

气体再燃低NO_x排放试验研究

张忠孝¹, 姚向东¹, 乌晓江¹, 魏华彦¹, 陶晓华¹, 朱基木²

(1. 上海理工大学动力工程学院, 上海市 杨浦区 200093;

2. 宝钢发电厂, 上海市 宝山区 200971)

EXPERIMENTAL STUDY ON LOW NO_x EMISSION USING GAS REBURNING

ZHANG Zhong-xiao¹, YAO Xiang-dong¹, WU Xiao-jiang¹, WEI Hua-yan¹, TAO Xiao-hua¹, ZHU Ji-mu²

(1. Power Engineering Department, University of Shanghai for Science and Technology, Yangpu District, Shanghai 200093, China; 2. Power Plant Bao Steel, LTD, Baoshan District, Shanghai 200971, China)

ABSTRACT: The effect of some key factors such as residence time, stoichiometric coefficient, temperature and coal types on NO_x formation regulation was studied on a one-dimensional test system with multi-function such as air stage and fuel reburning. The results showed that prolonging the reburn zone residence time can help to lower the NO_x emission and the best time was 0.6s. There existed an optimum value (0.8-0.9) for reburn zone stoichiometric coefficient. The NO_x reduction efficient increased with the increase of the reburn heat input and the reburn zone temperature. The effect on low NO_x emission was remarkable to different coal types. The experimental NO_x reduction rate was 70%-80%. The NO_x emission concentration was below 200mg/Nm³.

KEY WORDS: Thermal power engineering; Reburn; Natural gas; NO_x reduction

摘要: 在一台具有空气分离、燃料分级燃烧等多用途的一维热态试验台上, 研究了天然气再燃燃烧过程中停留时间、空气过量系数、温度、煤种等一些关键因素对NO_x释放规律的影响。结果表明: 提高再燃区停留时间有利于降低NO_x的排放, 其最佳停留时间为0.6s; 再燃区过量空气系数存在一个最佳值(0.8~0.9); 脱氮效率随着再燃量的增加而增大, 随着再燃区温度的增加而增大; 对于不同煤种, 均能起到显著的降低NO_x排放作用; 试验室的脱氮率为70%~80%, NO_x的排放浓度可在200mg/Nm³以下。

关键词: 热能动力工程; 再燃; 天然气; 脱氮

1 引言

煤作为一次能源, 其利用方式主要是燃烧, 但已造成了我国严重的大气污染, 其中NO_x排放日益严重已成为一项急需解决的问题。我国已采用各种低NO_x燃烧技术, 包括浓淡燃烧、低氧燃烧、烟

气再循环、空气分级等。这些技术只能减少20%~40%的NO_x排放量, 一般排放浓度接近650mg/Nm³, 无法进一步满足日益严格的NO_x排放要求。燃料再燃技术自问世以来, 由于其脱氮效率高、改造费用低等优点, 被认为是一种十分有效、很有前途的脱氮方法^[1-3], 是一个适合我国国情的低成本低NO_x排放技术。天然气因为其本身不含氮、灰和硫, 因此不会加重NO_x的排放水平, 也不会产生腐蚀性化合物, 且能比其它燃料产生更多的烃根, 故被认为是最理想、最广泛使用的再燃燃料^[4-5]。

再燃技术的机理是将锅炉炉膛内分成3个区段燃烧: 主燃区当量过量空气系数 $a > 1$, 使煤充分燃烧产生NO_x; 还原区喷入二次燃料(气体燃料、超细煤粉等)使过量空气系数 $a < 1$, 二次燃料在还原性气氛下产生CH₄、CO、H₂、C和C_nH_m等, 将主燃区产生的NO_x还原成N₂; 燃尽区喷入燃尽风使过量空气系数 $a > 1$, 使未燃气体和焦炭燃尽^[6-7]。

2 试验台简介

试验台主要由炉膛本体、给粉系统、送风系统、再燃系统、排气系统及取样分析系统组成。如图1所示: 煤粉由图中振动式给粉器3供给(速率为15g/min), 并使其与一次风混合后在如图所示的A位置喷射进入炉膛; 再燃气体通过石英管, 在A处下方B处喷入炉膛(具体主燃区轴向距离由伸入石英管的轴向位置确定, 即确定不同的主燃区长度—“A”~“B”的距离), 以实现再燃; 同样燃尽风也是通过石英管在再燃气体(即标记B处)下方C处喷入炉膛, 使未燃成分充分燃尽(再燃区轴向距离由

基金项目: 国家“863”高技术基金项目(2002AA527054)。

The National High Technology Research and Development of China(863 Programme)(2002AA527054).

再燃风喷口和和燃尽风喷口的位置共同确定,即“B”~“C”的距离)。主燃时间和再燃时间则分别按照主燃区和再燃区的炉膛轴向长度及不同区域内的燃气流速决定。对最后炉膛出口烟气采用欧路公司生产的IMR1400型烟气分析仪(测量范围为0~2000mg/Nm³,误差为1mg/Nm³)进行分析。炉体为一维管式电加热炉,总功率为30kW,炉膛最高温度可达1200℃,由控制系统(图1中的热电偶、温度控制器)控制,且有较长的恒温区域。在测量

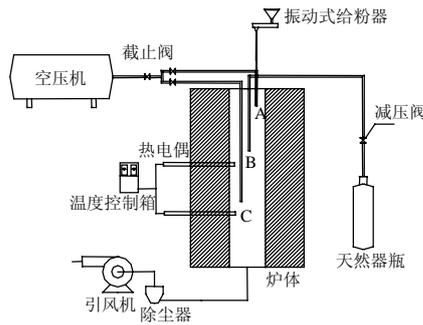


图1 天然气再燃低NO_x排放试验系统示意图

Fig. 1 Natural gas reburn experiment system

表1 不同再燃比例下天然气和空气供给量

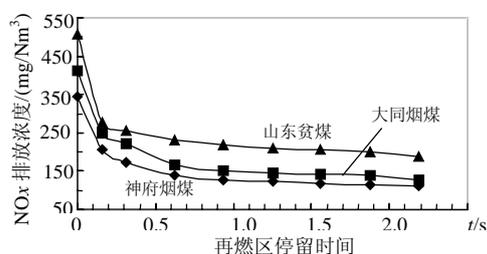
Tab. 1 Natural gas supply and air supply with different reburn fuel proportion

参数	数值						
再燃比例/%	0	5	10	15	20	25	30
天然气流量/(Nm ³ /h)	0	0.026	0.056	0.089	0.126	0.167	0.215
理论空气量/(Nm ³ /h)	4.8	5.1	5.4	5.7	6.1	6.5	7.0
空气(α=1.2)量/(Nm ³ /h)	5.8	6.1	6.5	6.8	7.3	7.8	8.4

表2 试验煤样的工业分析及元素分析

Tab. 2 Experimental coal industrial analysis and element analysis

	工业分析/%				元素分析/%					Q _{net, ad} kJ/kg
	M _{ad}	A _{ad}	V _{ad}	FC _{ad}	C _{ad}	H _{ad}	O _{ad}	S _{ad}	N _{ad}	
神府烟煤	1.76	30.11	23.06	45.07	58.68	3.31	4.94	0.51	0.97	20217
大同烟煤	2.66	10.52	27.47	59.35	75.48	4.34	7.35	1.52	0.79	26831
新泰贫煤	0.77	44.47	12.13	42.63	72.24	2.48	2.9	0.33	1.75	17008
龙口褐煤	8.3	22.1	39.8	29.8	49.9	3.4	14.22	1.1	1.38	18188



注:再燃量20%;再燃区温度1160℃;再燃区过量空气系数0.9。

图2 再燃区停留时间对NO_x排放的影响

Fig. 2 Effect of reburn zone residence time on NO_x emission

由图2可知:对各试验煤种,提高再燃区停留时间均有利于降低NO_x的排放。但随着时间的增加,其影响趋势趋于缓和。另外,过长的再燃区停留时

不同再燃区温度对NO_x的影响时,再燃区温度由温度控制系统控制并保持其温度恒定。

3 试验工况

本试验的目的是考察天然气再燃过程中各主要因素对NO_x排放的影响趋势。为此,本次试验选取了再燃停留时间、再燃区过量空气系数、再燃燃料比例、再燃区温度及煤种共5个因素,并对这些因素采取轮回试验的方法。试验中煤粉供给量为15g/min,总过量空气系数定为1.2。表1为不同再燃比例^[8](天然气燃烧产生的发热量占总发热量的比值)下天然气和空气供给量对照表。表2为试验煤样的分析结果。

4 试验结果与分析

4.1 再燃区停留时间对NO_x的影响

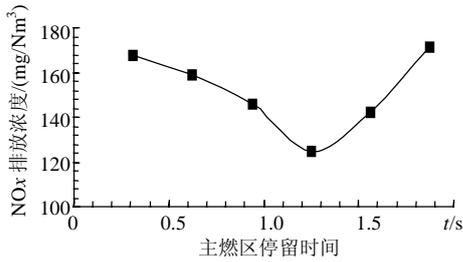
原则上,再燃区内停留时间越长,则还原反应越充分,降低NO_x的效果就越明显。但受到锅炉燃烧方式和燃尽要求的制约,一般再燃区的停留时间在0.4~1s之间^[9]。见图2。

间还会缩短燃尽区的停留时间而导致燃烧效率下降。本次试验的最佳再燃停留时间为0.6s。

4.2 主燃区停留时间对NO_x的影响

固定再燃区停留时间(0.6s)不变,改变主燃区停留时间,由试验结果可知(见图3),存在一个最佳主燃区燃烧时间(1.25s)。在此之前,天然气喷口越靠近主燃烧器,越多的氧量进入再燃区,从而削弱了再燃区的还原性气氛,导致NO_x的还原效果变差;在这之后,天然气喷口越远离主燃烧器,主燃烧区在富氧条件下反应越充分,进入再燃区的NO_x越多,而一定量天然气的还原能力有限,易导致天然气未能充分起到抑制NO_x生成的作用,这两种因素最终

导致NO_x排放浓度先减小又逐渐升高。



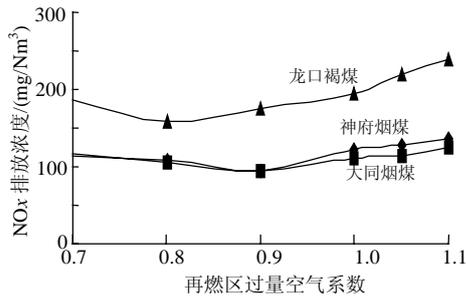
注：再燃量 20%；再燃区温度 1160℃；再燃区停留时间 0.625s。

图 3 主燃区停留时间对NO_x浓度的影响

Fig. 3 Effect of main zone residence time on NO_x emission

4.3 再燃区过量空气系数对NO_x的影响

图 4 是天然气再燃比例为 20%时，再燃区过量空气系数对NO_x排放的影响关系。由图 4 可知：在再燃区过量空气系数小于 1 的富燃料情况下，十分有利于NO_x的还原，NO_x的脱除率均在 60%以上；在再燃区过量空气系数大于 1 的富氧情况下，还原效果开始逐渐消弱。故本实验过量空气系数在 0.8~0.9 之间为宜。



注：工况：再燃量 20%；再燃区温度 1160℃。

图 4 再燃区过量空气系数对NO_x排放的影响

Fig. 4 Effect of reburn zone Stoichiometric coefficient on NO_x emission

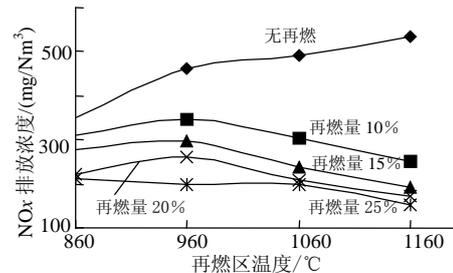
4.4 再燃量对NO_x的影响

为保证再燃区内对NO_x的还原效果，必需送入足够数量的再燃燃料，以保证再燃区内还原NO_x所必需的烃根浓度^[10]。一般情况下，再燃燃料的比例在 10%~20%之间比较合适。试验结果表明，在天然气再燃量增加时，对各种煤均呈现NO_x排放量降低、脱氮率增加的趋势。在再燃量为 10%时就能取得较好的脱氮效果，其脱氮率均大于 50%，对褐煤甚至已超过 60%。随后继续增加再燃量，NO_x降低的趋势趋于平缓。

4.5 再燃区温度对NO_x的影响

一般来说，再燃区内温度越高，NO_x的还原率也越高^[11-12]。图 5 为不同再燃区温度下，NO_x的排放浓度。图中最上一条曲线为无再燃情况下不同温

度的NO_x释放特性。随着温度的升高，NO_x的生成量也随之增大(由于试验条件的限制，试验温度低于 1200℃)。在此温度范围内燃煤所生成的NO_x主要是燃料型NO_x。挥发分N中最主要的氮化合物HCN和NH₃的量随着温度的增加而增加；同时，焦炭中氮的分解速度也随着温度的增加而增加；而在相同再燃量的情况下，随着温度的增加，其NO_x的排放量随之减小。这是因为高温有利于提高固定氮类化合物(NH₃、HCN、NO、焦炭氮)的分解速率，有利于增加CH_i、O、OH和H等反应基团的生成浓度。因此，提高再燃区温度，不仅能提高NO_x的还原率，而且还能促使含氮中间产物转变为N₂。虽然随着温度的升高，在主燃烧区中产生的NO_x浓度也升高。但是，再燃区中的还原作用加强，NO_x浓度降低很快。最终，高温下NO_x排放浓度还是低于低温下的排放浓度。



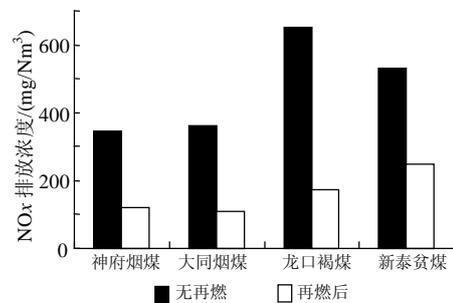
注：再燃区停留时间 0.625s；再燃区过量空气系数 0.9。

图 5 再燃区温度对NO_x排放的影响趋势

Fig. 5 Effect of reburn zone temperature on NO_x emission

4.6 煤种对NO_x的影响

图 6 为不同煤种对再燃的影响。由图 6 可知，无论对烟煤、褐煤、还是贫煤，天然气再燃均能起到显著降低NO_x排放的作用。不同煤种的脱氮效果有所差异：龙口褐煤的脱氮率最高为 73%、神府烟煤和大同烟煤的脱氮率分别为 65%和 69%、新泰贫煤的脱氮率最低为 53%。产生这种差异的主要原因



注：再燃量 20%；再燃区温度 1160℃；再燃区停留时间 0.625s。

图 6 煤种对再燃的影响

Fig. 6 Effect of coal types on NO_x emission

是煤中挥发份的含量不同。煤中的氮分为挥发分N和焦炭N两部分,且挥发份中氮产生的 NO_x 占总 NO_x 生成量的绝大多数。挥发分含量高,则在主燃烧区中生成的 NO_x 就相对较多,在最后的燃尽区中生成的 NO_x 就相对比较少;主燃烧区中生成的大量 NO_x 进入再燃区后就被大量还原,而在燃尽区中生成的 NO_x 被还原较差^[13-15]。因此,挥发分含量高,进入再燃区中被还原 NO_x 的就相对较多,因而其脱氮率就高。

5 结论

本试验重点考察了天然气再燃燃烧过程中,不同停留时间、过量空气系数、不同再燃量、不同温度及不同煤种对 NO_x 排放的影响。试验结果表明:提高再燃区停留时间有利于降低 NO_x 的排放。但随着停留时间的进一步增加,其影响趋势趋于平缓。综合考虑实际因素,如燃烧效率等,建议实际设计中再燃区内的停留时间选在0.6s左右比较合理;在再燃区过量空气系数小于1的富燃料情况下,十分有利于 NO_x 的还原。其值在0.8~0.9之间比较合适;脱氮效率随着再燃量的增加而增大;再燃量为10%时就能取得50%以上的脱氮效果;再燃温度对脱氮效果影响较大,随着温度的增加,其脱氮效率也随之增加。对于不同煤种,天然气再燃均能起到显著降低 NO_x 排放的作用;但对各煤种的脱氮效果有所差异。其中褐煤的效果最为明显,贫煤的效果相对较差,而烟煤的效果与褐煤比较接近,煤中的挥发分含量是造成这种差异的主要原因。

参考文献

- [1] Smoot L D, Hill S C, Xu H. NO_x control through reburning[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1998, 24(5): 385-408.
- [2] Tree D R, Clark A W. Advanced reburning measurements of temperature and species in a pulverized coal flame[J]. Fuel, 2000, 79(13): 1687-1695.
- [3] 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 the application in China[J]. Power Engineering, 2001, 21(4): 1320-1323.
- [4] 孙春, 唐耀, 齐志斌. 西气东输访谈录[J]. 石油规划设计, 1999, 10(3): 10-12.
Shun Chun, Tang Yao, Qi Zhibin. Talking about transportation of natural gas from west to east[J]. Petroleum Programming design, 1999, 10(3): 10-12.
- [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. Select principles of fuel on reburning technology[J]. Industrial Boiler, 2000, 21(3): 9-10.
- [6] 高正阳, 阎维平, 刘忠. 再燃过程再燃煤粉燃料 N 释放规律的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 238-242.
Gao ZhengYang, Yan WeiPing, Liu Zhong. Experimental investigation on fuel-N release characteristic of reburn fuel[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 238-242.
- [7] 刘忠, 阎维平, 高正阳, 等. 超细煤粉的细度对再燃还原 NO 的影响[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 204-208.
Liu Zhong, Yan WeiPing, Gao ZhengYang *et al.* The effect of the micro-pulverized coal fineness on nitric oxide reduction by reburning [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 204-208.
- [8] 姚向东, 张忠孝, 邱莉莉, 等. 天然气再燃降 NO_x 的化学动力学及影响因素分析[J]. 上海理工大学学报, 2004, (1): 62-65.
Yao Xiangdong, Zhang Zhongxiao, Qiu Lili *et al.* Analysis on the kinetic mechanism and key parameters of NO_x reduction with natural gas[J]. Journal University of Shanghai for Science and Technology, 2004, (1): 62-65.
- [9] Hartmut Spliethoff, Ulrich Greul, Helmut Rudiger *et al.* Basic effects on NO_x emissions in air staging and reburning at a bench-scale test facility[J]. Fuel, 1996, 75(5): 560-564.
- [10] 钟北京, 傅维镛. 气体燃料再燃对 NO_x 还原的影响[J]. 热能动力工程, 1999, 14: 419-424.
Zhong Beijing, Fu Weibiao. Effect of gas reburning on deoxidizing NO_x [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 1999, 14: 419-424.
- [11] 王大军, 毛科, 邢伟, 等. 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 Ke, Xing Wei *et al.* Study on Low NO_x emission using natural gas reburning on coal fired boiler[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2002, (6): 14-16.
- [12] 向军, 邱纪华, 熊友辉, 等. 锅炉氮氧化物排放特性试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 80-83.
Xiang Jun, Qiu Jihua, Xiong Youhui *et al.* Experimental study on characteristics of nitrogen oxide emission[J]. Proceedings of The CSEE, 2000, 20(9): 80-83.
- [13] 钟北京, 施卫伟, 傅维镛. 煤焦再燃过程中催化剂对 NO 还原的影响[J]. 热能动力工程, 2001, 16(16): 261-263.
Zhong Beijing, Shi Weiwei, Fu Weibiao. Effect of activator on deoxidizing NO with coal-coke reburning[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2001, 16(16): 261-263.
- [14] 钟北京, 施卫伟, 傅维镛. 煤和煤焦还原NO的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2000, 21(3): 383-387.
Zhong Beijing, Shi Weiwei, Fu Weibiao. Experimental study on deoxidizing NO with coal and coal-coke[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2000, 21(3): 383-387.
- [15] 钟北京, 张怀山. 贫煤焦催化还原 NO 的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(2): 249-252.
Zhong Beijing, Zhang Huaishan. Experimental study on deoxidizing NO with lean coal-coke[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, 23(2): 249-252.

收稿日期: 2004-10-13。

作者简介:

张忠孝(1959-), 男, 博士, 博士生导师, 主要从事洁净能源技术, 煤燃烧和脱硫技术、锅炉技术等领域的研究。