

冷凝水回收系统节能技术分析

张德旺

中核第七研究设计院有限公司 山西 太原 030000

摘要: 核电热力系统冷凝水蕴含大量可回收余热, 高效回用是厂区节能降耗的关键途径。本文结合核电连续化生产工况, 阐述冷凝水物化特性、热能构成及系统节能机理, 分析管网工况、设备适配、水质条件及运维管控等四大节能制约因素。针对现场能耗痛点, 系统探究闪蒸汽回收、疏水变频降耗、水质预处理、管网水力优化四类专项节能改造技术。结合核电安全运行要求, 制定分区优化、设备选型、测控调控及专项运维的适配优化方案, 可为核电厂冷凝水回收系统节能改造与高效运行提供技术参考。

关键词: 冷凝水回收; 节能技术; 余热利用; 管网优化; 核电热力系统

引言: 冷凝水回收是工业热力系统余热利用、节水降耗的重要工艺, 在核电生产体系中尤为关键。核电换热系统运行负荷稳定、连续作业周期长, 冷凝水存量、余热品位高, 具备极高的回收利用价值。当前多数核电配套厂区冷凝水系统受老旧管网、通用设备、粗放运维等因素影响, 存在余热散失、设备能耗偏高、回水利用率低等问题, 系统节能效能难以达到设计标准。为破解现场运行痛点, 提升能源与水资源利用率, 本文结合工程实际剖析系统能耗机理, 梳理主流节能技改技术, 定制适配核电工况的优化方案, 助力核电热力系统低碳高效运行。

1 冷凝水回收系统基础理论与节能机理

1.1 冷凝水物化特性及热能构成分析

工业及核电热力工况下, 蒸汽换热降温相变后形成高温冷凝水, 水质、温度具备固定工况属性。常规饱和和冷凝水温度维持90-140℃, 自带显热占原蒸汽总热值20%~30%, 水质依托热力管道介质纯度, 分为纯净冷凝水、杂质冷凝水两类。核电配套工艺换热系统冷凝水

含盐量低、腐蚀性弱, 可直接回用锅炉给水; 普通厂区换热设备冷凝水易混入铁锈、油污, 水质指标不达标, 无法直接回用。冷凝水热能分为可回收显热、散失式相变潜热两类, 其中管道承压状态下的显热回收利用率最高, 也是现场节能改造的核心回收热源, 闪蒸产生的二次蒸汽潜热损耗量大, 属于重点管控能耗点位。

1.2 冷凝水回收系统组成与运行工艺流程

现场在用冷凝水回收系统由疏水装置、集水罐、输送泵、管网、稳压组件、水处理单元六大模块组成(如图1)。标准运行流程为: 工艺换热器完成换热后, 疏水阀截留高压蒸汽, 仅导出高温冷凝水; 冷凝水依托管路压差汇入集水稳压罐, 完成气液分离; 合格水质冷凝水经由变频输送泵加压, 回流至锅炉房补水环节; 杂质冷凝水先行进入水处理单元过滤除杂, 水质达标后再回用。开式系统直接连通大气, 气液分离便捷但热量散失大; 闭式系统全程密闭承压运行, 可留存二次闪蒸热能, 适配核电连续化热力生产工况。

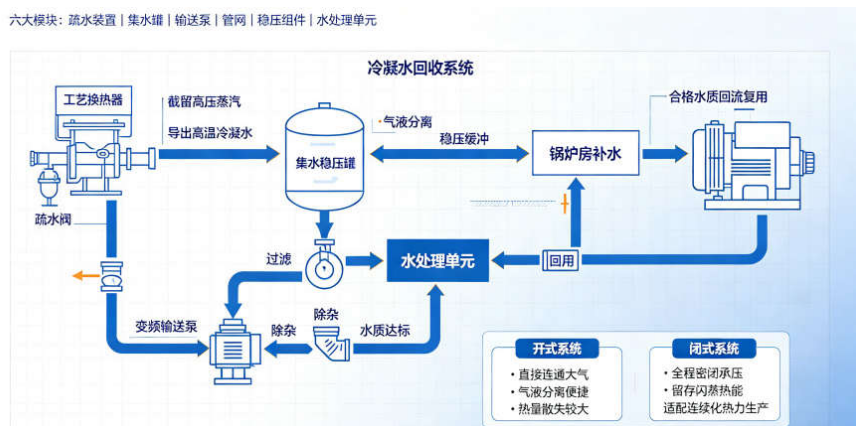


图1 冷凝水回收系统组成及工艺流程图

1.3 系统热能损耗类型及节能核心机理

厂区冷凝水系统能耗主要分为四类：管道外壁自然散热损耗、压差突变引发闪蒸潜热损耗、疏水阀渗漏蒸汽损耗、泵组冗余做功能耗。系统节能核心机理以减损、回用两大维度为主，一是通过密闭管网隔绝大气，消除常压闪蒸热量外泄，锁住冷凝水自带显热；二是优化疏水设备启闭精度，杜绝高温蒸汽随冷凝水混流流失，提升蒸汽利用率；三是依托余压输送原理，利用换热端原有压差输送冷凝水，降低水泵电能消耗；四是闭环回用高温冷凝水，减少锅炉冷水升温燃煤、耗气量，同步节约软化水资源，实现热能、水资源双向节能^[1]。

2 冷凝水回收系统运行节能制约因素

依据核电配套厂区及民用工业热力站点现场运维情况，冷凝水回收系统节能效率无法达设计值，受工艺设备、管网工况、水质、管控四类客观条件制约，具体制约因素如下：（1）管网输送工况制约。厂区冷凝水管网敷设年限不一，老旧管道内壁结垢、锈蚀严重，管道沿程阻力偏大；管网支路繁杂、高低点位落差大，局部压差波动剧烈，高温冷凝水极易产生闪蒸现象，二次热能直接损耗，同时增加输送泵负荷，产生额外电耗。（2）配套设备适配性制约。现场疏水阀、止回阀选型多沿用通用型号，未结合核电换热负荷定制选型，易出现阀门漏汽、排水不畅问题；水泵工频运行居多，无法匹配冷凝水流量动态变化，富余扬程造成无效能耗，设备匹配度不足直接降低系统节能率。（3）冷凝水水质条件制约。换热设备管壁腐蚀、管道杂质混入，会导致冷凝水含铁量、悬浮物超标，无法直接回用于锅炉给水。增设过滤、除铁水处理单元后，会增加系统运维能耗与处理成本，部分工况受场地限制，无法配套净水设备，只能外排冷凝水。（4）现场运维管控制约。多数厂区冷凝水系统独立管控，未联动锅炉换热系统联动调控；日常巡检仅排查设备故障，未定期校准疏水压力、管网压力参数，长期非标工况运行，持续加大系统能耗^[2]。

3 主流冷凝水专项节能改造技术应用

3.1 闪蒸汽耦合回收余热增效节能技术

高温冷凝水降压流动过程中会自发产生占比水量5%~12%的二次闪蒸汽，原有系统多直接排空闪蒸汽，造成大量低品位余热散失，闪蒸汽耦合回收为存量系统首选低成本技改技术，现场应用形式分为三类：（1）闪蒸汽就地换热回收。在换热机房集水罐排气端加装管壳式微型换热器，利用闪蒸汽可将锅炉补给水升温15~30℃，换热器材质选用304不锈钢，适配冷凝水pH值5.5~8.5微量酸碱腐蚀工况，改造无需改动原有输水主干管网，7~15

天即可完成单站点施工，多用于中小型换热分站改造。

（2）闪蒸汽负压并网回收。针对多车间集中换热厂区，加装负压引射装置，可稳定收集各支路95%以上散逸闪蒸汽，并入0.02~0.05MPa低压蒸汽管网，供厂区采暖、预处理设备使用，装置依托管路压差自主运行，无需外接动力设备，适配高低落差超5m、支路分散的核工厂区管网。（3）气液一体式回收改造。更换密闭式稳压集水罐，优化罐内气液分离结构，可将冷凝水闪蒸率降低40%~60%，相较于分体改造，可减少80%以上管网排气点位，规避空气混入冷凝水加剧管道锈蚀问题，多用于闭式系统老旧罐体更换技改项目^[3]。

3.2 高效疏水调压+变频泵送降耗集成技术

原有系统普遍存在疏水阀选型偏差、水泵工频恒速运行、管网压力失衡问题，造成15%~25%的系统无效能耗，现场多采用集成化配套改造，同步优化疏水与输送单元，具体应用内容如下：（1）分级更换适配疏水组件。淘汰通用浮球式疏水阀，根据换热端蒸汽压力，0.8~1.6MPa高压工段选用热静力式疏水阀，0.2~0.8MPa低压末端选用圆盘式疏水阀，彻底杜绝蒸汽窜流、积水滞留问题；同时在管路死角加装旁路疏水点，解决管网停运积水冻管、腐蚀问题，适配核电全年365天连续不间断运行工况。（2）管网分级调压改造。支路加装自力式调压阀，精准平衡各支路±0.03MPa范围内冷凝水输送压力，消除局部高压引发的闪蒸损耗，无需电控调控，适配温度120~180℃、高湿机房恶劣工况，后期运维零部件更换成本降低30%以上。（3）泵送系统变频适配改造。拆除工频控制柜，搭载流量联动变频模块，依托集水罐液位联动调控水泵转速，取消传统回流泄压管路，避免水泵富余扬程做功损耗；一用一备泵组同步加装变频装置，适配30%~100%负荷波动工况，有效降低水泵空载、过载耗电问题，单台水泵节电率可达20%~35%。

3.3 一体化水质净化适配回用节能预处理技术

管道锈蚀、换热介质渗漏造成冷凝水铁离子、油脂、悬浮物超标，是冷凝水无法回用、只能外排的核心原因，水质预处理改造为节能回用前置必备工艺，现场一体化装置应用方式如下：（1）机械式过滤除杂改造。在回水主干管加装高精度磁性过滤器、篮式过滤器，可精准拦截5μm以上管道铁锈、焊渣、固体颗粒物，杂质过滤效率≥98%，装置自带自动排污功能，无需停机拆解清洗，适配常规工业冷凝水初级净化，改造占地不足2m²，可直接对接原有管路法兰安装。（2）除铁净化一体化技改。针对碳钢老旧管网厂区，加装曝气除铁一体化设备，可将冷凝水二价铁离子含量降至0.3mg/L以下，

处理后水质满足热力锅炉补水基础标准,可直接回流锅炉房复用,单厂区年均减少外购软化水用水量500~1200吨。(3)油污分离专项改造。换热设备存在导热油、润滑油渗漏风险的工段,加装聚结式油水分离装置,可将水中油脂含量降至1mg/L以内,全程物理分离水中油脂,不添加化学药剂,避免药剂残留腐蚀锅炉受热面,多用于辅机换热车间冷凝水回用改造。

3.4 管网水力优化降阻节能优化技术

管网布局不合理、内壁结垢、管径不匹配、管路弯头过多,会增大30%~50%沿程阻力,大幅提升泵送能耗,管网水力优化为长效节能技改工艺,现场施工以存量改造为主,极少大面积改线,具体施工内容:(1)管路清垢防腐处理。采用高压水射流无损清洗工艺,清理主干、支管内壁水垢、腐蚀附着物,清洗后管壁粗糙度降低40%~50%,涂刷耐高温防腐涂层,有效减小流体流动阻力;老旧腐蚀支管直接更换无缝耐热钢管,规避局部渗漏、压降偏大问题。(2)管路节点优化整改。拆除管路多余截止阀、异径接头、直角弯头,替换为大弧度弯头、直通式管件;统一支路管径,消除管路突扩、突缩结构,稳定冷凝水流速波动范围在 $\pm 0.2\text{m/s}$,减少局部涡流造成热能损耗。(3)管网高程与泄水优化。梳理厂区管网高程,调整局部倒坡、低洼点位,增设自动排气阀、低点泄水阀,彻底解决管内气堵、积水问题,保障冷凝水依靠余压自流输送,水泵启动频次减少25%以上,从水力层面有效降低系统能耗^[4]。

4 适配核电工业场景冷凝水系统节能优化方案设计

核电配套工艺换热、辅机供热冷凝水系统具备负荷连续、介质纯度要求高、运维标准严苛、不可随意停机改造特点。结合核电工况安全优先、节能为辅原则,针对性制定落地式优化方案,兼顾运行稳定性与能耗管控,具体方案如下:(1)厂区工况分级适配优化。结合厂区热源点位分区管控,划分核岛辅机换热区、常规岛供热区、后勤公用换热区三大板块。辅机区域冷凝水纯度高、压力稳定,直接采用闭式全回收模式,不增设水处理单元;公用换热区管网老旧、介质易污染,采用分质回收模式,达标回水接入锅炉给水系统,超标冷凝水单独收集,就近厂区循环水复用。同时核定管网高低落差、支路压差参数,划定系统运行压力阈值,规避超负荷运行产生闪蒸损耗。(2)设备成套选型优化设计。摒弃通用民用热力设备,选用核电专用耐高温承压配件。

疏水装置按压力分级选型,高压换热端选用核电专用锻钢疏水阀,低压末端配置防堵塞调压疏水组件;回水输送泵选用耐磨屏蔽泵,适配机房高温潮湿环境,泵组统一配置工频变频双模式控制柜,低负荷时段变频运行。集水罐更换带分压隔层密闭罐体,提升气液分离效率,减少空气混入腐蚀管路。(3)就地简易测控调控优化。贴合核电自控合规标准,搭建就地联动测控体系,不在主控系统新增大量程序模块。在主干管路加装压力、液位、温度就地传感模块,联动调压阀、排气阀自动启停;设置高低液位联锁保护,液位超标自动启停备用泵,避免水泵空转、满管溢流耗能,适配核电系统联锁安保要求。(4)专属运维管控优化设计。制定核电冷凝水专项运维制度,固定月度阀门校验、季度管网测压、年度管路清垢作业流程;建立设备台账,记录疏水阀启闭参数、水泵运行能耗数据;划分运维责任分区,重点管控辅机回水关键点位,杜绝私自调整管路压力、阀门开度等违规操作,保障系统长期处于设计节能工况运行^[5]。

结束语:本文结合核电工业生产特性,完成冷凝水回收系统节能机理、制约因素及技改技术的系统性分析,明确各类节能技术的适用场景与应用优势。针对核电安全严苛、连续运行的特殊工况,形成适配性强的系统优化方案,有效解决管网能耗、设备适配、水质回用及运维管控等现场难题。通过系统化节能改造,可显著降低热力系统热能与电能损耗,提升冷凝水回用率。研究成果可有效改善核电厂热力系统运行能效,为同类工业冷凝水系统节能升级提供工程借鉴。

参考文献

- [1]胡景,喻君龙,宋梅芽,孙七林.一种制盐冷凝水低温余热回收工艺应用分析[J].盐科学与化工,2026,55(2):22-25.
- [2]陈之东.反渗透浓水回收系统能耗分析与节能降耗措施[J].中国科技期刊数据库工业C,2026(1):196-199.
- [3]张迪,刘尧祥.化工园区蒸汽冷凝水回收利用技术研究[J].科技与创新,2026(2):105-108.
- [4]马学宏,程永强,聂颖,刘逸,陈亮,徐进兵,钱雪峰.冷凝热回收技术在水(地)源热泵机组测试系统中的应用[J].制冷,2025,44(3):68-72.
- [5]许亦杰,刘龙,付佳兵,周赛涛,张嘉兴,魏沈冰.M310核电厂核辅助蒸汽冷凝水回收系统的放射性风险分析与优化措施[J].电工技术,2025(9):255-258.