

发电厂汽轮机缸体变形研究

张黎明

国家电投阜新发电有限责任公司 辽宁 阜新 123000

摘要：汽轮机缸体变形是多因素耦合作用下的几何形状偏离现象，分为整体与局部变形，会引发汽封漏汽、部件磨损，严重时甚至导致机组停机，造成经济损失并威胁设备安全。从设计、制造、安装、运行四个维度分析变形成因，明确各环节核心影响因素，进而提出针对性优化策略，涵盖设计优化、工艺提升、安装规范、工况调控及监测维护，为控制缸体变形、保障机组安全稳定运行提供支撑，有效降低故障风险与经济损失。

关键词：发电厂；汽轮机；缸体变形；热应力；优化策略

引言：汽轮机作为发电厂核心设备，缸体结构完整性直接决定机组运行效率与安全性。缸体在制造、安装及运行过程中，易受多种内外因素影响发生变形，且初期变形隐蔽、易累积，长期运行会逐步引发各类故障，制约机组稳定运行。为厘清缸体变形的特征与危害，剖析变形成因，探索科学有效的控制方法，解决实际运行中的变形难题，特开展相关研究，为后续优化防控提供思路。

1 汽轮机缸体变形的基本特征与危害

汽轮机缸体变形是指缸体在制造、安装及运行过程中，因各种内外因素作用，其几何形状偏离设计标准的现象，是一种复杂的多因素耦合作用结果。根据变形形态，缸体变形主要分为整体变形与局部变形，整体变形表现为缸体整体胀缩不均、轴线偏移，局部变形则集中在法兰、进汽口、抽汽口等结构突变部位，表现为翘曲、鼓胀、裂纹等。缸体变形的危害具有传导性与累积性，轻微变形会导致动静间隙异常，增加汽封漏汽量，降低机组热效率；中度变形会加剧转子与缸体的摩擦磨损，缩短部件使用寿命；严重变形会引发缸体裂纹、法兰漏汽，甚至导致机组非计划停机，造成巨大的经济损失，同时威胁设备与人身安全。缸体变形的产生与发展具有隐蔽性，初期变形量微小，难以直接察觉，长期运行后会随载荷循环与环境变化逐渐累积，最终引发严重故障^[1]。

2 汽轮机缸体变形的成因分析

2.1 设计因素

设计不合理是缸体变形的先天性诱因，主要体现在结构设计与材料选择上。结构设计中，缸体壁厚不均会导致运行时温度梯度过大，引发不均匀热膨胀；法兰与卸荷槽结构不合理易造成应力集中，引发翘曲变形；滑销系统布局及死点设置不当、间隙与润滑设计不符，会限制缸体自由胀缩，产生约束应力导致扭曲。材料选择

上，热膨胀系数不稳定、高温强度及耐热疲劳性能不足的材料，长期在高温交变载荷下易发生蠕变疲劳，引发变形；双层缸内外缸定位销设计不当会导致膨胀干涉，产生局部变形。

2.2 制造因素

制造工艺精度直接决定缸体初始状态，缺陷会埋下变形隐患。铸造时冷却不均会产生残余应力，未充分时效处理则会在运行中释放引发变形；焊接参数控制不当会导致焊缝应力集中，与运行应力叠加易引发变形甚至裂纹。机械加工精度不足，如结合面平面度、圆柱度超标，或加工应力未及时消除，会扩大初始几何偏差；滑销滑动面加工精度及粗糙度不达标，会增加摩擦阻力，间接加剧变形。此外，不完善的制造质量检测体系会导致不合格产品出厂，进一步增加变形风险^[2]。

2.3 安装因素

安装偏差会破坏缸体受力平衡与几何精度，加剧运行变形。缸体水平度、垂直度调整不当，会使其承受不均重力载荷，长期运行导致倾斜；猫爪支撑接触不足、受力不均，会引发局部变形。螺栓预紧力不足易导致法兰漏汽、局部温度异常，预紧力过大则约束缸体膨胀，引发法兰变形；管道推力过大或支吊架布置不合理，会产生附加约束力，破坏缸体胀缩轨迹，导致扭曲。此外，安装时未清理杂物、滑销未按要求润滑，会影响缸体正常胀缩，间接诱发变形。

2.4 运行因素

运行工况变化与操作不当是变形最主要诱因和累积核心。热载荷方面，机组启停、变负荷时，汽缸内外壁、上下缸及法兰与缸壁间会产生较大温度梯度，反复热应力作用引发热疲劳和塑性变形。机械载荷方面，蒸汽压力产生周向拉应力与轴向推力，负荷波动加剧应力变化；猫爪支撑受力不均引发倾斜，转子不平衡、气流脉动产生

的振动加速疲劳变形。此外,滑销卡涩、基础沉降不均会限制缸体膨胀,升高约束应力;环境温度变化、滑销维护不当,也会间接加剧缸体变形。

3 汽轮机缸体变形的优化策略

3.1 优化缸体设计方案

设计优化是控制缸体变形的源头,核心是通过合理的结构设计 with 材料选择,降低应力集中,提升缸体抗变形能力。(1) 结构设计上,优化缸体壁厚分布,保证壁厚均匀,减少热传导差异,降低温度梯度引发的不均匀膨胀;采用“窄法兰+深卸荷槽”设计,减少法兰热容量,提升热传导与应力释放能力,避免法兰应力集中。优化滑销系统布局,合理设置死点,高中压缸以推力轴承为死点,低压缸以排汽中心为死点,严格控制纵横销间隙,选用镶嵌石墨滑块等自润滑滑销,降低摩擦系数,保障缸体自由胀缩;双层缸采用弹性胀销设计,允许内缸微小径向位移,避免内外缸膨胀干涉。同时优化法兰与螺栓设计,合理确定法兰尺寸与螺栓布置,确保预紧力均匀,平衡蒸汽压力对法兰的张口力,避免预紧力过大约束缸体膨胀。(2) 材料选择上,选用热膨胀系数稳定、高温强度及耐热疲劳性能优良的P91、P92等耐热钢,减少温度变化对膨胀的影响;螺栓选用20Cr1Mo1VTiB等高合金材料,保障预紧力稳定。结合机组参数与运行工况,针对性优化缸体结构,高压缸重点优化壁厚与卸荷槽,低压缸重点优化滑销系统与支撑结构。此外,通过数值模拟对缸体结构进行仿真分析,预判设计缺陷并提前优化,确保结构合理、应力分布均匀^[3]。

3.2 提升制造工艺水平

制造工艺的提升是减少缸体初始缺陷、控制变形隐患的关键,需严格把控铸造、焊接、机械加工等各环节的工艺质量,消除残余应力,确保缸体几何精度。(1) 铸造工艺方面,优化铸造模具设计,采用精准的温度控制技术,确保缸体铸件冷却速度均匀,减少铸造残余应力;加强铸件质量检测,及时发现并处理铸造过程中产生的气孔、缩孔、裂纹等缺陷,避免缺陷导致的应力集中。完善时效处理工艺,根据缸体材质与尺寸,合理确定自然时效或人工时效的时间与温度,确保铸造与加工过程中产生的残余应力充分消除,避免后续运行中应力释放引发变形。(2) 焊接工艺方面,规范焊接操作流程,严格控制焊接电流、焊接速度、焊接温度等参数,采用分段焊接、对称焊接等工艺,减少焊接残余应力;焊接后及时进行回火处理,消除焊接应力,提升焊缝质量,避免焊缝区域成为变形薄弱环节。(3) 机械加工方面,提升加工精度,严格控制缸体结合面平面度、圆柱度、圆度等几何

参数,确保符合设计标准;加工过程中采用合理的加工工艺,减少加工应力,加工完成后及时进行应力消除处理。加强滑销滑动面加工质量控制,提高表面平整度与光滑度,采用等离子喷涂技术处理滑动面,提高耐磨性和润滑性,为后续缸体正常膨胀奠定基础。此外,建立完善的制造质量检测体系,对缸体各环节的质量进行严格检测,不合格产品严禁出厂,从源头杜绝变形隐患。

3.3 规范安装流程与精度控制

规范的安装操作与精准的精度控制,能够有效避免安装偏差引发的缸体变形,确保缸体处于合理的受力状态与几何位置。安装前,对缸体、滑销系统、螺栓等部件进行全面检查,清理部件表面的杂物、锈蚀,检查部件尺寸与精度,确保符合安装要求;对滑销系统进行预润滑处理,涂抹高温润滑脂,确保滑销滑动顺畅。安装过程中,严格控制缸体的水平度与垂直度,采用精准的测量工具进行实时监测,调整缸体位置,确保缸体受力均匀,避免倾斜变形;优化猫爪支撑安装,确保支撑接触面积充足、受力均匀,控制猫爪支撑反力在允许范围内,避免局部受力过大引发变形。螺栓预紧环节,采用液压预紧方式,严格控制预紧力大小与均匀性,根据缸体材质、螺栓规格与运行工况,合理确定预紧力参数,避免预紧力不足或过大;预紧过程中采用对称预紧、分步预紧的方式,确保法兰结合面受力均匀,密封严密,避免漏汽引发局部温度异常。管道连接时,优化管道支吊架布置,采用柔性连接方式,减少管道对缸体的附加推力与力矩,确保缸体膨胀不受外部约束;安装完成后,对管道与缸体的连接部位进行检查,避免管道应力传递至缸体。安装结束后,进行全面的安装精度检测与试运行,监测缸体的膨胀情况、振动参数与温度分布,及时调整安装偏差,确保缸体处于最佳运行状态^[4]。

3.4 优化运行工况与操作规范

运行工况的优化与规范操作,是控制缸体变形的核心环节,能够有效减少热载荷、机械载荷对缸体的影响,避免变形累积。(1) 启停工况控制方面,制定科学的启停曲线,冷态启动时,采用分段升温策略,初始升温速率控制在2~3℃/min,待汽缸内外壁温差稳定后提升至4~5℃/min,避免升温过快导致温度梯度过大;热态启动时,严格匹配冲转参数,确保蒸汽温度高于汽缸金属温度50~80℃,避免蒸汽温度低于金属温度导致汽缸收缩,破坏动静间隙。停机时,采用缓慢降温策略,避免降温过快引发热应力突变,减少热疲劳损伤。(2) 负荷调节方面,严格控制负荷变化速率,将负荷变化速率控制在1~2%额定负荷/min,避免负荷骤升骤降导致蒸汽参数突

变,加剧缸体应力变化;当胀差接近临界值时,通过调整进汽量、抽汽参数或投入夹层加热装置,平衡转子与汽缸膨胀,避免胀差超标引发变形。运行过程中,严格控制蒸汽参数稳定性,确保主汽温度、压力稳定,避免参数波动导致缸体温度场频繁变化,减少膨胀量反复波动带来的疲劳损伤。加强滑销系统运行维护,定期检查滑销滑动面的清洁度与润滑状态,及时清理积灰、结垢,补充高温润滑脂,确保滑销滑动顺畅,避免卡涩引发膨胀受阻;定期检查猫爪支撑状态,及时处理磨损超标问题。(3)优化运行环境,冬季启动时,对缸体进行预热处理,减少汽缸初始温度与蒸汽的温差;夏季高温环境下,加强缸体散热,避免局部过热导致膨胀不均匀。规范运行操作流程,避免频繁启停机组,减少热冲击次数;运行过程中密切关注缸体温度、振动、膨胀量等参数,发现异常及时调整工况,避免变形加剧。

3.5 建立完善的监测与维护体系

建立完善的缸体变形监测与维护体系是及时发现隐患、避免变形加剧的关键。(1)监测系统建设上,在缸体法兰、进汽口等关键部位,布置温度传感器、应变片、线性位移传感器等设备,实时监测温度分布、应力状态、膨胀量及振动参数,严格控制温差与胀差:内壁与外壁温差 $\leq 100^{\circ}\text{C}$,法兰内外壁温差 $\leq 80^{\circ}\text{C}$,上下缸温差 $\leq 50^{\circ}\text{C}$,胀差控制在 $\pm 5\text{mm}$ 内,转速 3000r/min 时振动有效值 $\leq 0.03\text{mm}$ 。(2)搭建监测数据采集与分析系统,实时采集、存储数据并进行趋势分析,预判变形发展趋势,及时发出异常预警,定期校准维护监测设备,保障数据准确可靠。维护方面,制定定期维护计划,重点检查法兰结合面、滑销系统等关键部位,及时排查变形、磨损

等隐患;定期清理缸体杂物积垢,润滑维护滑销系统与猫爪支撑,更换磨损部件,对缸体进行应力检测与时效处理,消除残余应力。(3)针对监测发现的变形隐患分类处置:轻微变形通过调整工况、加强维护控制;中度变形采用机械校正、局部热处理修复;严重变形需停机全面检修或更换部件。同时建立缸体变形档案,记录制造、安装、运行等相关数据,为后续变形分析与策略优化提供支撑,持续提升变形控制水平^[5]。

结束语:缸体变形是影响发电厂汽轮机安全经济运行的关键问题,其形成与设计、制造、安装、运行等多个环节密切相关,危害具有传导性与累积性。通过针对性优化设计方案、提升制造工艺、规范安装流程、优化运行工况及建立完善监测维护体系,可有效防控缸体变形,减少故障发生。后续可结合实际运行数据持续优化策略,进一步提升缸体抗变形能力,为机组长期稳定运行提供坚实保障。

参考文献

- [1]代东文,韩振华,庄涛,等.发电厂汽轮机缸体变形研究[J].设备监理,2021(2):35-36,43.
- [2]冯道海,余占国.浅谈大型汽轮机低压缸拼缸结合面变形控制[J].建筑工程技术与设计,2021(34):1725-1726.
- [3]许力,张羽成.6F.03联合循环汽轮机停机后上下缸温差异异常增大的成因解析与对策研究[J].燃气轮机技术,2025,38(4):59-64
- [4]李传海,葛云双,翟观文.火力发电厂汽轮机设备安装检修技术分析[J].清洗世界,2024,40(10):181-183.
- [5]李军.热力发电厂汽轮机设备安装与检修[J].新疆钢铁,2024(4):191-193.