

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.09.017

拜耳法赤泥与海水混合用于烟气脱硫试验

刘中凯, 闫琨, 康泽双, 和新忠

(中铝郑州有色金属研究院有限公司, 郑州, 450041)

摘要:以海水调制拜耳法赤泥作为脱硫剂开展烟气湿法脱硫试验,对比分析了赤泥海水浆、赤泥纯水浆和单纯海水的脱硫效果,并考察了液固比、液气比和温度对赤泥海水脱硫和赤泥脱碱效果的影响。在优选液固比 9、液气比 8.0 L/m^3 和温度 60°C 的工艺条件下,赤泥海水脱硫平均脱硫效率达到 99.62%,赤泥脱碱效率达到 85.06%,脱碱后赤泥满足 I 类工业固废标准,赤泥海水脱硫液与新鲜海水混合曝气后满足 GB 18486—2001 污水海洋处置标准要求。赤泥与海水混合用于烟气脱硫,提高了二氧化硫吸收效率,为沿海氧化铝企业赤泥处置利用提供一条新途径。

关键词:拜耳法赤泥;海水;脱硫效率;脱碱效率

中图分类号:X701.3

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2021)09-0104-07

Study on Flue Gas Desulfurization by Mixing Bayer Red Mud with Seawater

LIU Zhong-kai, YAN Kun, KANG Ze-shuang, HE Xin-zhong

(Zhengzhou Nonferrous Metals Research Institute Co., Ltd., CHALCO, Zhengzhou 450041, China)

Abstract: Experimental study on wet flue gas desulfurization was carried out by using Bayer red mud mixed with seawater as desulfurizer. Desulfurization effects of red mud seawater slurry, red mud pure water slurry and pure seawater were contrastively analyzed. Effects of L/S, ratio of gas to liquid and temperature on desulfurization were investigated. The results show that average desulfurization efficiency is 99.62% and alkali removal efficiency of red mud is 85.06% under the optimum conditions including L/S of 9, ratio of gas to liquid of 8.0 L/m^3 , and reaction temperature of 60°C . After desulfurization, red mud can meet the class I industrial solid waste standard, and red mud seawater desulfurization solution can meet the requirements of GB 18486—2001 marine sewage disposal standard after mixed aeration with fresh seawater. Red mud mixed with seawater used for flue gas desulfurization, which improves absorption efficiency of sulfur dioxide, provides a new way for red mud disposal and utilization of coastal alumina enterprises.

Key words: Bayer red mud; seawater; desulfurization efficiency; dealkalization efficiency

二氧化硫是大气污染物之一,烟气脱硫是全国范围强制实施的大气污染控制措施。传统的石灰或石灰石脱硫、钠碱法脱硫等技术投资大、运行成本

高^[1],寻求经济高效的脱硫技术一直是该领域研究热点。

赤泥是以铝土矿为原料生产氧化铝产生的强碱

收稿日期:2021-04-26

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFC1908802)

作者简介:刘中凯(1989-),男,山东菏泽人,硕士研究生,工程师

性废弃物,综合利用难度较大^[2]。目前,我国90%以上氧化铝生产采用拜耳法工艺。由于生产工艺及铝土矿品位的差别,生产1 t氧化铝约产生1.0~2.0 t赤泥^[3]。我国赤泥年排放量接近1亿t,累计堆存量超过12亿t,其综合利用率不到5%,大量的赤泥堆存,既占用大量土地,存在很大的环境风险^[4]。赤泥颗粒细微、比表面积大、碱性强、有效固硫成份含量高,对SO₂气体有较强的吸附能力和反应活性^[5-6],国内外学者对赤泥用于烟气脱硫开展了大量的研究^[7-16],取得了一定的技术效果。

天然海水呈现碱性,pH为7.8~8.3,碱度为2.0~3.0 mmol/L,具有很好的脱硫效果^[17],国内外相继在船舶烟气脱硫、热电厂脱硫进行了工程应用^[18-19]。但是单纯以海水为脱硫剂有一定局限性,只适用于低硫煤烟气。对中、高硫煤烟气脱硫效果差,脱硫剂成本高。

随着我国铝土矿品位的逐渐下降,进口铝土矿资源的用量越来越大,未来沿海氧化铝企业会呈现增长趋势,沿海氧化铝赤泥产生量会越来越大。本文研究以海水调制进口铝土矿拜耳法赤泥作为脱硫剂用于烟气湿法脱硫,协同利用赤泥和海水的脱硫作用,不仅提高烟气脱硫效率,更降低赤泥碱性,有利于赤泥综合利用,为沿海氧化铝企业赤泥处置提供一条有效途径。

1 试验部分

1.1 试验原料

拜耳法赤泥:本次试验原料为山东某氧化铝厂的进口铝土矿拜耳法赤泥。采用MagiX(PANalytical)荧光分析仪分析拜耳法赤泥的化学组成,结果为(%):Al₂O₃ 23.03、SiO₂ 13.99、Fe₂O₃ 35.44、TiO₂ 6.60、K₂O 0.19、Na₂O 7.23、CaO 1.17、MgO 0.58。该拜耳法赤泥的主要化学成分为Al₂O₃、Fe₂O₃和SiO₂,约占整个组分的72.46%,其次为Na₂O、TiO₂、CaO、K₂O和MgO,约占15.77%。

海水:取自渤海,pH为8.06,化学成分(g/L):Ca²⁺ 0.39、Mg²⁺ 1.08、K⁺ 0.30、Na⁺ 7.99、Cl⁻ 20.36、SO₄²⁻ 5.67。

1.2 试验装置及方法

装置包括计算机配气系统、脱硫反应主体、烟气检测等。试验装置连接如图1所示。模拟工业SO₂烟气,由钢瓶输送的SO₂、N₂、O₂气体采用RCS2000-A型智能计算机配气柜调配混合气体,调配的混合气SO₂浓度为3 000 mg/m³、N₂含量94%、

O₂含量6%。按照一定液固比配置海水赤泥浆,注入到脱硫塔底部,将脱硫塔底部的赤泥海水浆在恒温水浴锅内保温,以保证料浆温度恒定,赤泥海水浆通过浆液循环泵输送至塔上部喷淋头喷淋,与SO₂气体逆流接触,实现烟气脱硫,脱硫气体通入缓冲瓶,测量气体成分。

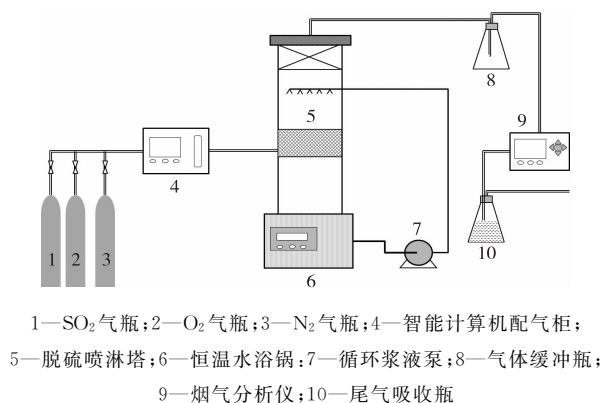


图1 赤泥海水脱硫所有装置连接图

Fig. 1 Connection diagram of red mud seawater mixed desulfurization experimental device

由于循环泵的流量恒定,通过调整计算机配气柜的进塔混合气体流量来调整液气比;通过调整恒温水浴锅温度调整脱硫反应温度。采用J2KNIB烟气分析仪测量脱硫塔入口和脱硫塔出口气体的SO₂浓度。采用PHS-3C型酸度计测量脱硫浆体的pH。对脱硫后浆体进行液固分离、烘干,测试脱硫赤泥化学成分,对比测试原赤泥和脱硫赤泥的XRD及扫描电镜形貌。

脱硫效率 R 即SO₂吸收率计算公式:

$$R = (C_{in} - C_{out}) / C_{in} \times 100\%$$

式中, C_{in} 和 C_{out} 分别为脱硫塔入口和出口处烟气分析仪所测的SO₂的浓度(mg/m³)。

赤泥脱碱效率 ρ ,即Na₂O脱除效率的计算公式:

$$\rho = (N_0 \times m_0 - N_i \times m_i) / (N_0 \times m_0) \times 100\%$$

N_0 和 N_i 分别为原赤泥与脱硫赤泥中Na₂O的百分含量(%); m_0 和 m_i 分别为原赤泥与脱硫赤泥的质量(g)。

2 结果与讨论

2.1 不同脱硫配比脱硫效果对比分析

在烟气SO₂浓度3 000 mg/m³、进塔气体总流量2.0 L/min、液气比6.0 L/m³以及脱硫塔脱硫温度50℃的条件下,分别采用赤泥海水浆、赤泥纯水浆

和单纯海水进行对比脱硫试验,测定在不同时间的脱硫效率,结果如图2所示。无论是赤泥海水脱硫剂还是赤泥纯水脱硫剂,一开始就维持较高的脱硫效率(>98%),并且保持较长的时间。赤泥海水脱硫剂脱硫效率维持98%以上的时间是120 min,赤泥纯水脱硫剂脱硫效率维持98%以上时间为70 min,而单一海水脱硫效率仅前40 min维持在95%以上。从变化规律看,赤泥海水浆的脱硫效率在120 min以后下降趋势较为平缓,而赤泥纯海水浆和单一海水的脱硫效率在60 min以后则迅速下降。

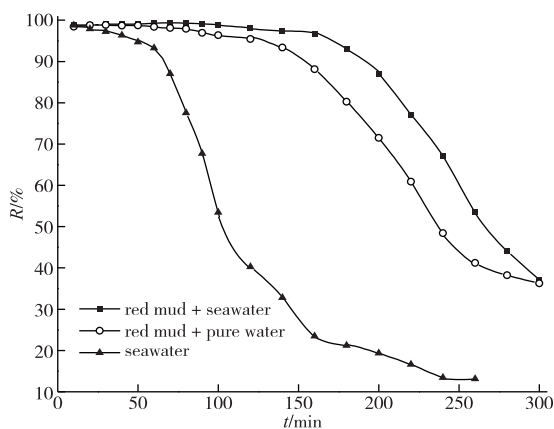
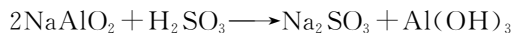
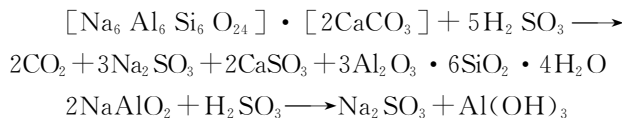
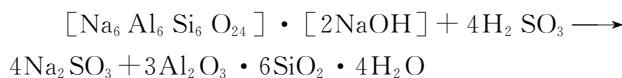
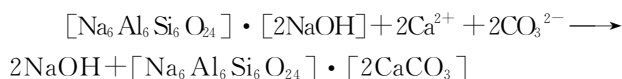
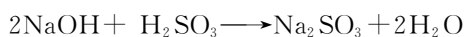
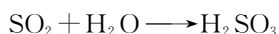


图2 不同脱硫剂脱硫过程脱硫效率随着时间变化关系

Fig. 2 Relationship between desulfurization efficiency and time during desulfurization process with different desulfurizer

赤泥海水脱硫效果优于赤泥纯水和单一海水脱硫,这是由于海水中含有大量的电解质离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等),这些多价阳离子会形成静电桥梁,促进更多氢氧化物、碳酸盐以及羟基碳酸盐的生成,如部分羟基方钠石($[\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}] \cdot [2\text{NaOH}]$)在海水作用下向钙霞石($[\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}] \cdot [2\text{CaCO}_3]$)转化,进一步提高了脱硫能力,同时也促使赤泥细小颗粒矿物质絮凝成较大的附聚物,避免了细小颗粒在脱硫过程中随烟气带走。由于电解质阳离子的作用,促进了带正电荷胶粒的形成,进一步促进了大量阴离子(包括 SO_3^{2-})吸收凝聚成胶团,使得胶团更容易直接固定 SO_3^{2-} ,促进 SO_2 的吸收过程,大幅提高了脱硫效率^[13]。

赤泥海水脱硫主要反应机理^[14-15]:



测量不同脱硫剂脱硫过程 pH 随着时间变化,结果如图3所示。三种脱硫剂料浆的 pH 随脱硫时间的延长均呈下降趋势。一开始 pH 下降速度均很快,100 min 赤泥海水脱硫剂的 pH 下降到 6.33,然后下降幅度趋于缓慢;赤泥纯水浆的 pH 在 100 min 下降到了 5.95,然后下降幅度也略有降缓,200 min 后 pH 下降速度又开始加快,此时赤泥料浆已变成酸性, SO_2 的脱除效率极低;单一海水脱硫过程 pH 迅速下降后维持在较低水平,90 min 即达到 4.92,其脱硫效率极低,后趋于平缓下降。

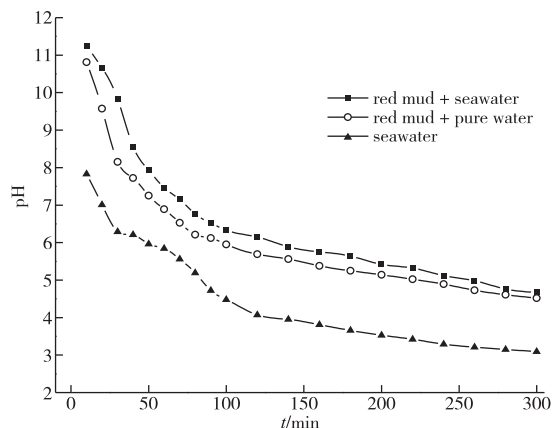


图3 不同脱硫剂脱硫过程 pH 随着时间变化关系

Fig. 3 pH value variation with time during desulfurization process with different desulfurizer

2.2 浆液液固比对赤泥海水脱硫效果分析

保持烟气 SO_2 浓度 $3\,000\text{ mg/m}^3$ 、进塔气体总流量 2.0 L/min 、液气比 6.0 L/m^3 以及脱硫塔脱硫温度 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 的条件不变,考察不同液固比下赤泥海水浆液的平均脱硫效率(脱硫效率维持在90%以上时间段的平均效率)以及赤泥中 Na_2O 的脱除效率,液固比与脱硫效率和脱碱效率的对应关系如图4所示。由图4可知,随着液固比的增加,脱硫效率先增大后

减小。 SO_2 与赤泥海水浆液反应是一个扩散传质和化学反应的双重过程,随着液固比的增大,浆液变稀,吸收体系黏度减小,反应物的扩散速度增加,反应速率增大,脱硫效率增大;但液固比继续增大,浆液变得很稀,单位体积内可与烟气反应的有效成分减少,故反应效率降低^[11-12]。随着液固比的增大赤泥的脱碱效率逐步增加,液固比增大到 9 后脱碱效率趋于平缓增加,这是因为,随着液固比的增大,赤泥颗粒分散更加均匀,烟气中的 SO_2 更容易与赤泥的结合碱和游离碱发生反应。综合脱硫效率和脱碱效果分析,取液固比 9 比较合适。

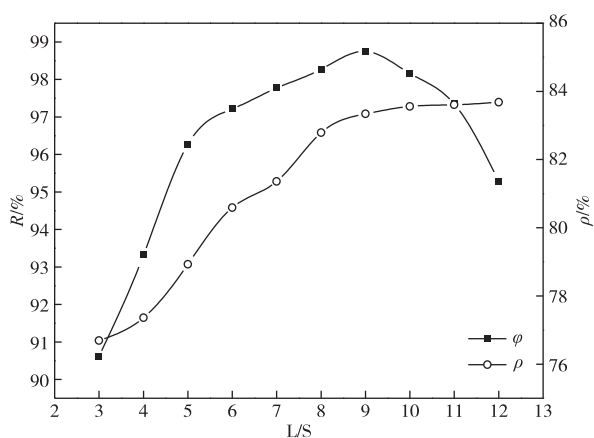


图 4 浆液液固比与脱硫效率和脱碱效率关系

Fig. 4 Relationship between L/S of slurry and desulfurization efficiency and dealkalization efficiency

2.3 液气比对赤泥海水脱硫效果分析

保持其他参数不变,考察不同液气比下赤泥海水浆液的平均脱硫效率以及赤泥脱碱效率。从图 5 可看出,赤泥海水的脱硫效率随液气比的增加迅速增加,液气比增加到 8.0 L/m^3 后脱硫效率趋于平缓。同样,随着液气比的增加,赤泥的脱碱效率也迅速增大,后趋于平缓。这是由于随着液气比增加,提高了传质系数,可提高烟气脱硫效率和赤泥脱碱效率。综合考虑,选取液气比为 8.0 L/m^3 。

2.4 温度对赤泥海水脱硫效果分析

保持其他参数不变,考察不同赤泥海水浆液脱硫温度下的平均脱硫效率以及赤泥脱碱效率,脱硫温度与脱硫效率和脱碱效率的对应关系如图 6 所示。从图 6 可知,随着脱硫温度的升高, SO_2 的脱除效率逐渐增大,这是因为,温度升高,气相传质分系数、液相传质分系数和液相总传质系数均随海水温度的升高而增大^[20-22]。但吸收温度也不能过高,温

度太高, SO_2 气体的溶解度减小,在溶液中的质量浓度降低,相应其利用率降低,脱硫效率会降低,且升高温度会增大能耗。随着温度的升高,赤泥的脱碱效率逐步增加,但增加到 60°C 以上赤泥的脱碱效率有所下降。虽然温度升高有利于脱碱,但温度过高后脱硫效率有所下降,其与赤泥中的碱反应不充分。综合考虑,取反应温度为 60°C ,此时平均脱硫效率达到 99.62%,赤泥的脱碱效率达到 85.06%。

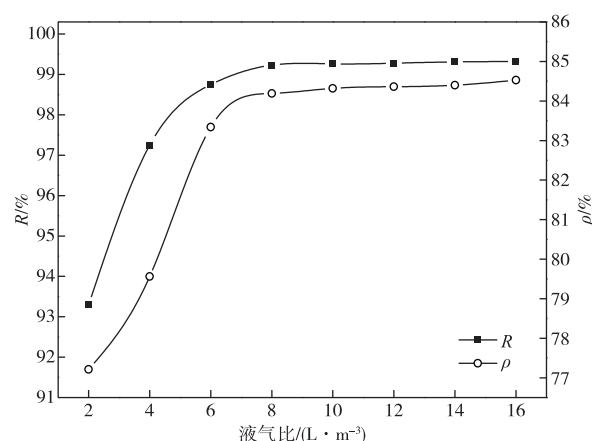


图 5 液气比与脱硫效率和脱碱效率关系

Fig. 5 Relationship between ratio of gas to liquid and desulfurization efficiency and dealkalization efficiency

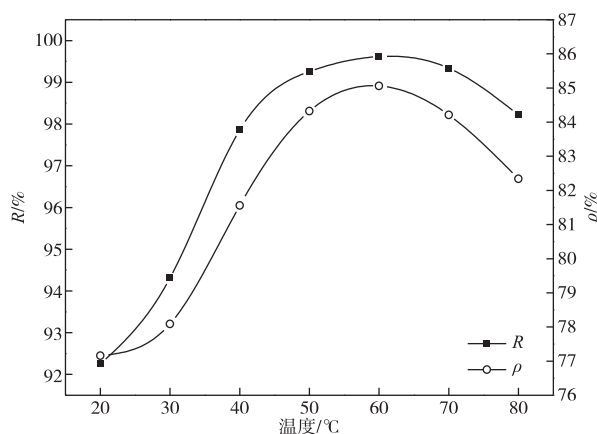


图 6 温度与脱硫效率和脱碱效率关系

Fig. 6 Relationship between temperature and desulfurization efficiency and dealkalization efficiency

2.5 脱硫赤泥性质分析

采用荧光分析仪分析脱碱赤泥的成分,主要化学成分(%): Al_2O_3 24.58、 SiO_2 14.53、 Fe_2O_3 38.58、 Na_2O 1.03、 CaO 0.78、 TiO_2 6.74、 MgO 0.61、

K_2O 0.09。与原赤泥相比,脱碱赤泥的 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 SiO_2 等含量变化不大,但脱碱赤泥的 Na_2O 含降低到 1.03%,其腐蚀性 pH 为 6.88,达到 GB 18599—2001 中 I 类工业固废标准。

分析原赤泥与脱碱赤泥的 XRD 谱如图 7 所示,原赤泥主要物相为赤铁矿(Fe_2O_3)、石英(SiO_2)、羟基方钠石($Na_6Al_6Si_{24} \cdot 2NaOH$)、锐钛矿(TiO_2)、一水软铝石($AlO(OH)$)、针铁矿($FeO(OH)$),经过赤泥海水脱硫后,赤泥中主要羟基方钠石衍射峰明显减弱,也出现了亚硫酸钙相($CaSO_3 \cdot 0.5H_2O$),其他衍射峰变化不明显。这是由于羟基方钠石在脱硫反应过程中参与反应,通过海水中钙离子的置换后进一步生成了亚硫酸钙。

原赤泥和脱碱赤泥的扫描电镜微观形貌如图 8 所示。从图 8 可以看出,原赤泥颗粒是形状不规则、大小不均匀的片状或块状小颗粒体,经过脱硫后赤泥颗粒整体形貌变化不大,而外观发生了明显变化,赤泥表面产生了较多的附聚颗粒状晶体,且颗粒表

面粗糙多孔。这说明在海水电解质阳离子的作用下,促进了带正电荷胶粒凝聚成胶团,也促进 SO_2 吸收, SO_2 与赤泥颗粒表面碱性物质发生反应,造成赤泥颗粒表面疏松多孔。

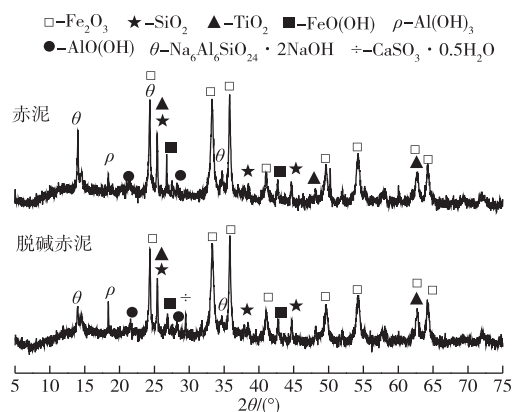


图 7 赤泥与脱碱赤泥的 XRD 谱

Fig. 7 XRD patterns of red mud and dealkalization red mud

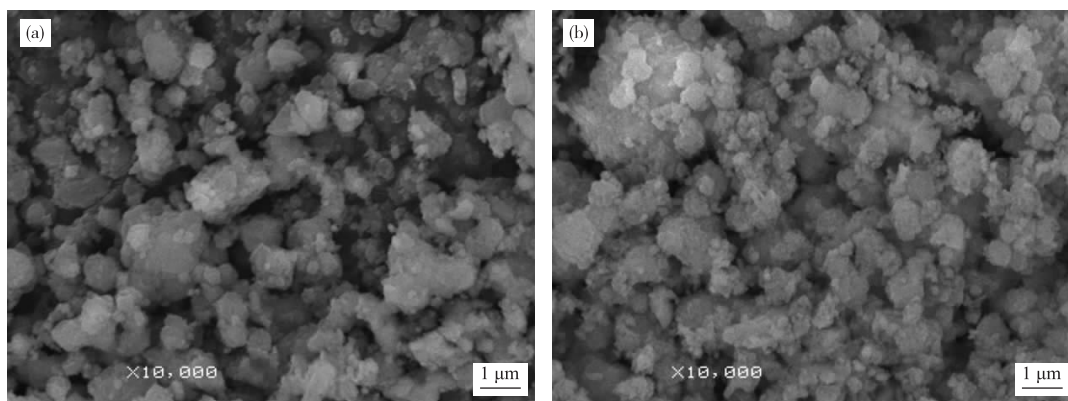


图 8 赤泥(a)与脱碱赤泥(b)的 SEM 形貌

Fig. 8 SEM images of red mud(a) and dealkalization red mud(b)

2.6 混合海水性质分析

将脱硫后的赤泥海水浆体液固分离得到酸性脱硫海水,其与新鲜海水按照 1:3 的比例混合曝气氧化,对混合海水进行污染物分析,分析结果如表 1 所

示。可以看出,混合海水水质的 pH、悬浮物、BOD、COD 以及重金属等污染物含量均符合《污水海洋处置工程污染控制标准》(GB 18486—2001)标准限制要求。

表 1 赤泥脱硫混合海水性质分析

Table 1 Property analysis of red mud desulfurization mixed seawater /($mg \cdot L^{-1}$)

检测项目	pH*	SS	BOD	COD	氰化物	氟化物	硫化物	氨氮	总磷
混合海水	7.05	35.72	17.51	2.32	未检出	2.41	0.01	0.08	0.21
GB 18486—2001 限定值	6~9	200	150	300	0.5	15	1.0	25	8.0
检测项目	总铬	总砷	总铅	六价铬	总铜	总镉	总汞	总锌	总镍
混合海水	0.041	<0.01	<0.005	<0.005	<0.01	<0.01	<0.01	0.026	<0.01
GB 18486—2001 限定值	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	0.1	0.05	5.0	1.0

注: * 无单位

3 结论

1) 赤泥海水混合脱硫剂的脱硫效果优于赤泥纯水脱硫剂,海水具有缓冲浆液 pH 的效果,海水中的多价阳离子会形成静电桥梁,促进赤泥中氢氧化物、碳酸盐以及羟基碳酸盐的生成,也加速细颗粒胶团凝聚,提高赤泥吸收二氧化硫效率。

2) 烟气脱硫过程中,除赤泥附着碱发生反应外,赤泥中的化合碱(如羟基方钠石)也发生反应,赤泥表面产生了较多的附聚颗粒,且颗粒表面粗糙多孔。

3) 采用赤泥海水混合脱硫,在液固比 9、反应液气比 8.0 L/m^3 和反应温度 60°C 的优选条件下,平均脱硫效率达到 99.62%,赤泥脱碱效率达到 85.06%,脱硫后尾气中的二氧化硫达到超低排放要求。

3) 赤泥海水混合脱硫后,脱碱赤泥 pH 为 6.88,能够满足 GB 18599—2001 中 I 类工业固废标准,赤泥海水脱硫液与新鲜海水混合曝气后满足 GB 18486—2001 污水海洋处置标准要求。

参考文献

- [1] 武春锦,吕武华,梅毅,等.湿法烟气脱硫技术及运行经济性分析[J].化工进展,2015,34(12):245-251.
WU C J, LYU W H, MEI Y, et al. Application and running economic analysis of wet flue gas desulfurization technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(12): 245-251.
- [2] 解立群,张延安,吕国志,等.钙化—碳化法连续化处理—水硬铝石拜耳法赤泥[J].有色金属(冶炼部分),2017(4):16-19.
XIE L Q, ZHANG T A, LV G Z, et al. Treatment of diaspoire Bayer red mud with calcification-carbonation continuous process[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2017(4): 16-19.
- [3] 张利,高一强,黄建洪,等.赤泥资源化综合利用研究进展[J].硅酸盐通报,2020,39(1):150-155.
ZHANG L, GAO Y Q, HUANG J H, et al. Research progress on resource comprehensive utilization of red mud[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(1): 150-155.
- [4] 宁国山,李帅,张波,等.赤泥含碳球团还原动力学[J].有色金属(冶炼部分),2017(1):24-27.
NING G S, LI S, ZHANG B, et al. Reduction kinetics of carbon-bearing pellets of red mud[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2017(1): 24-27.
- [5] 薛生国,李晓飞,孔祥峰,等.赤泥碱性调控研究进展[J].环境科学学报,2017,37(8):2815-2828.
XUE S G, LI X F, KONG X F, et al. Alkaline regulation of bauxite residue: A comprehensive review[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(8): 2815-2828.
- [6] 于绍忠,满瑞林.赤泥用于热电厂烟气脱硫研究[J].矿冶工程,2005,25(6):63-65.
YU S Z, MAN R L. Application of red mud in flue gas desulfurization from thermal power plant[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2005, 25(6): 63-65.
- [7] 位朋,李惠萍,靳苏静,等.氧化铝赤泥用于工业烟气脱硫的研究[J].化工进展,2011(增刊1):344-347.
WEI P, LI H P, JIN S J, et al. Research of alumina red mud for industrial flue gas desulfurization[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2011 (S1): 344-347.
- [8] 李惠萍,靳苏静,李雪平,等.工业烟气的赤泥脱硫研究[J].郑州大学学报(工学版),2013,34(3):34-37.
LI H P, JIN S J, LI X P, et al. Study on industrial flue gas desulfurization (FGD) by alumina red mud[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2013, 34(3): 34-37.
- [9] 黄芳,李军旗,赵平源,等.拜耳赤泥脱硫工艺的应用基础研究[J].有色金属,2010,62(3):153-155.
HUANG F, LI J Q, ZHAO P Y, et al. Application foundation study on novel desulfurization process[J]. Nonferrous Metals, 2010, 62(3): 153-155.
- [10] 陈义,李军旗,黄芳,等.拜耳赤泥吸收 SO_2 废气的性能研究[J].贵州工业大学学报(自然科学版),2007,36(4):30-32.
CHEN Y, LI J Q, HUANG F, et al. The performance research on absorbing SO_2 waste gas with Bayer red mud[J]. Journal of Guizhou University of Technology (Natural Science Edition), 2007, 36(4): 30-32.
- [11] 竹涛,王若男,金鑫睿,等.以废治废——铝厂固废赤泥治理工业废气二氧化硫的应用研究[J].有色金属工程,2019,9(7):109-114.
ZHU T, WANG R N, JIN X R, et al. Waste treatment by waste: Application research of solid waste red mud for purification of sulphur dioxide from industrial waste gas[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2019, 9(7): 109-114.
- [12] 南相莉,张延安,吴易全,等.拜耳赤泥吸收低浓度二氧化硫的研究[J].东北大学学报(自然科学版),2010,31(7):77-80.
NAN X L, ZHANG T A, WU Y Q, et al. A study on absorption of low-concentration SO_2 by Bayer red mud[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2010, 31(7): 77-80.
- [13] 孙详戔,盛彦清,张培青.赤泥与矿井废水在烟气脱硫

- 中的应用[J]. 环境化学, 2015(10):1958-1960.
- SUN X Y, SHENG Y Q, ZHANG P Q. Application of red mud and mine wastewater in flue gas desulfurization[J]. Environmental Chemistry, 2015(10):1958-1960.
- [14] FOIS E, LALLAI A A, MURA G. Sulfur dioxide absorption in a bubbling reactor with suspensions of Bayer red mud[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46(21):6770-6776.
- [15] WANG X K, ZHANG Y H, LV F Z, et al. Removal of alkali in the red mud by SO_2 and simulated flue gas under mild conditions[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2015, 34(1):81-87.
- [16] TAO L, WU H, WANG J, et al. Removal of SO_2 from flue gas using Bayer red mud: Influence factors and mechanism[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(2):467-478.
- [17] 张清风, 陈晓平, 余帆. 海水脱硫技术在船舶废气处理上的研究进展[J]. 化工进展, 2016, 35(1):277-284.
- ZHANG Q F, CHEN X P, YU F. A review of seawater desulphurization technology on ship exhaust treatment[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(1):277-284.
- [18] 薛军, 杨东, 陈玉乐, 等. 烟气海水脱硫技术的研发与应用[J]. 电力科技与环保, 2010, 26(1):36-38.
- XUE J, YANG D, CHEN Y L, et al. Development and application of seawater-FGD technology with self-owned intellectual property [J]. Electric Power Environmental Protection, 2010, 26(1):36-38.
- [19] 蔡正敏, 李刚, 李源. 海水脱硫法在印尼地热电站中的应用[J]. 能源与节能, 2018(12):87-88.
- CAI Z M, LI G, LI Y. Application of seawater FGD process in geothermal power plants in Indonesia[J]. Energy and Conservation, 2018(12):87-88.
- [20] 朱德勇, 谷伟, 冯庭有. 海水脱硫技术在 1 036 MW 超超临界机组中的应用[C]//2013 年发电企业节能减排技术论坛. 西安: 中国电机工程学会, 2013:275-279.
- ZHU D Y, GU W, FENG T Y. Application of seawater desulfurization technology in 1 036 MW ultra supercritical units [C]//2013 Energy Saving and Emission Reduction Technology Forum for Power Generation Enterprises. Xi'an: China Society of Electrical Engineering, 2013:275-279.
- [21] 卢凤菊, 沈晓倩, 沈伯雄, 等. 海水脱硫过程中影响脱硫效率的因素研究[J]. 化学工程, 2019, 47(2):9-15.
- LU F J, SHEN X Q, SHEN B X, et al. Factors affecting the desulfurization efficiency in the process of desulphurization of seawater [J]. Chemical Engineering, 2019, 47(2):9-15.
- [22] 张静伟, 卞俊杰, 李春虎, 等. 海水脱硫效率的影响因素考察[J]. 化工进展, 2009, 28(增刊 2):272-275.
- ZHANG J W, BIAN J J, LI C H, et al. Investigation on influencing factors of seawater desulfurization efficiency[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2009, 28(S2):272-275.