

# 非热等离子体强化碱液吸收脱除烟气中 NO 和 Hg<sup>0</sup> 的研究

罗宏晶, 朱天乐\*, 王美艳

(北京航空航天大学环境科学与工程系, 北京 100191)

**摘要:**采用正电晕放电产生非热等离子体将模拟烟气中的 NO 和 Hg<sup>0</sup> 氧化成更易吸收的 NO<sub>2</sub> 和 Hg<sup>2+</sup>, 从而强化其碱液吸收脱除, 并考察放电电压及入口 SO<sub>2</sub> 和 NO 浓度对氧化和脱除效果的影响. 结果表明, 随着电压升高, NO 和 Hg<sup>0</sup> 的氧化和脱除量增加. 当 NO 浓度为 134 mg/m<sup>3</sup>, 放电电压为 12.8 kV 时, 吸收塔出口 NO 和 NO<sub>2</sub> 浓度分别为 0 和 69 mg/m<sup>3</sup>. 当 Hg<sup>0</sup> 浓度为 110 μg/m<sup>3</sup>, 放电电压为 13.1 kV 时, 吸收塔出口 Hg<sup>0</sup> 和 Hg<sup>2+</sup> 浓度分别为 22 μg/m<sup>3</sup> 和 11 μg/m<sup>3</sup>. SO<sub>2</sub> 对 Hg<sup>0</sup> 的氧化和脱除具有一定促进效应, 且这种效应随 SO<sub>2</sub> 浓度提高而增强, 但 SO<sub>2</sub> 对 NO 的氧化和脱除影响不大. NO 对 Hg<sup>0</sup> 氧化有明显的抑制效应, 随着 NO 浓度提高, Hg<sup>0</sup> 氧化和脱除量显著降低. 当 800 mg/m<sup>3</sup> SO<sub>2</sub>、134 mg/m<sup>3</sup> NO 和 110 μg/m<sup>3</sup> Hg<sup>0</sup> 共存时, 对应 77 J/L 的能量输入, NO 和 Hg<sup>0</sup> 的脱除率分别为 57% 和 31%.

**关键词:**非热等离子体; 碱液吸收; NO; Hg<sup>0</sup>; SO<sub>2</sub>; 脱除; 烟气

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)06-1682-06

## Removal of NO and Hg<sup>0</sup> in Flue Gas Using Alkaline Absorption Enhanced by Non-thermal Plasma

LUO Hong-jing, ZHU Tian-le, WANG Mei-yan

(Department of Environmental Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Non-thermal plasma (NTP) induced by positive corona discharge was utilized to oxidize NO and Hg<sup>0</sup> to more water-soluble NO<sub>2</sub> and Hg<sup>2+</sup> under the conditions of simulated flue gas. The effects of discharge voltage and inlet SO<sub>2</sub> and NO concentrations on NO and Hg<sup>0</sup> oxidation and their removals by alkaline absorption were investigated. The results show that the oxidation and removal of NO and Hg<sup>0</sup> are enhanced with the increase of discharge voltage. The concentrations of NO and NO<sub>2</sub> at the outlet of absorption tower are 0 and 69 mg/m<sup>3</sup> with an inlet NO concentration of 134 mg/m<sup>3</sup> and a discharge voltage of 12.8 kV while the outlet concentrations of Hg<sup>0</sup> and Hg<sup>2+</sup> are 22 μg/m<sup>3</sup> and 11 μg/m<sup>3</sup> with an inlet Hg<sup>0</sup> concentration of 110 μg/m<sup>3</sup> and a discharge voltage of 13.1 kV. The presence of SO<sub>2</sub> slightly improves the oxidation and removal of Hg<sup>0</sup> while it has almost no effect on NO oxidation and its removal. The oxidation and removal of Hg<sup>0</sup> are significantly inhibited with the increase of inlet NO concentration. In the coexistence of 800 mg/m<sup>3</sup> SO<sub>2</sub>, 134 mg/m<sup>3</sup> NO and 110 μg/m<sup>3</sup> Hg<sup>0</sup>, the removal efficiencies are 57% for NO and 31% for Hg<sup>0</sup> with an energy input of 77 J/L.

**Key words:** non-thermal plasma; alkaline absorption; NO; Hg<sup>0</sup>; SO<sub>2</sub>; removal; flue gas

燃煤和焚烧烟气中含有烟尘、SO<sub>2</sub>、NO 和 Hg 等多种污染物. 传统的处理方法针对每一种污染物设置一个独立的处理装置, 主流技术方法包括除尘器分离烟尘, 石灰/石灰石浆液吸收脱除 SO<sub>2</sub>, 氨选择性催化还原净化 NO, 活性炭吸附焚烧烟气中的汞等. 这种处理方式净化效率高, 但流程长、设备数量多而复杂, 由此导致处理系统的投资和运行费用高、占地面积大. 因此, 开发新型技术, 在较短的流程内, 利用尽可能少的处理设备, 实现多种污染物的联合脱除是烟气净化的努力方向.

碱液吸收能够高效脱除烟气中的 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 和 Hg<sup>2+</sup>, 对荷电细颗粒物的脱除效果也优于不带电颗粒. 然而, 这种方法对 NO 和 Hg<sup>0</sup> 的脱除能力很差. 若要采用吸收净化, 需要先对其进行氧化. 为此, 人

们基于气相氧化和液相氧化 NO 和 Hg<sup>0</sup> 两条技术路线进行了一系列研究, 包括电子束氧化<sup>[1]</sup>、臭氧氧化<sup>[2]</sup>、等离子体氧化<sup>[3]</sup>、Ag(I)/Ag(II) 氧化<sup>[4]</sup> 和 NaClO 氧化<sup>[5]</sup> 等. 其中, 利用高能电子(电子束)、放电等离子体和臭氧等物质氧化 NO 或 Hg<sup>0</sup> 被认为是具有应用前景的方案. Fujishima 等<sup>[6]</sup> 采用等离子体氧化与亚硫酸钠和氢氧化钠的混合液吸收相结合脱除烟气中的 NO<sub>x</sub>, 发现注入能量为(以 NO 计) 56 eV/分子时, 98% 的 NO 和 75% 的 NO<sub>x</sub> 能被脱除, 并

收稿日期: 2009-08-21; 修订日期: 2009-09-26

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA06Z300); 北京市自然科学基金项目(8072017)

作者简介: 罗宏晶(1984~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: luohongjing@mse.buaa.edu.cn

\* 通讯联系人, E-mail: zhutl@buaa.edu.cn

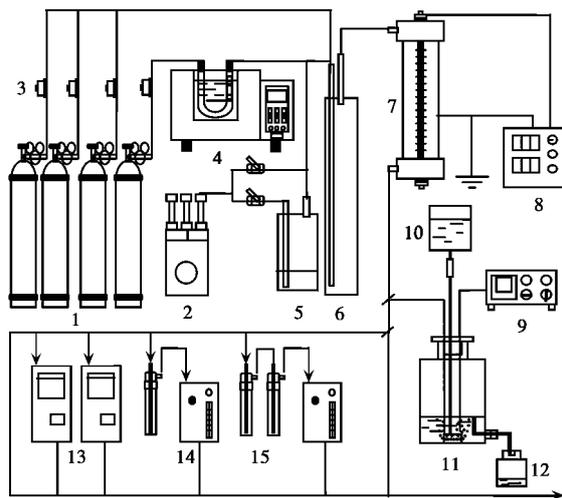
指出采用等离子体与化学吸收相结合的方式将是未来降低烟气处理成本的发展方向. Yamamoto 等<sup>[7]</sup>采用等离子体氧化与化学吸收相结合脱除 NO, 在达到 80% ~ 85% 的脱除率时, 脱除 NO 的运行费用为 4 010 美元/t, 是传统选择性催化还原技术的 1/3 ~ 1/5. Chen 等<sup>[8]</sup>研究表明, 使用介质阻挡放电产生等离子体对 Hg<sup>0</sup> 的氧化效率高, 但是能耗比较大.

到目前为止, 对于非等离子体氧化协同吸收同时脱除 NO 和 Hg<sup>0</sup> 的研究报道还鲜见. 本课题组前期研究了在非热等离子体作用下, 分别添加 CO<sub>2</sub>、NO、H<sub>2</sub>O 和 HCl 等组分对空气气氛中元素汞氧化的影响, 结果表明, CO<sub>2</sub> 的和 NO 的存在会抑制元素汞氧化; H<sub>2</sub>O 和 HCl 存在会促进元素汞的氧化<sup>[9]</sup>. 本研究基于模拟烟气气氛, 进一步考察非热等离子体强化氧化和碱液吸收脱除 NO 和 Hg<sup>0</sup> 的效果以及气相组分间的影响作用, 对开展等离子体技术与碱液吸收联合脱除烟气中多种污染物的应用具有一定指导意义.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

实验装置由配气、放电等离子体发生、气体吸收和气体成分分析 4 个部分构成, 如图 1 所示.



1. 标准气钢瓶; 2. 空气压缩机; 3. 质量流量计; 4. 汞渗透装置;
5. 水蒸气鼓泡塔; 6. 缓冲混合罐; 7. 等离子体反应器; 8. 高压电源;
9. pH 控制器; 10. 母液瓶; 11. 碱液吸收瓶; 12. 溢流液瓶;
13. 气体分析仪; 14. 大气采样仪; 15. 采样管

图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematics of the experimental setup

模拟烟气的基本组成为 6% O<sub>2</sub>、12% CO<sub>2</sub>、3% H<sub>2</sub>O, 平衡气为 N<sub>2</sub>. 汞渗透管置于控温油浴槽, 通过

汞渗透管的 N<sub>2</sub> 将 Hg<sup>0</sup> 引入反应混合气, 通过鼓泡塔的空气将 H<sub>2</sub>O 引入反应混合气. SO<sub>2</sub> 和 NO 来自标准气钢瓶, 通过质量流量计控制各路气体的流量, 总气量为 6 L/min. 气体依次通过缓冲罐混合、放电等离子体反应器和碱液吸收塔. 通过测量放电等离子体反应器入口和出口, 以及吸收塔出口的污染物浓度, 可确定氧化和脱除的效果.

### 1.2 等离子体反应器和碱液吸收塔

本研究采用线-管结构的正电晕放电等离子体反应器<sup>[9]</sup>. 管状接地极内径为 42 mm, 阳极为串接 30 个放电齿片的 6 mm 不锈钢管, 放电齿片间距为 5 mm, 放电齿片厚 1 mm, 每个放电齿片上有 4 个放电尖端, 放电尖端到阴极距离为 16 mm, 总放电区长度为 180 mm.

碱液吸收塔为鼓泡式, 通过 pH 控制系统调节新鲜吸收液 (1 mol/L 的 NaOH) 进入吸收塔流量, 继而维持吸收塔内溶液 pH 值为 6.0 ~ 6.5. 通过吸收塔侧面的溢流口排出多余的吸收液, 并维持吸收塔内溶液成分基本恒定.

### 1.3 分析方法

气体中汞浓度采用吸收法采样结合双硫脲分光光度法测定, 其中 Hg<sup>2+</sup> 由 0.5 mol/L 硫酸水溶液吸收, Hg<sup>0</sup> 由 0.1 mol/L 高锰酸钾与 10% 硫酸的混合溶液吸收. 采用 Kane SGA94 (Kane Co., Ltd., Britain) 和 Testo 335 (Testo Co., Ltd., Germany) 气体分析仪测量 SO<sub>2</sub>、NO 和 NO<sub>2</sub> 的浓度.

## 2 结果与讨论

### 2.1 非热等离子体强化碱液吸收脱除 NO 或 Hg<sup>0</sup>

在气相模拟烟气含有 134 mg/m<sup>3</sup> NO 或 110 μg/m<sup>3</sup> Hg<sup>0</sup> 的情况下, 即反应混合气组成分别为 6% O<sub>2</sub> + 12% CO<sub>2</sub> + 3% H<sub>2</sub>O + 134 mg/m<sup>3</sup> NO + N<sub>2</sub> 和 6% O<sub>2</sub> + 12% CO<sub>2</sub> + 3% H<sub>2</sub>O + 110 μg/m<sup>3</sup> Hg<sup>0</sup> + N<sub>2</sub> 时, 考察非热等离子体对 NO 或 Hg<sup>0</sup> 氧化和碱液吸收的影响, 结果分别如图 2 和图 3 所示.

从图 2 可以看出, 随着放电电压升高, 等离子体反应器出口 NO 或 Hg<sup>0</sup> 浓度皆降低, 而 NO<sub>2</sub> 或 Hg<sup>2+</sup> 浓度皆上升. 这是因为气氛中 O<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 的存在, 使得放电产生的非热等离子体中含有大量 O<sub>3</sub>、·O 和 ·OH 等氧化性自由基, 能够氧化 NO 或 Hg<sup>0</sup> 为 NO<sub>2</sub> 或 Hg<sup>2+</sup>, 并且所产生氧化性自由基的量随放电电压增大而升高, 总汞的浓度下降是由于等离子体反应器对 Hg<sup>2+</sup> 具有一定捕集作用<sup>[9]</sup>. 与 Hg<sup>0</sup> 相比, NO 更

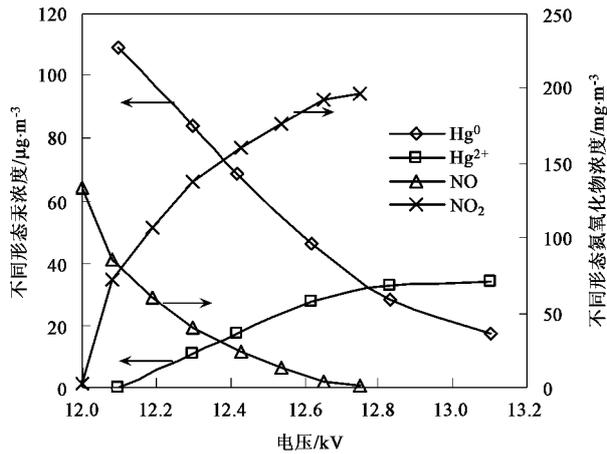


图2 NO 或 Hg<sup>0</sup> 存在下等离子体反应器出口污染物浓度与放电电压的关系

Fig. 2 Relationships between discharge voltage and outlet concentrations of pollutants from plasma reactor

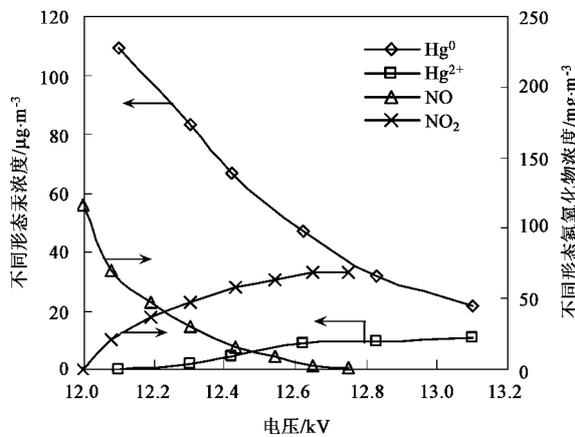


图3 NO 或 Hg<sup>0</sup> 存在下吸收塔出口污染物浓度与放电电压的关系

Fig. 3 Relationships between discharge voltage and outlet concentrations of pollutants from alkali absorption tower

易氧化. 不仅表现在相同电压下, NO 氧化程度高于 Hg<sup>0</sup>, 也表现在对应稳定放电可达到的最大放电电压下, NO 几乎全部氧化为 NO<sub>2</sub>, 而 Hg<sup>0</sup> 仍然有部分残余. 这可能与 NO 和 Hg<sup>0</sup> 的氧化速度差异有关. 实际上, 有研究已经表明<sup>[10]</sup>, 298 K 下 O<sub>3</sub> 与 Hg<sup>0</sup> 反应的速率常数约为  $7.5 \times 10^{-19} \text{ cm}^3 \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1}$ , 而与 NO 反应的速率常数<sup>[11]</sup> 为  $1.8 \times 10^{-14} \text{ cm}^3 \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1}$ , 后者显著高于前者.

由图3可以看到 NO 由 12.8 kV 产生的非热等离子体完全氧化后经过碱液吸收后有 69 mg/m<sup>3</sup> NO<sub>2</sub> 残留; Hg<sup>0</sup> 由 13.1 kV 时产生的非热等离子体大部分氧化后经过碱液吸收后有 22 μg/m<sup>3</sup> Hg<sup>0</sup> 和

11 μg/m<sup>3</sup> Hg<sup>2+</sup> 残留. 同时比较图2与图3可以看出, 吸收塔出口 NO<sub>2</sub> 或 Hg<sup>2+</sup> 的浓度远低于等离子体反应器出口(即吸收塔入口), 而吸收塔出口 NO 浓度与等离子体反应器出口相比只略微下降, Hg<sup>0</sup> 基本相同, 这进一步证明碱吸收只对 Hg<sup>2+</sup> 和 NO<sub>2</sub> 有效, 而对 NO 和 Hg<sup>0</sup> 的作用甚微. 另外, NO 的加入使放电电压升至 12.8 kV 以上时, 开始出现不稳定的火花放电, 因此确定最适合的放电电压为 12.8 kV.

### 2.2 非热等离子体强化碱液同时吸收脱除 SO<sub>2</sub> 和 Hg<sup>0</sup>

在固定放电电压和混合气 Hg<sup>0</sup> 浓度分别为 12.8 kV ± 0.1 kV 和 110 μg/m<sup>3</sup> 的条件下, 将不同量的 SO<sub>2</sub> 加入反应混合气中, 考察入口 SO<sub>2</sub> 浓度对非热等离子体氧化 Hg<sup>0</sup> 和强化碱液同时脱除 SO<sub>2</sub> 和 Hg<sup>0</sup> 的影响, 结果分别如图4和图5所示.

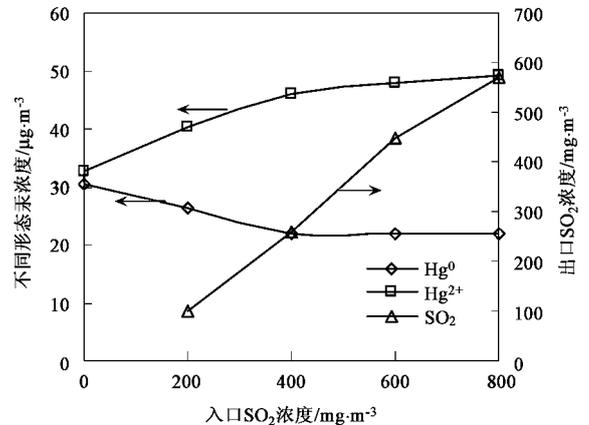


图4 SO<sub>2</sub> 和 Hg<sup>0</sup> 共存下等离子体反应器出口污染物浓度与入口 SO<sub>2</sub> 浓度的关系

Fig. 4 Relationships between inlet SO<sub>2</sub> concentration and outlet concentrations of pollutants from plasma reactor in the presence of both SO<sub>2</sub> and Hg<sup>0</sup>

由图4可以看出, 等离子体反应器出口 SO<sub>2</sub> 浓度稍低于入口, 这表明少量 SO<sub>2</sub> 被氧化为 SO<sub>3</sub>, 这与 Dong 等<sup>[12]</sup> 的研究结果相类似. 随着 SO<sub>2</sub> 浓度上升, Hg<sup>0</sup> 的浓度有所下降, Hg<sup>2+</sup> 浓度有所上升, 这可能是由于 SO<sub>2</sub> 氧化为 SO<sub>3</sub> 后, 与 HgO 反应消耗了部分 HgO, 继而又促进 Hg<sup>0</sup> 氧化所致.

由图5可以看到随着 SO<sub>2</sub> 浓度的升高, 吸收塔出口的 Hg<sup>0</sup> 浓度下降, SO<sub>2</sub> 自身的脱除率保持在 90% 以上. 这是因为吸收液吸收的主要是总汞当中的氧化态汞, SO<sub>2</sub> 的加入促进了 Hg<sup>0</sup> 的氧化, 从而提高了 Hg<sup>0</sup> 的总脱除量. 因此 SO<sub>2</sub> 对于烟气中汞的脱

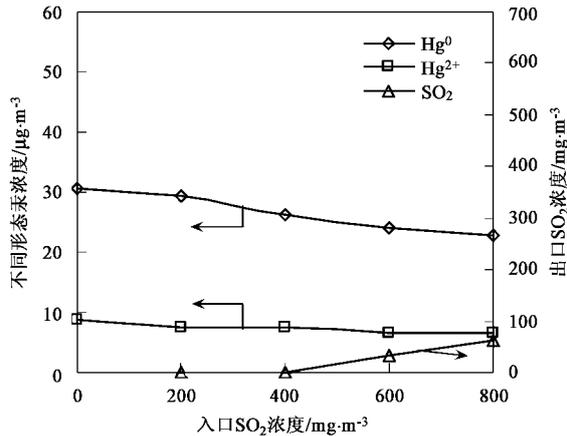


图5 SO<sub>2</sub> 和 Hg<sup>0</sup> 共存下碱液吸收塔出口污染物浓度与入口 SO<sub>2</sub> 浓度的关系

Fig. 5 Relationships between inlet SO<sub>2</sub> concentration and outlet concentrations of pollutants from alkali absorption tower in the presence of both SO<sub>2</sub> and Hg<sup>0</sup>

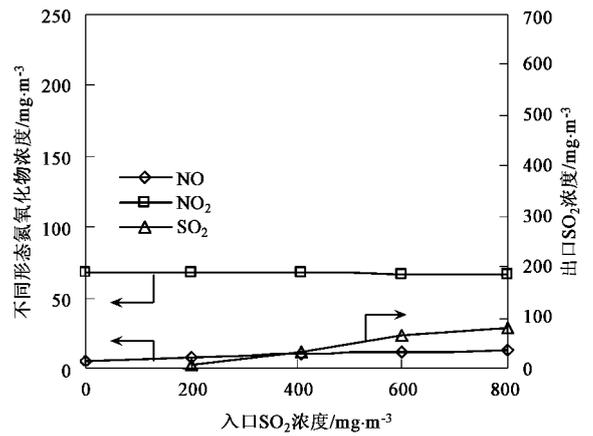


图7 SO<sub>2</sub> 和 NO 共存下碱液吸收塔出口污染物浓度与入口 SO<sub>2</sub> 浓度的关系

Fig. 7 Relationships between inlet SO<sub>2</sub> concentration and outlet concentrations of pollutants from alkali absorption tower in the presence of both SO<sub>2</sub> and NO

除具有一定的促进作用。

### 2.3 非热等离子体强化碱液同时吸收脱除 SO<sub>2</sub> 和 NO

在固定放电电压和混合气 NO 浓度分别为 12.8 kV ± 0.1 kV 和 134 mg/m<sup>3</sup> 的条件下,将不同量的 SO<sub>2</sub> 加入反应混合气中,考察入口 SO<sub>2</sub> 浓度对非热等离子体氧化 NO 和强化碱液同时脱除 SO<sub>2</sub> 和 NO 的影响,结果分别如图 6 和图 7 所示。

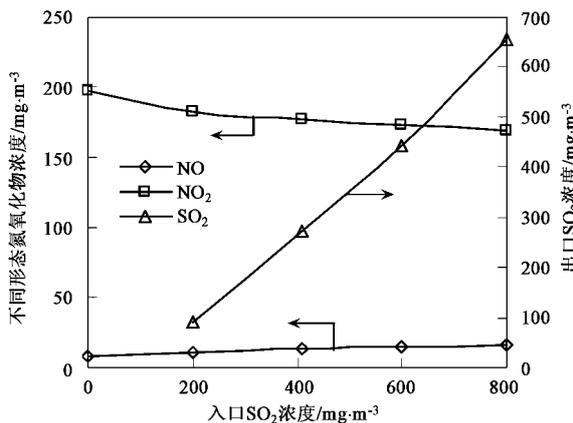


图6 SO<sub>2</sub> 和 NO 共存下等离子体反应器出口污染物浓度与入口 SO<sub>2</sub> 浓度的关系

Fig. 6 Relationships between inlet SO<sub>2</sub> concentration and outlet concentrations of pollutants from plasma reactor in the presence of both SO<sub>2</sub> and NO

由图 6 可以看出,随着 SO<sub>2</sub> 浓度增加,等离子体反应器出口 NO<sub>2</sub> 浓度略有下降,NO 浓度略有上升。Wang 等<sup>[2]</sup> 在研究 SO<sub>2</sub> 对臭氧氧化 NO 的影响发现,

由于 SO<sub>2</sub> 与臭氧的反应比较微弱,SO<sub>2</sub> 并不会对 NO 的氧化有太大的影响。在本研究中,尽管等离子体放电会产生除臭氧以外的其他自由基,但是,同样地,SO<sub>2</sub> 对等离子体氧化 NO 的影响比较小,说明氧化中,臭氧起着主导作用。

当 SO<sub>2</sub> 浓度升高,吸收塔出口 NO 浓度略有上升,NO<sub>2</sub> 浓度略有下降,从对 NO<sub>x</sub> 整体处理效果来看并没有太大影响,因此可以认为 SO<sub>2</sub> 浓度变化对 NO<sub>x</sub> 脱除影响很小。

### 2.4 非热等离子体强化碱液同时吸收脱除 NO 和 Hg<sup>0</sup>

在固定放电电压和混合气 Hg<sup>0</sup> 浓度分别为 12.8 kV ± 0.1 kV 和 110 μg/m<sup>3</sup> 的条件下,将不同量的 NO 加入反应混合气中,考察入口 NO 浓度对非热等离子体氧化 Hg<sup>0</sup> 和强化碱液同时脱除 NO 和 Hg<sup>0</sup> 的影响,结果分别如图 8 和图 9 所示。

由图 8 可以看出随着 NO 的浓度升高,Hg<sup>0</sup> 的浓度迅速上升,Hg<sup>2+</sup> 有所下降。由于 NO 氧化为 NO<sub>2</sub> 会大量消耗·O 和 O<sub>3</sub>,并且 Hg<sup>0</sup> 与臭氧反应的速率常数要比 NO 与臭氧反应常数要小 5 个数量级,而 Hg<sup>0</sup> 的浓度比 NO 又小 3 个数量级,因此 NO 的存在明显抑制了 Hg<sup>0</sup> 的氧化反应。Juyoung 等<sup>[13]</sup> 也得到相类似的研究结果。

从图 9 可以看出,由于 NO 使 Hg<sup>0</sup> 的氧化受到抑制,所以随着 NO 浓度增加,碱液吸收塔出口 Hg<sup>0</sup> 的浓度上升。因此 NO 的存在不利于非热等离子体

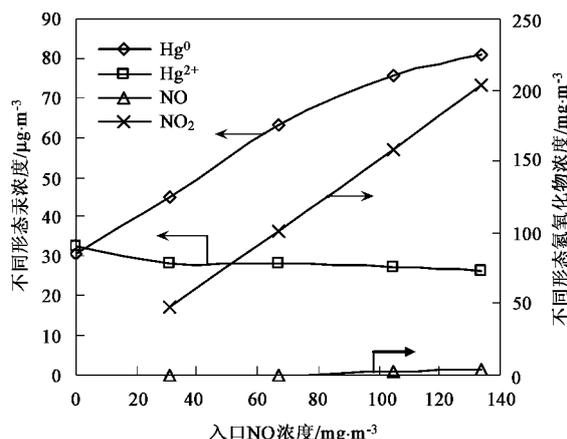


图 8 NO 和 Hg<sup>0</sup> 共存下等离子体反应器出口污染物浓度与入口 NO 浓度的关系

Fig. 8 Relationships between inlet NO concentration and outlet concentrations of pollutants from plasma reactor in the presence of both NO and Hg<sup>0</sup>

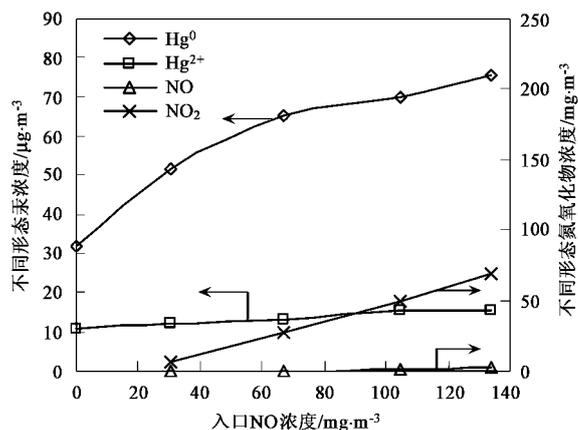


图 9 NO 和 Hg<sup>0</sup> 共存下碱液吸收塔出口污染物浓度与入口 NO 浓度的关系

Fig. 9 Relationships between inlet NO concentration and outlet concentrations of pollutants from alkali absorption tower in the presence of NO and Hg<sup>0</sup>

强化碱液脱除烟气中的 Hg<sup>0</sup>。

## 2.5 非热等离子体强化碱液同时吸收脱除 SO<sub>2</sub>、NO 和 Hg<sup>0</sup>

在放电电压为 12.8 kV ± 0.1 kV (对应 77 J/L 的能量输入) 的条件下, 考察 SO<sub>2</sub>、NO 和 Hg<sup>0</sup> 共存时, 对应不同 SO<sub>2</sub> 和 NO 浓度的污染物脱除率, 结果如表 1 所示。可以看出, 固定 SO<sub>2</sub> 浓度时, 汞的脱除

率随 NO 浓度增加而显著降低; 而固定 NO 浓度时, 汞的脱除率随 SO<sub>2</sub> 浓度增加略有上升。当入口 SO<sub>2</sub>、NO 和 Hg<sup>0</sup> 浓度分别为 800 mg/m<sup>3</sup>、134 mg/m<sup>3</sup> 和 110 μg/m<sup>3</sup> 条件下, SO<sub>2</sub> 的氧化率和脱除率分别为 20% 和 92%, NO 的氧化率和脱除率分别为 88% 和 57%, Hg<sup>0</sup> 的的氧化率和脱除率分别为 35% 和 31%。

表 1 3 组分共存下等离子体氧化与碱液吸收效果

Table 1 Oxidation by plasma and removal by alkaline solution in the coexistence of SO<sub>2</sub>, NO and Hg<sup>0</sup>

等离子体反应器入口浓度/mg·m <sup>-3</sup>			等离子体反应器出口氧化率/%			吸收塔出口脱除率/%		
SO <sub>2</sub>	NO	Hg	SO <sub>2</sub>	NO	Hg	SO <sub>2</sub>	NO	Hg
800	33	110 × 10 <sup>-3</sup>	19	100	68	92	96	50
800	67	110 × 10 <sup>-3</sup>	15	100	55	92	93	45
800	134	110 × 10 <sup>-3</sup>	20	88	35	92	57	31
400	134	110 × 10 <sup>-3</sup>	41	90	23	94	58	20
200	134	110 × 10 <sup>-3</sup>	71	91	20	97	60	19

## 3 结论

(1) 正直流电晕放电产生的非热等离子体对 NO 和 Hg<sup>0</sup> 都具有较好的氧化作用, 碱液对 NO 和 Hg<sup>0</sup> 的脱除率随氧化率的升高而增加。

(2) 烟气中 SO<sub>2</sub> 浓度的提高对 Hg<sup>0</sup> 氧化及其被碱液吸收脱除具有一定的促进作用, 而 NO 浓度的提高对 Hg<sup>0</sup> 氧化及其被碱液吸收脱除具有显著的抑制作用。

(3) SO<sub>2</sub>、NO 和 Hg<sup>0</sup> 共存的情况下, NO 对 Hg<sup>0</sup> 氧化的抑制作用要明显大于 SO<sub>2</sub> 的促进作用, 能量输入为 77 J/L 的时候 SO<sub>2</sub> 脱除率达到 92%, NO 脱

除率达到 57%, Hg<sup>0</sup> 的脱除率达到 31%。

## 参考文献:

- [1] Chang J S, Looy P C, Kazutoshi N, *et al.* Preliminary pilot plant tests of a corona discharge-electron beam hybrid combustion flue gas cleaning system[J]. IEEE Trans Ind Appl, 1996, 32(1): 131-137.
- [2] Wang Z H, Zhou J H, Zhu Y Q, *et al.* Simultaneous removal of NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> and Hg in nitrogen flow in a narrow reactor by ozone injection: Experimental results [J]. Fuel Process Technol, 2007, 88(8): 817-823.
- [3] Ko K B, Byun Y, Cho M, *et al.* Pulsed corona discharge for oxidation of gaseous elemental mercury [J]. Appl Phys Lett, 2008, 92(25): 1-3.
- [4] Raju T, Chung S, Moon I S. Novel process for simultaneous

- removal of NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> from simulated flue gas by using a sustainable Ag(I)/Ag(II) redox mediator[J]. Environ Sci Technol, 2008, **42**(19): 7464-7469.
- [ 5 ] Hutson N D, Krzyzynska R, Srivastava R K. Simultaneous removal of SO<sub>2</sub>, NO, and Hg from coal flue gas using a NaClO-Enhanced wet scrubber[J]. Ind Eng Chem Res, 2008, **47**(16): 5825-5831.
- [ 6 ] Fujishima H, Kuroki T, Okubo M, *et al.* Simultaneous NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> and diesel particulate removal using single-stage wet-type plasma and chemical hybrid process[J]. J Jpn Soc Mech Eng, 2004, **70**(691): 817-822.
- [ 7 ] Yamamoto T, Rajanikanth B S, Okubo M, *et al.* Performance evaluation of nonthermal plasma reactors for NO oxidation in diesel engine exhaust gas treatment[J]. IEEE Trans Ind Appl, 2003, **39**(6): 1608-1613.
- [ 8 ] Chen Z Y, Mannava D P, Mathur V K. Mercury oxidization in dielectric barrier discharge plasma system[J]. Ind Eng Chem Res, 2006, **45**(17): 6050-6055.
- [ 9 ] 唐萍, 朱天乐, 李焕, 等. 气相组分对非热等离子体氧化元素汞的影响[J]. 环境科学, 2008, **6**(29): 1749-1753.
- [ 10 ] Pal B, Ariya P. Studies of ozone initiated reactions of gaseous mercury: kinetics, products studies, and atmospheric implications[J]. Phys Chem Chem Phys, 2004, **6**(3): 572-579.
- [ 11 ] Dorai R, Kushner M J. Effect of multiple pulses on the plasma chemistry during the remediation of NO<sub>x</sub> using dielectric barrier discharges[J]. J Phys D: Appl Phys, 2001, **34**(4): 574-583.
- [ 12 ] Dong L M, Lu W, Chi X C, *et al.* A new type of corona discharge reactor for simultaneous removal of NO and SO<sub>2</sub> from flue gas [A]. In: IEEE Industry Applications Society. 2004 IEEE Industry Applications Conference: 39th IAS Annual Meeting [C]. Seattle: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2004.234-237.
- [ 13 ] Juyoung J, Jongsoo J. Removal of gaseous elemental mercury by dielectric barrier discharge[J]. Chemosphere, 2007, **68**(10): 2007-2010.