



# 中华人民共和国行业标准

NB/T 47003.2—2009 ( JB/T 4735.2 )

部分代替 JB/T 4735—1997

---

## 固体料仓

Silos for solid materials

2009-12-01 发布

2010-05-01 实施

---

国家能源局 发布

## 目 次

前言 .....	184
1 范围 .....	185
2 规范性引用文件 .....	185
3 术语和定义 .....	186
4 总则 .....	187
5 材料 .....	191
6 设计计算 .....	201
7 钢制料仓的制造、检验与验收 .....	229
8 铝制料仓的制造、检验与验收 .....	235
附录 A (资料性附录) 固体料仓的结构 .....	237
标准释义 .....	241

## 前 言

NB/T 47003 共分为两个部分：

- 第 1 部分：钢制焊接常压容器；
- 第 2 部分：固体料仓。

本部分为 NB/T 47003 的第 2 部分，代替 JB/T 4735—1997 中“圆筒形料仓”内容。

本部分与 JB/T 4735—1997 相比，主要变化如下：

- 修订了料仓的设计压力、设计温度、公称容积等的适用范围；
- 将料仓的安全系数由 2.5 修订为 2.4；
- 增加了磨蚀裕量的规定；
- 扩大了 Q235 系列材料的使用范围；
- 将料仓的设计计算方法由“詹森 (Janssen) 方法”修改为“赖姆伯特 (Reimebert) 方法”；
- 撤消了图 14-1d “锥顶悬挂式”的结构；
- 修改了 14.19 “环形支座”的内容；
- 增加铝制料仓的内容，包括铝材 (第 5 章的 5.7~5.11)、制造 (第 8 章)；
- 将原标准中的“制造、检验与验收”分为：第 7 章“钢制料仓的制造、检验与验收”和第 8 章“铝制料仓的制造、检验与验收”两个部分；
- 增加了附录 A “固体料仓的结构”。

本部分的附录 A 为资料性附录。

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：中国纺织工业设计院、安徽省特种设备检测院、中国特种设备检测研究院。

本部分主要起草人：刘福录、万网胜、张纯、张勇、张亚丹、周秀恒、佟杰、李世玉、朱巨贤、张延丰、高中稳、王文江、寿比南、王为国、陈朝晖、张万山、李梦强。

本部分所代替标准的历次版本发布情况为：

- JB/T 4735—1997。

## 固 体 料 仓

### 1 范围

1.1 NB/T 47003 的本部分规定了固体料仓（以下简称料仓）的设计、制造、检验与验收的要求。

1.2 本部分适用于容积大于  $15\text{m}^3$ ，设计压力大于  $-500\text{Pa}$  小于  $0.1\text{MPa}$ ，设计温度为仓壳材料允许使用温度的储存固体松散物料的钢制、铝制焊接立式圆筒形料仓。

超出上述参数范围的料仓，也可参照本部分进行设计与制造。

1.3 本部分不适用于下列各类料仓：

- a) 直接埋入地下的料仓；
- b) 盛装毒性为极度或高度危害介质的料仓；
- c) 经常搬运的料斗；
- d) 容积小于或等于  $15\text{m}^3$  的料斗。

### 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	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 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和钢带 (GB 912—2008, ISO 4995:2001(E), ISO 4996:1999(E), NEQ)
GB/T 983—1995	不锈钢焊条
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—2008, ISO 9692-1:2003, MOD)
GB/T 1220—2007	不锈钢棒
GB/T 3077—1999	合金结构钢
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 3274—2007	碳素结构钢和低合金结构钢热轧厚钢板和钢带
GB/T 3280—2007	不锈钢冷轧钢板和钢带
GB/T 3880.1—2006	一般工业用铝及铝合金板、带材 第1部分：一般要求
GB/T 3880.2—2006	一般工业用铝及铝合金板、带材 第2部分：力学性能
GB/T 3880.3—2006	一般工业用铝及铝合金板、带材 第3部分：尺寸偏差
GB/T 4237—2007	不锈钢热轧钢板和钢带
GB/T 5117—1995	碳钢焊条



GB/T 5118—1995	低合金钢焊条
GB/T 5293—1999	埋弧焊用碳钢焊丝和焊剂
GB 6479—2000	高压化肥设备用无缝钢管 (GB6479—2000, ISO9329-2:1997, NEQ)
GB/T 6893—2000	铝及铝合金拉(轧)制无缝管
GB/T 8162—2008	结构用无缝钢管
GB/T 8163—2008	输送流体用无缝钢管
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/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 50009—2001	建筑结构荷载规范
JB/T 4710	钢制塔式容器
JB/T 4711—2003	压力容器涂敷与运输包装
JB/T 4712.3—2007	容器支座 第3部分:耳式支座
JB 4726—2000	压力容器用碳素钢和低合金钢锻件
JB 4728—2000	压力容器用不锈钢锻件
JB/T 4730.1—2005	承压设备无损检测 第1部分:通用要求
JB/T 4730.2—2005	承压设备无损检测 第2部分:射线检测
JB/T 4730.3—2005	承压设备无损检测 第3部分:超声检测
JB/T 4730.4—2005	承压设备无损检测 第4部分:磁粉检测
JB/T 4730.5—2005	承压设备无损检测 第5部分:渗透检测
JB/T 4730.6—2005	承压设备无损检测 第6部分:涡流检测
JB 4733—1996	压力容器用爆炸不锈钢复合钢板
JB/T 4734	铝制焊接容器
JB/T 4747—2002	压力容器用钢焊条订货技术条件
NB/T 47003.1	钢制焊接常压容器
HG 20660—2000	压力容器化学介质毒性危害和爆炸危险程度分类
YB/T 5092—2005	焊接用不锈钢丝

### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于NB/T 47003的本部分。

#### 3.1

**压力 pressure**

除注明者外,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,料仓顶部可能达到的最高压力。

#### 3.3

**设计压力 design pressure**

设计压力指设定的料仓顶部的最高压力,其值不低于工作压力。

## 3.4

**金属温度 metal temperature**

金属温度指沿料仓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金属材料允许的使用温度。

## 3.5

**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。

注：对具有多种操作工况的料仓，应在图样或相应技术文件中注明各苛刻工况下相应的设计压力和设计温度。

## 3.6

**试验温度 test temperature**

试验温度指在压力试验时，料仓壳体的金属温度。

## 4 总则

## 4.1 通则

料仓的设计、制造、检验与验收除应符合 NB/T 47003 的本部分的规定外，还应遵守 NB/T 47003.1 的规定。

## 4.2 料仓的范围

本部分的料仓范围系指料仓壳体及与其连为整体的零部件，且划定在下列范围内：

## a) 料仓与外部管道连接：

- 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) 料仓开孔的封闭元件，如人孔、手孔的成型封头、平盖及其连接紧固件等；

## c) 料仓的支承元件、开孔补强元件及其与壳体的连接焊接接头等；

## d) 直接安装在料仓上的安全泄放装置（应符合图样规定）。

## 4.3 资格与职责

## 4.3.1 料仓的设计、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。

## 4.3.3 制造单位应按照设计图样要求进行料仓制造与施工。如需修改原设计，应取得原设计单位的认可。

## 4.3.4 制造单位的检验部门在料仓制造与施工的过程中和完工后，应按本部分规定和设计图样要求对料仓进行检验，提出报告，并对报告的准确性和完整性负责。

## 4.3.5 制造单位对其制造与施工的每台产品，应具有按本部分第 7 章、第 8 章规定的技术文件备查。

## 4.4 载荷

设计时应考虑以下载荷：

## a) 压力；

## b) 料仓自重（包括内件等）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；



- c) 固体粉、粒料导致的摩擦力;
- 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,料仓承受的作用力。

#### 4.5 厚度

##### 4.5.1 厚度附加量

厚度附加量按式(1)确定:

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

式中:

$C$ ——厚度附加量, mm;

$C_1$ ——材料的厚度负偏差,按相应材料标准选取, mm;

当材料的厚度负偏差不大于 0.25mm 且不超过名义厚度的 6%时,可取  $C_1=0$ ;

$C_2$ ——腐蚀裕量和磨蚀裕量,为弥补料仓由于腐蚀、机械磨蚀所导致厚度减薄的附加量,根据料仓的工艺操作要求及所处环境条件确定。

##### 4.5.2 设计厚度

设计厚度指满足强度校核要求的厚度与腐蚀裕量和磨蚀裕量之和。

##### 4.5.3 名义厚度

名义厚度指设计厚度加上材料厚度负偏差后,向上圆整至材料标准规格的厚度,即标注在图样上的厚度。

##### 4.5.4 有效厚度

有效厚度指名义厚度减去腐蚀裕量和磨蚀裕量、材料厚度负偏差。

#### 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:金属材料(除螺栓材料外)按表 1,螺栓材料按表 2。

##### 4.6.2 不锈钢复合钢板的许用应力:

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

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

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;

$[\sigma]_2^t$ ——设计温度下复层钢板的许用应力, MPa;

$\delta_1$ ——基层钢板的有效厚度, mm;

$\delta_2$ ——复层材料的有效厚度, mm。

表 1 材料许用应力

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	$\frac{R_{eL}}{1.5}$	$\frac{R_{eL}^t}{1.5}$	<sup>a</sup>
铝及铝合金	$\frac{R_{eL}(R_{p0.2})}{1.5}$	$\frac{R_{eL}^t(R_{p0.2}^t)}{1.5}$	
注: $R_m$ —— 钢材标准抗拉强度下限值, MPa; $R_{eL}(R_{p0.2})$ —— 钢(铝)材标准常温屈服强度(或 0.2%规定非比例延伸强度), MPa; $R_{eL}^t(R_{p0.2}^t)$ —— 钢(铝)材在设计温度下的屈服强度(或 0.2%规定非比例延伸强度), MPa。			
<sup>a</sup> 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 2 螺栓许用应力

材 料	螺栓直径, mm	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: $R_{\text{eL}}^t$ —— 钢材在设计温度下的屈服强度, MPa。			

4.6.3 设计温度低于 20℃时,取 20℃时的许用应力。

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,其值根据料仓受压部分的接头型式和无损检测要求选取。

4.7.2 钢制料仓的焊接接头系数见表 3。

表 3 钢制料仓的焊接接头系数

项 目	全焊透对接接头	单面焊有垫板对接接头	单面焊无垫板对接接头
全部无损检测	$\phi = 1.0$	$\phi = 0.9$	—
局部无损检测	$\phi = 0.85$	$\phi = 0.80$	$\phi = 0.70$
不做无损检测	$\phi = 0.70$	$\phi = 0.65$	$\phi = 0.60$
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 $\phi$ 值时则按 GB 150 要求的无损检测合格级别。			



4.7.3 铝制料仓的焊接接头系数见表 4。

表 4 铝制料仓的焊接接头系数

项 目	全焊透对接接头	单面焊有垫板对接接头
全部无损检测	$\phi = 0.95$	$\phi = 0.90$
局部无损检测	$\phi = 0.85$	$\phi = 0.80$
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 $\phi$ 值时则按 GB 150 要求的无损检测合格级别。		

4.8 试验

4.8.1 料仓制成后应经压力试验或渗漏试验。试验可做盛水试验、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 7.8 的规定。

4.8.2 试验压力

a) 液压试验按式 (3) 计算：

$$p_T = 1.25 p \quad \dots\dots\dots (3)$$

b) 气压试验按式 (4) 计算：

$$p_T = 1.15 p \quad \dots\dots\dots (4)$$

c) 气密性试验按式 (5) 计算：

$$p_T = 1.0 p \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$p_T$ —— 试验压力，MPa；

$p$ —— 设计压力，MPa。

注：料仓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 压力试验时的应力校核

压力试验时，圆筒的薄膜应力按式 (6) 计算：

$$\sigma_T = \frac{p_T (D_i + \delta_e)}{2\delta_e} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

$\sigma_T$ —— 仓壳圆筒薄膜应力，MPa；

$D_i$ —— 仓壳圆筒内直径，mm；

$\delta_e$ —— 仓壳圆筒的有效厚度，mm。

$\sigma_T$  应满足下列条件：

a) 液压试验时：

$$\sigma_T \leq 0.9\phi R_{eL}(R_{p0.2})$$

b) 气压试验时（液压与气压组合试验时）：

$$\sigma_T \leq 0.8\phi R_{eL}(R_{p0.2})$$

式中：

$R_{eL}(R_{p0.2})$ —— 仓壳圆筒材料在试验温度下的屈服强度（或 0.2% 规定非比例延伸强度），MPa；

$\phi$ ——仓壳圆筒的焊接接头系数。

## 5 材料

### 5.1 总则

5.1.1 料仓用材应符合本章规定,焊接元件用材应为焊接性良好的材料。

5.1.2 列入 GB 150 的钢材和 JB/T 4734 的铝材均可作料仓用材。

5.1.3 料仓用材应由平炉、电炉或氧气转炉冶炼。材料的技术要求应符合相应的材料标准或有关技术条件的规定。

5.1.4 料仓用材应附有材料生产单位的质量证明书,料仓制造单位应按质量证明书对材料进行验收,必要时还应进行复验。

5.1.5 选择料仓用材应考虑料仓的使用条件(如设计温度、介质特性和操作特点等)、材料的焊接性能、料仓的制造工艺以及经济合理性等。

5.1.6 对材料有特殊要求时,设计单位应在图样或相应技术文件中注明。

### 5.2 钢板

5.2.1 钢板的标准、使用状态及许用应力按表 5 的规定。

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℃~250℃;
- b) 用于料仓壳体时,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料仓。

注:介质毒性程度分级的划分按 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℃~350℃;
- b) 用于料仓壳体时,钢板厚度不大于 40mm。

注:与大气连通的料仓不受上列适用范围的限制。

5.2.4 用于法兰、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 用于仓壳圆筒时,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 型缺口低温冲击试验,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℃,且低于 -10℃,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℃,且低于 -10℃,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 6 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 7 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 8 的规定。

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 9 选用。

表 5 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 索 钢 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 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	183	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		
高 合 金 钢 钢 板														
钢 号	钢材标准	使用状态	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	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				
0Cr18Ni10 Ti	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				
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的元件，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6 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 钢 管												
Q235A	GB/T 3091	≤10	335	215	140	126	120	112	—	—	—	
Q235B	GB/T 3091	≤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 钢 管												
16Mn	GB 6479 GB/T 8162 GB/T 8163	≤16	490	320	204	196	183	170	156	143	133	
高 合 金 钢 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	<sup>a</sup>		
		≤18	137	114	103	96	90	85	82			
0Cr18Ni10Ti	GB 13296 GB/T 14976	≤13	137	137	137	130	122	114	111	<sup>a</sup>		
		≤18	137	114	103	96	90	85	82			
0Cr17Ni12Mo2	GB 13296 GB/T 14976	≤13	137	137	137	134	125	118	113	<sup>a</sup>		
		≤18	137	117	107	99	93	87	84			
0Cr18Ni12Mo2Ti	GB 13296 GB/T 14976	≤13	137	137	137	134	125	118	113	<sup>a</sup>		
		≤18	137	117	107	99	93	87	84			
00Cr19Ni10	GB 13296 GB/T 14976	≤13	118	118	118	110	103	98	94	<sup>a</sup>		
		≤18	118	97	87	81	76	73	69			
00Cr17Ni14Mo2	GB 13296 GB/T 14976	≤13	118	118	117	108	100	95	90	<sup>a</sup>		
		≤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 的钢管壁厚不大于 13mm、GB/T 14976 的钢管壁厚不大于 18mm。												
<sup>a</sup> 该行许用应力仅适用于允许产生微量永久变形的元件，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 7 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	112			
0Cr18Ni9	JB 4728	≤200	137	137	137	130	122	114	111	a		
			137	114	103	96	90	85	82			
0Cr18Ni10Ti	JB 4728	≤200	137	137	137	130	122	114	111	a		
			137	114	103	96	90	85	82			
0Cr17Ni12Mo2	JB 4728	≤200	137	137	137	134	125	118	113	a		
			137	117	107	99	93	87	84			
00Cr19Ni10	JB 4728	≤200	117	117	117	110	103	98	94	a		
			117	97	87	81	76	73	69			
00Cr17Ni14Mo2	JB 4728	≤200	117	117	117	108	100	95	90	a		
			117	97	87	80	74	70	67			
00Cr18Ni5Mo3Si2	JB 4728	≤100	197	197	178	163	156	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。												
* 该行许用应力仅适用于允许产生微量永久变形的元件，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 8 螺柱许用应力

钢 号	钢材标准	使用 状态	螺柱 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 柱													
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 柱													
40MnB	GB/T 3077	调 质	≤M22	805	685	196	176	171	165	162	154	143	
			M24 ~ M36	765	635	212	189	183	180	176	167	154	
30CrMoA	GB/T 3077	调 质	≤M22	700	550	157	141	137	134	131	129	124	
			M24 ~ M48	660	500	167	150	145	142	140	137	132	
35CrMoA	GB/T 3077	调 质	≤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 柱													
钢 号	钢材标准	使用 状态	螺柱规格 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			
			M24 ~ M27	147	137	130	123	120	117	113			
0Cr18Ni9	GB/T 1220	固 溶	≤M22	129	107	97	90	84	79	77			
			M24 ~ M48	137	114	103	96	90	85	82			
0Cr18Ni10Ti	GB/T 1220	固 溶	≤M22	129	107	97	90	84	79	77			
			M24 ~ M48	137	114	103	96	90	85	82			
0Cr17Ni12Mo2	GB/T 1220	固 溶	≤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。													

表 9 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, °C
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 钢制料仓焊接材料

### 5.6.1 钢制料仓用焊接材料应符合下列标准:

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

### 5.6.2 焊接材料质量证明书。

5.6.2.1 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。

5.6.2.2 焊接材料质量证明书应符合相应国家标准的规定和要求。

### 5.6.3 焊接材料的选用。

5.6.3.1 常用的碳素钢、低合金钢之间相焊的焊接材料可按表 10 的规定选用。

表 10 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	—	—



5.6.3.2 常用的高合金钢之间相焊的焊接材料可按表 11 的规定选用。

表 11 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			—

5.6.3.3 常用的不同钢号之间相焊的焊接材料可按表 12 的规定选用。

表 12 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



5.7 铝板

料仓用铝板的标准及许用应力按表 13 的规定。

表 13 铝板的许用应力

GB/T 3880.1~3 牌 号	状 态	厚度 mm	常温强度指标		在下列温度 (℃) 下的许用应力值, MPa			
			$R_m$ MPa	$R_{p0.2}$ MPa	≤20	65	100	150
1060	退 火 (O)	1.3 ~ 10.0	55	15	10	10	9	7
	热 作 (H112)	>4.5 ~ 6.5	75	35	19	18	15	11
		>6.5 ~ 12.5	70	35	17	16	15	11
		>12.5 ~ 25.0	60	25	15	14	13	10
		>25.0 ~ 80.0	55	15	10	10	9	7
3003	退 火 (O)	1.3 ~ 10.0	95	35	23	23	23	16
	热 作 (H112)	>12.5 ~ 50.0	105	40	26	26	25	16
		>50.0 ~ 80.0	100	40	25	25	24	16
5052	退 火 (O)	1.3 ~ 10.0	170	65	42	42	42	38
	热 作 (H112)	>4.5 ~ 12.5	195	110	48	48	48	43
		>12.5 ~ 80.0	175	65	43	43	43	38
5A03	退 火 (O)	1.3 ~ 4.5	195	100	40	40	—	—
	热 作 (H112)	>4.5 ~ 10.0	185	80	46	46	—	—
		>10.0 ~ 25.0	175	70	43	43	—	—
		>25.0 ~ 50.0	165	60	40	40	—	—
注: 对不可热处理强化的铝合金, 无论是退火状态 (O) 或热作状态 (H112), 焊接接头的许用应力均取退火状态 (O) 时的许用应力。								

5.8 铝管

料仓用铝管的标准及许用应力按表 14 和表 15 的规定。

表 14 铝拉 (轧) 制无缝管的许用应力

牌 号	铝管标准	状 态	壁厚 mm	常温强度指标		在下列温度 (℃) 下的许用应力值 MPa			
				$R_m$ MPa	$R_{p0.2}$ MPa	≤20	65	100	150
1060	GB/T 6893	退火 (O)	0.5 ~ 50.0	60	( 15 )	10	10	9	7
1050A		退火 (O)		60	( 20 )	13	13	12	10
3003		退火 (O)		95	( 35 )	23	23	23	16
5052		退火 (O)		170	( 70 )	42	42	42	38
5A03		退火 (O)		175	( 80 )	43	43	—	—

表 15 铝挤压无缝圆管的许用应力

牌 号	铝管标准	状 态	壁厚 mm	常温强度指标		在下列温度(℃)下的许用应力值, MPa			
				$R_m$ MPa	$R_{p0.2}$ MPa	≤20	65	100	150
1060	GB/T 4437.1	热作 (H112)	0.5 ~ 50.0	60	( 15 )	10	10	9	7
1050A		退火 (O)		60	( 20 )	13	13	12	10
3003		退火 (O)		95	( 35 )	23	23	23	16
		热作 (H112)							
5052		退火 (O)		170	70	42	42	42	38
5A03		退火 (O)		—	—	40	40	—	—
		热作 (H112)		175	70	43	43	—	—
6061		T4	5.0 ~ 50.0	180	110	45	45	45	41
		T4 焊		165	—	41	41	41	38
		T6		260	240	65	65	64	54
		T6 焊		165	—	41	41	41	38
6063		T6		205	170	51	51	50	34
		T6 焊		118	—	29	29	29	27

## 5.9 铝挤压棒

料仓用铝挤压棒的标准及许用应力按表 16 的规定。

表 16 铝挤压棒的许用应力

牌 号	铝棒标准	状 态	壁 厚 mm	常温强度指标		在下列温度(℃)下的许用应力值, MPa			
				$R_m$ MPa	$R_{p0.2}$ MPa	≤20	65	100	150
1060	GB/T 3191	退火(O)	≤150	60	15	10	10	9	7
		热作 (H112)							
退火(O)		—		—	13	13	12	10	
热作 (H112)		65		20					
3003		退火(O)		95	35	20	20	20	18
		热作 (H112)		90	30				
5052		退火(O)		175	70	43	43	43	38
		热作 (H112)							

5.10 铝热挤压型材

料仓用铝热挤压型材的标准及许用应力按表 17 的规定。

表 17 铝热挤压型材的许用应力

牌 号	铝管标准	状 态	壁厚 mm	常温强度指标		在下列温度（℃）下的许用应力值 MPa			
				$R_m$ MPa	$R_{p0.2}$ MPa	≤20	65	100	150
1060	GB/T 6893	退火（O）	≤100.0	60	15	10	10	9	7
		热作 （H112）							
3003		退火（O）		95	35	20	20	20	14
		热作 （H112）		90	30				
5052		退火（O）		170	70	42	42	42	38
5A03		退火（O）		180	180	45	45	—	—
		热作 （H112）							
2A11		固溶+自然 时效（T4）	≤10.0	335	190	83	83	81	54
2A12		固溶+自然 时效（T4）	≤5.0	390	295	97	97	94	60
			>5.0~ 10.0	410	295	102	102	99	63
6061		T4	≤16	180	110	45	45	45	41
		T4 焊		165	—	41	41	41	38
		T6	所有	265	245	66	66	65	54
		T6 焊		165	—	41	41	41	38
6063		T5		160	110	40	40	39	33
		T5 焊		118	—	29	29	29	27
		T6		205	180	51	51	50	33
	T6 焊	118		—	29	29	29	27	

注：可热处理强化的铝材，母材在 T4、T5、T6 状态焊接后，焊接接头许用应力取 T4 焊、T5 焊、T6 焊栏的值。

5.11 铝焊材

5.11.1 钢制料仓用焊接材料应符合下列标准：

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

5.11.2 焊接材料质量证明书

5.11.2.1 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。

5.11.2.2 焊接材料质量证明书应符合相应国家标准的规定和要求。



5.11.3 焊接材料的选用

5.11.3.1 同牌号铝焊接用焊丝可按表 18 的规定选用。

表 18 同牌号铝焊接用焊丝

同种母材牌号	焊 丝	同种母材牌号	焊 丝
1060	SAL-3	5052	SA1Mg-1
1050A	SAL-3	5A02	SA1Mg-1
		5A03	SA1Mg-2
1200	SAL-1	5083	SA1Mg-3
3003	SA1Mn	5A05	SA1Mg-5
3004	SA1Mn	6061	SA1Mg-1
			SA1Mg-5
			SA1Si-1

5.11.3.2 异种铝焊接用焊丝可按表 19 的规定选用。

表 19 异种铝焊接用焊丝

异 种 母 材	焊 丝
纯铝 + 铝锰合金	SA1Mn
纯铝、铝锰合金 + 5052、5A02	SA1Mg-1、SA1Mg-5
纯铝、铝锰合金 + 5A03	SA1Mg-2
纯铝、铝锰合金 + 5083、5086	SA1Mg-3
纯铝、铝锰合金 + 5A06、5A05	SA1Mg-5

6 设计计算

固体料仓的校核计算按以下步骤进行：

- a) 根据地震或风载的需要，选定若干计算截面（包括所有危险截面）；
- b) 根据 NB/T 47003.1 的相应章节，按设计压力及物料的特性初定仓壳圆筒及仓壳锥体各计算截面的有效厚度  $\delta_e$ ；
- c) 按 6.1 ~ 6.17 的规定依次进行校核计算，计算结果应满足各相应要求，否则需要重新设定有效厚度，直至满足全部校核条件为止。

固体料仓的外压校核计算按 GB 150 的相应章节进行。

6.1 符号说明

- $A$  —— 特性纵坐标值，mm； $A$  为系数，按 GB 150 确定；
- $B$  —— 系数，按 GB 150 确定，MPa；
- $C$  —— 壁厚附加量， $C=C_1+C_2$ ，mm；
- $C_1$  —— 钢板的厚度负偏差，按相应材料标准选取，mm；
- $C_2$  —— 腐蚀裕量和磨蚀裕量，mm；



腐蚀裕量对于碳钢和低合金钢,取不小于1mm;对于不锈钢,当介质的腐蚀性极微时,取为0;对于铝及铝合金,取不小于1mm;对于裙座壳,取不小于2mm;对于地脚螺栓,取不小于3mm;

磨蚀裕量对于碳素钢和低合金钢、铝及铝合金,一般取不小于1mm;对于高合金钢,一般取不小于0.5mm;

$D_i$ ——仓壳圆筒内直径,mm;

$D_o$ ——仓壳圆筒外直径,mm;

$E^t$ ——材料设计温度下的弹性模量,MPa;

$F_f$ ——物料与仓壳圆筒间的摩擦力,N;

$F_{k1}$ ——集中质量 $m_k$ 引起的基本振型水平地震力,N;

$F_v$ ——集中质量 $m_k$ 引起的垂直地震力,N;

$F_{vi}$ ——集中质量 $i$ 引起的垂直地震力,N;

$F_v^{0-0}$ ——料仓底截面处垂直地震力,N;

$F_v^{1-1}$ ——料仓任意计算截面处垂直地震力,仅在最大弯矩为地震弯矩参与组合时计入此项,N;

$g$ ——重力加速度,取 $g=9.81\text{m/s}^2$ ;

$H$ ——料仓总高度,mm;

$H_o$ ——仓壳圆筒高度,mm;

$H_c$ ——仓壳锥体高度,mm;

$H_i$ ——料仓顶部至第 $i$ 段底截面的距离,mm;

$h$ ——计算截面距地面高度(见图2),mm;

$h_c$ ——物料自然堆积上锥角高度(见图5),mm;

$h_i$ ——料仓第 $i$ 段集中质量距地面的高度(见图2),mm;

$h_k$ ——任意计算截面 I-I 以上集中质量 $m_k$ 距地面的高度(见图2),mm;

$h_w$ ——料仓计算截面以上的储料高度(见图6),mm;

$K$ ——载荷组合系数,取 $K=1.2$ 。

$M_E^{1-1}$ ——任意计算截面 I-I 处的基本振型地震弯矩,N·mm;

$M_E^{0-0}$ ——底部截面 0-0 处的地震弯矩,N·mm;

$M_w^{1-1}$ ——任意计算截面 I-I 处的风力弯矩,N·mm;

$M_w^{0-0}$ ——底部截面 0-0 处的风力弯矩,N·mm;

$M_{\max}^{1-1}$ ——任意计算截面 I-I 处的最大弯矩,N·mm;

$M_{\max}^{0-0}$ ——底部截面 0-0 处的最大弯矩,N·mm;

$m_c$ ——仓壳锥体质量与仓壳锥体部分所储物料质量之和,kg;

$m_{\min}$ ——料仓最小质量,kg;

$m_t$ ——单位面积的仓壳顶质量与附加质量之和,kg;

$m_o$ ——料仓操作质量,kg;

$M_{o5}$ ——料仓储料质量,kg;

$p$ ——设计压力,MPa;

$p_o$ ——设计外压力,MPa;

$p_h^{1-1}$ ——物料在仓壳圆筒计算截面 I-I 处产生的水平压力,MPa;

- $p_v^{I-I}$ ——物料在仓壳圆筒计算截面 I-I 处产生的垂直压力, MPa;  
 $p_h^{a-a}$ ——物料对仓壳锥体计算截面 a-a 处产生的水平压力, MPa;  
 $p_n^{a-a}$ ——物料对仓壳锥体计算截面 a-a 处产生的法向压力, MPa;  
 $p_v^{a-a}$ ——物料对仓壳锥体计算截面 a-a 处产生的垂直压力, MPa;  
 $p_n^{II-II}$ ——物料对仓壳锥体大端 II-II 处产生的法向压力, MPa;  
 $p_v^{II-II}$ ——物料在仓壳锥体大端 II-II 处产生的垂直压力, MPa;  
 $q_0$ ——基本风压值, 见 GB 50009, 或按当地气象部门资料, 但均不应小于  $300 \text{ N/m}^2$ ;  
 $q_w$ ——基本雪压值,  $\text{N/m}^2$ 。对我国主要地区,  $q_w$  可从 GB 50009 中选取。当表中查不到时, 可向当地气象部门咨询或取  $q_w = 300 \text{ N/m}^2$ 。当料仓露天建在山区时, 应将上述雪压值乘以系数 1.2;  
 $R_{eL}$ ——常温下材料屈服点, MPa;  
 $T_1$ ——料仓基本自振周期, s;  
 $W_e$ ——地震载荷, N;  
 $W_s$ ——雪载荷, N;  
 $\rho$ ——物料堆积密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  
 $\delta_e$ ——仓壳圆筒或仓壳锥体的有效壁厚, mm;  
 $\delta_{ei}$ ——各计算截面设定的仓壳圆筒或仓壳锥体的有效壁厚, mm;  
 $\delta_t$ ——仓壳顶的有效壁厚, mm;  
 $\theta$ ——仓壳锥体的半顶角, ( $^\circ$ );  
 $\phi$ ——焊接接头系数;  
 $\mu$ ——物料与料仓壳体间的摩擦系数;  
 $[\sigma]^t$ ——设计温度下材料的许用应力, MPa;  
 $\sigma_f$ ——物料与料仓壳体间摩擦产生的应力, MPa;  
 $\sigma_z$ ——组合轴向应力, MPa;  
 $\sigma_\theta$ ——周向应力, MPa;  
 $\sigma_\Sigma$ ——组合应力, MPa;  
 $\psi$ ——松散物料内摩擦角的最小值, ( $^\circ$ );  
 $\psi'$ ——松散物料与壳体壁面的摩擦角, ( $^\circ$ )。

## 6.2 料仓的结构类型

料仓壳体结构主要有拱顶式和锥顶式。

料仓支承结构主要有裙座式 (包括短裙座)、带整体加强环耳式支座及耳式支座, 见图 1 所示。

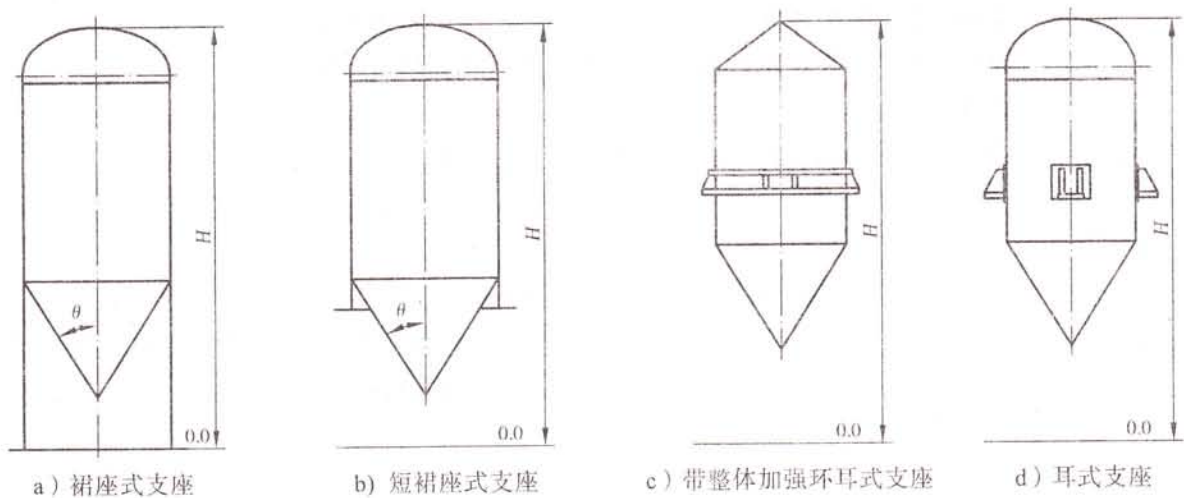


图 1 料仓的支承结构类型

6.3 料仓质量计算

料仓的操作质量按式 (7) 计算:

$$m_o = m_{o1} + m_{o2} + m_{o3} + m_a \tag{7}$$

式中:

- $m_o$ ——料仓的操作质量, kg;
- $m_{o1}$ ——仓壳 (包括支座) 质量, kg;
- $m_{o2}$ ——平台、扶梯质量, kg;
- $m_{o3}$ ——操作时料仓内物料质量, kg;
- $m_a$ ——仓壳顶安装的附件总质量, kg;

料仓的最小质量按式 (8) 计算:

$$m_{min} = m_{o1} + m_{o2} + m_a \tag{8}$$

6.4 地震载荷

本条提供的计算方法适用于裙座式支承结构[见图 1 a)]。带整体加强环耳式支座[见图 1 c)]及耳式支座[见图 1 d)]支承结构的计算按 NB/T 47003.1 的规定。短裙座式支座[见图 1 b)]的支承结构计算暂不作规定。

6.4.1 水平地震力

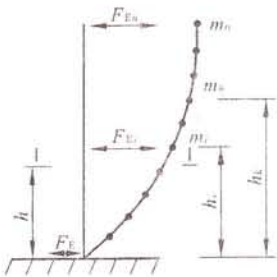


图 2 水平地震作用计算简图



料仓水平地震力按式(9)计算:

$$F_E = I\alpha_1 m_{eq} \xi \quad (9)$$

式中:

$F_E$ ——料仓总水平地震力, N;

$m_{eq}$ ——料仓等效总质量, kg,  $m_{eq} = m_a + \sum_{i=1}^n (\lambda_m m_{03i} + m_{01i} + m_{02i})$ ;

$\lambda_m$ ——等效质量系数, 地震计算时取  $\lambda_m = 0.85$ ;

$\alpha_1$ ——地震影响系数,  $\alpha_1 = \eta_2 \alpha_{\max}$ ;

$\eta_2$ ——阻尼调整系数,  $\eta_2 = 1 + \frac{0.05 - \zeta}{0.06 + 1.7\zeta}$ ;

$\zeta$ ——一阶振型阻尼比, 应为实际测量值, 无实际测量值时, 可取:  $\zeta = 0.03$ ;

$\alpha_{\max}$ ——地震影响系数最大值, 见表 20;

$I$ ——与物料特性有关的使用系数, 见表 21。

任意高度  $h_i$  (见图 2) 集中质量  $m_i$  的水平地震力按式(10)计算:

$$F_{Ei} = F_E \frac{m_i h_i}{\sum_{k=1}^n m_k h_k} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

$F_{Ei}$ ——距地面  $h_i$  处的水平地震力, N;

$m_k$ ——距地面  $h_k$  处的集中质量, kg。

表 20 对应于设防烈度的地震影响系数最大值  $\alpha_{\max}$

设 防 烈 度	7		8		9
设计基本地震加速度	0.1g	0.15g	0.2g	0.3g	0.4g
地震影响系数最大值 $\alpha_{\max}$	0.08	0.12	0.16	0.24	0.32

表 21 与物料特性有关的使用系数  $I$

物 料 特 性	$I$
一般料仓, 不储存危险物料	1.0
大、中型料仓, 储存危险物料	1.1
储存的危险物料, 失效后有发生二次灾害的可能	1.2

#### 6.4.2 垂直地震力

设防烈度为 8 度或 9 度区的料仓应考虑上下两个方向垂直地震力的作用, 如图 3 所示。料仓底截面处总的垂直地震力按式(11)计算:

$$F_v^{0-0} = \alpha_{v, \max} m_{vcq} g \quad (11)$$

式中:

$\alpha_{v, \max}$ ——垂直地震影响系数最大值, 取  $\alpha_{v, \max} = 0.65\alpha_{\max}$ ;

$m_{\text{veq}}$ ——料仓当量总质量, kg。  $m_{\text{veq}}=0.75 \times m_{\text{eq}}$ ;  
任意质量  $i$  处所分配的垂直地震力按式 (12) 计算。

$$F_{vi} = \frac{m_i h_i F_v^{0-0}}{\sum_{k=1}^n m_k h_k} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad \dots\dots\dots (12)$$

任意计算截面 I-I 处的垂直地震力按式 (13) 计算。

$$F_v^{I-I} = \sum_{k=i}^n F_{vk} \quad \dots\dots\dots (13)$$

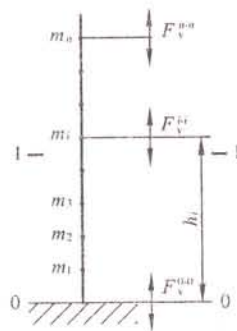


图3 垂直地震力作用示意图

#### 6.4.3 地震弯矩

料仓任意计算截面 I-I 的地震弯矩按式 (14) 计算 (见图3):

$$M_E^{I-I} = \sum_{k=i}^n F_{ik} (h_k - h) \quad \dots\dots\dots (14)$$

### 6.5 风载荷

#### 6.5.1 水平风力

两相邻计算截面间的水平风力按式 (17) 计算:

$$P_1 = K_1 K_{21} q_0 f_{l1} D_{01} \times 10^{-6} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$P_2 = K_1 K_{22} q_0 f_{l2} D_{02} \times 10^{-6} \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$P_i = K_1 K_{2i} q_0 f_{li} D_{0i} \times 10^{-6} \quad \dots\dots\dots (17)$$

式中:

$P_1, P_2, \dots, P_i$ ——料仓各计算段的水平风力, N;

$D_{01}, D_{02}, \dots, D_{0i}$ ——料仓各计算段的外径, mm;

$f_i$ ——风压高度变化系数, 按表 22 选取;

$H_{it}$ ——料仓第  $i$  段顶截面距地面的高度, m;

$K_1$ ——体型系数, 取  $K_1=0.7$ ;

$K_{21}, K_{22}, \dots, K_{2i}$ ——料仓各计算段的风振系数, 当料仓高度  $H \leq 20\text{m}$  时, 取  $K_{2i}=1.70$ ;

当  $H > 20\text{m}$  时, 按式 (18) 计算:

$$K_{2i} = 1 + \frac{\xi v_i \phi_{zi}}{f_i} \quad \dots\dots\dots (18)$$

- $\xi$ ——脉动增大系数, 按表 23 选取;  
 $\nu_i$ ——脉动影响系数, 按表 24 选取;  
 $\phi_{zi}$ ——振型系数, 根据  $h_{it}/H$  由表 25 选取;  
 $l_i$ ——第  $i$  计算段长度 (见图 4), mm。

表 22 风压高度变化系数  $f_i$ 

距地面高度 $H_{it}$ , m	地面粗糙度类别			
	A	B	C	D
5	1.17	1.00	0.74	0.62
10	1.38			
15	1.52	1.14		
20	1.63	1.25	0.84	
30	1.80	1.42	1.00	
40	1.92	1.56	1.13	0.73
50	2.03	1.67	1.25	0.84
60	2.12	1.77	1.35	0.93

注 1: A 类地面粗糙度系指近海面及海岛、海岸、湖岸及沙漠地区;  
 B 类系指田野、乡村、丛林、丘陵以及房屋比较稀疏的乡镇和城市郊区;  
 C 类系指有密集建筑群的城市市区;  
 D 类系指有密集建筑群且房屋较高的城市市区。  
 注 2: 中间值可采用线性内插法求取。

表 23 脉动增大系数  $\xi$ 

$q_1$ , N/m <sup>2</sup>	40	80	120	160	200
$\xi$	1.57	1.69	1.77	1.83	1.88
$q_1$ , N/m <sup>2</sup>	400	800	1 200	1 600	
$\xi$	2.04	2.24	2.36	2.46	

注 1: 取  $q_1$  时, 对 B 类可直接代入基本风压, 即  $q_1=q_0$ , 对 A 类以  $q_1=1.38q_0$ , 对 C 类以  $q_1=0.62q_0$ , 对 D 类以  $q_1=0.32q_0$ 。  
 注 2: 中间值可采用线性内插法求取。

表 24 脉动影响系数  $\nu_i$ 

地面粗糙度类别	$H_{it}$ , m					
	10	20	30	40	50	60
A	0.78	0.83	0.86	0.87	0.88	0.89
B	0.72	0.79	0.83	0.85	0.87	0.88
C	0.64	0.73	0.78	0.82	0.85	0.87
D	0.53	0.65	0.72	0.77	0.81	0.84

注: 中间值可采用线性内插法求取。



表 25 振型系数  $\phi_{zi}$

相对高度 $h_R/H$	$\phi_{zi}$
0.10	0.156
0.20	0.309
0.30	0.453
0.40	0.587
0.50	0.707
0.60	0.809
0.70	0.891
0.80	0.951
0.90	0.987
1.00	1.00

注：中间值可采用线性内插法求取。

6.5.2 风弯矩

料仓任意计算截面 I-I 处的风弯矩按式 (19) 计算：

$$M_w^{I-I} = \frac{P_1 l_1}{2} + P_2 (l_1 + \frac{l_2}{2}) + P_3 (l_1 + l_2 + \frac{l_3}{2}) + \dots \quad (19)$$

料仓底截面为 0-0 处的风弯矩按式 (20) 计算：

$$M_w^{0-0} = \frac{P_1 l_1}{2} + P_2 (l_1 + \frac{l_2}{2}) + P_3 (l_1 + l_2 + \frac{l_3}{2}) + \dots \quad (20)$$

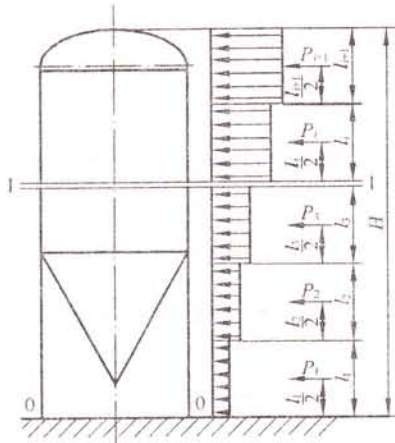


图 4 风弯矩计算简图

6.6 最大弯矩

料仓任意计算截面 I-I 处的最大弯矩按式 (21) 计算：

$$M_{\max}^{1-1} = \begin{cases} M_w^{1-1} \\ M_E^{1-1} + 0.25M_w^{1-1} \end{cases} \quad \text{取其中较大值} \quad (21)$$

料仓底部截面 0-0 处的最大弯矩按式 (22) 计算:

$$M_{\max}^{0-0} = \begin{cases} M_w^{0-0} \\ M_E^{0-0} + 0.25M_w^{0-0} \end{cases} \quad \text{取其中较大值} \quad (22)$$

## 6.7 物料对仓壳圆筒的作用力

### 6.7.1 特性纵坐标值

特性纵坐标值  $A$ , 其值按式 (23) 计算:

$$A = \frac{D_i}{4 \tan \psi' \tan^2 (45^\circ - \frac{\psi'}{2})} - \frac{h_c}{3} \quad (23)$$

$h_c$  按式 (24) 计算:

$$h_c = \frac{D_i}{2} \tan \psi \quad (24)$$

### 6.7.2 物料对仓壳圆筒的垂直压应力

物料对仓壳圆筒任意截面 I-I 处产生的垂直方向压应力  $p_v$ , 见图 5, 其值按式 (25) 计算:

$$p_v^{1-1} = \rho g \left[ h_w \left( \frac{h_w}{A} + 1 \right)^{-1} + \frac{h_c}{3} \right] \times 10^{-9} \quad (25)$$

### 6.7.3 物料对仓壳圆筒产生的水平压应力

物料对仓壳圆筒任意计算截面 I-I 处产生的水平压应力  $p_h$ , 按式 (26) 计算:

$$p_h^{1-1} = \frac{\rho g D_i}{4 \tan \psi'} \left[ 1 - \left( \frac{h_w}{A} + 1 \right)^{-2} \right] \times 10^{-9} \quad (26)$$

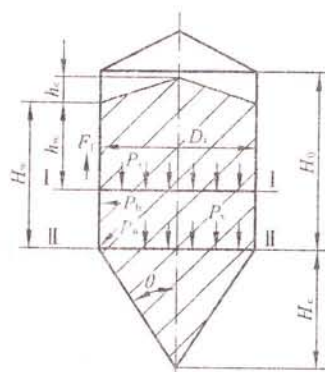


图 5 仓壳圆筒受力简图

### 6.7.4 物料与仓壳圆筒间的摩擦力

在计算截面 I-I 以上产生于仓壳圆筒表面的摩擦力, 按式 (27) 计算:

$$F_f^{I-I} = \frac{\pi D_i^2 \rho g h_w^2}{4(h_w + A)} \times 10^{-9} \quad \dots\dots\dots (27)$$

式中:

$F_f^{I-I}$  —— I-I 截面上仓壳圆筒表面的摩擦力, N。

#### 6.8 雪载荷

仓壳顶的雪载荷  $W_s$  按式 (28) 计算:

$$W_s = \frac{\pi D_o^2 q_w}{4} \times 10^{-6} \quad \dots\dots\dots (28)$$

#### 6.9 仓壳圆筒应力计算

##### 6.9.1 仓壳圆筒轴向应力计算

仓壳圆筒任意计算截面 I-I 处的轴向应力分别按式 (29) ~ 式 (32) 计算:

设计压力产生的轴向应力:

$$\sigma_{z1}^{I-I} = \frac{p D_i}{4 \delta_{ei}^{I-I}} \quad \dots\dots\dots (29)$$

式中:

$\sigma_{z1}^{I-I}$  —— 设计压力在计算截面 I-I 处产生的轴向应力, MPa;

$\delta_{ei}$  —— 仓壳圆筒计算截面 I-I 处的有效厚度, mm。

物料与仓壳圆筒间摩擦力产生的轴向应力:

$$\sigma_{z2}^{I-I} = \frac{F_f^{I-I}}{\pi D_i \delta_{ei}^{I-I}} \quad \dots\dots\dots (30)$$

式中:

$\sigma_{z2}^{I-I}$  —— 摩擦力在计算截面 I-I 处产生的轴向应力, MPa。

最大弯矩在仓壳圆筒内产生轴向应力:

$$\sigma_{z3}^{I-I} = \frac{32 D_o M_{\max}^{I-I}}{\pi (D_o^4 - D_i^4)} \quad \dots\dots\dots (31)$$

式中:

$\sigma_{z3}^{I-I}$  —— 最大弯矩在计算截面 I-I 处产生的轴向应力, MPa。

由计算截面 I-I 以上料仓壳体重量及垂直地震力产生的轴向应力:

$$\sigma_{z4}^{I-I} = \frac{m_{\text{up}}^{I-I} g + F_v^{I-I} + W_s}{\pi D_i \delta_{ei}^{I-I}} \quad \dots\dots\dots (32)$$

式中:

$\sigma_{z4}^{I-I}$  —— 壳体空重及垂直地震力在计算截面 I-I 处产生的轴向应力, MPa。

$m_{\text{up}}^{I-I}$  —— 计算截面 I-I 以上的料仓壳体及附件质量, kg, 按式 (33) 计算:

$$m_{\text{up}}^{I-I} = m_{1\text{up}}^{I-I} + m_{2\text{up}}^{I-I} + m_{\text{aup}}^{I-I} \quad \dots\dots\dots (33)$$



式中:

$m_{1up}^{I-I}$ ——计算截面 I-I 以上的料仓壳体质量, kg;

$m_{2up}^{I-I}$ ——平台、扶梯质量, kg;

$m_{aup}^{I-I}$ ——计算截面 I-I 以上的人孔、接管、法兰及仓壳顶安装的附件质量, kg。

### 6.9.2 仓壳圆筒周向应力

设计压力  $p$  和物料的水平压应力  $p_h^{I-I}$  在计算截面 I-I 处仓壳圆筒中产生的周向应力按式 (34) 计算:

$$\sigma_{\theta}^{I-I} = \frac{(p + p_h^{I-I})D_i}{2\delta_{ci}^{I-I}} \quad \dots\dots\dots (34)$$

式中:

$\sigma_{\theta}^{I-I}$ ——由设计压力  $p$  和物料的水平压应力  $p_h$  在计算截面 I-I 处产生周向应力, MPa。

### 6.9.3 应力组合

#### 6.9.3.1 组合拉应力

组合轴向应力按式 (35) 计算:

$$\sigma_z^{I-I} = \sigma_{z1}^{I-I} - \sigma_{z2}^{I-I} + \sigma_{z3}^{I-I} - \sigma_{z4}^{I-I} \quad \dots\dots\dots (35)$$

式中:

$\sigma_z^{I-I}$ ——组合轴向应力, MPa。

组合拉应力按式 (36) 计算:

$$\sigma_{zL}^{I-I} = \sqrt{(\sigma_z^{I-I})^2 + (\sigma_{\theta}^{I-I})^2 + \sigma_z^{I-I} \sigma_{\theta}^{I-I}} \quad \dots\dots\dots (36)$$

式中:

$\sigma_{zL}^{I-I}$ ——组合拉应力, MPa。

#### 6.9.3.2 组合压应力

组合压应力按式 (37) 计算:

$$\sigma_{zA}^{I-I} = \sigma_{z1}^{I-I} - \sigma_{z2}^{I-I} - \sigma_{z3}^{I-I} - \sigma_{z4}^{I-I} \quad \dots\dots\dots (37)$$

式中:

$\sigma_{zA}^{I-I}$ ——组合压应力, MPa。

### 6.9.4 应力校核

仓壳圆筒任意计算截面 I-I 处的组合拉应力与组合压应力分别按式 (38) 及式 (39) 校核:

$$\text{组合拉应力:} \quad \sigma_{zL}^{I-I} < K[\sigma]^t \phi \quad \dots\dots\dots (38)$$

$$\text{组合压应力:} \quad \sigma_{zA}^{I-I} < [\sigma]_{cr} \quad \dots\dots\dots (39)$$

$$[\sigma]_{cr} = \begin{cases} KB \\ K[\sigma]^t \end{cases} \quad \text{取其中较小值} \quad \dots\dots\dots (40)$$

式中:

$[\sigma]_{\text{cr}}$ ——仓壳圆筒材料的许用轴向压应力, MPa, 按式(40)确定:

## 6.10 仓壳锥体应力

### 6.10.1 仓壳锥体任意截面上的应力计算

#### 6.10.1.1 仓壳锥体特性纵坐标值

仓壳锥体特性纵坐标值  $A_z$ , 其值按式(41)计算:

$$A_z = \frac{D_{zi}^{a-a}}{4 \tan \psi' \tan^2 (45 - \frac{\psi'}{2})} - \frac{h_{zc}}{3} \quad \dots\dots\dots (41)$$

$h_{zc}$  按式(42)计算:

$$h_{zc} = \frac{D_{zi}^{a-a}}{2} \tan \psi \quad \dots\dots\dots (42)$$

式中:

$A_z$ ——仓壳锥体特性纵坐标值, mm;

$D_{zi}^{a-a}$ ——仓壳锥体计算截面 a-a 处的内直径, mm;

$h_{zc}$ ——物料在仓壳锥体计算截面 a-a 处的锥角高, mm。

#### 6.10.1.2 物料对仓壳锥体的垂直压应力

物料对仓壳锥体任意截面 a-a 处产生的垂直方向压应力  $p_v$ , 见图 6, 其值按式(43)计算:

$$p_v^{a-a} = \rho g \left[ h_w \left( \frac{h_w}{A_z} + 1 \right)^{-1} + \frac{h_{zc}}{3} \right] \times 10^{-9} \quad \dots\dots\dots (43)$$

#### 6.10.1.3 物料对仓壳锥体产生的水平压应力

物料对仓壳锥体任意计算截面 a-a 处产生的水平压应力  $p_h$ , 按式(44)计算:

$$p_h^{a-a} = \frac{\rho g D_{zi}}{4 \tan \psi'} \left[ 1 - \left( \frac{h_w}{A_z} + 1 \right)^{-2} \right] \times 10^{-9} \quad \dots\dots\dots (44)$$

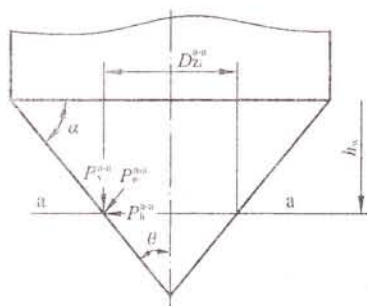


图 6 物料对仓壳锥体的垂直压应力

#### 6.10.1.4 仓壳锥体任意截面处的法向压应力

物料在仓壳锥体任意计算截面 a-a 处所产生的法向压应力  $p_n$  按式(45)计算, 此压应力与仓壳锥体间产生法向压应力。

$$p_n^{a-a} = p_v^{a-a} \sin^2 \theta + p_h^{a-a} \cos^2 \theta \quad \dots\dots\dots (45)$$

### 6.10.1.5 周向应力

仓壳锥体任意截面 a-a 处由设计压力  $p$  和垂直于其壁面的法向压应力  $p_n^{a-a}$  产生的周向应力按式 (46) 计算:

$$\sigma_\theta^{a-a} = \frac{(p + p_n^{a-a}) D_{zi}^{a-a}}{2 \delta_{ci}^{a-a} \cos \theta} \quad \dots\dots\dots (46)$$

### 6.10.1.6 轴向应力

任意截面 a-a 处由设计压力  $p$  和物料垂直压应力  $p_v^{a-a}$  产生的轴向应力按式 (47) 计算:

$$\sigma_z^{a-a} = \frac{(p + p_v^{a-a}) D_{zi}^{a-a}}{4 \delta_{ci}^{a-a} \cos \theta} + \frac{m_c^{a-a} g}{\pi D_{zi}^{a-a} \delta_{ci}^{a-a} \cos \theta} \quad \dots\dots\dots (47)$$

式中:

$m_c^{a-a}$  —— 仓壳锥体计算截面 a-a 以下的仓壳锥体质量与仓壳锥体计算截面 a-a 以下的仓壳锥体所储物料质量之和, kg。

### 6.10.2 组合应力

截面 a-a 处组合应力按式 (48) 计算:

$$\sigma_\Sigma^{a-a} = \sqrt{(\sigma_z^{a-a})^2 + (\sigma_\theta^{a-a})^2} - \sigma_z^{a-a} \sigma_\theta^{a-a} \quad \dots\dots\dots (48)$$

### 6.10.3 应力校核

截面 a-a 处组合应力按式 (49) 校核:

$$\sigma_\Sigma^{a-a} < K[\sigma]^t \phi \quad \dots\dots\dots (49)$$

## 6.11 仓壳顶计算

### 6.11.1 自支承式锥形仓壳顶

自支承式锥形仓壳顶结构见图 7。

仓壳顶的有效厚度按式 (50) 计算, 但不得小于 4.5mm。当  $\delta_t > 6\text{mm}$  时, 可以考虑采用加强筋结构。

$$\delta_t = \frac{2.24 D_i}{\sin \beta} \sqrt{\frac{m_t g}{E^t}} \times 10^{-3} + C \quad \dots\dots\dots (50)$$

$$m_t = m_{t1} + m_{t2} + m_{t3} + \frac{q_w}{g} \quad \dots\dots\dots (51)$$

式中:

$m_{t1}$  —— 单位面积的仓壳顶质量,  $\text{kg/m}^2$ ;

$m_{t2}$  —— 单位面积的仓壳顶附加质量,  $\text{kg/m}^2$ ;

$m_{t3}$  —— 单位面积仓壳顶上平均载荷,  $\text{kg/m}^2$ ;

$\beta$  —— 锥顶母线与其水平投影线间之夹角 (见图 7), 一般取  $10^\circ \sim 35^\circ$ 。



受内压锥顶的周向应力按式 (52) 计算:

$$\sigma_{\theta} = \frac{pD_i}{2\delta_t \sin \beta} \quad \dots\dots\dots (52)$$

周向应力  $\sigma_{\theta}$  按式 (53) 校核:

$$\sigma_{\theta} < [\sigma]^t \phi \quad \dots\dots\dots (53)$$

### 6.11.2 自支承式拱形仓壳顶

自支承式拱形仓壳顶的球壳内半径取料仓内直径的 0.8~1.2 倍, 见图 8。

拱形仓壳顶球壳的有效厚度按式 (54) 计算, 但不得小于 4.5mm。当  $\delta_t > 6\text{mm}$  时, 可以考虑采用加强筋结构。

$$\delta_t = R_n \sqrt{\frac{10m_t g}{E^t}} \times 10^{-3} + C \quad \dots\dots\dots (54)$$

式中:

$R_n$  —— 拱形仓壳顶球壳内半径 (见图 8), mm。

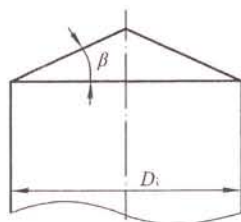


图 7 自支承式锥形仓壳顶

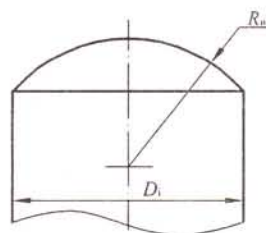


图 8 自支承式拱形仓壳顶

受内压拱形仓壳顶的周向应力, 按式 (55) 计算:

$$\sigma_{\theta} = \frac{pD_i}{4\delta_t} \quad \dots\dots\dots (55)$$

周向应力  $\sigma_{\theta}$  按式 (56) 校核:

$$\sigma_{\theta} < [\sigma]^t \phi \quad \dots\dots\dots (56)$$

### 6.11.3 仓壳顶加强筋

加强筋宜以仓壳顶中心为准, 呈辐射状均匀并对称分布, 如图 9 所示。

加强筋按以下步骤进行校核计算:

a) 加强筋的最大弯矩按式 (57) 计算:

$$M_{\max} = \frac{\pi D_i^3 m_t g}{48n} \times 10^{-9} + \frac{W_z D_i}{4n} \times 10^{-3} \quad \dots\dots\dots (57)$$

式中:

$M_{\max}$  —— 加强筋最大弯矩, N·m;

$W_z$ ——集中载荷, N;

$n$ ——直径方向加强筋的数量。

b) 所需加强筋截面模数按式 (58) 计算:

$$Z_{\min} = \frac{M_{\max}}{[\sigma]^t} \times 10^3 \quad \dots\dots\dots (58)$$

式中:

$Z_{\min}$ ——所需加强筋最小截面模数,  $\text{mm}^3$ 。

c) 设定加强结构 (包括加强筋和壳体有效组合截面) 的截面模数应大于或等于  $Z_{\min}$ 。否则需要调整加强筋的数量或型钢规格直到满足为止。



图 9 仓壳顶加强筋结构

#### 6.12 仓壳顶与仓壳圆筒连接处的加强结构

加强用的包边角钢与仓壳圆筒的连接可以采用对接或搭接型式, 见图 10 所示。

仓壳顶与仓壳圆筒连接处的有效面积 (包边角钢横截面积加上与其相连的仓壳圆筒与仓壳顶各 16 倍板厚范围内的截面之和) 应同时满足式 (59) 与表 26 的要求:

$$A_j \geq \frac{p_s D_i^2}{8[\sigma]^t \phi \tan \alpha} \quad \dots\dots\dots (59)$$

式中:

$A_j$ ——仓壳顶、仓壳圆筒与包边角钢有效截面积之和,  $\text{mm}^2$ ;

$p_s$ ——取设计压力  $p$  及设计外压  $p_o$  中的较大值, MPa。

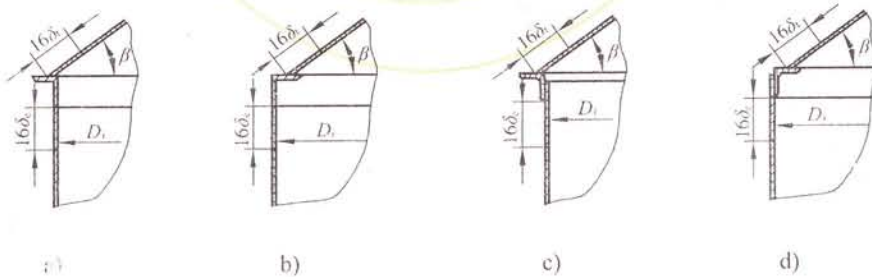


图 10 仓壳顶与仓壳圆筒连接处的加强结构

表 26 包边角钢最小尺寸

mm

仓壳圆筒内直径 $D_i$	包边角钢最小尺寸
$D_i \leq 5\,000$	$\angle 50 \times 50 \times 5$
$5\,000 < D_i \leq 10\,000$	$\angle 63 \times 63 \times 6$
$10\,000 < D_i \leq 20\,000$	$\angle 75 \times 75 \times 8$
$D_i \geq 20\,000$	$\angle 100 \times 100 \times 10$

包边角钢自身的对接接头及包边角钢与仓壳圆筒、仓壳顶连接的焊接接头应为全焊透结构。

### 6.13 仓壳锥体与仓壳圆筒连接处的加强结构

仓壳锥体与仓壳圆筒连接处的加强结构形式见图 11。

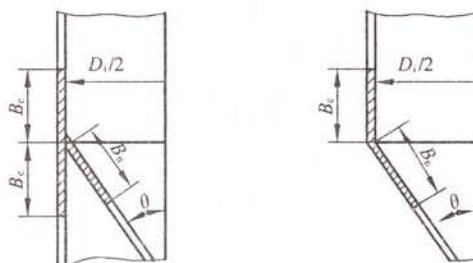


图 11 仓壳锥体与仓壳圆筒连接处的加强结构

仓壳圆筒圆周方向拉力按式 (60) 计算:

$$Y_s = (p + p_h) \frac{D_i}{2} \quad \dots\dots\dots (60)$$

式中:

$Y_s$ ——仓壳圆筒圆周方向拉力, N/mm。

仓壳锥体母线方向拉力按式 (61) 计算:

$$Y_l = \frac{(p + p_v) D_i}{4 \cos \theta} + \frac{m_c g}{\pi D_i \cos \theta} \quad \dots\dots\dots (61)$$

式中:

$Y_l$ ——仓壳锥体母线方向拉力, N/mm。

仓壳锥体圆周方向拉力按式 (62) 计算:

$$Y_2 = \frac{(p + p_n^{\text{II-II}}) R_i}{\cos \theta} \quad \dots\dots\dots (62)$$

式中:

$Y_2$ ——仓壳锥体圆周方向拉力, N/mm。

仓壳锥体圆周方向拉力按式 (63) 计算:

$$Q = Y_2 B_n + Y_s B_c - Y_l R_i \sin \theta \quad \dots\dots\dots (63)$$

式中:

$Q$ ——仓壳锥体圆周方向拉力, N;



$B_n$ ——仓壳锥体有效加强长度, mm, 按式(64)计算:

$$B_n = 0.6 \sqrt{\frac{D_i \delta_c}{2 \cos \theta}} \quad \dots\dots\dots (64)$$

$B_c$ ——仓壳圆筒有效加强长度, mm, 按式(65)计算:

$$B_c = 0.6 \sqrt{\frac{D_i \delta_c}{2}} \quad \dots\dots\dots (65)$$

承压圈区域内所需截面积按式(66)计算:

$$A_c = \frac{Q}{[\sigma]^t \phi} \quad \dots\dots\dots (66)$$

式中:

$A_c$ ——承压圈区域内所需截面积,  $\text{mm}^2$ 。

当  $A_c > B_c t_c + B_n t_n$  时需要增加具有相当于  $A_c - (B_c t_c + B_n t_n)$  截面积的补强圈。此时注意  $Q$  值为拉应力时按式(66)计算,  $Q$  值为压应力时用临界许用压应力计算。

#### 6.14 仓壳圆筒加强结构

##### 6.14.1 仓壳圆筒设计外压

仓壳圆筒设计外压按式(67)计算:

$$p_o = 2.25 f_i q_o + p_{in} \quad \dots\dots\dots (67)$$

式中:

$p_{in}$ ——料仓内部负压值, MPa。

##### 6.14.2 料仓许用临界外压力

料仓许用临界外压力值  $[p]_{cr}$  按 GB 150 计算:

##### 6.14.3 加强圈个数及位置

当  $[p]_{cr} < p_o$  时, 需在仓壳圆筒外设置加强圈, 加强圈的最少数量及其在当量仓壁上的位置, 应符合表 27。

表 27 仓壁加强圈最少数量及位置

设计外压 $p_o$ 与许用临界外压 $[p]_{cr}$ 的关系	所需加强圈最少个数	加强圈距当量仓体上端的距离, mm
$[p]_{cr} > p_o$	0	
$\frac{p_o}{2} < [p]_{cr} \leq p_o$	1	$\frac{1}{2} H_E$
$\frac{p_o}{3} < [p]_{cr} \leq \frac{1}{2} p_o$	2	$\frac{1}{3} H_E, \frac{2}{3} H_E$
$\frac{p_o}{n+1} < [p]_{cr} \leq \frac{1}{n} p_o$	$n$	$\frac{1}{n+1} H_E, \frac{1}{n-1} H_E, \dots, \frac{n}{n+1} H_E$

##### 6.14.4 加强圈最小截面尺寸

加强圈最小截面尺寸应符合表 28 的规定。

表 28 加强圈最小截面尺寸

mm

仓壳圆筒内直径 $D_i$	加强圈最小截面尺寸 (可用同等截面模数的型钢或组合件代替)
$D_i \leq 20\,000$	$\angle 100 \times 63 \times 8$
$20\,000 < D_i \leq 36\,000$	$\angle 125 \times 80 \times 8$
$D_i > 36\,000$	$\angle 150 \times 150 \times 10$

## 6.14.5 加强圈与仓壳圆筒的连接形式

加强圈与仓壳圆筒的连接形式按附录 A 确定。

## 6.15 裙座

6.15.1 裙座壳底截面的组合应力按式 (68) 和式 (69) 校核, 见图 12:

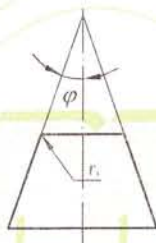


图 12 裙座壳示意图

$$\frac{1}{\cos \varphi} \left( \frac{M_{\max}^{0-0}}{Z_{sb}} + \frac{m_0 g + F_v^{0-0}}{A_{sb}} \right) \leq \begin{cases} KB \cos^2 \varphi \\ K[\sigma]^t \end{cases} \quad (68)$$

$$\frac{1}{\cos \varphi} \left( \frac{0.3M_w^{0-0} + M_e + m_{\max} g}{Z_{sb}} + \frac{m_{\max} g}{A_{sb}} \right) \leq \begin{cases} KB \cos^2 \varphi \\ 0.9R_{cl} \end{cases} \quad (69)$$

式中:

 $F_v^{0-0}$ ——0-0 截面处的垂直地震力, 仅在最大弯矩为地震弯矩参与组合时计入此项, N; $A_{sb}$ ——裙座壳底部截面积,  $\text{mm}^2$ , 按式 (70); $\varphi$ ——裙座半顶角, 对圆柱形裙座,  $\varphi=0$ , ( $^\circ$ ); $Z_{sb}$ ——裙座壳底部截面模数,  $\text{mm}^3$ , 按式 (71); $D_{is}$ ——裙座壳底部内直径, mm; $\delta_s$ ——裙座壳底部壁厚, mm; $m_{\max}$ ——料仓最大质量, 如不进行水压试验, 可取  $m_{\max} = m_0$ , kg。

$$A_{sb} = \pi D_{is} \delta_s \quad (70)$$

$$Z_{sb} = \pi D_{is}^2 \delta_s / 4 \quad (71)$$

6.15.2 裙座上较大开孔 (图 13) 处截面 h-h 组合应力按式 (72) 和式 (73) 校核:

$$\frac{1}{\cos \varphi} \left( \frac{M_{\max}^{h-h}}{Z_{sm}} + \frac{m_0^{h-h} g + F_v^{h-h}}{A_{sm}} \right) \leq \begin{cases} KB \cos^2 \varphi \\ K[\sigma]^t \end{cases} \quad (72)$$

$$\frac{1}{\cos \varphi} \left( \frac{0.3 M_w^{h-h} + M_e}{Z_{sm}} + \frac{m_{\max}^{h-h} g}{A_{sm}} \right) \leq \begin{cases} B \cos^2 \varphi \\ 0.9 \sigma_s \end{cases} \quad (73)$$

式中:

$F_v^{h-h}$ ——h-h 截面处的垂直地震力, 仅在最大弯矩为地震弯矩参与组合时计入此项, N;

$A_{sm}$ ——h-h 截面处裙座壳的截面积,  $\text{mm}^2$ , 按式 (74) 计算;

$b_m$ ——h-h 截面处水平方向的最大宽度, mm;

$D_{im}$ ——h-h 截面处裙座壳的内直径, mm;

$l_m$ ——开孔加强管长度, mm;

$M_{\max}^{h-h}$ ——h-h 截面处的最大弯矩, N·mm;

$M_w^{h-h}$ ——h-h 截面处的风弯矩, N·mm;

$m_o^{h-h}$ ——h-h 截面以上料仓的操作质量, kg;

$m_{\max}^{h-h}$ ——h-h 截面以上料仓的试验质量, 如不进行水压试验, 可取为  $m_o^{h-h}$ , kg;

$Z_{sm}$ ——h-h 截面处裙座壳的截面模数,  $\text{mm}^3$ , 按式 (76) 计算;

$$A_{sm} = \pi D_{im} \delta_{cs} - \sum [(b_m + 2\delta_m) \delta_{cs} - A_m] \quad (74)$$

$A_m$  按式 (75) 计算:

$$A_m = 2l_m \delta_m \quad (75)$$

$$Z_{sm} = \frac{\pi}{4} D_{im}^2 \delta_{cs} - \sum (b_m D_{im} \frac{\delta_{cs}}{2} - Z_m) \quad (76)$$

$Z_m$  按式 (77) 计算:

$$Z_m = 2\delta_{cs} l_m \sqrt{\left(\frac{D_{im}}{2}\right)^2 - \left(\frac{b_m}{2}\right)^2} \quad (77)$$

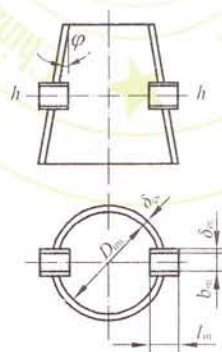


图 13 裙座壳上较大开孔处 h-h 截面示意图

如果不满足上述条件时, 须重新设定裙座壳有效厚度  $\delta_{cs}$ , 重复上述计算, 直至满足要求。

## 6.16 裙座地脚螺栓座

### 6.16.1 裙座基础环



6.16.1.1 基础环内、外径 (见图 14、图 15) 按式 (78)、式 (79) 选取:

$$D_{ob} = D_{is} + (160 \sim 400) \quad \dots\dots\dots (78)$$

$$D_{ib} = D_{is} - (160 \sim 400) \quad \dots\dots\dots (79)$$

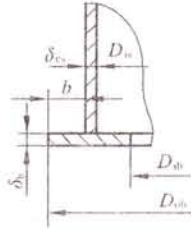


图 14 无筋板基础环

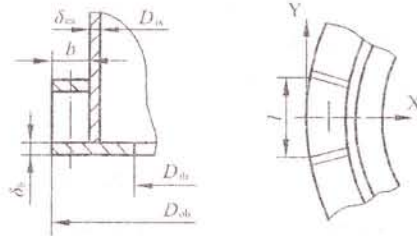


图 15 有筋板基础环

6.16.1.2 基础环厚度, 按式 (80) 或式 (81) 计算:

无筋板时 (见图 14) 的基础环厚度:

$$\delta_b = 1.73b \sqrt{\frac{\sigma_{b \max}}{[\sigma]_b}} \quad \dots\dots\dots (80)$$

有筋板时 (见图 15) 的基础环厚度:

$$\delta_b = \sqrt{\frac{6M_s}{[\sigma]_b}} \quad \dots\dots\dots (81)$$

无论无筋板或有筋板的基础环厚度均不得小于 16mm。

式中:

$\delta_b$  —— 基础环厚度, mm;

$[\sigma]_b$  —— 基础环材料许用弯曲应力, MPa;

$\sigma_{b \max}$  —— 混凝土基础上的最大压应力, MPa, 按式 (82) 计算:

$$\sigma_{b \max} = \begin{cases} \frac{M_{\max}^{0-0}}{Z_b} + \frac{m_o g \pm F_v^{0-0}}{A_b} \\ \frac{0.3M_w^{0-0}}{Z_b} + \frac{m_{\max} g}{A_b} \end{cases} \quad \text{取其中较大值} \quad \dots\dots\dots (82)$$

其中  $F_v^{0-0}$  仅在最大弯矩为地震弯矩参与组合时计入此项。

矩形板计算力矩按式 (83) 计算:

$$M_s = \max \{ |M_X|, |M_Y| \} \quad \dots\dots\dots (83)$$

式中  $|M_X|$ 、 $|M_Y|$  按式 (84)、式 (85) 计算:

$$|M_X| = C_X \sigma_{b \max} b^2 \quad \dots\dots\dots (84)$$

$$|M_Y| = C_Y \sigma_{b \max} l^2 \quad \dots\dots\dots (85)$$

其中系数  $C_X$ 、 $C_Y$  按表 29 选取。

表 29 系数  $C_X$ 、 $C_Y$  计算表

$b/l$	$C_X$	$C_Y$	$b/l$	$C_X$	$C_Y$	$b/l$	$C_X$	$C_Y$	$b/l$	$C_X$	$C_Y$
0	0.500	0	0.8	-0.173	0.075	1.6	-0.0485	0.126	2.4	-0.0217	0.132
0.1	0.500	0.0000	0.9	-0.142	0.0872	1.7	-0.0430	0.127	2.5	-0.0200	0.133
0.2	0.490	0.0006	1.0	-0.118	0.0972	1.8	-0.0384	0.129	2.6	-0.0185	0.133
0.3	-0.448	0.0051	1.1	-0.0995	0.105	1.9	-0.0345	0.130	2.7	-0.0171	0.133
0.4	-0.385	0.0151	1.2	-0.0846	0.112	2.0	-0.0312	0.130	2.8	-0.0159	0.133
0.5	-0.319	0.0293	1.3	-0.0726	0.116	2.1	-0.0283	0.131	2.9	-0.0149	0.133
0.6	-0.260	0.0453	1.4	-0.0629	0.120	2.2	-0.0258	0.132	3.0	-0.0139	0.133
0.7	-0.212	0.0610	1.5	-0.0550	0.123	2.3	-0.0236	0.132	—	—	—

注： $l$  为两相邻筋板最大外侧间距。

6.16.2 地脚螺栓

地脚螺栓承受的最大拉应力按式 (86) 计算：

$$\sigma_B = \begin{cases} \frac{M_w^{0-0}}{Z_b} \frac{m_{\min} g}{A_b} \\ \frac{M_E^{0-0} + 0.25 M_w^{0-0}}{Z_b} \frac{m_0 g - F_v^{0-0}}{A_b} \end{cases} \quad \text{取二者中较大值} \quad (86)$$

式中：

- $F_v^{0-0}$ ——0-0 截面处垂直地震力，仅在最大弯矩为地震弯矩参与组合时计入此项，N；
- $\sigma_B$ ——地脚螺栓承受的最大拉应力，MPa；
- $A_b$ ——基础环面积， $\text{mm}^2$ ，按式 (87) 计算；
- $Z_b$ ——基础环的截面模数， $\text{mm}^3$ ，按式 (88) 计算。

$$A_b = \frac{\pi}{4} (D_{ob}^2 - D_{ib}^2) \quad (87)$$

$$Z_b = \frac{\pi (D_{ob}^4 - D_{ib}^4)}{32 D_{ob}} \quad (88)$$

当  $\sigma_B \leq 0$  时，料仓可自身稳定，但为了固定料仓位置，仍应视具体情况，设置一定的地脚螺栓。  
当  $\sigma_B > 0$  时，料仓必须设置地脚螺栓。地脚螺栓小径按式 (89) 计算：

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \sigma_B A_b}{\pi n [\sigma]_{bt}}} + C_2 \quad (89)$$

式中：

- $d_1$ ——地脚螺栓螺纹小径，mm；
- $C_2$ ——地脚螺栓腐蚀裕量，mm；

$n$ ——地脚螺栓个数，一般取 4 的倍数，对小直径料仓，可取  $n=6$ ；

$[\sigma]_{bt}$ ——地脚螺栓材料的许用应力，MPa。

### 6.10.3 筋板

筋板压应力按式 (90) 计算：

$$\sigma_G = \frac{F}{n_1 \delta_G l_2} \quad (90)$$

式中：

$\sigma_G$ ——筋板的压应力，MPa；

$F$ ——一个地脚螺栓承受的最大拉力，N，按式 (91) 计算；

$n_1$ ——对应于一个地脚螺栓的筋板个数；

$l_2$ ——筋板宽度，mm；

$\delta_G$ ——筋板厚度，mm。

$$F = \frac{\sigma_B A_b}{n} \quad (91)$$

筋板的许用压应力按式 (92) 或式 (93) 计算：

当  $\lambda \leq \lambda_c$  时：

$$[\sigma]_c = \frac{\left[ 1 - 0.4 \left( \frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^2 \right] [\sigma]_G}{\nu} \quad (92)$$

当  $\lambda > \lambda_c$  时：

$$[\sigma]_c = \frac{0.277 [\sigma]_G}{(\lambda / \lambda_c)^2} \quad (93)$$

式中：

$[\sigma]_c$ ——筋板的许用压应力，MPa；

$\lambda$ ——细长比，按式 (94) 计算，且不大于 250；

$i$ ——回转半径，对长方形截面的筋板取  $0.289 \delta_G$ ，mm；

$l_k$ ——筋板长度，mm；

$\nu$ ——系数，按式 (95) 计算；

$\lambda_c$ ——临界细长比，按式 (96) 计算；

$E$ ——钢板材料的弹性模量，MPa；

$[\sigma]_G$ ——筋板材料的许用应力，MPa。

$$\lambda = \frac{0.5 l_k}{i} \quad (94)$$

$$\nu = 1.5 + \frac{2}{3} \left( \frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^2 \quad (95)$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6 [\sigma]_G}} \quad (96)$$



筋板的压应力等于或小于许用压应力, 即  $\sigma_G \leq [\sigma]_G$ 。但  $\delta_G$  一般不小于基础环厚度的 2/3。

#### 6.16.4 盖板

6.16.4.1 分块盖板最大应力按式(97)或式(98)计算:

无垫板时:

$$\sigma_z = \frac{Fl_3}{(l_2 - d_3)\delta_c^2} \dots\dots\dots (97)$$

有垫板时:

$$\sigma_z = \frac{Fl_3}{(l_2 - d_3)\delta_z^2 + (l_4 - d_7)\delta_z^2} \quad (98)$$

式中:

 $\sigma_z$ ——盖板的最大应力, MPa;

$d_2$ ——垫板上的地脚螺栓孔直径, mm;

$d_3$ ——盖板上的地脚螺栓孔直径, mm;

 $l_2$ ——筋板长度, mm;

$l_3$ ——筋板内侧间距, mm;

 $l_4$ ——垫板宽度, mm;

$\delta_c$ ——盖板厚度，一般分块厚度不小于基础环的厚度，mm；

 $\delta_z$ ——垫板厚度, mm。

6.16.4.2 环形盖板的最大应力按式(99)或式(100)计算:

无垫板时:

$$\sigma_z = \frac{3Fl_3}{4(l_2 - d_3)\delta_c^2} \quad (99)$$

有垫板时:

$$\sigma_2 = \frac{3Fl_3}{4(l_2 - d_3)\delta_c^2 + 4(l_4 - d_7)\delta_7^2} \quad (100)$$

式中:

$\sigma_z$ —— 环形盖板最大应力, MPa。

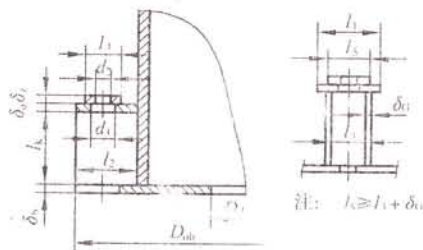


图 16 地脚螺栓座尺寸

一般环形盖板厚度不小于基础环厚度。

盖板最大应力应等于或小于盖板材料的许用应力。

## 6.17 仓壳圆筒与裙座连接焊缝

### 6.17.1 仓壳圆筒与裙座搭接焊接接头

J-J 截面处 (见图 17) 搭接焊接接头的剪应力按式 (101) 或式 (102) 校核:

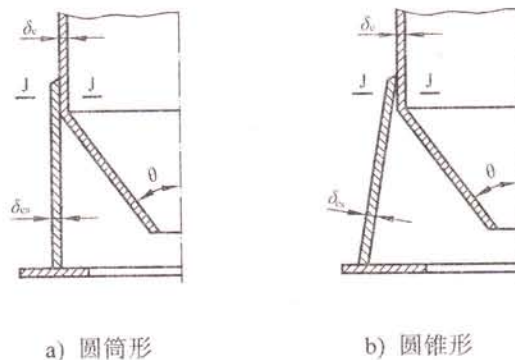


图 17 仓壳圆筒与裙座搭接焊接接头示意图

$$\frac{M_{\max}^{J-J}}{Z_w} + \frac{m_o^{J-J} g + F_v^{J-J}}{A_w} \leq 0.8K[\sigma]_w^t \quad (101)$$

$$\frac{0.3M_w^{J-J} + M_c}{Z_w} + \frac{m_{\max}^{J-J} g}{A_w} \leq 0.8 \times 0.9K\sigma_s \quad (102)$$

其中  $F_v^{J-J}$  仅在最大弯矩为地震弯矩参与组合时计入此项。

式中:

$A_w$  —— 焊接接头抗剪断面面积, 按式 (103) 计算,  $\text{mm}^2$ ;

$D_{ot}$  —— 裙座壳顶部截面外直径,  $\text{mm}$ ;

$F_v^{J-J}$  —— 搭接焊接接头处的垂直地震力,  $\text{N}$ ;

$M_{\max}^{J-J}$  —— 搭接焊接接头处的最大弯矩,  $\text{N}\cdot\text{mm}$ ;

$M_w^{J-J}$  —— 搭接焊接接头处的风弯矩,  $\text{N}\cdot\text{mm}$ ;

$m_{\max}^{J-J}$  —— 水压试验时 (或满仓时) 料仓最大质量 (不计裙座质量),  $\text{kg}$ ;

$m_o^{J-J}$  —— J-J 截面以上料仓操作质量,  $\text{kg}$ ;

$Z_w$  —— 焊接接头抗剪截面模数, 按式 (104) 计算,  $\text{mm}^3$ ;

$[\sigma]_w^t$  —— 设计温度下焊接接头的许用应力, 取两侧母材许用应力的较小者,  $\text{MPa}$ 。

$$A_w = 0.7\pi D_{ot} \delta_{cs} \quad (103)$$

$$Z_w = 0.55D_{ot}^2 \delta_{cs} \quad (104)$$

### 6.17.2 仓壳圆筒与裙座对接焊接接头

对接焊接接头 J-J 截面处 (见图 18) 的拉应力按式 (105) 校核:

$$\frac{4M_{\max}^{J-J}}{\pi D_{it}^2 \delta_{cs}} - \frac{m_o^{J-J} g - F_v^{J-J}}{\pi D_{it} \delta_{cs}} \leq 0.6K[\sigma]_w^t \quad (105)$$

其中  $F_v^{J-J}$  仅在最大弯矩为地震弯矩参与组合时计入此项。

式中:

$D_{it}$ ——裙座顶截面的内直径, mm。

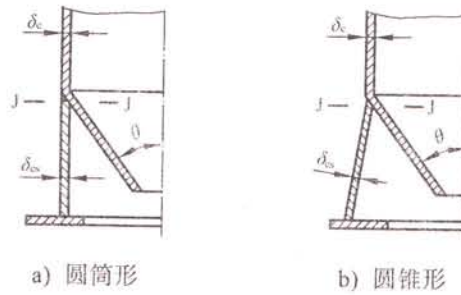


图 18 仓壳圆筒与裙座对接焊接接头示意图

#### 6.18 耳式支座

耳式支座按 JB/T 4712.3 选用及校核。

#### 6.19 环座式支座

##### 6.19.1 刚性环耳式支座组合截面的惯性矩

刚性环、垫板与料仓筒体的组合截面见图 19。

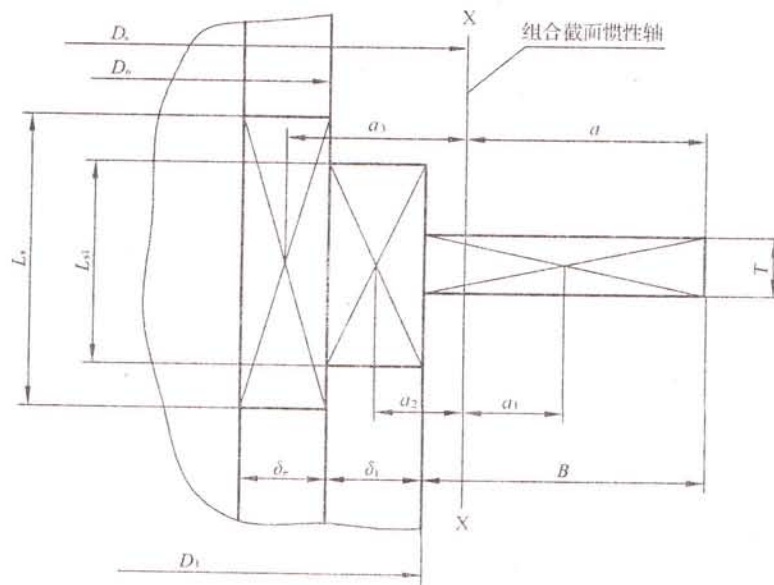


图 19 刚性环、垫板与壳体的组合截面图

料仓筒体和支座垫板圆筒的有效加强宽度按式 (106) 及式 (107) 计算:



$$L_s = 2 \times 0.55 \sqrt{D_o \delta_e} = 1.1 \sqrt{D_o \delta_e} \quad \dots\dots\dots (106)$$

$$L_{si} = 2 \times 0.55 \sqrt{D_i \delta_i} = 1.1 \sqrt{D_i \delta_i} \quad \dots\dots\dots (107)$$

式中:

$L_s$ ——料仓筒体有效加强长度, mm;

$L_{si}$ ——垫板圆筒有效加强长度, mm;

$D_i$ ——垫板圆筒外径, mm;

$\delta_i$ ——垫板圆筒有效厚度, mm。

组合截面的惯性轴 X-X 距刚性环外缘的距离  $a$  按式 (108) 计算:

$$a = \frac{B \cdot T \cdot \frac{1}{2} B + \delta_i \cdot L_{si} (B + \frac{1}{2} \delta_i) + \delta_e \cdot L_s (B + \delta_i + \frac{1}{2} \delta_e)}{B \cdot T + \delta_i \cdot L_{si} + \delta_e \cdot L_s} \quad \dots\dots\dots (108)$$

式中:

$a$ ——组合截面的惯性轴 X-X 距刚性环外缘的距离, mm;

$B$ ——刚性环宽度, mm;

$T$ ——刚性环厚度, mm。

组合截面的惯性矩按式 (109) 计算:

$$I = \sum I_i = I_1 + I_2 + I_3 \quad \dots\dots\dots (109)$$

式中:

$I$ ——组合截面的惯性矩,  $\text{mm}^4$ ;

$I_1$ ——刚性环对于惯性轴 X-X 的惯性矩, 按式 (110) 计算,  $\text{mm}^4$ ;

$a_1$ ——刚性环中心对于惯性轴 X-X 的距离, mm;

$I_2$ ——垫板有效加强段对于惯性轴 X-X 的惯性矩, 按式 (111) 计算,  $\text{mm}^4$ ;

$a_2$ ——垫板中心对于惯性轴 X-X 的距离, mm;

$I_3$ ——仓壳圆筒有效加强段对于惯性轴 X-X 的惯性矩, 按式 (112) 计算,  $\text{mm}^4$ ;

$a_3$ ——仓壳圆筒中心对于惯性轴 X-X 的距离, mm。

$$I_1 = \frac{1}{12} B^3 T + B \cdot T \cdot a_1^2 \quad \dots\dots\dots (110)$$

$$I_2 = \frac{1}{12} \delta_i^3 L_{si} + \delta_i \cdot L_{si} \cdot a_2^2 \quad \dots\dots\dots (111)$$

$$I_3 = \frac{1}{12} \delta_e^3 L_s + \delta_e \cdot L_s \cdot a_3^2 \quad \dots\dots\dots (112)$$

## 6.19.2 支座处作用于刚性环上的力

支座处作用于刚性环上的力  $F$  (见图 20) 按式 (113) 计算:

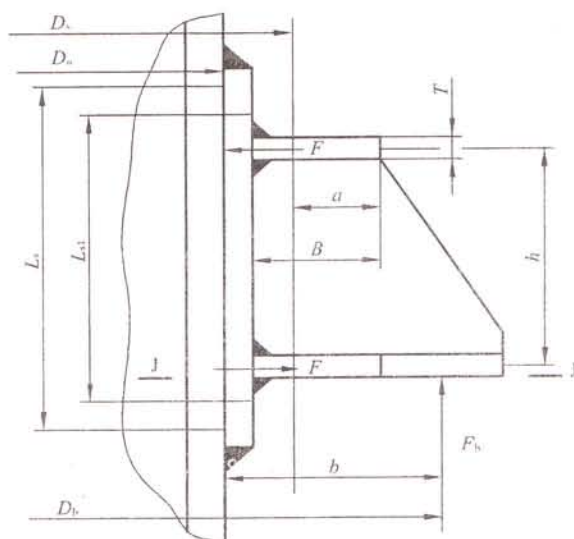


图 20 支座及刚性环上的作用力图

$$F = \frac{F_b \cdot b}{h} \quad (113)$$

式中:

$F$ ——支座处作用于刚性环上的力, N;

$b$ ——反力  $F_b$  至壳体的力臂。设有垫板时, 至仓壳圆筒的外表面; 不设垫板时, 至仓壳圆筒截面的中心, mm;

$h$ ——耳式支座的高度, mm;

$F_b$ ——作用于支座上的反力, 按式 (114) 计算, N;

$F_{b1}$ ——作用于一个支座上的反力, 按式 (115) 计算, N;

$$F_b = nF_{b1} \quad (114)$$

$$F_{b1} = \frac{4M_{\max}^{J-J}}{nD_b} + \frac{m_o g}{n} \quad (115)$$

$M_{\max}^{J-J}$ ——支座底部截面 J-J 处最大弯矩, N·mm;

$n$ ——支座的数量;

$D_b$ ——反力  $F_b$  作用点的直径, mm。

### 6.19.3 刚性环组合断面上的内力和应力

刚性环组合断面上的内力和应力分布见图 21。

#### 6.19.3.1 支座处应力校核

支座处内力矩按式 (116) 计算:

$$M_{r1} = -\frac{1}{2}F\left(\frac{1}{\theta} - \cot\theta\right)\frac{D_s}{2} \quad (116)$$

式中:

$D_s$ ——组合截面惯性轴直径, mm;

$M_{r1}$ —— 支座处内力矩, N·mm;

$\theta$ —— 两支座之间半夹角, rad。

4 个支座时,  $\theta = \frac{\pi}{4}$ 。

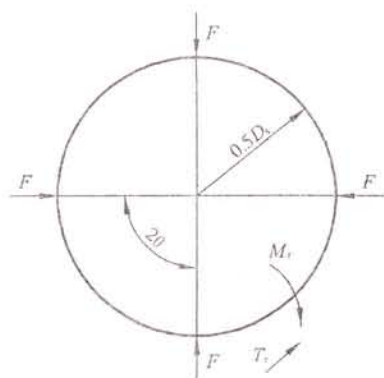


图 21 刚性环组合断面上的力和力矩

支座处周向力按式 (117) 计算:

$$T_{r1} = \frac{1}{2} F \cot \theta \quad \dots\dots\dots (117)$$

式中:

$T_{r1}$ —— 支座处圆周力, N。

支座处组合应力按式 (118) 计算:

$$\sigma_{r1} = \frac{|M_{r1}| \times a}{I} + \frac{T_{r1}}{A} \quad \dots\dots\dots (118)$$

式中:

$\sigma_{r1}$ —— 支座处组合应力, MPa;

$A$ —— 组合截面的面积,  $A = B \times T + \delta_1 L_{s1} + \delta_c L_s$ , mm<sup>2</sup>。

支座处组合应力按式 (119) 校核:

$$\sigma_{r1} < [\sigma]^t \quad \dots\dots\dots (119)$$

### 6.19.3.2 两支座中间处应力校核

两支座中间处内力矩按式 (120) 计算:

$$M_{r2} = \frac{1}{2} F \left( \frac{1}{\sin \theta} - \frac{1}{\theta} \right) \frac{D_s}{2} \quad \dots\dots\dots (120)$$

式中:

$M_{r2}$ —— 两支座中间处内力矩, N·mm。

两支座中间处周向力按式 (121) 计算:

$$T_{r2} = \frac{1}{2} F \frac{1}{\sin \theta} \quad \dots\dots\dots (121)$$

式中:

$T_{r2}$ —— 两支座中间处圆周力, N。



两支座中间处组合应力按式 (122) 计算:

$$\sigma_{r2} = \frac{|M_{r2}| \times a}{I} + \frac{T_{r2}}{A} \quad \dots\dots\dots (122)$$

式中:

$\sigma_{r2}$ ——两支座中间处组合应力, MPa。

支座处组合应力按式 (123) 校核:

$$\sigma_{r2} < [\sigma]^t \quad \dots\dots\dots (123)$$

## 7 钢制料仓的制造、检验与验收

### 7.1 总则

7.1.1 钢制圆筒形固体料仓的制造、检验和验收除符合本章的规定外, 还应符合图样的要求。

7.1.2 料仓在预制、安装、运输及存放过程中, 为保持料仓内表面光洁, 应采取有效措施防止内表面的划伤、电弧擦伤、腐蚀和铁锈污染, 同时保护好料仓内件表面和法兰密封面。

### 7.2 材料在下料前的检查

7.2.1 料仓用钢材须符合第 5 章及图样要求, 下料前应按钢材质量证明书进行核对, 并对钢材外观逐张进行检查。

7.2.2 料仓仓壳材料表面不得有裂纹、伤痕、折叠、压坑、锈蚀及分层等缺陷。发现缺陷应予以清除, 划伤必须打磨光滑。修磨后的厚度不得小于设计厚度。

7.2.3 经检验合格的钢板应妥善保护其表面。

7.2.4 需要在抛光的板面上做标记时, 宜用易擦洗的颜料作标记, 不得使用硬印标记。

7.2.5 用于高合金钢焊接的氩气纯度不得低于 99.9%, 含水量不得大于 50mg/m<sup>3</sup>。

### 7.3 加工成形

7.3.1 料仓现场预制时应设专用作业区, 并应有防风、防雨设施, 在有抛光要求时, 还需要可靠的防尘和其他防护措施。

7.3.2 不锈钢板预制时, 在加工过程中应有防止板面划伤的有效措施。

7.3.3 易变形的预制件应采取加固措施或放置在胎架上保管和运输。

7.3.4 预制前应根据设计图样及材料规格绘制排版图, 且应符合下列要求:

a) 相邻筒节的纵向焊缝之间的距离及仓壳顶、仓壳圆筒、仓壳锥体的拼接焊缝与相邻筒节的纵向焊缝之间的距离不应小于筒节名义厚度  $\delta_n$  的 3 倍, 且不得小于 100mm;

b) 裙座的纵向焊缝与相接筒节纵向焊缝和基础环的拼接焊缝之间的距离不宜小于 100mm。

7.3.5 预制焊缝坡口的形式应符合图样要求, 或参照附录 A 中的表 A.1 的形式及 GB/T 985 的规定。

7.3.6 钢板焊接坡口加工表面应平滑, 不得有夹渣、分层及裂纹等缺陷。

7.3.7 仓壳顶由壳板和中心圆板对接组成时, 任意两条不相交焊缝之间的最小距离不应小于壳顶名义厚度  $\delta_n$  的 3 倍, 且不得小于 100mm (见图 22)。

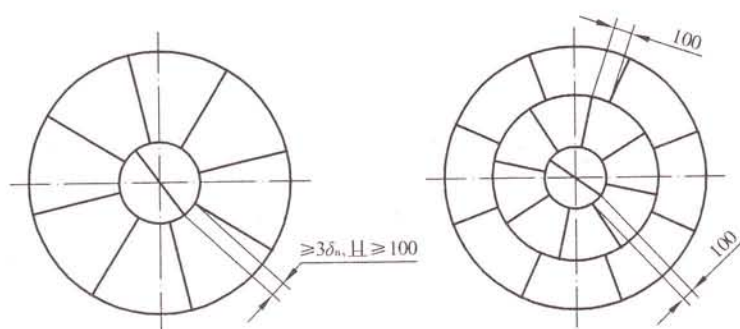


图 22 封头拼焊焊缝

7.3.8 仓壳的各类壳板预制成形后,应用弦长不小于 1000mm 的样板进行检查(见图 23),其间隙不得大于 4mm。

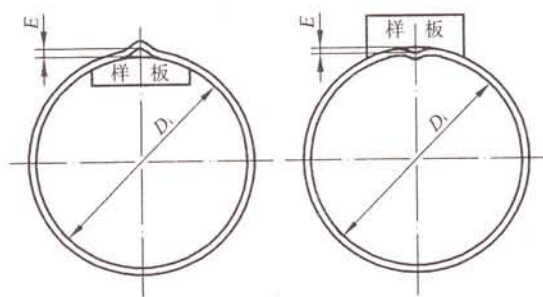


图 23 焊接接头环向形成的棱角

7.3.9 仓壳圆筒、仓壳锥体焊后形成的棱角  $E$  (见图 24),用直尺进行检查,其  $E$  值不得大于 5mm。

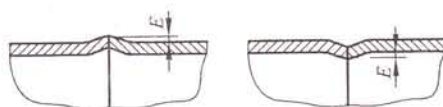


图 24 焊接接头轴向形成的棱角

7.3.10 包边角钢及加强圈预制后的圆度应用弦长不小于 1000mm 的样板进行检查,其间隙不得大于 3mm。其平面度不得超过该预制件内直径的 0.2%,且不大于 6mm。

#### 7.4 组装

##### 7.4.1 料仓组装的一般要求

7.4.1.1 料仓组装前应编制组装工艺方案。

7.4.1.2 现场组装料仓的预制件,必须有制造单位提供的产品质量证明书和产品合格证。产品质量合格证明书上至少应包括材料的机械性能、化学成分、规格、尺寸、无损检测报告、修补记录及排版图等内容。

7.4.1.3 料仓组装前,应根据设计图样及装箱单对仓壳壳板及零部件等按下列项目进行验收,并填写清点验收记录:

a) 仓壳壳板的外形尺寸(包括弧度)及开孔规格;

b) 零部件的规格、尺寸及数量。

7.4.1.4 料仓组装前，应按基础设计图样的规定对基础进行验收，合格后方可进行组装。

7.4.2 仓壳的组装

7.4.2.1 仓壳分段组装时，宜在内外壁（抛光表面除外）划出相隔 90° 的 4 条纵向组装线和基准圆周线，用于整体组装的安装找正和装设内件的依据。此线应保留到料仓验收以后。

7.4.2.2 包边型（角）钢与筒体组对时，型钢伸出壁板的高度偏差不得大于 4mm。

7.4.2.3 料仓各零部件几何尺寸允许偏差应符合表 30 的规定（见图 25）。

表 30 料仓各零部件几何尺寸允许偏差 mm

检 验 项 目		允 许 偏 差
仓壳顶、仓壳圆筒、仓壳锥体、裙座筒体圆度		$< 1.0\% D_i$ ，且不大于 30
表面局部凹凸量 $b_1$	仓壳顶	5
	仓壳锥体	3
高度允差 $\Delta H$	仓壳顶、仓壳圆筒、仓壳锥体	$< 0.3\%$ 设计长度，且不大于 30
	料仓总高度	$< 0.3\%$ 设计长度，且不大于 50
仓壳筒节、裙座筒节对口错边量 $b$		$b \leq 20\% \delta_n$ ，且不大于 3
仓壳筒体直线度		$\leq 0.15\%$ 名义总高度，且不大于 30
裙座基础环与裙座圆筒的垂直度		$\leq 0.1\%$ 基础环外径，且不大于 5
带整体加强环耳式支座的底座环与筒体的垂直度		$\leq 0.1\%$ 底座环外径，且不大于 5
裙座基础环上地脚螺栓中心圆直径允差、相邻两孔弦长允差和任意两孔弦长允差		$\pm 2$

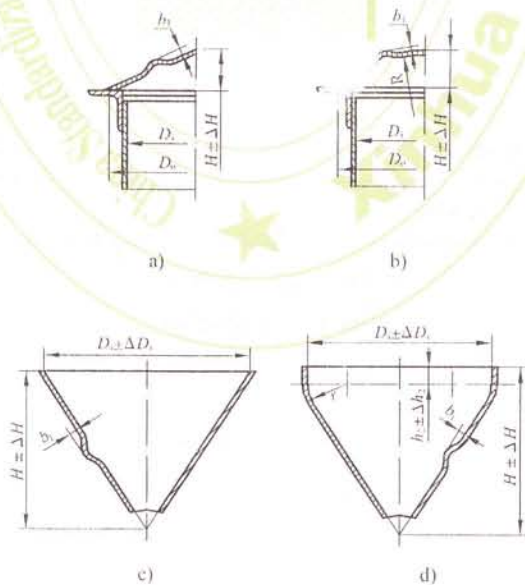


图 25 料仓各零部件几何尺寸允许偏差



7.4.3 接管和法兰的组装按 GB 150 中的要求。

7.5 焊接

7.5.1 料仓施焊前,应根据图样要求及施焊单位评定合格的焊接工艺,制定焊接工艺规程,焊工必须严格按焊接工艺规程施焊。

7.5.2 焊条、焊剂及其他焊接材料的贮存库应保持干燥,相对湿度不大于 60%。

7.5.3 当焊接环境出现下列任一情况时,且无有效防护措施时,禁止施焊:

- a) 手工焊时风速大于 10m/s;
- b) 气体保护焊时风速大于 2m/s;
- c) 相对湿度大于 90%;
- d) 雨、雪环境。

7.5.4 仓壳组对时,定位焊件及固定卡具的焊接,所用的焊接材料及工艺措施应与筒体焊接要求相同。在高合金钢料仓上使用碳钢吊耳、卡具时,应加与母材相同的垫板。垫板与仓壳的焊接工艺要求与仓壳焊接要求相同。拆除时不得损坏仓壳母材,焊瘤应磨平。

7.5.5 定位焊不得在焊接坡口外引弧,定位焊引起的缺陷应清除,不得伤害已抛光或需抛光的表面。

7.5.6 焊接接头检验

7.5.6.1 焊接接头均应进行外观检验。焊接接头表面必须清理干净,焊接接头表面不得有裂纹、气孔、弧坑和夹渣等缺陷,并不得保留有熔渣及飞溅物。

7.5.6.2 对内表面不要求打磨或抛光的仓壳,对接接头余高  $e_1$ 、 $e_2$  应符合表 31 和图 26 的规定。

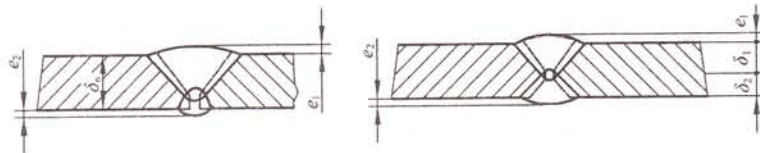


图 26 焊接接头的余高

表 31 对接接头余高  $e_1$ 、 $e_2$

mm

标准抗拉强度下限值 $R_m > 540\text{MPa}$ 的钢材				其他钢材			
单面坡口		双面坡口		单面坡口		双面坡口	
$e_1$	$e_2$	$e_1$	$e_2$	$e_1$	$e_2$	$e_1$	$e_2$
$0 \sim 10\% \delta_s$ 且 $\leq 3$	$\leq 1.5$	$0 \sim 10\% \delta_1$ 且 $\leq 3$	$0 \sim 10\% \delta_2$ 且 $\leq 3$	$0 \sim 15\% \delta_s$ 且 $\leq 3$	$\leq 1.5$	$0 \sim 15\% \delta_1$ 且 $\leq 3$	$0 \sim 15\% \delta_2$ 且 $\leq 3$
注:表中百分数计算值小于 1.5 时,按 1.5 计。							

7.5.6.3 咬边深度不得大于 0.5mm,焊接接头两边的咬边总长度不得超过该焊缝全长的 10%。

7.5.6.4 料仓上凡被补强圈、加强圈、裙座、垫板等覆盖的焊接接头均应在覆盖前进行检验,合格后方可组焊。

7.5.6.5 经检查不合格的焊接接头必须返修,返修后必须重新检验,并将返修情况记入交工资料。

## 7.6 无损检测

7.6.1 料仓的焊接接头,经形状尺寸检查及外观检查合格后,再对焊接接头进行射线或可记录的超声无损检测。接管与仓壳连接的角焊缝等部位,应进行磁粉或渗透检测。无损检测应由取得资格证书的无损检测人员担任相应的检测。

焊接接头的无损检测应按 JB/T 4730.1~4730.6 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) 焊接接头的可记录的超声检测技术等级为 B 级;质量等级Ⅱ级合格;
- c) 磁粉或渗透检测质量等级Ⅰ级合格。

7.6.2 料仓焊接接头的内部质量检验及合格标准按设计要求进行。焊接接头射线检测发现缺陷超标时,应在缺陷的延伸方向或可疑部位加倍做补充检测,如补充检测仍不合格,则该焊接接头或其他可疑部位的焊接接头应全部进行检测。

7.6.3 设计图样中对仓壳焊接接头的无损检测无特殊要求时,仓壳焊接接头无损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。

## 7.7 表面处理

7.7.1 所有与物料接触的焊接接头,其表面均应打磨光滑并与母材平齐。打磨应在焊接接头质量检查合格后进行。

7.7.2 要求抛光的仓壳内表面,抛光部位和表面粗糙度应符合设计图样要求。

7.7.3 设计图样无规定时,盛装粉料的仓壳锥体内侧焊接接头,其表面应进行打磨并与母材齐平。

7.7.4 高合金钢料仓的酸洗钝化应在磨光与抛光后进行。经酸洗钝化的表面不得有黑色流痕及铁红锈痕,表面金属光泽应一致,并防止酸洗过蚀和不足。

7.7.5 经酸洗钝化的料仓,应立即用氯离子含量小于  $25 \times 10^{-6}$  的清水清洗,用试纸检验呈中性为合格。

7.7.6 经清洗的料仓,应用干燥无油的压缩空气或其他惰性气体将表面吹干。

7.7.7 料仓的碳钢制零部件除设计另有规定外,应除锈并涂以防锈剂(漆)。

## 7.8 试验

7.8.1 料仓制造完成后,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。

7.8.2 料仓的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。

7.8.3 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。奥氏体不锈钢制料仓用水进行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。

7.8.4 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。

### 7.8.5 盛水试验及方法

料仓根据图样要求需要作盛水试验时,试验前应将焊接接头的外表面清除干净,并使之干燥。

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。

#### 7.8.6 液压试验及方法

7.8.6.1 试验压力按图样规定。

7.8.6.2 试验液体的温度应不低于 5℃。

7.8.6.3 液压试验方法:

- a) 试验时料仓的顶部应设排气口,进液时打开排气口,以确保料仓内空气排净。试验过程中,应保持料仓外表面干燥;
- b) 试验时压力应缓慢上升,达到规定试验压力后,应保持 30min 以上,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,应将液体排尽并用压缩空气将内部吹干。

#### 7.8.7 气压试验及方法

7.8.7.1 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,料仓不能安全的盛水;
- b) 料仓内部不容易干燥,运行中不允许残留试验液体。

7.8.7.2 气压试验应有安全措施。

7.8.7.3 气压试验压力应按图样规定。

7.8.7.4 气压试验使用干燥的压缩气体,试验时介质温度不得低于 5℃。

7.8.7.5 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 5min,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 10min 后再次进行泄漏检查,如有泄漏,修补后重做试验。

#### 7.8.8 气密性试验及方法

对图样规定有气密性试验要求的料仓,需经液压试验合格后再进行气密性试验。气密性试验压力应按图样规定。气密性试验前,料仓上的安全附件、阀类及全部内件均应安装齐全,并经检查合格。试验使用干燥的压缩气体,气体温度不应低于 5℃。

气密性试验方法:气密性试验时,压力应缓慢上升,达到规定试验压力后保压 10min,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。小型料仓做气密性试验时也可浸入水中检查。

#### 7.8.9 煤油渗漏试验及方法

7.8.9.1 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。

7.8.9.2 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。

7.8.9.3 对于有保温夹套的料仓,宜先对仓壳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,应进行料仓承受外压的稳定验算。

#### 7.9 验收

7.9.1 料仓制造完成后,应由制造单位(和建设单位)对料仓进行检查和验收。

7.9.2 验收时,制造单位需提供的质量证明文件应包括:

- a) 产品合格证;
- b) 竣工图;

## c) 质量证明书, 其中应包括:

- 1) 材料合格证和质量证明书;
- 2) 几何尺寸检验记录;
- 3) 焊接接头质量检查报告 (包括返修记录);
- 4) 无损检测报告;

必要时还需提供以下文件:

- 5) 设计变更通知书;
- 6) 内表面抛光质量检查结果报告;
- 7) 酸洗钝化检查报告;
- 8) 盛水试验、压力试验、气密性试验或煤油试漏等检查结果报告。

7.9.3 铭牌与标志。凡按本部分制造的料仓, 应设置铭牌。铭牌内容按图样要求。

7.9.4 制造单位制造的料仓, 其油漆、包装、运输按 JB/T 4711 的有关规定。

7.9.5 现场制造的料仓, 其油漆及表面处理按图样要求进行。

## 8 铝制料仓的制造、检验与验收

### 8.1 总则

铝及铝合金制料仓的制造、检验与验收应符合本章的规定外, 其余按第 7 章执行。

### 8.2 材料在下料前的检查

8.2.1 铝制料仓用铝材须符合第 5 章及图样要求, 下料前应按铝材质量证明书进行核对, 并对铝材外观逐张进行检查。

8.2.2 铝制料仓用铝材表面不得有裂纹、伤痕、折叠、压坑、锈蚀及分层等缺陷。发现缺陷, 宜采取机械打磨或化学处理的方法进行清除, 清除或修磨后的表面不得有肉眼看出的起伏变化, 修磨后的厚度不得小于设计厚度。

8.2.3 铝及铝合金材料的表面不得有水迹和其他污渍, 发现水迹或表面受潮, 须使其完全干燥后, 方能贮存和使用。

8.2.4 铝材在运输和制作中, 应避免与其他金属接触, 以免造成表面划伤或产生印迹。制作中更应严格保护其制件的表面不被损伤。

8.2.5 储存铝材不应邻近水源、门窗、碱、硝酸盐及其他酸性物质, 绝不允许室外储放。铝材要尽量采用包装箱来储放, 经检验合格的铝材及零部件应分类并按规格尺寸分别放置在垫木上, 严禁与碳钢材料混堆和接触。

8.2.6 用于铝及铝合金材料焊接的氩气纯度不得低于 99.96%, 含水量不得大于  $50\text{mg/m}^3$ 。钨极氩弧焊宜采用铈钨棒。

### 8.3 加工成形

铝制料仓的预制和加工成形应参照 JB/T 4734, 10.2 中的相应规定执行。

### 8.4 焊接

铝制料仓的焊接除符合本章的规定外, 其余应参照 JB/T 4734, 10.3 中的相应规定执行。

#### 8.4.1 焊接材料的选用应符合下列要求:

- a) 焊接铝镁合金时, 宜选用含镁量等于或稍高于母材的焊条;



- b) 焊接铝锰合金时, 宜选用与母材化学成分近似的焊条, 或铝硅合金焊条;
- c) 焊接纯铝时, 宜选用纯度比母材稍高的焊条, 且焊条中 Fe / Si 应大于 1;
- d) 母材的切条也可作为焊接填充材料。

8.4.2 焊条及坡口表面的清洗

8.4.2.1 焊条、垫板、坡口及坡口两侧各 50mm 范围内的表面应进行清洗, 一般的清洗方法见表 32。油污应用无机非可燃清洗剂去除; 氧化膜应采用化学或机械方法去除。经化学清洗后不得有水迹、碱迹, 否则应重新清洗。

8.4.2.2 清洗好的焊件在焊接前应防止沾污, 应 8h 内施焊, 否则应再次清洗。

8.4.3 焊件组对定位焊时, 选用的焊接材料及焊接工艺措施应与正式焊接要求相同, 定位焊缝如发现裂纹缺陷应清除后再焊。

点焊应在施焊的背面进行, 应不超过坡口深度的 2/3, 超过时施焊前应铲薄。

表 32 焊条、坡口表面的清洗方法

工序号	工 序 名 称		材 质		
			纯 铝 <sup>a</sup>	防锈铝	
1	除 油		用丙酮等有机溶剂清洗		
2	碱 洗	NaOH 溶液浓度, %	13~18	5~10	5~10
		温度, ℃	室温	50~60	50~60
		时间, min	10~16	1~5	4~5
3	冲 洗		清 水		
4	中和钝化	HNO <sub>3</sub> 溶液浓度, %	25~30		
		温度, ℃	室 温		
		时间, min	1~3		
5	冲 洗		清 水		
6	干 燥		无油压缩空气吹干或室温干燥		
<sup>a</sup> 碱洗时两种浓度碱液可任选其一。					

8.5 表面处理

8.5.1 内外表面机械损伤的修理。对表面严重的局部凹坑 (槽), 补焊后铲磨平整; 对表面轻微超差的局部损伤, 可用细砂纸或刮刀修整。

8.5.2 焊接变形的修复。对局部焊接变形的修复可采用机械方法、点或线加热急冷法、热加工法。不管采用何种方法修复, 均要注意材料的表面损伤。对加热急冷或热加工法的加热温度要严格控制。

8.5.3 设备焊接接头的整形。用不同形状的风铲头对不同部位的焊接接头进行整形。或用铣削工具代替风铲。还有用特殊的磨铝电动砂轮及旋转锉等整形方法。

8.5.4 对铝及铝合金料仓成品表面处理, 不但清洗在制造过程中表面粘附的油污、脏垢及施工中涂写的标记; 而且促使表面重新生成氧化膜, 使铝材受到保护。

## 附录 A

### (资料性附录)

### 固体料仓的结构

#### A.1 前言

本附录适用于钢制仓壳结构设计。对于铝制仓壳结构设计,除按本附录的规定外,还应参照 JB/T 4734 中附录 D “结构设计” 的规定。

#### A.2 仓壳圆筒的焊接接头结构

仓壳圆筒的对接接头的基本形式和尺寸应符合表 A.1 中的规定,或参照 GB/T 985 的规定执行。

#### A.3 仓壳圆筒的外加强形式

需要在仓壳圆筒外侧设置加强圈时,一般有以下几种形式,见图 A.1。使用较多的为图中 a)、b) 两种形式。

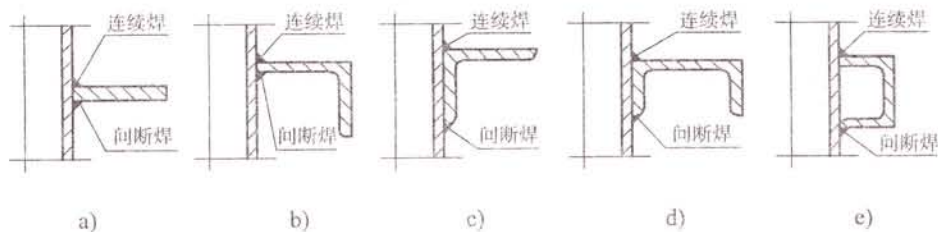


图 A.1 仓壳圆筒的外加强形式

#### A.4 料仓的仓壳顶形式

A.4.1 料仓的仓壳顶若采用锥顶时,有如图 A.2 中的几种形式。

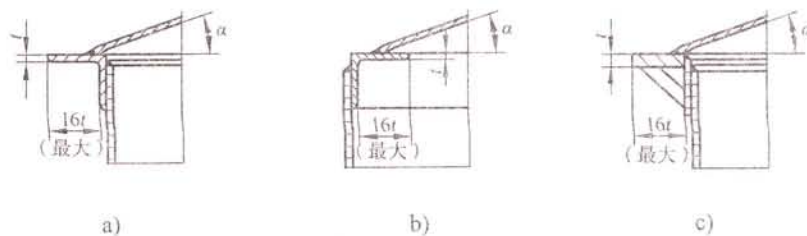


图 A.2 锥形仓壳顶结构形式

A.4.2 料仓的仓壳顶若采用拱顶时,见图 A.3 的形式。

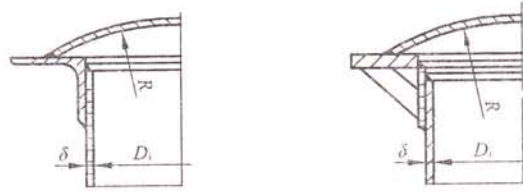


图 A.3 拱形仓壳顶结构形式

表 A.1 钢制料仓焊接常用坡口形式及尺寸 mm

序号	坡口名称	坡口形式	埋弧自动焊坡口尺寸			手工焊坡口尺寸			备注
				$\delta$			$\delta$		
1	I 形坡口		单面焊	$\delta$	3~10	单面焊	$\delta$	1~3	
				$b$	0~1		$b$	0~1.5	
			双面焊	$\delta$	6~20	双面焊	$\delta$	3~6	
				$b$	0~2.5		$b$	0~2.5	
2	Y 形坡口		$\delta$	10~24	24~30	$\delta$	3~26		
			$\alpha$	50°~80°	40°~80°	$\alpha$	40°~60°		
			$b$	0~2.5	0~2.5	$b$	0~3		
			$P$	5~8	6~10	$P$	1~4		
3	双 Y 形坡口		$\delta$	24~60		$\delta$	12~60		
			$\alpha$	50°~80°		$\alpha$	40°~60°		
			$b$	0~2.5		$b$	0~3		
			$P$	5~10		$P$	1~3		
4	I 形坡口 (T 型接头)		$\delta$	2~60		$\delta$	2~30		
			$b$	0~2		$b$	0~2		
5	带钝边 单边 V 形坡口		$\delta$	10~24		$\delta$	6~30		
			$\beta$	35°~50°		$\beta$	30°~50°		
			$b$	0~4		$b$	0~3		
			$P$	5~8		$P$	1~3		
6	带钝边 双单边 V 形坡口		$\delta$	10~40		$\delta$	20~40		
			$\beta$	40°~50°		$\beta$	40°~50°		
			$b$	0~2.5		$b$	0~3		
			$P$	3~5		$P$	1~3		
7	管座坡口		—	—		$\beta$	40°~50°		
			—	—		$b$	0~2		
			—	—		$\phi$	$\phi 76 \sim \phi 133$		

### A.5 料仓的仓壳锥体形式

采用下列形式的仓壳锥体,经计算,需要在仓壳圆筒外壁设置如 A.3 中的加强圈时,加强圈应设置在仓壳圆筒外壁与仓壳锥体相接的焊接接头附近。

A.5.1 仓壳锥体采用无折边的锥形封头时,常用图 A.4 中 a) 的形式。图 A.4 中 b) 的形式较少采用,一般用于直径小、重量轻的料仓。

A.5.2 仓壳锥体采用折边的锥形封头时,按图 A.5 的形式。

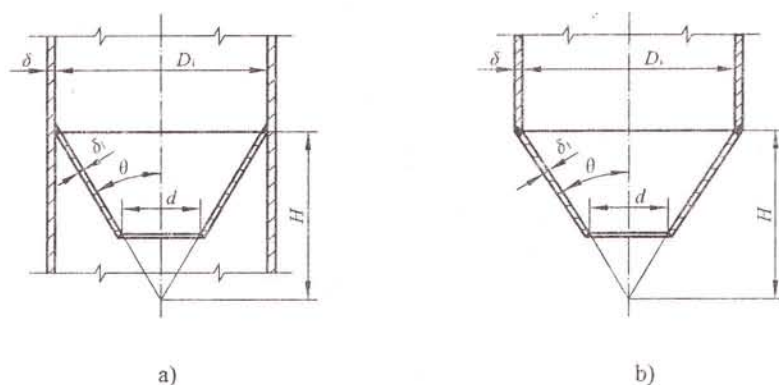


图 A.4 无折边的仓壳锥体形式

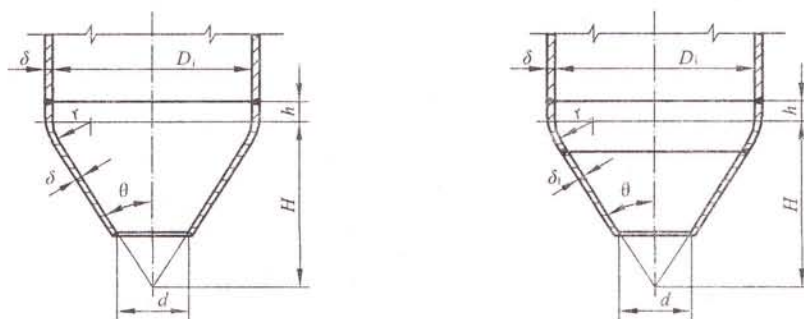


图 A.5 折边的仓壳锥体形式

### A.6 接管与仓壳的焊接结构

接管与仓壳的焊接结构,根据不同的使用场合,在表 A.1 推荐的结构中选用。

### A.7 细长接管加强结构

对于  $DN \leq 25\text{mm}$ , 伸出长度  $L \geq 100\text{mm}$ ,  $DN = 32\text{mm} \sim 50\text{mm}$ ,  $L \geq 150\text{mm}$  的任意方向接管,均应设置筋板予以加强。

A.7.1 采用角钢(角铝)作为细长接管的加撑时,见图 A.6。角钢(角铝)可按表 A.2 的规格选用。



表 A.2 支撑用角钢（角铝）规格 mm

接管尺寸DN	角钢（角铝）规格	H
20	∠25×25×3	20
25	∠25×25×3	20
32	∠36×36×3	20
40	∠36×36×4	30
50	∠45×45×4	30

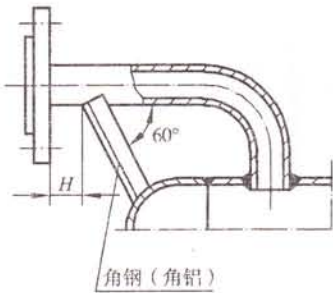


图 A.6 角钢（角铝）作为细长接管加强结构

A.7.2 采用扁钢（铝板）作为细长接管的加撑时，见图 A.7。

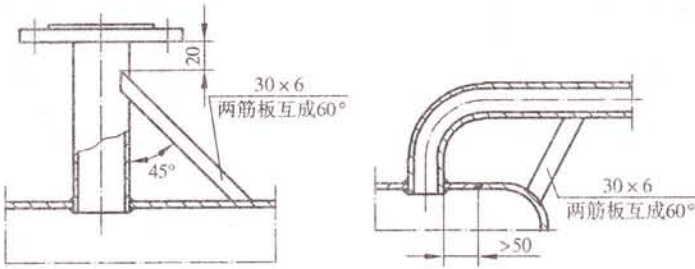


图 A.7 扁钢（铝板）作为细长接管加强结构

# NB/T 47003.2—2009 (JB/T 4735.2) 《固体料仓》

## 标准释义

### 前言

本部分是 NB/T 47003.2 的第 2 部分,是根据 1999 年全国锅炉压力容器标准化技术委员会《制修订标准项目计划》的安排,对 JB/T 4735—1997《钢制焊接常压容器》进行的修订,并将 JB/T 4735—1997 拆分为两个部分,本部分为“固体料仓”。

本部分依据 JB/T 4735—1997 实施以来所取得的经验,参照近期国际同类标准进行修订(主要有 JIS B 8511—1987《铝制圆筒形料仓结构》和 DIN 1055 Part 6—1987《结构的设计载荷》)。

本部分由 JB 4735《钢制焊接常压容器》标准工作组负责组织,成立了由甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司、中国纺织工业设计院、安徽省特种设备检测院等单位参加的标准编制组,在全国锅炉压力容器标准化技术委员会的指导下开展标准编制工作。

本部分编制工作于 1999 年 12 月 21 日在北京《钢制焊接常压容器》标准工作组成立会议上部署并做了工作分工。2000 年 9 月 6~9 日在大连进行了标准编制大纲的首次讨论。2003 年 1 月 6~8 日在北京对标准正文进行了全面讨论,经修改后形成标准正文,于 2006 年 4 月发出征求意见稿,广泛征求各界意见。2006 年 11 月 5~9 日在兰州召开标准征求意见汇总讨论会,并讨论形成标准释义稿。2007 年 4 月 13 日报全国锅炉压力容器标准化技术委员会固定式压力容器分会组织全体委员函审,2007 年 5 月 15 日函审通过。2007 年 8 月 10~12 日在北京对函审意见进行了汇总讨论,并形成报批稿。

钢制焊接常压容器标准工作组专家名单如下:

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。

本“标准释义”从理论、应用实践、工程经验、国内外现行标准理论基础对比等方面,介绍并解释了所修订的主要技术内容,还提供了一个设计计算例题,旨在帮助相关技术人员正确理解和使用本部分的各项规定和要求,有助于标准的宣贯和实施。

本“标准释义”由刘福录、万网胜、张蕻、张勇、李世玉、高中稳、李梦强编写。

## 引 言

固体料仓是储存固体松散物料的容器,它区别于储存气体、液体的容器。气体和液体在常温的自然状态下是无形的物质,松散的固体物料在自然状态下有堆积形态。气体充满于所储存的容器内,以自身的压力对整个容器壁产生作用力。液体盛装在容器里,对液面以下的容器壁,以液柱的静压对不同高度的壁面产生不同的作用力。松散的固体物料盛装在容器里,对物料面以下的容器壁,产生垂直压力、水平压力、在物料流动的情况下对壁面还产生摩擦力。所以设计固体料仓时除要考虑容器的共性外还要考虑到它的特殊性。

在古代,生产力发展到一定水平后,首先是稻谷、小麦、大豆等粮食类松散粒状固体物料要进行储存,人们用苇席编制、陶制、木制、砖木混制的各种容器、仓体等来储存多余的粮食。而后随着生产力的飞速发展,科学、技术的进一步提高,除对粮食类物料外,对建筑材料中的沙石、水泥,及各种工业原料和产品等需要进行储存、配用,需要储存的松散固体物料的种类越来越多。特别是粮食、水泥、煤炭成为料仓中储存的松散固体物料品种中最多的品种。制造料仓的材料也随之出现了钢筋混凝土、钢材、铝材、复合材料制等多种材质。仓体的形状也更多样化,出现了圆形、方形、矩形、星形、蜂窝形以及组合式等各种储存料仓,同时还产生了管风琴式、内置多卸料管式等均化料仓。物料的输送方式和输送量也发生了巨大的变化,料仓的容积也越来越大,出现了上万立方米容量的特大型料仓。料仓也成为一种具有独特用途和结构的设备。

料仓(bin, bunker)的种类繁多,其结构和制造工艺也相差甚远,其中金属制料仓具有占地面积小,具有先进的装、卸料工艺,机械化程度高,能保证储存的物料的质量等优点,成为工业用料仓中的一个不可缺少的设备。本部分并未将所有料仓都包括在内,主要适用于石油、化工、化纤工业用的金属板制圆筒形料仓(也称筒仓, silo),以及能盛装在用金属制料仓里的,如粮食、建筑用物料用的料仓。因此本部分中所考虑到的料仓是储存固体松散物料的料仓,其形状为圆筒形,料仓顶部为拱顶形或锥顶形,仓筒为圆筒形,料仓底部为仓壳锥体(hopper, 英文有时也指斗仓、料斗)形。结合我国实际情况,本部分对这些料仓做出了限制和规定。

构成料仓壳体的受力元件由仓壳顶、仓壳圆筒和仓壳锥体组成。仓壳顶和仓壳圆筒的结合部称肩部,仓壳锥体和仓壳圆筒的结合部称臀部,此两部分的结构根据料仓的不同大小和形状以及料仓使用的不同材质而有不同,设计者应根据实际情况采用不同的结构形式,以保证料仓具有足够的刚度和强度。

松散物料在料仓中的流动情况和形式见图1:



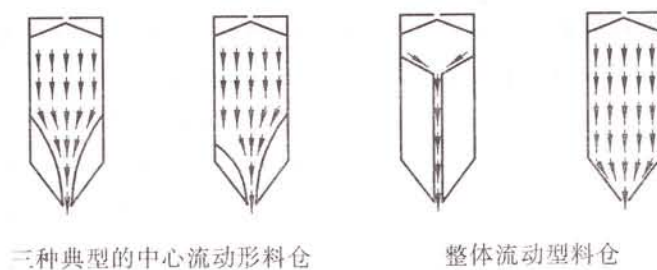


图 1

料仓设计时一般把物料流分为整体流动形（柱塞流形）和中心流动形（漏斗形），整体流动形的流动是最为理想的流动，符合先进先出的原则，仓壳受力也比较均匀。中心流动形的料仓由于仓壳处物料的滞留或崩塌，使料仓的受力变得复杂。

料仓支撑结构主要是裙座、短裙座、耳式支座和带整体加强环耳式支座。



## 1 范围

### 1.1 设计压力

固体料仓设计压力的适用范围,一般按常压考虑。因此规定设计压力的适用范围取 $-500\text{Pa} \sim 0.1\text{MPa}$ 。工程装置中在固体料仓的顶部根据工艺的要求有时有氮封,有时采用气流输送等情况,对于顶部有氮封(或其它作用的压力)的料仓,设计压力应取顶部可能出现的气体的最高操作压力作为设计压力。过高的设计压力会影响料仓的使用经济性,实际使用压力也被限制在一定范围内。

当设计压力超过 $0.1\text{MPa}$ 时,料仓的设计、计算仍可参照本部分进行,但钢制料仓的安全系数和制造技术要求应按GB 150的相关规定;铝制料仓的安全系数和制造技术要求应按JB 4734的相关规定。

### 1.2 设计温度

固体料仓的使用温度大都为常温,我国南北纬度跨度大,北方部分地区冬季极端最低气温较低,而南部、西南部地区夏季日照下仓壳的温度可达几十度,设计者决定设计温度时应考虑到料仓所处的地理位置,由于固体料仓一般不用保温,仓壳的温度基本与环境温度一致,裙座的用材应考虑环境温度的影响。当对储存物料有加热要求时还应考虑物料的温度效应及热膨胀的影响。因此本部分规定料仓的设计温度范围取料仓所使用的仓壳金属允许的使用温度,但由于通常料仓的使用温度不高,故仓壳材料的许用应力相应给到 $200^{\circ}\text{C}$ ,如果设计者遇到使用温度高于 $200^{\circ}\text{C}$ 的情况时,许用应力可以按标准中4.6节许用应力中的计算公式计算求得。

### 1.3 结构设计和适用容积范围

钢制固体料仓中容积较小的(例如小于或等于 $15\text{m}^3$ )一般称为料斗,可不按本部分设计。过去容积大于 $4000\text{m}^3$ 的料仓在工程装置中应用较少,这是由于设计和制造难度大、成本高所致。目前国内外料仓的设计水平、建造技术及工程实践经验在不断丰富,建造容积再大一些的料仓经过努力也能付诸实现。料仓结构设计、建造装备的进步和发展促进了料仓大型化,所以本部分未对容积的上限加以限制,我们希望设计者在设计建造超大型料仓时,应对料仓的仓顶结构、仓肩部结构和臀部等受压部位的仓壳刚性和钢结构加强件的结合等给予充分考虑,以满足料仓的经济性和可靠性。

铝制料仓则由于材料性能的限制,目前制造容积一般不大于 $1000\text{m}^3$ 。对于超出上述容积的铝制料仓,本部分并未作出限制,但设计者应对其经济性和可靠性等多方面因素予以综合考虑。

对于大型料仓的仓壳顶、肩部、臀部的结构设计和计算方法,国内外设计公司均有独到的设计思路和经验,目前本部分仅对仓壳承受松散物料应力状态作出规定,未对上述部位钢结构设计计算作出详细规定,设计压力低于 $6\text{kPa}$ 的料仓,设计者可参考GB 50341《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》等的设计方法对仓顶、肩部进行计算;设计压力为 $6\text{kPa} \sim 0.1\text{MPa}$ 的料仓,可参考NB/T 47003.1等的设计方法对仓顶、肩部进行计算。料仓臀部的局部应力可参考NB/T 47003.1等的设计方法进行计算。(本部分计算例题也同此处理。)

除钢板制固体料仓(俗称钢板仓)外,仓储行业还有分块组装式薄壁料仓(装配式波纹钢板筒仓)和薄钢板折弯增强环带式料仓(俗称利浦薄钢板料仓,施工方法为焊接、螺栓装配和螺旋卷边)等不同的自增强结构形式的料仓,用于不同物料和设计条件的仓储过程,建造这些料仓的成套建造装备也能提供超过 $4000\text{m}^3$ 的大型料仓,设计者可根据物料特性、工程实际的要求选择使用。

### 1.4 浅仓和深仓

料仓一般分为深仓和浅仓,深仓是指仓筒内所储松散物料的整个滑坡面都位于仓筒之内(图1),

否则为浅仓。浅仓中物料对仓壳的作用不均匀,在设计浅仓时应考虑比深仓更多一些不利的因素,在实际使用中的料仓大都处于深仓范围,故本部分按深仓考虑。

## 2 总则

关于资格与职责、安全系数、压力试验和致密性试验、焊接接头系数的规定,可参阅NB/T 47003.1的标准释义。其中固体料仓的安全系数根据NB/T 47003.1的规定,由2.5修订为2.4。

### 2.1 载荷

料仓所承受的载荷分为静载荷和动载荷。静载荷为长期载荷,动载荷为短期载荷。料仓仓壳和支承部分的安全性和经济性很大程度决定于选择合理的设计载荷。料仓的设计压力、储存物料引起的压力、料仓自重、梯子、平台等附件的重量、多雪地区的雪载荷等属于主要的静载荷;风载荷、地震载荷和料仓在加料、卸料时所产生的冲击载荷等属于主要的动载荷,此外连接管道和其它的部件对料仓的作用力、支座的反作用力等都是应当考虑的载荷。

#### 2.1.1 静载荷

操作状态的静载荷:包括压力、料仓储存物料引起的压力、料仓壳体自重、附件(包括梯子平台、人孔、接管、仪表、安全阀、过滤器、内件等)的重量、多雪地区的雪载荷等。

试验状态的静载荷:料仓一般不进行水压试验,必要时可做盛水试验。物料轻于水时,盛水试验状态的静载荷以盛水重量进行计算;物料重于水时,试验状态的静载荷以物料重量进行计算。

料仓储存物料引起的压力是料仓与其它容器不同的特别之处,此压力决定于固体物料的物性参数,一般常见的松散物料的物性参数参见表1。

表1 常见松散物料的物性参数

名 称	物料形状 mm	堆积密度 kg/m <sup>3</sup>	密度 kg/m <sup>3</sup>	安息角 (°)	物料内摩擦角 $\Psi$ (°)	物料与仓壳 摩擦系数 $\mu$
聚乙烯 (粒料)	$\phi 3 \times L 3 \sim 5$	500~600	940~979	35	35	0.3~0.36
聚乙烯 (粉料)	400 $\mu m$	300~400	940~970	35~40	35~38	0.32~0.36
聚丙烯 (粒料)	$\phi 3 \times 3$	500	900~950	38~40	35.5~37	0.27~0.32
聚丙烯 (粉料)	10~325 目	370~450	900~950	35~38	35~36.5	0.27~0.32
ABS (粒料)	$\phi 2.5 \times L 5$	500	1580	40	38	0.32~0.40
ABS (粉料)	200~250 目	480	1010	30~35	31~35	0.27~0.36
聚苯乙烯 (粒料)	$\phi 2.7 \times 3.2$	500~600	1050	30	35	0.36
聚苯乙烯 (粉料)	100~200 目	500~600	1030	30~35	31~35	0.27~0.32
聚 酯 (粒料)	$\square 4 \times 4 \times 2.5$	700~800	1165	40	38	0.34
聚 酯 (粉料)	200 目	700~760	1030	30~38	31~35	0.30
PTA (粉料)	120 $\pm$ 10 $\mu m$	860~1120	1510	45	35	0.466



表 1 (续)

名 称	物料形状 mm	堆积密度 kg/m <sup>3</sup>	密度 kg/m <sup>3</sup>	安息角 (°)	物料内摩擦角 Ψ (°)	物料与仓壳 摩擦系数 μ
砂	0.45 目	1400~1800	2620	35	32	0.32
米	3.15	860	1430	20~25	29	0.27~0.29
砂 糖	1.1	910	1590	35	37	0.67
大 豆	7.7	760	1160	28	39	0.30~0.34
小 麦	4.13	860	1380	32~35	25	0.48
尿 素	0.66	760	1330	35~38	22°	0.19~0.25
离子 交换树脂	0.79	840	1475	29	21.5	0.268
注：表中数据仅供参考，计算时应据实测数据校正。						

2.1.2 动载荷

动载荷包括风载荷、地震载荷、物料在加料和卸料时产生的冲击载荷，料仓内物料滞留或崩塌时引起的局部冲击载荷、通入料仓内疏通架桥物料的压缩空气引起的局部压力等。

自振周期、风载荷及相应计算可参阅 JB/T 4710 的标准释义。

2.2 厚度

2.2.1 腐蚀裕量和磨蚀裕量

腐蚀裕量是根据物料对金属材料的腐蚀速率和料仓的使用寿命来决定。

考虑到固体物料对料仓仓壳的机械磨蚀是不可避免的，本部分引入磨蚀裕量这一概念。在没有可靠的实验数据时，磨蚀裕量对碳素钢和低合金钢、铝及铝合金一般取不小于 1mm，对高合金钢一般取不小于 0.5mm。

本部分正文中的 C<sub>2</sub> 为腐蚀裕量和磨蚀裕量两部分之和，各自取值，互不影响。

2.2.2 最小厚度

GB 150 中是以考虑钢材的焊接工艺所需，规定了的最小厚度。而料仓的实际情况是容积大、壁厚薄，无论在现场制造或运输到现场，为防止在制造过程中或运输过程中出现过大的变形，不得不提出最小厚度与料仓直径的关系。仓壳圆筒设计厚度在很多情况下也受控于容器的最小厚度，可参考表 2 数据决定：

表 2 料仓最小厚度、临界压力与直径的关系

料仓直径，mm	碳钢		不锈钢	
	最小厚度，mm	临界压力，MPa	最小厚度，mm	临界压力，MPa
1200~3000	3	0.04516~0.1142	3	0.04467~0.01130
3000~5000	4	0.02345~0.01246	4	0.02320~0.01246
5000~10000	6	0.03003~0.01062	6	0.02971~0.01051
10000~16000	8	0.01658~0.01077	8	0.01301
>16000	8	0.01077	8	0.01065
注：表中数据是用式 (1) 计算的，未计入腐蚀裕量和磨蚀裕量。				

$$[\sigma]_{cr} = 2.59 \times E \times \left( \frac{D_i}{L} \right) \times \left( \frac{\delta}{D_i} \right)^{2.5} \dots\dots\dots (1)$$

## 2.3 地震载荷的计算

地震载荷计算的编制原则和依据是 GB 50011—2001《建筑抗震设计规范》，并参照石化行业标准 SH 3048—1999《石油化工钢制设备抗震设计规范》，其水平地震作用的计算方法可按下列情况确定：

- a) 底部剪力法 适用于单质点或可简化为单质点的设备，或平面对称，立面比较规则，刚度和质量沿高度分布比较均匀，且高度不超过 40m，以剪切变形为主的设备；
- b) 振型分解反应谱法 适用于除底部剪力法以外的设备；
- c) 时程反应分析法 可用于设防烈度大于 8 度，且高度大于 80m 的直立设备的补充计算。按时程反应分析法计算所得的底部剪力不应小于振型分解反应谱法所求得的数值的 80%。当采用时程反应分析法时，宜按烈度、近震、远震和场地类别选用若干条实际加速度记录或人工模拟的地震加速度时程曲线进行计算。

本部分提供的水平地震力计算方法，采用的是底部剪力法的计算模型及计算公式。日本 JIS B8511-1987《铝制圆筒形料仓构造》也同样应用的是底部剪力法。

对于料仓裙座式支承结构的地震载荷计算，应按照本部分提供的方法进行计算；考虑到料仓基本都属于粗矮结构，结构自振周期处于地震影响系数曲线的水平段，即自 0.1s 至特征周期  $T_g$  区段，水平地震影响系数  $\alpha_1$  取值等于  $\eta_2 \alpha_{max}$ 。其阻尼比会较标准设计反应谱所采用的  $\xi=0.05$  要小，因此本部分中在  $\xi$  无实际测量值时推荐  $\xi=0.03$ 。若有工程经验或有实测值作为依据可取经验值。

对于料仓带整体加强环耳式支座及耳式支座支承结构的地震载荷计算，可按照 NB/T 47003.1 标准提供的方法进行计算，但料仓较大时，还应计入地震载荷、风载荷等水平力对支座处仓壳圆筒附加的轴向拉应力；

对于料仓短裙座式支承结构的地震载荷计算，可将短裙座底截面至地面之间的结构体（钢架结构、混凝土结构）按等刚度原则（EJ）简化为当量圆筒体后，再参照本部分提供的裙座式支承结构的地震载荷计算公式进行计算，但此法仅限于结构体（钢架结构、混凝土结构）的总体刚度与料仓刚度之比不大于 5 的情况，结构体（钢架结构、混凝土结构）应采取必要的抗震构造措施。

## 3 材料

钢制固体料仓的材料选用原则，可参阅 NB/T 47003.1 的标准释义；铝制固体料仓的材料选用原则，可参阅 JB/T 4734 的标准释义。

## 4 设计计算

### 4.1 仓壳圆筒部分的载荷计算

JB/T 4735—1997 标准采用詹森（Janssen）创立的料仓压力理论为基础的计算方法，而本版标准采用赖姆伯特（Reimebert）的理论为基础的计算方法。其原因如下：

- a) 詹森方法和赖姆伯特方法在计算上有差异，但计算结果的差异不大；
- b) 赖姆伯特方法考虑了物料的堆积密度在任意高度处是不相同的，物料对料仓壳体的垂直压力和水平压力也是变化的，赖姆伯特方法比詹森方法更加接近实际操作工况；
- c) 赖姆伯特方法是在詹森方法的基础上经过大量研究实验而得出的，是詹森方法的修正版



本；

- d) 目前，德国标准对料仓的计算已经采用了赖姆伯特方法；
- e) 目前，中石化行业标准对料仓的计算也已经采用了赖姆伯特方法。

詹森方法和赖姆伯特方法的对比如下：

4.1.1 JB/T 4735—1997 标准中采用的计算方法

JB/T 4735—1997 标准中采用了以詹森（Janssen）创立的料仓压力理论为基础的计算方法，其推导如下：

我们对内直径为  $D_i$  的仓壳圆筒，在储存物料深度为  $x$  的立面位置上取一高度为  $dx$  的微元体（见图 2、图 3）来进行研究，这一微元体的体积  $d_v$  为

$$d_v = \frac{\pi}{4} D_i^2 dx \tag{2}$$

其重量  $d_w$  为

$$d_w = \frac{\pi}{4} D_i^2 \rho g dx \tag{3}$$

对这一微元体所受静力进行研究，在微元体上部截面 I-I 上受到截面以上由物料所产生的垂直压力为  $P_v$ ，在整个截面上所受的力为  $\pi D_i^2 P_v / 4$ 。

在微元体下部截面 II-II 上受到截面以上由物料所产生的垂直压力为  $P_v + dP_v$ ，在整个截面上所受的力为  $\pi D_i^2 (P_v + dP_v) / 4$ 。

由物料所产生的垂直压力  $P_v$ ，对仓壳圆筒产生了水平压力  $P_h$ ，假定垂直压力和水平压力的比值不变，即：

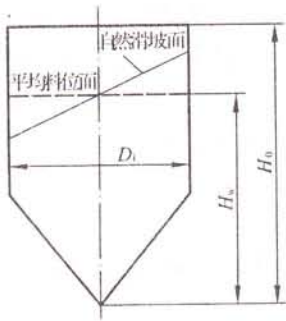


图 2

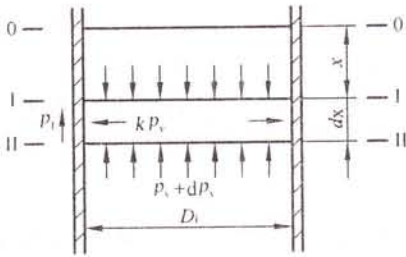


图 3

$$p_h = k P_v \tag{4}$$

$$k = \frac{1 - \sin \psi}{1 + \sin \psi} = \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\psi}{2} \right) \tag{5}$$

式中：

$\psi$  —— 松散物料内摩擦角的最小值，(°)。

水平压力  $P_h$  是垂直作用于仓壳圆筒壁的, 所以产生了沿壁面的压力:

$$p'_f = \mu P_h \quad \dots\dots\dots (6)$$

沿壁面一周所产生的摩擦力为:

$$p_f = \mu P_h \pi D_i dx \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中:

$\mu$  —— 物料与圆筒壁间的摩擦系数。

根据对以上诸力的研究可以写出此微元体的静力平衡方程:

$$\frac{\pi D_i^2 P_v}{4} + \frac{\pi D_i^2 \rho g}{4} dx = \frac{\pi D_i^2 (P_v + dP_v)}{4} + \pi D_i k \mu P_v dx \quad \dots\dots\dots (8)$$

对上式进行整理后可得一阶常系数线性微分方程:

$$\frac{dP_v}{dx} + \frac{4}{D_i} k \mu P_v = \rho g \quad \dots\dots\dots (9)$$

决定边界条件并解上述方程式:

仅考虑所储松散物料引起的压力时, 边界条件为  $x=0$  时,  $P_v=0$ , 解方程, 经单位换算后求得垂直压力  $P_v$  为:

$$P_v = \frac{D_i \rho g}{4k\mu} \left[ 1 - e^{-\left(\frac{4k\mu x}{D_i}\right)} \right] \quad \dots\dots\dots (10)$$

令  $f = k\mu$ , 并将其代入上式可得:

$$P_v = \frac{D_i \rho g}{4f} \left[ 1 - e^{-\left(\frac{4fx}{D_i}\right)} \right] \quad \dots\dots\dots (11)$$

由所储松散物料引起的水平压力可用垂直压力乘以侧压系数  $k$  求得:

$$P_h = k P_v \quad \dots\dots\dots (12)$$

经处理简化后摩擦力可以写为下式:

$$P_f = \frac{\pi D_i^2}{4\delta_{ci}} [H_w \rho g - P_v] \quad \dots\dots\dots (13)$$

詹森 (Janssen) 在料仓压力理论中主要依据了以下几种简化假设:

- 垂直载荷平均分布在水平横截面上;
- 堆积密度  $\rho$  在任意高度处是相同的;
- 比值  $k = p_h/p_w$  在任意高度处是常数;
- 仓壳的摩擦系数  $\mu = p_f/p_h$  在任意高度处是常数。

在很长一段时间里, 设计者们都采用这个简化的料仓压力理论来计算料仓, 这种方法计算简单, 对盛装一般的颗粒细、粒度均匀的物料的钢制料仓安全度是足够的, 很多国家的料仓设计规范都以这一种计算的理论为基础的。例如 DIN、JIS 等规范就采用了这种理论, 我国 JB/T 4735—1997 标准

也是依据这种理论来编制的,很明显大家采用时都知道这些假设中存在一些不符合客观实际的地方,但人们认为是可以允许的,是可以接受的。

上述观点在一定的范围里是对的,但是有局限性。对于粘性物料,在同一水平面上垂直载荷就不会是均匀分布的,在料仓的直径较大、高度较高时,加料和卸料时松散物料的堆积密度也是会变化的,在不同高度上的摩擦系数也不相同,物料在流动时载荷会有很大的变化。研究者们对新的计算理论进行大量研究。

#### 4.1.2 本部分采用的计算方法:

本部分采用以赖姆伯特(Reimbert)的理论为基础的计算方法。

赖姆伯特兄弟在进行了大量的试验基础上,提出了利用料仓壳体壁面摩擦平衡载荷的函数关联来计算垂直压力和水平压力,并确认垂直压力和水平压力的比值是随着料仓的深度和料仓的形状而变化的,对料仓的计算提出了新的解析方法。

目前各国标准使用的计算方法不同,有采用经典理论的计算方法,也有的采用了改进的计算方法。我们认为,从理论分析和试验数据看,采用“物料对仓壳的垂直压力与水平压力的比值随料仓高度变化而变化”的理论来分析料仓壳体的受力比较符合试验数据,我们在编制本部分时采用这种解析方法,但是此方法对大型锥体料斗的解析过于简单,需要作一些调整。

本部分使用的(赖姆伯特)计算方法要点:

符号说明:

式中:

$D_i$ ——仓壳圆筒内直径(或指多边形筒仓内切圆直径), mm;

$F$ ——仓壳圆筒内部横截面面积,  $\text{mm}^2$ ;

$H$ ——仓壳圆筒的高度, mm;

$h$ ——仓壳圆筒计算截面物料的深度, mm;

$h_c$ ——仓壳圆筒内松散物料自然堆积的锥体高度, mm;

$p_{v\max}$ ——平均垂直压力的最大值, MPa;

$P_{v\max}$ ——总垂直压力的最大值:  $P_{v\max} = F \cdot p_{v\max}$ , N;

$p_h$ ——深度  $h$  处的水平压力, MPa;

$p_{h\max}$ ——水平压力的最大值, MPa;

$p_v$ ——深度  $h$  处的垂直压力, MPa;

$r$ ——仓壳圆筒横截面平均水力半径,  $r = F / \pi D_i$ , mm;

$\pi D_i$ ——仓壳圆筒横截面内周长, mm;

$\rho$ ——松散物料堆积密度,  $\text{kg/m}^3$ ;

$\psi$ ——松散物料内摩擦角的最小值(假定休止角等于内摩擦角), ( $^\circ$ );

$\psi'$ ——松散物料与壳体壁面的摩擦角, ( $^\circ$ );

当松散物料放置在平面上时,堆积成母线与水平面成一定角度  $\psi$  的圆锥体。对于每一种物料,  $\psi$  角具有特定的数值,称为安息(休止)角,它是内摩擦角的最小值。

假如松散物料堆放在封闭空间如筒仓内,由于松散物料在壁上的摩擦作用,松散物料作用于壳体壁面及料仓锥底的合力为倾斜于壳体壁面的推力  $Q$ 。因此,该推力可分解为两个分力,一个分力是对壳体壁面的法向力  $N$ ,另一个分力是平行于壳体壁面的切向力  $T$ ,也称为垂直压力。这个法向力  $N$  又称为水平压力(图4和图5)。





图4 堆积角

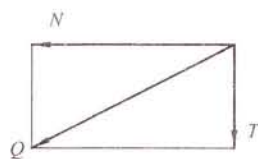


图5 力平衡图

把松散物料在壳体壁面上的摩擦角叫做  $\psi'$ ，相应的摩擦系数为  $\tan \psi'$ 。

作为倾斜压力  $Q$  的函数，上述两个分力  $N$  和  $T$  为：

$$N = Q \cos \psi' \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$T = Q \sin \psi' \quad \dots\dots\dots (15)$$

因此：

$$T = N \tan \psi' \quad \dots\dots\dots (16)$$

式中：

$T$ ——与对应于水平压力  $N$  产生的摩擦力平衡的载荷。

在仓壳横截面上的垂直载荷就是该段壁面的垂直压力（仓底上的载荷即为总的垂直压力），它等于该断面以上物料的总重量与其产生的作用于仓壳的摩擦力所平衡的总载荷之差。

在完成测定同一筒仓不同深度料仓锥底垂直压力的试验后，可以看到压力随深度增加而增加，但由于只有一小部分重量的松散物料对壳体壁面有摩擦作用，以致在一定深度上的压力变为常数，而达到最大值。以深度为纵坐标、压力为横坐标绘图，所得的压力曲线如图6所示。该曲线存在一条平行于纵坐标轴的渐近线，该渐近线对应的横坐标就是垂直压力的最大值。

对于代表壳体壁面侧压力的曲线作了相同的考察。该曲线也存在一条平行于纵坐标轴的渐近线，该渐近线对应的横坐标就是侧压力的最大值见图7。



图6



图7

可利用壳体壁面摩擦平衡载荷的函数关系，计算侧压力和垂直压力。

在直角坐标系上，以纵坐标代表仓壳圆筒的深度，以横坐标代表壳体壁面上和料仓锥底上的压力。坐标原点位于松散物料与壳体壁面接触表面（图8）。该平面以上的部分有一个物料形成的锥体，称之为“松散物料上的物料锥体”，其高

$$h_c = D_i \cdot \operatorname{tg} \psi / 2 \quad \dots\dots\dots (17)$$

“松散物料上的物料锥体部分”的质量为：

$$P_0 = \rho g \cdot F \cdot \frac{h_c}{3} \quad \dots\dots\dots (18)$$

式中：

$F$  —— 仓壳圆筒的横截面面积， $\text{mm}^2$ 。

假设松散物料与壳体壁面没有摩擦，则深度  $h$  的料仓锥底上的载荷为：

$$P_{v \max} = \rho g \cdot F \cdot h + P_0 \quad \dots\dots\dots (19)$$

当  $h \geq 0$  时，该载荷曲线为斜率  $\rho g F$ 、截距  $P_0 = \rho g \cdot F \cdot \frac{h_c}{3}$  的直线（图 8）。但是，由于松散物料在壳体壁面上摩擦作用的结果，摩擦平衡载荷曲线（II）有一无穷分支与  $z$  轴相切。该曲线（II）的纵坐标为直线（I）的纵坐标（摩擦力等于零时料仓锥底上的载荷）与料仓锥底实际载荷曲线的纵坐标之差。在极限情况下，当料仓锥底实际载荷变成常数（料仓锥底的最大载荷）时，直线（I）成为曲线（II）渐近线的方向。

因此，曲线（II）的渐近线平行于直线（I），两直线在  $z = 0$  时的横坐标之差等于料仓锥底的最大载荷  $P_{v \max}$ 。

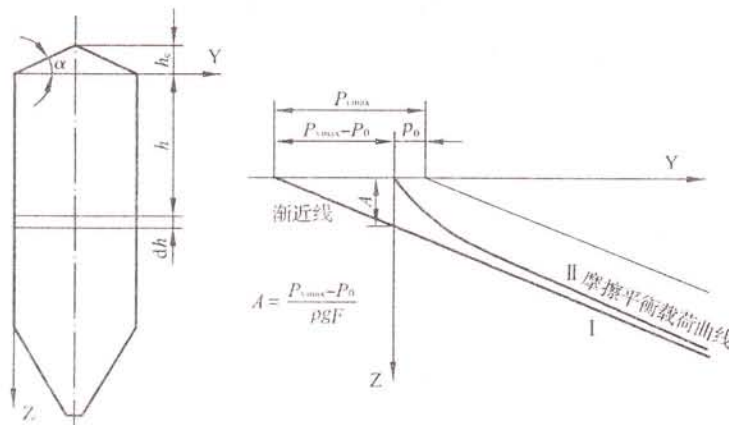


图 8 特征纵坐标

这些性质可以利用来确定壳体壁面摩擦平衡载荷曲线的函数关系。

首先，假设摩擦平衡函数  $J(h)$  是已知的，其微分为： $J'(h)dh$ 。

已知表明，对水平薄层  $dh$  而言，由壳体壁面摩擦平衡的载荷为： $p_{hw} \cdot \pi D_i \cdot \operatorname{tg} \psi' dh$ 。

因此：

$$J'(h)dh = p_h \cdot \pi D_i \cdot \operatorname{tg} \psi' dh \quad \dots\dots\dots (20)$$

由此可导出在深度  $h$  处水平压力的计算式：

$$P_h = \frac{J'(h)}{\pi D_i \cdot \operatorname{tg} \psi'} \quad \dots\dots\dots (21)$$

同样,在深度  $h$  处,松散物料的总载荷为:

$$\rho g \cdot F \cdot h + \rho g \cdot F \cdot \frac{h_c}{3} = \rho g \cdot F \left( h + \frac{h_c}{3} \right) \quad \dots\dots\dots (22)$$

当  $h \rightarrow H$  时,计算高度等于仓壳圆筒高度,在仓壳锥体大端截面上的载荷即为:

$$\rho g \cdot F \left( H + \frac{h_c}{3} \right) - J(H) \quad \dots\dots\dots (23)$$

由此可导出在深度  $h$  处垂直压力的计算式:

$$P_v = \rho g \left( h + \frac{h_c}{3} \right) - \frac{J(h)}{F} \quad \dots\dots\dots (24)$$

由此可见,如果已知松散物料在壳体壁面上摩擦平衡载荷的函数关系,则根据方程(21)和(24),可直接求出壳体壁面上侧压力的数值以及仓壳锥体大端截面上垂直压力的数值。

因此,我们开始研究壳体壁面摩擦平衡载荷曲线的函数关系:

试验表明,可以用双曲线  $y = \frac{Ah^2 + Bh + C}{Dh + E}$  的一个分支,相当精确地表示(图8)上的试验曲线(II)。式中  $A, B, C, D, E$  为方程式系数。

双曲线分支的渐近线方程为:

$$y = \rho g \cdot F \cdot h - (P_{v \max} - P_0) \quad \dots\dots\dots (25)$$

当  $h \rightarrow \infty$  时,渐进线的斜率  $\rho g \cdot F$  与极限  $\frac{y}{h}$  一致,因此:

$$\frac{y}{h} = \frac{Ah^2 + Bh + C}{h(Dh + E)} \quad \dots\dots\dots (26)$$

当  $y \rightarrow \infty$  时,  $\frac{y}{h} \rightarrow \frac{A}{D}$  (当两个二项式的次数相同时为最高次数项的系数比)。

即

$$\lim_{y \rightarrow \infty} \frac{y}{h} = \frac{A}{D} = \rho g \cdot F \quad \dots\dots\dots (27)$$

所以

$$A = D \cdot \rho g \cdot F \quad \dots\dots\dots (28)$$

此外,当  $h = 0$  时,侧压力等于零,因此摩擦平衡载荷等于零,所以函数式的分子必定为零,即:  $C = 0$ , 函数式变成:

$$y = \frac{D \cdot \rho g \cdot F \cdot h^2 + Bh}{Dh + E} \quad \dots\dots\dots (29)$$

$h = 0$  时曲线与  $h$  轴相切,所以函数的导数必须避免  $h = 0$  时情况,因此:

$$y' = \frac{(Dh + E)(2D \cdot \rho g \cdot F \cdot h + B) - (D \cdot \rho g \cdot F \cdot h^2 + Bh)D}{(Dh + E)^2} \quad \dots\dots\dots (30)$$



对于  $h=0$ , 分子必须等于零, 或者说:  $B \cdot E = 0$ 。

在这里, 因为函数将变为线性的, 所以  $E$  不可能等于零, 因此该导数必须消去  $B=0$  的情况, 这样, 函数式就成为:

$$y = \frac{D \cdot \rho g \cdot F \cdot h^2}{Dh + E} \quad \dots\dots\dots (31)$$

当  $h \rightarrow \infty$  时, 渐起线起点的横坐标  $-(P_{v \max} - P_0)$  与极限  $y - \rho g \cdot F \cdot h$  相当。

因为

$$y - \rho g \cdot F \cdot h = \frac{D \cdot \rho g \cdot F \cdot h^2}{Dh + E} - \rho g \cdot F \cdot h = \frac{-E \cdot \rho g \cdot F \cdot h}{Dh + E} \quad \dots\dots\dots (32)$$

当  $h \rightarrow \infty$  时,  $y - \rho g \cdot F \cdot h \rightarrow \frac{\infty}{\infty}$ 。

这时, 极限与其导数相同, 所以, 当  $h \rightarrow \infty$  时

$$y - \rho g \cdot F \cdot h = \frac{-E \cdot \rho g \cdot F}{D} = -(P_{v \max} - P_0) \quad \dots\dots\dots (33)$$

$$E = \frac{D(P_{v \max} - P_0)}{\rho g \cdot F} \quad \dots\dots\dots (34)$$

因而

$$y = \frac{D \cdot \rho g \cdot F \cdot h^2}{Dh + \frac{D(P_{v \max} - P_0)}{\rho g \cdot F}} \quad \dots\dots\dots (35)$$

消去  $D$  后写成:

$$y = \frac{\rho g \cdot F \cdot h^2}{h + \frac{P_{v \max} - P_0}{\rho g \cdot F}} \quad \dots\dots\dots (36)$$

此公式是筒仓计算的基本公式, 简化后可写成下式:

$$y = J(h) = \frac{\rho g \cdot F \cdot h^2}{h + A} \quad \dots\dots\dots (37)$$

此公式的物理意义是: 在深度  $h$  处, 摩擦平衡载荷在筒体周长单位长度上的值。

式中:

$$A = \frac{P_{v \max} - P_0}{\rho g \cdot F} \quad \dots\dots\dots (38)$$

$A$  值的大小等于摩擦平衡载荷曲线的渐近线在纵坐标轴上的截距。由于它所起作用的重要性, 把它称为“特性纵坐标”。对于某一种特定的物料、及盛装此物料的特定的料仓, 此值为一定值。

这样, 就可以来确定壳体壁面上的侧压力和料仓锥底上的垂直压力。

壳体壁面上的侧压力

已知摩擦平衡载荷的函数式为:

$$y = \frac{\rho g \cdot F \cdot h^2}{h + A} \quad \dots\dots\dots (39)$$

根据式(21),可以求侧压力的数值。该函数的导数为:

$$\begin{aligned} J'(h) &= \frac{2\rho g \cdot F \cdot h(h+A) - \rho g \cdot F \cdot h^2}{(h+A)^2} = \rho g \cdot F \cdot \frac{h^2 + 2Ah}{(h+A)^2} \quad \dots\dots\dots (40) \\ &= \rho g \cdot F \left(1 - \frac{A^2}{(F+A)^2}\right) = \rho g \cdot F \left[1 - \left(\frac{h}{A} + 1\right)^{-2}\right] \end{aligned}$$

把这个数值代替式(21)中的 $J'(h)$ 则:

$$P_h = \frac{\rho g \cdot F}{\pi D_i \cdot \operatorname{tg} \psi'} \left[1 - \left(\frac{h}{A} + 1\right)^{-2}\right] \quad \dots\dots\dots (41)$$

$$P_h = \frac{\rho g \cdot D_i}{4 \operatorname{tg} \psi'} \left[1 - \left(\frac{h}{A} + 1\right)^{-2}\right] \quad \dots\dots\dots (42)$$

这里,  $\frac{\rho g \cdot D_i}{4 \cdot \operatorname{tg} \psi'}$ 正好是壳体壁面最大侧压力的表达式。所以,壳体壁面上侧压力的表达式为:

$$p_h = p_{h \max} \left[1 - \left(\frac{h}{A} + 1\right)^{-2}\right] \quad \dots\dots\dots (43)$$

也可写为:

$$p_h = p_{h \max} \left[1 - \frac{A^2}{(h+A)^2}\right] \quad \dots\dots\dots (44)$$

作用在仓壳锥体大端截面的垂直压力

根据式(24):

$$p_v = \rho g \left(h + \frac{h_c}{3}\right) - \frac{J(h)}{F} \quad \dots\dots\dots (45)$$

将 $J(h)$ 的数值(可用 $y$ 值)代入方程式,则:

$$p_v = \rho g \left(h + \frac{h_c}{3}\right) - \frac{\rho g \cdot F \cdot h^2}{F(h+A)} = \rho g \left(h + \frac{h_c}{3} - \frac{h^2}{h+A}\right) \quad \dots\dots\dots (46)$$

所以

$$p_v = \rho g \left[h \left(\frac{h}{A} + 1\right)^{-1} + \frac{h_c}{3}\right] \quad \dots\dots\dots (47)$$

$$p_v = \rho g \left[\frac{h}{\frac{h}{A} + 1} + \frac{h_c}{3}\right] \quad \dots\dots\dots (48)$$

$$p_v = \rho g \left[ \frac{h}{h+A} + \frac{h_c}{3} \right] \quad \dots\dots\dots (49)$$

也可写成:

$$p_v = \rho g \left[ \frac{hA}{h+A} + \frac{D_i \operatorname{tg} \psi}{6} \right] \quad \dots\dots\dots (50)$$

仓壳锥体上的总载荷为:

$$P_{v \max} = F \cdot p_v \quad \dots\dots\dots (51)$$

特性纵坐标的数值

式(37)、(47)、(50)表明,各种压力函数的基本参数是很重要的,称之为“特性纵坐标”的参数A的数值,就是松散物料在壳体壁面上摩擦平衡载荷曲线的渐进线在纵坐标轴上的截距。

在式(47)中:

$$A = \frac{P_{v \max} - P_0}{\rho g \cdot F} \quad \dots\dots\dots (52)$$

$P_0$  式(18)和  $\rho g \cdot F$  是已知数,余下的问题是确定料仓锥底垂直压力的最大值。

显然,无论是哪一种理论,料仓锥底垂直压力最大值具有下列形式:

$$P_{v \max} = \rho g \cdot F \cdot r \frac{1}{f(\psi, \psi')} \quad \dots\dots\dots (53)$$

不同的作者提供的表达式  $f(\psi, \psi')$  各不相同。 $f(\psi, \psi')$  将称为“摩擦函数”。

特性纵坐标的数值使直接计算壳体壁面侧压力和料仓锥底垂直压力成为可能,而这个“摩擦函数”又是计算特性纵坐标大小的基础。

因此,最重要的问题是了解:“摩擦函数”,将根据对不同形状的料仓试验所得的结果,求出它在试验条件下的数值。

以往关于比值  $p_v / p_h$  变化的研究,用试验的方法进一步证实了  $p_v / p_h$  的极值。

在这一极限情况下,根据詹森-库林的假设(此处从略)垂直压力为最大值等于:

$$P_{v \max} = \rho g \cdot r \cdot \frac{1}{\operatorname{tg} \psi' \cdot \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\psi'}{2} \right)} \quad \dots\dots\dots (54)$$

垂直压力总载荷的最大值等于:

$$P_{v \max} = F \cdot p_{vw} = \frac{\rho g \cdot F \cdot r}{\operatorname{tg} \psi' \cdot \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\psi'}{2} \right)} \quad \dots\dots\dots (55)$$

即:

$$P_{v \max} = \frac{\rho g \cdot F \cdot D_i}{4 \operatorname{tg} \psi' \cdot \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\psi'}{2} \right)} \quad \dots\dots\dots (56)$$



将这一数值代入式(51), 根据式 18 求得  $P_0$  的数值, 这样, 可得到计算圆筒仓特性纵坐标的公式:

$$A = \frac{D_i}{4 \operatorname{tg} \psi' \cdot \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\psi}{2} \right)} - \frac{h_c}{3} \quad \dots\dots\dots (57)$$

也可以写为:

$$A = \frac{D_i}{4 \operatorname{tg} \psi' \cdot \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\psi}{2} \right)} - \frac{D_i \cdot \operatorname{tg} \psi}{6} \quad \dots\dots\dots (58)$$

赖母伯特进行了关于  $\psi$  和  $\psi'$  的大量测定工作和计算工作, 结果表明计算所得特性纵坐标的数据与试验相符。在实验室内能够确定各种粉状松散物料对不同形状筒仓不同壳体壁面的“摩擦函数”。然后就可以计算包括多边形筒仓在内的各种筒仓的压力。由于用这种方法可以在实验室确定“摩擦函数”, 能更精确地计算筒仓上的应力, 从而使仓筒具有更好的安全性。

对仓壳圆筒壁面的摩擦力

由于在深度  $h$  处, 根据式(37)摩擦载荷在筒体单位长度上的载荷公式可用下式表示:

$$y = J(h) = \frac{\rho g \cdot F \cdot h^2}{h + A} \quad \dots\dots\dots (59)$$

由松散物料在计算断面以上的仓壳圆筒上引起的摩擦力, 即可按下式计算:

$$P_f = \frac{\pi \rho g \cdot D_i^2 \cdot h^2}{4(h + A)} \quad \dots\dots\dots (60)$$

#### 4.2 仓壳锥体部分的载荷计算

我们对直径为  $D_i$  的仓壳锥体, 在储存物料高度为  $h_w$  的任意立面位置上取一高度为  $dh$  的微元体 (见图 9) 来进行研究, 这一微元体的体积  $d_v$  可以视为:

$$d_v = \frac{\pi}{4} D_{zi}^2 dh \quad \dots\dots\dots (61)$$

其重量  $d_w$  也可以视为

$$d_w = \frac{\pi}{4} D_{zi}^2 \rho g dh \quad \dots\dots\dots (62)$$

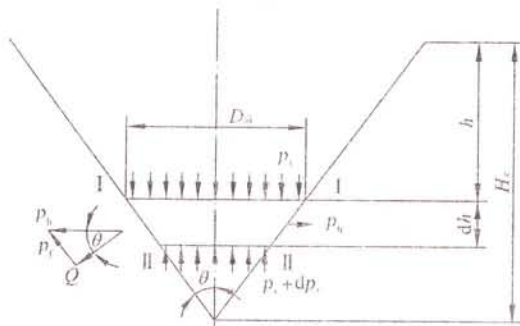


图 9

根据推导,可得到计算仓壳锥体计算断面特性纵坐标的公式:

$$A = \frac{D_{zi}}{4 \operatorname{tg} \psi' \cdot \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\psi}{2} \right)} - \frac{h_c}{3} \quad \dots\dots\dots (63)$$

此式可以写为:

$$A = \frac{D_{zi}}{4 \operatorname{tg} \psi' \cdot \operatorname{tg}^2 (45^\circ - \frac{\psi}{2})} - \frac{D_{zi} \cdot \operatorname{tg} \psi}{6} \quad \dots\dots\dots (64)$$

可得到计算仓壳锥体计算断面侧压力的公式:

$$p_{zh} = \frac{\rho g \cdot D_{zi}}{4 \cdot \operatorname{tg} \psi'} \left[ 1 - \left( \frac{h}{A} + 1 \right)^{-2} \right] \quad \dots\dots\dots (65)$$

此式可以写为:

$$p_{zh} = \frac{\rho g \cdot D_{zi}}{4 \cdot \operatorname{tg} \psi'} \left[ 1 - \frac{A^2}{(h + A)^2} \right] \quad \dots\dots\dots (66)$$

可得到计算仓壳锥体计算断面垂直压力的公式:

$$p_{zv} = \rho g \left[ h \left( \frac{h}{A} + 1 \right)^{-1} + \frac{h_c}{3} \right] \quad \dots\dots\dots (67)$$

此式可以写为:

$$p_{zv} = \rho g \left[ \frac{hA}{h + A} + \frac{D_{zi} \operatorname{tg} \psi}{6} \right] \quad \dots\dots\dots (68)$$

以上各式中  $D_{zi}$  —— 计算断面锥体大端直径, mm。

实际计算时可将锥体简化为若干个不等直径的圆筒体,用上述方法进行计算即可。

#### 4.3 仓壳圆筒的应力计算

本部分中的应力计算按仓壳圆筒受由所储松散物料引起的压力外,还有其它压力时的工况来考虑,在垂直压力和水平压力的作用下,仓壳分别产生了轴向应力和周向应力,标准中用一般薄膜应力公式来计算这些力,其中由设计压力引起的轴向应力为:

$$\sigma_{z1} = \frac{D_i p}{4 \delta_{ei}} \quad \dots\dots\dots (69)$$

由摩擦力引起的轴向应力:

$$\sigma_{z2} = \sigma_f = \frac{p_f^{1-l}}{\pi D_i \delta_{ei}} \quad \dots\dots\dots (70)$$

由设计压力和物料引起的周向应力为:

$$\sigma_{\theta} = \frac{D_i (p_h + p)}{2 \delta_{ei}} \quad \dots\dots\dots (71)$$

由各种重量和风弯矩、地震弯矩、附加弯矩引起的轴向力可按 JB/T 4710 的有关规定计算。

#### 4.4 料仓的轴向组合应力

作用在仓壳圆筒和仓壳锥体上的轴向组合应力包括以下部分：

- 由设计压力  $p$  在计算断面上所产生的轴向应力  $\sigma_{z1}$ ；
- 由所储松散物料与仓壳圆筒和仓壳锥体之间的摩擦力在计算断面上所产生的轴向应力  $\sigma_{z2}$ ；
- 由地震载荷和风载荷产生的弯矩在计算断面上所产生的轴向应力  $\sigma_{z3}$ ；
- 由仓壳顶重量、附加重量、雪载荷、动载荷等在计算断面上所产生的轴向应力  $\sigma_{z41}$ ；
- 由仓壳圆筒和仓壳锥体重量、内件重量、以及垂直地震力在计算断面上所产生的轴向应力  $\sigma_{z42}$ 。

设计者在计算时应注意到在上述各种应力中， $\sigma_{z1}$  是轴向拉应力， $\sigma_{z2}$  是轴向压应力， $\sigma_{z3}$  以中性面为界分为作用在受拉侧的为拉应力，作用在受压侧的为压应力， $\sigma_{z41}$  只作用在支撑截面之上，而且为压应力， $\sigma_{z42}$  作用在支撑截面之上时，轴向应力为压应力，作用在支撑截面之下时，轴向应力为拉应力。

不同的料仓有不同的支撑形式，弯矩引起的应力在支撑面以下可不计入组合应力，各种重量产生的应力在支撑面之上、支撑面之下有不同的作用，在标准正文公式中我们为简单明确起见，仅给出由各种重量引起的轴向应力  $\sigma_{z4}$ ，设计者可在计算时根据料仓的支撑情况，按图 10 将各种重量引起的应力分别列出并代入下面组合应力公式进行计算。一般而言仓筒的大部分都在支撑面之上，而设计时都习惯于遵循设计壁厚越向下越厚的原则，如均按在支撑面之上计算肯定是安全的。标准正文中是按在支撑面之上的轴向组合应力计算的。

根据规定，拉应力计算符号为“+”，压应力计算符号为“-”。下列组合应力公式为代数和，代入公式时需分清“+”、“-”号，在计算组合应力时应按标准正文所列顺序计算：

在支撑面之上的轴向组合应力为：

$$\sigma_{\Sigma z} = \sigma_{z1} + \sigma_{z2} + \sigma_{z3} + \sigma_{z41} + \sigma_{z42} \quad (72)$$

在支撑面之下的轴向组合应力为：

$$\sigma_{\Sigma z} = \sigma_{z1} + \sigma_{z2} + \sigma_{z41} + \sigma_{z42} \quad (73)$$

许用轴向压应力按下式计算：

$$[\sigma]_{cr} = \begin{cases} K_o B \\ K_o [R]^t \end{cases} \quad \text{取其中较小值} \quad (74)$$

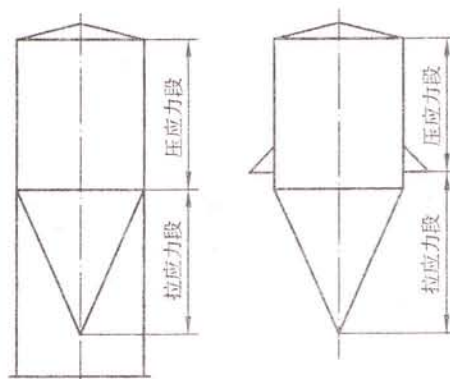


图 10



作用在仓壳圆筒上的周向组合应力是由设计压力  $p$  和所储松散物料产生的压力  $P_h$  引起的, 圆筒的周向应力可用简化的薄膜应力公式计算。

圆筒许用轴向压应力可采用有关经典公式计算。

本部分采用 GB 150 中外压力容器计算图作为许用压应力的图。

#### 4.5 仓壳顶的计算

仓壳顶一般采用锥形仓壳顶或拱形仓壳顶, 对于直径大于 5m 的料仓, 一般采用拱形仓壳顶, 设计者可根据料仓的直径、顶部附加载荷和设计压力, 在仓壳顶上设置加强筋以满足设计要求。设计压力小于 6kPa 的料仓设计者可参照 GB 50341《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》等的设计方法对仓顶、肩部进行计算; 设计压力为 6kPa ~ 0.1MPa 的料仓, 可参照 NB/T 47003.1 等的设计方法对仓顶、肩部进行计算。

拱形仓壳顶的许用临界压力按照立式圆筒形储罐的标准采用小变形理论公式, 临界压力为:

$$\sigma_{cr} = \frac{2}{\sqrt{3(1-\mu^2)}} E \left( \frac{\delta}{R_i} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (75)$$

取钢的  $\mu = 0.3$  代入上式, 则有:

$$\sigma_{cr} = 1.2E \left( \frac{\delta}{R_i} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (76)$$

考虑到实际的制造成型情况, 将系数 1.2 取为 0.1, 则得标准中所用的计算式。

#### 4.6 仓壳锥体和仓壳圆筒连接处的加强结构

在大型固体料仓上, 仓壳锥体和仓壳圆筒的连接处的应力通常都很大, 设计时要进行局部加强, 处理这一问题的设计方法很多, 通常是设置一个刚性环, 或设置一个刚性环座, 以此来加强连接处的刚度。对此国内外设计公司均有独到的设计思路和经验, 目前本部分未对上述部位钢结构设计计算作出详细规定, 如果仅考虑对壳体自身进行加强, 而不考虑使用刚性环的话, 设计者可参照 JB4745.1 的设计方法对料仓臀部, 也就是仓壳锥体和仓壳圆筒连接处的加强结构进行计算, 并确定该处结构的加强措施。对于带裙座的料仓, 必要时设计者可考虑采用刚性环座进行外部加强。

#### 4.7 支座

料仓用的裙式支座的设计方法见 JB/T 4710《钢制塔式容器》, 本部分完全引用其计算方法。

料仓用的耳式支座的设计方法见 NB/T 47003.1 和 HG 20583《钢制化工容器结构设计规定》, 在料仓的设计中常用的支座形式有: 耳式支座、带刚性环的耳式支座等, 本部分不另对耳式支座提出设计计算方法。设计者在设计计算时要注意到支座垫板与仓壳的连接处的局部应力不能过大, 对于大型薄壁料仓可采用带刚性环的耳式支座来解决局部应力过大的问题。

#### 4.8 静力计算方法和动力计算方法

本部分所采用的计算方法系静力计算方法。是按赖姆伯特 (Marcel L.Reimbert) 的现代料仓设计公式进行计算的。由于料仓中储存物料的形状、粒径、充填状态和仓壳圆筒尺寸大小以及加料和排料的方式不同, 有时仓壳圆筒所受的压力不可能完全按这些公式计算, 所以有的规范给出了加料和排料时料仓内各种压力变化的动力计算方法, 对不同物料提出的超压系数在 1.2~1.6 之间, 但是在料仓的实际计算中仅仅按储存物料的压力来决定仓壳壁厚的情况很少, 设计者大多是按料仓设计压力、料仓的自重、储存物料引起的压力、风载荷、雪载荷、地震载荷等引起的应力来决定仓壳壁厚, 所以本部分仍采用这些经典公式。



静力理论认为：垂直载荷是平均的分布于水平截面上，松散物料的堆积密度在给定高度处是相同的，设计公式是利用仓壳摩擦平衡载荷的函数关系来计算水平压力和垂直压力，计算时不考虑加料或卸料时物料的冲击作用，这种方法计算简单，对一般的颗粒细、粒度均匀的物料，对钢制的料仓可靠性也是足够的，到目前为止大多数国家的料仓设计规范都是以静力计算理论为基础。静力理论的这些观点在一定的范围里是对的，但是有局限性。对于粘性物料，在同一水平面上垂直载荷就不会是均匀分布的，在料仓的直径较大、高度较高时，加料和卸料时松散物料的堆积密度也是会变化的，物料在流动时载荷会有很大的变化。有一些用钢筋混凝土制作的大型料仓就因为设计时没有考虑到足够的抗震能力和物料流动对仓壳的作用因素而发生倒塌事故，重大的损失给人们带来了深刻的教训，研究者们开始对动力计算理论进行大量研究。

松散物料的种类很广，物料间的堆积特性、流动特性差异很大。一般而言，研究者认为物料在料仓中的流动形态分为两大类：柱塞流形态（整体流动型）和漏斗流形态（中心流动型）。在柱塞流形态的料仓内，物料均匀有序地流过料仓的各个断面，避免料仓内局部出现物料的滞留，也就是说物料在料仓中的流动是符合先进先出（first-in/first-out）的原则，先装进料仓内的物料在卸料时先卸出，物料流动时所产生的动压力均匀地直接作用在料仓壳上，仓壳所受的压力变化是稳定的。在漏斗流形态的料仓中，物料是以漏斗流的形式流动的，也就是说物料在料仓中的流动符合后进先出（last-in/first-out）的原则，后装进的物料在卸料时在某种程度上先卸出，物料只沿料仓的中心流动，靠近仓壳的物料是否流动是随松散物料的流动特性、储存时间、加料方法等因素的变化而变化，仓壳所受的压力变化是不稳定的，呈动态变化。

由于料仓内的物料流动形态不同，设计者在设计料仓时应当全面考虑组成料仓的各部分的详细情况，如物料入口、物料出口、料仓高径比、仓壳锥体的半顶角大小、仓壳锥体是否采用反吹装置或内反锥装置、仓筒内壁的粗糙度等这些影响物料储存和输送、影响料仓形状和强度的因素。确定料仓的各个结构要素，确定设计时如何使用静力计算方法或是再增加使用动力计算方法来解决实际问题。

随着近年来固体物料输送设备的发展，输送能力有了很大提高，在气流输送方面，输送种类有稀相、疏密相、密相等不同的输送方法，加料和排料时气流输送的大流量的气流和物料对仓壳施加的冲击力加大，而且是在动态变化状态下作用的，静力计算方法不可能对其加以分析考虑，因而设计料仓时应当使用动力计算法来处理这一类问题。动力计算的理论认为：在进料时，气流和物料对仓壳产生冲击作用，这种冲击力的大小和频度呈动态变化，在排料时，料仓的压力发生变动，对仓壳某一局部所作用的压力呈动态变化的，而且有可能使局部应力升高，专家们在研究中给出的大量资料表明仓壳压力的变动峰值可大于静态计算值的数倍。国外有的标准近年来已考虑到了这种情况，较为简单的方法是采用在静力计算的基础上增加一些动力影响系数来调整静力计算的误差，这些系数是通过试验或通过对实际经验的总结获得的。

考虑到料仓的动力计算方面我们目前尚无可靠的试验数据，也未对实际生产装置进行过测试或分析总结，对目前所使用的金属料仓而言，物料的形状、性质比较单一，物料流动的速度相对不是很大，用现行的设计经验和计算方法来分析还是安全的，所以标准仍按静力计算方法来编制。我国工业用金属料仓的设计、制造和使用中成功的经验居多，用于制造料仓的材料质量也有很大的提高，可以说，用静力计算来设计料仓，在目前是满足工业需要。当然从另外一方面来说我们也要对动力状态下如何应用超压系数和动压系数，如何选取计算数值还要进行研究。如果在工程设计的实例中遇到了某些大型料仓，当其加料和排料速度较大时，目前可参考本文下面介绍的“料仓的动力计算

方法”即日本或德国规范的办法,采用在静力计算的基础上增加一些动力引响系数来调整计算的误差,在今后再版的“固体料仓”标准中,如有可能经过试验后取得数据,可望能解决动力设计的计算方法,制定出既考虑静力计算又考虑动态影响的较为全面的计算方法的新标准。

#### 4.9 国外料仓的动力计算方法

日本规范采用的方法:

日本 JIS B 8511 规范也属于静力计算范畴,但在 1987 年版中提出了对长期作用的由松散物料引起的载荷和在料仓加料和排料时料仓受到的动态压力变化,加入冲击压力系数  $C_i$  和动压系数  $C_d$  来调整仓壳所受压力的设计方法。即在静力设计法的基础上,增加一个冲击压力系数用于调整由松散物料的质量、加料方式、连续加料时引起的物料对料仓壳的冲击作用,冲击压力系数  $C_i$  的大小在 1.0 到 2.0 之间。增加一个动压系数用于调整排料时物料对料仓的各部分仓壳所起的动态增压作用,动压系数  $C_d$  在料仓的上部进料区取 1.0 到 2.0,在储料区取 2.0,在下部锥体区取 1.25。

动力设计的各种压力用下列公式计算;

动力设计的垂直压力:

$$dP_v = C_i P_v \quad \dots\dots\dots (77)$$

动力设计的水平压力:

$$dP_l = C_d P_l \quad \dots\dots\dots (78)$$

动力设计的法向压力:

$$dP_c = C_i P_c \text{ 或 } dP_c = C_d P_c \quad \dots\dots\dots (79)$$

德国规范采用的方法:

德国 DIN 1055-1987 年版第六部分中还提出了加料时和排料时仓壳所受压力的计算方法,在仓内物料面呈水平的情况下,排料时的摩擦力、水平压力和垂直压力都会发生相应变化,其具体计算公式为:

对于排放压力是均匀的情况:

物料与仓壳的摩擦力:

$$P_{we} = 1.1 P_{wf} \quad \dots\dots\dots (80)$$

水平压力:

$$P_{he} = e_h \cdot P_{hf} \quad \dots\dots\dots (81)$$

垂直压力:

$$P_{ve} < P_{vf} \quad \dots\dots\dots (82)$$

式中:

$e_h$  —— 超压系数,其值在 1.2~1.6 之间。

#### 5 制造、检验与验收

固体料仓的制造、检验与验收的要求相对 GB 150 而言,要求较低。故本部分对固体料仓的材料、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。



本部分与 JB/T 4735—1997 标准中“圆筒形料仓”内容相比, 将原标准中的“制造、检验与验收”分为: 第 7 章“钢制料仓的制造、检验与验收”和第 8 章“铝制料仓的制造、检验与验收”两个部分。

## 6 料仓的结构 (附录 A)

本部分对钢制固体料仓的仓壳结构, 列举出了部分常见的结构形式, 供设计者参考。

其中包括料仓的焊接接头结构、仓壳圆筒的外加强形式、料仓的各主要部分形式、接管与仓壳的焊接结构、细长接管加强结构。

对于铝制仓壳结构设计, 还应参照 JB/T 4734 中的相关规定。

## 7 例题 (裙座式料仓计算)

### 7.1 设计条件:

料仓公称容积:  $V=1500 \text{ m}^3$ ;

料仓内直径:  $D_i=10000 \text{ mm}$ ;

仓壳锥体半顶角:  $\theta=22.5^\circ$ ;

设计压力:  $p=0.029 \text{ MPa}$ ;

设计外压力:  $p_o=0.002 \text{ MPa}$ ;

设计温度:  $T=65^\circ\text{C}$ ;

物料内摩擦角:  $\psi=35^\circ$ ;

物料与料仓壳壁之间的摩擦系数:  $\mu=\tan(25^\circ)$ ;

基本风压值:  $q_0=450 \text{ N/m}^2$ ;

地面粗糙度: A 类;

雪载荷:  $q_w=600 \text{ N/m}^2$ ;

抗震设防烈度: 7 度;

设计地震分组: 第一组;

设计基本地震加速度:  $0.1 \text{ g}$ ;

场地土类别: III 类;

仓壳圆筒、仓壳锥体的腐蚀裕量和磨蚀裕量:  $C_2=0+1=1 \text{ mm}$ ;

裙座腐蚀裕量:  $C_2=2 \text{ mm}$ ;

地脚螺栓腐蚀裕量:  $C_2=3 \text{ mm}$ ;

仓壳圆筒、仓壳锥体以及仓壳顶材料: 0Cr18Ni9;

设计温度下 0Cr18Ni9 许用应力:  $[\sigma]^t=137 \text{ MPa}$ ;

仓壳焊接接头系数:  $\phi=0.85$ ;

设计温度下 0Cr18Ni9 屈服强度:  $R_{eL}(R_{p0.2})=206 \text{ MPa}$ ;

设计温度下 0Cr18Ni9 弹性模量:  $E^t=191000 \text{ MPa}$ ;

裙座材料: Q345R;

设计温度下 Q345R 许用应力:  $[\sigma]^t=197 \text{ MPa}$ ;

设计温度下 Q345R 屈服强度:  $R_{eL}(R_{p0.2})=295 \text{ MPa}$ ;

设计温度下 Q345R 弹性模量:  $E^t=191000 \text{ MPa}$ 。

7.2 料仓质量

将料仓沿高度方向分为 10 段，分段见图 11，视每段高度之间的质量作用在该段高度 1/2 处。

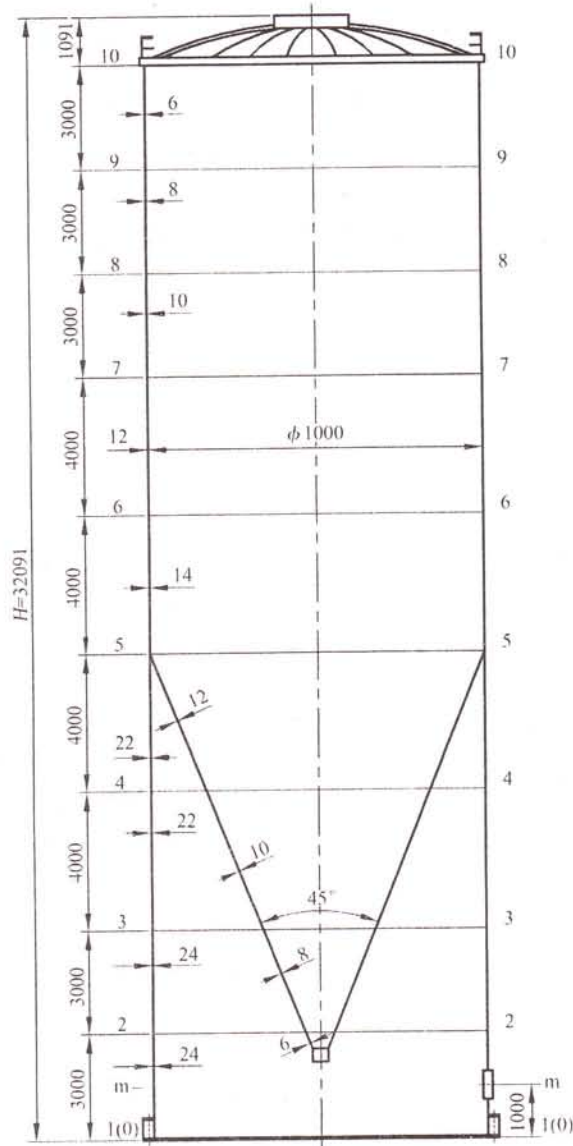


图 11

- 设定仓顶壳厚度为：6mm；
- 设定仓壳圆筒壁厚分别为：14mm，12mm，10mm，8mm，6mm；
- 设定仓壳锥体壁厚分别为：12mm，10mm，8mm，6mm；
- 设定裙座壳厚度分别为：24mm，24mm，22mm，22mm；
- 仓壳（包括支座）质量： $m_{o1}$  kg，见表 3；
- 平台、扶梯质量： $m_{o2}$  kg，见表 3；
- 物料堆积密度： $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$ ；
- 操作时料仓内物料质量： $m_{o3}$  kg，见表 3；
- 人孔、管件及仓壳顶上的附件（过滤器、吊柱等）质量： $m_a = 8000 \text{ kg}$ ；

第  $i$  段的操作质量:  $m_i$  kg, 见表 3;

料仓的操作质量:  $m_o = m_{o1} + m_{o2} + m_{o3} + m_a$ , 见表 3;

料仓的最小质量:  $m_{\min} = m_{o1} + m_{o2} + m_a$ , 见表 3;

料仓等效总质量:  $m_{eq} = m_a + \sum_{i=1}^n (\lambda_m m_{03i} + m_{01i} + m_{02i})$ , 见表 3;

等效质量系数: 地震计算时取  $\lambda_m = 0.85$ 。

表 3 料仓质量

kg

段号		$l_i$ ( mm )	$\delta$ ( mm )	$m_{o1}$	$m_{o2}$	$m_{o3}$	$m_a$	$m_i$
仓壳顶	10	1091	6	7000			8000	15000
仓壳圆筒	9	3000	6	4470	169.7	169646	0	174286
	8	3000	8	5961	169.7	282743		288874
	7	3000	10	7453	169.7	282743		290366
	6	4000	12	11927	226.3	376991		389145
	5	4000	14	13918	226.3	376991		391135
	裙座/ 仓壳锥 体	4	4000/4000	22/12	21888/10774	226.3		265872
3		4000/4000	22/10	21888/5415	226.3	98822		126352
2		3000/4000	24/8	17912/1379	169.7	14288		33749
1		3000/468	24/6	17912/53	169.7	218		18353
$\Sigma$				147951	1753.6	1868315		8000
$m_{\min}$				157705				
$m_o$				2026020				
$m_{eq}$				1745772				
注：表格内斜杠前表示裙座壳体数据，斜杠后表示锥壳体数据。								

### 7.3 地震载荷及地震弯矩

与物料特性有关的使用系数 (查 NB/T 47003.2 表 21):  $I=1.1$ ;

地震影响系数最大值 (查 NB/T 47003.2 表 20):  $\alpha_{\max}=0.08$ ;

一阶振型阻尼比:  $\zeta=0.03$ ;

阻尼调整系数:  $\eta_2 = 1 + \frac{0.05 - \zeta}{0.06 + 1.7\zeta} = 1 + \frac{0.05 - 0.03}{0.06 + 1.7 \times 0.03} = 1.18$ ;

地震影响系数:  $\alpha_1 = \eta_2 \alpha_{\max} = 1.18 \times 0.08 = 0.0944$ ;

重力加速度:  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ;

料仓总水平地震力:  $F_E = I \alpha_1 m_{eq} g = 1.1 \times 0.0944 \times 1745772 \times 9.81 = 1778366.3 \text{ N}$ ;

料仓第  $i$  段集中质量距地面的高度:  $h_i$  mm, 见表 4;

水平地震力:  $F_{Ei} = F_E \frac{m_i h_i}{\sum_{k=1}^n m_k h_k}$  ( $k=1, 2, \dots, n$ ), 见表 4。



表4 水平地震力

段号	$m_k (m_i)$ (kg)	$h_k (h_i)$ (mm)	$m_i h_i$	$m_i h_i / \sum m_k h_k$	$F_{Ei}$ , N
10	15000	31546	4.73E+08	0.012161	21627
9	174286	29500	5.14E+09	0.132137	234988
8	288874	26500	7.66E+09	0.196741	349879
7	290366	23500	6.82E+09	0.175370	311872
6	389145	20000	7.78E+09	0.200024	355716
5	391135	16000	6.26E+09	0.160838	286029
4	298760	12000	3.59E+09	0.092139	163858
3	126352	8000	1.01E+09	0.025978	46199
2	33749	4500	1.52E+08	0.003903	6941
1	18353	1500	2.75E+07	0.000708	1258
$\Sigma$			3.89E+10		

计算截面距地面高度:  $h$  mm, 见表5。

各截面地震弯矩:  $M_E^{1-i} = \sum_{k=i}^n F_{Ei} (h_k - h)$ , 见表5。

表5 各截面地震弯矩

段号	$F_{Ei}$ , N	$h_k$ , mm	$h$ , mm	1-1	2-2	3-3	4-4	5-5	6-6	7-7	8-8	9-9	10-10
10	21627	31546	31000	6.82E+08	6.17E+08	5.52E+08	4.66E+08	3.79E+08	2.93E+08	2.06E+08	1.42E+08	7.67E+07	1.18E+07
9	234988	29500	28000	6.93E+09	6.23E+09	5.52E+09	4.58E+09	3.64E+09	2.70E+09	1.76E+09	1.06E+09	3.52E+08	
8	349879	26500	25000	9.27E+09	8.22E+09	7.17E+09	5.77E+09	4.37E+09	2.97E+09	1.57E+09	5.25E+08		
7	311872	23500	22000	7.33E+09	6.39E+09	5.46E+09	4.21E+09	2.96E+09	1.72E+09	4.68E+08			
6	355716	20000	18000	7.11E+09	6.05E+09	4.98E+09	3.56E+09	2.13E+09	7.11E+08				
5	286029	16000	14000	4.58E+09	3.72E+09	2.86E+09	1.72E+09	5.72E+08					
4	163858	12000	10000	1.97E+09	1.47E+09	9.83E+08	3.28E+08						
3	46199	8000	6000	3.70E+08	2.31E+08	9.24E+07							
2	6941	4500	3000	3.12E+07	1.04E+07								
1	1258	1500	0	1.89E+06									
$\Sigma$ , N·mm				3.83E+10	3.29E+10	2.76E+10	2.06E+10	1.41E+10	8.40E+09	4.01E+09	1.72E+09	4.29E+08	1.18E+07

人孔截面地震弯矩:  $M_E^{m-m} = \sum_{k=1}^n F_{Ei} (h_k - 1000) = 3.65 \times 10^{10}$  N·mm。

#### 7.4 风载荷及风弯矩

体型系数:  $K_1=0.7$ ;

料仓各计算段风振系数 (料仓高度大于 20 米):  $K_{2i} = 1 + \frac{\xi v_i \Phi_{zi}}{f_i}$ ;

A 类地面粗糙度条件下, 查 NB/T 47003.2 表 23,  $q_1 = 1.38q_0 = 1.38 \times 450 = 621 \text{ N/m}^2$ ;

脉动增大系数 (查 NB/T 47003.2 表 23):  $\xi = 2.1505$ ;

根据地面粗糙度类型、高度, 查 NB/T 47003.2 表 22、表 24 得风压高度变化系数  $f_i$ 、脉冲影响系数  $v_i$ , 见表 6;

根据相对高度, 查 NB/T 47003.2 表 25 得第一振型系数:  $\phi_{zi}$ , 见表 6;

第  $i$  计算段长度:  $l_i$ , 见表 6;

料仓各计算段的外径:  $D_{oi}$ , 见表 6;

水平风载荷:  $P_i = K_1 K_{2i} q_0 f_i l_i D_{oi} \times 10^{-6}$ , 见表 6。

表 6 各截面水平风载荷

段号	$l_i$ , mm	$v_i$	$\phi_{zi}$	$f_i$	$K_{2i}$	$D_{oi}$ (mm)	$P_i$ (N)
10	1091	0.862	1	1.825	2.0157	10012	12661.02
9	3000	0.861	0.9956	1.812	2.0173	10012	34585.30
8	3000	0.854	0.9771	1.766	2.0161	10016	33700.28
7	3000	0.845	0.9384	1.715	1.9943	10020	32385.86
6	4000	0.836	0.8791	1.664	1.9498	10024	40978.33
5	4000	0.820	0.7691	1.586	1.8551	10028	37176.01
4	4000	0.800	0.6306	1.492	1.7271	10044	32611.60
3	4000	0.780	0.4685	1.380	1.5695	10044	27409.88
2	3000	0.468	0.2891	1.212	1.2401	10048	14271.15
1	3000	0.234	0.156	0.702	1.1118	10048	7411.15

各截面风弯矩:  $M_w^{i-1} = \frac{Pl_i}{2} + P_{i+1}(l_i + \frac{l_{i+1}}{2}) + P_{i+2}(l_i + l_{i+1} + \frac{l_{i+2}}{2}) + \dots$ , 见表 7。

表7 各截面风弯矩

段号	$P_i$ (N)	$l_i$ (mm)	1-1	2-2	3-3	4-4	5-5	6-6	7-7	8-8	9-9	10-10
10	12661.02	1091	3.99E +08	3.61E +08	3.23E +08	2.73E +08	2.22E +08	1.72E +08	1.21E +08	8.29E +07	4.49E +07	6.91E +06
9	34585.30	3000	1.02E +09	9.17E +08	8.13E +08	6.74E +08	5.36E +08	3.98E +08	2.59E +08	1.56E +08	5.19E +07	
8	33700.28	3000	8.93E +08	7.92E +08	6.91E +08	5.56E +08	4.21E +08	2.86E +08	1.52E +08	5.06E +07		
7	32385.86	3000	7.61E +08	6.64E +08	5.67E +08	4.37E +08	3.08E +08	1.78E +08	4.86E +07			
6	40978.33	4000	8.20E +08	6.97E +08	5.74E +08	4.10E +08	2.46E +08	8.20E +07				
5	37176.01	4000	5.95E +08	4.83E +08	3.72E +08	2.23E +08	7.44E +07					
4	32611.60	4000	3.91E +08	2.94E +08	1.96E +08	6.52E +07						
3	27409.88	4000	2.19E +08	1.37E +08	5.48E +07							
2	14271.15	3000	6.42E +07	2.14E +07								
1	7411.15	3000	1.11E +07									
$\Sigma, \text{N}\cdot\text{mm}$			5.17E +09	4.37E +09	3.59E +09	2.64E +09	1.81E +09	1.12E +09	5.80E +08	2.89E +08	9.68E +07	6.91E +06

人孔截面风弯矩:

$$M_{\text{w}}^{\text{m-m}} = P_1 \frac{l_1 - 1000}{2} + P_2 (l_1 - 1000 + \frac{l_2}{2}) + P_3 (l_1 - 1000 + l_2 + \frac{l_3}{2}) + \dots$$

$$+ P_{10} (l_1 - 1000 + l_2 + \dots + l_9 + \frac{l_{10}}{2}) = 4.90 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

### 7.5 物料对仓壳圆筒作用力

锥段以上物料堆积高度: 15800 mm;

料仓计算截面以上储料高度:  $h_{\text{w}}$  mm, 见表 8;

物料与仓壳圆筒壁之间摩擦系数:  $\mu = \tan 25^\circ = 0.4663$ ;

物料自然堆积上锥角高度:  $h_{\text{c}} = \frac{D_i}{2} \tan \psi = 3501 \text{ mm}$ ;

特性纵坐标值:  $A = \frac{D_i}{4 \tan \psi \tan^2 (45 - \frac{\psi}{2})} - \frac{h_{\text{c}}}{3} = 18617 \text{ mm}$ ;

物料在仓壳圆筒计算截面 I-I 处产生的水平压力:  $p_{\text{h}}^{1-1} = \frac{\rho g D_i}{4 \tan \psi'} \left[ 1 - \left( \frac{h_{\text{w}}}{A} + 1 \right)^{-2} \right] \times 10^{-9}$ , 见表 8;

物料在仓壳圆筒计算截面 I-I 处产生的垂直压力:  $p_{\text{v}}^{1-1} = \rho g \left[ h_{\text{w}} \left( \frac{h_{\text{w}}}{A} + 1 \right)^{-1} + \frac{h_{\text{c}}}{3} \right] \times 10^{-9}$ , 见表 8;

物料与仓壳圆筒间的摩擦力:  $F_{\text{f}}^{1-1} = \frac{\pi D_i^2 \rho g h_{\text{w}}^2}{4(h_{\text{w}} + A)} \times 10^{-9}$ , 见表 8;



表 8 物料对仓壳圆筒的摩擦力

段号	段高, mm	$h_w$ (mm)	$P_v$ (MPa)	$P_h$ (MPa)	$F_f$ (N)
9	3000	1800	0.033026	0.01063	146571.84
8	3000	4800	0.058601	0.02320	908758.84
7	3000	7800	0.078368	0.03174	2127174.5
6	4000	11800	0.098658	0.03943	4228097.7
5	4000	15800	0.114232	0.04460	6699440.3

## 7.6 仓壳圆筒应力

内压产生的轴向应力:  $\sigma_{z1}^{I-I} = \frac{pD_i}{4\delta_{ci}^{I-I}}$ , 见表 9;

物料与仓壳圆筒壁之间摩擦力产生的轴向应力:  $\sigma_{z2}^{I-I} = \frac{F_f^{I-I}}{\pi D_i \delta_{ci}^{I-I}}$ , 见表 9;

每一个计算截面上最大弯矩的计算:  $M_{\max}^{I-I} = \begin{cases} M_w^{I-I} \\ M_E^{I-I} + 0.25M_w^{I-I} \end{cases}$  取较大者, 见表 9;

最大弯矩产生的轴向应力:  $\sigma_{z3}^{I-I} = \frac{32D_o M_{\max}^{I-I}}{\pi(D_o^4 - D_i^4)}$ , 见表 9;

计算截面 I-I 以上的料仓壳体质量:  $m_{1up}^{I-I}$ , 按表 3 计算;

平台扶梯质量:  $m_{2up}^{I-I}$ , 按表 3 计算;

计算截面 I-I 以上的人孔、接管、法兰及仓壳顶安装的附件质量:  $m_{aup}^{I-I}$ , 按表 3 计算;

计算截面 I-I 以上的料仓壳体及附件质量:  $m_{up}^{I-I} = m_{1up}^{I-I} + m_{2up}^{I-I} + m_{aup}^{I-I}$ , 见表 9;

雪载荷:  $W_s = \frac{\pi}{4} D_o^2 q_w \times 10^{-6} = 47237 \text{ N}$ ;

截面以上仓壳重量及垂直地震力产生的轴向应力:  $\sigma_{z4}^{I-I} = \frac{m_{up}^{I-I} g + F_v^{I-I} + W_s}{\pi D_i \delta_{ci}^{I-I}}$ ,

(抗震设防烈度为 7 度,  $F_v^{I-I} = 0 \text{ N}$ ), 见表 9;

内压力和物料的水平压力筒壁中产生的周向应力:  $\sigma_{\theta}^{I-I} = \frac{(p + P_h^{I-I})D_i}{2\delta_{ci}^{I-I}}$ , 见表 9;

组合轴向应力:  $\sigma_z^{I-I} = \sigma_{z1}^{I-I} - \sigma_{z2}^{I-I} + \sigma_{z3}^{I-I} - \sigma_{z4}^{I-I}$ , 见表 9;

组合拉应力:  $\sigma_{zL}^{I-I} = \sqrt{(\sigma_z^{I-I})^2 + (\sigma_{\theta}^{I-I})^2} + \sigma_z^{I-I} \sigma_{\theta}^{I-I}$ , 见表 9;

组合压应力:  $\sigma_{zA}^{I-I} = \sigma_{z1}^{I-I} - \sigma_{z2}^{I-I} - \sigma_{z3}^{I-I} - \sigma_{z4}^{I-I}$ , 见表 9;

载荷组合系数:  $K = 1.2$ ;

轴向组合拉应力校核:  $\sigma_{zL}^{I-I} < K[\sigma]^t \phi = 1.2 \times 137 \times 0.85 = 140 \text{ MPa}$ ;

轴向组合压应力校核:  $\sigma_{zA}^{I-I} \leq [\sigma]_{cr}$ ,  $[\sigma]_{cr} = \begin{cases} KB \\ K[\sigma]^t \end{cases}$  取较小者, 见表 9;

钢板的厚度负偏差:  $C_1 = 0.8 \text{ mm}$ ;

壁厚附加量:  $C = C_1 + C_2 = 0.8 + 1 = 1.8 \text{ mm}$ ;

$$5-5 \text{ 截面系数: } A = 0.094 \frac{\delta_e}{R} = 0.094 \times \frac{14-1.8}{5000} = 2.294 \times 10^{-4};$$

5-5 截面系数 (查 GB 150 图 6-7):  $B = 29.2 \text{ MPa};$

$$6-6 \text{ 截面系数: } A = 0.094 \frac{\delta_e}{R} = 0.094 \times \frac{12-1.8}{5000} = 1.918 \times 10^{-4};$$

6-6 截面系数 (查 GB 150 图 6-7):  $B = 24.4 \text{ MPa};$

$$7-7 \text{ 截面系数: } A = 0.094 \frac{\delta_e}{R} = 0.094 \times \frac{10-1.8}{5000} = 1.542 \times 10^{-4};$$

7-7 截面系数 (查 GB 150 图 6-7):  $B = 19.6 \text{ MPa}。$

表 9 仓壳圆筒应力

段号	$\delta_e$ mm	$M_{\max}$ N·mm	$m_{\text{up}}^{1-1}$ kg	$\sigma_{z1}^{1-1}$ MPa	$\sigma_{z2}^{1-1}$ MPa	$\sigma_{z3}^{1-1}$ MPa	$\sigma_{z4}^{1-1}$ MPa	$\sigma_z^{1-1}$ MPa	$\sigma_\theta^{1-1}$ MPa	$\sigma_{zL}^{1-1}$ MPa	$\sigma_{zA}^{1-1}$ MPa	$[\sigma]_{\text{cr}}$ MPa
9	6-1.8	9.86E+08	19470	17.26	1.11	2.09	1.8	16.44	33.02	28.6	12.26	
8	8-1.8	1.94E+09	25431	11.69	4.67	3.08	1.52	8.59	32.62	29.29	2.42	
7	10-1.8	4.19E+09	32884	8.84	8.26	5.33	1.43	4.48	30.37	28.39	-6.18	23.52
6	12-1.8	8.59E+09	44811	7.11	13.19	9.1	1.52	1.5	28.51	27.79	-16.71	29.28
5	14-1.8	1.42E+10	58729	5.94	17.48	12.9	1.62	-0.26	26.29	26.42	-26.06	35.04

注: 组合应力  $\sigma_{zL}^{1-1}$ 、 $\sigma_{zA}^{1-1}$  中, “+” 表示拉应力, “-” 表示压应力校核通过。

### 7.7 物料对仓壳锥体的作用力以及仓壳锥体应力

仓壳锥体计算截面 a-a 处的内直径:  $D_{zi}^{a-a}$ , 见表 10;

物料在仓壳锥体计算截面 a-a 处的锥角高:  $h_{zc} = \frac{D_{zi}^{a-a}}{2} \tan \psi$ , 见表 10;

仓壳锥体特性纵坐标值:  $A_z = \frac{D_{zi}^{a-a}}{4 \tan \psi' \tan^2 (45 - \frac{\psi}{2})} - \frac{h_{zc}}{3}$ , 见表 10;

物料对仓壳锥体计算截面处产生的垂直压力:  $p_v^{a-a} = \rho g \left[ h_w \left( \frac{h_w}{A_z} + 1 \right)^{-1} + \frac{h_{zc}}{3} \right] \times 10^{-9}$ , 见表 10;

物料对仓壳锥体计算截面处产生的水平压力  $p_h^{a-a} = \frac{\rho g D_{zi}}{4 \tan \psi'} \left[ 1 - \left( \frac{h_w}{A_z} + 1 \right)^{-2} \right] \times 10^{-9}$ , 见表 10;

物料对仓壳锥体计算截面处产生的法向压力  $p_n^{a-a} = p_v^{a-a} \sin^2 \theta + p_h^{a-a} \cos^2 \theta$ , 见表 10;

仓壳锥体任意截面 a-a 处由设计压力  $p$  和垂直于其壁面的法向压应力  $p_n^{a-a}$  产生的周向应

力:  $\sigma_\theta^{a-a} = \frac{(p + p_n^{a-a}) D_{zi}^{a-a}}{2 \delta_{ci}^{a-a} \cos \theta}$ , 见表 10;

仓壳锥体计算截面 a-a 以下的仓壳锥体质量与仓壳锥体计算截面 a-a 以下的仓壳锥体所储物料质量之和:  $m_c^{a-a}$ , 见表 10;

仓壳锥体任意截面 a-a 处由设计压力  $p$  和物料垂直压应力  $p_v^{a-a}$  产生的轴向应力:

$$\sigma_z^{a-a} = \frac{(p + p_v^{a-a})D_{zi}^{a-a}}{4\delta_{ci}^{a-a}\cos\theta} + \frac{m_c^{a-a}g}{\pi D_{zi}^{a-a}\delta_{ci}^{a-a}\cos\theta}, \text{ 见表 10;}$$

截面 a-a 处组合应力:  $\sigma_\Sigma^{a-a} = \sqrt{(\sigma_z^{a-a})^2 + (\sigma_\theta^{a-a})^2} - \sigma_z^{a-a}\sigma_\theta^{a-a}$ , 见表 10;

轴向组合拉应力校核:  $\sigma_\Sigma^{a-a} < K[\sigma]^t \phi = 1.2 \times 137 \times 0.85 = 140 \text{ MPa}$ ;

钢板的厚度负偏差:  $C_1 = 0.8 \text{ mm}$ ;

壁厚附加量:  $C = C_1 + C_2 = 0.8 + 1 = 1.8 \text{ mm}$ 。

表 10 物料对仓壳锥体的作用力以及仓壳锥体应力

段号	段高, mm	$h_w$ (mm)	$D_{zi}$ (mm)	$h_{zc}$ (mm)	$A_z$ (mm)	$P_v^{a-a}$ (MPa)	$P_h^{a-a}$ (MPa)	$P_n^{a-a}$ (MPa)
4	4000	15800	10000	3501	18617	0.11423	0.04460	0.05480
3	4000	19800	6687	2341	12448	0.09906	0.03588	0.04513
2	3000	23800	3373	1181*	6279	0.06306	0.02034	0.02660
1	468	26800	888	311	1653	0.01953	0.00558	0.00762

段号	$\delta_e$ (mm)	$m_c^{a-a}$ (kg)	$\sigma_z^{a-a}$ (MPa)	$\sigma_\theta^{a-a}$ (MPa)	$\sigma_\Sigma^{a-a}$ (MPa)	$K[\sigma]^t \phi$ (MPa)	结论
4	12-1.8	396820.5	51.13	44.46	48.15	140	校核通过
3	10-1.8	120174.8	35.66	32.71	34.28		校核通过
2	8-1.8	15937.5	16.13	16.37	16.25		校核通过
1	6-1.8	270.7	3.02	4.19	3.75		校核通过

## 7.8 裙座壳应力

裙座壳应力:

$$\sigma_1 = \frac{M_{\max}^{0-0}}{Z_{sb}} + \frac{m_o g + F_v^{0-0}}{A_{sb}} \leq \begin{cases} KB \\ K[\sigma]^t \end{cases}, \text{ 见表 11;}$$

$$\sigma_2 = \frac{0.3M_w^{0-0}}{Z_{sb}} + \frac{m_{\max} g}{A_{sb}} \leq \begin{cases} B \\ 0.9R_{cl} \end{cases}, \text{ 见表 11;}$$

人孔截面 m-m 截面应力计算公式:

$$\sigma_1 = \frac{M_{\max}^{m-m}}{Z_{sm}} + \frac{m_o^{m-m} g + F_v^{m-m}}{A_{sm}} \leq \begin{cases} KB \\ K[\sigma]^t \end{cases}, \text{ 见表 11;}$$

$$\sigma_2 = \frac{0.3M_w^{m-m}}{Z_{sb}} + \frac{m_{\max}^{m-m} g}{A_{sb}} \leq \begin{cases} B \\ 0.9R_{cl} \end{cases}, \text{ 见表 11;}$$

钢板的厚度负偏差:  $C_1 = 0.8 \text{ mm}$ ;

壁厚附加量:  $C = C_1 + C_2 = 0.8 + 2 = 2.8 \text{ mm}$ ;

1-1、2-2、m-m 截面系数:  $A = 0.094 \frac{\delta_{cs}}{R} = 0.094 \times \frac{24 - 2.8}{5000} = 3.9856 \times 10^{-4}$ ;

1-1、2-2、m-m 截面系数 (查 GB150 图 6-5):  $B = 50.75 \text{ MPa}$ ;



$$3-3、4-4 \text{ 截面系数: } A = 0.094 \frac{\delta_{es}}{R} = 0.094 \times \frac{22-2.8}{5000} = 3.6096 \times 10^{-4};$$

3-3、4-4 截面系数 (查 GB150 图 6-5):  $B = 45.96 \text{ MPa};$

人孔截面开孔加强管长度:  $l_m = 120 \text{ mm};$

人孔截面处水平方向的最大宽度:  $b_m = 500 \text{ mm};$

人孔截面开孔加强管厚度 (查图 15):  $\delta_m = 16 \text{ mm};$

$$A_{Sm} = \pi D_{is} \delta_{es} - \sum [(b_m + 2\delta_m) \delta_{es} - A_m] \\ = \pi \times 10000 \times (24 - 2.8) - [(500 + 2 \times 16) \times (24 - 2.8) - 2 \times 120 \times 16] = 6.586 \times 10^5 \text{ mm}^2;$$

$$Z_m = 2\delta_{es} l_m \sqrt{\left(\frac{D_{is}}{2}\right)^2 - \left(\frac{b_m}{2}\right)^2} = 2 \times (24 - 2.8) \times 120 \sqrt{\left(\frac{10000}{2}\right)^2 - \left(\frac{500}{2}\right)^2} = 2.5408 \times 10^7 \text{ mm}^3;$$

$$Z_{sm} = \frac{\pi}{4} D_{is}^2 \delta_{es} - \sum (b_m D_{is} \frac{\delta_{es}}{2} - Z_m) = \frac{\pi}{4} \times 10000^2 \times (24 - 2.8) - (500 \times 10000 \times \frac{(24 - 2.8)}{2} - 2.5408 \times 10^7) = 1.637 \times 10^9 \text{ mm}^3。$$

表 11 裙座壳的应力

段号	$\delta_s$ mm	$m_o, m_{max}$ kg	$M_{max}$ N·mm	$Z_{sb} (Z_{sm})$ mm <sup>3</sup>	$A_{sb} (A_{sm})$ mm <sup>2</sup>	$\sigma_1$ MPa	$\sigma_2$ MPa	$KB$ MPa	$K [\sigma]^1$ MPa	$0.9\sigma_s$ MPa	结论
4	22	1968307	2.13 E+10	1.728 E+09	6.912 E+05	40.23	28.37	55.15	195.6	292.5	校核通过
3	22	1990195	2.85 E+10	1.728 E+09	6.912 E+05	44.72	28.84	55.15			校核通过
2	24	2008107	3.40 E+10	1.885 E+09	7.540 E+05	44.16	26.80	60.9			校核通过
1	24	2026020	3.96 E+10	1.885 E+09	7.540 E+05	47.33	27.16	60.9			校核通过
m-m	24	2026020	3.77 E+10	1.637 E+09	6.586 E+05	53.19	31.05	60.9			校核通过

## 7.9 基础环厚度

基础环外径:  $D_{ob} = D_{is} + (160 \sim 400) = 10000 + 300 = 10300 \text{ mm};$

基础环内径:  $D_{ib} = D_{is} - (160 \sim 400) = 10000 - 300 = 9700 \text{ mm};$

$$\text{基础环面积: } A_b = \frac{\pi}{4} (D_{ob}^2 - D_{ib}^2) = \frac{\pi}{4} (10300^2 - 9700^2) = 9.4248 \times 10^6 \text{ mm}^2;$$

$$\text{基础环的截面模数: } Z_b = \frac{\pi (D_{ob}^4 - D_{ib}^4)}{32 D_{ob}} = \frac{\pi (10300^4 - 9700^4)}{32 \times 10300} = 2.2896 \times 10^{10} \text{ mm}^3;$$

混凝土基础上的最大压应力 (下式中的取大值):

$$\sigma_{bmax} = \begin{cases} \frac{M_{max}^{0-0}}{Z_b} + \frac{m_o g}{A_b} = \frac{3.96 \times 10^{10}}{2.2896 \times 10^{10}} + \frac{2026020 \times 9.81}{9.4248 \times 10^6} = 3.83 \text{ MPa} \\ \frac{0.3 M_w^{0-0}}{Z_b} + \frac{m_{max} g}{A_b} = \frac{0.3 \times 5.17 \times 10^9}{2.2896 \times 10^{10}} + \frac{2026020 \times 9.81}{9.4248 \times 10^6} = 2.17 \text{ MPa} \end{cases}$$

取混凝土基础上的最大压应力为 3.83MPa;

采用带筋板结构,两个螺栓座之间筋板数量:  $n_j=5$ ;

地脚螺栓数量:  $n=24$ ;

筋板内侧间距:  $l_3=100\text{ mm}$ ;

裙座基础板外边缘到裙座壳外表面的距离(查 NB/T 47003.2 图 15):  $b = \frac{D_{ob} - D_{is}}{2} - \delta_s = 126\text{ mm}$ ;

筋板厚度:  $\delta_G = 18\text{ mm}$ ;

筋板间最大间距:  $l = (\frac{\pi D_{ob}}{n} - l_3 - \delta_G) / (n_j + 1) - \delta_G = 187\text{ mm}$ ;

$b/l = 0.670$  (查 NB/T 47003.2 表 29)  $C_X = -0.2264$ ,  $C_Y = 0.05629$ ;

$M_X = C_X \sigma_{b\max} b^2 = -0.2264 \times 3.83 \times 126^2 = -13766.27\text{ N}\cdot\text{mm}$ ;

$M_Y = C_Y \sigma_{b\max} l^2 = 0.05629 \times 3.83 \times 187^2 = 7538.99\text{ N}\cdot\text{mm}$ ;

$M_s = \max\{|M_X|, |M_Y|\} = 13766.27\text{ N}\cdot\text{mm}$ ;

基础环板的厚度:  $\delta_b = \sqrt{\frac{6M_s}{[\sigma]_b}} = \sqrt{\frac{6 \times 13766.27}{170}} = 22.1\text{ mm}$ ;

考虑腐蚀裕量 2 mm, 基础环厚度取 26 mm。

#### 7.10 地脚螺栓

地脚螺栓材料: Q235A;

地脚螺栓材料的许用应力(GB/T 700):  $[\sigma]_{bt} = 147\text{ MPa}$ ;

地脚螺栓承受的最大拉应力(下式中的取大值):

$$\sigma_B = \begin{cases} \frac{M_W^{0-0}}{Z_b} - \frac{m_{\min} g}{A_b} = \frac{5.17 \times 10^9}{2.2896 \times 10^{10}} - \frac{157705 \times 9.81}{9.4248 \times 10^6} = 0.062\text{ MPa} \\ \frac{M_E^{0-0} + 0.25 M_W^{0-0}}{Z_b} - \frac{m_o g - F_v^{0-0}}{A_b} \\ = \frac{3.83 \times 10^{10} + 0.25 \times 5.17 \times 10^9}{2.2896 \times 10^{10}} - \frac{2026020 \times 9.81}{9.4248 \times 10^6} = -0.3785\text{ MPa}; \end{cases}$$

取地脚螺栓承受的最大拉应力为 0.06200 MPa;

地脚螺栓的螺纹小径:  $d_1 = \sqrt{\frac{4\sigma_B A_b}{\pi[\sigma]_{bt}}} + C_2 = \sqrt{\frac{4 \times 0.06200 \times 9.4248 \times 10^6}{\pi \times 24 \times 147}} + 3 = 17.52\text{ mm}$ ;

设置 24 个 M24 × 3 地脚螺栓, 校核通过。

#### 7.11 筋板

筋板材料的许用应力:  $[\sigma]_G = 170\text{ MPa}$ ;

对应于一个地脚螺栓的筋板数:  $n_1 = n_j + 2 = 7$ ;

筋板宽度:  $l_2 = 126\text{ mm}$ ;

筋板长度:  $l_k = 200\text{ mm}$ ;

一个地脚螺栓承受的最大拉力:  $F = \frac{\sigma_B A_b}{n} = \frac{0.062 \times 9.4248 \times 10^6}{24} = 24347.4\text{ N}$ ;

$$\text{细长比: } \lambda = \frac{0.5l_k}{\rho_i} = \frac{0.5 \times 200}{0.289 \times 18} = 19.223;$$

$$\text{临界细长比: } \lambda_c = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6[\sigma]_G}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \times 191000}{0.6 \times 170}} = 135.95;$$

$$\text{系数: } \nu = 1.5 + \frac{2}{3} \left( \frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^2 = 1.5 + \frac{2}{3} \times \left( \frac{19.223}{135.95} \right)^2 = 1.5133;$$

筋板的许用压应力 ( $\lambda < \lambda_c$ ):

$$[\sigma]_c = \frac{[1 - 0.4 \left( \frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^2][\sigma]_G}{\nu} = \frac{[1 - 0.4 \times \left( \frac{19.223}{135.95} \right)^2] \times 170}{1.5133} = 111.44 \text{ MPa};$$

$$\text{筋板压应力: } \sigma_G = \frac{F}{n_1 \delta_G l_2} = \frac{24347.4}{7 \times 18 \times 126} = 1.53 \text{ MPa} \leq [\sigma]_c;$$

校核通过。

## 7.12 盖板

盖板材料的许用应力: 170 MPa;

垫板宽度:  $l_4 = 60 \text{ mm}$ ;

垫板上的地脚螺栓孔直径:  $d_2 = 27 \text{ mm}$ ;

盖板上的地脚螺栓孔直径:  $d_3 = 40 \text{ mm}$ ;

盖板厚度:  $\delta_c = 24 \text{ mm}$ ;

垫板厚度:  $\delta_z = 12 \text{ mm}$ ;

环形盖板的最大压应力:

$$\sigma_z = \frac{3Fl_3}{4(l_2 - d_3)\delta_c^2 + 4(l_4 - d_2)\delta_z^2} = \frac{3 \times 24346.6 \times 100}{4 \times (126 - 40) \times 24^2 + 4 \times (60 - 27) \times 12^2} = 33.64 \text{ MPa};$$

$\sigma_z < 170 \text{ MPa}$ , 校核通过。

注:

例题中未包括下列内容的计算:

- 1) 仓顶壳计算及加强结构;
- 2) 仓壳顶与仓壳圆筒连接处的加强结构;
- 3) 仓壳锥体与仓壳圆筒连接处的加强结构;
- 4) 仓壳圆筒加强结构。

在工程设计计算时, 请按 NB/T 47003.1 和其他相关规范及企业标准等进行上述项目的计算。