

Detection and Maintenance Strategy Optimization for Steam Turbine Condenser Tube Leakage in Thermal Power Plants

Feng Gao

National Energy Jilin Electric Power Engineering Technology Co., Ltd., Changchun, Jilin, 130114, China

Abstract

As the core component of thermal power plant heat systems, steam turbine condenser tubes are prone to leakage and perforation under prolonged exposure to high temperatures, humidity, and corrosive environments, significantly impacting unit efficiency and safety. This study systematically analyzes the mechanisms and detection technologies for condenser tube leakage, reviews mainstream diagnostic methods including negative pressure testing, tracer gas detection, acoustic emission, and infrared thermography, and evaluates their engineering applicability. Through case studies, it examines limitations of traditional maintenance approaches and proposes optimized strategies including intelligent online monitoring, scheduled maintenance, preventive repair, and full lifecycle management. Practical results demonstrate that these optimization measures enhance early leakage detection rates, extend equipment lifespan, and reduce operational costs. The research provides theoretical and engineering support for condenser pipeline management and fault prevention in thermal power plants, promoting equipment intelligence and safe operation.

Keywords

Thermal power plant; Steam turbine; Condenser; Tube leakage detection; Maintenance; Intelligent monitoring; Strategy optimization

火电厂汽轮机凝汽器管泄漏检测与检修维护策略优化

高峰

国能吉林电力工程技术有限公司，中国·吉林 长春 130114

摘要

汽轮机凝汽器作为火电厂热力系统核心，其管道长期在高温、湿热与腐蚀环境中易发生泄漏、穿孔等问题，严重影响机组效率与安全。本文系统分析了凝汽器管泄漏的机理与检测技术，梳理了负压法、示踪气体法、声发射、红外热成像等主流诊断手段，并评估其工程适用性。结合案例，剖析传统检修局限，提出智能在线监测、定期维护、预防性修复与全寿命管理等优化策略。实践表明，优化措施可提升泄漏早期发现率、延长设备寿命、降低运维成本。研究为火电厂凝汽器管道管理与故障防控提供理论与工程支撑，促进设备智能化与安全运行。

关键词

火电厂；汽轮机；凝汽器；管泄漏检测；检修维护；智能监测；策略优化

1 引言

在火电厂热力系统中，凝汽器承担着将汽轮机排汽冷却凝结为水的关键功能，其管系数量庞大、结构复杂、工作环境恶劣，是全厂最为薄弱的部位之一。凝汽器管道的任何泄漏都会直接破坏真空环境，影响汽轮机的运行效率和机组的经济性，严重时还会引发循环水串入汽侧、引发金属腐蚀、污染冷凝水等连锁反应。随着火电厂机组容量的增大和运行工况的复杂化，凝汽器管道泄漏的隐蔽性和突发性日益突出，给运行维护带来了极大挑战。

长期以来，火电厂对凝汽器管泄漏的管理主要依赖人工巡检、停机试压和被动抢修，存在检测灵敏度低、响应速度慢、检修周期长等问题。部分厂区虽然引进了局部自动检测设备，但受制于技术条件和管理水平，往往难以实现全覆盖、全过程的泄漏监控和预防性维护。随着智能检测、数据分析和材料修复等新技术的发展，构建科学、高效的凝汽器管泄漏检测与维护体系已成为提升火电厂设备管理水平和运行安全的核心诉求。本文围绕火电厂凝汽器管泄漏的成因、检测与维护技术展开研究，提出针对性优化策略，并通过工程实践验证其有效性和可推广性。

【作者简介】高峰（1980—），男，中国吉林长春人，本科，工程师，从事火电厂汽轮机检修研究。

2 凝汽器管泄漏机理及故障特征分析

2.1 泄漏的主要成因与发展过程

凝汽器管泄漏的发生通常由多种内外部因素共同作用。首先，管材本身的耐腐蚀性能是影响泄漏风险的关键。常用的不锈钢、黄铜、钛合金等管材在长期服役过程中，受电化学腐蚀、应力腐蚀、点蚀、缝隙腐蚀等多种机制影响，会逐渐出现局部变薄、穿孔。其次，循环水中含有的杂质、氯离子等腐蚀性物质，易加剧管壁的腐蚀速率，尤其在换季负荷波动、开停机频繁等情况下，局部应力与腐蚀环境耦合作用更加明显。此外，机械振动、流体冲刷、水锤冲击等因素也易导致管道机械损伤与疲劳裂纹。局部堵塞或水垢沉积则会引起流速异常和温差应力，加剧薄弱部位损伤。管道一旦出现微小裂纹或穿孔，泄漏水流在真空吸力作用下迅速扩大，极易发展为大面积故障。

2.2 泄漏故障的主要表现与影响

凝汽器管泄漏故障在实际运行过程中具有较为典型的表现形式，首先表现为凝汽器真度的显著下降，这直接影响机组的热效率与输出功率。同时，冷凝水的电导率会明显升高，表明非冷凝水介质如循环水或杂质已经渗入凝汽系统，导致冷凝水品质劣化。当泄漏进一步加重时，排气压力异常升高，汽侧水位也出现波动，严重威胁机组的安全稳定运行。若循环水大量泄漏至汽侧，不仅导致锅炉补给水系统受到污染，还可能引发整个热力系统的协同失效。此外，泄漏点局部往往发生金属腐蚀与结垢，长期运行下极易形成堵塞，进一步降低管道流通能力。更为严峻的是，泄漏引起的负荷降低与非计划停机，将造成电厂巨大的经济损失。由于早期泄漏信号微弱且分散，导致故障难以及时诊断和精准定位，极大地增加了设备健康管理的难度，并提升了运行维护的风险与压力。因此，加强泄漏故障的在线监测与快速诊断，成为提升火电厂运行可靠性的重要课题。

2.3 常见故障案例剖析

以某 600MW 火电厂为例，其在高负荷运行期间突遇凝汽器真度急剧下降，同时冷凝水电导率短时间内迅速升高。事故发生后，运维人员实施紧急停机检修，发现多根凝汽器换热管存在点蚀穿孔，沿焊缝部位亦检测出微小裂纹，并伴有局部腐蚀剥落现象。进一步检测发现，泄漏点集中在水流冲击较强且杂质沉积严重的管段。通过对管材成分与微观结构的分析，发现局部金属元素分布不均和组织缺陷，是诱发应力腐蚀及穿孔的关键内因。本案例表明，凝汽器管泄漏故障通常由多种因素共同作用，包括水质恶化、材料劣化、应力集聚及运行管理疏漏等。此案例暴露出设备运行和材料选型环节的薄弱点，凸显了强化运行参数监控、提升管材品质和规范检修维护的重要性，也为同类型机组的故障预防与管理提供了有益参考。

3 凝汽器管泄漏检测技术与适用性分析

3.1 传统检测方法及局限性

火电厂凝汽器管泄漏的传统检测方法主要包括人工巡检、真空保持测试、压差法和注水法等。这些方法通常依赖于设备停机和冷却，检测过程耗时较长，且对人员经验依赖较大。在实际操作中，人工巡检难以发现管道早期微小泄漏，存在较大的漏检概率。真空保持和注水法虽然能够在一定程度上判断系统密封性，但对微小裂纹和隐蔽缺陷的敏感度有限，易出现误报和漏报。此外，压差法受限于工况变化，容易受到外部环境扰动影响，导致检测结果不稳定。总体而言，传统检测方法检测周期长、覆盖面有限、实时性和准确性不足，无法有效应对现代火电厂对设备安全、运行效率和智能化管理的高标准要求。这些局限性使得传统方法在实际应用中难以满足凝汽器管泄漏早期预警和快速处置的需求，亟须引入先进检测技术实现突破。

3.2 智能化与无损检测技术应用

针对传统检测手段的不足，火电厂逐步引入以智能化和无损检测为代表的新型技术体系。声发射检测技术利用传感器实时捕捉泄漏产生的高频声波信号，能够在设备运行状态下实现对微小泄漏的在线监控；红外热成像技术通过监测管道表面的温度异常区域，快速锁定潜在泄漏点，适合大面积、多回路的泄漏排查；示踪气体法通过注入安全惰性气体并检测其在凝汽器内的浓度变化，实现对泄漏点的高灵敏度定量定位；超声波检测技术则可有效识别管道壁厚减薄和微小裂纹等早期损伤。多种智能检测手段的协同应用，大幅提升了凝汽器泄漏早期发现率和定位准确性。无损检测技术还可在不停机条件下开展，极大缩短了维护周期，降低了非计划停机风险，为设备健康管理与预防性维修提供了坚实的数据基础。

3.3 数据融合与在线监测系统构建

伴随着工业物联网、智能传感和数据分析技术的发展，火电厂逐步构建起基于多源数据融合的凝汽器管泄漏在线监测系统。系统集成真度、电导率、振动、声发射、温度等多类型传感器，结合数据采集终端与智能诊断平台，实现对凝汽器运行状态的全过程、全方位实时监控。通过大数据分析与智能算法，系统可自动判别设备健康状况，动态识别泄漏风险趋势，并支持远程报警、故障溯源及预防性维护决策。在线监测系统不仅提升了故障诊断的灵敏度和响应速度，还能够有效整合海量运行数据，支撑设备全生命周期管理和数字化转型。该平台已成为提升火电厂运行智能化水平、保障系统安全高效运行的重要基础，对实现火电厂设备管理的现代化与智能化具有深远意义。

4 凝汽器管检修与维护工艺优化路径

4.1 定期检修与风险评估机制

为有效延长凝汽器管道使用寿命、降低突发泄漏风险，

火电厂应建立科学的定期检修与风险评估机制。首先，应充分利用设备状态监测和历史运行数据，开展管道健康评估，精准识别高风险管段和重点监控对象，实现检修工作的有序化和精细化。结合定期停机检修与在线监测系统，针对性开展管道的清洗、堵漏、补焊或更换等维护措施，有效提升隐患治理效率。同时，推行基于失效模式的风险分级管理，根据不同类型的潜在故障制定差异化维护策略，合理配置检修资源，优化维护流程。定期风险评估不仅有助于早期发现潜在隐患、降低设备故障率，还能为检修计划的动态调整与科学决策提供数据支撑，为电厂安全稳定运行提供坚实保障。

4.2 新型修复材料与工艺推广应用

针对凝汽器管道普遍存在的腐蚀和磨损问题，火电厂应积极推广新型防腐合金管材、复合涂层以及自愈合堵漏材料等前沿技术手段。新一代防腐合金和多功能复合涂层能够有效阻隔腐蚀介质，延缓管道表面材料的劣化进程。自愈合堵漏材料在微裂纹或局部穿孔出现时能迅速封堵缺陷，显著提升系统的应急保障能力。在管道维修过程中，采用高性能焊接材料及先进焊接工艺，有助于提升补焊区域的结构完整性，减少热影响区的二次损伤。部分电厂还探索激光熔覆、冷喷涂等表面强化工艺，这些技术可显著增强管道的耐腐蚀与耐磨耗性能。对于已出现局部穿孔的管段，则可采用弹性堵漏剂、管内补衬或机械夹具进行修复，快速恢复凝汽器系统的运行能力。上述新型材料和工艺的持续推广，为提升凝汽器管道整体可靠性和延长服役寿命提供了有力的技术支撑。

4.3 精细化维护与全生命周期管理

现代火电厂需推进凝汽器管道的精细化维护与全生命周期管理。结合大数据平台建立设备健康档案，记录每次检修、修复、材料更换等全过程信息，实现可追溯的数字化管理。通过分析运行数据和失效案例，持续优化检修工艺和维护策略，提升决策的科学性和前瞻性。推动智能化远程监控、专家在线指导和检修流程标准化，提升整体运维效率。加强运维人员培训和技能考核，增强团队的专业能力和质量意识。以全生命周期理念为引领，实现设备健康运行、经济高效和本质安全的有机统一。

5 工程实践与管理成效分析

5.1 典型案例应用与效果评估

某大型火电厂在应用智能化泄漏检测与维护优化策略后，凝汽器管道故障率显著下降。通过多源数据在线监测与声发射系统结合，提前发现微小泄漏点，避免了多起大面积失效事故。新型修复工艺在现场快速堵漏和补焊后，设备恢复周期缩短 40%，年运维成本下降 15%。机组运行真空度

稳定，冷凝水品质提升，设备整体运行效率明显提高。工程实践证明，智能监测与精细化维护体系有效提升了设备本体健康水平和运维管理效能。

5.2 经济与安全性提升分析

实施泄漏检测与维护优化策略后，火电厂凝汽器的运行经济性和安全性同步增强。智能监测系统减少了人工巡检和非计划停机次数，提升了设备利用率和全厂发电量。先进材料和修复技术降低了材料采购和维护费用，延长了设备使用寿命。安全风险得到有效控制，重大事故发生率明显下降。全周期经济测算显示，优化策略下的设备管理模式可为企业带来可观的经济效益和社会效益，推动火电厂实现安全、高效、绿色发展。

5.3 管理建议与未来发展方向

为持续提升凝汽器管道泄漏检测与维护管理水平，建议火电厂深化智能化监控和数字化管理平台建设，扩大数据覆盖范围与分析深度。加强运维队伍的专业培训和技能储备，推进先进材料和修复工艺的标准化应用。重视与科研机构、设备厂商的合作创新，推动检测、修复与管理技术持续迭代升级。未来可进一步引入人工智能、大数据分析、数字孪生等前沿技术，实现凝汽器管道的全周期智能健康管理，助力火电厂设备本质安全与高质量运行目标的全面实现。

6 结语

凝汽器管泄漏作为火电厂设备管理中的核心难题，其检测与维护水平直接决定了机组的安全性与经济性。本文系统梳理了泄漏的机理、检测技术与维护工艺，提出了基于智能监测、数据分析和精细化管理的优化策略。工程应用表明，优化措施能显著提升泄漏早期发现和高效修复能力，降低故障率和运维成本，增强设备本体的健康和可持续运行能力。未来，火电厂应持续推进智能化、数字化和全生命周期管理，不断创新检测与维护技术，为我国电力行业的安全、经济和绿色发展提供坚实保障。

参考文献

- [1] 朱鹏,赵晟,刘潮立,等.凝汽器除垢技术在电厂节能减碳降污中的应用分析[J].上海节能,2024,(02):311-315.
- [2] 代雨辰.基于机器学习的凝汽器设备故障分类方法研究[D].东南大学,2022.
- [3] 韩建.新型凝汽器胶球清洗系统数值模拟及控制系统研究[D].华北电力大学,2019.
- [4] 桑秀军,张若龙,吴伟.汽轮机凝汽器换热管腐蚀泄露的研究与分析[J].电力设备管理,2018,(01):75-77.
- [5] 谭聪,金俊忠.燃气-蒸汽联合循环汽轮发电机组凝汽器真空下降分析[J].燃气轮机技术,2018,31(01):56-59.