



480 t/h 循环流化床锅炉飞灰特性的试验研究

刘兴国¹ 张宗珩², 刘海玉¹ 金 燕¹

(1. 太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原 030024; 2. 中煤平朔电力工程有限公司, 山西 朔州 036800)

摘 要: 以某电厂 480 t/h 循环流化床锅炉为研究对象, 通过试验探讨了给煤特性、总风量、一次风量和风室压力对飞灰特性的影响, 并对飞灰特性进行了微观分析。试验结果表明: 飞灰含碳量随粒径分布具有峰值特性, 当飞灰粒径为 37 μm 时, 飞灰含碳量达到最大值。100 MW 负荷下, 当省煤器出口氧量从 3.5% 增加到 4.5% 时, 飞灰含碳量降低约 3%; 一次风量从 15 × 10⁴ m³/h 降低到 14 × 10⁴ m³/h 时, 飞灰含碳量降低约 2%; 风压从 8 kPa 升高到 12 kPa 时, 飞灰含碳量降低约 4%。SEM 对飞灰表面结构和孔隙结构的表征结果表明: 不同粒径段飞灰孔隙特征具有渐变特性, 与飞灰粒径及含碳量分布特性相吻合。

关 键 词: 循环流化床锅炉; 运行参数; 飞灰; 粒径分布; 孔隙结构

中图分类号: TK224 文献标识码: A

引 言

循环流化床锅炉作为一种清洁燃烧技术, 由于其燃料适应性广而适合我国煤炭资源的特点^[1]。但是相比煤粉炉, 循环流化床锅炉机组具有运行安全性低、厂用电率偏高、排烟温度高和飞灰含碳量高等问题。飞灰含碳量偏高是造成循环流化床锅炉效率低的主要因素, 因此如何降低飞灰含碳量是亟待解决的问题^[2]。研究表明, 飞灰含碳量随粒径分布不均匀且具有峰值特性。焦炭颗粒长时间停留在主循环回路中反应活性下降, 由于颗粒的碎裂和磨损, 形成了飞灰中粒径较小的残碳; 煤中的细小煤粒首次通过炉膛时未燃尽且未被分离器收集, 形成了飞灰中较大颗粒的残碳^[3]。飞灰残碳反应活性比煤颗粒活性高, 主要来源于入炉煤中的细粉和燃烧早期因破碎和腐蚀而产生的来不及在炉膛燃尽的细小颗粒^[4]。究其原因主要是煤种及其粒径分布不同和燃烧氛围不同所造成, 煤种及运行参数的改变使

得飞灰残碳的来源不同。因此, 从运行角度讲, 研究给煤特性和运行参数对飞灰含碳量的影响规律具有直接可行的现实意义。本研究针对国内某台 480 t/h 循环流化床锅炉运行以来飞灰含碳量高的问题进行了改变运行参数的情况, 为电厂运行提供了合理的建议。

1 设备概况

某电厂 480 t/h 循环流化床锅炉型号为 WGF - 480/13.9 - 1 的超高压一次中间再热、平衡通风、自然循环、半露天布置、前墙给煤的循环流化床锅炉。主要参数如表 1 所示。

表 1 锅炉主要参数

Tab. 1 Main parameters of the boiler

	锅炉最大连续运行工况	锅炉额定运行工况
锅炉最大连续蒸发量/t · h ⁻¹	480	425
过热蒸汽出口额定压力/MPa	13.9	13.9
过热蒸汽出口额定温度/°C	540	540
再热蒸汽流量/t · h ⁻¹	396.18	352.74
再热蒸汽进口压力/MPa	2.79	2.478
再热蒸汽进口温度/°C	327	318
再热蒸汽出口温度/°C	540	540
锅炉给水温度/°C	250	244
冷空气温度/°C	20	20

2 试验结果与讨论

2.1 给煤粒度特性

循环流化床锅炉对入炉煤粒度有严格的要求,

收稿日期: 2012 - 09 - 24; 修订日期: 2012 - 11 - 18

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20101402110011); 国家自然科学基金资助项目(51206116)

作者简介: 刘兴国(1986 -), 男, 山西朔州人, 太原理工大学硕士研究生。

当入炉煤粒度偏离设计值时会造成炉内燃烧状况发生改变,设计的运行工况难以维持良好的燃烧,使飞灰含碳量升高,飞灰粒度分布发生变化。因此,给煤特性分析是燃烧调整的基础。表 2 为燃料粒度筛分结果与设计值的比较,从表中可以发现:

(1) 设计要求大于 4 mm 的煤占 8% 左右,而实际入炉煤中大于 4 mm 的煤占到 26.50%;要求大于 1 mm 的入炉煤占 74%,实际占 54.66%。根据破碎前煤矸石的粒度分布可以推断,炉中大于 4 mm 的主要是由煤矸石组成。

(2) 实际入炉煤中 0.1 ~ 0.5 mm 的煤占全部的 30%,远高于设计 9% 要求。

(3) 入炉煤中细颗粒主要是由破碎前原煤中的细颗粒及原煤在破碎过程中变成的细颗粒组成。

给煤粒度筛分特性说明,由煤矸石组成的粗颗粒过粗,难以燃烧,流化状态较差,而主要由原煤组成的高热值细颗粒在炉内停留时间过短,分离器分离特性较差,煤种的挥发分较低,在没有充分燃尽时已经随烟气进入尾部烟道,造成该炉的飞灰含碳量偏高。

表 2 设计粒度与实际燃料筛分粒度特性的比较 (%)
Tab. 2 Comparison of the characteristics of fuel at the design particle diameter and actually sifted partical diameter (%)

设计煤种	破碎前矸石	破碎前原煤	破碎前混煤	破碎后混煤
>4 mm	8	77.7	36.90	59.10
>2 mm	46	87.79	55.09	75.08
>1 mm	74	92.23	62.93	82.21
>0.5 mm	86	95.64	71.71	88.76
>0.1 mm	95	99.38	96.15	98.59

2.2 飞灰粒度及含碳量分布特性

飞灰粒度及其含碳量分布特性在一定程度上反映了运行参数的配置状况。图 1 为 100 MW 负荷下,氧量分别为 3.5%、4.0% 和 4.5% 时飞灰含碳量随粒径的分布,图 2 为对应的累积质量份额随粒径分布特征。由图 1 可以看出,飞灰含碳量随粒径分布具有峰值特性。在 37 μm 处飞灰含碳量达到最大值;48 ~ 78 μm 粒径段为平稳过渡区,且飞灰含碳量处于低谷;大于 78 μm 粒径段飞灰含碳量随粒径的增大又逐渐增加,但是图 2 所示其飞灰质量份额很小,不是构成飞灰残碳的主要来源。因此,研究

37 μm 峰值处的飞灰残碳来源及其含碳量随运行参数的变化,对优化燃烧具有重要意义。表 3 为计算出的不同粒径下焦炭颗粒在炉膛的停留时间分布。对比发现,小于 0.1 mm 焦炭颗粒一次通过炉膛停留时间较短且稳定在 6 s 附近,循环停留时间较短且呈线性增长趋势,分离效率较低;粒径进一步增大时颗粒停留时间加速增长,在 0.3 mm 处循环停留时间为 258.7 s,大约 0.01 mm 处的 26 倍;当粒径达到 0.65 mm 时,颗粒终端沉降速度为 5.39 m/s,接近气流速度 v_f ,这时颗粒停留时间理论上无限长。推断认为,37 μm 飞灰来源于一次性通过炉膛而未燃尽的小颗粒,停留时间短且分离效率低,造成飞灰含碳量高;大于 78 μm 飞灰含碳量高,质量份额少,可能是扬析夹带的结果;48 ~ 78 μm 飞灰可能是大于 0.65 mm 的焦炭颗粒燃烧形成,分离器分离效率极高,循环停留时间长,燃烧充分,飞灰含碳量低。

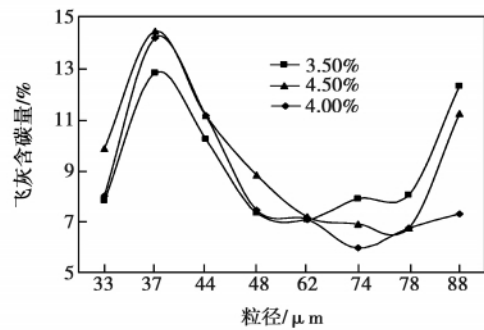


图 1 不同氧量下飞灰含碳量随粒径的变化关系
Fig. 1 Change of the carbon content of fly ash with the particle diameter under different oxygen quantities

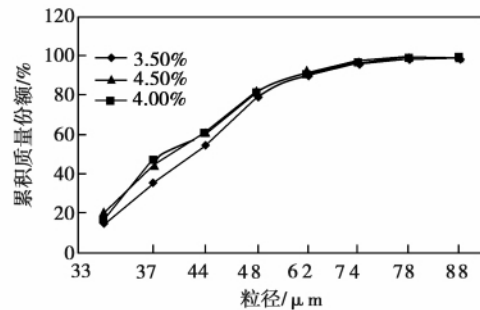


图 2 不同氧量下飞灰累积质量份额随粒径的分布

Fig. 2 Distribution of the cumulative mass share of fly ash with the particle diameter under different oxygen quantities

表 3 焦炭颗粒在炉膛停留时间分布
Tab. 3 Distribution of the residence time
of coke particles in the furnace

颗粒 粒径 d_p/mm	终端沉降 速度 $u_t/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	无循环停 留时间 τ_1/s	分离器分 级效率 $\eta/\%$	循环停 留时间 τ_2/s
0.01	2.67×10^{-3}	6.2	37.83	10
0.05	6.5×10^{-2}	6.3	68.04	19.7
0.1	0.27	6.5	81.04	34.3
0.3	2.49	12.6	95.13	258.7
0.65	5.39	∞	99.00	∞

2.3 总风量的调整

省煤器出口氧量反映了送入锅炉的总风量,可以通过改变二次风开度来调节。图 3 反映了飞灰含碳量随氧量的变化规律。从图中可以看出随着氧量的增加飞灰含碳量均有降低的趋势,这是因为总风量的增加提高了气相氧气浓度,加快气固反应速率和氧气的传质速率,在相对固定的停留时间内提高气固反应程度,使得燃烧更加充分。但是在不同的一次风量和风压下,含氧量对飞灰含碳量的影响幅度具有明显差异。在负荷为 125 MW、一次风量 $16 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 、风压 10 kPa 和负荷 85 MW、一次风量 $13 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 、风压 8 kPa 下,随含氧量的增加飞灰含碳量降低较为平缓,说明在此工况下总风量已经不是制约飞灰含碳量的主要因素,还与其它参数具有耦合性,此时增加总风量反而会造成排烟温度的升高,而且会增加风机电耗。因此在 100 MW 负荷下,通过一次风量和风压不同,选择提高含氧量从 3.5% 到 4.5%,使得飞灰含碳量降低约 3%,达到了调整的目的。

2.4 一次风量的调整

一次风量决定物料流化状态,是影响飞灰含碳量的一个重要因素^[5]。图 4 为 3 个工况下飞灰含碳量随一次风量的变化,随一次风量的降低飞灰含碳量都有不同程度的降低。因为一次风量的降低一方面能延长焦炭颗粒在炉膛中的停留时间,提高焦炭颗粒的燃尽程度;另一方面减小了对床层温度的冷却作用,床温升高,提高了焦炭颗粒的燃尽程度。负荷 100 MW、氧量 3.5% 下分别取风压 10 kPa 和 12 kPa,对比一次风量对飞灰含碳量的影响发现,风压 12 kPa 下飞灰含碳量的降低(约 2%)较为显著,而风压 10 kPa 下,飞灰含碳量降低较为平缓(约 0.7%)。说明高压下适合低一次风量运行,因为

高压意味着高的物料量及物料循环量,焦炭颗粒燃烧路径变短,而且一次风量增加会推迟燃烧,小颗粒焦炭更容易一次性未燃尽即逃逸出炉膛,使飞灰含碳量升高。但在 100 和 85 MW 负荷下继续降低一次风量到 $13 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 时飞灰含碳量并无明显降低趋势,因为一次风量的降低势必会影响流化质量,因此通过降低一次风量来降低飞灰含碳量要兼顾物料的流化质量。

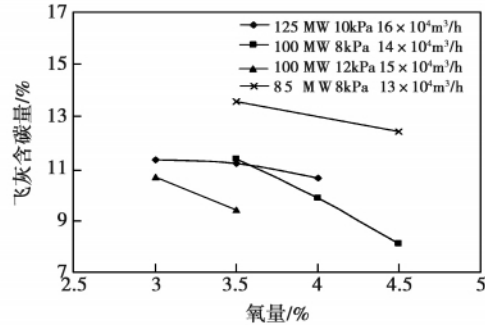


图 3 不同工况下飞灰含碳量与氧量的关系
Fig. 3 Relationship between the carbon content of fly ash and oxygen quantity under various operating conditions

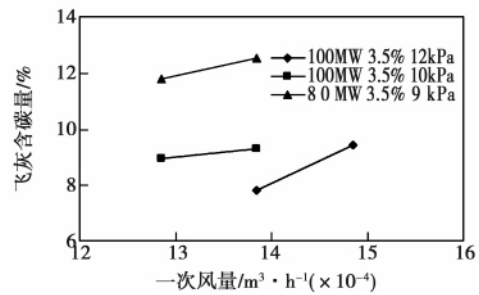


图 4 不同工况下飞灰含碳量与一次风量的关系
Fig. 4 Relationship between the carbon content of fly ash and the primary air quantity under various operating conditions

2.5 风室压力的调整

风室压力是反应炉膛床料量的重要参数,对飞灰特性有较大影响。风压的选择和氧量的选取密切相关,一方面风压的增大不利于颗粒的流态化,另一方面风压的降低会造成颗粒在炉膛的停留时间变短,而氧量是通过二次风调节的,其增加必然会加快颗粒反应速率,尤其是后燃速率,不同氧量下具有各自的最佳风压。图 5 中当氧量为 3.5% 时,飞灰含

碳量随风压的升高降低约 4% ,因为 3.5% 低氧量下颗粒后燃性差 ,必然需要高风压来延长颗粒停留时间来降低飞灰含碳量。当氧量为 4.5% 时,飞灰含碳量随风压的升高线性增加(4% 左右) ,因为在 4.5% 高氧量下 ,颗粒后燃性好 ,流化质量成为影响飞灰含碳量的主导因素 ,风压的增加造成流化质量下降 ,飞灰含碳量增加。当氧量为 4.0% ,床压从 8 增加到 10 kPa 时 ,颗粒停留时间延长的正效应正好抵消流化质量变差的负效应 ,飞灰含碳量维持稳定 ,继续增加风压到 12 kPa 时流化质量占据主导地位 ,飞灰含碳量升高。10 kPa 为曲线的交点 ,此工况下燃烧稳定 ,受风量波动影响很小。高压下适宜低氧量 ,低压下适宜高氧量运行。因为高压、高风量会增加飞灰残碳携带量 ,低压意味着床料较少 ,稀相区燃烧幅度增加 ,总风量不变的情况下应该增加二次风量 ,也即降低一次风量来提供焦炭后燃所需氧量 ,这与图 4 中降低一次风量来降低飞灰含碳量相吻合。

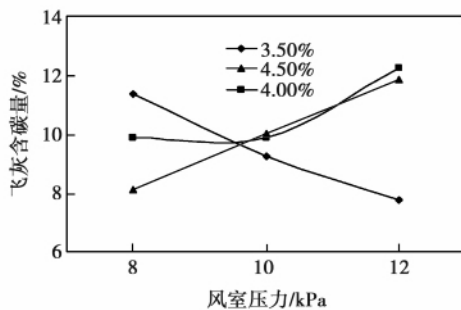


图 5 100 MW 负荷下飞灰含碳量与风室压力的关系

Fig. 5 Relationship between the carbon content of fly ash and the pressure in the air box under a load of 100 MW

3 飞灰微观特性

SEM 技术手段是利用二次电子成像技术来获取物体的孔隙结构的真实影像 ,其应用为表述飞灰微观特性和飞灰燃烧状况提供了新方法^[6-7]。为了进一步研究飞灰微观特性与燃烧工况的联系 ,本研究对不同粒径飞灰 SEM 图像形貌进行分析 ,并为变工况提供了微观解释。

取图 1 中典型的 3 个粒径段的飞灰 SEM 图像 ,如图 6(A) ~ (C) 并分区。图 6(A) 为 33 ~ 44 μm 粒

径段飞灰残碳 ,记为 I 区 ,图 6(B) 为 48 ~ 78 μm 粒径段飞灰残碳 ,记为 II 区 ,图 6(C) 为大于 78 μm 粒径段飞灰残碳 ,记为 III 区。图 6(A1) ~ (C1) 分别为图 6(A) ~ (C) 的特征部位的放大图。I 区和 III 区飞灰含碳量较高 ,并有峰值 ,II 区为平稳过渡区 ,且飞灰含碳量较低。

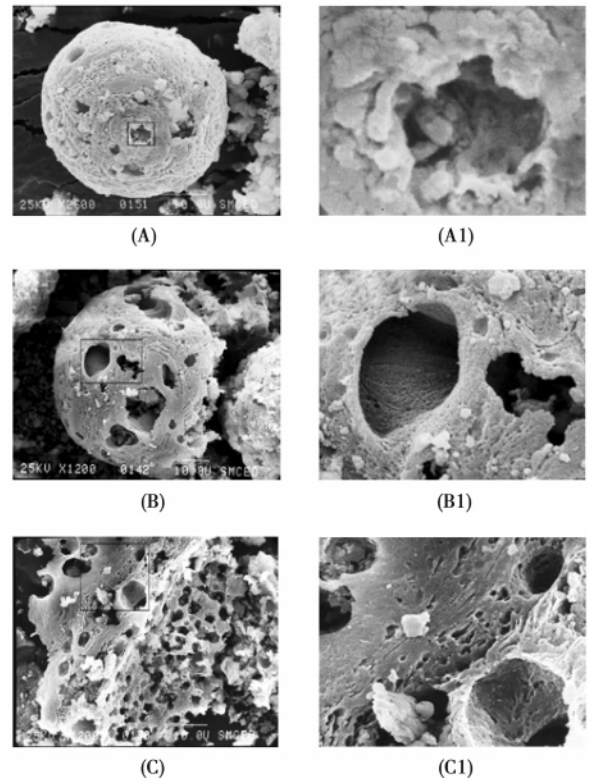


图 6 不同粒径飞灰 SEM 图像

Fig. 6 SEM image of fly ash in different particle diameters

从图 6(A)、图 6(A1) 到图 6(B)、图 6(B1) 有渐变的痕迹。前者为规则的圆形球体 ,后者则为有半边塌陷的不规则半球体;前者表面孔洞偏小而且封闭 ,后者则孔洞较大且呈开放状态;前者大孔内部致密 ,后者则大孔内部疏松且有二次孔存在。由此可以得出结论: I 区为小颗粒焦炭燃烧形成的飞灰残碳 ,由于在炉膛停留时间短 ,气孔没有完全打开即飞出炉膛 ,造成飞灰含碳量偏高且具有峰值。图 4 中 100 MW、3.5%、12 kPa 工况下 ,一次风量的增加使得飞灰含碳量显著增加 ,因此建议适当降低一次风量 ,减少小颗粒煤的入炉。II 区焦炭颗粒则在炉膛中经过充分的燃烧 ,孔隙打开程度高 ,飞灰含碳量低。图 6(C) 孔隙虽然增多 ,但是局部放大图 6(C1) 显示其孔隙致密 ,有塑形流痕迹。分析认为 III 区飞

灰残碳,乃大颗粒焦炭经过多次循环燃烧所形成。大颗粒焦炭在密相区表面温度较高,矿物元素融化,但是在上升到稀相区时温度突然降低,内部碳来不及燃烧就被塑形流包裹住,燃烧不充分造成飞灰含碳量偏高且随颗粒的增大而增加。对于Ⅲ区的颗粒,可以通过降低床料量及风压,提高流化质量(如图5中氧量为4.5%)来降低飞灰含碳量。

4 结 论

(1) 循环流化床锅炉飞灰含碳量具有峰值特性,在37 μm处飞灰含碳量达到峰值。

(2) 增加总风量能加快焦炭反应速率,降低一次风量能延长焦炭颗粒在炉膛停留时间,使燃烧更充分,降低飞灰含碳量。

(3) 高风室压力适宜低含氧量运行,低风室压力适宜高氧量运行。低风室压力下应适当降低一次风量并提高二次风量。

(4) SEM图像表明不同粒径段飞灰孔隙特征具有渐变特性。Ⅰ区飞灰残碳孔隙致密,燃烧不完全,Ⅱ区飞灰残碳存在二次孔,燃烧充分,Ⅲ区有塑形流痕迹,制约焦炭内部燃烧。

注:金燕(通讯作者)女,北京人,太原理工大学教授,博士。

参考文献:

[1] 蒋敏华,肖平.大型循环流化床锅炉技术[M].北京:中国电力出版社,2009.

JIANG Min-hua, XIAO Ping. Large-scale circulating fluidized bed boiler technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.

[2] 李斌,李建锋.我国大型循环流化床锅炉机组运行现状[J].锅炉技术,2012,43(1):23-28.

LI Bin, LI Jian-feng. Current status of the operation of large-scale circulating fluidized bed boiler units in China [J]. Boiler Technology, 2012, 43(1):23-28.

[3] 汤根土,吕俊复,张建胜,等.循环流化床锅炉飞灰中碳的形成机理[J].动力工程,2009,29(1):23-26.

TANG Gen-tu, LU Jun-fu, ZHANG Jian-sheng, et al. Mechanism governing the formation of carbon in fly ash in a CFB boiler [J]. Power Engineering, 2009, 29(1):22-26.

[4] 何宏舟,骆仲决,王勤辉,等.燃烧福建无烟煤的循环流化床锅炉飞灰及其未燃炭分析[J].燃料化学学报,2006,34(3):285-291.

HE Hong-zhou, LUO Zhong-yang, WANG Qin-hui, et al. Analysis of fly ash and unburned carbon from a CFB boiler burning Fujian-originated anthracite [J]. Journal of Fuel Chemistry, 2006, 34(3):285-291.

[5] 王松龄,刘哲,靳会宁,等.循环流化床锅炉优化燃烧调整试验研究[J].电站系统工程,2011,26(6):51-53.

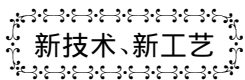
WANG Song-ling, LIU Zhe, JIN Hui-ning, et al. Experimental study of the combustion optimization and adjustment of a CFB boiler [J]. Power System Engineering, 2011, 26(6):51-53.

[6] Barbara G. Fly ash characterization by SEM-EDS [J]. Fuel, 2006, 85:2537-2544.

[7] 金燕,刘娟娟,乔晓磊,等.循环流化床锅炉中飞灰颗粒孔隙结构的实验研究[J].热能动力工程,2012,27(1):71-75.

JIN Yan, LIU Juan-juan, QIAO Xiao-lei, et al. Experimental study of the pore structure of the flying ash particles in a CFB boiler [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2012, 27(1):71-75.

(丛敏 编辑)



新技术、新工艺

欧洲的微型涡轮

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2013年3月刊报道,微型涡轮已在冷热电联产中起重要作用,并且在过去15年中已被市场接受。

意大利的Turbec SPA公司推出了T100CHP微型涡轮。该涡轮是热电联产和分布式发电的微型涡轮能源系统最重要的一个部件。T100CHP微型涡轮产生约105 kW电力和170 kW热能。

Turbec T100是一型单轴高速微型涡轮,其四极永磁发电机和压气机/涡轮装在同一根轴上。压气机和涡轮轮盘都为径流式。单级压气机的压比为4.5:1。单贫燃预混低排放燃烧室提供涡轮入口燃气温度约950℃。涡轮转速(即发电机转速)为70 000 r/min。径向空气入口,并装有预过滤器和高效过滤器。

电力电子系统将高速发电机生产的高频电力转换成给定频率的直流电或交流电。

(吉桂明 摘译)

ed with R141b serving as the working medium for flue gases at 300 to 450 °C a CORC power generation system can be adopted. Due to the thermal efficiency ,energy efficiency and power of a steam organic Rankine cycle being higher than those of the traditional steam Rankine cycle and such a cycle capable of effectively lowering the negative pressure of the working medium in the condenser for heat sources at a temperature higher than 450 °C a steam organic Rankine cycle can be used to replace the traditional steam Rankine cycle. **Key words:** intermediate and low pressure Rankine cycle ,power generation system ,organic working medium

480 t/h 循环流化床锅炉飞灰特性的试验研究 = **Experimental Study of the Fly Ash Characteristics of a 480 t/h Circulating Fluidized Bed Boiler** [刊,汉] LIU Xing-guo ,LIU Hai-yu ,JIN Yan (College of Electrical and Power Engineering ,Taiyuan University of Science and Technology ,Taiyuan ,China ,Post Code: 030024) ,ZHANG Zong-heng (China Coal Pingshuo Electric Power Engineering Co. Ltd. ,Shuozhou ,China ,Post Code: 036800) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 28(3) . -262 ~266

With a 480 t/h circulating fluidized bed boiler serving as the object of study ,through various tests ,investigated was the influence of coal feed characteristics ,total air quantity ,primary air quantity and the pressure in the air chamber on the flying ash characteristics and microscopically analyzed were the flying ash characteristics. The test results show that the carbon content of the flying ash will exhibit the peak value characteristics with the distribution of the particle diameters and when the particle diameter of the flying ash is 37 μm ,the carbon content of the flying ash will attain its maximum value. At a load below 100 MW ,when the oxygen content at the outlet of the economizer increases from 3.5% to 4.5% ,the carbon content of the flying ash will decrease by about 3% . When the primary air quantity decreases from $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ to $14 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$,the carbon content of the flying ash will decrease by around 2% . When the air pressure goes up from 8 kPa to 12 kPa ,the carbon content of the flying ash will decrease by about 4% . The characteristic results of the surface structure and pore structure of the flying ash obtained by using a scanning electronic microscope (SEM) show that the pore characteristics of the flying ash in various particle diameter sections display gradual change characteristics ,which is in agreement with the particle diameters and carbon content distribution characteristics of the flying ash. **Key words:** circulating fluidized bed boiler ,operating parameter ,flying ash ,particle diameter distribution ,pore structure

基于钙基的吸收增强式水气变换反应实验研究 = **Experimental Study of the Absorption Intensified Type Water-gas Conversion Reaction Based on a Calcium-base Absorbent** [刊,汉] LIU Yang ,LI Zhen-shan ,CAI Ning-sheng (Department of Thermal Energy Engineering ,Tsinghua University ,Beijing ,China ,Post Code: 100084) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 28(3) . -267 ~271