

文章编号: 1674-599X(2022)02-0033-07

# 基于三维激光扫描的吊索钢丝锈蚀形貌分析

马亚飞, 白浩, 苏小超, 阳健, 王磊, 张建仁

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘 要:** 为研究桥梁高强钢丝锈蚀对吊索性能退化的影响, 以一座服役 14 a 的拱桥吊索为研究对象, 进行了吊索高强钢丝酸性盐雾快速锈蚀试验, 得到了 6 种不同锈蚀程度的钢丝样本。采用三维激光扫描(3D 激光扫描)技术, 研究了锈蚀钢丝表面均匀锈蚀和坑蚀的特点, 并引入点蚀系数, 分析吊索高强钢丝局部锈蚀参数的概率分布特征。研究结果表明: 钢丝平均质量损失率与时间呈幂函数关系; 经检验, 钢丝点蚀系数  $\alpha$  和  $\beta$  均服从对数正态分布; 随着锈蚀程度的加剧, 钢丝锈蚀特征趋向于均匀锈蚀特征。

**关键词:** 桥梁吊索; 高强钢丝; 锈蚀; 三维激光扫描; 概率特征

中图分类号: U447

文献标志码: A

## Corrosion morphology analysis of bridge suspender steel wires based on 3D laser scanning method

MA Yafei, BAI Hao, SU Xiaochao, YANG Jian, WANG Lei, ZHANG Jianren

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

**Abstract:** In order to study the effect of corrosion of bridge high-strength steel wire on the performance degradation of sling, taking the sling of an arch bridge that has been in service for 14 years as the research object, the acid salt spray accelerated corrosion test of sling high-strength steel wire was carried out, and six steel wire samples with different corrosion degrees were obtained. Using three-dimensional (3D) laser scanning technology, the characteristics of uniform corrosion and pitting corrosion on the surface of corroded steel wire were studied, and the pitting coefficients were introduced to analyze the probability distribution characteristic of local corrosion parameter of sling high-strength steel wire. The results show that the average mass loss rate of steel wire is a power function with time. The coefficient  $\alpha$  and  $\beta$  of steel wire pitting can obey the lognormal distribution. The steel wire tend to uniform corrosion with the increase of corrosion level.

**Key words:** bridge suspender; high-strength steel wire; corrosion; three-dimensional laser scanning; probabilistic characteristic

桥梁腐蚀、损伤等病害在车辆反复荷载和外界不利环境作用下日益突出。已建的中下承式拱桥、悬索桥等大跨度桥梁吊索, 长期处于高应力状态, 若防护不当, 吊索内高强钢丝易发生腐蚀<sup>[1-2]</sup>, 会显著降低吊索的使用寿命。近年来, 已发生多起因腐蚀导致的吊索安全事故, 带来巨大

的人身伤亡和财产损失。桥梁管理部门将腐蚀吊索及时更换, 以防该类事故的发生。钢丝锈蚀分为均匀锈蚀和局部锈蚀, 而局部锈蚀易引起钢丝局部应力集中, 加速疲劳裂纹扩展, 对结构性能更为不利。因此, 研究钢丝的坑蚀特征, 对其力学性能退化规律尤为重要。

收稿日期: 2021-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778068); 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); 湖南省重点领域研发计划项目(2019SK2171)

作者简介: 马亚飞(1984—), 男, 长沙理工大学副教授, 博士生导师。

目前,针对锈蚀导致结构性能退化的研究已有较多成果。NAKAMURA等人<sup>[3-4]</sup>发现镀锌钢丝的伸长率和扭转强度均随锈蚀程度的增加而降低,待表面镀锌层完全锈蚀后,钢丝延性显著降低。李晓章等人<sup>[5-6]</sup>研究表明:高强钢丝极限应变的下降源于锈蚀钢丝横截面的不均匀损失,钢丝局部的微小锈坑成为裂纹萌生源。兰成明等人<sup>[7]</sup>建立了考虑腐蚀影响的三参数Weibull模型,发现随着钢绞线腐蚀程度的增加,疲劳寿命迅速减小,指定疲劳寿命下的许用应力幅迅速降低。FURUYA等人<sup>[8]</sup>通过自然环境腐蚀试验,指出高温和水分是拉索内钢丝腐蚀的主要诱因。张威等人<sup>[9-10]</sup>分析了蚀坑分布状况,认为蚀坑长度、宽度和深度均服从对数正态分布,蚀坑深宽比服从正态分布,而最大蚀坑深度服从极值II型分布。ZHANG等人<sup>[11]</sup>发现锈蚀平均截面积与最小截面积之比服从Gumbel极值分布,随着锈蚀的发展,其均值和均方差也随之增大。楼纪昂等人<sup>[12]</sup>通过ANSYS仿真模拟,探讨高强钢丝蚀坑长度、宽度和深度等因素对应力集中系数的影响程度,发现最大影响因素为蚀坑长度,深度次之,宽度最小。蒋超等人<sup>[13]</sup>发现高强钢丝均匀腐蚀深度的变异系数随腐蚀时长减小,最大点蚀深度服从极值I型分布,并建立了均匀腐蚀深度与最大点蚀深度的预测模型。然而,现有研究多采用通电加速腐蚀的方法获取锈蚀试件,这与自然环境存在较大差异,测试结果难以反映现实情况。而考察参数局限于最大腐蚀深度、宽度等,忽视了整体腐蚀的影响。因此,本研究以服役实桥上更换的吊索为研究对象,对其内部高强钢丝进行酸性盐雾试验模拟自然环境腐蚀,得到了质量损失率与锈蚀时间的变化规律。通过对锈蚀钢丝进行三维激光扫描(3D激光扫描),测得了不同位置的蚀坑深度。拟以点蚀系数表征局部锈蚀程度,考虑钢丝整体锈蚀的影响,经统计分析高强钢丝局部锈蚀参数的概率分布特征,以期研究高强钢丝力学性能规律提供借鉴。

## 1 自然环境模拟锈蚀试验

### 1.1 试件制作

四川某桥是一座中承式混凝土拱桥,于2016年进行了吊索更换,拆除时吊索已服役14 a。该吊

索由109根直径为7 mm的平行镀锌高强钢丝组成,钢丝抗拉强度标准值为1 670 MPa。拆除的部分吊索运回实验室,经切割加工后,得到60根长度为400 mm的钢丝样本。

采用酸性盐雾试验,模拟自然环境对高强钢丝的腐蚀,样本分6组,每组10根,试验周期分别为15、30、60、90、120和150 d。主要设备为CK/YW-60C的盐雾腐蚀试验箱和ATC系列笔式酸度计。电导率不超过20  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的蒸馏水和 $50\pm 5\text{ g/L}$ 的化学纯氯化钠配制盐溶液,通过冰乙酸和化学纯氢氧化钠,控制溶液PH值在3.0~3.1<sup>[14]</sup>。盐雾试验控制温度为25℃。在500 mL密度为1.19 g/mL的盐酸中,加入3.5 g六次甲基四胺和适量蒸馏水,配制成1 000 mL的除锈液。

先用丙酮擦拭试件表面,称重,放入试验箱,待试验周期结束时取出各组试件,自然风干30~60 min,用温度不高于40℃的清洁流动水冲洗钢丝表面,去除残留锈蚀液。

钢丝锈蚀后,外观如图1所示。在图1中,白色物质和红色物质分别为钢丝表面镀锌层和内芯基体的锈蚀产物。从图1中可以看出,盐雾暴露15 d之后,钢丝表面镀锌层已开始锈蚀,基体内芯出现了局部点蚀,随着盐雾暴露天数的增加,腐蚀向钢丝基体内芯发展,腐蚀程度愈发严重,钢丝截面呈不规则变化。



(a) 0 d (b) 15 d (c) 30 d (d) 60 d (e) 90 d (f) 120 d (g) 150 d

图1 不同暴露时间下钢丝锈蚀形貌

Fig. 1 Corrosion morphology of steel wire after different exposure time

### 1.2 高强钢丝质量损失

先将钢丝表面烘干,在室温环境下用配置好的除锈液清洗试件10 min,用软毛刷轻轻擦拭试件,除去钢丝表面膨松的锈蚀物。再用清水将试件充分冲洗,烘干,冷却至室温,再次称重并记录。锈蚀高强钢丝清洗后的外观如图2所示。在锈蚀初始阶段,仅钢丝表面镀锌层发生锈蚀,部分腐蚀严重区域出现点蚀,钢丝表面出现微小蚀坑,

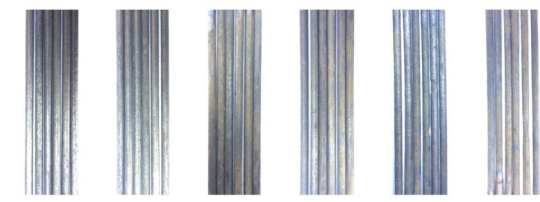
钢丝截面直径未有明显变化, 随着暴露时间的增加, 钢丝表面点蚀加重, 腐蚀产物覆盖整个试件表面, 局部出现较大蚀坑, 钢丝直径明显变小。

经本试验配置的酸性盐雾加速锈蚀后, 得到试件的质量锈蚀率见表 1。

钢丝质量损失率的计算式为:

$$\eta = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100\%$$

(1)



(a) 15 d (b) 30 d (c) 60 d (d) 90 d (e) 120 d (f) 150 d

图2 除锈后钢丝样本

Fig. 2 Steel wire samples after derusting

表1 钢丝质量损失

Table 1 Mass loss of steel wires

锈蚀天数/d	编号	$M_0/\text{g}$	$M_1/\text{g}$	$\eta/\%$	$\eta_0/\%$	锈蚀天数/d	编号	$M_0/\text{g}$	$M_1/\text{g}$	$\eta/\%$	$\eta_0/\%$
15	15-1	123.80	118.97	3.90	4.535	90	90-1	119.28	107.69	9.72	9.657
	15-2	118.77	114.01	4.01			90-2	123.35	112.49	8.80	
	15-3	117.48	112.67	4.09			90-3	120.49	110.00	8.70	
	15-4	118.80	113.64	4.35			90-4	118.47	106.49	10.11	
	15-5	119.44	114.10	4.47			90-5	124.85	112.86	9.60	
	15-6	119.59	114.14	4.55			90-6	118.68	107.56	9.37	
	15-7	117.39	111.94	4.64			90-7	119.28	107.47	9.90	
	15-8	118.83	112.71	5.15			90-8	118.68	106.65	10.14	
	15-9	117.93	111.80	5.20			90-9	125.75	113.80	9.51	
	15-10	118.47	112.56	4.99			90-10	119.86	107.02	10.71	
30	30-1	118.83	112.94	4.96	5.989	120	120-1	124.85	112.56	9.84	11.250
	30-2	118.68	112.24	5.43			120-2	119.80	107.23	10.49	
	30-3	119.44	112.36	5.92			120-3	117.48	104.91	10.70	
	30-4	119.80	112.99	5.68			120-4	119.13	106.2	10.86	
	30-5	118.83	111.22	6.41			120-5	118.68	105.27	11.30	
	30-6	119.68	112.03	6.39			120-6	118.41	105.58	10.84	
	30-7	117.33	110.66	5.68			120-7	119.77	105.95	11.54	
	30-8	119.13	111.88	6.09			120-8	118.47	104.58	11.73	
	30-9	119.68	111.86	6.53			120-9	119.86	104.57	12.75	
	30-10	119.28	111.18	6.79			120-10	118.35	103.61	12.46	
60	60-1	118.89	109.67	7.76	7.965	150	150-1	120.19	105.19	12.48	13.601
	60-2	118.86	109.37	7.99			150-2	117.93	103.09	12.58	
	60-3	118.38	109.30	7.67			150-3	120.28	104.78	12.89	
	60-4	118.83	110.13	7.32			150-4	118.38	102.51	13.41	
	60-5	118.68	109.05	8.12			150-5	120.04	104.06	13.31	
	60-6	118.95	109.44	8.00			150-6	124.85	108.50	13.10	
	60-7	120.01	110.20	8.17			150-7	119.89	101.94	14.97	
	60-8	120.49	111.22	7.69			150-8	126.35	108.12	14.43	
	60-9	119.16	109.03	8.50			150-9	125.75	107.28	14.69	
	60-10	124.85	114.33	8.43			150-10	124.55	106.92	14.16	

注:  $M_0$ 为完好钢丝质量,  $M_1$ 为除锈后钢丝质量,  $\eta$ 为质量损失率,  $\eta_0$ 为钢丝平均质量损失率。

钢丝平均质量损失率与盐雾环境暴露时间的变化关系如图3所示,经回归分析得:

$$\eta_0(t) = 1.26(t - t_0)^{0.46} \quad (2)$$

式中:  $t$  为盐雾环境暴露时间, d;  $t_0$  为短期酸性盐雾暴露环境下镀锌高强钢丝开始发生锈蚀所需的时间, d, 本试验  $t_0=15$ 。

从图3可以看出, 由于钢丝表面镀锌层先发生锈蚀, 锈蚀是一个从无到有的过程。因此, 初始质量损失速率较快, 待到钢丝表面覆盖的锈蚀产物形成一道保护膜后, 腐蚀速率趋缓, 随着锈蚀程度进一步加剧, 部分锈蚀产物脱落, 钢丝再次暴露在盐雾环境中, 锈蚀速率有所回升。

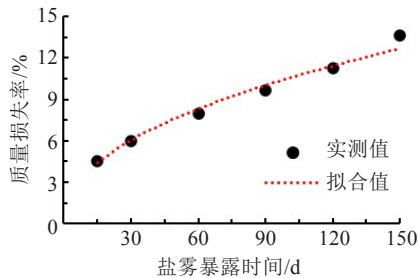


图3 平均质量损失率与盐雾暴露时间关系

Fig. 3 Relationship between average mass loss rate and salt spray exposure time

## 2 三维激光扫描

为研究高强钢丝的局部锈蚀特征, 利用三维激光扫描技术测量钢丝表面的蚀坑特征。本试验采用仪器为精度 0.02 mm 的 FARO Laser Scan Arm3D 激光扫描测量仪。从6组锈蚀试件中各取3根, 共计18根样本, 对其中间200 mm 区域进行扫描, 经配准、简化、去噪等流程, 得到原始点云数据。通过三维数据处理, 删除多余点、点云数据封装、划分网格等流程, 得到多边形钢丝网格模型。然后, 沿钢丝轴向每隔2 mm 剖切1个横断面, 如图4所示。固定圆心, 在坐标系中构建钢丝平均锈蚀深度圆截面和半径  $R_0=3.5$  mm 的原始圆截面, 测得原始截面圆心到锈蚀钢丝表面最近点的距离  $s$ , 通过计算得到钢丝表面蚀坑深度  $d$ , 其计算式为:

$$d = R_0 - s \quad (3)$$

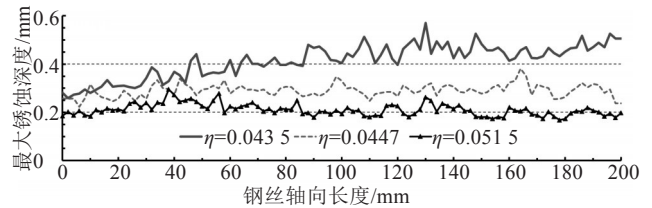


图4 钢丝模型横截面截取

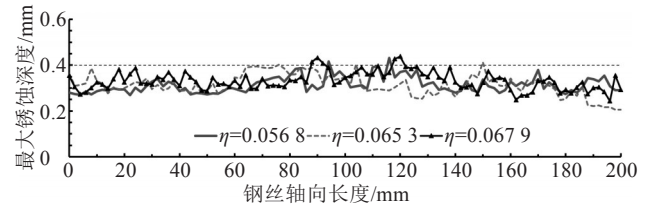
Fig. 4 Cross section interception of steel wire model

### 2.1 最大点蚀深度

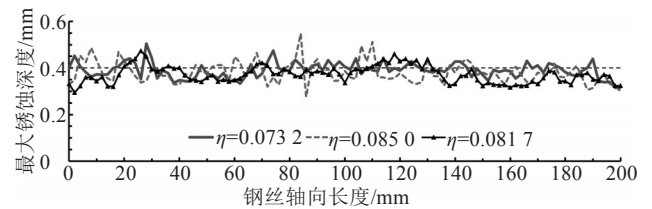
不同盐雾暴露时间下, 18根钢丝表面最大点蚀深度纵向、轴向分布情况如图5所示。从图5可以看出, 最大坑蚀深度沿钢丝轴向存在较大差异, 相同盐雾暴露时间下同组钢丝最大坑蚀水平较接近。钢丝最大坑深随盐雾暴露时间的增长逐渐增大, 如图5(g)所示, 但纵坐标轴方向的波动范围逐渐变小, 表明钢丝轴向腐蚀程度趋于均匀。



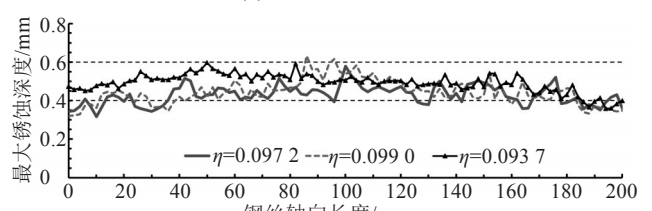
(a) 盐雾暴露 15 d



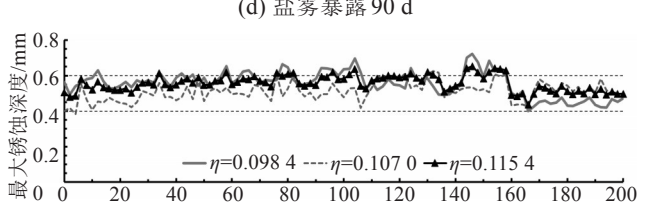
(b) 盐雾暴露 30 d



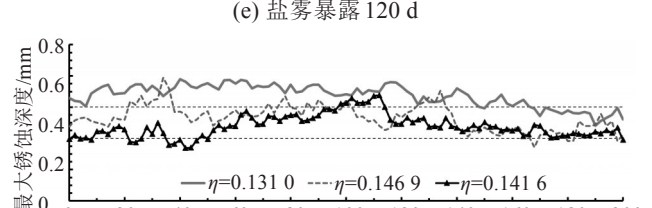
(c) 盐雾暴露 60 d



(d) 盐雾暴露 90 d



(e) 盐雾暴露 120 d



(f) 盐雾暴露 150 d



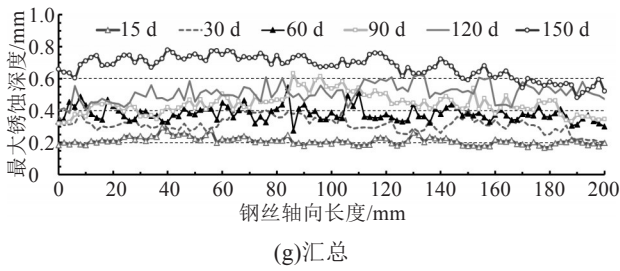


图5 不同盐雾暴露时间下最大锈蚀深度沿钢丝轴向分布

Fig. 5 Distribution of the maximum corrosion depth along the axis of steel wire under different salt spray exposure time

## 2.2 点蚀系数

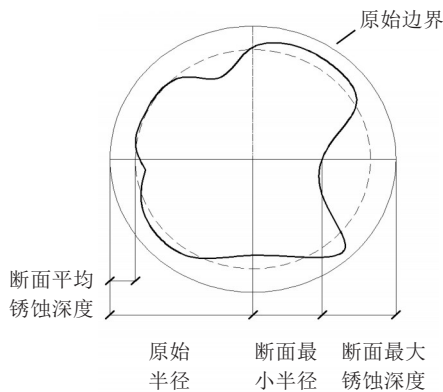
许多学者在研究钢丝局部锈蚀规律时, 仅研究较为严重的腐蚀区域, 而忽视其他蚀坑的情况。钢丝局部锈蚀的考察参数不应局限于最大点蚀深度和宽度, 还应考虑钢丝整体锈蚀的影响。因此, 本研究引入点蚀系数 $\alpha$ 和 $\beta$ , 表征钢丝局部腐蚀程度。通过本试验三维激光扫描得到数据, 对18根锈蚀钢丝共约1 800个钢丝截面进行计算分析, 研究了钢丝整体锈蚀情况, 并考虑了钢丝整体锈蚀深度对最大点蚀深度的影响, 点蚀系数计算式为:

$$\alpha = \frac{d_{l, \max}}{d_{l, \text{av}}} \quad (4)$$

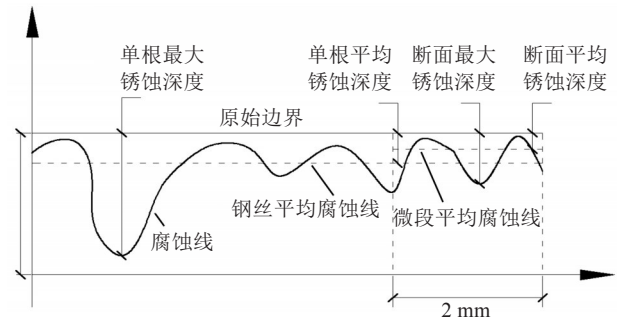
$$\beta = \frac{d_{m, \max}}{d_{m, \text{av}}} \quad (5)$$

式中:  $d_{l, \max}$  为整根钢丝最大锈蚀深度;  $d_{l, \text{av}}$  为整根钢丝平均锈蚀深度;  $d_{m, \max}$  为钢丝断面最大锈蚀深度;  $d_{m, \text{av}}$  为钢丝断面平均锈蚀深度。

各参数如图6所示。点蚀系数 $\alpha$ 和 $\beta$ 均不小于1。当 $\alpha$ 越大, 则钢丝轴向各截面坑深差别越大, 腐蚀程度越不均匀。同理, 当 $\beta=1$ 时, 钢丝在径向发生均匀腐蚀, 横截面直径变小, 仍近似保持圆形; 当 $\beta$ 越大, 则钢丝微段表面轮廓线越不规则。



(a) 径向锈蚀



(b) 轴向锈蚀

图6 锈蚀钢丝径向及轴向示意

Fig. 6 Schematic diagram of corroded steel wire in radial and axial direction

系数 $\alpha$ 随质量损失率变化曲线如图7所示。从图7可以看出, 随着钢丝质量损失率的增加, 点蚀系数 $\alpha$ 逐渐减小, 表明钢丝轴向锈蚀程度随锈蚀水平增大趋向均匀。

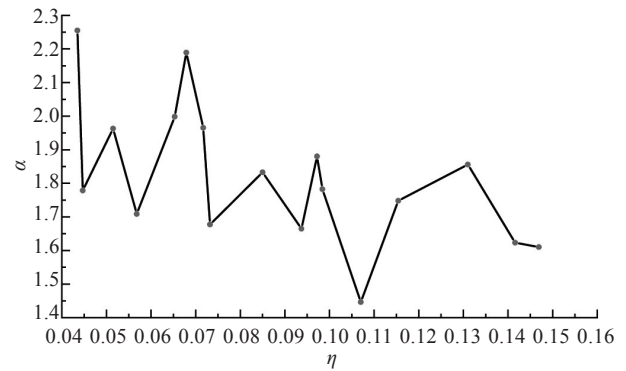
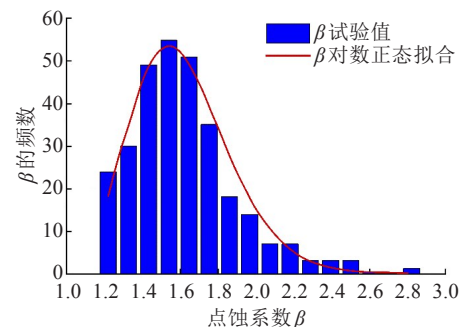


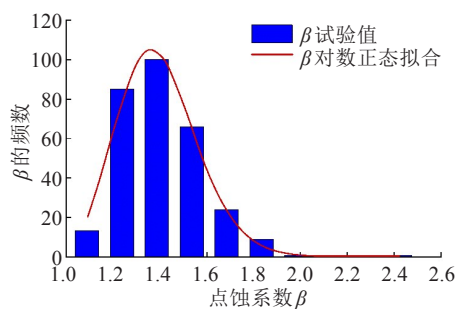
图7 点蚀系数 $\alpha$ 和质量损失率的关系

Fig. 7 Relationship between pitting coefficient  $\alpha$  and corrosion rate

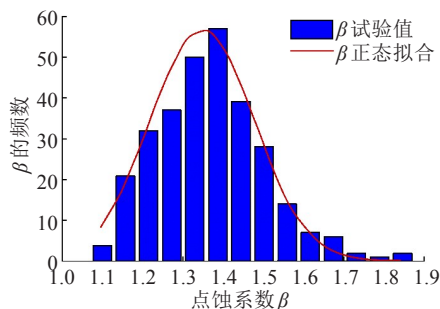
不同盐雾暴露时间下钢丝试件 $\beta$ 的频率直方图如图8所示。从图8可以看出, 盐雾环境下暴露60 d和120 d的钢丝的点蚀系数服从正态分布, 其余钢丝的均服从对数正态分布。随着钢丝锈蚀程度的加大,  $\beta$ 的期望值逐渐变小。表明: 钢丝径向的腐蚀程度也趋于均匀。



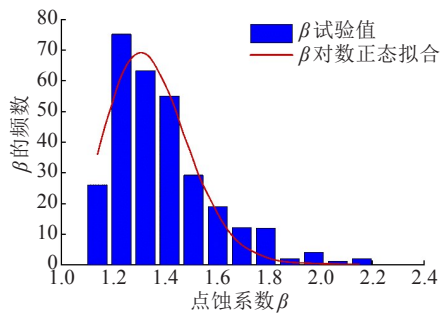
(a) 15 d



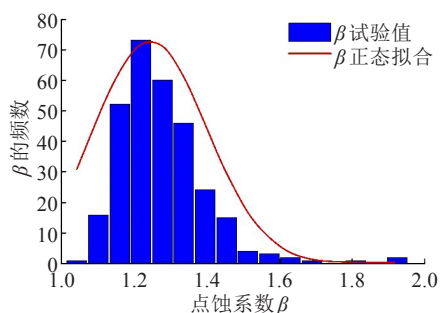
(b) 30 d



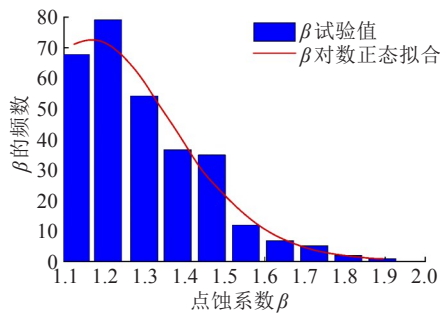
(c) 60 d



(d) 90 d



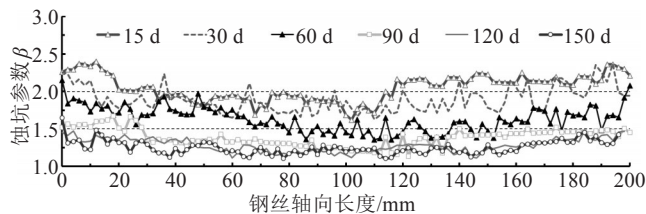
(e) 120 d



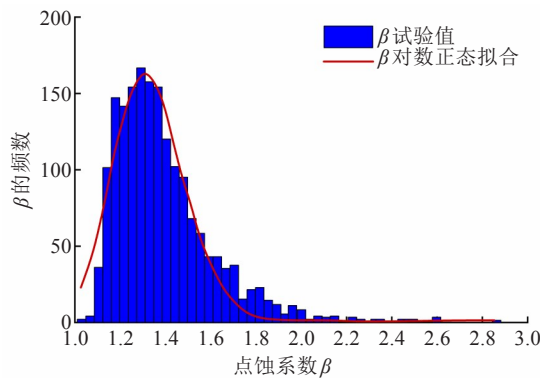
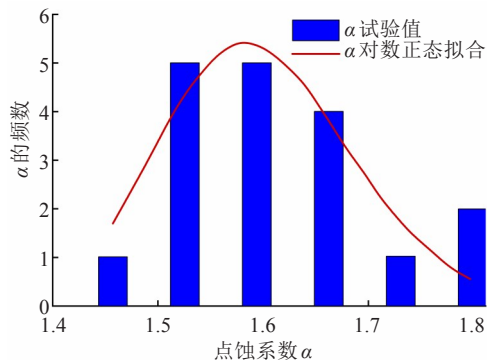
(f) 150 d

图8 参数 $\beta$ 的频率直方图和拟合曲线Fig. 8 Frequency histogram and fitting curve of parameter  $\beta$ 

不同暴露时间下各钢丝 $\beta$ 值沿钢丝轴向变化曲线如图9所示。从图9可以看出,在暴露时间较短时(15~30 d), $\beta$ 曲线相对平滑,随着暴露时间的增长(60~90 d),曲线波动范围逐渐变大,待暴露时间到达120 d时,曲线再次趋向平缓。表明:钢丝锈蚀初期,钢丝各微段的均匀锈蚀情况沿长度方向差异不明显。随着锈蚀的加剧,各微段锈蚀程度差异逐渐较大,当钢丝锈蚀到达120 d时,各微段锈蚀情况又趋于平缓。

图9 不同锈蚀程度钢丝点蚀系数 $\beta$ 沿长度方向变化趋势Fig. 9 Trend of pitting coefficient  $\beta$  of steel wire with different corrosion degrees along the length direction

统计18个 $\alpha$ 值和1 800个 $\beta$ 值,得到了其频率直方图和拟合的概率密度曲线,如图10所示。从图10可以看出, $\alpha$ 值主要分布在1.5~1.7,84.7%的 $\beta$ 值集中在1.1~1.6,经检验, $\alpha$ 和 $\beta$ 均服从对数正态分布。

图10  $\alpha$ 和 $\beta$ 的频率直方图Fig. 10 Frequency histogram of coefficients  $\alpha$  and  $\beta$

### 3 结论

对拆除的实桥吊索钢丝进行酸性盐雾加速腐蚀试验,基于三维激光扫描技术精确呈现了高强钢丝的锈蚀规律,引入点蚀系数描述钢丝不均匀锈蚀特征。得到结论为:

1) 暴露在盐雾环境中的镀锌高强钢丝,质量损失率随锈蚀时间的变化呈近似幂函数的规律变化。

2) 当高强钢丝在酸性盐雾环境中暴露时长达120 d时,其点蚀系数趋近于1,即径向和轴向最大蚀坑深度趋于平均蚀坑深度,钢丝锈蚀特征趋向于均匀锈蚀。

3) 引入点蚀系数 $\alpha$ 和 $\beta$ 来表征钢丝局部腐蚀程度,统计分析了18个 $\alpha$ 值和1 800个 $\beta$ 值,结果表明:高强钢丝的点蚀系数 $\alpha$ 和 $\beta$ 服从对数正态分布。

桥梁吊索中钢丝在自然环境下腐蚀过程复杂,本研究采用盐雾腐蚀模拟自然环境与实际仍存在一定差异,需要开展大量试验进一步验证。

### 参考文献(References):

- [1] 马亚飞,欧阳清波,汪国栋,等.基于等效初始裂纹尺寸的吊杆疲劳寿命预测[J].交通科学与工程,2020,36(2):52-57. (MA Yafei, OUYANG Qingbo, WANG Guodong, et al. Fatigue life prediction for suspender based on equivalent initial flaw size[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020,36(2):52-57.(in Chinese))
- [2] 陈治邦,鲁乃唯.斜拉索腐蚀损伤下斜拉桥体系可靠度研究[J].公路工程,2020,45(1):6-11.(CHEN Zhibang, LU Naiwei. System reliability evaluation of cable-stayed bridges considering cable corrosion[J]. Highway Engineering, 2020, 45(1): 6-11. (in Chinese))
- [3] NAKAMURA S I, SUZUMURA K, TARUI T. Mechanical properties and remaining strength of corroded bridge wires[J]. Structural Engineering International, 2004, 14 (1): 50-54.
- [4] NAKAMURA S I, SUZUMURA K. Hydrogen embrittlement and corrosion fatigue of corroded bridge wires[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(2):269-277.
- [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,2015,48(11):68-76. (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, 2015,48(11):68-76.(in Chinese))
- [6] 乔燕,李爱群,缪长青,等.腐蚀吊索钢丝力学性能退化研究[J].中外公路,2016,36(3):134-138. (QIAO Yan, LI Aiqun, MIAO Changqing, et al. Study on mechanical properties degradation of corroded cable wires[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(3): 134-138. (in Chinese))
- [7] 兰成明,杨海涛,白娜妮,等.腐蚀预应力钢绞线疲劳寿命概率模型[J].土木工程学报,2018,51(10):68-77. (LAN Chengming, YANG Haitao, BAI Nani, et al. Probabilistic model for fatigue life evaluation of corroded prestressing strand[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(10): 68-77.(in Chinese))
- [8] FURUYA K, KITAGAWA M, NAKAMURA S I, et al. Corrosion mechanism and protection methods for suspension bridge cables[J]. Structural Engineering International, 2000,10(3):189-193.
- [9] 张威.锈蚀钢筋表面特征的统计分析及其力学性能退化模型研究[D].西安:西安建筑科技大学,2013. (ZHANG Wei. The statistic analysis on surface feature and research on degradation model of mechanical properties of corroded reinforcing bars[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013. (in Chinese))
- [10] 王旭光,李翠.混凝土内钢绞线的蚀坑形状及分布特征[J].徐州工程学院学报(自然科学版),2010,25(2):37-44. (WANG Xuguang, LI Cui. Configuration and distributional characteristics of pits on steel strand in concrete[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2010, 25(2): 37-44. (in Chinese))
- [11] ZHANG W P, ZHOU B B, GU X L, et al. Probability distribution model for cross-sectional area of corroded reinforcing steel bars[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014,26(5):822-832.
- [12] 楼纪昂,孙福英,彭卫,等.不均匀锈蚀对高强钢丝应力集中影响的研究[J].建筑科学,2018,34(7):108-113. (LOU Ji'ang, SUN Fuying, PENG Wei, et al. Study on the effect of uneven corrosion on the stress concentration of high strength steel wire[J]. Building Science, 2018,34(7):108-113. (下转第61页))

- University, 2017.(in Chinese))
- [5] 王思洋. 并行盾构隧道下穿已有隧道的数值模拟及研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2020. (WANG Siyang. Numerical simulation and study of parallel shield tunnel under existing tunnel[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.(in Chinese))
- [6] 杨成永,马文辉,彭华,等. 地铁双线盾构近距下穿盾构隧道施工沉降控制[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(7): 91-98. (YANG Chengyong, MA Wenhui, PENG Hua, et al. Research on the settlement control of existing shield tunnels affected by construction of underneath dual shield tunnels[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(7): 91-98.(in Chinese))
- [7] 张海波,殷宗泽,朱俊高. 近距离叠交隧道盾构施工对老隧道影响的数值模拟[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 282-286. (ZHANG Haibo, YIN Zongze, ZHU Jungao. Numerical simulation of influence of new tunnel on short distance overlapped old tunnel during shield tunneling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(2): 282-286.(in Chinese))
- [8] AVGERINOS V, POTTS D M, STANDING J R. Numerical investigation of the effects of tunnelling on existing tunnels[J]. Géotechnique, 2017, 67(9): 808-822.
- [9] 肖果. 盾构下穿既有隧道扰动效应分析[J]. 公路与汽运, 2020(5): 134-139, 144. (XIAO Guo. Analysis of the disturbance effect of existing tunneling under shield tunneling [J]. Highways & Automotive Applications, 2020(5): 134-139, 144.(in Chinese))
- [10] 张孟喜,张靖,吴应明,等. 全风化岩层中双线盾构上穿邻近地铁隧道影响分析[J]. 土木工程学报, 2019, 52(9): 100-108. (ZHANG Mengxi, ZHANG Jing, WU Yingming, et al. Analysis of double-line shield tunnel over-crossing subway tunnel in completely weathered rock formation [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(9): 100-108. (in Chinese))
- [11] 廖少明,杨宇恒. 盾构上下夹穿运营地铁的变形控制与实测分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5): 812-818. (LIAO Shaoming, YANG Yuheng. Deformation analysis and control of a running subway crossed by upper-and lower-shield in succession[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(5): 812-818.(in Chinese))
- [12] 刘伟. 地铁区间重叠隧道近接施工数值分析[J]. 路基工程, 2019(3): 199-204. (LIU Wei. Numerical analysis on approaching construction of overlapping tunnel in metro sections[J]. Subgrade Engineering, 2019(3): 199-204. (in Chinese))
- [13] 范晓真,骆伟,王伊丽,等. 小净距上下重叠盾构隧道施工扰动数值分析[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(11): 108-114. (FAN Xiaozhen, LUO Yi, WANG Yili, et al. Numerical analysis of the construction disturbance of small-spacing overlapped shield tunnel[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(11): 108-114. (in Chinese))
- [14] 张海波. 软土地层小净距重叠隧道施工技术研究[J]. 山西建筑, 2019, 45(13): 119-120. (ZHANG Haibo. Study on construction technology of small distance overlapping tunnel in the soft soil[J]. Shanxi Architecture, 2019, 45 (13): 119-120.(in Chinese))
- [15] 奚灵智,高文杰,杨宇. 地铁重叠下穿既有隧道软土地基加固参数研究[J]. 建筑技术开发, 2020, 47(23): 158-161. (XI Lingzhi, GAO Wenjie, YANG Yu. Study on ground improvement of existing tunnel with overlapping underpass of subway[J]. Building Technology Development, 2020, 47(23): 158-161.(in Chinese))

(上接第39页)

- 113.(in Chinese))
- [13] 蒋超,吴冲,姜旭. 桥梁缆索高强钢丝均匀腐蚀及点蚀的规律[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(12): 1615-1621. (JIANG Chao, WU Chong, JIANG Xu. Experiment research on uniform corrosion and pitting corrosion of high-strength bridge wires[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2018, 46(12): 1615-1621. (in Chinese))
- [14] 武汉材料保护研究所. 人造气氛腐蚀试验盐雾试验: GB/T10125—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013. (Wuhan Research Institute Of Materials Protection. Corrosion tests in artificial atmospheres—Salt spray tests: GB/T 10125—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013. (in Chinese))