

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.04.018



索承式桥梁吊索钢丝腐蚀疲劳寿命评估

乔燕¹, 缪长青², 孙传智¹

(1. 宿迁学院 建筑工程系, 江苏 宿迁 223800; 2. 东南大学
混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要:根据吊索镀锌钢丝腐蚀疲劳破坏特点,把镀锌钢丝腐蚀疲劳纹形成和扩展过程分解成镀锌层腐蚀失效、蚀坑萌生、蚀坑形成、短裂纹扩展、长裂纹扩展和断裂破坏等阶段,建立各阶段时间表达式,得到镀锌钢丝疲劳寿命表达式,提出基于断裂力学的吊索钢丝腐蚀疲劳寿命评估研究方法。通过算例分析复杂运营条件下腐蚀环境和应力幅等因素对吊索钢丝腐蚀疲劳寿命的影响,研究表明:吊索钢丝腐蚀疲劳寿命主要由钢丝镀锌层腐蚀、蚀坑发展和短裂纹扩展等 3 个阶段组成,为了准确地评估吊索腐蚀疲劳寿命,需要掌握大桥的运营环境和交通荷载。

关键词:断裂力学;腐蚀;吊索;钢丝;疲劳寿命

中图分类号:U448.225 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)04-0115-07

Evaluation of corrosion fatigue life for corroded wire for cable-supported bridge

Qiao Yan¹, Miao Changqing², Sun Chuazhi¹

(1. Department of Architecture Engineering, Suqian College, Suqian 223800, Jiangsu, P. R. China; 2. Key Laboratory for Concrete and Prestressed Concrete Structures of Education Ministry, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China)

Abstract: According to the fatigue damage characteristics of galvanized wire, the propagation process is decomposed into 7 stages, including galvanized layer failure, matrix corrosion pit initiation, short crack propagation, long crack propagation and fracture damage stage. Then the expression of time in different stages and the galvanized wire fatigue life expression is established, and the evaluation method of corrosion fatigue is putted forward based on fracture mechanics. Finally through the case analysis of complex factors such as operation under the condition of corrosion environment and stress amplitude, the impact on the wire corrosion fatigue life is analyzed. The results show that the corrosion fatigue life of wire is mainly

收稿日期:2016-09-05

基金项目:国家自然科学基金(51078080);江苏省自然科学基金(BK2012562);江苏省高校自然科学基金项目(10KJB58005);宿迁市交通运输科学基金项目(KY2014-1、KY2015-2)

作者简介:乔燕(1976-),女,副教授,主要从事大跨桥梁承载力评估研究,(E-mail)sqjqiaoyan@163.com.

孙传智(通信作者),男,博士,(E-mail)schzh_xzh@163.com.

Received:2016-09-05

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51078080); Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China(No. BK2012562); Natural Science Foundation for Colleges and Universities in Jiangsu Province (No. 10KJB58005); Traffic Science Research Project of Suqian (No. KJ2014-1, KY2015-2)

Author brief: Qiao Yan (1976-), associate professor, main research interest: bearing capacity evaluation of large-span bridge, (E-mail) sqjqiaoyan@163.com.

Sun Chuazhi (corresponding author), PhD, (E-mail) schzh_xzh@163.com.

composed of steel galvanizing layer corrosion, pit development and short crack extension, and in order to accurately assess the corrosion fatigue life of wire, the operating environment and traffic load need to be grasped.

Keywords: fracture mechanics; corrosion; cable; wire; fatigue life

吊索作为索承式桥梁连接桥道系与上部主体构件的关键构件,是由若干根钢丝组成,钢丝受力是否安全将直接影响桥梁整体结构的安全性能^[1-5]。大量工程实例表明,由于环境作用、防护不当、受力复杂等原因,钢丝容易发生不同程度的损伤,从而导致桥梁结构安全系数降低或寿命缩短。目前,学者们在进行吊索钢丝腐蚀承载力评估时,多是假设钢丝均匀腐蚀^[6-8],而实际工程中,由于吊索钢丝产生腐蚀蚀坑,在腐蚀和车辆荷载共同作用下,可能发生疲劳断裂。

目前,对金属材料的腐蚀疲劳寿命评估方法的研究,主要是把金属材料腐蚀疲劳破坏过程分成几个过程^[9-12],其中 Shi 等^[9]提出七阶段腐蚀疲劳寿命过程模型,该模型主要包括:蚀坑萌生、蚀坑扩展、蚀坑到疲劳裂纹萌生的转化、短裂纹的扩展、短裂纹到长裂纹的转化、长裂纹扩展和断裂等过程。吊索钢丝腐蚀疲劳破坏不同于上述单一金属腐蚀疲劳破坏,因为吊索钢丝表面有一层镀锌层,钢丝基体的腐蚀必须在镀锌层腐蚀之后才能发生,即钢丝的腐蚀疲劳破坏过程增加了镀锌层腐蚀。因此,有必要根据吊索钢丝腐蚀疲劳寿命过程和吊索钢丝受力特点,对吊索钢丝各阶段的腐蚀疲劳寿命计算方法加以改进和完善。

本文首先根据吊索钢丝腐蚀疲劳破坏特点,确立吊索钢丝腐蚀疲劳裂纹形成和扩展过程,提出适合于工程应用的吊索钢丝腐蚀疲劳寿命评估方法。最后,通过算例分析了复杂运营条件下各因素对吊索钢丝腐蚀疲劳寿命的影响。

1 吊索钢丝腐蚀疲劳过程

徐宏^[13]在进行拉(吊)索腐蚀疲劳寿命评估时,根据与外部环境接触的先后及破坏的先后顺序,将拉索钢丝的腐蚀演化过程描述为:护套老化开裂→钢丝镀锌层的腐蚀失效→钢丝均匀腐蚀及坑蚀→钢丝的腐蚀疲劳→钢丝断裂失效。利用该模型在进行吊索钢丝腐蚀疲劳评估时,没有考虑蚀坑的萌生、短裂纹的扩展和短裂纹向长裂纹的转化等过程,没有区分短裂纹和长裂纹的扩展速率的不同,但是,短裂纹的扩展速率远远小于长裂纹的扩展速率^[14-16],利

用该模型进行吊索钢丝腐蚀疲劳寿命评估时,如果利用短裂纹或长裂纹的扩展速率来代替整个寿命过程的裂纹扩展速率,定会产生一定的误差。

由于本文只研究吊索钢丝的腐蚀疲劳寿命,所以,不考虑护套失效时间,平行钢丝腐蚀疲劳裂纹扩展过程分解成镀锌层腐蚀失效、基体蚀坑萌生、基体蚀坑形成、基体短裂纹扩展、基体长裂纹扩展和断裂破坏等阶段。吊索钢丝腐蚀疲劳寿命过程如图 1 所示。



图 1 吊索钢丝腐蚀疲劳寿命过程

Fig. 1 Corrosion fatigue life process of cable wire

正常运营状态下吊索腐蚀疲劳全过程寿命由上述几个阶段时间组成,如式(1)所示。

$$t_f = t_{xc} + t_{km} + t_{kf} + t_{scf} + t_{lcf} \quad (1)$$

式中: t_f 为吊索钢丝腐蚀疲劳总寿命(不包括护套失效时间); t_{xc} 为镀锌层腐蚀时间; t_{km} 为蚀坑萌生时间; t_{kf} 为基体腐蚀坑形成及由此形成短裂纹所需时间; t_{scf} 为基体短裂纹扩展向长裂纹转变所需时间; t_{lcf} 为长裂纹扩展到断裂失效所需时间。

2 吊索钢丝腐蚀疲劳各阶段寿命计算

2.1 平行钢丝镀锌层腐蚀

镀锌层腐蚀是平行钢丝腐蚀疲劳破坏的第 1 阶段。利用文献[17]中金属腐蚀深度公式,得到镀锌层腐蚀时间为

$$t_{xc} = \sqrt[n]{\frac{C}{C_1}} \quad (2)$$

式中: C 为镀锌层厚度; C_1 为镀锌层第一年的腐蚀深度; n 为与镀锌层及腐蚀环境有关的参数,其取值可参考文献[18]。

桥梁吊索用钢丝镀锌层的厚度根据中国国家标准^[19-20]规定,镀锌层平均质量不小于 300 g/m^2 ,镀锌层的平均厚度为

$$B = W/\rho \quad (3)$$

式中: W 为钢丝镀锌层质量下限值,取值 $W = 300 \text{ g/m}^2$; ρ 为锌的密度,取值为 $\rho = 7.2 \text{ g/cm}^3$ 。由式

(3)可计算得到钢丝镀锌层的平均厚度 $B=41.7 \times 10^{-6}$ m,考虑到镀锌层厚度的不均匀性,钢丝局部位置镀锌层厚度取值为 25×10^{-6} m。

本文针对实际工程袁州大桥拆除得到的吊杆钢丝进行了研究。袁州大桥,地处江西省宜春,地理环境与武汉类似,利用文献[18]所述热浸镀锌的腐蚀速率参数,钢丝镀锌层腐蚀时间为 15.2 a。但是,袁州大桥通车运营 15 a 后,吊杆钢丝就出现腐蚀和断丝现象,图 2 为袁州大桥腐蚀钢丝,我们完全有理由认为吊索钢丝镀锌层的腐蚀时间比较短。

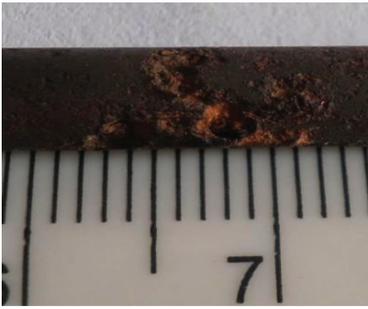


图 2 袁州大桥腐蚀钢丝

Fig. 2 Corroded wires of Yuan-zhou bridge

2.2 平行钢丝基体蚀坑萌生

点蚀的萌生时间 t_{km} 的长短取决于腐蚀介质中的阴离子浓度、pH 值、金属的纯度和表面完整性、外加极化电位等因素,对于给定的金属而言,随着 Cl^- 浓度的增加或外加电位的升高, t_{km} 减少,Janik-CzachoIr^[21]对金属蚀坑的萌生时间,利用电化学方法进行了研究,发现低碳钢发生点蚀的孕育期的倒数与 Cl^- 浓度呈线性关系。即

$$\frac{1}{t_{km}} = k[Cl^-] \quad (4)$$

式中: k 为常数; $[Cl^-]$ 为 Cl^- 浓度,当 Cl^- 浓度小于某限值时不发生点蚀。

该公式虽然在理论上具有一定的意义,但是,由于金属材料和腐蚀介质不同,具有很大的随机性,在实际工程中很难应用。吊索钢丝基体材料为铁,在腐蚀介质中容易发生腐蚀,缺乏必要的数据来确定点蚀萌生时间,根据文献[22]所述点蚀在形核之前有长达几个月甚至几年的萌生期。

2.3 平行钢丝基体蚀坑扩展

蚀坑在暴露的自身粒子附近因局部电流腐蚀而形成,蚀坑扩展时,暴露的粒子相互作用而导致蚀坑扩展,聚集在阳极和阴极的粒子数量影响电化学腐蚀的速率,则蚀坑扩展速度为^[23]

$$\frac{dv}{dt} = \frac{MI_{po}(k)}{nF\rho} \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) \quad (5)$$

式中: M 为材料的分子量; n 为化合价; F 为 Faraday 常数; ρ 为密度; ΔH 为活化能; R 为通用气体常数; T 为绝对温度; I_{po} 为蚀坑电流系数,与集结粒子有关; k 为阴极集结粒子数。蚀坑的几何形状相当复杂,为了简便且满足精度,可以近似地假设蚀坑为半椭球体,则

$$V = \frac{2}{3}\pi ca^2 \quad (6)$$

式中: a 和 c 为椭球体的长轴和短轴的一半,其数值对蚀坑扩展模型比较重要,有 3 种处理方法来表达 a 和 c 之间的关系:比值为常数;比值为离散值和比值为连续值。后两种方法太复杂而不能实现,所以采用第 1 种处理方法^[24]。其具体值和阴极集结离子数有关,其大小无法用精确表达式来表示。为了简化计算,取值为 1,则蚀坑可简化为半球形。

$$V = \frac{2}{3}\pi c^3 \quad (7)$$

利用 Faraday 公式,得到

$$v = \frac{2}{3}\pi(c^3 - c_0^3) = \frac{MI_{po}(k)}{nF\rho} \exp\left[-\frac{\Delta H}{RT}\right] \quad (8)$$

则蚀坑扩展时间为

$$t_{kf} = \frac{2nF\rho}{3MI_{po}(k)}\pi(c_{ci}^3 - c_0^3)\exp\frac{\Delta H}{RT} \quad (9)$$

式中: c_{ci} 为转变为裂纹形成的临界蚀坑尺寸; c_0 是初始蚀坑尺寸。

2.4 平行钢丝基体短裂纹扩展

短裂纹在腐蚀疲劳荷载作用下的扩展与金属材料的微观组织有很大关系。近年来,研究表明,短裂纹的扩展速率远远小于长裂纹的扩展速率^[14-16],在较小应力强度时短裂纹扩展速率远远小于长裂纹扩展速率,所以,利用 Paris 公式作为短裂纹扩展模型存在一定的问题。虽然,目前进行了大量的研究,但是,仍然很难得到精确的短裂纹扩展速率模型,尤其是在腐蚀环境中。短裂纹扩展采用经验公式

$$\frac{da}{dN} = C_{sc}(\Delta K)^{m_{sc}} \quad (10)$$

式中: C_{sc} 为材料常数; m_{sc} 为短裂纹扩展指数。短裂纹应力强度因子可表达为

$$\Delta K = Y\left(\frac{a}{D}\right)\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (11)$$

假定平行钢丝的裂纹开展与频率无关,则上式可表达为

$$\frac{da}{dN} = C_{sc}\left[Y\left(\frac{a}{D}\right)\Delta\sigma\sqrt{\pi a}\right]^{m_{sc}} \quad (12)$$

疲劳短裂纹应力强度因子形状修正系数 $Y(a/D)$ 的表达式^[25]为

$$Y\left(\frac{a}{D}\right) = 0.587 + 1.133\left(\frac{a}{D}\right) - 13.45\left(\frac{a}{D}\right)^2 + 64.44\left(\frac{a}{D}\right)^3 - 53.63\left(\frac{a}{D}\right)^4 \quad (13)$$

则钢丝裂纹扩展式为

$$\frac{da}{dt} = C_{sc} \left[\left(0.587 + 1.133\left(\frac{a}{D}\right) - 13.45\left(\frac{a}{D}\right)^2 + 64.44\left(\frac{a}{D}\right)^3 - 53.63\left(\frac{a}{D}\right)^4 \right) \Delta\sigma \sqrt{\pi a} \right]^{m_{sc}} f \quad (14)$$

式中: f 为产生疲劳裂纹扩展的交通荷载频率, 利用数值积分可得到短裂纹发展到临界尺寸所需的时间。

2.5 平行钢丝基体短裂纹临界尺寸

当短裂纹扩展速率和长裂纹扩展速率相等时, 此时的裂纹尺寸就是短裂纹临界尺寸。Dolley 等^[26]发现, 2024-T3 铝合金短裂纹临界尺寸在 0.5~5 mm 范围内; 唐雪松等^[27]在研究 LY12 铝合金板疲劳断裂裂纹扩展和赵小鹏^[28]在研究拉索钢丝疲劳裂纹扩展时, 均假设当疲劳裂纹大于 1 mm 时为宏观裂纹。同时, Mahmoud^[29]利用已有研究成果对钢丝裂纹应力强度因子形状修正系数进行拟合, 从文献中的插图可以看出, Mahmoud 在进行拟合公式时, 假定裂纹深度 a 与钢丝直径 D 比值 a/D 小于 0.2 时为半圆形裂纹, 而 a/D 大于 0.4 时为直线形裂纹, 说明当 a/D 大于 0.2 后, 钢丝裂纹扩展速率增加。所以, 本文在进行吊索钢丝腐蚀疲劳寿命评估时, 基体短裂纹临界尺寸取值为 1 mm。

2.6 平行钢丝基体蚀坑临界尺寸

蚀坑损伤转化为腐蚀疲劳损伤的临界尺寸模型最早由 Kondo^[30]提出, 该模型认为, 在腐蚀疲劳早期, 蚀坑腐蚀占主导地位, 而当蚀坑发展到一定阶段, 则由腐蚀疲劳占主导地位。在转化过程中, 当蚀坑的等效应力强度因子达到疲劳裂纹扩展门槛值时, 蚀坑向腐蚀疲劳裂纹转变, 该阶段是蚀坑扩展向疲劳裂纹萌生转变, 应力强度因子开始发挥作用, 疲劳裂纹的萌生由腐蚀蚀坑扩展和裂纹扩展竞争所决定, 该过程可用两个判断准则来描述^[12]: 1) 基于等效作用的蚀坑应力强度因子达到疲劳裂纹扩展的门槛值; 2) 腐蚀疲劳裂纹扩展速率超过蚀坑扩展速率。即

$$\begin{aligned} (\Delta K)_{\text{pit}} &\leq (\Delta K)_{\text{th}} \\ \left(\frac{dc}{dt}\right)_{\text{pit}} &\leq \left(\frac{da}{dt}\right)_{\text{crack}} \end{aligned} \quad (15)$$

裂纹扩展式为

$$\frac{da}{dt} = C_{sc} \left\{ \left[0.587 + 1.133\left(\frac{\zeta c}{D}\right) - 13.45\left(\frac{\zeta c}{D}\right)^2 + 64.44\left(\frac{\zeta c}{D}\right)^3 - 53.63\left(\frac{\zeta c}{D}\right)^4 \right] \Delta\sigma \sqrt{\zeta \pi c} \right\} f \quad (16)$$

式中: ζ 蚀坑等效裂纹折减系数, 参考文献[31]研究结果, 取值范围为 0.775~0.803, 本文为了保证结构安全, 提高安全系数, 取值为 0.85。

蚀坑体积变化速率可表达为

$$\frac{dV}{dt} = d\left(\frac{2\pi}{3}c^3\right)/dt = 2\pi c^2 \frac{dc}{dt} = C_p \quad (17)$$

则

$$C_p = \frac{MI_{po}(k)}{nF\rho} \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) \quad (18)$$

则蚀坑扩展速率为

$$\frac{dc}{dt} = \frac{C_p}{2\pi c^2} \quad (19)$$

当裂纹扩展与蚀坑扩展相等时, 即可得到临界蚀坑尺寸。利用式(19)可计算得到蚀坑扩展时间。

2.7 平行钢丝基体长裂纹扩展

在长裂纹扩展阶段, 利用 Paris 公式计算长裂纹扩展时间

$$\frac{da}{dt} = C_{lc} (\Delta K)^{m_{lc}} f \quad (20)$$

式中: C_{lc} 为长裂纹扩展材料常数; m_{lc} 为长裂纹扩展指数, 则

$$\frac{da}{dt} = C_{lc} \left[\left(0.587 + 1.133\left(\frac{a}{D}\right) - 13.45\left(\frac{a}{D}\right)^2 + 64.44\left(\frac{a}{D}\right)^3 - 53.63\left(\frac{a}{D}\right)^4 \right) \Delta\sigma \sqrt{\pi a} \right]^{m_{lc}} f \quad (21)$$

根据本文大量疲劳试件断口(如图 3 所示)分析可知, 腐蚀疲劳破坏临界尺寸与钢丝直径比值 a/D 取值大约为 0.4~0.6 之间, 利用数值积分即可得到长裂纹扩展时间。

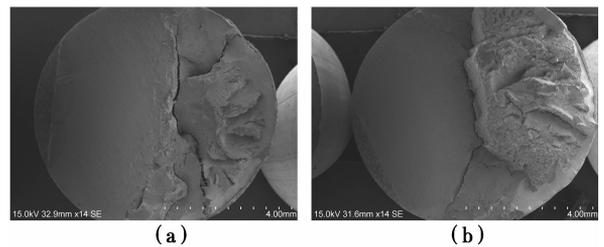


图 3 疲劳试验试件断口

Fig. 3 Fracture of Fatigue Test Specimen

3 算例及分析

大跨桥梁吊索高强钢丝镀锌层较薄处厚度为

25×10^{-6} m,第1年腐蚀量为 5×10^{-6} m,点蚀坑初始尺寸 c_0 为 1.5×10^{-6} m,蚀坑萌生时间 t_{km} 为 200 d。锌层厚度密度 $\rho = 7.2 \times 10^3$ kg/m³,摩尔质量为 55.85×10^{-3} kg,原子价为 3,活化能 $\Delta H = 59.7 \times 10^3$ J/mol,法拉第常数 $F = 96\ 514$ Cal/mol,通气系数 $R = 8.314$ J/mol·K, T 为绝对温度, $T = 273 + t$, t 为大桥常年平均气温。引起吊杆疲劳裂纹扩展的交通车辆每 1 min 通过 1 辆,即频率 f 等于 0.016 7 Hz,长、短裂纹扩展系数 m_{sc} 、 m_{lc} 均为 3.3,钢丝长裂纹扩展常数 C_{lc} 和短裂纹扩展常数 C_{sc} 分别为 6×10^{-11} 和 9×10^{-11} 。运营工况如表 1 所示。

表 1 运营工况

Table 1 Operating Conditions

工况序号	年平均温度/℃	应力幅值/MPa	腐蚀环境参数 n	蚀坑电流系数 I_{p0}	临界裂纹深度/mm
1	25	125	1.3	80.79	2.5
2	15	125	1.3	80.79	2.5
3	35	125	1.3	80.79	2.5
4	25	100	1.3	80.79	2.5
5	25	150	1.3	80.79	2.5
6	25	125	0.9	80.79	2.5
7	25	125	1.6	80.79	2.5
8	25	125	1.3	70.79	2.5
9	25	125	1.3	90.79	2.5
10	25	125	1.3	80.79	2.0
11	25	125	1.3	80.79	3.0

钢丝镀锌层腐蚀时间 t_{xc} 、蚀坑萌生时间 t_{km} 、蚀坑发展时间 t_{kf} 、短裂纹扩展时间 t_{scf} 和长裂纹扩展时间 t_{lcf} ,如表 2 所示。

表 2 各工况下各阶段扩展时间

Table 2 Propagation Time of Different Stages

工况序号	t_{xc}/a	t_{km}/a	t_{kf}/a	t_{scf}/a	t_{lcf}/a	t_f/a
1	5.11	0.55	3.3	10.76	0.28	20
2	5.11	0.55	3.87	13.01	0.28	22.82
3	5.11	0.55	2.8	9.01	0.28	17.75
4	5.11	0.55	6.11	18.82	0.58	31.17
5	5.11	0.55	2.01	6.77	0.15	14.59
6	10.55	0.55	3.3	10.76	0.28	25.44
7	3.76	0.55	3.3	10.76	0.28	18.65
8	5.11	0.55	3.49	11	0.28	20.43
9	5.11	0.55	3.17	10.54	0.28	19.65
10	5.11	0.55	3.3	10.76	0.24	19.97
11	5.11	0.55	3.3	10.76	0.29	20.01

从表 2 可以看出:

1)在工况 1、工况 2 和工况 3 作用时,年平均温度不同,其他参数不变。钢丝腐蚀疲劳总寿命最大为 22.82 a,最小为 17.75 a,由于年平均温度不同,蚀坑扩展时间和短裂纹扩展时间有一定差别,当年平均温度为 15 ℃时,蚀坑扩展时间为 3.87 a,短裂纹扩展时间为 13.01 a;当年平均温度为 35 ℃时,蚀坑扩展时间为 2.8 a,短裂纹扩展时间为 9.01 a。说明由于年平均温度不同,影响了蚀坑扩展临界尺寸,3 种年平均温度的临界尺寸分别为 3.95×10^{-5} 、 3.15×10^{-5} 和 4.85×10^{-5} m,从而导致腐蚀吊索钢丝疲劳寿命随着年平均温度的降低而增加。

2)在工况 1、工况 4 和工况 5 作用时,由于应力幅值不同,钢丝腐蚀疲劳总寿命最大为 31.17 a,最小为 15.59 a。由于应力幅不同,蚀坑扩展时间和短裂纹扩展时间有一定差别,当应力幅为 100 MPa 时,蚀坑扩展时间为 6.11 a,短裂纹扩展时间为 18.82 a;当应力幅为 150 MPa 时,蚀坑扩展时间为 2.01 a,短裂纹扩展时间为 6.77 a。说明由于应力幅值不同,导致短裂纹扩展速率有所变化,影响了蚀坑扩展临界尺寸,3 种应力幅值的临界尺寸分别为 3.95×10^{-5} 、 4.85×10^{-5} 和 3.25×10^{-5} m,同时,短裂纹扩展时间也随着应力幅值的减小而增加。

3)在工况 1、工况 6 和工况 7 作用时,由于腐蚀环境参数不同,导致镀锌层腐蚀时间相差很大,腐蚀环境参数为 0.9 时,镀锌层腐蚀时间需要 10.55 a,而腐蚀环境参数为 1.6 时,镀锌层腐蚀时间只需要 3.76 a,而对于后面的腐蚀和腐蚀疲劳影响比较小。

4)在工况 1、工况 8 和工况 9 作用时,钢丝蚀坑电流系数不同,而其他参数不变。钢丝腐蚀疲劳总寿命最大为 20.43 a,最小为 19.65 a。由于蚀坑电流系数不同,蚀坑扩展时间和短裂纹扩展时间有一定差别,当蚀坑电流系数为 70.79 时,蚀坑扩展时间为 3.49 a,短裂纹扩展时间为 11 a;当蚀坑电流系数为 90.79 时,蚀坑扩展时间为 3.17 a,短裂纹扩展时间为 10.54 a。说明由于蚀坑电流系数不同,影响了蚀坑扩展临界尺寸,3 种蚀坑电流系数的临界尺寸分别为 3.95×10^{-5} 、 3.85×10^{-5} 和 4.05×10^{-5} m,但是,对蚀坑扩展和短裂纹扩展时间影响不是太大。

5)在工况 1、工况 10 和工况 11 作用时,临界裂纹长度不同,但是,长裂纹扩展时间相差很小,临界裂纹长度为 2、2.5 和 3 mm 时,长裂纹扩展时间为 0.24、0.28 和 0.29 a,说明在钢丝短裂纹一旦扩展到 1 mm 左右,其疲劳裂纹扩展就变得很快,临界裂

纹的大小对钢丝整体腐蚀疲劳寿命影响较小。则在具体工程腐蚀疲劳寿命评估时,可简化计算, a/D 取值为 0.5,即临界裂纹深度为 2.5 mm。

6)在工况 1~工况 11 中,无论是何种运营工况,蚀坑萌生和长裂纹扩展时间所占腐蚀疲劳时间都很比较短,说明吊索钢丝腐蚀疲劳主要由钢丝镀锌层腐蚀、蚀坑发展和短裂纹扩展等 3 个阶段组成,特别是短裂纹扩展时间比较长。

7)上述各运营工况作用下,由于运营环境温度、腐蚀环境和交通荷载不同,钢丝腐蚀疲劳寿命相差较大,为了准确地评估吊索腐蚀疲劳寿命,需要掌握大桥的运营环境和交通荷载,从而更加精确地评估各阶段的寿命。

4 结论

结合吊索腐蚀寿命过程特点,确立了吊索钢丝腐蚀疲劳裂纹形成和扩展过程,提出基于断裂力学的平行钢丝腐蚀疲劳寿命评估方法,通过算例研究了复杂运营条件下各因素对吊索钢丝腐蚀疲劳寿命的影响。得到如下结论:

1)相比已有的吊索钢丝腐蚀疲劳寿命评估方法,本文把吊索钢丝疲劳寿命过程分为镀锌层腐蚀、点蚀萌生、蚀坑扩展、蚀坑向短裂纹转化、短裂纹扩展、短裂纹向长裂纹转化、长裂纹扩展和断裂等过程进行钢丝腐蚀疲劳寿命评估,更能反映破坏过程,能够保证评估结果更接近实际情况。

2)吊索钢丝腐蚀疲劳寿命主要由钢丝镀锌层腐蚀、蚀坑发展和短裂纹扩展等 3 个阶段组成,特别是短裂纹扩展时间比较长;而临界裂纹的大小对钢丝整体腐蚀疲劳寿命影响较小,在进行具体工程腐蚀疲劳寿命评估时,可简化计算,临界裂纹深度为 2.5 mm。

3)环境温度影响了蚀坑扩展临界尺寸大小;应力幅值影响短裂纹扩展时间;腐蚀环境参数决定镀锌层的腐蚀时间,因此,为了准确地评估吊索腐蚀疲劳寿命,需要掌握大桥的运营环境和交通荷载。

参考文献:

[1] LICHTENSTEIN A G. The Silver bridge collapse recounted [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 1993, 7(4): 249-261.

[2] HAMILTON H R, BREEN J E, FRANK K H. Investigation of corrosion protection systems for bridge stay cables; Research Report No. 1264-3F [R]. Center

for Transportation Research, Bureau of Engineering Research, University of Texas at Austin, 1995.

- [3] 李宏江,王江,张永明,等. 天津永和斜拉桥换索后的索力调整 [J]. 公路交通科技, 2008, 25(10): 79-83.
- LI H J, WANG J, ZHANG Y M, et al. Cable force adjustment after cable replacement for tianjin yonghe cable-stayed bridge [J]. Journal of Highway Transportation Research and Development, 2008, 25(10): 79-83. (in Chinese)
- [4] 周诚华,梅秀道. 南昌市八一大桥斜拉桥换索工程施工监控 [J]. 世界桥梁, 2011(2): 73-76.
- ZHOU C H, MEI X D. Construction monitoring and control of cable replacement for cable-stayed bridge of bayi bridge in Nanchang City [J]. World Bridges, 2011(2): 73-76. (in Chinese)
- [5] 谢福君,廖龙辉. 衡山湘江公路大桥换索方案研究 [J]. 公路, 2013(4): 21-24.
- XIE F J, MIAO L H. Research on scheme of cable replacement of Hengshan-Xiangjiang highway bridge [J]. Highway, 2013(4): 21-24. (in Chinese)
- [6] 朱劲松,肖汝诚. 大跨度斜拉桥拉索安全性分析方法研究 [J]. 土木工程学报, 2006, 39(9): 74-79.
- ZHU J S, XIAO R C. A study on the safety assessment method for stay cables of long-span cable-stayed bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(9): 74-79. (in Chinese)
- [7] ELACHACHI S M, BREYSSE D, YOTTE S, et al. A probabilistic multi-scale time dependent model for corroded structural suspension cables [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2006, 21(3): 235-245.
- [8] 马小利,王立彬,丁盛. 平行钢索的锈蚀时变失效概率分析 [J]. 工程力学, 2012, 29(4): 210-216.
- MA X L, WANG L B, DING S. Time-dependent failure probability analysis of corroded parallel wire cable [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(4): 210-216. (in Chinese)
- [9] SHI P, MAHADEVAN S. Damage tolerance approach for probabilistic pitting corrosion fatigue life prediction [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2001, 68: 1493-1507.
- [10] 李仲,吕国志,葛森. 一种预测蚀坑腐蚀疲劳寿命的概率模型 [J]. 机械强度, 2004, 26(Sup): 226-228.
- LI Z, LYU G Z, GE S. Probabilistic method of pitting corrosion fatigue life [J]. Journal of Mechanical Strength, 2004, 26(Sup): 226-228. (in Chinese)
- [11] 徐可君,江龙平,隋育松. 预测腐蚀疲劳寿命的概率方法 [J]. 机械强度, 2003, 25(2): 229-232.
- XU K J, JIANG L P, SUI Y S. Probability approach

- for prediction of corrosion fatigue life [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2003, 25 (2): 229-232. (in Chinese)
- [12] CHEN G S, WAN K C, GAO M, et al. Transition from pitting to fatigue crack growth-modeling of corrosion fatigue crack nucleation in a 2024-T3 aluminum alloy [J]. *Materials Science and Engineering*, 1996, A219: 126-132.
- [13] 徐宏. 桥梁拉(吊)索损伤后力学分析及安全评价[D]. 西安:长安大学, 2008.
XU H. Mechanical analysis and safety evaluation of bridge damaged cable [D]. Xi'an: Changan University, 2008. (in Chinese)
- [14] PIASCIK R S, WILLARD S A. The growth of small corrosion fatigue cracks in alloy 20244 [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1994, 17:1247-1259.
- [15] NEWMAN J C. A review of modeling small-crack behavior and fatigue life predictions for aluminum alloys [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2010, 17(4): 429-439.
- [16] KAYNAK C, ANKARA A, BAKER T J. Effects of short cracks on fatigue life calculations [J]. *International Journal of Fatigue*, 1996, 18(1): 25-31.
- [17] CZARNECKI A A, ANDRZEJ S. Time-variant reliability profiles for steel girder bridges [J]. *Structural Safety*, 2008, 30: 49-64.
- [18] 曹楚南. 中国材料的自然环境腐蚀[M]. 北京:化学工业出版社, 2008.
CAO C N. Corrosion environment of chinese material [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [19] 镀锌钢丝锌层质量试验方法: JGBT 2973—2004[S]. 北京:中国标准出版社, 2004.
Zinc coated steel wire test method for gravimetric determination of zinc coating: JGBT 2973-2004 [S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2004. (in Chinese)
- [20] 桥梁缆索用热镀锌钢丝: GB/T 17101—2008[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
Hot-dip galvanized steel wires for bridge cables: GB/T 17101-2008 [S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2008. (in Chinese)
- [21] JANIK-CZACHOIR M. An assessment of the processes leading to pit nucleation on iron [J]. *Journal of Electrochemical Society*, 1981, 128(12): 513-519.
- [22] 刘光磊. 石油钻柱疲劳腐蚀失效机理及防治措施研究[D]. 山东 东营:中国石油大学, 2007.
LIU G L. Study on weary petroleum drill post corrosion loses efficacy mechanism and prevention and cure measure [D]. Dongying, Shandong: China University of Petroleum, 2007. (in Chinese)
- [23] ZAMAN K B M Q, WEI R P. Probability approach for corrosion and corrosion fatigue life [J]. *Aiaa Journal*, 1994, 32(10): 2073-2079.
- [24] ZAMAN K B M Q, WEI R P. A probability model for the growth of corrosion pits in aluminum alloys induced by constituent particles [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1998, 59(3): 305-325.
- [25] 乔燕, 李爱群, 缪长青, 等. 索承式桥梁腐蚀吊索安全性能评估[J]. *土木建筑与环境工程*, 2015, 37(4): 28-35.
QIAO Y, LI A Q, MIAO C Q, et al. Assessment on safety performance of corroded cable for cable-supported bridge [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2015, 37 (4): 28-35. (in Chinese)
- [26] DOLLEY E J, WEI R P. Importance of chemically short-crack-growth on fatigue life [C]//2nd Joint NASA/FAA/DoD Conference on Aging Aircraft, Williamsburg, VA, 1998: 679-687.
- [27] 唐雪松, 赵小鹏. 疲劳裂纹扩展行为的跨尺度分析方法[J]. *工程力学*, 2012, 29(10): 20-26.
TANG X S, ZHAO X P. Multiscaling analysis approach of fatigue crack growth behavior [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29 (10): 20-26. (in Chinese)
- [28] 赵小鹏. 大跨度斜拉桥拉索钢丝跨尺度疲劳断裂行为研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2011.
ZHAO X P. Research of multiscaling fatigue fracture behavior of cable steel wires in a long-span cable-stayed bridge [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [29] MAHMOUD K M. Fracture strength for a high strength steel bridge cable wire with a surface crack [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2007, 48: 152-160.
- [30] KONDO Y. Prediction of fatigue crack initiation life based on pit growth [J]. *Corrosion*, 1998, 45(1): 7-11.
- [31] 任克亮, 吕国志, 张有宏. 老龄结构分析中腐蚀坑与等效裂纹间的量化关系[J]. *强度与环境*, 2006, 33(2): 50-57.
REN K L, LYU G Z, ZHANG Y H. The correlation between corrosion pit with equivalent initial surface crack [J]. *Structure & Environment Engineering*, 2006, 33(2): 50-57. (in Chinese)