

套筒烟囱热工计算的实验研究

顾瑞英 张 强 杜康荣 (西安冶金建筑学院)

陆卯生 朱为荣 (西北电力设计院)

〔摘要〕 对石横电厂套筒烟囱进行现场实测, 获得大量数据。进而根据热工学的基本原理, 参考测得的数据导出了一组计算公式。它们为套筒烟囱的工程设计提供了依据。

关键词 套筒烟囱 温度分布 测试 计算

1 前 言

套筒烟囱是具有抗腐蚀性能的一种新型烟囱。这种烟囱有足够宽的空气间层, 从而将承受各种载荷的钢筋混凝土筒身 (以下简称外筒) 与通烟气的烟筒 (以下简称内筒) 隔开, 不仅可以对内筒进行有效的隔热处理, 而且可以排除由内筒渗出的少量烟气, 大大减轻了外筒壁的温度应力, 避免了烟气经外筒壁裂缝的渗漏, 从而有效地防止外筒的腐蚀。我国已在山东石横电厂建成了第一座240/7.5 m的套筒烟囱。但目前尚未见到国内、外对套筒烟囱热工计算的完整资料。本课题组于1988年和1989年对石横电厂的烟囱进行了现场实测, 在此基础上结合理论分析, 提出了一套计算公式。在此愿与同行们共同探讨。

2 套筒烟囱的结构及热工测试

石横电厂的烟囱结构见图1。内筒为多段套接而成, 每段高25 m, 两段套接处的内、外筒环形通道中设有平台, 平台上方1.2 m处的内筒壁上预设有测孔。我们分别在烟囱半负荷 (一台炉) 和满负荷 (二台炉) 运行工况下, 在标高90 m, 115 m, 140 m, 165 m, 190 m, 215 m处连续24小时监测了如下参数: 烟温, 烟气流量, 内筒内壁温, 内筒耐火砖外表面温度, 内筒保温层外表面温度, 内筒壁热流通量, 外筒壁东、南、西、北四个朝向的内、外表面温度和热流通量, 室外和间层内的空气温度, 以及各标高处的烟气静压值。并量取了当地的大气压, 查取了当地太阳辐射强度、风速、风向等有关气象资料。所有的温度都用铜-康铜热电偶配电位差计测定。为了减小误差, 热电偶头部均加了辐射屏蔽罩。内、外筒壁体的热流通量用可挠式热流计测得。

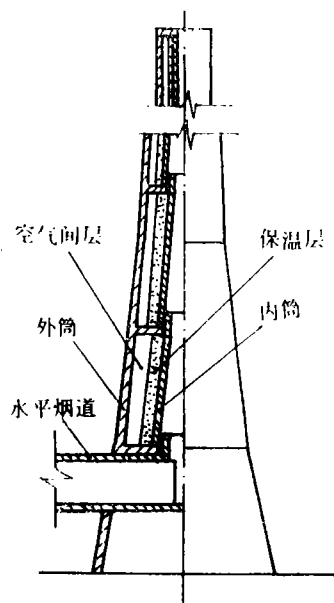


图1 套筒烟囱结构示意图

收稿日期 1990-05-31

通过测试,取得了大量的数据资料。并发现,由于内筒各段套接处密封不严,同时烟气呈负压,故有一定量的空气通过内筒壁漏入烟气中。

3 套筒烟囱的热工计算公式

3.1 计算目的和方法概说

计算的目的是在给定室外气象参数和烟囱入口处的烟气参数(温度、流量、密度或成分)的条件下,确定烟气温度的分布,间层内的空气温度分布以及内、外筒壁体的温度分布,为合理地设计烟囱和进行热应力分析提供依据。

由于烟囱结构尺寸随高度变化,室外气温、风速以及烟温和烟速均随高度变化,所以计算由烟气入口标高向上分段进行。在进行传热计算时,同一段内,烟温和室外气象参数取该段的平均值,还通常把内、外筒均是圆锥形的套筒简化为该段平均直径下的圆筒形套筒。

由于烟温和间层内的空气温度随时间波动很小,所以内筒壁体温度分布的计算可按稳态处理。问题的关键是烟温和间层空气温度的确定。

由于室外气温和太阳辐射均随时间按24小时的周期变化,所以外筒壁体温度分布的计算关键在于对室外外扰的处理。当按稳态考虑时,计算简单,但结果与实测有较大的误差。当按非稳态考虑时,一种最简单的方法是室外外扰取室外空气综合温度的逐时值,并用一阶谐波解析式来近似离散值,这种情况下的解析解已经得出。

3.2 内筒壁传热计算

由于筒壁厚度比直径小得多,可用平壁稳态传热公式,即

$$q_1 = K_1(t_s - t_c) \quad [\text{w/m}^2] \quad (1)$$

式中, K_1 ——内筒壁传热系数,

t_s ——计算段烟气平均温度,

t_c ——计算段间层空气温度。

t_s 和 t_c 的计算见式(16)和式(8)

$$K_1 = \left(\frac{1}{\alpha_s} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_c} \right)^{-1} \quad (2)$$

其中, α_s 为内筒内表面与烟气的总放热系数。考虑到辐射放热虽占有一定的比例,但即使忽略不计也不会对传热系数带来大的影响,为简便起见,这里仅取对流换热部分,并按下式计算[1]

$$\alpha_s = 0.032 \frac{\lambda_s}{D_1} Re_s^{0.8} Pr_s^{0.3} \left(\frac{D_1}{h} \right)^{0.054} \quad (3)$$

式中, λ_s 是烟气导热系数, $[\text{w}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})]$, Pr_s 是烟气普朗特数, D_1 是计算段内筒的平均内直径, $[\text{m}]$, h 是计算段距烟囱的烟气引入口的平均高度, $[\text{m}]$, Re_s 是烟气雷诺数

$$Re_s = \frac{w_s D_1}{\nu_s}, \quad w_s \text{ 是烟气在计算段中部截面的平均流速, } \nu_s \text{ 是烟气的运动粘度。}$$

α_c 是包括内筒外表面与间层空气的对流换热及与外筒内表面的辐射换热在内的总放热系数,理论计算比较复杂。根据实测到的内筒和外筒内表面的热流密度、表面温度和间层空气温度,推算得到的 α_c 值在10~15 $\text{w}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 范围内,设计计算时,建议取

$$\alpha_c = 13 \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})] \quad (4)$$

求出 q_1 后,可根据热阻串联原理由各层的热阻分别求出内筒内、外表面及各层接触面的温度。

3.3 间层空气温度的确定

间层空气温度受多种因素的影响。通过内、外筒壁对间层有传热量 Q_1 和 Q_2 ,由于外筒壁上装有玻璃窗,通过窗的缝隙会由室外漏入风量 G_a' ,同时如前所述,也会有部分空气 G_a'' 通过内筒壁缝隙漏入烟气中。另外,由于间层空气温度比室外的高,间层本身如同烟囱,由于自身抽力作用,空气会以一定流速随间层自下而上流动,设流入、流出环形通道的空气质流量分别为 G_c' 和 G_c'' 。对计算段列间层空气的质量和热量平衡得

$$G_c' + G_a' = G_c'' + G_a'' \quad (5)$$

$$\begin{aligned} K_1 F_1 (t_s - t_c) + G_c' C_{pc} t_c' + G_a' C_{pa} t_a \\ = K_2 F_2 (t_c - t_a) + G_c'' C_{pc} t_c'' + G_a'' C_{pa} t_a \end{aligned} \quad (6)$$

设 $C_{pa} = C_{pc} = C_p$, $t_c' = t_c'' = t_c$, 则由式(5), (6)解得

$$t_c = \frac{K_1 F_1}{K_1 F_1 + K_2 F_2 + G_a' C_p} t_s + \frac{K_2 F_2 + G_a' C_p}{K_1 F_1 + K_2 F_2 + G_a' C_p} t_a \quad (7)$$

令 $B = \frac{K_1 F_1}{K_1 F_1 + K_2 F_2 + G_a' C_p}$ 则式(7)可写成

$$t_c = B t_s + (1 - B) t_a \quad (8)$$

可见,间层空气温度是烟温 t_s 与室外空气平均温度 t_a 的加权平均值。由于漏风量 G_a' 的影响因素很复杂,导致 B 值难以用理论公式算出。根据实测到的 t_c , t_s 和 t_a 值整理得到的权系数 B 值在0.04~0.07之间,漏风愈严重, B 值愈小,建议设计时取

$$B = 0.05 \quad (9)$$

式(6)中的 K_2 为外筒壁的传热系数,

$$K_2 = \left(\frac{1}{\alpha_a} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_c} \right)^{-1} \quad (10)$$

式中, λ 和 δ 为外筒壁的导热系数和厚度, α_a 是其外表面与外界的总放热系数,按下式计算[3]

$$\alpha_a = 10.82 + 3.95 w_a \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})] \quad (11)$$

w_a 是计算段室外风速,按下式确定

$$w_a = \left(\frac{H}{10} \right)^{0.2} w_0 \quad [\text{m/s}] \quad (12)$$

其中, H 是计算段离地面的平均高度, $[\text{m}]$, w_0 是 $H = 10 \text{ m}$ 处的风速,设计时可取自当地气象台或文献[3]。 α_c 仍可取为 $13 [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})]$ 。

3.4 烟气温度计算

对于老式烟囱,许多文献已介绍了烟温的计算公式,但这些公式都是在忽略位能变化和考虑壁体漏风的情况下导出的。对于套筒烟囱,内筒包有保温层,并且由于空气间层的缓冲作用,使烟气和间层空气间的传热温差大大降低,从而使散热损失大大减少。此时,烟气位能的变化及漏风的影响与散热损失相比具有相同的数量级,故都不能忽略。

引入漏风系数
$$\beta = \frac{\Delta m}{m} \quad (13)$$

式中, Δm 是漏入烟道内的空气质量流量, m 是烟气质量流量。

对计算段做能量平衡, 得

$$mC_{ps}t_s' + \beta mC_{pc}t_c = C_{pc}(1 + \beta)mt_s'' + \pi D_1 K_1 \left(-\frac{t_s' + t_s''}{2} - t_c \right) L + (1 + \beta)mgL \quad (14)$$

式中, t_s', t_s'' ——分别为烟气进入和流出计算段时的温度, $[^{\circ}\text{C}]$

C_{ps} 和 C_{pc} ——分别为烟气及间层空气的定压比热, $[\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})]$

L ——计算段高度, $[\text{m}]$

g ——重力加速度, $[\text{m}/\text{s}^2]$

引进系数

$$A = \frac{0.5\pi D_1 L K_1}{(1 + \beta)mC_{ps}} \quad (15)$$

则式(14)可写成:

$$t_s'' = \frac{1}{1 + A} \left[-\frac{1}{1 + \beta} \left(t_s' + \beta \frac{C_{pc}}{C_{ps}} t_c \right) - A(t_s' - 2t_c) - \frac{gL}{C_{ps}} \right] \quad (16)$$

由上式可计算出每段出口处的烟温。式中的漏风系数 β 的影响因素很复杂, 根据实测结果推算, 可取

$$\beta = 0.0035 \quad (17)$$

由下向上逐段计算出每段的出口烟温, 即可求得烟温沿高度的分布。

3.5 外筒壁传热计算

外筒壁的传热计算视精度要求可以有稳态和非稳态两种方法。

当室外外扰取空气温度24小时的平均值时, 则计算公式与内筒壁相同。

当室外外扰取室外空气综合温度24小时的平均值时, 由于它与朝向有关, 严格说属于径向和周长二维稳态问题。但计算表明, 由于外筒直径大, 周长, 周向温度梯度相对径向的很小, 因此忽略周长导热不会带来很大的误差, 详见文献[4]。这样就可分别按各个朝向用稳态传热公式计算。

当室外外扰取室外综合温度的逐时值时, 一种最简单的处理方法是用一阶谐波去近似离散值, 然后再按各个朝向分别解周期性传热问题。设综合温度为

$$t_z = \overline{t_z} + A_z \cos \left[\frac{\pi}{12} (\tau - \tau_{\max}) \right] \quad (18)$$

则外筒壁体的温度响应为

$$\begin{aligned} \theta(x, \tau) &= t(x, \tau) - t_c \\ &= \overline{t_z} \left[\left(1 - \frac{K_2}{\alpha_a} \right) - \frac{K_2}{\lambda} x \right] + A_z q_z \cos \left[\frac{\pi}{12} (\tau - \tau_{\max} - \xi_z) \right] \end{aligned} \quad (19)$$

式中,

$\tau_{\max}$ ——为出现最大 t_z 值的时刻,

x ——为距外表面的距离,

K_2, λ ——分别为外筒壁的传热系数和导热系数,

φ_z ——为某 x 处对综合温度波的衰减系数,

ξ_z ——为某 x 处对综合温度波的延迟时间。

φ_z 和 ξ_z 的计算公式详见文献[5]。

4 计算结果与实测值的比较

图2示出了满负荷工况下的实测数据与按上述方法计算的结果比较,其中外筒壁传热取室外综合温度平均值,按各个朝向用稳态传热公式计算。

由图2可见,外筒外表面温度计算值比实测值偏低些,最大偏差为 2.5°C 。烟温的吻合最好,最大偏差只有 0.5°C 。其余温度计算值与实测值偏差也不大。其中曲线②实测值波动较大,估计是热电偶头部与壁面接触不良引起的。因此,如目的旨在计算套筒烟囱正常运行下的温度分布,本文所提出的方法能满足工程计算精度的要求。如目的旨在研究壁体的温度应力,进一步的研究表明,对内筒壁,起动和停运时的温度响应所造成的应力可能比正常运行时大得多[2],对外筒壁,应该同时考虑周期性外扰作用下的温度应力和风力等作用下造成的附加应力。

本课题是在西北电力设计院的资助下完成的。在现场测试过程中,得到了石横电厂的大力支持和帮助。另外,西安冶院的聂亚琴、杨瑞卿、法电良、王兆丰、张旭、李安桂等同志先后参加了现场测试工作,在此一并表示衷心感谢。

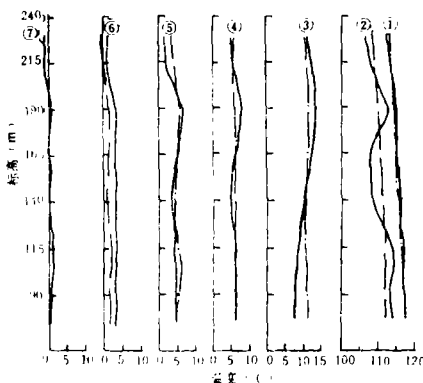


图2 实测温度分布线与计算值的比较

- ①烟温
- ②内筒内表面温度
- ③内筒外表面温度
- ④间层空气温度
- ⑤外筒南向内表面温度
- ⑥外筒南向外表表面温度
- ⑦室外空气温度24小时平均值

——实测温度分布线 计算温度分布线

参 考 文 献

- 1 [苏]西什科夫 И.А.等著,冯金耀等译.动力设备的烟囱.水利电力出版社,1878,9
- 2 梁亚红.烟囱墙体在起动和停运时的温度响应,西安冶金建筑学院.研究生硕士论文.1989.2
- 3 采暖通风与空气调节设计规范(GBJ 19-87).北京:中国计划出版社,1989
- 4 顾瑞英,刘伟民.烟囱墙体在正常运行时的温度响应.全国第三届计算传热学会论文集,上海:pp117-120 1989
- 5 彦启森,赵庆珠.建筑热过程.建筑工业出版社,1986,12

(下转第42页)

Analysis of a Sea Water Desalination Plant Incorporated in a Thermal Power Plant

Song Zhiping, Hu Sangao, Zhou Shaoxiang

(Beijing Graduate School under North China Electric Power Institute)

Abstract

After a brief description of the characteristics of the most commonly used distillation type sea water desalination plants this paper proposes a new criterion for evaluating such plants incorporated in a cogeneration power plant. On the basis of the proposed criterion some special points are taken into account for the design of the said desalination plants.

Key words: *desalination of sea water, cogeneration power plant, multi-stage flash distillation, water saving, waste heat utilization*

(上接第36页)

An Experimental Study of Jacketed Stack Thermal Calculation

Gu Ruiying, Zhang qaing, Du Kangrong

(Xian Institute of Metallurgy & Construction Engineering)

Lu Maosheng, Zhu Weirong

(Northwest Electric Power Design Institute)

Abstract

An on-site measurement program has been carried out for the jacketed stack at Shiheng Power Plant and numerous thermal engineering data have been collected with a set of formulas being deduced from fundamental principles of thermal engineering on the basis of the measured data. The said formulas can provide a sound basis for the engineering design of jacketed stacks.

Key words: *jacketed stack, temperature distribution, measurement, calculation*

(上接第49页)

参 考 文 献

1 新良田. 浅论垢下碱性腐蚀. 热能动力工程, 1983

(6)

2 James H. Milton, Roy M Leach. Marine Steam Boilers. 1979

(梁源沥 编辑)