

火电厂给水泵汽轮机排汽冷却系统的优化

侯艳国

大唐国际托克托发电有限责任公司 内蒙古 呼和浩特 010010

摘要：冷却系统是火电厂给水泵汽轮机中的重要组成部分，直接关系到汽轮机的运行效率与经济性。随着现代火电厂地不断发展，给水泵汽轮机功率逐渐提升，因而对冷却系统提出了更高的要求，为了确保冷却系统符合现代汽轮机运行要求，需要提升冷却系统体积、能耗等，使得整个火电厂运行成本大大增加。所以，为了确保给水泵汽轮机排气冷却效果符合要求的同时，加强对冷却系统体积与能耗的控制，则应对原有冷却系统进行优化。

关键词：火电厂；给水泵；汽轮机；排气；冷却系统

在给水泵汽轮机排汽末端加装混合式冷却器，采用主机凝结水作为冷却介质，通过雾化喷嘴与排汽直接混合换热。同时将原排入凝汽器的疏水（如低压加热器疏水、轴封加热器疏水）引入混合式冷却器热井。减少低压加热器抽汽量，降低给水泵汽轮机进汽需求，减轻主机凝汽器热负荷，提升真空度。

1 火电厂排汽冷却系统的分类

1.1 按冷却介质分类。湿式冷却系统（水冷系统），直流式（开式）冷却系统：直接从江、河、湖、海或水库取水作为冷却水源，冷却后排回自然水体。适用于水资源丰富地区，但可能造成热污染。循环式（闭式）冷却系统：冷却水在凝汽器与冷却塔之间循环使用。通过冷却塔将热量释放到空气中，耗水量大（占全厂耗水量65%以上），适用于水资源紧缺地区。干式冷却系统（空冷系统），以空气为冷却介质，无需消耗水资源，适用于缺水地区：直接空冷系统（ACC）：汽轮机排汽直接进入翅片管束，通过轴流风机强制通风冷却。结构紧凑，但背压控制难、噪声大、厂用电高。间接空冷系统（ISC）：表面式凝汽器系统：通过中间冷却水循环换热，冷却水与锅炉给水隔离，水质可控。混合式凝汽器系统（海勒式）：排汽与冷却水直接混合换热，需配备自然通风冷却塔。

1.2 按冷却设备结构分类。自然通风冷却塔，依靠空气密度差形成自然对流散热，塔体通常呈“细腰”双曲线形以增强抽力。机械通风冷却塔，利用风机强制通风，冷却效率高但能耗较大。冷却水池，大面积水体通过自然蒸发散热，成本低但对地形和水源要求高。

1.3 创新复合型系统。烟塔合一系统，将烟气排放与冷却塔结合，利用冷却塔热空气抬升烟气扩散，减少单独烟囱建设。干湿联合冷却系统，结合空冷与水冷优势，高温时段启用湿冷辅助，平衡节水与效率需求。三塔合一系统，集成脱硫塔、烟囱和冷却塔功能，大幅节省占地并降低排放浓度。

2 给水泵汽轮机排汽的特点

2.1 低参数与大焓降特性。低压低温状态，排汽压力远低于主汽轮机，通常处于真空或微正压状态（典型值 $\approx 6.8\text{kPa}$ ），排汽温度约35~50℃，接近饱和蒸汽状态。高焓降输出，蒸汽从较高初参数（如0.9~1.6MPa/350~400℃）膨胀至低压排汽，实现大焓降转换，驱动泵组所需机械功。

2.2 热能品质低与利用难点。低品位热能，排汽携带的余热温度低（<50℃），难以直接回收利用，需依赖凝汽设备强制冷却。冷源损失突出，未转化为机械功的热能比例高（占输入热能50%以上），是系统效率关键制约点。

2.3 结构适应性设计。紧凑型低压缸，采用短轴焊接低压缸或集成式排汽蜗壳，适应背压敏感工况，减少泄漏风险。末级抗蚀叶片，末两级动叶采用自带冠扭叶片及外包菌型叶根，抵抗湿蒸汽侵蚀与宽转速振动。

2.4 运行控制特殊性。背压高敏感性，排汽背压微小波动（ $\pm 1\text{kPa}$ ）可导致转速变化>100rpm，需快速响应调节系统。变工况频繁切换，随主机负荷变化，排汽量可在30%~130%范围内波动，要求冷却系统具备宽域适应能力。防汽蚀强制冷却，停机后需维持凝结水泵运行至排汽温度<50℃，防止凝汽器管束热变形泄漏。

2.5 环境适应性挑战。空冷系统适配难题，在缺水地区采用直排空冷时，受环境温度影响显著，夏季背压可能骤升>15kPa，威胁给水泵出力。疏水系统复杂性，排汽凝结水需与主机凝结水系统耦合，存在多级疏水回收与水质控制要求。

3 火电厂排汽冷却系统的重要性

3.1 维持热力循环基础。工质回收关键环节，将汽轮机排出的低温低压蒸汽（ $\approx 6.8\text{kPa}$ ）凝结为液态水，实现工质闭式循环，保障锅炉持续供水，避免发电循环中断。真空环境创建，通过快速冷却排汽建立凝汽器高

真空($\approx 5\text{kPa}$)，增大蒸汽可用焓降，提升循环热效率(常规机组约40%热耗源于冷端损失)。

3.2 节能增效核心作用。冷源损失控制，高效冷却系统可降低排汽温度8~15℃，背压每降低1kPa，机组热耗率下降1.5%~2.5%。余热梯级利用，集成低温省煤器回收烟气余热，预加热凝结水，降低凝汽器负荷，减少冷却水消耗量20%以上。

3.3 设备安全与寿命保障。防关键部件损伤，维持稳定背压避免汽轮机末级叶片颤振，防止湿蒸汽侵蚀叶片(空冷系统夏季背压 $> 15\text{kPa}$ 将威胁叶片强度)。热应力控制，快速冷却停机后排汽($< 50^\circ\text{C}$)，防止凝汽器钢管热变形泄漏，延长设备寿命3~5年。

3.4 环保与资源可持续性。水资源保护，循环冷却系统比直流式节水95%以上，空冷系统实现全工况零水耗，适应缺水地区需求。热污染防控，避免高温排水直接排放(湿冷系统排水温度比自然水体高10℃)，减少水生生态系统破坏。排放协同治理，烟塔合一技术利用冷却塔热空气抬升烟气，提升污染物扩散效率，降低地面浓度30%以上。

4 火电厂给水泵汽轮机现有排汽冷却系统分析

4.1 主流冷却系统类型。排入主机凝汽器，常规设计将小机排汽通过真空蝶阀接入主凝汽器，利用主机冷却系统统一处理。优点是系统简单，但会增加主凝汽器15~20%热负荷，导致真空下降0.5~1kPa，影响主机效率。独立空冷系统，采用专用空冷岛(ACC)或间接空冷塔(ISC)，适用于缺水地区。直接空冷系统通过翅片管束和轴流风机强制散热，背压调节灵活但受环境温度影响显著(夏季背压可达15kPa以上)。间接空冷通过表面式换热器实现二次冷却，水质可控但效率较低。

4.2 关键性能短板。冷源损失突出，排汽焓值高达2516~2637kJ/kg，约50%热能通过冷却系统散失，是系统能效主要瓶颈。变工况适应性差，转速范围3000~6000r/min的宽幅波动导致排汽量变化达100%，传统系统难以稳定维持最佳真空。热力耦合问题，与主机凝汽器连接时，小机排汽会升高主凝汽器温度，每增加10t/h排汽量可使真空降低约0.3kPa。

4.3 技术优化方向。混合式冷却器，在排汽末端加装雾化喷嘴，用主机凝结水直接换热，可降低凝汽器热负荷8~12%，提升真空0.4~0.7kPa。余热梯级利用，将排汽引入低温省煤器预热锅炉给水，可实现5~8%的热能回收。智能背压控制，基于环境温度和负荷率动态调节风机转速，夏季工况下可降低背压波动幅度30%。当前系统升级需综合考虑水源条件(湿冷/空冷选择)、主机匹配度(热力耦合影响)及智能化改造空间(如变频风机

群控)等核心因素。

5 火电厂给水泵汽轮机排汽冷却系统优化方案

5.1 系统架构优化。混合式冷却器集成，在排汽末端加装雾化喷嘴，利用主机凝结水直接换热，可降低凝汽器热负荷8~12%，提升真空0.4~0.7kPa。该方案同步回收No8低压加热器疏水，减少抽汽量3~5%。独立空冷系统改造，缺水地区可采用ACC空冷岛或ISC间接空冷塔，通过变频风机调节背压，但需应对夏季高温导致的背压波动(可达15kPa以上)。

5.2 能效提升技术。余热梯级利用，将排汽引入低温省煤器预热给水，可回收5~8%热能，降低烟气温度10~15℃。智能背压控制，基于负荷与环境温度动态调节冷却参数，夏季工况可减少背压波动30%。

5.3 运行模式创新。变工况协同调节，采用“单台高速+单台低速”泵组组合，匹配不同季节负荷需求，循环水泵耗电率可降0.5%。冷端系统智慧化，部署物联网传感器与AI算法，实时计算最佳真空并优化循环水量，供电煤耗降低1.2g/kWh。

5.4 经济性验证。以600MW机组为例，混合式冷却器改造可使凝汽器热负荷降低15%，年节约标煤约1200吨；若结合余热回收，综合节能收益可达3~5%。

6 火电厂给水泵汽轮机排汽冷却系统优化实施与效果

6.1 火电厂给水泵汽轮机排汽冷却系统优化实施步骤。系统诊断与基准测试，热力性能评估，测量排汽焓值、温度及真空度，量化主凝汽器额外热负荷(通常增加15%~20%)。分析排汽量波动范围(3000~6000r/min转速下可达100%)对真空稳定性的影响。设备状态检测，检查凝汽器管束结垢厚度、循环水泵效率及冷却塔性能，建立冷端系统基准模型。优化方案设计与仿真，混合式冷却器集成，在排汽管道末端加装雾化喷嘴，采用主机凝结水直接接触换热，降低凝汽器热负荷8~12%。重构疏水系统：将No8低压加热器疏水及轴封加热器疏水引入混合冷却器热井，减少抽汽量3~5%。余热梯级利用设计，耦合低温省煤器，用排汽余热预热锅炉给水(回收5~8%热能)。冬季接入供热管网，实现热电联产增效。智能控制系统架构，部署物联网传感器监测负荷、环境温度、循环水流量等参数。基于AI算法动态计算最佳背压目标值，联动调节风机频率。关键设备改造与安装，混合冷却系统施工，雾化喷嘴安装，选用耐高温合金喷嘴，垂直布置于排汽管道下游，确保雾化覆盖均匀。疏水管道改造，增设旁路管道将疏水引流至混合冷却器热井，加装逆止阀防止倒流。余热回收系统集成，低温省煤器安装，在烟道尾部加装鳍片管换热器，提升给水温度10~15℃。热网接口预留，在排汽管道设置蒸汽抽取

阀，连接区域供热管网。智能调控硬件部署，DCS系统升级，增加真空调节闭环控制模块，实现毫秒级风机频率响应。变频器改造，循环水泵电机加装双速或变频驱动，支持五种运行模式切换（如单台低速/高速、双低速等）。调试与运行优化，分阶段投运验证，先投混合冷却器，验证凝汽器真空提升幅度（目标0.4~0.7kPa）。再投余热回收系统，监测给水温度升幅及煤耗降低值。智能算法调参，导入历史运行数据训练AI模型，优化背压控制逻辑。

6.2 火电厂给水泵汽轮机排汽冷却系统优化实施后效果评估。核心能效提升效果，真空与热负荷优化，凝汽器真空提升：加装混合式冷却器后，排汽与主机凝结水直接接触换热，凝汽器真空提升0.4~0.7kPa，热负荷降低8~12%。排汽余热回收：通过低温省煤器预热锅炉给水，排汽温度降低10~15℃，热能回收率达5~8%。背压稳定性增强：AI动态调控循环水量及风机频率，夏季工况背压波动减少30%。厂用电率下降，循环水泵采用“单台高速+单台低速”组合或变频改造，耗电率降低0.5%~5%（视机组规模）。凝结水系统降压运行后，凝泵耗电率降至0.15%。运维成本优化，设备寿命延长：减少凝汽器结垢与氧腐蚀，大修周期延长至40年。智能运维降本：冷端系统实时监测结垢与传热效率，故障响应时间缩短60%。环保与资源效益，碳减排，空冷系统改造（ACC/ISC）实现近零水耗，1000MW机组年减排CO₂达5.41万吨。节水，空冷技术替代传统水冷，耗水量降低95%以上。协同减排，余热回收降低烟气温度10~15℃，减少脱硫系统能耗。风险控制效果，季节性适应能力，高寒地区启用泵组组合模式，防止冷却塔结冰，循泵耗电率再降0.5%。缺水地区空冷岛配置变频风机群控，缓解夏季背压骤升（>15kPa）风险。水质管理，混合式冷却器增设防堵监控，定期清洗保障雾化效果。优化后系统通过能量梯级利用与智能调控，实现供电煤耗、厂用电率双降，兼具节水减排效益。需持续监控背压稳定性及防冻设计，以维持长期经济运行。

6.3 火电厂给水泵汽轮机排汽冷却系统优化节能降耗效果量化。关键能效指标提升，煤耗降低，供电煤耗下降4~8g/kWh，600MW机组年节标煤达1200吨；1000MW超临界机组通过智能冷端系统改造，供电煤耗进一步降低1.2g/kWh。真空与热负荷优化，凝汽器真空提升0.4~0.7kPa，热负荷减少8~12%；排汽温度降低10~15℃，热能回收率5~8%。厂用电率下降，循环水泵变频改造后耗电率降低0.5%~5%（600MW机组年节电约120万kWh）；凝结水系统降压运行，凝泵耗电率降至0.15%。环保与资源效益，碳减排，空冷技术（ACC/ISC）改造后，1000MW机组年减排CO₂5.41万吨；节水，空冷系统替代水

冷，耗水量降低95%以上，年节水量超4300万吨（相当于120万人年用水量）；协同效益，余热回收降低烟气温度10~15℃，减少脱硫系统能耗3%~5%。风险控制与运维优化，背压稳定性，AI动态调控使夏季背压波动降低30%，避免真空骤升至15kPa以上风险；设备寿命，减少凝汽器结垢与氧腐蚀，大修周期延长至40年；防冻与水质管理，寒区启用“单台高速+单台低速”泵组模式，循泵耗电率再降0.5%；混合冷却器防堵监控保障雾化效率，维护成本降低10%~15%。优化后排汽能量梯级利用率达20%以上，热电联产模式下综合热效率提升显著。需持续监控背压稳定性及季节性工况适应性，确保长期经济运行。

6.4 火电厂给水泵汽轮机排汽冷却系统是否需要持续优化。火电厂给水泵汽轮机排汽冷却系统的持续优化是必要的，其必要性源于技术迭代、运行维护需求和经济效益提升等多重因素的综合驱动：技术迭代推动优化升级，热回收技术创新，混合式冷却器通过雾化喷嘴实现排汽与凝结水直接接触换热，可降低凝汽器热负荷8%~12%，真空提升0.4~0.7kPa。近年低温省煤器技术的应用进一步将排汽余热回收率提升至5%~8%，用于预热锅炉给水可降低煤耗。智能控制升级，基于AI的动态背压控制系统可实时响应负荷与环境变化，夏季背压波动降低30%；循环水泵变频改造结合“单高速+单低速”运行模式，使厂用电率再降0.5%。运行维护的持续性需求，设备老化与结垢控制，凝汽器管束结垢会导致传热端差上升0.8℃，供电煤耗增加0.5g/kWh。需定期清洗及水质监控，维持设计洁净系数0.8~0.9。季节性适应挑战，高寒地区需防冷却塔结冰，缺水区域需空冷岛变频调控缓解夏季背压骤升（>15kPa）风险；疏水阀门泄漏可能引发凝汽器热负荷增加10%，需强化检修隔离措施。优化瓶颈与突破方向，系统集成瓶颈，余热回收需协调回热系统（如No8低加疏水引入混合冷却器），抽汽量减少3%~5%的效益受制于管路阻力与阀门密封性。新材料与设计革新，超超临界机组（如27MPa/610℃参数）通过提升主汽压力1MPa可降热耗1%，但需突破材料耐温极限；塔式锅炉与单给水泵配置可进一步降低热耗，但需解决转子抖动等机械隐患。

总之，通过改造后，可降低整个火电机组的煤耗量，且能够在较短时间内将改造成本回收，有利于火电厂更好的发展。

参考文献

[1]李海.火电厂给水泵汽轮机排汽冷却系统的优化分析.2023.

[2]张小军，浅谈火电厂给水泵汽轮机排汽冷却系统的优化.2022.