火电汽轮机通流改造常见问题及处理方法

刘占龙
国网能源和丰煤电有限公司　新疆　塔城　834700

摘　要：本文聚焦燃煤火电汽轮机通流改造全流程管控，围绕提质升级核心目标，系统梳理改造覆盖的关键部件与全施工链路，针对解体检测、部件装配、整机调试三个核心阶段的典型共性问题展开分析，明确各环节缺陷的形成机理、运行危害与标准化处置工艺。通过覆盖从旧件拆解到性能验证的全工序技术要点，为火电通流改造现场施工提供可落地的技术参考，助力规避装配偏差、设备损伤等风险，保障改造后机组振动、热力参数、能耗指标全面达标，实现机组能效与运行稳定性的双重提升。

关键词：火电汽轮机；通流改造；装配缺陷；精度管控；故障处理

引言：火电汽轮机通流改造是现役燃煤机组实现节能降碳、提效增容的核心技术路径，区别于常规大修，其对通流核心部件转子、内缸及汽封全部重新优化设计更换。当前部分改造项目存在重部件更换、轻过程精细化管控的问题，易遗留原生设备缺陷与施工新增隐患，直接影响改造预期成效。本文基于现场施工全流程实践经验，系统梳理各阶段高频问题与标准化处置方法，为火电通流改造项目的质量闭环管控提供专业技术支撑。

1 火电汽轮机通流改造整体工作概况

火电汽轮机的通流改造应尽可能不改变原热力系统设计、汽轮机外形尺寸、旋转方向、轴承安装位置、各类抽汽接口与汽缸相对位置不变，最大限度利用原有设备，减少改造工作量和改造费用。通流部分技术改造应采用成熟的、先进的技术，提高机组长期运行的安全可靠性及经济性，并且要满足机组深度调峰的工况要求。

核心改造对象包含各级动叶、静叶、内缸、隔板、隔板套、汽封等关键通流部件，通过先进通流技术对动、静叶重新设计，合理增加通流级数，提高各级做功效率，优化整合内缸结构减少漏汽损失，实现机组热力循环优化与能效提升。整体施工流程涵盖汽轮机旧部件拆除、修前数据测量、原设备缺陷分析、转子汽缸等部件适配安装、通流间隙调整、汽缸结合面检查修复、轴系找中、整机回装静态调试、热态汽轮机性能验证全流程[1]。

火电机组目前普遍参与深度调峰，汽轮机低负荷运行低压缸存叶片汽流激振、叶片鼓风、动静碰磨和叶片水蚀等风险。理想情况下低压缸安全运行需要满足末级长叶片不运行在危险动应力区间，避免发生汽流激振；排汽不超温，叶片温度不超过材料许用极限；排汽不超温，避免长期喷水运行，减少末级叶片的水蚀，保证末级叶片的使用寿命。机组参与深调调峰后启停频繁、变工况运行多，施工中的装配偏差，可能会在机组热态运行时放大，可能会造成级间漏汽增大、汽缸结合面漏汽引起通流效率下降、轴系振动超标、缸温差超标、轴瓦温度超标等问题，直接导致改造后发电煤耗、轴系振动、机组出力等核心指标不达标。因此，机组通流改造要进行充分的可行性研究论证，确保改造方案成熟可靠。在火电通流改造全过程中，需结合现场详细制定施工方案、作业指导书，关键工序各级质检人员全过程旁站监督，通流间隙调整、汽缸严密性验收、轴系找中验收等数据检查复测，并设置隐蔽工程专项验收质检点等各项措施保障改造质量，实现机组通流改造后提效节能提效的目标。

火电汽轮机通流改造全过程必须强化工序交接验收与关键数据闭环管理，在解体、装配、调试各环节严格执行三级质检制度，对通流间隙、轴系中心、汽缸严密性、膨胀导向等核心指标实行双人复核、全程记录[2]。针对深度调峰工况下易出现的低压缸鼓风、汽流激振、水蚀加剧等问题，应在改造阶段同步优化汽封结构、喷水系统及叶片防护涂层，提升机组变工况适应能力。同时加强施工过程风险预判，对汽缸变形、部件卡涩、间隙不均等隐患提前制定预案，确保改造后机组效率、振动、缸温、瓦温等关键指标全面达标，实现长期安全、稳定、经济运行。

2 解体检测阶段常见问题及处理方法

2.1 修前轴系中心较设计值偏差较多

2.1.1 基础与支撑变化

机组经过长期运行，基础台板可能发生不均匀沉降，导致各轴承标高偏离设计值。同时，轴承座及汽缸的长期蠕变也会改变支撑状态。首先选定一个状态良好的基准转子（通常是低压转子），然后复核各轴承的实际标高，

并与上次大修记录对比，以确认是否存在基础沉降。

2.1.2 测量与计算误差

测量工具（如内径千分尺）精度不足或操作不当、百分表架固定不稳或百分表架过长等，都会引入误差。尤其百分表架过长问题对此存在认识不足，凭经验干活，觉得只会差 0.05mm 左右，实际现验证百分表架在接近水平架设布置时，表架自身存在一定挠度，在重力影响下，测量对轮外圆上下偏差达 0.15mm 左右，严重影响轴系找中心测量准确性。找中心期间需结合对轮间距制作专用表架，减少测量误差。

2.1.3 运行磨损与累积变形

轴承钨金长期磨损导致轴瓦下沉，或转子自身因高温蠕变产生轻微弯曲，都会破坏原有的对中状态。轴瓦乌金磨损严重时需重新浇筑乌金或更换轴瓦，轴系中心调整时，轴承座垫片应使用整张不锈钢垫片，且不超过 3 片。调整后复测，径向偏差和端面偏差一般应控制在轴系中心设计值以内，偏差≯0.03mm。

2.2 汽缸水平中分面间隙超标

汽轮机通流改造普遍会将高中压外缸、低压外缸进行利旧，其中高中压外缸多数情况下水平中分面间隙较设计值都会超标，主要原因：汽缸壁厚，机组启停热不均、长期高温蠕变导致汽缸塑性变形；汽缸铸造及焊接后存在残余应力未释放彻底，机组长期运行后残余应力释放导致汽缸变形；部分与汽缸连接管道安装不规范，机组启动运行后管道应力较大也可能会造成汽缸变形。现场主要处理方案是对汽缸水平中分面进行研磨消除间隙，以上缸中分面为基准图红丹扣空缸检查局部高点，采用手工活电动角磨机反复刮研并空缸试扣检验，直至空扣间隙 < 0.1mm，冷紧 1/3 结合面螺栓 0.03mm 塞尺不入合格，且红丹接触≮70%。除非局部间隙过大，否则不允许采用补焊处理，且焊接需指定专项焊接工艺卡，严格按照焊接工艺卡要求监督执行，防止汽缸水平结合面产生裂纹[3]。

2.3 部分汽轮机叶片锈蚀积盐较多末级叶片存在水蚀现象

汽轮机揭缸吊出转子后先让化学监督人员对叶片锈蚀积盐取样分析，根据成分分析判断日常运行中汽水指标控制是否满足要求，并对发现的问题及时制定整改措施，防止汽轮机通流改造后发生同类型的问题，从源头上控制汽水指标的合格率。水蚀主要发生在低压缸末级叶片排汽侧根部。在湿蒸汽区，大量水滴随汽流高速冲击叶片表面，导致材料疲劳剥落。尤其在深度调峰、低负荷运行时，回流区增大、水滴量成倍增加，会严重加剧水蚀损伤。需在通流改造期间对低压末级叶片进行防水蚀超音速火焰喷涂，超音速火焰喷涂 Cr3C2-NiCr 涂层的硬度可达到 800HV 以上，远高于叶片材料的本体硬度，因而可以提供极佳的耐水蚀效果。为改善深度调峰状态下发生鼓风时喷水对末叶片的水蚀情况，对喷水系统进行全新设计，根据背压和排汽温度等边界条件进行判断，分级开启，精准控制喷水量，并提升雾化效果。

3 部件装配阶段常见问题及处理方法

3.1 各级通流间隙超标、分布不均

部分机组可能会发生高中压外缸偏移的问题，造成汽轮机轴向通流间隙左右偏差较大，这种情况需对高中压外缸基建安装定位孔洼窝中心进行测量，根据偏差大小对外缸整体进行移动恢复设计值，过程中需拆除汽缸前后中心梁检查定位销偏心套，是否存在安装位置不到位或者配合间隙过大，造成定位销无法有效定位作用，机组长期运行频繁启停工逐渐受应力影响造成汽缸偏移。若偏心套定位销间隙配合超标需重新加工更换偏心套，确保配合间隙满足设计要求，安装过程中各级质检人员要全过程检查验收，防止因安装不到位造成后期汽缸偏移，严重的情况下可能会引起汽轮机动静摩擦造成设备损坏事故。

通流间隙是火电汽轮机通流改造的核心管控参数，直接决定机组漏汽损失与运行稳定性，涵盖高低压汽封径向 / 轴向间隙、叶顶间隙、隔板轴向间隙等。改造过程中，新部件加工公差、老旧缸体装配基准偏移、隔板定位销磨损、新旧部件适配偏差，易造成通流间隙偏大、偏小、局部不均等高频装配缺陷。间隙过大会导致级间漏汽剧增、节流损耗上升，机组煤耗、汽耗居高不下；间隙偏小会引发热态膨胀后动静部件碰摩，损坏叶片与汽封结构；间隙分布不均会造成流场失衡、气流激振，导致机组变工况振动异常。现场执行 "多点测量、分级校准、精准微调" 装配原则，采用塞尺、滚胶布对各级通流间隙全周向检测，定位偏差位置与数值。间隙偏大部位通过微调隔板定位、加装调整垫片、优化汽封齿装配寸，规避热态碰摩风险；局部间隙不均逐一校准部件装配位置，保证同截面间隙均匀，所有参数匹配设计标准，调整后全程记录存档，实现参数可追溯管控 。

3.2 新旧通流部件适配性不良

由于外缸利旧，改造或大修过程中会对水平结合面超标的外缸进行研磨处理，造成上外缸于内缸膨胀间隙较设计值偏小较多，机组启动后可能会因膨胀顶至外缸，造成外缸结合面漏汽的问题。各部件回装前需对隔板挂耳、内缸猫爪及汽缸槽道等配合间隙进行压铅丝、肥皂块进行检

查测量，确保各部件膨胀间隙满足设计要求。

通流改造需更换转子、内缸、汽封块及端部汽封等部件，新部件配合尺寸基于原设计图纸和现场测绘，结构尺寸、安装基准、固定方式与旧缸体、转子基座、隔板套存在适配差异，现场易出现内外缸槽道配合间隙过小、装配卡位、不严等问题。该类缺陷会导致部件装配不到位、固定受力不均，机组热态运行时出现部件松动、移位、局部应力集中，引发振动、流场扰动，直接影响通流系统结构稳定性与能效发挥。所有新部件正式装配前需开展现场试装核验，逐一核对连接尺寸、定位基准、安装孔位、贴合精度。轻微偏差采用现场铰孔修正、局部精细打磨、定制适配调整垫片优化装配精度。尺寸偏差过大、现场无法修正的部件严禁强行装配，退回厂家重新加工。装配采用对称分次紧固工艺，均匀控制螺栓力矩，装配完成后二次复检定位精度、同轴度及贴合状态，彻底消除适配隐患。

4 整机调试阶段常见问题及处理方法

火电汽轮机通流改造后，在空载冲转、过临界、并网带负荷、变工况调试阶段，易出现轴振、瓦振、瓦温超标、负荷波动时振动突变等问题，是火电改造调试阶段的典型问题。主要有以下几方面原因：（1）端部汽封间隙偏小，通流改造后机组启动过程中发生振动超标为高中压和低压端部汽封间隙调整过小，启动冲转过程中存在碰磨造成启动过临界振动超标甚至跳机，需在中低转速（避开共振区）进行多运行，待振动逐渐减小再尝试冲转过临界，防止因振动过大造成动静碰磨严重损坏设备；（2）启动暖机时间不足，机组启动过程中未暖机或暖机时间不足，汽缸未彻底膨胀开或者膨胀不畅，易造成冲转过临界振动超标，需运行人员关注对比同等温度修前缸胀判断是否具备冲转过临界条件；（3）汽流激振，单阀运行时振动合格，顺阀运行工况主要与调门开度有关，当某个调门开度变化时，激振力会突变引起振动增大，需重新调整阀门开启顺序和重叠度，避开激振区，若无效则需请厂家或专业振动分析人员协助出具处理方案；（4）轴系中心调整或轴承负荷变化，通流改造更换了转子、轴瓦，重新设计了轴系中心调整值，可能导致轴系中心和轴承负荷重新分配，可能会导致轴瓦振动和瓦温超标。需利用机组检修重新复核轴系中心，同时对对相应轴瓦间隙及油槽进行检查，确保油膜稳定，都满足设计要求，则需结合主机厂及原轴系中心数据重新调整轴承载荷分配，或现场开展动平衡试验，通过加装平衡块消除振动大的问题[4]。

结束语

综上，火电汽轮机通流改造的质量管控贯穿从解体检测到机组启动全工序链路，每一个环节的缺陷闭环处置，都是保障机组长期高效稳定运行的核心基础。只有在施工全过程坚持精度优先、溯源管控的原则，针对性化解老旧设备原生损伤与新老部件适配偏差等风险，才能充分释放新型通流部件的优化潜力，确保改造后机组的振动稳定性、热力参数与能耗指标全面达到设计预期，为现役火电机组在深度调峰工况下的安全经济运行筑牢技术支撑，助力火电行业节能降碳目标落地。

参考文献

[1]王维鹏，郭松林。燃煤电厂汽轮机通流部分结垢处理研究 [J]. 中文科技期刊数据库（全文版）工程技术，2025 (12):128-131.

[2]李云应，刘伟，傅云事等。激光测量技术在汽轮机通流中的应用研究与实践 [J]. 中国核电，2025,18 (5):665-669.

[3]王加勇，邓德兵，赵清森，柏余杰。汽轮机通流部分状态监测与诊断方法研究及应用 [J]. 电站系统工程，2023,39 (4):47-49.

[4]黄波。汽轮机调节气门油动机漏油原因及处理方法 [J]. 现代制造技术与装备，2023,59 (8):84-86.