

# 钢桥面板疲劳裂纹特征定量检测方法研究

傅中秋, 张呈奕, 吉伯海, 袁周致远

(河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 为研究钢桥面板疲劳裂纹特征的定量检测方法, 对 10 个试件的疲劳裂纹进行超声波定量检测试验. 考虑疲劳试件裂纹特征, 改进已有的人工裂纹特征的超声波检测方法, 对比检测结果与实际疲劳断面, 验证检测方法效果. 试验结果表明: 取裂纹开口回波代替裂纹尖端回波, 采用 1/3 测长法检测疲劳裂纹长度具有更好的效果; 裂纹长度检测值具有较高的精度, 可认为检测值等于实际值; 裂纹深度、角度检测值均与实际疲劳试件断面特征吻合较好, 修正误差后可作为安全评定的参考.

**关键词:** 钢桥面板; 疲劳裂纹特征; 定量检测; 超声检测

中图分类号: U441.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)01-0072-05

## Study on the quantitative detecting method of fatigue crack features in orthotropic steel deck

FU Zhongqiu, ZHANG Chengyi, JI Bohai, YUANZHOU zhiyuan

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to research the quantitative detecting method of fatigue crack features in orthotropic steel deck, fatigue cracks of 10 specimens were quantitative detected by ultrasonic testing. Considering crack features of fatigue specimens, existing ultrasonic testing method to detect artificial cracks features was improved. Detection results were compared with real fatigue fracture surfaces. The effect of quantitative detecting method was verified. The test results show that replacing echo of crack tip with echo of crack opening makes 1/3 length measurement method better on fatigue crack length detection. Measured values of crack length have higher accuracy, and can be considered as real values. Measured values of crack depth and angle are both in good agreement with features of real fatigue specimen fracture surfaces, which can be used as reference for safety assessment after correcting error.

**Key words:** orthotropic steel deck; fatigue crack features; quantitative detection; ultrasonic testing

正交异性钢桥面板经济性良好、性价比较高, 不仅用于新建铁路公路桥梁, 还用于既有桥梁改造, 在国内外的大、中跨径桥梁中得到广泛应用<sup>[1]</sup>. 但正交异性钢桥面板焊接部分多, 残余应力大, 本身存在初始缺陷, 长期承受交变荷载, 极易产生疲劳裂纹<sup>[2]</sup>. 疲劳裂纹呈现早发性、多发性、再现性特点<sup>[3]</sup>, 一旦出现导致整桥结构性能退化, 影响运营期间的安全性、耐久性, 更有甚者可能造成突发性桥面坍塌等事故. 因此在建成桥梁中, 亟需对裂纹特征进行定量检测以便定制出科学合理维修方案.

目前, 我国公路钢桥没有自己的无损检测规范, 借鉴锅炉压力容器等方法<sup>[4]</sup>, 适用性仍需探讨. 钢桥面板疲劳裂纹现场检测多采用目视检测、磁粉检测、渗透检测<sup>[5-6]</sup>, 仅能简单确定裂纹位置, 大致测得裂纹长度, 无法进一步量化疲劳裂纹深度、角度等特征. 近年来一些新型无损检测技术<sup>[7-8]</sup>得到发展, 但与实桥应用存在较大差距. 超声检测因其设备携带方便, 速度较快, 获得了工程师与研究者青睐<sup>[9-10]</sup>, 但鲜有涉及裂纹特征的定量检测研究. 实际上, 疲

劳裂纹检测可以分为存在的判断、定位、建立量化指标三个层次<sup>[11]</sup>, 定量检测裂纹特征对既有钢桥的损伤评估与维护具有重大意义. 超声检测对于确定可见及隐蔽裂纹的位置、取向、大小等参数有综合优势, 本文选择超声检测用于钢桥面板疲劳裂纹特征的定量检测试验.

## 1 检测原理

已有学者研究标准人工裂纹特征的超声波检测方法<sup>[12]</sup>, 提出 1/3 测长法: 探头位于裂纹中部时回波最高, 向两边移动回波高度逐渐下降, 裂纹末端的回波高度约为中部回波的 1/3. 通过回波高度确定裂纹的末端位置, 得到裂纹长度. 同时建立裂纹深度、角度判定公式: 根据裂纹尖端回波的指示深度、水平距离及前端距离, 几何方法求得裂纹深度、角度. 本文检验其适用性, 并针对钢桥面板疲劳裂纹进行改进.

检测对象为正交异性钢桥面板典型疲劳细节, 竖向加劲肋与顶板焊缝端部疲劳裂纹, 如图 1. 该

细节裂纹开展路径较为相似,如图2,均从加劲肋中轴线附近产生,沿焊趾形成一个半圆弧,后沿桥面板横向向两侧对称开展。



图1 竖向加劲肋与顶板焊缝  
Fig.1 Vertical stiffener and plate weld



图2 疲劳裂纹开展路径  
Fig.2 Fatigue crack growing path

疲劳裂纹全长深度不等,直射波打到裂纹尖端时,各测点声波反射不一致。如图3,采用一次反射法,使指示深度为母材厚度的两倍,声束恰好打到裂纹开口处端角,发生角反射效应。不论裂纹深度大小,全长均可得到明显回波。疲劳裂纹全长为曲线,不能直接采用1/3测长法。将裂纹全长分为三段:中部焊趾以内为圆弧段裂纹,两侧焊趾以外为直线段裂纹。把直线段根部的回波高度作为1/3测长法的中部回波高度,确定直线段末端位置即可测得裂纹长度。

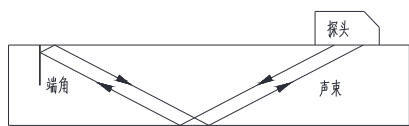


图3 角反射效应示意图  
Fig.3 Schematic diagram of end-corner reflection effect

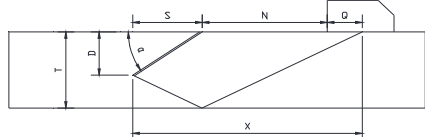


图4 裂纹深度、角度检测示意图  
Fig.4 Schematic diagram of crack depth and angle detection

测量裂纹深度、角度前,先判断裂纹尖端倾向。相同增益下,采用直射法在裂纹两侧前端距离相同处分别检测,若回波高度相等,则裂纹角度为 $90^\circ$ ;若回波高度不等,则裂纹尖端向回波高度较

高的一侧倾斜。直射法检测裂纹深度、角度时,声束与开裂面夹角过小,不利于裂纹尖端声波反射,改为一次反射法,如图4。一次发射法声程较长,避免裂纹尖端位于近场区,提高定量准确性。

## 2 检测试验

### 2.1 试件及仪器

参考类似试件<sup>[13]</sup>,设计该细节的局部足尺模型,如图5。共10个试件,依次编号为SJ1至SJ10。试件材料与实桥相同,采用Q345qD钢。焊接采用 $\text{CO}_2$ 气体保护焊,焊脚尺寸为6 mm。采用机械型振动疲劳试验机对试件进行弯曲加载,如图6,得到疲劳裂纹,末端距焊趾达到30 mm,认为试件失效,停止。

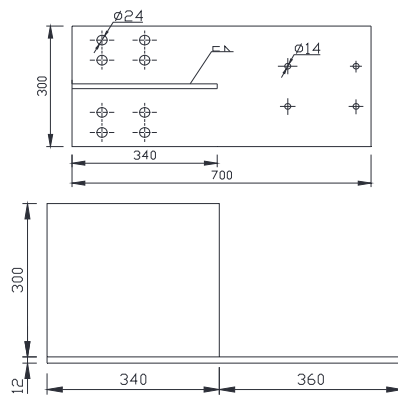


图5 试件几何尺寸  
Fig.5 Geometric dimension of specimens

试验仪器选用SH610数字超声波探伤仪、CG-98型超声波探伤耦合剂,探头型号选取2.5P8 $\times$ 12K2。采用A型脉冲反射法,直接接触,单斜探头横波检测。使用前,在标准试块CSK-IA上校准探头<sup>[14]</sup>,得到探头前沿 $Q$ 为9 mm,斜探头 $K$ 值为2。按GB/T 11345-2013标准<sup>[15]</sup>,采用一次反射法扫描时,探头移动区应大于或等于1.25 $P$ :

$$P = 2KT \quad (1)$$

式中, $P$ 为跨距, $T$ 为母材厚度, $K$ 为斜探头折射角的正切值。检测前,修整裂纹两侧宽度60 mm的探测面。

### 2.2 试验方法

如图7,距焊趾每隔5 mm设一个测点,左右各6个。裂纹末端深度几乎为零,不布置。加劲肋中轴线处再设一个,共13个测点,从左至右依次编号为1~13。记测点位置为至加劲肋中轴线的距离,左方为负值,右方为正值,如表1。

检测裂纹长度:在裂纹凸侧,将探头对准测点6(或8),保持探头中心垂直于裂纹走向,找到反射波。前后移动,使指示深度 $Y$ 为母材厚度 $T$ 的两倍,

调节增益,使回波高度稳定在70%左右.沿着裂纹走向向左(或右)移动,当波高降低为测点6(或8)回波高度的1/3时,认为探头中心对应的位置为裂纹末端,探头移动的距离是左方(或右方)裂纹的长度.

表1 测点编号、位置对照  
Tab.1 Correspondence between number and location of measuring points

测点编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
测点位置/mm	-37	-32	-27	-22	-17	-12	0	12	17	22	27	32	37

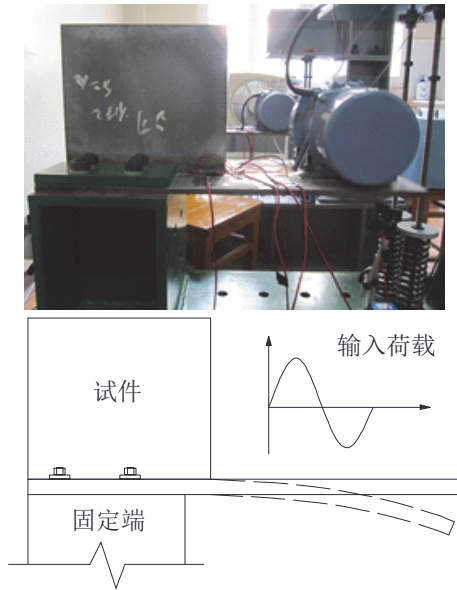


图6 疲劳加载  
Fig.6 Fatigue set-up

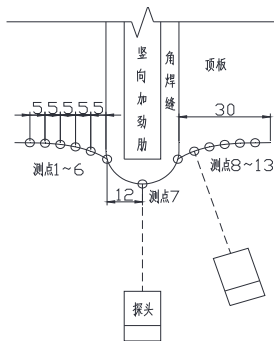


图7 测点布置示意图

Fig.7 Measuring points arrangement diagram

判断裂纹尖端倾向:在裂纹两侧,分别将探头对准某测点,保持探头中心垂直于裂纹走向,找到反射波.使两次检测前端距离 $N$ 、增益相等,且 $0 < Y \leq T$ ,发现裂纹凹侧回波更高,表明裂纹尖端向凹侧倾斜.

裂纹深度:

$$D = 2T - Y \quad (2)$$

裂纹角度:

$$\alpha = \tan^{-1}[(2T - Y)/(X - N - Q)] \quad (3)$$

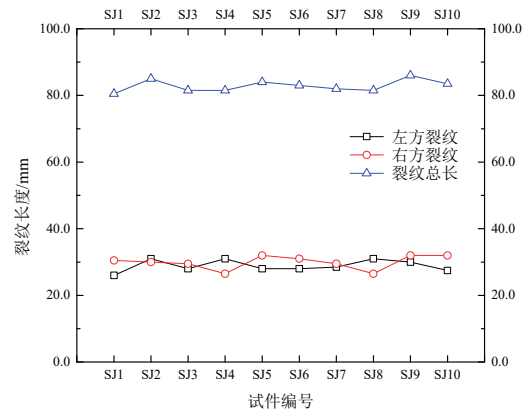
检测裂纹深度、角度:在裂纹凸侧,将探头对准某测点,保持探头中心垂直于裂纹走向,找到反

射波.前后移动,使 $T < Y \leq 2T$ ,找到裂纹尖端对应的回波顶点.将测得的指示深度 $Y$ 代入式(2)求得裂纹深度 $D$ ,将测得的指示深度 $Y$ 、水平距离 $X$ 、前端距离 $N$ 代入式(3)求得裂纹角度 $\alpha$ .

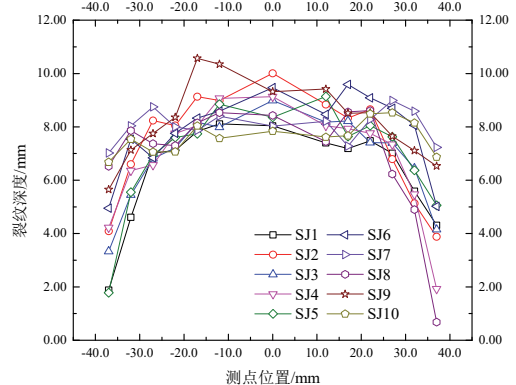
### 3 检测结果

#### 3.1 检测值分析

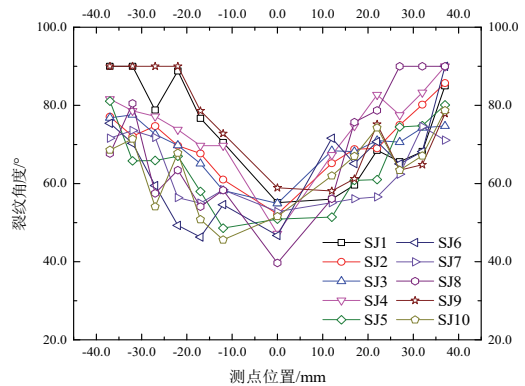
裂纹长度实际为投影长度,测点1~6为左方裂纹,测点8~13为右方裂纹,两者再加上焊脚尺寸、加劲肋厚度( $6+12+6=24$  mm)为裂纹总长.



(a) 裂纹长度



(b) 裂纹深度



(c) 裂纹角度

图8 检测值曲线

Fig.8 Measured value curves

如图8(a),裂纹的长度检测值大小不一,但在某一定值附近浮动,左方、右方约30 mm,总长约84 mm.

如图 8(b), 裂纹深度检测值有明显波动, 波动范围约为裂纹深度本身五分之一. 各试件检测值曲线线型相似, 接近为半椭圆, 大致关于测点 7 对称, 沿横轴正向(或负向)呈减小趋势, 中部较平缓, 端部较陡直, 符合图 9(a)疲劳试件正面特征. 如图 8(c), 裂纹角度检测值波动现象更加突出, 波动范围约为裂纹角度本身四分之一. 各试件检测值曲线线型相似, 接近为 V 字形, 大致关于测点 7 对称, 沿横轴正向(或负向)呈均匀增大趋势, 接近线性变化, 符合图 9(b)疲劳试件侧面特征.

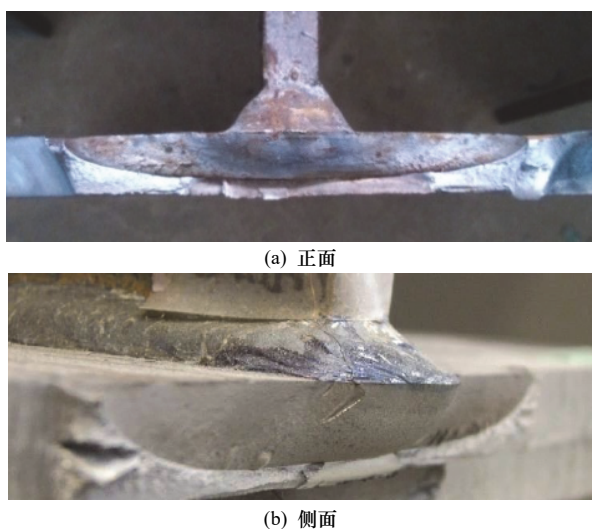
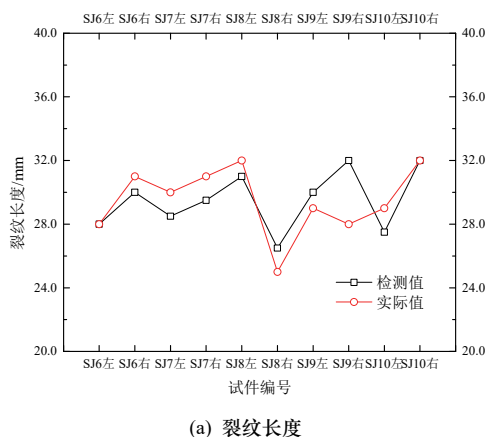


图 9 疲劳试件断面

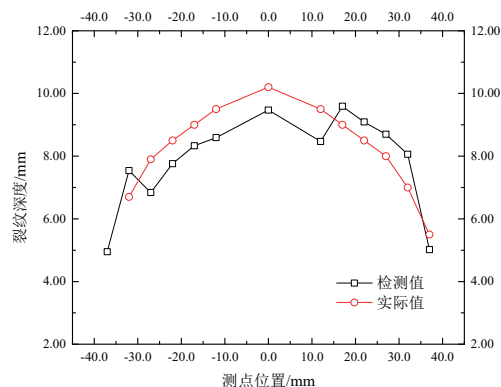
Fig.9 Fatigue specimen fracture surfaces

### 3.2 检测值、实际值比较

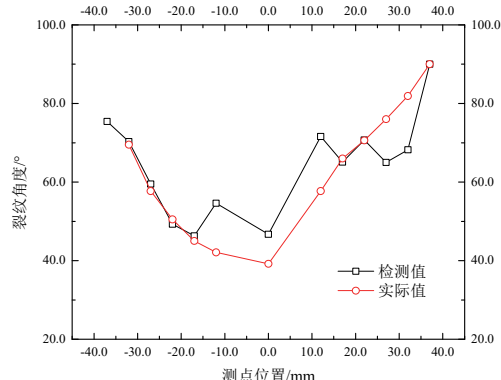
选取编号 SJ6 到 SJ10 试件, 沿桥面板横向切开, 折断后获得疲劳断口, 如图 9 所示, 刻度尺测量得到疲劳裂纹实际长度、深度, 及裂纹尖端、开口间相对水平距离, 通过简单的几何关系计算得到疲劳裂纹实际角度. 裂纹末端个别测点在剖切过程中破坏, 无法获得裂纹特征实际值, 予以剔除. 篇幅所限, 疲劳裂纹特征实际值曲线不再单独给出, 下文对检测值、实际值进行比较, 评估及修正检测方法.



(a) 裂纹长度



(b) 试件 SJ6 裂纹深度



(c) 试件 SJ6 裂纹角度

图 10 检测值、实际值比较

Fig.10 Comparisons between measured and real values

如图 10(a), 裂纹长度检测值分列在实际值两侧, 两侧数据点的个数大致相等, 相对误差较小. 试件 SJ9 右方裂纹长度检测值明显偏离实际值, 为防止形成粗大误差, 予以剔除. 裂纹长度样本数量较少,  $n=9<30$ , 采用  $t$  分布来评估相对误差. 平均值  $\bar{\varepsilon}=-1.3\%$ , 标准差  $\sigma=3.8\%$ , 按  $t$  分布, 在 95% 置信度下的相对误差变化范围为  $-10.0\%\sim 7.4\%$ , 可认为裂纹长度检测值具有较高的精度.

如图 10(b)、10(c), 以试件 SJ6 为例, 裂纹深度、角度检测值分列在实际值两侧, 两侧数据点的个数大致相等, 能较好的反映实际值的趋势走向. 裂纹深度样本数量较多,  $n=57>30$ , 采用正态分布来评估相对误差. 平均值  $\bar{\varepsilon}=2.6\%$ , 标准差  $\sigma=9.2\%$ , 按正态分布  $3\sigma$  原则, 在 95% 置信度下的相对误差变化范围为  $-15.8\%\sim 21.0\%$ , 可认为裂纹深度检测值具有较高的参考价值. 裂纹角度样本数量较多,  $n=53>30$ , 采用正态分布来评估相对误差. 平均值  $\bar{\varepsilon}=3.6\%$ , 标准差  $\sigma=11.6\%$ , 按正态分布  $3\sigma$  原则, 在 95% 置信度下的相对误差变化范围为  $-19.6\%\sim 26.9\%$ , 可认为裂纹角度检测值具有较高的参考价值.

如图 11, 裂纹长度、深度、角度的检测值-实际值数据点均分布于直线  $y=x$  附近, 表明试验采



用的疲劳裂纹特征定量检测方法是合理的。

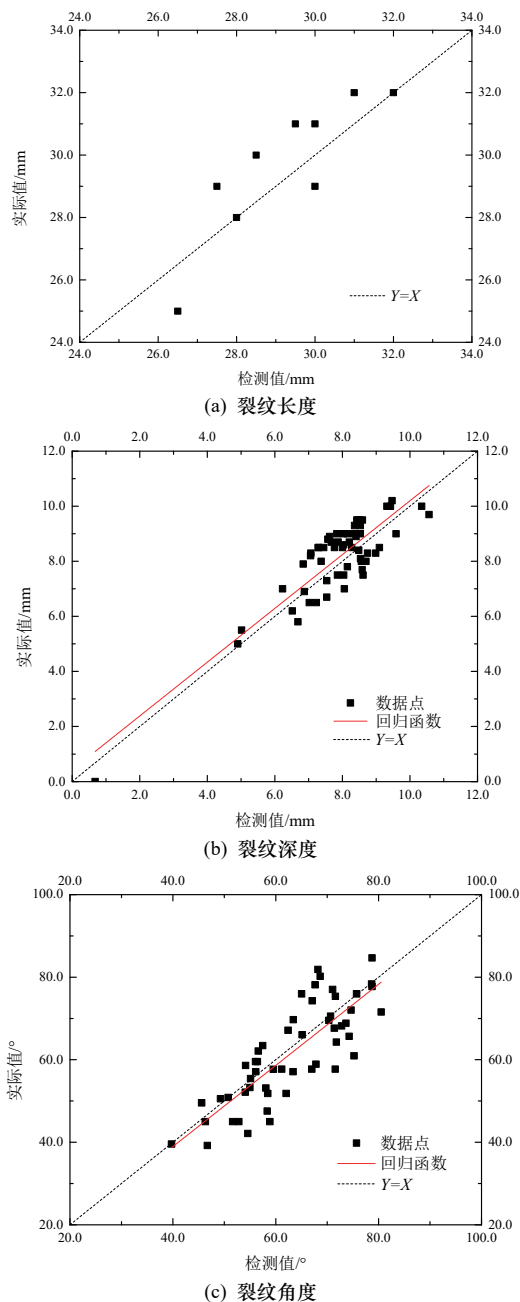


图 11 检测值-实际值曲线  
Fig.11 Measured-real value curves

如图 11(a), 对于裂纹长度, 数据点较少且区间较窄, 不足以拟合出具有一般意义的回归函数, 但各点交错分列在直线  $y=x$  两侧, 且两侧个数大致相等, 相对误差较小, 可认为检测值等于实际值已具有较高的精度。

如图 11(b), 线性回归得到  $|r|=0.878$ , 根据相关系数检验表, 查自由度  $\nu=n-2=57-2=55$  时相关系数显著的最小值,  $|r|=0.878>0.425$  表明裂纹深度实际值与检测值在  $\alpha=0.001$  水平上线性关系显著。对于裂纹深度, 可将检测值代入式(4)进一步修正, 以减小系统误差。

$$Y=0.977X+0.427 \quad (4)$$

式中,  $X$  为裂纹深度检测值,  $Y$  为裂纹深度修正值。

如图 11(c), 线性回归得到  $|r|=0.816$ , 根据相关系数检验表, 查自由度  $\nu=n-2=53-2=51$  时相关系数显著的最小值,  $|r|=0.816>0.439$  表明裂纹角度实际值与检测值在  $\alpha=0.001$  水平上线性关系显著。对于裂纹角度, 可将检测值代入式(5)进一步修正, 以减小系统误差。

$$Y=0.983X+0.371 \quad (5)$$

式中:  $X$  为裂纹角度检测值,  $Y$  为裂纹角度修正值。

## 4 结论

本文通过对 10 个钢桥面板疲劳试件裂纹特征进行定量检测试验, 得到以下结论:

(1) 取裂纹开口回波代替裂纹尖端回波, 采用 1/3 测长法检测疲劳裂纹长度具有更好的效果。裂纹尖端回波与声束-开裂面夹角相关, 影响疲劳裂纹深度、角度检测。

(2) 裂纹深度、角度检测值有明显波动, 波动范围约为裂纹特征本身的 20% 和 25%。各试件检测值曲线线型相似, 均与实际疲劳试件断面特征吻合较好。

(3) 裂纹长度检测值具有较高的精度, 可认为检测值等于实际值。裂纹深度、角度检测值存在一定相对误差, 但均能较好反映实际值的趋势走向, 可代入回归方程进一步修正, 作为安全评定的参考。

## 参考文献 References

- [1] 唐亮, 黄李骥, 刘高, 等. 正交异性钢桥面板足尺模型疲劳试验[J]. 土木工程学报, 2014, 47(3): 112-122.  
TANG Liang, HUANG Liji, LIU Gao, et al. Fatigue experimental study of a full-scale steel orthotropic deck model [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(3): 112-122.
- [2] 曾勇, 向中富, 于福, 等. 大跨度悬索桥钢加劲梁典型病害及维修策略[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2012, 31(S1): 700-703+709.  
ZENG Yong, XIANG Zhongfu, YU Fu, et al. Typical diseases and maintenance strategies for steel girder of large-span suspension bridge [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science Edition), 2012, 31(S1): 700-703+709.
- [3] 曾志斌. 正交异性钢桥面板典型疲劳裂纹分类及其原因分析[J]. 钢结构, 2011, 26(143): 9-15, 26.  
ZENG Zhibin. Classification and reasons of typical fatigue cracks in orthotropic steel deck [J]. Steel Construction, 2011, 26(143): 9-15, 26.
- [4] 高翔. 公路钢桥焊缝超声波检测标准研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.

(下转第 88 页)