq 200\text{mm}$  的管子壁厚, 按 4.2.1 条计算, 计算压力取最大外压力, 许用应力的修正系数  $\eta$  取表 2 所给值的 0.70 倍。

#### 4.10 热补偿应力的校核

4.10.1 管道热补偿应力的校核, 按水利电力部现行有关规定进行。

## 5 凸形封头的计算

## 5.1 符号说明

本章所用符号的意义和单位如下:

$S_t$ ——封头理论计算壁厚, mm;

$S_{\min}$ ——封头最小需要壁厚, mm;

$S$ ——封头取用壁厚, 简称“壁厚”, mm;

$S_0$ ——强度未减弱的热旋压封头圆筒部份理论计算壁厚, mm;

$S_y$ ——封头有效壁厚, mm;

$S'_y$ ——热旋压封头圆筒部分有效壁厚, mm;

$\beta$ ——按照封头有效壁厚算出的外径与内径的比值;

$C$ ——考虑腐蚀减薄、钢板下偏差的负值和工艺减薄的附加壁厚, mm;

$C_1$ ——考虑腐蚀减薄的附加壁厚, mm;

$C_2$ ——考虑钢板下偏差的负值和工艺减薄的附加壁厚, mm;

$D_n$ ——封头内径, mm;

$D_w$ ——热旋压封头圆筒部分外径, mm;

$h_n$ ——封头内高度, mm;

$P$ ——计算压力(表压), MPa;

$[P]$ ——校核计算最高允许计算压力(表压), MPa;

$P_{sw}$ ——水压试验最高允许压力(表压), MPa;

$(\sigma)$ ——许用应力, MPa;

$\sigma_s$ ——材料在 20℃ 的屈服限或条件屈服限(残余变形为 0.2%), MPa;

$\varphi_n$ ——焊缝减弱系数;

$Y$ ——形状系数;

$d$ ——孔的直径、椭圆孔的最大尺寸, mm。

## 5.2 计算公式

5.2.1 椭圆封头(图 9)和球形封头(图 10)的理论计算壁厚按下式计算:

$$S_t = \frac{PD_n Y}{2\varphi [\sigma] - P} \dots\dots\dots(54)$$

封头最小需要壁厚按下式计算:

$$S_{\min} = S_t + C \dots\dots\dots(55)$$

封头取用壁厚应满足:

$$S \geq S_{\min}$$

5.2.2 校核计算时, 封头最高允许计算压力按下式计算:

$$[P] = \frac{2S_y [\sigma] \varphi}{YD_n + S_y} \dots\dots\dots(56)$$

$S_y$ 按下式计算:

$$S_y = S - C \dots\dots\dots(57)$$

$S_y$ 也可取为实际测量最小壁厚减去以后可能的腐蚀减薄量。

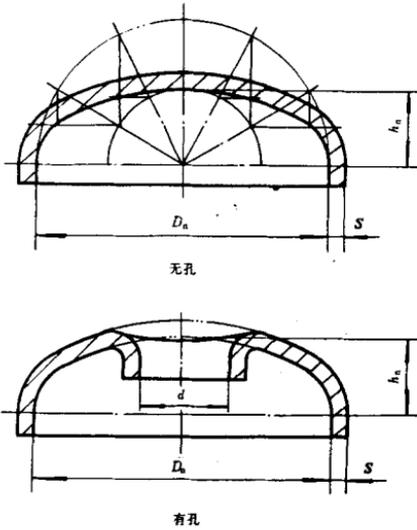


图9 椭圆封头

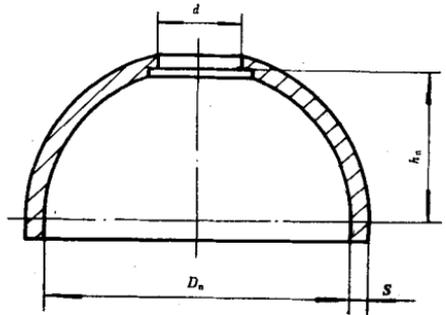


图10 球形封头

5.2.3 式(54)及(56)只有满足下列条件时才有效:

$$\frac{h_n}{D_n} \geq 0.2; \quad \frac{S_l}{D_n} \leq 0.1; \quad \frac{d}{D_n} \leq 0.6.$$

5.2.4 介质的计算压力 \$P\$ 取相连筒体的计算压力。

5.2.5 形状系数 \$Y\$ 按下式计算:

$$Y = \frac{1}{6} \left[ 2 + \left( \frac{D_n}{2h_n} \right)^2 \right] \dots\dots\dots(58)$$

5.2.6 封头减弱系数 \$\phi\$ 按表 16 选取。

表 16 封头减弱系数 \$\phi\$

封 头 结 构 型 式	\$\phi\$
无孔, 无拼接焊缝	1.00
无孔, 有拼接焊缝	\$\phi_w\$
有孔, 无拼接焊缝	\$1 - \frac{d}{D_n}\$
有孔, 有拼接焊缝, 但二者不重合 <sup>2)</sup>	取 \$\phi_w\$ 和 \$(1 - \frac{d}{D_n})\$ 中较小者
有孔, 有拼接焊缝, 且二者重合 <sup>2)</sup>	\$\phi_w (1 - \frac{d}{D_n})\$

注: 1) 焊缝减弱系数 \$\phi\_w\$ 按表 6 选取。

2) 孔中心与焊缝边缘距离大于 \$(0.5d+12)\$mm 为不重合, 小于、等于为重合。

5.2.7 封头的计算壁厚  $t_{th}$  取相连筒体的计算壁厚。

5.2.8 封头的附加壁厚按下式计算：

$$C = C_1 + C_2 \dots \dots \dots (59)$$

其中腐蚀减薄附加量  $C_1$  按 2.5.2 条原则处理；钢板下偏差的负值和工艺减薄的附加量  $C_2$  应根据各锅炉制造厂具体工艺情况而定。一般情况下，冲压工艺减薄值可按表 17 选取。

表 17 冲压工艺减薄值

mm

结 构 型 式	减 薄 值
椭球封头 ( $0.20 \leq \frac{h_a}{D_a} \leq 0.35$ )	0.1S <sub>1</sub> 或 0.09S
深椭球和球形封头 ( $0.35 < \frac{h_a}{D_a} \leq 0.50$ )	0.15S <sub>1</sub> 或 0.13S

5.2.9 封头和它的直段的计算壁厚不应小于按 2.2.1 条当筒体减弱系数  $\varphi_{min} = 1$  时所确定的锅筒筒体部分的计算壁厚。

5.2.10 在任何情况下凸形封头的取用壁厚应不小于 5mm。

5.2.11 锅筒封头的水压试验最高允许压力不应超过按下式确定的值：

$$P_{sw} = \frac{0.9(\beta^3 - 1)}{(2 + \beta^3)Y + (\beta^3 - 1)} \varphi_{sw} \sigma_s \dots \dots \dots (60)$$

式中： $\beta = 1 + \frac{2S_y}{D_a}$ 。

同时，也不应超过按式(27)所确定的封头直段的水压试验最高允许压力值。

5.2.12 热旋压凸形封头可按本章的规定进行计算；但旋压后封头顶端必须开工艺孔，最小孔径不小于 80mm；若集箱筒体的  $S_0/S'_y < 0.5$ ，且额定压力不大于 2.45MPa 时，则可将 5.2.3 条中  $d/D_a$  的限制放宽至  $d/D_w$  不大于 0.8。

5.2.13 新制造的封头不得采用扁球形的。

### 5.3 开孔要求

5.3.1 凸形封头上开孔应遵守下列条件：

a. 如封头上除中心人孔外还开有其它孔时，若孔径大于 38mm，则任意两孔边缘之间的投影距离  $l$  不应小于  $\frac{1}{3}(L_1 + L_2)$ ；若孔径等于或小于 38mm，则任意两孔边缘之间的投影距离  $l$  不应小于  $L_2$  (图 11)。

b. 对于  $\frac{h_a}{D_a} \leq 0.35$  的椭球封头，孔边缘至封头边缘之间的投影距离不应小于  $0.1D_a + S$  (图 11)。

对于  $\frac{h_a}{D_a} > 0.35$  的深椭球封头和球形封头，孔边缘离开封头与直段交接处的弧长  $l$  不应小于  $\sqrt{D_a S l}$  (图 12)。

c. 位于板边人孔附近的孔，除遵守上述条件外，还必须使开孔边缘与孔板边弯曲点之间的距离 (或者与焊接圈焊缝之间的距离) 不小于  $S$  (图 13)。

d. 板边孔不得开在焊缝上。

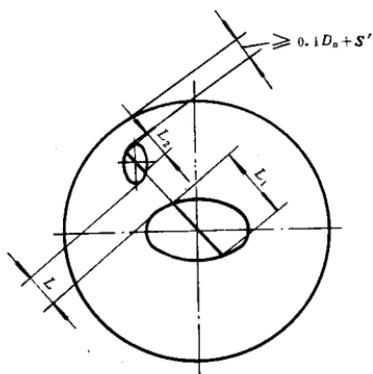


图 11 对开孔位置的要求

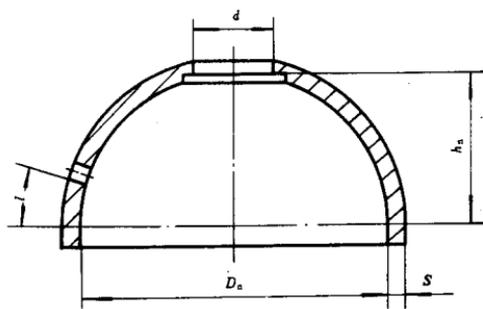


图 12 对开孔位置的要求

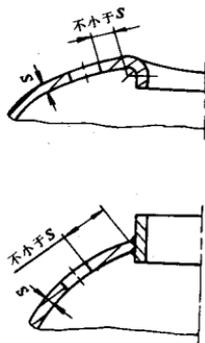


图 13 对开孔位置的要求

## 6 平端盖、平堵头及盖板的计算

### 6.1 符号说明

本章所用符号的意义和单位如下:

- $S_{\min}$ ——平端盖、平堵头或盖板的最小需要壁厚, mm;
- $S_1$ ——平端盖、平堵头或盖板的取用壁厚, 简称“壁厚”, mm;
- $S_2$ ——平端盖环形凹槽处的最小壁厚, mm;
- $S$ ——与平端盖相连接处的集箱筒体壁厚, mm;
- $D_n$ ——与平端盖相连接处的集箱筒体内径, mm;

- $D_w$ ——平堵头和盖板的外径, mm;  
 $a$ ——椭圆孔的长半轴, mm;  
 $b$ ——椭圆孔的短半轴, mm;  
 $P$ ——计算压力(表压), MPa;  
 $[P]$ ——校核计算最高允许计算压力(表压), MPa;  
 $P_w$ ——水压试验最高允许压力(表压), MPa;  
 $[\sigma]$ ——许用应力, MPa;  
 $\eta$ ——基本许用应力的修正系数;  
 $K$ ——与平端盖结构型式有关的系数;  
 $K_1$ ——形状系数;  
 $L$ ——计算尺寸, mm;  
 $r$ ——平端盖内转角过渡圆弧半径, mm;  
 $l$ ——平端盖直段部分的长度, mm。

## 6.2 平端盖

6.2.1 圆形平端盖的最小需要壁厚按下式计算:

$$S_{1\min} = KD_n \sqrt{\frac{P}{[\sigma]}} \dots\dots\dots(61)$$

圆形平端盖取用壁厚应满足:

$$S_1 \geq S_{1\min}$$

6.2.2 校核计算时, 圆形平端盖的最高允许计算压力按下式计算:

$$[P] = \left(\frac{S_1}{KD_n}\right)^2 [\sigma] \dots\dots\dots(62)$$

6.2.3 系数  $K$  按表 18 选取。

6.2.4 平端盖的计算压力  $P$  取相连筒体的计算压力。

6.2.5 平端盖的计算壁厚  $t_{bl}$  取相连筒体的计算壁厚。基本许用应力的修正系数  $\eta$  按表 18 选取。

6.2.6 圆形平端盖的水压试验最高允许压力不应超过按下式确定的值:

$$P_w = 0.9 \left(\frac{S_1}{KD_n}\right)^2 \sigma_s \dots\dots\dots(63)$$

在确定平端盖的水压试验最高允许压力时, 还应考虑平端盖直段的水压试验最高允许压力(见 3.7.1 条)。

6.2.7 圆形平端盖上中心孔的直径或长轴尺寸与端盖内直径之比值不应大于 0.8; 平端盖上任意两孔边缘之间的距离不应小于其中小孔的直径; 孔边缘至平端盖外边缘之间的距离不应小于  $2S_{1\min}$ ; 孔不得开在内转角过渡圆弧处。

6.2.8 平端盖直段部分的壁厚  $S$  不应小于按 3.2.1 条当减弱系数  $\phi_{\min} = 1$  时所确定的最小需要壁厚。

## 6.3 平堵头和盖板

6.3.1 圆形平堵头(图 14)、圆形盖板或椭圆盖板的最小需要厚度按下式计算:

$$S_{\min} = 0.55K_1L\sqrt{\frac{P}{[\sigma]}} \dots\dots\dots(64)$$

圆形盖板或椭圆盖板取用厚度应满足:

$$S_1 \geq S_{\min}$$

6.3.2 校核计算时, 圆形平堵头、圆形盖板或椭圆盖板的最高允许计算压力按下式计算:

$$[P] = 3.3\left(\frac{S_1}{K_1L}\right)^2 [\sigma] \dots\dots\dots(65)$$

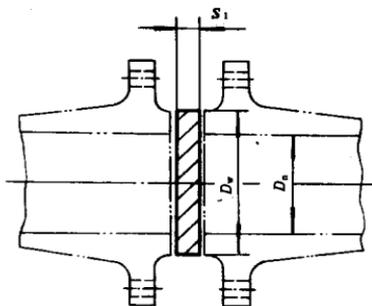


图 14 平堵头

6.3.3 形状系数  $K_1$  按以下规定选取:

对于圆形平堵头和圆形盖板, 取  $K_1 = 1.00$ ;

对于椭圆盖板,  $K_1$  按表 19 选取。

6.3.4 计算尺寸  $L$  按以下规定选取:

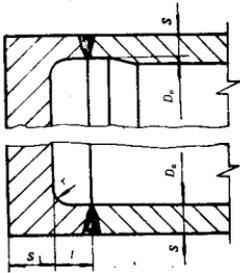
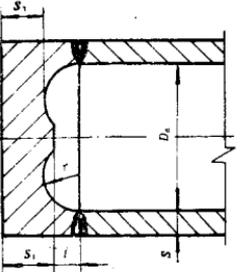
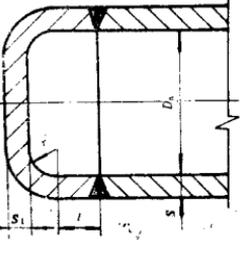
对于圆形平堵头和圆形盖板, 取  $L = D_n$ ;

对于椭圆盖板, 取  $L = 2b$ 。

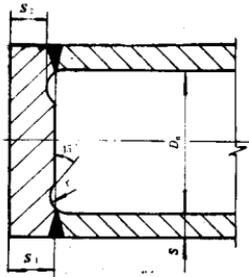
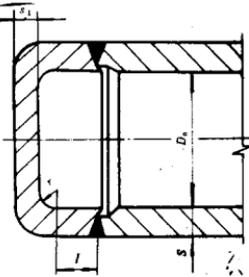
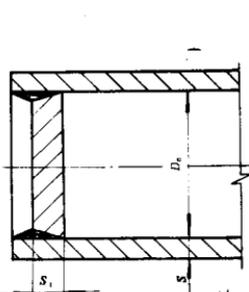
6.3.5 平堵头和盖板的计算压力  $P$  取相连元件的计算压力。

6.3.6 平堵头和盖板的计算壁厚  $t_{bi}$  取相连元件的计算壁厚。

表 18 圆形平端盖的系数  $K$  和修正系数  $\eta$ 

序号	平端盖型式	结构要求	$K$		$\eta$		备注
			无孔	有孔 <sup>1)</sup>	$l \geq 2S$	$2S > l \geq S$	
1		$r \geq \frac{2}{3}S$ $l \geq S$	0.40	0.45	1.05	1.00	推荐优先采用的结构型式
2		$r \geq 1.5S$ $S_1 \geq 0.8S_1$	0.40	0.45	0.90		
3		$r \geq 3S$ $l \geq S$	0.40	0.45	1.00	0.95	

续表 18

序号	平端盖型式	结构要求	K		$\eta$		备注
			无孔	有孔 <sup>D</sup>	$l \geq 2S$	$2S > l \geq S$	
4		$r \geq \frac{1}{3}S$ 和 $r \geq 5\text{mm}$ $S_1 \geq 0.8S_1$	0.40	0.45	0.90		用于额定压力小于 6.28MPa 的集箱端盖
5		$r \geq 3S$ $l \geq S$	0.40	0.45	1.00	0.95	用于额定压力不大于 2.45MPa 的集箱端盖
6			0.60	0.70	0.85		用于额定压力不大于 1.27MPa 和集箱外径不大于 219mm 的集箱端盖
			0.40	0.45	1.05		用于水压试验

注: 1) 开孔应满足 6.2.7 条的要求。

表 19 形状系数  $K_1$ 

$b/a$	1.00	0.75	0.50
$K_1$	1.00	1.15	1.30

7 孔的加强计算<sup>1)</sup>

注: 1)本章规定仅适用于径向开孔。若为椭圆孔, 则长轴与短轴之比不得大于 2。

## 7.1 符号说明

本章所用符号的意义和单位如下:

$D_a$ ——锅筒筒体和集箱筒体的内径, mm;

$d_a$ ——焊接管接头和管子的内径, mm;

$d$ ——锅筒筒体和集箱筒体上孔的直径, 插入式整体焊接管接头的内径<sup>1)</sup>, 椭圆孔在纵截面上的尺寸, mm;

$(d)$ ——未加强孔的最大允许直径, mm;

$(d)_d$ ——孔桥加强计算时的最大允许当量直径, mm;

$S_0$ ——强度未减弱的锅筒筒体和集箱筒体的理论计算壁厚, mm;

$S_y$ ——锅筒筒体和集箱筒体的有效壁厚, mm;

$S$ ——锅筒筒体和集箱筒体的取用壁厚, 简称“壁厚”, mm;

$S_{01}$ ——加强管接头承受内压力所需要的理论计算壁厚, mm;

$S_{y1}$ ——加强管接头的有效壁厚, mm;

$S_1$ ——加强管接头的取用壁厚, 简称“管接头壁厚”, mm;

$S_2$ ——加强垫板的厚度, mm;

$h$ ——加强管接头的有效高度, mm;

$b$ ——锅筒筒体和集箱筒体的有效加强宽度, mm;

$P$ ——计算压力(表压), MPa;

$(\sigma)$ ——筒体的许用应力, MPa;

$(\sigma)_1$ ——管接头的许用应力, MPa;

$(\sigma)_2$ ——垫板的许用应力, MPa;

$\varphi_{\min}$ ——锅筒筒体和集箱筒体的最小减弱系数;

$\varphi_w$ ——被加强孔桥在未加强前按孔径计算的纵向、两倍横向或斜向当量减弱系数;

$(\varphi)$ ——允许最小减弱系数;

$t$ ——纵向相邻两孔的节距, mm;

$t'$ ——横向相邻两孔的节距, mm;

$t''$ ——斜向相邻两孔的节距, mm;

$F$ ——纵截面内加强需要的面积, mm<sup>2</sup>;

$F_1$ ——纵截面内起加强作用的焊缝面积, mm<sup>2</sup>;

$F_2$ ——纵截面内起加强作用的管接头多余面积, mm<sup>2</sup>;

$F_3$ ——纵截面内起加强作用的垫板面积, mm<sup>2</sup>;

$F_4$ ——纵截面内起加强作用的锅筒筒体或集箱筒体的多余面积, mm<sup>2</sup>;

$e$ ——纵截面内焊接管接头的焊脚高度, mm;

$K$ ——斜向孔桥的换算系数;

$k$ ——系数。

注: 1)当管接头材料的许用应力 $(\sigma)_1$ 小于筒体材料的许用应力 $(\sigma)$ 时, 则  $d$  应取为管接头内径与  $2S_1(1 - \frac{(\sigma)_1}{(\sigma)})$  之

和。

## 7.2 未加强孔的最大允许直径

7.2.1 胀接孔、螺丝孔或手孔都应认为是未加强孔; 如管接头与锅筒筒体和集箱筒体连接的焊接型

式为填角焊缝(图 15), 以及虽采用图 17 的孔的加强结构型式, 但不满足 7.4.4 条规定的孔<sup>1</sup>, 都属于未加强孔。

7.2.2 锅筒筒体和集箱筒体上的未加强孔, 其最大允许直径不应超过按图 16a 和 16b 所确定的〔 $d$ 〕值。而且, 当  $D_n S_y > 130 \times 10^3 \text{mm}^2$  时, 按  $D_n S_y = 130 \times 10^3 \text{mm}^2$  查取; 若查出的〔 $d$ 〕 $> 200 \text{mm}$  时, 取〔 $d$ 〕 $= 200 \text{mm}$ 。

图 16a 和图 16b 中的系数  $k$  按下式计算:

$$k = \frac{PD_n}{(2[\sigma] - P)S_y} \dots\dots\dots(66)$$

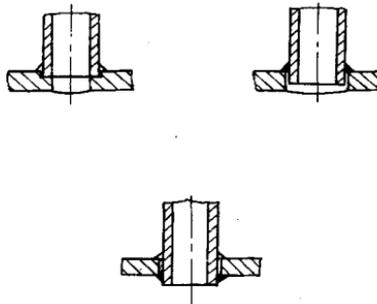


图 15 不能作为加强结构的管接头焊接型式

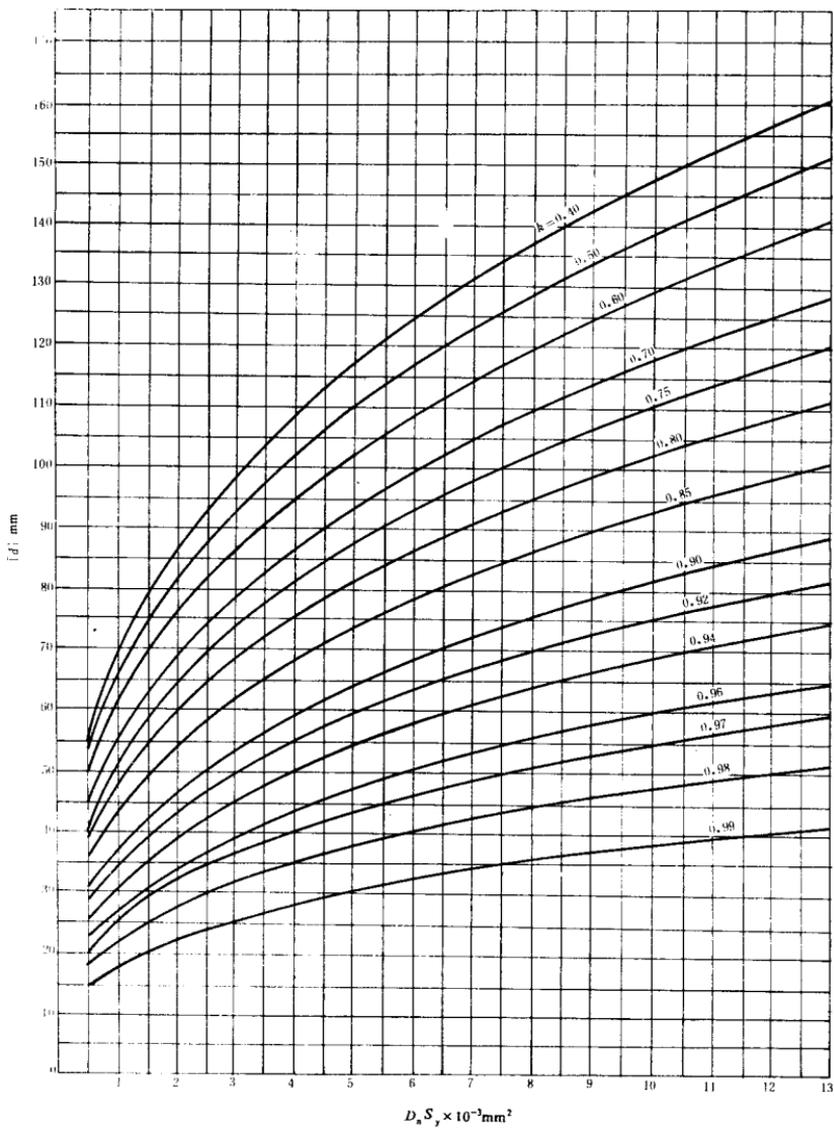


图 16a 未加强孔的最大允许直径

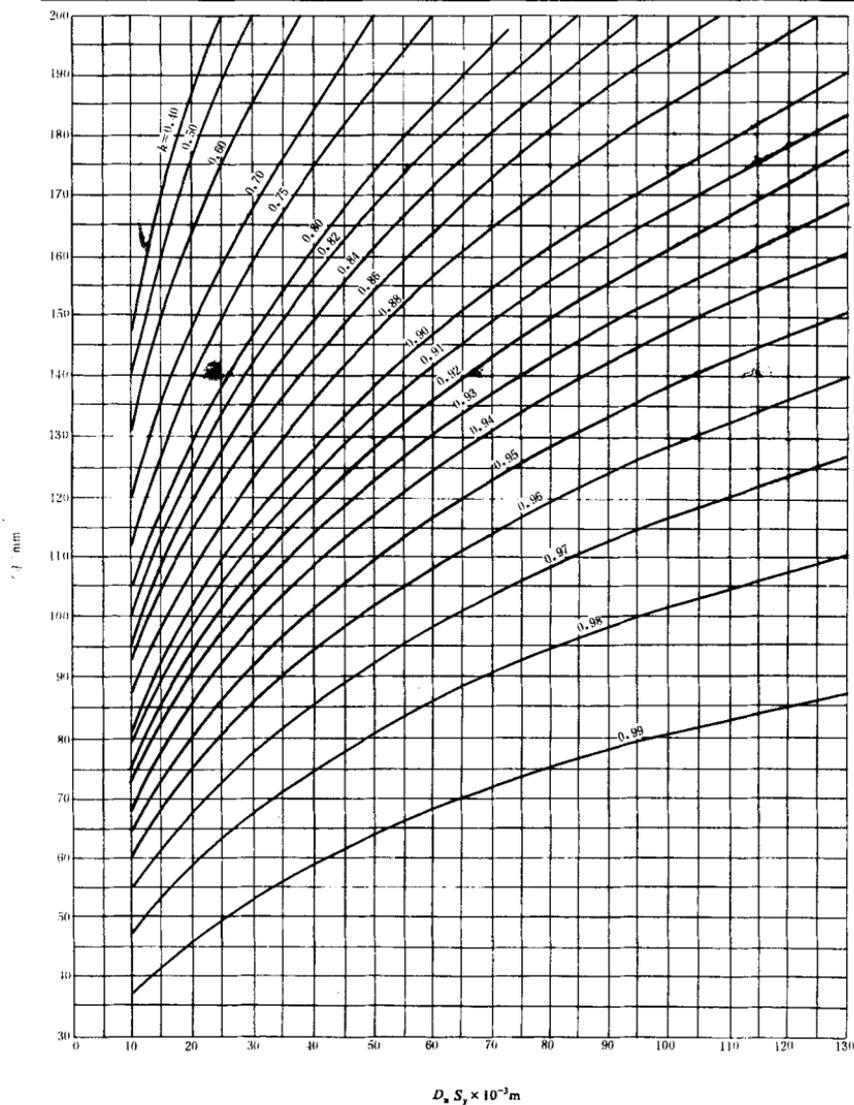


图 16b 未加强孔的最大允许直径

### 7.3 孔的加强结构

7.3.1 图 17 所示的结构型式都可视为加强结构, 其中 a)、b) 的结构型式只适用于额定压力不大于 2.45MPa 的锅炉。

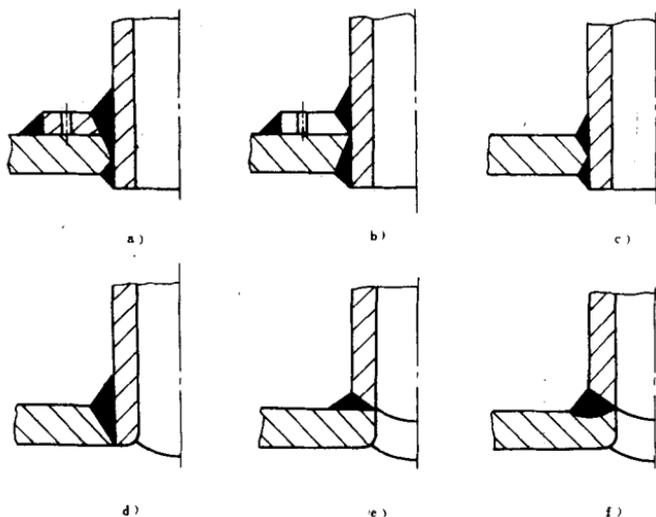


图 17 孔的加强结构型式

## 7.4 孔的加强计算

7.4.1 本章所给出的孔的加强方法, 仅适用于  $d/D_n < 0.8$ , 且  $d < 600\text{mm}$  的孔。如为椭圆孔, 则  $d$  为纵截面开孔尺寸。

7.4.2 当锅筒筒体和集箱筒体的系数  $k \geq 0.4$  时, 如果锅筒筒体和集箱筒体上的开孔直径超过按 7.2.2 条所确定的未加强孔的最大允许直径, 应采用 7.3.1 条规定的加强结构予以加强。

当系数  $k < 0.4$ , 强度自然满足, 不必进行加强。

7.4.3 开孔加强的有效范围为表 20 图中 ABCD 内所示的范围。

有效加强高度按以下规定选取:

$S_1/d_n \leq 0.19$  时, 取  $h = 2.5S_1$  和  $h = 2.5S$  中的较小值;

$S_1/d_n > 0.19$  时, 取  $h = \sqrt{(d_n + S_1)S_1}$ 。

有效加强宽度取:  $b = 2d_n$ 。

如为椭圆孔, 则  $d_n$  为纵截面上的尺寸。

7.4.4 开孔加强应满足以下条件:

$$F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \geq F \quad \dots\dots\dots(67)$$

且加强所需面积的  $\frac{2}{3}$  应分布在离孔边  $\frac{1}{4}$  孔径的范围内。

当采用表 20 所列的加强结构时, 式(67)中各面积的计算方法如表中所示。表中  $S_0$ ,  $S_{01}$  按下列公式计算:

$$S_0 = \frac{PD_n}{2[\sigma] - P} \quad \dots\dots\dots(68)$$

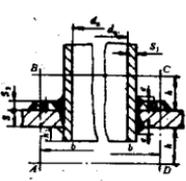
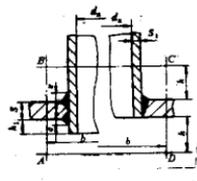
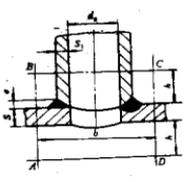
$$S_{01} = \frac{Pd_n}{2[\sigma]_1 - P} \dots\dots\dots(69)$$

对于椭圆孔,  $d_n$  系指长轴尺寸。

$S_y$  按式(12)、(33)计算,  $S_{y1}$  按式(42)计算。

当加强元件钢材的许用应力大于被加强元件钢材的许用应力时, 则按被加强元件钢材的许用应力计算。

表 20

型式	A	B	C
加 强 结 构	 <p>双面管接头和垫板联合加强 <math>S_2 &lt; S</math>, <math>h_1 &lt; h</math> 图 17 中 a) 和 b)</p>	 <p>双面管接头加强 <math>h_1 &lt; h</math> 单面管接头加强 <math>h_1 = 0</math> 图 17 中 c) 和 d)</p>	 <p>单面管接头加强 图 17 中 e) 和 f)</p>
$F$	$[d_n + 2S_{y1}(1 - \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]})]S_0$	$[d_n + 2S_{y1}(1 - \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]})]S_0$	$d_n^2 S_0$
$F_1$	$2e^2$	$2e^2$ (或 $e^2$ )	$e^2$
$F_2$	$[2h(S_{y1} - S_{01}) + 2h_1 S_{y1}] \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]}$	$[2h(S_{y1} - S_{01}) + 2h_1 S_{y1}] \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]}$	$2h(S_{y1} - S_{01}) \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]}$
$F_3$	$0.8S_2(b - d_n - 2S_1) \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]}$	0	0
$F_4$	$[d_n - 2S_{y1}(1 - \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]})](S_y - S_0)$	$[d_n - 2S_{y1}(1 - \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]})](S_y - S_0)$	$d_n^2(S_y - S_0)$

注: 1) 当开孔直径  $d$  与管接头内径  $d_n$  不同时,  $d_n$  用  $d$  代替。

## 7.5 孔桥的加强计算

7.5.1 锅筒筒体和集箱筒体上纵向、横向或斜向孔桥用管接头加强，以提高孔桥减弱系数时，首先应满足以下要求：

- a. 采用整体焊接结构，如图 17 中的 c)、d)、e)、f) 所示。
- b. 允许的最小孔桥减弱系数

$$[\varphi] < \frac{4}{3} \varphi_w \dots\dots\dots(70)$$

7.5.2 对锅筒筒体和集箱筒体上纵向、横向或斜向孔桥进行加强计算时，最大允许当量直径 $[d]_d$ 按下列公式计算：

对于纵向孔桥

$$[d]_d = (1 - [\varphi])t \dots\dots\dots(71)$$

对于横向孔桥

$$[d]_d = \left(1 - \frac{[\varphi]}{2}\right)t' \dots\dots\dots(72)$$

对于斜向孔桥

$$[d]_d = \left(1 - \frac{[\varphi]}{K}\right)t'' \dots\dots\dots(73)$$

允许最小减弱系数 $[\varphi]$ 按式(11)或(32)计算。

7.5.3 用于加强孔桥的管接头(图 18)应符合下述条件：

$$F_1 + F_2 \geq \left(\frac{F}{S_0} - [d]_d\right)S_y \dots\dots\dots(74)$$

$F$ 、 $F_1$ 及 $F_2$ 按表 20 中的公式计算。

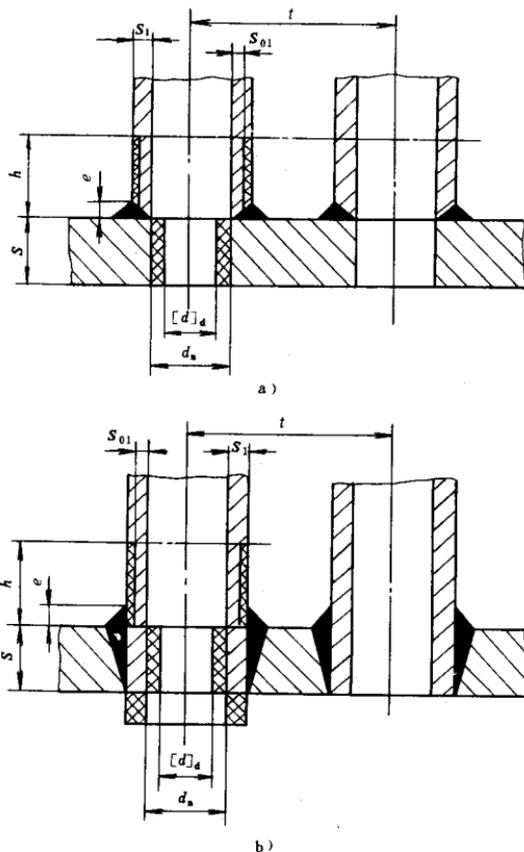


图 18 用管接头加强的孔桥

## 7.6 焊缝强度的校核计算

7.6.1 加强元件与锅筒筒体和集箱筒体的结合强度，必要时应进行验算。验算时取焊缝许用剪应力等于许用应力的 70%。

加强元件如能保证焊透，其焊缝计算高度取焊脚高度。

## 8 异形元件的计算

### 8.1 符号说明

本章所用符号的意义和单位如下：

$S_T$ ——三通主管和等径叉形管的理论计算壁厚，mm；

$S_{min}$ ——三通主管和等径叉形管的最小需要壁厚，mm；

$S$ ——三通主管和等径叉形管的取用壁厚，简称“壁厚”，mm；

$S_y$ ——三通主管和等径叉形管的有效壁厚，mm；

- $S_{I1}$ ——三通支管的理论计算壁厚, mm;  
 $S_{Imin}$ ——三通支管的最小需要壁厚, mm;  
 $S_I$ ——三通支管的取用壁厚, 简称“壁厚”, mm;  
 $S_{y1}$ ——三通支管的有效壁厚, mm;  
 $C$ ——考虑腐蚀减薄、钢管下偏差的负值和工艺减薄的附加壁厚, mm;  
 $C_1$ ——考虑腐蚀减薄的附加壁厚, mm;  
 $C_2$ ——考虑钢管下偏差的负值和工艺减薄的附加壁厚, mm;  
 $D_w$ ——三通主管和等径叉形管的外径, mm;  
 $D_n$ ——三通主管和等径叉形管的内径, mm;  
 $D_p$ ——三通主管的平均直径, mm;  
 $d_w$ ——三通支管的外径, mm;  
 $d_n$ ——三通支管的内径, mm;  
 $d_p$ ——三通支管的平均直径, mm;  
 $\beta_I$ ——按三通主管和等径叉形管理论计算壁厚算出的外径与内径的比值;  
 $P$ ——计算压力(表压), MPa;  
 $(P)$ ——校核计算最高允许计算压力(表压), MPa;  
 $[\sigma]$ ——许用应力, MPa;  
 $\varphi_y$ ——减弱系数;  
 $X, Y$ ——系数;  
 $d$ ——加强筋的直径, mm;  
 $\delta$ ——加强板的厚度, mm;  
 $h$ ——加强板的高度, mm.

## 8.2 焊制三通

### 8.2.1 无缝钢管焊制三通的理论计算壁厚按下列公式计算:

对于主管:

$$S_I = \frac{PD_w}{2\varphi_y [\sigma] + P} \dots\dots\dots(75)$$

对于支管:

$$S_n = S_I \frac{d_w}{D_w} \dots\dots\dots(76)$$

或

$$S_n = S_I \frac{d_n}{D_n} \dots\dots\dots(77)$$

焊制三通的最小需要壁厚按下列公式计算:

对于主管:

$$S_{min} = S_I + C \dots\dots\dots(78)$$

对于支管:

$$S_{1\min} = S_{fi} + C \dots\dots\dots(79)$$

焊制三通取用壁厚应满足:

对于主管:

$$S \geq S_{\min}$$

对于支管:

$$S_1 \geq S_{1\min}$$

8.2.2 校核计算时, 焊制三通的最高允许计算压力按下式计算:

$$[P] = \frac{2\varphi_y [\sigma] S_y}{D_w - S_y} \dots\dots\dots(80)$$

有效壁厚  $S_y$  按下式计算:

$$S_y = S - C \dots\dots\dots(81)$$

$S_y$  也可取为实际测量最小壁厚减去以后可能的腐蚀减薄值。

8.2.3 式(75)、(76)、(77)及(80)适用于  $D_w \leq 660\text{mm}$ 、 $\frac{d_n}{D_n} \geq 0.8$  的范围。

8.2.4 焊制三通的计算压力  $P$  取相连元件的计算压力。

8.2.5 焊制三通的计算壁厚  $t_{0i}$  取相连元件的计算壁厚。

8.2.6 图 19 为单筋、蝶式加强焊制三通的结构型式。用壁厚加强的焊制三通, 应采用图 17 中相应的接管型式。减弱系数  $\varphi$ , 按表 21 确定, 表中  $\beta$  值按 3.7.1 条计算,  $\beta_1$  值按式(35)计算。

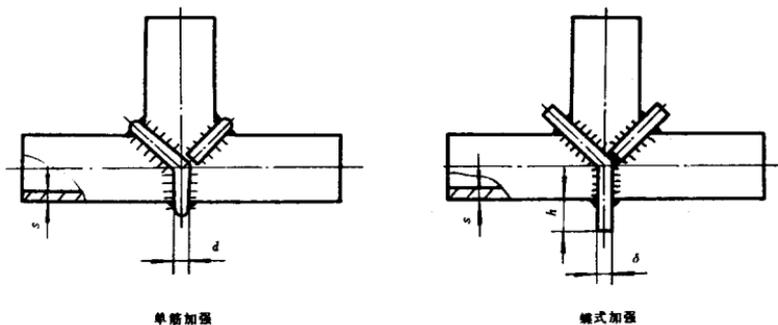


图 19 焊制三通的单筋、蝶式加强型式

表 21 焊制三通减弱系数  $\varphi_y$ 

$t_{\text{th}}$	$\beta, \beta_1$	加强型式	$\varphi_y$
小于钢材持久强度对基本许用应力起控制作用的温度	$1.05 \leq \beta < 1.1^{\text{D}}$	蝶式	0.90
	$1.1 \leq \beta, \beta_1 \leq 1.5$	蝶式	0.90
		单筋	0.80
		壁厚	按式(82)计算
不小于钢材持久强度对基本许用应力起控制作用的温度	$1.05 \leq \beta < 1.1$	蝶式	按式(82)计算
	$1.1 \leq \beta < 1.25$ $273\text{mm} < D_w \leq 660\text{mm}$	蝶式或单筋	按式(82)计算
	$1.1 \leq \beta \leq 1.25$ $D_w \leq 273\text{mm}$	蝶式或单筋	0.70
	$1.25 < \beta, \beta_1 \leq 2.0$	壁厚	按式(82)计算
	$1.25 < \beta, \beta_1 \leq 1.5$	蝶式或单筋	0.70

注: 1)对于额定压力不大于 2.45MPa 的锅炉无缝钢管焊制三通, 当主管外径  $D_w \leq 273\text{mm}$  时, 可用壁厚加强办法按式(82)计算  $\varphi_y$ 。

### 8.2.7 三通减弱系数按下式计算:

$$\varphi_y = \frac{1}{1.20 \left( 1 + \frac{X\sqrt{1+Y^2}}{2Y} \right)} \dots\dots\dots(82)$$

式中:  $X = \frac{d_0^2}{D_p d_p}$

$$Y = 4.05 \frac{S_y^3 + S_{y1}^3}{S_y^3 \sqrt{D_p S_y}}$$

8.2.8 焊制三通的附加壁厚  $C$  按 3.5.1 至 3.5.3 和 3.5.5 条的规定确定。

8.2.9 焊制三通加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 22 所规定的值。

8.2.10 不绝热的焊制三通, 其最大允许壁厚应符合第 3.6 条的要求。

8.2.11 焊制三通的焊缝坡口型式、尺寸、热处理规范及质量检查要求, 应符合锅炉制造技术条件的规定。

8.2.12 在图 20 所示的 ABCD 三通区域内, 应尽量避免开孔, 若必须开孔, 则孔的直径不应大于  $\frac{1}{4}D_w$ , 而且以 60mm 为限, 同时, 孔边缘至焊缝边缘的距离不应小于  $2S$ 。若为孔桥, 则式(75)和(80)中的  $\varphi_y$  可取按 8.2.6 条确定的  $\varphi_y$  和按 2.4.5 至 2.4.12 条确定的孔桥减弱系数两者的乘积, 或按第 9 章的方法确定三通的最高允许计算压力。

8.2.13 焊制三通的水压试验最高允许压力取与其相连元件的水压试验最高允许压力值, 但不应超过按 3.7 条所确定的值。

表 22 加强元件的尺寸要求

mm

加强型式	加强元件尺寸	
	$S \leq 20$	$S > 20$
螺 式	$\delta = S$ $h = 6S$	$\delta = S$ $h = 120$
单 筋	$d = 1.5S$	

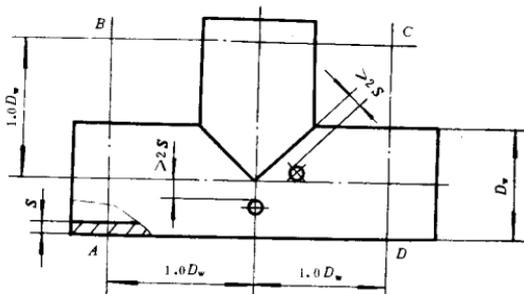


图 20 三通区域

### 8.3 锻造三通

8.3.1 锻造三通壁厚、最高允许计算压力和  $\beta$ 、 $\beta_i$  的计算公式，计算压力、计算壁温、附加壁厚  $C$ 、不绝热锻造三通的最高允许壁厚、水压试验最高允许压力，均按焊制三通的规定处理。

8.3.2 锻造三通采用壁厚加强，其减弱系数  $\varphi_y$  按式(82)计算。

8.3.3 锻造三通的上述规定，当其计算壁温  $t_{bi}$  小于钢材持久强度对基本许用应力起控制作用的温度时，适用于  $1.1 \leq \beta$ ， $\beta_i \leq 1.5$ ；当其计算壁温  $t_{bi}$  不小于钢材持久强度对基本许用应力起控制作用的温度时，适用于  $1.25 < \beta$ ， $\beta_i \leq 2.0$ 。

8.3.4 锻造三通的结构要求如图 21 所示，图中圆角半径可取以下两值中的较小者：(1)10mm；(2)转角处较厚部分壁厚的  $\frac{1}{4}$ 。

8.3.5 锻造三通在如图 21 所示的三通区域内，应尽量避免开孔。若必须开孔，则应布置在弧长  $l$  范围内，且孔的直径不应大于  $\frac{1}{4}D_w$ ，并以 60mm 为限，孔边缘至三通内壁相贯线的距离不应小于  $2S$ 。若为孔桥，则式(75)和(80)中的  $\varphi_y$  可取 8.3.2 条确定的  $\varphi_y$  和按 2.4.5 至 2.4.12 条确定的孔桥减弱系数两者的乘积，或按第 9 章的方法确定三通的最高允许计算压力。

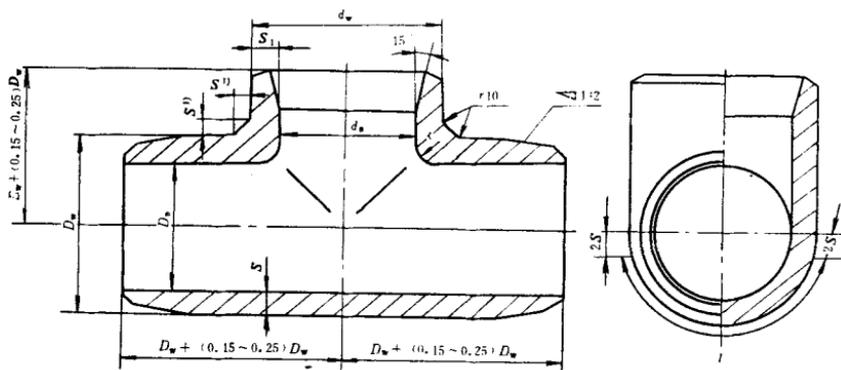


图 21 锻造三通结构

注：1)一般取  $S$ ，但不大于 50mm。

#### 8.4 等径叉形管

8.4.1 等径叉形管(图 22)的壁厚、最高允许计算压力和  $\beta$ 、 $\beta_I$  的计算公式，计算压力、计算壁温、附加壁厚、水压试验最高允许压力均按焊制三通的规定处理。

8.4.2 等径叉形管可用钢管弯制、锻造、铸造或用钢板压焊成型。在保证弯管、焊接、锻造及铸造质量的条件下，减弱系数  $\varphi_y$  按以下规定取用：

当计算壁温  $t_{bi}$  小于钢材持久强度对基本许用应力起控制作用的温度时： $\varphi_y = 0.70$ ；

当计算壁温  $t_{bi}$  不小于钢材持久强度对基本许用应力起控制作用的温度时： $\varphi_y = 0.60$ 。

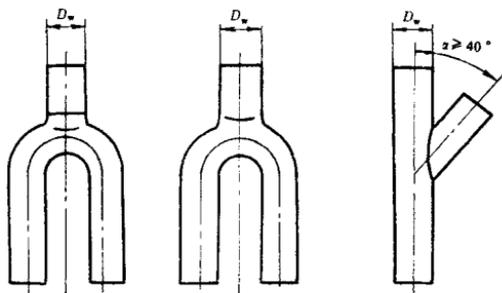


图 22 叉形管

#### 8.5 翻边焊接管接头

8.5.1 翻边焊接管接头(图 23)的强度应满足第 9 章规定的要求。

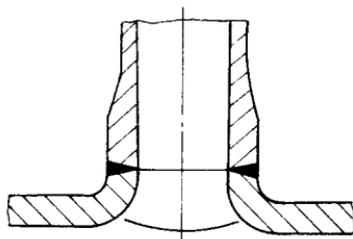


图 23 翻边焊接管接头

## 9 决定元件最高允许计算压力的验证试验

### 9.1 符号说明

本章所用符号的意义和单位如下:

$(P)$  ——工作温度时的最高允许计算压力(表压), MPa;

$P_{ys}$  ——试验温度时的验证压力(表压), MPa;

$P_{ymin}$  ——试验温度时的最小验证压力(表压), MPa;

$P_{ss}$  ——试验温度时最薄弱部位达到屈服时的压力(表压), MPa;

$P_{bs}$  ——试验温度时的爆破压力(表压), MPa;

$(\sigma)$  ——许用应力, MPa;

$[\sigma]_j$  ——基本许用应力, MPa;

$[\sigma]_{js}$  ——试验温度时的基本许用应力, MPa;

$\sigma_b$  ——材料在 20℃ 的抗拉强度, MPa;

$\sigma_{sls}$  ——试验温度时元件材料的实际屈服限, MPa;

$\sigma_{bl}$  ——元件材料在 20℃ 的实际抗拉强度, MPa;

$\sigma_{dmax}$  ——高应力区域中最大当量应力, MPa;

$\sigma'_{dmax}$  ——低应力区域中最大当量应力, MPa;

$\sigma_{pdmax}$  ——高应力区域中内外壁平均应力的当量应力最大值, MPa;

$\sigma'_{pdmax}$  ——低应力区域中内外壁平均应力的当量应力最大值, MPa;

$R_p$  ——回转壳体结构不连续部位的平均回转半径, mm;

$R_{pp}$  ——回转壳体上相邻两高应力区的平均回转半径的平均值, mm;

$S'_{min}$  ——结构不连续处的最小壁厚, mm;

$S_{pmis}$  ——相邻两高应力区的最小壁厚的平均值, mm;

$\varepsilon$  ——应变量, %;

$\phi_h$  ——焊缝减弱系数;

$\Delta$  ——应力测量的相对误差;

$f$  ——铸件的质量系数;

$S_{ys}$  ——经受验证试验的元件最薄弱处的壁厚, mm;

$S_{yz}$  ——实用元件对应于试验元件  $S_{ys}$  处的实际壁厚, mm.

### 9.2 概述

凡是形状复杂,不能按本标准以前各章规定进行计算的锅炉受压元件,它的最高允许计算压力可按本章给出的液压试验方法确定。采用验证试验确定最高允许计算压力的元件,必须用本标准允许的材料制造,并应符合有关锅炉制造技术条件的规定。同时,元件的所有转角处必须有适当的圆角。圆角半径不应小于以下两值中的较小值:

- (1)10mm; (2)圆角相连接的较厚部分壁厚的 $\frac{1}{4}$ 。

### 9.3 验证试验

#### 9.3.1 应力验证法

本方法适用于用本标准允许的各种钢材制造的,并在该钢材允许使用的温度范围内工作的元件,本方法可按下列程序进行(当量应力按最大剪应力强度理论计算):

a. 在元件可能出现高应力的区域的内外壁对应部位粘贴应变片,在元件其他部位的内外壁对应部位也应当粘贴应变片。

b. 按一定压力分级升压和降压,并记录每级压力值及其相应的每个测点的应变值。试验最高压力以外壁都不出现屈服为准。反复几次升压和降压,直至测量数据重现性满意为止。

c. 根据验证试验获得的应力值及其分布,按如下规定将应力区分为一次应力、二次应力和一次局部薄膜应力:

一次应力——元件上没有受到结构不连续影响的区域中的应力;

二次应力——元件结构上不连续部位由于满足变形协调条件在其邻近区域引起的应力;

一次局部薄膜应力——当应力值及其分布满足如下条件:元件上内、外壁平均应力的当量应力值不小于 $1.1(\sigma)$ 的范围,在回转壳体经线方向上的尺寸不大于 $\sqrt{R_F S'_{\min}}$ ,并且相邻两个这样的区域的边缘间距不小于 $2.5\sqrt{R_{FP} S'_{\min}}$ ,则这种性质的应力属于一次局部薄膜应力。

为方便起见,将只有一次应力的区域称为低应力区;将有二次应力和一次局部薄膜应力的区域称为高应力区。

d. 作出低应力区域中内外壁平均应力的当量应力最大点的 $\sigma'_{pd\max}-P$ 关系直线,从该线上定出相应于 $(\sigma)$ 的压力 $P_{y1}$ (图24)。

e. 作出低应力区域中当量应力最大点的 $\sigma'_{d\max}-P$ 关系直线,从该线上定出相应于 $1.5(\sigma)$ 的压力 $P_{y2}$ (图25)。

f. 作出高应力区域中内外壁平均应力的当量应力最大点的 $\sigma_{pd\max}-P$ 关系直线,从该线上定出相应于 $1.5(\sigma)$ 的压力 $P_{y3}$ (图26)。

g. 作出高应力区域中当量应力最大点的 $\sigma_{d\max}-P$ 关系直线,从该线上定出相应于 $3[\sigma]$ 的压力 $P_{y4}$ (图27)。

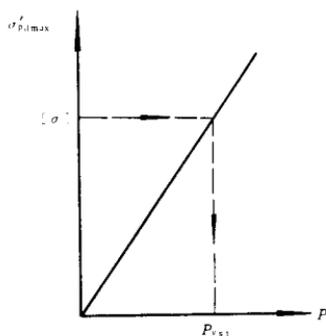


图 24 低应力区域中内外壁  
平均应力的当量应力  
最大点的  $\sigma'_{pdmax}-P$  直线

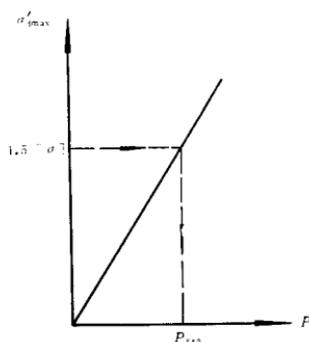


图 25 低应力区域中  
当量应力最大点的  
 $\sigma'_{dmax}-P$  直线

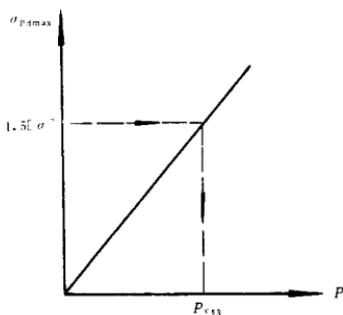


图 26 高应力区域中内外壁  
平均应力的当量应力最大点的  
 $\sigma'_{pdmax}-P$  直线

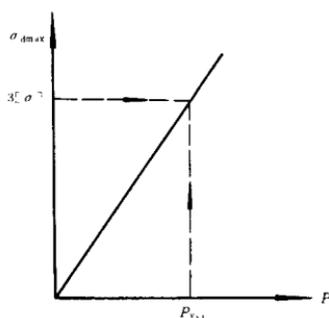


图 27 高应力区域中  
当量应力最大点的  
 $\sigma'_{dmax}-P$  直线

h. 取  $P_{ys1}$ 、 $P_{ys2}$ 、 $P_{ys3}$ 、 $P_{ys4}$  中的最小值为  $P_{ysmin}$ 。

i. 对应变测量的相对误差作出估计。如相对误差为  $\pm \Delta$ ，则按下式确定元件的最高允许计算压力：

$$[P] = \frac{P_{ysmin}}{1 + \Delta} \dots\dots\dots (83)$$

按式(83)确定的最高允许计算压力  $[P]$  用于不经验试验的相同元件时，应按实际情况考虑壁厚差异，进行修正。

### 9.3.2 屈服验证法

本方法只适用于用本标准允许的各种钢材制造的，且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，并且元件材料应满足以下条件：

$$\frac{\text{试验温度时最小保证屈服限}}{\text{试验温度时最小保证抗拉强度}} \leq 0.6$$

进行屈服验证的元件在试验前应是没有形变硬化和内应力的，也不得受过液压试验，否则，元件应在消除应力热处理后进行此项验证试验。

元件的最高允许计算压力按下式确定：

$$[P] = 0.75 \frac{P_{ss} [\sigma]_t \varphi_s}{\sigma_{st}} \dots \dots \dots (84)$$

式中， $[\sigma]_t$  应取元件材料在工作温度时的基本许用应力。

对于投入运行后内外壁能作定期严格检查的元件，必要时最高允许计算压力可放大至 1.25  $(P)$ ，即取式(84)所确定的值的 1.25 倍。

按式(84)确定的最高允许计算压力用于不经验证试验的相同元件时，应按实际情况考虑壁厚差异进行修正。

元件的屈服压力  $P_{ss}$  可用应变测量法确定：

在可能发生高应力部位的外壁粘贴应变片，然后缓慢分级升压，记录每级压力值及相应的每个测点的应变值，作出应变值最大点的  $P-\varepsilon$  曲线，取相应残余应变量为 0.2% 的压力为  $P_{ss}$  (图 28)。

### 9.3.3 爆破验证法

本方法只适用于用本标准允许的各种钢材制造的，且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，并且试件不应少于三个。

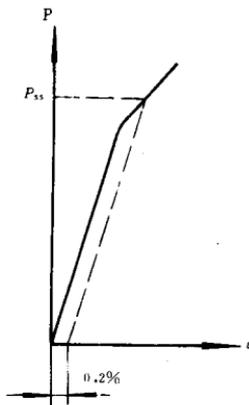


图 28 根据应变最大点的  $P-\varepsilon$  曲线确定  $P_{ss}$  的方法  
元件的最高允许计算压力按下式确定：

$$[P] = \frac{P_{bs} S_{yz} [\sigma]_1 \sigma_b}{4 S_y [\sigma]_{js} \sigma_{bt}} \varphi_b f \dots\dots\dots(85)$$

对于铸钢元件， $f$ 取为 0.7；对于其他元件，均取  $f=1.0$ 。

## 附录 A

非常用锅炉钢材在不同计算壁温下的基本许用应力 $[\sigma]$   
(补充件)

						MPa
钢号 与 标准号	A3	15g	22g	12Mng	12MoWVBSiXt*	
	GB 700-79	GB 699-65	GB 713-86	GB 713-86	(无Cr8#) GB 5310-85	
$\sigma_b$	372	372	420	430	539	
$\sigma_s$	216	216	265	275	314	
计 算 壁 温  t <sub>bi</sub> ℃	20	137	137	156	159	200
	250	113	116	137	149	
	260	111	113	134	146	
	280	105	108	130	140	
	300	101	104	127	135	
	320		99	123	132	
	340		93		130	
	350		90		129	
	360		88		128	
	380		82		125	
	400		78		123	
	410					
	420					
	430					
	440					
	450					
460						
470						
480						

续表

钢号 与 标准号	A3 GB 700-79	15g GB 699-65	22g GB 713-86	12Mng GB 713-86	12MoWVBSiXt' (无Cr8#) GB 5310-85
计 算 壁 温 t <sub>bi</sub> ℃	490				
	500				116
	510				111
	520				106
	530				99
	540				91
	550				88
	560				85
	570				80
	580				75

注：①板厚适用范围：A3,  $S \leq 22\text{mm}$ ；15g,  $S \leq 40\text{mm}$ ；22g,  $S \leq 60\text{mm}$ ；12Mng,  $S \leq 25\text{mm}$ 。

②相邻计算壁温数值之间的 $[\sigma]_t$ 可用算术内插法确定，但需舍弃小数点后的数字。

③表中粗线下方的数据系按持久强度 $\sigma_b$ 计算的，与此数据相对应的温度表示该钢材持久强度对基本许用应力起控制作用的温度。对于带\*的钢号，此粗线并不表示按持久强度计算基本许用应力的起始温度。

## 附录 B

开孔减弱断面的抗弯断面系数  $W$  的近似计算方法

(参考件)

## B1 本附录所用符号的意义和单位

- $S$ ——锅筒筒体或集箱筒体的壁厚, mm;  
 $D_w$ ——锅筒筒体或集箱筒体的外径, mm;  
 $D_n$ ——锅筒筒体或集箱筒体的内径, mm;  
 $R_p$ ——锅筒筒体或集箱筒体的平均半径, mm;  
 $d_i$ ——孔的直径( $i=1, 2, 3, \dots$ ), mm;  
 $\alpha_i$ ——孔中心线与锅筒筒体或集箱筒体水平中心轴线  $X-X$  之间的夹角, ( $i=1, 2, 3, \dots$ );  
 $J_x$ ——开孔减弱断面对轴线  $X-X$  的惯性矩,  $\text{mm}^4$ ;  
 $J_{x1}$ ——开孔减弱断面对轴线  $X_1-X_1$  的惯性矩,  $\text{mm}^4$ ;  
 $\Sigma S_x$ ——孔对轴线  $X-X$  的静矩,  $\text{mm}^3$ ;  
 $\Sigma F$ ——开孔减弱断面的面积,  $\text{mm}^2$ ;  
 $y_c$ ——开孔减弱断面重心坐标与轴线  $X-X$  之间的垂直距离, mm;  
 $W_x$ ——开孔减弱断面对轴线  $X-X$  的抗弯断面系数,  $\text{mm}^3$ ;  
 $J_{xdi}$ ——开孔减弱断面上孔  $d_i$  对轴线  $X-X$  的惯性矩,  $\text{mm}^4$ ;  
 $W_{x1}$ ——开孔减弱断面对轴线  $X_1-X_1$  的抗弯断面系数, 简称“抗弯断面系数”,  $\text{mm}^3$ .

## B2 开孔减弱断面的抗弯断面系数的计算公式

开孔减弱断面的抗弯断面系数按下式计算:

$$W_{x1} = \frac{J_{x1}}{\frac{D_w}{2} + y_c} \dots\dots\dots(B1)$$

$$y_c = \frac{\Sigma S_x}{\Sigma F} = \frac{-SR_p \Sigma d_i \sin \alpha_i}{\frac{\pi}{4}(D_w^2 - D_n^2) - \Sigma S d_i} \dots\dots\dots(B2)$$

$$\begin{aligned}
 J_{x1} = J_x - y_c^2 \Sigma F = \frac{\pi}{64}(D_w^4 - D_n^4) - \Sigma J_{xdi} - y_c^2 \Sigma F = \frac{\pi}{64}(D_w^4 - D_n^4) - \Sigma \left( \frac{S d_i^3}{12} \cos^2 \alpha_i \right. \\
 \left. + \frac{d_i S^3}{12} \sin^2 \alpha_i + d_i S R_p^2 \sin^2 \alpha_i \right) - y_c^2 \left[ \frac{\pi}{4}(D_w^2 - D_n^2) - \Sigma S d_i \right] \dots\dots\dots(B3)
 \end{aligned}$$

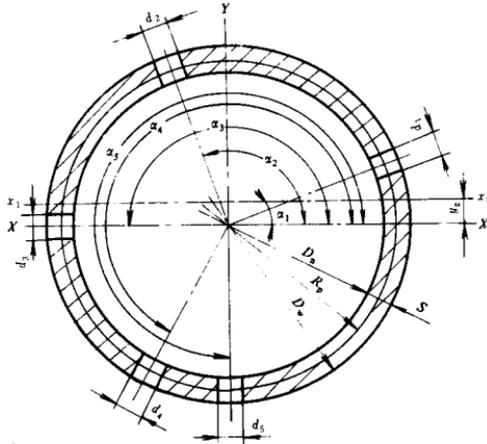


图 B1 锅筒筒体断面图

B3 开孔减弱断面的抗弯断面系数的近似计算

a. 惯性矩

$$J_{x1} \approx J_x \approx \frac{\pi}{64} (D_w^4 - D_s^4) - \sum d_i S R_0^2 \sin^2 \alpha_i \dots \dots \dots (B4)$$

计算中忽略

$$\sum \left( \frac{S d_i^3}{12} \cos^2 \alpha_i + \frac{S^3}{12} \sin^2 \alpha_i \right)$$

及

$$y_c^2 \left[ \frac{\pi}{4} (D_w^2 - D_s^2) - \sum S d_i \right]$$

b. 抗弯断面系数

在断面水平轴线 X-X 上, 下半部开孔减弱情况较接近的情况下,  $y_c$  值甚小, 可忽略不计(认为轴线 X-X 与轴线  $X_1-X_1$  重合, 也即  $y_c=0$ ), 因此, 抗弯断面系数可按下式近似计算:

$$W_{x1} \approx W_x = \frac{J_x}{\frac{D_w}{2}} \dots \dots \dots (B5)$$

若开孔减弱情况集中于断面水平轴线 X-X 的某一边时, 则必须考虑  $y_c$  值的影响, 此时, 抗弯断面系数按下式近似计算:

$$W_{x1} = \frac{J_x}{\frac{D_w}{2} + y_c} \dots \dots \dots (B6)$$

$J_x$  按式(B4)计算。

附 录 C  
例 题  
(参 考 件)

## C1 例题 1

某锅炉的额定工作压力  $P_e = 13.7\text{MPa}$ (表压), 锅筒筒体由 13MnNiMoNb 钢板用热卷方法焊制而成, 壁厚  $S = 95\text{mm}$ , 内径  $D_n = 1600\text{mm}$ , 置于烟道外。最大流量时, 锅筒至锅炉出口之间的压降为  $1.5\text{MPa}$ , 筒体受到如例题图 C1 所示管孔的减弱, 管孔全部焊上管接头, 试校核锅筒筒体壁厚。

〔解〕

a. 确定计算压力

按式(15)规定确定锅筒筒体的计算压力:

$$P = P_g + \Delta P_a$$

锅炉出口安全阀较低始启压力与额定压力的差值:

$$\Delta P_a = 13.7 \times 0.05 = 0.69\text{MPa}$$

按式(16)锅炉工作压力

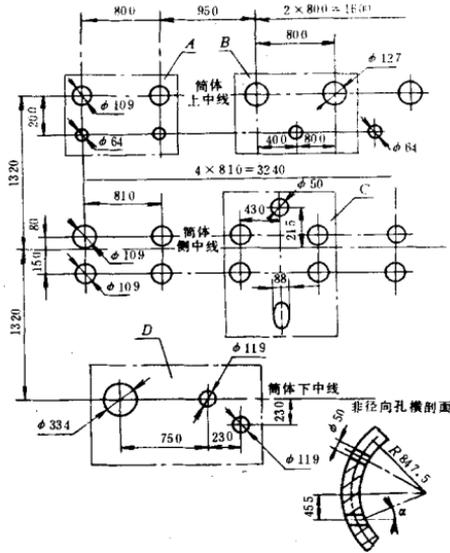
$$P_g = P_e + \Delta P_z + \Delta P_{z2}$$

由题设锅炉额定工作压力为

$$P_e = 13.7\text{MPa}$$

由题设最大流量时锅筒至锅炉出口之间的压降

$$\Delta P_z = 1.5\text{MPa}$$



D 组孔桥的加强管接头

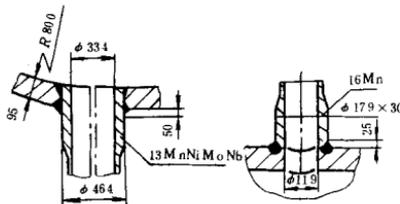


图 C1 筒体管孔布置图  
(按中径展开)

液柱静压力

$$\Delta P_{st} = 0$$

故

$$P_g = 13.7 + 1.5 + 0 = 15.2 \text{ MPa}$$

则锅筒筒体的计算压力

$$P = 15.2 + 0.69 = 15.89 \text{ MPa}$$

b. 确定许用应力

按式(1), 锅筒筒体的许用应力

$$[\sigma] = \eta[\sigma]_j$$

由表 2 注②, 对于额定压力不小于 13.7MPa 锅炉的锅筒

$$\eta = 0.90$$

由水蒸汽表查得  $P = 15.99\text{MPa}$ (绝对压力)时水的饱和温度

$$t_b = 347^\circ\text{C}$$

13MnNiMoNb 钢板最小保证值,  $\sigma_b = 570\text{MPa}$ ;  $\sigma_s^{300} = 343\text{MPa}$ ;  $\sigma_s^{350} = 333\text{MPa}$ 。用内插法求得  $\sigma_s^{347} = 333.6\text{MPa}$ 。

按式(2)与(3), 13MnNiMoNb 在  $347^\circ\text{C}$  时基本许用应力应取下列两值中较小者:

$$\frac{\sigma_b}{n_b} = \frac{570}{2.7} = 211\text{MPa}$$

$$\frac{\sigma_s^{347}}{n_s} = \frac{333.6}{1.5} = 222\text{MPa}$$

故基本许用应力为

$$[\sigma]_j = 211\text{MPa}$$

故

$$[\sigma] = 0.90 \times 211 = 189.9\text{MPa}$$

c. 确定不考虑相邻两孔影响的最小节距  $t_0$

按式(17), 对于  $d_1 = d_2 = 109\text{mm}$  管孔, 不考虑相邻两孔影响的最小节距

$$t_0 = d_p + 2\sqrt{(D_n + S)S} = \frac{109 + 109}{2} + 2\sqrt{(1600 + 95) \times 95} = 911.6\text{mm}$$

由例题图 C1 可见, 两孔节距为 800mm、810mm 时均小于  $t_0$ , 故都应按孔桥处理。

根据同样的计算, 可把筒体上的管孔分为 A, B, C, D 四组孔桥进行计算。

d. 确定未加强孔的最大允许直径

按式(12), 锅筒筒体的有效壁厚

$$S_y = S - C$$

按 2.5.1 条, 锅筒筒体的附加壁厚

$$C = C_1 + C_2$$

按 2.5.3 条, 当钢板  $S > 20\text{mm}$  时

$$C_1 = 0$$

按表 7, 热卷超高压锅筒筒体工艺减薄量为 4mm, 又因钢板的下偏差的负值为 1, 根据 2.5.3 条规定

$$C_2 = 0.5 + 4 = 4.5\text{mm}$$

所以

$$C = 0 + 4.5 = 4.5\text{mm}$$

$$S_y = S - C = 95 - 4.5 = 90.5 \text{ mm}$$

按式(66), 系数

$$k = \frac{P D_n}{(2[\sigma] - P) S_y} = \frac{15.89 \times 1600}{(2 \times 189.9 - 15.89) \times 90.5} = 0.772$$

由图 16b, 当  $k = 0.772$  和  $D_n S_y = 1600 \times 90.5 = 145 \times 10^3 \text{ mm}^2$  时的未加强孔最大允许直径

$$[d] = 200 \text{ mm}$$

c. 孔的加强计算

由例题图 C1 可知, D 组孔桥中的  $\phi 334 \text{ mm}$  孔已超过  $[d]$ , 应进行加强计算。

按 7.5.1 条的要求, 必须先满足

$$[\varphi] < \frac{4}{3} \varphi_w$$

按 2.2.2 条, 锅筒筒体允许最小减弱系数按式(11)

$$[\varphi] = \frac{P(D_n + S_y)}{2[\sigma] S_y} = \frac{15.89 \times (1600 + 90.5)}{2 \times 189.9 \times 90.5} = 0.782$$

按式(18)和(23)计算 D 组纵向孔桥未加强时的减弱系数

$$\varphi_w = \varphi = \frac{t - d_p}{t} = \frac{750 - \left(\frac{334 + 119}{2}\right)}{750} = 0.698$$

故  $\frac{4}{3} \varphi_w = \frac{4}{3} \times 0.698 = 0.931$ , 大于  $[\varphi] = 0.782$ , 满足上述 7.5.1 条要求,  $\phi 334 \text{ mm}$  的孔可按

7.4.1 至 7.4.4 条规定进行加强, 详见例题 8, 此孔加强后按无孔处理。

f. 计算各组孔桥减弱系数

各组孔桥减弱系数的计算如表 C1 所示:

表 C1

名称	符号	计算公式	计算	单位	数值
A 组孔桥					
纵向孔桥 减弱系数	$\varphi$	$\frac{t-d}{t}$	$\frac{800-109}{800}$	—	0.864
相邻两孔 平均直径	$d_p$	$0.5(d_1 + d_2)$	$0.5 \times (109 + 54)$	mm	86.5
横向孔桥 减弱系数	$2\varphi'$	$2 \frac{t'-d_p}{t}$	$2 \times \frac{200-86.5}{200}$	—	1.14

续表 C1

名称	符号	计算公式	计算	单位	数值
B 组孔桥					
纵向孔桥 减弱系数	$\varphi$	$\frac{t-d}{t}$	$\frac{800-127}{800}$	—	0.84
相邻两孔平均直径	$d_p$	$0.5(d_1+d_2)$	$0.5 \times (127+64)$	mm	95.5
系数	$n$	$\frac{b}{a}$	$\frac{400}{200}$	—	2
系数	$N$	$\frac{d_p}{a}$	$\frac{95.5}{200}$	—	0.478
斜向孔桥 当量减弱系数	$\varphi_a$	查图 4		—	0.80

## C 组孔桥

## 1. 纵向和横向孔桥

纵向孔桥 减弱系数	$\varphi$	$\frac{t-d}{t}$	$\frac{810-109}{810}$	—	0.865
横向孔桥 减弱系数	$2\varphi'$	$2 \frac{t'-d}{t'}$	$2 \times \frac{230-109}{230}$	—	1.05

## 2. 径向斜向孔桥

相邻两孔的 平均直径	$d_{p1}$	$0.5(d_1+d_2)$	$0.5 \times (50+109)$	mm	79.5
系数	$n_1$	$\frac{b_1}{a_1}$	$\frac{430}{215-80}$	—	3.18
系数	$n_2$	$\frac{b_2}{a_1}$	$\frac{810-430}{215-80}$	—	2.81
系数	$K_1$	按 2.4.7 条, $n_1 > 2.4$	取	—	1.0
系数	$K_2$	按 2.4.7 条, $n_2 > 2.4$	取	—	1.0

续表 C1

名称	符号	计算公式	计算	单位	数值
斜向节距	$t_1''$	$\sqrt{a^2 + b^2}$	$\sqrt{135^2 + 430^2}$	mm	451
斜向节距	$t_2''$	$\sqrt{a^2 + b^2}$	$\sqrt{135^2 + 380^2}$	mm	403
斜向孔桥 减弱系数	$\varphi_1''$	$\frac{t_1'' - d_{p1}}{t_1''}$	$\frac{451 - 79.5}{451}$	—	0.824
斜向孔桥 减弱系数	$\varphi_2''$	$\frac{t_2'' - d_{p2}}{t_2''}$	$\frac{403 - 79.5}{403}$	—	0.803
斜向孔桥 当量减弱系数	$\varphi_{d1}$	$K_1 \varphi_1''$	$1 \times 0.824$	—	0.824
斜向孔桥 当量减弱系数	$\varphi_{d2}$	$K_2 \varphi_2''$	$1 \times 0.803$	—	0.803

## 3. 非径向斜向孔桥

角度	$\alpha$	$\arcsin \frac{h}{R}$	$\arcsin \frac{455}{847.5}$	度	32.47°
弧长	$l$	$\pi R \frac{\alpha}{180}$	$\pi \times 847.5 \times \frac{32.47}{180}$	mm	480.3
系数	$n_3$	$\frac{b}{a}$	$\frac{430}{480.3 - 150}$	—	1.3
非径向孔 当量直径	$d_3'$	$d \sqrt{\frac{n^2 + 1}{n^2 + \cos^2 \alpha}}$	$88 \times \sqrt{\frac{1.3^2 + 1}{1.3^2 + \cos^2 32.47^\circ}}$	mm	93.1
系数	$n_4$	$\frac{b}{a}$	$\frac{810 - 430}{480.3 - 150}$	—	1.151
非径向孔 当量直径	$d_4$	$d \sqrt{\frac{n^2 + 1}{n^2 + \cos^2 \alpha}}$	$88 \times \sqrt{\frac{1.151^2 + 1}{1.151^2 + \cos^2 32.47^\circ}}$	mm	94
相邻两孔的 平均直径	$d_{p3}$	$0.5 (d_1 + d_4)$	$0.5 \times (109 + 93.1)$	mm	101.1
相邻两孔的 平均直径	$d_{p4}$	$0.5 (d_1 + d_4)$	$0.5 \times (109 + 94)$	mm	101.5

续表 C1

名称	符号	计算公式	计算	单位	数值
系数	$N_3$	$\frac{d_{P_3}}{a}$	$\frac{101.1}{480.3 - 150}$	—	0.306
系数	$N_4$	$\frac{d_{P_4}}{a}$	$\frac{101.5}{480.3 - 150}$	—	0.31
斜向孔桥 当量减弱系数	$\varphi_{a_3}$	查图 4		—	0.86
斜向孔桥 当量减弱系数	$\varphi_{a_4}$	查图 4		—	0.855
D 组 孔 桥					
系数	$n$	$\frac{b}{a}$	$\frac{230}{230}$	—	1.0
系数	$N$	$\frac{d}{a}$	$\frac{119}{230}$	—	0.517
斜向孔桥 当量减弱系数	$\varphi_d$	查图 4		—	0.69

## g. 孔桥加强计算

将上表中结果与  $[\varphi] = 0.782$  比较, 可见除 D 组  $\phi 119\text{mm}$  斜向孔桥减弱系数外, 均大于允许最小减弱系数。为此, 需要将 D 组  $\phi 119\text{mm}$  孔桥用管接头加强。

孔桥用管接头加强, 以提高孔桥减弱系数时, 首先必须满足 7.5.1 条要求, 即:

$$[\varphi] < \frac{4}{3} \varphi_w$$

由上述计算知

$$[\varphi] = 0.782$$

按式(20), 斜向孔桥未加强时的当量减弱系数

$$\varphi_w = K\varphi'' = K \frac{t'' - d}{t''}$$

斜向孔间距

$$t'' = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{230^2 + 230^2} = 325.3\text{mm}$$

按式(21)

$$K = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{0.75}{(1+n^2)^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{0.75}{(1+1^2)^2}}} = 1.11$$

式中

$$n = \frac{b}{a} = \frac{230}{230} = 1.0$$

所以

$$\varphi_w = 1.11 \times \frac{325.3 - 119}{325.3} = 0.704$$

故  $\frac{4}{3}\varphi_w = \frac{4}{3} \times 0.704 = 0.939$ , 大于  $[\varphi] = 0.782$ , 满足上述 7.5.1 条要求, 该斜向孔桥可用管接头加强, 以提高孔桥减弱系数。

下面按 7.5.3 条式(74), 检验用于加强孔桥的管接头是否符合:

$$F_1 + F_2 \geq \left(\frac{F}{S_0} - [d]_d\right) S_y$$

按表 20, 起加强作用的焊缝面积

$$F_1 = e^2$$

由例题图 C1, 管接头焊脚高度

$$e = 25\text{mm}$$

所以

$$F_1 = 25^2 = 625\text{mm}^2$$

由表 20 型式 C 起加强作用的管接头多余面积

$$F_2 = 2h(S_{y1} - S_{01}) \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]}$$

按 7.4.3 条

$$\frac{S_1}{d_n} = \frac{30}{119} = 0.25 > 0.19$$

故

$$h = \sqrt{(d_n + S_1)S_1} = \sqrt{(119 + 30) \times 30} = 66.9\text{mm}$$

锻造车削的管接头下偏差的负值按经验取  $C = 0.5\text{mm}$

按式(42)

$$S_{y1} = S_1 - C = 30 - 0.5 = 29.5\text{mm}$$

按式(69), 管接头的理论计算壁厚

$$S_{01} = \frac{Pd_n}{2[\sigma]_{1-P}}$$

由表 1、表 2 查得 16Mn 管接头在  $t_k = 347^\circ\text{C}$  时的许用应力

$$[\sigma]_t = \eta[\sigma]_{11} = 1.00 \times 129 = 129\text{MPa}$$

所以

$$S_{01} = \frac{15.89 \times 119}{2 \times 129 - 15.89} = 7.81\text{mm}$$

故

$$F_2 = 2 \times 66.9 \times (29.5 - 7.81) \times \frac{129}{189.9} = 1.97 \times 10^3\text{mm}^2$$

按表 20 型式 C

$$F = d_n S_0$$

按式(68), 未减弱锅筒筒体的理论计算壁厚

$$S_0 = \frac{PD_n}{2[\sigma] - P} = \frac{15.89 \times 1600}{2 \times 189.9 - 15.89} = 69.9\text{mm}$$

所以

$$F = 119 \times 69.9 = 8.32 \times 10^3\text{mm}^2$$

按 7.5.2 条式(73), 最大允许当量直径

$$[d]_e = \left(1 - \frac{[\varphi]}{K}\right) t'' = \left(1 - \frac{0.782}{1.11}\right) \times 325.3 = 96.1\text{mm}$$

故

$$\left(\frac{F}{S_0} - [d]_e\right) S_0 = \left(\frac{8.32 \times 10^3}{69.9} - 96.1\right) \times 90.5 = 2.075 \times 10^3\text{mm}^2$$

而

$$F_1 + F_2 = 0.625 \times 10^3 + 1.97 \times 10^3 = 2.595 \times 10^3\text{mm}^2$$

因此起加强作用的面积大于所需加强的面积, 满足上述 7.5.3 条要求, 此孔桥强度合格。

## C2 例题 2

某锅炉的锅筒由 13MnNiMoNb 钢板焊制而成, 材料性能保证书的低限:  $\sigma_b = 570\text{MPa}$ ;  $\sigma_s^{300} = 343\text{MPa}$ ;  $\sigma_s^{350} = 330\text{MPa}$ 。锅炉额定压力  $P_e = 9.8\text{MPa}$ , 由锅筒至锅炉出口的阻力  $\Delta P_r = 1.37\text{MPa}$ , 锅筒的内径  $D_n = 1600\text{mm}$ , 壁厚  $S = 70\text{mm}$ , 钢板上偏差的负值  $\Delta S = 2\text{mm}$ , 置于烟道外, 锅筒及相连元件金属重量、内部满水的重量、绝热材料的重量之总和  $G = 1810\text{kN}$ , 其中集中下降管金属、满水及绝热材料的总重量  $g = 687\text{kN}$ 。锅筒吊点间距离  $L = 10540\text{mm}$ , 其它尺寸见例题图 C2, 其中  $a = 2115\text{mm}$ ,  $b = 2100\text{mm}$ ,  $c = 1200\text{mm}$ , 最大弯曲力矩断面开孔位置见例题图 C3m—m 断面, 减弱最大断面开孔位置及尺寸见例题图 C3n—n 断面, 试验算此锅筒的弯曲应力。

〔解〕

此锅筒已按本标准第 2 章进行强度计算, 并已合格。由于锅筒支点间距大于 10m, 按 2.8.1 条规定, 应进行弯曲应力校核。

集中下降管重量按集中载荷考虑; 其余载荷由于较均匀地作用于锅筒上, 故按均布载荷处理。

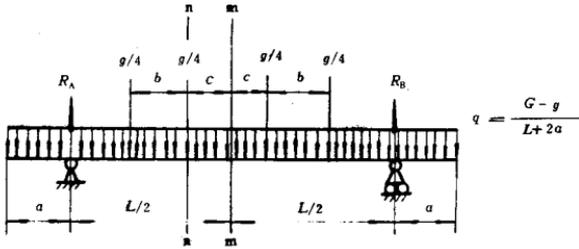


图 C2 锅筒的重量荷重示意图

断面 m-m 的弯曲力矩最大, 断面 n-n 减弱较严重又处于弯曲力矩较大位置, 故对此两断面(例题图 C3)进行校核, 校核过程见表 C2.

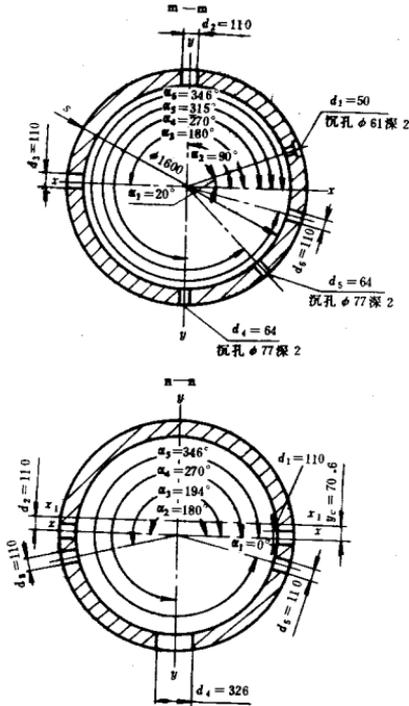


图 C3 锅筒受到减弱的 m-m 和 n-n 断面

表 C2

名称	符号	计算公式	计算	单位	数值
一、已知条件					
锅筒计算压力(表压)	$P$	$P_0 + \Delta P_f + \Delta P_a$	$9.8 + 1.37 + 0.05 \times 9.8$	MPa	11.66
介质饱和温度	$t_s$	按 $p = 11.66 + 0.1$ 查汽水性质表		℃	323
锅筒计算壁温	$t_{bl}$	表 3 $t_{bl} = t_s$		℃	323
基本许用应力	$(\sigma)_j$	按 1.3.1 条 $\frac{\sigma_b}{n_b}$	$\frac{570}{2.7}$	MPa	211
		$\frac{\sigma_j^{300}}{n_s}$	$\frac{343}{1.5}$	MPa	228
		$\frac{\sigma_j^{350}}{n_s}$	$\frac{333}{1.5}$	MPa	222
		按内插法求 323℃ 屈服许用应力	$228 - (228 - 222) \times \frac{323 - 300}{350 - 300}$	MPa	225
		由于 $\frac{\sigma_b}{2.7} < \frac{\sigma_j^{323}}{1.5}$		MPa	211
修正系数	$\eta$	表 2			1.00
许用应力	$(\sigma)$	$\eta (\sigma)_j$	$1.00 \times 211$	MPa	211
取用壁厚	$S$			mm	70
腐蚀附加壁厚	$C_1$	按 2.5.2 条 $S > 20\text{mm}$		mm	0
钢板下偏差的负值	$\Delta S$			mm	2.0
下偏差的负值及 工艺减薄附加量	$C_2$	按表 7 及 2.5.3 条	$4 + (2.0 - 0.5)$	mm	5.5
附加壁厚	$C$	$C_1 + C_2$	$0 + 5.5$	mm	5.5
有效壁厚	$S_y$	$S - C$	$70 - 5.5$	mm	64.5
外 径	$D_w$	$D_n + 2S$	$1600 + 2 \times 70$	mm	1740
内 径	$D_n$			mm	1600

续表 C2

名称	符号	计算公式	计算	单位	数值
平均半径	$R_p$	$\frac{D_o}{2} + \frac{S}{2}$	$\frac{1600}{2} + \frac{70}{2}$	mm	835
计算压力	$P$			MPa	11.66
总载荷	$G$			kN	1810
下降管集中载荷	$g$			kN	687
锅筒均布载荷	$q$	$\frac{G-g}{L+2a}$	$\frac{1810-687}{10.5+2 \times 2.115}$	kN/m	76
支座反力	$R_A$	$\frac{G}{2}$	$\frac{1810}{2}$	kN	905

## 二、m-m 断面弯曲应力校核

弯曲力矩	$M$	$R_A \frac{L}{2} - \frac{q \left(\frac{L}{2} + a\right)^2}{2} - \frac{g}{4} (b+2c)$	$905 \times \frac{10.54}{2} - \frac{76 \times \left(\frac{10.54}{2} + 2.115\right)^2}{2} - \frac{687}{4} \times (2.1 + 2 \times 1.2)$	kN·mm	$1924 \times 10^3$
当量直径	$d_{d1}$	$d + \frac{h}{S} (d_i - d)$	$50 + \frac{2}{70} \times (61 - 50)$	mm	50.3
当量直径	$d_{d2}$			mm	110
当量直径	$d_{d3}$			mm	110
当量直径	$d_{d4}$	$d + \frac{h}{S} (d_i - d)$	$64 + \frac{2}{70} \times (77 - 64)$	mm	64.4
当量直径	$d_{d5}$	$d + \frac{h}{S} (d_i - d)$	$64 + \frac{2}{70} \times (77 - 64)$	mm	64.4
当量直径	$d_{d6}$			mm	110
未减弱断面对轴线 X-X 的惯性矩	$J_x$	$\frac{\pi}{64} (D_o^4 - D_i^4)$	$\frac{\pi}{64} \times (1740^4 - 1600^4)$	mm <sup>4</sup>	$1.283 \times 10^{11}$
孔 $d_1$ 对轴线 X-X 的惯性矩	$J_{sd1}$	$\approx d_{d1}^2 S R_p^2 \sin^2 \alpha_1$	$50.3 \times 70 \times 835^2 \times \sin^2 20^\circ$	mm <sup>4</sup>	$2.87 \times 10^8$
孔 $d_2$ 对轴线 X-X 的惯性矩	$J_{sd2}$	$\approx d_{d2}^2 S R_p^2 \sin^2 \alpha_2$	$110 \times 70 \times 835^2 \times \sin^2 90^\circ$	mm <sup>4</sup>	$5.37 \times 10^9$
孔 $d_3$ 对轴线 X-X 的惯性矩	$J_{sd3}$	$\approx d_{d3}^2 S R_p^2 \sin^2 \alpha_3$	$110 \times 70 \times 835^2 \times \sin^2 180^\circ$	mm <sup>4</sup>	0

表 C2

名称	符号	计算公式	计算	单位	数值
孔 $d_4$ 对轴线 X—X 的惯性矩	$J_{d4}$	$\approx d_{d4}^4 S R_p^2 \sin^2 \alpha_4$	$64.4 \times 70 \times 835^2 \times \sin^2 270^\circ$	$\text{mm}^4$	$3.14 \times 10^9$
孔 $d_5$ 对轴线 X—X 的惯性矩	$J_{d5}$	$\approx d_{d5}^4 S R_p^2 \sin^2 \alpha_5$	$64.4 \times 70 \times 835^2 \times \sin^2 315^\circ$	$\text{mm}^4$	$1.57 \times 10^9$
孔 $d_6$ 对轴线 X—X 的惯性矩	$J_{d6}$	$\approx d_{d6}^4 S R_p^2 \sin^2 \alpha_6$	$110 \times 70 \times 835^2 \times \sin^2 346^\circ$	$\text{mm}^4$	$3.14 \times 10^8$
开孔减弱断面对轴线 X—X 的惯性矩	$J_x$	$J_x' - \sum J_{d_i}$	$1.283 \times 10^{11} - (0.287 + 5.37 + 0 + 3.14 + 1.57 + 0.314) \times 10^9$	$\text{mm}^4$	$11.76 \times 10^{10}$
抗弯断面系数	$W$	$\approx \frac{J_{x1}}{2} \approx \frac{J_x}{2}$	$\frac{11.76 \times 10^{10}}{2}$	$\text{mm}^3$	$1.35 \times 10^8$
弯曲应力	$\sigma_w$	$\frac{1000M}{W}$	$\frac{1924 \times 10^6}{1.35 \times 10^8}$	MPa	14.3
许用值		$[\sigma] = \frac{P(D_0 + S_y)}{4S_y \phi_s}$	$211 - \frac{11.66 \times (1600 + 64.5)}{4 \times 64.5 \times 1.00}$	MPa	135.8
结论		14.3MPa < 135.8MPa	故弯曲强度足够		

## 三、n—n 断面弯曲应力校核

弯曲力矩	$M$	$R_A \left( \frac{L}{2} - C \right)$ $- \frac{q \left( \frac{L}{2} + a - C \right)^2}{2}$ $- \frac{g}{4} b$	$905 \times \left( \frac{10.54}{2} - 1.2 \right)$ $- 76 \times \frac{\left( \frac{10.54}{2} + 2.115 - 1.2 \right)^2}{2}$ $- \frac{687}{4} \times 2.1$	kN·mm	$1869 \times 10^3$
开孔直径	$d_1$			mm	110
开孔直径	$d_2$			mm	110
开孔直径	$d_3$			mm	110
开孔直径	$d_4$			mm	326
开孔直径	$d_5$			mm	110
开孔减弱断面的面积	$\sum F$	$\frac{\pi}{4} (D_0^2 - D_1^2) - \sum S_{d_i}$	$\frac{\pi}{4} \times (1742^2 - 1600^2) - 70$ $\times (110 + 110 + 110 + 326 + 110)$	$\text{mm}^2$	$3.14 \times 10^5$
辅助量	$\sum d_i \sin \alpha_i$		$110 \times \sin 0^\circ + 110 \times \sin 180^\circ$ $+ 110 \times \sin 194^\circ + 326 \times \sin 270^\circ$ $+ 110 \times \sin 346^\circ$	mm	-379.2

续表 C2

名称	符号	计算公式	计算	单位	数值
断面重心坐标	$y_c$	$-\frac{SR_p \sum d_i \sin \alpha_i}{\sum F}$	$-\frac{70 \times 835 \times (-379.2)}{31.4 \times 10^4}$	mm	70.6
孔 $d_1$ 对轴线 $X-X$ 的惯性矩	$J_{sd1}$	$\approx d_1^2 SR_p^2 \sin^2 \alpha_1$	$110 \times 70 \times 835^2 \times \sin^2 0^\circ$	mm <sup>4</sup>	0
孔 $d_2$ 对轴线 $X-X$ 的惯性矩	$J_{sd2}$	$\approx d_2^2 SR_p^2 \sin^2 \alpha_2$	$110 \times 70 \times 835^2 \times \sin^2 180^\circ$	mm <sup>4</sup>	0
孔 $d_3$ 对轴线 $X-X$ 的惯性矩	$J_{sd3}$	$\approx d_3^2 SR_p^2 \sin^2 \alpha_3$	$110 \times 70 \times 835^2 \times \sin^2 194^\circ$	mm <sup>4</sup>	$3.14 \times 10^8$
孔 $d_4$ 对轴线 $X-X$ 的惯性矩	$J_{sd4}$	$\approx d_4^2 SR_p^2 \sin^2 \alpha_4$	$326 \times 70 \times 835^2 \times \sin^2 270^\circ$	mm <sup>4</sup>	$1.59 \times 10^{10}$
孔 $d_5$ 对轴线 $X-X$ 的惯性矩	$J_{sd5}$	$\approx d_5^2 SR_p^2 \sin^2 \alpha_5$	$110 \times 70 \times 835^2 \times \sin^2 346^\circ$	mm <sup>4</sup>	$3.14 \times 10^8$
开孔减弱断面对轴线 $X_1-X_1$ 的惯性矩	$J_{s1}$	$\approx J'_s - \sum J_{sdi}$	$1.283 \times 10^{11} - (3.14 + 159 + 3.14) \times 10^8$	mm <sup>4</sup>	$11.18 \times 10^{10}$
抗弯断面系数	$W$	$\frac{J_{s1}}{\frac{D_n}{2} + y_c}$	$\frac{11.18 \times 10^{10}}{\frac{1740}{2} + 70.6}$	mm <sup>3</sup>	$1.19 \times 10^8$
弯曲应力	$\sigma_w$	$\frac{1000M}{W}$	$\frac{1000 \times 1869 \times 10^3}{1.19 \times 10^8}$	MPa	15.7
许用值		$[\sigma] = \frac{P(D_n + S_T)}{4S_T \varphi_s}$	$211 - \frac{11.66 \times (1600 + 64.5)}{4 \times 64.5 \times 1.00}$	MPa	135.8
结论	15.7MPa < 135.8MPa 故弯曲强度足够				

## C3 例题 3

某单锅筒纵置式 6t/h 水管锅炉，锅炉额定蒸汽压力为 1.6MPa。上锅筒用 20g 钢板焊制而成。锅筒内径  $D_n = 900\text{mm}$ 。锅筒受到如例题图 C4 所示管孔减弱。锅筒纵焊缝采用熔剂层下的双面自动焊。锅筒置于炉膛内，锅筒与管子全部采用焊接连接。试计算该锅筒筒体壁厚。

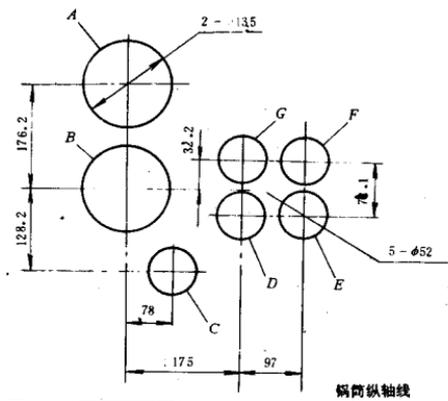


图 C4· 筒体管孔布置图 (按中径展开)

〔解〕

a. 确定计算压力

按式 (15) 和式 (16), 锅筒筒体的计算压力

$$P = P_g + \Delta P_s = P_c + \Delta P_z + \Delta P_{st} + \Delta P_a$$

锅炉出口安全阀较低始启压力与锅炉额定压力的差值

$$\Delta P_a = 1.6 \times (1.04 - 1) = 0.064 \text{ MPa}$$

锅炉额定压力

$$P_c = 1.6 \text{ MPa}$$

锅炉最大流量时锅筒至锅炉出口之间的压力降

$$\Delta P_z = 0$$

锅筒所受液柱静压力

$$\Delta P_{st} = 0$$

故

$$P = 1.6 + 0 + 0 + 0.064 = 1.664 \text{ MPa}$$

b. 确定许用应力

由水蒸气表查得  $P = 1.764 \text{ MPa}$  (绝对压力) 下水的饱和温度

$$t_b = 206^\circ\text{C}$$

由表 3, 锅筒置于炉膛内受热锅筒筒体的计算壁温

$$t_{bi} = t_b + 90 = 206 + 90 = 296^\circ\text{C}$$

由表 1, 查得 20g 钢板在  $296^\circ\text{C}$  的基本许用应力

$$[\sigma] = 114 \text{ MPa}$$

由表 2, 查得有焊接管孔, 且烟温超过  $600^\circ\text{C}$  的修正系数

$$\eta = 0.90$$

按式 (1), 锅筒筒体的许用应力

$$[\sigma] = \eta[\sigma_0] = 0.90 \times 114 = 102.6 \text{ MPa}$$

c. 确定不考虑相邻两孔影响的最小节距  $t_0$

假设筒体的壁厚  $S = 18 \text{ mm}$ . 按式 (17) 计算  $t_0$  值.

当两孔各为  $\phi 52 \text{ mm}$  时

$$t_0 = d_p + 2\sqrt{(D_n + S)S} = 52 + 2\sqrt{(900 + 18) \times 18} = 309.1 \text{ mm}$$

由例题图 C4 可知, 所有的节距都小于  $t_0$  值, 故都应按孔桥处理.

d. 确定最小减弱系数

(1) AB 孔桥

按式 (19), 横向孔桥减弱系数

$$\varphi' = \frac{t' - d}{t'} = \frac{176.2 - 135}{176.2} = 0.234$$

(2) EF 孔桥

按式 (19), 横向孔桥减弱系数

$$\varphi' = \frac{t' - d}{t'} = \frac{72.1 - 52}{72.1} = 0.279$$

(3) DE 孔桥

按式 (18), 纵向孔桥减弱系数

$$\varphi = \frac{t - d}{t} = \frac{97 - 52}{97} = 0.464$$

(4) BC 孔桥

按式 (22), 斜向孔桥减弱系数

$$t'' = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{128.2^2 + 78^2} = 150.1 \text{ mm}$$

$$\varphi'' = \frac{t'' - d_p}{t''} = \frac{150.1 - (135 + 52) \div 2}{150.1} = 0.377$$

系数

$$n = \frac{b}{a} = \frac{78}{128.2} = 0.608$$

按式 (21), 斜向孔桥换算系数

$$K = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{0.75}{(1 + n^2)^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{0.75}{(1 + 0.608^2)^2}}} = 1.29$$

按式 (20), 斜向孔桥当量减弱系数

$$\varphi_d = K\varphi'' = 1.29 \times 0.377 = 0.486$$

(5) BG 孔桥

按式 (22), 斜向孔桥减弱系数

$$l'' = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{32.2^2 + 175^2} = 177.9\text{mm}$$

$$\varphi'' = \frac{l'' - d_p}{l''} = \frac{177.9 - (135 + 52) \div 2}{177.9} = 0.474$$

系数

$$n = \frac{b}{a} = \frac{175}{32.2} = 5.44$$

按 2.4.7 条规定, 当  $n \geq 2.4$  时, 可取斜向孔桥换算系数

$$K = 1$$

按式 (20), 斜向孔桥当量减弱系数

$$\varphi_d = K\varphi'' = 1 \times 0.474 = 0.474$$

(6) 焊缝减弱系数

由表 6 查得, 熔剂层下双面自动焊对接焊缝减弱系数

$$\varphi_h = 1.00$$

(7) 最小减弱系数

按 2.4.1 条规定, 最小减弱系数  $\varphi_{\min}$  取  $\varphi_h$ 、 $\varphi$ 、 $2\varphi'$  及  $\varphi_d$  中最小值, 故

$$\varphi_{\min} = \varphi_{DE} = 0.464$$

e. 计算筒体壁厚

按式 (9), 筒体理论计算壁厚

$$S_l = \frac{PD_n}{2\varphi_{\min} [\sigma] - P} = \frac{1.664 \times 900}{2 \times 0.464 \times 102.6 - 1.664} = 16.01\text{mm}$$

按 2.5.2 条规定, 取筒体腐蚀减薄的附加壁厚

$$C_1 = 0.5\text{mm}$$

按 2.5.3 条规定, 取筒体卷制工艺减薄及钢板下偏差的负值之和

$$C_2 = 0.5\text{mm} \quad (\text{冷卷冷校, } S \leq 20\text{mm})$$

按式 (26), 筒体附加壁厚

$$C = C_1 + C_2 = 0.5 + 0.5 = 1\text{mm}$$

按式 (10), 筒体最小需要壁厚

$$S_{\min} = S_l + C = 16.01 + 1 = 17.01\text{mm}$$

$$S > S_{\min}$$

故筒体壁厚选用 18mm, 满足强度要求。

f. 确定未加强孔的最大允许直径

按式 (12), 筒体有效壁厚

$$S_y = S - C = 18 - 1 = 17\text{mm}$$

按式 (66), 系数

$$k = \frac{PD_n}{(2[\sigma] - P)S_y} = \frac{1.664 \times 900}{(2 \times 102.6 - 1.664) \times 17} = 0.433$$

$$D_n S_y = 900 \times 17 = 15.3 \times 10^3 \text{mm}^2$$

根据系数  $k = 0.433$  和  $D_n S_y = 15.3 \times 10^3 \text{mm}^2$ , 由图 16b 查得未加强孔最大允许开孔直径 ( $d$ ) = 167mm。而最大开孔直径  $d = 135\text{mm}$ , 故开孔不需要加强。

g. 弯曲应力校核

按 2.8.1 条规定, 锅筒筒体支点间距小于 10m, 且  $2\varphi'$  不小于  $\varphi$ 、 $\varphi_d$  时, 不需校核弯曲应力。

#### C4 例题4

某锅炉额定压力为 9.8MPa (表压), 锅筒工作压力为 11.37MPa (表压), 其水冷壁下集箱筒体系由材料为 20G 的  $\phi 273 \times 30\text{mm}$  无缝钢管制成, 位于锅筒中心线以下 40m 的炉膛外, 集箱筒体上焊有管接头, 开孔布置如例题图 C5 所示, 试校核集箱筒体的强度。

〔解〕

a. 确定集箱筒体的计算压力

锅炉出口安全阀较低始启压力与额定压力之差值为  $0.05 \times 9.8 = 0.49\text{MPa}$ , 集箱筒体承受的液柱静压力  $\Delta P_a = 0.01H = 0.01 \times 40 = 0.40\text{MPa}$ , 其值已超过  $0.03 \times (11.37 + 0.49 - 0.4) = 0.34\text{MPa}$ 。

按 3.3.1 条的规定, 集箱筒体的计算压力

$$P = 11.37 + 0.49 + 0.40 = 12.26\text{MPa}$$

b. 确定许用应力

由水蒸气表查得  $P = 12.26 + 0.10 = 12.36\text{MPa}$  (绝对压力) 下的饱和蒸汽温度

$$t_b = 327^\circ\text{C}$$

由表 4, 不受热集箱筒体的计算壁厚

$$t_{bi} = t_b = 327^\circ\text{C}$$

由表 1, 当  $t_{bi} = 327^\circ\text{C}$  时, 20G 钢管的基本许用应力

$$[\sigma] = 106\text{MPa}$$

由表 2, 不受热集箱筒体的修正系数

$$\eta = 1.00$$

按式 (1), 集箱筒体的许用应力

$$[\sigma] = \eta [\sigma]_j = 1.00 \times 106 = 106\text{MPa}$$

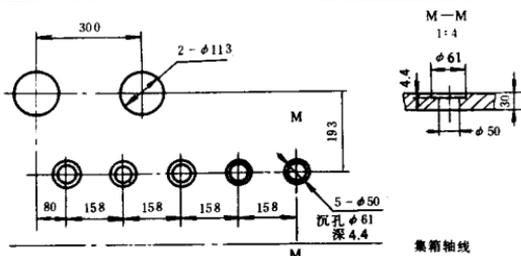


图 C5 集箱筒体开孔布置图 (按中径展开)

## c. 确定未加强孔最大允许直径

对于  $\phi 273 \times 30\text{mm}$  的无缝钢管, 其下偏差 (为负值时) 与壁厚的百分比值  $m = 10$ 。由表 10 查得系数  $A = 0.11$ 。按式 (37), 集箱筒体的附加壁厚

$$C = \frac{AS + C_1}{1 + A} = \frac{0.11 \times 30 + 0.5}{1 + 0.11} = 3.42\text{mm}$$

按式 (33), 集箱的有效壁厚

$$S_y = S - C = 30 - 3.42 = 26.58\text{mm}$$

集箱筒体内径

$$D_n = D_w - 2S = 273 - 2 \times 30 = 213\text{mm}$$

集箱筒体内径与有效壁厚的乘积

$$D_n S_y = 213 \times 26.58 = 5.66 \times 10^3 \text{mm}^2$$

按式 (66), 未加强孔的系数

$$k = \frac{PD_n}{(2[\sigma] - P) S_y} = \frac{12.26 \times 213}{(2 \times 106 - 12.26) \times 26.58} = 0.49$$

由图 16a, 当  $k = 0.49$ 、 $D_n S_y = 5.66 \times 10^3 \text{mm}^2$  时, 查得未加强孔的最大允许直径

$$[d] = 116\text{mm}$$

由例题图 C5 最大开孔直径为  $\phi 113\text{mm}$ , 小于  $[d]$ , 故不必加强。

d. 确定不考虑相邻两孔影响的最小节距  $t_0$ 

对于两  $\phi 113\text{mm}$  的孔, 按式 (17)

$$t_0 = d_p + 2\sqrt{(D_n + S) S} = \frac{113 + 113}{2} + 2\sqrt{(213 + 30) \times 30} = 284\text{mm}$$

实际节距为  $300\text{mm}$ , 已大于  $t_0$ , 故不必按孔桥处理。

按式 (24), 具有凹座的  $\phi 50\text{mm}$  开孔

$$d_d = d_1 + \frac{h}{S} (d'_1 - d_1) = 50 + \frac{4.4}{30} \times (61 - 50) = 51.61 \text{ mm}$$

对于两个  $d_d = 51.61 \text{ mm}$  的开孔的孔桥, 按式 (17)

$$t_0 = \frac{51.61 + 51.61}{2} + 2\sqrt{(213 + 30) \times 30} = 222 \text{ mm}$$

实际节距为  $158 \text{ mm}$  小于  $t_0$ , 故应按孔桥处理。

对于  $d_d = 51.61 \text{ mm}$  与  $d = 113 \text{ mm}$  的孔桥, 按式 (17)

$$t_0 = \frac{51.61 + 113}{2} + 2\sqrt{(213 + 30) \times 30} = 253 \text{ mm}$$

由计算可知, 左边两个  $d_d = 51.61 \text{ mm}$  的孔与  $d_d = 113 \text{ mm}$  的孔的斜向节距小于  $t_0$ , 它们应按孔桥处理。

### c. 确定孔桥最小减弱系数

(1) 按式 (18), 对于由两个  $d_d = 51.61 \text{ mm}$  开孔组成的孔桥, 纵向孔桥减弱系数

$$\varphi = \frac{t - d_d}{t} = \frac{158 - 51.61}{158} = 0.673$$

(2) 计算斜向孔桥减弱系数

由图 4, 系数

$$N = \frac{\frac{(d_1 + d_2)}{2}}{a} = \frac{0.5 \times (113 + 51.61)}{193} = 0.426$$

当  $N = 0.426$  时, 由图 4 查得在  $n = 1.02$  处有极小值

$$\varphi_{\text{dmin}} = 0.77$$

此极小值  $\varphi_{\text{dmin}}$  已大于纵向减弱系数  $\varphi$ , 故不必再具体计算出各孔桥的系数。

因此  $\varphi_{\text{min}} = \varphi = 0.673$ 。

### f. 集箱筒体强度校核

按式 (30), 集箱筒体的理论计算壁厚

$$S_l = \frac{PD_w}{2\varphi_{\text{min}} [\sigma] + P} = \frac{12.26 \times 273}{2 \times 0.673 \times 106 + 12.26} = 21.6 \text{ mm}$$

按式 (26) 和式 (36) 集箱筒体的附加壁厚

$$C = C_1 + C_2 = C_1 + AS_l = 0.5 + 0.11 \times 21.6 = 2.9 \text{ mm}$$

按式 (31), 集箱筒体最小需要壁厚

$$S_{\min} = S_1 + C = 21.6 + 2.9 = 24.5 \text{ mm}$$

集箱筒体的取用壁厚为 30mm, 故集箱筒体强度足够。

### C5 例题 5

某锅炉额定压力为 9.8MPa (表压), 锅筒和锅炉出口之间的压力降为 1.57MPa。锅炉后墙水冷壁通过  $n=12$  根悬吊管吊于顶板上, 后墙水冷壁总重  $1.28 \times 10^3 \text{ kN}$ 。悬吊管最低部位距锅筒中心线的垂直距离为 10m。悬吊管的外径  $D_w = 133 \text{ mm}$ 。采用 20G 无缝钢管。悬吊管拼接环焊缝用单面坡口氩弧焊打底手工电弧焊。悬吊管的最高热流密度  $q_{\max} < 407 \text{ kW/m}^2$ , 试确定悬吊管的壁厚。

(解)

#### a. 确定计算压力

悬吊管最低部位的液柱静压力  $\Delta P_{zz} = 0.01 \times 10 = 0.1 \text{ MPa}$ 。

锅炉出口安全阀较低始启压力和额定压力的差值

$$\Delta P_a = 0.05 P_e = 0.05 \times 9.8 = 0.49 \text{ MPa}$$

$$0.03 P_e = 0.03 \times 9.8 = 0.294 \text{ MPa}.$$

由于  $\Delta P_{zz} < 0.03 P_e$ ,  $\Delta P_{zz}$  必小于  $(P_e + \Delta P_a + \Delta P_{zz})$  的 3%, 因此, 确定计算压力时不考虑  $\Delta P_{zz}$ 。按式 (15) 和式 (16), 计算压力为

$$P = P_e + \Delta P_a = P_e + \Delta P_z + \Delta P_{zz} + \Delta P_a = 9.8 + 1.57 + 0 + 0.49 = 11.86 \text{ MPa (表压)}$$

#### b. 确定计算壁温

由水蒸气表查得  $P = 11.86 + 0.1 = 11.96 \text{ MPa}$  (绝对压力) 下的饱和温度

$$t_b = 324^\circ \text{C}$$

由表 5, 悬吊管的计算壁温

$$t_{bi} = t_b + 60 = 324 + 60 = 384^\circ \text{C}$$

#### c. 确定许用应力

由表 1, 查得  $t_{bi} = 384^\circ \text{C}$  时 20G 钢管的基本许用应力

$$[\sigma] = 91 \text{ MPa}$$

由表 2, 查得管子的基本许用应力修正系数

$$\eta = 1.00$$

按式 (1), 悬吊管的许用应力

$$[\sigma] = \eta [\sigma] = 1.00 \times 91 = 91 \text{ MPa}$$

#### d. 确定取用壁厚

由于采用无缝钢管, 取  $\phi_b = 1.00$

按式 (39), 悬吊管的理论计算壁厚

$$S_1 = \frac{P D_w}{2 \phi_b [\sigma] + P} = \frac{11.86 \times 133}{2 \times 1.00 \times 91 + 11.86} = 8.14 \text{ mm}$$

取下偏差 (为负值时) 与壁厚的百分比值  $m = 10$ , 由表 10, 查得

$$A = 0.11$$

按式 (26) 和式 (36), 悬吊管的附加壁厚

$$C = C_1 + C_2 = 0.5 + AS_1 = 0.5 + 0.11 \times 8.14 = 1.40 \text{ mm}$$

按式 (40), 悬吊管的最小需要壁厚

$$S_{\min} = S_1 + C = 8.14 + 1.40 = 9.54 \text{ mm}$$

取悬吊管的取用壁厚  $S = 12 \text{ mm}$ 。

e. 外载荷应力的校核

悬吊管的总横断面积, 由于  $d_w = 133 \text{ mm}$ ,  $d_a = d_w - 2S = 133 - 2 \times 12 = 109 \text{ mm}$

$$F = n \frac{\pi}{4} (d_w^2 - d_a^2) = 12 \times \frac{\pi}{4} \times (133^2 - 109^2) = 5.47 \times 10^4 \text{ mm}^2$$

由于悬吊管拼接焊缝为环向焊缝, 按 4.7.1 条和表 6, 取  $\varphi_h = 0.90$ 。按式 (51), 得悬吊管的平均附加轴向应力

$$\sigma_w = \frac{1000N}{F\varphi_h} = \frac{1000 \times 1.28 \times 10^3}{5.47 \times 10^4 \times 0.90} = 26.0 \text{ MPa}$$

考虑到 12 根悬吊管承载的不均匀性, 取超载系数为 1.5 (此值可视具体情况在设计时取定), 于是悬吊管的最大附加轴向应力

$$\sigma_z = 1.5\sigma_w = 1.5 \times 26.0 = 39 \text{ MPa}$$

对于悬吊管可认为附加弯曲应力  $\sigma_w$  和附加扭转应力  $\tau$  均为零。

按式 (37), 悬吊管的附加壁厚

$$C = \frac{AS + C_1}{1 + A} = \frac{0.11 \times 12 + 0.5}{1 + 0.11} = 1.64 \text{ mm}$$

按式 (42), 悬吊管的有效壁厚

$$S_y = S - C = 12 - 1.64 = 10.4 \text{ mm}$$

按式 (50), 校核由外载荷引起的管壁附加应力

$$[\sigma] - \frac{P(D_w - 2S_y)^2}{4S_y(D_w - S_y)\varphi_h} = 91 - \frac{11.86 \times (133 - 2 \times 10.4)^2}{4 \times 10.4 \times (133 - 10.4) \times 0.90} = 58.5 \text{ MPa}$$

因为

$$39 \text{ MPa} < 58.5 \text{ MPa}$$

故选用  $\phi 133 \times 12 \text{ mm}$  的 20G 无缝钢管做悬吊管, 其外载荷应力校核合格。

## C6 例题 6

某锅炉的锅筒 (见例题 1) 介质计算压力  $P = 15.89 \text{ MPa}$  (表压), 计算壁温  $t_{bi} = 347^\circ \text{C}$ 。锅筒的球形封头由 13MnNiMoNb 钢板制成, 其内径  $D_a = 1600 \text{ mm}$ , 材料性能保证值的下限:

$\sigma_b = 570\text{MPa}$ ;  $\sigma_s^{300} = 343\text{MPa}$ ;  $\sigma_s^{350} = 330\text{MPa}$ 。在封头顶部开有  $\phi 420\text{mm}$  的人孔 (见例题图 C6), 试确定封头的壁厚。

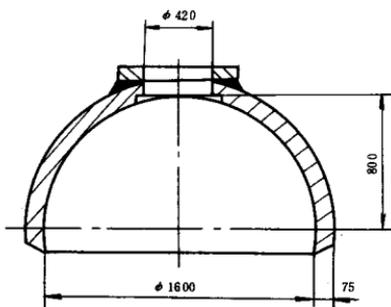


图 C6 球形封头

〔解〕

a. 确定许用应力

按式 (1), 封头的许用应力

$$[\sigma] = \eta[\sigma]_t$$

由表 2 附注②, 对于额定压力不小于 13.7MPa 的凸形封头修正系数

$$\eta = 0.90$$

13MnNiMoNb 钢板性能保证值  $\sigma_b = 570\text{MPa}$ ,  $\sigma_s^{300} = 343\text{MPa}$  和  $\sigma_s^{350} = 333\text{MPa}$ 。根据式(2)、(3)和式(5)中安全系数, 常温下的基本许用应力

$$\frac{\sigma_b}{n_b} = \frac{570}{2.7} = 211.1\text{MPa}$$

插值计算 347℃ 时的基本许用应力

$$\frac{\sigma_s^{347}}{n_s} = \frac{\sigma_s^{350}}{n_s} + \frac{3}{50} \times \left( \frac{\sigma_s^{300}}{n_s} - \frac{\sigma_s^{350}}{n_s} \right)$$

300℃ 和 350℃ 时的基本许用应力

$$\frac{\sigma_s^{350}}{n_s} = \frac{333}{1.5} = 222.0\text{MPa}$$

$$\frac{\sigma_s^{300}}{n_s} = \frac{343}{1.5} = 228.7\text{MPa}$$

所以  $\frac{\sigma^{347}}{n_s} = 222.0 + \frac{3}{50} \times (228.7 - 222.0) = 222.4 \text{MPa}$

用于强度计算的基本许用应力取上述常温 and 347℃ 基本许用应力的小者, 故

$$[\sigma]_j = 211.1 \text{MPa}$$

$$[\sigma] = \eta [\sigma]_j = 0.90 \times 211.1 = 190 \text{MPa}$$

#### b. 确定封头壁厚

按式 (54), 球形封头的理论计算壁厚

$$S_l = \frac{PD_n Y}{2\varphi [\sigma] - P}$$

由式(58), 球形封头的形状系数

$$Y = \frac{1}{6} \left[ 2 + \left( \frac{D_n}{2h_n} \right)^2 \right] = \frac{1}{6} \times \left[ 2 + \left( \frac{1600}{2 \times 800} \right)^2 \right] = 0.5$$

由表 16, 封头的减弱系数

$$\varphi = 1 - \frac{d}{D_n} = 1 - \frac{420}{1600} = 0.74$$

故

$$S_l = \frac{15.89 \times 1600 \times 0.5}{2 \times 0.74 \times 190 - 15.89} = 48.1 \text{mm}$$

按式(55), 封头的最小需要壁厚

$$S_{\min} = S_l + C$$

由式(59), 封头的附加壁厚

$$C = C_1 + C_2$$

按 2.5.2 条的规定, 选取腐蚀减薄附加量

$$C_1 = 0$$

由表 17, 对于  $\frac{h_n}{D_n} = \frac{800}{1600} = 0.5$  的球形封头冲压工艺减薄值

$$0.15 S_l = 0.15 \times 48.09 = 7.21 \text{mm}$$

而钢板下偏差的负值取 1mm, 则

$$C_2 = 1 + 7.21 = 8.21 \text{mm}$$

$$C = C_1 + C_2 = 0 + 8.21 = 8.21 \text{mm}$$

故

$$S_{\min} = 48.1 + 8.21 = 56.3 \text{mm}$$

按 5.2.9 条的规定, 锅筒筒体的理论计算壁厚

$$S_l = \frac{PD_n}{2\varphi_{\min} [\sigma] - P} = \frac{15.89 \times 1600}{2 \times 1.00 \times 190 - 15.89} = 69.83\text{mm}$$

按 2.2.1 条，锅筒筒体的最小需要壁厚

$$S_{\min} = S_l + C$$

由式(26)，锅筒筒体的附加壁厚

$$C = C_1 + C_2$$

按 2.5.2 条规定

$$C_1 = 0$$

按 2.5.3 条规定，取钢板下偏差的负值为 0，工艺减薄为 4mm，则

$$C_2 = 0 + 4 = 4\text{mm}$$

$$C = 0 + 4 = 4\text{mm}$$

所以

$$S_{\min} = 69.83 + 4 = 73.8\text{mm}$$

取封头取用壁厚为

$$S = 75\text{mm}$$

c. 封头的几何参数校核

$$\frac{h_n}{D_n} = \frac{800}{1600} = 0.5 > 0.2$$

$$\frac{S_l}{D_n} = \frac{48.1}{1600} = 0.03 < 0.1$$

$$\frac{d}{D_n} = \frac{420}{1600} = 0.263 < 0.6$$

满足 5.2.3 条的规定，故上述壁厚计算有效。

### C7 例题 7

某  $\phi 426 \times 45\text{mm}$  的 12Cr1MoV 过热器集箱，计算压力  $P = 17.16\text{MPa}$ （表压），置于烟道外。集箱采用有孔平端盖，端盖结构型式及孔的尺寸如例题图 C7 所示。平端盖材料也为 12Cr1MoV。计算壁温  $t_{\text{bi}} = 486^\circ\text{C}$ 。试确定该平端盖尺寸。

〔解〕

a. 确定许用应力

由表 1，查得  $t_{\text{bi}} = 486^\circ\text{C}$  时 12Cr1MoV 钢的基本许用应力

$$[\sigma]_j = 122\text{MPa}$$

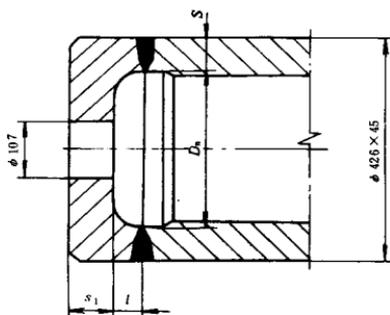


图 C7 平端盖

由表 18, 查得平端盖 ( $2S > l \geq S$ ) 的修正系数

$$\eta = 1.00$$

按式(1), 平端盖的许用应力

$$[\sigma] = \eta [\sigma]_j = 1.00 \times 122 = 122 \text{MPa}$$

由表 2, 查得在烟道外的集箱筒体的修正系数

$$\eta = 1.00$$

按式(1), 在烟道外的集箱筒体的许用应力

$$[\sigma] = \eta [\sigma]_j = 1.00 \times 122 = 122 \text{MPa}$$

b. 确定集箱筒体车削部分的壁厚

按式(30), 集箱筒体车削部分的理论计算壁厚

$$S_l = \frac{PD_w}{2\varphi_{\min} [\sigma] + P} = \frac{17.16 \times 426}{2 \times 1.00 \times 122 + 17.16} = 28.0 \text{mm}$$

对于集箱筒体的车削部分, 壁厚下偏差 (为负值时) 与壁厚的百分比值  $m$  可取为 0, 故由表 10, 系数

$$A = 0$$

按式(26)和式(36), 附加壁厚

$$C = C_1 + C_2 = 0.5 + A S_l = 0.5 + 0 \times 28.0 = 0.5 \text{mm}$$

按式(31), 最小需要壁厚

$$S_{\min} = S_l + C = 28.0 + 0.5 = 28.5 \text{mm}$$

取集箱筒体车削部分的取用壁厚

$$S = 30 \text{mm}$$

c. 确定平端盖壁厚和结构尺寸

平端盖的内径

$$D_n = D_w - 2S = 426 - 2 \times 30 = 366 \text{ mm}$$

按 6.2.7 条规定

$$\frac{107}{D_n} = \frac{107}{366} = 0.29 < 0.8, \text{ 满足开孔结构要求.}$$

由表 18 中序号 1, 有孔平端盖取系数

$$K = 0.45$$

按式(61), 平端盖的最小需要壁厚

$$S_{\min} = KD_n \sqrt{\frac{P}{[\sigma]}} = 0.45 \times 366 \sqrt{\frac{17.16}{122}} = 61.8 \text{ mm}$$

取平端盖取用壁厚

$$S_1 = 62 \text{ mm}$$

按表(18)中序号 1 的规定

$$r \geq \frac{2}{3} S$$

$$l \geq S$$

由以上计算得

$$S = 30 \text{ mm}$$

所以可取

$$r = 20 \text{ mm}, l = 30 \text{ mm}$$

### C8 例题 8

某锅炉锅筒的集中下降管管接头结构如例题图 C8 所示。锅筒材料为 13MnNiMoNb, 锅筒置于烟道外, 内径  $D_n = 1600 \text{ mm}$ , 壁厚  $S = 95 \text{ mm}$ , 计算压力  $P = 15.89 \text{ MPa}$  (表压), 附加壁厚为  $4.5 \text{ mm}$ 。

管接头材料为 13MnNiMoNb, 由钢板压制焊接车削而成, 内径  $d_n = 334 \text{ mm}$ , 壁厚  $S_1 = 65 \text{ mm}$ , 试校核接管区的强度。

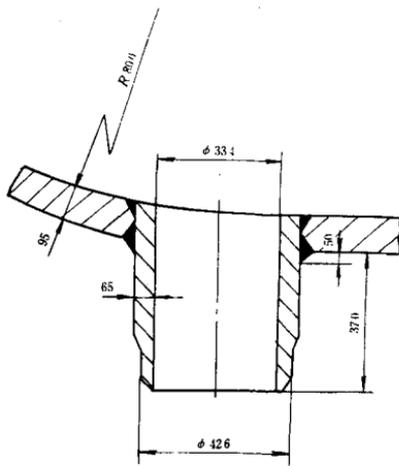


图 C8 下降管接头

〔解〕

a. 确定许用应力

由水蒸汽表查得  $P = 15.99\text{MPa}$  (绝对压力) 下水的饱和温度

$$t_{\text{bl}} = t_b = 347\text{C}$$

按 1.3.1 条, 许用应力按下式计算:

$$[\sigma] = \eta (\sigma)_j$$

13MnNiMoNb 钢板的最小保证值:

$$\sigma_b = 570\text{MPa}$$

$$\sigma_s^{300} = 343\text{MPa}$$

$$\sigma_s^{350} = 333\text{MPa}$$

- 用内插法算得  $\sigma_s^{347} = 333.6\text{MPa}$

基本许用应力按式(2)与(3)应取下列两值中较小者:

$$\frac{\sigma_b}{n_b} = \frac{570}{2.7} = 211\text{MPa}$$

$$\frac{\sigma_s^i}{n_s} = \frac{333.6}{1.5} = 222\text{MPa}$$

故取

$$[\sigma]_j = 211\text{MPa}$$

由表 2 注②查得锅筒的修正系数

$$\eta = 0.90$$

$$\text{故} \quad [\sigma] = \eta [\sigma]_j = 0.90 \times 211 = 189.9 \text{MPa}$$

b. 确定未加强孔的最大允许直径

按 7.2.2 条式(66), 系数

$$k = \frac{PD_n}{(2[\sigma] - P) S_y}$$

按式(12), 锅筒的有效壁厚

$$S_y = S - C = 95 - 4.5 = 90.5 \text{mm}$$

$$\text{故} \quad k = \frac{PD_n}{(2[\sigma] - P) S_y} = \frac{15.89 \times 1600}{(2 \times 189.9 - 15.89) \times 90.5} = 0.772$$

$$D_n S_y = 1600 \times 90.5 = 144.8 \times 10^3 \text{mm}^2$$

按 7.2.2 条取  $D_n S_y = 130 \times 10^3 \text{mm}^2$ , 查图 16b 得:

$$[d] = 200 \text{mm}$$

c. 孔的加强计算

$\phi 334 \text{mm}$  孔已超出最大允许未加强孔的尺寸, 需作补强计算。

按 7.4.4 条式(67):

$$F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \geq F$$

按表 20, 计算加强需要的面积

$$F = [d_n + 2S_y] \left(1 - \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]}\right) S_0$$

由于  $[\sigma]_1 = [\sigma]$ , 上式简化为

$$F = d_n S_0$$

按式(68), 未减弱筒体的理论计算壁厚

$$S_0 = \frac{PD_n}{2[\sigma] - P} = \frac{15.89 \times 1600}{2 \times 189.9 - 15.89} = 69.86 \text{mm}$$

故

$$F = 334 \times 69.86 = 2.33 \times 10^4 \text{mm}^2$$

按表 20, 计算起加强作用的面积

$$F_1 = e^2$$

由例题图 C8, 焊接管接头的焊脚高度  $e = 50 \text{mm}$

故

$$F_1 = 50^2 = 2.5 \times 10^3 \text{mm}^2$$

$$F_2 = [2h(S_{y1} - S_{01}) + 2h_1 S_{y1}] \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]}$$

由于 $[\sigma]_1 = [\sigma]$ ; 由例题图 C8 可知  $h_1 = 0$ , 则式化简为:

$$F_2 = 2h(S_{y1} - S_{01})$$

按式(69), 未减弱管接头的理论计算壁厚

$$S_{01} = \frac{P d_n}{2[\sigma]_1 - P} = \frac{15.89 \times 334}{2 \times 189.9 - 15.89} = 14.58 \text{mm}$$

按 7.4.3 条, 因  $\frac{S_1}{d_n} = \frac{65}{334} = 0.195 > 0.19$ , 管接头的有效加强高度

$$h = \sqrt{(d_n + S_1) S_1} = \sqrt{(334 + 65) \times 65} = 161 \text{mm}$$

按式(42), 加强管接头的有效壁厚

$$S_{y1} = S_1 - C = 65 - 0.5 = 64.5 \text{mm}$$

因是车削管接头, 上式中附加壁厚  $C = 0.5 \text{mm}$

故  $F_2 = 2 \times 161 \times (64.5 - 14.58) = 1.607 \times 10^4 \text{mm}^2$

因没有使用垫板加强, 所以  $F_3 = 0$

$$F_4 = [d_n - 2S_{y1} (1 - \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]})] (S_y - S_0)$$

由于 $[\sigma]_1 = [\sigma]$ , 上式可简化为

$$F_4 = d_n (S_y - S_0) = 334 \times (90.5 - 69.86) = 6.894 \times 10^3 \text{mm}^2$$

故  $F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = 2.5 \times 10^3 + 1.607 \times 10^4 + 0 + 6.894 \times 10^3 = 2.546 \times 10^4 \text{mm}^2$

$$2.546 \times 10^4 > 2.33 \times 10^4$$

故  $F_1 + F_2 + F_3 + F_4 > F$

且  $\frac{2}{3}F = \frac{2}{3} \times 2.33 \times 10^4 = 1.553 \times 10^4 \text{mm}^2$

$$F_1 + F_2 + \frac{1}{2}F_4 = 2.5 \times 10^3 + 1.607 \times 10^4 + 0.5 \times 6.894 \times 10^3 = 2.202 \times 10^4 \text{mm}^2$$

所以  $F_1 + F_2 + \frac{1}{2}F_4 > \frac{2}{3}F$

即起加强作用面积的  $\frac{2}{3}$  分布在离孔边  $\frac{1}{4}$  孔径的范围内, 故满足 7.4.4 条的要求, 强度合格。

### C9 例题 9

某锅炉的额定工作压力  $P_c = 9.8 \text{MPa}$  (表压), 锅筒筒体由 13MnNiMoNb 钢板用热卷方法焊制

而成，壁厚  $S=75\text{mm}$ ，内径  $D_0=1600\text{mm}$ ，置于烟道外，锅筒至锅炉出口之间的压力降为  $1.6\text{MPa}$ 。筒体上焊有管接头（见例题图 C9），管接头材料为  $16\text{Mn}$ 。试该校核该锅筒筒体的壁厚。

〔解〕

a. 确定计算压力

由式(15)，锅筒的介质计算压力

$$P = P_g + \Delta P_a$$

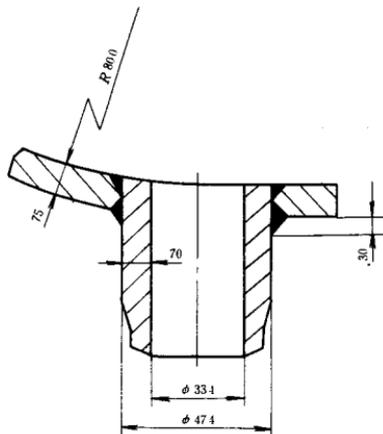
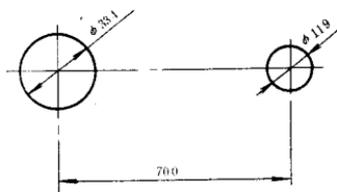


图 C9 下降管管接头

由式(16)，锅筒的工作压力

$$P_g = P_c + \Delta P_z + \Delta P_{sz}$$

因此计算压力

$$P = P_c + \Delta P_z + \Delta P_a + \Delta P_{sz}$$

额定工作压力  $P_c = 9.8\text{MPa}$

最大流量时锅筒至锅炉出口之间压力降  $\Delta P_z = 1.6\text{MPa}$

锅炉出口安全阀较低始启压力与额定压力之差值  $\Delta P_a = 9.8 \times 0.05 = 0.49\text{MPa}$

水柱静压力  $\Delta P_{sz} = 0$

因此计算压力为

$$P = 9.8 + 1.6 + 0.49 = 11.9\text{MPa}$$

b. 确定许用应力

由式(1)，许用应力

$$[\sigma] = \eta[\sigma]_t$$

由压力  $P = 12\text{MPa}$ （绝对压力）查水蒸汽表得水的饱和温度  $t_b = 324^\circ\text{C}$ 。

查得  $13\text{MnNiMoNb}$  钢板最小保证值：

$$\sigma_b = 570\text{MPa}$$

$$\sigma_s^{300} = 343 \text{ MPa}$$

$$\sigma_s^{350} = 333 \text{ MPa}$$

内插算得

$$\sigma_s^{324} = 338 \text{ MPa}$$

故 13MnNiMoNb 钢板在 324℃ 时基本许用应力可按式(2)、(3)与(5)有关安全系数的规定计算

$$\frac{\sigma_b}{n_b} = \frac{570}{2.7} = 211 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma_s^{324}}{n_s} = \frac{338}{1.5} = 225.3 \text{ MPa}$$

由此取得基本许用应力  $[\sigma]_b = 211 \text{ MPa}$

由表 2, 查得不受热锅筒筒体的修正系数  $\eta = 1.00$ 。

按式(1), 锅筒筒体的许用应力

$$[\sigma] = \eta[\sigma]_b = 1.00 \times 211 = 211 \text{ MPa}$$

由表 1, 用内插方法查得 16Mn 钢管在 324℃ 时的基本许用应力

$$[\sigma]_{11} = 131 \text{ MPa}$$

由表 2, 查得管子的修正系数  $\eta = 1.00$ 。

按式(1), 管接头的许用应力

$$[\sigma]_1 = \eta[\sigma]_{11} = 1.00 \times 131 = 131 \text{ MPa}$$

c. 确定不考虑相邻两孔影响的最小节距  $t_0$

按式(17), 不考虑相邻两孔影响的最小节距

$$t_0 = d_p + 2\sqrt{(D_n + S)S} = \frac{d_1 + d_2}{2} + 2\sqrt{(D_n + S)S}$$

因为  $\phi 474 \times 70$  管接头材料为 16Mn, 其壁厚  $S_1 = 70 \text{ mm}$ , 许用应力  $[\sigma]_1 = 131 \text{ MPa}$ ; 锅筒筒体材料的许用应力  $(\sigma) = 211 \text{ MPa}$ ,  $(\sigma)_1 < (\sigma)$ 。根据第 2 章要求, 其孔径  $d_1$  按下式计算:

$$d_1 = (474 - 70 \times 2) + 2S_1 \left(1 - \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]}\right) = 334 + 2 \times 70 \times \left(1 - \frac{131}{211}\right) = 387 \text{ mm}$$

由例题图 C9 知:  $d_2 = 119 \text{ mm}$

所以 
$$t_0 = \frac{387 + 119}{2} + 2 \times \sqrt{(1600 + 75) \times 75} = 961.8 \text{ mm}$$

由例题图 C9 可见, 节距 700mm 小于  $t_0$ , 故属孔桥。

d. 确定未加强孔的最大允许直径

首先, 计算锅筒筒体的附加壁厚。

按 2.5.2 条,

$$C_1 = 0$$

考虑钢板下偏差的负值为 1.5mm

由表 7 查得卷制工艺减薄量为 4.0mm

$$\text{则} \quad C_2 = 1.0 + 4.0 = 5.0 \text{mm}$$

因此按式(26), 锅筒筒体的附加壁厚

$$C = C_1 + C_2 = 0 + 5 = 5.0 \text{mm}$$

按式(12), 锅筒筒体的有效壁厚

$$S_y = S - C = 75 - 5 = 70 \text{mm}$$

按式(66), 系数

$$k = \frac{PD_n}{(2[\sigma] - P) S_y} = \frac{11.9 \times 1600}{(2 \times 211 - 11.9) \times 70} = 0.66$$

由图 16b, 当  $k = 0.66$  和  $D_n S_y = 1600 \times 70 = 112.0 \times 10^3 \text{mm}^2$  时, 未加强孔最大允许直径

$$(d) = 200 \text{mm}$$

e. 孔的加强计算

因孔  $\phi 387 \text{mm}$  已超过  $(d)$ , 而它又与  $\phi 119 \text{mm}$  的孔组成孔桥, 故应满足孔桥加强条件。

按式(68), 未减弱锅筒筒体的理论计算壁厚

$$S_0 = \frac{PD_n}{2[\sigma] - P} = \frac{11.9 \times 1600}{2 \times 211 - 11.9} = 46.42 \text{mm}$$

按式(18), 孔桥未加强时的减弱系数

$$\varphi_w = \frac{t - d_p}{t} = \frac{700 - \frac{387 + 119}{2}}{700} = \frac{700 - 253}{700} = 0.639$$

按式(11)

$$[\varphi] = \frac{P(D_n + S_y)}{2[\sigma] S_y} = \frac{11.9 \times (1600 + 70)}{2 \times 211 \times 70} = 0.672$$

按 7.5.1 条的规定:

$$[\varphi] < \frac{4}{3} \varphi_w$$

今  $\frac{4}{3} \varphi_w = \frac{4}{3} \times 0.639 = 0.851$ , 大于  $[\varphi] = 0.672$ , 故满足上述要求。

按 7.4.4 条中式(67)

$$F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \geq F$$

按式(69), 管接头的理论计算壁厚

$$S_{01} = \frac{PD_n}{2[\sigma]_1 - P} = \frac{11.9 \times 334}{2 \times 131 - 11.9} = 15.9\text{mm}$$

按式(42), 管接头有效壁厚

$$S_{y1} = S_1 - C_1$$

取

$$C_1 = 0.5\text{mm}$$

则

$$S_{y1} = 70 - 0.5 = 69.5\text{mm}$$

按表 20 型式 B 所列计算公式

加强所需的面积

$$\begin{aligned} F &= [d_n + 2S_{y1} (1 - \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]})] S_0 \\ &= [334 + 2 \times 69.5 \times (1 - \frac{131}{211})] \times 46.42 = 1.795 \times 10^4 \text{mm}^2 \end{aligned}$$

起加强作用的焊缝焊脚高度  $e = 30\text{mm}$ , 起加强作用的焊缝面积

$$F_1 = e^2 = 30^2 = 900\text{mm}^2$$

起加强作用的管接头多余面积

$$F_2 = [2h (S_{y1} - S_{01}) + 2h_1 S_{y1}] \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]}$$

因用单面管接头,  $h_1 = 0$

按 7.4.3 条, 管接头有效高度, 当  $\frac{S_1}{d_n} = \frac{70}{334} = 0.21 > 0.19$  时

$$h = \sqrt{(d_n + S_1) S_1} = \sqrt{(334 + 70) \times 70} = 168.1\text{mm}$$

故

$$F_2 = [2 \times 168 \times (69.5 - 15.9) + 0] \times \frac{131}{211} = 1.118 \times 10^4 \text{mm}^2$$

因无垫板, 故起加强作用的垫板面积

$$F_3 = 0$$

起加强作用的锅筒筒体有效面积

$$\begin{aligned} F_4 &= [d_n - 2S_{y1} (1 - \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]})] (S_y - S_0) \\ &= [334 - 2 \times 69.5 \times (1 - \frac{131}{211})] \times (70 - 46.3) = 0.6666 \times 10^4 \text{mm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{故} \quad F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = 900 + 1.118 \times 10^4 + 0 + 0.6666 \times 10^4 = 1.874 \times 10^4 \text{mm}^2$$

大于  $F = 1.795 \times 10^4 \text{mm}^2$ ，满足上述 7.4.4 条中式(67)的要求。

此外，由上述计算结果可得

$$F_1 + F_2 + \frac{1}{2} F_4 = 900 + 1.118 \times 10^4 + \frac{1}{2} \times 0.6666 \times 10^4 = 1.5413 \times 10^4 \text{mm}^2$$

$$\frac{2}{3} F = \frac{2}{3} \times 1.795 \times 10^4 = 1.197 \times 10^4 \text{mm}^2$$

$$\text{因此} \quad F_1 + F_2 + \frac{1}{2} F_4 = 1.541 \times 10^4 \text{mm}^2$$

大于  $\frac{2}{3} F = \frac{2}{3} \times 1.795 \times 10^4 = 1.197 \times 10^4 \text{mm}^2$ ，即起加强作用面积的  $\frac{2}{3}$  分布在离孔边  $\frac{1}{4}$  孔径的范围内，故满足 7.4.4 条的要求，强度合格。

### C10 例题 10

某锅炉的出口过热蒸汽集箱 ( $\phi 377 \times 45 \text{mm}$ ) 上有一焊制异径三通。三通支管与  $\phi 325 \times 40 \text{mm}$  的过热蒸汽导管相接。锅炉额定压力  $P_c$  为 13.7MPa (表压)，高温过热器出口集箱的介质温度  $t_j$  为 540℃，集箱和三通的汽水阻力压力降  $\Delta P_x$  和液柱静压力  $\Delta P_{\text{液}}$  均为零。集箱和三通均由 12Cr1MoV 无缝钢管制成。试确定三通主管和支管的钢管规格。

〔解〕

a. 确定三通的计算压力

按 8.2.4 条，三通的计算压力

$$P = P_c + \Delta P_x + \Delta P_z + \Delta P_{\text{液}} = P_c + 0.05 P_c + \Delta P_x + \Delta P_{\text{液}} = 13.7 + 0.05 \times 13.7 + 0 + 0 = 14.4 \text{MPa}$$

b. 确定许用应力

按 8.2.5 条、表 4 和 1.4.4 条的规定，焊制三通的计算壁温

$$t_{\text{bi}} = t_j + X \Delta t = 540 + 10 = 550^\circ \text{C}$$

由表 1 查得  $t_{\text{bi}}$  为 550℃ 时 12Cr1MoV 钢的基本许用应力

$$[\sigma]_1 = 71 \text{MPa}$$

由表 2 查得许用应力修正系数

$$\eta = 1.00$$

按式(1)，许用应力

$$[\sigma] = \eta [\sigma]_1 = 1.00 \times 71 = 71 \text{MPa}$$

c. 结构选择

为保证介质在三通内的流速与相连接管道内的流速基本相同，三通应按内径与相连接集箱内径基本相等的原则进行设计。选择焊制三通主管及支管的管子规格的计算采用试算法进行。根据集箱的内径  $d_n' = 377 - 2 \times 45 = 287 \text{mm}$  和蒸汽导管内径  $d_n'' = 325 - 2 \times 40 = 245 \text{mm}$ ，并假设焊制三通减弱系数  $\varphi'$  为 0.6，按下式进行试算：

主管理论计算试算壁厚

$$S'_i = \frac{PD'_a}{2\varphi_y [\sigma] - P} = \frac{14.4 \times 287}{2 \times 0.6 \times 71 - 14.4} = 58.4\text{mm}$$

支管理论计算试算壁厚

$$S'_{ii} = S'_i \frac{d'_a}{D'_a} = 58.4 \times \frac{245}{287} = 49.9\text{mm}$$

按  $D'_a = 287\text{mm}$  及  $d'_a = 245\text{mm}$  选择管子外径。所选用的管子外径必须相应地大于  $287+2 \times 58.4 = 404\text{mm}$  及  $245+2 \times 49.9 = 345\text{mm}$ 。

根据管子相近规格，分别选用  $\phi 426 \times 70\text{mm}$  和  $\phi 377 \times 63\text{mm}$  的无缝钢管做此三通的主管及支管。

取管子下偏差（为负值时）与壁厚的百分比值  $m = 10$ 。由表 10 查得系数

$$A = 0.11$$

按 3.5.5 条及 4.2.3 条计算附加壁厚和有效壁厚

对于主管

$$C = \frac{AS + C_1}{1 + A} = \frac{0.11 \times 70 + 0.5}{1 + 0.11} = 7.4\text{mm}$$

$$S_y = S - C = 70 - 7.4 = 62.6\text{mm}$$

对于支管

$$C = \frac{AS_1 + C_1}{1 + A} = \frac{0.11 \times 63 + 0.5}{1 + 0.11} = 6.7\text{mm}$$

$$S_{y1} = S_1 - C = 63 - 6.7 = 56.3\text{mm}$$

按 8.2.3 条规定

$$D_w = 426\text{mm} < 660\text{mm}$$

$$\frac{d_a}{D_a} = \frac{d_w - 2S_{y1}}{D_w - 2S_y} = \frac{377 - 2 \times 56.3}{426 - 2 \times 62.6} = 0.88 > 0.8$$

满足 8.2.3 条规定，因此三通可按壁厚加强方法计算。

d. 强度校核

三通主管平均直径

$$D_p = D_w - S_y = 426 - 62.6 = 363\text{mm}$$

三通支管平均直径

$$d_p = d_w - S_{y1} = 377 - 56.3 = 321 \text{ mm}$$

实际三通支管内径

$$d_n = d_w - 2S_{y1} = 377 - 2 \times 56.3 = 264 \text{ mm}$$

由 8.2.7 条, 系数

$$X = \frac{d_n^2}{D_p d_p} = \frac{264^2}{363 \times 321} = 0.598$$

$$Y = 4.05 \frac{S_1^3 + S_{y1}^3}{S_1^2 \sqrt{D_p S_y}} = 4.05 \times \frac{62.6^3 + 56.3^3}{62.6^2 \sqrt{363 \times 62.6}} = 2.91$$

三通主管实际减弱系数

$$\varphi_y = \frac{1}{1.2 \left(1 + \frac{X\sqrt{1+Y^2}}{2Y}\right)} = \frac{1}{1.2 \times \left(1 + \frac{0.6\sqrt{1+2.91^2}}{2 \times 2.91}\right)} = 0.63$$

按式(75), 三通主管理论计算壁厚

$$S_t = \frac{PD_w}{2\varphi_y [\sigma] + P} = \frac{14.4 \times 426}{2 \times 0.63 \times 71 + 14.4} = 59.1 \text{ mm}$$

按式(76), 三通支管理论计算壁厚

$$S_n = S_t \frac{d_w}{D_w} = 59.1 \times \frac{377}{426} = 52.3 \text{ mm}$$

对于主管

$$C = AS_t + 0.5 = 0.11 \times 59.1 + 0.5 = 7.0 \text{ mm}$$

$$S_{\min} = S_t + C = 59.1 + 7.0 = 66.1 \text{ mm}$$

对于支管

$$C = AS_n + 0.5 = 0.11 \times 52.3 + 0.5 = 6.3 \text{ mm}$$

$$S_{\min} = S_n + C = 52.3 + 6.3 = 58.5 \text{ mm}$$

主管实际取用壁厚

$$S = 70 \text{ mm} > S_{\min} = 66.1 \text{ mm}$$

支管实际取用壁厚

$$S_t = 63 \text{ mm} > S_{\min} = 58.5 \text{ mm}$$

按 8.2.6 条校核  $\beta$  和  $\beta_i$

$$\beta = \frac{D_w}{D_w - 2S_y} = \frac{426}{426 - 2 \times 63} = 1.42$$

$$\beta_l = \frac{D_w}{D_w - 2S_l} = \frac{426}{426 - 2 \times 59.1} = 1.38$$

$$1.25 < \beta, \beta_l < 2.0$$

结果满足 8.2.6 条的要求。

因此，选用主管规格  $\phi 426 \times 70\text{mm}$  和支管规格  $\phi 377 \times 63\text{mm}$  的焊接三通结构，强度满足要求。

#### 附加说明：

本标准由上海发电设备成套设计研究所提出并归口。

本标准由上海发电设备成套设计研究所负责起草。

起草单位：上海发电设备成套设计研究所、哈尔滨工业大学、清华大学、哈尔滨锅炉厂、哈尔滨电站设备成套设计研究所、上海锅炉厂、武汉锅炉厂、东方锅炉厂、西安交通大学、上海工业锅炉研究所、上海机械学院。

参加起草人员：黄乃祉、李之光、蒋智翔、沈根荣、张庆江、贾世贤、蒋胜龙、崔金现、沈其炎、杨小昭、夏长江、鲍子初、王铤庆、吴天禄、杨忠涛、田耀鑫、赵文成。

自本标准实施之日起，原 JB 2194—77 作废。