

# 钢筋混凝土烟囱温度应力浅析

程鹏 李娟

(山东三维石化工程股份有限公司, 山东淄博, 255434)

**摘要** 钢筋混凝土烟囱在使用过程中表面常出现裂缝, 有的裂缝宽度大大超过了规范允许的限值, 影响正常使用。本文采用有限元仿真软件 Ansys 对钢筋混凝土烟囱进行温度应力分析, 研究筒壁在高温烟气作用下的应力分布规律及其裂缝产生原因, 采取预防措施, 进一步优化设计。

**关键词** 烟囱 温度应力 有限元 裂缝

中图分类号: TK621 文献标识码: B 文章编号: 1009-9859(2010)03-0211-04

烟囱作为烟气的主要排放方式在工业企业中有广泛应用, 其中尤以钢筋混凝土烟囱应用最多。工业企业排放烟气通常都是高温气体, 且烟囱在使用过程中常年处于高温状态下, 由高温产生的筒壁温度应力是一种常态。筒壁裂缝会影响到整体刚度和结构强度, 危及生产安全, 其作用应引起重视。本文采用 Ansys 软件来分析筒壁温度应力, 研究温度应力的分布规律及其对裂缝产生的影响, 帮助我们在进行烟囱设计时有目的的采取措施来尽量减少温度应力的不利影响, 达到优化设计的目的。

## 1 烟囱筒壁热结构耦合分析

现结合西北某石化项目烟囱进行实际分析。烟囱总高 100 m, 上口内径 1.5 m, 下口内径 7 m, 内衬为高铝质隔热耐酸砖, 隔热层初始选择采用 60 mm 厚岩棉, 钢筋混凝土筒身, 壁厚从上至下递增, 上口壁厚 180 mm, 下口壁厚 380 mm。

### 1.1 模型及边界条件

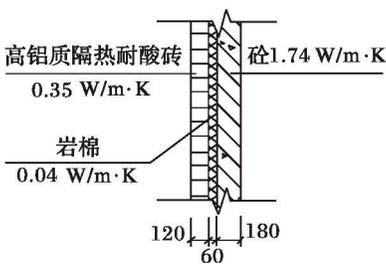


图 1 烟囱筒壁剖面及导热系数

正常工作状态下, 烟囱内部高温气体和外部大气之间的温差会导致筒壁内产生温度应力, 现在取其一段筒壁作为分析对象, 分析温度应力随不同变量的变化规律。内部烟气温度取 140 °C, 外部大气温度取 -10 °C; 烟囱筒壁剖面见图 1。

本例属于轴对称问题, 可以采用轴对称方法来进行分析; 同时本问题为典型的热-应力耦合问题, 可以采用间接法顺序耦合的一般方法来进行分析。

首先建立热分析模型, 轴向尺寸取任意大于零的值, 内壁温度 140 °C, 外壁温度 -10 °C 作为边界条件, Ansys 热分析模型见图 2。

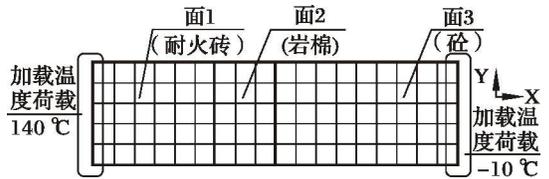


图 2 Ansys 热分析模型

然后建立热-结构耦合分析模型, 轴向尺寸取任意大于零的值, 将其一边轴向约束, 另一边所有节点轴向自由度耦合, 并将第一步热分析得出的面 3 两侧的温度作为边界条件加载至相应节点, Ansys 热-结构分析模型详见图 3。

收稿日期: 2010-05-25 修回日期: 2010-06-12

作者简介: 程鹏 (1978-), 男, 本科, 一级注册结构师, 工程师。电话: 0533-7574191。

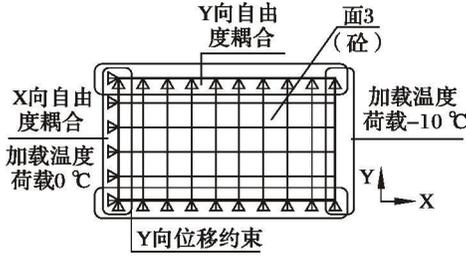


图 3 Ansys热 - 结构分析模型

### 1.2 稳态热分析

采用热分析单元 plane77, plane77是二维 8 节点热单元, 每个节点只有一个自由度 (温度)。8 节点单元具有一致的温度形函数, 可以较好的适应具有曲线边界的模型进行稳态和瞬态热分析。进行稳态热分析求解后, 用通用后处理器观察温度沿烟囱壁厚的变化。温度沿筒壁的变化曲线见图 4。

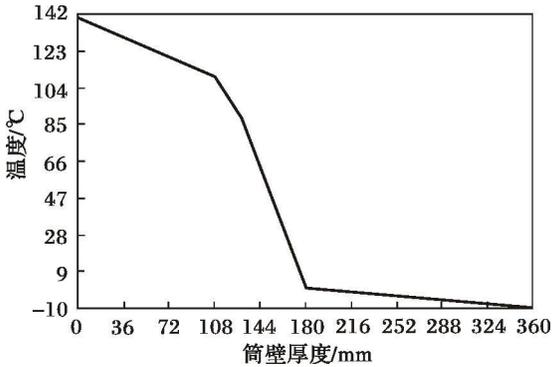


图 4 温度沿筒壁的变化曲线

从图 4可以看出, 高铝质隔热耐酸砖和岩棉的隔热效果非常明显, 尤其在经过热导率最小的岩棉后, 温度大约由 140℃降至 0℃, 大大降低了钢筋混凝土筒壁内外表面的温度差。

### 1.3 热 - 结构耦合分析

本文只对烟囱筒壁进行稳态热 - 结构耦合分析, 即分析烟囱在正常工作状态下的温度应力分布, 而不讨论升温 and 冷却反复交替作用下的情况。

由于中间隔热层岩棉为散体材料, 为了避免其弹性模量和泊松比的取值不合适会对热 - 结构耦合分析结果产生影响, 现仅对烟囱筒壁的混凝土部分重新建模, 边界条件取用前面稳态热分析的结果, 先进行稳态热分析, 再将热分析结果作为

体荷载加载到模型进行热 - 结构耦合分析。取混凝土弹性模量  $3.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ , 热膨胀系数  $1.2 \times 10^{-5} /\text{℃}$ , 泊松比 0.2; 内壁温度取 0℃, 外壁温度取 -10℃。

运行稳态热分析后, 将模型中的热单元 plane77转换为和其对应的结构单元 plane82 并设定其轴对称属性; 定义材料的力学性能, 结构分析边界条件和温度荷载, 进行求解。通过通用后处理器来观察分析结果, 见图 5。

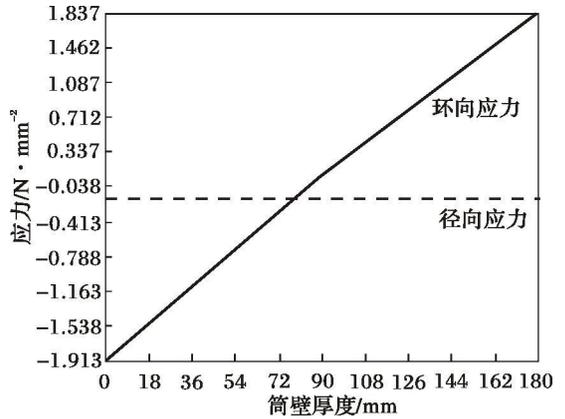


图 5 环向应力与径向应力

烟囱筒壁径向应力较小, 环向应力较大。筒壁内侧受压, 最大压应力 1.913MPa, 筒壁外侧受拉, 最大拉应力 1.837MPa。根据《混凝土结构设计规范》GB 50010—2002, C30混凝土强度标准值  $f_{tk} = 2.01 \text{ MPa}$ , 筒壁外侧的拉应力已经很接近强度标准值, 如果再考虑其它工况, 如风、地震等的共同作用, 按多轴强度理论分析<sup>[4]</sup>, 其外侧主拉应力极易超过混凝土拉力限值, 形成裂缝。

### 1.4 壁厚对筒壁外表面应力的影响

实际应用中, 因其结构受力特点, 烟囱的筒壁厚度往往设计成沿高度变化; 上部壁厚较薄而下部壁厚较厚。在不同壁厚的情况下, 分别应用上述分析方法得出其外表面环向应力, 以了解应力随壁厚变化的规律。保持其它条件不变, 仅修改烟囱的壁厚, 将壁厚改为 220 260 300 340mm 几个常用尺寸, 计算结果见图 6。

由图 6可以看出, 应力随壁厚改变的变化幅度不大, 壁厚每增加 40mm, 外表面环向应力降低 0.54个百分点; 且随壁厚的增加, 环向应力呈现出下降的趋势。

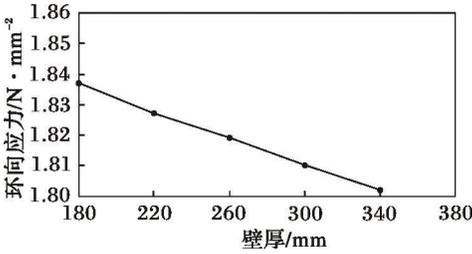


图 6 环向应力与壁厚相关曲线

### 1.5 烟囱内径对筒壁外表面应力的影响

应用中, 烟囱通常被设计成上细下粗的型式以满足其抵抗水平力的要求。在不同的高度处其内径不同, 保持其它条件不变的情况下, 仅修改烟囱的内径, 取常用烟囱内径 1 500 2 500 3 640 4 780 5 900mm 分别得出其外表面环向应力。结果见图 7。

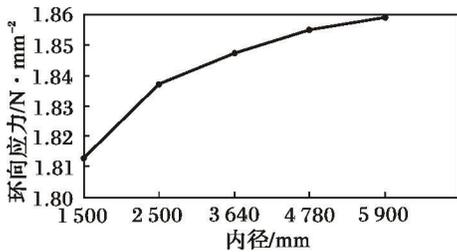


图 7 环向应力与内径的相关曲线

由图 7 看出, 应力随内径变大呈递增的趋势, 但其变化幅度依然不大, 每 10 m 高度约变动 0.54 个百分点。

### 1.6 内表面温度变化对筒壁外表面应力的影响

实际应用中, 筒壁内表面温度很难控制在恒温, 而是随外界环境不断的变动。参考烟气温度每 10m 降低 1℃ 左右, 保持其它条件不变, 仅修改内外表面温度差, 外表面取 - 10℃, 内表面取温度 0 2 4 6 8℃ 分别得出其外表面环向应力。结果见图 8

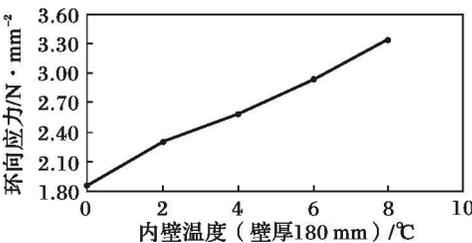


图 8 环向应力与内壁温度的相关曲线

由图 8 看出, 外表面环向应力随壁面温差的增大而增大, 温差每增加 2℃, 应力变动幅度约 17 个百分点。

通过以上 3 组数据的对比, 几何尺寸对应力变动的影晌基本可以忽略不计, 壁面温差对烟囱外表面环向应力起控制作用; 要控制外表面环向应力, 就要控制壁面温差。

## 2 烟气正压负压对筒壁内表面温度的影响

在烟囱正常工作状态下, 一般希望烟囱全程负压运行, 这样烟气很难渗入到烟囱间隙并到达外筒身的表面。若烟囱内出现正压区, 则烟气会通过内衬缝隙渗入到隔热夹层。由于内衬的隔热作用, 该处温度比烟气温度低很多, 因此当烟气冷却到低于露点温度时就会在该处筒壁内表面结露析出硫酸, 增大隔热层的湿度, 导致隔热层的导热系数成倍增加, 进一步扩大筒壁内外表面温差和外表面环向应力。

《烟风煤粉管道技术规定》中并未就烟囱内部热力空气动力特性给出标准化的理论计算公式, 这里参考前苏联《锅炉设备空气动力计算(标准方法)》一书及苏联《热能动力》杂志等参考资料<sup>[5]</sup>, 其中出口为大气的锥形烟囱内部静压力计算公式如下:

$$\Delta p = \left(1 + \frac{\lambda}{8i_n}\right) \times \left(1 - \frac{d_0^4}{d_n^4}\right) \times \frac{\omega_0^2 \gamma_y}{2} + \xi \frac{\omega_0^2 \gamma_y}{2} - \gamma_1 (\gamma_k - \gamma_y) g \tag{1}$$

式中:  $\Delta p$ ——烟囱内剩余静压力, Pa

$\lambda$ ——烟囱摩擦阻力系数, 对内部有环状凸出的混凝土烟囱取 0.05

$i_n$ ——锥形烟囱第  $n$  段坡度;

$d_0$ ——烟囱出口内径, m;

$\omega_0$ ——烟囱出口流速, m/s

$d_n$ ——锥形烟囱第  $n$  段入口直径, m

$\gamma_1$ ——各段烟囱出口至计算断面的高度, m

$\gamma_k$ ——室外空气重度, N/m<sup>3</sup>;

$\gamma_y$ ——烟气重度, N/m<sup>3</sup>;

$g$ ——重力加速度, 9.8 m/s<sup>2</sup>;

$\xi$ ——烟囱出口损失系数, 当不设扩压器时

取 0.1

对于前述 100m 高烟囱, 取烟囱出口流速 15 m/s 空气重度 1.297 N/m<sup>3</sup>, 烟气重度 1.019 N/

m<sup>3</sup>,以 10m 为区段计算烟囱内静压力分布。结果如图 9 所示。

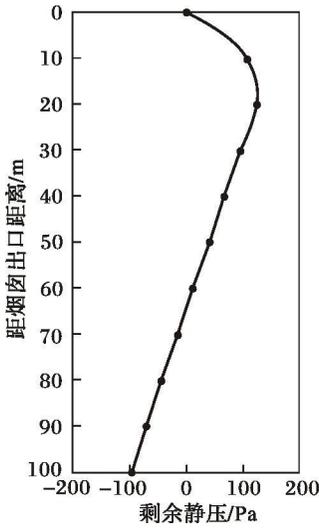


图 9 烟囱内静压力分布

按照工艺计算采用的 15 m /s 出口流速, 仅能保证烟囱的下部为负压, 而如果采用烟风煤粉管道技术规定中的烟囱出口流速上限推荐值来计算, 此烟囱将全程处于正压状态。这就是说对于现在应用的大多数单锥体烟囱来说, 不可能满足全程负压运行的要求, 越靠近出口处, 烟气正压越大, 其通过内衬空隙渗入到隔热夹层的可能性越大。这与《烟囱裂缝综述》<sup>[2]</sup>中汇总的裂缝分布规律是吻合的, 即裂缝绝大部分为纵向, 且分布在距出口 1/3~ 1/4 烟囱全高范围内。

### 3 日照对烟囱外壁应力的影响

在昼夜温差大的情况下, 白天太阳光直射会

迅速升高混凝土表面温度至 40~ 50℃, 这种情况下如果筒壁内侧温度低于外侧温度, 则会发生相反的应力分布, 即筒壁外侧受压而内侧受拉, 在多重荷载共同作用下, 筒壁内侧易产生微裂缝。在烟囱正压区, 深入到隔热夹层的烟气会在内壁表面结露析出硫酸, 硫酸渗入到裂缝中会迅速破坏混凝土结构的碱性环境, 从而导致承重结构腐蚀加速, 缩短烟囱使用寿命。

### 4 结论

通过以上分析, 在设计过程中同时考虑以下因素可以有效的预防烟囱在使用过程中出现裂缝现象。

(1)对烟囱筒壁进行热分析时考虑湿度对隔热材料的影响, 适当提高隔热材料导热系数来进行温度计算。

(2)采用憎水性实体材料作为隔热层, 减少烟气渗入夹层结露的可能性。

(3)对筒壁采用双层配筋, 降低由强烈日照产生筒壁内侧裂缝的可能性。

### 参考文献

- 1 姜子良. 120米钢筋混凝土烟囱竖向垂直裂缝分析. 建筑技术, 1984(2): 21~ 23
- 2 吕友全. 烟囱裂缝综述. 电力建设, 1987(3): 27~ 29
- 3 中华人民共和国建设部. GB 50051- 2002. 烟囱设计规范. 北京: 中国计划出版社, 2003
- 4 覃雨坤. 多轴强度理论在烟囱筒壁分析中的应用. 特种结构, 2000, 17(2): 1~ 4
- 5 李昌伟. 全负压烟囱选型浅析. 电力学报, 1997, 12(4): 59~ 64

## BRIEF DISCUSSION ON STRESS OF CHIMNEY FROM REINFORCEMENT CONCRETE UNDER HIGH TEMPERATURE

Cheng Peng Li Juan

(Shandong Samwei Petrochemical Engineering Co., Ltd., Zibo Shandong 255434)

**Abstract** The crack often appears during usage of the reinforcement concrete chimney and with of some cracks exceeds greatly pemitted limit value of the criterion, which influences normal service of the chimney. This paper analyzed stress acting on the reinforcement concrete chimney by FFE simulation software Ansys, studied stress distribution rule of the chimney wall and causes of the crack appearance, and took preventive measures and achieved optimized design.

**Key words** chimney, stress under temperature, FFE, crack