

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.03.004

有色行业冶炼烟气脱硫技术现状及展望

童震松,赵志龙

(矿冶科技集团有限公司,北京 100160)

摘要:为了顺应有色行业的迅猛发展和日益严格的环保要求,对有色行业冶炼烟气脱硫技术进行研究和总结迫在眉睫。按照工艺技术特点,对有色行业冶炼烟气常见脱硫技术从原理、工艺流程、优缺点及应用情况进行了介绍和对比,对现有脱硫技术进行了总结,并在此基础上,对有色行业冶炼烟气脱硫技术进行了展望,为将来的技术发展方向提供借鉴。

关键词:有色行业;冶炼烟气;脱硫技术;现状及展望

中图分类号:X511

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2021)03-0022-06

Status and Prospect of Smelting Flue Gas Desulfurization Technology in Nonferrous Metals Industry

TONG Zhen-song, ZHAO Zhi-long

(BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China)

Abstract: In order to comply with rapid development of nonferrous metals industry and increasingly stringent environmental requirements, it is urgent to study and summarize the smelting flue gas desulfurization technology in nonferrous metals industry. According to characteristics of technology, principle, process, advantages and disadvantages and application of common desulfurization technologies for smelting flue gas in nonferrous metals industry were introduced and compared, and the existing desulfurization technology was summarized. The desulfurization technology for smelting flue gas in nonferrous metals industry was prospected so as to provide reference for future development direction of technology.

Key words: nonferrous metals industry; smelting flue gas; desulfurization technology; status and prospect

近年来,我国有色行业发展迅猛。据统计,从2009年到2019年的十年间,我国的十种有色金属产量从2 681万t猛增至5 842万t,增幅达到117.90%。伴随着有色行业的快速发展,环保形势也日益严峻^[1-3]。有色金属矿物多数是以硫化物的形式存在,因而在火法冶炼过程中会有相当浓度的SO₂污染物释放,如不进行资源化利用或净化治理,将会造成严重污染。对于铜、镍、铅、锌等有色金属冶炼过程,由于产生的SO₂浓度较高,往往可达到

7.0%~28%,因而一般采用先制酸后进行烟气脱硫治理的技术路线;而对于其它SO₂浓度相对较低的冶炼烟气,考虑到经济因素,一般直接进行烟气脱硫治理^[4]。

有色行业冶炼烟气脱硫治理相对起步较晚,而且有色行业冶炼烟气存在以下特点:1)冶炼炉窑形式多样,工艺流程及参数繁杂多样;2)有色冶炼过程往往是非长期连续生产,存在间断开停的现象;3)有色冶炼烟气量一般不太大,往往存在多台炉共用一套

收稿日期:2021-01-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1903100);矿冶科技集团有限公司科研基金探索项目(02-2012)

作者简介:童震松(1975-),男,江苏南通人,博士,高级工程师

脱硫系统的现象;4)有色冶炼过程中烟气量、烟气温度、污染物浓度等还会出现较大的波动。因此给有色行业冶炼烟气的脱硫治理带来了相当大的难度^[5-7]。

烟气脱硫技术按照工艺过程中水的参与情况不同可分为三大类,即湿法、半干法、干法脱硫技术^[8]。按照工艺方法的不同,主要有基于吸收和基于吸附原理的烟气脱硫技术两大类。目前在有色行业冶炼烟气脱硫治理中,湿法脱硫技术占到了整个市场份额的90%左右;而除去活性炭(焦)法外,基本为基于吸收原理的烟气脱硫技术。

随着有色行业发展及环保要求的不断提升,对冶炼烟气脱硫处理提出了越来越高的要求,同时,对冶炼烟气中SO₂、颗粒物、NO_x、二噁英等污染物的协同治理也日益得到重视。因此,深入研究有色行业冶炼烟气脱硫技术对提升我国有色行业的技术和环保水平具有重要意义。

1 湿法烟气脱硫技术

所谓湿法烟气脱硫技术,即在整个脱硫过程中均有水参与且脱硫剂和脱硫副产物均为湿态的一类烟气脱硫技术。目前的湿法脱硫技术按照所使用脱硫剂的不同,主要有石灰石/石灰—石膏法、双碱法、

氨法、镁法、钠碱法、海水法、氧化锌法、离子液法、双氧水法等^[9],其中石灰石/石灰—石膏法、双碱法、钠碱法、氧化锌法、离子液法在有色行业冶炼烟气脱硫治理中应用较多。

湿法烟气脱硫技术由于全程有水的参与,含硫烟气与脱硫剂的接触及传质过程均较充分,因此脱硫效率以及脱硫剂的利用效率均很高,而钙硫比相对较低,因此应用最为广泛^[10]。但湿法烟气脱硫技术普遍存在腐蚀问题较严重、脱硫废水较难处理,存在结垢堵塞风险、烟囱排放有白色烟羽等问题^[11-13],因而在使用中需增加相应的辅助设施以保证整体环保达标,从而使得建造和运行成本大幅上升。

1.1 石灰石/石灰—石膏法

石灰石/石灰—石膏法,即是以石灰石(石灰)为脱硫剂、脱硫副产物为石膏的一种湿法烟气脱硫技术。脱硫剂石灰石(石灰)粉配置成一定浓度的脱硫浆液后,通过浆液循环泵进入喷淋层,通过喷淋层喷出与烟气逆向接触,实现烟气中SO₂的脱除,实现达标排放;同时,再通过对浆液的氧化,实现脱硫副产物从CaSO₃向石膏的转变,以利于副产物的脱水和综合利用。其典型工艺流程^[14]如图1所示。

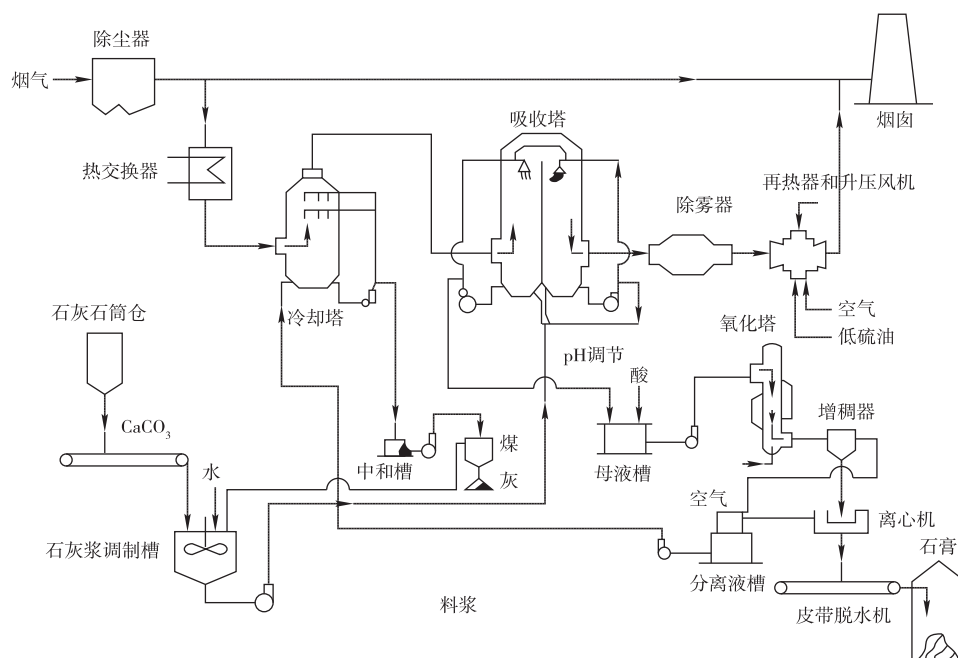


图1 石灰石—石膏法烟气脱硫工艺流程^[14]

Fig. 1 Flue gas desulfurization process flow sheet of limestone-gypsum method^[14]

该脱硫方法技术成熟、脱硫效率高、运行成本相对较低,但存在结垢堵塞、脱硫废水以及设备腐蚀等问题,同时,有色冶炼烟气中由于可能含有F、Cl、Br

等有害成分,长期运行会造成浆液中的富集,从而造成脱硫浆液的中毒,降低脱硫效果^[15]。目前,该技术在有色行业应用较广泛,已在云锡铜业、和鼎铜

业、喀拉通克铜镍矿、华信有色等烟气脱硫治理中得到应用。

1.2 双碱法

所谓双碱法,即在脱硫塔内以钠碱作为第一碱进行脱硫反应,反应产物 Na_2SO_3 进入置换池,在置换池中与加入的第二碱石灰进行反应,生成 CaSO_3 沉淀和 NaOH ,然后在澄清池中实现 CaSO_3 沉淀和 NaOH 溶液的分离,上清液 NaOH 溶液继续循环进入脱硫塔参与脱硫反应, CaSO_3 沉淀经过曝气氧化后得到副产物石膏^[16]。

双碱法是石灰石/石灰—石膏法的改良,一定程度上缓解了石灰石/石灰—石膏法普遍存在的结垢、堵塞问题,同时脱硫效率也得到提升,体现出一定的技术优势,但由于工艺流程的延长,路线相对复杂,潜在事故点增加。另外,由于双碱的应用,部分钠碱会掺入脱硫副产物,影响石膏品质和资源化利用;而且,脱硫废水以及设备腐蚀等问题依然存在^[17]。目前,该技术已在陕西锌业、赤峰山金银铅、河南志诚金铅、河南金利金铅、河池生富冶炼锑等烟气脱硫治理中得到应用。

1.3 钠碱法

钠碱法是以氢氧化钠或碳酸钠为脱硫剂的一种湿法脱硫技术。脱硫副产物可为亚硫酸钠或硫酸钠。由于脱硫剂为钠碱,因此脱硫效率很高,可达98%以上,因此适合用于有色行业高硫烟气的脱硫治理^[18-19]。

该技术由于脱硫剂和脱硫副产物的溶解性均非常好,因此杜绝了结垢、堵塞等问题,同时,非常高的脱硫效率也是其突出的优点。但是,由于脱硫剂原料成本较高,且脱硫副产物的综合利用相对较复杂,因此一定程度上限制了该技术的使用。而且,脱硫废水、设备腐蚀以及烟囱白色烟羽等问题依然存在。目前,该技术已在金川集团、大冶有色、金冠铜业、白银有色、河池南方有色等烟气脱硫治理中得到应用。

1.4 氧化锌法

该技术以含氧化锌的烟灰或焙砂为脱硫剂,制成一定浓度浆液后,通过喷淋装置喷入脱硫塔与含硫烟气接触反应,实现烟气脱硫,脱硫副产物主要为亚硫酸锌。然后可利用废电解液将亚硫酸锌转化生成硫酸锌和高浓度 SO_2 。高浓度 SO_2 气体可引入制酸系统资源化利用,而生成的硫酸锌则进入电解系统用于制锌^[20]。

由于脱硫剂的特殊性,该技术一般适用于铅锌冶炼企业,由于实现了资源的循环利用,因此在

大型铅锌冶炼企业应用较多。但是该技术也易出现结垢堵塞、设备腐蚀等问题,且工艺流程相对繁杂,同时脱硫剂的特殊性也一定程度上限制了其大规模推广和应用^[21]。目前,该技术已在豫光锌业、云铜锌业、江铜铅锌、丹霞冶炼厂等烟气脱硫治理中得到应用。

1.5 离子液法

离子液法也称为有机胺法。该技术以有机胺溶液为脱硫吸收剂,利用其高硫容特性,将烟气中的 SO_2 吸收,形成富液;然后,利用蒸汽在解析塔内加热将 SO_2 析出,并进而进入制酸系统用于制酸,而吸收剂经解析后则循环进入脱硫系统继续参与脱硫^[22]。

该技术实现了脱硫剂的循环利用,同时脱硫副产物也实现了资源化利用,且具有较高的脱硫效率,并克服了结垢堵塞等问题,因此具有一定的技术优势。但该技术由于脱硫剂相对昂贵且脱硫剂再生过程中需要消耗大量的蒸汽,因而显著增加了其运行成本^[23];而且,该技术对于 SO_2 浓度相对较低的烟气而言,也是不太经济的。目前,该技术已在广西金川有色、中原黄金、阳谷祥光铜业、金川集团等烟气脱硫治理中得到应用。

2 半干法烟气脱硫技术

所谓半干法烟气脱硫技术,即在脱硫过程中有水参与但脱硫副产物为干态的一类烟气脱硫技术。半干法脱硫技术按照工艺特点的不同,主要有密相干塔法、循环流化床法、旋转喷雾法等。由于半干法烟气脱硫技术在烟气结露温度以上运行,因此半干法烟气脱硫技术有效克服了湿法脱硫技术普遍存在的腐蚀严重、脱硫废水难处理、烟囱白色烟羽等问题;同时,也较好克服了湿法脱硫技术存在的结垢堵塞等问题^[24]。但其脱硫副产物的资源化以及减量化、相对较低的脱硫效率(一般为85%~95%)等问题也还需进一步加以解决。目前,半干法烟气脱硫技术在有色行业冶炼烟气脱硫治理中的应用刚刚开始,应用业绩还相对较少,但由于其克服了湿法脱硫技术的一些不足,因而应用前景广阔。

密相干塔技术是北京科技大学自主研发的加湿类半干法烟气脱硫技术。该技术以石灰(熟石灰)粉为脱硫剂,含有较多活性 CaO 组分的细粉状循环灰在加湿机内加湿,水均匀分配到颗粒表面。加湿后的循环灰与 SO_2 具有很好的反应活性,形成理想的

脱硫反应条件。待处理的烟气与加湿活化后的脱硫剂同向进入脱硫系统入口烟道。烟道位于密相塔中下部,入口端设有搅拌装置,保证烟气与脱硫剂均匀混合。携带脱硫剂的烟气在塔内先向下、后向上流动,烟气中的 SO_2 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 进行一系列反应, SO_2 得到去除并生成含有 CaSO_3 和 CaSO_4 等的副产物,最后经布袋除尘器除尘后达标排放。其示意图^[25]如图2所示。

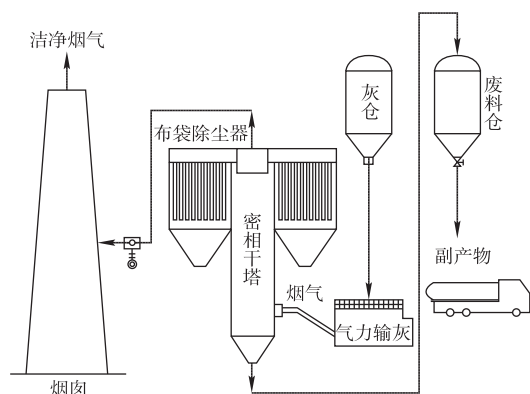


图2 密相干塔脱硫技术示意图^[25]

Fig. 2 Sketch map of dense phase dry tower desulfurization technology^[25]

该技术的关键是脱硫剂需要在系统内形成密相,从而保证含硫烟气与烟气的充分接触。经理论计算和相关试验表明,综合考虑脱硫效果及经济因素,一般选择脱硫剂在系统内的浓度为 $500 \sim 650 \text{ g/m}^3$ 。该技术不仅克服了湿法的不足,而且由于脱硫剂密相

运行的特点,不仅使得脱硫效率得到提升(可达95%以上),而且对于烟气流量、温度、污染物浓度等的波动具有良好的适应性,因而得到越来越多的重视^[26],目前在有色行业已在新疆天龙矿业、贵州元豪铝业电解铝烟气脱硫工程中得到应用。

针对有色行业冶炼烟气存在的高硫现象,北京科技大学与矿冶科技集团联合研发了多级密相干塔烟气脱硫技术,通过多级密相干塔的耦合,实现了对高浓度 SO_2 的成功脱除,并已在江西新金叶实业有限公司再生铜冶炼烟气脱硫治理中得到成功应用,实现了烟气 SO_2 与粉尘的达标排放。

该技术从技术和实际应用方面还有很大发展空间,后续将在脱硫副产物的资源化与减量化、脱硫系统流场的优化、系统的智能化方面进一步提升。

3 干法烟气脱硫技术

所谓干法烟气脱硫技术,即在整个脱硫过程中没有水参与且脱硫剂和脱硫副产物均为干态的一类烟气脱硫技术。目前的应用较多的干法脱硫技术主要是活性炭(焦)法。

活性炭(焦)技术即以活性炭(焦)为脱硫原料,利用活性炭(焦)的强吸附性,实现对烟气中 SO_2 的选择性吸附;吸附了 SO_2 的活性炭(焦)进入解吸塔,利用高温实现 SO_2 从活性炭(焦)中的解吸。解吸后的 SO_2 可进入制酸系统,实现资源化利用;活性炭(焦)重新进入吸附塔进行对烟气中 SO_2 的吸附。其典型的工艺流程^[27]如图3所示。

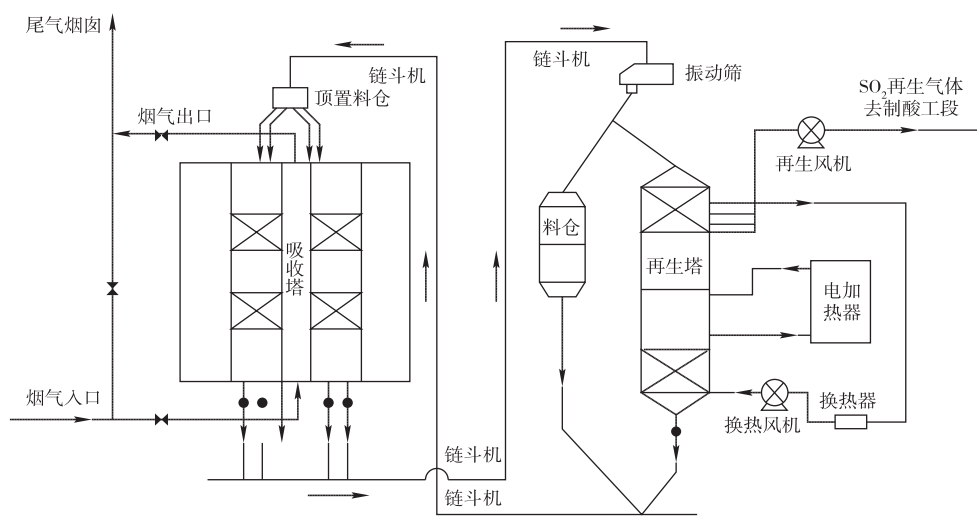


图3 活性炭(焦)脱硫技术典型工艺流程^[27]

Fig. 3 Process of activated carbon(coke)desulfurization technology^[27]

该技术不仅可实现烟气脱硫,还具备烟气脱硝功能,同时,还实现了废气中 SO_2 的资源化利用,且具有较高的脱硫效率,因此在有色、钢铁等行业均得到了应用。但是,该技术占地面积大、工艺路线繁杂、投资和运行成本高、对烟气条件波动适应性较差等不足也限制了其推广应用。目前,该技术已在江西铜业、金川集团等烟气脱硫治理中得到应用。

4 有色行业冶炼烟气脱硫技术展望

尽管目前的烟气脱硫技术多达几十种,但每种技术都有其优缺点,必须根据实际烟气条件从技术和经济等方面综合考虑,选择合适的脱硫方法。同时,还需要考虑脱硫副产物的资源化与减量化,真正实现清洁生产。

近年来,国家对于大气污染治理越来越重视,相关标准也越来越严格。电力、钢铁等行业已全面施行了超低排放标准,而有色行业目前的排放标准还相对宽松,而且也基本未进行含氧量等的折算,但可以预期的是,有色行业的排放标准将会继续提高,对有色行业既是压力也是动力。今后,研发和应用顺应环保标准和规范发展趋势、满足有色冶炼烟气二氧化硫浓度高、烟气条件波动性大等特点的烟气脱硫技术将越来越具备竞争优势。同时,可以预期,未来的发展趋势将是研发和应用多污染物联合治理技术,实现 SO_2 、 NO_x 、粉尘、重金属及二噁英等的协同治理,同时从源头减少污染物的生成,多管齐下,真正实现生产与环保的和谐共进。

参考文献

- [1] 毛玫清,杨琼分,岳媛.有色企业环境保护治理改进的措施[J].环境与发展,2020,32(5):214,216.
MAO M Q, YANG Q F, YUE Y. Measures for improvement of environmental protection governance of nonferrous enterprises [J]. Environment and Development, 2020, 32(5): 214, 216.
- [2] 苏晨阳,胡学军,冯权莉,等.有色金属冶炼尾气脱硫脱硝处理技术研究进展[J].化工科技,2018,26(6):71-75.
SU C Y, HU X J, FENG Q L, et al. Desulphurization and denitrification of tail gas in non-ferrous metal smelting[J]. Science & Technology in Chemical Industry, 2018, 26(6): 71-75.
- [3] 马永鹏,袁东丽,徐腾飞,等.三乙醇胺强化 Na_2SO_3 脱硫性能研究[J].环境污染与防治,2020,42(10):1196-1199.
MA Y P, YUAN D L, XU T F, et al. Study on sodium sulfite desulfurization performance with triethanolamine enhancement[J]. Environmental Pollution & Control, 2020, 42(10): 1196-1199.
- [4] 纪罗军,金苏闽.我国有色冶炼及烟气制酸环保技术进展与展望[J].硫酸工业,2016(4):1-8.
JI L J, JIN S M. Environmental protection technical progress and outlook of China's nonferrous metallurgy and metallurgical acid production[J]. Sulphuric Acid Industry, 2016(4): 1-8.
- [5] 马旻锐.金川有色冶炼低浓度二氧化硫烟气脱硫实践[J].硫酸工业,2017(5):36-38.
MA M Y. Practice of low concentration SO_2 flue gas desulphurization in Jinchuan nonferrous smelting[J]. Sulphuric Acid Industry, 2017(5): 36-38.
- [6] 蔡兵,杨洪才,陈珑文.铜冶炼烟气制酸尾气处理实践[J].有色冶金设计与研究,2017,38(2):12-14.
CAI B, YANG H C, CHEN L W. Treatment of tail gas from acid making plant in copper smelter [J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2017, 38(2): 12-14.
- [7] 刘珊珊,谢桂芳,李传祥.双氧水法脱硫在冶炼烟气制酸系统中的应用[J].硫酸工业,2020(10):38-41,45.
LIU S S, XIE G F, LI C X. Engineering application of hydrogen peroxide desulfurization on exhaust gas treatment in smelting acid making system[J]. Sulphuric Acid Industry, 2020(10): 38-41, 45.
- [8] 李玉然,闫晓森,叶猛,等.钢铁烧结烟气脱硫工艺运行现状概述及评价[J].环境工程,2014,32(11):82-87.
LI Y R, YAN X M, YE M, et al. Summary and evaluation for the desulfurization technologies applied in iron-steel sintering flue gas [J]. Environmental Engineering, 2014, 32(11): 82-87.
- [9] 张海燕,许星.国外烟气脱硫技术的发展与我国的现状[J].有色金属设计,2003,30(1):38-42.
ZHANG H Y, XU X. Current development situations of fume desulfurization technology in foreign countries and in China [J]. Nonferrous Metals Design, 2003, 30(1): 38-42.
- [10] CUI L, LU J W, SONG X D, et al. Energy conservation and efficiency improvement by coupling wet flue gas desulfurization with condensation desulfurization [J]. Fuel, 2021, 285: 119209. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119209>.
- [11] 杜家芝,曹顺安.湿法烟气脱硫技术的现状与进展[J].应用化工,2019,48(6):1495-1500.
DU J Z, CAO S A. Research status and progress of wet flue gas desulfurization technology [J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(6): 1495-1500.
- [12] 朱浩,黄杰.燃煤电厂湿法石灰石烟气脱硫技术的分

- 析[J]. 科技风, 2019(18):161.
- ZHU H, HUANG J. Analysis of wet limestone flue gas desulfurization technology in coal-fired power plant[J]. Technology Wind, 2019(18):161.
- [13] 周峰, 沈达, 李强, 等. 冷凝再热技术在湿法脱硫白色烟羽治理中的应用研究[J]. 电力科技与环保, 2020, 36(3): 6-10.
- ZHOU F, SHEN D, LI Q, et al. Application research of the condensation and reheating technology in white plume treatment of wet desulfurization[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2020, 36(3):6-10.
- [14] 王富勇. 湿式石灰石-石膏法脱硫技术及分析[J]. 上海电力学院学报, 2005, 21(2):132-136.
- WANG F Y. Technique and analysis of desulfurization of wet limestone-gypsum[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2005, 21(2):132-136.
- [15] 宁翔, 谷小兵, 倪黎, 等. 石灰石-石膏湿法脱硫系统氯离子富集时间的计算[J]. 热能动力工程, 2020, 35(9): 154-160.
- NING X, GU X B, NI L, et al. Calculation of chloride ion enrichment time in limestone-gypsum wet desulfurization system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(9):154-160.
- [16] 圣俊. 钠钙双碱法处理锌冶炼烟气制酸尾气探析[J]. 有色技术设计, 2015, 42(4):42-44.
- SHENG J. Analysis on treatment of gases from acid making with zinc smelting by Na-Ca double alkali method[J]. Nonferrous Metal Design, 2015, 42(4): 42-44.
- [17] 金平, 王昊辰, 李磊, 等. 烟气脱硫技术现状及展望[J]. 当代化工, 2019, 48(1):119-126.
- JIN P, WANG H C, LI L, et al. Status and prospect of flue gas desulfurization[J]. Contemporary Chemical Industry, 2019, 48(1):119-126.
- [18] 唐剑. 钠碱法脱硫在 100 kt/a 硫酸装置的应用及改造[J]. 硫酸工业, 2019(2):40-41, 44.
- TANG J. Application and transformation of sodium-alkali desulphurization in 100 kt/a sulphuric acid plant[J]. Sulphuric Acid Industry, 2019(2):40-41, 44.
- [19] 张正阳, 王海北, 孙留根. 电化学方法处理二氧化硫研究进展[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(3):1-7.
- ZHANG Z Y, WANG H B, SUN L G. Research progress in electrochemical treatment of sulfur dioxide[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2020(3):1-7.
- [20] 姚腾猛, 汤洛, 周桂月, 等. 新型氧化锌脱硫烟气处理系统在冶炼行业的应用[J]. 硫酸工业, 2020(9):25-28, 31.
- YAO T M, TANG L, ZHOU G Y, et al. Application of a new type of zinc oxide desulphurization flue gas treatment system in smelting industry[J]. Sulphuric Acid Industry, 2020(9):25-28, 31.
- [21] 肖万平, 王有健. 氧化锌脱硫技术在锌冶炼烟气制酸上的应用[J]. 硫酸工业, 2018(8):39-42.
- XIAO W P, WANG Y J. Application of zinc oxide desulphurization technology in acid making from zinc smelter flue gas[J]. Sulphuric Acid Industry, 2018(8): 39-42.
- [22] 祁茂刚, 嵇响亮, 布乃祥. 离子液烟气脱硫技术在铜冶炼中的应用[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015(9): 59-60, 63.
- QI M G, GAO X L, BU N X. Application of ionic liquid flue gas desulfurization technology in copper smelting[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2015(9): 59-60, 63.
- [23] 石哲浩, 王小飞, 王伟, 等. 可再生胺法脱硫技术处理锡冶炼低浓度 SO_2 烟气的应用实践[J]. 硫酸工业, 2014(4): 25-27.
- SHI Z H, WANG X F, WANG W, et al. Application practice of treating low SO_2 concentration off-gas from tin smelting by renewable amine technology[J]. Sulphuric Acid Industry, 2014(4):25-27.
- [24] 卢熙宁, 宋存义, 童震松, 等. 密相塔半干法烟气脱硫塔内加湿降温及其对脱硫效率的影响[J]. 环境工程学报, 2015, 9(6):2955-2962.
- LU X N, SONG C Y, TONG Z S, et al. Humidifying and cooling in tower of dense flow absorber semidry flue gas desulphurization and effects on desulfurization efficiency[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(6):2955-2962.
- [25] 史元良, 童震松, 宋存义. 球团烟气密相干塔脱硫-除尘一体化系统优化[J]. 钢铁, 2015, 50(12):72-79.
- SHI Y L, TONG Z S, SONG C Y. Simulation on desulfurization of sintering flue gas in dense flow absorber integrated bag-filter[J]. Iron and Steel, 2015, 50(12):72-79.
- [26] 刘金英, 杨金保, 朱辛洲, 等. 脱硫除尘一体化技术在首钢球团厂的应用[J]. 烧结球团, 2015, 40(3):53-60.
- LIU J Y, YANG J B, ZHU X Z, et al. Application of integrated desulphurization and dust removal technology in Shougang pelletizing plant[J]. Sintering and Pelletizing, 2015, 40(3):53-60.
- [27] 张虎. 100 kt/a 锌冶炼活性焦尾气脱硫系统运行总结[J]. 有色金属(冶炼部分), 2017(11):71-74.
- ZHANG H. Summary of 100 kt/a active coke exhaust gas desulfurization system in zinc smelting[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2017(11):71-74.