

# 添加剂对尿素/氨溶液同时脱硫脱硝特性影响的试验研究

谢红银, 熊源泉, 史占飞, 张吉超, 熊桂龙  
(东南大学能源与环境学院, 江苏省南京市 210096)

## Experimental Study on the Effects of the Characteristics of Additives on Urea /Ammonia Solution Simultaneous Desulphurization and Denitrification

XIE Hong-yin, XIONG Yuan-quan, SHI Zhan-fei, ZHANG Ji-chao, XIONG Gui-long  
(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

**ABSTRACT:** Experimental research of simultaneous removal of  $\text{NO}_x$  and  $\text{SO}_2$  from simulated flue gas with aqueous urea/ammonia solution was carried out in a bubbling reactor, where the effects of two different additives ( $\text{KMnO}_4$  and triethanolamine) on the  $\text{NO}_x$  and  $\text{SO}_2$  removal characteristics were investigated. The results show that  $\text{KMnO}_4$  has better effect on single denitrification than triethanolamine, and the removal efficiency of  $\text{NO}_x$  reaches 78.5% with 0.03%  $\text{KMnO}_4$  additive.  $\text{KMnO}_4$  plays a positive role in retarding the decrease of De- $\text{NO}_x$  efficiency, while the triethanolamine performs in the role of catalyst. The existence of  $\text{SO}_2$  has a competitive effect on  $\text{NO}_x$  removal in the aqueous urea/ammonium bicarbonate solution with  $\text{KMnO}_4$ , while synergistic effect on the absorption of  $\text{NO}_x$  in urea/ammonium bicarbonate solution with triethanolamine. When the  $\text{SO}_2$  concentration is lower than  $2 \times 10^{-3}$ ,  $\text{KMnO}_4$  affects markedly on the  $\text{NO}_x$  removal efficiency than that of triethanolamine.

**KEY WORDS:** urea; ammonium; additive; desulphurization; denitrification

**摘要:** 在鼓泡反应装置上进行铵根离子、尿素/添加剂同时脱硫脱硝的试验研究, 比较高锰酸钾和有机添加剂三乙醇胺的性能。研究表明: 高锰酸钾添加剂的单独脱硝效率远远优于三乙醇胺, 在高锰酸钾质量分数为 0.03% 时, 单独脱硝效率可达 78.5%; 高锰酸钾具有减缓脱氮效率下降的作用, 而三乙醇胺起催化缓冲作用;  $\text{SO}_2$  的加入对混合溶液/高锰酸钾添加剂的脱硝起竞争作用, 而对混合溶液/三乙醇胺添加剂吸收  $\text{NO}_x$  的反应却有协同促进作用; 当  $\text{SO}_2$  体积分数小

于  $2 \times 10^{-3}$  时, 高锰酸钾添加剂的脱硝效率高于三乙醇胺。

**关键词:** 尿素; 氨; 添加剂; 脱硫; 脱硝

## 0 引言

$\text{NO}_x$  和  $\text{SO}_2$  为火电厂排放的主要大气污染物, 国内外一般采用加装脱硫设备和脱硝设备的方式控制, 这种方式不但占地面积大, 而且投资和运行费用也很高。近年来世界各国都相继对烟气同时脱硫脱硝新技术、新理论进行了研究, 并进行了一定的工业应用<sup>[1-8]</sup>, 主要有湿式吸收法<sup>[9-10]</sup>、吸附法<sup>[11-12]</sup>、催化法<sup>[13]</sup>、高能辐射法<sup>[14]</sup>以及上述方法的联用<sup>[15-16]</sup>等。其中湿式尿素吸收法工艺和设备都较简单, 具有治理效果好、操作弹性大、投资少、耗能低等优点, 并且不存在催化剂中毒和失活等问题。因此, 具有较好的应用前景。

由于烟气中的  $\text{NO}$  占  $\text{NO}_x$  的 90% 左右, 而  $\text{NO}$  是一种几乎不被水或碱液吸收的惰性气体。国内外研究发现在湿法脱硫或脱氮工艺中加入合适的添加剂可以显著地提高脱硫或脱氮效率, 加快反应速度, 促进主反应抑制副反应, 且在一定程度上减缓系统腐蚀、结垢和堵塞等问题。常规无机添加剂有:  $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{KBr}$ 、 $\text{NaClO}_2$ 、 $\text{KMnO}_4$ 、 $\text{HClO}_3$ 、黄磷<sup>[17-20]</sup>, 研究表明:  $\text{NaClO}_2$  和  $\text{KMnO}_4$  具有强氧化性, 脱除  $\text{NO}_x$  的效果最佳, 其中  $\text{NaClO}_2$  热稳定性较差; 有机类添加剂主要是有机酸类和有机胺类, 其中三乙醇胺和乙二胺效果较好, 但乙二胺较三乙醇胺更易挥发。

笔者在本课题组从事多年的尿素溶液联合脱硫脱硝的研究基础上, 在尿素溶液中添加氨水来降

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(863 计划)(2009AA05Z304)。

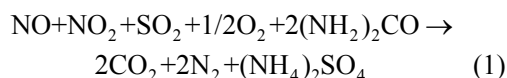
The National High Technology Research and Development of China(863 Program)(2009AA05Z304).

低同时脱硫脱硝成本的工艺中,加入 $\text{KMnO}_4$ 添加剂提高其效率,利用鼓泡反应器对 $\text{KMnO}_4$ 添加剂浓度进行了试验研究,并将之与三乙醇胺添加剂进行对比,以探索出一种合理而又经济的同时脱硫脱硝的方法。

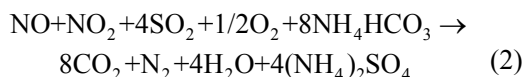
## 1 反应机制

### 1.1 尿素、氨/三乙醇胺同时脱硫脱硝反应机制

在尿素/三乙醇胺湿法烟气同时脱硫脱氮吸收过程中,吸收剂尿素与烟气发生的反应总反应式为

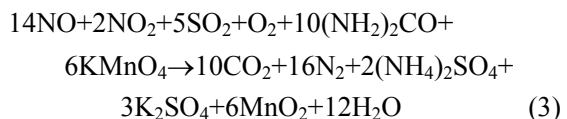


在铵根离子/三乙醇胺湿法烟气同时脱硫脱氮吸收过程中,吸收剂铵根离子与烟气发生的反应总反应式为

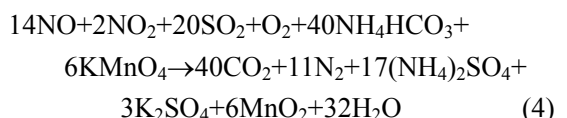


### 1.2 尿素、氨/ $\text{KMnO}_4$ 同时脱硫脱硝反应机制

在尿素/ $\text{KMnO}_4$ 湿法烟气同时脱硫脱氮吸收过程中,吸收剂尿素与烟气发生的反应总反应式为



在铵根离子/ $\text{KMnO}_4$ 湿法烟气同时脱硫脱氮吸收过程中,铵根离子为8电子稳定结构,使得其与添加剂高锰酸钾发生氧化还原反应的可能性变得很小,它与烟气发生的反应总反应式为



由以上反应可见,用铵根离子/尿素作为吸收液净化烟气中的 $\text{SO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ ,生成气体为 $\text{N}_2$ 和 $\text{CO}_2$ ,吸收尾气中的硫酸铵可以回收制成化肥具有可观的经济效益。

## 2 试验条件

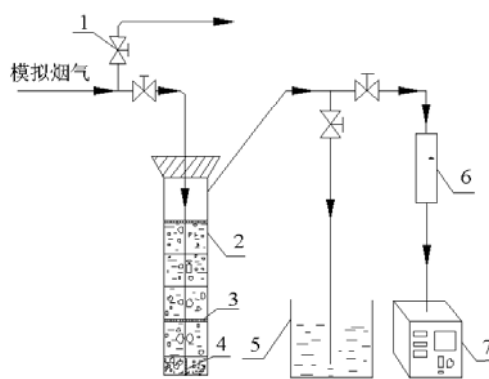
### 2.1 试剂与仪器

尿素(化肥,河北宣化化肥集团有限公司);碳酸氢铵(化肥,博爱县源泰化电有限公司);高锰酸钾( $\geq 78.0\%$ 分析纯,上海化学试剂有限公司);三乙醇胺( $\geq 78.0\%$ 分析纯,上海化学试剂有限公司);氮气( $> 99.5\%$ ,南京通广气体有限公司);氧气( $> 99.5\%$ ,南京通广气体有限公司);一氧化氮( $> 99.9\%$ ,南京伟泽气体有限公司);二氧化硫( $> 99.9\%$ ,南

京上元气体有限公司); $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 采用德国Rosemount公司的NGA2000型烟气分析仪测定(准确度 $\pm 2\%$ ,重复精度 $\pm 1\%$ )。

### 2.2 实验方法

实验装置示意图如图1所示。吸收反应器是直径为50 mm、高为1.3 m的不锈钢管,在不锈钢管中每隔10 cm有一层筛网,每层筛网由16目和20目的不锈钢网叠加而成,曝气头采用孔径为2~5  $\mu\text{m}$ 的耐腐蚀聚乙烯微孔管。



1—球阀; 2—鼓泡吸收反应器; 3—筛网; 4—曝气管; 5—水槽; 6—过滤器; 7—烟气分析仪。

图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

实验用钢瓶气:氮气、氧气、一氧化氮及二氧化硫模拟实际烟气,通过调节气瓶减压阀和流量计来控制模拟烟气的成分,气体经过流量计和混合器混合均匀后,以鼓泡的形式进入反应器,与吸收液进行反应,气泡在上升过程中穿过筛网,再次得到破碎、均匀分布,从鼓泡吸收反应器出来的烟气通过尾气吸收槽净化后排放。 $\text{SO}_2$ 去除率(即脱硫率 $D_S$ )和 $\text{NO}_x$ 去除率(即脱氮率 $D_N$ )计算如下:

$$D_S = \frac{\varphi_0(\text{SO}_2) - \varphi_t(\text{SO}_2)}{\varphi_0(\text{SO}_2)} \quad (5)$$

$$D_N = \frac{\varphi_0(\text{NO}_x) - \varphi_t(\text{NO}_x)}{\varphi_0(\text{NO}_x)} \quad (6)$$

式中: $\varphi_0(\text{SO}_2)$ 为鼓泡反应器入口处检测的 $\text{SO}_2$ 的体积分数; $\varphi_t(\text{SO}_2)$ 为鼓泡反应器出口处检测的 $\text{SO}_2$ 的体积分数; $\varphi_0(\text{NO}_x)$ 为鼓泡反应器入口处检测的 $\text{NO}_x$ 的体积分数; $\varphi_t(\text{NO}_x)$ 为鼓泡反应器出口处检测的 $\text{NO}_x$ 的体积分数。

## 3 结果与讨论

### 3.1 脱硝及同时脱硫脱硝

#### 3.1.1 单独脱硝

实验条件:吸收剂为5%碳酸氢铵和5%尿素的混合溶液(质量比),添加剂分别为高锰酸钾和三乙

醇胺，吸收液 900 mL，操作温度为 20 ℃左右，烟气流速 0.4 m<sup>3</sup>/h，NO<sub>x</sub> 体积分数为 1.5×10<sup>-3</sup> 左右，O<sub>2</sub> 体积分数为 4%，其余为 N<sub>2</sub>。

从图2(a)可以看出，高锰酸钾添加剂的质量分数是影响尿素、氨/KMnO<sub>4</sub>法脱硝效率的重要因素。高锰酸钾的加入，能极大地提高NO<sub>x</sub>去除效率，当KMnO<sub>4</sub>质量分数由0.005%增加到0.02%时，半小时内的脱硝率平均提高了12%。此后，随着高锰酸钾加入量的增大，脱硝效率增加的幅度较为平缓，当添加剂浓度为0.03%时，脱硝效率高达78.5%。显然，加入少量的高锰酸钾添加剂就能有效地提高脱硝效率，主要原因是高锰酸钾的强氧化性将难溶的NO氧化为易溶的NO<sub>2</sub>，反应式如下：



从而提高了 NO<sub>x</sub> 的气相和液相推动力，实现了较高的脱氮效率。

从图2(a)中还可以看出，随着KMnO<sub>4</sub>质量分数的增加，在一定的反应时间内有减缓脱硝效率下降的作用。当KMnO<sub>4</sub>质量分数为0.005%时，半个小时内脱氮效率下降了约15%，逐渐加大高锰酸钾的量，脱氮效率不断提高的同时脱氮曲线越来越平缓，当高锰酸钾的量增加到0.03%时，半小时内的脱硝效率只降低了约5%。这说明高锰酸钾在混合溶液中不仅起氧化NO的作用，还有着减缓脱氮效率下降的优点。

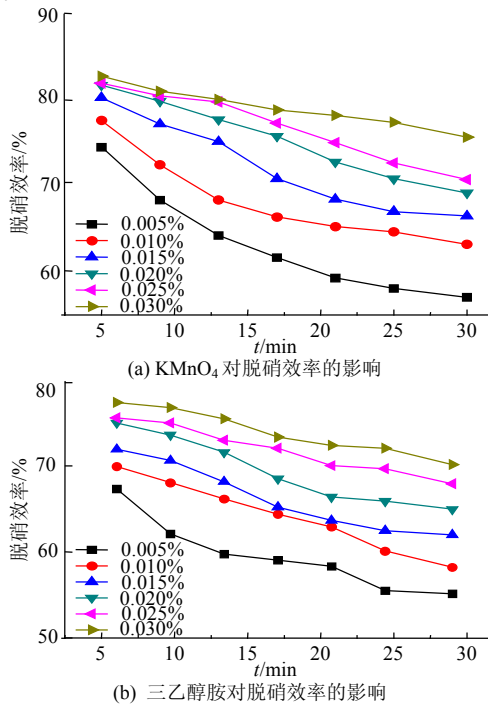


图 2 KMnO<sub>4</sub>、三乙醇胺对脱硝效率的影响  
Fig. 2 Effect of KMnO<sub>4</sub>、triethanolamine on denitrification efficiency

从图 2(b)中可以看出，提高三乙醇胺的浓度有利于显著提高脱硝效率。在反应 10 min 内，脱硝效率变化缓慢，随后有明显的下降趋势，这说明三乙醇胺添加剂在脱硝过程中存在缓冲点。同时实验发现加入三乙醇胺后，吸收液 pH 值在 7~9 变化缓慢，基本上可以维持在 7 以上。当三乙醇胺质量分数为 0.05%时，半小时内的脱硝效率下降了约 10%，逐渐加大三乙醇胺的量，脱硝效率曲线越来越平缓，当三乙醇胺量增加到 0.03%时，半小时内的脱硝效率仅下降了约 4%。由此可看出，三乙醇胺在吸收液中起着催化缓冲的作用。

### 3.1.2 同时脱硫脱硝

实验条件：吸收剂为5%碳酸氢铵和5%尿素的混合溶液(质量比)，添加剂高锰酸钾质量分数为0.015%，吸收液900 mL，操作温度为20 ℃左右，烟气流速为0.4 m<sup>3</sup>/h，NO<sub>x</sub>体积分数为1.5×10<sup>-3</sup>左右，O<sub>2</sub>体积分数为4%，其余为N<sub>2</sub>。

由图3(a)的实验结果可知：SO<sub>2</sub>的加入使脱硝效率急剧下降，SO<sub>2</sub>体积分数为1.2×10<sup>-3</sup>时，脱硝效率则比单独脱硝时降低了4%左右，当SO<sub>2</sub>体积分数增加到2.4×10<sup>-3</sup>时，30 min内脱硝效率下降到65%左右，说明SO<sub>2</sub>的存在对尿素、碳酸氢铵/高锰酸钾法吸收NO<sub>x</sub>有竞争作用。这是因为SO<sub>2</sub>与溶液中的KMnO<sub>4</sub>发生了如下反应：

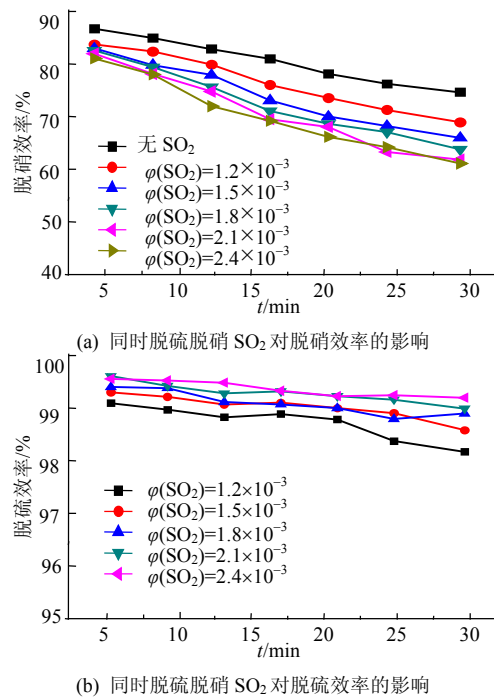
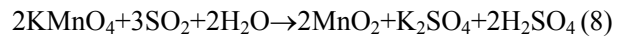


图 3 同时脱硫脱硝 SO<sub>2</sub> 对脱硝、脱硫效率的影响  
Fig. 3 Effect of SO<sub>2</sub> concentration on denitrification, desulfurization efficiency

使得溶液中的 $\text{KMnO}_4$ 消耗速率加快, 损耗了氧化 $\text{NO}$ 的 $\text{KMnO}_4$ 量, 造成了脱硝效率的下降。

由图 3(b)可知,  $\text{SO}_2$  体积分数对联合脱硫脱硝时的脱硫效率影响不大,  $\text{SO}_2$  体积分数大于  $1.2 \times 10^{-3}$  时, 该混合溶液联合脱硫脱硝系统的脱硫效率均稳定在 98% 以上。当烟气中  $\text{SO}_2$  体积分数增加时, 脱硫效率缓慢增大,  $\text{SO}_2$  体积分数由  $1.2 \times 10^{-3}$  增至  $2.4 \times 10^{-3}$ , 30 min 内的平均脱硫效率由 98.9% 增至 99.6%。

### 3.2 高锰酸钾和三乙醇胺添加剂的性能比较

#### 3.2.1 单独脱硝

实验条件: 吸收剂为 5% 碳酸氢铵和 5% 尿素的混合溶液(质量比), 吸收液 900 mL, 操作温度为  $20^\circ\text{C}$  左右, 烟气流量为  $0.4 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\text{NO}_x$  体积分数为  $1.5 \times 10^{-3}$  左右,  $\text{O}_2$  体积分数为 4%, 其余为  $\text{N}_2$ ; 添加剂分别采用三乙醇胺(质量比 0.015%)和高锰酸钾(质量比 0.015%)。

由图4可以看出, 添加剂为 0.015% 的  $\text{KMnO}_4$  时, 脱硝效率要比 0.015% 的三乙醇胺高 10%, 这说明单独脱硝时,  $\text{KMnO}_4$  添加剂要优于三乙醇胺。但  $\text{KMnO}_4$  添加剂脱硝效率的下降趋势大于三乙醇胺, 这主要是由于  $\text{KMnO}_4$  在脱硝过程中作为强氧化剂起作用。而三乙醇胺添加剂则起催化缓冲作用, 一方面提高  $\text{NO}$  的溶解度, 另一方面可控制系统的 pH 值在某一范围内, 从而提高烟气净化效率; 而高锰酸钾起到氧化作用后, 吸收液 pH 值呈酸性不利于反应进行。因此,  $\text{KMnO}_4$  的还原消耗势必造成脱硝效率的迅速下降。

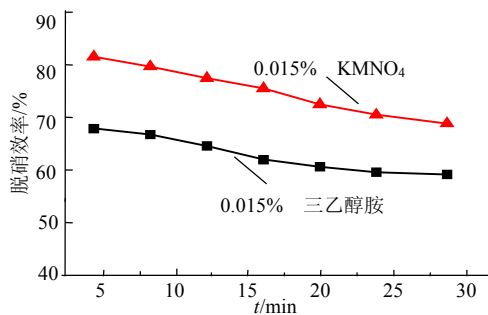


图 4  $\text{KMnO}_4$  和三乙醇胺添加剂单独脱硝比较

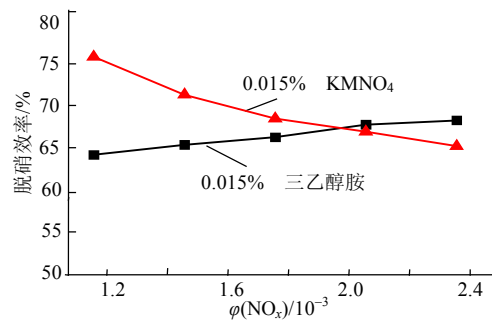
Fig. 4 Comparison of  $\text{KMnO}_4$  and triethanolamine on denitrification efficiency

#### 3.2.2 同时脱硫脱硝

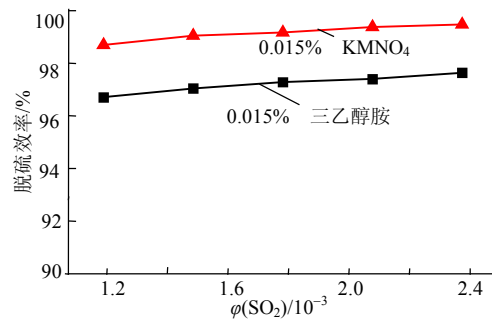
实验条件: 吸收液为 5% 的碳酸氢铵和 5% 的尿素溶液(质量比), 添加剂分别为 0.015% (质量比) 的三乙醇胺和高锰酸钾, 吸收液 900 mL, 操作温度为  $20^\circ\text{C}$  左右, 烟气流量为  $0.4 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\text{NO}$  体积分数为

$1.5 \times 10^{-3}$  左右,  $\text{O}_2$  体积分数为 4%, 其余为  $\text{N}_2$ 。实验结果取半小时内实验的平均值。

由图 5(a) 的实验结果可知: 随着入口烟气中  $\text{SO}_2$  初始体积分数的升高, 以三乙醇胺为添加剂的吸收液脱硝效率有上升趋势。当  $\text{SO}_2$  体积分数从  $1.1 \times 10^{-3}$  增加到  $2.4 \times 10^{-3}$  时, 脱硝效率上升了近 3% 左右。这说明当添加剂为三乙醇胺时,  $\text{SO}_2$  对脱硝效率起着协同促进作用。而以高锰酸钾为添加剂的吸收液脱硝效率却有下降趋势,  $\text{SO}_2$  体积分数从  $1.1 \times 10^{-3}$  增加到  $2.0 \times 10^{-3}$  时脱硝效率下降很明显, 约 8%; 当  $\text{SO}_2$  体积分数继续增大时, 脱硝效率下降缓慢。这说明当添加剂为高锰酸钾时,  $\text{SO}_2$  对脱硝效率有竞争作用。 $\text{SO}_2$  体积分数大于  $2.0 \times 10^{-3}$  后, 三乙醇胺的脱硝效率大于高锰酸钾。由图 5(b) 可以看出, 三乙醇胺和高锰酸钾对脱硫效率影响相差不大, 基本均能达到 97% 以上。



(a)  $\text{KMnO}_4$  和三乙醇胺添加剂对脱硝效率的影响



(b)  $\text{KMnO}_4$  和三乙醇胺添加剂对脱硫效率的影响

图 5  $\text{KMnO}_4$  和三乙醇胺添加剂对同时脱硫脱硝效率的影响

Fig. 5 Effects of  $\text{KMnO}_4$  and triethanolamine on denitrification and desulfurization efficiency

## 4 结论

1) 吸收剂为 5% 碳酸氢铵和 5% 尿素的混合溶液(质量比), 添加剂高锰酸钾质量分数为 0.03%, 操作温度为  $20^\circ\text{C}$  左右时, 单独脱硝效率可达 78.5%。

2) 以 0.015% 的高锰酸钾为添加剂时, 其单独脱硝效率远远大于 0.015% 的三乙醇胺, 高锰酸钾起着减缓脱硝效率下降的作用。但高锰酸钾的脱硝下

降趋势比三乙醇胺大, 这主要是因为三乙醇胺有催化缓冲作用。

3) 尿素、氨/高锰酸钾混合溶液中, 脱硫和脱氮过程是相互竞争的; 但在尿素、氨/三乙醇胺混合溶液中, 脱硫和脱氮过程具有协同促进作用。2种添加剂对脱硫效率的影响相差不多, 均可达到97%以上。

4) 从上述结论可知, 当烟气中SO<sub>2</sub>体积分数较低(小于2×10<sup>-3</sup>)时, 高锰酸钾作添加剂比三乙醇胺具有更高的脱硝效率。

## 参考文献

- [1] Zhao Yi, Sun Xiaojun, Fang Hua. Simultaneous removal of SO<sub>2</sub> and NO from flue gas using "Oxygen-enriched" highly reactive absorbent [J]. Environmental Engineering Science, 2007, 24(3): 372-382.
- [2] Deshwal B R, Jin D S, Lee S H, et al. Removal of NO from flue gas by aqueous chlorine-dioxide scrubbing solution in a lab-scale bubbling reactor[J]. Journal Hazardous Materials, 2008, 150(3): 649-655.
- [3] Wang Li. Simultaneous absorption of NO and SO<sub>2</sub> by FeEDTA combined with Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> solution[J]. Chemical Engineering Journal, 2007, 132(3): 227-232.
- [4] 辛志玲, 张金龙, 张大全, 等. 高效液相吸收剂同时脱硫脱硝的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(17): 76-82.  
Xin Zhiling, Zhang Jinlong, Zhang Daquan, et al. Experimental study on the simultaneous removal of SO<sub>2</sub> and NO by high efficiency liquid absorbent[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(17): 76-82(in Chinese).
- [5] Wei Zaishan, Lin Zhehang, Niu Hejing, et al. Simultaneous desulfurization and denitrification by microwave reactor with ammonium bicarbonate and zeolite[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009(162): 837-841.
- [6] Long Xiangli, Xiao Wende, Yuan Weikang. Simultaneous absorption of NO and SO<sub>2</sub> into hexamminecobalt(II)iodide solution[J]. Chemosphere, 2005(59): 811-817.
- [7] Xu Xinhua. Removing nitric oxide from flue gas using iron citrate chelate absorption with microbial regeneration[J]. Chemosphere, 2007, 67(8): 1628-1636.
- [8] 雷鸣, 岑超平, 胡将军. 尿素/高锰酸钾湿法烟气脱氮的试验研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(6): 16-18.  
Lei Ming, Cen Chaoping, Hu Jiangju. Study on the experiment of flue gas denitrification using urea/potassium permanganate solution[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2005, 6(6): 16-18(in Chinese).
- [9] 周春琼, 邓先和, 徐伟, 等. 乙二胺合钴/尿素湿法同时吸收 SO<sub>2</sub> 和 NO[J]. 化工学报, 2006, 57(3): 645-649.  
Zhou Chunqiong, Deng Xianhe, Xu Wei, et al. Simultaneous absorbing SO<sub>2</sub> and NO using solution of triethylenediamine cobalt(III) coupled with urea[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2006, 57(3): 645-649(in Chinese).
- [10] 陆雅静, 熊源泉, 高鸣, 等. 尿素/三乙醇胺湿法烟气脱硫脱硝的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(5): 44-50.  
Lu Yajing, Xiong Yuanquan, Gao Ming, et al. Experimental investigation on removal of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> from flue gas by aqueous solutions of urea/triethanolamine[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(5): 44-50(in Chinese).
- [11] 赵毅, 孙小军, 许佩瑶, 等. 烟气同时脱硫脱氮的高活性吸收剂的表征及脱除机制研究[J]. 中国科学 E 辑技术科学, 2006, 36(3): 326-340.  
Zhao Yi, Sun Xiaojun, Xu Peiyao, et al. Absorption investigation of simultaneous desulfurization and denitrification[J]. Science in China Series E: Information Sciences, 2006, 36(3): 326-340(in Chinese).
- [12] 孙晶, 徐铮. 活性炭材料在火电厂烟气脱硫脱硝中的应用[J]. 电力环境保护, 2008(5): 5-7.  
Sun Jing, Xu Zheng. The application of activated carbon material in SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> removal[J]. Electric Power Environmental Protection, 2008(5): 5-7(in Chinese).
- [13] 赵毅, 韩静, 赵莉, 等. 利用 TiO<sub>2</sub> 光催化烟气同时脱硫脱硝的实验研究[J]. 动力工程, 2007, 27(3): 411-414.  
Zhao Yi, Han Jing, Zhao Li, et al. Experimental and reaction mechanism study on simultaneous desulfurization and denitrification by modified photocatalyst TiO<sub>2</sub>[J]. Journal of Power Engineering, 2007, 27(3): 411-414(in Chinese).
- [14] 吴祖良, 高翔, 李济吾, 等. 电晕放电自由基簇射同时脱硫脱硝反应特性研究[J]. 高校化学工程学报, 2008, 22(2): 325-331.  
Wu Zuliang, Gao Xiang, Li Jiwu, et al. Study on the reactive characteristics of simultaneous removal of SO<sub>2</sub> and NO by corona discharge radical shower system[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2008, 22(2): 325-331(in Chinese).
- [15] 王智化, 周俊虎, 魏林生, 等. 用臭氧氧化技术同时脱除锅炉烟气中 NO<sub>x</sub> 及 SO<sub>2</sub> 的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(11): 1-5.  
Wang Zhihua, Zhou Junhu, Wei Linsheng, et al. Experimental research for the simultaneous removal of NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> in flue gas by O<sub>3</sub>[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(11): 1-5(in Chinese).
- [16] 魏林生, 周俊虎, 王智化, 等. 臭氧氧化结合化学吸收同时脱硫脱硝的研究[J]. 动力工程, 2006, 26(4): 563-567.  
Wei Linsheng, Zhou Junhu, Wang Zhihua, et al. Simultaneous desulfurization and denitrification by combined ozone oxidation and chemical scrubbing[J]. Journal of Power Engineering, 2006, 26(4): 563-567(in Chinese).
- [17] Chu H, Chien T W, Li S Y. Simultaneous absorption of SO<sub>2</sub> and NO from flue gas with KMnO<sub>4</sub>/NaOH solutions[J]. The Science of the Total Environment, 2001, 275(3): 127-135.
- [18] Jin D S, Deshwal B R, Park Y S. Simultaneous removal of SO<sub>2</sub> and NO by wet scrubbing using aqueous chlorine dioxide solution[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 135(3): 412-417.
- [19] Wei Jinchao, Yu Ping, Cai Bo, et al. Absorption of NO in aqueous NaClO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> solutions[J]. Chemical Engineering and Technology, 2009, 32(1): 114-119.
- [20] 沈迪新. 用含碱黄磷乳液同时净化烟气中 NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>2</sub>[J]. 中国环保产业, 2002(8): 30-31.  
Shen Dixin. Removal of NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> from flue gas by using alkali aqueous emulsions of phosphor[J]. China Environmental Protection Industry, 2002(8): 30-31(in Chinese).



谢红银

收稿日期: 2009-11-20.

作者简介:

谢红银(1986—), 女, 硕士研究生, 研究方向为环境工程, xieredag@163.com;

熊源泉(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为洁净煤燃烧与污染控制技术及可再生能源利用。

(责任编辑 张媛媛)