

煤化工项目循环水冷却系统工艺对比及技术经济分析研究

王进军 (内蒙古恒坤化工有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 016299)

摘要: 在煤化工项目中, 循环水冷却系统的工艺选型需综合考虑水资源条件等多重因素。企业采用适配性设计选择合适的冷却系统, 能够降低水资源与能源消耗, 优化全生命周期成本。基于此, 本文先对比了循环水冷却系统主流工艺技术, 然后构建了技术经济分析模型, 最后采用实际案例深入分析了煤化工项目循环水冷却系统改进达到的经济效益, 旨在为企业搭建循环水冷却系统提供有益参考。

关键词: 煤化工; 循环水冷却系统; 工艺对比; 技术经济分析; 节水降耗

中图分类号: TQ085.4

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 019-0075-03

Process comparison and technical and economic analysis of circulating water cooling system of coal chemical project

Wang Jinjun (Inner Mongolia Hengkun Chemical Co., Ltd., Ordos Inner Mongolia 016299, China)

Abstract: In coal chemical projects, multiple factors such as water resources and conditions should be considered in the process selection of circulating water cooling system. Choosing the right cooling system with adaptive design can reduce water and energy consumption and optimize life-cycle costs. Based on this, this paper first compares the mainstream process technologies of circulating water cooling system, then constructs a technical and economic analysis model, and finally uses actual cases to analyze the economic benefits of the improvement of circulating water cooling system in coal chemical projects, aiming to provide a useful reference for enterprises to build circulating water cooling systems.

Keywords: coal chemical industry; circulating water cooling system; process comparison; techno-economic analysis; Save water and reduce consumption

煤化工作为高耗水行业, 其循环水冷却系统具有关键的热量交换与设备保护功能, 直接关系到能源利用率。随着我国“双碳”目标推进及《工业水效提升行动计划》等政策实施, 传统冷却系统的高水耗等问题日益凸显。因此, 煤炭企业需要积极探索使用循环水冷却技术的新路径, 为循环水冷却系统的工艺选型提供科学决策依据, 助力行业绿色低碳发展。

1 循环水冷却系统主流工艺技术对比

1.1 开式循环冷却系统

在煤化工项目中, 开式循环冷却系统是较为传统的工艺方案, 其原理是冷却塔将热水与空气直接接触, 利用水的蒸发散热降低水温, 随后循环回用。该系统通常由冷却塔、水泵、换热设备和管道组成, 结构相对简单, 初期投资成本较低, 适用于水资源相对充足且对水质要求不高的场景。由于依赖自然蒸发降温, 系统运行时需持续补充大量新鲜水以弥补蒸发、飘散及排污损失, 导致水耗较高, 尤其在高温干燥地区, 补水需求进一步增加。

同时, 冷却水与空气直接接触易引入灰尘等杂质, 造成管道结垢、腐蚀及生物污垢问题, 需定期投加化学药剂进行水质稳定处理, 增加了运维复杂性和成本。此外, 冷却塔风机和水泵的持续运行使得系统电耗较大, 长期运行经济性受限。

1.2 闭式循环冷却系统

闭式循环冷却系统采用完全封闭的管道和换热设备实现冷却水循环, 避免了水与空气的直接接触。该系统依靠间壁式换热器传递热量, 冷却水在密闭环境中循环流动, 借助散热器释放热量, 大幅减少蒸发损失。由于水体不与外界环境交换, 水质稳定性显著提高, 有效抑制了管道结垢问题, 降低了对化学药剂的依赖。闭式系统的换热效率较高, 能够精准控制水温波动, 满足煤化工复杂工艺对温度敏感设备的冷却需求, 同时减少水泵扬程与循环流量, 能耗较开式系统降低约 15% ~ 30%。尽管其核心设备板式换热器的初期投资较高, 且对系统密封性要求严格, 但长期运行中节水节电效益突出, 尤其适用于水资源紧缺的场景。同时闭式系统因无蒸发排放, 可规避冷却塔飘水造成的周边环境污染问题, 更符合环保政策导向。

1.3 空冷技术

空冷技术是一种以空气为冷却介质的干式冷却方式, 使用风机驱动空气流经散热器翅片管束, 直接带走管内循环水的热量, 实现无水耗冷却。空冷系统完全脱离对水资源的依赖, 尤其适用于干旱缺水地区, 结构紧凑且无需配套冷却塔和水处理设施, 运维流程相对简化。由于空气比热容较低, 空冷系统的散热效率易受环境温度影响, 夏季高温时段可能需增加风机

表 1 循环水冷却系统评价性指标对比表

指标类别	换热效率	水质稳定性	占地面积	环保型
节水降耗能力	闭式循环: 密闭设计效率高; 空冷: 高温时效率下降; 复合式: 动态调节优化能效。	闭式循环: 污染风险低, 药剂用量少; 空冷: 无水质问题; 开式系统: 需频繁处理水质。	空冷: 散热器占地最大; 闭式: 设备紧凑; 复合式: 模块化布局节省空间。	空冷: 零水耗、无废水, 但需降噪; 闭式: 节水且药剂污染低; 开式: 蒸发损失与飘水污染风险高。
经济指标	初始投资 (CAPEX)	运行成本 (OPEX)	节能收益	投资回收期
	空冷系统: 最高散热器与风机成本高; 闭式: 次之精密设备投入; 开式: 最低。	开式系统: 水耗 + 电耗 + 药剂费最高; 闭式: 节水节电优势明显; 空冷: 无水耗但电费可能陡增。	闭式: 节水节电收益显著; 空冷: 规避水费与罚款; 复合式: 综合能效最优。	闭式: 3~5年高效收益; 空冷: 6~8年依赖长期节水与补贴; 复合式: 4~6年分阶段投资。

转速以维持冷却效果，导致电耗升高。再者，庞大的散热器组和风机群需要较大的安装空间，初期设备投资成本显著高于水冷系统。

2 技术经济分析模型构建

2.1 评价性指标

技术经济分析需企业从多维指标综合评估工艺方案的优劣，以下为煤化工循环水冷却系统工艺技术经济评价指标体系的归纳表，便于直观对比分析。（见表1）

企业可横向对比工艺的散热能力、运维难度及环保合规性，明确技术优劣，同时量化不同工艺的全生命周期经济性，突出闭式系统的“高 CAPEX、低 OPEX”特征。在实际选型需结合企业自身资源条件和政策要求，调整指标权重。

2.2 全生命周期成本 (LCC) 模型

全生命周期成本 (LCI) 模型以系统量化煤化工循环水冷却系统从设计、建设、运行到报废的全过程总成本, 为工艺选型提供长期经济性评估依据。初始投资成本 (CAPEX) 是模型的首要组成部分, 包括但不限于冷却塔等核心设备的采购费用, 以及土建安装与控制系统投入。不同工艺的 CAPEX 差异显著, 空冷系统因需配置大型散热器, 初始投资通常为闭式循环系统的 1.5-2 倍, 而闭式系统因精密换热器的要求, CAPEX 较开式系统增加 40% ~ 60%。运行成本 (OPEX) 则贯穿系统整个生命周期, 主要包括水费等合规支出。开式循环系统因依赖冷却塔蒸发散热, 年补水量大, 水费占 OPEX 的 40% 以上, 同时高扬程水泵与冷却塔风机导致电耗居高, 闭式循环以减少补水量与降低水泵功率, 显著缩减水、电费, 年运行成本较开式系统下降 30% ~ 50%。空冷系统虽彻底消除水耗, 但风机在高温时段的额外能耗可能使电费增加 20% ~ 30%。除此之外, 开式系统因水质污染风险高, 需持续投加阻垢剂与杀菌剂, 年费用可达 50 万 -100 万元, 而闭

式系统因水质稳定, 药剂成本可降低 60% 以上。报废处置成本, 通常占 LCC 的 3% ~ 5%。节能与隐性收益是 LCC 模型的关键修正项, 节水、电的直接经济回报可大幅冲减 OPEX, 闭式系统年节水数万吨, 折算水费节约可达数百万元, 空冷系统可以规避水资源税与环保罚款, 隐性收益在缺水地区尤为突出。政策补贴与碳交易收益也需纳入考量, 国家对节水技改项目的资金支持带来的额外收入。

3 案例分析：某煤化工企业闭式循环系统改造

3.1 企业背景

该企业位于西北内陆干旱地区，是当地重点建设的煤化工生产基地，主要生产煤制烯烃等化工产品，年产能达百万吨级。厂区所在区域年均降水量不足300mm，蒸发量高达2000mm，属于严重缺水地区，工业用水主要依赖地下水与跨区域调水，水源成本高昂且供应不稳定。企业原有冷却系统采用传统开式循环工艺，经冷却塔蒸发散热维持水温，年消耗新鲜水约150万吨，占全厂用水总量的四成以上。由于开式系统运行时水分蒸发、飘散损失大，加上循环水与空气直接接触易混入杂质，导致管道结垢与设备腐蚀问题频发，每年需投入大量资金进行化学清洗、更换损坏部件，非计划停机检修造成的生产损失超过1000万元。近年来，当地政府为落实“双碳”目标与水资源管控政策，对工业企业用水配额逐年收紧，并开征高额水资源税，超标排放废水将面临巨额罚款。该企业原有开式冷却系统因水耗高、废水排放量大，多次接近用水红线，环保合规压力持续加剧。同时，行业竞争加剧与产品利润空间压缩，迫使企业必须升级技术降低运营成本。在多方压力驱动下，该企业将循环水冷却系统改造列为重点节能降耗项目。

3.2 技术方案

企业改造方案采用完全封闭的循环架构，冷却水在密闭管道内循环流动，仅使用换热设备与外界交换

热量，从根源上消除蒸发损失。系统主体由板式换热器组、空气冷却器单元及智能调控平台构成，板式换热器采用不锈钢波纹板片设计，相比原管壳式设备，其传热效率提升约 30%，在相同散热需求下可减少约 20% 的循环水量，降低水泵输送能耗。空气冷却器作为辅助散热模块布置于厂区边缘，由多组翅片管束与轴流风机组成，在生产负荷高峰时自动启动。水质管理方面，系统配置在线监测传感器与自动加药装置，实时检测循环水的 pH 值、电导率及微生物指标，根据数据变化精准投放缓蚀剂与阻垢剂，将循环水浓缩倍数从改造前的 3 倍提升至 6 倍以上，显著减少排污频次与药剂消耗量。循环水泵与空冷风机均加装变频控制系统，根据实时水温与生产负荷动态调节运行功率，综合电耗较改造前降低 15% ~ 20%。针对西北地区昼夜温差大的特点，系统增设蓄冷水罐，在夜间低温时段预冷部分循环水，日间高峰时段释放冷量，进一步平衡能耗波动。余热回收是改造的另一重点，闭式系统高温回水经换热后接入厂区低品位热网，用于冬季供暖或部分工艺段原料预热，年回收余热相当于节约标煤 5000 吨。

3.3 经济效益

以下为某煤化工企业闭式循环系统改造前后经济效益的对比表格（见表 2），直观展示技术升级带来的综合收益。

本案例数据计算基于工业水价 4 元 / 吨、电价 0.6 元 / 度的实际定价标准，对比分析显示。改造后年直接经济收益包括节水 480 万元、节电 96 万元、化学

药剂与维护成本降低 495 万元、环保罚款规避 150 万元及政策补贴 500 万元，合计达 1721 万元。环保方面，补水量削减 80%、废水减排 85%，显著降低水资源消耗与环境污染风险，保证企业符合环保核查标准并规避停产危机。从全生命周期看，闭式系统设计寿命 15 年内累计收益可达 3.2 亿元，远超 1.2 亿元的初期投资，经济回报率超 266%。印证了闭式循环改造在降本增效、资源节约与合规运营方面的多维价值，为企业工艺升级提供了可复制的经济效益模型。

4 结束语

企业优化升级煤化工循环水冷却系统，可以有效应对资源约束与环保挑战。闭式循环改造的实践证明，使用精准匹配区域资源条件，能够降低水耗，提升经济效益。未来，企业需要将智能化控制与可再生能源深度整合，进一步突破冷却系统能效瓶颈，在保障生产稳定性的同时，为行业低碳化注入新动力。

参考文献：

[1] 刘丰, 孙中宁, 孟兆明, 张家琿, 张胜男. 开式自然循环系统排热功率提升实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2025, 46(01): 170-176.

[2] 杜君鸿. 化工生产中循环冷却水处理技术的应用与设备稳定运行维护策略 [J]. 山西化工, 2024, 44(11): 153-155.

[3] 余雪花. 组合式工业循环水冷却系统设计研究 [J]. 天津科技, 2023, 50(02): 80-82+87.

[4] 杨杰, 杨志岗, 张林. 化工企业循环冷却水系统优化改造 [J]. 氮肥与合成气, 2022, 50(01): 47-49.

表 2 改造前后经济效益的对比表

类别	改造前（开式系统）	改造后（闭式系统）	经济性变化
1. 资源消耗			
年耗水量	150 万吨	30 万吨	水费节约 480 万元
年耗电量	4000 万度	120 万元	电费节约 96 万元
2. 运维支出			
化学药剂 + 维护费用	800 万元	305 万元	节约 495 万元
环保罚款风险	150 万元	0	规避风险 150 万元
3. 政策与生产增益			
政府补贴收入	0	500 万元	新增收益 500 万元
年新增收益	1000 万元	100 万元	减少损失 900 万元
间接增产收益	0	4000 万元	新增收益 4000 万元