

文章编号:0253-9993(2010)09-1537-05

循环流化床锅炉掺烧煤泥飞灰底饲回燃试验

段伦博,李艳敏,刘道银,陈晓平,赵长遂

(东南大学 能源与环境学院,江苏 南京 210096)

摘要:在额定蒸发量为75 t/h的循环流化床(CFB)锅炉上进行掺烧60%煤泥和40%中煤时的飞灰底饲回燃试验。结果表明:随着底饲回燃量的增加,流化床密相区温度下降,炉膛出口温度上升,炉内温度趋于均匀。与飞灰不回燃的条件相比,当飞灰底饲回燃量增加到8 t/h,锅炉燃烧效率从92%提高到95%,石灰石脱硫效率也显著提高。随着底饲回燃量的增加,NO和CO排放浓度下降,粉尘排放浓度上升。采用飞灰底饲回燃技术后,可有效解决CFB煤泥锅炉飞灰含碳量高和脱硫效率低等问题,能产生明显的经济环保效益。

关键词:循环流化床(CFB);飞灰底饲回燃;燃烧效率;脱硫效率;污染物排放

中图分类号:TD926.4 **文献标志码:**A

Experimental on fly ash recirculation with bottom feeding in a circulating fluidized bed boiler co-burning coal sludge

DUAN Lun-bo, LI Yan-min, LIU Dao-yin, CHEN Xiao-ping, ZHAO Chang-sui

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: With the aim of reducing carbon content in fly ash, the present work was carried out on a 75 t/h Circulating Fluidized Bed (CFB) boiler burning mixture of 60% coal sludge and 40% coal by recalculating fly ash with bottom feeding. Results show that as the recirculation rate of fly ash increases, the CFB dense bed temperature decreases, and the furnace outlet temperature increases, also the temperature distribution in the furnace becomes uniform. Compared with the condition without fly ash recirculation, the combustion efficiency increases from 92% to 95% when the recirculation rate increases to 8 t/h, and the desulfurization efficiency also increases significantly. As the recirculation rate increases, the emissions of NO and CO decrease, but the particulate emission increases. The present study indicates that the technology of fly ash recirculation with bottom feeding can improve the combustion performance and desulfurization efficiency for the CFB boilers burning coal sludge, which can bring large economical and environmental benefits in China.

Key words: Circulating Fluidized Bed (CFB); fly ash recirculation with bottom feeding; combustion efficiency; desulfurization efficiency; pollutant emission

煤泥是煤炭洗选过程的副产品,其产量约为原煤的10%~20%。随着煤炭入洗比例的加大,煤泥产量逐年增加。洗煤泥水分大、灰分高、颗粒细、黏度大,不易利用,煤泥处理成为了煤炭企业的棘手问题。

煤泥可干燥后作为燃料销售,也可直接燃烧利用。与干燥后利用相比,用燃烧法处理煤泥可就地变废为宝,节省大量能耗。循环流化床锅炉热容大,床

内混合和传热传质过程十分强烈,特别适合于低热值劣质煤发电,具有燃烧效率高(97.5%~99.5%)、炉内脱硫效果好(当Ca/S摩尔比为2时可达90%以上)、氮氧化物排放量低($(50\sim 200)\times 10^{-6}$)等优点,可实现大批量地处理和利用煤泥^[1-5]。

CFB煤泥燃烧技术已广泛应用于我国煤炭行业,35、75、130 t/h等级燃用煤泥的循环流化床锅炉及

75、130、220、440 t/h 煤泥、煤矸石混烧的循环流化床锅炉陆续投入商业运行。通常这些锅炉存在一个较大问题,即飞灰含碳量较高,达 10%~12% 以上。这不但影响了锅炉的燃烧效率,而且降低了飞灰的活性,使煤泥锅炉的飞灰难以利用^[6-9]。同时,在额定负荷时,炉内温度基本在 950~1 050 ℃,超出循环流化床锅炉石灰石脱硫的最佳温度范围^[10],致使脱硫效率较低。如何降低床温,提高锅炉热效率和脱硫效率,有利于煤泥电厂的长期生存和效益提高,是个亟待解决的课题。

本文简要介绍了 CFB 锅炉底饲回燃技术,在一台额定蒸发量为 75 t/h 的 CFB 煤泥锅炉上进行了试验研究,考察了飞灰回燃量对炉内温度分布、燃烧效率、脱硫效率和污染物排放的影响,对 CFB 煤泥锅炉的改造和优化运行具有借鉴意义。

1 底饲回燃技术介绍

飞灰“底饲回燃”是循环流化床飞灰再循环方式的一种^[11],其系统如图 1 所示。它由飞灰分离装置、飞灰给料装置、喷射装置、耐磨弯头、底饲喷嘴、疏堵装置和输送气源等组成,可将锅炉飞灰分离装置(静电除尘器、布袋除尘器等)灰斗里的飞灰通过气力输送方式由底饲风帽送回循环流化床锅炉密相区进行燃烧。系统具有稳定、可靠、易于调节的优点。

底饲回燃飞灰颗粒被送回密相层底部后与大量炽热的床料混合,进行强烈的传热传质,迅速升温燃烧,表面灰壳被磨掉后露出新鲜的黑芯,在高温和高氧浓度条件下,燃烧速率大。正在燃烧着的飞灰颗粒

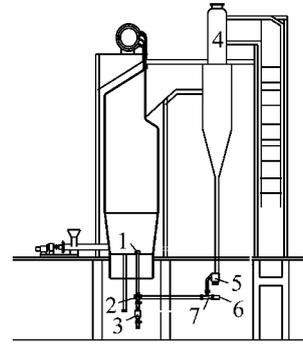


图 1 飞灰底饲回燃系统

Fig. 1 The fly ash recirculation with bottom feeding system
1—底饲喷嘴;2—耐磨弯头;3—疏堵装置;4—飞灰分离装置;
5—飞灰给料装置;6—输送气源;7—喷射装置

进入稀相区后仍保持高的温度,在稀相区进一步燃烧,循环一次即可获得很高的燃尽度。底饲回燃遵循燃烧的“3T 原则”,即 Turbulence(强烈的扰动)、Temperature(高的温度)、Time(长的停留时间),比常规的面饲回燃效果更优越。采用飞灰底饲回燃方式,即使在中低循环倍率流化床锅炉内也可获得理想的燃尽效果。

2 75 t/h CFB 煤泥锅炉飞灰底饲回燃试验

试验在某电厂燃用煤泥的 CFB 锅炉上进行,锅炉额定蒸发量为 75 t/h。燃料为 60% 的煤泥和 40% 中煤的混合物,元素分析和工业分析见表 1。煤泥由 3 台立式给料机从炉顶投入床内,中煤通过锅炉前墙的 4 个给煤机送入炉内。采用向炉内添加石灰石的方式进行脱硫,石灰石的成分分析见表 2。

表 1 煤泥和中煤的元素分析和工业分析

Table 1 Ultimate and proximate analysis of the samples

样 品	元素分析/%					低位热值/ (MJ · kg ⁻¹)	工业分析/%			
	w(C _{ad})	w(H _{ad})	w(O _{ad})	w(N _{ad})	w(S _{ad})		FC _{ad}	V _{ad}	A _{ad}	M _{ad}
煤泥	42.86	3.92	7.44	0.52	0.39	15.49	31.51	23.65	41.17	3.67
中煤	58.66	4.00	8.26	0.80	0.62	22.95	43.94	28.40	24.94	2.72

表 2 石灰石成分分析

Table 2 Composition analysis of the limestone

组 分	w(CaO)	w(MgO)	w(SiO ₂)	w(Fe ₂ O ₃)	w(Al ₂ O ₃)	w(K ₂ O)	w(Na ₂ O)	w(P ₂ O ₅)	w(SO ₃)	w(TiO ₂)	w(MnO)	w(LOI)
质量份额/%	52.08	1.63	3.54	0.49	0.88	0.23	0.021	0.018	0.029	0.05	0.018	41.23

注:LOI 为烧减量。

该锅炉投运以来,存在炉内温度分布不均匀、飞灰含碳量过高、燃烧效率和锅炉热效率偏低,以及脱硫效率偏低等问题。额定负荷工况下,密相区床温达 950~1 050 ℃,稀相区温度在 850 ℃左右,上下温差

高达 130 ℃。锅炉飞灰含碳量在 14% 以上,燃烧效率不到 92%,锅炉热效率不到 85%。而且由于炉内温度严重偏离了石灰石的最佳脱硫温度(一般在 850 ℃左右),钙硫比为 2.5 时,脱硫效率只有 83%,

SO₂排放很难达标。经过严密的热力计算和工程设计,在该锅炉上安装底饲回燃系统,将部分静电除尘器-电场的飞灰经气力输送由安装在布风板上的耐磨风帽送回床内进行再次燃烧,通过密封性良好的星形给料器控制底饲回燃量。经调试,系统工作稳定可靠,回燃飞灰量可调性好。

在此锅炉上进行100%负荷和70%负荷下底饲回燃量对锅炉燃烧及污染物排放影响的试验研究。通过星形给料器分别控制给料量为0、2、4、6和8 t/h。每个试验工况稳定后测试4 h。利用电厂完备的DCS系统记录温度、压力、蒸发量、一二次风流量等数据。在空气预热器出口采用飞灰等速取样方法进行飞灰取样,用烟气分析仪实时监测烟气中O₂、CO、CO₂、SO₂、NO和NO_x的排放浓度。在静电除尘器出口采用等速取样方法对排烟中的固体颗粒浓度进行测量。根据国家标准《电站锅炉性能试验规程》计算锅炉热效率。

3 结果与讨论

3.1 底饲回燃量对炉内温度分布的影响

如图2所示,随着飞灰底饲回燃量的增加,锅炉密相区下部和密相区中部温度明显下降,出口温度维持不变或者略有上升,炉内温度分布明显变得均匀。100%负荷下,从未投运底饲回燃到底饲回燃量为8 t/h,锅炉密相区温度由990℃左右逐步下降到890℃左右;70%负荷下,锅炉密相区温度由960℃左右逐步下降到880℃左右,温降效果明显。这是由于低温的飞灰和飞灰输送风进入炉膛对床料的冷却作用造成的。100%负荷下,从未投运底饲回燃到底饲回燃量为8 t/h,锅炉出口温度基本维持恒定;70%负荷下,锅炉出口温度由760℃上升至810℃。随着底饲回燃量的增大,进入炉内的飞灰在密相区被加热,被气流携带至稀相区燃烧放热,同时由于炉内的细颗粒浓度增大,更多的细颗粒被带到炉膛上部,增加了固体对受热面的冲刷,使稀相区温度升高。

3.2 底饲回燃量对燃烧效率和锅炉热效率的影响

底饲回燃量对飞灰可燃碳含量的影响如图3所示。100%负荷下,底饲回燃量由0增加到8 t/h,飞灰含碳量由14.1%下降到7.5%;70%负荷下,飞灰含碳量由14.3%下降到8.8%。循环流化床内强烈的物料湍动对飞灰外壳的磨损作用使其可燃碳暴露在炉内的高温环境,以及飞灰在炉内停留时间延长,使其燃烧更完全^[12]。

底饲回燃量对燃烧效率和锅炉热效率的影响如图4所示。两种负荷下,随底饲回燃量增加,燃烧效

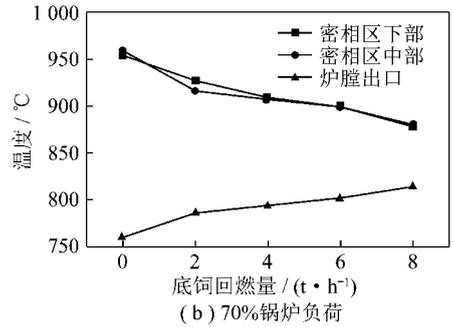
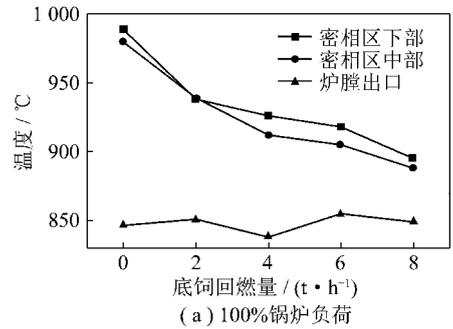


图2 底饲回燃量对炉内温度分布的影响

Fig. 2 Effect of the recirculation rate on the temperature distribution

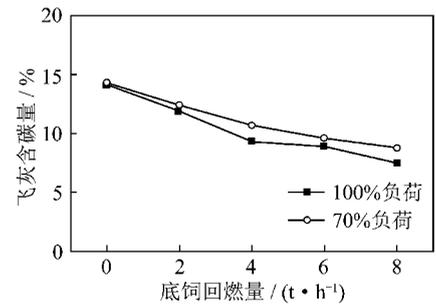


图3 底饲回燃量对飞灰可燃碳含量的影响

Fig. 3 Effect of the recirculation rate on the unburnt carbon in the fly ash

率和锅炉热效率均大幅上升。100%负荷,与不投运底饲回燃相比,燃烧效率可由92%提高到95%,锅炉热效率可由84.9%上升至88.7%,每天可为该电厂节省13.6 t煤泥,具有巨大的经济环保效益。

3.3 底饲回燃对污染物排放的影响

3.3.1 底饲回燃对SO₂排放及脱硫效率的影响

钙硫比为1.6时,底饲回燃对SO₂排放的影响如图5(a)所示。随着底饲回燃量的增大,SO₂排放浓度下降。底饲回燃对SO₂排放的影响存在两个方面:①底饲回燃使炉膛密相区温度下降,向循环流化床最佳脱硫温度靠近,使石灰石的脱硫效率提高;②飞灰中存在许多未煅烧的CaCO₃或者煅烧后而未硫化的CaO^[13],底饲回燃使这部分脱硫剂重新回到炉内,延长了其在炉内的停留时间,增大了脱硫剂与SO₂的反应时间,脱硫效率提高。如图5(b)所示,两负荷下,随着

底饲回燃量的增大,石灰石炉内脱硫效率显著提高。

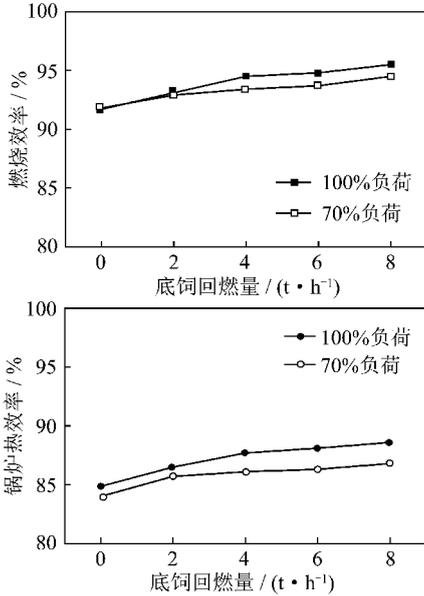


图4 底饲回燃量对燃烧效率和锅炉热效率的影响

Fig. 4 Effect of the recirculation rate on the combustion efficiency and the boiler thermal efficiency

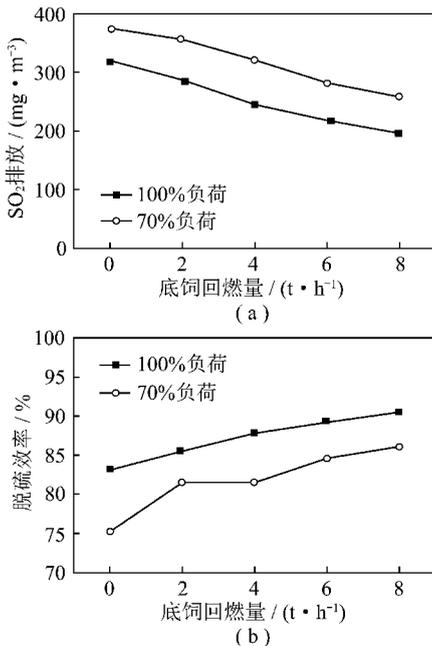


图5 底饲回燃量对SO₂排放和脱硫效率的影响

Fig. 5 Effect of the recirculation rate on SO₂ emission and the desulfurization efficiency

3.3.2 底饲回燃对NO和CO排放的影响

底饲回燃量对NO排放的影响如图6(a)所示。循环流化床中NO的来源主要是燃料N,它在热解过程中,首先生成NH₃、HCN等气相前驱物,之后被O和OH等基团氧化为NO。如果气氛中O和OH基团的浓度很低,那么燃料N则主要生成N₂。NO在循环流化床炉内的分解反应主要通过两个途径:一是被气

氛中CH_i等挥发分还原基团还原;二是通过焦炭表面发生的NO/CO/Char的催化还原反应还原。大量研究表明,循环流化床密相区是NO的主要生成区域,随后NO浓度沿炉膛高度下降^[14]。随底饲回燃量的增加,一方面,炉膛密相区的温度降低,空气中的氧气更不容易通过气相反应生成O和OH等的活性基团,NO生成量减小;另一方面,炉内固体浓度增加,增加了NO/CO/Char反应的程度,NO生成量减小。

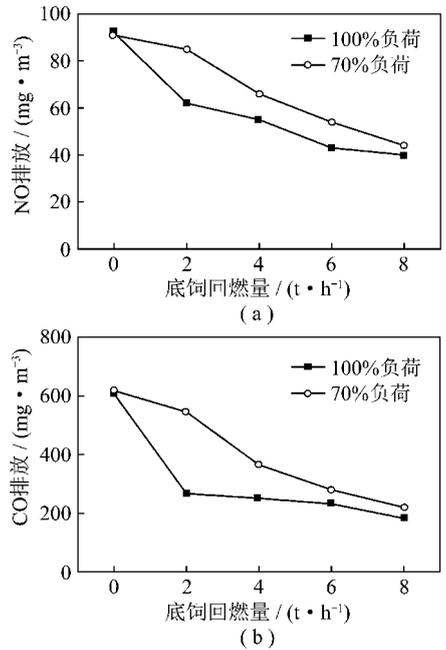


图6 底饲回燃量对NO排放和CO排放的影响

Fig. 6 Effect of the recirculation rate on NO emission and CO emission

底饲回燃量对CO排放的影响如图6(b)所示。两负荷下,随着底饲回燃量的增加,CO排放浓度大幅下降。底饲回燃使焦炭燃烧更完全,气体不完全燃烧程度降低,CO排放下降。前人研究表明,炉膛出口温度是影响CO排放浓度的关键因素^[15]。炉膛出口温度提高,CO排放浓度降低。底饲回燃可在一定程度上提高炉膛出口温度,使CO排放降低。

3.3.3 底饲回燃量对粉尘排放浓度的影响

底饲回燃会使飞灰在循环流化床炉内累积,炉膛出口烟气中固体含量上升。如果不增加静电除尘器的除尘效率,会增加锅炉排烟中的固体颗粒物排放。如图7所示,随着底饲回燃量的增加,烟气中粉尘浓度大幅上升。解决这一问题可以通过提高静电除尘器的除尘效率和合理分配静电除尘器各电场之间的负荷解决。

4 结 论

(1) 随着底饲回燃量的增加,锅炉密相区温度下

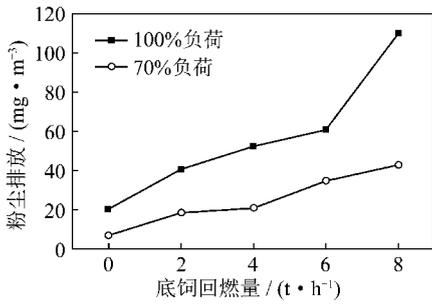


图7 底饲回燃量对粉尘排放的影响

Fig. 7 Effect of the recirculation rate on the particulate emission
降、稀相区温度上升,炉内温度场趋于均匀。

(2) 随着底饲回燃量的增加,锅炉燃烧效率和热效率均大幅提高;与飞灰不回燃的条件相比,当飞灰底饲回燃量增加到 8 t/h,锅炉燃烧效率从 92% 提高到 95%。

(3) 随着底饲回燃量的增加,SO₂排放量降低,石灰石炉内脱硫效率提高,NO 和 CO 排放浓度降低,但是锅炉粉尘排放有所上升。

(4) 飞灰底饲回燃可以有效改善循环流化床煤泥锅炉的燃烧状况,提高锅炉热效率和脱硫效率,降低 SO₂、NO 和 CO 等气态污染物的排放,促进煤泥锅炉的经济环保运行。

参考文献:

[1] 李玉,东野光磊,李从峰. 煤泥、煤矸石混烧技术在循环流化床锅炉上的应用[J]. 热力发电,2003,32(9):49-50.
Li Yu, Dongye Guanglei, Li Congfeng. Application of mud-coal and gangue mixed burning technology on a CFB boiler[J]. Thermal Power Generation, 2003, 32(9): 49-50.

[2] 李剑锋. 75 t/h 煤泥循环流化床锅炉[J]. 热能动力工程,2004, 19(6):653.
Li Jianfeng. 75 t/h CFB boilers burning coal sludge[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2004, 19(6): 653.

[3] 郭玉泉,宋浩,周文涛,等. 循环流化床锅炉掺烧煤泥热效率分析[J]. 洁净煤技术,2007,13(5):56-59.
Guo Yuquan, Song Hao, Zhou Wentao, et al. Boiler efficiency test analyzing for silt-coal firing CFB[J]. Clean Coal Technology, 2007, 13(5): 56-59.

[4] 陈艳容,张力,冉景煜,等. 煤层气与煤矸石在循环流化床内混烧影响因素的试验研究[J]. 煤炭学报,2009,34(10):1374-1378.
Chen Yanrong, Zhang Li, Ran Jingyu, et al. Experiment key factors of coal-bed gas and coal gangue co-combustion in circulating fluidized bed[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(10): 1374-1378.

[5] 闵凡飞,张明旭,范肖南,等. 选煤厂煤泥浆燃烧特性的研究[J]. 煤炭学报,2004,29(2):216-221.
Min Fanfei, Zhang Mingxu, Fan Xiaonan, et al. Study on combustibility of slime from coal preparation plant[J]. Journal of China Coal

Society, 2004, 29(2): 216-221.

[6] 李登新,吕俊复,郭庆杰,等. 循环流化床锅炉循环流化床灰渣利用研究进展[J]. 热能动力工程,2003,18(1):5-9.
Li Dengxin, Lü Junfu, Guo Qingjie, et al. Recent advances in a study on the utilization of circulating fluidized bed(CFB) ash residue[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2003, 18(1): 5-9.

[7] 岳焕玲,原永涛,朱洪峰. 循环流化床锅炉灰渣综合利用[J]. 锅炉技术,2006,37(S1):36-41.
Yue Huanling, Yuan Yongtao, Zhu Hongfeng. The review and analysis of comprehensive utilization of circulating fluidized bed boiler ash residue[J]. Boiler Technology, 2006, 37(S1): 36-41.

[8] 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.
Lü Junfu, Zhang Shouyu, Liu Qing, et al. Investigation on carbon content in fly ash in circulating fluidized bed[J]. Power Engineering, 2004, 24(2): 170-174.

[9] Behr A, Christina B. Characterization and use of fluidized bed combustion coal ash[J]. Journal of Environmental Engineering, 1994, 120(6): 1488-1506.

[10] 王文选,王凤君,韩松,等. 循环流化床中石油焦和煤混合燃烧 SO₂ 排放特性研究[J]. 燃烧科学与技术,2003,9(6):507-510.
Wang Wenxuan, Wang Fengjun, Han Song, et al. Investigation on SO₂ emission of petroleum coke combustion blending with coal in CFB[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2003, 9(6): 507-510.

[11] 赵长遂,段钰锋,陈晓平,等. 飞灰底饲回燃技术在无烟煤循环流化床锅炉中应用的机理和实绩[J]. 能源研究与利用,2001(6):12-14.
Zhao Changsui, Duan Yufeng, Chen Xiaoping, et al. Application of fly ash recirculation with bottom feeding in the CFB boiler burning anthracite[J]. Energy Research and Utilization, 2001(6): 12-14.

[12] 李少华,王启民,肖显斌,等. 循环流化床飞灰残碳的生成及其处理[J]. 热能动力工程,2007,22(1):52-57.
Li Shaohua, Wang Qimin, Xiao Xianbin, et al. Formation of fly-ash carbon residue in a circulating fluidized bed boiler and its disposal [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2007, 22(1): 52-57.

[13] 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炉 SO₂ 排放特性研究[J]. 化工学报,2008,59(3):926-932.
Duan Lunbo, Chen Xiaoping, Liang Cai, et al. SO₂ emission characteristics of circulating fluidized bed boiler co-firing coal and petroleum coke [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 59(3): 926-932.

[14] Reidick A, Kremer H. Pollutant formation during coal combustion in a CFB test furnace[J]. Symposium (International) on Combustion, 1996, 26(2): 3309-3315.

[15] Basu P. Combustion of coal in circulating fluidized-bed boilers: a review[J]. Chemical Engineering Science, 1999, 54(22): 5547-5557.