

# 飞灰循环流化床锅炉的设计计算

赵广播 陆慧林 秦裕琨

(哈尔滨工业大学)

〔摘要〕 采用飞灰再循环对提高流化床锅炉燃烧效率是行之有效的办法。本文给出了飞灰循环流化床锅炉的设计计算方法。

关键词 飞灰再循环 流化床锅炉 设计

## 1 前 言

流化床锅炉具有能够燃用其它燃烧方式难以稳定燃烧的劣质燃料,实现强化传热及可脱除 $\text{SO}_2$ 和减少 $\text{NO}_x$ 的生成,减轻大气污染等优点,因而得到世界各国的普遍重视。我国目前已投入运行的流化床锅炉已达二千多台。经过二十多年的大量实践,在设计、燃烧控制等方面积累了丰富的经验。但目前已投运的流化床锅炉普遍存在着燃烧效率低的问题,其主要原因是锅炉飞灰含碳量高,造成锅炉固体未完全燃烧,而且损失较大。如某燃用发热值 $Q_{dw}^*$ 为 $6.77 \text{ MJ/kg}$ 的矽石流化床锅炉,实测得悬浮段出口处的飞灰份额达 $0.4518$ ,飞灰平均含碳量为 $13.2\%$ ,仅飞灰造成的固体未完全燃烧损失达 $23.24\%$ 。因此,降低飞灰未完全燃烧损失是提高流化床锅炉燃烧效率的关键。

除在流化床锅炉设计中选取合适的沸腾风速、缩小给煤筛分范围等外,还可以采取一定的技术措施来降低飞灰含碳量。可采用的措施主要有:(1)设置旋风燃烬室。它可以使烟气中的可燃物与氧气得到充分的混

合和燃烧,并且延长飞灰颗粒在燃烬室中的停留时间,使之充分燃烬。(2)设置灰床。将收集的飞灰回送到单独设置的飞灰床中再燃烧,灰床可采用较低的沸腾风速,使飞灰颗粒得以燃烬。上述两种方法用于小容量流化床锅炉来提高燃烧效率是合适的,但对容量较大的流化床锅炉则会使锅炉增加体积,结构复杂,运行操作困难。(3)采用快速循环床。这种新型流化床锅炉具有燃烧效率高,易于向大型化发展等优点。近几年来国内外正在进行研究。(4)采用飞灰循环燃烧方式。在鼓泡床锅炉的炉膛出口或对流烟道上设置旋风分离器,将分离下来的飞灰中的一部分飞灰经飞灰回送装置再送入沸腾层继续燃烧。通过调节循环灰份额,控制飞灰在炉膛内停留时间,以此来控制飞灰的含碳量。国外一些实验研究表明,采用飞灰再循环,锅炉燃烧效率可达 $90\%$ 以上。

但是,流化床锅炉采用飞灰循环方式后,炉膛内物质平衡、热量平衡等不同于鼓泡床。本文将进一步讨论采用飞灰循环方式对锅炉炉膛热量平衡、受热面布置等方面的影响。

收稿日期1990-03-27

## 2 沸腾层埋管受热面吸热量

埋管受热面吸热量可以根据沸腾层热平衡来确定,其值确定正确与否,直接影响埋管受热面布置、沸腾层温度、床内物料的燃烧和控制等。

进入沸腾层物质带入的热量有:给煤带入的热量  $Q_r$  (千焦/千克)、循环灰带入的热量  $Q_{4h}$  和  $Q_{6h}$  (千焦/小时)、送风带入的热量  $(\alpha_{f1} + \alpha_b + \alpha_h) \cdot I_{rk}^0$  (千焦/千克)

(其中  $\alpha_{f1}$  是沸腾风率,  $\alpha_b$  是播煤风率,  $\alpha_h$  是飞灰回送用风率)。输出沸腾层物质带走的热量有:高温烟气带走的热量  $I''_{f1}$  (千焦/千克)、溢流灰带走的热量  $Q_{4yt}$  和  $Q_{6ft}$  (千焦/小时)、飞灰带出沸腾层的热量  $Q_{4ft}^h$  (千焦/小时)、可燃气体带走的热量  $Q_{3ft}$  和沸腾层散热量  $Q_{5ft}$  (千焦/小时)、埋管受热面吸热量  $Q_m$  (千焦/小时)。如图 1 所示。

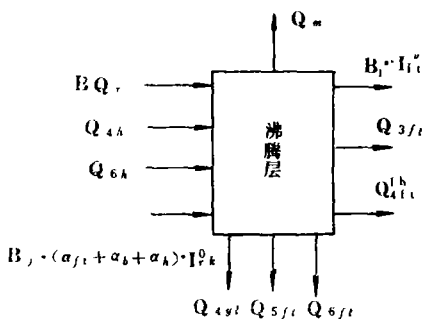


图 1 沸腾层内烟气侧热平衡框图

其热平衡方程为:

$$BQ_r + Q_{4h} + Q_{6h} + B_j \cdot (\alpha_{f1} + \alpha_b + \alpha_h) \cdot I_{rk}^0 = Q_m + B_j^* \cdot I''_{f1} + Q_{3ft} + Q_{4ft}^h + Q_{4yt} + Q_{6ft} + Q_{5ft} \quad (1)$$

式中,  $B$ 、 $B_j$ 、 $B_j^*$ ——分别是锅炉燃料消耗量、计算燃料消耗量和沸腾层计算燃料消耗量, kg/h。三者关系如下:

$$B_j = \frac{100 - q_4}{100} \cdot B \quad (2)$$

$$B_j^* = \frac{100 + q_{4h} - q_{4ft}}{100} \cdot B \quad (3)$$

其中,  $q_{4h}$  是循环灰热量,  $q_{4h} = \frac{7830A^y}{Q_r} \cdot \frac{C_h a_h}{100 - C_h}$ ,  $C_h$  是循环灰含碳量, %;  $a_h$  是循环灰份额;  $A^y$  是燃料应用基灰份, %;  $q_{4ft}$  是沸腾层出口固体未完全燃烧损失, 按下式计算:

$$q_{4ft} = (100 + q_{4h} - q_{3ft}) - \delta \cdot (100 - q_3 - q_4) \quad (4)$$

式中,  $\delta$  是沸腾层燃烧份额,  $q_3$  和  $q_4$  分别是锅炉可燃气体和固体未完全燃烧损失, %;  $q_{3ft}$  是沸腾层出口可燃气体未完全燃烧损失, %。

根据式 (2) ~ (4), 式 (1) 整理得:

$$Q_m + Q_{5ft} = B_j \left[ \frac{\delta(100 - q_3 - q_4) + q_{6h} - q_{6ft}}{100 - q_4} \cdot Q_r + (\alpha_{f1} + \alpha_h + \alpha_b) I_{rk}^0 - \frac{100 - q_{4ft} + q_{4h}}{100 - q_4} \cdot I''_{f1} \right] \quad (5)$$

式中,  $q_{6h}$ ——循环灰物理热,

$$q_{6h} = \frac{a_h \cdot A^y \cdot (C\theta)_h}{Q_r};$$

式中,  $C$  是灰比热, kJ/(kJ·°C);  $\theta_h$  是循环灰温度, °C。

沸腾层出口烟气焓  $I_{f1}''$  按下式计算:

$$I_{f1}'' = I_y^0 + (\alpha^*_{f1} - 1) \cdot I_K^0 + (C\theta)_{f1} \cdot \frac{A^y \cdot (1 - a_{yt} + a_h)}{100 - q_{4ft} + q_{4h}} \cdot \frac{100}{100 - C_f} \quad (6)$$

式中,  $I_y^0$ 、 $I_K^0$ ——沸腾层出口烟气理论焓和空气焓, kJ/kg;

$\alpha^*_{f1}$ ——沸腾层实际空气过剩系数。它与名义空气过剩系数  $\alpha_{f1}$  有如下关系:

$$\alpha^*_{f1} = \frac{100 - q_4}{100 + q_{4h} - q_{4ft}} \cdot \alpha_{f1} \quad (7)$$

设沸腾层的保热系数为

$$\varphi = \frac{Q_m}{Q_m + Q_{5ft}} \quad (8)$$

则式(5)整理得:

$$Q_m = \varphi B_j$$

$$\left[ Q_r \frac{\delta(100 - q_3 - q_4) + q_{ah} - q_{aft}}{100 - q_4} + \alpha''_{ft} I''_{rk} - \frac{100 - q_{4ft} + q_{4h}}{100 - q_4} I''_{ft} \right] \quad (9)$$

式中,  $\alpha''_{ft}$ ——沸腾层名义空气过剩系数,

$$\alpha''_{ft} = \alpha_{ft} + \alpha_h + \alpha_b$$

式(9)即为沸腾层范围内烟气侧热平

$$\beta = \frac{Q_m}{Q_{gt}}$$

$$= \frac{Q_r[\delta(100 - q_3 - q_4) + q_{ah} - q_{aft}] + (100 - q_4)\alpha''_{ft}I''_{rk} - (100 - q_{4ft} + q_{4h}) \cdot I''_{ft}}{(100 - q_3 - q_4 - q_6)Q_r - (I_{py} - \alpha_{py} \cdot I_{lk}^0)(100 - q_4)} \quad (10)$$

式中,  $I_{py}$ ——锅炉排烟焓, kJ/kg;

$\alpha_{py}$ ——锅炉排烟处空气过剩系数;

$I_{lk}^0$ ——冷空气焓, kJ/kg;

$q_6$ ——锅炉机组灰渣物理热损失,

%。

当埋管受热面结构一定时, 要使燃料在沸腾层中稳定燃烧, 沸腾层温度必须大于燃料着火温度  $t_z$ , 小于灰渣开始变形温度  $t_1$ 。由式(10)可知, 沸腾层受热面吸热份额应满足:

$$[\beta]_{t_1} < [\beta]_{t_{ft}} < [\beta]_{t_z} \quad (11)$$

式中,  $[\beta]_{t_z}$ 、 $[\beta]_{t_{ft}}$ 、 $[\beta]_{t_1}$ ——分别为床温等于燃料着火温度  $t_z$ 、沸腾层温度  $\theta_{ft}$  和灰渣开始变形温度  $t_1$  时的吸热份额。

考虑到实际沸腾层的调节运行和控制, 沸腾层温度的变化范围比上述要小, 即沸腾层受热面吸热份额变化范围比上述要小。

### 4 计算结果和分析

图2、图3表示了循环灰温度  $\theta_h$  和循环灰飞灰循环倍率  $a_h$  对沸腾层吸热份额  $\beta$  的影响。计算时取沸腾层燃烧份额  $\delta$  为 0.75, 燃

衡方程。由式(9)可见, 随飞灰循环倍率  $a_h$  增加, 循环灰温度降低, 要维持一定的床温, 埋管吸热量会减少, 埋管受热面积相应要减少。

### 3 沸腾层受热面吸热份额

沸腾层埋管受热面吸热大小直接影响锅炉热平衡和锅炉的经济性。埋管受热面吸热量  $Q_m$  占整个锅炉机组受热面吸热量  $Q_{gt}$  的份额为:

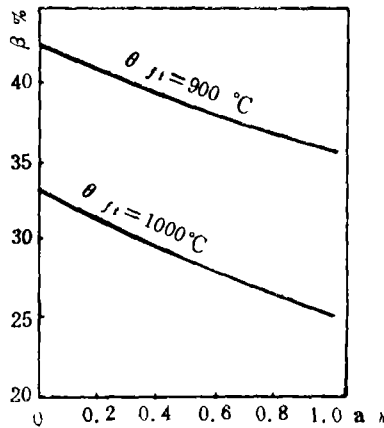


图2 飞灰循环倍率对  $\beta$  的影响

料灰分为  $A^y = 65.79\%$ , 水分为  $W^y = 3.9\%$ ,  $Q_{fw}^y = 6.95 \text{kJ/kg}$  的矽石。锅炉排烟温度为  $160^\circ\text{C}$ 。由图可见, 随循环灰温度增加, 使循环灰带入沸腾层中的热量增多, 相应使沸腾层吸热份额  $\beta$  增加; 相反, 随循环灰飞灰循环倍率增加, 加热循环灰至床温所需要的热量增加, 若维持一定的床温, 则沸腾层受热面吸热份额减小。

图4表示沸腾层温度  $\theta_{ft}$  对沸腾层受热面吸热份额  $\beta$  的影响。计算时取循环灰温度  $\theta_h = 600^\circ\text{C}$ , 飞灰循环倍率  $a_h = 1.0$ , 其它条

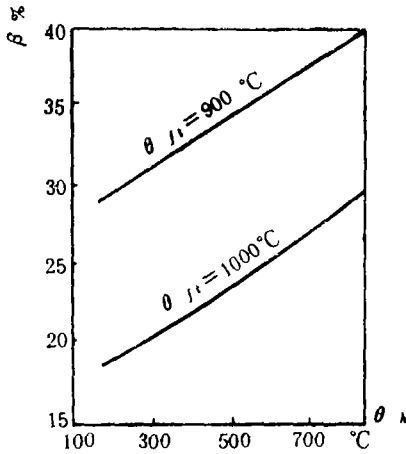


图3 循环灰温度对 $\beta$ 影响

件与上相同。由图可见，当燃烧份额一定时，随床温增加，流出沸腾层的物质带走的热量增加。若维持一定床温，则埋管受热面吸热量减小，吸热份额相应也减小。

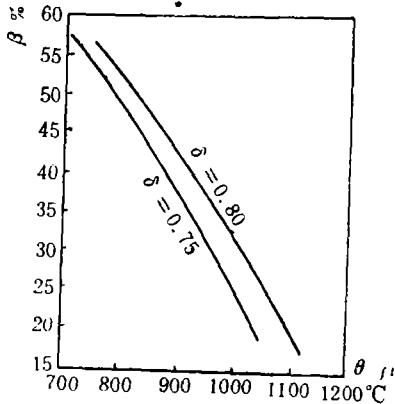


图4 沸腾层温度对 $\beta$ 影响

图5表示了沸腾层燃烧份额 $\delta$ 对吸热份额的影响。由图可见，随燃烧份额增加，燃料在沸腾层内放出热量增加。要维持一定床温，应使沸腾层受热面吸热份额增加。

图6表示燃料发热值  $Q_{d,w}^0$  对沸腾层受热面吸热份额的影响。计算时取飞灰循环倍率为0.8，循环灰温度为600℃，燃料特性按工业锅炉热力计算方法中推荐的煤种计算。由图可见，在发热值较小时，吸热份额变化剧烈；在发热值较大时， $Q_{d,w}^0$  对吸热份额的影

响比较小。

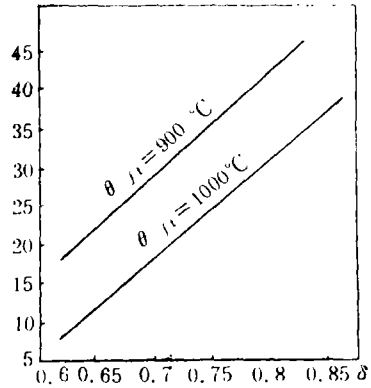


图5 沸腾层燃烧份额对 $\beta$ 的影响

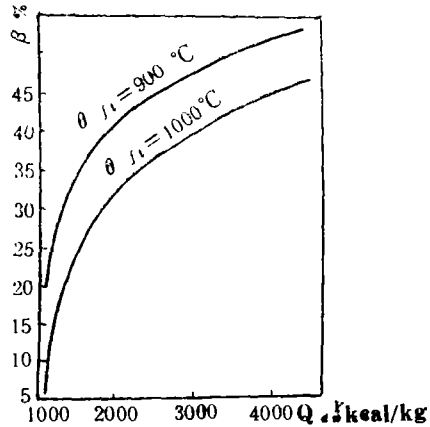


图6 燃料特性对 $\beta$ 影响

### 5 结 论

1. 采用飞灰再循环、调节循环灰份额来控制飞灰含碳量，可提高流化床锅炉燃烧效率，但在埋管受热面设计中，必须考虑循环飞灰（温度、份额等）的影响。

2. 采用飞灰再循环方式，沸腾层热平衡可按本文公式（9）计算。

### 参 考 文 献

- 1 工业锅炉标准汇编（第一辑）。上海工业锅炉研究所，1988年
- 2 赵明泉。锅炉结构设计。哈尔滨工业大学出版社，1987  
(下转第31页) (孙显辉 编辑)

channels at positive wet-steam enthalpies. Heat  
Transfer-Soviet Research, 1980, 12(6)

4 朱群益. 热水锅炉水动力特性试验研究. 哈尔滨  
工业大学硕士学位论文, 1986

## An Experimental Study of Minimum Water Flow Speed Required in Hot-Water Boiler Tubes

Zhu Qunyi, Chen Chongshu, Yang Mingxin

(*Harbin Institute of Technology*)

### Abstract

In this paper is studied the water flow speed needed to break away gas bubbles on boiler wall tubes with a formula for calculating such a flow speed and the minimum flow speed requisite to preventing oxygen bubbles from gathering excessively on the slightly inclined tube wall being also given.

**Key words:** hot-water boiler, gas bubbles on the wall, minimum flow speed of water.

---

(上接第27页)

## The Design of Fluidized Bed Combustion Boilers with Fly Ash Reinjection

Zhao Guangbo, Lu Huilin, Qin Yukun

(*Harbin Institute of Technology*)

### Abstract

The presently available FBC boilers generally suffer from a poor combustion efficiency, because the flue gas from a fluidized bed contains a large amount of carbon-rich fine particles and combustibles. Fly ash reinjection is one of the effective methods for improving combustion efficiency in such cases. This paper presents a calculation procedure for a fluidized bed boiler featuring fly ash reinjection.

**Key words:** fly ash reinjection, fluidized bed boiler, design method