

电厂锅炉补给水处理系统优化运行分析

刘 生

阳城国际发电有限责任公司 山西 晋城 048100

摘 要：本文聚焦电厂锅炉补给水处理系统优化运行。阐述了典型工艺流程与不同压力等级锅炉的水质标准，从预处理、反渗透、离子交换及EDI系统（全膜法）等环节，分别剖析各单元运行优化策略，涵盖参数调整、药剂投加、污染控制与清洗等方面，旨在提升系统运行效率与稳定性，保障锅炉安全、高效、经济运行，为电厂水处理系统优化提供参考。

关键词：电厂；锅炉补给水；水处理系统；优化运行

引言：在电厂运行中，锅炉补给水处理系统至关重要，其水质优劣直接影响锅炉的安全性及经济性。随着电力行业对节能减排与高效运行要求的提升，优化锅炉补给水处理系统运行成为关键。当前，部分电厂该系统存在运行效率不高、能耗较大等问题。本文深入分析各处理环节，探讨优化运行方法，以实现系统高效稳定运行，满足电厂生产需求。

1 锅炉补给水处理系统工艺流程与水质标准

1.1 典型锅炉补给水处理工艺流程

典型锅炉补给水处理工艺流程需依原水水质、锅炉参数及环保规范设计，分预处理、深度处理、精处理三阶段，各单元协同保障出水达标。原水先入预处理单元，经混凝反应、澄清池，去除悬浮颗粒、胶体杂质及部分溶解性有机物，再过滤降低浊度。超滤系统作为深度预处理核心，截留粒径大于 $0.1\mu\text{m}$ 的杂质，控制产水 $\text{SDI} \leq 3$ ，为反渗透系统提供合格进水。预处理合格水进入反渗透系统，去除98%以上溶解性盐类等^[1]。高压、超高压锅炉的RO产水，还需经离子交换或EDI系统精处理，彻底去除微量离子，获合格锅炉补给水，整个流程兼顾效率与能耗，确保系统稳定运行。

1.2 锅炉补给水水质标准

锅炉补给水水质标准需根据锅炉压力等级、蒸发量及运行工况差异化制定，核心指标涵盖硬度、电导率、pH值、溶解氧、二氧化硅等，且需严格遵循GB/T 12145-2016《火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量》要求。中低压锅炉补给水标准为：硬度 $\leq 0.03\text{mmol/L}$ ，电导率 $\leq 10\mu\text{S/cm}$ ，pH值8.5-9.5，溶解氧 $\leq 0.1\text{mg/L}$ ，二氧化硅 $\leq 20\mu\text{g/L}$ （以 SiO_2 计），悬浮物 $\leq 5\text{mg/L}$ ，油类 $\leq 0.1\text{mg/L}$ 。高压及超高压锅炉对水质要求更为严苛，补给水硬度 $\leq 0.005\text{mmol/L}$ ，电导率 $\leq 0.2\mu\text{S/cm}$ ，pH值9.0-10.0，溶解氧 $\leq 0.01\text{mg/L}$ ，二氧化硅 $\leq 20\mu\text{g/L}$ ，悬浮物及油类指标与中低压锅炉一致。另外，需结合企业实际运行经验动态调整指标，避免杂质进入锅炉形成水垢、腐蚀受热面，或影响蒸汽品质，保障锅炉安全、高效、经济运行。

L，悬浮物及油类指标与中低压锅炉一致。另外，需结合企业实际运行经验动态调整指标，避免杂质进入锅炉形成水垢、腐蚀受热面，或影响蒸汽品质，保障锅炉安全、高效、经济运行。

2 预处理单元运行优化

2.1 混凝澄清工艺优化

混凝澄清工艺优化的核心的是提升杂质去除效率、降低药剂消耗与污泥排放量，确保出水水质稳定，为后续过滤、超滤系统提供保障。需根据原水浊度、pH值、水温等实时参数，动态调整混凝剂与助凝剂投加量，常用混凝剂为聚合氯化铝、硫酸亚铁，投加量控制在10-30mg/L，搭配0.5-1.0mg/L聚丙烯酰胺助凝剂，通过搅拌试验确定最佳投加比例，避免投加不足导致澄清效果不佳，或投加过量造成药剂浪费与污泥激增^[2]。优化澄清池运行参数，控制进水流量均匀，上升流速维持在0.8-1.2mm/s，确保絮体充分沉降；定期清理池底污泥，排放周期24-48小时，控制污泥含水率 $\leq 98\%$ ，避免污泥堆积影响澄清效果。原水进水端可增设格栅等预处理装置去除大颗粒杂质，季节变化时调整参数，夏季高温适当增加药剂投加量，冬季低温延长搅拌时间，提升混凝澄清效果。

2.2 过滤系统运行优化

过滤系统运行优化的关键是延长滤料使用寿命、降低过滤阻力，确保出水浊度达标，同时减少反洗能耗与水资源浪费。合理选择滤料级配，采用石英砂+无烟煤双层滤料，石英砂粒径0.5-1.2mm，无烟煤粒径0.8-1.8mm，滤层厚度控制在1.2-1.5m，提升滤料截留能力与过滤效果。优化过滤运行参数，进水浊度控制在 $\leq 5\text{NTU}$ ，过滤速度维持在6-10m/h，过滤周期根据出水浊度动态调整，一般为12-24小时，当出水浊度 $> 0.5\text{NTU}$ 时及时启动反洗。反洗工艺采用“气洗+水洗”联合方式，气洗强度

10-15L/(m²·s), 水洗强度5-8L/(m²·s), 反洗时间10-15分钟, 确保反洗彻底, 避免滤料板结。定期检查滤料状态, 及时更换磨损、污染严重的滤料, 做好过滤器防腐处理, 减少设备损耗, 保障过滤系统长期稳定运行。

2.3 超滤系统运行优化

超滤系统运行优化的核心是控制膜污染、延长膜使用寿命, 确保产水SDI达标, 同时降低运行能耗, 为反渗透系统提供优质进水。优化超滤运行参数, 进水压力控制在 $\leq 0.3\text{MPa}$, 膜通量维持在30-50L/(m²·h), 跨膜压差控制在0.05-0.1MPa, 避免通量过高加速膜污染, 或通量过低影响处理效率。完善清洗工艺, 采用“在线冲洗+化学清洗”相结合的方式, 在线冲洗每日1-2次, 每次5-10分钟, 采用反洗+正洗交替进行, 去除膜表面轻度污染物; 化学清洗周期根据跨膜压差确定, 一般15-30天一次, 采用500-1000mg/L次氯酸钠或0.5%-1.0%柠檬酸溶液清洗, 时间30-60分钟, 确保污染物彻底去除。严格控制超滤进水水质, 进水浊度 $\leq 1\text{NTU}$ 、油类 $\leq 0.1\text{mg/L}$, 避免有机物、油脂污染膜元件; 定期检查膜组件, 更换破损、泄漏的膜元件, 做好系统密封防护, 防止二次污染。

3 反渗透系统运行优化

3.1 RO系统运行参数优化

RO系统运行参数优化的核心是在保障产水水质与产量的前提下, 降低能耗、减少膜污染, 延长膜元件使用寿命, 提升系统运行经济性。优化进水参数, 控制进水温度在25-35℃, 温度每升高1℃, 膜通量提升2%-3%, 温度过高时增设冷却装置, 避免膜元件老化; 进水pH值控制在7.0-8.5, 避免酸性或碱性水质腐蚀膜元件, 影响膜分离效果。调整运行压力与回收率, 根据原水含盐量动态调整进水压力, 一般控制在1.0-1.5MPa, 回收率维持在75%-85%, 避免回收率过高导致浓水含盐量超标, 引发膜浓差极化与结垢^[3]。控制膜通量, 根据膜元件型号调整为20-30L/(m²·h), 避免通量过高加速膜污染。采用连续运行模式, 避免频繁启停对膜元件造成冲击, 定期监测产水水质与浓水参数, 及时调整运行参数, 确保系统稳定运行, 降低单位产水能耗。

3.2 阻垢剂投加优化

阻垢剂投加优化的核心是有效防止RO膜结垢, 同时减少阻垢剂消耗, 避免药剂过量造成膜污染或浪费, 保障RO系统稳定运行。根据原水水质分析结果确定阻垢剂类型, 高硬度、高钙镁离子原水选用螯合型阻垢剂, 高硅原水选用抗硅型阻垢剂, 确保阻垢效果针对性。优化投加量, 结合原水含盐量、回收率及膜通量, 通过试验

确定最佳投加量, 一般控制在2-5mg/L, 投加前将阻垢剂稀释至5%-10%, 确保投加均匀, 与原水充分混合。投加点选择在RO系统保安过滤器前, 保障阻垢剂与原水充分反应, 发挥最佳阻垢效果。定期监测浓水水质, 当浓水LSI(朗格利尔饱和指数) > 0.5 时, 适当增加投加量; 当LSI < 0 时, 减少投加量, 避免药剂浪费。做好阻垢剂储存与管理, 防止药剂变质, 确保投加系统稳定, 有效抑制钙、镁、硅等物质在膜表面结垢。

3.3 RO膜污染控制与清洗

RO膜污染控制与清洗是保障RO系统稳定运行的关键, 需坚持“预防为主、及时清洗”的原则, 减少膜污染对系统运行的影响。污染控制方面, 严格控制预处理出水水质, 确保SDI ≤ 3 、浊度 $\leq 0.5\text{NTU}$ 、油类 $\leq 0.1\text{mg/L}$, 避免悬浮物、有机物、油脂等进入RO系统; 优化运行参数, 控制膜通量与回收率在合理范围, 减少浓差极化, 避免污染物在膜表面沉积; 定期对RO系统进行在线冲洗, 去除膜表面附着的轻度污染物, 延缓污染进程。清洗方面, 根据污染类型选择合适的清洗剂与工艺, 无机污染采用柠檬酸、盐酸等酸性清洗剂, 有机污染采用氢氧化钠、次氯酸钠等碱性清洗剂, 微生物污染搭配杀菌剂清洗。当跨膜压差上升至初始值的1.5倍时, 及时进行化学清洗, 控制清洗温度25-30℃、清洗流速1.0-1.5m/s, 确保清洗效果, 同时避免清洗剂腐蚀膜元件, 清洗后充分冲洗, 确保产水水质达标。

4 离子交换系统运行优化

4.1 阳/阴床运行优化

阳/阴床运行优化的核心是提升离子交换效率、延长运行周期, 降低再生能耗与药剂消耗, 确保出水水质满足混床进水要求。阳床运行优化方面, 控制进水浊度 $\leq 0.5\text{NTU}$ 、水温20-30℃, 进水流速维持在15-20m/h, 确保原水与阳树脂充分接触, 高效去除水中Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺等阳离子, 控制阳床出水Na⁺ $\leq 100\mu\text{g/L}$ 。定期监测阳床出水水质, 当出水Na⁺超标或出水酸度明显下降时, 及时停止运行进行再生。阴床运行优化方面, 控制进水pH值在7.0-8.0, 进水流速与阳床保持一致, 确保阴树脂充分吸附水中Cl⁻、SO₄²⁻、SiO₃²⁻等阴离子, 控制阴床出水SiO₂ $\leq 200\mu\text{g/L}$ 、电导率 $\leq 10\mu\text{S/cm}$ 。优化阳/阴床树脂层高度, 控制在1.5-2.0m, 定期检查树脂性能, 及时补充或更换老化、破损的树脂, 合理调整运行周期, 避免过早再生浪费药剂或过晚再生影响出水水质。

4.2 再生工艺优化

再生工艺优化是提升离子交换树脂再生效果、降低药剂消耗、减少环保压力的关键, 需根据树脂类型与污

染程度优化再生参数。阳床树脂再生采用盐酸或硫酸作为再生剂,优化再生剂浓度,盐酸浓度控制在3%-5%,硫酸浓度控制在2%-4%,避免浓度过高腐蚀设备、损伤树脂,或浓度过低导致再生不彻底。再生流速控制在5-8m/h,再生时间60-90分钟,再生液用量为树脂体积的3-5倍,确保再生剂与树脂充分反应。阴床树脂再生采用氢氧化钠作为再生剂,浓度控制在4%-6%,再生流速4-6m/h,再生时间90-120分钟,再生液用量为树脂体积的4-6倍。优化再生流程,采用“逆流再生”方式,提升再生效率,减少再生剂消耗;再生前对树脂进行反洗,去除表面附着的杂质;再生后进行正洗,直至出水水质达标后再投入运行,避免再生液残留影响出水水质。

4.3 混床运行优化

混床运行优化的核心是提升精处理效果,确保出水水质满足高压锅炉补给水要求,同时延长运行周期、降低再生成本。优化混床进水水质,确保阳/阴床出水达标,进水浊度 $\leq 0.1\text{NTU}$ 、电导率 $\leq 10\mu\text{S/cm}$,避免杂质进入混床污染树脂,影响离子交换效果。控制混床运行参数,进水流速维持在20-30m/h,水温25-30℃,确保阳、阴树脂充分混合,提升离子交换效率,控制混床出水电导率 $\leq 0.1\mu\text{S/cm}$ 、 $\text{SiO}_2 \leq 20\mu\text{g/L}$ 、硬度 ≈ 0 。定期监测混床出水水质,当出水电导率或 SiO_2 超标时,及时停止运行进行再生^[4]。再生工艺采用“床内再生”方式,再生时控制反洗水流速和反洗分层时间,确保阳/阴树脂完全分开,避免再生过程中树脂混合影响再生效果;优化再生剂用量和浓度,确保树脂再生彻底,再生后树脂混合均匀再投入运行,定期检查混床内部装置,确保布水均匀、树脂层高度合理。

4.4 EDI系统运行优化(全膜法)

EDI系统(全膜法)运行优化的关键是提升产水水质、延长膜堆使用寿命,降低能耗,替代传统离子交换

系统实现无化学再生,契合环保节能要求。优化EDI进水水质,确保RO产水达标,进水硬度 $\leq 0.1\mu\text{mol/L}$ 、电导率 $\leq 10\mu\text{S/cm}$ 、 $\text{SiO}_2 \leq 20\mu\text{g/L}$,避免硬度超标导致膜堆结垢,有机物污染影响产水效果。控制EDI运行参数,电流密度维持在0.5-1.0A/dm²,电压控制在200-400V,进水流速15-25m/h,水温25-35℃,确保离子在电场作用下充分迁移,提升产水纯度,控制EDI产水电导率 $\leq 0.06\mu\text{S/cm}$ 、 $\text{SiO}_2 \leq 20\mu\text{g/L}$ 。优化清洗工艺,定期对EDI膜堆进行在线清洗,采用0.5%-1.0%柠檬酸溶液清洗无机结垢,采用0.5%-1.0%氢氧化钠溶液清洗有机污染,清洗周期根据产水水质和运行电流确定,一般为30-60天。加强系统维护,定期检查膜堆密封性能,清理电极板沉积物,控制进水pH值7.0-8.5,避免腐蚀膜堆。

结束语

电厂锅炉补给水处理系统优化运行意义重大,通过对其各处理单元,如预处理、反渗透、离子交换及EDI系统(全膜法)等,从运行参数、药剂投加、污染控制与清洗等多方面进行优化,可有效提升系统运行效率,降低能耗与运行成本,保障锅炉安全稳定运行。未来,随着技术发展,需持续探索创新优化策略,以适应电力行业不断变化的需求。

参考文献

- [1]杜岳鹏.火电厂锅炉补给水处理系统调试技术研究[J].中国高新科技,2025(12):52-54.
- [2]黄清,栾九峰.超超临界火力发电厂锅炉补给水处理系统反渗透技术研究[J].现代制造技术与装备,2023,59(11):87-89.
- [3]韩征飞,赵保华,姜磊.火力发电厂锅炉补给水处理系统的扩容设计[J].广州化工,2022,50(16):163-165.
- [4]孙娇,张二有,吴耿,等.发电厂锅炉补给水处理系统优化改造分析[J].设备管理与维修,2025(17):149-151.