

面向低背压运行的机组蒸发冷凝器热力性能提升研究

马永军

大唐蒲城第二发电有限责任公司, 陕西 渭南 715501

DOI:10.61369/ME.2026010028

摘 要 : 面向低背压运行条件下的机组蒸发冷凝器热效率优化研究, 重点在于采用多元技术方案攻克传统空冷机组在高温工况下压力上升、效能降低的技术瓶颈。该研究全面考察了制约蒸发冷凝器换热效率的核心要素, 包括装置构型、传热介质、循环水调控及气流组织等参数。基于上述分析, 研究从结构改良与参数优化、先进强化换热技术实施、整体系统匹配与协同调节以及智能化调控与运行策略四个层面, 构建了完整的效能提升方案, 为火力发电等领域的能源节约与环保转型提供了切实可行的技术支撑。

关 键 词 : 低背压运行; 蒸发冷凝器; 热力性能; 强化传热

Research on Improving the Thermal Performance of Evaporative Condensers for Units Operating at Low Back Pressure

Ma Yongjun

Datang Pucheng Second Power Generation Co., LTD., Weinan, Shaanxi 715501

Abstract : Research on the thermal efficiency optimization of evaporative condensers for units under low back pressure operating conditions focuses on adopting multiple technical solutions to overcome the technical bottlenecks of pressure increase and efficiency reduction in traditional air-cooled units under high-temperature conditions. This study comprehensively examined the core elements that restrict the heat exchange efficiency of evaporative condensers, including parameters such as device configuration, heat transfer medium, circulating water regulation, and air flow organization. Based on the above analysis, the research has constructed a complete efficiency improvement plan from four aspects: structural improvement and parameter optimization, implementation of advanced enhanced heat exchange technology, overall system matching and coordinated regulation, and intelligent control and operation strategies, providing practical and feasible technical support for energy conservation and environmental protection transformation in fields such as thermal power generation.

Keywords : low back pressure operation; evaporative condenser; thermal performance; enhance heat transfer

引言

在电力生产环节中, 火力发电厂汽轮机的冷凝系统效能对电厂整体运行具有决定性影响。采用空气冷凝方式的直接空冷机组虽然能大幅减少水资源消耗, 但其散热效果受外界温度波动影响显著, 形成了“夏季效能不足、冬季防冻困难”的典型运行难题。当气温升高时, 空气与工作介质之间的热交换效率降低, 空冷凝汽器的散热能力显著减弱, 进而导致汽轮机排气压力上升。这种压力升高不仅减少了汽轮机的有效做功能力, 提高了燃料消耗率, 更严重制约了发电机组的最大输出功率, 使电站在用电需求高峰期难以达到额定负荷, 既影响了经济效益又削弱了供电可靠性。而在寒冷季节, 则需重点防范冷凝管束结冰问题, 这既增加了操作难度也提高了维护费用^[1]。

虽然蒸发冷凝器在理论层面展现出显著优势, 但其实际运行过程中的热工特性仍面临多重限制条件。具体而言, 换热管排的几何构型与空间排布、喷淋液膜覆盖的完整度与持续性、气流与液滴的混合状态、水质沉积风险以及设备调控方案等关键参数, 综合影响着装置的传热效率与能源消耗。基于降低运行压力的核心需求, 系统研究蒸发冷凝器的热力学性能优化路径, 借助技术革新与整体改进, 最大限度释放其节能效益, 这对增强火力发电设备的调节能力、经济指标, 以及促进电力系统向低碳方向发展, 均具备突出的学术价值和实践意义。

一、蒸发冷凝器热力性能影响因素分析

（一）结构参数与传热表面特性

冷凝器的结构特性直接影响其换热面积分布、流体动力学特性和热交换效能。传统管壳式蒸发冷凝器普遍采用板片管结构来增大换热面积，其中板片间隔尺寸、几何高度以及管排布形式尤为关键。适当缩小板片间隙能够提升单位体积换热面积，但过度缩小会增大大气流阻力并引发冷凝水积聚问题；而增加板片高度虽可增强换热效果，却会显著提高管内介质流动压损，需要在热传递增强与流动损失之间取得合理折中。

现代制冷技术中，板式蒸发冷凝器因其创新结构获得广泛研究。面向波纹板式结构的分析显示，运用多参数遗传优化算法调整波纹间距与高度参数，既能降低出口介质温度，又可优化气流侧压力损失，达成热力性能与流体特性的双重提升。值得注意的是，换热界面的材料选择与表面处理技术同样影响设备耐久性。选用具有防腐蚀、防积垢特性的表面处理工艺或特殊材料，例如镀锌合金管材、奥氏体不锈钢或铝覆层扁管，能够有效保持表面洁净度，抑制因污垢沉积引起的热阻增长，确保换热效能的长期可靠性^[2]。

（二）传热工质与两相流传热特性

蒸发冷凝器中的热交换机制包含蒸汽凝结与冷凝水汽化的双重过程，构成了典型的多相流传热系统。工质的物理特性直接决定了冷凝性能的优劣。面向非共沸混合工质而言，其相变时伴随的温度波动特性为温度调控创造了有利条件。在采用非共沸工质的有机朗肯循环系统中，蒸发冷凝器内存在特定的组分浓度区间。在此区间内运行，既能显著减小所需的换热面积，又能确保系统热力学效率达到峰值。

相关研究表明，在蒸汽喷射器等装置中，蒸汽膨胀过程中形成的液滴会显著改变流动状态，导致能量损耗增加。类似现象也可能出现在蒸发冷凝器的特定流动区域。深入探究多相流传热与流动特性的内在规律，并据此进行系统优化，是实现冷凝器核心换热性能提升的根本途径。这种优化需要综合考虑工质特性、流动状态和传热效率之间的复杂关系。

（三）水系统特性与蒸发过程调控

蒸发冷凝器的独特优势在于其水循环系统的设计，这一系统对潜热交换效果起着决定性作用。其中最关键的是喷淋水膜的质量参数，包括覆盖均匀度、持续稳定性和厚度控制。最佳状态的水膜应当完全包裹换热面，同时保持适中的厚度。水膜过厚会阻碍热量传递，而厚度不足则容易引发局部干燥现象。要实现这一目标，必须对喷淋装置的形态、分布密度以及工作压力进行精细调节。水质控制同样是不可忽视的重要环节。随着蒸发过程的持续，循环水中矿物质浓度不断升高，极易在管道内壁形成沉积层，这会额外增加热传导阻力。若长期运行而不加处理，积垢问题将导致换热能力呈现逐年衰减的趋势。为此，必须对补给水实施软化处理或定期投放防垢药剂，同时严格监控循环水的浓缩倍数^[3]。

（四）空气流动与传质过程强化

在蒸发冷凝器运行过程中，空气发挥着两种关键作用：首先

作为携湿介质，能够有效转移蒸发产生的水蒸气；其次通过强制对流方式吸收部分显热。这种特性使得空气流动状况直接决定了传热与传质效率。为确保理想的换气效果，必须保证充足的风量以及均匀分布的风速场。风机需要产生足够的压头来克服湿管束和除水装置带来的气流阻力。虽然提高空气流速可以强化对流换热效果并促进蒸发界面的水汽扩散，但同时也会导致风机能耗上升。通过改进流道结构设计，比如采用科学的管束排列方式防止气流旁通，确保空气与换热面充分接触，这对消除局部换热盲区、改善温度场均匀性具有决定性影响。外界空气湿度作为关键环境参数，直接影响着蒸发冷凝的驱动力。当遇到高温高湿工况时，空气的携湿能力显著降低，导致蒸发冷凝效率急剧下降，此时通常需要提高通风量来部分补偿性能衰减。

（五）系统控制策略与运行匹配

蒸发冷凝器的运行效能与整个机组冷端系统密切相关，必须根据主机负荷变化和环境参数实时调整。要实现最佳节能效果，关键在于采用智能化的调控方案。传统固定转速的运行模式在部分负荷工况或温度适宜时，往往导致不必要的能源损耗。现代优化系统通过引入变频调速技术，能够基于冷凝压力或温度目标值，动态控制风机转速和水泵运行频率。具体来说，当外界温度低于预设阈值（例如27℃）时，系统可优先或完全依赖空气冷凝模式；而随着气温上升引起背压增加，则会自动激活蒸发冷凝器，并智能调节其运行功率。同时，面向寒冷季节的运行特点，控制系统还需执行防冻保护程序，通过优化各冷凝单元的水量分配、改变气流组织方式或启动加热装置，有效避免换热管束内部结冰，确保设备可靠运行。这种精细化控制策略可在保证冷凝效果的同时，最大限度降低风机、水泵等辅助设备的电力消耗。

二、低背压运行的机组蒸发冷凝器热力性能提升策略

（一）结构创新与优化设计策略

从传热元件的结构创新与系统布局的合理规划入手，从根本上增强冷凝器的热传导性能与工况适应能力。首要任务是实现传热表面由常规圆管向高性能板片的转型。板式蒸发冷凝器凭借其紧凑的构造和优异的热交换效率，已成为重点发展方向。国内科研单位已在大型火电机组直冷系统改造中成功应用该技术，实际运行数据表明夏季真空指标获得明显改善。面向板片结构设计，可采用多参数优化方法，对板片几何尺寸、排列密度及倾斜角度等关键因素进行综合寻优，在传热效率与流动阻力之间取得最优解，从而开发出高效节能的强化传热结构。另一方面，需完善系统流程与空间配置。通过顺逆流混合的多流程布置方案，可满足不同季节的运行要求。高温季节采用顺流模式有利于增强蒸发效果；寒冷季节则可切换至逆流模式，有效预防防结冰问题。对于复合式系统，还需探究蒸发冷凝器与空冷设备的协同运行机制及容量匹配关系，确保各组件在多变工况下实现优势互补，达到协同增效的目的^[4]。

（二）新型强化传热技术应用策略

通过整合多学科领域的创新强化传热与传质方法，为系统性

能优化开辟新途径。其中，磁化水处理技术展现出独特的技术优势。研究证实，当喷淋水经过特定磁场强度处理后，其物性参数会发生明显变化，表面张力显著降低，从而改善液体在换热表面的润湿特性与汽化效率。在蒸发冷凝器中采用磁化水工艺，能够实现换热效能的突破性提升。将这一创新技术与蒸发冷凝设备相结合，可在维持能耗水平不变的情况下，有效强化其核心的蒸发换热机制。另一个值得关注的技术路线是开发新型传热介质，在某些特定工况下，选用非共沸混合制冷剂，利用其特有的温度滑移效应，能够更精准地适应冷凝过程中的温度梯度变化，降低传热环节的热力学损失，进而提升系统的火用利用效率。同时，纳米流体等新型传热工质在单相流强化传热领域已表现出优异性能，其在蒸发冷凝器管内侧冷凝过程中的潜在应用价值也亟待探索，这种双向强化策略可能为整个传热系统带来协同增效。

（三）系统集成与协同优化策略

在整体能源系统框架下审视蒸发冷凝器的应用，通过多热力环节的协同优化，显著提升综合能效表现。其中，复合型空冷凝汽系统是典型应用案例，采用空冷主导、蒸发冷凝辅助的混合模式，实现了技术层面的深度整合而非简单组合。该系统中，蒸发凝汽器作为调峰冷凝单元，仅在高温工况下启动，有效控制背压波动，以有限的水资源投入和设备运行时长，确保机组在关键工况下的性能表现和经济收益。

进一步的技术创新体现在低品位热源的梯级利用方面。现有技术方案中，存在通过分流部分循环冷凝水，经蒸发器与制冷剂进行热交换的工艺路线。该方案不仅实现了水温的二次降低，同时利用制冷剂冷凝释放的热量预热主凝汽器出口凝结水，有效改善过冷现象。这种集成化设计既优化了系统背压参数，又实现了冷端余热的回收利用，从热力循环整体角度提升了能效水平。此类系统优化需要跨越传统设备界限，开展全局热力学分析与参数优化。

（四）智能控制与运行优化策略

通过整合先进的传感技术、物联网架构以及人工智能算法，

实现精准化、智能化的运行管理，是充分发挥系统效能的核心策略。关键在于建立基于多元参数协同优化的动态调节机制，该机制以保持预设背压值为首要任务，以整体能耗最小化为最终目标，持续监测包括环境温湿度参数、机组运行负荷、循环水温度曲线以及风机水泵电流波动等在内的多维运行指标。智能调控模型能够实时计算出特定工况条件下风机的最优转速区间、喷淋系统的最佳水流量以及多冷凝单元之间的最优负荷配比方案。举例来说，在环境温度较低的夜间或机组低负荷运行阶段，可显著减少甚至完全停止喷淋装置和风机的运转；而在高湿度闷热天气条件下，则应重点确保充足通风量而非单纯提高喷淋强度。同时，智能化管理方案还需整合设备异常检测与预防性维护功能模块。通过对历史运行曲线与实时监测数据的偏差分析，能够提前预警换热器结垢风险、喷头堵塞征兆或风机性能衰减等问题，为实施预防性检修提供决策依据，确保设备长期处于最佳运行工况。最终，借助智能化管理手段将设计优势与技术特性转化为持续稳定的高效运行表现。

三、结语

综上，面向低背压工况下机组蒸发冷凝器的热力性能优化，这一课题涉及结构设计、工质特性、传热强化及系统调控等多个技术层面的协同攻关。本研究全面分析了制约其性能表现的核心要素，并基于此构建了包含结构革新、新型技术引入、系统集成及智能调控四个平行方向的综合性能提升方案。实验数据表明，孤立的技术改良往往效果不显著，唯有整合高效板式换热单元、磁化水等新型传质强化手段、与空冷系统协同运行的混合架构，以及依托人工智能和大数据分析的精确调控策略，构建完整的解决方案体系，才能充分挖掘蒸发冷凝器的性能提升空间。

参考文献

[1] 靳茗森, 胡晓微, 胡朋丽, 等. 板间距对板式蒸发冷凝器换热性能的影响规律研究 [J]. 节能, 2025, 44(02): 80-83.
[2] 赵红霞, 王奇, 刘光弟, 等. R1234yf在板式蒸发冷凝器中换热过程的数值模拟 [J]. 制冷技术, 2024, 44(03): 21-28+35.
[3] 王将, 张秋建, 王云龙, 等. 我厂蒸发式冷凝器的选型及改造 [J]. 纯碱工业, 2024, (03): 36-38.
[4] 陆刘记, 张胜利, 侯俊峰, 等. 肋片板式蒸发冷凝器传热性能及优化研究 [J]. 低温与超导, 2022, 50(01): 27-32+75.