仅限内部学习使用,请勿外传!

第 51 卷 第 10 期	热力发电	Vol.51 No.10
2022年10月	THERMAL POWER GENERATION	Oct. 2022

燃煤烟气脱硝喷卤素协同脱汞效果评估

黄见勋1, 尹子骏2, 马云龙3, 苏 胜2, 王乐乐3, 鲍 强3. 张庆文4,向 军2, 雷嗣远3, 叶顺长1 (1.厦门华夏国际电力发展有限公司, 福建 厦门 361026; 2.煤燃烧国家重点实验室(华中科技大学),湖北 武汉 430074: 3.西安热工研究院有限公司苏州分公司, 江苏 苏州 215153; 4.华能上海石洞口第二电厂,上海 200942)

[摘 要]为进一步降低现有燃煤机组烟气污染物排放质量浓度,实现大气污染物的协同深度治理, 选取现役的选择性催化还原(SCR)催化剂作为研究对象,对不同条件下 HCl/HBr 等卤素成 分对现役 SCR 催化剂脱硝协同汞氧化效果进行实验研究,并设计卤素溶液喷射系统,依据 实验室研究结果,在现场脱硝过程中进行了不同浓度 NH4Cl/NH4Br 溶液喷射的工程应用与 试验。结果表明:脱硝过程合理添加 NH4Cl 或 NH4Br 溶液均可有效提高现役 SCR 脱硝催化 剂对单质汞氧化能力,HCl/HBr共同作用可以提高单一HCl在SCR催化剂表面对单质汞的 氧化效果,进一步通过脱硝、下游脱硫、除尘等环保设施实现汞污染物的高效协同脱除。

「关 键 词 SCR 烟气脱硝;催化剂汞氧化;卤素喷射;协同脱除;工程示范 [中图分类号] TK16 [文献标识码] A [DOI 编号] 10.19666/j.rlfd.202203038

「引用本文格式] 黄见勋, 尹子骏, 马云龙, 等, 燃煤烟气脱硝喷卤素协同脱汞效果评估[J]. 热力发电, 2022, 51(10): 194-200. HUANG Jianxun, YIN Zijun, MA Yunlong, et al. Effect evaluation of synergistic mercury removal by halogen injection and gas denitrification in coal-fired power plant[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(10): 194-200.

Effect evaluation of synergistic mercury removal by halogen injection and gas denitrification in coal-fired power plant

HUANG Jianxun¹, YIN Zijun², MA Yunlong³, SU Sheng², WANG Lele³, BAO Qiang³, ZHANG Qingwen⁴, XIANG Jun², LEI Siyuan³, YE Shunchang¹ (1. Xiamen Huaxia International Power Development Co., Ltd., Xiamen 361026, China;
 State Key Laboratory of Coal Combustion (Huazhong University of Science & Technology), Wuhan 430074, China;

3. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou Branch, Suzhou 215153, China;

4. Huaneng Shanghai Shidongkou No.2 Power Plant, Shanghai 200942, China)

Abstract: In order to further reduce the emission mass concentration of pollutants from flue gas of existing coalfired units and realize coordinated and deep treatment of air pollutants, the active selective catalytic reduction (SCR) catalyst was selected as the research object, and the influence mechanism of halogen components such as HCl/HBr on the denitration synergistic mercury oxidation performance of the SCR catalyst under different conditions was systematically studied. Moreover, the halogen solution injection system was designed. According to the research result in laboratory, the engineering application and test using NH₄Cl/NH₄Br solution injection were carried out in the field denitration process. The results show that, reasonable addition of NH₄Cl or NH₄Br solution during the denitration process can effectively improve the mercury oxidation capacity of the existing catalyst. The combined action of HCl/HBr can improve the oxidation effect of single HCl on elemental mercury on the catalyst surface. Furthermore, through the denitration, downstream desulfurization, dust removal and other environmental protection facilities, efficient synergistic removal of mercury pollutants can be realized.

Key words: SCR flue gas denitration; catalyst mercury oxidation; halogen injection; simultaneous removal; demonstration project

收稿日期: 2022-03-02

微信搜

右上角唇公众号二维码或者在微信中搜索公众号"舜业之声"关注神/ 图整公众号 "找到去下角"会员中心",広街往景会员、注意注册会员时信息尾可能详尽。 、电料院、设计院好友填写自己目前从事的专业或者大学学习的专业。并州熟电产业 它的主营业多成产品。群办事处后期会权服会员注册信息建立群成员通讯录、行业专



国家白蛛科学基金联合基金项目(U20A2030 roject of National Natural Science Four ·搜 (1972),男,工程师,主要研究方向



有限公司科技项目(2020-KJ-007) 302); Power Technology Project of SDIC (2020-KJ-(述修维护, hjx.sypp@163.com。



第10期

随着我国对环保监管力度的增强, 燃煤烟气中 汞等污染物的排放标准越来越严格。由于 Hg⁰ 具有 高挥发性和难溶性,现有污染物控制装置很难将 其高效脱除[1]。相关研究表明, 卤素可有效促进燃 煤烟气中的 Hg^0 向 Hg^{2+} 的转化,从而促进 Hg^0 脱 除^[2-4]。Fry 等人^[5]发现初始汞质量浓度为 25 µg/m³, 向反应气体中添加体积分数为 500 µL/L HCl 时,单 质汞全部都被氧化。Sliger 等人^[6]针对 Hg⁰ 形态转化 过程的模拟计算表明, Cl 原子对 Hg⁰ 的氧化作用影 响显著, Cl 原子会与 Hg⁰反应生成中间产物 HgCl, 随后与 Cl、Cl₂、HCl 反应生成最终产物 HgCl₂。也 有学者研究发现卤素中 Br 对燃煤烟气汞的氧化效 果比 Cl 更好[7-9]。Granite 等人[10]提出单质汞在催化 剂表面的氧化过程遵守 Mars-Maessen 机理,并认为 气相中 Hg⁰会首先吸附在催化剂的表面,形成吸附态 Hg⁰,催化剂表面的晶格氧化剂(Br 或 Cl)会与吸附 态 Hg⁰反应并消耗晶格氧,从而实现 Hg⁰的氧化。

现有研究表明,烟气中卤素元素虽有利于 SCR 烟气脱硝过程中汞的协同氧化,但针对电厂现役的 SCR 烟气脱硝催化剂,卤素对汞协同氧化性能的影响尚缺乏深入系统的研究。为此,本文首先对不同 反应条件下卤素对典型现役 SCR 催化剂汞氧化特

性影响进行实验研究,揭示烟气温度、烟气中 HCl、 HBr 等浓度等因素对催化剂汞氧化性能的影响机 制; 然后,设计 SCR 烟气脱硝过程氨基喷射系统, 将含卤素溶液热解气化后进行卤素添加 SCR 烟气 脱硝协同汞氧化技术工程应用与试验。

1 实验条件与方法

该实验在催化剂脱硝协同汞氧化性能测试实 验台架进行。实验系统如图1所示,由供气系统、 固定床反应系统以及尾气在线监测装置等组成。混 合气体组成为N₂、NO、NH₃、O₂、HCl(HBr)以 及Hg⁰蒸气,各组分气体通过质量流量计控制,之 后在混气瓶中混合均匀后通入反应器中反应。

汞蒸气是由汞渗透管提供的,将汞渗透管放入 置于恒温水浴锅的U型管中,通过控制水温得到实 验所需浓度的汞蒸气,期间用 N₂ 作为载气将汞蒸 气引入混气瓶。固定床反应器放置于立式加热炉 中,催化剂放置在反应器中间的石英筛上,反应温 度由加热炉上的温度控制器控制。KM9106 烟气分 析仪用于在线测量反应前后尾气中 NO_x 的质量浓 度,VN3000 汞在线检测仪可在线监测尾气中 Hg⁰ 的质量浓度。





实验中利用 VM-3000 在线测汞仪和恒温加热 水浴锅确定入口的 Hg⁰质量浓度为 40 μ g/m³,反应 时间为 1 h,待稳定后记录尾部 VM-3000 在线测汞 仪和 KM9106 烟气分析仪的数据。反应过程 NO_x转 化率 η_{NO_x} 、Hg⁰脱除率 η_{Hg0} 根据以下公式计算:

$$\eta_{\text{NO}_x} = \frac{\psi_{\text{in}}(\text{NO}_x) - \psi_{\text{out}}(\text{NO}_x)}{\psi_{\text{in}}(\text{NO}_x)} \times 100\%$$
(1)

$$\eta_{\rm Hg^0} = \frac{\psi_{\rm in}({\rm Hg^0}) - \psi_{\rm out}({\rm Hg^0})}{\psi_{\rm in}({\rm Hg^0})} \times 100\%$$
(2)

式中:反应器入口和出口 NO_x的质量浓度用 $\psi_{in}(NO_x)$ 和 $\psi_{out}(NO_x)$ 表示;反应器入口和出口的单 质汞 Hg⁰的质量浓度用 $\psi_{in}(Hg^0)$ 和 $\psi_{out}(Hg^0)$ 表示。 Hg⁰表示单质汞,Hg²⁺表示气态二价汞,下文中提到 的 Hg^P为颗粒态汞,Hg^T为总汞。

实验过程中选取电厂现役的催化剂,催化剂的 结构为蜂窝状,并对催化剂进行了 BET、FT-IR、 NH₃-TPD 以及 H₂-TPR 的表征。

http://rlfd.tpri.com.cn

超星·期刊

196

2 实验结果与讨论

2.1 SCR 催化剂 Hg⁰氧化性能

该实验选取 280~400 ℃的 5 个反应温度,反应 气体组成为 500 µL/L NO、500 µL/L NH₃、5% O₂、 40 µg/m³ Hg⁰和 N₂ (作为平衡气),空速为 50 000 h⁻¹, 气体总流量为 1 L/min,催化剂质量 1.2 g。催化剂样 品在不同温度下对单质汞氧化效率如图 2 所示。由 图 2 可以看出:温度从 280 ℃升至 310 ℃时,Hg⁰ 氧化率基本不变,60 min 时稳定在 80%左右;当温 度高于 310 ℃时,Hg⁰ 的氧化率随着温度的升高逐 渐降低,当温度升高至 400 ℃时,Hg⁰氧化率在 30% 左右。该结果表明,温度是影响单质汞氧化的重要因 素。温度过高一方面会使已氧化的 HgO 发生分解反 应生成 Hg⁰,另一方面会抑制催化剂表面的物理和化 学吸附,二者都会致使单质汞的氧化效率降低^[11-12]。



图 2 不同温度下催化剂的单质汞氧化率 Fig.2 The mercury oxidation rate of catalyst at different temperatures

2.2 HCl 体积分数对催化剂单质汞氧化性能的影响

该实验选取 10~40 μL/L 中的 4 个 HCl 体积分数,反应温度为 340 ℃。不同 HCl 体积分数条件下 实验结果如图 3 所示。





由图 3 可以看出,在烟气中存在 O₂的情况下, HCl 的存在对单质汞的氧化有着促进作用,Hg⁰的 氧化率随着 HCl 体积分数的增加而增加。此外,当 烟气中没有 HCl 时,汞氧化也同时发生,当 HCl 的 体积分数从 0 增加到 40 μL/L,Hg⁰ 的氧化率从 65% 增加到 90%左右。

由于 SCR 催化剂具有较大的比表面积,其表面 存在大量的活性位点。烟气中 HCl 吸附到 SCR 催 化剂上以后,会与其表面的活性位点形成活性 Cl 原 子^[13],进而将 Hg⁰氧化成 Hg²⁺。研究中对 10 μL/L HCl 与 10 μL/L HBr 混合作用实验条件下的催化剂 表面积进行了分析,对比结果见表 1。由表 1 可知, 反应后催化剂的比表面积和孔径都有所降低。这表 明单质汞和 HgCl₂ 会通过物理或者化学作用吸附在 催化剂表面,从而降低了催化剂的比表面积,这可 能会影响催化剂对还原剂 NH₃ 的吸附。

表 1 反应前后催化剂的比表面积与孔径 Tab.1 Specific surface area and pore size of the catalyst before and after reaction

催化剂	比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	孔径/nm
作用前	49.000	22.731
HCl 作用后	48.477	21.194
HBr 作用后	45.410	20.637
HCl 和 HBr 共同作用后	45.018	20.434

2.3 HBr 体积分数对催化剂单质汞氧化性能的影响

该实验选取 10~30 μL/L 间的 3 个 HBr 体积分数,反应温度为 340 ℃。不同 HBr 体积分数下实验 结果如图 4 所示。由图 4 可见,与 HCl 的结果类 似,在烟气中存在 O₂ 的情况下,HBr 的存在对单质 汞氧化的促进作用明显,Hg⁰ 的氧化率随着 HBr 体 积分数的增加而增加。当 HBr 体积分数从 0 增加到 30 μL/L,Hg⁰ 的氧化率从 65%增加到 95%左右。



图 4 不同 HBr 体积分数下催化剂的单质汞氧化率 Fig.4 The mercury oxidation rate of catalyst with different HBr volume fractions

http://rlfd.tpri.com.cn

HBr 对单质汞氧化效果比 HCl 更好, 其原因为 烟气中 HBr 能够更有效的分解^[14], 进而得到氧化性 和活性更高 Br 原子或者 Br₂ 分子。由于 SCR 催化 剂表面有大量的活性中心点位, 烟气中的 HBr 吸附 到 SCR 催化剂上以后, 与其表面的活性中心点位形 成活性 Br 原子, Hg⁰ 首先被 Br 原子氧化成 HgBr, 再被 Br₂氧化为 HgBr₂。

表1数据显示,反应后催化剂的比表面积和孔 径都有所降低,这表明单质汞和 HgBr₂会吸附在催 化剂表面,从而降低了催化剂比表面积。

2.4 HCl/HBr 共同作用对催化剂单质汞氧化性能的 影响

该实验选取 10 µL/L HCl 和 10 µL/L HBr 组成 的混合气体,反应温度为 340 ℃。将实验中 10 µL/L HCl 与 10 µL/L HBr 共同作用的催化剂单质汞氧化 率与 20 µL/L HCl 和 20 µL/L HBr 单独分别作用下 的催化剂单质汞氧化率进行对比,实验结果如图 5 所示。由图 5 可知,10 µL/L HCl 与 10 µL/L HBr 混 合作用催化剂比 20 µL/L HCl 作用催化剂对单质汞 的氧化效率好,与 20 µL/L HBr 的氧化效果基本相 同。这表明,HCl/HBr 共同作用下可以提高单一 HCl 或 HBr (尤其是 HCl) 在催化剂表面对单质汞的氧 化效果。





由表1可知,反应后催化剂的比表面积和孔径 都有所降低,这表明单质汞和含汞的化合物会吸附 在催化剂表面,从而降低催化剂的比表面积。对比 发现,HBr 单独作用后和 HCl 与 HBr 共同作用后催 化剂比表面积和孔径均小于 HCl 作用后,这表明更 多的汞或者含汞化合物吸附在了催化剂的表面。可 见,相同体积分数下 HBr 对催化剂的汞氧化能力强 于 HCl, HCl 与 HBr 混合作用催化剂比 HCl 单独作 用催化剂对单质汞的氧化效率更高。

为了更加清楚揭示催化剂表面官能团对单质 汞氧化的影响,对 10 μL/L HCl 和 10 μL/L HBr 共 同作用后催化剂进行了红外光谱分析,结果如图 6 所示。波长 1 204 cm⁻¹ 处的吸收峰对应为 V=O 键的 振动,波长 1 638 cm⁻¹和 3 530 cm⁻¹ 处的吸收峰分 别为 HOH 和 V-OH 键的振动所致^[15]。



图 6 添加 HCl 和 HBr 反应前后催化剂的红外光谱 Fig.6 The infrared spectrum of catalyst before and after adding HCl and HBr

由图 6 可见,当催化剂在通入 HCl 和 HBr 反应之后 V=O 键的振动均变弱,这是由于 HCl 和 HBr 都吸附在钒基催化剂的 V=O 上,并与其反应生成钒氯化合物以及钒溴化合物。而 HCl 和 HBr 共同作用后的催化剂红外光谱显示反应后 V=O 键的振动并没有明显的减弱,由此可知当 HCl 和 HBr 同时通入反应器后,HCl 和 HBr 并没有先直接和钒基催化剂的 V=O 发生反应,而可能是 HCl 和 HBr 在高温有氧的情况下自身发生了反应。相关研究^[16]也发现,HBr 可与 HCl、O₂反应生成一种中间过渡化合物 BrCl,BrCl 很不稳定且化学反应性很强,其对汞的氧化能力高于 HCl。反应方程式为:

$$HBr + HCl + 1/2O_2 \rightarrow BrCl + H_2O$$
(3)

 $Br_2 + HCl \rightarrow BrCl + HBr$ (4)

$$2Hg + BrCl \rightarrow HgBr_2 + HgCl_2$$
 (5)

由上述研究结果可知,单独作用下 HBr 对催化剂 上汞的氧化能力强于 HCl,而 HCl/HBr 共同作用下可 以提高单一 HCl 在催化剂表明对单质汞的氧化效果。 这是由于 HBr 可与 HCl、O₂反应生成 BrCl等中间过 度化合物, BrCl 很不稳定且化学反应性很强,其对汞 的氧化能力高于 HCl,从而促进了单质汞的氧化。

3 工程应用与试验

3.1 试验方法

198

基于以上实验研究,进一步针对一台 300 MW 燃煤锅炉的 SCR 烟气脱硝系统,以 NH4Cl、NH4Br 作为氧化剂配置卤素溶液,同时利用脱硝上游热烟 气,将设计的混合器内卤素溶液加热气化分解,生 成 HCl、HBr 和 NH₃,注射喷入氨稀释风管道,再 通过喷氨格栅进入脱硝反应器内。该方法提供 SCR 催化剂氧化单质汞所需卤素气体外,同时代替一部 分 NH₃基还原剂,具有同时脱硝脱汞作用。卤素溶 液输送喷射流程如图 7 所示。



图 7 卤素溶液输送喷射系统流程 Fig.7 Flow chart of the halogen solution transportation and injection system

现场烟气脱硝 SCR 催化剂对 Hg⁰氧化效果及 汞污染物的迁移规律测试在锅炉燃用常用煤质的 条件下进行,试验时机组负荷为 280 MW。各工况 下分别测试 SCR 烟气脱硝装置进出口、低温省煤器 入口、电除尘器出口、脱硫出口、湿式电除尘器出 口(烟囱入口)的 Hg 污染物质量浓度。根据现场 条件以及测试要求,共进行了 8 个工况试验。其中, T-00 为不喷卤素情况下的基准工况,烟气中本身 HCl 体积分数约 3 μL/L, HBr 体积分数为 0.2 μL/L; 工况 T-01 至工况 T-04 为单喷射 NH4Cl 溶液,将烟气中 HCl 体积分数分别提高至 15、35、55、75 μL/L; 工 况 T-05 至工况 T-06 为单喷射 NH4Br 溶液,将烟气 中 HBr 体积分数分别提高至 5、10 μL/L 工况; 工况 T-07 为喷射 NH4Cl/NH4Br 混合溶液,将烟气中 HCl、 HBr 体积分数分别提高至 35、5 μL/L 的工况。

3.2 试验结果与讨论

不同工况下烟气中总汞 Hg^T、Hg²⁺和 Hg⁰ 的质 量浓度变化趋势如图 8一图 10 所示。由图 8一图 10 可见:不同工况条件下 Hg^T的变化幅度基本相似; 烟气经过 SCR 脱硝装置后,总汞 Hg^T质量浓度没 有明显的下降,但是汞的形态变化显著;随着烟气 流动过程中温度的降低,Hg⁰通过同相、异相以及 催化氧化反应生成 Hg²⁺和 Hg^P;烟气流经低低温电 除尘器捕集飞灰的同时可去除颗粒汞。烟气经过脱 硫装置后 Hg^T质量浓度明显下降,这表明汞在烟气 脱硫装置中被有效去除,这些被脱除的汞中大部分为 Hg²⁺,这是由于 Hg²⁺的水溶性导致的。



注: SCR 前、SCR 后分别表示 SCR 烟气脱硝装置前、后; FGD 前、FGD 后分别表示烟气脱硝装置前、后,以下同。

图 8 不同工况下随烟气流程总录 Hg^T质量浓度变化趋势 Fig.8 Variations of total mercury Hg^T mass concentration with flue gas process under different working conditions



图 9 不同工况下随烟气流程 Hg²⁺质量浓度变化趋势 Fig.9 Variations of Hg²⁺ mass concentration with flue gas process under different working conditions



图 10 不同工况下随烟气流程总汞 Hg⁰质量浓度变化趋势 Fig.10 Variations of total mercury Hg⁰ mass concentration with flue gas process under different working conditions

不同工况下 SCR 烟气脱硝装置进出口不同形态汞质量浓度变化如图 11 所示。从图 11 可以看出,

第10期

烟气中 Hg²⁺质量浓度随着 HCl 和 HBr 体积分数的增加而升高。在 SCR 烟气脱硝系统中,烟气中 Hg⁰经过 SCR 烟气脱硝催化剂后吸附在催化剂的表面活性位点上,烟气中酸性气体(HCl 和 HBr)及 O₂ 会促进 Hg⁰催化氧化成 Hg²⁺,从而使 Hg²⁺的含量增加。



图 11 不同工况下 SCR 烟气脱硝装置进出口不同形态 汞质量浓度变化

Fig.11 Changes of mass concentration of different forms of mercury at inlet and outlet of the SCR flue gas denitration system under different working conditions

不同工况下 SCR 催化剂对 Hg⁰氧化率及烟气 汞排放质量浓度的影响如图 12 所示。



图 12 不同工况下 SCR 催化剂对 Hg⁰氧化率及汞排放 质量浓度变化 Fig.12 Changes of Hg⁰ oxidation rate of SCR catalyst and



试验结果表明,随着烟气中 HCl 体积分数从 3 μL/L 增至 75 μL/L, Hg⁰ 的氧化率从 54.13%增至 85.74%。由于 SCR 催化剂具有较大的比表面积,其 表面存在大量的活性位点,烟气中 HCl 吸附到 SCR 催化剂上以后,会与其表面的活性中心点位形成活 性 Cl 原子,进而将 Hg⁰氧化成 Hg²⁺。与 HCl 的结 果类似,HBr 的存在对单质汞氧化的促进作用明显, Hg⁰的氧化率随着 HBr 体积分数的增加而增加。随 着烟气中 HBr 体积分数从 5 μL/L 增至 10 μL/L,Hg⁰ 的氧化率从 76.09%增至 83.46%。试验结果表明, 针对实际燃煤烟气,HCl/HBr 共同作用下可以提高单 一 HCl 在催化剂表面对单质汞的氧化效果。

4 结 论

1)研究结果表明,正常运行工况下,温度高 于 310 ℃时,现役 SCR 催化剂 Hg⁰氧化率随着温 度升高逐渐降低,机组低负荷下的汞氧化性能优于 高负荷。

2)单一卤素作用下, HBr 对催化剂表面汞的氧 化能力促进作用强于 HCl。HCl/HBr 共同作用可提 高单一 HCl 在催化剂表面对单质汞的氧化效果。这 与 HBr 和 HCl、O₂反应生成中间过度化合物 BrCl 有关,其对汞氧化能力高于 HCl,从而强化了单质 汞的氧化。

3) 实际燃煤烟气条件下工程应用试验表明,添加 NH4Cl 或 NH4Br 溶液均可有效提高现役 SCR 催 化剂的汞氧化能力,并大幅降低汞污染物的排放浓度。当添加卤素使得脱硝入口烟气中 HCl 的体积分数超过 55 μL/L 或 HBr 体积分数超过 5 μL/L 时,可以实现在役 3 层催化剂单质汞氧化率超过 75%,汞 污染物排放质量浓度稳定在 1.5 μg/m³以下。同时,为避免造成烟道下游设备腐蚀,应控制卤素喷射量。

[参考文献]

- [1] 吕太,冯银行,索利慧,等. 燃煤电厂现有烟气净化设备脱汞特性分析[J]. 热力发电,2017,46(3):59-63.
 LYU Tai, FENG Yinhang, SUO Lihui, et al. Mercury removal properties of current flue gas purification devices in coal-fired power plants[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(3): 59-63.
- 【2】 张胜军,许明海, 王莉, 等. 燃煤锅炉脱汞技术研究进展[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(7): 74-79.
 ZHANG Shengjun, XU Minghai, WANG Li, et al. Research progress of mercury removal technology for coal-fired boiler[J]. Environmental Pollution & Control, 2014, 36(7): 74-79.
- [3] 喻敏, 董勇, 王鹏, 等. 氯元素对燃煤烟气脱汞的影响 研究进展[J]. 化工进展, 2012, 31(7): 1610-1614. YU Min, DONG Yong, WANG Peng, et al. Progress of effects of chloride on mercury removal for coal-fired flue gas[J]. Chermical Industry and Engineering Progress, 2012, 31(7): 1610-1614.
- [4] 王铮,薛建明,许月阳,等.选择性催化还原协同控制 燃煤烟气中汞排放效果影响因素研究[J].中国电机工 程学报,2013,33(14):32-37.
 WANG Zheng, XUE Jianming, XU Yueyang, et al. Research on influencing factors of SCR's cooperative control in mercury emissions from coal-fired flue[J].

200

Proceedings of the CSEE, 2013, 33(14): 32-37.

- [5] FRY A, CAUCH B, SILCOX G D, et al. Experimental evaluation of the effects of quench rate and quartz surface area on homogeneous mercury oxidation[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 2855-2861.
- [6] SLIGER R N, KRAMLICH J C, MARINOV N M. Towards the development of a chemical kinetic model for the homogeneous oxidation of mercury by chlorine species[J]. Fuel Processing Technology, 2000, 65(99): 423-438.
- [7] GOODSITE M E, PLANE J M C, SKOV H. A theoretical study of the oxidation of Hg⁰ to HgBr₂ in the troposphere[J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(6): 1772-1776.
- [8] ARIYA P A, ALEXEI K A, GIDAS A. Reactions of gaseous mercury with atomic and molecular halogens: kinetics, product studies, and atmospheric implications[J]. Journal of Physical Chemistry A, 2002, 106(32): 7310-7320.
- [9] AUZMENDI-MURUA I, CASTILLO Á, BOZZELLI J W. Mercury oxidation via chlorine, bromine and iodine under atmospheric conditions: thermochemistry and kinetics[J]. Journal of Physical Chemistry A, 2014, 118(16): 2959-2975.
- [10] GRANITE E J, PENNLINE H W, HARGIS R A. Novel sorbents for mercury removal from flue gas[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2000, 30: 1020-1029.
- [11] PRESTO A A, GRANITE E J. Survey of catalysts for

oxidation of mercury in flue gas[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(18): 5601-5609.

- [12] 刘永超. SCR 催化剂催化氧化单质汞实验研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015: 2-10.
 LIU Yongchao. Research on catalytic oxidation of elemental mercury over SCR catalyst[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015: 2-10.
- [13] LEE K J, KUMAR P A, MAQBOOL M S, et al. Ceria added Sb-V₂O₅/TiO₂ catalysts for low temperature NH₃ SCR: physico-chemical properties and catalytic activity[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2013, 142/143: 705-717.
- [14] YOUN S, JEONG S, KIM D H, Effect of oxidation states of vanadium precursor solution in V₂O₅/TiO₂ catalysts for low temperature NH₃ selective catalytic reduction[J]. Catalysis Today, 2014, 232: 185-191.
- [15] WANG J, WANG X, LIU X, et al. Catalytic oxidation of chlorinated benzenes over V₂O₅/TiO₂ catalysts: the effects of chlorine substituents[J]. Catalysis Today, 2015, 241: 92-99.
- [16] 黄文博. 卤素添加对燃煤烟气汞形态转化的影响[D]. 青岛:青岛科技大学, 2015:1.
 HUANG Wenbo. Impacts of halogen addition on mercury transformation in coal-fired flue gas[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2015:1.

(责任编辑 杨嘉蕾)







