

化工行业循环水系统节能技术应用探讨

毛建平¹, 张中伟²

(1. 中海沥青股份有限公司, 山东 滨州 256600;

2. 山东欣广化学有限公司, 山东 滨州 256600)

摘要 循环水系统作为化工生产的“冷却中枢”, 承担着工艺设备降温、介质冷凝等核心功能, 其能耗约占化工企业总用电量的 15% ~ 30%, 水资源消耗更是占据工业用水总量的 40% 以上, 是化工行业节能降碳的关键领域。随着“双碳”目标深入推进和《国家鼓励的工业节水工艺、技术和装备目录(2025 年版)》等政策落地, 传统循环水系统“高耗低效、粗放运行”的模式已难以适应行业绿色转型需求。深入挖掘循环水系统节能潜力, 推广应用先进适用技术, 实现水资源与能源的协同高效利用, 不仅能降低企业生产成本, 更对推动化工行业高质量发展、保障国家水安全具有重要的学术价值和实践意义。

关键词 化工循环水系统; 节能技术; 水质优化; 智能调控; 节水协同

中图分类号: X78

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.06.023

0 引言

在化工生产过程中, 循环水系统承担着工艺冷却、设备降温等核心功能, 其运行状态直接影响生产稳定性与综合成本。随着“双碳”目标推进及《工业水效提升行动计划》实施, 要求 2025 年重点行业循环利用率达到 75%, 化工企业面临巨大的节能降耗压力。数据显示, 化工行业循环水系统平均能耗较国际先进水平高 15% ~ 20%, 每降低 1 千瓦时能耗可减少 CO₂ 排放约 0.75 千克, 节能技术应用兼具经济效益与环境价值。现有研究多聚焦单一技术优化, 如变频改造、浓缩倍率提升等, 但缺乏系统集成视角。随着物联网与电化学技术发展, 行业呈现“设备高效化+水质精准化+管理智能化”的融合发展趋势。姜慧超^[1]在石化企业案例中证实, 多技术集成改造可使循环水系统综合节能率超 20%, 为本文研究提供实践基础。

1 化工循环水系统运行现状与节能痛点

1.1 系统设计与生产负荷不匹配

部分化工企业循环水系统沿用早期设计方案, 存在“大马拉小车”的结构性矛盾。新建项目常按最大生产负荷冗余设计泵组与管网, 而实际生产中负荷波动较大时, 系统仍维持额定参数运行, 导致泵组运行效率低于 60%, 造成电能浪费。老旧企业则因生产装置升级改造, 原有循环水系统管网布局、流量分配与新工艺流程不匹配, 出现局部压力损失过大、冷却效率不足等问题, 被迫通过增大泵组功率弥补缺陷, 进一步加剧能耗冗余^[2]。

1.2 设备能效水平偏低且老化严重

设备选型与运维不当是能耗偏高的核心诱因。一是低效设备仍大量应用, 部分企业未更换 IE2 级以下老旧电机, 水泵采用传统水力模型设计, 比转速与实际工况适配度低, 运行效率较高效设备差距达 15% ~ 20%。二是设备老化问题突出, 冷却塔填料结垢、腐蚀导致换热效率下降 30% 以上, 风机叶片磨损、轴承老化增加运行阻力, 压力容器与管道腐蚀泄漏造成水资源浪费, 某万吨级系统管网泄漏率达 1% 时, 每日流失水量相当于 2 000 桶桶装水^[3]。三是设备组合配置不合理, 多泵并联运行时未根据负荷动态调整运行台数, 导致泵组处于低效区间空转。

1.3 运行调控模式粗放滞后

传统循环水系统多采用人工巡检、经验调控的方式, 缺乏精准化管控手段。一是水质调控盲目, 为控制结垢腐蚀, 过量投加化学药剂, 不仅增加药剂消耗成本, 还因水质参数失衡降低换热效率, 同时造成二次污染。二是工艺参数固定, 供水压力、水温等参数长期维持恒定值, 未根据环境温度、生产负荷变化动态调整, 如夏季高温时未及时优化冷却塔喷淋强度, 冬季低温时仍按高温工况运行泵组。三是缺乏系统协同调控, 循环水系统与工艺装置、余热回收设备间未建立联动机制, 导致冷量浪费与能源损耗叠加。

1.4 节水与能效提升不同步

部分企业存在“重节能、轻节水”或“节水不节能”的片面认知。一方面, 循环水浓缩倍数控制偏低, 多

作者简介: 毛建平(1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 化学工程。

数企业浓缩倍数维持在3~4倍,远低于政策鼓励的8倍以上标准,导致新鲜水补给量过大,同时增加废水处理能耗。另一方面,部分节水改造未兼顾能效提升,如采用简易水处理技术降低水耗后,因水质恶化导致换热效率下降,反而使泵组能耗增加,未能实现“节能一节水”协同增效^[4]。

1.5 数字化管控水平不足

传统循环水系统缺乏全流程监测与智能调控能力。多数中小企业未安装高精度传感器,无法实时获取水温、压力、流量、浊度等关键参数,依赖人工取样检测导致调控滞后。即使配备监测设备的企业,也多处于数据采集层面,未构建智能化调控平台,未能通过算法模型优化运行策略,导致系统运行参数偏离最优区间,能源利用效率低下。

2 化工循环水系统核心节能技术应用路径

2.1 设备升级与系统优化技术

1. 高效设备替换与组合配置:优先选用IE4/IE5级永磁同步电机,搭配高效水力模型水泵,通过精准测算确定比转速、扬程等参数,使泵组运行效率提升至85%以上^[5]。宁夏石化通过将两台3000立方米/小时旧泵替换为一台5000立方米/小时高效泵,运行负荷率达85%,节能率达37%,月节电7万千瓦时。冷却塔采用高效填料与雾化喷淋装置,优化风机叶片气动设计,降低风阻的同时提升换热效率,某项目改造后冷却塔冷却效率提升25%,风机能耗下降18%。

2. 管网系统优化改造:采用水力计算软件重构管网布局,减少弯头、阀门等局部阻力构件,更换大口径管道降低沿程损失。天津石化通过“管网并网+降压运行”改造,整合烯烃区、热电厂分散管网,停运冗余设备后系统整体压力下降,吨水用电量同比降低5%,年节电量达3020万千瓦时。对老旧管道实施防腐堵漏处理,采用声波测漏仪精准定位漏点,某造纸企业通过管网堵漏年节水超100万吨。

3. 负荷适应性调控:依据生产负荷波动来优化泵组工作方式,实施“变频调节+机组控制”协同策略,在低载状态利用变频装置削减泵的转速,高载时适度增减运行机组的具体数量,以此规避单泵出现低效运转,空分装置循环水系统通过实时调控泵组运行参数,确保供水压力和冷却需求相互协调,进而实现降耗29%~31%。

2.2 水质优化与节水协同技术

高浓缩倍数运行技术属于工业循环水处理领域重要节能手段,其依靠复合水处理药剂和电化学除垢技术协同效应,成功解决高浓缩倍数运行时结垢与腐蚀问题,该技术把循环水浓缩倍数提高到6~10倍

突破传统工艺限制,其特点是建立多参数精确控制系统,利用智能监测装置实时调节pH值浊度等关键参数,结合高效旁滤装置持续清除水中悬浮物维持循环水质稳定,实际应用显示该技术能让新鲜水用量减少20%~30%还降低废水排放量,既实现水资源优化利用又取得良好环保效果。例如:某大型化工厂采用此技术后循环水浓缩倍数从4倍提高到8倍,每年可节约用水934万吨有效降低生产成本,为高耗水行业提供可借鉴节水减排解决方案。

水质智能调控技术依靠“监测—诊断—投加”闭环体系达成全流程自动化控制,系统配备高精度传感器组可同步采集pH值、溶解氧、浊度、余氯等12项核心水质指标,分钟级数据采样频率确保实时掌握水质动态变化^[6]。借助多参数水质分析模型该技术能自动研判水质演变规律,科学计算絮凝剂、消毒剂等药剂精准投配量,相比传统人工操作可使药剂使用效率提高30%以上,同时杜绝因人为因素造成药剂过量浪费及处理效果波动。在处理工艺方面创新融合物理处理与化学处理手段,利用紫外线消毒技术替代30%的化学消毒剂用量,既维持优异灭菌效果又大幅减少氯化消毒剂副产物生成风险。系统具备智能报警功能,当水质指标出现异常时会立即启动应急响应程序,通过物联网技术实现远程操控与智能调度,全面增强水处理系统运行可靠性和经济效益,每年可节省药剂成本约20%并减轻废水排放对生态环境影响。

创新型非常规水处理技术给缓解水资源紧张情况开辟了新的思路,依靠先进工艺能把各类低质水源转化成可循环利用的水资源,该技术会将经过净化的工业废水、自然降水等非常规水源用于循环水系统补给,凭借深度净化工艺有效去除水中钙镁离子、悬浮颗粒及有机污染物等主要杂质,让水质完全符合工业冷却循环方面的标准,以某油气田工程为例,应用高效软化净化技术之后,钻井废水总硬度从1600毫克/升降到450毫克/升以下,达到回用补水标准从而显著降低对新鲜水的依赖,在煤化工产业当中,企业实施高盐废水全量化处理方案,整合预处理、膜分离及蒸发结晶等技术手段,使废水回收率达到97%以上,既达成了污染物零排放目标又把废水中盐分转化成工业原料,成功构建起“污水变原料”的资源循环模式,为高耗水行业的节水降耗提供可借鉴的技术路径。

2.3 数字化智能调控技术

AIoT智能监测平台融合物联网与大数据技术,在泵组、管道以及冷却塔等核心位置部署压力、流量、温度等传感设备来形成全域监测体系^[7]。依托工业互联网平台进行数据的即时采集、传输和存储,搭建循

环水系统数字孪生体立体展示系统运行状态与能耗情况。智能优化算法应用模型预测控制技术,结合生产负荷、环境温度等关键因素智能调节泵组运行速度、冷却塔喷淋量及阀门启闭度。某化工企业应用 AI 节能控制系统后取代原有固定压力控制方式使年度运行能耗减少 30%。借助机器学习技术解析历史数据提前预判水质变化趋势与设备潜在故障以达成“事前预警、主动干预”的管理目标。跨系统协同调控构建循环水系统与生产装置、余热利用设备的协同机制,把冷却过程产生的工艺余热回收用于生产加热或供暖,某钢铁企业应用该技术年回收余热折合标准煤 2 万吨。依据生产装置的实际冷却需求实时调整循环水温度与流量实现“供应—生产—需求”三方的动态平衡以提高整体能源利用效能。

2.4 余热回收与能效提升技术

温差优化技术是通过优化换热设备布局以及系统运行方式,把循环水供回水温差从常规的 5℃ 扩大到 8℃ 以上,进而降低循环水量 30%,并实现能耗同步削减。某钢铁企业用此技术后年节省电费逾千万元还减轻管网运行阻力,余热回收技术应用是在循环水回水管路上加装高效热交换装置,吸收高温循环水热能用于物料预热、生活热水供应或驱动制冷系统运行。针对锅炉高温废水采用高效余热回收技术能使热能回收率超 95%,达到节水减排降碳多重效益。冷却塔能效提升改造是以可调速风机替换传统固定转速风机,依照环境条件与冷却需求动态调整风机转速,同时优化冷却塔内部气流组织结构避免气流短路现象增强热交换效能,还采用超低飘水率填料将水分飘散损失从 5% 降至 1.5%。

3 节能技术应用保障措施

3.1 健全政策标准与激励机制

政府部门需制定化工行业循环水系统能效标准,把浓缩倍数、泵组运行效率等关键指标纳入强制性规范并与《工业水效提升行动计划》形成政策协同,还要强化对节能技术改造的政策扶持,通过财政补贴、税收优惠等手段引导企业选用目录内推荐的先进节能装备,并且推广合同节水服务模式,鼓励第三方节能服务机构参与改造项目以减轻企业前期投资压力。

3.2 强化企业主体责任落实

企业要构建“节能—节水—降碳”一体化管控机制并且将循环水系统节能成效纳入企业绩效考核体系,制定专项改造方案优先推进高效设备更新与数字化平台搭建等重点项目,保障相关资金投入不低于年度节能总预算的 30%^[8]。强化运维队伍建设,定期组织节能技术培训提高操作人员对智能调控系统操作水平防止先进技术因使用不当造成资源浪费。

3.3 加速技术创新与成果落地

要增加循环水系统节能核心技术的研发投入重点攻关高效水处理药剂、抗污染膜材料及智能优化算法等关键技术难点,构建产学研协同创新平台推动科研院所与企业联合技术攻关促进实验室成果快速转化为工程应用,采用“研发—示范—推广”的技术推广路径总结宁夏石化、天津石化等企业的成熟经验提炼形成具有行业推广价值的解决方案。

3.4 深化行业协作与监管

要搭建化工行业循环水系统节能技术交流共享平台促进先进经验与典型案例的推广应用,监管部门应实施“双随机、一公开”监管机制加强对企业能效指标与节水措施落实情况的监督检查对不达标企业下达限期整改要求,拓宽社会监督渠道引导公众参与节能监督构建政府监管、企业主体、社会参与的协同监管长效机制。

4 结束语

化工循环水系统节能技术要统筹好设备更新、工艺改进以及数字化管理等多个环节,依赖政策扶持、企业实践和技术支持共同来推进,应用高效设备、高倍浓缩运行以及智能控制等相关技术,能够使系统能耗减少 20%~37%、节水率提高 20%~30%。未来,随着 AIoT 与新材料等技术和循环水系统相结合,节能模式将从被动优化转变为主动创效、从单一节能升级成“节能—节水—降碳”协同效益。化工企业应把握绿色转型契机,加快循环水系统节能升级,通过技术革新提升资源利用率,为行业发展提供绿色动力。

参考文献:

- [1] 姜慧超.石化企业循环水系统节能案例及节水措施研究[J].天津化工,2022,36(06):85-88.
- [2] 王卫兵,徐宗利,颜红军,等.循环水整体优化技术在系统节能优化中的应用[J].石化技术,2023,30(12):118-120.
- [3] 朱彦亮,丁旭,杨宝玉.高效节能泵在高炉工序的实施与应用[J].冶金信息导刊,2024,61(05):17-19.
- [4] 齐俊祥,齐元山,李大应.冷却循环水系统节能技术对比分析[J].氮肥技术,2023,44(04):12-14.
- [5] 徐宗利,张人午,熊静红,等.空分预冷系统在 B 站清浄循环水系统降压优化过程中的实践[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(01):127-129.
- [6] 孟庆宝,马明杰,姜超,等.大型空分制氧装置循环水控制系统优化改造[J].冶金动力,2024(05):29-31.
- [7] 工业和信息化部,水利部.国家鼓励的工业节水工艺、技术和装备目录(2025年版)[Z].2025.
- [8] 李黄春雨,张立平.宁夏石化:节能 37% 循环水技改创效显著[N].中国石油报,2025-06-19.