

文章编号: 1674-599X(2020)02-0052-06

基于等效初始裂纹尺寸的吊杆疲劳寿命预测

马亚飞, 欧阳清波, 汪国栋, 王磊, 张建仁

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 在环境侵蚀和反复车辆荷载的长期作用下, 大跨桥梁吊杆的疲劳损伤突出。为准确评估平行钢丝吊杆的服役状况, 根据不同应力比作用下高强钢丝疲劳裂纹扩展的试验结果, 拟合得到了高强钢丝疲劳裂纹增长模型参数与应力比的关系表达式。将局部锈蚀引起的应力集中效应融入应力强度因子模型中, 对疲劳裂纹增长分析模型由等效初始裂纹尺寸至临界裂纹长度进行了积分, 从而预测单根钢丝的疲劳寿命。考虑吊杆钢丝断裂的关联性及钢丝断裂后吊杆应力的重分布, 实现了整个桥梁吊杆的疲劳寿命评估, 分析了断丝率、车载频率和锈坑增长速率对吊杆寿命的影响。研究表明: 可为服役大跨桥梁吊杆的安全性评价和运营维护提供参考。

关键词: 桥梁工程; 平行钢丝吊杆; 高强钢丝; 腐蚀; 疲劳寿命

中图分类号: U448.22⁺5

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.02.009

Fatigue life prediction for suspender based on equivalent initial flaw size

MA Ya-fei, OUYANG Qing-bo, WANG Guo-dong, WANG Lei, ZHANG Jian-ren

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Fatigue damage of long-span bridge suspenders is a serious problem under long-term environmental erosion and repeated vehicle loads. In order to accurately evaluate the service condition of parallel steel wire suspenders, the relationship between of fatigue crack growth model parameters and stress ratio was fitted based on the result of fatigue crack growth test of high strength steel wires under different stress ratios. The stress concentration effect caused by pitting corrosion was then incorporated into the stress intensity factor model. The fatigue crack growth analysis model was integrated from the equivalent initial crack size to a critical crack length to predict the fatigue life of a single steel wire. The fatigue life of the entire suspender can be assessed considering the relevance of fracture steel wire and the stress redistribution of suspender after the fracture of steel wires. Moreover, the effects of steel wire fracture ratio, frequency of vehicle load and corrosion pit growth rate on the service life of suspender was analyzed. This study may provide a reference for the safety evaluation and operational maintenance of existing long-span bridge suspenders.

Key words: bridge engineering; parallel wire suspender; high strength steel wire; corrosion; fatigue life

吊杆是中、下承式拱桥和悬索桥的重要受力构件, 长期处于高应力状态。在环境和荷载等因素作用下, 若防护不当, 高强钢丝易发生腐蚀^[1]。腐蚀会加速材料的疲劳损伤过程, 显著降低吊杆的疲劳

寿命^[2]。吊杆腐蚀疲劳失效往往是无任何征兆的脆性破坏。在中国, 已发生多起因吊杆疲劳断裂导致的安全事故。许多学者已对高强钢丝的疲劳性能进行了研究。李晓章^[3]等人开展了不同腐蚀程度高强

收稿日期: 2020-02-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778068, 51478050); 湖南省自然科学基金项目(2019JJ30024); 长沙市杰出创新青年培养计划项目(kq1802012); 湖南创新型省份建设专项经费资助项目(2019RS2035, 2019SK2171)

作者简介: 马亚飞(1984-), 男, 长沙理工大学副教授, 博士。

钢丝的疲劳试验, 发现锈蚀会大幅降低钢丝的疲劳寿命。Nakamura^[4]等人采用不同缺口类型来模拟钢丝表面的腐蚀形态, 指出钢丝局部缺陷是导致其疲劳性能退化的主要原因。Ma^[5]等人建立了应力范围-疲劳寿命-缺口深度的关系模型。但采用的自制缺口与实际锈蚀形态存在着一定的差别。在疲劳寿命评估方面, 李先立^[6]等人采用偏度-峰度法研究了不同应力水平下高强钢丝的疲劳寿命, 得到了 Weibull 分布下高强钢丝概率寿命曲线和疲劳强度。Castillo^[7-8]等人考虑应力幅值的影响, 提出了高强钢丝疲劳寿命评估的多参数 Weibull 模型。Lan^[9]等人基于锈蚀钢丝应力-寿命曲线和线性损伤累积方法, 建立了平行钢丝疲劳寿命概率分析模型。线性损伤累积方法计算简单, 但缺乏明确的物理失效准则。一些学者基于断裂力学和裂纹增长分析, 对高强钢丝疲劳寿命进行了研究。Toribio^[10]等人对比了不同直径钢丝疲劳裂纹速率的差异。马亚飞^[11-12]等人开展了平行钢丝顶推试验, 采用光学观测方法, 得到了不同应力比下高强钢丝的疲劳裂纹增长分析模型。然而, 受观测手段的限制, 未得到门槛值附近的裂纹扩展速率。郑祥隆^[13]等人建立了适用于不同屈服强度和应力比的疲劳裂纹扩展模型, 但忽略了锈蚀发展对钢丝疲劳的影响。这些研究均针对单根钢丝, 单根钢丝断裂并不意味着整根吊杆失效。因此, 作者基于等效初始裂纹原理, 拟将蚀坑引起的应力集中融入应力强度因子表达式中, 建立高强钢丝疲劳寿命预测模型。考虑钢丝的串并联关系和断丝后应力重分布的影响, 通过引入关联系数分析吊杆内各钢丝疲劳寿命的相关性, 提出服役桥梁吊杆疲劳寿命评估方法, 并进行参数敏感性分析, 以期为大跨度桥梁吊杆的安全性评价和维护提供参考。

1 高强钢丝疲劳裂纹扩展

疲劳裂纹的萌生和发展规律是疲劳寿命预测的前提。疲劳裂纹增长曲线分为低速扩展、稳定扩展和裂纹失稳区^[14], 稳定扩展区是决定疲劳裂纹扩展寿命的主要区域。材料裂纹扩展速率的计算式^[15]为:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K - \Delta K_{th})^m \quad (1)$$

式中: a 为裂纹长度; ΔK_{th} 为疲劳裂纹扩展门槛值;

ΔK 为应力强度因子幅值; N 为疲劳寿命; C 和 m 均为与应力比相关的常数。

为研究应力比的影响, 进行了不同应力比下高强钢丝疲劳裂纹扩展速率试验^[11], 得到了 C 和 m 的表达式。

$$C = 7.018 \times 10^{-11} e^{-1.893R} \quad (2)$$

$$m = 1.102 + 3.498R \quad (3)$$

式中: R 为应力比。

对式(1)进行积分, 可得:

$$N = \int_{a_i}^{a_c} C^{-1} (\Delta K - \Delta K_{th})^{-m} da \quad (4)$$

式中: a_i 为材料初始裂纹长度; a_c 为临界裂纹长度。

为避免复杂的短裂纹增长分析, 一些学者提出了采用等效初始裂纹进行疲劳寿命预测^[16]。目前, 等效初始裂纹尺寸(equivalent initial flaw size, 简称为 EIFS)有 3 种计算方法^[17]: ①外推法: 通过调整初始裂纹的大小使数值模拟下的理论寿命接近试验结果, 由此来估算等效初始裂纹尺寸。②TTCI 法: 从试验获得裂纹扩展深度与循环次数曲线或裂纹扩展深度与时间关系曲线, 将 $N=0$ (或 $t=0$) 所对应的裂纹扩展深度视为等效初始裂纹尺寸。③Kitagawa-Takahashi 图法: 利用裂纹长度与疲劳应力幅的关系, 将等效裂纹初始尺寸视为材料的一种固有特性, 如图 1 所示。

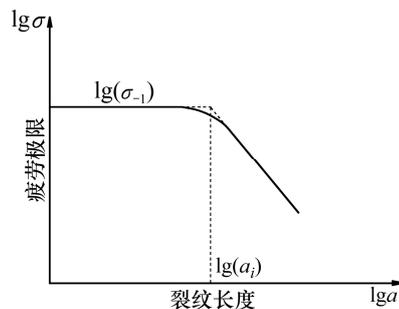


图 1 Kitagawa-Takahashi 图法

Fig. 1 Kitagawa-Takahashi method

Liu^[18]等人给出 EIFS 的计算方法, 其表达式为:

$$a_i = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_{th}}{\Delta \sigma_f Y} \right)^2 \quad (5)$$

式中: $\Delta \sigma_f$ 为疲劳极限; Y 为几何修正因子, 取决于裂纹扩展前沿形状。

已有研究^[11]表明: 钢丝疲劳裂纹前缘形状在初始扩展阶段呈半圆形。随着裂纹的扩展, 裂纹前缘的形状逐渐趋于扁平。裂纹前沿的几何修正因子为:

$$Y\left(\frac{a}{D}\right) = 0.7282 - 2.1425\left(\frac{a}{D}\right) + 18.082\left(\frac{a}{D}\right)^2 - 49.385\left(\frac{a}{D}\right)^3 + 66.114\left(\frac{a}{D}\right)^4 \quad (6)$$

式中： D 为钢丝直径。

材料屈服强度 σ_y 与疲劳裂纹扩展门槛值 K_{th} 受显微组织的影响，二者存在对应关系。对珠光体钢丝的门槛值进行了统计，建议门槛值经验公式^[13]为：

$$\Delta K_{th} = -1.6 \times 10^{-3} \sigma_y + 5.42 - 1.16R \quad (7)$$

式中： σ_y 为屈服强度。

实际环境中，钢丝发生锈蚀后，蚀坑处应力集中效应明显，降低了钢丝的疲劳寿命。腐蚀钢丝应力集中系数的计算公式为：

$$K_t = 3.453 \times (d + 0.0059)^{0.239} \quad (8)$$

式中： d 为锈坑深度。

蚀坑尖端的应力强度因子^[19]可表示为：

$$K_d = Y\sigma \sqrt{\pi \left(a + d \left(1 - \exp\left(-\frac{a}{d}(K_t^2 - 1)\right) \right) \right)} \quad (9)$$

式中： K_t 为应力集中因子； σ 为远端应力。



图 2 锈坑深度与裂纹深度增长示意

Fig. 2 Schematic of pit depth and crack depth growth

当钢丝疲劳裂纹发展至临界尺寸时，则发生断裂，临界裂纹长度 a_c 与材料的断裂韧性 K_c 有关，其计算公式^[20]为：

$$K_{max} = Y\sigma_{max} \sqrt{\pi a_c} \leq K_c \quad (10)$$

式中： σ_{max} 为最大应力； K_{max} 为应力强度因子上限值。

Mahmoud^[21]发现：当裂纹长度与钢丝直径比值达到 0.5 时，钢丝发生断裂。因此， a_c 与直径 D 的关系可表示为：

$$a_c = D / 2 \quad (11)$$

2 吊杆疲劳寿命预测

桥梁吊杆由 J 根平行钢丝组成，其最大应力为 σ_{max} ，最小应力为 σ_{min} ，应力比为：

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (12)$$

若吊杆防护套的有效防护时间为 T 年，年车辆荷载循环次数为 Q ，则 T 年的荷载循环次数为 QT ，通过 QT 可求得积分上限 a_1 。

$$QT = \int_{a_i}^{a_1} C^{-1} \left(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a} - \Delta K_{th} \right)^{-m} da \quad (13)$$

吊杆护套出现破损后，有害介质进入并诱发腐蚀，钢丝锈坑深度为：

$$d = b \cdot t \quad (14)$$

式中： b 为年锈坑深度增量； t 为腐蚀时间。

考虑腐蚀的影响，吊杆内单根钢丝的疲劳寿命为：

$$N = \int_0^N dN = \int_{a_i}^{a_c} C^{-1} \left(\Delta K_d - \Delta K_{th} \right)^{-m} da \quad (15)$$

疲劳裂纹尺寸 a_1 作为疲劳寿命积分下限，将年荷载循环次数代入公式，可求得第 $T+1$ 年疲劳寿命积分上限 a_2 。

$$Q = \int_{a_1}^{a_2} C^{-1} \left(Y\Delta\sigma \cdot \sqrt{\pi \left(a + b \left(1 - e^{-\frac{a}{b}(K_t^2 - 1)} \right) \right)} - \Delta K_{th} \right)^{-m} da \quad (16)$$

同理，将疲劳裂纹扩展尺寸 a_2 作为第 $T+2$ 年疲劳寿命积分下限，将此时锈坑深度代入公式，求得第 $T+2$ 年疲劳寿命积分上限 a_3 。

$$Q = \int_{a_2}^{a_3} C^{-1} \left(Y\Delta\sigma \cdot \sqrt{\pi \left(a + 2b \left(1 - e^{-\frac{a}{2b}(K_t^2 - 1)} \right) \right)} - \Delta K_{th} \right)^{-m} da \quad (17)$$

依此类推，计算得到 a_4, a_5, \dots, a_n 。裂纹长度达临界长度时，钢丝发生疲劳失效，其疲劳寿命为：

$$N_1 = \sum \left[\int_{a_i}^{a_1} C^{-1} \left(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a} - \Delta K_{th} \right)^{-m} da + \int_{a_1}^{a_2} C^{-1} \left(Y\Delta\sigma \sqrt{\pi \left(a + b \left(1 - e^{-\frac{a}{b}(K_t^2 - 1)} \right) \right)} - \Delta K_{th} \right)^{-m} da + \dots + \int_{a_n}^{a_f} \left(Y\Delta\sigma \cdot \sqrt{\pi \left(a + nb \left(1 - e^{-\frac{a}{nb}(K_t^2 - 1)} \right) \right)} - \Delta K_{th} \right)^{-m} da \right] \quad (18)$$

若各根钢丝互不关联, 考虑断丝后应力重新分布的影响, 则:

$$\sigma_{fmax} = \frac{J}{J-M} \sigma_{max} \quad (19)$$

式中: σ_{fmax} 为应力重分布后的最大应力; σ_{max} 为初始最大应力; J 为吊杆内钢丝总数; M 为断丝数。

由式(13)~(19)可得到, 考虑应力重分布影响的服役吊杆内每根钢丝的疲劳寿命 N_i 。本研究引入关联系数分析吊杆内各钢丝疲劳断裂的相关性, 吊杆疲劳寿命可表示为:

$$N_g = N_1 + \varphi_{1,2} N_2 + \varphi_{2,3} N_3 + \dots + \varphi_{i,i+1} N_{i+1} \quad (20)$$

式中: $\varphi_{i,i+1}$ 为第 i 根钢丝与第 $i+1$ 根钢丝的关联系数, 假定 $\varphi_{i,i+1} \sim U[0,1]$; N_g 为吊杆疲劳寿命。

3 实例分析

某三跨连续中承式钢管混凝土拱桥主桥为 (80+368+80) m, 主拱拱肋为无铰支。吊杆间距为 8 m, 由 73 根屈服强度为 1 670 MPa 的镀锌高强钢丝组成。锚头采用 OVM-LZM 型冷铸镦头锚, 吊杆钢丝的总横截面积为 2 807.95 mm², 如图 3 所示。建立该桥的有限元分析模型^[22], 对吊杆内力进行了计算。其中: 受力最大的吊杆轴力 F_{max} 为 2 254.40 kN, 最大应力 σ_{max} 为 802.86 MPa, 最小轴力 F_{min} 为 1 887.36 kN, 最小应力 σ_{min} 为 672.15 MPa, 应力比 R 为 0.84。

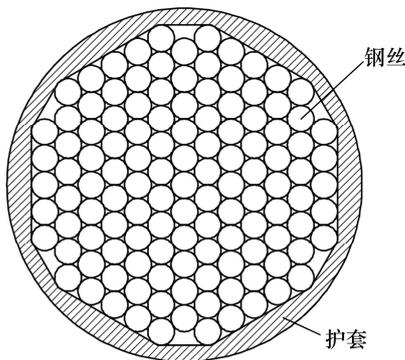


图 3 平行钢丝吊杆断面示意

Fig. 3 Schematic of parallel wire bundle

对该桥吊杆进行评估前, 需得到护套随时间的破损模型。目前, PE 护套按有关试验数据推断其防腐寿命约为 25 a, 但实际统计结果发现吊杆 3~5 a 需进行防腐维修, 10~15 a 需将原有涂层全部去

除^[23]。本研究取护套有效防护时间为 10 a。防护套出现破损后, 钢丝每年锈坑深度增加 0.5 mm, 假定该桥日荷载循环为 500 次, 由高强钢丝疲劳裂纹扩展模型考虑钢丝的串并联关系和断丝后吊杆钢丝应力重分布, 将相关参数代入式(18)和(19), 依次计算出 N_1, N_2, \dots, N_i 。采用蒙特卡罗方法抽样 1×10^5 次, 根据式(20)可计算得到考虑钢丝间相关性的吊杆疲劳寿命 N_g 。断丝率 ζ 为吊杆疲劳寿命评估的重要指标。不同断丝率下吊杆疲劳寿命的预测结果见表 1。吊杆疲劳寿命可用正态分布来描述, 即: 吊杆循环次数的均值、标准差及变异系数。相应的概率密度函数如图 4 所示。

表 1 断丝率与吊杆疲劳寿命

Table 1 The broken wire rate and fatigue life of suspender

钢丝断丝率/%	断裂根数	吊杆疲劳循环次数/次		
		均值/ $\times 10^6$	标准差/ $\times 10^5$	变异系数
5	4	1.651 8	4.753 3	0.287 7
8	6	2.418 6	5.446 0	0.225 2
10	7	2.786 0	5.831 8	0.209 3
12	9	3.392 7	6.492 8	0.191 4
15	11	4.006 7	5.252 0	0.131 0

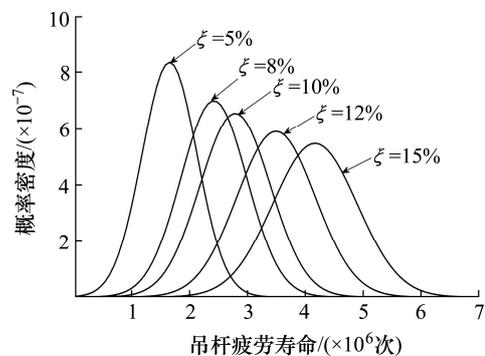


图 4 不同断丝率下吊杆疲劳寿命的概率密度

Fig. 4 PDF of fatigue life of suspender under various wire failure rate

从表 1 和图 4 中可以看出, 断丝后吊杆应力幅增大, 断丝速度加快, 引起钢丝疲劳寿命进一步降低。随着断丝率的增加, 概率密度曲线逐渐右移。当断丝率由 5% 提高至 8%, 10%, 12% 和 15% 时, 吊杆疲劳循环次数均值分别增加了 $7.668 \times 10^5, 1.134 2 \times 10^6, 1.740 9 \times 10^6$ 和 $2.354 9 \times 10^6$ 次, 标准差逐渐增大。按照《斜拉桥用热挤聚乙烯高强钢丝拉索 (GB/T 18365—2018)》^[24] 规定, 拉索在 2×10^6 次脉冲疲劳循环后, 断丝率不大于 5%。本试验结果表

明:当断丝率 ζ 等于8%时,吊杆所经受的疲劳循环次数均值为 2.419×10^6 次,仍满足规范 2×10^6 次循环的要求。

不同地区荷载频率和环境存在差异,应考虑荷载频率和蚀坑增长速度等因素的不确定性,进行参数敏感性分析,探讨各参数对预测结果的影响程度,如图5所示。从图5(a)中可以看出,日均荷载频率从500次/d增加至1000次/d时,疲劳寿命均值增加了33.9%,但吊杆服役时间减少了33.1%。腐蚀的不确定性主要体现在锈坑形状和腐蚀速率方面,锈坑增长速率对吊杆疲劳寿命的影响如图5(b)所示。随着锈坑增长速度的增加,概率密度曲线左移,吊杆疲劳寿命逐渐减小,曲线变陡,标准差逐渐减小。当锈坑年增幅从0.5 mm/a增加至1 mm/a时,疲劳寿命均值减少了28.4%,其服役时间减少了28.6%。表明荷载频率的变化对疲劳寿命更为敏感。

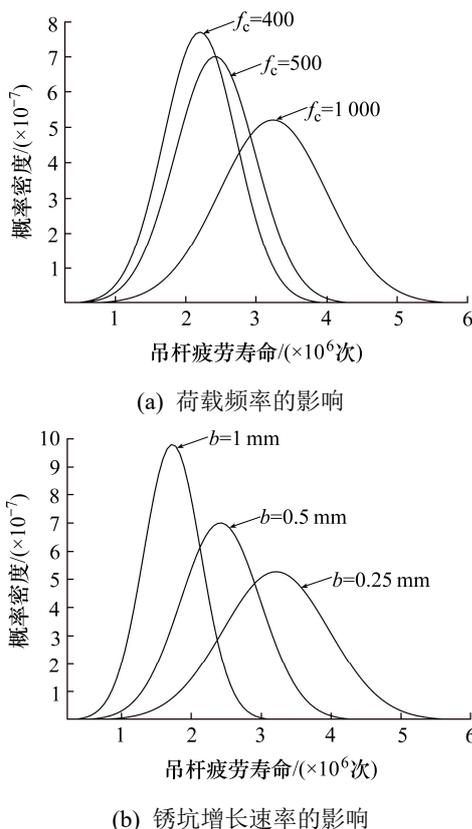


图5 参数对吊杆疲劳寿命的影响

Fig. 5 Influence of parameters on the fatigue life of suspender

4 结语

基于等效初始裂纹尺寸原理,将锈坑引起的应

力集中融入应力强度因子表达式中,建立了高强钢丝疲劳寿命预测模型。考虑钢丝的串、并联关系和断丝后应力重分布的影响,引入钢丝间断丝的关联系数,分析吊杆内各钢丝疲劳寿命的相关性,提出了服役桥梁吊杆疲劳寿命评估方法,并依托一座服役实桥进行了验证分析。得出的结论为:

1) 蚀坑增长速度和荷载频率对吊杆疲劳寿命的影响显著;与蚀坑增长速率相比,荷载频率对疲劳寿命更为敏感。

2) 该研究可为吊杆使用寿命评估和失效标准提供依据,也可为相关管理部门限载提供参考。

3) 实际中,疲劳损伤较为复杂,疲劳荷载往往为随机荷载,如何考虑随机荷载的影响仍需深入。另外,假定的吊杆内各钢丝疲劳断裂的关联系数,其适用性仍需日后进一步验证。

参考文献(References):

- [1] Sun B.A continuum model for damage evolution simulation of the high strength bridge wires due to corrosion fatigue[J]. Journal of Constructional Steel Research,2018,146:76-83.
- [2] 宁永刚,胡鹏越,王帅,等.在富集氯离子环境中钢丝绳吊索结构的腐蚀性能分析[J].公路工程,2018,43(4):110-115,126.(NING Yong-gang,HU Peng-yue,WANG Shuai, et al.Corrosion performance analysis of steel rope sling structure in chloride enriched environment[J].Highway Engineering,2018,43(4):110-115,126.(in Chinese))
- [3] 李晓章,谢旭,潘晓宇,等.拱桥吊杆锈蚀高强钢丝疲劳性能试验研究[J].土木工程学报,2015,48(11):68-76.(LI Xiao-zhang,XIE Xu,PAN Xiao-yu,et al.Experimental study on fatigue performance of corroded high tensile steel wires of arch bridge hangers[J].China Civil Engineering Journal,2015,48(11):68-76.(in Chinese))
- [4] Nakamura S,Suzumura K.Experimental study on fatigue strength of corroded bridge wires[J].Journal of Bridge Engineering,2013,18(3):200-209.
- [5] Ma Y,Wang Q,Guo Z,et al.Static and fatigue behavior investigation of artificial notched steel reinforcement[J]. Materials,2017,10(5):532-545.
- [6] 李先立,宋显辉,刘禹钦.高强镀锌钢丝疲劳可靠性研究[J].土木工程学报,1995,28(2):36-43.(LI Xian-li,SONG Xian-hui,LIU Yu-qin.Investigation on fatigue reliability of high strength galvanized steel wires[J].China Civil

- Engineering Journal,1995,28(2):36-43.(in Chinese))
- [7] Castillo E, López-Aenlle M, Ramos A, et al. Specimen length effect on parameter estimation in modelling fatigue strength by Weibull distribution[J]. International Journal of Fatigue,2006,28(9):1047-1058.
- [8] Faber M H,Engelund S,Rackwitz R.Aspects of parallel wire cable reliability[J]. Structural Safety, 2003, 25(2): 201-225.
- [9] Lan C,Xu Y,Liu C,et al.Fatigue life prediction for parallel-wire stay cables considering corrosion effects[J]. International Journal of Fatigue,2018,114:81-91.
- [10] Toribio J,Matos J,González B.Micro-and macro-approach to the fatigue crack growth in progressively drawn pearlitic steels at different R-ratios[J].International Journal of Fatigue,2009,31(11-12):2014-2021.
- [11] 马亚飞,陈志铖,王磊,等.桥梁吊杆高强钢丝疲劳裂纹扩展试验与数值模拟[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(1): 23-30.(MA Ya-fei,CHEN Zhi-cheng,WANG Lei, et al. Experimental and numerical study on fatigue crack growth of bridge suspender[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(1): 23-30.(in Chinese))
- [12] 马亚飞,鲁保勇,汪国栋,等.大跨桥梁吊杆平行钢丝间摩擦特性分析[J].交通科学与工程,2019,35(4):40-46.(MA Ya-fei,LU Bao-yong,WANG Guo-dong,et al.Friction characteristic analysis between parallel steel wires of long-span bridge suspenders[J].Journal of Transport Science and Engineering,2019,35(4):40-46.(in Chinese))
- [13] 郑祥隆,谢旭,李晓章,等.钢丝裂纹扩展估算模型及其在预腐蚀疲劳寿命计算中的应用[J].土木工程学报,2017, 50(3): 101-107. (ZHENG Xiang-long, XIE Xu, LI Xiao-zhang, et al. Estimation model for steel wire crack propagation and its application in calculation of pre-corrosion fatigue life[J].China Civil Engineering Journal,2017,50(3):101-107.(in Chinese))
- [14] 乔燕,缪长青,孙传智.索承式桥梁吊杆钢丝腐蚀疲劳寿命评估[J].土木建筑与环境工程,2016,39(4):116-121. (QIAO Yan, MIU Chang-qing, SUN Chuang-zhi. Evaluation of corrosion fatigue life for corroded wire for cable-supported bridge[J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2016, 39(4): 116-121. (in Chinese))
- [15] Donahue R,Clark H,Atanmo P,et al.Crack opening displacement and the rate of fatigue crack growth[J]. International Journal of Fracture Mechanics, 1972, 8(2): 209-219.
- [16] Kitagawa H,Takahashi S.Applicability of fracture mechanics to very small cracks or cracks in early stage[A]. Proceedings of the 2nd International Conference on Mechanical Behavior of Materials[C]. Cleveland,USA:American Society for Metals,1976:627-631.
- [17] Shahani A, Kashani H.Assessment of equivalent initial flaw size estimation methods in fatigue life prediction using compact tension specimen tests[J]. Engineering Fracture Mechanics,2013,99:48-61.
- [18] Liu Y, Mahadevan S. Probabilistic fatigue life prediction using an equivalent initial flaw size distribution[J]. International Journal of Fatigue,2009,31(3):476-487.
- [19] Liu Y,Mahadevan S.Fatigue limit prediction of notched components using short crack growth theory and an asymptotic interpolation method[J].Engineering Fracture Mechanics,2009,76(15):2317-2331.
- [20] 殷之平.结构疲劳与断裂[M].西安:西北工业大学出版社,2012.(YIN Zhi-ping.Structural fatigue and fracture[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2012.(in Chinese))
- [21] Mahmoud K.Fracture strength for a high strength steel bridge cable wire with a surface crack[J].Theoretical and Applied Fracture Mechanics,2007,48(2):152-160.
- [22] 李欣然.中下承式拱桥吊杆的跨尺度疲劳失效行为研究[D].长沙:长沙理工大学,2015.(LI Xing-ran.Research of multiscale fatigue failure behavior of suspenders in a half-through arch bridge[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology,2015.(in Chinese))
- [23] 胡志鹏.桥梁缆索系统腐蚀全寿命理论研究[D].长安:长安大学,2006.(HU Zhi-peng.Theoretical study on the corrosion cycle life of bridge cable system[D].Chang'an: Chang'an University,2006.(in Chinese))
- [24] 赵轶才,李闯,邹小燕,等.GB/T 18365—2018,斜拉桥用热挤聚乙烯高强钢丝拉索[S].北京:中国标准出版社,2018. (ZHAO Yi-cai,LI Chuang,ZOU Xiao-yan,et al.GB/T 18365—2018,Technical conditions for hot-extruding PE protection high strength wire cable of cable-stayed bridge[S].Beijing:China Standard Publishing House,2018. (in Chinese))