

# 燃煤电厂石灰石-石膏湿法脱硫系统运行优化与稳定性研究

陈司未

国家电投集团远达环保工程有限公司 重庆 401122

**【摘要】**：石灰石-石膏湿法脱硫技术由于具有脱硫效率高、工艺成熟、副产物可资源化利用等特点，是目前我国燃煤电厂主要的烟气脱硫工艺。但是该系统在实际的长期运行中存在着运行参数控制不恰当、能耗过高、设备故障频发、脱硫效率不稳定、石膏品质不稳定等问题，从而影响到机组环保达标排放和连续稳定运行。本文根据燃煤电厂实际运行工况，对石灰石-石膏湿法脱硫系统的运行机理进行分析，对系统运行不稳定的原因进行梳理，从工艺参数精细化控制、核心设备运行优化、系统运维管理完善、故障预判和处置等几个方面提出相应的运行优化和稳定性提升措施，并通过工程实践验证优化的效果。研究结果表明，全流程精细化控制加智能化调节，可以使脱硫效率达到95%以上，系统综合能耗降低15%到20%，大大减少设备故障次数，保证系统长期高效稳定运行，给燃煤电厂环保达标、节能降耗提供技术参考。

**【关键词】**：燃煤电厂；石灰石-石膏湿法脱硫；运行优化；稳定性；参数调控

DOI:10.12417/2811-0528.26.10.003

目前一些燃煤电厂还存在着运行调节粗放、参数控制不准、运维管理不到位等问题，过分依靠经验操作，没有形成系统的优化方案和稳定的管控机制。因此，对石灰石-石膏湿法脱硫系统进行运行优化和稳定性研究，整理出主要的影响因素，提出精细化的控制措施，建立全生命周期稳定性保障体系，对提高电厂环保治理水平、降低运行成本、延长设备使用寿命具有重要的工程实践意义。本文从电厂实际运行角度出发，对系统运行的痛点进行全方位的分析，并提出可行且经济的改进措施，从而达到脱硫系统高效、低耗、稳定的运行目的。

## 1 石灰石-石膏湿法脱硫系统原理及现存运行问题

### 1.1 系统核心工艺流程与反应机理

石灰石-石膏湿法脱硫系统由烟气系统、吸收塔系统、石灰石浆液制备系统、石膏脱水与排放系统、氧化空气系统、工艺水系统和自控系统组成。其主要的化学反应过程可以分为两步，第一步是吸收反应，烟气中的 $\text{SO}_2$ 进入吸收塔，与喷淋的石灰石浆液接触，溶解在浆液中并和 $\text{CaCO}_3$ 反应生成 $\text{CaSO}_3$ ；第二步是氧化反应，通过氧化风机向吸收塔浆池内注入空气，将 $\text{CaSO}_3$ 强制氧化成 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ （石膏），石膏经过脱水处理后可以作为建材原料资源化利用，净化后的烟气经除雾器脱水后排入烟囱。整个系统的运行核心就是保持气液传质效率、化学反应速率和浆液工况三者之间的动态平衡，任何一个环节的参数失衡或者设备故障，都会破坏系统的平衡，造成运行异常。

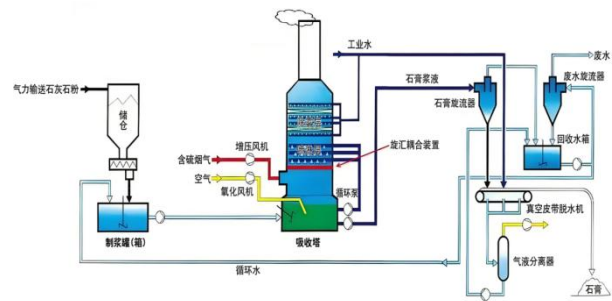


图1 石灰石-石膏湿法脱硫系统

### 1.2 系统运行常见稳定性问题

在国家“双碳”目标和越来越严格的空气质量标准双重压力之下，燃煤电厂烟气脱硫系统运行效果的好坏、稳定程度的高低，直接决定着整个机组环保是否合规以及整体运行经济性。石灰石-石膏湿法脱硫（WFGD）是目前应用最广的脱硫工艺，其主要原理就是用石灰石浆液做吸收剂，在吸收塔内和烟气中的 $\text{SO}_2$ 发生气液两相反应，生成亚硫酸钙，再经过强制氧化生成石膏，从而达到脱除 $\text{SO}_2$ 的目的。该工艺虽然技术成熟，但是涉及气液固三相反应、多设备协同运行，受燃煤硫分波动、机组负荷变化、吸收剂品质、浆液工况、设备性能等多重因素的影响，极易出现脱硫效率下降、浆液中毒、石膏脱水困难、设备腐蚀磨损、能耗超标等各类问题，严重时会造成系统停运，影响机组正常发电。常见问题如下所示。

脱硫效率不稳定，不能达到标准。由于燃煤硫分突变、机组负荷突然改变、浆液循环量不够、pH值控制不好等原因造成 $\text{SO}_2$ 脱除效率忽高忽低，部分时段超过环保排放标准，存在环保超标的风险。

浆液工况异常造成系统堵塞和中毒,吸收塔浆液密度、pH值、钙离子浓度、亚硫酸盐含量控制不严,容易产生浆液起泡、溢流、结垢堵塞,严重时还会造成浆液中毒,影响石灰石溶解,脱硫效率急剧降低。

核心设备能耗大、故障多:浆液循环泵、氧化风机一直在满负荷运转状态,变频控制不到位,电耗比例过大;浆液中有固体颗粒磨损、腐蚀性介质侵蚀,造成泵体、管道、喷嘴、除雾器等设备磨损泄漏、堵塞失效,维护频率和成本都很高。

脱水困难是由于氧化空气量不够、浆液中杂质多、石膏旋流器工作不正常等原因,造成石膏含水率高、亚硫酸盐含量高,不能达到建材利用的标准,甚至造成脱水系统堵塞停运。

自动化调控滞后,运维管理粗放,部分电厂自控系统不完善,参数监测不全面,依靠人工经验调节,响应滞后,缺少故障预判机制,小故障慢慢发展成系统停运事故。

## 2 脱硫系统运行优化核心策略

运行优化的核心目的就是保证SO<sub>2</sub>达标排放的同时实现系统低耗高效运行,从工艺参数的精细调节、设备运行方式的优化、吸收剂利用率的提高三个方面入手,从源头上解决运行异常的问题,筑牢系统稳定运行的基础。

### 2.1 关键工艺参数精细化调控

(1) 吸收塔浆液pH值优化:浆液pH值属于决定脱硫效率及反应平衡的关键因素,pH值过高会阻碍石灰石的溶解,增大浆液结垢的风险,加大钙硫比,引发吸收剂的浪费;pH值过低会使SO<sub>2</sub>的吸收速度变慢,从而造成脱硫效率下降。根据工程实践,最佳的pH值控制范围是5.2到5.8,用在线pH计实时监测,联动石灰石浆液供给泵自动调节给料量,防止pH值突然变化。根据燃煤硫分波动工况提前预判调整pH值设定值,高硫煤工况适当提高到5.6~5.8,低硫煤工况适当降低到5.2~5.4,兼顾脱硫效率和吸收剂利用率。

(2) 浆液密度与液气比优化:吸收塔浆液密度影响浆液的流动性以及反应活性,最佳控制范围是1080~1120kg/m<sup>3</sup>。密度过高会加重设备磨损,加大循环泵的耗能,降低传质效果;密度过低会使吸收剂含量下降,减弱脱硫能力。利用密度计实时检测,联动石膏排出泵自动排浆,保证密度稳定。

液气比(L/G)是反映气液接触好坏的指标,在正常情况下应控制在18~22L/m<sup>3</sup>之间。抛弃传统的满泵运行方式,根据机组的负荷和入口SO<sub>2</sub>浓度来调节浆液循环泵的运行台数以及变频转速,在保证脱硫效率的同时,尽量减小液气比,降低循环泵的电耗。机组低负荷、低硫分工况下,停运一台循环泵,变频转速降低10%,可达到10%以上的能耗节约。

(3) 氧化空气量精准调控:氧化空气量直接影响到亚硫酸钙的氧化效果,氧化不够会造成石膏中亚硫酸盐含量超标,脱水困难,氧化过多会加大氧化风机的能耗,引起浆液的扰动。根据入口SO<sub>2</sub>浓度、浆液循环量计算理论需氧量,氧化风机用变频运行方式来调节氧化空气量,使氧化空气量为理论值的1.1~1.2倍,同时检测石膏含水率和亚硫酸盐含量,实时调节风量,保证氧化充分且能耗最小。

### 2.2 核心设备运行优化

浆液循环泵、氧化风机、石灰石磨机、石膏脱水设备为系统能耗及故障高发的核心设备,需要对这些设备的运行方式进行针对性地改善来提高设备的运行效率。

浆液循环泵优化,全部加装变频装置,建立负荷、入口SO<sub>2</sub>浓度、循环泵运行台数三者之间的联动模型,自动启停和转速调节,定期清理泵体叶轮和入口滤网,减小磨损和阻力,保证泵组高效运行,避免低效满负荷运转。

采用高效磁悬浮或者空气悬浮风机代替传统的罗茨风机,降低风机的能耗;定期清理空气过滤器,优化风管布局,减小管路阻力,防止风量损失。

浆液制备系统优化,严格控制石灰石的品质,要求CaCO<sub>3</sub>含量≥90%,粒径D<sub>90</sub>≤45μm,提高吸收剂的反应活性;优化磨机的运行参数,防止过磨或者研磨不足,使浆液浓度保持在25%~30%之间,提高石灰石的利用率,降低钙硫比到1.03~1.05。

脱水系统优化,定期对石膏旋流器、真空皮带机进行检查,调节旋流器压力、皮带速度,使石膏含水率<10%,清除滤布上杂物,保证浆液含杂物少,提高脱水效果。

### 2.3 节能降耗与副产物资源化优化

在保证系统稳定运行的前提下,发掘节能潜能,削减水耗、电耗和吸收剂消耗。优化工艺水回用系统,把石膏脱水滤液、除雾器冲洗水回收利用,削减新鲜水耗费,经由参数精细化控制,缩减钙硫比,削减石灰石的使用量,改善除雾器冲洗频率,防止过度冲洗致使浆液稀释和水耗增多。另外严格控制石膏的质量来提高石膏的纯度和结晶度,拓展建材资源化的途径来使副产品增值,减少整个系统的运营成本。

## 3 脱硫系统稳定性保障措施

系统的稳定性是保证系统长期高效运转的前提,需要从故障预防、工况控制、设备运行、应急处理这四个方建立起全周期的稳定性保障体系,防止出现非计划停机情况,降低故障发生的概率。

### 3.1 浆液工况管控, 预防浆液中毒与堵塞

浆液中毒和塔内堵塞是造成系统停运的主要原因, 要加强对浆液全过程的控制。定期检测浆液中  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{CaSO}_3$ 、 $\text{Cl}^-$  离子含量, 保证  $\text{Cl}^-$  浓度不大于  $20000\text{mg/L}$ , 防止氯离子富集影响石灰石的溶解; 定期排掉石膏浆液, 换上新鲜浆液, 防止杂质积聚; 控制浆液起泡量, 必要时加入适量消泡剂, 防止浆液溢流; 定期清洗吸收塔喷淋层、喷嘴、除雾器, 防止结垢堵塞, 保证气流流通。

### 3.2 设备全周期运维管理

建立设备台账和定期运维制度, 确定运维周期及标准。对浆液循环泵、氧化风机等主要设备进行定期检修, 更换磨损的部件, 检测电机的绝缘和运行效率, 对管道、阀门进行防腐、密封检查并及时修补, 对喷嘴、除雾器进行清理、更换, 使喷淋均匀、除雾效果好, 自控系统仪表 ( $\text{pH}$  计、密度计、流量计、 $\text{SO}_2$  在线监测仪) 定时校准, 保证监测数据准确无误, 为参数调节提供可靠的依据。

### 3.3 智能化自控与故障预判体系建设

升级自动化控制系统, 创建脱硫系统运行监测平台, 实时采集入口  $\text{SO}_2$  浓度、出口  $\text{SO}_2$  浓度、 $\text{pH}$  值、浆液密度、温度、设备电流、风压等全方位数据, 创建智能调控模型, 达成参数自动调节、设备联动控制。采用故障预判算法, 用历史运行数据和实时数据对比的方式提前发现浆液异常、设备超载、仪表故障等可能的问题, 从事后抢修转变为事前预防, 大大降低突发故障的发生率。

### 3.4 应急处置与工况适配机制

制定出完善的应急处置预案, 对燃煤硫分突变、机组负荷骤变、设备突然故障、浆液中毒等异常工况作出处置流程及操作标准。加强运行人员的专业培训, 提高异常工况快速反应和处置能力; 建立燃煤硫分预判机制, 提前调节运行参数, 适应不同的工况; 对于极端工况, 留有备用设备和应急调控手段,

保证系统在工况变化的时候仍然可以正常运行, 防止环保超标。

## 4 工程应用效果验证

以某 300MW 燃煤机组石灰石-石膏湿法脱硫系统为实践对象, 在以上运行优化和稳定性控制措施实施之后, 系统的运行指标明显改善, 脱硫效率保持在 95% 到 98% 之间, 出口  $\text{SO}_2$  浓度远远小于环保排放限值, 没有超标现象出现, 吸收塔浆液  $\text{pH}$  值、密度波动范围控制在  $\pm 0.2$ 、 $\pm 20\text{kg/m}^3$  之内, 浆液中毒、堵塞问题彻底消除, 浆液循环泵、氧化风机综合能耗降低 18%, 石灰石钙硫比降至 1.04, 吸收剂利用率大幅提高, 石膏含水率稳定控制在 8%~10%, 纯度达标, 可以直接外销, 设备月均故障频次下降 70%, 非计划停运次数为零, 系统连续稳定运行时长突破 6000 小时, 环保效益和经济效益双提升。

## 5 结论与展望

石灰石-石膏湿法脱硫系统运行优化和稳定性的提高, 是系统工程, 核心就是抛弃粗放式的运行方式, 使工艺参数精细化、设备运行高效化、运维管理规范化、故障预防前置化。通过精确控制  $\text{pH}$  值、浆液密度、液气比、氧化空气量等主要参数, 改善核心设备变频运行及联动逻辑, 加强浆液工况控制和设备全生命周期运维, 创建起智能化监测和故障预估体系, 可以较好地解决系统运行效率低、能耗大、稳定性差等问题, 保证机组环保达标和连续运行。

随着智能化技术以及环保工艺的不断更新, 燃煤电厂脱硫系统会向着数字化、智能化、低碳化的方向前进。可以将大数据、数字孪生技术融合起来, 创建脱硫系统全生命周期数字模型, 达成远程运维、智能调节和能耗精确控制的目的; 并且尝试多污染物协同治理技术, 达成脱硫、脱硝、除尘一体化优化, 从而提升系统运行效能, 助力燃煤电厂绿色低碳转型, 更好地符合国家环保以及“双碳”目标的要求。

## 参考文献:

- [1] 周炜照. 石灰石-石膏湿法脱硫工艺影响因素研究[J]. 化学工程与装备, 2025, (10): 52-54+88.
- [2] 吉意, 陈晓楠, 孔繁荣. 石灰石-石膏湿法脱硫废水零排放技术在火力发电的应用[J]. 冶金动力, 2025, (04): 94-97.
- [3] 施良侨. 石灰石-石膏湿法脱硫系统节能降耗管理工作探讨[J]. 应用能源技术, 2025, (06): 79-81.
- [4] 吴宽飞, 吴赛鑫. 石灰石-石膏湿法脱硫系统节能减排的优化措施[J]. 电力设备管理, 2024, (21): 252-254.
- [5] 赵国成, 尹恩林, 杨胜全. 燃煤电厂石灰石-石膏湿法脱硫设施经济运行实践研究[J]. 环境生态学, 2024, 6(10): 136-140.