

桥梁缆索高强钢丝均匀腐蚀及点蚀的规律

蒋超, 吴冲, 姜旭

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 为了研究桥梁缆索高强钢丝均匀腐蚀及点蚀的规律, 采用酸性盐雾试验制作了 6 种共 30 根不同腐蚀程度的钢丝试件, 通过质量分析、三维扫描等手段, 研究了腐蚀高强钢丝均匀腐蚀深度、点蚀深度的演变规律. 试验结果表明: 均匀腐蚀深度随腐蚀时长的变化遵循幂函数规律, 均匀腐蚀深度的变异系数随腐蚀时长减小; 钢丝的点蚀深度服从正态分布, 最大点蚀深度服从极值 I 型分布. 最后, 建立了均匀腐蚀深度与最大点蚀深度的预测模型, 并运用于具体实桥分析预测中.

关键词: 桥梁缆索高强钢丝; 均匀腐蚀; 点蚀; 最大点蚀深度
中图分类号: U443.38 **文献标志码:** A

Experiment Research on Uniform Corrosion and Pitting Corrosion of High-Strength Bridge Wires

JIANG Chao, WU Chong, JIANG Xu

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to study the uniform corrosion and pitting corrosion of high-strength bridge wires, a total of 30 steel wire specimens on six corrosion levels were prepared by using the acetic acid salt spray test. The variation of uniform corrosion depth and pitting depth was evaluated by using weight analysis and three dimension scanning. The results show that the measured uniform corrosion depth follows the power-law distribution. The coefficient of variation of uniform corrosion depth decrease with the corrosion time. The pitting depth follows the normal distribution and maximum pitting depth follows the extreme value distribution. Finally, the prediction models for uniform corrosion depth and maximum pitting depth were established and then applied to the real cables on the bridge.

Key words: high-strength bridge wires; uniform corrosion; pitting corrosion; maximum pitting depth

吊杆、拉索是索承式桥梁的重要受力构件, 其耐久性直接影响着桥梁结构的安全性. 近 20 年来, 我国已有多座桥梁在服役 15 年内更换了吊杆或拉索, 包括宜宾南门大桥、广州海印大桥、江阴长江大桥等^[1]. 吊杆、拉索更换的原因与其内部钢丝严重的腐蚀现象有关^[2-3]. 在腐蚀影响下, 钢丝力学性能大幅下降, 威胁着吊杆和拉索的使用安全.

缆索高强钢丝的腐蚀类型可以分为均匀腐蚀与局部腐蚀, 局部腐蚀以点蚀为主. 均匀腐蚀减小了钢丝截面, 削弱了钢丝承载力等静力性能^[4]; 点蚀产生的蚀坑会形成裂纹萌生源, 减小钢丝的疲劳寿命^[5]. 因此, 缆索高强钢丝腐蚀规律是研究钢丝力学性能衰退规律、建立力学性能时变模型的关键.

国内外很多学者对钢材料的腐蚀规律进行了研究. Melchers^[6]提出了低合金钢腐蚀深度均值及标准差的双线性模型. Linder 等^[7]给出了碳钢在海水中均匀腐蚀深度的幂函数模型. 曹楚南^[8]给出了碳钢在我国部分地区大气下的腐蚀数据, 发现同样遵循幂函数规律. 点蚀方面, Aziz^[9]、Shibata^[10]采用极值统计分析和分块极值模型对最大点蚀深度进行了研究, 该方法将试验数据按表面积进行分块, 记录每块区域的最大点蚀深度, 发现最大点蚀深度符合极值 I 型分布(Gumbel 分布). Stewart 等^[11]采用点蚀系数——最大点蚀深度与均匀腐蚀深度的比值来定义点蚀程度, 并给出了点蚀系数与不同分布形式的比较. 上述研究为缆索高强钢丝均匀腐蚀及点蚀规律提供了理论基础和依据. 但高强钢丝与上述研究对象材料不同, 镀锌与冷拔过程极大地提高了钢丝的抗腐蚀能力, 同时以往研究对象大部分采用板件形式, 腐蚀规律是否适用于钢丝尚未可知. Li 等^[12]采用轮廓粗糙度仪对高强钢丝的腐蚀规律进行了研究, 提出了高强钢丝均匀腐蚀及点蚀模型, 但研究对象腐蚀程度较轻, 该方法的适用范围和有效性尚未

收稿日期: 2018-01-04

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2013CB036303); 国家自然科学基金(51408424)

第一作者: 蒋超(1992—), 男, 博士生, 主要研究方向为钢与组合结构桥梁. E-mail: jciangchao@hotmail.com

通信作者: 姜旭(1982—), 男, 助理研究员, 工学博士, 主要研究方向为钢与组合结构桥梁. E-mail: jiangxu@tongji.edu.cn

得到充分检验。

基于此,本文采用酸性盐雾试验得到了 6 组共 30 根不同腐蚀程度的钢丝试件,试件最大质量损失率超过 15%,研究了钢丝均匀腐蚀深度随时间的发展规律。通过三维扫描技术,获取了腐蚀钢丝表面三维数据,探究三维数据的处理方法,分析了点蚀深度的分布规律,建立最大点蚀深度的预测模型,为定量研究钢丝力学性能衰退规律提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

桥梁缆索高强钢丝试件采用江苏法尔胜缆索有

表 1 缆索高强钢丝化学成分(质量分数)

Tab.1 Chemical composition of high-strength bridge wires

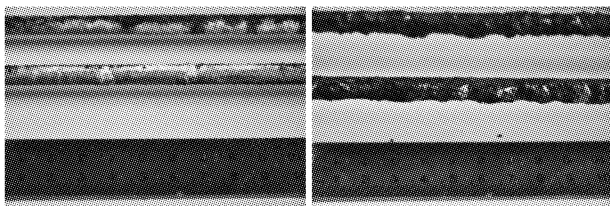
化学成分	C	Si	Mn	Cr	S	Cu
质量分数/%	0.85~0.90	0.12~0.32	0.60~0.90	0.10~0.25	≤0.025	≤0.10

钢丝试件分为 A~F 共 6 组,每组 5 根钢丝,盐雾腐蚀的时长随编号递增,具体腐蚀时长如表 2 所示。部分 A 组和 F 组的预腐蚀钢丝试件如图 1 所示。从图中可以很明显地看出, A 组试件表面尚存在白色的锌锈,而 F 组试件表面已经堆满了疏松的红褐色铁锈,试件表面粗糙度较高。

表 2 缆索高强钢丝腐蚀时长

Tab.2 Corrosion time of high-strength bridge wires

试件分组	A	B	C	D	E	F
时长/h	318.5	678	997	1 370	1 712	1 864.5



a A组

b F组

图 1 预腐蚀钢丝试件样品

Fig.1 Samples of pre-corroded steel wires

1.2 质量损失与均匀腐蚀深度计算

每组试件腐蚀完成后,立即从盐雾箱内取出,并按照标准《金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除:GB/T 16545—2015》^[14]进行试件清洗。先在流水中用软毛刷进行轻微机械清洗,去除附着不牢固或疏松的腐蚀产物,然后在 25 °C 室温下将试件浸在酸洗液中清洗 10 min。最后,用自来水、蒸馏水、乙醇依次冲洗,吹风机吹干后冷却至室温。酸洗液采用规范^[14]规定的铁或钢的清洗溶液,由 500

mL 浓盐酸、3.5 g 六次甲基四胺以及适量蒸馏水配制而成。

考虑到无腐蚀钢丝试件在酸洗液中也会产生质量损失,试验设置 3 根未腐蚀的对照试件,故腐蚀钢丝的质量损失率可以表达为

$$\eta_{nk} = \frac{m_{n0} - m_{nk} - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 [m_{c1}(i) - m_{c2}(i)]}{m_{n0} l_e / l_n} \quad (1)$$

式中: η_{nk} 为腐蚀时间 k 时的第 n 根钢丝的质量损失率; m_{n0} 、 m_{nk} 分别为第 n 根钢丝腐蚀前和腐蚀时间 k 时的质量; l_e 为试件实际腐蚀长度,为 300 mm; l_n 为试件总长度,为 500 mm; m_{c1} 、 m_{c2} 分别为对照试件初始质量和清洗后的质量。

根据钢丝试件的质量变化,均匀腐蚀深度可通过质量与面积损失的关系推导得出

$$\Delta m = \rho l_e \Delta A = \rho l_e \frac{\pi}{4} [D^2 - (D - 2d_{u,nk})^2] = \pi \rho l_e [d_{u,nk} (D - d_{u,nk})] \quad (2)$$

式中: ρ 为材料密度,考虑到钢和锌密度相近,且镀锌层未耗尽时就会产生钢、锌的共同腐蚀, ρ 统一取钢的密度; D 为钢丝直径; $d_{u,nk}$ 为腐蚀时间 k 时的第 n 根钢丝的均匀腐蚀深度。当 $d_{u,nk} \ll D$ 时,均匀腐蚀深度可简化为

$$d_{u,nk} = \frac{\Delta m}{\pi \rho l_e D} = \frac{m_{n0} - m_{nk} - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 [m_{c1}(i) - m_{c2}(i)]}{\pi \rho l_e D} =$$

$$\eta_{sk} \frac{m_{n0}}{\pi \rho D l_n} \quad (3)$$

1.3 三维扫描及数据处理

试验采用北京天远三维科技有限公司生产的照相式三维扫描仪对钢丝试件进行扫描,扫描仪型号为 OKIO-5M,仪器最高测量精度为 5 μm,平均采样间距最小为 40 μm,满足分析的精度要求.扫描步骤为:试件涂抹显像剂并干燥,通过支架将腐蚀钢丝试件固定,调整扫描精度开始扫描,扫描后将试件翻转 90°继续扫描,从而获得整根试件的表面三维数据.钢丝扫描数据通过三维软件 Geomagic Studio 显示的图像如图 2 所示.

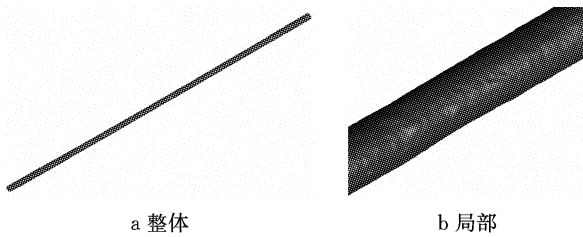


图 2 钢丝三维模型
Fig.2 3D model of steel wires

表面三维数据以三角形网格的方式存储于文件中.该文件无法直接输出点坐标,需要使用逆向工程软件进行处理.本文采用软件 NX Imageware 进行点云处理,并结合软件 AutoCad 获取点坐标.具体步骤如下:步骤 1,通过平移和旋转调整钢丝试件,采用平面向上切割三角形网格,生成每个切面上的点云;步骤 2,采用内插法曲线,通过点云生成切面的轮廓曲线;步骤 3,通过轮廓曲线构建均匀分布的点云,导出成 dxf 文件,通过软件 AutoCad 的数据提取功能生成点云坐标.

通过步骤 2、3,可以将切面上数量众多且间距不一的点云转换为给定数量的等间距点云.本文径向上切割的间距为 0.25 mm;每个轮廓曲线上构建 120 个点,即截面每隔 3°取 1 个点.

2 试验结果分析

2.1 均匀腐蚀深度

A~F 组试件均匀腐蚀深度的统计特性如表 3 所示.随着腐蚀时间的增加,钢丝均匀腐蚀深度的均值增大,变异系数减小. A 组试件的变异系数远大于其他组,原因是一方面镀锌层尚未完全耗尽,部分钢丝基体与尚存的镀锌层同时受到腐蚀,腐蚀速率不稳定,腐蚀深度不确定性较大;另一方面是

钢丝均匀腐蚀深度较小,对腐蚀深度的波动更敏感.

所有钢丝试件均匀腐蚀深度随腐蚀时长变化的关系如图 3 所示,两者呈非线性关系,均匀腐蚀深度的增长速度逐渐减慢.采用幂函数来拟合试验数据,得到试件均匀腐蚀深度随腐蚀时长的变化关系为

$$d_u(t) = 1.009t^{0.764} \quad (4)$$

表 3 均匀腐蚀深度统计特性

Tab.3 Statistical properties of uniform corrosion depth

试件编号	均值/μm	标准差/μm	变异系数
A	83.21	8.50	0.102
B	141.76	5.53	0.039
C	196.93	6.39	0.032
D	258.97	7.31	0.028
E	296.38	7.35	0.025
F	314.29	7.28	0.023

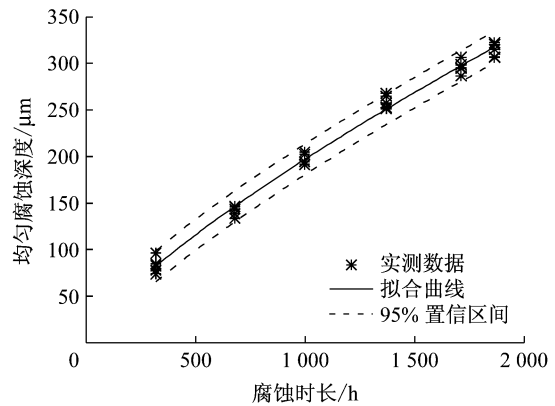


图 3 均匀腐蚀深度随腐蚀时长变化关系

Fig.3 Uniform corrosion depth versus exposure time

拟合曲线以及 95% 的置信区间如图 3 所示.可以看出,缆索高强钢丝在腐蚀下均匀腐蚀深度同样遵循幂函数规律.

2.2 点蚀深度

根据径向与周向上的等间距点云坐标,可以得到试件任意角度下的表面轮廓线.以试件 F-1 为例,所选角度为 0°、90°、180°、270°的轮廓线如图 4 所示,角度为钢丝圆周面上的旋转角度,取靠近扫描仪的水平方向为 0°.从图中可以看出,同一根钢丝在不同角度下的腐蚀情况相差较大,角度为 0°、180°的表面钢丝腐蚀情况好于角度为 90°、270°的表面.因此,仅根据有限个角度下的表面轮廓线无法精确计算钢丝的腐蚀情况.

基于每个试件 120 条轮廓线,可以得到腐蚀钢丝的腐蚀深度等高线.以试件 C-1 为例,等高线如图 5 所示.从图中可以看出明显的蚀坑分布,腐蚀时长为 997 h 时,部分蚀坑深度已超过 300 μm.

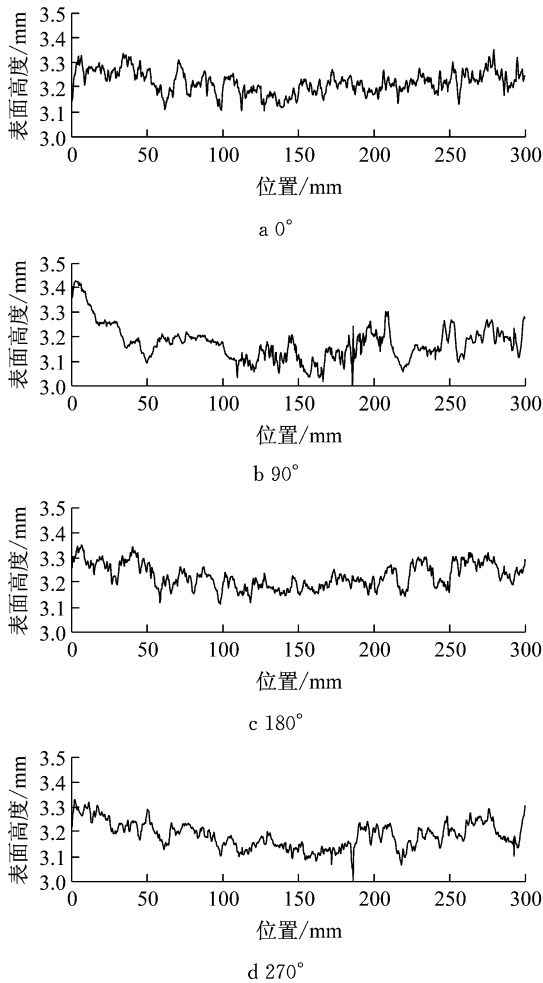


图 4 试件不同角度下的表面轮廓线
Fig.4 Surface profiles

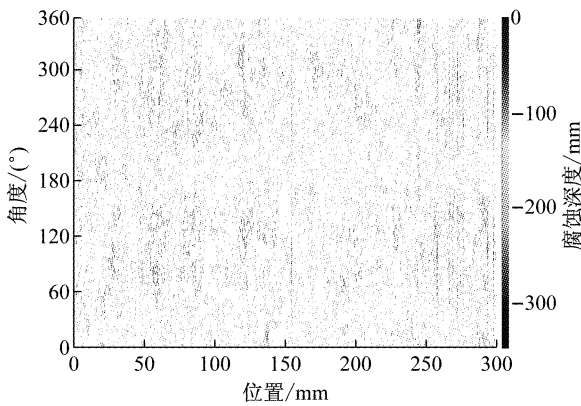


图 5 试件 C-1 腐蚀深度等高线
Fig.5 Contour of corrosion depth

每个试件 120 条轮廓线构成了试件的表面轮廓二维矩阵,对矩阵进行蚀坑识别,可以得到蚀坑长、宽、深度的信息,从而对蚀坑三维进行统计分析.经过假设检验发现,正态分布对于各组试件的点蚀深度均能通过显著性水平为 95% 的 K-S 检验.正态分布的概率密度函数表达式为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (5)$$

式中: μ 和 σ 均为分布参数.不同腐蚀时长试件的点蚀深度分布见图 6.图中点蚀深度正态分布模型的概率密度函数向右移动且宽度逐渐变大,表明点蚀深度的均值和离散度随腐蚀程度的增加而增大.

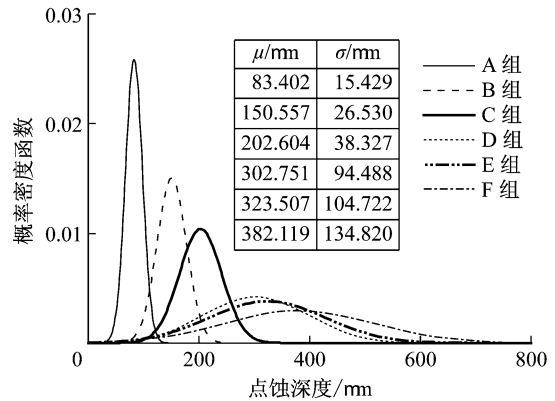


图 6 试件点蚀深度分布
Fig.6 Distribution of corrosion depth

试件分布参数与质量损失率的关系如图 7、8 所示.考虑到质量损失率为 0% 时分布参数均为 0,因此,同样采用幂函数来拟合分布参数.表达式分别为

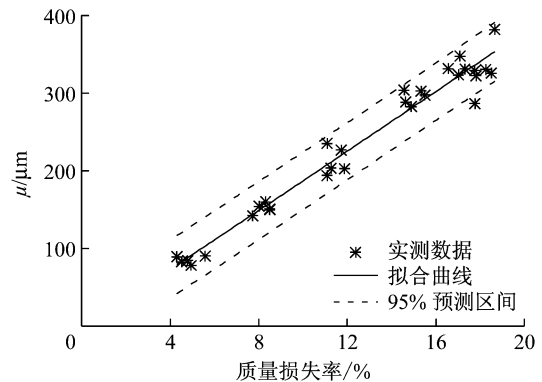


图 7 μ 与质量损失率的关系
Fig.7 μ versus weight loss

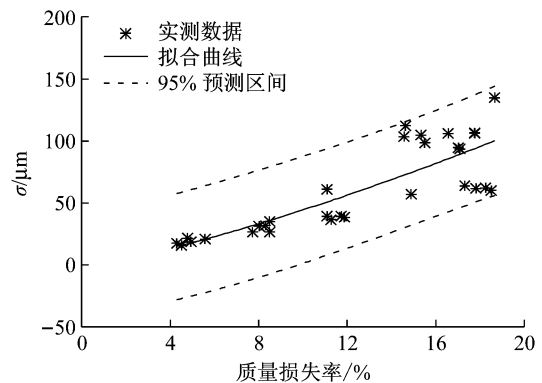


图 8 σ 与质量损失率的关系
Fig.8 σ versus weight loss

$$\left. \begin{aligned} \mu &= 1\,963.52\eta^{1.021} \\ \sigma &= 895.88\eta^{1.306} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: η 为质量损失率.

3 最大点蚀深度模型

3.1 模型推导

最大点蚀深度是影响腐蚀构件疲劳寿命的决定性因素,准确的点蚀深度预测模型是建立腐蚀构件疲劳衰退模型的基础.根据上文分析可知,缆索高强钢丝点蚀深度服从正态分布,分布参数可通过钢丝质量损失率结合式(4)、(5)计算得到.点蚀深度的概率密度函数如式(3)所示,分布函数的表达式为

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} dx \quad (7)$$

最大点蚀深度模型与点蚀深度模型的最值模型等价,可以通过点蚀深度模型的尾部分布推导

$$\begin{aligned} \left[\frac{1-F(x)}{f(x)}\right]' &= \left[\frac{\int_x^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} dx}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\}}\right]' = \\ & \left[\exp\left\{\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \int_x^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} dx\right]' = \\ & \exp\left\{\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \frac{x-\mu}{\sigma^2} \int_x^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} dx - \\ & \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} = \frac{\int_x^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} dx}{\exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \frac{\sigma^2}{x-\mu}} - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \end{aligned} \quad (8)$$

当 $x \rightarrow +\infty$ 时,

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow +\infty} \left[\frac{1-F(x)}{f(x)}\right]' &= \\ \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_x^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} dx}{\exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \frac{\sigma^2}{x-\mu}} - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} &= \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{1 + \frac{\sigma^2}{(x-\mu)^2}} - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

所以正态分布的尾部深度服从极值 I 型分布(Gumbel 分布)^[15].极值 I 型分布的分布函数形式为

$$F(x) = \exp\left\{-\exp\left(-\frac{x-b}{a}\right)\right\} \quad (10)$$

式中: a 为尺度参数; b 为位置参数.

当蚀坑个数 n 较大时,可以解得模型参数为^[16]

$$a = \frac{\sigma}{\sqrt{2 \ln n}}$$

$$b = \mu - \sqrt{2 \ln n} \sigma + \frac{(\ln \ln n + \ln 4\pi)\sigma}{2 \sqrt{2 \ln n}} \quad (11)$$

蚀坑个数 n 经试验结果统计分析可得

$$n = \frac{3L(-13\,717\eta + 5\,426.39)}{10} \quad (12)$$

式中: L 为钢丝长度, m ; η 为质量损失率.

3.2 模型验证

根据各试件点蚀深度模型的参数及蚀坑个数,可以计算得到试件最大点蚀深度 $d_{p\max}$ 服从的极值 I 型分布参数.在已知分布下,通过蒙特卡洛模拟生成符合该分布的 1 000 个随机数,模拟值与实测最大点蚀深度如表 4 所示.从表中可以看出,30 个试件中仅有 4 个试件的最大点蚀深度超出了模拟生成的最大点蚀深度最值区间,且误差均小于 10%,分别为 0.68%、-0.37%、-9.10% 和 -7.89%.其余试件中,13 个试件处于模拟的 95% 区间内,13 个试件处于最值区间内.表 4 表明,本文推导得出的最大点蚀深度模型与实测值吻合良好.

3.3 实例分析

以杭州湾大桥北航道桥某拉索为例,该拉索截面包含 109 根钢丝,钢丝长 98 m,直径为 7 mm.分析中将拉索护套出现轻微破损、护套内开始出现水气、钢丝与外部腐蚀环境开始接触的时间点设为零点.

杭州湾大桥拉索钢丝处于海水潮湿环境下.镀锌层在海水飞溅区的腐蚀速率为 $13.38 \mu\text{m} \cdot \text{年}^{-1}$,50 μm 厚的镀锌层将于 3.74 年后耗尽^[17].设实际环境与试验环境的换算系数为 k ,即实际环境中 1 年相当于试验环境小时 k ,那么

$$\begin{aligned} d_u(t) &= 1.009(3.74k)^{0.764} = 50 \mu\text{m} \\ k &= 44.24 \text{ h} \end{aligned} \quad (13)$$

因此实际环境中,钢丝的均匀腐蚀深度如图 9 所示,腐蚀 30 年后,拉索高强钢丝的均匀腐蚀深度

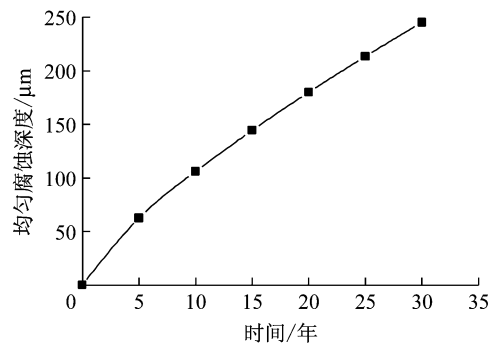


图 9 拉索钢丝均匀腐蚀深度
Fig.9 Uniform corrosion depth

表 4 预腐蚀缆索高强钢丝最大点蚀深度预测结果

Tab.4 Model prediction of maximum pitting depth of pre-corroded bridge wires

试件分组	编号	极值 I 型分布参数		随机模拟生成的 $d_{p \max}/\mu\text{m}$		实测 $d_{p \max}/\mu\text{m}$	与最值的误差/%
		$a/\mu\text{m}$	$b/\mu\text{m}$	95% 预测区间	最值预测区间		
A	A-1	3.72	137.77	[133.48, 148.97]	[130.75, 170.23]	158.57	△
	A-2	4.47	144.23	[139.23, 157.36]	[133.97, 175.70]	157.10	○
	A-3	5.23	161.16	[155.82, 177.57]	[152.04, 197.38]	179.73	△
	A-4	4.19	151.22	[146.57, 164.25]	[143.28, 178.33]	152.40	○
	A-5	5.02	163.18	[157.83, 178.13]	[153.18, 200.49]	170.80	○
B	B-1	7.79	271.03	[262.46, 295.43]	[255.45, 335.46]	284.33	○
	B-2	6.53	243.18	[236.43, 262.79]	[230.77, 284.22]	268.88	△
	B-3	6.49	234.81	[227.16, 253.42]	[221.89, 282.09]	279.28	△
	B-4	7.67	263.43	[254.70, 286.08]	[247.69, 323.82]	235.03	○
	B-5	8.59	272.16	[262.79, 295.82]	[254.86, 335.42]	229.48	○
C	C-1	9.72	329.60	[319.36, 358.80]	[310.89, 431.06]	398.72	△
	C-2	9.71	362.34	[352.04, 389.68]	[344.85, 429.89]	432.81	0.68
	C-3	9.50	335.26	[324.65, 364.25]	[316.01, 412.61]	391.57	△
	C-5	15.16	444.87	[428.71, 491.04]	[410.68, 562.44]	529.10	△
	C-4	9.00	329.12	[319.88, 355.24]	[310.93, 422.90]	330.59	○
D	D-1	25.40	665.55	[638.92, 741.75]	[610.84, 843.68]	677.67	○
	D-2	14.04	480.46	[465.49, 521.06]	[451.79, 614.74]	479.56	○
	D-3	24.11	643.91	[618.23, 715.42]	[601.92, 810.22]	654.61	○
	D-4	25.65	670.56	[522.82, 589.15]	[510.06, 656.20]	508.15	-0.37
	D-5	27.58	681.34	[651.84, 760.45]	[634.37, 854.28]	837.62	△
E	E-1	26.26	701.54	[677.30, 774.17]	[641.30, 882.89]	650.58	△
	E-2	15.78	552.70	[512.31, 576.27]	[502.05, 636.71]	591.63	△
	E-3	23.17	671.67	[647.75, 739.29]	[623.18, 820.79]	719.49	○
	E-4	25.94	703.55	[675.65, 783.87]	[658.97, 903.60]	869.53	△
	E-5	23.08	656.58	[630.96, 722.55]	[607.45, 847.25]	552.15	-9.10
F	F-1	33.02	855.72	[820.60, 947.96]	[796.57, 1202.84]	733.69	-7.89
	F-2	15.13	530.32	[736.15, 799.96]	[722.73, 844.14]	769.49	○
	F-3	15.47	532.93	[517.11, 581.07]	[502.15, 614.21]	672.22	○
	F-4	15.67	540.39	[642.00, 745.29]	[621.28, 924.94]	768.80	△
	F-5	26.73	646.25	[616.81, 723.49]	[587.50, 869.97]	608.16	△

注: △代表实测值处于预测最值区间内,但在预测 95% 区间外; ○代表实测值处于预测 95% 区间内。

接近 $250 \mu\text{m}$, 钢丝直径减小 7.01% , 截面横截面积减小 13.53% 。

根据式(6), 可以计算得到不同腐蚀年份下钢丝点蚀深度的模型参数, 结合式(11)和(12), 即可求得最大点蚀深度的模型参数。杭州湾大桥拉索钢丝在实际环境下的最大点蚀深度分布如图10所示, 腐蚀30年

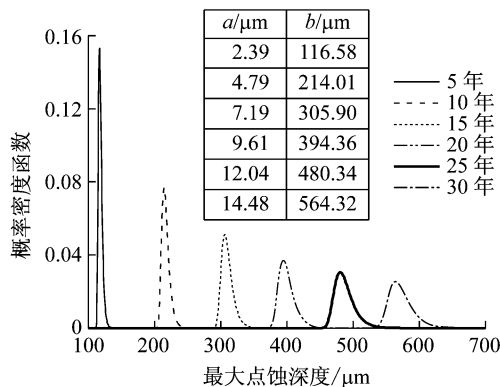


图 10 拉索钢丝最大点蚀深度分布

Fig.10 Distribution of maximum pitting depth

后, 拉索高强钢丝的最大点蚀深度超过 $550 \mu\text{m}$ 。

4 结论

本文采用酸性盐雾试验制备了不同腐蚀程度的桥梁缆索高强钢丝, 通过质量分析、三维扫描等手段, 研究了腐蚀钢丝均匀腐蚀及点蚀的演变规律, 得到如下结论:

(1) 缆索高强钢丝在腐蚀下均匀腐蚀深度随腐蚀时长的变化同样遵循幂函数规律, 均匀腐蚀深度的变异系数随腐蚀时长减小。

(2) 明确了钢丝三维扫描的数据处理方法, 钢丝的点蚀深度服从正态分布, 建立了以质量损失率为变量的点蚀深度模型。

(3) 建立了钢丝最大点蚀深度预测模型, 试验结果与预测值的对比验证了模型的准确性。

(4) 以实桥为例, 分析了在实际腐蚀环境下拉索

钢丝均匀腐蚀深度以及最大点蚀深度的变化,为定量研究拉索腐蚀后的使用寿命提供了参考。

参考文献:

- [1] 王力力,易伟建. 斜拉索的腐蚀案例与分析[J]. 中南公路工程, 2007, 32(1): 93.
WANG Lili, YI Weijian. Cases analysis on cable corrosion of cable stayed bridges[J]. Central South Highway Engineering, 2007, 32(1): 93.
- [2] 徐俊. 拉索损伤演化机理与剩余使用寿命评估[D]. 上海: 同济大学, 2006.
XU Jun. Damage evolution mechanism and remained service lives evaluation of stayed cables [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [3] 孙传智. 索承式桥梁腐蚀吊索安全性能与疲劳寿命评估[D]. 南京: 东南大学, 2013.
SUN Chuazhi. Assessment of safety capability and fatigue life of corroded cable for cable-supported bridge [D]. Nanjing: Southeast University, 2013.
- [4] LI S, XU Y, ZHU S, *et al.* Probabilistic deterioration model of high-strength steel wires and its application to bridge cables [J]. Structure & Infrastructure Engineering, 2014, 11(9): 1.
- [5] 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(11): 68.
LI Xiaozhang, XIE Xu, PAN Xiaoyu, *et al.* Experimental study on fatigue performance of corroded high tensile steel wires of arch bridge hangers [J]. China Civil Engineering Journal, 2015(11): 68.
- [6] MELCHERS R E. Corrosion uncertainty modelling for steel structures[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1999, 52(1): 3.
- [7] LINDER J, BLOM R. Development of a method for corrosion fatigue life prediction of structurally loaded bearing steels[J]. Corrosion, 2001, 57(5): 404.
- [8] 曹楚南. 中国材料的自然环境腐蚀[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
CAO Chu'nan. Material corrosion in natural environment of China[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [9] AZIZ P M. Application of the statistical theory of extreme values to the analysis of maximum pit depth data for aluminum [J]. Corrosion, 1956, 12(10): 2176.
- [10] SHIBATA T. 1996 W. R. whitney award lecture: statistical and stochastic approaches to localized corrosion[J]. Corrosion, 1996, 52(11): 813.
- [11] STEWART M G, AL-HARTHY A. Pitting corrosion and structural reliability of corroding RC structures; experimental data and probabilistic analysis[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2008, 93(3): 373.
- [12] LI S, XU Y, LI H, *et al.* Uniform and pitting corrosion modeling for high-strength bridge wires[J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 19(7): 04014025.
- [13] 中国国家标准化管理委员会. 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验: GB/T 10125—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Corrosion tests in artificial atmospheres-salt spray tests: GB/T 10125—2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [14] 中国国家标准化管理委员会. 金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除: GB/T 16545—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Corrosion of metals and alloys-removal of corrosion products from corrosion test specimens; GB/T 16545—2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [15] HÜSLER J. Extremes and related properties of random sequences and processes[J]. Metrika, 1984, 31(1): 98.
- [16] 袁子厚, 何小亚, 梅学斌. 多个独立正态分布随机变量的最大值分布[J]. 武汉纺织大学学报, 2004, 17(1): 52.
YUAN Zihou, HE Xiaoya, MEI Xuebin. The maximum distribution of multi-independent normal distribution random variable [J]. Journal of Wuhan University of Science and Engineering, 2004, 17(1): 52.
- [17] 李鑫, 李焰, 魏绪钧. 热镀锌钢板在青岛不同海水区带的腐蚀行为 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2007, 28(8): 1147.
LI Xin, LI Yan, WEI Xujun. Corrosion behavior of hot-dip galvanized sheet steel in different seawater zones in Qingdao [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2007, 28(8): 1147.