

文章编号: 1005-8893 (2004) 01-0021-04

钢烟囱横风向风振的防止

崇惠萍

(南京金陵石化工程有限责任公司 设备室, 江苏 南京 210042)

摘要: 介绍了某烷基苯装置中钢烟囱横风向振动及防止的措施。通过理论分析、数据计算, 防止横风向振动措施的比较, 参考以往实践与模拟实验的数据, 采用安装螺旋翅片破涡器来化解钢烟囱横风向的振动。

关键词: 高耸钢烟囱; 横风向风振; 防振措施

中图分类号: TK 223.26

文献标识码: A

高耸的圆柱形钢制塔器及钢制烟囱是化工与石油化工生产中广泛应用的设备。随着大型化工企业的兴起与发展, 高度与直径比大的塔器及烟囱的数量逐渐增多, 横风向振动事故时有发生, 持续的剧烈振动不仅无法维持生产的正常运行, 还将使设备应力过大, 形成疲劳裂纹, 甚至导致设备的破坏、生产的停顿。因此, 对高耸设备的振动分析在设计阶段就必须进行。

我们为某烷基苯装置设计的高 80 m 的钢烟囱, 上口内直径 2.15 m, 内衬耐热浇注料, 总重 138 t。2002 年 8 月 28 日空烟囱 (总重约 100 t) 吊装完毕, 只待衬里施工。然而在 9 月 6 日, 小雨天气, 风力约 6 级时烟囱发生剧烈振动, 振动方向与风向垂直。用仪器测量烟囱顶振幅, 最大时达 450 mm, 经分析判断为横风向的振动。

1 风振原理

1.1 横风向振动

露天放置的圆柱形设备, 在风力作用下, 将在两个方向上产生振动。一是顺风向的振动, 振动的方向与风的流向一致, 这是常规设计的主要内容; 另一种是横风向的振动, 振动的方向与风的流向垂直, 也称风诱导振动。

1.2 旋涡产生与影响因素

当风以一定的速度吹向圆柱形物体, 平行的气流在圆柱体背风面的两侧交替形成旋涡, 旋涡的出现与消失引起柱体两侧压力的改变, 迫使柱体发生垂直于风向的横向振动。在何种情况下产生涡流与物体的外形尺寸、风速等因素有关, 综合反映在雷诺数上。

1.3 卡门涡流

当 $300 \leq Re < 3 \times 10^5$ 范围内时, 柱体背后两侧周期性交替地形成旋涡并以相当确定的频率从柱体表面上脱落, 在尾流中有规律地交错排列成两行, 这就是通常所说的卡门涡流, 此范围属于亚临界 (Subcritical) 范围; 当 $3 \times 10^5 \leq Re < 3.5 \times 10^6$ 范围内, 卡门涡流消失, 此范围属于超临界 (Supercritical) 范围; 当 $Re \geq 3.5 \times 10^6$ 时, 卡门涡流将重新出现, 此范围属于跨临界 (Trans critical) 范围。见图 1。

1.4 共振

当旋涡脱落的频率等于或接近物体的任一振型的固有频率时, 便会引起物体的共振。

收稿日期: 2003-12-29

作者简介: 崇惠萍 (1966-), 女, 安徽天长人, 工程师, 主要从事化工机械和工业炉设计工作。

1.5 横风向振动判断

由以上可见,通过分析雷诺数、旋涡脱落频率及物体的固有频率,便可判断物体是否发生了横风向的振动。

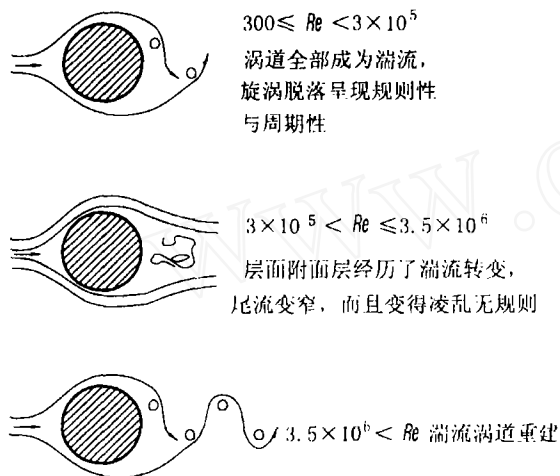


图1 旋涡脱落与雷诺数

2 理论计算与分析

2.1 钢烟囱的数据

高 80 m, 内径 2.15 m (上部直筒段), 内衬耐热浇注料 0.075 m 厚, 浇注料体积密度: 800 kg/m³, 钢壳材料: 碳钢 (Q235-B, F), 弹性模量: 1.91 × 10¹¹, 基本风压 400 N/m², 详细结构尺寸见图 2。

2.2 计算有旋涡产生时的风速

由于风速 v 和直径 D 沿高度均有变化, 在工程计算中为简便计, 取 2/3 高度处的值作为标准进行计算^[1]。

$$\text{根据 } Re = \frac{D\rho v}{\mu}, \text{ 得出: } v = \frac{Re \cdot \mu}{D\rho}.$$

式中: 空气密度 $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$, 动力粘度 $\mu = 1.79 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 2/3 高度 (53 m) 处的风速记作 v_{53} , 2/3 高度处的 $D = 2.17 \text{ m}$, $Re < 3 \times 10^5$ 或 $Re \geq 3.5 \times 10^6$ 。

代入上式得出: $v_{53} < 2.0 \text{ m/s}$ 或 $v_{53} \geq 23.1 \text{ m/s}$ 时烟囱背后将有卡门涡流产生, 相应得出 10 m 处风速: $v_{10} < 1.2 \text{ m/s}$ 或 $v_{10} \geq 13.6 \text{ m/s}$ 。由于 $v_{10} < 1.2 \text{ m/s}$, 属亚临界范围, 风速较小, 只引起微小振动, 可以不予考虑。 $v_{10} \geq 13.6 \text{ m/s}$ 即 6 级风时, 烟囱背后将有卡门涡流产生。此计算数据与实

际风振时风力相符。

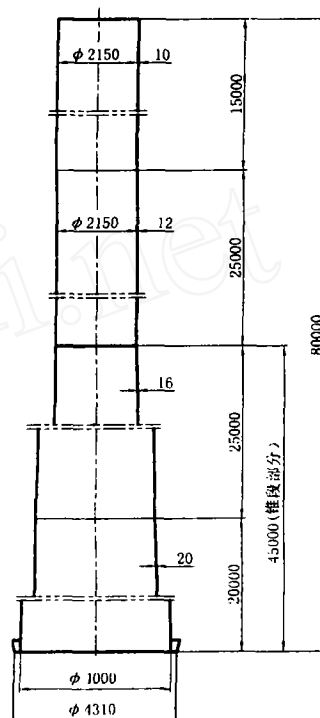


图2 烟囱的结构尺寸

2.3 计算烟囱固有频率

采用《钢制塔式容器》(JB4710-92)^[2]变截面塔第一振型振动周期的公式, 算得: 第一振型振动周期: $T_{c1} = 2.17 \text{ s}$, 第一振型固有频率: $f_{c1} = 1/T_{c1} = 0.46 \text{ s}^{-1}$ 根据文献 [3], 第二振型固有频率: $f_{c2} = 6 f_{c1} = 2.76 \text{ s}^{-1}$ 。

2.4 计算旋涡脱落频率

当风以一定的速度流经烟囱, 旋涡脱落频率 f_v 等于或接近烟囱的任一振型的固有频率 f_{cn} 时, 便会引起共振, 烟囱将在横风向产生大振幅的振动。

一般验证 f_v 是否在 $0.85 f_{cn} \leq f_v \leq 1.3 f_{cn}$ 范围^[4]。旋涡脱落频率 $f_v = St \cdot v/D$ 。

式中: St 为斯特罗哈数, 当 $Re \geq 3.5 \times 10^6$ 取 0.27 (无量纲), $v = 23.1 \text{ m/s}$ 。

代入得出: $f_v = 2.87 \text{ s}^{-1}$, 落在 $0.85 f_{c2} \sim 1.3 f_{c2}$ 范围内。所以 6 级风速的旋涡脱落频率接近烟囱第二振型固有频率, 可以判断本例中烟囱产生了风诱发的横风向振动。这与实际现场的观察是一致的。

3 防止横风向振动的若干措施

理论分析与现场观察均表明烟囱发生了横风向的振动, 需要采取措施减小涡流引起振动的振幅。实际的烟囱振动时总会受到一定的阻尼, 例如: 振动时受到空气摩擦的阻力所带来的流体动力阻尼、材料的反复变形使晶粒重新排列造成能量的耗散所引起的材料阻尼及部件之间碰撞与摩擦所引起的结构阻尼。这些能量消耗, 使得烟囱共振时振幅不会趋于无限大, 但仍可以达到一可观数值, 从而导致烟囱钢壳受到过大的应力。所以, 应采取必要的防振措施。

3.1 提高烟囱的固有频率

①降低烟囱高度, 增加烟囱直径; ②加大壁厚或采用密度小、弹性模量大的材料; ③条件允许, 在相应于烟囱的第二振型曲线节点位置, 即离烟囱顶 $0.22H$ (H 为烟囱的总高) 处安装一个铰支座。

改变结构尺寸改变烟囱的固有频率的方法, 对于本例中已进入安装阶段的烟囱, 已无法进行。

3.2 增加烟囱的阻尼

增加质量和结构的阻尼特性 (如: 使用耐火衬里)。文献 [5] 认为: 有衬里塔器的阻尼比为空塔的 2.5 倍, 即塔顶最大振幅可下降为空塔时的 $1/2.5$ 。

80 m 钢烟囱在衬里施工过程中, 发生过两次振动, 振动程度基本同空烟囱, 并伴随着烟囱与衬里脚手架之间的撞击声。衬里施工完毕后 12 月 2 日烟囱再次发生振动, 振幅仍有 450 mm, 说明本例中烟囱衬里所起的阻尼作用很小。

3.3 采用破涡器

使用空气动力学方法, 采用破涡器来化解风引起的振动, 破涡器至少应在烟囱最上部 $1/3$ 的高度内设置, 有两种设置方法:

(1) 螺旋翅片破涡器: 螺旋状加强筋应由 3 条间隔为 120° 的矩形扰流板组成, 其螺距为烟囱直径的 5 倍, 筋板宽度为烟囱直径的 0.1 倍。

(2) 轴向翅片破涡器: 交错排列的直立板长度应不大于 1.5 m, 3 块板应沿烟囱的周向成 120° 布置, 板宽应为烟囱外径的 0.1 倍, 上下相邻位置的直立板间应互相错开 30° 。

4 破涡器形式的比较

通过以上分析, 本烟囱只能采取增加破涡器的

防振方法。采用哪一种形式的破涡器, 进行了调研与资料搜集。

4.1 破涡器应用实例

(1) 扬子石化气体车间空分塔, 塔径: 1.4 m, 高 60 m, 一定的风速下发生共振, 在塔顶部 $1/2$ 高度焊上螺旋条, 头数为 3, 螺距为外径的 5 倍, 翅片宽度为外径的 0.1 倍, 螺旋条厚度为 5 mm, 螺旋条安装后起到了明显的减振效果。

(2) 天津 14 万 t 乙烯生产装置中的乙烯精馏塔, 高 75 m, 重 115 t, 每逢刮 4 级风时, 便剧烈晃动起来, 塔顶振幅为半米多, 分析为塔的二阶振型时卡门旋涡诱发的振动。采用了在塔的上部 $1/3$ 塔高范围内安装轴向翅片破涡器来减缓塔的共振。实践证明: 轴向翅片破涡器起到了减缓振动的作用, 塔顶振幅下降了一半, 不过, 效果仍不太理想^[6]。

4.2 模拟试验

为了探讨螺旋翅片破涡器可能达到的防振效果, 天津大学聂清德教授利用风洞装置进行了模拟试验, 试验用的管子材料为紫铜, 在光管外焊上螺旋形翅片, 头数为 3, 螺距为外径的 5 倍, 翅片宽度为外径的 0.1 倍, 结果为: 安装螺旋破涡器后的横向振幅为安装前的 $1/3.55$ 。

实践证明: 在大型钢制塔体上部 $1/3$ 高度的部分焊上螺旋条, 有很好的防振效果。根据上述风洞模拟试验数据及有关的资料与实践, 最终决定在烟囱上安装了螺旋破涡器, 尺寸见图 3。

安装螺旋翅片破涡器后, 本烟囱再未发生过较大的横风向振动。

5 结束语

高耸结构横风向的振动不容忽视。设计阶段不但要进行顺风向的强度及稳定核算, 符合下列条件之一者, 塔或烟囱还应作横风向振动分析: ①塔或烟囱高度 $H > 30$ m; ②无衬里烟囱的高径比, $H/D \geq 13$; 有衬里的烟囱 $H/D \geq 15$; 工业塔 $H/D \geq 15$ 。式中: H 为塔或烟囱高度; D 为塔或烟囱外径。

分析可能存在横风向振动时, 可按照 API 的有关数据规定尽可能选择安装螺旋翅片破涡器。在设计阶段采取有效的防振措施是最经济的。

参考文献:

- [1] 张相庭. 结构风压和风振计算 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1985.
- [2] JB4710-92, 《钢制塔式容器》及标准释义 [S].
- [3] ISO/FDIS 13705, 2001, 石油和天然气工业 一般炼油装置用火焰加热炉 [S].
- [4] 聂清德. 化工设备设计 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1991.
- [5] 曲文海, 叶日新, 聂清德, 等. 压力容器与化工设备实用手册 [M]. 下册. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [6] 聂清德, 谭蔚, 张明贤. 乙烯精馏塔的防振 [J]. 化工机械, 1999, 26 (6): 330-332.

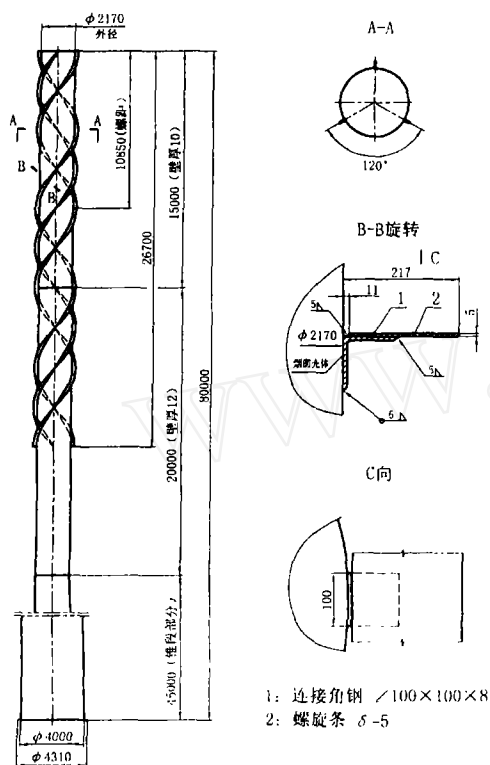


图3 螺旋翅片破涡器结构尺寸图

Prevention of Steel Stacks from Crosswind Vibration

CHONG Hui-ping

(Department of Mechanical and Vessel, Nanjing Jinling Petrochemical Engineering Co., Ltd, Nanjing 210042, China)

Abstract: This paper presents effective measures for preventing steel stacks in LAB plant from vibrating in crosswind. Based on theoretical analysis, data calculation, comparison of different anti-vibration measures as well as laboratory simulation, the author proposes a method to solve the vibration of steel stacks in crosswind direction by installing a helical fin whorl-breaker.

Key words: towering steel stacks; crosswind vibration; anti-vibration measures