

引文格式:刘佳伟,姚国文,王伟,等.在役钢管混凝土拱桥吊杆钢丝腐蚀疲劳损伤机理[J].建筑科学与工程学报,2024,41(6):111-120.
LIU Jiawei, YAO Guowen, WANG Wei, et al. Corrosion fatigue damage mechanism of steel wire of in-service concrete-filled steel tubular arch
bridge boom[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(6): 111-120.

DOI:10.19815/j.jace.2022.11086

在役钢管混凝土拱桥吊杆钢丝腐蚀疲劳损伤机理

刘佳伟¹, 姚国文^{1,2}, 王伟³, 张高峰¹, 吴树杭¹

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 2. 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; 3. 重庆市万州区城市管理局, 重庆 404199)

摘要:为了评估在役钢管混凝土拱桥吊杆钢丝的剩余疲劳寿命,以某服役满20年拱桥所更换下来的吊杆内部高强度钢丝为研究对象,进行不同时间的加速腐蚀,获得不同腐蚀程度的钢丝试件;对试件钢丝进行表面检测、称重、疲劳试验和断口形貌分析,得到了不同腐蚀程度下钢丝的表面粗糙度、质量损失率、断裂机理和疲劳寿命,通过Weibull模型对疲劳寿命数据进行分析,得到了不同失效概率下吊杆钢丝的剩余疲劳寿命公式。结果表明:随着腐蚀程度的增加,吊杆钢丝表面粗糙度和质量损失率的数值不断增加,疲劳寿命降低且疲劳断口均为脆性破坏,打磨后的钢丝疲劳寿命有所提升;相同失效概率下,吊杆钢丝剩余疲劳寿命将随着应力比的增加或腐蚀程度的增加而减少;研究结果可为吊杆钢丝的服役状态和疲劳寿命预测提供参考。

关键词:拱桥吊杆; 钢丝腐蚀; 疲劳寿命; Weibull分布; 损伤机理

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2024)06-0111-10

Corrosion fatigue damage mechanism of steel wire of in-service concrete-filled steel tubular arch bridge boom

LIU Jiawei¹, YAO Guowen^{1,2}, WANG Wei³, ZHANG Gaofeng¹, WU Shuhang¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Wanzhou City Management Bureau of Chongqing, Chongqing 404199, China)

Abstract: In order to assess the remaining fatigue life of the steel wire of in-service concrete-filled steel tubular arch bridge boom, the high-strength steel wire inside the replaced boom of an arch bridge that was in service for 20 years, was taken as the research object, and the steel wire was subjected to accelerated corrosion for different time to obtain steel wire specimens with different degrees of corrosion. The surface roughness, mass loss rate, fracture mechanism, and fatigue life of the steel wire under different degrees of corrosion were obtained through surface inspection, weighing, fatigue testing, and fracture morphology analysis. The fatigue life data were analyzed by using the Weibull model, and the remaining fatigue life formula of the boom steel wire under different failure probabilities was obtained. The results show that as the degree of corrosion

收稿日期: 2023-11-21

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178273); 重庆市自然科学基金项目(cstc2021jcyj-msxmX1159);

重庆英才计划“包干制”项目(cstc2022ycjh-bgzxm0124); 重庆市研究生联合培养基地建设项目(JDLHPYJD2020004);

重庆交通大学研究生科研创新项目(2021S0004)

通信作者: 姚国文(1974-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, E-mail: yaoguowen@sina.com。

increases, the surface roughness and quality loss rate of the boom steel wire continuously increase, the fatigue life decreases, and the fatigue fracture surface is brittle failure. The fatigue life of the polished steel wire is improved. Under the same failure probability, the remaining fatigue life of the boom steel wire will decrease with the increase of stress ratio or corrosion degree. The research results can provide reference for the service status and fatigue life prediction of boom steel wire.

Key words: arch bridge boom; corrosion of steel wire; fatigue life; Weibull distribution; damage mechanism

Author resume: YAO Guowen(1974-), male, PhD, professor, E-mail: yaoguowen@sina.com.

0 引言

吊杆作为中、下承式拱桥的核心承重结构,内部高强度钢丝的腐蚀情况将直接影响结构的安全性和耐久性。在中国规范中,吊杆的设计使用寿命一般为 20 年^[1],然而有的桥梁吊杆在使用不到 10 年就发生了表面 HDPE 护套破损,内部钢丝严重腐蚀,从而不得不进行更换^[2],并且在车辆交变荷载和腐蚀耦合作用下,吊杆实际疲劳寿命将远低于预期疲劳寿命^[3-5]。

腐蚀是导致钢丝、钢绞线力学性能退化的主要原因,国内外学者对腐蚀与钢丝、钢绞线力学性能之间的关系进行了研究。Mayrbaurl 等^[6]研究发现,在腐蚀环境下,蚀坑所导致的应力集中以及氢脆开裂都会导致钢丝断裂。Betti 等^[7]通过加速腐蚀试验发现,腐蚀引起钢丝表面几何形状不均匀,蚀坑和细微裂纹将引起局部应力集中从而导致钢丝断裂。Nakamura 等^[8]通过实际工程案例,拆解服役悬索桥上的钢丝,发现拆解下来的钢丝断裂是由于疲劳引起的,而不是由氢脆引起的。针对钢丝的疲劳性能,Li 等^[9]发现在高腐蚀程度和低疲劳应力幅度值情况下,钢丝疲劳寿命的退化较为明显,疲劳裂纹的扩展清晰可见。Wang 等^[10]通过试验发现,在腐蚀疲劳耦合作用下,钢丝蚀坑的深度和宽度越大,裂纹扩展速度越快,疲劳寿命越短。兰成明等^[11-13]以斜拉索为研究对象,对锈蚀钢丝进行了疲劳试验,并以三参数 Weibull 模型来评价锈蚀钢丝的疲劳寿命,提出了斜拉索钢丝疲劳寿命界限估计方法。Chen 等^[14]通过对钢丝进行加速腐蚀试验,测量锈蚀钢丝的力学性能,建立了基于正态分布锈蚀钢丝屈服强度和极限强度的退化模型。

在以上学者研究的基础上,本文将一座在役满 20 年的中承式拱桥所更换下的吊杆作为研究对象,对更换下来的吊杆钢丝进行加速腐蚀,分析钢丝腐

蚀形貌;通过疲劳试验测得钢丝疲劳性能,基于 Weibull 模型对实测疲劳寿命数据进行分析,得到了在役满 20 年钢管混凝土拱桥吊杆钢丝在不同失效概率下的剩余疲劳寿命。

1 试验概况

1.1 工程背景

某钢管混凝土拱桥主跨为 208 m 中承式钢管混凝土无铰拱,边跨为 3 孔 20 m 钢筋混凝土简支 T 梁,设计荷载为汽车-20 级、挂车-100、人群荷载 3.5 kPa,主桥结构平面如图 1 和图 2 所示。该桥于 2000 年建成通车,吊杆服役时间达到《钢管混凝土拱桥技术规范》^[1]所规定的 20 年,已无法满足承载能力要求,需对全桥共 38 根吊杆进行更换。

1.2 试件制备与盐雾腐蚀试验

试验用钢丝取自于该桥更换下来的 9[#] 吊杆,吊杆结构体系主要由 91 根 $\phi 7$ 的 1670 级平行钢丝表面包裹聚氨酯胶带,最外层采用 HDPE 保护套组成,如图 3(a) 所示,钢丝化学成分见表 1。切除 HDPE 护套后,将腐蚀钢丝切割为长度 $500 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$,如图 3(b) 所示,在腐蚀试验之前,对每根钢丝试件进行称重,以计算质量损失率。

采用 YW-200CH 型盐雾试验箱分别对钢丝进行为期 10、20、30 d 的腐蚀试验(以下分别称为 B、C、D 类钢丝,A 类钢丝为未进行盐雾腐蚀的原状钢丝,每类钢丝各 12 根);腐蚀溶液按照《人造气氛腐蚀实验》^[15]进行配置,溶液配置如表 2 所示,根据陈先亮^[16]的研究,环境温度设置为 $35 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。使用盐雾试验机对腐蚀溶液进行雾化处理,经过相应腐蚀时间后,对钢丝相关腐蚀数据进行观测。试验前需将试件清洗干净,并且为了防止试件两端夹具区域受到腐蚀而断裂,需要分别在钢丝两端包裹长度 100 mm 的塑料胶带,并使用石蜡密封,如图 4 所示。



(a) 拱桥整体



(b) 吊杆更换

图 1 拱桥全貌

Fig. 1 Arch bridge full appearance

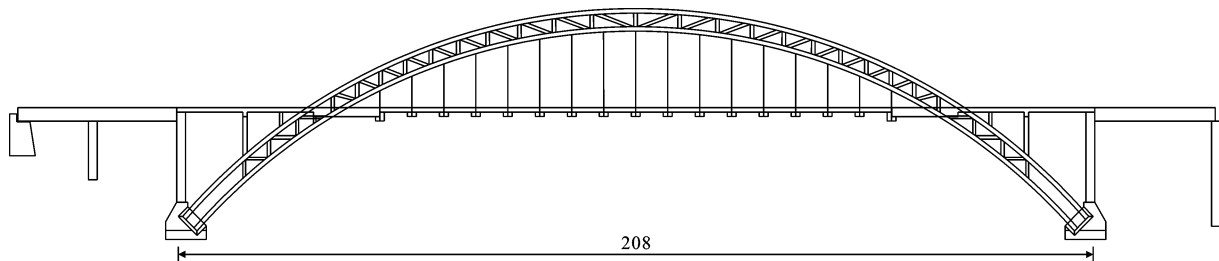


图 2 拱桥标高结构(单位:m)

Fig. 2 Arch bridge elevation structure (unit:m)

表 1 钢丝化学成分

Table 1 Chemical composition of steel wire

化学元素	C	Si	Mn	S	Cu	Cr
质量分数/%	0.85~0.90	0.12~0.32	0.60~0.90	≤0.002 5	≤0.10	0.10~0.25



(a) 吊杆横截面



(b) 吊杆钢丝

图 3 吊杆钢丝外观

Fig. 3 Appearance of boom steel wire

表 2 溶液配置

Table 2 Solution configuration

化学成分	NaCl	H ₂ O	CuCl ₂ · 2H ₂ O	CH ₃ COOH
质量分数/%	5.00	94.37	0.03	0.60

1.3 疲劳试验

采用 PLG-100C 疲劳测试机对 4 类钢丝进行疲劳测试。为了避免钢丝夹持区因应力集中引起疲劳断裂,采用能改善夹持性能的夹片,并用聚四氟乙烯



图4 试件尺寸(单位:mm)

Fig. 4 Specimen dimension (unit:mm)

胶布紧密缠绕钢丝的夹持部位,加载频率 $f = 25$ Hz;根据规范《桥梁缆索用热镀锌或锌铝合金钢丝》^[17],最大应力为 $0.45f_{ptk}$ (f_{ptk} 为钢丝的设计极限强度),即 752 MPa;疲劳应力幅度值设置为 $\Delta S = 360$ MPa(应力比 $S = 0.48$)。为了研究应力幅度值对疲劳寿命的影响,试验采用疲劳应力幅度值 $\Delta S = 270$ MPa(应力比 $S = 0.36$)和 $\Delta S = 450$ MPa(应力比 $S = 0.60$)作为对照。为了避免腐蚀钢丝表面蚀坑和细小裂纹对疲劳寿命的影响,对部分钢丝表面进行打磨,直到看不出任何蚀坑,然后采用应力幅 $\Delta S = 360$ MPa 的工况进行疲劳加载。

2 试验结果

2.1 腐蚀试样外观和处理

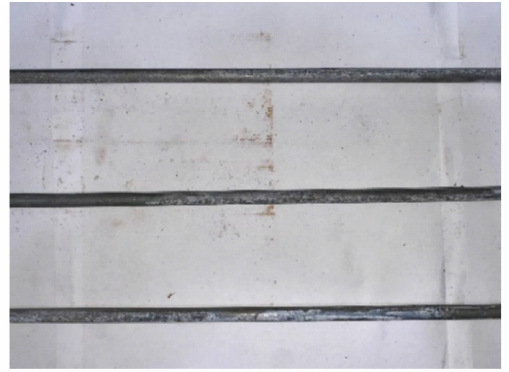
图5为试验完成后部分4类钢丝除锈前的表现形貌,可以看出A类钢丝表面被完整的镀锌层覆盖或部分附着氧化锌,随着腐蚀时间的推移,钢丝表面镀锌层几乎被完全破坏,内部铁基体逐渐产生棕色氧化铁^[18-19]。

腐蚀结束后,参考标准^[20]在温室下使用50%的稀盐酸(HCl)溶液和 $3.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的六亚甲基四胺($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$)溶液对钢丝表面进行除锈,除锈完成后对钢丝进行烘干。引入质量损失率来量化钢丝腐蚀程度,质量损失率 η 计算如式(1)所示。

$$\eta = \left\{ m_1 - m_2 + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 [m_{c1}(i) - m_{c2}(i)] \right\} / \left(m_1 \frac{l_c}{l} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_1 为钢丝原质量; m_2 为钢丝除锈后质量; l 和 l_c 分别为钢丝长度和腐蚀区域长度; $m_{c1}(i)$ 和 $m_{c2}(i)$ 分别为第 i 根钢丝使用除锈溶液清洗前和清洗后的质量。

在化学除锈过程中,难免会清洗掉钢丝未被腐蚀的锌层或铁基质,造成额外质量损失,因此选用3根原状钢丝作为参考试样,以计算除锈清洗过程中钢丝的质量损失。测得4类钢丝质量损失率后取平均值,结果如图6所示。可以看出,随着腐蚀时间的增加,质量损失率明显增加,但质量损失率的增长率逐渐减小。



(a) A类钢丝



(b) B类钢丝



(c) C类钢丝



(d) D类钢丝

图5 加速腐蚀钢丝试样

Fig. 5 Accelerated corrosion steel wire specimens

2.2 锈蚀钢丝表面轮廓分布特征

表面粗糙度常用于解决工程基础问题,例如两结构间的摩擦接触变形和钢筋在混凝土结构中的握

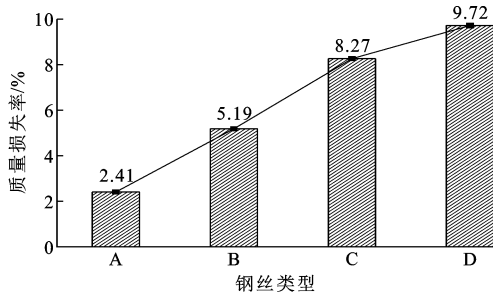


图 6 平均质量损失率

Fig. 6 Average quality loss rate

裹力,将表面粗糙度 R_a 的算术平均偏差作为结构表面粗糙度最常用的评定参数,如图 7 所示。

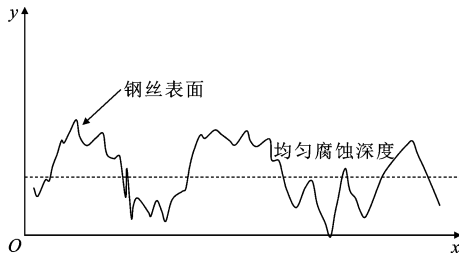


图 7 钢丝表面轮廓示意图

Fig. 7 Schematic diagram of steel wire surface profile

R_a 数学表达式如式(2)所示。

$$R_a = \frac{\int_0^l |y(x) - y_m| dx}{l} \approx \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k |y_i - y_m| \quad (2)$$

式中: x 为钢丝表面长度坐标; $y(x)$ 为腐蚀深度坐标; y_m 为均匀腐蚀深度; y_i 为第 i 个测量点的腐蚀深度; k 为测量点的总数。

采用 OLS5100 激光扫描显微镜对腐蚀钢丝进行扫描,图 8 为 D 类钢丝的部分扫描结果,图中数值表示粗糙度尺寸,扫描区域尺寸大小为边长 1 000 μm 的正方形。通过表面轮廓腐蚀深度图可以更直观了解钢丝表面腐蚀状况,腐蚀严重区域蚀坑环环相扣,造成钢丝截面面积损失。图 9 为钢丝表面粗糙度与腐蚀程度关系,可以看出随着腐蚀时间的增加,钢丝表面平均粗糙度数值不断增大。

2.3 疲劳试验结果

2.3.1 断口形貌分析

图 10 为 4 类未打磨钢丝在 $S=0.48$ 下的微观断口形貌,可以看出 4 类钢丝断口形貌差别不大,均由蚀坑疲劳源、光滑平坦的疲劳扩展区和表面粗糙的瞬断区组成。疲劳扩展区光滑平坦是因为一旦疲劳裂纹出现,裂纹将会快速扩展,导致钢丝迅速发展至断裂状态,说明钢丝抵抗疲劳破坏的能力主要体现在抗裂纹起裂上,而不是抗裂纹扩展上。将图 10

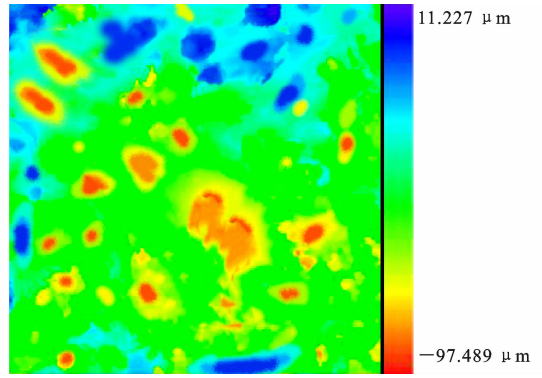


图 8 激光扫描结果

Fig. 8 Laser scanning results

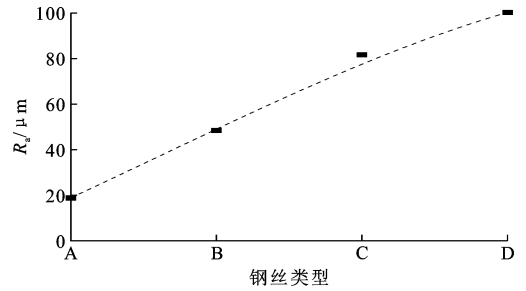


图 9 表面粗糙度与腐蚀程度关系

Fig. 9 Relationship between surface roughness and corrosion degree

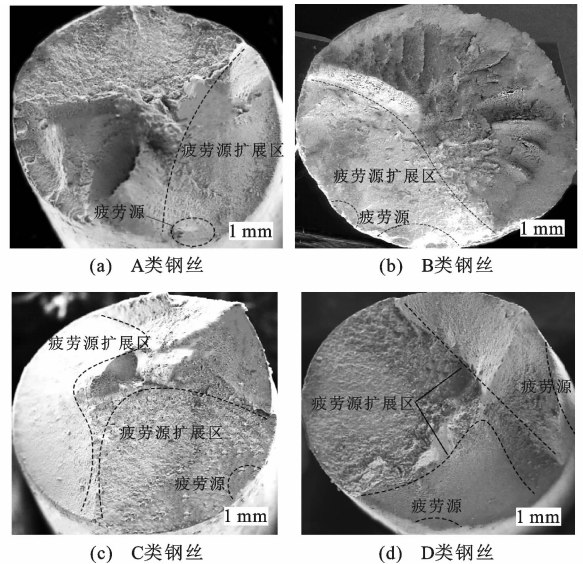


图 10 钢丝疲劳断口

Fig. 10 Fatigue fracture of steel wire

中钢丝断口进行对比可以发现,随着腐蚀程度的加深,疲劳源蚀坑的数量不断增加,蚀坑疲劳源扩展区域面积不断扩大,导致钢丝的疲劳裂纹传播速度更快,疲劳寿命更低。对于腐蚀程度较深的钢丝,其蚀坑的数量、直径都有所增加,使钢丝截面的几何形状从宏观上发生改变,形成不均匀断裂边缘,引起钢丝

R_a 的增加。

2.3.2 疲劳寿命分析

钢丝疲劳破坏后,发现钢丝截面较为光滑,无明显颈缩现象,是标准的疲劳破坏和脆性破坏,并且断裂位置不是钢丝的夹持区,说明试验数据是有效的,不同应力幅度值下 4 类钢丝疲劳试验结果见表 3。

图 11 为钢丝平均疲劳寿命与应力比的关系。可以看出,4 类钢丝疲劳寿命和应力比之间存在较

明显的阶段性关系:当 $0.36 \leq S \leq 0.48$ 时, S 的增加导致疲劳寿命的降低较为明显;当 $0.48 \leq S \leq 0.60$ 时,钢丝疲劳寿命的降低趋势低于 $0.36 \leq S \leq 0.48$,随着应力比降低,疲劳寿命受腐蚀程度的影响越敏感。

打磨后钢丝的疲劳寿命略有提升,由于随着腐蚀程度的加深,钢丝表面蚀坑深度将增加^[21],蚀坑周围更易产生应力集中现象。钢丝抵抗疲劳破坏主

表 3 腐蚀钢丝疲劳寿命

Table 3 Fatigue life of corroded steel wire

编号	钢丝类型	S	疲劳次数/ 10^6	编号	钢丝类型	S	疲劳次数/ 10^6
1	A	0.36	0.91	37	C	0.48	0.53
2			1.24	38			0.66
3			1.66	39			0.86
4			1.92	40			1.01
5			2.13	41			0.18
6		0.48	0.53	42		0.32	
7			0.75	43		0.41	
8			0.87	44		0.50	
9			0.93	45		0.61	
10			1.21	46		0.64	
11		0.60	0.36	47		0.84	
12			0.52	48		1.08	
13			0.63	49		1.31	
14			0.71	50		1.53	
15			0.99	51		0.29	
16	B	0.36	0.69	52	D	0.48	0.49
17			0.89	53			0.53
18			1.12	54			0.72
19			1.55	55			0.99
20			1.85	56			0.13
21		0.48	0.49	57		0.27	
22			0.74	58		0.37	
23			0.82	59		0.43	
24			1.01	60		0.62	
25			1.31	61		0.98	
26	0.60	0.23	62	A	0.48	1.18	
27		0.45	63	(打磨后)		1.05	
28		0.53	64	B		0.98	
29		0.71	65	(打磨后)		1.02	
30		0.89	66			1.20	
31	C	0.36	0.59	67	C	0.48	0.62
32			0.79	68	(打磨后)		0.86
33			1.01	69			1.07
34		1.25	70	D	0.57		
35		1.45	71	(打磨后)	0.63		
36		0.48	0.41	72			0.81

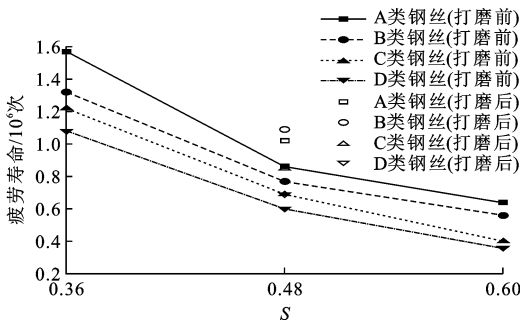


图 11 钢丝疲劳寿命与应力比的关系

Fig. 11 Relationship between fatigue life of steel wire and stress ratio

要体现在抗裂纹起裂上,而表面蚀坑的存在将使钢丝跳过抗裂纹起裂阶段,直接进入裂纹扩展阶段,对钢丝进行打磨减少了由腐蚀引起的蚀坑和裂纹,消除了疲劳源,提高了疲劳寿命。

材料的疲劳性能一般采用 $S-N$ 曲线进行描述, N 与应力幅值 ΔS 通常呈线性关系^[22],如式(3)所示。

$$m \ln(\Delta S) + \ln(N) = \ln(Z) \quad (3)$$

式中: N 为钢丝试验疲劳寿命平均值; m 和 Z 为材料常量。

4 类钢丝的 $\Delta S-N$ 曲线如图 12 所示。

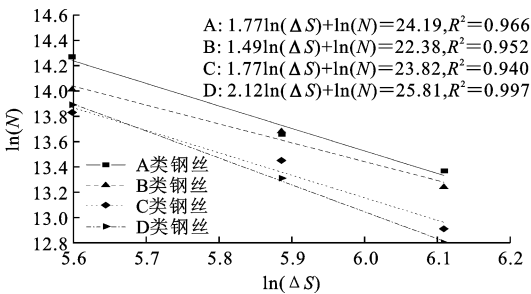


图 12 $\Delta S-N$ 曲线

Fig. 12 $\Delta S-N$ curves

2.3.3 Weibull 分布

考虑到试件数量较少,即使最大化地控制试验条件,吊杆钢丝的剩余疲劳寿命数据仍会呈现较大的离散型,若直接在此基础上对数据进行线性化拟合则结果不够严谨^[23-24]。因此在评估疲劳寿命时,引入一种概率分布方法,以此来变相表示腐蚀钢丝的疲劳寿命分布。Weibull 分布是一种相对精确的定量分析方法,根据 Weibull 分布理论^[25],在相同应力水平下,试件疲劳寿命的分布函数可以用 Weibull 函数来表示,假定随机变量疲劳寿命 N 服从 Weibull 分布,分布函数 $f(N)$ 如式(4)所示。

$$f(N) = \frac{a}{N_a - N_0} \left(\frac{N - N_0}{N_a - N_0} \right)^{a-1} \cdot$$

$$\exp\left[-\left(\frac{N - N_0}{N_a - N_0}\right)^a\right] \quad N \geq N_0 \quad (4)$$

式中: N_0 为最小寿命参数; N_a 为尺度参数; a 为形状参数(Weibull 斜率参数)。

考虑到试验所花费的时间和成本,在同一应力水平下得到较多样本是难以实现的,因此只需要采取科学合理的方法进行可靠性分析,即疲劳寿命小于 N_0 的失效概率为 0($N_0 = 0$),便可以简化分布函数,得到两参数 Weibull 概率密度函数 $f(N)$,如式(5)所示。

$$f(N) = \frac{a}{N_a} \left(\frac{N}{N_a} \right)^{a-1} \exp\left[-\left(\frac{N}{N_a}\right)^a\right] \quad N \geq 0 \quad (5)$$

对式(5)进行积分,得到累积分布函数 $F(N)$ 的表达式为

$$F(N) = P(N < N_p) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{N}{N_a}\right)^a\right] \quad (6)$$

对式(6)两边取两次对数得

$$\ln\{\ln[1 - F(N)]^{-1}\} = a \ln(N) - a \ln(N_a) \quad (7)$$

令 $Y = \ln\{\ln[1 - F(N)]^{-1}\}$, $X = \ln(N)$, $B = a \ln(N_a)$,则将式(7)简化为直线线性函数,即

$$Y = aX + B \quad (8)$$

$F(N)$ 采用均秩法估计,即

$$F(N) = \frac{i'}{n+1} \quad (9)$$

式中: n 为样本数据总数量; i' 为样本数据从小到大排列的序号。

将试验测得的疲劳寿命代入式(7)、(9),得到不同腐蚀程度、不同应力水平下的 Weibull 分布坐标,如图 13 所示。由图 13 可知,各腐蚀程度下吊杆钢丝的疲劳寿命服从两参数 Weibull 分布,且拟合优度较高。由此得到各应力水平条件下的 Weibull 参数取值,见表 4。

为了证实不同腐蚀程度和不同应力下拱桥吊杆钢丝疲劳寿命的概率分布可以用两参数 Weibull 分布表征,使用柯尔莫哥洛夫(K-S)拟合优度检验方法对疲劳数据概率分布进行检验^[26-27]。拟合优度检验公式为

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= \max_{0 \leq I \leq k} |F^*(x_I) - P(x_I)| \\ F^*(x_I) &= \frac{I}{k} \\ P(x_I) &= 1 - \exp\left(-\frac{x_I^a}{N_a^a}\right) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: I 为试验序列号; k 为某一应力水平下总的试验次数; D_1 为拟合优度检验参数。

表 5 给出了不同腐蚀程度和不同应力下拱桥吊

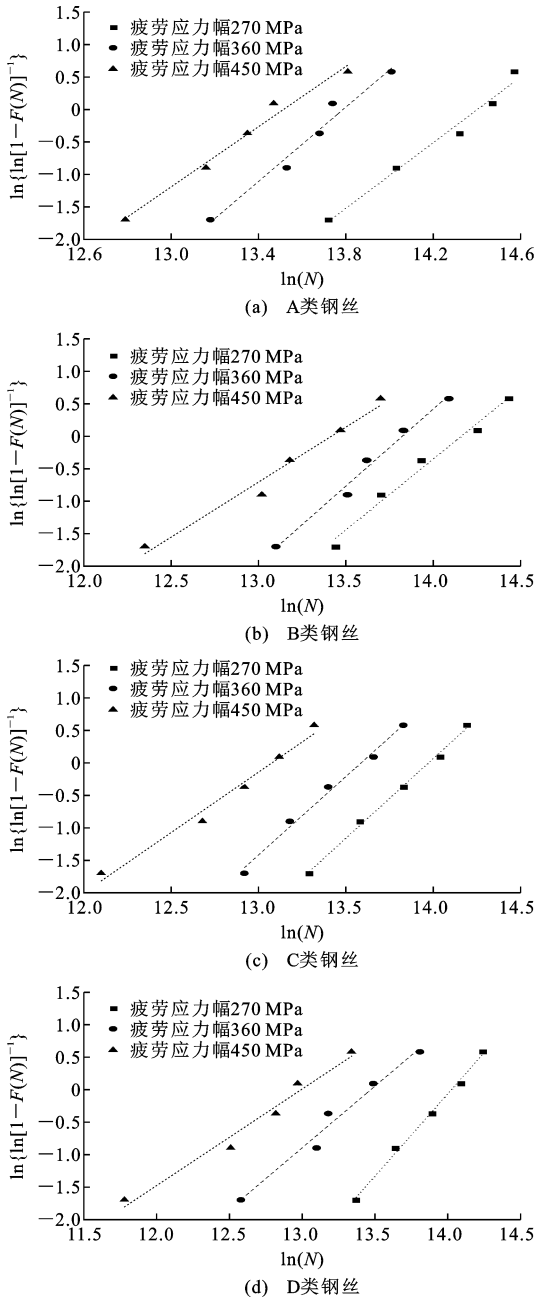


图 13 疲劳寿命 Weibull 分布坐标

Fig. 13 Fatigue life Weibull distribution coordinates

杆钢丝拟合优度检验的计算结果。从检验结果可知拟合优度检验参数最大值 $D_{1\max} = 0.534$ ，在该条件下的样本容量(试验总次数) $k = 5$ ，查询 K-S 临界值表^[27]可以得到：当 $k = 5$ 时，5% 显著性水平下的判断值 $D_c = 0.565 > D_{1\max}$ ，说明采用两参数 Weibull 分布模型可以满足不同腐蚀程度和不同应力下拱桥吊杆钢丝疲劳寿命分布函数计算的需要。

考虑到不同失效概率下疲劳寿命不同，将相同腐蚀程度和应力幅情况下钢丝疲劳寿命按照失效概率大小分类，把相同失效概率的疲劳寿命值作为一

表 4 Weibull 参数取值

Table 4 Weibull parameter values

钢丝类型	S	N_a	a
A	0.36	2 652 565	2.12
	0.48	1 018 697	2.85
	0.60	1 061 092	2.62
B	0.36	689 545	1.69
	0.48	1 020 132	2.37
	0.60	772 214	2.28
C	0.36	538 021	1.84
	0.48	810 826	2.41
	0.60	496 303	2.61
D	0.36	737 108	1.43
	0.48	746 992	1.89
	0.60	278 480	2.83

表 5 拟合优度检验参数 D_1 Table 5 Goodness-of-fit test parameter D_1

S	不同类型钢丝的 D_1			
	A	B	C	D
0.36	0.534	0.433	0.494	0.358
0.48	0.262	0.177	0.183	0.193
0.60	0.505	0.254	0.180	0.289

组对应关系，即 P_f -S-N 曲线。不同失效概率 P_f 下的疲劳寿命 N_p 表达式为

$$N_p = N_a |\ln(1 - P_f)|^{\frac{1}{a}} \quad (11)$$

将上文所得的 Weibull 分布参数代入式(11)，计算得到失效概率 $P_f = 0.05$ 和 $P_f = 0.1$ 时对应的疲劳寿命；通过对疲劳寿命值进行回归分析，得到吊杆钢丝的 P_f -S-N 曲线簇，某一失效概率吊杆钢丝疲劳寿命 N 与相对应的应力水平 ΔS 之间的关系为

$$\ln(\Delta S) = A_p \ln(N_p) + B_p \quad (12)$$

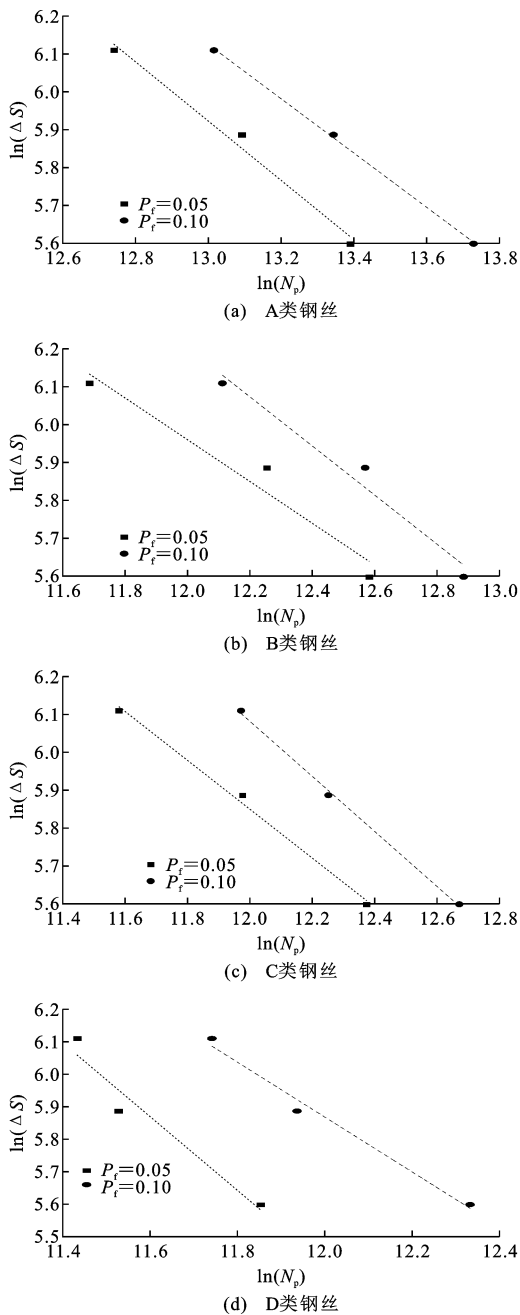
式中： A_p 、 B_p 为系数。

通过式(12)将表 4 数据进行双对数线性回归后，得到系数 A_p 和 B_p ，获得不同失效概率下双对数疲劳方程，拟合结果见图 14。

从图 14 可以看出：在相同应力比和相同腐蚀程度下的吊杆钢丝所经受的疲劳次数越多，失效概率越大；在相同失效概率下，应力比越大的钢丝达到该失效概率所需要的疲劳次数越少；吊杆钢丝的双对数疲劳方程拟合程度较好。 P_f -S-N 曲线簇为在役满 20 年后的拱桥吊杆钢丝在不同失效概率下的剩余疲劳寿命提供了一定参考。

3 结语

(1) 随着腐蚀程度的增加，钢丝表面粗糙度 R_a

图 14 P_r -S-N 曲线Fig. 14 P_r -S-N curves

呈增大趋势,且腐蚀所导致的蚀坑之间连接紧密,导致钢丝截面面积损失。

(2) 腐蚀使钢丝表面产生蚀坑,在疲劳应力作用下,裂纹将从蚀坑处扩展开,最终导致钢丝断裂,当疲劳应力为 360 MPa 时,进行打磨后的钢丝疲劳寿命有所提升,且疲劳应力幅度值降低,疲劳寿命受腐蚀程度的影响越敏感。

(3) 通过比较 K-S 拟合优度,验证了钢丝疲劳寿命的概率分布可用 Weibull 分布表征,利用均秩法获得了 Weibull 分布参数,得到了在役 20 年后拱

桥吊杆钢丝在不同失效概率下的剩余疲劳寿命,可为实际工程提供参考。

参考文献:

References:

- [1] 钢管混凝土拱桥技术规范:GB 50923—2013[S]. 北京:中国计划出版社,2014.
Technical code for concrete-filled steel tube arch bridges:GB 50923—2013[S]. Beijing:China Planning Press,2014.
- [2] 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.
- [3] LI H, LAN C M, JU Y, et al. Experimental and numerical study of the fatigue properties of corroded parallel wire cables[J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 17(2): 211-220.
- [4] 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.
- [5] JARWALI T, NAKAMURA S. Anti-corrosion performance of bridge strands consisting of steel wires galvanised with zinc-aluminium alloy [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2016, 12(6): 682-694.
- [6] MAYRBAURL R M, CAMO S. Cracking and fracture of suspension bridge wire[J]. Journal of Bridge Engineering, 2001, 6(6): 645-650.
- [7] BETTI R, WEST A C, VERMAAS G, et al. Corrosion and embrittlement in high-strength wires of suspension bridge cables[J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(2): 151-162.
- [8] NAKAMURA S, SUZUMURA K. Experimental study on fatigue strength of corroded bridge wires [J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(3): 200-209.
- [9] LI R, MIAO C Q, FENG Z X, et al. Experimental study on the fatigue behavior of corroded steel wire [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 176: 106375.
- [10] WANG Y, ZHANG W H, PAN X, et al. Experimental study on fatigue crack propagation of high-strength steel wire with initial defects for bridge cables [J]. Applied Sciences, 2020, 10(12): 4065.
- [11] 兰成明. 平行钢丝斜拉索全寿命安全评定方法研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.
LAN Chengming. Study on life-cycle safety assess-

- ment methods for parallel wire stay cable[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [12] 兰成明,任登路,徐阳,等. 平行钢丝斜拉索疲劳性能评定Ⅱ:斜拉索疲劳寿命模型[J]. 土木工程学报, 2017, 50(7): 69-77.
- LAN Chengming, REN Denglu, XU Yang, et al. Fatigue property assessment of parallel wire stay cable Ⅱ: fatigue life model for stay cable[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(7): 69-77.
- [13] 兰成明,徐阳,任登路,等. 平行钢丝斜拉索疲劳性能评定Ⅰ: 钢丝疲劳寿命模型[J]. 土木工程学报, 2017, 50(6): 62-70.
- LAN Chengming, XU Yang, REN Denglu, et al. Fatigue property assessment of parallel wire stay cable Ⅰ: fatigue life model for wire[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(6): 62-70.
- [14] CHEN A R, YANG Y Y, MA R J, et al. Experimental study of corrosion effects on high-strength steel wires considering strain influence [J]. Construction and Building Materials, 2020, 240: 117910.
- [15] 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验: GB/T 10125—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- Corrosion tests in artificial atmospheres-salt spray tests: GB/T 10125—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [16] 陈先亮. 桥梁索体钢丝腐蚀特征和力学性能试验研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
- CHEN Xianliang. Experimental study on corrosion characteristics and mechanical properties of bridge cable wires[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [17] 桥梁缆索用热镀锌或锌铝合金钢丝: GB/T 17101—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- Hot-dip zinc or zinc-aluminium coated steel wires for bridge cables: GB/T 17101—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [18] SUZUMURA K, NAKAMURA S I. Environmental factors affecting corrosion of galvanized steel wires [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(1): 1-7.
- [19] YUAN Y G, LIU X D, PU G N, et al. Temporal and spatial variability of corrosion of high-strength steel wires within a bridge stay cable[J]. Construction and Building Materials, 2021, 308: 125108.
- [20] Standard practice for preparing, cleaning, and evaluation corrosion test specimens: ASTM G1-90(1999)e1 [S]. West Conshohocken: ASTM, 2003.
- [21] 黄娟. 模拟酸雨环境下拉索钢丝腐蚀发展规律研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2017.
- HUANG Juan. Study on the law of corrosion development of cable wire in natural environment[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2017.
- [22] 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.
- [23] WANG M L, LIU X T, WANG X L, et al. Probabilistic modeling of unified S-N curves for mechanical parts[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2018, 27(7): 979-999.
- [24] HOOLE J, SARTOR P, BOOKER J, et al. Systematic statistical characterisation of stress-life datasets using 3-parameter distributions[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 129: 105216.
- [25] RINNE H. The weibull distribution[M]. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [26] BETHEA R M. Statistical methods for engineers and scientists[M]. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- [27] 茆诗松, 濮晓龙, 程依明. 概率论与数理统计简明教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- MAO Shisong, PU Xiaolong, CHENG Yiming. A concise course of probability theory and mathematical statistics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012.