

天然气再燃降低 NO_x 排放的热态工业试验研究

陈宝明, 张忠孝, 毕德贵, 李明强, 田丽勤, 顾凯颖
(上海理工大学 动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 本文根据对某电厂采用天然气再燃技术进行低氮改造220t/h煤粉炉的热态工业试验, 研究炉膛氧量、再燃量、停留时间、配风方式等运行因素对再燃还原NO_x效果的影响, 并与前人的研究成果进行对比。通过分析得出以下结论: 排放浓度都随着氧量的增加而增大, 随着锅炉负荷降低而减小, 最佳氧量为5% (表盘氧量为3.5%左右); 随着再燃量的增加NO_x浓度下降, 最佳再燃量保持在15%; 最佳停留时间为0.67s, 过长的停留时间对再燃还原效果影响不大; 主燃区最佳配风方式为正宝塔式; 最佳运行工况下NO_x排放浓度平均值为137 mg/Nm。

关键词: 天然气, 再燃, 低NO_x排放, 热态试验

中图分类号: TK 229

文献标志码: A

Study on Hot Industrial Test in Reducing NO_x

Emissions with Natural Gas Reburning

Baoming Chen, Zhongxiao Zhang, Degui Bi

(University of Shanghai for Science and Technology, School of Energy and Power
Engineering, Shanghai 200093, China)

Abstract: The target of this research was to observe the influence of several operation factors such as oxygen 、Reburning fuel flow 、on NO_x reduction 、residence time and air distribution mode on NO_x reduction effect, which was based on the hot industrial test of a 220t/h PC boiler that was renovated with gas reburning technology. The research achievements of predecessors was also Compared .The results indicated that : NO_x emission concentration increased with the increase of oxygen content and decreased With the decreases of boiler load, optimal oxygen content is 5%(Dial oxygen content is approximately 3.5%). NO_x concentration decreased With the increase of reburning fule, Best reburning amount held at 15%, Best residence time was 0.67 s, too long residence time was not important for reduction effect; The best way of air distribution for primary zone was pyramid. NO_x emission concentration average of the best operating condition was 137mg/Nm³.

Key: natural gas; reburning; low NO_x emission ; hot test.

引言

电站煤粉锅炉排放的氮氧化物 NO_x 是大气的主要污染物, 大约占 67%^[1], 预计到 2015 年火电将达 10 亿千瓦, NO_x 的排放量也将从 2007 年的 840 万吨增加到 1310 万吨^[2]。降低 NO_x 排放是当前国家环保工作的重点之一, 国家新标准要求新建机组从 2012 年 1 月 1 日开始、

现有机组从 2014 年 7 月 1 日开始执行 $100\text{mg}/\text{Nm}^3$ 的氮氧化物污染物排放限值^[3]，这对电站锅炉低氮燃烧技术提出了新的挑战。

气体再燃是最有效的低 NO_x 燃烧技术之一，一般可降低 NO_x 的排放量达50% 以上^[4]，目前工业上已经得到广泛应用。天然气被认为是最理想的再燃燃料，其他如高炉煤气、煤气化气等也作为再燃燃料，但是目前都只处于研究阶段^[5]。国内外学者对再燃还原 NO_x 的影响因素做了很多研究^[6-7]。Hennepin电厂1号机组71 MW切向燃烧机组采用18.5%的天然气再燃，平均降低 NO_x 67%^[8]。Vlad Zarnescu等^[9]提出在再燃区内 NO 的还原主要发生在再燃燃料射流子区域内，再燃气流的初动量提高， NO 还原率也随之提高。Nazeer等^[10]用天然气作为再燃燃料，表明增加再燃区的停留时间对降低 NO_x 是有利的，但是当停留时间超过700ms时就变得不再重要。Burch和Chen等^[11]认为高挥发分煤种由于挥发分含量和挥发分析出后焦炭表面积的增长，促进了对 NO 的还原。上海交通大学的张忠孝教授等^[12]研究发现再燃区最佳停留时间为0.6s，再燃区过量空气系数最佳值为0.8-0.9，试验室的脱氮率为70%~80%， NO_x 的排放浓度可在 $200\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下。宝钢电厂采用高炉煤气作为再燃气体在350MW机组锅炉上进行低氮改造^[13]，热态测试最低排放达到 $157\text{ mg}/\text{Nm}^3$ 。

本文在采用天然气再燃技术进行改造的某电厂220t/h煤粉炉上进行热态调试试验，研究炉膛氧量、再燃燃料量及再燃区停留时间等因素对 NO_x 还原效果的影响，深入分析天然气再燃降低 NO_x 的机理及规律，为气体再燃技术在工业上的应用和推广提供可靠的参考与指导。

1 试验内容

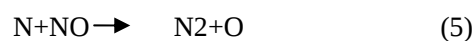
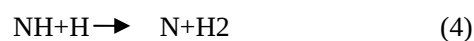
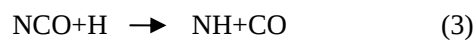
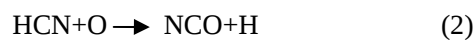
1.1 再燃机理

再燃还原 NO_x 反应一般分为异相反应和均相反应。异相反应主要是在焦炭表面和内孔与焦炭进行的反应，动力学分析主要集中在吸附、解吸和表面反应上。仅在特定的固体燃料和反应条件下，异相还原反应发挥着主要作用。

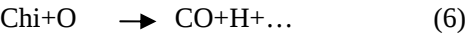
在实际再燃过程中，同相反应起着决定性作用。均相再燃反应典型的反应机理有 Miller and Bowman 机理、GRI 机理、Glarborg 机理和 Dagaut 机理，Leeds 机理、Alexander 机理、Scheme 机理等，上述机理包含几十种组分和上百个基元反应。综合这些机理对 NO_x 还原有着共同的认识。即在富燃料的条件下， HCN 的形成与 CH 的浓度有很大关系，其主要途径为：



反应产生的 HCN 通过下列反应最终还原成 N_2 ：



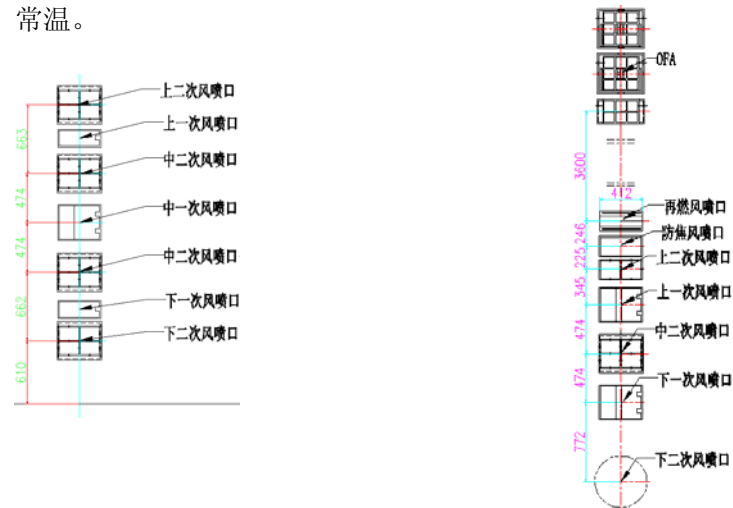
但是，在贫燃料条件下，CHi会与氧等物质通过如下反应形成CO：



反应(1)和(6)竞争消耗 CH，在富氧条件下，反应(6)占优势，从而抑制反应(1)的发生，不利于 NOx 的还原，一般再燃区维持过量空气系数为 0.7-0.9 左右，使 CHi 与 NO 充分反应，而尽量减少 CHi 与氧的反应。

1.2 改造项目

改造前燃烧器布置为 6 层，一次风和二次风各分为三层，改造后燃烧器布置为 7 层，其布置图如图 1 所示。一次风布置改为两层，增加再燃喷口和燃尽风喷口（OFA），燃尽风停留时间设计为 0.67s（即确定再燃喷口和 OFA 喷口的距离 3600mm），再燃喷口布置在主燃区上部标高为 13660mm 处，四角各 1 只，每个炉墙中心处各 1 只，共 8 只，其目的是保证再燃燃料对上升烟气的覆盖度^[14]，达到良好的还原效果。设计再燃燃料热量比例为 20%，四角处和侧墙出流量分别为 814Nm³/h、271Nm³/h，流速分别为 100m/s、流速为 40m/s，压力均为 80Kpa，常温。



(a) 改造前燃烧器布置图 (b) 改造后燃烧器布置图

图 1 某电厂 220 t/h 锅炉改造前后燃烧器布置图

Fig.1 The burner arrangement of a 220 t/h PC boiler transformed in one power plant

该电厂锅炉为单炉膛、自然循环、集中下降管、倒 U 型布置的固态排渣煤粉炉，额定蒸发量为 220t/h，过热器出口温度为 540℃，出口压力为 9.81MPa，给水温度为 215℃。燃烧器四角切向布置，假想切圆直径为 700mm，中储式热风送粉，入炉煤为烟煤，再燃燃料为矿井伴生气（天然气），各燃料特性如表 1 所示。

表 1 某电厂 220 t/h 锅炉入炉煤及再燃气燃料特性分析

Tab.1 Fuel characteristics of coal as fired and reburning gas in a 220t/h PC boiler

入 炉	项目	单位	数值	再 燃	项目	单位	数值
	Mt	%	7.3		CH ₄	63.67	%
	Vdaf	%	37.37		C ₂ H ₆	1.24	%
	Aar	%	33.86		C ₃ H ₈	0.04	%

煤 煤 质 分 析	F _{Car}	%	36.85	气 体 成 分 分 析	N ₂	4.18	%
	Car	%	48.96		CO ₂	30.87	%
	H _{ar}	%	3.23		Q _{net.ar}	23.609	MJ/Nm ³
	N _{ar}	%	0.65				
	St, _{ar}	%	0.32				
	O _{ar}	%	5.68				
	Q _{net.ar}	MJ/Kg	19.2				

2 试验方法

热态试验采用单因素轮换法，即在改变某一工况参数时，其它运行参数保持不变，分析和计算运行因素对锅炉的效率和 NOx 排放浓度的影响，系统地研究各单一因素变化的影响。试验及试验数据整理、计算、结果修正等依据 ASME PTC4. 1 进行^[15]。锅炉 NOx 排放浓度试验数据整理、计算，结果修正依据火电厂大气污染物排放标准执行^[3]。测试位置在空预器烟气出口，沿烟道径向截面均匀布置 4 个测孔，采用德图 340 烟气分析仪进行测试。根据本文研究内容，热态实验工况安排如下表 2 所示：

表 2 热态实验工况表

Tab.2 test conditions in hot industrial test

序号	内容	项目	工况
1	变氧量	未投再燃，170 t/h 负荷，220 t/h 负荷	2 个
		投再燃，170 t/h 负荷，220 t/h 负荷	2 个
2	变再燃量	未投再燃，220 t/h 负荷	1 个
		220 t/h 负荷，投再燃，再燃阀门开度分别为 25%，50%，75%，100%	4 个
3	变再燃区停留时间	220 t/h 负荷，投再燃，下层燃尽风喷口垂直角度分别为 0°，下摆 15°，上摆 15°	3 个

3 结果分析

3.1 炉膛氧量对 NOx 排放效果的影响

炉膛氧量是运行调节的重要参数之一，影响着炉膛内 NOx 产生、再燃还原 NOx 效果及燃尽程度。变氧量因素的影响安排 4 个工况，如表 2 所示，根据运行经验，主燃区配风采用正宝塔式，燃尽区配风采用倒宝塔式，再燃阀门开度 100%，为避免干燥介质的影响，试验时磨煤机均处于停运状态，由于表盘氧量存在一定的误差，氧量以实测值为主。试验结果如图 2 所示。

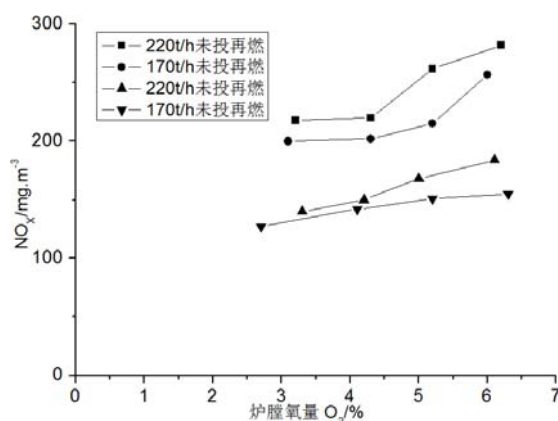


图 2 (a) 炉膛氧量对 NOx 排放浓度的影响

Fig.2(a) The influence of oxygen content on NO_x emission concentration

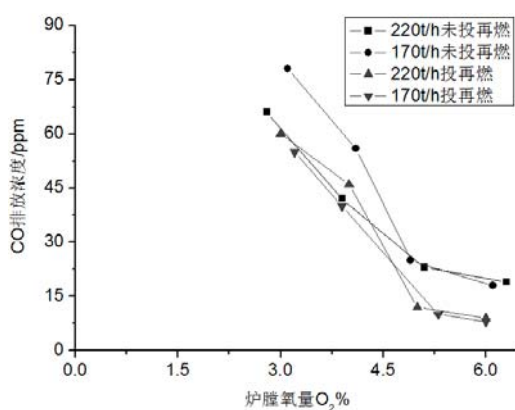


图 2 (b) 炉膛氧量对 CO 排放浓度的影响

Fig.2(b) The influence of oxygen content on CO emission concentration

从图 2 (a) 可以看出, 在 4 种试验工况下 NO_x 排放浓度都随着氧量的增加而增大, 这是因为在各级配风都不变的情况下, 炉膛氧量的增大, 会导致主燃区和再燃区氧量增大, 这种气氛有利于 NO_x 的生成, 并降低再燃气体的还原效果。在投再燃和未投再燃工况下, NO_x 排放浓度随着锅炉负荷降低而减小, 这是因为低负荷工况下炉膛温度较低, 大大降低热力型 NO_x 的产生。投用再燃工况下 NO_x 浓度明显低于纯煤粉工况, 再燃还原 NO_x 效果显著, 再燃 220t/h 工况下 NO_x 平均浓度为 160mg/Nm³, 标准偏差为 ± 19 mg/Nm³, 为平均值的 $\pm 12\%$ 。

从图 2 (b) 看出, 随着氧量增加 CO 排放降低, 在氧量为 3% 左右, CO 排放达到 80ppm, 燃料处于不完全燃烧状态, 影响锅炉效率, 在调试过程中不能一味的追求 NO_x 低排放。当氧量为 5% 时 (表盘氧量在 3.5% 左右), CO 排放基本在 20ppm 以下, 此时投再燃工况下 NO_x 浓度为 162 mg/Nm³, 是比较理想的运行工况。

3.2 再燃量对 NO_x 排放效果的影响

再燃量单因素对 NO_x 排放的影响通过再燃阀门开度调节, 其开度分别为 0, 25%, 50%, 75%, 100% (即再燃量为 0, 5%, 10%, 15%, 20%), 一共 5 个工况, 每个工况维持氧量为 5% 左右, CO 排放小于 50ppm, 锅炉负荷均为 220 t/h。试验结果如图 3 所示。

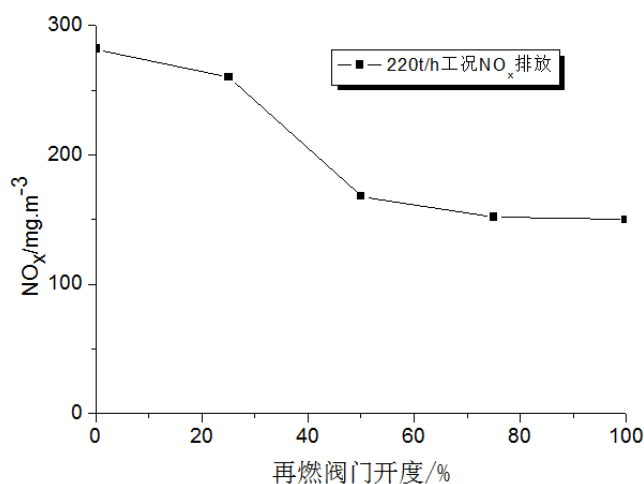


图 3 再燃量对 NOx 排放浓度的影响

Fig.3 The influence of reburning fuel flow on NO_x emission concentration

从图 3 可以看出，随着再燃阀门开度的增加 NO_x 浓度不断下降，在没有投再燃的工况下，NO_x 浓度基本在 280 mg/Nm³ 比较稳定，阀门开度从 25%到 50%时（流量从 5%增加到 10%）NO_x 浓度降低明显，阀门开度到 80%（再燃流量为 15%）以后，NO_x 浓度基本没有变化，在其他运行参数未调整的情况下，NO_x 浓度基本稳定在 150mg/Nm³。所以通过试验可知，再燃量小于 5%左右时，NO_x 还原效果并不明显，这是因为再燃气体对炉内上升烟气的覆盖度不够。再燃量超过 15%，NO_x 排放基本稳定，运行最佳再燃流量为 15%。

3.3 停留时间对 NOx 排放效果的影响

再燃区停留时间单因素对 NO_x 排放浓度影响的试验通过调节再燃喷口与下层燃尽喷口的距离来进行。当燃尽风喷口水平时，两喷口中心线距离为 3600mm，停留时间为 0.67s（设计值）。保持再燃喷口水平角度不变，燃尽风喷口角度分别为水平、上摆 15°、上摆 15°，从而延长或者缩短再燃区停留时间，试验结果如图 4 所示。

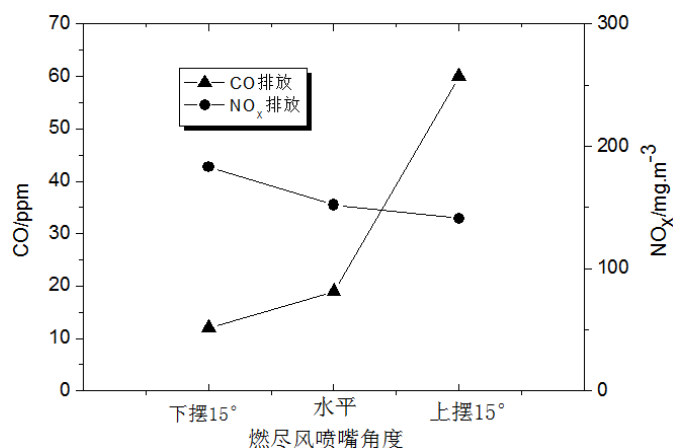


图 4 再燃区停留时间对 NOx 排放浓度的影响

Fig.4 The influence of residence time in reburn zone on NO_x emission concentration

从图 4 可以看出，燃尽风喷口上摆 15° 时，NO_x 浓度基本没变化，但此时 CO 排放浓度

有明显上升, 从 19ppm 上升到 62ppm, 说明停留时间超过 0.67s 设计值后这个影响因素就不再重要了, 这与 Nazeer 等^[10]实验室研究结果基本吻合, 但由于燃尽风到炉膛出口距离的缩短, 使得燃尽风和上升烟气的混合时间也相应缩短, 会存在不完全燃烧情况。当燃尽风喷口下摆 15° 时, NO_x 浓度略有上升, 从 142 mg/Nm³ 上升到 160 mg/Nm³, CO 浓度变化不明显, 这是因为再燃区与燃尽区距离的减少会缩短上升烟气与再燃气体的混合时间, 造成混合不充分, 降低 NO_x 还原效果。在这三种工况下, NO_x 排放浓度平均值为 180.6 mg/Nm³, 停留时间单因素引起的标准偏差为 ± 9.5mg/Nm³, 为平均值的 5.3%, 燃尽风喷口位置变化对 NO_x 排放影响不大。

3.4 主燃区配风方式对 NO_x 排放效果的影响

根据以上三个主要单因素试验结果, 确定最佳氧量值为 5% (表盘氧量为 3.5%), 最佳再燃量为 15% (阀门开度为 80%), 燃尽风采用倒塔式配风, 喷口水平。在此基础上调节主燃区配风, 分别调整为均等式、正宝塔式、束腰式、倒宝塔式, 分析 220t/h 再燃工况最佳运行方式。试验结果如图 5 所示。

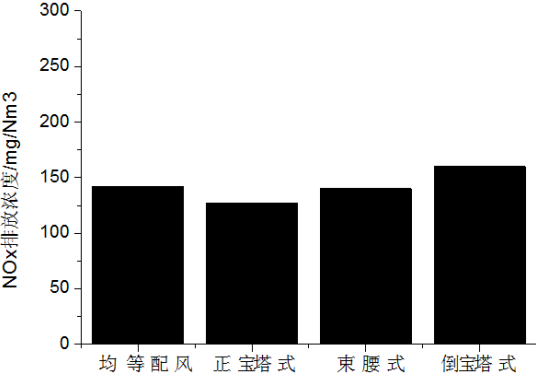


图 5 主燃区配风方式对 NO_x 排放浓度的影响

Fig.5 The influence of air distribution mode in Primary zone on NO_x emission concentration

从图 5 可以看出, 采用四种主燃区配风方式 NO_x 排放浓度整体变化是不很明显, 因为总风量不变, 主燃区和再燃区过量空气系数变化不大, 配风方式只是改变了局部氧量, 会造成小范围的变化, 这四种工况下 NO_x 排放浓度平均值为 143 mg/Nm³, 主燃区配风方式引起的标准方差为 ± 11.8mg/Nm³, 为平均值的 8.2%。正宝塔式时, NO_x 排放浓度最低, 平均值为 137mg/Nm³。倒宝塔式工况下 NO_x 排放浓度最高, 这是因为再燃喷口下部是上二次风, 倒宝塔式时上二次风量最大, 造成再燃区氧量过大, 影响再燃区的还原性氛围, 而采用正宝塔式, 上二次风风量最小, 再燃区氧量也变小, 更利于 NO_x 还原。束腰式和均等配风工况下基本一样, 排放比正宝塔式工况下略高。所以再燃工况下主燃区最佳配风方式为正宝塔式。

4 结论

根据某电厂对采用再燃技术低氮改造的 220t/h 煤粉炉进行现场热态试验, 并与前人关于再燃技术所做的研究结果进行对比, 得出以下结论:

- (1) NO_x 排放浓度都随着氧量的增加而增大, 但氧量过低会造成燃料的不完全燃烧,

运行调试时不能只追求 NO_x 浓度的低排放，需兼顾锅炉效率，最佳氧量为 5%（表盘氧量为 3.5%左右）；投用再燃工况下 NO_x 浓度明显低于纯煤粉工况，且 NO_x 排放浓度随着锅炉负荷降低而减小。

（2）随着再燃量的增加 NO_x 浓度下降，再燃量在 5%到 10%时 NO_x 浓度下降最显著，当再燃量大于 15%以后 NO_x 浓度基本保持不变，最佳再燃量保持在 15%。

（3）缩短再燃区设计停留时间（0.67s）会造成 NO_x 浓度升高，延长再燃区设计停留时间（0.67s）NO_x 浓度基本保持变，过长的停留时间对再燃还原效果影响不大。

（4）主燃区配风方式的改变对 NO_x 排放浓度影响不明显，但最佳配风方式为正宝塔式。220t/h 锅炉再燃在最佳运行方式下，NO_x 排放浓度平均值为 137 mg/Nm³。

参考文献

- [1] 王大军, 毛科. 燃煤锅炉采用天然气再燃烧技术降低NO_x排放的研究[J]. 四川电力技术, 2002 (6) : 14-16.
Wang Dajun ,Mao Liao.Research on natural gas reburning technology to reduce NO_x emissions in PC boiler [J].Sichuan Electric Power Technology.2002(6): 14-16
- [2] 《火电厂大气污染物排放标准》编制组.《火电厂大气污染物排放标准》编制说明[R]. 北京: 环境保护部科技标准司, 2009.
Establishment Section. Preparation instructions of Emission standard of air pollutants for thermal power plants[R]. Beijing: Journal of Environmental Sciences, 2009.
- [3] GB13223—2011, 火电厂大气污染物排放标准[S],2011
GB13223—2011, Emission standard of air pollutants for thermal power plants[S] , 2011(in Chinese)
- [4] Smoot LD, Hill SC, Xu H. NO_x control through reburning[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1998 (24) :385~408.
- [5] 张强, 刘艳华, 许晋源. 再燃烧技术中燃料的选取原则[J]. 工业炉,2000,21(3): 9-10.
Zhang Qiang,Liu Yanhua,Xu Jinyuan.Reburning fuel choosing principle for reburning technology[J]. Industrial Furnace,2000,21(3):9-10.
- [6] Lilippe D, Franck L.Experimental and kinetic modeling study of the reduction of NO by hydrocarbons and interactions with SO₂ in a JSR at 1 atm [J].Fuel, 2003, (82): 1033- 1040.
- [7] Vilas E,Skifter U,Jensen A D,et al.Experimental and modeling study of biomass reburning[J].Energy & Fuel,2004, 18(5):1442-1450
- [8] Enhancing The Use of Coals By Gas Reburning—Sorbent injection. ection. Volume 2-GasReburning-Sorbent injection at Hennepin Unit 1. Illinois Power Company. U. S. Department of Energy. March 1996.
- [9] Vlad Zarnescu.The Effect of Mixing Model and Mixing Characteristics on NO_x Reduction during Reburning.Energy & Fuels.2001,15(2): 363-371
- [10] W. A. Nazeer,R. E. Jackson,J. A. Peart.Detailed Measurements in aPulverized Coal Flame with Natural-gas

- Reburning. Fuel.1999, 78(6): 689-699
- [11] T.E.Burch,W.Y.Chen,T.W.Lester.Interaction of Fuel-N with Nitric Oxide During Reburning With Coal.Combustion and Flame.1994, 98(3): 391-401
- [12] 张忠孝, 姚向东, 乌晓江, 等.气体再燃低NO_x 排放试验研究[J].中国电机工程学报, 2005, (25) 9: 99-102.
Zhang Zhong-xiao, Yao Xiang-dong, Wu Xiao-jiang, et al. Experimental study on low NO_x emission using gas reburning [J]. Proceeding of the CSEE, 2005, 25 (9): 99-102 .
- [13] 魏华彦, 张忠孝, 朱基木等.气体再燃技术在宝钢电厂350 MW锅炉机组上的工业应用[J].热能动力工程, 2005, (20) 5: 535-538.
WEI Hua-yan, ZHANG Zhong-xiao, ZHU Ji-mu, et al. The industrial application of gas reburning technology in a 350 MW boiler unit at Bao Steel works power plant [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2005, 50(5):535-538.
- [14] 王伟平, 张忠孝, 滕叶等.部分气化煤制气多点喷射再燃脱硝的冷态流场研究[J].洁净煤技术,2013(19)1:97-100.
WANG Wei-ping,ZHANG Zhong-xiao,TENG Ye,et al .Influence of mlllti-point injection on coverage fraction of coal gas during its reburling process.[J] Clean Coal Technology ,2013(19)1:97-100
- [15] ASM E PTC 4. 1 (S team G enerat ing Un its) , 1964. [S] .