

海拔高度对锅炉传热影响的理论分析

车得福 惠世恩 夏长江 徐通模 郭宏生

(西安交通大学能源与动力工程系)

[摘要] 从现有的锅炉热力计算方法出发,分析推导了海拔高度的增加对锅炉炉内换热、对流放热系数、辐射放热系数和烟气物性的影响以及对锅炉总的换热量的影响,并指出了影响趋势。

关键词 海拔高度 传热 锅炉

分类号 TK 224 TK 222

1 引言

随着国民经济的发展,我国广大西部地区的工业及电力事业正在以前所未有的速度发展,近年来陆续在这一地区运行和安装了数目相当可观的各种用途的锅炉,运行实践证明,在东部平原地区运行良好的同一种锅炉,在西部高原地区都出现不同程度的出力不足,排烟温度升高等问题,严重地影响了锅炉运行的经济性^[1]。

我们知道,西部地区海拔普遍较高,由此引起的是这一地区大气压力的降低,本文从现有的锅炉热力计算方法出发,深入分析了大气压力对锅炉传热的影响,并指出了影响趋势。

2 海拔高度对气体物性的影响

在现行的锅炉热力计算中,一般都视空气及烟气为理想气体,根据分子物理学和热力学,对于理想气体,分子之间没有相互作用

的力,分子只具有内动能而无内势能。

2.1 对比热的影响

由于理想气体的比热仅为温度的函数,而与压力无关。因此,由于海拔高度的变化,空气及烟气的比热不变。故在锅炉的热力计算过程中,温焓表中的数值不因海拔高度变化而改变。

2.2 对动力粘性系数 μ 和导热系数 λ 的影响

同样因为是理想气体,动力粘性系数和导热系数均与压力无关,即海拔高度对 μ 和 λ 的数值无影响。

2.3 对普朗特准则系数 Pr 的影响

由于 $Pr = C_p \mu / \lambda$, 因此,海拔高度对 Pr 也无影响。

2.4 对密度的影响

根据理想气体状态方程 $P = \rho RT$, 当温度 T 一定时,密度 ρ 将随压力 P 的降低而减小,因此,海拔高度的增加将引起空气和烟气密度的下降。

2.5 对烟气平均热容量 VC_{p0} 的影响

由烟气平均热容量的定义

收稿日期 1993 02 11 收修改稿 1993 03 16

本文联系人 车得福 男 32 副教授 710049 西安

$$VC_{pi} = \frac{Q_i - I_i}{T_u - T_i}$$

Q_i ——炉膛有效放热量,即随同每公斤燃料送入炉膛的热量。

T_u ——理论燃烧温度,与该温度相应的烟气焓即为 Q_i

I_i ——炉膛出口烟气焓

由于 $I_i = (\sum C_i V_i) T_u$, $Q_i = (\sum C_i V_i) T_u$

故 $VC_{pi} = [Q_i - (\sum C_i V_i) T_i] / (T_u - T_i)$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dp}(VC_{pi}) &= \left\{ -(\sum C_i V_i) \frac{dT_i}{dp} (T_u - T_i) \right. \\ &+ [Q_i - (\sum C_i V_i) T_i] \frac{dT_i}{dp} / (T_u - T_i)^2 \\ &= [Q_i \frac{dT_i}{dp} - (\sum C_i V_i) T_u \frac{dT_i}{dp}] / (T_u - T_i)^2 \\ &= \frac{Q_i - (\sum C_i V_i) T_u}{(T_u - T_i)^2} \frac{dT_i}{dp} = 0 \end{aligned}$$

因此烟气平均热容量 VC_{pi} 也与气压无关。

3 海拔高度对炉内换热的影响

现代锅炉的炉内换热,主要是火焰与周围水冷壁的辐射换热,对流换热量可略去不计。而炉内辐射换热量的多少,完全取决于炉膛出口烟温的高低,如果送入炉膛的热量一定,某些因素引起炉膛出口烟温的升高,则表明炉内辐射换热量的减少;反之则表明炉内辐射换热量的增加。

根据现有的热力计算标准,炉膛出口烟温可表达成下式:

$$T_i = T_u / [M \left(\frac{\sigma_0 \phi F a_1 T_u^3}{\varphi B_j VC_{pi}} \right)^{0.6} + 1] \quad (1)$$

上式中

M ——为一经验系数,其值取决于火焰最高温度点的位置,对于一定的燃料及燃烧器布置型式,其值一定,与海拔高度无关;

ϕ ——为热有效系数,对于一定型式的锅炉,其值也一定而与海拔高度

无关;

VC_{pi} ——烟气平均热容量,由上面的讨论知,其大小也与海拔高度无关;

T_u ——为理论燃烧温度,其大小也与海拔高度无关;

φ ——为保热系数;

σ_0 ——玻尔兹曼常数;

F ——为炉壁面积;

B_j ——计算燃料消耗量;

显然 σ_0, F, φ 和 B_j 均与海拔高度无关。

因此,海拔高度对辐射换热量是否有影响,关键在于海拔高度对炉膛黑度 a_1 有无影响。对于室燃炉

$$a_1 = a_{ny} / [a_{ny} + (1 - a_{ny}) \psi]$$

对于层燃炉

$$a_1 = \frac{a_{ny} + (1 - a_{ny}) \psi}{1 - (1 - a_{ny})(1 - \psi)(1 - r)}$$

式中 a_{ny} 是火焰黑度。

r 为炉排面积占总炉壁面积的份额, $r = R/F$, 其中, R 为炉排有效面积。

而

$$a_{ny} = 1 - e^{-kps} \quad (2)$$

式中, kps 称为光学厚度,其中, s 为气体有效辐射层厚度, p 为气体压力, k 为火焰总减弱系数。

$$\text{一般, } k = k_q r_q + k_n \mu_n + k_j x_1 x_2$$

式中 k_q ——三原子气体减弱系数

$$\begin{aligned} k_q &= 10 \left(\frac{0.78 + 1.6 r_{H_2O}}{\sqrt{10 p r_q s}} - 0.1 \right) \\ &\times \left(1 - 0.37 \frac{T_i}{1000} \right) \end{aligned}$$

r_q ——三原子气体容积份额

k_n ——灰粒子减弱系数

$$k_n = \frac{55900}{\sqrt{T_i^2 d_n^2}}$$

μ_n ——飞灰份额

k_j ——焦炭粒子减弱系数

x_1, x_2 ——经验系数。

故

$$kps = 10 \left(\frac{0.78 + 1.6r_{H_2O}}{\sqrt{10pr_q s}} - 0.1 \right) r_q ps$$

$$\times (1 - 0.37 \frac{T_1}{1000}) r_q ps$$

$$+ \frac{55900}{\sqrt{T_1^2 d_h^2}} \mu_h ps + k_1 x_1 x_2 ps \quad (3)$$

上式中, $r_q, r_{H_2O}, s, \mu_h, d_h, k_1, x_1, x_2$ 与海拔高度无关, 海拔高度(即大气压力 P) 对 T_1 的影响, 最终归结到对 kps 的影响, 但从式(3) 不能直接判断出 kps 随大气压力的变化趋势, 因为式(3) 的右端包含有 T_1 。现在假定, 随着 P 的降低, T_1 升高。如果最终由式(1) 得出 T_1 升高的结论, 则证明这一假定是正确的。做出这一假定后, 很容易看出, 式(3) 中的后二项都是随 P 的降低而减少的。右端第一项中的第二个括号内的部分也是随 P 的降低而减少的。若能说明第一部分也随 P 的降低而减小就能获得 kps 随 P 的变化趋势。

令

$$y = \left(\frac{0.78 + 1.6r_{H_2O}}{\sqrt{10pr_q s}} - 0.1 \right) r_q ps \quad (4)$$

$$\frac{dy}{dp} = 0.5 \frac{0.78 + 1.6r_{H_2O}}{\sqrt{10pr_q s}} - 0.2 r_q ps \quad (5)$$

根据经验, $r_q \leq 0.3, r_{H_2O} \geq 0$ 。

因此, 若在上式中取 $r_q = 0.3, r_{H_2O} = 0$,

$p = 0.1$, 则为式(5) 的可能的最小取值, 即:

$$\left(\frac{dy}{dp} \right)_{\min} = 0.5 \left(\frac{0.78}{\sqrt{0.3s}} - 0.2 \right) r_q ps \quad (6)$$

从式(6) 可知, 只要 $s \leq 50.7$ m, 就能保证 $\frac{dy}{dp} \geq 0$ 。

一般的锅炉都能满足这个条件。因此, 在我们的讨论范围, 式(4) 也是 p 的单调增函数, 即随 p 的降低而减小。最后有 kps 随 p 的降低而减小, 即 kps 是 p 的单调增函数。由式(2) 知, 火焰黑度 a_n 也是 p 的单调增函数。

对于室燃炉

$$\frac{da_1}{da_{hy}} = \frac{\psi}{[a_{hy} + (1 - a_{hy})\psi]^2} > 0$$

即 a_1 为 a_{hy} 的单调增函数。

对于层燃炉

$$\frac{da_1}{da_{hy}} = (1 - \rho)\psi / [(1 - (1 - \psi)(1 - \rho) + a_{hy}(1 - \psi)(1 - \rho))^2] > 0$$

即 a_1 也为 a_{hy} 的单调增函数。

因此, a_1 是 p 的单调增函数, 即随 p 的降低, a_1 减小。

根据式(1), 随着大气压力 p 的降低, 炉膛出口烟温升高。故证明前面的假设是正确的。因此, 有结论, 随着海拔高度的增加, 同一型式的锅炉炉内辐射换热量将减小。

4 海拔高度对对流放热系数的影响

根据传热学原理, 对流换热准则方程为:

$$Nu = f(Re, Pr)$$

式中

Nu ——努谢尔特准则, 其表达式为

$$Nu = ad/\lambda$$

Re ——雷诺准则数, 其表达式为

$$Re = \rho Wd/\mu$$

Pr ——普朗特准则数, 其表达式为

$$Pr = C_p \mu/\lambda$$

以上公式中,

α 为对流放热系数, d 为定性尺寸, λ 为导热系数, ρ 为流体密度, W 为流速, μ 为流体动力粘性系数, C_p 为定压比热。

由前面的讨论可知, 海拔高度对比热, 导热系数, 动力粘性系数和普朗特准则数均无影响。根据质量守恒定律, 质量流速也与压

力无关。因此 Nu 准则数也与压力无关。所以我们有结论:海拔高度及其引起的大气压力变化对对流放热系数无影响。

5 海拔高度对辐射放热系数的影响

我们知道,锅炉对流受热面传热过程的一个显著特点是:从烟气到壁面高温侧的热量传递并不是一个纯对流换热的过程,而是包含有辐射换热的复合换热过程。辐射放热系数

$$\alpha_r = \sigma_0 \alpha_y (T_y^2 + T_{ho}^2)(T_y + T_{ho})$$

而 $\alpha_y = 1 - e^{-\beta p}$ 。

类似上面的分析可知, p 降低引起 α_y 减小, T_y 升高。因此,从上式可判断出, p 的降低对 α_r 的影响不大。

6 讨论

从上面的分析可知,对同一种锅炉来说,随着海拔高度的增加,将导致炉膛出口烟温的升高,即炉内辐射换热量的减小。对于燃用易结渣燃料的锅炉,炉膛出口烟温的升高会导致锅炉运行不安全。虽然海拔高度对对流放热系数和辐射放热系数无影响,但炉膛出口烟温增加,将引起进入后续各受热面的烟温的变化而影响传热系数及平均温压的大小,进而影响各受热面的吸热量。烟气的导热系数,动力粘性系数随温度的升高而增大,普朗特数 Pr 随温度的升高略有减小^[4]。总的说来,烟温的升高将引起对流放热系数的减小,

最终导致总的传热系数的降低。尽管平均温压会略有升高,但计算表明,总的换热效果是受热面的吸热量降低,致使该受热面后面的受热面的进口烟温升高,依此类推,最后则是大气压力的降低引起锅炉排烟温度的升高,亦即使得锅炉总的吸热量下降。

对于不同煤种、不同容量和型式的锅炉,海拔高度对各受热面吸热量的影响幅度将是不同的。由于篇幅所限,作者将另文就海拔高度对锅炉传热的影响作定量的分析和比较,并将从传热角度出发,就如何选择有关的热力参数、结构参数等进行讨论和建议。

7 结论

1 本文直接从现有的锅炉热力计算方法出发,经过分析与推导,明确指出了海拔高度的增加对锅炉传热的影响趋势。

2 海拔高度增加引起炉内辐射换热量减小,导致炉膛出口烟温升高。

3 海拔高度对对流放热系数无影响及对辐射放热系数影响不大,但由于各受热面进口烟温的变化会引起该受热面的传热系数下降,导致换热量减少。

参 考 文 献

- 1 陈寄东,徐通模. 动力工程, 1986, (4): 42
- 2 郭晓宁. 东方锅炉, 1991, (1): 17
- 3 陈学俊, 陈听宽主编. 锅炉原理(上册). 机械工业出版社, 1981
- 4 杨世铭. 传热学. 人民教育出版社, 1981

verized anthracite coal burner. Such burners feature combustion stability, relatively high combustion efficiency and a desirable tendency of slagging prevention and low NO_x emissions. **Key words:** *pulverized anthracite coal, high concentration, burner*

- (79) **An Experimental Study of Factors Exercising An Influence on the Separation Efficiency of Internal Circulation Fluidized Bed** Wang Yongwu, Wang Huaibin, Chen Chongsu (*Harbin Institute of Technology*)

An experimental investigation was undertaken on a cold-state test model of the factors liable to have an effect on the separation efficiency of internal circulation fluidized bed. On the basis of an analysis of the test results an optimum range of secondary air feeding rate is given with the nozzle angle and layout mode being studied and discussed. **Key words:** *internal circulation, fluidized bed boiler, separation effectiveness, secondary air feeding rate*

- (85) **The Influence of Elevation above Sea Level on the Heat Transfer in Boilers** Che Defu, Hui Shi'en, et al (*Energy & Power Engineering Dept. of Xi'an Jiaotong University*)

Based on the currently available thermal calculation method for boilers analysed and discussed in this paper is the influence of elevation above sea level on the following: boiler furnace heat exchange, convection heat transfer coefficient, radiation heat transfer coefficient, flue gas physical properties and the heat transfer rate of the boiler as a whole. The general tendency of the above influence is also given. **Key words:** *elevation above sea level, heat transfer, boiler*

- (89) **A study on the Structure Optimization of Intensified-Heat-Transfer Elements** Li Weizhong, Mang Gang, Hu Lianxi (*Department of Mechanical Engineering of Fushun Petroleum Institute*)

From the viewpoint of energy comprehensive applications the structure size optimization of intensified-heat-transfer elements has been studied through the use of multi-objective mathematical programming. A suitable optimization method has been developed with the effect of weighted factor on optimization results also being analysed. As a result, the authors provide a major and highly scientific approach for the study, design and utilization of intensified-heat-transfer elements. **Key words:** *intensified-heat-transfer element, optimization, weighted factor, mathematical model*

- (93) **Two-dimensional Temperature Field Calculation of Electric Heating Tubes** Xu Jinliang, Chen Tingkuan (*Xi'an Jiaotong University*)

Taking account of the fact that due to the effect of natural convection the single-phase flow and two-phase flow in horizontal and inclined tubes will lead to a non-uniformity of tube wall heat transfer factor along the peripheral direction the authors have proposed a numerical calculation model for the electric heating tube two-dimensional temperature field by employing the technique of "radial node internal contraction" and solved the problem of inadequacy of inner wall surface boundary conditions by utilizing the two boundaries of the outer wall surface. In addition, the conception of parallel network resistance heat generation has been applied to deal with the non-uniform internal heat source item. With the help of the above-cited model pro