

烟气再循环在煤粉工业锅炉上的数值模拟研究

李高亮^{1,2,3}, 王乃继^{1,2,3}, 肖翠微^{1,2,3}, 刘振宇^{1,2,3}, 刘羽^{1,2,3}

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 节能工程技术研究分院, 北京 100013; 2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013; 3. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室, 北京 100013)

摘要:为考察烟气再循环对工业煤粉锅炉 NO_x 排放及炉内燃烧过程的影响, 对 30 t/h 高效煤粉双锅筒室燃工业锅炉进行研究。采用数值模拟和试验研究, 考察烟气再循环的低氮效果, 分析烟气循环倍率对 NO_x 排放浓度的影响, 并研究循环倍率对炉膛温度、排烟温度等炉况的影响规律。结果表明: 循环烟气通入炉内, 火焰尺寸增大, 温度更加均匀, 减少了 NO_x 的排放浓度; 同时随着循环烟气的加大, 排烟温度逐渐升高, 蒸汽流量逐渐降低; 当烟气循环倍率为 20% 时, NO_x 减排 17%。

关键词:烟气再循环; 数值模拟; 过量空气系数; 循环倍率

中图分类号: TK229.2 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2015)02-0125-04

Numerical simulation and investigation on flue gas recycle technology in industrial pulverized coal boiler

LI Gaoliang^{1,2,3}, WANG Naiji^{1,2,3}, XIAO Cuiwei^{1,2,3}, LIU Zhenyu^{1,2,3}, LIU Yu^{1,2,3}

(1. Energy Saving Engineering Technology Branch, Coal Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of High Efficient Mining and Clean Utilization of Coal Resources (China Coal Research Institute), Beijing 100013, China; 3. National Energy Technology and Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control (China Coal Research Institute), Beijing 100013, China)

Abstract: In order to investigate the impact of flue gas recycle on NO_x emissions and combustion process in industrial pulverized coal boiler, the high efficiency industrial coal boiler of 30 t/h double drum chamber combustion was researched. Through numerical simulation and experimental study, the effects of flue gas recycle process and circulating ratio on NO_x emissions, furnace temperature and exhaust gas temperature was investigated. The results showed that the circulating flue gas increased the flame size, uniformized the temperature of boiler and decreased NO_x emissions. The increased circulating flue gas decreased the steam flow and improved exhaust gas temperature gradually. When the circulating ratio was 20%, the NO_x emissions decreased by 17%.

Key words: flue gas recycle; numerical simulation; excess air coefficient; circulating ratio

0 引 言

NO_x 是造成酸性降水、温室效应以及臭氧层破坏等环境问题的主要物质之一, 随着环境污染日益严重, 对其治理正逐渐引起重视。煤炭占我国能源利用率的 70%, 锅炉是燃煤的主要设备^[1-3]。电站锅炉规模大, 可采用烟气脱硝技术。而工业锅炉规模小, 适宜采用成本较低的低氮燃烧技术^[4]。低氮燃烧技术主要通过抑制 NO_x 的生成和还原已生成

的 NO_x 两种方法来实现^[5]。抑制法主要采用控制温度、氧量等反应条件, 降低 NO_x 的生成, 该方法主要包括低氧燃烧、烟气再循环及浓淡分离法^[6]; 还原法是通过分级的方法, 在主燃区前端或后段形成还原性气氛区域, 还原已生成的 NO_x, 该方法主要包括空气分级燃烧法和燃料分级燃烧法^[7-9]。烟气再循环也是目前使用较多的低氮燃烧技术^[10], 是在锅炉的空气预热器前抽取一部分烟气返回炉内, 利用惰性气体的吸热和氧浓度的减少, 使火焰温度降低,

收稿日期: 2015-01-12; 责任编辑: 孙淑君 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2015.02.029

基金项目: 煤炭科学研究总院技术创新基金资助项目(2014CX03)

作者简介: 李高亮(1988—), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 研究方向为煤炭洁净燃烧。E-mail: 997730939@qq.com

引用格式: 李高亮, 王乃继, 肖翠微, 等. 烟气再循环在煤粉工业锅炉上的数值模拟研究[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(2): 125-128, 133.

LI Gaoliang, WANG Naiji, XIAO Cuiwei, et al. Numerical simulation and investigation on flue gas recycle technology in industrial pulverized coal boiler[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(2): 125-128, 133.

抑制燃烧速度,减少热力型 NO_x [11-12]。烟气再循环只能减少热力型 NO_x , 抽取的烟气可以直接送入炉内,也可以混合一次风或二次风送入炉内。当烟气再循环率为 15% ~ 20% 时,煤粉炉的 NO_x 排放浓度可降低 25% 左右 [13]。随着计算流体力学、燃烧学、传热学以及计算机技术的发展,计算流体力学软件逐渐成为研究炉内燃烧的有力工具 [14]。通过数值模拟炉内 NO_x 生成,可为研究 NO_x 生成机理及影响因素,控制燃烧过程中 NO_x 生成,发展低 NO_x 燃烧技术提供一定的指导 [15]。有关烟气再循环低氮技术研究很多,但对煤粉工业锅炉的研究不足。笔者针对 1 台 30 t/h 高效煤粉工业锅炉进行数值模拟和试验研究,考察烟气再循环对 NO_x 排放浓度的影响,数据结论可为实际的工业设计和应用提供参考。

1 研究对象

1.1 试验装置

研究装置为位于神华集团某矿区的高效煤粉锅

炉房内 3 号炉,此炉是煤炭科学技术研究院有限公司开发的额定负荷 30 t/h,采用双锥燃烧器、固态排渣的工业煤粉卧式锅炉。燃烧配风系统自主设计,分为一次风、二次风、三次风和回流烟气。一次风用来输送煤粉,所占总风量比例较小约为 5%;二次风从燃烧器前端通入,经旋流叶片旋流进入预燃室,与一次风粉混合后在预燃室内组织燃烧,形成一级燃烧区,经预燃室后锥进入炉膛;三次风经炉膛前端的三次风口进入炉膛与未完全燃烧的煤粉组织燃烧,形成二级燃烧区。回流烟气由回流风机抽取经回流管道送至三次风管道,与三次风混合形成混合烟气后进入炉膛组织燃烧。

1.2 煤质分析

煤种采用神华煤,煤质分析见表 1,煤粉细度 $R_{90} = 20.8\%$ 。

理论空气量计算公式:

$$V^{\circ} = 0.0889(C_{\text{ar}} + 0.375S_{\text{ar}}) + 0.265H_{\text{ar}} - 0.0333O_{\text{ar}} \quad (1)$$

表 1 试验用煤种工业分析和元素分析

工业分析/%				元素分析/%					$Q_{\text{gr,ad}}/$
M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{d}	$w(C_{\text{ad}})$	$w(H_{\text{ad}})$	$w(N_{\text{ad}})$	$w(O_{\text{ad}})$	$w(S_{\text{t,ad}})$	$(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
4.57	6.27	32.83	59.03	72.05	4.40	0.88	11.47	0.36	27.80

理论烟气体积计算公式:

$$V_y^{\circ} = 0.01866(C_{\text{ar}} + 0.375S_{\text{ar}}) + 0.111H_{\text{ar}} + 0.0124M_{\text{ar}} + 0.0161V^{\circ} + 1.24G_w + 0.008N_{\text{ar}} + 0.79V^{\circ} \quad (2)$$

烟气体积计算公式:

$$V_y = V_y^{\circ} + 1.0161(a - 1)V^{\circ} \quad (3)$$

式中: V_y 为实际烟气体积, m^3/kg ; G_w 为采用蒸汽雾化和蒸汽二次风时的蒸汽耗量,一般此项为 0; a 为过量空气系数。

将以上数据代入公式(1)中得 $V^{\circ} = 7.20 \text{ m}^3/\text{kg}$; 25 °C 折算 $V = 7.86 \text{ m}^3/\text{kg}$;

将以上数据代入公式(2)中得 $V_y^{\circ} = 7.70 \text{ m}^3/\text{kg}$; 130 °C 折算 $V_y = 11.37 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。

1.3 试验方法及仪器

测量仪器: KM940 烟气分析仪、testo 350 烟气分析仪、皮托管风速仪。

测点选取 3 个,分别测母管风速、三次风速和回流烟气。风量检测采用皮托管和 testo 差压仪测量,该仪器测得压差转化为风速,再由管径计算得出实

际风量。其中一次风管直径为 150 mm,母管直径为 800 mm,三次风管直径为 350 mm,母管风量减去三次风量为二次风量。测点 3 选取回流风机后回流风管道,测得回流风速求得回流风量。

烟气成分检测:测点 1 选取在除尘器与引风机连接管道处,管道中打孔将探针插入抽取烟气测得数据。试验所用仪器为 KM940 型便携式烟气分析仪和 testo350 烟气分析仪,进行对比校核,以保证试验数据的可靠性。测点 2 选取引风机与烟筒连接管道处,管道中打孔将探针插入抽取烟气测得数据。

炉膛温度检测:温度测点选取在炉膛尾部。检测所用热电偶为 130 型热电偶/K 型/外管材料 Cr25Ni20,长度 1 ~ 1.7 m。

1.4 试验方案

1) 烟气直接循环回炉膛。固定供料量,二次风阀,关闭三次风阀,调节回流风阀和回流风机频率,控制回流烟气体积,考察烟气循环倍率对 NO_x 排放的影响规律,以及对锅炉炉膛温度、排烟温度和蒸汽流量的影响规律。

2) 烟气与三次风混合后进入炉膛。固定供料量,二次风阀,调节三次风阀、回流风阀和回流风机频率,控制混合回流烟气流,考察烟气循环倍率对 NO_x 排放的影响规律,分析其对锅炉炉膛温度、排烟温度和蒸汽流量的影响。

2 数值模拟

利用 DM 软件建立燃烧器及炉膛模型,用 ICEM 对模型进行网格划分,利用 Fluent 模拟软件对其进行数值模拟。采用非预混燃烧模型来模拟煤粉燃烧过程中化学反应以及各组分的输运,模型主要通过求解第 i 个组分的混合分数输运方程,然后根据预测的混合分数分布来推导出每个组分的浓度;采用混合分数概率密度函数来模拟气相湍流燃烧;采用 P1 辐射模型,对煤粉燃烧过程中火焰辐射传热、气体与颗粒之间的辐射换热,壁面由于辐射而引起加热/冷却,以及流体相由辐射引起的热量源进行计算;采用半隐式格式压力关联方程算法 (SIMPLE) 实现压力与速度的耦合计算;采用后处理方法预测炉内 NO_x 的生成。

保证总的过量空气系数不变,分别模拟二、三次风为氧浓度 21% 空气和 16% 烟气时燃烧状态及 NO_x 浓度的变化。

2.1 炉膛温度分布

炉膛温度变化如图 1 所示。观察图 1a 无烟气循环,此时最高温度达到 1753 °C,炉尾温度 725 °C,图 1b 将烟气返回炉内后,火焰尺寸明显增大,最高温度下降至 1605 °C,炉尾温度 800 °C,温度场更加均匀,有利于 NO_x 的减少。采用烟气循环后,为保证总过量空气系数不变,需增大氧含量较低的烟气体积,使炉内平均氧浓度明显下降,经计算炉膛出口氧浓度由 12% 下降至 10%。

2.2 NO_x 浓度分布

炉膛温度变化如图 2 所示。

将烟气循环回炉内后,整体温度的下降和氧浓度的减少,使得热力型 NO_x 以及燃料型 NO_x 生成量减少, NO_x 排放浓度明显降低,炉膛出口 NO_x 质量浓度由 425 mg/m^3 降至 318 mg/m^3 ,减少 23%。

3 试验结果与分析

3.1 烟气再循环试验

1) NO_x 随循环倍率变化的关系。 NO_x 随烟气循环倍率的变化如图 3 所示。

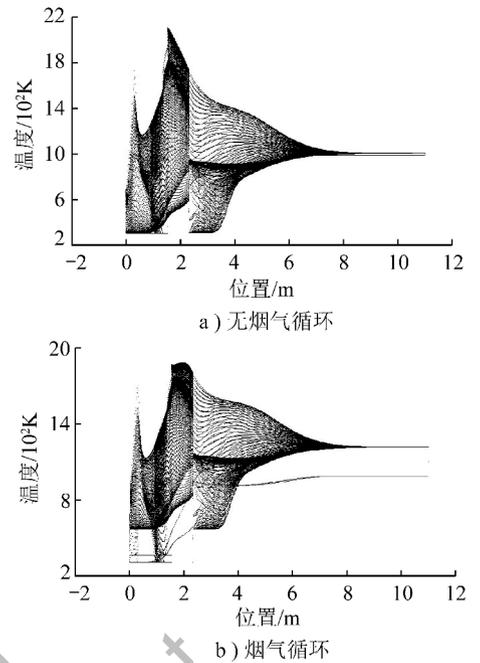


图 1 炉膛温度变化

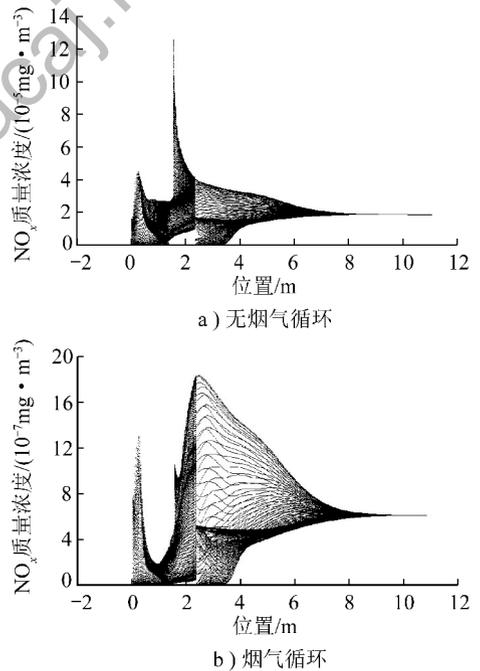


图 2 NO_x 浓度分布

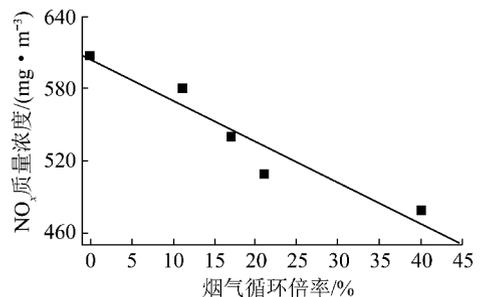


图 3 NO_x 随烟气循环倍率的变化

随着烟气循环倍率的增加,由于氧浓度的减少和炉内温度水平的降低,抑制了热力型 NO_x 的生成,同时也降低了燃料型 NO_x 的产生,与数值模拟结果较为吻合。循环倍率增大到 20%, NO_x 质量浓

度由 607 mg/m^3 减小到 505 mg/m^3 , 减排比例增大, NO_x 减少 17%。

2) 循环倍率对锅炉运行的影响。运行工况随烟气循环倍率的变化如图 4 所示。

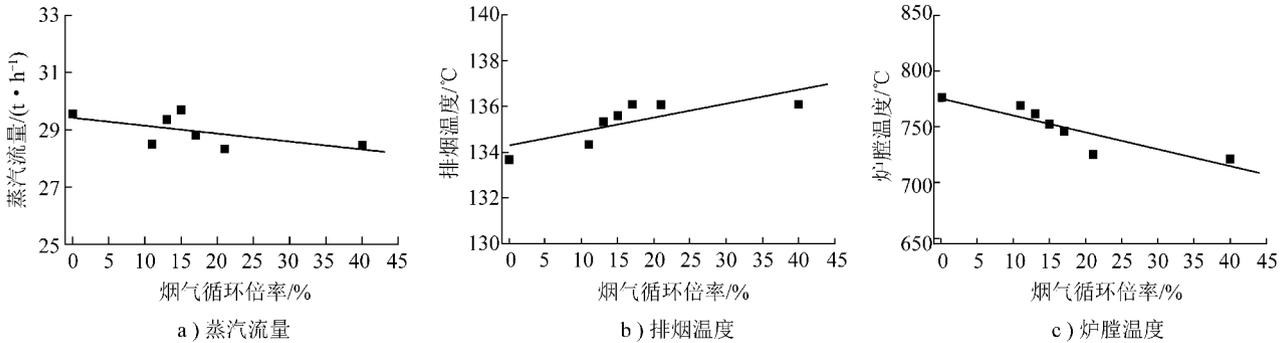


图 4 运行工况随烟气循环倍率的变化

由于循环烟气的增加,进入炉膛的惰性气体逐渐增多,带走的热量增多,炉膛内的温度水平逐渐降低,炉膛出口排烟温度逐渐增大,锅炉的输出热量减少,蒸汽流量降低,与数值模拟结果较为吻合。循环倍率为 20% 时,炉膛温度降低 $50 \text{ }^\circ\text{C}$, 排烟温度增大 $2.4 \text{ }^\circ\text{C}$, 再增加烟气循环量,排烟温度增加不明显,蒸汽流量降低 1.2 t/h 。循环倍率大于 40%, 炉况波动较大。

3.2 混合烟气试验

混合烟气 O_2 与 NO_x 关系如图 5 所示。

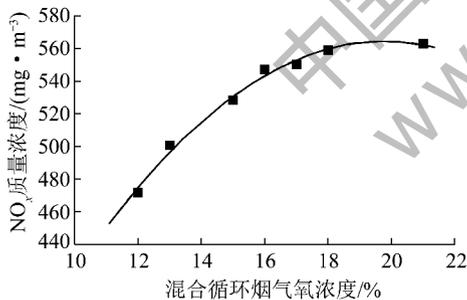


图 5 混合烟气 O_2 与 NO_x 关系

在混合烟气循环试验中,烟气与部分空气混合后进入炉膛组织燃烧。同样由于烟气吸热和氧浓度的减少,降低火焰温度,减少 NO_x 的生成。随着循环倍率的增加, NO_x 排放逐渐减小,减排比例增大,炉膛温度减小;排烟温度变化小,蒸汽流量略微增大。与纯烟气循环比 NO_x 减排效果小,炉况波动大。相同引风机频率下,随着循环倍率的增加,混合烟气氧浓度为 13%, NO_x 由 563 mg/m^3 减小到 471 mg/m^3 , NO_x 减少 16%, 炉温降低 $80 \text{ }^\circ\text{C}$; 氧浓度大于 16% 后, NO_x 上升趋势减缓。

4 结 论

1) 数值模拟表明:采用烟气循环后,炉内火焰尺寸明显增大,最高温度下降,温度场更加均匀,整体温度的下降减少了热力型 NO_x 以及燃料型 NO_x 的生成, NO_x 主要生成区域延后, NO_x 也明显减少。

2) 烟气由炉膛前端直接进入炉膛组织燃烧,降低了火焰温度,拉长火焰使温度更加均匀,减少 NO_x 的生成,与模拟结果基本相符。随着循环倍率的增加, NO_x 减排比例增大,炉膛温度减小,排烟温度小幅增大,蒸汽流量略微减小。循环倍率达 20% 时, NO_x 减少 17%, 炉况较为稳定,继续增大炉内燃烧出现大幅度波动。

3) 增大循环烟气的氧含量,减排效果减小,当氧浓度大于 16% 时, NO_x 上升趋势减缓。

参考文献:

- [1] 马广大. 大气污染控制工程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 3-4.
- [2] 胡永峰, 白永峰. SCR 法烟气脱硝技术在火电厂的应用[J]. 节能技术, 2007, 142(2): 152-156.
- [3] 徐智勇. 火电厂和工业燃烧装置的烟气净化[J]. 热力发电, 1980, 9(10): 48-59.
- [4] 崔豫泓, 王乃继, 周建明, 等. 电站锅炉分级燃烧技术在工业煤粉锅炉上应用的理论探讨[J]. 洁净煤技术, 2008, 14(5): 48-50.
- [5] 李凤瑞, 陈耀如, 池作和, 等. 一种既能保证煤粉燃烧器稳燃又能缓解炉膛结渣的方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11): 84-86.

(下转第 133 页)

究,但基本停留在实验室阶段,其放大困难,潜热回收难度高等问题阻碍了膜蒸馏的工业应用与推广。

3 结语及展望

脱硫废水的常规处理方法虽然比较成熟,工艺流程、建设成本以及运行费用都比较低,但无法做到废水零排放,随着对环保要求的不断提高,脱硫废水零排放技术的应用势在必行,而合理选择适宜的脱硫废水零排放工艺,对于电厂的脱硫废水处理及零排放至关重要。综上所述,在来水适当软化后,采用立式降膜蒸发器+强制循环闪蒸罐结晶工艺对脱硫废水进行零排放处理,可使燃煤电厂真正实现废水零排放,杜绝了污水排放。对建设更加清洁、环保的燃煤电厂提供了技术支撑,工程应用前景广阔。

基于上述工艺,今后应深入开发结晶盐提纯技术,现今蒸发后的结晶盐大多是 NaCl、Na₂SO₄ 等成分组成的杂盐,有些甚至被归类为危险废物,处置费用高。若在结晶过程中引入结晶盐高纯分离技术则会提取出高纯的 NaCl(可作为工业盐产生经济效益)。如此既保护了水资源,产生了非常高的环境效益,又会显著提升工艺的经济效益。

参考文献:

[1] 陈泽峰,冯铁玲. 电厂脱硫废水处理[J]. 工业水处理, 2006, 26(3): 86-88.

[2] 徐庆国. 火电厂脱硫废水零排放[J]. 科技资讯, 2009, 35(7): 71.

[3] Higgins, Thomas E, Sandy T, et al. Flue gas desulfurization wastewater treatment primer[J]. Power, 2009, 153(3): 34-35.

[4] 刘晓,周菊花. 燃煤电厂石灰石-石膏湿法烟气脱硫废水处理探讨[J]. 湖北电力, 2008, 32(6): 12-15.

[5] 徐建刚. 石灰石-石膏湿法烟气脱硫废水处理[J]. 电力科技与环保, 2010, 26(4): 33-34.

[6] 王佩章. 火力发电厂全厂废水零排放[J]. 电力环境保护, 2003, 19(4): 25-29.

[7] Shaw, William A. Fundamentals of zero liquid discharge system design[J]. Power, 2011, 155(10): 56-58.

[8] DL/T 5196—2004, 火力发电厂烟气脱硫设计技术规程[S].

[9] DongXuefeng, Shen Guifen, Zhou Xiaoxiang, et al. The problems and suggestions of the desulfurization wastewater treatment system during the operation[J]. Advances in Environmental Engineering, 2012, 599: 514-517.

[10] 沈荣澍,代厚兵,杨韦. 脱硫废水常规处理及零排放技术综述[J]. 锅炉制造, 2013, 15(2): 41-45.

[11] 邢铁辉,熊斌,杨宏斌. 浅谈燃煤电厂脱硫废水零排放处理工艺[J]. 电站系统工程, 2012, 28(6): 73-75.

[12] Macor F, Hofmann G, Paroli F. ZLD evaporation-crystallization plant in the power industry[C]//International workshop on industrial crystallization. South Africa: [s. n], 2007: 95-97.

[13] Sagharichih M, Jafarian A, Asgari M, et al. Simulation of a forward feed multiple effect desalination plant with vertical tube evaporators[J]. Chemical Engineering and Processing, 2014, 75(10): 114-118.

[14] 王治安,林卫,李冰. 脱硫废水零排放处理工艺[J]. 电力科技与环保, 2012, 28(6): 37-39.

[15] 柳杨,刘德志. 脱硫废水深度处理方法[J]. 电站系统工程, 2007, 23(5): 49-51.

[16] Sobhani R, Abahusayn M, Gabelich C J, et al. Energy footprint analysis of brackish groundwater desalination with zero liquid discharge in inland areas of the Arabian Peninsula[J]. Desalination, 2012, 291(10): 106-110.

[17] Seigworth A, Ludlum R, Reahl E. Integrating membrane process with evaporator to achieve conomical zero liquid discharge at the doswellcombined-cyclefacility[J]. Desalination, 1995, 102(1/3): 105-108.

[18] 李喜,李俊烟. 烟气脱硫技术研究进展[J]. 化学工业与工程, 2006, 10(4): 351-354.

[19] 高原,陈智胜. 新型脱硫废水零排放的处理方案[J]. 华电技术, 2008, 30(4): 78-80.

(上接第128页)

[6] 秦裕琨,孙绍增,吴少华. 浓缩煤粉燃烧技术的发展[J]. 燃烧科学与技术, 1995, 1(1): 43-48.

[7] 高明. 低氮燃烧及烟气脱硝国内外研究现状[J]. 广州化工, 2012, 40(17): 18-19.

[8] 杨明,谷红伟,李晓伟,等. 神华煤锅炉低氮燃烧特性研究[J]. 洁净煤技术, 2014, 25(4): 12-16.

[9] 周继军,彭伟功. 氮氧化物的生成机理及控制技术[J]. 内江科技, 2006, 27(6): 127-128.

[10] 胡满银,乔欢,杜欣,等. 烟气再循环对炉内氮氧化物生成影响的数值模拟[J]. 华北电力大学学报:自然科学版, 2007, 34(6): 77-82.

[11] 于岩,阎维平,刘彦丰,等. 空气分离/烟气再循环技术中 NO_x 排放特性及机理分析[J]. 热力发电, 2003, 32(10): 47-49.

[12] 马瑞存,姚旭坤,张栋. 锅炉烟气再循环调整炉膛燃烧温度的探讨[J]. 电力建设, 2003, 24(1): 10-12.

[13] 李文蛟,李琳琅,邱建荣,等. 再燃与烟气循环技术协同作用下 NO_x 的降解机理[J]. 锅炉制造, 2003, 25(1): 17-19.

[14] 殷捷. 分级燃烧控制大型燃煤锅炉 NO_x 生成的试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2007: 30-32.

[15] 章勤. 燃煤锅炉低 NO_x 燃烧实验及模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 31-42.