

Process Optimization of Seal Performance Improvement for Domestic 660MW Ultra Supercritical Steam Turbine

Guofang Zhang Guokun Wang Dayang Cheng Lin Liu Jingwei Li

China Resources Power Jiaozuo Co., Ltd., Jiaozuo, Henan, 454450, China

Abstract

For domestically produced 660MW ultra-supercritical units operating under high-temperature, high-pressure, and peak-shaving start-stop conditions, if a minor leak occurs in the high-pressure steam inlet tube seal, the leaking steam may flow through the interlayer between the inner and outer cylinders, causing localized overheating of the cylinder body, expansion of temperature differences, and axial vibration fluctuations. The commonly used laminated metal seals in field maintenance are sensitive to assembly interference and concentricity. After thermal expansion and wear, the sealing interface is difficult to maintain long-term contact. This paper, based on the engineering background of tube leakage treatment for China's domestically produced 660MW units, proposes a comprehensive process optimization approach focusing on composite sealing, online compensation, operational tracking, and maintenance.

Keywords

Domestic 660MW ultra-supercritical steam turbine; tube insertion; sealing performance improvement; process optimization

国产 660MW 超超临界汽轮机插管密封性能提升的工艺优化

张国防 王国坤 程大央 刘林 李静伟

华润电力焦作有限公司, 中国·河南焦作 454450

摘要

国产660MW等级超超临界机组在高温高压与调峰启停条件下, 高压进汽插管密封若出现微漏, 泄漏汽可能沿内外缸夹层窜流, 造成缸体局部过热、温差扩大及轴系振动波动。现场检修中常见的叠片金属密封对装配过盈与同心度敏感, 热态差胀与磨损叠加后, 密封界面难以长期保持贴合。本文以中国国产660MW机组插管泄漏治理为工程背景, 围绕复合密封、在线补偿、运行跟踪与检修提出成套工艺优化思路。

关键词

国产660MW超超临界汽轮机; 插管; 密封性能提升; 工艺优化

1 引言

660MW 超超临界汽轮机作为中国火电主力容量段之一, 结构紧凑且热应力水平高, 密封薄弱点常集中在高压缸进汽与抽汽插管位置。插管密封一旦失效, 漏汽将改变汽缸温场与夹层压力分布, 进而带来温异常、振动波动及效率下滑^[1]。对存量机组而言, 工程上更需要在既有结构基础上形成可实施、可检查、可维护的工艺路线, 使密封改造与运行管理能够相互闭环。

2 国产 660MW 超超临界汽轮机概述

660MW 超超临界汽轮机为高压缸双下进汽、一次中间再热、单轴、四缸、四排汽、双抽凝汽式结构。其中高压缸常见双下进汽、一次中间再热、四缸四排汽、双抽凝汽

式配置, 并采用全周进汽节流调节与双层缸结构, 高压内缸为圆筒形, 内外缸间设置隔热罩以抑制受热不均。高压进汽管路与汽缸连接多使用插管形式, 插管处处于高温区且压差大, 密封既要承受蒸汽冲刷, 又要跟随内外缸差胀与阀门端刚度变化引起的相对位移。因此, 插管密封的结构选型、配合面状态与装配质量, 往往直接映射到缸体温差、轴振与热耗的波动。

3 国产 660MW 超超临界汽轮机插管密封性能提升价值

插管密封的价值首先体现在热经济性上。插管微漏通常不呈现外部可见泄漏, 但泄漏汽会绕过通流级, 形成无功蒸汽, 热耗以小幅累积的方式长期抬升。在高温高压条件下, 原有叠片式金属密封容易因热态间隙扩大形成微通道, 且对热变形、振动与磨损缺乏自适应能力, 密封效果随运行时间衰减, 失效后还可能带来动静间隙变化等连锁风险。其次, 密封可靠性直接关联胀差与振动管理。夹层串汽会改

【作者简介】张国防(1974-), 男, 中国河南郟县人, 本科, 高级工程师, 从事火力发电厂热动力工程研究。

变缸体温场与支承受力,容易诱发轴振波动、端部汽封磨损加剧与二次漏汽,现场处理往往需要更长的揭缸窗口^[2]。再次,改造的可维护性决定停机成本。具备在线补偿能力的方案能够把部分处理工作前移到运行阶段,减少非计划停机与抢修的概率。以某660MW机组的改造数据为例,优化后在600VVO工况下热耗由7804.08降至7767.34kJ/kWh,高压缸温差由55℃降至28℃,轴振幅值由120μm降至58μm,反映出泄漏抑制、温场均衡与振动控制可以形成同向改善的链条。同时,高品位蒸汽的非计划泄漏减少后,缸体异常受热与热疲劳风险也随之降低。

4 国产660MW超超临界汽轮机插管密封性能提升的工艺优化

4.1 金属-石墨复合密封结构创新

针对国产660MW超超临界汽轮机高中压缸进汽插管处在热态差胀与装配离散叠加条件下的漏汽风险,现场可采用金属骨架承压、石墨涂层贴合的金属-石墨复合密封结构。第一,骨架层保留原金属密封环并沿用原基准尺寸,在工作面加工环形密封槽与注胶通道,槽型采用平底并配圆角过渡,槽深槽宽按目标石墨层厚度与接触带宽确定并预留固化收缩量,在槽口加工限位台阶与挡胶唇边以抑制高压侧挤出,刀具退刀处采用圆弧连切避免台阶划伤,机加工后复核同心度与端面平面度,槽底槽壁去毛刺后用无纺布与溶剂擦拭并吹干,回装前核对密封环与槽配合两侧总间隙全周一致性,工程上常以0.08mm至0.11mm作为复核参考。第二,密封环装入套管定位后实施注胶,选用与蒸汽温度等级匹配的高温石墨密封胶,按脱脂干燥、局部预热、分段充填、保压固化顺序执行,注胶前在通道末端设置排气点并确认无油无水,预热温度以不致胶体提前凝结为限并保持均匀,充填由低压侧向高压侧推进以降低夹气,分两至三次补胶并在每次保压后复查塌陷与气泡外溢,固化时间按材料说明并结合现场环境温度修正,必要时采用加热毯保温做试块对照,固化后对表面硬度与回弹进行抽检,未达到规定固化度不得带压冲转。第三,刚柔协同设计需明确差胀位移方向与约束边界,轴向补偿量以装配冷态间隙与热态伸长计算为依据设置,补偿量可控制在±1.5mm范围,槽口限位台阶与挡胶唇边应与高压侧迎风面匹配并留出受压变形余量,以降低石墨层被挤出的风险,金属层承压能力需结合环体壁厚、材料屈服强度与螺栓预紧力进行复核并满足25MPa以上工作压差,石墨层压缩变形率可按批次取样做压缩回弹试验确认,并与现场预紧目标对应,注胶口宜采用可拆堵头便于检修再用。第四,质量控制在回装前对石墨层厚度一致性、固化回弹与表面缺陷进行抽检,采用着色或压痕法检查接触带宽与连续性,接触带宽度宜保持在2mm至3mm,开展0.6MPa低压保压试验记录泄漏率并按现场限值判定,试运阶段结合缸温差、轴振与插管外壁温度点检,偏差时按规定复紧或修磨。

4.2 动态注胶补偿技术应用

国产660MW超超临界机组长周期运行中,插管密封副受热胀差、壳体椭圆化与振动耦合影响,配合间隙可能随负荷与温态变化产生漂移,动态注胶补偿应按标准化工序纳入汽机专业维护。第一,注胶通道与阀体布置以对称、避让与可操作为约束,在进汽管外壁按周向等分布置4个注胶口,孔径按现场注剂枪头与流量需求匹配选4mm级,孔位避开焊缝及高应力区并校核保温拆装后阀体检修空间,钻孔后对孔口倒角去毛刺并临时封堵防止异物落入,阀体宜带止回功能以防反窜汽,外设隔热罩与防误触结构,保证运行人员按票据流程完成接驳与隔离^[3]。第二,注胶作业遵循先通后补的分级控制,注胶前对通道吹扫并通过回胶口排气确认通畅,随后以小流量间歇注入促使胶料在环槽与通道内均匀铺展,待回胶口见胶后关闭排气端继续补入直至填满,必要时可按通道阻力从回胶端反向补注,该流程与注胶孔、回胶孔配合排气的做法一致。同一步骤中应结合缸温差与轴振谱的变化趋势细化补入量,注剂黏度按介质温度窗口控制并实施过滤、批次留样,避免低温凝结堵塞或高温稀释流失。第三,检修实施阶段对开孔定位、焊接密封与启闭可靠性实施强制校核,孔位以插管中心线与法兰基准复核后放样,现场加工将轴向与周向误差控制在0.1mm量级,注胶阀短接与管壁采用氩弧焊全焊透密封,焊后开展渗漏复核、阀芯启闭试验与阀座打压检查,注剂接头选用可快速接通并可切断通道的专用阀件与连接件,满足带压注剂连接要求。第四,运行维护阶段建立注胶台账并形成闭环复核,记录补胶时机、注剂用量、主汽参数、调门开度、缸温差曲线及轴振幅值与频谱变化,台账由运行与检修双签字并与当班操作票关联,阈值触发条件由本机组历史趋势与工况边界确定,补胶前核对工况稳定与隔离状态,补胶后保持观察并在同一负荷点复测,若阀体渗漏、阀芯卡涩或通道阻塞,则在小修窗口进行阀体更换与通道复通检查。

4.3 配合面表面强化与抗粘连处理

在660MW超超临界机组进汽插管密封改造中,配合面表面强化与抗粘连处理应与装配基准、紧固一致性同步受控,避免仅靠提高预紧力补偿泄漏,并把密封环更换批次纳入配套管理。第一,强化体系选择以热态温度区间、蒸汽冲刷与微动摩擦特征为依据,结合密封环材质确定可配对的表面体系。现场常用做法是在插管配合工作段采用司太立6号合金堆焊或Cr3C2-NiCr类喷涂层,优先选取与母材线膨胀系数接近的方案,并将目标硬度控制为梯度过渡,同时把厚度限定在后续可加工区间,例如堆焊层0.8至1.5mm,喷涂层0.3至0.8mm,并明确磨削余量与允许失圆值^[4]。第二,实施阶段重点管控热输入与残余应力,堆焊可采用TIG或等离子堆焊,按分道多层、对称走焊组织热场,预热150至200℃并控制层间温度200至250℃,每层焊后清渣并轻度打磨消除咬边与未熔合指示,焊后按材质要求执行保温缓冷或消应力回火并复测硬度梯度,喷涂宜选HVOF,喷

前按规定粒度喷砂粗化并固定喷距与入射角,基体预热 100 至 150 °C 并分次叠加厚度,单次增厚不宜过大,预留 0.2 至 0.4 mm 精加工余量,过程记录层间温度并对喷后冷却速率做约束以避免氧化夹层与微裂纹。第三,强化后应完成精加工与表面质量复核,将圆度、同轴度与粗糙度纳入同一验收链,车磨后圆度与同轴度分别控制在 0.02 mm 与 0.03 mm 以内,并以 Ra0.4 至 0.8 μm 为目标复测粗糙度与硬度,采用蓝油或着色检查接触带宽连续且无局部尖峰,必要时对边界区做缓坡过渡与 $0.5 \times 45^\circ$ 倒角,喷涂层结合质量可通过敲击声判、渗透抽查及局部超声厚度核对进行确认。第四,面向现场回修应提前固化修补工艺卡与工装路线,可预制薄层强化套或备好补焊丝材与喷涂粉末,小修期完成局部补焊或补喷后使用便携车磨装置回修尺寸并恢复圆度,同步记录磨削量与剩余强化层厚度,机组投运磨合期跟踪温升、振动与泄漏量,磨合后复测尺寸并将实际磨损速率写入下周期检修点检表。

4.4 运行期热态跟踪与检修闭环管理

插管密封处在高温高压与频繁启停叠加的边界区,改造投运后应以热态数据牵引问题回溯到工艺与运行控制,形成闭环。第一,运行侧应建立面向插管内漏的特征监视组合,而不是只依赖轴振单一量。现场可将高压缸上下缸金属壁温差、相关抽汽段温度偏差、夹层或导汽管附近金属温度作为主判据,并与负荷、主再热温度、阀位和抽汽流量同步对比,形成趋势曲线与变化速率指标。已有机组在阀门全开工况下因进汽插管密封环泄漏出现抽汽温度较设计值偏高且壁温差扩大的案例,可据此把阈值设为预警与报警两级,并在同类工况下用实测数据校准判据,同时对异常时段做热力平衡复核以验证泄漏路径。第二,当监视量连续上扬且已排除通流擦碰、调节波动和测点漂移后,运行规程应给出处置窗口与边界条件。通常结合负荷曲线与启停计划,优先在负荷稳定段或计划性小修窗口安排补偿或注胶等处置,明确允许的温差变化范围、升降负荷速率、保温措施与保压时间,并设置注胶前后的参数复核清单,至少包含缸胀差、抽汽参数回归、夹层温度回落与振动复测,处置中若壁温差或振动超出

边界应立即退出并恢复稳态。第三,密封介质与备件必须纳入材料台账并与施工要点绑定。石墨类密封胶应记录批次、有效期、储存温湿度与现场施工温度,入库后按先入先出领用,施工前对胶料外观与流动性抽检并核对配比,注胶通道完成清洁度确认、试注与回流检查,密封面保持干燥无油,施工中按分段充填与保压固化控制用量与节拍,施工后对注胶阀门和单向件做启闭与泄漏复核,定期验证通道畅通性,防止堵塞或固化不足导致剥落回流。第四,检修结束后应在首启及负荷爬坡阶段开展对照评价并把偏差写回工艺文件。评价指标除热耗外需同步核对壁温差、抽汽温度偏差与轴振变化,按时间轴标注启停、阀位调整与补偿动作,结合拆检结果将偏差归因到加工尺寸、同心度装配、预紧离散或运行边界超限,并将插管检查与密封部件装配要求固化为质量验收控制点,形成下一次检修的工艺修订条目,同时把测量记录、螺栓对号、注胶用量等随工资料归档并纳入点检清单^[5]。

5 结语

综上所述,国产 660MW 超超临界汽轮机插管密封优化的关键在于把热态差胀、磨耗与振动引起的间隙漂移纳入闭环控制,既要在结构上获得可贴合的密封界面,也要在运维上保留可恢复的调整手段。以金属-石墨复合密封与运行中注胶补偿为主线,辅以配合面强化、运行期热态跟踪与检修,能够在不扩大揭缸工作量的前提下改善缸体温差与轴振趋势,并为同容量段机组的保效改造提供可执行路径。

参考文献

- [1] 薛青鸿.某660MW超超临界汽轮机轴承箱油挡漏油分析及处理[J].发电设备, 2024, 38(5):323-327.
- [2] 刘阳明.1 000 MW超超临界汽轮机叶片表面粗糙度对气动性能的影响研究[J].机械管理开发, 2025(8).
- [3] 曹丽华,李想,司和勇.超超临界汽轮机转子涡动对密封动力特性的影响[J].汽轮机技术, 2023, 65(1):32-34.
- [4] 孙嘉,夏芄,杨洪亮,等.某1000MW超超临界机组低压通流优化方法研究[J].汽轮机技术, 2024, 66(6):418-422.
- [5] 李大才,吕长虹,卜振海,等.偏置量影响的超超临界汽轮机转子密封动力特性[J].汽轮机技术, 2024, 66(4):271-274.