

基于 Gumbel 极值理论的钢绞线腐蚀 疲劳寿命预测

喻宣瑞,姚国文

(重庆交通大学山区桥梁及隧道工程国家重点实验室,重庆 400074)

摘要 目的 预测钢绞线的腐蚀疲劳寿命,探究蚀坑深度对其寿命的影响. 方法 基于 Gumbel 极值理论,对实测蚀坑数据进行分析,建立蚀坑深度和钢绞线腐蚀寿命之间的回归模型. 结果 得到了钢绞线腐蚀寿命预测模型,并将其运用于实际的工程算例中,所得结果通过 K-S 检验和回归分析,说明了该模型的合理性. 结论 该预测模型的计算较为简便且具有一定精度,弥补了采用繁琐的断裂力学理论直接推算拉索构件寿命的不足.

关键词 Gumbel 极值理论;钢绞线;蚀坑深度;疲劳寿命

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Corrosion Fatigue Life of Steel Strands Based on Gumbel Extreme Theory

YU Xuanrui, YAO Guowen

(State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, China, 400074)

Abstract: In order to predict the corrosion fatigue life of steel strands and to explore the effect caused by pit depth on its life, measured data of pit depth was analyzed. An empirical regression model consisting of the depth of corrosion pits and the corrosion life of steel strand was obtained based on the Gumbel extreme value theory. Then put the model into application with a practical engineering example, and the results predicted was inspected by K-S test and was analyzed by regression. It can be seemed that this model is reasonable. The prediction model seem to be simple and accurate, which makes up for the shortage of using complicated fracture mechanics theory to calculate the life of cable members directly.

Key words: Gumbel extreme theory; steel strands; pit depth; fatigue life

索结构作为系杆拱桥等索承式桥梁的主要承重构件已经大量运用于实际工程中. 通

收稿日期:2019-09-04

基金项目:国家重点研发计划基金项目(2017YFC0806001);国家自然科学基金项目(11627802)

作者简介:喻宣瑞(1991—),男,博士研究生,主要从事桥梁健康监测、旧桥病害检测及处置等方面研究.

常情况下,吊索的一端锚固在主拱圈上,另一端通过锚具固定在桥面板上.索结构的组成大致分为高强度钢丝和钢绞线,是拉索受力的核心材料.目前钢绞线的运用更为广泛.

索承式桥梁因其自重轻、承载能力高在当前桥梁建设中得到广泛推广,尤其是跨海和跨江大桥.海上的环境十分恶劣,吊索常年暴露在恶劣的环境中,一旦其保护层受到破坏,将会与周围的电解质(空气、水、氯离子等物质)发生电化学反应,在巨大拉应力的作用下,索结构将会产生腐蚀疲劳破坏^[2-4].此等破坏一旦发生,便难以修缮,对桥梁结构的寿命将会产生十分致命的影响.

目前,对吊索疲劳的设计方法主要是根据 $S-N$ 曲线来进行设计^[5-7].但在实际工程中,吊索断裂的现象屡见不鲜,如宜宾小南门大桥、新疆孔雀大桥.原因在于,当服役的吊索被腐蚀过后,吊索的承载能力将大幅度降低,服役锈蚀的吊索断裂大多数会在远小于其屈服条件下发生.而吊索是由多股钢绞线组成,钢绞线的腐蚀疲劳寿命将直接决定吊索的疲劳寿命. S. Nakamura^[8] 通过对一批服役过后的拉索进行检验(腐蚀率约为3%),发现钢绞线的承载能力下降了50%,其疲劳寿命远低于200万次.李晓章等^[9-10] 对不同锈蚀率的钢绞线开展腐蚀疲劳实验也得到了类似的结论,即在锈蚀程度较低时,腐蚀对钢绞线的承载能力的影响也较为显著.此外,侯晓旦^[11] 在不同应力幅下也进行了相关试验,其结果显示锈蚀钢绞线的疲劳寿命与应力幅的大小成反比.

从以上试验研究中不难看出,钢绞线的锈蚀将会大大缩短自身的疲劳寿命.为了便于预测锈蚀钢绞线的疲劳寿命,李先立^[12] 通过拉力试验机对锈蚀钢绞线进行加载直至其发生断裂,对钢绞线的断口进行分析认为拉索的断裂是由蚀坑位置处较大的应力集中系

数所引起,蚀坑缺口的形状越尖锐,其应力集中现象越明显,裂缝衍生的速度越快.乔燕等^[13-15] 将钢绞线的腐蚀过程分为6个阶段:镀锌层腐蚀、蚀坑的萌生、蚀坑的扩展、短裂纹扩展、长裂纹扩展、断裂.其中蚀坑萌生是锈蚀断裂的重要阶段,一旦发生,钢绞线的疲劳寿命将大幅度降低.谢民滇^[16] 基于随机分布理论对拉索腐蚀蚀坑的形成进行了预测,得到了蚀坑分布的规律.李富民等^[17-18] 通过试验研究发现蚀坑的长度、宽度、深度对钢绞线的疲劳寿命有一定影响,尤其是蚀坑的深度对其影响最大,原因在于,局部最大应力的位置往往出现在蚀坑的底部.此外,刘雪云、于杰等^[19-21] 通过数值模拟的方法分析了蚀坑个数及静距对钢绞线腐蚀疲劳寿命的影响,发现两相邻蚀坑之间的相互影响较小,在荷载的作用下,钢绞线通常在最大蚀坑位置处断裂.

鉴于此,需要寻求一套行之有效的理论来量化蚀坑深度与其疲劳寿命的关系.考虑到蚀坑分布的随机性,笔者基于统计学的方法,探讨了蚀坑最大深度与钢绞线腐蚀疲劳寿命二者之间存在的规律,并通过实际的工程算例进行运用,提出了钢绞线腐蚀寿命的预测模型,并基于 Gumbel 极值理论,对实测蚀坑数据进行分析,建立了蚀坑深度和钢绞线腐蚀寿命之间的回归模型并将其运用于实际的工程算例中,最后通过 K-S 检验和回归分析,验证了该模型的合理性.

1 Gumbel 理论极值分布

Gumbel 极值理论是一种基于统计学的数学分析手法,通过对试验样品数据的分析,可得到数据最大值或最小值集合的分布特征.分析其原理:将整根钢绞线腐蚀区域分成若干个小的腐蚀单元,对每个单元的最大值和最小值进行极值统计,建立实际问题的统计分析模型,运用统计的方法推算出整个区间的极值^[19-20].大量的实践表明蚀坑的分布

服从 Gumbel I 型极值分布,表示如下:

$$F(x) = \exp \left[- \exp \left(- \frac{x - k}{\eta} \right) \right]. \tag{1}$$

式中: $F(x)$ 为最大腐蚀深坑超过 x 的概率; x 为最大腐蚀坑深的随机变量值; η 为蚀坑的尺寸参数; k 为位置参数.

2 蚀坑预测模型建立

对于钢绞线失效的分析,最大腐蚀深坑应着重关注. 按照传统的方法直接对腐蚀段钢绞线进行蚀坑深度的测量所得到的测量值具有较大的偶然性,即使对各段进行抽样检测得到各段最大值的平均值其所产生的系统误差也十分巨大. 为了避免偶然性带来的误差,笔者通过对抽样段蚀坑的极值进行分析并结合线性回归的手法对整段上的最大深坑进行预测.

从式(1)中可知,要得到最大腐蚀深坑的概率,尺寸参数和位置参数的求取显得十分关键,首先从整段上选取长度及面积相等的 N 个测量段. 获取每段上腐蚀深坑的最大深坑值. 将获得的最大深坑值按从小到大的顺序排列,即编号为 1 的深坑值为所有测量段中最大蚀坑深度的最小值,第 N 号为最大值. 最大腐蚀深坑 X_i 及其累计概率分别表示为

$$F_i = \frac{i}{N+1}. \tag{2}$$

其中, $i=1,2,\cdots,N$; X_i 为第 i 段测量段上检测到的最大腐蚀坑深; F_i 为与第 i 段测量值所对应的累计频率.

为便于计算,将式(1)两边取对数转化为

$$- \ln \left(\ln \frac{1}{F} \right) = \frac{x}{\eta} - \frac{k}{\eta}. \tag{3}$$

令 $y = - \ln \left(\ln \frac{1}{F} \right), a = - \frac{k}{\eta}, b = 1/\eta$; 则

式(3)可以线性化表示为

$$y = ax + b. \tag{4}$$

对于 a 和 b 的值可采用回归分析中的最小二乘法所求得,其中 a 和 b 的求解过程如下:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - N \overline{xy}}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - N (\overline{x})^2}. \tag{5}$$

$$a = \overline{y} - b \overline{x}. \tag{6}$$

回归期与累计概率的关系表示如下:

$$F(x) = 1 - \frac{1}{T}. \tag{7}$$

回归期通常用 $T = L/l$ 表示, L 为整段钢绞线的长度, l 为每段取样长度. 将式(7)带入式(3)中,得到腐蚀深坑的表达式如下:

$$y = - \ln \left(\ln \frac{T}{T-1} \right) = \frac{x_m}{\eta} - \frac{k}{\eta}. \tag{8}$$

腐蚀深坑的表达式:

$$x_m = k + \eta y. \tag{9}$$

3 钢绞线寿命预测

吊索被腐蚀后其疲劳寿命将会大打折扣,因此对吊索剩余疲劳寿命的预测显得十分重要. 相关研究表明,我国吊索的平均寿命大约在 15 a,最短的 3 a 左右就会对索进行更换^[1]. 因此通过对吊索疲劳寿命的预测大致确定拉索更换的时间以达到保证桥梁通行安全的目的具有可观的工程价值. 而吊索是由钢绞线相互耦合所构成的,钢绞线的腐蚀疲劳寿命将直接决定吊索的疲劳寿命. 目前对吊索结构疲劳寿命的研究还处于一个起步阶段,鉴于此,笔者参考圆柱体和圆柱壳的腐蚀规律对钢绞线的腐蚀寿命进行尝试性的探索. 卢晓刚^[22]对管柱结构的腐蚀规律做了详细的研究,认为管柱结构的腐蚀属于电化学腐蚀,腐蚀刚开始发生时腐蚀率较大,但随着时间的推移,腐蚀率将会逐渐降低,并通过大量的实验数据总结出管柱体剩余厚度 t_1 与腐蚀速率的关系为指数关系. 其指数关系为

$$t_1 = Ae^{BT_L} \tag{10}$$

式中: T_L 为钢绞线的运营(服役)时间, t_1 为钢绞线剩余厚度,其中 $t_1 = t - x_m$. 故得到蚀坑深度与钢绞线运营时间之间的关系式:

$$x_m = t - Ae^{BT_L} \tag{11}$$

式(11)展示了蚀坑深度与钢绞线运营

时间二者之间的关系,不难看出当钢绞线的服役时间越长蚀坑深度就越深,与实际情况较为符合.其中 A 、 B 为常数,对 A 、 B 的求解是预测钢绞线剩余寿命的关键所在.笔者在不考虑拉索保护层厚度的情况下对其进行求解,式(11)应满足以下边界条件:当运营时间为零时即认为钢绞线并未腐蚀故 $x_m = 0$,拉索的剩余厚度此时为钢丝的直径 d ,求解达到参数 A 的表达式为

$$A = t_1 = d \tag{12}$$

假设钢绞线运营时间为 T_i 时,其腐蚀厚度为 t_i ,将其带入式(11)中得到 B 值:

$$B = \frac{\ln\left(1 - \frac{t_i}{t_1}\right)}{T_i} \tag{13}$$

将式(11)、(12)、(13)联立求解得到腐蚀坑深度与钢绞线运营时间的关系式:

$$x_m = d - de^{-\frac{\ln\left(1 - \frac{t_i}{d}\right)}{T_i} T_L} \tag{14}$$

4 算例分析

为了验证该理论的合理性,笔者基于新

疆某中承式钢管混凝土拱桥进行说明^[1],现对该桥的结构参数进行简单的介绍,如图1所示.该桥修建于1997年,总跨径为321 m,其中两边边跨为90 m,跨中为120 m,设计荷载等级为汽-15,挂-80,人群荷载按照《公路工程技术标准》(JTJ001—81)规定人群荷载为-3.5 kPa.全桥拉索共有62根,吊杆采用墩头锚的形式锚固在桥面板上,由55根平行的直径为7 mm的钢丝组成,极限强度为1 600 MPa.在此桥运营18年后对其外观进行了常规性的检测发现多处吊杆因为腐蚀严重而出现渗水的现象,最终导致该吊杆断裂如图2所示.

试验选取位于靠近下锚固段长度为2 m的钢丝如图3所示^[1],钢绞线的表面布满了大量的铁锈,且形成了大量的蚀坑.钢丝的有效直径大幅度减小,将拉索中的钢绞线取下将其分成30份,每份长度为30 cm,分别对每根钢绞线的最大腐蚀深度做了统计,所得统计参数如表1所示.

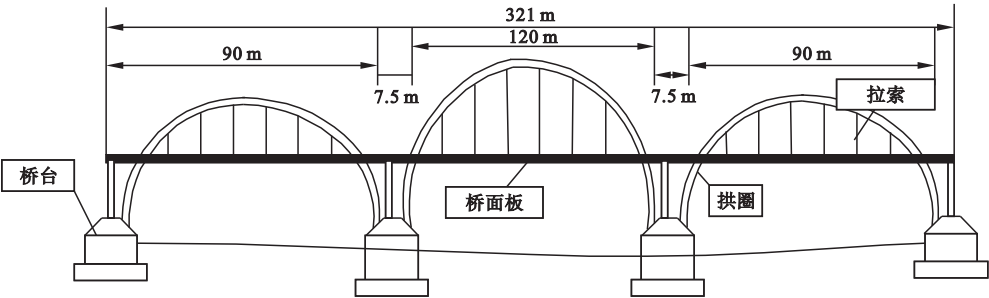


图1 新疆某大桥平面图
Fig. 1 Plane plan of a bridge in Xinjiang



图2 拉索断裂实体图
Fig. 2 Solid diagram of cable fracture

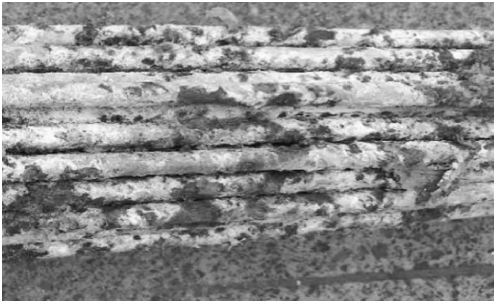


图3 钢绞线腐蚀大样图
Fig. 3 Detail drawing of steel strand corrosion

表 1 拉索蚀坑深坑统计结果

Table 1 Statistical results of cable pits and deep pits

序号	距离起点 距离/m	最大腐蚀 坑深/mm	序号	距离起点 距离/m	最大腐蚀 坑深/mm	序号	距离起点 距离/m	最大腐蚀 坑深/mm
1	0.25	2.2	11	3.12	1.79	21	6.07	1.25
2	0.37	2.35	12	3.46	2.51	22	6.42	3.08
3	0.68	1.78	13	3.54	3.48	23	6.63	1.47
4	1.04	2.78	14	4.03	0.94	24	7.12	2.59
5	1.43	1.65	15	4.42	1.62	25	7.34	1.06
6	1.67	3.43	16	4.65	3.25	26	7.65	3.23
7	2.04	3.67	17	5.03	1.35	27	8.03	2.83
8	2.21	4.12	18	5.22	0.65	28	8.21	2.17
9	2.67	2.67	19	5.63	2.76	29	8.45	0.73
10	2.82	1.41	20	5.82	2.31	30	8.82	2.12

表 1 中展示了在各样本测量段钢绞线蚀坑的最大深度值,将其蚀坑深度按照由小到大进行排序,通过式(2)计算得到各坑深度所对应的累计概率如表 2 所示.

表 2 蚀坑深坑累积概率计算结果

Table 2 Calculations of cumulative probability for pit

最大腐蚀坑深/mm	累积概率	最大腐蚀坑深/mm	累积概率	最大腐蚀坑深/mm	累积概率
0.65	0.03	1.78	0.35	2.76	0.68
0.73	0.06	1.79	0.39	2.78	0.71
0.94	0.10	2.12	0.42	2.83	0.74
1.06	0.13	2.17	0.45	3.08	0.77
1.25	0.16	2.20	0.48	3.23	0.81
1.35	0.19	2.31	0.52	3.25	0.84
1.41	0.23	2.35	0.55	3.43	0.87
1.47	0.26	2.51	0.58	3.48	0.90
1.62	0.29	2.59	0.61	3.67	0.94
1.65	0.32	2.67	0.65	4.12	0.97

为了保证所得结果的准确性,对表 2 中试验数据进行 K-S 检验以确保该试验数据是服从 Gumbel 分布. 通过对其概率分布函数和其累计频率的拟合得到如图 4 和图 5 所示.

图 4 和图 5 中展示了表 2 数据中蚀坑深度的概率分布图与累计概率图. 从图中不难看出,采用 Gumbel 分布函数模拟所得出的概率分布曲线与实测数据所得结果趋势较为相近. 通过式(7)~式(9)对试验所得数据

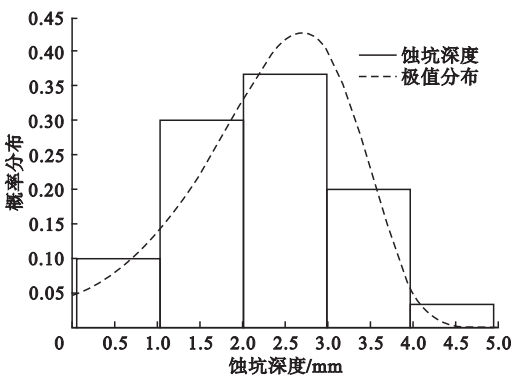


图 4 概率密度分布直方图

Fig. 4 Histogram of probability density distribution

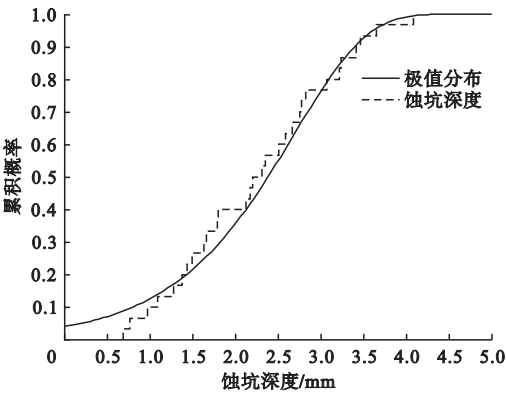


图5 累计概率分布图

Fig. 5 Cumulative probability distribution

进行线性回归可得到整段上蚀坑深度的表达式:

$$x_m = 0.63 + 3.22y. \tag{15}$$

为了验证式(15)的精确性将其计算结果与实测结果进行比较所得结果如图6所示.

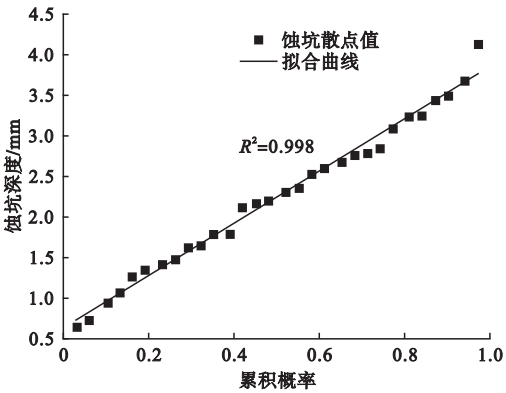


图6 实测结果与计算结果比较值

Fig. 6 Comparisons between measured results and calculated results

图6中曲线直线通过式(15)进行绘制,黑色离散点表示实测数据结果,从图中可明显看出实测结果与计算的回归结果较为吻合.散点都较为均匀地分布在直线两侧,其相关系数为0.998.说明式(15)的计算结果具有较高的精度,为预测吊索腐蚀蚀坑最大深度及确定吊索服役寿命打下基础.

钢绞线的疲劳寿命决定了整个桥梁体系的使用寿命,故对钢绞线使用寿命的预测显

得十分重要,笔者参照管柱结构腐蚀剩余厚度 t_1 与腐蚀速率的关系提出了蚀坑深度与桥梁运营时间之间的关系如式(14)所示.从式(14)不难看出,要精确的测量运营时间 T_i 所对应的蚀坑深度值,较为困难.原因在于,测量的样本容量较大,对其测量的仪器精度要求较高.为保证式(14)的计算精度,参数 B 的取值,笔者借鉴回归的思想对其进行预测,实测数据如表3所示.所得回归图函数如图7所示,与之对应的钢绞线腐蚀演变过程如图8所示(仅给出部分图片).

表3 腐蚀深度与营运时间关系

Table 3 Relation between cable corrosion depth and operating time

x_m/mm	T_i/a	x_m/mm	T_i/a
0.5	0.40	4	4.00
0.9	0.80	4.5	5.0
1.3	1.3	5	6.5
2	1.80	5.5	8.0
2.5	2.5	6	10.5
3	3	6.5	14.5
3.5	3.70	6.8	18

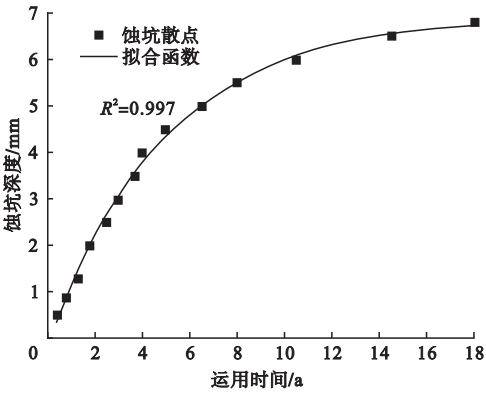


图7 钢绞线腐蚀深度与运营时间的关系

Fig. 7 The relationship between corrosion depth and operation time of steel strands

得到其分布函数:

$$x_m = 7 - 7e^{-0.27T_L}. \tag{16}$$

图7中展示了钢绞线运营年限与蚀坑深度之间的关系,并得出了相应的分布函数.由图可知,分布函数与实测结果数据的变化趋

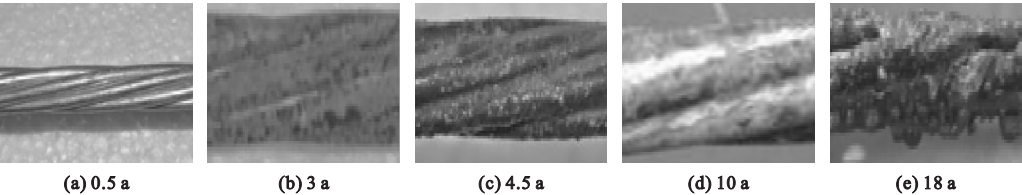


图 8 钢绞线腐蚀过程

Fig. 8 Corrosion process of steel strand

势一致,散点分布在曲线周围拟合系数为 0.997.说明该公式具有较高的精度.图 8 中展示了钢绞线的腐蚀过程,随着时间的增长钢绞线的外表面被铁锈逐渐包裹,尤其是在 3~10 年腐蚀较为迅速,当第 18 年时,钢绞线的截面完全被锈蚀,部分区域发生了脆断.

通过 Gumbel 极值理论得到了蚀坑深度与钢绞线运营时间的关系式,为了吊索疲劳寿命的预测提供了一个参考,也为类似结构的研究提供了一个新的视觉.但钢绞线暴露在空气中,容易受到温度、湿度、及空气中酸根离子等腐蚀性物质的影响.但这一系列的因素随机性较强无法对其进行精确的预测,要寻求一个完美的解析较为困难,故在后续的研究中还需近一步的分析与完善.

5 结 论

(1)通过对蚀坑深度实测数据进行分析,发现蚀坑的深度服从 Gumbel 极值分布,并通过 K-S 检验说明了该模型的合理性.

(2)笔者建立了蚀坑深度与钢绞线运营年限之间的关系式,提出了钢绞线的预测模型,并将其运用于实际算例中,显示其预测精度较高,为预测吊索的寿命提供了相应的参考.

参考文献

[1] 郑祥隆. 锈蚀钢丝疲劳性能及桥梁缆索疲劳可靠性评估方法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2018.
(ZHENG Xianglong. Research on fatigue performance of corroded steel wire and evaluation method of fatigue reliability for bridge cables [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.)
[2] 郑祥隆, 谢旭, 李晓章, 等. 锈蚀钢丝疲劳断口

分析与寿命预测[J]. 中国公路学报, 2017, 30 (4): 79-86.
(ZHENG Xianglong, XIE Xu, LI Xiaozhang, et al. Fatigue fracture analysis and fatigue life estimation of corroded steel wires[J]. Chinese journal of highway, 2017, 30(4): 79-86.)
[3] 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 (增刊 1): 226-228.
(LI Zhong, Lü Guozhi, GE Sen. Probabilistic method of pitting corrosion fatigue life [J]. Journal of mechanical strength, 2004, 26 (S1): 226-228.)
[4] 潘骁宇, 谢旭, 李晓章, 等. 锈蚀高强度钢丝的力学性能与评级方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48 (11): 1917-1924.
(PAN Xiaoyu, XIE Xu, LI Xiaozhang, et al. Mechanical properties and grading method of corroded high-tensile steel wires[J]. Journal of Zhejiang university (engineering edition), 2014, 48(11): 1917-1924.)
[5] SHI P, SANKARAN M. Damage tolerance approach for probabilistic pitting corrosion fatigue life prediction[J]. Engineering fracture mechanics, 2001, 68 (13): 1493-1507.
[6] 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 (3): 105-111.
(ZHENG Xianglong, XIE Xu, LI Xiaozhang, 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 (3): 105-111.)
[7] 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 Xiaoli, WANG Libin, DING Sheng. Time-dependent failure probability analysis of corroded parallel wire cable [J]. Engineering mechanics, 2012, 29 (4): 210-216.)
[8] NAKAMURA S I. Mechanical properties and remaining strength of corroded bridge wires [J]. Structural engineering international, 2004, 14 (1): 50-54.
[9] 李晓章, 谢旭, 潘骁宇, 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 (11): 68-76.
(LI Xiaozhang, XIE Xu, PAN Xiaoyu, et al. Experimental study fatigue performance of corroded high tensile steel wires of arch bridge hangers [J]. China civil engineering journal,

- 2015(11):68-76.)
- [10] 李晓章. 拱桥服役吊杆的力学性能退化及其索力识别研究[D]. 杭州:浙江大学,2015.
(LI Xiaozhang. Research on mechanical performance degradation and tension force identification of arch bridge hanger [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.)
- [11] 侯晓旦. 锈蚀分级下平行钢丝的疲劳强度试验研究及数值分析[D]. 南京:南京林业大学,2015.
(HOU Xiaodan. Experimental study and numerical analysis on fatigue strength of parallel wire based on corrosion classification [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2015.)
- [12] 李先立,宋显辉. 高强镀锌钢丝疲劳可靠性研究[J]. 土木工程学报,1995(2):36-43.
(LI Xianli, SONG Xianhui. Investigation on fatigue reliability of high strength galvanized steel wires[J]. China civil engineering journal, 1995(2):36-43.)
- [13] 乔燕,孙传智. 振动频率法测试斜拉桥拉索索力的应用研究[J]. 公路工程,2009,34(1):128-131.
(QIAO Yan, SUN Chuazhi. Research on using of vibration frequency in measuring the cable tension for cable-stayed bridge [J]. Highway engineering, 2009, 34(1):128-131.)
- [14] YI Y, LEE B, KIM S, et al. Corrosion and corrosion fatigue behaviors of 9cr steel in a supercritical water condition [J]. Materials science & engineering A, 2006, 429(1/2):161-168.
- [15] RAGAB A, ALAWI H, SOREIN K. Corrosion fatigue of steel in various aqueous environments [J]. Fatigue & fracture of engineering materials & structures, 2010, 12(6):469-479.
- [16] 谢民滇,谢发祥,胡星宇,等. 腐蚀环境下斜拉索承载力评价模型研究[J]. 交通科学与工程,2017,33(3):23-29.
(XIE Mindian, XIE Faxiang, HU Xingyu, et al. Study on the bearing capacity evaluation model of stay cables in corrosion environment [J]. Journal of transport science and engineering, 2017, 33(3):23-29.)
- [17] 李富民,袁迎曙. 氯盐环境下混凝土内钢绞线的锈蚀特性试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2009,3(4):35-40.
(LI Fumin, YUAN Yingshu. Corrosion behaviour of steel strand in concrete under chloride environment [J]. Journal of railway science and engineering, 2009, 3(4):35-40.)
- [18] 李富民,袁迎曙,王波,等. 腐蚀钢绞线预应力混凝土梁受弯承载力评估[J]. 建筑结构学报,2011(2):14-20.
(LI Fumin, YUAN Yingshu, WANG Bo, et al. Evaluation of flexural strength of prestressed concrete beams with corroded steel strands [J]. Journal of building structures, 2011(2):14-20.)
- [19] 刘雪云,张宁宁,赵光连,等. 储油罐底腐蚀深度统计的极值理论应用[J]. 哈尔滨工业大学学报,2013,45(3):56-60.
(LIU Xueyun, ZHANG Ningning, ZHAO Guanglian, et al. Application extreme value theory in the corrosion depth statistics of storage tank bottom [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2013, 45(3):56-60.)
- [20] 于杰. 腐蚀环境下桥梁拉索疲劳可靠性研究[D]. 南京:东南大学,2016.
(YU Jie. The research of the fatigue reliability of bridge cables under corrosive environment [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.)
- [21] ZUÑIGA T, ISHVARI F, DOMÍNGUEZ A, et al. Numerical investigation of the stress concentration on 7075-T651 aluminum alloy with one or two hemispherical pits under uniaxial or biaxial loading [J]. Advances in engineering software (thomson reuters), 2019, 131:23-35.
- [22] 卢晓刚. 油气长输腐蚀管道剩余寿命(体积型)评价研究[D]. 成都:西南石油大学,2005.
(LU Xiaogang. Study on residual life evaluation (bulk type) for oil/gas corroded pipeline [D]. Chengdou: Southwest Petroleum University, 2005.)
- [23] 韩克江,帅健. 基于 Gumbel 极值分布的腐蚀管线剩余寿命预测[C]//中国力学学会学术大会 2009 论文摘要集. 郑州:中国力学学会,2009:390.
(HAN Kejiang, SHUAI Jian. Prediction of residual life of corroded pipelines based on Gumbel extreme value distribution [C]// Summary of Papers of the Academic Conference of Chinese Mechanics Society 2009. Zhengzhou: Chinese Mechanics Society, 2009:390.)
- (责任编辑:刘春光 英文审校:刘永军)