

汽轮机轴封漏汽问题分析与优化改造研究

郑旋

贵州西电电力股份有限公司黔北发电厂，贵州 毕节 551800

DOI:10.61369/ME.2026070037

摘 要： 轴封系统是汽轮机的重要组成结构，承担着阻隔高压蒸汽外泄与外部空气内渗的功能，其运行状态直接影响机组的热效率与安全稳定性。轴封漏汽是火电机组汽轮机运行过程中的典型高频缺陷，长期漏汽会导致机组热耗升高、发电效率下降，还会引发轴系受潮、润滑油品质劣化、设备腐蚀、振动异常等问题，严重威胁机组的长期稳定运行。本文结合汽轮机轴封系统的结构与运行原理，对轴封漏汽的各类诱发因素开展系统分析，梳理轴封漏汽造成的运行危害，总结当前汽轮机轴封结构与运维模式存在的不足，提出针对性的优化改造方案与运维管控措施，可有效解决轴封漏汽问题，提升机组运行的经济性与安全性。

关 键 词： 汽轮机；轴封系统；漏汽故障；优化改造

Analysis and Optimization Transformation Research on Steam Leakage from Steam Seal of Turbine

Zheng Xuan

Guizhou Xidian Electric Power Co., Ltd. Qianbei Power Plant, Bijie, Guizhou 551800

Abstract： The steam seal system is an important component of a turbine, responsible for preventing the leakage of high-pressure steam and the infiltration of external air. Its operating condition directly affects the thermal efficiency and safety stability of the unit. Steam leakage from the steam seal is a typical high-frequency defect in the operation of thermal power units' turbine engines. Long-term leakage will lead to an increase in thermal consumption of the unit, a decrease in power generation efficiency, and also cause problems such as moisture in the shaft system, deterioration of lubricating oil quality, equipment corrosion, and abnormal vibration. It seriously threatens the long-term stable operation of the unit. This paper, based on the structure and operating principle of the steam seal system of the turbine, conducts a systematic analysis of various inducing factors of steam leakage from the steam seal, summarizes the operational hazards caused by steam leakage, summarizes the current deficiencies in the structure and operation mode of the steam seal of the turbine, and proposes targeted optimization and transformation schemes and operation control measures, which can effectively solve the problem of steam leakage from the steam seal and improve the economic and safety performance of the unit.

Keywords： turbine; steam seal system; steam leakage fault; optimization transformation

引言

新型电力系统建设背景下，火电机组逐渐担负起调峰调频的任务，机组的启停次数明显增多，变负荷运行工况也越来越多，汽轮机各个辅机及密封系统的运行压力不断增大。轴封系统是汽轮机缸体和转子之间密封的装置，依靠密封间隙和蒸汽压力平衡来达到密封的效果，是保证汽轮机密闭运行的重要设备。长期运行过程中由于结构磨损、工况波动、运维不善、设备老化等原因，轴封很容易出现漏汽现象。轴封漏汽不但会造成大量的热能和工质的浪费，降低机组的发电效率，还会引起许多次生设备的故障。对轴封漏汽原因进行详细的分析，并开展设备优化改造研究，对于提高机组的经济性、减少设备故障率、延长设备使用寿命有着十分重要的工程意义。

一、汽轮机轴封系统基础概述

（一）轴封系统工作原理

汽轮机轴封系统分为高压侧轴封和低压侧轴封两大部分，整体依靠蒸汽压力平衡原理来完成动态密封。机组正常运行时，高

压缸轴封靠内部高压蒸汽来构成一个密封屏障，阻止缸内高温高压蒸汽向外泄漏。低压缸轴封靠外部给蒸汽供给微正压的环境来保证，防止外界冷空气进入缸体内。轴封用多级阶梯式的密封结构来降低蒸汽压力，减小内外压力差，配合合理的密封间隙达到蒸汽零外泄、空气零内渗的目的。稳定的轴封压力和间隙控制，

是保证汽轮机热力系统完整、轴系运行稳定的根基。

（二）轴封系统结构组成

汽轮机轴封系统整体结构由轴封本体、密封齿、供汽管路、溢流管路、压力调节装置、疏水装置等主要部分组成。轴封本体装在转子的外侧，多级密封齿均匀地分布在转子的外侧，构成一个逐级降压的密封腔体。供汽系统为低压轴封提供稳定的密封蒸汽，溢流系统用来调节轴封腔室的压力，防止压力过高造成蒸汽外溢。疏水结构可以及时将管路、腔室内积存的凝结水排掉，防止积水对设备造成冲击、腐蚀。压力调节装置根据机组负荷的变化自动调节轴封供汽压力，保证不同的工况下密封系统正常工作，构成完整的轴封密封调节系统。

（三）轴封漏汽的主要运行危害

轴封漏汽会给机组带来经济性和安全性两方面的影响，涉及到了整个机组。从经济角度来说，轴封漏汽会使得大量的高品质蒸汽直接浪费掉，造成机组有效做功蒸汽量的减少，供电煤耗大幅增加，机组发电效率不断降低。从安全角度来说，外泄的蒸汽会进入轴承箱，使润滑油受潮乳化、油质变坏，润滑冷却效果下降，引起轴系磨损振动超限。长期漏汽会造成轴封齿、转子轴段被水蚀、冲刷而造成密封结构的损坏^[1]。同时，漏汽伴随的温差变化还会引起缸体变形、通流间隙偏移，从而加重机组运行缺陷，增大非计划停机风险。

二、汽轮机轴封漏汽主要成因分析

（一）轴封结构设计固有缺陷

传统的汽轮机大多采用梳齿式的轴封结构，结构设计上存在着固有的不足之处，是造成漏汽问题频繁发生的主要原因。常规梳齿轴封密封齿为固定式硬质结构，密封间隙为固定数值，难以适应机组变工况运行的形变变化。机组启停、变负荷时，转子和缸体的热膨胀量不一样，动静部件之间就会产生微小的相对位移，固定的间隙不能自动调节。间隙过大，节流降压效果便会大大降低，蒸汽泄漏量会急剧增大。间隙太小容易造成动静摩擦，使密封齿磨损变形，永久增大密封间隙，形成持续性轴封漏汽故障，很难通过运维操作彻底消除。

（二）设备磨损与老化形变

机组长时间运行时所出现的磨损、老化形变等，是造成轴封漏汽的主要直接因素。汽轮机转子长时间高速运转，在启停过程中容易发生轻微的动静摩擦，反复摩擦会使轴封密封齿受到磨损，齿顶变薄，间隙变大。机组长时间高温工作会引发轴封金属部分热老化的状况，造成刚度和稳定性降低，并且密封齿存在弯曲变形倒伏等问题。蒸汽长时间高速冲刷会使密封腔体磨损、通流结构变形，破坏多级节流密封的效果。设备老化磨损属于持续性的累积缺陷，会慢慢加大漏汽的程度，造成不可逆的设备故障。

（三）轴封运行参数调控不当

轴封供汽压力温度等参数控制不好，是造成运行阶段漏汽频繁的原因之一。机组启停及变负荷工况转换时，轴封供汽参数调节过迟，造成供汽压力偏高，产生过多蒸汽向外泄漏，引发外

漏。供汽压力太低不能形成有效的密封屏障，外面的空气会渗入到低压缸内，破坏了机组的真空系统。供汽温度和缸体金属温度不匹配，就会引起轴封部件产生温差应力，造成局部变形，破坏密封间隙的均匀性。部分机组存在轴封溢流调节滞后、疏水不及时的问题，易引发腔室压力失衡，进而导致轴封漏汽问题加剧。

（四）安装检修工艺不够规范

设备安装、检修工艺不规范，会造成轴封密封精度不足，埋下漏汽隐患。机组检修时轴封间隙测量调整精度不够，存在间隙偏大、间隙分布不均等状况，不能达到密封运行的要求。轴封密封齿修复、更换安装工艺不规范，密封齿垂直度平整度不达标，多级密封腔体同轴度偏差大。检修完毕后没有进行精确调试和气密性试验，残留安装误差和结构缺陷。长期运行之后，初始安装的偏差就会不断增大，使轴封的密封效果一直降低，漏汽的问题逐渐显现出来并且反复发生^[3]。

三、汽轮机轴封系统现存核心短板

（一）传统密封结构适配性较差

传统的梳齿轴封结构刚性大、调节性差，很难适应机组各种运行工况。该结构只能适应机组额定负荷稳定运行状态，在启停、低负荷、变工况运行时，密封间隙不能自适应调节，密封效果大大降低。刚性密封结构的抗摩擦性能不佳，轻微的动静摩擦都会造成密封齿永久性损害，设备容错率低。由于机组经常进行调峰运行，传统的结构适应性差的问题一直存在，并不能满足现代大型机组高效节能、稳定运行的要求。

（二）参数调控智能化水平偏低

大部分机组的轴封系统还存在着人工辅助控制的情况，智能化自动化程度较低。轴封供汽压力、温度、溢流开度等参数大多依靠人工经验来调节，调节精度低、反应速度慢。工况切换时参数调整滞后，不能及时适应机组运行状况，很容易造成压力失衡而产生漏汽。系统没有智能监测和预警功能，无法对细微的漏汽隐患进行及时准确的识别，故障初期很难被发现，只能等到漏汽问题严重之后才采取被动的处理措施，造成故障不断累积，影响机组经济安全运行。

（三）检修运维体系不够完善

目前，轴封系统运维检修方式比较传统，针对性和精细化程度不高。常规检修大多集中于核心主机设备，对轴封这样的辅助密封系统重视不足，检修频次低、排查深度小。检修过程中缺乏标准化的间隙调整工艺，参数校准精度不足。日常维护仅关注显性漏汽故障，未重视间隙微小变化、参数波动等潜在隐患。同时缺少专项故障台账与数据分析体系，无法准确掌握漏汽故障的发展规律，导致同类漏汽故障反复出现，无法彻底根治^[3]。

四、汽轮机轴封系统优化改造方案

（一）轴封密封结构升级改造

针对传统梳齿轴封结构的不足，用柔性可调式蜂窝轴封代替

原来的刚性轴封结构，在硬件上从根本上解决漏汽问题。蜂窝轴封为蜂窝状柔性密封结构，具有较好的自适应调节性，机组启停及变工况时，密封结构可随着转子位移而自适应地微调间隙，保证始终处于最佳密封间隙状态。柔性结构有很好的抗摩擦性能，轻微的动静接触不会对密封齿造成永久性的损伤，大大提高了设备的容错率。多级蜂窝密封结构可以加强节流降压的效果，大幅度降低蒸汽泄漏量，提高轴封密封性能，适合机组全工况稳定运行。

（二）轴封供汽系统智能化改造

升级轴封供汽调节系统，创建自动化智能调节体系，改善参数契合度和反应速度。更换掉旧的手动调节阀门，安装上电动智能调节阀和高精度的压力温度传感器，对轴封供汽参数实施实时的监测并加以自动调节。根据机组负荷信号、缸体温度信号、真空度信号来建立联动调节逻辑，工况切换时自动匹配最佳供汽压力和温度，消除由于参数滞后造成的漏汽问题。增设漏汽监测模块及智能预警功能，可对密封出现的异常情况作出预判，防止故障的发生，使轴封系统一直处于动态稳定的运行状态。

（三）优化轴封检修安装工艺

制订标准化、精细化的轴封检修安装工艺标准，消除人为工艺因素造成的漏汽故障。统一轴封间隙测量和调整标准，用多点均分测量方式保证各级密封间隙均匀合规，杜绝局部间隙偏大的问题。规范密封齿更换、校正、安装流程，严格控制密封齿平整度、垂直度和腔体同轴度。机组检修结束之后，对轴封气密性做专项试验，对密封情况进行全方位的检查，找出存在的泄漏隐患。建立检修工艺复核制度，对间隙参数、安装质量、调试数据进行二次复核，保证检修安装精度达到要求，从工艺上防止漏汽故障的发生。

（四）优化机组工况运行调控策略

结合调峰机组的运行特点优化轴封系统工况调节策略，降低工况波动对密封系统造成的损伤。制定机组启停标准化操作程序，严格控制升温升压及降温降压速率，减小轴封部件温差应力与形变^[4]。机组变负荷运行过程中，根据工况变化提前预判，同步联动调整轴封供汽参数，保障密封压力稳定。合理管控机组最小稳燃负荷，避免长时间低负荷运行引发轴封密封失效。优化盘车与停机保温环节，机组停机后保持轴封系统持续运行，防止冷热突变引发结构变形或漏汽问题。

五、优化改造后的运维保障措施

（一）建立精细化日常巡检机制

对改造后的新型轴封系统创建专门的精细化巡检制度，保证系统长时间稳定的运作。细化巡检项目，主要是对轴封供汽参数、腔体压力、外泄蒸汽状况、轴承箱油质变化等进行监测。加强变工况、启停阶段的专项巡检频率，在工况转换期的瞬时漏汽危险点上做重点监测。做好巡检数据的记录 and 对比分析，跟踪参数的变化趋势，及时发现微小的异常，防止隐患积累发展成严重的漏汽故障，保证轴封系统处于最佳运行状态。

（二）完善定期检修养护体系

建立轴封系统常态化的定期检修养护体系，对设备的状况进行评价，并对存在的缺陷进行处理。机组大修时主要对蜂窝密封结构的磨损、形变、老化情况做检查，并对损坏部件进行修理或更换。定期对压力温度调节装置及传感器进行校准，保证调节精度达到要求。彻底清除轴封腔体及管路的积垢、杂物，疏通疏水系统，防止积水冲刷、结构堵塞。建立设备全生命周期台账，记载检修改造、缺陷处理、运行参数变动等信息，给设备运维改良提供数据支撑。

（三）强化人员专业技能培训

对新型轴封结构、智能调控系统进行专项技能培训，提高运维人员的操作和故障处理能力。组织人员学习新型蜂窝轴封结构原理、智能系统控制逻辑、标准化操作流程和故障诊断方法。开展工况模拟实操培训，提高人员变工况参数调整、异常隐患识别、故障应急处置能力^[5]。规范人员的操作行为，防止由于参数调节不当、操作不规范等人为因素造成的轴封系统运维管理不到位，从而保证优化改造的效果能够得到长久的保持。

六、结论

汽轮机轴封漏汽属于影响机组经济性和安全性的重要常见故障，传统梳齿结构的匹配度低、设备磨损老化、参数调节不合理、检修工艺不规范、工况频繁变化是造成故障发生的因素，会造成机组煤耗增大、油质变坏、轴系振动异常等众多问题。经过对蜂窝轴封结构的升级、智能供汽系统的改造、检修工艺的改进、工况调节的改善等一系列的改造工作，可以从根本上提高轴封的密封性能以及工况适应性。配套创建精细化巡检、定期检修、技能培训的保障体系，可以不断巩固改造成效，提高机组运行的效率和稳定性，为调峰火电机组的安全、经济、长期运行提供有力的保证。

参考文献

[1] 刘喆. 联合循环机组汽轮机高压轴封漏汽原因分析及处理[J]. 电力设备管理, 2023(12): 87-89.
[2] 苏博. 电厂汽轮机轴端端面汽封改造优化设计分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2024, 14(8): 108-109.
[3] 刘斌, 史庆峰, 熊建新, 等. 核电厂汽轮机高压缸轴封漏汽问题分析[J]. 电工技术, 2023(22): 185-187.
[4] 瞿惠斌, 姚建强. K156型汽轮机轴封漏汽分析及处理[J]. 电力设备管理, 2024(7): 221-223.
[5] 王利伟, 张鹏, 吕蒙. 汽轮机门杆漏汽系统典型问题分析及处理[J]. 山西电力, 2024(2): 60-63.