

原料半焦和 FeCl₃ 改性半焦脱除模拟 烟气中气态 Hg⁰ 的实验研究

王 力¹, 张林林¹, 刘秀丽¹, 李 敏¹, 陈继涛²

(1. 山东科技大学 化学与环境工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 天津大学 化工学院, 天津 300073)

摘 要:在固定床实验台上,利用内蒙古霍林河褐煤半焦及其改性半焦对模拟烟气中的气态 Hg⁰ 进行吸附实验。结果表明:与原料半焦相比,在 140 °C 下、经 FeCl₃ 溶液改性半焦吸附效率有明显提高,并且长时间维持在 90% 以上;改性半焦对气态 Hg⁰ 具有较高的吸附稳定性。BET 测试结果表明,半焦经 FeCl₃ 溶液处理后,孔道发生部分堵塞或破坏,使得半焦的孔隙结构发达程度有所降低;XRD 测试表明,改性半焦中无定形碳的结构并未发生变化,表面 Fe_xO_y 以高度分散的无定形态存在;FTIR 分析结果表明,FeCl₃ 溶液处理使半焦表面 O—H 官能团和 C=O 官能团的含量增加。

关键词:改性半焦;FeCl₃ 溶液;气态 Hg⁰;烟气脱汞;吸附性能

中图分类号:TQ536.9

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2014)01-0046-07

Experimental Study on Adsorption Performance of Semi-coke and Semi-coke Modified by FeCl₃ Solution for Gas-phase Hg⁰ in Flue Gas

Wang Li¹, Zhang Linlin¹, Liu Xiuli¹, Li Min¹, Chen Jitao²

(1. College of Chemical and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology,

Qingdao, Shandong 266590, China;

2. School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300073, China)

Abstract: The adsorption performance of semi-coke and FeCl₃ solution-modified semi-coke for gas-phase Hg⁰ was investigated with a bench-scale fixed-bed reactor system. The experimental results suggest that the adsorption performance of FeCl₃ solution-modified semi-coke for gas-phase Hg⁰ presents better than semi-coke. The samples impregnated by FeCl₃ solution have excellent adsorption performance which can get 90% for gas-phase Hg⁰ at 140 °C in a long time. FeCl₃ solution-modified semi-coke for gas-phase Hg⁰ is more stable. The BET analysis shows that semi-coke has rich mesopore but become weak after modification. The XRD results indicate that the structure of the amorphous carbon in FeCl₃ solution-modified semi-coke is not changed and the trace of Fe_xO_y exists as the highly fragmented amorphous state in the surface of modified semi-coke. The FTIR results indicate that the surface of FeCl₃ solution-modified semi-coke have more O—H functional group and C=O functional group than semi-coke.

Key words: modified semi-coke; FeCl₃ solution; gas-phase Hg⁰; mercury removing from flue gas; adsorption performance

汞是煤中较易挥发的痕量元素^[1],燃煤行业所排放的烟气中的汞是汞污染的主要来源之一^[2-3]。我国是世界上第一产煤大国,同时也是煤炭消耗大国,在现行的能源结构中煤的比例占了 75%^[4]。我国汞污染物

收稿日期:2013-09-09

基金项目:国家自然科学基金项目(21276146);山东科技大学研究生科技创新基金项目(YCA120368)

作者简介:王 力(1966—),男,山东菏泽人,教授,博士生导师,主要从事煤基矿物材料及资源综合利用方面的教学与科研工作。E-mail:wanglisidust@126.com

排放总量中约 40% 为燃煤汞污染物。烟气中的汞主要以三种形式存在:元素态 Hg⁰、氧化态 Hg²⁺ 和颗粒态 Hg_p^[5-7]。其中,元素态 Hg⁰ 因具有特殊的物理性质:熔点低,不易溶于水,平衡蒸气压高等,因此较难通过常规的烟气净化装置除去,成为重点控制对象^[8]。有研究^[9]表明:由燃煤排放的汞中,单质汞占 20%~50%。

目前对于烟气中汞的脱除研究最广泛、较早、较成熟的是活性炭吸附法^[10-12]。但因活性炭成本高、再生困难限制了其应用^[13-14]。开发廉价、脱汞效率高的吸附剂成为目前的一个重要研究方向。半焦作为煤燃烧的副产物,在过去的工业生产和生活中一直作为能源利用后的废弃物处理,不仅污染环境也造成资源的浪费。而活性半焦价格低廉且活性与活性炭相当^[15]。胡龙军等^[16]采用硝酸活化、水热活化和浸渍活化组分等改性方法对原料半焦进行改性处理,制备了改性半焦脱硫剂;张斌等^[17]利用不同浓度的 HNO₃ 和 NaOH 溶液制备改性活性焦,并在固定床吸附装置上模拟基本烟气组成,进行了活性焦的脱硫及脱汞性能测试。在烟气脱除气态 Hg⁰ 方面也已取得一定进展,Zhang 等^[18]利用褐煤半焦,经过载银改性后,对实验室模拟烟气中的汞进行吸附并研究了其吸附机理。

本实验采用小型固定床实验台(装置)模拟烟气中气态 Hg⁰ 的吸附,考察不同浓度的 FeCl₃ 溶液改性对半焦吸附性能的影响及其吸附机理。

1 实验部分

1.1 改性半焦混合吸附剂的制备

选用内蒙古霍林河褐煤,将其破碎至 3~5 mm,置于马弗炉沙浴中,在 N₂ 保护、700 °C 条件下干馏 1 h,再研磨、过筛,制得 60~100 目原料半焦,记为 SC 样品。用不同浓度的 FeCl₃ (分析纯,天津市大茂化学试剂厂)溶液浸渍 SC 样品,再在 80 °C 条件干燥,得到 FeCl₃ 改性半焦混合吸附剂样品,记为 FSC。

1.2 吸附实验装置及方法

图 1 中 3 为 U 形管,实验用汞渗透管(美国 VI-CI Metronics 公司)置于其中,通过调节数控恒温水浴锅 10 的温度来调节气态 Hg⁰ 的逸出浓度。实验中以高纯 N₂ 作为载气,载气流经流量计 1 和 2 的流量分别控制为 330 mL/min 和 670 mL/min,其中流经流量计 2 中的高纯 N₂ 通过 U 型管 3 将气态 Hg⁰ 携带出来,到达缓冲瓶后与流经流量计 1 的高纯 N₂ 在此混合均匀,形成总流量为 1 L/min 含气态 Hg⁰ 混合气体。实验开始前调节三通阀 8 和 9,保证实验开始后气体直接进入尾气吸收瓶 14 后(内置 10% H₂SO₄-4% KMnO₄ 溶液)排向室外,待混合气体气流稳定后(大约 2 h),再调节三通阀 9,使混合气体进入测汞仪(QM201H 型,苏州青安仪器有限公司),进行气态 Hg⁰ 的初始浓度 c_0 的测定。待测定的 c_0 稳定后,调节三通阀 8,使气体通过 U 型管 4(内置半焦吸附剂)后进入测汞仪,进行半焦吸附后气态 Hg⁰ 的浓度 c_t 测定。本文中 c_0 均为 30 μg/m³,吸附剂用量为 0.50 g。

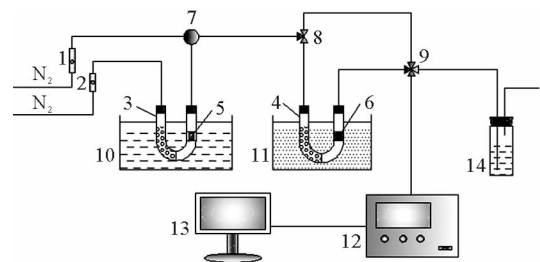
样品的吸附效率:

$$\eta = (1 - \frac{c_t}{c_0}) \times 100\% \quad (1)$$

其中: η —吸附效率; c_0 —半焦吸附前气态 Hg⁰ 的浓度值; c_t —半焦吸附后气态 Hg⁰ 的浓度值。在较高的吸附效率下,实验中有有效吸附时间越长,说明吸附剂的吸附性越好。

1.3 TCLP 毒性实验和总汞提取实验原理方法及装置

固体废弃物的浸出毒性,是指采用规定的浸出程序对固体废弃物进行浸取,所测定的浸出液中污染物的浓度。如果浸出液中污染物浓度超过规定的标准,则认定这种固体废弃物具有浸出毒性,有可能对水环境等



1,2—转子流量计;3,4—U型管;5—汞渗透管;6—吸附剂;
7—气体混合瓶;8,9—气体控制阀;10—恒温水浴;11—油浴;
12—QM201H 燃煤烟气测汞仪;13—计算机;14—尾气吸收瓶

图 1 气态 Hg⁰ 吸附实验装置示意图

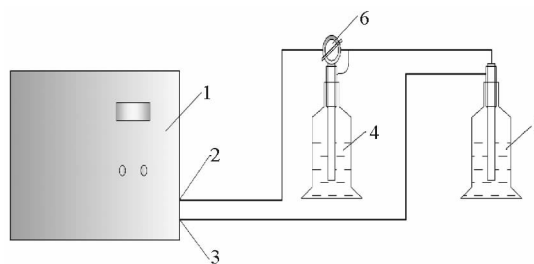
Fig. 1 Experimental device for adsorption of gas-phase Hg⁰

带来潜在的污染问题。实验采用的 TCLP(toxicity characteristic leaching procedure)是美国最新的法定重金属污染评价方法^[19-20]。

根据物质溶于水之后酸碱度的不同选择不同的提取剂,当 pH 值 < 5 时选用提取剂为 1,即:将 5.7 mL 冰醋酸溶于 500 mL 去离子水中,再加入 1 mol/L 的 NaOH 64.3 mL 定容至 1 L,用 1 mol/L 的 HNO₃ 或 1 mol/L 的 NaOH 调节溶液的 pH 值,使之保持在 4.88~4.98。当 pH 值 > 5 时选用提取剂 2,即:将 5.7 mL 冰醋酸溶于去离子水中,定容至 1 L,保持溶液的 pH 值在 2.83~2.94。缓冲溶液的用量是半焦的 20 倍,即固液质量比为 1 : 20,以 (30 ± 2) r/min 的速度在常温下振荡 (18 ± 2) h,离心,过滤,再用 1 mol/L 的 HNO₃ 调节提取液 pH 值至 2,以长时间保存^[21]。本实验中的样品溶于水之后的 pH 值都小于 5,因此分别对吸附后的两种半焦加入试剂 1 进行提取,TCLP 中的汞浓度即为 TCLP 法提取的浓度。

吸附后半焦中总汞的含量测定实验根据国家标准 GB/T22105.1—2008 原子荧光光度法测量半焦中总汞的含量。准确称取 0.5 g 半焦于 50 mL 具塞比色管中加少许去离子水润湿样品,加入王水 10 mL,摇动比色管混合均匀,在沸水中消解 2 h,去除冷却后,加入 10 mL 保存液(0.05% 的重铬酸钾/硝酸混合液),用载液(5% 的盐酸)稀释至刻度。摇匀,静置,取上清液检测。

图 2 为汞含量测定实验装置示意图。采用 SG-921 双光数显测汞仪,检测范围为 0.1 ~ 10.0 ng/mL,重复性误差 ≤ 5%,相关系数 ≥ 0.998。将吸附了气态 Hg⁰ 的半焦浸入一定的溶液中一定时间后,取适量的离心溶液于还原瓶 5 中调节三通活塞 6 于测定位置,向还原瓶溶液中快速滴加 20% 的氯化亚锡溶液(将溶液中的汞还原为元素态),盖紧鼓泡器后,测汞仪显示读数迅速上升,直至峰值,达到峰值后将三通活塞 6 调节到吸收位置,吸收瓶 4 中的吸收液(5% 高锰酸钾溶液)吸收产生的汞蒸气,记录峰值。



1—测汞仪; 2—出气嘴; 3—进气嘴;
4—尾气吸收瓶; 5—还原瓶; 6—三通活塞

图 2 汞含量测定实验装置示意图

Fig. 2 Experimental device for the determination of Hg⁰

2 结果与讨论

2.1 FSC 与 SC 对气态 Hg⁰ 的吸附性能

因为实际生产中烟气温度较高,为考察在高温下改性半焦对气态 Hg⁰ 的吸附性能,实验讨论了半焦在 140 °C 时对气态 Hg⁰ 的吸附性能。每次取 10 g SC 样品,将其置于 22 mL 浓度分别为 0.08, 0.16, 0.20, 0.25, 0.30 mol/L 的 FeCl₃ 溶液中,80 °C 条件下浸渍 10 h 制得不同的半焦改性样品。分别称量上述改性样品 0.50 g,固定于 U 型管中进行吸附实验,样品的吸附性能如图 3 所示。由图 3 可见,与 SC 相比,FSC 在 140 °C 时的吸附效率和有效吸附时间均明显提高。当 FeCl₃ 溶液的浓度低于 0.25 mol/L 时,随着 FeCl₃ 溶液浓度的升高,吸附剂的吸附效率也逐渐提高,这可能与 FeCl₃ 在改性半焦中的含量增加有关;当溶液浓度达到 0.25 mol/L 时,改性样品 FSC 对气态汞具有最佳吸附性能,最高吸附效率达 97.3%,并且能保持较长的时间。

2.2 FSC 与 SC 吸附气态 Hg⁰ 后的 TCLP 和总汞含量结果分析

取在 140 °C 下吸收气态 Hg⁰ 后的 FSC(FeCl₃

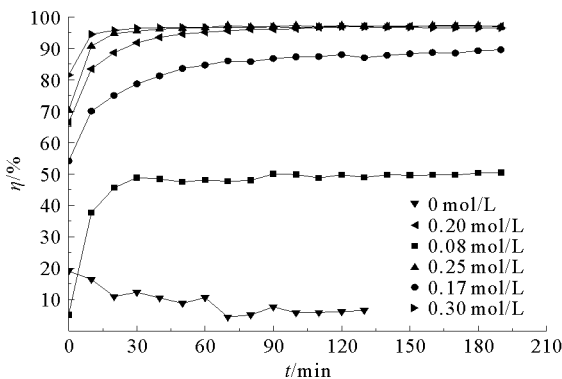


图 3 FeCl₃ 溶液浓度对吸附性能的影响曲线图

Fig. 3 Effect of FeCl₃ solution concentration on the adsorption performance

溶液浓度为 0.25 mol/L)和 SC 进行 TCLP 和总汞含量实验,表 1 给出了 SC 和 FSC 的 TCLP 和总汞实验提取液中汞有效态量。FSC 的滤液中汞浓度略高,为 0.010 3 mg/L,SC 的提取液的汞浓度是 0.003 2 mg/L。是因为吸附温度较高时,部分 Hg⁰ 会在 FSC 表面被氧化为 HgCl₂,单质汞、HgCl₂ 在水中的溶解度分别为 0.06 和 6.9×10^4 mg/L, HgCl₂ 极易溶于水,在水环境中非常不稳定,因此 FSC 样品浸出液中汞的浓度较高。但两种浸出液中的汞浓度均低于 TCLP 标准中汞的安全浓度值 25 μg/L,表明用 FSC 和 SC 对气态 Hg⁰ 的吸附稳定性较好,在浸滤过程中不容易溢出。FSC,SC 总汞含量数据分别为 0.283 5 mg/L 和 0.029 4 mg/L,进一步说明 FSC 对气态 Hg⁰ 有较高的吸附效率。

2.3 FSC 与 SC 的分析表征及对气态汞的脱除机理

表 2 给出的是原料半焦 SC 和经 0.25 mol/L 的 FeCl₃ 溶液处理的 FSC 的 BET(Brunauer-Emmett-Teller)分析结果。

表 2 原料半焦及 FeCl₃ 溶液处理半焦的比表面积和孔径结构分析

Tab. 2 The BET analyses of virgin and FeCl₃ solution modified semi-coke

样品	比表面积/(m ² /g)	孔隙/(cm ³ /g)	平均孔径/nm
SC	63.725	0.103 7	6.52
FSC	10.545	0.055 4	21.02

由表 2 可知,原料半焦的平均孔径为 6.52 nm,属于介孔(2~50 nm)。经 FeCl₃ 溶液浸渍后,半焦的比表面积和总孔容量明显减小,其平均孔径却增至 21.02 nm。由此可见,改性后半焦的部分孔道被堵塞或破坏使得半焦的孔隙结构发达程度降低。此时改性半焦的比表面积变小,而吸附性能实验表明吸附率大大增加,这可能与改性半焦表面对气态 Hg⁰ 进行了化学吸附有关。任建莉等^[21]利用 FeCl₃ 溶液对矿石改性的研究表明,利用 FeCl₃ 对吸附剂的化学改性过程,即对吸附剂进行渗氯操作,在表面形成了某种含 Cl 官能团^[22-23]:



因此,在吸附过程中提供 Cl⁻ 与烟气中的 Hg⁰ 发生化学反应的条件,结合形成了 [HgCl]⁺(g),有一部分进而形成了 HgCl₂ 或者其他氧化态的汞,如较复杂的四氯化汞(HgCl₄²⁻)的形式^[24]。

2.4 FSC 表面化学形态分析

2.4.1 XRD 谱图分析

图 4 给出的是 SC 及 FSC 的 XRD(X-ray diffraction)谱图。从 XRD 谱图可以看出,在 26.5° 的衍射峰可归属于炭材料中较大的石墨微晶(六方石墨结构的 002 面衍射)。经过 FeCl₃ 溶液处理后的半焦,26.5° 石墨微晶的衍射峰减弱,说明处理过程会使半焦表面减少部分石墨化程度,是石墨微晶细晶化的标志^[25]。20°~30° 的衍射峰,可归属于无定形炭的特征峰,与原料半焦相比,FeCl₃ 溶液处理后的半焦在此位置的特征峰无明显变化,说明处理过

表 1 TCLP 和总汞实验提取溶液中汞有效态量

Tab. 1 Concentrations of in extractant solutions by TCLP and total mercury

样品	TCLP/(mg/L)	总汞含量/(mg/L)
SC	0.003 2	0.029 4
FSC	0.010 3	0.283 5

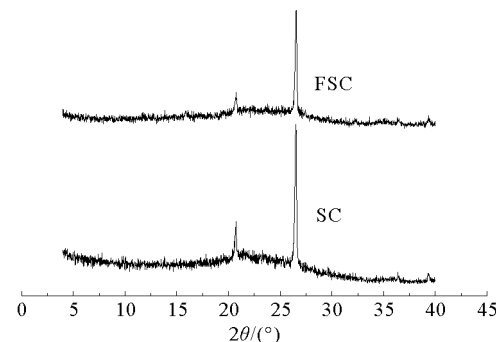


图 4 原料半焦及 FeCl₃ 溶液处理半焦的 XRD 谱图

Fig. 4 XRD pattern of SC and FSC

程中,半焦的无定形炭的结构没有发生变化。有研究^[26]指出,FeCl₃ 溶液处理的半焦,会出现 Fe₃O₄ 的衍射峰的晶型。由图 4 可以看出,改性半焦的 XRD 谱图上只出现了 SiO₂ 的衍射峰,并没有检测到任何有关 Fe_xO_y 的信号,这说明改性半焦表面的 Fe_xO_y 是以高度分散的无定形态存在。FSC 相对于 SC 有较高的吸附气态 Hg⁰ 的效率,这可能与其表面高度分散的无定形态的 Fe_xO_y 有关,因为与晶形态的 Fe_xO_y 相比,高度分散状态下的 Fe_xO_y 与气态 Hg⁰ 之间具有更大接触面积,更利于对气态 Hg⁰ 的吸附。

2.4.2 FTIR 谱图分析

SC 及 FSC 的红外光谱 (FTIR, Fourier transform infrared spectroscopy) 分析数据如图 5 所示。FeCl₃ 溶液处理后的半焦红外谱图与原料半焦比较相似,但吸收峰波数在 3 750~3 100 cm⁻¹ 范围的吸收峰强度显著增大,说明 FeCl₃ 溶液处理使半焦表面 O—H 官能团的含量增加。FeCl₃ 溶液处理后的半焦在 1 700~1 300 处出现新的、多个吸收峰,此为芳酮类的 C=O 基团的伸缩振动峰,说明 FeCl₃ 溶液处理后增加了半焦表面 C=O 官能团的含量。Tan 等^[27] 研究指出有 C=O 官能团存在时,对 Hg⁰ 吸附反应中发生了电子转移,C=O 官能团可以看作是反应的电子受体,从而有利于电子转移反应的进行。

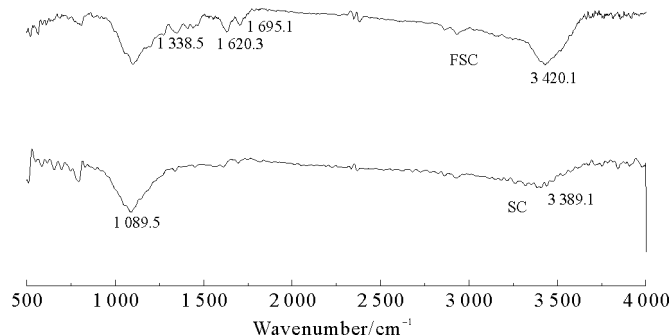


图 5 原料半焦及 FeCl₃ 溶液处理半焦的 FTIR 分析谱图

Fig. 5 FTIR spectrum of SC and FSC

因此,由于 C=O 官能团的催化氧化,Hg⁰ 更易转化为 HgO。反应中所需的 H₂O 来自于原料气,并且需要量很少^[28]。

3 结论

1) 经 FeCl₃ 溶液浸渍处理后,在高温状态下,改性半焦样品对气态 Hg⁰ 的吸附性能明显提高。140℃ 时,FeCl₃ 浸渍液浓度为 0.25 mol/L 时吸附性能最佳。

2) TCLP 实验表明,原料半焦 SC 和改性半焦 FSC 对气态 Hg⁰ 的吸附有较高的稳定性,均在安全浓度值范围内,且改性半焦对气态 Hg⁰ 的吸附率要高于原料半焦。

3) BET 分析表明,在半焦改性制备过程中,半焦的孔隙结构在被破坏的同时也不断生成,改性后半焦的吸附性能有不同程度的提高。与 SC 相比,FSC 的比表面积减小,孔隙结构发达程度降低。

4) XRD 测试表明,FSC 表面无定形炭的结构没有发生变化,表面的 Fe_xO_y 是以高度分散的无定形态存在,吸附后的 Hg 以化学形式存在于样品表面。FTIR 测试结果表明改性后的半焦表面的 O—H 官能团、C=O 官能团的含量增加。

参考文献:

- [1] 支国瑞,薛志刚,李洋,等.基于国内实测燃煤电厂烟气汞排放估算的不确定度[J].环境科学研究,2013,26(8):814-821.
Zhi Guorui,Xue Zhigang,Li Yang,et al. Uncertainty of flue gas mercury emissions from coal-fired power plants in China based on field measurements[J]. Research of Environment Sciences,2013,26(8):814-821.
- [2] Li P,Feng X B,Qiu G L,et al. Mercury pollution in Asia: A review of the contaminated sites[J]. Journal of Hazardous Materials,2009,168 (2/3):591-601.
- [3] Glodek A,Pacyna J M. Mercury emission from coal-fired power plants in Poland[J]. Atmospheric Environment,2009,43

- (35):5668-5673.
- [4] 向飞,申哲民,梅志坚,等. 活性炭负载催化剂对模拟烟气中单质汞的吸附[J]. 环境科学与技术,2007,30(9):7-8,20.
Xiang Fei, Shen Zhemin, Mei Zhijian, et al. Activated carbon loaded with catalyst to adsorb element mercury in simulated flue gas[J]. Environmental Science and Technology, 2007, 30(9):7-8, 20.
- [5] 王力,陈继涛,张华伟,等. KMnO₄ 溶液改性半焦对烟气中气态 Hg⁰ 的吸附性能研究[J]. 燃料化学学报,2012,40(12):1498-1504.
Wang Li, Chen Jitao, Zhang Huawei, et al. Adsorption performance of semi-coke modified by KMnO₄ solution for gas-phase Hg⁰ in flue gas[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2012, 40(12):1498-1504.
- [6] 冯新斌,仇广乐,付学吾,等. 环境汞污染[J]. 化学进展,2009,21(2):426-456.
Feng Xinbin, Qiu Guangle, Fu Xuewu, et al. Mercury pollution in the environment[J]. Progress in Chemistry, 2009, 21(2):426-456.
- [7] Zhang H W, Chen J T, Liang P, et al. Mercury oxidation and adsorption characteristics of potassium Permanganate modified lignite semi-coke[J]. Journal of Environmental Sciences(China), 2012, 24(12):2083-2090.
- [8] 李建荣,何焱,商雪松,等. SCR 脱硝催化剂对烟气中零价汞的氧化效率研究[J]. 燃料化学学报,2012,40(2):241-246.
Li Jianrong, He Chi, Shang Xuesong, et al. Oxidation efficiency of elemental mercury in flue gas by SCR de-NO_x catalysts[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2012, 40(2):241-246.
- [9] Senior C L, Sarofim A F, Zeng T F, et al. Gas phase transformations of mercury in coal-fired power plants[J]. Fuel Processing Technology, 2000, 63:197-213.
- [10] Matsumura Y. Adsorption of mercury vapor on the surface of activated 153 carbons modified by oxidation or iodization[J]. Atmospheric Environment, 1974(8):1321-1327.
- [11] Radisav D V, Dolglas P S. Vapor-phase elemental mercury adsorption by activated carbon impregnated with chloride and cheating agents[J]. Carbon, 2001, 39:3-4.
- [12] Yan R, Liang D T, Tsen L, et al. Bench-scale experimental evaluation of carbon performance on mercury vapour adsorption[J]. Fuel, 2004, 83:2401-2409.
- [13] 张郃,赵建涛,房倚天,等. 活性炭催化氧化脱除单质汞的研究[J]. 燃料化学学报,2011,39(5):373-377.
Zhang He, Zhao Jiantao, Fang Yitian, et al. Stabilized oxidation and adsorption of elemental mercury by activated carbon[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2011, 39(5):373-377.
- [14] 高洪亮,周劲松,骆仲泱. 改性活性炭对模拟燃煤烟气中汞吸附的实验研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(8):26-30.
Gao Hongliang, Zhou Jinsong, Luo Zhongyang, et al. Experimental study on Hg vapor adsorption of modified activated carbons in simulated flue gas[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(8):26-30.
- [15] 王林学,李春虎,胡龙军,等. 改性褐煤半焦用于脱除汽油中含硫化化合物的研究[J]. 现代化工,2006,26(12):34-39.
Wang Linxue, Li Chunhu, Hu Longjun, et al. Study on desulfurization of gasoline by modified lignite activated semicokes[J]. Modern Chemical Industry, 2006, 26(12):34-39.
- [16] 胡龙军,李春虎,王林学,等. 改性半焦脱除 FCC 汽油中含硫化化合物的研究[J]. 精细石油化工进展,2006,7(10):20-23.
Hu Longjun, Li Chunhu, Wang Linxue, et al. Desulfurization of FCC gasoline with modified semicoke[J]. Advances in Fine Petrochemicals, 2006, 7(10):20-23.
- [17] 张斌,范朋慧,周雷宇,等. HNO₃ 和 NaOH 改性活性炭吸附模拟烟气中 SO₂ 和 Hg 的实验[J]. 煤炭学报,2011,36(1):163-166.
Zhang Bin, Fan Penghui, Zhou Leiyu, et al. Experiment on SO₂ and Hg adsorption of HNO₃ and NaOH modified activated coke in simulated flue gas[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1):163-166.
- [18] Zhang H W, Liu S S, Chen J T, et al. Research on the preparation of silver-loaded semi-coke and its adsorption characteristics to gas-phase Hg⁰[J]. Advanced Materials Research, 2012, 356-360:1350-1355.
- [19] Mehmet A Y, Bilge A. Leaching of metals from soil contaminated by mining activities[J]. Journal of Hazardous Materials, 2001, 87:289-300.
- [20] Christina S, Anthimos X. Reduction of Pb, Zn, and Cd availability from tailings and contaminated soils by the application of lignite fly ash[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2002, 137:247-265.
- [21] 任建莉,周劲松,骆仲泱,等. 新型吸附剂脱除烟气中气态汞的实验研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(2):48-53.

- Ren Jianli, Zhou Jinsong, Luo Zhongyang, et al. The application of novel sorbents for mercury vapor removal from simulated flue gases [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(2): 48-53.
- [22] Granite E J, Pennline H W, Hargis R A. Novel sorbents for mercury removal from flue gas [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2000, 39(4): 1020-1029.
- [23] Roberts D L, Stewart R M. Characterization of sorbents for removal of vapor phase mercury [C/CD] // EPRI Mercury Sorbent Workshop. Grand Forks, ND, July, 1996.
- [24] Li Y H, Lee C W, Gullett K B. Importance of activated carbon's oxygen surface functional groups on elemental mercury adsorption [J]. Fuel, 2003, 82(4): 451-457.
- [25] 杨全红, 郑经堂, 王茂章, 等. 用 SEM 和 XRD 研究改性活性炭纤维的结构 [J]. 新型炭材料, 1998, 13(4): 60-64.
Yang Quanhong, Zheng Jingtang, Wang Maozhang, et al. XRD and SEM investigation of the microstructures of modified ACF [J]. New Carbon Materials, 1998, 13(4): 60-64.
- [26] 朱珍平, 崔洪, 李允梅, 等. 载铁煤焦中铁化学形态的研究 [J]. 燃料化学学报, 1996, 24(2): 125-130.
Zhu Zhenping, Cui Hong, Li Yunmei, et al. Study of iron chemical forms in iron-loaded coal chars [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 1996, 24(2): 125-130.
- [27] Tan Z Q, Sun L S, Xiang J, et al. Gas-phase elemental mercury removal by novel carbon-based sorbents [J]. Carbon, 2012, 50: 362-371.
- [28] Li H Y, Lee W C, Gullett K B. The effect of activated carbon surface moisture on low temperature mercury adsorption [J]. Carbon, 2002, 40: 65-72.

(责任编辑: 吕海亮)

“能源与环境材料”研究专栏征稿

征稿范围:

- | | |
|--------------|--------------|
| ◇煤的清洁利用 | ◇海洋能利用及相关材料 |
| ◇氢能及燃料电池材料 | ◇风能利用与相关材料 |
| ◇太阳能与电池材料 | ◇新型储能材料 |
| ◇光催化材料 | ◇生物能源 |
| ◇环境资源与环境材料化学 | ◇新型可再生能源开发利用 |

欢迎相关领域专家学者和工程技术人员踊跃投稿, 来稿请注明“能源与环境材料”研究专栏。稿件通过专家评审后优先发表, 优稿优酬。

投稿平台: http://xuebao.sdust.edu.cn/index_z.asp

电子邮箱: zkchem@sdust.edu.cn, sdustzkb@163.com

联系电话: 0532-86057859

山东科技大学学报(自然科学版)编辑部