

苏亚欣, Benson B. Gathitu, Chen Weiyin. 2011. Fe_2O_3 控制再燃脱硝中间产物 HCN [J]. 环境科学学报, 31(6): 1181-1186

Su Y X, Benson B. Gathitu, Chen W Y. 2011. HCN control by Fe_2O_3 during re-burning of waste tires [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(6): 1181-1186

Fe_2O_3 控制再燃脱硝中间产物 HCN

苏亚欣^{1,*}, Benson B. Gathitu², Chen Weiyin²

1. 东华大学环境学院, 上海 201620

2. Department of Chemical Engineering, University of Mississippi, Oxford, MS 38677, USA

收稿日期: 2010-09-08

修回日期: 2010-10-09

录用日期: 2010-11-01

摘要:再燃脱硝过程的中间产物 HCN 在燃尽过程的二次氧化对最终 NO 的脱除效率影响很大, 有效控制 HCN 的转化对提高再燃脱硝的效率具有重要意义. 以天然气和 150 目废轮胎粉为再燃燃料, 利用模拟烟气在陶瓷管反应器中对典型条件下的再燃脱硝特性和中间产物 HCN/ NH_3 的生成特性进行了实验研究. 结果表明在典型的再燃条件下, 随着再燃区空气系数的增大(再燃燃料的给料量减少), HCN 的生成量逐渐下降, 再燃过程生成的 HCN 的浓度远大于 NH_3 , 表明 HCN 是主要的中间产物. 进一步对 HCN 在不同温度下的分解特性以及在 Fe_2O_3 的催化作用下的还原特性进行了实验测试, 发现 Fe_2O_3 能够有效地减少再燃过程 HCN 的生成, 水蒸气和温度对 Fe_2O_3 的催化作用具有一定的影响. 在再燃温度为 1250 °C, 燃尽温度为 1150 °C, 进口 NO 体积浓度为 0.05%, 烟气中水蒸气体积比为 6.35% 以及再燃段和燃尽段的空气系数分别为 0.9 和 1.2 条件下, 当 Fe 的摩尔浓度为 4000×10^{-6} 时, 废轮胎的再燃 + 燃尽脱硝效率达到 88%.

关键词:氮氧化物 (NO_x); 再燃脱硝; HCN/ NH_3 ; Fe_2O_3

文章编号: 0253-2468(2011)06-1181-06

中图分类号: X701

文献标识码: A

HCN control by Fe_2O_3 during re-burning of waste tires

SU Yaxin^{1,*}, Benson B. Gathitu², CHEN Weiyin²

1. School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620

2. Department of Chemical Engineering, University of Mississippi, Oxford, MS 38677, USA

Received 8 September 2010;

received in revised form 9 October 2010;

accepted 1 November 2010

Abstract: The re-oxidation of HCN during burnout strongly influences the final NO reduction efficiency by reburning. Effective control of HCN conversion is important to improve NO reduction efficiency. Natural gas and waste tire powders of 150-mesh were used as reburning fuel and experimental investigation of the reburning performance and HCN/ NH_3 formation under typical reburning conditions were carried out with simulated flue gases in a ceramic reactor. Results showed that the amount of HCN decreased as the air/fuel ratio in the reburning zone increased. The HCN concentration was much more than that of NH_3 during reburning, which confirmed that HCN was the major intermediate product. Further experiments were conducted on the thermal decomposition of HCN and reduction of HCN catalysed by Fe_2O_3 . Fe_2O_3 was effective in reducing the formation of HCN. Water vapor and temperature had an influence on Fe_2O_3 catalysis effectiveness. The NO reduction efficiency of 88% was achieved at a reburning temperature of 1250 °C, burnout temperature of 1150 °C, air/fuel ratio of reburning 0.9, air/fuel ratio of burnout zone 1.2, molar concentration of Fe 4000×10^{-6} and volume fraction of water vapor in simulated flue gases 6.35%.

Keywords: nitrogen oxides; reburning; HCN/ NH_3 ; Fe_2O_3

1 引言(Introduction)

燃煤过程排放的氮氧化物 (NO_x) 是大气中 NO_x 污染气体的主要来源. 再燃脱硝技术是一种在燃烧过程中控制 NO_x 的有效技术(Wendt *et al.*, 1973).

它是一种三段式燃烧技术, 通过把再燃燃料(占总燃料的 10% ~ 30%) 在主燃区以上送入锅炉, 在富燃料条件下, 再燃燃料形成的烃类首先与 NO 反应生成 HCN, 然后 HCN 通过逆向扩大的 Zeldovich 反应被还原为 N_2 (Smoot *et al.*, 1998). 1983 年再燃技

基金项目: 东华大学中央高校基本科研业务费专项资金(No. 20091304-4-01); 上海市自然科学基金(No. 11ZR1401000)

Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(No. 20091304-4-01) and the Natural Science Foundation of Shanghai (No. 11ZR1401000)

作者简介: 苏亚欣(1972—), 男, 副教授(博士), E-mail: suyx@dhu.edu.cn; * 通讯作者(责任作者)

Biography: SU Yaxin(1972—), male, associate professor(Ph. D.), E-mail: suyx@dhu.edu.cn; * Corresponding author

术首次被应用到大型锅炉的脱硝过程,并取得了50%的脱硝效果(Takahashi *et al.*, 1983).我国在大型锅炉中采用超细煤粉的再燃脱硝技术也达到了50%的脱硝效率(文军等, 2004).很多研究人员对再燃脱硝进行了多方面的机理研究(Chen and Ma, 1996; Chen and Tang, 2001; Chen and Gathitu, 2006; Glarborg *et al.*, 2000; Harding *et al.*, 2000; Smart *et al.*, 1994; Smoot *et al.*, 1998; 李戈等, 2004; 刘忠等, 2003; 高正阳等, 2004; 金晶等, 2004; 徐璋等, 2003).目前国际上所采用的再燃燃料一般为天然气和超细煤粉.在过去近30年时间里,实验室小型实验台的研究结果和大型锅炉的实际运行结果都表明,无论是煤粉还是天然气,最多只能脱除大约60%左右的主燃区生成的 NO_x (Johnson *et al.*, 1999).其中一个重要原因是再燃中间产物 HCN/NH_3 在燃尽过程二次氧化为 NO 所致.因此,如何有效地控制再燃中间产物 HCN/NH_3 是提高再燃脱硝效率的关键.

Chen等(Chen and Gathitu, 2006)研究发现,褐煤灰能够有效减少天然气再燃中间产物 HCN 和 NH_3 的生成.他们使用了两种不同来源的褐煤灰,其中布袋除尘器所收集的褐煤灰与同一锅炉的静电除尘器所收集的褐煤灰的作用相差较大.对比两种灰的成分发现,布袋除尘器所收集的褐煤灰中 Fe_2O_3 含量较高,而其余成分两种灰的含量很接近.Lissianski等(Lissianski *et al.*, 2001a; Lissianski *et al.*, 2001b)的实验研究发现,某些金属氧化物能有效地提高再燃脱除 NO 的效率,但未揭示它们对 HCN/NH_3 的生成规律的影响机制.

作者利用天然气和废轮胎为再燃燃料,对在典型再燃条件下中间产物 HCN/NH_3 的生成特性以及 Fe_2O_3 、水蒸气等对 HCN 的控制作用进行实验研究,本文报道部分研究结果.

2 实验系统(Experimental setup)

实验在一个陶瓷管反应器中利用模拟烟气进行,实验系统如图1所示.该实验装置的加热段(反应器)为一个内径1.91 cm的陶瓷管,总长64 cm,要加热的中间部分(长度为30 cm)封装在一个电加热炉中,加热温度可达1250 °C.完整的再燃脱硝需要由再燃和燃尽两个阶段来实现.再燃过程是在富燃料条件下,燃料中的挥发份烃类还原 NO 为 N_2 .由于氧不足,因此经过再燃后虽然 NO 浓度下降了,

但燃料通常不能燃尽.因此,为提高燃料的燃尽率,需要在再燃后补充氧气,形成富氧环境,实现剩余燃料的燃尽.本实验台的炉子由上、下两段串连,进行再燃实验时,只加热上部炉子.当进行再燃和燃尽实验时,同时加热两段炉子,并给下面的炉子补充氧气,实现燃尽.检测再燃中间 HCN/NH_3 时,直接进行上部炉子的再燃实验,而不加热下部炉子.

模拟烟气的成分为16.8% CO_2 , 1.95% O_2 , 500×10^{-6} 的 NO ,其余用 He 配平.实验时燃料和模拟烟气等从反应器管道的上部送入,最终的烟气从底部引出,送入在线检测仪器检测 NO 、 CO 、 CO_2 的含量.其中 NO 用基于化学发光法检测, CO 、 CO_2 用基于红外技术的方法检测, HCN/NH_3 的浓度用湿化学法检测(Chen *et al.*, 2006).再燃温度为1150 °C,燃尽温度为1250 °C,再燃段的驻留时间为0.2 s,燃尽段驻留时间为0.14~0.16 s.驻留时间由陶瓷管反应段的长度和通过陶瓷管的烟气平均流速相除得到.

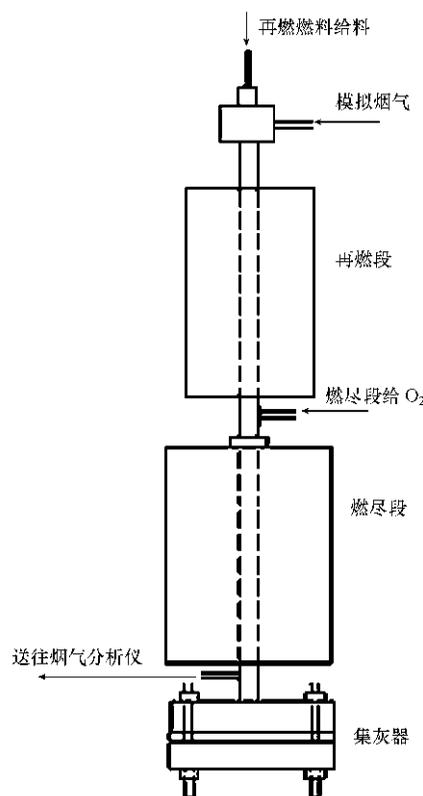


图1 实验系统示意图

Fig.1 Experimental setup

实验中使用的燃料为甲烷和150目废轮胎胶粉.废胶粉的工业与元素分析如表1所示.

表 1 废胶粉的工业与元素分析(质量分数)

Table 1 Ultimate and proximate analysis of waste tire powder

工业分析				$Q_{b,ad}$ $/(J \cdot g^{-1})$	元素分析				
M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}		C_{ad}	H_{ad}	N_{ad}	S_{ad}	O_{ad}
0.80%	7.41%	64.64%	27.15%	39564	80.92%	6.804%	0.384%	1.666%	4.293%

3 结果 (Results)

为表征燃烧过程的氧气供给情况,引入一个空气系数,定义为所供应的实际空气量与燃料完全燃烧所需的理论空气量的比,记做 SR 。当 $SR > 1$ 时为富氧条件,当 $SR < 1$ 时为富燃料条件。记再燃区的空气系数为 SR_2 ,燃尽区的空气系数为 SR_3 。

3.1 再燃结果

图 2 为 150 目废胶粉在炉膛温度 1150 °C,初始 NO 体积分数 0.05% 和 0.08%,再燃区停留时间 0.2 s,进气流量 $2 L \cdot min^{-1}$ 时的再燃脱硝效率的实验结果。结果表明,随 SR_2 的增加,再燃脱硝效率下降,最佳的 SR_2 大约在 0.9 左右。再燃脱硝是在富燃料条件下,燃料中的挥发份气体与 NO 发生一系列的还原反应,把 NO 转化为 N_2 。如果 SR_2 过小,则再燃过程消耗的再燃燃料过多,而脱硝效率的增加却十分有限。此外,再燃过程生成的中间产物 HCN 和 NH_3 将会随着再燃燃料的增加而增加(见图 3),它们在随后的燃尽段(富氧段)还将被重新氧化为 NO,从而使得总的脱硝效率将降低。因此,再燃段的 SR_2 不宜小于 0.9。再燃单段实验研究结果提供了最佳的再燃参数 SR_2 。

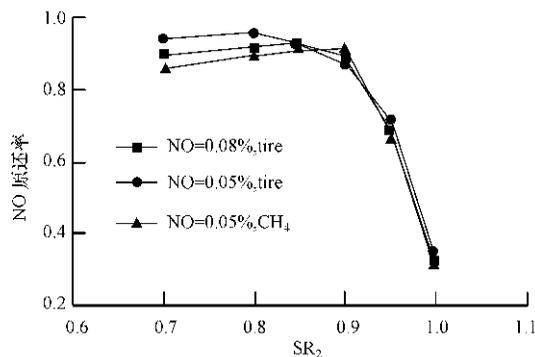


图 2 再燃脱硝效率

Fig. 2 NO reduction efficiency during reburning

3.2 再燃中间产物 HCN/ NH_3

再燃过程的重要中间产物是 HCN 和 NH_3 。经过再燃燃料的还原,NO 部分被转换为 N_2 ,部分转换为 HCN 和 NH_3 (Smoot *et al.*, 1998)。在燃尽段的富氧

条件下 HCN 和 NH_3 将再次被氧化为 NO,导致最后的 NO 排放量增加。为掌握再燃过程中间产物 HCN 和 NH_3 的生成特性,对典型再燃条件下(1150 °C, $SR_2 = 0.85 \sim 0.95$),天然气和废轮胎再燃过程生成的 HCN/ NH_3 进行了检测,结果如图 3 所示。

与天然气再燃相比,在相同的再燃条件下,废轮胎再燃产生的中间产物 HCN 的浓度较高。随着 SR_2 的增大(再燃燃料的给料量减少),HCN 的生成量逐渐下降,而 NH_3 的生成量在 SR_2 大于 0.9 后变化不大,因此, SR_2 的最佳的值可确定为 0.9。对比 HCN 和 NH_3 的浓度发现,再燃过程生成的 HCN 的浓度远大于 NH_3 ,表明 HCN 是主要的中间产物。有效地控制再燃过程的中间产物 HCN 的生成并将其还原为 N_2 ,对于提高最终的脱硝效率十分关键。因此,需要进一步研究 HCN 的还原条件。

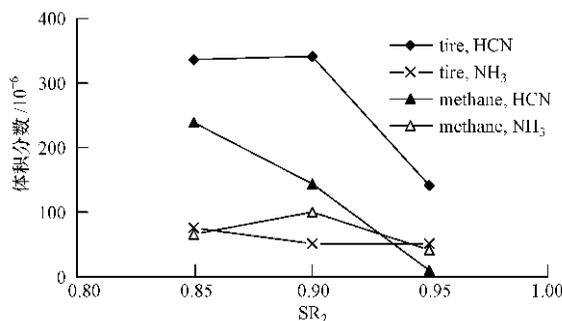


图 3 再燃中间产物

Fig. 3 Reburning intermediate product

3.3 Fe_2O_3 对 HCN 生成的影响

在图 1 所示的实验装置中只利用再燃段炉膛进行实验,通入体积百分比为 0.06% 的 HCN(He 为配平气体),在 1150 ~ 1300 °C 温度下,检测出口 HCN 的变化特点。 Fe_2O_3 的纯度为商品纯,粒度在 $5 \mu m$ 以下。结果如图 4 所示。

当不使用 Fe_2O_3 的时候,出口 HCN 浓度的变化反映了 HCN 自身受热分解的特点。随着炉膛反应温度的升高,HCN 的浓度迅速下降,表明随着炉内温度的升高,HCN 受热分解加强。当向炉膛供给 1200×10^{-6} 的 Fe_2O_3 时,在相同的温度条件下,出口 HCN 的浓度显著降低。两条曲线的差表示了 Fe_2O_3 对 HCN 的催化还原作用。

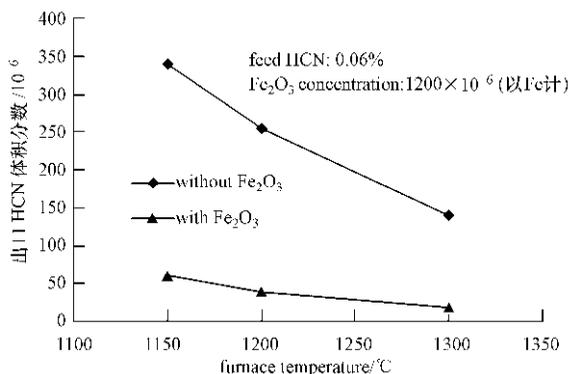
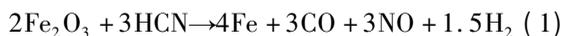
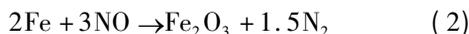
图4 HCN的热分解和Fe₂O₃的催化效果

Fig. 4 Thermal decomposition and catalytic reduction of HCN

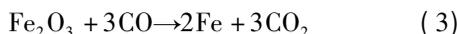
Tan 等 (Tan *et al.*, 2010) 对 CaO、MgO 和 Fe₂O₃ 与 HCN 的反应机理进行了实验研究,发现 Fe₂O₃ 将 HCN 转化为了 NO,并提出了如下的 Fe₂O₃ 对 HCN 的作用机理:



研究人员 (Hayhurst and Ninomiya, 1998; Lissianski *et al.*, 2001a; Gradon and Lasek, 2010) 已经发现 NO 在 Fe 的催化作用下通过下面的反应被还原为 N₂:



此外,Fe₂O₃ 和 CO 发生如下反应:



在 Fe₂O₃ 的作用下,HCN 最终通过反应 (1) ~ (3) 被还原为 N₂.

3.4 水蒸气和温度对 Fe₂O₃ 催化作用的影响

前人 (Bilbao *et al.*, 1995) 的反应模型的模拟研究表明,在再燃脱硝复杂的中间反应方程中,水蒸气作为第三方出现后,会使部分反应的动力学常数增大数倍,如有水时 CH₄ 分解为 CH₃、H 两种自由基的反应速度常数增加 5 倍,中间产物 HCO 分解为 CO 和 H 自由基的反应速度常数增加 5 倍等,它们都会影响再燃脱硝复杂的反应过程.此外,在再燃脱硝的反应模型中,H、OH 自由基是参与 HCN 转化的重要的反应基元.因此,在反应器中通过补充水蒸气,在高温下水蒸气的分解提供 H、OH 自由基,从而检验水蒸气对再燃脱硝反应的作用.比较典型的煤燃烧后烟气中的水蒸气的含量为 6.35% 左右,因此在模拟烟气中加入体积比为 6.35% 的水蒸气来模拟在接近实际烟气条件下的再燃脱硝特性.以甲烷为再燃燃料,进行再燃和燃尽实验,检测出口 NO 浓度,结果如图 5 所示.图中横

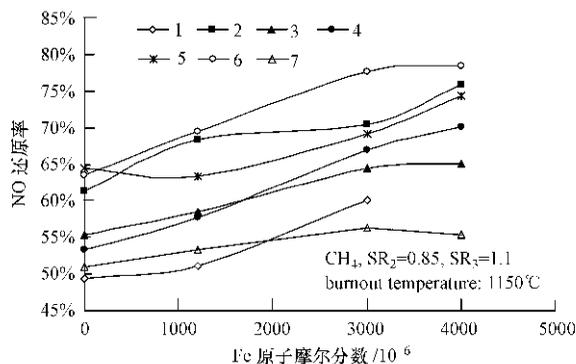
坐标表示 Fe 原子与烟气中总的气体分子的摩尔比.实验工况见表 2.

从实验结果看到,在相同温度时,通入水蒸气能明显地提高 NO 的脱除率.在相同的水蒸气含量条件下,如水蒸气为 6.35% 时,随着温度的升高,NO 的脱除率增加,而在 1250℃ 和 1300℃ 时 NO 的脱除率比较接近.在 1300℃,水蒸气含量为 17% 时 NO 的脱除率最高.然而,由图 4 可知,在较高温度下,中间产物 HCN 的热分解反应比较剧烈,因此,1300℃,水蒸气含量为 17% 时 NO 的脱除率还受 HCN 热分解的影响.

表 2 图 5 的实验工况

Table 2 Cases for Fig 5

曲线	再燃温度/℃	水蒸气体积比
1	1250	0
2	1300	0
3	1250	6.35%
4	1300	6.35%
5	1250	17.00%
6	1300	17.00%
7	1150	6.35%

图 5 水蒸气和温度对 Fe₂O₃ 催化作用的影响Fig. 5 Effect of water vapor and temperature on catalysis of Fe₂O₃

3.5 再燃 + 燃尽两段再燃脱硝结果

由于废轮胎再燃产生的中间产物 HCN 生成量较多,有效控制 HCN 的生成,则可以提高废轮胎再燃脱硝的最终效率.此外,由于煤的以芳香族环链为主的缩合芳香体系的化学结构,使得煤粉再燃过程中一部分氮将残留于煤焦中,煤焦中的氮在燃尽过程的氧化生成新的 NO,从而导致煤粉再燃的效率难以超过 60% (Johnson *et al.*, 1999; Molina *et al.*, 2000; Molina *et al.*, 2002). 废轮胎的分子结构主要是脂肪烃结构,其中的 N 元素只存在于碳-氢

的直链侧链中,燃烧时它不生成含 N 的焦,因此再燃时它不存在焦氮的二次氧化难题. 因此,只要在再燃时通过合理控制中间产物 HCN 的生成,就可避免在燃尽段 NO 的重新生成. 而且,废轮胎是一种废弃物,用于再燃脱硝也为其能源资源化利用提供了一种全新的技术途径.

由再燃实验确定的最佳的再燃 SR_2 以及水蒸气的体积比、再燃温度等参数后,对甲烷和废轮胎粉在 Fe_2O_3 的作用下的再燃 + 燃尽特性进行了实验研究,结果如图 6 所示. 再燃段炉膛温度为 $1250\text{ }^\circ\text{C}$, 燃尽段炉膛温度为 $1150\text{ }^\circ\text{C}$, 进口 NO 体积分数为 0.05% , 水蒸气的体积比为 6.35% . 结果表明, Fe_2O_3 对提高再燃脱硝效率作用显著. 随着 Fe_2O_3 供给量的增加,脱硝效率增加. 当 Fe_2O_3 的供给量为 4000×10^{-6} 时,废轮胎的再燃脱硝效率达到了 88% ,超过了甲烷,并远远超过煤粉再燃的效率. 表 3 给出了图 6 中 Fe 的原子浓度所对应的 Fe_2O_3 与废轮胎粉的质量比. 研究表明(Stultz *et al.*, 1992), 4000×10^{-6} 的 Fe_2O_3 对锅炉的受热面的影响大致相当于燃烧烟煤时的情况. 因此,再燃过程添加的 Fe_2O_3 对锅炉受热面的影响不大.

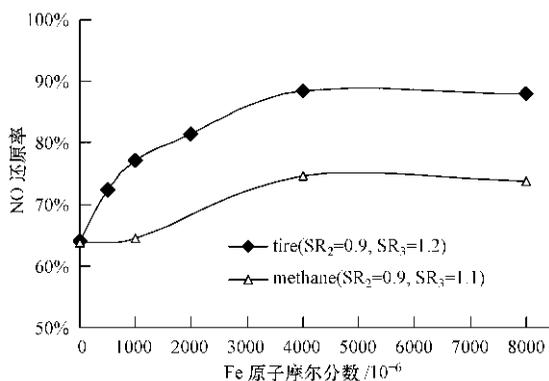


图 6 在 Fe_2O_3 的作用下的再燃 + 燃尽特性

Fig. 6 Effect of Fe_2O_3 on NO reduction by reburning and burnout

表 3 Fe_2O_3 与废轮胎粉的质量比

Table 3 Mass ratio of Fe_2O_3 and waste tires

Fe 原子摩尔分数 / 10^{-6}	Fe_2O_3 与废轮胎粉的质量比
0	0
500	5.63%
1000	11.26%
2000	22.52%
3000	33.78%
4000	45.00%
8000	90.00%

4 结论(Conclusions)

1) 在典型的再燃条件下废轮胎的脱硝效率和天然气相当.

2) Fe_2O_3 能够有效地催化还原 HCN, 控制再燃过程 HCN 的生成, 从而避免了 HCN 在燃尽过程的二次氧化, 使得最终的再燃脱硝效率提高. 水蒸气和温度对 Fe_2O_3 的催化作用具有一定的影响.

3) 在再燃温度为 $1250\text{ }^\circ\text{C}$, 燃尽温度为 $1150\text{ }^\circ\text{C}$, 进口 NO 体积浓度为 0.05% , 水蒸气体积比为 6.35% 以及再燃段和燃尽段的空气系数分别 0.9 和 1.2 条件下, 当 Fe_2O_3 的供给量为 4000×10^{-6} 时, 废轮胎的再燃 + 燃尽脱硝效率达到 88% .

责任作者简介: 苏亚欣(1972—), 男, 副教授(博士), E-mail: suyx@dhu.edu.cn.

参考文献(References):

- Bilbao R, Alzueta M U, Millera A, *et al.* 1995. Simplified kinetic model of the chemistry in the reburning zone [J]. *Ind Eng Chem Res*, 34: 4540-4548
- Chen W Y, Gathitu B B. 2006. Design of mixed fuel for heterogeneous reburning [J]. *Fuel*, 85: 1781-1793
- Chen W Y, Ma L. 1996. Effect of heterogeneous mechanisms during reburning of nitrogen oxide [J]. *AIChE Journal*, 42(7): 1968-1976
- Chen W Y, Tang L. 2001. Variables, Kinetics and mechanisms of heterogeneous reburning [J]. *AIChE Journal*, 47(12): 2781-2797
- Glarborg P, Kristensen P G, Dam-Johansen K. 2000. Nitric oxide reduction by non-hydrocarbon fuels. Implications for reburning with gasification gases [J]. *Energy and Fuels*, 14: 828-838
- Gradon B, Lasek J. 2010. Investigations of the reduction of NO to N_2 by reaction with Fe [J]. *Fuel*, 89: 3505-3509
- Harding N S, Adams B R. 2000. Biomass as a reburning fuel: a specialized cofiring application [J]. *Biomass and Bioenergy*, 19: 429-445
- Hayhurst A N, Ninomiya Y. 1998. Kinetics of the conversion of NO to N_2 during the oxidation of iron particles by NO I. a hot fluidised bed [J]. *Chemical Engineering Science*, 53(8): 1481-1489
- 金晶, 张忠孝, 李瑞阳. 2004. 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*, 24(10): 215-218
- Jin J, Zhang Z X, Li R Y. 2004. Numerical simulation and experimental study in micronized coal reburning [J]. *Proceeding of the CSEE*, 24(10): 215-218 (in Chinese)
- Johnson D K, Engelhardt D A, Harvilla J, *et al.* 1999. Reburning technologies for the control of nitrogen oxides emissions from coal-fired boilers [R]. Topical Report No. 14, Washington, DC: United States Dept of Energy. 1-32
- 李戈, 池作和, 靳东坡, 等. 2004. 生物质废弃物再燃降低 NO_x 排放的试验研究 [J]. *热力发电*, 33(2): 41-44

- Li G , Chi Z H , Si D P , *et al.* 2004. Test and study on reburning of biological wastes to reduce NO_x emission [J]. *Thermal Power Generation* , 33(2) : 41-44(in Chinese)
- Lissianski V V , Maly P M , Zamansky V M , *et al.* 2001a. Utilization of iron additives for advanced control of NO_x emissions from stationary combustion sources [J]. *Industry and Engineering Chemistry Research* 40: 3287-3293
- Lissianski V V , Zamansky V M , Maly P M. 2001b. Effect of metal-containing additives on NO_x reduction in combustion and reburning [J]. *Combustion and Flame* 125: 1118-1127
- 刘忠 , 阎维平 , 高正阳 , 等. 2003. 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* 23(10) : 204-208
- Liu Z , Yan W P , Gao Z Y , *et al.* 2003. The effect of micro-pulverized coal fineness on nitric reduction by reburning [J]. *Proceeding of the CSEE* , 23(10) : 204-208(in Chinese)
- Molina A , Eddings E C , Pershing D W , *et al.* 2000. Char nitrogen conversion: Implications to emissions from coal-fired utility boilers [J]. *Progress of Energy and Combustion Science* , 6: 507-531
- Molina A , Eddings E C , Pershing D W , *et al.* 2002. Nitric oxide destruction during coal and char oxidation under pulverized-coal combustion conditions [J]. *Proceedings of the Combustion Institute* , 29: 2275-2281
- Smoot L D , Hill S C , Xu H. 1998. NO_x control through reburning [J]. *Progress of Energy and Combustion Science* , 24: 385-408
- Takahashi Y , Sakai M , Kunimoto T , *et al.* 1983. Development of MACT in furnace NO_x removal process for steam generators [C]. *Proc. 1982 Joint Symposium on Stationary Combustion NO_x Control* , Electric Power Research Institute , vol. 1 , No. CS-3128
- Tan H Z , Wang X B , Niu Y Q , *et al.* 2010. Studies of interaction mechanism between Iron and HCN [J]. *Asian Journal of Chemistry* , 22(5) : 4017-4025
- The Babcock and Wilcox Company. 1992. Fuel ash effects on boiler design and operation // Stultz S C , Kitto J B , editors. *Steam: its Generation and Use* [M]. Barberton , Ohio: The Babcock and Wilcox Company
- 文军 , 齐春松 , 王月明 , 等. 2004. 细煤粉再燃技术在我国燃煤锅炉上的首次工程应用 [J]. *热力发电* 33(8) : 29-31
- Wen J , Qi C S , Wang Y M , *et al.* 2004. First engineering application of finely pulverized coal re-burning technology on a boiler in china [J]. *Thermal Power Generation* , 33(8) : 29-31(in Chinese)
- Wendt J , Sterling C , Matovich M. 1973. Reduction of sulfur trioxide and nitrogen oxides by secondary fuel injection [J]. *Proceedings of the Combustion Institute* , 15: 897-904
- 徐璋 , 李戈 , 潘维 , 等. 2003. 利用三次风细粉再燃降低 NO_x 排放的几个关键问题分析 [J]. *热力发电* 32(9) : 42-46
- Xu Z , Li G , Pan W , *et al.* 2003. Analysis of several key issues on reducing NO_x emission by reburning tertiary air with finely-pulverized coal [J]. *Thermal Power Generation* , 32(9) : 42-46 (in Chinese)