烧结烟气湿法脱硫工艺使用脱硫灰应用探讨

赵丽娜, 贺 帅, 郭孝义, 田晓棠

(包钢集团节能环保科技产业有限责任公司, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 文章研究将脱硫灰与石灰石混合制备复合脱硫剂, 通过 ANSYS 与 MATLAB 构建仿真模型, 模拟不同工况、掺混比例及运行参数下的烧结烟气湿法工艺脱硫效果。结果表明: 在入口 SO_2 浓度 5 000 ~ 6 000 mg/m^3 工况下, 脱硫灰与石灰石最佳质量掺混比例为 15%, 此时脱硫效率达 99.3%, 出口 SO_2 浓度不大于 35 mg/m^3。

关键词: 脱硫灰; 湿法脱硫; 脱硫剂

中图分类号: TD464 **文献标识码**: B **文章编号**: 1009 - 5438(2025)06 - 0011 - 04

Discussions on Applying Desulfurization Ash in Wet Desulfurization Process of Ore Sintering Flue Gas

Zhao Lina, *He Shuai*, *Guo Xiaoyi*, *Tian Xiaotang*

(*Baotou Steel Group Energy Saving and Environmental Protection Technology Industry Co., Ltd.*, *Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region*, *China*)

Abstract: In this paper, the desulfurization effects of wet desulfurization process of ore sintering flue gas with different operating conditions, mixing ratios and operating parameters simulated by establishing simulation model with the ANSYS and MATLAB are studied with the composite desulfurization agent prepared by mixing desulfurization ash and limestone. The results showed that the desulfurization effect could reach 99.3% and concentration of SO_2 at outlet was not more than 35 mg/m^3 with the operating conditions that concentration of SO_2 at inlet was 5 000 ~ 6 000 mg/m^3 and optimal mass mixing ratio of desulfurization ash to limestone was 15%.

Key words: desulfurization ash; wet desulfurization; desulfurization agent

循环流化床脱硫灰富含 CaO 等碱性物质, 具备作为脱硫剂的潜在价值, 但直接应用存在脱硫效率低、副产品品质下降等问题, 导致资源利用率不足。为实现脱硫灰的资源化利用, 降低脱硫成本, 同时保障脱硫效率与副产品品质达标, 本文针对某钢厂烧结、球团脱硫灰特性开展应用研究。通过构建湿法脱硫仿真模型, 系统开展脱硫灰与石灰石掺混比例试验、高浓度 SO_2 适应性试验及关键运行参数优化试验, 重点探究掺混比例、入口 SO_2 浓度、液气比、氧化风量等因素对脱硫效率及副产品品质的影响。明确最佳掺混比例区间与运行参数, 为脱硫灰在高硫烟气湿法脱硫中的工程应用提供科学依据, 助力钢铁行业超低排放与固废资源化协同推进[1]。

1 脱硫工艺概况

1.1 循环流化床脱硫灰性状

循环流化床脱硫灰是烧结、球团烟气半干法脱硫处理工艺产生的固体废弃物, 其性状为浅灰色粉

收稿日期: 2025 - 07 - 14

作者简介: 赵丽娜(1983 -), 女, 内蒙古包头市人, 硕士, 高级工程师, 现从事环境保护技术管理工作。

末状,其颗粒形态具有不规则性,微观结构表现为多孔状构造,颗粒表面呈现光滑特征,整体结构呈现松散的堆积状态,富含 CaO 和 $Ca(OH)_2$ 等碱性物质,以及 $CaSO_3$[2]。此外,它还含有少量的杂质,如 SiO_2、F_2O_3、Al_2O_3 等,脱硫灰性状见图1。



图1 脱硫灰物理性状

1.2 某钢厂烧结、球团烟气湿法脱硫工艺

某钢烧结、球团工序产生的烟气含 SO_2 浓度为(5 000~6 000) mg/m^3,某钢除使用循环流化床脱硫技术外,还使用"石灰石-石膏湿法脱硫"工艺进行烧结、球团烟气处理,其工艺流程图见图2。

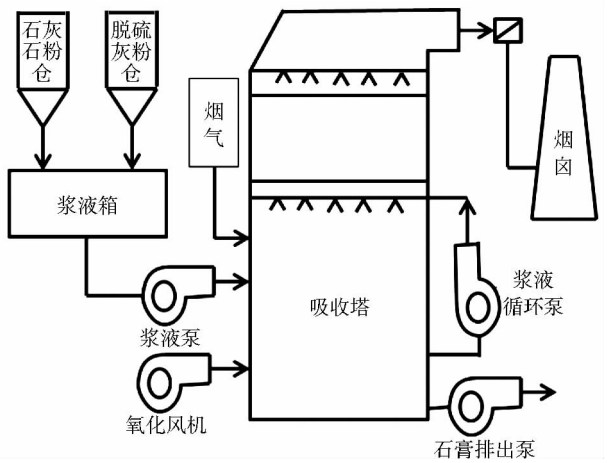


图2 工艺流程图

2 脱硫灰应用模拟试验

2.1 试验前准备

2.1.1 试验样品理化特性分析

(1)脱硫灰样品

本次模拟试验所用脱硫灰样品,取自某钢烧结机循环流化床系统产生的脱硫灰,其主要化学成分及含量见表1。

表1 循环流化床工艺脱硫灰主要化学成分及含量(质量分数) %

成分	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3^{2-}	Cl^-
质量分数	5.0~7.3	0.6~0.8	3.5~4.9	45~55	1.9~2.4	25~27	0.8~1.0

由表2可知,烧结脱硫灰中 CaO 的含量为45%~55%,该成分可作为湿法烟气脱硫吸收剂的有效成分。

(2)石灰石样品

本次模拟试验选用工业级石灰石粉作为基准脱硫剂,其化学成分及含量见表2。

表2 石灰石粉主要化学成分及含量(质量分数) %

成分	CaO	MgO	SiO_2	酸不溶物	Al_2O_3	$CaCO_3$
质量分数	≥51.0	≤2.0	≤3.0	≤5.0	≤0.5	≥85.0

2.1.2 模拟试验仿真模型构建

参照实际运行参数还原真实现场工况,利用 ANSYS 与 MATLAB 相结合的仿真软件模拟湿法脱硫系统运行过程,仿真系统搭建包含以下核心模块:

(1)烟气预处理模块

该模块的核心功能是模拟入口烟气的均质化与温控过程。针对某钢烧结平均60万 m^3/h 的入口烟气量,模型需考虑烟气在混合段的湍流扩散特性(管道直径3.0 m,雷诺数 $Re \approx 4.7 \times 10^6$),并设置多孔介质挡板模拟烟气混合效果,确保进入吸收塔的烟气成分与温度分布均匀性。

(2)吸收塔模块

该模块构建吸收塔空间三维模型。吸收塔主体几何尺寸为:直径14 m、高度37 m。喷淋系统设计中,塔内设置5层喷淋层,喷淋覆盖率设为200%,使得喷淋面积总和可达到吸收塔横截面积的2~3

倍,确保烟气与浆液充分接触,避免烟气短路造成喷嘴布置交错排列,上层覆盖下层间隙。

(3)浆液循环模块

该模块的核心功能是模拟浆液的物理特性与流动特性。石灰石浆液箱的主体几何尺寸为 Φ6.6 × 8 m,有效容积为 247 m^3;箱内设有搅拌器,用于防止 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 结晶沉淀。循环泵选用离心泵模型,流量调节范围为(0 ~ 8 000) m^3/h,可通过变频器调节电机电源频率、转速,以匹配不同负荷下的液气比(L/G)需求。

(4)氧化模块

该模块主要模拟 $CaSO_3$ 氧化过程。模型采用“浆液池 + 曝气盘”结构,氧化风机风量设定为 8 000 m^3/h,曝气盘布置在浆液池底部,氧化反应动力学模型,耦合 pH 值控制在(5.5 ~ 6.5)范围内,以确保 SO_3^{2-} 的氧化率能够达到 95% 以上。

(5)工况参数校准与边界条件设定

以某钢厂实际工况为基准,向模型输入烟气的相关参数,设定标况下入口烟气量 60 万 m^3/h,烟气温度 130 ℃,入口烟气 SO_2 浓度为(5 000 ~ 6 000) mg/m^3。校准模型边界条件,使仿真结果与实际偏差控制在 ±5% 以内,验证模型在超负荷下的稳定性,确保脱硫效率仍能维持 99% 以上。

2.1.3　基准参数设定

在模拟试验研究中,为确保试验结果的科学性、可比性,以纯石灰石脱硫剂作为基准反应物,其化学纯度 $CaCO_3$ 含量不小于 95%,粒径分布为(40 ~ 60) μm,借此消除杂质对反应动力学的干扰。

基准工况参数设定:浆液初始 pH 值控制在 4.8 ~ 5.8范围内,浆液温度不大于 65 ℃,液气比为(30 ~ 50) L/m^3,氧化风量稳定在 8 000 m^3/h。在上述基准工况下的脱硫效率,将作为对照组的基准值,用于后续变量试验的性能比对[3]。

试验评价指标设定:出口 SO_2 浓度必须不大于 35 mg/m^3,该极限值符合环大【2019】35 号《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》中烧结机/球团烟气出口污染物超低排放要求;系统脱硫效率不小于 99%,计算方法采用干基标态体积浓度(折算氧含量为 16%)[4];脱硫石膏中 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 含量不大于 95%,$CaCO_3$ 残留量需不大于 5%,此指标参考《烟气脱硫石膏》(GB/T 37785—2019)[5] 建材回用标准。

2.2　脱硫灰应用模拟试验分析

2.2.1　脱硫灰掺混比例与脱硫效率关系分析

通过监测不同掺混比例下的脱硫效率并记录数据,绘制“脱硫灰掺混比例 – 脱硫效率”曲线,在入口 SO_2 浓度为(5 000 ~ 6 000) mg/m^3 的工况下,其“脱硫灰掺混比例 – 脱硫效率”曲线见图 3,分析脱硫灰掺混比例对脱硫效率的影响,找出脱硫效率峰值对应的脱硫灰掺混比例范围。由图 3 可知,脱硫灰掺混比例超过 15%,则脱硫效率则急剧下降,无法达到 99% 的基准参数。

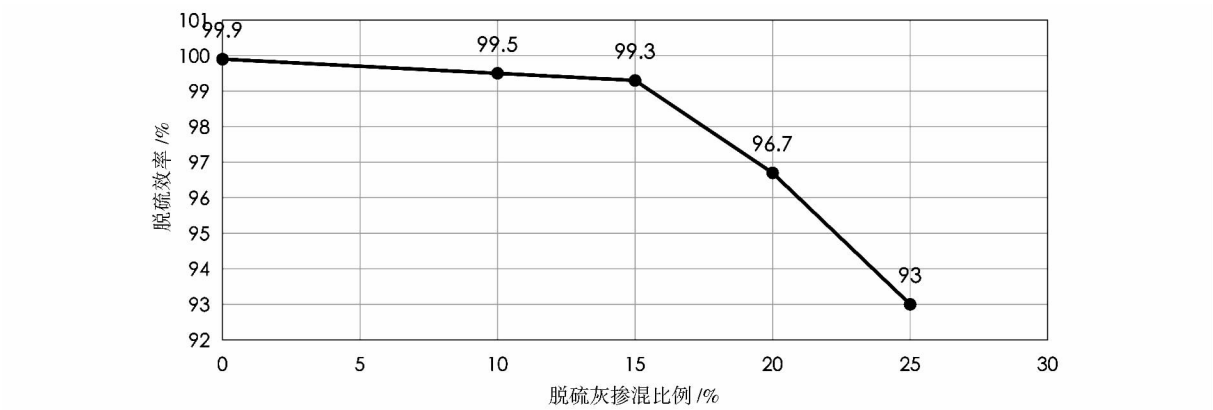


图 3　脱硫灰掺混比例 – 脱硫效率曲线

2.2.2　脱硫石膏品质分析

对于不同脱硫灰掺混比例下产生的脱硫石膏,进行主要成分及杂质含量检测,分析脱硫灰掺混比例对湿法脱硫副产品石膏品质的影响,重点分析 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 纯度、$CaCO_3$ 残留量及主要杂质(Fe_2O_3、SO_2)含量变化,结果如表 3 所示。

表3 脱硫石膏主要成分及杂质含量(质量分数) %

脱硫灰掺混比例	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 含量	$CaCO_3$ 残留量	Fe_2O_3 含量	SiO_2 含量	品质评价
0(纯石灰石)	96.8	2.1	0.3	0.5	符合标准
10	96.2	2.5	0.8	1.2	符合标准
15(最佳比例)	95.5	3.2	1.1	1.8	符合标准
20	92.3	5.8	1.5	2.7	不符合标准

由表3可知,当脱硫灰掺混比例不大于15%时,脱硫石膏中 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 含量均不小于95%,$CaCO_3$ 残留量不大于5%,满足建材回用标准要求。其中掺混比例为15%时,$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 含量为95.5%,$CaCO_3$ 残留量为3.2%,虽然较纯石灰石工况略有下降,但是仍处于达标范围内。当掺混比例提升至20%时,石膏品质显著恶化,$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 含量降至92.3%,$CaCO_3$ 残留量超标至5.8%。同时 Fe_2O_3、SO_2 等杂质含量进一步升高,主要原因是脱硫灰中杂质包裹 Ca^{2+},阻碍反应,且 $CaSO_3$ 氧化不充分导致残留增加。这一结果与脱硫效率变化趋势一致,表明将脱硫灰掺混比例控制在15%以内是兼顾脱硫效率与石膏品质的关键。

3 结论

(1)试验结果表明,在入口 SO_2 浓度为(5 000~6 000) mg/m^3 的工况下,脱硫灰与石灰石的最佳质量掺混比例为15%。此时脱硫效率可达99.3%,出口 SO_2 浓度稳定控制在35 mg/m^3 以下,满足超低排放标准。

(2)模拟试验核心运行参数:液气比35 L/m^3,保证气液充分接触的同时,可以最大限度地降低循环泵能耗。氧化风量为8 000 m^3/h,确保浆液中 $CaSO_3$ 转化率达98%以上,减少 $CaSO_3$ 残留对系统的影响。浆液pH值控制在4.8~5.8,既能维持脱硫反应活性,又能减缓设备腐蚀,延长设备使用寿命。

(3)当混合脱硫剂中添加的脱硫灰量超过最佳混合质量比时,系统脱硫效率开始下降,此时需增加脱硫浆液的更换频次,湿法脱硫副产物中 $CaSO_3$ 的含量随之也增加,从而导致石膏的品质下降。因此,在实际应用中,为保障脱硫系统稳定运行,在提高系统氧化效率的同时,添加脱硫灰的混合质量比不宜过高。

参 考 文 献

[1] 孟宪栋,牟文宇,程华,等.钢铁行业全流程超低排放技术研析应用[J].环境影响评价,2020,42(4):10-15.

[2] 刘高珍.球团脱硫灰在湿法脱硫中的特性及脱硫性能研究[D].湛江:广东海洋大学,2022.

[3] 柳领君,张玉亭,魏全伟.烧结/球团烟气活性焦脱硫脱硝技术研究[J].环境生态学,2020,2(9):66-70.

[4] 沈建斌.旋冲塔湿法烟气脱硫工艺在烧结球团生产中的应用[J].金属材料与冶金工程,2010,38(6):22-26.

[5] GB/T 37785—2019,烟气脱硫石膏[S].