

高温高压蒸汽管道热应力分析与寿命预测研究

张朋伟

中国核电工程有限公司河北分公司, 河北 石家庄 050011

[摘要]高温高压蒸汽管道长期服役时要承受复杂热应力作用, 容易产生蠕变、疲劳、裂纹等损伤, 严重影响设备安全性与运行寿命。建立热力耦合有限元模型分析不同运行工况下管道的温度场和应力分布规律, 就能识别出高风险区域及其应力演化趋势, 再结合蠕变损伤理论与低周疲劳寿命模型预测关键部位剩余寿命, 可为管道检修策略和延寿方案提供定量依据, 提升运行管理水平与安全保障能力。

[关键词]高温高压; 热应力; 蒸汽管道; 有限元分析; 寿命预测

DOI: 10.33142/hst.v8i8.17350

中图分类号: TM726

文献标识码: A

Research on Thermal Stress Analysis and Life Prediction of High Temperature and High Pressure Steam Pipelines

ZHANG Pengwei

Hebei Branch of China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050011, China

Abstract: High temperature and high pressure steam pipelines are subjected to complex thermal stress during long-term service, which can easily cause damage such as creep, fatigue, and cracking, seriously affecting equipment safety and operating life. By establishing a thermal coupled finite element model to analyze the temperature field and stress distribution of pipelines under different operating conditions, high-risk areas and their stress evolution trends can be identified. Combined with creep damage theory and low cycle fatigue life models, the remaining life of key parts can be predicted, providing quantitative basis for pipeline maintenance strategies and life extension plans, and improving operational management and safety assurance capabilities.

Keywords: high temperature and high pressure; thermal stress; steam pipeline; finite element analysis; life prediction

引言

在火力发电和石化装置里, 高温高压蒸汽管道是关键的输送部件, 整个系统的稳定运行直接取决于其安全性和可靠性, 服役年限增加会使复杂热载荷和机械应力耦合作用, 导致管道容易出现蠕变、疲劳等损伤, 严重时还会引发重大事故, 准确掌握其热应力分布特性和寿命演化规律是当前工程安全管理的重要课题, 系统性地分析和预测对延长设备寿命、优化维护策略具有现实意义。

1 高温高压蒸汽管道运行特点与失效机理分析

高温高压蒸汽管道在极端工况下长期运行且遭受热与压的耦合作用, 结构损伤极易产生, 准确识别其运行特点与失效机理极为重要。

1.1 高温高压工况下的运行特性

火电石化等行业广泛用蒸汽管道输送高温高压蒸汽, 由于蒸汽管道常年在 500℃高温、10MPa 高压环境下运行, 这种条件下材料膨胀变形厉害且内部温度梯度大, 很容易产生不均匀热应力, 并且设备启停时热循环频繁使得交变应力不断积累, 高温会让材料组织发生像晶粒长大、位错运动加剧的变化, 进而材料强度和塑性降低, 而高压下内压作用于管壁会产生较大环向和径向应力并叠加起来形成复杂应力场, 因此长期服役后如果没有有效的监测和控制机制就容易出现裂纹、壁厚减薄甚至突然破裂的情况,

从而使系统安全受到严重威胁。

1.2 管道失效模式及形成原因

蒸汽管道主要有蠕变损伤、低周疲劳、热疲劳、腐蚀及应力腐蚀开裂等失效模式, 其中蠕变这种典型的高温失效形式就是材料在恒定载荷下慢慢产生不可逆的塑性变形且应力集中区的蠕变变形速度更快, 容易发展成贯穿性裂纹, 设备频繁启停产生高幅应力循环时低周疲劳就容易发生且裂纹大多从焊缝、热影响区或者局部缺陷处产生, 温度变化产生反复热应力会导致热疲劳从而使得表面产生裂纹并慢慢扩展, 高温蒸汽里可能有腐蚀性介质, 在高压推动下和管壁起化学反应造成局部减薄、脱碳甚至应力腐蚀破裂, 多种失效机制常一起存在还相互促进使得管道早早退役或者突发事故。

1.3 典型失效案例及工程警示

工业运行实践里, 多起高温高压蒸汽管道失效事故给工程安全管理敲响了警钟, 像某电厂再热器出口管道运行 12 年后突然破裂, 调查显示管道壁厚严重变薄, 断口有典型的蠕变空洞聚集和疲劳条带, 意味着它在蠕变和疲劳共同作用下出现了迟发性断裂, 还有换热器入口弯头处的泄漏事件, 局部焊接缺陷早期没被发现, 在热应力集中作用下成了裂纹, 大面积泄漏, 这样的例子表明高温高压服役环境下, 管道应力分析、寿命评估和失效预警很重要,

工程上得强化材料选型、焊接质量控制和在线监测手段,将热应力模拟和寿命预测技术相结合,制定科学的检修周期与风险控制措施来防范潜在的结构性灾害。

2 热应力作用下的温度场与应力场分布特征

高温高压蒸汽管道非均匀的温度分布会产生对结构安全影响很大的热应力,因此研究它的温度场与应力场分布规律在工程上意义重大。

2.1 温度梯度形成与传热特性

蒸汽管道运行时管内高温蒸汽和外界环境温差显著,热量经管壁从内往外传导且径向温度梯度明显,高温蒸汽使管道内表面温度快速升高而外表面因冷空气或保温层升温慢且热流密度大且不均,启停阶段热负荷剧变导致短时间内轴向温度梯度可能变大从而热应力集中更严重,管道截面结构、保温层厚度不同、蒸汽流速变化等会让温度场空间分布不对称,T型接头、弯头、三通等复杂构件处局部热容有变化且热传导路径不一样使得温度场分布复杂,这给应力集中提供了热力学基础。

2.2 热应力产生机理与分布规律

材料在温度变化过程中热膨胀受限会产生内力,这是热应力的主要来源,管道加热时,内层材料升温快想膨胀,可外层温度低有约束,导致压应力和拉应力交替分布,径向上,蒸汽侧附近区域受拉应力,远离蒸汽侧多是压应力,轴向上,支撑、焊缝或者弯头这些几何不连续的地方容易应力集中,长时间热负荷作用下,会出现应力松弛和塑性变形,应力分布状态也会进一步改变,数值模拟显示,结构突变区和温度梯度最大的区域,像焊缝根部、管座下方、管壁厚度突变的地方,热应力峰值常出现,热应力分布不均会使材料局部屈服强度降低,这就成了裂纹萌生的关键之处,对结构寿命威胁很大。

2.3 应力与温度场的耦合效应分析

温度场和应力场高度耦合且相互影响、共同演化,热应力的空间分布由温度场决定且应力状态反过来影响材料的导热性能及其结构响应,多次热循环下应力状态从初始弹性阶段变为蠕变与塑性阶段从而产生应力重分布与结构疲劳,热力耦合有限元分析能准确描述温度-应力动态演变过程并识别关键危险区域,高温弯管中内弯侧受热集中应力拉伸而外弯侧受压收缩且形成交变应力,存在温度扰动或载荷波动时局部应力可能瞬间超材料屈服极限进而诱发裂纹扩展,工程实践里将传感器监测数据和仿真结果相结合就能有效掌握温度和应力分布规律、提升评估精度与结构安全冗余度并为管道寿命预测提供基础支撑。

3 热力耦合有限元建模与关键部位应力演化分析

高温高压蒸汽管道的应力响应能被热力耦合有限元方法精准模拟并揭示关键部位应力演化规律,从而给结构安全评估提供理论支持。

3.1 有限元建模基本流程与关键参数设定

真实工况是热力耦合有限元建模的基础,需要综合考

虑材料热物性参数、边界条件、载荷特性和几何结构等因素。建模流程包括三维几何建模、材料属性赋值、网格划分、边界及载荷定义、求解与后处理分析等环节,其中热传导系数、热膨胀系数、杨氏模量、泊松比、蠕变参数等材料属性要从试验数据或者权威数据库获取。蒸汽流场测量或者热传导计算是温度载荷的来源,内部蒸汽压力和外部约束力属于机械载荷,边界条件的设置要贴近工程实际,应明确表达固定端、滑动端、接头约束等。为提高计算精度,焊缝、弯头等区域的模型需用局部加密网格以捕捉应力梯度变化,在模型验证阶段还需与监测数据或者典型工况对比才能确认模拟结果的准确性和工程可用性。

3.2 热力耦合分析的应力响应特征

管道在不同热工况下的应力响应过程可通过热力耦合分析动态反映,系统从冷态加热到稳定高温运行时初始的热膨胀压应力会逐渐转变成热稳态下的热应力场,初期温度升得快则热应力峰值短时间内迅速上升且管道弯头、焊缝根部等结构不连续区域尤其容易形成应力集中,温度趋于稳定后热应力场分布渐渐平衡且局部应力集中区域维持高应力状态并成为潜在失效风险点,模拟结果表明热应力幅值与温度梯度呈正相关且结构几何突变会进一步放大局部应力,多次热循环的话应力会有滞回效应和累积塑性变形且应力重分布和疲劳效应增强结构的疲劳寿命演化趋势得特别关注。

3.3 关键部位应力演化趋势与安全评估

对热力耦合模拟结果的应力时间历程加以分析,就能识别出蒸汽管道中的高风险部位及其应力演化趋势,弯头、三通、焊接接头、固定支撑附近等属于典型高应力区域,在热载荷与结构约束共同作用时,这些部位容易成为热应力集中区域,焊缝根部,模拟表明在多次启停循环里,其应力峰值累积显著,渐渐接近材料屈服极限,是最容易产生裂纹的薄弱之处,应力演化规律还能揭示不同运行阶段的结构应力变化路径,如快速升温阶段应力急剧增加、高温稳态时的恒定应力平台以及冷却过程中的反向应力恢复,依据这些演化数据能构建应力-时间-损伤三维评价模型,从而预测管道剩余寿命并划分风险等级,在工程实践当中,这为制定更科学的检修计划、优化结构设计、提高管道安全冗余提供了可靠依据。

4 基于蠕变与疲劳损伤机制的寿命预测方法

高温高压蒸汽管道长期服役时会被蠕变与疲劳共同作用,准确构建损伤模型并开展寿命预测对提升运行安全性很关键。

4.1 蠕变损伤机制与寿命模型构建

材料在高温高应力长时间作用下会发生缓慢变形的蠕变过程,0.4倍熔点温度时这一现象更明显,高温蒸汽管道的主导失效机制就有蠕变且应力集中区域的时间依赖性塑性流动往往是其表现形式,蠕变分初期、稳定、加速三个阶段且可能造成空洞、微裂纹聚集和断裂破坏,Norton-Bailey 方程、Kachanov-Rabotnov 模型等常被用于

寿命预测以描述蠕变应变率与时间、温度、应力关系,根据有限元模拟的温度应力场数据能从关键位置提取应力历程并代入蠕变损伤模型算出单位时间损伤增量,一直累积到临界值就得到剩余寿命,实际工程里要拿金相检验、硬度检测等数据来修正模型参数以提高预测精度。

4.2 低周疲劳行为与热循环效应

高应力、低循环次数的工况下低周疲劳容易出现且设备启停、负荷变化等热循环常引发这种以塑性应变为主导的低周疲劳。高温环境里材料的循环应力-应变响应会软化从而使疲劳寿命大幅缩短。应变幅和寿命间的定量关系常用 Coffin-Manson 关系描述,要是考虑应力比、保持时间、温度影响等因素就得引入时间依赖疲劳模型或者改进的能量模型。热力耦合分析结果能给疲劳寿命评估提供热应力循环数据,通过识别应力-应变滞回环,统计循环次数与应变幅度来量化低周疲劳损伤。多源损伤协同的时候,疲劳和蠕变往往存在得用蠕变-疲劳交互模型一起评估。工程上,焊缝热影响区、结构转折处等是疲劳裂纹高发地需要重点安排监测与评估。

4.3 损伤累积方法与寿命评估策略

高温蒸汽管道实际服役时的损伤常是蠕变和疲劳叠加产生的,建立合理的损伤累积准则对寿命预测特别重要。常见的线性累积法像 Miner 法则虽然简单,但难以精确反映多机制耦合这种复杂情况,时间分段耦合法、能量叠加法或者基于损伤力学的非线性方法更常用些。典型的 Chaboche 模型或者 Liu's 联合损伤模型能考虑蠕变损伤发展和疲劳裂纹扩大,在工程里应用很广,借助热力耦合有限元得到温度、应力、循环次数等数据,用损伤演化方程把不同段的损伤叠加起来,预测剩余安全寿命。也能引入贝叶斯统计或者机器学习方法校正预测结果、分析不确定性,寿命预测结果要和实际检测手段相结合,动态更新评估策略,以便给管道维修、改造和更换提供科学的决策依据。

5 寿命预测结果在管道运行与维护中的工程应用

蒸汽管道的运行管理与维护策略以寿命预测结果为科学依据,有助于提升设备可靠性并降低运行风险与维护成本。

5.1 检维修策略优化与实施

寿命预测结果能将管道各部位剩余寿命分布量化呈现出来,使检维修工作从“定期更换”变为“状态维修”和“风险导向维修”,像焊缝、弯头、三通等高风险结构区域要制定优先检查计划,合理安排停机窗口和维修资源,避免盲目检修和非计划停运,实际应用时依据应力-寿命评估结果调整传统年度检修制度,将有限维护资源集中在潜在失效点上,部件若寿命消耗率高则预设安全阈值触发报警机制,提前更换或者加固处理,从而显著提高系统运行连续性和安全性,将寿命评估数据和资产管理系统联动起来形成一体化维护数据库,实现检修记录、评估数据和

历史工况的闭环管理,让后续维护有可追溯的数据作支撑,提升检修工作的科学性和决策效率。

5.2 风险评估与运行安全保障

寿命预测模型能成为设备风险评估体系里的重要部分,它与缺陷检测、在线监测等数据协同分析从而实现多维度风险识别。基于此构建风险等级分类标准,进而对不同区域进行分级管理。临界寿命状态下的管段,可对其施加像降低温度、减少启停频率或者改进蒸汽参数控制这样的运行限制措施来减缓损伤进展。寿命评估结果嵌入数字化监控系统,达成实时状态评估和动态预警,为调度指挥提供决策支持,增强整个系统的运行韧性。风险前置管控可减少突发性故障与安全事故发生的概率,保障人员和设备的双重安全。

5.3 运维数字化与管理智能化转型

工业数字化发展让寿命预测结果慢慢融入智能运维平台,实现定性经验向定量决策的转变,将热力耦合分析、寿命评估模型和监测数据相结合就能建立蒸汽管道的“数字孪生”模型,实时映射实际运行状态和健康水平,通过可视化界面展示应力分布、寿命消耗、预警等级等信息,使运维人员能直观掌握设备状态,利用人工智能技术对历史工况和故障数据进行学习训练,提升预测模型的准确性和自适应能力,智能化系统还可依据寿命趋势自动生成检修建议,辅助制定长期运行优化策略,实现管道全生命周期的精细化管理。

6 结语

承压高温设备高温高压蒸汽管道,其系统稳定与人员安全直接关联其运行安全性,进行热应力分析、寿命预测建模和关键部位应力演化研究就能全面把握管道服役状态和潜在风险,将寿命预测结果运用到运维管理中对检修策略的优化、风险控制的强化和智能化运行体系建设的推动都是有益的,随着工程技术和数字手段不断发展,管道安全管理会朝着更科学、精准和高效发展。

[参考文献]

- [1]杜藏宝.火电厂主蒸汽管道的应力分析和寿命评估[D].北京:华北电力大学(北京),2016.
- [2]陈志强.高温高压蒸汽管道应变测量及应力分析[J].化工管理,2019,12(35):213-214.
- [3]谢阿萌,胡智方,成磊,等.高温高压蒸汽管道疏水罐内壁裂纹产生分析[J].发电设备,2023,37(1):18-23.
- [4]李庆,郎喆,向轶,等.热动力站蒸汽管道热膨胀异常原因分析及改进措施[J].区域供热,2024,11(5):62-69.
- [5]屠博,李立瑶,程勇明,等.高温高压蒸汽管道应力分析及优化调整[J].节能,2025,44(4):142-144.

作者简介:张朋伟(1993.12—),毕业院校:河南理工大学,所学专业:能源与动力工程,当前就职单位:中国核电工程有限公司河北分公司,职务:设计员,职称级别:初级。