

0.3 MW CFB 燃煤烟气喷射 NH_4Br 改性稻壳焦 脱汞试验研究

谷小兵¹, 陶君¹, 耿新泽², 柳帅², 胡鹏², 卢锦程², 刘猛², 段钰锋²

(1. 大唐环境产业集团股份有限公司, 北京 100097; 2. 东南大学 能源与环境学院 能源热转换及其过程测控教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要:为研究燃煤烟气条件下, 喷射烟气温度和吸附剂喷射量对汞脱除效率的影响, 采用 1% 的 NH_4Br 溶液对稻壳焦浸渍改性, 制备 NH_4Br 改性稻壳焦 (Br-RHC) 脱汞吸附剂, 并通过比表面积及孔隙率分析仪对改性前后吸附剂的孔隙结构进行表征; 在 0.3 MW 燃煤循环流化床中试装置上进行了吸附剂烟道喷射脱汞试验。结果表明: 吸附剂改性后的比表面积、微孔容积与总孔容积均有一定程度的增加; 喷射脱汞效率随喷射量的增大而增加并趋于稳定, 喷射量由 0.3 kg/h 升高为 0.5 kg/h 时, 脱汞效率从 69.36% 升至 79.44%。喷射脱汞效率随烟气温度的升高而升高, 由 142 °C 的 57.74% 升高为 200 °C 的 79.48%。生物质稻壳焦经化学改性后可代替活性炭用于燃煤锅炉烟气喷射脱汞技术。

关键词: 改性稻壳焦; 燃煤烟气; 喷射脱汞; 循环流化床

中图分类号: X511

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2019)02-0120-06

Experimental study on flue gas mercury removal with injection of NH_4Br modified rice husk coke in a 0.3 MW CFB coal-fired facility

GU Xiaobing¹, TAO Jun¹, GENG Xinze², LIU Shuai², HU Peng², LU Jincheng², LIU Meng², DUAN Yufeng²

(1. Datang Environment Industry Group Co., Ltd., Beijing 100097, China; 2. Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to study the effect of flue gas injection temperature and adsorbent injection amount on mercury removal efficiency in coal-fired flue gas, 1% NH_4Br solution was used to impregnate and modify rice husk coke to prepare mercury removal adsorbent NH_4Br modified rice husk coke (Br-RHC). The pore structure of the adsorbent before and after modification was characterized by specific surface area and porosity analyzer, and the experiment of adsorbent injection removing mercury in the flue was carried out in a 0.3 MW coal-fired circulating fluidized bed combustor of pilot scale. The results show that the specific surface area, micropore volume and total pore volume of the adsorbent after modification increase to some extent. The efficiency of injection mercury removal increases with the increase of injection amount and tends to be stable. The mercury removal efficiency increases from 69.36% to 79.44% when the injection amount increases from 0.3 kg/h to 0.5 kg/h. The mercury removal efficiency of the injection process increases with the increase of flue gas temperature, it rose from 57.74% at 142 °C to 79.48% at 200 °C. It is verified that the chemical modified biomass rice husk char is a suitable alternative for activated carbon to be applied into the flue gas injection demercuration technology in coal-fired boilers.

Key words: modified rice husk coke; coal-fired flue gas; injection demercuration; circulating fluidized bed

0 引言

重金属汞作为燃煤烟气的第四大污染物, 具有剧

毒性、易迁移性、生物富集性和高度隐蔽性, 引起了世界范围内的广泛关注^[1]。尽管煤中汞的平均含量不高, 但巨大的煤炭消耗量使其成为最大的人为汞污染

收稿日期: 2019-01-03; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.19010303

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0600203)

作者简介: 谷小兵(1976—), 男, 河南漯河人, 高级工程师, 硕士, 主要从事燃煤电厂污染物控制技术研究。E-mail: guxb@dtcg.com.cn

引用格式: 谷小兵, 陶君, 耿新泽, 等. 0.3 MW CFB 燃煤烟气喷射 NH_4Br 改性稻壳焦脱汞试验研究[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(2): 120-125.

GU Xiaobing, TAO Jun, GENG Xinze, et al. Experimental study on flue gas mercury removal with injection of NH_4Br modified rice husk coke in a 0.3 MW CFB coal-fired facility[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(2): 120-125.



移动阅读

源^[2]。中国作为最大的煤生产国与消费国,则面临更严峻的汞污染现状。为有效控制燃煤汞排放,2011 年 7 月 29 日,中国环境保护部和国家质量监督检验检疫总局联合发布 GB 13223—2011《火电厂大气污染物排放标准》,首次正式对燃煤电厂汞排放实行监控,限值为 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$,已于 2015 年 1 月 1 日开始实施^[3],同年,北京市颁布了《锅炉大气污染物排放标准》,更是将这一限值严格规定为 $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ^[4]。

烟道活性炭喷射 (activated carbon injection, ACI) 是目前最成熟可行的控制燃煤烟气汞排放技术^[5],但 ACI 存在竞争吸附、温度域窄、成本高、再生能力差等问题^[6-7],研究并开发廉价高效的脱汞吸附剂已成为当前研究热点^[8]。稻壳焦作为农业废弃物热解所得生物质焦,具有与活性炭相似的发达孔隙结构,且来源广泛、储量丰富、清洁环保以及价格低廉,便于工业推广应用^[9]。化学改性的方法可在吸附剂表面形成有利于汞吸附的官能团,进而获得具有高效吸附能力的脱汞吸附剂^[10]。朱纯等^[9]在固定床上对卤化铵盐改性稻壳焦研究发现 1% NH_4Br 的改性效果最佳,改性后稻壳焦的汞吸附量提高了 10 倍;后续研究发现模拟烟气中 O_2 、 CO_2 、 NO 与 HCl 可提高其汞脱除效果,不同体积分数的 SO_2 对 NH_4Br 改性稻壳焦的汞吸附能力呈现先促进后抑制的趋势^[11];在此基础上姚婷等^[12]发现吸附态的 Hg 可能以 Hg-Br 化合物的形式吸附于吸附剂表面。余敏等^[13]发现 CO_2 、 H_3PO_4 活化后的生物质焦吸附 2 h 后还具有 80%~90% 以上汞吸附效率;周强等^[14]从动力学角度发现溴改性后活性炭表面活性位点 (Br 活性位点) 明显增加,强化了化学吸附作用进而提高汞的氧化脱除能力。因此 NH_4Br 改性稻壳焦在固定床试验台上具备良好汞脱除性能。为进一步探究在更加复杂的工程应用条件下该吸附剂的真正脱汞性能,本文选取 NH_4Br 改性稻壳焦为脱汞吸附剂,在 0.3 MW 循环流化床燃煤中试装置上进行吸附剂烟道喷射脱汞试验,研究喷射温度与喷射量对吸附剂喷射脱汞效率的影响。

1 试验系统及方法

1.1 0.3 MW CFB 燃煤中试装置与 ACI 系统

试验在东南大学 0.3 MW 循环流化床燃煤中试装置系统上进行,如图 1 所示。该试验装置系统主要由燃煤循环流化床 (CFB) 燃烧炉系统、SCR 脱硝系统、烟气喷射吸附剂脱汞系统 (ACI)、布袋除尘装置系统 (FF)、湿法烟气脱硫装置系统 (WFGD) 以及各种辅机等装置组成。

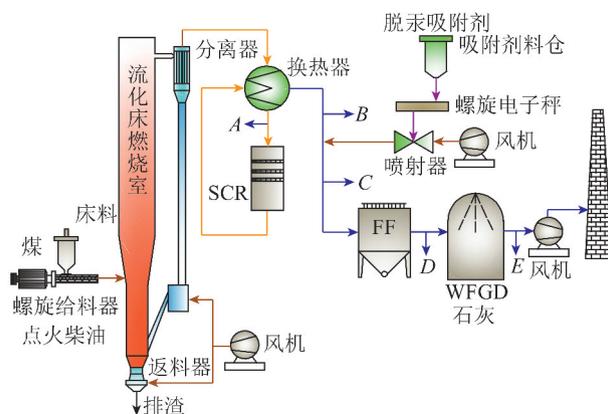


图 1 0.3 MW 燃煤循环流化床中试装置系统

Fig. 1 0.3 MW pipot scale coal-fired circulating fluidized bed combustion system

烟道吸附剂喷射脱汞系统 (ACI) 包括吸附剂料罐、吸附剂微量螺旋给料机、吸附剂喷射装置。将制备好的吸附剂储存于吸附剂料仓中,通过已标定好的螺旋给料机控制吸附剂的喷射量,最后经喷射风机与喷射器共同作用将吸附剂喷入烟道中;喷入脱汞吸附剂的烟气经过长约 8 m 的管道,以保证脱汞吸附剂与烟气有充足的接触与反应时间,最终进入 FF 除去烟气中的飞灰与脱汞吸附剂。图 1 中 B 点为 ACI 前烟气取样点,C 点为 ACI 后烟气取样点,以检测喷射前后烟气中 Hg^0 、 Hg^{2+} 、 Hg^p 的浓度及烟气组分等参数。

1.2 吸附剂制备及表征

试验采用的 NH_4Br 改性稻壳焦 (Br-RHC) 脱汞吸附剂具体改性步骤如下:将制备好的稻壳焦 (RHC) 破碎后过 0.037 4~0.075 0 mm 标准筛;然后按稻壳焦与 1% NH_4Br 溶液的质量比 1:10 混合并搅拌 6 h,将搅拌后的混合溶液静置 6 h 以完成浸渍改性;最后将改性好的吸附剂抽滤后于 45 °C 烘箱内干燥 10 h 备用。

稻壳焦改性前后的比表面积与孔隙结构采用 ASAP2020M 比表面积及孔容分析仪 (美国 Micromeritics 公司) 测定。

1.3 试验工况参数

工况参数设计见表 1。采用粒径 0.037 4~0.075 0 mm 的 Br-RHC 为脱汞吸附剂;控制吸附剂在烟道中的停留时间为 2.5 s (± 0.5 s);为探究 0.3 MW 循环流化床试验台上喷射温度与 Br-RHC 喷射量对脱汞效率的影响,控制喷射量 0.5 kg/h 不变,喷射温度分别为 142、167、200 °C (工况 1、2、3);控制喷射温度为 202 °C (± 2 °C) 稳定,喷射量分别为 0.3、0.5、0.7 kg/h (工况 3、4、5)。此外,本文烟气中汞形态浓度值均换算成 6% 干烟气氧浓度标准

工况,记录给煤量以用于汞质量平衡的计算,保证测试结果的准确性与可靠性。试验实际给煤量与烟气中 O_2 浓度等实测参数见表 1。

表 1 测试工况
Table 1 Test conditions

工况	喷射温度/ $^{\circ}C$	喷射量/ $(kg \cdot h^{-1})$	停留时间/s	烟气 O_2 浓度/%	给煤量/ $(kg \cdot h^{-1})$
1	142	0.5	3.0	10	33
2	167	0.5	2.6	9	42
3	200	0.5	2.2	9	52
4	203	0.3	2.5	11	39
5	204	0.7	2.5	11	36

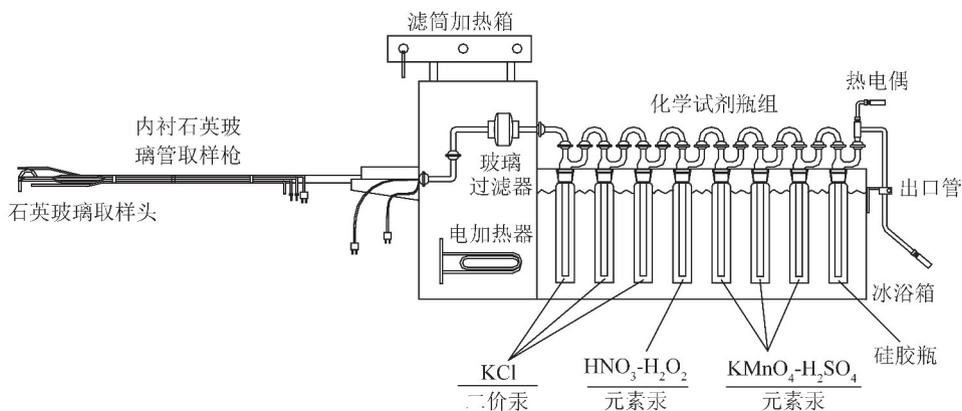


图 2 烟气汞等速取样系统(OHM)

Fig. 2 Flue gas mercury sampling system diagram (OHM)

采用 OHM 方法进行汞取样的同时,每隔 0.5 h 采集一次入炉煤、底渣、FF 飞灰等固体样品,固体样品中的汞含量使用 Hydra II C 全自动汞分析仪 (Leeman, 美国) 测定,最低检出限为 0.001 ng; 采用傅里叶变换红外光谱分析仪在线检测 O_2 等烟气组分,为确保测试精度及减少环境气氛的影响,测试过程中采用金属过滤网及滤膜对烟气进行除灰过滤处理,并全程伴热防止水汽在管路中冷凝,避免对烟气组分造成影响。

1.5 吸附剂喷射脱汞评价方法

0.3 MW 循环流化床试验台 Br-RHC 喷射脱汞效率采用单质汞脱除率 $\eta_{Hg^0}(\%)$ 、价态汞脱除率 $\eta_{Hg^{2+}}(\%)$ 与总汞脱汞效率 $\eta_{Hg^T}(\%)$ ($Hg^T = Hg^0 + Hg^{2+}$) 来评价,计算公式为

$$\eta_{Hg^0} = \frac{C_{Hg_1^0} - C_{Hg_2^0}}{C_{Hg_1^0}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\eta_{Hg^{2+}} = \frac{C_{Hg_1^{2+}} - C_{Hg_2^{2+}}}{C_{Hg_1^{2+}}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\eta_{Hg^T} = \frac{C_{Hg_1^T} - C_{Hg_2^T}}{C_{Hg_1^T}} \times 100\% \quad (3)$$

1.4 汞测试方法

为保证取样数据的同时性与准确性,在 ACI 前后 (B、C 点) 同时进行烟气等速取样,取样方法采用美国 EPA 推荐使用的 OHM 标准方法 ASTM D 6784—2002^[15]。OHM 烟气汞等速取样系统如图 2 所示,取样枪后的玻璃纤维滤筒用于捕获烟气中的 Hg^P , Hg^{2+} 由 3 个相邻盛有 1 mol/L KCl 溶液的吸收瓶吸收, Hg^0 则由 1 个盛有 5% HNO_3 -10% H_2O_2 和 3 个盛有 10% H_2SO_4 -4% $KMnO_4$ 的组合吸收瓶吸收。取样完成后对所取样品进行恢复和消解,使用 Hydra AA 全自动测汞仪 (Leeman, 美国) 进行汞含量测定,最低检出限为 1 ng/L。

式中, $C_{Hg_1^0}$ 、 $C_{Hg_1^{2+}}$ 与 $C_{Hg_1^T}$ 分别为 ACI 前烟气中 Hg^0 , Hg^{2+} 与 Hg^T 浓度, $\mu g/m^3$; $C_{Hg_2^0}$ 、 $C_{Hg_2^{2+}}$ 与 $C_{Hg_2^T}$ 分别为 ACI 后烟气中 Hg^0 , Hg^{2+} 与 Hg^T 的浓度, $\mu g/m^3$ 。

2 结果与分析

2.1 BET 表征结果

表 2 为 RHC 改性前后的孔结构参数。由表 2 可知, Br-RHC 的 BET 比表面积、微孔容积与总孔容积均提高 10% 左右,平均孔径略有提高,而微孔容积率却略降低。这可能是由于改性过程中 RHC 表面的碎屑被洗涤冲刷,无机附着物溶解于改性溶液中,使更多的孔隙结构裸露出来;同时,改性过程中氧化性溶液与 RHC 表面反应生成新的孔隙结构使得吸附剂的比表面积、总孔容积以及微孔容积均有一定程度的增加。另一方面,由于 Br 等活性组分负载到 RHC 微孔表面,占据了部分微孔容积,致使 Br-RHC 的微孔容积率略降低。

2.2 煤样分析

煤样的工业分析和元素分析结果见表 3,煤中汞元素与氯元素含量会对烟气中汞含量和形态分布

有一定影响^[16]。由表 3 可知,煤样汞含量为 62.84 $\mu\text{g}/\text{kg}$,远低于我国燃煤平均汞含量 220 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[17],

属低汞煤。硫元素与氯元素含量分别 1.45% 与 0.05%,属中硫低氯煤^[18-19]。

表 2 改性前后吸附剂孔结构参数

Table 2 Pores structure parameters of adsorbent before and after modification

样品	BET 比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	微孔容积/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	总孔容积/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	微孔容积率/%	平均孔径/nm
RHC	642.29	0.245 6	0.357 3	68.7	2.225 3
Br-RHC	706.24	0.268 7	0.399 3	67.3	2.261 9

表 3 煤样工业与元素分析

Table 3 Industry analysis and elemental analysis of coal sample

工业分析/%				元素分析							
M_{ar}	A_{ar}	V_{ar}	FC_{ar}	$C_{\text{ar}}/\%$	$H_{\text{ar}}/\%$	$O_{\text{ar}}/\%$	$N_{\text{ar}}/\%$	$S_{\text{ar}}/\%$	$Cl_{\text{ar}}/\%$	$\text{Hg}/(\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	
4.27	25.73	27.75	42.83	56.03	3.63	8.06	0.83	1.45	0.05	62.84	

2.3 汞质量平衡

由于测试过程中锅炉运行参数变化造成耗煤量、烟气流量波动,以及人为误差等因素,认为汞质量平衡率在 70% ~ 130% 时,测试结果可信^[20]。汞质量平衡如图 3 所示。由图 3 可知,各试验工况下 ACI 装置前后与全系统的平衡率在 71.46% ~ 129.31%,均满足误差要求,测试结果准确可靠。

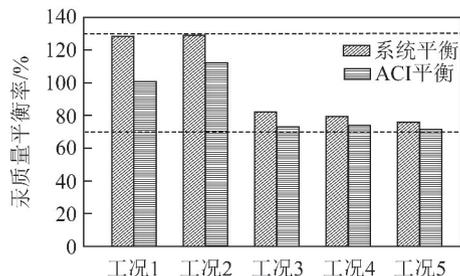


图 3 汞质量平衡

Fig. 3 Mass balance of mercury

2.4 喷射量的影响

喷射量对 Br-RHC 喷射脱汞效率的影响如图 4 所示。3 种工况下 ACI 前烟气中 Hg 主要以 Hg^{2+} 为主, Hg^{p} 次之, Hg^0 含量最少。这是由于本试验台 SCR 脱硝装置中为新型的脱硝协同脱汞双效催化剂^[21],在去除烟气中 NO_x 的同时,还可将烟气中 Hg^0 氧化为 Hg^{2+} ,使 Hg^{2+} 成为 ACI 前烟气汞中的主要形式。此外 0.3 MW 循环流化床为小型试验,煤燃烧效率较低,飞灰中未燃尽碳(UBC)含量较高,可将烟气中 $\text{Hg}^0/\text{Hg}^{2+}$ 转换为 Hg^{p} ^[22]。ACI 后烟气中 Hg^{2+} 占比显著降低, Hg^0 含量明显减少, Hg^{p} 含量大幅上升,最高可达 83.27%。说明烟气中气态形式的 Hg^0 与 Hg^{2+} 均被 Br-RHC 吸附并转换为 Hg^{p} ,进而被后续的除尘装置脱除。

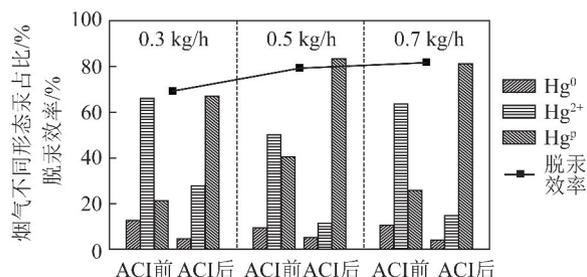


图 4 喷射量对喷射脱汞效率的影响

Fig. 4 Effect of injection amount on the efficiency of injection mercury removal

活性炭喷射试验中,一般采用碳汞比^[23]作为衡量 ACI 系统喷射量的评价指标。喷射量为 0.3、0.5、0.7 kg/h 对应的碳汞比分别为 10 000、16 000、21 000。喷射量对喷射脱汞效率的影响如图 4 所示。由图 4 可知,随喷射量升高,脱汞效率先升高后趋于稳定。喷射量由 0.3 kg/h 升至 0.5 kg/h 时,脱汞效率从 69.36% 升至 79.44%;喷射量升至 0.7 kg/h 时,脱汞效率为 81.84%,仅升高了 2.4%。说明在一定区间内喷射量越大,碳汞比越高,有利于提高脱汞效率;但喷射量过大,过高的碳汞比对脱汞效率的促进作用不明显。根据以上试验结果并结合喷射高效性与经济性综合分析认为最佳 Br-RHC 喷射脱汞碳汞比为 16 000。

2.5 喷射温度的影响

采用 0.5 kg/h 喷射量(碳汞比 16 000)探究喷射温度对吸附剂喷射脱汞效率的影响,结果如图 5 所示。升高温度对烟气中 Hg^{2+} 的脱除效果有促进作用, Hg^{2+} 脱除率由 142 $^{\circ}\text{C}$ 的 52.88% 升高为 200 $^{\circ}\text{C}$ 的 83.31%,相反,烟气中 Hg^0 的脱除率随温度的升高由 68.22% 降低为 58.94%;综合来看 ACI 装置对

于烟气中气相总汞的脱除效率随喷射温度升高而升高,由142℃的57.74%升高为200℃的79.48%。而姚婷等^[12]试验结果显示Br-RHC对 Hg^0 脱除效率不受吸附温度的影响,两者结果不相符。

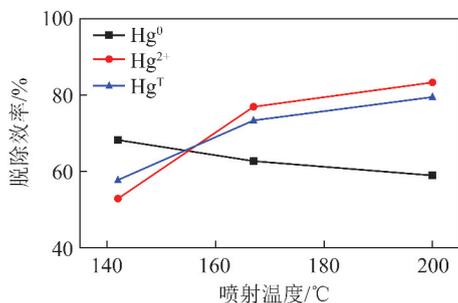


图5 喷射温度对 Hg^0 、 Hg^{2+} 、 Hg^T 脱除效率的影响

Fig. 5 Effect of injection temperature on the removal efficiency of Hg^0 , Hg^{2+} , Hg^T

ACI前烟气中 Hg^0 与 Hg^{2+} 占比见表4。由表4可知,随温度升高,ACI前烟气中 Hg^{2+} 占比由68.30%升至84.27%,而 Hg^0 正好相反,占比由31.70%降为15.73%。这可能是由于随烟气温度升高,SCR装置中双效催化剂对Hg的氧化效率增大,导致烟气中 Hg^{2+} 占比增加^[21]。

表4 ACI前烟气中 Hg^0 与 Hg^{2+} 占比

Table 4 Ratio of Hg^0 and Hg^{2+} in flue gas before ACI

喷射温度/°C	Hg^0 占比/%	Hg^{2+} 占比/%
142	31.70	68.30
167	25.14	74.86
200	15.73	84.27

姚婷等^[12]固定床试验的汞源为 Hg^0 ,而本文燃煤烟气中汞有3种赋存形态,且温度越高烟气中 Hg^{2+} 占比越高, Hg^{2+} 脱除率也越高^[24],进而促进了总汞脱除率的提高。此外,真实烟气条件下其烟气组分、烟气流场等远比固定床模拟烟气条件复杂得多,因此温度对Br-RHC喷射脱汞的影响规律应进行更深层次的探讨。

3 结 论

1)利用0.3 MW燃煤循环流化床中试装置研究 NH_4Br 改性稻壳焦(Br-RHC)脱汞吸附剂在不同喷射温度与喷射量条件下的喷射脱汞效率及其影响因素,发现在CFB燃煤烟气条件下,ACI前烟气中汞的主要形态为 Hg^{2+} ,ACI后烟气中的 Hg^0 与 Hg^{2+} 被脱汞吸附剂Br-RHC有效吸附并转化为颗粒态的汞(Hg^p);随着喷射量增大,脱汞效率呈先升高后平稳的趋势,卤素改性稻壳焦喷射脱汞吸附剂Br-RHC

表现出较高的喷射脱汞效率,其经济高效的碳汞比为16 000,与之对应的喷射脱汞效率可达79.44%。

2)ACI对烟气中总汞的脱除效率随烟气喷射温度的升高而增加,200℃时达到79.48%。喷射温度的升高对 Hg^{2+} 和总汞的脱除有促进作用,但对 Hg^0 有抑制作用。考虑到吸附温度对物理和化学吸附的复合影响以及烟气组分的作用,其影响机制还需在今后试验中进一步研究。

参考文献 (References):

- [1] WANG S, ZHANG L, ZHAO B, et al. Mitigation potential of mercury emissions from coal-fired power plants in China[J]. Energy & Fuels, 2012, 26(8): 4635-4642.
- [2] 李春峰,段钰锋,汤红健,等. CaO对汞的选择性吸附及 SO_2 毒化特性[J]. 化工学报, 2017, 68(9): 3565-3572.
LI Chunfeng, DUAN Yufeng, TANG Hongjian, et al. Mercury selective adsorption characteristics and SO_2 poison performance on CaO [J]. CIESC Journal, 2017, 68(9): 3565-3572.
- [3] 环境保护部,国家质量监督检验检疫总局. 火电厂大气污染物排放标准:GB 13223—2011[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2011.
- [4] 北京市环境保护局,北京市质量技术监督局. 锅炉大气污染物排放标准:DB 11/139—2015[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2015.
- [5] SJOSTROM S, DURHAM M, BUSTARD C J, et al. Activated carbon injection for mercury control: Overview [J]. Fuel, 2010, 89(6): 1320-1322.
- [6] 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.
- [7] 周强,段钰锋,卢平. 燃煤电厂吸附剂喷射脱汞技术的研究进展[J]. 化工进展, 2018, 37(11): 4460-4467.
ZHOU Qiang, DUAN Yufeng, LU Ping. Research progress on in-duct mercury removal by sorbent injection in power plant [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(11): 4460-4467.
- [8] 许静,段钰锋,姚婷,等. 可再生脱汞吸附剂的研究进展[J]. 化工进展, 2017, 36(S1): 442-448.
XU Jing, DUAN Yufeng, YAO Ting, et al. Research progress on regenerable mercury sorbents [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(S1): 442-448.
- [9] 朱纯,段钰锋,尹建军,等. 卤化铵盐改性生物质稻壳焦的汞吸附特性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(1): 99-104.
ZHU Chun, DUAN Yufeng, YIN Jianjun, et al. Mercury adsorption by rice husk char sorbents modified by ammonium halide [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43(1): 99-104.
- [10] ZENG H, JIN F, GUO J. Removal of elemental mercury from coal combustion flue gas by chloride-impregnated activated carbon [J]. Fuel, 2004, 83(1): 143-146.

- [11] 朱纯,段钰锋,冒咏秋,等. 烟气组分对氯化铵改性活性炭汞吸附特性的影响[J]. 工程热物理学报,2013,34(10):1982-1985.
ZHU Chun, DUAN Yufeng, MAO Yongqiu, et al. Effect of flue gas components on mercury adsorption by ammonium chloride modified activated carbon[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2013,34(10):1982-1985.
- [12] 姚婷,段钰锋,朱纯,等. 温度和氧含量对 NH_4Br 改性稻壳焦汞氧化吸附特性的影响[J]. 化工学报,2016,67(4):1467-1474.
YAO Ting, DUAN Yufeng, ZHU Chun, et al. Effect of temperature and oxygen content on Hg^0 oxidation and adsorption by rice husk char impregnated with NH_4Br [J]. CIESC Journal,2016,67(4):1467-1474.
- [13] 余敏,段钰锋,朱纯,等. $\text{CO}_2/\text{H}_3\text{PO}_4$ 活化与 NH_4Br 改性稻壳焦的脱汞性能实验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版),2014,44(2):321-327.
SHE Min, DUAN Yufeng, ZHU Chun, et al. Experimental study on mercury adsorption performances of rice husk chars activated by $\text{CO}_2/\text{H}_3\text{PO}_4$ and modified by NH_4Br [J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition),2014,44(2):321-327.
- [14] 周强,冒咏秋,段钰锋,等. 溴素改性活性炭汞吸附特性研究[J]. 工程热物理学报,2014,35(12):2531-2534.
ZHOU Qiang, MAO Yongqiu, DUAN Yufeng, et al. Studies on mercury adsorption on bromine modified activated carbon[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2014,35(12):2531-2534.
- [15] 段钰锋,江贻满,杨立国,等. 循环流化床锅炉汞排放和吸附实验研究[J]. 中国电机工程学报,2008,28(32):1-5.
DUAN Yufeng, JIANG Yiman, YANG Liguang, et al. Experimental study on mercury emission and adsorption in circulating fluidized bed boiler[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(32):1-5.
- [16] TANG N, PAN S W. Study on mercury emission and migration from large-scale pulverized coal fired boilers[J]. Journal of Fuel Chemistry & Technology,2013,41(4):484-490.
- [17] BELKIN H E, FINKELMAN R B, ZHENG B. Mercury in People's Republic of China coal[J]. The Geological Society of America Abstract,2005,37(7):48.
- [18] 姜英. 我国煤中氯的分布及其分级标准[J]. 煤质技术,1998(5):7-8.
- [19] 高连芬,刘桂建,CHOU Chenlin,等. 中国煤中硫的地球化学研究[J]. 矿物岩石地球化学通报,2005,24(1):79-87.
GAO Lianfen, LIU Guijian, CHOU Chenlin, et al. The study of sulfur geochemistry in Chinese coals[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry,2005,24(1):79-87.
- [20] ZHAO S, DUAN Y, YAO T, et al. Study on the mercury emission and transformation in an ultra-low emission coal-fired power plant[J]. Fuel,2017,199:653-661.
- [21] LI H, WU C, LI Y, et al. $\text{CeO}_2\text{-TiO}_2$ catalysts for catalytic oxidation of elemental mercury in low-rank coal combustion flue gas[J]. Environmental Science & Technology,2011,45(17):7394-7400.
- [22] LÓPEZ-ANTÓN M A, DÍAZ-SOMOANO M, MARTÍNEZ-TARAZONA M R. Retention of elemental mercury in fly ashes in different atmospheres[J]. Energy & Fuels,2007,21(1):99-103.
- [23] 丁建东,陈博,刁永发,等. 碳汞比对燃煤烟气中 Hg 脱除影响的实验研究[J]. 环境工程,2012,30(1):58-61.
DING Jiandong, CHEN Bo, DIAO Yongfa, et al. The experimental study on the influence of C/Hg ratio on removal of elemental mercury in simulated flue gas[J]. Environmental Engineering,2012,30(1):58-61.
- [24] YAN N, LIU S, CHANG S, et al. Method for the study of gaseous oxidants for the oxidation of mercury gas[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research,2005,44(15):5567-5574.