

# 循环流化床锅炉飞灰残碳的生成及其处理

李少华, 王启民, 肖显斌, 杨海瑞

(清华大学热能工程系, 北京 100084)

**摘要:** 循环流化床燃烧技术因其众多的优点得到广泛应用, 但是在运行中普遍存在着飞灰含碳量远远高于预期的问题。影响飞灰含碳量的主要因素包括: 煤指标、煤的结构和焦炭反应活性、给煤粒径以及循环流化床的结构和其它运行参数等。目前, 降低飞灰含碳量的方法有: 飞灰再循环、加强二次风刚性和调整床压降等。实验表明, 在低风速条件下, 可以将飞灰中的残碳充分燃尽。另外, 高压静电分离和飞灰水活化团聚也都为飞灰残碳的利用提供了新思路。

**关键词:** 循环流化床锅炉; 飞灰含碳量; 低速流化床; 静电分离; 飞灰水活化团聚

中图分类号: TK224.1 文献标识码: A

## 引言

循环流化床锅炉由于具有煤种适应性强, 利于污染物控制等优点, 已经得到了广泛应用。目前在中国运行的循环流化床锅炉已有上千台。越来越多的大容量、高蒸汽参数循环流化床锅炉也已经和即将投入运行。

燃烧效率是锅炉设计和运行中倍受关注的问题, 根据循环流化床的设计理论, 虽然炉温比煤粉炉低, 只有 850~900 °C, 但是由于床料在其中反复循环的特点, 飞灰含碳量应该较低。然而在我国运行的多数循环流化床都存在飞灰含碳量过高的现象, 有的飞灰含碳量甚至高达 30% 以上, 严重影响了锅炉的燃烧效率, 造成了很大的能源浪费。高含碳量也妨碍了利用飞灰生产水泥<sup>[1,7]</sup>。因此, 飞灰含碳量过高严重制约了循环流化床锅炉技术的发展及商业应用, 是目前行业中亟待解决的重要问题。

## 1 导致循环流化床锅炉中飞灰含碳量高的原因

### 1.1 给煤性质对飞灰含碳量的影响

国外电厂运行经验表明, 循环流化床锅炉燃烧

褐煤等高反应性燃料时, 飞灰含碳量很低。然而, 中国大多数循环流化床锅炉燃用贫煤、无烟煤和矸石等低反应活性的燃料, 飞灰含碳量一般较高, 有时甚至高达 30%<sup>[3]</sup>, 部分引进国外技术生产的大容量循环流化床锅炉也出现类似情况<sup>[1]</sup>。由此分析, 大量使用低活性燃料是循环流化床锅炉飞灰含碳量高的关键原因之一。

煤的性质对碳颗粒燃尽的影响可以用煤指标, 即挥发份对发热量的贡献  $I = V_{daf} / Q_{ar, net, p}$  来表达, 将其作为评价不同煤种对飞灰含碳量影响的指标<sup>[4,3]</sup>。如图 2 所示, 煤的性质对循环流化床锅炉飞灰含碳量影响的非常大。

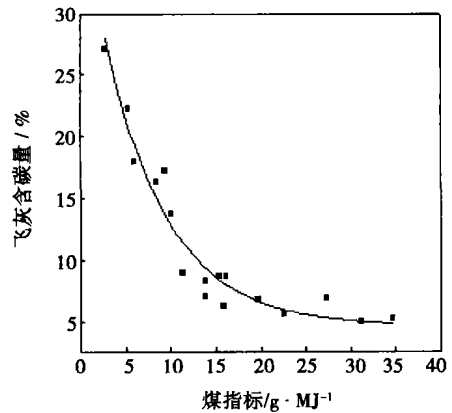


图 1 煤指标和飞灰含碳量关系

褐煤的挥发份高, 发热量低, 但煤指标高, 其飞灰含碳量低。而当燃用劣质燃料时, 其飞灰含碳量高。

煤的结构和焦炭反应活性等, 也对飞灰含碳量影响较大。在燃烧过程中, 煤焦中碳结构排列有序化和具有催化能力的矿物质组分烧结或熔融, 是煤炭颗粒失活的主要原因<sup>[4,9]</sup>。表现在最初的很短时间内, 煤炭颗粒的燃尽程度很高, 约为 50%~

80%<sup>[9]</sup>;但是在随后的过程中,颗粒中剩余碳的燃尽却需要很长时间。不同煤种在热处理中的失活特性不同<sup>[10]</sup>。如图 2 所示,燃烧温度越高,燃烧时间越长,焦炭颗粒的反应活性也越低。

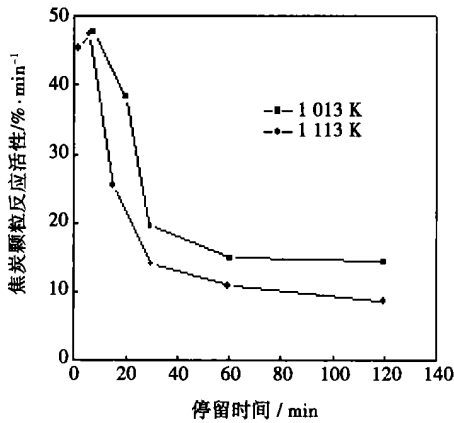


图 2 焦炭颗粒反应活性和反应温度及时间的关系

在循环流化床的运行温度下,焦炭颗粒的失活时间依煤种不同约为 10~30 min<sup>[8]</sup>,此后,较大的颗粒虽然在不断循环,但是因为已经失活,所以很难发生反应。这样,因大颗粒磨损产生的小颗粒不断从分离器逃逸出物料循环,导致其飞灰含碳量过高。因此煤的结构和焦炭反应活性也是决定燃烧效率的重要因素。

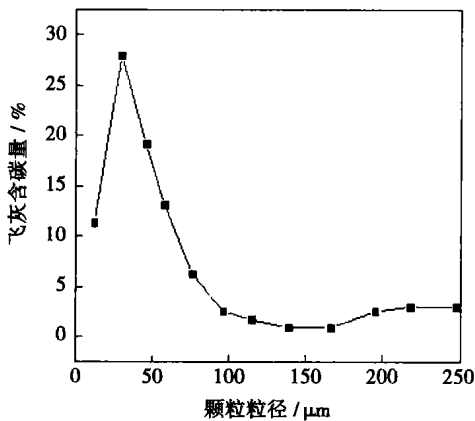


图 3 循环流化床飞灰粒径和含碳量的普遍关系

测量发现,给煤的粒径分布对循环流化床飞灰含碳量也有重要的影响。典型的循环流化床飞灰含碳量与粒径的关系如图 3 所示,含碳量较高的飞灰粒径主要集中在 50 μm 左右。根据焦炭粒子燃烧模型,颗粒的燃尽时间在粒径为 40~50 μm 出现峰值,即在此粒径范围内的焦炭粒子燃尽所需的时间最

长<sup>[9]</sup>;在循环流化床内,颗粒的停留时间在颗粒粒径 100 μm 附近达到峰值,即 100 μm 颗粒的停留时间最长;而在 50 μm 附近其停留时间相对较短。这样,粒径 50 μm 左右的颗粒所需的燃尽时间最长,而其停留时间却较短,很难实现较大程度的燃尽,因此在此粒度范围内的飞灰含碳量很高。

## 1.2 流化床结构及其它运行参数的影响

气固混合不充分也是导致飞灰含碳量过高的原因之一。在循环流化床中,二次风口以上存在着如图 4 所示的中心贫氧区,在此富燃料区域内,颗粒的燃烧很不充分,细颗粒没有燃尽就逃出循环。

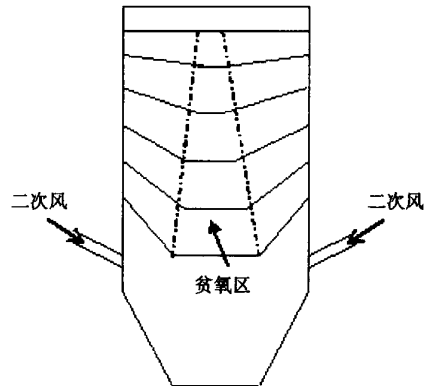


图 4 二次风口以上的中心贫氧区

分离器效率不够高可能是影响飞灰含碳量的重要原因之一。给煤中的细颗粒和在床内由一次爆裂、二次爆裂产生的已经失活的细碳颗粒从分离器逃逸<sup>[1]</sup>,这类细颗粒在炉内停留时间很短,燃烧不完全,导致其飞灰含碳量过高。

另外,床温、过量空气系数等都是影响飞灰含碳量的因素,在此不再一一详述。

## 2 目前的主要解决方法

结合上述各个影响因素,目前有如降低飞灰含碳量的方法。

### 2.1 飞灰再循环

飞灰再循环通过再循环设备将除尘器捕集下的飞灰送回炉膛进行再燃,是降低飞灰含碳量的常用方法之一,这是来自于鼓泡床的经验,在循环流化床锅炉中采用,可以使飞灰含碳量比没有再循环时降低 20% 左右。

由于需要在流化床锅炉基础上加入飞灰循环系统,所以结构和运行变得复杂,尾部受热面磨损增加,热量分配发生变化,需要做出合适的调整才能保

证在锅炉正常运行的基础上降低飞灰含碳量。

在回送飞灰的同时也将未完全反应的氧化钙送回炉膛, 所以飞灰再循环也提高了石灰石的利用效率。

### 2.2 加强二次风穿透力

近年来, 人们注意到气固混合效果对飞灰含碳量的重大影响, 倾向于提高二次风刚性, 以加强二次风的穿透深度, 加强气固的混合, 从而使燃烧更加充分<sup>[3, 11]</sup>。对一台锅炉的二次风口进行改造以加强二次风刚性, 改造后飞灰含碳量有显著下降(见图 5)。事实上, 仅仅提高刚性并不足以改善整个炉膛的氧气分布, 在相当大的程度上扩散起着重要的作用。

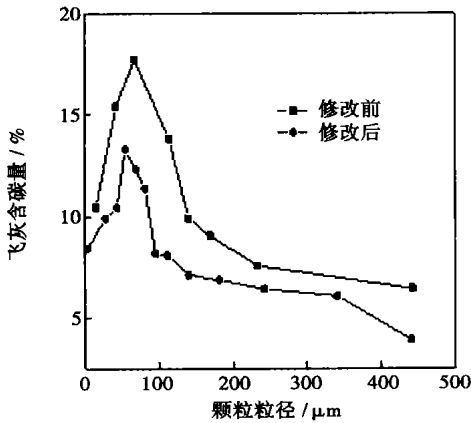


图 5 二次风刚性对飞灰含碳量的影响

扩散与混合不仅仅受制于二次风的布置, 而且与炉膛中的气固两相流有关。二次风的背压越低, 越有利于混合。而二次风的背压取决于炉膛中的物料浓度, 物料浓度宏观上表现为床压降。杨海瑞等人的研究, 在一台 465 t/h 的循环流化床锅炉实验结果证明了以上观点(见图 6(a))<sup>[4]</sup>。

需要指出的是, 床压降对飞灰含碳量的影响并不是唯一的。床压降上升, 物料浓度增大, 加剧了颗粒团聚现象, 使得内循环加强, 延长了细颗粒的停留时间, 因此有利于可燃颗粒的燃尽; 床压降减少, 加强了气固混合, 但是减少了停留时间, 这两种机制共同控制可燃物的燃尽程度。这在 3 台 75 t/h 循环流化床中燃用 6 种煤的测量得到验证(见图 6(b))。

因此, 床压降对飞灰含碳量的影响机理是复杂的, 还有待更深入的实验验证。

## 3 处理高含碳飞灰的新方法

上述各种方法都是从循环流化床本身的运行参

数、结构等方面进行调整改进, 可以有效降低飞灰含碳量。但是由于失活、停留时间太短等原因, 经过处理的飞灰中含碳量仍然不低, 因此如何利用高含碳飞灰, 受到高度重视。近年来出现了高压静电分离飞灰残碳以及飞灰水活化团聚再燃的新方法。

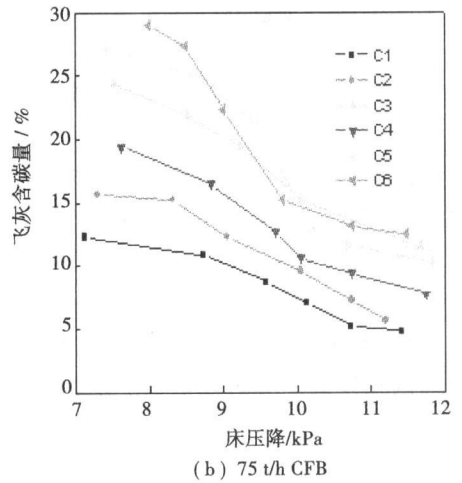
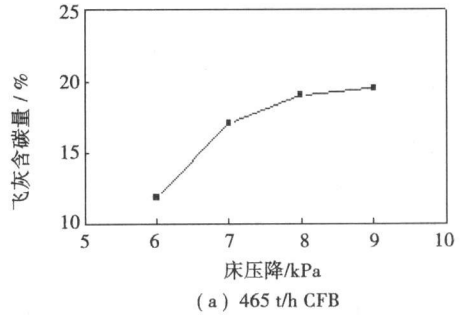


图 6 床压降对飞灰含碳量的影响

### 3.1 高压静电分离飞灰残碳

高压静电分离技术是利用飞灰中矿物质与飞灰碳的相对分离的分布规律, 根据飞灰碳(近似于石墨)和矿物质(主要是高岭土、偏高岭土、硅铝铁氧化物等)的介电常数的不同, 在相互摩擦时, 飞灰碳颗粒失去电子带正电荷, 矿物质得到电子带负电荷, 从而在高压静电场中发生分离的一项技术。

在高压静电分离过程中, 富含碳的成分倾向于沉积在负极侧, 富含灰的成分倾向于沉积在正极侧。碳含量在负极侧为最大值, 然后逐渐降低, 到正极达到最小值; 灰含量则正好相反, 碳和灰的含量是连续分布的。可见, 对分离产物进行划分就可能满足任意的碳纯度要求, 但是和其它物理分离过程一样, 高纯度必然导致低产率<sup>[12]</sup>。

正极侧富含灰的产物的回收率和回收物中碳含量的关系及负极侧富含碳的产物的回收率和回收物

中碳含量的关系如图 7 所示<sup>[12]</sup>。当分隔板向富含灰的正极侧移动时, 富含灰的分离产物的回收率下降, 其中的碳含量也减少, 因为原来含碳量相对最高的一部分被划分出去; 而富含碳的负极侧, 分离产物的回收率增大, 碳含量也降低, 因为原来在正极侧碳含量相对为最高的一部分, 被划分到负极侧后, 却成了碳含量相对最低的部分, 因此导致整个负极侧分离产物的碳含量下降。

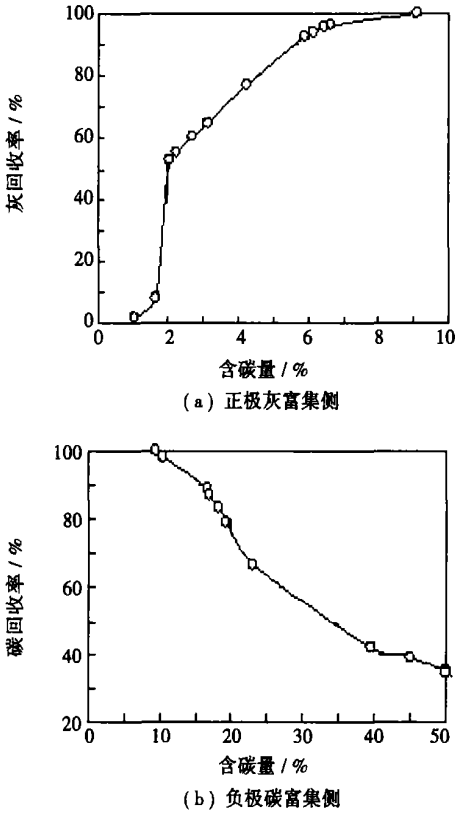


图 7 回收率与回收物中碳含量的关系曲线

### 3.2 飞灰水活化团聚

飞灰水活化团聚技术是一项既提高飞灰含碳燃尽度, 同时又提高脱硫效率的新工艺, 该技术的最大优势是在现有流化床飞灰返送装置上稍加改动就可以实现团聚飞灰返送, 并明显提高飞灰含碳燃烧程度和降低钙硫比<sup>[13]</sup>。

飞灰和水以 1:1 的比例送入灰浆池, 在一定温度下, 与水充分混合, 用搅拌机搅拌均匀后, 用泥浆泵经输送管及设置在燃烧室内的喷嘴将物料喷入流化床燃烧室内, 即可实现飞灰快速水化团聚。原因是飞灰在流化床内的高温烟气作用下, 飞灰中的水分迅速挥发, 内部气压变小, 飞灰颗粒在外压和范德华力作用下团聚成球, 因而飞灰颗粒体积变大, 在

流化床内停留时间延长, 飞灰与烟气中的 SO<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 反应时间延长, 提高飞灰的脱硫及燃烧效率。

流化床飞灰经过水活化团聚工艺, 制备飞灰团聚颗粒, 提高了飞灰在流化床中的停留时间, 进而提高飞灰中钙的利用率, 降低飞灰未燃碳含量, 可以提高整个流化床的整体经济性<sup>[14]</sup>。

### 3.3 在低速流化床的飞灰燃尽

提出了含碳飞灰在低速流化床进一步燃尽的方法, 并进行了实验研究。

在流量较小, 风速较低的工况下, 颗粒在床内的停留时间较长, 可改善在循环流化床中飞灰再循环的燃烧时间不足的问题。如果在此工况下将飞灰送入床内, 可以设想, 由于停留时间足够长, 即使是已经失活的部分颗粒, 也可以发生燃烧反应, 飞灰中的残碳将得到更加充分的燃烧。

在图 8 所示的小型电加热循环流化床实验台上进行验证实验。该试验台由主反应器, 温控系统, 配气系统, 给料装置和取样系统组成。炉下加热段可以对流化风进行预热。炉下预热流化风可以保证炉膛内流化均匀, 温度一致。

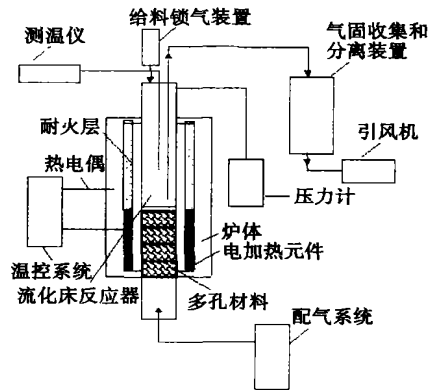


图 8 小型循环流化床实验台

样品为来自同一电厂两台循环流化床的飞灰: 飞灰 1 的在马弗炉加热后烧失量为 44.5%, 飞灰 2 的烧失量为 39.8%。表 1 为两种飞灰的 C、H、N、S 的元素分析结果。

表 1 两种飞灰的部分元素分析结果

	C	H	N	S
飞灰 1	41.2	0	0.81	1.41
飞灰 2	36.5	0	0.76	0.6

对两种飞灰的实验研究发现, 经过足够的停留时间, 飞灰是可以趋于燃尽的(见图 9)。因此, 将飞

灰送入低风速、低循环量的流化床中燃烧,可以基本实现飞灰残碳的最大限度的燃烧。这可能是一种有前途的高含碳飞灰处理方法,有关这方面的研究还在深入进行中。

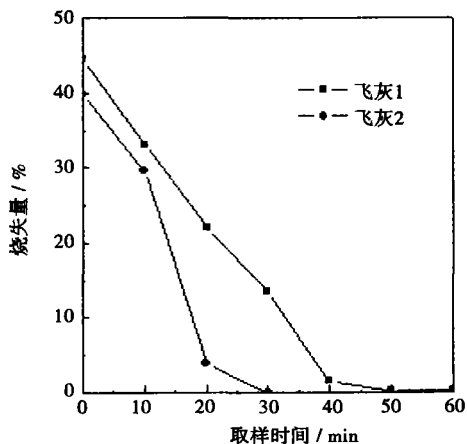


图 9 飞灰烧失量和取样时间的关系曲线

#### 4 结 论

循环流化床锅炉运行过程中出现的飞灰含碳量过高的现象,其本质是运行工况偏离了定态设计要求的工况,但是完全按照设计要求运行,在大多数情况下是难以达到的。现有的降低飞灰含碳量技术都在原来的锅炉中尽量降低飞灰含碳量为着眼点,受到尾部受热面磨损、能耗等的限制,以及飞灰颗粒失活的影响,即使经这类技术处理的飞灰,其含碳量还有较大的降低空间。

因此,需要采用新的办法进一步降低飞灰含碳量:经过实验验证,用低风速低循环量的流化床对飞灰进行再燃,延长了颗粒的停留时间,可以基本实现飞灰最大限度的燃尽,从而大大降低飞灰含碳量;水活化飞灰送入炉膛,可使飞灰颗粒团聚,体积增大,停留时间延长,实现飞灰中残炭的进一步燃尽;采用高压静电分离技术对飞灰残碳进行分离,是利用飞灰中碳颗粒和矿物质介电常数不同,相互摩擦后分别带正电荷和负电荷的原理,使飞灰中的碳颗粒和矿物质在高压静电场中实现分离。这 3 种新方法都可以大幅度的降低飞灰含碳量,达到有效利用能源的目的。

#### 参考文献:

[1] XIAO X, YANG H. Research on carbon content in fly ash from circulating fluidized bed boilers[J]. Energy & Fuels, 2005, 19(4): 1520-

1525.

[2] 杨海瑞, 肖显斌. 循环流化床锅炉床压降对飞灰含碳量的影响[J]. 电站系统工程, 2005, 21(2): 13-14.

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

[4] 郭广辉, 路霁. 循环流化床锅炉飞灰残碳生成机理研究[J]. 煤碳转化, 2000, 23(3): 19-25.

[5] 郑洽余, 刘信刚. 循环流化床锅炉燃烧室内焦炭粒子燃烧特性的研究[J]. 工程热物理学报, 1995, 16(1): 106-110.

[6] 王智微, 张岩丰. 循环流化床锅炉燃料适应性的研究分析[J]. 锅炉制造, 2002(1): 1-3.

[7] 杨文, 谢晓闻. 循环流化床锅炉飞灰综合利用初探[J]. 工业锅炉, 1999(1): 52-53.

[8] LI Y, YUE G, LU J, et al. An investigation of carbon Loss of boilers burning hard coals //Proceeding of 16th International Conference on Fluidized Bed Combustion[C]. ASME, Paper FBC01-0064, 2001.

[9] 张守玉, 黎永. 煤焦反应活性影响因素的探讨[J]. 煤碳转化, 2003, 26(2): 25-28.

[10] 张守玉, 吕俊复. 热处理对煤焦反应性及微观结构的影响[J]. 燃料化学学报, 2004, 32(6): 673-678.

[11] JIN X, LU J. Gas concentration profiles in the furnace of large CFB boilers with water-cooled square separator //Proceeding of 1st International Conference of Engineering Thermophysics[C]. Beijing: Academy Press, 1999. 275-286.

[12] BAN H, LI TIAN X, JAMES C HOWER, et al. Dry triboelectrostatic beneficiation of coal and fly ash[J]. Fuel, 1997, 76(8): 801-805.

[13] 徐猛, 李登新. 飞灰水活化团聚脱硫技术[J]. 煤碳转化, 2003, 26(1): 22-25.

[14] 李登新, 吕俊复. 高碳团聚飞灰的燃烧特性[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 213-216.

(辉 编辑)

#### 书 讯

### 现代控制理论

本书内容包括状态空间概念,状态方程建立及求解,李雅普诺夫稳定理论,能控能观性,极点配置和观测器,以及最优控制问题和基本解决方法;即变分法,动态规划和极大值原理。书中编入了大量例题和习题,并将难点和重点寓于例题和习题之中。

读者对象: 高校自动化学科及相关专业本科学学生, 工程技术人员。

2007 年 1 月出版

which flaky particles predominate. The description of particles by using fractal dimensions will show different fractal dimensions for large particles and small ones. The boundary dividing point of big and small particles is about 3.17 mm for raw coal and about 3.06 mm for cold cinder. **Key words:** fluidized bed, bed materials, coal particle, particle morphological appearance, flaky shape

循环流化床锅炉飞灰残碳的生成及其处理 = **Formation of Fly-ash Carbon Residue in a Circulating Fluidized Bed Boiler and Its Disposal** [刊, 汉] / LI Shao-hua, WANG Qi-min, XIAO Xian-bin, et al (Thermal Energy Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(1). — 52 ~ 56

Circulating fluidized bed combustion techniques have been widely used in China due to its numerous merits. However, a universal problem in operation is that the carbon content of fly-ash is much higher than generally expected. The major factors influencing the carbon content of fly ash are: coal index, coal structure and coke reaction activity, feed-coal particle diameter and structure of the circulating fluidized bed as well as other operational parameters etc. At present, the methods for reducing fly-ash carbon content mainly include: fly ash recirculation, secondary air strength enhancement and pressure-drop adjustment for a circulating fluidized bed etc. The experiments performed by the authors indicate that under the condition of a low air speed, the carbon residue in fly ash can be fully burnt up. In addition, high voltage electrostatic separation and fly-ash water activated agglomeration can also provide a new approach for utilizing carbon residue in fly ash. **Key words:** circulating fluidized bed boiler, carbon content of fly ash, low speed circulating fluidized bed, electrostatic separation, fly-ash water activated agglomeration

撞击气化火焰边缘的分形特性 = **Fractal Characteristics of an Impinging Gasification-flame Edge** [刊, 汉] / LIANG Qin-feng, NIU Miao-ren, YU Guang-suo, et al (Clean Coal Technology Research Institute under the East China University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200237) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(1). — 57 ~ 60

A gasification furnace is a key equipment item in an IGCC (integrated gasification combined cycle) power generation system. During tests, the authors have by using a flame camera system taken the pictures of impinging gasification-flames in a multi-nozzle and opposed gasification furnace. The fractal dimension of the impinging gasification-flame edge was calculated by using a pixel-covering method, providing an effective method for judging the combustion condition of the impinging gasification-flame. The test results show that the curves of the above-mentioned flame edge assume fractal characteristics. The fractal dimensions of the flame edge curve will gradually decrease during the ignition stage but increase during the process of transition from a two-nozzle impinging to a four-nozzle one. With an increase in the operational load, the fractal dimension will also increase. However, the difference between the fractal dimension of a two-nozzle and four-nozzle impinging flames will gradually diminish. **Key words:** IGCC, impingement, gasification, flame, fractal characteristics

含盐有机废液焚烧煤灰熔融特性试验研究 = **Experimental Study of Coal-ash Fusion Characteristics Obtained from the Incineration of Salty Organic Waste Liquid** [刊, 汉] / CHEN Hui-chao, ZHAO Chang-sui, CHEN Xiaoping, et al (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology under the Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(1). — 61 ~ 64, 72

Studied are the ash fusion characteristics obtained from the mixed incineration of 1. three types of coal (Yuanbaoshan-origin lignite, Cuijiagou-origin bituminous coal and Xuzhou bituminous coal, hereinafter referred to as Coal Y, Coal C and Coal X for short respectively), which have different ash fusion characteristics, and 2. chemical waste-liquid red water with different salt contents (the content of alkali metal sodium salt  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaNO}_3$  and  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  etc. in red water, hereinafter generally referred to as the salt content). The study results show that if no limestone is added, the ash fusion tem-