

# 汽轮机高温高压运行下的材料选择和疲劳寿命分析

王毅

华电新疆发电有限公司乌鲁木齐分公司 新疆 乌鲁木齐 830000

**摘要:** 本文深入探讨了汽轮机在高温高压极端运行环境下材料选择与疲劳寿命评估的关键技术。首先,详细分析了汽轮机工作环境的温度范围、压力等级及介质特性对材料性能的影响。随后,基于高温强度、抗氧化性、抗腐蚀性、热膨胀系数等关键因素,提出了材料选择的原则,并介绍了多种常见高温合金材料的特性及其适用场景。进一步,本文阐述了高温疲劳寿命评估的多种方法,包括高温蠕变试验、高温循环试验及有限元模拟分析,并探讨了这些方法在汽轮机材料评估中的综合应用策略。针对汽轮机叶片、转子等关键部件,本文利用先进的模拟技术分析了其疲劳寿命特性,并提出了优化设计的具体措施。最后,探讨了材料性能提升的新技术与新型合金材料的应用前景,为汽轮机高温高压运行下的材料选择与疲劳寿命优化提供了技术参考。

**关键词:** 汽轮机; 高温高压; 材料选择; 疲劳寿命; 有限元模拟; 高温合金

引言: 随着能源需求的不断增长,汽轮机作为电力、石化等行业的重要动力设备,其运行效率与可靠性成为关注的焦点。高温高压环境对汽轮机材料提出了严峻挑战,合理的材料选择与科学的疲劳寿命评估成为确保汽轮机长期稳定运行的关键。本文旨在从技术角度深入剖析汽轮机高温高压运行下的材料选择与疲劳寿命分析,为相关领域的研究与工程实践提供理论支持与技术指导。

## 1 汽轮机高温高压运行环境的特性分析

### 1.1 汽轮机在高温高压下工作的具体条件

#### 1.1.1 温度范围

汽轮机内部的工作温度通常远高于常规工作环境,尤其是蒸汽轮机,其入口蒸汽温度可高达566°C(超超临界机组)甚至更高。这样的高温环境要求材料具备卓越的耐热性,以防止高温下发生软化、蠕变或热疲劳。

#### 1.1.2 压力等级

与高温相伴的是高压环境。汽轮机内部,尤其是蒸汽轮机的高压缸和再热缸,承受着数十到数百兆帕的压力。这种高压环境不仅增加了材料的应力水平,还可能影响材料的微观结构和力学性能。

#### 1.1.3 介质特性

汽轮机工作介质主要为蒸汽或燃气,这些介质在高温高压下具有极高的活性和腐蚀性。蒸汽中的水分、氧气及可能的杂质会与材料表面发生化学反应,导致氧化、腐蚀和应力腐蚀开裂等问题。燃气轮机则面临更复杂的热化学环境,包括高温氧化、热腐蚀和积碳等。

## 1.2 高温高压环境对汽轮机材料性能的影响

### 1.2.1 强度与塑性

随着温度的升高,材料的屈服强度和抗拉强度通常

会降低,而塑性变形能力则可能增强。这种变化可能导致材料在高温下无法承受设计载荷,从而引发失效。此外,高温下材料的蠕变行为也变得显著,长期蠕变会导致部件尺寸变化、应力重新分布和性能退化。

### 1.2.2 抗氧化性

高温环境中的氧气会与材料表面发生反应,形成氧化层。氧化层的形成速率和性质取决于材料的化学成分和微观结构。如果氧化层疏松多孔或易于剥落,则会加速材料内部的进一步氧化,导致材料性能迅速下降。

### 1.2.3 抗腐蚀性

在高温高压的介质中,材料还可能遭受各种形式的腐蚀,包括均匀腐蚀、点蚀、缝隙腐蚀和应力腐蚀开裂等。这些腐蚀形式会破坏材料的表面和内部结构,降低材料的力学性能和耐久性。

### 1.2.4 热膨胀系数

不同材料在高温下的热膨胀系数不同,这可能导致汽轮机内部部件之间产生热应力。热应力是材料在温度变化过程中由于热膨胀系数不匹配而产生的内部应力,它可能导致部件变形、开裂或失效。

## 2 高温高压下汽轮机材料的选择原则

### 2.1 材料选择需评估的核心要素

在极端高温高压环境下,汽轮机材料的选择必须基于精确的数据与深入的技术考量。首要评估的是材料的高温强度特性,特别是在600°C及以上的高温环境中,材料需展现卓越的抗拉与屈服强度,以有效抵抗蠕变与疲劳失效。抗氧化性亦是关键,要求材料表面能形成稳定且致密的氧化层,减缓高温氧化速率,确保长期服役能力。此外,抗腐蚀性在含有腐蚀性介质的环境中尤为重

要,需确保材料能够抵御应力腐蚀开裂等风险。热膨胀系数的匹配性亦需细致考量,以防止因热应力集中导致的部件失效。同时,材料的经济性、加工难易程度及供应链稳定性也是不可忽视的评估维度。

## 2.2 优选的高温合金材料概览

针对汽轮机的高温高压运行条件,镍基合金因其卓越的高温强度、出色的抗氧化与抗腐蚀性能而备受青睐。例如,Inconel718合金,其工作温度上限可达650°C,展现出优异的抗蠕变能力与良好的加工性能,是汽轮机叶片、转子等核心部件的理想选择。铁基合金虽成本较低,但在高温下的抗氧化与抗腐蚀性能相对较弱,需根据具体应用场景权衡利弊。钴基合金则以其极端条件下的高强度与耐磨性,在特定需求下得到应用。材料选择时,需结合具体工况、性能要求及成本效益进行综合分析。

## 2.3 材料选择的科学方法与验证流程

材料选择过程应基于科学严谨的方法与技术手段。首先,通过精密的材料性能测试,获取包括力学性能、抗氧化性、抗腐蚀性在内的关键数据,为选择提供量化依据。其次,利用先进的有限元模拟分析技术,预测材料在高温高压环境下的应力分布与疲劳寿命,评估其在实际工况中的表现。同时,参考行业权威标准与规范,以及成功应用案例,为材料选择提供有力支持。选定材料后,需进行严格的材料验证试验,包括模拟工况下的性能测试与长期稳定性评估,确保所选材料在实际应用中能够稳定可靠地运行。

## 3 高温高压下汽轮机材料的疲劳寿命评估方法

### 3.1 高温疲劳寿命评估的常用方法

在高温高压环境下,汽轮机材料的疲劳寿命评估是确保设备长期安全运行的关键环节。常用的评估方法包括但不限于疲劳试验法、断裂力学分析法以及基于数值模拟的预测方法。疲劳试验法通过模拟实际工作条件下的循环加载,直接测量材料的疲劳寿命,数据精确但耗时长、成本高。断裂力学分析法则利用材料的裂纹扩展速率和应力强度因子等参数,通过理论计算预测疲劳寿命,具有经济性和高效性。此外,基于有限元模拟的预测方法能够综合考虑材料性能、工作条件及结构细节,对疲劳寿命进行全面评估,是现代工程技术中的重要手段。

### 3.2 每种方法的原理、操作步骤及优缺点

#### 3.2.1 疲劳试验法

原理在于通过控制应力或应变水平,对试样进行周期性的加载与卸载,直至试样断裂,记录疲劳寿命。操作步骤包括试样制备、试验装置安装、加载制度设定、数据采集与分析等。优点在于结果直观、可靠,但耗时

长、成本高,且难以完全模拟复杂工况。

#### 3.2.2 断裂力学分析法

基于断裂力学的原理,通过测量材料的裂纹尺寸、形状及扩展速率,结合应力强度因子等参数,预测裂纹扩展至临界尺寸所需的疲劳寿命。操作步骤包括裂纹检测、参数测量、理论计算等。优点在于经济高效,适用于复杂结构,但依赖于裂纹检测技术的准确性。

#### 3.2.3 数值模拟预测法

利用有限元分析软件,建立材料的微观结构模型或宏观结构模型,考虑温度、应力、应变等因素的影响,对疲劳寿命进行数值模拟预测。操作步骤包括模型建立、参数设置、求解计算、结果分析等。优点在于能够全面考虑各种因素,预测精度高,但计算量大,对计算资源要求较高。

## 3.3 综合评估策略

在实际应用中,为了更准确地评估高温高压下汽轮机材料的疲劳寿命,建议采用综合评估策略。首先,根据具体工况和材料特性选择合适的评估方法;其次,结合多种方法进行相互验证和补充,以提高评估结果的准确性和可靠性;最后,根据评估结果制定相应的维护和更换计划,以确保设备的安全运行。例如,可以先通过疲劳试验法获取基础数据,再利用断裂力学分析法和数值模拟预测法进行进一步验证和优化。

## 4 汽轮机关键部件的疲劳寿命分析与优化

### 4.1 关键部件的疲劳寿命特点

汽轮机关键部件,如叶片、转子及联轴器等,在极端高温高压及复杂应力状态下运行,其疲劳寿命呈现出高度的非线性和多因素耦合特性。这些部件不仅需承受循环载荷导致的低周疲劳,还可能面临高温蠕变、氧化腐蚀等长期效应引起的损伤累积。此外,材料微观结构的不均匀性、加工缺陷及运行过程中的动态变化,均会显著影响疲劳寿命的预测精度。因此,针对这些关键部件的疲劳寿命分析,需采用高度专业化的技术手段,以捕捉并量化这些复杂因素的影响。

### 4.2 利用有限元模拟进行深入分析

为了精确评估汽轮机关键部件的疲劳寿命,有限元模拟技术成为不可或缺的工具。通过建立高精度的三维几何模型,并赋予材料真实的力学性能和热物理性能参数,可以模拟部件在实际工况下的应力应变分布、温度场变化及裂纹扩展过程。在模拟过程中,需采用先进的算法处理非线性问题,如材料非线性(如蠕变、塑性变形)、几何非线性(如大变形、接触)及边界条件非线性(如温度梯度、热应力)等。通过模拟结果,可以直观展示部件

的疲劳损伤分布,预测潜在的疲劳裂纹萌生位置及扩展路径,为后续的使用寿命评估和优化设计提供有力支持。

#### 4.3 优化措施

基于有限元模拟的疲劳寿命分析结果,可采取多种优化措施以提高汽轮机关键部件的疲劳寿命。首先,针对疲劳损伤集中的区域,通过改变部件的几何形状、尺寸或材料配方,以降低应力集中因子和裂纹扩展速率。例如,对叶片进行叶型优化以减少气动激振力,或采用高强韧性的合金材料以提高抗疲劳性能。其次,优化部件的制造工艺,减少加工缺陷和内部残余应力,提高部件的整体质量。此外,采用先进的表面处理技术,如渗碳、渗氮、喷丸等,以提高部件的表面硬度和抗疲劳性能。最后,结合运行监测和故障诊断技术,实时监控部件的应力状态和损伤情况,及时发现并处理潜在的疲劳问题,确保汽轮机的长期稳定运行。

### 5 高温高压下汽轮机材料的性能提升与新技术应用

#### 5.1 材料性能提升途径

在高温高压环境下,提升汽轮机材料的性能是确保机组长期稳定运行的关键。

##### 5.1.1 合金化

通过向基体金属中添加适量的合金元素,如铬、镍、钨等,可以显著改善材料的耐高温性能、抗氧化性能及耐腐蚀性能。这些合金元素能有效提高材料的热稳定性,降低高温下的蠕变速率,并增强材料的抗腐蚀能力。例如,GH3535高温合金就是一种典型的合金化产品,广泛应用于汽轮机等高温高压环境中。

##### 5.1.2 热处理优化

合理的热处理工艺能够细化材料的晶粒结构,消除内部应力,提高材料的力学性能和抗疲劳性能。针对高温高压环境下的汽轮机材料,通常采用高温固溶处理、时效处理等热处理手段,以获得理想的微观组织和性能。

##### 5.1.3 表面处理技术

通过表面涂覆、渗镀、喷丸等表面处理技术,可以在材料表面形成一层具有优异性能的涂层或改性层,从而提高材料的耐高温、耐腐蚀及抗疲劳性能。这些表面处理技术不仅能够有效保护基体材料,还能延长材料的使用寿命。

#### 5.2 先进制造技术

在汽轮机材料的制造过程中,先进制造技术的应用对于提高材料性能至关重要。

##### 5.2.1 精密铸造技术

采用精密铸造技术可以制备出形状复杂、尺寸精确且性能优良的汽轮机部件。通过优化铸造工艺参数和合金成

分,可以进一步提高部件的耐高温性能和力学性能。

##### 5.2.2 锻造与热处理集成技术

将锻造与热处理工艺相结合,可以实现对材料微观组织的精确控制,从而提高材料的整体性能。例如,在超超临界汽轮机高压转子的制造过程中,采用ESR法冶炼、WHF锻造方法及等温过冷奥氏体热处理工艺,可以显著提高转子的高温强度和抗疲劳性能。

##### 5.2.3 增材制造技术

增材制造技术(如3D打印)为汽轮机材料的制造提供了全新的可能性。通过逐层堆积材料的方式,可以制备出形状复杂且性能优异的部件。同时,增材制造技术还可以实现材料微观结构的精确控制,从而进一步提高部件的性能。

#### 5.3 新型合金材料的应用前景

随着科技的不断进步和高温高压技术应用的不断扩大,新型合金材料在汽轮机领域的应用前景日益广阔。这些新型合金材料通常具有更高的耐高温性能、更强的抗氧化性能及更优异的力学性能。例如,GH3535等高温合金材料已经在航空航天、石油化工、船舶制造等领域得到了广泛应用,并展现出了良好的性能表现。未来,随着材料科学研究的不断深入和制造工艺的不断完善,更多新型合金材料将被开发出来并应用于汽轮机领域,为汽轮机的性能提升和稳定运行提供更加有力的支持。

#### 结语

本文系统研究了汽轮机在高温高压运行环境下的材料选择与疲劳寿命分析技术,提出了基于多因素考量的材料选择原则与综合评估策略。通过深入剖析关键部件的疲劳寿命特点与优化措施,以及探讨材料性能提升与新技术应用的前景,为汽轮机高温高压运行的安全性与可靠性提供了有力保障。未来,随着材料科学与制造技术的不断进步,汽轮机材料选择与疲劳寿命分析技术将迈向更高水平。

#### 参考文献

- [1]陈明,刘建.高温高压环境下汽轮机材料的微观结构与性能关系研究[J].金属学报,2019,55(5):657-664.
- [2]韩志鹏,孙丽.先进制造技术在汽轮机高温高压部件制造中的应用[J].制造技术与机床,2020,(6):22-26.
- [3]张伟,王晓峰.高温合金在汽轮机关键部件中的应用研究[J].热力发电,2020,49(5):120-124.
- [4]王强,李晓光.高温高压环境下汽轮机转子材料的性能优化[J].机械工程材料,2021,45(2):63-68.
- [5]李刚,王海燕.汽轮机高温部件疲劳损伤监测与寿命预测技术研究进展[J].航空动力学报,2022,37(2):289-298.