

化工設備元件 強度計算

化學工業部設備設計技術中心站

化工设备元件强度计算

江苏工业学院图书馆
藏书章

化学工业部设备设计技术中心站

一九八九年四月

前 言

在设备设计中常常遇到我国现行容器设计规范以外的一些通用另部件的设计计算问题,为此化工部基建局以(88)化基设字第84号文安排编写本资料供从事化工设备设计及压力容器设计、制造和使用方面的技术人员参考。

本资料由化工部设备设计技术中心站方子风负责编写,俞天慧、洪德晓、应道宴同志校审。

由于编者水平有限,内容会有不足和错误之处,热忱希望广大读者提出宝贵意见,以便今后补正。

内 容 提 要

本书着重介绍了一些特殊的设备元件的设计方法,如非圆形法兰、搪玻璃法兰,双向加强的矩形壳体、支腿及耳架与壳体的连接焊缝,对分焊接弯管、U形管换热器中U形弯管的热应力、焊接式波纹管与异形管板等40余种,并附有一定的例题,这些元件的计算,在我国容器设计规范,规定中是没有的。

本资料可供从事化工计备设计人员及有关受压容器的设计、制造和使用的技术人员,高等院校有关专业的师生参考。

TCED S2—89

工本费: 5.00 元



目 录

第一章 概论	1
一、各种载荷.....	1
二、许用应力.....	1
三、焊缝系数.....	3
第二章 板	4
一、拉撑及带拉撑的板.....	4
二、管板.....	13
三、人孔盖板.....	20
第三章 法兰	22
一、法兰的载荷和当量压力.....	22
二、带筋法兰.....	23
三、非圆形法兰.....	25
四、碟形封头用法兰.....	28
五、搪玻璃高颈法兰.....	30
第四章 带法兰的碟形封头	39
一、凹面受压的碟形封头.....	39
二、凸面受压的碟形封头.....	39
三、凸面受压的铸铁封头.....	39
第五章 壳体	41
一、扁平集流管.....	41
二、双向加强轴向长度较短的矩形壳体.....	45
三、串接球壳.....	46
第六章 夹套	48
一、短管支撑式或折边式蜂窝形、蛇形半圆管、排管形半圆管或弓形管夹套.....	48
二、圆管夹套.....	60
三、型钢夹套.....	63
第七章 波形膨胀节	64
一、“Ω”形膨胀节.....	64
二、焊接式波纹管.....	67
第八章 管件	79
一、焊制三通.....	79
二、等径叉形管.....	84
三、弯管.....	85
第九章 开孔补强(切向或非切向接管、翻边开孔及整体补强锻件的开孔)	94
一、引用符号.....	94

二、公式适用范围	96
三、主要计算尺寸及系数的确定	97
四、单个开孔的补强计算	99
五、相互有影响的开孔补强计算	103
六、外压容器及设备的开孔补强计算	103
第十章 支腿和耳架	104
一、局部应力	104
二、支腿、耳架与壳体间连接焊缝尺寸的确定	110
三、支腿	113
四、悬挂式耳架	121
第十一章 热应力计算	126
一、两程固定管板换热器的热应力	126
二、换热器“U”形管中热应力	131
附录: 苏联标准 ГОСТ 25859-82 钢制容器及设备低循环疲劳强度计算的规范和方法	134

第一章 概 论

本“计算”涉及《钢制石油化工压力容器设计规定^[1]》及《化工设计计算准 CD130A1.3-84^[2]》以外的一些化工计备的元件。这些元件一般形状比较特殊,计算资料比较少,强度计算缺乏精确解,因此计算公式较粗略,但不少公式都有一定使用经验,已列于有关的标准中,当然采用这些计算方法时,有关的结构设计等也应符合相应标准的规定和要求。有的计算方法虽然没有列入规范,但也有一定的试验基础,故也可供设计使用,属于常规的计算方法。

一、各种载荷

设计时应考虑下列各种载荷及其组合:

1. 内压和外压;
2. 容器的重量及正常操作或试验状态下容器内部储存物的重量(包括由于液体静压头引起的附加压力);
3. 附属设备,如电机、运转设备、其它容器以及管道、衬里和保温层等产生的外加载荷;
4. 内件、容器的支座和支腿等产生的反作用力和局部应力;
5. 风载荷和地震载荷;
6. 由于温度梯度及不同的线膨胀系数产生的温度应力;
7. 压力和温度变化产生的短期超载;
8. 流体等冲击引起的反力。

二、许用应力

许用应力的选取是较复杂的,它和材料、制造工艺、计算的精确性、应力种类、载荷种类及属承压与非承压元件等因素有关。在遵守文献[1]的有关规定下,工作在材料蠕变温度以下的元件许用应力的推荐除按在后面计算中另有规定者外,一律按下述选取。

1. 承压元件

(1) 拉伸应力的许用应力为:

- 1) 总体一次薄膜应力 $\leq [\sigma]'$, 其中 $[\sigma]'$ 为文献[1]第二章中给出的许用应力(下同);
- 2) 一次薄膜应力+一次弯曲应力 $\leq 1.5[\sigma]'$

(2) 圆筒形元件轴向压缩应力的许用应力取下列数值中较小者:

- 1) 许用拉应力;
- 2) 按文献[1]中 1.8 节求得的 B 值。

(3) 在上述第一节中各载荷组合产生的应力的最大许用应力 $[\sigma]_{\max}$ 按表 1 选取,风载荷和地震载荷不考虑同时出现。

表 1 压力容器元件的许用应力

序号	设计条件	设计载荷的组合						$\sigma_{\max}$ (MPa)	附 注
		设计压力	容器重量	风或地震	短期超载	局部机械载荷	热膨胀载荷		
1	现场安装		×	×				$1.2[\sigma]$	1
2	操作	×	×	×				$1.2[\sigma]^t$	2、5、6
3	有热膨胀的操作	×	×	×			×	$1.25 \{[\sigma]^t + [\sigma]\}$	2、3、5
4	短期机械载荷超载	×	×		×			$1.33 [\sigma]^t < \sigma_s^t$	2
5	有热膨胀的短期机械载荷超载	×	×		×		×	$1.5 \{[\sigma]^t + [\sigma]\}$	2
6	有局部机械载荷(弯曲)的操作	×	×	×		×		$2[\sigma]^t < \sigma_s^t$	2、5
7	水压试验	试验压力						$0.8\sigma_s$	4

表中符号: $[\sigma]$ ——材料在室温时的许用应力, MPa;

σ_s ——材料在室温时的屈服限, MPa;

σ_s^t ——材料在设计温度时的屈服限, MPa。

表中附注: 1. 按完全未腐蚀时厚度的计算应力;

2. 按腐蚀后的厚度计算应力;

3. 这里使用 ANSI B31.3 的规定, 即将最大计算主应力限制在按最大剪应力理论的许用应力范围内。1.25 $\{[\sigma]^t + [\sigma]\}$ 值是作为关于局部应力和其它应力条件产生疲劳可能性的安全性的控制。显然, 应按有、无热膨胀的两种情况计算应力, 因为对无热膨胀条件的许用应力是小得很多的。作为一个附加的安全措施, 通常按室温下的弹性模数 E 计算应力;

4. 在试验温度下按试验壁厚计算应力。因为水压试验是属短期载荷, 对支撑类构件的许用应力往往增大 20%, 根据工程实践的经验是水压试验时容器任何部分的最大薄膜应力 $\leq 80\%$ 屈服限。因不存在热应力和局部机械应力, 故不考虑;

5. 表中许用应力适用于静态应力的容器。这意味着容器在使用寿命中不需进行疲劳分析;

6. 允许最高的设计壁温不得超过表 2 的规定。

表 2 采用系数 1.2 时的金属最高壁温

材 料	温 度 °C
碳钢及低合金钢	370
铝及铝合金	150
铜及铜合金	65
镍及高镍合金	480
钛及钛合金	315
铬	315
高合金钢	425

2. 非承压元件:

(1) 如裙座、吊耳、基础环等重要的非承压元件及重要的内件的支承件和采用适当的焊缝系数的焊缝等的许用应力亦按上述承压元件的规定。

(2) 如支腿等的型钢和裙座基础部分的筋板等非重要的非承压元件可取比前述较高的许用应力,一般可从文献[3]、[4]钢结构设计手册中选取。

3. 剪切应力

一般许用剪切应力 $[\tau]' = 0.8[\sigma]'$

4. 局部应力

由连接件、支座等部件在壳体中引起的载荷,当其离壳体不连续处的距离 $>2.5\sqrt{Rt}$ (这里 R ——壳体平均半径; t ——壳体主要截面壁厚,下同),且在圆周上的范围不超过 $1/3$ 壳体周长;或接管及开孔离其它的壳体不连续处距离 $>2.5\sqrt{Rt}$,且接管或开孔本身已按规定被加强者产生的载荷为局部载荷,因为这些载荷引起的应力具有局部性,从而产生的变形不致引起整个壳体的大变形,因此可允许有较高的许用应力,规定如下:

- 1) 在局部载荷作用下,直接应力强度 $<[\sigma]'$ 或 $1.2[\sigma]'$ (考虑风载荷或地震载荷时);
- 2) 直接应力+弯曲应力 $<2[\sigma]'$ (见表1序号6);
- 3) 如果只有剪应力存在,则此应力 $<0.5[\sigma]'$
- 4) 材料的许用接触应力 $<1.6[\sigma]'$ 。对铸铁可取 $2[\sigma]'$ 。

三、焊缝系数

焊缝系数按文献[1]选取,现将填角焊和塞焊焊缝系数列于表3,作为[1]的补充。当计算压应力时,焊缝系数都取为1。

表3 焊缝系数

序 号	接 头 型 式 说 明	不作射线检查
1	双面满角的搭接焊缝	0.55
2	单面满角的搭接焊缝并加塞焊	0.50
3	单面满角的搭接焊缝但不加塞焊	0.45

第二章 板

一、拉撑及带拉撑的板

在高温高压下操作的管板或平板,为了减少板的两面的温差应力或加工工艺的要求,希望板的厚度尽可能薄一些,但这样降低了板的承压能力,往往采用支撑杆、支撑螺栓、支撑管及角撑板等拉撑件进行加强,提高板的承压能力。其计算方法基本按文献[5~8]推荐如下:

1. 拉撑件的计算

不规则布置的拉撑件按下述计算:

(1) 拉撑件支撑的面积

拉撑件支撑的面积 A 等于被拉撑平板上支撑点中位线所包围的面积。支撑点中位线为相距邻支点等距离点的连线,可近似取为相邻三个支撑点的切圆中心和相邻二个支撑点的中点的连线,如图 1 所示。

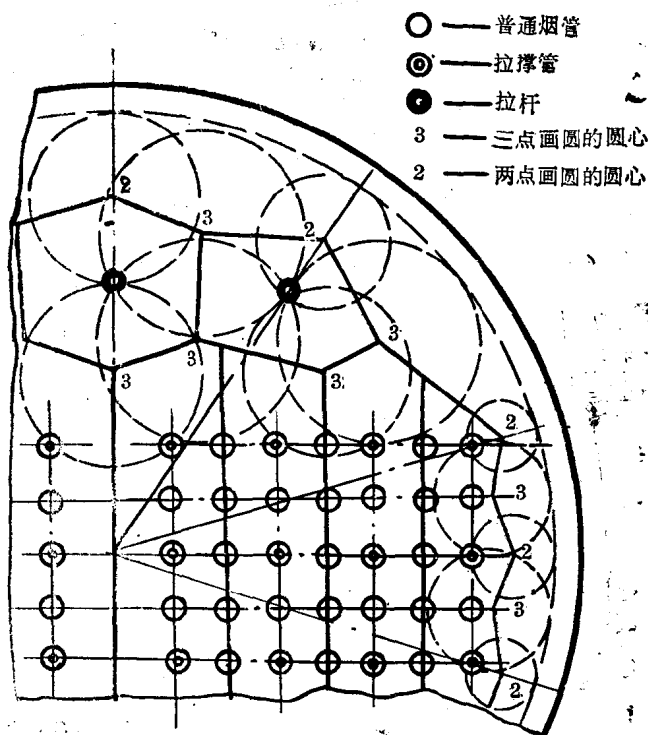


图 1 支撑面积的画法

对于直拉杆或拉撑管还应减去拉杆或管子所占据的面积作为支撑面积 A , 对于斜拉杆或角撑板则不减去它们所占据的面积。

(2) 直拉杆或拉撑管承受的载荷 F_R :

$$F_R = PA, \quad \text{N} \quad (1)$$

式中: A ——拉杆或支撑管的支撑面积, mm^2 ;

P ——最高许用压力, MPa 。

(3) 直拉杆或拉撑管所需的最小截面积 $f_{\min}$:

$$f_{\min} = \frac{PA}{[\sigma]^t \eta}, \quad \text{mm}^2 \quad (2)$$

式中: η ——许用应力修正系数, 取 $\eta = 0.55$

(4) 直拉杆的直径 d :

$$d = 2\sqrt{\frac{f_{\min}}{\pi}} \quad \text{mm} \quad (3)$$

式中: d 不得小于 25mm , 上式计算中未包括腐蚀裕量。

(5) 拉撑管的壁厚 S_1 :

$$S_1 \geq \frac{d_0}{2} - \sqrt{\left(\frac{d_0}{2}\right)^2 - \frac{f_{\min}}{\pi}}, \quad \text{mm} \quad (4)$$

式中 S_1 不得小于 5mm , 上式计算中未包括腐蚀裕量。 d_0 为管子外径, mm 。

(6) 直拉杆和拉撑管的许用临界压缩载荷 $[F_{cr}]$:

当拉杆和拉撑管承受压缩载荷时, 需按下式验算其许用临界压缩载荷

$$[F_{cr}] = \frac{\pi^2 EI}{l_K^2 \cdot 3}, \quad \text{N} \quad (5)$$

式中: EI ——支撑件的抗弯刚度, $\text{N} \cdot \text{mm}^2$;

l_K ——支撑件的计算长度, mm ;

按不同的端部约束条件由表 4 选取。

表 4 不同端部约束条件的 l_K

	支撑杆沿轴向两端不受约束 (两支撑板之间的管子或支撑管)	支撑杆沿轴向一端固定另一端不受约束 (管板和支撑板之间的管子或支撑杆)	支撑杆沿轴向两端固定 (两管板之间的管子或支撑杆)
加载情况简图			
计算长度 l_K	l_0	$0.7l_0$	$0.5l_0$

比较式(1)和式(5), 当 $F_R < [F_{cr}]$ 时才安全, 但长细比 λ :

$$\lambda = \frac{4l_K}{\sqrt{d_0^2 + d_i^2}}$$

不得超过 200, 式中 d_0 和 d_i 分别为支撑管的外径和内径 mm。当 $\lambda < 90$ 时, 承受弯曲应力部分不仅对弹性弯曲而且对塑性变形都必须进行验算。在文献[5]中规定直拉杆的外径 d 不得小于 25mm, 当长度超过 5m 时, 在拉杆或管子中间应加支点, 以防止产生过大挠度。

(7) 直拉杆与平板连接的焊缝尺寸 e (见图 2) 的计算:

取许用剪应力为 0.8 倍的许用拉应力, 则直拉杆与平板连接的焊缝尺寸 e :

$$e \geq \frac{1.25f_{min}}{\pi d}, \quad \text{mm} \quad (7)$$

拉杆与平板的焊缝结构如图 3、图 4 所示, 图 3 用于烟气温度 $< 800^\circ\text{C}$, 图 4 可用于 $> 800^\circ\text{C}$ 的场合, 当用于 $< 800^\circ\text{C}$ 烟气时, 拉杆伸出焊缝的长度可放大至 5mm。图 4(c) 中 e 应满足式 (7) 的要求。

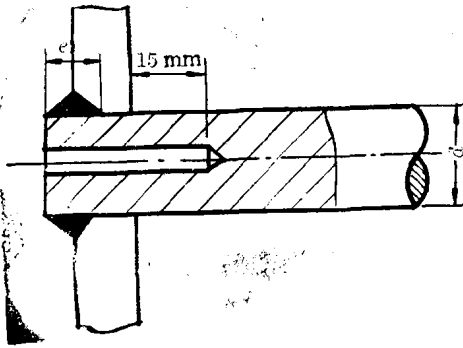


图 2 拉杆连接焊缝尺寸

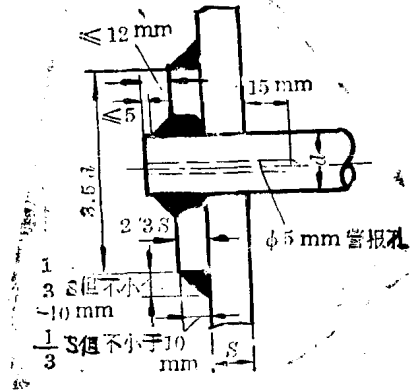


图 3 有加强板的拉杆

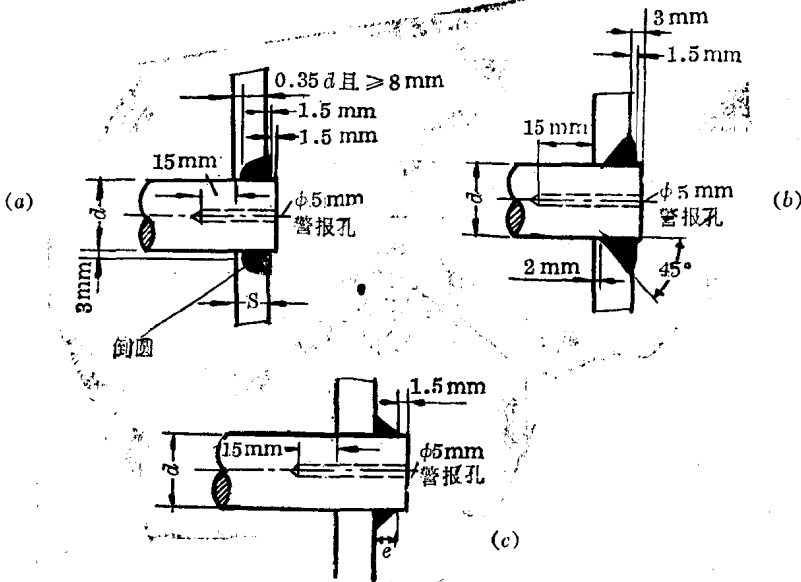


图 4 拉杆与平板的连接

(7) 拉撑管与平板连接的结构如图 5 所示,如应用于 $<800^{\circ}\text{C}$ 的场合,拉撑管伸出焊缝的长度不应超过 5mm。

(8) 用于夹套的短管拉撑连接如图 6 所示。

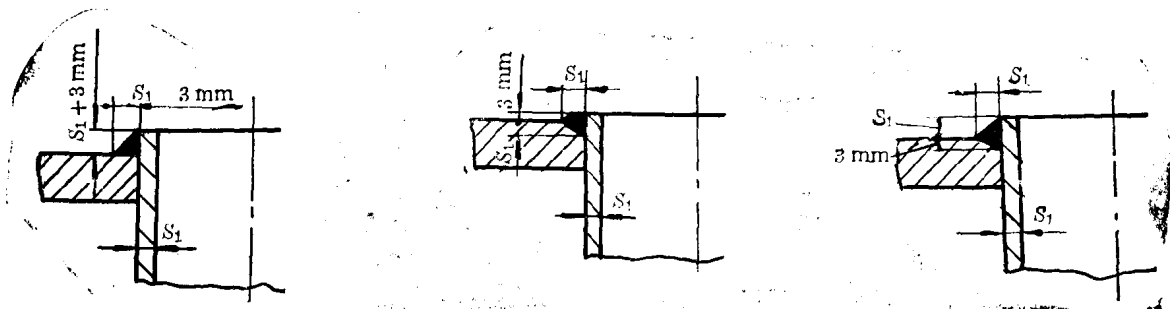


图 5 拉撑管与平板的连接(烟气温度 $>800^{\circ}\text{C}$)

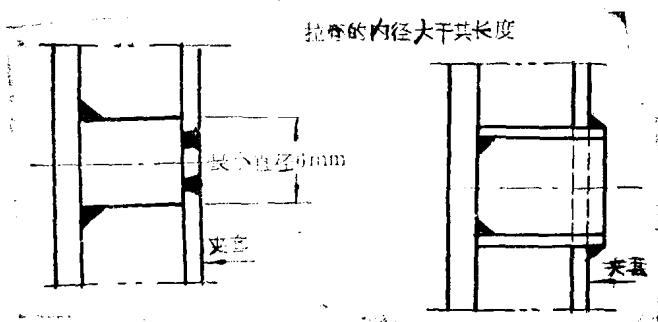


图 6 无法封焊的单面角焊(用于夹套)

(9) 斜拉杆

1) 斜拉杆所需的最小截面积

斜拉杆所受的载荷比直拉杆(纵向拉杆)大,如图 7 所示。图中 PA 为直拉杆承受的载荷,它为斜拉杆承受载荷的垂直于板面的分量,因此斜拉杆承受的载荷为 $PA/\sin\alpha$,故所需的最小截面积 $f'_{\min}$:

$$f'_{\min} = \frac{PA}{[\sigma] \cdot \eta \cdot \sin\alpha}, \quad \text{mm}^2 \quad (8)$$

式中: α ——斜拉杆与平板的夹角,不得小于 60° ,如图 7 所示;

图 7 所示;

η ——许用应力修正系数,取 0.55;

其余符号同前。

由图可知,斜拉杆除了承受沿杆中心线的轴向载荷外,还存在有弯曲应力,但由于公式简单方便,采用了较低的许用应力,几十年的经验表明是安全的。

2) 斜拉杆与壳体、平板的连接

斜拉杆与壳体、平板的连接结构如图 8 所示,斜拉杆的转角半径 $r \geq 2d$, 式中 d 为拉杆直径, $\alpha > 60^{\circ}$, 拉杆与平板的连接焊缝应符合上述(7)节及图 4 的要求,并以 $f'_{\min}$ 代替式(7)中

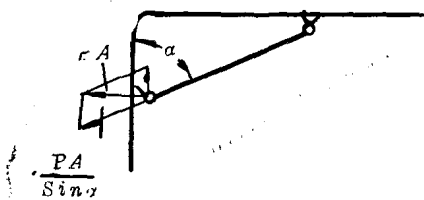


图 7 斜拉杆与角撑板受力计算模型

$f_{\min}$ 计算焊脚尺寸 e 。斜拉杆与壳体的连接如图 8 所示, 焊脚尺寸 $e = \frac{d}{4}$, 式中 d [mm] 为拉杆直径, 焊缝长度 L_h 按下式计算

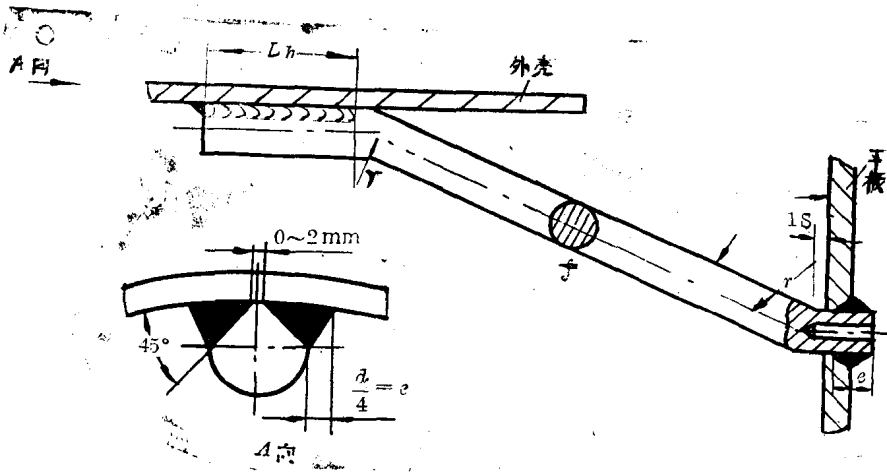


图 8 斜拉杆与壳体、平板的连接

$$L_h = \frac{1.25 f'_{\min}}{2e}, \quad \text{mm} \quad (9)$$

拉焊直径 d 按式(3)计算, 式中 $f_{\min}$ 以式(8) $f'_{\min}$ 代替, 且 $d \geq 25\text{mm}$, 斜拉杆不得用于与 800°C 以上的烟气直接接触的壳体部位。

(10) 角撑板

1) 角撑与平板、壳体的连接结构见图 9、图 10。角撑板与筒体在安装处主要产生剪应力, 而与平板的安装处则产生拉应力, 为此后者的安装条件要求较严, 采用开坡口型焊缝(见图 9), 且在连接的趾部必须加一块小横板(见图 10), 前者为角焊缝(见图 9)。角撑板与平板间之夹角 $\alpha > 60^\circ$, 角撑板的厚度不得小于与其相连元件壁厚的 80%, 且至少为 12 mm。趾部小横板尺寸应满足图 10 的要求。

2) 连接焊缝尺寸的确定

受力模型见图 7。焊缝结构尺寸见图 9、图 10, 焊缝高度 e 不得小于 10 mm, 焊缝长度 L_h 按下式计算

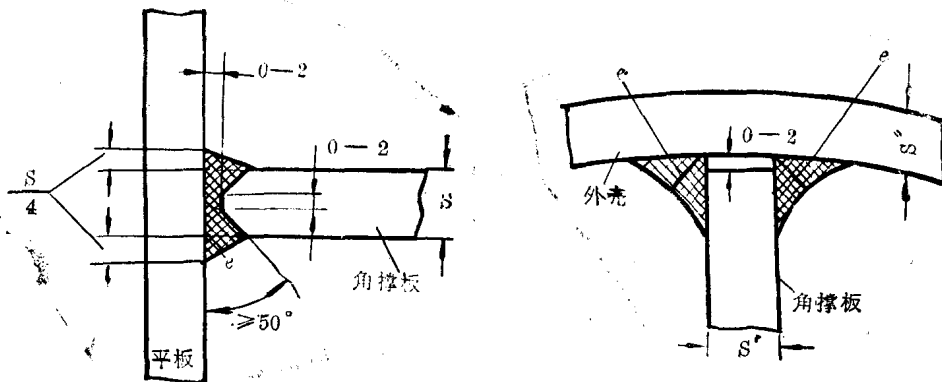


图 9 角撑板与平板、壳体的连接

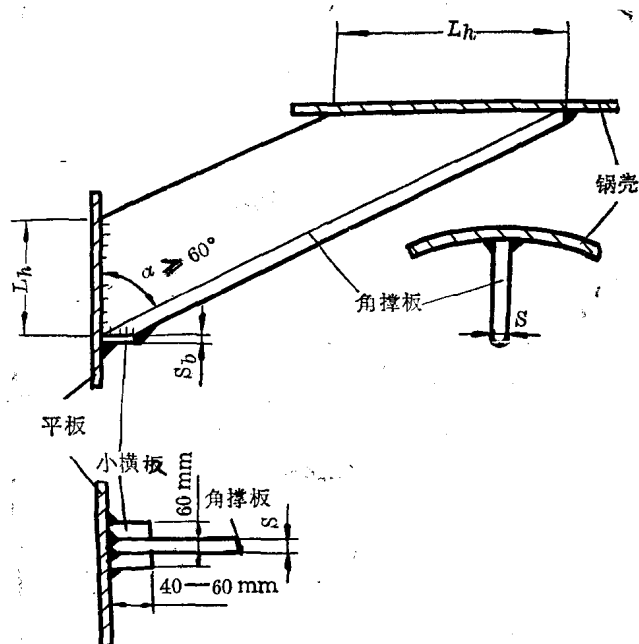


图 10 角撑板结构

对于开坡口型

$$L_h = \frac{PA}{s[\sigma]^t \eta \varphi \sin \alpha} + 20, \quad \text{mm} \quad (10)$$

对于角焊型

$$L_h = \frac{PA}{2e[\sigma]^t \eta \varphi \sin \alpha} + 20, \quad \text{mm} \quad (11)$$

式中: s ——平板厚度, mm;

η ——许用应力修正系数, 取 0.55;

φ ——焊缝系数, 按表 5 选取。

表 5 焊缝系数

焊缝型式	未消除应力处理	消除应力处理
开坡口	0.60	0.70
角焊	0.55	0.65

(11) 盖板中心设置一根拉杆(见图 11)的计算

1) 支撑面积 A' :

$$A' = \pi[(R/2)^2 - r^2], \quad \text{mm}^2 \quad (12)$$

即为图 11 中阴影线部分。

式中: R ——被拉撑平板的半径, mm

r ——拉杆半径, mm。

2) 拉杆强度计算按前述直拉杆各公式计算, 但式中 A 以式(12)的 A' 代入。

(11) 拉杆采用销钉的铰链连接

当采用销钉铰接按装直拉杆或斜拉杆时,必须将销子作成双面受剪,如图 12 所示,且销子的截面积必须满足下列条件:

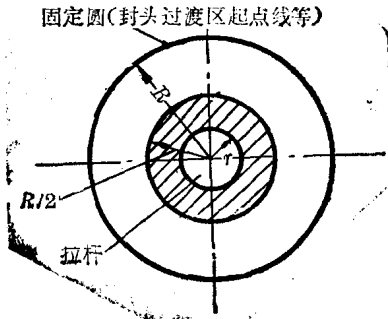


图 11 单根拉杆支撑面积

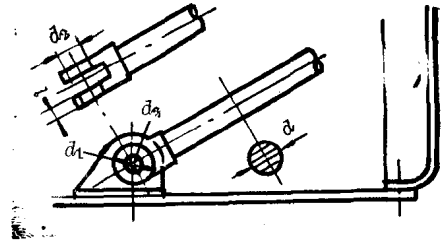


图 12 销钉连接的拉杆

$$\frac{\pi}{4} d^2 \geq \frac{3}{4} \times \frac{\pi}{4} d r^2 \quad (13)$$

式中: d ——销子直径, mm;

$d r$ ——拉撑所需的最小直径, mm。

及拉撑穿销环环形部分的截面积必须满足下列条件:

$$2(d_1 - d_2) \cdot l \geq 1.25 \times \frac{\pi}{4} d r^2 \quad (14)$$

式中: d_1 ——穿销环的外径(见图 12), mm;

d_2 ——穿销环的内径(见图 12), mm;

l ——穿销环的厚度(见图 12), mm。

2. 带不规则布置拉撑的平板

由弹性力学知,受均布载荷的圆形平板厚度计算公式为

$$S = K D_c \sqrt{\frac{P}{[\sigma]^3}}$$

式中 K 为结构特征系数,由板的结构形式及周边支承情况而定,对于从周边固支到简支的圆板,其值的变化范围为 0.43~0.56 之间。

带支撑受均布载荷的平板与上述类似,亦为两向弯曲问题,所不同的是支撑点一般为不连续的,分析较复杂,为了简化计算,采用与上式相同形式的公式。但系数 K 的取值决定于各支撑点的类型;在计算圆圆周上有两个或两个以上不同的支撑点时,则取各支点的 K 值的平均值,通常其值也介于固支与简支之间。带不规则布置拉撑的平板厚度 S 按下式计算:

$$S = K_1 D_c \sqrt{\frac{P}{[\sigma]^3 \cdot \eta}} + C, \text{ mm} \quad (15)$$

式中: K_1 ——系数,与支点的结构形式及其工作条件有关,按表 6 选取,当有几个不同类型支点时,取各支撑点相应值的平均值(即各支点的 K_1 值之和除以支点数),如在全焊后消除应力热处理者,则 K_1 值可比表 6 给出值减少 10%。

D_c ——通过两或三个支撑点所画的计算圆直径(见图 13), mm;

P ——平板承受的设计压力, MPa;
 $[\sigma]'$ ——平板材料在设计温度下的许用应力, 按表 7^[5] 或文献[1]选取, MPa;
 η ——许用应力修正系数, 取 $\eta=0.85$;
 C ——板厚附加量, mm。

表 6 平板支撑点系数 K_1

支撑结构形式	工 作 条 件	K_1
支点线(见图 14)	与火焰接触	0.45
	不与火焰接触	0.42
孔边开坡口的拉杆(见图 4)、角撑板	与火焰接触	0.50
	不与火焰接触	0.46
有加强圈且孔边开坡口的拉杆(见图 3)	不与火焰接触	0.42
无法封焊的单面角焊(见图 6)	不与火焰接触	0.51

注: 火焰是指包括 800°C 以上的高温烟气。

计算直径 D 为经过三个支撑点或二个支撑点所划出的圆中取最大圆的直径。其画法如图 13 所示, 如经过三个支撑点画圆, 则三个支撑点不得位于同一直径的一侧; 如经过二个支撑点画圆, 则二个支撑点应位于同一直径上; 任何情况画圆, 在圆中不应包围任何其它支撑点。

表 7 许用应力值 $[\sigma]'$

钢 号		10	A3g	15ga	20, 20g	12Mng	16Mng
室 温	σ_b	333	372.5	372.5	402	431	470.5
	σ_s	206	215	215	225.5	274.5	284
计 算 壁 温 °C	250	98	105	109	121.5	138	146
	260	96	103	106	118.5	136	143
	270	94	100	104	116.5	133.5	140
	280	92	98	101	113.5	130.5	137
	290	90	96	99	111.5	128.5	135
	300	87	94	97	110	125.5	133.5
	310	85.5		94	107	124.5	131.5
	320	83.5		92	104	123.5	130.5
	330	80.5		89	101	122.5	129.5
	340	78.5		86	98	121.5	128.5
	350	76.5		84.5	97	120.5	127.5

注: (1) 如计算壁温介于表中两个相邻数值之间, 基本许用应力可用算术内插法求得

(2) 表中 20g、12Mng 和 16Mng 的 σ_b 和 σ_s 值适用于板厚为 6~16mm 情况, 若大于 16mm, 应按 GB713-86《锅炉用碳素钢和低合金钢钢板技术条件》确定。

由图 13 可知, 拉杆及拉撑管中心, 角撑板中线及支点线上各点都是支撑点。支点线的确定方法如图 14 所示, 当平板与壳体连接有过渡圆弧时, 支点线取过渡圆弧半径 r 或 $2.5S$ (S 为平板厚度) 中较小值。人孔或手孔的板边不得用作支点线。

3. 包含人孔在内的平板

人孔本身已被加强(用内折翻边、补强板等元件补强者), 至少有一个假想圆(计算圆)应将人包含在内, 如图 15 所示(而相邻计算圆如其中心进入人孔, 此计算圆不作为强度计算的依