

火电厂凝汽器真空度下降原因分析及检修技术改进

曾文龙¹ 李 勇²

1. 华电新疆红雁池发电有限公司 新疆乌鲁木齐 830002

2. 华电新疆准东五彩湾发电有限公司 新疆昌吉 831100

摘要: 凝汽器真空度维系火电厂汽轮机组热力循环效率与运行安全。系统解析真空度下降诱因, 涵盖真空系统密封性失效、循环水热交换失配、轴封气幕功能紊乱、换热面劣化及水位调控失准等因素, 提出基于多学科理论的检修技术革新方案。通过强化系统密封性诊断、优化流体传输网络、革新轴封动力学控制、实施表面工程防护及构建智能水位调控体系, 提升凝汽器运行效能, 为电力生产的稳定高效提供技术支持。

关键词: 火电厂凝汽器; 真空度衰减; 致因机理; 检修技术创新

引言

在火电机组热力循环系统中, 凝汽器承担蒸汽凝结与真空维持双重功能, 其真空度指标直接关联机组热耗率与发电效率。依据热力学第二定律, 真空度下降致使汽轮机排汽焓值升高, 热力循环有效焓降缩减, 机组经济性显著降低。从动力学角度分析, 真空异常引发的排汽压力波动, 可能诱发汽轮机转子振动失稳, 威胁设备安全运行。因此, 探究真空度下降的复杂致因, 研发系统性检修技术改进策略, 对提升火电厂运行可靠性与能源利用效率具有重要意义。

一、凝汽器真空度下降原因分析

(一) 真空系统泄漏

真空系统泄漏现象的本质是基于压力梯度驱动的气体分子流传输过程, 其遵循分子运动论与流体力学相关理论^[1]。当系统内部压力低于外界大气压时, 气体分子将通过密封缺陷处的缝隙, 以克努森流(分子平均自由程大于缝隙尺寸)或粘滞流(分子平均自由程小于缝隙尺寸)的形式进行传输。

在法兰连接部位, 长期处于热-机械疲劳的复杂工况下, 螺栓预紧力会逐渐松弛。根据材料力学理论, 密封垫片在持续应力作用下, 会发生应力松弛与蠕变变形, 导致其压缩回弹性能显著下降。依据密封理论, 当密封比压无法达到介质压力的特定倍数要求时, 密封失效, 泄漏现象随即发生。在实际工程案例中, 某电厂因法兰密封失效, 空气泄漏致使凝汽器真空度在短时间内从正常的95kPa降至90kPa以下。

阀门密封面在高速汽流冲刷与颗粒磨损的协同作用

下, 其表面微观形貌发生显著改变。从表面工程学角度分析, 粗糙度参数Ra值大幅增加, 形成大量微米级的泄漏通道。这些通道为气体分子的渗透提供了路径, 加剧了真空系统的泄漏。管道焊缝处, 焊接残余应力与介质腐蚀的交互作用, 成为引发应力腐蚀开裂的关键因素。根据断裂力学理论, 裂纹在应力与腐蚀介质的共同作用下, 以一定速率不断扩展, 最终成为气体泄漏的主要路径。这些泄漏点的存在, 打破了凝汽器内汽-气两相的动态平衡, 随着不凝结气体的不断积聚, 真空度持续衰减。

(二) 循环水量不足

循环水系统的热交换过程严格遵循传热传质双膜理论与牛顿冷却定律。当循环水量不足时, 单位时间内循环水带走的蒸汽凝结潜热大幅减少, 直接导致排汽温度升高, 蒸汽分压增大, 进而使凝汽器真空度降低。

从流体力学角度深入分析, 循环水泵性能衰退是导致流量不足的关键因素。叶轮在长期运行过程中, 受汽蚀损伤影响, 叶片表面形成蜂窝状蚀坑, 严重改变叶轮流道几何形状。根据泵的水力性能理论, 这将致使泵的扬程-流量曲线下移, 泵的整体效率显著降低。在实际案例中, 某电厂循环水泵因叶轮汽蚀严重, 其实际流量远低于设计流量, 无法满足凝汽器的冷却需求。同时, 泵轴密封磨损使得间隙增大, 泄漏量增加, 进一步降低了有效流量输出。

在管道系统中, 循环水中的碳酸钙、硫酸钙等盐类物质, 在一定条件下会在管壁沉积形成垢层。从传热学角度来看, 垢层的导热系数远低于金属管材, 极大地增加了沿程水头损失^[2]。此外, 循环水池水位过低会恶化

水泵的吸入条件，导致水泵进口处产生旋涡，引发流量波动与气蚀现象，严重影响循环水系统的稳定运行，进而削弱凝汽器的冷却效果。

（三）轴封供汽异常

轴封系统的气幕密封性能受到流体动力学与热力学的双重机制制约。依据伯努利方程，当轴封供汽压力低于临界值时，外界空气与汽轮机内部形成的压力差将突破气幕防护，导致空气倒灌进入凝汽器。

轴封加热器的故障对供汽稳定性有着显著影响。换热管内水垢沉积会使传热热阻大幅增加，根据传热学原理，这将导致蒸汽冷凝效率下降，造成供汽温度升高、压力波动。疏水不畅形成的水塞现象，阻碍了蒸汽的正常流通，使得气幕压力分布不均，局部密封失效。

传统轴封供汽系统采用的PID控制策略存在固有缺陷。在机组负荷快速变化的工况下，其比例-积分-微分参数难以快速适应，调节滞后明显，导致供汽压力波动幅值较大，严重削弱了气幕的密封效果。例如，在某机组负荷快速变化过程中，轴封供汽压力波动超出允许范围，致使大量空气进入凝汽器，真空度迅速下降。

（四）凝汽器结垢腐蚀

凝汽器换热面的结垢与腐蚀是一个复杂的物理化学耦合过程。在结垢方面，循环水中的钙、镁离子在温度与pH值变化的条件下，遵循溶度积原理发生结晶析出。当水中相关离子浓度达到一定阈值，且温度、pH值等条件改变时，碳酸钙过饱和度急剧增加，从而形成以方解石为主的垢层。垢层的多孔结构不仅降低了传热效率，还为腐蚀介质提供了富集场所。

在腐蚀过程中，铜管表面因存在 α -黄铜与 β -黄铜相结构差异，形成微电池效应。在溶解氧与氯离子等腐蚀介质的作用下，发生脱锌腐蚀与点蚀。从材料腐蚀学角度分析，随着腐蚀的进行，铜管管壁厚度逐渐减薄。在实际案例中，某电厂凝汽器铜管因腐蚀严重，部分区域出现穿孔泄漏，严重破坏了蒸汽凝结过程的相平衡，导致真空度急剧下降。同时，腐蚀产物的堆积进一步加剧了结垢倾向，形成恶性循环。

（五）凝汽器水位异常

凝汽器水位与真空度之间的耦合关系涉及流体静力学与传热学原理。当水位过高时，部分换热管束被淹没，有效传热面积减少。根据傅里叶导热定律，传热速率降低，蒸汽凝结延迟，排汽压力上升。从流体动力学角度分析，过高水位还会改变凝汽器内蒸汽流动特性，形成局部涡流区，增加流动阻力，导致蒸汽滞留量增加^[3]。

水位过低则会影响凝结水泵的吸入性能。当水泵进口压力低于饱和蒸汽压时，会发生汽蚀现象，泵的容积效率下降，流量波动幅度增大。凝结水流量的不稳定，使得凝汽器热负荷调节失衡，间接影响真空度的稳定性。此外，水位快速波动产生的水锤效应，其压力峰值对管道与设备造成严重机械冲击，加剧了系统的运行风险。如某机组因凝汽器水位过高，真空度从正常的94kPa降至90kPa左右，对机组运行产生了不利影响。

二、检修技术改进措施

（一）加强真空系统密封性检查

为提升真空系统密封性，需构建多维度检测与强化体系。基于分子流理论，氦质谱检漏技术利用氦气低分子量、高扩散系数的特性，在真空环境下能够以分子流形式快速渗透泄漏点。通过质谱仪对离子化氦气的精确检测，可实现高精度的泄漏定位。结合质谱成像技术，能够直观呈现泄漏区域的浓度分布，为后续修复工作提供精确依据。红外热成像技术则基于斯特藩-玻尔兹曼定律，通过检测密封面因气体泄漏产生的对流换热异常，捕捉细微的温度场变化，从而识别潜在泄漏点。

在密封结构强化方面，法兰连接采用梯度密封设计理念。内层金属波齿垫片利用弹性变形提供初始密封应力，外层膨胀石墨缠绕垫片通过层间滑移补偿热变形，实现微位移自适应，有效提升密封性能^[4]。阀门密封面采用激光熔覆WC-Co涂层技术，基于激光快速熔凝原理，形成纳米晶结构，显著提升表面硬度与耐冲刷性能。管道焊缝采用超声波相控阵检测技术，通过电子控制阵列探头声束角度与聚焦深度，实现缺陷的三维成像检测。配合脉冲TIG焊接工艺，减少焊接热输入，降低残余应力，提升接头致密性，从根本上增强真空系统的密封性。

（二）优化循环水系统

循环水系统的优化需整合流体力学、材料科学与智能控制理论。基于CFD数值模拟，建立循环水系统三维湍流模型，采用先进的湍流方程对不同工况下的流场分布进行精确模拟，从而优化管道布局与管径配置，有效降低局部阻力。

永磁同步变频调速技术应用矢量控制算法，实现水泵转速的精确调节，使泵运行点与管网特性曲线高效匹配，大幅提升泵的运行效率。管道智能清垢装置基于电磁脉冲原理，通过产生特定强度的脉冲电场，使水垢晶体结构发生转变，降低垢层附着力，实现管道的在线清垢。纳米过滤膜采用聚酰胺复合结构，凭借其独特的孔径设计，对水中离子和悬浮物具有高截留率，有效净化

循环水水质。

水质智能调控系统采用模糊-神经网络混合控制策略,以多个水质参数为输入,通过神经网络强大的非线性映射能力,结合模糊规则库,实现阻垢剂、缓蚀剂的动态精准投加,稳定控制循环水浓缩倍率。循环水池补水采用LSTM(长短期记忆网络)预测模型,输入多种相关变量,利用其对时序数据的强大处理能力,实现未来补水量的精确预测,保障循环水系统的稳定运行。

(三) 改进轴封系统

轴封系统的改进融合了流体动力学与智能控制技术。模型预测控制(MPC)算法基于轴封供汽系统状态空间模型,通过滚动优化策略,对未来的负荷变化进行多步预测,并采用二次规划求解最优控制序列,有效控制供汽压力波动,提升轴封气幕的密封性能。

轴封加热器采用螺旋折流板与微通道复合结构,通过优化传热路径和增大传热面积,显著提升传热性能,降低蒸汽过冷度。自适应自密封轴封技术利用高压缸排汽的余压与余热,通过压力-流量串级控制回路,精确调节气动调节阀开度,实现供汽压力的自平衡调节,减少对外部供汽的依赖。

智能疏水阀组基于差压-温度双参数检测,采用支持向量机(SVM)算法对蒸汽-水两相流流型进行准确识别。当检测到水塞趋势时,能够以极快的响应速度开启疏水阀,消除背压波动,保障轴封系统的稳定运行。

(四) 定期清洗凝汽器

凝汽器清洗防护体系集成了生物化学、材料表面工程与大数据技术。微生物酶清洗技术利用纤维素酶、蛋白酶等的特异性催化作用,通过酶-底物复合物的形成,加速有机物分解,实现对软质有机垢的高效清洗。高压水射流清洗采用超高压水流,结合旋转喷头,产生强大的冲击应力,能够有效破除硬质无机垢层结构。化学螯合剂与金属离子形成稳定络合物,实现残余垢质的高效溶解。

磁控溅射沉积纳米TiN-AlN复合涂层,在氩气等离子体环境下,通过离子轰击实现原子级沉积,形成梯度结构涂层,降低表面能,有效抑制水垢附着。在线监测系统利用光纤光栅传感器实时采集换热管参数,通过卷积神经网络对数据进行特征提取,结合灰色预测模型,实现结垢腐蚀趋势的超前预警,为凝汽器的维护提供科学依据。

(五) 优化水位控制系统

水位控制系统的升级依赖于多传感器信息融合与智

能决策技术,采用D-S证据理论融合多种水位计数据,通过构建基本概率分配函数,降低测量误差,提高水位测量的准确性和可靠性^[5]。自适应模糊神经网络控制算法以多个运行参数为输入层,经隐含层进行模糊推理,输出层调节变频器频率,实现水位的快速响应和精确控制。

凝结水泵采用变频调速与液力耦合器协同控制,基于泵相似定律与管网特性曲线,通过遗传算法优化组合控制参数,提升泵运行效率,确保其在高效区稳定运行。异常预警系统采用长短时记忆网络对水位、流量、压力等时序数据进行深入分析,当检测到异常趋势时,触发基于规则引擎的应急处理程序,保障系统安全稳定运行。

结论

火电厂凝汽器真空度下降是一个多因素耦合作用的复杂过程,涉及流体力学、传热学、材料学、控制理论等多学科领域。通过深入剖析真空系统泄漏、循环水量失衡、轴封供汽异常、换热面劣化及水位调控失准等问题的致因机理,基于多学科理论提出的系统性检修技术改进方案,实现了从故障诊断到修复优化的全流程技术升级。这些技术措施的应用,不仅提升了凝汽器运行的可靠性与经济性,也为同类设备的维护管理提供了具有重要参考价值的技术路径。随着智能化与数字化技术的不断发展,未来凝汽器检修技术将朝着预测性维护、自主决策的方向持续演进,进一步提高火电厂的运行效率与能源利用水平,为电力行业的可持续发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 邢树涛,赵锐.火电厂循环水系统优化及水资源高效利用[J].中国科技期刊数据库 工业A,2025(3):069-072.
- [2] 朱小刚.火电厂汽轮机真空系统的检修与维护策略的探讨[J].中国科技期刊数据库 工业A,2025(2):127-130.
- [3] 苏玉凤,金浩,马骁,程军,尹力.火电厂循环冷却水智慧监控系统的研发及应用[J].电力与能源,2024,45(6):726-728766.
- [4] 赵杰.火电厂循环水系统深度处理与再生水利用技术探讨[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024(11):142-145.
- [5] 廖祖慧.火电厂循环水系统工程改造技术探析[J].电力设备管理,2024(10):271-273.