

董若凌, 周俊虎, 杨卫娟, 等. 煤粉再燃对锅炉 CO 及 N₂O 排放控制的试验研究[J]. 环境科学学报, 2005, 25(6): 734-737

DONG Ruoling, ZHOU Junhu, YANG Weijuan, *et al.* An experimental study on controlling CO and N₂O emission of boiler through pulverized coal reburn[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(6): 734-737

煤粉再燃对锅炉 CO 及 N₂O 排放控制的试验研究

董若凌*, 周俊虎, 杨卫娟, 周志军, 岑可法

能源洁净利用和环境工程教育部重点实验室, 浙江大学热能工程研究所, 杭州 310027

收稿日期: 2004-09-06 修回日期: 2005-01-20 录用日期: 2005-01-25

摘要: 结合 CO 和 N₂O 的生成及分解机理, 利用 2.11 MW 燃煤半工业炉进行了煤粉再燃试验, 研究了煤粉再燃技术对锅炉 CO 和 N₂O 排放的控制效果. 试验发现, 随再燃比的增加和再燃区过量空气系数的减少, CO 和 N₂O 的脱除效果增强; 过高或过低的一级燃烧区过量空气系数均不利于 CO 的脱除; N₂O 的脱除随一级燃烧区过量空气系数的增大而增大. 煤粉炉应用煤粉再燃技术可以实现 CO 和 N₂O 的同时脱除, 因而可开发该技术在燃煤锅炉中的多种污染物联合控制能力.

关键词: 煤粉再燃技术; CO; N₂O

文章编号: 0253-2468(2005)06-0734-04 中图分类号: TK16, X511 文献标识码: A

An experimental study on controlling CO and N₂O emission of boiler through pulverized coal reburn

DONG Ruoling*, ZHOU Junhu, YANG Weijuan, ZHOU Zhijun, CEN Kefa

Clean Energy and Environment Engineering Key Laboratory of Ministry of Education, Institute for Thermal Power Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027

Received 6 September 2004; received in revised form 20 January 2005; accepted 25 January 2005

Abstract: The reductions of CO and N₂O emissions through pulverized coal reburn were investigated on a 2.11 MW pilot scale coal fired boiler. It is found that CO and N₂O reductions increased with increase in the reburn fuel fraction and decrease in the reburn zone excess air ratio. The N₂O reduction efficiency increased as the excess air ratio increases in the primary combustion zone. Since the pulverized coal reburn technique can simultaneously reduce CO and N₂O emissions, it is possible to further develop this technique to control multiple pollutants from coal fired boilers.

Keywords: pulverized coal reburn; CO; N₂O

燃煤锅炉在燃烧过程中排放多种污染物, 如 CO 和 N₂O 等. CO 是燃料燃烧不完全的产物, 容易与人体血液中的血红蛋白结合, 影响内脏器官的正常工作. N₂O 在大气中的停留时间长达 150 a, 对臭氧层的破坏程度占臭氧层化学分解的 70%, N₂O 同时又是一种温室效应气体, 吸收红外线的的能力是 CO₂ 的 250 倍. 随着环保要求的不断提高, 开发上述污染物的有效控制技术迫在眉睫.

再燃技术的特点是采取燃料分级的燃烧方式, 在炉内不同区域建立氧化或还原氛围, 燃料在氧化区燃烧, 燃烧生成的污染物在还原区得到脱除, 未燃燃料在随后的燃尽区燃尽. 该技术最初被应用于控

制锅炉 NO_x 排放^[1,2], 但随着研究的不断深入, 其它污染物如 CO 和 N₂O 的再燃控制效果逐渐引起了科研人员的关注: Syverud 的再燃试验实现锅炉 CO 排放下降 50%^[3], Maly 等人^[4] 和 EER 公司^[5] 对各自的再燃锅炉进行烟气成分测试, 发现 CO 排放浓度可控制在 20~50 mL·m⁻³ 的范围内; N₂O 排放的再燃控制研究较多集中于流化床锅炉^[6-10], Rutar 等人在试验中使用 H₂、CH₄ 和 CO 等做再燃燃料, 获得了高于 80% 的 N₂O 脱除率^[8]. 虽然已经有了上述尝试, 但目前科研人员关于再燃的研究仍集中在单纯污染物的控制上, 对于更为经济的再燃燃料——煤粉, 则缺乏 CO 及 N₂O 的再燃控制实践, 二者的联合脱除效果

作者简介: 董若凌(1974—), 男, 博士研究生, E-mail: dongruoling@126.com; * 通讯作者(责任作者)

Biography: DONG Ruoling (1974—), male, Ph. D. candidate, E-mail: dongruoling@126.com; * Corresponding author

尚未涉及, 控制规律和影响因素有待明确. 为此, 本文在一台 2.11 MW 燃煤四角炉上进行了 CO 和 N₂O 排放的煤粉再燃控制研究, 为开拓上述污染物的煤粉再燃联合控制技术提供参考.

1 试验装置及试验方案

1.1 试验装置

试验装置为一设计功率 2.11 MW, 采用 II 型布置的半工业、固态排渣、四角喷燃煤粉锅炉. 炉膛截面为边长 1.10 m 的正方形, 炉高 11.34 m. 再燃设备包括再燃粉仓、绞笼给粉机和煤粉混合器, 试验系统如图 1. 沿炉膛高度方向, 布置一级燃烧器于 4.18 m, 再燃燃烧器于 5.80 m, 燃尽风口于 8.20 m. 试验中, 各燃烧器之间的炉膛空间依次被划分为一级燃烧区、再燃区和燃尽区.

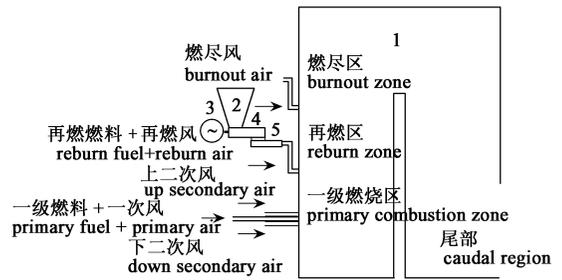


图 1 煤粉再燃试验系统示意图 (1. 燃煤四角炉 2. 再燃粉仓 3. 调速电机 4. 绞笼给粉机 5. 煤粉混合器.)

Fig. 1 Schematic diagram of pulverized coal reburn experimental system (1. Coal-fired boiler 2. Reburn fuel surge bin 3. Governor motor 4. Screw feeder 5. Coal powder mixer)

1.2 试验用煤种煤质分析

试验采用神华煤, 煤质分析见表 1. 煤粉细度 $R_{90} = 23.04\%$.

表 1 试验用煤种煤质分析(空气干燥基)

Table 1 Proximate analysis and ultimate analysis of coal used in the test (Air-dried basis)

工业分析				发热量/(kJ·kg ⁻¹)	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%	25 395	62.8%	3.93%	0.91%	11.01%	0.41%

1.3 试验方案及测量方法

试验炉炉膛中心燃烧温度为 1 100~1 260 °C, 未应用再燃时, 炉膛出口过量空气系数 $\alpha = 1.10$, 尾部 CO 和 N₂O 排放浓度分别为 153 mL·m⁻³ 和 20 mL·m⁻³ (6% 氧量). 煤粉再燃试验主要考察再燃参数 (如再燃比 RFF、再燃区过量空气系数 α_r 和一级燃烧区过量空气系数 α_p) 对 CO 和 N₂O 脱除的影响规律. 试验中, 燃尽区过量空气系数 α_b 维持 1.10 不变. 烟气 CO 及 N₂O 浓度变化采用 MLT Analyzer 烟气分析仪跟踪记录, 并将测量值折算为 6% 氧量下的相应值以利于对照分析.

2 试验结果

2.1 再燃比对 CO 和 N₂O 脱除的影响

再燃比是再燃燃料占总燃料输入量的份额, 再燃比的改变直接影响炉内氧化和还原反应参与物的分配, 乃至最终物质的排放状况. 在维持系统再燃参数 $\alpha_p = 1.10$, $\alpha_r = 0.95$ 的前提下, 改变试验再燃比, CO 和 N₂O 脱除率随之呈正比变化规律 (如图 2). 但在再燃比达到一定值, 如 20% 之后, CO 和 N₂O 的脱除效果变化不再明显. 由于提高再燃比将涉及到最终燃料的燃尽问题, 依据试验结果, 实际应用中, 控

制再燃比在 20% 左右, 即可实现较好的 CO 和 N₂O 脱除效果.

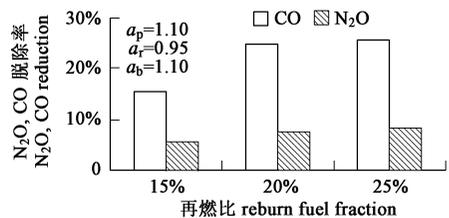


图 2 再燃比对锅炉 CO 和 N₂O 脱除的影响

Fig. 2 Effect of reburn fuel fraction on CO and N₂O reduction

2.2 一级燃烧区过量空气系数对 CO 和 N₂O 脱除的影响

应用再燃技术时, 一级燃烧区可集中 75% 以上的燃料, 该区域的过量空气系数不仅决定了锅炉污染物总体的生成情况, 而且会影响其后燃烧区的氛围和污染物脱除状况. 提高一级燃烧区过量空气系数, 有利于 CO 的充分氧化燃烧, 但较高的一级燃烧区过量空气系数未必能实现锅炉 CO 排放的降低. 如图 3, 试验中, 维持再燃区和燃尽区参数不变, 改变一级燃烧区过量空气系数后, 系统 CO 脱除率随之呈现抛物线变化规律. $\alpha_p = 1.10$ 时, CO 的脱除效果较明显. N₂O 的生成和脱除与燃烧区温度和离子

浓度相关,当一级燃烧区过量空气系数较大时,燃烧区高温利于 N_2O 发生热分解。 N_2O 的脱除效果随一级燃烧区过量空气系数呈正比变化规律。

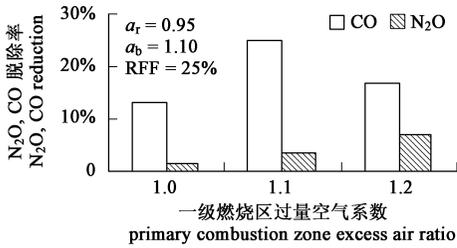


图3 一级燃烧区过量空气系数对 CO 和 N_2O 脱除的影响

Fig. 3 Effect of excess air ratio on CO and N_2O reduction in primary combustion zone

2.3 再燃区过量空气系数对 CO 和 N_2O 脱除效果的影响

煤粉再燃技术设计了一个贫氧的再燃区以形成还原氛围,处于该氛围内的煤粉可与来自上游的氧化型污染物进行还原反应,实现该污染物的脱除。试验获得的再燃区过量空气系数对 CO 和 N_2O 脱除效果影响如图4,随着再燃区过量空气系数的增大,再燃区还原性氛围减弱,CO 和 N_2O 的脱除能力变差。再燃区过量空气系数决定还原反应进行的程度,半工业炉试验在 $\alpha_r = 0.88$ 时,获得了最大的 CO 和 N_2O 脱除率,分别为 47% 和 21%。

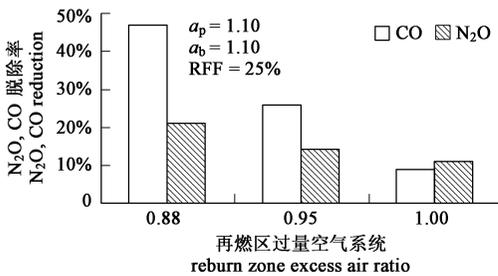


图4 再燃区过量空气系数对 CO 和 N_2O 脱除的影响

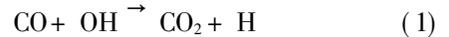
Fig. 4 Effect of excess air ratio on CO and N_2O reduction in reburn zone

3 分析与讨论

再燃技术中,燃料的分级供给减少了污染物的生成量,还原区的存在为多种污染物的脱除创造了便利条件。再燃参数与 CO 和 N_2O 的脱除效果密切相关,但由于这 2 种物质的物理化学特性迥异,脱除机理不同,加之炉内燃烧环境复杂,再燃参数变化对它们的影响程度不一致。

燃料中的碳在燃烧的最初阶段均生成 CO。在一

级燃烧区的富氧氛围下,CO 生成后随即氧化为 CO_2 ,从而实现炉内的首次脱除。在再燃区内,部分再燃煤粉因不完全燃烧而生成一定的 CO,但相对贫氧的环境下,煤粉挥发份火焰中的 OH 离子较多,CO 与之发生如下反应:



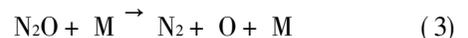
此反应速率高于 CO 与 O_2 的燃烧反应速率^[11],是实现再燃区 CO 脱除的重要途径。半工业炉试验中,再燃比和再燃区过量空气系数与 CO 脱除率的关系,即是源于再燃区 OH 离子浓度的改变。另外,CO 自身具有还原性,可参与 NO_x 和 N_2O 的脱除反应。

Rutar 在试验中发现,65% ~ 85% 的 CO 可消耗于对氮氧化物的还原作用^[8];Johnsson 的试验还确证了 CO 具有活化煤焦表面的作用^[9],即:



该反应也能控制 CO 排放。锅炉燃尽区的存在保证了残留 CO 的氧化燃尽。上述过程实现了煤粉再燃技术对 CO 排放的控制。

N_2O 的生成和脱除较多地发生在低温燃烧工况,如循环流化床中。半工业炉燃烧温度较高, N_2O 排放量不大,但仍可用以了解煤粉再燃对其的脱除作用和影响因素。 N_2O 的炉内脱除包括离子分解和热分解 2 种方式。温度高于 585 °C 后, N_2O 的热分解效应逐渐明显^[12]:



N_2O 的离子分解得益于还原性氛围下,煤粉挥发份火焰中较高浓度的 H 离子^[7,9,13]:



冯波等人^[10]在流化床再燃试验中发现:煤量不是 N_2O 反应系统的重要参数;富氧的一级燃烧区内,高温使燃烧形成的 N_2O 多发生热分解反应(3),再燃是次要的 N_2O 脱除机制。半工业炉试验时,再燃比和一级燃烧区过量空气系数对 N_2O 脱除率的影响范围仅 2% ~ 8%,同样不体现为影响 N_2O 脱除的主要因素。但再燃区过量空气系数影响该区还原性物质的多少,再燃区过量空气系数较小时,CO、H 和 OH 浓度将增大, N_2O 的离子脱除效果被强化。CO 的表面活化效果还能增强煤焦对 N_2O 的异相脱除。因此,半工业炉应用煤粉再燃时,系统对 N_2O 的控制能力受再燃区过量空气系数的影响较大。由于未燃尽燃料在燃尽区内的燃烧可提高炉膛出口温度, N_2O 的再次热分解将实现再燃技术对其的进一步控制。

依据半工业炉试验结果, 结合 NO_x、CO 和 N₂O 的再燃脱除机理^[1~4], 发现煤粉再燃技术可实现多种污染物的同步脱除. 上述污染物脱除过程中所发生的反应能相互促进: CO 发生脱除的同时, 可活化煤焦表面为 NO_x 和 N₂O 的脱除提供 H 离子, 甚至直接参与对 NO_x 和 N₂O 的还原; N₂O 脱除过程中发生的反应(4)为贫氧条件脱除 CO 提供 OH 离子. 从这一角度而言, 拓展煤粉再燃技术的多种污染物综合控制能力切实可行.

在本试验系统中, 氛围的调节是通过改变燃烧器挡板开度实现的. 增大一级燃烧区氧量的同时, 为维持再燃区和燃尽区氛围不变, 上述燃烧区燃烧器挡板开度被适当关小, 供气速度降低, 引起这些区域空气和烟气混合动量减弱. 烟气的混合状况涉及反应进行程度. 由于混合动量和化学反应的综合效果, 半工业炉试验中出现了一级燃烧区过量空气系数高于 1.10 后, CO 脱除效果回落的现象. N₂O 的脱除更多地与温度相关, 混合动量对其的影响作用未在本试验中体现出来. 可以确定, 混合动量也是影响污染物脱除的因素之一, 值得进一步开展试验研究.

4 结论

1) CO 的再燃脱除率随再燃比的增大而增大, 随再燃区过量空气系数的增大而减小, 与一级燃烧区过量空气系数呈现抛物线变化规律. 应用煤粉再燃技术后, CO 的最大脱除率可达 47%.

2) 再燃比及一级燃烧区过量空气系数对 N₂O 再燃脱除效果的影响不明显; 随再燃区过量空气系数的增加, N₂O 再燃脱除率减小.

3) 半工业炉应用煤粉再燃技术时, N₂O 和 CO 的还原反应同时发生, 相互促进. 煤粉再燃利于锅炉实现多种污染物排放的同步控制.

参考文献(References):

- [1] Xu H D, Luo Y H, Wang E L, *et al.* Reburning technology and its application prospects in China[J]. Power Engineering, 2001, 21(4): 1320—1323(in Chinese)
- [2] Li G, Shi D B, Chi Z H, *et al.* Experimental research on NO_x reduction in furnace with coal reburning [J]. Power System Engineering, 2004, 20(1): 44—46(in Chinese)
- [3] Smoot L D, Hill S C, Xu H. NO_x control through reburning[J].

Progress in Energy and Combustion Science, 1988, 24(4): 385—408

- [4] Maly P M, Zamansky V M, Ho L, *et al.* Alternative fuel reburning [J]. Fuel, 1999, 78(3): 327—334
- [5] Ashworth R A, Maly P M, Cason W R. Results of CWS reburn tests on a 10 × 10⁶ Btu/hr tower furnace and its impact on CWS reburn economics [C]. The 22nd International Technical Conference on Coal Utility & Fuel System, Clearwater, Florida, USA, 1997
- [6] Liu Y H, Che D F, Hui S E, *et al.* Current situation of research on reburning technology and application prospects thereof in fluidized beds [J]. Thermal Power Generation, 2001, 30(2): 5—8(in Chinese)
- [7] Liu H, Lu J D, Feng B, *et al.* Reduction of N₂O/SO₂/NO_x during coal combustion in fluidized beds [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1996, 24(11): 103—106(in Chinese)
- [8] Rutar T, Kramlich J C, Malte P C. Nitrous oxide emissions control by reburning [J]. Combustion and Flame, 1996, 107(4): 453—463
- [9] Johnson J E. Formation and reduction of nitrogen oxides in fluidized-bed combustion [J]. Fuel, 1994, 73(9): 1398—1409
- [10] Feng B, Lin Z J, Yuan J W, *et al.* Research on N₂O formation influence factors in fluidized-bed combustion [J]. Thermal Power Generation, 1994, 23(6): 29—35(in Chinese)
- [11] Chigier N A [Han Z C, Guo B W(Translation)]. Energy combustion and environment [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1991: 379(in Chinese)
- [12] Xiang S F, Yan X S, Cao T L, *et al.* Series of inorganic chemistry (4) [M], Beijing: Science Press, 1998: 70(in Chinese)
- [13] Kristensen P G, Glarborg P, Dam Johansen K. Nitrogen chemistry during burnout in fuel staged combustion [J]. Combustion and Flame, 1996, 107(4): 211—222

中文参考文献:

- [1] 徐华东, 罗永浩, 王恩禄. 再燃燃烧技术及其在我国的应用前景 [J]. 动力工程, 2001, 21(4): 1320—1323
- [2] 李戈, 师东波, 池作和. 煤粉再燃还原 NO 的实验研究 [J]. 电站系统工程, 2004, 20(1): 44—46
- [6] 刘艳华, 车得福, 惠世恩. 再燃技术研究现状及其在流化床中的应用前景 [J]. 热力发电, 2001, 30(2): 5—8
- [7] 刘皓, 陆继东, 冯波. 流化床煤燃烧 N₂O, SO_x 及 NO_x 的消减 [J]. 华中理工大学学报, 1996, 24(11): 103—106
- [10] 冯波, 林志杰, 袁建伟. 流化床燃烧中 N₂O 生成影响因素的研究 [J]. 热力发电, 1994, 23(6): 29—35
- [11] [美] 诺曼·奇格(韩昭沧, 郭伯伟译). 能源、燃烧与环境 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1991: 379
- [12] 项斯芬, 严宣申, 曹庭礼. 无机化学丛书(第4卷) [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 70