

白云峰, 李永旺, 吴树志, 等. 2009 钙基吸收剂液相氧化法协同脱硫脱硝试验 [J]. 环境科学学报, 29(3): 505-510

Bai Y F, Li Y W, Wu S Z, *et al*. 2009 Simultaneous absorption of SO₂ and NO from flue gas with CaCO₃ and liquid phase oxidation [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(3): 505-510

钙基吸收剂液相氧化法协同脱硫脱硝试验

白云峰^{1,2}, 李永旺², 吴树志², 刘鹏程², 高翔^{1,*}, 骆仲决¹, 岑可法¹

1 浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 杭州 310027

2 北京博奇电力科技有限公司, 北京 100022

收稿日期: 2008-05-21 修回日期: 2008-07-25 录用日期: 2009-01-14

摘要: 采用 CaCO₃ 作为吸收剂, 利用单隔板喷射鼓泡实验装置研究了 NaClO₂ 作为氧化剂的协同脱硫脱硝效果, 并与 KMnO₄ 进行了对比. 考察了不同试验条件对 NO 和 SO₂ 脱除效率的影响. 实验结果表明, 同等条件下 NaClO₂ 的脱硫脱硝效果优于 KMnO₄; 低 pH 值有利于 NaClO₂ 氧化脱硝, 但对于 KMnO₄ 氧化脱硝, pH 值无明显影响; 提高 SO₂ 浓度或降低 NO 浓度均可提高 NO 脱除效率, NaClO₂ 的氧化脱硝特性较 KMnO₄ 显著; 提高氧化剂加入量和喷射管浸没深度均可以提高脱硫脱硝效率.

关键词: NaClO₂; KMnO₄; CaCO₃; NO; SO₂; 协同脱除

文章编号: 0253-2468(2009)03-505-06 中图分类号: X701.3 文献标识码: A

Simultaneous absorption of SO₂ and NO from flue gas with CaCO₃ and liquid phase oxidation

BAI Yunfeng^{1,2}, LI Yongwang², WU Shuzhi², LIU Pengcheng², GAO Xiang^{1,*}, LUO Zhongyang¹, CEN Kefa¹

1 State Key Laboratory of Clean Energy Utilization Zhejiang University, Hangzhou 310027

2 Beijing Boqi Electric Power Science & Technology CO. LTD., Beijing 100022

Received 21 May 2008 received in revised form 25 July 2008 accepted 14 January 2009

Abstract Systematic comparative experiments on simultaneous flue gas desulfurization and denitrification were conducted with CaCO₃ as the solvent and with NaClO₂ and KMnO₄ as oxidants. The influences of different experimental conditions on the removal efficiencies of SO₂ and NO were examined. Experimental results show that NaClO₂ gives better desulfurization and denitrification results than KMnO₄ under the same conditions. Lower pH is beneficial to denitrification oxidized with NaClO₂, but it has no significant impact on denitrification with KMnO₄. NO removal efficiency can be improved by increasing SO₂ concentration or decreasing NO concentration, more notably for the oxidant NaClO₂ than KMnO₄. Increasing the feeding amount of oxidant or the depth of jet tubes immersed into the sorbent results in a rise in the removal efficiencies of SO₂ and NO.

Keywords NaClO₂; KMnO₄; CaCO₃; NO; SO₂; simultaneous removal

1 引言 (Introduction)

我国是一个煤储量丰富的国家, 煤炭占一次能源的 75%, 能源消费结构对煤的过分依赖导致了环境污染的加剧, 煤炭燃烧所排出的 SO₂ 和 NO_x 是酸雨的主要前体物 (马双忱等, 2006). 发达国家普遍采用 WFGD (Wet Flue Gas Desulfurization) 与 SCR (Selective Catalytic Reduction) 相结合的方法来脱硫脱硝. 虽然此种方法对污染物脱除效率高, 但投资与运行成本也较高, 且工艺复杂 (Srivastava *et al*,

2005; 秦明等, 2005), 故发展多种烟气污染物协同脱除技术成为当前国际上的一个研究热点. 近年来, 各种烟气同时脱硫脱硝技术不断涌现 (赵毅等, 2003; 2005). 在 SO₂ 和 NO_x 的脱除当中 NO_x 的脱除要比 SO₂ 困难得多, 因此, 从 NO_x 角度可将同时脱硫脱硝技术大致可分为 2 类 (王智化等, 2007). 第 1 类是催化还原法: 主要利用催化剂、还原剂等将 NO_x 进行还原 (吴碧君等, 2007), 实现同时脱硫脱硝; 如 ABB 公司的 SNO_x™ 技术, Babcock & Wilcox 公司的 SO_x-NO_x-RO_xBO_x™ 技术. 第 2 类为氧化吸收法: 主要

基金项目: 国家重点基础研究计划项目 (973) 资助项目 (No. 2006CB200303)

Supported by the National Key Basic Research Program of China (No. 2006CB200303)

作者简介: 白云峰 (1975-), 男, 博士; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: xga@emee.zju.edu.cn

Biography: BAI Yunfeng (1975-), male, Ph.D.; * Corresponding author. E-mail: xga@emee.zju.edu.cn

是利用各种强氧化剂和活性自由基将不溶于水的 NO 氧化生成 NO₂, NO₂ 与 SO₂ 在后期同时吸收; 强氧化剂包括 NaClO₂、ClO₂、HClO₃、KMnO₄、H₂O₂ 等 (Chu *et al.*, 2001; Jin *et al.*, 2006), 自由基包括 O²⁻·、OH·、O₃· 等, 其产生技术有电子束技术、脉冲电晕放电、自由基簇射等 (Chien, 2000; Radou *et al.*, 2003; 林赫等, 2002; 吴祖良等, 2006). 基于国内目前石灰石-石膏湿法脱硫技术的广泛应用, 开发可与湿法脱硫技术相结合的氧化吸收法的协同脱硫脱硝技术, 具有非常广阔的工业应用前景.

当前, 国内外采用氧化吸收法同时脱硫脱硝的研究已有大量的报道. Jin 等 (2006) 采用 ClO₂ 水溶液, 在 2.5 L 的反应器中进行了联合脱硫脱硝实验; 实验结果显示, 在最佳运行条件下脱硫效率可达 100%, 脱硝效率可达 66% ~ 72%. Chien 等 (2003) 采用 NaClO₂ 作为氧化剂, 研究了酸性条件下该氧化剂同时脱硫脱硝的动力学特性; 测试结果表明, 污染物吸收速率在 $1.91 \times 10^{-11} \sim 9.59 \times 10^{-10} \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 范围内, 化学反应速率常数在 $1.32 \times 10^7 \sim 1.21 \times 10^8 \text{ L}^{1.9} \cdot \text{mol}^{1.9} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内. Chu 等 (2001) 采用 KMnO₄ / NaOH 氧化吸收液, 在小型双搅拌釜实验台上进行了联合脱硫脱硝实验. 研究结果表明, SO₂ 的吸收接近于气膜控制反应; 提高气流速度不利于 SO₂ 的吸收; NO 对 SO₂ 的吸收无影响作用. 张虎等 (2007) 在固定床反应器中考察了强氧化剂 KMnO₄ 作为添加剂对钙基吸收剂同时脱硫脱硝的调

质效果. 实验结果表明, 在 Ca/(S+O.5N) 为 1.8 时, 钙基吸收剂可获得 31.4% 的脱硫率和 13.5% 的脱硝率; 反应温度升高能够促进 SO₂ 的脱除, 但脱硝率对温度的变化不敏感; 脱硫率随着烟气相对湿度的增加而增加, 但脱硝率与相对湿度的关系不是单调的, 存在一个最大值.

然而, 当前关于氧化吸收法协同脱硫脱硝的研究大多采用强碱作为吸收剂, 相对于湿法脱硫的石灰石脱硫剂, 其工业运行成本必然较高. 所以, 本研究中采用 CaCO₃ 作为吸收剂, 在喷射鼓泡实验台上分别考察 NaClO₂ 和 KMnO₄ 协同脱硫脱硝的效果, 旨在考察喷射鼓泡法钙基吸收剂液相氧化协同脱硫脱硝的影响因素以及脱除特性, 为此种脱硫脱硝技术的优化以及工业化应用提供可靠的依据.

2 试验装置和条件 (Apparatus and conditions)

2.1 试验装置

钙基吸收剂液相氧化脱硫脱硝实验系统如图 1 所示, 系统为单隔板喷射鼓泡装置, 由配气装置、电加热装置、浆液搅拌装置、浆液加入装置、测压装置、烟气分析仪 (Testo350XL) 以及鼓泡塔塔体构成. 鼓泡塔喷射管数目为 5 根, 其中 1 根布置在隔板中央, 其它 4 根喷射管均位于以隔板中点为中心、直径为 150mm 的圆周上; 喷射管内径均为 30mm, 每根喷射管上沿喷射管周在同一水平面上设置 6 个喷射孔, 孔径为 7mm, 喷射孔距喷射管底端距离为

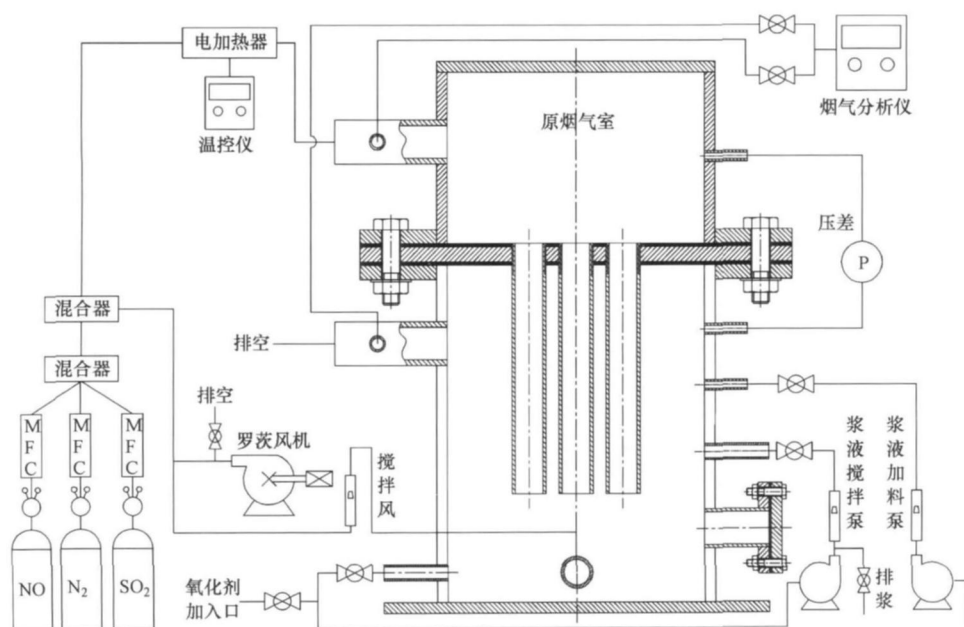


图 1 实验系统示意图

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

100mm. 试验台设计烟气流量为 $80\text{m}^3\text{h}^{-1}$, 模拟烟气主要成分为空气, 由型号为 3L14XD1450 三叶罗茨风机供给. 模拟烟气中 NO 和 SO_2 采用质量流量计控制加入模拟烟气中. 考虑到目前还没有关于烟气中 CO_2 对液相氧化脱硫脱硝有本质影响的研究报道, 本研究中对模拟烟气作了简化, 模拟烟气中未加入 CO_2 . 为避免 NO 气体直接加入充当模拟烟气的空气中而被大量的氧化, 本系统采用 N_2 作为保护气, 将 NO 按一定比例稀释后再与空气混合. 模拟烟气由温度可调 ($20\sim 120^\circ\text{C}$) 的电加热器加热, 加热到设定温度后由原烟气入口通道进入原烟气室, 而后再由喷射管喷射进入浆液中, 进行气液接触洗涤; 洗涤后的净烟气从浆液中鼓出, 再由净烟气排出通道排出. 浆液加入和浆液搅拌均采用隔膜泵, 同时在加入系统和搅拌系统布置转子流量计计量浆液流量. 除了浆液循环搅拌外, 本系统同时还采用气力搅拌, 在塔体下部布置一圆形通道, 通道外壁开孔, 从罗茨风机引入的空气从通道外壁的孔喷射出, 实现对浆液的搅拌, 避免液固分离.

2.2 试验材料

为模拟石灰石-石膏湿法烟气脱硫工程所用的浆液固体含量和浆液组份, 实验所用的吸收浆液固体含量为 10%, 在实验前以 98% $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 2% CaCO_3 配制. 实验过程中, 将 NaClO_2 或 KMnO_4 按一定比例从浆液搅拌泵入口加入到吸收塔内. 浆液初始 pH 值通过盐酸来调整, 实验过程中浆液 pH 值通过 CaCO_3 的加入量调整.

实验所用的 NaClO_2 、 KMnO_4 、 CaCO_3 和 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 均为分析纯; 实验所用的 N_2 、 NO 和 SO_2 均为纯气体, 纯度分别为 99.99%、99.99% 和 99.99%.

2.3 试验方法

1) 氧化剂加入量的影响试验: 为了方便试验中 NaClO_2 和 KMnO_4 两种氧化剂加入摩尔流量与 NO 的摩尔流量之比在同一图中具有可比性, 在 KMnO_4 氧化剂前乘以 3 来表达 KMnO_4 氧化剂与 NO 摩尔流量之比. 定义氧化剂与 NO 摩尔流量之比为 R (见式 (1)), 因而, R 值随氧化剂加入量的增大而增加.

$$R = \frac{Q_{\text{NaClO}_2}}{Q_{\text{NO}}} = \frac{1}{3} \times \frac{Q_{\text{KMnO}_4}}{Q_{\text{NO}}} \quad (1)$$

式中, Q 为物质的摩尔流量.

在 SO_2 浓度为 $460\text{mL} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 NO 浓度为 $240\text{mL} \cdot \text{m}^{-3}$ 、喷射管浸没深度为 120mm、浆液 pH 值为

4.6 时, 通过改变浆液中氧化剂的配入比例, 研究氧化剂加入量对脱硫和脱硝效率的影响.

2) SO_2 浓度的影响试验: 在 NO 浓度为 $240\text{mL} \cdot \text{m}^{-3}$ 、喷射管浸没深度为 120mm、浆液 pH 值为 4.6、 $R=0.5$ 时, 通过调整配气系统 SO_2 的加入量, 考察 SO_2 浓度对脱硫和脱硝效率的影响.

3) NO 浓度的影响试验: 在 SO_2 浓度为 $460\text{mL} \cdot \text{m}^{-3}$ 、喷射管浸没深度为 120mm、浆液 pH 值为 4.6、 $R=0.5$ 时, 通过调整配气系统 NO 的加入量, 考察 NO 浓度对脱硫和脱硝效率的影响.

4) pH 的影响试验: 在 SO_2 浓度为 $460\text{mL} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 NO 浓度为 $240\text{mL} \cdot \text{m}^{-3}$ 、喷射管浸没深度为 120mm、 $R=0.5$ 时, 通过盐酸调整浆液的初始 pH 值, 研究浆液 pH 值对脱硫和脱硝效率的影响.

5) 浸没深度的影响试验: 在 SO_2 浓度为 $460\text{mL} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 NO 浓度为 $240\text{mL} \cdot \text{m}^{-3}$ 、浆液 pH 值为 4.6、 $R=0.5$ 时, 通过改变塔内浆液量, 研究喷射管浸没深度对脱硫脱硝效率的影响.

2.4 测试项目及方法

试验过程中模拟烟气中 SO_2 和 NO 浓度采用烟气分析仪 (Testo350XL) 实时测量, 浆液 pH 值采用 pH 计 (HM-30G) 离线测量, 喷射鼓泡管浸没深度通过固定于鼓泡塔的有机玻璃外壁的直尺测量, 氧化剂的质量采用分析天平测量.

3 结果 (Results)

3.1 氧化剂加入量的影响

图 2 为不同氧化剂加入量对 SO_2 和 NO 脱除效率的影响, 其中 SO_2 浓度为 $460\text{mL} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 NO 浓度为

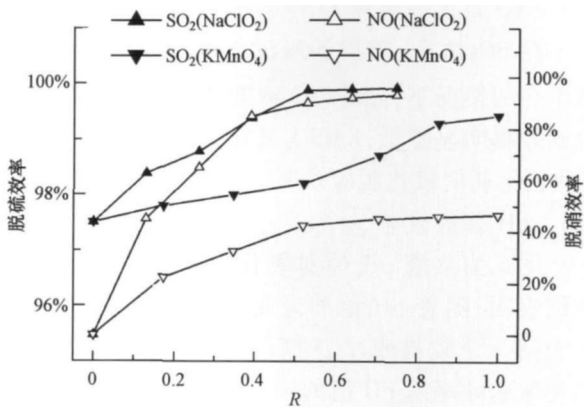


图 2 氧化剂加入量对脱除效率的影响 ($[\text{SO}_2] = 460\text{mL} \cdot \text{m}^{-3}$, $[\text{NO}] = 240\text{mL} \cdot \text{m}^{-3}$, $L = 120\text{mm}$, $\text{pH} = 4.6$)

Fig 2 Effect of oxidizer concentration on removal efficiency

240 mL · m⁻³、喷射管浸没深度 $L = 120\text{mm}$ 、浆液 pH 值为 4.6 对比 2 种氧化剂的脱硫脱硝效果可知, NaClO_2 的协同脱硫脱硝效率明显高于 KMnO_4 , 且随着氧化剂加入量的增大, NaClO_2 氧化脱硫脱硝效率增长速度高于 KMnO_4 . 在 $R = 0.5$ 时, NaClO_2 的氧化脱硫和脱硝效率分别达到 99.8% 和 90.0%, KMnO_4 的氧化脱硫和脱硝效率分别达到 98.9% 和 45.1%. 在 R 大于 0.5 之后, 继续增加氧化剂的加入量, 上述 2 种氧化剂的氧化脱硫脱硝效率增幅减缓.

3.2 SO_2 浓度的影响

图 3 为不同 SO_2 浓度条件下对 NO 和 SO_2 的协同脱除效率. 由图可知, 随着 SO_2 浓度的增大, NaClO_2 和 KMnO_4 氧化脱硫脱硝效率均增大, 其中 NaClO_2 氧化脱硝效率的增幅明显高于 KMnO_4 , 2 种氧化剂的氧化脱硫效率增幅较缓.

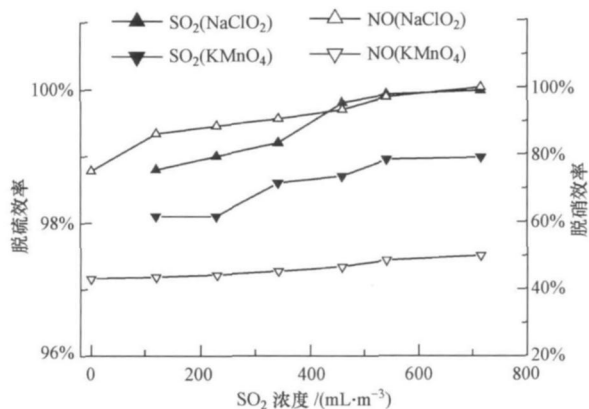


图 3 SO_2 浓度对脱除效率的影响 ($[\text{NO}] = 240\text{mL} \cdot \text{m}^{-3}$, $R = 0.5$, $L = 120\text{mm}$, $\text{pH} = 4.6$)

Fig. 3 Effect of SO_2 concentration on removal efficiency

3.3 NO 浓度的影响

在 SO_2 浓度、喷射管浸没深度、浆液 pH 值和 R 值不变的情况下, 随着 NO 浓度的提高, NaClO_2 氧化脱硝效率明显降低, KMnO_4 氧化脱硝效率微弱降低, 2 种氧化剂的氧化脱硫效率无明显变化 (见图 4).

3.4 pH 值的影响

图 5 为浆液 pH 值对氧化剂脱硫脱硝的影响. 该图表明, 随着 pH 值的升高, SO_2 的脱除效率迅速增大到一个较高水平, 随后基本保持不变; NaClO_2 氧化脱硝效率随 pH 值的增大有微弱的降低, 在 pH 高于 7 时, NO 的脱除效率随 pH 值的增大迅速降低; KMnO_4 氧化脱硝效率随浆液 pH 值的改变无明显变化.

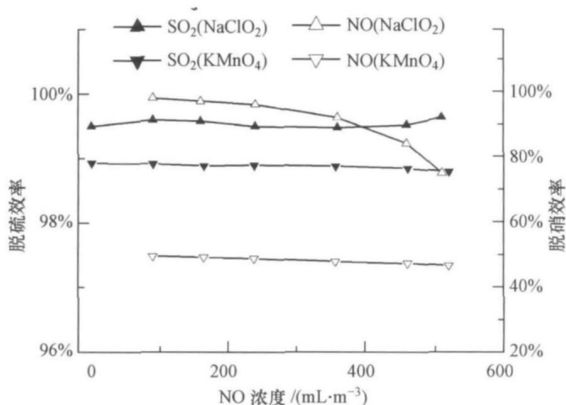


图 4 NO 浓度对脱除效率的影响 ($[\text{SO}_2] = 460\text{mL} \cdot \text{m}^{-3}$, $R = 0.5$, $L = 120\text{mm}$, $\text{pH} = 4.6$)

Fig. 4 Effect of NO concentration on removal efficiency

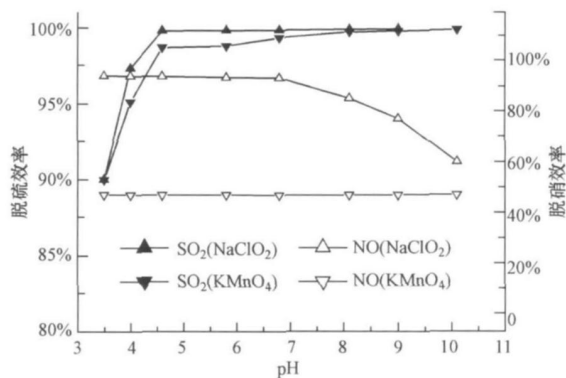


图 5 pH 值对脱除效率的影响 ($L = 120\text{mm}$, $R = 0.5$, $[\text{SO}_2] = 460\text{mL} \cdot \text{m}^{-3}$, $[\text{NO}] = 240\text{mL} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig. 5 Effect of pH value on removal efficiency

3.5 浸没深度的影响

试验台喷射鼓泡管浸没深度对液相氧化脱硫

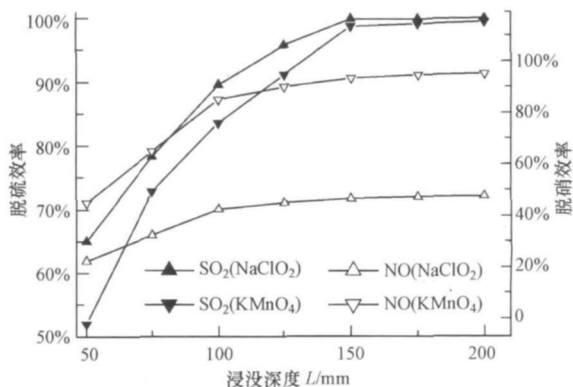


图 6 浸没深度对脱除效率的影响 ($[\text{SO}_2] = 460\text{mL} \cdot \text{m}^{-3}$, $[\text{NO}] = 240\text{mL} \cdot \text{m}^{-3}$, $R = 0.5$, $\text{pH} = 4.6$)

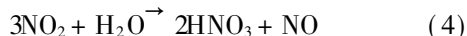
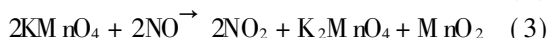
Fig. 6 Effect of immersion depth on removal efficiency

脱硝的影响如图 6 所示. 该图表明, 随喷射管浸没深度的提高, 液相氧化脱硫脱硝效率均明显提高; 在浸没深度 L 达到 100mm 后, NaClO_2 和 KMnO_4 两种氧化剂脱硝效率随浸没深度的增大缓慢提高; 在浸没深度达到 150mm 后, NaClO_2 和 KMnO_4 两种氧化剂脱硫效率随浸没深度的增大无明显改变. 这是因为鼓泡喷射管浸没深度不同, 气液有效接触面积也不同, 随着浸没深度的提高, 鼓泡层高度提高, 气液总接触面积迅速提高, 因此, 提高 NO 和 SO_2 在气液界面的反应量, 脱硫脱硝效率也随之提高 (图 6)

4 讨论 (Discussion)

4.1 氧化剂氧化特性

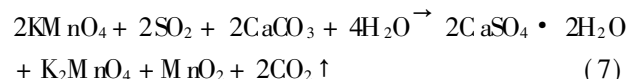
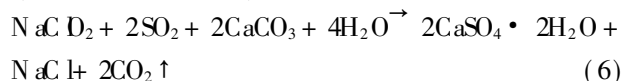
采用 NaClO_2 和 KMnO_4 作为氧化剂, 其与模拟烟气中的 NO 反应如下 (Chien, 2000):



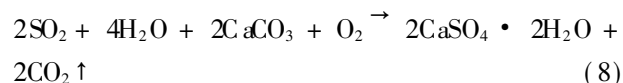
上述反应生成的 HNO_3 与 CaCO_3 发生如下反应:



氧化剂与模拟烟气中 SO_2 的反应可表述为 (Chien *et al.*, 2003):



在氧化剂不足的情况下, 模拟烟气中 SO_2 的吸收反应如下:



反应 (8) 为常规石灰石-石膏脱硫的基本化学反应式.

几种常用强氧化剂氧化能力强弱次序为 $\text{ClO}_2 > \text{H}_2\text{O}_2 > \text{NaClO}_2 > \text{KMnO}_4 > \text{Cl}_2 > \text{NaOCl} > \text{Na}_2\text{O}_2$, NaClO_2 氧化能力强于 KMnO_4 , 故在相同的条件下 NaClO_2 氧化脱硫脱硝效率高于 KMnO_4 氧化脱硫脱硝效率, 图 2~图 6 表明了这一特性.

4.2 氧化剂加入量

氧化剂加入量的多少, 直接关系到模拟烟气中 NO 和 SO_2 的氧化反应速率. 增大氧化剂加入量, 氧化剂与 NO 和 SO_2 的氧化反应增强, 污染物的脱除效率也相应提高 (图 2). 当氧化剂加入量增加到一定程度后, 继续增大氧化剂的加入量, 由于此时浆

液中化学反应产物 NO_3^- 、 Cl^- 、 MnO_4^{2-} 等浓度已增长到一个较高水平, 增大了氧化剂氧化反应的阻力, 故脱硫脱硝效率增长速度减缓.

对于 SO_2 , 即使在不添加氧化的情况下, 脱除效率也可以达到 95% 之上; 当添加氧化剂后, 增强了 SO_2 的氧化, 但其脱除效率增长的幅度较小.

4.3 SO_2 和 NO 浓度

提高 SO_2 和 NO 浓度, 可在一定程度上增强这 2 种污染物的气液传质反应速率, 从而提高这 2 种物质的最终脱除效率. 此外, SO_2 溶于水反应可生成 SO_3^{2-} 和 HSO_3^- , 这 2 种物质可在 NaClO_2 氧化剂作用下与 NO 和 NO_2 发生反应, 形成 N-S 化合物, 从而促进 NO 的吸收反应 (Chien *et al.*, 2000). 所以, 随 SO_2 浓度的增大, NaClO_2 脱硝效率迅速提高, 图 3 表明了这一特性.

在 SO_2 浓度保持不变的条件下提高 NO 浓度, SO_2 浓度相对 NO 浓度比例减小, N-S 化合物形成量相对减少, 导致 NaClO_2 脱硝效率降低, 如图 4 所示. 而对于 SO_2 , NO 浓度的改变对其吸收反应无影响, 因而其脱除效率基本保持不变.

4.4 浆液 pH 值

浆液的 pH 值决定了 NO 和 SO_2 在浆液中的氧化吸收反应环境, 较低的 pH 值不利于 SO_2 在浆液中的溶解和电离, 因而其脱除效率处于低水平; 随着 pH 值的升高, SO_2 在浆液中的溶解和电离逐渐加强, SO_2 的吸收反应加强, 因而其脱除效率迅速提高并达到较高的水平. 在浆液 pH 值较低条件下, NaClO_2 在浆液中分解产生了 ClO_2 , 而 ClO_2 氧化性较 NaClO_2 强, 因而在这种条件下有利于污染物的氧化吸收反应. 随浆液 pH 值的提高, NaClO_2 分解反应减弱, 因而可以认为 NaClO_2 所表现出的宏观氧化性随 pH 值的增大而减弱. 在浆液 pH 值为 3.5~7.0 的范围内, NO 在浆液中的溶解度随 pH 值得提高而增大. 所以, 在 NaClO_2 氧化性和 NO 溶解度 2 种作用下, 在 pH 值为 3.5~7.0 范围内, NaClO_2 氧化脱硝效率随 pH 值的增大无明显改变; 在 pH 值大于 7.0 时, 继续提高浆液的 pH 值, NaClO_2 氧化性迅速减弱, 导致 NaClO_2 氧化脱硝效率快速降低 (Chien *et al.*, 2003) (图 5).

5 结论 (Conclusions)

1) 在浆液 pH 值、 SO_2 浓度、 NO 浓度和氧化剂加入比例相同条件下氧化性较强的 NaClO_2 的氧化脱

硫脱硝效率高于 KMnO_4 .

2) 提高 SO_2 浓度或降低 NO 浓度均可提高 NO 脱除效率; 对于 NaClO_2 氧化剂, 其脱硝效率的提高明显高于 KMnO_4 .

3) 较低的浆液 pH 值有利于 NaClO_2 氧化脱硝; 但对于 KMnO_4 氧化脱硝, 浆液 pH 值对其脱硝效果无明显影响.

4) 提高氧化剂加入量和喷射管浸没深度均可以提高 SO_2 和 NO 脱除效率.

责任作者简介: 高翔 (1968—), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 主要研究方向为大气污染控制和洁净煤燃烧技术.

参考文献 (References):

- Chien T W. 2000. Removal of SO_2 and NO from flue gas by wet scrubbing using an aqueous NaClO_2 solution [J]. *Journal of Hazardous Materials* 80(1-3): 43-57
- Chien T W, Chu H, Hsueh H T. 2003. Kinetic study on absorption of SO_2 and NO_x with acidic NaClO_2 solutions using the spraying column [J]. *Journal of Environmental Engineering* 129(11): 967-974
- Chu H, Chien T W, Li S Y. 2001. Simultaneous absorption of SO_2 and NO from flue gas with $\text{KMnO}_4/\text{NaOH}$ solutions [J]. *The Science of the Total Environment* 275(3): 127-135
- 林赫, 高翔, 骆仲决, 等. 2002. 直流电晕自由基簇射脱除烟气中的 NO_x [J]. *中国电机工程学报*, 22(8): 150-155
- Lin H, Gao X, Luo Z Y, et al. 2002. Removing NO_x from flue gas by means of radical showering induced by DC corona [J]. *Proceedings of the CSEE*, 22(8): 150-155 (in Chinese)
- Jin D S, Deshwal B R, Park Y S. 2006. Simultaneous removal of SO_2 and NO by wet scrubbing using aqueous chlorine dioxide solution [J]. *Journal of Hazardous Materials* 135(3): 412-417
- 马双忱, 赵毅, 马宵颖, 等. 2006. 微波诱导催化还原脱硫脱硝实验研究 [J]. *中国电机工程学报*, 26(18): 121-125
- Ma S C, Zhao Y, Ma X Y, et al. 2006. Experimental Study on Microwave Induced Catalyzed Reduction for Desulfurization and Denitrification [J]. *Proceedings of the CSEE*, 26(18): 121-125 (in Chinese)
- 秦明, 吴少华, 孙绍增, 等. 2005. 六角切圆燃烧褐煤煤粉锅炉低 NO_x 燃烧技术研究 [J]. *中国电机工程学报*, 25(1): 158-162
- Qin M, Wu S H, Sun S Z, et al. 2005. Low NO_x emission study for six point tangential burning of PC boiler burning lignite coal [J]. *Proceedings of the CSEE*, 25(1): 158-162 (in Chinese)
- Radoiu M T, Calinescu D I M I. 2003. Emission control of SO_2 and NO_x by irradiation methods [J]. *Journal of Hazardous Materials* 97(1-3): 145-158
- Srivastava R K, Gano W N D, Khan S et al. 2005. Controlling NO_x emission from industrial sources [J]. *Environmental Progress* 24(2): 181-197
- 王智化, 周俊虎, 魏林生, 等. 2007. 用臭氧氧化技术同时脱除锅炉烟气中 NO_x 及 SO_2 的实验研究 [J]. *中国电机工程学报*, 27(11): 1-5
- Wang Z H, Zhou J H, Wei L S et al. 2007. Research for the Simultaneous Removal of NO_x and SO_2 in Flue Gas by O_3 [J]. *Proceedings of the CSEE*, 27(11): 1-5 (in Chinese)
- 吴碧君, 刘晓勤, 肖萍, 等. 2007. Mn-Fe/TD₂ 低温 NH_3 选择性还原 NO 催化活性及其反应机制 [J]. *中国电机工程学报*, 27(17): 51-56
- Wu B J, Liu X Q, Xiao P, et al. 2007. Catalytic performance and mechanism of Mn-Fe/TD₂ for low-temperature selective reduction of NO with NH_3 [J]. *Proceedings of the CSEE*, 27(17): 51-56 (in Chinese).
- 吴祖良, 高翔, 骆仲决, 等. 2006. 电晕放电自由基簇射过程中臭氧和 NO_x 的生成 [J]. *化工学报*, 57(5): 1214-1219
- Wu Z L, Gao X, Luo Z Y, et al. 2006. Formation of ozone and NO_x during corona discharge radical shower [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering* 57(5): 1214-1219 (in Chinese)
- 赵毅, 马双忱, 黄建军, 等. 2005. 烟气循环流化床同时脱硫脱氮实验研究 [J]. *中国电机工程学报*, 25(2): 120-124
- Zhao Y, Ma S C, Huang J J et al. 2005. Testing study on simultaneous removal SO_2 and NO_x by flue gas circulating fluidized bed [J]. *Proceedings of the CSEE*, 25(2): 120-124 (in Chinese)
- 赵毅, 马双忱, 黄建军, 等. 2003. 高活性吸收剂脱硫和脱氮实验及机制研究 [J]. *中国电机工程学报*, 23(10): 236-240
- Zhao Y, Ma S C, Huang J J et al. 2003. Experimental study on SO_2 and NO_x removal and mechanism by highly reactive sorbent [J]. *Proceedings of the CSEE*, 23(10): 236-240 (in Chinese)
- 赵毅, 马双忱, 李燕中, 等. 2002. 利用粉煤灰吸收剂对烟气脱硫脱氮的实验研究 [J]. *中国电机工程学报*, 22(3): 108-112
- Zhao Y, Ma S C, Li Y Z et al. 2002. The experimental investigation of desulfurization and denitrification from flue gas by absorbents based on fly ash [J]. *Proceedings of the CSEE*, 22(3): 108-112 (in Chinese)
- 张虎, 佟会玲, 王晋元, 等. 2007. 用 KMnO_4 调质钙基吸收剂从燃煤烟气同时脱硫脱硝 [J]. *化工学报*, 58(7): 1810-1815
- Zhang H, Tong H L, Wang J Y, et al. 2007. Simultaneous removal of SO_2 and NO by using calcium absorbent with KMnO_4 as additive [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering* 58(7): 1810-1815 (in Chinese)