

桥梁结构钢材疲劳性能与寿命预测模型研究

王 勇

湖北省路桥集团有限公司, 湖北 武汉 430000

[摘要]随着交通负载的不断增长,桥梁作为关键基础设施,正面临越来越严峻的安全隐患。在长期荷载的作用下,桥梁结构可能发生疲劳性损伤,导致性能退化,甚至出现结构故障。为了有效预测钢材的疲劳寿命,并结合现代的预测模型与有限元分析技术,成为了当今桥梁研究中的重要方向。文章探讨钢材疲劳特性,并通过实验与理论相结合的方式,提出有效的疲劳寿命预测方法。

[关键词]桥梁结构; 钢材; 疲劳性能; 寿命预测; 有限元分析

DOI: 10.33142/ect.v2i12.14762

中图分类号: U448.14

文献标识码: A

Research on Fatigue Performance and Life Prediction Model of Bridge Structural Steel

WANG Yong

Hubei Road & Bridge Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract: With the continuous increase of traffic load, bridges, as key infrastructure, are facing increasingly severe safety hazards. Under long-term loads, bridge structures may experience fatigue damage, leading to performance degradation and even structural failure. In order to effectively predict the fatigue life of steel and combine modern prediction models with finite element analysis techniques, it has become an important direction in current bridge research. The article explores the fatigue characteristics of steel and proposes an effective method for predicting fatigue life through a combination of experiments and theory.

Keywords: bridge structure; steel products; fatigue performance; life prediction; finite element analysis

桥梁作为重要的交通基础设施,其使用寿命和安全性直接关系到人民群众的生命财产安全。钢材是桥梁结构中常用的材料之一,其在长时间荷载作用下容易发生疲劳损伤,因此,研究钢材的疲劳性能与寿命预测成为了桥梁工程领域的重要课题。通过建立准确的疲劳寿命预测模型,可以有效评估桥梁的使用寿命,为桥梁的设计、施工、维护提供科学依据。

1 常见的疲劳寿命预测方法

1.1 S-N 曲线法

S-N 曲线法是一种经典的疲劳寿命预测技术,在工程设计中有着广泛的应用。该方法基于实验数据绘制的应力-寿命(S-N)曲线,可以用来估算材料在不同应力水平下的疲劳寿命。其基本的数学表达式为:

$$N = C \cdot S^{-b} \quad (1)$$

其中, N为疲劳寿命, S为应力幅值, C是常数, b为材料的疲劳指数。S-N 曲线法操作简单,计算便捷,因此在处理常见的工况问题时十分高效。然而,这一方法在面对复杂的荷载工况时存在局限,尤其是在变幅荷载或复杂应力状态下,其预测精度较低。因此,尽管该方法适用于基础工程设计,其应用范围却受到一定的限制。

1.2 应力谱法

应力谱法是一种考虑了荷载变化特性的疲劳寿命预测方法,能够模拟实际工作中荷载的变幅特性。通过分析工作荷载的应力谱,能够为不同的荷载历史下的疲劳寿命

提供估算。该方法基于 Palmgren-Miner 损伤累积准则,具体的数学表达式为:

$$\sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (2)$$

其中, n_i 表示第*i*种应力幅值出现的次数, N_i 为该应力幅值下的疲劳寿命。与 S-N 曲线法相比,应力谱法能够处理更为复杂的荷载历史,适用于动态荷载等复杂工况,广泛应用于交通、航空等领域。然而,该方法需要大量的荷载谱数据,且计算较为繁琐,精度依赖于荷载数据的完整性与准确性。

1.3 局部应变法

局部应变法侧重于对结构局部区域应变响应的分析,尤其是在高应力集中的部位,能够为疲劳寿命的预测提供精准依据。该方法通过局部应变与应力的关系来进行疲劳寿命估算,其基本公式为:

$$N = \left(\frac{\Delta \epsilon}{\Delta \epsilon_f} \right)^{-m} \quad (3)$$

在该公式中, $\Delta \epsilon$ 表示应变幅值, $\Delta \epsilon_f$ 为材料的疲劳极限应变幅值, m为疲劳指数。局部应变法能够准确分析裂纹的萌生与扩展,特别适合于焊接接头等高应力集中区域的疲劳分析。尽管该方法的预测精度较高,但其计算过程较为复杂,常常依赖于数值模拟或者大量的实验数据。因此,在大规模结构分析中,采用该方法时可能面临较高的

计算成本与资源需求。

2 疲劳寿命的影响因素

疲劳寿命的预测受到多种因素的共同作用,包括材料的本身特性、外部荷载的性质、环境条件及结构设计等。各因素相互交织,综合影响结构的疲劳寿命。材料的疲劳强度及韧性直接决定其抗疲劳的能力。具有较高疲劳极限的材料,能在较长时间内承受更多的载荷循环,从而延长使用寿命^[1]。外部荷载的变幅性、频率变化及荷载历史等因素,会在一定程度上影响疲劳过程,尤其是在荷载波动较大的情况下,损伤积累的速度加快,导致疲劳寿命缩短。环境因素对材料的疲劳性能同样起着重要作用,尤其是温度、湿度以及腐蚀等环境条件。在腐蚀介质下,裂纹的萌生与扩展会加速,从而缩短材料的使用寿命。结构设计中存在应力集中的部位,如焊接接头或几何不连续性区域,也更易成为疲劳破坏的薄弱环节。

3 桥梁结构钢材疲劳寿命的实验研究

3.1 实验设计与方法

为研究桥梁钢材在长期荷载作用下的疲劳行为,本实验选取了多种钢材类型,并设计了多种加载条件,模拟真实工况以获取相关数据。实验中使用疲劳试验机施加荷载,利用应变计监测材料的应力-应变特性,同时借助光学显微镜观察裂纹的生成与扩展。实验通过逐步施加不同水平的应力来模拟疲劳过程,记录每阶段的损伤情况,形成了一套完整的数据采集与分析流程,为后续模型的建立提供了精确的数据支持。

3.2 实验材料与设备

研究选用了桥梁工程中常见的结构钢材,包括 Q345 和 Q235 等,材料具有较高的机械强度和优良的加工性能。实验设备方面,疲劳试验机是核心仪器,用于模拟实际荷载条件并精确控制加载过程;应变计实时记录钢材的应力-应变响应,为疲劳寿命的计算提供了基础数据;光学显微镜则用于详细观察裂纹在疲劳加载过程中逐步扩展的形态与速度。

3.3 实验过程与数据分析

实验以逐级加载的方式评估钢材的疲劳损伤,实时采集每个阶段的应力-应变数据,并通过显微镜记录裂纹扩展的微观特征。随着加载应力的增加,材料的疲劳损伤逐步积累,最终形成贯穿裂纹。数据分析采用 S-N 曲线法,对钢材在不同应力水平下的疲劳寿命进行估算。裂纹扩展的观察结果揭示了材料疲劳破坏的演化机制。数据处理过程中,结合应力循环次数与损伤积累规律,对疲劳寿命进行量化,明确了疲劳过程中的关键影响因素。

3.4 实验结果与讨论

实验发现,不同应力水平显著影响钢材的疲劳寿命。低应力状态下,钢材能够承受较多的循环加载,而高应力条件下,疲劳寿命显著缩短,裂纹扩展速度明显加快,疲劳损伤的积累过程呈现出更高的非线性特征。实验还表明,

加载条件对疲劳寿命影响显著,尤其是在变幅荷载下,疲劳寿命较恒定荷载条件更短,频繁的荷载波动更易加速疲劳损伤的形成。通过深入分析实验数据,发现疲劳寿命受应力水平、加载模式以及材料性能的共同作用影响。荷载历史和应力幅值的波动对裂纹扩展的速度和范围起到了决定性作用。研究结果不仅揭示了疲劳过程的内在规律,还为钢材的疲劳寿命预测提供了可靠依据,为优化桥梁钢材设计和疲劳性能提升指明了方向。

4 钢材疲劳寿命预测模型的建立

4.1 预测模型的基本原理

钢材疲劳寿命预测模型的建立基于对其微观损伤演化及宏观疲劳行为之间联系的研究。应力-应变响应的精确描述,为分析材料在不同工况下的疲劳寿命奠定了基础。通常,采用实验数据建立数学模型,用以估算复杂条件下的疲劳寿命。材料的疲劳特性主要通过应力幅值、循环次数与寿命的关系呈现,该关系常用如下公式描述:

$$N_f = \frac{1}{A \cdot (\sigma - \sigma_e)^m} \quad (4)$$

公式中,疲劳寿命以 N_f 表示,作用应力为 σ ,疲劳极限为 σ_e ,而 A 与 m 则为材料特定的参数。在复杂荷载条件下,需将非线性损伤累积特性纳入模型,以提高其适应性和准确性。

4.2 模型建立的关键步骤

构建疲劳寿命预测模型需要完成多个核心步骤,包括方法选择、数据收集及模型验证。依据预测需求,常用方法涵盖 S-N 曲线模型、局部应变法及断裂力学模型等。实验数据通过疲劳试验设备获取,在加载过程中记录材料的应力-应变响应及疲劳损伤规律。损伤的累积常用 Miner 法则表示,其公式为:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \quad (5)$$

其中,损伤程度由 D 表示, n_i 为特定应力水平下的循环次数, N_i 为相应的疲劳寿命。模型参数校准需基于实验数据,通过误差最小化提升精度。针对不同应力状态的损伤规律差异,需结合理论与实验开展参数优化,确保模型能够准确反映材料疲劳特性。

4.3 考虑不同工况下的预测模型

桥梁结构在动态荷载、温度变化及湿度条件下的疲劳寿命差异显著,因此预测模型需针对实际工况进行调整与扩展。通过引入修正系数 k ,可以对环境条件对疲劳寿命的影响进行修正,其公式为:

$$N'_f = k \cdot N_f \quad (6)$$

其中,修正系数 k 根据实验拟合而得。在动态荷载作用下,材料的应力响应可用以下积分公式描述:

$$N_f = \frac{1}{\int_0^T A(\sigma(t) - \sigma_e)^m dt} \quad (7)$$

公式中,应力随时间的变化用 $\sigma(t)$ 表达, T 为周期长度。采用这种方法,模型能够准确刻画材料在动态条件下的疲劳行为。

4.4 模型的精度与验证

模型精度直接影响预测结果的可信度,通过实验数据验证其有效性极为重要。均方根误差(RMSE)常用于衡量模型预测与实际数据的偏差,其计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (N_{f,exp} - N_{f,pred})^2} \quad (8)$$

其中,实验测得的疲劳寿命为 $N_{f,exp}$,模型预测值为 $N_{f,pred}$ 。若预测误差超出容许范围,需进一步调整模型结构或增加新的影响因子(如裂纹扩展速率的非线性变化)。通过与实验数据的对比,模型的性能持续优化,其预测的精确性也得以提升。

5 基于有限元分析的疲劳寿命预测

5.1 有限元分析在疲劳寿命预测中的应用

有限元分析(FEA)作为一种重要的数值模拟工具,通过建立详细的三维桥梁模型,结合材料的非线性行为、荷载历史等因素,能够更精确地估算疲劳寿命^[2]。与传统的理论预测方法相比,有限元分析在捕捉结构局部高应力区域方面具有明显优势,它可以有效模拟材料的复杂行为,特别是在动态荷载作用下的疲劳响应。此外,环境因素如温度变化、湿度等也能够模型中得到合理考虑,这使得模拟结果更贴合实际使用情况。

5.2 桥梁结构有限元建模

利用ANSYS、Abaqus等有限元软件,可以构建桥梁结构的三维模型,准确再现其在各种荷载作用下的响应。为保证模拟结果的准确性,建模过程中必须充分考虑材料本构关系、接触条件以及几何形状的细节。特别是对桥梁关键部位,如支座、焊缝等应力集中区域,应采用更为精细的网格划分。精确的网格划分有助于捕捉局部的应力集中现象,进而提高分析的精度。此外,合理设定荷载类型及边界条件,也是确保模型可靠性的关键。

5.3 疲劳分析与寿命评估

在有限元分析框架下,复杂的应力时程通常会经过雨流计数法处理,以便转化为不同幅值的循环次数,并进一步依据矿业损伤理论或断裂力学模型进行计算。在实际应用中,模型应根据不同的工作条件,如温度、湿度等环境因素,进行适当修正,以提高预测的准确性。此外,疲劳寿命的评估不仅关注传统静态荷载,还需考虑动态荷载、交通荷载等复杂情况,确保结果的全面性。

5.4 有限元分析结果的讨论

通过将有限元分析结果与实际实验数据进行对比,验证了该分析方法在桥梁疲劳寿命预测中的有效性^[3]。对结果的进一步探讨表明,有限元分析相比传统方法,尤其在处理局部高应力区域的疲劳预测方面,表现出更高的精度。然而,模型的准确性仍然受到一些因素的影响,如材料参数的选择、荷载历史的模拟准确度及网格划分的精细度等。

针对这一问题,对关键参数的敏感性分析显得尤为重要,可以通过调整模型参数来优化结果。为了进一步提升预测的可靠性,后续研究可以聚焦于提高模型的精度,优化建模方法,并通过更多的实验验证模型的适用性。

6 桥梁结构疲劳性能优化与寿命延长措施

6.1 结构设计优化

通过精心设计桥梁结构,可有效减少应力集中的现象,从而提升其疲劳强度,延长使用寿命。应力集中通常发生在桥梁的连接部位、支座及焊接区域,这些地方由于材料不均匀或几何形状的复杂性,容易成为疲劳损伤的源头。优化结构设计,采取合理的连接方式或渐变过渡设计,能够有效减小应力集中现象,增强结构的整体抗疲劳能力。精确的荷载分配与施工方法同样对改善桥梁的受力状态起到关键作用。

6.2 材料选择与改良

选择高强度钢材及抗疲劳性能较好的材料,对于提高桥梁的整体耐久性具有重要意义。高强度低合金钢、合金钢及碳纤维复合材料等新型材料,具备了更高的抗疲劳性能及耐腐蚀性,能够有效适应多变的工作环境。这些材料在满足强度要求的同时,还能够增强桥梁的长期耐久性。除了材料选择外,通过表面处理技术,如热处理或涂层技术,也能有效提高钢材的疲劳强度。

6.3 施工与维护措施

施工过程中,采用先进的施工工艺能够减少因操作不当导致的材料损伤,从而确保桥梁结构的稳定性。特别是在焊接过程中,焊接缺陷往往是疲劳损伤的根源,精确控制焊接质量至关重要。采用先进的焊接技术,结合优化的施工流程,可有效降低疲劳裂纹的产生。此外,施工后的定期检查与维护对于延缓疲劳损伤的扩展起到了关键作用。定期检查能够及时发现潜在的裂纹或腐蚀问题,并进行修复,有效防止这些损伤扩展至严重程度。针对疲劳损伤较为严重的部位,可以进行局部加固,进一步提高桥梁的疲劳强度。

6.4 基于预测模型的寿命管理策略

借助疲劳寿命预测模型,通过精确预测模型,桥梁的疲劳状态得以实时监控,管理者能够基于预测结果采取有效的预防措施,减少潜在风险的发生。依据这些预测数据,可以制定出科学合理的维护计划,包括定期检查、维修与加固等措施,以确保桥梁始终处于最佳工作状态。通过定期关注预测模型指出的疲劳高风险区域,管理人员可以及时进行专项监测与维护,避免疲劳裂纹的扩展。对于已经出现疲劳损伤的部分,能够在早期进行修复,防止损伤蔓延,确保桥梁的结构安全。此外,借助预测模型优化资源配置,避免不必要的维修支出,提高了维护工作的经济效

益与管理效率。

7 结语

钢材疲劳寿命受到诸多因素的综合影响,包括材料特性、荷载历史、环境条件以及结构设计等。在设计中采用合理的优化方案及高性能材料,有助于提升钢材的疲劳强度,进而延长桥梁的使用寿命。通过结合疲劳寿命预测模型,能够为桥梁的维护与管理提供科学支持,降低潜在的安全风险。此外,科学的施工方法及定期维护保养也是延长桥梁使用寿命的重要因素。随着大数据与人工智能技术的不断发展,桥梁管理的智能化水平将不断提升,进而为疲劳寿命预测提供更为精准的技术保障,有助于确保桥梁

的长期稳定与安全运行。

[参考文献]

- [1]赵威.不同应力状态下钢结构钢材与节点的超低周疲劳断裂性能[D].河南:郑州大学,2020.
 - [2]郑晓伟,吕恒林,李宏男,等.高层建筑风致疲劳分析中的钢材强度退化模型[J].防灾减灾工程学报,2022,42(2):276-282.
 - [3]魏欢欢,郑东东,陈晨,等.钢结构钢材腐蚀疲劳损伤研究综述[J].建筑结构,2022,52(2):1302-1306.
- 作者简介:王勇(1990.12—),男,职称:中级,籍贯:湖北保康。