球团脱硫灰中$CaSO_3$的氧化试验及应用分析

张乾熙，刘高珍，贾明生，何 明
(广东海洋大学 机械与动力工程学院，广东 湛江 524088)

摘要：为探明 $CaSO_3$ 在球团脱硫灰与石灰石粉混合脱硫剂浆液中的氧化特性，本文通过搭建氧化试验装置，模拟电厂湿法脱硫的反应条件，对不同氧化时间、氧气流量、球团脱硫灰占比、$CaSO_3$ 质量分数下的氧化率进行测定，并分析不同试验工况对 $CaSO_3$ 氧化速率的影响。结果表明：在酸性环境下，氧化时间、氧气流量的增加将促进 $CaSO_3$ 的氧化；延长氧化时间比增大氧气流量更有利于 $CaSO_3$ 的氧化，而降低脱硫灰占比和 $CaSO_3$ 质量分数有利于 $CaSO_3$ 氧化率的提高；不同的球团脱硫灰，适宜的氧化时间、氧气流量不同。本文结论可为改善混合脱硫剂浆液中 $CaSO_3$ 的氧化提供理论与技术支持，以发挥球团脱硫灰在湿法脱硫中的作用。

关键词：球团脱硫灰；$CaSO_3$；氧化率；湿法脱硫
中图分类号：TF046.6; X701.3 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)04－0092－07
doi：10.13403/j.sjqt.2022.04.059

Oxidation test and application analysis of $CaSO_3$ in pellet desulfurization ash

ZHANG Ganxi, LIU Gaozhen, JIA Mingsheng, HE Ming
(*School of Mechanical and Power Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang* 524088, *Guangdong, China*)

Abstract: In order to explore the oxidation characteristics of $CaSO_3$ in the desulfurizer slurry mixed with pellet desulfurization ash and limestone powder, the oxidation rate under different oxidation time, oxygen flow, proportion of pellet desulfurization ash and $CaSO_3$ mass fraction is determined by setting up an oxidation test device to simulate the reaction conditions of wet desulfurization in power plants, and the influence of different experimental conditions on the oxidation rate of $CaSO_3$ is analyzed. The results show that the increase of oxidation time and oxygen flow would promote the oxidation of $CaSO_3$ under acidic environment; the prolongation of oxidation time is more favorable than the increase of oxygen flow for the oxidation of $CaSO_3$. The lower percentage of desulfurization ash and $CaSO_3$ mass fraction is favorable for $CaSO_3$ oxidation rate; the suitable oxidation time and oxygen flow are different for different pellet desulfurization ash. The conclusion can provide theoretical and technical support for improving the oxidation of $CaSO_3$ in mixed desulfurizer slurry to play the role of pellet desulfurization ash in wet desulfurization.

Key words: pellet desulfurization ash; $CaSO_3$; oxidation rate; wet desulfurization

我国钢铁行业所产生的 SO_2 量仅次于煤电行业。通常烟气脱硫分为湿法、半干法、干法三大类脱硫工艺[1－2]。结合球团烟气的特点，因半干法/干法脱硫工艺具有工艺流程短、能耗低、侵蚀少、无污水或污酸处理等优点而被球团工序广泛应用[3]。球团脱硫灰是半干法/干法烟气脱硫工艺产生的一种副产物，其主要成分为 CaO、$CaSO_3$、$CaCO_3$、$CaSO_4$ 和 $Ca(OH)_2$ 等物质。由于 $CaSO_3$ 呈弱碱性，其水化反应慢，且不稳定，因此球团脱硫灰的消纳和再利用非

收稿日期：2021－10－19；**修回日期**：2021－12－27
基金项目：广东省财政专项资金资助项目(GDOU2016050257)；宝钢湛江钢铁科技项目(B20044)
作者简介：张乾熙(1980—)，男，副教授，从事工业节能减排与低碳方面的研究。
通信作者：贾明生(1964—)，男，教授，从事煤的清洁燃烧与污染控制方面的研究。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

常困难，目前还没有形成一种适用于钢铁厂内部消纳处理的技术。

针对 $CaSO_3$ 的物性特点，一般先将脱硫灰中 $CaSO_3$ 氧化改性，而后再对脱硫灰进行资源化利用[4]。徐宏建等[5]在较低温度下以空气为氧化剂，开展 $CaSO_3$ 氧化改性，效果不佳。研究发现，通过提升反应温度，$CaSO_3$ 氧化率提高明显[6]，但是较高的反应温度也使能耗增加；高孝钱等[7]在脱硫灰中加入催化剂，40 ℃反应时间 1 h，氧化率达到 50% 以上；蒋路漫等[8]研究几种催化剂共同作用时发现，Fe、Mn 复合催化速率高于单独催化，最佳 pH 值为 4.5；李茜[9]研究表明，温度低时催化剂对 $CaSO_3$ 的氧化起主导作用，温度高时温度起主导作用，另外高的 O_2 体积分数、低的 CaO 质量分数都可使初始氧化温度降低，合理的湿度也影响很大。

以上研究成果对脱硫灰中 $CaSO_3$ 的氧化提供了指导，但综合目前的研究结果和生产现状，脱硫灰作为一种无法大量资源化利用的冶金固废，其消纳处理技术还具有一定的局限性[10]。特别是 $CaSO_3$ 在低温下的氧化率低这一技术难题，仍未得到很好地解决。升高脱硫浆液温度虽能提高氧化率，但会抑制脱硫反应的进行[11]。鉴于球团脱硫灰富含碱性成分，可与石灰石粉掺混用作钢铁企业自备电厂湿法脱硫剂，实现球团脱硫灰资源化利用的同时，也通过湿法脱硫系统中的氧化系统对 $CaSO_3$ 进行氧化，制备石膏。由于 $CaSO_3$ 质量分数直接影响石膏的品质，目前还没查阅到 $CaSO_3$ 在球团脱硫灰与石灰石粉混合浆液环境中氧化特性的研究。

本文针对其湿法脱硫产物中 $CaSO_3$ 质量分数过高这一应用技术问题，通过搭建氧化实验装置，对不同氧化时间、氧气流量、球团脱硫灰占比、$CaSO_3$ 质量分数下的氧化率进行测试和分析，寻求适宜 $CaSO_3$ 氧化工艺条件，为实现球团脱硫灰在湿法脱硫系统内的资源化利用提供技术支撑。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

试验所用原料来自某钢铁企业球团制造过程中半干法脱硫所得产物，其主要成分及质量分数如表 1 所示。由表 1 可知：球团烟气脱硫灰含有较高的 Ca、S 元素，呈碱性。干燥状态的 $CaSO_3$ 理化性质稳定，不容易发生氧化或分解反应。然而，潮湿状态的 $CaSO_3$ 理化性质非常不稳定，极其容易在空气中发生氧化，生成以 $CaSO_4$ 为主要成分的氧化产物层。

表 1　球团脱硫灰主要成分(质量分数)

Table 1　Main components of pellet desulfurization ash　　%

CaO	SO_3	Fe_2O_3	SiO_2	MgO	Al_2O_3	Cl
55 ~ 60	23 ~ 25	3.5 ~ 4.8	1.2 ~ 2.3	0.5 ~ 0.8	0.7 ~ 0.9	0.5 ~ 7.8

1.2　试验方法

$CaSO_3$ 作为湿法脱硫的产物和氧化反应的反应物，其氧化特性对整个脱硫反应有重要影响。$CaSO_3$ 质量分数高造成系统结垢严重、脱硫率下降、石膏品质低等问题，而过氧化势必然增加能源消耗[12]。$CaSO_3$ 氧化涉及到的化学反应主要有：

$$SO_3^{2-} + O_2 \rightarrow SO_5^{2-} \quad (1)$$

$$SO_3^{2-} + SO_5^{2-} \rightarrow 2SO_4^{2-} \quad (2)$$

试验所用脱硫剂由球团脱硫灰和工业石灰石粉组成。试验过程中，称取一定质量的脱硫剂和去离子水混合，配成固液比(即脱硫剂与浆液质量比)在 6% 左右的浆液。依据电厂脱硫塔的实际运行工况，用质量分数为 20% 的标准盐酸和 ZD-2 自动电位滴定仪控制浆液 pH 值为 5.5。氧化试验装置如图 1 所示。由图 1 可见：试验采用 HHS-11-2 电热恒温水浴锅配合球形三口烧瓶使浆液的氧化反应在 45 ℃条件下进行；采用鼓泡分散器使进入浆液中的氧气分散，并延长气体在浆液中的停留时间；采用 LC-OSE-100SH 悬臂式电动搅拌器使氧气与脱硫灰固体颗粒间充分接触；采用 SEC-Z522MGX 质量流量

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

控制器控制气体流速。

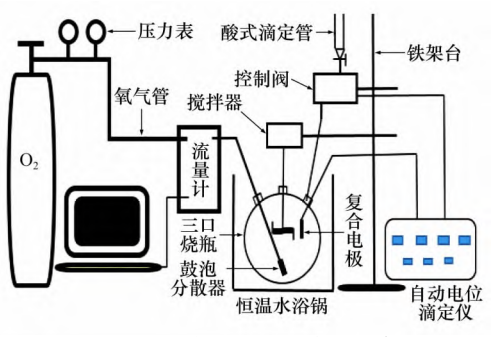


图 1 浆液氧化试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of slurry oxidation experimental device

试验选用同一批次 $CaSO_3$ 质量分数约为 10% 的球团脱硫灰，氧化前后脱硫灰中 $CaSO_3$ 的质量分数采用碘量法测定，计算方法如下。

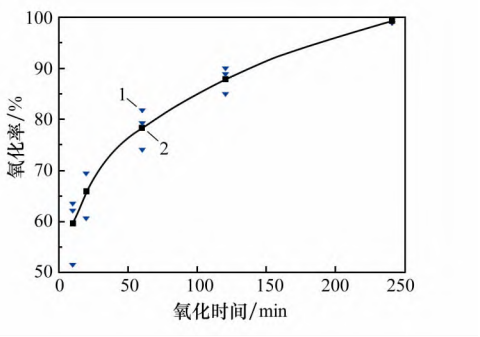
$$\omega = \frac{\omega_0 - \omega_1}{\omega_0} \times 100\% \tag{3}$$

式中：ω 为 $CaSO_3$ 的质量分数，%；ω_0 为脱硫灰原料中 $CaSO_3$ 质量，g；ω_1 为氧化后脱硫灰中 $CaSO_3$ 质量，g。

2 试验结果与讨论

2.1 氧化时间的影响

当脱硫剂中脱硫灰与石灰石配比为 1∶1时，设定氧气流量为 0.3 L/min，氧化时间分别为 10、20 min 和 1、2、4 h，进行氧化试验。经测定，脱硫剂在不同氧化时间下的氧化率如图 2 所示。由图 2 可知：随着氧化时间的延长，脱硫灰中 $CaSO_3$ 氧化率提高，当氧化时间为 1 h 时，$CaSO_3$ 氧化率达到78.4%，浆液沉淀物中 $CaSO_3$ 质量分数降至 2.5%。且随着氧化时间变长，氧化速率减缓，这与文献[13]的结论相一致。随着氧化的进行，一方面 $CaSO_3$ 的总量越来越少，另外生成的 $CaSO_4$ 因为包覆作用覆盖在 $CaSO_3$ 的表面，阻碍了固液传质过程，降低了 $CaSO_3$ 与氧气的接触几率，氧气利用率也越来越低。因此，反应开始前 10 min 氧气利用率约为 5%，氧化 1 h 时利用率降为 1.1%，氧化 4 h 时氧气利用率仅为 0.35%。



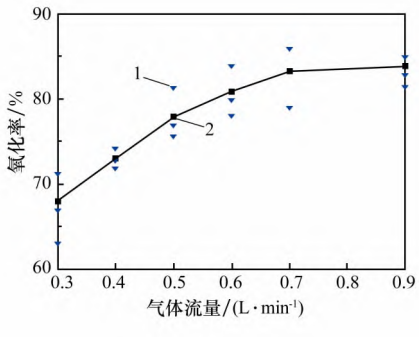
1—试验测量值；2—试验测量平均值。

图 2 氧化时间对氧化率的影响

Fig. 2 Effect of oxidation time on oxidation rate

2.2 氧气流量的影响

当脱硫剂中脱硫灰与石灰石配比为 1∶1时，设定氧化时间为 0.5 h，采用质量流量控制器调节氧气流量分别为 0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.9 L/min，测定脱硫剂在不同氧气流量下 $CaSO_3$ 氧化率，结果如图 3 所示。由图 3 可知：随着气体流量的加强，氧化率先升高后基本不变，当氧气流量为 0.7 L/min 时，$CaSO_3$ 氧化率基本不会随着流量增大而继续升高，气体流量对氧化率的影响越来越弱；当氧气流量为 0.5 L/min 时，$CaSO_3$ 氧化率为 78%，浆液沉淀物中 $CaSO_3$ 质量分数降低至 2.5% 以下。当氧气流量较小时，可能因为单位时间内氧气供应量不足，氧化率较低，当气体流量继续增大时，浆液中溶解氧的质量浓度达到饱和之后，氧化速率趋于稳定，这与常规脱硫浆液 $CaSO_3$ 氧化规律类似[14-15]。经测算，随着气体流量增大，氧气利用率逐渐降低，氧气流量由 0.3 L/min 升高至 0.7 L/min 时，利用率由 1.92% 降至 1%。



1—试验测量值；2—试验测量平均值。

图 3 氧气流量对 $CaSO_3$ 氧化率的影响

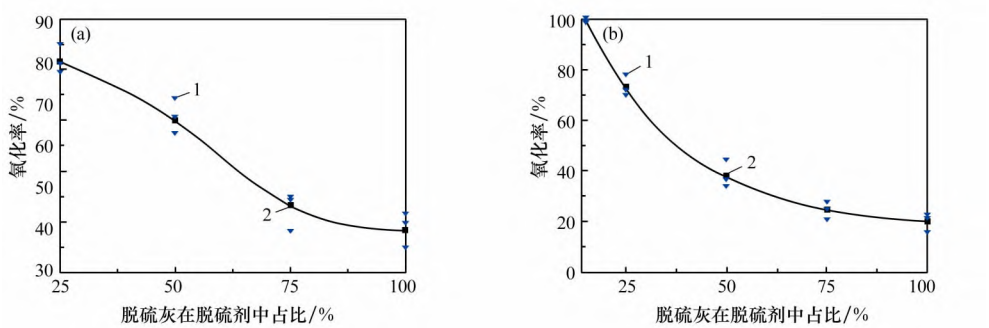
Fig. 3 Effect of oxygen flow rate on $CaSO_3$ oxidation rate

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

结合图 2、3 分析可知，单位时间内增大气体流量后，氧化率达到一定值后几乎不变，而单位流量下延长氧化时间，氧化率不断升高。因此在氧气足量的情况下，延长氧化时间相比于提高氧气流量更利于 $CaSO_3$ 的氧化，综合考虑到氧气利用率和石膏品质，建议在较低的气体流量下，适当增加氧化时间。氧化时间的延长也使浆液沉淀物的质量由 27 g 下降为 16 g，提高了脱硫剂的利用率。

2.3　脱硫剂中不同脱硫灰与石灰石配比影响

设定氧化时间为 0.5 h，氧气流量为 0.3 L/min，控制不同的球团脱硫灰与石灰石配比分别为 1∶3、1∶1、3∶1、1∶0，测定脱硫剂在不同配比下的氧化率，结果如图 4(a) 所示。选用另一批次 $CaSO_3$ 质量分数为 28.5% 的球团脱硫灰进行重复试验，设定氧气流量为 0.4 L/min，控制不同的脱硫灰与石灰石配比分别为 3∶17、1∶3、1∶1、3∶1、1∶0，其它条件不变测定氧化率，结果如图 4(b) 所示。



$CaSO_3$ 质量分数/%：(a)　10；(b)　28.5

1—试验测量值；2—试验测量平均值。

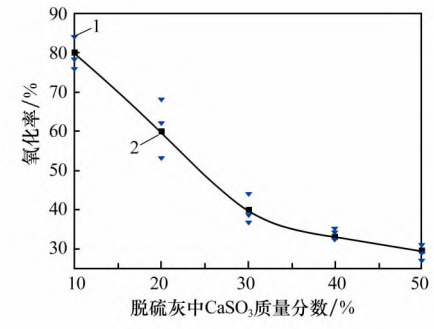
图 4　不同脱硫灰占比对氧化率的影响

Fig. 4　Effect of different proportion of desulfurization ash on oxidation rate

由图 4 可知，随着脱硫灰占比增加，$CaSO_3$ 氧化率降低。分析原因认为，脱硫灰占比升高，$CaSO_3$ 总量增多，受溶解度限制，大部分的 $CaSO_3$ 来不及氧化[16]。试验中还发现，随着脱硫灰占比的增大，控制浆液 pH 值恒定的耗酸量明显减少，说明脱硫容量减小。丰晔等[17]完全用脱硫灰做脱硫剂时，不仅氧化风机负荷过高，石膏品质也大大降低。

2.4　球团脱硫灰中不同 $CaSO_3$ 质量分数影响

当脱硫剂中脱硫灰与石灰石配比为 1∶1时，设定氧化时间为 0.5 h，气流量为 0.4 L/min，通过向脱硫灰中添加分析纯无水亚硫酸钙控制混合脱硫剂浆液中 $CaSO_3$ 质量分数分别为 10%、20%、30%、40%、50%，测定脱硫剂在不同 $CaSO_3$ 质量分数下的氧化率，结果如图 5 所示。由图 5 可知，随着 $CaSO_3$ 质量分数增大，氧化率降低。氧化速率会随着 SO_3^{2-} 质量分数升高而升高，但增加的 SO_3^{2-} 会使溶液中被氧化的 SO_3^{2-} 的量也增多，因而在其他条件不变的情况下，造成氧化率降低[18]。由于 SO_3^{2-} 质量分数升高，氧气有更大的几率参与氧化反应，因此氧气利用率由 1.56% 增加至 2.82%。



1—试验测量值；2—试验测量平均值。

图 5　脱硫灰中不同 $CaSO_3$ 质量分数对氧化率的影响

Fig. 5　Influence of different $CaSO_3$ content on oxidation rate of desulfurization ash

综合图 4、5 可知，当脱硫剂中球团脱硫灰占比增大或球团脱硫灰中 $CaSO_3$ 质量分数升高

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

时，氧化时间、气体流量应适当增大。由于每一批次球团脱硫灰成分组成差别较大，针对不同批次的球团脱硫灰，适宜添加的最大占比有所不同，对于 $CaSO_3$ 质量分数高的球团脱硫灰，应降低其在脱硫剂中的占比。

3 实际应用分析

球团脱硫灰中 $CaSO_3$ 在碱性环境中氧化率较低，初期试验中在不加酸的情况下通入氧气，浆液 pH 值在 13 左右、氧化率普遍在 50% 以下，这与文献[19]的结论相似，原因之一是 $CaSO_3$ 在碱性环境中基本不溶；且脱硫灰中 $CaSO_3$ 与 $CaCO_3$ 相互包覆，降低了氧化反应的比表面积。钢厂自备电厂脱硫浆液的 pH 值一般维持在 5.5 附近，满足 $CaSO_3$ 氧化所需环境，又有利于球团脱硫灰中碱性成分的溶解，在与石灰石粉混合用于电厂脱硫生产实践中表现出较好的脱硫性能[20]。由于球团脱硫灰本身 $CaSO_3$ 质量分数有差异，在用于湿法脱硫时氧化时间、氧气流量、在脱硫剂中占比也有不同。此外，脱硫灰对石灰石溶解以及灰中杂质对 $CaSO_3$ 氧化也有一定影响[21-22]。

国家明确规定通用硅酸盐水泥中 SO_3 质量分数不得超过 3.5%，因此，湿法脱硫产物在用于建材行业时也应综合考虑[23]。球团脱硫灰中碱性物质活泼但质量分数较低，脱硫容量小，因此必须与石灰石掺混作为脱硫剂，在保证脱硫率和脱硫容量的同时，使湿法脱硫产物成为高品质石膏，其在实际生产中基本达到预想效果。目前问题之一是氧气利用率低、氧化效率不高，如要达到高的氧化率，势必造成氧气的大量浪费，建议改进脱硫塔结构，把从浆液中溢出的氧气再次通入到浆液中，反复利用，在小的气体流量下延长氧化时间，在 SO_2 达标排放的前提下适当升高浆液温度。此外，浆液中可适当添加硫酸锰、氯化钴等催化剂，降低氧化反应活化能[24]。

4 结 论

本文通过模拟电厂湿法脱硫的温度、pH 值和固液比等实际工况，改变氧化时间、氧气流量、脱硫灰与石灰石配比和 $CaSO_3$ 质量分数等条件，开展 $CaSO_3$ 在球团脱硫灰与石灰石粉混合浆液环境中氧化特性试验，得到以下结论：

(1) 延长氧化时间、适当增大氧气流量有利于球团脱硫灰中 $CaSO_3$ 氧化率的提升。

(2) 在氧气足量的情况下，延长氧化时间比提高氧气流量更利于 $CaSO_3$ 的氧化。随着氧化时间延长，可以适当减小气体流量。

(3) 提高脱硫剂中球团脱硫灰的占比以及球团脱硫灰中 $CaSO_3$ 的质量分数将使 $CaSO_3$ 的氧化率降低，同时造成耗酸量降低、浆液池中沉淀物增多。$CaSO_3$ 质量分数高的球团脱硫灰，还应降低其添加到脱硫剂中的占比。

参考文献：

[1] LIU X W. Progress of desulfurization and denitration technology of flue gas in china[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 242(4): 1755-1315.

[2] JIA Y, YUAN W H, LIU J, et al. An integrated process of chemical precipitation and sulfate reduction for treatment of flue gas desulphurization wastewater from coal-fired power plant[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 228: 63-72.

[3] 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.
CHEN Yongrui. Physicochemical properties and comprehensive utilization of dry desulfurization ash[J]. Journal of Fuqing Branch of Fujian Normal University, 2019(2): 15-20.

[4] 卢荣椿, 苗苗, 孔皓, 等. 260 t/h CFB 锅炉烟气脱硫超低排放技术研究[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(S1): 195-199.
LU Rongchun, MIAO Miao, KONG Hao, et al. Ultra-low emission technology of flue gas desulfurization for 260 t/h CFB boilers[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(S1): 195-199.

[5] 徐宏建, 潘卫国. 脱硫废水亚硫酸钙催化氧化动力学研究[J]. 上海电力学院学报, 2020, 36(1): 78-82.
XU Hongjian, PAN Weiguo. Research on kinetics of catalytic oxidation of sulfite in desulfurization wastewater[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2020, 36(1): 78-82.

[6] 许琴. 半干法脱硫产物中亚硫酸钙转化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011: 37.
XU Qin. Study on catalytic oxidation of calcium sulfite in semi-dry FGD byproducts[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011: 37.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[7] 高孝钱,朱波青,吴小俊,等. 半干法脱硫灰的催化氧化研究[J]. 化工时刊,2012,26(10):1-3;23.
GAO Xiaoqian,ZHU Boqing,WU Xiaojun,et al. Study on catalytic oxidation of semi-dry desulfurization ash[J]. Chemical Industry Times,2012,26(10):1-3;23.

[8] 蒋路漫,周振,俞杰,等. 烟气脱硫中亚硫酸钙铁锰复合催化氧化优化[J]. 环境工程学报,2017,11(12):6332-6338.
JIANG Luman,ZHOU Zhen,YU Jie,et al. Optimization for Fe-Mn catalyzed sulfite oxidation in flue gas desulfurization[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2017,11(12):6332-6338.

[9] 李茜. 半干法脱硫灰中 $CaSO_3$ 低温转化技术研究[D]. 石家庄:河北科技大学,2009:25-26.
LI Qian. Study on low-temperature conversion technologies of $CaSO_3$ in semi-dry FGD ash[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology,2009:25-26.

[10] 刘杰,马贤国,夏铁玉,等. 烧结烟气脱硫灰烧结再利用的研究与应用[J]. 烧结球团,2019,44(2):63-68.
LIU Jie,MA Xianguo,XIA Tieyu,et al. Study and application of recycled desulphurization ash of sintering flue gas[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(2):63-68.

[11] 胡蕊. 燃煤电厂湿法脱硫塔能效评价研究[D]. 济南:山东大学,2020:34-35.
HU Rui. Study on energy efficiency evaluation of wet flue gas desulphurization tower in coal-fired power plant[D]. Jinan: Shandong University,2020:34-35.

[12] 马双忱,杨静,张立男,等. 湿法脱硫浆液的氧化控制缺陷及对策[J]. 化工进展,2016,35(8):2547-2552.
MA Shuangchen, YANG Jing, ZHANG Linan, et al. Defects and countermeasures of slurry oxidation control in the Wet-FGD[J]. Chemical industry and engineering progress,2016,35(8):2547-2552.

[13] 余欣雨. 半干法脱硫灰渣性质、组成分析及转化初步研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013:45-46.
YU Xinyu. A Preliminary Study on the conversion of semi-dry FGD ashes based on its characteristics[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2013:45-46.

[14] 郭静娴. 湿法脱硫中亚硫酸盐固相催化氧化理论研究[D]. 北京:华北电力大学,2014:35-36.
GUO Jingxian. Research on the theory of solid-phase catalytic oxidation of Wet FGD sulfite[D]. Beijing: North Cina Electric Power University. 2014:35-36.

[15] 王永占. 湿法脱硫中间产物亚硫酸钙的氧化特性[D]. 北京:华北电力大学,2017:18-20.
WANG Yongzhan. Oxidation characteristics of calcium sulfite as an intermediate product in wet desulfurization[D]. Beijing: North Cina Electric Power University,2017:18-20.

[16] 杜谦,吴少华,朱群益,等. 湿法烟气脱硫环境下亚硫酸钙的非催化氧化[J]. 化工学报,2003(10):1490-1493.
DU Qian,WU Shaohua,ZHU Qunyi,et al. Non-catalytic oxidation kinetics of calcium sulfite in wet limestone-gypsum FGD process[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering,2003(10):1490-1493.

[17] 丰晔,徐永胜,任志荣. 脱硫灰用作湿法脱硫剂的可行性分析[J]. 聚氯乙烯,2020,48(1):35-38.
FENG Ye, XU Yongsheng, REN Zhirong. Feasibility analysis of desulfurized ash as wet desulfurizing agent[J]. Polyvinyl Chloride,2020,48(1):35-38.

[18] 杨剑. 湿法烟气脱硫氧化过程动力学研究[D]. 重庆:重庆大学,2008:64-65.
YANG Jian. Kinetics of oxidation process in wet flue gas desulfurization technology[D]. Chongqing: Chongqing University,2008:64-65.

[19] 王毅璠,龙红明,魏汝飞,等. 烧结半干法脱硫灰中亚硫酸钙浆液氧化试验研究[C]//第十一届中国钢铁年会论文集. 北京:中国金属学会,2017:7.
WANG Yifan,LONG Hongming,WEI Rufei,et al. Experimental study on oxidation of calcium sulfite slurry from sintered semi-dry desulfurization ash[C]//Proceedings of the 11th China Iron and Steel Annual Conference. Beijing: China Metal Society,2017:7.

[20] 贾明生,刘高珍,张乾熙,等. 球团脱硫灰在湿法脱硫中的消溶特性[J]. 应用化工,2021,50(8):2148-2151.
JIA Mingsheng,LIU Gaozhen,ZHANG Qianxi,et al. Dissolving characteristics of pellet desulfurization ash in wet desulfurization[J]. Applied Chemical Industry,2021,50(8):2148-2151.

[21] 卢丽君,李丽坤,康凌晨,等. 湿法脱硫工艺氧化环境对SDA脱硫灰转化及利用试验研究[J]. 武钢技术,2017,55(3):34-37.
LU Lijun,LI Likun,KANG Linchen,et al. Experimental study on conversion and utilization of SDA desulfurization ash by oxidation environment in wet FGD process[J]. Wuhan Iron and Steel Corporation technology,2017,55(3):34-37.

[22] 尹传烈,杨有余,吕应兰,等. 电石渣中杂质对亚硫酸钙氧化及石膏浆液脱水性能影响[J]. 环境工程,2013,31(2):109-114.
YIN Chuanlie,YANG Youyu,LÜ Yinglan,et al. Effects of impurities of carbide slag on the oxidation of calcium sulfite and dewatering performance of gypsum slurry[J]. Environmental Engineering,2013,31(2):109-114.

[23] 宋月. 半干法烟气脱硫灰氧化与应用研究[D]. 马鞍山:安徽工业大学,2019:4-5.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

SONG Yue. Study on the oxidation of semi-dried desulfurization ash and its applications[D]. Ma'anshan: Anhui university of technology,2019:4-5.

[24] 周臣,张子昕,谭文轶. 湿法脱硫工艺中 $MnSO_4$ 对 $CaSO_3$ 氧化与溶解速率的控制研究[J]. 环境工程,2017,35(7):106-109;80.

ZHOU Chen,ZHANG Zixin,TAN Wenyi. Study on oxidation rate of $CaSO_3$ with the catalyst of $MnSO_4$ in the process of wfgd[J]. Environmental Engineering,2017,35(7):106-109;80.

(上接第76页)

[10] 梅光军,余军,葛英勇,等. 降低包头铁精矿钾、钠含量的浮选试验研究[J]. 金属矿山,2006(2):31-35.

MEI Guangjun,YU Jun,GE Yingyong,et al. Reducing Na_2O and K_2O contents in baotou iron concentrate by flotation [J]. Metal Mine,2006(2):31-35.

[11] 梅光军,余军,葛英勇,等. 氟硅酸铵在赤铁矿与含铁硅酸盐浮选分离中的选择性抑制作用[J]. 矿冶工程,2005,25(4):24-26;29.

MEI Guangjun,YU Jun,GE Yingyong,et al. Selective depressive action of ammonium hexafluorosilicate in flotation separation of hematite and iron-containing silicate[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2005,25(4):24-26;29.

(上接第91页)

[7] 张晟,董辉. 环冷机内气固传热过程仿真及优化[C]//第十一届中国钢铁年会论文集. 北京:中国金属学会,2017:73-78.

ZHANG S,DONG H. Simulation and optimization of gas-solid heat transfer in sinter annular cooler[C]//Proceedings of the 11th China Iron and steel annual conference. Beijing: The Chinese Society for Metals,2017:73-78.

[8] 张小辉,张家元,戴传德,等. 烧结矿冷却过程数值仿真与优化[J]. 化工学报,2011,62(11):3081-3087.

ZHANG X H,ZHANG J Y,DAI C D,et al. Optimization and simulation of sinter cooling process[J]. CIESC Journal,2011,62(11):3081-3087.

[9] 张效鹏,周继良,潘文,等. 首钢京唐烧结 580 m^2 环冷机风量优化研究[C]//第十届全国能源与热工学术年会论文集. 杭州:中国金属学会,2019:300-309.

ZHANG X P,ZHOU J L,PAN W,et al. Study on air flow optimization of 580 m^2 circular cooler in jingtang sintering plant of shougang[C]//Proceedings of the 10th National Annual Conference on energy and thermal engineering. Hangzhou: The Chinese Society for Metals,2019:300-309.

[10] 陶文铨. 数值传热学(第2版)[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001.

TAO W Q. Numerical Heat Transfer(Second Edition)[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press,2001.

[11] 唐家鹏. Ansys fluent 16.0 超级学习手册[M]. 北京:人民邮电出版社,2016.

TANG J P. Ansys fluent 16.0 Super learning manual[M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press,2016.

[12] 果晶晶,陈健,王书桓. 烧结矿余热罐内温度场的数值模拟研究[J]. 烧结球团,2019,44(3):64-67;72.

GUO J J,CHEN J,WANG S H. Study on numerical simulation of temperature field in waste heat tank of sinter[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(3):64-67;72.

[13] 潘鹤,金永龙,马洛文,等. 冷却制度对烧结矿性能的影响[J]. 钢铁,2007,42(11):5-8.

PAN H,JIN Y L,MA L W,et al. Study of influence of cooling conditions on properties of sinters[J]. Iron and Steel,2007,42(11):5-8.

[14] 侯向东. 影响烧结矿强度的因素及对策[J]. 科技情报开发与经济,2002(2):67-68.

HOU X D. Factors influencing the strength of agglomerate and countermeasures[J]. Sci/Tech Information Development & Economy,2002(2):67-68.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net