

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.055



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



附加锌丝对拉索腐蚀形貌及力学性能退化的影响

李利孝^{1,2}, 何易¹, 杨汝铃¹, 周海俊¹, 刘世增², 李强²

(1. 深圳大学土木与交通工程学院, 广东深圳 518060; 2. 南方电网有限责任公司超高压输电公司大理局, 云南大理 671014)

摘要:拉索是索承桥梁的主要传力构件, 腐蚀严重时将威胁桥梁结构的安全性和耐久性。对新型附加锌丝拉索开展人工加速腐蚀、形貌三维扫描和力学性能测试, 探究附加锌丝对拉索腐蚀扩展特征及力学性能退化的影响机制。制备含锌丝和不含锌丝(对照组)的高强钢丝拉索试件, 通过在护套设置环形开口模拟破损情况, 采用喷滴方式进行 4、8、12 周人工加速腐蚀; 采用华郎-3DX+非接触式扫描仪构建拉索点云模型, 分析锌丝对高强钢丝腐蚀扩展的影响规律; 采用 MTS 试验机对不同锈蚀度高强钢丝进行静力拉伸, 构建锈蚀高强钢丝截面损失率与力学性能的关联模型, 并评估拉索承载性能。结果表明: 加速腐蚀 4、8、12 周后, 附加锌丝拉索护套开口处钢丝最大截面损失率均值较无锌丝拉索分别减小 47.14%、62.68%、38.70%; 护套开口处钢丝极限强度均值分别提高 0.17%、6.12%、5.55%, 屈服强度均值分别提高 -0.31%、8.54%、6.24%, 拉索剩余承载力分别提高 0.16%、5.41%、4.83%。

关键词: 锌丝保护; 高强钢丝拉索; 人工加速腐蚀; 力学性能; 腐蚀形貌

中图分类号: U443.38 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)03-0196-10

Influence of additional zinc wire on corrosion morphology and degradation of mechanical properties of bridge cable

LI Lixiao^{1,2}, HE Yi¹, YANG Ruling¹, ZHOU Haijun¹, LIU Shizeng², LI Qiang²

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, P. R. China;

2. Dali Bureau of EHV Power Transmission Company, China Southern Power Grid, Dali 671014, Yunnan, P. R. China)

Abstract: Cables are the main force-transfer components of cable-stay bridges, and the safety and durability of the bridges will be threatened when the cables are seriously corroded. In this study, artificial accelerated corrosion, three-dimensional topography scanning and mechanical properties testing were carried out to explore the mechanism of the influence of additional zinc wire on corrosion expansion characteristics and mechanical properties degradation of the cables. Firstly, high-strength steel wire cable specimens with zinc wire and without zinc wire (control group) were prepared, and the artificial accelerated corrosion was carried out for 4, 8, and 12

收稿日期: 2024-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(U2005216, 52178491); 深圳市自然科学基金(JCYJ20210324093809023)

作者简介: 李利孝(1984-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事结构抗风和防灾减灾研究, E-mail: lilixiao@szu.edu.cn。

周海俊(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: haijun@szu.edu.cn。

Received: 2024-02-27

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. U2005216, 52178491); Shenzhen Natural Science Foundation Upper-level Project (No. JCYJ20210324093809023)

Author brief: LI Lixiao (1984-), associate professor, doctoral supervisor, main research interests: structural wind resistance and disaster prevention and mitigation, E-mail: lilixiao@szu.edu.cn.

ZHOU Haijun (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: haijun@szu.edu.cn.

weeks by spraying droplets through the annular openings set up in the sheaths to simulate the damage of the sheaths. Secondly, the Holon 3DX+ non-contact scanner was used to construct the point cloud model of the cable, and the influence of zinc wire on the corrosion expansion of high-strength steel wires was analyzed. Finally, the MTS testing machine was utilized to conduct static tensile tests on high-strength steel wires with varying degrees of corrosion. A correlation model between the cross section loss rate and the mechanical properties of the corroded high-strength steel wires was established, and the load-bearing performance of the cable was evaluated. The results show that after 4, 8, and 12 weeks of accelerated corrosion, the average values of the maximum section loss rate of the steel wire at the sheath opening of the zinc-added wires were reduced by 47.14%, 62.68%, and 38.70%, respectively, compared with those of the zinc-free wires; the average values of the ultimate strength of the steel wires at the sheath openings and the average values of the yield strength were increased compared with those of the cables without zinc wire by 0.17%, 6.12%, 5.55%, and -0.31%, 8.54%, and 6.24%, respectively; and the residual load carrying capacity of the cable was increased by 0.16%, 5.41%, and 4.83%, respectively.

Keywords: zinc wire protection; high strength steel wire cable; artificially accelerated corrosion; mechanical properties; corrosion morphology

交通基础设施的安全性和耐久性是互联互通交通体系建设的重要保障。大跨度桥梁(尤其是大跨度斜拉桥和悬索桥)结构是现代化交通体系的核心,承载着城市之间、区域之间硬联通的重任^[1]。拉(缆)索是大跨度索承桥梁结构最主要的传力构件,对该类桥梁的安全性起着至关重要的作用。然而,在运输、施工以及正常使用期间,一旦拉(缆)索高密度聚乙烯(high density polyethylene, HDPE)护套破损,外部环境中的腐蚀介质就会侵蚀到索体内部,导致高强钢丝发生腐蚀,造成拉(缆)索承载性能退化,严重时将影响索承桥梁的安全性^[2]。

鉴于此,学者们针对拉(缆)索腐蚀损伤后的力学性能开展了大量试验研究。李晓章等^[3]针对服役旧索内的高强钢丝进行人工加速腐蚀试验,并利用有限元软件探究了蚀坑对钢丝应力集中的影响,发现腐蚀对钢丝的疲劳寿命影响很大。Bakker等^[4]进行了荷载与盐雾腐蚀环境耦合下的拉索人工加速腐蚀试验,并分析得到了腐蚀钢丝在环境与荷载耦合下的抗拉强度、延伸率、失重率。Molnár等^[5]对整体绳索和单根钢丝进行了64 d盐溶液加速腐蚀试验,并对其力学性能退化进行评估,发现腐蚀导致力学性能逐渐降低。韩依璇等^[6]对锈蚀高强钢丝进行研究发现,不同腐蚀程度下高强钢丝的极限应变与蚀坑大小和截面损失率存在定量关系。同时,学者们针对拉(缆)索的疲劳问题也进行了大量研究。Nakamura等^[7]对3种不同锈蚀程度的锈蚀镀锌钢丝进行了疲劳试验,结果表明,严重的腐蚀会在更集中的区域产生更深的蚀坑,且凹坑形状越尖锐,应力集中越大,此为疲劳强度降低的主要原因。Liu

等^[8]对不同腐蚀和加载条件下的腐蚀钢丝进行了腐蚀疲劳试验,结果表明,静态和疲劳应力导致腐蚀加速。Yao等^[9]采用有限元分析和钢丝腐蚀疲劳模拟试验对其损伤和失效机理进行了理论分析,结果表明,试样发生腐蚀疲劳损伤后,断裂伸长率有所下降,与未锈蚀试样相比,约下降了40%,试样发生了脆性断裂。针对腐蚀形貌对高强钢丝力学性的显著影响,现有研究大多聚焦于钢丝腐蚀形貌的分析。Li等^[10]分别采用称重法、游标卡尺测量法、排水法、三维扫描法和XCT法对钢筋的锈蚀参数进行测量,经比较分析发现,三维扫描法和XCT法测得的钢筋锈蚀参数数据匹配良好,三维扫描法更适合于锈蚀钢筋的锈蚀参数测量。Xu等^[11]提出了一种基于图像处理的高强钢丝表面蚀坑可视化建模方法,基于3D表面测量方法,对高强钢丝表面蚀坑的腐蚀形态进行测量,蚀坑的识别采用二值图像,用椭圆对蚀坑近似进行精确模拟,并对蚀坑的几何形态参数进行计算和统计分析。Jiang等^[12]对腐蚀高强钢丝进行了三维测量和疲劳试验,结果表明,试验中的点蚀深度服从正态分布。Chen等^[13]建立了外层钢丝被腐蚀的钢绞线空间参数方程,考虑腐蚀凹坑对表面形态、分布形式和弹塑性的影响,构建了高精度模型,分析得出:腐蚀导致应力集中,增加了应力、应变和接触压力,降低了轴向承载能力。Li等^[14]研究服役桥梁中钢丝表面腐蚀坑的特征参数发现,最大凹坑深度主导钢丝强度,且腐蚀程度越高,深椭圆形凹坑数量越少,沟槽形和鞍形凹坑数量越多。Chen等^[15]提出并验证了半平行线股均匀腐蚀深度的计算方法以及腐蚀深度与暴露时间之间关

系的三参数幂函数,并建立了大气暴露试验与标准实验室加速腐蚀试验之间的等效转换关系。

此外,针对拉(缆)索腐蚀防护,学者们也进行了大量探索,拉索的腐蚀防护主要包括:高强钢丝表面涂镀层处理;高强钢丝外使用护套;拉索内添加填充剂以及增加缠绕带^[16-17]。从拉索防腐体系的发展历史来看,最初采用封闭索防护,拉索面层采用Z字形线互相嵌合,防水性好但制造工艺复杂,经济成本较高;后来尝试采用塑料罩套或钢管、铝管压注水泥浆或防蚀油脂等填充剂,但由于填充工艺复杂且不能保证填充效果,后期拉索直接使用热挤HDPE护套进行防护。但拉索中护套的使用也存在一些问题,如护套厚度局部不均匀、护套热挤工艺欠佳造成索股变形、护套长期在应力状态下工作加速老化、护套内进水等^[16]。而当拉索护套开裂后,雨水等腐蚀因素进入护套内部,最初腐蚀时,钢丝镀锌层可起到电化学防护效果,但镀锌层与铁基体的中间合金层是硬脆的Fe-Zn相层,在长期应力条件下,镀层界面容易产生裂纹等缺陷^[18]。Li等^[19]提出在雨水环境下利用冲击电流阴极保护(ICCP)方法保护桥梁缆索高强度钢丝,通过模拟动态雨水环境发现,ICCP能显著减小腐蚀坑的数量和大小,有效降低腐蚀速率,但在不同流速下,保护效率略有差异。Yao等^[20]揭示了桥梁缆索ICCP的腐蚀保护机理,并设计开发了一种基于ICCP的桥梁缆索保护装置,通过加速腐蚀试验发现,较负电压的冲击电流提高了防腐效率,但过负电压可能导致氢脆。

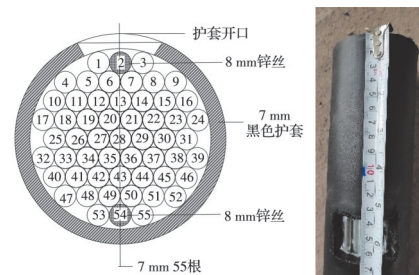
综上,当前针对拉(缆)索腐蚀劣化的研究主要集中于拉(缆)索内高强钢丝锈蚀后其力学性能的退化规律方面,针对腐蚀防护,尤其是锌丝保护方面的研究相对较少。本文主要探究附加锌丝对大跨度桥梁缆索腐蚀形貌及力学性能的影响规律。分别制作含有两根锌丝及不含锌丝的两组拉索,然后对其护套进行开口,以模拟工程实践中的护套损坏,并开展人工加速腐蚀试验,根据拉索腐蚀形貌进行腐蚀评级及腐蚀云图制作;对锈蚀钢丝进行三维扫描,得到其点云模型;最后对锈蚀钢丝进行静力拉伸试验,分析锈蚀高强钢丝截面损失率与其力学性能之间的关系,并对比两组拉索损伤后的承载力,以探究锌丝在拉索中的保护效果。

1 人工加速腐蚀试验

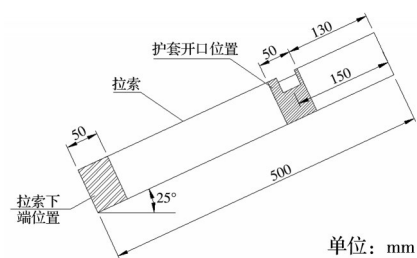
试验拉索采用《斜拉桥用热挤聚乙烯高强钢丝拉索》(GB/T 18365—2018)^[21]中PESC-7-55规格拉索,由55根直径为7 mm的镀锌高强钢丝组成,保护

套采用7 mm厚黑色HDPE护套,拉索长度为50 cm,两端不做处理。在制作拉索时将其中两根镀锌钢丝替换成直径为8 mm的锌丝,如图1(a)所示。试验所用拉索由柳州欧维姆机械股份有限公司加工制备。人工加速腐蚀试验的腐蚀溶液采用《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》(GB/T 10125—2021)^[22]中铜加速乙酸盐雾试验(CASS)所用腐蚀溶液,即采用纯度 $\geq 99.5\%$ 的固体NaCl晶体,利用去离子水配制浓度为 (50 ± 5) g/L的NaCl溶液,随后加入适量无水乙酸,用pH检测仪测量pH值,使溶液pH值稳定在3.1~3.3之间,最后加入氯化铜($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),使其浓度达到 (0.26 ± 0.02) g/L。

切除拉索护套人工环形开口,以模拟实际拉索护套破损情况,开口中心位置距离拉索上端150 mm,开口尺寸为横向宽度50 mm(护套外轮廓弧长),纵向宽度30 mm。同时,为模拟实际工程中斜拉桥最外层索的倾斜角度,拉索腐蚀时采用 25° 倾角放置,如图1(b)所示。



(a) 拉索截面及开口尺寸示意图



(b) 拉索放置示意图

图1 拉索截面及放置图

Fig. 1 Cross section and placement diagram of the cable

试件共分为两组,每组3根拉索(其中1根为备用拉索)。A组为对照组,拉索中未添加锌丝;B组为试验组,将拉索截面顶部和底部2根高强钢丝替换为锌丝,如图1(a)所示。采用人工喷洒腐蚀溶液的方式对两组拉索试件分别进行4、8、12周的人工加速腐蚀,每次喷洒时间为2 s,时间间隔为40 min,喷洒速率为0.1 s/mL。每组试件的编号为M-i,其

中 M 为拉索类型, i 为拉索腐蚀时间, 单位为周, 试验工况如表 1 所示。

表 1 人工加速腐蚀试验工况表

Table 1 Working conditions of artificial accelerated corrosion test

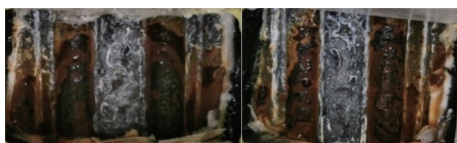
试件编号	腐蚀时长/周	含锌丝
A-4	4	否
A-8	8	否
A-12	12	否
B-4	4	是
B-8	8	是
B-12	12	是

2 锈蚀形貌分析

图 2 所示为 A、B 两组试件在腐蚀 4 周后截面开口处的锈蚀形貌。由图 2 可见, 两组拉索护套破损处高强钢丝腐蚀均较严重, 产生了大量红褐色锈蚀产物。这是由于锈蚀产物的堆积堵住了钢丝与护套间的缝隙, 导致腐蚀溶液部分积水, 加剧了钢丝的腐蚀。A 组拉索开口处钢丝出现大面积红锈和蚀坑; 而 B 组拉索开口处钢丝上端尚存在部分镀锌层。证明锌丝对其周围钢丝具有一定保护效果。



(a) A 组拉索



(b) B 组拉索

图 2 护套开口处钢丝的腐蚀形貌

Fig. 2 Corrosion morphology of steel wires at the opening of the sheath

将拉索取出清理后, 可见其锈蚀表面形貌, 如图 3 所示。从图 3 可以看出, 钢丝腐蚀段与未腐蚀段有较清晰的锈蚀线, 锈蚀线反映了腐蚀溶液从护套开口侵入后在拉索截面方向的侵入轨迹。腐蚀 4 周后, 锈蚀线与拉索长度方向呈 $30^\circ \sim 40^\circ$ 夹角, 8 周后, 夹角为 $45^\circ \sim 50^\circ$, 12 周后夹角增大至 60° 。这是由于腐蚀初期护套开口处钢丝锈蚀产物较少, 腐蚀溶液易沿拉索长度方向流出, 从钢丝间缝隙渗透进拉索内部的腐蚀溶液较少; 随着腐蚀时间的增加, 钢丝和护套间的空隙逐渐被堆积的锈蚀产物堵塞,

腐蚀溶液逐渐沿重力方向向拉索内部和两侧渗透, 最后, 锈蚀线与重力方向基本一致。

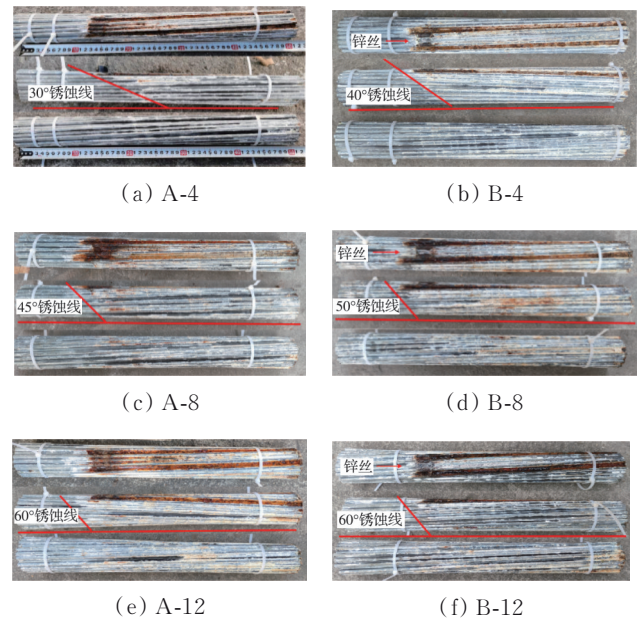


图 3 锈蚀拉索上、侧、下部锈蚀表面形貌

Fig. 3 Corroded surface morphology of the upper, side and lower parts of corroded cables

为探究拉索纵向与横向截面的腐蚀扩散特征, 将每根高强钢丝的横截面划分成 4 个分区, 同时将沿钢丝长度方向每 1 cm 设为一个小节, 一根钢丝共设 50 个小节、200 个分区, 如图 4 所示。根据文献 [23] 提出的锈蚀高强钢丝分类等级表, 对每根钢丝各分区进行腐蚀定级。

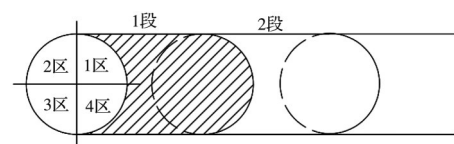
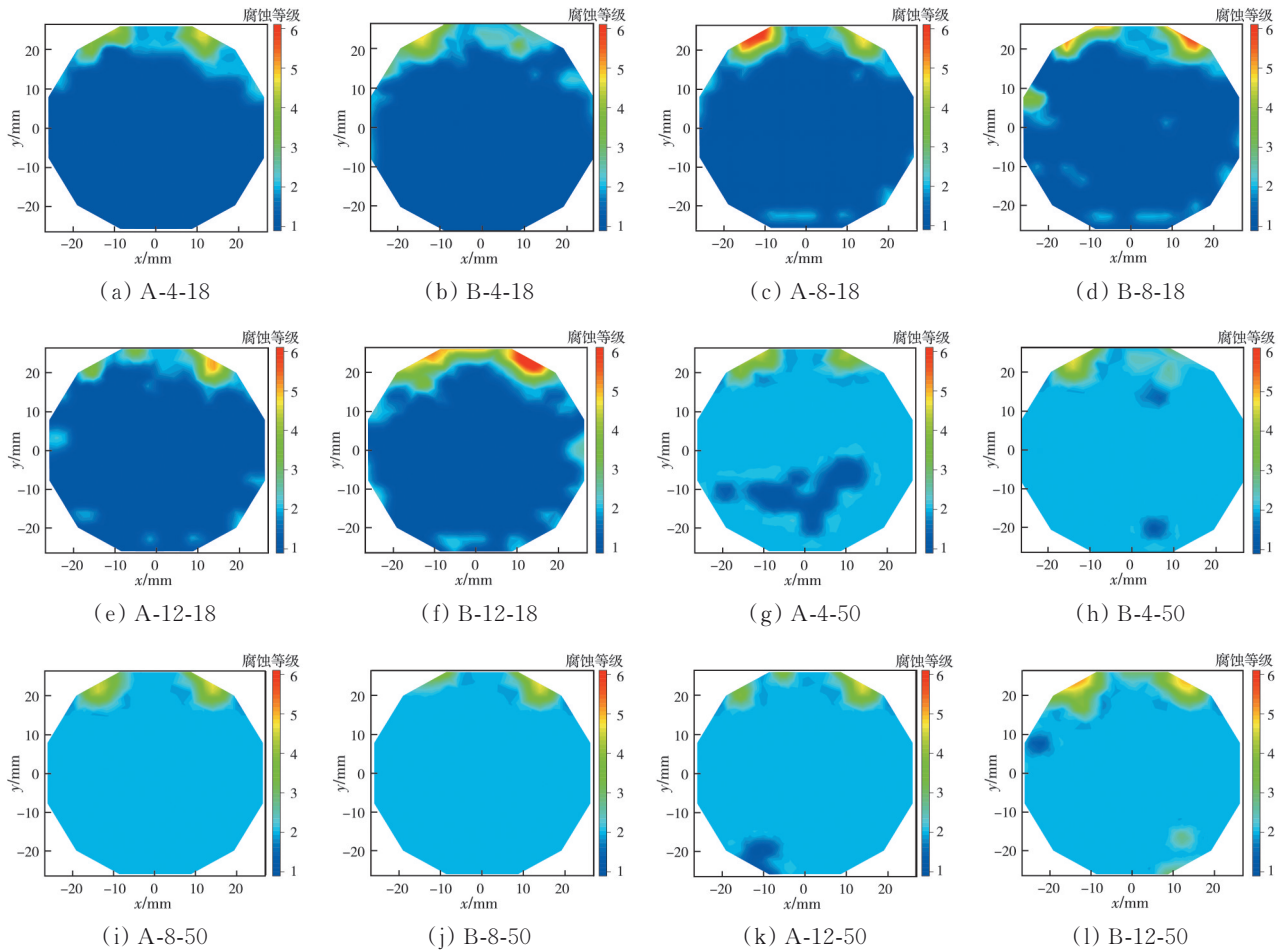


图 4 锈蚀高强钢丝的节段分区示意图

Fig. 4 Schematic diagram of segment division of corroded high-strength steel wire

图 5 为 A、B 两组拉索在护套开口处和尾端的高强钢丝腐蚀等级云图。由图 5 可见, 开口处与腐蚀液直接接触的高强钢丝表面腐蚀最严重, 腐蚀从外围钢丝向内扩展; 随着腐蚀时间的增加, 同一截面处腐蚀沿拉索横截面方向向内扩展, 腐蚀等级逐步增加。对比 A、B 两组拉索发现, 同一截面处, 有锌丝保护的钢丝腐蚀程度低于没有锌丝保护的。拉索尾端未做处理, 能部分反映实际拉索下锚固端封锚后的拉索锈蚀情况。对比 A、B 两组拉索发现, 拉索尾端均未出现较为严重的钢丝锈蚀, 锌丝对该处拉索的腐蚀未产生明显影响。



注:截面编号为A-i-j,其中*i*为腐蚀周数,*j*为*j*-1至*j*的单位节段

图 5 不同腐蚀时间以及不同横截面腐蚀云图对比

Fig. 5 Comparison of corrosion contours at different corrosion times and cross sections

3 锈蚀高强钢丝三维扫描

3.1 试验方法及工况

将腐蚀评级后的钢丝酸洗后,用华郎-3DX+非接触式扫描仪(图6)对钢丝形貌扫描。首先用新美达DPT-5着色渗透探伤剂对酸洗后的高强钢丝进行着色,该设备的测量精度为±0.01 mm,平均采样点间距为0.06~0.47 mm。扫描区域为距离拉索上端13~18 cm的5 cm长度区域,其余区域假定无锈蚀发生,进而得到锈蚀高强钢丝的点云模型。A组

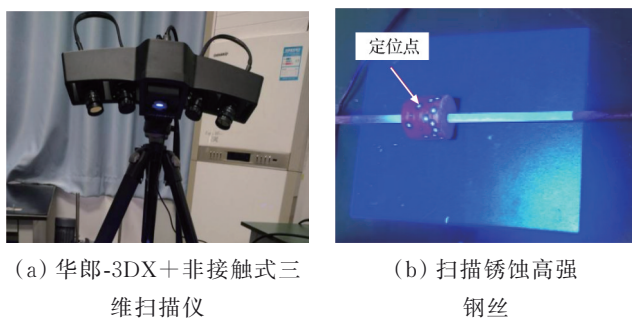


图 6 三维扫描仪器及扫描过程

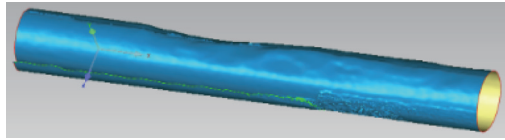
Fig. 6 3D scanning instrument and scanning process

工况每根拉索取1~5号和8、9号钢丝,B组工况取1号、3~5号和8、9号钢丝,这部分钢丝都暴露在护套开口处,与腐蚀溶液直接接触,腐蚀最为严重。

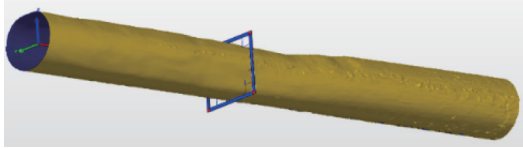
3.2 锈蚀高强钢丝截面损失分析

使用Geomagic Wrap软件对三维扫描得到的PLY文件进行预处理,随后使用三维点云处理软件Polyworks对设好坐标系的扫描数据进行处理。沿钢丝轴向截取平面,从而获得钢丝表面的轮廓数据,截取精度为0.1 mm,如图7所示。每根高强钢丝的扫描长度为50 mm,共获取了501个截面,且每个截面约有400~420个数据点,点的密度与扫描精度以及钢丝的外表面尺寸有关。为方便后续分析,采用线性插值将每个截面的数据点统一取为420个,即每根钢丝有420×501个坐标数据点。图8所示是编号为A8-2、最大截面损失率为13.5079%的高强钢丝经三维扫描后得到的某截面外表面轮廓。由图8可见,截面面积损失明显,且锈蚀主要发生在钢丝的一侧。

采用格林公式计算钢丝剩余截面面积后,计算锈蚀高强钢丝的最大截面损失率,计算式为



(a) 建立的坐标系



(b) 截取的钢丝截面

图 7 三维扫描点云数据处理

Fig. 7 3D scanning point cloud data processing

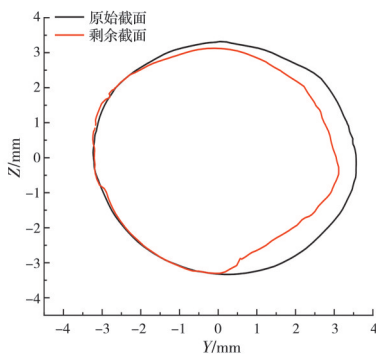


图 8 钢丝剩余截面

Fig. 8 Remaining cross section of steel wire

$$\xi_s = \frac{A_0 - A_{\min}}{A_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: A_0 为镀锌高强钢丝未腐蚀的截面面积, mm^2 ; A_{\min} 为锈蚀高强钢丝最小截面面积, mm^2 ; ξ_s 为锈蚀高强钢丝最大截面损失率,%。

计算得到每根锈蚀高强钢丝扫描的 501 个截面的最小截面面积,利用式(1)计算得到最大截面损失率,根据统计数据绘制锈蚀钢丝最大截面损失率随腐蚀时间变化的误差图,如图 9 所示。由图 9 可见,随着腐蚀时间的增加,HDPE 护套开口处的钢丝最小截面面积逐渐减小,截面损失率逐渐增大,锈蚀程度加深。B 组拉索表层钢丝最大截面损失率比 A 组钢丝更低,说明 HDPE 护套开口处锌丝对拉索锈蚀起到保护作用,延缓了钢丝的锈蚀,在腐蚀时间达到 4、8、12 周后,B 组护套开口处钢丝最小截面面积均值较 A 组提高了 3.11%、7.62%、5.59%,B 组护套开口处钢丝最大截面损失率均值较 A 组减小了 47.14%、62.68%、38.70%。这主要是由于在腐蚀初期(0~8 周)未添加锌丝的对照组拉索腐蚀速率相对稳定,导致拉索表层钢丝的截面损失率和质量损失率持续增加较快;但在腐蚀 8 周后,由于腐蚀介质在钢丝表面形成了新的钝化膜,导致腐蚀速率下降,即截面损失率和质量损失率增加变缓;而

对于添加锌丝的拉索,在腐蚀初期,锌丝对与其紧密接触的钢丝具有较好的保护效果,使得腐蚀速率较低,表层钢丝的截面损失率和质量损失率均较小。然而随着腐蚀时间的增加,锌丝表面的腐蚀产物使得锌丝与钢丝的接触减弱,进而钢丝的腐蚀速率略有加强,导致高强钢丝的截面损失率与质量损失率增加较快。

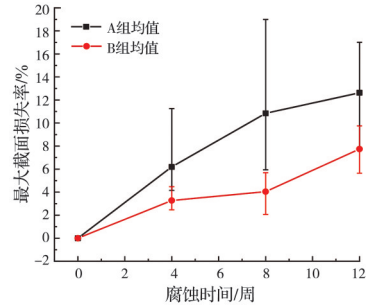


图 9 锈蚀钢丝最大截面损失率随腐蚀时间的变化

Fig. 9 Change in maximum cross-sectional loss rate of corroded steel wires with corrosion time

4 非均匀锈蚀高强钢丝静力拉伸试验

4.1 试验装置及方法

采用 MTS300 拉力试验机对 4 根未腐蚀镀锌高强钢丝和 39 根不同腐蚀情况的高强钢丝进行静力拉伸试验,高强钢丝长度为 500 mm,试验机两端夹口各夹 75 mm,高强钢丝有效长度为 350 mm,加载速率参照《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[24]的规定,设为 2 mm/min,试验时安装引伸计和采集箱实时采集数据,引伸计的标距为 80 mm,数据采集频率为 10 Hz。

4.2 应力-应变曲线

对高强钢丝进行力学试验,将试验所得荷载值除以高强钢丝原始截面积 38.484 5 mm^2 ,将引伸计所得位移值除以引伸计标距 80 mm,得到高强钢丝静力拉伸应力-应变曲线,如图 10 所示。由图 10 可见,随着腐蚀时间的增加,高强钢丝极限应力呈逐渐减小趋势;随着蚀坑扩展、截面损失的增加,高强

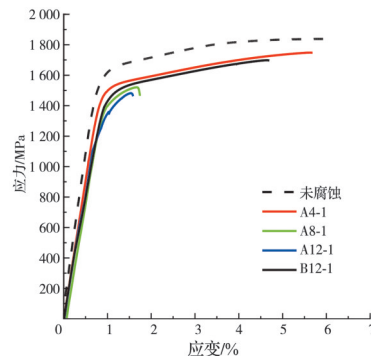


图 10 应力-应变对比图

Fig. 10 Comparison of stress-strain curves

钢丝的强化阶段逐渐缩短,极限应变急剧减小,材料的脆性显著增加。对比试件 A12-1 和 B12-1 高强钢丝的应力-应变曲线可见,锌丝的保护作用可有效减少开口处钢丝的腐蚀。经过 12 周腐蚀后, A 组 1 号钢丝的极限应力相较未腐蚀试件下降了 19.09%, B 组 1 号钢丝则仅下降了 7.28%, 二者极限应变分别下降了 73.64%、21.98%。

4.3 非均匀锈蚀高强钢丝的力学性能

拉索内锈蚀较严重的钢丝主要分布在上两层,因此,选取第 1 层钢丝以及第 2 层 4、5、8、9 号钢丝进行静载试验。取应力-应变曲线所对应的极限应力值作为极限强度,取塑性应变为 0.2% 时所对应应力-应变曲线中的应力值作为屈服强度,得到高强钢丝极限强度、屈服强度与最大截面损失率的变化关系,如图 11 和图 12 所示。由图 11、图 12 可见,随着最大截面损失率的增加,屈服强度与极限强度均呈逐渐降低趋势。对极限强度和屈服强度与最大截面损失率的变化关系进行最小二乘拟合,其 R^2 分别为 0.798 9、0.698 3。极限强度 σ_b 与最大截面损失率的关系如式(2)所示;屈服强度 σ_s 与最大截面损失率的关系如式(3)所示。

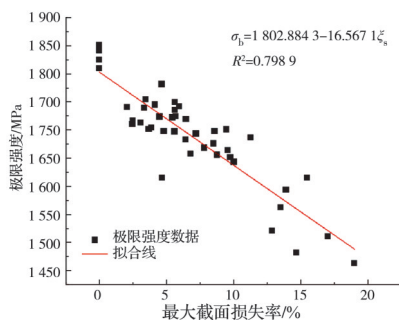


图 11 极限强度-最大截面损失率散点图

Fig. 11 Scatter plot of ultimate strength vs. maximum cross-sectional loss rate

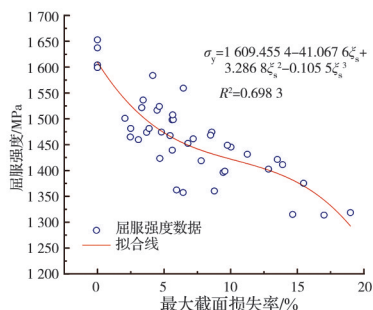


图 12 屈服强度-最大截面损失率散点图

Fig. 12 Scatter plot of yield strength vs. maximum cross-sectional loss rate

$$\sigma_b = 1812.5740 - 26.3317\xi_s + 1.6697\xi_s^2 \quad (2)$$

$$\sigma_s = 1609.4554 - 41.0676\xi_s + 3.2868\xi_s^2 - 0.1055\xi_s^3 \quad (3)$$

根据应力-应变曲线计算得到极限强度和屈服强度,而在试验中应力采用未锈蚀高强钢丝的截面面积进行计算,故按照实际最小截面面积计算得到的非均匀锈蚀高强钢丝实际极限强度如图 13 所示。可以看出,非均匀锈蚀高强钢丝实际极限强度基本不随截面面积的减小而降低,其均值为 1814.16 MPa,与未锈蚀高强钢丝的极限强度十分接近。

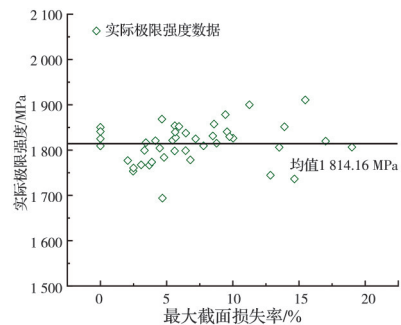


图 13 实际极限强度-最大截面损失率散点图

Fig. 13 Scatter plot of actual ultimate strength vs. maximum cross-sectional loss rate

根据《桥梁缆索用热镀锌或锌铝合金钢丝》(GB/T 17101—2019)^[25]测量锈蚀高强钢丝断后伸长率,试样的标准长度为 250 mm,故在试验前从试验机两端夹口处按 250 mm 进行多段划线标记,加载后对带有断口的部分进行测量,并按式(4)计算断后伸长率。

$$\eta = \frac{L - 250}{250} \times 100\% \quad (4)$$

式中: η 为断后伸长率,%; L 为测量长度,mm。

断后伸长率的统计如图 14 所示,由图 14 可见,随着最大截面损失率的增加,断后伸长率呈逐渐降低趋势。对断后伸长率-最大截面损失率散点图采用线性最小二乘法拟合,得到断后伸长率与最大截面损失率的关系式,见式(5)。

$$\eta = 1.1771 + 4.4961 \times 0.9078\xi_s \quad (5)$$

取弹性阶段应变 0%~0.1%^[26]处对应的应力-应变曲线斜率作为弹性模量,取应力-应变曲线对应的应变最大值作为极限应变,图 15 和图 16 分别为弹性模量和极限应变随最大截面损失率的关系。由图 15 和图 16 可见,随着腐蚀的增加,弹性模量基本不发生变化,其值基本符合规范对高强钢丝弹性模量的要求范围,即 190~210 GPa 之间;随着最大截面损失率的增加,极限应变呈逐渐减小趋势,通过线性拟合得到极限应变与最大截面损失率的变化关系,如式(6)所示。

$$\epsilon_u = 6.3515 - 0.2695\xi_s \quad (6)$$

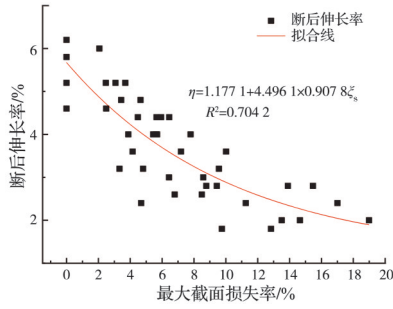


图 14 断后伸长率-最大截面损失率散点图

Fig. 14 Scatter plot of elongation after fracture vs. maximum cross-sectional loss rate

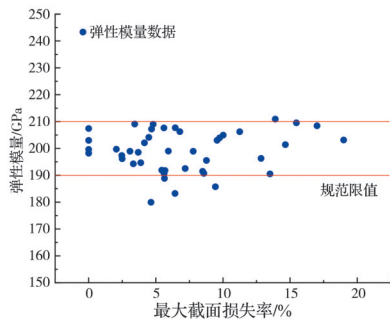


图 15 弹性模量-最大截面损失率散点图

Fig. 15 Scatter plot of elastic modulus vs. maximum cross-sectional loss rate

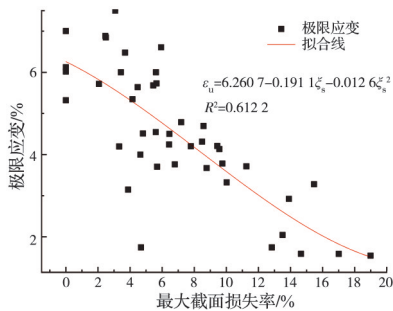


图 16 极限应变-最大截面损失率散点图

Fig. 16 Scatter plot of ultimate strain vs. maximum cross-sectional loss rate

5 锈蚀拉索剩余承载力分析

图 17、图 18 为 A、B 两组拉索锈蚀高强钢丝极限强度的平均值和屈服强度平均值随腐蚀时间的变化关系。可以发现,随着腐蚀时间的增加,添加锌丝的 B 组拉索高强钢丝极限强度和屈服强度平均值下降速度明显低于 A 组拉索高强钢丝。A、B 两组锈蚀高强钢丝平均极限强度、平均屈服强度增幅随腐蚀时间的变化如图 19 所示,人工加速腐蚀 4、8、12 周后,B 组护套开口处钢丝极限强度均值较 A 组高 0.17%、6.12%、5.55%,屈服强度均值较 A 组高 -0.31%、8.54%、6.24%。

拉索承载力由拉索内部高强钢丝提供,高强钢丝的力学性能直接决定了拉索的承载性能。实际

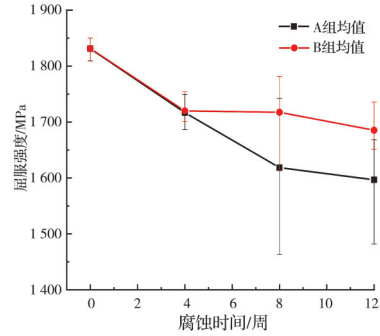


图 17 锈蚀高强钢丝的极限强度-腐蚀时间

Fig. 17 Ultimate strength of corroded high-strength steel wire vs. corrosion time

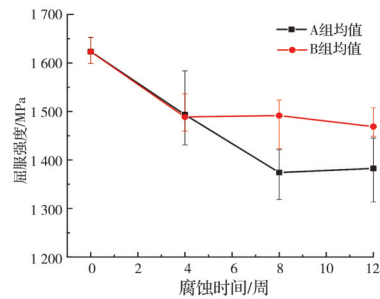


图 18 锈蚀高强钢丝的屈服强度-腐蚀时间

Fig. 18 Yield strength of corroded high-strength steel wire vs. corrosion time

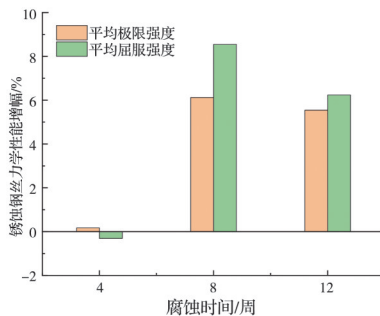


图 19 锈蚀高强钢丝的力学性能增幅

Fig. 19 Increase in mechanical properties of corroded high-strength steel wire

拉索内部的高强钢丝通常处于均匀受力状态,当锈蚀造成其中一根高强钢丝断裂时,直接影响整根拉索的安全性。因此,锈蚀拉索的剩余承载力可以拉索内极限强度最低的钢丝强度为基准。但由于锈蚀具有随机性,导致拉索内最弱钢丝具有很大随机性,因此,以护套开口处锈蚀高强钢丝平均极限强度为基准。锈蚀拉索剩余承载力计算式为

$$P_b = n \times A_0 \times \bar{\sigma}_u \tag{7}$$

式中: P_b 为拉索剩余承载力,kN; $\bar{\sigma}_u$ 为 HDPE 护套开口处锈蚀高强钢丝平均极限强度,MPa; n 为拉索内高强钢丝数量,A组为 55,B组为 53。

由于锌丝强度较低,其极限抗拉强度一般为 400 MPa,故按式(7)计算拉索承载力时不考虑锌丝

的抗拉贡献。图20为采用式(7)计算得到的人工加速腐蚀下拉索剩余承载力随腐蚀时间的变化规律。由图20可见,在人工加速腐蚀的初期(0~4周),由于B组拉索中2根高强钢丝被替换成锌丝,其承载力低于A组拉索;随着腐蚀的继续进行,从第8周开始,B组拉索的剩余承载力高于A组,第12周时,B组拉索剩余承载力相比于A组高1.71%。

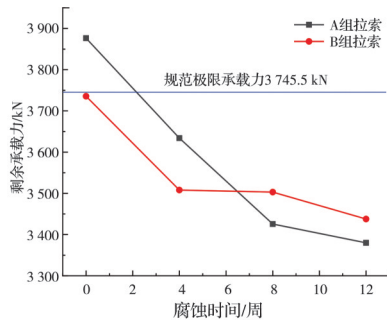


图20 拉索剩余承载力随腐蚀时间的变化

Fig. 20 Change in residual bearing capacity of cables with corrosion time

将拉索剩余承载力进行归一化处理,即用剩余承载力除以未锈蚀拉索承载力,得到拉索无量纲化剩余承载力随腐蚀时间的变化关系,如图21所示。同时,采用最小二乘法拟合,得到拉索无量纲剩余承载力与腐蚀时间的变化规律,如式(8)、(9)所示。

$$P'_{bA} = 1.0017 - 0.0205t + 7.93 \times 10^{-4}t^2 \quad (8)$$

$$P'_{bB} = 0.9962 - 0.0142t + 6.79 \times 10^{-4}t^2 \quad (9)$$

式中: P'_{bA} 、 P'_{bB} 分别为A、B组拉索无量纲剩余承载力; t 为腐蚀时间,周。

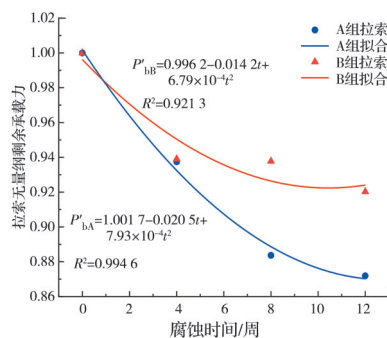


图21 无量纲剩余承载力随腐蚀时间的变化

Fig. 21 Change in dimensionless residual bearing capacity with corrosion time

由图21可见,随着腐蚀时间的增加,拉索无量纲剩余承载力下降速率呈逐渐减缓趋势;由于锌丝延缓了B组拉索的锈蚀发展,B组拉索的剩余承载力下降速率显著低于A组拉索;加速腐蚀4周后,A组和B组拉索的剩余承载力分别为初始值的93.75%和93.91%,B组拉索剩余承载力比A组高0.16%;同理,8、12周后,B组拉索剩余承载力分别

比A组高5.41%、4.83%。

6 结论

高强钢丝拉索护套破损,腐蚀介质侵入导致索体内部高强钢丝发生锈蚀甚至断裂,严重影响高强钢丝及拉索的承载性能。通过人工加速腐蚀的方法,探究高强钢丝拉索内部替换锌丝对高强钢丝拉索腐蚀的保护效果,重点分析锌丝对拉索内部高强钢丝腐蚀扩展形貌和力学性能的影响规律。得出如下结论:

1)拉索HDPE护套破损后,随着腐蚀时间的增加,腐蚀介质逐渐沿重力方向向拉索内部和两侧渗透,形成的锈蚀线与拉索夹角从 30° 逐渐增至 60° ,与重力线重合;锈蚀高强钢丝断口位置在距离拉索上端14~17 cm处,非均匀锈蚀钢丝在锈蚀区域出现V型脆性断口。

2)随着腐蚀时间的增加,HDPE护套开口处的钢丝最小截面面积逐渐减小,截面损失率逐渐增大,拉索内添加锌丝有效延缓了拉索锈蚀。在人工加速腐蚀4、8、12周后,加锌丝拉索护套开口处钢丝最小截面面积均值较无锌丝拉索分别提高了3.11%、7.62%、5.59%,最大截面损失率分别减小了47.14%、62.68%、38.70%。

3)随着腐蚀时间的增加,添加锌丝的B组钢丝极限强度和屈服强度下降速度明显低于未添加锌丝的A组钢丝;腐蚀4、8、12周后,在护套开口处,相比无锌丝拉索,加锌丝拉索钢丝极限强度均值分别高0.17%、6.12%、5.55%,屈服强度均值分别高-0.31%、8.54%、6.24%;拉索无量纲剩余承载力分别提高0.16%、5.41%、4.83%。

参考文献

- [1] 陈政清,李寿英,邓羊晨,等.桥梁长索结构风致振动研究新进展[J].湖南大学学报(自然科学版),2022,49(5):1-8. Chen Z Q, Li S Y, Deng Y C, et al. Recent challenges and advances on study of wind-induced vibrations of bridge cables[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(5): 1-8. (in Chinese)
- [2] Lonetti P, Pascuzzo A. Vulnerability and failure analysis of hybrid cable-stayed suspension bridges subjected to damage mechanisms[J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 45: 470-495.
- [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 X Z, Xie X, Pan X Y, 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] Bakker J, Frangopol D M, van Breugel K. Life-cycle of engineering systems: Emphasis on sustainable civil infrastructure[M]. 1st ed. London: CRC Press, 2016: 2240-2246.
- [5] Molnár V, Fedorko G, Krešák J, et al. The influence of corrosion on the life of steel ropes and prediction of their decommissioning[J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 74: 119-132.
- [6] 韩依璇, 辛付开, 张国荣, 等. 悬索桥锈蚀主缆钢丝力学性能退化研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(12): 11-17.
Han Y X, Xin F K, Zhang G R, et al. Mechanical properties degradation of corroded main cable wires of suspension bridge[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2018, 37(12): 11-17. (in Chinese)
- [7] Nakamura S, Suzumura K. Experimental study on fatigue strength of corroded bridge wires[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(3): 200-209.
- [8] Liu Z X, Guo T, Yu X M, et al. Corrosion fatigue and electrochemical behaviour of steel wires used in bridge cables[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2021, 44(1): 63-73.
- [9] Yao G W, Yang S C, Zhang J Q, et al. Analysis of corrosion-fatigue damage and fracture mechanism of in-service bridge cables/hangers[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 6633706.
- [10] Li D W, Wei R, Du Y G, et al. Measurement methods of geometrical parameters and amount of corrosion of steel bar[J]. Construction and Building Materials, 2017, 154: 921-927.
- [11] Xu Y, Li H, Li S L, et al. 3-D modelling and statistical properties of surface pits of corroded wire based on image processing technique[J]. Corrosion Science, 2016, 111: 275-287.
- [12] Jiang C, Wu C, Jiang X. Experimental study on fatigue performance of corroded high-strength steel wires used in bridges[J]. Construction and Building Materials, 2018, 187: 681-690.
- [13] Chen Y P, Qin W, Wang Q, et al. Influence of corrosion pit on the tensile mechanical properties of a multi-layered wire rope strand[J]. Construction and Building Materials, 2021, 302: 124387.
- [14] Li R, Miao C Q, Zhang Y L, et al. Corrosion characteristics and damage constitutive model of galvanized steel wires for bridge cables[J]. Structures, 2021, 34: 3414-3426.
- [15] Chen Z H, Chen H Y, Liu H B, et al. Corrosion behavior of different cables of large-span building structures in different environments[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(11):04020345.
- [16] 吴文明, 李闯. 斜拉索防腐技术探讨[J]. 公路交通技术, 2008, 24(4): 47-49.
Wu W M, Li C. Discussion on anti-corrosion technology for stay cables[J]. Technology of Highway and Transport, 2008, 24(4): 47-49. (in Chinese)
- [17] 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 J. Damage evolution mechanism and remaining service life evaluation of cables[D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese)
- [18] 魏大圣, 叶觉明, 罗国强, 等. 大跨度桥梁缆索用钢丝热浸镀层研究综述[J]. 表面技术, 2019, 48(11): 91-105.
Wei D S, Ye J M, Luo G Q, et al. Research progress of hot-dip coating for bridge cable steel wires[J]. Surface Technology, 2019, 48(11): 91-105. (in Chinese)
- [19] Li S L, Zhang L G, Wang Y, et al. Effect of cathodic protection current density on corrosion rate of high-strength steel wires for stay cable in simulated dynamic marine atmospheric rainwater[J]. Structures, 2021, 29: 1655-1670.
- [20] Yao G W, He X B, Liu J W, et al. Test study of the bridge cable corrosion protection mechanism based on impressed current cathodic protection[J]. Lubricants, 2023, 11(1): 30.
- [21] GB/T 18365—2018 斜拉桥用热挤聚乙烯高强钢丝拉索[S]. GB/T 18365—2018 Hot-extruded PE protection parallel high strength wire cable for cable-stayed bridge[S]. (in Chinese)
- [22] GB/T 10125—2021 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验[S]. GB/T 10125—2021 Corrosion tests in artificial atmospheres—Salt spray tests[S]. (in Chinese)
- [23] 龚帆, 齐盛珂, 邹易清, 等. 锈蚀高强钢丝力学性能退化的试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(10): 105-115.
Gong F, Qi S K, Zou Y Q, et al. Experimental study on degradation of mechanical properties of corroded high strength steel wire[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(10): 105-115. (in Chinese)
- [24] GB/T 228.1—2021 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法[S]. GB/T 228.1—2021 Metallic materials—Tensile testing: Part 1: Method of test at room temperature[S]. (in Chinese)
- [25] GB/T 17101—2019 桥梁缆索用热镀锌或锌铝合金钢丝[S]. GB/T 17101—2019 Hot-dip zinc or zinc-aluminium coated steel wires for bridge cables[S]. (in Chinese)
- [26] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学(II)[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2013.
Sun X F, Fang X S, Guan L T. Mechanics of materials (II) [M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2013. (in Chinese)