

汽轮机轴封加热器疏水系统优化与余热高效回收技术研究

黄小飞

衢州东港环保热电有限公司 浙江 衢州 324022

【摘要】：汽轮机轴封加热器疏水系统运行效率直接影响机组热经济性与安全稳定水平。针对传统疏水系统存在疏水不畅、热量损失大及回收利用率低等问题，围绕系统结构优化与余热梯级利用展开研究，提出疏水流程重构、智能调控及余热高效回收技术方案。对运行参数与能量平衡进行分析，构建优化模型并进行工程验证，结果表明该技术可显著降低排汽热损失，提高凝结水品质与机组整体效率，实现节能降耗与经济效益协同提升。

【关键词】：汽轮机轴封加热器；疏水系统优化；余热回收；热效率提升；节能降耗

DOI:10.12417/2705-0998.26.02.003

引言

汽轮机运行过程中的轴封加热器承担着回收轴封蒸汽热量的重要任务，其疏水系统性能直接关系到机组热耗水平与安全稳定运行。当前部分电厂在疏水组织与余热利用方面仍存在效率偏低、调控粗放等问题，制约了节能潜力的进一步释放。围绕疏水系统优化与余热高效回收展开技术研究，对于提升机组综合热效率、推动节能减排具有现实意义，也为相关系统改造提供理论依据与实践路径。

1 汽轮机轴封加热器疏水系统运行现状与存在问题

1.1 疏水系统结构及工作机理分析

汽轮机轴封加热器疏水系统通常由轴封蒸汽冷却换热单元、疏水管路、疏水阀组、液位控制装置及凝结水回收通道等构成，其核心功能在于将轴封蒸汽在换热后的凝结水及时排出，并维持稳定的水位与热交换条件。轴封蒸汽在加热器内释放潜热后形成凝结水，若排放不及时，将导致换热面积被水淹没，影响传热系数并引发热阻增大现象。系统运行依赖于合理的压差分配与连续排水机制，疏水阀的动作灵敏度与密封性能直接关系到疏水连续性与系统安全性。在实际工程中，疏水系统多采用重力疏水与压差疏水相结合的方式，将凝结水导入低压加热器或凝结水系统，实现热量回收与循环利用。其工作机理本质上是维持稳定的热力平衡与液位平衡，保证轴封蒸汽充分冷凝并高效回收显热与潜热，从而提升机组整体热效率。

疏水系统的结构布置对热经济性具有决定性影响。管路走向、标高设置及阀门选型若设计不当，易形成局部阻力增大与二次蒸发闪蒸现象，进而干扰正常排水节奏。运行中还需兼顾轴封蒸汽压力波动与负荷变化对疏水量的影响，通过液位自动调节装置维持稳定工况。合理的系统结构应确保疏水畅通、避免汽水混流与倒流，降低冷源损失与热量散失。对疏水路径与换热过程进行热力学与流体力学分析，可为后续系统优化与余热高效回收技术奠定理论基础，为机组节能改造提供可靠依据。

1.2 疏水不畅与热损失机理研究

轴封加热器在运行过程中若出现疏水不畅现象，往往会引发一系列连锁反应。凝结水在壳侧或管侧滞留，会导致有效换热面积缩减，传热系数下降，使蒸汽冷凝过程受阻，部分蒸汽夹带水滴进入后续系统，增加设备振动与腐蚀风险^[1]。液位异常升高还可能造成水击现象，威胁管道与阀门的结构安全。从热力学角度分析，疏水受阻会使轴封蒸汽潜热未能充分释放，部分热量随蒸汽排入低效回收通道甚至直接排放，形成显著的能量损失。闪蒸汽的无序释放增加了系统背压，改变原有压差分布，进一步削弱疏水驱动力，形成恶性循环。

热损失机理还体现在冷凝水过冷不足与再蒸发损失两个方面。凝结水在高温状态下若直接排入低压区域，会产生闪蒸汽，导致热能以蒸汽形式逸散；而疏水阀密封失效或调节滞后，则可能造成蒸汽泄漏，使高品位热量未经有效换热便进入凝结水系统，降低回收效率。实际电厂运行数据显示，疏水系统调控不精确会使轴封加热器出口温度波动明显，进而影响给水温度与机组热耗指标。深入分析疏水不畅与热损失形成机理，有助于明确优化方向，通过改善压差条件、优化控制策略与强化余热梯级利用，实现热量的高效回收与稳定利用。

1.3 余热利用效率偏低的影响因素

轴封加热器疏水系统中余热利用效率偏低，往往与系统整体热力匹配程度不足密切相关。部分机组在设计阶段对轴封蒸汽参数波动考虑不充分，导致换热面积裕量偏小或流程衔接不合理，使蒸汽潜热释放不完全。疏水管路布置存在高差不足、局部阻力系数偏大等问题时，凝结水排放不连续，换热器壳侧易形成积水层，降低传热系数并削弱对低温凝结水的加热效果。运行过程中若轴封压力随负荷频繁变化，而液位调节装置响应滞后，系统难以维持稳定的热平衡状态，部分高品位热能以闪蒸汽形式损失。疏水回收路径与低压加热系统衔接不紧密，也会造成热量梯级利用不足，使轴封余热未能有效转化为给水焓值提升，直接影响机组热耗指标。

设备选型与运行管理水平同样对余热回收效果产生显著

影响。疏水阀类型与工况匹配度不高时,易出现蒸汽泄漏或排水间断现象,导致热量回收率下降。长期运行后,换热管束结垢与腐蚀会增大传热热阻,削弱轴封蒸汽冷凝效率,增加排汽温度波动。部分电厂在控制系统中缺乏对轴封加热器出口温度、液位及压差的精细化监测,未建立完善的能量平衡分析机制,难以及时发现热偏差与能量损失点。实际运行数据表明,当疏水系统未实现与主凝结水系统的优化耦合时,回收热量难以稳定输入至热力循环,造成热经济性提升幅度有限。

2 轴封加热器疏水系统优化与余热回收技术方案

2.1 疏水流程重构与系统结构优化

围绕汽轮机轴封加热器疏水系统存在的排水滞后与热量损失问题,对原有疏水流程进行重构具有关键意义。优化疏水管路走向与标高布置,合理配置压差驱动条件,可有效增强凝结水的连续排放能力,避免壳侧积水造成传热面积衰减。在结构优化过程中,应结合热力系统能量平衡计算,对轴封蒸汽流量、压力及冷凝温度进行校核,重新匹配疏水阀通径与控制方式,减少局部阻力损失与闪蒸现象。针对传统系统中存在的多级串联排放路径复杂、回收节点分散等问题,可通过集中回收与分级利用相结合的方式,缩短疏水流程,提高回收稳定性。加强换热器内部结构改进,优化冷凝区与排水区分布,提升整体传热系数,为余热高效回收创造良好的物理条件。

系统结构优化还需兼顾安全性与运行可靠性。设置合理的旁路调节回路与液位联锁保护装置,可在负荷波动时维持疏水系统稳定运行,防止水击与倒流现象发生。结合实际电厂改造经验,采用模块化设计理念,将疏水回收单元与低压加热系统进行紧密耦合,有助于减少管网冗余与能量损耗。对关键节点进行流体力学仿真分析,可识别压降集中区域与汽水分离不充分位置,从而有针对性地实施结构调整。

2.2 智能调控与运行参数匹配技术

在疏水系统结构优化基础上,引入智能调控与参数匹配技术,是提升轴封加热器运行效率的重要手段。通过在线监测轴封蒸汽压力、温度、液位及疏水流量等关键参数,建立实时数据采集与分析平台,可实现对系统工况的动态评估^[2]。依托自动控制算法,对液位调节阀与疏水阀动作进行精准控制,使疏水排放与蒸汽冷凝过程保持协调,避免因调节滞后导致的热量损失。结合机组负荷变化趋势,构建运行参数自适应模型,实现不同工况下的最佳压差分配与流量匹配,从而提高换热效率与余热回收比例。智能化手段的应用,有助于减少人为干预误差,增强系统运行稳定性。

运行参数匹配技术还体现在热力循环整体优化层面。对轴封加热器出口凝结水温度与主凝结水系统进行协同控制,可实现热量输入与系统需求的动态平衡,降低给水加热不均衡带来的能耗波动。利用数据挖掘与趋势分析方法,对历史运行数据

进行建模,可识别异常工况与潜在能量损失点,及时调整控制策略。部分电厂在改造中引入分布式控制系统与预测性维护技术,实现对疏水阀性能衰减的提前预警,有效避免蒸汽泄漏与排水不畅问题。

2.3 余热梯级利用与能量回收路径设计

轴封蒸汽在冷凝过程中蕴含一定品位的热能,通过科学的梯级利用设计,可最大限度发挥其节能潜力。依据热力学第二定律,应按照温度等级将回收热量优先用于低温加热环节,使能量利用符合热量匹配原则。在路径设计中,可将轴封加热器疏水引入低压加热器或凝结水预热系统,通过优化接口方式与流量分配,实现热量的稳定传递。对于存在闪蒸汽的系统,可设置闪蒸分离装置,将产生的二次蒸汽导入合适的压力级段加以利用,减少直接排放损失。建立完整的能量平衡模型,对不同回收路径进行热经济性比较,可筛选出综合效益最佳方案。

能量回收路径设计还需考虑系统运行的灵活性与安全边界。负荷变化时,轴封蒸汽流量与压力波动明显,回收系统应具备一定的调节裕度,以防止过热或供热不足影响主循环稳定。结合实际工程经验,将余热回收单元与机组控制系统深度融合,有助于实现热量分配的动态优化。对回收前后机组热耗率与煤耗指标进行对比分析,可量化梯级利用带来的节能效果。科学构建余热利用路径,提高轴封加热器疏水系统的能源利用率,也为电厂整体节能降耗提供可持续技术支撑。

3 优化技术的工程应用与节能效果分析

3.1 优化模型构建与实施步骤

围绕汽轮机轴封加热器疏水系统优化与余热高效回收目标,需构建基于热力学与流体力学耦合的综合优化模型。模型建立以能量守恒与质量守恒方程为基础,将轴封蒸汽流量、冷凝温度、疏水压力、液位高度及传热系数等关键参数纳入统一计算框架,建立热平衡方程与压差驱动方程,明确各节点能量分布与流动特性。在此基础上引入传热强化系数与局部阻力系数修正参数,对实际运行中存在的结垢、腐蚀及阀门性能衰减等因素进行修正,提高模型的工程适用性。结合数值仿真与现场测试数据,对不同疏水路径与回收方案进行对比分析,筛选出兼顾热效率与运行稳定性的最优结构形式,为系统改造提供理论依据。

实施过程中需按照“参数采集—模型校核—方案比选—分阶段改造”的技术路线推进。对机组不同负荷工况下的运行数据进行系统采样,完成模型参数标定与灵敏度分析,识别影响余热回收效率的关键变量。在完成结构优化设计后,分阶段对疏水管路、控制阀组及回收接口进行改造,并同步开展调试与性能验证。改造完成后对比理论预测值与实测数据,对模型进行再校正,形成可复制的技术标准。

3.2 运行数据对比与热经济性评估

在系统优化完成后，对改造前后运行数据进行对比分析，可直观反映余热回收技术的实际效果。选取轴封蒸汽压力、疏水温度、凝结水出口温度及机组热耗率等关键指标，建立对比评价体系，对不同负荷条件下的数据进行归一化处理，排除外界工况干扰因素。数据显示，优化后疏水排放更加稳定，轴封加热器出口温度波动范围明显收窄，凝结水温升幅度提高，说明传热过程更加充分。结合热平衡计算结果，可测算轴封蒸汽潜热回收率的提升幅度，为节能效果提供量化依据。通过统计煤耗变化趋势，评估热经济性改善程度，验证技术改造的可行性与经济合理性。

热经济性评估还需结合长期运行稳定性进行综合判断。对关键设备振动值、液位控制稳定度及疏水阀动作频次进行跟踪分析，可判断系统是否在高效状态下保持安全运行。改造后若出现背压下降、闪蒸汽减少及冷源损失降低等现象，说明余热利用路径更加合理^[1]。将优化前后单位发电量供热量、等效煤耗及热效率指标进行对比，可进一步评估系统综合效益。

3.3 节能效益与运行安全性提升分析

轴封加热器疏水系统优化与余热高效回收技术的实施，在节能层面体现为热量利用率的显著提升。强化疏水通畅性与热量梯级利用，轴封蒸汽潜热得以充分回收，机组给水温度提升

幅度增加，减少了抽汽量需求，从而降低循环热损失。煤耗指标随之下降，单位发电量能耗水平得到改善。结合能量平衡测算结果，可量化节约标煤量与减排二氧化碳排放量，体现出显著的经济与环保效益。优化后系统运行更加稳定，热效率曲线趋于平滑，表明余热回收技术在不同负荷工况下均具备良好的适应能力。

运行安全性方面的提升同样具有重要意义。疏水系统结构优化与智能调控技术的应用，使液位控制更加精准，减少水击与倒流风险，降低设备腐蚀与疲劳损伤概率。疏水阀动作更加平稳，蒸汽泄漏现象得到有效抑制，延长关键部件使用寿命。系统压差分布趋于合理，避免因局部阻力过大引发异常振动或管道冲刷。完善联锁保护与在线监测功能，可实现对异常工况的及时预警，提高机组整体安全运行水平。

4 结语

本文围绕汽轮机轴封加热器疏水系统优化与余热高效回收技术展开系统研究，从运行机理分析、流程重构、智能调控到能量梯级利用路径设计进行了深入探讨，并结合工程数据对热经济性与安全性提升效果进行验证。研究表明，优化措施能够显著提高余热利用率，降低机组热耗与能耗水平，增强系统运行稳定性与可靠性，为电厂节能改造与高效运行提供了可行技术路径。

参考文献：

- [1] 刘博源.基于零号高加辅助的火电机组经济灵活优化运行研究[D].华北电力大学(北京),2025.
- [2] 李衍平.一起汽轮机进水事件原因分析[J].电力安全技术,2022,24(01):20-22.
- [3] 郝金波,周永峰.壳管式换热乏汽回收技术在疏水及定排扩容器上的应用[J].低碳世界,2020,10(10):37-39.