

电解脱硫废水及产物回喷氧化烟气中 Hg^0 的研究

纪明轩¹, 刘世念², 龙一飞¹, 李鸿鹄³, 赵宁², 胡将军^{1*}

(1. 武汉大学资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430079; 2. 南方电网电力科技股份有限公司, 广东 广州 510080; 3. 中南财经政法大学环境与健康研究中心, 湖北 武汉 430073)

摘要: 为了处理燃煤电厂排放的高氯脱硫废水、解决烟气氯元素质量分数不足及选择性催化还原催化剂对 Hg^0 氧化效率较低等问题, 利用电解法降低脱硫废水中的氯离子质量分数, 并将电解产物回喷入烟道内, 提高 Hg^0 氧化效率。研究了电流和氯离子初始质量浓度对脱硫废水中 Cl^- 脱除量和阳极电解产物中 Cl_2 所占比例的影响。考察了不同条件下的电解脱硫废水阳极液产物回喷到烟道内对 SCR 催化剂氧化 Hg^0 的效率的影响。随着电流和氯离子初始质量浓度的增加, 脱硫废水中的 Cl^- 脱除量有所增加, 阳极电解产物中 Cl_2 所占比例也有增加的趋势。将不同电解脱硫废水阳极液产物回喷至燃煤烟气中, SCR 催化剂对 Hg^0 氧化效率明显提升。

关键词: 电解法; 脱硫废水; SCR 催化剂; Hg^0 的氧化

中图分类号: X773

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2022)02-0210-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.02.042

Electrolysis of desulfurization wastewater and back-spraying electrolysis products to oxidize Hg^0 in fuel gas

Ji Ming-xuan¹, Liu Shi-nian², Long Yi-fei¹, Li Hong-hu³, Zhao Ning², Hu Jiang-jun^{1*}

(1. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. China Southern Power Grid Electric Power Technology Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;

3. Research Center for Environment and Health, Zhongnan University of Economics and Law, Wuhan 430073, China)

Abstract: To deal with high-chlorine desulfurization wastewater discharged from coal-fired power plants, and solve the problems that chlorine content in flue gas is insufficient and selective catalytic reduction catalyst exhibits low efficiency of for Hg^0 oxidation of coal-fired power plants in China, the electrolysis method is employed to reduce chloride ion content in the desulfurization wastewater, and spray the electrolysis product back into the flue to improve the oxidation efficiency of Hg^0 . The effects of current size and initial chloride ion concentration on the amount of Cl^- removed from desulfurization wastewater and the proportion of Cl_2 in the anode electrolysis product are studied. Afterwards, the effect of the sprayed back anolyte products of electrolytic desulfurization wastewater under different conditions on the oxidation efficiency of Hg^0 by SCR catalysts are studied. With the increases of current sizes and initial chloride ion concentration, both the amount of Cl^- removed from desulfurization wastewater and the proportion of Cl_2 in the anode electrolysis product increase. As the anolyte products of different electrolytic desulfurization wastewater are sprayed back into the coal-fired flue gas, the oxidation efficiency of Hg^0 over SCR catalysts is improved significantly.

Key words: electrolysis; desulfurization wastewater; SCR catalyst; oxidation of Hg^0

汞及其化合物具有剧毒性、易挥发性, 在环境中持久性存在, 并且可以在生物体内积累, 通过食物链进行富集。燃煤电厂排放的烟气是汞污染物排放到大气中的主要污染源。汞以 3 种形式存在于燃煤烟气中: 零价汞 (Hg^0)、二价汞 (Hg^{2+}) 和颗粒态汞 (Hg_p)。二价汞 (Hg^{2+}) 和颗粒态汞 (Hg_p) 可以很容易的被燃煤电厂现有污染物控制装置去除, 如湿法烟气脱硫装置和除尘装置。但是零价汞 (Hg^0) 由于其难溶和较高的挥发性, 难以被现有装置所去

除^[1]。选择性催化还原技术 (SCR) 是燃煤电厂应用最广泛的脱硝技术。SCR 技术不仅可以催化氧化 NO_x , 还可以氧化燃煤烟气中的 Hg^0 ^[2]。当燃煤烟气通过 SCR 催化剂时, Hg^0 被氧化为 Hg^{2+} 。然而传统商用 SCR 催化剂 ($\text{V}_2\text{O}_5/\text{WO}_3-\text{TiO}_2$) 氧化 Hg^0 的效率较低^[3]。有研究表明, $\text{V}_2\text{O}_5/\text{WO}_3-\text{TiO}_2$ 催化剂在有 HCl 、 Cl_2 或其他活性氯存在的条件下, 对 Hg^0 的氧化效率较高^[4]。然而中国国内的煤炭含氯量较低, 需要向烟道内提供更多的含氯物质。

收稿日期: 2021-09-06; 修回日期: 2021-12-03

作者简介: 纪明轩 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为燃煤电厂烟气脱硝脱汞, 2019202050097@whu.edu.cn; 胡将军 (1963-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为燃煤电厂烟气污染控制, 通讯联系人, jihu1963@outlook.com。

石灰石-石膏法湿法脱硫装置运行过程中需要排出部分脱硫废水。脱硫废水中盐质量浓度较高,一般可达 20 g/L Cl^- [5-7]。脱硫废水在排放之前,首先要对较高质量浓度的 Cl^- 进行处理。目前,降低脱硫废水中 Cl^- 质量浓度的主要方法是电解法。电解法阳极将 Cl^- 氧化为 Cl_2 和其他活性氯成分是较高效的除氯方法 [6-8]。

采用电解法处理脱硫废水,然后将电解脱硫废水产物回喷到烟道内,不仅解决了脱硫废水中 Cl^- 质量浓度较高的问题,同时解决了燃煤烟气中氯化物质量浓度不高、SCR 催化剂氧化 Hg^0 的效率较低的问题。笔者首先利用电解法脱除模拟脱硫废水中的 Cl^- ,研究了不同电解条件下 Cl^- 的脱除量以及不同活性氯产物含量。将电解脱硫废水阳极液回喷至烟道内,考察 SCR 催化剂对模拟燃煤烟气中 Hg^0 的氧化效率。

1 材料和方法

1.1 实验材料

氯化钠、六水合氯化镁、无水氯化钙、高锰酸钾、氯化钾,优级纯,国药集团化学试剂有限公司生产;压缩气体,武润桦辉氧气体瓶检验有限责任公司东新分公司生产; $\text{RuO}_2\text{-IrO}_2\text{-TiO}_2/\text{Ti}$ 阳极和 Ti 阴极,宝鸡市永合顺钛业有限公司生产;全氟磺酸阳离子交换膜 Nafion 117,美国杜邦公司生产; $\text{V}_2\text{O}_5/\text{WO}_3\text{-TiO}_2$ SCR 催化剂,宜兴市宜刚环保工程材料有限公司生产。

1.2 实验装置

1.2.1 电解装置

电解装置由两室电解槽、直流实验电源以及阳

极和阴极组成,如图 1 所示。阳极采用 $\text{RuO}_2\text{-IrO}_2\text{-TiO}_2/\text{Ti}$ 阳极,阴极为 Ti 电极,阳极和阴极均为网状电极。阳离子交换膜采用美国杜邦公司全氟磺酸阳离子交换膜(Nafion 117)。为了防止全氟磺酸阳离子交换膜堵塞,阳极液采用 NaOH 和 NaCO_3 二级处理软化后的模拟电解脱硫废水, Cl^- 质量浓度在 $15\ 000\sim 30\ 000 \text{ mg/L}$ 之间, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 质量浓度较低。

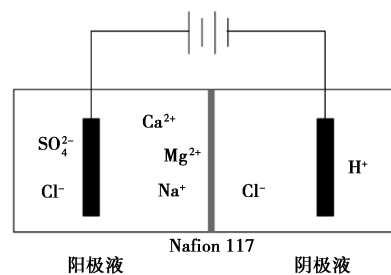


图 1 电解模拟脱硫废水装置

阴极液为 0.75 mol/L HCl 溶液,阴极室为酸性溶液有利于降低槽电压,并防止 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 在阴极上结垢。电解过程中,阳极板上主要析出 Cl_2 和少部分活性氯成分,阴极板主要析出 H_2 。

1.2.2 模拟燃煤烟气脱汞装置

模拟燃煤烟气脱汞装置由气体发生装置、汞渗透管、气体混合罐、固定床反应器、烟气分析仪和烟气汞吸收装置组成,如图 2 所示。气体发生器由若干压缩气体钢瓶组成,钢瓶内有反应所需气体。钢瓶产生的气体和汞渗透管产生的汞蒸气在气体混合罐混合,然后进入管式炉组成的固定床反应器中进行反应,反应温度为 350°C ,气流大小为 1 L/min 。出口烟气由烟气分析仪进行检测,烟气中的汞由吸收剂吸收。

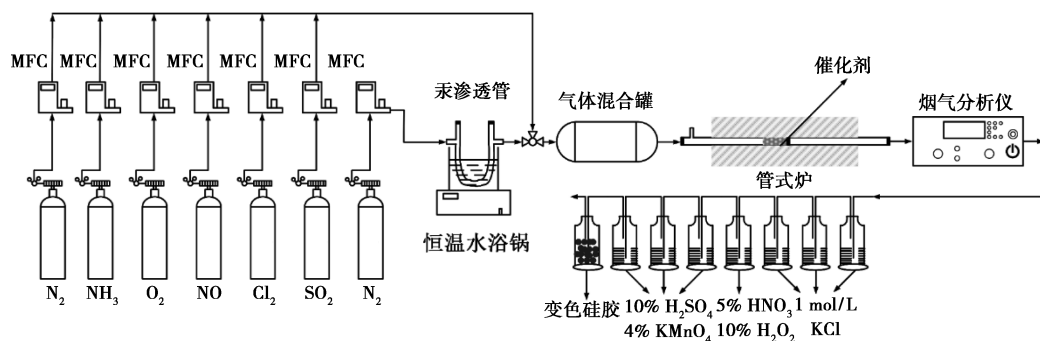


图 2 模拟燃煤烟气脱汞装置

1.3 实验方法

1.3.1 工艺参数确定

根据法拉第第一定律及法拉第第二定律可得 [9]:

$$m = MIt/Fn \quad (1)$$

式中: M 为电解析出的物质的摩尔质量, kg/mol ; I 为电解电流, A ; t 为电解时间, s ; F 为法拉第常数, $96\ 485 \text{ C/mol}$; n 为电解物质得失电子数。

根据式(1)可知,影响电解产物的因素为电流大小、电解物质初始浓度和电解时间。因此,本实验将以电流大小和电解物质初始质量浓度变量进行实验。

1.3.2 检测方法

溶液中氯离子的检验方法采用硝酸汞滴定法(HJ-T 343—2007)^[10]。

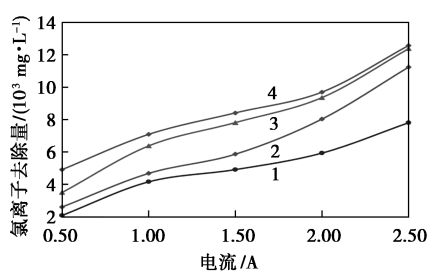
溶液中活性氯的检测方法采用五步碘量法^[11]。

燃煤烟气中的汞元素的吸收采用安大略法(Ontario Hydro Method)^[12]。吸收液中汞元素的含量最终由原子吸收仪测定。

2 结果与讨论

2.1 电流对电解脱硫废水产物的影响

电流对电解脱硫废水产物的影响如图 3 所示。由图 3 可知,当电流从 0.50 A 增加到 2.50 A 时,阳极液中 Cl⁻ 脱除量随电流的增加而增加。当阳极液中 Cl⁻ 质量浓度为 15 000 mg/L 时,电流大小为 0.50 A 时 Cl⁻ 脱除量为 2 086 mg/L,电流大小为 2.50 A 时 Cl⁻ 脱除量为 7 814 mg/L;当阳极液中 Cl⁻ 质量浓度为 30 000 mg/L 时,电流大小为 0.50 A 时 Cl⁻ 脱除量为 4 913 mg/L,电流大小为 2.50 A 时 Cl⁻ 脱除量为 12 573 mg/L。随着电流的增加,Cl⁻ 脱除量大幅度增加。



1—15 000 mg/L; 2—20 000 mg/L; 3—25 000 mg/L; 4—30 000 mg/L

图 3 电流大小对氯离子脱除量的影响

这是由于随着电流大小的增加,溶液中 Cl⁻ 向阳极移动的推动力增加,加快液相传质过程,使得电解反应速率提升^[6,13];另一方面,由于电解反应为异相反应,因此阳极上的反应速率可以由异相化学反应速率表示^[14],其表达式为:

$$v = I/zFA \quad (2)$$

式中: v 为电极反应速率, mol/m²; I 为电流大小, A; z 为粒子电荷数; F 为法拉第常数, 96 485 C/mol; A 为电极面积, m²。

由式(2)可知,电解反应速率与电流成正比,电

流增加,电解反应速率明显提升。因此 Cl⁻ 脱除量明显增加。

电流对电解产物中 Cl₂ 所占比例的影响如图 4 所示。由图 4 中可以看出,随着电流的增加,阳极电解产物中 Cl₂ 所占比例也随之增加。当电流从 0.50 A 增加到 1.00 A 时,电解产物中 Cl₂ 所占比例增加幅度较大;而当电流大小增加到 2.50 A 时,电解产物中 Cl₂ 所占比例增加幅度较缓。

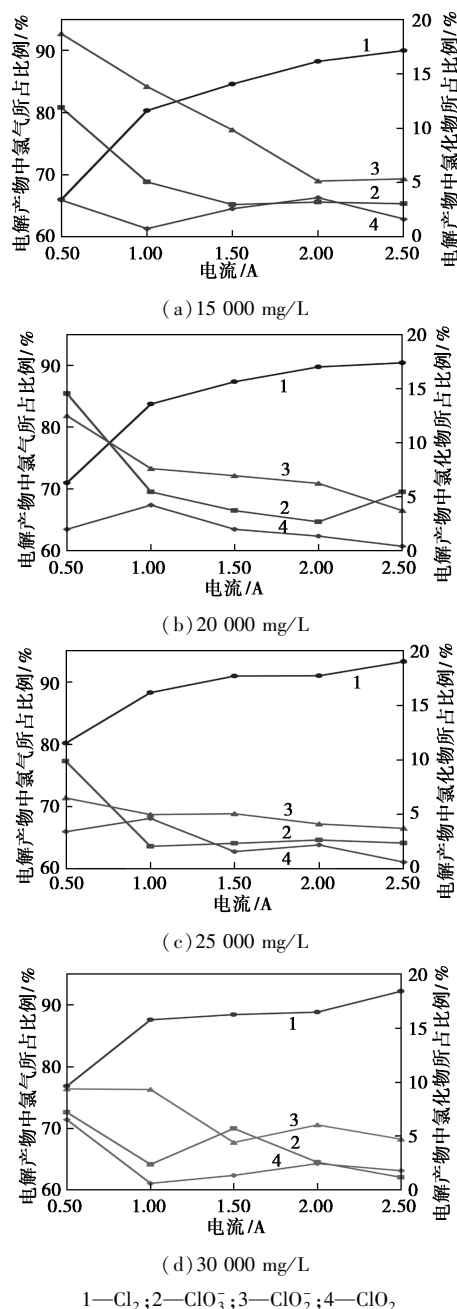


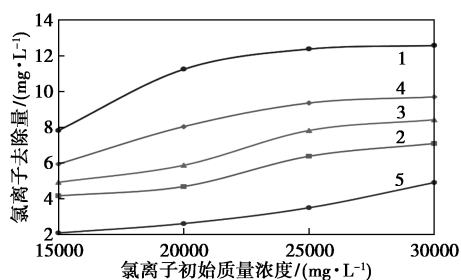
图 4 电流对电解产物中 Cl₂ 所占比例的影响

电解产物中 Cl₂ 所占比例增加主要与 Cl⁻ 脱除量和电流效率的增加有关。Cl⁻ 脱除量的增加有利于电解产物量增加。而随着电流的不断提高,电流

效率呈不断提高的趋势。电流效率的提高有利于目标产物的生成。过大的电流使得阳极液中溶解的 Cl_2 过早达到饱和,之后电解生成的 Cl_2 更容易从溶液中析出,从而减少副反应的发生,提高电流效率,这与钱凯凯^[6]和梅玉倩^[8]等的研究结果相一致。

2.2 氯离子初始质量浓度对电解脱硫废水产物的影响

氯离子初始质量浓度对氯离子脱除量的影响如图5所示。由图5中可以看出,随着阳极液中 Cl^- 初始质量浓度的增加,阳极液中 Cl^- 脱除量不断增加。当 Cl^- 初始质量浓度从 15 000 mg/L 增加到 25 000 mg/L 时,阳极液中 Cl^- 脱除量增加明显。而当 Cl^- 初始质量浓度从 25 000 mg/L 增加到 30 000 mg/L 时,阳极液中 Cl^- 脱除量增加比较缓慢。



1—0.50 A; 2—1.00 A; 3—1.50 A; 4—2.00 A; 5—2.50 A

图5 氯离子初始质量浓度对氯离子脱除量的影响

根据电化学原理^[13], Cl^- 在阳极氧化的理论分压为:

$$E^0 = \varphi^+ - \varphi^- \quad (3)$$

式中: φ^+ 为阳极平衡电极电位, V; φ^- 为阴极平衡电极电位, V。

由能斯特方程可知^[15], 阳极平衡电极电位表达式为:

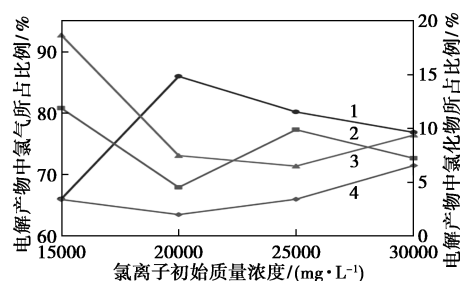
$$\varphi^+ = \varphi^0 + (RT/2F) \ln(P_{Cl_2}/\alpha_{Cl^-}^2) \quad (4)$$

式中: φ^+ 为阳极平衡电极电位, V; φ^0 为标准电极电位, V; R 标准气体常数, 8.314 J/(mol·K); T 为阳极室温度, K; F 为法拉第常数, 96 485 C/mol; P_{Cl_2} 为氯气分压, Pa; α_{Cl^-} 为 Cl^- 浓度, mol/L。

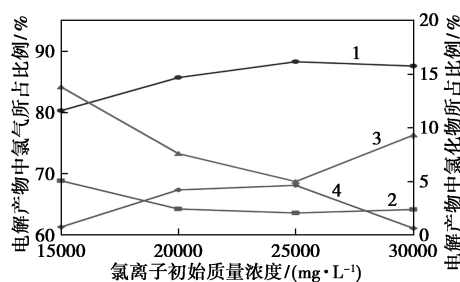
阳极液中 Cl^- 初始质量浓度的增加可以降低 $RuO_2-IrO_2-TiO_2/Ti$ 阳极的析氯电位, 促进 Cl^- 在阳极表面的氧化, 减少 Cl_2 在水中的溶解度, Cl_2 更容易析出; 另一方面, Cl^- 初始质量浓度的增加使 Cl^- 迁移的推动力增加, Cl^- 富集在阳极周围, 更容易氧化脱除。而当 Cl^- 初始质量浓度从 25 000 mg/L 增加到 30 000 mg/L 时, 初始质量浓度过高导致离子之

间间距变小, 相互作用增强, 离子运动阻力增大, 因此 Cl^- 脱除量增加不大^[6]。

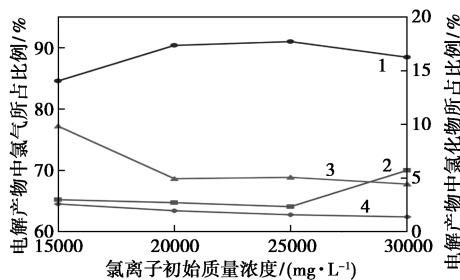
氯离子初始质量浓度对电解产物中 Cl_2 所占比例的影响如图6所示。由图6中可以看出, 随着阳极液中 Cl^- 初始质量浓度的增加, 阳极电解产物中 Cl_2 所占比例呈现先增大后减小的趋势。当电流从 0.50 A 变化到 1.50 A, Cl^- 初始质量浓度从 15 000 mg/L 增加到 25 000 mg/L 时, 阳极电解产物中 Cl_2 所占比例增加明显; 而当 Cl^- 初始质量浓度从 25 000 mg/L 增加到 30 000 mg/L 时, 阳极电解产物中 Cl_2 所占比例略有下降。当电流从 1.50 A 变化到 2.50 A 时, 阳极电解产物中 Cl_2 所占比例变化趋势不明显。



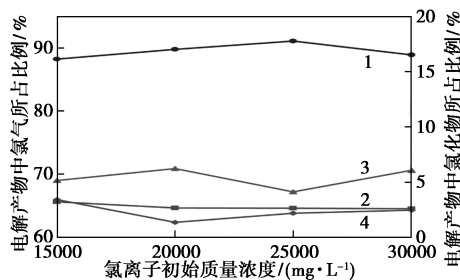
(a) 0.50 A



(b) 1.00 A



(c) 1.50 A



(d) 2.00 A

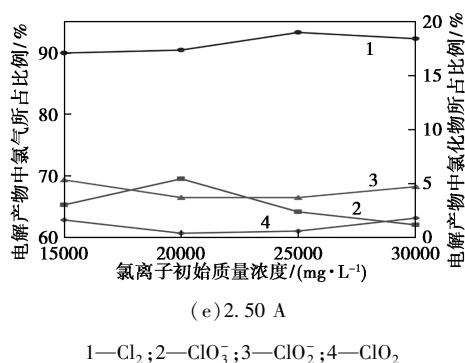


图 6 氯离子初始质量浓度对电解产物中 Cl₂ 所占比例的影响

由能斯特-普朗克方程可知^[16], 电解过程中离子的传质主要与离子迁移和离子分散有关。而阳极液中 Cl⁻ 初始质量浓度的增加, 使得溶液中的电导率提升, 有利于离子迁移能力的提升; 阳极液中 Cl⁻ 初始质量浓度的增加同样使得离子分散能力提升, 有利于提高电解反应中的电流效率, 使得目标产物产量增加^[14]。根据能斯特方程[式(4)]可知, 阳极液中 Cl⁻ 初始质量浓度的增加, 降低了 RuO₂-IrO₂-TiO₂/Ti 阳极的析氯电位, 抑制析氧副反应的发生。这些条件都有利于阳极电解产物中 Cl₂ 所占比例增大。但是当 Cl⁻ 初始质量浓度增加到一定值时, 离子交换膜两侧水的渗透作用变得足够大, 使得溶液中离子通过离子交换膜的通量减少, 导致电流效率降低, 阳极电解产物中 Cl₂ 所占比例下降^[14]。而当电流从 1.50 A 变化到 2.50 A 时, 电流大小起主要作用, 因此随着阳极液 Cl⁻ 初始质量浓度的增加, 阳极电解产物中 Cl₂ 所占比例变化趋势不明显。

2.3 阳极液电解产物对 SCR 催化剂脱汞性能的影响

燃煤烟气中 Hg⁰ 的氧化一直是人们研究的热点。商业 SCR 催化剂氧化 Hg⁰ 的能力较弱、效率不高^[3]。有研究表明, 燃煤烟气中存在 HCl、Cl₂ 和其他活性氯物质的条件下, 商业 SCR 催化剂有较高的氧化 Hg⁰ 的能力^[4]。因此, 向燃煤烟气中喷入电解脱硫废水阳极液产物来氧化 Hg⁰ 切实可行。

当电解脱硫废水阳极液产物喷入模拟烟气时, 电解脱硫废水阳极液产物对 SCR 催化剂氧化 Hg⁰ 效率的影响如图 7 所示。由图 7 中可以看出, 随着电解电流的升高, Hg⁰ 的氧化效率呈先升高后降低的趋势。Hg⁰ 的氧化效率基本维持在 70%, 比在无氯化物的烟气条件下有明显提高。

当阳极液产物喷入烟道内, 氯化物在高温下气化成 HCl、Cl₂ 和 HClO 等物质。HCl、Cl₂ 和 HClO 等物质在 SCR 催化剂表面活化, 与附着在 SCR 催化

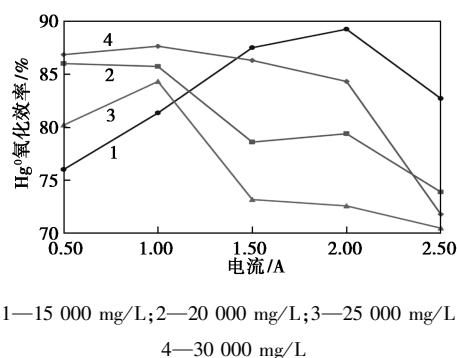
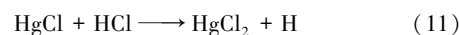
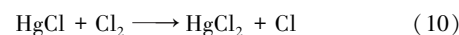
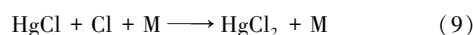
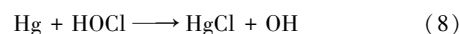
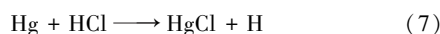
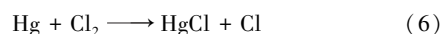
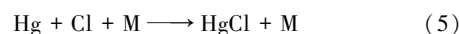


图 7 电解脱硫废水阳极液产物对 SCR 催化剂氧化 Hg⁰ 效率的影响

剂表面的 Hg⁰ 发生反应生成 HgCl 和 HgCl₂, Hg⁰ 被氧化除去, 如式(5)~式(12)所示^[4]。随着电流的增加, Hg⁰ 的氧化效率有降低的趋势, 主要是 Cl₂ 浓度过高, 降低了催化剂的催化活性。因此, 适当控制电流大小可以有效提高 Hg⁰ 的氧化效率。



3 结论

(1) 电解法可以很好地脱除脱硫废水中的 Cl⁻, 将 Cl⁻ 在阳极氧化成 Cl₂ 和其他活性氯物质。随着电流大小和阳极液中 Cl⁻ 初始质量浓度的增加, Cl⁻ 的脱除量也随之增加。

(2) 随着电流的增加, 阳极电解产物中 Cl₂ 所占比例逐渐增加; 随着阳极液中 Cl⁻ 初始质量浓度的增加, 阳极电解产物中 Cl₂ 所占比例先增大后减小。

(3) Cl₂ 和其他活性氯物质可以促进 SCR 催化剂氧化 Hg⁰ 的效率, 因此可以将电解脱硫废水阳极液产物喷入烟道内, 作为氯化物来源提高 Hg⁰ 的氧化效率。将不同条件下的电解脱硫废水阳极液产物喷入烟道内, 对 SCR 催化剂 Hg⁰ 的氧化效率都有显著提高, Hg⁰ 的氧化效率维持在 70% 以上。

参考文献

- [1] Xie Y, Li C, Zhao L, et al. Experimental study on Hg⁰ removal from flue gas over columnar MnO_x-CeO₂/activated coke [J]. Applied Surface Science, 2015, 333: 59-67.

(下转第 219 页)

- 醇气体传感器[J].炭素,2016,(3):17-21.
- [11] 郎大宁,李怡招,曹亚丽,等.氧化锌/石墨烯复合物的固相制备及气敏、光催化应用[J].现代化工,2019,39(12):130-134.
- [12] 杨芳,余堃,齐天骄,等.可控合成铂功能化还原氧化石墨烯及其氢敏性能[J].电子元件与材料,2017,36(8):69-74.
- [13] Guo J, Liu X, Wang H, *et al.* Synthesis of hollow tubular reduced graphene oxide/SnO₂ composites and their gas sensing properties [J]. *Materials Letters*, 2017, 209(1):102-105.
- [14] 孙宇峰,刘少波,李会华,等.氧化石墨烯的制备及其对NH₃的敏感特性研究[J].功能材料,2012,43(6):712-714.
- [15] Zhang G H, Deng X Y, Wang P Y, *et al.* Morphology controlled syntheses of Cr doped ZnO single-crystal nanorods for acetone gas sensor[J]. *Materials Letters*, 2016, 165(Feb.15):83-86.
- [16] Zhang Lexi, Yin Y. Large-scale synthesis of flower-like ZnO nanorods via a wet-chemical route and the defect-enhanced ethanol-sensing properties[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, 183(18):110-116.
- [17] Hu L, Jia F, Wang S, *et al.* The nano-composite of Co-doped g-C₃N₄ and ZnO sensors for the rapid detection of BTEX gases: Stability studies and gas sensing mechanism [J]. *Journal of Materials Science*, 2020, 56(prepublication):1-12.
- [18] Hu K, Wang F, Shen Z, *et al.* Ternary heterojunctions synthesis and sensing mechanism of Pd/ZnO-SnO₂ hollow nanofibers with enhanced H₂ gas sensing properties[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 850(62):5342-5342.
- [19] Yousefi H R, Hashemi B, Mirzaei A, *et al.* Effect of Ag on the ZnO nanoparticles properties as an ethanol vapor sensor [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2020, 1179(52):105172-105172.
- [20] Xu X H, Ma S Y, Xu X L, *et al.* Ultra-sensitive glycol sensing performance with rapid-recovery based on heterostructured ZnO-SnO₂ hollow nanotube[J]. *Materials Letters*, 2020, 273(C):327-328.
- [21] 赵长辉,牛高强,龚慧敏,等.电化学与半导体SO₂气体传感器的研究进展[J].功能材料与器件学报,2020,26(3):143-159.
- [22] Ni Z, Bao S, Gong X Q. A DFT study of the CO adsorption and oxidation at ZnO surfaces and its implication for CO detection[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2020, 31(6):1674-1679.
- [23] Fan C, Sun F, Wang X, *et al.* Enhanced H₂S gas sensing properties by the optimization of p-CuO/n-ZnO composite nanofibers[J]. *Journal of Materials Science*, 2020, 55(10):7702-7714.
- [24] Hong Y, Wu M, Bae J H, *et al.* A new sensing mechanism of Si FET-based gas sensor using pre-bias [J]. *Sensors and Actuators*, 2020, 302:127147.1-127147.9.
- [25] Duy L V, Hanh N H, Son D N, *et al.* Facile hydrothermal synthesis of two-dimensional porous ZnO nanosheets for highly sensitive ethanol sensor[J]. *Journal of Nanomaterials*, 2019, 2019(5):1-7.
- [26] Singh G, Singh R C. Highly sensitive and selective liquefied petroleum gas sensor based on novel ZnO-NiO heterostructures[J]. *Journal of Materials Science Materials in Electronics*, 2019, 30(22):20010-20018.
- [27] Quang, Trung, Tran, *et al.* Synthesis and application of graphene-silver nanowires composite for ammonia gas sensing [J]. *Advances in Natural Sciences Nanoscience & Nanotechnology*, 2013, 4(4):045012-045012. ■

(上接第214页)

- [2] Zhou Z, Liu X, Hu Y, *et al.* Investigation on synergistic oxidation behavior of NO and Hg⁰ during the newly designed fast SCR process[J]. *Fuel*, 2018, 225:134-139.
- [3] He S, Zhou J, Zhu Y, *et al.* Mercury oxidation over a vanadia-based selective catalytic reduction catalyst[J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23(1):253-259.
- [4] Krishnakumar B, Helble J J. Determination of transition state theory rate constants to describe mercury oxidation in combustion systems mediated by Cl, Cl₂, HCl and HOCl[J]. *Fuel Processing Technology*, 2012, 94(1):1-9.
- [5] Brogren C, Karlsson H T. The impact of the electrical potential gradient on limestone dissolution under wet flue gas desulfurization conditions[J]. *Chemical Engineering Science*, 1997, 52(18):3101-3106.
- [6] 钱凯凯. 电化学处理脱硫废水协同去除燃煤烟气零价汞的研究[D]. 武汉:武汉大学,2020.
- [7] 杨博. 电解—电渗析法处理湿法烟气脱硫废水中氯离子的试验研究[D]. 济南:山东大学,2017.
- [8] 梅玉倩. 电解法处理脱硫废水中氯离子的实验研究[D]. 北京:华北电力大学,2018.
- [9] 张师愚. 物理化学[M]. 北京:中国医药科技出版社,2014.
- [10] 国家环境保护总局. 水质 氯化物的测定 硝酸汞滴定法; HJ/T 343—2007[S]. 北京:中国环境科学出版社,2007.
- [11] 王舂,方赤光,董青,等. 五步碘量法测定二氧化氯的含量[J]. 中国公共卫生,2003,19(1):113-114.
- [12] 王相凤,邓双,刘宇,等. 燃煤烟气安大略汞测试方法的实验研究[J]. 环境工程,2013,31(2):126-131.
- [13] 李荻. 电化学原理[M]. 第三版. 北京:北京航空航天大学出版社,2008.
- [14] Cui L, Li G, Li Y, *et al.* Electrolysis-electrodialysis process for removing chloride ion in wet flue gas desulfurization wastewater (DW): Influencing factors and energy consumption analysis [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2017, 123:240-247.
- [15] 李富玺. 离子膜电解法处理船舶压载水的研究[D]. 大连:大连海事大学,2012.
- [16] Gjelstad A, Rasmussen K E, Pedersen B S. Simulation of flux during electro-membrane extraction based on the Nernst-Planck equation [J]. *Journal of Chromatography A*, 2007, 1174(1):104-111.
- [17] Ma J, Liu Z, Liu Q, *et al.* SO₂ and NO removal from flue gas over V₂O₅/AC at lower temperatures-role of V₂O₅ on SO₂ removal[J]. *Fuel Processing Technology*, 2008, 89(3):242-248.
- [18] Chi G, Shen B, Yu R, *et al.* Simultaneous removal of NO and Hg⁰ over Ce-Cu modified V₂O₅/TiO₂ based commercial SCR catalysts [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 330:83-92. ■