

小颗粒油页岩及半焦 CFB 锅炉燃烧适应性研究

张世鑫¹, 翁君杰², 陈昕灿³, 刘海峰¹

(1. 中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京 102209; 2. 宁波明州热电有限公司, 浙江 宁波 315193;
3. 华西能源工业股份有限公司, 四川 自贡 643001)

摘要:油页岩经低温干馏可以得到页岩油, 因生产工艺限制, 干馏炉无法使用粒径 12 mm 以下的油页岩, 同时会产生大量副产品(页岩半焦)。为提高副产品的利用能力, 实现资源利用最大化。通过在 1 MW_{th} CFB 燃烧试验台对小颗粒页岩及页岩半焦进行试烧试验, 研究小颗粒页岩及页岩半焦的理化特性、着火特性、燃尽特性、结焦特性。试验结果表明, 控制床温在 720 ~ 850 °C 内, 由油页岩小颗粒和半焦掺混而成的设计燃料在试验台采用 CFB 方式能够稳定燃烧, 试验各工况灰渣含碳量均低于 1.81%, 试验燃料较易燃尽。CFB 锅炉适合油页岩小颗粒与半焦掺烧利用, 且燃烧效率高, 燃烧稳定性较好。

关键词:油页岩; 半焦; CFB; 燃烧

中图分类号: TK229.91; TQ534

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2017)05-0077-05

Study on the adaptability of small-grain oil shale and semi-coke CFB boiler combustion

ZHANG Shixin¹, WENG Junjie², CHEN Xincan³, LIU Haifeng¹

(1. Huaneng Clean Energy Research Institute, Beijing 102209, China; 2. Ningbo Mingzhou Thermolectric Co., Ltd., Ningbo 315193, China; 3. China Western Power Industrial Co., Ltd., Zigong 643001, China)

Abstract: Oil shale pyrolyzed at low temperature can get shale oil. Due to the limitation of producing process, oil shale with diameter below 12 mm can not be used in the distillation furnace, and a large number of by-products (shale semi-coke) are produced. This study was carried out to improve the utilization of by-products and maximize the use of resources. The physical and chemical properties, ignition characteristics, burnout features and coking performances of small particle shale and shale semi-coke were studied on a 1 MW_{th} CFB combustion test device. The experimental results show that the designed fuels from small particles and semi-coke in oil shale can guarantee stable combustion in CFB, when the combustion temperature is in the range of 720 to 850 °C. CFB boiler is suitable for oil shale small particles and semi-coke blending burning. This way has the characteristics of high combustion efficiency and good combustion stability.

Key words: oil shale; shale semi-coke; CFB; combustion

0 引 言

油页岩(又称油母页岩)是一种高灰分的固体可燃有机矿产^[1], 包含原生有机物、不溶于石油溶剂且热解时可以提取大量页岩油的细颗粒沉积岩^[2]。油页岩呈黄棕、灰、褐、黑灰及黑色等, 颜色越浅含油率越高^[3]; 发热量较低, 是煤发热量的

30% ~ 50%。油页岩矿石采出后, 最先作为能源被使用的, 即作为燃料和干馏炼油^[4-6]。油页岩干馏后的页岩油可作为燃料油, 也可精制生产轻柴油。世界油页岩储量相当丰富, 如果折算成页岩油, 相当于目前世界天然原油探明可采储量的 5.4 倍^[7]。油页岩作燃料主要是用来发电^[8], 即直接作锅炉燃料或进行低温干馏生产气体燃料进行发电, 还可用于

收稿日期: 2017-03-14; 责任编辑: 孙淑君 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2017.05.015

作者简介: 张世鑫(1983—), 男, 河南沁阳人, 工程师, 从事循环流化床锅炉及清洁煤发电技术的研究工作。E-mail: zhangshixin@hnceri.com

引用格式: 张世鑫, 翁君杰, 陈昕灿, 等. 小颗粒油页岩及半焦 CFB 锅炉燃烧适应性研究[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(5): 77-81.

ZHANG Shixin, WENG Junjie, CHEN Xincan, et al. Study on the adaptability of small-grain oil shale and semi-coke CFB boiler combustion[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(5): 77-81.

长途运输和供暖。油页岩的使用主要集中在提炼页岩油和发电上,因此干馏工艺和燃烧锅炉的发展直接影响使用效果。油页岩作为燃料用于发电经历了漫长的研究开发过程,从油页岩悬浮燃烧与气化到油页岩流化床燃烧再到油页岩循环流化床燃烧。悬浮燃烧与气化技术出现了实际出力偏小、炉膛结焦、受热面高温腐蚀、尾部受热面堵灰、污染物排放量大、制粉系统耗电量大、锅炉维修费用高、可靠性差等问题。循环流化床燃烧技术可有效地提高油页岩的利用率和锅炉的热效率,减少污染气体的排放^[9]。油页岩干馏技术已形成工业化生产规模^[10-13],但因生产工艺限制,油页岩干馏炉无法使用粒径 12 mm 以下的油页岩,同时会产生大量副产品(页岩半焦)。为充分利用小颗粒页岩及页岩半焦,提高副产品的利用能力,实现资源利用最大化,减少对环境的影响,考虑干馏技术与循环流化床技

术相结合,进行油页岩的全面利用。因此,需进行小颗粒页岩及页岩半焦在循环流化床(CFB)锅炉中的燃烧适应性研究。试验在中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司 1 MW_{th} CFB 燃烧试验台进行。该试验台容量大,燃烧室高,是我国最高的 CFB 燃烧中试热态试验台。已经进行了 100 多个工程煤种的试烧试验,试验结果接近于实炉参数。试验结果可以为实炉设计及运行提出针对性技术措施,以期达到对小颗粒页岩及页岩半焦的高效、安全利用。

1 油页岩小颗粒及半焦性质

所用油页岩小颗粒取自不同批次,根据热值要求,将油页岩小颗粒与半焦掺混后进行燃烧试验。将小颗粒 1 : 小颗粒 2 : 半焦 = 70 : 15 : 15 (质量比)作为设计燃料,将小颗粒 1 : 小颗粒 2 = 50 : 50 作为校核燃料进行理化分析,理化分析结果见表 1。

表 1 油页岩、半焦的工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of oil shale and shale semi-coke

样品	工业分析/%					元素分析/%					$Q_{\text{net,ar}}/$ (MJ · kg ⁻¹)
	M_t	M_{ad}	A_{ar}	V_{daf}	C_{ar}	H_{ar}	N_{ar}	O_{ar}	$S_{\text{t,ar}}$		
小颗粒 1	9.20	7.41	68.29	91.02	14.71	1.89	0.64	4.51	0.76	5.39	
小颗粒 2	15.20	8.07	62.09	91.75	15.00	1.89	0.68	4.37	0.77	5.44	
半焦	21.30	4.43	65.05	76.28	8.79	0.78	0.54	2.95	0.59	2.22	
设计燃料	11.90	4.70	67.04	88.19	13.89	1.68	0.65	4.06	0.78	4.88	
校核燃料	12.20	7.74	65.19	91.39	14.86	1.89	0.66	4.44	0.77	5.42	

由表 1 可知,试验所用不同批次的油页岩小颗粒成分相近。小颗粒 1 属于极低发热量、高挥发分、极高灰分和低硫分的劣质燃料;小颗粒 2 属于极低发热量、高挥发分、极高灰分和低硫分的劣质燃料;半焦属于极高灰分、极低发热量、高挥发分和低硫分的劣质燃料。由半焦和小颗粒 1、小颗粒 2 按一定比例掺混而成的设计燃料属于极低发热量、高挥发分、极高灰分和低硫分的劣质燃料;校核燃料属于极低发热量、高挥发分、极高灰分和低硫分的劣质燃料。设计燃料与校核燃料的指标已经超出发电煤粉锅炉用煤质量指标。由于 CFB 锅炉具有可以燃用劣质燃料的特点,因此,通过试烧试验深入研究其采用 CFB 方式的燃烧特性,可以为后续工程项目的开展提供技术决策参考,并为 CFB 锅炉及其辅机系统设计、选型提供相关技术依据。

燃料粒度是 CFB 锅炉设计中一个重要参数。

本次试验对设计燃料和校核燃料分别进行了筛分,筛分结果见表 2。结果显示,设计燃料、校核燃料颗粒度基本控制在 10 mm 以下,设计燃料中位径为 1 961.0 μm,校核燃料中位径为 1 961.6 μm,粒径分布情况符合 CFB 锅炉入炉燃料粒度的要求。

2 燃烧适应性研究

2.1 着火性

因燃料挥发分较高,点火时可适当降低投煤温度。试烧试验结果表明,采用床下油枪点火方式,密相区温度升至 440 °C 时开始投煤,升至 620 °C 后再逐渐减小投油量,可使设计燃料顺利着火并稳定燃烧。此时适当增加给煤量和一次风量,待床温升至 680 °C 左右时再加大给煤量和风量,停止油枪供油,最终可使炉膛下部床温稳定在 850 °C 左右。图 1 为典型的设计燃料点火特性曲线。

表 2 设计燃料和校核燃料的筛分结果

Table 2 Screening results of design fuel and check fuel

燃料	筛余量/%											中位径 $d_{50}/\mu\text{m}$	
	13 000 μm	10 000 μm	6 700 μm	5 000 μm	3 600 μm	1 000 μm	710 μm	280 μm	154 μm	125 μm	50 μm		0
设计燃料	0.8	4.1	10.8	21.4	40.1	60.9	73.4	88.4	93.7	95.7	99.9	100	1 961.0
校核燃料	0	0.4	5.0	15.6	38.4	64.2	77.4	91.0	95.5	96.3	99.9	100	1 961.6

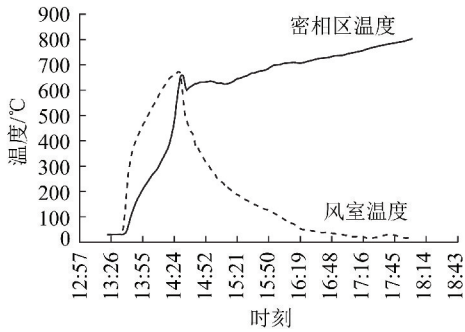


图 1 设计燃料冷态点火特性曲线

Fig. 1 Cold ignition characteristic curves of design fuel

着火温度决定投煤时间(特别是对难燃煤种)。投煤过早,因温度未达到燃点,加入的煤不但无法燃烧,还会冷却床内物料;同时未燃烧煤在床内积累过多后,一旦达到着火温度,炉内迅速产生大量热量,导致床温迅速升高,甚至导致床温难以控制而引起结焦。反之,若投煤太晚,会增加点火时间和点火油耗。

2.2 稳燃性

对于设计燃料和校核燃料,通过试烧试验可以看到,由于灰分较高,导致炉内灰浓度较大,锅炉床压增长较快。在实炉运行过程中,运行人员要根据料层差压和床压的变化及时排放灰渣,控制床压在合理的范围内,保证锅炉燃烧稳定。试验表明,床温在 720 ~ 850 °C,设计燃料和校核燃料均能保证稳定燃烧。

2.3 燃尽性

试验台条件下,设计燃料各工况的燃烧效率在 96.97% ~ 98.09%,校核燃料的燃烧效率在 97.15% ~ 97.85%。灰渣含碳量均低于 1.81%,较易燃尽,这与设计燃料的挥发分极高有关。

设计燃料燃烧温度对灰渣可燃物含量和燃烧效率的影响如图 2 所示。可知,在燃烧温度相对较低的条件下,灰渣可燃物含量较高。随着燃烧温度的升高,灰渣可燃物含量随之降低,燃烧效率提高。石灰石的加入,对燃烧效率有一定影响,燃料含硫量越

高,附加灰渣物理热损失越大^[14]。此次添加石灰石后的燃烧效率普遍低于不添加石灰石的燃烧效率(图 3(a))。随着一次风比例的增大,燃烧效率有升高趋势(图 3(b)),这可能与设计燃料挥发分极高的特性有关:一次风增大,密相区氧含量充足,挥发分迅速析出并燃烧,因此灰渣含碳量随着一次风比例的增高而降低。

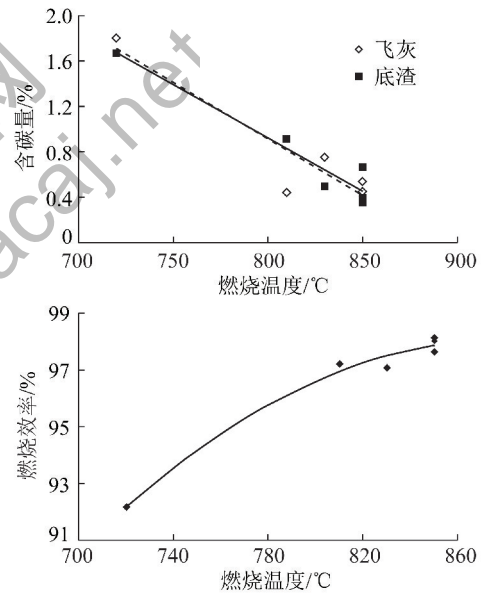


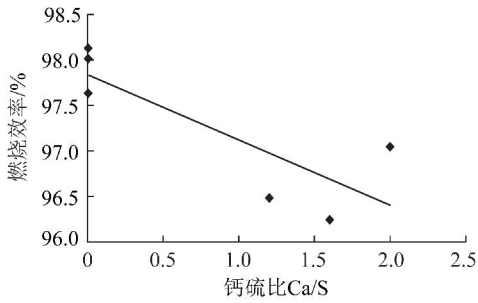
图 2 燃烧温度对灰渣可燃物含量和燃烧效率的影响(设计燃料、Ca/S=0)

Fig. 2 Effect of combustion temperature on the ash content and combustion efficiency of fuel (design fuel, Ca/S=0)

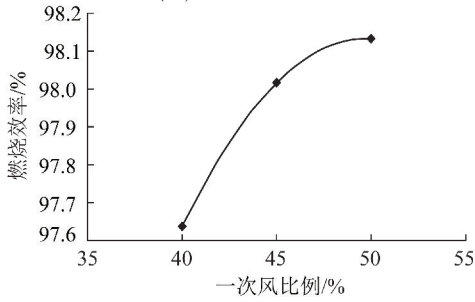
需要说明的是,虽然本试验中温度沿整个炉膛和灰循环回路分布较为均匀,使燃料在整个炉内停留阶段都能进行充分燃烧,颗粒燃烧氛围同实炉相近,但与实炉相比,其炉膛高度仍然偏低,细颗粒停留时间相对较短,因此,实炉灰渣可燃物应低于试验台试烧值,燃烧效率也将优于试烧试验结果。

2.4 结焦特性

CFB 锅炉如果设计不佳或运行不当,会发生炉内或物料循环回路结焦。结焦后形成的大渣块堵塞物料流通回路,引起运行事故。如果设计燃料容易



(a) 设计燃料、 $T=850\text{ }^{\circ}\text{C}$



(b) 设计燃料、 $\text{Ca/S}=0$

图3 钙硫比和一次风比例对燃烧效率的影响

Fig. 3 Effect of calcium sulfur ratio and primary air ratio on combustion efficiency

结焦,在运行中就需要严格控制床温的波动水平,设计时也要注意流化速度及一、二次风比例的选择。

燃料结焦特性受影响的因素较多,不同煤种的结焦性能有差别。采用煤灰软化温度ST作为结焦性的初级判据,判别界限为: $ST < 1\ 260\text{ }^{\circ}\text{C}$,结渣倾向严重; $1\ 260 \leq ST \leq 1\ 390\text{ }^{\circ}\text{C}$,结渣倾向中等; $ST > 1\ 390\text{ }^{\circ}\text{C}$,结渣倾向轻微^[6]。试验结果显示,设计燃料ST为 $1\ 190\text{ }^{\circ}\text{C}$,属于结渣倾向严重煤种。

本次试烧进行了结焦专项试验,因燃料灰分较高,导致炉内灰浓度较大,加大给料量后床温最高达到 $875\text{ }^{\circ}\text{C}$,未能达到结焦温度。模拟循环灰中断情况,床温最高达到 $951\text{ }^{\circ}\text{C}$,同样未能达到结焦温度。这可能与设计燃料单位热量灰分较大有关,在流化良好时,无法形成高于结焦温度的条件。试验结果表明,在保证良好流化的条件下,试验煤种不易结焦,试验过程如图4所示。

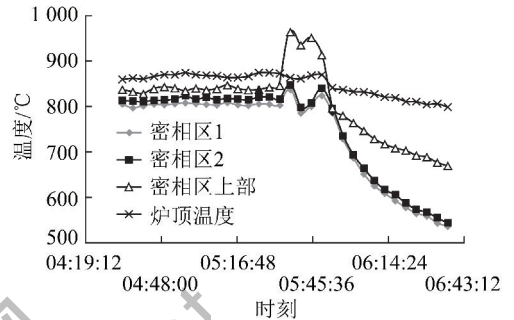


图4 结焦试验温度曲线

Fig. 4 Temperature curves of coking test

2.5 沿床高温分布

表3为试验工况炉内温度沿炉膛高度的分布。各工况炉膛温度分布均较均匀,各工况炉内温度沿炉膛高度分布规律基本一致。试烧试验表明,设计燃料灰渣量较大,排渣时有青烟,说明燃烧不完全。在锅炉设计时可以考虑较大炉膛截面,较多给料口,配风及风压可适度增大裕量;同时,设计燃料热值低,可考虑较高料层厚度,密相区保温及浇筑层可适当加厚,以保证床温稳定性。

表3 炉内温度分布

Table 3 Temperature distribution in the furnace

项目	工况参数		炉内温度/ $^{\circ}\text{C}$											
	钙硫比	一次风比例	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	T_{10}	T_{11}	T_{12}
工况 1	0	0.63	677.6	686.4	725.7	730.9	707.0	709.5	735.0	738.7	729.7	731.8	738.4	741.0
工况 2	0	0.50	770.8	774.1	805.1	809.8	815.8	818.2	815.7	823.4	805.3	808.9	818.7	823.2
工况 3	0	0.44	782.3	794.0	843.0	848.7	820.5	825.0	849.0	850.4	834.2	837.2	851.7	853.0
工况 5	0	0.45	805.8	816.0	865.3	872.1	843.7	847.2	871.1	874.1	854.4	856.0	869.8	872.1
工况 6	0	0.50	805.9	818.3	863.0	867.1	841.6	845.2	870.7	872.3	855.2	858.1	871.7	873.7
工况 7	1.2	0.45	805.9	818.6	845.9	850.3	829.1	833.4	859.9	860.9	850.5	853.5	868.4	869.8
工况 8	1.6	0.47	821.4	824.3	847.9	850.1	864.5	868.5	868.4	873.4	852.8	856.5	868.7	873.5
工况 9	2.0	0.45	807.7	819.2	855.0	860.7	835.2	838.9	868.5	871.2	857.6	859.0	868.7	871.8
工况 10	0	0.45	813.5	825.0	861.2	867.1	842.0	845.5	867.8	870.2	856.5	858.9	869.8	870.8
工况 11	1.6	0.45	803.7	816.0	857.0	862.8	833.8	838.2	862.1	864.5	851.1	852.4	865.2	867.7

注:工况1~9的煤种为设计燃料;工况10、11的煤种为校核燃料; $T_1 \sim T_{12}$ 为沿炉膛高度由下而上温度分布(到布风板距离分别为0.43, 1.02, 1.43, 3.43, 4.95, 7.22, 10.30, 12.95, 14.50, 15.95, 17.49, 20.42)。

3 结 语

1) 理化分析结果表明,由油页岩小颗粒与半焦混合而成的设计燃料属于极高灰分、极低发热量、高挥发分和低硫分的劣质燃料。筛分结果显示,粒径分布情况符合 CFB 锅炉入炉燃料粒度的要求。

2) 燃烧适应性研究表明:① 采用床下油枪点火方式,密相区温度升至 440 ℃ 开始投煤,升至 620 ℃ 后再逐渐减小投油量,可使设计燃料顺利着火并稳定燃烧,试验燃料较易着火;② 控制床温在 720 ~ 850 ℃,试验燃料可以保证稳定燃烧;③ 各工况炉膛温度分布均较均匀,各工况炉内温度沿炉膛高度分布规律基本一致;④ 试验各工况灰渣含碳量均低于 1.81%,试验燃料较易燃尽。

3) 结焦特性研究表明,虽然 $ST=1\ 190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 表明设计燃料属于结渣倾向严重煤种,但试验过程中,在保证良好流化条件下,试验燃料不易结焦。

4) CFB 锅炉适合油页岩小颗粒与半焦掺烧利用,且燃烧效率较高,燃烧稳定性较好。但试验燃料灰渣量均较大,锅炉设计时可以考虑较大炉膛截面,较多给料口,配风及风压可适度增大裕量;设计燃料热值低,可考虑较高料层厚度,密相区保温及浇筑层可适当加厚,以保证床温稳定性。

参考文献 (References):

[1] 刘招君,董清水,叶松青,等. 中国油页岩资源现状[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2006,36(6):869-876.
LIU Zhaojun, DONG Qingshui, YE Songqing, et al. The situation of oil shale resources in China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36(6): 869-876.

[2] 刘柏谦. 油页岩在国家能源结构中的地位[J]. 中国能源, 1999(2):19-21.

[3] 刘飞. 中国油页岩加工业新的发展机遇[J]. 当代化工, 2005, 34(3):154-156.
LIU Fei. The new opportunity of Chinese oil shale industry [J]. Contemporary Chemical Industry, 2005, 34(3): 154-156.

[4] 李丹梅,汤达祯,杨玉凤. 油页岩资源的研究、开发与利用进展[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(6):657-661.
LI Danmei, TANG Dazhen, YANG Yufeng. Advances in oil shale resources: Development and utilization [J]. Petroleum Exploration

and Elopment, 2006, 33(6):657-661.

[5] 张志军,李亚男,杨小霞,等. 桦甸油页岩的矿物学特征及重力分选富集[J]. 石油学报(石油加工), 2016, 37(6):1246-1252.
ZHANG Zhijun, LI Ya'nan, YANG Xiaoxia, et al. Mineralogical characterization and gravity separation of Huadian oil shale [J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2016, 37(6):1246-1252.

[6] 陈松,周扬,丁会敏,等. 国内油页岩产业现状和发展思路[J]. 化学工程师, 2016(12):61-62,75.
CHEN Song, ZHOU Yang, DING Huimin, et al. Present situation and development of domestic oil shale industry [J]. Chemical Engineer, 2016(12):61-62,75.

[7] 刘招君,柳蓉. 中国油页岩特征及开发利用前景分析[J]. 地学前缘, 2005, 12(3):315-323.
LIU Zhaojun, LIU Rong. Oil shale resource state and evaluating system [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3):315-323.

[8] 侯吉礼,马跃,李术元,等. 世界油页岩资源的开发利用现状[J]. 化工进展, 2015, 34(5):1183-1190.
HOU Jili, MA Yue, LI Shuyuan, et al. Development and utilization of oil shale worldwide [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(5):1183-1190.

[9] AADU Paist. New epoch Estonian oil shale combustion technology [J]. Oil Shale, 2004, 21(3):181-182.

[10] 张家强. 国内外油页岩开发利用前景及对策:地质工作战略问题研究——中国地质矿产经济学会青年分会 2005 年年会学术论文集[C]. 北京:中国大地出版社, 2005:215-223.

[11] 高健. 世界各国油页岩干馏技术简介[J]. 煤炭加工与综合利用, 2003(2):44-46.

[12] 肇永辉. 页岩油加工方案的研究[J]. 沈阳化工, 2000(2):78-80.
ZHAO Yonghui. Research on processing plan of shale oil [J]. Shenyang Chemical Industry, 2000(2):78-80.

[13] 王清强,马跃,李术元,等. 世界油页岩资源研究开发利用近况;并记 2016 年国外两次油页岩国际会议[J]. 中外能源, 2017, 22(1):23-29.
WANG Qingqiang, MA Yue, LI Shuyuan, et al. Global oil shale research, development and utilization today: Two International Oil Shale Symposiums Held in 2016 [J]. Sino-Global Energy, 2017, 22(1):23-29.

[14] 周一工,陆明. 循环流化床锅炉添加石灰石脱硫对锅炉效率的影响[J]. 锅炉技术, 2000(10):13-16.
ZHOU Yigong, LU Ming. Effect of limestone desulfurization on CFB boiler efficiency [J]. Boiler Technology, 2000(10):13-16.