

烟煤煤粉及热解产物对 NO 的还原特性实验研究

苟 湘, 周俊虎, 周志军, 杨卫娟, 刘建忠, 岑可法

(能源清洁利用国家重点实验室(浙江大学), 浙江省 杭州市 310027)

Experimental Research on Characteristics of NO Reduction Using Pulverized Coal and Pyrolysis Production of Bituminous Coal

GOU Xiang, ZHOU Jun-hu, ZHOU Zhi-jun, YANG Wei-juan, LIU Jian-zhong, CEN Ke-fa
(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization (Zhejiang University), Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: The experiments on characteristics of NO reduction using pulverized coal and pyrolysis production of bituminous coal were carried out separately at different temperatures in a fixed-bed reactor, through which the NO reduction characteristics of pyrolysis gas, char, and pulverized coal were studied. It is found out that the pyrolysis gas produced from coal at different temperatures has different components and thus takes on different reduction characteristics. The reductions of pyrolysis gas and char get more effective as temperature rises. At the same temperature, the NO reduction using pyrolysis gas is more effective than that using char in the early reaction stage, but afterwards the NO reduction using char is more effective than that using pyrolysis gas. The NO reduction using pulverized coal is more effective than that using pyrolysis gas or char at the same temperature but less effective than the combined effect of the two separate NO reductions using pyrolysis gas and char as homogenous reduction and heterogenous reduction and their interaction effect take place at the same time. The homogenous reduction dominates the early reaction stage of NO reduction using coal, but afterwards heterogenous reduction dominates. The fast separation of pyrolysis gas and char is in favor of NO reduction. The unburned coal contributes more to NO reduction in the coal reburning zone.

KEY WORDS: thermal power engineering; bituminous coal; pyrolysis gas; char; NO; characteristic of reduction

摘要: 在固定床反应器中, 不同温度下将烟煤煤粉及其热解产物分别对 NO 进行还原性实验, 研究了热解气体、焦炭以及煤粉的还原作用。结果表明, 煤粉在不同温度下析出的热

解气体因组成不同而具有不同的还原性。随温度升高, 热解气体和焦炭的还原效果均越好。同温度下, 在反应前期热解气体对 NO 的还原作用优于焦炭对 NO 的还原作用, 后期则后者优于前者。煤粉对 NO 的还原效果均比同温度下的热解气体或焦炭的单独还原效果好, 但比各自单独还原的效果总和要差, 这是因为同时存在同相还原和异相还原以及二者相互竞争的影响。煤粉还原反应的前期同相还原起主要作用, 后期则异相还原起主要作用。加速煤粉热解气体和焦炭的分离有利于煤粉对 NO 的还原。在煤粉再燃区, 没有燃烧的煤粉对 NO 的还原贡献更大。

关键词: 热动力工程; 烟煤; 热解气体; 焦炭; NO; 还原特性

0 引言

煤燃烧是我国大气污染的主要来源, 燃煤带来的污染物 NO_x 排放问题日益受到人们的关注。燃料再燃技术是降低 NO_x 排放的有效方法之一, 其中对于再燃燃料的选取已有较多研究, 如天然气、煤粉、水煤浆、油或其他碳氢燃料等^[1-9]。有学者^[10-11]研究表明, 采用煤粉作为再燃燃料, 不但对 NO_x 还原效果明显, 而且对于煤粉炉, 其再燃燃料种类与一次燃料相同, 无需考虑对第二种燃料的输送问题, 这在煤粉炉上使用再燃技术提供了有利条件。但考虑到使用常规煤粉再燃会带来燃尽方面的问题, 因此有学者^[12-14]对超细煤粉再燃进行了研究, 为工程应用提供了参考。煤粉再燃技术对NO的还原作用包括两个方面, 一是热解气体对NO的同相还原, 二是焦炭对NO的异相还原。有学者^[15]将煤的挥发分抽象为单纯几种气态组分: CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_2 , 通过计算分析, 研究了各组分在不同的再燃工况下对NO

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(50525620); 国家重点基础研究发展规划基金项目(2006CB200303)。

Scientific Funds for Outstanding Young Scientists of China (50525620); Project Subsidized by the Special Funds for Major State Basic Research Projects of China (2006CB200303)。

的还原效果,对分析再燃机理具有重要意义。有学者^[16]把烟煤和褐煤的热解气体作为再燃燃料对NO的还原作用进行研究,得出其还原效果优于甲烷或天然气。文献[17]研究得出,煤粉作为再燃燃料还原NO时,煤焦的异相还原机理起了重要作用。

煤粉在不同温度下的热解产物组成不同,使得热解产物的还原特性也就不同,通常的研究是在模拟烟气的有氧情况下研究还原效果^[15-17],为了避免其有氧条件下热解气体被氧化的影响,本文主要是在无氧条件下,将不同温度下烟煤煤粉的热解气体、焦炭和煤粉分别对NO的还原效果进行综合比较性实验,研究其极限还原效果。

1 实验部分

1.1 实验样品及实验系统

实验煤种选用兖州烟煤,煤粉粒径为 150~200 目,其工业分析和元素分析见表 1。

表 1 兖州烟煤的工业分析和元素分析

Tab. 1 Proximate and ultimate of Yanzhou bituminous coal

工业分析 w / %				元素分析 w / %				
M _{ad}	A _{ad}	V _{ad}	FC _{ad}	C _{ad}	H _{ad}	N _{ad}	S _{ad}	O _{ad}
4.81	16.97	24.51	53.71	62.56	2.62	0.9	0.41	11.73

本实验采用固定床反应器,实验系统如图 1 所示。实验系统由 Ar 气瓶、Ar、NO 混合气瓶、流量计、混合器、高温定碳炉、德国 Rosemount 烟气分析仪、HP 数据采集仪、计算机以及废气处理系统组成。高温定碳炉的温度由 KSY 智能型温度控制仪控制,炉内有石英管①和②。

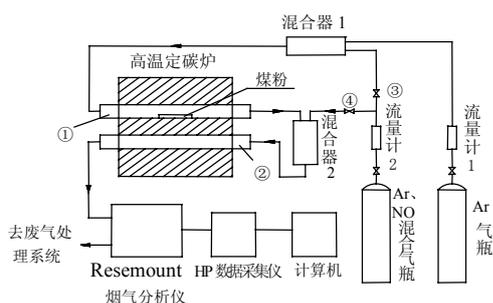


图 1 实验系统图

Fig. 1 Diagram of experimental system

1.2 实验方案

实验包括热解气体的析出规律、热解气体还原 NO、焦炭还原 NO 和煤粉直接还原 NO 共 4 个部分。

在做检测热解气体成分时,将 Ar 气瓶中的 Ar 气经过流量计 1 到混合器 1,然后到高温定碳炉的石英管①,煤粉在石英管①发生热解后出来的热解气体用气袋收集起来,使用气相色谱 Trace 2000 进

行成分分析。该实验不使用 Ar、NO 混合气瓶、混合器 2、石英管②、Rosemount 烟气分析仪、HP 数据采集仪、计算机以及废气处理系统,同时关闭阀门③和④。

在做热解气体还原 NO 时,将阀门③关闭,热解气体在石英管①中产生后,进入混合器 2 与 Ar、NO 混合气瓶出来的气体混合后进入石英管②中发生还原反应,从石英管②出来的气体进入 Rosemount 烟气分析仪,排放气体去废气处理系统,由 HP 数据采集仪和计算机共同完成实验数据的采集和保存。

在做焦炭还原 NO 时,将热解气体还原 NO 的实验结束后,关闭阀门④,打开阀门③,Ar 气瓶的 Ar 气与混合气瓶中的 Ar 和 NO 在混合器 1 混合后进入石英管①,发生焦炭还原 NO 的反应。从石英管①出来的气体经过混合器 2 和石英管②后进入 Rosemount 烟气分析仪,排放气体去废气处理系统,由 HP 数据采集仪和计算机共同完成实验数据的采集和保存。

在做煤粉还原 NO 时,系统状态如焦炭还原 NO,煤粉放在石英管①中。

为了便于还原效果的综合比较,热解气体、焦炭和煤粉直接还原 NO 3 个实验的 NO 初始浓度都是 303 μL/L,还原反应发生以前的系统准备时间 $t_0=200$ s,混合气体流量为 600 mL/min,煤粉质量为 200 mg。

2 实验结果与讨论

2.1 热解气体析出规律

分别在 800 °C、1000 °C 和 1200 °C 下进行热解实验。利用气相色谱进行成分分析可知,主要热解气体成分包括 CO₂、N₂、H₂、CO、CH₄、C₂H₄、C₂H₆、其中对 NO 起还原作用的气体为 H₂、CO、CH₄、C₂H₄、C₂H₆,兖州烟煤在不同温度下分别析出还原性气体成分的分布规律如图 2 所示,横坐标表示温度,纵坐标表示每克煤粉析出还原性气体的毫摩尔数。

在实验温度范围内,H₂、CO、CH₄的析出规律为温度越高析出量越多。C₂H₄、C₂H₆的析出规律却是温度越高析出量越少。H₂、CO、CH₄、C₂H₄、C₂H₆ 5 种还原性气体析出总量的规律是温度越高还原性气体析出总量越多。温度对煤的热解包括 2 个方面,一个是对煤本身的热解,另一个是对热解产物的二次反应。在不存在二次反应的情况下,某一个挥发

组分产量随温度升高均为单一地增加,即随着产生该组分的分解反应的增加而增加。在存在大量二次反应时,温度升高将提高某些组分的产量,而抑制其他组分的产生,当然它反映出由于二次反应相应地引起的某些组分的产生或消耗^[18]。本实验在较高温度下C₂H₄、C₂H₆的析出量反而较少的原因可能是在高温条件下的二次反应使得较大分子的化学键断裂,形成较小分子。

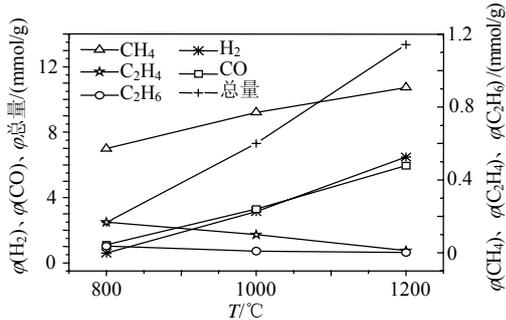
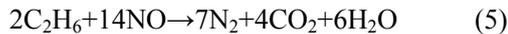


图2 H₂、CO、CH₄、C₂H₄、C₂H₆析出量随温度变化
Fig. 2 H₂, CO, CH₄, C₂H₄, C₂H₆ production changed with temperature

2.2 热解气体还原 NO

分别采用不同温度下煤粉的热解混合气来还原NO,得出NO的浓度变化曲线如图3所示。可以看出,热解气体与NO反应能带来NO浓度值下降,图3中用R_v表示,说明热解气体能对NO产生还原作用。在各温度下,反应前期因热解气体的快速析出还原NO使得R_v快速增加,后期热解气体析出减少使得R_v减少,直到NO浓度回到初始水平。温度越高,析出的热解气体使得NO浓度值下降越多,热解气体的还原作用越强。对NO的同相还原可能存在的反应有:



由于各温度下热解气体中H₂、CO和CH₄3种还原性气体的总量占很大比例,800℃时占5种还原性气体总量的91.7%,而1000℃时占98.5%,1200℃时占99.9%。因此,反应(1)、(2)、(3)可能是同相还原反应的主要反应。

在图3中,1200℃下的曲线(3),当t=232s时NO浓度达到最低值103.7ppm,此时NO还原率达到65.8%。有学者^[19]在过量空气系数为0.2~1时,计算甲烷对NO的还原率约在50%~70%,在过量空气系

数为0.8~0.9之间实验研究^[20]甲烷对NO的还原率约在60%以上,在天然气再燃实验研究^[21]中得出,过量空气系数为0.78时获得70%的最大NO还原率。可见,兖州烟煤的热解气体在无氧条件下的NO还原效果和在有氧条件下甲烷或天然气再燃的NO还原效果基本相当。

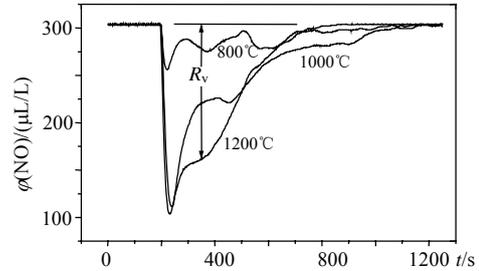


图3 不同温度下热解气体对NO的还原效果
Fig. 3 NO reduction using pyrolysis gas at different temperatures

2.3 焦炭还原 NO

分别将各温度下热解气体析出后剩下的焦炭用来还原NO,得出NO浓度变化曲线如图4所示。因为焦炭在磁舟底部均匀分布并且在实验时间内焦炭的质量充足,使得各温度下的异相还原效果在实验时间后期能达到一个基本稳定的数值,当然如果增加实验时间,反应会随着焦炭的消耗而使得曲线上升,如同图3后期NO的浓度将回到初值。焦炭还原使得NO浓度下降,图4中用R_{ch}表示,各温度下,随着反应时间的进行,NO还原效果R_{ch}值逐渐增加,然后趋于稳定。在反应的各时间点,R_{ch}(800℃)<R_{ch}(1000℃)<R_{ch}(1200℃),说明温度越高,焦炭的异相还原作用越强。对NO的异相还原可能存在的反应有:

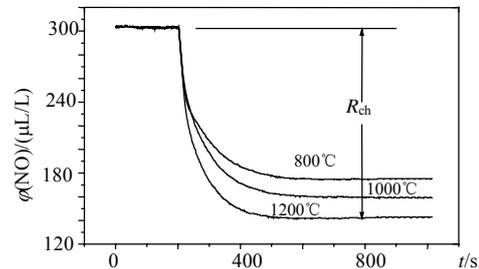


图4 不同温度下焦炭对NO的还原效果
Fig. 4 NO reduction using char at different temperatures

当t=800s,如图4所示,焦炭还原基本稳定,各温度下的CO₂、CO浓度也基本稳定,其中800℃时,浓度比φ(CO)/φ(CO₂)=4.02;1000℃时,φ(CO)/φ(CO₂)=2.91;1200℃时,φ(CO)/φ(CO₂)=2.37。说明反应(6)占主要地位,而且温度越低,φ(CO)/

$\alpha(\text{CO}_2)$ 比值越大, 说明反应(6)相对更主要。温度越高得到的NO还原效果越好, 说明高温对反应(7)的促进更明显。

2.4 煤粉还原 NO

在不同温度下将煤粉直接还原NO, 得到NO浓度变化曲线如图 5 所示。反应开始后使得NO浓度快速下降, 其下降值如图中 R_c 所示, 然后缓慢上升趋于稳定值, 这个快速下降是由于煤粉热解气体和焦炭对NO的还原同时作用, 实验时间后期 R_c 趋于稳定值是由于后期基本上属于焦炭还原。从图中 3 个温度条件下的煤粉还原可知, 温度越高, R_c 越大, 煤粉对NO的还原效果越好。

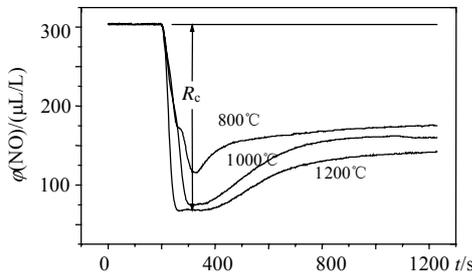


图 5 不同温度下煤粉对 NO 的还原效果

Fig. 5 NO reduction using pulverized coal at different temperatures

2.5 还原性综合讨论

为进一步定量综合分析还原效果, 将以上热解气体、焦炭和煤粉分别还原NO的曲线产生的 R_v , R_{ch} 以及 R_c 值按反应进行时间做积分运算, 再折合出单位质量煤粉条件下热解气体、焦炭和煤粉分别对NO的还原效果。将还原效果积分曲线比较归纳, 如图 6~8 所示, 横坐标表示时间, 纵坐标表示还原效果, 即每克煤粉产生的热解气体、每克煤粉产生的焦炭或者每克煤粉分别还原NO的毫克数。

图 6 是将不同温度下的热解气体和焦炭对NO的还原效果进行比较, 曲线(1)~(3)为热解气体的还原效果积分曲线, 曲线(4)~(6)为焦炭的还原效果积分曲线。热解气体的还原效果在初始时间段随热解气体的快速析出而上升较快, 之后随着热解气体的析出完毕而趋于水平, 比较曲线(1)~(3)并且结合图 2 可知, 温度越高, 热解气体析出总量越多, 还原效果越好。在实验时间内, 焦炭的还原效果积分曲线随时间增加几乎呈现直线上升, 这是由于焦炭量的充足使之得到稳定还原的结果。比较曲线(4)~(6)可知, 温度越高, 焦炭的还原效果越好。图中 t_0 为还原反应开始时间, t_1 为曲线(1)和(4)的交点对应的时间, t_2 为曲线(2)和(5)的交点对应的时间, t_3 为曲线(3)和(6)的交点对应的时间, $t_0=200\text{s}$, $t_1=213\text{s}$,

$t_2=445\text{s}$, $t_3=508\text{s}$, 分别比较 800°C, 1000°C 和 1200°C 下的热解气体和焦炭对NO的还原效果, 得出其规律如下: 在 t_1 , t_2 , t_3 之前, 该温度下, 热解气体还原效果积分曲线在焦炭还原效果积分曲线的上方, 说明热解气体的还原效果优于焦炭的还原效果, 但是在其相应的时间点以后, 热解气体的还原效果比焦炭的还原效果差。这是由于在前期快速析出热解气体浓度高, 还原性好, 而后期浓度低, 还原性弱。

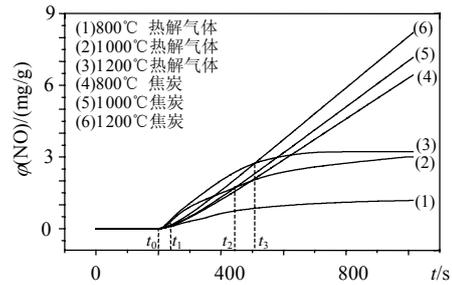


图 6 不同温度下热解气体和焦炭对 NO 的还原效果比较
Fig. 6 Comparison of NO reduction using pyrolysis gas and char separately at different temperatures

图 7 是将不同温度下煤粉对 NO 的还原效果与热解气体和焦炭分别对 NO 的还原效果总和进行比较。曲线(1)~(3)为各温度下热解气体和焦炭的还原效果总和, 曲线(4)~(6)为各温度下煤粉的还原效果。曲线(1)、(2)、(3)分别在曲线(4)、(5)、(6)的上方, 可知, 在相同温度下, 热解气体与焦炭分别单独还原 NO 的效果总和大于煤粉还原 NO 的效果, 这可能是因为煤粉的还原中, 热解气体的析出影响了 NO 向焦炭表面的扩散, 以及热解气体与焦炭对 NO 还原时二者的相互竞争作用影响了还原的进程。

图 8 是将 1200°C 下热解气体、焦炭和煤粉对NO的还原效果进行比较。如图所示, 煤粉的还原效果积分曲线(3)一直在热解气体还原效果积分曲线(1)和焦炭还原效果积分曲线(2)的上方, 说明煤粉的还原效果均优于热解气体和焦炭单独的还原效果。煤粉的还原包含热解气体的同相还原和焦炭的异相还原, 由图 8 可知, 反应前期在 $t=508\text{s}$ (即图中 t_b 时刻)之前同相还原起主要作用, 后期(即 t_b 时刻以后)异相还原起主要作用。在 $t=742\text{s}$ (即图中 t_c 时刻), 热解气体的还原效果积分曲线(1)几乎不再上升, 焦炭和煤粉还原效果积分曲线仍然继续上升, t_c 时刻热解气体对应的NO还原效果积分值 $R_v'=3.210\text{ mg/g}$, 焦炭对应的NO还原效果积分值 $R_{ch}'=5.267\text{ mg/g}$, 煤粉对应的NO还原效果积分值 $R_c'=7.533\text{ mg/g}$, 而热解气体与焦炭分别还原NO的积分值总和 $R_v'+R_{ch}'=8.477\text{ mg/g}$, 这个总和与 R_c' 的差值 $\Delta R=(R_v'+R_{ch}')-R_c'=0.944$

mg/g, 这个差值是热解气体和焦炭分开独立还原带来的效果, 因此加速热解气体和焦炭的分离有利于NO的还原。

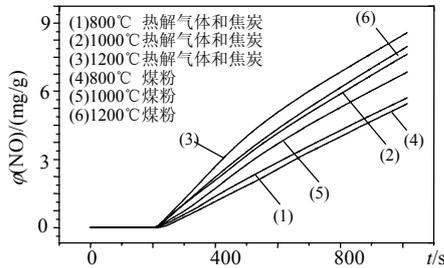


图7 不同温度下煤粉对NO的还原效果与热解气体和焦炭分别对NO的还原效果总和比较

Fig. 7 Comparison of NO reduction using pulverized coal and the combined NO reduction using pyrolysis gas and char separately at different temperatures

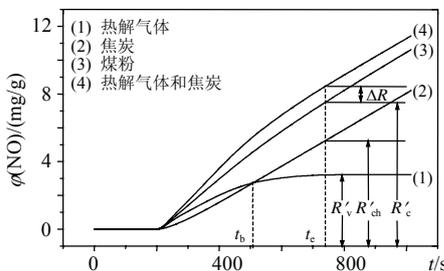


图8 1200°C下热解气体、焦炭和煤粉对NO的还原效果比较

Fig. 8 Comparison of NO reduction using pyrolysis gas, char and pulverized coal at 1200°C

另外, 目前工程应用中煤粉作为再燃燃料的脱硝率一般在50%左右, 再燃煤粉量占总煤粉消耗量的20%左右, 例如对一台410t/h煤粉炉实施煤粉再燃改造, 总耗煤量为13.5kg/s, 其中再燃煤粉量2.7kg/s, 送风量为94 Nm³/s, 在改造前后NO排放分别为600 mg/Nm³和300 mg/Nm³, 折合计算出每克煤粉还原NO约10mg左右, 这个数值仅相当于图8中t=959 s时的煤粉还原效果。再有, 本文作者通过对兖州烟煤煤粉有氧还原NO的实验研究可知, 在氧量为4%的条件下, t=822 s时, NO还原效果达到最大值为6.955 mg/g, 而图8中当t=822 s时对应的NO还原效果积分值R'_c=8.462 mg/g, 说明煤粉的无氧还原比有氧还原效果好。从而进一步说明在煤粉作为再燃燃料的再燃区中, 没有燃烧的煤粉对NO的还原贡献更大。

3 结论

(1) 兖州烟煤在800, 1000和1200°C条件下快速热解析出还原性气体的规律为: H₂、CO、CH₄为温度越高析出量越多; C₂H₄、C₂H₆为温度越高析

出量越少。

(2) 热解气体对NO的同相还原性随热解温度升高而增强, 焦炭对NO的异相还原性也随温度的升高而增强。同温度下, 在反应前期热解气体对NO的还原效果优于焦炭对NO的还原效果, 后期则后者优于前者。

(3) 在各温度下煤粉直接对NO的还原效果均优于同温度下的热解气体和焦炭单独对NO的还原效果, 这是因为煤粉的还原同时包含同相还原和异相还原, 在反应的前期同相还原起主要作用, 后期则异相还原起主要作用。

(4) 加速煤粉热解气体和焦炭的分离有利于煤粉对NO的还原。

(5) 在煤粉作为再燃燃料的再燃区中, 没有燃烧的煤粉对NO的还原贡献更大。

参考文献

- [1] 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. Developing condition of low NO_x combustion technology [J]. Thermal Power Generation, 2000, 29(2): 2-9(in Chinese).
- [2] 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).
- [3] 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.
- [4] Shen Boxiong, Yao Qiang, Xu Xuchang. Kinetic model for natural gas reburning[J]. Fuel Processing Technology, 2004, 85(11): 1301-1315.
- [5] 沈伯雄, 孙幸福. 天然气先进再燃区脱硝效率影响因素的实验与模拟研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 146-149.
Shen Boxiong, Sun Xingfu. Study on the parameters that influence the efficiency of DE-NO in advanced natural gas reburning area by experimental and kinetic model[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 146-149(in Chinese).
- [6] Liu Hao, Hampartsoumian E, Gibbs B M. Evaluation of the optimal fuel characteristics for efficient NO reduction by coal reburning[J]. Fuel, 1997, 76(11): 985-993.
- [7] Zarnescu V, Pisupati S V. The effect of mixing model and mixing characteristics on NO_x reduction during reburning[J]. Energy & Fuels, 2001, 15(2): 363-371.
- [8] Ashworth R A, Maly P M, Carson W R. Results of CWS reburn tests on a 10×10⁶ Btu/hr tower furnace and its impact on CWS reburn economics[C]. 22nd international conference on coal utilization & fuel systems, Clearwater, FL, USA, 1997.
- [9] 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).
- [10] Kichener A, Spliechoff H. The effect of different reburning fuels on NO_x reduction[J]. Fuel, 1994, 73(9): 1443-1446.
- [11] Hartmut S, Ulrich G, Helmut R. Basic effects on NO_x emissions in air staging and reburning at a bench-scale test facility[J]. Fuel, 1996, 75(5): 560-564.
- [12] 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(in Chinese).
- [13] 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(in Chinese).
- [14] 金晶, 张忠孝, 李瑞阳. 超细煤粉再燃的模拟计算与试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 215-218.
Jin Jing, Zhang Zhongxiao, Li Ruiyang. Numerical simulation and experimental study on micronized coal reburning[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 215-218(in Chinese).
- [15] 钟北京, 傅维标. 煤的挥发分对NO_x再燃特性的研究[J]. 燃烧科学与技术, 2000, 6(2): 185-189.
Zhong Beijing, Fu Weibiao. Study of NO_x reduction during reburning coal with volatiles[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2000, 6(2): 185-189(in Chinese).
- [16] Spliethoff H, Greul U, Rüdiger H, et al. NO_x Reduction using coal pyrolysis gas as reburn fuel: Effects of pyrolysis gas composition[C]. The 8th International Conference on Coal Science, Oviedo/Spain, 1995, 10-15.
- [17] 钟北京, 施卫伟, 傅维标. 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 of NO reduction with coal and char[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2000, 21(3): 383-387(in Chinese).
- [18] 岑可法, 姚强, 骆仲泱, 等. 高等燃烧学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002: 256-260.
- [19] 钟北京, 傅维标. 气体燃料再燃对NO_x还原的影响[J]. 热能动力工程, 1999, 14(6): 419-423.
Zhong Beijing, Fu Weibiao. Effects of gaseous fuel reburning on NO_x reduction[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 1999, 14(6): 419-423(in Chinese).
- [20] 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 Zhongxiao, Yao Xiangdong, Wu Xiaojiang, et al. Experimental study on low NO_x emission using gas reburning[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 99-102(in Chinese).
- [21] Waseem A N, Robert E J, Jacob A P, et al. Detailed measurements in a pulverized coal flame with natural gas reburning[J]. Fuel, 1999, 78(6): 689-699.

收稿日期: 2007-01-31.

作者简介:

苟 湘(1972—), 男, 四川泸州人, 博士研究生, 主要从事燃煤污染物控制方面的研究, gouxiang@sina.com;

周俊虎(1962—), 男, 浙江宁波人, 教授, 博士生导师, 主要从事环境及能源清洁利用方面的研究。

(编辑 王庆霞)