

# 流化床风冷式冷渣器的排渣温度及其分布

赵广播 朱群盖 黄怡珉

(哈尔滨工业大学)

〔摘要〕 采用冷渣器可回收流化床锅炉的灰渣余热, 便于干式除渣及灰渣的综合利用。本文给出了流化床风冷式冷渣器的排渣温度及其分布规律。

关键词 流化床锅炉 溢流灰 温度分布

## 1 前言

由于流化床锅炉的燃烧温度较低, 不易破坏煤的灰渣中矿物质结构, 并且溢流灰渣含碳量低, 故流化床锅炉的溢流灰是生产水泥、加气混凝土等建材的好材料, 也可作为铝盐原料、肥料等, 进行多方面的综合利用〔1〕。

对流化床锅炉的灰渣进行综合利用, 要求保持灰渣的活性, 即实现干式除渣。而溢流灰温度一般为 850~1050℃, 直接干式除渣比较困难, 所以需要把灰渣温度降低。流化床风冷式冷渣器是降低溢流灰温度的装置(见图1)。

设计流化床风冷式冷渣器时, 可采用热平衡法计算, 在不计散热损失的前提下, 灰粒子放出的热量等于气体获得的热量, 并且认为出口气体、床内灰粒子与出口灰粒子均处于同一温度, 据热平衡方程, 可求出出口风温及渣温〔2〕。

实际上, 各灰粒子在床中的停留时间是不同的, 由此造成排渣中各粒子温度不同。本文从另一方面分析了流化床风冷式冷渣器的排渣温度及其分布规律。

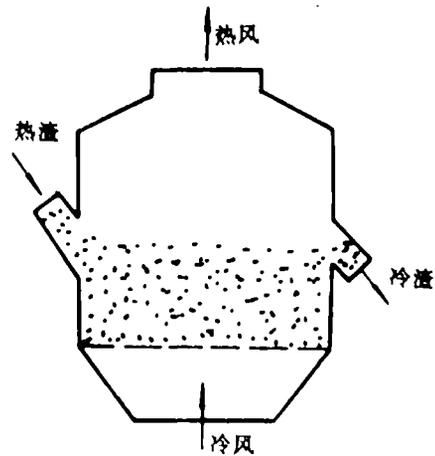


图1 流化床风冷式冷渣器

## 2 理论分析

气固流化床中气体与颗粒之间的换热, 研究者颇多。由于各研究者的实验条件及所作的假设不同, 其结果差异较大。然而, 影响气固流化床内气体与粒子间换热的因素是一定的, 气体与粒子间的换热系数取决于粒子形状、大小、流化速度、过程温度的高低, 流化床的结构及流体与粒子的物理性质等〔3,4〕, 一般可用下列形式表示

$$N_u' = f\left(Re, Fe, Pr, \frac{h_0}{d_p}, \frac{D_p}{d_p}\right) \quad (1)$$

收稿日期 1992-03-11

本文联系人 赵广播 男 讲师 150006 哈尔滨工业大学热能工程教研室

对空气流化床,当温度变化不大时,可认为Pr为常数,另外,当 $D_p/d_p > 15$ 时,床径 $D_p$ 对换热的影响可忽略不计,这样对流化床中空气和粒子之间换热有影响的因素主要是 $Re$ 、 $Fe$ 和 $h_0/d_p$ 。

文献[5]报导,溢流灰和空气之间的换热可用沃氏公式描述,即

$$Nu = 0.0097 Re Re^{0.53} \left(\frac{h_0}{d_p}\right)^{-0.45} \quad (2)$$

$30 < Re < 120$

$$Nu = 0.015 Re^{0.805} Fe^{0.53} \left(\frac{h_0}{d_p}\right)^{-0.45} \quad (3)$$

$120 \leq Re < 2500$

一般情况下,以颗粒总表面积为基准的气体与颗粒之间的换热系数可能很小,典型值低达 $6 \sim 23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ ,但是颗粒与流化气体的换热却非常有效[6],这是因为换热量不仅与换热系数有关,还与参与换热的颗粒群总表面积有关,尽管单个粒子的换热面积很小,但颗粒群的表面积之和却非常大。

文献[7]认为,流化床中流体温度在接近布风板的区域变化较大,这一区域叫活动段,活动段高度与流化速度、颗粒的大小和密度、床层几何特性、布风板构造等有关,其高度通常在几个毫米到几个厘米之间,与床的工作高度相比,活动段高度可忽略不计,可认为流化床中气体温度是相同的。

灰粒子在流化气体中的冷却过程可以认为是具有第三类边界条件的不稳定导热过程,粒子内部的温度变化可用下列方程描述:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{a}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial t}{\partial r} \right) \quad (4)$$

初始条件为

$$t(r, 0) = t_0 \quad (5)$$

边界条件为

$$a [t(r, \tau) - t_c] = \lambda_h \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \quad (6)$$

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial r} = 0 \quad (7)$$

解方程,得到某瞬时灰粒子的平均温度为

$$\bar{t}(\tau) = t_0 + (t_c - t_0) \sum_{i=1}^{\infty} \frac{6 B_i^2}{\mu_n^2 (\mu_n + B_i^2 - B_i)} e^{-\mu_n^2 \cdot F_0} \quad (8)$$

流化床锅炉一般燃用宽粒度分布燃料,其溢流灰也为宽粒度分布。灰粒子的平均停留时间随粒度变化,对粒度为 $R$ 的粒子,其平均停留时间为

$$\bar{\tau}(R) = \frac{1}{\frac{F_1}{W} + \tilde{K}(R)} \quad (9)$$

式中[8]  $\tilde{K}(R) = 6.4873 \exp(-2.5955 \frac{u_t}{W})$

$$\cdot \frac{\rho_g W A_t}{W_c} \quad (10)$$

$u_t$ 按下式计算[2]

$$u_t = \frac{g(\rho_s - \rho_g) d_p^2}{18\mu} \quad \text{当 } Re_p < 0.4 \quad (11)$$

$$u_t = \left[ \frac{4}{225} \frac{(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{\rho_g \mu} \right]^{1/3} d_p \quad (12)$$

$0.4 < Re_p < 500$

$$u_t = \left[ \frac{3.1g(\rho_s - \rho_g) d_p}{\rho_g} \right]^{1/2} \quad (13)$$

$500 < Re_p < 200000$

$F_1$ 由下式求得

$$\frac{F_1}{F_0} = \sum \frac{P_0(R) \cdot \Delta R}{1 + \frac{W}{F_1} \cdot \tilde{K}(R)} \quad (14)$$

$$W_c = \rho_d A_t h_0 \quad (15)$$

并非粒度为 $R$ 的粒子进入床层中 $\bar{\tau}(R)$ 时间后就一定从床中排出,实际上,排渣中各粒子在床内的停留时间是不同的,当床内粒子作完全混合时,床中各粒度的灰粒子停留时间分布为

$$E(R, \tau) = \frac{1}{\bar{\tau}(R)} e^{-\tau/\bar{\tau}(R)} \quad (16)$$

其中  $E(R, \tau) \cdot d\tau$  表示排渣时, 粒径为  $R$  的颗粒停留时间在  $\tau \sim \tau + d\tau$  之间的份额。对粒径为  $R$  的灰粒群, 排料时的平均温度

$$t(R) = \sum E(R, \tau) \cdot d\tau \cdot t(\tau) \quad (17)$$

### 3 计算实例

某流化床风冷式冷渣器, 已知下列数据:

$$A_t = 1.0 \text{ m}^2; \quad t_0 = 950 \text{ }^\circ\text{C}; \quad h_0 = 0.5 \text{ m};$$

$$F_0 = 2.64 \text{ kg/s}; \quad \rho_s = 2400 \text{ m}^3/\text{m}^3;$$

$$\rho_d = 1200 \text{ kg/m}^3;$$

$$W = 3 \text{ m/s};$$

溢流灰粒度分布见下表

粒径 $d$ (mm)	<0.2	0.2~0.5	0.5~1	1~2.5	2.5~5	5~8	8~10
重量份额 $x_i$ (%)	0.8	26	27	31.4	6.4	6.4	2.0

由热平衡计算, 求得出口风温为  $640 \text{ }^\circ\text{C}$ , 按前述分析, 出口风温等于流化介质温度, 即  $T_c = 640 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

按公式 (8) ~ (16) 编制程序, 计算得灰粒子平均停留时间随粒径的变化关系见图2。

粒径增大时粒子平均温度基本不变。可以认为在本文条件下, 粒子的平均温度与粒径无关。这是因为虽然粒径增大, 粒子表面与气流的换热增强, 但粒子表面上的热扰动传入粒子内部所需的时间变长, 加之粒径变化范围较小, 使得粒子平均温度变化很小。

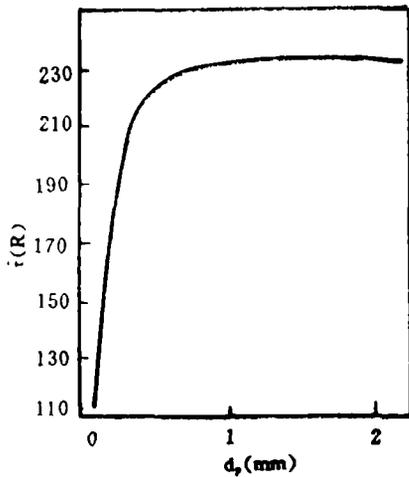


图 2

由图2可见, 灰粒子直径较小时, 其平均停留时间随粒径增加而增长, 而当粒径较大时, 平均停留时间不随粒径变化。

我国的流化床锅炉, 燃用煤的粒度一般在  $0 \sim 8 \text{ mm}$  范围内, 溢流灰粒径小于  $6 \text{ mm}$  的占  $90\%$  以上, 取形状系数为  $0.62$ , 则溢流灰中大部分粒子的平均当量直径小于  $3.72 \text{ mm}$ , 因此这里只讨论平均当量直径小于  $3.72 \text{ mm}$  的灰粒子的冷却。

由图3可见, 经过相同的冷却时间以后,

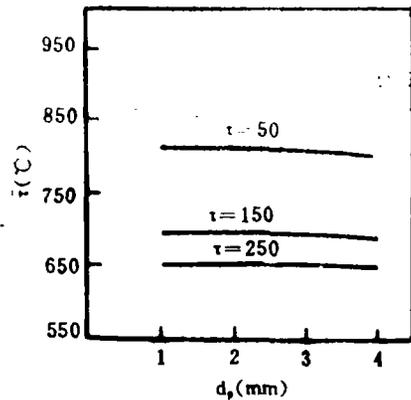


图 3 灰粒子平均温度与粒径的关系

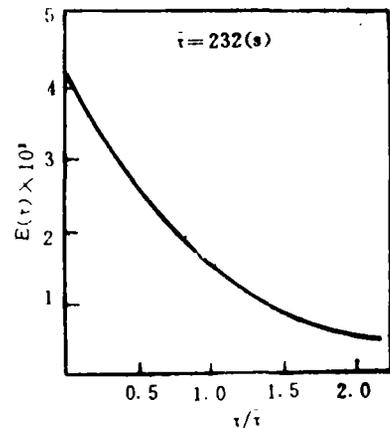


图 4 平均当量直径灰粒子的停留时间分布

由上述分析,灰粒径对绝大部分灰粒子的平均停留时间及平均温度影响极小,可以只讨论平均当量直径的灰粒子。对平均当量直径的灰粒子,其停留时间分布见图4、粒子温度与时间的关系见图5。

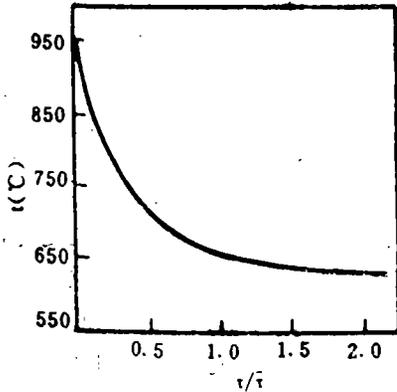


图5 平均当量直径灰粒子的平均温度与时间的关系

由图6可见,排渣中分布着各种温度的灰粒子,其中渣温低于670 °C的灰占52%。按式(17)计算得排渣平均温度为707.4 °C。

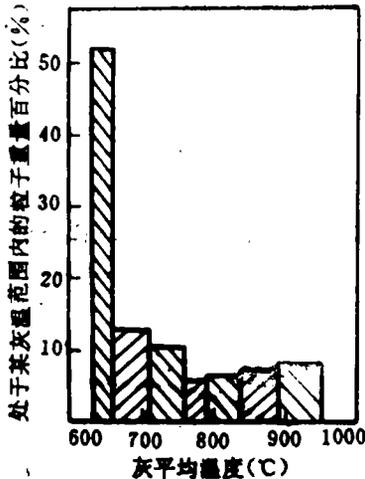


图6 排渣中灰粒子的温度分布

#### 4 结论

1. 在流化床风冷式冷渣器的操作速度范围内,灰粒子直径对大多数灰粒子的平均

停留时间和平均温度影响极小。

2. 排渣中分布着各种温度的灰粒子,排渣的平均温度可用式(17)计算。

符号说明

- $a$ : 导温系数,  $m^2/s$ ;
- $A_i$ : 床横截面积,  $m^2$ ;
- $Bi$ : 毕渥准则;
- $d_p$ : 粒子当量直径,  $m$ ;
- $D_p$ : 床径,  $m$ ;
- $Fe$ : 费道罗夫准则;
- $F_0$ : 床灰量,  $kg/s$ ;
- $F_1$ : 出灰量,  $kg/s$ ;
- $h_0$ : 静料层高度,  $m$ ;
- $\tilde{K}(R)$ : 扬析常数,  $s^{-1}$ ;
- $Nu$ : 努谢尔特准则;
- $Pr$ : 普朗特准则;
- $P_0(R)$ : 进料固体颗粒的粒度分布。  
 $m^{-1}$ ;
- $Re$ : 雷诺数;
- $R$ : 粒子半径,  $m$ ;
- $t$ : 灰温,  $^{\circ}C$
- $t_0$ : 灰粒子初始温度,  $^{\circ}C$ ;
- $t_c$ : 流化介质温度,  $^{\circ}C$ ;
- $\bar{t}$ : 灰粒子平均温度,  $^{\circ}C$ ;
- $u_t$ : 颗粒终端速度,  $m/s$ ;
- $W$ : 床层操作速度,  $m/s$ ;
- $W_c$ : 床料总重,  $kg$ ;
- $\alpha$ : 气体与颗粒之间的换热系数,  $kJ/(m^2 \cdot h)$ ;
- $\mu$ : 气体粘度,  $kg/(m \cdot s)$ ;
- $\rho_s$ : 粒子真实重度,  $kg/m^3$ ;
- $\rho_d$ : 粒子堆积重度,  $kg/m^3$ ;
- $\rho_g$ : 气体重度,  $kg/m^3$ ;
- $\tau$ : 时间,  $s$ ;
- $\bar{\tau}$ : 平均停留时间,  $s$ ;
- $d\tau$ : 时间间隔,  $s$ ;
- $\lambda_b$ : 灰粒子导热系数,  $kJ/(m^2 \cdot h \cdot C)$ 。

## 参 考 文 献

- 1 王志忠. 煤矸石的综合利用途径. 煤炭综合利用. 1990.1
- 2 国井大藏. 列文斯比尔. 流态化工程, 石油化学工业出版社, 1977
- 3 Сыромятников, Н И Волков В Ф. Процессы в кипящем слое. 1959
- 4 Толес О М, Циточ О Б. Аппараты кипящим эрнстым слое. 1981
- 5 陈国谦等. 沸腾炉溢流灰渣显热回收的实验研究. 华中工学院燃烧理论研究室, 1985
- 6 Juveland A C, et al. Chem.(Fund.)5, 439. 1968
- 7 戴维森 J F, 哈里森 D. 流态化. 中国科学院化工冶金研究所等译, 1981
- 8 王宏宇等. 宽筛分流化床锅炉的扬析. 节能技术, 1989(2)



预研成果迅速转化为生产力的典型范例  
国际中标充分利用军工技术的成功总承

## STIG装置和调试锅炉通过鉴定

● 国家计委、国防科工委、国家科委军转民办公室主持鉴定会

1992年8月3日至5日在深圳召开了由我所总承包的深圳南山热电有限公司PG5361P<sub>1</sub>燃气轮机余热回收利用及大亚湾核电站调试锅炉鉴定推广会。会议由国家计委、国防科工委、国家科委军转民办公室主持。深圳市副市长朱悦宁专程到会祝贺。参加会议的有上级单位领导、专家、学者100余人。中央电视台等国内新闻单位及香港几家报社记者也到会进行采访。

与会专家认为, 哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所开发的燃气轮机蒸汽回注高新技术项目, 标志着我国在该领域的技术已达到国际80年代后期水平, 必将对我国燃机界的技术更新换代产生深远影响。该装置为我国第一套工业用大功率燃气轮机回注蒸汽热电联供装置, 自1992年4月投运以来, 经1700多小时运行表明各项性能指标均达到了设计值, 性能稳定, 机动性好, 运行可靠, 装置功率增加30%, 耗油率降低15%, 能很好地满足燃气轮机各种工况下供热和回注灵活匹配的要求。这项军转民成果填补了国内空白, 是一项符合我国能源政策, 利国利民的新技术和节能项目。该项技术实施后所带来的经济效益和社会效益极其显著, 改造周期短、投资省, 也是提高能源利用率, 实施节能改造工程的一种有效的新技术途径。

广东核电有限公司关于大亚湾核电站调试锅炉的设计、制造、安装、调试等交钥匙工程1989年7月我所一举中标。由于坚持严格执行合同, 采用国际上科学管理技术和方法, 对工程实施全过程的质量控制、产品和服务都满足了用户的要求。该调试锅炉于1991年12月19日正式交付使用。运行结果表明, 其热效率高, 机动性好, 耗油率低, 完全满足了该核电站主汽轮机组及辅机系统的预运行要求。到会专家认为: 本调试锅炉在国内研制尚属首创, 填补了核电设备中的一大空白。经过八个月的运行实践, 证明性能优于同类进口产品, 可以替代进口设备, 并可进入国际市场。

(哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所 张国达)

(10)

## A Study on the Intensified Heat Transfer of In-Tube Spiral Coils and Its Application in Power Station Boilers

Zhang Yongfu and Li Fangyue

(*Southeastern University*)

### Abstract

This paper deals with an experimental study on tube side heat transfer and friction factor of in-tube spiral coils for the case of turbulent gas phase media. All experimental data have been processed by use of a multiple regression analysis method with a set of heat transfer correlation formulas being obtained. The above study results have already been applied to the air preheaters of some power station boilers. As compared with prototype parameters, the exhaust gas temperature is reduced by 12~20℃ while the hot air temperature increased by 15~25℃. This has led to an improvement of combustion conditions in the boiler furnace, resulting in an enhancement of the boiler thermal efficiency.

**Key words:** *spiral coil, intensified heat transfer, power boiler*

(15)

## The Outgoing Slag Temperature of a Fluidized Bed Air-Cooled Slag Cooler and Its Distribution Pattern

Zhao Guangbo, Zhu Qungai and Huang Yimin

(*Harbin Institute of Technology*)

### Abstract

The waste heat of ash and slag of fluidized bed boilers can be recovered by use of slag coolers, which also facilitates the adoption of dry slag removal method and slag comprehensive utilization. This paper gives the slag temperature profile of an air-cooled slag cooler used for fluidized bed boilers and its distribution pattern.

**Key words:** *fluidized bed boiler, overflow ash, temperature profile*