

UDC

中华人民共和国国家标准



P

GB 50761 - 2012

石油化工钢制设备抗震设计规范

Code for seismic design of petrochemical steel facilities

2012 - 05 - 28 发布

2012 - 10 - 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

石油化工钢制设备抗震设计规范

Code for seismic design of petrochemical steel facilities

GB 50761 - 2012

主编部门:中国石油化工集团公司

批准部门:中华人民共和国住房和城乡建设部

施行日期:2012年10月1日

中国计划出版社

2012 北 京

中华人民共和国住房和城乡建设部公告

第 1414 号

关于发布国家标准 《石油化工钢制设备抗震设计规范》的公告

现批准《石油化工钢制设备抗震设计规范》为国家标准，编号为 GB 50761—2012，自 2012 年 10 月 1 日起实施。其中，第 1.0.4、1.0.6、3.2.3、4.1.1、4.2.1、5.2.1、6.3.1、7.3.1、8.3.1、9.3.1、10.3.1、11.3.1 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

二〇一二年五月二十八日

前 言

本规范是根据原建设部《关于印发〈2007年工程建设标准制订、修订计划(第二批)〉的通知》(建标〔2007〕126号)的要求,由中国石化工程建设有限公司会同有关单位共同编制而成的。

在本规范编制过程中,编制组开展了多项专题研究工作,调查总结了近年来国内外大地震的经验教训,采纳了在石油化工设备设计、施工方面的成熟经验和科研成果,考虑了我国的经济条件和工程实践,并在全中国范围内广泛征求了有关勘察、设计和施工单位的意见,经反复讨论、修改和试设计,最后经审查定稿。

本规范共分11章和3个附录,主要包括:总则、术语和符号、基本规定、地震作用和抗震验算、鞍座支承的卧式设备、支腿式直立设备、支耳式直立设备、裙座式直立设备、球形储罐、立式圆筒形储罐和加热炉等。

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。

本规范由住房和城乡建设部负责管理和对强制性条文的解释,中国石油化工集团公司负责日常管理和对强制性条文的解释,中国石化工程建设有限公司负责具体技术内容的解释。在执行过程中,请各单位结合工程实践,认真总结经验,并将意见和有关资料寄至中国石化工程建设有限公司国家标准《石油化工钢制设备抗震设计规范》管理组(地址:北京市朝阳区安慧北里安园21号,邮政编码:100101),以便今后修订时参考。

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:中国石化工程建设有限公司

参 编 单 位:全国锅炉压力容器标准化技术委员会

中国地震灾害防御中心

中石化洛阳工程有限公司

主要起草人:冯清晓 寿比南 孙恒志 杨国义 李 群
孙 毅 历亚宁 赵凤新 胡庆均 陈奎显
许超洋 倪正理 张郁山
主要审查人:王亚勇 侯忠良 葛春玉 朱 红 黄左坚
张迎恺 葛学礼 李立昌 苏经宇 李小军
王 伟 陈红芳 茅建民 宋启祥 冯成红
李 冰 杨盛启

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	(6)
3.1	设备的重要度分类	(6)
3.2	地震影响	(6)
3.3	设备的结构体系设计	(7)
4	地震作用和抗震验算	(9)
4.1	一般规定	(9)
4.2	地面设备设计反应谱	(10)
4.3	地面设备水平地震作用	(12)
4.4	构架上设备水平地震作用	(14)
4.5	竖向地震作用	(16)
4.6	载荷组合	(17)
4.7	抗震验算	(17)
5	鞍座支承的卧式设备	(22)
5.1	一般规定	(22)
5.2	地震作用和抗震验算	(22)
5.3	抗震构造措施	(23)
6	支腿式直立设备	(24)
6.1	一般规定	(24)
6.2	自振周期	(24)
6.3	地震作用和抗震验算	(26)

6.4	抗震构造措施	(26)
7	支耳式直立设备	(27)
7.1	一般规定	(27)
7.2	自振周期	(27)
7.3	地震作用和抗震验算	(28)
7.4	抗震构造措施	(28)
8	裙座式直立设备	(29)
8.1	一般规定	(29)
8.2	自振周期	(29)
8.3	地震作用和抗震验算	(31)
8.4	抗震构造措施	(32)
9	球形储罐	(33)
9.1	一般规定	(33)
9.2	自振周期	(33)
9.3	地震作用和抗震验算	(36)
9.4	抗震构造措施	(37)
10	立式圆筒形储罐	(38)
10.1	一般规定	(38)
10.2	自振周期	(38)
10.3	水平地震作用及效应	(39)
10.4	罐壁竖向稳定许用临界应力	(40)
10.5	罐壁的抗震验算	(40)
10.6	液面晃动波高	(42)
10.7	抗震构造措施	(43)
11	加热炉	(44)
11.1	一般规定	(44)
11.2	自振周期	(44)
11.3	地震作用和抗震验算	(50)
11.4	抗震构造措施	(52)

附录 A 柔度矩阵元素	(55)
附录 B 支腿式直立设备抗震验算	(58)
附录 C 支耳式直立设备抗震验算	(63)
本规范用词说明	(68)
引用标准名录	(69)
附:条文说明	(71)

Contents

1	General provisions	(1)
2	Terms and symbols	(2)
2.1	Terms	(2)
2.2	Symbols	(3)
3	Basic requirement	(6)
3.1	Classification of importance factors	(6)
3.2	Seismic influences	(6)
3.3	Equipment structural system design	(7)
4	Seismic load and seismic checking	(9)
4.1	General requirement	(9)
4.2	Seismic design response spectral of above-ground equipment	(10)
4.3	Horizontal seismic load of above-ground equipment	(12)
4.4	Horizontal seismic load of on-framework equipment	(14)
4.5	Vertical seismic load	(16)
4.6	Combinations of loads	(17)
4.7	Seismic checking	(17)
5	Horizontal steel vessel supported by saddles	(22)
5.1	General requirement	(22)
5.2	Seismic load and seismic checking	(22)
5.3	Details of seismic design	(23)
6	Steel vertical vessels supported by legs	(24)
6.1	General requirement	(24)
6.2	Natural vibration period	(24)

6.3	Seismic load and seismic checking	(26)
6.4	Details of seismic design	(26)
7	Steel vertical vessels supported by lugs	(27)
7.1	General requirement	(27)
7.2	Natural vibration period	(27)
7.3	Seismic load and seismic checking	(28)
7.4	Details of seismic design	(28)
8	Steel vertical vessels supported by skirt	(29)
8.1	General requirement	(29)
8.2	Natural vibration period	(29)
8.3	Seismic load and seismic checking	(31)
8.4	Details of seismic design	(32)
9	Steel spherical tanks supported by legs	(33)
9.1	General requirement	(33)
9.2	Natural vibration period	(33)
9.3	Seismic load and seismic checking	(36)
9.4	Details of seismic design	(37)
10	Vertical cylindrical steel storage tanks	(38)
10.1	General requirement	(38)
10.2	Natural vibration period	(38)
10.3	Horizontal seismic load and seismic effect	(39)
10.4	Allowable compression longitudinal stresses of tank shell	(40)
10.5	Seismic checking of tank shell	(40)
10.6	Liquid sloshing height	(42)
10.7	Details of seismic design	(43)
11	Tubular heater	(44)
11.1	General requirement	(44)
11.2	Natural period	(44)

11.3	Seismic action and seismic checking	(50)
11.4	Details of seismic design	(52)
Appendix A	Calculation of flexible matrix element	(55)
Appendix B	Seismic checking of steel vertical vessels supported by legs	(58)
Appendix C	Seismic checking of steel vertical vessels supported by lugs	(63)
	Explanation of wording in this code	(68)
	List of quoted standards	(69)
	Addition; Explanation of provisions	(71)

1 总 则

1.0.1 为贯彻执行国家有关防震减灾的法律法规,实行预防为主方针,使石油化工设备经抗震设防后减轻地震破坏,减少经济损失,制定本规范。

1.0.2 本规范适用于抗震设防烈度为 6 度~9 度或设计基本地震加速度为 $0.05g\sim 0.40g$ 地区的石油化工装置中的卧式设备、支腿式直立设备、支耳式直立设备、裙座式直立设备、球形储罐、立式圆筒形储罐和加热炉等钢制设备的抗震设计。

注: g 为重力加速度。

1.0.3 按本规范进行抗震设计的石油化工设备,当遭受相当于本地区抗震设防烈度的地震影响时,设备本体不应损坏。

1.0.4 抗震设防烈度为 6 度或设计基本地震动加速度为 $0.05g$ 及以上地区的石油化工设备,必须进行抗震设计。

1.0.5 卧式设备、支腿式直立设备、支耳式直立设备、裙座式直立设备、球形储罐及立式圆筒形储罐可采用许用应力设计法进行抗震设计,加热炉可采用极限状态设计法进行抗震设计。

1.0.6 抗震设防烈度或设计地震动参数,必须按国家规定的权限审批、颁发的文件(图件)确定。

1.0.7 抗震设防烈度可按现行国家标准《中国地震动参数区划图》GB 18306 规定的设计基本地震加速度确定。对完成地震安全性评价的工程场地,应按批准的抗震设防烈度或设计地震动参数进行抗震设防。

1.0.8 石油化工钢制设备的抗震设计,除应符合本规范外,尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 抗震设计 seismic design

对需要抗震设防的设备进行的一种专业设计,包括抗震计算和抗震构造措施。

2.1.2 抗震设防烈度 seismic precautionary intensity

按国家规定的权限批准作为一个地区抗震设防依据的地震烈度。

2.1.3 抗震设防标准 seismic precautionary criterion

衡量抗震设防要求的尺度;由抗震设防烈度和设备使用功能的重要性确定。

2.1.4 地震作用 seismic load

由地震动引起的设备动态作用,包括水平地震作用和竖向地震作用。

2.1.5 地震作用效应 seismic effect

在地震作用下设备产生的内力或变形。

2.1.6 设计地震动参数 design parameters of ground motion

抗震设计用的地震加速度时程曲线、加速度反应谱和峰值加速度。

2.1.7 设计基本地震加速度 design basic acceleration of ground motion

50年设计基准期,超越概率10%的地震加速度的设计取值。

2.1.8 特征周期 characteristic period of ground motion

抗震设计用的地震影响系数曲线中,反映地震震级、震中距和场地类别等因素的下降段起始点对应的周期值。

2.1.9 地震影响系数 seismic influence coefficient

单质点弹性体系在地震作用下的最大加速度反应与重力加速度比值的统计平均值。

2.1.10 抗震措施 seismic fortification measures

除地震作用计算和抗力计算以外的抗震设计内容,包括抗震设计的基本要求、抗震构造措施等。

2.1.11 抗震构造措施 details of seismic design

一般不需计算而对结构和非结构各部分必须采取的各种细部要求。

2.1.12 设备本体 body

设备壳体或加热炉框架结构。

2.1.13 附属构件 attachments

支撑结构、锚固结构、加强件。

2.1.14 许用应力设计法 allowable stress design

按元件在使用载荷作用下其截面中的计算应力不超过材料的许用应力为原则的设计方法。

2.1.15 极限状态设计法 limits state design

按结构或构件达到某种预定功能要求的极限状态为原则的工程结构设计方法。

2.2 符 号

2.2.1 作用和作用效应:

F_{ek} ——地震作用;

F_G ——设备的重力载荷;

m_{eq} ——设备的等效质量;

P ——压力载荷或设计压力;

P_l ——液柱静压力;

S_{chj} ——由 j 振型水平地震作用产生的效应;

S_{cht} ——水平地震作用效应。

2.2.2 材料性能和抗力：

E^t ——设计温度下材料的弹性模量；

R_{el} ——材料屈服强度或应变为 0.2% 的应力值；

σ_{cr} ——临界应力；

$[\sigma]$ ——材料的抗震许用应力；

$[\sigma]^t$ ——设计温度下材料的许用应力。

2.2.3 设备或结构几何参数：

A ——横截面积；

b ——支承结构中心线跨度；

D_b ——地角螺栓中心圆直径；

H_0 ——设备顶部到基础顶面的距离；

H_s ——建(构)筑物的总高度；

$\delta_{1/3}$ ——罐壁高度 1/3 处的罐壁名义厚度；

θ ——拉杆的仰角。

2.2.4 各种计算系数：

α_1 ——对应于设备或结构基本自振周期的水平地震影响系数；

α_{max} ——水平地震影响系数最大值；

α_{vmax} ——竖向地震影响系数最大值；

β ——构架动力放大系数；

K_L ——抗震许用应力调整系数；

ζ ——设备的阻尼比；

η ——设备重要度系数；

η_2 ——阻尼调整系数；

γ_j ——第 j 振型的振型参与系数；

R_e ——地震作用效应折减系数。

2.2.5 其他：

T, T_1 ——设备或结构的基本自振周期；

T_g ——特征周期；

T_w ——罐内储液晃动基本自振周期；
 X_{ji} —— j 振型 i 质点的水平相对位移；
 j, i, k ——质点序列号或代号。

3 基本规定

3.1 设备的重要度分类

3.1.1 设备抗震设计时,应按其用途和在地震破坏后的危害程度进行重要度分类,重要度可由小到大按下列要求分类:

- 1 包括储水罐和除第二、三类以外的设备,应为第一类设备。
- 2 容积大于或等于 100m^3 的卧式设备,公称容积大于或等于 1000m^3 且小于 30000m^3 的立式圆筒形储罐,加热炉和高度为 $20\text{m}\sim 80\text{m}$ 的直立设备,应为第二类设备。
- 3 公称容积大于或等于 30000m^3 的立式圆筒形储罐和高度大于 80m 的裙座式直立设备,应为第三类设备。

3.1.2 设备的重要度系数,应根据设备重要度类别按表 3.1.2 选用。

表 3.1.2 重要度系数

设备重要度类别	第一类	第二类	第三类
重要度系数	0.90	1.00	1.10

3.1.3 当抗震设防烈度为 6 度或设计基本地震加速度小于或等于 $0.05g$ 时,可不进行设备的地震作用计算,但应满足抗震措施要求。

3.2 地震影响

3.2.1 设备所在地区遭受的地震影响,应采用相应于抗震设防烈度的设计基本地震加速度和特征周期表示。

3.2.2 抗震设防烈度和设计基本地震加速度取值的对应关系,应符合表 3.2.2 的规定。

表 3.2.2 抗震设防烈度和设计基本地震加速度的对应关系

抗震设防烈度	6	7		8		9
设计基本地震加速度	0.05g	0.10g	0.15g	0.20g	0.30g	0.40g

3.2.3 地震影响的特征周期应根据设备所在地的设计地震分组和场地类别确定。本规范的设计地震共分为三组,其特征周期应按表 3.2.3 采用。

表 3.2.3 特征周期值(s)

设计地震分组	场地类别				
	I ₀	I ₁	II	III	IV
第一组	0.20	0.25	0.35	0.45	0.65
第二组	0.25	0.30	0.40	0.55	0.75
第三组	0.30	0.35	0.45	0.65	0.90

3.2.4 我国主要城镇中心地区的抗震设防烈度、设计基本地震加速度值和设计地震分组,可按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关规定执行。

3.3 设备的结构体系设计

3.3.1 设备的结构体系,应符合下列要求:

- 1 在满足工艺要求的前提下,设备宜露天布置。
- 2 应具有明确的计算简图和合理的地震作用传递途径。
- 3 应避免因设备零部件或附属构件失效而导致整个设备失效或抗震能力丧失。

4 应具备必要的抗震承载能力、良好的变形能力和消耗地震能量的能力。

5 对附着在设备本体上的附属设备的薄弱部位,应采取提高抗震能力的措施。

6 设备的锚固螺栓应设双螺母或带锁紧装置。

7 设备的刚度、质量变化宜平缓,其内件和整个设备的质量

中心宜低位布置。

8 高径比大于 10 或高度大于 10m 的设备(立式储液罐除外),宜采用带螺栓座的结构形式。

9 与设备连接的管道,应具有柔性。

3.3.2 钢构件材料应符合下列要求:

1 材料的屈服强度与抗拉强度的比值不应大于 0.85。

2 材料应有明显的屈服台阶,其伸长率不应小于 20%。

3 材料应具有良好的焊接性和合格的冲击韧性。

4 在低温条件下,应计入低温导致材料冲击韧性降低的影响。

4 地震作用和抗震验算

4.1 一般规定

4.1.1 设备的地震作用和抗震验算应符合下列规定:

- 1 应计算水平方向的地震作用并进行抗震验算。
- 2 抗震设防烈度为 8 度、9 度时,对于高度与直径之比大于 5 且高度大于 20m 的直立设备和加热炉落地烟囱,应计算竖向地震作用并进行抗震验算。
- 3 安装在构架(包括构筑物)上的卧式设备、支腿式直立设备,应计入设备所在构架的地震放大作用。

4.1.2 设备的地震作用计算,宜采用下列方法:

- 1 高度小于或等于 10m,或高度与直径之比小于 5、质量和刚度沿高度分布比较均匀的直立设备,以及可简化为单质点体系的设备,可采用底部剪力法。
- 2 除本条第 1 款外的设备,宜采用振型分解反应谱法。
- 3 设计基本地震加速度大于或等于 $0.30g$,高度大于 120m,且高径比大于 25 的直立设备和 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上的超大型储油罐,宜采用时程分析法进行补充计算。

4.1.3 采用时程分析法时,应按设备所在场地类别和设计地震分组选用大于或等于二组的实际强震加速度记录和一组人工模拟的地震加速度时程曲线,其平均地震影响系数曲线应与振型分解反应谱法所采用的地震影响系数曲线在统计意义上相符,其加速度时程的最大值可按表 4.1.3 采用。

采用时程分析法时,每条时程曲线计算所得设备底部剪力不应小于振型分解反应谱法计算结果的 65%,多条时程曲线计算所得的底部剪力的平均值不应小于振型分解反应谱法计算结果的

80%。

表 4.1.3 时程分析所用地震加速度时程的最大值 (cm/s²)

地震影响	设计基本地震加速度					
	0.05g	0.10g	0.15g	0.20g	0.30g	0.20g
多遇地震	18	35	55	70	110	140
设防地震	50	100	150	200	300	400
罕遇地震	125	220	310	400	510	620

4.1.4 鞍座支承的卧式设备、支腿式直立设备、支耳式直立设备、裙座式直立设备、球形储罐、立式圆筒形储罐等,应按设防地震计算地震作用,并按许用应力法进行抗震验算。加热炉应按多遇地震计算地震作用,并按极限状态设计法进行抗震验算。

4.2 地面设备设计反应谱

4.2.1 设备的地震影响系数应根据设防烈度、场地类别、设计地震分组、设备自振周期和阻尼比确定。其水平地震影响系数最大值应按表 4.2.1 选用;特征周期应根据场地类别和设计地震分组按表 3.2.3 选用。

表 4.2.1 水平地震影响系数最大值

地震影响	设计基本地震加速度					
	0.05g	0.10g	0.15g	0.20g	0.30g	0.40g
多遇地震	0.04	0.08	0.12	0.16	0.24	0.32
设防地震	0.12	0.23	0.34	0.45	0.68	0.90
罕遇地震	0.28	0.50	0.72	0.90	1.20	1.40

4.2.2 地震影响系数曲线(图 4.2.2)的阻尼调整系数和形状参数,应符合下列规定:

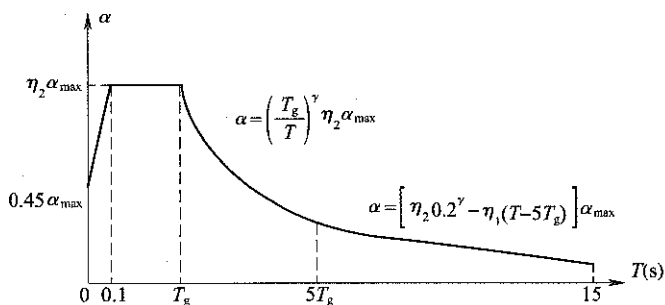


图 4.2.2 地震影响系数曲线

α —水平地震影响系数； α_{\max} —水平地震影响系数最大值；

η_1 —直线下降段的下降斜率调整系数； γ —曲线下降段的衰减指数；

T_g —特征周期； η_2 —阻尼调整系数； T —设备自振周期

1 曲线下降段的衰减指数应按下式确定：

$$\gamma = 0.9 + \frac{0.05 - \zeta}{0.3 + 6\zeta} \quad (4.2.2-1)$$

式中： γ ——曲线下降段的衰减指数；

ζ ——设备的阻尼比。

2 直线下降段的下降斜率调整系数，应按下列公式确定：

当 $T(s) \leq 6.0s$ 时：

$$\eta_1 = 0.02 + \frac{0.05 - \zeta}{4 + 32\zeta} \quad (4.2.2-2)$$

当 $T(s) > 6.0s$ 时：

$$\eta_1 = \frac{\eta_2 \cdot 0.2^\gamma - 0.03}{14} \quad (4.2.2-3)$$

式中： η_1 ——直线下降段的下降斜率调整系数，小于 0 时，应取 0。

3 阻尼调整系数，应按下式确定：

$$\eta_2 = 1 + \frac{0.05 - \zeta}{0.08 + 1.6\zeta} \quad (4.2.2-4)$$

式中： η_2 ——阻尼调整系数，小于 0.55 时，应取 0.55。

4 当水平地震影响系数的计算值小于 $0.05\eta_2\alpha_{\max}$ 时，应取

$0.05\eta_2\alpha_{\max}$ 。

4.3 地面设备水平地震作用

4.3.1 当采用底部剪力法时,设备水平地震作用计算简图可按图 4.3.1 采用,设备总水平地震作用,应按下列公式计算:

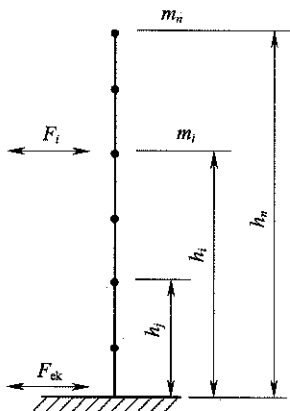


图 4.3.1 设备水平地震作用计算

$$F_{ek} = \eta\alpha_1 m_{eq}g \quad (4.3.1-1)$$

$$m_{eq} = \lambda_m \sum_{i=1}^n m_i \quad (4.3.1-2)$$

$$F_i = \frac{m_i h_i^\delta}{\sum_{j=1}^n m_j h_j^\delta} F_{ek} \quad (4.3.1-3)$$

式中: F_{ek} ——设备总水平地震作用(N);

α_1 ——相应于设备基本自振周期的水平地震影响系数,应根据设备的类型按本规范第 4.2 节的规定确定;

η ——设备的重要度系数,应按本规范表 3.1.2 选用;

m_{eq} ——设备的等效质量(kg);

F_i ——作用于质点 i 的水平地震作用(N);

λ_m ——等效质量系数,单质点可取 1,多质点体系可取 0.85;

m_i, m_j ——分别为集中于质点 i, j 的质量(kg);

h_i, h_j ——分别为质点 i, j 的计算高度(mm);

n ——质点数;

δ ——弯曲变形影响指数,应按表 4.3.1 选用。

表 4.3.1 弯曲变形影响指数

设备基本自振周期	<0.5	0.5~2.5	>2.5
δ	1.0	$0.75+0.5T_1$	2

注: T_1 为设备基本自振周期(s)。

4.3.2 采用振型分解反应谱法时,设备的地震作用和作用效应的计算应符合下列规定:

1 设备 j 振型 i 质点的水平地震作用,应按下列公式确定:

$$F_{hji} = \eta \alpha_j \gamma_j X_{ji} m_i g \quad (4.3.2-1)$$

$$\gamma_j = \frac{\sum_{i=1}^n X_{ji} m_i}{\sum_{i=1}^n X_{ji}^2 m_i} \quad (4.3.2-2)$$

式中: F_{hji} ——第 j 振型 i 质点的水平地震作用(N);

α_j ——相应于设备第 j 振型自振周期的水平地震影响系数,应按本规范第 4.2 节的规定确定;

γ_j ——第 j 振型的振型参与系数;

X_{ji} ——第 j 振型 i 质点的水平相对位移;

m_i —— i 质点的质量(kg)。

2 水平地震作用效应,应按下列公式确定:

$$S_{ehk} = \sqrt{\sum_{j=1}^n S_{ehj}^2} \quad (4.3.3-3)$$

式中: S_{ehk} ——水平地震作用效应;

S_{ehj} ——由 j 振型水平地震作用产生的效应,可取前 2 阶~3

阶振型；当基本自振周期大于 1.5s 时，振型数不宜少于 3 阶。

4.4 构架上设备水平地震作用

4.4.1 本节适用于安装在构架上的卧式设备、支腿式直立设备的地震作用计算。

4.4.2 当无法确定支承设备的构架结构参数时，构架上设备的水平地震作用可采用下式计算：

$$F_h = K_m \eta \alpha_1 m_{eq} g \quad (4.4.2)$$

式中： F_h ——构架上设备的水平地震作用(N)；

K_m ——构架上设备的地震作用放大系数，可按表 4.4.2 选用；

m_{eq} ——设备的等效质量(kg)。

表 4.4.2 构架上设备的地震作用放大系数

构架层数	第一层	第二层	第三层	第四层	第五层及以上
放大系数	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0

注：每层构架高度可按 4m~5m 确定。

4.4.3 当已知支承设备的构架结构参数时，构架上的设备水平地震作用可按下列规定计算：

1 第 i 层构架上的设备水平地震作用，应按下式计算：

$$F_{hsi} = \eta \alpha_{si} m_{eqi} g \quad (4.4.3-1)$$

式中： F_{hsi} ——第 i 层构架上的设备水平地震作用(N)，其值不得小于该设备按建在地面上时计算所得的数值；

m_{eqi} ——第 i 层构架上设备的等效质量(kg)。

2 支承设备多层构架的计算简图可按图 4.3.1 采用，其中 m_i 应为第 i 层构架的质量(包括该构架上的设备质量)， h_i 应为第 i 层构架至地面的高度。

3 第 i 层构架的等效地面加速度系数，应按下式计算：

$$a_{si} = \frac{F_i}{m_i g} \quad (4.4.3-2)$$

式中: a_{si} ——第 i 层构架的等效地面加速度系数;

F_i ——第 i 层构架的水平地震作用(N), 应按本规范第 4.3.1 条计算。

4 第 i 层构架上设备的水平地震影响系数, 应按下式计算:

$$\alpha_{si} = \beta a_{si} \quad (4.4.3-3)$$

式中: α_{si} ——第 i 层构架上的设备水平地震影响系数;

β ——构架的动力放大系数(图 4.4.3)。

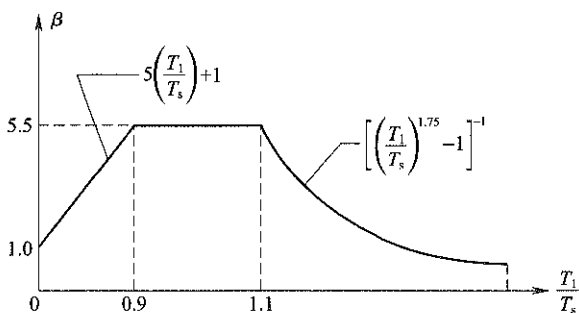


图 4.4.3 构架动力放大系数曲线

T_1 ——设备的基本自振周期(s); T_s ——支承设备构架的基本自振周期(s)

5 确定 T_1 值时, 应将支承设备的构架视为设备的刚性基础。

6 确定 T_s 值时, 所用质量应包括构架上设备等附属物的质量, 无条件取得精确值时, 可按本规范第 4.4.4 条计算。

4.4.4 构架的基本自振周期, 可采用下列简化方法计算:

1 钢构架的基本自振周期, 可按下式计算:

$$T_s = 3H_s \times 10^{-5} \quad (4.4.4-1)$$

2 钢筋混凝土构架的基本自振周期, 可按下式计算:

$$T_s = 2H_s \times 10^{-5} \quad (4.4.4-2)$$

式中: T_s ——构架的基本自振周期(s);

H_s ——构架的总高度(mm)。

4.5 竖向地震作用

4.5.1 直立式设备的竖向地震作用(图 4.5.1),应按下列规定计算:

1 设备底部总竖向地震作用,应按下列式计算:

$$F_v = \eta \alpha_{v\max} m_{eq} g \quad (4.5.1-1)$$

式中: F_v ——设备底部总竖向地震作用(N);

$\alpha_{v\max}$ ——竖向地震影响系数最大值,对设防地震可取水平地震影响系数最大值的 50%,对多遇地震可取水平地震影响系数最大值的 65%;

m_{eq} ——设备的等效质量(kg),可取总质量的 75%。

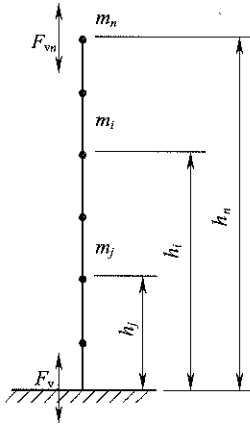


图 4.5.1 设备竖向地震作用计算

2 设备任意质点 i 处的竖向地震作用,可按下列式计算:

$$F_{vi} = \frac{m_i h_i}{\sum_{j=1}^n m_j h_j} F_v \quad (4.5.1-2)$$

式中: F_{vi} ——设备质点 i 的竖向地震作用(N);

h_i 、 h_j ——分别为质点 i 、 j 的计算高度(mm);

m_i ——集中于质点 i 的质量(kg);

m_j ——集中于质点 j 的质量(kg)。

4.6 载 荷 组 合

4.6.1 采用极限状态法设计时,地震作用与其他载荷作用的组合,除本规范另有规定外,应按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关规定执行。

4.6.2 采用许用应力法设计时,地震作用与其他载荷作用的组合,除本规范另有规定外,应按下列原则进行组合:

$$F_G + P + P_1 + \psi_w W_f + F_{ek} + F + \psi_s S + L \quad (4.6.2)$$

式中: F_G ——设备的重力载荷,包括设备的自重(包括内件和填料等),正常工作条件下内装物料的重力载荷,以及附属设备及隔热材料、衬里、管道、扶梯、平台等的重力载荷;

P ——压力载荷,包括内压、外压或最大压差;

P_1 ——液柱静压力;

W_f ——水平风载荷作用;

ψ_w ——水平风载荷组合系数,对直立设备和球形储罐应取 0.25,其他设备应取 0;

F_{ek} ——地震作用;

S ——雪载荷;

ψ_s ——雪载荷组合系数,应取 0.5,高温部位以及设备承载面较小时,应取 0;

F ——其他载荷,包括支座、底座圈、支耳及其他型式支撑件的反作用力,连接管道和其他部件的作用力,温度梯度或热膨胀量不同引起的作用力等;

L ——活载荷,包括人、工具、维修、冲击、振动等主要可移动载荷。

4.7 抗 震 验 算

4.7.1 采用极限状态法设计时,应按现行国家标准《建筑抗震设

计规范》GB 50011 的有关规定进行抗震验算。

4.7.2 采用许用应力法设计时,除本规范另有规定外,应按下列规定进行抗震验算:

1 对设备进行抗震验算时,载荷组合作用下验算部位的应力值应满足下式要求:

$$\sigma \leq [\sigma] \quad (4.7.2-1)$$

式中: σ ——载荷组合作用下的应力值(MPa);

$[\sigma]$ ——材料的抗震许用应力(MPa)。

2 设备抗震验算截面的水平地震作用效应,应乘以相应的地震作用效应折减系数 R_e 。除本规范另有规定外,水平地震作用效应折减系数应按表 4.7.2-1 确定。

表 4.7.2-1 水平地震作用效应折减系数

设备类型	部位	R_e
鞍座支承的卧式设备	壳体	0.45
	鞍式支座	0.50
	地脚螺栓	0.50
支腿式直立设备	壳体	0.45
	支腿	0.50
	地脚螺栓	0.50
	支腿底板	0.50
	支腿与壳体连接	0.45
支耳式直立设备	壳体	0.40
	支耳	0.45
	地脚螺栓	0.45
	支耳与壳体连接	0.40

续表 4.7.2-1

设备类型	部位	R_e
裙座式直立设备	壳体	0.45
	裙座筒体	0.50
	裙座与壳体连接	0.45
	螺栓座与裙座筒体连接	0.50
	地脚螺栓	0.50
	裙座底座环	0.50
	螺栓座	0.50
球形储罐	球壳	0.40
	支柱	0.45
	支柱与壳体连接	0.40
	拉杆	0.45
	拉杆附件	0.45
	支柱底板	0.45
立式圆筒形储罐	罐壁	0.40
	地脚螺栓	0.40
	螺栓座	0.40
	螺栓座与罐壁连接	0.40

3 设备抗震验算的许用应力,除本规范另有规定外,应按下列规定确定:

1)设备本体,可按下式计算:

$$[\sigma] = K_L [\sigma]^t \quad (4.7.2-2)$$

式中: $[\sigma]$ ——材料的抗震许用应力(MPa);

$[\sigma]^t$ ——设计温度下材料的许用应力(MPa);

K_L ——抗震许用应力调整系数,可取 1.2。

2)支承结构,可按下式计算:

$$[\sigma] = K_L [\sigma]^t \quad (4.7.2-3)$$

式中: $[\sigma]$ ——材料的抗震许用应力(MPa);

$[\sigma]^t$ ——设计温度下材料的许用应力(MPa);

K_L ——抗震许用应力调整系数,可取 1.33。

3) 锚栓,可按下列式计算:

$$[\sigma]_b = 0.75R_{el} \quad (4.7.2-4)$$

$$[\tau]_b = 0.8[\sigma]_b \quad (4.7.2-5)$$

4) 锚固附件,可按下列式计算,并取较小值:

$$[\sigma]_b = 0.75R_{el} \quad (4.7.2-6)$$

$$[\sigma]_b = K_L[\sigma]^t \quad (4.7.2-7)$$

式中: R_{el} ——材料屈服强度(或应变为 0.2%的应力值)(MPa);

$[\sigma]_b$ ——材料的抗震许用拉应力(MPa);

$[\tau]_b$ ——材料的抗震许用剪应力(MPa);

$[\sigma]^t$ ——设计温度下材料的许用应力(MPa);

K_L ——抗震许用应力调整系数,可取 1.33。

5) 锚固附件的许用压应力,可按下列规定计算:

当 $\lambda \leq \lambda_c$ 时:

$$[\sigma]_{bc} = \frac{\left[1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2\right]}{\frac{3}{2} + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2} [\sigma]^t \quad (4.7.2-8)$$

当 $\lambda > \lambda_c$ 时:

$$[\sigma]_{bc} = \frac{0.277}{\left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2} [\sigma]^t \quad (4.7.2-9)$$

$$\lambda = \frac{k l_k}{i} \quad (4.7.2-10)$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{\pi^2 E^t}{0.6[\sigma]}} \quad (4.7.2-11)$$

式中: $[\sigma]_{bc}$ ——材料的抗震许用压应力(MPa);

E^t ——设计温度下材料的弹性模量(MPa);

λ ——长细比;

- λ_c ——临界长细比；
 l_k ——计算长度(mm)；
 i ——惯性半径(mm)，对长方形截面可取 $0.289\delta_e$ ；
 δ_e ——截面有效厚度 (mm)；
 k ——计算系数，可按表 4.7.2-2 取值。

表 4.7.2-2 计算系数 k

边界条件	两端简支	一端固支、一端自由	两端固支	一端固支、一端简支
k	1	2	0.5	0.7

6) 附属构件与设备本体连接处焊缝的许用应力，可按下列公式计算：

$$[\sigma] = K_L [\sigma]^t \quad (4.7.2-12)$$

$$[\tau] = 0.8 [\sigma] \quad (4.7.2-13)$$

式中： $[\sigma]$ ——材料的抗震许用拉应力(MPa)；

$[\tau]$ ——材料的抗震许用剪应力(MPa)；

$[\sigma]^t$ ——设计温度下材料的许用应力(MPa)，取附属构件与本体材料许用应力的较小值；

K_L ——抗震许用应力调整系数，可取 1.2。

5 鞍座支承的卧式设备

5.1 一般规定

5.1.1 本章适用于鞍式支座支承的卧式设备。

5.1.2 重叠式卧式设备的抗震计算也应满足本章的有关规定。

5.2 地震作用和抗震验算

5.2.1 卧式设备的水平地震作用计算,地震影响系数应按本规范第 4.2.1 条设防地震的规定取最大值。

5.2.2 安装在地面上的卧式设备,应按本规范第 4.3 节的要求分别计算其轴向、横向水平地震作用;安装在构架上的卧式设备,可按本规范第 4.4 节规定分别计算其轴向、横向水平地震作用。

5.2.3 卧式设备的阻尼比可取 0.05。

5.2.4 对重叠式卧式设备,在轴向和横向均可视为一个多自由度体系(图 5.2.4),对安装在地面上的重叠式卧式设备的地震作用,可按本规范第 4.3 节计算,其地震影响系数可取水平地震影响系数的最大值;对安装在构架上的重叠式卧式设备的总地震作用和各质点的水平地震作用,可按本规范第 4.4 节计算。

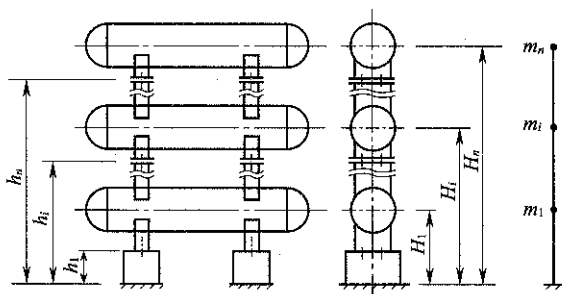


图 5.2.4 重叠式卧式设备计算

5.3 抗震构造措施

5.3.1 卧式设备每个支座的地脚螺栓数量不应少于 2 个,且应为双螺母。

5.3.2 滑动支座上的地脚螺栓应具有限制设备横向位移的功能。

6 支腿式直立设备

6.1 一般规定

6.1.1 本章适用于高度小于或等于10m(含支腿高度),高径比小于或等于5的支腿式直立设备的抗震设计(图6.1.1)。

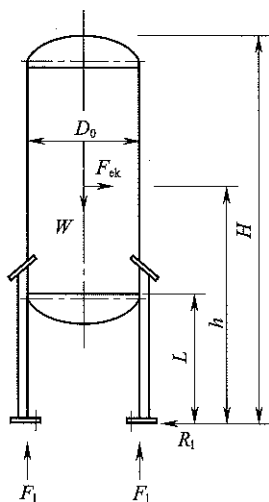


图 6.1.1 支腿式直立设备

6.1.2 对安装在地面上,直径小于1.2m、高度小于3m(含支腿高度),且支腿高度小于0.5m的支腿式设备,当抗震设防烈度为6度、7度,或设计基本地震加速度小于 $0.20g$ 时,可不进行抗震验算,但应满足抗震构造措施要求。

6.2 自振周期

6.2.1 支腿式设备的基本自振周期,可按下列式计算:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{m_e}{1000K}} \quad (6.2.1)$$

式中: T_1 ——设备的基本自振周期(s);

m_e ——设备的质量(kg);

K ——支承结构的侧移刚度(N/mm),可按本规范第 6.2.2 条计算。

6.2.2 支腿式设备支承结构的侧移刚度,应按下列公式计算:

$$K = \frac{1}{\frac{\lambda_c}{K_1} + \frac{1}{K_2}} \quad (6.2.2-1)$$

$$K_1 = \frac{3nEA_z D_b^3}{2L^3} \quad (6.2.2-2)$$

$$K_2 = \frac{nK_c}{1 + \frac{LK_c}{GA_z}} \quad (6.2.2-3)$$

$$K_c = \frac{4E(I_1 + I_2)}{L^3} \quad (6.2.2-4)$$

$$\lambda_c = \left(\frac{h}{L}\right)^2 - \frac{h}{L} + 4 \quad (6.2.2-5)$$

式中: K ——支承结构的侧移刚度(N/mm);

K_1 ——支承结构的弯曲刚度(N/mm);

K_2 ——支承结构的剪变刚度(N/mm);

K_c ——单根支腿的弯曲刚度(N/mm);

λ_c ——质心高度修正系数;

n ——支腿的数量;

E ——支腿材料的弹性模量(MPa);

G ——支腿材料的弹性剪变模量(MPa);

A_z ——单根支腿的横截面积(mm²);

D_b ——地脚螺栓中心圆直径(mm);

h ——基础顶面至设备质心的高度(mm);

L ——支腿的高度(mm);

I_1 ——单根支腿的切向水平截面惯性矩(mm^4)；

I_2 ——单根支腿的径向水平截面惯性矩(mm^4)。

6.3 地震作用和抗震验算

6.3.1 支腿式设备的水平地震作用计算,地震影响系数应按本规范第 4.2.1 条设防地震的规定采用。

6.3.2 安装在地面上的支腿式设备的地震作用,应按本规范第 4.3.1 条计算;安装在构架上的支腿式设备的地震作用,应按本规范第 4.4 节的规定计算。

6.3.3 支腿式设备的阻尼比可取 0.03。

6.3.4 支腿式设备壳体、支腿、支腿与筒体连接焊缝、地脚螺栓等,应按本规范第 4.7 节的规定进行抗震验算。

6.3.5 支腿式设备的抗震验算方法可按本规范附录 B 的规定执行。

6.4 抗震构造措施

6.4.1 支腿数量不应少于 3 个;当设防烈度为 8 度、9 度或设计基本地震加速度大于或等于 $0.30g$ 时,支腿数量不宜少于 4 个,且应为偶数。

6.4.2 当支腿高度大于 1.5m 时,可设置斜撑加强。

6.4.3 每个支腿均应设置地脚螺栓,且应为双螺母。

7 支耳式直立设备

7.1 一般规定

7.1.1 本章适用于支耳式直立设备的抗震设计(图 7.1.1)。

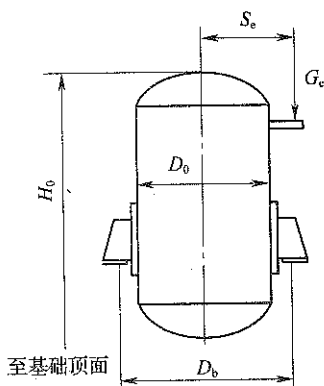


图 7.1.1 支耳式直立设备

D_b —地脚螺栓中心圆直径; S_e —偏心距; G_c —偏心荷载

7.1.2 对直径小于 2m、切线长度小于 5m 的支耳式设备,当抗震设防烈度为 6 度、7 度或设计基本地震加速度小于 $0.20g$ 时,可不进行抗震验算,但应满足抗震构造措施要求。

7.2 自振周期

7.2.1 支耳式设备的基本自振周期,可按式计算:

$$T_1 = 0.56 + 0.4 \times 10^{-6} \frac{H_0^2}{D_0} \quad (7.2.1)$$

式中: T_1 ——支耳式设备的基本自振周期(s);

D_0 ——设备外直径(mm);

H_0 ——设备顶部到基础顶面的距离(mm)。

7.3 地震作用和抗震验算

- 7.3.1 支耳式设备的水平地震作用计算,地震影响系数应按本规范第 4.2.1 条设防地震的规定采用。
- 7.3.2 支耳式设备的水平地震作用,应按本规范第 4.2 节计算。
- 7.3.3 支耳式设备的阻尼比可取 0.03。
- 7.3.4 支耳式设备壳体、支耳、支耳与筒体连接焊缝、地脚螺栓等,应按本规范第 4.7 节的规定进行抗震验算。
- 7.3.5 支耳式设备的抗震验算方法可按本规范附录 C 的规定执行。

7.4 抗震构造措施

- 7.4.1 支耳宜设置在设备重心高度以上,支耳数量不宜小于 4 个,且应为偶数。当设备直径小于 1000mm 时,支耳数量不应少于 2 个。
- 7.4.2 每个支耳均应设置地脚螺栓,且应为双螺母。

8 裙座式直立设备

8.1 一般规定

8.1.1 本章适用于裙座式自支承的直立式设备。

8.1.2 高度大于 20m, 设防烈度为 8 度、9 度时的直立式设备应计入竖向地震作用的影响。

8.2 自振周期

8.2.1 等直径、等厚度的落地式直立设备, 其基本自振周期可按下列式计算:

$$T_1 = 90.33H \sqrt{\frac{m_0 H}{E' D_i^3 \delta_e}} \quad (8.2.1)$$

式中: T_1 ——设备的基本自振周期(s);

H ——从基础顶面至设备顶部的高度(mm);

E' ——设计温度下材料的弹性模量(MPa);

δ_e ——设备筒体的厚度(mm);

D_i ——设备筒体的内直径(mm);

m_0 ——设备的总质量(kg)。

8.2.2 不等直径或不等厚度的直立设备, 可将直径、厚度、材料沿高度变化的设备视为一个多质点体系(图 8.2.2), 其基本自振周期可按下列公式计算:

$$T_1 = 114.8 \sqrt{\sum_{i=1}^n m_i \left(\frac{h_i}{H}\right)^3 \left(\sum_{i=1}^n \frac{H_i^3}{E_i' I_i} - \sum_{i=2}^n \frac{H_i^3}{E_{i-1}' I_{i-1}}\right)} \times 10^{-3} \quad (8.2.2-1)$$

$$\text{圆筒段: } I_i = \frac{\pi}{8} (D_i + \delta_{ei})^3 \delta_{ei} \quad (8.2.2-2)$$

$$\text{圆锥段: } I_i = \frac{\pi D_{ie}^2 D_{it}^2 \delta_{ei}}{4(D_{ie} + D_{it})} \quad (8.2.2-3)$$

式中: T_1 ——设备的基本自振周期(s);

h_i ——第 i 段设备质量距基础顶面的高度(mm);

m_i ——设备第 i 计算段的操作质量(kg);

H ——从基础顶面至设备顶面的高度(mm);

H_i ——从设备顶面至第 i 段底截面的距离(mm);

E_i, E_{i-1} ——第 i 段、第 $i-1$ 段筒体设计温度下材料的弹性模量(MPa);

I_i, I_{i-1} ——第 i 段、第 $i-1$ 段筒体的截面惯性矩(mm⁴);

δ_{ei} ——各计算截面的圆筒或锥壳的有效厚度(mm);

D_i ——第 i 段筒体的内直径(mm);

D_{ie} ——锥壳大端内直径(mm);

D_{it} ——锥壳小端内直径(mm)。

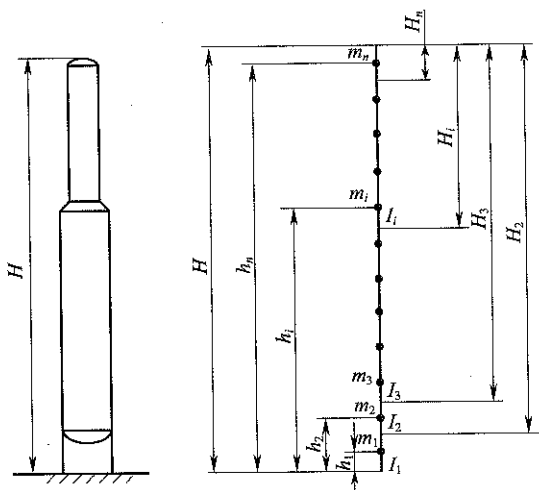


图 8.2.2 直立式设备多质点体系计算示意

8.2.3 安装在圆筒(柱)式基础的直立设备,其自振周期可采用振型分解法计算。

8.2.4 支承在构架上的直立设备,其自振周期可按下列规定计算:

1 支承构架应视为设备的一部分,每层构架可简化为一个质点,构架的层间刚度折算可按位移等效原理确定,设备的自振周期可按本规范第 8.2.3 条规定计算。

2 高径比小于或等于 5,且壁厚小于或等于 30mm 的直立设备,其基本自振周期可按下式近似计算:

$$T_1 = 0.56 + 0.40 \times 10^{-3} \frac{H^2}{D_i} \quad (8.2.4)$$

8.3 地震作用和抗震验算

8.3.1 直立设备的水平地震作用计算,地震影响系数应按本规范第 4.2.1 条设防地震的规定采用。

8.3.2 高度小于或等于 10m 或高径比小于 5 的直立设备,可采用底部剪力法进行计算,其地震影响系数可取水平地震影响系数的最大值。

8.3.3 高度大于 10m 且高径比大于 5 的直立设备,可采用振型分解法进行计算。

8.3.4 当设备的高度大于 120m,且设防烈度大于或等于 8 度或设计基本地震加速度值大于或等于 $0.30g$ 时,其水平地震作用宜按本规范第 4.1.2 条第 3 款的规定进行补充计算。

8.3.5 直立设备的阻尼比,可按下列规定取值:

1 当设备的基本自振周期小于或等于 1.5s 时,可取 0.035。

2 当设备的基本自振周期大于 1.5s,且小于或等于 2.0s 时,可按下列式计算:

$$\xi = 0.11 - 0.05T_1 \quad (8.3.5)$$

3 当设备的基本自振周期大于 2.0s 时,可取 0.01。

8.3.6 直立设备的竖向地震作用,应按本规范第 4.5 节的规定计算。

8.3.7 直立设备的壳体、裙座筒体、基础环、地脚螺栓座、裙座与壳体连接焊缝、螺栓座与裙座筒体连接焊缝、地脚螺栓等,应按本规范第 4.7 节的规定进行抗震验算。

8.4 抗震构造措施

8.4.1 设备的平台不宜与其他设备或构筑物直接连接。

8.4.2 与设备连接的管道,宜采用柔性连接。

8.4.3 设备外部较重的附属设备宜另设支承结构,不宜由设备直接支承。

8.4.4 设备的内部承重构件应与壳体牢固连接。

8.4.5 设备的高径比大于 5,且抗震设防烈度大于 7 度或设计基本地震加速度值大于 $0.15g$ 时,设备筒体与裙座不宜采用搭接连接。

8.4.6 直径大于或等于 600mm 设备的地脚螺栓,不应小于 M24,其数量不应少于 8 个。

9 球形储罐

9.1 一般规定

9.1.1 本章适用于赤道正切柱支撑的可调式和固定式拉杆结构的钢制球形储罐。

9.1.2 本章不适用于支柱隔一拉杆拉接或设有两层拉杆结构的储罐。

9.2 自振周期

9.2.1 球罐在操作状态下的等效质量,应按下列公式计算:

$$m_{eq} = m_1 + m_2 + 0.5m_3 + m_4 + m_5 \quad (9.2.1-1)$$

$$m_2 = m_1\varphi \quad (9.2.1-2)$$

式中: m_{eq} ——球罐在操作状态下的等效质量(kg);

m_1 ——球壳本身的质量(kg);

m_2 ——储液的有效质量(kg);

m_3 ——支柱和拉杆的质量(kg);

m_4 ——球罐其他附件的质量(kg),包括各开口、喷淋装置、梯子和平台等;

m_5 ——球罐保温层的质量(kg);

m_1 ——球壳储液质量(kg);

φ ——储液的有效质量率系数,应根据球罐内液体充满度按图 9.2.1 采用。

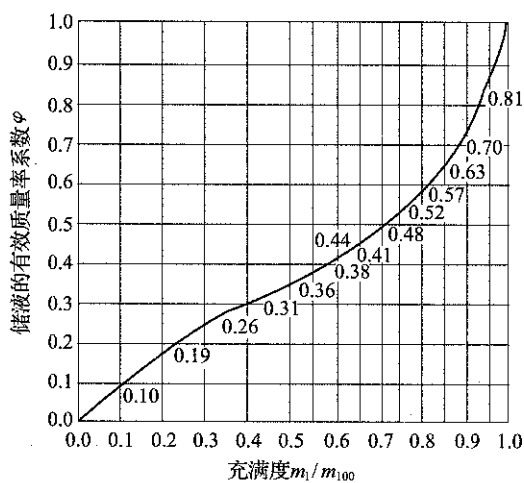


图 9.2.1 液体有效率

m_{100} —球罐 100% 充满液体时的液体质量

9.2.2 球罐构架(图 9.2.2)的水平刚度,应按下列公式计算:

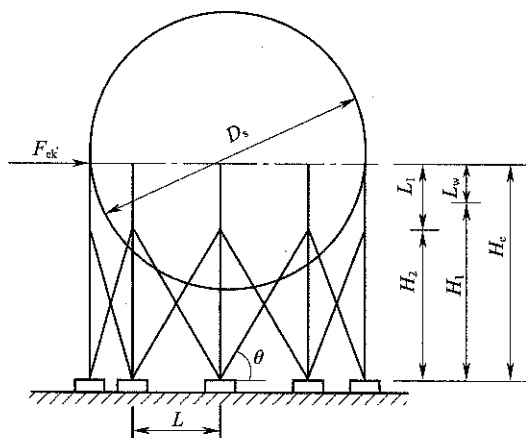


图 9.2.2 球罐结构

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}} \quad (9.2.2-1)$$

$$K_1 = \frac{3nEA_c D_b^2}{8H_c^3} \quad (9.2.2-2)$$

$$K_2 = nK_c \left[\frac{2C_1}{C_2 + \frac{4LK_c}{EA'}} + 1 \right] \quad (9.2.2-3)$$

$$K_c = \frac{3EI_c}{H_1^3} \quad (9.2.2-4)$$

$$A' = \frac{1}{\frac{C_3}{A_b \cos^3 \theta} + \frac{C_4 \tan^3 \theta}{A_c}} \quad (9.2.2-5)$$

$$C_1 = 0.25\lambda_c^2 (3 - \lambda_c^2)^2 \quad (9.2.2-6)$$

$$C_2 = \lambda_c^2 (1 - \lambda_c)^3 (3 + \lambda_c) \quad (9.2.2-7)$$

$$\lambda_c = \frac{H_2}{H_1} \quad (9.2.2-8)$$

$$H_1 = H_c - L_w \quad (9.2.2-9)$$

$$L_w = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{D_c D_s}{2}} \quad (9.2.2-10)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{H_2}{L} \quad (9.2.2-11)$$

式中：

K ——球罐构架的水平刚度(N/mm)；

K_1 ——球罐构架的弯曲刚度(N/mm)；

K_2 ——球罐构架的剪变刚度(N/mm)；

n ——支柱根数；

E ——支柱材料的弹性模量(MPa)；

A_c ——单根支柱的横截面面积(mm²)；

D_b ——支柱中心圆直径(mm)；

H_c ——支柱底板底面至球壳中心的高度(mm)；

L ——相邻支柱之间距离(mm)；

I_c ——单根支柱的截面惯性矩(mm⁴)；

A_b ——拉杆的有效截面积(mm²)；

θ ——拉杆的仰角(°)；

H_1 ——支柱的有效高度(mm);
 H_2 ——底板至拉杆安装位置的高度(mm);
 L_w ——支柱与球壳连接焊缝长度的1/2(mm);
 D_c ——支柱外径(mm);
 D_s ——球壳的内直径(mm);

$K_c, A', C_1, C_2, \lambda_c$ ——计算参数或系数;

C_3, C_4 ——拉杆结构形式系数,应根据拉杆的结构形式按表 9.2.2 查取。

表 9.2.2 拉杆结构形式系数

系 数	可调式	固定式
C_3	1.0	0.5
C_4	1.0	0

9.2.3 球罐基本自振周期,应按下列式计算:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{m_{eq}}{1000K}} \quad (9.2.3)$$

式中: T_1 ——球罐基本自振周期(s)。

9.3 地震作用和抗震验算

9.3.1 球罐的水平地震作用计算,地震影响系数应按本规范第 4.2.1 条设防地震的规定采用。

9.3.2 球罐的水平地震作用,可按本规范第 4.3.1 条计算。

9.3.3 球罐的阻尼比可取 0.035。

9.3.4 水平地震作用在上段支柱产生的总弯矩,应按下列式计算:

$$M = F_{ek} L_1 \quad (9.3.4)$$

式中: M ——水平地震作用在上段支柱产生的总弯矩(N·mm);

L_1 ——球罐壳体水平中心线至拉杆与支柱中心线交点的距离(mm)。

9.3.5 球壳、支柱、支柱与壳体连接焊缝、拉杆、拉杆附件、支柱底板等,应按本规范第 4.7 节的规定进行抗震验算。

9.4 抗震构造措施

9.4.1 球罐每根支柱的地脚螺栓直径不应小于 M24, 且应为双螺母。

9.4.2 与罐体连接的管线, 宜采用柔性连接。

10 立式圆筒形储罐

10.1 一般规定

10.1.1 本章适用于罐壁高度与直径之比小于或等于 1.5, 且容积大于或等于 100m^3 的常压立式圆筒形钢制平底储罐。

10.1.2 本章不适用于储液上表面与顶盖之间空间小于储罐容积 4% 的固定顶盖储罐。

10.2 自振周期

10.2.1 储罐的罐液耦连振动基本自振周期, 可按下式计算:

$$T_1 = K_c H_w \sqrt{\frac{R}{\delta_{1/3}}} \quad (10.2.1)$$

式中: T_1 ——储罐的罐液耦连振动的基本自振周期(s);

R ——储罐的内半径(mm);

$\delta_{1/3}$ ——罐壁 1/3 高度处的名义厚度(mm);

H_w ——储罐设计最高液位(mm);

K_c ——耦连振动周期系数, 根据 D/H_w 值由表 10.2.1 查取, 中间值可采用插入法计算;

D ——储罐的内直径(mm)。

表 10.2.1 耦连振动周期系数 K_c

D/H_w	0.6	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
K_c	0.514×10^{-3}	0.44×10^{-3}	0.425×10^{-3}	0.435×10^{-3}	0.461×10^{-3}	0.502×10^{-3}
D/H_w	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
K_c	0.537×10^{-3}	0.58×10^{-3}	0.62×10^{-3}	0.681×10^{-3}	0.736×10^{-3}	0.791×10^{-3}

10.2.2 储液晃动基本自振周期, 可按下式计算:

$$T_w = 2\pi \sqrt{\frac{D}{3680g} \coth\left(\frac{3.68H_w}{D}\right)} \quad (10.2.2)$$

式中: T_w ——罐内储液晃动基本自振周期(s);

\coth ——双曲余切函数。

10.3 水平地震作用及效应

10.3.1 储罐的水平地震作用计算,地震影响系数应按本规范第 4.2.1 条的设防地震的规定采用。

10.3.2 储罐的水平地震作用,应按下列公式计算:

$$F_{ek} = \eta \alpha m_{eq} g \quad (10.3.2-1)$$

$$m_{eq} = m_1 \varphi \quad (10.3.2-2)$$

式中: F_{ek} ——储罐的水平地震作用(N);

α ——水平地震影响系数,可按本规范第 4.2 节的规定确定;

m_{eq} ——储液的等效质量(kg);

m_1 ——储液质量(kg);

φ ——动液系数,可按本规范第 10.3.4 条计算;

g ——重力加速度(m/s^2),可取 9.81。

10.3.3 储罐的阻尼比可取 0.04。

10.3.4 动液系数,应按下列公式计算:

1 当 $H_w/R \leq 1.5$ 时:

$$\varphi = \frac{\tanh\left(\sqrt{3} \frac{R}{H_w}\right)}{\sqrt{3} \frac{R}{H_w}} \quad (10.3.4-1)$$

式中: R ——储罐的内半径(mm);

\tanh ——双曲正切函数。

2 当 $H_w/R > 1.5$ 时:

$$\varphi = 1 - 0.4375 \frac{R}{H_w} \quad (10.3.4-2)$$

10.3.5 水平地震作用下储罐底面的倾倒地矩,应按下式计算:

$$M_{g1} = 0.45R_e F_{ek} H_w \quad (10.3.5)$$

式中: M_{g1} ——水平地震作用下储罐底面的倾倒地矩(N·mm);

R_e ——地震作用调整系数,可取0.4。

10.4 罐壁竖向稳定许用临界应力

10.4.1 第一圈罐壁(自下往上计)的竖向稳定临界应力,应按下列公式计算:

$$\sigma_{cr} = \kappa_c E^t \frac{\delta_1}{D_1} \quad (10.4.1-1)$$

$$\kappa_c = 0.0915 \left(1 + 0.0429 \sqrt{\frac{H}{\delta_1}} \right) \left(1 - 0.1706 \frac{D_1}{H} \right) \quad (10.4.1-2)$$

式中: σ_{cr} ——第一圈罐壁竖向稳定临界应力(MPa);

E^t ——设计温度下罐壁材料的弹性模量(MPa);

D_1 ——第一圈罐壁的平均直径(mm);

δ_1 ——第一圈罐壁的有效厚度(mm);

κ_c ——临界应力系数;

H ——罐壁的高度(mm)。

10.4.2 第一圈罐壁的的稳定许用临界应力,应按下式计算:

$$[\sigma]_{cr} = \frac{\sigma_{cr}}{1.5} \quad (10.4.2)$$

式中: $[\sigma]_{cr}$ ——第一圈罐壁的的稳定许用临界应力(MPa)。

10.5 罐壁的抗震验算

10.5.1 罐底周边单位长度上的提离力,应按下式计算:

$$F_t = \frac{4M_{g1}}{\pi D_1^2} \quad (10.5.1)$$

式中: F_t ——罐底周边单位长度上的提离力(N/mm)。

10.5.2 罐底周边单位长度上的提离抵抗力,应按下列公式计算:

$$F_l = F_{l0} + \frac{N_1}{\pi D_1} \quad (10.5.2-1)$$

$$F_{l0} = \delta_b \sqrt{\frac{R_{el} H_w \rho_s g}{10^9}} \quad (10.5.2-2)$$

式中: F_l ——罐底周边单位长度上的提高抵抗力(N/mm);

F_{l0} ——储液和罐底的最大提高抵抗力(N/mm),当其值大于 $0.02H_w D_1 \rho_s g \times 10^{-9}$ 时,可取 $0.02H_w D_1 \rho_s g \times 10^{-9}$;

δ_b ——罐底环形边缘板的有效厚度(mm);

R_{el} ——罐底环形边缘板材料的屈服强度(MPa);

ρ_s ——储液密度(kg/m^3);

N_1 ——第一圈罐壁底部所承受的重力(N)。

10.5.3 锚固储罐应符合下列要求:

1 罐壁底部竖向压应力,可按下列公式计算:

$$\sigma_c = \frac{N_1}{A_1} + \frac{M_{gl}}{Z_1} \quad (10.5.3-1)$$

$$\sigma_c \leq [\sigma]_{cr} \quad (10.5.3-2)$$

式中: σ_c ——罐壁底部的竖向压应力(MPa);

A_1 ——第一圈罐壁的截面积(mm^2),可取 $\pi D_1 \delta_1$;

Z_1 ——第一圈罐壁的横截面抵抗矩(mm^3),可取 $0.785 D_1^2 \delta_1$ 。

2 地脚螺栓的拉应力,应按下列公式计算:

$$\sigma_{bt} = \frac{1}{n A_{bt}} \left(\frac{4 M_{gl}}{D_b} - N_1 \right) \quad (10.5.3-3)$$

$$\sigma_{bt} \leq [\sigma]_{bt} \quad (10.5.3-4)$$

式中: σ_{bt} ——地脚螺栓的拉应力(MPa),计算值小于0时,表示储罐不需锚固;

n ——地脚螺栓的个数;

A_{bt} ——一个地脚螺栓的有效截面积(mm^2);

D_b ——地脚螺栓的中心圆直径(mm);

$[\sigma]_{bt}$ ——地脚螺栓抗震许用应力(MPa),其值可按本规范第4.7.2条确定。

10.5.4 无锚固储罐的罐壁底部竖向压应力,应符合下列要求:

1 $F_t \leq F_{t1}$ 时,可按下式计算:

$$\sigma_c = \frac{N_1}{A_1} + \frac{M_{g1}}{Z_1} \quad (10.5.4-1)$$

2 $F_t < F_{t1} \leq 2F_{t1}$ 时,可按下列公式计算:

$$\sigma_c = \frac{N_1}{A_1} + l \frac{M_{g1}}{Z_1} \quad (10.5.4-2)$$

$$l = 0.4 \left(\frac{F_{t1}}{F_t} \right)^2 - 0.7 \frac{F_{t1}}{F_t} + 1.3 \quad (10.5.4-3)$$

式中: l ——罐底提离影响系数。

3 当 $F_t > 2F_{t1}$,或 $\sigma_c > [\sigma]_{cr}$ 时,可采取下列措施中的一项或多项,并应重复本条第1款和第2款计算,直到满足要求为止:

- 1)减小储罐高径比;
- 2)加大第一圈罐壁的厚度;
- 3)加大罐底环形边缘板的厚度;
- 4)采用地脚螺栓把储罐锚固在基础上。

10.5.5 根据本章抗震验算所得的第一圈罐壁厚度大于按静液压力计算所得的厚度(不含腐蚀裕量)时,其他各圈罐壁厚度也应在按静液压力计算所得厚度的基础上,按相同的比例予以增厚,或逐圈通过抗震验算确定其壁厚。

10.5.6 设防烈度为9度时,应按地震作用和静液压力的组合进行罐壁环向应力验算,其许用应力值可按罐壁强度许用应力值的1.33倍采用。

10.6 液面晃动波高

10.6.1 水平地震作用下罐内液面晃动波高,应按下列公式计算:

$$h_v = 1.5K_v \alpha R \quad (10.6.1-1)$$

$$K_v = 0.018T_w^2 - 0.326T_w + 1.697 \quad (10.6.1-2)$$

式中: h_v ——罐内液面晃动波高(mm);

α ——水平地震影响系数,应根据储液晃动周期,按本规范

第 4.2 节设防地震确定。

K、——长周期反应谱调整系数。

10.6.2 储存易燃或有毒液体的储罐,对浮顶罐,浮船顶面至罐壁顶部的距离,应大于液面晃动波高;对非浮顶罐,液面至罐壁顶部的距离应大于液面晃动波高。

10.7 抗震构造措施

10.7.1 储存易燃液体的浮顶罐,其导向装置、转动浮梯等,应接触良好,并应连接可靠;浮顶与罐壁之间,宜采用软密封材料。

10.7.2 与罐体连接的管道,宜采用柔性连接。

10.7.3 采用螺栓锚固的罐体,直径小于 15m 时,螺栓间距不得大于 2m;直径大于或等于 15m 时,螺栓间距不得大于 3m。锚栓的公称直径不应小于 24mm。

11 加 热 炉

11.1 一 般 规 定

11.1.1 本章适用于一般炼油装置管式加热炉、燃烧炉、辅助燃烧室、制硫炉、硫黄尾气焚烧炉等卧式加热炉,以及余热回收系统的落地集合烟风道及落地烟囱等加热炉的附属设备。

11.1.2 加热炉结构的地震作用计算,应符合下列规定:

1 箱式加热炉、圆筒炉对流室的框架结构,应在水平面上两个主轴方向分别计算水平地震作用,并应进行抗震验算。各方向的水平地震作用,应由该方向的抗侧力构件承担。

2 卧式加热炉的水平地震作用,可仅计算炉体横向的水平地震作用,并应进行抗震验算。

3 当抗震设防烈度为 8 度、9 度或设计基本地震加速度值为 $0.2g \sim 0.4g$ 时,落地烟囱应计算竖向地震作用,并按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关规定与水平地震作用进行不利组合。

11.2 自 振 周 期

11.2.1 圆筒型加热炉可简化为多质点结构体系,其自振周期可采用矩阵迭代法计算,静位移系数(矩阵元素)可按本规范附录 A 的规定计算。高度小于或等于 35m(包括炉顶烟囱高度)的圆筒炉,其基本自振周期可按下列公式计算:

1 纯辐射型圆筒炉(图 11.2.1-1):

$$T_1 = 0.0268 + 0.0444 \frac{H_a}{\sqrt{D_2}} \quad (11.2.1-1)$$

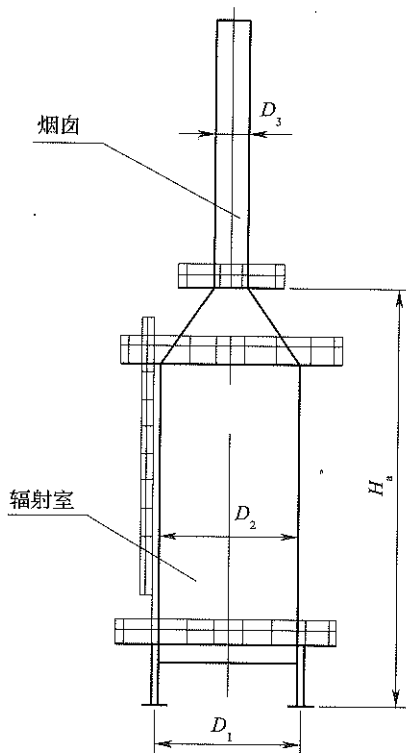


图 11.2.1-1 纯辐射型圆筒炉

2 辐射对流型圆筒炉(图 11.2.1-2):

$$T_1 = 0.2505 + 0.976 \times 10^{-3} \left(\frac{H_1^2}{D_2} + \frac{h_4^2}{D_3} \right) \quad (11.2.1-2)$$

式中: T_1 ——基本自振周期(s);

H_1 ——炉底柱、辐射室、对流室高度之和(mm);

H_0 ——炉底柱、筒体、锥段高度之和(mm);

h_4 ——烟囱高度(mm);

D_2 ——辐射室筒体外径(mm);

D_3 ——烟囱外径(mm)。

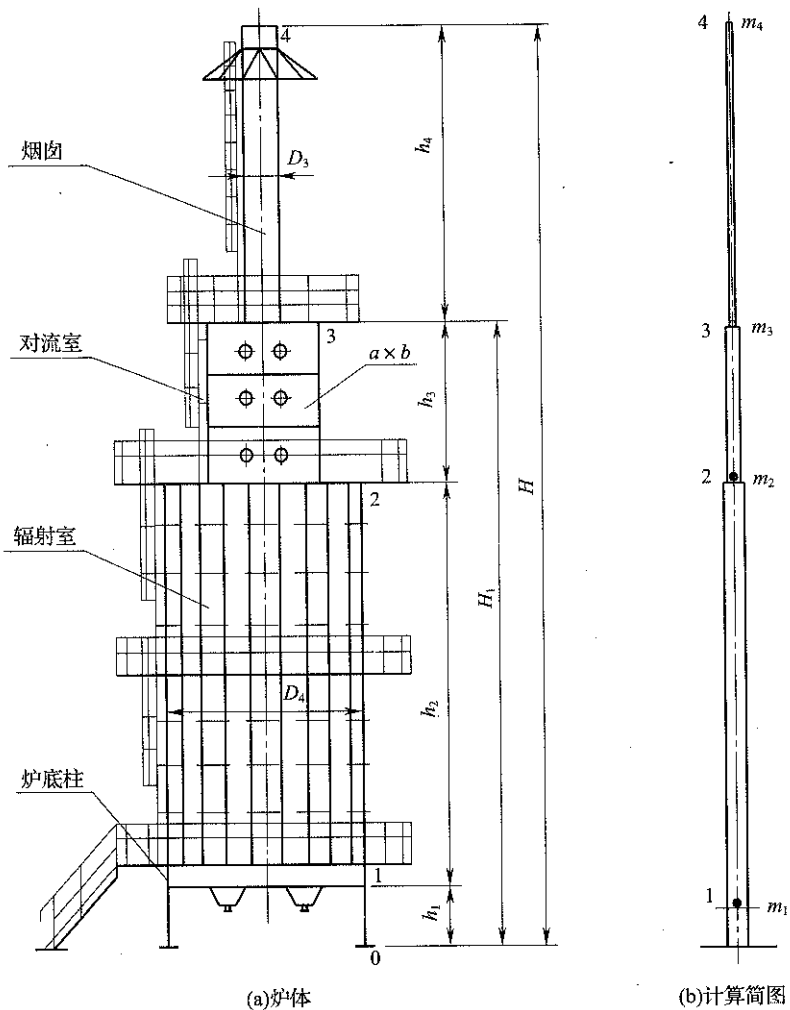


图 11.2.1-2 辐射对流型圆筒炉

11.2.2 箱式加热炉(图 11.2.2-1、图 11.2.2-2),可简化为多质点体系,其基本自振周期可采用矩阵迭代法计算,静位移系数可按

本规范附录 A 的方法计算。高度小于或等于 40m 的箱式加热炉，基本自振周期可按下式计算：

$$T_1 = 0.2749 + 0.02924 \frac{H_1}{\sqrt[3]{b}} \quad (11.2.2)$$

式中： H_1 ——炉框架计算高度(mm)，当辐射室边框架未达到对流室时，应取自对流室的形心至框架柱柱脚板下表面之间的距离；

b ——炉框架柱中心线的跨度(mm)，当炉框架为多柱列时， b 值取最外边跨度中心线的距离。

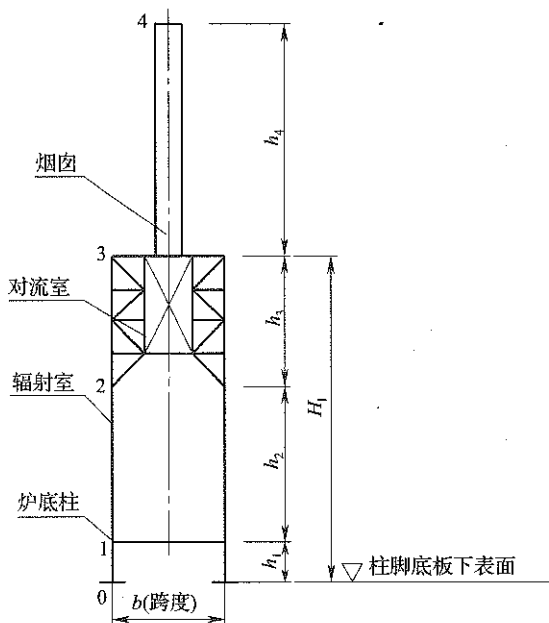


图 11.2.2-1 立式(箱式)炉

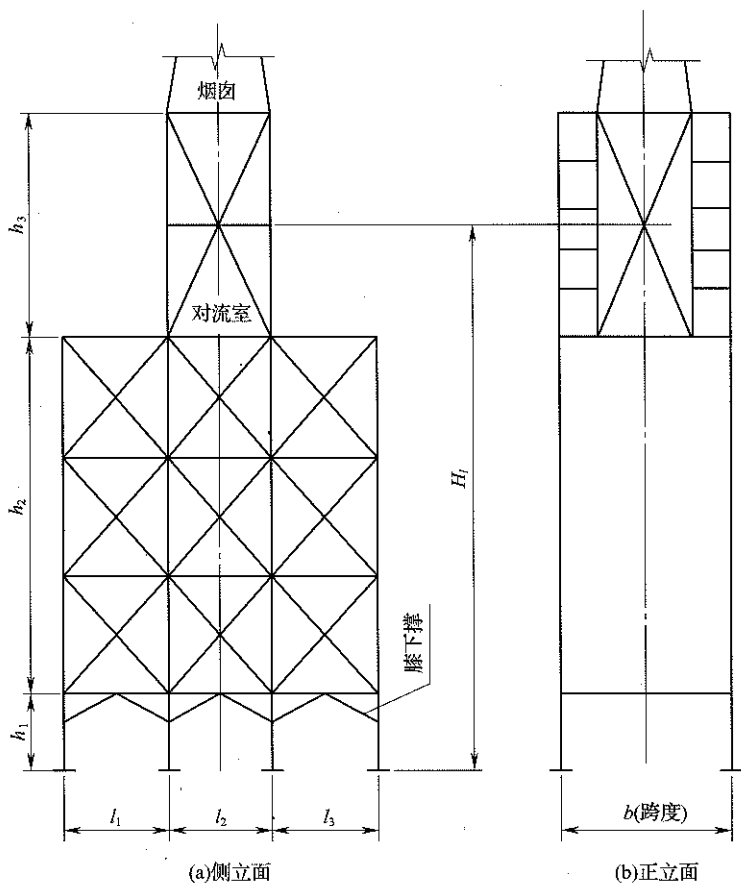


图 11.2.2-2 中间框架设对流室的立式炉

11.2.3 落地烟囱的基本自振周期可采用矩阵迭代法计算。对于高度小于或等于40m的落地烟囱,可按下列规定计算:

1 不变截面直筒式烟囱,可按下式计算:

$$T_1 = 1.79H_c \sqrt{\frac{m_c H_c}{E'I}} \quad (11.2.3-1)$$

式中: m_c ——烟囱质量(kg),当衬里与烟囱壁连接时,应包括衬里的质量;

H_e ——烟囱计算高度(mm),自地脚螺栓底板下表面至顶面高度;

E^t ——设计温度下材料的弹性模量(MPa);

I ——烟囱截面惯性矩(mm^4)。

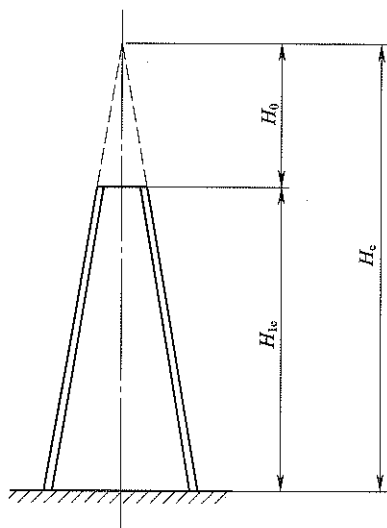


图 11.2.3 锥体式烟囱

2 锥体式烟囱(图 11.2.3),可按下列式计算:

$$T_1 = \lambda H_e^2 \sqrt{\frac{A \cdot \rho}{E^t I_1}} \quad (11.2.3-2)$$

式中: A ——烟囱底部水平截面积(mm^2);

ρ ——烟囱密度(kg/m^3),当衬里与烟囱壁连接时,应包括衬里密度;

I_1 ——烟囱底部水平截面惯性矩(mm^4);

λ ——锥体高度系数,根据 H_0/H_{1c} 的比值,可按表 11.2.3 查取;

H_0 ——锥体式烟囱的延伸高度(图 11.2.3)(m);

H_{1e} ——烟囱高度(图 11.2.3)(m)。

表 11.2.3 λ 值

$\frac{H_0}{H_{1e}}$	0.4	0.6	0.8	1.0
λ	1.29	1.5	1.7	1.79

3 变截面烟囱的基本自振周期可采用矩阵迭代法计算,其静位移系数可采用本规范附录 A 的方法计算。

11.3 地震作用和抗震验算

11.3.1 加热炉的水平地震作用计算,地震影响系数应按本规范第 4.2.1 条多遇地震的规定采用。

11.3.2 加热炉的竖向地震作用计算,应按本规范第 4.5.1 条规定采用。

11.3.3 圆筒型加热炉结构阻尼比可取 0.03,箱式加热炉结构阻尼比可取 0.04。

11.3.4 加热炉的地震作用计算,可采用下列方法:

1 高度(包括炉顶烟囱高度)小于或等于 40m 的箱式加热炉,可采用底部剪力法。

2 除本条第 1 款外的管式加热炉,可采用振型分解反应谱法。

3 卧式加热炉,可采用底部剪力法,地震影响系数可取最大值。

11.3.5 地震作用计算的重力载荷代表值,应取结构和配件自重标准值和各可变载荷组合值之和。平台活载荷的组合值系数应取 0.5。

11.3.6 估计加热炉钢结构水平地震作用扭转影响时,平行于地震作用方向的两个边框架,其地震作用效应应乘以增大系数。其增大系数,短边可按 1.15 采用,长边可按 1.05 采用;当扭转刚度较小时,均可按 1.3 采用。

11.3.7 箱式加热炉顶部烟囱的水平地震作用,可采用本规范第4.4节的方法计算,也可采用底部剪力法计算。采用底部剪力法计算时,烟囱的地震作用效应乘以增大系数2.0,增大后的地震作用效应可仅用于计算烟囱壁厚及其连接部分。在计算炉体结构的地震作用时,可将炉顶烟囱质量视为炉顶面上的一个集中质量。

11.3.8 落地烟囱的水平地震作用,高度小于或等于40m时,可采用底部剪力法;高度大于40m时,可采用振型分解法。

11.3.9 加热炉的附属设备、落地余热回收系统等的地震作用,可采用下列方法计算:

1 支承空气预热器的落地钢架,可采用底部剪力法。

2 架空烟道及其支架,仅计算垂直于烟道长度方向的水平地震作用时,可采用地面设备设计反应谱法,地震影响系数可取最大值。

11.3.10 加热炉结构构件的抗震验算,应采用以概率理论为基础的极限状态设计方法,应按现行国家标准《构筑物抗震设计规范》GB 50191规定的分项系数设计表达式进行计算。结构构件、节点连接焊缝和连接螺栓的承载力,可取不计入地震作用时的1.2倍。

11.3.11 加热炉应进行多遇地震作用下的抗震变形验算,受弯构件的允许挠度应符合表11.3.11的规定。

表 11.3.11 受弯构件的允许挠度

构件名称	允许挠度
吊炉管大梁	$L/400$
主框架大梁	$L/400$
圆筒炉对流室底大梁	$L/450$
烟囱底座梁	$L/400$
炉底梁	$L/360$
其他梁	$L/250$
操作棚檩条	$L/200$
炉顶风机底座梁	$L/400$

注:L为受弯构件跨度,悬臂梁为悬伸长度的2倍。

11.3.12 加热炉框架柱的顶端允许位移应小于柱全长的 $1/450$ 。

11.4 抗震构造措施

11.4.1 箱式加热炉,应符合下列规定:

1 炉架侧墙顶部和底部横梁及炉架柱变截面部位的横梁,宜采用热轧 H 型钢,截面尺寸不宜小于 $H200 \times 100$ 。

2 炉顶平面应设置水平支撑,采用单肢角钢时,不宜小于角钢 75×6 ;采用双肢角钢时,不宜小于角钢 63×6 。

3 当炉顶有烟囱时,应在支承烟囱的两柱之间设置斜撑,斜撑与立柱的夹角宜为 $30^\circ \sim 60^\circ$ 。

4 炉框架立柱与支承对流室的立柱应采用刚性连接,其间的支撑可为刚接或铰接。

5 支承炉顶烟囱底座梁的两端应采用刚性连接。

6 不同截面炉架柱的连接处,应有平缓的过渡段。

7 炉框架侧墙炉底柱间宜设置膝下撑(图 11.2.2-2)。

11.4.2 圆筒型加热炉,应符合下列规定:

1 对流室高度不宜大于辐射室高度。

2 对流室结构构件应对称布置,当对流室高度大于 4m 时,宜在对流室框架柱的侧向对称设置斜撑(图 11.4.2)。

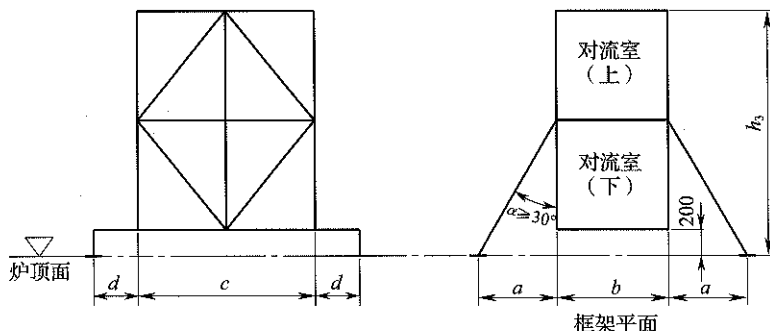


图 11.4.2 对流室斜撑

3 对流室顶部设有直筒式烟囱时,对流室顶面应设置水平支撑,支撑杆件不应小于角钢 63×6 。

4 当对流室顶面支承烟囱的底座采用单根型钢梁支承时,其型钢不宜小于 $H200 \times 100$,且梁端应采用刚性连接。

5 抗震设防烈度为 7 度~9 度或设计基本地震加速度值为 $0.10g \sim 0.40g$,且辐射炉管支承在筒体上部时,应在筒体顶部环梁向下均匀设置纵向加强肋,其间距宜为 $0.6m \sim 1.3m$ 。

6 炉底柱的数量小于或等于 8 根时,柱脚与基础应采取固接,且柱脚应设置高台底座。

7 辐射室筒体直径大于 $3.8m$,且对流室柱脚与辐射室环柱不重合时,辐射室顶部和底部的环梁均宜采用空腹型组合截面。

11.4.3 卧式加热炉应采取下列抗震构造措施:

1 筒体厚度不宜小于 $10mm$ 。

2 支承筒体的鞍座底板厚度不应小于 $12mm$,宽度不应小于 $200mm$;鞍座立板厚度不应小于 $12mm$,其肋板厚度不应小于 $10mm$ 。

11.4.4 加热炉的地脚螺栓不应小于 $M24$,柱脚底板厚度不应小于 $14mm$ 。

11.4.5 炉顶烟囱的底座,采用法兰形式连接时,连接螺栓不应小于 $M16$,螺栓间距不应大于 $250mm$;采用高台底座形式连接时,底座螺栓不应小于 $M24$,螺栓数量不应少于 8 个。螺栓应采用双螺母固定。

11.4.6 炉架构件,在可能产生塑性铰的最大应力区,不宜采用焊接接头。

11.4.7 架空烟道应采取下列抗震构造措施:

1 烟道壁厚不应小于 $6mm$ 。

2 当采用承插式烟道进行温度补偿时,应根据计算确定膨胀节设置个数,并应预留膨胀间隙。

3 承插式烟道补偿处应设置支承结构。

4 支座处的烟道两侧应设置限位装置,限位板应与烟道平

行,距烟道外壁宜为 30mm~50mm。

11.4.8 落地烟囱底座环板的厚度不应小于 14mm,底部应设置螺栓座。地脚螺栓不应小于 M24,其数量不应少于 8 个,并应采用双螺母固定。

11.4.9 梁与柱的连接宜采用柱贯通型。

11.4.10 梁与柱刚性连接时,焊接 H 型钢柱翼缘与腹板间或箱形柱壁板间的连接焊缝,应采用坡口全熔透焊缝。

附录 A 柔度矩阵元素

A.0.1 柔度矩阵元素应按下式计算(图 A.0.1):

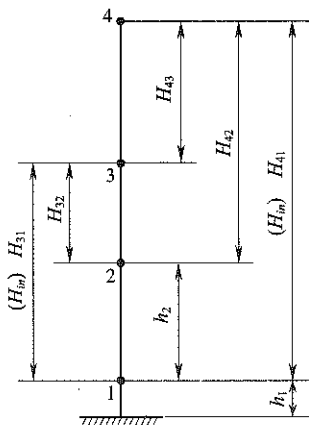


图 A.0.1 质点高度

$$\delta_{ji} = \delta_{ij} = \sum_{n=1}^i \frac{h_n}{EI_n} \left[H_{jn} H_{in} + \frac{1}{2} h_n (H_{jn} + H_{in}) + \frac{1}{3} h_n^2 \right] + \sum_{n=1}^i \frac{K_n h_n}{GA_n} \quad (j = 1, 2, 3 \dots, i = 1, 2, 3 \dots, i \leq j)$$

(A.0.1)

式中: δ_{ji} 、 δ_{ij} ——单位力作用于质点 $i(j)$, 在质点 $j(i)$ 处引起的水
平位移 (mm/N);

j 、 i ——质点序号;

h_n ——质点 n 与质点 $n-1$ 间的距离 (mm);

H_{jn} 、 H_{in} ——分别为质点 n 与质点 j , 质点 n 与质点 i 的高度差
(mm);

I_n ——惯性矩 (mm⁴);

A_n ——计算截面积(mm^2);

K_n ——剪切截面形状系数。

1 对于辐射对流型圆筒炉, I_n 、 A_n 、 K_n 可按表 A. 0. 1-1 计算。

表 A. 0. 1-1 辐射对流型圆筒炉的几何特性

部位	截面积 (m^2)	惯性矩 (m^4)	剪切截面形状系数
炉底柱	$A_1 = nA_{01}$	$I_1 = \frac{1}{2}nA_{01} \left(\frac{D_1}{2}\right)^2$	$K_1 = \frac{\text{全截面积}}{\text{腹板截面积}}$
辐射室	$A_2 = nA_{02} + \pi D_2 t_2$	$I_2 = \frac{1}{2}nA_{02} \left(\frac{D_2}{2} + d_2\right)^2 + 0.393D_2^3 t_2$	$K_2 = 3$
对流室	$A_3 = nA_{03} + \frac{1}{2}[ab - (a - 2t_3)(b - 2t_3)]$	$I_3 = nA_{03} \left(\frac{b}{2}\right)^2 + \frac{1}{12}[ab^3 - (a - 2t_3) \times (b - 2t_3)^3]$	$K_3 = 3$
烟囱	$A_4 = \pi D_4 t_4$	$I_4 = 0.393D_4^3 t_4$	$K_4 = 0$

注: A_{01} —单根柱截面积(mm^2);

n —柱根数;

D_1 —炉底柱中心圆直径(mm);

A_{02} —辐射室单根筒体柱的截面积(mm^2);

t_2 —辐射室筒壁厚度(mm);

D_2 —辐射室筒体直径(mm);

d_2 —辐射室单根筒体柱的截面高度(mm);

A_{03} —对流室单根柱的截面积(mm^2);

a —对流室壁板长边长度(mm);

b —对流室壁板短边长度(mm);

t_3 —对流室壁板厚度(mm);

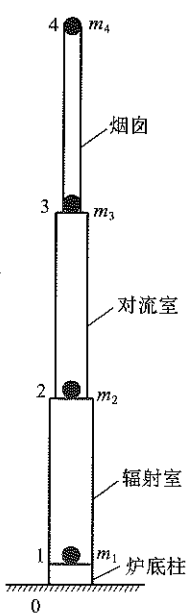
D_4 —烟囱筒体直径(mm);

t_4 —烟囱筒体壁板厚度(mm)。

2 辐射对流型圆筒炉, 可仅计算炉底、辐射室顶、对流室顶和烟囱顶的水平静位移。

3 求出静位移后,代入特征方程求解动力特性,其中质点质量“ m_i ”可按表 A.0.1-2 规定计算,可取前两阶振型。

表 A.0.1-2 质点质量

质点	简图	m_i	
		吊 管	座 管
4		$m_4 = 0.25Q_4$	$m_4 = 0.25Q_4$
3	对流室	$m_3 = 0.75Q_4 + 0.5Q_3$	$m_3 = 0.75Q_4 + 0.5Q_3$
2	辐射室	$m_2 = 0.5(Q_2 + Q_3) + Q'_2$	$m_2 = 0.5(Q_2 + Q_3)$
1	炉底柱	$m_1 = 0.5Q_2 + Q_1$	$m_1 = 0.5Q_2 + Q_1 + Q'_2$

注: Q_4 —烟囱质量(kg);

Q_3 —对流室(含炉管充水、预热器)质量(kg);

Q_2 —辐射室质量(kg);

Q'_2 —辐射室炉管(含炉管充水)质量(kg);

Q_1 —炉底和炉底柱质量(kg)。

A.0.2 箱式加热炉的静位移,可按层间刚度法计算,得出静位移后,连同质点质量“ m_i ”代入特征方程求解动力特性,可取前两阶振型。

附录 B 支腿式直立设备抗震验算

B.1 支 腿

B.1.1 支腿的水平反力,应按下列式确定:

$$R_1 = \frac{F_z}{n} + \frac{F_{ek}}{n} R_e \quad (\text{B.1.1})$$

式中: R_1 ——单个支腿的水平反力(N);

F_{ek} ——设备的水平地震作用(N);

F_z ——设备的水平载荷(N),除水平地震作用之外的其他水平载荷之和;

n ——设备支腿的个数;

R_e ——水平地震作用效应折减系数。

B.1.2 单个支腿的垂直反力,应按下列式确定:

$$F_1 = \pm \left(\frac{4M_1}{nD_0} R_e + \frac{4M_2}{nD_0} \right) - \frac{W}{n} \quad (\text{B.1.2})$$

式中: F_1 ——单个支腿的垂直反力(N);

M_1 ——水平地震作用产生的倾覆力矩(N·mm);

M_2 ——倾覆力矩(N·mm),水平地震作用之外其他水平载荷产生的力矩、偏心质量产生的力矩、管道产生的力矩及其他弯矩;

W ——竖向载荷(N),包括设备自重、管道及其他垂直载荷;

D_0 ——设备外直径(mm)。

B.1.3 支腿截面的抗震验算,应符合下列规定:

1 支腿的弯曲应力,可按下列式计算:

$$\sigma_b = \frac{R_1 L + F_1 e}{Z} \quad (\text{B.1.3-1})$$

2 支腿的压应力,可按下列式计算:

$$\sigma_c = \frac{F_1}{A_1} \quad (\text{B. 1. 3-2})$$

式中: σ_b ——支腿的弯曲应力(MPa);

σ_c ——支腿的压应力(MPa);

L ——支腿的高度,取基础板底面至支腿连接焊缝中心的距离(mm);

R_1 ——支腿的水平反力(N);

F_1 ——支腿的垂直反力(N);

Z ——支腿的最小抗弯截面模量(mm^3);

A_1 ——支腿的横截面积(mm^2);

e ——设备外壁至支腿形心的距离(图 B. 1. 3)(mm)。

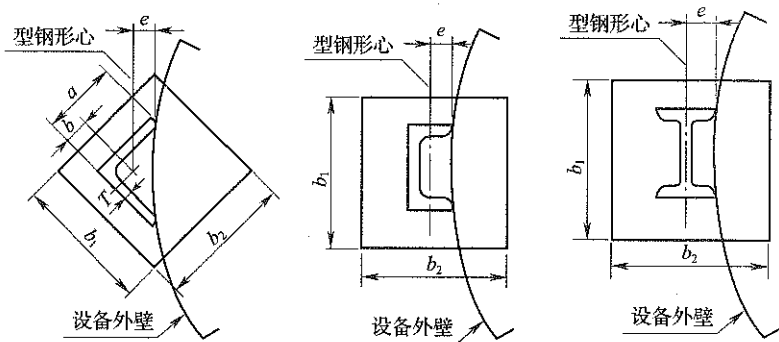


图 B. 1. 3 支腿及基础板

3 支腿的许用临界压应力,可按下列规定计算:

1) 当 $\lambda \leq \bar{\lambda}$ 时,可按下列式计算:

$$[\sigma]_{cr} = \frac{\left[1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\bar{\lambda}} \right)^2 \right] [\sigma]}{\nu} \quad (\text{B. 1. 3-3})$$

2) 当 $\lambda > \bar{\lambda}$ 时,可按下列公式计算:

$$[\sigma]_{cr} = \frac{0.277 [\sigma]}{\left(\frac{\lambda}{\bar{\lambda}} \right)^2} \quad (\text{B. 1. 3-4})$$

$$\lambda = \frac{L}{\tilde{i}} \quad (\text{B. 1. 3-5})$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6 [\sigma]}} \quad (\text{B. 1. 3-6})$$

$$\nu = \frac{3}{2} + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\bar{\lambda}} \right)^2 \quad (\text{B. 1. 3-7})$$

式中: $[\sigma]_{\text{cr}}$ ——支腿的许用临界压应力(MPa);

$[\sigma]$ ——支腿材料抗震许用应力(MPa),其值可按本规范第 4.7.2 条确定;

λ ——支腿的有效长细比;

$\bar{\lambda}$ ——支腿的临界长细比;

E ——支腿材料的弹性模量(MPa);

\tilde{i} ——单根支腿截面的最小回转半径(mm)。

4 支腿的截面抗震验算,应满足下式要求:

$$\frac{\sigma_c}{[\sigma]_{\text{cr}}} + \frac{\sigma_b}{[\sigma]} \leq 1 \quad (\text{B. 1. 3-8})$$

式中: $[\sigma]$ ——支腿的抗震许用应力(MPa),其值可按本规范第 4.7.2 条确定;

B. 1. 4 支腿与筒体连接处焊缝的抗震验算,应符合下列规定:

1 焊缝的剪应力,可按下列公式计算:

$$\tau = \frac{F_t}{A_t} \quad (\text{B. 1. 4-1})$$

$$\tau \leq [\tau] \quad (\text{B. 1. 4-2})$$

式中: τ ——连接焊缝处的剪应力(MPa);

$[\tau]$ ——焊缝的抗震许用剪应力(MPa),其值可按本规范第 4.7.2 条确定;

A_t ——焊缝的抗剪面积(mm²)。

2 焊缝的弯曲应力,可按下列公式计算:

$$\sigma = \frac{R_t L}{Z} \quad (\text{B. 1. 4-3})$$

$$\sigma \leq [\sigma] \quad (\text{B. 1. 4-4})$$

式中： σ ——焊缝处的弯曲应力(MPa)；

Z ——焊缝的抗弯截面模量(mm³)；

$[\sigma]$ ——焊缝的抗震许用应力(MPa)，其值可按本规范第 4. 7. 2 条确定。

B. 1. 5 地脚螺栓的抗震验算，应符合下列规定：

1 当 $F_1 > 0$ 时，地脚螺栓的拉应力，应按下列公式校核：

$$\sigma_b = \frac{F_1}{n_b A_b} \quad (\text{B. 1. 5-1})$$

$$\sigma_b \leq [\sigma]_b \quad (\text{B. 1. 5-2})$$

式中： σ_b ——单个地脚螺栓的拉应力(MPa)；

n_b ——单个支腿的地脚螺栓数量；

A_b ——单个地脚螺栓的有效截面积(mm²)；

$[\sigma]_b$ ——地脚螺栓抗震许用应力(MPa)，其值可按本规范第 4. 7. 2 条确定。

2 地脚螺栓的剪应力，可按下列公式计算：

$$\tau_b = \frac{R_1}{n_b A_b} \quad (\text{B. 1. 5-3})$$

$$\tau_b \leq [\tau]_b \quad (\text{B. 1. 5-4})$$

式中： τ_b ——地脚螺栓的剪应力(MPa)；

$[\tau]_b$ ——地脚螺栓抗震许用剪应力(MPa)，其值可按本规范第 4. 7. 2 条确定。

B. 1. 6 支腿底板的厚度，可按下列规定计算：

1 支腿底板的压应力，可按下式计算：

$$\sigma_{cb} = \frac{F_1}{b_1 b_2} \quad (\text{B. 1. 6-1})$$

式中： σ_{cb} ——支腿底板的压应力(MPa)；

b_1 ——支腿底板长度(mm)；

b_2 ——支腿底板宽度(mm)。

2 支腿底板的厚度，可按下式计算：

$$\delta_b = B_1 \sqrt{\frac{2\sigma_{cb}}{[\sigma]}} + C_2 \quad (\text{B. 1. 6-2})$$

式中： δ_b ——支腿底板厚度(mm)；

B_1 ——支腿到底板边缘的最大长度(mm)；

$[\sigma]$ ——支腿底板的抗震许用应力(MPa)，其值可按本规范第4.7.2条确定；

C_2 ——支腿底板腐蚀裕度(mm)。

B. 2 支腿连接处的筒体

B. 2. 1 与支腿连接的筒体处，由支腿反力引起的轴向弯矩、环向弯矩和径向剪力(图 B. 2. 1)，可按下列公式计算：

$$M_l = F_l L \quad (\text{B. 2. 1-1})$$

$$M_c = F_t e \quad (\text{B. 2. 1-2})$$

$$Q = F_r \quad (\text{B. 2. 1-3})$$

$$F_r = F_t \pm R_l \quad (\text{B. 2. 1-4})$$

式中： M_l ——支腿反力引起的轴向弯矩(N·mm)；

M_c ——支腿反力引起的环向弯矩(N·mm)；

Q ——支腿反力引起的径向剪力(N)；

e ——设备外壁至支腿形心的距离(图 B. 1. 3)(mm)；

F_r ——水平载荷作用引起连接处筒体的径向反力(N)；

F_t ——水平载荷作用引起连接处筒体的环向反力(N)。

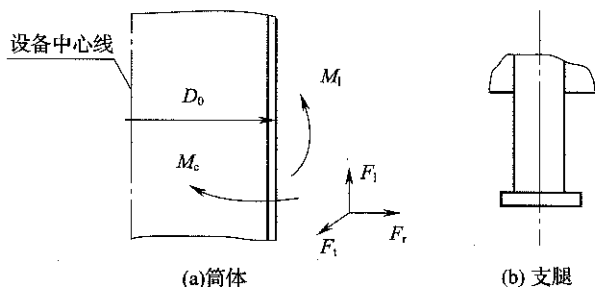


图 B. 2. 1 支腿连接处的筒体反力示意

附录 C 支耳式直立设备抗震验算

C.1 筒 体

C.1.1 支耳处的筒壁抗震验算,应符合下列规定:

1 由压力引起的轴向应力,可按下式计算:

$$\sigma_1 = \frac{PD_m}{4\delta_e} \quad (\text{C. 1. 1-1})$$

式中: σ_1 ——由压力引起的轴向应力(MPa);

δ_e ——筒体有效厚度(mm);

P ——计算压力,取绝对值(MPa);

D_m ——筒体平均直径(mm)。

2 由竖向载荷引起的轴向应力,可按下式计算:

$$\sigma_2 = \frac{W}{\pi D_m \delta_e} \quad (\text{C. 1. 1-2})$$

式中: σ_2 ——由竖向载荷引起的轴向应力(MPa);

W ——竖向载荷(N),包括设备自重,偏心载荷,管道引起的垂直载荷;

δ_e ——筒体厚度(mm)。

3 由地震弯矩引起的轴向应力,可按下式计算:

$$\sigma_3 = \frac{4M_1}{\pi D_m^2 \delta_e} R_e \quad (\text{C. 1. 1-3})$$

式中: σ_3 ——由地震弯矩引起的轴向应力(MPa);

M_1 ——水平地震作用产生的弯矩(N·mm);

R_e ——水平地震作用效应折减系数;

δ_e ——筒体有效厚度(mm)。

4 由地震弯矩之外的弯矩引起的轴向应力,可按下式计算:

$$\sigma_4 = \frac{4M_2}{\pi D_m^2 \delta_e} \quad (\text{C. 1. 1-4})$$

式中: σ_4 ——由地震弯矩之外的弯矩引起的轴向应力(MPa);

M_2 ——弯矩(N·mm), 水平地震作用之外其他水平载荷产生的力矩、偏心质量产生的力矩、管道产生的力矩及其他弯矩;

δ_e ——筒体有效厚度(mm)。

1) 组合拉应力按以下公式计算:

$$\text{对内压力容器} \quad \sigma_t = \sigma_1 - \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 \quad (\text{C. 1. 1-5})$$

$$\text{对外压力容器} \quad \sigma_t = -\sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 \quad (\text{C. 1. 1-6})$$

$$\sigma_t \leq [\sigma] \quad (\text{C. 1. 1-7})$$

式中: σ_t ——筒壁轴向组合拉应力(MPa);

$[\sigma]$ ——筒壁抗震许用应力(MPa), 可按本规范第 4. 7. 2 条确定。

2) 组合压应力按以下公式计算:

$$\text{内压力容器} \quad \sigma_c = \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 \quad (\text{C. 1. 1-8})$$

$$\text{外压力容器} \quad \sigma_c = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 \quad (\text{C. 1. 1-9})$$

$$\sigma_c \leq [\sigma] \quad (\text{C. 1. 1-10})$$

式中: σ_c ——筒壁轴向组合压应力(MPa);

$[\sigma]$ ——筒壁抗震许用应力(MPa), 可按本规范第 4. 7. 2 条确定。

C. 2 支 耳

C. 2. 1 水平载荷作用引起的支耳反力(图 C. 2. 1), 应按下式计算:

$$F_r = F_t = \pm \left(\frac{F_h}{n} + \frac{F_{ek}}{n} R_e \right) \quad (\text{C. 2. 1})$$

式中: F_r ——水平载荷引起设备支耳处的径向反力(N);

F_t ——水平载荷引起设备支耳处的环向反力(N);

F_{ek} ——设备的水平地震作用(N);

F_h ——设备的水平载荷(N),除水平地震作用之外的其他水平载荷之组合;

n ——设备支耳的个数。

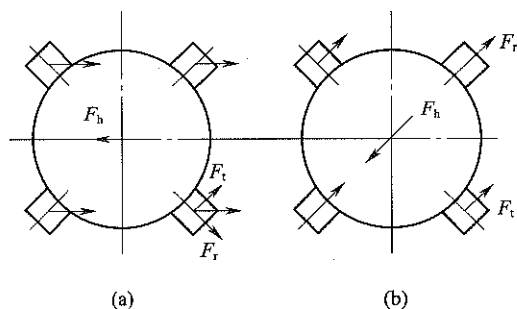


图 C. 2. 1 水平载荷作用引起的支耳反力

C. 2. 2 弯矩和竖向载荷作用在支耳上产生的垂直反力,应按下式计算:

$$F_1 = \pm \left(\frac{4M_1}{nD_b} R_c + \frac{4M_2}{nD_b} \right) - \frac{W}{n} \quad (\text{C. 2. 2})$$

式中: F_1 ——支耳的垂直反力(N);

D_b ——设备地脚螺栓中心圆直径(mm)。

C. 2. 3 支耳的应力,可按下式计算:

$$\sigma = \frac{F_1 l}{Z_1} + \frac{F_t l}{Z_1} + \frac{F_r}{A_1} \quad (\text{C. 2. 3})$$

式中: σ ——支耳的应力(MPa);

F_1 ——支耳的垂直反力(N),可按本规范公式(C. 2. 2)计算;

F_t ——水平载荷引起设备支耳处的环向反力(N),可按本规范公式(C. 2. 1)计算;

F_r ——水平载荷引起设备支耳处的径向反力(N),可按本规范公式(C. 2. 1)计算;

l ——从设备本体外壁至反力作用点的距离(mm);

A_1 ——支耳的截面积(mm²);

Z_1 ——支耳对设备轴向的弯曲模量(mm³);

Z_1 ——支耳对设备环向的弯曲模量(mm^3)。

C.2.4 支耳连接处焊缝的应力,应符合下列规定:

1 拉应力可按下列公式计算:

$$\sigma = \frac{F_r}{A'_1} \quad (\text{C. 2. 4-1})$$

$$\sigma \leq [\sigma] \quad (\text{C. 2. 4-2})$$

2 剪应力可按下列公式计算:

$$\tau = \frac{\sqrt{F_t^2 + F_l^2}}{A_1} \quad (\text{C. 2. 4-3})$$

$$\tau \leq [\tau] \quad (\text{C. 2. 4-4})$$

式中: σ ——焊缝处的拉应力(MPa);

$[\sigma]$ ——焊缝的抗震许用拉应力(MPa);

τ ——焊缝处的剪应力(MPa);

$[\tau]$ ——焊缝的抗震许用剪应力(MPa);

A_1 ——焊缝的焊脚截面积(mm^2);

A'_1 ——焊缝截面积(mm^2)。

C.2.5 地脚螺栓的抗震验算,应符合下列规定:

1 当 $F_1 > 0$ 时,地脚螺栓的拉应力可按下列公式计算:

$$\sigma_b = \frac{F_1}{nA_b} \quad (\text{C. 2. 5-1})$$

$$\sigma_b \leq [\sigma]_b \quad (\text{C. 2. 5-2})$$

式中: σ_b ——地脚螺栓的拉应力(MPa);

n ——地脚螺栓数量;

A_b ——单个地脚螺栓的有效截面积(mm^2);

$[\sigma]_b$ ——地脚螺栓材料抗震许用应力,其值可按本规范第 4.7.2 条确定(MPa)。

2 地脚螺栓的剪应力可按下列公式计算:

$$\tau_b = \frac{F_r}{nA_b} \quad (\text{C. 2. 5-3})$$

$$\tau_b \leq [\tau]_b \quad (\text{C. 2. 5-4})$$

式中： τ_b ——地脚螺栓的剪切应力(MPa)；

$[\tau]_b$ ——地脚螺栓材料抗震许用剪应力，其值可按本规范第4.7.2条确定(MPa)。

C.3 支耳连接处筒体

C.3.1 支耳连接处的筒体，由支耳反力引起的轴向弯矩、环向弯矩和径向弯矩(图 C. 3. 1)，可按下列公式计算：

$$M_l = F_l l \quad (\text{C. 3. 1-1})$$

$$M_c = F_l l \quad (\text{C. 3. 1-2})$$

$$Q = F_r \quad (\text{C. 3. 1-3})$$

式中： M_l ——支耳反力引起的轴向弯矩(N·mm)；

M_c ——支耳反力引起的环向弯矩(N·mm)；

Q ——支耳反力引起的径向力(N)。

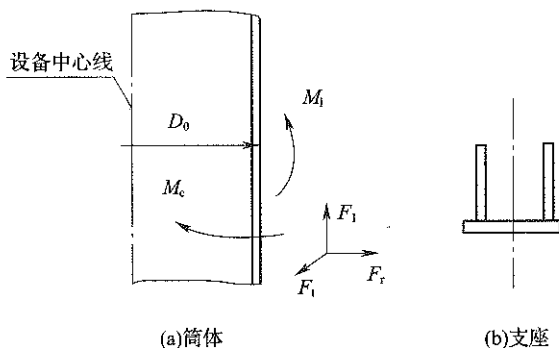


图 C. 3. 1 支耳反力示意

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

《建筑抗震设计规范》GB 50011

《构筑物抗震设计规范》GB 50191

《中国地震动参数区划图》GB 18306

中华人民共和国国家标准

石油化工钢制设备抗震设计规范

GB 50761 - 2012

条文说明

制定说明

《石油化工钢制设备抗震设计规范》GB 50761—2012,经住房和城乡建设部 2012 年 5 月 28 日以第 1414 号公告批准发布。

本规范系根据原建设部《关于印发〈2007 年工程建设标准规范制订、修订计划(第一批)的通知〉》(建标[2007]126 号)的要求,由中国石化工程建设有限公司会同有关单位共同编制而成的。

为做好本规范的编制工作,规范编制组在编制过程中先后开展了石油化工钢制设备结构阻尼比研究、大型方箱形加热炉和高塔类设备自振周期的研究、现行标准规范抗震设计反应谱对比分析研究、不同阻尼比反应谱转换关系的对比研究、中欧美日储罐抗震计算方法对比分析研究、规范用长周期抗震设计反应谱研究等多项专题研究和测试工作,取得了许多重要技术参数。

2008 年 5 月 12 日发生的汶川地震,对石油化工企业中的储油罐、球罐和支腿类等设备都带来了一定的破坏。本规范主编单位在中国石化集团公司主管部门的组织下,分别对西安石化分公司和都江堰、彭州、绵竹、什邡等地震灾区的有关企业进行了地震灾害的考察。这次地震考察,收集到了在以往国内外的震害资料上仅有文字描述,而没有实物照片的石化设备震害资料,为本规范的编制提供了宝贵的参考依据。

另外,为吸收国外先进标准的经验与方法,编制组还对国外相关标准,如:美国石油学会标准《钢制焊接油罐》API 650 标准附录 E(储罐抗震计算)、欧洲《用于储存操作温度介于 $0^{\circ}\text{C}\sim 165^{\circ}\text{C}$ 的低温液化气体的现场建造立式圆筒型平底钢制储罐的设计和建造》EN 14620 附录 A(储液罐的地震分析过程),以及日本《高压瓦斯设备抗震设计标准》等进行了翻译、研究和计算对比分析。

编制组于 2008 年 5 月完成了本规范征求意见稿初稿的编制工作。2008 年 7 月,由中国石化集团公司主持召开了本规范征求意见稿初稿研讨会。会上,与会专家对本规范在抗震设防原则、设备重要度的分类、抗震计算方法、抗震设计反应谱等方面进行了认真的讨论,并结合石油化工行业的实际情况,提出了许多好的修改意见和建议。

为加快本规范编制工作的进度,规范编制组在落实本规范征求意见稿初稿研讨会上与会专家提出的意见和建议的同时,采取了一边抓研究、一边对完成的征求意见稿进行意见征求的办法,于 2009 年 8 月 27 日,由中国石化集团公司标准主管部门发文,向中国建筑科学研究院、北京工业大学、中国纺织工业设计院、中国石油天然气集团公司所属设计单位和中国石化集团公司各直属单位等近 90 余家勘察、设计、科研和抗震管理部门发出了规范征求意见稿进行意见征求。

2010 年 11 月 10 日,由中国石化集团公司和住房和城乡建设部标准定额司主持召开了本规范送审稿审查会。会议认为,本规范的编制具有十分重要的意义,编制工作思路正确,章节划分合理,技术可靠、操作性强;编制原则符合国家当前经济发展现状,体现了石化行业特点;编制过程中所做的许多开创性工作,对做好石油化工钢制设备的抗震设计,保证石油化工企业的地震安全提供了科学依据,并对其他与石油化工设备设计有关的标准规范在抗震设防和抗震计算方面起到一定的指导和借鉴作用。

本规范的编制,主要解决了以下与石油化工设备抗震设计有关的问题:

1. 明确了石油化工设备的抗震设防目标;
2. 给出了新的抗震设计反应谱;
3. 给出了各类设备的结构阻尼比;
4. 给出了设备抗震计算的荷载组合原则;
5. 对各类设备提出了明确的抗震设计要求。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本规范时能正确理解和执行条文规定,《石油化工钢制设备抗震设计规范》编制组按章、节、条顺序编制了本规范的条文说明,对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明,还着重对强制性条文的强制理由作了解释。但是,本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力,仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目 次

1	总 则	(79)
2	术语和符号	(83)
3	基本规定	(84)
3.1	设备的重要度分类	(84)
3.2	地震影响	(84)
3.3	设备的结构体系设计	(85)
4	地震作用和抗震验算	(87)
4.1	一般规定	(87)
4.2	地面设备设计反应谱	(88)
4.3	地面设备水平地震作用	(89)
4.4	构架上设备水平地震作用	(89)
4.5	竖向地震作用	(92)
4.6	荷载组合	(92)
4.7	抗震验算	(93)
5	鞍座支承的卧式设备	(95)
5.1	一般规定	(95)
5.2	地震作用和抗震验算	(95)
5.3	抗震构造措施	(95)
6	支腿式直立设备	(96)
6.1	一般规定	(96)
6.2	自振周期	(96)
6.3	地震作用和抗震验算	(96)
6.4	抗震构造措施	(97)
7	支耳式直立设备	(98)

7.1	一般规定	(98)
7.2	自振周期	(98)
7.3	地震作用和抗震验算	(98)
7.4	抗震构造措施	(99)
8	裙座式直立设备	(100)
8.1	一般规定	(100)
8.2	自振周期	(100)
8.3	地震作用和抗震验算	(100)
8.4	抗震构造措施	(101)
9	球形储罐	(103)
9.1	一般规定	(103)
9.2	自振周期	(103)
9.3	地震作用和抗震验算	(106)
9.4	抗震构造措施	(106)
10	立式圆筒形储罐	(108)
10.1	一般规定	(108)
10.2	自振周期	(108)
10.3	水平地震作用及效应	(109)
10.4	罐壁竖向稳定许用临界应力	(110)
10.5	罐壁的抗震验算	(111)
10.6	液面晃动波高	(113)
10.7	抗震构造措施	(114)
11	加热炉	(115)
11.1	一般规定	(115)
11.2	自振周期	(115)
11.3	地震作用和抗震验算	(116)
11.4	抗震构造措施	(119)
附录 B	支腿式直立设备抗震验算	(122)
附录 C	支耳式直立设备抗震验算	(123)

1 总 则

1.0.1 国家有关防震减灾方面的法律法规主要是指《中华人民共和国防震减灾法》及相关的条例等。本规范的编制是以现有的科学水平和国家的经济条件为前提,由于目前对地震规律的认识还很不足,因此编制规范的科学依据只能是现有的经验和资料。

1.0.2 关于大于9度地区的石油化工钢制设备抗震设计,由于缺乏相关地震资料和数据,本规范尚未给出具体设计规定,目前可按原建设部1989年印发《地震基本烈度X度区建筑抗震设防暂行规定》(建抗字第426号)执行,并结合设备的特点进行理论和试验研究,确定其分析方法和抗震构造措施,为设计提供依据。

1.0.3 鉴于石油化工设备受地震破坏后的危害程度和目前在设备的设计计算中(除加热炉外)仍采用单一安全系数的许用应力法进行强度校核,为确保设备的抗震安全,本规范仍采用1990年中国地震烈度区划图规定的地震基本烈度和现行国家标准《中国地震动参数区划图》GB 18306规定的峰值加速度所对应的50年超越概率为10%的地震烈度(也称基本地震烈度)作为抗震设防的目标。

设备本体指设备与物料接触的壳体、加热炉框架结构。

1.0.4 本条为强制性条文,必须严格执行。鉴于数十年来我国很多6度地震区发生了较大的地震,甚至发生特大地震,如1976年唐山地震之前唐山市为6度区,当时不属于抗震设防城市,而实际发生的地震烈度达8度~11度。因此,对6度区的设备也应进行抗震设计,以减轻地震灾害。

由于目前大部分《工程建设场地地震安全性评价报告》中仅给出设计基本地震加速度值,为便于设计人员使用本规范,在规范中

凡是提及抗震设防烈度的地方也对应给出了设计基本地震加速度值。

1.0.5 许用应力设计法是以构件的计算应力 σ 不大于有关规范所给定的材料许用应力 $[\sigma]$ 的原则来进行设计的方法。一般的设计表达式为：

$$\sigma \leq [\sigma] \quad (1)$$

计算应力 σ 按载荷标准值以线性弹性理论计算；许用应力 $[\sigma]$ 由规定的材料屈服强度(或极限强度)除以大于 1 的单一安全系数而得。

许用应力设计法以线性弹性理论为基础，以设备危险截面的计算应力小于或等于材料的许用应力为准则，在应力分布不均匀的情况下，如受弯构件、受扭构件或静不定结构，用这种设计方法比较保守。

许用应力设计法是工程结构中的一种传统设计方法，应用简便。目前在公路、铁路工程设计中仍在应用。它的主要缺点是所采用的单一安全系数是一个笼统的经验系数，由此给出的许用应力不能保证各种结构具有比较一致的安全度水准，也未考虑载荷增大的不同比率或具有异常载荷效应情况对结构安全的影响。

而极限状态设计是当以整个结构或结构的一部分超过某一特定状态时就不能满足设计规定的某一功能要求，此特定状态称为该功能的极限状态，按此状态进行设计的方法称为极限状态设计法，是针对破坏强度设计法的缺点而改进的工程结构设计法。该方法一般分为半概率极限状态设计法和概率极限状态设计法。

半概率极限状态设计法是将工程结构的极限状态分为承载能力极限状态、变形极限状态和裂缝极限状态三类(也可将后两者归并为一类)，并以载荷系数、材料强度系数和工作条件系数代替单一的安全系数。对载荷或载荷效应和材料强度的标准值分别以数理统计方法取值，但不考虑载荷效应和材料抗力的联合概率分布和结构的失效概率。

概率极限状态设计法是将工程结构的极限状态分为承载能力极限状态和正常使用极限状态两大类。按照各种结构的特点和使用要求,给出极限状态方程和具体的限值,作为结构设计的依据。用结构的失效概率或可靠指标度量结构可靠度(见结构可靠度分析方法),在结构极限状态方程和结构可靠度之间以概率理论建立关系。这种设计方法即为基于概率的极限状态设计法,简称为概率极限状态设计法。其设计式是用载荷或载荷效应、材料性能和几何参数的标准值附以各种分项系数,再加上结构重要性系数来表达。对承载能力极限状态采用载荷效应的基本组合和偶然组合进行设计,对正常使用极限状态按载荷的短期效应组合和长期效应组合进行设计。

在欧美等发达国家中,对压力容器和储罐采用极限状态设计方法的研究发展较快,目前已有成熟的标准供设计使用。我国对压力容器的结构设计采用极限状态设计方法的研究起步较晚,与石化设备设计有关的现行设计标准中还没有引入极限状态设计方法,鉴于本规范中对卧式设备、支腿式直立设备、支耳式直立设备、裙座式直立设备、球形储罐和立式圆筒形储罐仍规定采用许用应力设计方法,但为了反映钢制设备在地震作用下的特点,本规范在进行设备的抗震设计时引入了地震作用调整系数和抗震许用应力调整系数,来对设备的不同部位和构件进行地震作用效应计算和抗震验算,并通过设备的结构体系设计(也称为抗震概念设计)和各章中给出的抗震构造措施等方法达到规范规定的抗震设防目标,确保了石化钢制设备抗震设计的可靠性。

1.0.6 本条为强制性条文,必须严格执行。本条是按照现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 编写的。作为抗震设防依据的设防烈度或设计基本地震动参数,其审批权限是由国家主管部门依法规定和批准。

1.0.7 本条是抗震设防的基本依据。对于一般建设工程的抗震设防标准是按照现行国家标准《中国地震动参数区划图》

GB 18306给出的地震动参数采用。根据《中华人民共和国防震减灾法》和《地震安全性评价管理条例》(国务院令第 323 号)等国家抗震减灾方面的法律法规有关条文规定,要求对已完成地震安全性评价的工程场地或已编制抗震设防区划的地区,应采用经主管部门批准的抗震设防烈度或设计地震动参数进行抗震设计。

2 术语和符号

2.1.3 抗震设防标准,是一种衡量对设备抗震能力要求高低的综合尺度,既取决于建设地点预期地震影响强弱的不同,又取决于设备使用功能重要性的不同。

2.1.4 设备或结构上地震作用的含义,强调了其动态作用的性质,不仅是加速度的作用,还应包括地震动的速度和位移的作用。

2.1.11 抗震构造措施只是抗震措施的一个组成部分。

2.1.14 许用应力设计法,以构件的计算应力 σ 不大于有关规范所给定的材料许用应力 $[\sigma]$ 的原则来进行设计的方法,又称为工作应力设计、安全系数法设计等。

2.1.15 极限状态设计法,当整个结构或结构的一部分超过某一特定状态就不能满足设计规定的某一功能要求时,此特定状态称为该功能的极限状态,按此状态进行设计的方法称极限状态设计法,又称为载荷和抗力系数设计等。

3 基本规定

3.1 设备的重要度分类

3.1.1 目前,在我国已编制和颁布了国家标准《建筑抗震设防分类标准》GB 50223 和《石油化工建(构)筑物抗震设防分类标准》GB 50453。在该两项标准中,对建(构)筑物按其重要性和受地震破坏后的严重程度进行了抗震设防分类。本条根据石油化工设备的特点、设备的规格、储存介质、使用用途和受地震破坏后的危害程度对其进行了重要度分类。

3.1.2 本条给出了设备重要度系数的取值规定。

3.1.3 根据地震震害调查和对 6 度区的设备抗震计算可知,6 度地震区设备的地震作用较小,因此一般情况下,对 6 度区的设备可不进行抗震验算,但应满足相应的构造措施。

3.2 地震影响

3.2.1、3.2.2 关于设计基本地震加速度的取值,是根据建设部 1992 年 7 月 3 日颁发的《关于统一抗震设计规范地面运动加速度设计取值的通知》(建标[1992]419 号)给出的,其定义是:50 年设计基准期超越概率 10% 的地震加速度的设计取值;7 度 0.1g,8 度 0.2g,9 度 0.4g。此外,在表 3.2.2 中还按现行国家标准《中国地震动参数区划图》GB 18306 引入了 6 度区设计基本地震加速度值 0.05g,并将 0.15g 和 0.3g 区域分别列入 7 度区和 8 度区。

3.2.3 本条为强制性条文,必须严格执行。设备在特定场地条件下所受到的地震影响,除与地震震级(地震动强度)大小有关外,主要取决于该场地条件下反应谱频谱特性中的特征周期值。反应谱(地震影响系数曲线)的特征周期又与震级大小和震中距远近有

关,在现行国家标准《中国地震动参数区划图》GB 18306 中的“中国地震动反应谱特征周期区划图”中将设计近震、远震改为设计地震分组,引入了“设计特征周期”的概念。为了更好地体现震级和震中距的影响,现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 和《构筑物抗震设计规范》GB 50191 对设计地震进行了分组,按三组设计地震分别给出设计特征周期值。在地震影响系数曲线中,设计所用特征周期是通过 T_g 来表征。

3.3 设备的结构体系设计

3.3.1 设备的结构体系的合理性与经济性是密切相关的,为了实现二者统一,必须根据设备的重要度类别,抗震设防标准、场地条件等因素,对设计方案进行综合分析、比较来确定。而规则、对称的结构是震害实例、实验研究和理论分析均得到证实是有利于抗震的,这不仅指对设备结构的尺寸要求,还包括其刚度、质量和强度分布的要求。总的目的是:避免过大的偏心距引起设备结构发生扭转振动,避免设备结构或支承设备的抗侧力构件出现薄弱部位(层)或塑性变形集中区。

1 如果设备建在建筑物内,则建筑物倒塌时将会砸坏设备;反之,设备倒塌时也可能砸坏建筑物。这些情况在 1976 年唐山地震和 2008 年汶川地震震害中均有实例。因此,在工艺条件允许的前提下,设备宜露天布置。这样不仅可减轻或避免因建筑物倒塌带来的地震破坏,而且可节省投资。

2 设备的抗震设计计算最初环节,就是依据设备的结构形式和特点来建立一个用于计算分析的数学模型,该数学模型建立的是否合理将直接影响到计算结果的精度或准确性。

3 作为抗震结构体系,应在强度和变形两方面均具有抗震能力。强度能力主要表现在弹性阶段;变形能力主要表现在塑性阶段。

4 本条是为改善钢构件所承受地震作用的变形能力而制定的。

5 有些设备因工艺要求,需安装或挂吊在主体设备上,对这类情况需在设备的连接处采取加强措施,以防止设备在地震中发生开裂或脱落。

6 根据对石油化工设备的地震震害调查分析可知,许多用来固定设备的地脚(连接)螺栓被拉长或拉断,为确保设备的地脚(连接)螺栓在地震中不发生滑扣现象,特提出此规定。

7 为了减少设备的倾倒地矩,要求设备的质心宜低。为了减小扭矩,要求设备体形宜匀称,设备质心宜与其刚度中心重合。

8 为防止设备在地震中倾覆,建议对重心较高的立式设备采用带螺栓座的结构形式。

9 通过对石油化工企业的地震震害考察可知,石油化工企业的地震灾害许多情况下是由于连接设备的管道破坏引起的。因此,本条要求与设备连接的管道应考虑采用柔性连接措施。

3.3.2 本条对设备的材料提出了基本要求。

伸长率反映钢材承受残余变形量的程度及塑性变形;屈强比为保证当结构某部位出现塑性铰后该处有足够的转动能力、耗能能力。良好的焊接性以及冲击韧性,是设备延性的保证。

低温下,材料的韧性将降低,因此应留有足够裕量。

4 地震作用和抗震验算

4.1 一般规定

4.1.1 本条是强制性条文,必须严格执行。对地震作用方向、竖向地震作用和安装在构架上的设备作出了规定。

1 在石油化工设备中,除箱式加热炉外,一般都是轴对称结构。考虑到地震可能来自任意方向,为此要求有斜交抗侧力构件的设备,应考虑各构件最不利方向的水平地震作用。

2 本款规定对高烈度区的高径比大于5且高度大于20m的直立设备和加热炉落地烟囱,应考虑竖向地震作用与重力载荷的不利组合。设备高度是指设备顶部至设备基础顶面的距离,变径设备的直径取加权平均值。

3 从国内外的震害资料了解到,安装在构架上的设备破坏程度要比安装在地面上的设备严重,因此,应对安装在构架(包括构筑物)上的卧式设备(含重叠式换热器)、支腿式设备等考虑地震的放大作用。

4.1.2 本条规定了对不同类型或不同计算要求的设备,应采取的不同计算分析方法。

1 为简化计算,对较矮的直立式设备和简化为单质点的设备可采用底部剪力法计算设备的地震作用。

2 对设备自振周期 T 处在设计反应谱速度或位移控制段的,宜采用振型分解反应谱法计算各质点的地震作用。

3 对特别重要或缺少设计依据的设备,为确保安全起见,建议采用时程分析法进行地震作用的补充计算。在选择地震加速度时程曲线时,要满足地震动三要素的要求,即频谱特性、加速度有效峰值和持续时间。

4.1.3 频谱特性可用地震影响系数曲线表征,依据设备所处的场地类别和设计地震分组确定。

加速度有效峰值可按规范表 4.1.3 中所列地震加速度最大值采用,该数值是以地震影响系数最大值除以放大系数(2.25)得到的。计算输入的加速度曲线的峰值,必要时可比上述有效峰值适当加大。当设备采用三维空间模型需要双向(二个水平向)或三向(二个水平和一个竖向)地震波输入时,其加速度最大值通常按 1(水平 1):0.85(水平 2):0.65(竖向)的比例调整。人工模拟的加速度时程曲线,也应按上述要求生成。

输入的地震加速度时程曲线的有效持续时间,一般从首次达到该时程曲线最大峰值的 10% 那一点算起,到最后一点达到最大峰值的 10% 为止,无论是采用实际的强震记录还是人工模拟地震波,有效持续时间一般为结构基本自振周期的 5 倍~10 倍,即设备结构顶点位移可按基本自振周期往复 5 次~10 次。

4.1.4 为使按本规范设计的石油化工设备满足设防烈度地震下的抗震设防目标,并保持与现行标准规范的连续性,本条对卧式设备、支腿式直立设备、支耳式直立设备、裙座式直立设备、球形储罐和立式圆筒形储罐等设备提出应按设防地震进行地震作用的计算,并按许用应力法进行构件的抗震验算。对加热炉设备,应按多遇地震计算地震作用,并按极限状态设计法进行抗震验算。

4.2 地面设备设计反应谱

4.2.1 本条为强制性条文,必须严格执行。弹性反应谱理论是目前阶段抗震设计的最基本理论,本规范所采用的设计反应谱(即地震影响系数曲线)是根据石油化工设备的特点,在现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 和《构筑物抗震设计规范》GB 50191 基础上提出的,其特点是:

1 本反应谱给出的水平地震影响系数最大值与原建设部《关

于统一抗震设计规范地面运动加速度设计取值的通知》(建标[1992]419号)中的规定相一致。

2 在 $T \leq 0.1s$ 的范围内,各类场地的地震影响系数一律采用同样的斜线,使之符合 $T=0$ 时(刚体)动力不放大的规律。

3 本反应谱存在两个下降段,即速度控制段和位移控制段,在 T_g 到 $5T_g$ 控制段是由地震动最大速度决定,此段反应谱按 $(T_g/T)^{\gamma} \eta_2 \alpha_{\max}$ 规律衰减;在 $5T_g$ 到 $T=15s$ 控制段是由地震最大位移控制,此段反应谱按 $[\eta_2 0.2^{\gamma} - \eta_1 (T - 5T_g)] \alpha_{\max}$ 规律衰减,当 α 计算值小于 $0.05 \eta_2 \alpha_{\max}$ 时,取 $\alpha = 0.05 \eta_2 \alpha_{\max}$ 。

4 本反应谱的长周期段主要是用来计算储罐液体晃动反应。

5 为与现行国家标准《中国地震动参数区划图》GB 18306 相协调,增加了设计地震分组和设计基本加速度为 $0.15g$ 和 $0.30g$ 地区的反应谱值。

4.2.2 为满足不同类型设备抗震设计的需要,本条给出了不同阻尼比调整系数的计算公式。

4.3 地面设备水平地震作用

4.3.1 底部剪方法视多质点体系为等效单质点体系,一般适用于质量和刚度沿高度分布比较均匀的剪切型、弯剪型和弯曲型结构。为满足设备的水平地震作用简化计算的需要,本规范的底部剪方法是参照现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 给出的。

4.3.2 关于振型分解反应谱法。由于时程分析法也可利用振型分解法进行计算,故加上“反应谱”以示区别,称为“振型分解反应谱法”。为提高计算精度,应适当增加其振型组合的个数,一般可取振型参与质量达到 90% 所需的振型数。

4.4 构架上设备水平地震作用

4.4.1 对安装在混凝土框架或钢框架上的卧式设备(含重叠式换

热器)、支腿式设备等,当设备的操作质量远小于构架的整体质量时,可采用本节中给出的方法进行地震作用的计算。

对直接支承在钢框架(或钢筋混凝土框架)上的塔类设备、大型卧式设备、支耳式设备等均不属于此范围,对这类结构的设备,在抗震计算时应将设备与支承结构作为一个整体来考虑其相互耦联的影响。

4.4.2 楼层上设备地震作用的放大作用已在历次地震破坏的调查中得以证实,20世纪80年代国内外有关单位已做了大量的测试和研究工作。例如:

1 日本电报电话公司(NTT)通过地震观测资料的研究分析后,确定了加速度增大的量化指标(按4层结构考虑),其增大率的平均值以地面加速度为准,地上一层约为2倍,最上层为3.2倍,屋顶为4倍左右。

2 同济大学朱伯龙教授在20世纪80年代中期通过大量的振动台试验和实物计算分析也给出了各类场地条件下的楼面设备地震作用放大系数,以Ⅱ类场地土、五层结构的房屋为例,一层的放大系数为2.1左右,二、三、四层分别在2.5、3.0、3.5左右,而顶层的放大系数可达4.1左右。

严格地讲,对于设置在混凝土框架或钢框架上的设备,只有在满足一定条件:①设备的质量与构架的质量相比非常小,一般小于 $1/500$;设备的自振周期 T_e 与构架的自振周期 T 相差较大 $0.9 > T_e/T > 1.1$ 时,可以忽略设备对结构的反馈作用,才可以采用楼层反应谱作为地震输入进行抗震计算,而在石化企业中安装在混凝土框架或钢框架上的大型卧式设备(含重叠式换热器)和支腿式设备等相对来说比较重,为使这类设备的抗震计算更趋合理,在原中国石化总公司北京设计院与中国建筑科学研究院合作完成的“石油化工设备抗震设计(鉴定)反应谱研究”课题的研究成果中给出了不同设备阻尼比和设备的质量与构架的质量相比的楼层放大修正系数,见表1。

表 1 楼层放大修正系数

m_0/m_1	ξ			
	0.1	0.05	0.02	0.01
$\geq 1/2$	0.50	0.37	0.29	0.28
1/10	0.68	0.51	0.38	0.35
1/50	0.87	0.76	0.67	0.62
1/100	0.93	0.90	0.80	0.80
$\leq 1/500$	1.00	1.00	1.00	1.00

注： m_0 为设备的质量； m_1 为构架楼层的质量； ξ 为设备的阻尼比。

依据上述研究结果，本条对无法确定支承设备的建(构)筑物结构参数时，对安装在混凝土构架或钢构架上的设备给出了简化计算方法。

4.4.3 本条是根据原中国石化总公司北京设计院与中国建筑科学研究院合作完成的“石油化工设备抗震设计(鉴定)反应谱研究”课题的研究成果编写的。

在“石油化工设备抗震设计(鉴定)反应谱研究”课题中给出的构架动力放大系数曲线不仅与支承设备的建(构)筑物结构动力特性有关，而且与设备的动力特性有关。通过对大量的实例计算可知，其地震作用比值一般在 0.5~2.5，个别较小的比值甚至到 0.2，较大的有到 3.0 的。地震作用比值较小的设备一般是安放在多层结构物的第一层上，且在场地土类别较低的情况下。地震作用比值较大的设备一般是安放在较矮结构物的顶层上(这时设备的自振周期与结构物的基本自振周期相差不大)，场地土类别较高，且设备质量与构架质量(包括该构架上所计算设备以外其他设备的质量)的比值较小的情况下。

对于已知支承设备的建(构)筑物结构参数时，一般可按照本条给出的构架动力放大系数曲线(图 4.4.3)进行地震作用的计算。从图 4.4.3 可看出，构架动力放大系数 β 不仅是设备自振周期，而且也是支承设备的建(构)筑物自振周期的函数。这较好地体现

了地面运动、建(构)筑物和设备三者之间动力特性的相互关系。

考虑到安装在构架上的设备主要是卧式设备、重叠式换热器和支腿式设备等矮小的设备,这类设备的阻尼比一般为 0.05,所以为简化计算,本构架动力放大系数 β 曲线是直接以 0.05 阻尼比给出的。

为安全起见,本条规定构架上设备地震作用的计算结果“不得小于该设备按建在地面上时计算所得的数值”,当对该设备按所在构架计算所得的地震作用与按建在地面上计算所得的地震作用比值小于 1 时,应取为 1。

4.4.4 条文中式(4.4.4-1)和式(4.4.4-2)是取自《日本建筑结构抗震条例(1980)》。但式(4.4.3-1)中 H_s 的系数原为 0.028,经过对石化企业中一些支承设备的钢构架的实测值和计算值发现该值偏小,因此,本规范采用 0.03。

4.5 竖向地震作用

4.5.1 本条是根据现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 编写的。

通过对设备地震震害的调查实例(如汶川地震中,什邡地区的川心店化工厂的硫酸吸收塔和釜峰化工厂的 100 立方米球罐地脚螺栓被拉长、拉断)和大量的计算分析表明,在地震烈度为 8 度、9 度时,设备在竖向地震的作用下可产生一定的拉力,因此对竖向地震作用影响不能忽视。

竖向地震影响系数的最大值,可取水平地震影响系数最大值的 65%。对多质点体系,计算竖向地震作用所采用的设备等效总质量载荷 m_{eq} 可取总载荷的 75%。

4.6 载荷组合

4.6.1 考虑到与现行石油化工设备设计有关的标准规范连续性,以及目前对大部分设备采用可靠度设计的条件尚不成熟,所以在

本规范中,除加热炉是采用极限状态法进行设计外,对其他设备仍采用许用应力法进行设计。

4.6.2 本条对采用许用应力设计的设备,给出了地震作用与其他载荷作用组合的基本原则。

4.7 抗震验算

4.7.1 本规范中,对加热炉设备的钢结构是采用极限状态设计法,在抗震验算时,其地震作用与其他荷载作用的组合需按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的规定执行。

4.7.2 本条给出了采用许用应力法设备抗震验算的规定。

为使按本规范设计的石油化工设备满足设防烈度地震下的抗震设防目标,并保持与原石油化工设备抗震计算方面相同的抗震安全度,在计算设备的地震载荷效应中引入了水平地震作用效应折减系数 R_e ,并说明如下:

1 本规范在按设防烈度地震进行地震作用计算时,取消了多年来在设备抗震计算中所采用的综合影响系数 C ,这对有些设备来说,当不考虑设备的阻尼比影响时,取消综合影响系数的地震作用计算值比考虑综合影响系数的计算值提高了 50%~80%。本规范通过引入地震作用效应折减系数 R_e ,不仅使按本规范设计的设备在抗震强度水准上保持与现行石油化工设备抗震计算方面相同的安全度水准,也合理地提高了设备有关部位(件)的抗震设计值。

2 在计算设备的地震载荷效应中引入地震作用效应折减系数 R_e 。在一定程度上也体现了设备结构(或构件)变形能力的不同,可合理地分配设备结构(或构件)的地震作用效应。众所周知,在原相关标准规范中对设备的抗震计算时,对不同类型的设备所取综合影响系数 C 值也不同,但对同一种设备无论是计算设备构件的受压、受拉或剪切载荷时,均采用相同的结构影响系数值,这从分析结构的受力状态上来说是不合理的。本规范参考了现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 和《构筑物抗震设计规范》

GB 50191 中给出的抗震调整系数,在设备的地震载荷效应计算中,对验算的部位和受力状态,分别给出了地震作用效应折减系数值,使其计算结果更趋合理和完善。

3 地震作用属于可变作用或偶然作用,其抗震安全度要求应低于静力作用。也就是说,抗震设计中采用的材料许用应力应高于静力作用时的材料的许用应力。对此,在本规范中通过引入抗震许用应力调整系数来提高材料的许用应力。另外,根据抗震设防目标对设备抗震验算的部位和受力状态,分别给出的抗震许用应力调整系数,使其计算结果也更趋合理和完善。

为使编制的本规范保持与现行国家或行业标准规范的连续性和可操作性,在下面各章中,对已有成熟单项标准的设备(如鞍座支承的卧式设备、裙座式直立设备、球形储罐等),一般仅给至地震作用的计算为止,但对这些设备需要进行抗震验算的部位都提出了明确的抗震设计要求,当需要计算这些设备各部位的地震效应时,可采用相应标准中给出的计算方法;而对于现行标准规范中没有给出计算方法,或计算方法不全面的(如支耳式、支腿式设备、立式圆筒形储罐等),在本规范中均给出了具体的设计计算方法。

5 鞍座支承的卧式设备

5.1 一般规定

5.1.1 本条给出了卧式设备的适用范围。

5.1.2 重叠式卧式设备在石化企业中比较常见,本条要求对重叠式卧式设备的抗震计算也应按照本章的相关规定进行。

5.2 地震作用和抗震验算

5.2.1 本条为强制性条文,必须严格执行。根据振动台试验、现场实测和大量的抗震计算结果表明,卧式设备的结构自振周期大部分在 $0.05\text{s}\sim 0.3\text{s}$ 。对此,一般情况下可不作设备的自振周期计算,在采用反应谱理论计算设备地震作用时,对设备的地震影响系数可直接取 α_{\max} 。

5.2.3 卧式设备的阻尼比是参考中国石化工程建设有限公司与中国建筑科学研究院以及哈尔滨工业大学等单位共同完成的“石油化工钢制设备结构阻尼比研究”课题的研究成果给出的。

5.2.4 对重叠式卧式设备,可简化为图 5.2.4 的多质点体系,采用底部剪力法进行抗震验算。

5.3 抗震构造措施

5.3.1 根据设备的地震震害调查可知,设备的地脚螺栓是抗震的薄弱环节。对高柔设备的地脚螺栓,往往被拉长,或拉断;对低矮设备的地脚螺栓常出现剪断破坏现象。因此,应重视对设备地脚螺栓的抗震验算。

6 支腿式直立设备

6.1 一般规定

6.1.1 支腿式设备一般是由角钢、槽钢、工字钢、H型钢或钢管支柱支撑,不宜用于高度较高、直径较大、高径比较大的直立设备,当设备高度大于10m或高径比大于5时,建议采用支耳式结构或裙座式结构形式。

6.1.2 根据地震震害考察和大量的实例计算,本条对抗震设防烈度为6度、7度地区,安装在地面上的直径小于1.2m、高度小于3m(含支腿高度),且支腿高度小于0.5m的支腿式设备提出了可不进行抗震验算,但应满足抗震构造措施要求。

6.2 自振周期

6.2.1 支腿式设备自振周期的计算公式是考虑了支腿弯曲变形和剪切变形的影响推导出来的。

6.3 地震作用和抗震验算

6.3.1 本条为强制性条文,必须严格执行。条文要求对支腿式设备应按照设防地震的有关规定进行抗震计算。

6.3.2 因有些支腿式设备是安装在框架(构架)上的,在计算地震作用时,应考虑构架对设备的放大影响。

6.3.3 支腿式设备的阻尼比是参考“石油化工钢制设备结构阻尼比研究”课题的研究成果给出的。

6.3.4 地震时,支腿支承的设备将随着每个支腿的弯曲变形而整体变形,由于支腿的连接部位与设备重心不在一条垂直线上,地震中设备首先将产生倾覆力矩,而支腿则承受偏心压缩使其屈曲强

度降低。对此,本条要求应对支腿连接焊缝强度、地脚螺栓强度、基础板强度、支腿连接处的筒体强度进行抗震计算。

6.3.5 为简化本章正文条文的编写,将支腿式设备的抗震验算的内容放入附录 B 中。

6.4 抗震构造措施

6.4.2 支腿式设备的震害主要表现在设备的移位、倾覆等,由于设备的移位往往造成连接管道拉裂,因此,对设备的支腿必须设置地脚螺栓固定。

7 支耳式直立设备

7.1 一般规定

7.1.1 支耳式设备是由支耳式支座通过垫板与设备筒体焊接,可用于高度较高、直径较大或高径比较大的直立设备。支座与设备重心存在偏心,在重力作用下支座处的筒体存在较大的附加剪力和弯矩。

7.2 自振周期

7.2.1 由于支耳式设备是安装在框架上,设备自振周期不仅与设备本身结构特性有关,而且与框架结构特性有关,理论计算较复杂。因此,本节给出的设备自振周期计算公式是采用了国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009—2001 附录 E 给出的框架基础塔的自振周期的经验公式。

7.3 地震作用和抗震验算

7.3.1 本条为强制性条文,必须严格执行。支耳式设备的结构比较特殊,一般情况下可按地面设计反应谱计算地震作用,对安装在较高框架(构架)上的支耳式设备,在计算地震作用时,应考虑构架对设备的放大影响。

7.3.3 支耳式设备的阻尼比是参考裙座式直立设备给出的。

7.3.4 考虑到支耳式支座可用于直径较大或高径比较大的直立设备,因此,有必要核算支座处筒体的轴向应力。

7.3.5 为简化本章条文的编写,将支耳式设备抗震验算的内容放入附录 C 中。

7.4 抗震构造措施

7.4.1 由于支耳式设备的结构形式在地震中会产生以设备本体为刚体,支承结构为弹性体的扭转振动,因此,为减少或避免设备产生扭转振动,支座应尽量选择设备的重心位置。当抗震设防烈度大于8度,或设计基本地震加速度大于 $0.30g$ 时,支耳数应大于4,且为偶数;当支耳数量较多时,应采用上下环板的结构形式。

7.4.2 为避免设备在地震中产生移位或滑脱等震害现象,对抗震验算中拉应力和剪应力均小于0的情况下,也应设置地脚螺栓。

8 裙座式直立设备

8.1 一般规定

8.1.2 根据地震震害调查和大量的实例计算,本条要求对8度、9度区,高度大于20m的直立设备应考虑竖向地震作用。

8.2 自振周期

8.2.3 采用振型分解法计算直立设备的基本自振周期精度较高,对于较高的直立设备建议采用该方法计算其基本自振周期。

8.2.4 对设置在构架上的直立设备,应考虑构架对设备自振特性的影响,对此本条第1款规定,在计算构架上直立设备的自振特性时应视构架为设备本体的一部分,采用刚度等效的方法进行计算。

本条第2款给出的经验公式是通过大量安装在构架上的直立设备动力特性的现场实测,并采用数理统计方法得到的。

8.3 地震作用和抗震验算

8.3.1 本条为强制性条文,必须严格执行。在我国早期的塔类设备抗震计算中,是采用设防烈度的地震影响进行地震作用的计算,并以综合影响系数 C_z 来概括设备的震害特点、结构延性和工程经验等因素。为使按本规范设计的塔类设备的抗震安全度水准不低于原相关规范的设计水准,本规范在考虑了设备阻尼影响的同时,还引入地震作用效应折减系数,使其计算结果更趋合理。

8.3.2 根据对高度小于或等于10m直立设备的计算了解到,该类设备的自振周期一般都在0.1s~0.3s,对此,为简化地震作用

的计算,地震影响系数可取最大值。

8.3.4 尽管高塔类设备的设计应力主要是受风载荷控制,但对建在高烈度区的直立设备,通过采用时程分析法进行补充计算,可提高设备的可靠性。

8.3.5 在石油化工企业中,因生产工艺需要使得裙座式直立设备的类型繁多,有高度不到10m的塔类设备,也有高度超过100m的超大型塔器;有的塔直径仅有几十厘米,有的塔直径已达10m或10m以上。为使这类设备抗震计算中阻尼比的取值更趋科学合理,在“石油化工钢制设备结构阻尼比研究”课题研究成果的基础上,根据这类设备的结构形式和结构自振周期的规律统计分析给出了裙座式直立设备结构阻尼比取值范围。

8.3.6 在设防烈度为8度、9度或设计基本地震加速度值为 $0.20g\sim 0.40g$ 地区,对高径比较大的直立设备,其竖向地震作用不容忽视。

8.3.7 本条要求对裙座式直立设备的壳体、裙座筒体、地脚螺栓、裙座基础环、地脚螺栓座、裙座与壳体连接处等也要按照本规范的要求进行抗震验算。

8.4 抗震构造措施

8.4.1 在石油化工企业中,直立设备用平台与其他设备(或构筑物)连接是常见的。研究表明,当直立设备仅由一层平台与其他设备连接时,往往在连接处的筒壁上产生较大的地震弯矩和局部应力,对直立设备的抗震能力产生不利影响。因此,本条规定连接设备的平台不宜与其他设备或建(构)筑物直接连接。

8.4.2 管道与设备采用柔性连接,可减少管道对设备的地震作用影响。

8.4.3 因生产工艺要求,与主体设备有关的附属设备如直接安装在设备本体上,将对设备产生较大偏心载荷,对抗震不利。

8.4.4 直立设备在 seismic 中晃动较大,为防止内部构件在 seismic 中滑脱,特编写本条。

8.4.6 为使设备地脚螺栓受力均匀分布,本条规定直径大于或等于 600mm 的设备的地脚螺栓数目不应少于 8 个。

9 球形储罐

9.1 一般规定

9.1.1 球罐的种类很多,结构形式也有所不同。常用的有拉杆式结构,其中有的拉杆是拉接在相邻支柱之间,有的拉杆是隔一支柱拉接,有的采用钢管支撑;有的采用V型柱式支撑;有的采用三柱会一形柱式结构支撑;此外,还有因工艺要求,将球罐安装在较高的混凝土框架上,而设有两层拉杆的结构。本规范给出的计算方法适用于可调式拉杆或固定式拉杆在相邻支柱间拉接的赤道正切柱式结构。

9.2 自振周期

9.2.1 除本规范外,目前我国还有五项标准规范涉及球罐的抗震设计(或抗震鉴定),这五项国家现行标准分别为:《钢制球形储罐》GB 12337、《构筑物抗震设计规范》GB 50191、《室外给水排水和燃气热力工程抗震设计规范》GB 50032、《石油化工钢制设备抗震设计规范》SH 3048 和《石油化工设备抗震鉴定标准》SH/T 3001。在这五项标准中,给出的自振周期的计算方法有三类,其中《钢制球形储罐》GB 12337 为一类,《构筑物抗震设计规范》GB 50191 与《室外给水排水和燃气热力工程抗震设计规范》GB 50032 为一类,《石油化工钢制设备抗震设计规范》SH 3048 与《石油化工设备抗震鉴定标准》SH/T 3001 为一类。

根据中国石化工程建设有限公司长期以来对在役的球罐类设备自振周期的大量实测值,以及“石油化工钢制设备结构阻尼比研究”课题中,对上述五项标准中的自振周期计算公式进行了计算对比分析,通过对各类方法的计算值与实测值和有限元计算值对比

分析可知,现行行业标准《石油化工钢制设备抗震设计规范》SH 3048 给出的自振周期的计算方法与实测值较接近。对此,本规范采用了《石油化工钢制设备抗震设计规范》SH 3048 给出的自振周期计算方法。

球罐储存介质的有效率。球罐常用于储存石油气、煤气和氨气等液化气体。根据 G. W. Housner 理论,液体在地震中可分为两个部分,一部分是固定在罐壁上与罐体作一致运动(称为固定液体);另一部分是独立作长周期自由晃动(称为自由液体)。地震时,主要是固定在罐壁上的这部分液体参与结构的整体振动。因此,在本节中引入了有效质量这一概念。结构的模拟质点体系见图 1。

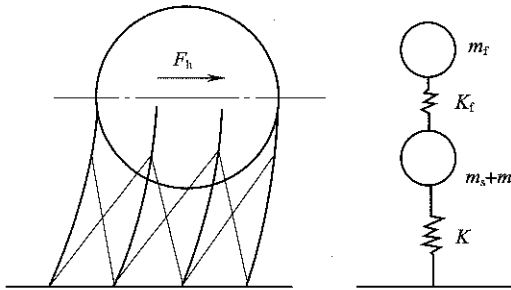


图 1 自由液体质量和固定液体质量示意

K_f —自由液体晃动刚度; m_s —球罐结构金属总质量

在图 9-1 中,自由液体质量和固定液体质量按下列公式计算:

$$m_f = (1 - \varphi)m_1 \quad (2)$$

$$m_2 = \varphi m_1 \quad (3)$$

式中: m_f ——自由液体质量(kg);

m_2 ——固定液体质量(也称液体有效质量)(kg);

φ ——储液的有效质量率系数;

m_1 ——储液质量(kg)。

由式 3 可知,储液参与整体结构振动的有效质量等于球罐储

液总质量与储液有效质量率系数的乘积。而储液有效质量率系数 φ 是根据球罐中液体充满程度,按本规范图 9.2.1 查取。

9.2.2 水平刚度的计算公式与目前国内的有关标准相比有所不同,这里是采用了日本《高压瓦斯设备抗震设计标准》中的计算方法,该方法是根据结构力学中的位移法推导出来的,在推导过程中基本假设条件如下:

- 1 球壳为刚体;
- 2 支柱的上端为固接;
- 3 支柱的底端为铰接;
- 4 拉杆支撑的两端为铰接;
- 5 考虑支柱、拉杆的伸缩和弯曲;
- 6 基础为刚体。

简化的结构分析计算模型见图 2。把球壳视为刚体,地基视为刚性,设作用在球壳中心的水平地震作用 F_h 所产生的挠度为 δ , 则水平刚度 K 为:

$$K = \frac{F_h}{\delta} \quad (4)$$

式中, K 是球罐支撑结构的水平刚度,它是由支撑构架抵抗弯曲变形的刚度 K_1 和拉杆与支柱形成的构架剪切刚度 K_2 合成的,即:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}} \quad (5)$$

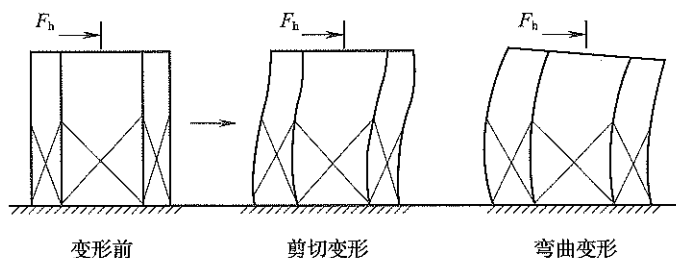


图 2 结构变形示意

根据基本假设条件可知,式 4 和式 5 的推导是偏于安全的。这两个公式在推导过程中不仅考虑了构架的剪切影响和弯曲影响,同时还考虑了拉杆位置的变化和直径变化的影响,拉杆直径的变化直接影响构架的水平刚度,考虑这一点是至关重要的。

9.2.3 目前,国内外有关的标准规范中均把球罐的整体结构简化为单质点体系来考虑,视球壳为刚体,质量集中在球壳中心,刚度以构架的水平刚度为主。忽略基础的影响,以此为动力分析模型得到球罐的基本自振周期为:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{m_{eq}}{1000K}} \quad (6)$$

式中: m_{eq} ——是按本规范 9.2.1 条求出的球罐等效质量(kg);

K ——是按本规范 9.2.2 条求出的结构水平刚度(N/mm)。

9.3 地震作用和抗震验算

9.3.1 本条为强制性条文,必须严格执行。为使按本规范设计的球罐类设备的抗震安全度水准不低于原相关规范的设计水准,本条要求对球罐类设备应按照设防地震的有关规定进行抗震计算。

9.3.3 球罐的阻尼比是根据“石油化工钢制设备结构阻尼比研究”课题的研究成果给出的。

9.3.5 本条要求对球壳、支柱、支柱与壳体连接、拉杆、拉杆附件、支柱底板及与外部管道连接的零部件等也应按照本规范要求进行抗震验算。

9.4 抗震构造措施

9.4.1、9.4.2 球罐的震害较多,主要表现在地脚螺栓被拉长,或拉断;拉杆被拉断;与罐体连接的进出口管线被拉断等。例如,1952 年美国加利福尼亚恩郡地震中,一个液化气球罐由于连接管线破裂引起爆炸;2008 年 5 月 12 日的汶川大地震中,位

于什邡市红白镇的釜峰化工厂 1000m^3 球罐支柱的地脚螺栓被剪断、支柱移位,罐底进出口管线在法兰连接处断裂。因此,要求与罐体连接的进出口管线应采用柔性连接,并设置紧急自动切断阀。

10 立式圆筒形储罐

10.1 一般规定

10.1.1 本章适用范围同现行国家标准《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》GB 50341 的 1.0.2 条。本条对储罐高、径比和容积的规定是根据目前国内常用油罐的公称容积系列的有关参数,经计算、分析、归纳后,并参考美国石油学会标准《钢制焊接油罐》API 650 而制定的。

10.1.2 本章原则上只适用于具有自由液面的储液罐的设计。对于浮顶罐,因为其浮顶是处于漂浮状态的薄膜圆盘,且浮顶下面仍保持有部分油气空间,浮顶对液面几乎不起约束作用,故可把浮顶罐近似地当做自由液面储罐看待。但对固定顶盖,且盖液之间的空间小于储罐容积的 4% 时,则所有储液几乎全被储罐周边约束住,所以本条作了空间容积 4% 的规定。

10.2 自振周期

10.2.1 目前我国共有四项标准规范涉及储油罐的抗震设计(或抗震鉴定)。这四项国家现行标准分别为:《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》GB 50341、《构筑物抗震设计规范》GB 50191、《石油化工钢制设备抗震设计规范》SH 3048 和《钢制常压立式圆筒形储罐抗震鉴定标准》SH/T 3026。在这些标准规范中,关于储油罐自振周期的计算都各自给出了不同的计算方法。美国石油学会标准《钢制焊接油罐》API 650 2005 版中也增加了储罐罐液耦连振动基本自振周期的计算公式,这是 API 650 标准中多年来一直欠缺的。

在这些标准规范中,对同一种设备却给出了不同的计算方法

而导致计算结果存在差异,给从事该方面工作的设计人员带来诸多的不便和困惑。对此,“石油化工钢制设备结构阻尼比研究”课题中,利用对大量储油罐的现场实测周期值和有限元计算得到的自振周期值与上述目前现行国家或行业标准规范中给出的自振周期计算公式进行对比计算分析。通过比较分析,课题组认为国家现行标准《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》GB 50341—2003和《石油化工钢制设备抗震设计规范》SH 3048—1999中给出的自振周期计算值与实测值较接近。为做到国内标准规范的统一,本规范采用了《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》GB 50341—2003中给出的计算方法。

10.2.2 储液晃动基本自振周期计算公式(10.2.2)取自 G. W. Housner 的著作。美国原子能委员会和美国石油学会标准《钢制焊接油罐》API 650 均采用了此计算式。

10.3 水平地震作用及效应

10.3.1 本条为强制性条文,必须严格执行。油罐本身属大型壳体结构,在地震中一旦发生破坏不仅仅表现在地震的直接经济损失上,还表现在随之产生的次生灾害上,而往往次生灾害的损失都大大超过地震本身带来的直接损失。为使按本规范设计的油罐的抗震安全度水准不低于现行相关标准规范的设计水准,本条要求对油罐应按照设防地震的有关规定进行抗震计算。

10.3.2 本条是根据反应谱法写成的。其中由动液系数 ϕ 引进了动液压力的概念。

式(10.3.2-1)中的 m_{eq} ,精确计算时,应该包括罐壁和罐顶的质量。但考虑到罐壁和罐顶的质量通常只相当于满载时储液质量的 1.2%~3.2%,为了简化计算,故可忽略不计。

10.3.3 油罐的阻尼比是根据“石油化工钢制设备结构阻尼比研究”课题的研究成果给出的。

10.3.4 本条动液系数的计算公式是取自 G. W. Housner 的著

作。他认为,如果储罐比较细高,例如 $H_w > 1.5R$ 时,罐体下部深度低于 $1.5R$ 的储液可以认为与完全被约束在储罐内一样,即假定从储液上表面至深度为 $1.5R$ 处有一刚性水平薄膜把储液分割成上、下两部分。液体的运动只限于上部分,而下部分储液则如刚体一样固定在罐壁。据此,导得式(10.3.4-2)。

10.3.5 根据 G. W. Housner 刚性壁理论,计算得到的脉冲压力作用中心的高度为 $0.375H_w$,日本标准取 H_w/D 的函数,其值通常为 $0.375H_w \sim 0.437H_w$ 。考虑到罐体弹性会增大地震作用,对流压力也可能与脉冲压力耦连,所以本规范取压力中心的高度稍大一些,取 $0.45H_w$,于是得到倾覆力矩式(10.3.5)。

10.4 罐壁竖向稳定许用临界应力

10.4.1 罐壁竖向压缩临界应力公式(10.4.1-1)和公式(10.4.1-2)是按大连理工大学邬瑞锋教授等人提出的力学模型而求得的。首先按有限元法用环壳单元把罐壁离散,对液体则用解析法进行分析,然后通过边界积分将动力影响转加到罐壁上并求解罐液耦连振动,再用反应谱法求出其地震反应,最后用线性屈曲理论和能量法进行动力稳定分析。我们根据这一计算模型,对大量标准系列油罐进行计算,并根据计算所得的大量数据,回归而得到临界应力的计算公式。

国内外现行的一些储罐抗震标准中,包括美国石油学会标准《钢制焊接油罐》API 650,采用的轴压稳定临界应力公式,都是基于轴对称空圆筒在纯轴压作用下,按静力理论推导而得的,这显然与实际地震时的受力情况相去甚远,运用这个不考虑储液动力影响并按静力理论推导的公式,来验算由动液理论计算所得的罐壁应力显然是不够合理的。

要说明的是,在美国石油学会标准《钢制焊接油罐》API 650中,虽然也引进了静液压力作为确定临界应力的一个附加因素,但这毕竟还是从静力观点出发的。

通过对 30 个标准系列油罐的计算结果表明:在设防烈度 8 度、II 类场地土时,按国内外一些标准中的公式计算时,许多罐的罐壁竖向压缩应力成倍地提高后也能满足抗震要求,甚至有些罐,如 50000m^3 、 30000m^3 外浮顶罐和 10000m^3 拱顶罐分别提高到现有应力的 4.4、2.8 和 4.2 倍都尚能满足抗震要求,这是不够安全的,也与按动力模型计算的抗失稳结果不符。另一方面,如果加大安全系数,把许用临界应力缩小,则许多容积较小的罐又不能满足要求。而采用本规范给出的计算方法,其结果比较合理。

10.5 罐壁的抗震验算

10.5.1 试验发现:尽管竖向激励时,台面加速度峰值是水平激励的 4 倍,但水平激励的提高高度却比竖向激励的还大,这说明提高力主要是由水平地震作用引起的。而式(10.5.1)正是体现了这一原则的,因为其中的 M_{g1} 就是由水平地震作用产生的。式(10.5.1)的实质是与美国石油学会标准《钢制焊接油罐》API 650 一致的,只是表现形式不同。

10.5.2 提高抵抗力计算式(10.5.2-1)来自美国石油学会标准《钢制焊接油罐》API 650。 F_1 包括 F_{10} 和重力抗力, F_{10} 为储液和罐底所能提供的最大提高抵抗力,其限制值 $0.02H_w D_1 \rho_s g \times 10^{-9}$ 相当于限制其提高深度为罐底半径的 6.8%。该限制值相当于原规范 F_1 的限制值 $250\rho_s H_w D_1$ (这里的 ρ_s 为比重)中的 250,换为 196,本规范限制 F_{10} 比较合理,意义更加明确。

10.5.3 本规范增加了锚固储罐的计算方法。罐壁底部应力与未发生提高的储罐计算相同。锚固螺栓的强度验算应使罐底周边单位长度上的锚固螺栓抗力大于周边单位长度上的提高力与罐壁重力之差。

10.5.4 本条主要是引进提高影响系数的问题。根据国内、外许多学者的理论和实验分析,一致认为提高会急剧增加罐壁的应力,因此提出了提高影响系数问题。式(10.5.3-1)是锚固罐,或虽是

浮放罐,但未发生提高(即 $F_t < F_1$)时的罐壁底部竖向压应力的计算公式。由于提高问题,是储液罐罐体、储液与基础等的多种非线性耦连系统的三维动边界接触问题,要从理论上解决这个问题是很困难的。美国石油学会标准《钢制焊接油罐》API 650 2005 版考虑了竖向加速度的影响,根据目前国内的抗震设计的一般要求尚不考虑该部分的内容,因此我们仍然参考美国石油学会标准《钢制焊接油罐》API 650 2003 版的相关内容,该标准在发生提高时罐壁底部的竖向压应力是采用曲线形式给出的,经过转化得到:

$$\sigma_c = \frac{N_1}{A_1} + f_1(C_x) \frac{M_1}{Z_1} \quad (7)$$

式中, $f_1(C_x)$ 是变量 C_x 的函数,美国石油学会标准《钢制焊接油罐》API 650 中的 C_x 为:

$$C_x = \frac{M_1}{D_1^2(W_1 + W_t)} \quad (8)$$

式中的 $(W_1 + W_t)$,就是本规范式(10.5.2-2)中的 F_1 ,可得到:

$$C_x = \frac{\pi F_t}{4 F_1} \quad (9)$$

美国石油学会标准《钢制焊接油罐》API 650 认为,当 C_x 大于 1.57 时,罐体结构将不稳定,这相当于本规范 $F_t/F_1 > 2$ 的情况。这一限制,使得标准系列罐中的一些高径比较大的罐在 8 度时就已不能满足稳定性要求,除了由于这些罐的高径比较大外,另一原因是美国石油学会标准《钢制焊接油罐》API 650 的计算液体抗力 W_1 过于保守,忽略了底板膜力的影响,因此使得 W_1 偏小。考虑到限制 $F_t/F_1 \leq 2$,有益于限制罐体的高径比,保证储罐的安全,故本规范采用了这一限制条件。式(10.5.4-2)中的 l 就是式(10)中的 $f_1(C_x)$,它也是变量 F_t/F_1 的函数,即:

$$l = f_1(C_x) = f(F_t/F_1) \quad (10)$$

但在美国石油学会标准《钢制焊接油罐》API 650 中,当 C_x 接近 1.57(即 F_t/F_1 接近 2)时, $f_1(C_x)$ 急剧增加,导致应力非常大。考虑到它用的是静提高模型,其提高段上的抗力 W_1 为常数,且

W_1 的计算值偏低。在对标准系列罐大量验算的基础上,本规范提出了提高影响系数的计算公式(10.5.4-3)。

应该指出的是,对标准系列罐的验算表明,现有内浮顶罐的提高影响相当大,许多罐在 8 度时就出现 $F_1/F_1 > 2$ 的情况,这主要是由于其高径比较大,设计时应予注意。

10.6 液面晃动波高

10.6.1 G. W. Housner 根据势流理论和理想流体的条件导出了液面晃动波高的计算公式,经 Clough 修正后为: $h_v = \alpha R$, 后来美国原子能委员会技术情报司第 TID7024 号文献“Nuclear Reactors and Earthquakes”在应用时又改变成:

$$h_v = 0.343\alpha T_s^2 \tanh\left(4.77 \sqrt{\frac{H}{D}}\right) \quad (11)$$

式中: h_v ——液面晃动波高(m);

α ——地震影响系数;

H ——储液高度(m);

D ——罐直径(m);

T_s ——储液晃动基本自振周期(s)。

日本工业标准《钢制焊接油罐结构》JIS B8501 规定液面晃动波高为:

$$h_v = 0.418D\alpha \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{0.641}{T_s} \quad (13)$$

该标准中选取速度谱段进行波高计算,并且取速度谱值为 100cm/s。

编制本标准时,采用势流理论并考虑流体粘性影响后导出液面晃动波高 h_v 为:

$$h_v = 0.837R\alpha \quad (14)$$

当采用反应谱理论计算波高时, α 由加速度反应谱查出。

由于本标准中反应谱对应的阻尼比为 5%，而晃动阻尼比为 0.5%，随着阻尼减少、地震反应加大，故应修正。日本及美国的设备抗震标准中规定的修正系数见表 2。

表 2 阻尼修正系数

阻尼	0.3	0.2	0.1	0.05	0.03	0.02	0.01	0.005
日本标准修正系数	0.44	0.56	0.78	1.00	1.18	1.32	1.53	1.79
美国标准修正系数	0.40	0.54	0.77	1.00	1.17	1.31	1.54	1.77

对 1985 年 9 月 18 日墨西哥地震记录分析可知，随不同土壤而异的阻尼修正系数在 1.7~2.3。本条在计算储液晃动波高时，随着阻尼减少至 0.005 而乘以系数 1.79。即：

$$h_v = 1.79 \times 0.837R_\alpha = 1.5R_\alpha \quad (15)$$

10.7 抗震构造措施

10.7.3 锚固螺栓的结构规定采用了现行国家标准《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》GB 50341 的有关规定。

11 加 热 炉

11.1 一 般 规 定

11.1.1 本条给出了加热炉抗震设计的适用范围。

11.1.2 本条规定了计算地震作用时应遵循的原则：

1 计算箱式加热炉框架和圆筒炉对流室框架的地震作用时，应考虑框架结构两个主轴(短边和长边)方向的水平地震作用，这是考虑到地震作用可能来自任意方向。为此，框架在两个主轴方向的抗侧力构件均应满足抗震要求。

2 卧式加热炉，是指燃烧炉之类的气体加热炉，这类加热炉，在炉膛内不设炉管，炉多为重力式结构，计算水平地震作用时，取垂直于炉体长轴方向的横向水平地震作用，这样假定偏于安全，而在炉体的长度方向，因有炉体的温度膨胀摩擦力，所以可不考虑炉体长度方向的水平地震作用。

3 本条是根据现行国家标准《烟囱设计规范》GB 50051 和《高耸结构设计规范》GB 50135 的规定制定的。

11.2 自 振 周 期

11.2.1 圆筒型加热炉可简化为多质点体系结构计算其自振特性。对于辐射对流型圆筒炉，一般可简化为四个质点体系，计算前两阶振型即可满足抗震要求。

公式(11.2.1-1)、公式(11.2.1-2)，是根据动力测试了 100 多台圆筒型加热炉(辐射对流型圆筒炉约 100 余台，纯辐射型圆筒炉 20 余台)的实测数据，由最小二乘法回归得出的经验公式。

用经验公式对 32 个炼油和石油化工厂的百余台辐射对流型圆筒炉进行了反馈验算，其合格率 95% 以上。

根据“石油化工钢制设备结构阻尼比研究”课题分析报告,对目前炼油厂的 20 台圆筒型加热炉自振周期进行了实测,与公式(11.2.1-1)、公式(11.2.1-2)的平均偏差为 16.69%,说明该计算公式可满足工程设计需要。

公式(11.2.1-2)的特点是充分考虑了炉顶烟囱在自由振动中的弯曲特性,式中的第 4 项 h_4^2/D_3 是烟囱高度和其外径之比,若烟囱外径 D_3 不变,烟囱高度 h_4 增高,则 h_4^2/D_3 的变率加急,计算的基本自振周期也随着增大,这与辐射对流型圆筒加热炉弯剪振型的实际情况相当吻合。

11.2.2 对于高度小于或等于 40m(包括炉顶烟囱)的箱式加热炉,基本自振周期可按本条提供的经验公式计算,该经验公式(11.2.2)是根据测试了 30 余台箱式加热炉的实测数据,由最小二乘法归纳计算得出的。用该经验公式对 25 台箱式加热炉进行了反馈验算,合格率达 98%以上。

这类炉体框架的动力特点是:尽管炉体框架两个方向(横向和纵向)的抗弯刚度不同,但所测得的两个方向基本自振周期却很接近,这充分说明炉体框架是以剪切变形为主的剪弯型结构,实测的基本自振周期大都在 0.5~0.75 附近,这也说明炉架是刚性或中刚性结构,因此,可用测得的炉框架横向(短边)的基本自振周期代表整个炉架的基本自振周期,经验公式(11.2.2)表达了这一特点。

11.2.3 落地烟囱,可分为直筒式和锥体式,基本自振周期可按典型的公式(11.2.3-1)和公式(11.2.3-2)计算,对于较高(高度大于 40m)的变截面烟囱,可按附录 A 的方法计算,对于基本自振周期大于 1s 的烟囱计算到三阶振型,即可满足抗震计算需要。

11.3 地震作用和抗震验算

11.3.1 本条为强制性条文,必须严格执行。加热炉钢框架结构属构筑物范畴,抗震验算时,采用的是以概率可靠度为基础的多系数极限状态设计法。

11.3.3 “石油化工钢制设备结构阻尼比研究”课题组对 20 台圆筒炉和 14 台箱式炉阻尼比的数据采集工况是在脉动振源(微震)条件下完成的,考虑到现场设备的结构形式和工艺操作条件,并根据多年来振动台模型试验的基本规律,给出加热炉炉体结构在弹性阶段抗震计算用结构阻尼比建议值。

11.3.4 本条共有三款规定:

1 本款规定高度(包括炉顶烟囱高度)小于或等于 40m 且以剪切变形为主的箱式加热炉,其水平地震作用采用反应谱底部剪力法计算。这是因为这类炉多为剪切变形或是以剪切变形为主。

2 除第 1 款外的加热炉,多为弯剪变形,如圆筒形加热炉,在炉顶上的烟囱为弯曲变形,这类炉多是以烟囱弯曲变形为主和炉体剪切变形相组合的振型,所以其水平地震作用应采用振型分解反应谱法计算。

3 卧式加热炉,多系重力式炉,且低质心高频率,所以计算水平地震作用时,直接取地震影响系数的最大值,不考虑组合风荷载效应。

11.3.5、11.3.6 这两条是根据现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 制定的。

11.3.7 坐落在箱式炉顶面上的烟囱,应按本规范第 4 章图 4.4.1 构架动力放大系数计算水平地震作用,这是因为炉顶层质量与烟囱的质量比都大于 2,炉顶面结构有较大的刚性,可以视为烟囱的刚性基础面。采用构架动力放大系数法计算得水平地震作用,比采用局部地震作用效应增大系数“3”(参照现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011)的计算方法,计算所得烟囱水平地震作用切合实际,但为了方便计算,也可以采用反应谱底部剪力法再乘以地震作用效应增大系数计算,本条采用构架动力放大系数法计算了 6 种不同类型的炉顶烟囱(见表 3),得出烟囱水平地震作用效应增大系数(与反应谱底部剪力法比较)在 1.58~1.96 之间,为了安全起见采用效应增大系数为 2.0。

表 3 炉顶烟囱水平地震作用效应增大系数

序号	炉框架		炉顶烟囱		反应谱底部 剪力法、计算水 平地地震作用 F_{hsj}	楼面谱法 计算水平 地震作用 F'_{hsj}	$K_y = F_{hsj} / F'_{hsj}$
	m_s	T_s	m_e	T_e			
1	82.69	0.7	32.47	0.42	3.15g	4.987g	1.58
2	69.6	0.62	21.0	0.37	2.13g	4.026g	1.89
3	68.34	0.522	19.95	0.522	2.15g	3.55g	1.65
4	55.44	0.56	13.40	0.32	1.36g	2.671g	1.96
5	41.47	0.5	8.2	0.231	0.81g	1.59g	1.96
6	32.00	0.42	4.85	0.18	0.49g	0.95g	1.94

注： m_s —炉框架顶层质量(t)；

T_s —炉框架基本自振周期(s)；

m_e —炉顶烟囱质量(t)；

T_e —炉顶烟囱基本自振周期(s)；

F_{hsj} —构架动力放大系数法计算得水平地震作用(kN)；

F'_{hsj} —反应谱底部剪力法计算得水平地震作用(kN)；

K_y —炉顶烟囱水平地震作用效应增大系数(F_{hsj} 和 F'_{hsj} 的比值)， $K_y \approx 2.0$ 。

在计算炉体结构的水平地震作用时(按多质点体系计算)，仍把烟囱质量视为炉顶面上的一个集中质量，这种假定是符合实际情况的。

11.3.8 对于高度小于或等于40m的落地烟囱，可按等效单质点体系采用反应谱底部剪力法计算水平地震作用；对于高度大于40m的落地烟囱，可按多质点体系采用振型分解反应谱法计算水平地震作用，此规定可确保不同刚度的烟囱满足抗震设计要求。

11.3.9 落地余热回收系统中的空气预热器钢架，一般为剪切振型结构，所以在计算水平地震作用时，采用反应谱底部剪力法。

架空烟道及其支架，虽然有的距地面较高，但为了安全起见，在计算水平地震作用时，取地震影响系数的最大值，且仅计算垂直烟道长度方向的水平地震作用。在烟道长度方向，因有温度膨胀作用产生的摩擦力，摩擦力的作用效应不与水平地震作用效应

组合。

11.3.10 加热炉钢结构构件抗震验算,采用极限状态设计方法的原因是:

1 加热炉钢结构的主要支撑体系为框架梁柱结构,适用于工业与民用一般构筑物的钢结构设计;

2 为与国家现行标准《钢结构设计规范》GB 50017 及《石油化工管式炉钢结构设计规范》SH/T 3070 配套使用,本章采用了以概率论为基础的极限状态设计方法。

11.4 抗震构造措施

11.4.1 箱式加热炉的构造措施,都是多年行之有效的实践经验。为了增加抗御地震作用的能力,保证炉框架结构的整体性,以起到多道抗震防线的作用,增加吸能能力,因而支撑系统是必不可少的。

3 在炉架侧墙两端相邻两柱之间及支承烟囱的两柱之间设置斜撑是为了保证加热炉的整体稳定性,并增加柱列的侧向刚度。

7 框架侧墙的炉底柱是侧墙柱网的薄弱环节,为了加强该部位的刚度,在柱网之间增设膝下撑(图 11.2.2-2)是必要的。近几年国外设计的炉框架一般都设置了膝下撑,其主要作用是加强炉底侧墙柱网的刚度。

11.4.2 本条共有 7 款规定:

1 要求对流室高度不宜大于辐射室高度,因为对流室过高将造成炉体重心上移,而不利于抗震。

2 要求对流室结构构件应对称布置,在对流室高度大于 4m 时,亦应对称设置斜撑。对称布置结构构件,使其质心、形心一致,避免结构产生扭转,对抗震有利。

3 在炉顶平面支承直筒式烟囱的平面内设置斜撑,是保证炉顶平面在地震作用下的整体性和不产生变形。

4 规定烟囱底座支承梁的最小型号,是保证烟囱底座的刚度;规定烟囱底座梁采用刚性连接,是加强结构的整体性能,从而

当烟囱遭受地震作用时,底座梁能承受烟囱传来的局部振动。

5 在设防烈度 7 度~9 度时,应在辐射室筒体上口环梁向下设置纵向加劲肋,当筒体遭受地震作用时,保持其稳定性。

6 在辐射室筒体炉底柱数目少于 8 根时,设计成固接柱脚对抗震是有利的,可以避免在炉底柱数目少的情况下,由于柱脚连接薄弱而产生柱脚扭转,同时要求采用高台底座的柱脚形式。

7 筒体上、下口环梁设计成空腹型闭口截面,是为了增加环梁在水平地震作用下的抗扭转性能。

11.4.3 卧式加热炉在操作状态下多为微正压,在与水平地震作用效应组合时,应能保证筒体的局部和整体稳定性能,因而对筒体提出了最小壁厚要求,使筒体在水平地震作用下,不致发生局部屈曲的现象。

规定卧式加热炉筒体鞍座最小厚度,是为了保证鞍座在水平地震作用下,有相应的稳定性能和抗剪能力。

11.4.4 规定加热炉地脚螺栓的最小规格和柱脚底板最小厚度,是保证加热炉在水平地震作用下,不减弱抗倾覆能力和保持加热炉的总体稳定性能。

以上抗震构造措施,经历了 7 度和 7 度以上的地震烈度考验,证明是行之有效的。

11.4.5 炉顶烟囱的底座螺栓,是锚固烟囱的重要部件,因此必须牢固可靠,不允许有螺栓连接松弛,造成烟囱与炉体分离,形成不同步振动的情况,以致影响整个炉体结构的稳定性和承载能力,本条规定的目的就在于此。

11.4.6 在地震时,炉架的最大应力区容易产生塑性铰,导致构件失去整体和局部稳定,所以在构件的最大应力区不宜设置焊接接头。

11.4.7 架空烟道的抗震构造措施:

1 在地震作用下,烟道壁板太薄容易产生变形,造成烟道壁板内瘪外突。同时应指出,烟道壁板的最小厚度是指在加劲肋或

加强壁框能保证烟道的强度和稳定的前提下定出的。

2 用承插式烟道进行温度补偿时,应预留间隙,除吸收热膨胀外,还应留有余量,避免在发生地震时,烟道在承插处断开,致使烟道破坏。

3 承插式烟道补偿设施,应焊接在支承结构上,避免在地震时补偿设施与烟道脱开,掉出支承结构而发生事故。

4 在烟道支座处设置烟道侧向挡板,以防止地震时烟道滑出支座发生事故。

11.4.8 本条规定都是为保证底座连接的牢靠性和稳定性。

11.4.9、11.4.10 这两条是依据现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 制定的。

附录 B 支腿式直立设备抗震验算

B.1 支 腿

B.1.1 支腿承受的水平载荷一般包括水平地震作用、管道载荷和风载荷等。

B.1.3 地震时,支腿支承的设备将随着每个支腿的弯曲变形而整体变形,由于支腿的连接部位与设备重心不在一条垂直线上,地震中设备首先将产生倾覆力矩,而支腿则承受偏心压缩使其屈曲强度降低。支腿的稳定强度是按压弯构件进行核算。

B.2 支腿连接处筒体

B.2.1 支腿连接处筒体的受力一般包括地震作用、压力、管道载荷和风载荷等。

在以上载荷作用下,支腿连接处的筒体将产生较大的局部应力。在各国标准中,局部应力的计算方法一般采用简化的美国焊接研究会第 107 号公报(WRC107 公报)方法。

当支腿连接处筒体的局部应力不满足要求时,可以设置垫板,使垫板厚度参与局部应力计算。垫板的宽度应根据设备的操作温度、直径和筒体长度设置。

附录 C 支耳式直立设备抗震验算

C.1 筒 体

C.1.1 考虑到支耳式支座可用于直径较大或高径比较大的直立设备,因此,有必要核算支座处筒体的轴向应力。

C.2 支 耳

C.2.1 由于水平地震作用的方向不定,所以应综合考虑支耳的安装方向。至少考虑如图 3 所示的两个方向,这时各支耳的反力大小如图所示。

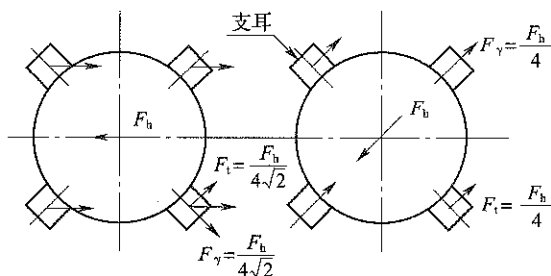


图 3 水平载荷作用引起的支耳反力示意

由于各支耳的支承载荷不一定限于理想的等分,因此,应从偏于安全来慎重考虑在一个支耳上同时作用有地震作用载荷、管道载荷和风载荷等,故给出式(C.2.1)。

C.2.2 同样,由于水平作用载荷引起的弯矩和垂直载荷在支耳上产生纵向反力也存在以上工况。故给出式(C.2.2)。

C.3 支耳连接处筒体

C.3.1 支耳连接处筒体的受力一般包括地震作用、压力、管道载

荷和风载荷等。在以上载荷作用下,支耳连接处的筒体将产生较大的局部应力。在各国标准中,局部应力的计算方法一般采用简化的 WRC107 公报方法。

当支耳连接处筒体的局部应力不满足要求时,可以设置垫板,使垫板厚度参与局部应力计算。垫板的宽度应根据设备的操作温度、直径和筒体长度设置。

对支耳连接处筒体的局部应力不满足时,也可采用刚性环支撑结构,其计算方法可参考有关文献。