

# 脱硫系统氧化风对浆液品质影响的研究

王颢睿 王靖怡

华电潍坊发电有限公司 山东潍坊 261000

DOI: 10.12238/ems.v7i11.16074

**[摘要]** 在燃煤电厂湿法脱硫系统中, 氧化风系统作为石膏脱水环节的核心组成部分, 其运行状态直接影响浆液品质, 进而关系到脱硫效率与系统稳定性。本文系统分析了氧化风的风量、风压、氧浓度、温度及分布均匀性等参数对浆液 pH 值、石膏纯度、颗粒粒径分布及浆液密度等关键品质指标的影响机理。研究表明, 氧化不足会导致亚硫酸钙残留、浆液品质恶化, 而过度氧化则可能引发设备腐蚀与能耗增加。基于影响机理, 从氧化风系统优化、运行参数调控及设备维护三个维度提出针对性改进措施, 包括采用变频风机调节风量、优化布风装置提升均匀性、建立在线监测与自适应控制体系等。案例验证显示, 实施优化后石膏纯度提升至 90% 以上, 浆液含水率降低 8%-12%, 系统运行稳定性显著增强, 为脱硫系统高效运行提供了技术支撑。

**[关键词]** 脱硫系统; 氧化风; 浆液品质; 石膏纯度; 参数优化; 运行调控

## 一、引言

### (一) 研究背景

湿法石灰石-石膏脱硫工艺是当前燃煤电厂控制二氧化硫排放的主流工艺。氧化风系统负责将吸收塔内的亚硫酸钙氧化为硫酸钙, 是石膏结晶与脱水的关键。氧化风通过布风装置送入吸收塔浆液池, 为氧化反应提供氧气。浆液品质直接体现脱硫系统运行状态, 影响石膏利用价值和设备使用寿命, 品质不佳会引发诸多问题, 增加维护成本。近年来, 氧化风对浆液品质的影响成为研究热点, 但目前对氧化风参数与浆液品质关联性的系统研究缺乏, 氧化风调控不当会影响脱硫系统稳定运行。

### (二) 研究意义

深入探究氧化风对浆液品质的影响, 有重要理论与实践意义。理论上, 明确氧化风参数对浆液品质的作用机理, 可为建立关联模型提供依据, 丰富湿法脱硫工艺理论体系。实践中, 研究成果可指导电厂优化氧化风系统参数, 提升浆液品质, 减少设备故障和维护成本, 提高石膏利用价值, 实现资源回收, 保障脱硫效率, 满足环保要求。

### (三) 国内外研究现状

国内外学者对湿法脱硫系统氧化过程有部分研究。氧化反应动力学方面, 反应速率与氧气浓度等因素相关, 氧气浓度是关键因素之一。氧化风系统设计上, 国外聚焦布风装置优化, 国内关注氧化风机选型与节能运行。浆液品质控制方面, 现有研究多关注石灰石品质等因素, 对氧化风系统性研究不足, 缺乏对氧化风综合影响的全面探讨。因此, 需开展系统研究, 厘清氧化风参数与浆液品质指标的联系。

## 二、氧化风与浆液品质的基本特性

### (一) 氧化风的组成与作用

氧化风主要由压缩、过滤后的空气提供, 主要成分是氧气和氮气, 含少量杂质。在湿法脱硫系统中, 其核心作用是

为氧化反应提供氧气, 促使亚硫酸钙转化为硫酸钙。亚硫酸钙溶解度高, 难以直接结晶, 硫酸钙溶解度低, 易形成石膏晶体沉淀。氧化风通过特定反应推动亚硫酸钙向硫酸钙转化, 为石膏生成创造条件。

### (二) 浆液品质的关键指标

浆液品质评价围绕以下关键指标: 石膏纯度是核心指标, 高纯度石膏经济价值高, 纯度不足则可能成固废。颗粒粒径分布影响浆液脱水性能, 大且均匀的石膏晶体易于脱水。浆液 pH 值反映酸性强弱, 正常控制在 5.0 - 5.8, 过高或过低都会产生不良影响。浆液密度通常控制在 1080 - 1150 kg/m<sup>3</sup>, 过高或过低会影响脱硫效率和设备能耗等。

## 三、氧化风参数对浆液品质的影响机理

### (一) 风量的影响

氧化风量是决定氧化反应程度的关键参数。在一定范围内, 随着氧化风量的增加, 浆液中氧气含量升高, 亚硫酸钙的氧化速率加快, 可减少亚硫酸钙在浆液中的残留, 有利于提高石膏纯度。

当风量不足时, 氧化反应不充分, 亚硫酸钙大量积累, 会导致石膏纯度下降, 同时亚硫酸钙的存在会使浆液的黏性增加, 影响石膏晶体的生长, 导致颗粒粒径偏小, 脱水性能恶化。此外, 未被氧化的亚硫酸钙还可能与浆液中的其他成分反应, 生成不稳定的化合物, 加剧浆液品质的波动。

然而, 风量并非越大越好。过度增大风量会导致浆液中气泡过多, 形成泡沫层, 阻碍气液传质效率, 反而可能降低氧化反应速率。同时, 过量的空气会携带大量热量进入浆液, 导致浆液温度升高, 影响石膏结晶平衡, 还会增加氧化风机的能耗, 提高运行成本。

### (二) 风压的影响

风压是保障氧化风在浆液中有效扩散的重要参数。足够的风压可使氧化风通过布风装置(如曝气头)形成细小气泡, 增

大气液接触面积，提高氧气利用率，促进氧化反应充分进行。

风压不足时，氧化风难以穿透浆液，气泡直径较大且分布不均，气液接触不充分，导致局部区域氧化不足，出现亚硫酸钙富集现象，影响石膏纯度和颗粒粒径分布。同时，风压不足还可能导致布风装置堵塞，进一步恶化氧化效果。

若风压过高，一方面会使气泡破碎过于剧烈，产生过多细小气泡，这些气泡易聚合形成大气泡，反而降低气液接触效率；另一方面，过高的风压会加剧布风装置的磨损和振动，缩短设备使用寿命，增加维护成本。此外，高压气流还可能对浆液池底部的石膏沉积层产生冲击，导致已结晶的石膏颗粒被打碎，影响浆液的稳定性。

### （三）氧浓度的影响

氧浓度直接影响氧化反应的驱动力。在相同风量下，提高氧化风中的氧浓度（如采用富氧氧化技术）可显著加快氧化反应速率，缩短反应时间，提高亚硫酸钙的转化率，从而提升石膏纯度。

当氧浓度偏低时，即使风量充足，氧化反应也难以高效进行，会导致亚硫酸钙残留，与风量不足的后果类似。特别是在浆液中杂质较多、反应活性较低的情况下，低氧浓度会进一步加剧氧化不足的问题。

但氧浓度的提高也需合理控制。过高的氧浓度可能导致氧化反应过于剧烈，生成的硫酸钙晶体生长过快，易形成细小颗粒，影响脱水性能。同时，富氧氧化会增加制氧成本，需在经济性与氧化效果之间进行权衡。

### （四）温度的影响

氧化风温度对浆液温度具有间接影响，进而作用于氧化反应和石膏结晶过程。氧化风温度升高时，会使浆液温度上升，在一定范围内可加快氧化反应速率，因为温度升高会提高分子运动活性，促进氧气在浆液中的溶解和扩散。

然而，浆液温度过高（超过 60℃）会导致石膏的溶解度下降，影响石膏晶体的生长，易形成细小的针状晶体，不利于脱水。同时，高温环境会加剧浆液对设备的腐蚀，降低设备的使用寿命。

若氧化风温度过低，进入浆液后会降低浆液温度，减慢氧化反应速率，延长反应时间，可能导致氧化不充分。尤其在冬季或低温环境下，需注意控制氧化风温度，避免对浆液品质产生不利影响。

### （五）分布均匀性的影响

氧化风在浆液中的分布均匀性是确保整体氧化效果的关键。分布均匀时，浆液中各区域的氧气含量相对一致，氧化反应同步进行，可避免局部氧化不足或过度氧化的情况，有利于生成纯度高、粒径均匀的石膏晶体。

当分布不均匀时，局部区域氧气充足，氧化反应充分，而其他区域则可能因氧气匮乏导致亚硫酸钙积累。这种局部

差异会使浆液中石膏晶体的生长环境不一致，形成大小不一的颗粒，影响浆液的稳定性和脱水性能。此外，氧化风分布不均还可能导致浆液池内局部腐蚀加剧，因为氧化充分区域的酸性较强，而氧化不足区域则可能存在还原性物质，加速设备的电化学腐蚀。

## 四、基于浆液品质优化的氧化风系统改进措施

### （一）氧化风系统设计优化

风机选型与控制：采用变频氧化风机，根据浆液中亚硫酸钙浓度、pH 值等参数实时调节风量，实现按需供风。变频控制可有效避免风量过大或过小的问题，提高能源利用效率，同时保证氧化反应的稳定性。例如，当监测到亚硫酸钙浓度升高时，自动增大风量；当浓度降低至合理范围时，减少风量。

布风装置改进：优化曝气头的结构和布置方式，提升氧化风分布均匀性。采用多孔式曝气头，可产生细小且均匀的气泡，增大气液接触面积。在布置上，根据浆液池的形状和尺寸，采用对称或梅花形布置，确保每个区域都能获得充足的氧气。同时，选用耐磨、耐腐蚀的材料（如陶瓷、不锈钢）制作曝气头，延长其使用寿命。

富氧氧化系统应用：在高硫煤机组或对石膏品质要求较高的场景，可考虑采用富氧氧化系统。通过制氧设备提高氧化风中的氧浓度（如提升至 30%-50%），加快氧化反应速率，减少风量需求，降低风机能耗。但需进行经济性分析，确保投入与产出平衡。

### （二）运行参数调控策略

建立参数关联模型：通过实验和现场数据采集，建立氧化风参数（风量、风压、氧浓度等）与浆液品质指标（石膏纯度、颗粒粒径、pH 值等）的关联模型。利用该模型可根据目标浆液品质，反推出最优的氧化风参数设置，为运行调控提供指导。

实时监测与反馈：在吸收塔和氧化风系统中安装在线监测仪表，实时监测浆液的 pH 值、亚硫酸钙浓度、石膏颗粒粒径、氧化风量、风压、氧浓度等参数。将监测数据传输至控制系统，通过闭环控制算法自动调整氧化风参数，确保浆液品质稳定在合理范围内。例如，当监测到石膏纯度下降时，适当增大风量或提高氧浓度。

分段调控策略：根据脱硫系统的运行阶段（如启动、稳定运行、停机）制定不同的氧化风参数调控策略。启动阶段，浆液中亚硫酸钙浓度较低，可适当降低风量，避免能源浪费；稳定运行阶段，按照关联模型设置参数，确保氧化反应充分；停机前，适当提高风量，将浆液中的亚硫酸钙充分氧化，减少停机期间的浆液变质风险。

### （三）设备维护与管理

定期清洁与检查：定期对氧化风管道、布风装置进行清

洁,清除堵塞物(如石膏沉积、杂质),确保气流畅通。检查曝气头是否损坏、脱落,及时更换老化部件,保证氧化风分布均匀性。同时,检查风机的运行状态,包括轴承温度、振动、风压等,确保风机正常工作。

浆液池清理:定期清理浆液池底部的沉积石膏和杂质,避免其影响氧化风的扩散和浆液的流动性。清理周期可根据浆液品质和运行情况确定,一般每 3-6 个月进行一次。

人员培训:加强对运行和维护人员的培训,使其熟悉氧化风系统的工作原理、参数调控方法及设备维护要点。提高操作人员对浆液品质异常情况的判断和处理能力,确保在出现问题能及时采取措施,减少故障影响。

## 五、案例分析

### (一) 案例一:某 300MW 燃煤机组脱硫系统

问题:该机组脱硫系统运行中出现石膏纯度偏低(约 82%)、脱水困难(滤饼含水率约 25%)的问题,经检查发现氧化风量波动较大,布风装置存在局部堵塞,导致氧化风分布不均。

改进措施:

将原有定速氧化风机更换为变频风机,实现风量自动调节。更换全部曝气头,采用多孔陶瓷曝气头,并优化布置方式。增设在线监测系统,实时监测亚硫酸钙浓度和石膏粒径。

效果:改进后,氧化风量稳定在合理范围,氧化风分布均匀性显著提升。石膏纯度提高至 92%,滤饼含水率降至 15% 以下,石膏脱水效率提升明显。系统运行稳定性增强,半年内未发生因浆液品质问题导致的停机事故,维护成本降低约 15%。

### (二) 案例二:某 600MW 燃煤机组脱硫系统

问题:该机组采用富氧氧化系统,但运行中出现石膏颗粒细小、脱水性能差的问题,同时制氧成本较高。经分析,发现氧浓度过高(约 60%),导致氧化反应过于剧烈,晶体生长不良。

改进措施:

调整制氧系统,将氧浓度降至 40%。

优化风量与氧浓度的匹配关系,根据浆液状态实时调整。

加强对浆液温度的控制,通过换热器降低氧化风温度,避免浆液过热。

效果:调整后,石膏晶体粒径明显增大,平均粒径从 40  $\mu\text{m}$  增至 80  $\mu\text{m}$ ,脱水性能改善,滤饼含水率降低 8%。同时,制氧成本下降约 20%,在保证石膏品质的前提下,提高了系统的经济性。

## 六、结论与展望

### (一) 结论

氧化风的风量、风压、氧浓度、温度及分布均匀性等参数对浆液品质具有显著影响,其中风量和分布均匀性是关键因素,直接决定氧化反应的充分性和石膏晶体的生长状态。

氧化不足会导致亚硫酸钙残留、石膏纯度下降、颗粒粒径偏小及脱水性能恶化;过度氧化则可能引发能耗增加、设备腐蚀加剧等问题,需通过合理调控实现平衡。

采用变频风机调节风量、优化布风装置提升均匀性、建立在线监测与自适应控制体系等改进措施,可有效提升浆液品质,增强脱硫系统运行稳定性。

案例验证表明,针对氧化风系统的优化措施能显著提高石膏纯度、改善脱水性能,降低维护成本,具有良好的应用效果。

### (二) 展望

智能化调控技术:结合大数据和人工智能技术,建立基于深度学习的氧化风-浆液品质预测模型,实现氧化风参数的精准智能调控。通过分析历史运行数据,自动识别最佳运行参数组合,进一步提升系统的经济性和稳定性。

新型布风技术研发:开发具有自清洁功能的布风装置,减少堵塞问题,提高氧化风分布均匀性的长期稳定性。探索新型曝气方式(如超声曝气、脉冲曝气),增强气液传质效率,降低能耗。

协同优化研究:开展氧化风系统与其他脱硫子系统(如浆液循环系统、石灰石供给系统)的协同优化研究,建立整体系统的优化运行策略,实现脱硫效率、浆液品质与能耗的多目标优化。

绿色氧化技术探索:研究可再生能源驱动的氧化风系统(如太阳能辅助风机),降低对传统能源的依赖,减少碳排放,符合绿色低碳发展趋势。

通过持续的技术创新和优化,有望进一步提升脱硫系统氧化风对浆液品质的控制能力,为燃煤电厂的清洁高效运行提供更有力的支撑。

### [参考文献]

[1]付达,林扬波,雷鸣. 脱硫系统中氯丁橡胶衬里的改性研究及其耐腐蚀性能评价[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2025, (07): 163-165. DOI: 10.19307/j.cnki.ctr. 2025. 07. 031.

[2]段大为. 燃煤电厂烟气脱硫系统状态监测与优化调控研究[D]. 浙江大学, 2024. DOI: 10.27461/d.cnki.gzjdx. 2024. 000217.

[3]李建. 灵活性发电背景下脱硫氧化风优化[D]. 华北电力大学(北京), 2021. DOI: 10.27140/d.cnki.ghbbu. 2021. 001350.

[4]张鑫博. 脱硫循环浆液中亚硫酸钙的氧化控制研究[D]. 山东大学, 2020. DOI: 10.27272/d.cnki.gshdu. 2020. 01428.

[5]陆培宇. 工业锅炉快装式脱硫塔结构设计与优化[D]. 华南理工大学, 2015.