钙基脱硫灰在石灰石－石膏湿法脱硫系统中的应用

李乃霞，韩 飞，刘翠甜
（宝钢湛江钢铁有限公司，广东 湛江 524074）

摘要：钙基脱硫灰的资源化利用一直是行业应用难题。本文为验证钙基脱硫灰替代石灰石－石膏湿法脱硫系统原用脱硫剂（石灰石粉）的脱硫效果，进行在混合脱硫剂中添加不同比例钙基脱硫灰的实验室和工业应用试验，分析脱硫效率、SO_2 排放质量浓度、吸收塔浆液和石膏的化学成分、脱硫污泥量等主要工艺参数的变化情况，并对钙基脱硫灰添加前、后湿法脱硫系统的生产运行方式变化进行对比分析。结果表明：当钙基脱硫灰替代占比在 50% 以下时，吸收塔浆液的化学成分基本没有发生变化，系统脱硫效率均在 95% 以上；SO_2 排放质量浓度均在 10 mg/Nm^3 以下，小于 35 mg/Nm^3 的国家排放标准，满足行业超低排放要求；石膏的化学成分基本没有发生变化，满足石膏的社会化应用标准；污泥产生量没有增加，吸收塔内的 Cl^- 浓度有所上升但可通过增大废水排放量来解决；湿法脱硫系统的操作调整变化不大，运行成本没有明显增加。采用钙基脱硫灰替代石灰石粉可为干法、半干法脱硫灰的综合利用提供一种经济、环保的有效途径。

关键词：钙基脱硫灰；石灰石粉；湿法脱硫系统；资源化利用
中图分类号：TF09；TF046.6 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764（2024）01－0113－06
doi：10.13403/j.sjqt.2024.01.016

Application of calcium-based desulfurization ash in limestone-gypsum wet desulfurization system

LI Naixia, HAN Fei, LIU Cuitian
(Baosteel Zhanjiang Iron and Steel Co., Ltd., Zhanjiang 524074, Guangdong, China)

Abstract: The resource utilization of calcium-based desulfurization ash has always been an application problem in the industry. In order to verify the desulfurization effect of calcium-based desulfurization ash instead of the original desulfurizer (limestone flour) of limestone-gypsum wet desulfurization system, laboratory and industrial application tests of adding different proportions of calcium-based desulfurization ash to the mixed desulfurization agent are carried out, and the changes of such main process parameters as desulfurization efficiency, SO_2 emission mass concentration, chemical composition of absorption tower slurry and gypsum, as well as the amount of desulfurization sludge are analyzed, and the changes in the production and operation mode of the wet desulfurization system before and after the addition of calcium-based desulfurization ash are compared and analyzed. The results show that when the replacement ratio of calcium-based desulfurization ash is below 50%, the chemical composition of the absorption tower slurry basically does not change, and the system desulfurization efficiency is above 95%; the SO_2 emission mass concentration is below 10 mg/Nm^3, less than the national emission standard of 35 mg/Nm^3, meeting the ultra-low emission requirements of the industry; the chemical composition of gypsum has basically not changed, meeting the social application standards of gypsum; the amount of sludge produced has not increased, and the Cl^- concentration in the absorption tower has increased, however, this can be solved by increasing the amount of wastewater discharged; the operational adjustment of the wet desulfurization system has not changed much, and the operating cost has not increased significantly. The use of calcium-based desulfurization ash instead

收稿日期：2022－08－22；**修回日期**：2022－09－20
作者简介：李乃霞（1981—），女，工程师，从事烟气脱硫脱硝技术方面的应用研究。

of limestone flour can provide an economical, friendly and effective way for the comprehensive utilization of dry and semi-dry desulfurization ash.

Key words: calcium-based desulfurization ash; limestone flour; wet desulfurization system; resource utilization

干法、半干法烟气脱硫工艺因不产生脱硫废水，其应用越来越广泛。但受不同工艺原料特性和工艺流程的影响，进入脱硫系统烟气的化学成分不同，加之运行工况和不同行业排放标准等差异，其副产物脱硫灰各组分的质量分数不固定，且波动范围较大[1-2]。钙基脱硫灰中含有大量的$CaSO_3$，性质不稳定，还有 Fe、Al、Cl 等杂质元素，这给脱硫灰的实际应用(尤其是高附加值应用)带来较大困难[3]。而堆存处理方式不仅会占用大量土地，还易对土壤和地下水造成污染[4]。目前，钙基脱硫灰主要应用于加气混凝土砌块、混凝土掺合料等建筑材料制备，也有小比例用于烧结配矿，部分替代熔剂返回烧结工序，并经活性炭烟气净化系统的脱硫塔后制取硫酸等，但实际利用量不大且效果不佳[5-6]。

开发脱硫灰的资源化利用技术，提高其应用价值和利用量，是解决脱硫灰应用问题的关键。针对该问题，丰晔等[7]采用电石渣、脱硫灰或两者的混合物作为脱硫剂用于湿法脱硫，研究表明酸性条件更利于$CaSO_3$的氧化，但实际产生的石膏纯度较低、$CaSO_3$含量高，无法回用于水泥生产。贾明生等[8]研究了球团脱硫灰的消溶特性，结果表明：溶液的 pH 值越低，溶解率越高；Cl^-、$CaSO_3$含量对脱硫灰溶解率有抑制作用；当脱硫灰替代占比为 50% 时，脱硫灰的溶解性最佳，此外温度对消溶特性的影响不大。张乾熙等[9]研究了脱硫灰中$CaSO_3$的氧化特性，结果表明：在酸性环境下，氧化时间、氧气流量增加能促进$CaSO_3$氧化；延长氧化时间比增大氧气流量更有利于$CaSO_3$的氧化；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。由此可知，在酸性环境下利用脱硫灰部分替代石灰石粉用作脱硫剂具有一定的可行性，但替代占比不能太高。

为此，本文采用钙基脱硫灰部分替代石灰石粉形成混合脱硫剂，将其加入湿法脱硫吸收塔，通过实验室模拟和工业应用试验分析不同脱硫灰替代占比对湿法脱硫系统脱硫效率、浆液和石膏的化学成分以及生产运行方式的影响，验证钙基脱硫灰部分替代石灰石粉的可行性，为钙基脱硫灰的综合利用提供一种新方法。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验所用脱硫剂有两种：一种是石灰石－石膏湿法脱硫系统常用石灰石粉，其 $w(CaO) \geqslant 52\%$，<0.045 mm 粒级占比≥90%；另一种是钙基脱硫灰，为某钢铁企业球团单元半干法烟气脱硫系统的副产物，其主要化学成分如表 1 所示。由表 1 可知，该脱硫灰中可作为脱硫剂有效成分的$CaCO_3$、$Ca(OH)_2$的总质量分数为 45%~57%，可转化为石膏的$CaSO_3$、$CaSO_4$总质量分数为 23%~37%，Cl^-质量分数为 6%~8%，还有少量 Fe、Al 等杂质。脱硫灰的粒度分布检测结果显示其粒度均在 8.0 μm 以下(集中在 1~4 μm)，这与 XIANG 等[10]研究的脱硫灰粒度(98% 都在 20 μm 以下)结果一致，该脱硫灰满足湿法脱硫剂的粒度要求。试验所用烟气分别由SO_2/N_2混合而成(由锅炉燃烧产生)，水分别为工业水和自来水，O_2均为空气。

表 1 某钙基脱硫灰的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of calcium-based desulphurized ash %

样品编号	$CaCO_3$	$Ca(OH)_2$	$CaSO_3$	$CaSO_4$	Cl^-	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO	SiO_2
1#	30.60	21.70	19.60	4.95	6.43	3.50	0.60	0.80	1.45
2#	25.50	20.10	29.80	7.46	6.35	4.80	0.50	0.50	1.67
3#	28.60	16.40	28.30	5.42	7.88	5.40	0.90	0.90	1.01
4#	35.60	21.20	21.60	7.74	8.06	1.08	0.94	0.94	1.55

1.2　试验方法

（1）石灰石－石膏湿法脱硫系统模拟试验。在实验室搭建石灰石－石膏湿法脱硫系统模拟试验装置，如图 1 所示。该装置以吸收塔为主体设备，并配置循环泵、流量计、风机、分析仪等辅助设备。试验流程：浆液在循环泵作用下，一部分被喷嘴泵入吸收塔底部形成旋流，用于搅拌、混匀浆液，防止浆液沉淀；另一部分被喷嘴喷入吸收塔上部，用于烟气脱硫。此外，浆液流量通过调节阀开度控制，流量值通过电磁流量计测量；采用 pH 计测量浆液 pH 值，向吸收塔内通入空气实现 $CaSO_3$ 强制氧化；吸收塔进口烟气由 SO_2 和 N_2 气体混合组成，进、出口 SO_2 质量浓度由烟气分析仪（TESTO—340）检测，由此计算整套装置的脱硫效率。

为验证不同脱硫灰替代占比对系统脱硫效果的影响，试验固定吸收塔进口 SO_2 质量浓度为 570 mg/Nm^3（工业生产中吸收塔进口 SO_2 质量浓度在 600 mg/Nm^3 以下），空气流量为 25 L/min，吸收塔进口烟气流量为 1 000 L/min，混合脱硫剂投加流量为 1.80 t/h 等条件。试验设定吸收塔浆液 pH 值为 5.0～5.2，研究脱硫灰替代占比分别为 10%、20%、35%、50%、60%、75%、100% 时系统的脱硫效率和 SO_2 排放质量浓度变化情况。

（2）工业应用试验。工业现场有两套浆液制备系统，试验利用其中一套（石灰石粉仓、浆液箱）制备脱硫灰浆液，另一套制备石灰石浆液，其质量浓度均约为 20%。试验将两种脱硫剂按照不同比例同时加入 1#吸收塔进行脱硫反应，验证脱硫灰替代石灰石粉前、后的脱硫效果。因脱硫灰中含有一定量 Fe、Mg、Si、Al、Cl 等杂质，这些杂质会对湿法脱硫反应产生一定的副作用。为防止替代占比过大影响系统脱硫效率及运行效果，设置工业试验的脱硫灰替代占比从 5% 开始，并按 5% 梯度逐渐增加，开展 5%～50% 共 10 组替代试验，每组替代试验的周期至少为 7 d。试验过程记录 SO_2 排放质量浓度、脱硫效率，对吸收塔浆液和石膏的化学成分进行取样分析，并对比生产参数的变化。

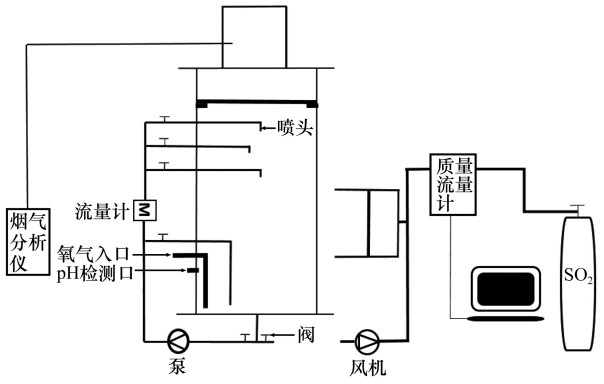


图 1　石灰石－石膏湿法脱硫系统模拟试验装置

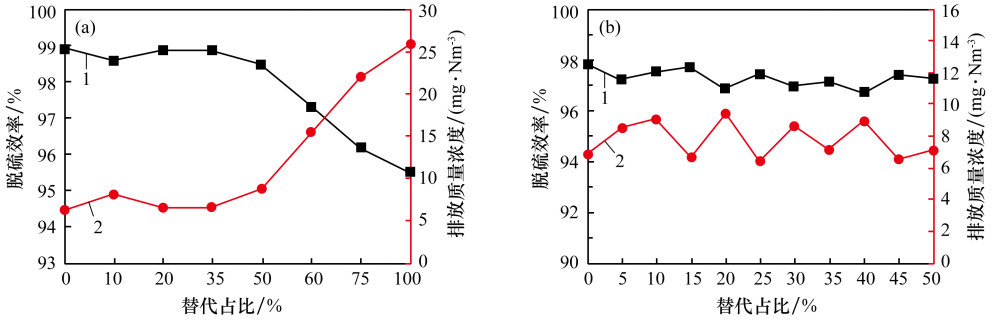
Fig. 1　Simulated test equipment of limestone-gypsum wet desulfurization system

2　结果与讨论

2.1　脱硫灰替代占比对系统脱硫效率和 SO_2 排放质量浓度的影响

实验室模拟试验得到脱硫灰替代占比对系统脱硫效率和 SO_2 排放质量浓度的影响，结果如图 2（a）所示。由图 2（a）可以看出，随着脱硫灰在混合脱硫剂中替代占比的增加，脱硫效率和 SO_2 排放质量浓度发生如下变化：当脱硫灰替代占比为0～50% 时，系统脱硫效率和 SO_2 排放质量浓度基本不随脱硫灰替代占比的增大而升高，脱硫效率在 98% 以上，SO_2 排放质量浓度为 9 mg/Nm^3 以下；当脱硫灰替代占比大于 50% 时，系统脱硫效率出现较大幅度下降、SO_2 排放质量浓度出现较大幅度上升，脱硫效率为 95% 以上，SO_2 排放质量浓度为 26 mg/Nm^3 以下，满足湿法脱硫生产要求。分析原因认为：当脱硫灰替代占比低于 50% 时，引入的脱硫反应中间产物 $CaSO_3$、产物 $CaSO_4$ 以及 Fe、Al、Cl 等杂质相对较少，对脱硫反应的影响不大；当脱硫灰替代占比增大后，系统中引入的 $CaSO_3$、$CaSO_4$ 及杂质含量增大，更大程度地影响了脱硫反应的效率，加之模拟装置单纯以循环泵搅拌浆液，搅拌效果不理想，烟气、空气与浆液接触的面积和时间均不够。

工业应用试验结果如图 2（b）所示，其与实验室结果一致，即脱硫灰替代占比低于 50% 对湿法脱硫反应的影响不大。由图 2（b）可知：脱硫效率集中在96%～98%，SO_2 排放质量浓度集中在6～



（a）实验室；（b）工业应用试验

1—脱硫效果；2—排放质量浓度。

图 2 不同脱硫灰替代占比对系统脱硫效率和 SO_2 排放质量浓度的影响

Fig. 2 Effects of different desulfurization ash substitution ratio on desulfurization efficiency and SO_2 emission concentration

10 mg/Nm^3，小于 35 mg/Nm^3 的国家排放标准，也满足行业超低排放要求。系统脱硫效率和 SO_2 排放质量浓度波动的原因与发电机组的生产负荷、煤种变化、煤气掺烧比、脱硫系统的调节方式（浆液循环泵的运行数量和浆液 pH 值控制范围）等 4 个因素有关，而前 3 个因素影响吸收塔进口 SO_2 质量浓度，第 4 个因素直接影响脱硫效率和 SO_2 排放质量浓度。

2.2 脱硫灰替代占比对吸收塔浆液化学成分的影响

工业应用试验前对 1$^{\#}$吸收塔浆液进行基准样品分析，基准样品为单石灰石粉（无脱硫灰替代）作为脱硫剂的吸收塔浆液。在不同替代阶段均取吸收塔浆液样品的化学成分进行分析，结果如表 2 所示。由表 2 可以看出：随着脱硫灰替代占比的增加，反应物 $CaCO_3$、产物 SO_4^{2-} 等主要化学成分没有发生明显变化，这说明石灰石粉和脱硫灰中的 $CaCO_3$ 均很好地发挥了脱硫剂作用，吸收的 SO_2 转化为 $CaSO_3$ 后在鼓入吸收塔的空气强制氧化作用下转化为 SO_4^{2-}。当脱硫灰替代占比为 25% 时，$CaSO_3$ 质量分数开始增加；当脱硫灰替代占比为 40% 时，$CaSO_3$ 质量分数上升幅度明显增加，这是因为 SO_2 吸收反应生成 $CaSO_3$、脱硫灰中自带 $CaSO_3$，使 $CaSO_3$ 质量分数增大，加之氧化风机的工频运行，提供的氧化空气量固定，氧气的富裕度降低，影响了氧化效果。另外，当脱硫灰的替代占比为 40% 时，Cl^- 质量分数开始有较大幅度的升高；当替代占比为 50% 时，吸收塔内 Cl^- 质量浓度将近 20 000 mg/L，这是因为脱硫灰中 Cl^- 质量分数（6%～8%）较高，并且石膏的脱水滤液被循环利用。Cl^-、$CaSO_3$ 对脱硫剂的溶解起抑制作用、不利于 $CaSO_3$ 氧化，按此趋势如继续增大替代占比，$CaSO_3$ 和 Cl^- 质量分数继续升高，对湿法脱硫反应及系统设备性能均有一定负面影响。

表 2 吸收塔浆液的主要化学成分

Table 2 Absorber slurry main composition list

替代占比	质量分数/%			Cl^-/(mg·L^{-1})
	SO_4^{2-}	$CaCO_3$	$CaSO_3$	
0	55.3	0.36	<0.01	10 516
5	46.7	0.60	<0.01	10 423
10	55.3	0.36	<0.01	9 145
15	48.9	0.41	0.14	8 121
20	50.8	1.00	0.04	9 333
25	48.8	0.73	0.19	7 612
30	49.9	0.64	0.16	10 110
35	50.4	0.68	0.17	10 211
40	51.1	0.21	0.36	15 812
45	56.1	0.71	0.46	16 221
50	50.2	0.19	0.58	19 617

2.3 脱硫灰替代占比对石膏化学成分的影响

试验前进行石膏的基准样检测，在不同替代占比阶段均取石膏样品进行化学成分分析，结果如表 3 所示。由表 3 可以看出：石膏主要成分 $CaSO_4\cdot 2H_2O$、$CaCO_3$ 的含量未发生明显变化，$CaSO_3\cdot 1/2H_2O$ 的含量有所上升，其原因与吸收塔浆液化学成分变化类似；附着水的含量没有随脱硫灰替代占比增大，这说明脱硫灰替代石灰石粉后，形成的石膏晶体的结构及大小没有受到较大影响，虽然 $CaSO_3\cdot 1/2H_2O$ 的含量有所上升，但

表 3　石膏的主要化学成分(质量分数)

Table 3　Gypsum main composition list　　%

替代占比	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$CaCO_3$	$CaSO_3 \cdot 1/2H_2O$	H_2O
标准	≥85.0	≤3.00	≤0.35	≤12.0
0	91.4	0.21	0.01	7.5
5	93.0	0.26	0.01	9.1
10	88.8	0.34	0.01	11.2
15	88.2	0.35	0.14	8.4
20	92.3	1.08	0.04	9.0
25	86.4	1.11	0.16	10.2
30	89.9	0.63	0.17	10.9
35	92.9	0.53	0.17	11.5
40	90.5	0.13	0.21	11.7
45	88.6	0.14	0.30	10.1
50	90.0	0.13	0.24	9.7

均在 0.35% 以下，其对石膏脱水性能影响较小，石膏产品仍能满足社会化利用要求。

2.4　脱硫灰替代占比对污泥产生量的影响

脱硫灰中含有 Fe、Mg、Si、Al 等杂质，这些物质可能进入污泥，为此统计污泥的产生量。得到脱硫污泥产生量与不同脱硫灰替代占比之间的关系如图 3 所示。由图 3 可知，脱硫污泥产生量与脱硫灰替代占比的相关性不大，这是因为杂质含量不高，加之杂质除进入污泥外，也有部分进入石膏；此外，脱硫灰替代石灰石粉后，石膏颜色稍微变红，是杂质中的 Fe 所致。石膏产量主要受吸收塔进口 SO_2 质量浓度影响，受杂质影响较小，故未对石膏产量进行分析。

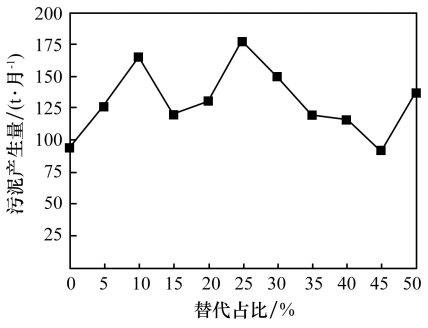


图 3　污泥产生量与脱硫灰替代占比的关系

Fig. 3　Relationship between sludge production and desulfurization ash replacement ratio

3　湿法脱硫系统生产运行方式

石灰石－石膏湿法脱硫系统的核心设备是吸收塔，主要控制参数为吸收塔浆液 pH 值和浆液循环泵的运行数量。脱硫灰替代石灰石粉前、后，石灰石－石膏湿法脱硫系统主要生产运行方式没有发生变化：系统依然保持运行 3 台较低功率的浆液循环泵，脱硫效率大于 95%，吸收塔浆液 pH 值继续维持在 5.0～6.0、密度控制在 1 100～1 165 kg/m^3，石膏旋流器和石膏脱水系统依然每天白班运行 8 h 左右，真空皮带脱水机的真空度(28～35 kPa)维持不变。

脱硫灰替代石灰石粉对湿法脱硫系统的最大影响是吸收塔内 Cl^- 质量浓度明显上升，其主要原因：替代前，湿法脱硫系统中 Cl^- 来源为工艺水(80～100 mg/L)、锅炉烟气(4 mg/m^3 以下，较小)和石灰石粉(约 0.1%，忽略不计)，当脱硫废水排放量约为 100 t/d 时吸收塔内 Cl^- 质量浓度维持在 8 000 mg/L；替代后，工艺水和锅炉烟气中 Cl^- 来源几乎不变，因所用脱硫灰中 Cl^- 质量分数(6%～8%)明显高于一般脱硫灰(约 0.5%)，加之湿法脱硫系统特点，滤液水返回吸收塔重复利用，Cl^- 在系统中不断富集。当脱硫废水排放量保持 100 t/d 不变时，吸收塔内 Cl^- 质量浓度短时由 8 000 mg/L 升高至 20 000 mg/L；加大脱硫废水排放量至 130 t/d 后，吸收塔内 Cl^- 质量浓度才降低至 15 000 mg/L 以下，满足湿法脱硫系统小于 20 000 mg/L 的标准。在钙基脱硫灰替代石灰石粉的过程中应及时检测吸收塔中 Cl^- 含量，以降低 Cl^- 对湿法脱硫系统设备的腐蚀，保证系统的脱硫效率。

脱硫灰替代石灰石粉生产期间发生了吸收塔浆液轻微起泡现象，发生该现象的原因为锅炉燃烧产生的烟气中杂质较多，与脱硫灰的投加没有直接关系。泡沫消失后继续使用脱硫灰没有再出现吸收塔浆液起泡现象。

综上，当脱硫灰替代占比为 0～50% 时，整个系统的操作变化不大，电能和水消耗没有明显上升，比夏纯洁等[11]在新疆某湿法脱硫工程中以半干法脱硫灰完全替代电石渣、石灰石粉的负面影响小很多。根据吸收塔浆液和石膏浆液的化学成分，若继续增大脱硫灰替代占比，系统中的 $CaSO_3$ 和 Cl^- 等不利成分含量将会继续增大，生产

运行方式要对应调整，生产运行费用会增加，经济性下降，同时可能影响系统脱硫性能。

4 结 论

（1）钙基脱硫灰部分替代石灰石粉在湿法脱硫系统中应用可行。脱硫灰替代占比在50%以下时，系统脱硫效率均在95%以上，SO_2 排放质量浓度均在10 mg/Nm^3 以下，满足行业超低排放要求；石膏化学成分基本没有发生变化，满足石膏社会化应用标准。继续增大替代占比对湿法脱硫系统将产生不利影响。

（2）湿法脱硫系统的生产运行方式变化不大，成本没有明显增加。此外，可通过增大废水排放量来解决吸收塔内 Cl^- 质量浓度上升的问题。

（3）脱硫灰可继续发挥脱硫剂作用，不仅降低了石灰石粉的使用量，还能转化为石膏产品销售。此资源化利用技术为脱硫灰类固废处置提供了一套经济高效、环境友好的解决方案，具有较好的推广应用价值。

参考文献：

[1] 田刚，王红梅，张凡. 脱硫灰的综合利用[J]. 能源环境保护，2003，17(6)：49－53.
TIAN Gang，WANG Hongmei，ZHANG Fan. Comprehensive utilization of desulfurization ash[J]. Energy and environmental protection，2003，17(6)：49－53.

[2] 解晓宁，刘凤源，杨黛竹. 干法脱硫灰综合利用现状与分析[J]. 新型建筑材料，2021，48(8)：65－69.
XIE Xiaoning，LIU Fengyuan，YANG Daizhu. Current situation and analysis of comprehensive utilization of dry desulfurization ash[J]. New building materials，2021，48(8)：65－69.

[3] LI Haoxin，ZHANG Hui，LI Lin，et al. Utilization of low-quality desulfurized ash from semi-dry flue gas desulfurization by mixing with hemihydrate gypsum[J]. Fuel，2019，255：115783.

[4] 周茂军，张代华. 宝钢烧结烟气超低排放技术应用及分析[J]. 烧结球团，2019，44(3)：58－63.
ZHOU Maojun，ZHANG Daihua. Application and analysis of Baosteel sintering flue gas ultra-low emission technology[J]. Sintering and Pelletizing，2019，44(3)：58－63.

[5] LI Q Y，ZHANG P，GAO S. Experimental research on making aerated concrete by petroleum coke desulfuration residue[J]. Materials Science Forum，2011，675－677：799－802.

[6] 苏航，邵久刚，毛瑞，等. 烧结半干法脱硫灰资源化利用研究与实践[J]. 烧结球团，2023，48(1)：36－43.
SU Hang，SHAO Jiugang，MAO Rui，et al. Research and practice on resource utilization of sintering semi-dry desulfurization ash[J]. Sintering and Pelletizing，2023，48(1)：36－43.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 张乾熙，刘高珍，贾明生，等. 钙基脱硫灰中 $CaSO_3$ 的氧化试验及应用分析[J]. 烧结球团，2022，47(4)：92－98.
ZHANG Qanxi，LIU Gaozhen，JIA Mingsheng，et al. Oxidation test and application analysis of $CaSO_3$ in desulphurization ash of pellets[J]. Sintering and Pelletizing，2022，47(4)：92－98.

[10] XIANG W，HAN B P，ZHOU D. Study on the physicochemical properties of desulfurization ash from two different coal fired power plants[C]//The 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. Shenzhen：China University of Mining and Technology，2010.

[11] 夏纯洁，刘兴利，莫建松，等. 半干法脱硫灰在湿法脱硫方面的应用研究[J]. 环境科技，2016，29(2)：25－28.
XIA Chunjie，LIU Xingli，MO Jiansong，et al. Applied research of semi-dry desulfurization ash in wet FGD[J]. Environmental science and technology，2016，29(2)：25－28.