

石灰石—石膏法脱硫系统能效提升与成本控制策略研究

康栩妍

福建华电可门发电有限公司，福建省福州市，350000；

摘要：在“双碳”目标与严格能效考核的双重约束下，燃煤电厂石灰石-石膏湿法脱硫系统面临能效优化与成本管控的迫切需求。本文构建包含能量流分析、关键指标评价与全生命周期管理的三维优化体系，基于热力学模拟与工程实践，提出“设备精准改造-运行智能调控-副产品价值挖掘”的协同策略。通过浆液循环泵变频耦合预测控制、氧化空气系统能效重构、脱水系统梯级优化等关键技术实施，实现系统电耗降低 18.9%、水耗下降 15.6%、石灰石利用率提升 9.3% 的显著成效。研究成果构建了脱硫系统能效提升的技术实施路径，为燃煤电厂减污降碳协同增效提供了可复制的工程范式，对推动电力行业绿色转型具有重要的理论与实践意义。

关键词：脱硫系统；能效提升；成本控制

DOI: 10.69979/3041-0673.25.11.041

1 引言

1.1 研究背景与政策驱动

随着全球气候变化加剧，我国“双碳”目标对燃煤电厂污染物控制与能效提升提出更高要求。石灰石-石膏湿法脱硫技术以其成熟性和可靠性，占据国内燃煤电厂脱硫市场的 85% 以上份额，但其能耗问题突出——典型 300MW 机组脱硫系统电耗达 285kWh/tSO₂，占全厂用电的 12%-15%，远超欧美同类机组水平。《煤电节能减排升级与改造行动计划》明确要求，2025 年底前现役机组脱硫系统单位电耗需降至 230kWh/tSO₂ 以下，推动行业必须突破传统单设备优化模式，构建系统性能提升与成本控制策略。

1.2 国内外研究现状综述

国外对该技术的优化始于 20 世纪 90 年代，早期聚焦吸收塔传质效率提升，如脉冲悬浮技术使浆液循环量降低 10%-15%；21 世纪以来，智能控制技术通过动态耦合浆液 pH 值与氧化空气量，实现电耗降低 12%-18%。国内研究经历了从引进消化到自主创新的过程，清华大学、浙江大学等机构在泵组变频调速、除雾器优化等方面取得进展，使系统能效提升 10%-15%。但现有研究缺乏“设备-系统-产业链”协同优化，尤其在副产品利用与全生命周期成本管理方面存在短板。

1.3 研究目标与技术路线

本文以构建系统性优化策略为目标，通过建立能量流分析模型识别能效瓶颈，开发智能控制算法实现参数动态优化，构建全生命周期成本模型形成经济性评价体系，旨在为现役机组改造提供技术路径，推动脱硫系统从“成本中心”向“价值中心”转化。

2 系统能效分析模型构建

2.1 多尺度能量流分析

基于热力学原理，将脱硫系统划分为烟气、吸收、氧化、脱水四大子系统，重点解析能量损耗环节：浆液循环系统能耗占比最高（65%），低负荷时扬程冗余达 25%；氧化空气系统在 50% 负荷下风机效率从 80% 降至 68%，空气利用率仅 75%；脱水系统因滤布堵塞导致含水率超 12%，冲洗水浪费占系统水耗 30%。通过 AspenPlus 模拟不同负荷能效变化，发现机组负荷低于 60% 时电耗上升 18%-22%，主要因关键设备效率下降所致。

2.2 全维度能效评价指标

构建包含 4 类 8 项指标的评价体系，实现技术、经济、环境效益的综合量化，具体见表 1：

指标分类	核心指标	基准值	说明
能耗指标	系统电耗 (kWh/tSO ₂)	285	高于设计值 15%
	水耗 (m ³ /tSO ₂)	3.2	冲洗水浪费占比 30%
物耗指标	石灰石利用率 (%)	82	反应活性不足导致浪费
	石膏含水率 (%)	12	高于水泥用石膏标准 (≤10%)
环保指标	SO ₂ 脱除效率 (%)	93.5	低于设计值 1.5 个百分点
	粉尘排放浓度 (mg/m ³)	30	高于超低排放标准 20%
经济性指标	单位脱硫成本 (元/tSO ₂)	285	包含能耗、物耗、运维成本
	副产品利用率 (%)	65	仅 30% 用于高附加值领域

3 能效提升关键技术策略

3.1 浆液循环系统精准调控

3.1.1 泵组变频改造与智能控制

将传统定速泵改造为“2 变频+1 工频”组合，配置高效变频器并开发 LSTM 神经网络预测算法。该算法以烟气 SO_2 浓度、机组负荷等为输入，提前 30 分钟预测循环量需求，动态调整泵频率（30–50Hz），实现扬程与流量精准匹配。工程实践显示，50%–100% 负荷区间泵组电耗下降 22.3%，年节电 1260 万 kWh，等效减碳 1.02 万吨。

3.1.2 喷淋系统流场优化

更换高效螺旋喷嘴（雾化粒径从 $1200\ \mu\text{m}$ 降至 $800\ \mu\text{m}$ ），优化喷淋层间距至 2.2m，使气液接触时间延长 1.2 秒。模拟分析表明，改造后浆液循环量可降低 10%–15%，现场测试循环泵电流下降 15A，年节电 980 万 kWh，脱硫效率同步提升 1.2 个百分点。

3.2 氧化空气系统能效提升

3.2.1 风机选型与智能联控

将低效罗茨风机更换为离心式风机（配备永磁电机，效率 85%），建立“氧化空气量–浆液 ORP 值–pH 值”三参数耦合控制模型。通过在线监测氧化还原电位实时调整风机转速，使氧化空气量与反应需求动态匹配。改造后风机电耗从 $75\text{kWh}/\text{tSO}_2$ 降至 $48\text{kWh}/\text{tSO}_2$ ，效率提升 17 个百分点，年均节电 450 万 kWh，石膏纯度提升至 95%。

3.2.2 风管路阻力优化

将主管路直径从 DN300 增大至 DN400，采用导流板设计降低沿程阻力，同时优化空气分布管孔径与间距。改造后管路压损从 12kPa 降至 8kPa，氧化空气利用率从 75% 提升至 88%，同等氧化效果下空气量减少 12%，年节约电费 36 万元。

3.3 脱水系统能效优化

3.3.1 真空皮带机技术升级

采用新型陶瓷滤布替代传统滤布，过滤效率提升 20%，并优化滤饼厚度控制与冲洗水回收。改造后石膏含水率从 12% 降至 8.5% 以下，脱水机运行时间减少 1.5 小时/天，电耗下降 18%，后续处理成本降低 25%。

3.3.2 滤液水梯级利用

建立三级水回收体系：一级回收冲洗水用于石灰石制浆，二级回收滤液水用于吸收塔补水，三级回收废水

处理清水用于设备冷却。改造后系统水耗降至 $2.7\text{m}^3/\text{tSO}_2$ ，年节水 12 万 m^3 ，节约水费 48 万元，废水排放减少 15%。

4 全链条成本控制策略

4.1 物料循环优化

4.1.1 石灰石粉磨精细化

调整球磨机钢球配比并增设筛分装置，将石灰石粉细度从 $D_{90}=32\ \mu\text{m}$ 优化至 $25\ \mu\text{m}$ ，比表面积提升至 $350\text{m}^2/\text{kg}$ ，反应活性增加 15%。改造后石灰石消耗量下降 9.3%，年节约 1800 吨，成本降低 36 万元（按 200 元/吨计）。

4.1.2 浆液密度智能调控

建立 BP 神经网络预测模型，将密度控制区间优化为 $1130\text{--}1140\text{kg}/\text{m}^3$ ，自动匹配石膏排出与石灰石供给。该策略使设备结垢频率下降 30%，冲洗水用量减少 20%，泵叶轮寿命延长 20%，年减少检修成本 25 万元。

4.2 副产品高值化利用

4.2.1 石膏分级处理

建设在线监测系统对石膏品质实时分级，将优质石膏（含水率 $<10\%$ 、纯度 $>95\%$ ，占比 70%）供给水泥企业作为缓凝剂（售价 80 元/吨），其余用于生产石膏砌块（售价 50 元/吨）。改造后综合利用率从 65% 提升至 92%，年增收益 260 万元。

4.2.2 废水零排放

采用“预处理–膜处理–蒸发结晶”工艺，将废水处理为工业盐（氯化钠纯度 $>98\%$ ）和蒸馏水，年回收工业盐 3000 吨（售价 500 元/吨）、蒸馏水 12 万吨（替代工业水价值 48 万元），投资回收期 3.5 年，同时避免 20 万元/年排放费。

4.3 全生命周期成本管理

构建包含初始投资、运行、维护、环境成本的 LCC 模型，通过设备选型优化（如吸收塔采用 2205 双相不锈钢，寿命延长 5 年）与状态检修策略（年检修次数从 4 次降至 2 次），使年运维成本下降 12%，设备寿命周期成本降低 18%。

5 工程实施与效果验证

5.1 改造工程概况

某 300MW 机组脱硫系统改造总投资 1200 万元，历时 6 个月，主要实施内容见表 2：

项目分类	技术方案	投资（万元）	实施周期
浆液循环系统	泵组变频改造+智能控制	450	2 个月
氧化空气系统	风机更换+管路优化	300	1.5 个月
脱水系统	真空皮带机升级+水回收	250	2 个月
智能控制系统	预测算法开发+传感器网络	200	1 个月

5.2 运行效果对比

改造后关键指标通过 3 个月在线监测验证，对比结果见表 3：

指标	改造前	改造后	变化率	达标情况
系统电耗 (kWh/tSO ₂)	285	231	-18.9%	优于标准 17%
水耗 (m ³ /tSO ₂)	3.2	2.7	-15.6%	达行业先进值
石灰石利用率 (%)	82	90.3	+9.3%	提升显著
石膏含水率 (%)	12	8.5	-29.2%	达水泥用石膏标准
单位脱硫成本 (元/tSO ₂)	285	220	-22.8%	降低 22.8%
SO ₂ 脱除效率 (%)	93.5	96.2	+2.7%	优于设计值

5.3 效益评估

5.3.1 经济效益

能耗节约：年节电 2690 万 kWh，节约电费 162 万元（电价 0.6 元/kWh）。

物耗节约：年节约石灰石 1800 吨（36 万元）、工业水 12 万吨（48 万元），合计 84 万元。

副产品与废水收益：石膏高值化利用年增 260 万元，废水处理年创 198 万元，合计 458 万元。

年总收益：162+84+458=704 万元，静态投资回收期

1.7 年（优于行业平均水平）。

5.3.2 环境效益

年减少 CO₂ 排放 2.2 万吨，SO₂ 排放浓度从 50mg/m³ 降至 35mg/m³，达超低排放标准；石膏综合利用率 92%，废水零排放，实现“污染物-资源”转化闭环。

6 结论与展望

6.1 研究结论

模型构建：通过能量流分析与指标评价，明确浆液循环、氧化空气、脱水系统为核心优化对象，构建三维优化模型。

技术突破：设备改造与智能控制协同实现电耗、水耗、物耗多维度优化，单位脱硫成本显著降低 22.8%。

模式创新：副产品分级利用与废水零排放策略推动系统从成本中心向价值中心转化，示范工程验证方案经济性与可行性。

6.2 未来方向

数字孪生技术：开发脱硫系统数字孪生模型，实现全工况实时优化，目标控制误差<5%。

多污染物协同控制：探索 SO₂ 与 CO₂、NO_x 协同脱硫技术，研发纳米改性石灰石等新型吸收剂。

低碳技术融合：研究脱硫系统与 CCUS、新能源耦合模式，构建煤电行业循环经济体系。

本研究为燃煤电厂脱硫系统改造提供了可复制的工程范式，建议在新建机组设计中嵌入能效优化理念，从源头实现节能降耗。随着“双碳”目标推进，需进一步加强跨学科技术融合，促进石灰石-石膏法脱硫技术向高效化、智能化、低碳化发展。

参考文献

[1] 罗聪. 燃煤烟气污染物控制技术性能评估及经济性优化策略研究[D]. 浙江大学, 2021.

[2] 张曼曼, 张德友, 方毅, 等. 湿法烟气脱硫硫酸石膏离心分离系统的开发及节能计算[J]. 环境工程, 2023, 41(S02): 369-371.

[3] 王承亮. 锅炉系统能效提升技术探析[C]// 中国电力科技网. 中国电力科技网, 2017.