

UDC

中华人民共和国国家标准



P

GB/T 50761 – 2018

石油化工钢制设备抗震设计标准

Standard for seismic design of petrochemical
steel equipments

2018 – 01 – 16 发布

2018 – 09 – 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标准

Standard for seismic design of petrochemical
steel equipments

GB/T 50761 - 2018

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:2018年9月1日

中国计划出版社

2018 北 京

中华人民共和国国家标准
石油化工钢制设备抗震设计标准
GB/T 50761-2018

☆

中国计划出版社出版发行

网址: www.jhpress.com

地址: 北京市西城区木樨地北里甲 11 号国宏大厦 C 座 3 层

邮政编码: 100038 电话: (010) 63906433 (发行部)

三河富华印刷包装有限公司印刷

850mm×1168mm 1/32 4.25 印张 106 千字

2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

☆

统一书号: 155182·0310

定价: 26.00 元

版权所有 侵权必究

侵权举报电话: (010) 63906404

如有印装质量问题, 请寄本社出版部调换

中华人民共和国住房和城乡建设部公告

第 1811 号

住房和城乡建设部关于发布国家标准 《石油化工钢制设备抗震设计标准》的公告

现批准《石油化工钢制设备抗震设计标准》为国家标准,编号为 GB/T 50761—2018,自 2018 年 9 月 1 日起实施。原国家标准《石油化工钢制设备抗震设计规范》GB 50761—2012 同时废止。

本标准在住房和城乡建设部门户网站(www.mohurd.gov.cn)公开,并由住房和城乡建设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

2018 年 1 月 16 日

前 言

本标准是根据住房城乡建设部《关于印发〈2015 年工程建设标准规范制订、修订计划〉的通知》(建标〔2014〕189 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对《石油化工钢制设备抗震设计规范》GB 50761—2012 进行修订而成。

本标准在修订过程中,编制组采纳了近年来完成的专题研究的成果,调查总结了国内外大地震的经验教训,并在全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。

本标准共分 11 章和 4 个附录,主要内容包括:总则、术语和符号、基本规定、地震作用和抗震验算、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。

本次修订的主要内容是:

1. 调整了抗震设计反应谱在直线下降段的斜率。
2. 完善了设备抗震重要度的分类。
3. 简化了地震作用调整系数。
4. 对安装在构架上设备的水平地震作用的计算方法进行了补充完善。
5. 根据完成的研究课题,对立式圆筒形储罐和支腿式直立设备的阻尼比进行调整。
6. 根据本标准征求意见稿的反馈意见和建议,对相关条文和文字进行修改等。

本标准由住房城乡建设部负责管理,由中国石油化工集团公司负责日常管理,由中国石化工程建设有限公司负责具体技术内

容的解释。本标准在执行过程中如有意见和建议,请寄送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标准》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。

本标准主编单位、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 元少昀

武铜柱 杨良瑾 孙毅 厉亚宁 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 邱正华 葛学礼 李小军 刘晶波

赵勇 黄左坚 张迎恺 李立昌 刘福录

杨铁荣 李艳明 李绍明 段新群 周蓉

付春辉 曹宝刚 李涛

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	设备抗震重要度分类	(6)
3.2	地震影响	(6)
3.3	设备体系设计	(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	(15)
4.6	载荷组合	(16)
4.7	抗震验算	(16)
5	卧式设备	(19)
5.1	一般规定	(19)
5.2	地震作用和抗震验算	(19)
5.3	抗震构造措施	(20)
6	支腿式直立设备	(21)
6.1	一般规定	(21)
6.2	自振周期	(21)
6.3	地震作用和抗震验算	(23)
6.4	抗震构造措施	(23)

7	支耳式直立设备	(24)
7.1	一般规定	(24)
7.2	自振周期	(24)
7.3	地震作用和抗震验算	(25)
7.4	抗震构造措施	(25)
8	裙座式直立设备	(26)
8.1	一般规定	(26)
8.2	自振周期	(26)
8.3	地震作用和抗震验算	(28)
8.4	抗震构造措施	(29)
9	球形储罐	(30)
9.1	一般规定	(30)
9.2	自振周期	(30)
9.3	地震作用和抗震验算	(33)
9.4	抗震构造措施	(34)
10	立式圆筒形储罐	(35)
10.1	一般规定	(35)
10.2	自振周期	(35)
10.3	水平地震作用及效应	(36)
10.4	罐壁竖向稳定许用临界应力	(37)
10.5	罐壁的抗震验算	(37)
10.6	液面晃动波高	(40)
10.7	抗震构造措施	(40)
11	加热炉	(41)
11.1	一般规定	(41)
11.2	自振周期	(41)
11.3	地震作用和抗震验算	(47)
11.4	抗震构造措施	(48)
附录 A	构架上设备的地震作用	(52)

附录 B 支腿式直立设备抗震验算	(55)
附录 C 支耳式直立设备抗震验算	(60)
附录 D 柔度矩阵元素	(63)
本标准用词说明	(66)
引用标准名录	(67)
附:条文说明	(69)

Contents

1	General provisions	(1)
2	Terms and symbols	(2)
2.1	Terms	(2)
2.2	Symbols	(3)
3	Basic requirements	(6)
3.1	Classification of importance factors	(6)
3.2	Seismic influences	(6)
3.3	Equipment system design	(7)
4	Seismic action and seismic checking	(9)
4.1	General requirements	(9)
4.2	Seismic design response spectral of above-ground equipment	(10)
4.3	Horizontal seismic action of above-ground equipment	(12)
4.4	Horizontal seismic action of on-framework equipment	(14)
4.5	Vertical seismic action	(15)
4.6	Combinations of loads	(16)
4.7	Seismic checking	(16)
5	Horizontal vessels	(19)
5.1	General requirements	(19)
5.2	Seismic action and seismic checking	(19)
5.3	Details of seismic design	(20)
6	Vertical vessels supported by legs	(21)
6.1	General requirements	(21)
6.2	Natural vibration period	(21)

6.3	Seismic action and seismic checking	(23)
6.4	Details of seismic design	(23)
7	Vertical vessels supported by lugs	(24)
7.1	General requirements	(24)
7.2	Natural vibration period	(24)
7.3	Seismic action and seismic checking	(25)
7.4	Details of seismic design	(25)
8	Vertical vessels supported by skirt	(26)
8.1	General requirements	(26)
8.2	Natural vibration period	(26)
8.3	Seismic action and seismic checking	(28)
8.4	Details of seismic design	(29)
9	Spherical tanks supported by legs	(30)
9.1	General requirements	(30)
9.2	Natural vibration period	(30)
9.3	Seismic action and seismic checking	(33)
9.4	Details of seismic design	(34)
10	Vertical cylindrical storage tanks	(35)
10.1	General requirements	(35)
10.2	Natural vibration period	(35)
10.3	Horizontal seismic action and seismic effect	(36)
10.4	Allowable compression longitudinal stresses of tank shell	(37)
10.5	Seismic checking of tank shell	(37)
10.6	Liquid sloshing height	(40)
10.7	Details of seismic design	(40)
11	Tubular heater	(41)
11.1	General requirements	(41)
11.2	Natural vibration period	(41)

11.3	Seismic action and seismic checking	(47)
11.4	Details of seismic design	(48)
Appendix A	Horizontal seismic action of on-framework equipment	(52)
Appendix B	Seismic checking of vertical vessels supported by legs	(55)
Appendix C	Seismic checking of vertical vessels supported by lugs	(60)
Appendix D	Calculation of flexible matrix element	(63)
	Explanation of wording in this standard	(66)
	List of quoted standards	(67)
	Addition; Explanation of provisions	(69)

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,制定本标准。

1.0.2 本标准适用于设计基本地震加速度不大于 $0.40g$,或抗震设防烈度 9 度及以下地区的石油化工卧式设备、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。

1.0.3 按本标准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设防地震影响时,设备本体、支撑构件和锚固结构不应损坏。

1.0.4 设计地震动参数或抗震设防烈度应按现行国家标准《中国地震动参数区划图》GB 18306 的有关规定确定;对完成地震安全性评价的工程场地,应按批准的设计地震动参数或抗震设防烈度进行抗震设防。

1.0.5 石油化工钢制设备的抗震设计,除应符合本标准外,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措施。

2.1.2 抗震设防烈度 seismic fortification 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 地震作用 seismic action

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。

2.1.4 地震作用效应 seismic effect

在地震作用下设备产生的内力或变形。

2.1.5 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。

2.1.6 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。

2.1.7 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。

2.1.8 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。

2.1.9 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。

2.1.10 抗震构造措施 details of seismic design

根据抗震概念设计原则,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。

2.1.11 设备本体 body

设备壳体或加热炉框架结构。

2.1.12 许用应力设计法 allowable stress design

按元件在设计载荷作用下截面中计算应力不超过材料许用应力为原则的设计方法。

2.1.13 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_h ——设备总水平地震作用设计值;

F_v ——设备底部总竖向地震作用设计值;

F_{hi} ——作用于质点 i 的水平地震作用设计值;

F_{hji} ——第 j 振型 i 质点的水平地震作用设计值;

F_{vi} ——设备质点 i 的竖向地震作用设计值;

F_{hk} ——构架上设备的水平地震作用设计值;

m_{eq} ——设备的等效总质量;

m_i 、 m_j ——分别为集中于质点 i 、 j 的质量;

m_{eqv} ——设备的竖向等效质量;

m_i ——集中于质点 i 的质量;

m_j ——集中于质点 j 的质量;

S_j ——由 j 振型水平地震作用产生的效应;

S_h ——水平地震作用效应；

X_{ji} ——第 j 振型 i 质点的水平相对位移。

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；

σ ——载荷组合作用下的应力值；

$[\sigma]$ ——材料的抗震许用应力；

$[\sigma]^t$ ——设计温度下材料的许用应力；

$[\sigma]_b$ ——材料的抗震许用拉应力；

$[\sigma]_{bc}$ ——材料的抗震许用压应力；

τ ——载荷组合作用下的剪应力值；

$[\tau]$ ——材料的抗震许用剪应力；

$[\tau]_b$ ——材料的抗震许用剪应力。

2.2.3 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_j ——对应于设备第 j 振型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；

$\alpha_{v\max}$ ——竖向地震影响系数最大值；

ϕ ——焊接接头系数；

K_L ——抗震许用应力调整系数；

K_m ——构架上设备的地震作用放大系数；

ζ ——设备的阻尼比；

η ——设备抗震重要度系数；

R_E ——设备地震作用调整系数；

η_1 ——直线下降段的下降斜率调整系数；

η_2 ——阻尼调整系数；

γ ——曲线下降段的衰减指数；

γ_j ——第 j 振型的振型参与系数；

δ ——弯曲变形影响指数；

λ_m —— 等效质量系数；

k —— 计算系数。

2.2.4 其他：

h_i, h_j —— 分别为质点 i 、 j 的计算高度；

T, T_1 —— 设备或结构的基本自振周期；

T_g —— 特征周期；

n —— 质点数；

λ —— 长细比；

λ_c —— 临界长细比；

l_k —— 计算长度；

\bar{i} —— 惯性半径；

δ_e —— 截面有效厚度。

3 基本规定

3.1 设备抗震重要度分类

3.1.1 抗震设计时,设备抗震重要度应按设备用途和地震破坏后的危害程度分为以下四类:

1 第一类,除第二、三、四类以外的设备。

2 第二类,包括特种设备安全技术规范《固定式压力容器安全技术监察规程》TSG 21 中的第 II 类压力容器,按现行行业标准《立式圆筒形钢制焊接储罐安全技术规范》AQ 3053 划分为第 II 类的储罐,以及加热炉和高度为 20m~80m 的直立设备。

3 第三类,包括特种设备安全技术规范《固定式压力容器安全技术监察规程》TSG 21 中的第 III 类压力容器,按现行行业标准《立式圆筒形钢制焊接储罐安全技术规范》AQ 3053 划分为第 III 类的储罐和高度大于 80m 的裙座式直立设备。

4 第四类,消防用途的设备。

3.1.2 抗震计算时,设备抗震重要度系数应根据设备抗震重要度类别按表 3.1.2 选用。

表 3.1.2 重要度系数

设备抗震重要度类别	第一类	第二类	第三类	第四类
重要度系数 η	0.90	1.00	1.10	1.20

3.2 地震影响

3.2.1 设备所在地区遭受的地震影响,除加热炉外,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征。

3.2.2 设计基本地震加速度与抗震设防烈度的对应关系见

表 3.2.2。

表 3.2.2 设计基本地震加速度与抗震设防烈度的对应关系

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

注: g 为重力加速度。

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。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(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 设备体系设计

3.3.1 设备体系应满足下列要求:

- 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 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;
- 5 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;

6 高径比大于 10 或高度大于 10m 的裙座式直立设备,宜采用带螺栓座的结构形式;

7 与设备连接的外部管线,在地震过程中应能适应管线与设备连接点的位移。

3.3.2 附属构件材料应符合下列规定:

1 材料的屈服强度与抗拉强度的比值不应大于 0.85;

2 支承构件的材料,其延伸率不应小于 15%;

3 需要焊接的材料,应具有良好的焊接性和满足设计要求的冲击韧性;

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 设计基本地震加速度为 $0.20g \sim 0.40g$ ，或抗震设防烈度为 8 度、9 度时，对直径大于 $4m$ ，且两支座间距大于 $20m$ 的卧式设备，以及高度大于 $20m$ 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 安装在构架上的设备，应计入设备所在构架的地震放大作用。

4.1.2 当设计基本地震加速度等于 $0.05g$ ，或抗震设防烈度为 6 度时，对第一类和第二类设备可不进行设备的地震作用计算，但应满足抗震措施要求。

4.1.3 设备的地震作用计算，宜采用下列方法：

1 下列设备可采用底部剪力法：

1) 高度小于或等于 $10m$ 的直立设备；

2) 高径比小于 5，且质量和刚度沿高度分布比较均匀的直立设备；

3) 可简化为单质点体系的设备。

2 除本条第 1 款外的设备，宜采用振型分解反应谱法。

3 当设计基本地震加速度大于或等于 $0.30g$ 时，高度大于 $120m$ ，且高径比大于 25 的直立设备和 $15 \times 10^4 m^3$ 以上的立式圆筒形储罐，宜采用时程分析法进行补充计算。

4.1.4 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不少于两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,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,加速度时程的最大值可按表 4.1.4 采用。

表 4.1.4 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	0.40g
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

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%。

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计基本地震加速度、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本标准表 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 设备的地震影响系数曲线(图 4.2.2)的阻尼调整系数和形状参数,应符合下列规定:

1 地震影响系数曲线的形状分以下几部分:

- 1) 直线上升段, 自振周期小于 0.1s 的区段;
- 2) 水平段, 自振周期自 0.1s 至特征周期区段;
- 3) 曲线下降段, 自振周期自特征周期至 5 倍特征周期区段;
- 4) 直线下降段, 自振周期自 5 倍特征周期至 15s 区段。

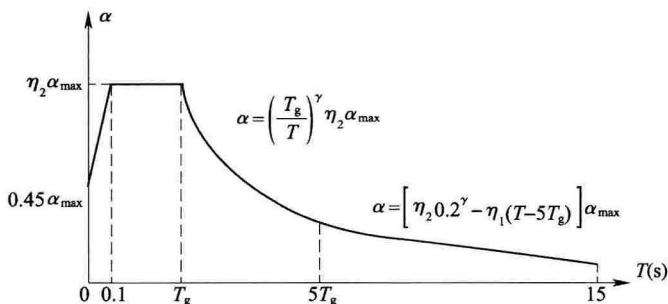


图 4.2.2 地震影响系数曲线

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

2 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。

3 直线下降段的下降斜率调整系数应按下式确定:

$$\eta_1 = \frac{\eta_2 0.2^\gamma - 0.03}{14} \quad (4.2.2-2)$$

式中: η_1 ——直线下降段的下降斜率调整系数, 小于 0 时取 0。

4 阻尼调整系数应按下式确定:

$$\eta_2 = 1 + \frac{0.05 - \zeta}{0.08 + 1.6\zeta} \quad (4.2.2-3)$$

式中： η_2 ——阻尼调整系数，小于 0.55 时取 0.55。

5 当水平地震影响系数的计算值小于 $0.05\eta_2\alpha_{\max}$ 时取 $0.05\eta_2\alpha_{\max}$ 。

4.3 地面设备水平地震作用

4.3.1 当采用底部剪力法时，设备总水平地震作用设计值（图 4.3.1）应按下列公式计算：

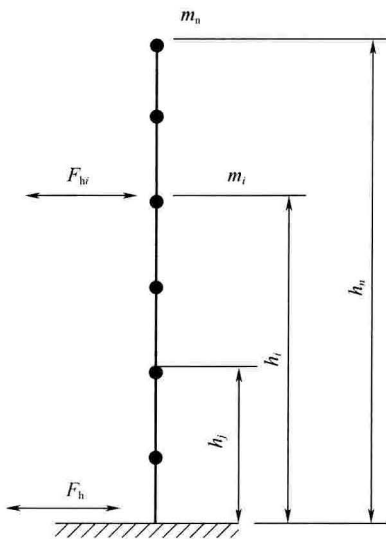


图 4.3.1 设备总水平地震作用计算

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

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

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

式中： F_h ——设备总水平地震作用设计值(N)；
 η ——设备抗震重要度系数，按本标准表 3.1.2 选用；
 R_E ——设备地震作用调整系数，按本标准表 4.3.1-1 选用；
 α_1 ——相应于设备基本自振周期的水平地震影响系数，按本标准第 4.2 节的规定确定；
 m_{eq} ——设备的等效总质量(kg)；
 λ_m ——等效质量系数，单质点取 1，多质点体系取 0.85；
 m_i, m_j ——分别为集中于质点 i, j 的质量(kg)；
 F_{hi} ——作用于质点 i 的水平地震作用设计值(N)；
 h_i, h_j ——分别为质点 i, j 的计算高度(mm)；
 δ ——弯曲变形影响指数，按表 4.3.1-2 选用；
 n ——质点数。

表 4.3.1-1 水平地震作用调整系数

设备类型	R_E
卧式设备	0.45
支腿式直立设备	0.45
支耳式直立设备	0.45
裙座式直立设备	0.45
球形储罐	0.45
立式圆筒形储罐	0.40

表 4.3.1-2 弯曲变形影响指数

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

4.3.2 采用振型分解反应谱法时，设备的地震作用设计值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设计值，应按下列公式确定：

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

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

式中： F_{bj} ——第 j 振型 i 质点的水平地震作用设计值(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，按本标准第 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。

2 水平地震作用效应应按式确定：

$$S_h = \sqrt{\sum S_j^2} \quad (4.3.2-3)$$

式中： S_h ——水平地震作用效应；

S_j ——由 j 振型水平地震作用产生的效应，取前 2 阶~3 阶振型，当基本自振周期大于 1.5s 时，振型数不少于 3 阶。

4.4 构架上设备水平地震作用

4.4.1 构架与设备的质量比大于或等于 2 时，设备的水平地震作用宜按本节规定计算。

4.4.2 安装在构架上设备的水平地震作用设计值可按下式计算：

$$F_{hk} = K_m \eta R_E \alpha_1 m_{eq} g \quad (4.4.2)$$

式中： F_{hk} ——构架上设备的水平地震作用设计值(N)；

K_m ——构架上设备的地震作用放大系数，按表 4.4.2 选用。

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 当已知构架结构参数时，安装在构架上设备的水平地震作用设计值可按本标准附录 A 的规定计算。

4.5 竖向地震作用

4.5.1 直立式设备的竖向地震作用设计值(图 4.5.1),应按下列规定计算:

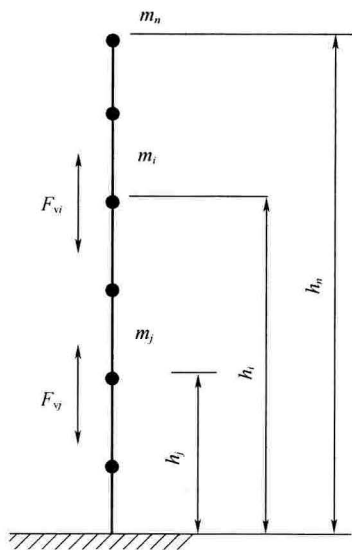


图 4.5.1 设备竖向地震作用计算

1 设备底部总竖向地震作用设计值应按下式计算:

$$F_v = \eta R_E \alpha_{vmax} m_{eqv} g \quad (4.5.1-1)$$

式中: F_v ——设备底部总竖向地震作用设计值(N)。

α_{vmax} ——竖向地震影响系数最大值,取水平地震影响系数最大值的 65%;

m_{eqv} ——设备的竖向等效质量(kg),取设备总质量的 75%。

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 的竖向地震作用设计值(N)。

4.5.2 卧式设备的竖向地震作用设计值,当设计基本地震加速度为 $0.20g$ 、 $0.30g$ 和 $0.40g$ 时,可分别取该设备总重力荷载的 10% 、 15% 和 20% 。

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,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,应按下列原则进行组合:

1 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;

2 压力载荷,包括内压、外压或最大压差;

3 液柱静压力;

4 水平风载荷作用,对直立设备和球形储罐,水平风载荷组合系数取 0.25 ,其他设备取 0 ;

5 水平、竖向地震作用设计值;

6 雪载荷,考虑组合系数 0.5 ,高温部位以及设备承载面较小时取 0 ;

7 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;

8 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 采用极限状态设计法时,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 采用许用应力设计法时,应按下列规定进行抗震验算:

1 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列公式的要求:

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

$$\tau \leq [\tau] \quad (4.7.2-2)$$

式中: σ —— 载荷组合作用下的应力值(MPa);

ϕ —— 焊接接头系数,受压时取 1.0;

$[\sigma]$ —— 材料的抗震许用应力(MPa);

τ —— 载荷组合作用下的剪应力值(MPa);

$[\tau]$ —— 材料的抗震许用剪应力(MPa)。

2 设备抗震验算的许用应力,应按下列规定确定:

1) 设备本体及支承构件可按下式计算:

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

式中: $[\sigma]$ —— 材料的抗震许用应力(MPa);

K_L —— 抗震许用应力调整系数,设备本体取 1.2,支承构件取 1.33;

$[\sigma]^t$ —— 设计温度下材料的许用应力(MPa)。

2) 锚栓可按下列公式计算:

$$\text{碳素钢} \quad [\sigma]_b = 0.75R_{eL} \quad (4.7.2-4)$$

$$\text{低合金钢} \quad [\sigma]_b = 0.6R_{eL} \quad (4.7.2-5)$$

$$\text{碳素钢、低合金钢} \quad [\tau]_b = 0.8[\sigma]_b \quad (4.7.2-6)$$

式中: $[\sigma]_b$ —— 材料的抗震许用拉应力(MPa);

R_{eL} —— 材料屈服强度(MPa);

$[\tau]_b$ —— 材料的抗震许用剪应力(MPa)。

3) 锚固附件可按下式计算:

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

式中: K_L —— 抗震许用应力调整系数,可取 1.33;

$[\sigma]^t$ —— 设计温度下材料的许用应力(MPa)。

4) 锚固附件及支承构件的许用压应力,可按下列规定计算:
当 $\lambda \leq \lambda_c$ 时:

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

当 $\lambda > \lambda_c$ 时:

$$[\sigma]_{bc} = \frac{0.2777}{\left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^2} [\sigma]^t \quad (4.7.2-9)$$

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

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

式中: λ ——长细比;

λ_c ——临界长细比;

$[\sigma]_{bc}$ ——材料的抗震许用压应力(MPa);

k ——计算系数,按表 4.7.2 取值;

l_k ——计算长度(mm);

i ——惯性半径(mm),对长方形截面取 $0.289\delta_c$, 其中 δ_c 为截面有效厚度;

E^t ——设计温度下材料的弹性模量(MPa)。

表 4.7.2 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

5) 支承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: K_L ——抗震许用应力调整系数,取 1.2;

$[\sigma]^t$ ——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。

5 卧式设备

5.1 一般规定

5.1.1 卧式设备的抗震设计应符合本章规定。

5.1.2 卧式设备的基本自振周期可取 0.10s; 当多台重叠时, 基本自振周期可取 0.15s。

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, 地震影响系数可按本标准第 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, 应按本标准第 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, 可按本标准第 4.4 节的规定分别计算轴向、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,

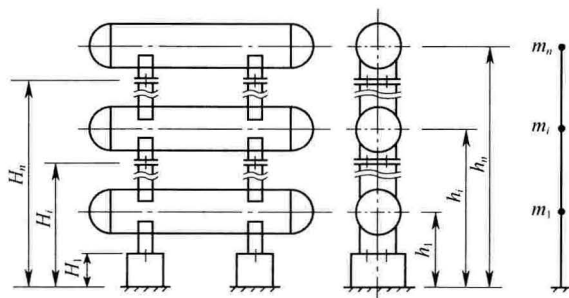


图 5.2.4 重叠式卧式设备计算

H_1 、 H_i 、 H_n 分别为设备支座底板距地面或构架表面高度;

h_1 、 h_i 、 h_n 分别为设备质心距地面或构架表面高度;

m_1 、 m_i 、 m_n 分别为设备集中于质点 1、 i 、 n 的质量

可按本标准第 4.3 节计算,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,可按本标准第 4.4 节计算。

5.2.5 卧式设备的本体、支座、地脚螺栓等应进行抗震验算,并应符合本标准第 4.7 节的规定。

5.3 抗震构造措施

5.3.1 设备每个支座的地脚螺栓数量不应少于 2 个,螺栓直径不宜小于 M16,螺母应设有防松动措施。

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。

5.3.3 抗震设防烈度大于或等于 7 度时,支座应与设备本体进行焊接。

6 支腿式直立设备

6.1 一般规定

6.1.1 高度 H 不大于 10m(含支腿高度),且高径比不大于 5 的支腿式直立设备的抗震设计(图 6.1.1)应符合本章规定。

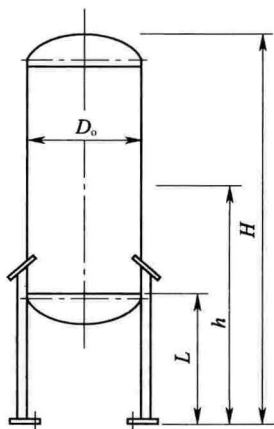


图 6.1.1 支腿式直立设备

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),且支腿高度低于 0.5m 的支腿式直立设备,当抗震设防烈度为 6 度或 7 度时,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 支腿式直立设备的基本自振周期可按下式计算:

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

式中: T_1 ——设备的基本自振周期(s);

m_c ——设备的质量(kg);

K ——支承结构的侧移刚度(N/mm),按本标准第 6.2.2 条计算。

6.2.2 支腿式直立设备支承结构的侧移刚度,应按下列公式计算:

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

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

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

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

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

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);

A_z ——单根支腿的横截面面积(mm²);

D_b ——支腿中心圆直径(mm);

L ——支腿的高度(mm);

G ——支腿材料的弹性剪变模量(MPa);

I_1 ——单根支腿的切向水平截面惯性矩(mm⁴);

I_2 ——单根支腿的径向水平截面惯性矩(mm^4)；

h ——基础顶面至设备质心的高度(mm)。

6.3 地震作用和抗震验算

6.3.1 支腿式直立设备的水平地震作用计算,地震影响系数应符合本标准第 4.2 节设防地震的规定。

6.3.2 安装在地面上的支腿式直立设备的地震作用,应按本标准第 4.3.1 条计算;安装在构架上的支腿式直立设备的地震作用,应按本标准第 4.4 节的规定计算。

6.3.3 支腿式直立设备的阻尼比可取 0.05。

6.3.4 支腿式直立设备壳体、支腿、支腿与筒体连接焊缝、地脚螺栓等的抗震验算,应符合本标准第 4.7 节的规定。

6.3.5 支腿式直立设备的抗震验算方法可按本标准附录 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,设防烈度为 8 度、9 度,设备直径大于 800mm 时,支腿数量不宜少于 4 个。

6.4.2 每个支腿均应设置地脚螺栓,螺栓直径不宜小于 M16,螺母应设有防松动措施。

7 支耳式直立设备

7.1 一般规定

7.1.1 支耳式直立设备的抗震设计(图 7.1.1)应符合本章规定。

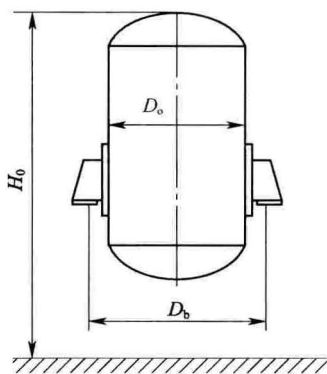


图 7.1.1 支耳式直立设备

7.1.2 对于直径小于 2m、切线长度小于 5m 的支耳式直立设备，当抗震设防烈度为 6 度或 7 度时，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 支耳式直立设备的基本自振周期，可按下式计算：

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

式中： T_1 ——支耳式直立设备的基本自振周期(s)；

H_0 ——设备顶部到地面的距离(mm)；

D_0 。——设备外直径(mm)。

7.2.2 当切线长度小于 3m 时, T_1 可取 0.3s。

7.3 地震作用和抗震验算

7.3.1 支耳式直立设备的水平地震作用计算,地震影响系数应符合本标准第 4.2 节设防地震的规定。

7.3.2 支耳式直立设备的水平地震作用,应按本标准第 4.3.1 条计算。

7.3.3 支耳式直立设备的阻尼比可取 0.03。

7.3.4 支耳式直立设备壳体、支耳、支耳与筒体连接焊缝、地脚螺栓等的抗震验算,应符合本标准第 4.7 节的规定。

7.3.5 支耳式直立设备的抗震验算方法可按本标准附录 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。

7.4.2 支耳数量不宜少于 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。

7.4.3 每个支耳均应设置地脚螺栓,螺母应设有防松动措施。

8 裙座式直立设备

8.1 一般规定

8.1.1 裙座式直立设备的抗震设计应符合本章规定。

8.1.2 高度大于 20m,设计基本地震加速度大于或等于 0.20g 或抗震设防烈度为 8 度、9 度时,应计入竖向地震作用的影响。

8.2 自振周期

8.2.1 裙座式直立设备可简化为多质点体系,计算自振周期。

8.2.2 等直径、等厚度的安装在地面基础上的裙座式直立设备,其基本自振周期可按下式计算:

$$T_1 = 90.33H \sqrt{\frac{m_0 H}{E^1 D_i^3 \delta_e}} \times 10^{-3} \quad (8.2.2)$$

式中: T_1 ——设备的基本自振周期(s);

H ——从基础顶面到设备顶部的高度(mm);

m_0 ——设备的总质量(kg);

E^1 ——材料的弹性模量(MPa);

D_i ——设备圆筒体的内直径(mm);

δ_e ——设备筒体的有效厚度(mm)。

8.2.3 不等直径或不等厚度的落地式直立设备,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 8.2.3),其基本自振周期可按下列公式计算:

$$T_1 = 114.8 \sqrt{\sum_{i=1}^n m_i \left(\frac{h_i}{H}\right)^3 \left(\sum_{i=1}^n \frac{H_i^3}{E_i^1 I_i} - \sum_{i=2}^n \frac{H_i^3}{E_{i-1}^1 I_{i-1}}\right)} \times 10^{-3} \quad (8.2.3-1)$$

$$\text{圆筒段:} \quad I_i = \frac{\pi}{8} (D_i + \delta_{ei})^3 \delta_{ei} \quad (8.2.3-2)$$

$$\text{圆锥段:} \quad I_i = \frac{\pi D_{ie}^2 D_{if}^2 \delta_{ei}}{4(D_{ie} + D_{if})} \quad (8.2.3-3)$$

式中: T_1 ——设备的基本自振周期(s);

m_i ——设备第 i 计算段的质量(kg);

h_i ——第 i 段设备质量距基础底板顶面的高度(mm);

H ——从基础底板顶面至设备顶面的总高度(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 $i-1$ 段壳体材料的弹性模量(MPa);

I_i, I_{i-1} ——第 i 段、第 $i-1$ 段壳体的截面惯性矩(mm^4);

D_i ——第 i 段圆筒体的内直径(mm);

δ_{ei} ——各计算截面的圆筒或锥壳的有效厚度(mm);

D_{ie} ——锥壳大端内直径(mm);

D_{if} ——锥壳小端内直径(mm)。

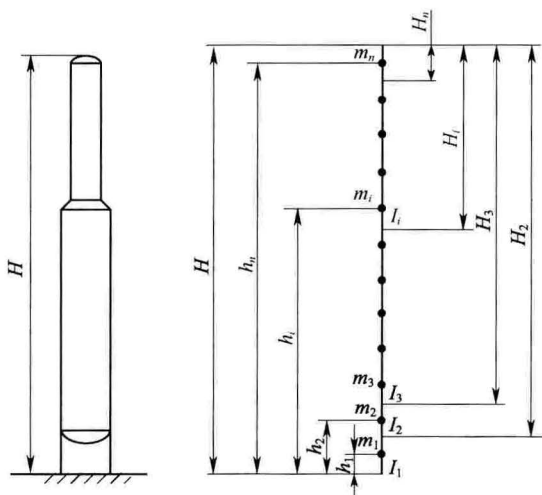


图 8.2.3 裙座式直立设备多质点体系计算

8.2.4 安装在构架上的裙座式直立设备,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,设备的自振周期可采用振型分解法计算。

2 高径比小于或等于 5,且壁厚小于或等于 30mm 的裙座式直立设备,其基本自振周期可按本标准公式(7.2.1)近似计算。

8.3 地震作用和抗震验算

8.3.1 裙座式直立设备的水平地震影响系数应符合本标准第 4.2 节的规定,最大值应按本标准表 4.2.1 设防地震取值。

8.3.2 裙座式直立设备的水平地震作用计算应符合本标准第 4.3 节的规定。

8.3.3 高度小于或等于 10m 或高径比小于或等于 5 的裙座式直立设备,可采用底部剪力法进行水平地震作用计算,其地震影响系数可取设防地震的水平地震影响系数的最大值。

8.3.4 高度大于 10m 且高径比大于 5 的裙座式直立设备,可采用振型分解法进行计算。

8.3.5 裙座式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:

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

3 当设备的基本自振周期大于 2.0s 时,可取 0.01。

8.3.6 裙座式直立设备的竖向地震作用,应按本标准第 4.5 节的规定计算。

8.3.7 裙座式直立设备的壳体、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、地脚螺栓等应进行抗震验算,并应符合本标准第 4.7 节的规定。

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 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。
- 8.4.3 设备的内部承重构件应与壳体牢固连接。
- 8.4.4 设备的高径比大于 5,且抗震设防烈度大于 7 度时,设备筒体与裙座不宜采用搭接连接。
- 8.4.5 设备的直径大于或等于 800mm 时,地脚螺栓不应小于 M24,其数量不宜少于 8 个,螺母应设有防松动措施。

9 球形储罐

9.1 一般规定

9.1.1 赤道正切或相割以支柱支撑的可调式和固定式拉杆结构的球形储罐(以下简称球罐)的抗震设计应符合本章规定。

9.1.2 球罐地震作用计算应计入储液的影响。

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:

$$m_{\text{eq}} = m_1 + m_2 + m_5 + 0.5m_6 + m_7 \quad (9.2.1-1)$$

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

式中: m_{eq} ——球罐在操作状态下的等效质量(kg);

m_1 ——球壳质量(kg);

m_2 ——储液的有效质量(kg);

m_5 ——球罐保温层的质量(kg);

m_6 ——支柱和拉杆的质量(kg);

m_7 ——附件质量(kg),包括人孔、接管、液位计、内件、喷淋装置、安全阀、梯子平台等;

m_L ——球罐储液质量(kg);

φ ——储液的有效质量系数,根据球罐内液体充满度按图 9.2.1 选取。

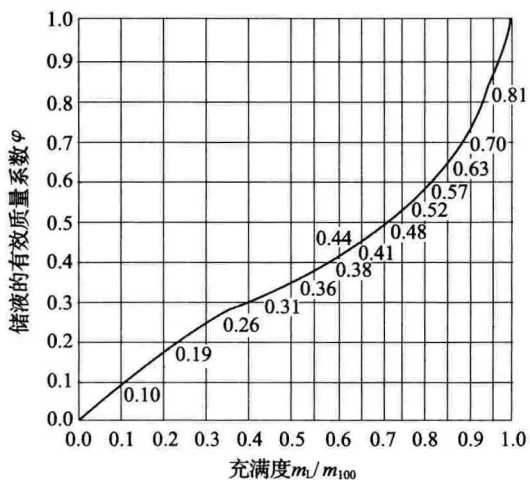


图 9.2.1 储液的有效质量系数

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:

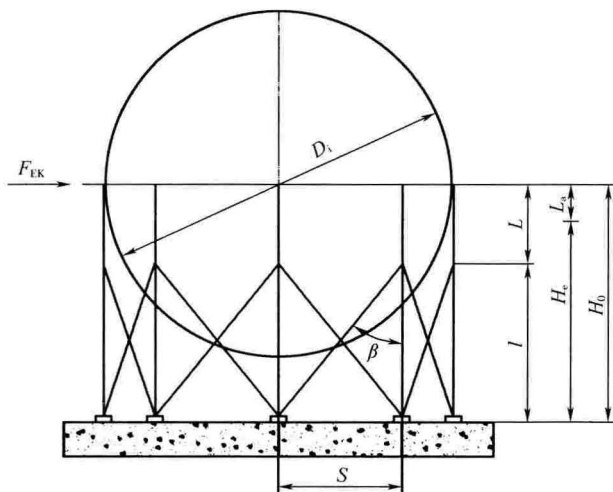


图 9.2.2 球罐构架

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

$$K_1 = \frac{3nE_sAD_b^2}{8H_0^3} \quad (9.2.2-2)$$

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

$$K_c = \frac{3E_sI}{H_c^3} \quad (9.2.2-4)$$

$$A' = \frac{1}{\frac{C_3}{A_T \sin^3 \beta} + \frac{C_4 \cot^3 \beta}{A}} \quad (9.2.2-5)$$

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

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

$$\lambda_c = \frac{l}{H_c} \quad (9.2.2-8)$$

$$H_c = H_0 - L_a \quad (9.2.2-9)$$

$$L_a = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{d_o D_i}{2}} \quad (9.2.2-10)$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{S}{l} \quad (9.2.2-11)$$

- 式中：
- K —— 球罐构架的侧移刚度(N/mm)；
 - K_1 —— 球罐构架的弯曲刚度(N/mm)；
 - K_2 —— 球罐构架的剪切刚度(N/mm)；
 - n —— 支柱根数；
 - E_s —— 支柱材料的室温弹性模量(MPa)；
 - A —— 单根支柱的横截面面积(mm²)；
 - D_b —— 支柱中心圆直径(mm)；
 - H_0 —— 支柱底板底面至球壳中心的高度(mm)；
 - S —— 相邻支柱之间的距离(mm)；

- I ——单根支柱横截面的惯性矩(mm^4)；
 H_e ——支柱的有效高度(mm)；
 A_T ——拉杆的有效截面积(mm^2)；
 β ——拉杆和支柱间的夹角($^\circ$)；
 l ——支柱底板底面至上支耳销子中心的距离(mm)；
 L_a ——支柱和球壳之间焊缝长度的 $1/2$ (mm)；
 d_o ——支柱外直径(mm)；
 D_i ——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, 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标准第 4.2 节设防地震的规定采用。

9.3.2 球罐的水平地震作用可按本标准第 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式计算：

$$M = F_{EK}L \quad (9.3.4)$$

式中： M ——水平地震作用在上段支柱产生的总弯矩($\text{N} \cdot \text{mm}$)；

F_{EK} ——球罐所受的水平地震作用设计值(N)；

L ——球壳赤道平面至上支耳销子中心的距离(mm)。

9.3.5 支柱、支柱与球壳连接焊缝、拉杆及拉杆附件、支柱底板及地脚螺栓等的抗震验算,应符合本标准第 4.7 节的规定。

9.4 抗震构造措施

9.4.1 球罐支柱的地脚螺栓直径不应小于 M24,螺母应设有防松动措施。

9.4.2 球罐壳体与支柱、支柱与耳板、拉杆和翼板、支柱与底板之间的连接焊缝应为较薄件等强度焊缝,焊缝应饱满,不应有表面缺陷。

9.4.3 拉杆松紧应适度,各拉杆松紧度应大体相同,拉杆交叉处不应焊死。

10 立式圆筒形储罐

10.1 一般规定

10.1.1 罐壁高径比不大于 1.6,且公称容积大于或等于 100m^3 的立式圆筒形钢制焊接平底储罐(以下简称储罐)的抗震设计应符合本章规定。

10.1.2 固定顶储罐的储液上表面与顶盖之间空间应小于储罐公称容积的 4%。

10.1.3 储罐的地震作用计算应计入储液的影响。

10.2 自振周期

10.2.1 储罐的罐液耦联振动基本自振周期可按式计算:

$$T_1 = K_c H_w \sqrt{\frac{R}{\delta_{1/3}}} \times 10^{-3} \quad (10.2.1)$$

式中: T_1 ——储罐的罐液耦联振动的基本自振周期(s);

K_c ——罐液耦联振动周期系数,由表 10.2.1 查取,中间值可采用插入法计算;

H_w ——储罐设计最高液位(mm);

R ——储罐的内半径(mm);

$\delta_{1/3}$ ——罐壁距离底板 1/3 高度处的名义厚度扣除钢板厚度负偏差或实际厚度(mm)。

表 10.2.1 罐液耦联振动周期系数 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}

续表 10.2.1

D/H_w	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
K_e	0.537×10^{-3}	0.58×10^{-3}	0.62×10^{-3}	0.681×10^{-3}	0.736×10^{-3}	0.791×10^{-3}

注: D 为储罐的内直径(mm)。

10.2.2 储液晃动基本自振周期可按式计算:

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

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应按下列公式计算:

$$F_{bg} = \eta R_E \alpha_1 Y_1 m_{eq} g \quad (10.3.1-1)$$

$$m_{eq} = m_L \varphi \quad (10.3.1-2)$$

式中: F_{bg} —— 储罐的水平地震作用设计值(N);

R_E —— 地震作用调整系数,按本标准表 4.3.1-1 确定;

α_1 —— 水平地震影响系数,根据 T_1 和储罐的阻尼比,按本标准第 4.2 节的规定确定;

Y_1 —— 罐体影响系数,取 1.1;

m_{eq} —— 储罐的等效质量(kg);

m_L —— 储液质量(kg);

φ —— 动液系数,按本标准第 10.3.3 条计算。

10.3.2 储罐的阻尼比可取 0.05,储液晃动时的阻尼比取 0.005。

10.3.3 动液系数应按下列公式计算:

1 储液最高设计液位(H_w)与储罐的内半径(R)之比小于或等于 1.5 时:

$$\varphi = \frac{\text{th}\left(\sqrt{3} \frac{R}{H_w}\right)}{\frac{\sqrt{3}R}{H_w}} \quad (10.3.3-1)$$

式中:th——双曲正切函数。

2 储液最高设计液位(H_w)与储罐的内半径(R)之比大于1.5时:

$$\varphi = 1 - 0.4375 \frac{R}{H_w} \quad (10.3.3-2)$$

10.3.4 水平地震作用下储罐底面的倾覆力矩应按下列公式计算:

$$M_g = 0.45 F_{bg} H_w \quad (10.3.4)$$

式中: M_g ——水平地震作用下储罐底面的倾覆力矩(N·mm)。

10.4 罐壁竖向稳定许用临界应力

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

$$\sigma_{cr} = \kappa_c E \frac{\delta_{el}}{D_1} \quad (10.4.1-1)$$

$$\kappa_c = 0.13725 \left(1 + 0.0429 \sqrt{\frac{H}{\delta_{el}}} \right) \left(1 - 0.1706 \frac{D_1}{H} \right) \quad (10.4.1-2)$$

式中: σ_{cr} ——第一圈罐壁竖向稳定临界应力(MPa);

κ_c ——临界应力系数;

E ——罐壁材料在设计温度下的弹性模量(MPa);

δ_{el} ——第一圈罐壁的有效厚度(mm);

D_1 ——第一圈罐壁的平均直径(mm);

H ——罐壁的总高度(mm)。

10.4.2 第一圈罐壁的的稳定许用临界应力应按下列公式计算:

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

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 罐壁底部圆周方向单位长度上的提高力应按下列公式计算:

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

式中: F_t ——罐壁底部圆周方向单位长度上的提高力(N/mm)。

10.5.2 罐壁底部圆周方向单位长度上的提高抵抗力,应按下列公式计算:

$$F_L = F_{L0} + \frac{N_1}{\pi D_1} \quad (10.5.2-1)$$

$$F_{L0} = 99\delta_{\text{ch}}\sqrt{R_{\text{cl}}H_w\rho_s} \times 10^{-6} \quad (10.5.2-2)$$

式中: F_L ——罐壁底部圆周方向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),当大于 $0.02 H_w D_1 \rho_s g \times 10^{-9}$ 时,取 $0.02 H_w D_1 \rho_s g \times 10^{-9}$, 并取罐内边缘板的宽度为 $0.035D$;

N_1 ——第一圈罐壁底部所承受的重力(N);

δ_{ch} ——罐底边缘板的有效厚度(mm);

R_{cl} ——罐底边缘板材料的屈服强度(MPa);

ρ_s ——储液密度(kg/m^3)。

10.5.3 当罐壁底部圆周方向单位长度上的提高力(F_t)大于2倍的提高抵抗力($2F_L$)时,应把储罐锚固在基础上。

10.5.4 锚固储罐应符合下列规定:

1 罐壁底部竖向压应力应按下列公式计算:

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

$$\sigma_c \leq [\sigma_{\text{cr}}] \quad (10.5.4-2)$$

式中: σ_c ——罐壁底部的竖向压应力(MPa);

C_v ——竖向地震力影响系数,对7度或8度地震区, C_v 取1.0,对9度地震, C_v 取1.45;

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

Z_1 ——第一圈罐壁的横截面抗弯截面模量(mm^3),取

$$0.785 D_1^2 \delta_{e1}。$$

2 地脚螺栓的拉应力应按下列公式计算：

$$\sigma_{bt} = \frac{1}{n A_{bt}} \left(\frac{4M_g}{D_r} - N_1 \right) \quad (10.5.4-3)$$

$$\sigma_{bt} \leq [\sigma]_{bt} \quad (10.5.4-4)$$

式中： σ_{bt} ——地脚螺栓的拉应力(MPa)，计算值小于0时，应为0；

n ——地脚螺栓的个数；

A_{bt} ——单个地脚螺栓的有效截面积(mm²)；

D_r ——地脚螺栓的中心圆直径(mm)；

$[\sigma]_{bt}$ ——地脚螺栓抗震许用应力(MPa)，取地脚螺栓材料标准屈服强度下限值的80%。

10.5.5 无锚固储罐的罐壁底部竖向压应力，应符合下列规定：

1 当罐壁底部圆周方向单位长度上的提离力(F_t)小于或等于提离反抗力(F_L)时，应按下式计算：

$$\sigma_c = C_v \frac{N_1}{A_1} + \frac{M_g}{Z_1} \quad (10.5.5-1)$$

2 当罐壁底部圆周方向单位长度上的提离力(F_t)大于提离反抗力(F_L)且小于或等于2倍的提离反抗力($2F_L$)时，应按下列公式计算：

$$\sigma_c = C_v \frac{N_1}{A_1} + C_L \frac{M_g}{Z_1} \quad (10.5.5-2)$$

$$C_L = 0.4 \left(\frac{F_t}{F_L} \right)^2 - 0.7 \left(\frac{F_t}{F_L} \right) + 1.3 \quad (10.5.5-3)$$

式中： C_L ——罐底提离影响系数。

3 罐壁底部竖向压应力应满足下式的要求：

$$\sigma_c \leq [\sigma_{cr}] \quad (10.5.5-4)$$

4 当罐壁底部竖向压应力(σ_c)大于稳定许用临界应力($[\sigma_{cr}]$)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款的计算，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)加大罐底边缘板的厚度;
- 4)把储罐锚固在基础上。

10.5.6 根据本节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,逐圈通过抗震验算确定其壁厚。

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:

$$h_v = \bar{\eta} K_v \alpha_v R \quad (10.6.1-1)$$

$$K_v = 3.03629 - 0.67886 \times T_w + 0.06602 \times T_w^2 - 0.00197 \times T_w^3 \quad (10.6.1-2)$$

式中: h_v ——罐内液面晃动波高(mm);

$\bar{\eta}$ ——罐型系数,浮顶和内浮顶储罐取 0.85,固定顶储罐取 1.0;

K_v ——调整系数;

α_v ——水平地震影响系数,应根据 T_w 和储液晃动阻尼比,按本标准第 4.2 节设防地震确定。

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;对固定顶罐,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 采用螺栓锚固的储罐,直径小于 15m 时,螺栓间距不得大于 2m;储罐直径大于或等于 15m 时,螺栓间距不得大于 3m。螺栓的直径不应小于 M24,螺母应设有防松动措施。

11 加 热 炉

11.1 一 般 规 定

11.1.1 除乙烯裂解炉外,管式加热炉、辅助燃烧室、硫黄装置加热炉,以及余热回收系统集成烟风道和烟囱的抗震设计应符合本章规定。

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 卧式加热炉可仅计算炉体横向的水平地震作用,并进行抗震验算;

3 对于落地烟囱,当设计基本地震加速度值为 $0.20g \sim 0.40g$ 或抗震设防烈度为 8 度、9 度时,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组合,并进行抗震验算;

4 包括炉顶烟囱高度大于 30m 的加热炉,当设计基本地震加速度值为 $0.4g$ 或抗震设防烈度为 9 度时,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组合,进行抗震验算。

11.2 自 振 周 期

11.2.1 加热炉可简化为多质点结构体系,当采用矩阵迭代法计算自振周期时,柔度矩阵元素可按本标准附录 D 的规定计算。

11.2.2 高度 H 小于或等于 35m 的圆筒炉,其基本自振周期可按下列规定确定:

1 纯辐射型圆筒炉(图 11.2.2-1)可按下列式计算:

$$T_1 = 0.0268 + 0.0444 \frac{H_a}{\sqrt{D_2}} \quad (11.2.2-1)$$

式中： T_1 ——基本自振周期(s)；

H_a ——炉底柱、筒体、锥段高度之和(m)；

D_2 ——辐射室筒体外径(m)。

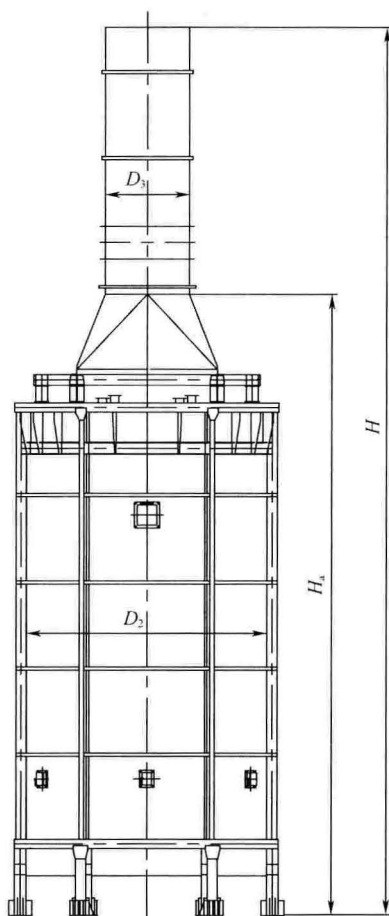


图 11.2.2-1 纯辐射型圆筒炉

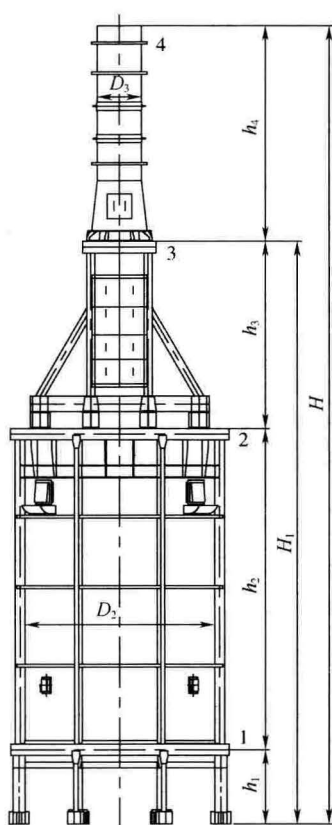
2 辐射对流型圆筒炉(图 11.2.2-2)可按下列式计算:

$$T_1 = 0.2505 + 0.976 \times 10^{-3} \left(\frac{H_1^2}{D_2} + \frac{h_4^2}{D_3} \right) \quad (11.2.2-2)$$

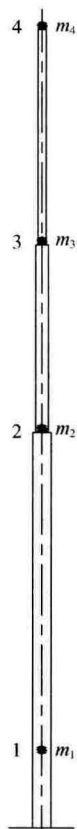
式中: H_1 —— 炉底柱、辐射室、对流室高度之和(m);

h_4 —— 烟囱高度(m);

D_3 —— 烟囱外径(m)。



(a) 炉体



(b) 计算简图

图 11.2.2-2 辐射对流型圆筒炉

11.2.3 高度 H 小于或等于 40m 的箱式加热炉(图 11.2.3-1 和图 11.2.3-2),基本自振周期可按式计算:

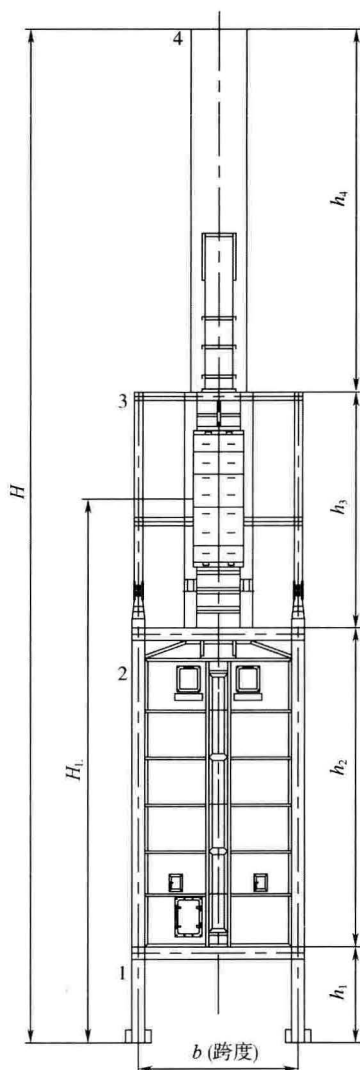


图 11.2.3-1 箱式炉

$$T_1 = 0.2749 + 0.02924 \frac{H_L}{\sqrt[3]{b}} \quad (11.2.3)$$

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

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

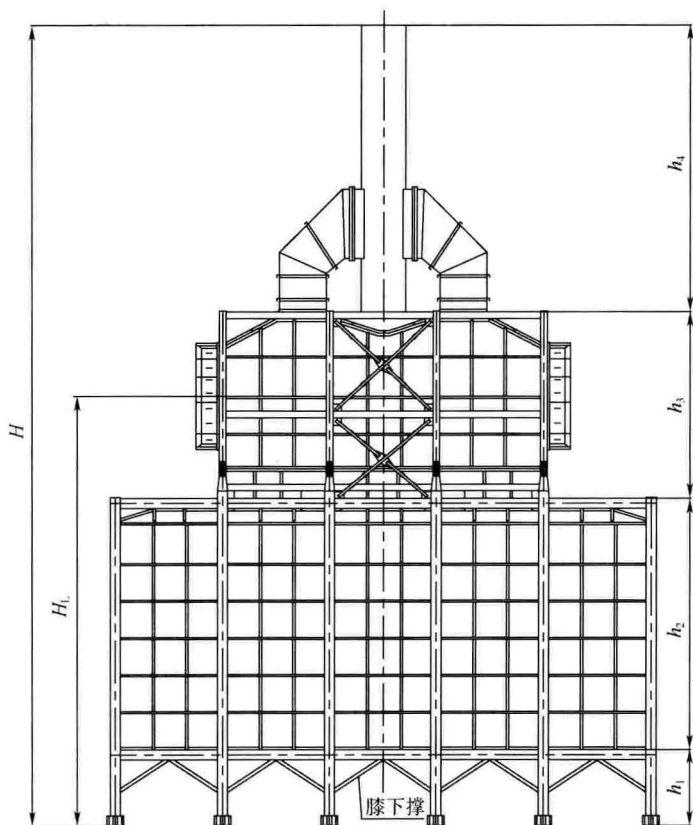


图 11.2.3-2 中间框架设对流室的立式炉

11.2.4 落地烟囱的自振周期可按下列规定确定：

1 等截面直筒式烟囱的基本自振周期可按下列式计算：

$$T_1 = 1.79H_e \sqrt{\frac{m_e H_e}{E^t I}} \quad (11.2.4-1)$$

式中： H_e ——烟囱计算高度(m)，自地脚螺栓底板下表面至顶面高度；

m_e ——烟囱质量(kg)，当衬里与烟囱壁连接时，包括衬里的质量；

E^t ——设计温度下材料的弹性模量(Pa)；

I ——烟囱截面惯性矩(m⁴)。

2 锥体式烟囱(图 11.2.4)的基本自振周期可按下列式计算：

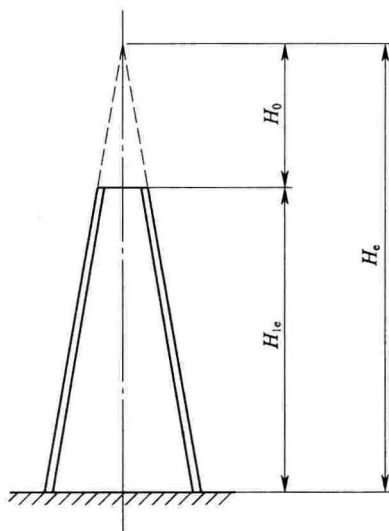


图 11.2.4 锥体式烟囱

H_0 —锥体式烟囱的延伸高度(m)； H_{1e} —烟囱高度(m)

$$T_1 = \lambda H_e^2 \sqrt{\frac{A \rho}{E^t I_1}} \quad (11.2.4-2)$$

式中： λ ——锥体高度系数，根据 H_0/H_{1e} 的比值，按表 11.2.4 查取；

A —— 烟囱底部截面积(m^2);

ρ —— 烟囱材料的密度(kg/m^3), 当衬里与烟囱壁连接时, 为其组合体的密度;

I_1 —— 烟囱底部截面惯性矩(m^4)。

表 11.2.4 锥体高度系数 λ

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

3 变截面烟囱可简化为多质点结构体系计算自振周期。

11.3 地震作用和抗震验算

11.3.1 加热炉的抗震设防类别应按现行国家标准《石油化工建(构)筑物抗震设防分类标准》GB 50453 的乙类执行。

11.3.2 加热炉的地震作用和抗震验算应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的规定。

11.3.3 圆筒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 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 箱式加热炉顶部烟囱的水平地震作用, 可采用底部剪力法计算。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。

11.3.7 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。

11.3.8 落地烟囱的竖向地震作用和抗震验算应符合现行国家标准《烟囱设计规范》GB 50051 的规定。

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计算,可采用下列方法:

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,地震影响系数可按本标准第 4.2.1 条取最大值。

11.3.10 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 11.3.10 的规定。

表 11.3.10 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	$L/360$
炉顶风机底座梁	$L/400$
其他梁	$L/250$
操作棚檩条	$L/200$

注: L 为受弯构件跨度,悬臂梁为悬伸长度的 2 倍。

11.3.11 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 炉框架侧墙顶部和底部横梁及炉框架柱变截面部位的横梁,宜采用热轧 H 型钢,抗震设防烈度为 7 度时不宜小于 H250×125,8 度时不宜小于 H300×150,9 度时不宜小于 H350×175;

2 炉顶平面应设置构造斜撑,采用单肢角钢抗震设防烈度为 7 度时不宜小于角钢 75×6,8 度时不宜小于角钢 90×8,9 度时不宜小于角钢 110×10;采用双肢角钢设防烈度为 7 度时不宜小于角钢 63×6,8 度时不宜小于角钢 75×6,9 度时不宜小于角钢 90×8;

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;

5 支承炉顶烟囱底座梁的两端应采用刚性连接;

6 不同截面炉框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(见本标准图 11.2.3-2)。

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);

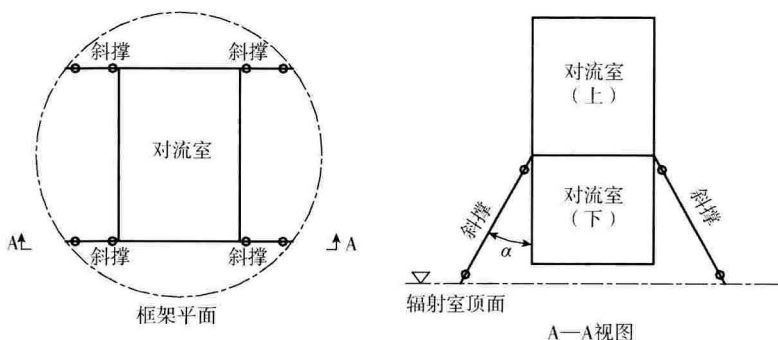


图 11.4.2 对流室斜撑

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,梁端应采用刚性连接,抗震设防烈度为 7 度时不宜小于 $H250 \times 125$, 8 度时不宜小于 $H300 \times 150$, 9 度时不宜小于 $H350 \times 175$;

5 设计基本地震加速度值为 $0.10g \sim 0.40g$ 或抗震设防烈度为 7 度~9 度,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 炉底柱的数量少于 8 根时,柱脚与基础应采取固接,且柱脚应采用高台底座形式;

7 辐射室筒体直径大于 $3.8m$ 且对流室立柱与辐射室筒体柱不重合时,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 卧式加热炉应符合下列规定:

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 $10mm$;

3 固定支座的地脚螺栓数量不应少于 2 个,螺母应设有防松动措施;

4 滑动支座应设置限制卧式加热炉横向位移的措施。

11.4.4 加热炉的地脚螺栓不应小于 $M24$,螺母应采取防松动措施,柱脚底板厚度不应小于 $14mm$ 。

11.4.5 炉顶烟囱底座,采用法兰连接时,连接螺栓不应小于 $M16$,螺栓间距不应大于 $250mm$;采用高台底座连接时,连接螺栓不应小于 $M24$,螺栓数量不应少于 8 个。螺母应采取防松动措施。

11.4.6 炉框架构件的焊接接头不应位于可能产生塑性铰的最大应力区。

11.4.7 架空烟道应符合下列规定:

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,膨胀节设置应根据计算确定,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,底部应设置高台底座螺栓座。地脚螺栓不应小于 M24,其数量不应少于 8 个,螺母应采取防松动措施。

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,应采用全熔透焊缝。

附录 A 构架上设备的地震作用

A. 0.1 支承设备的多层构架的计算简图可按本标准图 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。

A. 0.2 安装在构架上的设备,当已知支承设备的构架参数以及构架与设备的质量比大于或等于 2 时,设备所在构架层的动力放大系数可按图 A. 0.2 采用,构架上的设备水平地震作用可按下列规定计算:

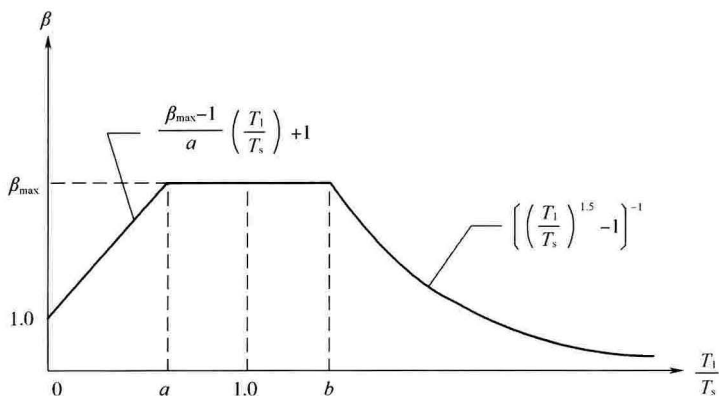


图 A. 0.2 构架动力放大系数曲线

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);

a, b —分别为类共振区的左右边界

1 第 i 层构架上的设备水平地震作用设计值,应按下列公式计算:

$$F_{hsf} = \eta R_E \alpha_{si} m_{eqi} g \quad (\text{A. 0. 2-1})$$

$$\alpha_{si} = \tilde{\beta}_{\max} a_{si} \quad (\text{A. 0. 2-2})$$

$$a_{si} = \frac{F_i}{m_i g} \quad (\text{A. 0. 2-3})$$

$$\tilde{\beta}_{\max} = \psi \beta_{\max} \quad (\text{A. 0. 2-4})$$

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

α_{si} ——第 i 层构架上的设备水平地震影响系数；

m_{eqi} ——第 i 层构架上的设备的等效质量(kg)；

$\tilde{\beta}_{\max}$ ——修正后的构架动力放大系数最大值；

F_i ——第 i 层构架的水平地震作用(N)；

ψ ——反馈影响系数，按表 A. 0. 2-1 采用；

β_{\max} ——修正前的构架动力放大系数最大值，按表 A. 0. 2-2 采用。

表 A. 0. 2-1 反馈影响系数 ψ

m_s/m_e	阻尼比 ζ					
	0.1	0.07	0.05	0.02	0.01	0.005
2	0.50	0.42	0.37	0.29	0.28	0.27
10	0.68	0.58	0.51	0.38	0.35	0.34
50	0.87	0.81	0.76	0.67	0.62	0.60
100	0.93	0.91	0.90	0.80	0.80	0.80
≥ 500	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

注：中间值可用线性内插法求取。 m_s 为构架的质量(包括构架上其他设备及附属物的质量)， m_e 为计算设备的质量。

表 A. 0. 2-2 修正前的构架动力放大系数最大值 β_{\max}

阻尼比 ζ	0.1	0.07	0.05	0.02	0.01	0.005
β_{\max}	3.5	4.6	5.5	8.5	10.5	12.5

注：中间值可用线性内插法求取。

2 确定 T_1 值时，应将支承设备的构架视为设备的刚性基础。

3 确定 T_s 值时,所有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,可按本标准第 A.0.4 条计算。

A.0.3 类共振区的左右边界可按下列公式计算:

$$a = \left(1 - \frac{1}{\beta_{\max} - 0.3}\right)^{1/1.5} \quad (\text{A.0.3-1})$$

$$b = \left(1 + \frac{1}{\beta_{\max}}\right)^{1/1.5} \quad (\text{A.0.3-2})$$

A.0.4 支承设备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:

$$T_s = 3H_s \times 10^{-5} \quad (\text{A.0.4-1})$$

式中: T_s —— 构架的基本自振周期(s);

H_s —— 构架的总高度(mm)。

2 钢筋混凝土构架的基本自振周期可按下式计算:

$$T_s = 2H_s \times 10^{-5} \quad (\text{A.0.4-2})$$

附录 B 支腿式直立设备抗震验算

B. 0. 1 支腿的水平反力应按下式确定：

$$R_1 = \frac{F_Z}{n} + \frac{F_{ck}}{n} \quad (\text{B. 0. 1})$$

式中： R_1 ——单个支腿的水平反力(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；

F_{ck} ——设备的水平地震作用设计值(N)；

n ——设备支腿的个数。

B. 0. 2 一个支腿的垂直反力应按下式确定：

$$F_1 = \pm \left(\frac{4M_1}{nD_b} + \frac{4M_2}{nD_b} \right) - \frac{W}{n} \quad (\text{B. 0. 2})$$

式中： F_1 ——单个支腿的垂直反力(N)；

M_1 ——水平地震作用设计值产生的倾覆力矩(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；

D_b ——地脚螺栓中心圆直径(mm)；

W ——竖向载荷(N)，包括设备自重、管道及其他垂直载荷。

B. 0. 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式计算：

$$\sigma_b = \frac{R_1 L_c + F_1 e}{Z} \quad (\text{B. 0. 3-1})$$

2 支腿的压应力可按下式计算：

$$\sigma_c = \frac{F_1}{A_1} \quad (\text{B. 0. 3-2})$$

式中： σ_b ——支腿的弯曲应力(MPa)；

R_1 ——支腿的水平反力(N)；

L_c ——支腿的计算高度，取基础板底面至支腿与壳体连接焊缝中心的距离(mm)；

F_1 ——支腿的垂直反力(N)；

e ——从设备外径至支腿形心的距离(mm)(图 B. 0. 3)；

Z ——支腿的最小抗弯截面模量(mm³)；

σ_c ——支腿的压应力(MPa)；

A_1 ——支腿的横截面积(mm²)。

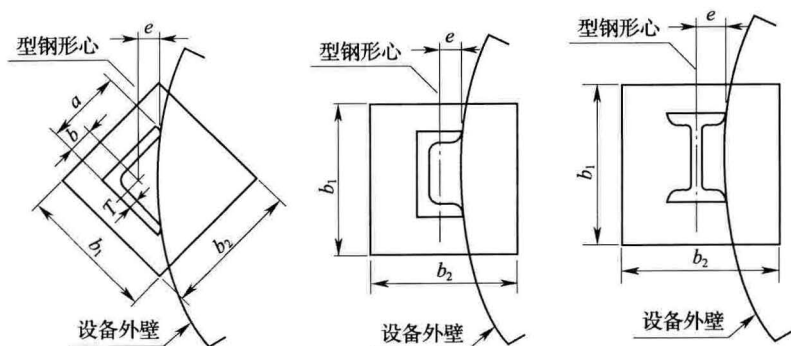


图 B. 0. 3 支腿及基础板

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：

$$[\sigma]_{cr} = \frac{\left[1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\bar{\lambda}}\right)^2\right] [\sigma]}{\nu} \quad (\text{B. 0. 3-3})$$

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

$$[\sigma]_{cr} = \frac{0.277 [\sigma]}{\left(\frac{\lambda}{\bar{\lambda}}\right)^2} \quad (\text{B. 0. 3-4})$$

$$\lambda = \frac{0.7L_c}{\bar{i}} \quad (\text{B. 0. 3-5})$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6[\sigma]}} \quad (\text{B. 0. 3-6})$$

$$\nu = \frac{3}{2} + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\bar{\lambda}} \right)^2 \quad (\text{B. 0. 3-7})$$

式中： λ ——支腿的有效长细比；

$\bar{\lambda}$ ——支腿的临界长细比；

$[\sigma]_{cr}$ ——支腿的许用临界压应力(MPa)；

$[\sigma]$ ——支腿材料抗震许用应力(MPa)，按本标准第 4.7.2 条确定；

ν ——由 λ 和 $\bar{\lambda}$ 决定的系数；

\bar{i} ——单根支腿截面的最小回转半径(mm)；

E ——支腿材料的弹性模量(MPa)。

4 支腿的截面抗震验算应满足下式要求：

$$\frac{\sigma_c}{[\sigma]_{cr}} + \frac{\sigma_b}{[\sigma]} \leq 1 \quad (\text{B. 0. 3-8})$$

式中： $[\sigma]$ ——支腿的抗震许用应力(MPa)，按本标准第 4.7.2 条确定。

B. 0. 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：

$$\tau = \frac{F_l}{A_f} \quad (\text{B. 0. 4-1})$$

$$\tau \leq [\tau] \quad (\text{B. 0. 4-2})$$

式中： τ ——连接焊缝处的剪应力(MPa)；

A_f ——焊缝的抗剪面积(mm²)；

$[\tau]$ ——焊缝的抗震许用剪应力(MPa)，按本标准第 4.7.2 条确定。

2 焊缝的弯曲应力可按下列公式计算：

$$\sigma = \frac{R_1 L_c}{Z_f} \quad (\text{B. 0. 4-3})$$

$$\sigma \leq [\sigma] \quad (\text{B. 0. 4-4})$$

式中： σ ——焊缝处的弯曲应力(MPa)；

Z_f ——焊缝的抗弯截面模量(mm³)；

$[\sigma]$ ——焊缝的抗震许用应力(MPa)，按本标准第 4. 7. 2 条确定。

B. 0. 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：

$$\sigma_b = \frac{F_1}{n_b A_b} \quad (\text{B. 0. 5-1})$$

$$\sigma_b \leq [\sigma]_b \quad (\text{B. 0. 5-2})$$

式中： σ_b ——地脚螺栓的拉应力(MPa)；

n_b ——单个支腿的地脚螺栓数目；

A_b ——地脚螺栓的有效截面积(mm²)；

$[\sigma]_b$ ——地脚螺栓抗震许用应力(MPa)，按本标准第 4. 7. 2 条确定。

2 地脚螺栓的剪应力可按下列公式计算：

$$\tau_b = \frac{R_L}{n_b A_b} \quad (\text{B. 0. 5-3})$$

$$\tau_b \leq [\tau]_b \quad (\text{B. 0. 5-4})$$

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)，按本标准第 4. 7. 2 条确定。

B. 0. 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：

$$\sigma_{cb} = \frac{F_1}{b_1 b_2} \quad (\text{B. 0. 6-1})$$

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：

$$\delta_b = B_1 \sqrt{\frac{3\sigma_{cb}}{[\sigma]}} + C_2 \quad (\text{B.0.6-2})$$

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)，按本标准第4.7.2条确定；

C_2 ——支腿底板腐蚀裕度(mm)。

附录 C 支耳式直立设备抗震验算

C.0.1 水平载荷作用引起的支耳反力(图 C.0.1)应按下式计算:

$$F_r = F_t = \pm \left(\frac{F_h}{n} + \frac{F_{el}}{n} \right) \quad (\text{C.0.1})$$

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_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;
 F_{el} ——设备的水平地震作用设计值(N);
 n ——设备支耳的个数。

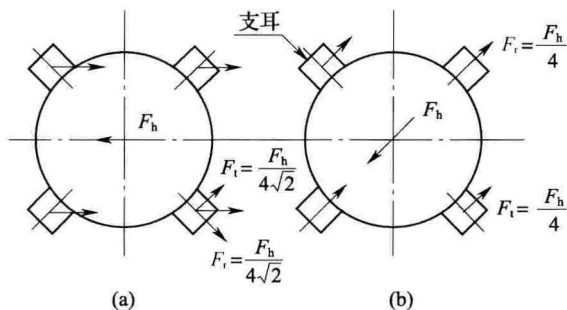


图 C.0.1 水平载荷作用引起的支耳反力

C.0.2 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:

$$F_l = \pm \left(\frac{4M_1}{nD_b} + \frac{4M_2}{nD_b} \right) - \frac{W}{n} \quad (\text{C.0.2})$$

式中: F_l ——支耳的垂直反力(N);

M_1 ——水平地震作用设计值产生的倾覆力矩(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；

D_b ——设备地脚螺栓中心圆直径(mm)；

W ——竖向载荷(N)，包括设备自重、管道及其他垂直载荷。

C.0.3 支耳的应力可按下式计算：

$$\sigma = \frac{F_1 l}{Z_1} + \frac{F_t l}{Z_t} + \frac{F_r}{A_1} \quad (\text{C.0.3})$$

式中： σ ——支耳的应力(MPa)；

F_1 ——支耳的垂直反力(N)，按本标准式(C.0.2)计算；

F_t ——水平载荷引起设备支耳处的环向反力(N)，按本标准式(C.0.1)计算；

F_r ——水平载荷引起设备支耳处的径向反力(N)，按本标准式(C.0.1)计算；

l ——从设备本体外壁至反力作用点的距离(mm)；

Z_1 ——支耳对设备轴向抗弯模量(mm³)；

Z_t ——支耳对设备环向抗弯模量(mm³)；

A_1 ——支耳的截面积(mm²)。

C.0.4 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：

$$\sigma = \frac{F_r}{A'_1} \quad (\text{C.0.4-1})$$

$$\sigma \leq [\sigma] \quad (\text{C.0.4-2})$$

2 剪应力可按下列公式计算：

$$\tau = \frac{\sqrt{F_t^2 + F_1^2}}{A_1} \quad (\text{C.0.4-3})$$

$$\tau \leq [\tau] \quad (\text{C.0.4-4})$$

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(mm²)；

A'_1 ——焊缝截面积(mm²)。

C.0.5 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：

$$\sigma_b = \frac{F_1}{n_b A_b} \quad (\text{C.0.5-1})$$

$$\sigma_b \leq [\sigma]_b \quad (\text{C.0.5-2})$$

式中： σ_b ——地脚螺栓的拉应力(MPa)；

n_b ——单个支耳地脚螺栓数量；

A_b ——单个地脚螺栓的有效截面积(mm²)；

$[\sigma]_b$ ——地脚螺栓材料抗震许用应力(MPa)，按本标准第 4.7.2 条确定。

2 地脚螺栓的剪应力可按下列公式计算：

$$\tau_b = \frac{F_r}{n_b A_b} \quad (\text{C.0.5-3})$$

$$\tau_b \leq [\tau]_b \quad (\text{C.0.5-4})$$

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(MPa)，按本标准第 4.7.2 条确定。

附录 D 柔度矩阵元素

D.0.1 柔度矩阵元素应按下列规定确定(图 D.0.1)。

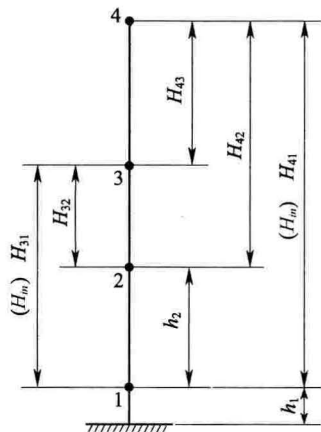


图 D.0.1 多质点体系计算模型

1 静位移可按下式计算：

$$\delta_{ji} = \delta_{ij} = \sum_{n=1}^i \frac{h_n}{EI_n} \left[H_{jn} H_{in} + \frac{1}{2} h_n (H_{jn} + H_{in}) + \frac{1}{3} h_n^2 \right] + \sum_{n=1}^j \frac{K_n h_n}{GA_n} \quad (j = 1, 2, 3 \dots, i = 1, 2, 3 \dots, i \leq j) \quad (\text{D.0.1})$$

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)；

E ——材料的弹性模量 (MPa)；

I_n —— 惯性矩 (mm^4)；

H_j, H_m —— 分别为质点 n 与质点 j 、质点 n 与质点 i 的高度差 (mm)；

K_n —— 剪切截面形状系数；

G —— 材料的剪切模量 (MPa)；

A_n —— 计算截面积 (mm^2)。

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

表 D. 0. 1-1 辐射对流型圆筒炉的几何特性

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

注: n —— 柱根数;

A_{01} —— 单根柱截面积 (mm^2);

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);

D_2 —— 辐射室筒体直径 (mm);

t_2 —— 辐射室筒壁厚度 (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)。

3 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。

4 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 D. 0. 1-2 计算,可取前两阶振型。

表 D. 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		$m_3 = 0.75Q_4 + 0.5Q_3$	$m_3 = 0.75Q_4 + 0.5Q_3$
2		$m_2 = 0.5(Q_2 + Q_3) + Q'_2$	$m_2 = 0.5(Q_2 + Q_3)$
1		$m_1 = 0.5Q_2 + Q_1$	$m_1 = 0.5Q_2 + Q_1 + Q'_2$

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)。

D. 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。

本标准用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待,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
- 《烟囱设计规范》GB 50051
- 《石油化工建(构)筑物抗震设防分类标准》GB 50453
- 《中国地震动参数区划图》GB 18306
- 《固定式压力容器安全技术监察规程》TSG 21
- 《立式圆筒形钢制焊接储罐安全技术规范》AQ 3053

中华人民共和国国家标准

石油化工钢制设备抗震设计标准

GB/T 50761 - 2018

条文说明

编制说明

本次修订是根据住房城乡建设部《关于印发〈2015年工程建设标准规范制订、修订计划〉的通知》(建标〔2014〕189号)的要求,由中国石化工程建设有限公司会同有关单位对《石油化工钢制设备抗震设计规范》GB 50761—2012进行了全面修订。

这次修订调整了抗震设计反应谱在直线下降段的斜率;完善了设备抗震重要度的分类;简化了地震作用调整系数;对安装在构架上设备的水平地震作用的计算方法进行了补充完善;根据完成的研究课题,对立式圆筒形储罐和支腿式直立设备的阻尼比进行了调整;根据本标准征求意见稿的反馈意见和建议,对相关条文和文字进行了修改等。

上一版的主编单位是中国石化工程建设有限公司,参编单位是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,主要起草人是冯清晓、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。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定,编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明,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。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	(77)
2	术语和符号	(79)
2.1	术语	(79)
3	基本规定	(80)
3.1	设备抗震重要度分类	(80)
3.2	地震影响	(80)
3.3	设备体系设计	(81)
4	地震作用和抗震验算	(83)
4.1	一般规定	(83)
4.2	地面设备设计反应谱	(84)
4.3	地面设备水平地震作用	(86)
4.4	构架上设备水平地震作用	(86)
4.5	竖向地震作用	(88)
4.6	载荷组合	(88)
4.7	抗震验算	(89)
5	卧式设备	(91)
5.1	一般规定	(91)
5.2	地震作用和抗震验算	(91)
5.3	抗震构造措施	(91)
6	支腿式直立设备	(93)
6.1	一般规定	(93)
6.2	自振周期	(93)
6.3	地震作用和抗震验算	(93)

6.4	抗震构造措施	(94)
7	支耳式直立设备	(95)
7.1	一般规定	(95)
7.2	自振周期	(95)
7.3	地震作用和抗震验算	(95)
7.4	抗震构造措施	(95)
8	裙座式直立设备	(97)
8.1	一般规定	(97)
8.2	自振周期	(97)
8.3	地震作用和抗震验算	(97)
8.4	抗震构造措施	(98)
9	球形储罐	(99)
9.1	一般规定	(99)
9.2	自振周期	(99)
9.3	地震作用和抗震验算	(102)
9.4	抗震构造措施	(102)
10	立式圆筒形储罐	(104)
10.1	一般规定	(104)
10.2	自振周期	(104)
10.3	水平地震作用及效应	(105)
10.4	罐壁竖向稳定许用临界应力	(106)
10.5	罐壁的抗震验算	(107)
10.6	液面晃动波高	(110)
10.7	抗震构造措施	(111)
11	加热炉	(112)
11.1	一般规定	(112)
11.2	自振周期	(112)
11.3	地震作用和抗震验算	(113)
11.4	抗震构造措施	(116)

附录 A	构架上设备的地震作用	(119)
附录 B	支腿式直立设备抗震验算	(121)
附录 C	支耳式直立设备抗震验算	(122)

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》、国务院令第 323 号《地震安全性评价管理条例》等。标准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，因此编制标准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的抗震设计，由于缺乏相关地震资料和数据，本标准尚未给出具体设计规定，目前可按原建设部印发(89)建抗字第 426 号《地震基本烈度 X 度区建筑抗震设防暂行规定》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)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，本标准仍采用 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 本条是抗震设防的基本依据。作为抗震设防依据的设计基本地震动参数或抗震设防烈度，其审批是由国家主管部门依法规定和批准。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》和国务院令第 323 号《地震安全性评价管理条例》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 术 语

2.1.10 抗震构造措施只是抗震措施的一个组成部分。

2.1.12 许用应力设计法是以构件的计算应力 σ 不大于有关标准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法、安全系数设计法等。

2.1.13 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法等。

3 基本规定

3.1 设备抗震重要度分类

3.1.1 现行国家标准《建筑工程抗震设防分类标准》GB 50223 和《石油化工建(构)筑物抗震设防分类标准》GB 50453 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。日本的《高压瓦斯设备抗震设计标准》中,根据设备本身的重要性和使用条件将设备划分为 4 个等级。

鉴于目前石油化工设备的抗震设计是采用单一抗震设防水准,即 50 年超越概率为 10% 的地震动加速度值作为抗震设防目标,如按照现行国家标准《建筑工程抗震设防分类标准》GB 50223 和《石油化工建(构)筑物抗震设防分类标准》GB 50453 对设备进行抗震设防分类尚不成熟,对此,本标准参照日本《高压瓦斯设备抗震设计标准》的分类方法,根据石油化工设备的特点、规格、储存介质、使用用途和受地震破坏后的危害程度等把设备重要度类别划分为四类,分类原则是在参照我国《固定式压力容器安全技术监察规程》TSG 21 中对压力容器分为三类的基础上增加了第四类——消防救灾用途的设备。

3.1.2 本条给出了设备抗震重要度系数的取值规定。

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,是根据原建设部 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《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 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 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 设备体系设计

3.3.1 设备体系的合理性与经济性是密切相关的，为了实现二者统一，必须根据设备抗震重要度类别、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 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。

5 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。

6 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。

7 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,本款要求与设备连接的管道要考虑在地震过程中能够适应管线与设备连接点的位移。

3.3.2 本条对设备的材料提出了基本要求。

延伸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,因此要留有足够裕量。

4 地震作用和抗震验算

4.1 一般规定

4.1.1 本条对地震作用方向、竖向地震作用和安装在构架上的设备做出了规定。

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,要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度大于 20m 的直立设备和加热炉落地烟囱,要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。

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,要对安装在构架上的卧式设备(含重叠式换热器)、支腿式设备等考虑结构对设备的放大作用。

4.1.2 根据地震震害调查和对设计基本地震加速度为 $0.05g$ 或 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 度区的第一类和第二类设备可以不进行抗震验算,但需要满足相应的构造措施。

4.1.3 本条规定对不同类型或不同计算要求的设备,要采取不同的计算分析方法。

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 设备自振周期 T 处在设计反应谱速度或位移控制段时,推荐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。

4.1.4 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本标准表 4.1.4 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 2.5 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(两个水平向)或三向(两个水平和一个竖向)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要按上述要求生成。

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,到最后一次达到最大峰值的 10% 为止,不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。

4.2 地面设备设计反应谱

4.2.2 弹性反应谱理论是现阶段抗震设计的最基本理论,本标准所采用的设计反应谱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 的基础上提出的,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建标[1992]419 号文《关于统一抗震设计规范地面运动加速度设计取值的通知》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, 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; $5T_g$ 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)在《石油化工钢制设备抗震设计规范》GB 50761—2012 中规定的地震影响系数曲线直线下降段的下降斜率调整系数 η_1 采用了分段形式,在周期 6.0s 前后采用了不同的计算公式。这种方法导致最终的地震影响系数曲线在 6.0s 处出现突变,如图 1 中灰色实线所示。图中, $\alpha_{\max} = 0.23$, $T_g = 0.4s$, $\zeta = 0.05$ 。

修订后的标准统一采用原规范中 6.0s 后的计算公式确定 η_1 。相同参数下其确定的地震影响系数曲线如图 1 中黑色点线所示。可以看出,新标准不仅避免了 6.0s 处曲线的突变问题,而且在 $5T_g$ 与 6.0s 之间,新标准确定的地震影响系数略大于原规范。

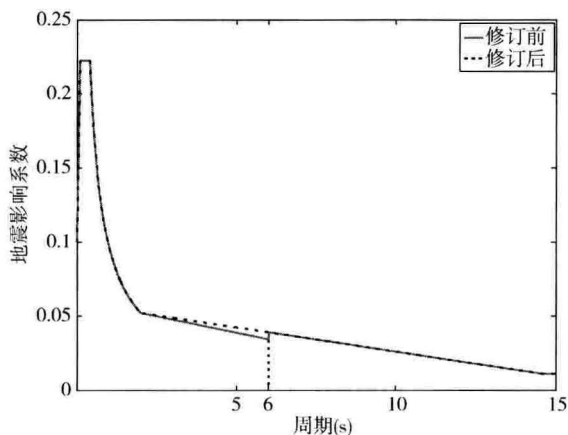


图 1 修订前后地震影响系数曲线的比较

(5)本反应谱的长周期段主要是用来计算储罐液体晃动反应。

(6)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 的地区的反应谱值。

(7)为满足不同类型的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 底部剪力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,本标准的底部剪力法是参照现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 给出的。

本标准在进行地震作用计算时,由于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 的计算方法,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 C 的计算值提高了 50%~80%。本标准通过引入设备地震作用调整系数 R_E ,使按本标准设计的设备在满足现行国家标准《中国地震动参数区划图》GB 18306 规定的基础上,保持了与原相关标准规范设计的石油化工设备具有相同的抗震安全度水准。

4.3.2 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

4.4.2 依据国内外长期以来对楼层反应谱的研究结果,当无法确定支承设备的建(构)筑物结构参数时,本条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。

构架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。

国外某电话公司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。

国内某大学在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时,如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,即 $0.9 > T_e/T > 1.1$ 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)和支耳式等设备相对来说比较重,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	ζ			
	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

表 1 楼层放大修正系数

m_0/m_1	ζ			
	0.1	0.05	0.02	0.01
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； ζ 为设备的阻尼比。

4.4.3 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)、支腿式等设备,当已知构架结构的参数时,可采用本标准附录 A 给出的方法进行水平地震作用的计算。

这里需要说明的是,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。

4.5 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 100m^3 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,设备在竖向地震作用下的影响不能忽视。

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} 可取总载荷代表值的 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的连续

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,所以在本标准中,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抗震验算时载荷组合的基本原则。

4.7 抗震验算

4.7.1 本标准对加热炉设备的钢结构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进行设备抗震验算的规定。

目前国内外的抗震规范中,在对结构进行抗震强度验算时,考虑到地震作用为一种发生概率较低的短期作用,都对结构安全度做一定的调整。一般情况下,当采用安全系数法设计时,安全系数取值比不考虑地震作用的工况有所降低;当采用许用应力法设计时,则将许用应力值予以提高,二者是一致的。

在我国的建(构)筑物或设备的抗震设计中,均采用统一的比值,即安全系数一般取不考虑地震作用时数值的 80%,或许用应力值取不考虑地震作用时的 125%。

提高设备抗震设计许用应力值的理由是:

(1)地震作用为短期作用荷载,较大的地震多为几十年或百年一遇。而石化设备因受介质腐蚀和生产周期等影响,设备的服役区一般为 10 年~20 年,因此在设备使用期遭遇大地震的概率较低,安全度可以适当降低。

(2)设备本体是由钢材制造的,延性好,在短期地震荷载的作用下,材料的动力强度比静力强度有所提高。钢材的屈服极限与强度极限的提高程度随应变速度而不同,应变速度越大屈服极限提高越多静力作用下的屈服极限越小,则在动力作用下的屈服极限提高也越大;动力作用下的强度极限也比静力作用下的强度有

所提高,但提高的程度远低于屈服极限。因此,在短期的地震动作用下,设备应变速度很大,使钢材的动力强度有较大的提高,设备的抗震能力也随之增强。

(3)石化设备一般都是对称或圆形结构,抗震能力强,因此,设备抗震设计的许用应力比不考虑地震作用时应该有所提高。

5 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 本条根据经验给出了卧式设备的自振周期取值。

5.2 地震作用和抗震验算

5.2.1 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为 $0.05\text{s}\sim 0.3\text{s}$ 。对此,一般情况下可不进行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} 。

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

5.2.5 本条明确了卧式设备的本体、支座、地脚螺栓等应进行抗震验算。在日本《高压瓦斯设备抗震设计标准》(1997年修订版)及《鞍座支撑的水平压力容器》JIS B8278—2003中,将卧式设备承受的水平 and 竖向地震作用等效为鞍座反力,其中水平地震作用等效鞍座反力取轴向和横向水平作用分别等效后之大值,然后进行各应力的校核验算。而根据我国振动台试验,从设备横向进行激振,壳体压应力比较大,且支座边角处壳体压应力最大,因此,在抗震验算时,尤其要考虑横向地震作用下等效鞍座的反力时,对支座边角处的壳体环向压应力进行验算。

5.3 抗震构造措施

5.3.1 根据对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。高柔设备的地脚螺栓往往被拉长或拉断,低矮设备的地脚螺栓常出现剪断破坏现象,因此要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。

6.2 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 本条要求对支腿式设备要按照地震设防的有关规定进行抗震计算。

6.3.2 因为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,要考虑框架(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中国石化工程建设公司与中国建筑科学研究院等单位共同完成的“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。

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,本条要求要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现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012 附录 F 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 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,要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 为简化本章正文条文的编写,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、7.4.2 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,支座要尽量选择在设备的重心位置。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,有必要采用上下环板的结构形式。

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

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,本条要求设计基本地震加速度大于或等于 $0.20g$ 或抗震设防烈度大于或等于 8 度区,高度大于 20m 的直立设备需考虑竖向地震作用。

8.2 自振周期

8.2.4 对设置在构架上的直立设备,有必要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。采用振型分解法计算直立设备的自振周期精度较高,对于较高的直立设备建议采用该方法计算其自振周期。

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

8.3.3 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为 $0.1s \sim 0.3s$,对此,为简化地震作用的计算,地震影响系数可取最大值。

8.3.5 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,许多单位共同进行了深入的研究。本条引用了其成果,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的取值范围。

8.3.6 在设计基本地震加速度值为 $0.20g \sim 0.40g$ 或抗震设防烈度大于或等于 8 度的地区,对高径比较大的直立设备,其竖向地震作用不容忽略。

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)相连接是常见的。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最好不与其他设备或构筑物直接连接。

8.4.2 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。

8.4.3 直立设备在地震中晃动较大,为防止内部构件在地震中滑脱,特编写本条。

8.4.5 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 800mm 的设备的地脚螺栓数目不少于 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形柱式支撑;有的采用三柱合一形柱式结构支撑。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。本标准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或相割柱式结构。

9.2 自振周期

9.2.1 除本标准外,目前我国还有四项标准规范涉及球罐的抗震设计(或抗震鉴定),这四项标准规范分别为《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 和《石油化工设备抗震鉴定标准》SH/T 3001。在这四项标准中,给出的自振周期的计算方法有三种,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,以及在与中国建筑科学研究院等单位共同完成的“石油化工设备阻尼比研究”课题中,对上述四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,《石油化工钢制设

备抗震设计规范》GB 50761—2012 给出的自振周期的计算方法与实测值较接近。对此,本标准沿用了《石油化工钢制设备抗震设计规范》GB 50761—2012 给出的自振周期的计算方法。

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,一部分固定在罐壁上与罐体做一致运动(称为固定液体);另一部分独立做长周期自由晃动(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 2。

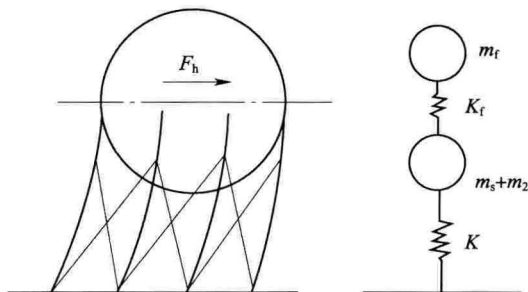


图 2 自由液体质量和固定液体质量示意图

在图 2 中,自由液体质量和固定液体质量按下式计算:

$$m_f = (1 - \varphi)m_L \quad (1)$$

$$m_2 = \varphi m_L \quad (2)$$

式中: m_f ——自由液体质量(kg);

m_L ——储液质量(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。

由式(2)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,按本标准图 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 3。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:

$$K = \frac{F_h}{\delta} \quad (3)$$

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:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}} \quad (4)$$

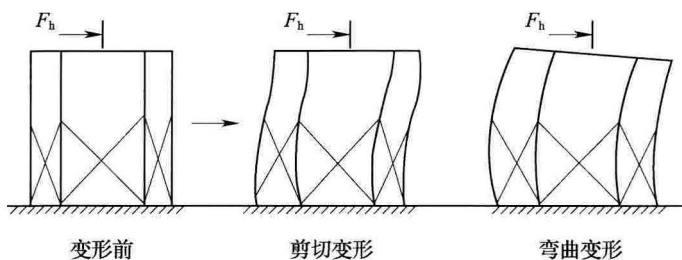


图 3 结构变形示意图

根据基本假设条件可知,式(3)、式(4)的推导是偏于安全的。此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:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{m_{eq}}{1000K}} \quad (5)$$

式中: m_{eq} ——按本标准第 9.2.1 条求出的球罐等效质量(kg);

K ——按本标准第 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 为使按本标准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,本条要求球罐类设备都要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中国石化工程建设公司与中国建筑科学研究院等单位共同完成的“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。

9.4 抗震构造措施

9.4.1~9.4.3 球罐的主要震害表现在地脚螺栓被拉长或拉断/剪断,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荃峰化工厂 1000m³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,本节从对地脚螺栓

连接的可靠性、支柱拉杆等连接可靠性、地震过程中结构耗能过程等方面提出抗震构造要求。与罐体连接的进出口管线采用柔性连接要求,统一放在本标准第 3.3.1 条第 7 款中。

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—2014 的第 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 Std 650 而制订的。对储罐的高径比上限值,由原规范 GB 50761—2012 中的 1.5 调整为 1.6,主要是与现行国家标准《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》GB 50341、现行行业标准《钢制常压立式圆筒形储罐抗震鉴定标准》SH/T 3026 等相关标准保持协调,同时也扩大本标准的适用范围。

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作自由液面储罐看待。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,所以本条做了空间容积 4% 的规定。原规范中“储罐容积的 4%”不明确,修订为储罐公称容积的 4%。

10.2 自振周期

10.2.1 目前我国共有三项标准规范涉及储油罐的抗震设计(或抗震鉴定),这些标准规范分别为《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 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 Std 650 也给出了储罐罐液耦联振动基本自振周期的计算公式。

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,中国石化工程建设公司在 2007 年开展的“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《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》GB 50341—2003 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,本标准采用了《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。GB 50341—2014 沿用了 2003 版的计算方法,但公式中罐壁 1/3 高度处的厚度由 GB 50341—2003 中的有效厚度改为了计算厚度,对具体的储罐,其罐液耦联振动自振周期应该与罐壁的实际厚度有关,故本标准对罐壁 $\delta_{1/3}$ 的取值修改为名义厚度扣除钢板厚度负偏差(对新建储罐)或实测厚度(对在用储罐)。

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 Std 650 均采用了此计算式。

10.3 水平地震作用及效应

10.3.1 油罐本身属大型壳体结构,在地震中一旦发生破坏不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。为使按本标准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,本条要求对油罐要按照设防地震的有关规定进行抗震计算。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(10.3.1-1)中的 m_{eq} , 精确计算时, 应该包括罐壁和罐顶的质量。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%, 最大不超过 10%, 为了简化计算, 在公式中增加罐体影响系数 $Y_1=1.1$ 以考虑罐体质量的作用。

与本标准内容相协调, 计算水平地震作用时, 考虑地震作用调整系数。

10.3.2 油罐的阻尼比是根据中国石化工程建设公司与中国建筑科学研究院等单位共同完成的“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。与 GB 50341、API Std 650 等国内外标准一致, 储液的阻尼比取 0.005。

10.3.3 本条动液系数的计算公式取自 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, 不难导得式(10.3.3-2)。

10.3.4 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 $0.375 H_w$, 日本标准取 H_w/D 的函数, 其值通常为 $0.375 H_w \sim 0.437 H_w$ 。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联, 所以本标准取压力中心的高度稍大一些, 取 $0.45 H_w$, 于是得到倾覆力矩公式(10.3.4)。

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联振动, 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。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 API Std 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 API Std 650 标准中,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。

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 倍、2.8 倍和 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。

本次修订时,针对容积为 $200\text{m}^3 \sim 30000\text{m}^3$ 的储罐,按照 GB 50761—2012 中式(10.4.1-1)和式(10.4.1-2)计算,竖向稳定临界应力系数 $K_c = 0.12 \sim 0.20$,小于 GB 50341 和 JIS B 8501、API Std 650 中相应的系数 0.22、0.33 和 0.41,已经偏保守,如果按第 10.4.2 条再考虑 1.5 的安全系数,则结果过于保守,经济性差,为此,修订时在保留 1.5 作为安全系数的情况下,将 K_c 值扩大 1.5 倍。

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_g 就是由水平地震作用产生的。式(10.5.1)的实质是与 API Std 650 一致的,只是表现形式不同。

10.5.2 GB 50761—2012 中的提高抵抗力计算式(10.5.2-1)来自美国石油学会标准《焊接石油储罐》API 650。 F_L 包括 F_{L0} 和重力抗力, F_{L0} 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_L 的限制值 $250 \rho_s H_w D_1$ (ρ_s 为比重)中的 250,换为 196,该限制 F_{L0} 比较合理,意义更加明确。

但由于 GB 50761—2012 中液位高度 H_w 等参数的单位与 API Std 650 中不同,因此上述公式与 API 650 中相应公式实质不同,存在问题。故修订时,根据各参数的单位将公式做了修正,修正后的公式与 API Std 650 实质相同。

10.5.3 按 API Std 650,当锚固比 $J > 1.54$ 时,储罐应设置锚固,而 $F_1 > 2F_L$ 对应 $J > 1.54$,由于本标准在第 10.5.4 条和第 10.5.5 条中分别提出了锚固罐和无锚固罐的抗震验算要求,故此增加一条设置锚固的判定条件,将 GB 50761—2012 中第 10.5.4 条第 3 款的第 4 项取消。

10.5.4 本标准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。对 9 度地震,要考虑竖向地震的影响(竖向地震影响系数取水平地震影响系数最大值的一半),故增加竖向地震影响系数 $C_v = 1 + 0.5 \times 0.9 = 1.45$ 。锚固螺栓的强度验算要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。

10.5.5 本条主要是引进提高影响系数。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。式(10.5.4-1)是锚固罐,或虽是浮放罐,但是未发生提高(即 $F_1 < F_L$)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联系统

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。API Std 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 API Std 650 修订版 2003 的相关内容,该标准在发生提离时罐壁底部的竖向压应力是用曲线形式给出的,经过转化,不难得到:

$$\sigma_c = \frac{N_1}{A_1} + f_1(C_x) \frac{M_1}{Z_1} \quad (6)$$

式中 $f_1(C_x)$ 是变量 C_x 的函数,API Std 650 中的 C_x 为:

$$C_x = \frac{M_1}{D_1^2(W_L + W_T)} \quad (7)$$

式中的 $(W_L + W_T)$ 就是本标准式(10.5.2-1)中的 F_L , 因此不难得到:

$$C_x = \frac{\pi F_T}{4F_L} \quad (8)$$

API Std 650 认为,当 C_x 大于 1.57 时,罐体结构将不稳定,这相当于本标准 $F_T/F_L > 2$ 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 API Std 650 的计算液体抗力 W_L 过于保守,忽略了底板膜力的影响,因此使得 W_L 偏小。考虑到限制 $F_T/F_L \leq 2$, 有益于限制罐体的高径比,保证储罐的安全,故本标准采用了这一限制条件。式(10.5.5-2)中的 C_L 就是式(9)中的 $f_1(C_x)$, 它也是变量 F_T/F_L 的函数,即:

$$l = f_1(C_x) = f(F_T/F_L) \quad (9)$$

但在 API Std 650 中,当 C_x 接近 1.57(即 F_T/F_L 接近 2)时, $f_1(C_x)$ 急剧增加,导致应力非常之大。考虑到它用的是静提离模型,其提离段上的抗力 W_L 为常数,且 W_L 的计算值偏低。在对标准系列罐大量验算的基础上,本标准提出了提离影响系数的计算公式(10.5.5-3)。

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

离影响相当大,许多罐在 8 度时就出现 $F_v / F_L > 2$ 的情况,这主要是由于其高径比较大,设计时要给予注意。

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: $h_v = \alpha R$, 后来美技术情报司 TID7024 在应用时又改变成:

$$h_v = 0.343\alpha T_s^2 \tanh\left(4.77 \sqrt{\frac{H}{D}}\right) \quad (10)$$

式中: h_v ——液面晃动波高(m);

α ——地震影响系数;

T_s ——储液晃动基本自振周期(s);

H ——储液高度(m);

D ——罐直径(m)。

日本工业标准《钢制焊接油罐结构》JIS B 8501 规定液面晃动波高为:

$$h_v = 0.418D\alpha \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{0.641}{T_s} \quad (12)$$

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黏性影响后导出液面晃动波高 h_v 为:

$$h_v = 0.837R\alpha \quad (13)$$

当采用反应谱理论计算波高时, α 由加速度反应谱查出。

经过对 JIS B 8501、API Std 650、GB 50341、GB 50761—2012、SH 3048 等标准的储液晃动波高计算公式对比,发现 GB 50341 和 GB 50761—2012 存在阻尼调整系数重复修正的问题(即在晃动波高计算公式中既考虑了阻尼比为 0.005 时的调整系数 1.79,又在

水平地震影响系数中考虑了阻尼比为 0.005 时的调整系数 1.5114), GB 50341 计算得到的晃动波高明显高于其他标准, 结果不合理; GB 50761—2012 由于引用的 K_v 系数不妥, 计算所得的晃动波高明显偏小。

本标准修订时, 去掉了 GB 50761—2012 中计算储液晃动波高公式中的系数 1.5, 将公式修改为 $H_v = \bar{\eta} K_v \alpha_v R$, 增加了罐型系数 $\bar{\eta}$, 对浮顶和内浮顶储罐, 取 $\bar{\eta} = 0.85$, 对固定顶罐, 取 $\bar{\eta} = 1.0$, 并结合了储罐在地震中液面晃动的实际情况, 重新修正了调整系数 K_v 。调整系数 K_v 已包含式(13)中的系数 0.837。

采用本标准修订后的计算公式, 对直径从 5m 到 100m 的储罐进行计算, 所得的晃动波高数值与 JIS B 8501 的结果吻合得较好。

10.7 抗震构造措施

10.7.2 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要遵循的原则。

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,要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要满足抗震要求。

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,考虑由炉体的温度膨胀所产生的摩擦力作用,所以可不考虑炉体长度方向的水平地震作用。

3、4 此两款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 的规定而制订的。

11.2 自 振 周 期

11.2.2 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。

式(11.2.2-1)、式(11.2.2-2)是根据动力测试了 100 多台圆筒加热炉(辐射对流型圆筒炉 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,其合格率在 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 台圆筒加热炉自振周期进行了实测,与式(11.2.2-1)、式(11.2.2-2)的平均偏差为 16.69%,说明该计算公式可满足工程设计需要。

式(11.2.2-2)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 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,计算得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。

11.2.3 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(11.2.3)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为 0.5~0.75,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(11.2.3)表达了这一特点。

11.2.4 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式(11.2.4-1)和式(11.2.4-2)计算,对于变截面烟囱,可采用矩阵迭代方法计算,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、11.3.2 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。抗震验算时,为与国家现行标准《钢结构设计标准》GB 50017 及《石油化工管式炉钢

结构设计规范》SH/T 3070 配套使用,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 由中国石化工程建设有限公司和中国建筑科学研究院等单位共同完成的“石油化工钢制设备结构阻尼比研究”课题组对 20 台圆筒炉和 14 台立式炉进行了阻尼比的测试,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 本条给出了加热炉的地震作用计算方法。

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要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。

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标准第 4 章计算水平地震作用,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的水平地震作用,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 2),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 2.0。

表 2 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 计算水平地震作用 F_{Hsi}	楼面谱法计算 水平地震作用 F'_{Hsi}	$K_y =$ F_{Hsi}/F'_{Hsi}
	m_s	T_s	m_e	T_e			
1	82.69	0.700	32.47	0.420	3.15g	4.987g	1.58
2	69.60	0.620	21.00	0.370	2.13g	4.026g	1.89
3	68.34	0.522	19.95	0.522	2.15g	3.550g	1.65
4	55.44	0.560	13.40	0.320	1.36g	2.671g	1.96
5	41.47	0.500	8.20	0.231	0.81g	1.590g	1.96
6	32.00	0.420	4.85	0.180	0.49g	0.950g	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_{Hsi} ——构架动力放大系数法计算得的水平地震作用(kN);

F'_{Hsi} ——反应谱底部剪力法计算得的水平地震作用(kN);

K_y ——炉顶烟囱水平地震作用效应增大系数(F_{Hsi} 和 F'_{Hsi} 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。

对于高度小于或等于 40m 的落地烟囱,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,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。

11.3.8 现行国家标准《烟囱设计规范》GB 50051 中给出的竖向地震作用计算结果与现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB

50011 的计算结果有较大差异,前者更与地震震害及地震时在高层建筑上的实测结果相符合。即竖向地震作用沿高度的分布规律为:在烟囱上部和下部相对较小,而在烟囱中下部 $h/3$ 附近竖向地震力最大。因此本标准采用的是现行国家标准《烟囱设计规范》GB 50051 中竖向地震作用的计算方法。

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,因温度膨胀产生摩擦力,摩擦力的作用效应不与水平地震作用效应组合。

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,支撑系统是必不可少的。

3 在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 11.2.3-2)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 本条对圆筒型加热炉做出规定。

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,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,宜对称设置斜撑。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,是为了保

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为了保证烟囱底座的刚度;规定烟囱底座梁采用刚性连接,是为了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 在设防烈度为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 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,高台底座的柱脚形式在地震作用下具有良好的耗能效果。

7 1976年唐山地震后,为了增加环梁在水平地震作用下的抗扭转性能,国内的圆筒炉抗震设计中,对于辐射筒体上下口环梁通常采用空腹型闭口截面。结构特点为辐射筒体立柱均布布置,筒体立柱与对流段框架不在同一平面内,辐射筒体顶部的箱式环梁假定为刚体平面基础,支撑上面的对流段及烟囱。目前,国外工程公司设计的圆筒型加热炉筒体立柱与对流段框架通常在同一平面内,从而形成框架结构。这种结构的特点为辐射筒体立柱非均布布置,辐射筒体上、下环梁的结构形式大多采用卧式单槽钢,与辐射筒体壁板形成侧向连接结构。这种结构传力路径明确,采用“强柱弱梁”的结构,更加有利于抗震。而且随着国内加热炉模块化制造的广泛应用,此种结构也更加有利于分模制造,易于矫形,能够很好地保证焊接质量。据此本标准进行了有条件的放宽。

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,要保证筒体的局部和整体稳定性,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,是为了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,导致构件整体和局部失稳,所以在构件的最大应力区不推荐设置焊接接头。

11.4.7 本条规定了架空烟道的抗震构造措施。

1 在地震作用下,烟道壁太薄容易产生变形,造成烟道壁内瘪外突。同时要指出,烟道壁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,要留有足够的插入长度,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要焊接在支承结构上,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 本条规定都是为了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 制订的。

附录 A 构架上设备的地震作用

A. 0. 2 本条是根据原中国石化总公司北京设计院完成的“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。通过大量的实例计算可知,其地震作用比值一般在 0. 5 到 2. 5 之间。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。

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 A. 0. 2)进行地震作用的计算。从图 A. 0. 2 中可看出,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。

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,取为 1。

A. 0. 4 式(A. 0. 4-1)和式(A. 0. 4-2)是取自《日本建筑结构抗震

条例(1980)》，当采用长度单位为 m 时，式(A. 0. 4-1)中 H_s 的系数原为 2. 8，经过对石油化工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，本标准中的系数采用 3。

附录 B 支腿式直立设备抗震验算

B. 0. 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. 0. 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。各种外载作用下支腿连接处的筒体将产生较大的局部应力,设计时应予以考虑。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。垫板的宽度必须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.0.1 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 4 所示的两个方向,这时各支耳的反力大小如图 4 所示。

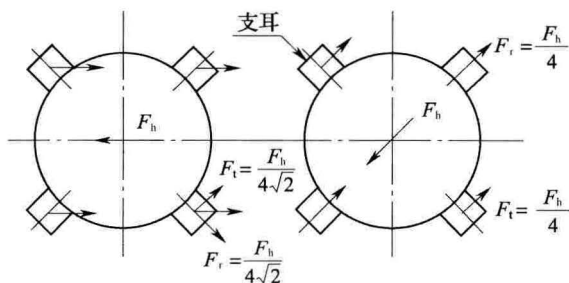


图 4 水平载荷作用引起的支耳反力示意

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.0.1)。

C.0.2 同样,由于水平作用载荷引起的弯矩和竖向载荷在支耳上产生纵向反力也存在以上工况,故给出式(C.0.2)。

C.0.3 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。因此,除了校核支耳本身的应力外,也应考虑连接处筒体的局部应力。

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。当局部应力不满足许用值时,可以设置垫板,且垫板要有足够的宽度,使垫板厚度参与局部应力计算。

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。

S/N:155182 · 0310



9 155182 031005



统一书号: 155182 · 0310

定 价: 26.00 元