

既有腐蚀拉索钢丝蚀坑形态参数的分布特征

许红胜, 胡亚斯, 颜东煌

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 从实际工程更换的腐蚀斜拉索中获取腐蚀钢丝试样, 并利用室内加速腐蚀试验制备了腐蚀钢丝对比试样, 针对各腐蚀分级的钢丝试样观测并记录了钢丝表面蚀坑的几何形态、数量和分布情况; 利用统计分析研究了实际工程和腐蚀试验制备的钢丝试样的蚀坑形态参数的概率分布模型。结果表明: 腐蚀钢丝的蚀坑几何形状可抽象为浅球形、深椭圆形、浅椭圆形、长槽形 4 种, 不同腐蚀等级钢丝中 4 种蚀坑形状的出现数量有较大差异; 蚀坑长度、宽度以及深宽比符合对数正态分布; 考虑张拉应力的局部加速腐蚀钢丝试样的统计规律与实际工程腐蚀钢丝试样的统计规律具有良好的拟合度。

关键词: 桥梁工程; 腐蚀钢丝; 蚀坑尺寸; 概率统计; 分布特征; 形态参数

中国 20 世纪修建的 100 余座斜拉桥中, 由于斜拉索钢丝锈蚀的原因, 有超过 20% 的斜拉桥进行了斜拉索更换, 耗资巨大。在基于腐蚀的设计方法(CBDA)中, 对于斜拉索这种多钢丝组成的富余结构, 斜拉索失效是建立在钢丝腐蚀失效的基础上。而针对拉索钢丝腐蚀损伤的试验研究均表明, 钢丝的腐蚀程度与其强度和疲劳寿命的降低存在显著的关联性。研究结果表明: 要对拉索的寿命进行有效预测, 必须准确地掌握拉索钢丝的腐蚀程度。最近的拉索钢丝腐蚀研究指出, 点蚀是影响拉索钢丝力学性能的关键腐蚀模式, 对拉索钢丝腐蚀程度的判定需重点研究腐蚀蚀坑的形态及其参数特征。

在实际工程中对斜拉索腐蚀钢丝的收集存在一定困难, 目前针对钢丝腐蚀的试验研究主要采用室内加速腐蚀试验制备钢丝样本。显然, 合适的试验方法对钢丝腐蚀相关研究具有重要意义。该文以实际工程中更换的腐蚀斜拉索的腐蚀钢丝作为基础样本, 对比不同室内加速腐蚀试验制备腐蚀钢丝样本, 进行腐蚀钢丝表面蚀坑几何形态参数的统计规律研究, 为腐蚀斜拉索的剩余寿命评估提供蚀坑数值化的基础试验数据, 并对所采用的加速腐蚀试验的合理性进行评价。

1 试验材料与试验设计

1.1 实桥腐蚀钢丝

长沙某湘江大桥主桥为双塔单索面塔梁固结预应

力混凝土斜拉桥, 跨径为(105+210+105) m, 斜拉索呈扇形分布, 东、西塔每塔两侧各 15 组斜拉索。该桥 1990 年 12 月竣工投入运营, 2005 年进行的桥梁检测发现斜拉索钢丝出现较严重腐蚀; 2010 年再次检测时, 发现斜拉索腐蚀程度显著发展; 2012 年 9 月完成全桥斜拉索更换施工。从更换的斜拉索中选取锈蚀严重的东塔东 14 号索、锈蚀较严重的东塔西下游 9 号索和锈蚀较轻微的东塔东 7 号索, 切取出其中腐蚀相对严重的钢丝丝段(400 mm 长)作为实桥腐蚀钢丝样本(60 个)进行分析。

1.2 腐蚀试验设计

目前针对拉索钢丝进行的加速腐蚀试验常采用周浸法、盐雾法、局部腐蚀法(钢丝表面局部棉纱浸润法), 该文采用周浸法和局部腐蚀法进行钢丝加速腐蚀试验。试验设计情况见表 1。

1.3 钢丝腐蚀分级

为了有效评估钢丝腐蚀的程度, 需要对其腐蚀严重性进行评价分级。文献[14]根据 JTG/T H21—2011《公路桥梁技术状况评定标准》规定结合试验钢丝表面锈蚀情况将拉索钢丝锈蚀划分成 5 个不同程度的等级, 文献[15]根据钢丝表面锈蚀情况将腐蚀等级分为 6 级, 文献[16]在此基础上增加完好和基本完好的级别, 将钢丝腐蚀情况划分为 8 级, 文献[17]以文献[15]的腐蚀分级为基础, 增加了具体的蚀坑参数作为腐蚀分级评价指标, 提高了评估的操作性。该文依据文献[17]的钢丝腐蚀分级方法, 按 6 个腐蚀等级进行

表 1 钢丝加速腐蚀试验设计情况

项目	周浸法	局部腐蚀法
腐蚀液配制	利用蒸馏水和氯化钠配制溶液,利用稀硝酸、稀硫酸、氢氧化钠调节 pH 值为 3.0	
干湿循环设计	10 min 浸入腐蚀液+50 min 取出风干	每 8 h 一次用腐蚀液湿润钢丝表面棉纱
预拉力	不考虑预拉力	施加 0.25 倍钢丝标准强度预拉力
试验环境	试验温度 25 ℃,相对湿度 50%	室温,自然空气对流
试验样本情况	φ7 钢丝 450 mm 长,60 个试验样本	φ7 钢丝 3 m 长,多处局部腐蚀,18 个试样

腐蚀钢丝样本分类,表 2 为试验样本数量表。

表 2 腐蚀分级钢丝样本数量

腐蚀级别	实桥腐蚀 样本数量	周浸法腐蚀 样本数量	局部腐蚀法 样本数量
1	10	10	3×4
2	10	10	3×4
3	10	10	3×4
4	10	10	3×4
5	10	10	3×4
6	10	10	3×4

注:局部腐蚀样本为每一腐蚀级别 3 根张拉试样,每试样上 4 处局部腐蚀试验段。

2 典型蚀坑形貌与分布规律

2.1 典型蚀坑形貌

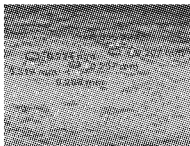
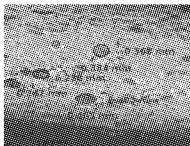
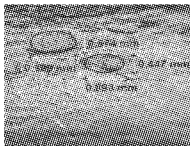
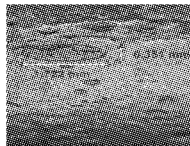
从中国国内部分实桥腐蚀拉索钢丝的试验检测情

况发现,拉索腐蚀具有明显的局部特性,即往往出现局部区段腐蚀较严重的情况。在这些腐蚀严重的局部区段中,往往出现大量的腐蚀蚀坑,根据多蚀坑对应力集中影响性的研究成果,当两个较深蚀坑间距离大于 5 倍蚀坑半径时,蚀坑之间的相互影响可忽略不计。

蚀坑取样中以最深蚀坑为近似中心,长度 105 mm 的钢丝严重腐蚀区段作为蚀坑几何形态参数统计的调查区域,通过对严重腐蚀区段进行染色,确定典型蚀坑的位置并进行标记;将钢丝表面的染色剂洗去,利用 MDA2000 工业显微镜对钢丝表面的蚀坑进行拍照,然后利用与显微镜配套的 Gaosuo 测量软件对标识区的蚀坑进行测量(多次测量取平均值),量取钢丝表面蚀坑的长度 L 、宽度 W ;钢丝表面典型蚀坑深度采用深度测量仪测量,从蚀坑长度和宽度方向分别对蚀坑深度进行测量 3 次,取平均值作为腐蚀蚀坑的深度 h 。

为便于现场检测参考,蚀坑几何形态宏观上可抽象为浅球形、深椭圆形、浅椭圆形、长槽形 4 种,表 3 为各典型蚀坑几何形态照片和参数特征。

表 3 典型蚀坑照片和几何形态特征

项目	浅球形	深椭圆形	浅椭圆形	长槽形
蚀坑局部放大照片				
坑口形状	$R_B \approx 1$ 的圆形	$R_B < 1.5$ 的短椭圆形	$R_B > 1.5$ 的长椭圆形	$R_B > 2.5$ 的长条形
坑深度 h	一般 $h \leq 0.1$ mm	一般 $h \leq 0.15$ mm	一般 $h \geq 0.1$ mm	一般 $h \geq 0.15$ mm

注: R_B 为蚀坑表面长边与短边的比值; h 为蚀坑的深度。

2.2 蚀坑分布密度及规律

随着腐蚀程度的加深,蚀坑的典型形态和分布密度也会相应随之变化,因此调查典型蚀坑的分布情况对于腐蚀程度的判断具有良好的指示性。

进入统计范围的蚀坑其深度 h 不小于 0.03 mm,对试验样本的典型蚀坑各级别的分布密度进行统计,绘制各典型蚀坑密度随腐蚀级别的变化情况(图 1)。

从图 1 可看出:3 种试验类型的钢丝腐蚀蚀坑密度走势大体相同,实桥腐蚀蚀坑分布密度大致处于局部腐蚀蚀坑密度和周浸法腐蚀蚀坑密度之间,局部腐蚀的各类型蚀坑的分布密度曲线更接近实桥;蚀坑形态在腐蚀初期均以浅球形为主伴有少量的深椭圆形,未见有浅椭圆形和长槽形蚀坑;随着腐蚀级别的加深,浅球形蚀坑逐渐减少,在 6 级锈蚀时基本趋于 0;深椭圆蚀

坑和浅椭圆形蚀坑呈先增后减的趋势,深椭圆形蚀坑均在 3 级锈蚀时分布密度达到最大,浅椭圆形蚀坑在

4 级锈蚀时分布密度达到最大;长槽形蚀坑从 3 级锈蚀开始分布密度呈逐渐增大的趋势。

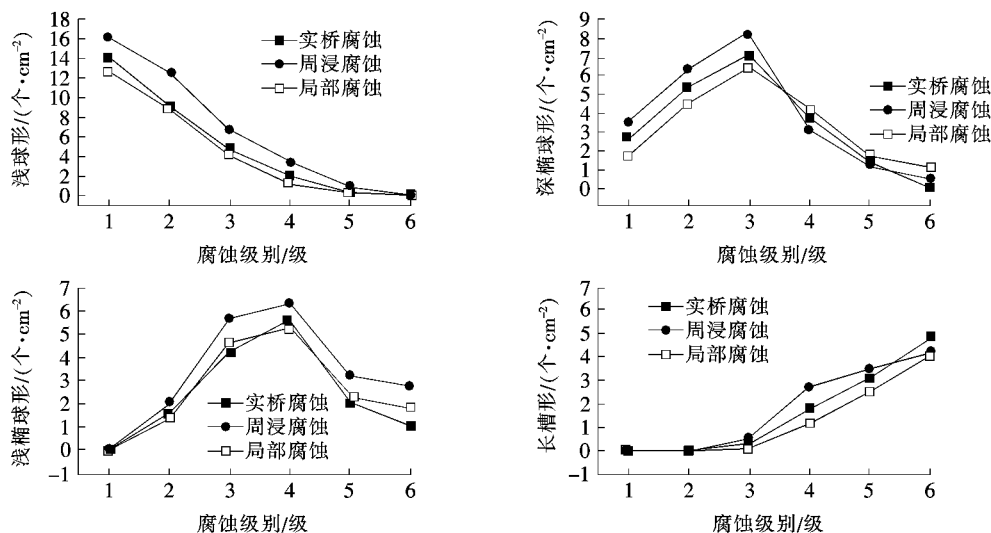


图 1 典型蚀坑分布密度变化图

通过对各类型蚀坑在各腐蚀级别出现的概率进行分析,绘制各类型蚀坑在不同试验条件下随腐蚀级别变化的概率拟合分布曲线(图 2)。由于篇幅有限,图 2 仅给出了深椭圆形蚀坑在 3 类试验时出现的概率随腐蚀分级变化的分布图;同类型蚀坑在不同试验中拟合

的曲线类型是完全一致的,且拟合度较高,浅球形蚀坑与腐蚀级别相关的概率分布曲线呈负指数函数;深椭圆形蚀坑和浅椭圆形蚀坑与腐蚀级别相关的概率分布曲线呈高斯函数;长槽形蚀坑与腐蚀级别相关的概率分布曲线呈指数函数。

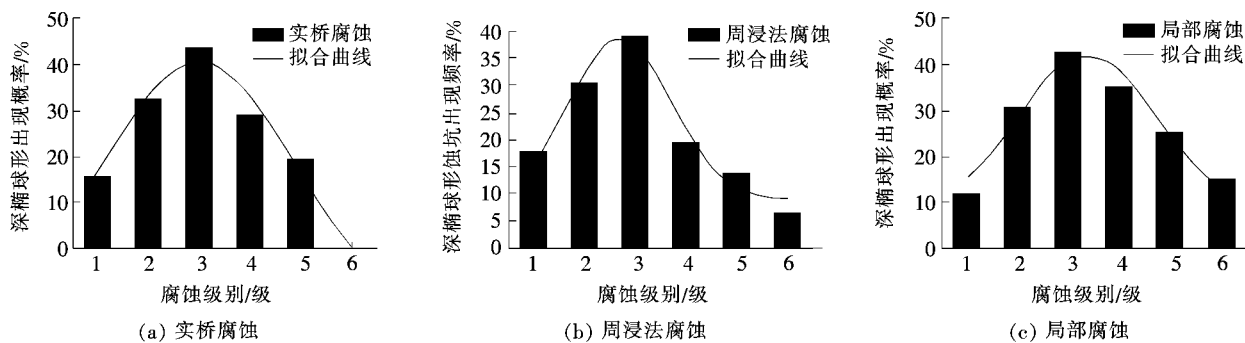


图 2 3 类试验下深椭圆形蚀坑出现的概率图

对上述同类型蚀坑拟合的概率分布曲线在不同试验下进行对比(图 3),由图 3 可以看出:考虑张拉应力的局部腐蚀的拟合曲线与实际工程钢丝的腐蚀拟合曲线更接近。

3 蚀坑形态参数的分布特征

随机选取不同类型试验的钢丝试样,对钢丝表面蚀坑的三维尺寸进行测量并统计。统计的实桥腐蚀、周浸腐蚀以及局部腐蚀试样蚀坑分别为 425、294、260 个。通过分析钢丝表面蚀坑三维尺寸的数据,作出不

同试验的蚀坑三维尺寸分布直方图及对数正态分布曲线(表 4)。从表 4 可得:曲线拟合效果较好,对数据进行 $k-s$ 假设检验(表 5),表 5 表明:3 类试验蚀坑的参数在显著性水平 $\alpha_{0.05}$ 下均服从对数正态分布。

蚀坑的长度、宽度以及深宽比服从对数正态分布,其概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2} \right] \quad (1)$$

式中: x 为蚀坑变量; μ 为变量的对数均值; σ 为变量的对数标准差。

对不同试验统计的蚀坑长度、宽度以及深宽比的

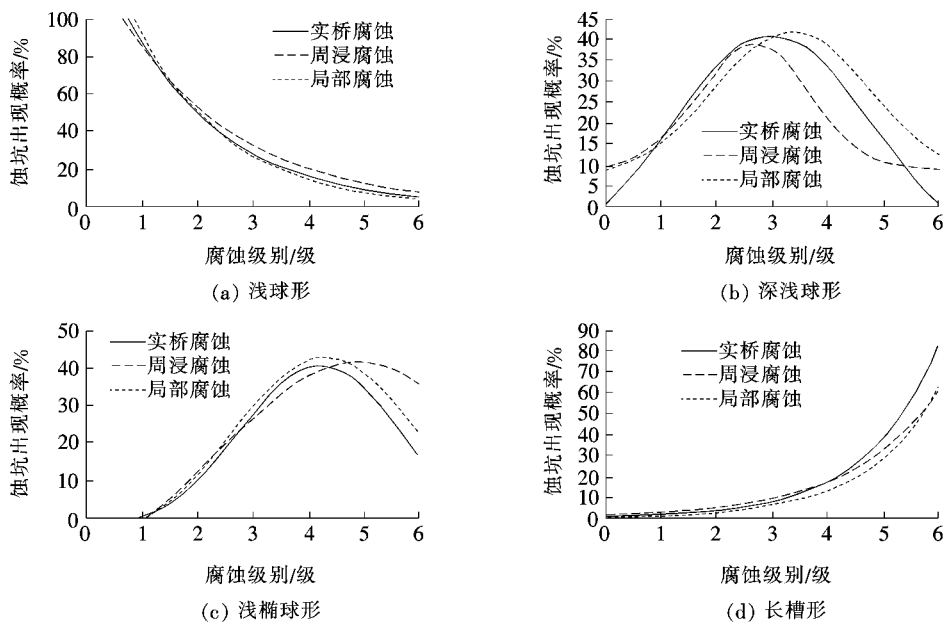


图 3 各类型蚀坑拟合曲线对比图

表 4 不同试验典型蚀坑形态参数分布直方图

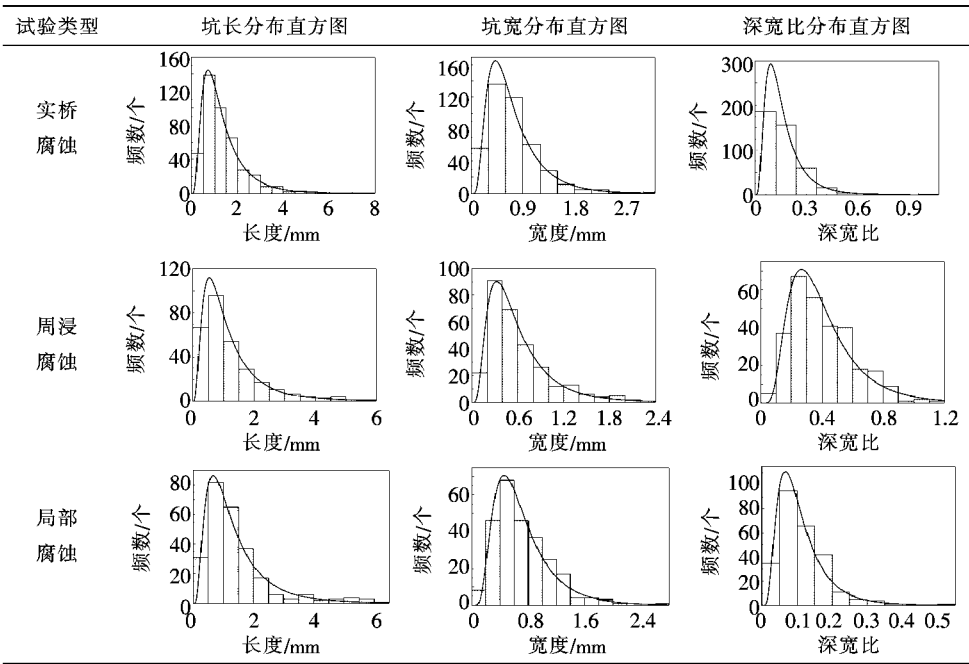


表 5 不同试验典型蚀坑参数估计与 $k-s$ 检验

试验类型	长度			宽度			深宽比		
	μ	σ	p	μ	σ	p	μ	σ	p
实桥腐蚀	0.089 9	0.669 3	0.963 6	-0.495 9	0.606 2	0.215 3	-2.198 8	0.638 5	0.984 4
周浸腐蚀	-0.077 6	0.752 5	0.143 2	-0.703 9	0.646 6	0.138 7	-1.032 5	0.535 7	0.224 4
局部腐蚀	0.087 8	0.704 8	0.882 2	-0.476 9	0.549 7	0.495 8	-2.357 5	0.585 7	0.528 5

概率分布函数的曲线进行对比如图 4 所示,由图 4 可得:考虑张拉应力的局部腐蚀加速腐蚀钢丝试样的形

态参数的概率分布函数与实际工程腐蚀钢丝试样的形态参数的概率分布函数拟合度良好。

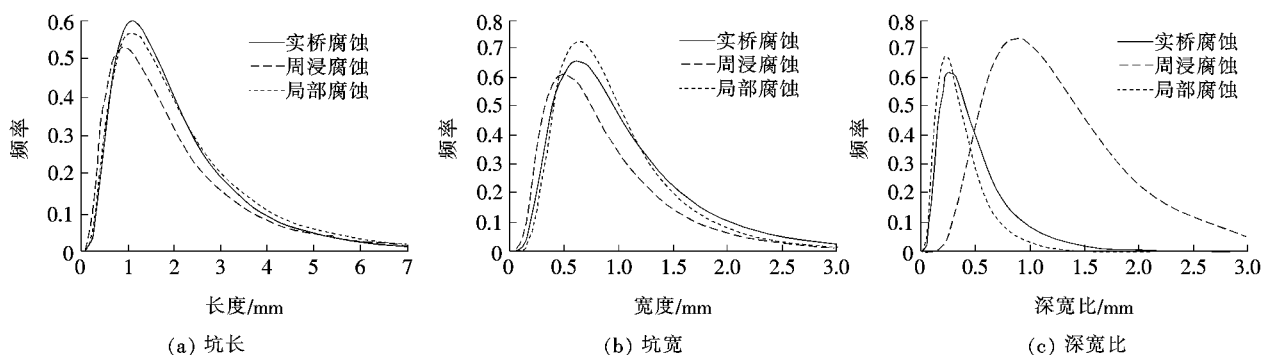


图4 各类型试验下蚀坑形态参数的概率分布函数

4 结论

(1) 腐蚀钢丝的蚀坑几何形状为浅球形、深椭圆形、浅椭圆形及长槽形,在腐蚀初期,试验样本蚀坑以浅球形及深椭圆形为主,随着腐蚀级别的加深,蚀坑主要以浅椭圆形和长槽形蚀坑为主。浅球形蚀坑的概率分布服从负指数;深椭圆形和浅椭圆形蚀坑的概率分布呈高斯分布;长槽形蚀坑的概率分布呈现指数分布。

(2) 对3种类型试验的形态参数进行统计,发现蚀坑在长度、宽度以及深宽比上服从对数正态分布,深度上不服从传统的随机分布模式。

(3) 在该文统计的蚀坑类型以及蚀坑形态参数的基础上,考虑张拉应力的局部腐蚀加速腐蚀钢丝试样的蚀坑统计规律与实际工程腐蚀钢丝试样蚀坑统计规律具有良好的拟合度。

参考文献:

- [1] J. Kruger. Cost of Metallic Corrosion. Uhlig's Corrosion Handbook[M]. third Edition. New York: John Wiley & Sons Inc, 2011:15-21.
- [2] 成永强. 既有斜拉桥换索状况综述[J]. 山西建筑, 2010(9).
- [3] R. W. Staehle. Lifetime Prediction of Materials in Environments. Uhlig's Corrosion Handbook[M]. third Edition. New York: John Wiley & Sons Inc, 2011:31-75.
- [4] 兰成明. 平行钢丝拉索疲劳性能理论研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009(1).
- [5] 徐阳. 腐蚀环境下斜拉索高强度钢丝退化状态研究[D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2014.
- [6] 李涛. 交变应力与环境耦合作用下拉索腐蚀疲劳损伤机理研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文, 2014.
- [7] 潘晓宇, 谢旭, 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, 2014(11).

- [8] 叶华文, 黄云, 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(2).
- [9] H. Li, C. M. Lan, Y. Ju, D. S. Li. Experimental and Numerical Study of the Fatigue Properties of Corroded Parallel Wire Cables[J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 17(2):211-220.
- [10] Shunichi Nakamura, Keita Suzumura. Experimental Study on Fatigue Strength of Corroded Bridge Wires[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(3):200-208.
- [11] Guowen, Y. Guojun, D. Shiya, L. Corrosion Damage Research of Stayed Cable under Coupling Salt Spray Environment and Loading[J]. Life - Cycle of Engineering Systems, 2016; 2:240-246.
- [12] Shunichi Nakamura, Keita Suzumura. Experimental Study on Repair Methods of Corroded Bridge Cables[J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 17(4):720-727.
- [13] GB/T 19746-2005 金属和合金的腐蚀盐溶液周浸试验[S].
- [14] 钟力. 斜拉索腐蚀损伤与安全性能评定方法研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文, 2014.
- [15] Sante Camo, P. E. Probabilistic Strength Estimates and Reliability of Damaged Parallel Wire Cables[J]. Journal of Bridge Engineering, 2003(8):297-311.
- [16] 徐俊. 拉索损伤演化机理与剩余使用寿命评估[D]. 同济大学博士学位论文, 2006.
- [17] 许红胜, 吴佳东, 颜东煌, 等. 基于蚀坑参数的既有斜拉索钢丝腐蚀程度分级评价研究[J]. 中外公路, 2015(6).
- [18] 乔燕, 李爱群, 缪长青, 等. 索承式桥梁腐蚀吊索安全性能评估[J]. 土木建筑与环境工程, 2015(4).
- [19] Chen, Wei Zhen; Yang, Jian Xi. Inspection and Assessment of Stay Cables in Cable Stayed Bridges[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 638-640:954-960.
- [20] 张岳林, 彭飞, 牟金磊. 双点腐蚀对船体板应力集中影响研究[J]. 舰船科学技术, 2015(12).