

火电厂汽轮机冷端系统优化改造及降煤耗实践分析

张 昊

焦作煤业（集团）冯营电力有限责任公司 河南 焦作 454000

摘 要：火电机组冷端系统运行质量对机组热力循环效率及煤耗水平产生直接牵引作用。本文从冷端系统组成结构与热量传递机理出发，剖析凝汽器换热衰减、循环水系统阻力增大及真空密封失效等典型运行缺陷的成因，并围绕换热体系、输水管路、真空抽气及辅助配套四个层面提出针对性优化改造方法。同时梳理运行工况精细化调控、设备运维管理优化、多子系统协同控制及长效节能管理体系构建等降煤耗实践路径，为火电机组通过冷端改造实现节能降耗提供技术参考。

关键词：汽轮机冷端系统；优化改造；降煤耗；协同调控；运行管控

引言：火电机组能量转换效率始终受到汽轮机冷端系统运行状态的深刻约束，冷端各环节工况波动会沿热力循环链条逐级传导，最终在燃煤消耗端形成能耗增量。当前大量在役机组冷端设备普遍存在换热面污垢堆积、循环水输送冗余损耗及真空密封性能衰退等问题，导致排汽背压偏高、辅机电耗攀升，机组煤耗持续走高。深入梳理冷端系统运行机理与能耗关联路径，系统推进设备优化改造与运行管控协同优化，对于挖掘火电机组节能潜力、降低发电煤耗具有重要工程实践价值。

1 汽轮机冷端系统基础构成与运行机理

1.1 冷端系统核心组成结构

汽轮机冷端系统是火电机组热力循环的重要配套体系，整体由多项关键热力设备与辅助管路设备组合而成。凝汽器作为系统主体换热设备，承担蒸汽热量交换与工质回收的关键作用。循环水设备持续为换热过程输送冷却水源，搭建完整的热量交换介质通道。真空设备组稳定维持系统内部压力状态，阻挡外界空气渗入干扰机组热力循环^[1]。疏水设备、补水设备及各类调控管路，完成系统内部水汽工质的疏导与补给。各类设备依据热力流程有序排布，搭建完整闭式循环架构。各单元设备独立运行且相互配合，适配汽轮机排汽冷却的实际工况需求，直接作用于汽轮机排汽冷却效率与内部压力稳定性。

1.2 冷端系统工作运行原理

火电机组运行期间，汽轮机完成做功后的低压排汽持续输入冷端系统内部。低温循环水流经凝汽器换热管路，和管路外侧高温蒸汽产生热量交换。蒸汽释放汽化潜热后发生相变，气态水汽转化为液态凝结水，机组内部压力逐步降低。循环水体吸收热量后温度升高，输送至外部冷却设施完成散热，降温水体回流管路继续参与换热作业。凝结生成的液态水输送至前端热力系统，重

新投入锅炉产汽与机组做功流程。热量传递与工质相变形成闭环流程，持续维持汽轮机低压缸出口低压环境，支撑机组热力循环持续运转。

1.3 冷端系统与机组煤耗的关联机制

冷端系统运行工况直接改变汽轮机排汽压力与换热能力，干预机组整体热力循环效率。换热工况产生波动时，汽轮机排汽凝结质量发生改变，机组有效做功能力随之出现浮动。机组维持恒定发电负荷的过程中，锅炉燃煤燃烧体量会跟随机组做功效率自动调整。优质的真空环境能够缩减热力循环能量损耗，工况偏移则会持续增加循环能耗。机组能耗出现上涨后，锅炉燃煤投入量会被动提升，弥补机组做功效率不足产生的负荷缺口。冷端设备的工况变动会顺着热力循环链条传导至燃煤消耗环节，形成设备运行状态与机组煤耗的联动变化关系。

2 汽轮机冷端系统运行现存问题与成因分析

2.1 凝汽设备运行缺陷分析

凝汽器换热面长期接触水汽介质与循环水体，表面会逐步附着污垢与杂质沉积层。污垢堆积会缩小换热管路有效接触面积，弱化管壁热量传导能力。换热热阻出现持续增长，蒸汽与冷却水之间的热量交换速率出现明显下降。设备长期运行会引发管路内壁轻微腐蚀，造成管壁厚度出现不均匀变化，干扰换热过程的稳定性^[2]。部分管路流通空间会出现缩窄问题，冷却水流通速率受到限制，整体换热通量无法匹配机组额定运行需求。换热状态的持续弱化会造成排汽凝结不充分，机组内部热力环境出现持续性偏差。

2.2 循环水系统运行短板梳理

循环水系统管路长期服役会产生内壁结垢与锈蚀堆积，降低管路内部流通截面，改变水体输送流速与流量参数。水体输送过程中会产生额外沿程阻力，造成冷

却水输送动力损耗增加。系统水泵长期处于固定工况运转,出力匹配性无法适配机组变负荷运行状态,输水流量存在冗余或不足的情况。冷却水取水与回水流程管控精度不足,水体温度调控均匀性无法保障,部分换热区域出现冷却力度不匹配的问题。水体杂质过滤装置运行效能衰减,细小颗粒物持续进入循环管路,持续加剧管路及凝汽器设备的污染程度。

2.3 真空系统运行异常诱因剖析

真空系统各类密封构件长期受温度交变与压力波动影响,会产生老化、形变与磨损问题,密封紧密性出现下降。系统管路连接部位、阀门构件会出现细微缝隙,外界空气可以透过缝隙渗入系统内部。空气持续堆积会提升系统内部压力,破坏低压运行环境,削弱排汽凝结效果。真空抽取设备长期运行会出现机械性能衰减,抽取能力逐步下降,无法及时排出系统内部积聚的不凝结气体。内部气体滞留量持续增加会覆盖换热表面,进一步阻碍热量交换进程,造成真空参数持续偏离额定运行标准。

2.4 系统匹配性不足对机组能耗的影响机理

冷端各子系统独立运行的调控模式,会造成设备运行参数无法形成动态适配,整体运行协同度处于较低水平。凝汽器换热效率波动、循环水流量不稳与真空参数偏移会形成叠加效应,持续破坏机组热力循环的平衡状态。热力循环过程出现不可逆能量损耗,机组有效热能转化比例持续降低。电网负荷保持稳定的运行条件下,热力利用效率的降低会迫使锅炉提升燃料燃烧总量,保障机组输出功率满足负荷需求。子系统运行参数的动态失衡,会持续放大机组运行能耗,造成燃煤资源的无效消耗,制约机组节能运行水平的提升。

3 汽轮机冷端系统优化改造及实践方法

3.1 凝汽器换热体系优化实操方法

凝汽器换热性能衰减多来源于换热表面污层堆积、管路结构损耗与内部流场分布不均,针对性技术改造可从清洁处理、结构整改与防护升级多个维度推进。依托物理高压冲洗与高效化学介质清洗结合的处理模式,对凝汽器换热管路内壁开展全方位清洁作业,逐层剥离顽固污垢、生物黏泥与金属氧化物,恢复换热管壁洁净度与原始导热能力^[3]。对长期运行出现管壁减薄、局部蚀坑与形变扭曲的换热管路进行精准更换,统一管路通流规格,弱化局部换热阻滞与热量传递不均的问题。结合机组实际热力流通特性调整换热管路排布密度,优化内部蒸汽流通通道,改善低压排汽进入腔体后的扩散状态。增设精细化导流结构引导蒸汽均匀覆盖全部换热区域,消除腔体

内部流通死角,提升整体换热面积的有效利用率。

3.2 循环水输送系统优化实操方法

循环水输送系统优化聚焦通流能力提升、动力匹配调整与水质管控升级,解决管路通流损耗与工况适配不足的问题。对全线循环水输送管路开展系统性运维清理,彻底清除内壁锈蚀沉积物与固化污垢,修复管路形变、局部堵塞及接口错位等结构缺陷,恢复管路标准通流截面,降低水体输送过程中的沿程阻力。升级传统简易过滤设备,配置高精度多级净化装置,强化水体悬浮颗粒物、杂质胶体的拦截过滤能力,减少固态杂质持续进入循环管路引发的二次污染问题。改造水泵组调控逻辑,摒弃固定工频运行模式,依托机组负荷变动与凝汽器换热需求动态调节水泵输出流量,让输水体流量适配不同工况下的冷却需求。重新规划厂区取水与回水布置结构,均衡各支路冷却水分配体量,弱化管理路远近排布带来的冷却温差。

3.3 真空密封抽气系统优化实操方法

真空密封抽气系统优化围绕密封缺陷治理、抽气能力提升与压力稳态调控开展,改善系统低压环境失衡问题。对系统法兰连接位置、阀门密封接触面、管路插接节点等关键渗漏点位开展全域排查,批量更换弹性失效、材质老化与形变破损的密封构件,填充精密密封填料,封堵所有细微透气缝隙,阻断外界空气向内渗透的通道。对运行效率衰减的抽气设备开展整机检修或设备更新,优化叶轮结构与腔体负压形成机制,提升系统内部不凝结气体的抽取速率与排出体量。结合内部气体聚集规律调整抽气点位布局,在蒸汽流通盲区与气体滞留高发区域增设辅助抽气接口,彻底清除腔体内部积聚的惰性气体与空气杂质。细化真空压力调控逻辑,匹配机组变负荷运行状态微调抽气设备运行强度,稳定系统内部负压区间,规避压力大幅波动对蒸汽凝结进程的干扰。

3.4 冷端辅助配套系统优化实操方法

冷端辅助配套系统优化聚焦工质输送、状态监测与协同调控,补齐主系统运行的配套短板。对疏水与补水系统各类阀体、管路及调压构件开展系统性调校整改,疏通工质流通通道,稳定水汽输送通量,规避疏水不畅、补水滞后等工况问题,保障冷端工质循环持续顺畅。优化辅助管路通流结构,整改局部节流、管路弯折过度等影响流通效率的结构问题,让辅助系统参数变动节奏适配主系统换热与负压调控需求。扩充冷端系统监测点位布局,新增关键管路温度、介质压力与水体流量采集终端,拓宽运行数据采集范围,实现设备运行状态的精细化感知。重构辅助设备联动调控逻辑,打破子系

统独立运行的局限,强化换热、输水、真空各单元的运行匹配度,弱化工况偏移带来的系统失衡问题。细化辅助设备运维管控流程,定时排查设备运行隐患,及时处理构件老化、参数偏移等隐性问题,保障整套冷端系统维持高效协同的运行工况。

4 冷端系统优化降煤耗实践运行管控

4.1 机组运行工况精细化调控方式

火电机组不同负荷区间的运行状态会持续改变冷端换热环境,精细化调控能够贴合动态工况匹配最优运行参数。依托机组负荷变动规律调整冷端系统运行参数,依据电网负荷波动幅度微调冷却介质输送体量与系统负压区间。贴合环境温度变化规律调整冷端运行模式,适配四季温度差异带来的换热效率变动,稳定凝汽器内部换热水平^[4]。细化机组低负荷、高负荷与变负荷过渡阶段的调控标准,弱化工况切换过程中参数大幅波动的问题。优化机组热力参数调控精度,缩小排汽压力、循环水温等关键参数的波动范围,让热力循环始终维持高效运转状态,减少热力损耗引发的燃料消耗增量。

4.2 冷端系统设备运维管理优化路径

常态化运维管理可以持续稳固冷端系统优化改造成果,维持设备长效高效运行状态。建立周期化设备巡检机制,重点排查换热管路密封状态、水泵运行工况与抽气设备工作状态,及时处置设备隐性故障。制定分级设备养护标准,针对易损耗密封构件、过滤装置、换热管路等部件设定差异化养护周期,延缓设备性能衰减速度。摒弃统一化养护作业模式,结合设备运行时长与工况损耗程度开展针对性养护作业。记录设备运行参数变化规律,积累设备工况变动数据,支撑养护方案动态调整,规避设备性能退化引发的冷端换热效率下降问题。

4.3 系统运行协同性优化调控方法

冷端多子系统独立调控模式容易产生参数匹配偏差,协同调控可以消除系统运行失衡带来的能耗损耗。搭建各子系统参数联动调控逻辑,让循环水流量、真空压力、疏水通量等参数形成动态匹配关系。贴合凝汽器实时换热状态调整输水与抽气强度,规避单一系统参数过高或过低造成的资源浪费。平衡各子系统运行负荷,

避免局部设备高负荷运转、其余设备低效运行的不合理工况。打通各设备运行数据传输通道,实现工况参数实时互通,让系统整体运行状态适配机组热力循环的动态需求,缩减循环过程中的无效能量损耗。

4.4 长效节能降耗运行管理体系构建

稳定的管理体系能够固化节能运行机制,持续挖掘冷端系统降能耗潜力。搭建适配优化改造后设备性能的运行管理制度,明确各类设备操作规范与工况调控标准。细化岗位运行管控职责,落实设备日常操作、巡检养护与参数调控的各项工作要求。建立工况参数动态复盘机制,跟踪冷端系统运行状态与能耗变化关联规律,持续调整运行调控策略^[5]。完善设备故障处置流程,缩短设备异常工况的持续时长,减少异常运行状态带来的能耗增量。依托标准化管理模式规范机组运行流程,让冷端系统始终保持最优节能运行状态。

结束语

汽轮机冷端系统作为热力循环的终端换热与工质回收环节,运行品质优劣直接左右机组整体煤耗水平。通过凝汽器换热面治理、循环水输配系统疏通、真空密封修复及辅助系统协同优化等改造手段,配合运行工况精细调控与设备长效运维管理,能够有效压缩排汽背压、降低辅机电耗,使燃煤消耗回归合理区间。构建系统化的节能运行管控体系,让冷端各子系统在动态工况下保持参数匹配与高效协同,是火电机组持续挖掘降煤耗空间的关键所在。

参考文献

- [1]鲍旭东,魏君安,郭兆宝,等.核电汽轮机冷端系统设计对运行的影响分析[J].中国核电,2025,18(6):841-846.
- [2]周士博,庞凯元,张宝琴.火电机组汽轮机冷端系统优化改造技术分析[J].仪器仪表用户,2024,31(5):77-79.
- [3]王克.大型火电机组汽轮机冷端系统优化改造技术浅析[J].特种设备安全技术,2022(5):14-16.
- [4]刘萍.火电厂凝汽式汽轮机冷端运行优化探究[J].电力设备管理,2024(3):59-61.
- [5]丘敏.资源综合利用型电厂汽轮机冷端优化运行的实现[J].中国新技术新产品,2022(16):76-78.