

# Study on the mechanism and prediction method of pipeline vibration fatigue damage

Yanfen Wang

Shenzhen CGN Engineering Design Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

## Abstract

The pipeline systems in nuclear power plants are subject to various excitation sources during operation, which can easily cause vibrations. These vibrations can lead to fatigue damage, affecting the safety and operational lifespan of the equipment. Considering the operational environment and conditions of nuclear power plants, this study analyzes the mechanisms of vibration-induced fatigue damage in pipelines, identifies the key factors influencing fatigue failure, and reviews the current mainstream prediction methods, including frequency domain analysis, time domain analysis, and machine learning techniques. It also proposes a fatigue prediction process and recommendations for nuclear power pipeline systems. The findings provide a theoretical basis and engineering guidance for the safety assessment and life management of nuclear power pipelines.

## Keywords

nuclear power plant; pipeline system; vibration fatigue; damage mechanism; life prediction; structural safety

# 管道振动疲劳损伤机理及预测方法研究

王艳芬

深圳中广核工程设计有限公司, 中国 · 广东 深圳 518000

## 摘 要

核电站中的管道系统在运行过程中受到各种激励源作用, 极易产生振动, 进而引发疲劳损伤, 影响设备安全性与运行寿命。基于核电站运行环境和工况特点, 系统分析了管道振动疲劳的损伤机理, 阐述了疲劳破坏的关键影响因素, 并在此基础上综述了当前主流的预测方法, 包括频域法、时域法、机器学习方法等, 提出适用于核电管道系统的疲劳预测流程与建议。研究结果为核电管道的安全评估和寿命管理提供了理论依据和工程指导。

## 关键词

核电站; 管道系统; 振动疲劳; 损伤机理; 寿命预测; 结构安全

## 1 引言

身为高安全等级能源系统的核电站, 其内部管道肩负着输送冷却剂、蒸汽等关键工艺流体的使命, 在长周期、高温、高压连同机械振动等工况交叠作用之际, 管道极易陷入振动疲劳损伤困境, 因为其损伤大多发展得慢, 初期不易察觉, 必然造成严重后果, 对振动疲劳机理展开深入认知并精准预测, 成了保障核电设备结构完整性的关键技术之一, 本文围绕着核电管道振动疲劳的问题展开, 由微观损伤机制和影响因素作为开端, 配合现代预测途径, 查找系统又可实施的评估路径。

## 2 管道振动疲劳的损伤机理分析

### 2.1 疲劳损伤的基本机制

在核电站开启运行的阶段, 管道系统在复杂工况下经历长期考验, 经常承受交变载荷的作用, 诸如流体脉动表现、设备振动表现、启停操作环节等, 虽说这些交变载荷幅度不大, 只是频率高且持续时间持久, 会在金属材料内部引发微观裂纹的萌生, 伴随应力循环次数不断累积, 这些细微裂缝逐步延伸, 最终引发材料的断裂, 引发结构疲劳失效。按照应力循环次数的差异, 疲劳可分为高周、低周这两类疲劳, 高周疲劳所指的是应力循环次数超过  $10^4$  次的情形, 其特征表现为每次载荷变化的应力不大, 但累积起来的效果极为明显; 低周疲劳发生在应力幅值大但循环次数少的工况里, 在核电站中, 高周疲劳较为常见, 主要诱因有管道内流体的脉动、泵类设备的非平衡运行以及频繁的热冷循环等<sup>[1]</sup>。

【作者简介】王艳芬 (1982-), 女, 中国河北唐山人, 硕士, 工程师, 从事核电站力学分析研究。

## 2.2 振动引起疲劳的主要来源

### 2.2.1 流体激励

流体激励属于管道系统里最常见的动态载荷来源，主要有流体脉动、湍流诱导振动（TIV）和涡激励振动（VIV）等类型，流体脉动大多是由泵、压缩机等周期性工作设备引起的，其压力波动会传导至管道内，造就交变应力，速度波动在湍流流动过程中可引发管壁振动；涡激励振动是流体绕着障碍物流动时形成的规则涡列，周期性地冲击管道壁，促成高频振动，长时间作用有造成疲劳损伤的风险。

### 2.2.2 机械激励

机械设备运行过程中产生的不平衡力是机械激励的主要来源，诸如泵组、压缩机、电机等设备的转动部件，倘若这些设备的转子失去平衡，会引发周期性的振动，通过连接结构传输至管道系统中，该激励频率常与设备工作转速相关，要是管道支撑设计不当或共振频率接近，局部区域因机械激励而产生应力集中，造成疲劳裂纹萌生，乃至引起结构损坏。

### 2.2.3 结构共振

结构共振是在管道系统固有频率与外部激励频率相吻合时，振动响应出现显著的放大，甚至达到正常水平数倍程度，一旦流体激励频率或者机械激励频率与管道系统某一阶固有频率一致，可能会激起共振现象，即便激励能量微弱，也会因共振不断累积造成大幅的位移和高应力，严重情形下，可能引起管道疲劳破裂、支撑断裂以及连接松脱等事故<sup>[2]</sup>。

## 2.3 疲劳损伤的累积过程

根据 Miner 线性累积损伤理论，不同应力幅值下的多个应力循环逐步累积，导致了疲劳损伤，按照该理论的说法，各应力水平下的疲劳载荷，都将对材料造成一定程度的损伤，该类损伤是可叠加计算的，若处于某一特定应力幅值范围，此应力幅值对应的材料疲劳寿命为  $N_i$  次，而实际经历的循环次数为  $n_i$  次，则该应力水平的损伤能够以  $n_i/N_i$  来表示，若结构历经多个具有不同应力幅值的载荷循环，总损伤可由全部应力水平下损伤之和表达，即累积损伤因子  $D$  可由  $\sum n_i/N_i$  得出。

若累积损伤因子  $D \geq 1$  时，Miner 理论认为结构已触及疲劳极限，进入失效状态，这一判据为工程实际中的疲劳寿命评估提供了简明的计算参照，尤其适用于载荷频繁改变但每次应力幅度不大的工况，在核电管道、航空航天架构或是桥梁等领域，工程师经常借助该理论进行疲劳寿命的预测及维护策略的制定，以此增强设备运行的可靠性与安全水平。

## 3 核电管道疲劳损伤的影响因素

### 3.1 管道材料与焊接工艺

疲劳裂纹的扩展过程显著且直接地受材料疲劳强度、塑性特征及晶体结构等内在属性影响，在相同载荷作用下，高疲劳强度材料可承受更多应力循环的次数，不易萌生裂

纹；具有良好塑性的材料在应力集中处可借助塑性变形来缓解局部应力，以此延缓裂纹的扩张速度，诸如晶体结构的排列状况、位错运动的属性以及晶界特征等微观因子，也会影响到裂纹传播的路径和扩展的速率。

就实际的工程结构而言，焊接接头往往被视为疲劳薄弱点，尤其是靠近焊缝处的热影响区，因焊接过程的高温而引起的局部组织变化，此区域的硬度及力学性能往往发生剧烈变化，出现软化、硬化现象，引起应力的集中效应，焊接残余应力的存在也会推动裂纹在热影响区起始并扩展<sup>[3]</sup>。

### 3.2 管道结构布置

在管道系统中，诸如弯头、三通、异径管等，属于几何形状复杂的结构，这些区域鉴于截面变化剧烈，容易造成应力集中情形，应力集中使局部区域在交变载荷发挥作用时承受较大的应力幅度，由此极大地降低了疲劳寿命，即便整体结构设计于强度方面合格，这些特殊部位可能会因局部疲劳而提前出现裂缝，成为结构的薄弱节点。

结构刚度分布的不均匀同样是影响疲劳行为的关键要素，若管道系统的某些区域刚度出现大幅变化，振动能量无法均匀传输，较易导致局部出现共振现象，这种局部振动响应可进一步增强应力幅值，加速疲劳裂纹的起始与延展，设计阶段需对结构过渡区域进行合理优化，防止刚度出现陡然突变；运行阶段同样可借助监测与维护行动，即时辨认潜在的高风险疲劳区域，保障系统运行的平稳与可靠。

### 3.3 运行工况波动

在实际工程的运行阶段，压力、温度与流速等工况参数并非始终稳定不变，而是时常伴有频繁的波动，这些波动可造成设备以及管道系统内部交变载荷发生变化，导致材料出现周期性的应变，进而加速疲劳损伤的积聚，尤其在流体动力系统中，流速变化极易引发流体脉动及水击现象，引起瞬时压力急剧增加，进而加剧结构所承受的疲劳负荷。

对于启停频繁或非稳态运行的工况而言，疲劳问题格外显著，在核电、石化等行业领域中，设备开启和关停过程，往往伴随温度和压力的快速改变，导致热胀冷缩作用在结构上交替出现，造成明显的热疲劳后果，在系统非稳态运行的阶段，流体工况的波动极为剧烈，局部载荷持续变化，导致材料承受复杂的交变应力情形。

### 3.4 支撑系统状态

支吊架在管道系统中有着支撑、引导与限制振动的关键作用，设计是否合理，直接关系到系统力学方面的稳定与疲劳可靠性。支吊架布置不合理，譬如位置挑选不当、刚度过大或过柔，可能会引发管道受力状态的改变，促使系统边界条件出现改变。该改变将会影响整个系统的动力学特性，尤其是固有频率出现的变化情形，让其更易达到与外部激励频率接近的状态。

一旦系统的固有频率跟某一外部激励频率相匹配，即会出现共振情形，引起管道强烈的振动，共振不仅加速疲劳

裂纹的生成与扩展,还可能引发焊缝开裂、支架松动,最终引起设备损坏。若支吊架因为长期运行出现老化、锈蚀、松动等失效情况,同样会在潜移默化中改变结构的受力边界,促使系统的振动响应进一步加剧。保证支吊架设计科学且合理,同时定期开展状态检查及维护工作,是防范管道系统疲劳失效的关键保障手段<sup>[4]</sup>。

## 4 疲劳寿命的预测方法研究

### 4.1 基于频域的疲劳分析法

该方法主要借助振动频谱分析技术,开展结构在随机载荷作用下频率响应的计算,以此得到关键部位的应力响应谱,将得到的应力响应与材料的S-N曲线(应力-寿命曲线)结合使用,可实现对结构疲劳寿命的估算。S-N曲线揭示了材料面对不同应力幅值时可承受的循环次数,是进行疲劳寿命分析的关键依据。该方法在处理长期受随机激励的结构方面尤为合适,诸如流体输送的管线、旋转类设备等。

此方法优势体现为计算效率高,适宜大规模工程结构的初步疲劳评价。鉴于采用频域分析这一方式,其在处理稳定激励伪线性系统的振动响应时效率出众。该方法处理接触、摩擦、塑性变形等非线性行为以及启停冲击、水击等瞬态事件的能力受限,不易精准捕捉短时剧烈载荷引发的疲劳响应。应对复杂非线性结构或是急剧的工况变动时,还需借助时域分析以及非线性有限元方法进行更细致的疲劳评估。

### 4.2 基于时域的疲劳寿命评估

该方法为一种依托时域的疲劳寿命预测技术,首先需把真实工况下测量出的载荷时程数据输入结构有限元模型。依靠有限元分析方法,可得到结构关键部位在整个载荷历程中的应力时程响应数据。这些应力时程数据真切反映出结构在实际运作过程中所承受的交变应力情形,成为疲劳分析的关键基础要素。

采用雨流计数法处理应力时程数据,将复杂又不规则的应力历程分解为一系列等效应力循环,统计不同幅值及均值的应力循环出现次数,进一步与材料诸如S-N曲线或应变-寿命曲线的疲劳曲线相结合,开展累积损伤的计算,由此预判结构的疲劳寿命。该方法最明显的优势是计算精度极高,可精准体现实际运行工况对结构疲劳寿命的影响。它对输入数据的完整性、精准程度及处理过程的自动化和高效性要求较高,对计算资源和分析能力而言也构成了较大挑战,于是常被运用于关键结构或安全要求高的场合<sup>[5]</sup>。

### 4.3 基于机器学习的预测方法

伴随人工智能技术的迅猛发展,研究人员开始采用神

经网络、支持向量机等机器学习方法构建应力响应与疲劳寿命的映射关联。这些方法通过学习大量历史疲劳数据,能够捕捉复杂工况中材料、结构的非线性行为及多变量影响要素,以此达成对疲劳寿命的高效预估。

在实际运用中,这些方法依旧面临一些难题,模型训练对大量高质量的历史数据依赖程度极高,数据一旦不足或有偏差,将直接影响预测结果的精准度。机器学习模型泛化能力的范围有限,可能在未碰到过的工况下表现不佳,常把这类模型视为“黑箱”,欠缺足够的透明度与可解释性,导致工程师在实际决策时难以对其预测结果给予充分信任。

### 4.4 联合方法与工程实现路径

将时域分析、频域分析与机器学习方法相结合,可充分发挥彼此的长处,进而大幅提高疲劳寿命预测的精准度与实时性,时域分析可细致地捕捉结构于实际工况时的应力变化进程,适合开展复杂非线性与瞬态载荷的研究;对于线性系统和随机载荷的处理,频域分析具有计算效率高、稳定性好的优势;机器学习方法依靠对大量历史数据的学习掌握,可找出复杂工况下的非线性规律与多变量关联,完成对未知工况的智能预估,通过三者融合,疲劳评估变得更加全面又精准,有益于实现针对结构健康状态的动态监测及预警。

## 5 结语

核电厂管道的振动引起的疲劳损伤问题,对结构安全以及运行稳定性构成挑战,切实理解其损伤原理,掌握关键影响参数,选用合理的寿命预估方法,是实现设备可靠运作及延寿管理的核心,本文对管道振动疲劳损伤全流程展开系统分析,形成了具有工程适配性的预测评估办法,为后续核电设备安全管理提供理论与实践的相关支持,应将智能感知与数据驱动技术结合起来,驱动管道健康管理向智能化方向发展。

## 参考文献

- [1] 胡亚平.海底管道振动响应特性及疲劳损伤评估方法研究[D].西安建筑科技大学,2024.
- [2] 王斌斌.核电厂风机管道振动的疲劳分析及处理措施[J].电力勘测设计,2024,(05):88-92.
- [3] 林磊,陈志林,徐德城,黄前进,刘寅立.核电厂管道系统的典型振动现象及其治理[J].中国核电,2023,16(01):60-65.
- [4] 王香红.考虑腐蚀影响的海底悬跨管道振动疲劳特性及防护研究[D].西安建筑科技大学,2022.
- [5] 高喜峰,廖宏运,徐万海.非对称边界悬跨管道的涡激振动疲劳特性分析[J].哈尔滨工程大学学报,2019,40(05):960-966.