

电解酸性脱硫废水 及产物回喷氧化烟气中的 Hg^0

刘世念¹, 赵 宁¹, 纪明轩², 龙一飞², 李鸿鹄³, 胡将军^{2*}

(1. 南方电网电力科技股份有限公司, 广东 广州 510080;

2. 武汉大学资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430079;

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:为了增加燃煤烟气中氯化物的含量、提高选择性催化还原脱硝装置催化剂对零价汞(Hg^0)的氧化效率,将模拟脱硫废水电解产物回喷至烟道内。将不同浓度 HCl 溶液(0~0.5 mol/L)添加到模拟脱硫废水中,随着 HCl 溶液浓度的增加,氯离子脱除量和脱除率均先增大后减小,在 0.3 mol/L 达到最大值; Cl_2 在电解产物中所占比例也是先增大后减小,在 0.4 mol/L 达到最佳值。将模拟脱硫废水电解产物回喷至烟道内,选择性催化还原脱硝装置催化剂对 Hg^0 的氧化效率均有很大程度的提高,当将加入 0.3 mol/L HCl 溶液模拟脱硫废水电解产物回喷至烟道内时, Hg^0 氧化效率达到最大值 94.9%。

关键词:电解法;脱硫废水;SCR 催化剂; Hg^0 氧化

中图分类号:X773

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2022)S2-0244-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.S2.048

Oxidation of Hg^0 in flue gas through back-spraying electrolytic acidic desulfurization wastewater and products

LIU Shi-nian¹, ZHAO Ning¹, JI Ming-xuan², LONG Yi-fei², LI Hong-hu³, HU Jiang-jun^{2*}

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

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

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

Abstract: The electrolytic products of simulated desulfurization wastewater is sprayed back into flue gas to increase the content of chlorides in the flue gas and improve the oxidation efficiency of Hg^0 over selective catalytic reduction catalysts. Firstly, different concentrations of HCl solution ($0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} - 0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) is added into the simulated desulfurization wastewater to study the impacts of HCl concentrations. As the concentrations of HCl solution increases from $0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ to $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, both the removal amount and rate of Cl^- increase firstly and decreases then, and reach the maximum values when the concentrations of HCl solution is $0.4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. The catalyst in the selective catalytic reduction denitrification unit exhibits a great improved oxidation efficiency for zero valent mercury when the electrolytic products of simulated desulfurization wastewater are sprayed back into the flue. The oxidation efficiency of Hg^0 reaches 94.9% as the maximum when the simulated desulfurization wastewater added with $0.3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ of HCl solution is sprayed back into the flue.

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

汞及其化合物具有较高的毒性、易挥发性,在环境中持久存在,并且在食物链中通过生物累积而富集,严重危害人类健康^[1]。预防汞污染对人体健康产生的危害,主要途径是减少汞及其化合物的排放,世界各国出台了多项相关的法律法规来限制汞污染物的排放。

燃煤电厂被认为是汞污染的主要人为排放源,约占总排放量的 1/3^[2]。汞主要以 3 种形式存在于燃煤电厂排放的烟气中:零价汞(Hg^0)、二价汞

(Hg^{2+})和颗粒态汞(Hg_p)^[3]。 Hg^{2+} 易溶于水,当烟气经过石灰石-石膏湿法脱硫装置(WFGD)时, Hg^{2+} 可以溶解在脱硫浆液中并从烟气中脱除^[3]; Hg_p 是 Hg^0 或者 Hg^{2+} 吸附在烟尘颗粒上而形成的一种汞的存在形式,可以被电除尘器和袋式除尘器捕集而从烟气中脱除^[3];而 Hg^0 由于其易挥发性和水不溶性,很难被现有的污染物控制装置捕集^[3]。因此,如何将 Hg^0 从烟气中脱除,成为防止汞污染物排放的关键问题。

收稿日期:2022-04-25;修回日期:2022-06-29

基金项目:高耗水企业废水资源化及零排放关键技术与集成应用(GDKJXM20183546)

作者简介:刘世念(1971-),男,博士,正高级工程师,研究方向为水污染控制与给水净化,lsn23433@163.com;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,jjhu1963@outlook.com。

选择性催化还原技术(SCR)是燃煤烟气主要的脱硝技术,普遍应用于燃煤电厂中。SCR技术不仅可以催化还原 NO_x ,还可以氧化燃煤烟气当中的 Hg^0 ^[4]。当燃煤烟气通过SCR催化剂时,其中的 Hg^0 可被空气中的 O_2 氧化为 Hg^{2+} ,但是传统SCR催化剂氧化 Hg^0 的效率较低^[5]。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 或者其他活性氯存在的条件下,对 Hg^0 的氧化效率较高^[6]。然而我国生产的煤炭氯元素含量较低,导致燃煤烟气中氯化物含量不足,无法使 Hg^0 全部氧化,因此需要向燃煤烟气中添加一部分氯化物。

WFGD技术是目前应用最广泛的脱硫技术,由于其脱硫效率高、技术成熟、运行可靠,大部分燃煤电厂都装备了WFGD脱硫装置^[7]。WFGD脱硫装置运行过程中,来自燃煤烟气的可溶性氯化物、颗粒物和重金属物质不断积累在脱硫浆液中,脱硫浆液中混入这些杂质降低了WFGD脱硫装置的运行效率,氯离子的积累导致运行设备和管道腐蚀,降低了副产品石膏的品质^[8-10]。因此,一部分脱硫废水必须从脱硫装置中排出,控制脱硫浆液中杂质的浓度,以保证脱硫装置高效稳定运行^[11]。

排放的脱硫废水中氯离子含量较高,一般可达到 20 g/L ^[12-13]。氯离子较容易溶于水,现有的处理脱硫废水的方法很难将其有效去除。电解法可以将脱硫废水中的氯离子氧化脱除。电解法阳极将氯离

子氧化为 Cl_2 和其他活性氯成分,是较高效的除氯方法^[12,14-15]。

WFGD脱硫系统中直接排放的脱硫废水一般呈弱酸性至中性,pH一般在 $5\sim 6$ ^[11],如果直接使用排放的脱硫废水进行电解,阳极液pH较高,电解产物中 Cl_2 含量较低,而且会产生少量的 ClO^- 和 ClO_3^- ^[16]。过多的 ClO^- 和 ClO_3^- 回喷至烟道内将会使烟道结垢,对工业生产带来严重危害。而当阳极液pH较低时,将会抑制 ClO^- 和 ClO_3^- 的生成,并使溶解在阳极液中的 Cl_2 更容易从溶液中析出^[17]。因此,电解酸性脱硫废水可以获得更好的电解效果。

本实验阳极液采用酸性脱硫废水,研究不同酸性脱硫废水对电解产物的影响。之后将电解产物回喷入烟道中,研究电解产物对 Hg^0 氧化的影响。

1 材料与方

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),压缩气体(武润桦辉氧气气瓶检验有限责任公司东新分公司), $\text{V}_2\text{O}_5/\text{WO}_3\text{-TiO}_2$ SCR催化剂(宜兴市宜刚环保工程材料有限公司)。

1.2 实验装置

本实验所用的实验装置如图1所示。模拟燃煤烟气气体组分来自于压缩钢瓶,通过玻璃转子流量

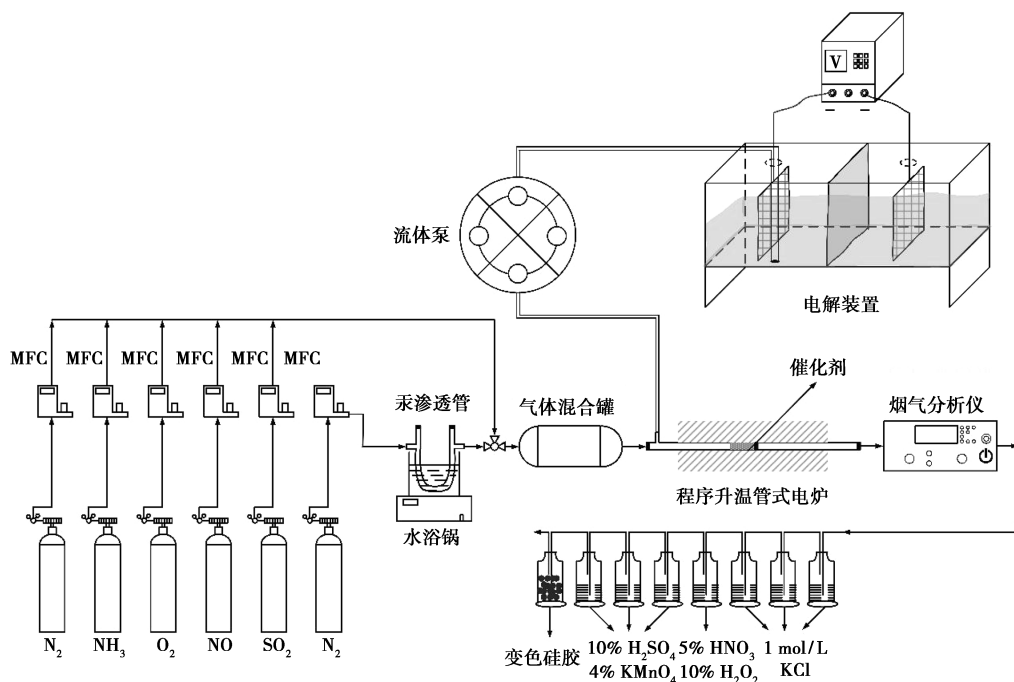


图1 模拟燃煤烟气脱硝脱汞实验装置

计进入到气体混合罐中。玻璃转子流量计用于控制气体流量大小,并保持总气体流量为 1 L/min。 Hg^0 来源于汞渗透管,并由 N_2 携带进入到混合气中。活性氯组分由电解装置产生,并由流体泵循环进入到混合烟气中。烟气组分混合后,从入口处进入到程序升温管式电炉中,在 SCR 催化剂上发生反应。反应后的气体从出口处离开管式电炉。出口处的烟气分析仪可以实时监测各烟气组分的浓度,末端安大略装置吸收并固定烟气中的汞元素^[18]。吸收液中的汞元素由 ICP-MS 进行分析。

1.3 实验方法

1.3.1 工艺参数确定

本实验向阳极液脱硫废水中加入 0~0.5 mol/L 的 HCl 溶液,在 2.50 A 的直流电流条件下电解 120 min。电解完成后,对阳极液测定氯离子含量和活性氯含量。然后将电解除硫废水阳极液回喷至模拟烟气中,在固定床反应器中的 SCR 催化剂表面与 Hg^0 反应。模拟烟气在固定床反应器由吸收瓶吸收 60 min,然后使用原子吸收仪测定汞元素含量。

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)^[19]。

溶液中活性氯的检测方法采用五步碘量法^[20]。

燃煤烟气中汞元素的吸收采用安大略法(Ontario Hydro Method)^[18]。

2 结果与讨论

2.1 HCl 浓度对氯离子脱除量和脱除率的影响

HCl 浓度对氯离子脱除量和脱除率的影响见图 2。

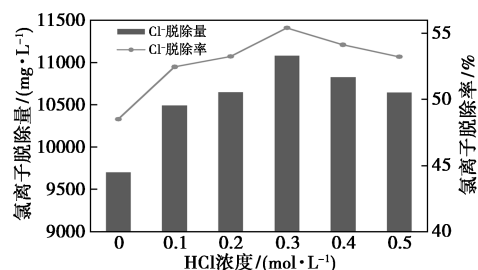
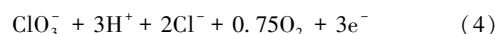
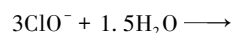
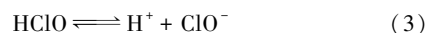
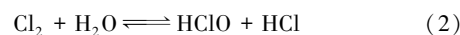
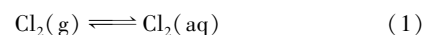


图 2 HCl 浓度对氯离子脱除量和脱除率的影响

由图 2 可知,随着 HCl 溶液浓度的增加,氯离子脱除量先增大后减小。当 HCl 溶液为 0.3 mol/L 时,氯离子脱除量最大,为 11 000 mg/L。当 HCl 溶液浓度为 0 时,电解产生的 Cl_2 首先溶解在阳极液中,生成 HClO 和 ClO^- ,并伴有其他副反应的发生

[见式(1)~(4)]^[16],增加了电解电压,降低了电流效率,因此,HCl 溶液为 0 时氯离子脱除量较低。随着电解的进行,当溶液 pH 下降到 2.0~2.5 时,电解生成的 Cl_2 开始从溶液中析出^[17]。当 HCl 溶液从 0.1 mol/L 增大到 0.3 mol/L 时,阳极液初始 pH 较低,抑制了 Cl_2 在阳极液中的溶解和副反应的发生,电流效率增大,因此,氯离子脱除量有显著增加^[16-17]。当 HCl 溶液从 0.3 mol/L 增大到 0.5 mol/L 时,阳极液和阴极液中 HCl 溶液化学浓度梯度差不多,化学浓度梯度的扩散作用减弱;又因为电场的作用,阴极液中大量的阴离子移动到离子交换膜附近,影响了极液之间的传质作用。所以,当 HCl 溶液浓度大于 0.3 mol/L 时,氯离子脱除量略有减少^[17,21]。



由图 2 还可以看出,随着 HCl 溶液浓度的增加,氯离子脱除率也是先增大后减小。当 HCl 溶液浓度为 0.3 mol/L 时,氯离子脱除率达到最大值 55.41%。当阳极液为酸性溶液时(HCl 溶液浓度为 0.1~0.5 mol/L),氯离子脱除率均在 50% 以上,氯离子脱除效果优于前人的研究^[14-15]。

2.2 HCl 浓度对电解产物中 Cl_2 所占比例的影响

酸性阳极液有利于阳极电解产生更多的 Cl_2 ,从而提高 Cl_2 的产量和纯度^[17]。本节实验首先向脱硫废水中添加不同浓度的 HCl 溶液,然后研究不同 HCl 浓度对电解产物中 Cl_2 所占比例的影响,结果见图 3。

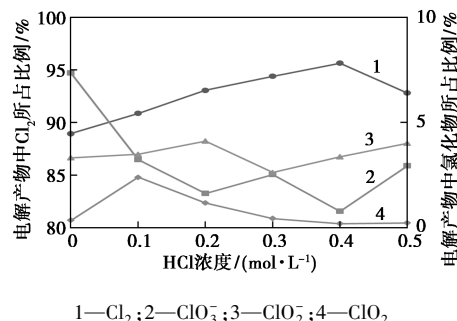
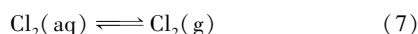
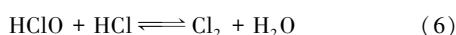


图 3 电解产物中各氯化物所占比例

由图 3 可知,当 HCl 溶液浓度从 0 增大到 0.5 mol/L 时, Cl_2 在电解产物中所占比例先升高后减小,当 HCl 溶液浓度为 0.4 mol/L 时 Cl_2 所占比例达到最大值 95.67%。当 HCl 溶液从 0 增大到 0.4 mol/L 时, Cl_2 在电解产物中所占比例不断增

大,这主要是由于阳极液中存在大量 H^+ 离子,抑制了 HClO 电离生成 ClO^- ,从而抑制了 Cl_2 在阳极液中的溶解, Cl_2 更容易从阳极液中析出[见式(5)~(7)],因此提高了 Cl_2 的产量;而阳极液中 HClO 和 ClO^- 浓度的降低,避免了电解副反应的发生,所以 Cl_2 在电解产物中所占比例不断增大^[17]。当 HCl 溶液从 0.4 mol/L 增大到 0.5 mol/L 时, Cl_2 在电解产物中所占比例略有降低,这主要是由于阳极液中 HCl 浓度过高,使得更多的氯离子和 ClO^- 在阳极被氧化生成 ClO_2^- 和 ClO_3^- ,副反应增加[见式(8)、(9)], Cl_2 在电解产物中所占比例略有降低^[16]。

由于 HCl 溶液浓度为 0.3 和 0.4 mol/L 时,电解产物中 Cl_2 所占比例大致相同;而 HCl 溶液浓度为 0.3 mol/L 时氯离子脱除量和脱除率又最大,所以 0.3 mol/L 为 HCl 溶液最佳浓度。



2.3 不同电解脱硫废水产物回喷对烟气中 Hg^0 氧化的影响

燃煤烟气中的 Hg^0 可以在 SCR 催化剂表面被氧化生成 Hg^{2+} 。在有 O_2 参与条件下,通过 Mars-Maessen 机理, Hg^0 被 V_2O_5 催化氧化生成 HgO 。然而在无氯化物参与条件下, V_2O_5 催化效率较低(仅有 20%)^[5]。有研究表明,在 HCl 、 Cl_2 和 HClO 等氯化物参与下, Hg^0 氧化效率较高^[6]。因此,电解脱硫废水产生较多的氯化物,可以回喷进烟道内,提高 Hg^0 氧化效率。不同电解脱硫废水产物对烟气中 Hg^0 的氧化率见图 4。

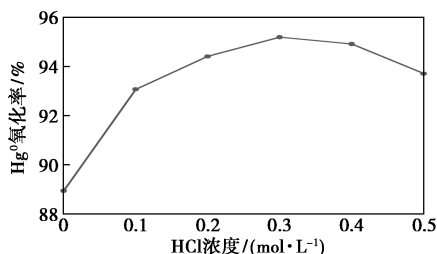


图 4 不同电解脱硫废水产物回喷对烟气中 Hg^0 的氧化率

由图 4 可知,当脱硫废水中无 HCl 溶液时,SCR 催化剂对 Hg^0 的氧化效率为 89%,比之前文章研究的只在 O_2 参与条件下的 Hg^0 氧化效率高很多^[5]。随着向脱硫废水中加入不同浓度的 HCl 溶液,大量 H^+ 促进了阳极电解产生更多的 Cl_2 ,SCR 催化氧化

Hg^0 的效率继续提升。当 HCl 溶液浓度从 0.1 mol/L 增大到 0.5 mol/L 时, Hg^0 氧化率先增大后减小,在 0.3 mol/L 时达到最大氧化率 94.9%。

当电解脱硫废水产物回喷进烟道后,一部分未被阳极氧化的剩余氯离子在 SCR 催化剂表面通过 Deacon 反应催化氧化生成 Cl_2 ,溶解在阳极液中的 Cl_2 在高温烟道中气化,而电解产生的气态 Cl_2 直接从电解装置中引入烟道内,这些生成的 Cl_2 在 SCR 催化剂表面被活化,生成氯氧合钒配合物,氯氧合钒配合物与 Hg^0 反应生成 HgCl_2 , Hg^0 被氧化生成 Hg^{2+} ^[5]。

3 结论

(1) 向脱硫废水阳极液添加 HCl 溶液,可以降低电解产生的 Cl_2 在阳极液中的溶解度,同时抑制 Cl_2 与阳极液反应生成 HClO 和 ClO^- 等,有利于产生更多的 Cl_2 并促进 Cl_2 从阳极液中析出。 HCl 溶液的加入同时可以提高氯离子脱除量和脱除率,当 HCl 溶液浓度为 0.3 mol/L 时,氯离子脱除量和脱除率达到最大值 11 000 mg/L 和 55.41%。

(2) 向脱硫废水阳极液添加 HCl 溶液,可以抑制阳极液电解副反应的发生,提高 Cl_2 在电解产物中所占比例,当 HCl 溶液浓度为 0.4 mol/L 时, Cl_2 在电解产物中所占比例达到最大值 95.67%。

(3) 将不同电解脱硫废水产物回喷进烟道内,对 Hg^0 的氧化率均有不同程度的提高。当 HCl 溶液浓度为 0.3 mol/L 时, Hg^0 的氧化率达到最大值 94.9%。

参考文献

- [1] Pavlish J H, Sondreal E A, Mann M D, *et al.* Status review of mercury control options for coal-fired power plants[J]. *Fuel Process Technol*, 2003, 82(2): 89-165.
- [2] Wu Y, Wang S, Streets D G, *et al.* Trends in anthropogenic mercury emissions in China from 1995 to 2003[J]. *Environ Sci Technol*, 2006, 40(17): 5312-5318.
- [3] Galbreath K C, Zygarićke C J. Mercury transformations in coal combustion flue gas[J]. *Fuel Process Technol*, 2000, 65-66: 289-310.
- [4] Zhou Z, Liu X, Hu Y, *et al.* Investigation on synergistic oxidation behavior of NO and Hg^0 during the newly designed fast SCR process[J]. *Fuel*, 2018, 225: 134-139.
- [5] 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.
- [6] Krishnakumar B, Helble J J. Determination of transition state theory rate constants to describe mercury oxidation in combustion systems mediated by Cl, Cl_2 , HCl and HOCl[J]. *Fuel Process Technol*, 2012, 94(1): 1-9.

(下转第 254 页)

- [5] 魏季宁,刘涛,朱林,等.石灰石-石膏湿法脱硫副产物综合利用及对策研究[J].电力科技与环保,2012,(3):38-40.
- [6] 林驰前.干法脱硫副产物的特性及综合利用技术[J].中国环保产业,2016,(5):46-50.
- [7] 陈永瑞.干法脱硫灰的理化特性及其综合利用现状[J].福建师大福清分校学报,2019,(2):15-20.
- [8] Fernández J, González F, Pesquera C, *et al.* Qualitative and quantitative characterization of a coal power plant waste by TG/DSC/MS, XRF and XRD [J]. *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*, 2016, 125(2):703-710.
- [9] Chuparina E V, Chubarov V M, Paradina L P. A comparative determination of major components in coal power plant wastes by wavelength dispersive X-ray fluorescence using pellet and fused bead specimens [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2019, 152:162-167.
- [10] 霍超,刘志刚,白瑞英,等.钢厂烧结烟气脱硫灰理化特性[J].河北联合大学学报:自然科学版,2015,31(2):1-4,9.
- [11] 常风.半干法烧结烟气脱硫灰的理化特性与综合利用[J].安徽冶金,2019,(4):26-28.
- [12] 耿继双,王东山,张大奎,等.鞍钢烧结烟气脱硫灰综合利用研究[J].鞍钢技术,2011,(6):13-16.
- [13] 纪宪坤,周永祥,冷发光.流化床(FBC)燃煤固硫灰渣研究综述[J].粉煤灰,2009,(6):41-45.
- [14] 蔡文举.CFB 脱硫灰与粉煤灰对比分析初探[J].中国水泥,2019,(11):104-106.
- [15] 胡伟.脱硫灰与矿渣耦合制备新型墙体材料的研究[D].马鞍山:安徽工业大学,2018.
- [16] 刘彦鹏,王勤辉,骆仲决,等.不同煤种下循环流化床灰渣特性的试验研究[J].锅炉技术,2004,35(3):19-23.
- [17] 郭斌,卜京凤,任爱玲,等.烧结烟气半干法脱硫灰理化特性[J].中南大学学报(自然科学版),2010,41(1):387-392.
- [18] 刘品德,全峰,陆洁,等.煤粉炉粉煤灰和循环流化床锅炉粉煤灰的特性及其对蒸压加气混凝土性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2019,(7):67-70.
- [19] 湛军.脱硫灰改良路基软土特性研究及工程应用[D].南京:河海大学,2007.
- [20] 程志,魏林海,韩涛,等.循环流化床脱硫灰渣性质及应用研究进展[J].锅炉技术,2018,49(5):34-38.
- [21] 谢锦鹏.脱硫灰渣的综合利用现状研究[J].冶金管理,2021,(5):150-151.
- [22] 王朝强,谭克锋,戴传彬,等.我国脱硫灰渣资源化综合利用现状[J].粉煤灰综合利用,2014,(2):51-56.
- [23] 单雪媛,马志斌,郭彦霞,等.不同粒径循环流化床粉煤灰组成特性研究[J].煤炭科学技术,2018,46(11):232-238.
- [24] 周笛.烧结烟气脱硫灰制备硫酸钙晶须及生长行为研究[D].马鞍山:安徽工业大学,2020.
- [25] Ballirano P, Melis E. Thermal behaviour and kinetics of dehydration of gypsum in air from in situ real-time laboratory parallel-beam X-ray powder diffraction [J]. *Physics & Chemistry of Minerals*, 2009, 36(7):391-402.
- [26] 张辉.密相干塔脱硫灰的特性分析及制备蒸养砖的研究[D].石家庄:河北科技大学,2012.
- [27] 王文龙,崔琳,马春元,等.干法半干法脱硫灰的特性与综合利用研究[J].电站系统工程,2005,21(5):27-29.
- [28] 袁伟,刘涛,李程龙,等.脱硫灰制备蒸压加气混凝土影响因素浅析[J].砖瓦,2020,(3):54-56.
- [29] 常迎星,王丹丹,巩艳萍,等.纳米碳酸钙吸油值的研究[J].化学试剂,2019,41(6):577-580.
- [30] 陈艳琼,高璋生.干法脱硫灰替代矿粉对沥青路面性能影响研究[J].长春工程学院学报:自然科学版,2021,22(1):4-7. ■
- (上接第 247 页)
- [7] Sun Z, Wang S, Zhou Q, *et al.* Experimental study on desulfurization efficiency and gas-liquid mass transfer in a new liquid-screen desulfurization system [J]. *Appl Energy*, 2010, 87(5):1505-1512.
- [8] Ma S, Chai J, Wu K, *et al.* Experimental and mechanism research on volatilization characteristics of HCl in desulfurization wastewater evaporation process using high temperature flue gas [J]. *J Ind Eng Chem*, 2018, 66:311-317.
- [9] Saleh T A. Applying nanotechnology to the desulfurization process in petroleum engineering [M]. IGI Global, 2015.
- [10] Saleh T A. Nanotechnology in oil and gas industries [M]. Switzerland: Springer, 2018.
- [11] 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]. *Chem Eng Res Des*, 2017, 123:240-247.
- [12] 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.
- [13] Brogren C, Karlsson H T. The impact of the electrical potential gradient on limestone dissolution under wet flue gas desulfurization conditions [J]. *Chem Eng Sci*, 1997, 52(18):3101-3106.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Athnacios A K. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. 7th [M]. German: Wiley-VCH, 2010. <https://doi.org/10.1002/14356007.a06-483.pub2/>
- [17] Athnacios A K. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. 7th [M]. German: Wiley-VCH, 2011. <https://doi.org/10.1002/14356007.a06-399.pub3/>
- [18] 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.
- [19] 国家环境保护总局.HJ/T 343—2007 水质 氯化物的测定 硝酸汞滴定法[S].北京:中国环境科学出版社,2007.
- [20] 王香,方亦光,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.
- [21] Davis T A, Pletcher D. A first course in ion permeable membranes [M]. London: The Electrochemical Consultancy, 1997:4-8. ■