

# 应力比对高强钢丝疲劳寿命影响试验研究

曾懿,颜东煌,许红胜,杨盈

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**为明确应力比对钢丝疲劳寿命的影响,验证断裂力学模型对钢丝疲劳寿命评估的适用性。在将钢丝点蚀坑等效为缺口的假设基础上,开展了不同应力比下不同预制深度缺口钢丝样本的疲劳试验,建立了考虑应力比效应的疲劳寿命经验方程。试验结果表明:钢丝样本的疲劳寿命受应力比的影响明显,随应力比的增大而明显减小。预制缺口深度和应力比的增大均会导致钢丝样本疲劳强度的下降。采用考虑应力比效应的断裂力学模型对钢丝样本进行了疲劳寿命预测,预测结果处于 $\pm 2$ 倍误差带内。断裂力学模型对于不同应力比下的缺口钢丝疲劳寿命预测具有一定的适用性。

**关键词:**高强钢丝;疲劳试验;应力比;预制缺口;疲劳寿命

中图分类号:U443.38

文献标志码:A

## Experimental Study on Influence of Stress Ratio on Fatigue Life of High Strength Steel Wire

ZENG Yi, YAN Donghuang, XU Hongsheng, YANG Ying

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

**Abstract:** To clarify the influence of stress ratio on the fatigue life of high strength steel wire and verify the applicability of the fracture mechanics model to evaluate the fatigue life of steel wire, based on the assumption of equating wire corrosion pits to notches, fatigue tests were carried out on steel wire samples with different prefabricated notch depths at different stress ratios, and a fatigue life empirical equation considering the stress ratio effect was established. The results show that the fatigue life of the steel wire samples is significantly influenced by the stress ratio, which decreases with the increase in the stress ratio. The increase in both prefabricated notch depth and stress ratio will lead to a decrease in the fatigue strength of the steel wire samples. The fatigue life of the steel wire samples is predicted by the fracture mechanics model considering the stress ratio effect, and the predicted values are within the error band of  $\pm 2.0$  times. The fracture mechanics model has certain applicability for predicting the fatigue life of notched steel wires at different stress ratios.

**Keywords:** high strength steel wire; fatigue test; stress ratio; prefabricated notch; fatigue life

## 0 引言

高强钢丝作为索结构的关键构件,因其优异的性能被广泛应用于大跨径桥梁<sup>[1-2]</sup>。拉索在服役过程中,不可避免地受到循环荷载和环境腐蚀的影响。腐蚀与疲劳会显著降低钢丝疲劳性能,进一步影响拉索的承载能力<sup>[3-4]</sup>。

腐蚀与疲劳是影响高强钢丝疲劳寿命的两个重要因素。均匀腐蚀和点蚀是钢丝腐蚀的两种类型,

相比均匀腐蚀引起的钢丝净截面面积减小,点蚀引起的应力集中是降低疲劳寿命的主要因素<sup>[5-6]</sup>。Li等<sup>[7]</sup>对服役钢丝进行疲劳试验,发现点蚀加速了疲劳裂纹扩展以及疲劳断裂的过程;李晓章等<sup>[8]</sup>对轻微锈蚀、严重锈蚀以及点蚀钢丝进行疲劳试验研究,发现锈蚀对钢丝疲劳寿命影响显著,但随着锈蚀程度的进一步加深,疲劳寿命变化规律不明显;吴冲等<sup>[9]</sup>对不同锈蚀程度下,预腐蚀钢丝疲劳性能的退化规律进行研究,发现锈蚀钢丝应力-寿命曲线呈双直线关

收稿日期:2023-03-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51878073,52278141)

作者简介:曾懿,男,硕士研究生.E-mail:864424554@qq.com

系;Wang等<sup>[10]</sup>基于3D扫描技术提出了蚀坑深度与腐蚀程度的定量关系,并基于等效初始裂纹尺寸评估锈蚀钢丝的疲劳寿命。腐蚀对钢丝性能的影响不能忽视,但由于蚀坑发展的随机性以及尺寸多样性,在研究腐蚀钢丝的疲劳性能时,往往不能系统性研究蚀坑形貌尺寸与疲劳寿命之间的定量关系。

现有研究表明:通过机械铣切在钢丝表面做缺口,模拟表面点蚀坑是一种合理可行的研究疲劳寿命的方法。潘晓宇等<sup>[11]</sup>采用缺口来模拟钢丝表面蚀坑,建立蚀坑参数与钢丝极限应变分布的关系;Li等<sup>[12]</sup>对自然腐蚀和人工预制缺口钢丝进行对比疲劳试验,讨论腐蚀程度、缺口尺寸与疲劳寿命之间的关系;Nakamura等<sup>[13]</sup>认为缺口形状是影响钢丝疲劳强度的主要因素,深而尖的缺口比圆坑影响效果更为显著;叶华文等<sup>[14]</sup>以不同缺口形状模拟点蚀坑,认为基于临界域法对钢丝疲劳寿命的预测具有准确性和适用性;Ma等<sup>[15]</sup>研究了不同缺口形状对应力集中系数的影响,建立了缺口形状、缺口深度与疲劳寿命的关系模型。上述研究主要通过人工预制缺口的方式模拟钢丝的点蚀,系统地研究了点蚀坑参量对钢丝疲劳性能的影响。

然而,除了点蚀处应力集中对钢丝疲劳寿命的影响外,应力比对疲劳寿命也具有较大的影响<sup>[16-18]</sup>。Jiang等<sup>[19]</sup>对不同应力比下的裂纹钢丝进行疲劳试验,发现应力比越大,裂纹扩展速度越快,钢丝疲劳寿命越小;Zheng等<sup>[20]</sup>对片状试样进行不同应力比下的裂纹扩展试验,发现板状裂纹扩展规律可用于钢丝的疲劳寿命预测;Miao等<sup>[21]</sup>通过有限元分析不同蚀坑尺寸和应力比下钢丝的疲劳寿命,发现应力比对宽浅形蚀坑的影响远大于深窄坑;Jie等<sup>[22]</sup>基于应力法、应变能法和断裂力学方法预测了不同应力比下腐蚀钢丝的疲劳寿命。由上述研究可知,线弹性断裂力学可用于腐蚀钢丝的疲劳寿命评估,但采用线弹性断裂力学对缺口钢丝疲劳寿命进行评估仍需要进一步研究。

本文基于不同腐蚀等级钢丝的蚀坑深度模拟,探讨应力比对等效蚀坑的缺口钢丝疲劳寿命的影响。首先,为了模拟钢丝表面点蚀,对钢丝预制缺口进行处理;其次,通过对钢丝开展不同应力比下疲劳寿命试验,讨论应力比对缺口钢丝疲劳性能的影响;最后,采用考虑应力比效应的断裂力学模型对缺口钢丝的疲劳寿命进行预测。

## 1 疲劳试验

### 1.1 试验样本

试验样本取自服役12年的斜拉索钢丝,钢丝表面仍然有镀锌层,无明显腐蚀现象。对服役钢丝进行静力测试,得到的平均极限抗拉强度 $\sigma_b$ 为1704 MPa。钢丝样本直径 $D$ 为7.0 mm,切割长度为400 mm。通过机械铣切的方式,使钢丝具有不同预制深度的半椭圆形缺口,预制缺口形状如图1所示。样本钢丝分为A、B、C三组,预制缺口深度设置为0.4 mm、0.6 mm、0.8 mm各15根,缺口钢丝样本如图2所示。

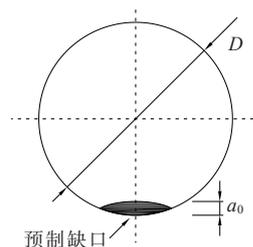


图1 预制缺口形状

Figure 1 Prefabricated notch shape

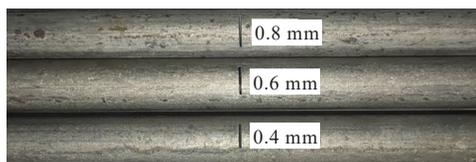


图2 缺口钢丝样本

Figure 2 Steel wire samples with notches

### 1.2 试验方案

采用MTS Landmark电液伺服液压万能试验机进行疲劳加载,加载波形为正弦波,加载频率为6 Hz,加载装置如图3所示。等幅疲劳载荷可由应力幅值 $\sigma_a$ 和平均应力 $\sigma_m$ 确定,并可根据应力比 $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ 和应力范围 $\Delta S = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ 得到。根据《桥梁缆索用热镀锌或锌铝合金钢丝》(GB/T 17101—2019)<sup>[23]</sup>要求,最大应力水平不超过 $0.45\sigma_b$ ,同时参考文献[17]应力比设置方法,本文应力比 $R$ 设置为0.1、0.2、0.3,对A、B、C三组钢丝样本根据不同应力比分级进行组内细分,在应力比不变的情况下,每组应力 $\Delta S$ 保持在540 MPa、480 MPa、420 MPa、360 MPa和300 MPa,疲劳试验设计参数见表1。每次疲劳试验开始时,MTS夹具夹持的钢丝中间自由段长度控制为260 mm,在加载装置上输入的应力幅值和平均应力可分别用应力比与应力范围表示如下:

$$\sigma_a = \Delta S / 2 \quad (1)$$

$$\sigma_m = \Delta S (1 + R) / [2(1 - R)] \quad (2)$$

式中： $\sigma_a$ 为应力幅值； $\sigma_m$ 为平均应力； $\Delta S$ 为应力范围； $R$ 为应力比。



图3 疲劳试验加载装置

Figure 3 Loading device of fatigue test

表1 疲劳试验设计参数

Table 1 Fatigue test design parameters

样本编号	应力比 $R$	应力范围 $\Delta S / \text{MPa}$	应力最大值 $F_{\max} / \text{kN}$
A1/B1/C1	0.1	540	23.09
		480	20.53
		420	17.96
		360	15.39
		300	12.83
A2/B2/C2	0.2	540	25.98
		480	23.09
		420	20.20
		360	17.32
		300	14.43
A3/B3/C3	0.3	540	29.69
		480	26.39
		420	23.09
		360	19.79
		300	16.49

## 2 试验结果与分析

### 2.1 S-N 曲线

不同预制深度和应力比下的钢丝疲劳寿命如图4所示。

从图4可以看出：缺口深度与应力比是引起钢丝疲劳寿命下降的主要因素。为了进一步明确不同应力比下和不同预制深度的钢丝疲劳寿命变化规律，对图4中试验数据进行回归处理，通常疲劳寿命  $N$  与应力范围  $\Delta S$  采用幂函数的形式表示<sup>[24]</sup>：

$$\Delta S^B N = A \quad (3)$$

对式(3)两边取双对数，可以得到：

$$\lg N = \lg A - B \lg(\Delta S) \quad (4)$$

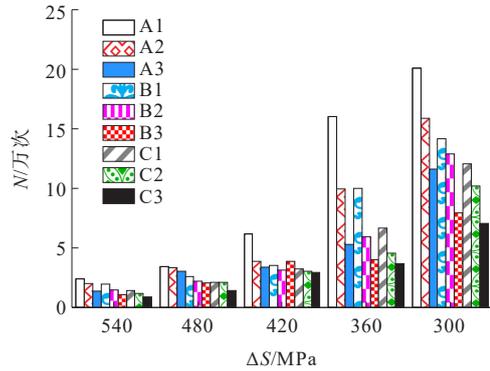


图4 钢丝疲劳寿命

Figure 4 Fatigue life of steel wire

式中： $A$ 与 $B$ 为材料参数； $\lg A$ 为对数  $S-N$  曲线与  $\lg N$  轴的截距； $B$ 为缺口钢丝对数  $S-N$  曲线的斜率。

假设缺口试样在不同应力比和预制深度下有相同的斜率  $B$ ，采用公式(4)对图4试验数据进行线性回归分析，各拟合曲线材料参数和决定系数  $R^2$  如表2所示。表中决定系数  $R^2$  越接近1，说明疲劳寿命对应力范围的依赖关系越显著，拟合效果越好。曲线截距反映了不同测试条件对钢丝的疲劳性能的影响。可以看出：对于缺口钢丝，材料参数  $B$  在3.7左右时，决定系数  $R^2$  大于0.9，说明曲线拟合程度较好，应力比对  $S-N$  曲线斜率无明显影响。

表2 S-N 曲线拟合材料参数

Table 2 Fitting material parameters of S-N curve

编号	$\lg A$	$R^2$	编号	$\lg A$	$R^2$	编号	$\lg A$	$R^2$
A1	14.51	0.956 2	B1	14.39	0.967 6	C1	14.26	0.939 7
A2	14.35	0.954 5	B2	14.25	0.991 7	C2	14.16	0.900 4
A3	14.25	0.995 3	B3	14.18	0.983 9	C3	14.07	0.966 6

注：回归材料参数  $B=3.7$ 。

### 2.2 疲劳寿命分析

根据表2拟合参数，绘制不同应力比下，缺口深度为0.4 mm的钢丝的  $S-N$  曲线如图5所示。从图5中可以看出：当应力范围  $\Delta S=300 \text{ MPa}$  时，不同应力比之间的疲劳寿命最大差值为80 483次，而当  $\Delta S=540 \text{ MPa}$  时，不同应力比之间的疲劳寿命最大差值为9 610次，随着应力范围的降低，不同应力比下的钢丝疲劳寿命差异越大。当应力范围恒定时，当应力比  $R$  从0.1增加到0.2时，钢丝的平均使用寿命下降了30.3%，而应力比  $R$  从0.1增加到0.3时，钢丝的平均使用寿命下降了45.1%。在应力范围恒定的情况下，随着应力比的增大，钢丝的疲劳寿命越小。

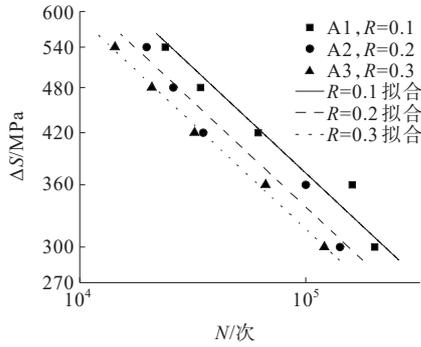


图5 不同应力比下缺口钢丝的S-N曲线(缺口深度:0.4 mm)

Figure 5 S-N curves of notched steel wire at different stress ratios(Notch depth:0.4 mm)

### 2.3 疲劳强度分析

为了更直接地了解缺口深度与应力比对钢丝疲劳性能的影响,确定不同测试条件下的S-N曲线之间的定量关系,拟合出200万次下的疲劳强度,描述预制深度和应力比与钢丝的疲劳强度之间的关系。

《桥梁缆索用热镀锌或锌铝合金钢丝》(GB/T 17101—2019)<sup>[23]</sup>要求,高强镀锌钢丝在360 MPa的应力范围下至少需要承受200万次循环而不发生断裂。根据表2和式(4)计算出钢丝样本在200万次循环次数下的疲劳强度,不同应力比下不同缺口深度钢丝的疲劳强度如图6所示。可以看出:与文献[23]相比,本文测试条件下的钢丝疲劳强度下降54%~65%,应力比与预制深度对于钢丝的疲劳强度有显著影响。

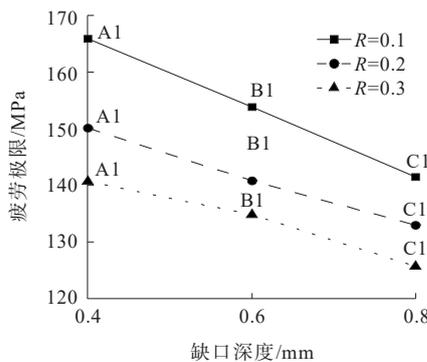


图6 不同应力比下缺口钢丝的疲劳强度

Figure 6 Fatigue strength of notched steel wire at different stress ratios

从图6可以看出:在给定的应力比下,疲劳强度随着预制深度的增大近似呈线性下降的趋势,当缺口深度从0.4 mm增加到0.8 mm,应力比R=0.1时的钢丝疲劳强度分别降低7.27%和8.02%,应力比R=0.2时的钢丝疲劳强度分别降低6.22%和

5.53%,应力比R=0.3时的钢丝疲劳强度分别降低4.20%和5.74%。不同应力比下疲劳强度的斜率近似相等,疲劳强度曲线呈现近似平行关系,随着应力比的增大,曲线向下移动。

### 2.4 疲劳寿命经验方程

本文使用常规的S-N拟合曲线得到表2中不同应力比下缺口钢丝的疲劳寿命与应力范围的关系。考虑应力比R对疲劳寿命的综合影响,对式(4)中的材料参数A采用应力比R表示,建立考虑应力比的缺口钢丝疲劳寿命经验方程:

$$A组: \lg N = 14.63 - 1.30R - 3.7 \lg(\Delta S) \quad (5)$$

$$B组: \lg N = 14.48 - 1.05R - 3.7 \lg(\Delta S) \quad (6)$$

$$C组: \lg N = 14.35 - 0.95R - 3.7 \lg(\Delta S) \quad (7)$$

当给定应力比时,在一定程度上式(5)~(7)可以估计宏观缺口下钢丝的疲劳寿命。

## 3 疲劳寿命预测

### 3.1 基于断裂力学的疲劳寿命预测模型

基于断裂力学的方法是疲劳寿命预测的主要工具之一,该方法的关键研究手段主要利用疲劳断口的裂纹尺寸以及疲劳裂纹扩展速率参数来评估疲劳寿命。试验研究表明应力比对钢丝疲劳寿命有明显影响,为了分析缺口钢丝在不同应力比下的剩余疲劳寿命理论公式的适用性,采用考虑应力比效应的断裂力学模型。

考虑应力比效应的Walker模型表达式如下<sup>[25]</sup>:

$$\frac{da}{dN} = C_1 [(1-R)^p \Delta K]^m \quad (8)$$

式中:da/dN为裂纹扩展速率(m/次);a为裂纹长度;C<sub>1</sub>、m<sub>1</sub>、p为Walker模型的裂纹扩展参数,可以由裂纹扩展数据来确定;ΔK为应力强度因子范围。

式(8)用对数进行线性化表示为:

$$\lg\left(\frac{da}{dN}\right) = m_1 \lg(\Delta K) + pm_1 \lg(1-R) + \lg C_1 \quad (9)$$

既考虑应力比又考虑断裂韧性影响的Forman模型表达式如下<sup>[26]</sup>:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_2 (\Delta K)^{m_2}}{(1-R) K_{Ic} - \Delta K} \quad (10)$$

式中:断裂韧性<sup>[27]</sup>K<sub>Ic</sub>取65.7 MPa·m<sup>1/2</sup>;C<sub>2</sub>、m<sub>2</sub>为Forman模型的裂纹扩展参数。

对式(10)采用对数进行线性化表示如下:

$$\lg\left(\frac{da}{dN}[(1-R)K_{IC}-\Delta K]\right) = m_2 \lg(\Delta K) + \lg C_2 \quad (11)$$

采用文献[28]中不同应力比( $R=0.1, 0.5, 0.8$ )下钢丝的裂纹扩展速率数据对式(9)~(11)分别进行多元线性拟合,经过计算得到的 Walker 模型和 Forman 模型如图 7 所示,拟合参数如表 3 所示。

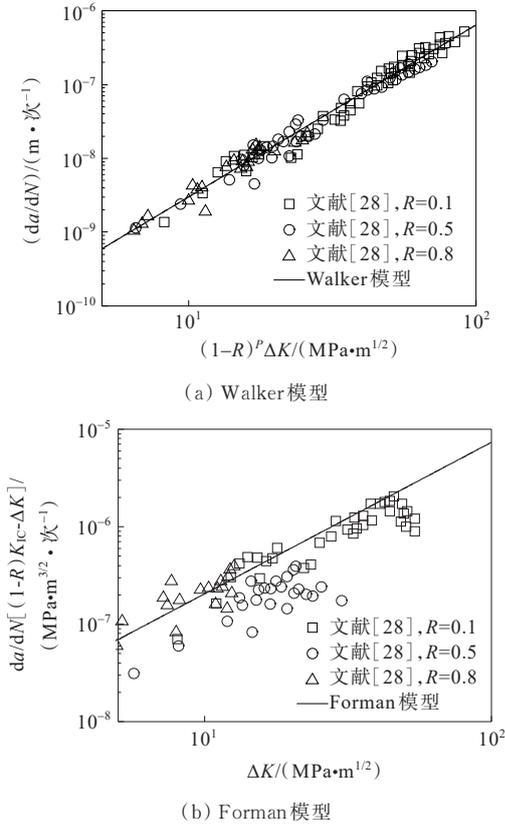


图 7 疲劳预测模型

Figure 7 Fatigue life prediction model

表 3 预测模型拟合参数

Table 3 Fitting parameters of prediction model

拟合参数	$C$	$m$	$p$
Walker 模型	$1.40 \times 10^{-11}$	2.33	-0.21
Forman 模型	$5.69 \times 10^{-9}$	1.55	-

应力强度因子范围  $\Delta K$ , 可通过式(12)表示:

$$\Delta K = Y \Delta S \sqrt{\pi a} \quad (12)$$

$Y$  为形状修正系数, 已有研究表明<sup>[28]</sup>: 对于裂纹前缘裂纹形状修正系数为:

$$Y = \left[ 0.473 - 3.286 \left( \frac{a}{D} \right) + 14.797 \left( \frac{a}{D} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot \left[ \left( \frac{a}{D} \right) - 0.621 \left( \frac{a}{D} \right)^2 \right]^{-1/4} \quad (13)$$

式中:  $D$  为钢丝直径。

对上述式(8)、(10)分别进行曲线积分, 裂纹扩展寿命  $N_p$  可通过式(14)、(15)计算:

Walker 模型:

$$N_{p1} = \frac{1}{C_1 (1-R)^{pm_1}} \int_{a_0}^{a_c} (Y \Delta S \sqrt{\pi a})^{-m_1} da \quad (14)$$

Forman 模型:

$$N_{p2} = \int_{a_0}^{a_c} \left( \frac{(1-R)K_{IC} - Y \Delta S \sqrt{\pi a}}{C_2 (Y \Delta S \sqrt{\pi a})^{m_2}} \right) da \quad (15)$$

式中:  $a_0$  为初始裂纹尺寸;  $a_c$  为疲劳失效时的断口临界裂纹尺寸。

疲劳失效本身涉及裂纹萌生以及裂纹扩展两个阶段, 但是由于应力集中效应的影响, 表面缺口处更容易形成裂纹<sup>[12]</sup>, 因此, 忽略裂纹萌生阶段, 假设预制缺口深度为初始裂纹尺寸  $a_0$ 。同时, 当缺少钢丝断口临界尺寸数据时, 可由式(16)和断裂韧性  $K_{IC}$  对临界裂纹尺寸  $a_c$  进行迭代估算:

$$a_c = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_{IC}}{Y \sigma_{max}} \right)^2 = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{(1-R)K_{IC}}{Y \Delta S} \right]^2 \quad (16)$$

### 3.2 模型验证

为了验证疲劳寿命预测模型的适用性, 根据上述得到的裂纹扩展材料参数, 得到缺口钢丝在不同应力比下的预测疲劳寿命。双对数坐标下 Walker 模型与 Forman 模型对缺口钢丝试样预测寿命与试验值之间的对比结果如图 8 所示,  $X$  轴表示钢丝试验疲劳寿命  $N_{exp}$ ,  $Y$  轴表示所采用的断裂力学模型预测疲劳寿命  $N_p$ 。

从图 8 可以看出: 两种模型预测疲劳寿命随着应力范围的减小而趋近于试验值。在低应力范围下 ( $\Delta S \leq 360$  MPa), 两种模型的预测寿命与理论寿命预测结果相对误差较小且较为均匀地分布在对角线两侧, 但对于在高应力范围下 ( $\Delta S > 360$  MPa) 的 Walker 模型, 预测结果大多低于理论预测值, 计算出来的疲劳寿命与试验数据之间存在较大偏差。误差出现的主要原因是所提出的疲劳寿命预测模型未考虑缺口深宽比的影响, 直接将缺口深度等效成初始裂纹尺寸, 此外, 缺口宽度越小的钢丝缺口底部应力集中越高<sup>[29]</sup>。在受到过高的循环荷载时, 表面缺口处的裂纹更容易突然增大, 从而使钢丝的剩余疲劳寿命退化显著, 导致试验数据偏小。

虽在高应力范围下, 预测值与试验值有一定偏差, 但 Walker 模型和 Forman 模型有超过 95% 的预测

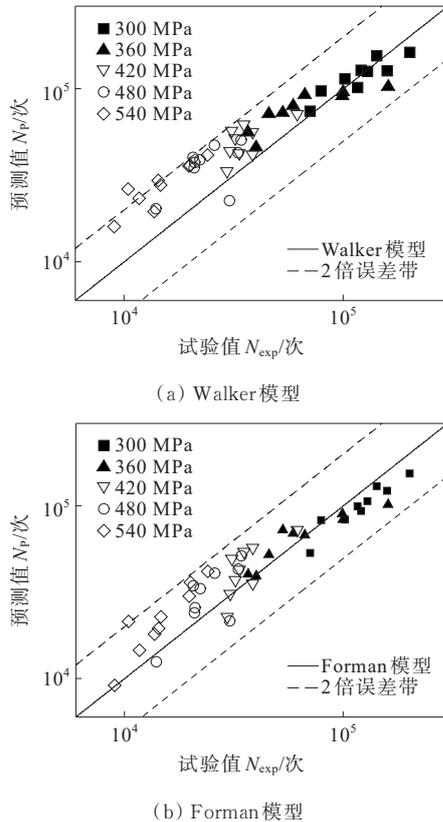


图8 疲劳寿命预测值与试验值对比

Figure 8 Predicted and experimental values of fatigue life

值仍然落在 $\pm 2$ 倍误差带内(图8中虚线所示)。整体看来,Walker模型和Forman模型对钢丝疲劳寿命预测在可接受范围之内,基于考虑应力比效应的疲劳预测模型具有一定的准确性以及适用性。且在高应力范围下的Forman模型预测结果较好。

#### 4 结论

本文开展了不同应力比不同缺口深度钢丝的疲劳试验,结合断裂力学理论对钢丝疲劳寿命进行研究,得出以下结论:

(1) 应力范围恒定的情况下,随着应力比的增大,钢丝的疲劳寿命越小。应力比对缺口钢丝S-N曲线斜率无明显影响。并建立了考虑应力比效应的疲劳寿命经验方程。

(2) 预制缺口深度和应力比的增大均会导致钢丝的疲劳强度下降。不同应力比下疲劳强度下降斜率近似相等。

(3) 断裂力学模型对缺口钢丝的疲劳寿命预测有一定适用性。对比两种模型,预测得到的结果基本落在 $\pm 2$ 倍误差带内,Forman模型在高应力范围下

有较好的预测结果。

本文基于人工预制缺口简化模拟腐蚀坑的方式仅考虑了点蚀的深度影响,而缺口钢丝与实际服役过程中的腐蚀钢丝仍有一定区别,需要在未来的理论和试验研究中进一步详细研究。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] XUE S L, SHEN R L, XUE H J, et al. Failure analysis of high-strength steel wire under random corrosion[J]. Structures, 2021, 33: 720-727.
- [2] 许红胜,任凯,颜东煌. 腐蚀拉索钢丝的双蚀坑应力强度因子研究[J]. 中外公路, 2021, 41(5): 90-96.  
XU Hongsheng, REN Kai, YAN Donghuang. Study on stress intensity factor of double pits in corroded cable wires[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(5): 90-96.
- [3] 郑祥隆,谢旭,李晓章,等. 锈蚀钢丝疲劳断口分析与寿命预测[J]. 中国公路学报, 2017, 30(4): 79-86.  
ZHENG Xianglong, XIE Xu, LI Xiaozhang, et al. Fatigue fracture surface analysis and fatigue life estimation of corroded steel wires[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(4): 79-86.
- [4] FAN Z Y, YE Q W, XU X, et al. Fatigue reliability-based replacement strategy for bridge stay cables: A case study in China[J]. Structures, 2022, 39: 1176-1188.
- [5] 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.
- [6] SUN J Z, DING Z H, HUANG Q. Corrosion fatigue life prediction for steel bar in concrete based on fatigue crack propagation and equivalent initial flaw size[J]. Construction and Building Materials, 2019, 195: 208-217.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 吴冲,蒋超,姜旭. 预腐蚀桥梁缆索高强钢丝疲劳试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(12): 1622-1627, 1695.

- WU Chong,JIANG Chao,JIANG Xu.Experiment research on fatigue performance of pre-corroded high-strength bridge wires[J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2018,46(12):1622-1627,1695.
- [10] WANG G D,MA Y F,WANG L,et al.Experimental study and residual fatigue life assessment of corroded high-tensile steel wires using 3D scanning technology[J]. Engineering Failure Analysis,2021,124:105335.
- [11] 潘骁宇,谢旭,李晓章,等. 锈蚀高强度钢丝的力学性能与评级方法[J]. 浙江大学学报(工学版),2014,48(11):1917-1924.
- PAN Xiaoyu, XIE Xu, LI Xiaozhang, et al. Mechanical properties and grading method of corroded high-tensile steel wires[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2014,48(11):1917-1924.
- [12] 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.
- [13] NAKAMURA S,SUZUMURA K. Experimental study on fatigue strength of corroded bridge wires[J]. Journal of Bridge Engineering,2013,18(3):200-209.
- [14] 叶华文,黄云,王义强,等. 基于临界域法的桥梁钢丝腐蚀疲劳寿命[J]. 西南交通大学学报,2015,50(2):294-299.
- YE Huawen, HUANG Yun, WANG Yiqiang, et al. Fatigue life estimation of corroded bridge wires based on theory of critical distances[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2015,50(2):294-299.
- [15] MA Y F, WANG Q, GUO Z Z, et al. Static and fatigue behavior investigation of artificial notched steel reinforcement[J]. Materials,2017,10(5):532.
- [16] LIU X L,SUN C Q,HONG Y S.Effects of stress ratio on high-cycle and very-high-cycle fatigue behavior of a Ti - 6Al - 4V alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015,622:228-235.
- [17] 许天早,杨宝,王党会,等. 应力比对 S135 钻杆钢腐蚀疲劳行为的影响[J]. 机械工程材料,2016,40(8):72-75.
- XU Tianhan, YANG Bao, WANG Danghui, et al. Influence of stress ratio on corrosion fatigue behaviour of S135 drill pipe steel[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2016, 40(8):72-75.
- [18] 董鹏鹏,贺启林,王海洲,等. 应力比对不锈钢焊接接头疲劳寿命的影响研究[J]. 宇航材料工艺,2022,52(5):82-89.
- DONG Pengpeng, HE Qilin, WANG Haizhou, et al. Investigation of the effects of stress ratio on fatigue life of stainless steel welded joints[J]. Aerospace Materials & Technology,2022,52(5):82-89.
- [19] JIANG J H,MA A B,WENG W F,et al.Corrosion fatigue performance of pre-split steel wires for high strength bridge cables[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures,2009,32(9):769-779.
- [20] ZHENG X L, XIE X, LI X Z, et al. Fatigue crack propagation characteristics of high-tensile steel wires for bridge cables[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures,2019,42(1):256-266.
- [21] MIAO C Q,LI R,YU J.Effects of characteristic parameters of corrosion pits on the fatigue life of the steel wires[J]. Journal of Constructional Steel Research,2020,168:105879.
- [22] JIE Z Y,CHEN C,BERTO F,et al.Effect of stress ratios on corrosion fatigue life of high-strength steel wires[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2022,45(2):593-606.
- [23] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 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.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Hot-dip zinc or zinc-aluminium coated steel wires for bridge cables: GB/T 17101—2019[S]. Beijing: Standards Press of China,2019.
- [24] 姚卫星. 结构疲劳寿命分析[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
- YAO Weixing. Fatigue life prediction of structures[M]. Beijing:National Defense Industry Press,2003.
- [25] WALKER K. The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 aluminum[C]//Effects of Environment and Complex Load History on Fatigue Life. ASTM International 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959,1970:1-14.
- [26] FORMAN R G. Study of fatigue crack initiation from flaws using fracture mechanics theory[J]. Engineering Fracture Mechanics,1972,4(2):333-345.
- [27] MAHMOUD K M. Fracture strength for a high strength steel bridge cable wire with a surface crack[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics,2007,48(2):152-160.
- [28] LLORCA J, SANCHEZ-GALVEZ V. Fatigue threshold determination in high strength cold drawn eutectoid steel wires [J]. Engineering Fracture Mechanics,1987,26(6):869-882.
- [29] WANG Y,ZHANG W H,ZHENG Y Q.Experimental study on corrosion fatigue performance of high-strength steel wire with initial defect for bridge cable[J]. Applied Sciences,2020,10(7):2293.