

UDC

中华人民共和国国家标准



P

GB 50884 – 2013

钢筒仓技术规范

Code for design of steel silo structures

2013 – 06 – 08 发布

2013 – 12 – 01 实施

中华人民共和国住房和城乡建设部
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局

联合发布

中华人民共和国国家标准

钢筒仓技术规范

Code for design of steel silo structures

GB 50884-2013

主编部门:中国有色金属工业协会

批准部门:中华人民共和国住房和城乡建设部

施行日期:2013年12月1日

中国计划出版社

2013 北 京

中华人民共和国住房和城乡建设部公告

第 52 号

住房城乡建设部关于发布国家标准 《钢筒仓技术规范》的公告

现批准《钢筒仓技术规范》为国家标准，编号为 GB 50884—2013，自 2013 年 12 月 1 日起实施。其中，第 4.1.1、4.2.2、5.1.2、6.1.2 条为强制性条文，必须严格执行。

本规范由我部标准定额研究所组织中国计划出版社出版发行。

中华人民共和国住房和城乡建设部

2013 年 6 月 8 日

前 言

本规范是根据原建设部《关于印发〈2007 年工程建设标准规范制订、修订计划(第二批)〉的通知》(建标〔2007〕126 号)的要求,本规范由中国瑞林工程技术有限公司会同有关单位共同编制完成。

本规范在编制过程中,规范编制组经广泛调查研究,认真总结钢筒仓工程建设经验,参考国内、外相关行业标准的有关内容,并在广泛征求意见的基础上编制本规范。

本规范共分 8 章和 4 个附录,主要技术内容包括:总则、术语和符号、基本规定、荷载与荷载效应组合、圆形钢筒仓、矩形钢筒仓、支承结构与基础、内衬与防护等。

本规范中以黑体字标志的条文为强制性条文,必须严格执行。

本规范由住房城乡建设部负责管理和对强制性条文的解释,由中国有色金属工业工程建设标准规范管理处负责日常管理,由中国瑞林工程技术有限公司负责技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议,请寄送中国瑞林工程技术有限公司技术质量部(地址:江西省南昌市红角洲前湖大道 888 号,邮政编码:330031)。

本规范主编单位、参编单位、主要起草人和主要审查人:

主 编 单 位:中国瑞林工程技术有限公司

参 编 单 位:天津水泥工业设计研究院有限公司

中冶京诚工程技术有限公司

西安有色冶金设计研究院

中国矿业大学(北京)

福州大学

中国石化集团南京设计院

主要起草人:	徐世晖	左菊林	李大浪	高连松	关晓松
	吴灵宇	陈军武	吴丽丽	林 翔	吕辉勇
	朱颂华	沈虹波	黄恒平	董 超	任存斌
主要审查人:	熊进刚	朱建平	侯 越	郭立湘	段建华
	李世虎	叶 菲	李寿明	刘惠东	付国顺
	武 力				

目 次

1	总 则	(1)
2	术语和符号	(2)
2.1	术语	(2)
2.2	符号	(3)
3	基本规定	(5)
3.1	一般规定	(5)
3.2	材料	(5)
3.3	结构布置原则	(7)
3.4	结构选型	(8)
4	荷载与荷载效应组合	(10)
4.1	一般规定	(10)
4.2	贮料荷载	(10)
4.3	地震作用	(16)
4.4	荷载效应组合	(19)
5	圆形钢筒仓	(21)
5.1	一般规定	(21)
5.2	仓顶	(21)
5.3	仓壁	(23)
5.4	仓底	(31)
5.5	构造	(34)
6	矩形钢筒仓	(36)
6.1	一般规定	(36)
6.2	结构计算	(37)
6.3	构造	(40)

7 支承结构与基础	(42)
8 内衬与防护	(43)
附录 A 常用贮料的物理特性参数	(45)
附录 B 浅圆仓贮料压力计算公式	(47)
附录 C 贮料荷载计算系数	(51)
附录 D 旋转壳体在对称荷载下的薄膜内力	(54)
本规范用词说明	(59)
引用标准名录	(60)
附:条文说明	(63)

Contents

1	General provisions	(1)
2	Terms and symbols	(2)
2.1	Terms	(2)
2.2	Symbols	(3)
3	Basic requirements	(5)
3.1	General requirement	(5)
3.2	Materials	(5)
3.3	Structure layout principle	(7)
3.4	Structure selection	(8)
4	Load and load effect combination	(10)
4.1	General requirement	(10)
4.2	Storage loading	(10)
4.3	Earthquake action	(16)
4.4	Load effect combination	(19)
5	Circular steel silo	(21)
5.1	General requirement	(21)
5.2	Steel silo roof	(21)
5.3	Steel silo wall	(23)
5.4	Steel silo hooper	(31)
5.5	Details	(34)
6	Rectangular steel silo	(36)
6.1	General requirement	(36)
6.2	Structural calculation	(37)
6.3	Details	(40)

7	Structural support and foundation	(42)
8	Lining and protection	(43)
Appendix A	Common storage physical characteristics	(45)
Appendix B	Storage presssure computational formula of shallow bin	(47)
Appendix C	Load coefficient	(51)
Appendix D	Film internal force of rotatory shell in symmetrical	(54)
	Explanation of wording in this code	(59)
	List of quoted standards	(60)
	Addition;Explanation of provisions	(63)

1 总 则

1.0.1 为在钢筒仓设计中贯彻执行国家的技术经济政策,做到技术先进、经济合理、安全适用、确保质量,制定本规范。

1.0.2 本规范适用于符合下列条件的钢筒仓设计:

- 1 建材、煤炭、冶金、化工、石化行业;
- 2 水平平面形状为圆形或矩形;
- 3 采用中心装、卸料方式;
- 4 贮存的物料为固体散料。

1.0.3 钢筒仓的设计除应符合本规范外,尚应符合国家现行的有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 钢筒仓 steel silo

平面为圆形、方形、矩形、多边形或其他几何形状的贮存散料的直立钢容器。

2.1.2 仓顶 top of silo

封闭仓体顶面的结构。

2.1.3 仓壁 barrel

钢筒仓与贮料直接接触且承受贮料侧压力的仓体竖壁。

2.1.4 漏斗 hopper

仓体底部收小口的部分,卸出贮料的容器。

2.1.5 筒壁 supporting wall

平面与仓体相同,支承仓体的立壁。

2.1.6 仓下支承结构 supporting structure of silo bottom

钢筒仓基础以上仓体以下的支承结构。

2.1.7 斜壁 inclined wall

构成漏斗的倾斜仓壁。

2.1.8 深仓 deep bin

贮料计算高度 h_n 与圆形仓内径 d_n 或与矩形仓的短边 b_n 之比大于或等于 1.5 时的钢筒仓。

2.1.9 浅仓 shallow bin

贮料计算高度 h_n 与圆形仓内径 d_n 或与矩形仓的短边 b_n 之比小于 1.5 时的钢筒仓。

2.1.10 单仓 single silo

不与其他建、构筑物联成整体的单体钢筒仓。

2.1.11 排仓 silos in line

按单线排列并联为整体的矩形钢筒仓。

2.1.12 群仓 group silos

三个或多于三个非单线排列且联为整体的矩形钢筒仓。

2.1.13 填料 filler

用于仓底构成卸料斜坡的填充材料。

2.1.14 内衬 liner

用于仓底,漏斗及部分仓壁的保护、抗磨耗且有利于贮料流动的衬砌。

2.2 符 号

2.2.1 几何参数

a_n ——矩形钢筒仓长边;

b_n ——矩形钢筒仓短边;正方形钢筒仓边长;

d_n ——圆形钢筒仓内径;

h ——仓壁高度;

h_n ——贮料计算高度;

h_h ——漏斗高度;

r ——圆形钢筒仓的半径;

t ——仓壁、漏斗或筒壁厚度;

α ——漏斗壁与水平面的夹角;

ρ ——钢筒仓水平净截面的水力半径。

2.2.2 计算系数

C_h ——贮料水平压力修正系数;

C_v ——贮料竖向压力修正系数;

C_f ——贮料摩擦压力修正系数;

k ——侧压力系数;

α_1 ——相应于结构基本自振周期的水平地震影响系数值;

K_p ——仓壁竖向受压稳定系数;

γ ——贮料重力密度；
 μ ——贮料与仓壁的摩擦系数；
 φ ——贮料的内摩擦角。

2.2.3 作用

F_k ——作用于矩形钢筒仓仓壁上的集中荷载标准值；环线轴
力标准值；
 P_{fk} ——贮料作用于计算截面以上仓壁单位周长上的总竖向摩
擦力标准值；
 P_{hk} ——贮料作用于仓壁单位面积上的水平压力标准值；
 P_{nk} ——贮料作用于漏斗斜壁单位面积上的法向压力标准值；
 P_{vk} ——贮料作用于仓底或漏斗顶面处单位面积上的竖向压力
标准值；贮料顶面或贮料锥体重心以下距离 h 处单位
面积上的竖向压力标准值；
 P_{tk} ——漏斗壁单位面积上切向压力标准值；
 P_{yk} ——均化仓仓壁上的水平压力标准值。

2.2.4 作用效应

N_h ——矩形浅仓仓壁的水平拉力；角锥形漏斗壁的水平拉力；
 N_v ——矩形浅仓仓壁的竖向力；
 N_{inc} ——角锥形漏斗壁的竖向力；
 N ——角锥形漏斗壁交角顶部的斜向拉力。

2.2.5 其他

s ——贮料顶面或贮料锥体重心至所计算截面处的距离；
 γ ——贮料的重力密度；
 E ——钢材的弹性模量；
 f ——钢材抗拉、抗压强度设计值；
 f_t^w ——对接焊缝抗拉强度设计值；
 f_c^w ——对接焊缝抗压强度设计值；
 f_t^w ——角焊缝抗拉、抗压和抗剪强度设计值；
 σ_{cr} ——受压构件临界应力。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 钢筒仓结构的设计使用年限不应少于 25 年。

3.1.2 钢筒仓结构的安全等级宜为二级,抗震设防类别宜为丙类,地基基础设计等级宜为乙级。当与其他建筑连为一体时,钢筒仓的安全等级、抗震设防类别及地基基础设计等级不应低于建筑物的等级和类别。

3.1.3 钢筒仓的耐火等级应符合国家现行有关标准的规定。

3.1.4 储存粉尘及其他易爆性物料的钢筒仓,相关工艺专业应根据不同的贮料特性分别设置防爆、泄爆、防静电、防明火及防雷电等设施。

3.1.5 独立布置的钢筒仓应设置沉降观测点(岩石地基除外)。

3.1.6 钢筒仓与毗邻的建(构)筑物之间或群仓地基土的压缩性有显著差异时,应采取防止不均匀沉降的措施。

3.1.7 钢筒仓设计文件中,应对首次装卸料要求、沉降观测及标志设置等予以说明。

3.2 材 料

3.2.1 为保证钢筒仓的承载能力和防止在一定条件下出现脆性破坏,应根据结构的重要性、荷载特征、结构形式、应力状态、连接方法、钢材厚度、工作环境和气候条件等因素选用钢材牌号和材性。

3.2.2 钢筒仓的材料宜采用 Q235 钢、Q345 钢、Q390 钢和 Q420 钢,其质量应分别符合现行国家标准《碳素结构钢》GB/T 700 和《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 的有关规定,并不应低于 B 级。当采用其他牌号的钢材时,应符合现行国家标准《钢结构设计

规范》GB 50017 的有关规定。

3.2.3 钢筒仓采用的钢材应具有抗拉强度、伸长率、屈服强度和硫、磷含量的合格保证,焊接结构还应具有碳含量以及冷弯试验的合格保证。

3.2.4 钢筒仓仓壁为波纹板、螺旋卷边板、肋型钢板时,应采用热镀锌或合金钢板。

3.2.5 钢铸件采用的铸钢材质应符合现行国家标准《一般工程用铸造碳钢件》GB/T 11352 的有关规定。

3.2.6 对处于外露环境,且对耐腐蚀有特殊要求或在腐蚀性气体和固态介质作用下的筒仓结构,宜采用 Q235NH、Q345NH 和 Q415NH 牌号的耐候结构钢,性能和技术条件应符合现行国家标准《耐候结构钢》GB/T 4171 的有关规定。

3.2.7 钢筒仓的连接材料应符合下列要求:

1 手工焊接采用的焊条,应符合现行国家标准《非合金钢及细晶粒钢焊条》GB/T 5117 或《热强钢焊条》GB/T 5118 的有关规定。选择的焊条型号应与主体金属力学性能相适应。对直接承受动力荷载或振动荷载且需要验算疲劳的结构,宜采用低氢型焊条;

2 自动焊接或半自动焊接采用的焊丝和相应的焊剂应与主体金属力学性能相适应,并应符合现行国家标准《埋弧焊用碳钢焊丝和焊剂》GB/T 5293 和《埋弧焊用低合金钢焊丝和焊剂》GB/T 12470 的有关规定;

3 普通螺栓应符合现行国家标准《六角头螺栓 C 级》GB/T 5780 和《六角头螺栓》GB/T 5782 的有关规定。

4 高强度螺栓应符合现行国家标准《钢结构用高强度大六角头螺栓》GB/T 1228、《钢结构用高强度大六角螺母》GB/T 1229、《钢结构用高强度垫圈》GB/T 1230、《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件》GB/T 1231 或《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副》GB/T 3632 的有关规定;

5 圆柱头焊钉(栓钉)连接件的材料应符合现行国家标准《电

弧螺柱焊用圆柱头焊钉》GB/T 10433 的有关规定；

6 铆钉应采用现行国家标准《标准件用碳素钢热轧圆钢》GB/T 715 中规定的 BL2 或 BL3 钢；

7 锚栓宜采用现行国家标准《碳素结构钢》GB/T 700 中规定的 Q235 钢或《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 中规定的 Q345 钢。

3.2.8 钢筒仓结构及连接材料的设计指标,应按现行有关国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 和《冷弯薄壁型钢结构技术规范》GB 50018 的有关规定执行。

3.3 结构布置原则

3.3.1 钢筒仓的平面及竖向布置,应根据工艺、地形、工程地质和施工等条件,经技术经济比较后确定。

3.3.2 钢筒仓仓群平面布置形式,圆形钢筒仓宜采用独立布置形式,矩形钢筒仓可采用仓体相连的群仓布置形式(图 3.3.2)。

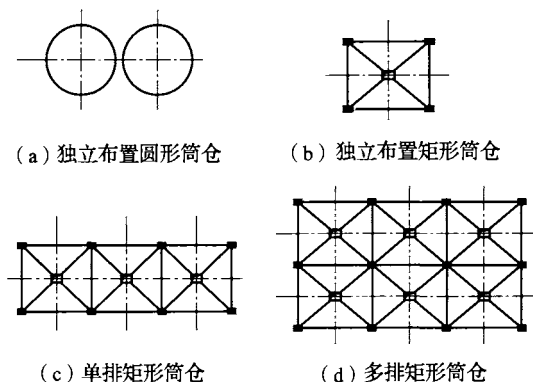


图 3.3.2 钢筒仓仓群平面布置形式示意图

3.3.3 钢筒仓的平面形状,除工艺特殊要求外宜采用圆形。

3.3.4 跨铁路专用线的钢筒仓,应同时符合国家现行有关标准的规定。

3.3.5 靠近钢筒仓处不宜设置堆料场,当必须设置时,应验算堆载对钢筒仓结构及地基的不利影响。

3.3.6 钢筒仓仓顶上不宜设置有筛分等振动设备。

3.3.7 钢筒仓的安全通道、维护结构应符合国家现行有关标准的规定。

3.4 结构选型

3.4.1 钢筒仓结构可分为仓上建筑物、仓顶、仓壁、仓底、仓下支承结构(筒壁或柱)及基础六部分(图 3.4.1)。

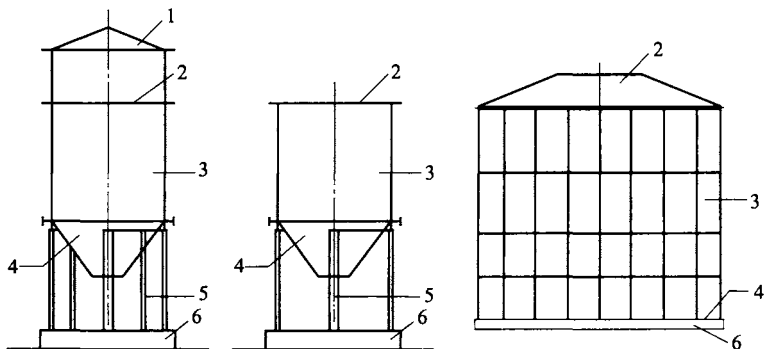


图 3.4.1 钢筒仓结构示意图

1—仓上建筑物;2—仓顶;3—仓壁;

4—仓底;5—仓下支承结构(柱-支撑或柱-抗震墙);6—基础

3.4.2 圆锥及角锥形漏斗壁与平面的夹角或漏斗壁的坡度应由相关工艺专业提供。

3.4.3 钢筒仓仓底结构的选型应符合下列要求:

- 1 荷载传递明确,结构受力合理;
- 2 造型简单,施工方便;
- 3 相关专业要求。

3.4.4 钢筒仓可采用钢或钢筋混凝土仓底及仓下支承结构(图 3.4.4)。直径较小时,宜采用柱或柱-支撑、外筒内柱支承的架空

式仓下支承结构及锥斗仓底；直径较大时，宜采用落地式平底仓，地道式出料通道。

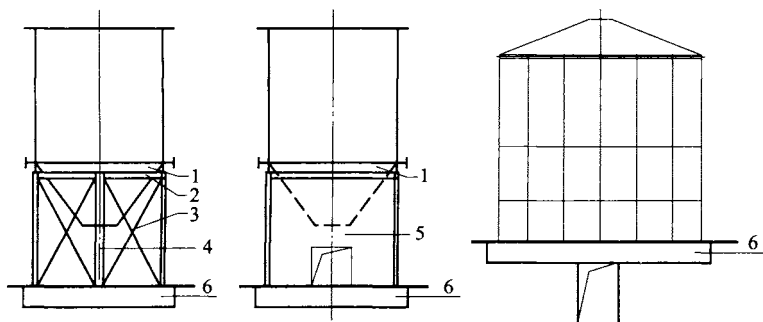


图 3.4.4 常用钢筒仓仓底和仓下支承结构示意图

1—筒仓底部；2—框架梁；3—支撑；4—柱；

5—钢筋混凝土抗震墙筒；6—基础

3.4.5 抗震设防区的钢筒仓结构选型应符合下列规定：

1 钢筒仓的仓下支承结构，宜选用抗震墙、框架-抗震墙结构或框架-支撑结构的型式；

2 非落地钢筒仓支座宜设置在满仓工况时筒仓重心高度处。

3.4.6 当钢筒仓之间或钢筒仓与其邻建(构)筑物之间需要连接时，宜采用简支结构相连。

4 荷载与荷载效应组合

4.1 一般规定

4.1.1 钢筒仓设计,应计算下列荷载:

- 1 永久荷载:结构自重,其他构件及固定设备重;
- 2 可变荷载:贮料荷载、楼面活荷载、屋面活荷载、雪荷载、风荷载、可移动设备荷载、固定设备中的活荷载及设备安装荷载、积灰荷载、钢筒仓外部地面的堆料荷载及管道输送产生的正、负压力;
- 3 温度作用;
- 4 地震作用。

4.1.2 钢筒仓结构计算时,对不同荷载代表值及荷载组合应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的有关规定执行。

4.1.3 钢筒仓的风荷载体形系数的取值应符合下列规定:

- 1 仓壁稳定计算:取 1.0;
- 2 钢筒仓整体计算:独立钢筒仓取 0.8,仓群取 1.3。

4.2 贮料荷载

4.2.1 散料的物理特性参数应由工艺专业提供,也可按本规范附录 A 所列数值选用,但应经工艺专业确认。

4.2.2 计算贮料荷载时,应采用对结构产生最不利作用的贮料品种的参数。计算贮料对波纹钢板仓壁的摩擦作用时,应取贮料的内摩擦角。

4.2.3 深仓贮料重力流动压力的计算应符合下列规定(图 4.2.3):

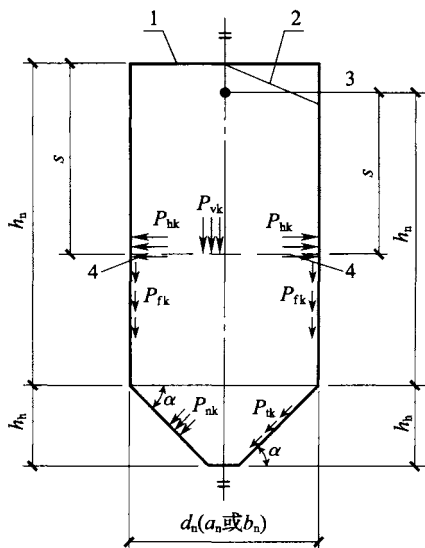


图 4.2.3 深仓贮料重力流动压力示意图

1—贮料顶为平面；2—贮料顶为斜面；3—贮料锥体重心；4—计算截面

1 贮料顶面或贮料锥体重心以下距离 s 处，贮料作用于仓壁单位面积上的水平压力标准值 P_{hk} 应按下列公式计算：

$$P_{hk} = C_h \gamma \rho (1 - e^{-k s / \rho}) / \mu \quad (4.2.3-1)$$

$$k = \tan^2(45^\circ - \varphi/2) \quad (4.2.3-2)$$

式中： P_{hk} ——贮料作用于仓壁单位面积上的水平压力标准值 (N/mm^2)；

C_h ——深仓贮料水平压力修正系数；

γ ——贮料的重力密度 (N/mm^3)；

ρ ——钢筒仓水平净截面的水力半径 (mm)；

μ ——贮料与仓壁的摩擦系数；

k ——侧压力系数；

e ——自然对数的底；

s ——贮料顶面或贮料锥体重心至所计算截面的距离(mm);

φ ——贮料的内摩擦角(°)。

2 贮料作用于仓底或漏斗顶面处单位面积上的竖向压力标准值 P_{vk} 应按下列公式计算:

$$P_{vk} = C_v \gamma \rho (1 - e^{-\mu k h_n / \rho}) / \mu k \quad (4.2.3-3)$$

$$P_{vk} \leq \gamma h_n \quad (4.2.3-4)$$

式中: P_{vk} ——贮料作用于仓底或漏斗顶面处单位面积上的竖向压力标准值(N/mm²);

C_v ——深仓贮料竖向压力修正系数;

h_n ——贮料计算高度(mm)。

3 贮料顶面或贮料锥体重心以下距离 s 处的计算截面以上仓壁单位周长上的总竖向摩擦力标准值 P_{fk} 应按下式计算:

$$P_{fk} = C_f \rho [\gamma s - \gamma \rho (1 - e^{-\mu k s / \rho}) / \mu k] \quad (4.2.3-5)$$

式中: P_{fk} ——贮料作用于计算截面以上仓壁单位周长上的总竖向摩擦力标准值(N/mm²)。

4.2.4 贮料计算高度 h_n 的确定,应符合下列规定:

1 上端:贮料顶面为水平时,按贮料顶面计算;贮料顶面为斜坡时,按贮料锥体的重心计算;

2 下端:仓底为钢锥形漏斗时按仓底顶面计算;仓底为平板无填料时,按仓底顶面计算;仓底为填料做成的漏斗时,按填料表面与仓壁内表面交线的最低点处计算。

4.2.5 钢筒仓水平净截面水力半径的确定应符合下列规定:

1 一般多边形钢筒仓水平净截面的水力半径应按下列公式计算:

$$\rho = A / C \quad (4.2.5-1)$$

2 圆形钢筒仓水平净截面的水力半径应按下列公式计算:

$$\rho = d_n / 4 \quad (4.2.5-2)$$

式中: ρ ——筒仓水平净截面的水力半径(mm);

A ——多边形筒仓的面积(mm²);

C ——多边形筒仓的周长(mm);

d_n ——圆形钢筒仓内径(mm)。

3 矩形钢筒仓水平净截面的水力半径应按下式计算：

$$\rho = a_n b_n / 2(a_n + b_n) \quad (4.2.5-3)$$

式中： a_n ——矩形钢筒仓长边内侧尺寸(mm)；

b_n ——矩形钢筒仓短边内侧尺寸(mm)。

4.2.6 深仓贮料压力修正系数 C_h 、 C_v 、 C_f ，应按表 4.2.6 选用。

表 4.2.6 深仓贮料压力修正系数

钢筒仓部位	系数名称	修正系数	
仓壁	水平压力修正系数 C_h	当 $S \leq h_n/3$ 时	$1 + 3S/h_n$
		当 $S > h_n/3$ 时	2.0
	摩擦压力修正系数 C_f	—	1.1
仓底	竖向压力修正系数 C_v	钢漏斗	2.0
		平板	1 漏斗填料最大厚度大于 1.5m 的钢筒仓可取 1.0； 2 其他情况钢筒仓可取 1.4。

注：1 本表不适用于设有特殊促流或减压装置的钢筒仓；

2 当 $h_n/d_n \geq 3$ 时，表中 C_h 值应乘以 1.1；

3 对于流动性性能较差的散料， C_h 值可乘以系数 0.9；

4 对于群仓的内仓及边长不大于 4m 的方仓， $C_h = C_v = 1.0$ 。

4.2.7 平面为圆形、矩形或其他几何形的浅仓贮料压力(图 4.2.7)的计算，应符合下列规定：

1 贮料顶面或贮料锥体重心以下距离 s 处，作用于仓壁单位面积上的水平压力标准值 P_{hk} 应按下式计算：

$$P_{hk} = k \gamma s \quad (4.2.7-1)$$

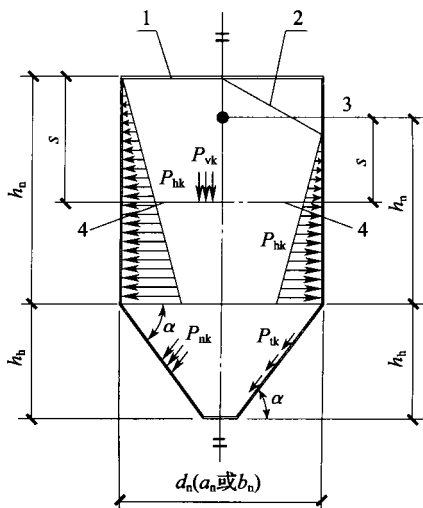


图 4.2.7 浅仓贮料压力示意图

1—贮料顶为平面；2—贮料顶为斜面；3—贮料锥体重心；4—计算截面

2 钢筒仓的贮料计算高度 h_n 与其内径 d_n 或其他几何平面的短边 b_n 之比等于 1.5 时或贮料计算高度 h_n 大于 10m 且钢筒仓内径 d_n 大于或等于 12m 时，贮料水平压力除按公式(4.2.7-1)计算外，尚应按本规范公式(4.2.3-1)计算贮料压力，二者计算结果取其大值。此外，还应按下式计算钢筒仓内壁单位面积上的竖向摩擦力标准值：

$$P_{fk} = \mu k \gamma s \quad (4.2.7-2)$$

3 贮料顶面或贮料锥体重心以下距离 s 处，单位面积上的竖向压力标准值 P_{vk} 应按下式计算：

$$P_{vk} = \gamma s \quad (4.2.7-3)$$

4 贮料计算高度 h_n 小于或等于 0.5 倍的钢筒仓内径 d_n ，且 d_n 大于或等于 24m 的大型浅圆仓仓壁上水平压力标准值 P_{hk} 的计算应计入仓壁顶面以上堆料的作用，可按本规范附录 B

计算。

4.2.8 作用于仓底圆形漏斗壁上的贮料压力标准值应符合下列规定：

1 漏斗壁单位面积上的法向压力标准值，深仓、浅仓可按下列公式计算：

$$\text{深仓：} \quad P_{nk} = C_v P_{vk} (\cos^2 \alpha + k \sin^2 \alpha) \quad (4.2.8-1)$$

$$\text{浅仓：} \quad P_{nk} = P_{vk} (\cos^2 \alpha + k \sin^2 \alpha) \quad (4.2.8-2)$$

式中： P_{nk} ——贮料作用于漏斗斜壁单位面积上的法向压力标准值(N/mm²)；

$(\cos^2 \alpha + k \sin^2 \alpha)$ ——可按本规范附录 C 查表。

2 漏斗壁单位面积上切向压力标准值，深仓、浅仓可按下列公式计算：

$$\text{深仓：} \quad P_{tk} = C_v P_{vk} (1-k) \cos \alpha \sin \alpha \quad (4.2.8-3)$$

$$\text{浅仓：} \quad P_{tk} = P_{vk} (1-k) \cos \alpha \sin \alpha \quad (4.2.8-4)$$

式中： P_{tk} ——漏斗壁单位面积上切向压力标准值(N/mm²)。

4.2.9 贮料作用于仓底或漏斗壁顶面处单位面积上的竖向压力标准值 P_{vk} 应按下列规定取值：

1 对于深仓，在漏斗高度范围内均应采用漏斗顶面之值；

2 对于浅仓，在漏斗顶面和漏斗底面可按下列公式计算：

$$\text{漏斗顶面：} \quad P_{vk} = \gamma h_n \quad (4.2.9-1)$$

$$\text{漏斗底面：} \quad P_{vk} = \gamma (h_n + h_h) \quad (4.2.9-2)$$

式中： P_{vk} ——贮料作用于仓底或漏斗顶面处单位面积上的竖向压力标准值(N/mm²)；

h_n ——漏斗高度(mm)。

4.2.10 仓内贮料为流态的均化仓仓壁上的水平压力标准值 P_{yk} ，可按液态压力计算：

$$P_{yk} = 0.6 \gamma h_n \quad (4.2.10)$$

式中： P_{yk} ——均化仓仓壁上的水平压力标准值(N/mm²)；

γ ——贮料的重力密度(N/mm³)；

h_n ——贮料的计算高度(mm)。

4.3 地震作用

4.3.1 计算钢筒仓水平地震作用及其自振周期时,应取贮料总重 80% 作为贮料有效质量的代表值,重心应取其贮料总重的重心。

4.3.2 钢筒仓构件抗震验算时,结构构件的地震作用效应和其他荷载效应的基本组合,应计算全部重力荷载代表值和水平地震作用的效应。计算重力荷载代表值的效应时,除贮料荷载外,其他重力荷载分项系数可取 1.2;当重力荷载对构件承载能力有利时,其分项系数不应大于 1.0。在计算水平地震作用效应时,地震作用分项系数应取 1.3。水平地震作用的标准值应乘以相应的增大系数或调整系数。

4.3.3 钢筒仓可按单仓计算地震作用,落地式平底钢筒仓可不计算竖向地震作用。

4.3.4 钢筒仓的水平地震作用可按单质点或多质点体系模型,采用底部剪力法或振型分解反应谱法计算。当按底部剪力法计算时,仓上建筑分配的水平地震作用应乘以增大系数 3,但增大部分不应向下传于仓壁构件。

4.3.5 钢筒仓的水平地震作用,可采用下列简化方法进行计算:

1 钢筒仓底部的水平地震作用标准值可按下式计算:

$$F_{Ek} = \alpha_1 (G_{sk} + G_{mk}) \quad (4.3.5-1)$$

式中: F_{Ek} ——钢筒仓底部的水平地震作用标准值(N);

α_1 ——相应于结构基本自振周期的水平地震影响系数值;

G_{sk} ——钢筒仓自重的重力荷载代表值(N);

G_{mk} ——贮料总重的重力荷载代表值(N)。

2 相应于结构基本自振周期的水平地震影响系数值 α_1 ,应按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010 第 5.1.4 条和第 5.1.5 条的规定确定。对于落地式钢筒仓,水平地震影响

系数值可按式计算：

$$\alpha_1 = \alpha_{\max} \quad (4.3.5-2)$$

3 水平地震作用对钢筒仓底部产生的弯矩标准值可按式计算：

$$M_{Ek} = \alpha_1 (G_{sk} h_s + G_{mk} h_m) \quad (4.3.5-3)$$

式中： M_{Ek} ——钢筒仓底部的水平地震作用标准值(N·mm)；

h_g ——钢筒仓自重的重心高度(mm)；

h_m ——贮料总重心高度(mm)。

4 沿钢筒仓高度第 i 质点分配的水平地震作用标准值可按式计算：

$$F_{ik} = F_{Ek} \frac{G_{ik} h_i}{\sum_{i=1}^n G_{ik} h_i} \quad (4.3.5-4)$$

式中： F_{ik} ——沿钢筒仓高度第 i 质点分配的水平地震作用标准值(N)；

G_{ik} ——集中于第 i 质点的重力荷载代表值(N)；

h_i ——第 i 质点的重心高度(mm)。

4.3.6 地震作用下贮料对于仓壁的局部压力计算应符合下列规定(图 4.3.6-1、图 4.3.6-2)：

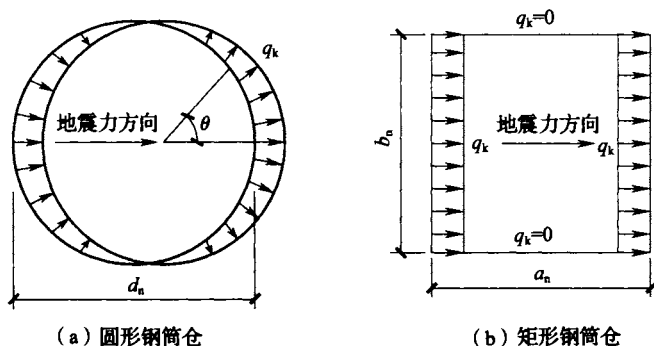


图 4.3.6-1 地震作用下贮料对钢筒仓筒壁局部压力平面分布示意图

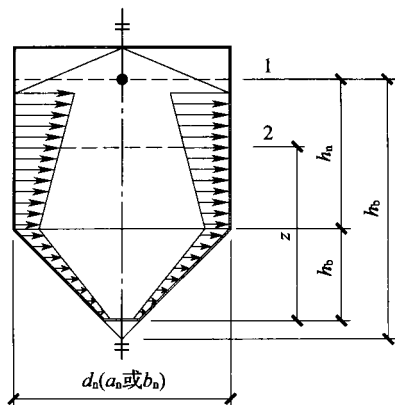


图 4.3.6-2 地震作用下贮料对钢筒仓筒壁局部压力竖向分布示意图

1—贮料锥体中心；2—计算截面

1 圆形钢筒仓垂直筒壁地震压力标准值分布应按下式计算：

$$q_k = \alpha(z) \frac{d_n}{2} \gamma \cos \theta \quad (4.3.6-1)$$

式中： q_k ——圆形筒仓垂直筒壁地震压力标准值(N/mm²)；

$\alpha(z)$ —— z 高度处钢筒仓水平地震影响系数；

d_n ——圆形钢筒仓内径(mm)；

γ ——贮料重力密度(N/mm³)。

2 圆形钢筒仓垂直筒壁地震压力标准值应同时符合下列公式的要求：

$$q_k \leq \alpha(z) h_b \gamma \cos \theta \quad (4.3.6-2)$$

$$q_k \leq \alpha(z) (3z) \gamma \cos \theta \quad (4.3.6-3)$$

式中： h_b ——钢筒仓的总高度，即钢筒仓底部平板或底部漏斗 outlet 口到贮料顶面或顶部锥体重心的距离(mm)。

3 矩形钢筒仓垂直筒壁地震压力标准值分布应按下式计算：

$$q_k = \alpha(z) \frac{a_n}{2} \gamma \quad (4.3.6-4)$$

式中： a_n ——矩形钢筒仓平行于地震力方向的边长(mm)。

4 矩形钢筒仓垂直筒壁地震压力标准值应同时符合下列公式要求:

$$q_k \leq \alpha(z) h_b \gamma \quad (4.3.6-5)$$

$$q_k \leq \alpha(z) (3z) \gamma \quad (4.3.6-6)$$

5 z 高度处贮料的水平地震影响系数应按下列公式计算:

$$\alpha(z) = \frac{2z}{h_b^2} \alpha_1 \quad (4.3.6-7)$$

4.3.7 地震作用下贮料对于仓壁的地震压力计算阻尼比应采用 0.10; 钢筒仓支架阻尼比根据结构材料确定, 混凝土应采用 0.05, 钢结构应采用 0.035。

4.3.8 抗震设防烈度为 8 度和 9 度时, 仓下漏斗与仓壁的连接应进行竖向地震作用计算, 竖向地震作用系数可分别采用 0.1 和 0.2。

4.3.9 地震作用下钢筒仓贮料对于仓壁的局部压力当参与荷载组合时压力最小值为 0, 贮料与筒壁之间不应出现拉力。

4.3.10 群仓抗震设计时应从结构布置和构造上采取抗震措施。

4.4 荷载效应组合

4.4.1 按承载力极限状态计算钢筒仓结构时, 应按荷载效应的基本组合进行计算:

$$\gamma_0 S \leq R \quad (4.4.1)$$

式中: γ_0 ——结构重要性系数应取 1.0, 特殊用途的钢筒仓可按具体要求采用大于 1.0 的系数;

S ——荷载效应组合的设计值;

R ——结构构件抗力的设计值。

4.4.2 钢筒仓荷载效应基本组合中各种荷载取值应符合下列规定:

1 永久荷载效应控制的组合, 永久荷载与可变荷载应取全部;

2 可变荷载效应控制的组合, 永久荷载及可变荷载效应中起控制作用的可变荷载应取全部。

4.4.3 筒仓荷载效应的基本组合,永久荷载和可变荷载分项系数取值应符合下列规定:

1 永久荷载效应控制的组合,永久荷载分项系数应取 1.35。可变荷载分项系数:贮料应取 1.3;其他可变荷载效应分项系数应取 1.4。

2 可变荷载效应控制的组合,永久荷载分项系数应取 1.2。可变荷载分项系数:贮料应取 1.3;其他可变荷载效应分项系数应取 1.4。

4.4.4 可变荷载组合系数应采用下列数值:

1 楼面活荷载及其他可变荷载,无风荷载参与组合时系数应取 1.0;有风荷载参与组合时系数应取 0.6;对雪荷载可取 0.5;

2 钢筒仓无顶盖且贮料重按实际重量取值时,贮料荷载组合系数应取 1.0,有顶盖时可取 0.9。

4.4.5 在按正常使用极限状态计算钢筒仓结构及构件时,应采用荷载效应的标准组合,并按下式进行设计:

$$S \leq C \quad (4.4.5)$$

式中:C——结构或结构构件达到正常使用要求的规定限值。

4.4.6 钢筒仓进行倾覆稳定或滑动稳定计算时,其抗滑稳定安全系数可取 1.3,倾覆稳定安全系数可取 1.5。永久荷载分项系数有利时应取 1.0。

5 圆形钢筒仓

5.1 一般规定

5.1.1 圆形钢筒仓结构,应分别按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行设计。

5.1.2 圆形钢筒仓结构,按承载能力极限状态进行设计时,应采用荷载设计值和材料强度设计值,计算应包括下列内容:

- 1 结构构件及连接强度、稳定性计算;
- 2 钢筒仓整体抗倾覆计算、稳定计算;
- 3 钢筒仓与基础的锚固计算。

5.1.3 圆形钢筒仓结构,按正常使用极限状态进行设计时,应采用荷载标准值。对需控制变形的结构构件应进行变形验算。

5.1.4 圆形钢筒仓结构,对直接承受动力荷载重复作用的钢结构构件及其连接件,当应力变化的循环次数 n 大于 5×10^4 次时,应按现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 的有关规定进行疲劳验算。

5.2 仓 顶

5.2.1 仓顶结构可分为下列几种形式:

- 1 钢板直接弯成型的圆锥壳仓顶,适用于直径不大于 4m 的仓顶;
- 2 斜梁、环梁及支撑系统组成的梁板式仓顶;
- 3 其他空间结构仓顶。

5.2.2 钢板直接弯成型的圆锥壳仓顶的承载力应符合下列规定:

- 1 对各向同性圆锥壳外部临界屈曲压应力(图 5.2.2),应按

下式计算：

$$q_{n,Rcr} = 2.65E \left(\frac{t \cos \beta}{r} \right)^{2.43} \tan^{1.6} \beta \quad (5.2.2-1)$$

式中： $q_{n,Rcr}$ ——各向同性圆锥壳外部临界屈曲压应力(N/mm²)；

E ——钢材的弹性模量(N/mm²)；

t ——壳体最小板厚(mm)；

r ——仓顶外圆半径(mm)；

β ——锥面的水平倾角(°)。

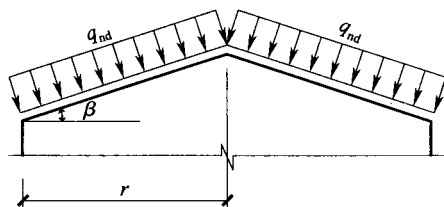


图 5.2.2 仓顶外部压力设计值示意图

2 圆锥壳仓顶法向压应力应按下式计算：

$$q_{n,d} \leq q_{n,Rd} = \alpha_p q_{n,Rcr} / \gamma_{M1} \quad (5.2.2-2)$$

式中： $q_{n,d}$ ——圆锥壳仓顶外部压力设计值(N/mm²)；

$q_{n,Rd}$ ——圆锥壳仓顶结构法向极限压力承载力(N/mm²)；

α_p ——弹性屈曲的缺陷敏感系数， $\alpha_p = 0.20$ ；

γ_{M1} ——板壳稳定承载力分项系数， $\gamma_{M1} = 1.10$ 。

5.2.3 梁板式仓顶应包括平板式仓顶及正截锥壳仓顶。正截锥壳仓顶应由斜梁、环梁及支撑系统组成(见图 5.2.3)。仓顶构件内力宜按空间杆系计算。当圆形钢筒仓直径小于 12.0m 时，在对称荷载作用下，仓顶构件内力可按下列简化方法计算：

1 斜梁按简支梁计算，其支座反力分别由上下环梁承担。上下环梁按本规范第 5.2.4 条计算；

2 作用于上环梁上的竖向荷载由斜梁平均承担；

3 作用于斜梁的吊挂荷载，由直接吊挂荷载的斜梁承担。

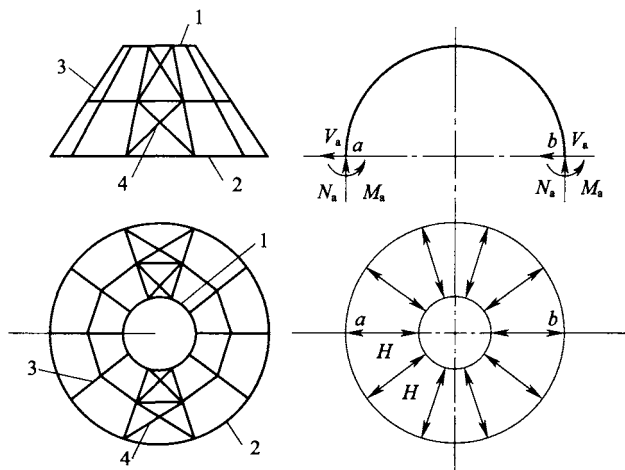


图 5.2.3 正截锥仓顶及环梁内力示意图

1—上环梁;2—下环梁;3—斜梁;4—支撑构件

5.2.4 正截锥壳仓顶的上、下环梁应按下列规定计算:

1 上环梁应按压、弯、扭构件进行强度和稳定计算。在径向水平推力作用下,上环梁的稳定计算可按本规范第 5.4.4 条第 1 款规定执行。

2 下环梁应按拉、弯、扭构件进行强度计算。

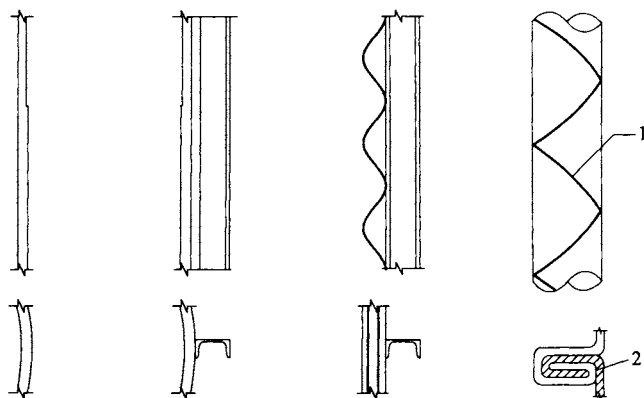
3 下环梁计算可不与其相连的仓壁共同工作。

5.2.5 斜梁传给下环梁的竖向力,可由下环梁均匀传给下部结构。

5.3 仓 壁

5.3.1 圆形钢筒仓仓壁可分为下列几种类型(图 5.3.1):

- 1 由钢板焊接或螺栓连接成型仓壁;
- 2 波形板仓壁;
- 3 由钢板咬口成型仓壁。



(a) 钢板焊接仓壁 (b) 设置加劲肋仓壁 (c) 波形板仓壁 (d) 钢板咬口成型仓壁

图 5.3.1 圆形钢筒仓仓壁类型图

1—钢板咬口; 2—钢板咬口大样

5.3.2 钢筒仓仓壁承载能力极限状态设计时,应按下列荷载组合:

1 作用于仓壁单位面积上的水平压力的基本组合(设计值)应按下式计算:

$$P_h = 1.3 P_{hk} \quad (5.3.2-1)$$

2 作用于仓壁单位周长的竖向压力的基本组合(设计值)应按下列公式计算:

无风荷载参与组合时:

$$q_v = 1.2 q_{gk} + 1.3 q_{fk} + 1.4 \sum \psi_i q_{Qik} \quad (5.3.2-2)$$

有风荷载参与组合时:

$$q_v = 1.2 q_{gk} + 1.3 q_{fk} + 1.4 \times 0.6 \sum (q_{wk} + q_{Qik}) \quad (5.3.2-3)$$

有地震作用参与组合时:

$$q_v = 1.2 q_{gk} + 1.3 \times 0.9 q_{fk} + 1.3 q_{Ek} + 1.3 \sum \psi_i q_{Qik} \quad (5.3.2-4)$$

式中: q_{gk} ——永久荷载作用于仓壁单位周长上的竖向压力标准值 (N/mm);

q_{fk} ——储料作用于仓壁单位周长上的总摩擦力标准值 (N/mm);

q_{wk} ——风荷载作用于仓壁单位周长上的竖向压力标准值 (N/mm);

q_{Ek} ——地震作用于仓壁单位周长上的竖向压力标准值 (N/mm);

q_{Qik} ——仓顶及仓上建筑可变荷载作用于仓壁单位周长上的竖向压力标准值 (N/mm);

ψ_i ——可变荷载组合系数。仓顶及仓上建筑可变荷载作用于仓壁单位周长上的竖向压力标准值 q_{Qik} , 按实际考虑时取 1.0, 按等效均布荷载时取 0.6。

5.3.3 钢筒仓仓壁无加劲肋时, 钢筒仓仓壁内力可采用有限元法进行计算; 在轴对称荷载作用下, 可按薄膜理论计算其内力。旋转壳体在对称荷载作用下的薄膜内力可按本规范附录 D 的规定执行; 有加劲肋时, 可按下列方法之一进行计算:

1 按带肋薄壁结构, 采用有限元方法进行计算;

2 加劲肋间距不大于 1.2m 时, 采用折算厚度按薄膜理论进行计算;

3 按本规范第 5.3.5 条规定的简化方法进行计算。

5.3.4 钢筒仓不设加劲肋时, 仓壁可按下列规定进行强度计算:

1 在储料水平压力作用下, 可按轴心受拉构件进行计算:

$$\sigma_t = P_h d_n / 2t \leq f \quad (5.3.4-1)$$

2 在竖向压力作用下, 可按轴心受压构件进行计算:

$$\sigma_c = q_v / t \leq f \quad (5.3.4-2)$$

式中: σ_t ——仓壁环向拉应力设计值 (N/mm²);

σ_c ——仓壁竖向压应力设计值 (N/mm²);

f ——钢材抗拉或抗压强度设计值 (N/mm²);

t ——仓壁厚度(mm)。

3 在环向拉力和竖向压力共同作用下,折算应力可按式计算:

$$\sigma_{zs} = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_c^2 - \sigma_t \sigma_c} \leq f \quad (5.3.4-3)$$

式中: σ_{zs} ——仓壁折算应力设计值(N/mm²);

σ_t, σ_c ——拉应力为正值;压应力为负值。

4 仓壁钢板采用对接焊缝拼接时,对接焊缝可按式进行计算:

$$\sigma_t = N/L_w t \leq f_t^w \text{ 或 } f_c^w \quad (5.3.4-4)$$

式中: N ——垂直于焊缝长度方向的拉力或压力设计值(N);

L_w ——对接焊缝的计算长度(mm);

t ——被连接仓壁的较小厚度(mm);

f_t^w, f_c^w ——对接焊缝的抗拉、抗压强度设计值(N/mm²)。

5.3.5 圆形钢筒仓设加劲肋时,应按下述简化方法进行强度计算:

1 由钢板焊接或螺栓连接成型仓壁及波形板仓壁水平方向抗拉强度应按本规范公式(5.3.4-1)计算,波形板仓壁加劲肋之间的水平间距 $d_{s,\max}$ 应按下列公式计算:

$$d_{s,\max} = 7 \left(\frac{r^2 D_y}{C_y} \right)^{0.25} \quad (5.3.5-1)$$

$$D_y = 0.13 E t d^2 \quad (5.3.5-2)$$

$$C_y = E t \left(1 + \frac{\pi^2 d^2}{4 l^2} \right) \quad (5.3.5-3)$$

式中: D_y ——平行于最薄波纹板每单位宽度的抗弯刚度(N·mm);

C_y ——平行于最薄波纹板每单位宽度的拉伸刚度(N/mm);

d ——波形板波峰到波谷的幅值(mm);

l ——波形板的波长(mm)。

2 在竖向压力作用下,波形板仓壁不承担竖向压力,全部竖向压力应由竖向加劲肋承担;由钢板焊接或螺栓连接成型仓壁应取宽度为 $2b_e$ 的仓壁与加劲肋的组体承担竖向压力(图5.3.5)。 b_e 应同时符合下列公式的要求:

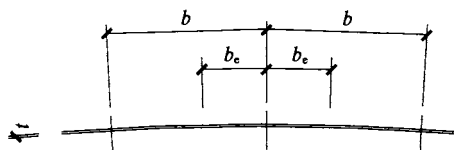


图 5.3.5 组合构件截面示意图

$$b_e \leq 15t \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (5.3.5-4)$$

$$b_e \leq \frac{b}{2} \quad (5.3.5-5)$$

3 加劲肋或加劲肋和仓壁构成的组合体,截面强度应按下列公式计算:

$$N = q_v b \quad (5.3.5-6)$$

$$\sigma = N/A_n \pm M/W_n \leq f \quad (5.3.5-7)$$

式中: σ ——加劲肋或组合构件截面拉、压应力设计值(N/mm²);

N ——加劲肋或组合构件承担的竖向压力设计值(N);

M ——竖向压力 N 对加劲肋或组合构件截面形心的弯矩设计值(N·mm);

A_n ——加劲肋或组合构件的净截面面积(mm²);

W_n ——加劲肋或组合构件净截面弹性抵抗距(mm³);

b ——加劲肋中距(mm)。

5.3.6 加劲肋与仓壁连接时,强度计算应符合下列规定:

1 单位高度仓壁传给加劲肋的竖向力设计值应按下式计算:

$$V = [1.2P_{gk} + 1.3C_f P_{fk} + (1.2q_{gk} + 1.4 \sum q_{Qik})/h_s]b \quad (5.3.6-1)$$

式中: P_{gk} ——仓壁单位面积重力标准值(N/mm²);

P_{fk} ——贮料作用于计算截面以上仓壁单位周长上的总竖向摩擦力标准值(N/mm²);

q_{gk} ——仓顶与仓上建筑永久荷载作用于仓壁单位周长上的竖向压力标准值(N/mm);

q_{Qik} ——仓顶与仓上建筑可变荷载作用于仓壁单位周长上的
竖向压力标准值(N/mm);

h_s ——计算截面以上仓壁高度(mm)。

2 当采用角焊缝连接时,应按下式计算:

$$\tau_f = \frac{VL}{h_e L_w} \leq f_f^w \quad (5.3.6-2)$$

式中: τ_f ——按焊缝有效截面计算,沿焊缝长度方向的平均剪应力
(N/mm²);

L ——单位高度(mm);

h_e ——角焊缝有效厚度(mm);

L_w ——仓壁单位高度内,角焊缝的计算长度(mm);

f_f^w ——角焊缝强度设计值(N/mm²)。

3 当采用普通螺栓或高强螺栓时,应按现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 的有关规定进行计算。

5.3.7 钢筒仓在竖向荷载作用下,仓壁应按薄壳弹性稳定理论或按下列方法进行稳定计算:

1 在竖向轴压力作用下,应按下列公式计算:

$$\sigma_c \leq \sigma_{cr} = k_p E t / R \quad (5.3.7-1)$$

$$k_p = \frac{1}{2\pi} \left(100 \frac{t}{R} \right)^{\frac{3}{8}} \quad (5.3.7-2)$$

式中: σ_c ——仓壁竖向压应力设计值(N/mm²);

σ_{cr} ——竖向荷载下仓壁的临界应力(N/mm²);

E ——钢材的弹性模量, $E = 2.06 \times 10^5$ N/mm²;

t ——仓壁的计算厚度,有加劲肋且间距不大于 1.2m 时可
取仓壁的折算厚度,其他情况取仓壁的厚度(mm);

R ——钢筒仓半径(mm);

k_p ——竖向压力下仓壁的稳定系数。

2 当竖向压力及贮料水平压力共同作用下,应按下列公式
计算:

$$\sigma_c \leq \sigma_{cr} = k'_p Et/R \quad (5.3.7-3)$$

$$k'_p = k_p + 0.265 \frac{R}{t} \sqrt{\frac{P_{hk}}{E}} \quad (5.3.7-4)$$

式中: k'_p ——有内压时仓壁的稳定系数, 当 k'_p 大于 0.5 时, 取 $k'_p = 0.5$ 。

3 仓壁局部承受竖向集中力时, 应在集中力作用处设置加劲肋, 集中力的扩散角可取 30° , 并按下式验算仓壁的局部稳定 (图 5.3.7):

$$\sigma_c \leq \sigma_{cr} = k_p Et/R \quad (5.3.7-5)$$

式中: σ_c ——仓壁局部压应力设计值 (N/mm^2);

k_p ——竖向压力下仓壁的稳定系数。

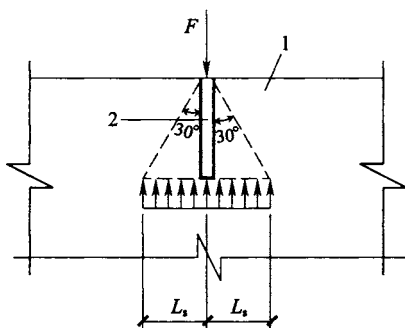


图 5.3.7 仓壁集中力示意图

1—仓壁; 2—加劲肋

5.3.8 内部部分空仓的仓壁, 在风荷载作用下的屈曲应符合下列规定:

1 在风荷载(迎风)作用下最大外部法向压力设计值 $q_{n,Rd}$ 应按下列式计算:

$$q_{n,Rd} \leq \alpha_n q_{n,Rcr} / \gamma_{M1} \quad (5.3.8-1)$$

式中: α_n ——弹性屈曲的缺陷系数, $\alpha_n = 0.5$;

$q_{n,Rcr}$ ——各向同性筒壁在外部法向压力下的临界屈曲应力

(N/mm²);

γ_{M1} ——板壳稳定承载力分项系数, $\gamma_{M1}=1.10$ 。

2 在风荷载作用下的临界法向屈曲应力应按式计算:

$$q_{n, Rcr} = 0.92 C_b \mu_s E \left(\frac{r}{l} \right) \left(\frac{t}{r} \right)^{2.5} \quad (5.3.8-2)$$

式中: t ——筒壁上最薄处的板厚(mm);

l ——环梁之间的距离或筒壁上下边缘之间的距离(mm);

C_b ——外部压力屈曲系数, 取 0.6;

μ_s ——风荷载的体型系数。

3 当筒壁处于一个紧密排列的钢筒仓群时, 风荷载的体型系数(迎面)均应取: $\mu_s=1.0$ 。

4 在独立钢筒仓并只承受风荷载作用下, 风荷载的体型系数应取下列两公式中的较大值:

$$\mu_s = \frac{2.2}{\left[1 + 0.1 \sqrt{C_b \frac{r}{l} \sqrt{\frac{r}{t}}} \right]} \quad (5.3.8-10)$$

$$\mu_s = 1.0 \quad (5.3.8-11)$$

5.3.9 无加劲肋的螺旋卷边钢筒仓, 仓壁咬口弯卷处(图 5.3.9)的抗弯强度可按式计算:

$$\sigma = 6\alpha(q_w - q_g)/t \leq f \quad (5.3.9)$$

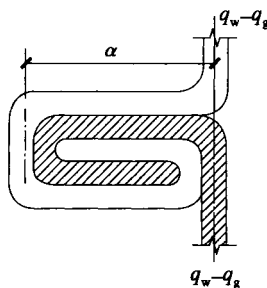


图 5.3.9 咬口弯卷示意

式中: q_w ——水平风荷载作用于仓壁单位周长上的竖向拉力设计值(N/mm);

q_g ——永久荷载作用于仓壁单位周长上的竖向压力设计值(N/mm);

α ——卷边的外伸长度(mm);

t ——仓壁厚度(mm)。

5.4 仓 底

5.4.1 圆锥漏斗仓底内力应按下列规定进行强度计算(图5.4.1):

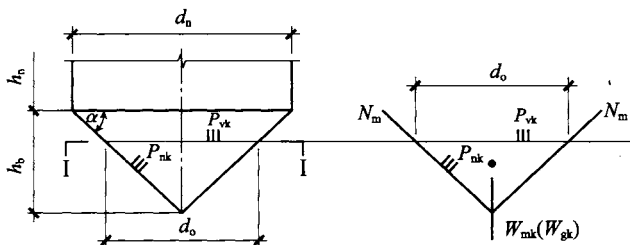


图 5.4.1 圆锥漏斗仓底内力计算示意

1 截面 I—I 处漏斗壁单位周长的经向拉力设计值可按下式计算:

$$N_m = 1.3 \times \left[\frac{P_{vk} d_0}{4 \sin \alpha} + \frac{W_{mk}}{\pi d_0 \sin \alpha} \right] + 1.2 \times \frac{W_{gk}}{\pi d_0 \sin \alpha} \quad (5.4.1-1)$$

式中: N_m ——计算截面处漏斗壁单位周长的经向拉力设计值(N/mm);

P_{vk} ——计算截面处贮料竖向压力标准值(N/mm²);

W_{mk} ——计算截面以下漏斗内贮料重力标准值(N);

W_{gk} ——计算截面以下漏斗壁重力标准值(N);

d_0 ——计算截面处漏斗的边长(mm);

α ——漏斗壁与水平面的夹角。

2 截面 I—I 处漏斗壁单位宽度内的环向拉力设计值可按下列式计算：

$$N_t = 1.3 P_{nk} d_0 / (2 \sin \alpha) \quad (5.4.1-2)$$

式中： N_t ——漏斗壁单位宽度内的环向拉力设计值(N)；

P_{nk} ——贮料作用于漏斗壁单位面积上的法向压力标准值(N)。

3 漏斗壁应按下列公式进行强度计算：

1) 单向抗拉强度按下列公式计算：

$$\text{径向：} \quad \sigma_m = N_m / t \leq f \quad (5.4.1-3)$$

$$\text{环向：} \quad \sigma_t = N_t / t \leq f \quad (5.4.1-4)$$

2) 折算应力按下式计算：

$$\sigma_{zs} = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_m^2} - \sigma_t \sigma_m \leq f \quad (5.4.1-5)$$

式中： σ_{zs} ——漏斗壁折算应力(N/mm²)

σ_t ——漏斗壁环向拉应力(N/mm²)；

σ_m ——漏斗壁径向拉应力(N/mm²)；

t ——漏斗壁厚度(mm)。

5.4.2 圆锥漏斗仓底与仓壁相交处，应设置环梁(图 5.4.2)。环梁与仓壁及漏斗壁的连接应符合下列规定：

1 可采用焊接或螺栓连接。

2 当环梁与仓壁及漏斗壁采用螺栓连接时，环梁计算不可与之相连的仓壁及漏斗壁参与工作。

3 当环梁与仓壁及漏斗壁采用焊接连接时，环梁计算可按环梁及与之相连的部分壁板共同工作，共同工作的壁板范围应按下列规定取值：

1) 共同工作的仓壁范围应取 $0.5 (\gamma_c t_c)^{0.5}$ ，但不应大于 $15 t_c (235/f_y)^{0.5}$ ；

2) 共同作用的漏斗壁范围应取 $0.5 (\gamma_h t_h)^{0.5}$ ，但不应大于 $15 t_h (235/f_y)^{0.5}$ 。

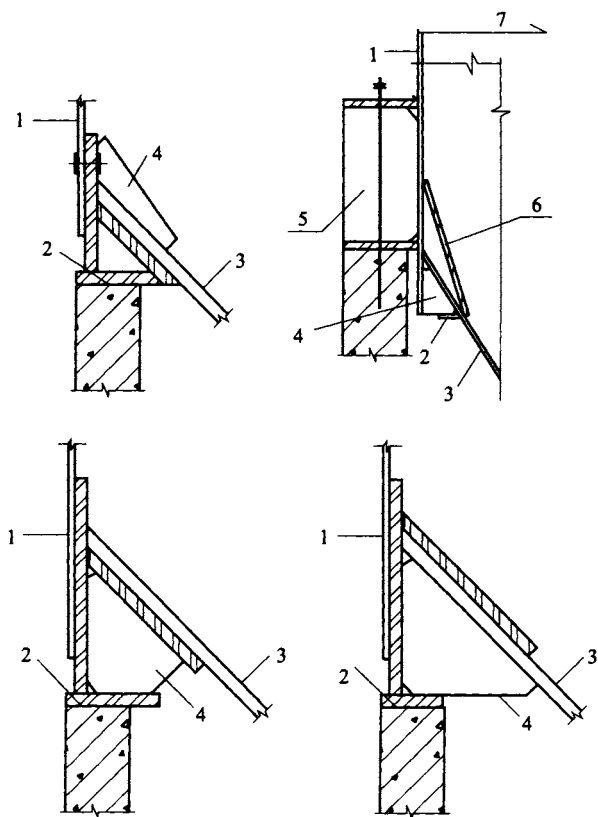


图 5.4.2 漏斗环梁示意

1—仓壁；2—环梁；3—斗壁；

4—加劲肋；5—钢筒仓支座环梁；6—加劲板；7—钢筒仓内径

其中： t_c 、 γ_c 应为仓壁与环梁相连处的厚度和等效曲率半径；

t_h 、 γ_h 应为漏斗壁与环梁相连处的厚度和等效曲率半径。

5.4.3 环梁的荷载(图 5.4.3)，应包括下列荷载：

1 由仓壁传来的竖向压力 q_v 及其偏心产生的扭矩 $q_v e_v$ ， q_v 可按本规范第 5.3.2 条确定；

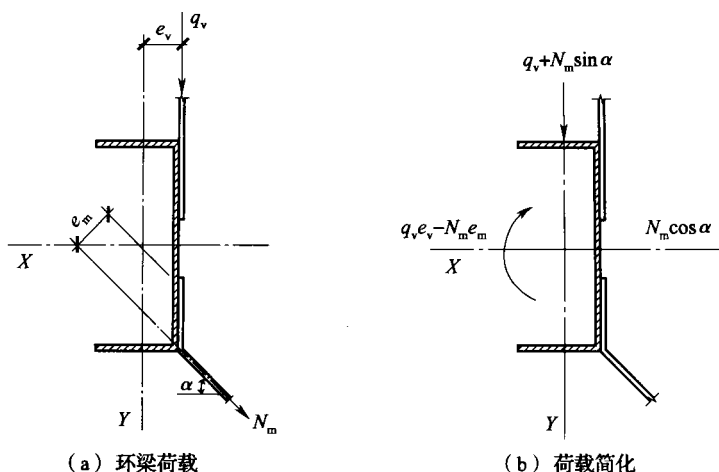


图 5.4.3 环梁荷载及简化图

2 由漏斗壁传来的径向拉力 N_m 及其偏心产生的扭矩 $N_m e_m$, N_m 可按本规范第 5.4.1 条确定。 N_m 可分解为水平分量 $N_m \cos \alpha$ 及垂直分量 $N_m \sin \alpha$ (图 5.4.3);

3 在环梁高度范围内作用的贮料水平压力 P_h 可忽略不计。

5.4.4 环梁按承载力极限状态设计时,应进行下列计算:

1 在水平荷载 $N_m \cos \alpha$ 作用下,环梁的稳定性按下式计算:

$$N_m \cos \alpha \leq N_{cr} = 0.6 EI_y / r^3 \quad (5.4.4)$$

式中: N_m ——漏斗壁传来的径向拉力(N);

I_y ——环梁截面的惯性矩(mm^4);

r ——环梁的半径(mm);

N_{cr} ——单位长度环梁的临界径向压力值(N)。

2 环梁截面的抗弯、抗扭及抗剪强度计算;

3 环梁与仓壁及漏斗壁的连接强度计算。

5.5 构造

5.5.1 仓上建筑的支撑点宜在仓壁上或仓顶锥台上。较重的仓

上建筑或重型设备,宜采用落地支架。

5.5.2 波纹钢板、焊接钢板仓壁,相邻上下两层壁板的竖向接缝应错开布置。焊接接缝间距错开不应小于 250 mm。

5.5.3 波纹钢板仓壁的搭接缝及连接螺栓孔,均应设密封条、密封圈。

5.5.4 钢筒仓仓壁在满足结构计算要求的基础上,应根据外部环境对钢板的腐蚀及贮料对仓壁的磨损采用相应的措施。

5.5.5 竖向加劲肋接头应采用等强度连接。相邻两加劲肋的接头不宜在同一水平高度上。通至仓顶的加劲肋数量不应少于总数的 25%。

5.5.6 竖向加劲肋与仓壁的连接应符合下列规定:

1 波纹钢板仓宜采用镀锌螺栓连接;

2 螺旋卷边仓宜采用高频焊接或螺栓连接;

3 螺栓的直径与数量应经计算确定,直径不宜小于 8mm,间距不宜大于 200mm;

4 当采用焊接连接时,焊缝高度应取被焊仓壁较薄钢板厚度;螺旋卷边仓咬口上下焊缝长度不应小于 50mm。施焊仓壁外表面的焊痕应进行防腐处理。

6 矩形钢筒仓

6.1 一般规定

6.1.1 矩形钢筒仓宜由钢壁板、钢壁板水平或竖向加劲肋、水平梁及竖向钢柱组成仓顶、仓壁、仓底三部分(图 6.1.1)。

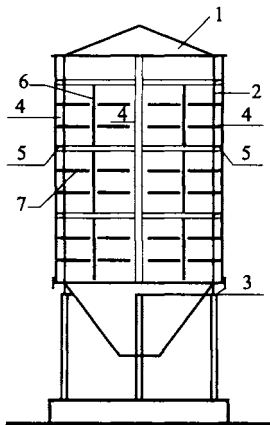


图 6.1.1 矩形钢筒仓简图

1—仓顶;2—壁板;3—钢筒仓底部;4—仓壁钢柱;

5—仓壁水平钢梁;6—仓壁竖向加劲肋;7—仓壁水平加劲肋

6.1.2 矩形钢筒仓结构,按承载力极限状态进行设计时,应包括下列计算内容:

- 1 结构构件及连接强度、稳定性计算;
- 2 钢筒仓整体抗倾覆计算、稳定计算;
- 3 钢筒仓与基础的锚固计算。

6.1.3 矩形钢筒仓结构中直接承受动力荷载重复作用的钢结构构件及其连接件,当应力变化的循环次数 n 等于或大于 5×10^4 次时,应进行疲劳验算。

6.1.4 按正常使用极限状态设计时,受弯构件的容许挠度应符合表 6.1.4 的要求。

表 6.1.4 受弯构件的容许挠度(mm)

构件类型	容许挠度	备注
仓壁壁板	$L/100$	L —两加劲肋间距离
加劲肋	$L/150$	L —加劲肋跨度
仓壁钢柱	$H/400$	H —钢柱高度
仓壁水平钢梁	$L/250$	—
斜壁板	$L/100$	—

6.1.5 抗震设防区的矩形钢筒仓应进行抗震设计。仓下支撑结构的抗震等级应按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关规定确定。

6.2 结构计算

6.2.1 矩形钢筒仓仓壁及仓底结构内力的计算,可采用计算机建立空间模型进行有限元内力计算。

6.2.2 矩形钢筒仓仓壁及仓底结构内力的计算,可按平面构件计算。其构件的内力计算应包括下列内容:

1 对称布置的矩形钢筒仓仓壁或角锥形漏斗壁,在贮料水平压力或贮料法向压力及漏斗壁自重作用下,由邻壁传来的水平拉力可按下列公式计算(图 6.2.2-1):

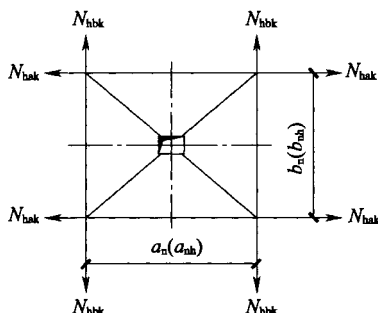


图 6.2.2-1 仓壁(或角锥形斜壁)水平拉力位置示意

1) 浅仓仓壁 A、B 底部的水平拉力标准值 N_{hak} 、 N_{hbk} 按下列公式计算：

$$\text{浅仓仓壁 A: } N_{hak} = N_{Rk} b_n / 2 \quad (6.2.2-1)$$

$$\text{浅仓仓壁 B: } N_{hbk} = N_{Rk} a_n / 2 \quad (6.2.2-2)$$

2) 深仓仓壁 A、B 任一水平截面单位高度上的水平拉力标准值 N_{hak} 、 N_{hbk} 按下列公式计算：

$$\text{深仓仓壁 A: } N_{hak} = p_{hk} b_n / 2 \quad (6.2.2-3)$$

$$\text{深仓仓壁 B: } N_{hbk} = p_{hk} a_n / 2 \quad (6.2.2-4)$$

3) 角锥形漏斗壁 A、B 任一水平截面沿壁斜向单位高度上的水平拉力标准值 N_{hak} 、 N_{hbk} 按下列公式计算：

$$\text{角锥形漏斗壁 A: } N_{hak} = [(p_{nbk} + q_{bk} \cos \alpha_b) b_{nh} \sin \alpha_a] / 2 \quad (6.2.2-5)$$

$$\text{角锥形漏斗壁 B: } N_{hbk} = [(p_{nak} + q_{ak} \cos \alpha_a) a_{nh} \sin \alpha_b] / 2 \quad (6.2.2-6)$$

4) 贮料水平压力作用下，浅仓仓壁底部单位宽度上的反力标准值 N_{Rk} 按下列公式计算：

$$\text{顶部有楼板: } N_{Rk} = 2 p_{hk} h_n / 5 \quad (6.2.2-7)$$

$$\text{顶部无楼板: } N_{Rk} = p_{hk} h_n / 2 \quad (6.2.2-8)$$

式中： p_{hk} ——计算截面处，贮料作用于仓壁上的水平压力标准值 (N/mm^2)；

p_{nak} 、 p_{nbk} ——分别为计算截面处，贮料作用于角锥形漏斗壁 A、B 上的法向压力标准值 (N/mm^2)；

q_{ak} 、 q_{bk} ——分别为角锥漏斗壁 A、B 单位面积自重标准值 (N/mm^2)；

a_n 、 b_n ——分别为仓壁 A、B 的内侧宽度 (mm)；

h_n ——贮料计算高度 (mm)；

a_{nh} 、 b_{nh} ——分别为计算截面处，角锥形漏斗壁 A、B 的内侧宽度 (mm)；

α_a 、 α_b ——分别为角锥形漏斗壁 A、B 与水平面之夹角 ($^\circ$)。

2 对称布置的矩形钢筒仓仓壁或角锥形漏斗壁,在贮料荷载、结构自重等竖向荷载作用下,仓壁 A、B 底部单位宽度上的竖向力标准值 N_{vak} 、 N_{vbk} ;角锥漏斗 A、B 任一水平截面单位宽度上的斜向力标准值 $N_{inc,ak}$ 、 $N_{inc,bk}$ 可按下列公式计算:

$$N_{vak} = N_{vbk} = G_1 / 2(a_n + b_n) \quad (6.2.2-9)$$

$$N_{inc,ak} = G_2 / 2(a_{nh} + b_{nh}) \sin \alpha_a \quad (6.2.2-10)$$

$$N_{inc,bk} = G_2 / 2(a_{nh} + b_{nh}) \sin \alpha_b \quad (6.2.2-11)$$

式中: G_1 ——仓壁底部所承受的全部竖向荷载(包括全部贮料荷载和仓壁底部以下的漏斗的结构自重及附设在其上的设备重等)(N);

G_2 ——计算截面以下漏斗壁所承受的全部竖向荷载(对于浅仓:包括图 6.2.2-2 中阴影部分贮料重、计算截面以下的漏斗结构自重及附设在其上的设备重等)(N);

a_n 、 b_n ——分别为仓壁的宽度(轴线尺寸)(mm);

a_{nh} 、 b_{nh} ——分别为计算截面处角锥漏斗壁 A、B 的宽度(轴线尺寸)(mm)。

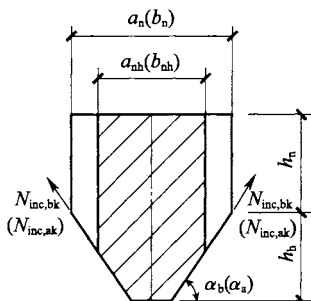


图 6.2.2-2 斜向力及贮料荷载示意

3 对称布置且柱子支承的角锥漏斗壁交角顶部在贮料重量

及漏斗自重作用下的斜向拉力标准值 N_{inc}^s 可按下式计算：

$$N_{\text{inc}}^s = c(a_n N_{\text{inc}, \text{ak}} + b_n N_{\text{inc}, \text{bk}}) / 2 \quad (6.2.2-12)$$

式中： c ——荷载分配系数，可按图 6.2.2-3 选用；

$N_{\text{inc}, \text{ak}}$ 、 $N_{\text{inc}, \text{bk}}$ ——分别为角锥形漏斗壁 A、B 顶部单位宽度上的斜向拉力标准值。

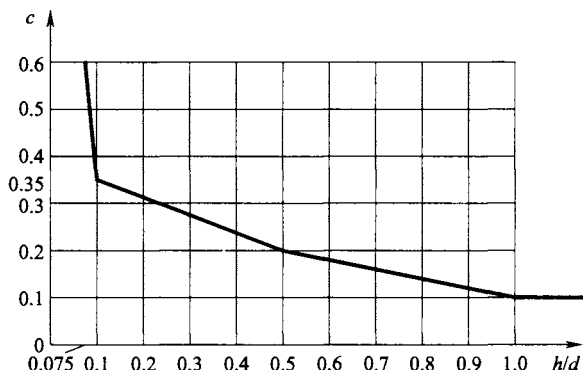


图 6.2.2-3 荷载分配系数 c

h —仓壁高度或漏斗仓壁上边梁高度

4 矩形仓仓壁、角锥形漏斗壁平面外的弯曲，可按多跨连续梁计算；

5 矩形钢筒仓水平及竖向加劲肋可接单跨简支梁设计；

6 矩形钢筒仓水平环梁应按双向拉弯构件设计，仓壁钢柱可按双向压弯构件设计；

7 矩形群仓仓壁除应按单仓计算外，尚应计算在空、满仓不同荷载条件下的内力。

6.2.3 构件强度及稳定应符合现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 的有关规定。

6.3 构造

6.3.1 矩形钢板仓仓壁转角处宜加腋(图 6.3.1)。

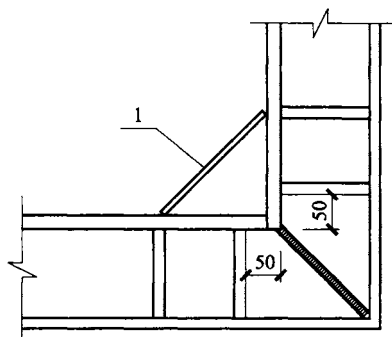


图 6.3.1 仓壁转角处加腋

1—转角加腋兼焊缝连接护板

6.3.2 加劲肋焊于斜壁上的焊缝,应采用单面焊,且应沿肋全长满焊,焊缝高度不应小于 4mm。

6.3.3 漏斗在水平肋的转角处应设置导向板(图 6.3.3),较大的漏斗在两转角中间宜设置导向板。

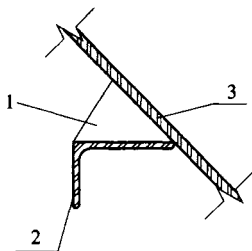


图 6.3.3 导向板示意

1—导向板;2—加劲肋;3—漏斗壁

6.3.4 在两相邻壁交接处,应沿交接缝满焊,焊缝高度应不小于较薄壁厚。

7 支承结构与基础

7.0.1 仓下支承结构的设计应符合国家现行有关标准的规定,并宜按空间结构进行内力计算。

7.0.2 钢筒仓基础计算除应满足现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 相关要求外,尚应符合下列规定:

- 1 钢筒仓地基承载力取值可不计入宽度修正系数;
- 2 群仓整体基础应根据空仓、满仓及附近大面积堆载的工况设计;
- 3 基础底面不宜出现零应力区,基础底面与地基之间零应力区面积不应超过基础底面面积的 15%;
- 4 基础倾斜率不应大于 0.002,平均沉降量不应大于 200mm。

7.0.3 支承结构的构造宜符合下列规定:

- 1 仓下支撑结构宜采用混凝土结构;
- 2 当直径较小时,可采用钢柱-支撑体系。

8 内衬与防护

8.0.1 仓壁和斜壁的防护,应根据贮料的重力、密度、粒径、硬度、落差、进出料方式以及贮料的流动状态等因素对内壁的磨损,采取相应措施。

8.0.2 仓壁和斜壁受贮料冲磨轻微的部位,在满足结构受力计算要求的情况下,可增加壁厚作防护措施。

8.0.3 仓壁和斜壁受贮料冲磨严重的部位,应选用与钢板结合牢固、抗冲磨性能好的材料作内衬。

8.0.4 贮料流动对焊缝有较大摩擦的部位,宜设置焊缝防护角钢或钢板(图 8.0.4)。

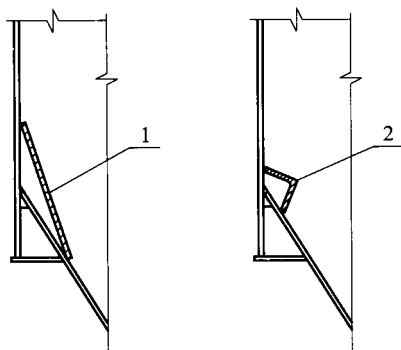


图 8.0.4 焊缝防护大样示意

1—防护钢板;2—防护角钢

8.0.5 钢管仓外侧防腐蚀应按现行有关国家标准《钢结构设计规范》GB 50017、《冷弯薄壁型钢结构技术规范》GB 50018 和《工业建筑防腐蚀设计规范》GB 50046 的有关规定执行。

8.0.6 钢筒仓外侧防火涂料的涂层材料、厚度应按现行有关国家标准《钢结构防火涂料》GB 14907、《建筑设计防火规范》GB 50016和《有色金属工程设计防火规范》GB 50630 的有关规定执行。

附录 A 常用贮料的物理特性参数

表 A 常用贮料的物理特性参数

序号	名称	重力密度 (kN/m^3)	内摩擦角 ($^\circ$)	摩擦系数	
				对混凝土板	对钢板
1	镍矿石	18~20	30~34	0.45	0.40
2	钨矿石	20	22~25	0.35	0.30
3	铜精矿(粉状)	18~23	28~32	0.55	0.45
4	镍精矿(粉状)	17~20	30~34	0.45	0.40
5	钨精矿(粉状)	17~22	22~25	0.35	0.30
6	铅精矿(粉状)	24~33	30~34	0.60	0.50
7	锌精矿(粉状)	18~21	28~32	0.60	0.50
8	锡精矿(粉状)	32	29~32	0.55	0.40
9	镁粉	18	33	0.53	0.35
10	铁粉(硫铁矿废渣)	16	33	0.55	0.35
11	铁精矿(含铁 60%左右)	20~27	30~34	0.50	0.36
12	硫铁精矿(粉状)	20	30~34	0.55	0.45
13	矿渣(干粒状高炉渣)	11	30	0.50	0.35
14	焦炭	6	40	0.80	0.50
15	烟煤	8~11	25~40	0.50~0.60	0.30
16	无烟煤	8~12	25~40	0.50~0.60	0.30
	无烟煤(小块、干燥)	7~10	27~30	0.50	0.30
17	褐煤	7~10	23~38	0.50~0.60	0.30
18	煤粉	8~9	25~30	0.55	0.40
19	粉煤灰	7~8	25~30	0.55	0.40

续表 A

序号	名称	重力密度 (kN/m^3)	内摩擦角 ($^\circ$)	摩擦系数	
				对混凝土板	对钢板
20	中煤	12~14	35~40	0.50~0.60	0.30
21	煤矸石	16	35~40	0.60	0.45
22	石灰石(粒径 25mm~75mm)	12~15	35	0.50	0.35
23	消化石灰粉	7	35	0.55	0.35
24	石膏(碎块)	15	35	0.50	0.35
25	萤石粉	20	28~32	0.60	0.45
26	水泥	16	30	0.58	0.30
27	水泥生料	14	30	0.58	0.30
28	水泥熟料	16	33	0.50	0.30
29	黏土(干)	16	35	0.50	0.30
30	干砂	16	30	0.70	0.50
31	湿砂	18	35	0.60	0.40
32	油母页岩	7~10	23~38	0.50~0.60	0.30
33	白水泥	13	30	0.58	0.30
34	白水泥熟料	15	30	0.58	0.30
35	氧化铝粉	10~12	24~35	0.50	0.40
36	石油焦	0.75~0.85	30~45	0.40	0.30

注:1 表中内摩擦角和摩擦系数指散料外在含水量小于12%的值;当超过时,需另行考虑;

2 表中的重力密度为干密度,设计时应按贮料的实际含水量进行修正。

附录 B 浅圆仓贮料压力计算公式

B. 0. 1 当仓壁顶面以上的贮料为锥体、破裂面通过仓的中线(图 B. 0. 1)时,贮料作用于浅圆仓仓壁上的侧压力可按下列公式计算:

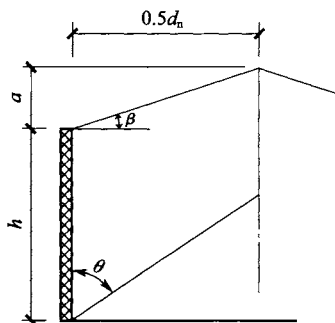


图 B. 0. 1 仓壁顶面以上的贮料为锥体的破裂面示意

$$\cot\theta = -\cot\varphi + \frac{\sqrt{2[1 + \cos 2\varphi + \sin 2\varphi(\tan\beta + 6\delta)]}}{\sin 2\varphi} \quad (\text{B. 0. 1-1})$$

$$\delta = h/d_n \quad (\text{B. 0. 1-2})$$

$$\lambda_{kl} = \frac{1}{12\delta^2} (6\delta + \tan\beta - \cot\theta) \cot(\theta + \varphi) \quad (\text{B. 0. 1-3})$$

$$E = 0.5\lambda_{kl}\gamma h^2 \quad (\text{B. 0. 1-4})$$

$$P_h = \lambda_{kl}\gamma h \quad (\text{B. 0. 1-5})$$

式中: E ——侧压力总值(N);

λ_{kl} ——贮料作用于仓壁上的侧压力系数;

δ ——浅圆仓的高径比;

θ ——贮料的破裂角。

B. 0.2 当仓壁顶面以上的贮料为截锥体、破裂面不通过仓中线 (图 B. 0.2) 时, 贮料作用于仓壁上的侧压力按下列公式计算:

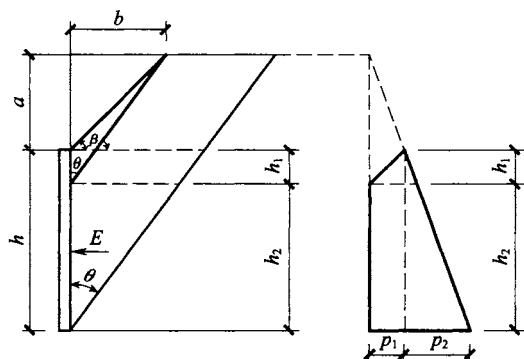


图 B. 0.2 仓壁顶面以上贮料为截锥体的破裂面及侧压力示意

$$A_s = 0.5 (a + h)^2$$

$$B_s = 0.5ab \quad (\text{B. 0.2-1})$$

$$s = \frac{h^2 + a(3h^2 - 3h_1h + h_1^2)}{3[h^2 + a(2h - h_1)]} \quad (\text{B. 0.2-2})$$

$$h_1 = \frac{b - a \tan \theta}{\tan \theta}$$

$$\tan \theta = -\tan \varphi + \sqrt{(\tan \varphi + \cot \varphi) \left(\tan \varphi + \frac{B_s}{A_s} \right)} \quad (\text{B. 0.2-3})$$

$$\lambda_{k2} = \tan \theta \frac{\cos(\theta + \varphi)}{\sin(\theta + \varphi)} \quad (\text{B. 0.2-4})$$

$$\eta_1 = 1 - \frac{(h + a)^3 \tan^2 \theta - a^3 \cot^2 \beta}{3r [(h + a)^2 \tan \theta - a^2 \cot \beta]} \quad (\text{B. 0.2-5})$$

$$E = \gamma \eta_1 \lambda_{k2} \frac{A_s \tan \theta - B_s}{\tan \theta} \quad (\text{B. 0.2-6})$$

$$P_1 = \gamma a \lambda_{k2} \quad (\text{B. 0.2-7})$$

$$P_2 = \gamma h \lambda_{k2} \quad (\text{B. 0. 2-8})$$

$$P_h = \gamma \eta_1 \lambda_{k2} (h + a) \quad (\text{B. 0. 2-9})$$

式中: s ——图 B. 0. 2 中 E 至底边的距离(mm);

E ——侧压力总值(N);

a, b ——仓壁顶面以上贮料锥体的尺寸(mm);

λ_{k2} ——贮料作用于仓壁上的侧压力系数;

η_1 ——修正系数;

r ——钢筒仓的半径(mm)。

B. 0. 3 当仓壁顶面以上贮料为锥体、破裂面不通过仓中线时(图 B. 0. 3), 贮料作用于仓壁上的侧压力按下列公式计算:

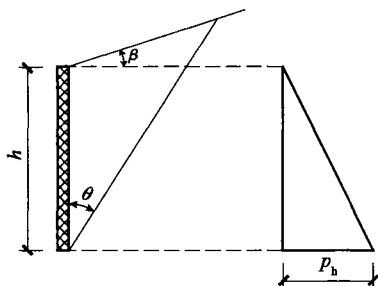


图 B. 0. 3 仓壁顶面以上贮料为锥体的破裂面及侧压力示意

$$\tan(\theta + \beta) = -\tan\psi + \sqrt{(\tan\psi + \cot\psi)(\tan\psi + \tan\beta)} \quad (\text{B. 0. 3-1})$$

$$\psi = \varphi - \beta (\varphi \neq \beta) \quad (\text{B. 0. 3-2})$$

$$\delta = \frac{h}{d_n} \quad (\text{B. 0. 3-3})$$

$$\lambda_{k3} = \frac{\cos^2 \varphi}{\left[1 + \sqrt{\frac{\sin \varphi \sin(\varphi - \beta)}{\cos \beta}} \right]^2} \quad (\text{B. 0. 3-4})$$

$$\eta_2 = 1 - \frac{1}{3} (2\delta + \tan\beta) \tan\theta \quad (\text{B. 0. 3-5})$$

$$\cot\theta_0 = 2\delta + 2\tan\beta \quad (\text{B. 0. 3-6})$$

$$E = 0.5\gamma h^2 \lambda_{k3} \eta_2 \quad (\text{B. 0. 3-7})$$

$$p_h = \gamma h \lambda_{k3} \eta_2 \quad (\text{B. 0. 3-8})$$

式中： θ_0 ——破裂面交于仓顶锥体贮料锥顶时的破裂角；

λ_{k3} ——贮料作用于仓壁上的侧压力系数；

δ ——浅圆仓的高径比；

η_2 ——修正系数。

附录 C 贮料荷载计算系数

表 C-1 $\xi = \cos^2 \alpha + k \sin^2 \alpha$ 的值

α (°)	$\varphi(^{\circ})$						
	20	25	30	35	40	45	50
	$k = \tan^2(45^{\circ} - \varphi/2)$						
	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217	0.172	0.132
25	0.909	0.893	0.881	0.869	0.800	0.852	0.845
30	0.872	0.852	0.833	0.818	0.804	0.793	0.783
35	0.832	0.805	0.781	0.760	0.742	0.727	0.715
40	0.789	0.755	0.725	0.699	0.677	0.657	0.642
42	0.772	0.734	0.701	0.673	0.650	0.629	0.612
44	0.754	0.713	0.678	0.648	0.622	0.600	0.584
45	0.745	0.703	0.667	0.636	0.609	0.536	0.566
46	0.736	0.698	0.655	0.623	0.505	0.571	0.551
48	0.719	0.672	0.632	0.598	0.568	0.543	0.521
50	0.701	0.651	0.608	0.572	0.540	0.518	0.491
52	0.684	0.631	0.586	0.547	0.511	0.486	0.461
54	0.666	0.611	0.563	0.523	0.487	0.457	0.432
55	0.658	0.601	0.552	0.511	0.475	0.444	0.418
56	0.649	0.592	0.542	0.499	0.462	0.430	0.404
58	0.633	0.573	0.520	0.476	0.437	0.404	0.376
60	0.617	0.555	0.500	0.453	0.413	0.378	0.340
62	0.602	0.537	0.480	0.431	0.389	0.354	0.324
64	0.588	0.520	0.461	0.411	0.367	0.330	0.299
65	0.581	0.512	0.452	0.401	0.357	0.320	0.287
66	0.574	0.504	0.443	0.391	0.346	0.303	0.276
68	0.561	0.490	0.426	0.373	0.327	0.287	0.254
70	0.550	0.476	0.412	0.356	0.309	0.265	0.234

表 C-2 $\lambda = (1 - e^{-\mu ks/\rho})$ 的值

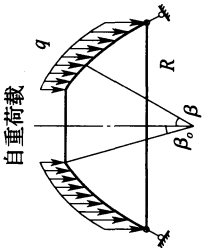
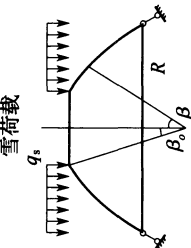
$\mu ks/\rho$	λ	$\mu ks/\rho$	λ	$\mu ks/\rho$	λ	$\mu ks/\rho$	λ
0.01	0.01	0.27	0.237	0.53	0.411	0.79	0.546
0.02	0.02	0.28	0.244	0.54	0.417	0.80	0.551
0.03	0.03	0.29	0.252	0.55	0.423	0.81	0.555
0.04	0.039	0.30	0.259	0.56	0.429	0.82	0.559
0.05	0.049	0.31	0.267	0.57	0.434	0.83	0.564
0.06	0.058	0.32	0.274	0.58	0.440	0.84	0.568
0.07	0.068	0.33	0.281	0.59	0.446	0.85	0.573
0.08	0.077	0.34	0.288	0.60	0.451	0.86	0.577
0.09	0.086	0.35	0.295	0.61	0.457	0.87	0.581
0.10	0.095	0.36	0.302	0.62	0.462	0.88	0.585
0.11	0.104	0.37	0.309	0.63	0.467	0.89	0.589
0.12	0.113	0.38	0.316	0.64	0.473	0.90	0.593
0.13	0.122	0.39	0.323	0.65	0.478	0.91	0.597
0.14	0.131	0.40	0.330	0.66	0.483	0.92	0.601
0.15	0.139	0.41	0.336	0.67	0.488	0.93	0.605
0.16	0.148	0.42	0.343	0.68	0.493	0.94	0.609
0.17	0.156	0.43	0.349	0.69	0.498	0.95	0.613
0.18	0.165	0.44	0.356	0.70	0.503	0.96	0.617
0.19	0.173	0.45	0.362	0.71	0.508	0.97	0.621
0.20	0.181	0.46	0.369	0.72	0.513	0.98	0.625
0.21	0.189	0.47	0.375	0.73	0.518	0.99	0.628
0.22	0.197	0.48	0.381	0.74	0.523	1.00	0.632
0.23	0.205	0.49	0.387	0.75	0.528	1.02	0.639
0.24	0.213	0.50	0.393	0.76	0.532	1.04	0.647
0.25	0.221	0.51	0.399	0.77	0.537	1.06	0.654
0.26	0.229	0.52	0.405	0.78	0.542	1.08	0.660

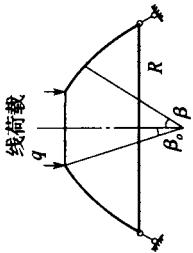
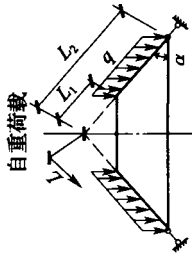
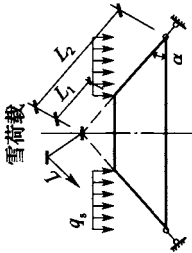
续表 C-2

$\mu ks/\rho$	λ	$\mu ks/\rho$	λ	$\mu ks/\rho$	λ	$\mu ks/\rho$	λ
1.10	0.667	1.50	0.777	1.90	0.850	2.75	0.939
1.12	0.674	1.52	0.781	1.92	0.853	2.80	0.939
1.14	0.680	1.54	0.786	1.94	0.856	2.85	0.942
1.16	0.687	1.56	0.790	1.96	0.859	2.90	0.945
1.18	0.693	1.58	0.794	1.98	0.862	2.95	0.948
1.20	0.699	1.60	0.798	2.00	0.865	3.00	0.950
1.22	0.705	1.62	0.802	2.05	0.871	3.10	0.955
1.24	0.711	1.64	0.806	2.10	0.878	3.20	0.959
1.26	0.716	1.66	0.810	2.15	0.884	3.30	0.963
1.28	0.722	1.68	0.814	2.20	0.889	3.40	0.967
1.30	0.727	1.70	0.817	2.25	0.895	3.50	0.970
1.32	0.733	1.72	0.821	2.30	0.900	3.60	0.973
1.34	0.738	1.74	0.824	2.35	0.905	3.70	0.975
1.36	0.743	1.76	0.828	2.40	0.909	3.80	0.978
1.38	0.748	1.78	0.831	2.45	0.914	3.90	0.980
1.40	0.753	1.80	0.835	2.50	0.918	4.00	0.982
1.42	0.758	1.82	0.838	2.55	0.922	5.00	0.993
1.44	0.763	1.84	0.841	2.60	0.926	6.00	0.998
1.46	0.768	1.86	0.844	2.65	0.929	7.00	0.999
1.48	0.772	1.88	0.847	2.70	0.933	8.00	1.000

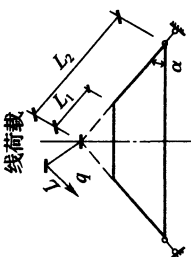
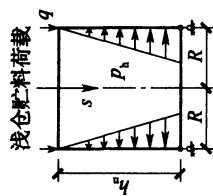
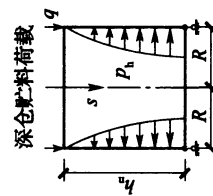
附录 D 旋转壳体在对称荷载下的薄膜内力

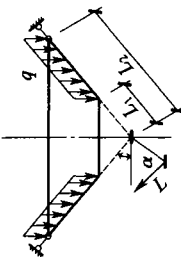
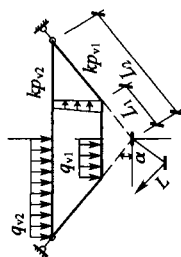
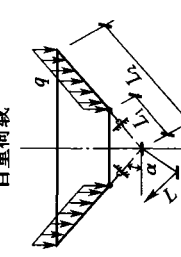
表 D 旋转壳体在对称荷载下的薄膜内力

荷载类型	环向力 N_ϕ (受拉为正)	经向力 N_m (受拉为正)
 <p>自重荷载</p>	$qR \left(\frac{\cos\beta_0 - \cos\beta}{\sin^2\beta} - \cos\beta \right)$	$-qR \left(\frac{\cos\beta_0 - \cos\beta}{\sin^2\beta} \right)$
 <p>雪荷载</p>	$\frac{q_s R}{2} \left(1 - \frac{\sin\beta_0}{\sin^2\beta} - 2 \cos^2\beta \right)$	$-\frac{q_s R}{2} \left(1 - \frac{\sin\beta_0}{\sin^2\beta} \right)$

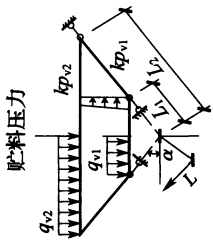
 <p>线荷载</p>	$q \frac{\sin \beta_0}{\sin^2 \beta}$	$-q \frac{\sin \beta_0}{\sin^2 \beta}$
 <p>自重荷载</p>	$-ql \cos \alpha \cot \alpha$	$-\frac{ql}{2 \sin \alpha} \left(1 - \frac{l_1^2}{l^2} \right)$
 <p>雪荷载</p>	$-q_s / \cos^2 \alpha \cot \alpha$	$-\frac{1}{2} q_s l \left(1 - \frac{l_1^2}{l^2} \right) \cot \alpha$

续表 D

荷载类型	环向力 N_θ (受拉为正)	经向力 N_m (受拉为正)
<p>线荷载</p> 	0	$-\frac{qL_1}{l}$
<p>浅仓贮料荷载</p> 	$P_h R$	$-q - r_c S t$
<p>深仓贮料荷载</p> 	$P_h R$	$-q - P_f - r_c S t$

<p>自重荷载</p> 	$ql\cos\alpha\cot\alpha$	$\frac{ql}{2\sin\alpha}\left(1-\frac{l_1^2}{l^2}\right)$
<p>肥料压力</p> 	$\frac{\xi\cot\alpha}{1-n}\left[(P_{v2}-P_{v1})\frac{l^2}{l_2}+(P_{v1}-nP_{v2})/l\right]$	$\frac{l\cot\alpha}{2}g\left[\frac{l_2(P_{v1}-nP_{v2})-l(P_{v1}-P_{v2})}{l_2-l_1}+\frac{l\cot\alpha}{2}g\frac{\gamma\sin\alpha}{3}\left(l-\frac{l_1^3}{l^2}\right)\right]$
<p>自重荷载</p> 	$ql\cos\alpha\cot\alpha$	$\frac{ql}{2\sin\alpha}\left(1-\frac{l_2^2}{l^2}\right)$

续表 D

荷载类型	环向力 N_p (受拉为正)	经向力 N_m (受拉为正)
 <p>贮料压力</p>	$\xi \cot \alpha \left[(P_{v2} - P_{v1}) \frac{l^2}{l_2} + (P_{v1} - n P_{v2}) l \right]$	$\frac{\cot \alpha}{2} \left\{ P_{v1} \frac{ll_2 - l^2}{(1-n)l_2} - P_{v2} \left[\frac{l_2^2}{l} - \frac{l^2 - nll_2}{(1-n)l_2} \right] - \frac{\cot \alpha}{2} \times \frac{\gamma}{3} \left(\frac{l_2^3}{l} - l^2 \right) \sin \alpha \right\}$

注:1 γ_c ——仓壁材料重力密度 (kN/m^3);

ξ ——系数, $\xi = \cos^2 \alpha + k \sin^2 \alpha$;

n ——系数, $n = l_1/l_2$;

P_{v1}, P_{v2} ——分别为贮料作用于漏斗底部及顶部单位面积上的竖向压力 (kPa);

l ——旋转壳的厚度 (m);

2 各项荷载均以图示方向为正。

本规范用词说明

1 为便于在执行本规范条文时区别对待,对要求严格程度不同的用词说明如下:

1)表示很严格,非这样做不可的:

正面词采用“必须”;反面词采用“严禁”;

2)表示严格,在正常情况下均应这样做的:

正面词采用“应”;反面词采用“不应”或“不得”;

3)表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的:

正面词采用“宜”;反面词采用“不宜”;

4)表示有选择,在一定条件下可以这样做的,采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为:“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 《建筑地基基础设计规范》GB 50007
- 《建筑结构荷载规范》GB 50009
- 《建筑抗震设计规范》GB 50011
- 《建筑设计防火规范》GB 50016
- 《钢结构设计规范》GB 50017
- 《冷弯薄壁型钢结构技术规范》GB 50018
- 《工业建筑防腐蚀设计规范》GB 50046
- 《有色金属工程设计防火规范》GB 50630
- 《碳素结构钢》GB/T 700
- 《标准件用碳素钢热轧圆钢》GB/T 715
- 《钢结构用高强度大六角头螺栓》GB/T 1228
- 《钢结构用高强度大六角螺母》GB/T 1229
- 《钢结构用高强度垫圈》GB/T 1230
- 《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件》
GB/T 1231
- 《低合金高强度结构钢》GB/T 1591
- 《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副》GB/T 3632
- 《耐候结构钢》GB/T 4171
- 《非合金钢及细晶粒钢焊条》GB/T 5117
- 《热强钢焊条》GB/T 5118
- 《埋弧焊用碳钢焊丝和焊剂》GB/T 5293
- 《六角头螺栓 C 级》GB/T 5780
- 《六角头螺栓》GB/T 5782

《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》GB/T 10433

《一般工程用铸造碳钢件》GB/T 11352

《埋弧焊用低合金钢焊丝和焊剂》GB/T 12470

《钢结构防火涂料》GB 14907

中华人民共和国国家标准

钢筒仓技术规范

GB 50884 - 2013

条文说明

制 订 说 明

《钢筒仓技术规范》GB 50884—2013,经住房和城乡建设部 2013 年 6 月 8 日以第 52 号公告批准发布。

本规范在编制过程中,规范编制组经广泛调查研究,认真总结钢筒仓工程建设经验,参考国内、外相关行业标准的有关内容,并在广泛征求意见的基础上编制本规范。

为便于有关人员使用本规范,能够正确理解本规范条文规定,《钢筒仓技术规范》编制组按照各章、节、条、款的顺序编制了条文说明。针对有关规范条文规定的目的、背景、依据以及执行中需注意的有关事项,进行了较为详尽的解释与说明,供使用者作为理解和把握规范规定的参考。但是,本条文说明不具备与规范正文同等的法律效力。

目 次

1	总 则	(69)
2	术语和符号	(70)
2.1	术语	(70)
3	基本规定	(71)
3.1	一般规定	(71)
3.2	材料	(72)
3.3	结构布置原则	(72)
3.4	结构选型	(73)
4	荷载与荷载效应组合	(76)
4.1	一般规定	(76)
4.2	贮料荷载	(76)
4.3	地震作用	(78)
4.4	荷载效应组合	(80)
5	圆形钢筒仓	(81)
5.1	一般规定	(81)
5.2	仓顶	(82)
5.3	仓壁	(82)
5.4	仓底	(86)
5.5	构造	(87)
6	矩形钢筒仓	(88)
6.1	一般规定	(88)
6.2	结构计算	(88)
7	支承结构与基础	(89)

8 内衬与防护	(90)
附录 A 常用贮料的物理特性参数	(91)
附录 B 浅圆仓贮料压力计算公式	(92)

1 总 则

1.0.1 在我国用钢板装配或卷制而成的钢筒仓、漏斗是近年来引进国外先进技术发展起来的新技术。钢筒仓具有自重轻、建设工期短、企业技术改造升级方便、便于机械化生产等优点,在建材、煤炭、冶金、化工、石化等行业已广泛使用。为使钢筒仓技术健康发展,做到安全适用、经济合理、确保质量,在总结近年钢筒仓的建仓实践和建设经验的基础上,参考国内外有关标准、规范和技术资料,特制定本规范。

1.0.2 本条说明本规范的适用行业范围及外形为圆形或矩形散料中心装、卸料的钢筒仓设计。本规范适用于贮存建材、煤炭、冶金、化工、石化等行业的固体散料钢板仓。其散料的粒径,颗粒组成、含水量及其他物理力学特性均应符合散体理论的要求。对于平均粒径大于 200mm、小于 1000mm 的粗块状散体,不适用于深仓,只适用于低壁浅仓或斗仓。对于粒径更大的块体贮料,其物理力学特性已超出散体力学的研究范围,不适用于本规范。当该钢筒仓用于贮存易燃易爆、腐蚀性固体散料时,应采取有效的防护措施,避免筒壁与物料直接接触。钢筒仓为薄壁结构,径厚比大,稳定性差,在工程实践中已经发生过由于偏心出料,在贮料流动过程中产生偏心荷载,造成仓体失稳倒塌事故。偏心卸料对钢筒仓产生的偏心荷载,目前还没有比较成熟的计算方法。工艺要求必须设置多点进、出料口时,应特别注意对称、等流量布置,并采取措施防止有的料口畅通,有的料口堵塞,形成偏心进、出料,致使仓壁受偏心荷载。偏心装、卸料的钢筒仓设计需进行专题研究论证。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1~2.1.3 本节所列术语的英文名称是参照国内外有关规范的常用词编入的。仓壁 barrel 是参照欧洲规范和英文解释取用的（与国内《粮食钢板筒仓设计规范》GB 50322 silo wall 和《钢筋混凝土筒仓设计规范》GB 50077 wall of silo 不同）。

2.1.9 当钢筒仓内贮料计算高度 h_n 与圆形钢筒仓内径 d_n 或与矩形钢筒仓的短边 b_n 之比大于或等于 1.5 时为深仓, 小于 1.5 时为浅仓。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 钢筒仓的设计使用年限理论上可以与钢结构建筑物具有相同的设计使用年限,设计计算的各种荷载作用取值也相同,但考虑到目前我国钢筒仓使用时间最长的还不到 50 年,设计使用年限定于为 50 年缺乏依据。钢筒仓是一种类似于工业设备的特种结构,宜参照设备检修使用条件进行维护,设计使用年限宜与设备使用年限适当匹配以节省一次性投资。

3.1.2 根据钢筒仓在工业建(构)筑物中的特殊性和重要性,将钢筒仓的安全等级定义为二级,抗震设防类别为丙类。与钢筒仓结构组合或连接在一起其他生产工艺工业建筑,应视同一体,采用相同的安全等级和抗震设防类别。

3.1.4 钢筒仓的设计未考虑爆炸力对结构的影响,一般情况下,根据工艺专业提供的泄爆面积在仓壁的顶部开洞,洞口可采用易破裂的材料封闭,以便有爆炸产生时及时泄爆,使爆炸力得到释放,从而减少爆炸对结构的破坏作用。或者在仓内设置相应的预防设备。

3.1.5、3.1.6 钢筒仓的自重相对较轻,贮料荷载占主导地位。由于贮料的空、满仓荷载变化将引起地基变形,独立布置的钢筒仓沉降观测点数建议一般不少于 4 个。地基变形可能导致各单体构筑物的相对位移,在设计各单体构筑物之间的连接栈桥、连廊、输送地道时,应考虑因地基变形引起各单体构筑物之间的相对位移。输送地道设置沉降缝;连接单体构筑物的架空栈桥、连廊的支承处,考虑相对水平位移。

3.1.7 由于贮料荷载自重很大,除建在基岩上的钢筒仓外,地基

都会因装、卸贮料产生变形,为避免首次装料时地基产生过大的压缩变形,在设计文件中应根据钢筒仓容量和地基条件提出首次装卸料的要求,如分次装料,每次装料后的允许沉降量、下次装料条件等。控制每次地基沉降量,确保使用安全。应根据不同行业的贮料特点制定相应的装料要求。如水泥行业:根据地基土的情况,1个月内装 $1/3$;1~3个月装 $2/3$;3个月以后逐步装满。或者3个月内装 $1/3$;3~6个月装 $2/3$;6个月以后逐步装满。群仓要均匀装料。

3.2 材 料

3.2.1 钢结构中所用的钢材,应保证抗拉强度、屈服强度、冲击韧性合格及硫、磷和碳含量的限制值。抗拉强度是实际上决定结构安全储备的关键,伸长率反映钢材能承受残余变形量的程度及塑性变形能力,钢材的屈服强度不宜过高,同时要求有明显的屈服台阶,伸长率应大于20%,以保证构件具有足够的塑性变形能力,冲击韧性是抗震结构的要求。当采用国外钢材时,亦应符合我国现行国家标准的要求。现行国家标准《碳素结构钢》GB/T 700中,Q235钢分为A、B、C、D四个等级,其中A级钢不要求任何冲击试验值,并只在用户要求时才进行冷弯试验,且不保证焊接要求的含碳量,故不建议采用。现行国家标准《低合金高强度结构钢》GB/T 1591中,Q345钢分为A、B、C、D、E五个等级,其中A级钢不保证冲击韧性要求和延性性能的基本要求,故亦不建议采用。

3.2.3 目前钢材品种越来越多,本条制定的目的是给适合各种腐蚀环境及耐磨要求的特种钢留有使用的余地。

3.2.4 钢筒仓仓壁为波纹钢板、螺旋卷边钢板时,涂漆困难,应采用热镀锌或合金钢板,以保证钢筒仓的工作寿命。

3.3 结构布置原则

3.3.2 图3.3.2只是排仓、群仓布置方式的示意图,在具体布置

时,每组仓的组合个数可根据仓体的大小及变形缝区间的划分组合,不一定受此图表示个数的限制。圆形群仓不论如何布置,其受力特点均应为独立布置。

3.3.3 钢筒仓的平面形状有圆形、方形、矩形等,国内已建钢筒仓的实践证明,圆形钢筒仓与方形、矩形钢筒仓相比,具有体型合理、仓体结构受力明确、计算和构造简单、仓内死料少、有效贮存率高等优点,因此经济效果显著。

3.3.5 靠近钢筒仓堆放散料或其他物料时,这部分荷载会引起地基不均匀下沉,致使钢筒仓倾斜,尤其建在非坚硬黏土地基上的钢筒仓更为严重,甚至使钢筒仓与相邻建筑物脱开或相碰,从而造成破坏事故。需计算地基下沉引起钢筒仓的倾斜率,使其限制在允许的范围,并计算地基下沉引起仓体倾斜时对仓下支承结构产生的附加内力等。

3.3.6 在钢筒仓仓顶上设置有振动设备时,其设备支座的间距不可能做大,这就需要仓顶结构增加复杂的构建作为支承构件。尤其支柱支承在仓壁上时,支柱与仓壁截面的大小不可能一样,从而使构造复杂传力不明确。同时对钢结构的疲劳也极为不利,因此本规范不建议在仓顶平台上直接设置有振动的设备。

3.3.7 在钢筒仓室内主要通道的宽度、设备维护通道的宽度,通道的净空高度,宜根据工艺使用要求,并满足相关建筑安全使用规范确定。

3.4 结 构 选 型

3.4.1 钢筒仓结构六部分的划分,是为了在设计中进行技术比较时,有一个统一的技术口径。仓上建筑物是指仓顶平台以上的建筑物,包括单层或两层及以上的厂房。仓顶是指仓顶平台或仓顶平台及与仓壁整体连接的梁板结构、用于大直径钢筒仓或筒壁落地的浅圆仓的截锥壳或截球壳、大跨钢结构及大跨空间结构。仓壁是指直接承受贮料水平面压力的竖壁。仓底是指直接承受贮料

竖向压力的,由平板、梁板式结构加填料及各种壳体形成的漏斗等结构。仓下支承结构是指仓底以下的筒壁、柱子或墙壁,是仓壁、仓底和基础之间起承上启下作用的支承结构。基础是指筒壁、柱子或墙壁以下的部分,图 3.4.1 仅是钢筒仓结构划分的示意图。

3.4.3 如何选择适当的仓底形式,是钢筒仓设计的重要环节之一。根据多年来建成钢筒仓的统计,圆形钢筒仓仓底结构的钢材消耗约占整个钢筒仓材消耗的 25%~50%,而且在直径、贮量相同条件下由于仓底结构选型的差异,材料消耗指标变化的幅度很大。仓底结构的布置合理与否,对计算工作量的简化程度均有直接的影响。此外,仓底是否合理,对于卸料的畅通与否,影响也很大。仓底选型的三项原则,是基于上述几个方面的情况,从钢筒仓设计经验中总结出来的,对钢筒仓设计具有指导意义。

3.4.4 图 3.4.4 示意的几种常用的仓底型式,是结合国内外钢筒仓设计的实践,技术上比较成熟、行之有效、技术经济指标比较合理的常用普通仓底型式,钢筒仓仓底结构和基础所耗的钢材通常占整个钢筒仓钢材用量较大,因此选用合理的仓底结构和基础形式,是体现钢筒仓设计经济合理的重要环节。钢筒仓直径大于 12 m 时,仓底宜采用落地式平底仓,利用地基承担大部分贮料自重,更经济合理。当钢筒仓直径较大、工艺又不允许做落地式平底仓时,应优先考虑设内柱,以减少仓底和基础的结构跨度。

3.4.5 钢筒仓的抗震能力,主要取决于仓下的支承结构。筒壁支承或筒壁与内柱共同支承的仓下结构形式,其抗震性能优于柱支承的仓下结构形式。从结构特征上分析,筒壁因其为壳体结构,刚度较大、变形适应能力强、抗扭性能较好。地震时刚度大的结构耗能明显加大,对地震作用效应的消能作用有明显的效果。另外,仓体与仓下支承结构连接处,筒壁支承的钢筒仓与柱支承的钢筒仓相比截面变化缓和,不像柱支承钢筒仓那样产生巨大的刚度突变,从而消除了应力集中,减少地震作用效应对结构的破坏。此外,筒壁支承或筒壁与内柱共同支承钢筒仓,一般采用条形、环形或筏形

基础,基础与地基接触面较大,相应的阻尼也大,钢筒仓整体稳定性好,这也都是筒壁支承抗震性能优于柱支承的有利条件。对于柱支承的方仓或圆形钢筒仓,其结构形式是典型的上大下小、上重下轻的结构,造成仓下支柱的轴压比较大。大多为单独基础,仓体稳定性差。上部仓体与仓底支柱的连接处,刚度往往有较大的突变,使支柱的延性较差。在排仓或群仓贮料不对称时,地震的效应的扭转作用将会加剧钢筒仓的破坏。因此,需框架-抗震墙结构或框架-支撑结构的形式,以提高支承结构的抗震性能。

3.4.6 钢筒仓之间或钢筒仓与其他建(构)筑物之间连接结构的支座,采用简支形式受力最明确,有利于结构计算和施工。地震区应按防震要求设计其支座。

4 荷载与荷载效应组合

4.1 一般规定

4.1.1 钢板筒仓为工业生产用特种结构,使用过程中永久荷载长期作用在筒仓结构上,对筒仓的仓壁结构产生附加应力;可变荷载为经常作用在筒仓结构上,对筒仓结构产生较大的应力;环境温度的变化会引起结构材料的热胀冷缩,当环境温度变化较大且筒仓结构受到约束而不能自由热胀冷缩时,必将对筒仓结构产生较大的温度应力;当发生地震时,筒仓的贮料等荷载会对筒仓结构产生较大的动荷载,对筒仓的作用力较大。

筒仓结构设计时,必须充分考虑以上荷载及作用,使筒仓结构能够抵抗以上荷载的单独或可能的同时作用,进而保证筒仓的结构安全。如果设计中荷载考虑不全,就有可能造成筒仓结构截面承受荷载能力不足,使筒仓结构被破坏(整体倒塌等),直接影响生产运行,并有可能造成人员伤亡。所以,本条为强制性条文,必须严格执行。

4.1.3 钢筒仓一般可不进行倾覆稳定或滑动稳定计算。只有当高径比大、地基条件不良、空仓及处于特大台风作用地区的钢筒仓,可按本条规定进行验算。

4.2 贮料荷载

4.2.1 贮料散料的物理特性参数(重力密度、内摩擦角与仓壁之间的摩擦系数等)的取值,对贮料荷载的计算结果有很大影响,然而影响贮料散料物理特性参数的因素很多,不同的物料状态(颗粒形状、含水量)、装卸条件、外界温度、贮存时间等均会使散料的物理特性参数发生变化,因此设计中选用各种参数时必须慎重。

贮料散料的物理特性参数一般应通过试验,并综合考虑各种变化因素。附录 A 所列贮料散料的物理特性参数,是我国贮料钢筒仓设计的经验数据,采用时应根据实际贮料散料的来源、品种等进行选择。

4.2.2 不同品种的贮料,对筒仓壁的侧压力计算参数和摩擦力计算参数不同,计算得出对筒仓壁的荷载作用效应差别较大。

波纹钢板钢筒仓卸料时,贮料与仓壁间的相对滑移面并不完全是沿波纹钢板表面,位于钢板外凸波内的贮料与仓内流动区内的贮料之间也发生相对滑移,由于采用贮料的内摩擦角计算得到的贮料对仓壁的摩擦力比采用贮料对平钢板的外摩擦角大,故在考虑贮料对仓壁的摩擦作用时,基于安全的考虑,取贮料对平钢板的内摩擦角进行计算,以求得在最不利工况下的设计值。

筒仓结构承受荷载能力的大小是根据各工况荷载及其组合荷载作用于筒仓仓壁的荷载效应大小而来的,当筒仓仓壁的荷载效应计算值小于实际荷载效应时,筒仓结构的承载能力将小于实际荷载效应,由此将导致筒仓破坏。所以,本条为强制性条文,必须严格执行。

4.2.3 钢筒仓划分为深仓与浅仓,主要是考虑贮料荷载的不同特征。深仓与浅仓的界限划分,有以下不同的方法:

- 1 按仓壁高度与直径的比值划分;
- 2 按仓壁高度与钢筒仓截面面积的平方根的比值划分;
- 3 按贮料的破裂面划分。

本规范采用以贮料的计算高度与钢筒仓内径的比值作为划分的标准,是考虑到大直径钢筒仓的仓壁高度与贮料高度相差较大,且这种方法比较简单,已沿用多年,为大家所熟悉。

4.2.4 贮料计算高度的取值,对贮料压力的计算结果有很大影响。特别是对于大直径钢筒仓贮料顶面为斜面时,确定其计算高度,应考虑贮料斜面可能会超出仓壁高度形成的上部锥体或贮料斜面可能会低于仓壁高度产生的无效仓容,故计算高度上端算至

贮料锥体的重心,否则会产生较大误差。钢筒仓下部为填料时,由于填料有一定的强度,能够承受贮料压力,故应考虑填料的有利影响,将计算高度算至填料的表面。

4.2.6 本规范中选用的深仓贮料动态压力修正系数主要依据我国多年来的钢筒仓设计实践,并参考了国外的钢筒仓设计规范。贮料的水平与竖向动压压力修正系数 C_h 、 C_v 与现行国家标准《钢筋混凝土筒仓设计规范》GB 50077 取值相同;另外考虑到钢筒仓的径厚比较大,稳定性较差,钢筒仓工程事故多是由于卸料时仓壁屈曲而引起。参考国内外有关国家钢筒仓设计规范,对贮料作用于仓壁的竖向摩擦力也引入动力修正系数 C_f 。

4.2.7 浅仓贮料对仓壁的水平压力,是按库仓理论作为计算的基本公式。但对装料高度较大的大直径浅仓,贮料对仓壁也会产生较大的摩擦力,故对 h_n 大于 10m 且 d_n 大于 12m 的浅仓,仍要求按深仓计算贮料对仓壁的水平压力,同时还应考虑贮料摩擦荷载,以保证仓壁的安全可靠。

4.3 地震作用

4.3.1 计算贮料水平地震作用时,由于贮料是散体,地震时颗粒之间及颗粒与仓壁的运动和摩擦,消耗一部分能量,使地震作用减少,但由于此种能量的损失是受贮料的物理特性、地震烈度、贮仓几何形状等多种因素的影响,现在还不能就各因素得出定量的分析,因此,为了设计上的方便,采用折减贮料质量的方法,以降低地震作用效应。考虑到贮料的种类繁多,只能近似地选取一个系数,经参考国内外的有关资料,将此影响系数取 0.9,同时考虑到地震时贮料未必满仓,折减系数取 0.9。因此,这两次折减的结果为 $0.9 \times 0.9 \approx 0.8$,即贮料总重力的 80%。

4.3.2 鉴于现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 关于地震水平的计算公式中含有结构基本自振周期水平地震影响系数 α ,计算该系数用的自振周期多由计算求得。因此,为了设计方便,

在周期计算中的质量取值也用 0.8 折减。当然,这样计算的周期与实测数值是有差异的,只是一个近似值,但考虑到最终计算地震荷载的综合结果,并不折减很多,还是可以采用的。

地震对于钢筒仓的作用,国内外的研究尚无完全统一的定论。有关的国外资料多数是将贮料及自重乘以地震系数,这种方法虽然简单但不一定代表地震的真正作用机理。在发生地震时非压密的贮料在仓内运动状态对仓体的作用效应是不同的。根据日本科学家以煤作为贮料进行的试验,地震时散体煤在仓内的运动对仓体的地震效应有一定的阻尼作用,其等效黏滞阻尼效应可达 40%。由散体煤产生的仓体底部剪力的 75%~80% 由仓壁承受。这一结果在某种程度上与本规范所取的折减系数相吻合。实验结论还认为,地震输入的加速度越高,圆形钢筒仓仓壁承受的单位输入加速度基底剪力值越小。贮料粒径及力学特性的改变对仓底剪力变化的影响可忽略不计。

4.3.4 钢筒仓结构虽然大,但按其高径比远没有烟囱等高耸建筑或构筑物大,故其破坏仍为第一振型,竖向地震破坏不是主要的,当需要验算时可参照现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 计算。

4.3.6 地震时仓内贮料因运动作用于仓壁的荷载分布是参照欧洲规范《抗震结构设计 第 4 部分 筒仓、贮水池和管道》BS EN 1998—4:2006 以及我国近几年大量国外工程设计实践得出的。其中压应力分布沿用了欧洲规范, z 高度处贮料的水平地震影响系数是按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 中采用底部剪力法推导出来的计算公式。

4.3.7 贮料振动的阻尼比取值为参考欧洲规范《抗震结构设计 第 4 部分 筒仓、贮水池和管道》BS EN1998—4:2006。

4.3.10 群仓抗震设计时应从结构布置和构造上采取抗震措施,避免因群仓布置、群仓加料不均匀性带来的结构扭转。

4.4 荷载效应组合

4.4.1、4.4.2 钢筒仓是以贮料荷载为主的特种结构,荷载组合时,应区别于一般建筑物,因此,本规范对荷载组合做了必要的简化。

钢筒仓起控制作用的永久荷载主要是钢筒仓的自重,起控制作用的可变荷载主要是贮料。故本条在钢筒仓结构按承载能力极限状态计算的荷载效应组合中,需着重体现起控制作用的荷载。

可变荷载效应控制的组合中,当钢筒仓的高与外径之比 $H/D \geq 10$ 且有台风作用的地区,应考虑风的作用,其他条件下可不计。

4.4.5 结构或结构构件达到正常使用要求的规定限值(如变形、振幅及加速度等限值),应按本规范及钢筒仓使用相关工艺要求的规定采用,各荷载均取荷载效应的标准值。

5 圆形钢筒仓

5.1 一般规定

5.1.1 根据现行国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068 的要求,贮料钢筒仓结构设计应采用以概率理论为基础的极限状态设计方法。

承载能力极限状态是指结构或构件发挥允许的最大承载能力的状态。结构或构件由于塑性变形而使其几何形状发生显著改变,虽未达到最大承载能力,但已完全不能使用,也属达到承载能力极限状态。

正常使用极限状态可理解为结构或构件达到使用功能上所允许的某个限值的状态。例如,某些构件必须控制其变形,因变形过大会影响正常使用,也会使人们在心理上产生不安全的感

5.1.2 作用在筒仓结构上的外部荷载通常引起构件之间连接受力、构件受力(压力作用下有稳定问题)、整体倾覆、整体受压以及与基础连接锚固节点受力等。

总结历年来筒仓工程事故,其中不乏构件连接被破坏、单个构件失稳、整体倾覆、整体失稳、空仓时风荷载作用下或满仓时地震荷载作用下筒仓与基础连接处锚固螺栓破坏,进而引起筒仓整体倒塌,造成财产和人员的重大损失。其原因均为筒仓结构构件及连接的设计强度、稳定性、整体抗倾覆能力、基础锚固的承载能力小于实际外部荷载效应,因此必须对本条所列的各项进行计算,以确保在极限状态下筒仓结构的承载能力大于外部荷载作用效应,保证筒仓结构安全。所以,本条为强制性条文,必须严格执行。

5.2 仓 顶

5.2.2 参考欧洲规范,给出了直径不大于 4m 且屋面的水平倾角不大于 40° 的仓顶可采取由钢板直接弯成圆锥壳仓顶,并给出了承载力的计算公式。当直径较大时考虑到仓顶一般是用扇形板块在现场拼装而成,不可避免会有较大缺陷,此缺陷会使锥壳的稳定性大幅度下降,当缺陷达到超出薄壳厚度时,下降幅度可能会达到 50%。

5.2.3 梁板式仓顶包括平板式仓顶及由斜梁、环梁及支撑系统组成正截锥壳仓顶。平板式仓顶的结构验算同普通钢结构楼板。当围护钢板厚度不小于 3mm 且与梁有可靠连接时可计入钢板的共同作用。建议将钢板用等效拉杆考虑共同作用。

圆形钢筒仓上环梁承受斜梁传来的径向水平压力,若与斜梁偏心连接,径向水平压力会对上环梁产生扭转作用,故应按压、弯、扭构件进行计算。下环梁承受斜梁传来的径向水平拉力,若与斜梁偏心连接,径向水平拉力会对下环梁产生扭转作用,故应按拉、弯、扭构件进行计算。与下环梁相连的仓壁一般较薄,在平面外刚度很小,故下环梁环截面计算时不再考虑仓壁与下环梁的共同工作。

由于钢筒仓仓顶多为轻钢结构,故斜梁传给下环梁的竖向荷载较小。而下环梁在竖向一般具有较大的抗弯刚度,下部又与仓壁整体相连,斜梁传给下环梁的竖向力,可认为由下环梁均匀传给下部结构。

5.3 仓 壁

5.3.2 本条分别给出了仓壁在水平及竖直方向上应考虑的荷载基本组合,设计中应从中选取相应最不利的组合进行仓壁的强度、稳定及连接的计算。

5.3.3 钢筒仓采用有限元分析时应考虑钢板初始几何缺陷、焊接

残余应力,荷载的偶然偏心等影响,按有限元稳定分析得到临界极限承载力应除以安全系数才能得到设计容许荷载标准值,参考欧洲规范和我国粮食钢板筒仓规范相关条文,安全系数取 15;加劲肋间距不大于 1.2m 时的钢筒仓将加劲肋折算成所加强方向的壳壁截面,可按“等效强度”或“等效刚度”的原则进行,折算后的壳壁厚度按下列规定取值:

1 抗拉强度相等原则折算时,折算厚度按下式计算:

$$t_s = t + \frac{A_s}{b} \quad (1)$$

2 抗弯刚度相等原则折算时,折算厚度按下式计算:

$$t_s = 12 \left(\frac{I_s}{b} + \frac{A_s e_s^2 + t e_i^2}{b} + t e_i^2 + \frac{t^3}{12} \right)^{1/3} \quad (2)$$

式中: t ——仓壁厚度;

A_s ——加劲肋的横截面积;

I_s ——加劲肋截面对平行于仓壁的本身截面形心轴的惯性矩;

b ——加劲肋间距(弧长);

e_s ——加劲肋截面形心距组合截面中心的距离;

e_i ——仓壁钢板截面形心距组合截面中心的距离。

折算后的壳壁,在加劲肋加强方向上进行壳壁的抗拉、抗压强度计算时,应采用按抗拉强度相等的原则确定折算厚度;抗弯和稳定验算时,应采用按抗弯刚度相等的原则确定折算厚度。

5.3.4 计算折算应力的公式(5.3.4-3),是根据能量强度理论,保证钢材在复杂应力状态下处于弹性状态的条件。由于钢筒仓属于薄壁结构,在仓壁厚度方向上应力一般较小,故按双向应力状态进行计算。其余计算公式是根据现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 的有关规定给出的。

5.3.5 有加劲肋的钢筒仓按简化方法进行强度计算时,加劲肋与仓壁的组合构件,在竖向荷载作用下截面实际受力较为复杂,且卸料时还有动载影响,宜完全按弹性进行强度计算,不允许截面有塑

性开展。加劲肋为薄壁型钢时,其截面尺寸取值尚应符合现行国家标准《冷弯薄壁型钢结构技术规范》GB 50018 的有关规定。参考欧洲规范,增加了波形板仓壁加劲肋之间的水平间距要求。

钢筒仓仓壁为波纹钢板时,仓壁的竖向荷载将全部经连接传给加劲肋;仓壁为平钢板或螺旋卷边钢板时,仓壁的竖向荷载仅有部分经连接传给加劲肋。为简化计算,在设计仓壁与加劲肋的连接时,不分仓壁钢板类型,偏于安全按仓壁的竖向荷载全部经连接传给加劲肋来考虑。连接强度计算公式是根据现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 的有关规定给出的。

5.3.7 钢筒仓仓壁在竖向荷载作用下的稳定计算,包括空仓时及竖向荷载作用下、满仓时竖向荷载与贮料水平压力共同作用下及局部集中荷载作用下仓壁的稳定计算。

1 弹性稳定理论分析,理想中圆筒壳在轴压下的稳定临界应力为 $\sigma_{cr}=0.605E\frac{t}{R}$,但大量试验证明,实际圆筒壳的临界应力比理想圆筒壳的理论计算值要少 $1/2\sim 2/3$,失稳破坏时的稳定系数仅为 $0.15\sim 0.3$,而不是 0.605 。厚筒壳的轴压临界应力在很大程度上取决于初始形状缺陷,随着初始形状缺陷的增大,临界应力明显下降,下降幅度可能达到 50% 之多。经过对国内外有关试验资料及分析结果相比较,同时考虑设计计算的方便,采用了前苏联 B. T. 利律等人提出的稳定系数表达式: $k_p=\frac{1}{\pi}\left(\frac{100t}{R}\right)^{3/8}$ 作为在空仓时验算仓壁的稳定系数。当仓壁半径与厚度之比 R/t 在 1500 以下时,此式计算结果和大量的试验结果可很好地符合;当 R/t 在 $2000\sim 2500$ 时,按此式计算结果比试验分析结果略大(约 10%)。另考虑到贮料钢筒仓多为现场组装,与试验条件有较大差异,取初始形状缺陷影响系数 0.5 ,则得到空仓时验算仓壁的稳定系数计算公式(5.3.7-2)。

钢筒仓在竖向荷载作用下进行稳定验算时,仓壁的竖向压应力应参照本规范第 5.3.1 条和 5.3.2 条的规定,按可能出现的最

不利荷载组合进行计算；

2 钢筒仓在满仓时,仓壁受到竖向压力及内部水平压力的共同作用,内压可以减少筒壳初始缺陷的影响,而使稳定临界应力有所提高。衡量内压影响的大小,参考国外有关资料,采用无量纲参数 $P = \frac{P}{E} \left(\frac{R}{t} \right)^2$ 。在内压 P 作用下,筒壳稳定临界力的提高程度

与参数 P 有关。经对美国、前苏联等国外有关试验结果及经验公式的对比计算,采用了前苏联 B. T. 利律等人提出的算式,即:

$k'_p = k_p + 0.265 \sqrt{\bar{P}}$, 由于钢筒仓在卸料时,贮料压力可能会不均匀分布,在计算参数 \bar{P} 时不考虑贮料压力动力修正系数,同时因内压 P 对仓壁整体稳定起有利作用,取其分项系数为 1.0,故取贮料对仓壁的静态水平压力标准值来计算参数 \bar{P} 。经整理即为钢筒仓在满仓时仓壁的稳定系数计算公式(5.3.7-4);

3 仓上建筑支承于钢筒仓壁顶端时,仓壁将局部承受竖向集中荷载,为防止仓壁局部应力过大而导致局部失稳,应在局部竖向集中的荷载作用处设置加劲肋。假定竖向集中荷载经加劲肋向仓壁传递的扩散角为 30° ,并且考虑到钢筒仓顶端区段内压较小,在本规范公式(5.3.7-5)中,仓壁临界应力的计算不再考虑内压的影响,总体来讲是偏于安全的。

5.3.8 风荷载对仓壁表面产生不均匀的径向压力、使仓壁整体弯曲而产生的竖向压应力,使仓壁整体剪切而产生水平剪应力,都可能引起钢筒仓仓壁失稳破坏。

风荷载使仓壁整体弯曲而产生的竖向压应力,应与可能同时出现的其他荷载产生的竖向压应力进行组合,并按本规范第 5.3.7 条进行竖向荷载下仓壁的稳定验算。在常用的钢筒仓高度范围(35m 以下),风荷载使仓壁整体剪切而产生水平剪应力,对仓壁稳定一般不起控制作用。

风荷载对仓壁表面产生不均匀的径向压力,假定在钢筒仓的

整个高度上均匀分布而沿周向不均匀分布的压力,按有关理论分析研究,中长筒壳($h \geq 25\sqrt{Rt}$)在筒壁失稳时的临界荷载相当于轴对称加载时的临界荷载,相应计算公式可写成为 $P_{cr} = 0.92kE \left(\frac{t}{R}\right)^{3/2} \frac{t}{h}$ 。式中的 k 为筒壳的初始形状缺陷影响系数,其值随 R/t 增大而减小。参考欧洲规范: k 取值采用外部压力屈曲系数和风压力分布系数表达。

5.4 仓 底

5.4.1 由于在圆锥漏斗仓底与仓壁的连接处设置有环梁,漏斗壁的计算不必再考虑连接处由于曲率的变化而引起的附加内力的影响,漏斗壁的径向、环向均按轴向受力进行强度计算。

5.4.2 仓底环梁与仓壁及漏斗采用连续焊接连接时,则成为一个整体,可考虑部分壁板与环梁共同工作。

不同曲率的壳体相连接,曲率剧烈变化,由于壳壁径向力的作用将在壳体相连处产生附加环向力,能够有效地承受这种附加环向力的壳体宽度范围,按理论分析为 $k\sqrt{rt}$ (r 为曲率半径)。而圆筒壳与锥壳相连,当锥壳倾角为 $30^\circ \sim 60^\circ$ 时, $k=0.6$ 。所以本条规定与环梁共同工作的壁板有效范围采用 $0.5\sqrt{rt}$,同时考虑此范围若过大,会由于壁板中应力的不均匀而使此范围壁板不能充分发挥作用,参照现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 中受压板件宽厚比限值的有关规定,限制此范围亦不应大于 $15t\sqrt{\frac{235}{f_y}}$ 。

5.4.3 仓底环梁的荷载,应考虑仓壁传来的竖向力,漏斗壁传来的斜向拉力及荷载偏心引起的扭矩。在环梁高度范围内的贮料水平压力,由于数据较小且对环梁的径向受压稳定起有利作用,故偏于安全不计其影响。

5.4.4 仓底环梁是分段制作、安装,环梁段在径向压力作用下的稳定可按圆弧拱进行分析,其平面内与平面外的临界荷载均可用

公式 $N_{cr} = k \frac{EI}{r^2}$ 来计算,且随圆弧角度的增大,平面内外的稳定系数 k 值均减小,当圆弧角度为 2π 时,稳定系数最小值 $k=0.6$,即本规范公式(5.4.4)。

5.5 构造

5.5.1 最常见的仓上建筑为输送廊道,用于安装输送设备并有操作荷载。本条强调仓上建筑的支架要支搁在下张力环或上张力环上,使仓顶结构整体承受仓上建筑的荷载,并应注意防止仓顶结构偏心受力。对于装有清理、计量等设备的仓上建筑,需用落地支架,独立承担仓上建筑的荷载。

5.5.4 根据对贮料钢筒仓使用情况调查,仓顶板与斜梁采用外露螺栓连接时,极易在连接处出现锈蚀和渗水而影响钢筒仓安全贮料。

5.5.5、5.5.6 卸料时,贮料与仓壁的摩擦产生的竖向压力,使仓壁承受竖向压应力,此时仓壁与竖向加劲肋共同工作。因此,竖向加劲肋的长度与仓壁的连接对仓壁稳定、安全使用至关重要。根据对一些发生事故的钢筒仓的调查分析,有些焊接连接的加劲肋与仓壁未能焊实或焊缝长度不够;螺栓连接的螺栓脱落或剪断,致使钢筒仓破坏。因此这两条提出加劲肋与仓壁的连接必须可靠,保证仓壁与加劲肋共同受力;加劲肋接长采用等强度连接。除根据计算设置加劲肋外,其接头错开布置,以保证内力均匀传递。

6 矩形钢筒仓

6.1 一般规定

6.1.1 钢筒仓的高度与平面尺寸均不大(4m以下),而仓壁计算内力又较小时,仓壁宜采用钢板加劲肋。

平面尺寸不大(5m~6m)、高度在4m~5m的漏斗,其水平加劲肋宜采用角钢加劲肋。

平面尺寸不大但较深(7m~8m)的漏斗,宜同时设置水平加劲肋和垂直加劲肋;水平加劲肋采用角钢或其他型钢,垂直加劲肋采用钢板。

6.1.2 作用在筒仓结构上的外部荷载通常引起构件之间连接受力、构件受力(压力作用下有稳定问题)、整体倾覆、整体受压以及与基础连接锚固节点受力等。

总结近年来筒仓工程事故,其中不乏构件连接被破坏、单个构件失稳、整体倾覆、整体失稳、空仓时风荷载作用下或满仓时地震荷载作用下筒仓与基础连接处锚固螺栓破坏,进而引起筒仓整体倒塌,造成财产和人员的重大损失。其原因均为筒仓结构构件及连接的设计强度、稳定性、整体抗倾覆能力、基础锚固的承载能力小于实际外部荷载效应,因此必须对本条所列的各项进行计算,以确保在极限状态下筒仓结构的承载能力大于外部荷载作用效应,保证筒仓结构安全。所以,本条为强制性条文,必须严格执行。

6.2 结构计算

6.2.1 矩形仓仓壁主要受力以弯曲为主,弯曲变形挠度一般大于或接近仓壁壁厚,属大挠度非线性变形,为节省钢材,可按多跨连续梁计算。并可以考虑大变形的非线性影响,此时对于周边钢梁应同时考虑由于钢板大挠度变形对其引起的薄膜拉力。

7 支承结构与基础

7.0.1 支承结构是保证钢筒仓安全使用最重要的结构之一,尤其在有抗震设防要求的地区,支承结构不仅应满足承担贮料和钢筒仓的重力作用,还应满足地震和风荷载的水平作用,高烈度区还应考虑地震的垂直作用,支承结构如果采用平面简化计算不能真实反映结构的受力状态。目前,设计单位基本上均采用空间设计计算软件计算和设计,因此,要求采用空间模型计算是合理的和必要的。

7.0.2 基础设计计算的要求仅列出几条主要要求,其他均应满足现行地基基础规范的要求。如有矛盾应按照严格的条文执行。

8 内衬与防护

8.0.1 根据钢筒仓使用的情况调查,装贮不同散料的钢筒仓以及在同一钢筒仓内的不同部位,钢筒仓内表面的磨损程度是不同的,这主要与贮料的重力、密度、粒径、硬度、落差、进出料方式以及贮料的运动状态有关。

8.0.2 钢筒仓由于表面光滑摩擦系数相对混凝土结构要小,仓壁和漏斗受贮料冲磨轻微的部位,采用除满足结构计算要求外,壁厚适当加厚的方法,可以满足使用要求,无需另外增加工序,可节省施工安装时间,经济性也较好,目前在实际工程中经常采用。

8.0.3 仓壁和漏斗受贮料冲磨严重的部位,需要增加内衬材料,可作内衬的耐磨材料种类很多,设计曾采用过不锈钢、金刚砂、石英砂、超高分子聚乙烯类板材等但效果均不理想。死料作内衬是使仓底免受直接冲击作用的有效措施之一,有时也是一种最廉价的内衬材料,故当条件允许时可以考虑以死料做内衬。这种做法在铁矿石等贮仓中采用较多。

附录 A 常用贮料的物理特性参数

常用贮料的物理特性参数表中数据选自现行国家标准《钢筋混凝土筒仓设计规范》GB 50077 附录 B,并参考了部分试验资料而制定。首先,使用时由于松散状物料的堆积密度(堆积状态下的单位重量)和其压实程度、堆积时间、料的粒径、含水率等因素影响有很大关系,即使同种物料,其密度等数值差别会很明显。工程设计中需要根据实际情况或使用可能出现的情况进行分析,选用符合实际情况的可靠的计算参数。其次,应注意散状物料的内摩擦角值($^{\circ}$)与物料的安息角(休止角、堆积角)的区别。土体(散状物料)压力计算时,所采用的内摩擦角是表示在土体或松散状物料内部,其间的摩擦阻力大小的相应参数(以夹角示出)。松散状物料的安息角与其内摩擦角之间有密切关系,一般条件下,当物料的流动性较好或物料为松散状态时,安息角与内摩擦角相当。当物料压实重力密度增大时,内摩擦角会大于同类物料的安息角。

附录 B 浅圆仓贮料压力计算公式

B. 0. 1~B. 0. 3 对于大型浅圆仓,贮料作用于仓壁上的侧压力,可采用本附录的公式计算。在计算贮料作用于仓壁上的侧压力时,以上公式中未计入贮料对仓壁产生的摩擦力。计算地基承载力时,可计入贮料对仓壁的摩擦力。当有实践经验时,亦可采用其他计算方法计算。

基于本规范第 B. 0. 1~B. 0. 3 条,确定计算浅圆仓仓壁侧压力的基本步骤如下:

1 首先由公式(B. 0. 1-1)计算 θ ,计为 θ_1 ;

2 再由公式(B. 0. 3-6)计算 θ_0 ;

3 比较 θ_1 和 θ_0 的大小。若 $\theta_1 > \theta_0$,说明破裂面通过仓的中线,则应按公式(B. 0. 1-3)计算 λ_{k1} ,并按公式(B. 0. 1-4)、(B. 0. 1-5)分别计算仓壁总侧压力及仓壁不同高度的侧压力分布;若 $\theta_1 \leq \theta_0$,说明破裂面不通过仓的中线,应按本规范第 B. 0. 3 条确定仓壁侧压力的分布;

4 当 $\theta_1 \leq \theta_0$ 时,按公式(B. 0. 3-1)计算 θ ,计为 θ_3 ;

5 若 $\theta_3 \leq \theta_0$,则取 $\theta = \theta_3$,并代入公式(B. 0. 3-5)计算修正系数 η_2 ;若 $\theta_3 > \theta_0$,则取 $\theta = \theta_0$,并代入公式(B. 0. 3-5)计算修正系数 η_2 ;

6 按公式(B. 0. 3-4)计算 λ_{k3} ,并按公式(B. 0. 3-7)、(B. 0. 3-8)分别计算仓壁总侧压力及仓壁不同高度的侧压力。