

# 动力系统冷凝水回收与梯级利用优化策略研究

乔建安

中铝山东有限公司热电力厂 山东 淄博 255000

**摘要:** 动力系统运行中冷凝水回收与梯级利用意义重大。本文剖析其基础理论,从热力学、流体力学及水质处理角度阐述重要性。诊断关键问题,涵盖回收环节的设备、管道等问题,利用环节的水质与需求矛盾等,以及系统层面的协同性问题,并量化分析根源。提出源头、核心、保障、智能及系统优化策略,旨在提升能源利用效率、降低成本、减少污染,实现冷凝水资源高效利用。

**关键词:** 动力系统; 冷凝水回收; 梯级利用; 优化策略

引言: 在工业生产领域,动力系统作为能源转换与利用的核心,其运行效率直接影响企业成本与环境效益。冷凝水作为蒸汽做功后的产物,蕴含大量余热且水质相对纯净,但传统模式下其回收率低、利用方式粗放,导致能源浪费与环境污染问题突出。本文聚焦动力系统冷凝水回收与梯级利用,通过剖析基础理论、诊断关键问题,提出覆盖全生命周期的优化策略,为提升能源综合利用率、推动工业绿色转型提供理论支撑与实践路径。

## 1 动力系统冷凝水回收与利用基础理论

动力系统在运行过程中,蒸汽在氧化铝蒸发器、管道化系统完成做功或热交换后,会凝结成冷凝水。冷凝水回收与利用对于提高能源利用效率、降低运行成本和减少环境污染具有重要意义。从热力学角度看,冷凝水具有较高的温度和压力,蕴含大量余热。若直接排放,这部分热量将白白损失。通过有效的回收装置,可将冷凝水收集起来,利用其热量为其他工艺环节供热,如预热进入系统的原料水,减少外部热源的投入,实现能源的梯级利用,符合热力学第二定律中能量品质合理利用的原则。在流体力学方面,冷凝水的回收需要考虑管道的合理布局 and 压力损失。合适的管径、坡度以及泵的选型,能确保冷凝水顺畅回流,避免因管道阻力导致冷凝水积存或排放不畅,保障系统稳定运行<sup>[1]</sup>。水质处理也是关键环节,冷凝水虽较为纯净,但可能含有微量杂质和腐蚀性物质。经过适当的过滤、除氧等处理,可使其达到再利用的水质标准,用于锅炉补水等,既节约水资源,又减少因使用新水带来的水处理成本和对环境的压力。

## 2 动力系统冷凝水回收与利用的关键问题诊断

### 2.1 回收环节的核心制约因素

动力系统冷凝水回收受设备、管道、运行调控等多维度制约。设备上,收集设备密封性欠佳,高温冷凝水易溶氧,加剧管道腐蚀,且部分设备换热效率低,显热

回收不足,造成能量浪费。管道系统布局不合理,长距离输送保温差,热损失率达 15% - 25%;管径选型不当,流速过高会引发汽液两相流和水击,损坏接口与阀门。运行调控方面,缺乏精准的压力和液位控制机制,氧化铝液量、蒸汽负荷波动时,冷凝水产量变化,导致收集罐液位和管道压力不稳定,回水质量差,阀门和泵频繁启停,降低设备寿命。此外,冷凝水产生点分散,部分点位无专用回收装置,回收覆盖率低;老旧系统回收设备兼容性差,改造难度大、成本高,这些因素使实际回收率普遍低于设计值。

### 2.2 利用环节的突出矛盾

冷凝水利用环节矛盾集中在水质与用能需求、供需时序、利用成本控制三方面。水质与用能需求上,不同场景水质要求差异大,冷凝水水质波动也大,如锅炉给水要求高纯度,混入杂质未深度处理会致锅炉结垢腐蚀;而精细氧化铝生产对水质要求低,高标准处理增加成本。供需不同品质冷凝水回量波动源于动力系统冷凝水产生量随负荷变化呈周期性波动,而部分用能环节需稳定供能,如炉机、供暖系统需持续稳定的热源,当冷凝水产生量不足时,需启用蒸汽、其他余热加热,增加能耗和运行复杂度;产生量过剩时,多余冷凝水无法及时利用,只能排放造成浪费,增加循环水系统压力。利用成本控制矛盾体现在处理成本与利用收益的平衡上,采用高精度处理技术提升水质可扩大利用范围,但会增加设备投资和运行成本,若处理成本超过新水采购和水处理成本,企业缺乏回用动力,导致冷凝水未得到高效利用。

### 2.3 系统层面的协同性问题

动力系统冷凝水回收与利用的系统层面协同性问题主要表现为各蒸发器及厂内东、南、西线三个区域冷凝水泵房系统之间联通协调、参数匹配失衡及管理机制不完善。三个冷凝水泵房联通协调不畅体现在冷凝水产生

子系统、回收子系统、处理子系统和利用子系统各自独立设计运行,缺乏整体规划,例如因蒸发器开车区域调整,导致南线生产冷凝水多,而西线冷凝水需求量大供量不足,导致区域之间不平衡,冷凝水出口电导率、压力和温度参数两线之间有区别,增加回收平衡难度,水质无法精准匹配利用需求。参数匹配失衡表现为系统流量、压力、温度等关键参数未实现动态协同,如回收泵额定流量与冷凝水产生量不匹配,导致管道压力波动。管理机制方面,缺乏统一的运行监控平台,各环节数据无法实时共享,运维人员难以全面掌握系统运行状态,导致故障排查滞后<sup>[2]</sup>。此外,公司冷凝水系统改扩建过程中未进行东南西线整体全流程评估,新增回收设备、新增用水需求与现有冷凝水系统兼容匹配性不佳,破坏原有系统稳定性,进一步加剧协同性问题。

#### 2.4 问题的量化分析与根源定位

对动力系统冷凝水回收与利用问题的量化分析需依托多维度数据监测和科学计算方法。通过在冷凝水产生点、回收管道、处理设备及利用终端安装流量、电导率仪、温度、压力等传感器,采集连续运行数据,计算设定关键指标数值。回收环节量化指标包括优质、合格冷凝水回收率和设备故障率,例如公司热电炉机系统监测显示,冷凝水实际回收率仅为58%,低于股份对标单位广西华晟的80%,长距离管道热损失率达22%,优质水、合格水泵年故障率为16%。利用环节通过水质检测数据,如电导率、含油量、碱含量等,量化水质超标频率。系统协同性通过参数匹配度量化,如流量匹配度为65%,压力波动幅度达0.3MPa,远超允许范围。根源定位基于量化数据进行因果分析,回收率低的根源为部分管道化3个组产水点未设系统回收流程,占总产生量的20%,且管道保温层老化导致热损失过高;南线C组蒸发器水质超标根源为回收管道与油污渗漏设备交叉,存在泄漏污染,排查消缺难度大;协同性差的根源为缺乏集中监控系统,各子系统控制参数独立设定,未建立联动调控机制,通过量化分析实现问题精准定位,为优化策略制定提供数据支撑。

### 3 动力系统冷凝水回收与梯级利用优化策略

#### 3.1 源头优化:冷凝水生产与收集系统改进

源头优化聚焦冷凝水生产效率提升和收集系统改进,从产水端奠定高效回收基础。在冷凝水生产环节,改善蒸发器换热设备工况,采用高效强化换热管,如波纹管或翅片管,增加换热面积和传热系数,提升蒸汽冷凝效率,使单位蒸汽消耗量产生的冷凝水量提高10%~15%。同时,优化蒸汽系统控制参数,确保蒸汽品质、压力稳定,减少

蒸汽波动及杂质含量,降低冷凝水污染风险。收集系统改进方面,对分散产水点进行就近集中整合,实现优质水、合格水、洗涤水的三级分离,实现所有冷凝水产生点全覆盖。更换老化密封件和阀门,采用耐高温、耐腐蚀的密封材料,提升收集设备和管道密封性,将氧气溶解量控制在0.05mg/L以下<sup>[3]</sup>。优化管道布局,缩短输送距离,采用聚氨酯硬质泡沫保温层并外包防腐层,将热损失率降至5%以内。选用变频式冷凝水泵,根据冷凝水箱液位实时调节泵体转速,合理控制液位,避免液位大幅波动和设备频繁启停。在冷凝水泵入口设置滤网和除油器,初步去除固体杂质和油污,减轻后续处理负担,从源头提升冷凝水回收量和品质。

#### 3.2 核心优化:基于品质分级的梯级利用模式设计

核心优化通过建立基于品质分级的梯级利用模式,实现冷凝水资源和能量的精准匹配利用。首先构建多参数水质分级体系,根据电导率、含油量、悬浮物含量、pH值等指标,将冷凝水划分为优质冷凝水(电导率 $< 30\mu\text{S}/\text{cm}$ )、合格冷凝水(电导率 $30\sim 80\mu\text{S}/\text{cm}$ )和洗涤水(电导率 $> 80\mu\text{S}/\text{cm}$ )三个等级。优质冷凝水直接回用于锅炉给水,因水质接近锅炉给水标准,仅需经过简单除氧处理,可降低锅炉补水处理成本60%以上,同时减少新水消耗;合格冷凝水用于精细氧化铝沸石、拟薄水、微粉等对水质要求中等的生产环节,替代部分加热提温蒸汽和反渗透水,实现能量高效利用;洗涤水用于设备清洗、地面冲洗、循环水补充等低质用水环节,进一步挖掘水资源价值。同时建立供需匹配调度机制,根据各环节实时用能用水需求,动态分配不同等级冷凝水,实现“品质适配、梯级递进”的高效利用模式。

#### 3.3 保障优化:水质稳定控制技术

水质稳定控制技术作为冷凝水回收利用的保障,从污染防控、实时监测、精准处理三个维度构建防控体系。污染防控方面,采用全过程密封技术,在冷凝水产生、收集、输送、处理各环节选用密封性能优异的设备 and 管道,关键节点安装氮气密封装置,隔绝空气与冷凝水接触,将腐蚀速率控制在0.02mm/a以下。针对易混入油污的环节,在收集管道入口安装在线油水分离器,利用重力分离和聚结过滤技术,降低含油量。实时监测体系通过部署在线水质监测设备,对电导率、pH值、含油量、溶解氧等关键指标进行24小时连续监测,数据传输至集中控制系统,当指标超标时自动触发报警机制。精准处理技术采用分级处理工艺,针对不同污染类型定制处理方案,当溶解氧超标时,启用热力除氧或化学除氧装置,通过加热使水温达到 $105^{\circ}\text{C}$ ,去除溶解氧;当硬度超标时,采用阳离

子交换树脂处理,去除钙、镁离子。另外,定期对处理设备维护校准,每季度开展管道内壁腐蚀检测,每年进行全系统水质评估,根据监测数据优化处理药剂投加量和设备运行参数,确保冷凝水水质长期稳定达标,为后续利用提供可靠保障。

### 3.4 智能优化:多参数耦合调控系统构建

智能优化通过构建多参数耦合调控系统,实现冷凝水回收与利用全流程的自动化、精准化调控。系统以工业互联网平台为载体,整合冷凝水产生量、电导率、温度、压力等各用能环节需求等多维度数据,建立数据采集与传输网络,采用5G和工业以太网技术,确保数据传输延迟低于100ms。核心控制模块基于机器学习算法构建多参数耦合模型,通过历史运行数据训练,实现对冷凝水产量变化趋势的精准预测,预测误差控制在5%以内。根据预测结果和实时需求,自动调控运行参数,例如当预测冷凝水产生量增加时,结合水箱水位,提前调大冷凝水泵转速;当某用水流程需求减少时,自动分流冷凝水至其他生产工艺需求环节。系统具备自适应调节功能,当动力系统负荷波动或水质出现小幅波动时,无需人工干预,调控系统可在30秒内完成参数调整,维持系统稳定运行。同时集成故障诊断模块,通过分析设备运行参数和水质数据,精准识别管道堵塞、设备泄漏、传感器故障等问题,定位故障位置并提供维修建议,缩短故障处理时间。此外,系统支持远程监控和运维,运维人员可通过移动端或电脑端实时查看系统运行状态,远程下发调控指令,提升管理效率。

### 3.5 系统优化:全生命周期集成设计

系统优化采用全生命周期集成设计理念,涵盖设计、建设、运行、退出全阶段,实现冷凝水回收与利用系统与动力系统的深度融合。规划阶段开展全面的用能用水需求调研,结合动力系统产能规模、负荷特性和未来扩建计划,制定冷凝水回收利用总体规划,明确回收覆盖率、利用率、能量回收效率等核心指标,确保系统设计与长期

发展需求匹配。设计阶段采用模块化设计方法,将回收、处理、利用系统拆分为多个标准化模块,增强与现有动力系统的兼容性,同时预留扩建接口<sup>[4]</sup>。进行热力学和流体力学仿真模拟,优化管道布局、设备选型和参数匹配。建设阶段严格执行施工标准,加强设备安装精度和管道连接密封性检测,开展水压试验和气密性试验,确保施工质量。运行阶段建立全生命周期数据库,记录设备运行参数、维护记录、能耗数据等,为优化运行和维护提供数据支撑。退役阶段制定绿色退役方案,对设备和管道进行环保拆解,可回收材料利用率不低于80%,同时对场地进行环境评估和修复。通过全生命周期集成设计,实现系统投资成本降低15%-20%,运行效率提升25%以上,延长系统使用寿命至15年以上。

### 结束语

动力系统冷凝水回收与梯级利用对能源综合有效利用,降低新水,节能减排意义非凡。本研究深入剖析了其基础理论、关键问题,并提出系列优化策略,涵盖源头至系统全生命周期。通过源头改进、梯级利用、水质控制、智能调控及全生命周期设计,可有效解决现存问题,提升回收利用率与能源利用效率。未来,需持续探索创新,推动该领域发展,为实现绿色可持续发展贡献力量。

### 参考文献

- [1]李光俊.冷凝水脉冲容积式计量系统研究[J].中国检验检测,2024,32(1):16-19.
- [2]张凡,吴廉巍,张侨禹.蒸汽动力系统在不同工况下的凝水分配协调性分析[J].中国舰船研究,2021,16(2):188-193.
- [3]郭盼春,金华,刘军,等.蒸汽冷凝水自动回收系统的研究[J].现代盐化工,2021,48(3):47-48.
- [4]刘晓刚,邹声华,张杰,等.无动力回收冷凝水提高分体空调机性能的实验[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(3):39-45.