

水煤浆再燃降低锅炉 NO_x 排放的实验研究

董若凌¹, 周俊虎², 岑可法², 韩志英²

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 浙江省 杭州市 310018;

2. 浙江大学, 浙江省 杭州市 310027)

Experimental Study on Reducing Furnace NO_x Emission Through Coal Water Slurry Reburning

DONG Ruo-ling¹, ZHOU Jun-hu², CEN Ke-fa², HAN Zhi-ying²

(1. College of Mechanical and Automation Control, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, Zhejiang Province, China;

2. Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: The performance of coal water slurry (CWS) reburning technology for NO_x emission control was investigated in a 0.25 MW down-fired furnace. Shenhua pulverized coal and its CWS were reburning fuels. The results indicate that CWS is superior to pulverized coal in regard to NO_x reduction; high reburning fuel fraction and oxygen primary combustion zone favor to the control of furnace NO_x emission; NO_x reduction efficiency is inverse proportional to the square of excess air ratio in the primary combustion zone, and decreases with increase in the reburning zone excess air ratio. CWS is a good reburning fuel and could be widely applied in the industry furnace for further NO_x emission control.

KEY WORDS: coal water slurry; down-fired furnace; reburning technology; NO_x reduction

摘要: 为明确锅炉采用水煤浆再燃技术时的整体NO_x控制效果和影响因素, 利用神华煤, 在0.25 MW沉降炉上, 分别以煤粉和水煤浆为再燃燃料, 进行了再燃NO_x控制实验。结果显示, 水煤浆再燃时的脱硝效果优于煤粉; 一定范围内, 较高的再燃比有利于锅炉整体再燃脱硝; 锅炉主燃区宜采用氧化性氛围, 此时该处的过量空气系数与脱硝效果呈现二次曲线关系; 水煤浆再燃脱硝率与再燃区过量空气系数成反比。实验证实, 水煤浆是一种较优的再燃燃料, 可被广泛应用, 以实现工业炉NO_x排放的有效控制。

关键词: 水煤浆; 沉降炉; 再燃技术; 脱硝

0 引言

燃煤电站锅炉所排放的NO_x会带来光化学烟雾, 破坏臭氧层, 引发酸雨, 影响动、植物生长, 甚至危及人类生活健康^[1]。为此, 科研人员对之进行了深入研究, 并开发了多种控制手段。再燃技术是其中之一^[2-8]。再燃是指分区段向燃煤锅炉输送不

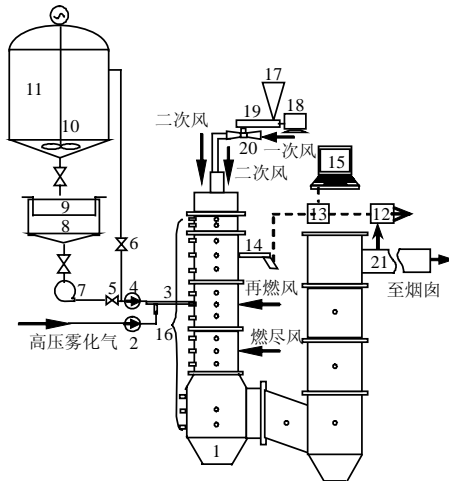
同比例的燃料/空气混合物, 在不同区域内形成氧化性或还原性氛围, 在保证燃烧的前提下, 将已有NO_x还原为N₂。目前, 再燃技术在工业应用中可获得的脱硝率在20%~70%^[9], 除技术本身原因外, 再燃燃料选择是引起以上差异的重要一环。天然气不含N物质, 是较优的再燃燃料。但由于存在价格和产品可靠供给问题, 天然气再燃技术的工业实施比较有限^[10]。对燃煤电站锅炉而言, 煤粉是最便利的再燃燃料, 且二次处理(如超细化和制浆化)后, 再燃效果会进一步提高: 超细煤粉再燃实现的工业脱硝率现已达28%~57%^[9]。徐璋^[11]和李戈^[9]的一维炉实验还曾报道了高于60%的脱硝效果, 不过, 超细粉再燃应用的经济性仍待权衡; 煤浆化是另一煤粉再燃应用处理方式, EER曾利用洗煤厂煤渣制浆, 在0.3 MW塔式炉、0.3 MW和3 MW旋流炉上进行测试, 实现再燃脱硝率55%~77%, 几近天然气的应用效果, 且经济可靠^[12-13]。鉴于燃煤电站锅炉在煤浆制备上的便利, 以及利用水煤浆作为再燃燃料可能具有的较好NO_x控制前景, 进行该领域探索, 确定水煤浆再燃影响因素, 极具意义。由此, 在初步了解水煤浆作为再燃燃料时若干再燃区反应特性的基础上^[14], 本文利用0.25 MW沉降炉对水煤浆再燃技术的系统应用作进一步考察。

1 实验装置和方法

1.1 实验装置

图1为水煤浆再燃实验台简图。整套系统的构成包括实验炉本体、煤粉主燃烧系统、煤浆再燃系统和实验监测系统。其中, 实验炉主体高约3.5 m, 内径300 mm。主燃烧器顶置, 一、二次风均为环形

风，一次风口内径 40 mm，外径 72 mm，二次风口内径 78 mm，外径 93 mm。炉体四周开设 20 多个有密封盖的小孔，作观测、取样用，亦作再燃燃料喷入口和供风口。实验中，主燃煤粉由螺旋给粉器供给，再燃煤浆则利用高压空气将煤浆泵输送来的浆液通过煤浆枪实施有效雾化后送入炉内。实验监测系统包括多种测量仪器：火焰温度采用红外高温计和铂铑-铂铑热电偶配合测量，烟气成份采样由 ROSEMENT 烟气分析仪执行(分析物及测量精度为 O₂: ±0.25%，CO₂: ±1%，CO: ±250 mL·m⁻³，NO: ±15 mL·m⁻³)。实验分析时，烟气组成将被转化为 φ(O₂)=6% 下的相应值以方便研究。为保证所测数据可靠，以上诸系统在实验前均进行标定工作。



1—0.25 MW 沉降炉；2—空气流量计；3—煤浆枪；4—压力表；5—煤浆泵出口阀；6—旁路阀；7—煤浆泵；8—煤浆罐；9—滤网；10—搅拌器；11—煤浆储罐；12—烟气分析仪；13—Datalogger；14—热电偶(红外高温仪)；15—数据采集中枢；16—观测孔；17—煤粉仓；18—调速电机；19—螺旋给粉机；20—风粉混合器；21—烟道

图 1 0.25 MW 水煤浆再燃实验系统简图
Fig. 1 Sketch of 0.25 MW CWS reburning experiment system

1.2 实验用燃料特性及制备

实验用主燃燃料和再燃煤浆均由神华煤制成(煤质分析见表 1)。由于已证实低浓度水煤浆可获得较高的脱硝率，且无需添加剂^[12-14]，本文煤浆浓度确定为 50%。在精确称量煤粉和水分质量后，按 1:1 比例混合，置于储浆罐，用搅拌器以 60 r/min 的速率充分搅拌。上述工作至少在实验前 4 h 开始实施。

表 1 实验用煤工业分析及元素分析

Tab. 1 Proximate analysis and ultimate analysis of coals used in the test

工业分析/%				元素分析/%				
M _{ad}	A _{ad}	V _{ad}	FC _{ad}	C _{ad}	H _{ad}	N _{ad}	O _{ad}	S _{ad}
6.39	14.55	26.93	52.13	62.80	3.93	0.91	0.41	11.01

1.3 实验方案

实验意图从锅炉整体角度研究水煤浆再燃技术的脱硝效果和影响因素，主要内容包括：锅炉主燃区过量空气系数 α₁、再燃燃料占锅炉总热输入量的百分比(再燃比 w_{rr})和再燃区过量空气系数 α₂ 等参数与脱硝率间的关系。煤粉、水和水煤浆的再燃脱硝效果比较也在考察范围之内。

为经济、安全，实验采用 20 kg/h 的总燃料供给速率，再燃比 10%~25%，主燃区过量空气系数 0.90~1.20，再燃区过量空气系数 0.75~1.00，燃尽区过量空气系数保持 1.15。

依据煤粉锅炉颗粒停留时间计算方法^[15]，在考虑燃烧器布局时，再燃燃料喷射位置一般选为距主燃烧器 1 145 mm 处，如此，主燃燃料的主燃区停留时间不少于 0.35 s。燃尽风口一般距主燃烧器 1 490~1 590 mm，可保证燃料再燃区停留约 0.4 s。剩余炉膛空间仍能满足煤粉的炉内停留约 0.5 s，符合文献 [16] 所推荐的最佳停留时间范围。

实验炉脱硝率计算公式为

$$\eta = \frac{\varphi_b(\text{NO}_x) - \varphi_r(\text{NO}_x)}{\varphi_b(\text{NO}_x)} \times 100\% \quad (1)$$

式中：η 为脱硝率，%；φ_b(NO_x) 为基础工况下排烟 NO_x 浓度，mL·m⁻³；φ_r(NO_x) 为再燃工况下排烟 NO_x 浓度，mL·m⁻³。

2 实验结果分析

2.1 水煤浆、煤粉和水的再燃效果比较

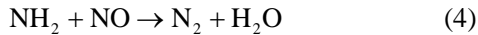
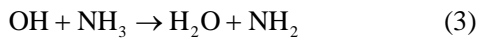
以煤粉、水煤浆和水为再燃燃料，进行主燃区过量空气系数为 1.05，再燃比为 20% 的诸工况研究，获得沉降炉再燃 NO_x 排放控制效果如图 2 所示。

由图可知，喷水脱硝技术不适于锅炉类燃烧设备的 NO_x 控制——脱硝效率仅 5% 左右。欧文·格拉斯曼^[17]认为，燃烧系统内的水分仅起降低燃烧温度和 O 离子浓度的作用，亦即水能抑制 NO_x 生成，但单独并不具备还原 NO_x 的能力。

煤粉和水煤浆的再燃应用均实现了锅炉 NO_x 排放的有效控制。不过，煤粉再燃脱硝效果普遍低于水煤浆，且此现象随再燃区过量空气系数的增加愈发明显：在再燃区过量空气系数为 0.80 时，水煤浆脱硝率仅相对煤粉高 4%，至再燃区过量空气系数 0.95 时，水煤浆相对煤粉脱硝能力的提高达 48%。这一趋势的发生可能与高温下的 H₂O/O 作用有关：高过量空气系数预示烟气中氧浓度增加，以水煤浆作为再燃燃料时，水分蒸发将促进反应：



烟气 OH 离子数量的增多即使脱硝作用(式(3)和(4))得到增强:



而煤粉再燃时缺乏类似效应。水煤浆的再燃应用一定程度上实现了环境氧的利用,较煤粉严苛的还原性再燃条件而言是一种改进,在作用形式上优于煤粉。

图2揭示水煤浆再燃在再燃区过量空气系数为0.85~0.90时,呈现脱硝强势,此氛围恰好是已知的挥发分析出峰出现条件^[18],水分蒸发对燃料气态物质挥发的增强效应是上述特性得以保存的合理解释。实验中,煤粉没有清晰地表现出类似特性,其脱硝率随再燃区过量空气系数较多呈现单调变化规律。整体燃烧系统的复杂情况和挥发物在烟气比例中所占份额的不足,是煤粉挥发分脱硝效应受到掩盖的原因所在。可见,水煤浆的再燃应用更多地保持和促进了较易进行的气相间同相还原效应。

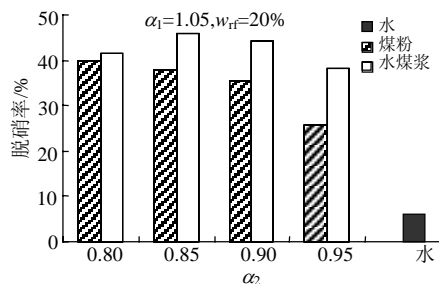


图2 煤粉、水煤浆和水的再燃脱硝特性

Fig. 2 Reburning NO_x reduction preference of coal, CWS and water

2.2 再燃比对水煤浆再燃脱硝率的影响

再燃比改变直接决定锅炉不同区域的热负荷、温度和燃烧产物状况,是影响再燃效果的关键参数。为此,本文设计4种再燃比,分别为10%、15%、20%和25%,选择主燃区过量空气系数为1.05,再燃区过量空气系数等于0.90和主燃区过量空气系数为1.00,再燃区过量空气系数等于1.00两种燃烧条件进行研究,实验结果如图3。

实验中,水煤浆再燃脱硝效果多数情况下与再燃比呈正比变化规律,但当再燃比达到一定值(如20%)后,增加趋势可能变缓: $\alpha_1=1.00, \alpha_2=1.00$ 条件下的实验结果对应这一变化;亦或有所下降:对 $\alpha_1=1.05, \alpha_2=0.90$ 的再燃工况而言,再燃比增加最终导致脱硝率降低。

再燃比增加不仅意味着再燃燃料量增多,而且

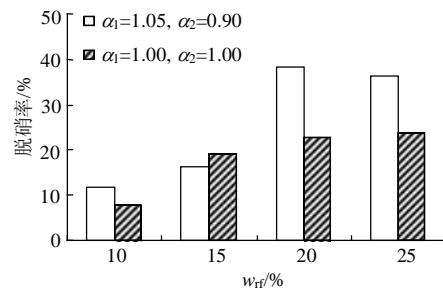


图3 再燃比对脱硝率的影响

Fig. 3 Effect of reburning fuel fraction on NO_x reduction 存在由于主燃区燃料减少引起的 NO_x 生成降低效应。测试证实:当再燃比为10%时,实验炉主燃区结束平面最高 NO_x 浓度约 $940 \text{ mL}\cdot\text{m}^{-3}$,在再燃比为25%时,该位置的 NO_x 浓度最高仅 $750 \text{ mL}\cdot\text{m}^{-3}$ 。显然,低再燃比工况下进入再燃区的污染物数量较多,脱硝负荷大,再燃燃料不足进一步恶化 NO_x 作用条件,脱硝率自然不高;提高再燃比后,一方面主燃区 NO_x 生成量减少,另一方面再燃燃料供给得到保证,参与还原的物质增多,系统脱硝效果随之改观;进一步增加再燃燃料量,主燃区 NO_x 生成量更少,再燃区脱硝负荷不大,少数再燃燃料即可完成对 NO_x 的有效还原,为此,再燃脱硝率的增强趋势不明显;进而,如果一定数量的未反应水煤浆半焦和挥发分N物质进入燃尽区,氧化形成 NO 不可避免,某些工况下系统脱硝率随再燃比过度增加呈现的下降现象恰源于此。过度增加再燃比的另一危害在于将使锅炉燃尽区燃烧负担加大,带来不必要的损失。

在水煤浆的再燃应用中,提高再燃比是实现 NO_x 排放控制的一种有效调节手段,不过此调节存在最佳值,就本实验而言,20%是较适合的选择。

2.3 主燃区过量空气系数对脱硝率的影响

对主燃区而言,过量空气系数主要影响其后的烟气组成、再燃区供风量和反应状况。有关主燃区过量空气系数对再燃具体影响作用的研究目前比较有限,部分研究者^[19]建议采用低于1.00的主燃区过量空气系数,但从保证一定燃尽率的角度考虑,这一建议的实施价值存在疑问;季俊杰^[20]等总结层燃炉再燃技术主燃区过量空气系数对脱硝率的影响时认为,主燃区过量空气系数和 NO_x 排放成正比关系,为此在保证燃烧的前提下,控制一次风风量越小越好。本文获得的主燃区过量空气系数对煤粉炉水煤浆再燃效果影响规律如图4所示,此实验再燃比选择为25%。

可见,随主燃区过量空气系数增加,实验炉脱硝率呈现增涨趋势,至 $\alpha_1=1.15$ 时达极值,为42%~

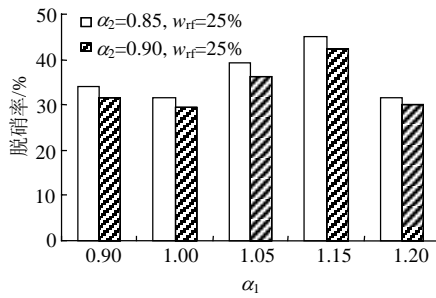


图 4 主燃区过量空气系数对脱硝率的影响

Fig. 4 Effect of excess air ratio on NO_x reduction in primary combustion zone

45%，但此后主燃区过量空气系数的进一步提高往往造成系统脱硝率回落。主燃区过量空气系数降低不利于再燃脱硝效果的提高，不过当过量空气系数降至当量系数以下，主燃区处于完全还原性气氛(如 $\alpha_1=0.90$)时，实验炉出现了脱硝率回升现象——获得了高于主燃区过量空气系数为 1.00 工况时的脱硝效果。可见，主燃区过量空气系数对系统脱硝效果的影响规律极其复杂。

分析认为，还原性主燃区过量空气系数的采用使实验炉燃烧状况更接近空气分级技术^[2]，由于缺氧，主燃区内煤粉挥发分生成的燃料型 NO_x 减少，炉内燃烧速度较慢，火焰温度不高，热力型 NO_x 也得到抑制，为此显示了一定的脱硝优势。不过，对于这样的燃烧方式，主燃区结渣和腐蚀相当严重，且燃料燃尽将集中于燃尽区，使该位置热负荷增加，可能危及系统安全。

对于采用氧化性主燃区的实验工况，控制主燃区过量空气系数较小固然可以使 NO_x 初始生成量减少，但没有得到完全挥发的剩余燃料 N 物质在经由再燃区后将面临富氧的燃尽区，有再次形成 NO 的可能，以至影响整体脱硝效率。增加主燃区过量空气系数，虽然初始 NO_x 生成量有所增加，但只要调节再燃区参数使还原反应处于最佳状态，即可使进入燃尽区的活性 N 物质减少，确保系统脱硝效果逐步好转。当然，过度提高主燃区氧量，所形成的 NO_x 超出再燃区处理能力，并且烟气与再燃燃料的有效混合问题也将显现，系统脱硝率随即下降。

实验揭示：神华水煤浆再燃脱硝效率与锅炉主燃区过量空气系数的关系呈阶段性变化，太高或太低的 α_1 均不利实现 NO_x 有效控制，1.15 是较合适的选择。

2.4 再燃区过量空气系数对脱硝率的影响

再燃脱硝作用主要发生于锅炉再燃区，为此该位置氛围是获得良好 NO_x 排放控制的关键。关于再

燃区过量空气系数对水煤浆再燃的影响规律在对比煤粉、水煤浆和水的脱硝能力时已有涉及，图 2 的内容和论述依然有效，此间仅对以上实验略做补充，工况选用的主燃区过量空气系数等于 0.90 和 1.00，再燃比 25%，结果如图 5。

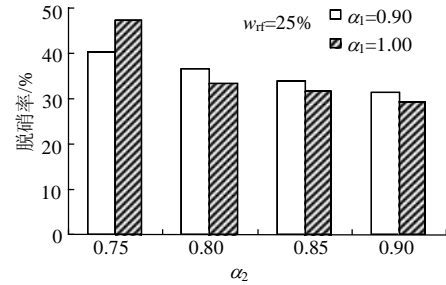
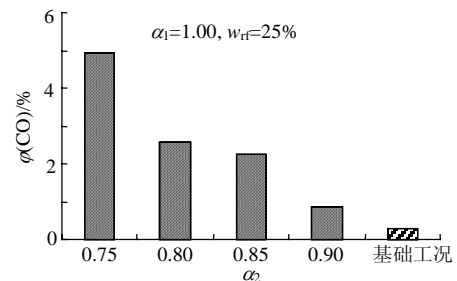


图 5 再燃区过量空气系数对实验炉脱硝率的影响

Fig. 5 Effect of excess air ratio on NO_x reduction in reburning zone

再燃是一种还原作用，其顺利进行依赖缺氧条件的维持。由于隔绝了 O₂ 干扰，煤焦、热解挥发分中的烃类和小分子 N 物质将更多地与来自主燃区的 NO_x 发生作用，将之还原为 N₂。为此，实验获得的系统脱硝率与再燃区过量空气系数关系近似线性反比，再燃区还原性氛围加强有利于水煤浆再燃效率提高。

除已知的再燃煤粉参与作用外，水煤浆再燃应用时还应顾及燃料不完全燃烧和水煤气发生现象。图 6 给出不同工况下炉内再燃区 CO 浓度分布状况，显然，还原性氛围的保持有助于再燃区 CO 浓度的增加。高浓度 CO 的存在一方面能维持必须的再燃区还原条件，另一方面将充当煤焦表面活化剂和再燃脱硝反应催化剂，甚至直接参与 NO_x 的还原^[21]。这一特性是水煤浆再燃利用的优势，其高于煤粉的脱硝能力应部分源于较高再燃区 CO 浓度的影响。

图 6 基础工况和再燃工况再燃区 CO 分布状况
Fig. 6 CO concentration in reburning zone under different condition

3 结论

(1) 水煤浆再燃脱硝效果优于煤粉，喷水脱硝技术不适用于锅炉系统。

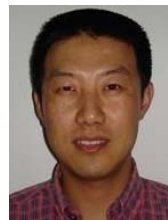
(2) 改变再燃比可调节水煤浆再燃脱硝效果, 但此调节存在最佳值。综合各种因素, 本文推荐神华水煤浆再燃比采用 20%。

(3) 还原性的主燃区虽然一定程度上提高了系统脱硝率, 但存在燃尽困难及因之引起的其他不利结果。氧化性主燃区的过量空气系数与再燃脱硝率呈现二次曲线关系, 神华水煤浆在 $\alpha_1 = 1.15$ 时可获得较好的 NO_x 控制效果。

(4) 水煤浆再燃脱硝率与再燃区过量空气系数成反比, 燃料不完全燃烧和水煤气效应形成的 CO 增强了水煤浆的再燃区脱硝能力。

参考文献

- [1] 诺曼·奇格. 能源、燃烧与环境[M]. 韩昭沧, 郭伯伟, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1991.
- [2] 毕玉森. 低氮氧化物燃烧技术的发展状况[J]. 热力发电, 2000, 29(2): 2-9.
Bi Yusen. Present status of low- NO_x combustion technology[J]. Thermal Power Generation, 2000, 29(2): 2-9(in Chinese).
- [3] Zarnitz R, Pisupati S V. Evaluation of the use of coal volatiles as reburning fuel for NO_x reduction[J]. Fuel, 2007, 86(4): 554-559.
- [4] 苟湘, 周俊虎, 周志军, 等. 烟煤煤粉及热解产物对 NO 的还原特性实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(23): 12-17.
Gou Xiang, Zhou Junhu, Zhou Zhijun, et al. Experimental research on characteristics of NO reduction using pulverized coal and pyrolysis production of bituminous coal[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(23): 12-17(in Chinese).
- [5] Hardy T, Kordylewski W. Effectiveness of Polish lignites as reburn fuels[J]. Fuel, 2002, 81(6): 837-840.
- [6] Nimmo W, Patsias A A, Hampartsoumian P E, et al. Calcium magnesium acetate and urea advanced reburning for NO control with simultaneous SO_2 reduction[J]. Fuel, 2004, 83(9): 1143-1150.
- [7] Lazaroiu G H, Zissulescu E, Sandu M. Electron beam non-thermal plasma hybrid system for reduction of NO_x and SO_x emissions from power plants[J]. Energy, 2007, 32(12): 2412-2419.
- [8] Maly P M, Zamansky V M, Ho L, et al. Alternative fuel reburning[J]. Fuel, 1999, 78(3): 327-334.
- [9] 李戈. 超细煤粉再燃机理及细粉分离技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
Li Ge. Study on super-pulverized coal reburning mechanism and separating technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [10] 沈伯雄, 姚强. 天然气再燃脱硝的原理和技术[J]. 热能动力工程, 2002, 17(97): 7-9.
Shen Boxing, Yao Qiang. Basic principles and technology of denitration through the reburning of natural gas[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2002, 17(97): 7-9(in Chinese).
- [11] 徐璋, 邓涛, 李戈, 等. 超细煤粉再燃降低 NO_x 排放的试验研究[J]. 热力发电, 2004, 33(2): 34-37.
Xu Zhang, Deng Tao, Li Ge, et al. Test and study on NO_x reduction with micronized coal dust reburning[J]. Thermal Power Generation, 2004, 33(2): 34-37(in Chinese).
- [12] Ashworth R A, Morrison D K, Payne R, et al. Coal water slurry reburning-low cost NO_x compliance system for cyclone-fired boilers [C]. 21st International Technical Conference On Coal Utilization & Fuel Systems, Clearwater, FL, USA, 1996.
- [13] Ashworth R A, Maly P M, Carson W R. Results of CWS reburn tests on a 10×10^6 Btu/hr tower furnace and its impact on CWS reburn economics[C]. 22nd International Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, Clearwater, FL, USA, 1997.
- [14] 董若凌, 周俊虎, 孟德润, 等. 再燃区水煤浆脱硝反应特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 56-59.
Dong Ruoling, Zhou Junhu, Meng Derun, et al. Experimental investigation on NO_x reduction performance of coal water slurry in the reburning zone[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(4): 56-59(in Chinese).
- [15] 傅维镛. 煤燃烧理论及其宏观通用规律[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [16] 吴双应, 李友荣, 卢啸风, 等. 再燃烧技术原来及其影响因素分析[J]. 冶金能源, 2002, 21(2): 24-29.
Wu Shuangying, Li Yourong, Lu Xiaofeng, et al. Analysis on the principle of reburning technology and its influence factors[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2002, 21(2): 24-27(in Chinese).
- [17] 欧文·格拉斯曼. 燃烧学[M]. 赵惠富, 张宝诚, 译. 北京: 科学出版社, 1983.
- [18] Schäfer S, Bonn B. Hydrolysis of HCN as an important step in nitrogen oxide formation in fluidized combustion. Part 1. Homogeneous reactions[J]. Fuel, 2000, 79(10): 1239-1246.
- [19] 徐华东, 罗永浩, 王恩禄, 等. 再燃烧技术及其在我国的应用前景[J]. 动力工程, 2001, 21(4): 1320-1323.
Xu Huadong, Luo Yonghao, Wang Enlu, et al. Reburning technology and its application prospects in China[J]. Power Engineering, 2001, 21(4): 1320-1323(in Chinese).
- [20] 季俊杰, 罗永浩, 陆方. 若干因素对层燃炉气体再燃降低 NO_x 的影响[J]. 工业锅炉, 2002, (5): 7-10.
Ji Junjie, Luo Yonghao, Lu Fang. The influence of some factors on NO_x reduction with gas reburning in stoker[J]. Industrial Boiler, 2002, (5): 7-10(in Chinese).
- [21] Aarna I, Suuberg E M. A review of the kinetics of the nitric oxide-carbon reaction[J]. Fuel, 1997, 76(6): 475-491.



董若凌

收稿日期: 2007-10-20。

作者简介:

董若凌(1974—), 男, 博士, 讲师, 从事清洁生产方面的研究, dongruoling@126.com;

周俊虎(1962—), 男, 博士, 教授, 从事环境及能源清洁利用方面的研究。

(责任编辑 王庆霞)