

混烧石油焦油页岩循环流化床灰渣特性的试验研究

邓雨生

(茂名石化动力厂, 广东 茂名 525021)

摘要: 在1 MW 流化床(CFB) 燃烧试验台试烧5种不同掺烧比例的石油焦和油页岩混合燃料。对燃烧产生的灰渣特性进行了分析研究。分析结果表明,石油焦和油页岩混合燃料试烧后形成的底渣和飞灰粒度与常规煤种相比趋于偏细;而且,随着混合燃料中油页岩掺烧比例的升高,对灰渣份额、燃烧效率、飞灰比电阻值、飞灰磨损特性等都有明显的影响。在钙硫比为0和2.4时,随着油页岩掺烧比例由2:8升高6:4,飞灰份额均明显增加,灰渣排放总量也同时提高,试验所得燃烧效率均逐渐降低。在钙硫比为2.4时,当油页岩的掺混比例由3:7提高至5:5,飞灰的比电阻值由 $1.15 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 升高至 $1.40 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 。飞灰磨损特性指数 H_m 由10.27%升高21.34%。试验结果对实炉试烧混合燃料以及采用相近燃料的CFB锅炉的设计、运行有一定的参考意义。

关键词: 循环流化床; 混烧; 石油焦和油页岩; 灰渣特性

中图分类号: TK223.28 **文献标识码:** B

引言

20世纪90年代以来,随着循环流化床(CFB)锅炉技术的快速发展,国内外高等院校、科研院所及发电企业开始注重油页岩和高硫石油焦的洁净燃烧技术,并且已有不少相关技术得到应用。石油焦属于炼油工艺副产品,其热值高,挥发分及灰分低,硫、氮元素及钒、镍等碱金属含量高,属劣质燃料^[1];油页岩属于高灰分、低发热量和高挥发分的特殊劣质燃料,完全不同于普通燃煤的理化特性^[2]。这两种燃料在常规煤粉炉都难以很好燃烧。目前,国内外只有研究纯烧石油焦、纯烧油页岩、石油焦与煤混烧、油页岩与煤混烧的技术^[3~5],而对石油焦与油页岩混烧技术的研究未见有报道,因而石油焦与油页岩混烧试验也是一个新课题。因此,茂名石化委托西安热工院以在其大型CFB燃烧试验台进行了石油焦与油页岩混烧试验。这里重点研究不同油页岩掺烧比例混合燃料燃烧后的灰渣特性,为在410 t/h CFB锅炉试烧石油焦与油页岩提供技术参考依据。

1 试验研究

1.1 试验装置

油页岩与石油焦混合燃料在西安热工院1 MW CFB燃烧试验台上进行了燃烧、脱硫、排放及灰渣特性试烧试验研究。1 MW CFB燃烧试验台系统如图1所示。

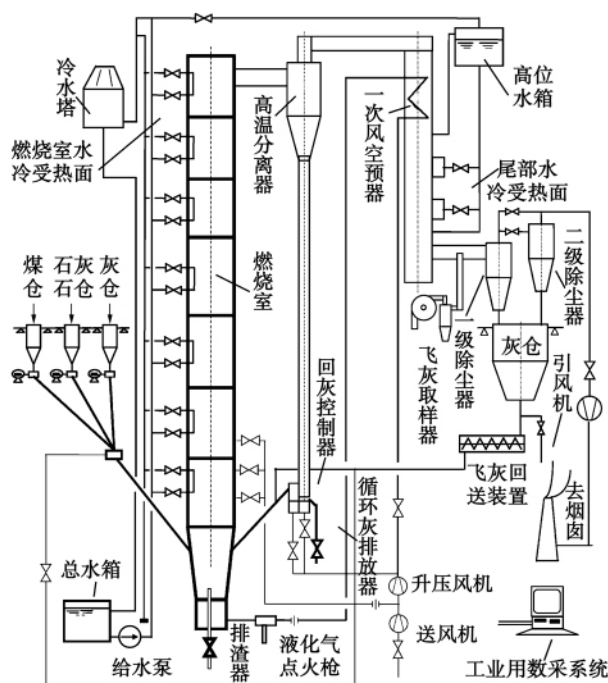


图1 1 MW CFB燃烧试验台系统

Fig. 1 1 MW CFB combustion test rig system

试验台燃烧室净高23 m,下部横截面积 $0.175 \text{ m} \times 0.351 \text{ m}$,上部横截面积 $0.351 \text{ m} \times 0.351 \text{ m}$,截面锥段过渡,炉膛和分离器入口温度变化范围可达 $400 \sim 1000^\circ\text{C}$ 。燃烧热功率 $0.2 \sim 1.0 \text{ MW}$,截面热负荷达到 $1.6 \sim 5.7 \text{ MW}/\text{m}^2$,容积热负荷达到 $0.07 \sim 0.25 \text{ MW}/\text{m}^3$ 。一次风风压可高达20 kPa,经空气预热器加热后送入风室。二次风风压可达10 kPa,

收稿日期: 2010-12-10; 修订日期: 2011-01-07

作者简介: 邓雨生(1972-),男,广东茂名人,茂名石化动力厂高级工程师。

按照不同高度分三层送入燃烧室。试验台采用高温旋风分离器,立管下部 U 型回料控制器和循环灰排放器可以调节循环灰量和燃烧室温度。燃烧室下部密相区的排渣器设置排渣取样口。尾部烟道采用空气预热器和自然循环多级组合式换热器冷却烟气,冷却后的烟气经两级旋风除尘器净化从 40 m 高的烟囱排出。收集的飞灰进入荷重传感器计量的冷灰斗,由冷灰斗下部的绞龙输送机完成冷灰回送。

表 1 试验燃料特性分析

Tab.1 Analysis of the characteristics of the test fuel

	1 号 燃料	2 号 燃料	3 号 燃料	4 号 燃料	5 号 燃料
油页岩石油焦混合比例	2:8	3:7	4:6	5:5	6:4
全水分 $M_t/\%$	6.12	7.23	8.34	9.45	10.56
收到基灰分 $A_{ar}/\%$	13.24	19.39	25.54	31.69	37.83
无灰基挥发分 $V_{daf}/\%$	25.16	32.36	39.55	46.74	53.93
收到基碳 $C_{ar}/\%$	69.67	62.63	55.59	48.55	41.50
收到基氢 $H_{ar}/\%$	3.30	3.16	3.02	2.89	2.75
收到基氮 $N_{ar}/\%$	1.20	1.09	0.97	0.86	0.74
收到基氧 $O_{ar}/\%$	1.36	1.90	2.44	2.98	3.52
全硫 $S_{t,ar}/\%$	5.11	4.61	4.10	3.60	3.10
收到基低位发热 量 $Q_{net,ar}/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	26990	24260	21530	18810	16080

1.2 试验研究

为确保试烧结果靠近实际情况,试验采用的石油焦和油页岩、石灰石均为茂名石化 CFB 锅炉电站实炉所使用的燃料和脱硫剂。油页岩和石油焦按质量比分别为 2:8、3:7、4:6、5:5、6:4 掺混成的 5 种混合燃料,混合燃料特性分析如表 1 所示,石灰石(CaCO_3 含量为 97.68%) 的具体组成如表 2 所示。

表 2 石灰石化学成分分析(%)

Tab.2 Analysis of the chemical components of limestone(%)

	数值
灼烧减量 L. O. I	43.09
二氧化硅 SiO_2	1.35
三氧化二铝 Al_2O_3	0.23
三氧化二铁 Fe_2O_3	0.17
氧化钙 CaO	52.98
氧化镁 MgO	1.68

本次灰渣特性试验进行 10 个燃烧试验工况。工况 1 ~ 工况 5 为不添加石灰石情况下,改变油页岩和石油焦掺烧比例试验;工况 6 ~ 工况 10 为添加石灰石情况下,改变油页岩和石油焦掺烧比例试验。各燃烧工况参数如表 3 所示。

表 3 各燃烧试验工况

Tab.3 Operating condition of the test

工况	煤种	钙硫比	给煤量 $/\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	炉膛平均 温度/ $^{\circ}\text{C}$	过量空 气系数	飞灰含 碳量/ $\%$	飞灰份 额/ $\%$	底渣含 碳量/ $\%$	底渣 份额	底渣燃 烧损失/ $\%$	飞灰燃烧 损失/ $\%$	燃烧效 率/ $\%$
1	1 号燃料	0.0	70.0	858.5	1.53	5.70	72.08	1.46	27.92	0.08	0.86	99.05
2	2 号燃料	0.0	71.4	860.8	1.55	4.60	76.61	2.42	23.39	0.18	1.14	98.69
3	3 号燃料	0.0	74.1	858.3	1.51	4.65	78.51	1.31	21.49	0.13	1.69	98.18
4	4 号燃料	0.0	74.9	845.9	1.57	3.30	81.58	1.32	18.42	0.15	1.70	98.15
5	5 号燃料	0.0	92.3	852.0	1.47	5.40	83.90	1.96	16.10	0.27	4.03	95.70
6	1 号燃料	2.4	85.9	877.3	1.56	2.67	65.71	1.55	34.29	0.33	1.09	98.58
7	2 号燃料	2.4	88.0	877.5	1.56	3.10	71.98	1.18	28.02	0.24	1.66	98.10
8	3 号燃料	2.4	96.8	879.2	1.40	3.50	74.67	1.66	25.33	0.36	2.30	97.34
9	4 号燃料	2.4	100.3	874.6	1.54	3.20	76.04	1.05	23.96	0.26	2.56	97.19
10	5 号燃料	2.4	120.7	877.6	1.47	3.40	77.61	1.67	22.39	0.47	3.40	96.13

2 试验结果及分析

2.1 不同掺烧比例下的底渣、飞灰粒径

本次试验选取 2 号试验燃料(工况 7) 和 4 号试

验燃料(工况 9) 作为典型工况进行分析。两个典型工况的底渣粒度分布曲线如图 2 所示。

直接观察从试验所得底渣样,可以明显发现:石油焦与油页岩的混合燃料经过 CFB 锅炉试验台燃烧所产生的底渣粒径较其它试烧煤种底渣样明显偏

细。表4为其它煤样在1MW CFB试验台试烧下所得底渣中位粒径(即50%质量比的颗粒通过筛孔的直径,用 d_{50} 表示)的对比。

由表4中数据可以看出,油页岩与石油焦混合物燃料所得底渣中位径值相对较小,这和油页岩具有较强的成灰特性有关。

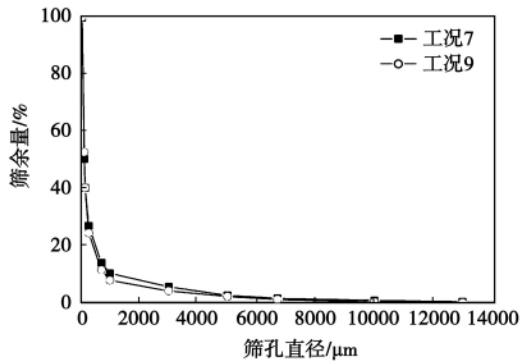


图2 试验燃料的底渣粒度分布

Fig.2 Particulate diameter distribution of the test fuel

表4 不同燃料试烧所得底渣中位径的对比表

Tab.4 Table showing the comparison of the mean diameter of the bottom slag obtained from the trial combustion of different fuels

	干燥无灰基挥发分/%	收到基灰份/%	底渣中位径 $d_{50}/\mu\text{m}$
京煤试烧	38.88	53.77	810
上湾试烧	41.97	38.42	573
淮北试烧	29.31	29.86	823
公门试烧	12.41	49.77	1488
联盛试烧	23.73	36.89	502
湖北宜都试烧	14.29	20.01	208
大唐嘉禾试烧	19.86	53.98	683
贵州天富试烧	38.38	36.1	177
油页岩石油焦试烧			
2号燃料	32.36	19.39	146
4号燃料	46.74	31.69	145

两个典型工况飞灰粒度分布曲线如图3所示。飞灰粒度采用库尔特激光粒度分析仪测量。尽管CFB锅炉入炉燃料粒度远大于粉煤炉,但是由于有分离器的分离作用,2号试验燃料及4号试验燃料飞灰中位径分别为21.4和16.3 μm 左右,属于CFB燃烧方式中比较细的飞灰。

试验表明,由于受油页岩成灰特性的影响,混合燃料燃烧后的灰渣粒度偏细,且随着油页岩掺烧比例提高,灰渣的中位径有减小的趋势。

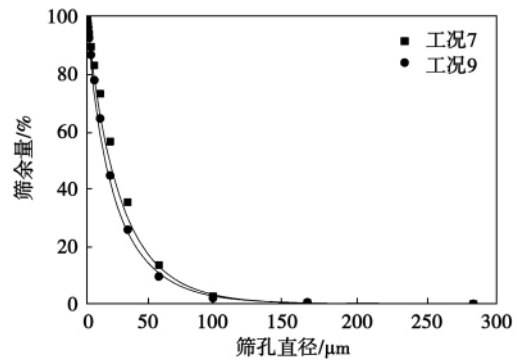


图3 试验用飞灰粒度分布

Fig.3 Particulate diameter distribution of the test limestone

2.2 不同掺烧比例下的飞灰和底渣的份额

由表1可知,随着油页岩掺烧比例提高,燃料的灰分明显增加,由13.24%增加到37.83%。试验结果表明,随着油页岩掺烧比例提高,飞灰份额明显升高。图4给出了投加石灰石前后飞灰份额随油页岩掺烧质量份额的关系。由图4可知,在投加石灰石前,飞灰份额由72.08%上升至83.90%;投加石灰石后,飞灰份额由65.71%上升至77.61%。而造成飞灰份额明显升高的原因是:茂名油页岩属于挥发分高、灰分高的特殊燃料,油页岩有较强的爆裂、成灰特性,加入的油页岩颗粒更易在燃烧过程中碎裂、磨损成为细颗粒飞灰。

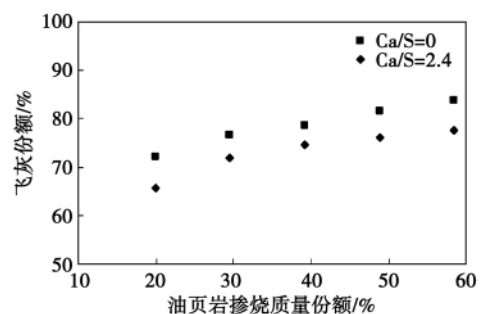


图4 油页岩掺烧份额对飞灰份额的影响

Fig.4 Curves showing the particulate diameters of the bottom slag

与此同时,由于随着油页岩掺烧比例提高,灰渣的排放总量也显著上升,如图5所示。从图5可以看出,由于燃料含硫量较大,投加石灰石对灰渣总量有明显影响:油页岩掺烧比例20%时,石灰石加入前后灰渣总量相差3倍以上;掺烧比例60%时,灰渣总量相差也接近1倍。且不加石灰石时,燃料灰

渣主要通过飞灰排放,而加入石灰石后,有相当部分灰渣会由底渣排出,这就是投加石灰石后的飞灰份额要比不投加石灰石的飞灰份额反而要低的原因。

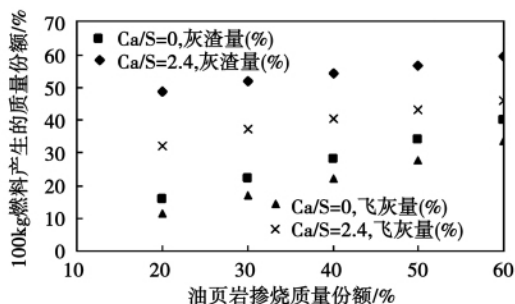


图5 油页岩掺烧份额对灰渣量的影响

Fig. 5 Curves showing the partial diameters of flyash

2.3 不同掺烧比例下的燃烧效率

试验发现,掺烧不同比例油页岩会对燃料的燃尽特性产生明显影响。图6 燃烧效率与油页岩掺混份额的关系曲线。由图6可知,随着油页岩的掺混比例增加,试验所得燃烧效率逐渐降低。从燃烧效率变化趋势看,油页岩掺烧比例大于50%后,燃料的燃烧效率有明显降低趋势。主要原因为:从西安热工院对茂名油页岩和石油焦进燃料燃尽特性化验分析结果发现,石油焦的最高反应速度对应温度为464℃,反应指数RI为262,燃尽指数Cb为3.3376,最大反应速度为13%/min,属于易着火,易燃尽燃料;油页岩的最高反应速度对应温度为309℃,反应指数RI为243,燃尽指数Cb为9.8327,最大反应速度为2.4%/min,属于易着火,难燃尽燃料。^[6]因而很大程度上由于油页岩的难燃尽性使得锅炉燃烧效率随着油页岩掺混份额的增加而有所降低。

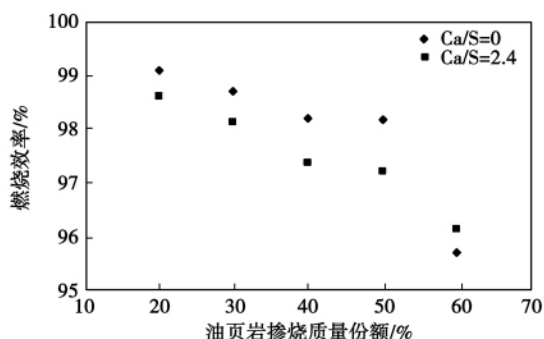


图6 油页岩掺混比例对燃烧效率的影响

Fig. 6 Influence of the proportion of the oil shale in combustion on the proportion of flyash

2.4 不同掺烧比例下的飞灰比电阻

由于茂名石化2台410 t/h CFB锅炉均采用静电除尘器除去尾部烟气中的粉尘,因此本次试验中用梳齿法进行了典型工况的飞灰比电阻测定,测量结果如表5所示。

由表5可知,2号试验燃料在Ca/S=2.4,床温877.5℃条件(工况7)下,在150℃时飞灰比电阻值为 $1.15 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$;4号试验燃料在Ca/S=2.4,床温874.6℃条件(工况9)下,在150℃时飞灰比电阻值为 $1.40 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 。脱硫剂石灰石的加入会影响到飞灰比电阻的大小,4号试验燃料在没投加石灰石时(工况4)测得飞灰比电阻为 $1.12 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$,究其原因因为:投加石灰石会引起飞灰中CaO含量的增加,从而导致飞灰比电阻值增加。

表5 飞灰比电阻测量结果($\Omega \cdot \text{cm}$)

Tab. 5 Measurements of specific resistance of flyash

	工况7	工况4	工况9
	2号试验燃料		4号试验燃料
油页岩、石油焦混合比例	3:7		5:5
钙硫比	2.4		0
测量温度150℃	1.15×10^{12}	1.12×10^{12}	1.40×10^{12}

试验结果表明,随着油页岩掺烧比例的提高,飞灰比电阻值增加;同一掺烧比例下,随着石灰石的投加,飞灰比电阻值也增加。

2.5 不同掺烧比例下飞灰的磨损特性

CFB锅炉在燃用高灰份燃料时,高速的灰粒冲刷对流受热面管束时,管壁表面将受到剧烈的磨损,往往发生局部的严重破坏,甚至导致事故停炉。因而,本次试验对两个典型工况的飞灰磨损特性进行了研究。灰的磨损特性与颗粒大小、形状、硬度、结焦性和化学成分等因素有关,但主要取决于灰中的 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 等成分以及灰分含量。煤灰磨损特性的特性判别指数评估系数为 H_m ,用于判别煤灰对金属部件的磨损强烈程度,定义为^[7]:

$$H_m = A_{\text{ar}} / 100 \times (\text{SiO}_2 + 0.8\text{Fe}_2\text{O}_3 + 1.35\text{Al}_2\text{O}_3) \quad (1)$$

式中: A_{ar} —煤中收到基灰分,%; SiO_2 —飞灰中二氧化硅含量,%; Fe_2O_3 —飞灰中三氧化二铁含量,%; Al_2O_3 —飞灰中三氧化二铝含量,%;1、0.8、1.35为相对硬度系数。

判别界限如下: $H_m < 10\%$ 时磨损倾向轻微; $H_m = 10\% \sim 20\%$ 时磨损倾向中等; $H_m > 20\%$ 时磨损倾向严重。

表 6 飞灰成分分析

Tab. 6 Analysis of flyash constituents

检测项目	2 号试验燃料	4 号试验燃料
	工况 7	工况 9
二氧化硅 (SiO ₂) /%	31.39	37.43
三氧化二铝 (Al ₂ O ₃) /%	13.69	18.81
三氧化二铁 (Fe ₂ O ₃) /%	3.86	5.65

由式 1 可得出典型工况下的飞灰磨损特性指数, 试验 2 号燃料(工况 7) 的飞灰磨损特性指数 $H_m = 10.27\%$, 飞灰磨损特性属于中等偏轻磨损水平; 4 号燃料(工况 9) 的飞灰磨损特性指数 $H_m = 21.34\%$, 飞灰磨损特性属于严重磨损水平。试验表明, 随着油页岩掺烧比例的提高, 飞灰磨损倾向于严重。

3 结 论

通过在西安热工院 1 MW 循环流化床燃烧试验台对 5 种不同掺混比例的油页岩和石油焦混合燃料 10 个工况进行了 10 个燃烧试验工况, 分析了各工况下的灰渣排放特性, 主要结论如下:

(1) 不同掺混比例的油页岩和石油焦混合燃料, 灰渣粒度具有相似分布曲线, 灰渣粒度中位径比常规煤种偏细。

(2) 随着油页岩掺烧比例提高, 飞灰份额明显升高, 当钙硫比为零时飞灰份额由 72.08% 升至 83.90%; 当钙硫比为 2.4 时飞灰份额由 65.71% 升至 77.61%。灰渣排放总量也同时增高。

(3) 随着油页岩的掺混比例增加, 试验所得燃烧效率逐渐降低。当钙硫比为 0 时燃烧效率由 99.05% 降至 95.70%; 当钙硫比为 2.4 时燃烧效率由 98.58% 降至 96.13%。

(4) 随着油页岩的掺混比例增加, 飞灰的比电阻值升高, 在钙硫比为 2.4 时, 当油页岩的掺混比例由 3:7 提高至 5:5, 飞灰的比电阻值由 $1.15 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 升高至 $1.40 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

(5) 随着油页岩的掺混比例增加, 飞灰磨损特性也倾向于严重, 在钙硫比为 2.4 时, 当油页岩的掺

混比例由 3:7 提高至 5:5, 飞灰磨损特性指数 H_m 由 10.27% 升高 21.34%。

参考文献:

- [1] 段伦博, 陈晓平, 梁 财, 等. 以煤焦混合物为燃料的循环流化床锅 SO₂ 排放特性 [J]. 化工学报, 2008, 59(3): 728-734.
DUAN Lun-bo, CHEN Xiao-ping, LIANG Cai, et al. SO₂ emission characteristics of a CFB boiler with coal/coke mixture serving as the fuel [J]. Journal of Chemical Industry, 2008, 59(3): 728-734.
- [2] 赵剑剑, 王春华. 油页岩发电利用研究 [J]. 广东电力, 2008, 21(9): 20-22.
ZHAO Jian-jian, WANG Chun-hua. Study of the utilization of oil shales in power generation [J]. Guangdong Electric Power, 2008, 21(9): 20-22.
- [3] 王文选, 赵石铁, 赵长遂, 等. 石油焦燃烧特性研究 [J]. 锅炉技术, 2005, 36(4): 39-53.
WANG Wen-xuan, ZHAO Shi-tie, ZHAO Chang-sui, et al. Study of the combustion characteristics of petroleum coke [J]. Boiler Technology, 2005, 36(4): 39-53.
- [4] 蒋德华. 茂名油页岩燃烧特性研究 [J]. 洁净煤技术, 2006, 12(3): 86-94.
JIANG De-hua. Study of the combustion characteristics of Maoming-originated oil shales [J]. Clean Coal Technology, 2006, 12(3): 86-94.
- [5] 于海龙, 姜秀民, 赵 翔, 等. 油页岩与煤的混烧特性研究 [J]. 燃料化学学报, 2004, 32(3): 274-277.
YU Hai-long, JIANG Xiu-min, ZHAO Xiang, et al. Study of the blended combustion characteristics of oil shale and coal [J]. Journal of Fuel Chemicals, 2004, 32(3): 274-277.
- [6] 韩 应, 高洪培, 王鹏利, 等. 中国石化集团茂名石化公司石油焦油页岩燃料混合试烧试验研究报告 [R]. 西安: 西安热工研究院有限公司, 2008, 9.
HAN Ying, GAO Hong-pei, WANG Peng-li, et al. Report on the experimental study of the trial blended combustion of petroleum tar and oil shale fuel, China Petroleum Corporation Maoming Petroleum Company [R]. Xi'an: Xi'an Thermotechnic Research Institute Co. Ltd., 2008, 9.
- [7] 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 sized CFB boiler technology [M]. Beijing: China Power Press, 2009.

(陈 滨 编辑)

In the light of such problems of the dual inlet and outlet ball-mill-based direct-fired milling system of a 315 MW “W” type flame boiler burning low quality coal as insufficient power output and poor adaptability to various coal ranks and burdens, presented was a version to modify the original direct-fired milling system to a “cabin-direct-fired” milling system, which required to develop a high performance pulverized coal injection type coarse powder separator. For this purpose, the researchers designed two typical pulverized coal injection type coarse powder separators and three types of inner flow guide device and conducted a numerical and physical simulation study. The research results show that the pulverized coal injection type coarse powder separator thus designed can meet the technical requirements for a “cabin-direct-fired” milling system. The flow resistance inside the heightened injection type separator is not quite susceptible to any change of the structural dimensions of the inner flow guide device and the variation range of the resistance is only around 20 Pa while the prototype of the injection type coarse powder separator is susceptible to any change of the structural dimensions of the inner flow guide device and the variation range of the resistance is as high as 183 Pa. The biggest difference of the inner flow resistance between the prototype and the heightened injection type coarse powder separator is 163 Pa. **Key words:** milling system, flow guide device, coarse powder separator, numerical simulation, physical simulation

混烧石油焦油页岩循环流化床灰渣特性的试验研究 = **Experimental Study of the Ash and Slag Characteristics of a Circulating Fluidized Bed Burning a Mixture of Oil Coke and Shale** [刊, 汉] DENG Yu-sheng (Maoming Petrochemical Corporation Power Plant, Maoming, China, Post Code: 525021) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(6). - 716 ~ 720

On a 1 MW circulating fluidized bed combustion test rig, a fuel mixture of oil coke and shale in five mixing and dilution proportions was tried and burned with the characteristics of ash and slag produced during the combustion being analyzed and studied. The analytic results show that the particle diameter of the bottom slag and flying ash formed by burning the fuel mixture of oil coke and shale tends to be excessively fine compared with that of the conventional coal ranks. Furthermore, with an increase of the oil shale proportion in the fuel mixture, the ash and slag share, combustion efficiency, specific electric resistance value and wear and tear characteristics of the flying ash will be significantly affected. When the calcium/sulfur ratio equals to 0 and 2.4 respectively, with the oil shale mixing and dilution proportion increasing from 2:8 to 6:4, the flying ash share markedly increases and the ash and slag discharge quantity also increases simultaneously. The combustion efficiencies obtained from the tests gradually decline. When the calcium/sulfur ratio equals to 2.4, with an increase of the oil shale mixing and dilution proportion from 3:7 to 5:5, the specific electric resistance value of the flying ash will increase from $1.15 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ to $1.40 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$. The flying ash wear and tear characteristics index Hc will grow from 10.27% to 21.34%. The test results can offer certain reference for trial combustion of the fuel mixture in a real boiler and also for design and operation of a CFB boiler burning similar fuels. **Key words:** circulating fluidized bed, blended combustion, oil coke and oil shale, ash and slag characteristics

气体微波放电转化 NO 的模拟实验研究 = **Simulation and Experimental Study of NO Conversion By Means**