

改性活性炭吸附烧结烟气中氮氧化物的研究

蔡建宇¹, 彭兆丰², 宋丽云¹, 侯环宇³, 李 坚^{1*}

(1. 北京工业大学区域大气污染防治北京市重点实验室, 北京 100124; 2. 河钢股份有限公司, 河北 石家庄 050023; 3. 河钢集团钢铁研究总院, 河北 石家庄 050023)

摘要:以煤质活性炭为原料, 制备了碳酸钾(K_2CO_3)改性活性炭, 模拟烧结烟气条件, 考察了其在有 SO_2 、 CO_2 和 O_2 条件下的 NO_x 吸附效果。试验表明: 0.65 mol/L K_2CO_3 改性活性炭的 NO_x 吸附量最高, 120 °C 时 NO_x 吸附量可达 15.17 mg/g, 较原样提高了 20 倍以上; 随着吸附温度的升高, NO_x 饱和吸附量有所下降, 稳定在 13.70 ~ 13.97 mg/g; 由于 SO_2 吸附后生成稳定硫酸盐难以脱除, 影响了活性炭的加热再生效果。该吸附剂适用于移动床吸附处理烧结烟气。

关键词: 烧结; 烟气; 氮氧化物; 活性炭; 吸附; 碳酸钾

中图分类号: TF046, X701

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2021)01-0075-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.01.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者
聊科研

Study on adsorption of nitrogen oxide in sintering flue gas by modified activated carbon

Cai Jianyu¹, Peng Zhaofeng², Song Liyun¹, Hou Huanyu³, Li Jian^{1*}

(1. Key Laboratory of Beijing on Regional Air Pollution Control of Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. HBIS Company Limited, Shijiazhuang 050023, Hebei, China; 3. HBIS Steel Technology Research Institute, Shijiazhuang 050023, Hebei, China)

Abstract: Potash (K_2CO_3) modified activated carbon was prepared with coal activated carbon as raw material. Under simulated sintering flue gas conditions, the effect of NO_x adsorption under the condition with SO_2 , CO_2 and O_2 was investigated. Experimental results show that 0.65 mol/L K_2CO_3 modified activated carbon have the highest adsorption quantity of NO_x . The NO_x adsorption capacity can reach 15.17 mg/g and can be improved by more than 20 times. With the increase of adsorption temperature, the desorption quantity of NO_x decreases and stabilizes at about 13.70 mg/g to 13.97 mg/g. Since stable sulfate is difficult to remove after SO_2 adsorption, which decreases the regeneration effect of activated carbon. The adsorbent is suitable for moving bed adsorption treatment of sintering flue gas.

Key words: sintering, flue gas, NO_x , activated carbon, adsorption, K_2CO_3

0 引言

氮氧化物(NO_x)是目前大气污染的重要污染物

之一, NO_x 包括 N_2O 、 NO 、 N_2O_3 、 NO_2 、 N_2O_4 、 N_2O_5 等几种, 其中以 NO 和 NO_2 最为常见^[1-3]。 NO_x 的来源主要有自然源和人为源^[4]。氮氧化物危害严重,

收稿日期: 2020-08-05

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0210302); 北京工业大学研究生科技基金(ykj-2017-00101)。

作者简介: 蔡建宇(1992—), 男, 河北承德人, 博士生, 主要从事大气污染控制工程研究工作, E-mail: caijy@emails.bjut.edu.cn;

* 通讯作者: 李坚(1965—), 男, 北京人, 博士生导师, 教授, 博士, 长期从事大气污染控制工程研究工作, E-mail: ljian@bjut.edu.cn。

不仅会影响人体呼吸系统,引发各种疾病,还会对植物造成损害;同时 NO_x 还是形成酸雨、光化学烟雾和破坏臭氧层的元凶之一^[5-10]。

目前, NO_x 治理方法主要有以下几种: ①吸收法: 水吸收法、碱液吸收法、酸吸收法、吸收氧化法、吸收还原法等^[11]; ②吸附法: 活性炭吸附、分子筛吸附、硅胶吸附等^[12]; ③催化反应法: 选择性催化还原法^[13-14]和三效催化剂等^[15]; ④生物法: 利用微生物通过硝化或反硝化去除 NO_x ^[16]; ⑤等离子体法: 电子束法^[17]和电晕法等^[18]; ⑥多种技术协同处理: 等离子体协同催化剂处理 NO_x ^[19]和碱液协同等离子体处理 NO_x ^[20]等。

其中吸附法处理 NO_x 效率较高,二次污染较低,工艺流程相对简单且易于操作,成本较低,可以在一定程度上实现废物资源化,适用于低浓度污染物的去除,因而得到了广泛的应用^[21-23]。吸附法的缺点是吸附材料的吸附容量小,造成设备体积庞大,吸附剂本身理化性质也限制着吸附法的应用^[24]。

活性炭具有发达的孔隙结构,巨大的比表面积,复杂的表面化学性质和较高的吸附活性^[25-26]。活性炭是一种低价的、放热性小的,适用于低温物理吸附的吸附剂^[27-29]。而高温条件下活性炭穿透时间较短,吸附效果较差。

为了提高活性炭对 NO_x 的吸附能力,需要对活性炭进行改性处理,目前活性炭改性方法主要有: 酸碱改性、负载金属改性、等离子体改性、高温热改性、微生物改性等^[30]。Li^[31] 利用 $\text{Cu}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ 复合催化剂对活性炭纤维进行了改性处理,发现改性后活性炭纤维孔径减低,表面官能团增加,进而提高了其 NO 吸附性能。都亚茹^[32] 对活性炭纤维进行了硝酸改性,改善了吸附材料的表面化学性质,大大提高了材料 NO_x 吸附性能。庞成勇^[33] 对活性炭进行高温处理,除去活性炭内部水分及其他可挥发物质,创造丰富微孔,从而提高了活性炭 NO_x 吸附容量。李国希^[34] 利用 Pt 对活性炭纤维进行改性,活性炭负载 Pt 后对 NO 的吸附容量提高了一倍。Lee^[35] 利用 KOH 浸渍法制备了改性活性炭,改变活性炭表面官能团组成,该活性炭在 130 °C 的无硫条件下具有良好的 NO_x 吸附效果。

目前针对烧结烟气特点,在 100 ~ 120 °C 且有 SO_2 和水蒸气存在条件下,提高活性炭 NO_x 吸附性能的研究还比较少。笔者主要对煤质活性炭进行改性研究,以提高活性炭高温 NO_x 吸附性能,从而减

少活性炭用量,降低运行成本,并探究 SO_2 和水蒸气对活性炭吸附效果的影响。

1 试验材料与方法

1.1 材料、试剂和仪器

煤质活性炭: 市售; K_2CO_3 : 分析纯($\geq 99.0\%$), 天津市福晨化学试剂厂。

试验所用仪器有: SK-G08123K 型开启式真空/气氛管式炉: 天津市中环试验电炉有限公司; VARIO PLUS 型工业气体连续分析仪: 德国 MRU 公司; Micromeritics Gemini V 型比表面积分析仪: 美国 Micromeritics 公司; ESCALAB 250XI 型能谱分析仪: 美国 Thermo Fisher 公司。

1.2 改性活性炭制备

酸碱改性是一种常用的活性炭改性手段, NO_x 为酸性气体, 本研究拟使用碱性碳酸盐为改性剂, 一方面通过 K_2CO_3 分解产生的 CO_2 , 疏通活性炭内部孔道; 另一方面通过碱改性引入碱性官能团, 提高 NO_x 的吸附容量。本实验室前期研究发现 0.7 mol/L 的 K_2CO_3 改性活性炭在 100 °C 能够显著提高活性炭的 NO_x 吸附性能。综合考虑各种碱性碳酸盐的性质, 结合本实验室已有研究成果选取 K_2CO_3 为改性试剂, 并进一步筛选最优改性浓度, 探索改性活性炭在更高温度下模拟烧结烟气中的吸附性能。

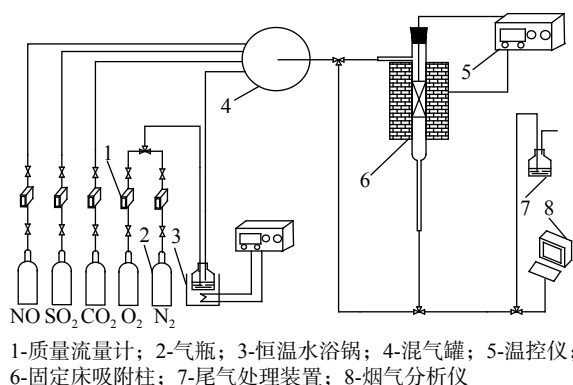
分别称取一定质量 K_2CO_3 , 配制成 0.6、0.65、0.7、0.75 mol/L 的 K_2CO_3 溶液待用。称取煤质活性炭 50 g, 分别置于编号为 1[#]、2[#]、3[#]、4[#] 的锥形瓶中, 将上述不同浓度 K_2CO_3 溶液分别倒入到 4 个锥形瓶中, 使溶液刚好没过活性炭即可, 将活性炭震荡均匀 5 min 后静置, 待活性炭静置 12 h 后, 去除剩余溶液, 放入烘箱中, 于 110 °C 烘干后, 移入管式炉, 在氮气气氛条件下以 3 °C/min 的升温速度升温至 600 °C, 保持 2 h 后降温至室温, 即制得改性活性炭, 分别记为: HH-0.60、HH-0.65、HH-0.70、HH-0.75, 活性炭原样记为 HH。

1.3 样品表征

本试验采用美国 Micromeritics 公司生产的 Micromeritics Gemini V 比表面分析仪来测定活性炭的比表面积。利用 X-射线光电能谱(XPS)对中毒前后活性炭中 S 进行分析。

1.4 吸附性能评价

改性活性炭吸附性能评价装置如图 1 所示。

图 1 活性炭 NO_x 吸附性能评价装置示意Fig. 1 Schematic diagram of NO_x adsorption performance evaluation device of activated carbon

改性活性炭吸附性能测定试验模拟烧结烟气条件, 具体条件为: NO 270 mg/m³, SO₂ 715 mg/m³, CO₂ 88.4 g/m³, O₂ 214.3 g/m³, 水蒸气 12 g/m³, 气量: 1.7 L/min, 吸附柱内风速: 0.1 m/s, 吸附剂用量: 15 g, 床层厚度: 12 cm, 用烟气分析仪连续监测出入口 NO_x 浓度, 待进出口 NO_x 浓度相同时, 视为该吸附剂达到动态吸附平衡, 测试停止, 计算吸附剂的动态吸附容量。

NO_x 吸附量计算方法是: 绘制活性炭 NO_x 吸附速率随时间变化曲线, 并对曲线进行积分, 即可得到活性炭 NO_x 总吸附量为 Q_1 (mg), 再用以下公式计算每克活性炭 NO_x 吸附量 Q_2 (mg/g)。

$$Q_2 = Q_1 / 15$$

1.5 改性活性炭再生方法

利用加热再生的方法对吸附饱和的活性炭进行处理, 具体方法是当活性炭吸附饱和后, 利用 1 L/min 的 N₂ 吹扫活性炭, 并以 1 °C/min 的升温速率程序升温至 450 °C, 直到出口 NO_x 浓度为 0, 视为脱附完成。脱附后的活性炭经冷却后进行下一次吸附, 如此循环。

2 结果与讨论

2.1 活性炭改性前后比表面积测定结果

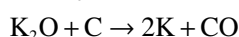
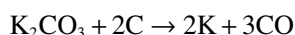
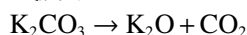
利用比表面积分析仪对改性前后的活性炭比表面积进行了测试, 测试结果如表 1 所示。

表 1 活性炭比表面积测定结果

Table 1 Measured specific surface area of activated carbon

样品	BET比表面积/(m ² ·g ⁻¹)
HH-0.60	906
HH-0.65	892
HH-0.70	897
HH-0.75	904
HH	1 108

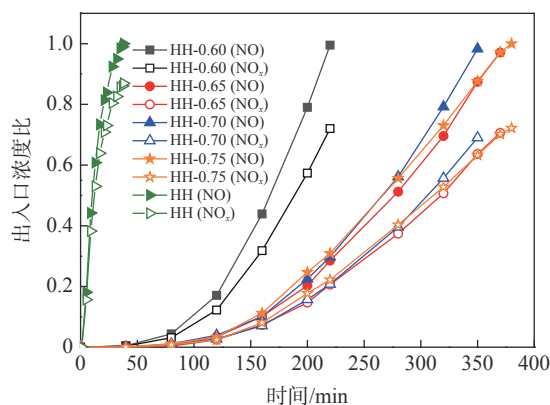
根据表 1 结果可以发现, 随着改性试剂浓度的增加, 比表面积呈现出先下降再上升的趋势, 在改性浓度为 0.65 mol/L 时, 活性炭比表面积最小为 892 m²/g, 比原样降低了 20%。整体来看改性活性炭的比表面积较原样均有所下降, 这与 Illán-Gómez M. J^[36] 和 Saygılı H^[37] 等人研究结果一致。如以下方程式所示^[38-39]:



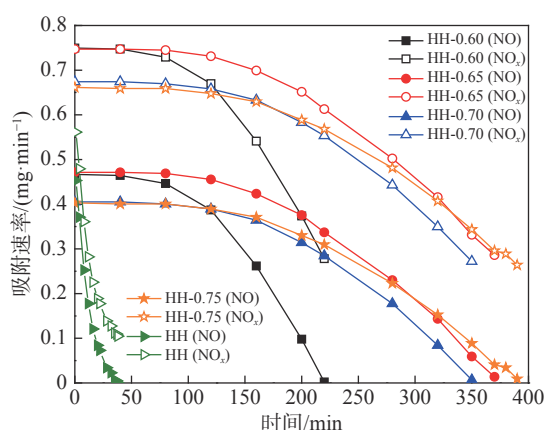
由于浸渍了 K₂CO₃, 一方面 K₂CO₃ 分解可以释放出 CO₂, 同时 K₂CO₃ 和 K₂O 能够与 C 发生还原反应, 生成 CO, CO₂ 和 CO 可以疏通部分孔道, 造成比表面积增大; 另一方面, 生成的 K₂O 和 K 会阻塞孔道, 造成比表面积减小。当改性浓度为 0.65 mol/L 时, 阻塞孔道的效应达到最大, 使得此时比表面积最小。

2.2 120 °C 条件下改性试剂浓度对活性炭 NO_x 吸附性能影响

利用上述活性炭 NO_x 吸附性能评价装置, 对表 1 中的 4 种改性活性炭进行了吸附性能测试, 试验结果如图 2 所示。

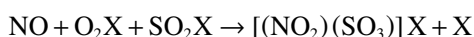
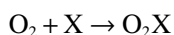
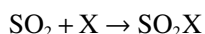
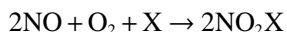
图 2 不同浓度 K₂CO₃ 改性活性炭 NO_x 穿透曲线Fig. 2 Breakthrough curve of NO_x of activated carbon modified by different concentrations of K₂CO₃

从图 2 中穿透曲线可以看出, 改性活性炭对 NO_x 的吸附效果均显著优于活性炭原样, 原样活性炭仅 30 min 即失去吸附效果, 而改性活性炭在 200 min 以上仍具有吸附能力; 图 3 是不同浓度 K₂CO₃ 改性活性炭对 NO_x 吸附速率随时间的变化, 对曲线进行积分, 计算得到不同改性活性炭对 NO_x 的吸附量, 如表 2 所示。

图3 不同浓度 K₂CO₃ 改性活性炭 NO_x 吸附速率Fig. 3 NO_x adsorption rate of activated carbon modified by different concentrations of K₂CO₃表2 活性炭 NO_x 吸附量Table 2 Capacity of NO_x adsorption by activated carbon

样品	NO吸附量/ (mg·g ⁻¹)	NO ₂ 吸附量/ (mg·g ⁻¹)	NO _x 吸附量/ (mg·g ⁻¹)
HH-0.60	5.02	4.12	9.14
HH-0.65	8.40	6.77	15.17
HH-0.70	6.90	6.25	13.15
HH-0.75	7.50	6.52	14.022
HH	0.36	0.26	0.62

根据表2所得改性活性炭对 NO_x 的吸附量, 结合以上比表面积测定结果, 可以发现 HH-0.65 改性活性炭比表面积最小, 但吸附量最大, 达到了 15.17 mg/g, 较原样提高了 20 倍以上。这是因为改性活性炭对 NO_x 的吸附主要是化学吸附, 通过化学试剂改性活性炭来提高吸附量, 就是通过在化学试剂和 NO_x 之间形成一种新的化学结构, 从而使 NO_x 吸附在活性炭表面的方法, NO_x 在吸附剂的活性位点上的吸附机制可以写作^[40]:



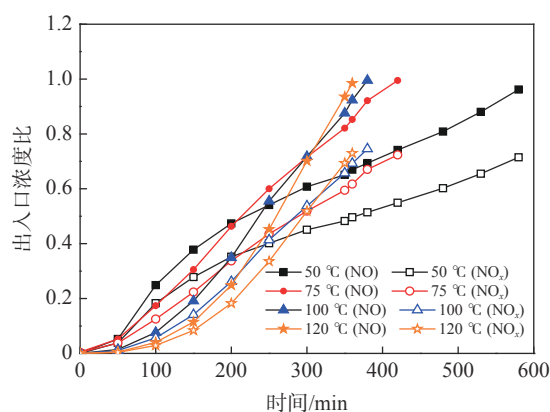
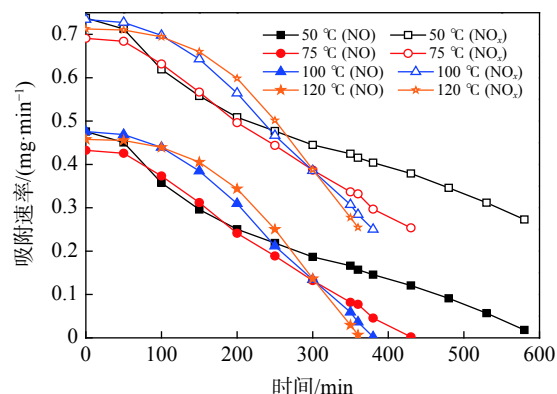
其中 X 表示吸附在活性位点上的微粒。Lee^[41] 等人研究了 KOH 浸渍改性活性炭对 NO_x 的吸附, 发现来自 KOH 的钾离子最终以 KNO₃ 的形式吸附在吸附剂表面。因此可以推测, K₂CO₃ 改性活性炭提高 NO_x 吸附性能的机理, 就是一方面通过其分解产生 CO₂ 来疏通孔道, 清除杂质; 另一方面创造活性位点, 通过上述方式与 NO_x 结合生成新物质 KNO₃ 吸附在活性炭表面, 进而扩大吸附容量。

当改性试剂浓度为 0.65 mol/L 时, 改性活性炭

表面及内部由 K 形成的有效吸附位点最多, 因此吸附量达到最大。

2.3 吸附温度对改性活性炭 NO_x 吸附性能影响

利用上述试验条件及活性炭吸附性能评价装置, 分别在 50、75、100、120 °C 对 HH-0.65 改性活性炭进行了 NO_x 吸附性能测试, 试验结果如图 4、5 所示。

图4 不同温度条件下改性活性炭 NO_x 穿透曲线Fig. 4 Breakthrough curve of NO_x of activated carbon working at different temperatures图5 不同温度条件下活性炭 NO_x 吸附速率Fig. 5 NO_x adsorption rate of activated carbon working at different temperatures

从图4穿透曲线可以发现, 改性活性炭在 50~120 °C 的测试区间内均具有良好吸附效果, 且在 300 min 以后依然具有吸附能力, 其中 50 °C 条件下活性炭 NO_x 吸附效果最好。对图5中曲线进行积分, 得到不同温度下改性活性炭的 NO_x 吸附量, 如表3所示。

50 °C 时改性活性炭 NO_x 吸附量最高, 达到了 18.41 mg/g, 这是物理吸附和化学吸附共同作用的结果, 低温条件下物理吸附作用较强, 而随着温度升高, 物理吸附效果减弱, 化学吸附占主导作用, 此时孔道结构和比表面积对吸附容量的影响较小, 活性炭内部活性位点直接影响着活性炭的吸附容量, 因

此在较高温度条件下 NO_x 吸附效果稳定在 13.70~13.97 mg/g。

表 3 不同温度下活性炭 NO_x 吸附量
Table 3 Capacity of NO_x adsorption by activated carbon working at different temperatures

样品	温度/℃	NO 吸附量/ (mg·g ⁻¹)	NO ₂ 吸附量/ (mg·g ⁻¹)	NO _x 吸附量/ (mg·g ⁻¹)
HH-0.65	50	8.41	10.00	18.41
HH-0.65	75	6.63	7.33	13.96
HH-0.65	100	7.50	6.47	13.97
HH-0.65	120	7.63	6.07	13.70

2.4 改性活性炭再生后吸附效果

本研究在 120 ℃ 条件下考察了低硫条件下 HH-0.65 改性活性炭的再生吸附效果。试验条件改变 SO₂ 浓度为 71.5 mg/m³, 其他气体组分浓度不变, 按照上述吸附及再生方法, 对改性活性炭进行了四次循环吸脱附试验, 得到结果如图 6、7 所示。

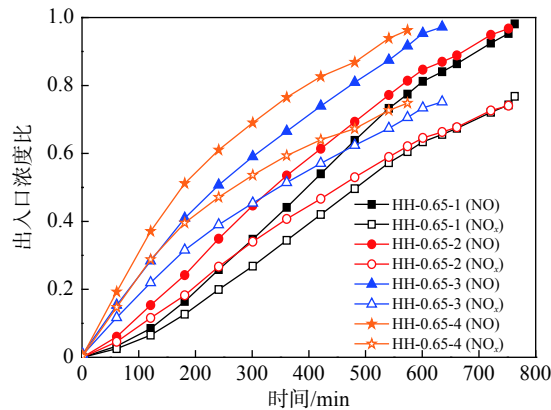


图 6 改性活性炭循环吸附试验 NO_x 穿透曲线
Fig. 6 Breakthrough curve of NO_x of activated carbon of cycle adsorption experiment

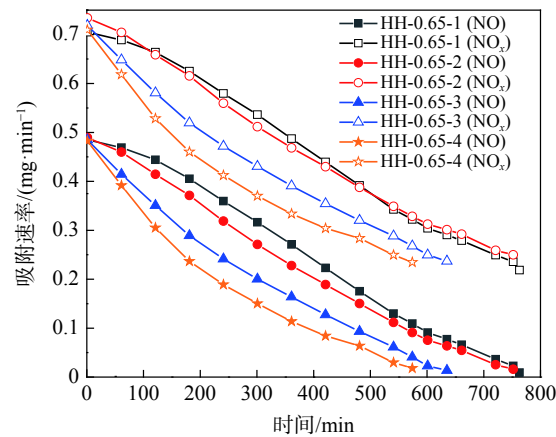


图 7 改性活性炭循环吸附试验 NO_x 吸附速率
Fig. 7 NO_x adsorption rate of activated carbon of cycle adsorption experiment

从图 6 中穿透曲线可以看出, 随着再生次数的增加, 活性炭吸附效率呈现出逐次下降的趋势; 对图 7 中曲线进行积分, 得到改性活性炭再生三次的吸附量, 如表 4 所示。

表 4 改性活性炭再生后 NO_x 吸附量
Table 4 Capacity of NO_x adsorption by regenerative modified activated carbon

再生次数	NO 吸附量/ (mg·g ⁻¹)	NO ₂ 吸附量/ (mg·g ⁻¹)	NO _x 吸附量/ (mg·g ⁻¹)
0	12.90	11.01	23.91
1	11.62	12.01	23.63
2	8.81	9.68	18.49
3	7.17	8.48	15.65

对比表 4 活性炭 NO_x 吸附量, 第一次吸附量可达 23.91 mg/g, 再生三次后, 吸附量下降到了 15.65 mg/g, 吸附量下降了 35%。试验过程中发现, 当活性炭 NO 吸附饱和后, 检测出口 SO₂ 浓度依然为 0, 而脱附再生过程中, 脱附出口也难以检测到 SO₂, 可见当 NO 吸附饱和后, 吸附剂的 SO₂ 吸附容量尚未饱和, 且吸附的 SO₂ 难以脱附去除。Lee^[42] 等人研究也发现 SO₂ 在吸附剂表面的亲和力要大于 NO_x, 使得 NO_x 吸附能力降低。

对新鲜改性活性炭和经过 3 次循环吸脱附测试后的活性炭进行了 X-射线光电子能谱(XPS)分析, 中毒前后 S2p 的 XPS 谱图如图 8 所示。

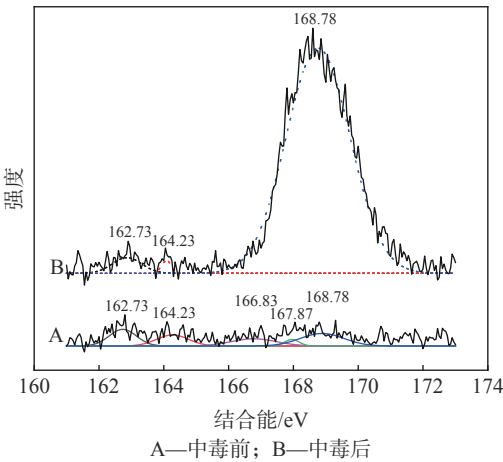
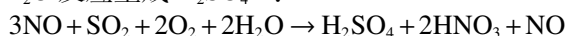


图 8 改性活性炭中毒前后 XPS 谱图
Fig. 8 XPS spectrum before and after modified activated carbon poisoning

在以上 XPS 谱图中, 162.73 eV 处为硫醚(醇)硫, 164.23 eV 处为噻吩类硫, 166.83 eV 处为(亚)砷硫^[43-46], 167.87 eV 处为 SO₃²⁻, 168.78 eV 处为 SO₄²⁻^[47]。对比中毒前后活性炭 XPS 谱图发现, 新鲜改性活性炭中硫酸盐强度较低; 脱附后的活性炭中硫酸盐强

度明显增高,中毒前后 SO_4^{2-} 峰面积之比为 1:24。有研究表明,当烟气中有水蒸气存在时, SO_2 极易和 O_2 、 H_2O 反应生成 H_2SO_4 ^[48]:



可以推测烟气中 SO_2 不仅会吸附在活性炭上,造成物理吸附位点减少,还会与 O_2 和 H_2O 反应生成 H_2SO_4 ,进而与活性炭中的 K 发生化学反应生成稳定的硫酸盐难以分解脱附,造成化学吸附活性位点大量丧失,同时还会堵塞活性炭孔道,影响活性炭 NO_x 吸附能力。

3 结论

1) 利用 K_2CO_3 改性活性炭能够极大提高活性炭的 NO_x 吸附能力。

2) 改性活性炭对 NO_x 的吸附包括物理吸附和

化学吸附,随着温度升高,物理吸附逐渐减弱,化学吸附逐渐占据主导地位,因此 NO_x 吸附能力随温度升高而下降,最终趋于稳定。

3) 在 120 ℃ 高温条件下,且有高浓度 CO_2 、 SO_2 和水蒸气时,0.65 mol/L 的 K_2CO_3 改性活性炭依然具有良好吸附效果,其吸附量可达 15.17 mg/g,较活性炭原样提高了 20 倍以上。

4) 由于改性活性炭对 NO_x 的吸附主要是以化学吸附为主, SO_2 会与活性炭上的钾发生化学反应生成稳定的硫酸盐,加热再生的方法难以将其脱除,从而影响活性炭的再生吸附能力。考虑到移动床吸附器中活性炭的磨损,需要添加新鲜活性炭,这将有利于维持吸附装置的整体吸附效果。因此该活性炭结合移动床吸附器,适用于烧结烟气中 NO_x 的吸附去除,脱附回收 NO 组分,实现资源的再利用。

参考文献

- [1] Wang Yusu, Zhang Lei, Chen Jihao, *et al.* Harm and treatment of nitrogen oxides in the atmosphere[J]. *Technology Innovation and Application*, 2019, (7): 137-138.
(王禹苏, 张蕾, 陈吉浩, 等. 大气中氮氧化物的危害及治理[J]. *科技创新与应用*, 2019, (7): 137-138.)
- [2] Shen Jun. The denitrification technology of flue gas in the cement industry[J]. *Jiangsu Building Materials*, 2019, (1): 14-17.
(沈军. 水泥工业烟气中氮氧化物脱除技术[J]. *江苏建材*, 2019, (1): 14-17.)
- [3] Wang Xurui. Nitrogen oxide hazards and treatment methods[J]. *Modern Chemical Research*, 2018, (10): 116-117.
(王旭睿. 氮氧化物危害及处理方法[J]. *当代化工研究*, 2018, (10): 116-117.)
- [4] Sun Jinyu. Controlling atmosphere pollution by NO_x control technique[J]. *Energy Conservation*, 2004, (5): 41-44.
(孙锦余. 利用氮氧化物控制技术治理大气污染[J]. *节能*, 2004, (5): 41-44.)
- [5] Li Yufang. Research on motor vehicle exhaust pollution and countermeasures[J]. *Environment & Development*, 2020, 32(2): 39-42.
(李玉芳. 机动车尾气污染及防治对策研究[J]. *环境与发展*, 2020, 32(2): 39-42.)
- [6] Li Guoliang. Hazards of nitrogen oxides to the environment and pollution control technology[J]. *Shanxi Chemical Industry*, 2019, 39(5): 123-124.
(李国亮. 氮氧化物对环境的危害及污染控制技术[J]. *山西化工*, 2019, 39(5): 123-124.)
- [7] Liu Suying. Analysis of the hazards and countermeasures of flue gas pollution in thermal power plants[J]. *Course Education Research*, 2019, (19): 255.
(刘素英. 火力发电厂烟气污染的危害及对策探析[J]. *课程教育研究*, 2019, (19): 255.)
- [8] Wang Xiaoman, Zhang Chenghao, Quan Fangfang. Harmness of NO_x and its catalytic reduction control method[J]. *Shanghai Energy Conservation*, 2019, (4): 259-261.
(王小曼, 张晟昊, 权芳芳. 氮氧化物的危害及其催化还原控制方法[J]. *上海节能*, 2019, (4): 259-261.)
- [9] Yang Yanlong. Emissions reduction of NO_x in coal-fired power plant and simple analysis of SCR flue gas denitration technology[J]. *Energy Environmental Protection*, 2017, 31(2): 31-35.
(杨延龙. 火电厂氮氧化物减排及 SCR 烟气脱硝技术浅析[J]. *能源环境保护*, 2017, 31(2): 31-35.)
- [10] Fan Gaixiao. Talking about the purification technologies of nitrogen oxides in vehicle exhaust gas[J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2019, (13): 258-259.
(樊改肖. 浅谈机动车尾气中氮氧化物减排技术的发展[J]. *内燃机与配件*, 2019, (13): 258-259.)
- [11] Wang Jichao, Yan Yali. Overtview of nitrous oxides treatment[J]. *Industrial Technology Innovation*, 2015, (3): 375-379.
(王纪超, 闫亚丽. 含氮氧化物废气治理方法概述[J]. *工业技术创新*, 2015, (3): 375-379.)

- [12] Liu Qian, Zhou Zhenzhen. Progress in activated-synthesis of Si-based oxynitrides materials at low temperatures[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2018, 33(2): 129–137.
(刘茜, 周真真. 低温活化合成含硅氮氧化物材料研究进展[J]. *无机材料学报*, 2018, 33(2): 129–137.)
- [13] Li Wusheng. Discusses the marine diesel exhaust treatment system based on SCR technology[J]. *China Plant Engineering*, 2019, (13): 65–66.
(李武胜. 试论基于SCR技术的船舶柴油机尾气处理系统[J]. *中国设备工程*, 2019, (13): 65–66.)
- [14] Yu Xiaolong, Wu Xiaomin, Chen Ziyi, *et al.* Oxygen vacancy defect engineering in Mn-doped CeO₂ nanostructures for nitrogen oxides emission abatement[J]. *Molecular Catalysis*, 2019, 476: 110512.
- [15] Hu Hebing, Wang Muye, Wu Yongmin, *et al.* Pollution of nitrogen oxides and its treating method[J]. *Environmental Protection Science*, 2006, 32(4): 5–9.
(胡和兵, 王牧野, 吴勇民, 等. 氮氧化物的污染与治理方法[J]. *环境保护科学*, 2006, 32(4): 5–9.)
- [16] He Zhiqiao, Wang Jiade, Chen Jianmeng. Research progress of biological methods controlling and eliminating nitrogen oxides air pollution[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2002, 3(9): 59–62.
(何志桥, 王家德, 陈建孟. 生物法处理 NO_x 废气的研究进展[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2002, 3(9): 59–62.)
- [17] Cheng Canhua. Discussion on application of integrated desulfurization and denitrification technology in power plant[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2019, (22): 185–186.
(程灿华. 电厂脱硫脱硝一体化工艺应用探讨[J]. *科学技术创新*, 2019, (22): 185–186.)
- [18] Yi Honghong, Ning Ping, Chen Yaxiong. Treatment technology of nitrogen oxide waste gas[J]. *Environmental Science Trends*, 1998, (4): 17–20.
(易红宏, 宁平, 陈亚雄. 氮氧化物废气的治理技术[J]. *环境科学动态*, 1998, (4): 17–20.)
- [19] Su Qingfa, Liu Yamin, Chen Jie, *et al.* Research advance in non-thermal plasma induced selective catalytic reduction NO_x with low hydrocarbon compounds[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2009, (8): 1449–1457.
(苏清发, 刘亚敏, 陈杰, 等. 低温等离子体诱导低碳烃选择性催化还原 NO_x 研究进展[J]. *化工进展*, 2009, (8): 1449–1457.)
- [20] Yang Guoqing, Cao Yisong, Shao Zhuxia, *et al.* Lye synergy dielectric barrier discharge on removing NO_x of exhaust[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(12): 4013–4019.
(杨国清, 曹一崧, 邵朱夏, 等. 碱液协同介质阻挡放电处理含氮氧化物废气[J]. *高电压技术*, 2018, 44(12): 4013–4019.)
- [21] He Zhi, He Keqiao, Li Lei, *et al.* Research and application of recycling high concentration nitrogen oxide flue gas[J]. *Sichuan Metallurgy*, 2019, 41(06): 32–35.
(何志, 何珂桥, 李磊, 等. 高浓度氮氧化物烟气资源化研究及应用[J]. *四川冶金*, 2019, 41(06): 32–35.)
- [22] Lourenço M A O, Ferreira P, Gomes J R B. Flue gas adsorption on periodic mesoporous phenylene-silica: a DFT approach[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2018, 20(24): 16686–16694.
- [23] Liu Zhisong, Yu Feng, Ma Cunhua, *et al.* A critical review of recent progress and perspective in practical denitration application[J]. *Catalysts*, 2019, 9(9): 771.
- [24] Zhu Yiyan. Research progress of nitrogen oxide treatment technology[J]. *Guangxi Journal of Light Industry*, 2015, 31(6): 100–101, 103.
(朱奕彦. 氮氧化物治理技术的研究进展[J]. *轻工科技*, 2015, 31(6): 100–101, 103.)
- [25] Ma Xiancheng, Li Liqing, Chen Ruofei, *et al.* Porous carbon materials based on biomass for acetone adsorption: Effect of surface chemistry and porous structure[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 459: 657–664.
- [26] Zhou Ke, Ma Weiwu, Zeng Zheng, *et al.* Experimental and DFT study on the adsorption of VOCs on activated carbon/metal oxides composites[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 372: 1122–1133.
- [27] Creamer A E, Gao B. Carbon-based adsorbents for postcombustion CO₂ capture: a critical review[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(14): 7276–7289.
- [28] Shen Yafeng. Rice husk silica derived nanomaterials for sustainable applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 80: 453–466.
- [29] Promdee K, Chanvidhwatanakit J, Satitkune S, *et al.* Characterization of carbon materials and differences from activated carbon particle (ACP) and coal briquettes product (CBP) derived from coconut shell via rotary kiln[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 75: 1175–1186.
- [30] Yang Si'e, Lin Jianqing. Review of modification technology of activated carbon and its application[J]. *Journal of Anhui*

- Agricultural Sciences*, 2014, 42(9): 2712–2715.
(杨四娥, 林建清. 活性炭的改性技术及其应用研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(9): 2712–2715.)
- [31] Li Chongjiu, Zhao Ran, Peng Mengqi, *et al.* Study on desulfurization and denitrification by modified activated carbon fibers with visible-light photocatalysis[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2015, 43(12): 1516–1522.
- [32] Du Yaru, Zhang Xinghui, Yang Jiaojiao. NO_x adsorptive performance by impregnated activated carbon fibers[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, 13(7): 1694–1702.
(都亚茹, 张兴惠, 杨姣姣. 浸渍改性活性炭纤维吸附氮氧化物性能[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(7): 1694–1702.)
- [33] Pang Chengyong, Li Yuping. Study on removing of nitrogen oxides by adsorption in activated carbon[J]. *Energy Environmental Protection*, 2006, 20(6): 38–41.
(庞成勇, 李玉平. 用活性炭吸附法脱除氮氧化物的研究[J]. *能源环境保护*, 2006, 20(6): 38–41.)
- [34] Li Guoxi, Huang Qizhong, Hou Juan. NO adsorption activity of Pt supported on activated carbon fiber[J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2003, 24(2): 107–110.
(李国希, 黄启忠, 侯娟. 负载 Pt 活性炭纤维对 NO 的吸附活性[J]. *催化学报*, 2003, 24(2): 107–110.)
- [35] Lee Y W, Choi D K, Park J W. Surface chemical characterization using AES/SAM and TOF-SIMS on KOH-impregnated activated carbon by selective adsorption of NO_x[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2001, 40(15): 3337–3345.
- [36] Illán-Gómez M J, Raymundo-Piñero E, García-García A, *et al.* Catalytic NO_x reduction by carbon supporting metals[J]. *Applied Catalysis B, Environmental*, 1999, 20(4): 267–275.
- [37] Saygılı H, Saygılı G A. Optimized preparation for bimodal porous carbon from lentil processing waste by microwave-assisted K₂CO₃ activation: Spectroscopic characterization and dye decolorization activity[J]. *Elsevier Ltd*, 2019, 226: 968–976.
- [38] Chen Yandan, Huang Biao, Huang Mingjie, *et al.* On the preparation and characterization of activated carbon from mangosteen shell[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2011, 42(5): 837–842.
- [39] Deng Hui, Li Guoxue, Yang Hongbing, *et al.* Preparation of activated carbons from cotton stalk by microwave assisted KOH and K₂CO₃ activation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 163(3): 373–381.
- [40] Ünveren E E, Monkul B Ö, Sarioğlu Ş, *et al.* Solid amine sorbents for CO₂ capture by chemical adsorption: a review[J]. *Petroleum*, 2017, 3(1): 37–50.
- [41] Lee Y W, Choi D K, Park J W. Performance of fixed-bed KOH impregnated activated carbon adsorber for NO and NO₂ removal in the presence of oxygen[J]. *Carbon*, 2002, 40(9): 1409–1417.
- [42] Lee Y W, Kim H J, Park J W, *et al.* Adsorption and reaction behavior for the simultaneous adsorption of NO–NO₂ and SO₂ on activated carbon impregnated with KOH[J]. *Carbon*, 2003, 41(10): 1881–1888.
- [43] Dai Shifeng, Ren Deyi, Song Jianfang, *et al.* Application of XPS in research on occurrence of organic sulfur in vitrain[J]. *Journal of China University of Mining*, 2002, 31(3): 225–228.
(代世峰, 任德怡, 宋建芳, 等. 应用 XPS 研究镜煤中有机硫的存在形态[J]. *中国矿业大学学报*, 2002, 31(3): 225–228.)
- [44] Cai Chuanchuan, Yang Minghu, Pan Lulu, *et al.* Study of types and content of sulfur in coal samples of different densities using X-ray photoelectron spectroscopy(XPS)[J]. *Coal Preparation Technology*, 2018, (5): 56–59.
(蔡川川, 杨明虎, 潘露露, 等. 基于 XPS 技术的不同密度煤样中硫的类型和含量研究[J]. *选煤技术*, 2018, (5): 56–59.)
- [45] Ge Tao, Cai Chuanchuan. The XPS analysis of different-density-level organic sulfur in coking coal[J]. *Journal of Anhui University of Science and Technology*, 2015, 35(3): 14–16, 20.
(葛涛, 蔡川川. 不同密度炼焦煤中有机硫的 XPS 研究[J]. *安徽理工大学学报(自然科学版)*, 2015, 35(3): 14–16, 20.)
- [46] Liu Yifeng, Shen Benxian, Pi Zhipeng, *et al.* Oxidation transferring mechanism of SO₂ in FCC flue gas over CeO₂ surface[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2016, 67(12): 5015–5023.
(刘逸锋, 沈本贤, 皮志鹏, 等. CeO₂ 表面氧化转移 FCC 烟气中 SO₂ 的反应过程[J]. *化工学报*, 2016, 67(12): 5015–5023.)
- [47] Xu Ning, Tao Xiuxiang, Xie Maohua, *et al.* Study on variation of sulfur chemical forms in microwave desulfurized coal based on XPS[J]. *Coal Engineering*, 2014, 46(12): 111–113.
(许宁, 陶秀祥, 谢茂华, 等. 基于 XPS 的微波脱硫前后煤中硫形态的变化研究[J]. *煤炭工程*, 2014, 46(12): 111–113.)
- [48] Tang Qiang, Zhang Zhigang, Zhu Wenpei, *et al.* SO₂ and NO selective adsorption properties of coal-based activated carbons[J]. *Fuel*, 2005, 84(4): 461–465.