

文章编号:1007-9629(2021)06-1315-07

交变荷载和氯盐环境耦合作用下钢绞线的 腐蚀特征及力学性能

喻宣瑞, 姚国文, 钟浩, 蒋一星
(重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

摘要:为探究钢绞线在交变荷载和氯盐环境耦合作用下的腐蚀特征及力学性能,通过开展盐雾腐蚀试验,模拟钢绞线的腐蚀规律,并基于灰度理论定量研究了应力幅对钢绞线腐蚀的影响,分析了不同应力幅作用下钢绞线的破坏形式及疲劳寿命.结果表明:在氯盐环境下,所施加应力幅越大,钢绞线的腐蚀越严重,易出现单疲劳源断口破坏;随着应力幅的降低,钢绞线腐蚀速率有所下降,易出现多疲劳源破坏和分层破坏;钢绞线的抗拉强度与腐蚀率呈指数关系,其延伸率与腐蚀率呈线性衰减趋势;腐蚀程度的增加对钢绞线的疲劳寿命影响较为显著.

关键词:交变荷载;钢绞线;加速试验;灰度处理;破坏模式;疲劳寿命

中图分类号:U445.7

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.06.025

Corrosion Characteristics and Mechanical Properties of Steel Strands under Coupling Effect of Alternating Load and Chloride Salt Environment

YU Xuanrui, YAO Guowen, ZHONG Hao, JIANG Yixing

(School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to analysis the corrosion mechanical property of steel strands under the coupling effects of chloride ion and variable load, the corrosion process of the steel strands by the accelerated corrosion test was simulated. Grayscale was used to quantify the corrosion degree of steel strands in different stress amplitudes and the failure mode and the fatigue of steel strands were also analyzed. The results indicate that greater amplitude of the stress applied at both ends of the strands will lead to more severe corrosion of the strand, and the single fatigue source failure is prone to occur. While smaller stress amplitude will result in slower corrosion speed, and the fracture of multiple fatigue sources and delamination is prone to occur. The relationship between tensile strength and corrosion rate is exponential, and the relationship between elongation and corrosion rate is linear attenuation trend; the increase of corrosion degree has a significant effect on the fatigue life of steel strands.

Key words: alternating load; steel strand; accelerated test; gray processing; failure mode; fatigue life

氯盐环境下,由氯离子侵蚀所诱发的拉索内钢绞线锈蚀是导致索承式桥梁耐久性失效破坏的重要原因^[1].因此揭示氯离子对钢绞线的腐蚀规律及侵蚀过程中钢绞线力学性能变化过程,对评价索承式桥

梁安全性能,提高结构物在恶劣环境下的耐久性具有一定理论意义和工程价值^[2].

起初,绝大部分研究仅考虑交变荷载对钢绞线耐久性的影响,如 Mayrbaurl 等^[3]分析了交变荷载对

收稿日期:2020-06-29; 修订日期:2020-07-03

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0806001);城市快速路桥梁超限荷载监测预警系统与安全风险控制技术(2017YFC0806001)

第一作者:喻宣瑞(1991—),男,重庆人,重庆交通大学博士生.E-mail: 1531282698@qq.com

通讯作者:姚国文(1974—),男,山东潍坊人,重庆交通大学教授,博士生导师,博士.E-mail: 990020050526@cqjtu.edu.cn

索承式桥梁承载能力的影响,得到钢绞线的破坏模式;李先立等^[4]通过物理模型试验,揭示了交变荷载应力幅对高强镀锌钢丝的破坏规律,并采用可靠度的方法对钢丝疲劳寿命进行预测.但上述研究仅考虑了交变荷载对钢绞线力学性能的影响,而忽视了氯盐环境对结构寿命的作用.为此,Khaled等^[5]依托相关工程案例,探究钢绞线的腐蚀机理,发现钢绞线与水、氯离子三者之间易发生电化学反应,氯离子在整个反应中起到催化剂作用,故反应一旦发生,将会持续进行下去,直至钢绞线断裂.钢绞线的腐蚀种类大致分为2类:析氢腐蚀和吸氧腐蚀^[6].析氢腐蚀更容易在酸性条件下发生,而吸氧腐蚀更容易在碱性或者中性环境下进行.对钢绞线的腐蚀分为3个阶段:蚀坑萌芽、蚀坑衍生、裂纹形成(包括短裂纹的形成、长裂纹的形成)^[7].Quesnay等^[8]发现蚀坑是影响钢绞线安全性能及疲劳寿命的关键因素,在拉力作用下,蚀坑位置处形成明显的应力集中现象,裂纹易从该处衍生,导致钢绞线安全性能降低.

然而大多数研究仅考虑荷载对钢绞线耐久性的影响,或者分别考虑交变荷载和氯盐环境对其耐久性的作用,而未考虑氯盐环境和荷载的耦合作用.在实际工程中,钢绞线往往承受二者共同作用,故对该问题应进行进一步深入研究.

针对上述问题,本文通过开展盐雾腐蚀试验,在不同应力幅和氯盐环境共同作用下模拟钢绞线腐蚀

规律,并基于灰度处理方法从细观层面上量化钢绞线腐蚀形态,通过对钢绞线进行腐蚀分区,得到钢绞线抗拉强度和延伸率与腐蚀率之间的关系.采用工业电子显微镜观察各腐蚀区钢绞线的破坏规律,分析了不同腐蚀等级下钢绞线的疲劳寿命.

1 试验

1.1 原材料及试验仪器

钢绞线由中国宝武钢铁集团有限公司生产,直径为15.2 mm,抗拉强度为1 860 MPa,表面镀锌层厚度为0.2 mm,单根钢丝镀锌层质量不小于110 g/m²,每根钢绞线长度为5.4 m.试验仪器的名称、型号技术参数等如表1所示.将试件分为20组,每组3根.分别以5、15、30 d为周期进行试验,所施加的应力幅($\Delta\sigma$)分别为100、200、300 MPa,最大循环荷载为744 MPa,即 $0.4f_{pk}$ (f_{pk} 为钢绞线极限强度标准值)^[9].整个试验历时720 h,以 $\Delta\sigma=200$ MPa为例,其加载示意图如图1所示.

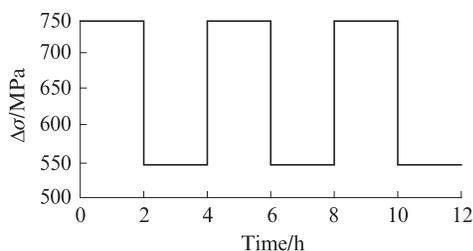


图1 交变荷载加载示意图

Fig. 1 Loading schematic diagram of alternating load

表1 试验仪器

Table 1 Test instruments

| Device name | Type | Technical parameter | Quantity |
|--|------------|--|----------|
| Salt fog test box | YC-200 | Saline spray deposition 250 mL/(m ² ·h) | 1 |
| Universal testing machine | WAW-1000 | Maximum load 1 000 kN | 1 |
| Air compressor | VB-0. 2/8 | Power 2. 2 kW | 1 |
| Digital scanning electronic instrument | KYKY-2008B | — | 1 |
| Electronic balance | SL500ZN | Accuracy 0. 01 g | 1 |
| Ultra-high voltage electric oil pump | DSS | Power 0. 75 kW | 1 |
| Acidimeter | PHS-3C | — | 1 |

1.2 试验条件

综合考虑温度、湿度及氯离子质量浓度对试验的影响,同时为保证试验精度,本文参照ASTIM G85-94《Standard practice for modified salt spray(fog) testing》来配置氯盐溶液.该溶液由氯化钠、水、氯化铜及醋酸组成,其pH值为3.1~3.3,试验温度设置为25℃.氯盐溶液配置步骤如下:先将氯化钠溶于水,质

量浓度控制在50 g/L左右;再往盐溶液中加入0.26~0.28 g/L氯化铜;最后加入醋酸,以保持酸性环境.

2 试验结果分析

采用铬酸溶液清洗钢绞线后,为防止盐雾中的氯离子腐蚀钢绞线基体,用自来水冲洗钢绞线,冷风吹干静置.向清洗钢绞线后的铬酸溶液中加入

KSCN(硫氰化钾),溶液变红,说明腐蚀产物中含有大量的Fe³⁺. 采用KYKY-2008B电子显微镜将钢绞线断面放大6 000倍,其SEM照片如图2所示. 由图2可见,在交变荷载和氯盐环境耦合作用下,钢绞线表面

出现大量蚀坑,且裂纹从蚀坑周围衍生,其中部分裂纹有进一步扩展趋势,裂纹最大长度可达5 mm.

当腐蚀时间为720 h时,钢绞线局部腐蚀部位灰度处理结果如表2所示.

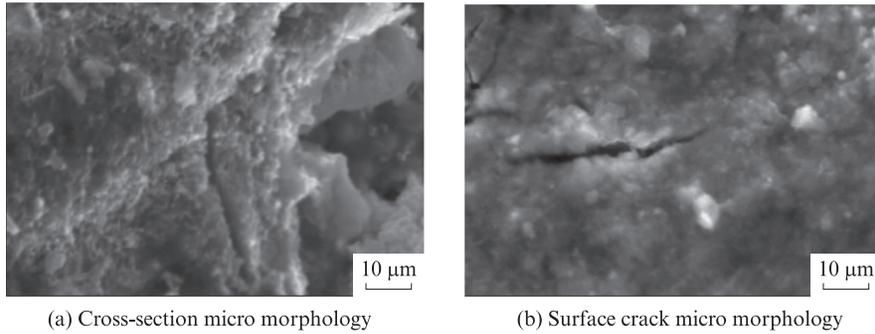


图2 钢绞线蚀坑的SEM照片
Fig. 2 SEM photos of steel strand corrosion pit

表2 钢绞线局部腐蚀部位灰度处理结果
Table 2 Gray processing results of local corrosion of steel strand

| $\Delta\sigma/\text{MPa}$ | Original graph | Gray scale image | Gray scale mean | Gray scale standard deviation |
|---------------------------|----------------|------------------|-----------------|-------------------------------|
| 100 | | | 80 | 25 |
| 200 | | | 100 | 28 |
| 300 | | | 125 | 27 |

由表2可见: 当应力幅为100 MPa时,钢绞线表面较为平整,蚀坑深度较小,但密度较大,部分镀锌层仍存在,个别蚀坑直径约为40 μm;当应力幅为200 MPa时,钢绞线表面出现了大量蚀坑,且蚀坑深度明显大于应力幅为100 MPa时,个别蚀坑直径达到55 μm,部分蚀坑已联合贯通形成裂纹;当应力幅为300 MPa时,钢绞线表面出现大面积腐蚀,镀锌层

完全被破坏,大量小蚀坑已联合贯通形成较大蚀坑,个别蚀坑直径可达75 μm,蚀坑位置处产生明显裂纹,部分裂纹已经开始衍生,钢绞线寿命受到严重影响.

将色调值在110以下的数值定义为蚀坑^[9],导出色调分布直方图,并统计分布量来计算钢绞线的蚀坑密度,所得结果如表3所示.

表3 不同交变荷载作用下的灰度直方图数据
Table 3 Grayscale histogram data under different loading conditions

| $\Delta\sigma/\text{MPa}$ | Hue level (peak) | Standard deviation | Pit frequency (tone ≤ 110) | Total frequency | Pit density/% |
|---------------------------|------------------|--------------------|----------------------------------|-----------------|---------------|
| 100 | 96(3 871) | 1 440.4 | 126 541 | 398 034 | 32.1 |
| 200 | 93(3 595) | 1 121.2 | 156 777 | 398 034 | 39.4 |
| 300 | 73(4 550) | 1 091.9 | 247 975 | 398 034 | 62.3 |

由表3可知,灰度直方图总频数为398 034,对于应力幅为100、200、300 MPa这3种工况,色调值小于等于110的频数总和分别为126 541、156 777、247 975.将色调值小于等于110的频数总和和所占总频数的百分比定义为钢绞线的腐蚀率^[10-11],得到3种工况下钢绞线的腐蚀率分别为32.1%、39.4%、62.3%.参照文献[12-13],按照灰度处理结果对钢绞线进行腐蚀分区,如表4所示.由表4可知,在应力幅为100、200、

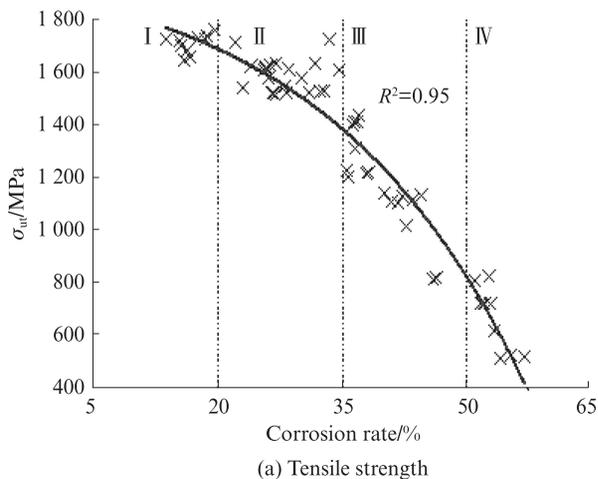
300 MPa时,钢绞线所对应的腐蚀区分别为I区、II区、III区、IV区.将位移增长量控制在1 mm/min^[14],通过对不同腐蚀等级的钢绞线施加1 860 MPa拉力,得到钢绞线抗拉强度、延伸率与腐蚀率之间的关

表4 钢绞线腐蚀分区标准
Table 4 Division standard of steel strand^[12-13]

| Corrosion grade | I | II | III | IV |
|------------------|------|-------|-------|-------|
| Corrosion rate/% | 0-20 | 20-35 | 35-50 | 50-65 |

系,如图3所示.由图3可知:钢绞线的抗拉强度与腐蚀率之间的相关系数为0.95;钢绞线的延伸率与腐蚀率之间的相关系数为0.93,表明拟合结果具有较高精度.钢绞线抗拉强度、延伸率与腐蚀率之间的关系如式(1)、(2)所示.

$$\sigma_{ut} = 2047 - 195e^{4\Delta w} \quad (1)$$



$$\epsilon = 6 - 7\Delta w \quad (2)$$

式中: σ_{ut} 为钢绞线抗拉强度,MPa; ϵ 为钢绞线延伸率,%; Δw 为腐蚀率,%.

从上述结果可知:钢绞线的抗拉强度与其腐蚀率服从指数分布;钢绞线的延伸率与其腐蚀率服从线性分布.

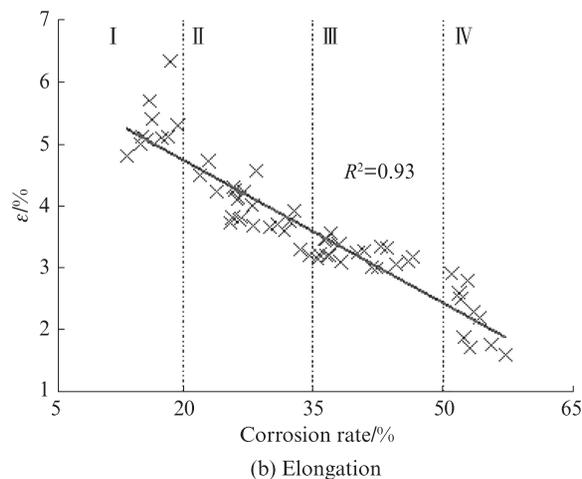


图3 钢绞线抗拉强度、延伸率与腐蚀率的关系

Fig. 3 Relationship between tensile strength, elongation and corrosion rate of steel strand

3 钢绞线破坏模式

采用电子显微镜对钢绞线典型破坏断面放大1000倍进行观察,结果如图4所示.由图4可见,钢绞线断裂的原因是蚀坑所引起的.蚀坑作为潜在疲劳源,当钢绞线的开裂应力强度因子(ΔK ,MPa·m^{1/2})大于其开裂韧性值时,裂纹易从该位置处延伸. ΔK 计算表达式^[15]为:

$$\Delta K = 0.65\Delta\sigma_0(\pi A_{rea}^{1/2})^{1/2} \quad (3)$$

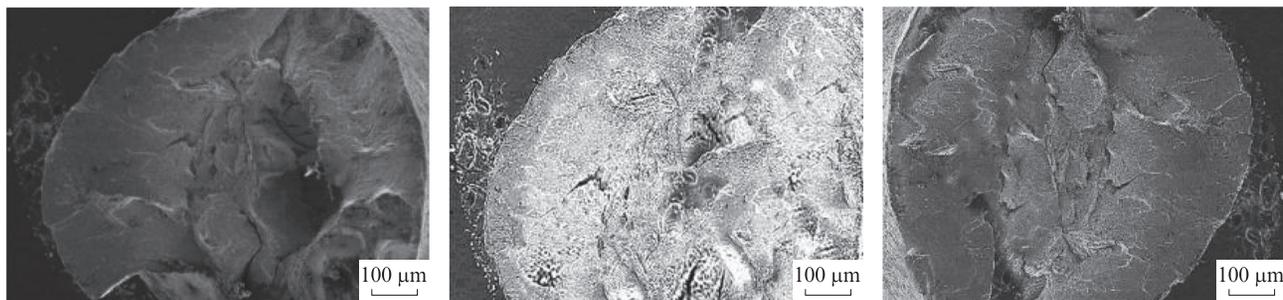
式中: $\Delta\sigma_0$ 为应力变化幅值,MPa; A_{rea} 为疲劳源扩展区面积, μm^2 .

根据钢绞线疲劳源扩展区面积计算结果(图

5),通过式(3)计算得到不同腐蚀区钢绞线的 ΔK ,如图6所示.由图6可见:钢绞线腐蚀率与 ΔK 的增长有较为显著的关系;随着钢绞线腐蚀程度的加深,其 ΔK 显著增大.研究表明,钢绞线的开裂韧性值为6~8 MPa·m^{1/2}[8].以 $\Delta K=7.5$ MPa·m^{1/2}为例,由图6还可知,腐蚀区I、II、III、IV的钢绞线发生开裂的概率分别为28.5%、30.4%、37.8%、45.7%.当钢绞线裂纹扩展到一定程度时,其断裂应力因子(K_1 ,MPa·m^{1/2})超过材料本身断裂韧性值,钢绞线断. K_1 计算表达式为:

$$K_1 = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (4)$$

式中: Y 为裂纹形状因子; σ 为试件两端所承受的应力,MPa; a 为蚀坑深度.



(a) Single fatigue source failure

(b) Multiple fatigue source failure

(c) Delamination failure

图4 钢绞线断面破坏模式

Fig. 4 Fracture failure modes of steel strands

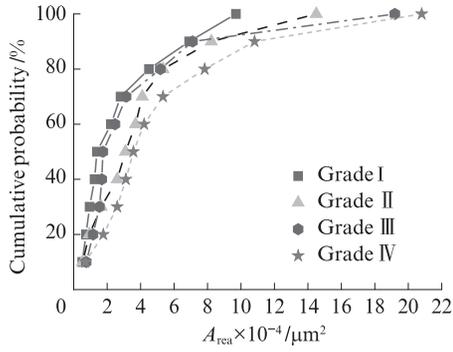


图5 钢绞线疲劳源扩展区面积
Fig. 5 Fatigue source defect area of steel strand

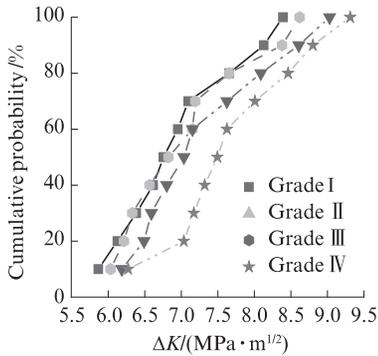


图6 钢绞线开裂应力强度因子
Fig. 6 Fatigue crack propagation threshold of steel strands

圆柱体表面椭圆裂纹形状因子计算式^[15]为:

$$Y = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^3 C_{ij} (a/\Phi)^i (a/b)^j \quad (5)$$

式中: Φ 为钢绞线直径; b 为蚀坑宽度; C_{ij} 取值范围见表5^[15].

各腐蚀区钢绞线的断裂应力因子计算结果如表6所示. 由表6可知, 钢绞线腐蚀程度越严重, 其断裂应力

表6 钢绞线断裂应力因子计算结果
Table 6 Fracture toughness values of steel strands

| Corrosion grade | $\Delta\sigma/\text{MPa}$ | a/mm | b/mm | Y | $K_I/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$ | $\bar{K}_I/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$ | Standard deviation |
|-----------------|---------------------------|---------------|---------------|------|---------------------------------------|---|--------------------|
| I | 300 | 1.63 | 1.56 | 0.86 | 49.8 | 50.96 | 1.26 |
| | 200 | 1.41 | 1.53 | 0.99 | 50.8 | | |
| | 100 | 1.52 | 1.61 | 1.12 | 52.3 | | |
| II | 300 | 1.71 | 1.62 | 0.92 | 50.9 | 49.60 | 1.25 |
| | 200 | 1.56 | 1.65 | 0.93 | 48.4 | | |
| | 100 | 1.54 | 1.62 | 0.96 | 49.7 | | |
| III | 300 | 2.11 | 1.64 | 0.82 | 47.6 | 48.40 | 0.81 |
| | 200 | 2.13 | 1.72 | 0.88 | 48.5 | | |
| | 100 | 2.15 | 1.74 | 0.92 | 49.2 | | |
| IV | 300 | 2.52 | 1.81 | 0.64 | 43.5 | 45.20 | 1.65 |
| | 200 | 2.45 | 1.74 | 0.68 | 45.4 | | |
| | 100 | 2.31 | 1.72 | 0.75 | 46.8 | | |

表5 C_{ij} 的取值范围

| Table 5 Values of coefficient C_{ij} ^[15] | | | | |
|--|-------|---------|---------|--------|
| i | $j=0$ | $j=1$ | $j=2$ | $j=3$ |
| 0 | 1.118 | -0.171 | -0.339 | 0.130 |
| 2 | 1.405 | 5.902 | -9.057 | 3.032 |
| 3 | 3.891 | -20.370 | 23.217 | -7.555 |
| 4 | 8.328 | 21.895 | -36.992 | 12.676 |

因子值越低. 在不同应力幅作用下, 其破坏模式又存在着较大区别, 当所施加应力幅较大时, 钢绞线腐蚀较为严重, 易发生单疲劳源破坏(图4(a)). 原因在于, 施加应力幅越大, 钢绞线的裂纹扩展速率越大, 开裂应力强度因子更加容易达到开裂韧性值, 裂纹贯穿钢绞线整个截面, 使得钢绞线迅速断裂. 随着应力幅的减小, 钢绞线腐蚀程度降低, 此时裂纹难以从一个方向衍生并贯穿整个截面, 故裂纹从多个蚀坑衍生, 相互贯穿, 形成多疲劳源破坏. 当处于低应力幅状态, 如应力幅为100 MPa时, 各疲劳源处裂纹无法短时间贯穿断面, 钢绞线易出现分层破坏.

4 钢绞线的腐蚀疲劳寿命

采用图2所示的加载方式, 对不同腐蚀区的钢绞线进行疲劳试验, 所得疲劳寿命 N 如表7所示. 由表7可见: 钢绞线的腐蚀率和应力幅对钢绞线疲劳寿命影响显著; 当腐蚀程度相当时, 随着应力幅的增大, 特别是应力幅为300 MPa时, 钢绞线的疲劳寿命出现显著下降的趋势; 当所加荷载幅度相同时, 钢绞线的腐蚀程度越严重, 其疲劳寿命的下降幅度越大. 原因在于, 钢绞线腐蚀程度越严重, 其开裂应力强度和断裂应力因子显著降低, 裂纹更易发生衍生, 故疲劳寿命越短. 通过三参数法对表7中的数据进行了拟

表7 钢绞线的腐蚀疲劳寿命

Table 7 Valid experimental results of steel strands fatigue life

| $\Delta\sigma$ / MPa | $N \times 10^{-5}$ /times | | | |
|-------------------------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | Grade I | Grade II | Grade III | Grade IV |
| 100 | 6.11-6.23 | 5.81-5.77 | 5.72-5.87 | 5.45-5.57 |
| 200 | 5.85-6.02 | 5.68-5.70 | 5.55-5.75 | 5.35-5.52 |
| 300 | 5.85-5.95 | 5.5-5.65 | 5.42-5.61 | 5.17-5.32 |

合,得到各腐蚀区钢绞线的腐蚀疲劳寿命,其计算表达式见式(6).

$$\begin{cases} N \times (\Delta\sigma - 247.7)^{0.97} = 10^{8.12} \text{ (Grade I)} \\ N \times (\Delta\sigma - 223.8)^{1.07} = 10^{7.93} \text{ (Grade II)} \\ N \times (\Delta\sigma - 198.4)^{1.09} = 10^{6.25} \text{ (Grade III)} \\ N \times (\Delta\sigma - 195.8)^{1.08} = 10^{5.95} \text{ (Grade IV)} \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可看出,随着腐蚀率的增大,钢绞线的疲劳寿命出现明显下降趋势.原因在于,钢绞线腐蚀面积过大,其基体内部产生大量裂纹,在荷载作用下裂纹极易衍生,致使钢绞线整体力学性能显著降低,钢绞线发生断裂破坏.

5 结论

(1)基于灰度处理方法,根据腐蚀率进行分区,发现钢绞线的抗拉强度与腐蚀率服从指数分布,其延伸率与腐蚀率服从线性分布.运用断裂力学对不同腐蚀程度钢绞线进行分析,得出不同腐蚀程度下钢绞线的开裂应力强度因子和断裂应力因子,两者可直观反映腐蚀率对钢绞线力学性能的影响.

(2)在高应力幅作用下,钢绞线易出现单疲劳源破坏模式.随着应力幅的减小,其破坏模式由单疲劳源破坏转变为多疲劳源破坏.当裂纹处于低应力幅状态,如应力幅为100 MPa时,裂纹从不同断面上衍生,钢绞线易出现分层破坏.

(3)钢绞线腐蚀疲劳寿命理论计算公式的获得,为评价索承式桥梁结构寿命提供了参考,具有一定的理论意义和工程价值.

参考文献:

- [1] FABER M H, ENGELUND S, RACKWITZ R. Aspects of parallel wire cable reliability[J]. Structural Safety, 2003, 25(2):201-225.
- [2] BARTON S C, VERMAAS G W, DUBY P F, et al. Accelerated corrosion and embrittlement of high strength bridge wire[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2000, 12(1):33-38.
- [3] MAYRBAURL R M, CAMO S. Cracking and fracture of suspension bridge wire[J]. Journal of Bridge Engineering, 2001, 6(6):645-650.
- [4] 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, 28(2):36-43.
LI Xianli, SONG Xianhui. Study on fatigue reliability of high strength galvanized steel wire[J]. Journal of Civil Engineering, 1995, 28(2):36-43. (in Chinese)
- [5] KHALEDMM, JOHN W F. Mechanics of environment-assisted cracking in bridge cable wire[J]. Bridge Structures, 2007, 3(3):247-254.
- [6] JOHN M, GEORGE D, DAVID P B. Safety analysis of suspension-bridge cables: Williamsburg Bridge[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(11):3197-3211.
- [7] CODARO E N, NAKAZATO R Z, HOROVISTIZ A L. An image processing method for morphology characterization and pitting corrosion evaluation[J]. Materials Science & Engineering A, 2002, 334(1/2):298-306.
- [8] QUESNAY D, UNDERHILLPR, BRITT H. Fatigue crack growth from corrosion damage in 7075-T6511 aluminium alloy under aircraft loading[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(5):371-377.
- [9] 杨世聪, 姚国文, 张劲泉. 加速盐雾环境中钢绞线的腐蚀疲劳特征[J]. 材料导报, 2018, 32(12):1988-1993.
YANG Shicong, YAO Guowen, ZHANG Jinqun. Corrosion fatigue characteristics of steel strand in accelerated salt fog environment[J]. Materials Reports, 2018, 32(12):1988-1993. (in Chinese)
- [10] YANG S C, YAO G W, ZHANG J Q. Observations on the damage behaviors of corrosion fatigue in steel strands based on image analysis[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(12):168-174.
- [11] 杨世聪. 桥梁拉吊索腐蚀-疲劳问题及服役可靠性[D]. 重庆:重庆交通大学, 2018.
YANG Shicong. Corrosion fatigue problem and service reliability of bridge girder tension sling[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [12] 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. Study on fatigue performance of corroded steel wire and fatigue reliability evaluation method of bridge cable[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)
- [13] 朱子昂. 平行钢丝拉索在荷载与电化学腐蚀耦合作用下的损伤机理试验研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2018.
ZHU Zhiang. Experimental study on damage mechanism of parallel steel cable under coupling action of load and electrochemical corrosion[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [14] 郑文忠, 胡琼, 张昊. 高温下及高温后1770级 Φ P5低松弛预应力钢丝力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(2):120-128.
ZHENG Wenzhong, HU Qiong, ZHANG Hao. Experimental study on mechanical properties of 1770 grade Φ P5 low relaxation prestressed steel wire at high temperature and after high

- temperature [J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(2): 120-128. (in Chinese)
- [15] 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, 50(3): 105-111.
- ZHENG Xianglong, XIE Xu, LI Xiaozhang, et al. Estimation model of steel wire crack growth and its application in calculation of pre corrosion fatigue life[J]. Journal of Civil Engineering, 2017, 50(3): 105-111. (in Chinese)