



中华人民共和国行业标准

NB/T 47003.1—2009 (JB/T 4735.1)

部分代替 JB/T 4735—1997

钢制焊接常压容器

Steel welded atmospheric pressure vessels

2009-12-01 发布

2010-05-01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言	4
1 范围	5
2 规范性引用文件	5
3 术语和定义	7
4 总则	8
5 材料	13
6 基本结构元件	23
7 立式圆筒形容器	46
8 矩形容器	61
9 制造、检验与验收	78
附录 A (资料性附录) 钢材在不同温度下的性能	89
标准释义	93

前 言

NB/T 47003 分为 2 个部分:

——第 1 部分: 钢制焊接压力容器;

——第 2 部分: 固体料仓。

本部分为 NB/T 47003 的第 1 部分。

本部分与 JB/T 4735—1997 相比, 主要变化如下:

- 在修订了碳素钢、低合金钢、铁素体高合金钢的安全系数, 将钢材标准抗拉强度下限值的安全系数由 2.5 降为 2.4;
- 对第 4 章的最小厚度和计算厚度的定义进行了修订; 压力试验中增加气压试验, 试验压力由 1.15 改为 1.10 倍; 压力试验时的应力校核进行了修订;
- 第 5 章根据钢材标准的变动, 相应的增加钢号; 增加螺柱、螺母用钢钢号; 增加型钢许用应力; 增加焊接材料;
- 将原标准的第 5 章“内压圆筒”、第 6 章“外压圆筒与外压球壳”、第 7 章“封头”、第 8 章“平盖”、第 9 章“开孔和开孔补强”、第 10 章“法兰”合并为本部分第 6 章“基本结构元件”;
- 对第 6 章“基本结构元件”中的“平盖”、“开孔和开孔补强”和“法兰”的部分公式进行了修正; 放宽了开孔的范围和直径;
- 对第 7 章“立式圆筒形容器”的部分公式进行了修正;
- 对第 8 章“矩形容器”的部分公式进行了修正;
- 第 9 章增加了矩形容器、气压试验及方法的内容。将气压试验时介质温度修改为应不低于 5℃;
- 撤消原标准第 12 章“立式圆筒形储罐”、第 14 章“圆筒形料仓”、附录 A “材料的补充规定”、附录 C “立式圆筒形储罐的抗震设计”、附录 D “带肋拱顶的设计”、附录 E “立式圆筒形储罐基础设计的基本要求”、附录 F “储罐 T 型接头、角焊接接头试件制备和检查”、附录 G “结构节点详图”、附录 H “齐平型清扫孔的开孔和开孔补强”。

本部分的附录 A 是资料性附录。

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

本部分负责起草单位: 甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司。

本部分参加起草单位: 兰州石油机械研究所、安徽省特种设备检测院、中国石化工程建设公司、中国寰球工程公司、中国石油工程设计公司大连分公司、中国石化集团上海工程有限公司、洛阳石化工程公司、中国特种设备检测研究院、北京市燃气集团有限责任公司特种设备检验所。

本部分主要起草人: 刘福录、张勇、严国华、费继增、夏莉、岳国印、赵建新、王文江、冀峰、岳彬、姜英明、沈炳余、朱保国、王万磊、李晓明、李世玉、寿比南、王为国、江枫。

本部分所代替标准的历次版本发布情况为:

——JB/T 4735—1997。

钢制焊接常压容器

1 范围

1.1 本部分规定了钢制焊接常压容器（以下简称容器）的设计、制造、检验与验收的要求。

常压卧式容器的设计计算按 JB/T 4731《钢制卧式容器》的有关规定，其许用应力值可按本部分 4.6 选取。

1.2 本部分适用的容器范围为：

- a) 圆筒形容器：设计压力大于 -0.02MPa ，小于 0.1MPa ，设计温度范围按钢材允许的使用温度确定；
- b) 矩形容器：设计压力为零，设计温度范围按钢材允许的使用温度确定。

1.3 本部分不适用于下列各类容器：

- a) 直接受火焰加热的容器；
- b) 受核辐射的容器；
- c) 盛装毒性为极度或高度危害介质的容器；
- d) 直接埋入地下的容器；
- e) 可升降气柜；
- f) 经常搬运的容器；
- g) 料仓；
- h) 几何容积大于 1000m^3 的立式圆筒形容器；
- i) 高度大于 10m 且长径比大于 5 的塔式容器。

2 规范性引用文件

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

GB 150—1998	钢制压力容器
GB/T 699—1999	优质碳素结构钢
GB/T 700—2006	碳素结构钢 (GB/T 700—2006, ISO 630: 1995, NEQ)
GB/T 711—2008	优质碳素结构钢热轧厚钢板和钢带
GB/T 712—2000	船体用结构钢 (GB/T 712—2000, IASS 国际船级协会 CCS 中国般级社, EQV)
GB 713—2008	锅炉和压力容器用钢板 (GB 713—2008, ISO 9328-2: 2004, NEQ)
GB 912—2008	碳素结构钢和低合金结构钢热轧薄钢板钢带 (GB 912—2008, ISO 4995: 2001、ISO 4996: 1999, NEQ)
GB/T 983—1995	不锈钢焊条 (GB/T 983—1995, ANSI/AWS A5.4: 1992, NEQ)
GB/T 985.1—2008	气焊、焊条电弧焊、气体保护焊和高能束焊的推荐坡口 (GB/T 985.1

NB/T 47003.1—2009 (JB/T 4735.1)

	—2008, ISO 9692-1: 2003, MOD)
GB/T 985.2—2008	埋弧焊的推荐坡口 (GB/T 985.2—2008, ISO 9692-2: 1998, MOD)
GB/T 1220—2007	不锈钢棒
GB/T 1591—2008	低合金高强度结构钢
GB/T 1804—2000	一般公差 未注公差的线性 and 角度尺寸的公差 (GB/T 1804—2000, ISO 2768-1: 1989, EQV)
GB/T 3077—1999	合金结构钢 (GB/T 3077—1999, DIN EN 10083-1: 1991, NEQ)
GB 3087—2008	低中压锅炉用无缝钢管 (GB 3087—2008, ISO 9329-1: 1989, NEQ)
GB/T 3091—2008	低压流体输送用焊接钢管 (GB/T 3091—2008, ISO 559: 1991, NEQ)
GB/T 3098.1—2000	紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱 (GB/T 3098.1—2000, ISO 898-1: 1999, IDT)
GB/T 3098.2—2000	紧固件机械性能 螺母 粗牙螺纹 (GB/T 3098.2—2000, ISO 898-2: 1992, IDT)
GB/T 3274—2007	碳素结构钢和低合金结构钢热轧厚钢板和钢带 (GB/T 3274—2007, ISO 13976: 2005, ISO 630: 1995, NEQ)
GB/T 3280—2007	不锈钢冷轧钢板和钢带
GB/T 4237—2007	不锈钢热轧钢板和钢带
GB/T 4334—2008	金属和合金的腐蚀 不锈钢晶间腐蚀试验方法 (GB/T 4334—2008, ISO 3651-1: 1998, ISO 3651-2: 1998, MOD)
GB/T 5117—1995	碳钢焊条 (GB/T 5117—1995, ANSI/AWSA5.1: 1991, EQV)
GB/T 5118—1995	低合金钢焊条 (GB/T 5118—1995, ANSI/AWSA5.5: 1981, NEQ)
GB/T 5293—1999	埋弧焊用碳钢焊丝和焊剂 (GB/T 5293—1999, ANSI I/AWSA5.17: 1989, EQV)
GB/T 5779.1—2000	紧固件表面缺陷 螺栓、螺钉和螺柱 一般要求 (GB/T 5779.1—2000, ISO 6157-1: 1988, IDT)
GB/T 5779.2—2000	紧固件表面缺陷 螺母 (GB/T 5779.2—2000, ISO 6157-2: 1995, IDT)
GB 6479—2000	高压化肥设备用无缝钢管 [GB 6479—2000, ISO 9329-2: 1997 (E), NEQ]
GB/T 8162—2008	结构用无缝钢管 (GB/T 8162—2008, EN 10297-1: 2003, NEQ)
GB/T 8163—2008	输送流体用无缝钢管 (GB/T 8163—2008, EN 10216-1: 2004, NEQ)
GB/T 8165—2008	不锈钢复合钢板和钢带
GB/T 9019—2001	压力容器公称直径
GB/T 12470—2003	埋弧焊用低合金钢焊丝和焊剂
GB 13296—2007	锅炉、热交换器用不锈钢无缝钢管 (GB 13296—2007, ASME SA-213/213M: 2001, NEQ)
GB/T 14957—1994	熔化焊用钢丝
GB/T 14976—2002	流体输送用不锈钢无缝钢管 (GB/T 14976—2002, ASTM A269: 2000, NEQ)
GB 50009—2001	建筑结构荷载规范

GB 50011—2001	建筑抗震设计规范
GB 50017—2003	钢结构设计规范
GB 50236—1998	现场设备、工业管道焊接工程施工及验收规范
JB/T 4701	甲型平焊法兰
JB/T 4702	乙型平焊法兰
JB/T 4703	长颈对焊法兰
JB 4708	钢制压力容器焊接工艺评定
JB/T 4709	钢制压力容器焊接规程
JB/T 4710	钢制塔式容器
JB/T 4711	压力容器涂敷与运输包装
JB/T 4712.1	容器支座 第1部分：鞍式支座
JB/T 4712.2	容器支座 第2部分：腿式支座
JB/T 4712.3	容器支座 第3部分：耳式支座
JB/T 4712.4	容器支座 第4部分：支承式支座
JB/T 4726	压力容器用碳素钢和低合金钢锻件
JB/T 4728	压力容器用不锈钢锻件
JB/T 4730.2	承压设备无损检测 第2部分：射线检测
JB/T 4730.3	承压设备无损检测 第3部分：超声检测
JB/T 4731	钢制卧式容器
NB 4744	钢制压力容器产品焊接试板的力学性能检验
NB/T 4746	钢制压力容器用封头
NB/T 4747	压力容器用钢焊条订货技术条件
NB/T 47002.1	压力容器用爆炸焊接复合板 第1部分：不锈钢-钢复合板
NB/T 47002.2	压力容器用爆炸焊接复合板 第2部分：镍-钢复合板
NB/T 47002.3	压力容器用爆炸焊接复合板 第3部分：钛-钢复合板
NB/T 47002.4	压力容器用爆炸焊接复合板 第4部分：铜-钢复合板
SY 5036—1983	承压流体输送用螺旋缝埋弧焊钢管
SY/T 5037—2000	低压流体输送管道用螺旋缝埋弧焊钢管
SY/T 5038—1992	普通流体输送管道用螺旋缝高频焊钢管
HG/T 20592 ~ 20635	钢制管法兰、垫片、紧固件
HG 20660—2000	压力容器中化学介质毒性危害和爆炸危险程度分类
HG 21514 ~ 21535	钢制人孔和手孔
HG 21594 ~ 21604	不锈钢人、手孔
YB/T 5092—2005	焊接用不锈钢丝
锅炉压力容器管道焊工考试与管理规则(2002) 国家质量监督检验检疫总局	

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本部分。

3.1

压力 **pressure**

- 除注明者外, 压力均指表压力。

3.2

工作压力 **operating pressure**

工作压力指在正常工作情况下, 容器顶部可能达到的最高压力。

3.3

设计压力 **design pressure**

设计压力指设定的容器顶部的最高压力, 与相应的设计温度一起作为设计载荷条件, 其值不低于工作压力。

外压容器的设计压力, 应取不低于在正常工作情况下可能出现在壳壁内外的最大压力差。

3.4

计算压力 **calculating pressure**

计算压力指在相应的设计温度下, 用以确定容器各部位或元件计算厚度的压力, 其值为设计压力与容器各部位或元件所承受的液柱静压力之和。由两室或两个以上容积室组成的容器, 如夹套容器, 确定计算压力时, 应考虑各室之间的最大压力差。

3.5

金属温度 **metal temperature**

金属温度指沿容器元件金属截面的温度平均值。

在任何情况下, 元件金属的表面温度不得超过钢材允许的使用温度。

3.6

设计温度 **design temperature**

设计温度指在正常工作情况下, 设定的元件金属温度, 其值不得低于元件金属在工作状态下可能出现的最高金属温度, 对 0℃以下的金属温度, 设计温度不得高于元件金属可能达到的最低温度。

容器设计温度 (即标注在容器铭牌上的设计温度) 系指壳体的设计温度。

注: 对具有多种操作工况的容器, 应在图样或相应技术文件中注明各操作工况下相应的设计压力 and 设计温度, 并按最苛刻的工况设计。

3.7

试验温度 **test temperature**

试验温度指在压力试验时, 容器壳体的金属温度。

4 总则

4.1 通则

容器的设计、制造、检验与验收除应符合本部分的规定外, 还应遵守国家颁布的有关法令、法规和规章。

4.2 容器的范围

本部分的容器范围系指容器壳体及与其连为整体的零部件, 且划定在下列范围内:

a) 容器与外部管道连接:

- 1) 焊接连接的第一道环向接头坡口端面;

- 2) 螺纹连接的第一个螺纹接头端面;
- 3) 法兰连接的第一个法兰密封面;
- 4) 专用连接件或管件连接的第一个密封面。
- b) 接管、人孔、手孔等的成型封头、平盖及其紧固件。
- c) 容器的支承元件、开孔补强元件及其与壳体的连接焊接接头等。
- d) 直接安装在容器上的安全泄放装置。

4.3 资格与职责

4.3.1 容器的设计、制造单位应具备健全的质量管理体系。

4.3.2 设计单位应对设计文件(一般包括设计计算书和设计图样)的正确性、完整性负责。制造单位应按照设计图样要求进行容器制造。如需修改原设计,应取得原设计单位的认可。

4.3.3 制造单位的检验部门在容器制造的过程中和完工后,应按本部分规定和设计图样要求,对容器进行各项具体检验和试验,提出检验报告,并对检验报告的准确性和完整性负责。

4.4 载荷

设计时应考虑以下载荷:

- a) 设计压力;
 - b) 液柱静压力;
 - c) 容器自重(包括内件和填料等)以及在正常工作条件下或试验状态下内装物料(或试压液体)的重力载荷,以及固体粉、粒料导致的摩擦力等;
 - d) 附属设备及隔热材料、衬里、管道、扶梯、平台等的自重载荷;
 - e) 雪载荷、风载荷及地震载荷;
- 必要时,还应考虑以下载荷的影响:
- f) 来自支承、连接管道及其他部件引起的作用力;
 - g) 由于热膨胀不同引起的作用力;
 - h) 运输、安装、维修时,容器承受的作用力。

4.5 厚度

4.5.1 厚度附加量

厚度附加量按式(4-1)确定:

$$C=C_1+C_2 \quad \dots\dots\dots (4-1)$$

式中:

C —— 厚度附加量, mm;

C_1 —— 钢板或钢管的厚度负偏差,按相应钢板或钢管标准选取, mm;

当钢材的厚度负偏差不大于 0.3mm 且不超过名义厚度的 6% 时,可取 $C_1=0$;

C_2 —— 腐蚀裕量,为弥补容器由于腐蚀、机械磨损而导致厚度减薄的附加量,根据容器的工艺操作要求及所处环境条件确定(除不锈钢外,一般不宜小于 1mm)。

4.5.2 最小厚度

不包括腐蚀裕量的圆筒最小厚度:对碳素钢及低合金钢为 3mm;对高合金钢为 2mm。

4.5.3 计算厚度

计算厚度指按各章公式计算所得到的厚度,需要时,尚应计入其他载荷所需厚度(见 4.4)。

4.5.4 设计厚度

设计厚度指以计算厚度与最小厚度二者中较大值与腐蚀裕量之和。

4.5.5 名义厚度

名义厚度指设计厚度加上钢材厚度负偏差后，向上圆整至钢材标准规格的厚度，即标注在图样上的厚度。

当计算厚度小于最小厚度时，其名义厚度可不考虑钢材厚度负偏差。

4.5.6 有效厚度

有效厚度指名义厚度减去腐蚀裕量和钢材厚度负偏差。

4.5.7 容器制造单位应根据制造工艺条件，并考虑板材的实际厚度自行确定加工裕量，以确保容器产品各部位的实际厚度不小于该部位的名义厚度减去钢材厚度负偏差。

4.6 许用应力

4.6.1 本部分所用材料的许用应力按第 5 章选取。确定许用应力的依据为：钢材（除螺栓材料外）按表 4-1，螺栓材料按表 4-2。

表 4-1 钢材许用应力

材 料	许用应力 取下列各值中的最小值，MPa		
碳素钢，低合金钢，铁素体高合金钢	$\frac{R_m}{2.4}$	$\frac{R_{eL}}{1.5}$	$\frac{R_{eL}^t}{1.5}$
奥氏体高合金钢	$\frac{R_{eL}}{1.5}$	$\frac{R_{eL}^t}{1.5}^a$	
注： R_m —— 钢材标准抗拉强度下限值，MPa； R_{eL} —— 钢材标准常温屈服强度，MPa； R_{eL}^t —— 钢材在设计温度下的屈服强度，MPa。			
^a 当部件允许有微量永久变形时，可适当提高许用应力，但不得超过 $0.9 R_{eL}^t$ 。此规定不适用于法兰或其他当有微量永久变形就产生泄漏或故障的场合。			

表 4-2 螺栓许用应力

材 料	螺栓直径	热处理状态	许用应力，MPa
碳素钢	≤M22	热轧、正火	$R_{\text{eL}}^t / 2.7$
	M24~M48		$R_{\text{eL}}^t / 2.5$
低合金钢 马氏体高合金钢	≤M22	调 质	$R_{\text{eL}}^t / 3.5$
	M24~M48		$R_{\text{eL}}^t / 3.0$
	≥M52		$R_{\text{eL}}^t / 2.7$
奥氏体高合金钢	≤M22	固 溶	$R_{\text{eL}}^t / 1.6$
	M24~M48		$R_{\text{eL}}^t / 1.5$
注： R_{eL}^t —— 钢材在设计温度下的屈服强度，MPa。			

4.6.2 设计温度低于 20℃时, 取 20℃时的许用应力。

4.6.3 不锈钢复合钢板的许用应力

对于覆层与基层结合率达到 JB/T 4733 中 B2 级板以上的复合钢板, 在设计计算中, 如需计入覆层材料的强度时, 其设计温度下的许用应力按式 (4-2) 确定:

$$[\sigma]^t = \frac{[\sigma]_1^t \delta_1 + [\sigma]_2^t \delta_2}{\delta_1 + \delta_2} \quad \dots\dots\dots (4-2)$$

式中:

$[\sigma]^t$ —— 设计温度下复合钢板的许用应力, MPa;

$[\sigma]_1^t$ —— 设计温度下基层钢板的许用应力, MPa;

$[\sigma]_2^t$ —— 设计温度下覆层钢板的许用应力, MPa;

δ_1 —— 基层钢板的有效厚度, mm;

δ_2 —— 覆层材料的有效厚度, mm。

4.6.4 许用轴向压缩应力

圆筒或管子的许用轴向压缩应力取下列两者中的较小值:

a) 设计温度下的材料许用应力 (见第 5 章);

b) 按下列步骤求取的 B 值:

1) 按式 (4-3) 计算 A 值:

$$A = \frac{0.094\delta_e}{R_o} \quad \dots\dots\dots (4-3)$$

式中:

A —— 系数;

δ_e —— 圆筒或管子的有效厚度, mm;

R_o —— 圆筒或管子的外半径, mm。

2) 根据所选材料、设计温度及 A 值按 GB 150 图 6-3~图 6-10 查 (遇中间温度用内插法) 求取 B 值。

若 A 值落在设计温度下材料线的左方, 则按式 (4-4) 计算 B 值。

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

式中:

B —— 许用轴向压缩应力, MPa;

E^t —— 设计温度下材料的弹性模量, MPa。

4.7 焊接接头系数

4.7.1 本条所列焊接接头系数适用于本部分中各元件的相应计算, 其值根据容器受压部分的接头型式和无损检测要求选取。

4.7.2 双面焊或相当于双面焊的全熔透对接接头:

全部无损检测 $\phi = 1.0$

局部无损检测 $\phi = 0.85$

不做无损检测 $\phi = 0.70$

4.7.3 单面焊的对接接头,且沿其根部全长具有紧贴基本金属的垫板:

全部无损检测 $\phi = 0.90$ 局部无损检测 $\phi = 0.80$ 不做无损检测 $\phi = 0.65$

注:本部分一般不要求全部无损检测,但设计需要全部无损检测且取相应的 ϕ 值时则按 GB 150 要求的无损检测合格级别。

4.7.4 单面焊无垫板对接接头:

局部无损检测 $\phi = 0.70$ 不做无损检测 $\phi = 0.60$

4.8 试验

4.8.1 容器制成后应经压力试验或渗漏试验。试验可做盛(充)水试验、液压试验、气压试验、气密性试验以及煤油渗漏试验等,当无法做液压试验时,可做气压试验,其试验方法及项目应在图样上注明。试验的具体要求见 9.7 的规定。

4.8.2 试验压力:

a) 液压试验按式(4-5)计算:

$$p_T = \begin{cases} 1.25p \frac{[\sigma]}{[\sigma]^t} & \text{取两者的较大值} \\ 0.05 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4-5)$$

b) 气压试验按式(4-6)计算:

$$p_T = \begin{cases} 1.10p \frac{[\sigma]}{[\sigma]^t} & \text{取两者的较大值} \\ 0.05 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4-6)$$

c) 气密性试验按式(4-7)计算:

$$p_T = 1.0p \quad \dots\dots\dots (4-7)$$

式中:

 p_T ——试验压力, MPa; p ——设计压力, MPa; $[\sigma]$ ——容器元件材料在试验温度下的许用应力, MPa; $[\sigma]^t$ ——容器元件材料在设计温度下的许用应力, MPa。

注1:如因采用 0.05MPa (液压试验) 或 0.05MPa (气压试验) 试压,会导致必须增加壳体厚度时,则允许适当降低试验压力,但不得低于 $1.25p \frac{[\sigma]}{[\sigma]^t}$ (液压试验) 或 $1.10p \frac{[\sigma]}{[\sigma]^t}$ (气压试验)。

注2:容器各元件(圆筒、封头、接管、法兰及紧固件等)所用材料或设计温度不同时,应取各元件 $\frac{[\sigma]}{[\sigma]^t}$ 之比值中的最小者。

注3:容器以卧置进行液压试验时,试验压力应为立置时的试验压力 p_T 加液柱静压力。

4.8.3 当容器需做液压试验,但液压试验所需充液高度高于容器规定的储液高度,且设计又不

允许时,可采用液压与气压组合试验。试验压力 p_T 按式(4-6)确定。试验时,先给容器充水到达设计允许的液位高度,再将压缩空气注入容器上部,直至气相空间压力达到图样要求的试验压力值。

外压容器以内压进行压力试验。

4.8.4 压力试验时的应力校核

压力试验时,圆筒的薄膜应力按式(4-8)计算:

$$\sigma_T = \frac{p_T (D_i + \delta_e)}{2\delta_e} \dots\dots\dots (4-8)$$

式中:

- σ_T ——圆筒薄膜应力, MPa;
- p_T ——试验压力, MPa;
- D_i ——圆筒内直径, mm;
- δ_e ——圆筒的有效厚度, mm。

σ_T 应满足下列条件:

液压试验时:

$$\sigma_T \leq 0.9\phi R_{eL} \dots\dots\dots (4-9)$$

气压试验时(液压与气压组合试验时):

$$\sigma_T \leq 0.8\phi R_{eL} \dots\dots\dots (4-10)$$

式中:

- R_{eL} ——圆筒材料在试验温度下的屈服强度, MPa;
- ϕ ——圆筒的焊接接头系数。

5 材料

5.1 总则

- 5.1.1 容器用钢应符合本章规定,焊接结构用钢须是焊接性良好的钢材。
- 5.1.2 列入 GB 150 的钢材均可作容器用钢。
- 5.1.3 容器用钢应由平炉、电炉或氧气转炉冶炼。钢材的技术要求应符合相应的钢材标准或有关技术条件的规定。
- 5.1.4 容器用钢应附有钢材生产单位的钢材质量证明书,容器制造单位应按质量证明书对钢材进行验收,必要时尚应进行复验。
- 5.1.5 选择容器用钢应考虑容器的使用条件(如设计温度、介质特性和操作特点等)、材料的焊接性能、容器的制造工艺以及经济合理性等。
- 5.1.6 容器用钢的使用温度下限,按钢材允许的使用温度下限。
- 5.1.7 对钢材有特殊要求时,设计单位应在图样或相应技术文件中注明。
- 5.1.8 钢材的不同温度性能参考值见附录 A(资料性附录)。

5.2 钢板

- 5.2.1 钢板的标准、使用状态及许用应力按表 5-1 的规定。

表 5-1 钢板许用应力

钢 号	钢材标准	使用状态	厚度 mm	常温强度指标		在下列温度（℃）下的许用应力值，MPa							注
				R _m ，MPa	R _{eL} ，MPa	≤20	100	150	200	250	300	350	
碳素钢板													
Q235A.F	GB 912	热轧	3 ~ 4	375	235	140	126	120	112	100	—	—	a
	GB/T 3274		4.5 ~ 16	375	235	140	126	120	112	100	—	—	a
Q235A	GB 912	热轧	3 ~ 4	375	235	140	126	120	112	100	92	84	a
	GB/T 3274		4.5 ~ 16	375	235	140	126	120	112	100	92	84	a
			>16 ~ 40	375	235	140	120	114	107	96	88	80	a
Q235B	GB 912	热轧	3 ~ 4	375	235	140	126	120	112	100	92	84	a
	GB/T 3274		4.5 ~ 16	375	235	140	126	120	112	100	92	84	a
			>16 ~ 40	375	235	140	120	114	107	96	88	80	a
Q235C	GB 912	热轧	3 ~ 4	375	235	156	140	133	124	111	102	93	
	GB/T 3274		4.5 ~ 16	375	235	156	140	133	124	111	102	93	
			>16 ~ 40	375	235	156	133	127	119	107	98	89	
Q245R	GB 713	热轧或正火	6 ~ 16	400	245	163	147	140	131	117	108	98	
			>16 ~ 36	400	235	157	140	133	124	111	101	91	
			>36 ~ 60	400	225	150	133	127	119	107	98	89	
低合金钢板													
Q345R	GB 713	热轧或正火	6 ~ 16	510	345	213	210	197	183	167	153	143	
			>16 ~ 36	500	325	208	197	180	170	157	143	133	
Q370R	GB 713	正火	6 ~ 16	530	370	221	221	213	200	190	180	170	
			>16 ~ 36	530	360	221	220	207	193	183	173	163	

表 5-1 (续)

钢 号	钢材标准	使用状态	厚度 mm	常温强度指标		在下列温度（℃）下的许用应力值，MPa							注
				R_m , MPa	R_{eL} , MPa	≤20	100	150	200	250	300	350	
高合金钢板													
0Cr13	GB/T 4237	退火	2 ~ 60	137	126	123	120	119	117	112			
0Cr18Ni9	GB/T 4237	固溶	2 ~ 60	137	137	137	130	122	114	111			b
				137	114	103	96	90	85	82			
0Cr18Ni10Ti	GB/T 4237	固溶或稳定化	2 ~ 60	137	137	137	130	122	114	111			b
				137	114	103	96	90	85	82			
0Cr17Ni12Mo2	GB/T 4237	固溶	2 ~ 60	137	137	137	134	125	118	113			b
				137	117	107	99	93	87	84			
0Cr18Ni12Mo2Ti	GB/T 4237	固溶	2 ~ 60	137	137	137	134	125	118	113			b
				137	117	107	99	93	87	84			
00Cr19Ni10	GB/T 4237	固溶	2 ~ 60	118	118	118	110	103	98	94			b
				118	97	87	81	76	73	69			
00Cr17Ni14Mo2	GB/T 4237	固溶	2 ~ 60	118	118	117	108	100	95	90			b
				118	97	87	80	74	70	67			
00Cr18Ni5Mo3Si2	GB/T 4237	固溶	2 ~ 25	197	197	190	173	167	163				
注：中间温度的许用应力可按本表的应力值用内插法求得。													
a 所列许用应力已乘质量系数 0.9。													
b 该行许用应力仅适用于允许产生微量永久变形之元件，对于法兰或其他有微量永久变形就引起泄漏或故障的场合不能采用。													

5.2.2 碳素钢沸腾钢板 Q235A.F 的适用范围按以下规定:

- a) 钢板的使用温度为 $0^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$;
- b) 用于容器壳体时, 钢板厚度不大于 16mm;
- c) 不得用于盛装毒性为极度、高度和中度危害介质以及盛装易燃介质的各类容器。

注: 介质毒性危害程度和爆炸危险程度的分级的划分按 HG 20660 的规定。

5.2.3 碳素钢镇静钢板 Q235A、Q235B、Q235C 的适用范围按以下规定:

- a) 钢板的使用温度为 $0^{\circ}\text{C} \sim 350^{\circ}\text{C}$;
- b) 用于容器壳体时, 钢板厚度不大于 40mm。

注: 与大气连通的圆筒形及矩形容器不受上列适用范围的限制。

5.2.4 用于法兰、管板、平盖等元件, 厚度大于 50mm 的 Q245R 和 Q345R 钢板应在正火状态下使用。

5.2.5 用于圆筒形容器壳体时, 当设计温度和钢板厚度符合下列情况时, 应每批取一张钢板进行夏比 V 形缺口低温冲击试验, 试验温度为最低设计温度, 试样取样方向为横向:

- a) 设计温度高于 -20°C , 且低于 -10°C , 钢板厚度大于 12mm 的 Q245R。3 个试样的冲击功平均值不小于 27J, 允许 1 个试样的冲击功小于平均值, 但不得小于 70%;
- b) 设计温度高于 -20°C , 且低于 -10°C , 钢板厚度大于 20mm 的 Q345R。3 个试样的冲击功平均值不小于 31J, 允许 1 个试样的冲击功小于平均值, 但不得小于 70%。

5.2.6 高合金钢板一般按 GB/T 4237 选用。对厚度小于 4mm 的钢板, 当按 GB/T 4237 选用时, 设计单位应注明钢板表面质量的组别; 当按 GB/T 3280 选用时, 设计单位应注明钢板表面加工等级。

5.3 钢管

5.3.1 钢管的标准及许用应力按表 5-2 的规定。

5.3.2 采用 GB/T 8162 应增做液压试验。

5.4 锻件

5.4.1 锻件的标准及许用应力按表 5-3 的规定。

5.4.2 锻件的级别由设计单位确定, 并应在图样上注明。用于易燃以及毒性程度为中度危害介质工况的锻件应选用 II 级或更高级别。

5.5 螺柱和螺母

5.5.1 螺柱用钢的标准、使用状态及许用应力按表 5-4 的规定。

表 5-2 钢管许用应力

钢 号	钢管标准	壁厚 mm	常温强度指标		在下列温度（℃）下的许用应力值，MPa								注
			R_m , MPa	R_{eL} , MPa	≤20	100	150	200	250	300	350		
碳素钢管													
Q235A	GB/T 3091 GB/T 3092	≤10	335	215	140	126	120	112	—	—	—	—	
Q235B	GB/T 3091 GB/T 3092	≤10	375	235	140	126	120	112	—	—	—	—	
10	GB/T 8162 GB/T 8163	≤10	335	205	137	121	115	108	98	88	82		
20	GB/T 8162 GB/T 8163	≤10	390	245	163	147	140	131	117	108	98		
低合金钢管													
16Mn Q345	GB 6479 GB/T 8162, GB/T 8163	≤16	490	320	204	196	183	170	156	143	133		
高合金钢管													
钢 号	钢管标准	壁厚 mm	在下列温度（℃）下的许用应力值，MPa								注		
			≤20	100	150	200	250	300	350				
0Cr13	GB/T 14976	≤18	137	126	123	120	119	117	112				
0Cr18Ni9	GB 13296 GB/T 14976	≤13	137	137	137	130	122	114	111	a			
		≤18	137	114	103	96	90	85	82				

表 5-2 (续)

钢 号	钢管标准	壁厚 mm	常温强度指标		在下列温度（℃）下的许用应力值，MPa							注
			R_m , MPa	R_{eL} , MPa	≤ 20	100	150	200	250	300	350	
高合金钢管												
0Cr18Ni10Ti	GB 13296 GB/T 14976	≤ 13	—	—	137	137	137	130	122	114	111	a
		≤ 18	—	—	137	114	103	96	90	85	82	
0Cr17Ni12Mo2	GB 13296 GB/T 14976	≤ 13	—	—	137	137	137	134	125	118	113	a
		≤ 18	—	—	137	117	107	99	93	87	84	
0Cr18Ni12Mo2Ti	GB 13296 GB/T 14976	≤ 13	—	—	137	137	137	134	125	118	113	a
		≤ 18	—	—	137	117	107	99	93	87	84	
00Cr19Ni10	GB 13296 GB/T 14976	≤ 13	—	—	118	118	118	110	103	98	94	a
		≤ 18	—	—	118	97	87	81	76	73	69	
00Cr17Ni14Mo2	GB 13296 GB/T 14976	≤ 13	—	—	118	118	117	108	100	95	90	a
		≤ 18	—	—	118	97	87	80	74	70	67	
注：中间温度的许用应力可按本表的应力值用内插法求得。GB 13296 的钢管壁厚小于或等于 13mm、GB/T 14976 的钢管壁厚小于或等于 18mm。												
a 该行许用应力仅适用于允许产生微量永久变形之元件，对于法兰或其他有微量永久变形就引起泄漏或故障的场合不能采用。												

表 5-3 锻件许用应力

钢 号	锻件标准	公称厚度 mm	常温强度指标		在下列温度（℃）下的许用应力值，MPa								注
			R _m ，MPa	R _{eL} ，MPa	≤20	100	150	200	250	300	350		
碳素钢锻件													
20	JB 4726	≤200	390	215	143	130	121	111	101	91	85		
低合金钢锻件													
16Mn	JB 4726	≤300	450	275	183	163	157	144	137	124	117		
高合金钢锻件													
钢 号	锻件标准	公称厚度 mm	在下列温度（℃）下的许用应力值，MPa										注
			≤20	100	150	200	250	300	350				
0Cr13	JB 4728	≤100	137	126	123	120	119	117	117	112			
0Cr18Ni9	JB 4728	≤200	137	137	137	130	122	114	114	111	a		
			137	114	103	96	90	85	82				
0Cr18Ni10Ti	JB 4728	≤200	137	137	137	130	122	114	114	111	a		
			137	114	103	96	90	85	82				
0Cr17Ni12Mo2	JB 4728	≤200	137	137	137	134	125	118	118	113	a		
			137	117	107	99	93	87	84				
00Cr19Ni10	JB 4728	≤200	117	117	117	110	103	98	98	94	a		
			117	97	87	81	76	73	69				
00Cr17Ni14Mo2	JB 4728	≤200	117	117	117	108	100	95	95	90	a		
			117	97	87	80	74	70	67				
00Cr18Ni5Mo3Si2	JB 4728	≤100	197	197	178	163	156	153	153	—			
注：中间温度的许用应力可按本表的应力值用内插法求得。													
a 该行许用应力仅适用于允许产生微量永久变形之元件，对于法兰或其他有微量永久变形就引起泄漏或故障的场合不能采用。													

表 5-4 螺栓柱许用应力

钢 号	钢材标准	使用状态	螺栓规格 mm	常温强度指标		在下列温度（℃）下的许用应力值，MPa							注
				R _m , MPa	R _{eL} , MPa	≤20	100	150	200	250	300	350	
碳素钢螺栓													
Q235A	GB/T 700	热 轧	≤M20	375	235	87	78	74	69	62	56	—	
35	GB/T 699	正 火	≤M20	530	315	117	105	98	91	82	74	69	
			M24 ~ M27	510	295	118	106	100	92	84	76	70	
低合金钢螺栓													
40MnB	GB/T 3077	调 质	≤M22	805	685	196	176	171	165	162	154	143	
30CrMoA	GB/T 3077	调 质	M24 ~ M36	765	635	212	189	183	180	176	167	154	
			≤M22	700	550	157	141	137	134	131	129	124	
35CrMoA	GB/T 3077	调 质	M24 ~ M48	660	500	167	150	145	142	140	137	132	
			≤M22	835	735	210	190	185	179	176	174	165	
			M24 ~ M48	805	685	228	206	199	196	193	189	180	
高合金钢螺栓													
钢 号	钢材标准	使用状态	螺栓规格 mm	在下列温度（℃）下的许用应力值，MPa									注
				≤20	100	150	200	250	300	350			
2Cr13	GB/T 1220	调 质	≤M22	126	117	111	106	103	100	97			
0Cr18Ni9	GB/T 1220	固 溶	M24 ~ M27	147	137	130	123	120	117	113			
			≤M22	129	107	97	90	84	79	77			
0Cr18Ni10Ti	GB/T 1220	固 溶	M24 ~ M48	137	114	103	96	90	85	82			
			≤M22	129	107	97	90	84	79	77			
0Cr17Ni12Mo2	GB/T 1220	固 溶	M24 ~ M48	137	114	103	96	90	85	82			
			≤M22	129	109	101	93	87	82	79			
			M24 ~ M48	137	117	107	99	93	87	84			

注：中间温度的许用应力可按本表的应力值用内插法求得。

注: 中间温度的许用应力可按本表的应力值用内插法求得。

5.5.2 与各螺柱用钢组合使用的螺母用钢的标准、使用状态及许用应力可按表 5-5 选用。

表 5-5 螺母用钢

螺 柱 用 钢			螺 母 用 钢			
钢 号	钢材标准	使用状态	钢 号	钢材标准	使用状态	使用温度，℃
Q235A	GB/T 700	热轧	Q215A、Q235A	GB/T 700	热轧	> - 20 ~ 300
35	GB/T 699	正火	Q235A	GB/T 700	热轧	> - 20 ~ 300
			20，25	GB/T 699	正火	> - 20 ~ 350
40MnB	GB/T 3077	调质	35，45，40Mn	GB/T 699	正火	> - 20 ~ 350
30CrMoA	GB/T 3077	调质	45，40Mn	GB/T 699	正火	> - 20 ~ 350
			30CrMoA	GB/T 3077	调质	> - 20 ~ 350
35CrMoA	GB/T 3077	调质	45，40Mn	GB/T 699	正火	> - 20 ~ 350
			30CrMoA，35CrMoA	GB/T 3077	调质	> - 20 ~ 350
2Cr13	GB/T 3077	调质	1Cr13，2Cr13	GB/T 1220	调质	> - 20 ~ 350
0Cr18Ni9	GB/T 1220	固溶	1Cr13	GB/T 1220	退火	> - 20 ~ 350
			0Cr18Ni9	GB/T 1220	固溶	~ 350
0Cr18Ni10Ti	GB/T 1220	固溶	0Cr18Ni10Ti	GB/T 1220	固溶	~ 350
0Cr17Ni12Mo2	GB/T 1220	固溶	0Cr17Ni12Mo2	GB/T 1220	固溶	~ 350

5.6 型钢

5.6.1 结构型钢按 GB/T 700 和 GB/T 1591 选用。

5.6.2 与容器相连的碳素钢和低合金钢结构型钢的许用应力按表 5-6 的规定。

表 5-6 碳素钢和低合金钢结构型钢的许用应力

钢号	钢材标准	钢材厚度（直径） mm	在常温下的许用应力，MPa	
			抗拉、抗压和抗弯	抗剪
Q235A.F	GB/T 700	≤ 16	150	88
Q235A		>16 ~ 40	137	84
Q235B				
Q235C	GB/T 700	≤ 16	167	98
		>16 ~ 40	152	93
Q345	GB/T 1591	≤ 16	235	142
		>16 ~ 25	225	137

5.7 焊接材料

5.7.1 常压容器用焊接材料应符合下列标准：

GB/T 983、GB/T 5117、GB/T 5118、GB/T 5293、GB/T 12470、GB/T 14957、JB/T 4747、YB/T 5092。

5.7.2 焊接材料质量证明书

5.7.2.1 焊接材料应有质量证明书。当无质量证明书或对质量证明书有疑问时，应对焊接材料进行复验。

5.7.2.2 焊接材料质量证明书应符合相应国家标准的规定和要求。

5.7.3 焊接材料的选用

5.7.3.1 常用的碳素钢、低合金钢之间相焊的焊接材料可按表 5-7 的规定选用。

表 5-7 常用的碳素钢、低合金钢之间相焊的焊接材料选用表

钢号	焊条电弧焊		埋 弧 焊			二氧化碳 气体保护焊 焊丝钢号	氩弧焊 焊丝钢号
	焊条型号	对应 牌号 示例	焊丝钢号	焊 剂			
				型 号	对应牌 号示例		
Q235A.F Q235A 10（管） 20（管）	E4303	J422	H08A H08MnA	HJ401-H08A	HJ431	H08MnSi	—
Q235B Q235C Q245R 20（锻）	E4316	J426	H08A H08MnA	HJ401-H08A	HJ431	H08MnSi	—
	E4315	J427					
16Mn Q345R	E5016	J506	H10MnSi H10Mn2	HJ401-H08A HJ402-H10Mn2 HJ404-H08MnA	HJ431 HJ350 SJ101	H08Mn2SiA	H10MnSi
	E5015	J507					
Q370R	E5515-G	J557	—	HJ404-H08MnA	SJ101	—	—

5.7.3.2 常用的高合金钢之间相焊的焊接材料可按表 5-8 的规定选用。

表 5-8 常用的高合金钢之间相焊的焊接材料选用表

钢号	焊条电弧焊		埋 弧 焊		氩弧焊 焊丝钢号
	焊条型号	焊条对应牌号示例	焊丝钢号	焊剂对应牌号示例	
0Cr18Ni9	E308-16	A102	H0Cr21Ni10	HJ260	H0Cr20Ni10
	E308-15	A107			
0Cr18Ni10Ti	E347-16	A132	H0Cr20Ni10Ti	HJ260	H0Cr20Ni10Ti
	E347-15	A137			
0Cr17Ni12Mo2	E316-16	A202	H0Cr19Ni12Mo2	HJ260	H0Cr19Ni12Mo2
	E316-15	A207			
0Cr18Ni12Mo2Ti	E316L-16	A022	H0Cr20Ni14Mo3	HJ260	H0Cr20Ni14Mo3
	E318-15	A212			
00Cr19Ni10	E308L-16	A002	H00Cr21Ni10	HJ260	H00Cr21Ni10
00Cr17Ni14Mo2	E316L-16	A022	—	—	—
0Cr13	E410-16	G202	—	—	—
	E410-15	G207			

5.7.3.3 常用的不同钢号之间相焊的焊接材料可按表 5-9 的规定选用。

表 5-9 不同钢号之间相焊的焊接材料选用表

被焊钢材类别	常用钢号	焊条电弧焊		埋 弧 焊		
		焊条型号	对应牌号示例	焊丝钢号	焊 剂	
					型号	对应牌号示例
碳素钢之间焊接	Q235A, Q235B, Q235C + 10（管）, Q245R	E4303	J422	H08A	HJ401-H08A	HJ431
		E4315	J427			
碳素钢与低合金钢之间焊接	Q235A, Q245R + 16Mn, Q345R Q370R	E4303	J422	H08A H08MnA	HJ401-H08A	HJ431
		E4315	J427			
		E5015	J507			
碳素钢与奥氏体不锈钢之间焊接	Q235B, Q235C, Q245R + 0Cr18Ni10Ti 0Cr18Ni9	E309-16	A302	H1Cr24Ni13	—	HJ260
		E309-15	A307			
		E309Mo-16	A312	—	—	—
低合金钢与奥氏体不锈钢之间焊接	16Mn, Q345R + 0Cr18Ni10Ti 0Cr18Ni9	E309-16	A302	H1Cr24Ni13	—	HJ260
		E309Mo-16	A312			

6 基本结构元件

6.1 内压圆筒和内压球壳

6.1.1 符号说明

- D_i ——圆筒或球壳内直径，mm；
- p_c ——计算压力，MPa；
- σ ——设计温度下圆筒或球壳的计算应力，MPa；
- $[\sigma]^t$ ——设计温度下材料许用应力，MPa；
- δ ——设计温度下圆筒或球壳的计算厚度，mm；
- δ_e ——圆筒或球壳的有效厚度，mm；
- ϕ ——焊接接头系数。

6.1.2 适用范围

本条适用于受内压和（或）液柱静压力作用下容器圆筒和球壳厚度的计算。

6.1.3 计算厚度

6.1.3.1 设计温度下圆筒的计算厚度按式（6-1）确定：

$$\delta = \frac{p_c D_i}{2[\sigma]^t \phi}$$

.....（6-1）

6.1.3.2 设计温度下球壳的计算厚度按式（6-2）确定：

$$\delta = \frac{p_c D_i}{4[\sigma]^t \phi} \dots\dots\dots (6-2)$$

6.1.4 计算应力

6.1.4.1 设计温度下圆筒计算应力按式(6-3)确定:

$$\sigma = \frac{p_c D_i}{2\delta_e} \dots\dots\dots (6-3)$$

6.1.4.2 设计温度下球壳计算应力按式(6-4)确定:

$$\sigma = \frac{p_c D_i}{4\delta_e} \dots\dots\dots (6-4)$$

6.1.4.3 σ 应满足式(6-5)的要求:

$$\sigma \leq \phi[\sigma]^t \dots\dots\dots (6-5)$$

6.2 外压圆筒和外压球壳

6.2.1 外压圆筒和外压球壳的计算

外压圆筒和外压球壳的计算按 GB 150—1998, 6.2 中的规定。

6.2.2 外压圆筒加强圈的设计

外压圆筒加强圈的设计按 GB 150—1998, 6.3 中的规定。

6.2.3 许用应力取值

材料的许用应力取值应按第 5 章的规定。

6.3 封头

6.3.1 符号说明

A ——球冠形封头或无折边锥形封头大端与圆筒连接处所需总承压面积, mm^2 ;

A' ——无折边锥形封头小端与圆筒连接处所需总承压面积, mm^2 ;

A_r ——封头与圆筒连接处实际需要增加的承压面积, mm^2 ;

D_{hi} ——凸形封头内直径或锥形封头大端内直径, mm ;

D_{his} ——锥形封头小端内直径, mm ;

D_{ho} ——锥形封头大端计算外直径, mm ;

D_{hos} ——锥形封头小端计算外直径, mm ;

D_i ——圆筒内直径, mm ;

h_i ——封头曲面深度, mm ;

L_h ——锥形封头轴向计算长度, mm ;

p_c ——计算压力, MPa ;

$[p]$ ——最大允许工作压力, MPa ;

Q ——球冠形封头或无折边锥形封头大端与圆筒连接处总的环向力, N ;

Q' ——无折边锥形封头小端与圆筒连接处总的环向力, N ;

R_{hi} ——凸形封头球面部分的内半径, mm ;

- r —— 碟形封头过渡区转角处的内半径, mm;
 T_1 —— 球冠形封头或无折边锥形封头大端处单位环向长度上的经向内力, N/mm;
 T_1' —— 无折边锥形封头小端处单位环向长度上的经向内力, N/mm;
 T_2 —— 球冠形封头或无折边锥形封头大端处单位经向长度上的环向内力, N/mm;
 T_2' —— 无折边锥形封头小端处单位经向长度上的环向内力, N/mm;
 T_{2s} —— 球冠形封头或无折边锥形封头大端与圆筒连接处圆筒母线上单位长度的环向内力, N/mm;
 T_{2s}' —— 无折边锥形封头小端与圆筒连接处圆筒母线上单位长度的环向内力, N/mm;
 W_c —— 球冠形封头或无折边锥形封头大端与圆筒连接处圆筒上的有效宽度, mm;
 W_c' —— 无折边锥形封头小端与圆筒连接处圆筒上的有效宽度, mm;
 W_h —— 无折边锥形封头大端连接处封头上的有效宽度, mm;
 W_h' —— 无折边锥形封头小端连接处封头上的有效宽度, mm;
 α —— 对无折边锥形封头为锥壳半顶角, 对球冠形封头为连接处球壳切线与圆筒壁的夹角, ($^\circ$);
 δ_c —— 圆筒有效厚度, mm;
 δ_{es} —— 球冠形封头或无折边锥形封头大端与圆筒连接处圆筒上的有效厚度, mm;
 δ_{es}' —— 无折边锥形封头小端与圆筒连接处圆筒上的有效厚度, mm;
 δ_h —— 封头计算厚度, mm;
 δ_{he} —— 封头有效厚度或无折边锥形封头大端与圆筒连接处封头的有效厚度, mm;
 δ_{he}' —— 无折边锥形封头小端与圆筒连接处封头的有效厚度, mm;
 δ_{hn} —— 封头名义厚度, mm;
 δ_n —— 圆筒名义厚度, mm;
 δ_r —— 连接处加强圈的厚度, mm;
 $[\sigma]^t$ —— 设计温度下材料许用应力, MPa;
 ϕ —— 焊接接头系数。

6.3.2 适用范围

本条规定了凸形封头(椭圆形封头、碟形封头、球冠形封头)和无折边锥形封头等的设计, 如图 6-1、图 6-3 所示。折边锥形封头及带法兰的凸形封头按 GB 150—1998, 7.2 和 7.6 中的规定。

6.3.3 凸形封头

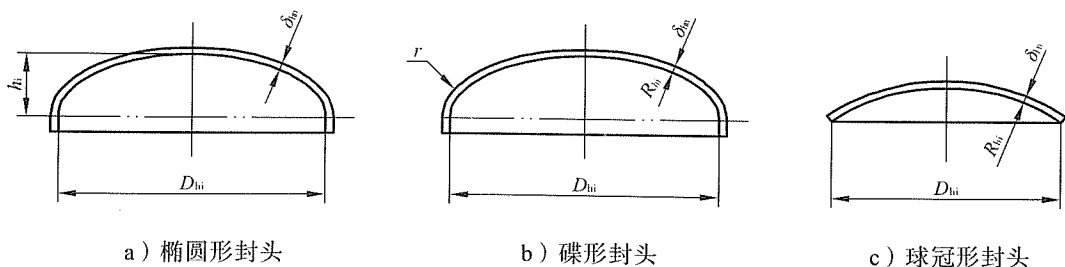


图 6-1 椭圆形封头、碟形封头和球冠形封头

6.3.3.1 椭圆形封头

推荐采用长短轴比值为 2 的标准椭圆形封头。

6.3.3.1.1 受内压（凹面受压）椭圆形封头计算厚度按式（6-6）确定：

$$\delta_h = \frac{K p_c D_{hi}}{2[\sigma]^t \phi} \dots\dots\dots (6-6)$$

式中：

K —— 椭圆形封头形状系数，其值见表 6-1，也可按式（6-7）确定：

$$K = \frac{1}{6} \left[2 + \left(\frac{D_{hi}}{2h_i} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (6-7)$$

标准椭圆形封头 $K = 1$ 。

表 6-1 系数 K 值

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

$K \leq 1$ 的标准椭圆形封头的有效厚度应不小于封头内直径的 0.15%， $K > 1$ 的椭圆形封头的有效厚度应不小于封头内直径的 0.30%。但当确定封头厚度时已考虑了内压下的弹性失稳问题，可不受此限制。

6.3.3.1.2 椭圆形封头的最大允许工作压力按式（6-8）确定：

$$[p] = \frac{2[\sigma]^t \phi \delta_{he}}{K D_{hi}} \dots\dots\dots (6-8)$$

6.3.3.1.3 受外压（凸面受压）椭圆形封头的厚度计算按 GB 150—1998，7.1.2.2 中的规定。

6.3.3.2 碟形封头

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

6.3.3.2.1 受内压（凹面受压）碟形封头计算厚度按式（6-9）确定：

$$\delta_h = \frac{M p_c R_{hi}}{2[\sigma]^t \phi} \dots\dots\dots (6-9)$$

式中：

M —— 碟形封头形状系数，其值见表 6-2，也可按式（6-10）确定：

$$M = \frac{1}{4} \left[3 + \sqrt{\frac{R_{hi}}{r}} \right] \dots\dots\dots (6-10)$$

表 6-2 系数 M 值

R_{hi}/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18
R_{hi}/r	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50	7.00
M	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39	1.41
R_{hi}/r	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	—	—	—
M	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	—	—	—

$M \leq 1.34$ 的碟形封头，其有效厚度应不小于封头内直径的 0.15%， $M > 1.34$ 的碟形封头，其有效厚度应不小于封头内直径的 0.30%。但当确定封头厚度时已考虑了内压下的弹性失稳问题，可不受此限制。

6.3.3.2.2 受内压（凹面受压）碟形封头的许用压力按式（6-11）确定：

$$[p] = \frac{2[\sigma]^t \phi \delta_{he}}{MR_{hi}} \dots\dots\dots (6-11)$$

6.3.3.2.3 受外压（凸面受压）碟形封头的厚度计算按 GB 150—1998，7.1.3.2 中的规定。

6.3.3.3 球冠形封头

球冠形封头可用作端封头，也可用作容器两独立室的中间封头，其结构形式如图 6-2 所示。

6.3.3.3.1 球冠形封头的最小厚度应不小于与其连接的圆筒的最小厚度。封头与圆筒连接处的设计见 6.3.5。

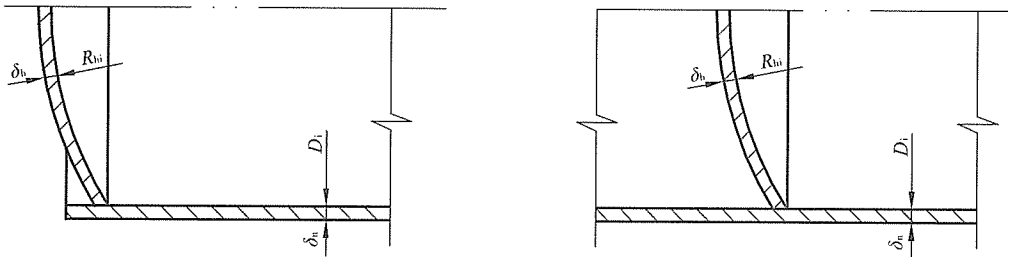


图 6-2 球冠形封头与圆筒连接

6.3.3.3.2 受内压（凹面受压）球冠形封头计算厚度按式（6-12）确定：

$$\delta_h = \frac{p_c D_i}{2[\sigma]^t \phi} \dots\dots\dots (6-12)$$

6.3.3.3.3 受外压（凸面受压）球冠形封头计算厚度取下列三者中的最大值：

- a) 圆筒的最小厚度；
- b) 按 GB 150—1998，6.2.2 中确定的厚度；
- c) 按式（6-12）确定的厚度。

6.3.3.3.4 球冠形封头用作两独立器室的中间封头时，按一侧受压，或两侧同时受压的工况，以

其可能出现的最苛刻工况的受力组合计算封头厚度。

6.3.4 无折边锥形封头 (锥壳半顶角 $\alpha < 60^\circ$ 的轴对称无折边锥形封头, 如图 6-3 所示)

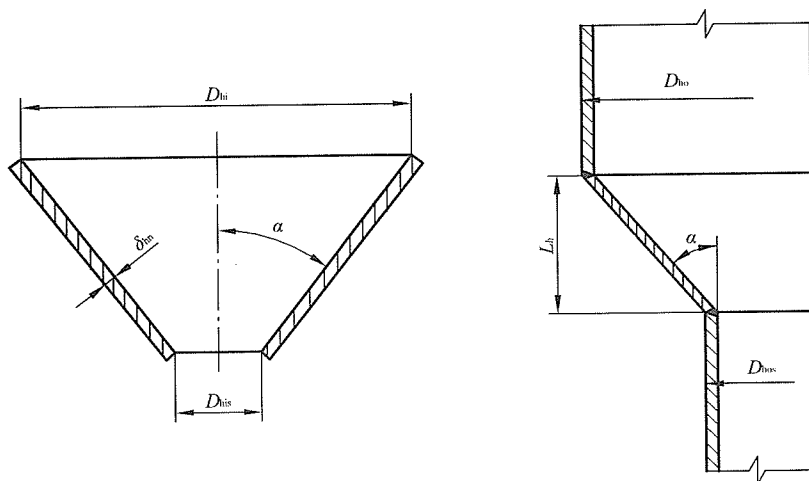


图 6-3 无折边锥形封头

6.3.4.1 无折边锥形封头的最小厚度不小于与其相连接的大端圆筒的最小厚度, 封头与圆筒连接处的结构设计见 6.3.5。

6.3.4.2 受内压的无折边锥形封头计算厚度按式 (6-13) 确定:

$$\delta_h = \frac{p_c D_{hi}}{2[\sigma]^t \phi \cos \alpha} \cdot \frac{1}{\cos \alpha} \quad \dots\dots\dots (6-13)$$

6.3.4.3 受外压的无折边锥形封头的有效厚度按 GB 150—1998, 7.2.5.2 中的规定。

6.3.5 封头与圆筒连接处的设计

6.3.5.1 球冠形封头、无折边锥形封头与圆筒连接处的设计如图 6-4 所示, 且封头、圆筒自身的拼接采用对接焊接。封头与圆筒连接处的焊接接头应采用全焊透结构。

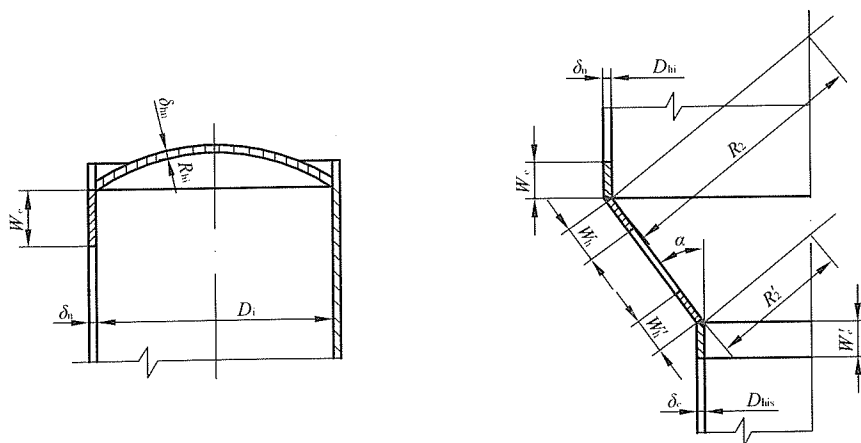


图 6-4 球冠形封头、无折边锥形封头与圆筒的连接

6.3.5.2 封头与圆筒连接处单位内力的计算

6.3.5.2.1 圆筒上单位长度的环向内力按式(6-14)、式(6-15)确定:

- a) 与球冠形封头连接或与无折边锥形封头大端连接的圆筒母线上单位长度的环向内力按式(6-14)确定:

$$T_{2s} = \frac{1}{2} D_{hi} p_c \quad \dots\dots\dots (6-14)$$

- b) 与无折边锥形封头小端连接的圆筒母线上单位长度的环向内力按式(6-15)确定:

$$T'_{2s} = \frac{1}{2} D_{his} p_c \quad \dots\dots\dots (6-15)$$

6.3.5.2.2 球冠形封头上单位长度的经向、环向内力按式(6-16)确定:

$$T_1 = T_2 = \frac{1}{2} R_{hi} p_c \quad \dots\dots\dots (6-16)$$

6.3.5.2.3 无折边锥形封头上单位长度的经向内力与环向内力按式(6-17)~式(6-20)确定:

- a) 无折边锥形封头大端处单位长度的经向内力与环向内力按式(6-17)、式(6-18)确定:

$$T_1 = \frac{p_c D_{hi}}{4 \cos \alpha} \quad \dots\dots\dots (6-17)$$

$$T_2 = \frac{p_c D_{hi}}{2 \cos \alpha} \quad \dots\dots\dots (6-18)$$

- b) 无折边锥形封头小端处单位长度的经向内力与环向内力按式(6-19)、式(6-20)确定:

$$T'_1 = \frac{p_c D_{his}}{4 \cos \alpha} \quad \dots\dots\dots (6-19)$$

$$T'_2 = \frac{p_c D_{his}}{2 \cos \alpha} \quad \dots\dots\dots (6-20)$$

注: T_1 、 T_2 、 T_{2s} 及 T'_1 、 T'_2 、 T'_{2s} 为正值表示拉力, 为负值表示压力。

6.3.5.3 封头与圆筒连接处的有效宽度

6.3.5.3.1 圆筒承受环向力的有效宽度按式(6-21)、式(6-22)确定:

- a) 球冠形封头或无折边锥形封头大端与圆筒连接处圆筒上的有效宽度按式(6-21)确定:

$$W_c = 0.6 \sqrt{0.5 D_{hi} \delta_{es}} \quad \dots\dots\dots (6-21)$$

- b) 无折边锥形封头小端与圆筒连接处圆筒上的有效宽度按式(6-22)确定:

$$W'_c = 0.6 \sqrt{0.5 D_{his} \delta'_{es}} \quad \dots\dots\dots (6-22)$$

6.3.5.3.2 封头承受环向力的有效宽度按式(6-23)~式(6-25)确定:

- a) 球冠形封头上的有效宽度按式(6-23)计算:

$$W_h = 0.6 \sqrt{R_{hi} \delta_{he}} \quad \dots\dots\dots (6-23)$$

- b) 无折边锥形封头大端连接处封头上的有效宽度按式(6-24)确定:

$$W_h = 0.6 \sqrt{R_2 \delta_{he}} \quad \dots\dots\dots (6-24)$$

- c) 无折边锥形封头小端连接处封头上的有效宽度按式(6-25)确定:

$$W'_h = 0.6\sqrt{R'_2\delta'_{he}} \quad \dots\dots\dots (6-25)$$

式中:

R_2, R'_2 ——锥形封头大端、小端与圆筒连接处沿锥壳法线至圆筒中心的距离(见图 6-4), mm。

R_2, R'_2 按式(6-26)、式(6-27)确定:

$$R_2 = \frac{D_{hi}}{2\cos\alpha} \quad \dots\dots\dots (6-26)$$

$$R'_2 = \frac{D_{his}}{2\cos\alpha} \quad \dots\dots\dots (6-27)$$

6.3.5.4 封头与圆筒连接处总环向力

封头与圆筒连接处总环向力按式(6-28)、式(6-29)确定:

a) 球冠形封头或无折边锥形封头大端与圆筒连接处总环向力按式(6-28)确定:

$$Q = T_2W_h + T_{2s}W_c - \frac{1}{2}T_2D_{hi}\sin\alpha \quad \dots\dots\dots (6-28)$$

b) 无折边锥形封头小端与圆筒连接处总环向力按式(6-29)确定:

$$Q' = T'_2W'_h + T'_{2s}W'_c - \frac{1}{2}T'_2D_{his}\sin\alpha \quad \dots\dots\dots (6-29)$$

6.3.5.5 封头与圆筒连接处所需的总承压面积

封头与圆筒连接处所需的总承压面积按式(6-30)~式(6-33)确定:

a) 当 $Q < 0$ 时(受压), 球冠形封头或无折边锥形封头大端与圆筒连接处所需的总承压面积按式(6-30)确定:

$$A = \frac{Q}{[\sigma]_{cr}^t} \quad \dots\dots\dots (6-30)$$

b) 当 $Q' < 0$ 时(受压), 无折边锥形封头小端与圆筒连接处所需的总承压面积按式(6-31)确定:

$$A' = \frac{Q'}{[\sigma]_{cr}^t} \quad \dots\dots\dots (6-31)$$

c) 当 $Q > 0$ 时(受拉), 球冠形封头或无折边锥形封头大端与圆筒连接处所需的总承压面积按式(6-32)确定:

$$A = \frac{Q}{[\sigma]^t\phi} \quad \dots\dots\dots (6-32)$$

d) 当 $Q' > 0$ 时(受拉), 无折边锥形封头小端与圆筒连接处所需的总承压面积按式(6-33)确定:

$$A' = \frac{Q'}{[\sigma]^t\phi} \quad \dots\dots\dots (6-33)$$

式中:

$[\sigma]_{cr}^t$ ——设计温度下材料的许用压缩应力, 对碳素钢和奥氏体不锈钢可按表 6-3 选取, MPa。

表 6-3 $[\sigma]_{cr}^l$ 值

设计温度 t , $^{\circ}\text{C}$	$t \leq 100$	$100 < t \leq 200$	$200 < t \leq 250$	$250 < t \leq 350$
$[\sigma]_{cr}^l$, MPa	103	100	95	80

6.3.5.6 封头与圆筒连接处实际需增加的承压面积

封头与圆筒连接处实际需增加的承压面积应满足式 (6-34) ~ 式 (6-36) 的要求:

- a) 球冠形封头或无折边锥形封头大端与圆筒连接处实际需增加的承压面积应满足式 (6-34) 的要求:

$$A_r \geq A - W_c \delta_{cs} - W_h \delta_{hc} \dots\dots\dots (6-34)$$

- b) 无折边锥形封头小端与圆筒连接处实际需增加的承压面积应满足式 (6-35) 的要求:

$$A_r \geq A' - W'_c \delta'_{cs} - W'_h \delta'_{hc} \dots\dots\dots (6-35)$$

- c) 当球冠形封头用作两独立受压室的中间封头时, 其与圆筒连接处实际需增加的承压面积应满足式 (6-36) 的要求:

$$A_r \geq A - 2W_c \delta_{cs} - W_h \delta_{hc} \dots\dots\dots (6-36)$$

6.3.5.7 受压封头与圆筒连接处的计算

当 $Q < 0$ (受压) 时, 封头与圆筒连接处的计算除应满足式 (6-34) 或式 (6-36) 实际需增加的承压面积要求外, 还应满足式 (6-37) 的要求:

$$W_h \sin \alpha \geq 0.0075 D_{hi} \dots\dots\dots (6-37)$$

6.3.5.8 封头与圆筒连接处加强圈

6.3.5.8.1 封头与圆筒连接处的计算如不能满足式 (6-34)、式 (6-35) 及式 (6-36) 的要求时, 应增加封头和圆筒的厚度, 或增设加强圈。

6.3.5.8.2 加强圈可采用扁钢、角钢、槽钢或其他组合型结构形式。

6.3.5.8.3 加强圈伸出圆筒外侧的水平宽度不宜超过 16 倍的加强圈厚度 δ_r , 且应尽量设置在靠近封头与圆筒的连接处, 如图 6-5 所示。

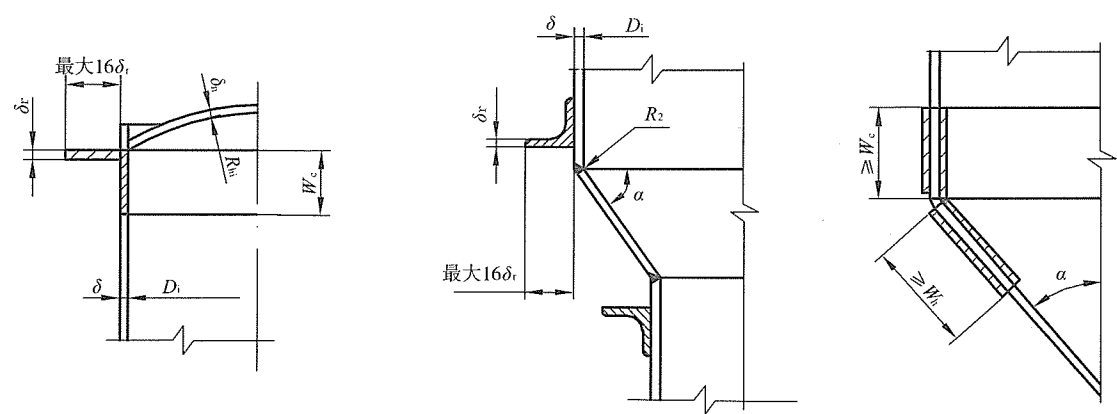


图 6-5 加强圈的设置

6.3.5.8.4 加强圈自身的连接应采用对接焊接接头型式,加强圈与圆筒的连接可采用连续角焊接头型式或断续角焊接头型式。当采用断续角焊接头型式时,每两段焊接接头间的未焊部分的长度不大于圆筒有效厚度的8倍,且焊接总长度不小于圆周长度的一半,焊脚高度为两相焊件中较薄件的厚度。

6.4 平盖

6.4.1 符号说明

- a ——非圆形平盖的短轴长度, mm;
 b ——非圆形平盖的长轴长度, mm;
 D_c ——平盖计算直径(见表6-4中简图), mm;
 D_i ——容器内直径, mm;
 K_p ——结构特征系数(查表6-4);
 L ——用角钢加强平盖两角钢之间距离, mm;
 L_G ——螺栓中心至垫片压紧力作用中心线的距离(见表6-4中简图), mm;
 L_p ——非圆形平盖螺栓中心连接周长, mm;
 p_c ——计算压力, MPa;
 $[\sigma]^t$ ——设计温度下材料许用应力(按第5章), MPa;
 r ——平盖的过渡区圆弧半径, mm;
 W ——预紧状态时或操作状态时的螺栓设计载荷(按6.6,取 W_a 或 W_p 较大值), N;
 Z_p ——非圆形平盖的形状系数, $Z_p=3.4-2.4a/b$, 且 $Z_p \leq 2.5$;
 Z_s ——加强筋与平盖组合截面实际截面系数, mm³;
 Z_x ——加强筋与平盖组合截面所需截面系数(按表6-4), mm³;
 δ ——壳体的计算厚度, mm;
 δ_1 ——加强筋的厚度, mm;
 δ_e ——壳体的有效厚度, mm;
 δ_p ——平盖计算厚度, mm;
 ϕ ——焊接接头系数。

6.4.2 适用范围

本条适用于受内压或外压的圆形和非圆形(椭圆形、长圆形、矩形及正方形等)的平盖设计。

本条不适用于放置在平基础上(作罐底用)的平盖。

6.4.3 平盖厚度

平盖与圆筒连接型式及其结构见表6-4。

6.4.3.1 对表6-4中序号为1和2所示平盖,其厚度可按表6-5选取。

6.4.3.2 对表6-4中序号为3~17所示平盖,圆形平盖厚度按式(6-38)计算:

$$\delta_p = D_c \sqrt{\frac{K_p p_c}{[\sigma]^t \phi}} \quad \text{..... (6-38)}$$

对表6-4中序号为3~16所示平盖,非圆形平盖厚度按式(6-39)计算:

$$\delta_p = a \sqrt{\frac{K_p Z_p p_c}{[\sigma]^t \phi}} \quad \text{..... (6-39)}$$

对表 6-4 中序号 17 所示非圆形平盖厚度按式 (6-40) 计算:

$$\delta_p = a \sqrt{\frac{K_p p_c}{[\sigma]^t \phi}}$$

..... (6-40)

其中 K_p 值见表 6-4。

6.4.3.3 对表 6-4 中序号为 17 所示平盖,计算时,应取其操作状态及预紧状态的 K_p 值代入式 (6-38) 或式 (6-40) 分别计算,取较大值,其中预紧状态的 $[\sigma]^t$ 取常温的许用应力。

6.4.4 加强筋设计:

- a) 加强筋可采用扁钢、角钢、槽钢等型钢;
- b) 加强筋采用扁钢时,扁钢的高与厚度之比应不大于 16;
- c) 表 6-4 中序号为 10~14 所示平盖,其加强筋也可在容器内部;
- d) 加强筋与平盖组合截面系数 Z_S 应不小于表 6-4 中规定计算出的所需截面系数 Z_X ,加强筋与平盖组合截面包括加强筋中心两侧各 $10\delta_p$ 范围;
- e) 加强筋与平盖的连接可采用连续或间断焊。当采用间断焊时,加强筋每侧间断焊接接头总长不小于加强筋长度的 1/2。

表 6-4 平盖结构图

序号	固定方法	简 图	系数 K_p		截面系数 Z_X, mm^3	备注
			圆形	非圆形		
1	与筒体角焊连接					适用范围: $p_c \leq 0.002 \text{MPa}$ $t \leq 200^\circ\text{C}$ $D_i \leq 2\,200 \text{mm}$ 见表 6-5
2	螺栓连接					适用范围: $p_c \leq 0.002 \text{MPa}$ $t \leq 200^\circ\text{C}$ $D_i \leq 2\,200 \text{mm}$ 螺栓数量应为 4 的整数倍 螺栓最大间距 220mm 见表 6-5

表 6-4 (续)

序号	固定方法	简 图	系数 K_p		截面系数 Z_x, mm^3	备注
			圆形	非圆形		
3	与筒体角焊连接		0.03		$\frac{0.01 p_c D_c^3}{[\sigma]^t}$	适用范围: $p_c \leq 0.07 \text{MPa}$ $D_1 = D_c/3$
4			0.03		$\frac{0.01 p_c D_c^3}{[\sigma]^t}$	适用范围: $p_c \leq 0.07 \text{MPa}$ $D_1 = D_c/3$
5			$0.44 \delta / \delta_c$ 且不小于 0.2	0.44		
6			$0.44 \delta / \delta_c$ 且不小于 0.2	0.44		
7	与筒体对焊连接		0.2			

表 6-4 (续)

序号	固定方法	简 图	系数 K_p		截面系数 Z_x, mm^3	备注
			圆形	非圆形		
8	与筒体对焊连接		0.03		$\frac{0.01 p_c D_c^3}{[\sigma]^t}$	$D_1 = D_c / 3$
9	与筒体角焊连接		$0.44 \delta / \delta_c$ 且不小 0.2	0.44		
10			0.132		$\frac{0.05 p_c D_c^3}{[\sigma]^t}$	
11			0.08		$\frac{0.041 p_c D_c^3}{[\sigma]^t}$	

表 6-4 (续)

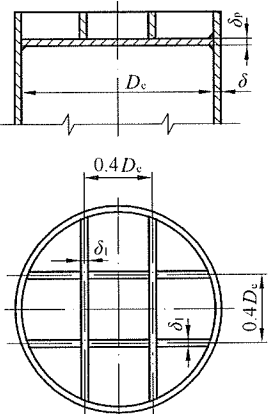
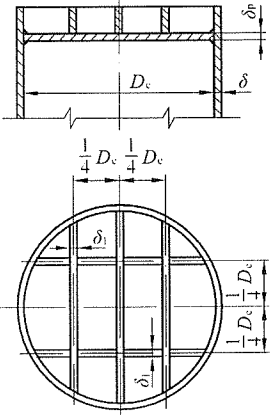
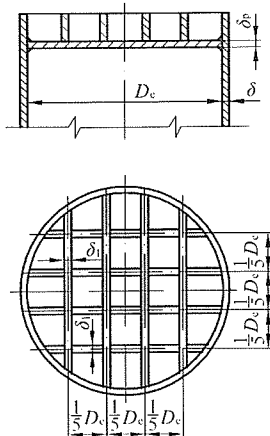
序号	固定方法	简 图	系数 K_p		截面系数 Z_x, mm	备注
			圆形	非圆形		
12	与筒体角焊连接		0.032		$\frac{0.019 p_c D_c^3}{[\sigma]^t}$	
13			0.018		$\frac{0.018 p_c D_c^3}{[\sigma]^t}$	
14			0.012		$\frac{0.014 p_c D_c^3}{[\sigma]^t}$	

表 6-4 (续)

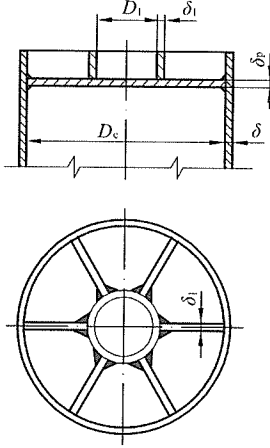
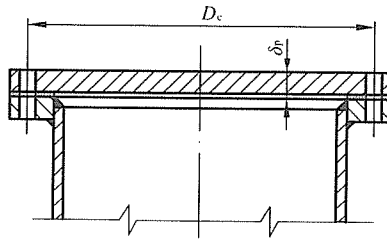
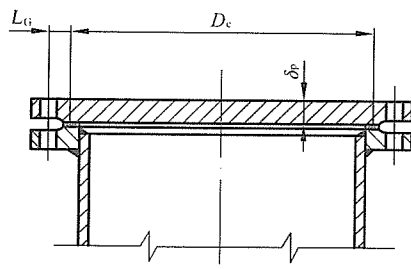
序号	固定方法	简 图	系数 K_p		截面系数 Z_x, mm	备注
			圆形	非圆形		
15	与筒体角焊连接		0.03		$\frac{0.01 p_c D_c^3}{[\sigma]^4}$	$D_1 = D_c/3$
16	螺栓连接		0.25	0.25		
17			操作时: $0.3 + \frac{1.78 W L_G}{p_c D_c^3}$ 预紧时: $\frac{1.78 W L_G}{p_c D_c^3}$	操作时: $0.3 Z_p + \frac{6 W L_G}{p_c L_p a^2}$ 预紧时: $\frac{6 W L_G}{p_c L_p a^2}$		

表 6-5 平盖厚度及加强角钢规格

容器 公称直径 mm	碳素钢及低合金钢				不 锈 钢			
	平盖厚度, mm		角钢规格 mm	间距 L mm	平盖厚度, mm		角钢规格 mm	间距 L mm
	序号 1 所示平盖	序号 2 所示平盖			序号 1 所示平盖	序号 2 所示平盖		
≤600	4	6	无		3	4	无	
700~1 100	5	6	无		3	4	无	
1 200	5	6	无		4	4	无	
1 400	6	6	无		4	4	无	
1 600~1 800	5	5	L 50×50×5	600	4	4	L 50×50×5	600
2 000	5	5	L 63×63×6	700	4	4	L 63×63×6	700
2 200	6	6	L 63×63×6	750	5	5	L 63×63×6	750
注: 碳素钢及低合金钢允许腐蚀裕量 1.5mm。								

6.5 开孔和开孔补强

6.5.1 符号说明

A —— 开孔削弱所需的补强截面积, mm^2 ;

B —— 补强有效宽度, mm;

C —— 厚度附加量, $C=C_1+C_2$, mm;

C_1 —— 钢板或接管厚度负偏差, mm;

C_2 —— 腐蚀裕量, mm;

D_i —— 圆筒内直径, mm;

D_o —— 平盖直径, mm;

d —— 开孔直径, 圆形孔取接管内直径加 2 倍厚度附加量, 即 $d = d_i + 2(C_2 + C_1)$; 椭圆形或长圆形孔取所考虑平面上的尺寸 (弦长, 包括厚度附加量), mm;

h_1 —— 接管外侧有效补强高度, mm;

h_2 —— 接管内侧有效补强高度, mm;

p_c —— 计算压力, MPa;

R_i —— 球壳内半径、椭圆形封头当量内球面半径或碟形封头内球面半径, mm;

$[\sigma]^t$ —— 设计温度下壳体的许用应力 (按第 5 章), MPa;

δ —— 壳体开孔处的计算厚度, mm;

δ_e —— 壳体开孔处的有效厚度, $\delta_e = \delta_n - C$, mm;

δ_{et} —— 接管有效厚度, $\delta_{et} = \delta_{nt} - C$, mm;

δ_n —— 壳体开孔处的名义厚度, mm;

δ_{nt} —— 接管名义厚度, mm;

δ_p —— 平盖的计算厚度, mm;

δ_t —— 接管的计算厚度, mm;

ϕ —— 焊接接头系数。

6.5.2 总则

本条规定了容器壳体的开孔及补强。

壳体上的开孔为圆形、椭圆形或长圆形。当开设椭圆形或长圆形孔时，孔的长径与短径之比不应大于 2.0。

6.5.3 适用的开孔范围

6.5.3.1 圆筒

当其内直径 $D_i \leq 1500\text{mm}$ 时，开孔最大直径 $d \leq 0.6D_i$ ，且 $d \leq 600\text{mm}$ ；
当其内直径 $D_i > 1500\text{mm}$ 时，开孔最大直径 $d \leq 0.4D_i$ ，且 $d \leq 1200\text{mm}$ 。

6.5.3.2 凸形封头或球壳

凸形封头或球壳的开孔最大直径 $d \leq 0.6D_i$ 。

6.5.3.3 锥壳（或锥形封头）

锥壳（或锥形封头）的开孔最大直径 $d \leq 0.4D_i$ ， D_i 为开孔中心处的锥壳内直径。

6.5.3.4 椭圆形或碟形封头过渡部分

在椭圆形或碟形封头过渡部分开孔时，其孔的中心线宜垂直于封头表面。

6.5.4 不另行补强的最大开孔直径

壳体开孔满足下列全部要求时，可不考虑补强：

- a) 两相邻开孔中心的间距（曲面间距以弧长计算）应不小于两孔直径之和的 2 倍；
- b) 接管公称直径 $DN \leq 100\text{mm}$ ；
- c) 接管最小壁厚满足表 6-6 的要求。

表 6-6 接管最小壁厚 mm

接管公称直径 DN	25	32	40	50	65	80	100
接管最小壁厚	3.5		4.0	5.0		6.0	
注：接管的腐蚀裕量为 1mm。							

6.5.5 开孔补强结构

壳体的开孔补强可按具体条件选用补强圈或厚壁管结构型式，其焊接接头可参见 GB 150。
补强圈的材料应与被开孔壳体的材料相同，且补强圈厚度一般不大于壳体厚度。

6.5.6 补强计算

通过开孔中心，且垂直于壳体表面的截面上所需的最小补强面积按下列要求确定。

6.5.6.1 内压容器：

6.5.6.1.1 圆筒和锥壳开孔削弱所需的补强截面积按式（6-41）计算：

$$A = d\delta \dots\dots\dots (6-41)$$

式中：

δ —— 圆筒或锥壳（或锥形封头）的计算厚度，分别按式（6-1）、式（6-13）计算，对锥壳以开孔中心处的内直径取代式（6-13）中的 D_{hi} 。

6.5.6.1.2 椭圆形或碟形封头开孔削弱所需的补强截面积按式（6-41）计算，式中 δ 按下列情况确

定:

a) 开孔位于以椭圆形封头中心为中心 80%封头内直径的范围时, δ 按式 (6-42) 计算:

$$\delta = \frac{p_c K_1 D_i}{2[\sigma]^t \phi} \quad \dots\dots\dots (6-42)$$

式中:

K_1 ——椭圆形长短轴比值决定的系数, 由 GB 150—1998 中表 7-2 查得。

b) 开孔位于碟形封头的球面部分时, δ 按式 (6-43) 计算:

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

c) 开孔位于 a)、b) 两条所述范围之外时, δ 按式 (6-6)、式 (6-9) 计算。

6.5.6.2 外压容器

外压容器开孔所需的补强截面积按式 (6-44) 计算:

$$A = 0.5d\delta \quad \dots\dots\dots (6-44)$$

式中:

δ ——按外压计算所得计算厚度, mm。

6.5.6.3 凡交替受内压和外压的容器, 开孔所需的补强截面积应分别按内压和外压计算, 取较大值。

6.5.6.4 平盖开孔补强的要求:

a) 平盖开孔直径 $d \leq \frac{1}{2} D_0$ (或加撑平盖当量直径的 1/2, 或非圆形平盖短轴长度的 1/2) 时,

所需的补强截面积按式 (6-45) 计算:

$$A = 0.5d\delta_p \quad \dots\dots\dots (6-45)$$

式 (6-45) 适用于外加补强元件的补强要求。

若采用增加平盖的厚度进行补强时, 则对螺栓连接的平盖, 将本章平盖厚度计算式中的 K_p 增大为 $2K_p$ 进行计算; 对其他形式的平盖, 应将相应厚度计算式中的 K_p 以 $2K_p$ 或者 0.75 两者中的较小值代入进行计算;

b) 平盖中心开孔直径 $d > \frac{1}{2} D_0$ 时, 按 GB 150—1998 的 8.9 进行设计。

6.5.7 有效补强范围及补强面积

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

6.5.7.1 有效补强范围:

a) 有效宽度 B 按式 (6-46) 计算:

$$B = 2d \quad \dots\dots\dots (6-46)$$

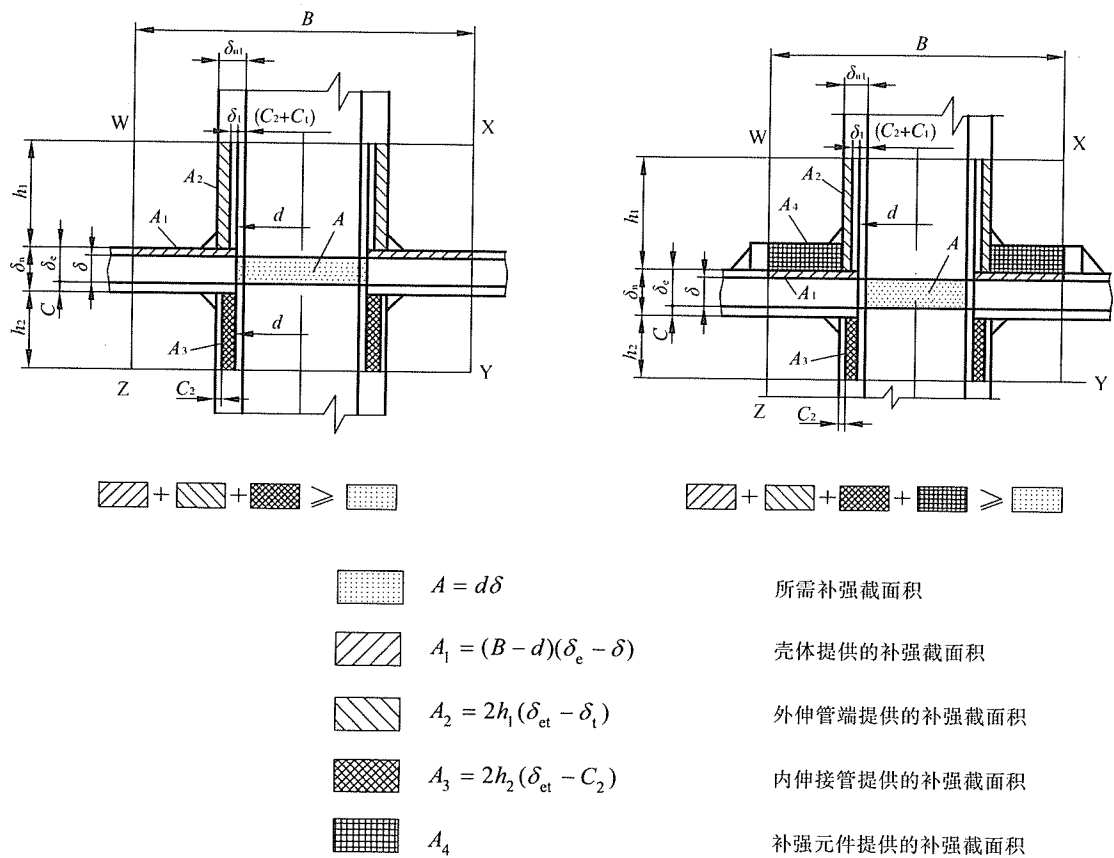


图 6-6 有效补强范围示意图

b) 有效高度按式 (6-47)、式 (6-48) 计算, 分别取式中较小值。

外侧高度:

$$h_1 = \begin{cases} \sqrt{d\delta_{nt}} \\ \text{接管实际外伸高度} \end{cases} \dots\dots\dots (6-47)$$

内侧高度:

$$h_2 = \begin{cases} \sqrt{d\delta_{nt}} \\ \text{接管实际内伸高度} \end{cases} \dots\dots\dots (6-48)$$

6.5.7.2 补强面积

在有效补强范围内, 可作为补强的截面积按式 (6-49) 计算:

$$A_e = A_1 + A_2 + A_3 \dots\dots\dots (6-49)$$

式中:

A_e —— 补强面积, mm^2 ;

A_1 —— 壳体有效厚度减去计算厚度之外的多余面积, 按式 (6-50) 计算, mm^2 ;

$$A_1 = (B - d)(\delta_e - \delta) \dots\dots\dots (6-50)$$

A_2 —— 外伸接管有效厚度减去计算厚度之外的多余面积, 按式 (6-51) 计算, mm^2 ;

$$A_2 = 2h_1(\delta_{et} - \delta_t) \dots\dots\dots (6-51)$$

A_3 —— 内伸接管有效厚度减去计算厚度之外的多余面积，按式 (6-52) 计算， mm^2 ；

$$A_3 = 2h_2(\delta_{et} - C_2) \dots\dots\dots (6-52)$$

若 $A_e \geq A$ ，则开孔不需另加补强；
若 $A_e < A$ ，则开孔需另加补强，其另加补强面积按式 (6-53) 计算：

$$A_4 \geq A - A_e \dots\dots\dots (6-53)$$

式中：

A_4 —— 有效补强范围内另加的补强面积 (见图 6-6)， mm^2 。

6.5.8 多个开孔补强

6.5.8.1 当任意两个相邻开孔的中心距小于两孔直径之和，而使其补强范围彼此重叠时 (见图 6-7)，则此两开孔应在两孔中心线的平面内按 6.5.8.2 进行补强计算，且应采用联合补强。联合补强的总面积，要求不小于各孔单独补强所需面积之和。两孔之间的补强面积至少应等于两孔所需总补强面积的 50%。在计算联合补强面积时，任意截面不得重复计入。孔中心在同一直线上的开孔，可按逐次配对的开孔处理。

6.5.8.2 当两个以上相邻开孔的中心距小于该两孔直径之和，且采用联合补强时 (见图 6-8)，则这些相邻开孔的中心距应至少等于其平均直径的 $1\frac{1}{3}$ 倍。任意相邻两孔之间的补强面积应至少等于该两孔所需总补强面积的 50%。

若任意两相邻开孔中心距小于其平均直径的 $1\frac{1}{3}$ 倍，则该两孔之间的任何金属均不得作补强，这些开孔必须按 6.5.8.3 的方法进行补强。

6.5.8.3 任何数量并以任何方式排列的相邻开孔，均可作为一个假想孔 (其直径包括所有靠近的开孔) 进行补强。假想孔的直径不得超过 6.5.3 的规定，所有接管金属均不得用作补强。

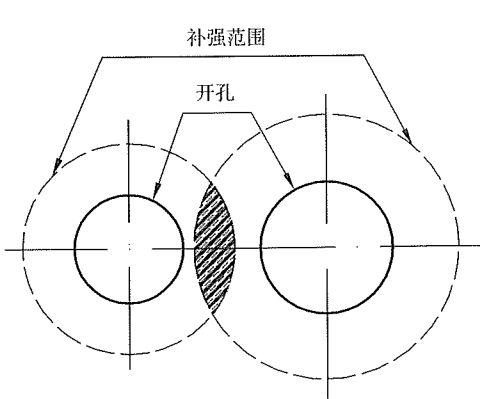


图 6-7 相邻开孔示意图

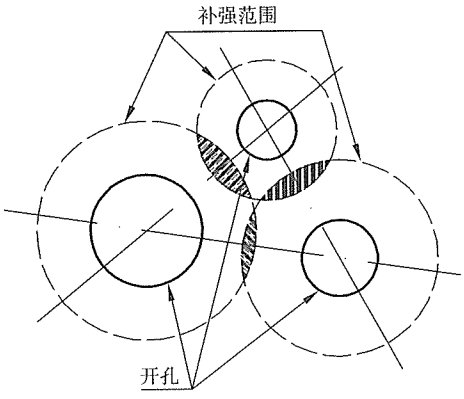


图 6-8 多个开孔示意图

6.6 矩形法兰

6.6.1 符号说明

A_a —— 预紧状态下，需要的单个螺栓最小截面积，以螺纹小径计算或以无螺纹部分的最小直径计算，取较小值， mm^2 ；

- A_b —— 单个螺栓实际使用截面积, 以螺纹小径计算或以无螺纹部分的最小直径计算, 取较小值, mm^2 ;
 A_m —— 需要的单个螺栓截面积, 取 A_a 与 A_p 两者的较大值, mm^2 ;
 A_p —— 操作状态下, 需要的单个螺栓最小截面积, 以螺纹小径计算或以无螺纹部分的最小直径计算, 取较小值, mm^2 ;
 b —— 预紧状态垫片有效密封宽度, mm ;
 $2b'$ —— 操作状态垫片有效密封宽度, mm ;
 b_o —— 预紧状态垫片基本密封宽度, $b_o = D - D_b$, mm ;
 D —— 短边截面垫片外侧距离或法兰外侧距离, 取两者的较小值, mm ;
 D_b —— 短边截面螺栓中心距, mm ;
 D_i —— 短边截面法兰内侧距离, mm ;
 d —— 螺栓公称直径, mm ;
 d_b —— 螺栓孔直径, mm ;
 F —— 作用于斜线阴影区 (见图 6-9 主视图) 流体压力引起的轴向力, $F = 0.5(D_b - d_b)L_F p_c$, N ;
 F_D —— 作用于横线阴影区 (见图 6-9 主视图) 法兰内截面部分的流体压力引起的轴向力,
 $F_D = 0.5D_i L_F p_c$, N ;
 F_G —— 预紧状态下, 单个螺栓需要的最小垫片压紧力, N ;
 F_p —— 操作状态下, 单个螺栓需要的最小垫片压紧力, N ;
 F_R —— 作用在螺栓中心外侧, 为平衡 F_D 、 F_p 、 F_T 产生的力矩所需的轴向力, N ;
 F_T —— F 与 F_D 之差, $F_T = F - F_D$, N ;
 L_A —— 螺栓中心至法兰背面焊缝的距离, mm ;
 L_D —— 螺栓中心至 F_D 作用位置处的距离, mm ;
 L_e —— 螺栓中心至法兰外侧的距离, mm ;
 L_F —— 相邻螺栓间距, mm ;
 $L_{F\max}$ —— 螺栓最大间距, mm ;
 L_p —— 螺栓中心至 F_p 作用位置处的距离, mm ;
 L_R —— 螺栓中心至 F_R 作用位置处的距离, mm ;
 L_T —— 螺栓中心至 F_T 作用位置处的距离, mm ;
 m —— 垫片系数, 由表 6-7 查得;
 M_o —— 法兰设计力矩, $\text{N} \cdot \text{mm}$;
 p_c —— 计算压力, MPa ;
 $[\sigma]_b$ —— 常温下螺栓材料的许用应力, MPa ;
 $[\sigma]_b^t$ —— 设计温度下螺栓材料的许用应力, MPa ;
 $[\sigma]_f^t$ —— 设计温度下法兰材料的许用应力, MPa ;
 W_a —— 预紧状态下, 需要的单个螺栓最小载荷, N ;
 W_p —— 操作状态下, 需要的单个螺栓最小载荷, N ;
 y —— 垫片比压力, 由表 6-7 查得, MPa ;
 δ_f —— 法兰有效厚度, mm 。

6.6.2 总则

6.6.2.1 本条规定了宽面矩形法兰的计算方法，如图 6-9 所示，对于螺栓连接的圆形法兰设计应按 GB 150 的规定。

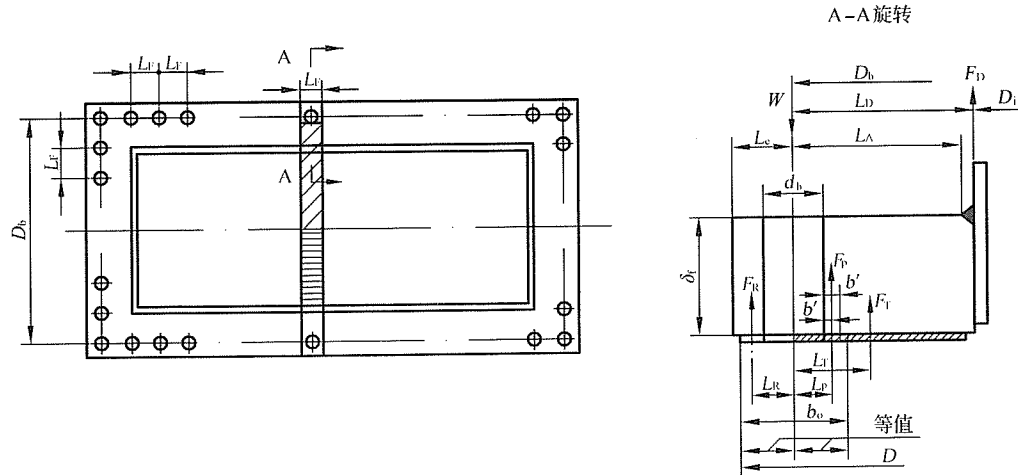


图 6-9 法兰结构型式

6.6.2.2 本条适用于承受流体静压力及垫片压紧力作用并符合下列条件的螺栓法兰连接设计：

- a) 长、短边比大于 2 的矩形宽面法兰（即垫片的接触面分布于螺栓孔中心内外两侧）；对于长、短边比小于 2 的矩形法兰，也可参照本方法计算；
- b) 密封面为光滑平面；
- c) 采用厚度不小于 1.5mm 的非金属软垫片。

6.6.2.3 螺栓法兰连接设计包括：

- a) 确定垫片材料及尺寸；
- b) 确定螺栓材料、规格及数量；
- c) 确定法兰材料及结构尺寸；
- d) 进行应力校核。

注：计算中所有尺寸均不包括腐蚀裕量。

6.6.3 垫片

6.6.3.1 常用软垫片的特性参数

常用软垫片的特性参数（ m ， y ）可由表 6-7 查取。

6.6.3.2 垫片有效密封宽度：

- a) 预紧状态垫片有效密封宽度按式（6-54）确定：

$$b = 4\sqrt{b_o} \dots\dots\dots (6-54)$$

- b) 操作状态垫片有效密封宽度（ $2b'$ ）应等于 5mm。

6.6.3.3 垫片压紧力：

- a) 预紧状态需要的最小垫片压紧力按式（6-55）计算：

$$F_G = L_F b y \dots\dots\dots (6-55)$$

b) 操作状态需要的最小垫片压紧力按式（6-56）计算：

$$F_p = 2b'L_Fmp_c \dots\dots\dots (6-56)$$

表 6-7 常用软垫片特性参数 *m*、*y*

垫 片 材 料			垫片系数 <i>m</i>	比压力 <i>y</i> MPa
合成橡胶板	肖氏 硬度	< 75	0.50	0
		≥ 75	1.00	1.4
石棉橡胶板、石棉板	厚度 mm	3	2.00	11
		1.5	2.75	25.5
内有棉纤维的橡胶板			1.25	2.8
植物纤维			1.75	7.6

6.6.4 螺栓

6.6.4.1 螺栓布置：

- a) 螺栓间距 *L_F* 及法兰结构尺寸 *L_A*、*L_e* 的最小值可按表 6-8 确定；
- b) 推荐的螺栓最大间距按式（6-57）计算：

$$L_{Fmax} = 3d_b + 2\delta_f \dots\dots\dots (6-57)$$

表 6-8 *L_F*、*L_A*、*L_e* 的最小值 mm

<i>d_b</i>	12	16	20	22	24	27	30	36
<i>L_F</i>	32	38	46	52	56	62	70	80
<i>L_e</i>	16	18	20	24	26	28	30	36
<i>L_A</i>	16	20	24	26	28	31	36	39

6.6.4.2 螺栓载荷：

- a) 预紧状态螺栓载荷按式（6-58）计算：

$$W_a = F_G = L_Fby \dots\dots\dots (6-58)$$

- b) 操作状态螺栓载荷按式（6-59）计算：

$$W_p = F + F_p + F_R \dots\dots\dots (6-59)$$

式中：

$$F_R = \frac{F_D L_D + F_p L_p + F_T L_T}{L_R} ;$$

$$L_R = 0.25(D - D_b + d_b) ;$$

$$L_p = 0.5(d_b + 2b');$$

$$L_T = 0.25(D_b - D_i + d_b + 2b')。$$

6.6.4.3 螺栓面积:

a) 预紧状态需要的最小螺栓面积按式(6-60)计算:

$$A_a = \frac{W_a}{[\sigma]_b} \dots\dots\dots (6-60)$$

b) 操作状态需要的最小螺栓面积按式(6-61)计算:

$$A_p = \frac{W_p}{[\sigma]_b^t} \dots\dots\dots (6-61)$$

c) 需要的螺栓面积 A_m 取 A_a 与 A_p 之大值;

d) 实际螺栓面积 A_b 应不小于需要的螺栓面积 A_m 。

6.6.5 法兰

6.6.5.1 法兰力矩按式(6-62)计算:

$$M_o = F_R L_R \dots\dots\dots (6-62)$$

6.6.5.2 法兰厚应按式(6-63)计算:

$$\delta_f = \sqrt{\frac{6M_o}{(L_F - d_b)[\sigma]_f^t}} \dots\dots\dots (6-63)$$

7 立式圆筒形容器

7.1 符号说明

A —— 组合截面的面积, $A = B \times T + \delta_1 \times L_{S1} + \delta \times L_S$, mm^2 ;

A_b —— 地脚螺栓截面积, 以螺栓小径计算, mm^2 ;

A_t —— 单根支腿的横截面面积, mm^2 ;

a —— 支座底板长度, mm ;

b —— 支座底板宽度, mm ;

c —— 支座盖板宽度, mm ;

d —— 支座中性轴与底板下表面交点至容器外壁的距离, mm ;

D_b —— 地脚螺栓的中心圆直径, mm ;

D_o —— 容器(圆筒)的外直径, mm ;

F —— 每个支耳上的载荷, N ;

F_H —— 容器的水平力, 是由风载荷和地震载荷而定, N ;

F_L —— 支柱的最大垂直反力, N ;

F_R —— 沿中性轴的载荷(见图 7-3), N ;

h —— 基础顶面至设备质心的高度或支耳筋板的高度, mm ;

- L_1 —— 基础板下表面到支腿装配焊缝中心的长度, mm;
 n —— 支腿的个数或带整体加强环耳式支座的支承点数;
 n_b —— 一个支腿的地脚螺栓个数;
 P_w —— 风载荷, N;
 R_{el} —— 支腿材料的屈服强度, MPa;
 W —— 垂直载荷, N, 取设备最大操作重量;
 α —— 筋板与底板的夹角, ($^\circ$);
 σ_{cl} —— 支腿作用在混凝土基础上压缩应力, MPa;
 σ_{cmax} —— 筋板的最大压缩应力, MPa;
 $[\sigma]$ —— 筋板、底板、支腿或刚性环材料的许用应力, MPa;
 $[\sigma]_a$ —— 盖板材料的许用弯曲应力, MPa;
 $[\sigma]_b$ —— 支腿、底板材料的许用弯曲应力, MPa;
 $[\sigma]_c$ —— 支腿、筋板材料的许用压缩应力, MPa;
 $[\sigma]^t$ —— 支腿设计温度下的许用应力, MPa;
 δ —— 支腿的水平反力, N;
 δ_a —— 支座盖板厚度, mm;
 δ_b —— 支座底板或基础环的厚度, mm;
 δ_g —— 筋板厚度, mm;
 λ —— 支腿的有效长细比;
 λ_c —— 支腿的极限长细比。

7.2 结构设计

7.2.1 球形(冠)封头、无折边锥形封头与筒体或法兰的连接角焊缝, 应采用全焊透结构。

7.2.2 容器法兰可按 JB/T 4701 ~ 4703 选用。

7.2.3 人孔、手孔和检查孔的设置: 需进行内部清理或制造安装以及检查、维修上有要求的容器, 应开设人孔或手孔、检查孔, 其设置位置应便于检查、清理, 对人孔还要考虑进出方便。碳素钢和低合金钢制人孔、手孔可按 HG 21514 ~ 21535 选用。不锈钢制人孔、手孔按 HG 21594 ~ 21604 选用。

7.2.4 接管及接管法兰: 接管的伸出长度宜根据管径、设备有无保温和工艺的要求确定, 接管是否需要加固应根据管径和接管伸出长度来确定。钢制管法兰、垫片、紧固件宜按 HG/T 20592 ~ 20635 选用。

7.2.5 支承分类

立式圆筒形容器的支承分为以下四种型式:

- 耳式支座, 分为不带整体加强环耳式支座和带整体加强环耳式支座两种型式;
- 支腿式支承;
- 支承式支承, 分为管式结构和板式结构两种型式;
- 裙式支承。

7.2.6 一般要求

7.2.6.1 各式支承由钢板或型材制成。

7.2.6.2 对操作温度较高的容器, 应设置特制的滑动支撑板, 其结构如图 7-1 所示。

7.2.6.3 所有支座宜优先按标准规定选用，超出标准范围支座的应参照标准的计算方法进行计算。

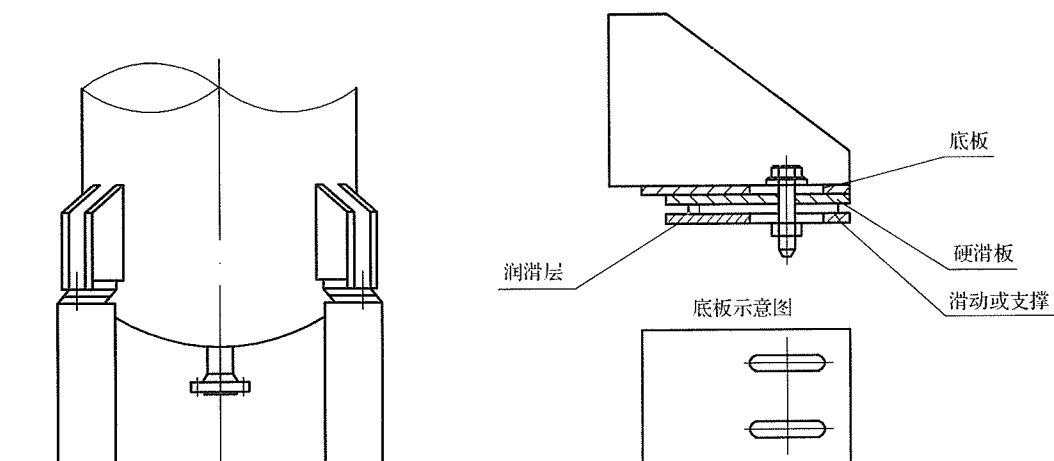


图 7-1 立式容器滑动支撑板结构

7.3 耳式支座

耳式支座宜优先按 JB/T 4712.3 选用。

7.3.1 不带整体加强环耳式支座

7.3.1.1 通则

不带整体加强环耳式支座一般由底板、筋板组成。为降低容器壳体的局部应力，以及考虑壳体的稳定，可采用加长筋板、增加盖板或设置垫板等加强措施。不带整体加强环耳式支座的结构如图 7-2 所示。

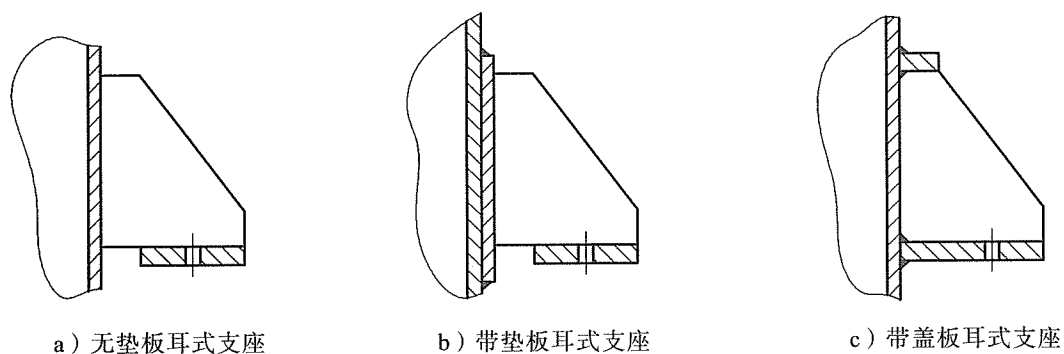


图 7-2 不带整体加强环耳式支座

7.3.1.2 一般容器采用 4 个耳式支座均布。对于仅承受静力载荷，直径小于或等于 700mm 的容器，可以采用 2 个耳式支座对称分布。对于大直径且重量较重的容器，应适当增加耳式支座的数量。

7.3.1.3 计算

先假定结构尺寸（见图 7-3），再按以下步骤进行核算：

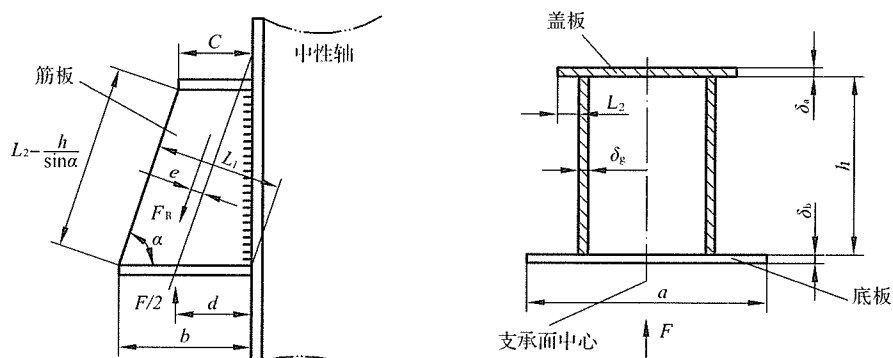


图 7-3 带盖板耳式支座受力分析

- a) 筋板的最大压缩应力按式 (7-1) 计算, 最大压缩应力应小于或等于筋板材料的许用压缩应力 $[\sigma]_c$, $[\sigma]_c$ 按式 (7-2) 计算。

$$\sigma_{c\max} = \frac{F_R}{L_1 \delta_g} + \frac{6eF_R}{L_1^2 \delta_g} \quad \dots\dots\dots (7-1)$$

式中:

$$L_1 = b \sin \alpha;$$

$$e = \left(d - \frac{b}{2} \right) \sin \alpha;$$

$$F_R = \frac{F}{2 \sin \alpha}。$$

$$[\sigma]_c = \frac{[\sigma]}{1 + \frac{(L_2/r)^2}{140[\sigma]}} \quad \dots\dots\dots (7-2)$$

式中:

$$r \text{ —— 筋板惯性半径, } r = \sqrt{\frac{I_{\min}}{A}} = 0.289 \delta_g, \text{ mm};$$

$$L_2 \text{ —— 筋板长度, } L_2 = \frac{h}{\sin \alpha}, \text{ mm};$$

$I_{\min}$ —— 最小惯性矩, mm^4 ;

A —— 筋板截面积, mm^2 。

- b) 底板的最大应力按式 (7-3) 计算, 最大应力应小于或等于底板材料的许用应力 $[\sigma]_b$ 。

$$\sigma_b = \frac{\beta F b}{a \delta_b^2} \quad \dots\dots\dots (7-3)$$

式中:

β ——由底板的长度 a 、宽度 b 决定的系数, 见表 7-1。

表 7-1 由底板的长度、宽度决定的系数 β

a/b	0.50	0.667	1.0	1.25	1.5	2.0	4.0
β	0.36	0.45	0.67	0.72	0.77	0.79	0.80

c) 盖板的最大应力按式 (7-4) 计算, 最大应力应小于或等于盖板材料的许用弯曲应力 $[\sigma]_a$ 。

$$\sigma_a = \frac{0.75Fda}{\delta_a c^2 h} \dots\dots\dots (7-4)$$

式中:

c ——最小值为 50mm, 最大值为 $8\delta_a$ 。

7.3.2 带整体加强环耳式支座

7.3.2.1 当耳式支座处圆筒壁内存在较高的局部应力或对圆筒壁变形有较严格要求, 而不宜采用垫板时, 可采用带整体加强环的耳式支座。

7.3.2.2 带整体加强环的耳式支座可设置 2、3、4、6、8 个支承点, 沿环周向均布, 如图 7-4 所示。

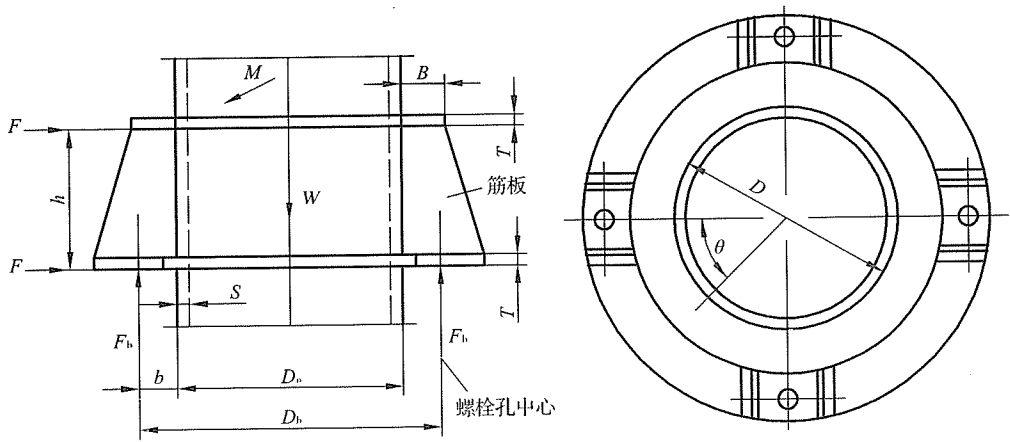


图 7-4 带整体加强环耳式支座的容器

7.3.2.3 强度计算。

7.3.2.3.1 组合截面的惯性矩计算:

假定刚性环的尺寸如图 7-5 所示。

圆筒壳体上有效加强宽度 L_s 按式 (7-5) 计算:

$$L_s = 1.1\sqrt{D_o\delta_e} \dots\dots\dots (7-5)$$

式中:

L_s ——圆筒壳体有效加强宽度, mm;

δ_e ——圆筒壳体的有效厚度, mm。

圆筒上带垫板的有效加强宽度 L_{s1} 按式 (7-6) 计算:

$$L_{s1} = 1.1\sqrt{D_{o1}\delta_{e1}} \dots\dots\dots (7-6)$$

式中:

L_{s1} ——圆筒上带垫板的有效加强宽度, mm;

D_{o1} ——垫板圆筒的外径, mm;

δ_{e1} ——垫板的有效厚度, mm。

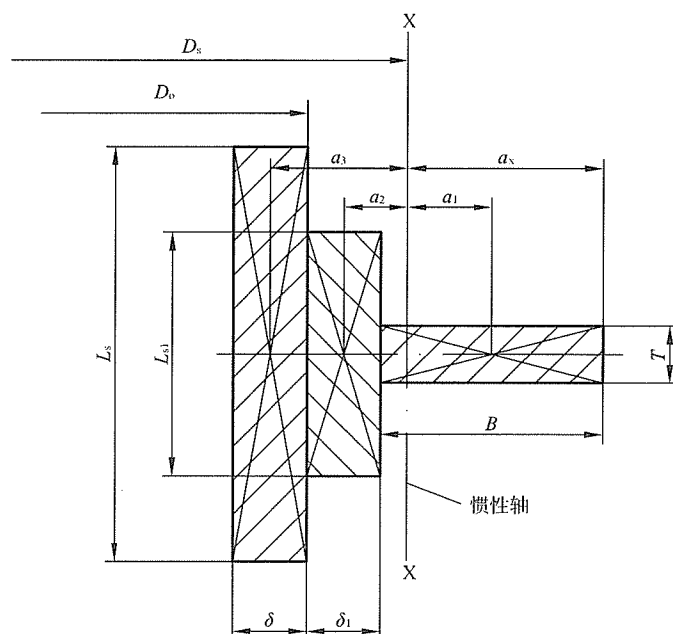


图 7-5 刚性环、垫板与壳体的组合截面

组合截面的惯性矩 I (mm⁴) 按式 (7-7) 计算:

$$I = \sum I_i = I_1 + I_2 + I_3 \quad \dots\dots\dots (7-7)$$

式中:

$$I_1 = \frac{1}{12} B^3 T + B T a_1^2;$$

$$I_2 = \frac{1}{12} \delta_1^3 L_{s1} + \delta_1 L_{s1} a_2^2;$$

$$I_3 = \frac{1}{12} \delta^3 L_s + \delta L_s a_3^2;$$

$$a_1 = a_x - \frac{1}{2} B;$$

$$a_2 = B + \frac{1}{2} \delta_1 - a_x;$$

$$a_3 = B + \delta_1 + \frac{1}{2} \delta - a_x。$$

式中:

B ——刚性环的宽度, mm;

T ——刚性环的厚度, mm;

δ_1 ——垫板的厚度, mm。

惯性轴直径 D_s , mm, 按式 (7-8) 计算:

$$D_s = D_o + 2(\delta_1 + B - a_x) \quad \dots\dots\dots (7-8)$$

组合截面的惯性轴 X-X 的位置:

$$a_x = \frac{(TB^2)/2 + \delta_1 L_{s1}(B + \delta_1/2) + \delta L_s(B + \delta_1 + \delta/2)}{BT + \delta_1 L_{s1} + \delta L_s} \quad \dots\dots\dots (7-9)$$

式中:

a_x —— 刚性环外缘至惯性轴的距离, mm。

7.3.2.3.2 计算支座处作用于刚性环上的力:

支座处作用于刚性环上的力 F , 按式 (7-10) 计算:

$$F = \frac{F_b b}{h} \quad \dots\dots\dots (7-10)$$

式中:

F_b —— 作用于一个支座上的力, N, 按式 (7-11) 计算:

$$F_b = \frac{4M}{nD_b} + \frac{W}{n} \quad \dots\dots\dots (7-11)$$

式中:

M —— 外载荷作用在容器上的力矩, N·mm;

D_b —— 支座与基础接触面中心的直径。当缺少此数据时,可按地脚螺栓中心圆直径来计算, mm。

计算刚性环组合断面上的内力、应力 (见图 7-6)。

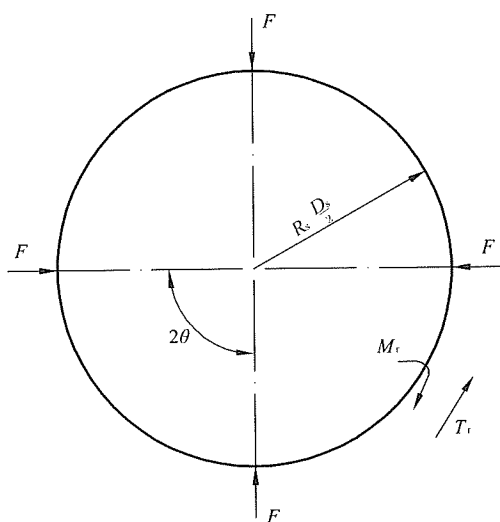


图 7-6 刚性环组合断面上的力和力矩

7.3.2.3.3 计算支座处和两支座中间处刚性环组合断面上的应力:

支座处:

内力矩 M_r , 按式 (7-12) 计算:

$$M_r = -\frac{1}{2}FR_s \left(\frac{1}{\theta} - \cot\theta \right) \quad \dots\dots\dots (7-12)$$

式中:

$\theta = \frac{\pi}{n}, \text{rad}。$

当支座数量 $n=4$ 时: $\theta = \frac{\pi}{4}。$

周向力 T_r , 按式 (7-13) 计算:

$$T_r = \frac{1}{2} F \cot \theta \dots\dots\dots (7-13)$$

应力 σ 按式 (7-14) 计算:

$$\sigma = \frac{|M_r| a_x}{I} + \frac{T_r}{A} \leq [\sigma] \dots\dots\dots (7-14)$$

两支座中间处:

内力矩 M_r , 按式 (7-15) 计算:

$$M_r = \frac{1}{2} F R_s \left(\frac{1}{\sin \theta} - \frac{1}{\theta} \right) \dots\dots\dots (7-15)$$

周向力 T_r , 按式 (7-16) 计算:

$$T_r = \frac{F}{2 \sin \theta} \dots\dots\dots (7-16)$$

应力 σ 按式 (7-17) 计算:

$$\sigma = \frac{|M_r| a_x}{I} + \frac{T_r}{A} \leq [\sigma] \dots\dots\dots (7-17)$$

7.4 支腿式支撑

7.4.1 通则

支腿由底板、支柱、盖板组成。必要时可增加加强板, 如图 7-7 所示。支柱通常由钢管或等边角钢制成, 也可以用槽钢或工字钢制成。支腿式支座宜优先按 JB/T 4712.2 选用, 超出标准范围的按照 7.4.4 计算。

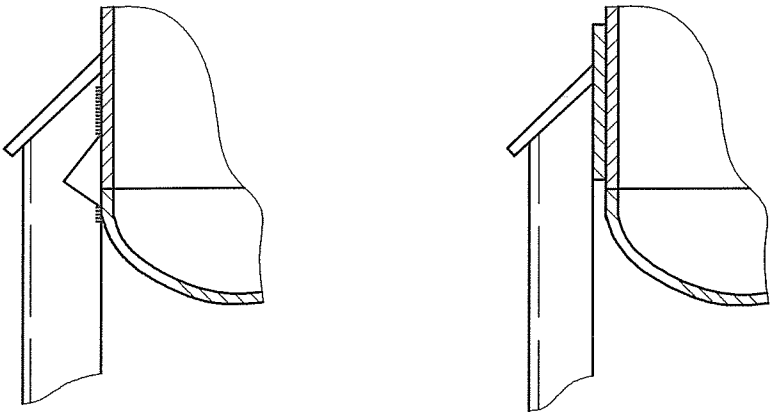


图 7-7 支腿

7.4.2 支腿

筒体直径小于或等于 1200mm 时,推荐用 3 个支腿,筒体直径大于 1200mm 时,推荐用 4 个支腿,筒体直径更大时可用 6~8 个支腿。支腿与器壁的贴合处,遇到容器的环向焊接接头时,应在支腿上切割缺口,避免与焊接接头相碰,在支腿顶部宜加焊盖板。

7.4.3 不宜采用支腿支撑的容器

支腿一般不适用下列条件的立式容器:

- a) 安装于非刚性基础上的容器;
- b) 通过管线直接与往复运转的机器刚性连接的容器。

7.4.4 强度计算

7.4.4.1 载荷

支腿受力图见图 7-8。

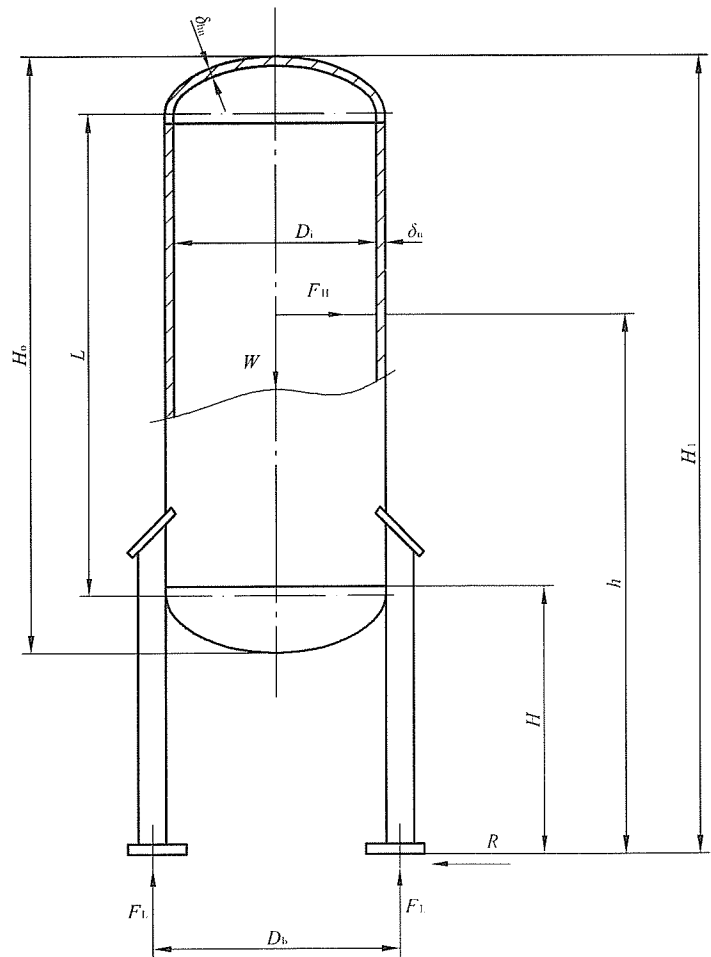


图 7-8 支腿受力图

支腿的水平反力 R 按式 (7-18) 计算:

$$R = \frac{F_H}{n} \dots\dots\dots (7-18)$$

支腿的最大垂直反力 F_L 按式 (7-19) 计算:

$$F_L = \pm \frac{4hF_H}{nD_b} - \frac{W}{n} \quad \dots\dots\dots (7-19)$$

7.4.4.2 支腿稳定及强度计算

假定支腿与壳体的连接为固接，支腿端部为自由端。单根支腿内产生的最大应力，发生在受压侧的支腿内。单根支腿的压缩应力 σ_c 按式(7-20)计算，压缩应力应小于或等于支腿的临界许用压缩应力 $[\sigma]_c$ 。

$$\sigma_c = \frac{F_L}{A_t} \quad \dots\dots\dots (7-20)$$

支腿的临界许用压缩应力 $[\sigma]_c$ ，MPa，由式(7-21)或式(7-22)求取。

当 $\lambda \leq \lambda_c$ 时：

$$[\sigma]_c = \frac{1.2 \left[1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^2 \right] R_{eL}}{n_s \eta} \quad \dots\dots\dots (7-21)$$

当 $\lambda > \lambda_c$ 时：

$$[\sigma]_c = \frac{0.227 R_{eL}}{\left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^2} \quad \dots\dots\dots (7-22)$$

式中：

λ —— 支腿的有效长细比， $\lambda = \frac{0.7H}{i}$ ；

n_s —— 由 λ 和 λ_c 决定的系数， $n_s = \frac{3}{2} + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^2$ ；

η —— 设备重要度系数，取 $\eta = 1$ ；

i —— 单根支腿截面的最小回转半径， $i = \sqrt{\frac{I}{A_t}}$ ，mm；

H —— 支承高度，mm；

I —— 单根支腿的最小截面惯性矩，mm⁴。

支腿的临界长细比 λ_c 按式(7-23)计算：

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6 R_{eL}}} \quad \dots\dots\dots (7-23)$$

式中：

E —— 材料的弹性模量，对于碳钢， $E = 2.1 \times 10^5$ MPa。

支腿的剪切应力 τ 按式(7-24)计算，剪切应力应小于或等于支腿的许用剪切应力 $[\tau]$ ， $[\tau] = 0.6[\sigma]^t$ 。

$$\tau = \frac{F_H}{nA_t} \quad \dots\dots\dots (7-24)$$

支腿的弯曲应力 σ_b 按式 (7-25) 计算, 弯曲应力应小于或等于支腿的许用弯曲应力 $[\sigma]_b$ 。

$$\sigma_b = \frac{RL_1 + F_L e}{Z_{\min}} \quad \dots\dots\dots (7-25)$$

式中:

$Z_{\min}$ —— 单根支腿的最小抗弯截面模量, mm^3 ;

e —— 壳体外径至支腿形心的距离, mm 。

支腿结构应满足式 (7-26) 要求:

$$\frac{\sigma_c}{[\sigma]_c} + \frac{\sigma_b}{[\sigma]_b} \leq 1 \quad \dots\dots\dots (7-26)$$

7.4.4.3 地脚螺栓的强度计算

地脚螺栓的拉应力 σ_{bt} 按式 (7-27) 计算, 当计算得的值小于 0 时, 其值为 0。拉应力应小于或等于地脚螺栓的许用拉应力 $[\sigma]_{bt}$, 对于碳钢常温下: $[\sigma]_{bt} = 147\text{MPa}$ 。

$$\sigma_{bt} = \frac{1}{n \cdot n_b \cdot A_{bt}} \left(\frac{4F_H h}{D_b} - W \right) \quad \dots\dots\dots (7-27)$$

式中:

A_{bt} —— 一个地脚螺栓的有效截面面积, $A_{bt} = \frac{\pi}{4} (d_1 - c_{bt} - \frac{0.866 \times t_b}{6})^2$, mm^2 ;

d_1 —— 地脚螺栓的内径, mm ;

c_{bt} —— 地脚螺栓腐蚀裕量, mm ;

t_b —— 地脚螺栓螺距, mm 。

地脚螺栓的剪切应力 τ_{bt} 按式 (7-28) 计算, 当计算得的值小于 0 时, 其值为 0。剪切应力应小于或等于地脚螺栓的许用剪切应力 $[\tau]_{bt}$, 对于碳钢常温下: $[\tau]_{bt} = 117.6\text{MPa}$ 。

$$\tau_{bt} = \frac{F_H - 0.4W}{n \cdot n_b \cdot A_{bt}} \quad \dots\dots\dots (7-28)$$

7.4.4.4 底板

支腿作用在混凝土基础上压缩应力 σ_{cl} 按式 (7-29) 计算, 压缩应力应小于或等于混凝土许用耐压应力 $[\sigma]_{cl}$ 。

$$\sigma_{cl} = \frac{F_L}{b_1 b_2} \quad \dots\dots\dots (7-29)$$

式中:

b_1 、 b_2 —— 底板的长和宽, mm 。

底板的厚度 δ_b 按式 (7-30) 计算:

$$\delta_b = B \sqrt{\frac{3R_{cl}}{[\sigma]}} + c_b \quad \dots\dots\dots (7-30)$$

式中:

B ——支柱到基础板边缘的最大长度, mm;

c_b ——底板腐蚀裕量, mm。

7.4.4.5 支腿装配焊缝的强度计算

支腿装配焊缝的剪切应力 τ_1 按式 (7-31) 计算:

$$\tau_1 = \frac{F_L}{A} \quad \dots\dots\dots (7-31)$$

式中:

A ——焊缝的横截面积, mm^2 。

支腿装配焊缝的弯曲应力 σ_f 按式 (7-32) 计算:

$$\sigma_f = \frac{RL_1}{Z} \quad \dots\dots\dots (7-32)$$

式中:

Z ——焊缝的抗弯截面模量, mm^3 。

支腿装配焊缝的当量应力 σ_z 按式 (7-33) 计算:

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_f^2 + 3\tau_1^2} \quad \dots\dots\dots (7-33)$$

支腿装配焊缝的抗弯、抗剪许用应力 $[B]$ 按式 (7-34) 计算:

$$[B] = 1.5[\sigma]^t \phi \quad \dots\dots\dots (7-34)$$

式中:

$[B]$ ——支腿装配焊缝的抗弯、抗剪许用应力, MPa;

ϕ ——焊缝系数。对于角焊缝受剪切时, $\phi=0.49$ 。

支腿装配焊缝的剪切应力 τ_1 应满足式 (7-35) 的要求:

$$\tau_1 \leq [B] \quad \dots\dots\dots (7-35)$$

支腿装配焊缝的弯曲应力 σ_f 应满足式 (7-36) 的要求:

$$\sigma_f \leq [B] \quad \dots\dots\dots (7-36)$$

支腿装配焊缝的当量应力 σ_z 应满足式 (7-37) 的要求:

$$\sigma_z \leq [B] \quad \dots\dots\dots (7-37)$$

7.5 支承式支座

支承式支座分为管式结构和板式结构两种型式, 分别见图 7-9 及图 7-10。支承式支座宜优先按 JB/T 4712.4 选用。

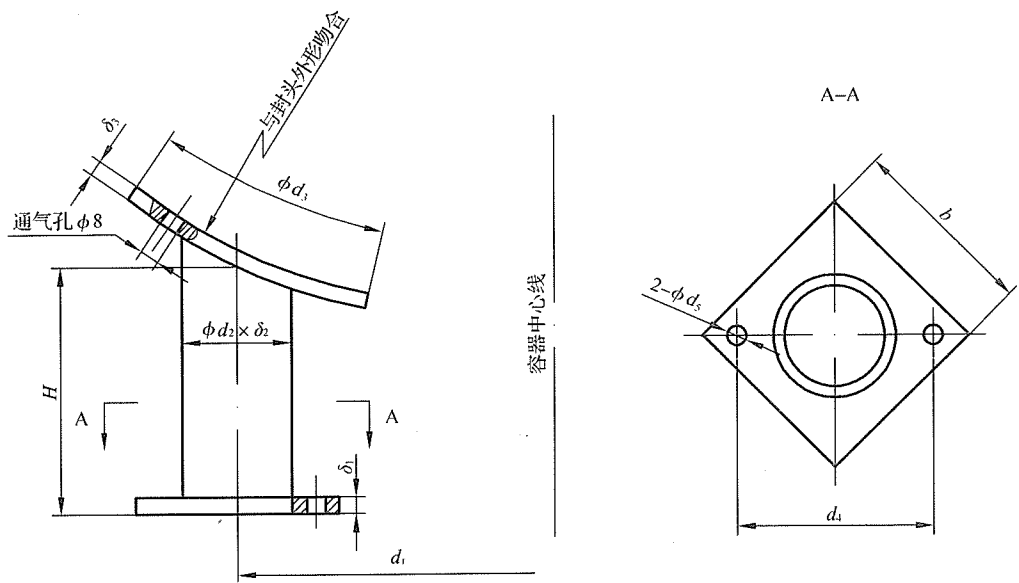


图 7-9 管式支座

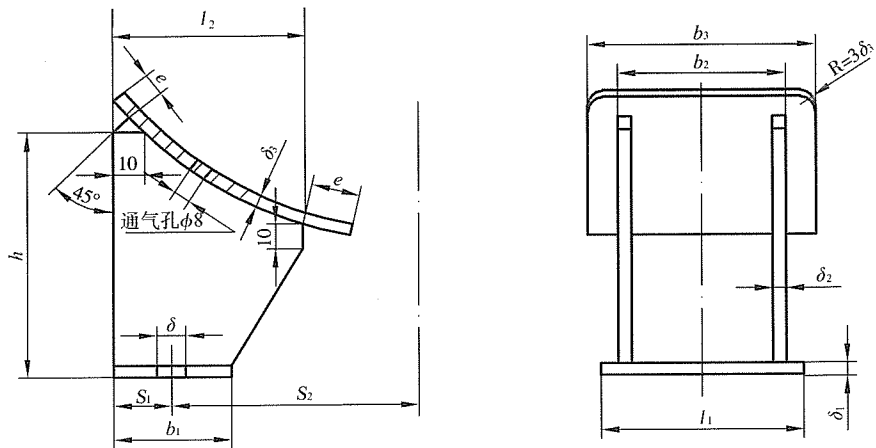


图 7-10 板式支座

7.6 裙式支承

裙式支承的设计计算可参照 JB/T 4710 进行。其结构、材料和选型还应符合以下规定：

7.6.1 裙座与容器连接处，可采用对接或搭接的形式。当对接时，宜使裙座壳的外径与下封头的外径相等，裙座筒体与容器封头的连接焊接接头应采用全焊透对接连续焊。当搭接时，应校核焊接接头的剪切力。搭接接头的角焊接头必须填满。

裙座筒体壁厚不得小于 3mm。

对接焊接接头形式及尺寸见图 7-11 所示，搭接焊接接头形式及尺寸见图 7-12 所示。

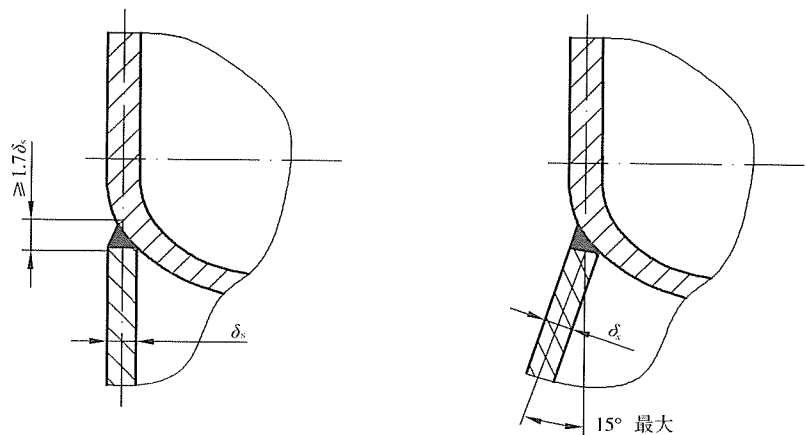


图 7-11 裙座和筒体的对接焊接接头

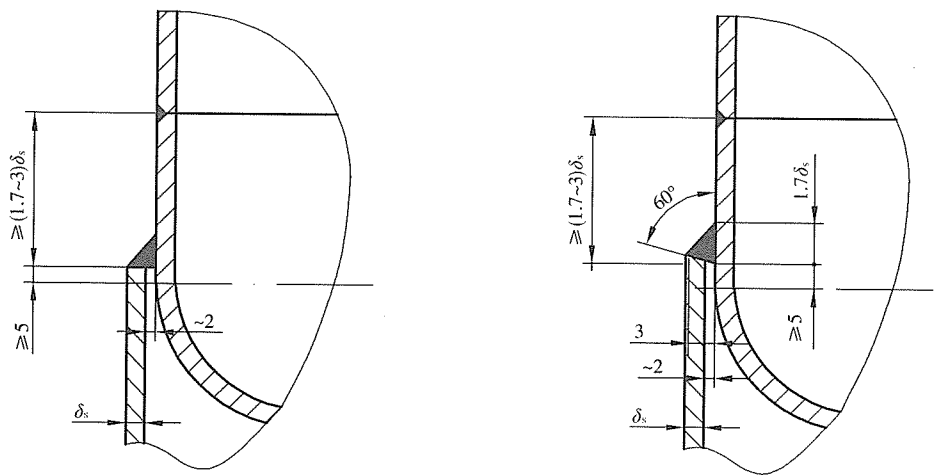


图 7-12 裙座和筒体的搭接焊接接头

7.6.2 立式容器裙座的材料当设计温度高于 0℃，低于 250℃时可以采用 Q235A.F，但其厚度不应大于 12mm。当设计温度高于 -20℃，低于 350℃时可以采用 Q235B。

7.6.3 当碳素钢裙座与合金钢、不锈钢的壳体相焊时，必须采用过渡段或其他消除异种钢焊接影响的措施。

7.6.4 裙座排气孔或排气管

当筒体与裙座不设保温（保冷、防火）层时，在距离裙座顶端 140mm 处应均匀开设 $\phi 80\text{mm}$ 的排气孔。

裙座内径小于或等于 1200mm 时，开设 2 个孔，当裙座内径大于 1200mm 时，开设 4 个孔。裙座上部开有避开封头拼接焊接接头的缺口时（其结构形式见图 7-13），可不开设排气口。裙座筒体尺寸按表 7-2 确定。

表 7-2 裙座筒体缺口尺寸 mm

封头名义厚度 δ_n	4 ~ 8	10 ~ 18	20 ~ 26
宽度 K	70	100	120
缺口半径 R	35	50	60

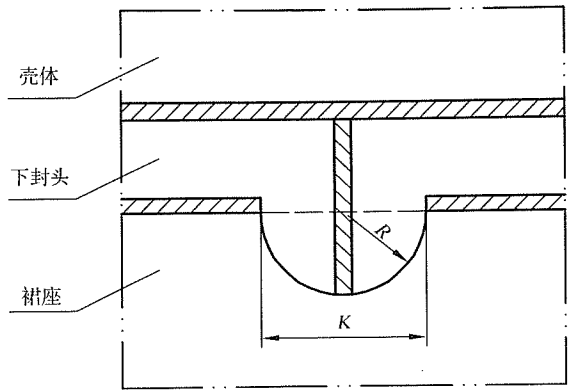


图 7-13 裙座筒体缺口形式

当筒体与裙座有保温（保冷、防火）层时，裙座上部应均匀设置 $\phi 89 \times 4 \text{mm}$ 排气管。裙座内径为 $600 \text{mm} \sim 1200 \text{mm}$ 时，设 2 个；裙座内径为 $1200 \text{mm} \sim 2400 \text{mm}$ 时，设 4 个；裙座内径大于 2400mm 时，设 6 个。

7.6.5 裙座圆筒底部一般设置 1 个排水孔，其结构尺寸如图 7-14 所示。

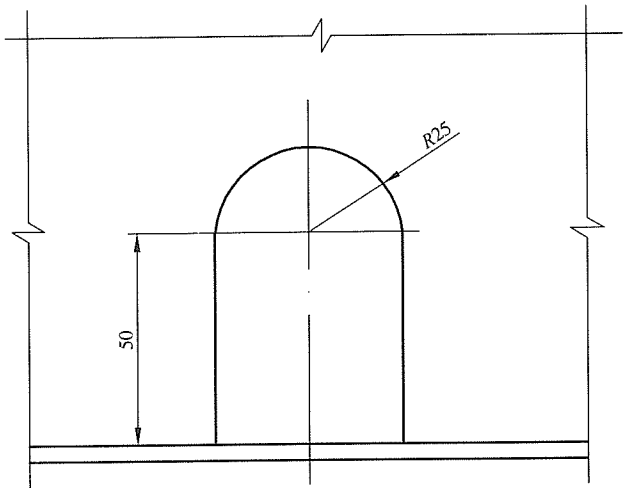


图 7-14 排水孔

7.6.6 立式容器在自身足够稳定的情况下，基础环和筋板的结构尺寸可按图 7-15 和表 7-3 选取。
基础环无筋板时，其厚度按式（7-38）计算：

$$\delta_b = 1.73b \sqrt{\frac{\sigma_{b\max}}{[\sigma]_b}} \dots\dots\dots (7-38)$$

基础环有筋板时，其厚度按式（7-39）计算：

$$\delta_b = \sqrt{\frac{6M_s}{[\sigma]_b}} \dots\dots\dots (7-39)$$

式中：
 $\sigma_{b\max}$ —— 混凝土基础上的最大压应力，按 JB/T 4710 中式（8-54）计算；

M_s —— 计算力矩, 取矩形板对 X、Y 轴的弯矩 M_x , M_y 绝对值较大者, M_x , M_y 按 JB/T 4710 中式 (8-56)、式 (8-57) 计算;
 $[\sigma]_b$ —— 基础环材料的许用应力, 对低碳钢取 $[\sigma]_b=147\text{MPa}$ 。

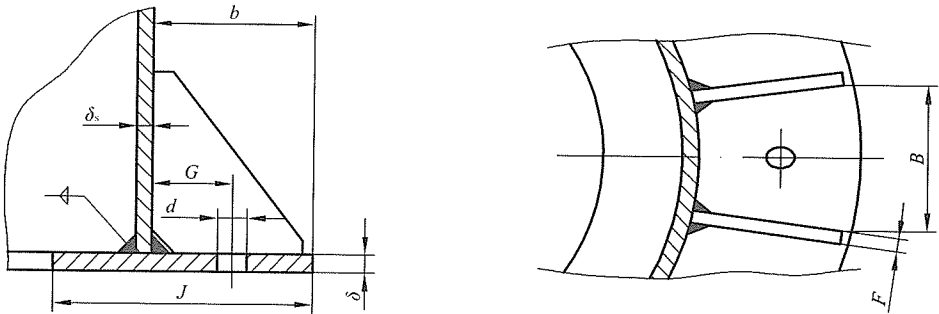


图 7-15 基础环和筋板结构

表 7-3 基础环和筋板尺寸 mm

螺栓直径	d	b	G	J	B	F
M16	20	60	35	120	80	6
M20	24	70	40	140	100	8
M24	28	90	50	180	120	10
M30	36	100	55	200	140	10

8 矩形容器

8.1 符号说明

- A 、 B —— 矩形板计算公式与图表中矩形边的一般符号, mm; 应用时视具体问题以 L 、 L_p 、 L_T 代替 A , 以 H 、 H_i 、 W 、 W_T 代替 B ;
- a —— F 型矩形容器拉杆水平间距, mm;
- b —— 扁钢宽度, mm;
- C —— 厚度附加量, $C=C_1+C_2$, mm;
- C_1 —— 钢板厚度负偏差, mm;
- C_2 —— 腐蚀裕量, mm;
- d —— C、E 型矩形容器圆钢拉杆直径, mm;
- d_i —— F 型矩形容器第 i 截面拉杆直径, mm;
- E^t —— 设计温度下材料的弹性模量, MPa;
- F_i —— D、E 型矩形容器第 i 截面加固圈单位长度上的载荷, N/mm;
- $[f]$ —— 壁板或顶板的许用挠度, mm;
- $f_{i,\max}$ —— D、E、G 型矩形容器第 i 层壁板最大挠度, mm;
- $f_{W,\max}$ 、 $f_{T,\max}$ —— 壁板、顶板最大挠度, mm;

- g —— 重力加速度, $g=9.81 \text{ m/s}^2$;
 H —— 容器高度, mm;
 H_c 、 L_c —— 顶边加固件承受储液压力的高度、宽度, mm; 应用时视具体问题以 H 、 h_1 代替 H_c , 以 L 、 L_p 代替 L_c ;
 H_i —— D、E、G 型矩形容器第 i 段加固圈、拉杆或联杆段间距, mm;
 h —— F 型矩形容器拉杆垂直间距, mm;
 h_i —— D、E、F、G 型矩形容器顶边与第 i 截面加固圈、拉杆或联杆距离, mm;
 i —— D、E、F、G 型矩形容器加固圈、拉杆或联杆的层序号, 从顶边以下分别为 1、2、3...
 $I_{c,i}$ —— D、E 型矩形容器第 i 截面加固圈所需惯性矩, mm^4 ;
 $I_{c,T}$ —— 顶边加固件所需惯性矩, mm^4 ;
 I_x —— G 型矩形容器顶部联杆组合截面惯性矩, mm^4 ;
 L —— 容器长度, mm; ($L \geq W$);
 L_b —— 底板支承梁间距, mm;
 $L_{b,\max}$ —— 底板支承梁最大允许间距, mm;
 L_p 、 $L_{p,\max}$ —— C、E、G 型矩形容器加固柱间距, 最大间距, mm;
 L_R —— 拉杆或联杆长度, mm;
 L_T 、 W_T —— 顶板加强筋沿 L 、 W 方向的间距, mm;
 M —— 加固柱承受的最大弯矩, $\text{N} \cdot \text{mm}$;
 p_a —— 顶板附加载荷, $p_a=1.2 \times 10^{-3} \text{ MPa}$;
 p_c —— 计算压力, MPa;
 W —— 容器宽度 ($W \leq L$), mm;
 Z_p —— C、E、G 型矩形容器加固柱所需截面系数, mm^3 ;
 $L_{T,L}$ 、 $W_{T,W}$ —— 顶板 L 方向、 W 方向加强筋所需截面系数, mm^3 ;
 Z_T —— 顶板加强筋所需截面系数, mm^3 ;
 Z_x —— G 型矩形容器顶部联杆组合截面所需截面系数, mm^3 ;
 Γ 、 Δ —— 矩形板的长边和短边, Γ 为 A 、 B 中的较大值, Δ 为 A 、 B 中的较小值, mm;
 α 、 β —— 系数, 见图 8-5、图 8-7、图 8-15;
 $[\sigma]_b$ —— 常温下型钢结构件材料的许用应力, MPa;
 $[\sigma]_{bt}$ —— 常温下拉杆或联杆抵抗液体静压对外推力的许用应力, MPa; 普通碳素钢取 55.6MPa;
 $[\sigma]^t$ —— 设计温度下矩形板材料的许用应力, MPa;
 $\sigma_{n,w}$ —— 拉杆或联杆自身重力引起的弯曲应力, MPa;
 $\sigma_{t,p}$ —— 拉杆或联杆液体静压引起的拉应力, MPa;
 $\sigma_{t,w}$ —— 拉杆或联杆自身重力引起的拉应力, MPa;
 $\sigma_{R,\max}$ —— 作用于拉杆或联杆的最大应力, MPa;
 δ_b 、 $\delta_{b,n}$ 、 $\delta_{b,e}$ —— 底板计算厚度, 名义厚度, 有效厚度, mm;
 δ_e —— 矩形容器壁板, 底板有效厚度, mm;
 δ_i 、 $\delta_{i,n}$ 、 $\delta_{i,e}$ —— D、E、F、G 型矩形容器第 i 层壁板计算厚度, 名义厚度, 有效厚度, mm;
 δ_{nb} —— G 型矩形容器扁钢联杆名义厚度, mm;
 δ_T 、 $\delta_{T,n}$ 、 $\delta_{T,e}$ —— 顶板计算厚度, 名义厚度, 有效厚度, mm;

δ_w 、 $\delta_{w,n}$ 、 $\delta_{w,e}$ ——壁板计算厚度，名义厚度，有效厚度，mm；
 η ——可选许用挠度的系数；
 ρ ——储液密度，kg/mm³， $\rho=1\times10^{-6}$ kg/mm³；
 ρ_M ——矩形板或加固件的材料密度，kg/mm³， $\rho_M=7.85\times10^{-6}$ kg/mm³。

8.2 结构设计

8.2.1 结构形式分类

矩形容器可采用不加固型（A型）、顶边加固型（B型）、垂直加固型（C型）、横向加固型（D型）、垂直和横向联合加固型（E型）、拉杆加固型（F型）及带双向水平联杆垂直加固型（G型）等七种结构形式，其分类说明按表 8-1。

表 8-1 矩形容器分类说明

类型	代号与名称	加固方式	尺寸范围与 选用原则	设计元 件
小型	A 型 不加固型	不加固	$V\leq 1\text{m}^3$ $0.3\leq H/L\leq 3$	顶板[可选]、底板、壁板
中型	B 型 顶边加固型	顶边加固	选用原则按 设计流程	同 A 型；顶边加固件
	C 型 垂直加固型	顶边加固 垂直加固		同 B 型；垂直加固件、拉杆[可选]
	D 型 横向加固型	顶边加固 横向加固		同 B 型；水平加固件
	E 型 垂直和横向联合 加固型	顶边加固 垂直加固 横向加固		同 A 型；垂直加固件、水平加固件
较大型	F 型 拉杆加固型	顶边加固 内部壁板由双向拉杆加固		同 A 型；拉杆
	G 型 带双向水平联杆垂直 加固型	顶边加固 内部垂直加固 内部水平双向联杆加固		同 B 型；垂直加固件，水平联杆

8.2.2 矩形容器板边连接形式及加固措施如图 8-1。对垂直加固的矩形容器，如采用[图 8-1 a)]的筋板加固时，此筋板应与加固柱对中。

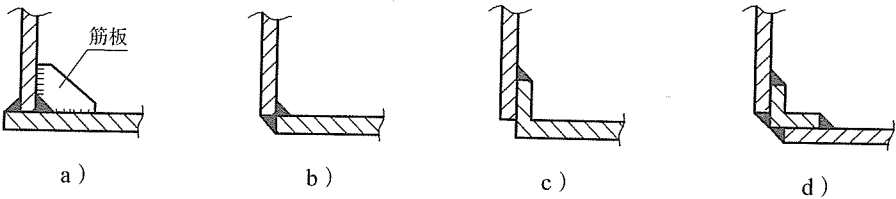


图 8-1 板边连接焊接接头

- 8.2.3 容器内部设置有分室隔板时，隔板应按壁板设计。
- 8.2.4 壁板及顶板加固件可用连续焊或间断焊，每侧间断焊接接头的总长不少于加固件长度的 1/2。
- 8.2.5 矩形容器可置于平面基础上，也可用型钢支撑（如图 8-16）。

8.3 设计控制方式

8.3.1 容器各元件的设计

矩形容器壁板、顶板需作强度设计以确定壁厚，并作刚度校核；容器底板作强度设计；加固件按相应的强度或刚度要求作截面设计。

8.3.2 许用应力和许用挠度

8.3.2.1 矩形容器壁板、顶板、底板钢板许用应力按 4.6 及 5.2.1 规定；加固件型材许用应力按 5.6 规定。

8.3.2.2 矩形容器壁板、顶板许用挠度按式 (8-1) 计算：

$$[f] = 5 \left(\frac{\delta_e}{2} + \sqrt{\frac{B}{A} \cdot \frac{A}{500}} \right) \quad \dots\dots\dots (8-1)$$

式中可选许用挠度系数 η ，根据矩形板短边与长边之比 Δ/L 由图 8-2 查取。

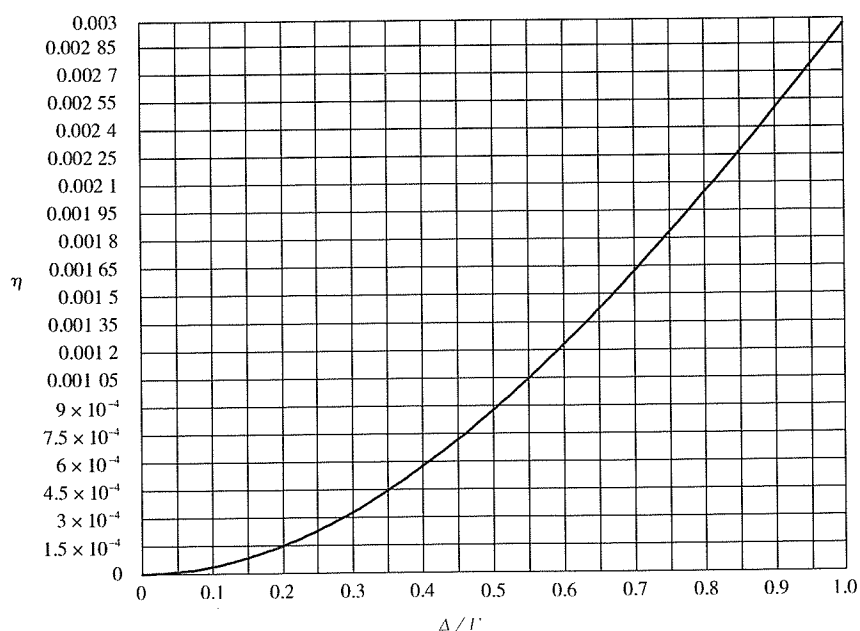


图 8-2 可选许用挠度系数 η

8.3.3 矩形容器的选型及设计可参照图 8-3 的设计流程进行。

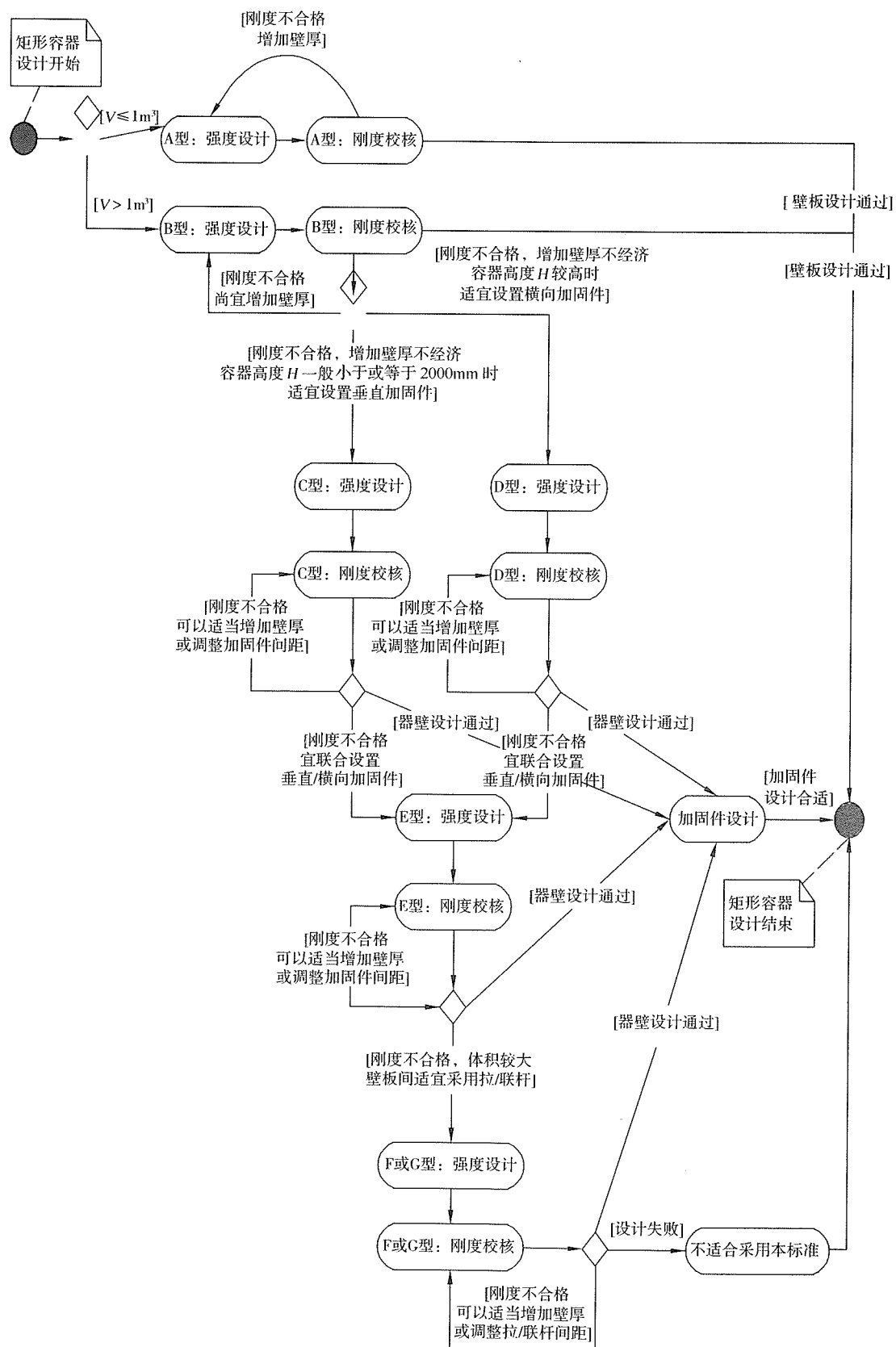


图 8-3 矩形容器设计流程

8.4 A型、B型、C型、D型设计中的统一公式

8.4.1 壁板计算厚度按式(8-2)计算:

$$\delta_w = 2.45 A \sqrt{\frac{\alpha p_c}{[\sigma]^t}} \quad \dots\dots\dots (8-2)$$

8.4.2 壁板最大挠度按式(8-3)计算:

$$f_{w,\max} = \frac{\beta A^4 p_c}{E^t \delta_{w,e}^3} \quad \dots\dots\dots (8-3)$$

8.4.3 壁板最大挠度应满足式(8-4)要求:

$$f_{w,\max} < [f] \quad \dots\dots\dots (8-4)$$

8.4.4 顶边加固件一般采用角钢,其规格不应小于 $\angle 50 \times 50 \times 5$ 。

顶边加固件所需惯性矩 $I_{c,T}$ 按式(8-5)计算,加固件实际的惯性矩应不小于 $I_{c,T}$:

$$I_{c,T} = \frac{0.217 \rho g H_c^2 L_c^3}{E^t} \quad \dots\dots\dots (8-5)$$

8.5 不加固型(A型)

8.5.1 结构

A型矩形容器体积不应大于 1m^3 ,结构形式如图8-4。

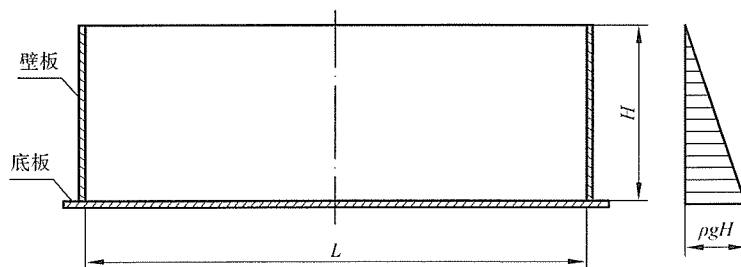


图 8-4 不加固型(A型)矩形容器

8.5.2 壁板

A型矩形容器壁板计算厚度按式(8-2)计算,壁板最大挠度按式(8-3)计算,壁板最大挠度校核按式(8-4)计算。式中各参数取值为:按图8-4, A 取为 L ; α 、 β 以 H/L 查图8-5; $[f]$ 按式(8-1),其中 Γ 为 L 、 H 中的较大值, A 为 L 、 H 中的较小值; p_c 按式(8-6)计算:

$$p_c = \rho g H \quad \dots\dots\dots (8-6)$$

8.6 顶边加固型(B型)

8.6.1 结构

B型矩形容器的顶边设置加固件,一般采用角钢,其规格不应小于 $\angle 50 \times 50 \times 5$,其结构如图8-6。

8.6.2 壁板

B 型矩形容器壁板计算厚度按式 (8-2) 计算, 壁板最大挠度按式 (8-3) 计算, 壁板最大挠度校核按式 (8-4)。式中各参数取值为: 如图 8-6, A 取为 L 、 B 取为 H ; α 、 β 以 B/A 查图 8-7; $[f]$ 按式 (8-1), 其中 Γ 为 L 、 H 中的较大值, Δ 为 L 、 H 中的较小值; p_c 按式 (8-6) 计算。

8.6.3 顶边加固件

B 型矩形容器顶边加固件所需惯性矩按式 (8-5) 计算。式中各参数取值为: 如图 8-6, H_c 取为 H , L_c 取为 L 。

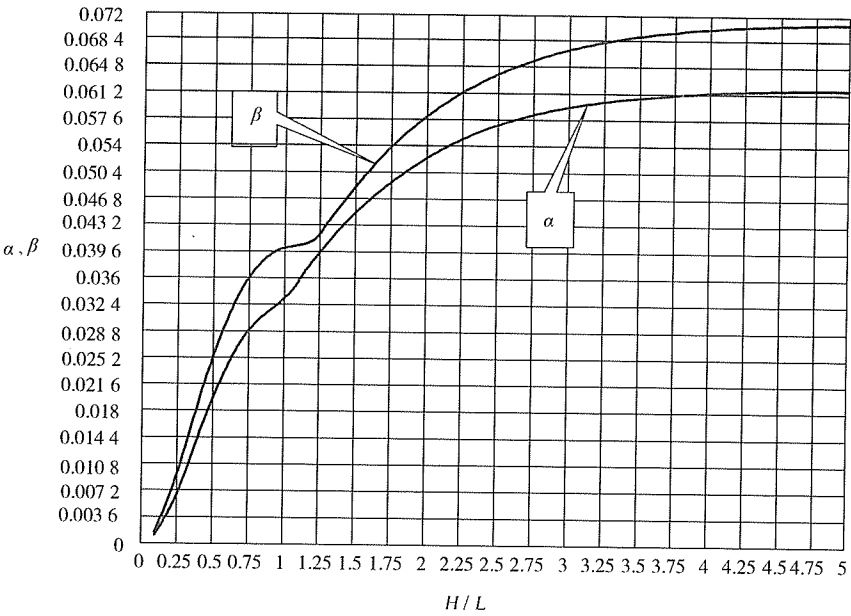


图 8-5 α 、 β 计算图 (三边简支顶边自由, 三角形载荷)

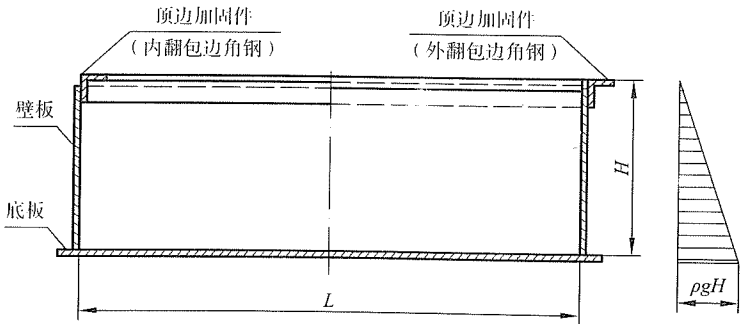


图 8-6 顶边加固型 (B 型) 矩形容器

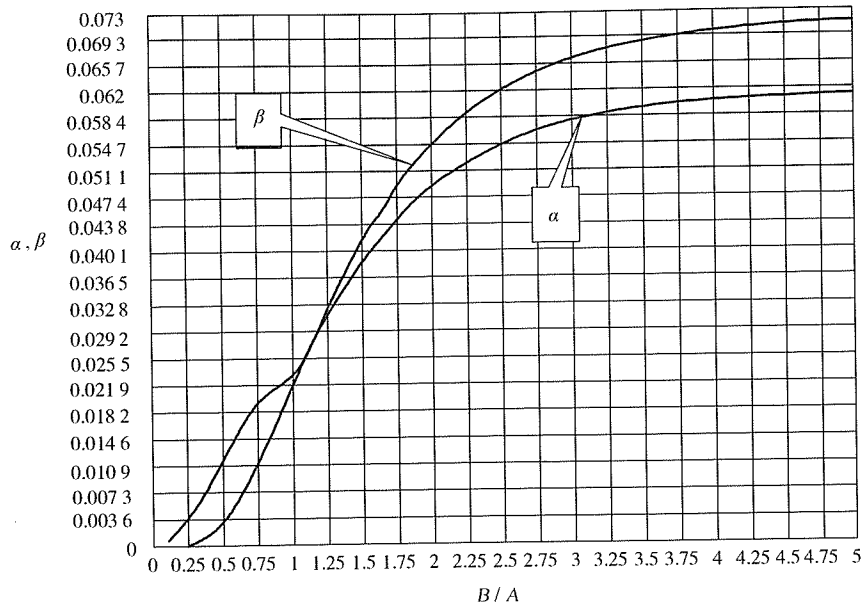


图 8-7 α 、 β 计算图 (四边简支, 三角形载荷)

8.7 垂直加固型 (C 型)

8.7.1 结构

C 型矩形容器, 顶边设置加固件, 一般采用角钢, 其规格不应小于 $L 50 \times 50 \times 5$; 在长度方向、宽度方向器壁上设置垂直加固柱, 相对器壁的加固柱之间可设置拉杆, 其结构如图 8-8。

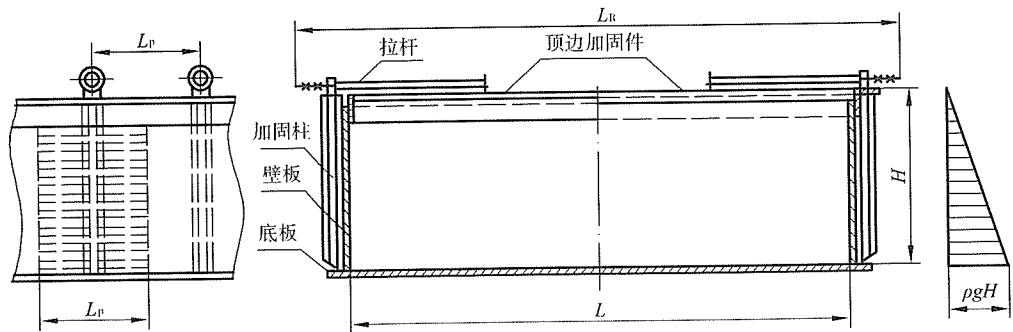


图 8-8 垂直加固型 (C 型) 矩形容器

8.7.2 壁板

先假设 C 型矩形容器加固柱间距 L_p 值, 然后按 8.4 计算壁板名义厚度 $\delta_{w,n}$ 值, 再按 8.7.3、8.7.4 和 8.7.5 对加固柱、顶边加固件和拉杆进行设计; 最后按 8.4 对壁板最大挠度进行校核。如图 8-8, A 取为 L_p 、 B 取为 H ; α 以 B/A 查图 8-7; p_c 按式 (8-6) 计算。

8.7.3 加固柱

8.7.3.1 加固柱的最大间距按式 (8-7) 计算:

$$L_{p,max} = 0.408 \delta_{w,e} \sqrt{\frac{[\sigma]^t}{\alpha p_c}} \quad \dots\dots\dots (8-7)$$

式中各参数取值为：如图 8-8， A 取为 L_p 、 B 取为 H ； α 、 β 以 B/A 查图 8-7； p_c 按式 (8-6) 计算。

8.7.3.2 图 8-8 中实际的加固柱间距 L_p 应不大于 $L_{p, \max}$ 。

8.7.3.3 加固柱所需截面系数 Z_p 按式 (8-8) 计算，加固柱实际截面系数应不小于 Z_p ：

$$Z_p = L_p \left(\frac{0.0642 \rho g H^3}{[\sigma]^t} - \frac{\delta_{w,e}^2}{6} \right) \quad \dots\dots\dots (8-8)$$

8.7.4 顶边加固件

顶边加固件所需惯性矩按式 (8-5) 计算。式中各参数取值为：如图 8-8，当有拉杆时， H_c 取为 H ， L_c 取为 L_p ；当无拉杆时， H_c 取为 H ， L_c 取为 L 。

8.7.5 圆钢拉杆

8.7.5.1 当拉杆长度 $L_R \geq 363 d^{2/3}$ ，拉杆直径按式 (8-9)、式 (8-10) 计算：

$$d = 0.553H \sqrt{\frac{\rho g L_p}{[\sigma]_{bt}}} + C_2 \quad \dots\dots\dots (8-9)$$

$$\left. \begin{aligned} [\sigma]_{bt} &= [\sigma]_b - 62.1 \\ \text{对普通碳素钢可取 } [\sigma]_{bt} &= 55.6 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (8-10)$$

8.7.5.2 当拉杆长度 $L_R < 363 d^{2/3}$ ，按式 (8-11) ~ 式 (8-15) 进行应力校核：

拉杆自身重力引起的拉应力按式 (8-11) 计算：

$$\sigma_{t,w} = 0.864 E^t \frac{d^2}{L_R^2} \quad \dots\dots\dots (8-11)$$

拉杆自身重力引起的弯曲应力按式 (8-12) 计算：

$$\sigma_{n,w} = \frac{\rho_M g L_R^2}{d} \quad \dots\dots\dots (8-12)$$

液体静压力作用于拉杆上引起的拉应力按式 (8-13) 计算：

$$\sigma_{t,p} = \frac{0.306 \rho g H^2 L_p}{d^2} \quad \dots\dots\dots (8-13)$$

拉杆的最大应力按式 (8-14) 计算：

$$\sigma_{R, \max} = \sigma_{t,w} + \sigma_{n,w} + \sigma_{t,p} \quad \dots\dots\dots (8-14)$$

拉杆的最大应力应满足式 (8-15) 计算：

$$\sigma_{R, \max} \leq [\sigma]_b \quad \dots\dots\dots (8-15)$$

8.8 横向加固型 (D 型)

8.8.1 结构

D 型矩形容器，顶边设置加固件，一般采用角钢，其规格不应小于 $L 50 \times 50 \times 5$ ；在器壁上设置横向加固圈，其结构如图 8-9。

8.8.2 顶边加固件

顶边加固件所需惯性矩按式 (8-5) 计算。式中各参数取值为: 如图 8-9, H_c 取为 h_1 , L_c 取为 L 。

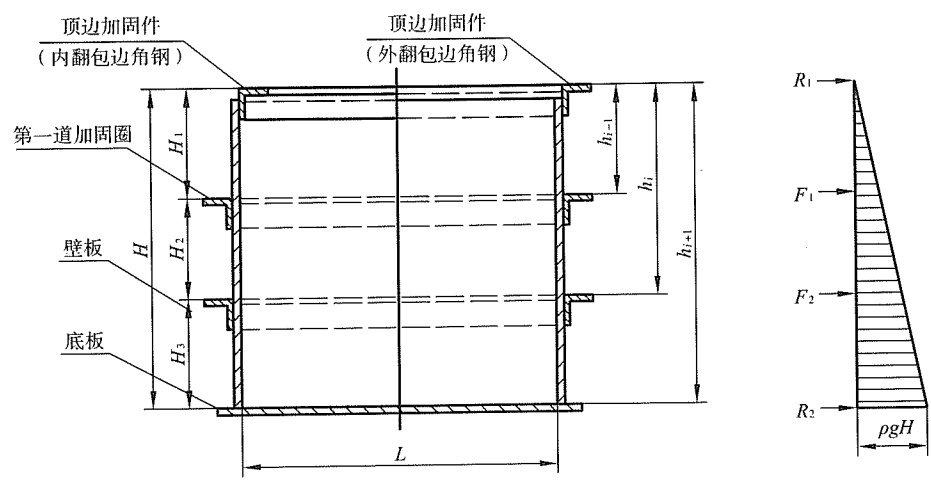


图 8-9 横向加固型 (D 型) 矩形容器

8.8.3 加固圈

推荐的加固圈数量与段间距见表 8-2 和表 8-3。

表 8-2 加固圈数量

容器高 H , mm	1 500~2 100	>2 100~3 000	>3 000~4 000	>4 000
加固圈数量 (个)	1	2	3	4

表 8-3 加固圈段间距

数量 (个)	段 间 距, mm				
	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5
1	$0.60H$	$0.40H$	—	—	—
2	$0.45H$	$0.30H$	$0.25H$	—	—
3	$0.37H$	$0.25H$	$0.21H$	$0.17H$	—
4	$0.31H$	$0.21H$	$0.18H$	$0.16H$	$0.14H$

8.8.4 各段设计

8.8.4.1 第一段

第一道加固圈单位长度上的载荷按式 (8-16) 计算:

$$F_1 = \frac{1}{6} \rho g h_2 (h_1 + h_2) \dots\dots\dots (8-16)$$

第一道加固圈所需的惯性矩按式 (8-17) 计算, 该道加固圈实际的惯性矩应不小于 $I_{c,T}$:

$$I_{c,T} = \frac{1.3 F_1 L^3}{E^t} \dots\dots\dots (8-17)$$

第一段壁板计算厚度按式 (8-18) 计算:

$$\delta_1 = L \sqrt{\frac{3\alpha_1 \rho g h_1}{[\sigma]^t}} \quad \dots\dots\dots (8-18)$$

式中 α_1 查图 8-7 的 α , 查图时, A 取为 L , B 取为 H_1 。

8.8.4.2 第一段以下各段

由矩形容器顶端算起, 第 i ($i=2, 3, 4\dots$) 道横向加固圈单位长度上的载荷按式 (8-19) 计算:

$$F_i = \frac{1}{6} \rho g (h_{i+1} - h_{i-1})(h_{i+1} + h_i + h_{i-1}) \quad \dots\dots\dots (8-19)$$

第 i 道横向加固圈所需的惯性矩按式 (8-20) 计算, 各道加固圈实际的惯性矩应不小于 $I_{c,i}$:

$$I_{c,i} = \frac{1.3 F_i L^3}{E^t} \quad \dots\dots\dots (8-20)$$

第 i 段壁板计算厚度按式 (8-21) 计算:

$$\delta_i = L \sqrt{\frac{6 \alpha_i \rho g (h_{i-1} + h_i)}{[\sigma]^t}} \quad \dots\dots\dots (8-21)$$

式中 α_i 查图 8-7 的 α , 查图时, A 取为 L , B 取为 H_i 。

8.8.5 各段刚度校核

8.8.5.1 第一段

按式 (8-18) 计算的第一段壁板厚度, 应按式 (8-22) 计算最大挠度, 并按式 (8-23) 校核刚度:

$$f_{1,\max} = \frac{\beta_1 L^4 \rho g h_1}{2 E^t \delta_{1,e}^3} \quad \dots\dots\dots (8-22)$$

$$f_{1,\max} \leq [f] \quad \dots\dots\dots (8-23)$$

式 (8-22) 中, β_1 查图 8-7 的 β , 查图时, A 取为 L , B 取为 H_1 ; 式 (8-23) 中, $[f]$ 按式 (8-1), 其中 Γ 取 L 、 H_1 中较大值, Δ 取 L 、 H_1 中较小值, η 根据矩形板短边与长边之比 Δ/Γ 由图 8-2 查取。

8.8.5.2 第一段以下各段

按式 (8-21) 计算的各段壁板厚度, 应按式 (8-24) 计算最大挠度, 并按式 (8-25) 校核刚度:

$$f_{i,\max} = \frac{\beta_i L^4 \rho g (h_{i-1} + h_i)}{2 E^t \delta_{i,e}^3} \quad \dots\dots\dots (8-24)$$

$$f_{i,\max} \leq [f] \quad \dots\dots\dots (8-25)$$

式 (8-24) 中, β_i 查图 8-7 的 β , 查图时, A 取为 L , B 取为 H_i ; 式 (8-25) 中, $[f]$ 按式 (8-1), 其中 Γ 取 L 、 H_i 中较大值, Δ 取 L 、 H_i 中较小值, η 根据矩形板短边与长边之比 Δ/Γ 由图 8-2 查取。

8.9 垂直和横向联合加固型 (E 型)

8.9.1 结构

当矩形容器高 H 超过 2200mm 时, 通常在壁板垂直加固的型式上, 再加横向加固圈, 以增加壁板的刚度, 此即垂直横向联合加固型 (E 型) 矩形容器, 如图 8-10。

8.9.2 设计

E 型矩形容器顶边加固件、各段横向加固圈与壁板的设计、校核按 8.8, 各项计算中的 A 改用 L_p ; 垂直加固柱和圆钢拉杆的设计按 8.7.3 和 8.7.5。

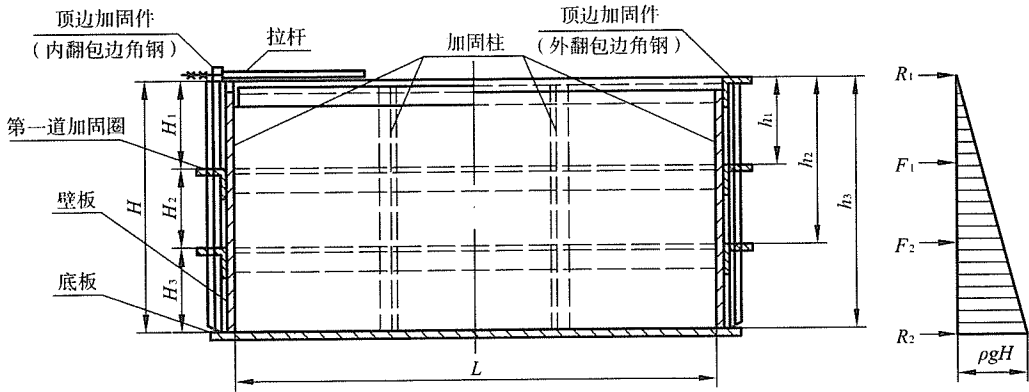


图 8-10 垂直和横向联合加固型 (E 型) 矩形容器

8.10 拉杆加固型 (F 型)

8.10.1 结构

对较大矩形容器, 可采用内部拉杆结构, 结构如图 8-11, 拉杆布置时, 宜使 $a \approx h$ 。

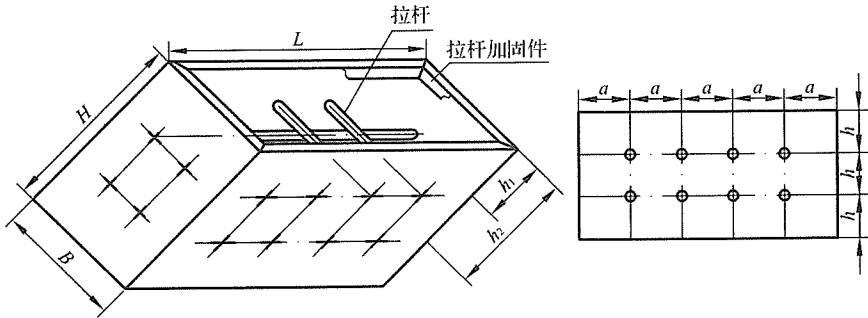


图 8-11 拉杆加固型 (F 型) 矩型容器

8.10.2 壁板

拉杆间距 $a \approx h$ 时, 壁板计算厚度按式 (8-26) 计算:

$$\delta_i = h \sqrt{\frac{\rho g h_i}{2[\sigma]^t}} \quad \dots\dots\dots (8-26)$$

8.10.3 拉杆

拉杆直径按式 (8-27) 计算, 且不应小于 6mm。

$$d_i = 1.13 \sqrt{\frac{a h \rho g h_i}{2[\sigma]_{bt}}} + C_2 \quad \dots\dots\dots (8-27)$$

8.10.4 顶边加固件

顶边加固件所需的惯性矩按式(8-5)计算。式中各参数取值为:如图8-11, H_c 取为 h_1 , L_c 取为 L 。

8.11 带双向水平联杆垂直加固型(G型)

8.11.1 结构

带双向水平联杆垂直加固型(G型)矩形容器,为内部加固的较大型矩形容器,通常在垂直加固柱之间设置一排或两排不等距的联杆,顶部联杆兼作盖板支承,其结构如图8-12, α 、 β 由图8-7查取。

8.11.2 加固柱与联杆

8.11.2.1 设置一层联杆时

8.11.2.1.1 加固柱

联杆宜设置在 $H_1=0.6H$ 处,此时,加固柱所需的截面系数 Z_p 按式(8-28)计算,实际的截面系数应不小于 Z_p :

$$Z_p = L_p \left(\frac{0.015 \rho g H^3}{[\sigma]_b} - \frac{\delta_{w,c}^2}{6} \right) \dots\dots\dots (8-28)$$

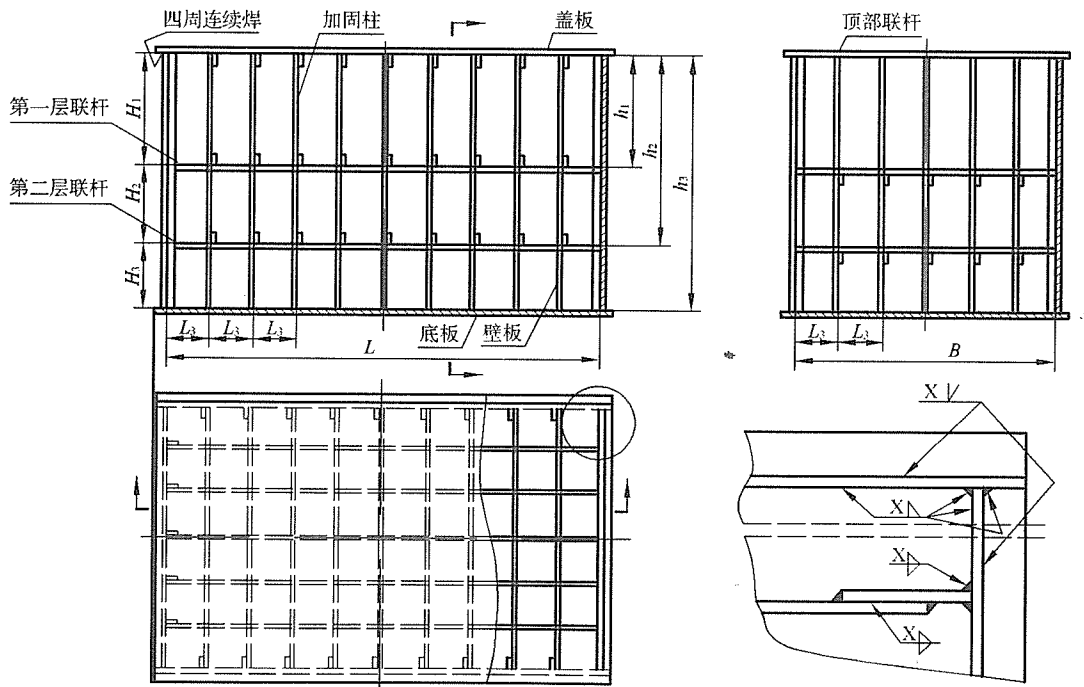


图 8-12 带双向水平联杆垂直加固型(G型)矩形容器

8.11.2.1.2 扁钢联杆

a) 中间联杆:

联杆自身重力引起的拉应力按式(8-29)计算:

$$\sigma_{t,w} = \frac{0.8 E^t b^2}{L_R^2} \quad \dots\dots\dots (8-29)$$

联杆自身重力引起的弯曲应力按式 (8-30) 计算:

$$\sigma_{n,w} = \frac{0.75 \rho_M g L_R^2}{b} \quad \dots\dots\dots (8-30)$$

液体静压力作用于中间联杆上引起的拉应力按式 (8-31) 计算:

$$\sigma_{t,p} = \frac{0.27 \rho g H^2 L_p}{(\delta_{nb} - 2C)(b - 2C)} \quad \dots\dots\dots (8-31)$$

中间联杆的最大应力按式 (8-32) 计算:

$$\sigma_{R,max} = \sigma_{t,w} + \sigma_{n,w} + \sigma_{t,p} \quad \dots\dots\dots (8-32)$$

中间联杆的最大应力 $\sigma_{R,max}$ 应满足式 (8-33) 的要求:

$$\sigma_{R,max} \leq [\sigma]_b \quad \dots\dots\dots (8-33)$$

b) 顶部联杆:

顶部联杆与顶板的计算组合截面见图 8-13, 式 (8-34)、式 (8-35) 中组合截面的惯性矩 I_x 、组合截面系数 Z_x 按截面力学特性公式计算。

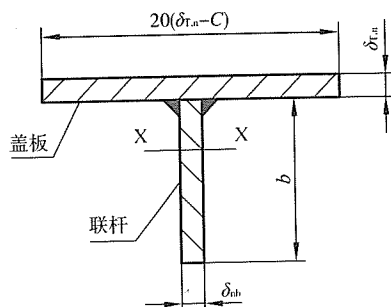


图 8-13 顶部联杆与顶板计算组合截面

联杆自身重力引起的拉应力按式 (8-34) 计算:

$$\sigma_{t,w} = \frac{9.6 E^t I_x}{L_R^2 (\delta_{nb} b + \delta_{T,n} L_p)} \quad \dots\dots\dots (8-34)$$

联杆自身重力引起的弯曲应力按式 (8-35) 计算:

$$\sigma_{n,w} = \frac{9.62 \times 10^{-6} L_R^2 (\delta_{nb} b + \delta_{T,n} L_p)}{Z_x} \quad \dots\dots\dots (8-35)$$

液体静压力作用于顶部联杆上的拉应力按式 (8-36) 计算:

$$\sigma_{t,p} = \frac{0.06 \rho g H^2 L_p}{(b - C)(\delta_{nb} - 2C) + L_p \delta_{T,e}} \quad \dots\dots\dots (8-36)$$

顶部联杆的最大应力按式 (8-37) 计算:

$$\sigma_{R, \max} = \sigma_{t, w} + \sigma_{n, w} + \sigma_{t, p} \quad \dots\dots\dots (8-37)$$

顶部联杆的最大应力 $\sigma_{R, \max}$ 应满足式 (8-38) 的要求:

$$\sigma_{R, \max} \leq [\sigma]_b \quad \dots\dots\dots (8-38)$$

8.11.2.2 设置两层联杆时

8.11.2.2.1 加固柱

联杆宜设置在 $H_1=0.45H$ 、 $H_2=0.3H$ 、 $H_3=0.25H$ 处, 此时, 加固柱所需的截面系数 Z_p 按式 (8-39) 计算, 实际的截面系数应不小于 Z_p :

$$Z_p = L_p \left(\frac{0.0054 \rho g H^3}{[\sigma]_b} - \frac{\delta_{w, e}^2}{6} \right) \quad \dots\dots\dots (8-39)$$

8.11.2.2.2 扁钢联杆

a) 第一层联杆:

联杆自身重力引起的拉应力 $\sigma_{t, w}$ 和弯曲应力 $\sigma_{n, w}$ 按式 (8-29) 和式 (8-30) 计算, 液体静压力作用于第一层联杆上引起的拉应力按式 (8-40) 计算:

$$\sigma_{t, p} = \frac{0.15 \rho g H^2 L_p}{(\delta_{nb} - 2C)(b - 2C)} \quad \dots\dots\dots (8-40)$$

b) 第二层联杆:

联杆自身重力引起的拉应力 $\sigma_{t, w}$ 和弯曲应力 $\sigma_{n, w}$ 按式 (8-29) 和式 (8-30) 计算, 液体静压力作用于第二层联杆上引起的拉应力按式 (8-41) 计算:

$$\sigma_{t, p} = \frac{0.202 \rho g H^2 L_p}{(\delta_{nb} - 2C)(b - 2C)} \quad \dots\dots\dots (8-41)$$

第二层联杆的最大应力 $\sigma_{R, \max}$ 及所要满足的要求分别按式 (8-37) 和式 (8-38)。

c) 顶部联杆:

顶部联杆与顶板的计算组合截面见图 8-13。

联杆自身重力引起的拉应力 $\sigma_{t, w}$ 和弯曲应力 $\sigma_{n, w}$ 按式 (8-34) 和式 (8-35) 计算, 液体静压力作用于顶部联杆上引起的拉应力按式 (8-42) 计算:

$$\sigma_{t, p} = \frac{0.034 \rho g H^2 L_p}{(b - C)(\delta_{nb} - 2C) + L_p \delta_{T, e}} \quad \dots\dots\dots (8-42)$$

顶部联杆的最大应力 $\sigma_{R, \max}$ 及所要满足的要求分别按式 (8-37) 和式 (8-38)。

8.11.3 壁板

如图 8-12, 壁板按分层联杆分段, 各段壁板的计算厚度按式 (8-18) 和式 (8-21) 计算, 计算和查图中的 L 改用 L_p 。

8.12 顶板

8.12.1 结构

矩形容器顶板上一般需设置加强筋,如图 8-14。以下顶板的计算厚度和最大挠度,只考虑顶板自重和附加载荷 $p_a=1.2\times 10^{-3}\text{MPa}$ 。

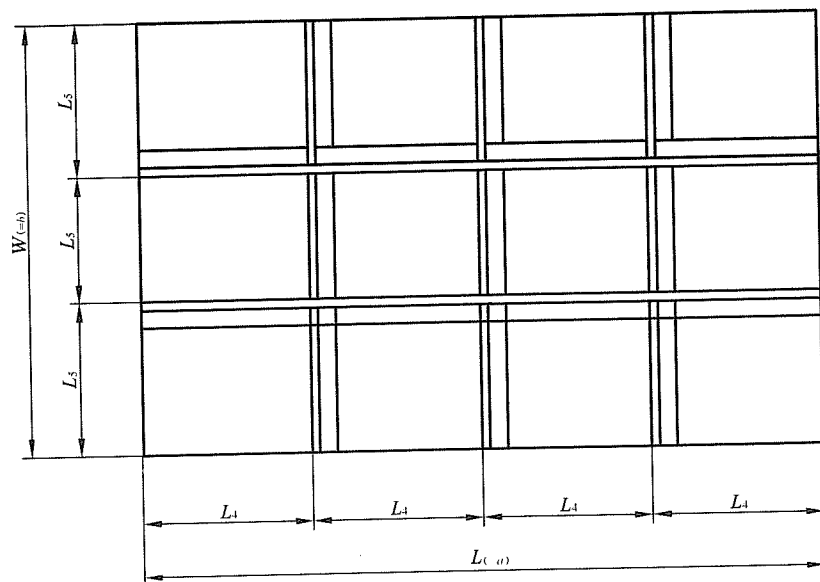


图 8-14 顶板上加强筋的布置

8.12.2 顶板的计算厚度按式 (8-43) 计算:

$$\delta_T = \frac{3A^2\alpha\rho_M g + A\sqrt{3\alpha(3A^2\alpha\rho_M^2 g^2 + 2p_a[\sigma]^t)}}{[\sigma]^t} \quad \dots\dots\dots (8-43)$$

式中取值为:当如图 8-14 设置加强筋时, A 取为 L_T , B 取为 W_T ; 当不设加强筋时, A 取为 L , B 取为 W 。 α 以 B/A 查图 8-15。

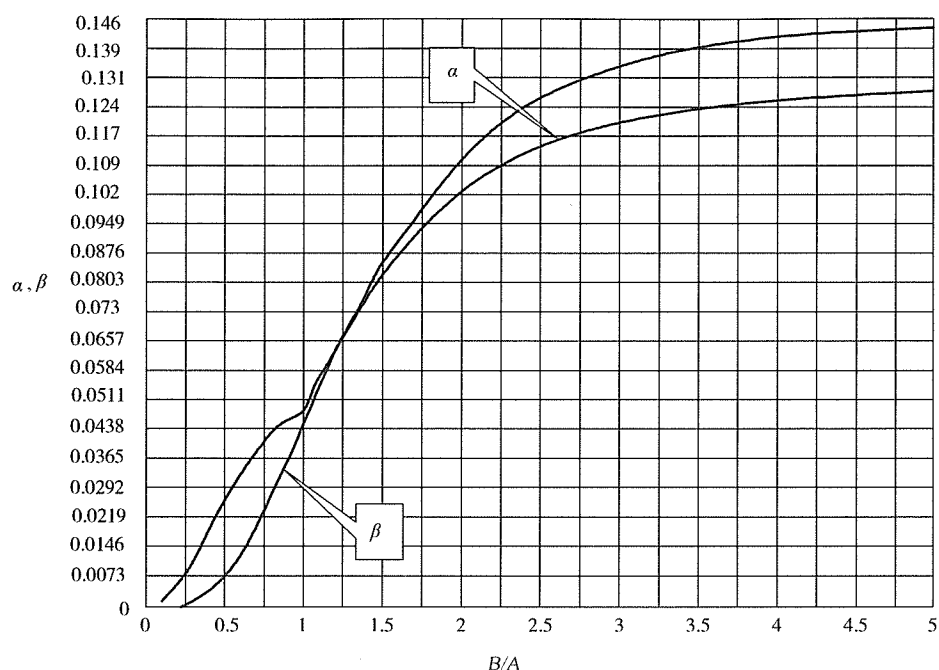
8.12.3 顶板最大挠度按式 (8-44) 计算,最大挠度应满足式 (8-45) 要求:

$$f_{T,\max} = \frac{\beta A^4 (\rho_M g \delta_{T,e} + p_a)}{E^t \delta_{T,e}^3} \quad \dots\dots\dots (8-44)$$

$$f_{T,\max} \leq [f] \quad \dots\dots\dots (8-45)$$

式中取值为:当如图 8-14 设置加强筋时, A 取为 L_T , B 取为 W_T ; 当不设加强筋时, A 取为 L , B 取为 W 。 β 以 B/A 查图 8-15。

$[f]$ 按式 (8-1), 其中 Γ 为 A 、 B 中的较大值, Δ 为 A 、 B 中的较小值, η 以 Δ/Γ 查图 8-2。

图 8-15 α 、 β 计算图 (四边简支, 均布载荷)

8.12.4 加强筋

顶板上加强筋的截面系数 Z_T 取 L 方向截面系数 $Z_{T,L}$ 与 W 方向截面系数 $Z_{T,W}$ 的较大值, $Z_{T,L}$ 、 $Z_{T,W}$ 、 Z_T 分别按式 (8-46) ~ 式 (8-48) 计算, 顶板上加强筋实际的截面系数应不小于 Z_T 。

$$Z_{T,L} = \frac{(\rho_M g \delta_{T,e} + p_a) L_T W_T^2}{9.4 [\sigma]_b} - \frac{L_T \delta_{T,e}^2}{6} \quad \dots\dots\dots (8-46)$$

$$Z_{T,W} = \frac{(\rho_M g \delta_{T,e} + p_a) W_T L_T^2}{9.4 [\sigma]_b} - \frac{W_T \delta_{T,e}^2}{6} \quad \dots\dots\dots (8-47)$$

$$Z_T = \max \{Z_{T,L}, Z_{T,W}\} \quad \dots\dots\dots (8-48)$$

8.13 底板

8.13.1 结构

底板可放置在型钢支撑上, 如图 8-16。也可放置在整个平面上, 平面支承的底板, 当壁板厚度小于 10mm 时, 底板厚度不小于 6mm; 当壁板厚度为 10mm ~ 20mm 时, 底板厚度不小于 8mm。

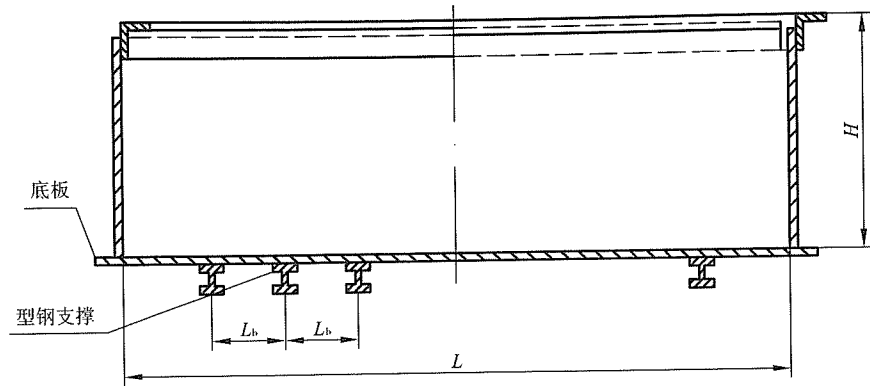


图 8-16 型钢上的矩形容器底板

8.13.2 型钢上的矩形容器底板

型钢支承的底板计算厚度按式 (8-49) 计算:

$$\delta_b = 0.8L_b \sqrt{\frac{\rho g H}{[\sigma]^t}} \quad \dots\dots\dots (8-49)$$

如果已知底板厚度 $\delta_{b,n}$ (或先设 $\delta_{b,n}$), 则支承的最大间距按式 (8-50) 计算:

$$L_{b,max} = 1.25 \delta_{b,e} \sqrt{\frac{[\sigma]^t}{\rho g H}} \quad \dots\dots\dots (8-50)$$

8.13.3 在平基础上全平面支撑的底板

当底板整个表面被支撑时, 底板最小厚度常用 4mm ~ 6mm (或与壁板等厚), 同时考虑腐蚀裕量来确定底板的名义厚度。

9 制造、检验与验收

9.1 总则

9.1.1 容器的制造、检验与验收除应符合本章规定外, 还应符合设计图样的规定。

9.1.2 容器制造单位对设计的修改, 原则上应取得原设计单位出具的设计变更文件。容器制造单位应将设计改动内容在竣工图上做详细记载。

9.2 材料

在下列情况下应对制造容器的材料进行复验:

- a) 钢材质量证明书提供的材料性能数据不全;
- b) 焊接材料无质量证明书;
- c) 图样注明对钢材有特殊要求。

9.3 加工成型

9.3.1 坡口表面要求:

- a) 坡口表面不得有裂纹、分层、夹杂等缺陷;
- b) 施焊前, 应清除坡口及其母材两侧表面 20mm 范围内 (以离坡口边缘的距离计算) 的氧化物、油污、熔渣及其他有害杂质。

9.3.2 封头:

- a) 封头各种不相交的拼焊焊缝中心线间距离至少应为钢板名义厚度 δ_n 的 3 倍,且不小于 100mm。径向焊接接头之间最小距离也不得小于上述的规定,如图 9-1 所示。若采用平行拼缝的旋压封头,为避免焊缝分布到封头的过渡区,造成封头成型后焊缝严重变形而无法进行无损检测,由制造单位确定拼缝距板边缘的最小距离;
- b) 先拼板后成型的凸形封头,其内侧表面的焊接接头与外侧表面影响成型质量的焊接接头应于成型前打磨至与母材齐平,所有拼焊接头应于封头成型后进行全部射线或超声检测,其结果射线 III 级、超声 II 级为合格。若成型前进行无损检测,则成型后应在圆弧过渡区再做无损检测。对锥形封头仅对大小口翻边处焊缝进行全部射线检测,而没有发生纤维变化的其他部位焊缝应与筒体检测比例相同;

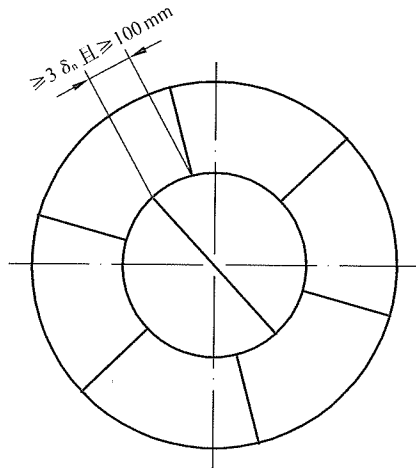


图 9-1 封头拼焊焊缝

- c) 碟形封头由成型的瓣片和顶圆板拼接制成时,顶圆板应不大于 $0.7DN$ (DN 为封头外径);
- d) 冲压成型后的封头,其最小厚度不应小于钢板名义厚度 δ_n 减去钢板负偏差或按图样要求;
- e) 碟形封头、折边锥形封头及折边平盖的过渡区转角半径不得小于图样规定;
- f) 凸形封头、锥形封头(或壳体)和平盖(见图 9-2)的加工允差应不大于表 9-1 的规定(平盖表面局部凹凸量 b 公差不得大于 $0.3\%D_o$ 且不大于 4mm)。

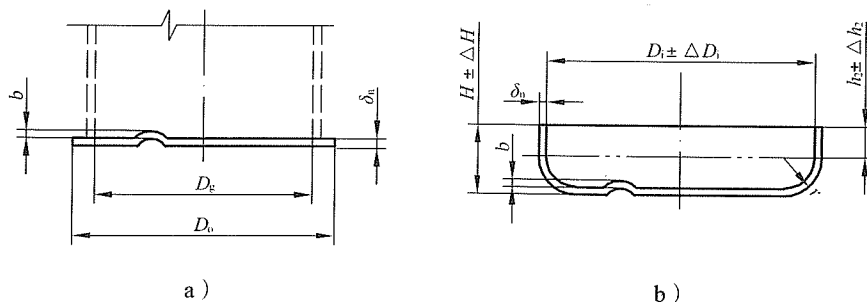


图 9-2 凸形封头、锥形封头(或壳体)和平盖

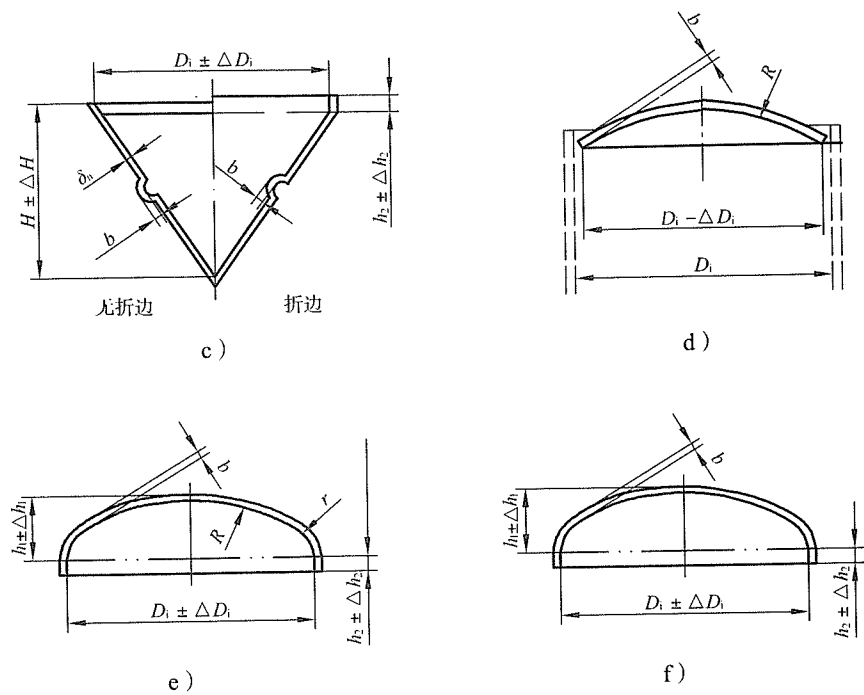


图 9-2 (续)

表 9-1 封头加工允差表 mm

项 目	内直径 D_i								
	< 800	800 ~ 1 200	1 300 ~ 1 600	1 700 ~ 2 400	2 600 ~ 3 000	3 200 ~ 4 000	4 200 ~ 6 000	6 000 ~ 10 000	> 10 000
ΔD_i 球冠形封头	± 2	± 2	± 2.5	± 3	± 3	± 3	± 3.5	± 4.5	± 5.0
ΔD_i 其他型式封头	± 2	+4 -3	+4 -3	+4 -3	+4 -3	+4 -3	+6 -4	+6 -4	+7 -5
最大最小内直径之差 e	3	5	7	10	14	18	25	25	30
表面局部凹凸量 b	2	3	4	4	4	4	4	4	4
直边高度允差 Δh_2	+3 -2			+4 -2					
封头全高允差 ΔH	+4 -1	+6 -2	+8 -3	+12 -4	+16 -5	+20 -6	+20 -7	+20 -7	+20 -7

9.3.3 壳体:

- a) 壳体上各类焊接接头对口错边量 b (见图 9-3) 应符合表 9-2 的规定。复合钢板对口错边量 b (见图 9-4) 应不大于钢板覆层厚度的 50%，且不大于 2mm；

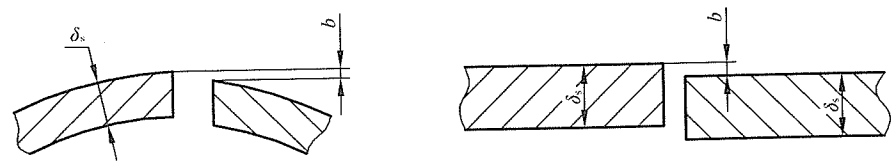


图 9-3 焊接接头对口错边量

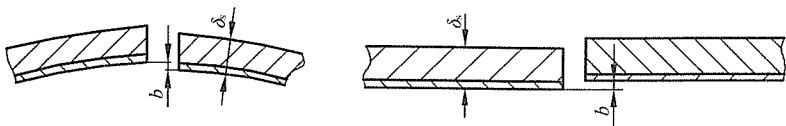


图 9-4 复合钢板对口错边量

表 9-2 焊接接头对口错边量 mm

对口处的钢板名义厚度, δ_n	对口错边量, b	
	纵向焊接接头	环向焊接接头
≤ 12	$\leq 1/4\delta_n$	$\leq 1/4\delta_n$
$>12 \sim 20$	≤ 3	$\leq 1/4\delta_n$
$>20 \sim 40$	≤ 3	≤ 5

- b) 在焊接接头环向形成的棱角 E , 用弦长等于 $1/6$ 内径 D_i , 且不小于 300mm 的内样板或外样板检查 (见图 9-5), 其 E 值不大于 $(\delta_n/10 + 2)$ mm, 且不大于 5mm。
在焊接接头轴向形成的棱角 E (见图 9-6), 用长度不小于 300mm 的直尺检查, 其 E 值不大于 $(\delta_n/10 + 2)$ mm, 且不大于 5mm;

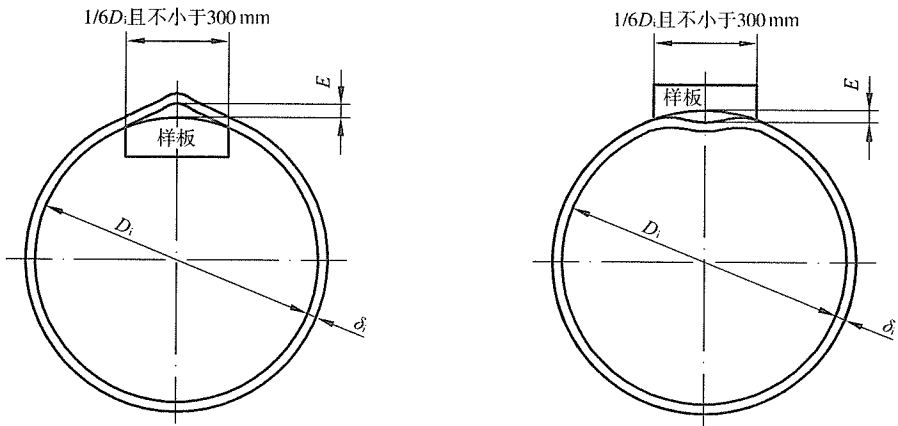


图 9-5 焊接接头环向形成的棱角

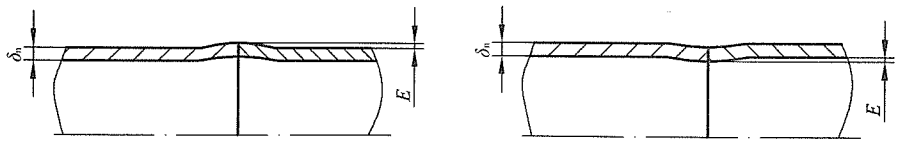


图 9-6 焊接接头轴向形成的棱角

- c) 壳体上的对接焊接接头, 当两板厚度不等时, 若薄板厚度不大于 10mm, 且两板厚度差超过 3mm, 以及薄板厚度大于 10mm, 且两板厚度差大于薄板厚度的 30%或超过 5mm 时, 均应按图 9-7 的要求削薄厚板的边缘;

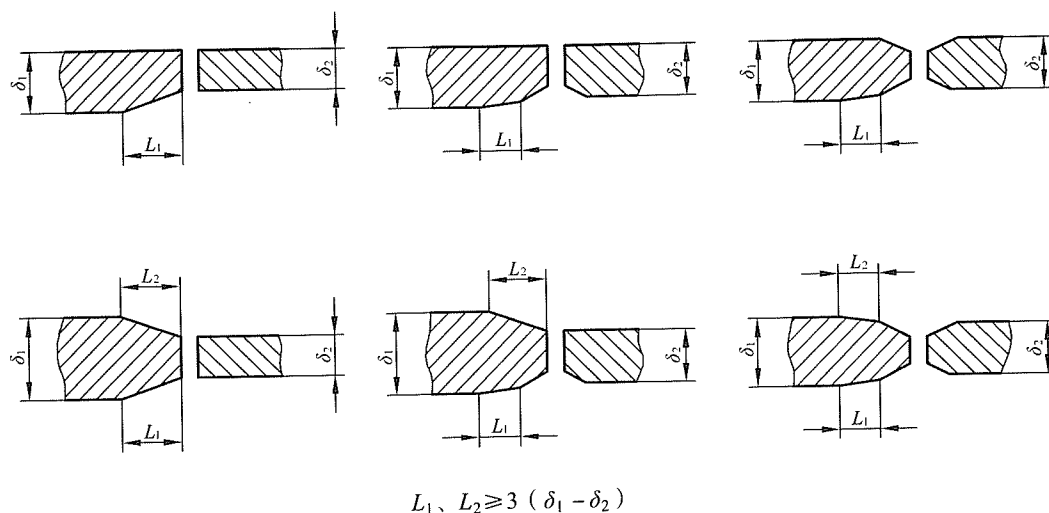


图 9-7 两板厚度不等的对接焊接接头

- d) 壳体同一断面上最大内直径与最小内直径之差应不大于该断面内径 D_i 的 1%，且不大于 30mm (见图 9-8)；

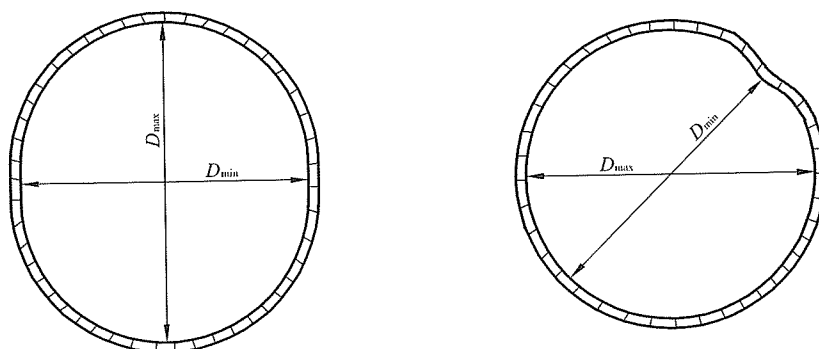


图 9-8 壳体同一断面上最大内直径与最小内直径

当被检断面位于开孔处，或离开孔中心 1 倍开孔内直径范围内时，则该断面最大内直径与最小内直径之差，应不大于该断面内径 D_i 的 1% 与开孔内直径的 3% 之和，且不大于 35mm。矩形容器同一截面上，最大边长与最小边长之差应不大于该截面边长的 1%，且不大于 30mm (见图 9-9)；

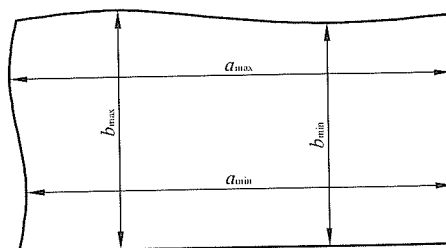


图 9-9 矩形容器截面上最大边长与最小边长

- e) 制造壳体时, 相邻圆筒的纵向焊接接头的距离, 或封头拼接焊接接头的端点与相邻圆筒的纵向焊接接头的距离均应大于钢板名义厚度 δ_n 的 3 倍, 且不小于 100mm。筒节长度应不小于 300mm。矩形容器壁板相邻拼接焊缝间距 Δ 应大于钢板名义厚度 δ_n 的 3 倍, 且不小于 100mm (见图 9-10);

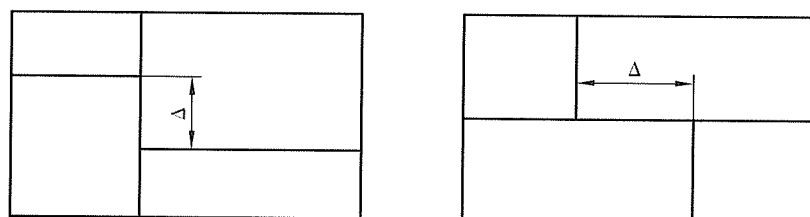


图 9-10 矩形容器壁板相邻拼接焊缝间距

- f) 制造中应避免钢板表面的机械损伤, 对较严重的机械伤痕应进行修磨。对壳体钢板的修磨深度不得超过钢板名义厚度 δ_n 的 10%, 且不大于 2mm, 并使修磨范围内均匀过渡, 不得有突变;
- g) 高合金钢制容器的表面不应有影响耐腐蚀性的局部伤痕、刻槽等缺陷。若有缺陷须予修磨, 修磨深度应不超过钢板厚度 (复合钢板指覆层厚度) 的负偏差。若修磨深度超出规定, 允许采用焊接修补, 补焊后还应满足本条要求。

9.3.4 法兰:

- a) 接管法兰、容器法兰按相应标准要求进行加工。
- b) 角钢或扁钢制法兰 (见图 9-11) 的加工要求如下:

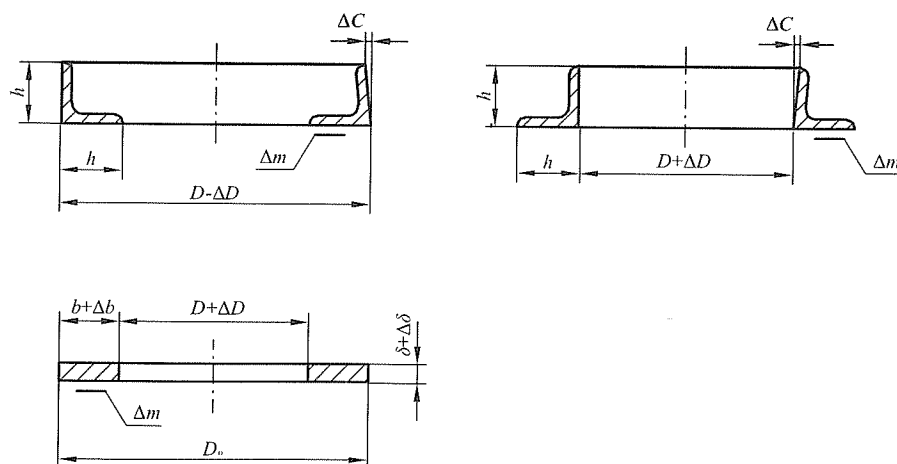


图 9-11 角钢或扁钢制法兰

- 1) 角钢或扁钢制法兰加工允差按表 9-3 的规定;

表 9-3 角钢或扁钢制法兰加工允差

mm

项 目		直 径 D					
		<800	800 ~ 1 200	1 300 ~ 1 600	1 700 ~ 2 400	2 600 ~ 3 000	3 200 ~ 4 000
直径允差 ΔD	$h < 100$	3	4	5	6	7	7
	$h > 100$	4	5	6	7	8	8
表面不平度 Δm		3	3	3	4	4	4
最大最小直径之差 e		4	5	6	7	7	8
立筋不垂直度 ΔC	$h \leq 100$	2.5					
	$h > 100$	3.5					
宽度允差 Δb	$b \leq 100$	+3					
		- 2					
	$b > 100$	+4					
		- 2					
厚度允差 $\Delta \delta$		$\leq 0.1\delta$ 且 ≤ 3					
注：角钢、扁钢表面不平度用长度不小于 300mm 的直尺检查， Δm 为直尺与被检平面之间隙。							

- 2) 非配钻螺栓孔中心圆直径和相邻两孔弦长允差为 $\pm 1\text{mm}$ ，任意两弦长允差应不大于 2mm ；
- 3) 法兰表面不得有裂纹、毛刺，以及降低强度和连接可靠性的缺陷。
- c) 法兰面应垂直于接管或圆筒的主轴中心线。法兰的螺栓通孔应与壳体主轴线或铅垂线跨中布置（见图 9-12）。有特殊要求时，应在图样上注明。
- d) 安装接管法兰应保证法兰面的水平或垂直（有特殊要求的应在图样中注明），其偏差均不得超过法兰外径的 1%（法兰外径小于 100mm 时，按 100mm 计），且不大于 3mm 。
- e) 直立容器的底座圈、底板上地脚螺栓通孔应跨中布置，中心圆直径允差、相邻两孔弦长允差和任意两孔弦长允差均不大于 2mm 。
- f) 矩形容器底板如设置地脚螺栓（见图 9-13），地脚螺栓孔中心线长度 L_b 、 W_b 的允差为 2mm ；同一螺栓孔中心线上，相邻、任意两螺栓孔中心距离允差为 2mm 。

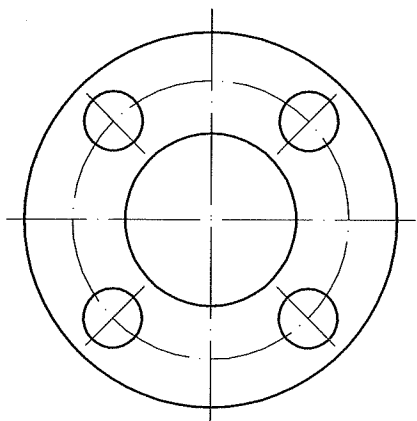


图 9-12 法兰的螺栓通孔图

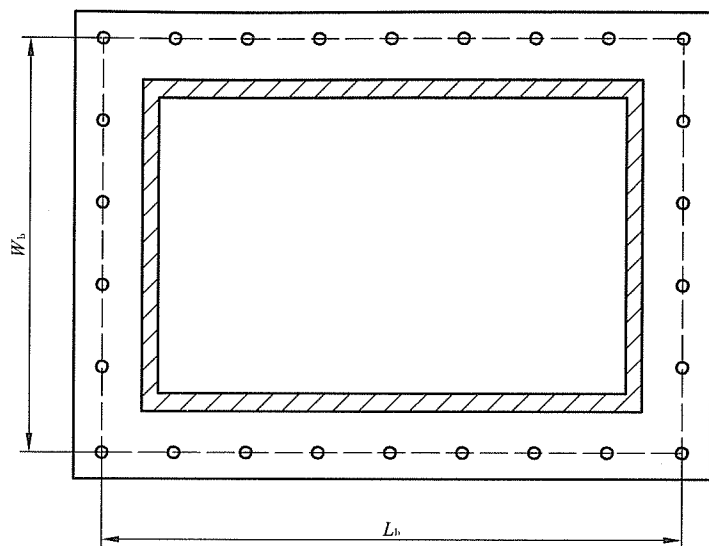


图 9-13 矩形容器底板地脚螺栓孔

9.3.5 螺栓、螺母

螺栓、螺母等紧固件应根据图样要求分别按 GB/T 3098.1、GB/T 3098.2、GB/T 5779.1、GB/T 5779.2 的规定加工。

9.3.6 极限偏差

机械加工表面和非机械加工表面的线性尺寸的极限偏差,分别按 GB/T 1804 中的 m 级和 c 级的规定。

9.4 焊接

9.4.1 焊工资格

从事焊条电弧焊、埋弧焊的焊工应按《锅炉压力容器压力管道焊工考试与管理规则》的有关规定进行考试,并取得相应合格证书。

9.4.2 焊前准备及施焊环境:

- a) 容器施焊前,应根据图样要求制定合理的焊接工艺规程。
- b) 容器施焊前,应检查圆筒的组装质量,清除坡口及其两侧 20mm 范围内的泥砂、铁锈、油污、氧化皮及其他杂质。
- c) 焊条、焊剂及其他焊接材料的储存库应保持干燥,相对湿度不大于 60%。
- d) 当施焊环境出现下列任一情况,且无有效防护措施时,禁止施焊:
 - 1) 焊条电弧焊时风速大于 10m/s;
 - 2) 气体保护焊时风速大于 2m/s;
 - 3) 相对湿度大于 90%;
 - 4) 雨、雪环境。
- e) 当焊件温度低于 0℃时,应在始焊处 100mm 范围内预热到 15℃左右。

9.4.3 焊接工艺:

- a) 容器施焊前的焊接工艺评定,应按 JB 4708 进行;
- b) 焊接工艺评定报告、焊接工艺规程、施焊记录及焊工的识别标记,应保存 3 年。

9.4.4 焊缝表面外观要求:

- a) 焊接接头表面不得有裂纹、气孔、弧坑和飞溅物;
- b) 焊接接头咬边的连续长度不得大于 100mm, 焊接接头两侧咬边的总长度不得超过该条焊接接头总长的 10%, 咬边深度不得大于 0.5mm, 高合金钢制容器不得有咬边;
- c) 焊接接头的余高 e_1 、 e_2 按表 9-4 和图 9-14 的规定。

表 9-4 焊接接头的余高 mm

单 面 坡 口		双 面 坡 口	
e_1	e_2	e_1	e_2
$0 \sim 15\% \delta_n$ 且 ≤ 4	≤ 1.5	$0 \sim 15\% \delta_1$ 且 ≤ 4	$0 \sim 15\% \delta_2$ 且 ≤ 4

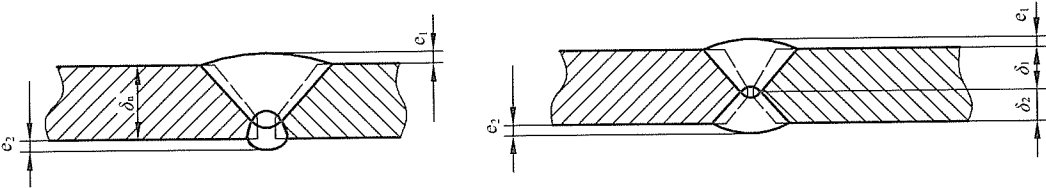


图 9-14 焊接接头的余高

9.4.5 焊接返修:

- a) 需要返修的焊接接头其返修工艺应符合 9.4.3 的有关规定;
- b) 返修次数、部位和返修情况应记入容器的质量证明书;
- c) 有抗晶间腐蚀要求的高合金钢制容器, 返修部位仍需保证原有要求。

9.5 热处理

9.5.1 冷或温成型封头应进行热处理。当制造单位确保冷成型后的材料性能符合设计、使用要求时, 不受此限。除图样另有规定, 冷成型的奥氏体高合金钢封头可不进行热处理。

9.5.2 图样注明有应力腐蚀的容器, 应进行消除应力热处理。

9.5.3 有防腐要求的高合金钢及复合钢板制容器表面, 应进行酸洗、钝化处理。该类钢制零部件按图样要求进行热处理后, 还需作酸洗、钝化处理。

9.6 无损检测

9.6.1 除另有规定, 容器对接焊接接头需进行局部射线或超声检测, 检测长度不得少于各条焊接接头长度的 10%。局部无损检测应优先选择 T 形接头部位。

9.6.2 焊接接头的无损检测应按 JB/T 4730.2、JB/T 4730.3 的规定进行, 要求如下:

- a) 焊接接头的射线检测技术等级为 AB 级; 质量等级 III 级合格;
- b) 焊接接头的超声检测技术等级为 B 级; 质量等级 II 级合格。

9.7 试验

9.7.1 容器制造完成后, 应按图样要求进行盛水试验、液压试验、气压试验、气密性试验或煤油渗漏试验等。

9.7.2 容器的开孔补强圈应在压力试验以前通入 0.1MPa 的压缩空气检查焊接接头质量。

9.7.3 试验液体一般采用水,需要时也可采用不会导致危险的其他液体。试验气体一般采用干燥、洁净的空气,需要时也可采用氮气或其他惰性气体。奥氏体不锈钢制容器用水进行液压试验后应将水渍清除干净。当无法达到这一要求时,应控制用水的氯离子含量不超过 25mg/L。

9.7.4 试验时应采用两个经校正的,且量程相同的压力表,压力表的量程为试验压力的 2 倍左右。

9.7.5 盛水试验方法:

- a) 试验前应将焊接接头的外表面清除干净,并使之干燥;
- b) 试验的持续时间应根据观察所需的时间决定,但不得少于 1h;
- c) 试验中焊接接头应无渗漏;
- d) 如有渗漏,修补后应重新试验;
- e) 试验完毕后,应将水排尽并用压缩空气将内部吹干。

9.7.6 液压试验及方法

9.7.6.1 试验压力按图样规定。

9.7.6.2 试验液体的温度应不低于 5℃。

9.7.6.3 液压试验方法:

- a) 试验时容器的顶部应设排气口,进液时打开排气口,以确保容器内空气排净。试验过程中,应保持容器外表面干燥;
- b) 试验时压力应缓慢上升,达到规定试验压力后,应保持足够时间,并检查所有焊接接头和连接部位,如有渗漏,修补后重做试验;
- c) 试验完毕应立即打开排气口,应将水液体排尽并用压缩空气将内部吹干。

9.7.7 气压试验及方法

9.7.7.1 在下列情况下,可采用气压试验代替液压试验:

- a) 由于结构或支承原因,容器不能安全地盛水;
- b) 容器内部不容易干燥,运行中不允许残留试验液体。

9.7.7.2 气压试验应有安全措施。

9.7.7.3 气压试验压力应按图样规定。

9.7.7.4 气压试验时介质温度应不低于 5℃。

9.7.7.5 气压试验方法

试验时压力应缓慢上升,至规定试验压力的 50%时,保压足够时间,然后对所有焊接接头和连接部位进行初次泄漏检查,如有泄漏,修补后重新试验。初次泄漏检查合格后,再继续缓慢升压至规定试验压力。保压足够时间后再次进行泄漏检查。如有泄漏,修补后重做试验。

9.7.8 气密性试验及方法

9.7.8.1 对图样规定有气密性试验要求的容器,需经液压试验合格后再进行气密性试验。

9.7.8.2 气密性试验压力应按图样规定。

9.7.8.3 气密性试验时,压力应缓慢上升,达到规定试验压力后保压足够时间,然后降至设计压力,对焊接接头和连接部位进行泄漏检查。如有泄漏,修补后重做试验。小型容器做气密性试验时也可浸入水中检查。

9.7.9 煤油渗漏试验及方法

9.7.9.1 将焊接接头能够检查的一面清理干净,涂以白粉浆,晾干后,在焊接接头另一面涂以煤油,使表面得到足够的浸润,经 0.5h 后以白粉上没有油渍为合格。

9.7.9.2 在图样允许的情况下或经设计单位同意,可以用煤油渗漏试验代替盛水试验。

9.7.9.3 对于有保温夹套的容器,应先对容器(本体)按规定进行各项试验,试验合格后再焊夹套。对夹套做液压试验时,应进行容器承受外压的稳定验算。

9.8 验收

9.8.1 质量证明书

容器出厂质量证明文件应包括三部分:

- a) 产品合格证;
- b) 容器说明书,至少应包括下列内容:
 - 容器特性(包括设计压力、试验压力、设计温度、工作介质);
 - 容器总图(由订货单位供图时可不包括此项);
 - 容器主要零部件表;
 - 容器热处理状态与禁焊等特殊说明。
- c) 质量证明书,至少应包括下列内容:
 - 主要零部件材料的化学成分和力学性能;
 - 无损检测结果;
 - 压力试验结果;
 - 与图样不符的项目。

9.8.2 容器铭牌

容器铭牌应固定于容器明显的位置。容器铭牌应包括如下内容:

- a) 制造单位名称;
- b) 制造单位对该容器产品的编号;
- c) 制造日期;
- d) 设计压力;
- e) 试验压力;
- f) 设计温度;
- g) 容器重量。

9.8.3 容器的油漆、包装、运输

容器的油漆、包装、运输按 JB/T 4711 的规定。

附录 A

(资料性附录)

钢材在不同温度下的性能

表 A.1 钢板高温屈服强度

钢 号	厚度 mm	在下列温度 (℃) 下的 $R_{p0.2}$ (R_{eL}), MPa						
		≤20	100	150	200	250	300	350
碳 素 钢 钢 板								
Q245R	6 ~ 16	245	220	210	196	176	162	147
	>16 ~ 36	235	210	200	186	167	153	139
	>36 ~ 60	225	200	191	178	161	147	133
低 合 金 钢 钢 板								
Q345R	6 ~ 16	345	315	295	275	250	230	215
	>16 ~ 36	325	295	275	255	235	215	200
	>36 ~ 60	315	285	260	240	220	200	185
Q370R	6 ~ 16	370	340	320	300	285	270	255
	>16 ~ 36	360	330	310	290	275	260	245
	>36 ~ 60	340	310	290	270	255	240	225
高 合 金 钢 钢 板								
0Cr13		205	189	184	180	178	175	168
0Cr18Ni9		205	171	155	144	135	127	123
0Cr18Ni10Ti		205	171	155	144	135	127	123
0Cr17Ni12Mo2		205	175	161	149	139	131	126
00Cr19Ni10		177	145	131	122	114	109	104
00Cr17Ni14Mo2		177	145	130	120	111	105	100
0Cr18Ni12Mo2Ti		205	175	161	149	139	131	126

表 A.2 钢管高温屈服强度

钢 号	钢管壁厚 mm	在下列温度 (℃) 下的 $R_{p0.2}$ (R_{eL}), MPa						
		≤20	100	150	200	250	300	350
碳 素 钢 钢 管								
10	≤16	205	181	172	162	147	133	123
20	≤16	245	220	210	196	176	162	147
低 合 金 钢 钢 管								
16Mn	≤16	320	295	275	255	235	215	200
	17 ~ 40	310	285	265	245	225	205	191
注：高合金钢钢管高温屈服强度可参考表 A.1 所列相应钢号的数据。								

表 A.3 锻件高温屈服强度

钢 号	公称厚度 mm	在下列温度 (℃) 下的 $R_{p0.2}$ (R_{eL}), MPa						
		≤20	100	150	200	250	300	350
碳 素 钢 锻 件								
20	≤100	215	191	181	167	152	137	127
低 合 金 钢 锻 件								
16Mn	≤300	275	245	235	215	205	186	176
注：高合金钢锻件高温屈服强度可参考表 A.1 所列相应钢号的数据。								

表 A.4 螺柱高温屈服强度

钢 号	螺柱规格 mm	在下列温度 (℃) 下的 $R_{p0.2}$ (R_{eL}), MPa						
		≤20	100	150	200	250	300	350
碳 素 钢 螺 柱								
35	≤M22	315	285	265	245	220	200	186
	M24 ~ M27	295	265	250	230	210	191	176
低 合 金 钢 螺 柱								
40MnB	≤M22	685	620	600	580	570	540	500
	M24 ~ M36	635	570	550	540	530	500	460
30CrMoA	≤M22	550	495	480	470	460	450	435
	M24 ~ M48	500	450	435	425	420	410	395
35CrMoA	≤M22	735	665	645	625	615	605	580
	M24 ~ M48	685	620	600	585	575	565	540
注：高合金钢螺柱高温屈服强度可参考表 A.1 所列相应钢号的数据。								

表 A.5 钢材弹性模量

材 料	在下列温度 (°C) 下的弹性模量, 10^3MPa							
	-20	20	100	150	200	250	300	350
碳素钢 ($C \leq 0.30\%$)	194	192	191	189	186	183	179	173
碳素钢 ($C > 0.30\%$)、碳锰钢	208	206	203	200	196	190	186	179
奥氏体钢	199	195	191	187	184	181	177	173
高铬钢 (Cr13 ~ Cr17)	203	201	198	195	191	187	181	175

表 A.6 钢材平均线膨胀系数

材 料	在下列温度 (°C) 与 20°C 之间的平均线膨胀系数, $10^{-6}\text{mm}/(\text{mm}\cdot^\circ\text{C})$								
	-50	0	50	100	150	200	250	300	350
碳素钢、碳锰钢	10.39	10.76	11.12	11.53	11.88	12.25	12.56	12.90	13.24
奥氏体钢	15.97	16.28	16.54	16.84	17.06	17.25	17.42	17.61	17.79
高铬钢 (Cr13 ~ Cr17)	8.95	9.29	9.59	9.94	10.20	10.45	10.67	10.96	11.19

NB/T 47003.1—2009 (JB/T 4735.1) 《钢制焊接常压容器》 标准释义

一、标准工作组

NB/T 47003.1—2009 由“钢制焊接常压容器标准工作组”组织起草,标准工作组成员名单如下:

组长:刘福录

顾问:李世玉、朱巨贤

成员:张延丰、武铜柱、万网胜、夏莉、岳国印、沈炳余、严国华、张勇、郝春生、徐耀康、斯新中、陈长宏

NB/T 47003.1—2009 负责起草单位:甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司。

NB/T 47003.1—2009 参加起草单位:安徽省特种设备检测院、中国石化工程建设公司、中国寰球工程公司、中国石油工程设计公司大连分公司、中国石化集团上海工程有限公司、洛阳石化工程公司、中国特种设备检测研究院、北京市燃气集团有限责任公司特种设备检验所。

NB/T 47003.1—2009 各章主要起草人:

第1章 范围	刘福录
第2章 规范性引用文件	刘福录
第3章 术语和定义	刘福录
第4章 总则	刘福录
第5章 材料	张 勇
第6章 基本结构元件	严国华、费继增、夏 莉、岳国印、赵建新
第7章 立式圆筒形容器	王文江、冀 峰、岳 彬
第8章 矩形容容器	姜英明、沈炳余
第9章 制造、检验与验收	严国华、费继增、沈炳余
附录 A 材料不同温度下的性能	张 勇

参加 NB/T 47003.1—2009 编制工作的单位及人员有:

甘肃蓝科石化高新装备有限公司:朱保国、王万磊、李晓明

中国石化工程建设公司:李世玉

中国特种设备检测研究院:寿比南、王为国

北京市燃气集团有限责任公司特种设备检验所:江枫

二、条文说明

1 范围

NB/T 47003.1—2009 属国家标准 GB 150《钢制压力容器》的配套标准,规定了适用的压力范围为大于-0.02MPa 至小于 0.1MPa,设计温度范围按钢材允许的使用温度的压力容器设计、制造、检验与验收的要求。取消了原标准中“低温低应力工况”的规定。

1.1 设计压力

设计压力的定义与 GB 150 相同,也引入了计算压力的定义,NB/T 47003.1—2009 与 GB 150 不同之处在于,由于设计压力较低,无论何种情况计算压力均应计入液柱静压力。NB/T 47003.1—2009 的适用压力范围是与 GB 150 衔接形成体系而确定的,其中圆筒形容器沿用了 JB 2880—1981《钢制焊接常压力容器技术条件》的适用范围;矩形容器多是直通大气,且为仅承受液体静压的储水设备或冷却水箱式换热器等,故 NB/T 47003.1—2009 规定矩形容器的设计压力为零。

适用压力限定在小于 0.1MPa 还考虑了以下两个问题:

① 可与《压力容器安全技术监察规程》(1999 版)协调一致。

② 与大多数国家压力容器所划界限相接,如 GB 150、美国 ASME-VIII-1、英国 BS 5500、日本 JIS B8270 等的适用压力下限都划定在 0.1MPa。

1.2 设计温度

容器的设计温度是按钢材允许使用温度,根据钢材的特性确定,可从 -196°C 至钢材的蠕变范围。

具体设计温度范围是:

非受压容器用碳素钢: 沸腾钢 $0^{\circ}\text{C}\sim 250^{\circ}\text{C}$;

镇静钢 $0^{\circ}\text{C}\sim 350^{\circ}\text{C}$;

压力容器用碳素钢: $-19^{\circ}\text{C}\sim 350^{\circ}\text{C}$;

低合金钢: $-19^{\circ}\text{C}\sim 350^{\circ}\text{C}$;

高合金钢: $-19^{\circ}\text{C}\sim 350^{\circ}\text{C}$ 。

对于设计温度低于 -20°C 的常压力容器, NB/T 47003.1—2009 不另行规定,其设计、制造、检验与验收的要求应与 GB 150 相同。

1.3 不适用的各类容器

NB/T 47003.1—2009 不适用的容器类别,除压力限制外,基本上同 GB 150 一致。具体如下:

- a) 受火焰加热的容器;
- b) 受核辐射的容器;
- c) 盛装毒性为极度或高度危害介质的容器;
- d) 直接埋入地下的容器;
- e) 可升降气柜;
- f) 经常搬运的容器;
- g) 料仓;
- h) 几何容积大于 1000m^3 的立式圆筒形容器;
- i) 高度大于 10m,长径比大于 5 的塔式容器。

增加第 g)、h)、i),其都有相应标准,按各自标准执行。

盛装毒性为极度或高度危害介质的容器,因涉及人身安全,其设计、制造、检验与验收要求高,划归在 GB 150 中。

2 术语和定义

NB/T 47003.1—2009 所用术语和定义,系参照 GB 150,且尽可能与其一致,但在个别定义上作了改动,如外压容器的设计压力改为“应取不低于在正常工作情况下可能出现在壳壁内外的最大压

力差”；其他的名词定义与 GB 150 相同。

计算压力指在相应的设计温度下，用以确定容器各部位或元件计算厚度的压力，其值为设计压力与容器各部位或元件所承受的液柱静压力之和。

因设计压力较小，故液柱静压力均应计入（GB 150 规定液柱静压力小于设计压力的 5% 时可不计入）。NB/T 47003.1—2009 中的计算公式都使用计算压力 p_c 确定计算厚度。各种厚度之间的关系示意如图 1 所示：

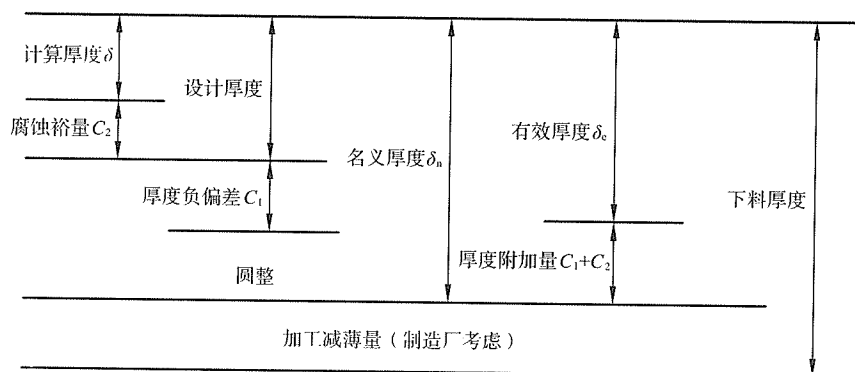


图 1 各种厚度关系

3 总则

3.1 资格与职责

按照《压力容器安全技术监察规程》(1999 版) 的规定，设计压力小于 0.1MPa 的容器不属于安全监察范围管辖，对其设计单位不要求持有压力容器设计单位批准书，制造单位不要求持有压力容器制造许可证，但常压容器包容了各类大型容器，以及盛装中、轻度毒性介质和有密封要求的设备，故规定容器的设计、制造单位应具有健全的质量体系，以避免粗制滥造，影响生产及安全。基于上述原因，NB/T 47003.1—2009 参照 GB 150 的有关规定，结合常压容器的特点，对设计、制造单位的资格与职责作了具体要求。

3.2 安全系数

NB/T 47003.1—2009 修订了碳素钢、低合金钢、铁素体高合金钢的安全系数。由于 GB 150 规定的安全系数为 3.0，JB/T 4732《钢制压力容器—分析设计标准》规定的安全系数为 2.6，且已使用多年，积累了丰富的经验，证明安全可靠。目前国外的压力容器标准也有将安全系数降低的趋势，如德国的压力容器标准已将屈服极限下的安全系数降为 1.5，法国的压力容器分析设计标准已将安全系数确定为 2.4，英国的压力容器标准已将安全系数确定为 2.3。JB/T 4735—1997 版规定的安全系数为 2.5 已显得偏高，结合 JB/T 4735—1997 的使用经验，为充分利用材料性能，降低常压容器的制造成本，在确保安全使用的前提下，经标准工作组 2005 年兰州会议讨论决定，将钢材标准抗拉强度下限值的安全系数由 2.5 降为 2.4，其余与 GB 150 一致，不作修改。

3.3 压力试验与试漏

常压容器实际所承受压力为设计压力与液柱静压力之和，其中多数情况下液柱静压力起主要作用。JB/T 4735—1997 规定的压力试验压力，液压试验时为 0.1MPa，气压试验时为 0.07MPa，与液柱

静压力相加后容易导致容器底部压力过大,在试压时可能引起结构变形,而不得不增加壳体厚度进行试压,增加不必要的制造成本,故 NB/T 47003.1—2009 将压力试验压力降低:液压试验时由 0.1MPa 降为 0.05MPa,气压试验时由 0.07MPa 降为 0.05MPa。并同时规定如因采用 0.05MPa (液压试验)或 0.05MPa (气压试验)试压,会导致必须增加壳体厚度时,则允许适当降低试验压力,但不得低于 $1.25p \frac{[\sigma]}{[\sigma]^t}$ MPa (液压试验)或 $1.10p \frac{[\sigma]}{[\sigma]^t}$ MPa (气压试验)。

由于肥皂水试漏的效果不明显, NB/T 47003.1—2009 取消了肥皂水试漏的规定。

气压试验时介质温度与 GB 150 的规定的不得低于 15℃不同, NB/T 47003.1—2009 为不低于 5℃。是考虑到以下因素:

- ① 常压容器的试验压力相对较低,故试验过程中的危险性也相对较低;
- ② 常压容器的常用钢料 Q235、Q245R、Q345R 的脆性转变温度均在 -20℃以下, Q235A.F 有可能在 -20℃~0℃之间产生脆性转变,故气压试验时介质温度不低于 5℃是安全的;
- ③ JB/T 4735—1997 将气压试验介质温度确定为不得低于 15℃,目前,在很多情况下很难确保,多数制造单位要求适当降低气压试验介质温度。

4 材料

4.1 总则

由于常压容器相对于 GB 150 规定的压力容器而言要求较低, NB/T 47003.1—2009 规定凡是 GB 150 所用的钢材均可用于常压容器,并增加了 Q235A.F、Q235A 等材料。常压容器用钢的使用温度下限, NB/T 47003.1—2009 修改为按钢材允许的使用温度下限。

根据 TSG R0004—2009《固定式压力容器监察规程》的规定,将气压试验试验压力由 $1.15p \frac{[\sigma]}{[\sigma]^t}$ 改为 $1.10p \frac{[\sigma]}{[\sigma]^t}$ 。

4.2 钢板

低合金钢板增加 Q370R 牌号。高合金钢板取消不常用的 0Cr19Ni13Mo3 和 00Cr19Ni13Mo3 两个牌号,增加 00Cr18Ni5Mo3Si2 牌号。对于 Q235A.F、Q235A、Q235B、Q235C 等钢板的厚度限制放宽到钢材允许的厚度。

4.3 钢管

碳素钢钢管增加 Q235A、Q235B、16Mn 牌号, NB/T 47003.1—2009 为充分体现常压容器的特点,规定允许采用 GB/T 8162 的钢管,但应增做液压试验。高合金钢管取消不常用的 0Cr19Ni13Mo3 和 00Cr19Ni13Mo3 两个牌号,对于 0Cr18Ni19 牌号,当采用 GB 13296 的钢管时壁厚小于或等于 13mm,采用 GB/T 14976 的钢管时壁厚小于或等于 18mm。

4.4 锻件

高合金增加 00Cr18Ni5Mo3Si2 牌号。

4.5 螺柱和螺母

螺柱和螺母用钢增加 40MnB、30CrMoA、35CrMoA 牌号,螺母用钢取消 Q215A、20、25、2Cr13、0Cr13 牌号。

4.6 型钢

16Mn 牌号修改为 Q345 牌号。

4.7 焊接材料

NB/T 47003.1—2009 增加了焊接材料的内容,对焊接材料的质量证明书,碳素钢、低合金钢之间相焊的焊接材料,高合金钢之间相焊的焊接材料,不同钢号之间相焊的焊接材料的选用提供了参考依据。

5 基本结构元件

5.1 内压圆筒和内压球壳

(1) 内压圆筒

圆筒厚度计算采用第一强度理论计算周向应力的公式,根据常容器的特点,由于设计压力相对较低,故对公式进行了简化。具体公式如下:

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

(2) 内压球壳

NB/T 47003.1—2009 增加内压球壳计算公式,补充了缺项。内压球壳厚度计算采用第一强度理论计算周向应力的公式,根据常容器的特点,由于设计压力相对较低,故对公式进行了简化。具体公式如下:

$$\delta = \frac{p_c D_i}{4[\sigma]^t \phi} \dots\dots\dots (2)$$

5.2 外压圆筒和外压球壳

外压圆筒和外压球壳的计算完全为刚性和失稳问题,其计算方法与 GB 150 的规定完全一致,NB/T 47003.1—2009 不再另行规定。设计时除许用应力按 NB/T 47003.1—2009 规定外,其余计算方法完全按 GB 150 的规定。

5.3 封头

考虑常容器的特点和使用情况,仅列出了标准椭圆形、碟形和球冠形封头,以及无折边锥形封头(或称锥壳)。未列出半球形、有折边锥形和带法兰的凸形封头,使用者采用上述封头时,可按 GB 150 的有关规定。

① 由于 JB/T 4735—1997 规定受内压(凹面受压)椭圆形封头的有效厚度根据使用经验,有可能出现转角内压失稳的问题,故 NB/T 47003.1—2009 根据 GB 150 对其进行了修改,由 JB/T 4735—1997 中受内压(凹面受压)椭圆形封头有效厚度应不小于封头内直径的 0.10% 修改为: $K \leq 1$ 的标准椭圆形封头的有效厚度应不小于封头内直径的 0.15%; $K > 1$ 的椭圆形封头的有效厚度应不小于封头内直径的 0.30%。但当确定封头厚度时已考虑了内压下的弹性失稳问题,可不受此限制。

② 基于上述原因, NB/T 47003.1—2009 对受内压(凹面受压)碟形封头的有效厚度也进行了修改,由 JB/T 4735—1997 中受内压(凹面受压)碟形封头有效厚度应不小于封头内直径的 0.10% 修改为: $M \leq 1.34$ 的碟形封头,其有效厚度应不小于封头内直径的 0.15%; $M > 1.34$ 的碟形封头,其有效厚度应不小于封头内直径的 0.30%。但当确定封头厚度时已考虑了内压下的弹性失稳问题,可不受此限制。

③ 无折边锥形封头和球冠形封头考虑常容器的特点,参照了美国石油学会 API 620 的计算方法。API 620 规定的计算方法是近似的,没有考虑边缘弯曲应力和剪切应力的影响,但由于 API 620

中球冠或锥壳与圆筒连接结构及受力状态比较接近实际,且概念清楚、计算简便,当前国内大部分设计都参考了该标准。

在内压作用下,球冠或锥壳大端与圆筒连接处,封头部分单位长度上的薄膜力 T_2 将圆筒壁向内推,此推力在连接处产生环向附加压力 $0.5T_2D_{\text{his}}\sin\alpha$ 。在连接处总环向内力 Q 近似可按壳体在二次应力有效范围内的薄膜力 T_2W_h 加上 $T_{2s}W_c$ 和附加压力 $0.5T_2D_{\text{his}}\sin\alpha$ 的总和确定,即NB/T 47003.1—2009中式(6-28)。但当用锥壳作为过渡段时,在锥壳小端与圆筒连接处,锥壳单位长度上的薄膜力 T'_2 将圆筒壁向外推,此推力在连接处产生环向附加拉力 $0.5T'_2D_{\text{his}}\sin\alpha$,增加了作用在连接处的总环向拉伸力 Q' ,即NB/T 47003.1—2009中式(6-29)。若在外压作用下,封头部分单位长度上内力 T_1 、 T'_1 和 T_2 、 T'_2 及圆筒部分单位长度上环向力 T_{2s} 、 T'_{2s} ,其方向与受内压时是相反的,代入式(6-28)或式(6-29)计算环向总内力 Q 或 Q' 时就要区别 T_1 、 T_2 、 T_{2s} 和 T'_1 、 T'_2 、 T'_{2s} 是受拉(正号)或受压(负号)。

对圆筒,当连接处假设为完全嵌固时,其二次应力开始衰减到零的距离按式(3)计算:

$$L = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\sqrt{R\delta}}{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

取钢的 $\mu=0.3$ 代入式(3)得:

$$L = 0.6\sqrt{R\delta} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

R ——圆筒内半径,mm;

δ ——圆筒厚度,mm。

封头与圆筒在连接处具有二次应力的范围即所谓“有效宽度”可近似按式(3)及式(4)确定,见NB/T 47003.1—2009中式(6-21)~式(6-25)。

环向总内力 Q 或 Q' 原则上由连接处的有效宽度范围内的截面来承受,但按API 620规定对封头和圆筒自身的拼接为对接焊时才适用。当封头自身拼接采用搭接焊时,封头上的有效面积 W_h 、 W'_h 就不能视为承受环向内力,此时NB/T 47003.1—2009中式(6-34)及式(6-35)或式(6-36)应改为下式:

$$A_r \geq A - W_c \delta_{cs} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$A_r \geq A' - 2W'_c \delta'_{cs} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$A_r \geq A - 2W_c \delta_{cs} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中 A_r 应小于或等于零,不满足时应增加封头和圆筒的厚度或增设加强圈。

当采用搭接时,实际增加的承压面积比采用对接时多,同时NB/T 47003.1—2009中式(6-37)也不能用作校核封头的稳定性。

本章考虑到一般容器封头自身拼接多采用对接接头,所以规定封头、圆筒自身的拼接必须采用对接接头。若工程设计中需要采用搭接接头时,则应考虑受力的不利影响,增加连接处承压面积,此部分可参见API 620中例题。

连接处的许用应力值按 API 620 规定。当屈服强度在 30 000 磅/英寸²~38 000 磅/英寸²的钢材(相当我国的 Q 235 碳素钢),当 $Q > 0$ 时取纯拉伸时的最大许用应力。当 $Q < 0$ 时,许用压缩应力为 15 000 磅/英寸² ($\approx 103\text{MPa}$)。但 API 620 规定的适用范围是按操作时金属温度不超过 200°F (93℃)。而 NB/T 47003.1—2009 的温度适用范围比 API 620 高,且连接处在承受环向压缩应力时,对这种局部压缩许用应力值如何选取尚缺乏可靠的数据,故只好按钢材的常规情况随着温度升高钢材的临界应力也随之下降的原则,考虑在 API 620 规定的 200°F 时取许用压缩应力 15 000 磅/英寸² ($\approx 103\text{MPa}$) 的基础上, NB/T 47003.1—2009 中给出表 6-3 供设计参考。

NB/T 47003.1—2009 中式 (6-37) 表示连接处封头部分的有效承压宽度的水平投影应不小于圆筒内半径的 0.015 倍,以保证封头与圆筒连接处在承受环向压缩应力时不致于发生失稳。但当封头自身拼接采用搭接时,封头部分的有效承压宽度的水平投影不能用来满足水平宽度的需要,则在连接处有效宽度范围内需另加结构件来承担。

一般情况下, NB/T 47003.1—2009 中式 (6-34) ~ 式 (6-37) 要求不易得到满足,此时需要在连接处设置加强圈,加强圈的型式很多,可为扁钢、角钢或加厚连接处的节点板等。API 620 介绍几种允许采用和不允许采用的型式。NB/T 47003.1—2009 推荐采用以下三种结构,如图 2 所示。

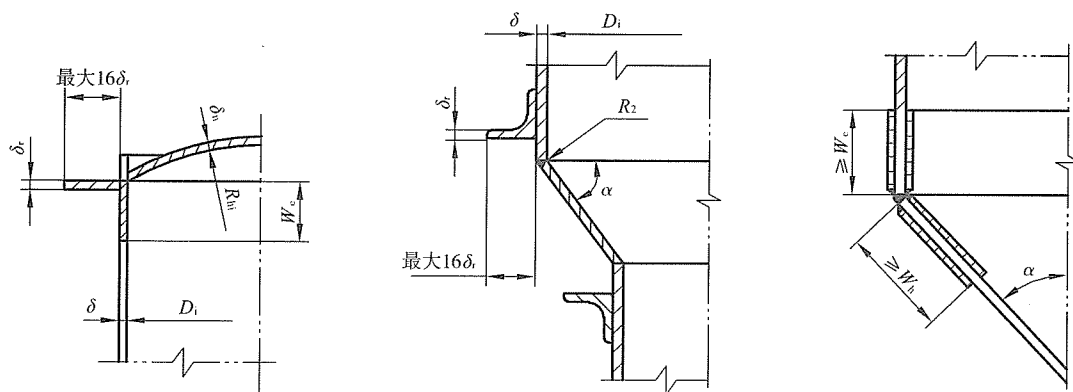


图 2 加强圈的设置

按 API 620 规定加强圈应尽量设置在靠近封头与圆筒连接的平面上,且加强圈伸出圆筒外侧的最大宽度不应超过 16 倍的加强圈厚度。若超过此值应考虑在加强圈截面上加支撑,以保证加强圈自身的稳定性。

5.4 平盖

根据常压容器的特点,并考虑更实用的原则,本节对 JB/T 4735—1997 内容作了一定增减,主要改动如下:

- ① 增加了 $p \leq 0.002\text{MPa}$ 情况下的平盖系列厚度,厚度见 NB/T 47003.1—2009 中表 6-5,结构见 NB/T 47003.1—2009 表 6-4 中序号 1、2 所示;
- ② 增加了几种径向加筋的结构,见 NB/T 47003.1—2009 表 6-4 中序号 3、4、8 所示结构;
- ③ 去掉 JB/T 4735—1997 中表 8-1 中序号 1、2、6、7、11、18 项,主要考虑此类型结构比较少用。当设计者由于特殊情况需采用与 GB 150 结构相同的平盖形式时,可按 GB 150 公式进行计算。
- ④ 对部分结构的结构特征系数 K_p (JB/T 4735—1997 中为 K) 作了改动。

对工程中大量应用的 $p \leq 0.002 \text{ MPa}$ (200mm H₂O) 的情况 (见 NB/T 47003.1—2009 表 6-4 中序号 1~2 所示结构), 平盖厚度主要由经验确定, 用列表给出了推荐平盖厚度, 此内容参考 HG5-1571~1580《普通碳素钢及低合金钢贮罐标准系列》, 并经过验算后确定, 在国内也有较成熟的使用经验。

对表 6-4 中序号 3、4、8 所示径向加筋结构, 参考 HG 20582—1998 而得, 其源自原苏联文献中。为使用统一的计算公式 [标准中式 (6-38)], 把 HG 20582—1998 中公式经转换与式 (6-38) 一致, 可得其 $K_p=0.03$ 。

对于其他形式平盖, 采用了经典的与 GB 150 一致的厚度公式进行计算。公式如下:

$$\delta_p = D_c \sqrt{\frac{K_p p_c}{[\sigma]^t \phi}}$$

对不同的结构, 采用了不同的结构系数 K_p 值。

对 NB/T 47003.1—2009 表 6-4 中序号 5、6、7、9 所示平盖结构, K_p 值参考了 ASME 和 GB 150 选取。该值比 JB/T 4735—1997 低, 主要考虑 JB/T 4735—1997 系数 K_p 参考日本 JIS 8243—1981 及法国 CODAP 等, 而在 JIS B8270 中, 系数 K_p 已降低至与 ASME 相同。

对 NB/T 47003.1—2009 表 6-4 中序号 10、12~15 所示平盖结构, K_p 及截面系数 Z_x 值按 JB/T 4735—1997 选取。其基于周边简支扇形或矩形板的公式和系数, 经简化后求得。

对 NB/T 47003.1—2009 表 6-4 中序号 11 所示平盖结构的 K_p 及截面系数 Z_x 值也是基于周边简支扇形或矩形板的公式和系数, 经简化后求得。

对 NB/T 47003.1—2009 表 6-4 中序号 16、17 所示平盖结构的 K_p 值按 GB 150 选取。该值也与 ASME 和 API 620 一致。

关于带平盖容器试验压力, 带平盖容器水压试验压力应取 $1.25p[\sigma]/[\sigma]^t$, 气压试验压力应取 $1.10p[\sigma]/[\sigma]^t$ 。当采用大于该值的试验压力时, 设计人应自行校核平盖强度或密封性。

5.5 开孔和开孔补强

计算方法按 GB 150 和 JB/T 4735—1997 中等面积补强法, 根据常压容器的特点作如下修改:

① 假设接管材料与开孔壳体材料具有相同或相近的强度指标, 取强度削弱系数 $f_r=1$, 简化补强面积计算。

② 放宽了适用的开孔范围。

a) 圆筒:

当其内直径 $D_i \leq 1500 \text{ mm}$ 时, 开孔最大直径 $d \leq 0.6D_i$, 且 $d \leq 600 \text{ mm}$;

当其内直径 $D_i > 1500 \text{ mm}$ 时, 开孔最大直径 $d \leq 0.4D_i$, 且 $d \leq 1200 \text{ mm}$ 。

b) 凸形封头或球壳的开孔最大直径 $d \leq 0.6D_i$ 。

c) 锥壳 (或锥形封头) 的开孔最大直径 $d \leq 0.4D_i$, D_i 为开孔中心处的锥壳内直径。

图 3 以圆筒为例说明 GB 150 与 NB/T 47003.1—2009 开孔范围的比较。

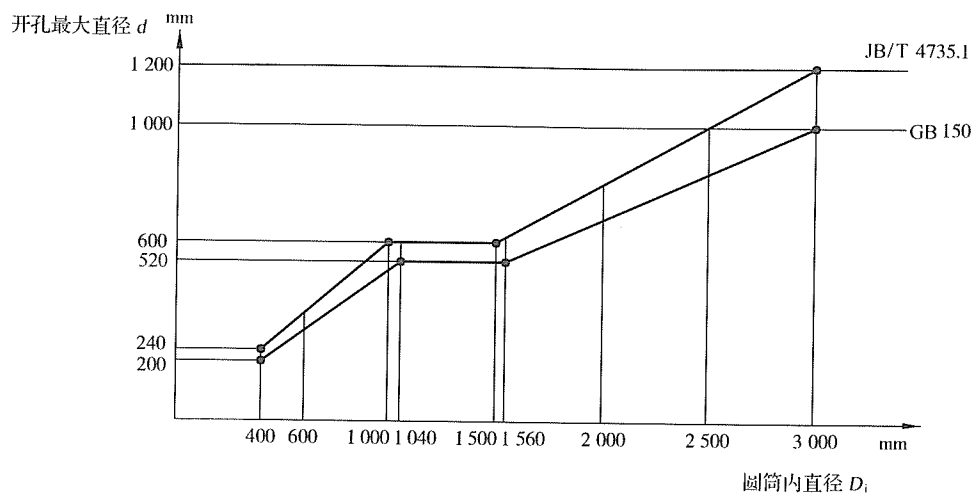


图3 两标准开孔范围比较

③ 补充了 JB/T 4735—1997 不另行补强接管壁厚要求。

壳体开孔满足下列全部要求时，可不考虑补强：

- a) 两相邻开孔中心的间距（对曲面间距以弧长计算）应不小于两孔直径之和；
- b) 接管公称直径 $DN \leq 100\text{mm}$ ；
- c) 接管最小壁厚满足表 1 要求。

表 1 接管最小壁厚

mm

接管公称直径 DN	25	32	40	50	65	80	100
接管最小壁厚	3.5		4.0	5.0		6.0	

注：接管的腐蚀裕量为 1 mm。

④ 要求补强圈材料一般与壳体材料相同，所以删除 JB/T 4735—1997 中补强圈材料许用应力与壳体材料许用应力不同时，对补强面积的要求。

⑤ 取消 JB/T 4735—1997 中当直径超出适用的开孔范围时，对其补强面积和补强位置的要求。

⑥ 略去焊缝所提供的金属补强截面积 A_3 。

⑦ 参照 ASME 规范，对“有效补强范围示意图”中各元件图示补强面积进行了修改，更清晰明了。

⑧ 等面积法开孔补强的理论及实践依据参见 GB 150—1989《标准释义》的有关说明。

5.6 矩形法兰

NB/T 47003.1—2009 编制的矩形法兰，其密封面由窄面法兰改为宽面法兰形式。

矩形法兰一般用于低压场合。在低压工况下，法兰强度计算往往取决于预紧状态下的螺栓载荷。窄面法兰在预紧状态下的螺栓载荷作用时会产生较大的力矩，而作用在宽面法兰上则不产生力矩。由于在低压操作状态下的螺栓载荷较小，宽面法兰的力臂也小，所以作用在法兰上的力矩较小。法兰力矩的减小，不仅仅会使法兰厚度减薄，同时也使相对较为薄弱的矩形箱体避免受到较大法兰力矩的影响，这对箱体的设计非常重要。

虽然宽面法兰因其垫片有效宽度较宽,要求有较大的垫片压紧力,但因矩形法兰工作压力低,所需的螺栓总面积并不大。所以低压矩形法兰很适宜采用宽面法兰作为密封面,这与目前工厂使用情况相符合,调查时也未见有窄面密封面法兰用于矩形法兰上的例子。为了使标准具有更大的适应性,以满足大部分工程设计的实际需要,这次改版将矩形法兰密封面改为宽面法兰,计算方法也作了相应修改。矩形法兰仍保持板式平焊结构。

6 立式圆筒形容器

6.1 不带整体加强环耳式支座

(1) 不带整体加强环耳式支座的结构型式及使用范围

不带整体加强环耳式支座结构简单,制造方便,广泛应用于中小型立式设备中。目前,不带整体加强环耳式支座的结构型式大致分为无垫板耳式支座、带垫板耳式支座及带盖板耳式支座。

无垫板耳式支座由筋板与底板组成。筋板数量根据设备的重量以及设备所承受的外力矩大小而定,一般取两块,但对轻型容器可只用一块。无垫板耳式支座适用于小型立式容器。

带垫板耳式支座由垫板、筋板以及底板组成。垫板厚度一般取与壳体等厚或不小于 0.8 倍壳体厚度。带垫板耳式支座适用于以下设备:

① 支座对设备壳体产生的附加应力过大,为防止壳体凹陷,需增加垫板,以减少设备壳体的局部载荷。

② 当壳体材料为不锈钢时,为防止壳体与支座在焊接过程中合金元素的流失,需在支座与壳体间加不锈钢垫板。

JB/T 4712.3《容器支座 第3部分:耳式支座》中已详细列出无垫板耳式支座、带垫板耳式支座的结构参数尺寸。对于公称直径小于或等于 4000mm 的立式圆筒形容器宜优先选用 JB/T 4712.3 规定的支座。

带盖板耳式支座整体稳定性好,筋板的应力也低,在国外设备中有广泛的应用。适用于以下设备:

① 对于支座实际所受载荷超出支座允许载荷范围的中型立式圆筒形容器。

② 公称直径小于或等于 4000mm,高径比为 2~5 的设备。

(2) 带盖板耳式支座的设计计算

支座设计计算参照 Herry H. Bednar. P. E.《压力容器设计手册》中关于顶部有横板支耳的受力分析的模型及其计算。

关于计算公式的几点说明:

① 明确规定筋板最大压缩应力 σ_{cmax} 应小于筋板材料的压缩许用应力 $[\sigma]_c$, $[\sigma]_c$ 考虑了由于筋板受压而引起结构性失稳的影响。

② 筋板的最大压缩应力 σ_{cmax} 。筋板被认为是一个两端铰接并受偏心压力 $[F]_R$ 的平板,筋板的最大压缩应力 σ_{cmax} 由 F_R 引起的压应力 $\frac{F_R}{L_1 \delta_g}$ 及弯曲应力 $\frac{6eF_R}{L_1^2 \delta_g}$ 组成,在式中 $e = \left(d - \frac{b}{2}\right) \sin \alpha$ 中, d 一般取支座底板上螺栓中心到壳体外壁的距离。在筋板厚度未知的情况下,筋板厚度 δ_g 的计算公式可根据筋板的最大压缩应力 $\sigma_{\text{cmax}} = \frac{F_R}{L_1 \delta_g} + \frac{6eF_R}{L_1^2 \delta_g}$ 推导出,即 $\delta_g = \frac{(3d-b)F}{[\sigma]_c b^2 \sin^2 \alpha}$,式中 $[\sigma]_c$ 为筋板材料的压缩许用应力。

③ 盖板的最大应力。盖板可认为是一个受均布力 $\frac{Fd}{h}$ 的简支梁。盖板的最大应力发生在盖板长度方向中点处。

盖板的最大应力 $R = \frac{6M}{\delta_a c^2}$ 式中, M 为最大弯矩, 把 $M = \frac{Fda}{8h}$ 代入上式得盖板的最大应力公式:

$$R = \frac{0.75Fda}{\delta_a c^2 h}$$

在盖板厚度未知的情况下, 盖板厚度 δ_a 的计算公式可根据筋板的最大压缩应力 $R = \frac{0.75Fda}{\delta_a c^2 h}$ 推出, 即 $\delta_a = \frac{0.75Fda}{[\sigma]_a c^2 h}$ 。

6.2 带整体加强环耳式支座

(1) 带整体加强环耳式支座的使用范围

当耳式支座处圆筒壁内存在较高的局部应力或对圆筒壁变形有较严格要求, 而不宜采用垫板时, 可采用带整体加强环的耳式支座。

(2) 带整体加强环耳式支座的计算

带整体加强环耳式支座的计算, 参考了 HG 20582—1998 中关于带刚性环支耳支座的设计和计算。

6.3 支腿式支撑

支腿式支撑强度计算部分参照 JB/T 4712.2 附录 A 的关于支承于筒体器壁的支腿支座的强度计算方法。

视水平力为一作用于容器质心的水平载荷, 建立的力学模型如图 4 所示, 在最大水平力 F_H 产生的力矩 $M_{\max}$ 的作用下, 容器发生偏转, 从而在正风侧的支腿产生拉力, 背风侧的支腿产生压力, 弯矩按式 (8) 计算:

$$M_{\max} = F_H \cdot h \quad \dots\dots\dots (8)$$

假定支腿 i 的垂直载荷为 F_i , 其所在的方位角为 θ_i , 见图 5 所示。

A 向受力时支柱方位角按式 (9) 计算:

$$\theta_i = i \frac{360^\circ}{n} \quad \dots\dots\dots (9)$$

B 向受力时支柱方位角按式 (10) 计算:

$$\theta_i = \left(i - \frac{1}{2} \right) \frac{360^\circ}{n} \quad \dots\dots\dots (10)$$

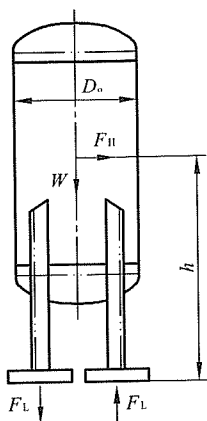


图4 支腿式支撑容器力学模型

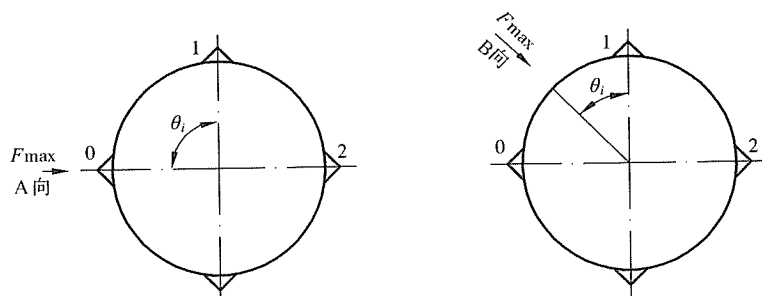


图5 支腿受力方位角示意图

容器在 M_{max} 的作用下偏转一个角度，则根据平面变形假设，支腿各力之间存在如下关系：

$$\frac{F_0}{F_i} = \frac{R \cdot \cos \theta_0}{R \cdot \cos \theta_i} \quad \frac{F_1}{F_i} = \frac{R \cdot \cos \theta_1}{R \cdot \cos \theta_i}$$

于是：

$$M_{max} = R \cdot F_i \cdot \frac{\cos^2 \theta_0}{\cos \theta_i} + R \cdot F_i \cdot \frac{\cos^2 \theta_1}{\cos \theta_i} + R \cdot F_i \cdot \frac{\cos^2 \theta_2}{\cos \theta_i} + \dots$$

任意一根支腿 i 的垂直载荷 F_i 为：

$$F_i = \frac{\cos \theta_i \cdot M_{max}}{R \cdot (\cos^2 \theta_0 + \cos^2 \theta_1 + \cos^2 \theta_2 + \dots)} = \frac{2 \cdot \cos \theta_i \cdot M_{max}}{n \cdot R} \quad \dots \quad (11)$$

由式 (11) 可知，当最大水平力作用在容器上时，迎风侧支腿所受的最大拉力和背风侧支腿所受的最大压力可按式 (12) 计算：

$$(F_i)_{max} = \frac{2 \cdot M_{max}}{n \cdot R} = \frac{2 \cdot F_H \cdot h}{n \cdot R} \quad \dots \quad (12)$$

将 $R = \frac{D_b}{2}$ 代入式 (12) 中，则变为 NB/T 47003.1—2009 中的公式：

$$(F_i)_{max} = \pm \frac{4 F_H \cdot h}{n \cdot D_b}$$

6.4 裙式支座

裙式支座的常容器的设计计算与 JB/T 4710—2005《钢制塔式容器》相同, NB/T 47003.1—2009 不另行给出系统的计算公式和方法, 设计计算时应按 JB/T 4710 的有关规定计算容器的质量、自振周期、地震载荷、风载荷、偏心弯矩和最大弯矩, 校核壳体和裙座筒体的轴向应力, 并计算地脚螺栓。

裙式支承结构分为基础环无筋板和基础环有筋板两种形式。根据常容器的特点和实际使用经验, 为简化常压力容器裙式支承的设计计算, 在 NB/T 47003.1—2009 中, 推荐了与部分规格的地脚螺栓相配套的基础环和筋板结构尺寸, 但基础环的厚度需按 NB/T 47003.1—2009 的规定, 经计算确定。

(1) 无筋板基础环

其结构形式如图 6 所示, 其力学模型可简化为如图 7 所示的一端固支受均布载荷的悬臂梁, 混凝土基础对基础底板微元的反力可以简化成一线力 q (N/m) 作用在一端固支的梁上, 其弯矩为 $M_x = -\frac{qb^2}{2}$ 。如图 8 所示, 底板微元的截面系数 $W_x = \frac{b'\delta_b^2}{6}$, 底板应力 σ 按式 (13) 计算:

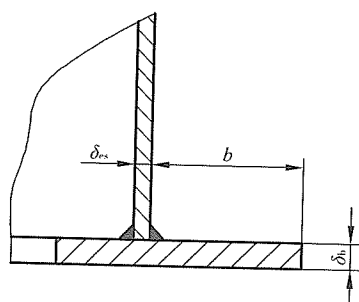


图 6 无筋板基础环

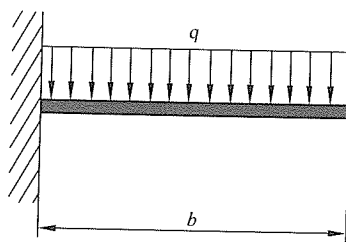
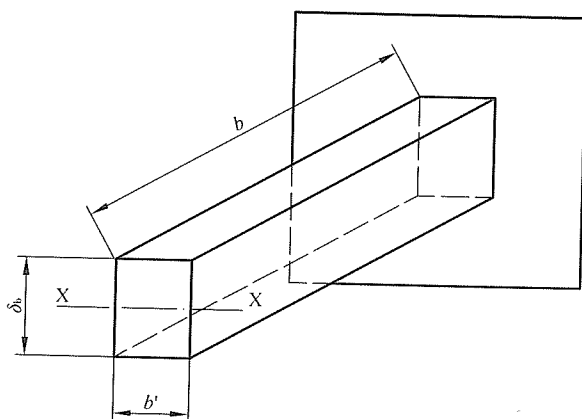


图 7 简化后的模型

图 8 宽度为 b' 的基础环微元模型

$$\sigma = \frac{M_x}{W_x} = -\frac{\frac{qb^2}{2}}{\frac{b'\delta_b^2}{6}} = -\frac{3qb^2}{b'\delta_b^2} \quad \dots\dots\dots (13)$$

其中 $q = \sigma_{b, \max} b'$, 代入式 (13) 整理得:

$$\sigma = -\frac{3qb^2}{b'\delta_b^2} = -\frac{3\sigma_{b,\max}b'b^2}{b'\delta_b^2} = -\frac{3\sigma_{b,\max}b^2}{\delta_b^2} \quad \dots\dots\dots (14)$$

式(14)中 $\sigma_{b,\max}$ 按JB/T 4710的有关规定按式(15)计算,并取其中较大值。

$$\sigma_{b,\max} = \begin{cases} \frac{M_{\max}^{0-0}}{Z_b} + \frac{m_0g \pm F_V^{0-0}}{A_b} \\ \frac{0.3M_w^{0-0} + M_e}{Z_b} + \frac{m_{\max}g}{A_b} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (15)$$

根据式(15)可得: $\delta_b = \sqrt{\frac{3\sigma_{b,\max}b^2}{R}} = 1.73b\sqrt{\frac{\sigma_{b,\max}}{R}}$, 取 R 为基础环材料的许用应力 $[\sigma]_b$, 即

得无筋板基础环的厚度: $\delta_b = 1.73b\sqrt{\frac{\sigma_{b,\max}}{[\sigma]_b}}$ 。

(2) 有筋板基础环

其厚度计算公式为 $\delta_b = \sqrt{\frac{6M_s}{[\sigma]_b}}$ 。

式中:

M_s —— 计算力矩,取矩形板对X、Y轴的弯矩 M_x 、 M_y 绝对值较大者, M_x 、 M_y 按JB/T 4710—2005中表8-7查取, N·mm/mm。

7 矩形容器

7.1 矩形容器的主要新增及修改内容

① 增加顶边自由型矩形容器, 共计七种类型矩形容器(见本标准中表8-1)。顶边自由型矩形容器 $V \leq 1\text{m}^3$, $0.3 \leq H/L \leq 3$, 顶部不设包边角钢, 其力学模型是顶边自由, 另三边简支, 承受三角形载荷的矩形板。

② 修改设计控制方式, 由原来的单纯壁厚设计, 变为壁厚设计加刚度校核, 给出了壁板的许用挠度, 以保证壁板的刚度要求。

③ 增加顶板设计, 力学模型为四边简支承受自重及附加载荷的矩形板。

④ 对七种矩形容器进行了详细分类说明, 给出了强度-刚度联合设计时的设计流程。

⑤ 修改、补充了部分结构说明。

7.2 与JB/T 4735—1997及国外标准的不同

(1) 关于刚度问题

JB/T 4735—1997的壁板设计为强度设计, 实际上从理论模型和实际应用, 都须考虑壁板的刚度。

理论上, 小挠度矩形薄板理论的一个基本前提是小变形, 文献[9]指出矩形板的小挠度问题, 前提条件是, 挠度与板厚之比小于或等于1/5。

工程上,除了要保证板的强度外,还需知道板的变形挠度,并对其作一定控制。文献[4]规定矩形的最大允许挠度为长边板长的 $1/500$,文献[5]规定为板厚的 $1/2$,这些规定并没有充分考虑矩形板这一承载结构的特点。另一方面,结构工程上,对梁的许用挠度已有成熟规定,考虑梁与矩形板的结构关系,矩形容器壁板的许用挠度,可以采用梁-板之挠度-载荷比拟相当原则,由梁的许用挠度得到板的许用挠度。具体分析见 7.4, NB/T 47003.1—2009 中图 8-2 的曲线数据见附录 A。

综合矩形板小挠度的理论与工程应用条件,壁板的许用刚度由式(8-1)确定。

(2) 关于矩形容器的型式问题

表 2 列出了国外标准、JB/T 4735—1997 及 NB/T 47003.1—2009 所包含的矩形容器的型式。

表 2 国外标准、JB/T 4735—1997 及 NB/T 47003.1—2009 所包含的矩形容器型式

设计标准	包含的矩形容器型式
文献[3]	顶边加固型、垂直加固型
文献[4]	顶边加固型、垂直加固型、横向加固型、拉杆加固型
文献[5]	顶边自由型、顶边加固型、垂直加固型、横向加固型
JB/T 4735—1997	顶边加固型、垂直加固型、横向加固型、拉杆加固型、垂直和横向组合加固型、带双向水平联杆垂直加固型
NB/T 47003.1—2009	顶边自由型、顶边加固型、垂直加固型、横向加固型、拉杆加固型、垂直和横向组合加固型、带双向水平联杆垂直加固型

(3) 关于设计流程

文献[5]提出: 1) 顶边自由其余三边支撑; 2) 四边支撑; 3) 四边支撑设置垂直加强筋; 4) 四边支撑设置水平加强筋; 5) 四边支撑设置垂直及水平联合加强筋。这五种型式的矩形容器,其设计方法是:

选择型式 m) 作壁板强度设计,然后计算最大挠度,如不满足 $W_{\max} \leq [f] = \delta_e/2$,则选择型式 n), ($m < n$); 继续进行强度设计和刚度校核,重复这一过程直到强度设计的壁板满足刚度要求为止。

这实际上是提出了强度-刚度联合设计时的设计流程问题。本次修订,提出了强度设计加刚度校核的设计原则,增加了矩形容器的类型,结合设计原则和各类型矩形容器的特点,给出了矩形容器的设计流程,即 NB/T 47003.1—2009 中 8.3。

(4) 关于矩形板的应力计算系数和挠度计算系数

矩形容器壁板的力学模型是各种边界条件和载荷形式作用下的矩形板,下一节将详细叙述。利用这些力学模型的理论结果进行矩形容器壁板设计计算时,要用到矩形板的应力计算系数 α 和挠度计算系数 β 。

文献[3]认为,矩形容器壁板的实际边界条件介于简支和固支之间,因而实际用于设计计算的应力计算系数可采用四周简支,受液体静压作用矩形板的理论应力计算系数的 0.8 倍。JB/T 4735—1997 采用了这一观点^[2],但应力计算系数的实际数据(即原标准中的图 13-3)却是取自文献[4],而文献[4]并没有明确指出用于矩形容器壁板设计计算的应力计算系数 α 与理论应力计算系数的关系。

本次修订,对用于矩形容器壁板设计计算的应力计算系数 α 和挠度计算系数 β ,均采用了矩形板的理论值。并且在推导计算应力计算系数 α 时,采用了与压力容器设计准则相一致的第一强度理

论, 将最大主应力作为强度计算的依据, 这与一般机械设计手册所提供的矩形板的应力计算系数值稍有不同, 后者将最大应力取为矩形板中面内两个正应力中的较大者, 而不是最大主应力。表 3 比较了 NB/T 47003.1—2009 所用四边简支, 受液体静压 (三角形载荷) 矩形板的应力计算系数与 JB/T 4735—1997 及文献[11]中的数据。

表 3 JB/T 4735—1997、国外标准、机械设计手册及 NB/T 47003.1—2009 中关于四边简支, 承受三角形液体静压之矩形板的应力计算系数 α 的比较

a/b	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
B/A	1.0	0.667	0.5	0.4	0.333	0.286	0.25	0.222
NB/T 47003.1—2009 中之 α	0.023 3	0.017 4	0.012 3	0.008 7	0.006 4	0.004 9	0.003 9	0.003 1
JB/T 4735—1997 及文献[4]中之 α	0.019 0	0.010 8	0.007	0.005	0.004	0.002 3	0.001 5	0.001
文献[11]中之应力计算系数 α'	0.16	0.26	0.32	0.35	0.37	0.38	0.38	0.38
以 α' 计算得到的对应的 α^*	0.026 7	0.019 3	0.013 3	0.009 3	0.006 9	0.005 2	0.004	0.003 1
* 比较式 (8-2) 和文献[11]中相应公式, 可以得到 α 与 α' 的关系: $\alpha = \frac{\alpha'}{6(a/b)^2}$ 。								

7.3 壁板、顶板和底板的力学模型

壁板、顶板计算的基础是小挠度薄板理论, 其中, 拉杆加固型矩形容器的壁板, 采用的是密布支承板的小圆平板模型; 其余几种型式矩形容器的壁板采用的是经典 Kichoff - Poisson 矩形平板理论; 顶板也是采用矩形板理论; 底板的力学模型是承受均布载荷 (自重及介质重量), 单位宽度的等跨连续梁。

矩形板的求解, 对于顶边自由三边简支的壁板采用了李维 (Levy) 解, 具体可参见文献[8]; 对于四边简支的矩形板采用纳维 (Navier) 解, 具体可参见弹性力学教材, 如文献[9]。壁板、顶板和底板具体的计算模型见表 4。

7.4 四边简支之矩形板的纳维解 (Navier Solution) ^{[9], [10]} 在矩形容器壁板、顶板计算上的应用

如图 9, 矩形薄板两边长为 a, b , 厚度为 t , 将坐标系建在板的中面上, 并记沿 Z 轴方向板的挠度为 W , 板的上表面承受集度为 q 的压力, 则矩形薄板的弹性曲面方程, 即控制方程为:

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \nabla^2 W &= \frac{q}{D} \\ D &= \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

表 4 矩形容器壁板、顶板和底板的力学模型

矩形板	力学模型	平板尺寸	解法及参考文献
顶边自由的壁板	一边自由三边简支, 承受三角形液体静压的矩形板	矩形容器的长/高, 或宽/高	李维解, 文献[8]
顶边加固的壁板	四边简支, 承受三角形液体静压的矩形板	矩形容器的长/高, 或宽/高	纳维解, 文献[2], [9]
被垂直加固柱和/或水平加固件加固的壁板	四边简支, 承受三角形或梯形液体静压的矩形板	相邻加固件之间的距离	纳维解, 文献[2], [9]
拉杆加固的壁板	直径为 $\sqrt{2}h$ 的圆平板 (h 为拉杆节距), 边界的结构特征系数取介于简支与固支之间的中间值	直径为 $\sqrt{2}h$ 的圆平板 (h 为拉杆节距)	文献[2], [12]
顶板	四边简支, 承受均布载荷(自重及附加载荷)的矩形板	相邻加固件之间的距离	纳维解, 文献[9]
底板	承受均布载荷(自重及介质重量), 单位宽度的等跨连续梁	—	文献[2]

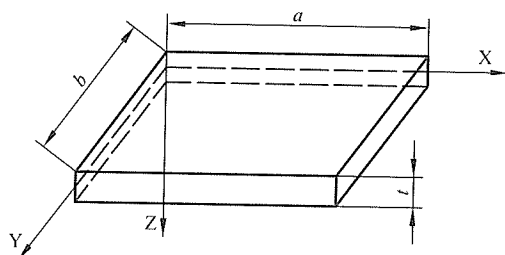


图 9 矩形薄板

D 为板的抗弯刚度, 板内任意一点的主要应力为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{Ez}{1-\mu^2} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) \\ \sigma_y &= -\frac{Ez}{1-\mu^2} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) \\ \tau_{xy} &= -\frac{Ez}{1+\mu} \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

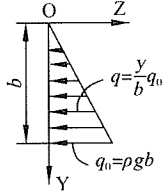
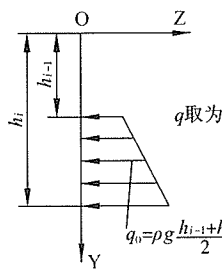
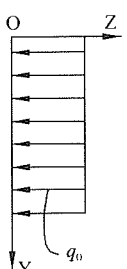
式中, 当 $z=\pm t/2$, (即在板的上下表面处), 应力为最大。

对于四边简支的矩形板, 纳维提出重三角级数解法, 可以得到挠度为:

$$W = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \dots\dots\dots (18)$$

对于三角形/梯形液体静压，自重及附加均布载荷等不同的载荷形式，其载荷集度 q 及上式中相应的系数 A_{mn} 的表示式列在表 5。

表 5 四边简支之矩形容器壁板、顶板的载荷和 A_{mn} 的表示

四边简支之矩形板	载荷	A_{mn}
顶边加固的壁板；垂直加固的壁板；横向加固时自器顶算起的第一段壁板		$A_{mn} = \frac{(-1)^{n+1} 8 q_0}{\pi^6 D_{mn} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2}$ ($m = 1, 3, 5 \dots$)
横向加固时自器顶算起第一段以下的壁板		A_{mn} 有理论解，但简化起见，对于梯形液体静压，其载荷集度 q 按左图取值，应力计算系数和挠度计算系数，标准中采用三角形液体静压载荷形式下的应力计算系数的 2 倍和挠度计算系数的 2 倍
顶板		$A_{mn} = \frac{16 q_0}{\pi^6 D_{mn} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2}$ ($m, n = 1, 3, 5 \dots$)

利用式 (16) ~ 式 (18) 及上表的结果，可以求得板内应力及板的挠度，进而还可按下式求得最大主应力：

$$\sigma_{\max} = \frac{R_x + R_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{R_x - R_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad \dots\dots\dots (19)$$

因此分析和计算表明，对于不同边长比例 (b/a) 的矩形板， $\sigma_{\max}$ 和 $f_{\max}$ 可表示为：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\max} &= \alpha a^2 \frac{6 q_0}{t^2} \\ f_{\max} &= \beta a^4 \frac{q_0}{E t^3} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (20)$$

式中 α 为应力计算系数， β 为挠度计算系数，它们是只与 b/a 有关的无因次参数，本次修订版中，四边简支承受各种形式载荷之矩形板的应力计算系数 α 和挠度计算系数 β ，就是按以上各式，根据矩形板的不同边长比例 (b/a)，利用数学工具软件 Mathematica 计算所得，即应力计算系数 α 和挠度计算系数 β 与矩形板边长比例 (b/a) 的关系曲线，也就是 NB/T 47003.1—2009 中的图 8-7、图 8-15。这些结果与文献[1]、[4]、[6]、[11]等提供的数据作了比较，也用 Ansys 对算例作了有限

元校核, 结果是与有限元分析结论相吻合的。文献[8]对顶边自由, 三边简支, 承受三角形液体静压之矩形板的设计作了详细介绍, 其分析过程与四边简支之矩形板类似, 但对控制方程(1)求解采用的是李维解 (Levy Solution), 得到的 α , β — (b/a) 关系曲线即 NB/T 47003.1—2009 图 8-5。

对式(20)作变形, 并用许用应力代替最大应力, 将 $q_0 = \rho g b$ 代入, 可以得到四边简支, 承受三角形液体静压之矩形板的壁厚设计公式和最大挠度计算公式, 顶边自由, 三边简支, 承受三角形液体静压之矩形板也有类似结果, 这些就是 NB/T 47003.1—2009 中的式(8-2), 式(8-3)。

横向加固的矩形容器, 其壁板被水平加固件分割为四边简支的各段, 自器顶而下, 第一段壁板, 承受三角形液体静压, 第一段以下各段壁板, 承受梯形液体静压, 简化起见, 为了能应用四边简支, 承受三角形载荷矩形板的应力计算系数 α 和挠度计算系数 β , 对各段作了如下处理:

第一段:

$$\left. \begin{aligned} q_0 &= \frac{\rho g h_1}{2} \\ \alpha &= \alpha_1 \\ \beta &= \beta_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (21)$$

将式(21)代入式(20), 并用许用应力代替最大应力, 即得 NB/T 47003.1—2009 中的式(8-18), 式(8-22)。

第一段以下各段:

$$\left. \begin{aligned} q_0 &= \rho g \frac{h_{i-1} + h_i}{2} \\ \alpha &= 2\alpha_i \\ \beta &= 2\beta_i \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (22)$$

即, 将梯形载荷简化为平均深度 $(h_{i-1} + h_i)/2$ 处液体静压的均匀载荷, 该段壁板的简化均匀载荷的应力计算系数 α_i 和挠度计算系数 β_i 分别取为三角形液体静压载荷的应力计算系数的 2 倍和挠度计算系数的 2 倍。将式(22)代入式(20), 并用许用应力代替最大应力, 即得 NB/T 47003.1—2009 中的式(8-21), 式(8-24)。

对于顶板, q_0 为:

$$q_0 = g\gamma\delta + p \dots\dots\dots (23)$$

式中 p 为附加面载荷, $p = 1.2 \times 10^{-3} \text{ MPa}$, 将式(23)代入式(20), 并用许用应力代替最大应力, 即得 NB/T 47003.1—2009 中的式(8-43), 式(8-44)。

图 10 中跨度为 a 的简支梁, 其最大挠度为:

$$f_b = \frac{5q_b a^4}{384EI} \dots\dots\dots (24)$$

将梁的常用许用挠度 $[f_b] = a/250$, 并取 $E = 2 \times 10^5 \text{ MPa}$, 代入式(24)得到简支梁在许用挠度下的承载为:

$$[q_b] = 5.12 \times 10^4 \frac{\delta^3}{a^3} \dots\dots\dots (25)$$

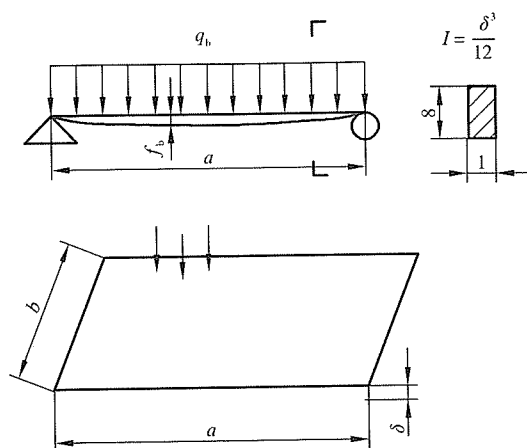


图 10 梁-板之挠度-载荷比拟相当

承受线形载荷的梁与承受面载荷的板相比拟，具有挠度-载荷相当性，可将简支梁在许用挠度下的承载 $[q_b]$ 当量为四边简支矩形板的载荷 q_p ，进而确定矩形板的许用挠度：

$$q_p = \frac{q_h \times a \times b}{a \times b} = q_b \quad \dots\dots\dots (26)$$

将式(26)代入可得到简支矩形板的许用挠度系数 $\eta=W/a$ 与板边比 b/a 的关系曲线，即 NB/T 47003.1—2009 中的图 8-2，曲线的数据列在附录 A。

7.5 圆平板理论在拉杆加固型矩形容器壁板计算上的应用

如图 11，是受密布拉杆加固的矩形容器壁板，壁板厚度可由图中阴影部分的矩形板决定，而在拉杆布置的节距 $a \approx h$ 情况下，该阴影部分矩形板厚度可由其近似外接圆平板计算得到。

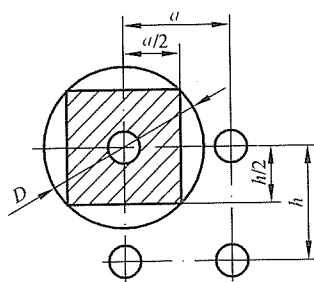


图 11 拉杆加固的壁板

文献[12]指出，圆平板厚度可由下式表示：

$$\delta = D \sqrt{\frac{K' p}{[\sigma]}} \quad \dots\dots\dots (27)$$

其中， D 为圆平板直径， p 为作用在圆平板上的横向均布载荷， K' 为与边界条件有关的结构特征系数，对周边固支圆平板， $K'=0.188$ ；对周边简支圆平板， $K'=0.31$ 。对于现在的情况，可取 $K'=(0.188+0.31)/2=0.25$ ，或取 $K=1/K'=4$ 。

再取 $p = \rho g h_i$ ， $D = \sqrt{2}h$ 代入式(27)，即得 NB/T 47003.1—2009 中的式(8-26)。

7.6 矩形容器底板的力学模型

当底板整个表面安装在平基础上(如砂基础上或平屋顶上等),则底板厚度常用 4mm~6mm,必要时另加腐蚀裕量。

当底板是由型钢梁支承时,应作分析计算,以确定梁的间距和底板厚度。

如图 12,取出宽度为 1mm 的底板,将其视为等跨连续梁,其上的均布载荷 q 为:

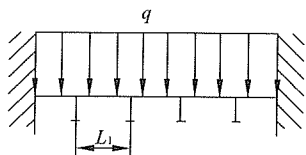


图 12 型钢加固的底板

$$q = 1 \cdot \rho g H \quad \dots\dots\dots (28)$$

梁中最大弯矩:

$$M_n = \frac{1}{9.4} q L_1^2 = \frac{\rho g H L_1^2}{9.4} \quad \dots\dots\dots (29)$$

此单位宽度梁的截面系数:

$$Z = \frac{1(\delta_n - C)^2}{6} \quad \dots\dots\dots (30)$$

δ_b 与 L_b 其中一个已知,另一个可相应确定,即 NB/T 47003.1—2009 中的式(8-49),式(8-50):

$$\sigma_n = \frac{M_n}{Z} = \frac{6\rho g L_1^2 H}{9.4(\delta_n - C)^2} \quad \dots\dots\dots (31)$$

$$L_1 = \sqrt{\frac{9.4(\delta_n - C)^2 [\sigma]}{6\rho g H}} = 1.252(\delta_n - C) \sqrt{\frac{[\sigma]}{\rho g H}} \quad \dots\dots\dots (32)$$

7.7 加固件,拉杆,联杆的力学模型

(1) 顶边加固件

顶边加固件视为两端固支受均布载荷 q 的梁,如图 13,取出单位宽度的矩形壁板,其顶端的支座反力 R_1 即为 q 。取梁的许用挠度为梁跨度的 $1/500^{[4]}$,联立以下各方程,求出梁的截面惯性矩 I ,即得 NB/T 47003.1—2009 中的式(8-5)。

梁的挠度:	$f = \frac{qL^4}{384EI}$	} \quad \dots\dots\dots (33)
梁的许用挠度:	$[f] = \frac{L}{500}$	
对 B 点取矩,求 R_1 :	$R_1 H = \frac{\rho g H^2}{2} \cdot \frac{H}{3}$	
梁的载荷 q :	$q = R_1$	

顶边加固件规格一般不小于 L 50×50×5。

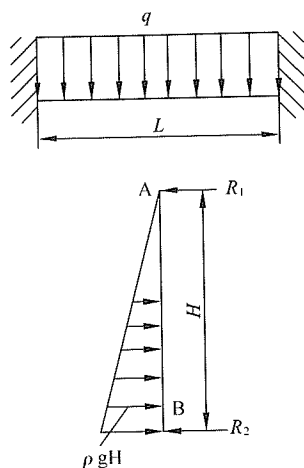


图 13 顶边加固件

(2) 垂直加固件

垂直加固件与宽度为 L_3 的壁板组合在一起，视为承受三角形液体静压的简支梁，如图 14，简化起见，认为梁的截面系数 Z_1 ，即加固件与壁板的组合截面系数，等于加固件的截面系数 Z 与壁板的截面系数 Z_2 之和，由以下各式可求出 Z ，就是 NB/T 47003.1—2009 中的式 (8-8)。

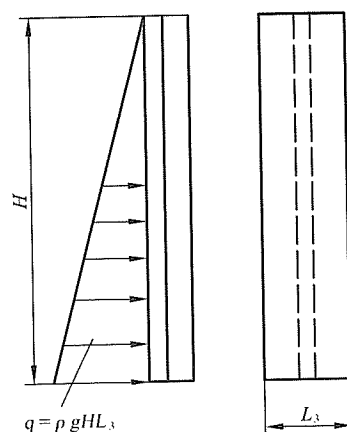


图 14 垂直加固件

$$\left. \begin{aligned}
 \text{梁的最大弯矩:} \quad & M_{\max} = \frac{qH^2}{9\sqrt{3}} = 0.0642\rho gH^3L_3 \\
 \text{梁的截面系数:} \quad & Z_1 = \frac{M_{\max}}{[\sigma]} = \frac{0.0642\rho gH^3L_3}{[\sigma]} \\
 \text{壁板的截面系数:} \quad & Z_2 = \frac{L_3(\delta_n - C)}{6} \\
 \text{加固件的截面系数:} \quad & Z = Z_1 - Z_2
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (34)$$

(3) 垂直加固件上的圆钢拉杆

垂直加固件上的圆钢拉杆的计算模型见表 6。

(4) 横向加固件

横向加固件视为承受均布载荷 F_i 的水平固支梁, 如图 15, 其许用挠度取为 $L/500$ 。取出单位宽度的壁板, 将其视为承受三角形液体静压的不等跨连续梁, 它的支座反力 F_i [按 NB/T 47003.1—2009 中式 (8-16)、式 (8-19)] 即为横向加固圈作为水平固支梁的载荷。利用水平固支梁的挠度公式, 即可得到横向加固件的截面惯性矩 I , 即 NB/T 47003.1—2009 中的式 (8-17)、式 (8-20):

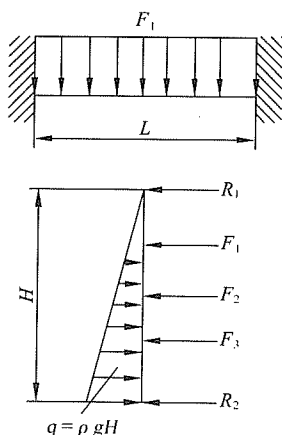


图 15 横向加固件

$$f = \frac{F_i L^4}{384EI} = [f] = \frac{L}{500} \quad \dots\dots\dots (35)$$

(5) 加固壁板的拉杆

加固壁板的拉杆按受拉杆件设计, 液位高度为 h_i 处, 单根拉杆所受载荷 N 为如图 2 中阴影矩形板上的液体静压, 即:

$$N = ah\rho gh_i \quad \dots\dots\dots (36)$$

拉杆直径 d_i 按下式, 也就是 NB/T 47003.1—2009 中的式 (8-27):

$$\begin{aligned} \because N &= \frac{\pi}{4} d_i^2 [\sigma] \\ \therefore d_i &= \sqrt{\frac{4 ah\rho gh_i}{\pi [\sigma]} + C_2} = 1.13 \sqrt{\frac{ah\rho gh_i}{[\sigma]} + C_2} \quad \dots\dots\dots (37) \end{aligned}$$

(6) 水平联杆与加固柱

带水平双向联杆的矩形容器, 适用于不影响内件安装, 顶部遮盖的矩形容器, 其结构一般除在器顶设置一排联杆以支承顶板并共同抵抗液体静压向外的推力外, 还在垂直高度 (H) 中间最佳位置处, 设置与两侧加固柱联接的一排或两排联杆, 以增强加固柱的强度。

垂直加固柱的力学模型是不等跨受均布载荷的连续梁, 表 7 是按文献[6]、[7]导出的垂直加固柱在各支座处的弯矩和反力。由支座的最大弯矩进一步可以得到加固柱的截面系数, 即 NB/T 47003.1—2009 中的式 (8-48)、式 (8-20)。加固柱在联杆处的支座反力, 就是联杆所受液体静压产生的水

平推力, 进而可以计算得到由这一推力在联杆内产生的应力。本次修订, 对垂直加固柱的计算公式按文献[6]、[7]作了推导, 修订了 JB/T 4735—1997 中相应公式中的系数, 参见表 6。

表 6 圆钢拉杆的计算模型

拉杆内的应力		柔性拉杆 ($16\,000 > L_2 > 363d^{2/3}$, $d=16\text{mm}\sim 24\text{mm}$)	弹性拉杆 ($L_2 < 363d^{2/3}$)
自重产生的应力 σ_{t1}	载荷 q	$q = \frac{7.698 \times \pi d^2 \times 10^{-5}}{4} \quad \text{N/mm}$	
	挠度 f	$f = [f] = \frac{L_2}{250}$	$f = \frac{5qL_2^4}{384EI}$
	轴力 N	$N = \frac{qL_2}{8f}$	
	应力 σ_{t1}	$\sigma_{t1} = \frac{N}{A} = \frac{N}{\pi d_0^2 / 4}$, 拉杆螺纹小径 $d_0 \approx \frac{d}{1.2}$	
弯曲应力 σ_n		$\sigma_n = \frac{4.655d^5}{N^2} \sigma_{t1}$	$\sigma_n = \frac{\gamma g L_2^2}{d}$
液体静压产生的应力 σ_{t2}	液体静压 Q	$Q = \frac{1}{3} \times \frac{\rho g H^2 L_3}{2} = \frac{\rho g H^2 L_3}{6}$	
	应力 σ_{t2}	$\sigma_{t2} = \frac{Q}{A} = \frac{N}{\pi d_0^2 / 4}$ 拉杆螺纹小径 $d_0 \approx \frac{d}{1.2}$	
控制准则		$\sigma_{t2} = [\sigma]_{bt}$, 将以上 σ_{t2} 式变形, 即得 NB/T 47003.1—2009 中式 (8-9): $[\sigma]_{bt} = [\sigma]_b - (\sigma_{t1} + \sigma_n)_{\max}$ $(\sigma_{t1} + \sigma_n)_{\max} = \sigma_{t1} + \sigma_n \Big _{\substack{L_2=16\,000 \\ d=24}} = 62.1\text{MPa}$ 对普通碳素钢 $[\sigma]_b = 117.7\text{MPa}$, 故 $\sigma_{bt} = 55.6$	$\sigma_{t1} + \sigma_n + \sigma_{t2} < [\sigma]_b$

联杆内的应力包括由重力产生的拉应力 σ_{t1} , 弯曲应力 σ_n 和由液体静压产生的水平推力所造成的拉应力 σ_{t2} 。表 8 给出了联杆应力的计算方法。

(7) 顶板加固件

顶板上的加固件, 视为承受均载的等跨连续梁, 如图 16, 长边方向上单根加固件所受载荷 q_1 等于宽度为 L_5 的顶板的自重和其上的附加载荷, 短边方向上单根加固件所受载荷 q_2 等于宽度为 L_4 的顶板的自重和其上的附加载荷, 利用梁中最大弯矩 M 可得到梁 (加固件) 所需的截面系数 Z , 即 NB/T 47003.1—2009 中的式 (8-46) ~ 式 (8-48):

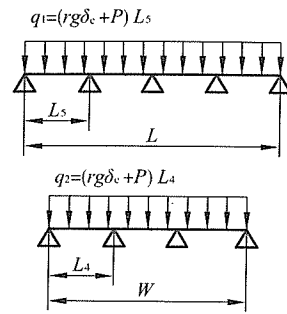


图 16 顶边加固件

$$\left. \begin{aligned}
 &\text{长边方向:} & M_1 &= \frac{q_1 L_4^2}{9.4} = \frac{(\gamma g \delta_e + P) L_5 L_4^2}{9.4} \\
 &\text{短边方向:} & M_2 &= \frac{q_2 L_5^2}{9.4} = \frac{(\gamma g \delta_e + P) L_4 L_5^2}{9.4}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (38)$$

$$M = \max\{M_1, M_2\}$$

$$Z = \frac{M}{[\sigma]}$$

表 7 带联杆矩形容器的垂直加固柱的计算模型

垂直加固柱	加固柱的支座反力	加固柱的支座弯矩
设一层联杆时的垂直加固柱	$R_1 = 0.120\ 833\rho g H^2 L_3$ $F = 0.322\ 917\rho g H^2 L_3$ $R_2 = 0.056\ 25\rho g H^2 L_3$	$M_O = M_B = 0$ $M_A = -0.017\ 5\rho g H^3 L_3$
设二层联杆时的垂直加固柱	$R_1 = 0.091\ 500\ 8\rho g H^2 L_3$ $F_1 = 0.232\ 443\rho g H^2 L_3$ $F_2 = 0.122\ 623\rho g H^2 L_3$ $R_2 = 0.053\ 433\ 7\rho g H^2 L_3$	$M_O = M_C = 0$ $M_A = -0.009\ 449\ 62\rho g H^3 L_3$ $M_B = -0.002\ 266\ 58\rho g H^3 L_3$

表 8 带水平双向联杆矩形容器联杆的应力计算

		顶部联杆	下部各层联杆
组合 截面 特性	截面积 A	$\delta_{nb}b + \delta_n L_3$	$\delta_{nb}b$
	有效面积 A_e	$(\delta_{nb} - 2C)(b - C) + (\delta_n - C)L_3$	$(\delta_{nb} - 2C)(b - 2C)$
	惯性矩 I	按 NB/T 47003.1—2009 中图 8-13 计算	$I = \frac{\delta_{nb}b^3}{12}$
	截面系数 Z		$Z = \frac{\delta_{nb}b^2}{6}$
重力 产生 的 σ	载荷 q	$q = 7.698 \times 10^{-5} A$	
	挠度 f	$f = \frac{5qL_2^4}{384EI}$	
	轴力 N	$N = \frac{qL_2^2}{8f}$	
	弯矩 M	$M = N \cdot f$	
	拉应力 σ_{t1}	$\sigma_{t1} = N / A$	
弯曲应力 σ_n		$\sigma_n = 0.75g L_2^2$	$\sigma_n = M / Z$
液体 静压 产生 的 σ	液体静压的 水平推力 Q	设一层联杆时: $Q_0 = R_1$ 设二层联杆时: $Q_0 = R_1$	设一层联杆时: $Q_0 = R_1$ 设二层联杆时: $Q_1 = F_1, Q_2 = F_2$
	Q 产生的 拉应力 σ_{t2}		
控制准则		$\sigma_{t1} + \sigma_n + \sigma_{t3} < [\sigma]$	

表9 顶边自由, 三边简支承受三角形液体静压之矩形板的 α , β 值

(NB/T 47003.1—2009 中图 8-5 数据)

b/a	α	β	b/a	α	β
0.1	0.000 972	0.001 586	2.6	0.057 579	0.064 807
0.2	0.004 086	0.005 971	2.7	0.058 126	0.065 545
0.3	0.008 904	0.012 119	2.8	0.058 61	0.066 201
0.4	0.014 366	0.018 797	2.9	0.059 038	0.066 783
0.5	0.01957	0.025 042	3.0	0.059 416	0.067 3
0.6	0.023 996	0.030 304	3.1	0.059 75	0.067 757
0.7	0.027 446	0.034 378	3.2	0.060 043	0.068 162
0.8	0.029 926	0.037 286	3.3	0.060 302	0.068 519
0.9	0.031 543	0.039 16	3.4	0.060 529	0.068 834
1.0	0.033 237	0.040 173	3.5	0.060 728	0.069 111
1.1	0.035 609	0.040 504	3.6	0.060 904	0.069 356
1.2	0.038 27	0.041 103	3.7	0.061 057	0.069 57
1.3	0.040 703	0.043 471	3.8	0.061 192	0.069 759
1.4	0.042 923	0.046 135	3.9	0.061 309	0.069 925
1.5	0.044 946	0.048 598	4.0	0.061 412	0.070 07
1.6	0.046 784	0.050 867	4.1	0.061 503	0.070 198
1.7	0.048 449	0.052 948	4.2	0.061 581	0.070 309
1.8	0.049 955	0.054 851	4.3	0.061 65	0.070 407
1.9	0.051 313	0.056 584	4.4	0.061 71	0.070 492
2.0	0.052 534	0.058 157	4.5	0.061 763	0.070 567
2.1	0.053 63	0.059 58	4.6	0.061 808	0.070 632
2.2	0.054 61	0.060 863	4.7	0.061 848	0.070 69
2.3	0.055 486	0.062 017	4.8	0.061 883	0.070 739
2.4	0.056 267	0.063 053	4.9	0.061 913	0.070 783
2.5	0.056 962	0.063 98	5.0	0.061 94	0.070 821

表 10 四边简支承受三角形液体静压之矩形板的 α , β 值
(NB/T 47003.1—2009 中图 8-7 数据)

b/a	α	β	b/a	α	β
0.1	0.000 635	7.48E-06	2.6	0.055 921	0.063 851
0.2	0.002 442	0.000 115	2.7	0.056 631	0.064 772
0.3	0.005 276	0.000 555	2.8	0.057 261	0.065 587
0.4	0.008 717	0.001 607	2.9	0.057 818	0.066 309
0.5	0.012 254	0.003 453	3.0	0.058 312	0.066 949
0.6	0.015 509	0.006 125	3.1	0.058 749	0.067 516
0.7	0.018 271	0.009 521	3.2	0.059 136	0.068 019
0.8	0.020 466	0.013 459	3.3	0.059 477	0.068 465
0.9	0.022 11	0.017 732	3.4	0.059 778	0.068 861
1.0	0.023 27	0.022 147	3.5	0.060 044	0.069 214
1.1	0.026 727	0.026 545	3.6	0.060 278	0.069 529
1.2	0.030 2	0.030 808	3.7	0.060 484	0.069 81
1.3	0.033 445	0.034 854	3.8	0.060 664	0.070 062
1.4	0.036 439	0.038 634	3.9	0.060 822	0.070 288
1.5	0.039 176	0.042 123	4.0	0.060 96	0.070 492
1.6	0.041 66	0.045 314	4.1	0.061 081	0.070 677
1.7	0.043 902	0.048 21	4.2	0.061 185	0.070 845
1.8	0.045 918	0.050 824	4.3	0.061 276	0.070 998
1.9	0.047 724	0.053 174	4.4	0.061 354	0.071 138
2.0	0.049 338	0.055 277	4.5	0.061 421	0.071 268
2.1	0.050 779	0.057 156	4.6	0.061 478	0.071 387
2.2	0.052 062	0.058 829	4.7	0.061 526	0.071 498
2.3	0.053 204	0.060 317	4.8	0.061 566	0.071 602
2.4	0.054 219	0.061 639	4.9	0.061 6	0.071 7
2.5	0.055 121	0.062 812	5.0	0.061 627	0.071 793

表 11 四边简支承受均布载荷之矩形板的 α , β 值

(NB/T 47003.1—2009 中图 8-15 数据)

b/a	α	β	b/a	α	β
0.1	0.001 327	1.5E-05	2.6	0.115 335	0.127 856
0.2	0.005 101	0.000 23	2.7	0.116 719	0.129 695
0.3	0.011 022	0.001 112	2.8	0.117 943	0.131 323
0.4	0.018 203	0.003 22	2.9	0.119 026	0.132 766
0.5	0.025 573	0.006 92	3.0	0.119 985	0.134 043
0.6	0.032 334	0.012 274	3.1	0.120 836	0.135 175
0.7	0.038 046	0.019 078	3.2	0.121 592	0.136 179
0.8	0.042 556	0.026 968	3.3	0.122 264	0.137 07
0.9	0.045 906	0.035 529	3.4	0.122 864	0.137 863
1.0	0.048 234	0.044 374	3.5	0.123 4	0.138 568
1.1	0.055 85	0.053 186	3.6	0.123 881	0.139 198
1.2	0.063 067	0.061 725	3.7	0.124 313	0.139 761
1.3	0.069 791	0.069 829	3.8	0.124 703	0.140 266
1.4	0.075 978	0.077 4	3.9	0.125 056	0.140 721
1.5	0.081 614	0.084 387	4.0	0.125 377	0.141 131
1.6	0.086 709	0.090 775	4.1	0.125 671	0.141 504
1.7	0.091 289	0.096 573	4.2	0.125 94	0.141 842
1.8	0.095 387	0.101 806	4.3	0.126 189	0.142 152
1.9	0.099 042	0.106 507	4.4	0.126 419	0.142 437
2.0	0.102 292	0.110 715	4.5	0.126 633	0.142 7
2.1	0.105 177	0.114 473	4.6	0.126 834	0.142 944
2.2	0.107 734	0.117 819	4.7	0.127 023	0.143 172
2.3	0.109 998	0.120 794	4.8	0.127 202	0.143 386
2.4	0.112	0.123 436	4.9	0.127 372	0.143 587
2.5	0.113 77	0.125 779	5.0	0.127 534	0.143 778

8 制造、检验与验收

常压容器的制造、检验与验收的要求相对 GB 150 而言,要求较低。故 NB/T 47003.1—2009 对常压容器的材料、加工成型、焊接、热处理、无损检测、试验、验收等方面,系统地提出了低于 GB 150 的要求。NB/T 47003.1—2009 与 JB/T 4735—1997 相比,作了以下修改:

① 9.1.2 参照《容规》第 27 条的规定,对常压容器的制造单位在设计图样变更方面作了原则规定。

② 9.3.2 c) 当采用封头转角半径 r 为 $0.15D_i$, 为将成型的瓣片和成形的顶圆板拼接焊缝避开高应力转角区,规定了成形的顶圆板直径应不大于 $0.7DN$ 。当采用封头转角半径 r 为 $0.10D_i$, 成形的顶圆板直径可不大于 $0.8DN$ 。当图样规定的转角半径 r 大于 $0.15D_i$, 则成形的顶圆板最大直径还应作相应调整。

③ 9.3.2 f) 对封头的允差作了以下调整:

- a) 封头内直径允差、封头全高允差增加了负偏差;
- b) 最大最小内直径之差按 $0.5\% D_i$ 控制,且不大于 25mm;
- c) 直边高度允差分两档,上下限按 $-5\%h_2 \sim 10\%h_2$ 控制;
- d) 封头全高上下限允差按 $-0.2\% D_i \sim 0.6\% D_i$ 控制,且不大于 20mm。

④ 9.3.3 d) 增加:矩形容器同一截面上,最大边长与最小边长之差应不大于该截面边长的 1%,且不大于 30mm。

⑤ 9.3.3 e) 增加:矩形容器壁板相邻拼接焊缝间距应大于钢板名义厚度 δ_n 的 3 倍,且不小于 100mm。

⑥ 增加了气压试验的内容及方法。

⑦ 9.7.9.3 中,对于无法对本体进行先行试验的夹套容器,应由制造厂与设计部门商定一个试验方法,以确保本体和夹套能满足使用要求。

9 例题

9.1 耳式支承常压力容器

(1) 不带整体加强环耳式支座 (DN 2500mm 立式圆筒形容器)

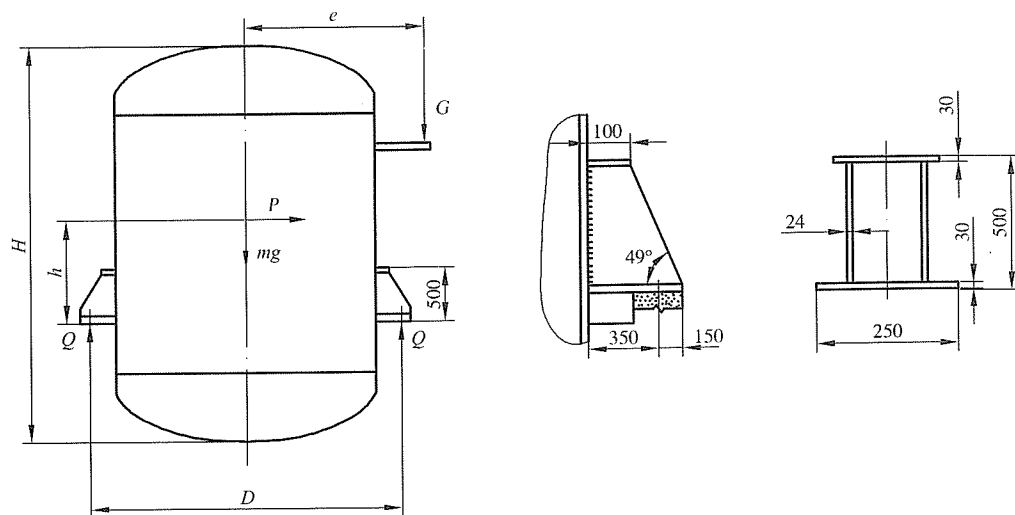


图 17 支座结构尺寸图

① 设计条件

设计压力: $p_c=0.09\text{MPa}$ 设计温度: $t=20^\circ\text{C}$

介质: 油、水

基本风压值: $q_0=500\text{Pa}$ 地震设防烈度: 8 度, 设计基本地震加速度为 $0.2g$ 容器总高度: $H=7\,000\text{mm}$ 筒体直径: $D_i=2\,500\text{mm}$ 支座底板离地面高度: $5\,000\text{mm}$ 支座底板到壳体质心的距离: $h=2\,000\text{mm}$ 安装尺寸: $D=3\,100\text{mm}$ 偏心载荷: $G=20\,000\text{N}$ 偏心距: $e=1\,500\text{mm}$

筒体、封头、翼板、筋板和垫板材料: Q235A

筒体、封头、翼板、筋板和底板材料 Q235A 在设计温度下的许用应力: $[\sigma]^t=140\text{MPa}$

② 筒体、封头厚度计算

筒体焊缝焊接接头系数: $\phi=0.85$ 封头焊缝焊接接头系数: $\phi=1$ 标准椭圆形封头形状系数: $K=1$ 厚度附加量: $C=C_1+C_2=0+1=1\text{mm}$

$$\text{筒体计算厚度: } \delta = \frac{p_c D_i}{2[\sigma]^t \phi} = \frac{0.09 \times 2\,500}{2 \times 140 \times 0.85} = 0.95\text{mm}$$

筒体名义厚度: 取 $\delta_n=8\text{mm}$ 。

$$\text{封头计算厚度: } \delta_h = \frac{K p_c D_{hi}}{2[\sigma]^t \phi} = \frac{1 \times 0.09 \times 2\,500}{2 \times 140 \times 1} = 0.8\text{mm}$$

封头名义厚度: 取 $\delta_{hn}=8\text{mm}$ 。

③ 支座计算

支座的结构尺寸假定如图 17 所示:

支耳数量: $n=4$ (4 个支座均布容器外壁)操作状态下设备的总质量: $m_o=20\,000\text{kg}$ 重力加速度: $g=9.81\text{m/s}^2$ 地震设防烈度 8 度, 基本地震加速度为 $0.2g$ 时, 地震影响系数: $\alpha_e=0.16$ 地震载荷: $P_e = \alpha_e mg = 0.16 \times 20\,000 \times 9.81 = 3.14 \times 10^4\text{N}$ 风压高度变化系数: $f_i=1$ 当量宽度: $K_3=400\text{mm}$ (无确切数据时取值)有效直径: $D_o = D_i + K_3 + 2\delta_n = 2\,500 + 400 + 2 \times 8 = 2\,916\text{mm}$ 风载荷: $P_w = 1.2 f_i q_0 D_o H \times 10^{-6} = 1.2 \times 1 \times 500 \times 2\,916 \times 7\,000 \times 10^{-6} = 1.22 \times 10^4\text{N}$

水平载荷 P 取地震载荷 P_e 与风载荷 P_w 中的最大值, $P=P_e=3.14 \times 10^4 \text{ N}$

不均匀系数: $k=0.83$ (安装 3 个以上支座时)

每个支耳上的载荷 F :

$$F = \frac{m \cdot g + G}{k \cdot n} + \frac{N(P \cdot h + G \cdot e)}{n \cdot D}$$

$$= \frac{20\,000 \times 9.81 + 20\,000}{0.83 \times 4} + \frac{4 \times (3.14 \times 10^4 \times 2\,000 + 20\,000 \times 1\,500)}{4 \times 3\,100} = 9.51 \times 10^4 \text{ N}$$

④ 底板计算

底板长度: $a=250\text{mm}$

底板宽度: $b=500\text{mm}$

底板厚度: $\delta_b=30\text{mm}$

底板长宽比: $a/b=0.5\text{mm}$

由底板长度宽度决定的系数 $\beta=0.36$ (查表 7-1)

$$\text{底板最大应力: } \sigma_b = \frac{\beta F b}{a \cdot \delta_b^2} = \frac{0.36 \times 9.51 \times 10^4 \times 500}{250 \times 30^2} = 76.08 \text{ MPa}$$

$$\sigma_b = 76.08 \text{ MPa} < [\sigma]^t = 140 \text{ MPa}$$

底板结构尺寸满足强度要求。

⑤ 盖板计算

支座中性轴与底板下表面交点至容器外壁的距离: $d=350\text{mm}$

支座盖板宽度: $c=100\text{mm}$

支座盖板厚度: $\delta_a=30\text{mm}$

支耳筋板的高度: $h=440\text{mm}$

$$\text{盖板最大应力: } \sigma_a = \frac{0.75 F d a}{\delta_a c^2 h} = \frac{0.75 \times 9.51 \times 10^4 \times 350 \times 250}{30 \times 100^2 \times 440} = 47.27 \text{ MPa}$$

$$\sigma_a = 47.27 \text{ MPa} < [\sigma]^t = 140 \text{ MPa}$$

盖板结构尺寸满足强度要求。

⑥ 筋板计算

筋板角度: $\alpha = 49^\circ$

$$\text{筋板长度: } L_2 = \frac{h}{\sin \alpha} = \frac{440}{\sin 49^\circ} = 583 \text{ mm}$$

筋板厚度: $\delta_g=24\text{mm}$

筋板惯性半径: $r = 0.289 \delta_g = 0.289 \times 24 = 6.94 \text{ mm}$

$$\text{筋板材料的压缩许用应力: } [\sigma]_c = \frac{[\sigma]^t}{1 + (L_2 / r)^2 (140 [R]^t)^{-1}} = \frac{140}{1 + \left(\frac{583}{6.94}\right)^2 \times \frac{1}{140 \times 140}} = 102.9 \text{ MPa}$$

$$\text{沿中性轴的载荷: } F_R = \frac{F}{2 \sin \alpha} = \frac{9.51 \times 10^4}{2 \times \sin 49^\circ} = 6.30 \times 10^4 \text{ N}$$

$$\text{基础板下表面到支腿装配焊缝中心长度: } L_1 = b \sin \alpha = 500 \times \sin 49^\circ = 377 \text{ mm}$$

$$\text{偏心距: } e_p = \left(d - \frac{b}{2}\right) \sin \alpha = \left(350 - \frac{500}{2}\right) \times \sin 49^\circ = 75.5 \text{ mm}$$

$$\text{筋板最大压缩应力: } \sigma_{\text{cmax}} = \frac{F_R}{L_1 \delta_g} + \frac{6 e_p F_R}{L_1^2 \delta_g} = \frac{6.30 \times 10^4}{377 \times 24} + \frac{6 \times 75.5 \times 6.30 \times 10^4}{377^2 \times 24} = 15.33 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{c, max}} = 15.33 \text{ MPa} < [\sigma]_c = 102.9 \text{ MPa}$$

筋板厚度满足强度要求。

(2) 带整体加强环耳式支座 (DN 4 000mm 立式圆筒形容器)

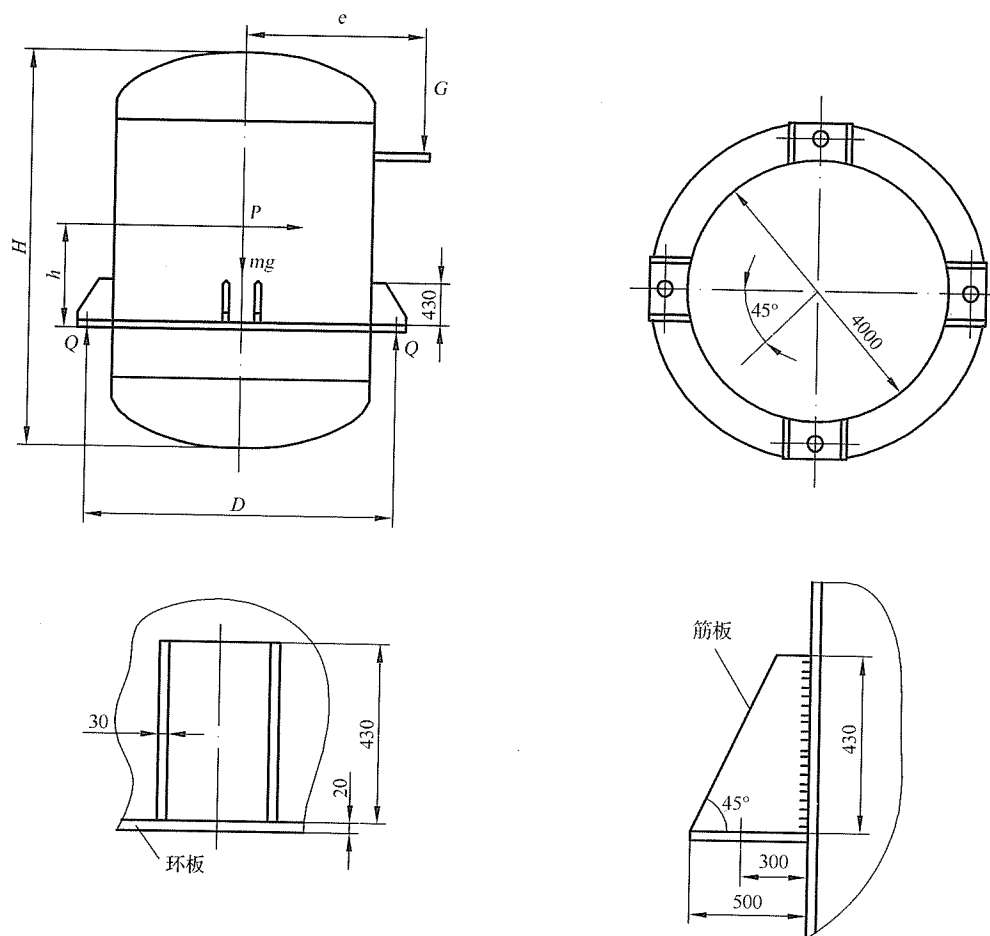


图 18 支座结构尺寸图

① 设计条件

设计压力: $p=0.08 \text{ MPa}$

设计温度: $t=40^\circ \text{C}$

容器总高度: $H = 8\,000 \text{ mm}$

筒体内径: $D_i=4\,000\text{mm}$

支座底板离地面高度: $4\,000\text{mm}$

支座底板到壳体质心的距离: $h=2\,500\text{mm}$

支座地脚螺栓中心圆直径: $D_b=4\,600\text{mm}$

偏心载荷: $G=30\,000\text{N}$

偏心距: $e=2\,400\text{mm}$

设置地区的基本风压: $q_0=600\text{Pa}$

重力加速度: $g=9.81\text{m/s}^2$

地震设防烈度: 8 度

② 筒体、封头计算

筒体焊缝焊接接头系数: $\phi=0.85$

封头焊缝焊接接头系数: $\phi=1$

筒体、封头和垫板材料: Q235A

筒体、封头及垫板材料 Q235A 在设计温度下的许用应力: $[\sigma]^t=140\text{MPa}$

$$\text{筒体计算厚度: } \delta = \frac{p_c D_i}{2[\sigma]^t \phi} = \frac{0.08 \times 4\,000}{2 \times 140 \times 0.85} = 1.34\text{mm}$$

筒体名义厚度: 取 $\delta_n=12\text{mm}$ 。

标准椭圆形封头形状系数: $K=1$

$$\text{封头计算厚度: } \delta_h = \frac{K p_c D_{hi}}{2[\sigma]^t \phi} = \frac{1 \times 0.08 \times 4\,000}{2 \times 140 \times 1} = 1.14\text{mm}$$

封头名义厚度: 取 $\delta_{hn}=12\text{mm}$ 。

③ 支座计算

支座的结构尺寸如图 18 所示:

支耳数量: $n=4$ (4 个支耳均布)

操作状态下设备的总质量: $m=120\,000\text{kg}$

圆筒壳体的有效厚度: $\delta_e=12\text{mm}$

圆筒外径: $D_o=4\,024\text{mm}$

圆筒壳体上有效加强宽度: $L_s=1.1\sqrt{D_o\delta_e}=1.1\times\sqrt{4\,024\times12}=241.72\text{mm}$

垫板的有效厚度: $\delta_{e1}=10\text{mm}$

垫板圆筒的外径: $D_{o1}=4\,044\text{mm}$

圆筒上带垫板的有效加强宽度: $L_{s1}=1.1\sqrt{D_{o1}\delta_{e1}}=1.1\times\sqrt{4\,044\times10}=221.21\text{mm}$

刚性环板宽度: $B=500\text{mm}$

刚性环板厚度: $T=20\text{mm}$

垫板厚度: $\delta_1=10\text{mm}$

组合截面的惯性轴 X-X 的位置:

$$a_x = \frac{(TB^2)/2 + \delta_1 L_{s1}(B + \delta_1/2) + \delta_n L_s(B + \delta_1 + \delta_n/2)}{BT + \delta_1 L_{s1} + \delta_n L_s}$$

$$= \frac{(20 \times 500^2)/2 + 10 \times 221.21 \times (500 + 10/2) + 12 \times 241.72 \times (500 + 10 + 12/2)}{500 \times 20 + 10 \times 221.21 + 12 \times 241.72}$$

$$= 338.38 \text{ mm}$$

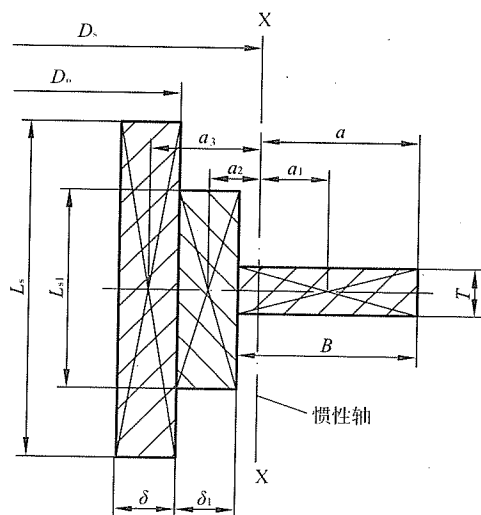


图 19 刚性环、垫板与壳体的组合截面

惯性轴直径: $D_s = D_o + 2(\delta_1 + B - a_x) = 4\,024 + 2 \times (10 + 500 - 338.38) = 4\,367.24 \text{ mm}$

刚性环板相对惯性轴 X-X 的距离: $a_1 = a_x - \frac{1}{2}B = 338.38 - \frac{1}{2} \times 500 = 88.38 \text{ mm}$

垫板相对惯性轴 X-X 的距离: $a_2 = B + \frac{1}{2}\delta_1 - a_x = 500 + \frac{1}{2} \times 10 - 338.38 = 166.62 \text{ mm}$

壳体相对惯性轴 X-X 的距离: $a_3 = B + \delta_1 + \frac{1}{2}\delta_n - a_x = 500 + 10 + \frac{1}{2} \times 12 - 338.38 = 177.62 \text{ mm}$

刚性环板相对惯性轴 X-X 的惯性矩:

$$I_1 = \frac{1}{12} B^3 T + B T a_1^2$$

$$= \frac{1}{12} \times 500^3 \times 20 + 500 \times 20 \times 88.38^2 = 2.86 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

垫板相对惯性轴 X-X 的惯性矩:

$$I_2 = \frac{1}{12} \delta_1^3 L_{s1} + \delta_1 L_{s1} a_2^2$$

$$= \frac{1}{12} \times 10^3 \times 221.21 + 10 \times 221.21 \times 166.62^2 = 6.14 \times 10^7 \text{ mm}^4$$

壳体相对惯性轴 X-X 的惯性矩:

$$I_3 = \frac{1}{12} \delta_n^3 L_s + \delta_n L_s a_3^2$$

$$= \frac{1}{12} \times 12^3 \times 241.72 + 12 \times 241.72 \times 177.62^2 = 9.15 \times 10^7 \text{ mm}^4$$

刚性环板、垫板与壳体的组合截面的惯性矩:

$$I = \sum I_i = I_1 + I_2 + I_3 = 2.86 \times 10^8 + 6.14 \times 10^7 + 9.15 \times 10^7 = 4.39 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

—— 支座处作用于刚性环上的力:

$$\text{外载荷作用在容器上的力矩: } M = G \times e = 30\,000 \times 2\,400 = 7.2 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

作用于一个支座上的力:

$$F_b = \frac{4M}{nD_b} + \frac{W}{n} = \frac{1}{n} \left(\frac{4M}{D_b} + W \right) = \frac{1}{4} \times \left(\frac{4 \times 7.2 \times 10^7}{4\,600} + 120\,000 \times 9.81 \right) = 3.10 \times 10^5 \text{ N}$$

筋板宽度: $b=300\text{mm}$

筋板高度: $h=430\text{mm}$

$$\text{支座处作用于刚性环上的力: } F = \frac{F_b b}{h} = \frac{3.10 \times 10^5 \times 300}{430} = 2.16 \times 10^5 \text{ N}$$

—— 支座处和两支座中间处刚性环组合断面上的应力:

$$\text{刚性环组合断面上的力矩: } R_s = \frac{D_s}{2} = \frac{4\,367.24}{2} = 2\,183.62 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

当支座数量 $n=4$ 时, 支座处作用于刚性环板上的力的夹角: $\theta = \frac{\pi}{4} = 45^\circ$

支座处内力矩 M_r :

$$M_r = -\frac{1}{2} F R_s \left(\frac{1}{\theta} - \text{ctg} \theta \right) = -\frac{1}{2} \times 2.16 \times 10^5 \times 2\,183.62 \times \left(\frac{1}{\pi/4} - \text{ctg} \frac{\pi}{4} \right) = -6.44 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

支座处周向力 T_r :

$$T_r = \frac{1}{2} F \text{ctg} \theta = \frac{1}{2} \times 2.16 \times 10^5 \times \text{ctg} \frac{\pi}{4} = 1.08 \times 10^5 \text{ N}$$

支座处组合截面的面积:

$$A = B \times T + \delta_1 \times L_{s1} + \delta_n \times L_s = 500 \times 20 + 10 \times 221.21 + 12 \times 241.72 = 1.51 \times 10^4 \text{ mm}^2$$

支座处应力:

$$\sigma = \frac{|M_r| a}{I} + \frac{T_r}{A} = \frac{|-6.44 \times 10^7| \times 338.38}{4.39 \times 10^8} + \frac{1.08 \times 10^5}{1.51 \times 10^4} = 56.79 \text{ MPa}$$

$$\sigma = 56.79 \text{ MPa} < [\sigma]^t = 140 \text{ MPa}$$

两支座中间处内力矩:

$$M_r = \frac{1}{2} FR_s \left(\frac{1}{\sin \theta} - \frac{1}{\theta} \right) = \frac{1}{2} \times 2.16 \times 10^5 \times 2183.62 \times \left(\frac{1}{\sin(\pi/4)} - \frac{1}{\pi/4} \right) = 3.32 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm};$$

两支座中间处周向力:

$$T_r = \frac{F}{2 \sin \theta} = \frac{2.16 \times 10^5}{2 \times \sin(\pi/4)} = 1.52 \times 10^5 \text{ N}$$

两支座中间处应力:

$$\sigma = \frac{|M_r| \cdot a_x}{I} + \frac{T_r}{A} = \frac{|3.32 \times 10^7| \times 338.38}{4.39 \times 10^8} + \frac{1.52 \times 10^5}{1.51 \times 10^4} = 35.66 \text{ MPa}$$

$$\sigma = 35.66 \text{ MPa} < [\sigma]^t = 140 \text{ MPa}$$

环板结构尺寸满足强度要求。

④ 筋板强度计算

地震设防烈度为 8 度, 设计基本地震加速度为 $0.3g$ 时, 地震影响系数: $a_e = 0.24$

地震载荷: $P_e = a_e mg = 0.24 \times 120\,000 \times 9.81 = 2.83 \times 10^5 \text{ N}$

容器质心高度: $H_o = 6\,500 \text{ mm}$

风压高度变化系数: $f_i = 1$

当量宽度: $K_3 = 400 \text{ mm}$ (无确切数据时取值)

有效直径: $D_o = D_i + K_3 + 2\delta_n = 4\,000 + 400 + 2 \times 12 = 4\,424 \text{ mm}$

风载荷: $P_w = 1.2 f_i q_o D_o H_o \times 10^{-6} = 1.2 \times 1 \times 600 \times 4\,424 \times 6\,500 \times 10^{-6} = 2.7 \times 10^4 \text{ N}$

水平载荷取地震载荷 P_e 与风载荷 P_w 中的最大值, $P = P_e = 2.83 \times 10^5 \text{ N}$

不均匀系数: $K = 0.83$ (安装 3 个以上支座时)

每个支耳上的载荷:

$$F = \frac{m \cdot g + G}{k \cdot n} + \frac{4(P \cdot h + G \cdot e)}{n \cdot D_b} \\ = \frac{120\,000 \times 9.81 + 30\,000}{0.83 \times 4} + \frac{4 \times (2.83 \times 10^5 \times 2\,500 + 30\,000 \times 2\,400)}{4 \times 4\,600} = 5.33 \times 10^5 \text{ N}$$

筋板高度: $h = 430 \text{ mm}$

筋板角度: $\alpha = 45^\circ$

筋板宽度: $\delta_g = 30 \text{ mm}$

筋板长度: $L_2 = \frac{h}{\sin \alpha} = \frac{430}{\sin 45^\circ} = 608 \text{ mm}$

惯性半径: $r = 0.289 \delta_g = 0.289 \times 30 = 8.67 \text{ mm}$

$$\text{筋板材料的压缩许用应力: } [\sigma]_c = \frac{[\sigma]^t}{1 + (L_2/r)^2 (140[\sigma]^t)^{-1}} = \frac{140}{1 + \left(\frac{608}{8.67}\right)^2 \times \frac{1}{140 \times 140}} = 112.38 \text{ MPa}$$

$$\text{筋板材料的最大压缩应力: } F_R = \frac{F}{2 \sin \alpha} = \frac{5.33 \times 10^5}{2 \times \sin 45^\circ} = 3.77 \times 10^5 \text{ N}$$

基础板下表面到支腿装配焊缝中心长度: $L_1 = b \sin \alpha = 500 \times \sin 45^\circ = 353.55 \text{ mm}$

支座中性轴与底板下表面交点至容器外壁的距离: $d = 300 \text{ mm}$

$$\text{偏心距: } e = \left(d - \frac{b}{2}\right) \sin \alpha = \left(300 - \frac{500}{2}\right) \times \sin 45^\circ = 35.36 \text{ mm}$$

$$\text{筋板最大压缩应力: } \sigma_{c, \max} = \frac{F_R}{L_1 \delta_g} + \frac{6eF_R}{L_1^2 \delta_g} = \frac{3.77 \times 10^5}{353.55 \times 30} + \frac{6 \times 35.36 \times 3.77 \times 10^5}{353.55^2 \times 30} = 56.87 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c, \max} = 56.87 \text{ MPa} < [\sigma]_c = 112.38 \text{ MPa}$$

筋板结构尺寸满足强度要求。

9.2 腿式支承常压容器

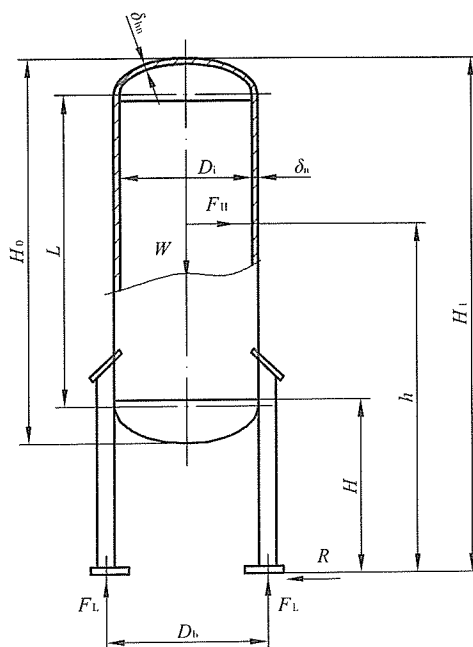


图 20 支腿受力图

① 设计条件

设计压力：常压

设计温度：20℃

腐蚀裕量：1mm

壳体材料：Q245R

介质：油、水

筒体内径： $D_i=1\,200\text{mm}$

壳体切线距： $L=3\,000\text{mm}$

支撑高度： $H=1\,900\text{mm}$

筒体、封头材料：20R

支腿材料：Q 235A

支腿数量： $n=4$

支腿规格： $\angle 100 \times 100 \times 12$

支腿底板腐蚀裕量： $C_b=2\text{mm}$

地脚螺栓规格：M24

地脚螺栓腐蚀裕量：2mm

设计地区基本风压： $q_0=600\text{Pa}$

地面粗糙度：B类

地震设防烈度：7级，设计基本地震加速度 $0.15g$

重力加速度： $g=9.81\text{m/s}^2$

设备建设场地类别：II类

设备直接安装在刚性地基上。

② 筒体、封头厚度计算

介质密度： $\rho=113.26\text{kg/m}^3$

介质高度： $h=3\,600\text{mm}$

计算压力： $p_c=\rho gh=0.04\text{MPa}$

筒体焊缝焊接接头系数： $\phi=0.85$

封头焊缝焊接接头系数： $\phi=1$

筒体、封头材料 Q245R 在设计温度下的许用应力： $[\sigma]^t=163\text{MPa}$

$$\text{筒体计算厚度: } \delta = \frac{p_c D_i}{2[\sigma]^t \phi} = \frac{0.04 \times 1\,200}{2 \times 163 \times 0.85} = 0.17\text{mm}$$

取筒体的名义厚度： $\delta_n=6\text{mm}$ 。

标准椭圆形封头形状系数： $K=1$

$$\text{封头计算厚度: } \delta_h = \frac{K p_c D_{hi}}{2[\sigma]^t \phi} = \frac{1 \times 0.04 \times 1\,200}{2 \times 163 \times 1} = 0.15\text{mm}$$

取封头的名义厚度： $\delta_{hm}=6\text{mm}$ 。

③ 载荷计算

B类地面粗糙度，风压高度变化系数： $f_i=1.0$

筒体外径： $D_o=1\,212\text{mm}$

设备高度： $H_o=3\,612\text{mm}$

支座数量： $n=4$

水平风载荷： $P_w=1.2 f_i q_0 D_o H_o \times 10^{-6} = 1.2 \times 1.0 \times 600 \times 1\,212 \times 3\,612 \times 10^{-6} = 3.15 \times 10^3 \text{N}$

操作状态下设备的最大质量: $m_0=4\,520\text{kg}$

地震影响系数: $\alpha_e=0.12$

地震载荷: $P_e = \alpha_e m_0 g = 0.12 \times 4\,520 \times 9.81 = 5.32 \times 10^3 \text{N}$

最大载荷 (取风载荷 P_w 与地震载荷 $P_e + 0.25 P_w$ 中较大值):

$$F_H = P_e + 0.25 P_w = 5.32 \times 10^3 + 0.25 \times 3.15 \times 10^3 = 6.11 \times 10^3 \text{N}$$

垂直载荷: $W = m_0 g = 4\,520 \times 9.81 = 4.43 \times 10^4 \text{N}$

$$\text{每个支腿的水平反力: } R = \frac{F_H}{n} = \frac{6.11 \times 10^3}{4} = 1.53 \times 10^3 \text{N}$$

地脚螺栓的中心圆直径: $D_b = 1\,212\text{mm}$

封头直边高度: $h_1 = 25\text{mm}$

$$\text{基础顶面至设备质心高度: } h = H - h_1 + \frac{L}{2} = 1\,900 - 25 + \frac{3\,000}{2} = 3\,375\text{mm}$$

弯矩的拉伸侧支腿的最大垂直反力:

$$F_L = \frac{4hF_H}{nD_b} - \frac{W}{n} = \frac{4 \times 3\,375 \times 6.11 \times 10^3}{4 \times 1\,212} - \frac{4.43 \times 10^4}{4} = 5.94 \times 10^3 \text{N}$$

弯矩的压缩侧支腿的最大垂直反力:

$$F_L = -\frac{4hF_H}{nD_b} - \frac{W}{n} = -\frac{4 \times 3\,375 \times 6.11 \times 10^3}{4 \times 1\,212} - \frac{4.43 \times 10^4}{4} = -5.94 \times 10^4 \text{N}$$

④ 支腿稳定及强度计算

假定支腿与壳体的连接为固接, 支腿端部为自由端。单根支腿内产生的最大应力, 发生在受压侧的支腿内。

单根支腿的最小截面惯性矩: $I = 2.089 \times 10^6 \text{mm}^4$

单根支腿的横截面面积: $A_t = 2\,280 \text{mm}^2$

支腿材料的弹性模量: $E = 2.1 \times 10^5 \text{MPa}$

支腿材料的屈服强度: $R_{bcl} = 235 \text{MPa}$

设计温度下支腿材料的许用应力: $[\sigma]_b^{20} = 137 \text{MPa}$

$$\text{单根支腿截面的最小回转半径: } i = \sqrt{\frac{I}{A_t}} = \sqrt{\frac{2.089 \times 10^6}{2\,280}} = 30.27 \text{mm}$$

$$\text{支腿的有效长细比: } \lambda = \frac{0.7H}{i} = \frac{0.7 \times 1\,900}{30.27} = 43.94$$

$$\text{支腿的极限长细比: } \lambda_c = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6 R_{bcl}}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \times 2.1 \times 10^5}{0.6 \times 235}} = 121.24$$

$$\text{由 } \lambda \text{ 和 } \lambda_c \text{ 决定的系数: } n_s = \frac{3}{2} + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^2 = \frac{3}{2} + \frac{2}{3} \left(\frac{43.94}{121.24} \right)^2 = 1.59$$

设备重要度系数: $\eta = 1$

由于 $\lambda \leq \lambda_c$,

支腿的临界许用压缩应力:

$$[\sigma]_c = \frac{1.2 \left[1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^2 \right] R_{beL}}{n_s \eta} = \frac{1.2 \times \left[1 - 0.4 \times \left(\frac{43.94}{121.24} \right)^2 \right] \times 235}{1.59 \times 1} = 168.04 \text{ MPa}$$

$$\text{单根支腿的压缩应力: } \sigma_c = \frac{F_L}{A_1} = \frac{2.89 \times 10^4}{2280} = 12.68 \text{ MPa}$$

$\sigma_c = 12.68 \text{ MPa} < [\sigma]_c = 168.04 \text{ MPa}$, 支腿稳定性校核通过。

$$\text{支腿的剪切应力: } \tau = \frac{F_H}{nA_1} = \frac{6.11 \times 10^3}{4 \times 2280} = 0.67 \text{ MPa}$$

支腿的许用剪切应力: $[\tau]_b = 0.6[\sigma]_b^{20} = 0.6 \times 137 = 82.2 \text{ MPa}$

由于 $\tau = 0.67 \text{ MPa} < [\tau]_b = 82.2 \text{ MPa}$, 故安全。

壳体外径至支腿形心的距离: $e = 62 \text{ mm}$

支腿与壳体装配焊缝长度: 取 360 mm

支腿与壳体环焊缝预留长度: 50 mm

$$\text{基础板下表面到支腿装配焊缝中心的长度: } L_1 = H + \frac{360}{2} + 50 = 2130 \text{ mm}$$

单根支腿的最小抗弯截面模量: $Z_{\min} = 2.948 \times 10^4 \text{ mm}^3$

$$\text{支腿的弯曲应力: } \sigma_b = \frac{RL_1 - F_L e}{Z_{\min}} = \frac{1.53 \times 10^3 \times 2130 - (-2.89 \times 10^4) \times 62}{2.948 \times 10^4} = 171.33 \text{ MPa}$$

$$\text{支腿结构校验: } \frac{\sigma_c}{[\sigma]_c} + \frac{\sigma_b}{[\sigma]_b} = \left| \frac{12.68}{168.04} \right| + \left| \frac{171.33}{235} \right| = 0.805 \leq 1, \text{ 满足要求。}$$

⑤ 地脚螺栓的强度计算

地脚螺栓螺距: $t_b = 2.5 \text{ mm}$

地脚螺栓的内径: $d_1 = 17.294 \text{ mm}$

一个地脚螺栓的有效截面面积:

$$A_{bt} = \frac{\pi}{4} \left(d_1 - c_{bt} - \frac{0.866 \times t_b}{6} \right)^2 = \frac{\pi}{4} \left(17.294 - 2 - \frac{0.866 \times 2.5}{6} \right)^2 = 175.14 \text{ mm}^2$$

单个支腿的地脚螺栓数: $n_b = 1$

碳素钢地脚螺栓常温下的许用拉应力: $[\sigma]_{bt} = 147 \text{ MPa}$

地脚螺栓的拉应力:

$$\sigma_{bt} = \frac{1}{n \cdot n_b \cdot A_{bt}} \left(\frac{4F_H \cdot h}{D_b} - W \right) = \frac{1}{4 \times 1 \times 2280} \left(\frac{4 \times 6.11 \times 10^3 \times 3375}{1212} - 4.43 \times 10^4 \right) = 2.60 \text{ MPa}$$

$\sigma_{bt} = 2.60 \text{ MPa} < [\sigma]_{bt} = 147 \text{ MPa}$, 满足要求。

$$\text{地脚螺栓的剪切应力 } \tau_{bt} = \frac{F_H - 0.4W}{n \cdot n_b \cdot A_{bt}} = \frac{6.11 \times 10^3 - 0.4 \times 4.43 \times 10^4}{4 \times 1 \times 175.14} = -16.57 \text{ MPa}$$

当 τ_{bt} 计算得的值小于 0 时, 其值为 0

碳钢地脚螺栓常温下的许用剪切应力: $[\tau]_{bt} = 117.6 \text{ MPa}$

$\tau_{bt} = 0 < [\tau]_{bt} = 117.6 \text{ MPa}$, 满足要求。

⑥ 底板

底板长度: $b_1 = 150 \text{ mm}$

底板宽度: $b_2 = 150 \text{ mm}$

$$\text{支腿作用在混凝土基础上压缩应力: } \sigma_{cl} = \frac{F_L}{b_1 b_2} = \frac{2.89 \times 10^4}{150 \times 150} = 1.28 \text{ MPa}$$

混凝土许用耐压应力: $[\sigma]_{cl} = 11.768 \text{ MPa}$

$\sigma_{cl} = 1.28 \text{ MPa} < [\sigma]_{cl} = 11.768 \text{ MPa}$, 满足要求。

支柱到基础板边缘的最大长度: $B = 25 \text{ mm}$

基础板材料 Q235A 在设计温度下的许用应力: $[\sigma]^t = 140 \text{ MPa}$

$$\text{底板计算厚度: } \delta = B \sqrt{\frac{3R_{cl}}{[\sigma]^t}} + c_b = 25 \times \sqrt{\frac{3 \times 1.28}{140}} + 2 = 6.14 \text{ mm}$$

取支腿底板厚度: $\delta_b = 22 \text{ mm}$

⑦ 支腿装配焊缝的强度计算

每条装配焊缝的计算长度: $l = 360 \text{ mm}$

焊缝的焊脚尺寸: $k = 10 \text{ mm}$

焊缝的横截面积: $A = 2 \times 0.707kl = 2 \times 0.707 \times 10 \times 360 = 5090.4 \text{ mm}^2$

$$\text{焊缝的抗弯截面模量: } Z = \frac{2 \times 0.707k \times l^2}{6} = \frac{2 \times 0.707 \times 10 \times 360^2}{6} = 3.05 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

$$\text{支腿装配焊缝的剪切应力: } \tau_1 = \frac{F_L}{A} = \frac{2.89 \times 10^4}{5090.4} = 5.68 \text{ MPa}$$

$$\text{支腿装配焊缝的弯曲应力: } \sigma_f = \frac{RL_1}{Z} = \frac{1.53 \times 10^3 \times 2130}{3.05 \times 10^5} = 10.68 \text{ MPa}$$

$$\text{支腿装配焊缝的当量应力: } \sigma_z = \sqrt{\sigma_f^2 + 3\tau_1^2} = \sqrt{10.68^2 + 3 \times 5.68^2} = 14.52 \text{ MPa}$$

角焊缝受剪切时, 焊缝系数: $\phi = 0.49$

支腿装配焊缝的抗弯、抗剪许用应力: $[B] = 1.5[\sigma]^t \phi = 1.5 \times 137 \times 0.49 = 100.7 \text{ MPa}$

支腿装配焊缝的剪切应力验算: $\sigma_f = 10.68 \text{ MPa} < [B] = 100.7 \text{ MPa}$, 满足要求。

支腿装配焊缝的弯曲应力验算: $\tau_1 = 5.68 \text{ MPa} < [B] = 100.7 \text{ MPa}$, 满足要求。

支腿装配焊缝的当量应力验算: $\sigma_z = 14.52 \text{ MPa} < [B] = 100.7 \text{ MPa}$, 满足要求。

9.3 裙式支承常压容器 (DN4 000mm×16 600mm 的立式常压容器)

① 设计条件

设计压力: $p=0.049\text{MPa}$

设计温度: $t=50^{\circ}\text{C}$

壳体内直径: $D_i=4\,000\text{mm}$

介质: 油、水

设计地区基本风压值: $q_0=400\text{Pa}$

地震设防烈度: 8 度

设计基本地震加速度: $0.2g$

容器总高度: $H=16\,600\text{mm}$

壳体总长度: $H_0=15\,112\text{mm}$

壳体切线距: $L=13\,080\text{mm}$

裙座高度: $H_1=2\,500\text{mm}$

裙座底部内直径: $D_{is}=4\,500\text{mm}$

重力加速度: $g=9.81\text{m/s}^2$

地面粗糙度: B 类

场地土类别: II 类

设备直接安装在刚性基础上。

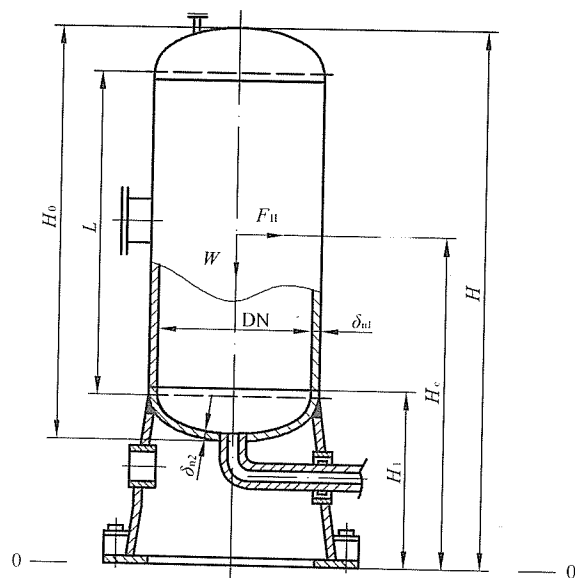


图 21

② 筒体、封头厚度计算

筒体、封头材料: Q345R

筒体、封头材料 Q345R 在设计温度下的许用应力: $[\sigma]^t=211.9\text{MPa}$

计算压力: $p_c=p+\rho g H_0 \times 10^{-9}=0.049+1\,000 \times 9.81 \times 15\,112 \times 10^{-9}=0.197\text{MPa}$

筒体焊接接头系数: $\phi=0.85$

封头焊接接头系数: $\phi=1$

厚度附加量: $C=C_1+C_2=0+3=3\text{mm}$

标准椭圆形封头形状系数: $K=1$

$$\text{壳体计算厚度: } \delta_1 = \frac{p_c D_i}{2[\sigma]^t \phi} + C = \frac{0.197 \times 4\,000}{2 \times 211.9 \times 0.85} + 3 = 5.19\text{mm}$$

$$\text{封头计算厚度: } \delta_2 = \frac{p_c D_i K}{2[\sigma]^t \phi} + C = \frac{0.197 \times 4\,000 \times 1}{2 \times 211.9 \times 1} + 3 = 4.86\text{mm}$$

取封头、壳体和裙座壳名义厚度: $\delta_n=16\text{mm}$ 。

③ 载荷计算

裙座材料: Q235A

操作状态下容器质量 (包括壳体及其附件、介质、平台梯子等的质量): $m_0=2.13 \times 10^5 \text{ kg}$

裙座材料 Q235A 的弹性模量: $E^t=1.92 \times 10^5 \text{ MPa}$

裙座材料 Q235 在常温下的许用应力: $[\sigma]_s^t=140\text{MPa}$

封头直边高度: $h_1=40\text{mm}$

$$\text{基础顶面至设备质心高度: } H_c = H_1 - h_1 + \frac{L}{2} = 2\,500 - 40 + \frac{13\,080}{2} = 9\,000\text{mm}$$

$$\text{裙座截面惯性矩: } I = \frac{\pi}{64} (D_{os}^4 - D_{is}^4) = \frac{\pi}{64} [(4\,500 + 2 \times 16)^4 - 4\,500^4] = 5.79 \times 10^{11} \text{ mm}^4$$

$$\text{地震载荷: } P_e = \alpha_e m_0 g = 0.16 \times 2.13 \times 10^5 \times 9.81 = 3.34 \times 10^5 \text{ N};$$

$$\text{地震弯矩: } M_E^{0-0} = p_e H_c = 3.34 \times 10^5 \times 9\,000 = 3.01 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

笼式扶梯当量宽度: $K_3=400\text{mm}$

操作平台当量宽度: $K_4=600\text{mm}$

$$\text{容器的有效直径: } D_e = D_i + 2 \times \delta_{n1} + K_3 + K_4 = 4\,000 + 2 \times 16 + 400 + 600 = 5\,032\text{mm}$$

风载体形系数: $K_1=0.7$

风振系数 ($H \leq 20\text{m}$): $K_2=1.7$

风压高度变化系数: $f_i=1.18$

$$\text{风载荷: } P_w = K_1 K_2 q_0 f_i H D_e \times 10^{-6} = 0.7 \times 1.7 \times 400 \times 1.18 \times 16\,600 \times 5\,032 \times 10^{-6} = 4.69 \times 10^4 \text{ N}$$

$$\text{风弯矩: } M_w^{0-0} = P_w H_c = 4.69 \times 10^4 \times 9\,000 = 4.22 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

水平载荷:

$$F_H = \max \{ P_w, P_e + 0.25 P_w \} = \max \{ 4.69 \times 10^4, 3.34 \times 10^5 + 0.25 \times 4.69 \times 10^4 \} = 3.45 \times 10^5 \text{ N}$$

$$\text{最大弯矩 } M_{\max}^{0-0} = F_H H_c = 3.45 \times 10^5 \times 9\,000 = 3.11 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

④ 裙座计算

裙座底部 0-0 截面:

$$\text{裙座按圆锥形裙座 (下封头椭圆方程为 } \frac{x^2}{2\,016^2} + \frac{y^2}{1\,016^2} = 1 \text{) 进行演算。}$$

裙座与椭圆形封头相交处 X 方向距离: $x = \frac{D_i}{2} = \frac{4\,000}{2} = 2\,000\text{mm}$

筒体半径: $R_i = 2\,000\text{mm}$

有效厚度: $\delta_{es} = \delta_n - C_2 = 16 - 3 = 13\text{mm}$

裙座与椭圆形封头相交处 Y 方向距离: $y = 1\,016 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{2\,016}\right)^2} = 1\,016 \sqrt{1 - \left(\frac{2\,000}{2\,016}\right)^2} = 127.75\text{mm}$

圆锥半顶角: $\beta = \arctan \frac{D_{is} - D_i}{2H_1} = \arctan \frac{4\,500 - 4\,000}{2 \times 2\,500} = 5.71^\circ$

系数: $A = 0.094 \frac{\delta_{es}}{R_i} = 0.094 \times \frac{13}{2\,000} = 6.11 \times 10^{-4}$

系数: $B = 83\text{MPa}$ (查 GB 150—1998 图 6-5)

载荷组合系数: $K = 1.2$

裙座材料 Q235A 的屈服强度: $R_{eL} (R_{p0.2}) = 235\text{MPa}$

操作时锥壳许用轴向应力 [按 JB/T 4710—2005 式 (8-47)]:

$$\begin{cases} KB \cos^2 \beta = 1.2 \times 83 \times \cos^2 5.71^\circ = 98.61\text{MPa} \\ K[\sigma]_s^t = 1.2 \times 140 = 168\text{MPa} \end{cases} \quad \text{取较小值: } 98.6\text{MPa}$$

压力试验时圆筒或锥壳许用轴向应力 [按 JB/T 4710—2005 式 (8-48)]:

$$\begin{cases} B \cos^2 \beta = 83 \times \cos^2 5.71^\circ = 82.18\text{MPa} \\ 0.9R_{eL} (R_{p0.2}) = 0.9 \times 235 = 211.5\text{MPa} \end{cases} \quad \text{取较小值: } 82.18\text{MPa}$$

裙座圆筒或锥壳底部抗弯截面系数: $Z_{sb} = \frac{\pi}{4} D_{is}^2 \delta_{es} = \frac{\pi}{4} \times 4\,500^2 \times 13 = 2.07 \times 10^8 \text{mm}^3$

裙座圆筒或锥壳底部截面积: $A_{sb} = \pi D_{is} \delta_{es} = \pi \times 4\,500 \times 13 = 1.84 \times 10^5 \text{mm}^2$

操作状态下裙座壳底截面的组合应力 [按 JB/T 4710—2005 式 (8-47)]:

裙座底截面处的垂直地震力: $F_v^{0-0} = 0$

$$\frac{1}{\cos \beta} \left(\frac{M_{\max}^{0-0}}{Z_{sb}} + \frac{m_0 g + F_v^{0-0}}{A_{sb}} \right) = \frac{1}{\cos 5.71^\circ} \left(\frac{3.11 \times 10^9}{2.07 \times 10^8} + \frac{2.13 \times 10^5 \times 9.81 + 0}{1.84 \times 10^5} \right) = 26.51\text{MPa}$$

$26.51\text{MPa} < 98.6\text{MPa}$, 满足要求。

压力试验时裙座壳底截面的组合应力 [按 JB/T 4710—2005 式 (8-48)]:

$$\frac{1}{\cos \beta} \left(\frac{0.3M_w^{0-0} + M_c}{Z_{sb}} + \frac{m_{\max} g}{A_{sb}} \right) = \frac{1}{\cos 5.71^\circ} \left(\frac{0.3 \times 4.22 \times 10^8}{2.07 \times 10^8} + \frac{2.13 \times 10^5 \times 9.81}{1.84 \times 10^5} \right) = 12.03\text{MPa}$$

$12.03\text{MPa} < 82.17\text{MPa}$, 满足要求。

⑤ 基础环厚度计算

基础环外径: $D_{ob} = D_{is} + (160 \sim 400) = 4\,500 + 364 = 4\,864\text{mm}$

基础环内径: $D_{ib} = D_{is} - (160 \sim 400) = 4\,500 - 190 = 4\,310\text{mm}$

$$\text{基础环抗弯截面系数: } Z_b = \frac{\pi(D_{ob}^4 - D_{ib}^4)}{32D_{ob}} = \frac{\pi(4864^4 - 4310^4)}{32 \times 4864} = 4.33 \times 10^9 \text{ mm}^3$$

$$\text{基础环面积: } A_b = \frac{\pi}{4}(D_{ob}^2 - D_{ib}^2) = \frac{\pi}{4}(4864^2 - 4310^2) = 3.99 \times 10^6 \text{ mm}^2$$

偏心质量: $M_e = 0$

混凝土基础上的最大压应力[按 JB/T 4710—2005 式(8-54)]:

$$\sigma_{b, \max} = \begin{cases} \frac{M_{\max}^{0-0}}{Z_b} + \frac{m_0 g}{A_b} = \frac{3.11 \times 10^9}{4.33 \times 10^9} + \frac{2.13 \times 10^5 \times 9.81}{3.99 \times 10^6} = 1.24 \text{ MPa} \\ \frac{0.3M_w^{0-0} + M_e}{Z_b} + \frac{m_{\max} g}{A_b} = \frac{0.3 \times 4.22 \times 10^8 + 0}{4.33 \times 10^9} + \frac{2.13 \times 10^5 \times 9.81}{3.99 \times 10^6} = 0.55 \text{ MPa} \end{cases}$$

取较大值: $\sigma_{b, \max} = 1.24 \text{ MPa}$

a) 无筋板时:

基础环外直径与裙座壳体直径之差的 1/2:

$$b = 0.5(D_{ob} - D_{is} - 2\delta_n) = 0.5 \times (4864 - 4500 - 2 \times 16) = 166 \text{ mm}$$

基础环材料 Q235A 在常温下的许用应力: $[\sigma]_b = 147 \text{ MPa}$

$$\text{基础环计算厚度[按 JB/T 4710—2005 式(8-53)]: } \delta_b = 1.73b \sqrt{\frac{\sigma_{b, \max}}{[\sigma]_b}} = 1.73 \times 166 \times \sqrt{\frac{1.24}{147}} = 26.37 \text{ mm}$$

无筋板时取基础环名义厚度: $\delta_{bn} = 30 \text{ mm}$ 。

b) 有筋板时:

相邻筋板间的最大外侧距离(假定安装 24 个地脚螺栓时): $l = 498.9 \text{ mm}$

$$\text{系数: } \frac{b}{l} = \frac{166}{498.9} = 0.333$$

根据 b/l , 查 JB/T 4710—2005 表 8-7 得矩形板力矩系数: $C_x = -0.427$, $C_y = 0.0084$

矩形板的计算力矩:

$$M_x = C_x \sigma_{b, \max} b^2 = -0.427 \times 1.24 \times 166^2 = -1.46 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$M_y = C_y \sigma_{b, \max} l^2 = 0.0084 \times 1.24 \times 498.9^2 = 2.59 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$|M_x| < |M_y|, \text{ 得矩形板的计算力矩: } M_s = |M_x| = 1.46 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$\text{有筋板时基础环计算[按 JB/T 4710—2005 式(8-54)]: } \delta_b = \sqrt{\frac{6M_s}{[\sigma]_b}} = \sqrt{\frac{6 \times 1.46 \times 10^4}{147}} = 24.41 \text{ mm}$$

有筋板时取基础环名义厚度: $\delta_{bn} = 26 \text{ mm}$ 。

⑥ 地脚螺栓计算

地脚螺栓材料: Q235A

地脚螺栓材料 Q235A 在常温下的许用应力: $[\sigma]_{bt} = 147 \text{ MPa}$

裙式支承容器安装状态时的最小质量: $m_{\min} = 3.3 \times 10^4 \text{ kg}$

地脚螺栓承受最大拉应力[按 JB/T 4710—2005 式(8-58)]:

$$\sigma_B = \begin{cases} \frac{M_w^{0-0} + M_e}{Z_b} - \frac{m_{\min} g}{A_b} = \frac{4.22 \times 10^8 + 0}{4.33 \times 10^9} - \frac{3.3 \times 10^4 \times 9.81}{3.99 \times 10^6} = 0.179 \text{ MPa} \\ \frac{M_E^{0-0} + 0.25 M_w^{0-0} + M_e}{Z_b} - \frac{m_0 g - F_v^{0-0}}{A_b} \\ = \frac{3.01 \times 10^9 + 0.25 \times 4.22 \times 10^8 + 0}{4.33 \times 10^9} - \frac{2.13 \times 10^5 \times 9.81 - 0}{3.99 \times 10^6} = 1.24 \text{ MPa} \end{cases}$$

取: $\sigma_B = 1.24 \text{ MPa}$

地脚螺栓个数: $n=24$

地脚螺栓的螺纹小径[按 JB/T 4710—2005 式 (8-59)]:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4\sigma_B A_b}{\pi n [\sigma]_{bt}}} + C_2 = \sqrt{\frac{4 \times 1.24 \times 3.99 \times 10^6}{\pi \times 24 \times 147}} + 3 = 45.26 \text{ mm}$$

取地脚螺栓: M56。

⑦ 筋板

筋板材料: Q235A

筋板材料 Q235A 在常温下的许用应力: $[\sigma]_G = 140 \text{ MPa}$

对应于一个地脚螺栓的筋板个数: $n_1=2$

筋板厚度: $\delta_G = 12 \text{ mm}$

筋板宽度: $l_2' = 166 \text{ mm}$

筋板长度: $l_k = 256 \text{ mm}$

长方形筋板的惯性半径: $\rho_i = 0.289 \delta_G = 3.468 \text{ mm}$

$$\text{一个地脚螺栓承受的最大拉力: } F_1 = \frac{R_B A_b}{n} = \frac{1.24 \times 3.99 \times 10^6}{24} = 2.06 \times 10^5 \text{ N}$$

$$\text{长细比: } \lambda = \frac{0.5 l_k}{\rho_i} = \frac{0.5 \times 256}{3.468} = 36.91$$

$$\text{临界长细比: } \lambda_c = \sqrt{\frac{\pi^2 E^t}{0.6 [\sigma]_G}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \times 1.92 \times 10^5}{0.6 \times 140}} = 150.20 > \lambda = 36.91$$

$$\text{系数: } \nu = 1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^2 = 1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{36.91}{150.20} \right)^2 = 1.54$$

$$\text{筋板的许用临界压应力: } [\sigma]_c = \frac{\left[1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^2 \right] [R]_G}{\nu} = \frac{\left[1 - 0.4 \left(\frac{36.91}{150.2} \right)^2 \right] \times 140}{1.54} = 88.71 \text{ MPa}$$

$$\text{筋板压应力: } \sigma_G = \frac{F_1}{n_1 \delta_G l_2'} = \frac{2.06 \times 10^5}{2 \times 12 \times 166} = 51.71 \text{ MPa}$$

$R_G = 51.71 \text{ MPa} < [\sigma]_c = 88.71 \text{ MPa}$, 满足要求。

⑧ 盖板 (盖板为环形盖板加垫板结构)

盖板材料: Q235A

盖板材料 Q235A 在常温下的许用应力: $[\sigma]_z = 140 \text{ MPa}$

筋板内侧间距: $l'_3 = 110 \text{ mm}$

垫板宽度: $l'_4 = 120 \text{ mm}$

垫板上地脚螺栓孔直径: $d_2 = 59 \text{ mm}$

盖板上地脚螺栓孔直径: $d_3 = 75 \text{ mm}$

盖板厚度: $\delta_c = 40 \text{ mm}$

垫板厚度: $\delta_z = 22 \text{ mm}$

环形盖板的最大压应力[按 JB/T 4710—2005 式 (8-66)]:

$$\sigma_z = \frac{3}{4} \left[\frac{F_1 l'_3}{(l'_2 - d_3) \delta_c^2 + (l'_4 - d_2) \delta_z^2} \right] = \frac{3}{4} \left[\frac{2.06 \times 10^5 \times 110}{(166 - 75) \times 40^2 + (120 - 59) \times 22^2} \right] = 97.05 \text{ MPa}$$

$\sigma_z = 97.05 \text{ MPa} < [\sigma]_z = 140 \text{ MPa}$, 满足要求。

9.4 矩形容器

本例题未作说明的符号见 NB/T 47003.1—2009 中 8.1。

(1) A 型 (普通型) 矩形容器

① 类型说明

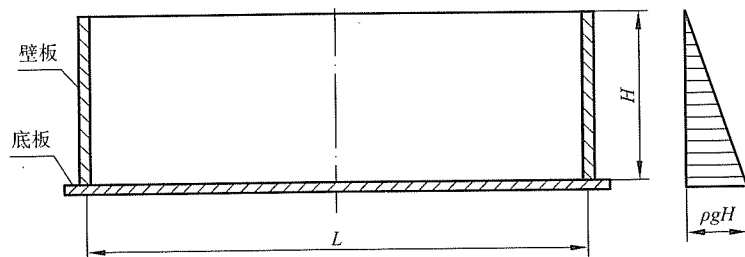


图 22 普通型 (A 型) 矩形容器

A 型 (普通型) 矩形容器为三边简支顶边自由, 设计压力为常压, 仅承受液体静压的矩形容器。本计算书对壁板, 顶板 (可选) 和底板作强度、刚度分析。

② 设计条件

设备位号		T-1	容器尺寸	长 L	mm	1 500
设计压力	MPa	常压		宽 W	mm	650
设计温度	℃	50		高 H	mm	1 000
介质名称		水	器壁材料			Q235A
介质密度 ρ	kg/mm ³	1.0×10^{-6}	加固件材料			Q235A
钢板厚度负偏差 C_1	mm	0.6	设计温度下器壁材料许用应力 $[\sigma]^t$		MPa	135
腐蚀裕量 C_2	mm	2	设计温度下器壁材料弹性模量 E^t		MPa	1.91×10^5

③ 壁板强度计算

根据设计条件计算壁板厚度的各参数分别为：

$A=L=$	1 500	mm	$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³
$B=H=$	1 000	mm	$g=$	9.81	m/s ²

查图 8-5 得 α 为： $\alpha=0.02630$

$$\text{壁板的计算厚度: } \delta_w = 2.45A \sqrt{\frac{\alpha p_c}{[\sigma]^t}} = 2.45 \times 1500 \times \sqrt{\frac{0.02630 \times 9.81 \times 10^{-3}}{135}} = 5.08 \text{ mm}$$

式中计算压力： $p_c = \rho g H = 1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 1000 = 9.81 \times 10^{-3} \text{ MPa}$

钢板厚度负偏差： $C_1=0.6 \text{ mm}$

腐蚀裕量： $C_2=2 \text{ mm}$

$$\delta = \delta_w + C_1 + C_2 = 5.08 + 0.6 + 2 = 7.68 \text{ mm}$$

取壁板名义厚度： $\delta_{w,n}=10 \text{ mm}$ 。

④ 壁板刚度校核

根据设计条件计算壁板最大挠度的各参数分别为：

$A=L=$	1 500	mm	$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³
$B=H=$	1 000	mm	$g=$	9.81	m/s ²

查图 8-5 得 β 为： $\beta=0.03302$

$$\text{壁板有效厚度 } \delta_{w,e} = \delta_{w,n} - (C_1 + C_2) = 10 - (0.6 + 2) = 7.4 \text{ mm}$$

$$\text{壁板最大挠度: } f_{w,\max} = \beta A^4 \frac{p_c}{E^t \delta_{w,e}^3} = 0.03302 \times 1500^4 \times \frac{9.81 \times 10^{-3}}{1.91 \times 10^5 \times 7.4^3} = 21.19 \text{ mm}$$

壁板的许用挠度 $[f]$ 为：

$$[f] = 5 \left(\frac{\delta_{w,e}}{2} + \sqrt{\frac{B}{A} \frac{A}{500}} \right) = 5 \times \left(\frac{7.4}{2} + \sqrt{\frac{1000}{1500} \times \frac{1500}{500}} \right) = 30.75 \text{ mm}$$

壁板刚度校核结论： $f_{w,\max} < [f]$ ，刚度满足要求。

⑤ 顶板强度计算[可选] (如不作顶板设计, 此节可忽略。)

根据设计条件计算顶板厚度的各参数分别为:

$A=L_T=$	750	mm	$\rho_M=$	7.85×10^{-6}	kg/mm ³
$B=W_T=$	650	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$p_a=$	1.20×10^{-3}	MPa	$[\sigma]^t=$	135	MPa

查图 8-15 得 α 为: $\alpha=0.04479$

顶板承受自重所需的计算厚度 δ_T 为:

$$\begin{aligned} \delta_T &= \frac{3A^2\alpha\rho_M g + A\sqrt{3\alpha(3A^2\alpha\rho_M^2 g^2 + 2p_a[\sigma]^t)}}{[\sigma]^t} \\ &= \frac{3 \times 750^2 \times 0.04479 \times 7.85 \times 10^{-6} \times 9.81}{135} \\ &\quad + \frac{750 \times \sqrt{3 \times 0.04479 \times [3 \times 750^2 \times 0.04479 \times (7.85 \times 10^{-6})^2 \times 9.81^2 + 2 \times 1.20 \times 10^{-3} \times 135]}}{135} \\ &= 1.19 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\delta = \delta_T + C_1 + C_2 = 0.717 + 0.6 + 2 = 3.32 \text{ mm}$$

考虑壁厚附加量及设置加强筋后, 顶板的名义厚度 $\delta_{T,n}$ 取为 6mm。

⑥ 顶板刚度校核[可选] (如不作顶板设计, 此节可忽略。)

承受自重, 及附加载荷顶板刚度校核:

根据设计条件计算顶板最大挠度的各参数分别为:

$A=L_T=$	750	mm	$\rho_M=$	7.85×10^{-6}	kg/mm ³
$B=W_T=$	650	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$p_a=$	1.20×10^{-3}	MPa	$E^t=$	1.91×10^5	MPa

查图 8-15 得 β 为: $\beta=0.03268$

$$\text{顶板有效厚度 } \delta_{T,e} = \delta_{T,n} - (C_1 + C_2) = 6 - (2 + 0.6) = 3.4 \text{ mm}$$

顶板最大挠度 $f_{T,\max}$ 为:

$$f_{T,\max} = \beta A^4 \frac{\rho_M g \delta_{T,e} + p_a}{E^t \delta_{T,e}^3} = 0.03268 \times 750^4 \times \frac{7.85 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 3.4 + 1.2 \times 10^{-3}}{1.91 \times 10^5 \times 3.4^3} = 2.01 \text{ mm}$$

顶板的许用挠度 $[f]$ 为:

$$[f] = 5 \left(\frac{\delta_{T,e}}{2} + \sqrt{\frac{B}{A} \frac{A}{500}} \right) = 5 \times \left(\frac{3.4}{2} + \sqrt{\frac{650}{750} \times \frac{750}{500}} \right) = 15.48 \text{ mm}$$

顶板刚度校核结论: $f_{T,\max} < [f]$, 刚度满足要求。

⑦ 顶板加强筋

$L_T =$	1 500	mm	$\rho_M =$	7.85×10^{-6}	kg/mm ³
$W_T =$	650	mm	$g =$	9.81	m/s ²
$p_a =$	1.20×10^{-3}	MPa	$[\sigma]_b =$	137	MPa
$\delta_{T,e} =$	3.40	mm			

顶板上加强筋 L 方向截面系数 $Z_{T,L}$ 为:

$$Z_{T,L} = \frac{(\rho_M g \delta_{T,e} + p_a) L_T W_T^2}{9.4 \times [\sigma]_b} - \frac{L_T \delta_{T,e}^2}{6}$$

$$= \frac{(7.85 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 3.4 + 1.2 \times 10^{-3}) \times 1\,500 \times 650^2}{9.4 \times 137} - \frac{1\,500 \times 3.4^2}{6} = -2\,186 \text{ mm}^3$$

顶板上加强筋 W 方向的截面系数 $Z_{T,W}$ 为:

$$Z_{T,W} = \frac{(\rho_M g \delta_{T,e} + p_a) W_T L_T^2}{9.4 \times [\sigma]_b} - \frac{W_T \delta_{T,e}^2}{6}$$

$$= \frac{(7.85 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 3.4 + 1.2 \times 10^{-3}) \times 650 \times 1\,500^2}{9.4 \times 137} - \frac{650 \times 3.4^2}{6} = 372.2 \text{ mm}^3$$

顶板上加强筋所需的截面系数 $Z_T = \max\{Z_{T,W}, Z_{T,L}\} = 372.2 \text{ mm}^3$

顶板加强筋选用: L 50×50×5

顶板加强筋截面系数: 3.13 cm^3

顶板加强筋强度结论: 所选加强筋合格。

⑧ 底板设计

a) 型钢支撑的底板

—— 底板厚度计算:

$H =$	1 000	mm	型钢跨距 $L_b =$	150	mm
$\rho =$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³	$g =$	9.81	m/s ²

底板计算厚度 δ_b 为:

$$\delta_b = 0.8 L_b \sqrt{\frac{\rho g H}{[\sigma]^t}} = 0.8 \times 150 \times \sqrt{\frac{1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 1\,000}{135}} = 1.02 \text{ mm}$$

钢板厚度负偏差 $C_1 = 0.6 \text{ mm}$

腐蚀裕量 $C_2 = 2 \text{ mm}$

$\delta = \delta_b + C_1 + C_2 = 1.02 + 0.6 + 2 = 3.62 \text{ mm}$

最终取底板名义厚度 $\delta_{b,n} = 4 \text{ mm}$ 。

型钢跨度计算:

$H=$	1 000	mm	底板名义厚度 $\delta_{b,n}=$	4	mm
$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³	$g=$	9.81	m/s ²

型钢的最大跨度 $L_{b,max}$ 为：

$$L_{b,max}=1.25(\delta_{b,n}-C)\sqrt{\frac{[\sigma]^t}{\rho g H}}=1.25\times(4-2.6)\times\sqrt{\frac{135}{1.0\times10^{-6}\times9.81\times1\,000}}=205.3\text{mm}$$

b) 在平基础上全平面支撑的底板

当底板整个表面被支撑时，底板最小厚度常用 4mm~6mm（或与壁板等厚），并考虑腐蚀裕量，最终取底板的名义厚度 $\delta_{b,n}$ 为 4mm。

（2）B 型（顶边加固型）矩形容器

① 类型说明

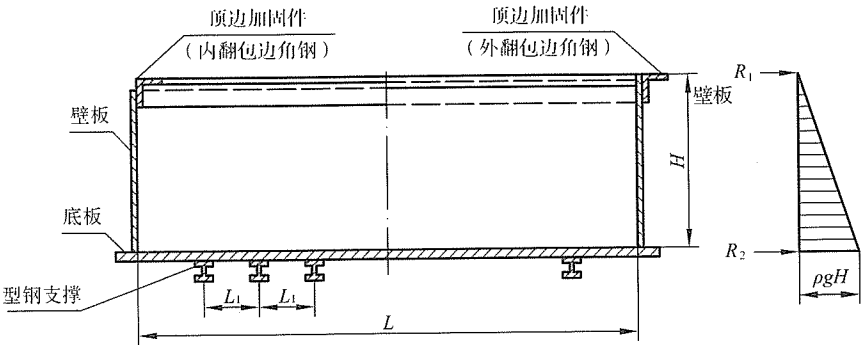


图 23 顶边加固的（B 型）矩形容器

B 型（顶边加固型）矩形容器为四边简支，设计压力为常压，仅承受液体静压的矩形容器。本计算书对壁板，顶板（可选）和底板作强度、刚度分析，对加固件作刚度分析。

② 设计条件

设备位号		T-2	容器尺寸	长 L	mm	3 000
设计压力	MPa	常压		宽 W	mm	3 000
设计温度	℃	50		高 H	mm	2 100
介质名称		水	器壁材料			Q235A
介质密度 ρ	kg/mm ³	1.0×10^{-6}	加固件材料			Q235A
钢板厚度负偏差 C_1	mm	0.6	设计温度下器壁材料许用应力 $[\sigma]^t$		[MPa]	135
腐蚀裕量 C_2	mm	1.5	设计温度下器壁材料弹性模量 E^t		[MPa]	1.91×10^5

③ 壁板强度计算

根据设计条件计算壁板厚度的各参数分别为：

$A=L=$	3 000	mm	$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³
$B=H=$	2 100	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$[\sigma]^t=$	135	MPa			

查图 8-7 得 α 为: $\alpha=0.01735$

壁板的计算厚度 δ_w 为:

$$\delta_w = 2.45 A \sqrt{\frac{ap_c}{[\sigma]^t}} = 2.45 \times 3000 \times \sqrt{\frac{0.01735 \times 2.06 \times 10^{-2}}{135}} = 11.96 \text{ mm}$$

式中计算压力: $p_c = \rho g H = 1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 2100 = 2.06 \times 10^{-2} \text{ MPa}$

钢板厚度负偏差 $C_1=0.6 \text{ mm}$

腐蚀裕量 $C_2=1.5 \text{ mm}$

$\delta = \delta_w + C_1 + C_2 = 11.96 + 0.6 + 1.5 = 14.06 \text{ mm}$

最终取壁板名义厚度 $\delta_{w,n}=16 \text{ mm}$ 。

④ 壁板刚度校核

根据设计条件计算壁板最大挠度的各参数分别为:

$A=L=$	3 000	mm	$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³
$B=H=$	2 100	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$E^t=$	1.91×10^5	MPa			

查图 8-7 得 β 为: $\beta=0.00839$

壁板有效厚度 $\delta_{w,e} = \delta_{w,n} - (C_1 + C_2) = 16 - (0.6 + 1.5) = 13.9 \text{ mm}$

壁板最大挠度 $f_{w,\max}$ 为:

$$f_{w,\max} = \beta A^4 \frac{p_c}{E^t \delta_{w,e}^3} = 0.00839 \times 3000^4 \times \frac{2.06 \times 10^{-2}}{1.91 \times 10^5 \times 13.9^3} = 27.29 \text{ mm}$$

壁板的许用挠度 $[f]$ 为:

$$[f] = 5 \left(\frac{\delta_{w,e}}{2} + \sqrt{\frac{B}{A} \frac{A}{500}} \right) = 5 \times \left(\frac{13.9}{2} + \sqrt{\frac{2100}{3000} \times \frac{3000}{500}} \right) = 59.85 \text{ mm}$$

壁板刚度校核结论: $f_{w,\max} < [f]$, 刚度满足要求。

⑤ 顶边加固件设计

$L_c=L=$	3 000	mm	$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³
$H_c=H=$	2 100	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$E^t=$	1.91×10^5	MPa			

顶边加固件所需的惯性矩 $I_{c,T}$ 为:

$$I_{c,T} = 0.217 \frac{\rho g H_c^2 L_c^3}{E^t} \times 10^{-4} = 0.217 \times \frac{1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 2100^2 \times 3000^3}{1.91 \times 10^5} \times 10^{-4} = 0.044 \text{ cm}^4$$

注: 顶边加固件一般采用包边角钢, 其规格不应小于 L 50×50×5, 设计所采用的加固件惯性矩应不小于以上计算惯性矩值。本设计顶边加固件采用 L 100×100×8, 该规格顶边加固件的惯性矩为 148.2 cm⁴。

结论: 所选顶边加固件刚度合格。

⑥ 顶板强度计算[可选] (如不作顶板设计, 此节可忽略。)

根据设计条件计算顶板厚度的各参数分别为:

$A=L_T=$	500	mm	$\rho_M=$	7.85×10^{-6}	kg/mm ³
$B=W_T=$	500	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$p_a=$	1.20×10^{-3}	MPa	$[\sigma]^t=$	135	MPa

查图 8-15 得 α 为: $\alpha=0.04479$

顶板承受自重所需的计算厚度 δ_T 为:

$$\begin{aligned}\delta_T &= \frac{3A^2\alpha\rho_M g + A\sqrt{3\alpha(3A^2\alpha\rho_M^2 g^2 + 2p_a[\sigma]^t)}}{[\sigma]^t} \\ &= \frac{3\times 500^2\times 0.04479\times 7.85\times 10^{-6}\times 9.81}{135} \\ &\quad + \frac{500\times \sqrt{3\times 0.04479\times [3\times 500^2\times 0.04479\times (7.85\times 10^{-6})^2\times 9.81^2 + 2\times 1.20\times 10^{-3}\times 135]}}{135} \\ &= 0.78\text{mm}\end{aligned}$$

$$\delta = \delta_T + C_1 + C_2 = 0.56 + 0.6 + 1.5 = 2.88\text{mm}$$

考虑壁厚附加量及设置加强筋后, 顶板的名义厚度 $\delta_{T,n}$ 取为 6mm。

⑦ 顶板刚度校核[可选] (如不作顶板设计, 此节可忽略。)

承受自重, 及附加载荷顶板刚度校核:

根据设计条件计算顶板最大挠度的各参数分别为:

$A=L_T=$	500	mm	$\rho_M=$	7.85×10^{-6}	kg/mm ³
$B=W_T=$	500	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$p_a=$	1.20×10^{-3}	MPa	$E^t=$	1.91×10^5	MPa

查图 8-15 得 β 为: $\beta=0.0438$

$$\text{顶板有效厚度 } \delta_{T,e} = \delta_{T,n} - (C_1 + C_2) = 6 - (0.6 + 1.5) = 3.9\text{mm}$$

顶板最大挠度 $f_{T,\max}$ 为:

$$f_{T,\max} = \beta A^4 \frac{\rho_M g \delta_{T,e} + p_a}{E^t \delta_{T,e}^3} = 0.0438 \times 500^4 \times \frac{7.85 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 3.9 + 1.2 \times 10^{-3}}{1.91 \times 10^5 \times 3.9^3} = 0.36\text{mm}$$

顶板的许用挠度 $[f]$ 为:

$$[f] = 5 \left(\frac{\delta_{T,e}}{2} + \sqrt{\frac{B}{A} \frac{A}{500}} \right) = 5 \times \left(\frac{3.9}{2} + \sqrt{\frac{500}{500} \times \frac{500}{500}} \right) = 14.75\text{mm}$$

顶板刚度校核结论: $f_{T,\max} < [f]$, 刚度满足要求。

⑧ 顶板加强筋

$L_T =$	3 000	mm	$\rho_M =$	7.85×10^{-6}	kg/mm ³
$W_T =$	500	mm	$g =$	9.81	m/s ²
$p_a =$	1.20×10^{-3}	MPa	$[\sigma]_b =$	137	MPa
$\delta_{T,e} =$	3.90	mm			

顶板上加强筋 L 方向截面系数 $Z_{T,L}$ 为:

$$Z_{T,L} = \frac{(\rho_M g \delta_{T,e} + p_a) L_T W_T^2}{9.4 [\sigma]_b} - \frac{L_T \delta_{T,e}^2}{6}$$

$$= \frac{(7.85 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 3.9 + 1.2 \times 10^{-3}) \times 3\,000 \times 500^2}{9.4 \times 137} - \frac{3\,000 \times 3.9^2}{6} = -6\,731 \text{ mm}^3$$

顶板上加强筋 W 方向的截面系数 $Z_{T,W}$ 为:

$$Z_{T,W} = \frac{(\rho_M g \delta_{T,e} + p_a) W_T L_T^2}{9.4 [\sigma]_b} - \frac{W_T \delta_{T,e}^2}{6}$$

$$= \frac{(7.85 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 3.9 + 1.2 \times 10^{-3}) \times 500 \times 3\,000^2}{9.4 \times 137} - \frac{500 \times 3.9^2}{6} = 3\,975 \text{ mm}^3$$

顶板上加强筋所需的截面系数 $Z_T = \max\{Z_{T,W}, Z_{T,L}\} = 3\,975 \text{ cm}^3$

顶板加强筋选用: L 70×70×7

顶板加强筋截面系数: 8.59 cm³

顶板加强筋强度结论: 所选加强筋合格。

⑨ 底板设计

a) 型钢支撑的底板

—— 底板厚度计算:

$H =$	2 100	mm	型钢跨距 $L_b =$	150	mm
$\rho =$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³	$g =$	9.81	m/s ²
$[\sigma]^t =$	135	MPa			

底板计算厚度 δ_b 为:

$$\delta_b = 0.8 L_b \sqrt{\frac{\rho g H}{[\sigma]^t}} = 0.8 \times 150 \times \sqrt{\frac{1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 2\,100}{135}} = 1.48 \text{ mm}$$

钢板厚度负偏差 $C_1 = 0.6 \text{ mm}$

腐蚀裕量 $C_2 = 1.5 \text{ mm}$

$\delta = \delta_b + C_1 + C_2 = 1.48 + 0.6 + 1.5 = 3.58 \text{ mm}$

最终取底板名义厚度 $\delta_{b,n} = 4 \text{ mm}$ 。

—— 型钢跨度计算:

$H=$	2 100	mm	底板名义厚度 $\delta_{b,n}=$	4	mm
$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³	$g=$	9.81	m/s ²
$[\sigma]^t=$	135	MPa			

型钢的最大跨度 $L_{b,max}$ 为:

$$L_{b,max} = 1.25(\delta_{b,n} - C) \sqrt{\frac{[\sigma]^t}{\rho g H}} = 1.25 \times (4 - 2.1) \times \sqrt{\frac{135}{1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 2\,100}} = 192.26 \text{ mm}$$

b) 在平基础上全平面支撑的底板

当底板整个表面被支撑时, 底板最小厚度常用 4mm~6mm (或与壁板等厚), 并考虑腐蚀裕量。最终取底板的名义厚度 $\delta_{b,n}$ 为 4mm。

(3) C 型 (垂直加固型) 矩形容器

① 类型说明

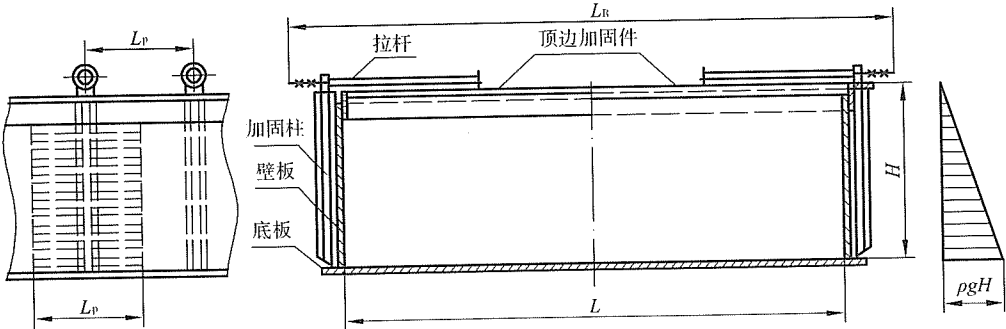


图 24 垂直加固的 (C 型) 矩形容器

C 型 (垂直加固型) 矩形容器为四边简支、有顶边和垂直加固件, 设计压力为常压, 仅承受液体静压的矩形容器。本计算书对壁板、顶板 (可选) 和底板作强度、刚度分析, 对加固件作刚度分析。

② 设计条件

设备位号		T-3	容器尺寸	长 L	mm	4 500
设计压力	MPa	常压		宽 W	mm	2 500
设计温度	℃	50		高 H	mm	3 000
介质名称		水	器壁材料			Q235A
介质密度 ρ	kg/mm ³	1.0×10^{-6}	加固件材料			Q235A
钢板厚度负偏差 C_1	mm	0.8	设计温度下器壁材料许用应力 $[\sigma]^t$		MPa	135
腐蚀裕量 C_2	mm	2	设计温度下器壁材料弹性模量 E^t		MPa	1.91×10^5
加固柱间距 L_p	mm	1 200				

注: 初次设计时, 可先假设 L_p 值, 按式 (8-2)、式 (8-3)、式 (8-4) 设计壁板厚度 $\delta_{w,n}$, 再按式 (8-7) 计算 $L_{p,max}$, 假设的 L_p 值应不大于式 (8-7) 计算的 $L_{p,max}$ 值。

③ 壁板强度计算

根据设计条件计算壁板厚度的各参数分别为：

$A=L_p=$	1 200	mm	$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³
$B=H=$	3 000	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$[\sigma]^t=$	135	MPa			

查图 8-7 得 α 为： $\alpha=0.055\ 12$

壁板的计算厚度 δ_w 为：

$$\delta_w = 2.45 A \sqrt{\frac{\alpha p_c}{[\sigma]^t}} = 2.45 \times 1\ 200 \times \sqrt{\frac{0.055\ 12 \times 2.94 \times 10^{-2}}{135}} = 10.19 \text{ mm}$$

式中计算压力： $p_c = \rho g H = 1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 3\ 000 = 2.94 \times 10^{-2} \text{ MPa}$

钢板厚度负偏差 $C_1=0.8 \text{ mm}$

腐蚀裕量 $C_2=2 \text{ mm}$

$\delta = \delta_w + C_1 + C_2 = 10.19 + 0.8 + 2 = 14 \text{ mm}$

最终取壁板名义厚度 $\delta_{w,n}=14 \text{ mm}$ 。

④ 壁板刚度校核

根据设计条件计算壁板最大挠度的各参数分别为：

$A=L_p=$	1 200	mm	$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³
$B=H=$	3 000	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$E^t=$	1.91×10^5	MPa			

查图 8-7 得 β 为： $\beta=0.062\ 81$

壁板有效厚度 $\delta_{w,e} = \delta_{w,n} - (C_1 + C_2) = 14 - (0.8 + 2) = 11.2 \text{ mm}$

壁板最大挠度 $f_{w,\max}$ 为：

$$f_{w,\max} = \beta A^4 \frac{p_c}{E^t \delta_{w,e}^3} = 0.062\ 81 \times 1\ 200^4 \times \frac{2.94 \times 10^{-2}}{1.91 \times 10^5 \times 11.2^3} = 14.27 \text{ mm}$$

壁板的许用挠度 $[f]$ 为：

$$[f] = 5 \left(\frac{\delta_{w,e}}{2} + \sqrt{\frac{B}{A} \frac{A}{500}} \right) = 5 \times \left(\frac{11.2}{2} + \sqrt{\frac{3\ 000}{1\ 200} \times \frac{1\ 200}{500}} \right) = 46.97 \text{ mm}$$

壁板刚度校核结论： $f_{w,\max} < [f]$ ，刚度满足要求。

⑤ 加固柱设计

$A=L=$	4 500	mm	$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³
$B=H=$	3 000	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$\delta_{w,n}=$	14	mm	$[\sigma]^t=$	135	MPa
$C=$	2.8	mm			

查图 8-7 得 α 为: $\alpha=0.01735$

加固柱的最大间距 $L_{p,\max}$ 为:

$$L_{p,\max} = 0.408(\delta_{w,n} - C) \sqrt{\frac{[\sigma]^t}{\alpha p_c}} = 0.408 \times (14 - 2.8) \times \sqrt{\frac{135}{0.01735 \times 2.94 \times 10^{-2}}} = 2\,350.83\text{mm}$$

结论: $L_p \leq L_{p,\max}$, 加固柱间距满足强度要求。

⑥ 顶边加固件设计

$L=$	4 500	mm	$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³
$L_p=$	1 200	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$H=$	3 000	mm	$E^t=$	1.91×10^5	MPa

当无拉杆时, $H_c=H=3\,000\text{mm}$, $L_c=L=4\,500\text{mm}$, 顶边加固件所需的惯性矩 $I_{c,T}$ 为:

$$I_{c,T} = 0.217 \frac{\rho g H_c^2 L_c^3}{E^t} \times 10^{-4} = 0.217 \times \frac{1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 3\,000^2 \times 4\,500^3}{1.91 \times 10^5} \times 10^{-4} = 914.06\text{cm}^4$$

而当有拉杆时, $H_c=H=3\,000\text{mm}$, $L_c=L_p=1\,200\text{mm}$, 顶边加固件所需的惯性矩 $I_{c,T}$ 为:

$$I_{c,T} = 0.217 \frac{\rho g H_c^2 L_c^3}{E^t} \times 10^{-4} = 0.217 \times \frac{1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 3\,000^2 \times 1\,200^3}{1.91 \times 10^5} \times 10^{-4} = 17.33\text{cm}^4$$

注: 顶边加固件一般采用包边角钢, 其规格不应小于 L 50×50×5, 设计所采用的加固件惯性矩应不小于以上计算惯性矩值。本设计顶边加固件采用 L 70×70×6, 该规格顶边加固件的惯性矩为 37.33cm⁴。

结论: 当无拉杆时, 所选顶边加固件刚度不合格; 当有拉杆时, 所选顶边加固件刚度合格。

⑦ 圆钢拉杆[可选] (如没有圆钢拉杆, 此节可忽略。)

拉杆直径: $d=28\text{mm}$

拉杆长度: $L_R=2\,000\text{mm}$

注: $L_R < 363d^{2/3}$, 是自重拉杆。

自重拉杆强度校核:

$d=$	28	mm	$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³
$L_R=$	2 000	mm	$\rho_M=$	7.85×10^{-6}	kg/mm ³
$H=$	3 000	mm	$E^t=$	1.91×10^5	MPa
$L_p=$	1 200	mm	$[\sigma]_b=$	137	MPa
$g=$	9.81	m/s ²			

拉杆自身重力引起的拉应力 $\sigma_{t,w}$ 为:

$$\sigma_{t,w} = 0.864 E^t \frac{d^2}{L_R^2} = 0.864 \times 1.91 \times 10^5 \times \frac{28^2}{2\,000^2} = 32.34\text{MPa}$$

拉杆自身重力引起的弯曲应力 $\sigma_{t,w}$ 为:

$$R_{n,w} = \rho_M g \frac{L_R^2}{d} = 7.85 \times 10^{-6} \times 9.81 \times \frac{2000^2}{28} = 11.0 \text{ MPa}$$

液体静压力作用于拉杆上引起的拉应力 $\sigma_{t,p}$ 为:

$$\sigma_{t,p} = 0.306 \frac{\rho g H^2 L_p}{d^2} = 0.306 \times \frac{1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 3000^2 \times 1200}{28^2} = 41.35 \text{ MPa}$$

拉杆的最大应力 $\sigma_{R,\max}$ 为:

$$\sigma_{R,\max} = \sigma_{t,w} + \sigma_{n,w} + \sigma_{t,p} = 32.34 + 11.0 + 41.35 = 84.69 \text{ MPa}$$

结论: $\sigma_{R,\max} \leq [\sigma]_b$, 自重拉杆强度合格。

⑧ 顶板强度计算[可选] (如不作顶板设计, 此节可忽略。)

根据设计条件计算顶板厚度的各参数分别为:

$A=L_T=$	450	mm	$\rho_M=$	7.85×10^{-6}	kg/mm ³
$B=W_T=$	250	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$p_a=$	1.20×10^{-3}	MPa	$[\sigma]^t=$	135	MPa

查图 8-15 得 α 为: $\alpha=0.02933$

顶板承受自重所需的计算厚度 δ_T 为:

$$\begin{aligned} \delta_T &= \frac{3A^2 \alpha \rho_M g + A \sqrt{3\alpha (3A^2 \alpha \rho_M^2 g^2 + 2p_a [\sigma]^t)}}{[\sigma]^t} \\ &= \frac{3 \times 450^2 \times 0.02933 \times 7.85 \times 10^{-6} \times 9.81 + 450 \times}{135} \\ &\quad \sqrt{3 \times 0.02933 \times [3 \times 450^2 \times 0.02933 \times (7.85 \times 10^{-6})^2 \times 9.81^2 + 2 \times 1.20 \times 10^{-3} \times 135]} \\ &\quad 135 \\ &= 0.57 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\delta = \delta_T + C_1 + C_2 = 0.57 + 0.8 + 2 = 3.37 \text{ mm}$$

考虑壁厚附加量及设置加强筋, 顶板的名义厚度 $\delta_{T,n}$ 取为 4mm。

⑨ 顶板刚度校核[可选] (如不作顶板设计, 此节可忽略。)

承受自重及附加载荷顶板刚度校核, 根据设计条件计算顶板最大挠度的各参数分别为:

$A=L_T=$	450	mm	$\rho_M=$	7.85×10^{-6}	kg/mm ³
$B=W_T=$	250	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$p_a=$	1.20×10^{-3}	MPa	$E^t=$	1.91×10^5	MPa

查图 8-15 得 β 为: $\beta=0.00989$

$$\delta_{T,e} = \delta_{T,n} - (C_1 + C_2) = 4 - (0.8 + 2) = 1.2 \text{ mm}$$

顶板最大挠度 $f_{T,\max}$ 为:

$$f_{T,max} = \beta A^4 \frac{\rho_M g \delta_{T,e} + p_a}{E^t \delta_{T,e}^3} = 0.009\,89 \times 450^4 \times \frac{7.85 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 1.2 + 1.2 \times 10^{-3}}{1.91 \times 10^5 \times 1.2^3} = 2.29\text{mm}$$

顶板的许用挠度 $[f]$ 为:

$$[f] = 5 \left(\frac{\delta_{T,e}}{2} + \sqrt{\frac{B}{A} \frac{A}{500}} \right) = \left(5 \times \frac{1.2}{2} + \sqrt{\frac{250}{450}} \times \frac{450}{500} \right) = 6.35\text{mm}$$

顶板刚度校核结论: $f_{T,max} < [f]$, 刚度满足要求。

⑩ 顶板加强筋

$L_T =$	4 500	mm	$\rho_M =$	7.85×10^{-6}	kg/mm ³
$W_T =$	250	mm	$g =$	9.81	m/s ²
$p_a =$	1.20×10^{-3}	MPa	$[\sigma]_b =$	137	MPa
$\delta_{T,e} =$	1.20	mm			

顶板上加强筋 L 方向截面系数 $Z_{T,L}$ 为:

$$\begin{aligned} Z_{T,L} &= \frac{(\rho_M g \delta_{T,e} + p_a) L_T W_T^2}{9.4 \times [\sigma]_b} - \frac{L_T \delta_{T,e}^2}{6} \\ &= \frac{(7.85 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 1.20 + 1.2 \times 10^{-3}) \times 4\,500 \times 250^2}{9.4 \times 137} - \frac{4\,500 \times 1.20^2}{6} \\ &= -803.79\text{mm}^3 = -0.804\text{cm}^3 \end{aligned}$$

顶板上加强筋 W 方向的截面系数 $Z_{T,W}$ 为:

$$\begin{aligned} Z_{T,W} &= \frac{(\rho_M g \delta_{T,e} + p_a) W_T L_T^2}{9.4 \times [\sigma]_b} - \frac{W_T \delta_{T,e}^2}{6} \\ &= \frac{(7.85 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 1.20 + 1.2 \times 10^{-3}) \times 250 \times 4\,500^2}{9.4 \times 137} - \frac{250 \times 1.20^2}{6} \\ &= 5\,020.6\text{mm}^3 = 5.02\text{cm}^3 \end{aligned}$$

顶板上加强筋所需的截面系数 $Z_T = \max\{Z_{T,W}, Z_{T,L}\} = 5.02\text{cm}^3$

顶板加强筋选用 L 70×70×6

顶板加强筋截面系数: 7.48cm³

顶板加强筋强度结论: 所选加强筋合格。

⑪ 底板设计

a) 型钢支撑的底板

—— 底板厚度计算:

$H=$	3 000	mm	型钢跨距 $L_b=$	150	mm
$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm^3	$g=$	9.81	m/s^2
$[\sigma]^t=$	135	MPa			

底板计算厚度 δ_b 为:

$$\delta_b = 0.8 L_b \sqrt{\frac{\rho g H}{[\sigma]^t}} = 0.8 \times 150 \times \sqrt{\frac{1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 3\,000}{135}} = 1.77 \text{ mm}$$

钢板厚度负偏差 $C_1=0.8\text{mm}$

腐蚀裕量 $C_2=2\text{mm}$

$$\delta = \delta_b + C_1 + C_2 = 1.77 + 0.8 + 2 = 4.57 \text{ mm}$$

最终取底板名义厚度 $\delta_{b,n}=6\text{mm}$ 。

—— 型钢跨度计算:

$H=$	3 000	mm	底板名义厚度 $\delta_{b,n}=$	6	mm
$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm^3	$g=$	9.81	m/s^2
$[\sigma]^t=$	135	MPa			

型钢的最大跨度 $L_{b,\max}$ 为:

$$L_{b,\max} = 1.25 (\delta_{b,n} - C) \sqrt{\frac{[\sigma]^t}{\rho g H}} = 1.25 \times (6 - 2.8) \times \sqrt{\frac{135}{1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 3000}} = 270.9 \text{ mm}$$

b) 在平基础上全平面支撑的底板

当底板整个表面被支撑时, 底板最小厚度常用 4mm~6mm (或与壁板等厚), 并考虑腐蚀裕量, 最终取底板的名义厚度 $\delta_{b,n}$ 为 6mm。

(4) D 型 (横向加固型) 矩形容器

① 类型说明

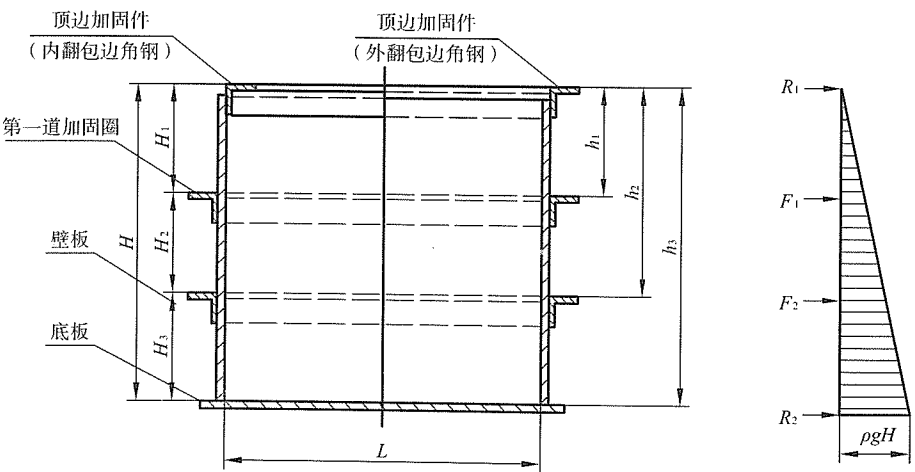


图 25 横向加固的 (D 型) 矩形容器

D 型 (横向加固型) 矩形容器为四边简支, 有顶边和横向加固件, 设计压力为常压, 仅承受液体静压的矩形容器。本计算书对壁板, 顶板 (可选) 和底板作强度、刚度分析, 对加固件作刚度分析。

② 设计条件

设备位号		T-4	容器 尺寸	长 L	mm	6 000
设计压力	MPa	常压		宽 W	mm	4 000
设计温度	℃	50		高 H	mm	5 000
介质名称		水	器壁材料			Q235A
介质密度 ρ	kg/mm ³	1.0×10^{-6}	加固件材料			Q235A
钢板厚度负偏差 C_1	mm	0.8	设计温度下器壁材料许用应力 $[\sigma]^t$			MPa 135
腐蚀裕量 C_2	mm	2	设计温度下器壁材料弹性模量 E^t			MPa 1.91×10^5

加固圈数量 n 为 4 个

推荐的加固圈间距如下表：

n	H_i , mm				
	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5
1	3 000	2 000	—	—	—
2	2 250	1 500	1 250	—	—
3	1 850	1 250	1 050	850	—
4	1 550	1 050	900	800	700

请根据加固圈的个数及段间距的实际布置情况填下表：

n	H_i , mm				
	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5
此行不填	—	—	—	—	—
此行不填	—	—	—	—	—
此行不填	—	—	—	—	—
4	1 600	1 000	900	800	700

③ 顶边加固件设计

$L_c=L=$	6 000	mm	$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³
$H_c=h_1=$	1 600	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$E^t=$	1.91×10^5	MPa			

顶边加固件所需的惯性矩 $I_{c,T}$ 为：

$$I_{c,T} = 0.217 \frac{\rho g H_c^2 L_c^3}{E^t} \times 10^{-4} = 0.217 \times \frac{1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 1\,600^2 \times 6\,000^3}{1.91 \times 10^5} \times 10^{-4} = 616.3 \text{cm}^4$$

注：顶边加固件一般采用包边角钢,其规格不应小于 L 50×50×5，设计所采用的加固件惯性矩应不小于以上计算惯性矩值。本设计顶边加固件采用 L 140×140×14，该规格顶边加固件的惯性矩为 688.81cm⁴。

结论：所选顶边加固件刚度合格。

④ 分段对加固件及壁板作强度、刚度分析

$A=L=$	6 000	mm	$[\sigma]^t=$	135	MPa
$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³	$E^t=$	1.91×10^5	MPa
$g=$	9.81	m/s ²			

项 目	第一段	第二段	第三段	第四段	第五段
$B=H_i$	1 600	1 000	900	800	700
$h_i=\sum H_i$	1 600	2 600	3 500	4 300	5 000
α_i	0.004 33	0.001 84	0.001 54	0.001 24	0.000 94
β_i	0.000 41	0.000 08	0.000 06	0.000 04	0.000 03

查图 8-7 得 α , β 如上表。

如令 $h_0=0$, 当 $i=1$ 时, $k=3$, $i \geq 2$ 时, $k=6$, 则各段的 F_i , I_i , δ_i , $f_{i,\max}$ 分别为:

$$F_i = \frac{1}{6} \rho g (h_{i+1} - h_{i-1}) (h_{i+1} + h_i + h_{i-1})$$

$$I_i = 1.3 F_i \frac{L^3}{E^t}$$

$$\delta_i = L \sqrt{\frac{k \alpha_i \rho g (h_{i-1} + h_i)}{[\sigma]^t}}$$

$$f_{i,\max} = \beta_i L^4 \frac{\rho g (h_{i-1} + h_i)}{2 E \delta_{i,c}^3}$$

各段的分析结果如下表:

n	项目	第一段	第二段	第三段	第四段	第五段
4	F_i , kN	17.84	23.90	28.88	31.36	—
	I_i , cm ⁴	2 622.17	3 513.04	4 245.42	4 610.41	—
	δ_i , mm	7.37	11.01	12.13	12.30	11.68
	δ_i+C , mm	10.17	13.81	14.93	15.10	14.48
	$\delta_{i,n}$, mm	12.00	16.00	18.00	18.00	16.00
	$\delta_{i,c}$, mm	9.20	13.20	15.20	15.20	13.20
	$f_{i,\max}$, mm	28.00	4.86	3.47	2.95	4.03
	$[f]$, mm	53.98	57.49	61.24	59.91	53.49
	刚度结论	合格	合格	合格	合格	合格

⑤ 顶板强度计算[可选] (如不作顶板设计, 此节可忽略。)

根据设计条件计算顶板厚度的各参数分别为:

$A=L_T=$	200	mm	$\rho_M=$	7.85×10^{-6}	kg/mm ³
$B=W_T=$	200	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$p_a=$	1.20×10^{-3}	MPa	$[\sigma]^t=$	135	MPa

查图 8-15 得 α 为: $\alpha=0.048\,23$

顶板承受自重所需的计算厚度 δ_T 为:

$$\begin{aligned}\delta_T &= \frac{3A^2\alpha\rho_M g + A\sqrt{3\alpha(3A^2\alpha\rho_M^2 g^2 + 2p_a[R]^t)}}{[\sigma]^t} \\ &= \frac{3 \times 200^2 \times 0.048\,23 \times 7.85 \times 10^{-6} \times 9.81 + 200}{135} \times \\ &\quad \frac{\sqrt{3 \times 0.048\,23 \times [3 \times 200^2 \times 0.048\,23 \times (7.85 \times 10^{-6})^2 \times 9.81^2 + 2 \times 1.20 \times 10^{-3} \times 135]}}{135} \\ &= 0.32\text{mm}\end{aligned}$$

承受自重, 及附加载荷顶板刚度校核:

根据设计条件计算顶板最大挠度的各参数分别为:

$A=L_T=$	200	mm	$\rho_M=$	7.85×10^{-6}	kg/mm ³
$B=W_T=$	200	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$p_a=$	1.20×10^{-3}	MPa	$E^t=$	1.91×10^5	MPa

查图 8-15 得 β 为: $\beta=0.043\,8$

顶板有效厚度 $\delta_{T,e}=\delta_{T,n}-(C_1+C_2)=4-(0.8+2)=1.2\text{mm}$

顶板最大挠度 $f_{T,\max}$ 为:

$$f_{T,\max} = \beta A^4 \frac{\rho_M g \delta_{T,e} + p_a}{E^t \delta_{T,e}^3} = 0.043\,8 \times 200^4 \times \frac{7.85 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 1.2 + 1.20 \times 10^{-3}}{1.91 \times 10^5 \times 1.2^3} = 0.27\text{mm}$$

顶板的许用挠度 $[f]$ 为:

$$[f] = 5 \left(\frac{\delta_{T,e}}{2} + \sqrt{\frac{B}{A} \frac{A}{500}} \right) = 5 \times \left(\frac{1.2}{2} + \sqrt{\frac{200}{200} \times \frac{200}{500}} \right) = 5\text{mm}$$

顶板刚度校核结论: $f_{T,\max} \leq [f]$, 刚度满足要求。

⑦ 顶板加强筋

$L_T=$	6 000	mm	$\rho_M=$	7.85×10^{-6}	kg/mm ³
$W_T=$	200	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$p_a=$	1.20×10^{-3}	MPa	$[\sigma]_b=$	137	MPa
$\delta_{T,e}=$	1.20	mm			

顶板上加强筋 L 方向截面系数 $Z_{T,L}$ 为:

$$\begin{aligned}Z_{T,L} &= \frac{(\rho_M g \delta_{T,e} + p_a) L_T W_T^2}{9.4 \times [\sigma]_b} - \frac{L_T \delta_{T,e}^2}{6} \\ &= \frac{(7.85 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 1.20 + 1.2 \times 10^{-3}) \times 6\,000 \times 200^2}{9.4 \times 137} - \frac{6\,000 \times 1.20^2}{6} \\ &= -1\,199\text{mm}^3 = -1.20\text{cm}^3\end{aligned}$$

顶板上加强筋 W 方向的截面系数 $Z_{T,W}$ 为:

$$Z_{T,W} = \frac{(\rho_M g \delta_{T,e} + p_a) W_T L_T^2}{9.4 \times [\sigma]_b} - \frac{W_T \delta_{T,e}^2}{6}$$

$$= \frac{7.85 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 1.20 + 1.2 \times 10^{-3}}{9.4 \times 137} \times 200 \times 6\,000^2 - \frac{200 \times 1.20^2}{6} = 7\,177.8 \text{ mm}^3 = 7.18 \text{ cm}^3$$

顶板上加强筋所需的截面系数 $Z_T = \max\{Z_{T,W}, Z_{T,L}\} = 7.18 \text{ cm}^3$

顶板加强筋选用: $\angle 75 \times 75 \times 8$

顶板加强筋截面系数: 11.2 cm^3

顶板加强筋强度结论: 所选加强筋合格。

⑧ 底板设计

a) 型钢支撑的底板

—— 底板厚度计算:

$H=$	5 000	mm	型钢跨距 $L_b=$	200	mm
$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³	$g=$	9.81	m/s ²
$[\sigma]^t=$	135	MPa			

底板计算厚度 δ_b 为:

$$\delta_b = 0.8 L_b \sqrt{\frac{\rho g H}{[\sigma]^t}} = 0.8 \times 200 \times \sqrt{\frac{1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 5\,000}{135}} = 3.05 \text{ mm}$$

钢板厚度负偏差 $C_1=0.8 \text{ mm}$

腐蚀裕量 $C_2=2 \text{ mm}$

$$\delta = \delta_b + C_1 + C_2 = 3.05 + 0.8 + 2 = 5.85 \text{ mm}$$

最终取底板名义厚度 $\delta_{b,n}=8 \text{ mm}$ 。

—— 型钢跨度计算:

$H=$	5 000	mm	底板名义厚度 $\delta_{b,n}=$	8	mm
$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³	$g=$	9.81	m/s ²
$[\sigma]^t=$	135	MPa			

型钢的最大跨度 $L_{b,\max}$ 为:

$$L_{b,\max} = 1.25 (\delta_{b,n} - C) \sqrt{\frac{[\sigma]^t}{\rho g H}} = 1.25 \times (8 - 2.8) \times \sqrt{\frac{135}{1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 5\,000}} = 341.0 \text{ mm}$$

b) 在平基础上全平面支撑的底板

当底板整个表面被支撑时,底板最小厚度常用 $4 \text{ mm} \sim 6 \text{ mm}$ (或与壁板等厚), 并考虑腐蚀裕量。

最终取底板的名义厚度 $\delta_{b,n}$ 为 8 mm 。

(5) E 型 (垂直横向联合加固型) 矩形容器

① 类型说明

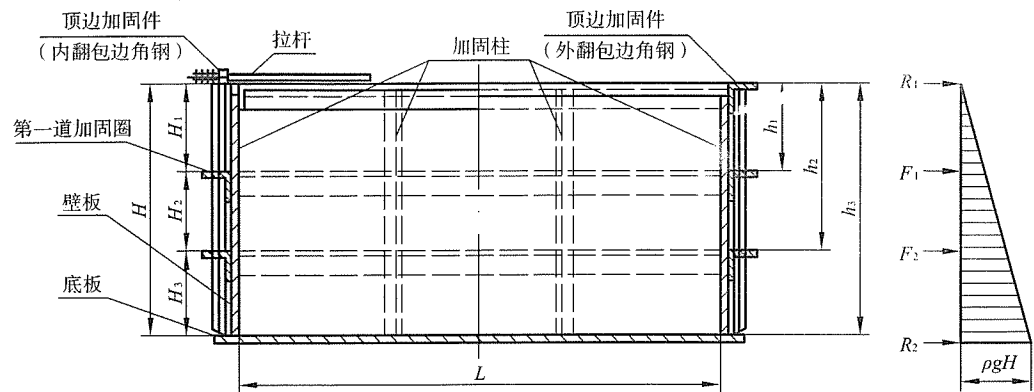


图 26 垂直和横向联合加固的（E 型）矩形容器

E 型（垂直横向联合加固型）矩形容器为四边简支，有顶边和垂直、横向加固件，设计压力为常压，仅承受液体静压的矩形容器。本计算书对壁板，顶板（可选）和底板作强度、刚度分析，对加固件作刚度分析。

② 设计条件

设备位号		T-5	容器尺寸	长 L	mm	10 000
设计压力	MPa	常压		宽 W	mm	6 000
设计温度	℃	50		高 H	mm	8 000
介质名称		水	器壁材料			Q235A
介质密度 ρ	kg/mm ³	1.0×10^{-6}	加固件材料			Q235A
钢板厚度负偏差 C_1	mm	0.8	设计温度下器壁材料许用应力 $[\sigma]^t$		MPa	135
腐蚀裕量 C_2	mm	2	设计温度下器壁材料弹性模量 E^t		MPa	1.91×10^5
加固柱间距 L_p	mm	1 000				

加固圈数量 n 为 4 个

推荐的加固圈间距如下下表：

n	$H_i, \text{ mm}$				
	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5
1	4 800	3 200	—	—	—
2	3 600	2 400	2 000	—	—
3	2 960	2 000	1 680	1 360	—
4	2 480	1 680	1 440	1 280	1 120

请根据加固圈的个数及段间距的实际布置情况填下表：

n	$H_i, \text{ mm}$				
	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5
此行不填	—	—	—	—	—
此行不填	—	—	—	—	—
此行不填	—	—	—	—	—
4	2 500	1 600	1 500	1 300	1 100

③ 顶边加固件设计:

$L_c=L_p=$	1 000	mm	$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³
$H_c=h_1=H_1=$	2 500	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$E^t=$	1.91×10^5	MPa			

顶边加固件所需的惯性矩 $I_{c,T}$:

$$I_{c,T} = 0.217 \frac{\rho g H_c^2 L_c^3}{E^t} \times 10^{-4} = 0.217 \times \frac{1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 2\,500^2 \times 1\,000^3}{1.91 \times 10^5} \times 10^{-4} = 6.97 \text{ cm}^4$$

注: 顶边加固件一般采用包边角钢, 其规格不应小于 $\angle 50 \times 50 \times 5$, 设计所采用的加固件惯性矩应不小于以上计算惯性矩值。本设计顶边加固件采用 $\angle 50 \times 50 \times 5$, 该规格顶边加固件的惯性矩为 11.21 cm^4 。

结论: 所选顶边加固件刚度合格。

④ 分段对加固件及壁板作强度、刚度分析:

$A=L_p=$	1 000	mm	$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³
$h_1=H_1=$	2 500	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$E^t=$	1.91×10^5	MPa			

项目	第一段	第二段	第三段	第四段	第五段
$B=H_i$	2 500	1 600	1 500	1 300	1 100
$h_i=\sum H_i$	2 500	4 100	5 600	6 900	8 000
α_i	0.055 12	0.041 66	0.039 18	0.033 44	0.026 73
β_i	0.062 81	0.045 31	0.042 12	0.034 85	0.026 55

查图 8-7 得 α , β 如上表。

如令 $h_0=0$, 当 $i=1$ 时, $k=3$; $i \geq 2$ 时, $k=6$, 则各段的 F_i , I_i , δ_i , $f_{i,\max}$ 分别为:

$$F_i = \frac{1}{6} \rho g (h_{i+1} - h_{i-1}) (h_{i+1} + h_i + h_{i-1})$$

$$I_i = 1.3 F_i \frac{L^3}{E^t}$$

$$\delta_i = L \sqrt{\frac{k \alpha_i \rho g (h_{i-1} + h_i)}{[\sigma]^t}}$$

$$f_{i,\max} = \beta_i L^4 \frac{\rho g (h_{i-1} + h_i)}{2 E \delta_{i,e}^3}$$

各段的分析结果如下表:

<i>n</i>	项 目	第一段	第二段	第三段	第四段	第五段
4	F_i , kN	44.20	61.77	75.92	80.36	—
	I_i , cm ⁴	30.08	42.04	51.67	54.70	—
	δ_i , mm	5.48	10.94	12.87	13.49	13.17
	δ_i+C , mm	8.28	13.74	15.67	16.29	15.97
	$\delta_{i,n}$, mm	10.00	16.00	18.00	18.00	18.00
	$\delta_{i,e}$, mm	7.20	13.20	15.20	15.20	15.20
	$f_{i,max}$, mm	10.79	3.34	2.98	3.18	2.89
	$[f]$, mm	33.81	45.65	50.25	49.40	48.49
	刚度结论	合格	合格	合格	合格	合格

⑤ 加固柱设计

$A=L_p=$	1 000	mm	$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³
$B=H=$	8 000	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$\delta_{i,n,min}=$	10.00	mm	$[\sigma]^t=$	135	MPa
$C=$	2.8	mm			

查图 8-7 得 α 为: $\alpha=0.062$

加固柱的最大间距 $L_{p,max}$ 为:

$$\begin{aligned} L_{p,max} &= 0.408(\delta_{i,n,max} - C) \sqrt{\frac{[\sigma]^t}{\alpha \rho g H}} \\ &= 0.408 \times (10 - 2.8) \times \sqrt{\frac{135}{0.062 \times 1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 8\,000}} = 489.3 \text{ mm} \end{aligned}$$

结论: $L_p > L_{p,max}$ 加固柱间距不满足强度要求。

⑥ 顶边加固件设计

$L=$	10 000	mm	$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³
$L_c=L_p=$	1 000	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$H=$	8 000	mm	$E^t=$	1.91×10^5	MPa

当无拉杆时, $H_c = H, L_c = L$ 顶边加固件所需的惯性矩 $I_{c,T}$ 为:

$$\begin{aligned} I_{c,T} &= 0.217 \frac{\rho g H_c^2 L_c^3}{E^t} \times 10^{-4} \\ &= 0.217 \times \frac{1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 8\,000^2 \times 10\,000^3}{1.91 \times 10^5} \times 10^{-4} = 71\,330.5 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

而当有拉杆时, $H_c = H, L_c = L_p$ 顶边加固件所需的惯性矩 $I_{c,T}$ 为:

$$I_{c,T} = 0.217 \frac{\rho g H_c^2 L_c^3}{E^t} \times 10^{-4}$$
$$= 0.217 \times \frac{1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 8\,000^2 \times 1\,000^3}{1.91 \times 10^5} \times 10^{-4} = 71.33 \text{cm}^4$$

注: 顶边加固件一般采用包边角钢,其规格不应小于 L 50×50×5, 设计所采用的加固件惯性矩应不小于以上计算惯性矩值。本设计顶边加固件采用 L 75×75×10, 该规格顶边加固件的惯性矩为 71.98cm⁴。

结论: 当无拉杆时, 所选顶边加固件刚度不合格。当有拉杆时, 所选顶边加固件刚度合格。

⑦ 圆钢拉杆: [可选] (如没有圆钢拉杆, 此节可忽略。)

拉杆直径 $d=24\text{mm}$

拉杆长度 $L_R=10\,000\text{mm}$

提示: $L_R \geq 363d^{2/3}$, 是柔性拉杆。

柔性拉杆的最小直径:

当 $L_R \geq 363d^{2/3}$, 且 $d=16\text{mm} \sim 24\text{mm}$ 时, 为柔性拉杆。

$H_1=$	2 500	mm	$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³
$L_p=$	1 000	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$C_2=$	2	mm	$[\sigma]_{bt}=$	55.6	MPa

拉杆的最小直径 $d_{\min}$ 为:

$$d_{\min} = 0.553 H_1 \sqrt{\frac{\rho g L_p}{[\sigma]_{bt}}} + C_2$$
$$= 0.553 \times 2\,500 \times \sqrt{\frac{1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 1\,000}{55.6}} + 2 = 20.36 \text{mm}$$

结论: $d \geq d_{\min}$, 柔性拉杆强度合格。

⑧ 顶板强度计算[可选] (如不作顶板设计, 此可忽略。)

根据设计条件计算顶板厚度的各参数分别为:

$A=L_T=$	200	mm	$\rho_M=$	7.85×10^{-6}	kg/mm ³
$B=w_T=$	200	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$p_a=$	1.2×10^{-3}	MPa	$[\sigma]^t=$	135	MPa

查图 8-15 得 α 为: $\alpha=0.048\,23$

顶板承受自重所需的计算厚度 δ_T 为:

$$\delta_T = \frac{3A^2 \alpha \rho_M g + A \sqrt{3\alpha (3A^2 \alpha \rho_M^2 g^2 + 2p_a [\sigma]^t)}}{[\sigma]^t}$$
$$= \frac{3 \times 200^2 \times 0.048\,23 \times 7.85 \times 10^{-6} \times 9.81}{135}$$

$$+ \frac{200 \times \sqrt{3 \times 0.048 \ 23 \times (3 \times 200^2 \times 0.048 \ 23 \times 7.85 \times 10^{-6} \times 9.81^2 + 2 \times 1.2 \times 10^{-3} \times 135)}}{135}$$

=0.32mm

$\delta = \delta_T + C_1 + C_2 = 0.32 + 0.8 + 2 = 3.12 \text{ mm}$

考虑壁厚附加量及设置加强筋后，顶板的名义厚度 $\delta_{T,n}$ 取为 4mm。

⑨ 顶板刚度校核[可选]（如不作顶板设计，此节可忽略。）

承受自重，及附加载荷顶板刚度校核：

根据设计条件计算顶板最大挠度的各参数分别为：

$A=L_T=$	200	mm	$\rho_M=$	7.85×10^{-6}	kg/mm ³
$B=W_T=$	200	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$p_a=$	1.2×10^{-3}	MPa	$E^t=$	1.91×10^5	MPa

查图 8-15 得 β 为： $\beta=0.043 \ 8$

顶板有效厚度 $\delta_{T,e} = \delta_{T,n} - (C_1 + C_2) = 4 - (2 + 0.8) = 1.2 \text{ mm}$

顶板最大挠度 $f_{T,max}$ 为：

$$f_{T,max} = \beta A^4 \frac{\rho_M g \delta_{T,e} + P_a}{E^t \delta_{T,e}^3} = 0.043 \ 8 \times \frac{200^4 \times 7.85 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 1.2 + 1.2 \times 10^{-3}}{1.91 \times 10^5 \times 1.2^3} = 0.27 \text{ mm}$$

顶板的许用挠度 $[f]$ 为：

$$[f] = 5 \left(\frac{\delta_{T,e}}{2} + \sqrt{\frac{B}{A} \frac{A}{500}} \right) = 5 \times \left(\frac{1.2}{2} + \sqrt{\frac{200}{200} \times \frac{200}{500}} \right) = 5 \text{ mm}$$

顶板刚度校核结论： $f_{T,max} \leq [f]$ ，刚度满足要求。

⑩ 顶板加强筋

$L_T=$	10 000	mm	$\rho_M=$	7.85×10^{-6}	kg/mm ³
$W_T=$	200	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$p_a=$	1.2×10^{-3}	MPa	$[\sigma]_b=$	137	MPa
$\delta_{T,e}$	1.20	mm			

顶板上加强筋 L 方向截面系数 $Z_{T,L}$ 为：

$$\begin{aligned} Z_{T,L} &= \frac{(\rho_M g \delta_{T,e} + p_a) L_T W_T^2}{9.4 \times [\sigma]_b} - \frac{L_T \delta_{T,e}^2}{6} \\ &= \frac{(7.85 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 1.2 + 1.2 \times 10^{-3}) \times 10\ 000 \times 200^2}{9.4 \times 137} - \frac{10\ 000 \times 1.2^2}{6} = -1\ 998.57 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

顶板上加强筋 W 方向的截面系数 $Z_{T,W}$ 为：

$$Z_{T,W} = \frac{(\rho_M g \delta_{T,e} + p_a) W_T L_T^2}{9.4 \times [\sigma]_b} - \frac{W_T \delta_{T,e}^2}{6}$$

$$= \frac{(7.85 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 1.2 + 1.2 \times 10^{-3}) \times 200 \times 10\,000^2}{9.4 \times 137} - \frac{200 \times 1.2^2}{6} = 20\,023.60 \text{ mm}^3$$

顶板加强筋选用 L 100×100×12

顶板加强筋截面系数：29.48cm³

顶板加强筋强度结论：所选加强筋合格。

⑪ 底板设计

a) 型钢支撑的底板

—— 底板厚度计算：

$H=$	8 000	mm	型钢跨距 $L_b=$	200	mm
$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³	$g=$	9.81	m/s ²
$[\sigma]^t=$	135	MPa			

底板计算厚度 δ_b 为：

$$\delta_b = 0.8 L_b \sqrt{\frac{\rho g H}{[\sigma]^t}} = 0.8 \times 200 \times \sqrt{\frac{1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 8\,000}{135}} = 3.86 \text{ mm}$$

钢板厚度负偏差 $C_1=0.8\text{mm}$

腐蚀裕量 $C_2=2\text{mm}$

$$\delta_b + C_1 + C_2 = 3.86 + 0.8 + 2 = 6.66 \text{ mm}$$

最终取底板名义厚度 $\delta_{b,n}=8\text{mm}$

—— 型钢跨度计算：

$H=$	8 000	mm	底板名义厚度 $\delta_{b,n}=$	8	mm
$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³	$g=$	9.81	m/s ²
$[\sigma]^t=$	135	MPa			

型钢的最大跨度 $L_{b,\max}$ 为：

$$\begin{aligned} L_{b,\max} &= 1.25(\delta_{b,n} - C) \sqrt{\frac{[\sigma]^t}{\rho g H}} \\ &= 1.25 \times (8 - 2.8) \times \sqrt{\frac{135}{1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 8\,000}} = 269.59 \text{ mm} \end{aligned}$$

b) 在平基础上全平面支撑的底板

当底板整个表面被支撑时，底板最小厚度常用 4mm~6mm，(或与壁板等厚)，并考虑腐蚀裕量。最终取底板的名义厚度 $\delta_{b,n}$ 为 8mm。

(6) F 型 (拉杆加固型) 矩形容器

① 类型说明

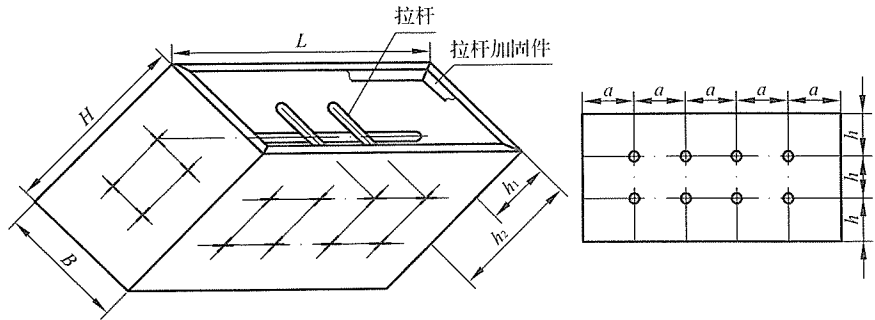


图 27 拉丁加固的 (F 型) 矩形容器

F 型 (拉杆加固型) 矩形容器为四边简支, 有顶边和内部拉杆加固件, 设计压力为常压, 仅承受液体静压的矩形容器, 对较大的矩形容器可采用该种类型。本计算书对壁板、顶板 (可选) 和底板作强度、刚度分析, 对加固件作强度设计和刚度校核。

② 设计条件

设备位号		T-6	容器尺寸	长 L	mm	6 000
设计压力	MPa	常压		宽 W	mm	5 000
设计温度	℃	50		高 H	mm	12 000
介质名称		水	器壁材料			Q235A
介质密度 ρ	kg/mm ³	1.0×10^{-6}	加固件材料			Q235A
钢板厚度负偏差 C_1	mm	0.8	设计温度下器壁材料许用应力 $[\sigma]^t$		MPa	135
腐蚀裕量 C_2	mm	2	设计温度下器壁材料弹性模量 E^t		MPa	1.91×10^5
拉杆层数 n	层	11	拉杆垂直间距 h		mm	1 000
拉杆水平间距 a	mm	1 000				

③ 各层拉杆加撑表面厚度及拉杆直径

项 目	1 层	2 层	3 层	4 层	5 层	6 层
h_i	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000
δ_i	6.03	8.52	10.44	12.06	13.48	14.76
δ_i+C	8.83	11.32	13.24	14.86	16.28	17.56
$\delta_{i,n}$	10.00	14.00	16.00	16.00	18.00	20.00
d_i	11.63	15.62	18.68	21.26	23.53	25.58
项 目	7 层	8 层	9 层	10 层	11 层	12 层
h_i	7 000	8 000	9 000	10 000	11 000	12 000
δ_i	15.95	17.05	18.08	19.06	19.99	20.88
δ_i+C	18.75	19.85	20.88	21.86	22.79	23.68
$\delta_{i,n}$	22.00	22.00	24.00	24.00	26.00	26.00
d_i	27.47	29.23	30.88	32.45	33.93	—

④ 顶边加固件设计

$$H_c = h_1 = 1\,000\text{mm}$$

$$L_c = L = 6\,000\text{mm}$$

顶边加固件所需的惯性矩 $I_{c,T}$:

$$I_{c,T} = 0.217 \frac{\rho g H_c^2 L_c^3}{E^t} \times 10^{-4}$$

$$= 0.217 \times \frac{1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 1\,000^2 \times 6\,000^3}{1.91 \times 10^5} \times 10^{-4} = 240.74\text{cm}^4$$

注：顶边加固件一般采用包边角钢，其规格不应小于 L 59×50×5，设计所采用的加固件惯性矩应不小于以上计算惯性矩值。本设计顶边加固件采用 L 110×110×10，该规格顶边加固件的惯性矩为 242.19cm⁴。

结论：所选顶边加固件刚度合格。

⑤ 顶板强度设计[可选]（如不作顶板设计，此节可忽略。）

根据设计条件计算顶板厚度的各参数分别为：

$A=L_T=$	200	mm	$\rho_M=$	7.85×10^{-6}	kg/mm ³
$B=W_T=$	250	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$p_a=$	1.2×10^{-3}	MPa	$[\sigma]^t=$	135	MPa

查图 8-15 得 α 为： $\alpha=0.066\,43$

顶板承受自重所需的计算厚度 δ_T 为：

$$\delta_T = \frac{3A^2 \alpha \rho_M g + A \sqrt{3\alpha(3A^2 \alpha \rho_M^2 g^2 + 2p_a[\sigma]^t)}}{[\sigma]^t}$$

$$= \frac{3 \times 200^2 \times 0.066\,43 \times 7.85 \times 10^{-6} \times 9.81}{135}$$

$$+ \frac{200 \times \sqrt{3 \times 0.066\,43 \times (3 \times 200^2 \times 0.066\,43 \times 7.85 \times 10^{-6} \times 9.81^2 + 2 \times 1.2 \times 10^{-3} \times 135)}}{135}$$

$$= 0.38\text{mm}$$

$$\delta = \delta_T + C_1 + C_2 = 0.38 + 0.8 + 2 = 3.18\text{mm}$$

考虑壁厚附加量及设置加强筋后，顶板的名义厚度 $\delta_{T,n}$ 取为 4mm。

⑥ 顶板刚度校核[可选]（如不作顶板设计，此节可忽略。）

承受自重，及附加载荷顶板刚度校核：

根据设计条件计算顶板最大挠度的各参数分别为：

$A=L_T=$	200	mm	$\rho_M=$	7.85×10^{-6}	kg/mm ³
$B=W_T=$	250	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$p_a=$	1.2×10^{-3}	MPa	$E^t=$	1.91×10^5	MPa

查图 8-15 得 β 为： $\beta=0.065\,78$

$$\delta_{T,e} = \delta_{T,n} - (C_1 + C_2) = 4 - (0.8 + 2) = 1.2\text{mm}$$

顶板最大挠度 $f_{T,\max}$ 为:

$$f_{T,\max} = \beta A^4 \frac{\rho_M g \delta_{T,e} + P_a}{E^t \delta_{T,e}^3} = 0.065\,78 \times \frac{200^4 \times 7.85 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 1.2 + 1.2 \times 10^{-3}}{1.91 \times 10^5 \times 1.2^3} = 0.41 \text{ mm}$$

顶板的许用挠度 $[f]$ 为:

$$[f] = 5 \left(\frac{\delta_{T,e}}{2} + \sqrt{\frac{B}{A} \frac{A}{500}} \right) = 5 \times \left(\frac{1.2}{2} + \sqrt{\frac{250}{200} \times \frac{200}{500}} \right) = 5.24 \text{ mm}$$

顶板刚度校核结论: $f_{T,\max} \leq [f]$, 刚度满足要求。

⑦ 顶板加强筋

$L=$	6 000	mm	$\rho_M=$	7.85×10^{-6}	kg/mm ³
$W_T=$	250	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$p_a=$	1.2×10^{-3}	MPa	$[\sigma]_b=$	140	MPa
$\delta_{T,e}=$	1.20	mm			

顶板上加强筋 L 方向截面系数 $Z_{T,L}$ 为:

$$\begin{aligned} Z_{T,L} &= \frac{(\rho_M g \delta_{T,e} + p_a) L_T W_T^2}{9.4 \times [\sigma]_b} - \frac{L_T \delta_{T,e}^2}{6} \\ &= \frac{(7.85 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 1.2 + 1.2 \times 10^{-3}) \times 6\,000 \times 250^2}{9.4 \times 140} - \frac{6\,000 \times 1.2^2}{6} = -1\,071.72 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

顶板上加强筋 W 方向的截面系数 $Z_{T,W}$ 为:

$$\begin{aligned} Z_{T,W} &= \frac{(\rho_M g \delta_{T,e} + p_a) W_T L_T^2}{9.4 \times [\sigma]_b} - \frac{W_T \delta_{T,e}^2}{6} \\ &= \frac{(7.85 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 1.2 + 1.2 \times 10^{-3}) \times 250 \times 6\,000^2}{9.4 \times 140} - \frac{250 \times 1.2^2}{6} = 8\,778.67 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

顶板上加强筋所需的截面系数 $Z_T = \max\{Z_{T,W}, Z_{T,L}\} = 8.8 \text{ cm}^3$

顶板加强筋选用: L 75×75×10

顶板加强筋截面系数: 13.64 cm³

顶板加强筋强度结论: 所选加强筋合格。

⑧ 底板设计

a) 型钢支撑的底板

—— 底板厚度计算:

$H=$	12 000	mm	型钢跨距 $L_b=$	200	mm
$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³	$g=$	9.81	m/s ²
$[\sigma]^t=$	135	MPa			

底板计算厚度 δ_b 为:

$$\delta_b = 0.8 L_b \sqrt{\frac{\rho g H}{[\sigma]^t}} = 0.8 \times 200 \times \sqrt{\frac{1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 12\,000}{135}} = 4.72 \text{ mm}$$

钢板厚度负偏差 $C_1=0.8\text{mm}$

腐蚀裕量 $C_2=2\text{mm}$

$$\delta = \delta_b + C_1 + C_2 = 4.72 + 0.8 + 2 = 7.52 \text{ mm}$$

最终取底板名义厚度 $\delta_{b,n}=8\text{mm}$ 。

—— 型钢跨度计算:

$H=$	12 000	mm	底板名义厚度 $\delta_{b,n}=$	8	mm
$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³	$g=$	9.81	m/s ²
$[\sigma]^t=$	135	MPa			

型钢的最大跨度 $L_{b,max}$ 为:

$$L_{b,max} = 1.25(\delta_{b,n} - C) \sqrt{\frac{[\sigma]^t}{\rho g H}} = 1.25 \times (8 - 2.8) \times \sqrt{\frac{135}{1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 12\,000}} = 220.12 \text{ mm}$$

b) 在平基础上全平面支撑的底板

当底板整个表面被支撑时, 底板最小厚度常用 4mm~6mm (或与壁板等厚), 并考虑腐蚀裕量, 最终取底板的名义厚度 $\delta_{b,n}$ 为 8mm。

(7) G 型 (带双向水平联杆垂直加固型) 矩形容器

① 类型说明

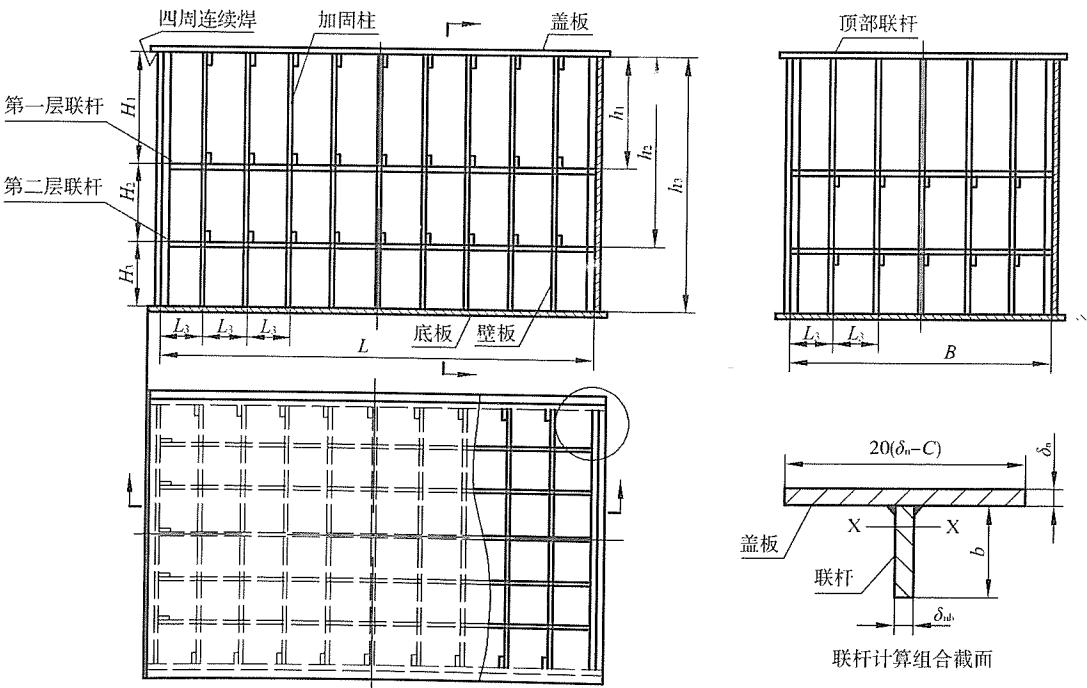


图 28 带双向水平联杆垂直加固型 (G 型) 矩形容器

G 型（带双向水平联杆垂直加固型）矩形容器为四边简支，有内部联杆和垂直加固件，设计压力为常压，仅承受液体静压的矩形容器，对较大的矩形容器可选择该种类型。本计算书对壁板、顶板（可选）和底板作强度、刚度分析，对加固件作强度设计和刚度校核。

② 设计条件

设备位号		T-7	容器尺寸	长 L	mm	6 000
设计压力	MPa	常压		宽 W	mm	5 000
设计温度	℃	50		高 H	mm	6 000
介质名称		水	器壁材料			Q235A
介质密度 ρ	kg/mm ³	1.0×10^{-6}	加固件材料			Q235A
钢板厚度负偏差 C_1	mm	0.8	设计温度下器壁材料许用应力 $[\sigma]^t$		MPa	135
腐蚀裕量 C_2	mm	2	设计温度下器壁材料弹性模量 E^t		MPa	1.91×10^5
联杆层数	层	1	加固柱间距 L_p		mm	1 000

提示：按第③节设计壁板、加固柱和联杆，第④节可忽略！

③ 设置一层联杆时，壁板、加固柱和联杆设计

推荐的 $H_1=0.6H=3\,600\text{mm}$

实际采用的 $H_1=3\,600\text{mm}$

a) 壁板厚度计算

$A=L_p=$	1 000	mm	$[\sigma]^t=$	135	MPa
$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³	$E=$	1.91×10^5	MPa
$g=$	9.81	m/s ²			

项 目	第一段	第二段
$b=H_i$	3 600	2 400
$h_i=\sum H_i$	3 600	6 000
α_i	0.060 28	0.054 22
β_i	0.069 53	0.061 64

查“图 8-7”得 α 、 β 如上表。

如令 $h_0=0$ ，当 $i=1$ 时， $k=3$ ， $i\geqslant 2$ 时， $k=6$ ，则各段的 δ_i ， $f_{i,\max}$ 分别为：

$$\delta_i=L_p\sqrt{\frac{k\alpha_i\rho g(h_{i-1}+h_i)}{[\sigma]^t}}$$

$$f_{i,\max}=\beta_iL_p^4\frac{\rho g(h_{i-1}+h_i)}{2E\delta_{i,e}^3}$$

各段的分析结果如下表：

<i>n</i>		第一段	第二段
1	δ_i , mm	6.87	15.06
	δ_i+C , mm	9.67	17.86
	$\delta_{i,n}$, mm	12.00	20.00
	$\delta_{w,e}$, mm	9.20	17.20
	$f_{i,max}$, mm	8.25	2.98
	$[f]$, mm	41.97	58.49
	刚度结论	合格	合格

b) 加固柱设计

$L_p=$	1 000	mm	$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³
$H=$	6 000	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$\delta_{i,n,min}=$	12.00	mm	$[\sigma]_b=$	137	MPa
$C=$	2.8	mm			

加固柱所需的截面系数 Z_p 为：

$$Z_p = L_p \left[\frac{0.015 \rho g H^3}{[\sigma]_b} - \frac{(\delta_{i,n,min} - C)^2}{6} \right] \times 10^{-3}$$
$$= 1\,000 \times \left[\frac{0.015 \times 1.00 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 6\,000^3}{137} - \frac{(12.00 - 2.8)^2}{6} \right] \times 10^{-3} = 217.9 \text{ cm}^3$$

注：加固柱一般采用槽钢或工字钢，设计所采用的加固柱其截面系数应不小于以上计算截面系数。本设计加固柱件采用 120×53，该规格加固柱的截面系数为 346.3cm³。

结论：所选加固柱刚度合格。

c) 扁钢联杆强度校核

—— 中间联杆

$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³	扁钢厚度 $\delta_{nb}=$	40	mm
ρ_M	7.85×10^5	kg/mm ³	扁钢宽度 $b=$	100	mm
$g=$	9.81	m/s ²	扁钢长度 $L_R=$	6 000	mm
$[\sigma]_{扁钢}=$	135	MPa	$L_p=$	1 000	mm
$E^t=$	1.91×10^5	MPa	$H=$	6 000	mm
$C=$	2.8	mm			

联杆自身重力引起的拉应力 $\sigma_{t,w}$ 为：

$$\sigma_{t,w} = 0.8 E^t \frac{b^2}{L_R^2} = 0.8 \times 1.91 \times 10^5 \times \frac{100^2}{6\,000^2} = 42.44 \text{MPa}$$

联杆自身重力引起的弯曲应力 $\sigma_{n,w}$ 为：

$$\sigma_{n,w} = 0.75 \frac{\rho_M g L_R^2}{b} = 0.75 \times \frac{7.85 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 6\,000^2}{100} = 20.79 \text{MPa}$$

液体静压力作用于中间联杆上引起的拉应力 $\sigma_{t,p}$ 为：

$$\sigma_{t,p} = 0.27 \frac{\rho g H^2 L_p}{(\delta_{nb} - 2C)(b - 2C)} = 0.27 \times \frac{1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 6\,000^2 \times 1\,000}{(40 - 2 \times 2.8) \times (1\,000 - 2 \times 2.8)} = 29.36 \text{MPa}$$

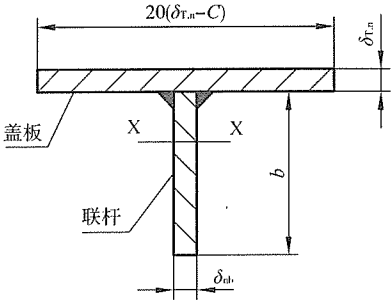
中间联杆的最大应力 $\sigma_{R,max}$ 为：

$$\sigma_{R,max} = \sigma_{t,w} + \sigma_{n,w} + \sigma_{t,p} = 42.44 + 20.79 + 29.33 = 92.59 \text{MPa}$$

结论： $\sigma_{R,max} \leq [\sigma]_{\text{扁钢}}$ ，中间联杆强度合格。

—— 顶部联杆

$\rho =$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³	扁钢厚度 $\delta_{nb} =$	40	mm
$\rho_M =$	7.85×10^5	kg/mm ³	扁钢宽度 $b =$	100	mm
$g =$	9.81	m/s ²	扁钢长度 $L_R =$	6 000	mm
$[\sigma]_{\text{扁钢}} =$	135	MPa	$L_p =$	1 000	mm
$E^t =$	1.91×10^5	MPa	$H =$	6 000	mm
$\delta_{T,n} =$	12.00	mm	$C_2 =$	2	mm
$C =$	2.8	mm			



联杆计算组合截面

$$A_1 = (b - C_2)(\delta_{nb} - C) \times 10^{-2} = (100 - 2) \times (40 - 2.8) \times 10^{-2} = 36.46 \text{cm}^2$$

$$W_1 = (b - C_2) / 2 \times 10^{-1} = \frac{100 - 2}{2} \times 10^{-1} = 4.9 \text{cm}$$

$$I_1 = \frac{(\delta_{nb} - C)(b - C_2)^3}{12} \times 10^{-4} = \frac{(40 - 2.8) \times (100 - 2)^3}{12} \times 10^{-4} = 291.77 \text{ cm}^4$$

$$A_2 = \{20(\delta_{T,n} - C)^2\} \times 10^{-2} = 20 \times (12 - 2.8)^2 \times 10^{-2} = 16.93 \text{ cm}^2$$

$$W_2 = \left[(b - C_2) + \frac{(\delta_{T,n} - C)}{2} \right] \times 10^{-1} = \left[(100 - 2) + \frac{(12 - 2.8)}{2} \right] \times 10^{-1} = 10.26 \text{ cm}$$

$$I_2 = \left[20 \frac{(\delta_{T,n} - C)^4}{12} \right] \times 10^{-4} = \left[20 \times \frac{(12 - 2.8)^4}{12} \right] \times 10^{-4} = 1.19 \text{ cm}^4$$

重心: $W_y = 6.60 \text{ cm}$

惯性矩: $I_{x1} = 397.08 \text{ cm}^4$

惯性矩: $I_{x2} = 228.00 \text{ cm}^4$

惯性矩: $I_x = 625.08 \text{ cm}^4$

截面系数: $Z_x = 94.71 \text{ cm}^3$

联杆自身重力引起的拉应力 $\sigma_{t,w}$ 为:

$$\sigma_{t,w} = 9.6 E^t \frac{I_x}{L_R^2 (\delta_{nb} b + \delta_{T,n} L_p)} = 9.6 \times 1.91 \times 10^5 \times \frac{6250800}{6000^2 \times (40 \times 100 + 12 \times 1000)} = 20 \text{ MPa}$$

联杆自身重力引起的弯曲应力 $\sigma_{n,w}$ 为:

$$\sigma_{n,w} = 9.62 \times 10^{-6} \frac{L_R^2 (\delta_{nb} b + \delta_{T,n} L_p)}{Z_x} = 9.62 \times 10^{-6} \times \frac{6000^2 \times (40 \times 100 + 12 \times 1000)}{94710} = 58.5 \text{ MPa}$$

液体静压力作用于中间联杆上引起的拉应力 $\sigma_{t,p}$ 为:

$$\begin{aligned} \sigma_{t,p} &= 0.06 \frac{\rho g H^2 L_p}{(b - C)(\delta_{nb} - 2C) + L_p(\delta_{T,n} - C)} \\ &= 0.06 \times \frac{1.00 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 6000^2 \times 1000}{(100 - 2.8) \times (40 - 2 \times 2.8) + 1000 \times (12 - 2.8)} = 1.69 \text{ MPa} \end{aligned}$$

中间联杆的最大应力 $\sigma_{R,\max}$ 为:

$$\sigma_{R,\max} = \sigma_{t,w} + \sigma_{n,w} + \sigma_{t,p} = 20 + 58.5 + 1.69 = 80.2 \text{ MPa}$$

结论: $\sigma_{R,\max} \leq [\sigma]_{\text{扁钢}}$, 顶部联杆强度合格。

④ 设置二层联杆时壁板、加固柱和联杆设计

推荐的 H_i , mm		实际采用的 H_i , mm	
$H_1 = 0.45 H =$	2 700	$H_1 =$	2 700
$H_2 = 0.3 H =$	1 800	$H_2 =$	1 800
$H_3 = 0.25 H =$	1 500	$H_3 =$	1 500

a) 壁板厚度设计

$A=L_p=$	1 000	mm	$[\sigma]^t=$	135	MPa
$\rho=$	1.00×10^{-6}	kg/mm ³	$E^t=$	1.91×10^5	MPa
$g=$	9.81	m/s ²			

项 目	第一段	第二段	第三段
$B=H_i$	2 700	1 800	1 500
$h_i=\sum H_i$	2 700	4 500	6 000
α_i	0.056 63	0.045 92	0.039 18
β_i	0.064 77	0.050 82	0.042 12

查图 8-7 得 α 、 β 如上表。

如令 $h_0=0$ ，当 $i=1$ 时， $k=3$ ， $i \geq 2$ 时， $k=6$ ，则各段的 δ ， $f_{i,\max}$ 分别为：

$$\delta_i = L_p \sqrt{\frac{k\alpha_i \rho g(h_{i-1} + h_i)}{[\sigma]^t}}$$

$$f_{i,\max} = \beta_i L_p^4 \frac{\rho g(h_{i-1} + h_i)}{2E\delta_{i,e}^3}$$

各段的分析结果如下表：

n		第一段	第二段	第三段
2	δ_i	5.77	12.00	13.39
	δ_i+C	8.57	14.80	16.19
	$\delta_{i,n}$	10.00	16.00	18.00
	δ_e	7.20	13.20	15.20
	$f_{i,\max}$	12.02	4.08	3.23
	$[f]$	34.43	46.42	50.25
	刚度结论	合格	合格	合格

b) 加固柱设计

$L_p=$	1 000	mm	$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³
$H=$	6 000	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$\delta_{w,n}=$	10.00	mm	$[\sigma]_b=$	137	MPa
$C=$	2.8	mm			

加固柱所需的截面系数 Z_p 为:

$$Z_p = L_p \left[\frac{0.0054 \rho g H^3}{[\sigma]_b} - \frac{(\delta_{w,n} - C)^2}{6} \right] \times 10^{-3}$$

$$= 1\,000 \times \left[\frac{0.0054 \times 1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 6\,000^3}{137} - \frac{(10.0 - 2.8)^2}{6} \right] \times 10^{-3} = 74.88 \text{ cm}^3$$

注: 加固柱一般采用槽钢或工字钢, 设计所采用的加固柱其截面系数应不小于以上计算截面系数, 本设计加固柱件采用 80×43, 该规格加固柱的截面系数为 101.3 cm³。

结论: 所选加固柱刚度合格。

c) 扁钢联杆强度校核:

—— 第一层联杆

$\rho =$	1.00×10^{-6}	kg/mm ³	扁钢厚度 $\delta_{nb} =$	40	mm
$\rho_M =$	7.85×10^5	kg/mm ³	扁钢宽度 $b =$	100	mm
$g =$	9.81	m/s ²	扁钢长度 $L_R =$	6 000	mm
$[\sigma]_{\text{扁钢}} =$	135	MPa	$L_p =$	1 000	mm
$E^t =$	1.91×10^5	MPa	$H =$	6 000	mm
$C =$	2.8	mm			

联杆自身重力引起的拉应力 $\sigma_{t,w}$ 为:

$$\sigma_{t,w} = 0.8 E^t \frac{b^2}{L_R^2} = 0.8 \times 1.91 \times 10^5 \times \frac{100^2}{6\,000^2} = 42.44 \text{ MPa}$$

联杆自身重力引起的弯曲应力 $\sigma_{n,w}$ 为:

$$\sigma_{n,w} = 0.75 \frac{\rho_M g L_R^2}{b} = 0.75 \times \frac{7.85 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 6\,000^2}{100} = 20.79 \text{ MPa}$$

液体静压力作用于第一层联杆上引起的拉应力 $\sigma_{t,p}$ 为:

$$\sigma_{t,p} = 0.15 \frac{\rho g H^2 L_p}{(\delta_{nb} - 2C)(b - 2C)} = 0.15 \times \frac{1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 6\,000^2 \times 100}{(40 - 2 \times 2.8)(100 - 2 \times 2.8)} = 1.13 \text{ MPa}$$

第一层联杆的最大应力 $\sigma_{R,\max}$ 为:

$$\sigma_{R,\max} = \sigma_{t,w} + \sigma_{n,w} + \sigma_{t,p} = 42.44 + 20.79 + 1.13 = 64.36 \text{ MPa}$$

结论: $\sigma_{R,\max} \leq [\sigma]_{\text{扁钢}}$, 第一层联杆强度合格。

—— 第二层联杆

联杆自身重力引起的拉应力 $\sigma_{t,w}$ 为:

$$\sigma_{t,w} = 0.8 E^t \frac{b^2}{L_R^2} = 0.8 \times 1.91 \times 10^5 \times \frac{100^2}{6\,000^2} = 42.44 \text{ MPa}$$

联杆自身重力引起的弯曲应力 $\sigma_{n,w}$ 为:

$$\sigma_{n,w} = 0.75 \frac{\rho_M g L_R^2}{b} = 0.75 \times \frac{7.85 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 6\,000^2}{100} = 20.79 \text{MPa}$$

液体静压力作用于第二层联杆上引起的拉应力 $\sigma_{t,p}$ 为:

$$\sigma_{t,p} = 0.202 \frac{\rho g H^2 L_p}{(\delta_{nb} - 2C)(b - 2C)} = 0.202 \times \frac{1.00 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 6\,000^2 \times 1\,000}{(40 - 2 \times 2.8) \times (100 - 2 \times 2.8)} = 21.96 \text{MPa}$$

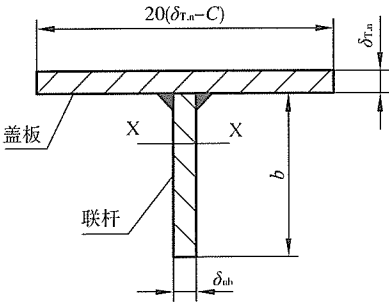
第二层联杆的最大应力 $\sigma_{R,\max}$ 为:

$$\sigma_{R,\max} = \sigma_{t,w} + \sigma_{n,w} + \sigma_{t,p} = 42.44 + 20.79 + 21.96 = 85.19 \text{MPa}$$

结论: $\sigma_{R,\max} \leq [\sigma]_{\text{扁钢}}$, 第二层联杆强度合格。

—— 顶部联杆

$\rho =$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³	扁钢厚度 $\delta_{nb} =$	40	mm
$\rho_M =$	7.85×10^5	kg/mm ³	扁钢宽度 $b =$	100	mm
$g =$	9.81	m/s ²	扁钢长度 $L_R =$	6 000	mm
$[\sigma]_{\text{扁钢}} =$	135	MPa	$L_p =$	1 000	mm
$E^t =$	1.91×10^5	MPa	$H =$	6 000	mm
$\delta_{T,n} =$	10.00	mm	$C_2 =$	2	mm
$C =$	2.8	mm			



联杆计算组合截面

$$A_1 = (b - C_2)(\delta_{nb} - C) \times 10^{-2} \times 10^{-2} = (100 - 2) \times (40 - 2.8) \times 10^{-2} = 36.46 \text{cm}^2$$

$$W_1 = \frac{b - C_2}{2} \times 10^{-1} = \frac{100 - 2}{2} \times 10^{-1} = 4.90 \text{cm}$$

$$I_1 = \frac{(\delta_{nb} - C)(b - C_2)^3}{12} \times 10^{-4} = \frac{(40 - 2.8) \times (100 - 2)^3}{12} \times 10^{-4} = 291.77 \text{cm}^4$$

$$A_2 = 20 (\delta_{T,n} - C)^2 \times 10^{-2} = 20 \times (10 - 2.8)^2 \times 10^{-2} = 10.37 \text{cm}^2$$

$$W_2 = (b - C_2 + \frac{\delta_{T,n} - C}{2}) \times 10^{-1} = (100 - 2 + \frac{10 - 2.8}{2}) \times 10^{-1} = 10.16 \text{ cm}$$

$$I_2 = 20 \frac{(\delta_{T,n} - C)^4}{12} \times 10^{-4} = 20 \times \frac{(10 - 2.8)^4}{12} \times 10^{-4} = 0.45 \text{ cm}^4$$

重心: $W_y = 6.06 \text{ cm}$

惯性矩: $I_{x1} = 341.22 \text{ cm}^4$

惯性矩: $I_{x2} = 174.34 \text{ cm}^4$

惯性矩: $I_x = 515.56 \text{ cm}^4$

截面系数: $Z_x = 85.01 \text{ cm}^3$

联杆自身重力引起的拉应力 $\sigma_{t,w}$ 为:

$$\sigma_{t,w} = 9.6 E^t \frac{I_x}{L_R^2 (\delta_{nb} b + \delta_{T,n} L_p)} = 9.6 \times 1.91 \times 10^5 \times \frac{515.56 \times 10^4}{6\,000^2 \times (40 \times 100 + 10 \times 1\,000)} = 18.76 \text{ MPa}$$

联杆自身重力引起的弯曲应力 $\sigma_{n,w}$ 为:

$$\begin{aligned} \sigma_{n,w} &= 9.62 \times 10^{-6} \frac{L_R^2 (\delta_{nb} b + \delta_{T,n} L_p)}{Z_x} \\ &= 9.62 \times 10^{-6} \times \frac{6\,000^2 \times (40 \times 100 + 10 \times 1\,000)}{85.01 \times 10^3} = 57.03 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{t,p} &= 0.034 \frac{\rho g H^2 L_p}{(b - C) (\delta_{nb} - 2C) + L_p (\delta_{T,n} - C)} \\ &= 0.034 \times \frac{1.0 \times 10^6 \times 9.81 \times 6\,000^2 \times 1\,000}{(100 - 2.8) \times (40 - 2 \times 2.8) + 1\,000 \times (10 - 2.8)} = 1.13 \text{ MPa} \end{aligned}$$

顶部联杆的最大应力 $\sigma_{R,\max}$ 为:

$$\sigma_{R,\max} = \sigma_{t,w} + \sigma_{n,w} + \sigma_{t,p} = 18.76 + 57.03 + 1.13 = 76.92 \text{ MPa}$$

结论: $\sigma_{R,\max} \leq [\sigma]_{\text{扁钢}}$, 顶部联杆强度合格。

⑤ 顶板强度设计[可选] (如不作顶板设计, 此节可忽略。)

根据设计条件计算壁板厚度的各参数分别为:

$A=L_T=$	200	mm	$\rho_M=$	7.85×10^5	kg/mm ³
$B=W_T=$	250	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$p_a=$	1.2×10^{-3}	MPa	$[\sigma]^t=$	135	MPa

查图 8-15 得 α 为: $\alpha=0.06643$

顶板承受自重所需的计算厚度 δ_T 为:

$$\begin{aligned}\delta_T &= \frac{3A^2\alpha\rho_M g + A\sqrt{3\alpha(3A^2\alpha\rho_M^2 g^2 + 2P_a[\sigma]^t)}}{[\sigma]^t} \\ &= \frac{3 \times 200^2 \times 0.06643 \times 7.85 \times 10^{-6} \times 9.81}{135} \\ &\quad + \frac{200 \times \sqrt{3 \times 0.06643 \times (3 \times 200^2 \times 0.06643 \times 7.85 \times 10^{-6} \times 9.81^2 + 2 \times 1.2 \times 10^{-3} \times 135)}}{135} \\ &= 0.38\text{mm}\end{aligned}$$

$$\delta = \delta_T + C_1 + C_2 = 0.38 + 0.8 + 2.0 = 3.16\text{mm}$$

考虑壁厚附加量及设置加强筋后, 顶板的名义厚度 $\delta_{T,n}$ 取为 4mm。

⑥ 顶板刚度校核[可选] (如不作顶板设计, 此节可忽略。)

承受自重及附加载荷顶板刚度校核, 根据设计条件计算顶板最大挠度的各参数分别为:

$A=L_T=$	200	mm	$\rho_M=$	7.85×10^5	kg/mm ³
$B=W_T=$	250	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$p_a=$	1.20×10^{-3}	MPa	$E^t=$	1.91×10^5	MPa

查图 8-15 得 β 为: $\beta=0.06578$

$$\text{顶板有效厚 } \delta_{T,e} = \delta_{T,n} - (C_1 + C_2) = 4.0 - (0.8 + 2.0) = 1.2\text{mm}$$

顶板最大挠度 $f_{T,\max}$ 为:

$$\begin{aligned}f_{T,\max} &= \beta A^4 \frac{\rho_M g \delta_{T,e} + p_a}{E^t \delta_{T,e}^3} \\ &= 0.06578 \times 200^4 \times \frac{7.85 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 1.2 + 1.20 \times 10^{-3}}{1.91 \times 10^5 \times 1.2^3} = 0.41\text{mm}\end{aligned}$$

顶板的许用挠度 $[f]$ 为:

$$[f] = 5 \left(\frac{\delta_{T,e}}{2} + \sqrt{\frac{B}{A} \frac{A}{500}} \right) = 5 \times \left(\frac{1.2}{2} + \sqrt{\frac{250}{200} \times \frac{200}{500}} \right) = 5.24\text{mm}$$

顶板刚度校核结论: $f_{T,\max} \leq [f]$, 刚度满足要求。

⑦ 顶板加强筋

$L_T=$	6 000	mm	$\rho_M=$	7.85×10^5	kg/mm ³
$W_T=$	250	mm	$g=$	9.81	m/s ²
$p_a=$	1.20×10^{-3}	MPa	$[\sigma]_b=$	137	MPa
$\delta_{T,e}=$	1.20	mm			

顶板上加强筋 L 方向截面系数 $Z_{T,L}$ 为:

$$Z_{T,L} = \frac{(\rho_M g \delta_{T,e} + p_a) L_T W_T^2}{9.4 \times [\sigma]_b} - \frac{L_T \delta_{T,e}^2}{6}$$

$$= \frac{(7.85 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 1.2 + 1.2 \times 10^{-3}) \times 6\,000 \times 250^2}{9.4 \times 137} - \frac{6\,000 \times 1.2^2}{6} = -1\,063.7 \text{ mm}^3$$

顶板上加强筋 W 方向的截面系数 $Z_{T,W}$ 为:

$$Z_{T,W} = \frac{(\rho_M g \delta_{T,e} + p_a) W_T L_T^2}{9.4 \times [\sigma]_b} - \frac{W_T \delta_{T,e}^2}{6}$$

$$= \frac{(7.85 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 1.2 + 1.2 \times 10^{-3}) \times 250 \times 6\,000^2}{9.4 \times 137} - \frac{250 \times 1.2^2}{6} = 8\,972.2 \text{ mm}^3$$

顶板上加强筋所需的截面系数 $Z_T = \max\{Z_{T,W}, Z_{T,L}\} = 9 \text{ cm}^3$

顶板加强筋选用: L 75×75×10

顶板加强筋截面系数: 13.64 cm³

顶板加强筋强度结论: 所选加强筋合格。

⑧ 底板设计

a) 型钢支撑的底板

—— 底板厚度计算

$H=$	6 000	mm	型钢跨距 $L_b=$	200	mm
$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³	$g=$	9.81	m/s ²
$[\sigma]^t=$	135	MPa			

底板计算厚度 δ_b 为:

$$\delta_b = 0.8 L_b \sqrt{\frac{\rho g H}{[\sigma]^t}} = 0.8 \times 200 \times \sqrt{\frac{1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 6\,000}{135}} = 3.34 \text{ mm}$$

钢板厚度负偏差 $C_1=0.8 \text{ mm}$

腐蚀裕量 $C_2=2 \text{ mm}$

$\delta = \delta_b + C_1 + C_2 = 3.34 + 0.8 + 2 = 6.14 \text{ mm}$

最终取底板名义厚度 $\delta_{b,n}=8 \text{ mm}$ 。

—— 型钢跨度计算

$H=$	6 000	mm	底板名义厚度 $\delta_{b,n}=$	8	mm
$\rho=$	1.0×10^{-6}	kg/mm ³	$g=$	9.81	m/s ²
$[\sigma]^t=$	135	MPa			

型钢的最大跨度 $L_{b,\max}$ 为:

$$L_{b,\max} = 1.25(\delta_{b,n} - C) \sqrt{\frac{[\sigma]^t}{\rho g H}}$$

$$= 1.25 \times (8 - 2.8) \times \sqrt{\frac{135}{1.0 \times 10^{-6} \times 9.81 \times 6\,000}} = 311.29 \text{ mm}$$

b) 在平基础上全平面支撑的底板

板整个表面被支撑时, 底板最小厚度常用 4mm ~ 6mm (或与壁板等厚), 并考虑腐蚀裕量, 最终取底板的名义厚度 $\delta_{b,n}$ 为 8mm。

参 考 文 献

- [1] GB 150—1998 《钢制压力容器》
- [2] HG 20582—1998 《钢制化工容器强度计算规定》
- [3] JB/T 4710—2005 《钢制塔式容器》
- [4] JB/T 4735—1997 《钢制焊接常压容器》
- [5] JB/T 4735—1997 《钢制焊接常压容器》标准释义
- [6] 《石油炼厂设备之计算和设计》.[苏]尤, 勒·维赫曼.石油工业出版社, 1956 (译文)
- [7] 《压力容器手册》.[美]E.F.MEGYESY.石油工业出版社, 1984 (译文)
- [8] 《矩形贮罐的设计方法》.[美]Kantl K. Mahajan.《化工设备设计》1980 (第二期)
- [9] 《建筑结构静力计算手册》.中国建筑工业出版社, 1975
- [10] 《机械设计手册》上册, 第一分册.化学工业出版社
- [11] 《常压矩形容器壁板强度和刚度设计》.姜英明.《石油化工设备》2001 第 30 卷第 4 期
- [12] 《弹性力学及其数值方法》.夏志皋, 江理平, 唐寿高.同济大学出版社, 1997
- [13] 《弹性力学学习方法及解题指导》.王俊民编著.同济大学出版社, 2000
- [14] 《机械设计手册》.机械工业出版社, 第 1 卷, 第 4 篇, 第 9 章
- [15] 《化工容器设计》.王志文.化学工业出版社, 1993