

文章编号:1671-6833(2007)02-0064-04

## 高塔型烟气脱硫吸收塔结构动力特性分析

李天, 孙永胜

(郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**目前国内尚没有吸收塔结构设计规范,通过分析国内薄壁塔类结构相关规范,得出薄壁塔类结构的动力特性计算方法基本归结为仅考虑结构本身与仅考虑固液耦联作用两大类;根据有限元理论,对带有高塔的烟气脱硫吸收塔结构进行有限元建模,并进行了动力特性分析,对其刚度分布情况有了深入的了解;通过将有限元分析结果与按国内各薄壁塔类结构规范中的公式计算结果进行比较,得出吸收塔结构基本自振周期可按照《钢制塔式容器》中的公式进行计算,误差为4.5%。

**关键词:** 烟气脱硫吸收塔;有限元法;动力特性;结构刚度

**中图分类号:** TU 33+3

**文献标识码:** A

### 0 引言

目前我国大型火电厂烟气脱硫主要采用国外应用较成熟、应用较广的湿法(石灰石/石膏法)脱硫工艺。吸收塔是实现烟气脱硫工艺中的主体结构,为大型薄壁壳体钢结构。吸收塔内部设置各种管道、支撑梁,塔体开设管道洞口、烟气进出口,塔体有些部分通过型钢加强,整个结构形式复杂。对于脱硫吸收塔的设计我国还没有专门的设计规范。对于这类结构的设计,主要参照国内钢制压力容器及钢制储罐等方面的规范。对于这类结构的静力分析,各本规范一般都一样。然而当对于这类结构的抗震分析,各规范均有较大的不同。仅就这类结构的动力特性计算,在不同的规范中也给出了不同的计算方法。因此,在实际工程中采用合理的计算方法是对于高塔型烟气脱硫吸收塔结构设计的基本要求。作者首先分析了各规范对于薄壁塔类结构基本周期计算公式的适用性,然后通过对于高塔型烟气脱硫吸收塔结构进行动力特性分析,确定该类结构的计算方法。

### 1 国内薄壁塔类结构相关规范

目前国内有关薄壁塔类结构的设计规范包括有钢制压力容器和钢制储罐等方面的规范,与脱硫吸收塔类似的主要有:《钢制塔式容器》(JB/

T 4710-2005)、《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》(GB 50341-2003)、《构筑物抗震设计规范》(GB 50191-93)、《石油化工钢制设备抗震设计规范》(SH 3048-1999)、《粮食钢板筒仓设计规范》(GB 50322-2001),这些规范均包含有关于塔类结构动力特性计算的方法。

(1)《钢制塔式容器》<sup>[1]</sup>为部颁标准。在该标准中,将直径、厚度或材料沿高度变化的塔式容器视为一个多质点体系,如图1所示。其中直径和厚度不变的每段塔式容器质量,处理为作用在该段高度1/2处的集中质量。塔式容器基本振型自振周期( $T_1$ )的计算表达式为

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

显然,公式(1)不考虑塔内液体的影响,同时结构的自振周期是按弯曲变形考虑。

(2)《构筑物抗震设计规范》<sup>[2]</sup>中常压立式圆筒形储罐的自振周期计算适用于储罐高度与直径之比小于1.6的圆筒形储罐,计算按梁式振动理论推导出的近似公式简化得出,主要考虑了圆筒形储罐的剪切变形、弯曲变形及圆筒截面变形的影响,其质量考虑为储液的质量,不考虑储罐本身的质量。罐液耦连振动周期( $T_1$ )按下式计算:

$$T_1 = 0.374 \times 10^{-3} \gamma_c h \sqrt{r_1 / i_0} \quad (2)$$

收稿日期:2006-12-03;修订日期:2007-02-10

作者简介:李天(1960-),男,浙江宁波人,郑州大学教授,博士,博士生导师,主要从事钢结构、工程结构抗震方面的研究。

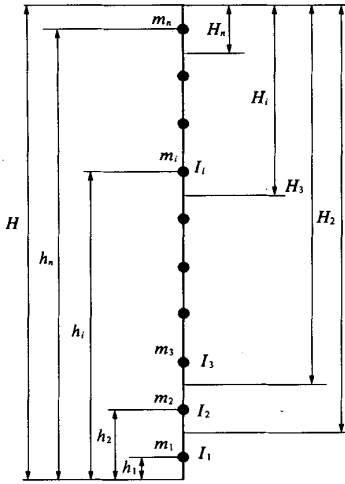


图1 多质点体系图

Fig.1 The picture of multi-mass point system

(3)《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》<sup>[3]</sup>中关于罐液藕联振动基本自振周期的计算与《构筑物抗震设计规范》中立式圆筒形储罐自振周期的计算公式类似,表达式为

$$T_c = K_c H \sqrt{R/\delta_3} \quad (3)$$

(4)《石油化工钢制设备抗震设计规范》<sup>[4]</sup>也为部颁标准,储罐的罐液藕联振动基本自振周期计算考虑了液体压力非均匀分布作用,计算公式为

$$T_1 = 7.743 \times 10^{-5} \left( e^{\frac{H_w}{D}} + 0.7147 \frac{H_w}{D} \right) D \sqrt{\frac{D}{\delta_3}} \quad (4)$$

(5)《粮食钢板筒仓设计规范》<sup>[5]</sup>中粮食钢板筒仓结构的动力特性计算建议按下端固定于地面,沿高度质量基本均匀分布的悬臂构件计算。

通过以上分析,目前我国规范关于圆筒形塔类结构的动力特性计算方法基本可归为两大类,一类仅考虑结构本身的质量,不考虑结构与液体的耦连作用,如式(1);另一类则是只考虑结构与储液的耦连作用不考虑结构本身的质量,其在规范中仅适用于高度与直径比较小的结构,如式(2)~(4)。无论哪类方法,动力特征计算均采用梁式振动理论。

## 2 吸收塔结构动力特性分析

吸收塔是脱硫工艺中的主要结构,为大型薄壁壳体钢结构。吸收塔内部还设置了各种管道、支撑梁,塔体开设管道洞口、烟气进出口,塔体有些部分通过型钢加强。由于塔体结构的高径比远大于1.6,同时塔内有一定量的液体,结构有较多的

变截面、开洞等,结构形式与前面所提的各个规范都有一定的差距。要确定该类型结构的动力特性计算方法,无法直接套用上述的规范。而通过有限元法计算吸收塔体系的动力特性是一种行之有效的方法。

### 2.1 有限元模型

不失一般性,这里以具有代表性的某全钢结构脱硫吸收塔为对象,塔身按直径分为3段,下段直径为12 m,中段直径9 m,上段直径6.2 m;塔身壁厚沿高度分段变化,如图2(a)所示,图中尺寸标高单位为m,其余尺寸单位均为mm。

计算中采用通用有限元计算软件 ANSYS 建模,选用三维4节点弹性壳单元 shell63 模拟塔体、进出口烟道及管道,选用空间梁单元 beam188 模拟支撑梁及各种加强梁。由于塔体开设多个洞口,给单元划分带来不便。选择面的划分顺序对不规则单元数目产生影响,通过尝试不同的划分顺序减少不规则单元数目<sup>[6]</sup>。网格划分后塔体壳单元的数目为36 063,节点数目为22 171,定义了9种 shell63 单元实常数、15种 beam188 单元截面形式,有限元模型如图2(b)所示。

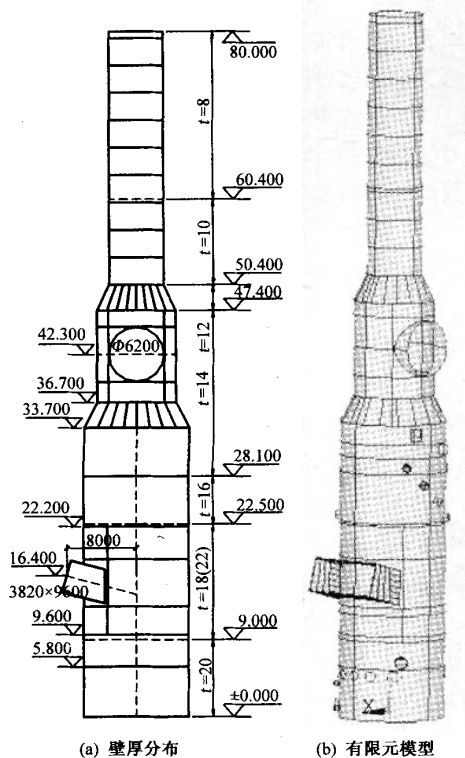


图2 吸收塔壁厚分布及有限元模型

Fig.2 The wall thickness distribution and finite element modal of absorber tower

2.2 动力特性分析

由于脱硫吸收塔内部有一定的液体,所以严格地说,在进行动力特性计算时应当考虑液柱静压力.但对于本例所分析的高塔型吸收塔,总高度达 80 m,液柱的高度所占的比例较小,对于整个吸收塔的动力特性的影响不大.所以在建模时液柱视为集中质量加到浆液作用部位的塔壁节点

上<sup>[7-9]</sup>.吸收塔底部和基础环板焊接在一起,与基础通过预埋的 36 个地脚锚栓连接在一起,较好的约束了底部的位移和转动,所以约束条件近似简化为在底部固接.在 ANSYS 求解选项中声明模态分析方法为分块 Lanczos 法.根据吸收塔结构特点以及通过试计算,确定该吸收塔的振型计算数.表 1 列出了吸收塔前 10 阶振动频率及周期.

表 1 振动频率及周期  
Tab.1 The vibration frequency and period

阶 数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
频率/Hz	2.140 1	2.328 3	3.612 5	3.623 5	4.436 2	4.621 0	4.898 4	4.998 9	5.023 5	5.030 3
周期/s	0.467 3	0.429 5	0.276 8	0.276 0	0.225 4	0.216 4	0.204 1	0.200 0	0.199 1	0.198 8

通过对吸收塔的动力特征分析,从计算结果表 1 以及结构模态特征图 3 可以看出:

(1)第 1、2 阶振型为吸收塔在两个主要方向的基本振型.说明这种高型吸收塔的整体振型是结构的主要振型,表现出结构的整体刚度起主要控制作用.

(2)第 3~18 阶振型主要表现为不同部位壳体的局部振动伴随局部梁的振动.而第 3、4 阶振型表现为吸收塔上部筒体的振动,该吸收塔下段筒体表面开设较多洞孔,且洞孔附近没有加劲,局部刚度削弱较严重,故该段塔身局部振动较明显(第 13、14、18 阶振型).而开有大孔但进行局部加强的部位(烟气进口)没有明显的振动,说明对于洞口的局部加强效果是明显的.

(3)在吸收塔内设置了池分离层管道、喷淋管道、支撑梁,这些梁的刚度相对较弱,第 5~12 阶振型表现为吸收塔体内部支撑梁的弯曲振动振型,且出现很多.有的支撑梁在较早就出现了二阶弯曲振型.由于吸收塔内的各种支撑梁的刚度对于整体结构影响并不是主要的,所以对于这些构件的刚度要求,可以不作为需要处理的对象.

(4)第 6、19、22 阶振型分别为沿两个方向的整体高阶振型,以后的更高阶的整体振型很晚才出现,说明这种高塔结构高阶振型的影响不大.

(5)由于两个圆台面及烟气进口都有很多型钢加强,明显的局部振动振型出现得均较晚.进风口明显局部振动直到第 68 阶振型才出现.

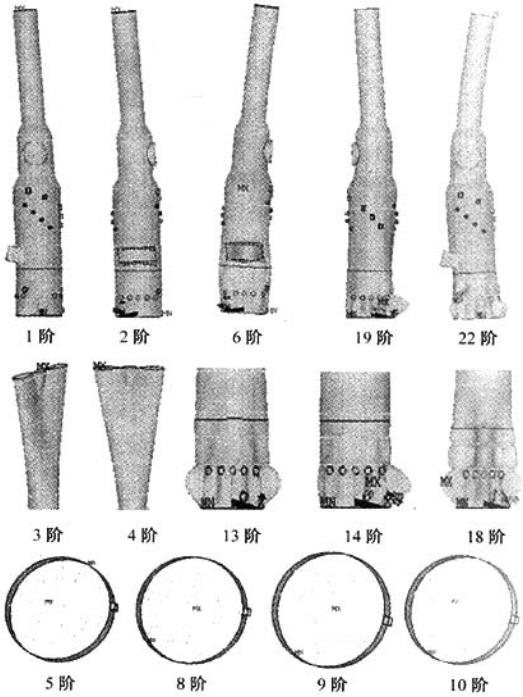


图 3 有代表性的振型  
Fig.3 The representational vibration form

3 吸收塔基本周期的计算

根据前面所讨论的各规范给出的塔类结构的基本周期计算公式,计算该高塔型烟气脱硫吸收塔结构的基本自振周期,计算结果列于表 2 中.

表 2 按国内各规范计算吸收塔的基本自振周期  
Tab.2 The natural vibration period of absorber tower calculated by each code in domestic

国内各相关规范	GB 50191 - 93	GB 50341 - 2003	SH 3048 - 1999	JB/T 4710 - 2005
基本自振周期/s	0.091 7	0.091 5	0.055 2	0.446 1

从表中可以看出,按前3个规范中的公式计算吸收塔基本周期与有限元计算的结果(表1)相差较大,这说明吸收塔不符合这些规范的要求,同时建模时对于浆液的处理不完善,不能真正反映浆液的存在对吸收塔振动特性的影响。而《钢制塔式容器》(JB/T 4710-2005)中基本自振周期的计算简化比较符合吸收塔结构,其计算结果与有限元分析结果比较接近,误差为4.5%。所以,在进行吸收塔结构设计时,当不需要考虑吸收塔内的液体与结构的动力相互作用,则其基本自振周期的计算可参照《钢制塔式容器》中所给的公式。

#### 4 结语

通过分析目前我国关于塔式容器规范中结构动力特性的计算方法,可以看出关于塔式容器的动力分析主要采用两种分析方法,一种是多质点体系分析方法,另一种是考虑液体和结构相互作用的方法。对于高塔型脱硫吸收塔,当液体与结构的相互作用不是非常大,可以采用多质点体系的分析方法,不考虑液体与结构的相互作用。从吸收塔各阶振型的分析中可以看出,整体高阶振型出现较晚,局部振动振型明显。而烟气进口及两个圆台面由于有很多型钢加劲刚度比较大,局部振动不明显或出现较晚。因此该吸收塔整体的刚度和

质量分布不是很均衡,不利于吸收塔的动力性能。作者对吸收塔结构进行动力特性分析,为吸收塔的进一步分析提供了理论依据。

#### 参考文献:

- [1] 国家发展和改革委员会. JB/T 4710-2005 钢制塔式容器[S]. 北京: 新华出版社, 2005.
- [2] 中华人民共和国合金工业部. GB 50191-93 构筑物抗震设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1993.
- [3] 中国石油天然气集团公司. GB 50341-2003 立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [4] 中国石油化工集团公司. SH 3048-99 石油化工钢制设备抗震设计规范[S]. 北京: 中国石化出版社, 1999.
- [5] 国家粮食局. GB 50322-2001 粮食钢板筒仓设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2001.
- [6] 许谋奎, 马人乐. 镇江电厂烟气脱硫吸收塔有限元计算分析[J]. 特种结构, 2005, 22(2): 23-25.
- [7] 孙利民, 张庆华, 赵 勇. 卧式圆筒形储油罐液固耦合模态分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2005, 26(2): 89-92.
- [8] 赵云峰, 周利剑. 立式储罐动力反应谱分析[J]. 世界地震工程, 2005, 21(1): 55-60.
- [9] 万 水, 朱德懋. 圆柱贮液器固液耦合模态分析[J]. 工程力学, 2000, 17(3): 87-92.

## Analysis of The Dynamic Properties of Smoke Desulphurization Absorber Tower Structure

LI Tian, SUN Yong-sheng

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Up to now, there is no design code for absorber tower structure. This paper analyzes the calculating method of dynamic properties in thin wall tower structure code in China and draws the conclusion that these methods can be divided into two kinds: only considering structure itself and only considering the interacting between structure and fluid. According to the theory of finite element, the finite element model of smoke desulphurization absorber tower with high tower is established. Then the dynamic properties analysis is conducted and the stiffness characters of the smoke desulphurization absorber tower with high tower structure are studied deeply. By comparing the finite element method results with the calculated results of those codes, the basic natural vibration period of absorber structure is calculated according to the formula in steel vertical vessels supported by skirt code. The discrepancy of the calculated results is 4.5%.

**Key words:** smoke desulphurization absorber tower; finite element method; dynamic property; structural stiffness