

核电厂小支管焊接接头随机振动疲劳评价方法研究

杨建东¹ 高红波² 徐洋洋¹ 周 帅² 林 磊² 彭 亮¹ 施红星¹ 栾振兴¹ 赵 越²

(1. 广西防城港核电有限公司, 防城港 538000)

(2. 苏州热工研究院有限公司, 苏州 215004)

摘要:【目的】针对核电厂小支管焊接接头在随机振动载荷下的疲劳寿命评估问题,探讨了基于测试数据、在役适用性评估(Fitness-For-Service, ASME FFS-1)方法和等效结构应力法的疲劳寿命评估方法。【方法】对比了基于测试数据、ASME FFS-1疲劳分析方法和等效结构应力法的疲劳寿命评估方法,并通过随机振动疲劳试验进行对比验证。【结果】研究表明,ASME FFS-1疲劳分析方法在处理复杂结构时易受网格敏感性影响,可能导致疲劳寿命评估结果的保守性偏高;基于测试应力的疲劳分析方法同样表现出较高的保守性,可能增加不必要的维护成本;相比之下,等效结构应力法能够更准确地考虑焊接接头的局部应力集中效应,并能有效应对复杂的随机振动环境,在疲劳寿命预测中表现出更高的准确性和工程适用性。研究可为制定有效的预防性维护策略提供重要参考。

关键词: 小支管; 焊接接头; 随机振动; 等效结构应力; 疲劳寿命

中图分类号: TG405 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.06.012

0 引言

在核电厂的管道系统中,小支管焊接接头是连接小支管与主管道的重要结构部件。随着核电厂运行时间的增加,核电厂频繁出现直径为50.8 mm以下的小支管的失效事件,对核电机组的安全稳定运行形成威胁。运行经验反馈表明,小支管特殊的结构容易引发高频随机振动,在长期的振动载荷作用下,其焊接接头位置极易发生疲劳失效(图1)^[1-2]。对于影响机组运行、涉及停机停堆、失效风险高、输送高能介质的这类小支管,一旦出现泄漏现象,将对人员或环境造成安全威胁,甚至导致被迫停机或停堆维修,给电厂带来巨大损失。因此,准确评估核电厂小支管焊接接头在随机振动载荷下的疲劳寿命,不仅是确保核电厂安全运行的关键措施之一,还能够为制定有效的预防性维护策略提供科学依据^[3]。

近年来,国内、外学者对核电厂小支管焊接接头的随机振动疲劳问题进行了广泛研究,相关研究内容主要集中在振动特性分析、失效机制、预防措施和疲劳寿命评估方法等方面。在振动特性分析方面,ECONOMOU等^[4]通过对法国核电厂小支管失效案例的分析,提出了一种3阶段的方法来识别敏感小支管连接,制订了在役检查计划,并确定振动来源和可能



图1 小支管焊接接头疲劳断裂

Fig. 1 Fatigue fracture of small branch pipe welded joints

的解决方案。RAO^[5]总结了电厂管道振动测试和分析的背景及要求,包括ASME OM-3标准中的测试和评估方法。MAEKAWA等^[6-7]基于单质量和双质量模型,使用光学位移传感器的非接触测量方法,开发了一系列小支管振动应力测量方法,并通过模拟试验和实际应用验证了其有效性。雷雨恒等^[8]提出了一种基于应变响应反演技术的弓网动态接触力监测方法,通过实时监测系统,实现了高精度的动态接触力测量。在失效机制研究方面,文保华等^[9]针对三轴随机振动条件下的疲劳损伤问题,建立了有限元模型,并通过仿真与加速试验,验证了疲劳损伤机制。TAKAHASHI等^[10]研究了闭式支管中的流致振动问题,揭示了残余空气或气体在闭式支管中引起严重低

收稿日期: 2024-08-15 修回日期: 2024-10-09

基金项目: 2023广西壮族自治区技术创新自筹类项目(桂工信园区[2023]699)

作者简介: 杨建东,男,1986年生,云南施甸人,高级工程师; 主要研究方向为核电厂机械设备振动状态监测和故障分析诊断; E-mail: yangjiandong@cgnpc.com.cn。

高红波(通信作者),男,1990年生,河南虞城人,硕士,高级工程师; 主要研究方向为核电厂结构完整性评估; E-mail: 458508826@qq.com。

引用格式: 杨建东,高红波,徐洋洋,等. 核电厂小支管焊接接头随机振动疲劳评价方法研究[J]. 机械强度,2026,48(6):110-116.

YANG Jiandong, GAO Hongbo, XU Yangyang, et al. Study on random vibration fatigue evaluation method of small branch pipe welded joints in nuclear power plants[J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(6): 110-116.



免费获取

频振动的可能性,提出一种使用带孔板的附加支管来抑制流致声共振的方法,并给出了考虑马赫数、孔板压力损失系数和粒子速度强度的设计方法。JIA 等^[11]基于有限元分析,研究了裂纹对小管道自然频率的影响,为小管道裂纹识别提供了理论基础。WANG 等^[12-13]研究了疲劳裂纹扩展过程中自然频率的变化,并设计了一种基于频率变化的疲劳损伤累积法则。上述研究深化了对小支管疲劳失效机制的理解。在预防措施和改进方法方面,CHOI 等^[14-15]通过有限元分析,评估了核电站管道插套焊在疲劳载荷下的完整性,研究了焊缝间隙和焊脚尺寸的影响,为插套焊的设计和施工提供了指导。MILES 等^[16]构建了一种多阶段评审流程,用于识别和评估大型设施中管道的振动风险,并优先处理高风险位置。在疲劳寿命评估方法研究方面,BERGER 等^[17]研发了一种用来估计小支管潜在疲劳裂纹的位置和启动时间的分析方法,并给出了以均方根速度表示的振动限值。FAHMY 等^[18]开发了一种小支管动力学模型,用以研究影响小支管振动的参数。石红梅等^[19]提出了一种预测高、低周复合疲劳寿命的新方法,通过应变比-寿命比曲线,来预测材料在高、低周复合疲劳载荷下的寿命。HAN 等^[20]开发了一种考虑频率响应变化的振动疲劳分析方法,并通过试验验证了其有效性。以上研究有望为小支管的疲劳寿命评估提供新的思路和方法。

尽管现有研究取得了显著进展,但在核电厂小支管焊接接头随机振动疲劳寿命评估方面仍存在很多不足。例如,传统的疲劳寿命评估方法主要适用于单一频率或简单谐振情况,难以准确处理核电厂小支管所面临的复杂随机振动环境;对于小支管焊接接头的局部应力集中效应及其对疲劳寿命的影响研究还不够深入,焊趾位置的应力奇异可能导致评估结果的不稳定。

针对上述问题,本文系统地比较基于测试数据、在役适用性评估(Fitness-For-Service, ASME FFS-1)方法和等效结构应力法在小支管焊接接头随机振动疲劳寿命评估中的适用性和准确性,并通过试验验证其有效性,为核电厂小支管焊接接头的疲劳寿命评估提供重要的参考依据。

1 分析方法

1.1 基于测试的疲劳分析

针对小支管随机振动问题,目前核电现场多通过应变测试并结合 ASME B31.1 标准开展疲劳评估,其实施方法如下:

1) 在距离焊趾 1/2 壁厚的位置布置应变片,采集随机振动过程中的应变数据。

2) 假设在振动载荷下,管道焊接接头变形在线弹性范围内,利用式(1)将测得的应变 ε 换算得到应力 R ,即

$$R = K_f E \varepsilon \quad (1)$$

式中, K_f 为疲劳强度减弱系数; E 为材料的弹性模量。

3) 根据换算的应力结果,结合如图 2 所示的 $S-N$ 曲线开展疲劳计算。

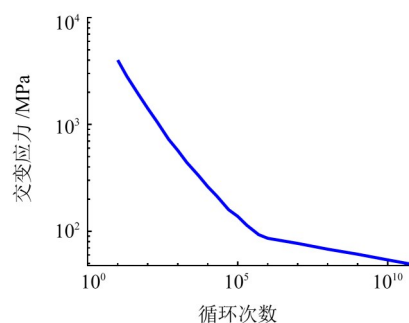


图 2 $S-N$ 曲线

Fig. 2 $S-N$ curve

1.2 ASME FFS-1 疲劳分析方法

ASME FFS-1 方法中,焊接接头的疲劳分析采用基于光滑试样的疲劳曲线,结合疲劳强度减弱系数的评估方法。该方法在 1968 年首次纳入 ASME 锅炉压力容器规范,至今基本保持不变。

在 ASME 标准中,疲劳计算基于由线弹性有限元分析得到的有效总等效应力幅值。对于每个循环,交变应力是一次加二次加峰值等效应力幅值,定义为一次加二次加峰值等效应力范围的 1/2,交变应力幅值的计算式为

$$S_{alt,k} = \frac{K_{e,k} \Delta S_{P,k}}{2} \quad (2)$$

式中, $K_{e,k}$ 为塑性修正因子; $\Delta S_{P,k} = \left\{ \frac{1}{2} [(\Delta R_{11,k} - \Delta R_{22,k})^2 + (\Delta R_{11,k} - \Delta R_{33,k})^2 + (\Delta R_{22,k} - \Delta R_{33,k})^2] + 6(\Delta R_{12,k}^2 + \Delta R_{13,k}^2 + \Delta R_{23,k}^2) \right\}^{\frac{1}{2}}$ 。

焊接接头的影响通常通过引入疲劳强度减弱系数 K_f 来考虑,即

$$\Delta R_{ij,k} = K_f (R_{ij,k}^m - R_{ij,k}^n) \quad (3)$$

式中, $\Delta R_{ij,k}$ 为修正后的有效应力分量范围; $R_{ij,k}^m$ 为 m 时刻第 ij 个应力张量分量值; $R_{ij,k}^n$ 为 n 时刻第 ij 个应力张量分量值。

1.3 等效结构应力法

等效结构应力法是由 DONG 等^[21]提出的一种网格不敏感的结构应力计算方法,该方法基于对任意位置(如焊趾处)沿壁厚的应力状态进行平衡等效分解,用于焊接接头的疲劳评估。对于图 3 所示的空间中任意曲线焊缝,定义由一系列节点连接而成的焊缝线。沿焊趾的单元被称为焊接单元,用于提取有限元分析的节点力,并进行相应的旋转以匹配焊缝线的局部坐标系。通过式(4)求解线性方程组,将节点力转换为等效的线力和线矩。

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{l_1 + l_{n-1}}{3} & \frac{l_1}{6} & 0 & 0 & \dots & 0 & \frac{l_{n-1}}{6} \\ \frac{l_1}{6} & \frac{l_1 + l_2}{3} & \frac{l_2}{6} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \frac{l_2}{6} & \frac{l_2 + l_3}{3} & \frac{l_3}{6} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{l_3}{6} & \frac{l_3 + l_4}{3} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{l_{n-3} + l_{n-2}}{3} & \frac{l_{n-2}}{6} \\ \frac{l_{n-1}}{6} & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{l_{n-2}}{6} & \frac{l_{n-2} + l_{n-1}}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_{n-1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, l_i 为第 i 个单元在焊缝线上的投影长度; F_i 为节点力; f_i 为线力。

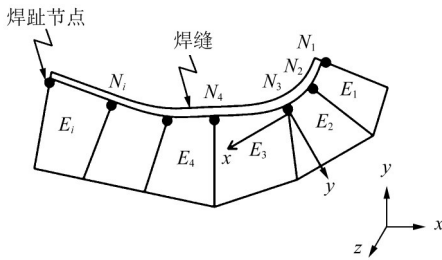


图3 空间任意弯曲焊缝的焊线和焊缝单元定义

Fig. 3 Definition of weld lines and weld seam elements for spatially arbitrary curved welds

根据线力和线矩计算结构应力为

$$R_s = R_m + R_b = \frac{f_{y'}}{t} + \frac{6m_{x'}}{t^2} \quad (5)$$

式中, R_m 为薄膜应力; R_b 为弯曲应力; $f_{y'}$ 为 y' 方向的线力; $m_{x'}$ 为关于 x' 轴的线力矩; t 为板厚。

为了考虑厚度效应和加载模式的影响, 引入等效结构应力范围参数:

$$S_s = \frac{\Delta R_s}{(t_{\text{ess}})^{2/9} I_r^{1/m_{\text{ess}}}} \quad (6)$$

式中, ΔR_s 为结构应力范围; t_{ess} 为相对厚度; m_{ess} 为与壁厚相关的常数; I_r 为与弯曲比 $r = R_b/R_s$ 相关的无量纲函数。

疲劳计算基于由大量疲劳试验数据建立的等效结构应力的主 S - N 曲线, 即

$$N = \left(\frac{\Delta S_s}{C_d} \right)^{\left(\frac{1}{h} \right)} \quad (7)$$

式中, ΔS_s 为等效结构应力幅值; C_d 和 h 均为主 S - N 曲线拟合参数。

该曲线考虑了应力集中效应、厚度效应和加载模式效应等多种因素, 显著减弱了数据离散性; 同时, 通过引入等效结构应力参数, 主 S - N 曲线能够将不同接头类型、加载条件和板厚下的大量疲劳试验数据统一到 1 条较窄的散布带内。相比于传统的名义应力或热点应力方法, 主 S - N 曲线可以更准确地预测焊接接头的疲劳寿命, 并且不受有限元网格密度的影响。

1.4 随机振动疲劳分析方法

对于复杂随机振动激励, 传统基于时域的计算方法因计算量过大难以分析足够的时长, 和客观有效地反映随机数据的分布规律, 因此复杂随机振动疲劳通常通过频域的统计信息实现, 其分析流程如图 4 所示。

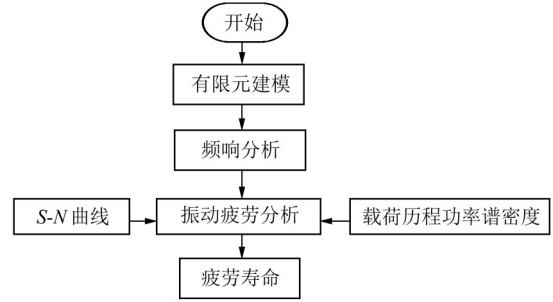


图4 随机振动疲劳分析流程

Fig. 4 Analysis process of the random vibration fatigue

随机振动疲劳分析首先需确定结构传递函数, 即单位输入下的结构响应; 传递函数是系统或模型的基本特性, 与输入载荷无关。在频域中, 载荷输入通常以功率谱密度 (Power Spectral Density, PSD) 的形式表示。通过将传递函数与输入载荷的 PSD 相乘, 可以计算出结构中特定位置的 PSD 响应。

采用应力-寿命法结合 Palmgren-Miner 线性累积损伤准则, 疲劳累积损伤 D 取决于损伤分数的总和, 其表达式为

$$D = \sum_{i=1}^{n_i} \frac{n_i}{N_{fi}} \quad (8)$$

式中, n_i 和 N_{fi} 分别为在给定应力幅值下施加的循环数和相应的许用循环数。当 $D = 1$ 时, 发生疲劳失效。

振动疲劳损伤的总和基于应力幅值的概率密度函数 (Probability Density Function, PDF) $f_{S_a}(S_a)$, 通过积分进行计算。1985 年, DIRLIK^{[22]198} 提出一个经验性的闭合形式应力幅值雨流计数的概率密度函数, 并得到了广泛应用。在时间 T 内, Dirlik 损伤模型的表达式为

$$D_{\text{Dirlik}} = \frac{E[P]T}{C_d^{1/h}} \int_0^\infty S_a^{1/h} f_{S_a}(S_a) dS_a \quad (9)$$

式中, $E[P]$ 为每秒应力历史中的预期峰值; T 为时间; S_a 表示应力范围。

应力范围的概率密度函数 $f_{S_a}(S_a)$ 的形式为

$$f_{S_a}(S_a) = \frac{D_1}{Q} e^{-\frac{Z}{Q} S_a} + D_2 \frac{Z}{R^2} e^{-\frac{Z^2}{2R^2} S_a^2} + D_3 \frac{Z}{\sqrt{2\pi} S_a} e^{-\frac{Z^2}{2} S_a^2} \quad (10)$$

式中, D_1 、 D_2 、 D_3 、 Z 、 Q 、 R 都是 PSD 矩 M_n 的函数, 其表达式见文献[22]¹⁹⁸。

2 案例分析

2.1 随机振动疲劳试验

为验证本文提出的评估方法, 开展了随机振动疲劳试验。如图 5 所示, 试验装置主要由振动激励系统、交变应力监测系统、泄漏检测系统和管道系统组成。

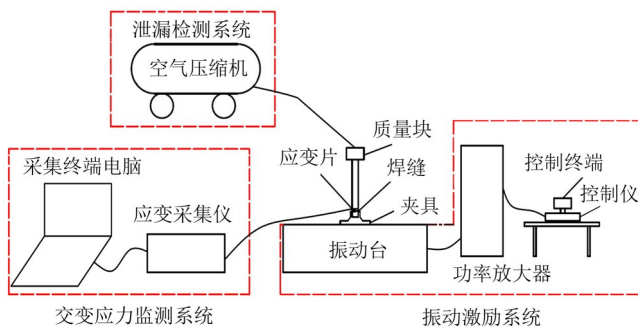


图 5 试验装置

Fig. 5 Test device

试样采用插套焊结构, 相关参数如表 1 所示。

表 1 试样参数

Tab. 1 Specimen parameters

焊接形式	管道材料	夹具材料	焊接材料	管道规格/(mm×mm)
插套焊	20G	Q245R	ER70S-3	25×4

在试验过程中, 同时测量根部固定位置的加速度激励参数和距离焊趾 2 mm 位置的应变参数, 插套焊测试试样如图 6 所示。通过振动台在管道根部施加水平方向的加速度随机激励, 如图 7 所示。激励频率范围为 20~500 Hz, 当检测到气体泄漏时, 即认为试样发生疲劳失效, 停止试验。试验总持续时间为 6.23 h, 为后续疲劳寿命评估与验证提供了数据支撑。

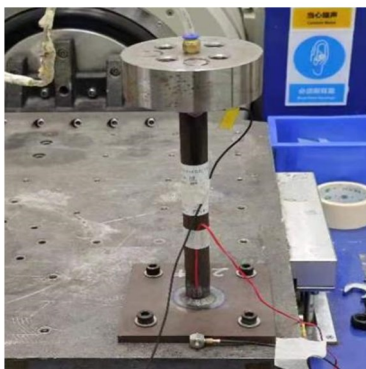


图 6 插套焊测试试样

Fig. 6 Socket weld test specimen

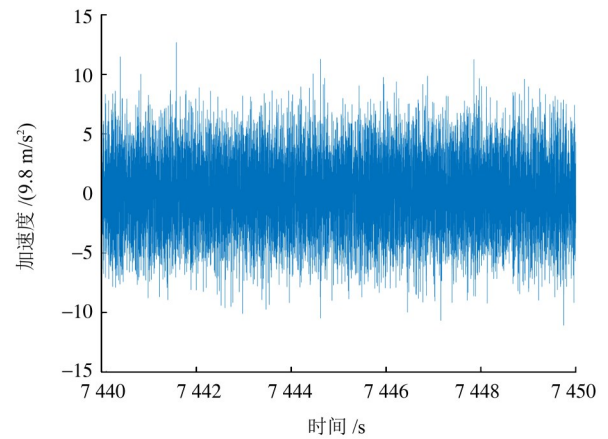


图 7 随机振动加速度激励

Fig. 7 Random vibration acceleration excitation

2.2 网格敏感性分析

为了分析小支管插套焊接头焊趾处应力奇异的影响, 本文对小支管焊接接头模型进行了网格敏感性分析。采用 Ansys Mechanical 软件进行数值计算, 通过逐步细化网格, 分析了不同网格密度下焊趾位置的应力状态, 网格敏感性对比如图 8 所示。

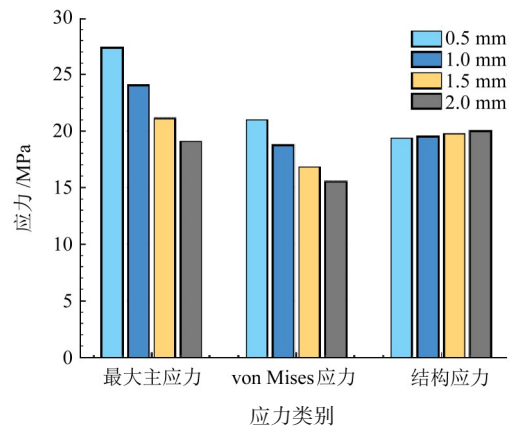


图 8 网格敏感性对比

Fig. 8 Mesh sensitivity comparison

焊趾处存在的几何不连续性导致应力的奇异性。随着网格密度的增加, 焊趾位置的最大主应力和 Mises 应力明显上升。相比之下, 结构应力随网格密度变化的幅度较小, 表明结构应力对网格密度的敏感性较低。此外, 第 1.2 节中 ASME FFS-1 疲劳分析方法直接从有限元结果提取应力, 受网格密度影响较大, 其准确性难以控制。网格依赖性可能导致疲劳寿命预测结果不稳定, 在应力集中区域的评估结果可能过于保守。

2.3 基于测试应力的疲劳分析

在进行基于测试应力的疲劳分析时, 采用疲劳强度减弱系数修正焊接接头处应力集中效应对疲劳寿命的影响, 从而更准确地预测疲劳失效。参考 ASME B31.1 标准, 针对插套焊缝, 其疲劳强度减弱系数取 4.0。

在试验过程中,通过在距离焊趾位置 1/2 壁厚处布置应变片,获取了随机振动加载下的应变时程数据。将实测应变数据转换为应力历程,并进一步转换得到测试应力 PSD(图 9)。采用 Dirlik 方法对焊接接头的疲劳累积损伤进行了计算,在 1 s 内疲劳累积损伤为 0.007 273。根据式(8),当疲劳累积损伤达到 1 时,结构将会发生疲劳失效,因此基于测试应力分析的疲劳寿命为 0.038 h,远低于实际试验寿命 6.23 h。在工程应用中,使用基于测试应力的分析方法进行疲劳寿命预测具有较大保守性。

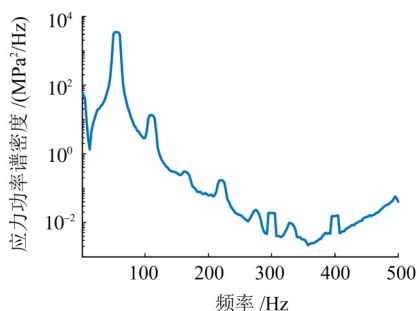


图 9 测试应力功率谱密度
Fig. 9 PSD of the test stress

2.4 基于等效结构应力的疲劳分析

为了激发结构的多个模态,更好地模拟实际工作环境中的复杂振动条件,试验过程中施加了 20~500 Hz 宽频带随机振动激励。随机振动激励的 PSD 曲线如图 10 所示,其幅值为 0.015 $(9.8 \text{ m/s}^2)^2/\text{Hz}$,呈现出平直的谱线特性。

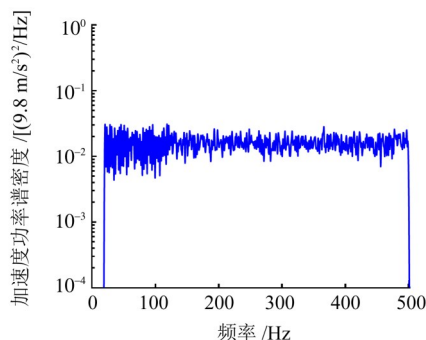


图 10 随机振动激励功率谱密度
Fig. 10 PSD of the random vibration excitation

采用 Ansys Mechanical 软件对单位加速度激励 (1g) 开展正弦扫频计算,以获得焊趾位置的节点力数据,并进一步计算得到等效结构应力传递函数,其中应力最大位置的等效结构应力传递函数如图 11 所示。

图 11 显示了结构在不同频率激励下的响应特性,由图 11 可知,在约 60 Hz 处存在一个显著的峰值,与结构的第 1 阶固有频率相对应,在此频率附近,即使较小的激励也可能导致较大的应力响应。

基于随机振动的基本理论,结合随机振动激励的

PSD 和结构应力传递函数,采用式(11)计算等效结构应力的 PSD,应力最大位置的等效结构应力 PSD 如图 12 所示。在 60 Hz 附近出现了一个突出的峰值,与图 11 中观察到的传递函数特性一致。尽管输入的激励在此频率范围内相对较小,但由于结构动力特性的放大作用,导致了较大的应力响应。

$$D_{\text{PSDs}}(f) = H_s(f)H_s^*(f)S(f) \quad (11)$$

式中, $D_{\text{PSDs}}(f)$ 为等效结构应力的功率谱密度函数; $H_s(f)$ 为等效结构应力的传递函数; $S(f)$ 为输入载荷的功率谱密度。

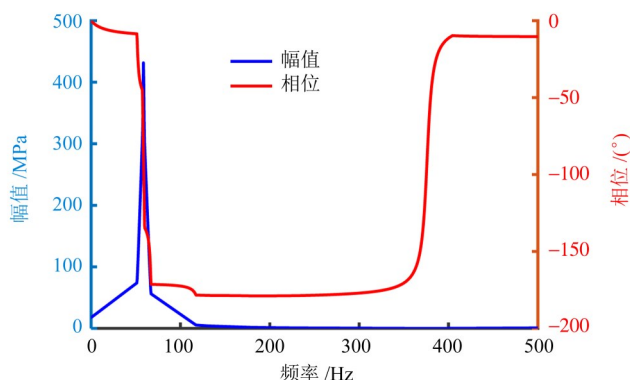


图 11 等效结构应力传递函数
Fig. 11 Equivalent structural stress transfer function

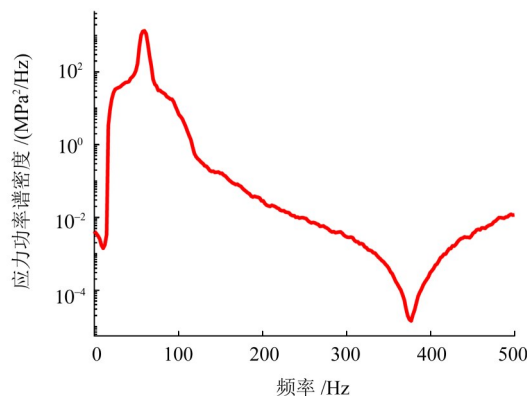


图 12 等效结构应力功率谱密度
Fig. 12 PSD of the equivalent structural stress

基于主 $S-N$ 曲线开展疲劳寿命计算,图 13 所示为管道焊趾所在截面各个位置在 1 s 内的疲劳累积损伤分布。由图 13 可知,疲劳损伤主要集中在振动激励方向的位置,这些区域可能成为潜在的疲劳裂纹起始点。

表 2 中汇总了基于测试应力、等效结构应力 2 种疲劳分析方法在焊趾处累积疲劳损伤及其对应的疲劳寿命,案例分析结果表明:基于测试应力的疲劳分析方法得出 1 s 内的累积疲劳损伤为 7.27×10^{-3} ,计算出的疲劳寿命仅为 0.038 h。与试验结果相比,相对误差为 99.39%,基于测试应力的分析方法在预测焊接接头随机振动下的疲劳寿命时,具有极大保守性。其主要原因可能是在处理焊接接头的应力集中效应时,过度估

计了接头疲劳强度减弱系数,进而产生了过于保守的疲劳寿命预测结果。

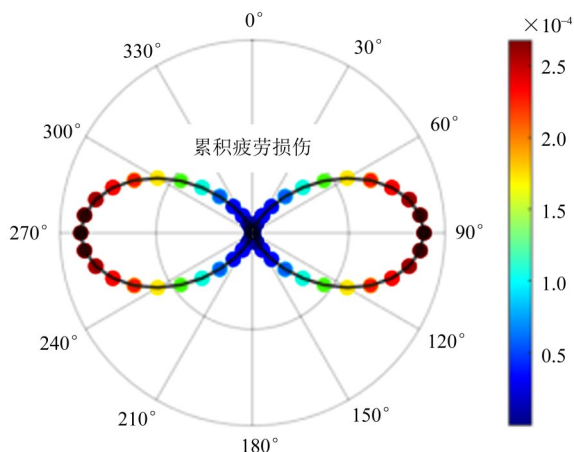


图 13 焊趾位置疲劳损伤分布

Fig. 13 Fatigue damage distribution at the weld toe

表 2 疲劳寿命计算结果

Tab. 2 Fatigue life calculation results

方法	1 s 内的疲劳累积损伤	计算寿命/h	试验寿命/h	误差/%
测试应力法	7.27×10^{-3}	0.038	6.23	-99.39
等效结构应力法	2.67×10^{-4}	1.04	6.23	-83.31

相较之下,基于等效结构应力的分析方法显示出更为合理的预测结果。该方法计算出 1 s 内的累积疲劳损伤为 2.67×10^{-4} ,对应的疲劳寿命为 1.04 h,相对误差减小至 83.31%,与试验结果更加接近且具备足够的保守性。等效结构应力方法在考虑焊接接头的局部应力集中效应和随机振动环境的复杂性方面具有更高的准确性。

3 结论

针对核电厂小支管焊接接头在随机振动载荷下的疲劳寿命评估问题,对比了基于测试数据、ASME FFS-1 疲劳分析方法和等效结构应力法的疲劳寿命评估方法,并通过随机振动疲劳试验进行对比验证,得到以下主要结论:

1) ASME FFS-1 疲劳分析方法受网格敏感性影响较大,针对焊趾位置疲劳寿命预测结果不稳定,在应力集中区域可能产生过于保守的评估结果。

2) 基于测试应力的疲劳分析方法的预测结果过于保守,高度保守性可能导致不必要的维护成本增加和设备使用效率降低。

3) 等效结构应力法克服了有限元计算在焊趾位置应力奇异问题,在预测焊接接头随机振动下的疲劳寿命时表现出更高的准确性和合理性,具备足够的保守性和工程适用性。

本研究为核电厂小支管焊接接头的安全性评估

提供了新的思路,对提高核电厂安全运行和预防性维护策略制定具有重要的理论意义和实际应用价值。

参考文献 (References)

- [1] 赖姜,何超,孙磊,等. 核电厂小支管的模态与振动响应分析[J]. 核动力工程,2019,40(增刊1):114-116.
LAI Jiang, HE Chao, SUN Lei, et al. Analysis of modal characteristics and dynamic response of branch pipe in nuclear power plants[J]. Nuclear Power Engineering, 2019, 40(Suppl. 1): 114-116. (In Chinese)
- [2] 沈双全,徐昱根,张世伟,等. 基于应变与加速度响应的核电厂小支管振动评价[J]. 核动力工程,2016,37(增刊2):77-79.
SHEN Shuangquan, XU Yugen, ZHANG Shiwei, et al. Vibration evaluation of small bore pipe in NPPs based on strain and acceleration [J]. Nuclear Power Engineering, 2016, 37(Suppl. 2): 77-79. (In Chinese)
- [3] 袁少波,李振,徐伟祖,等. 核电厂小支管裂纹泄漏原因分析和改造[J]. 核动力工程,2019,40(增刊1):97-99.
YUAN Shaobo, LI Zhen, XU Weizu, et al. Cause analysis and improvement of crack leakage of small bore pipe in nuclear power plants[J]. Nuclear Power Engineering, 2019, 40(Suppl. 1): 97-99. (In Chinese)
- [4] ECONOMOU J, THEBAULT Y, COSTES P E. Small bore pipe branch connections fatigue [C]//Proceedings of the ASME 2011 Pressure Vessels and Piping Conference. New York; ASME, 2012: 659-663.
- [5] RAO K R. Companion guide to the ASME boiler and pressure vessel and piping codes[M]. 6th ed. New York: American Society of Mechanical Engineer (ASME) Press, 2023: 225-232.
- [6] MAEKAWA A, NODA M, SUZUKI M, et al. Development of measurement methods for vibration-induced stress of small-bore piping[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2017, 139(4): 041207.
- [7] MAEKAWA A, TAKAHASHI T, TSUJI T, et al. Noncontact measurement method of vibration stress using optical displacement sensors for piping systems in nuclear power plants[J]. Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, 2015, 1(3): 031002.
- [8] 雷雨恒,任亮,刘强平,等. 基于应变响应反演技术的弓网动态接触力监测方法及应用研究[J]. 机械强度,2022,44(6):1300-1306.
LEI Yuheng, REN Liang, LIU Qiangping, et al. Research on monitoring method and application of the dynamic contact force between catenary and pantograph based on strain response inversion technology[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(6): 1300-1306. (In Chinese)
- [9] 文保华,徐凤林,赵华,等. 三轴随机振动条件下电连接器插孔簧片疲劳损伤研究[J]. 机械强度,2023,45(6):1465-1473.
WEN Baohua, XU Fenglin, ZHAO Hua, et al. Research on fatigue damage of electrical connector jack springs under triaxial random vibration conditions[J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(6): 1465-1473. (In Chinese)
- [10] TAKAHASHI S, TAMURA A, SATO S, et al. Flow-induced vibrations in closed side branch pipes and their attenuation methods

- [J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2016, 53 (8) : 1164-1177.
- [11] JIA J H, ZHENG X Y, ZHANG Z Q. Crack identification based on natural frequency of cracked small pipes [C]//Proceedings of the 2017 6th International Conference on Measurement, Instrumentation and Automation (ICMIA 2017). Paris: Springer Nature, 2017: 27-30.
- [12] WANG R J, SHANG D G, LI L S, et al. Fatigue damage model based on the natural frequency changes for spot-welded joints [J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(6): 1047-1055.
- [13] WANG R J, SHANG D G. Fatigue life prediction based on natural frequency changes for spot welds under random loading [J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(2): 361-366.
- [14] CHOI Y H, CHOI S Y. Socket weld integrity in nuclear piping under fatigue loading condition [J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237(2): 213-218.
- [15] CHOI Y H, CHOI S Y, KIM J S. Surface crack behavior in socket weld of nuclear piping under fatigue loading condition [J]. Key Engineering Materials, 2005, 297/298/299/300: 1678-1684.
- [16] MILES T, ANDREWS B. Managing the risk of vibration related failures on facility pipework [C]//Proceedings of the 2008 7th International Pipeline Conference. New York: ASME, 2009: 385-393.
- [17] BERGER J, GUILLOU J, POIRIER E. Small bore piping system fatigue—determination of favored crack location and related admissible vibration criterion [C]//Proceedings of the ASME 2012 Pressure Vessels and Piping Conference. New York: ASME, 2012: 409-418.
- [18] FAHMY S. Small bore dynamics and some fatigue related issues [C]//Proceedings of the Inter-noise and Noise-con Congress and Conference. Wakefield: Institute of Noise Control Engineering, 2016: 4855-5847.
- [19] 石红梅, 崔璐, 侯伟, 等. 一种预测高低周复合疲劳寿命的新方法 [J]. 机械强度, 2023, 45(5): 1229-1232.
SHI Hongmei, CUI Lu, HOU Wei, et al. New method to predict the life of high and low cycle composite fatigue life [J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(5): 1229-1232. (In Chinese)
- [20] HAN S H, AN D G, KWAK S J, et al. Vibration fatigue analysis for multi-point spot-welded joints based on frequency response changes due to fatigue damage accumulation [J]. International Journal of Fatigue, 2013, 48: 170-177.
- [21] DONG P, HONG J K. The master S-N curve approach to fatigue of piping and vessel welds [J]. Welding in the World, 2004, 48(1/2): 28-36.
- [22] DIRLIK T. Application of computers in fatigue analysis [D]. Coventry: University of Warwick, 1985: 198.

Study on random vibration fatigue evaluation method of small branch pipe welded joints in nuclear power plants

YANG Jiandong¹ GAO Hongbo² XU Yangyang¹ ZHOU Shuai² LIN Lei² PENG Liang¹ SHI Hongxing¹
LUAN Zhenxing¹ ZHAO Yue²

(1. Guangxi Fangchenggang Nuclear Power Co., Ltd., Fangchenggang 538000, China)

(2. Suzhou Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215004, China)

Abstract: [Objective] Aiming at the fatigue life evaluation of welded joints of small-bore pipes in nuclear power plants under random vibration loads, fatigue life evaluation methods based on test data, the in-service fitness-for-service (FFS) assessment method specified in ASME FFS-1 and the equivalent structural stress method were investigated. [Methods] The fatigue life evaluation approaches based on test data, ASME FFS-1 fatigue analysis method and equivalent structural stress method were compared, and comparative verification was conducted via random vibration fatigue tests. [Results] The research results reveal that the ASME FFS-1 fatigue analysis method is susceptible to mesh sensitivity when dealing with complex structures, which may lead to excessively conservative fatigue life evaluation results. The fatigue analysis method based on measured stress also presents high conservatism and may cause unnecessary increase in maintenance costs. In contrast, the equivalent structural stress method can more accurately take into account the local stress concentration effect of welded joints, effectively adapt to complex random vibration environments, and possesses higher prediction accuracy and engineering applicability in fatigue life prediction. It can provide an important reference for formulating effective preventive maintenance strategies.

Key words: Small branch pipe; Welded joint; Random vibration; Equivalent structural stress; Fatigue life

Corresponding author: GAO Hongbo, E-mail: 458508826@qq.com

Fund: 2023 Guangxi Autonomous Region Technological Innovation Self-Funded Project (Guigongxinyuan District [2023]699)

Received: 2024-08-15 Revised: 2024-10-09

(编辑: 刘欢欢)