

# 降低循环流化床锅炉飞灰含碳量的理论及其应用

邱 燕<sup>1</sup>, 田茂诚<sup>1</sup>, 牛蔚然<sup>2</sup>, 程 林<sup>1</sup>

(1. 山东大学 能源与动力工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东电力研究院 热能研究所, 山东 济南 250022)

**摘 要:** 首先从燃烧角度分析了影响循环流化床锅炉飞灰含碳量的主要因素, 然后针对 HG-465/13.7-L PM 7 型循环流化床锅炉实际运行中存在的飞灰含碳量高的问题, 根据理论分析并结合现场试验, 分析得到了煤质及运行参数对飞灰含碳量的影响。利用试验结果指导运行, 使该炉的飞灰含碳量由原来的 18% 降低到 12%。

**关 键 词:** 循环流化床锅炉; 飞灰含碳量; 燃烧调整

中图分类号: TK229 文献标识码: A

## 1 前 言

大型循环流化床锅炉作为新型高效清洁的燃烧技术, 其发展具有长远的战略意义。随着锅炉的大型化, 提高流化床锅炉运行的经济性、效率越来越具有重要的意义。飞灰含碳量高是循环流化床锅炉最常出现的运行问题之一, 从最早的小型 25 t/h 到目前运行的 465 t/h 的循环流化床锅炉都普遍存在。目前我国大多数流化床锅炉的飞灰含碳量在 10%~20%, 少数流化床锅炉高达 30% 以上。其中细灰的碳不完全燃烧损失约占  $q_4$  (机械未完全燃烧损失) 的 70%~80%。所以, 飞灰含碳量高是影响流化床锅炉燃烧效率的重要因素, 也是循环流化床锅炉效率低于煤粉炉效率的主要原因<sup>[1-4]</sup>。

针对这个问题, 结合某电厂 465 t/h 循环流化床锅炉, 本文进行了相关的理论和试验研究。

## 2 循环流化床锅炉飞灰的生成

循环流化床锅炉的飞灰主要由直径 100  $\mu\text{m}$  以下的细颗粒组成, 分析飞灰颗粒粒径及其含碳量关系可以发现, 直径在 20  $\mu\text{m}$  以下的物料颗粒的含碳量非常小, 对于直径在 50~100  $\mu\text{m}$  范围内的物料而言, 其含碳量却非常高, 最大甚至可以达到 30%~

40%。

### 2.1 飞灰颗粒的燃尽时间<sup>[1-3]</sup>

飞灰含碳量即煤粒的燃尽程度, 主要取决于煤粒在循环流化床锅炉内部的停留时间和其本身的燃烧反应速率。颗粒在炉膛内的停留时间越长, 燃烧反应速率越快, 颗粒就越容易燃尽。颗粒的燃烧反应速度是由颗粒本身的化学反应活性决定的, 活性越高, 燃烧速度就越快。

形成飞灰的煤颗粒在流化床内的燃烧时间参考煤粒燃烧的双阻力模型, 即炭粒的燃尽时间  $t_p$  是扩散时间  $t_d$  与反应时间  $t_r$  的总和, 即:

$$t_p = t_d + t_r \quad (1)$$

艾森海提出下列方程来计算焦炭粒子的燃尽时间:

$$t_p = K''_c d_c + K'''_g d_c^2 \quad (2)$$

$$K''_c = C_{cm} / 2 \Phi C_e K_c \quad (3)$$

$$K'''_g = \frac{C_{cm}}{2 \Phi C_e} \times \frac{1}{Sh D_m} \quad (4)$$

式中:  $d_c$ —碳粒直径;  $K_c$ ,  $K''_c$ —碳反应常数;  $K'''_g$ —气体扩散系数,  $\text{cm}^2/\text{s}$ ;

$C_{cm}$ —碳粒子中碳的平均摩尔浓度;  $\Phi$ —化学当量因子;  $C_e$ —乳化相氧浓度;

$Sh$ —舍伍德准则数;  $D_m$ —气体分子扩散系数。

使用上式计算较为复杂, 实际使用中一般采用下列燃尽时间的经验关系式:

$$t_p = k_b d_c^n \quad (5)$$

式中:  $k_b = 8.77 \times 10^9 e^{-qT_b}$  ( $q = 0.01276$ );

$$n = 1.16.$$

所以:  $t_p = 8.77 \times 10^9 e^{-0.01276T_b} d_c^{1.16}$  (6)

式中:  $T_b$ —床温。

不同粒径碳颗粒燃尽时间的计算数据见表 1。

### 2.2 465 t/h 循环流化床锅炉飞灰含碳量的生成

收稿日期: 2004-11-22; 修订日期: 2005-02-24

作者简介: 邱 燕(1975-), 女, 山东潍坊人, 山东大学讲师, 博士研究生。

对于 465 t/h 循环流化床锅炉, 从布风板 7 m 到炉顶 46.5 m, 炉膛中心线到分离器出口中心线 10 m, 细颗粒最短流程约 50 m, 满负荷运行总风量约  $4.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ , 炉膛截面积  $100 \text{ m}^2$ , 则炉内截面风速和颗粒最小停留时间与床温关系见表 2。

对比两表可以发现, 细小焦炭颗粒停留时间要远远小于其需要的燃尽时间, 这就是飞灰中存在未燃尽碳的主要原因。

对粒径在  $20 \mu\text{m}$  以下的焦炭颗粒, 虽然在炉内的停留时间很短, 但是其反应表面积大, 反应速度快, 在床温较高的情况下其停留时间仍大于燃尽所需时间, 故颗粒在离开炉膛之前就可以燃尽。

对粒径在  $50 \sim 100 \mu\text{m}$  间的焦炭颗粒, 炉内停留时间远远小于其所需要的燃尽时间, 所以该档颗粒的含碳量较高。循环流化床锅炉的实际运行结果也证明了该粒径档的焦炭颗粒是飞灰中未燃尽碳损失的主要来源。

表 1 不同粒径碳颗粒燃尽时间 (s)

颗粒粒径 $\mu\text{m}$	800 °C	850 °C	900 °C
20	16.55	8.75	4.62
40	36.99	19.54	10.33
60	59.21	31.28	16.53
80	82.66	43.67	23.08
100	107.08	56.58	29.89

表 2 炉内截面风速和颗粒最小停留时间与床温关系

床温/°C	截面风速 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	颗粒最小停留时间/s
800	4.91	10.18
850	5.14	9.72
900	5.37	9.31

### 2.3 降低循环流化床锅炉飞灰含碳量的措施

根据以上燃烧分析, 降低循环流化床锅炉飞灰含碳量的方法应集中在提高细煤粒的燃尽水平上。根据实际流化床锅炉结构和运行过程, 将其影响因素简要分析如下:

(1) 入炉煤粒径。对单位质量燃料而言, 粒径减小, 粒子数增加, 碳粒的总表面增加, 碳粒的燃烧速度增加, 燃尽时间缩短。但如果细颗粒过多, 或煤燃烧过程中生成较多的  $50 \mu\text{m}$  左右的细颗粒, 其颗粒的燃尽时间远远长于其炉内停留时间, 将会导致飞灰含碳量增加。因此保持入炉煤粒径在一个合理的范围内, 对降低飞灰含碳量是有益的。

(2) 入炉煤煤质。燃煤煤质的变化对循环流化床锅炉的燃烧及运行参数控制有重大影响, 特别是运行中的流化床, 当煤质变化时, 床温床压将出现大幅波动, 虽然可以通过调整配风进行调整, 但燃烧工况的恶化必然导致飞灰含碳量的增加。对于挥发分含量较高、结构比较松散的烟煤、褐煤和油页岩等燃料, 燃烧速率较高, 飞灰含碳量较小。对于挥发分含量低, 结构密实的无烟煤、石煤等相同条件下飞灰含碳量要高出很多。

(3) 床层温度。床温增加, 碳粒的燃尽时间缩短, 可降低飞灰含碳量。但流化床床层运行温度上限受灰分的变形温度限制, 并综合考虑脱硫效果、 $\text{NO}_x$  生成量和结焦, 一般认为流化床最佳运行温度为  $850 \sim 950 \text{ }^\circ\text{C}$ 。因此为了降低飞灰含碳量, 床温应根据运行情况确定运行上限。

(4) 氧量。氧量增大, 流化气体与碳粒子之间传质系数增大, 燃烧速度增大, 但当氧量增大到某一值后, 燃烧速度达到极限。而过高氧量降低了细煤粒在床内的停留时间, 导致飞灰含碳量增加。实际运行中控制炉膛出口过量空气系数 1.25 左右, 既保证碳粒子的充分燃烧, 又防止截面流速过大。

(5) 均匀布煤。HG-465/13.7-L PM 7 型循环流化床采用后墙给煤方式, 给煤通过两台刮板给煤机进入后墙四个返料斜腿中。这种给煤方式使 4 个落煤口煤量分布无法计量与控制, 从而存在较为严重的布煤不均问题。而入炉煤不均匀, 容易造成部分给煤口附近煤量过于集中, 形成缺氧区, 从而增加了飞灰含碳量。

(6) 床层高度。要尽量维持恰当的料层高度, 如果料层过高, 不仅会增大风机电耗, 而且会增大气泡尺寸和扬析损失。料层过薄, 又会导致燃烧工况不稳定, 燃料在床内的停留时间缩短。

## 3 HG-465/13.7-L PM 7 型循环流化床锅炉应用实例

### 3.1 锅炉概况<sup>[5-9]</sup>

HG-465/13.7-L PM 7 型循环流化床锅炉为超高压自然循环、单锅筒、高温绝热分离器, 床上、床下燃烧器联合启动布置方式。锅炉主要由炉膛, 高温绝热分离器, 自平衡“U”形回料阀和尾部对流烟道组成。冷渣器采用风水联合冷渣器, 由锥形阀控制排渣。炉膛内的蒸发受热面采用膜式水冷壁, 同时布置了双面水冷壁。屏式 II 级过热器和屏式再热

器布置在燃烧室内, 炉膛壁面和受热面的易磨损部位均采取了防磨措施。炉膛底部是水冷布风板, 其上布有大直径钟罩式风帽。一、二次风分开布置, 一次风经布风板给入, 二次风喷口布置于炉膛密相区, 给煤、石灰石系统的密封风均取自二次风。启动燃烧器共 8 只, 其中床上 4 只, 床下 4 只。油枪均为蒸汽雾化油枪, 燃用轻柴油, 油压 1.38 MPa。

### 3.2 问题描述

某厂 HG-465/13.7-L PM 7 型循环流化床锅炉投产后, 飞灰含碳量一直较高, 平均为 18%。锅炉运行基本情况如下:

燃煤工业分析见表 3。

煤颗粒度化验结果见表 4。

满负荷下床温分布情况见表 5。

满负荷下锅炉一次风约为  $2.3 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ ; 二次风约为  $2.2 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

表 3 燃煤的工业分析

	取样 1	取样 2
空气干燥基灰分 $A_{ad}/\%$	37.68	40.27
空气干燥基挥发分 $V_{ad}/\%$	10.83	13.92
收到基低位发热量 $Q_{net,ar}/\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	19.056	17.552

表 4 煤颗粒度化验结果

	粒径			
	> 6 mm	> 3 mm	> 1 mm	< 1 mm
取样 1/ $\%$	7.72	26.7	50.76	49.24
取样 2/ $\%$	8.26	29.36	51.7	48.3

表 5 满负荷下床温分布

	下层	中层	上层
前墙/ $^{\circ}\text{C}$	848/877/884	854/861	840/862
左墙/ $^{\circ}\text{C}$	865	877	866
后墙/ $^{\circ}\text{C}$	872/857/863	861/823	834/822
右墙/ $^{\circ}\text{C}$	846	850	832

### 3.3 工业试验设计及试验结果

#### 3.3.1 飞灰取样点对飞灰含碳量的影响

电厂煤粉锅炉飞灰取样较常采用的是撞击式飞灰取样器, 但撞击式飞灰取样器对循环流化床锅炉飞灰取样存在较大误差。通过对比试验发现, 在本炉上撞击式飞灰取样器取样为 5% 时, 电除尘下取样含碳量可达到 18%。这主要是煤粉炉和流化床锅炉的飞灰颗粒的分布以及各颗粒的含碳量存在较

大偏差所造成的, 因此在试验中我们取电除尘第一电场飞灰样作为参考样。

#### 3.3.2 入炉煤煤质与飞灰含碳量的关系

由于入厂煤的煤种繁多, 通过化验分析得知, 其干燥基挥发分可从 8% 变化至接近 30%, 加之煤场较小, 无法充分混煤配煤, 导致锅炉入炉煤质变化频繁。为了考察入炉煤煤质对锅炉飞灰含碳量的影响, 我们对锅炉入炉煤质和飞灰含碳量进行了长期的跟踪, 结果显示, 飞灰含碳量与煤种中干燥基挥发分之间存在较强的对应关系, 试验数据见图 1。

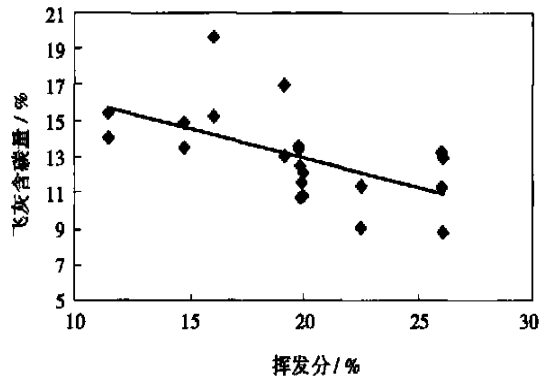


图 1 飞灰含碳量与挥发分的关系

从图中可以发现当挥发分由 10% 变化到 26% 时, 飞灰含碳量由 20% 降低至 10%。因此可以得到如下结论: 煤种的变化对循环流化床锅炉飞灰含碳量的影响较大, 在保证燃烧稳定的前提下, 提高煤质, 特别是提高挥发分含量, 对降低飞灰含碳量有显著作用。

#### 3.3.3 运行参数对飞灰含碳量的影响试验

根据正交试验理论, 我们设计了 4 因素 2 水平的正交试验表。从独立可调整变量的角度出发, 将运行影响因素总结为入炉煤量、一二次风量、总风量和床压。在试验过程中, 保证锅炉负荷不变, 忽略入炉煤变化。试验考察的重点放在总风量、一二次风量配比、上下二次风配比以及床压对飞灰含碳量的影响。

试验工况设计及试验结果见表 6。

分析表 6 可以得到如下结论:

(1) 氧量影响。试验数据显示, 氧量降低 1.379% 时, 飞灰含碳量增加了 0.621%。适当增加总风量, 有助于降低飞灰含碳量。

(2) 一次风率影响。当一次风率降低 0.045 时, 飞灰含碳量降低了 0.599%。适当降低一次风

量,增加二次风量,有助于降低飞灰含碳量。

(3) 下二次风率。当下二次风率降低 0.17 时,飞灰含碳量增加了 0.189%。进一步分析试验数据,可根据氧量(总风量)大小将试验工况分为两组,在一次风率大的情况下,下二次风率小的飞灰含碳量低;一次风率小时,情况正相反,下二次风率大的飞灰含碳量低。因此一次风率和下二次风率间存在较大的相互影响。

表 6 试验数据及分析表

工况	氧量 /(%) (a)	一次风 率(b)	下二次 风率(c)	床压 /kPa	飞灰含 碳量/%		
1	5.365	0.523	0.571	8.26	15.53		
2	5.105	0.498	0.555	7.48	12.79		
3	5.605	0.465	0.575	7.3	13.375		
4	5.825	0.459	0.371	8.56	15.095		
5	3.99	0.536	0.580	8.72	16.31		
6	4.06	0.527	0.413	7.300	14.6		
7	4.035	0.493	0.712	7.360	12.44		
8	4.3	0.487	0.421	8.86	15.925		
					a×b	a×c	b×c
R	-0.621	0.599	-0.189	-0.184	-0.674	0.699	2.414
高平均	5.475	0.521	0.610	7.870			
低平均	4.096	0.476	0.440	8.090			
差	-1.379	-0.045	-0.170	0.220			

注:表中符号相乘代表因素之间交互作用。

(4) 床压影响。床压增加 0.22 kPa,飞灰含碳量可以减少 0.22%。适当增加床压,有助于降低飞灰含碳量。

(5) 交互作用影响。试验显示氧量与一次风率交互作用影响了飞灰含碳量 0.674%;氧量与下二次风率的交互作用对飞灰含碳量影响了 0.699%。一次风率和下二次风率的交互作用对飞灰含碳量影响了 2.414%。

(6) 根据试验结果,各影响因素按影响大小排序如下:一次风率和下二次风率的交互作用,氧量与下二次风率的交互作用,氧量与一次风率的交互作用,氧量,一次风率,下二次风率,床压。

在本次试验的基础上,我们在另外一台同型号锅炉上进行了相同试验,两炉试验结论基本相同。试验证明了运行参数对飞灰含碳量的单因素影响相对与其交互作用对飞灰含碳量的影响相比要弱些,因此在运行过程中进行降低飞灰含碳量的燃烧调整时,必须综合考虑各因素的综合作用,才能达到最佳效果。利用试验,我们可以得到目前最优的运行方式是:大氧量低一次风率高下二次风率高床压。

## 4 结 论

经过现场长期跟踪和试验,我们对降低某厂 HG-465/13.7-L PM7 型循环流化床锅炉飞灰含碳量建议如下:

(1) 稳定入炉煤煤质,控制其干燥基挥发分在 20%左右;

(2) 运行方式按照大氧量低一次风率高下二次风率高床压原则控制,具体运行参数可根据实际煤种和负荷情况进行综合调整。

采取以上措施后,该炉飞灰含碳量有了明显降低,目前一般可控制在 12%左右,但由于现场条件限制,目前还无法保证入炉煤煤质,在入炉煤粒径,入炉煤分布等方面也由于设备原因无法进行调整,因此在进行相关设备的改造和运行方式的调整后,其飞灰含碳量还有潜力进一步降低。

## 参考文献:

[1] 刘德昌, 阎维平. 流化床燃烧技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.

[2] 申 莉, 刘德昌, 张世红, 等. 影响循环流化床锅炉燃烧效率的因素分析及改善措施[J]. 动力工程, 2002, 22(6): 2054-2058.

[3] 吕俊复, 张守玉, 刘 青, 等. 循环流化床锅炉的飞灰含碳量问题[J]. 动力工程, 2004, 24(2): 170-174.

[4] 岑可法, 倪明江, 骆仲泱, 等. 循环流化床锅炉的设计与运行[M]. 北京: 科学出版社, 1994.

[5] 牛蔚然. HG-465/13.7-L PM7 型循环流化床锅炉结构特点及调试[J]. 华北电力技术, 2004, 10: 7-11.

[6] 牛蔚然. 465 t/h 循环流化床锅炉结焦原因及分析[J]. 华东电力, 2004, 32(7): 59-60.

chanical and chemical incomplete combustion losses. The latter is the main cause of a low burn-out rate. The authors' study results may offer significant reference data and information for understanding the combustion characteristics of the above type of boilers and conducting relevant technical adjustments. **Key words:** W-shaped furnace, water-cooled gun suction thermocouple, flue gas analysis, burn-out rate, temperature, particulate size

**激光感生击穿光谱技术测量飞灰含碳量 = The Measurement of Carbon Content in Fly Ash by Laser-induced Breakdown Spectroscopy** [刊, 汉] / WU Ge, LU Ji-dong, YU Liang-ying, et al (National Key Laboratory for Coal Combustion Under the Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 365 ~ 368

The theory of laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) and its present status of application potential are described and the measurement of carbon content in fly ash by using this method and results of analysis presented. The rank of coal selected is Jiaozuo anthracite. By a method of rapid incineration fly ash samples with carbon content ranging from 0.5% to 7.0% were obtained. The measurement of carbon content in fly ash by using LIBS technique was compared with the carbon content in fly ash samples measured through the use of traditional weight combustion method. The results of the two measurement methods are in very good agreement. **Key words:** laser-induced breakdown spectroscopy, plasma, calibration, carbon content of fly ash

**降低循环流化床锅炉飞灰含碳量的理论及应用 = The Theory of the Reduction of Fly-ash Carbon Content in a Circulating Fluidized Boiler and Its Applied Research** [刊, 汉] / QIU Yan, TIAN Mao-cheng, CHENG Lin (Institute of Energy and Power Engineering under the Shandong University, Jinan, China, post Code: 250061), NIU Wei-ran (Thermal Energy Research Institute under the Shandong Electric Power Research Academy, Jinan, China, Post Code: 250022) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 369 ~ 372

First, from the viewpoint of combustion an analysis was conducted of the main factors which may influence the carbon content of fly ash in a circulating fluidized bed boiler. Then, in the light of the high carbon content of fly ash during the practical operation of a HG-465/13.7-L PM 7 circulating fluidized bed boiler the impact of coal quality and operating parameters on fly-ash carbon content was ascertained by an analysis on the basis of theoretical investigation in conjunction with on-site tests. The test results have been used to guide boiler operation, resulting in a reduction of fly-ash carbon content from the original 18% to 12%. **Key words:** circulating fluidized bed boiler, carbon content of fly ash, combustion adjustment

**回流式循环流化床烟气脱硫的工程试验研究 = Experimental Study of the Flue Gas Desulfurization Project of a Reflux Circulating Fluidized Bed** [刊, 汉] / HAN Xu, YAO Guang-yi, LI Rui-xing, et al (Wuhan Kaidi Electric Power Co. Ltd., Wuhan, China, Post Code: 430070) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 373 ~ 376

At Yinchuan Thermal Power Plant an experimental investigation was conducted on boiler No.5 (150 t/h) involving the flue gas desulfurization plant for a reflux type circulating fluidized bed (CFB) with a semi-dry method of CFB desulfurization technique being employed. The designed flue gas quantity being treated on the desulfurization plant is 160,000 m<sup>3</sup>/h. Inside the desulfurizer and at its top employed is a special reflux construction design. With the realization of internal circulation of materials inside the desulfurizer the concentration at the inlet of dust removal device has been reduced. Through industrial tests studied was the impact of calcium/sulfur ratio and water spray rate on the efficiency of the system desulfurization. Test results indicate with the calcium/sulfur ratio being 1.3, temperature and concentration inside the desulfurizer respectively at 70 °C and 800 g/m<sup>3</sup> the system desulfurization efficiency can reach 90%, dust emission concentration is 80 mg/m<sup>3</sup> and the desulfurization system resistance less than 1.5 kPa. **Key words:** reflux type, circulating fluidized bed, flue gas desulfurization, desulfurization efficiency