

试验研究

# 漂白粉/尿素处理高浓度氮氧化物试验研究

王 瑛

(煤科集团杭州环保研究院,浙江杭州,311201)

**摘要:**针对工业锅炉尾气中高浓度氮氧化物的脱除问题,以一套四级串联填料塔为主体反应器,采用前置漂白粉氧化、后置尿素吸收的方式,对高浓度氮氧化物进行湿法脱除,总脱硝效率达到 88.5%,并对气速、液气比、溶液 pH、物料浓度、初始氮氧化物浓度等工况参数进行了研究,确定了最佳实验条件。

**关键词:**高浓度氮氧化物;湿法脱硝;漂白粉;尿素

中图分类号:701

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2017)06-0041-06

## EXPERIMENTAL STUDY ON REMOVAL OF HIGH CONCENTRATION NITROGEN OXIDES USING $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ / $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ SOLUTION

WANG Ying

(CCTEG Hangzhou Environmental Research Institute, Hangzhou 311201, China)

**Abstract:** With regard to the removal of high concentration nitrogen oxides contained in the tail gas of industrial boiler, in this research, experiments of denitrification of the tail gas by use of  $\text{Ca}(\text{ClO})_2/\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  solution were performed in four tandem spraying towers. During the experiments, the tail gas was firstly oxidized with  $\text{Ca}(\text{ClO})_2$  solution and then absorbed with  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  solution. Under the experimental conditions, the total denitrification efficiency reached to 88.5%. Moreover, such parameters as gas velocity, liquid-gas ratio, pH, concentration of materials and nitrogen oxides were studied, and the best experimental conditions were identified finally.

**Key words:** high concentration nitrogen oxides; wet denitrification; Calciumhypochlorite; urea.

工业时代伊始,煤炭就开始成为社会发展的主要能源物质之一,其燃烧除了能产生热量,还会形成大量的  $\text{CO}_x$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$ 、有机气溶胶和固体颗粒污染物,对自然环境及人体健康都有着极大的危害<sup>[1]</sup>。其中  $\text{NO}_x$  是大气中的主要气态污染物之一,其不仅是形成酸雨、超细颗粒物( $\text{PM}_{2.5}$ )污染及灰霾的重要原因,同时也是造成臭氧层空洞及光化学烟雾污染的重要前体物之一<sup>[2]</sup>。我国中小型工业锅炉数量多、分布广、能耗高、燃烧效率低<sup>[3]</sup>,其

排放的  $\text{NO}_x$  在我国氮氧化物排放总量中同样占到很大比重,同时,许多工业锅炉与居住区的距离较近,对居住环境带来了严重的污染。因此,随着环保政策的日益严格,工业锅炉污染物质成为环保治理的焦点。2014年环保部发布《锅炉大气污染物排放标准》<sup>[4]</sup>,进一步将氮氧化物排放限制提高到  $200 \text{ mg/m}^3$ ,使得工业锅炉  $\text{NO}_x$  治理迫在眉睫。

目前,国内外最成熟的烟气脱硝技术主要包括选择性催化还原法(SCR)和选择性非催化还原法(SNCR),虽然脱硝效率高但仍存在占地面积

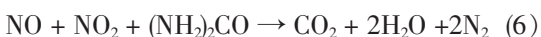
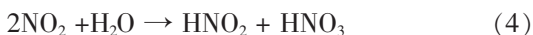
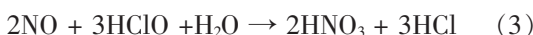
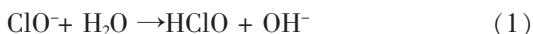
大、投资和运行成本高及工艺复杂等缺陷<sup>[5]</sup>,不适用于中小型锅炉脱硝。而湿法脱硝因其工艺设备简单、操作温度较低、投资运行成本低、可实现同时脱硫脱硝等优点<sup>[6]</sup>,成为中小型锅炉烟气治理的主流发展方向。

液相还原法,即湿式分解法,是一种利用亚硫酸盐、硫代硫酸盐、硫化物、尿素等液相还原剂将氮氧化物还原为氮气的方法。其中,尿素吸收法反应产物简单、无二次污染、成本低,可以达到排放要求,在 NO<sub>x</sub> 浓度高、波动范围大的废气处理方面得到广泛的应用。但尿素对难溶于水的 NO 吸收效率仍较低,仍需加入少量氧化剂以促进 NO 转化为 NO<sub>2</sub>。在常用的氧化剂中亚氯酸钠(NaClO<sub>2</sub>)、高锰酸钾(KMnO<sub>4</sub>)原料成本高昂,臭氧(O<sub>3</sub>)氧化能耗较高,双氧水(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)氧化效率低,而漂白粉(次氯酸钙,Ca(ClO)<sub>2</sub>)氧化性强、性质稳定、水溶性好、价格适中、来源广泛,适宜作湿法脱硝反应的氧化剂。

本研究以次氯酸钙为氧化剂,尿素为吸收剂,以一套四级串联填料塔为主体反应器,采用前置氧化、后置吸收的双段式结构,对某工业锅炉高浓度氮氧化物尾气进行脱除。试验中以低成本、高效率为目的,对气速、液气比、溶液 pH 值、物料浓度、氮氧化物初始浓度等工况条件进行了优化,选出了最佳工况条件以及最佳浓度配比,为工业化应用提供了理论支撑。

## 1 吸收理论

次氯酸钙溶解产生大量强氧化性的次氯酸根离子(ClO<sup>-</sup>),次氯酸根离子再将一氧化氮氧化成二氧化氮和硝酸根离子,见反应式(1)~(3)。在尿素溶液中,NO<sub>2</sub>与水反应生成硝酸(HNO<sub>3</sub>)与亚硝酸(HNO<sub>2</sub>),HNO<sub>2</sub>可以与尿素反应,生成无二次污染的氮气、二氧化碳和水,其反应式见(4)~(5);在 NO 浓度不高的情况下,1mol 尿素还能直接与 1molNO 和 1molNO<sub>2</sub> 同时反应,见反应式(6)<sup>[7-8]</sup>。



## 2 试验装置及工艺流程

现场试验研究在一套四级串联的填料塔反应器中进行,其中 1、2 号为次氯酸钙氧化塔,3、4 号为尿素吸收塔。填料塔内径 100 mm,采用 10 mm×10 mm×4 mm 的塑料鲍尔环以乱堆方式填充,填料层高度为 800 mm。硝化尾气从工厂烟道引出,从底部进入填料塔,与喷淋液逆流混合反应,再由顶部流出,依次经过四级反应吸收后导回烟囱排出。喷淋液从填料塔顶部喷下,与气体接触反应后进入塔底储液槽,循环使用。试验流程见图 1。采用英国 KANE 产品 KM9106 型烟气分析仪检测各级填料塔进出口氮氧化物浓度。

次氯酸钙溶液氧化 NO 的效率公式:

$$\text{NO}_{\text{氧化}} = \frac{C_{\text{NO进}} - C_{\text{NO出}}}{C_{\text{NO进}}} \times 100\% \quad (7)$$

公式中: NO<sub>氧化</sub>-NO 氧化效率, %;

C<sub>NO出</sub>-NO 出口浓度, mg/m<sup>3</sup>;

C<sub>NO进</sub>-NO 进口浓度, mg/m<sup>3</sup>;

尿素溶液吸收 NO<sub>2</sub> 的效率公式:

$$\text{NO}_2_{\text{吸收}} = \frac{C_{\text{NO}_2\text{进}} - C_{\text{NO}_2\text{出}}}{C_{\text{NO}_2\text{进}}} \times 100\% \quad (8)$$

公式中: NO<sub>2</sub>吸收-NO<sub>2</sub> 吸收效率, %;

C<sub>NO<sub>2</sub>出</sub>-NO<sub>2</sub> 出口浓度, mg/m<sup>3</sup>;

C<sub>NO<sub>2</sub>进</sub>-NO<sub>2</sub> 进口浓度, mg/m<sup>3</sup>;

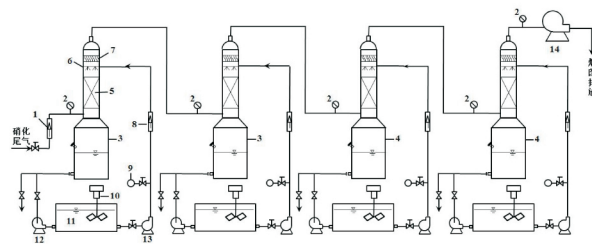


图 1 试验系统流程

1. 气体流量计; 2. 烟气分析仪; 3. 次氯酸钙氧化塔; 4. 尿素吸收塔;
5. 填料; 6. 喷嘴; 7. 除雾器; 8. 液体流量计; 9. pH 计; 10. 搅拌器;
11. 浆液槽; 12. 循环泵; 13. 输送泵; 14. 引风机

## 3 结果讨论

### 3.1 气流速度的影响

气流速度决定气液接触时间,从而影响 NO 的氧化效率及 NO<sub>2</sub> 的吸收效率。保持其他参数不变,选取气流速度分别为 0.1 m/s、0.2 m/s、0.3 m/s、0.4 m/s、0.5 m/s,研究气速的影响。气流速度对氧

化效率影响的其他试验条件为:  $\text{NO}_x$  浓度约为  $5\ 000\ \text{mg}/\text{m}^3$ , 其中  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  为  $60\%$ , 次氯酸钙溶液浓度为  $1\ \text{mol}/\text{L}$ ,  $\text{pH}$  为  $4$ , 液气比  $25\ \text{L}/\text{m}^3$ , 其结果如图 2 所示。气流速度对吸收效率影响的试验条件为:  $\text{NO}_x$  浓度约为  $3\ 000\ \text{mg}/\text{m}^3$ , 其中  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  为  $95\%$ , 尿素溶液浓度为  $15\ \text{wt}\%$ ,  $\text{pH}$  为  $10$ , 液气比  $25\ \text{L}/\text{m}^3$ , 其结果如图 3 所示。

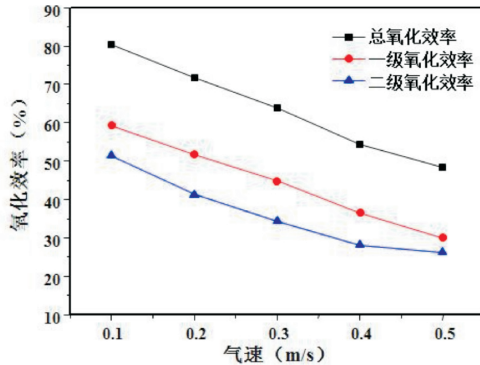


图2 气流速度对氧化效率的影响

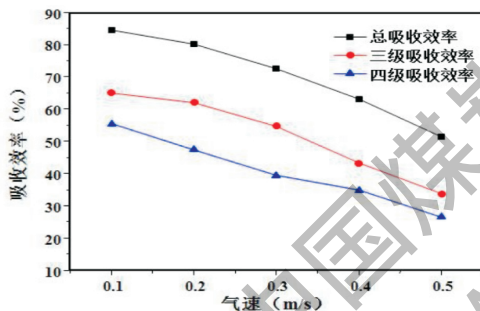


图3 气流速度对吸收效率的影响

由图 2 可知, 随着气速增大, 总氧化效率减小。在气速为  $0.1\ \text{m}/\text{s}$ ~ $0.4\ \text{m}/\text{s}$  段, 氧化效率随气速的增加快速下降; 当气速大于  $0.4\ \text{m}/\text{s}$  后, 氧化效率的下降趋势减缓。与之相对的, 图 3 反应的吸收效率同样随着速度的增大而下降, 且气速越大, 下降越快。

试验结果表明: 随着气流速度的增大, 氧化效率与吸收效率会随之降低, 这是因为气流速度的增大, 降低了气液传质的时间, 所以要保证  $\text{NO}$  的高效氧化与  $\text{NO}_2$  的高效吸收, 气体与喷淋溶液的接触反应需要足够长的时间。同时通过图 2 和图 3 可明显看到, 一级塔氧化效率大于二级塔氧化效率, 三级塔吸收效率大于四级塔吸收效率, 这是因为随着反应的进行,  $\text{NO}$  与  $\text{NO}_2$  在前一级塔中已经反应了一部分, 使得后一级塔中  $\text{NO}$  与  $\text{NO}_2$  的分压降低, 从而  $\text{NO}$  与  $\text{NO}_2$  的溶解速度减缓, 相

对的, 二级氧化与四级吸收的效率均有所降低。综上所述, 试验中选取气流速度为  $0.1\ \text{m}/\text{s}$  为最佳气流速度工况参数。

### 3.2 液气比的影响

液气比影响反应的气液传质效果, 从而影响氧化和吸收效率。试验中保持其他条件不变, 改变喷淋液流量, 调节液气比为  $5\ \text{L}/\text{m}^3$ 、 $10\ \text{L}/\text{m}^3$ 、 $15\ \text{L}/\text{m}^3$ 、 $20\ \text{L}/\text{m}^3$ 、 $25\ \text{L}/\text{m}^3$ 、 $30\ \text{L}/\text{m}^3$ , 研究液气比的影响。液气比对氧化效率的影响选取的试验条件为:  $\text{NO}_x$  浓度约为  $5\ 000\ \text{mg}/\text{m}^3$ , 其中  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  为  $60\%$ , 次氯酸钙溶液浓度为  $1\ \text{mol}/\text{L}$ , 气体流速为  $0.1\ \text{m}/\text{s}$ ,  $\text{pH}$  为  $4$ ; 液气比对吸收速率的影响选取的试验条件为:  $\text{NO}_x$  浓度约为  $3\ 000\ \text{mg}/\text{m}^3$ , 其中  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  为  $95\%$ , 尿素溶液浓度为  $15\ \text{wt}\%$ , 气体流速为  $0.1\ \text{m}/\text{s}$ ,  $\text{pH}$  为  $10$ , 其结果如图 4、图 5 所示。

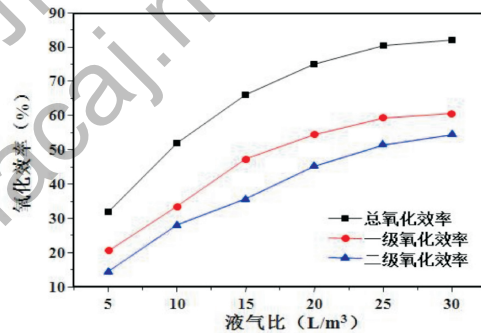


图4 液气比对氧化速率的影响

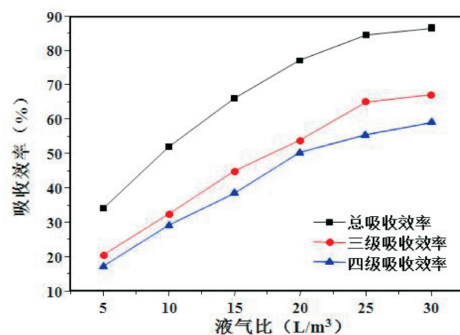


图5 液气比对吸收速率的影响

由图可知,  $\text{NO}$  氧化效率和  $\text{NO}_2$  吸收效率均随液气比的增大而增加, 但其增加速率略有下降。液气比的增大一方面等于提高了吸收塔的喷淋密度, 使气液接触面积增大, 传质单元增多, 故此氮氧化物的去除率也相应提高; 另一方面, 液气比的增大还能增大气体吸收过程的推动力, 使气体更容易吸收。但是, 液气比也不能无限制的增大, 当液气比增大到一定程度后, 不仅吸收液与气体反

应时间缩短,而且液滴凝聚性增大,在此情况下,比表面积可能出现减小的现象;再者,液气比过大会增大气体传质阻力,从而增加水泵的能耗,也会增加对烟道的腐蚀<sup>[9]</sup>;此外,液气比的增大还会相应提高对吸收塔除雾器的运行要求,从而增加工艺的成本费用。在实际工业运用中,一般吸收塔的液气比大多控制在 15~30 L/m<sup>3</sup>,结合上述实验结果,本实验选取 25 L/m<sup>3</sup> 作为液气比基准。

### 3.3 pH 的影响

pH 值主要影响吸收液中次氯酸根离子的氧化能力和尿素溶液对氮氧化物的吸收能力,从而影响 NO 的氧化效率和 NO<sub>2</sub> 的吸收效率。pH 对氧化效率的影响选取的试验条件为: NO<sub>x</sub> 浓度约为 5 000 mg/m<sup>3</sup>,其中 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> 为 60%,次氯酸钙溶液浓度为 1 mol/L,气体流速为 0.1 m/s,液气比为 25 L/m<sup>3</sup>,选择 pH 值为 2、3、4、5、6、7,结果如图 6 所示。pH 对吸收效率的影响选取的试验条件为: NO<sub>x</sub> 浓度约为 3 000 mg/m<sup>3</sup>,其中 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> 为 95%,尿素溶液浓度为 15 wt%,气体流速为 0.1 m/s,液气比为 25 L/m<sup>3</sup>,选择 pH 值为 8、9、10、11、12,其结果如图 7 所示。

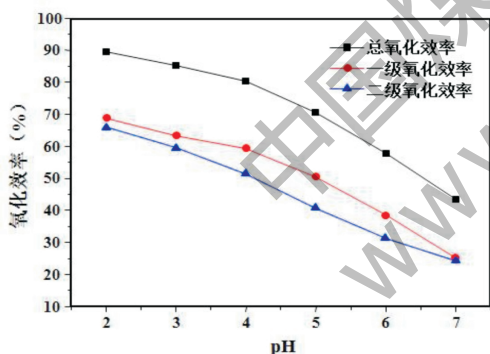


图 6 pH 对氧化效率的影响

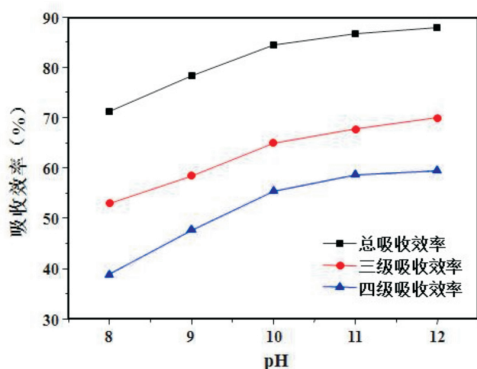


图 7 pH 对吸收效率的影响

由图 6 可知,随着 pH 的增大,NO 的氧化效率呈下降趋势,且下降速率先快后慢。这是因为次氯酸钙溶解在水中主要形成 Cl<sub>2</sub>、HClO 和 ClO<sup>-</sup>,它们的含量与溶液 pH 值有关。碱性条件下主要是 ClO<sup>-</sup>,接近中性范围内,HClO 和 ClO<sup>-</sup>的浓度积最大,弱酸性环境下则以 HClO 为主,而在强酸性环境下则会产生氧化性更强的 Cl<sub>2</sub>。Ca(ClO)<sub>2</sub> 在酸性、中性以及碱性溶液中的标准电极电位(E<sup>0</sup>)分别为 1.49 V、1.20 V 以及 0.9 V<sup>[10]</sup>。由此可见,次氯酸钙溶液的氧化性很大程度上受 pH 的影响,且溶液酸性越强,氧化性越强。但酸性过强不仅对仪器设备的运行和维护提出了更高的要求,而且释放的 Cl<sub>2</sub> 还会对周边环境和人体健康产生一定的危害,因此在后续试验中仍选择 pH 为 4 进行氧化试验。

由图 7 可知,NO<sub>2</sub> 的吸收效率随着 pH 的增大而呈上升趋势。碱性条件下,溶液中的 OH<sup>-</sup>会与吸收过程中产生的 H<sup>+</sup>反应中和,促进反应式(4)向正反应方向移动,从而促进了 NO<sub>2</sub> 的吸收反应。同时,强碱条件下 NO<sub>2</sub> 还会直接与 OH<sup>-</sup>反应<sup>[11]</sup>,但此时溶液 pH 对吸收效率的促进作用并不明显,这是因为此时决定 NO<sub>2</sub> 吸收反应速率的是 NO<sub>2</sub> 的溶解速率,即气液接触时间才是此时的决定性因素。pH 值过高不仅对仪器设备有着更高的要求,增加了运行维护成本,同时喷淋废液也不易处理,因此在后续试验中仍选择 pH 为 10 进行吸收试验。

### 3.4 溶液浓度的影响

溶液浓度影响脱硝过程的化学反应速率,从而决定 NO 的氧化效率和 NO<sub>2</sub> 的吸收效率。次氯酸钙浓度对氧化效率的影响选取的试验条件为: NO<sub>x</sub> 浓度约为 5 000 mg/m<sup>3</sup>,其中 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> 为 60%,气体流速为 0.1 m/s,pH 为 4,液气比为 25 L/m<sup>3</sup>,选择次氯酸钙浓度为 0.5 mol/L、0.75 mol/L、1 mol/L、1.5 mol/L、2 mol/L,结果如图 8 所示。尿素浓度对吸收效率的影响选取的试验条件为: NO<sub>x</sub> 浓度约为 3 000 mg/m<sup>3</sup>,其中 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> 为 95%,气体流速为 0.1 m/s,pH 为 10,液气比为 25 L/m<sup>3</sup>,选择尿素浓度为 6 wt%、9 wt%、12 wt%、15 wt%、18 wt%,其结果如图 9 所示。

由图 8、图 9 可见,随着溶液浓度的增大,NO 的氧化效率和 NO<sub>2</sub> 的吸收效率均呈上升趋势,其

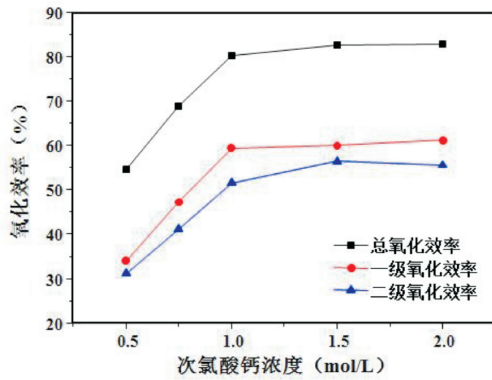


图 8 次氯酸钙浓度对氧化效率的影响

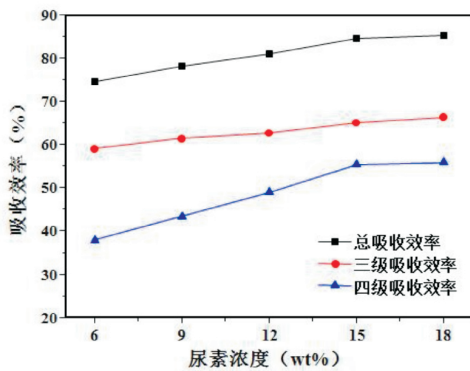


图 9 尿素浓度对吸收效率的影响

中氧化效率的上升幅度大于吸收效率。当次氯酸钙溶液浓度从 0.5 mol/L 增大到 1 mol/L 时, 氧化效率有较大幅度的增长, 而当次氯酸钙溶液浓度大于 1 mol/L 时, 氧化效率基本维持不变。这是因为当溶液浓度达到一定程度后, 决定整个气液反应速率的不再是物料浓度, 而是 NO 和 NO<sub>2</sub> 的溶解速度。综合考虑脱硝效率和经济因素, 选定次氯酸钙浓度为 1 mol/L, 尿素浓度为 15 wt% 进行后续实验。

### 3.5 初始氮氧化物浓度的影响

考虑到工业锅炉实际生产工艺的特殊性, 尾气中的氮氧化物会随着生产条件的变化而产生大幅度的波动, 因此本试验选取初始氮氧化物浓度为 1 000 mg/m<sup>3</sup>、5 000 mg/m<sup>3</sup> 和 10 000 mg/m<sup>3</sup> 三种具有代表性的工况, 研究初始氮氧化物浓度对氧化效率、吸收效率和总脱硝效率的影响, 其结果分别如图 10、图 11、图 12 所示。其他条件为: 次氯酸钙浓度为 1 mol/L, 尿素浓度为 15 wt%, 气体流速为 0.1 m/s, 液气比为 25 L/m<sup>3</sup>, 为尽可能确保超高浓度氮氧化物的脱除, 此处选取氧化塔的 pH 为 2, 吸收塔的 pH 为 12。

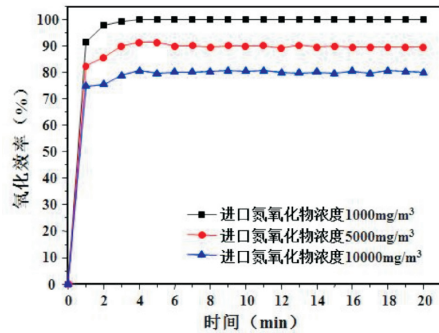


图 10 初始氮氧化物浓度对氧化效率的影响

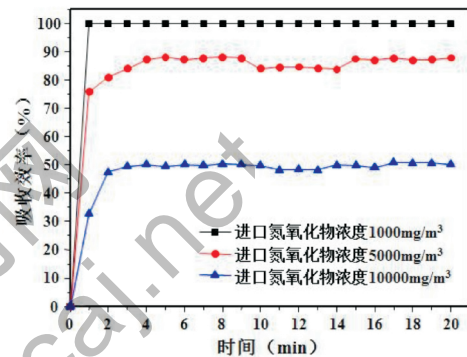


图 11 初始氮氧化物浓度对吸收效率的影响

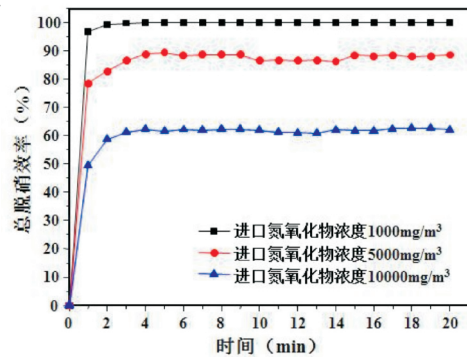


图 12 初始氮氧化物浓度对总脱硝效率的影响

由图 10 可知, NO 的氧化效率会随初始氮氧化物浓度的增大而减小。较低浓度条件下(1 000 mg/m<sup>3</sup>)的氧化效率基本保持在 100%, 当初始浓度增大到 5 000 mg/m<sup>3</sup> 后仍有约 90% 的氧化效率, 当初始浓度继续增大到 10 000 mg/m<sup>3</sup>, NO 的氧化效率下降为 79.8%。由图 11 可知, 初始氮氧化物浓度对尿素吸收效率的影响较大。在初始浓度为 1 000 mg/m<sup>3</sup> 时, 经过前两级次氯酸钙溶液的氧化, 大部分氮氧化物已被氧化成硝酸根和亚硝酸根而吸收, 剩余少量未被吸收的 NO<sub>2</sub> 能快速被尿素溶液吸收; 在初始浓度为 5 000 mg/m<sup>3</sup> 时, 经

过前两级次氯酸钙的氧化,仍有约 3 000 mg/m<sup>3</sup> 的 NO<sub>2</sub> 进入第三级吸收塔,此部分约有 87 % 的 NO<sub>2</sub> 被尿素吸收;当初始浓度继续增大到 10 000 mg/m<sup>3</sup> 时,约有 6 000 mg/m<sup>3</sup> 的 NO<sub>2</sub> 进入三级吸收塔,只有接近 50 % 的 NO<sub>2</sub> 被尿素吸收。由图 12 可知,在初始氮氧化物浓度为 1 000 mg/m<sup>3</sup> 时,系统的脱硝效率接近 100 %;而当初始氮氧化物浓度增大到 5 000 mg/m<sup>3</sup> 及 10 000 mg/m<sup>3</sup> 时,系统的脱硝效率分别下降为 88.5 % 和 62.2 %。

#### 4 结论

本试验以一套四级串联填料塔为主体反应器,采用前置次氯酸钙氧化、后置尿素吸收的方式,进行了工业锅炉高浓度氮氧化物的湿法脱除研究,得到了以下几点结论:

(1) 随着气流速度的增大,NO 氧化效率和 NO<sub>2</sub> 吸收效率均减小,气流速度在整个氧化吸收过程中起到了决定性作用。

(2) 随着液气比、次氯酸钙浓度和尿素浓度的增大,NO 氧化效率和 NO<sub>2</sub> 吸收效率均有不同程度的提高,液气比对氧化、吸收效率的提升效果更为显著。

(3) 酸性条件下,NO 的氧化效率随 pH 的增大而减小;碱性条件下,NO<sub>2</sub> 的吸收效率随 pH 的增大而增大。pH 对 NO 氧化过程的影响大于 NO<sub>2</sub> 吸收过程。

(4) 在 NO<sub>x</sub> 浓度约为 5 000 mg/m<sup>3</sup>,其中 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> 为 60 %,气体流速为 0.1 m/s,液气比为 25 L/m<sup>3</sup>,次氯酸钙浓度为 1 mol/L,尿素浓度为 15 wt%,氧化塔 pH 为 2,吸收塔 pH 为 12 的条件下,取得的最佳脱硝效率为 88.5 %。

#### 参考文献

- [1] 郝吉明,马广大,王书肖.大气污染控制工程[M].北京:高等教育出版社,2010.
- [2] 郝润龙.燃煤烟气中 SO<sub>2</sub>、NO 和 Hg<sub>0</sub> 一体化控制实验研究[D].华北电力大学(河北),2015.
- [3] 张艳,王硕,王博.燃煤工业锅炉氮氧化物的排放控制技术[J].中国环保产业,2011(3):40-43.
- [4] 锅炉大气污染物排放标准 (GB13271-2014)[S].环境保护部,2014.
- [5] 王惠挺,郭瑞堂,高翔,等.利用 NaClO<sub>2</sub>/CaCO<sub>3</sub> 浆液同时脱硫脱硝的试验研究[J].热力发电,2013,42(1):41-44.
- [6] 王莉,吴忠标.湿法脱硝技术在燃煤烟气净化中的应用与研究进展[J].安全与环境学报,2010,10(3):73-77.
- [7] 尹凤交.尿素/Ca(ClO)<sub>2</sub> 湿法同时脱硫脱硝技术的试验研究[D].山东大学,2010.
- [8] 杨一理.尿素与氧化剂复合吸收液同时脱硫脱硝试验研究[D].浙江工业大学,2013.
- [9] 刘畅,崔向丽,邓徐顿,胡文胜.湿法烟气脱硫液气比的影响因素及参数确定[J].电力科技与环保,2010(3):22-23.
- [10] 肖灵,程斌,吴忠标,等.次氯酸钠湿法烟气脱硝及同时脱硫脱硝技术研究[J].环境科学学报,2011,31(6):1175-1180.
- [11] 韩少强.不同添加剂对提高尿素同时脱硫脱硝效率的研究[D].天津大学,2015.

(上接第 51 页)

解决了所处区域声环境容量不足的问题,避免了大规模的环境搬迁。

实践证明,区域噪声协同防治理论值得进一步研究和推广。

#### 参考文献

- [1] 李巍巍.不确定条件下电煤供应链协调的机制设计及评价方法研究[D].哈尔滨工业大学,2016.
- [2] 国家统计局.中国统计年鉴-2016 [M].中国统计出版社,2016.
- [3] 王建民,杨文培,杨力.双赢目标约束下中国能源结构调整测算[J].中国人口资源与环境,2016,26(3):27-36.
- [4] 田文超.燃煤电厂环境保护现状及对策探析 [J].经营管理者,2014(28):394.
- [5] 王诗宗.治理理论及其中国适用性[M].浙江:浙江大学出版社,2009:201.

- [6] 李胜.跨行政区流域污染协同治理的实现路径分析[J].中国农村水利水电,2016,(01):89-93.
- [7] 魏娜,赵成根.跨区域大气污染协同治理研究——以京津冀地区为例[J].河北学刊,2016,36(01):144-149.
- [8] 梁亮,陈益凤.水污染协同治理机制研究:以甬江水污染治理为例[J].宁波广播电视大学学报,2015,13(01):55-58.
- [9] 唐兵,杨旗.协同视角下的湖泊水污染治理 [J].理论探索,2014(05):86-89.
- [10] 李一平,逢勇,吕俊,梁梅.外源性污染对太湖梅梁湾水质影响的定量化[J].城市环境与城市生态,2004,17(01):5-8.
- [11] HJ/T2.4-1995,中华人民共和国环境保护行业标准,环境影响评价技术导则声环境[S].
- [12] 聂伟.环境认知、环境责任感与城乡居民的低碳减排行为[J].科技管理研究,2016(15):252-256.
- [13] 徐猛,张俊红,李基芳,何伟举,翟乃斌.基于单一源求逆法的排气噪声对车内噪声贡献量分析 [J].噪声与振动控制,2013,33(5):64-66,76.