

NO/SO₂对纳米氧化铁脱除单质汞性能的影响

孔凡海, 邱建荣, 刘豪, 赵然, 曾汉才

(煤燃烧国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074)

Effect of NO/SO₂ on Elemental Mercury Adsorption by Nano-Fe₂O₃

KONG Fanhai, QIU Jianrong, LIU Hao, ZHAO Ran, ZENG Hancan

(State Key Laboratory of Coal Combustion(Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: The effect of NO, SO₂ on gas-phase Hg⁰ adsorption by nano-Fe₂O₃ was evaluated on a fixed bed reactor using an online gas-mercury analyzer. The results show that the presence of NO could enhance the Hg⁰ adsorption by nano-Fe₂O₃, the mercury adsorption capacity of nano-Fe₂O₃ gradually improves as the NO concentration increases, more than 96% of total mercury is removed when 200×10⁻⁶ NO is introduced. The inhibiting effect of SO₂ on Hg⁰ capture was detected as it could compete with Hg⁰ for adsorption sites. In the NO/SO₂ condition, the adsorption efficiency and the capacity of mercury removal change greatly depending on SO₂ concentration. The lower content of SO₂ can promote mercury adsorption, while the higher content of SO₂ inhibits mercury adsorption.

KEY WORDS: nano-Fe₂O₃; elemental mercury; adsorption; NO/SO₂

摘要: 利用汞在线测量装置在固定床反应器上研究了 NO, SO₂ 对纳米氧化铁吸附剂脱除气态单质汞性能的影响。实验结果表明: NO 的加入对纳米氧化铁脱汞效果具有明显的促进作用, 随着 NO 浓度增加, 吸附剂汞吸附量增加, 在体积浓度为 200×10⁻⁶ 的 NO 通入条件下, 最高吸附效率达到 96% 以上。受竞争吸附的影响, SO₂ 的加入对纳米氧化铁的脱汞效果具有一定的抑制作用。NO 和 SO₂ 共同作用时, 在低 SO₂ 浓度条件下, NO/SO₂ 组合气氛对纳米氧化铁的汞吸附效率和吸附容量具有一定的促进作用, 但高浓度 SO₂ 的加入会抵消 NO 的促进作用, 使得吸附剂脱汞效果降低。

关键词: 纳米氧化铁; 单质汞; 吸附; NO/SO₂

0 引言

汞是一种生物积累的神经毒物, 可通过食物链

进入人体。煤燃烧引起的汞排放是大气汞排放的主要来源, 若不加控制排入大气将会污染环境, 危害人类健康。燃煤烟气中汞以多种形式存在, 其中, 单质汞具有较高的挥发性和较低的水溶性, 是最难控制的形态之一^[1-2]。

采用吸附剂(碳基、钙基、飞灰等)脱除燃煤烟气中的汞是一种有效的脱汞方式, 而寻求经济性好、吸附容量大以及产物易处理的多功能吸附剂对提高除汞效率以及协同脱除其他污染物具有重要意义。近年来, 铁基吸附剂材料因其具有吸附活性强, 价廉易制以及便于分离回收等优点已受到广泛关注, 其较好的除汞效果也在模拟烟气条件下的实验室研究中得以证实^[3-4]。

纳米铁基氧化物材料凭借其超强的催化活性已广泛应用于工业催化及环境气体净化方面^[5-7]; 作者前期在 N₂ 气氛下研究了纳米氧化铁对烟气中单质汞的吸附性能, 取得了良好的实验效果^[8]。在吸附剂除汞的过程中, 除了吸附剂本身物化特性外, 燃煤烟气中的主要气体组分(HCl, NO_x, SO₂ 等)对吸附剂除汞效果也有重要影响^[9], 其中, HCl 参与条件下吸附剂脱汞机制及影响效果已研究的较为深入, 但是对 NO_x, SO₂ 参与条件下, 单一组分对除汞吸附剂的影响机制及多种组分的协同影响效果还存在一定争议^[10-11], 因此, 对于新型除汞吸附剂材料, 该方面需要深入研究。

本文借助傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)等分析手段, 利用汞在线测量装置在自制的固定床反应器上研究了 NO、SO₂ 对纳米氧化铁脱除气态单质汞性能的影响及协同作用机制。以期初步揭示在 NO、SO₂ 影响下, 纳米氧化铁颗粒表面上单质汞的吸附行为

基金项目: 国家杰出青年基金项目(50525619); 国家自然科学基金项目(51078163, 50976041)。

Project Supported by Scientific Funds for Outstanding Young Scientists of China (50525619). National Natural Science Foundation of China (51078163, 50976041).

特征,并对吸附剂改性提供有益的参考。

1 实验

1.1 样品制备及表征

称取一定量的 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 配制不同浓度的 Fe^{3+} 溶液, 在常温下缓慢滴加氢氧化钠溶液, 调节 pH 到 12, 得到红褐色的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 水凝胶, 并在室温下陈化数小时后待用。取下层胶体置于高压釜中, 密封后升温至 $180\text{ }^\circ\text{C}$, 保温 30 min 后自然冷却至室温。将得到的沉淀物用蒸馏水洗涤数次, 最后在 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下真空烘干, 得到纳米氧化铁前驱体。将烘干后的前驱体样品置于马弗炉中, 并在 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 下焙烧 2 h 后得到深红色的氧化铁纳米颗粒^[12]。

样品比表面积(BET)和孔结构采用比表面和孔径分布测定仪(美国麦克公司 ASAP2020 型)进行测定; 样品晶相组成由 X 射线衍射仪(荷兰帕纳科公司 X'Pert PRO)测定; 样品形貌由场发射扫描电子显微镜(荷兰 FEI 公司 Sifion200 型)测定; 实验前后样品表面官能团变化用傅里叶变换红外光谱测试仪(德国 Bruker 公司 VERTEX70 型, KBr 压片)进行测定; 单质汞进出口浓度使用汞在线分析仪(德国 Mercury Instruments VM3000, 分析精度 $0.1\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$) 进行检测; 模拟烟气中各气体组分由烟气分析仪(英国 KANE 公司 KM900, 分析精度 $1\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$) 测定。

1.2 实验装置和方法

图 1 为实验用小型固定床吸附系统, 该系统主要由模拟烟气单元, 汞蒸气发生单元, 固定床吸附反应器单元和测量单元组成。其中, 为清除吸附反应可能产生的气态氧化汞的影响, 在测汞仪前放置 SnCl_2 还原装置。实验用小型固定床反应器由内径 30 mm 和内径 36 mm 的一组石英管夹套组成。内置石英管上部设置多孔石英床层, 底部连接部位

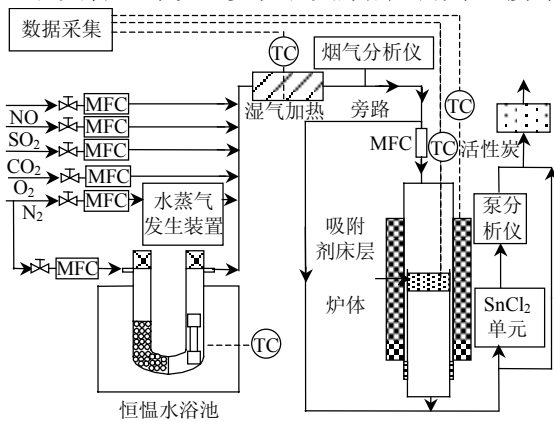


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fixed-bed reactor system

采用密封组件。精细铠装热电偶插入床层用以准确监测床层温度。

吸附温度保持在 $150\text{ }^\circ\text{C}$, 气体总流量 $2\text{ L}/\text{min}$, 基本气体组成保持不变, O_2 、 CO_2 及 H_2O 分别占总气体体积的 6%、12% 和 3%, 高纯 N_2 为平衡气体。调节载气及稀释气流量, 使入口汞蒸气的浓度恒定在 $40\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。在每次脱汞实验开始前, 先进行汞发生装置、管路以及汞测定仪的检查、校正工作, 保证实验期间整套装置的稳定、可靠, 同时进行空白实验以减小实验误差(实验不确定度 15%)。实验过程中, 称取 0.5 g 纳米氧化铁与 3 g 石英砂($300\sim 400\text{ }\mu\text{m}$)均匀混合, 平铺在一定厚度的石英棉夹层中。

实验中采用吸附剂对汞的脱除效率以及 1 h 内吸附剂样品单位吸附量为指标评价其性能。某时刻吸附剂对汞的脱除效率:

$$\eta = (C_{\text{in}} - C_{\text{out}}) / C_{\text{in}} \times 100\% \quad (1)$$

式中 C_{out} 和 C_{in} 分别为反应器出口及入口单质汞浓度, g/m^3 。某时刻吸附剂样品单位吸附量:

$$q = \left[\int_0^t (1 - C_{\text{out}} / C_{\text{in}}) Q dt \right] C_{\text{in}} / m \quad (2)$$

式中: Q 为单位时间内通过吸附剂床层的气体流量, m^3/min ; m 为吸附剂的质量, g ; t 为通过吸附剂床层的时间, min 。

2 实验结果分析

2.1 吸附剂表征

表 1 给出了实验所用吸附剂的物性参数, 其中样品的比表面积, 孔容及平均孔径由 BET 分析测定, 纳米氧化铁的尺寸由谢乐公式计算而得。由表中数据可知, 与普通氧化铁颗粒相比, 实验用纳米氧化铁具有较高的比表面积和适中的孔容, 平均孔径较小, 有利于气体分子在样品孔道内外表面的吸附。

表 1 实验用纳米氧化铁物理性质

Tab. 1 Properties of nano- Fe_2O_3 for test

| 样品 | 粒径/nm | 比表面积/ (m^2/g) | 总孔容/ (cm^3/g) | 平均孔径/nm |
|----|-------|-------------------------------|-------------------------------|----------|
| NA | 16.3 | 47.58 | 0.117695 | 9.863 56 |
| CA | >700 | 18.394 0 | 0.046915 | 23.481 |

注: NA: 纳米氧化铁; CA: 普通氧化铁

图 2 和图 3 分别为实验用纳米氧化铁的 X 射线衍射图及扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)图, 结合文献[12]可知, 所制样品为纯净六方晶结构 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 微晶, 棒径 $20\sim 40\text{ nm}$, 长度 $300\sim 500\text{ nm}$, 样品均匀分散, 疏松多孔。

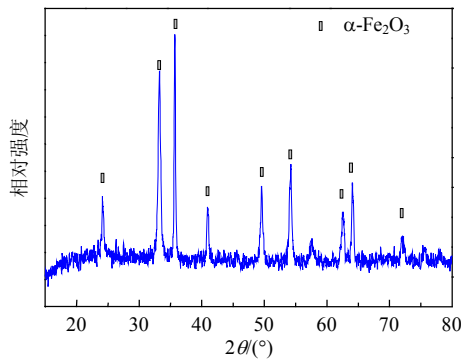


图 2 纳米氧化铁 X 射线衍射图

Fig. 2 X-ray diffraction pattern of nano-Fe₂O₃

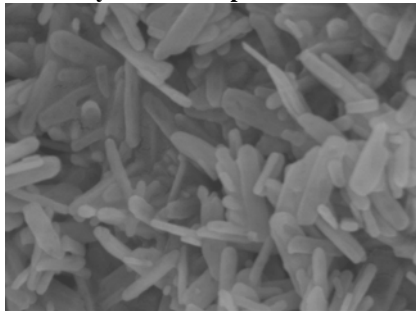


图 3 纳米氧化铁 SEM 图

Fig. 3 SEM image of nano-Fe₂O₃

2.2 烟气成分的影响

2.2.1 NO 对汞吸附的影响

在基本气体基础上，通入体积浓度分别为 0、50×10⁻⁶、200×10⁻⁶ 的 NO 气体，图 4 和图 5 给出了不同 NO 浓度下纳米氧化铁脱汞效率及吸附量变化曲线。

与无 NO 通入条件下样品的脱汞效率曲线相比，加入 50×10⁻⁶ 的 NO 以后，样品脱汞性能明显增强，初始脱汞效率增加 6.5%，达到 92.5%，最高脱汞效率增至 94.7%。60 min 后，样品脱汞效率仍然保持在 30%以上。随着入口 NO 浓度提高至 200×10⁻⁶，纳米氧化铁汞吸附性能进一步增强，样品最高脱汞效率增至 96.25%。从吸附量变化曲线来看，随着入口 NO 浓度增加，纳米氧化铁汞吸附量也随之增加，与无 NO 通入相比，50×10⁻⁶ 和 200×10⁻⁶ NO 通入条件下，样品汞吸附量分别增加 10%和 24%，达到 2.05 和 2.32 μg/g。这说明 NO 的加入对纳米氧化铁汞脱除效果具有明显的促进作用。

NO 会影响 Hg⁰ 的吸附，从电子结构上来分析，主要是因为 NO 中的 N 原子是未成对电子，极性较大，而 Hg⁰ 外圈电子数目多，容易失去最外层电子，容易与 N 的一个未成对电子成键，这样被吸附的 NO 变成了吸附中心，进而对 Hg⁰ 的吸附起到促进作用^[13]。

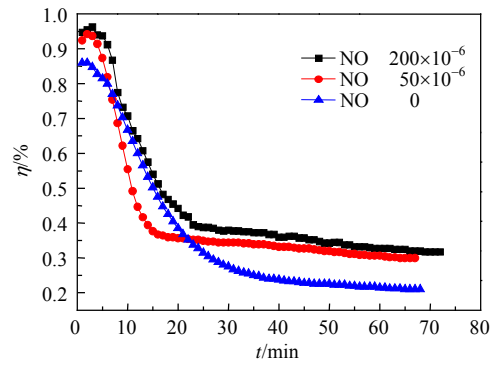


图 4 NO 对纳米氧化铁脱汞效率的影响

Fig. 4 Effect of NO on mercury adsorption efficiency of nano-Fe₂O₃

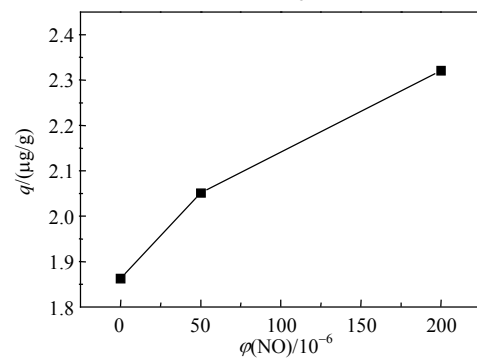
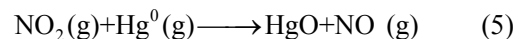
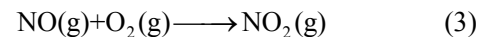


图 5 NO 对纳米氧化铁脱汞吸附量的影响

Fig. 5 Effect of NO on mercury adsorption capacity of nano-Fe₂O₃

从吸附类型来看，以金属氧化物为代表的无机吸附剂材料对汞的吸附主要是化学吸附^[9,14]，在 O₂-NO-Hg⁰-Fe₂O₃ 体系中，汞是一种能与 NO₂ 发生化学反应的元素，在较低的温度下能生成氧化汞。由于纳米氧化铁具有很强的催化活性^[5-7]，其表面也具有一定的含氧官能团，可以与 NO 反应，此时纳米氧化铁可以充当催化剂，在吸附表面将 NO 转化为 NO₂，而 NO₂ 本身具有氧化性，它能促进单质汞向氧化态汞的转化，并在较低的温度下生成含氧化汞和硝酸汞在内的气、固混合物，进而促进汞在吸附剂上的吸附与脱除^[15-16]，其可能的反应方程式如下：



Norton 等^[17-18]研究了不同烟气成分对电站飞灰及模拟飞灰汞氧化性能的影响，结果表明，受灰中含铁相催化作用的影响，NO 的加入对 Hg⁰ 的氧化较为有利，进而促进飞灰对汞的吸附脱除，这与本文实验的结果较为一致。

2.2.2 SO₂ 对汞吸附的影响

在基本气体基础上，通入体积浓度分别为 0、

500×10^{-6} 、 $1\,500 \times 10^{-6}$ 的 SO_2 气体, 图 6 和图 7 给出了不同 SO_2 浓度下纳米氧化铁脱汞效率及吸附量变化曲线。

与无 SO_2 通入条件下样品的脱汞效率曲线相比, 加入 SO_2 以后, 在吸附初期, 样品的脱汞效率有短暂的升高, 随着 SO_2 的持续通入, 脱汞效率迅速降低。从吸附效果来看, 加入 500×10^{-6} 的 SO_2 以后, 样品脱汞性能明显减弱, 初始脱汞效率降低 15%, 最大脱汞效率降低 5%。随着入口 SO_2 浓度进一步提高至 $1\,500 \times 10^{-6}$, 样品初始脱汞效率降至 59.5%, 最大脱汞效率降至 73.2%。从吸附量变化曲线来看, 随着入口 SO_2 浓度增加, 纳米氧化铁汞吸附量呈降低趋势, 与无 SO_2 通入时相比, 500×10^{-6} 和 $1\,500 \times 10^{-6}$ SO_2 的通入使得样品 60 min 汞吸附量分别减少 4% 和 35%, 降至 1.79 和 1.22 $\mu\text{g/g}$, 这说明 SO_2 的加入, 特别是高浓度 SO_2 的加入对纳米氧化铁汞脱除效果具有明显的抑制作用。

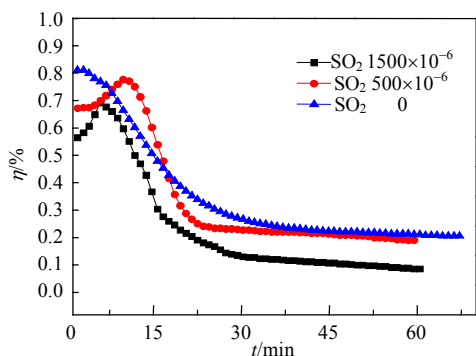


图 6 SO_2 对纳米氧化铁脱汞效率的影响

Fig. 6 Effect of SO_2 on mercury adsorption efficiency of nano- Fe_2O_3

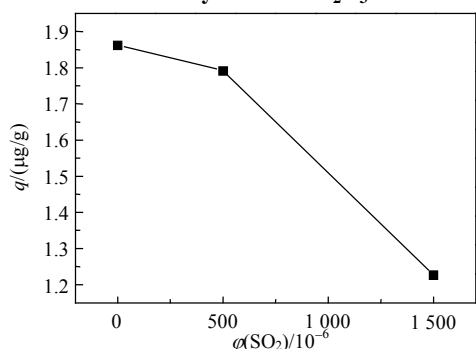


图 7 SO_2 对纳米氧化铁脱汞吸附量的影响

Fig. 7 Effect of SO_2 on mercury adsorption capacity of nano- Fe_2O_3

在 O_2 - SO_2 - Hg^0 - Fe_2O_3 体系中, 讨论 SO_2 气体对吸附剂汞吸附性能产生的影响, 从吸附机制来看, 由于 SO_2 分子偶极距较大, 具有更大的吸附亲和力, 而 SO_2 本身对 Hg^0 也具有一定的氧化能力, 部分优先吸附的 SO_2 分子在吸附反应前期会与 Hg^0 反应生

成 HgSO_4 进而促进吸附^[9,19]。但随着 SO_2 的持续通入, 大量的 SO_2 分子与纳米氧化铁接触后会占据部分孔道和表面, 使这些活性区域失去对单质汞的捕捉能力, 造成竞争吸附, 引起单质汞吸附效率的下降^[13,15]; 实验条件下模拟烟气中单质汞浓度量级为 10^{-9} , 远低于 SO_2 ($500 \times 10^{-6} \sim 1\,500 \times 10^{-6}$), 如此高的浓度差别使得更多的 SO_2 分子碰撞在吸附剂表面, 抢占活性吸附位, 进而抑制汞的吸附。另一方面, 由于纳米氧化铁作为一种高效的催化剂, 即使在室温条件下仍然对 SO_2 具有较强的氧化能力^[7], 因此部分 SO_2 分子可由纳米氧化铁的催化作用而被氧化成 SO_3 。而 SO_3 有着比 SO_2 更低的蒸气压力, 其与烟气中单质汞的竞争吸附作用较 SO_2 更为明显^[19]。此外, 在水蒸气的参与作用下, SO_3 会以不易脱附的硫酸形态附着在吸附剂表面, 存在于吸附剂的孔道内, 这样也会在一定程度上削弱纳米氧化铁对单质汞的吸附能力。

Presto 等^[19-20]在小型固定床上研究了 SO_2 和 SO_3 对碳基材料脱汞性能的影响, 结果表明, 受竞争吸附的影响, 对单质汞在吸附剂表面上吸附行为, SO_3 比 SO_2 具有更强的抑制作用, 20×10^{-6} 的 SO_3 使得吸附量降低 80%, 而吸附剂本身的催化活性, 会在一定程度上强化这一抑制效果。

2.2.3 NO/SO_2 对汞吸附的影响

在基本气体基础上, 通入体积浓度分别为 0/0, 200/500 $\times 10^{-6}$, 200/1500 $\times 10^{-6}$ 的 NO/SO_2 气体, 图 8 和图 9 给出了不同 NO/SO_2 浓度下纳米氧化铁脱汞效率及吸附量变化曲线。

从图 8 和图 9 可以看出, 无 NO/SO_2 通入条件下, 初始时刻脱汞效率为 86%, 60 min 后脱汞效率降至 21%, 相应的吸附量为 1.86 $\mu\text{g/g}$; 通入 200/500 $\times 10^{-6}$ 的 NO/SO_2 以后, 样品的脱汞性能有一定程度的增强, 其初始脱汞效率提高 4%; 60 min 汞吸附量也增至 2.28 $\mu\text{g/g}$ 。随着入口 SO_2 进一步提高至 $1\,500 \times 10^{-6}$, 样品脱汞性能下降明显, 其初始脱汞效率降至 81%, 60 min 汞吸附量降低 30%, 降至 1.65 $\mu\text{g/g}$ 。从脱汞效率曲线来看, 在实验时间内, 高 SO_2 浓度的 NO/SO_2 组合的脱汞效率不但大大低于低 SO_2 浓度的 NO/SO_2 组合, 而且显著低于无 NO/SO_2 通入条件下样品的脱汞效率。这说明在低 SO_2 浓度条件下, 受 NO 的影响, NO/SO_2 组合气氛对纳米氧化铁的汞脱除性能具有一定的促进作用, 但高浓度 SO_2 的加入会抵消 NO 的促进作用, 使得

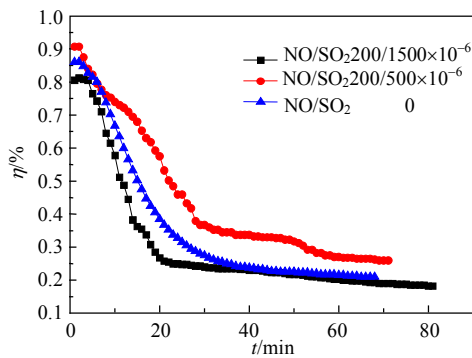


图 8 NO/SO₂ 对纳米氧化铁脱汞效率的影响

Fig. 8 Effect of NO/SO₂ on mercury adsorption efficiency of nano-Fe₂O₃

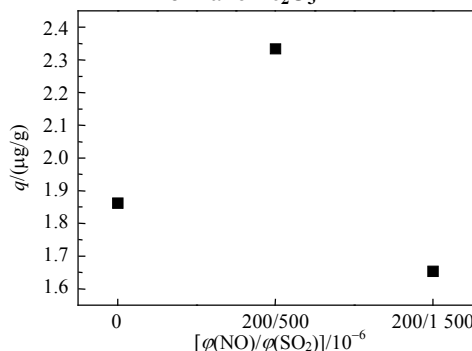


图 9 NO/SO₂ 对纳米氧化铁脱汞吸附量的影响

Fig. 9 Effect of NO/SO₂ on mercury adsorption capacity of nano-Fe₂O₃

样品脱汞性能大为降低。

与 SO₂ 或 NO 单独作用相比,同时存在 SO₂/NO_x 的条件下的情况更为复杂,不仅需要考虑单一气氛的影响,其交互作用以及吸附剂样品本身的物化特性同样不容忽视。在 NO/SO₂/Hg⁰ 体系中,一方面,SO₂ 会和 NO 相互竞争吸附位,由于 SO₂ 的分子极性要强于 NO、SO₂ 的分子直径、临界体积都比 NO 大的多,从而导致了 SO₂ 优先吸附;另一方面,受纳米氧化铁催化活性的影响,SO₂ 和 NO 均会与 O₂ 反应,由于化学吸附的 NO 不易被 SO₂ 置换掉,仍留在吸附位上,并且可能使部分 NO 氧化成吸附态的 NO₂,并将电子转移至吸附态的 SO₂,进而使得 SO₂ 化学吸附更容易^[21-22]。考虑到就吸附剂除汞效果来看,SO₂ 的存在以抑制作用为主,因此,实验中 SO₂ 浓度的大幅度提高使得吸附剂脱汞效果降低显著。

就 NO、SO₂、Hg⁰ 三者间交互影响而言,有研究表明 SO₂ 和 NO₂ 的反应是 Hg⁰ 的吸附、解析和氧化的主导因素^[9,23]。

作为 NO 在纳米氧化铁表面上的催化产物,一方面,吸附态的 NO₂ 可通过电子转移的方式与吸附剂孔道内化学吸附的 SO₂ 发生反应生成吸附态的中

间产物 [(NO₂)(SO₃)]^{*}, 并最终生成 SO₄²⁻ 和 NO₃⁻^[23], 即:

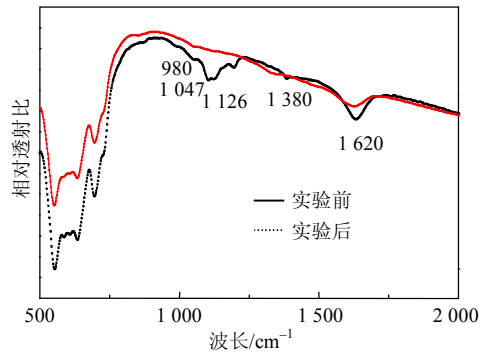
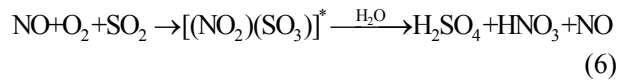
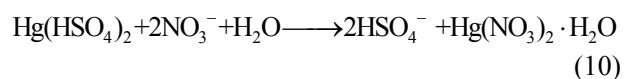
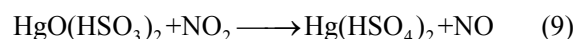
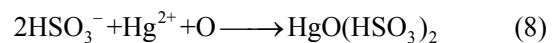
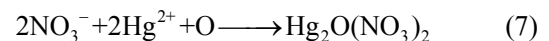


图 10 200/500×10⁻⁶ NO/SO₂ 气氛下样品实验前后的红外光谱图

Fig.10 FTIR spectra of nano-Fe₂O₃ before and after test (200/500×10⁻⁶ NO/SO₂)

图 10 为体积浓度为 200/500×10⁻⁶NO/SO₂ 条件下纳米氧化铁样品实验前后的红外光谱图。从图中可以看出,与吸附反应前样品相比,吸附实验后样品在波长为 1126 cm⁻¹ 处出现了 SO₄²⁻ 的特征峰,而在波长为 1620 和 1380 cm⁻¹ 处也出现了 NO₃⁻ 的特征峰,这也在一定程度上证实了以上推论。

另一方面,当 NO₂ 存在时,Hg⁰ 可以与之反应并与吸附剂表面的碱性基团结合生成不易挥发的 Hg₂O(NO₃)₂,而大量的 SO₂ 通入后,生成的 Hg(NO₃)₂ 作为氧化剂,使得 SO₂ 和 Hg⁰ 反应生成一种不稳定的中间产物[Hg(HSO₄)₂],然后再与 NO₃⁻ 反应形成一种稳定但易挥发的 Hg(NO₃)₂·H₂O,其可能的反应方程式如下^[11,24]:



3 结论

1) NO 的加入对纳米氧化铁汞脱除效果具有明显的促进作用,随着 NO 浓度的增加,吸附剂汞吸附量增加,最高脱除效率可达 96% 以上。

2) 受竞争吸附的影响,SO₂ 的加入对纳米氧化铁汞吸附性能具有抑制作用,随着 SO₂ 浓度的增加,其抑制效果愈加显著。

3) NO, SO₂ 共同作用时,受 NO 的促进作用的影响,低 SO₂ 浓度下,NO/SO₂ 组合气氛对纳米

氧化铁的汞脱除性能具有一定的促进作用,但高浓度 SO_2 的加入会抵消 NO 的促进作用,使得吸附剂脱汞性能降低。

作为一种新型除汞吸附剂材料,纳米氧化铁的除汞性能受燃煤烟气中主要气体成分 NO 、 SO_2 影响显著,如何通过材料改性,克服高浓度条件下 SO_2 竞争吸附带来的不利影响,需要做进一步的工作。

参考文献

- [1] Pacyna E G, Pacyna J M. Global emission of mercury from anthropogenic sources in 1995[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, 137(4): 149-165.
- [2] Dunham G E, Dewall R A, Senior C L. Fixed bed studies of the interactions between mercury and coal combustion fly ash[J]. *Fuel Processing Technology*, 2003, 82(2): 197-213.
- [3] Wu Shengji, Md A U, Eiji S. Characteristics of the removal of mercury vapor in coal derived fuel gas over iron oxide sorbents[J]. *Fuel*, 2006, 85(2): 213-218.
- [4] Wu Shengji, Masaki O, Md A U, et al. Development of iron-based sorbents for Hg_0 removal from coal derived fuel gas: Effect of hydrogen chloride[J]. *Fuel*, 2008, 87(4): 467-474.
- [5] Li Ping, MISER D E, RABIEI S, et al. The removal of carbon monoxide by iron oxide nanoparticles[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2003, 43(2): 151-162.
- [6] Hu Jing, Chen Guohua, MC L I. Selective removal of heavy metals from industrial wastewater using maghemite nanoparticle: Performance and mechanisms[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2006, 132(7): 709-715.
- [7] Fu Hongbo, Wang Xiao, Wu Hongbo, et al. Heterogeneous uptake and oxidation of SO_2 on iron oxides[J]. *Journal of Physical Chemistry*, 2007, 111(16): 6077-6085.
- [8] 孔凡海, 邱建荣, 刘豪, 等. 纳米氧化铁吸附脱除单质汞的实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2010, 31(7): 1227-1230.
Kong Fanhai, Qiu Jianrong, Liu Hao, et al. Experimental study on elemental mercury adsorption by nano- Fe_2O_3 [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, 31(7): 1227-1230 (in Chinese).
- [9] Stanley J, Miller G E, Dunham E S, et al. Flue gas effects on a carbon-based mercury sorbent[J]. *Fuel Processing Technology*, 2000, 65(6): 343-362.
- [10] Liu Wei, Vidic R D, Brown T D. Impact of flue gas conditions on mercury uptake by sulfur-impregnated activated carbon[J]. *Environmental Science and Technology*, 2000, 34(1): 154-159.
- [11] Yan Rong, Liang D T, Tsen L, et al. Bench-scale experimental evaluation of carbon performance on mercury vapour adsorption[J]. *Fuel*, 2004, 83(18): 2401-2409.
- [12] Wu Changzheng, Yin Ping, Zhu Xi, et al. Synthesis of hematite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) nanorods: Diameter-size and shape effects on their applications in magnetism, lithium ion battery, and gas sensors[J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2006, 110(36): 17806-17812.
- [13] 许绿丝. 改性处理活性炭纤维吸附氧化脱除 $\text{SO}_2/\text{NO}_x/\text{Hg}$ 的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
Xu Lusi. Study on adsorption and oxidation removal of $\text{SO}_2/\text{NO}_x/\text{Hg}$ at low-temperature by modified activated carbon fiber[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007 (in Chinese).
- [14] Evan J G, Pennline H W, Hargis R A. Novel sorbents for mercury removal from flue gas[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2000, 39(4): 1020-1029.
- [15] 任建莉, 周劲松, 骆仲泱, 等. 活性炭吸附烟气中气态汞的试验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(2): 171-175.
Ren Jianli, Zhou Jinsong, Luo Zhongyang, et al. An experimental study on activated carbon sorbents for gas-phase mercury removal from flue gas[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(2): 171-175 (in Chinese).
- [16] 孟素丽, 段钰锋, 黄治军, 等. 烟气成分对燃煤飞灰汞吸附的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(20): 66-73.
Meng Suli, Duan Yufeng, Huang Zhijun, et al. Effect of flue gas components on mercury adsorption by coal-fired fly ash[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(20): 66-73 (in Chinese).
- [17] Norton G A, Yang Hongqun, Brown R C, et al. Heterogeneous oxidation of mercury in simulated post combustion conditions[J]. *Fuel*, 2003, 82(2): 107-116.
- [18] Ghorishi S B, Lee C W, Jozewicz W S, et al. Effects of fly ash transition metal content and flue gas HCl/SO_2 ratio on mercury speciation in waste combustion [C]// *International Conference on Incineration and Thermal Treatment Technologies*. Orlando, FL: Environmental Engineering Science, 2003: 221-231.
- [19] Presto A A, Granite E J. Impact of sulfur oxides on mercury capture by activated carbon[J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, 41(18): 6579-6584.
- [20] Presto A A, Granite E J, Karash A. Further investigation of the impact of sulfur oxides on mercury capture by activated carbon[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2007, 46(24): 8273-8276.
- [21] Olson E S, Sharma R K, Miller S J, et al. Identification of the breakthrough oxidized mercury species from sorbents in flue gas [C]// *Proceedings of the Specialty Conference on Mercury in the Environment*. Minneapolis, MN: Science of the Total Environment, 1999: 389-395.
- [22] Tang Qiang, Zhang Zhigang, Zhu Wenpei, et al. SO_2 and NO selective adsorption properties of coal-based activated carbons[J]. *Fuel*, 2005, 84(4): 461-465.
- [23] Olson E S, Miller S J, Sharma R K. Catalytic effects of carbon sorbents for mercury capture[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2000, 74(1): 61-79.
- [24] Olson E S, Grant E, Dunham R K, et al. Mechanisms of mercury capture and breakthrough on activated carbon sorbents[C]// *National Meeting of the American Chemical Society*. Washington DC: American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry, 2000: 886-889.



孔凡海

收稿日期: 2010-04-07。

作者简介:

孔凡海(1981), 男, 博士研究生, 研究方向: 环境催化, 燃煤烟气净化研究, kongfanhai211@163.com。

邱建荣(1967), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向: 燃烧污染防治, 电站锅炉结渣预测, 高效燃烧。

(责任编辑 王庆霞)