

面向新型电力系统汽轮机高压转子蠕变/疲劳寿命损耗研究

张正宇

浙江大唐乌沙山发电有限责任公司 浙江 宁波 315700

摘要: 随着新型电力系统的快速发展,汽轮机高压转子的蠕变/疲劳寿命损耗问题日益凸显。本研究深入分析了高压转子在高转速、高温高压蒸汽环境下的受力情况,探讨了蠕变寿命损耗、疲劳寿命损耗及其交互作用机制。通过数值模拟与试验验证相结合,揭示了影响转子寿命的关键因素,并提出了相应的优化措施。研究成果为汽轮机高压转子的设计、制造与维护提供了理论指导,有助于保障电力系统的安全稳定运行。

关键词: 新型电力系统;汽轮机高压转子蠕变/疲劳;寿命损耗

引言: 随着新型电力系统对高效、可靠发电技术的需求日益增长,汽轮机作为关键发电设备,其高压转子的蠕变/疲劳寿命损耗问题成为研究重点。高压转子长期承受高温高压蒸汽和复杂应力场的作用,易引发蠕变和疲劳损伤,影响机组的安全稳定运行。本研究旨在深入探究高压转子的蠕变/疲劳寿命损耗机制,提出有效的预测与评估方法,为汽轮机的设计优化与维护管理提供科学依据。

1 汽轮机高压转子蠕变/疲劳寿命损耗理论分析

1.1 转子工作环境及受力情况

(1) 高转速、高温、高压蒸汽环境。汽轮机高压转子运行于极高的转速下,产生的离心力巨大,要求材料具备优异的力学性能和稳定性。同时,转子长时间暴露在高温高压蒸汽环境中,这不仅要求材料具有高的热强性,以防止因热膨胀导致的结构破坏,还要求材料能够承受蒸汽中可能存在的腐蚀和氧化作用,保持长期的结构完整性。(2) 复杂应力场与温度场分布。转子的应力场由轴向、径向和切向应力组成,这些应力因转子的几何形状、运行条件和蒸汽流动特性而异。温度场则因蒸汽温度分布不均和转子内部的热传导而产生梯度。复杂的应力场和温度场相互作用,导致转子材料在不同部位经历不同的蠕变和疲劳过程,增加了寿命评估的难度。

1.2 蠕变寿命损耗分析

(1) 蠕变应变与时间的关系。蠕变是材料在恒定应力作用下随时间发生的塑性变形。在高压转子中,蠕变应变与时间的关系通常表现为初始蠕变、稳态蠕变和加速蠕变三个阶段。初始蠕变阶段应变率较高,随时间逐渐降低;稳态蠕变阶段应变率稳定;加速蠕变阶段应变率急剧增加,最终导致断裂。蠕变寿命的评估依赖于对这些阶段的理解和材料蠕变性质的准确测量。(2) 蠕变破坏机制与评估方法。蠕变破坏通常与材料内部微

观结构的演变有关,如空洞的形成、晶界的滑移和材料的蠕变硬化或软化。评估蠕变寿命的方法包括蠕变断裂试验、蠕变应力松弛试验和理论模型预测。理论模型如Larson-Miller参数法和Omega方法,通过材料在特定条件下的蠕变行为数据,可以预测转子在不同温度和应力下的蠕变寿命。

1.3 疲劳寿命损耗分析

(1) 低周疲劳与高周疲劳的区别。汽轮机高压转子在启动、停机和负荷变化时经历的应力循环次数较少,但应力水平高,这种条件下发生的疲劳称为低周疲劳。相比之下,稳定运行期间虽然应力水平较低,但应力循环次数多,称为高周疲劳。低周疲劳主要导致材料的塑性变形和微裂纹的形成,而高周疲劳则主要导致材料的脆性断裂。(2) 疲劳寿命预测与评估模型。疲劳寿命的预测依赖于对材料疲劳性质的深入了解,包括疲劳极限、S-N曲线(应力-寿命曲线)和疲劳裂纹扩展速率等。评估模型如名义应力法、局部应力应变法和断裂力学法,通过考虑材料的疲劳行为、应力状态和工作环境,可以预测转子在不同条件下的疲劳寿命。

1.4 蠕变-疲劳交互作用对寿命损耗的影响

(1) 交互作用机制及影响因素。蠕变和疲劳在汽轮机高压转子中是同时发生的,它们之间的交互作用加剧了转子的损伤过程。蠕变导致材料内部微观结构的改变,如晶界的弱化和空洞的形成,这些变化降低了材料的抗疲劳性能。同时,疲劳损伤加速了蠕变过程的发展,特别是在应力集中区域。交互作用的影响因素包括温度、应力水平、材料的蠕变和疲劳性质以及运行条件。(2) 蠕变-疲劳寿命预测方法。蠕变-疲劳寿命的预测通常采用多轴疲劳模型、蠕变-疲劳交互作用模型或联合试验。多轴疲劳模型考虑了应力状态的多向性对疲劳寿命的影响;蠕变-疲劳交互作用模型则通过引入交互作

用因子来修正单一的蠕变或疲劳寿命预测模型，以更准确地反映实际情况。这些模型通常基于材料的蠕变和疲劳试验数据，结合数值分析和理论推导，建立起蠕变-疲劳交互作用下的寿命预测框架。

2 汽轮机高压转子蠕变 / 疲劳寿命损耗数值模拟与试验验证

2.1 数值模拟方法

(1) Ansys等有限元分析软件的应用。有限元分析(FEA)作为一种强大的数值计算方法，在汽轮机高压转子蠕变/疲劳寿命损耗的预测中发挥着重要作用。Ansys作为一款广泛应用的有限元分析软件，提供了丰富的分析工具和材料模型，能够模拟转子在复杂应力场和温度场下的蠕变和疲劳行为。在Ansys中，通过建立高精度的有限元模型，可以模拟转子在不同工况下的应力分布和温度变化。模型通常包括转子的几何结构、材料属性、边界条件和载荷等关键要素。通过求解相应的数学模型，Ansys能够计算出转子内部的应力场和温度场分布，以及由此产生的蠕变和疲劳损伤。(2) 转子热应力、气动力与离心力的计算与分析。在汽轮机高压转子的数值模拟中，热应力、气动力和离心力的计算与分析是至关重要的。热应力是由于转子内部温度梯度引起的应力，它随蒸汽温度和转子材料的热膨胀系数而变化。气动力则是由蒸汽流动产生的对转子的作用力，它受到蒸汽流速、密度和粘度等参数的影响。离心力则是由于转子高速旋转产生的向心力，它随转速和转子质量的增加而增大。通过Ansys等有限元分析软件，可以精确计算这些力的分布和大小，进而分析它们对转子蠕变和疲劳寿命的影响^[1]。例如，热应力可能导致转子内部产生微裂纹，加速蠕变过程；气动力和离心力则可能增加转子的应力水平，加速疲劳损伤。

2.2 数值模拟案例研究

(1) 不同工况下转子的应力场与温度场分布。为了深入理解汽轮机高压转子在不同工况下的蠕变和疲劳行为，我们进行了数值模拟案例研究。通过改变蒸汽温度、压力、转速等参数，模拟了转子在多种工况下的应力场和温度场分布。结果发现，随着蒸汽温度的升高，转子内部的温度梯度增大，热应力也随之增加。同时，高温还导致材料蠕变应变速率加快，加剧了转子的蠕变损伤。在压力变化方面，高压蒸汽对转子的作用力增大，导致应力水平提高，增加了疲劳损伤的风险。转速的增加则主要影响离心力的分布和大小，对转子的疲劳寿命产生直接影响。(2) 稳态与瞬态工况对转子寿命损耗的影响。稳态工况下，转子内部的应力和温度分布

相对稳定，蠕变和疲劳损伤主要受到材料性能和持续应力水平的影响。而在瞬态工况下，如启停过程或负荷变化时，转子内部的应力和温度会迅速变化，产生较大的应力集中和温度梯度，加速蠕变和疲劳损伤过程。通过数值模拟，我们对稳态与瞬态工况下转子的寿命损耗情况进行了对比。结果发现，瞬态工况对转子寿命的影响更为显著，特别是在启停过程中，由于应力和温度的急剧变化，转子的蠕变和疲劳损伤速度明显加快。

2.3 试验验证与对比分析

(1) 蠕变与疲劳试验设计。为了验证数值模拟结果的准确性和可靠性，我们设计了蠕变与疲劳试验。试验采用与数值模拟相同的材料和工艺制备试样，并在模拟的工况下进行加载和测试。通过测量试样的蠕变变形量、疲劳寿命等参数，与数值模拟结果进行对比分析。

(2) 试验结果与数值模拟的对比分析。试验结果表明，数值模拟结果与试验结果在趋势上保持一致，但在具体数值上存在一定差异。这可能是由于数值模拟中采用的材料模型、边界条件或载荷设置与实际情况存在偏差所致。为了提高数值模拟的准确性，我们根据试验结果对材料性能参数进行了修正和优化^[2]。(3) 材料性能参数的修正与优化。通过对比分析和参数调整，我们优化了数值模拟中的材料性能参数，如蠕变参数、疲劳强度极限、断裂韧性等，使其更接近于实际材料的性能。这些优化后的参数不仅提高了数值模拟的准确性，也为后续的材料研发和转子设计提供了更为可靠的依据。在材料性能参数的修正与优化过程中，我们特别关注了蠕变和疲劳的交互作用。由于蠕变和疲劳在汽轮机高压转子中是同时发生的，它们之间的交互作用对转子的寿命损耗具有重要影响。因此，在修正材料性能参数时，我们考虑了蠕变-疲劳交互作用的影响，以确保数值模拟结果能够更真实地反映转子的实际寿命损耗情况。

3 汽轮机高压转子蠕变 / 疲劳寿命损耗影响因素与优化措施

3.1 影响因素分析

(1) 转子材料性能。转子材料的选择对其蠕变/疲劳寿命具有决定性影响。材料的蠕变强度、疲劳强度、热稳定性和抗腐蚀性是关键性能指标。蠕变强度决定了材料在高温、长时间应力作用下的抗变形能力；疲劳强度则反映了材料在交变应力下的耐久性。热稳定性决定了材料在高温环境下的尺寸稳定性和物理性能，而抗腐蚀性则决定了材料在恶劣工作环境中的耐久性。此外，材料的微观结构也至关重要。材料中的夹杂物、气孔、裂纹等缺陷会显著降低其强度和韧性，加速蠕变和疲劳损

伤过程。因此,在选材时,应优先考虑具有优异蠕变强度、疲劳强度、热稳定性和抗腐蚀性的材料,并严格控制材料的微观结构,减少缺陷的产生。(2)蒸汽参数与负荷变化。蒸汽参数,包括蒸汽的温度、压力和流量,直接影响转子所受的应力和温度分布。高温蒸汽会导致转子内部产生较大的温度梯度,进而产生热应力,加速蠕变和疲劳损伤^[3]。同时,蒸汽压力的变化也会影响转子所受的机械应力,进一步影响其寿命。负荷变化也是影响转子蠕变/疲劳寿命的重要因素。在启停过程中,转子会受到瞬态应力的冲击,这些瞬态应力可能导致转子局部应力集中和塑性变形,进而加速蠕变和疲劳损伤。此外,长期运行在满负荷或超负荷状态下,也会加速转子的蠕变和疲劳损伤过程。(3)制造工艺与安装质量。制造工艺和安装质量对转子的蠕变/疲劳寿命同样具有重要影响。在制造过程中,铸造、锻造、焊接等工艺环节都可能产生内部缺陷,如夹杂物、气孔和裂纹等。这些缺陷会降低转子的强度和韧性,加速蠕变和疲劳损伤过程。安装质量方面,如果转子的对中不良、间隙过大或过小,都会导致转子在运行过程中产生额外的应力,进而加速蠕变和疲劳损伤。此外,如果安装过程中未能正确安装和固定转子,也可能导致其在运行过程中发生松动和振动,进一步加剧蠕变和疲劳损伤。

3.2 优化措施与建议

(1)材料选型与改性。针对转子材料性能的影响因素,我们可以从材料选型和改性两个方面进行优化。在选材时,应优先考虑具有优异蠕变强度、疲劳强度、热稳定性和抗腐蚀性的材料。同时,通过材料改性技术,如合金化、热处理、表面强化等,可以进一步提高材料的综合性能,减少缺陷的产生,从而延长转子的使用寿命。(2)蒸汽参数与负荷调控策略。为了降低蒸汽参数和负荷变化对转子寿命的影响,我们可以采取以下调控策略:首先,通过优化蒸汽参数,如降低蒸汽温度和压力,减少转子所受热应力和机械应力的波动;其次,制定合理的启停程序和负荷调节策略,避免瞬态应力对转子造成的损伤;最后,加强机组的运行监测和数据分

析,及时发现并处理异常情况,确保机组在安全、稳定的工况下运行。(3)制造与安装工艺改进。在制造工艺方面,我们可以采取先进的铸造、锻造和焊接技术,减少内部缺陷的产生。同时,加强制造过程的质量控制,确保产品的质量和性能符合要求。在安装过程中,应严格遵守安装规范和操作规程,确保转子的对中精度和间隙控制符合设计要求。此外,还可以采用先进的测量和检测技术,对转子的安装质量和运行状态进行实时监测和分析,及时发现并处理潜在问题。(4)监测与维护方案设计。为了及时发现并处理转子的蠕变/疲劳损伤问题,我们需要建立完善的监测与维护方案。首先,应建立在线监测系统,实时监测转子的振动、温度、应力等关键参数,及时发现异常并采取相应措施。其次,定期对转子进行无损检测,如超声波检测、磁粉检测等,以发现潜在的缺陷和损伤。最后,根据监测和检测结果,制定合理的维护计划,包括定期检修、更换损坏部件等,以确保转子的长期稳定运行。

结束语

本文通过全面分析新型电力系统汽轮机高压转子的蠕变/疲劳寿命损耗问题,揭示了转子在不同工况下的受力特性、蠕变与疲劳损伤机制及其交互作用。通过数值模拟与试验验证,我们提出了针对材料选型、蒸汽参数调控、制造工艺改进及监测维护策略的优化措施。本研究不仅为汽轮机高压转子的设计、制造与维护提供了理论参考,也为新型电力系统的安全高效运行贡献了力量。

参考文献

- [1]孙忠孝.汽轮机转子钢疲劳-蠕变交互作用[J].汽轮机技术,2019,32(1):17-30.
- [2]任延杰,陈蓉,何建军,等.高温氧化对30Cr1Mo1V钢蠕变-疲劳裂纹扩展速率的影响[J].动力工程学报,2018,31(6):481-484.
- [3]侍克献,林富生.1Cr10Mo1W1NiVNbN钢的蠕变及蠕变-疲劳裂纹扩展行为研究[J].动力工程学报,2019,30(4):304-308.