

拉索钢丝双裂纹疲劳寿命试验研究

许红胜,王智鸿,颜东煌

(长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:目前针对腐蚀钢丝剩余疲劳寿命的研究,通常采用将典型蚀坑等效模拟成预制单裂纹方法进行处理。而实际桥梁拉索腐蚀钢丝中往往出现多个典型蚀坑相邻的情况,多蚀坑对剩余疲劳寿命的影响尚不清晰,故有必要研究钢丝多蚀坑分布情况对疲劳剩余寿命的影响。该文通过将双腐蚀坑等效为双预制裂纹,分析研究双裂纹不同轴向距离、不同周向角度对钢丝疲劳寿命的影响。试验结果表明:双裂纹轴向距离较小时,钢丝的剩余疲劳寿命比单裂纹更大;随着双裂纹钢丝轴向距离的增大,钢丝的剩余疲劳寿命降低。双裂纹周向角度对钢丝疲劳寿命的影响有较大的离散性,对侧分布情况下,单双裂纹剩余疲劳寿命基本一致,钢丝剩余疲劳寿命最小;其次是垂直分布时双裂纹剩余疲劳寿命有较大提高;同侧分布时对钢丝剩余疲劳寿命影响较大,剩余疲劳寿命最高。但不论裂纹如何分布,二者相互影响都随着轴向距离的增加而逐渐减小,当双蚀坑间距足够大,对钢丝整体剩余疲劳寿命的影响与单裂纹基本相当。故将典型多蚀坑相邻的情况模拟成单裂纹的评估方法偏保守,对其剩余疲劳寿命的影响还需要进一步研究。

关键词:桥梁结构;双裂纹;疲劳试验;剩余寿命

中图分类号:U448

文献标志码:A

0 引言

腐蚀是金属材料常见的破坏形式之一。腐蚀通常在材料的断裂表面处发现^[1],而断裂是随着表面裂纹的逐渐扩展而引起的^[2]。在初始阶段,点蚀是在金属材料中产生针状、点状、小孔状的一种局部的腐蚀形态,这是一种局部腐蚀很大的危害^[3]。试验表明:在疲劳载荷下,腐蚀坑会产生应力集中,然后使裂纹从腐蚀坑迅速萌芽,这是由于腐蚀破坏而导致疲劳寿命显著降低的主要原因。有文献表明:腐蚀可使钢板的疲劳寿命降低58%^[4]。

研究者对结构腐蚀的疲劳性能进行了很多研究^[5-8]。Nakamura等^[9]研究了腐蚀钢丝的断裂机理和剩余疲劳寿命,得出如下结论:人工腐蚀的钢丝疲劳寿命随着腐蚀的加重而降低;Cerit等^[10]假设腐蚀坑为半椭圆形裂纹,并通过有限元方法建立了三维模型;研究结果发现,腐蚀裂纹深宽比是应力集中因子的关键影响参数,最大应力发生在裂纹底部;Nakamura等^[11]认为钢丝疲劳性能下降的主要原因是钢丝表面的腐蚀

坑,这加速了疲劳损伤的裂纹萌生,并由于应力集中而缩短了疲劳寿命;许红胜等^[12]运用有限元分析方法通过在单裂纹应力强度因子结合修正系数的方法来计算双蚀坑裂纹应力强度因子,为多蚀坑裂纹的应力强度因子分析提供了更加简便的计算方法。上述腐蚀钢丝的疲劳理论和试验表明,拉索钢丝的疲劳寿命与钢丝表面腐蚀坑的尺寸参数显著相关^[10]。钢丝表面的腐蚀坑会导致脆性破坏,并导致疲劳寿命降低。

但是,目前的研究都是针对单腐蚀坑,即最大的腐蚀坑对疲劳寿命的影响,它们中的大多数都没有考虑腐蚀坑数量和位置对疲劳寿命的影响。然而在工程实际中,点蚀往往是多个蚀坑一起出现,常见两个及以上相同量级的腐蚀坑出现在相邻的位置,腐蚀坑之间的相对位置是不规则的^[13]。多腐蚀坑在疲劳荷载下的寿命研究仍不充分,拉索钢丝疲劳寿命与多腐蚀坑位置参数之间的关系尚未建立,所以有必要研究蚀坑数量和位置对钢丝疲劳寿命的影响。

由于天然腐蚀坑的几何形状、数量和分布不规则,而人工腐蚀坑制作难度大,且难以控制腐蚀坑的

收稿日期:2023-03-10(修改稿)

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

作者简介:许红胜,男,博士,副教授.E-mail:hongsheng74@163.com

数量及位置参数^[14],不少学者通过将腐蚀坑等效成初始裂纹进行研究,并进行了相关的理论分析和试验研究^[15-22]。孙辽等^[15]将蚀坑损伤参量分成4类:统计、试验参数、尺寸、形状,探究了蚀坑深度、投影面积、预腐蚀系数、表面腐蚀率、分形维数、长宽比、矩形比等影响剩余寿命的主要损伤参量,总结了蚀坑等效成初始裂纹的方法;何卫平等^[16]通过开展2024-T62和7B04-T74两种铝合金板材单腐蚀坑的形成机理及扩展试验研究,将腐蚀坑等效成各种初始裂纹,验证了蚀坑当量化技术及含蚀坑损伤铝合金疲劳寿命预测方法的可行性;近年来,Guo等^[17]、Ma等^[18]将腐蚀坑等效成裂纹进行建模分析的结果表明,对于极端侵蚀性环境和低交通频率条件,将腐蚀坑视为裂纹是一种快速评估老化的钢筋混凝土桥梁的替代建模方法;陈杰等^[19]提出了一种等效表面缺陷模型,该模型使用最大腐蚀程度和长宽比来定量描述腐蚀效果,以预测疲劳寿命。以上研究表明将腐蚀坑等效成初始裂纹分析具有可行性。

任凯^[23]针对双蚀坑等效成双裂纹做出了相关理论及仿真分析,考虑了不同尺寸的双裂纹在钢丝不同轴向距离以及周向不同角度分布的情况,利用有限元软件计算出裂纹尖端各积分点的应力强度因子,并通过与单裂纹尖端应力强度因子的对比拟合了双裂纹尖端的应力强度因子的简便算法。但是,目前针对拉索钢丝双裂纹的试验分析较少,其理论及仿真分析的合理及可信性还有待进一步验证。故本文针对已有研究对拉索钢丝双裂纹的相关理论及仿真分析,结合文献成果^[24-25],将钢丝腐蚀坑等效为初始椭圆形裂纹,将同样尺寸的双裂纹在不同位置参数下进行细致的试验划分,通过试验得到单裂纹及双裂纹钢丝在疲劳荷载下的断裂截面及剩余疲劳寿命,研究钢丝疲劳寿命与双裂纹的位置参数之间的关系。

1 试验设计

1.1 样本设计

自然腐蚀下的拉索钢丝从开始的点蚀发展到后来的群集腐蚀是一个漫长的过程,在腐蚀的初期阶段,数量较多的典型蚀坑形貌是浅球形和深椭球形,在中后期阶段,出现概率较高的是浅椭球形蚀坑和长槽形蚀坑;而在钢丝的腐蚀中,以椭球形腐蚀坑数

量最多^[26]。腐蚀坑的大小和位置关系是随机的。

为了研究双腐蚀坑轴向距离及周向角度与疲劳寿命之间的关系,本文选取椭球形蚀坑作为研究对象,三维参数选择为长1.95 mm、宽0.92 mm、深0.3 mm^[14],参考已有文献资料^[15]将腐蚀坑形状简化为椭圆形裂纹,等效参数选择蚀坑深度和宽度,将形貌特征为椭球形的蚀坑等效为长半轴为0.8 mm、短半轴为0.32 mm的二维半椭圆形;由于实际加工条件的限制,依据文献^[27]参考裂纹深度取0.3 mm,通过线切割机床切削加工制造了42个带有双裂纹的钢丝和1组单裂纹钢丝作为对照。通过相同应力幅值的钢丝疲劳试验,研究了裂纹的数量及位置参数对钢丝疲劳性能的影响。

标本设计如图1所示。图中为含有两条裂纹的钢丝基体的正投影和侧投影, C_1 、 C_2 为等效半椭圆形状,其与钢丝基体切割形成初始裂纹, AB 为半椭圆与钢丝的交接角点。 a_1 为半椭圆的短半轴长度, b_1 为半椭圆的长半轴长度, h 为预制裂纹深度。在正投影中,等效半椭圆双裂纹的圆心与钢丝基体圆心所成夹角为周向角度;在侧投影中,等效半椭圆双裂纹沿钢丝基体轴向方向的距离为轴向距离 d 。采用控制变量法,对轴向距离和周向角度进行调整,为确定双裂纹的相对位置,按照图1所示,将周向角度分别设置为同侧(0°)、垂直(90°)、对侧(180°)3种不同的位置参数。

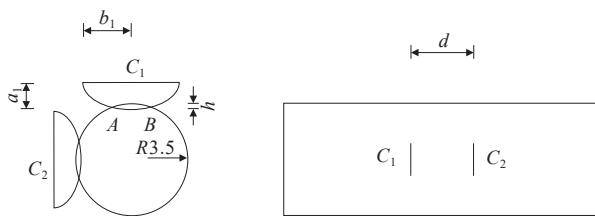


图1 标本说明(单位:mm)

1.2 样品加工

大跨度桥梁斜拉索常用 $\phi 5 \sim \phi 7$ mm 高强镀锌钢丝组成平行钢丝索,承担桥面传递的荷载。故本疲劳试验材料采用的是 $\phi 7$ mm 高强度镀锌钢丝,表面光滑无缺陷。钢丝的材料性能如表1所示。

试验设备为线切割机床与加载装置MTS疲劳试验机,先用线切割机床对试验钢丝进行初始裂纹的预制,然后用疲劳试验机测出不同带裂纹钢丝的剩余疲劳寿命。疲劳试验机主机采用电磁调速电机驱动,试验频率为2 Hz;测控系统对试验中的力与位

移进行全程监控,同时进行疲劳循环计数,当试验力或位移大于预设值后,系统自动停止工作,对系统起到保护作用。本试验试件以双裂纹周向角度不同分为A、C、G 3批,各个批次中的周向角度相同,而相对轴向距离分别设置为0、2、4、6、8 mm,表2为各批次钢丝的特征参数。

表1 高强度钢丝的材料性能

材料	E/GPa	F/MPa	f_y/MPa	ν
热浸镀锌钢丝	205	1 670	1 540	0.3

表2 试样的特征参数

周向角度/ $^{\circ}$	不同轴向距离(mm)对应的试样				
	0	2	4	6	8
0	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
90	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
180	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅

1.3 疲劳试验

结合试验加载装置高度、上下端锚固长度,本试验确定材料长度为300 mm,采用上部张拉方式。双裂纹试验对照组为单裂纹疲劳试验,单裂纹分组进行试验,每组3根。为贴合工程实际及模拟钢丝在多腐蚀坑条件下工作的应力状态,本试验以长沙银盆岭大桥为工程背景,结合已有研究得到的长沙银盆岭大桥的相关试验数据,疲劳试验加载均以大桥正常使用下的工作状态为参照^[27]。疲劳荷载设置为极限抗拉强度的0.30~0.36,应力峰值为600 MPa,应力幅值为100 MPa。试验完成后根据液压伺服疲劳机得出每根带裂纹钢丝的剩余疲劳寿命次数。

2 试验分析

2.1 试验结果

图2为具有代表性的断裂试样图。

由图2可以看出:钢丝的疲劳断裂可分为裂纹萌生区、裂纹扩展区和裂纹断裂区3个区域,疲劳中心位于裂纹表面,疲劳区域的外侧为瞬时断裂区域,辐射方向明显。裂纹萌生区是由人工加工材料形成的,其表面光滑平整。裂纹扩展区是由拉索钢丝疲劳荷载作用引起的,其表面光滑明亮平整。裂纹断裂区域是由于疲劳作用导致钢丝净截面减小,不足以承受荷载而瞬间断裂引起,其表面凹凸不平。

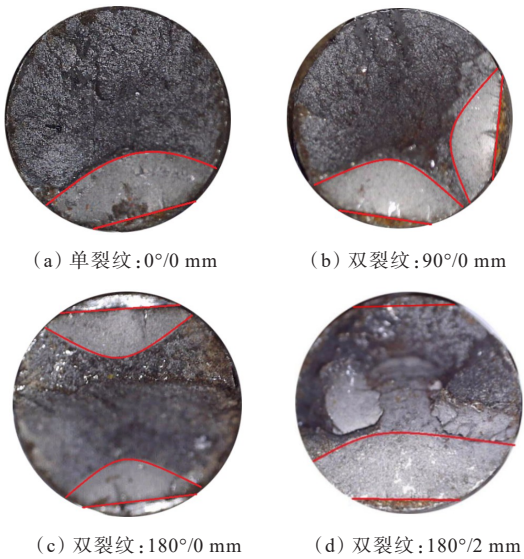


图2 带有裂纹的钢丝断裂图(周向角度/轴向距离)

图2(b)、(c)、(d)显示了双裂纹的钢丝疲劳断裂,断裂面存在2个疲劳扩展区,随着裂纹扩展最终融合形成1个断裂区,融合过程是不规则的,在实际情况中称为多源疲劳断裂。值得注意的是图2(d)双裂纹钢丝由于轴向距离的影响,双裂纹扩展方向与钢丝截面不再处于同一平面,一侧裂纹扩展明显,待裂纹扩展达到临界裂纹尺寸时,沿着双裂纹连接面发生瞬间断裂,瞬时断裂面特别凹凸不平,断裂面不再与钢丝截面处于同一基准面,呈阶梯韧性断裂。而在图2(b)、(c)断裂面中,双裂纹均发生明显扩展,扩展方向基本一致,待达到临界裂纹尺寸时,沿着双裂纹连接面发生瞬间断裂。

拉索钢丝预制裂纹面积如表3所示。图2(a)为单裂纹的钢丝疲劳断裂,钢丝全截面面积约为38.47 mm²,预制裂纹截面面积约占全截面面积的1.59%;与图2(b)、(c)、(d)相比较发现,其预制面积最小,疲劳面积最小,疲劳裂纹扩展不足,即单裂纹钢丝疲劳寿命最短。图2(b)、(c)、(d)为双裂纹的钢丝疲劳断裂。当双裂纹周向角度逐渐增大,图2(b)、(c)疲劳面积减小,表明疲劳寿命降低;当双裂纹轴向距离逐渐增大,图2(c)、(d)疲劳面积减小,表明疲劳寿命降低。

表3 拉索钢丝截面面积对比

图片	轴向距离/mm	周向角度/ $^{\circ}$	全截面面积/mm ²	预制面积/mm ²	(预制/全截面面积)/%
图2(a)	0	0	38.47	0.61	1.59
图2(b)	0	90	38.47	1.22	3.17
图2(c)	0	180	38.47	1.22	3.17
图2(d)	2	180	38.47	1.22	3.17

在试验中,试样的疲劳断裂没有预兆,是瞬时发生的脆性断裂,没有宏观的塑形变形过程,故危险性极大。由表3可知:预制裂纹区域相对于试件整体截面面积很小,但是随后的疲劳裂纹扩展面积和瞬时断裂面积都是裂纹预制区引起的。裂纹扩展区最主要的特征是较清晰的疲劳条纹和疲劳台阶,这是由于在试验过程中,钢丝试件在应力幅保持不变的情况下,裂纹扩展区经历循环反复的摩擦损伤,从而使之较为平整。在疲劳试验机作用下,裂纹继续扩展,随着加载时间的持续,外部荷载

按照设定周期不断循环变化,同时裂纹面张开与闭合现象交替出现,其扩展方向与外荷载方向垂直。随着裂纹面的缓慢扩展,钢丝试件疲劳面积增大,而有效受力截面逐渐减小,当试件扩展到临界状态时,试件就会在加载时突然断裂,疲劳断裂区断面粗糙且凹凸不平。

2.2 双裂纹疲劳寿命对比分析

3组钢丝在不同特征参数下的疲劳寿命如表4所示。双裂纹疲劳寿命与轴向距离、周向角度之间的关系如图3~8所示。

表4 拉索钢丝疲劳试验结果

试样	疲劳寿命/次			试样	疲劳寿命/次			试样	疲劳寿命/次		
	第1组	第2组	第3组		第1组	第2组	第3组		第1组	第2组	第3组
A ₁	296 560	298 660	297 605	C ₁	516 322	529 842	509 645	G ₁	313 478	307 940	362 591
A ₂	702 088	643 968	695 437	C ₂	411 942	455 852	420 124	G ₂	308 718	304 552	309 554
A ₃	664 708	629 654	643 902	C ₃	382 322	425 816	402 648	G ₃	307 278	301 898	308 006
A ₄	643 784	605 896	612 537	C ₄	371 372	382 288	379 924	G ₄	305 324	300 382	299 288
A ₅	625 132	593 404	598 644	C ₅	321 246	330 386	336 584	G ₅	295 928	300 030	298 766

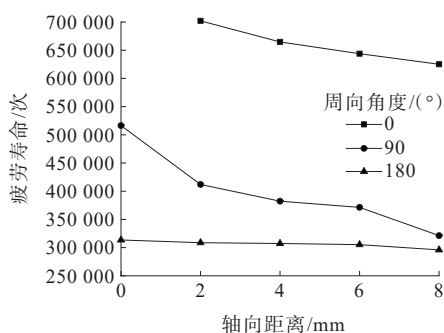


图3 钢丝剩余疲劳寿命曲线图(第1组)

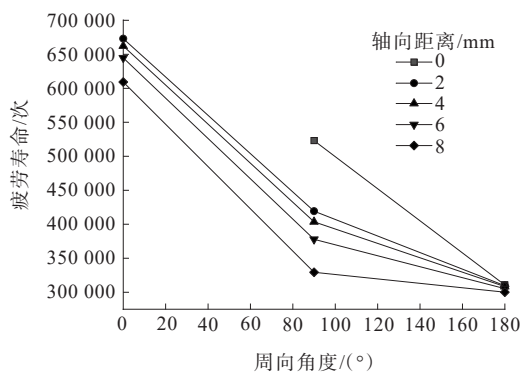


图4 钢丝剩余疲劳寿命曲线图(第1组)

图3、5、7为钢丝的疲劳寿命与双裂纹轴向距离之间的关系。由图3、5、7可以看出:随着双裂纹轴向距离的增加,钢丝的疲劳寿命下降,表明双裂纹轴向位置参数是影响钢丝疲劳寿命的因素之一。双裂纹成对侧180°分布时,钢丝剩余疲劳寿命最小,与单裂纹钢丝疲劳寿命最为接近;随着轴向距离的增加,钢

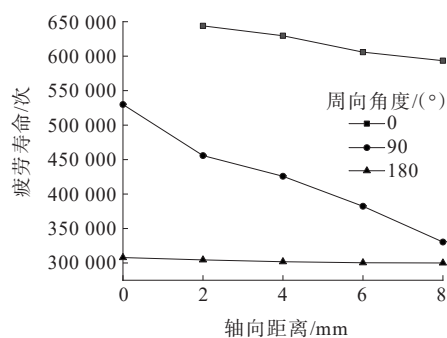


图5 钢丝剩余疲劳寿命曲线图(第2组)

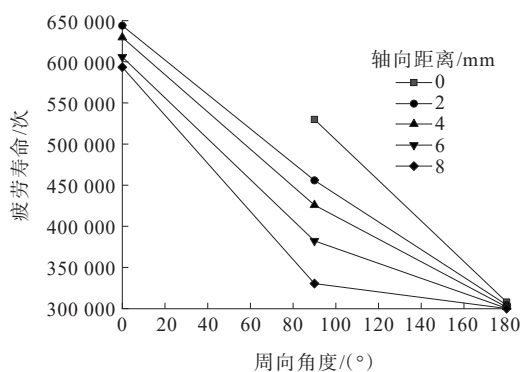


图6 钢丝剩余疲劳寿命曲线图(第2组)

丝疲劳寿命基本不变,在此情况下对轴向距离变化不敏感。双裂纹同侧0°分布时,钢丝剩余疲劳寿命最大,随着轴向距离的增加,钢丝疲劳寿命降低9.47%。双裂纹呈垂直90°分布时钢丝疲劳寿命随着轴向距离的增加而降低,当轴向距离从0增加到8 mm时,钢丝的平均疲劳寿命从大约500 000次急剧下降到大约

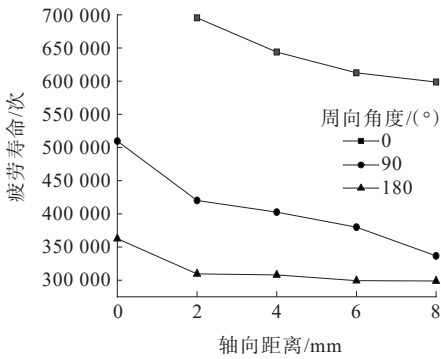


图7 钢丝剩余疲劳寿命曲线图(第3组)

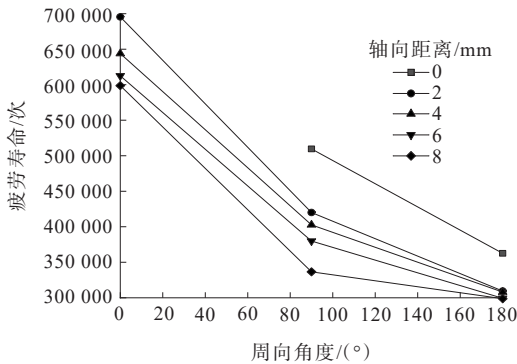


图8 钢丝剩余疲劳寿命曲线图(第3组)

320 000次,下降了37%,说明双裂纹垂直分布时疲劳寿命对轴向距离变化特别敏感,有较大的变异性。

图4、6、8为钢丝的疲劳寿命与双裂纹周向角度之间的关系。由图4、6、8可以看出:随着双裂纹周向角度的增加,钢丝的疲劳寿命下降,表明双裂纹周向位置参数是影响钢丝疲劳寿命的因素之一。当从0°增加到90°时,疲劳寿命最大下降了46.44%,疲劳寿命下降趋势较快。当从90°增加到180°时,疲劳寿命最大下降了40.6%,疲劳寿命下降趋势变慢。

当周向角度从0°到180°时,随着轴向距离的增加,不同周向角度的剩余疲劳寿命曲线越来越接近单裂纹疲劳寿命曲线,表明当轴向距离增大到一定程度后,双裂纹钢丝可看成单裂纹钢丝研究其疲劳寿命。

2.3 单双裂纹疲劳寿命对比分析

值得注意的是当单裂纹钢丝A₁(轴向距离为0,周向角度为0°)到双裂纹钢丝的疲劳寿命有一个突变,即双裂纹的疲劳试验寿命次数比单裂纹疲劳试验寿命次数更大。为了更加直观地对比单双裂纹剩余疲劳寿命的差别,取3组疲劳试验平均值计算出双裂纹与单裂纹剩余疲劳寿命比值,如表5所示。

由表5可以看出:双裂纹同侧分布时,双裂纹钢丝剩余疲劳寿命可达单裂纹钢丝的2.25倍,当两裂

表5 单双裂纹试验剩余疲劳寿命对比结果

试样	$N_{\text{双}}/N_{\text{单}}$	试样	$N_{\text{双}}/N_{\text{单}}$	试样	$N_{\text{双}}/N_{\text{单}}$
A ₁	1.00	C ₁	1.75	G ₁	1.09
A ₂	2.25	C ₂	1.45	G ₂	1.03
A ₃	2.16	C ₃	1.38	G ₃	1.02
A ₄	2.08	C ₄	1.27	G ₄	1.01
A ₅	2.01	C ₅	1.10	G ₅	1.00

纹相对距离为8 mm时,依然为2倍多,说明同侧双裂纹对钢丝剩余疲劳寿命影响较大;双裂纹成垂直分布时,其值最大为1.75倍;双裂纹呈对侧分布时,二者剩余疲劳寿命基本相同,当两裂纹相对距离为8 mm时,单双裂纹的疲劳寿命基本一致,说明此情况下双裂纹钢丝可视为单裂纹研究其疲劳寿命。

钢丝裂纹不同位置参数都表明多裂纹钢丝会导致疲劳寿命增加,原因是本试验设置的双裂纹分布状态削弱了单裂纹情况下的应力集中情况,使得双裂纹钢丝的剩余疲劳寿命比单裂纹大,钢丝能承受疲劳荷载的时间更久。

3 结论

本文通过预制获得了具有不同特征参数的45根高强钢丝。结合已有学者的研究成果,将腐蚀蚀坑等效为椭圆形裂纹。通过疲劳试验,探讨双腐蚀坑轴向距离和周向角度对钢丝疲劳寿命的影响。主要结论如下:

(1) 疲劳试验结果表明,预制的I型切口双裂纹试件的剩余疲劳寿命高于单裂纹预制试件的剩余疲劳寿命。说明在实际工程中使用单腐蚀坑进行剩余疲劳寿命预测评估是安全可靠,偏于保守的。

(2) 当双腐蚀试件轴向距离从0增加到8 mm时,钢丝的疲劳寿命降低。钢丝的疲劳寿命随着双腐蚀坑轴向距离的增加而下降,但是双腐蚀坑产生的相互干涉导致其剩余疲劳寿命仍显著大于单腐蚀坑的剩余疲劳寿命。仅当相对距离过大时,双腐蚀坑钢丝的相互影响减小直到其剩余疲劳寿命与单腐蚀坑钢丝的剩余疲劳一致。

(3) 当双腐蚀坑周向角度从0°增加到180°时,钢丝的疲劳寿命降低。钢丝的疲劳寿命随着双腐蚀坑周向角度的增加而下降,但是其剩余疲劳寿命仍大于单腐蚀坑。双腐蚀坑周向角度相距0°时,疲劳寿命对轴向距离变化不敏感,大致呈线性变化;双腐蚀坑

周向角度相距 90° 时,其疲劳寿命对轴向距离变化特别敏感;双腐蚀坑周向角度相距 180° 时,其对轴向距离变化不敏感。

参考文献:

- [1] KASHANI M M, CREWE A J, ALEXANDER N A. Use of a 3D optical measurement technique for stochastic corrosion pattern analysis of reinforcing bars subjected to accelerated corrosion[J]. *Corrosion Science*, 2013, 73: 208-221.
- [2] XU S H, WANG Y D. Estimating the effects of corrosion pits on the fatigue life of steel plate based on the 3D profile[J]. *International Journal of Fatigue*, 2015, 72: 27-41.
- [3] QIN G C, XU S H, YAO D Q, et al. Study on the degradation of mechanical properties of corroded steel plates based on surface topography[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 125: 205-217.
- [4] SILVA J E, GARBATOV Y, GUEDES SOARES C. Reliability assessment of a steel plate subjected to distributed and localized corrosion wastage[J]. *Engineering Structures*, 2014, 59: 13-20.
- [5] XIAO J, XIAO T, ZHENG Y Q, et al. Corrosion fatigue crack growth behavior of 316NG heat affected zone in simulated pressurized water reactor environment[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2020, 537: 152259.
- [6] WANG Y, ZHENG Y Q, ZHANG W H, et al. Analysis on damage evolution and corrosion fatigue performance of high-strength steel wire for bridge cable: Experiments and numerical simulation[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, 107: 102571.
- [7] CUI C J, CHEN A R, MA R J. An improved continuum damage mechanics model for evaluating corrosion-fatigue life of high-strength steel wires in the real service environment[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 135: 105540.
- [8] WANG S Q, ZHANG D K, CHEN K, et al. Corrosion fatigue behaviors of steel wires used in coalmine[J]. *Materials & Design*, 2014, 53: 58-64.
- [9] 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.
- [10] CERIT M, GENEL K, ESKI S. Numerical investigation on stress concentration of corrosion pit[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2009, 16(7): 2467-2472.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] WU K G, JUNG W S, BYEON J W. In-situ monitoring of pitting corrosion on vertically positioned 304 stainless steel by analyzing acoustic-emission energy parameter[J]. *Corrosion Science*, 2016, 105: 8-16.
- [14] 许红胜,胡亚斯,颜东煌. 既有腐蚀拉索钢丝蚀坑形态参数的分布特征[J]. *中外公路*, 2020, 40(1): 80-84.
- [15] 孙辽,姚卫星. 铝合金蚀坑损伤参量评述[J]. *力学与实践*, 2013, 35(4): 10-19.
- [16] 何卫平,陈勃,曹定国. 铝合金腐蚀损伤规律及蚀坑当量化技术研究[J]. *航空标准化与质量*, 2011(2): 10-13, 51.
- [17] GUO Z Z, MA Y F, WANG L, et al. Modelling guidelines for corrosion-fatigue life prediction of concrete bridges: Considering corrosion pit as a notch or crack[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 105: 883-895.
- [18] MA Y F, WANG G D, GUO Z Z, et al. Critical region method-based fatigue life prediction of notched steel wires of long-span bridges[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 225: 601-610.
- [19] 陈杰,庞森,刁波. 坑蚀钢筋疲劳寿命预测的等效表面缺陷模型[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(S2): 380-386.
- [20] HUANG Y F, WEI C, CHEN L J, et al. Quantitative correlation between geometric parameters and stress concentration of corrosion pits[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2014, 44: 168-178.
- [21] HUANG Y F, YE X B, HU B R, et al. Equivalent crack size model for pre-corrosion fatigue life prediction of aluminum alloy 7075-T6[J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 88: 217-226.
- [22] SANKARAN K K, PEREZ R, JATA K V. Effects of pitting corrosion on the fatigue behavior of aluminum alloy 7075-T6: Modeling and experimental studies[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2001, 297(1/2): 223-229.
- [23] 任凯. 拉索钢丝双蚀坑应力强度因子及其扩展寿命研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2019.
- [24] BURNS J T, GANGLOFF R P. Scientific advances enabling next generation management of corrosion induced fatigue[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 10: 362-369.
- [25] 孙辽. 铝合金腐蚀形貌与剩余疲劳寿命研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2013.
- [26] MIAO C, YU J, MEI M. Distribution law of corrosion pits on steel suspension wires for a tied arch bridge[J]. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 2016, 63: 166-170.
- [27] 曾毅杰. 斜拉索腐蚀钢丝蚀坑等效当量化方法及有效性研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2017.