

# 尿素/三乙醇胺湿法烟气脱硫脱硝的试验研究

陆雅静<sup>1</sup>, 熊源泉<sup>1</sup>, 高鸣<sup>1</sup>, 姚志彪<sup>1</sup>, 郑守忠<sup>2</sup>

- (1. 洁净煤发电及燃烧技术教育部重点实验室(东南大学), 江苏省南京市 210096;
2. 中国水利电力物资天津公司, 天津市河东区 300012)

## Experimental Investigation on the Removal of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> From Flue Gas by Aqueous Solutions of Urea/Triethanolamine

LU Ya-jing<sup>1</sup>, XIONG Yuan-quan<sup>1</sup>, GAO Ming<sup>1</sup>, YAO Zhi-biao<sup>1</sup>, ZHENG Shou-zhong<sup>2</sup>

- (1. Key Laboratory of Clean Coal Power Generation and Combustion Technology(Southeast University), Ministry of Education, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China; 2. China National Water Resources & Electric Power Materials & Equipment Tianjin Co., Hedong District, Tianjin 300012, China)

**ABSTRACT:** Aqueous solutions of urea can remove NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> simultaneously with the NO<sub>x</sub> reduction into N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>. The experimental research on the NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> emission in aqueous solution of urea/triethanolamine was performed by a set of two filling absorption towers. This paper investigated the effects of many key operating parameters, such as the velocity of flow, liquid-gas ratio, reactant concentration, additive concentration, temperature, etc., on the removal efficiency of SO<sub>2</sub>, alone, and that of NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub>, simultaneously in aqueous solution of urea/triethanolamine. The results show that the efficiency of removal SO<sub>2</sub> from flue gas increases with increasing the velocity of the flue gas and liquid-gas ratio, but the urea concentration and additive concentration have fewer affect. It finds that SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> have synergistic effect each other in the process of the simultaneous desulfurization and denitrification by aqueous solutions of urea/additive. The removal efficiency of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> increases 1%~3% and 5%~6% respectively, compared with those at single desulfurization or denitrification process. In this case, the total efficiency of removal of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> from flue gas is more than 95% and 63% respectively.

**KEY WORDS:** urea; triethanolamine; desulfurization; denitrification

**摘要:** 尿素溶液与NO<sub>x</sub>反应生成N<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>气体, 可实现烟气同时脱硫脱硝, 该文进行了尿素/三乙醇胺湿法脱硫脱硝的试验研究。试验采用双级串联的填料塔为主体反应器, 分

别对气速、液气比、反应物浓度、添加剂浓度、反应温度等参数对尿素溶液吸收SO<sub>2</sub>反应的影响进行了试验研究, 并进行了尿素溶液同时吸收SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>的试验研究, 研究表明: 增大气速、液气比可使脱硫效率增加, 而三乙醇胺和尿素浓度对脱硫效率影响较小。SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>具有相互协同促进作用, 其净化效率在试验条件下可分别提高1%~3%和5%~6%, 总脱硫效率可达95%以上, 脱硝效率在63%以上。

**关键词:** 尿素; 三乙醇胺; 脱硝; 脱硫

## 0 引言

中国是燃煤大国, 燃煤机组发电在我国一直占主导地位, 煤燃烧产生大量污染物, 如NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>, 对人体、环境和生态系统危害极大。近年来世界各国, 尤其是工业发达国家都相继开展了同时脱硫脱硝技术的研究开发, 并进行了一定的工业应用, 主要有: 等离子体法, 如电子束照射法<sup>[1]</sup>, 电晕法<sup>[2]</sup>; 固体吸附与再生技术, 如固体吸附法<sup>[3-5]</sup>, NO<sub>x</sub>SO<sub>2</sub>工艺, CuO吸收还原法<sup>[6]</sup>, Pahlman烟气脱硫脱硝工艺等; 氧化法, 如臭氧氧化法<sup>[7]</sup>; 溶液吸收法, 如NaClO<sub>2</sub>法<sup>[8]</sup>, 亚铁螯合剂法, 钴氨溶液法<sup>[9-11]</sup>等。

关于尿素湿法烟气净化工艺研究最早起源于俄罗斯门捷列夫化学工艺学院。后来, 国内贾瑛<sup>[12]</sup>等对酸性尿素水溶液处理导弹氧化剂废水中NO<sub>x</sub>进行了研究, 在实验条件下对NO的去除率可达99.5%。王树江<sup>[13]</sup>等研究了尿素水溶液对二氧化碳气体中氮氧化物的去除。曹忠宇<sup>[14]</sup>和王军<sup>[15]</sup>等对酸性尿素溶液作吸收液还原吸收处理间歇性、高浓度氮氧化物废气做了研究。Alain Lasalle等人<sup>[16]</sup>研究

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2004CB217702-03)。

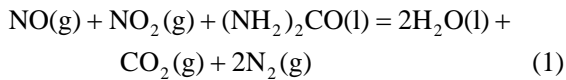
Project Supported by the National Basic Research Program of China(2004CB217702-03).

了在酸性条件下尿素溶液脱硝反应动力学。岑超平等<sup>[17-19]</sup>利用模拟烟气通过固定液柱的实验方法对尿素/高锰酸钾脱除NO<sub>x</sub>, 以及尿素/添加剂吸收脱除NO<sub>x</sub>和同时脱硫脱硝的动力学、吸收特性等方面做了一定的研究。

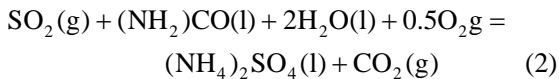
本文以前人的理论研究为基础, 以一套双级串连的填料塔为主体反应器<sup>[20]</sup>, 从工业应用的角度进行了尿素/三乙醇胺法脱硫脱硝的试验, 研究各种因素对尿素溶液吸收NO<sub>x</sub>和SO<sub>2</sub>反应的影响。

### 1 反应机理

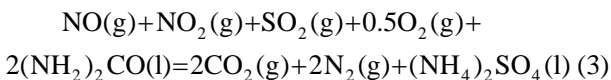
尿素溶液吸收去除烟气中NO<sub>x</sub>的反应可表示为



尿素溶液吸收去除烟气中SO<sub>2</sub>的反应为



所以, 尿素溶液吸收同时脱硫脱硝的总反应为



由以上反应可见, 用尿素作为吸收液净化烟气中的SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>, 生成N<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>, 可直接排放, 副产物为硫酸铵。

### 2 试验方法

试验在一套双级串连的填料塔反应器(如图 1 所示)中进行, 填料塔塔径(内径)为 39 mm, 采用 16 mm×16 mm×0.4 mm 的金属鲍尔环以乱堆方式填充, 单级填料层高度为 1.8 m。

模拟烟气经过气体加热器加热后, 从底部进入填料塔, 与洗涤液逆流混合反应, 再由顶部流

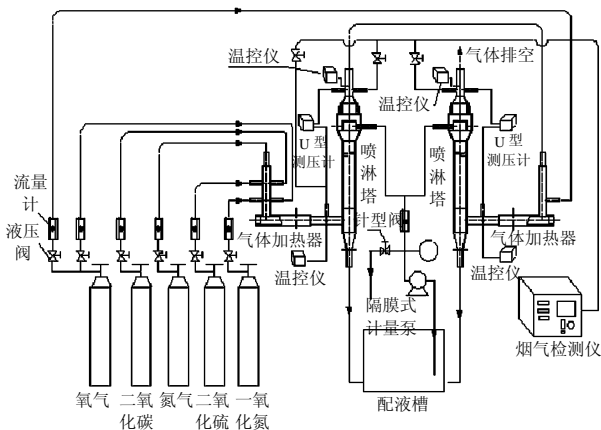


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

出, 用德国 Rosemount 公司的 NGA 2000 型烟气分析仪分析后排空。洗涤液自填料塔顶部流入, 与气体接触反应后从底部流出, 进入配液槽循环利用。

试验结果中的脱硫/脱硝总效率为一级脱硫/脱硝效率加上一级脱硫/脱硝效率与二级脱硫/脱硝效率的乘积。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 填料塔操作条件对脱硫效率的影响

##### 3.1.1 气速对脱硫效率的影响

图 2 是气速对脱硫效率的影响, 其试验条件为  $\phi_{\text{NO}_2}/\phi_{\text{NO}_x}$  为 6.8%, SO<sub>2</sub> 体积含量为  $1000 \times 10^{-6}$ , 尿素含量为 10% (质量比), 三乙醇胺含量为 0.01% (质量比), 液气比为 16 L/m<sup>3</sup>, 操作温度为常温。图 2 中总效率曲线表明, 随着气速增大, 脱硫效率减小。气速从 0.1 到 0.2 m/s 时, 脱硫效率下降仅 2% 左右。当气速大于 0.2 m/s 时, 脱硫效率才开始快速下降。当气速大于 0.4 m/s 后, 脱硫效率下降又变缓。试验结果表明: 为了保证高效地脱除烟气中的 SO<sub>2</sub>, 烟气与尿素水溶液的接触反应必须控制一定的时间, 即控制脱除烟气中 SO<sub>2</sub> 的接触反应时间。此外, 由于液体在乱堆填料层内向下流动时, 有偏向塔壁流动的现象, 造成塔中心的填料不被润湿, 降低了表面利用率; 塔径越小, 对应于单位塔截面的周边越长, 这种现象越严重。本试验中, 受试验条件限制, 在 1.8 m 的填料层高度上未设置液体再分布装置, 填料塔中下部分存在偏流现象, 导致气液接触不够充分。故需要降低气速, 延长停留时间, 以保证反应充分进行。

此外, 由图 2 可知, 一级塔效率大于二级塔效率, 这是由于随着反应进行, SO<sub>2</sub> 在一级塔中已与尿素溶液快速反应, 使进入二级塔的 SO<sub>2</sub> 分压大大降低, 相对的 SO<sub>2</sub> 去除效率也降低。

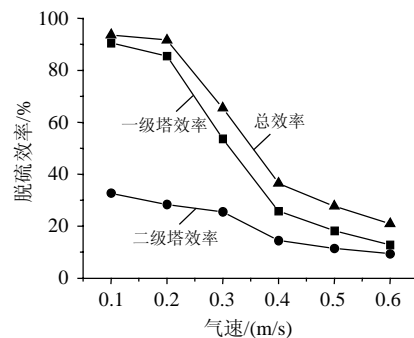


图 2 气速对脱硫效率的影响

Fig. 2 Effect of gas velocity on desulfurization efficiency

### 3.1.2 液气比对脱硫效率的影响

图3是液气比对脱硫效率影响的试验结果,其试验条件为 $\Phi_{\text{NO}_2}/\Phi_{\text{NO}_x}$ 为6.8%, $\text{SO}_2$ 体积含量为 $1000 \times 10^{-6}$ ,尿素含量为10%(质量比),三乙醇胺含量为0.01%(质量比),气速为0.1 m/s,操作温度为常温。由图3可知,随着液气比的增大,脱硫效率增大,液气比由4增至 $16 \text{ L/m}^3$ 时,脱硫效率由33%左右增加至92%以上,增幅非常大,当液气比大于 $16 \text{ L/m}^3$ 时,脱硫效率基本不再变化。本文选择 $16 \text{ L/m}^3$ 为后续试验的液气比。

对于湿法脱硫脱硝系统而言,液气比是关系到吸收效果和装置能耗的主要因素。液气比越大,吸收提供的液滴越多,气液接触越充分,吸收效率就越高。但液气比大,会使吸收液循环量增大,造成设备的庞大,使造价和耗能提高。因此,今后的研究中还应进行进一步经济衡算,以确定最佳液气比。

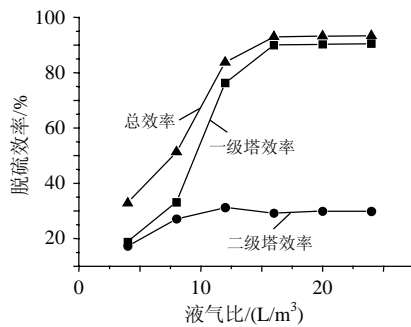


图3 液气比对脱硫效率的影响  
Fig. 3 Effect of liquid/gas ratio on desulfurization efficiency

## 3.2 各种吸收条件对脱硫效率的影响

### 3.2.1 尿素浓度对脱硫效率的影响

图4是尿素浓度对脱硫效率影响的试验结果,其试验条件为 $\Phi_{\text{NO}_2}/\Phi_{\text{NO}_x}$ 为6.8%, $\text{SO}_2$ 体积含量为 $1000 \times 10^{-6}$ ,三乙醇胺含量为0.01%(质量比),气速为0.1 m/s,液气比为 $16 \text{ L/m}^3$ ,操作温度为常温。

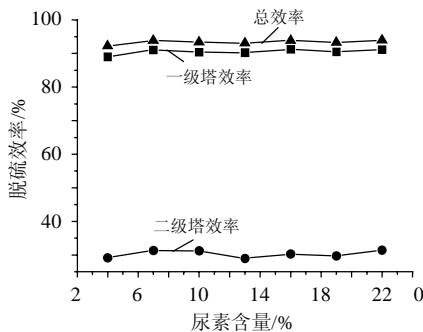


图4 尿素浓度对脱硫效率的影响  
Fig. 4 Effect of urea concentration on desulfurization efficiency

通过图4可以看出,脱硫效率基本不随尿素浓度的变化而变化,只有尿素含量小于6%时,总脱硫效率略低,为91%左右,尿素含量增大至7%以上后,脱硫效率可维持在92%以上。因此,在保证吸收液尿素含量7%以上的条件下,尿素浓度对脱硫效率的影响很小。

### 3.2.2 添加剂浓度对脱硫效率的影响

本试验条件为 $\Phi_{\text{NO}_2}/\Phi_{\text{NO}_x}$ 为6.8%, $\text{SO}_2$ 体积含量为 $1000 \times 10^{-6}$ ,尿素含量为10%(质量比),气速为0.1 m/s,液气比为 $16 \text{ L/m}^3$ ,操作温度为常温。从图5可看出,未加添加剂时的脱硫效率与添加三乙醇胺后的脱硫效率都在92%左右,且脱硫效率基本不随三乙醇胺的浓度变化。说明加入三乙醇胺对尿素溶液吸收 $\text{SO}_2$ 的反应影响不大。

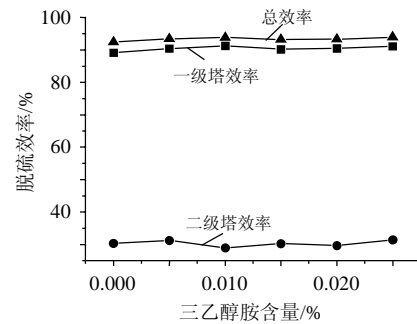


图5 三乙醇胺浓度对脱硫效率的影响  
Fig. 5 Effect of triethanolamine concentration on desulfurization efficiency

### 3.2.3 温度对脱硫效率的影响

尿素溶液吸收 $\text{SO}_2$ 的反应为放热反应,考虑到该反应为气液接触反应,设计试验吸收液温度在常温 $80^\circ\text{C}$ 之间。通过热力学计算,得到不同温度下反应(2)的标准平衡常数 $K^\ominus$ 以及 $\text{SO}_2$ 的平衡分压 $P$ ,见表1。

从表1可知,在 $30\sim 80^\circ\text{C}$ 之间,随着温度的升高,尿素吸收 $\text{SO}_2$ 反应的标准平衡常数均降低,且吸收反应达到平衡时 $\text{SO}_2$ 的分压在上述情况下都呈增大趋势,这说明从热力学角度看反应温度升高不利于 $\text{SO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ 的脱除。然而,即使温度升高, $\text{SO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ 的分压也极小,表明 $\text{SO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ 几乎可以被

表1 反应标准平衡常数及 $\text{SO}_2$ 平衡态分压与温度关系  
Tab. 1 Relationships between  $K^\ominus$ ,  $P$  and  $t$

$t/^\circ\text{C}$	$K^\ominus$	$P/\text{Pa}$
30	321	$4.66 \times 10^{-52}$
40	311	$2.89 \times 10^{-50}$
50	301	$1.38 \times 10^{-48}$
60	292	$5.26 \times 10^{-47}$
70	284	$1.62 \times 10^{-45}$
80	275	$4.10 \times 10^{-44}$

完全吸收，温度升高对该吸收反应的影响不大。

图 6 是在试验条件为  $\Phi_{\text{NO}_2}/\Phi_{\text{NO}_x}$  为 6.8%， $\text{SO}_2$  体积含量为  $1\ 000\times 10^{-6}$ ，尿素含量为 10%(质量比)，三乙醇胺含量为 0.01%(质量比)，气速为 0.1 m/s，液气比为  $16\ \text{L}/\text{m}^3$  下得到的结果。图 6 结果显示，常温下(24.5 °C)的脱硫效率(92.1%)略小于 30 °C 时的脱硫效率(93.6%)，这可能是因为温度较低时，单位体积内活化分子的数量较少，反应速率较低，导致脱硫效率也较低。而反应温度在 30~70 °C 之间时，脱硫效率均在 93% 以上，基本保持不变；当反应温度达到 80 °C 时，脱硫效率略有降低，这是由于温度过高会使尿素的水解反应速度加快，使尿素水解生成  $\text{NH}_3$ ，反应如下：

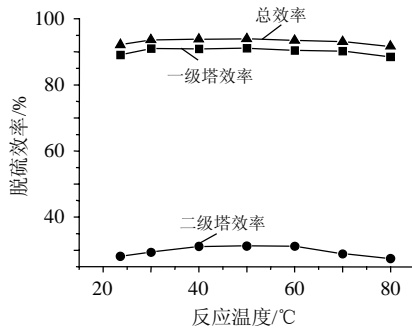
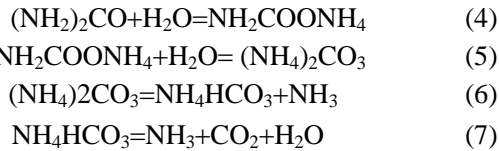


图 6 温度对脱硫效率的影响

Fig. 6 Effect of temperature on desulfurization efficiency

因此，尿素溶液脱硫和脱硝的最佳反应温度均应控制在 30~70 °C 之间。

### 3.2.4 $\text{SO}_2$ 浓度对脱硫效率的影响

图 7 是在试验条件为  $\Phi_{\text{NO}_2}/\Phi_{\text{NO}_x}$  为 6.8%，尿素含量为 10%(质量比)，三乙醇胺含量为 0.01%(质量比)，气速为 0.1 m/s，液气比为  $16\ \text{L}/\text{m}^3$ ，操作温度为常温下得到的结果。由图 7 可知，当烟气中  $\text{SO}_2$

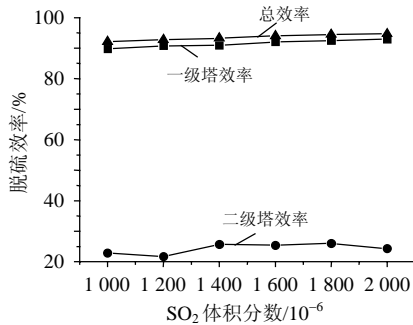


图 7  $\text{SO}_2$  浓度对脱硫效率的影响  
Fig. 7 Effect of  $\text{SO}_2$  concentration on desulfurization efficiency

体积分数增加时，脱硫效率缓慢增大， $\text{SO}_2$  体积分数由  $1\ 000\times 10^{-6}$  增至  $2\ 000\times 10^{-6}$ ，总脱硫效率由 92.1% 增至 94.7%，增幅不大。因此， $\text{SO}_2$  体积分数对脱硫效率的影响不大， $\text{SO}_2$  体积分数大于  $1\ 000\times 10^{-6}$  时，该尿素溶液吸收脱硫系统的总效率都可以达到 92% 以上。

## 3.3 尿素溶液同时脱硫脱硝

### 3.3.1 温度对同时脱硫脱硝的影响

在气速 0.1 m/s，液气比  $16\ \text{L}/\text{m}^3$ ，尿素含量 13%(质量比)，添加剂(三乙醇胺)含量 0.01%(质量比)， $\text{NO}_x$  体积含量  $900\times 10^{-6}$  左右，氧化度 6.8%， $\text{SO}_2$  体积浓度在  $1\ 000\times 10^{-6}$  左右时，研究温度(室温至 80 °C)对脱硫脱硝效率的影响，试验结果如图 8、9 所示。

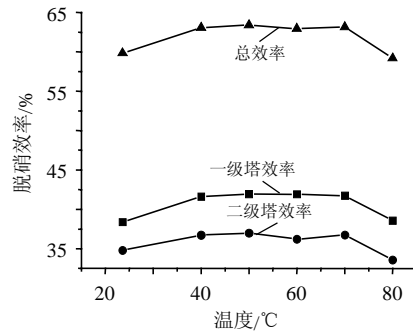


图 8 同时脱硫脱硝时温度对脱硝效率的影响

Fig. 8 Effect of temperature on denitrification efficiency

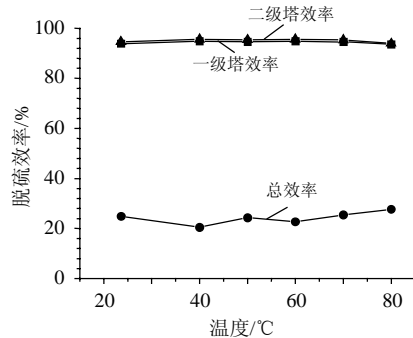


图 9 同时脱硫脱硝时温度对脱硫效率的影响

Fig. 9 Effect of temperature on desulfurization efficiency

由图 8 和图 9 可以看出，40~70 °C 时总脱硝效率基本不变，维持在 63% 左右(如图 8)；而脱硫效率却在 30~70 °C 范围内基本保持不变，总脱硝效率均在 95% 以上(如图 9)。低温时脱硝、脱硫效率低可能是因为温度较低时，反应体系内分子的混乱度较低，单位体积内活化分子的数量较高温时小，反应速率较低；而温度大于 80 °C 时脱硝、脱硫效率降低是由于尿素水解所致。因此，认为尿素/添加剂溶液同时脱硫脱硝的最佳反应温度应控制在 40~70 °C 之间。

### 3.3.2 SO<sub>2</sub>浓度对尿素/三乙醇胺吸收NO<sub>x</sub>的影响

在气速 0.1 m/s, 液气比 16 L/m<sup>3</sup>, 反应温度 30 °C, 尿素含量 13%(质量比), 添加剂(三乙醇胺)含量 0.01%(质量比), NO<sub>x</sub>体积含量 1 000×10<sup>-6</sup>左右, 氧化度 6.8%时, 研究了SO<sub>2</sub>体积浓度在 1 000×10<sup>-6</sup>~2 000×10<sup>-6</sup>变化时对脱硝效率的影响, 试验结果如图 10 所示。

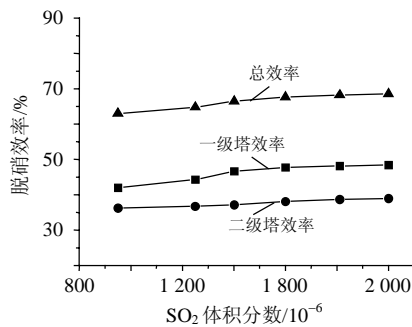


图 10 SO<sub>2</sub>浓度对脱硝效率的影响  
Fig. 10 Effect of SO<sub>2</sub> concentration on denitrification efficiency

从图 10 试验结果可以看出, 随着SO<sub>2</sub>浓度的增加, 脱硝效率也增加。当SO<sub>2</sub>体积浓度由 1 000×10<sup>-6</sup>增至 2 000×10<sup>-6</sup>时, 脱硝效率增加了约 4%~5%。

然而, 对比尿素/三乙醇胺溶液单独脱硝的试验研究(如图 11 所示), 发现在相同试验条件下, 烟气中NO<sub>x</sub>体积浓度为 1 000×10<sup>-6</sup>时, 加入 1 000×10<sup>-6</sup>SO<sub>2</sub>比不加SO<sub>2</sub>的脱硝效率增加了约 5%~6%, 达到 64%, 这说明SO<sub>2</sub>的存在对尿素溶液吸收NO<sub>x</sub>的反应有协同促进作用。此外, 由图 10 可看出, 一级塔脱硝效率随SO<sub>2</sub>体积浓度由 42%增至 48.5%, 增幅较大, 而二级塔脱硝效率增幅较小, 只增加了 2%左右, 这是因为 94%以上的SO<sub>2</sub>在一级塔中被尿素溶液吸收, 进一步说明SO<sub>2</sub>的存在对NO<sub>x</sub>吸收反应的促进作用显著。

图 12 为存在NO<sub>x</sub>条件下, SO<sub>2</sub>浓度对SO<sub>2</sub>的去除效率的影响情况。由图 12 试验结果可看出,

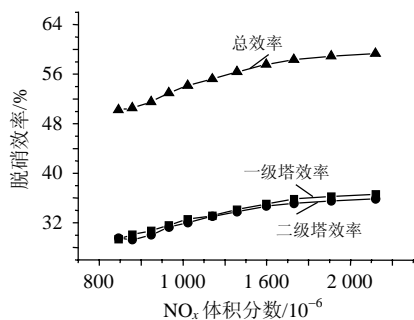


图 11 NO<sub>x</sub>浓度对脱硝效率的影响  
Fig. 11 Effect of NO<sub>x</sub> concentration on denitrification efficiency

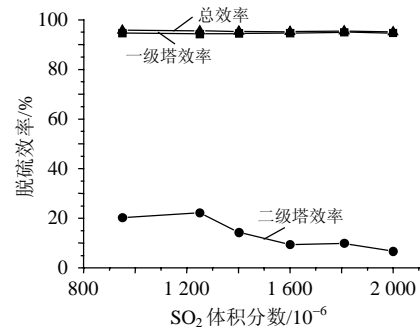


图 12 同时脱硫脱硝SO<sub>2</sub>浓度对脱硫效率的影响  
Fig. 12 Effect of SO<sub>2</sub> concentration on desulfurization efficiency

脱硫效率基本保持在 95%以上, 与尿素溶液单独脱硫时(如图 7)的效率曲线相比, 脱硫效率比单独脱硫时增加了 1%~3%。从图 12 可看出, 一级效率曲线几乎接近总效率曲线, 一级塔脱硫效率可达到 94.5%以上, 这说明烟气中的NO<sub>x</sub>对尿素溶液吸收SO<sub>2</sub>的反应也有一定的协同促进作用。

### 3.3.3 NO<sub>x</sub>浓度对尿素/三乙醇胺吸收SO<sub>2</sub>的影响

在气速 0.1 m/s, 液气比 16 L/m<sup>3</sup>, 反应温度 30 °C, 尿素含量 13%(质量比), 添加剂(三乙醇胺)含量 0.01%(质量比), SO<sub>2</sub>体积含量 1 000×10<sup>-6</sup>左右, 氧化度为 6.8%, 研究NO<sub>x</sub>体积浓度在 400×10<sup>-6</sup>~1 000×10<sup>-6</sup>变化时对脱硫效率的影响, 试验结果如图 13 所示。

从图 13 可看出, 脱硫效率维持在 95%以上, 脱硫效率比单独脱硫时(如图 7)增加了 1%~3%; 随着NO<sub>x</sub>浓度增大, 总脱硫效率有些微提高, 基本上影响不大。然而, 一级脱硫效率曲线越来越接近总效率曲线, 说明SO<sub>2</sub>在一级塔内基本上被完全吸收。

图 14 为存在SO<sub>2</sub>的条件下, NO<sub>x</sub>浓度对NO<sub>x</sub>的去除效率的影响情况。对比图 14 与尿素溶液单独脱硝的效率曲线(如图 11)可发现, 相同NO<sub>x</sub>浓度下, 加入 1 000×10<sup>-6</sup>SO<sub>2</sub>可使总脱硝效率增加 4%~

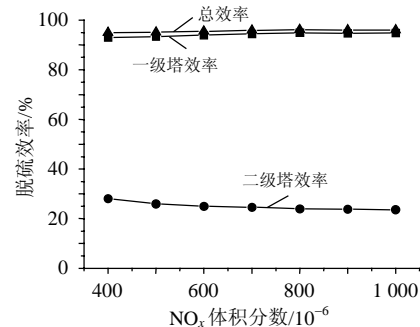


图 13 同时脱硫脱硝NO<sub>x</sub>浓度对脱硫效率的影响  
Fig. 13 Effect of NO<sub>x</sub> concentration on desulfurization efficiency

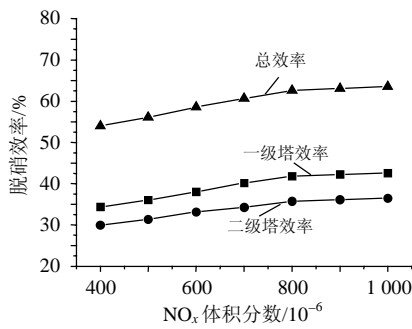


图 14 同时脱硫脱硝 NO<sub>x</sub> 浓度对脱硝效率的影响  
Fig. 14 Effect of NO<sub>x</sub> concentration on denitrification efficiency

5%。再次证明 SO<sub>2</sub> 的存在对尿素溶液吸收 NO<sub>x</sub> 的反应有一定的协同促进作用。

#### 4 结论

本文以一套双级串连的填料塔为主体反应器，试验研究了尿素/三乙醇胺溶液同时脱硫脱硝效率的影响因素，得到以下试验结果：

(1) 随着气速增大，脱硫效率减小。

(2) 随着液气比的增大，脱硫效率增大，当液气比大于 16 L/m<sup>3</sup> 时，脱硫效率增至 92%，基本不再变化。

(3) 吸收液尿素含量大于 7% 以上，脱硫效率基本不随尿素浓度的变化而变化，尿素浓度对脱硫效率的影响相对较小。

(4) 添加剂(三乙醇胺)和 SO<sub>2</sub> 体积分数对尿素溶液吸收 SO<sub>2</sub> 的效率影响不大。

(5) 尿素溶液吸收同时脱硫脱硝的最佳反应温度应控制在 40~70 °C 之间。

(6) 在尿素/添加剂溶液烟气同时脱硫脱硝过程中，SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 具有相互协同促进作用，其净化效率在试验条件下可分别提高 1%~3% 和 5%~6%，总脱硫效率可达 95% 以上，脱硝效率在 63% 以上。

#### 参考文献

- [1] 杨睿懿, 吴彦, 任志凌, 等. 电子束氨法烟气脱硫工艺[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, 24(6): 245-247.  
Yang Ruizhuang, Wu Yan, Ren Zhiling, et al. Study on flue gas desulfurization with electron beam[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2004, 24(6): 245-247(in Chinese).
- [2] 林赫, 高翔, 骆仲泱, 等. 直流电晕自由基簇射脱除烟气中的 NO<sub>x</sub> [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 150-155.  
Lin He, Gao Xiang, Luo Zhongyang, et al. Removing NO<sub>x</sub> from flue gas by means of radical showering induced by DC corona [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 150-155(in Chinese).
- [3] 马建蓉, 黄张根, 刘振宇, 等. 再生方法对 V2O5/AC 催化剂同时脱硫脱硝活性的影响[J]. 催化学报, 2005, 26(6): 463-469.

- Ma Jianrong, Huang Zhanggen, Liu Zhenyu, et al. Effect of regeneration method on activity for simultaneous removal of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> over V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/AC catalyst-sorbent[J]. 2005, 26(6): 463-469(in Chinese).
- [4] 赵毅, 马双忱, 李燕中, 等. 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, 2002, 22(3): 108-112.  
Zhao Yi, Ma Shuangchen, Li Yanzhong, et al. The experimental investigation of desulfurization and denitrification from flue gas by absorbents based on fly ash[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 108-112(in Chinese).
- [5] 赵毅, 马双忱, 黄建军, 等. 高活性吸收剂脱硫和脱氮实验及机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 236-240.  
Zhao Yi, Ma Shuangchen, Huang Jianjun, et al. Experimental study on SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> removal and mechanism by highly reactive sorbent [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 236-240(in Chinese).
- [6] Macken C, Hodnett B K. Testing of the CuO Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst-sorbent in extended operation for the simultaneous removal of NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> from flue gases[J]. Ind Eng Chem Res, 2000, 39(10): 3868-3874.
- [7] 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).
- [8] Chien T W. Removal of SO<sub>2</sub> and NO from flue gas by wet scrubbing using an aqueous NaClO<sub>2</sub> solution[J]. Journal of Hazardous Materials, 2000, 80(1-3): 43-57.
- [9] Long Xiangli, Xiao Wende, Yuan Weikang. Removal of sulfur dioxide and nitric oxide using cobalt ethylenediamine solution[J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2005, 44(4): 686-691.
- [10] Long Xiangli, Xiao Wende, Yuan Weikang. Kinetics of gas-liquid reaction between NO and Co(en)<sub>3</sub><sup>3+</sup>[J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2005, 44(12): 4200-4205.
- [11] Macneil J H, Berseth P, Westwood G, et al. Aqueous catalytic disproportionation and oxidation of nitric oxide[J]. Environ. Sci. Technol., 1998, 32(8): 876-881.
- [12] 贾瑛, 王焯军, 樊秉安. 酸性尿素水溶液处理导弹氧化剂废水中氮氧化物[J]. 安全与环境学报, 2002, 2(3): 48-50.  
Jia Ying, Wang Xunjun, Fan Bingan. On the acidity uratinian disposal of the NO<sub>x</sub> in missile oxidant waste water[J]. Journal of Safety and Environmental, 2002, 2(3): 48-50(in Chinese).
- [13] 王树江, 杨骥, 刘桂英, 等. 二氧化碳气体中氮氧化物去除的研究[J]. 吉林化工学院学报, 2004, 21(3): 13-15.  
Wang Shujiang, Yang Ji, Liu Guiying, et al. Study on the removal of nitrogen oxides from carbon dioxide[J]. Journal of Jilin Institution of Chemical Technology, 2004, 21(3): 13-15(in Chinese).
- [14] 曹忠宇. 含氮氧化物(NO<sub>x</sub>)工业废气治理[J]. 石油化工环境保护, 1999, (1): 47-51.  
Cao Zhongyu. Treatment of containing NO<sub>x</sub> commercial waste gas[J]. Environment Proction in Pertochemical Industry, 1999, (1): 47-51(in Chinese).
- [15] 王军, 曾庆福, 陈磊, 等. 间歇式高浓度氮氧化物废气的治理技术[J]. 武汉科技学院学报. 2003, 16(5): 26-31.  
Wang Jun, Zeng Qingfu, Chen Lei, et al. The intermittent and high

- concentration  $\text{NO}_x$  exhaust gas disposal technology[J]. Journal of Wuhan University of Science and Engineering, 2003, 16(5): 26-31(in Chinese).
- [16] Alain L., Christine R., Noel M., et al. Removal of NO from flue gases using the urea acidic process: kinetics of the chemical reaction of nitrous acid with urea[J]. Ind. Eng. Chem. Res., 1992, 31(3): 777-780.
- [17] 岑超平, 古国榜. 尿素/添加剂湿法烟气同时脱硫脱氮研究(I)——吸收反应中尿素消耗的动力学方程[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2004, 32(1): 37-40.  
Cen Chaoping, Gu Guobang. Simultaneous desulfurization and denitrification from flue gas by using urea/ additive solution(1): kinetic equation of urea consumption in absorption reaction [J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2004, 32(1): 37-40(in Chinese).
- [18] 岑超平, 古国榜. 尿素/添加剂湿法烟气同时脱硫脱氮研究(II)——净化过程中  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  的吸收特性[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2004, 32(2): 14-17.  
Cen Chaoping, Gu Guobang. Simultaneous desulfurization and denitrification from flue gas by using urea/additive solution(II): absorption characteristics of  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_x$  in cleaning process [J]. Journal of south China University of Technology(Natural Science Edition), 2004, 32(2): 14-17(in Chinese).
- [19] 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, 47.  
Lei Ming, Cen Chaoping, Hu Jiangjun. Removal of NO from flue gases using the urea/ $\text{KMnO}_4$  solution [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2005, 6(6): 16-18, 47(in Chinese).
- [20] 陆雅静, 熊源泉. 尿素/添加剂湿法脱硝、同时脱硫脱硝的试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2007.  
Lu Yajing, Xiong Yuanquan. Experimental study on the removal of  $\text{NO}_x$  and the simultaneous removal of  $\text{NO}_x$  and  $\text{SO}_2$  in aqueous solutions of urea/additive[D]. Nanjing: Southeast University, 2007(in Chinese).
- 
- 收稿日期: 2007-09-17。  
作者简介:  
陆雅静(1982—), 女, 硕士, 研究方向为环境工程, lyjing0118@163.com。

(编辑 车德竞)