

火电厂 660MW 汽轮机组轴封系统泄漏控制技术应用

张涛涛

国家电投集团贵州金元黔西中水发电有限公司 贵州省毕节市 551500

摘要:在我国能源结构中,火力发电占据主导地位,660MW 汽轮机组作为煤电主力机型,其轴封系统泄漏问题影响显著。轴封系统一旦密封失效,会导致机组做功能力下降、能耗增加、污染物排放增多,还存在安全隐患。本文深入分析了 660MW 汽轮机组轴封系统泄漏的成因,包括轴封磨损、汽封间隙过大、供汽压力波动、系统设计缺陷和运行维护不当等,同时阐述了其带来的经济、安全和环保方面的危害。针对这些问题,研究了传统控制技术的局限性,并重点探讨了新型控制技术,如先进汽封技术、智能监测与调节技术以及材料优化技术。实践证明,新型控制技术能有效降低泄漏量,提升机组的经济性、安全性和环保性,为火电厂节能增效与可持续发展提供有力支持。

关键词:火电厂;汽轮机;轴封系统;泄露;控制;节能

引言

在我国能源结构中,火力发电长期占据主导地位,尤其是 660MW 汽轮机组作为煤电主力机型,但其轴封系统作为汽轮机组的关键组成部分,泄漏问题长期困扰企业,该系统通过密封动静部件间隙防止蒸汽外漏及空气内漏,一旦密封失效,高压缸蒸汽泄漏会直接导致机组有效做功能力下降,低压缸空气漏入则破坏真空系统效率,同时伴随二氧化硫、氮氧化物等污染物排放浓度升高,加剧环保治理压力。在此背景下,深入研究轴封系统泄漏控制技术,通过优化密封结构、精准调节供汽参数、提升监测水平等手段降低泄漏量,不仅能直接提升机组热经济性,降低发电成本,更可减少污染物生成与排放,助力“双碳”目标实现;同时,有效控制泄漏还能避免蒸汽窜入轴承箱引发油质劣化、轴系振动等安全隐患,保障机组长周期稳定运行,对火电厂实现节能增效与可持续发展具有显著的工程应用价值与战略意义。

1 汽轮机轴封系统泄露问题分析

1.1 系统结构与工作原理

660MW 汽轮机组轴封系统主要由轴封供汽母管、轴封加热器、轴加风机、汽封调节阀、汽封体及相关管道阀门组成,其核心功能是通过密封汽轮机转子与汽缸间的动静间隙,阻止高压蒸汽外漏及外界空气内漏,同时回收余热并维持系统压力平衡^[1]。轴封供汽母管作为核心枢纽,向高压缸排汽端、中低压缸进汽端轴封供汽,其中高压缸前端轴封采用多级梳齿式汽封,将泄漏蒸汽通过管道引入轴封加热器,

利用蒸汽余热加热凝结水以提高机组热效率,剩余蒸汽经轴加风机抽出不凝结气体后排入大气;低压缸两端轴封因处于真空环境,需通过汽封调节阀从外部引入低温低压蒸汽(如辅助蒸汽或主蒸汽节流后的蒸汽),在轴封腔室形成正压密封区,阻止空气漏入凝汽器破坏真空。

系统运行时,汽封调节阀根据机组负荷自动调节供汽压力,维持高压轴封漏汽量与低压轴封供汽量的动态平衡:高负荷时高压缸轴封漏汽量增加,部分蒸汽经溢流阀排入凝汽器或疏水扩容器;低负荷时供汽母管压力下降,调节阀自动开大以补充供汽,确保各轴封段在不同工况下均能形成有效密封。整个流程中,轴封加热器通过管壳式热交换实现热量回收,轴加风机则通过维持负压环境保障轴封蒸汽的顺畅流动,共同构成集密封、热量回收、压力调节于一体的复杂动态系统。

1.2 泄露成因与危害

1.2.1 泄露成因

轴封磨损多因机组启停频繁或长期高负荷运行,导致汽封齿与转子轴颈发生碰磨,尤其在机组振动超标时,动静部件间隙动态变化加剧磨损,使原本紧密贴合的梳齿结构出现缺口或变形,密封性能逐步失效;汽封间隙过大可能源于安装调试误差、转子热膨胀变形或汽缸下垂,当径向间隙超过设计值(如高压轴封间隙从 0.5mm 扩大至 0.8mm 时),蒸汽泄漏量将呈指数级增长,而轴向间隙不合理会破坏密封腔室压力梯度,导致漏汽路径异常;供汽压力波动主要受机

组负荷变化、汽源切换或调节阀故障影响,当低压轴封供汽压力低于临界值(如低于 0.02MPa)时,外界空气易突破密封区进入凝汽器,而高压轴封压力过高则迫使蒸汽向轴承箱窜漏;系统设计缺陷包括早期机组采用固定间隙汽封(如传统梳齿式),无法根据工况自动调整密封间隙,且轴封供汽母管管径设计偏小易引发节流损失,疏水管道布置不合理导致积水反灌^[2];运行维护不当表现为检修时汽封片更换不及时、间隙测量误差超限,或运行中未定期清理轴封腔室积垢,导致汽封齿被异物堵塞,同时疏水阀门开关不及时造成轴封系统积水,加剧部件腐蚀与磨损。

1.2.2 泄露危害

高压轴封蒸汽泄漏直接造成做功能力损失,每千克高压蒸汽泄漏均导致机组热效率下降 $0.1\%\sim 0.3\%$,若单台机组轴封漏汽量从设计值 5t/h 增至 10t/h ,年煤炭消耗量将增加约1.2万吨。低压轴封空气漏入凝汽器会降低真空度,使汽轮机排汽压力升高,背压每升高 1kPa ,煤耗率增加 $1.5^{-2}\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,同时空气与蒸汽混合导致轴封加热器换热效率下降,凝结水温度降低影响回热系统效能^[3]。当蒸汽窜入轴承箱会使润滑油乳化,破坏轴承润滑性能,引发轴瓦温度升高甚至烧瓦事故,且高温蒸汽长期作用于轴颈会导致转子局部热变形,诱发轴系振动超标;空气漏入还可能加剧低压缸内部金属腐蚀,缩短设备寿命。

2 汽轮机轴封系统泄露控制技术

2.1 传统控制技术

传统梳齿式汽封由镶嵌在汽封环上的多层薄金属齿片组成,齿片与转子轴颈形成曲折狭窄的环形通道,蒸汽通过时经多次节流降压,利用“迷宫效应”减少泄漏量,其结构简单、成本低,但金属齿片硬度较低,机组启停时易因热膨胀差异与转子发生碰磨,导致齿片倒伏或断裂,径向间隙扩大后泄漏量显著增加,且固定间隙无法随负荷变化动态调整,高负荷时密封冗余、低负荷时密封不足。蜂窝式汽封则以蜂窝状金属网格替代传统齿片,利用蜂窝孔室的涡流效应阻滞蒸汽流动,其耐磨性与抗变形能力优于梳齿式,且蜂窝结构可容纳少量磨损碎屑,减少动静碰磨风险,但蜂窝网格在长期高温蒸汽冲刷下易发生塑性变形,导致蜂窝孔尺寸增大、密封性能衰减,同时两种汽封均为固定间隙设计,无法适应转子热胀冷缩及轴系振动引起的间隙动态变化,运行后期泄漏控制效果随部件老化逐步下降,且检修时需整体更换

汽封环,维护成本较高。

2.2 新型控制技术

2.2.1 先进汽封技术

汽封采用弹簧加载的分段式汽封环结构,每段汽封环背部安装螺旋弹簧与限位装置,静止状态下弹簧将汽封环撑开,使径向间隙增大至 $1.2\sim 1.5\text{mm}$,避免机组启停时因转子与汽缸热膨胀不同步导致的动静碰磨;机组正常运行时,高压蒸汽通过汽封环背部的压力孔进入弹簧腔室,蒸汽压差克服弹簧力推动汽封环径向收缩,使间隙缩小至设计值(约 $0.3\sim 0.5\text{mm}$),形成紧密密封。这种“低负荷大间隙、高负荷小间隙”的动态调节机制^[4],既保护了汽封与转子,又能在全工况下保持最优密封效果,相比传统汽封可降低泄漏量 $30\%\sim 50\%$ 。接触式汽封则采用柔性碳环或弹性金属片作为密封元件,碳环通过背压弹簧压向转子轴颈,在正常运行时与轴颈表面形成微米级接触密封,利用材料的自润滑性和耐磨损特性,允许轻微接触而不产生显著磨损;当转子发生振动或热膨胀时,弹性结构可自适应调整接触压力,避免刚性碰磨。两种汽封均通过压差感应或弹性元件实现间隙的动态响应,解决了传统汽封固定间隙无法适应工况变化的问题,尤其在机组变负荷运行时,能有效减少高压蒸汽外漏与空气内漏,同时通过优化密封齿型(如采用倾斜齿、变齿距设计)进一步强化节流效果,配合表面涂层技术(如陶瓷耐磨涂层)提升部件寿命,实现了密封性能与可靠性的双重提升。

2.2.2 智能监测与调节技术

智能监测与调节技术通过在轴封系统关键位置部署压力传感器(监测供汽母管、轴封腔室压力)、温度传感器(检测蒸汽温度、轴承温度)、位移传感器(测量汽封环径向位移、转子振动)及流量传感器(监测漏汽量),实时采集数据并传输至PLC或DCS控制系统,构建多维度泄漏监测模型。系统基于机组负荷、主蒸汽参数、凝汽器真空度等运行数据,通过预设的热力学模型与模糊控制算法,动态计算轴封供汽的最佳压力阈值(如将低压轴封供汽压力波动范围从 $\pm 0.005\text{MPa}$ 缩小至 $\pm 0.002\text{MPa}$),并驱动汽封调节阀精准调节供汽量。当位移传感器检测到汽封间隙超过预警值(如高压轴封间隙 $\geq 0.6\text{mm}$)时,系统自动触发报警并联动调整相邻腔室压力,抑制泄漏发展;针对负荷快速变化场景(如 $10\%/min$ 变负荷速率),通过预测控制算法提前修正供汽参数,避免压力滞后导致的瞬时泄漏^[5]。此外,轴加风机转速

与轴封加热器疏水水位纳入智能调节回路,根据漏汽量动态匹配风机出力(调节精度 $\pm 5\%$),维持轴封系统负压稳定,防止积水引发的密封失效。该技术实现了泄漏状态的在线诊断(故障识别准确率 $\geq 95\%$)与供汽系统的自适应控制,相比传统定压力调节方式,供汽压力波动幅度降低60%,变负荷工况下轴封泄漏量减少25%–35%,同时为新型汽封的动态间隙调节提供了数据支撑,显著提升轴封系统在复杂工况下的密封可靠性。

2.2.3 材料优化

新型汽封材料的应用从本质上提升了密封部件的耐磨损性、耐高温性及自适应能力,有效解决了传统金属材料在严苛工况下的性能缺陷。

碳化物复合材料(如碳化钨、碳化硅基材料)通过粉末冶金工艺制成汽封齿或涂层,其硬度可达HRC85以上,耐高温达1200℃,相比传统不锈钢齿片(硬度HRC35,耐高温800℃),抗蒸汽冲刷能力提升5–8倍,在高压轴封高温高流速区域(蒸汽流速 $\geq 150\text{m/s}$)使用时,可将汽封齿磨损速率从0.05mm/年降至0.01mm/年以下,显著延缓间隙扩大进程,其表面经纳米晶处理后,摩擦系数从0.35降至0.18,减少动静碰磨时的能量损耗,配合可拆卸式镶嵌结构,检修时仅需更换磨损的齿片而非整体汽封环,维护成本降低40%。

柔性石墨材料(如浸锑柔性石墨)则凭借1.5–2.0MPa的抗压强度、–200℃至650℃的宽温适应性及0.05–0.1的超低摩擦系数,成为低压轴封接触式密封的理想材料,其层状结构可通过弹性变形贴合转子表面(最大适应径向位移 $\pm 0.3\text{mm}$),在真空环境下形成致密密封,同时自润滑特性避免了金属间直接摩擦,经抗氧化处理后使用寿命可达8–10年,较传统橡胶密封件(寿命2–3年)提升3倍以上。两种材料分别针对高压端“耐磨耐高温”与低压端“柔性自适应”的需求,通过优化材料物理性能(如导热系数、线膨胀系数),使汽封部件在机组启停(温度变化率 $\leq 5^\circ\text{C}/\text{min}$)及变负荷(速率 $\leq 15\%/ \text{min}$)过程中,始终保持稳定的密封间隙与接触压力,从材料层面切断“磨损–间隙增大–泄漏加剧”的恶性循环,配合新型汽封结构设计,可将整体泄

漏量降低20%–30%,同时减少因材料失效导致的非计划检修次数,提升机组运行可靠性。

3 结语

通过对轴封系统结构、工作原理、泄漏成因与危害的深入剖析,以及对传统和新型控制技术的对比研究可知,新型控制技术在泄漏控制方面展现出明显优势。先进汽封技术、智能监测与调节技术以及材料优化技术的综合应用,大幅降低了轴封系统泄漏量,显著提升了机组的经济性、安全性和环保性。为进一步提升汽轮机轴封系统密闭性,保证其可靠性,未来的技术研究还可以聚焦于三方面:一是开发兼具高导热性与形状记忆功能的智能密封材料(如形状记忆合金、气凝胶复合材料),实现汽封间隙随温度/压力的自主动态调整,突破现有材料依赖外部驱动的局限性;二是构建基于大数据与深度学习的泄漏预测模型,融合机组历史运行数据、设备状态参数及实时监测信号,提前预警密封失效风险,并通过强化学习算法动态优化供汽控制策略,使变负荷工况泄漏量降低;三是探索“轴封系统–回热系统–真空系统”多系统耦合优化技术,将轴封泄漏控制与机组整体热力循环优化相结合,形成能量流、信息流、物质流的深度协同,为火电厂实现“双碳”目标提供更高效的技术路径。

参考文献:

- [1] 谢涛涛,孙海龙.300MW机组低压轴封蒸汽温度偏差大的原因与对策分析[J].电子技术,2025,54(02):412–415.
- [2] 钱阳.630MW汽轮机运行故障原因与防范措施研究[J].南方农机,2024,55(24):155–157+188.
- [3] 李伍亮,刘世云.高效汽轮机组端部汽封高温区控制策略研究[J].汽轮机技术,2024,66(06):413–414+417.
- [4] 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,(02):60–63.
- [5] 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.

作者简介: 张涛涛; 性别: 男; 出生日期: 1996年12月; 民族: 汉族; 籍贯: 贵州遵义; 学历: 大学本科; 职称: 助理工程师; 研究方向: 火力发电厂系统研究与应用