

蒸汽轮机凝汽器铜管泄漏原因及堵管工艺

陈波豫

大唐惠州热电有限责任公司 广东 惠州 516123

【摘要】：凝汽器作为蒸汽轮机重要换热设备，其铜管运行环境复杂，长期受腐蚀、冲刷及振动影响，易产生泄漏隐患，导致真空下降与系统效率波动。现场运行中泄漏点定位困难、处置滞后等问题逐渐显现。基于运行数据与检修记录，对泄漏机理进行分类识别，结合管材状态与缺陷特征匹配堵管工艺，形成标准化处置路径。通过优化封堵方式与工艺参数控制，泄漏扩散得到有效抑制，机组真空稳定性明显改善，设备运行可靠性持续提升。

【关键词】：凝汽器；铜管泄漏；腐蚀机理；堵管工艺；真空稳定

DOI:10.12417/2705-0998.26.12.007

引言

蒸汽轮机运行状态高度依赖凝汽器换热性能，铜管作为核心换热元件，一旦发生泄漏，将直接影响冷却效率与系统真空水平。运行周期延长后，水质条件、流体冲刷及结构振动等因素叠加作用，使局部区域逐步形成薄弱环节。泄漏初期往往不易察觉，待参数异常显现时，缺陷已具备扩展趋势，增加处理难度。常规检修方式在应对多点、小孔径泄漏时存在效率不足问题，现场处置亟需更加精准与高效的技术路径。围绕泄漏成因与工艺响应之间的匹配关系展开分析，有助于提升处理针对性，使设备运行状态保持在可控区间。

1 凝汽器铜管运行状态与缺陷表现特征

1.1 换热管束受力与流动环境分析

凝汽器管束长期处于低压高湿的冷端环境，内部冷却水呈高速流动状态，流体冲刷力沿管壁形成持续剪切应力，叠加蒸汽侧凝结产生的温差梯度，使铜管内外表面承受不均匀热应力分布。管束排列密集，局部区域易形成流速偏差与紊流强化现象，导致冲刷集中区与滞流区并存。支撑结构间距与固定方式直接影响振动响应，当流体激励频率接近结构固有频率时，易诱发共振放大效应，造成微裂纹扩展。复杂流动与受力耦合作用，使管壁局部应力集中加剧，为后续损伤演化提供条件。

1.2 铜管材质特性与老化趋势

铜管材料以导热性能优良为优势，但在含氧及含盐环境中易发生电化学反应，表面保护膜在长期运行中逐渐失稳，点蚀倾向增强。微观组织随温度循环出现晶界弱化，材料韧性下降，抗疲劳性能逐步减弱^[1]。运行年限增长后，管壁厚度呈现非均匀减薄特征，腐蚀产物附着于表面形成二次反应界面，进一步改变电位分布。新发展理念下更强调材料全生命周期管理，通过状态监测与性能评估联动分析，可识别老化进程的关键节点，为缺陷预控提供数据支撑。

1.3 泄漏初期运行参数变化特征

泄漏初期多表现为系统运行参数的细微偏移，凝汽器真空度出现缓慢下降趋势，排汽压力波动幅度增大，换热端温差分

布出现不均衡状态。冷却水侧水质指标发生异常变化，导电率及含氧量呈局部升高趋势，反映出介质间发生非正常交换。机组热耗指标在稳定区间内出现隐性上升，运行效率逐渐偏离设计值。参数变化具有滞后性与隐蔽性特征，需要结合多源数据进行关联识别，通过连续监测形成趋势判定，为早期定位泄漏区域提供依据。

2 铜管泄漏形成机理及诱发因素解析

2.1 电化学腐蚀与点蚀发展过程

冷却水中溶解氧、氯离子及其他活性离子共同作用，使铜管表面形成微电池结构，局部区域电位差逐渐扩大，促使阳极区优先发生金属溶解反应。原有氧化膜在流动冲刷与化学介质作用下稳定性下降，保护功能削弱，点蚀核心逐步形成。腐蚀产物在微孔内部堆积，导致局部环境酸化，进一步加速腐蚀速率，形成自催化效应。腐蚀发展呈现由表及里的穿透特征，孔径虽小但扩展速度较快，最终形成贯通性缺陷。基于精细化管理理念，需通过水质控制与电位监测协同手段，对腐蚀敏感区域实施动态识别与预控。

2.2 流体冲刷导致壁厚减薄机制

冷却水在管内高速流动状态下形成持续剪切力，对铜管内壁产生机械剥蚀作用，尤其在入口区、弯曲段及流速突变位置，流场结构复杂，紊流强度显著增强，冲刷效应更加集中^[2]。长期冲刷使表层金属逐步剥离，管壁厚度呈非均匀减薄趋势，局部形成薄弱区。冲刷作用还会破坏原有保护膜结构，使金属基体直接暴露于介质环境中，进一步放大腐蚀速率。流动参数波动叠加运行工况变化，使减薄过程具有阶段性加速特征。面向精细运维需求，应结合流速分布与结构布置优化流场条件，降低局部冲刷强度。

2.3 振动耦合作用引发疲劳破坏

蒸汽侧压力波动与冷却水流动激励共同作用，使管束产生周期性振动响应，振动频率与结构固有频率接近时，能量累积效应明显增强。支撑结构刚度不足或间距不合理，会使局部振幅放大，管壁反复受拉压交变应力作用，逐步形成微观裂纹。

裂纹在循环载荷驱动下沿晶界扩展，最终发展为宏观破坏形态。振动与腐蚀环境叠加后，材料抗疲劳性能进一步下降，损伤演化速度显著提高。基于协同控制理念，应通过振动监测与结构优化相结合方式，抑制激励源并提高系统整体稳定性。

3 现场堵管工艺适配路径构建

3.1 缺陷类型判定与封堵策略选择

凝汽器铜管缺陷呈现多样化特征，需通过系统化检测手段实现精准识别与分类。依据泄漏形态、缺陷位置及扩展趋势，将缺陷划分为点蚀穿孔型、壁厚均匀减薄型及疲劳裂纹型等不同类别，并结合无损检测数据对缺陷深度与分布范围进行定量评估。判定过程中引入数据融合理念，将涡流检测、超声检测及水质参数变化进行关联分析，形成多维度诊断结果。封堵策略需与缺陷类型高度匹配，对于局部穿孔缺陷，优先采用快速封堵方式以控制泄漏扩散；对于多点分布或成片减薄区域，应通过整体隔离处理以避免后续连锁失效。策略选择还需综合考虑管束排列密度、运行负荷及检修窗口条件，实现安全性与可操作性的平衡。构建标准化判定流程，将检测、评估与决策形成闭环体系，可提升处置精准度并降低误判风险，使堵管工艺具备更强的适应性与前瞻性。

3.2 机械堵管与焊接封堵工艺要点

机械堵管工艺依赖专用堵头与胀接工具，通过径向扩张形成可靠密封结构，关键控制要点在于堵头尺寸匹配精度与胀接力均匀性。堵头材料需具备良好的耐腐蚀性能与弹性恢复能力，以保证长期密封稳定性。安装过程中需严格控制插入深度与胀接位置，避免对邻近管道产生附加应力。焊接封堵工艺适用于结构稳定性要求较高的部位，通过端口封焊实现永久性隔离，其核心在于焊接热输入控制与焊缝成形质量。焊接参数需与铜材导热特性相匹配，防止过热引发组织变化或产生新的缺陷^[3]。焊后需进行气密性检测与表面质量检查，确保封堵效果达到设计要求。两类工艺在应用中需结合运行条件进行合理选择，并通过工艺标准化与工具专用化提升施工一致性，实现堵管过程的可控化与精细化管理。

3.3 工艺实施过程质量控制措施

堵管工艺实施阶段需构建全过程质量控制体系，从前期准备到后期验收形成闭环管理。作业前需完成管束状态复核与缺陷标识确认，确保施工对象准确无误，同时对设备隔离状态进行核查，防止误操作风险。施工过程中引入过程监测机制，对关键参数如胀接力、焊接温度及作业时间进行实时记录，形成可追溯数据链。质量控制重点集中在密封可靠性与结构稳定性两个方面，通过分阶段检验手段对每一道工序进行确认。封堵完成后需开展系统性检测，包括真空严密性测试与冷却水侧压力试验，以验证封堵效果。基于精益运维理念，建立质量评估与反馈机制，将检测结果与历史数据进行比对分析，持续优化

工艺参数与操作流程。通过标准化文件与数字化记录体系固化控制要求，使堵管作业在不同工况下保持一致性与稳定性，为凝汽器长期安全运行提供支撑。

4 堵管实施后的运行稳定性检验

4.1 真空恢复程度与波动范围评估

堵管完成后需对凝汽器真空水平进行系统性跟踪，通过连续采集排汽压力与冷端真空数据，构建运行曲线以判断恢复程度。真空恢复不单取决于泄漏点封堵数量，还受管束整体传热状态与系统密封完整性影响，因此需结合历史运行基线进行对比分析。重点关注真空值稳定区间及波动幅度变化，识别是否存在周期性扰动或突变现象。通过对负荷变化条件下真空响应特性的监测，可判断堵管后系统适应能力与调节灵敏度。引入数据化运维理念，对多时段运行数据进行趋势分析与异常识别，形成动态评估模型，使真空恢复状态具备量化判定依据，为后续运行优化提供可靠支撑。

4.2 换热效率变化与热耗指标表现

堵管处理对换热面积产生直接影响，需通过综合热力参数对换热效率变化进行评估。通过对冷却水进出口温差、蒸汽侧凝结温度及端差变化进行连续监测，可反映换热过程的实际表现。热耗指标作为关键运行参数，其变化趋势能够反映机组整体效率水平，堵管后若热耗出现异常上升，则需结合管束有效面积与流量分布进行进一步分析。运行数据应在不同负荷区间进行对比，以识别堵管对高低负荷工况下换热性能的差异影响^[4]。基于精细化能效管理理念，构建多参数联动分析体系，将温度、压力及流量数据进行耦合计算，实现对换热效率变化的精确判定，确保设备运行处于合理区间。

4.3 泄漏扩散抑制效果与持续性分析

堵管实施后需重点评估泄漏控制的持续稳定性，通过周期性水质检测与在线监测数据，判断是否存在新的泄漏迹象。对冷却水中导电率、溶解氧及杂质含量变化进行趋势分析，可识别潜在的微小渗漏风险。结合凝汽器内部检查结果，对已封堵区域周边管道状态进行复核，防止局部应力重新分布引发新的损伤。运行过程中需建立长期监测机制，对关键参数设定预警阈值，实现异常信号的快速识别与响应。基于全生命周期管理理念，将堵管效果评估纳入设备健康管理体系，通过数据积累与模型优化，实现泄漏风险的持续控制与动态调节，使系统运行稳定性得到长期保障。

5 堵管工艺优化与运行管控机制完善

5.1 缺陷数据库构建与经验反馈机制

凝汽器铜管运行过程中产生的大量检测数据与检修记录具备显著的工程价值，需要通过系统化整合形成结构化缺陷数据库。数据来源涵盖无损检测结果、堵管位置分布、缺陷类型

判定及运行参数变化信息，通过统一编码规则进行标准化处理，实现不同批次数据的可比性与可追溯性。数据库构建过程中引入分层分类管理模式，将缺陷按机理、部位及发展阶段进行归档，使信息具备多维检索能力。经验反馈机制依托数据分析结果展开，将历史处置效果与后续运行状态进行关联比对，识别不同堵管工艺的适用边界与性能表现。结合数字化运维理念，建立动态更新机制，使新产生的数据持续补充并修正既有模型，实现知识积累的迭代优化，为后续工艺决策提供可靠依据。

5.2 周期检测与预警联动控制方式

运行阶段需构建以周期检测为基础的状态监测体系，将凝汽器关键参数纳入统一监控平台，实现多源数据的实时采集与分析。检测周期依据设备运行工况及历史缺陷分布特征进行分级设定，关键区域实施高频监测，以提高异常识别灵敏度。预警机制通过阈值模型与趋势分析相结合方式建立，对真空度、水质指标及温差变化进行动态判定，一旦出现偏离设定区间的趋势，即触发联动响应流程。联动控制不仅包括参数预警，还涉及检修计划调整与运行方式优化，使问题能够在早期阶段得到干预^[5]。基于智能化发展理念，逐步引入数据驱动模型，对异常信号进行模式识别与预测分析，提高预警准确性与响应效率，实现由事后处理向事前防控转变。

参考文献：

- [1] 张建林,袁荣正,刘杰,等.超临界机组凝汽器铜管泄漏失效的微观分析[J].电力设备管理,2023,(2):287-289.
- [2] 冯福媛,梁惠勋,张淇钧,等.凝汽器水位扰动下火电机组调节过程的动态响应特性[J].洁净煤技术,2025,31(6):229-237.
- [3] 孙伟,郑清文,阳欧,等.基于凝汽器冷凝分布特性的喉部导流结构优化[J].汽轮机技术,2025,67(3):175-178.
- [4] 冀斌.压水反应堆蒸汽发生器传热管焊接堵管工艺实践[J].发电设备,2024,38(2):109-114.
- [5] 余建平.梨园水电站推力冷却器铜管泄漏原因分析[J].云南水力发电,2022,38(S1):4-6.

5.3 工艺标准化与检修流程固化路径

堵管工艺在不同机组与工况条件下需保持一致性与可复制性，通过建立标准化技术文件与操作规程，实现作业过程的统一规范。标准内容包括缺陷判定方法、工艺选择原则、施工参数控制范围及质量验收指标，使各环节具备明确执行依据。检修流程需进行模块化设计，将检测、评估、实施及验收划分为独立单元，并通过流程节点控制实现顺序衔接，避免操作遗漏与偏差。质量控制要求贯穿全过程，通过关键点签认与数据记录机制形成完整闭环。结合精益管理理念，对流程执行效果进行持续评估，依据运行反馈对标准内容进行动态修订，使工艺体系不断完善。通过制度化与流程化手段固化经验成果，使堵管作业在长期运行中保持稳定质量水平，支撑凝汽器安全可靠运行。

6 结语

凝汽器铜管泄漏处置需建立从机理识别到工艺匹配再到运行评估的完整技术链条，堵管工艺在精准判定与规范实施条件下能够有效控制泄漏扩展并维持系统稳定。运行阶段结合数据监测与状态评估，可持续修正工艺参数并优化控制方式。依托数据库与标准化体系，检修经验得到固化与传承，设备运行风险得到有效约束，凝汽器长期安全性与可靠性得到持续保障。