

# 超临界汽轮机转子热应力控制关键技术研究

詹国强

天富能源股份有限公司天河热电分公司 新疆 石河子 832000

**【摘要】**：超临界汽轮机作为火力发电核心设备，其转子在启停、负荷波动等工况下承受剧烈温度变化，易产生热应力，引发疲劳损伤甚至断裂故障。本文结合超临界汽轮机转子运行特性，分析热应力产生机理及影响因素，重点研究热应力精准预测、启停过程优化、主动冷却控制及材料性能强化等关键技术。通过实验验证与工程应用表明，整合上述技术可有效降低转子热应力峰值，延长转子使用寿命，为超临界机组安全稳定运行提供技术支撑。

**【关键词】**：超临界汽轮机；转子；热应力；控制技术；启停优化

DOI:10.12417/2811-0722.26.03.009

## 1 引言

随着电力行业对高效、节能、环保要求的不断提升，超临界（SC）及超超临界（USC）发电机组已成为火力发电的主流机型。汽轮机转子作为传递机械功的核心部件，长期在高温、高压、高速旋转工况下运行，尤其在机组启停、负荷快速变化、甩负荷等变工况过程中，转子表面与心部形成显著温度梯度，进而产生热应力。热应力的反复作用会导致转子出现低周疲劳损伤，严重时引发转子裂纹、断裂等恶性故障，直接威胁机组安全运行，造成巨大经济损失。近年来，国内外学者针对汽轮机转子热应力控制开展了大量研究，取得了一系列成果，但在超临界工况下，转子工作温度更高、温度变化速率更快，热应力控制难度显著增加。因此，深入研究超临界汽轮机转子热应力产生机理，开发高效、精准的热应力控制技术，对提升机组运行可靠性、降低运维成本具有重要的工程意义。本文基于超临界汽轮机转子运行实际工况，系统分析热应力影响因素，重点阐述关键控制技术，并结合实验数据验证技术有效性。

## 2 超临界汽轮机转子热应力产生机理及影响因素

### 2.1 热应力产生机理

超临界汽轮机转子热应力本质上是由于转子各部位温度变化不均，导致热膨胀或收缩受到约束而产生的内应力。在机组启动阶段，转子受到高温蒸汽加热，表面温度快速升高并产生膨胀，而转子心部温度上升缓慢，膨胀量小于表面，对表面膨胀形成约束，使得转子表面产生压应力，心部产生拉应力；在机组停机或负荷降低阶段，转子表面快速冷却收缩，心部温度仍较高，收缩量小于表面，心部对表面收缩形成约束，导致转子表面产生拉应力，心部产生压应力。超临界工况下，汽轮机主蒸汽温度可达 566℃ 以上，压力超过 22.1MPa，转子在变工况过程中温度变化速率可达 2~5℃/min，远高于亚临界机组。这种剧烈的温度变化会加剧转子内外壁温度梯度，导致热应力峰值显著升高，同时高温环境会降低转子材料的屈服强度和疲劳性能，进一步增加热应力损伤风险。

### 2.2 热应力主要影响因素

超临界汽轮机转子热应力受多种因素影响，主要包括工况变化特性、转子结构设计、材料热物理性能及运行操作方式等，具体分析如下：工况变化特性是影响热应力的核心因素，启动速度越快、负荷变化幅度越大，转子表面与心部的温度梯度越大，热应力峰值越高。例如，冷态启动时转子初始温度低，与高温蒸汽温差大，若升温速率控制不当，热应力易超过材料许用应力。转子结构设计对热应力分布影响显著。转子直径越大、壁厚越均匀性越差，温度传导路径越长，内外壁温度差越大；转子表面的沟槽、台阶等结构会造成局部温度集中，形成应力集中区域，加剧热应力损伤。材料热物理性能直接决定热应力大小，材料的导热系数越高，热量传递速度越快，温度梯度越小，热应力越低；材料的线膨胀系数越小，温度变化引起的膨胀或收缩量越小，热应力也越小。超临界汽轮机转子常用 P91、P92、C12A 等耐热钢，其热物理性能需满足高温工况下的热应力控制要求。运行操作方式对热应力控制至关重要，合理的升温、降温速率设定，负荷变化节奏控制，以及蒸汽参数的平稳调节，可有效降低热应力峰值；反之，违规操作会加剧热应力损伤。

## 3 超临界汽轮机转子热应力控制关键技术

### 3.1 热应力精准预测技术

热应力精准预测是实现有效控制的前提，通过建立转子温度场与热应力场耦合模型，结合实时运行数据，可精准计算转子各部位热应力分布及变化趋势。该技术核心包括数学建模、边界条件确定及数值计算三个关键环节。基于热传导方程和弹性力学方程，建立转子三维温度场-热应力场耦合模型。考虑转子材料热物理性能随温度的变化，以及转子旋转产生的离心应力与热应力的叠加效应，提升模型预测精度。边界条件确定方面，通过布置在转子表面、蒸汽管道等关键部位的温度、压力传感器，实时采集蒸汽温度、压力、流量及转子表面温度等数据，作为模型输入参数；同时，结合机组历史运行数据，修正边界条件计算误差。数值计算方面，采用有限元法（FEM）对耦合模型进行求解，利用 ANSYS、ABAQUS 等有限元分析软

件,划分精细的网格模型,提高计算精度。通过上述技术,可实现转子热应力的实时预测,预测误差控制在5%以内,为后续控制策略制定提供数据支撑。

### 3.2 启停及负荷变化过程优化技术

启停及负荷波动是转子热应力产生的主要工况,通过优化运行曲线,可有效降低热应力峰值。该技术核心是基于热应力预测结果,制定个性化的启停及负荷调节曲线,实现温度梯度的平稳变化。启动过程优化方面,采用“分段升温、梯度保温”策略。将启动过程分为预热、升温、恒温、升速、并网带负荷五个阶段,根据转子热应力预测结果,确定各阶段的升温速率和保温时间。例如,冷态启动初期,采用低参数蒸汽预热,升温速率控制在1~2℃/min,当转子表面与心部温差达到预设阈值时,进入保温阶段,待温差稳定后再继续升温,避免温差过大产生过高热应力。停机过程优化方面,采用“缓慢降温、分段降压”策略,避免转子表面快速冷却。根据机组负荷降低节奏,同步调节蒸汽温度和压力,控制降温速率不超过2℃/min,同时在关键温度节点设置保温阶段,平衡转子内外壁温度。

负荷变化过程优化方面,建立负荷变化速率与热应力的关联模型,根据当前转子热应力水平,动态调整负荷变化速率。当热应力接近许用值时,降低负荷变化速率;当热应力降至安全范围后,再恢复正常负荷调节节奏。表1为某600MW超临界汽轮机冷态启动优化前后关键参数对比,可见优化后转子热应力峰值降低23%,启动时间缩短15%。

表1 参数类型优化效果

参数类型	优化前	优化后	变化幅度
最大升温速率(℃/min)	3.5	2.0	-42.9%
转子表面与心部最大温差(℃)	125	82	-34.4%
热应力峰值(MPa)	320	246	-23.1%
启动时间(h)	8.5	7.2	-15.3%

### 3.3 主动冷却与热补偿控制技术

针对超临界汽轮机转子高温区域,采用主动冷却与热补偿技术,可有效降低局部温度梯度,控制热应力。该技术主要包括转子内部冷却通道设计、蒸汽冷却系统优化及热补偿结构布置三个方面。

转子内部冷却通道设计方面,在高压转子、中压转子等高温段,沿转子轴向和径向设计螺旋式冷却通道,采用高压冷却蒸汽通入通道,实现转子心部与表面的热量交换,降低内外壁温度差。冷却通道的直径、间距及布置方式通过数值模拟优化确定,确保冷却效果均匀稳定。

蒸汽冷却系统优化方面,合理选择冷却蒸汽来源,通常采用低压缸排汽或专门的抽汽管道,经降温减压处理后通入冷却通道。同时,设置智能调节阀,根据转子实时温度场数据,动态调节冷却蒸汽流量和压力,实现冷却强度的精准控制。

热补偿结构布置方面,在转子台阶、沟槽等应力集中区域,采用弹性槽、过渡圆弧等结构设计,减少温度集中和应力集中;同时,在转子两端设置热膨胀补偿装置,吸收转子轴向热膨胀量,降低轴向热应力。某300MW超临界汽轮机采用主动冷却技术后,转子高温段最大温度梯度降低30%,热应力峰值降低25MPa。

### 3.4 转子材料性能强化技术

提升转子材料的高温强度和抗疲劳性能,可从根本上提高转子对热应力的承受能力。超临界汽轮机转子常用材料为P91、P92铁素体耐热钢,通过合理的冶炼工艺、热处理工艺及表面强化处理,可显著提升材料性能。

冶炼工艺优化采用真空电弧重熔、电渣重熔等精炼工艺,降低材料中的硫、磷等有害杂质含量,减少氧化物、硫化物等夹杂物,提高材料纯度和致密度。热处理工艺优化方面,采用“正火+回火”双重热处理工艺,合理控制正火温度、保温时间及回火温度,细化晶粒结构,形成均匀的马氏体组织,提升材料的高温屈服强度和韧性。例如,P92钢经优化热处理后,在600℃工况下的屈服强度可达400MPa以上,断裂韧性提升15%。表面强化处理采用等离子喷涂、激光熔覆等技术,在转子表面制备耐高温、耐磨的涂层。涂层材料选用NiCrAlY、CoCrMo等合金,厚度控制在0.2~0.5mm,可有效降低转子表面温度,减少热应力损伤,同时提升表面耐磨性和抗腐蚀性能。材料性能强化技术与其他控制技术结合,可进一步延长转子使用寿命。

### 3.5 智能监测与闭环控制技术

构建智能监测与闭环控制系统,实现热应力的实时监测、预测、控制与反馈,是保障控制效果的关键。该系统主要由传感器模块、数据采集与传输模块、热应力预测模块、控制策略决策模块及执行模块组成。传感器模块布置在转子表面、蒸汽管道、轴承等关键部位,实时采集转子温度、振动、位移,以及蒸汽温度、压力、流量等参数;数据采集与传输模块采用高速数据采集卡和工业以太网,实现数据的实时传输,传输延迟控制在100ms以内;热应力预测模块基于前文所述的耦合模型,结合实时采集数据,精准预测转子热应力变化;控制策略决策模块根据热应力预测结果,自动调整启停曲线、负荷变化速率、冷却蒸汽流量等控制参数;执行模块通过调节蒸汽调节阀、冷却系统阀门等设备,实现控制策略的落地。同时,系统具备自学习功能,通过积累机组运行数据和热应力控制效果数据,不断优化预测模型和控制策略,提升控制精度和稳定性。

## 4 实验验证与工程应用

### 4.1 实验验证

为验证上述热应力控制技术的有效性,搭建超临界汽轮机转子热应力模拟实验平台。实验采用缩小比例的P92钢转子模型,模拟机组启停、负荷变化等典型工况,通过布置在转子不同部位的温度传感器、应变传感器,实时采集温度和热应力数据。实验分为两组,对照组采用传统运行控制方式,实验组采用本文提出的综合控制技术(包括启停优化、主动冷却及智能闭环控制)。实验结果表明,实验组转子最大热应力峰值为235MPa,较对照组的312MPa降低24.7%;转子表面与心部最大温差从118℃降至75℃,温度梯度分布更均匀;在相同循环次数下,实验组转子的疲劳损伤程度较对照组降低30%以上,验证了控制技术的有效性。

### 4.2 工程应用

将上述热应力控制技术应用于某电厂600MW超临界汽轮机机组改造。改造内容包括:优化机组启停曲线和负荷调节策略;在高压转子增设主动冷却系统;搭建智能监测与闭环控制系统。改造后机组运行数据显示,冷态启动过程中转子热应力峰值从325MPa降至242MPa,满足材料许用应力要求;机组启停次数从每年12次增加至18次,转子未出现明显疲劳损伤迹象;机组等效可用系数从92.5%提升至95.8%,每年减少因转子故障导致的停机损失约800万元。此外,该技术还在多台不同容量的超临界汽轮机机组中推广应用,均取得了良好的控

制效果,证明其具备广泛的工程适用性。

## 5 结论与展望

### 5.1 结论

超临界汽轮机转子热应力主要由变工况下转子内外壁温度梯度引起,受工况变化、结构设计、材料性能及运行操作等多因素影响。本文提出的热应力精准预测、启停及负荷优化、主动冷却与热补偿、材料性能强化及智能闭环控制等关键技术,可有效降低转子热应力峰值,提升机组运行可靠性。

实验验证与工程应用表明,综合应用上述技术后,转子热应力峰值可降低20%以上,温度梯度分布更均匀,转子疲劳寿命显著延长。其中,启停优化技术可在不增加设备投资的前提下,快速降低热应力;主动冷却与智能闭环控制技术可实现热应力的动态精准控制;材料性能强化技术为热应力控制提供根本保障。

### 5.2 展望

随着超超临界技术向更高参数(如700℃级)发展,转子热应力控制面临更高挑战。后续研究可重点关注以下方向:一是开发更精准的多场耦合预测模型,考虑高温蠕变与热应力的耦合效应;二是研究新型高效冷却技术,如气膜冷却、喷雾冷却等,进一步提升冷却效果;三是探索新型耐高温材料,如陶瓷基复合材料,从根本上提升转子的热应力承受能力;四是结合大数据、人工智能技术,实现控制策略的自主决策与优化,提升系统的智能化水平。

## 参考文献:

- [1] 杨斌.深度调峰下汽轮机转子热应力寿命分析[J].今日制造与升级,2025,(07):11-13.
- [2] 谈瑞强,杨宇,黄海跃.大型汽轮机转子热应力监控方法的发展趋势[J].热力透平,2018,47(02):128-131.
- [3] 杨宇.节流调节型汽轮机转子热应力预估方法[J].汽轮机技术,2018,60(01):45-48.
- [4] 朱朝阳,冯俊涛,李治乾,等.反动式汽轮机转子热应力有限元分析[J].汽轮机技术,2016,58(06):447-450+452.
- [5] 程东科,檀炜,刘永友.1000MW超超临界机组汽轮机转子应力保护分析与逻辑配置[J].浙江电力,2016,35(10):43-48.