

基于透射信号的钢桥面板贯穿型裂纹 超声检测方法研究

夏俊元,吉伯海,袁周致远,高天

(河海大学土木与交通学院,江苏南京210098)

摘要 目的 提出一种基于超声波透射信号的钢桥面板贯穿型裂纹检测方法,提高在役钢桥隐蔽裂纹检测精度和效率。**方法** 采用数值分析方法研究了超声波在含裂纹面板中的传播机制,分析了不同裂纹参数与接收信号强度的变化规律,并通过顶板贯穿裂纹检测试验,进一步验证该检测方法的可行性。**结果** 裂纹检测参数建议激励晶片边长为4 mm、激励频率为5 MHz、 K 值为0.8;裂纹宽度小于0.1 mm时可忽略裂纹宽度对检出信号的影响,裂纹宽度大于0.1 mm时可将尖端反射信号作为判断依据;透射信号与裂纹深度呈负相关,恢复至最大值时的入射坐标与裂纹深度呈线性关系,作为裂纹深度的计算依据,检测误差在1 mm以内。**结论** 基于穿透信号的超声波检测方法,以恢复至最大值时的入射坐标为主要指标,可以实现钢桥顶板贯穿裂纹的有效检测。

关键词 桥梁与隧道工程;钢桥面板;贯穿型裂纹;穿透法;超声波检测

中图分类号 TU317⁺.8;U443.31 文献标志码 A

引用格式:夏俊元,吉伯海,袁周致远,等.基于透射信号的钢桥面板贯穿型裂纹超声检测方法研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(1):96-104.(XIA Junyuan,JI Bohai,YUAN Zhouzhiyuan,et al. Ultrasonic testing method for through-deck cracks in steel bridge decks based on penetration signals[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(1):96-104.)

Ultrasonic Testing Method for Through-deck Cracks in Steel Bridge Decks Based on Penetration Signals

XIA Junyuan,JI Bohai,YUAN Zhouzhiyuan,GAO Tian

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

Abstract: This study proposes a method for detecting through-deck cracks in steel bridge decks based on ultrasonic penetration signals, aiming to enhance the accuracy and efficiency of hidden crack detection in existing bridges. The propagation mechanism of ultrasonic waves in cracked decks was studied by the finite element method. The variation law of different crack parameters and received signal strength was analyzed. The feasibility and reliability of the detection method

收稿日期:2023-09-04

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFE0128700);江苏省交通运输科技项目(2022Y19);中央高校业务费项目(B230201034)

作者简介:夏俊元(1992—),男,博士研究生,主要从事钢桥疲劳与维护等方面研究。

were further verified by a through-wall crack detection test. The recommended detection parameters are wafer side length of 4mm, excitation frequency of 5MH, and K value of 0.8. When the crack width is less than 0.1 mm, the influence of the crack width can be ignored, otherwise the crack width can be judged by reflection signal. The penetration signal is inversely related to crack depth. The incident coordinates at maximum restoration value are linearly related to crack depth with a error within 1 mm. The ultrasonic detection method based on penetration signals, with the incident coordinates at maximum restoration value as the primary indicator, can effectively achieve through-deck crack detection in steel bridge decks.

Key words: bridge and tunnel engineering; steel bridge deck; through-deck cracks; penetration method; ultrasonic testing

钢箱梁是大跨桥梁常用主梁形式之一,由钢桥面板、横隔板和纵向加劲肋(简称U肋)焊接而成。受残余应力影响,在车辆荷载的长期反复作用下,钢箱梁不可避免地会产生疲劳裂纹^[1-3]。钢桥面板直接承担车辆荷载,其与U肋焊接焊缝是疲劳易损部位之一^[4-6]。裂纹一旦萌生便会以较快速度扩展,影响桥梁结构安全。由于U肋为封闭式结构,当裂纹萌生于焊根^[7-9]时,裂纹具有一定的隐蔽性,难以被发现。如何及时检出疲劳裂纹,为损伤评估和处治提供基础,是当前桥梁工程研究的热点问题之一。

围绕钢桥疲劳裂纹的无损检测难题,国内外许多学者开展了诸多研究。目前,常用于钢结构隐蔽裂纹检测的无损检测方法主要有电涡流检测技术、声发射技术、射线技术和超声波技术等。T. Yamada^[10]和A. Tsukamoto等^[11]基于电磁感应原理,制作了电涡流移动检测车,意在实桥上实现铺装隔层下的钢桥面板裂纹检测,但受桥面震动等外在因素的影响,裂纹的识别效果尚有待提高。M. Y. Bhuiyan^[12]等将声发射技术用于薄板试件疲劳开裂过程检测,获得了裂纹扩展过程中的声波演变过程,但桥梁服役过程中的噪声干扰将会成为该技术的应用难题。K. Wang^[13]等采用射线检测对拱桥桁架中的焊接接头进行检测,以获得疲劳试验中不同阶段的裂纹扩展情况,考虑到技术安全性和便捷性,射线检测还无法较好地用于桥梁现

场检测。超声波技术便捷、安全、高效,能够较好地适应现场检测环境,是目前实桥最常用的无损检测技术之一,相关学者围绕超声波检测开展了大量研究。吉伯海等^[14]在常规单探头脉冲反射检测法的基础上,开展了针对钢箱梁疲劳裂纹的各种特征参数的检测试验研究,明确了疲劳裂纹特征与回波参数的相关性。张清华^[15]、石林泽等^[16]从检测机理和试验角度,开展了基于超声Lamb导波的钢桥面板焊缝疲劳裂纹的检测方法研究,验证了超声导波用于正交异性钢桥面板疲劳裂纹监测和检测的可行性。高峰等^[17]将超声衍射时差法(TOFD)与相控阵技术相结合,提出了一种基于光纤皮秒激光器和高速旋转镜的相控阵激光超声裂纹检测方法,验证了裂纹尖端参数与衍射信号指标的变化规律。在役桥梁的钢桥面板裂纹检测一般在铺装翻修施工期间开展,施工周期较短,面板上表面会在挖除原铺装后采用抛丸和喷漆处理。

上述研究为钢结构疲劳裂纹检测提供了诸多可行方案,但受工期和表面处理的限制,对于钢桥面板贯穿裂纹几何特征判断仍存在一定局限性。基于此,笔者针对钢桥面板顶板贯穿裂纹的检测需求,提出基于超声波穿透法的移动式裂纹检测方法,通过有限元方法建立顶板-U肋移动检测模型,研究检出信号随检测位置的变化特征,分析不同裂纹宽度和裂纹深度对检出信号的影响,并通过预制裂纹检测试验,进一步验证该检测方法的可行性,为钢

桥面板贯穿裂纹的检测提供参考。

1 顶板贯穿型裂纹检测方法

钢桥顶板与U肋焊接焊缝疲劳裂纹中,从焊根萌生、沿顶板厚度方向扩展的贯穿型裂纹是常见裂纹形式之一(见图1),贯穿顶板后还会引发箱梁漏水腐蚀、铺装开裂等次生病害。

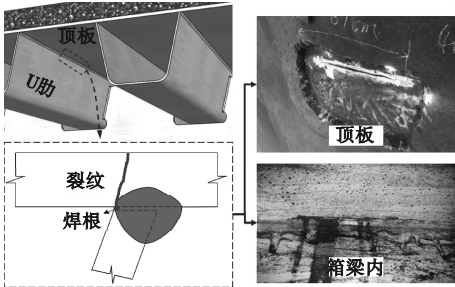


图1 顶板贯穿型裂纹

Fig. 1 Through-deck cracks

现有超声波检测多用压电式晶片产生超声波束,能量基本集中在主声束中。对于方形晶片,声束半扩散角(指向角)由式(1)确定:

θ₀ = arcsin λ/a ≈ 57 λ/a. (1)

式中:λ为声波波长;a为晶片边长。

远场区内,主声束中声压沿声轴对称分布,且声压会随偏离声轴逐渐降低(见图2)。

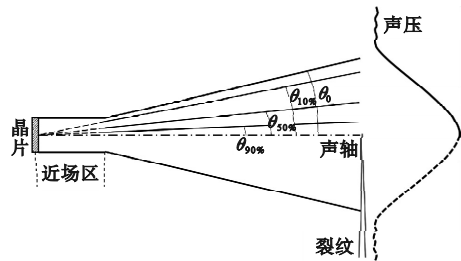


图2 声束声压分布

Fig. 2 Sound pressure distributions of sound beam

以声轴的声压为参照,不同指向角声束上的声压可由指向角系数η和式(2)来确定,其中η值可由串列式直探头测定,常见取值见表1。

θ = arcsin η × 1.22 λ/a. (2)

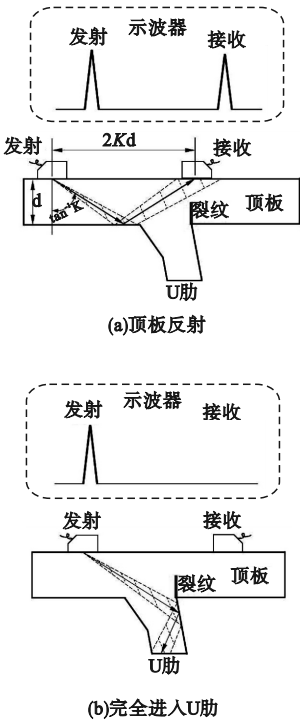
式中:θ为声束指向角。

表1 指向角系数与边界声压关系

Table 1 Relationship between directivity coefficient and boundary sound pressure

声压比 (P _边 /P _轴)/%	η 值
89.1	0.263
50.1	0.602
10.0	0.908

声波传播过程中遇到缺陷会产生反射或折射,依据收到穿透声波信号的强弱来判断被检构件内部缺陷的检测方法称为超声波穿透法。由于空气与钢的声阻抗值差异较大,声波在钢-空气的分界面上可视为发生全反射。根据不同位置处裂纹反射部分声束导致穿透信号衰减情况,可以判断顶板贯穿型裂纹(见图3)。依据穿透信号的变化和发射探头的位置信息,可判断顶板贯穿裂纹的几何特征。



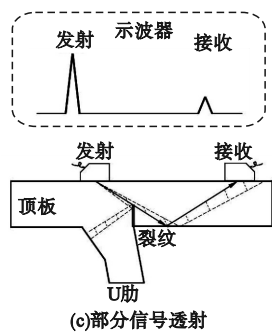


图 3 超声波穿透法检测示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ultrasonic penetration detection

超声探头的参数选择直接影响检测的精准性,因此需要对探头 K 值、频率、晶片尺寸等参数进行比选。文中检测对象是顶板-U肋角焊缝,属于薄板检测,选用斜探头。约束条件主要有:①应避免信号反射位置在近场区内;②控制扩散角大小,移动过程中信号可完全进入焊缝。综合考虑激励参数和探头大小,拟选用激励晶片边长为 4 mm、激励频率为 5 MHz、 K 值为 0.8 (折射角为 39°) 的探头开展研究。

2 有限元可行性分析

2.1 有限元模型及计算参数

为探究超声波在顶板中的传播过程,明确不同裂纹特征对超声波透射信号的影响规律,采用 COMSOL Multiphysics 有限元软件,参照某跨江大桥钢箱梁建立顶板-U肋角焊缝局部模型(见图 4)。有限元模型长×宽为 70 mm×25 mm,由顶板、U肋和探头组成。

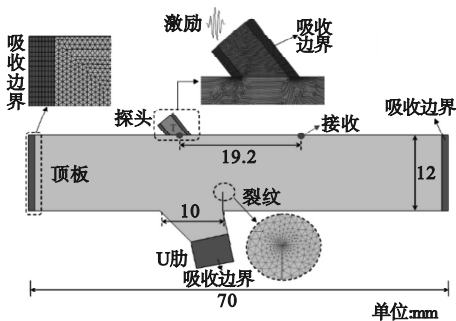


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

顶板厚度为 12 mm,U肋厚度为6 mm,焊根与焊趾的距离为 10 mm。不考虑探头与钢材间的折射与反射,探头与顶板-U肋构造材料均设为钢,其余为空气,材料参数见表 2。顶板两侧、探头边缘和 U肋设置为吸收层,吸收所有声波,避免反射信号的干扰。

表 2 钢物性能

Table 2 Physical properties of steel			
弹性模量/MPa	泊松比	波速/ (m·s ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)
2.06 × 10 ⁵	0.3	6 100	7 850

探头激励宽度为 4 mm,信号接收点随探头移动。依据探头 K 值和顶板厚度,接收点位与发射点位距离固定为 19.2 mm。激励信号为经汉宁窗调制的 5 周期正弦信号,中心频率为 5 MHz,以激励界面加速度形式施加;接收信号为接收点受声扰动产生的逾量压强,即声压,Pa,并进行线性归一化处理。激励信号表达式为

$$u(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi f_c t}{n}\right) \right] \cdot \sin(2\pi f_c t), & 0 \leq t \leq 10^{-6}; \\ 0, & t > 10^{-6}. \end{cases} \quad (3)$$

式中: f_c 为中心频率; n 为调制信号周期数。
模型主体采用自由三角形网格,为确保一个激励的每个周期内至少包含 6 个节点,网格单元最大尺寸设为 0.01 mm。吸收边界采用映射法形成四边形网格,网格最大尺寸设为 0.2 mm。由于裂纹宽度较小,简化裂纹形状为矩形,并根据裂纹宽度进行加密,确保裂纹尖端至少有 3 个节点。选用基于间断伽辽金法的压力声学物理场进行时域瞬态仿真,控制时间步长为 2×10^{-8} s,计算时间总长为 1.2×10^{-5} s。由于钢材的声衰减系数较小,且传播总声程较小,仿真过程忽略因波束散射和吸收造成的能量衰减。

2.2 检测过程信号变化特征

以焊根正上方顶板为坐标原点,探头中心点 T 坐标(记为 x_T)作为探头位置。从声

波反射点在焊趾左侧开始(此处可取 $x_T = -25\text{ mm}$),向右移动至坐标原点(发射信号可越过裂纹),每移动 1 mm 计算一次,以模拟一次焊缝移动检测过程。提取接收信号的最大声压值,获得接收信号强度随发射点位的变化情况,结果如图 5 所示。从图中可以看出,当发射信号进入焊缝位置时,接收声压开始降低,直至全部信号通过焊缝进入 U 肋,声压值降至 0,表明探头参数满足计算要求。发射信号往焊根或裂纹尖端移动,接收声压值逐渐增大,当越过焊根或裂纹尖端时达到最大值。相比于无裂纹恢复到最大值时的发射点位,探头需进一步向焊根移动,完全绕过裂纹尖端后才恢复到最大值,此变化可以用于判断裂纹特征。

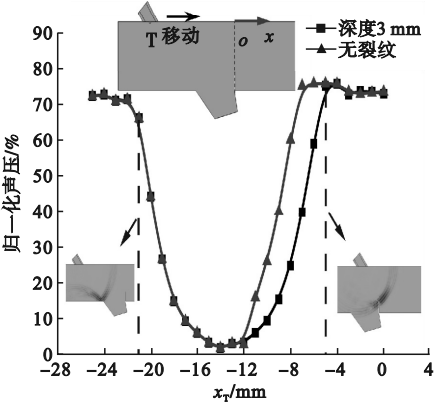


图 5 有裂纹试件检测信号变化对比
Fig. 5 Comparison of detection signals with or without crack

考虑到钢桥面板厚度较小,且贯穿裂纹从焊根萌生后快速沿板厚方向扩展,笔者控制裂纹垂直于顶板萌生,研究裂纹宽度和深度对检出信号的影响。

2.3 裂纹宽度影响

钢材微裂纹宽度一般为 $0.01 \sim 0.1\text{ mm}$ ^[18],控制裂纹固定发射探头位置 $x_T = -7\text{ mm}$,改变裂纹深度,获得不同裂纹宽度下的接收峰值声压,结果如图 6 所示。从图中可以看出,对于同一深度裂纹,声压强度基本不随裂纹宽度变化而变化,这表明萌

生阶段的裂纹宽度基本不影响检出信号。因此该方法检测过程中可忽略裂纹宽度的影响。

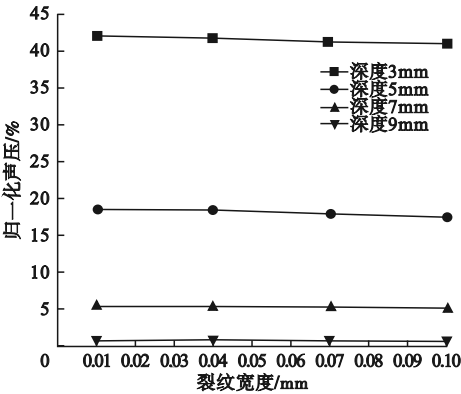
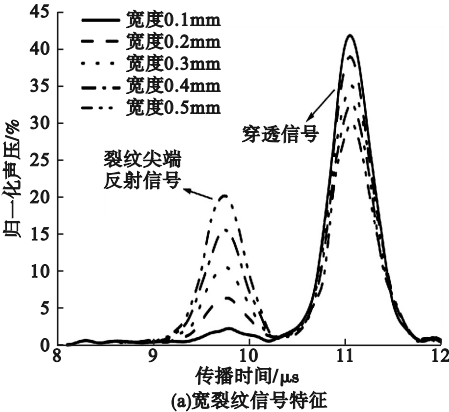


图 6 不同裂纹宽度下的接收信号
Fig. 6 Signals of different crack widths

考虑到裂纹情况多变,控制裂纹深度为 3 mm ,逐步增大裂纹宽度,以研究宽裂纹的信号特征。随着裂纹宽度的增大,接收信号呈现如图 7(a)所示的双峰样式,“前峰”峰值逐渐增大的同时,“后峰”峰值逐渐减小。由传播时间计算声程可知,接收到的“前峰”信号为裂纹尖端反射声波,“后峰”为穿透声波。提取两峰值强度,可得接收信号峰值与裂纹宽度关系(见图 7(b))。采用最小二乘法进行线性拟合可知,相比于透射信号,裂尖反射信号强度与裂纹宽度表现出更强的线性关系,即对于裂纹宽度较大的裂纹,可选用接收到的尖端反射信号来计算裂纹宽度。



(a)宽裂纹信号特征

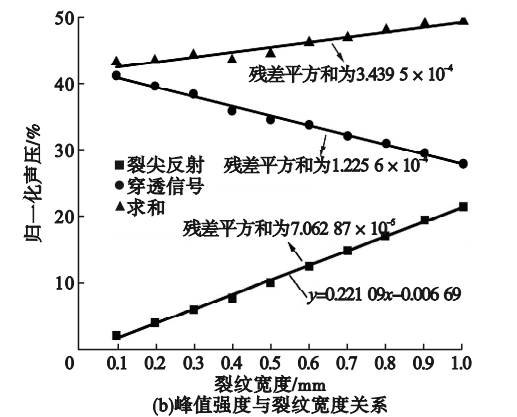


图7 透射与尖端反射情况

Fig. 7 Transmission and tip reflection

2.4 裂纹深度影响

控制裂纹宽度为 0.1 mm,改变裂纹深度和发射探头位置,绘制穿透信号随裂纹深度变化曲线如图 8 所示。从图中可以看出,随着裂纹深度的增加,透射信号均呈下降趋势,且发射点越靠近裂纹透射信号下降越快。若以透射信号强度作为裂纹深度判断依据,则需获得每个人射点对应的声压强度 - 裂纹深度曲线,这在一定程度上会增加检测的复杂程度。同时,实桥检测过程中,透射信号强度可能还受裂纹宽度、待测面粗糙度、受力状态等因素的干扰,进一步加大了通过透射强度判断裂纹深度的难度。

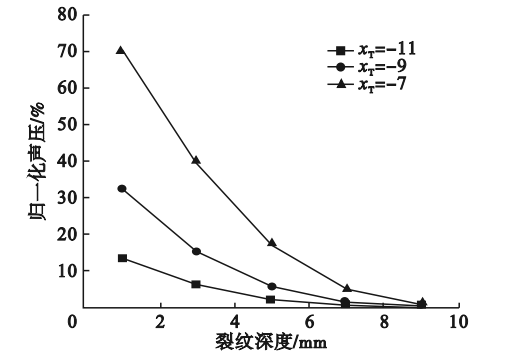


图8 裂纹深度对检测信号的影响

Fig. 8 Effect of crack depth

考虑整个移动检测过程,当发射信号越过裂纹尖端时,透射信号会恢复到最大值(见图 9(a))。提取透射信号刚好到达最大值时的入射横坐标 x_{Tmax} ,绘制裂纹深度随 x_{Tmax} 的变化曲线(见图 9(b))。从图中可以看出,裂纹深度与透射信号刚好到达最大值

时的入射横坐标 x_{Tmax} 呈线性关系,可以将 x_{Tmax} 作为裂纹深度检出指标,避免直接采用穿透信号强度,可以有效降低现场检测难度。

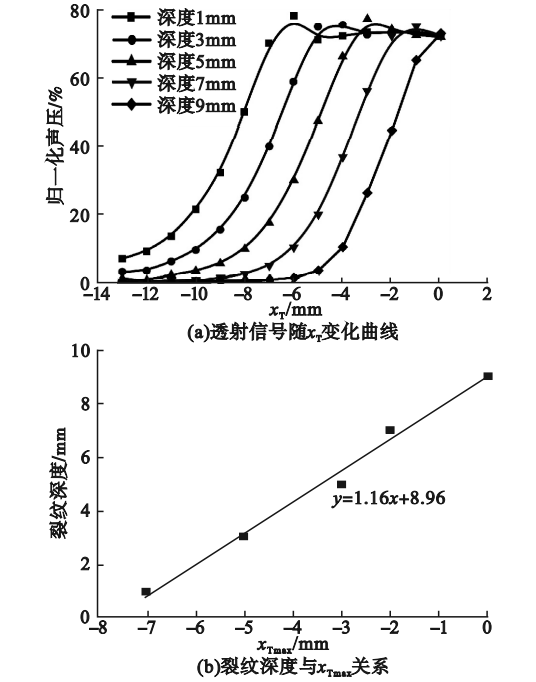


图9 裂纹深度与透射信号关系
Fig. 9 Relationship between crack depth and transmitted signal

3 试验验证

3.1 试件与检测设备

参考上述参数制作了无裂纹和含预制裂纹的顶板-U肋构造试件。试件材料为 Q345q,采用 CO₂ 保护焊进行焊接。预制裂纹采用电火花线切割而成,受线切割钼丝直径最小为 0.18 mm 的限制,预制裂纹宽度控制在 0.2 ~ 0.6 mm。试件参数和实物如图 10 所示,具体参数见表 3。

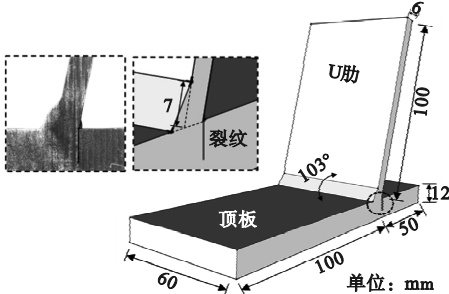


图10 预制裂纹试件
Fig. 10 Prefabricated crack specimens

表3 试件裂纹设计参数

Table 3 Crack parameters of the specimens			
试件类型	编号	裂纹宽度/mm	裂纹深度/mm
预制裂纹	W2-D6	0.2	6
	W4-D6	0.4	6
	W6-D6	0.6	6
	W4-D2	0.4	2
	W4-D4	0.4	4
	W4-D8	0.4	8
无裂纹	N	—	—
验证试件	W4-D5	0.4	5
	W5-D6	0.5	6

试验检测设备为 SH610 数字式超声探伤仪,耦合剂为 CG-98 型超声波探伤耦合剂,校核探头采用 CSK-IA 标准试块,探头采用定制探头,参数见表 4。

表4 探头参数

Table 4 Probe parameters					
序号	频率/ MHz	晶片长×宽/ mm	设计 K 值	校核 K 值	探头前 沿/mm
1	5	4×4	0.8	0.78	4.55
2	5	4×4	2.0	2.20	5.50

3.2 试验方案

选用数字探伤仪的穿透模式,参照图 3 选取不同位置进行检测。在远离焊缝位置将发射与接收探头相对且垂直于焊缝方向放置,两探头间距约为 19 mm ($K = 0.8$) 或 48 mm ($K = 2$),适当调整探头位置和探伤仪的示波范围和增益,控制稳定最大波高约为 80%。保持两探头的间距不变,将两探头同步沿垂直焊缝方向移动,每移动 1 mm 记录一次对应位置的波高,得到入射点距焊根距离 x_T -波高曲线。为降低试验误差,每个试件沿宽度方向上取 3 个测点,每个测点分别进行 3 次测量,即每个试件得到 9 条 x_T -波高曲线,采用 Bigaussia 函数对 9 条曲线进行非线性拟合,得到每个试件对应的 1 条 x_T -波高曲线。测量裂纹宽度时,同时记录两个波高。通过不同裂纹试件的 x_T -波高曲线分别与无裂纹试件参照曲线进行对比分析,判断顶板焊根贯穿裂纹的宽度和深度。

3.3 试验结果与分析

3.3.1 无裂纹试件距离-波高曲线

分别采用 $K = 0.8$ 和 $K = 2$ 的探头组对无裂纹试件进行移动检测,绘制无裂纹试件 x_T -波高曲线如图 11 所示。从图中可以看出, $K = 2$ 探头组在探头移动过程中存在信号降低阶段,但始终能够接收到信号,表明信号在扫查到焊缝时声扩散范围超过焊缝宽度,只有部分信号进入 U 肋,这会导致无法判断信号衰减是由声波进入焊缝还是被裂纹反射引起。 $K = 0.8$ 无裂纹曲线存在明显的无信号区域,证实了有限元仿真的正确性。后续裂纹宽度和深度检测试验和参照曲线均采用 $K = 0.8$ 探头组。

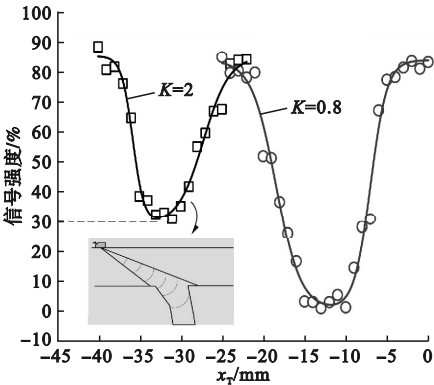


图11 无裂纹试件 x_T -波高曲线
Fig. 11 x_T -wave height curves of crack free specimen

3.3.2 裂纹宽度分析

选择试件 W2-D6、W4-D6、W6-D6 开展裂纹宽度测试试验。不同裂纹宽度对应的 x_T -波高曲线如图 12(a) 所示。从图中可以看出,对于同一深度的裂纹, x_T -波高曲线基本重合,表明宽度对该检测方法的影响较小,在尖端反射信号微弱时,可忽略宽度的影响。提取信号提升阶段测点 $x_T = -5$ mm 时的双峰波高值,同时绘制尖端反射信号和透射信号随裂纹宽度变化图,并采用最小二乘法拟合得到裂纹宽度与接收信号强度的关系式(见图 12(b))。对验证试件 W5-D6 进行检测试验,获得在测点 $x_T = -5$ mm 处的透射信号峰值为 14.3%,尖端反射峰值为 7.2%,

分别带入图中相应的拟合公式,计算裂纹宽度为 0.42 mm 和 0.52 mm。对比采用两种不同信号进行裂纹宽度的判断结果可知,采用尖端反射信号的判断误差更小。

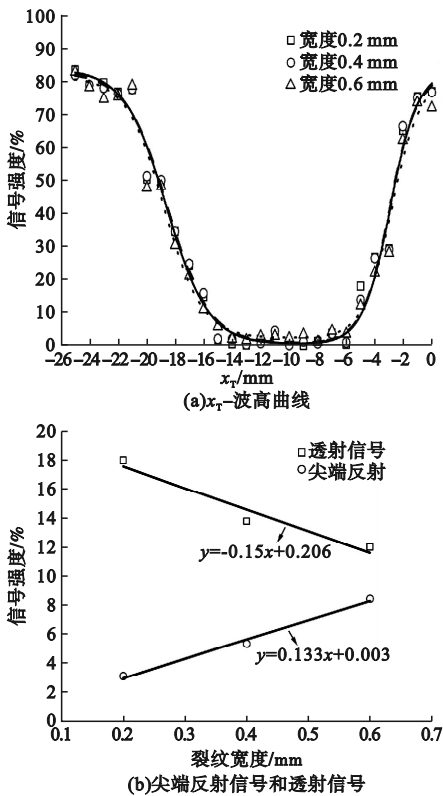


图 12 不同裂纹宽度下的接收信号
Fig. 12 Signals of different crack widths

3.3.3 裂纹深度分析

选择 W4-D2、W4-D4、W4-D6、W4-D8 试件开展裂纹深度测试试验。不同裂纹深度对应的 x_T -波高曲线如图 13 (a) 所示。从图中可以看出,不同深度的裂纹,波高随入射位置的变化趋势基本与有限元仿真结果保持一致。提取透射信号刚好到达最大值时的入射横坐标 x_{Tmax} ,绘制裂纹深度随 x_{Tmax} 的变化图,并进行线性拟合,结果如图 13 (b) 所示。对验证试件 W4-D5 进行深度检测试验,获得信号刚好到达最大值时的入射横坐标为 $x_{Tmax} = -2$ mm,带入拟合公式,获得裂纹深度为 5.48 mm,误差为 0.48 mm。受人工移动探头和直尺读数限制,检测误差较大,后续引入自动化检测装置可进一步缩小检测误差。

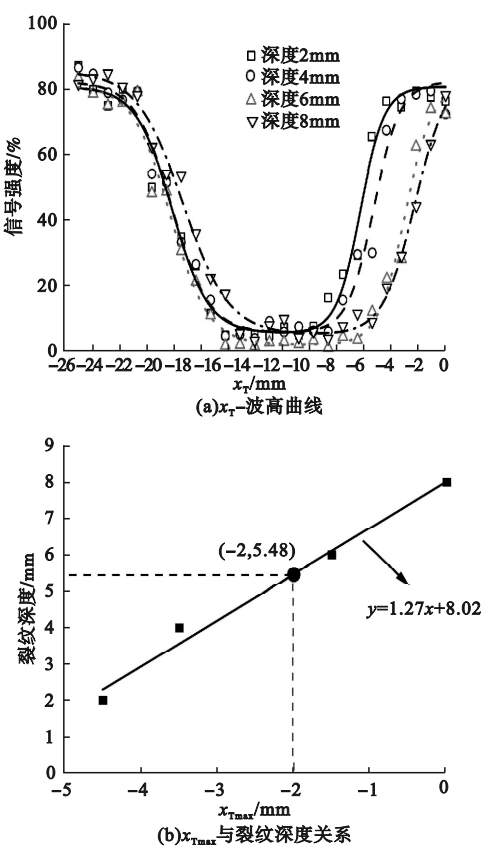


图 13 不同裂纹深度下的接收信号
Fig. 13 Signals of different crack depth

4 结 论

- (1) 基于有限元模拟和贯穿裂纹检测试验,通过对比不同入射点位下的穿透信号与裂纹参数变化情况,可以实现钢桥面板贯穿裂纹的检测,判断裂纹的几何参数,验证了超声波穿透法检测钢桥面板贯穿裂纹的可行性。
- (2) 裂纹宽度小于 0.1 mm 时,不同裂纹宽度试件的曲线具有较好的一致性;裂纹宽度较大时,可采用裂纹尖端反射信号强度与宽度的线性关系获得裂纹宽度。
- (3) 裂纹深度与透射信号刚好到达最大值时的入射横坐标存在比例关系,通过拟合的裂纹深度计算公式可以较好地计算出裂纹深度,测量误差在 1 mm 以内。

参考文献

[1] 刘汉勇,代希华,程寿山. 大跨径钢箱梁桥正交异性板疲劳裂纹发展规律及处置措施[J].

- 公路交通科技,2022,39(8):32-38.
(LIU Hanyong, DAI Xihua, CHENG Shoushan. Propagation rule and treatment measures of fatigue crack in orthotropic deck of long-span steel box girder bridge [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2022,39(8):32-38.)
- [2] 汪珍,王莹. 正交异性钢桥面板的疲劳裂纹扩展规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020,51(7):1873-1882.
(WANG Zhen, WANG Ying. Analysis of fatigue crack propagation on orthotropic steel bridge deck [J]. Journal of central south university(science and technology),2020,51(7):1873-1882.)
- [3] 曾勇,渠昱,顾安邦,等. 钢箱梁悬索桥大节段正交异性钢桥面板疲劳性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2016,48(9):95-100.
(ZENG Yong, QU Yu, GU Anbang, et al. Large sectional fatigue experiment of the orthotropic steel deck from a box-girder suspension bridge [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2016,48(9):95-100.)
- [4] 卜一之,金正凯,黄云,等. 钢桥面板纵肋顶板焊缝疲劳裂纹扩展的关键影响因素[J]. 中国公路学报,2019,32(9):61-70.
(BU Yizhi, JIN Zhengkai, HUANG Yun, et al. Key influencing factors of fatigue crack propagation in rib-to-deck welded joints of orthotropic steel bridge deck [J]. China journal of highway and transport,2019,32(9):61-70.)
- [5] 罗鹏军,张清华,龚代勋,等. 钢桥面板 U 肋与顶板双面焊连接疲劳性能研究[J]. 桥梁建设,2018,48(2):19-24.
(LUO Pengjun, ZHANG Qinghua, GONG Daixun, et al. Study of fatigue performance of U rib-to-deck double side welded joint in orthotropic steel bridge deck [J]. Bridge construction, 2018,48(2):19-24.)
- [6] LIU X, FENG D, TANG H, et al. Investigation on the bending fatigue and shear failure in steel bridge deck pavement systems [J]. Journal of testing and evaluation,2016,44(2):895-906.
- [7] 王占飞,韩迎秋,何志成,等. 基于 XFEM 钢桥面板-U 肋焊缝疲劳裂纹扩展规律及其影响因素分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2023,39(4):689-698.
(WANG Zhanfei, HAN Yingqiu, HE Zhicheng, et al. Fatigue crack propagation and influencing factors of steel bridge deck and U-rib weld based on XFEM [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science),2023,39(4):689-698.)
- [8] 邓扬,刘涛磊,曹宝雅,等. 钢桥面顶板-U 肋焊缝贴贴增强板材疲劳加固方法研究[J]. 中国公路学报,2022,35(2):201-211.
(DENG Yang, LIU Taolei, CAO Baoya, et al. Fatigue strengthening for deck-to-rib welds in orthotropic steel bridge deck by bonding reinforced plate on deck surface [J]. China journal of highway and transport,2022,35(2):201-211.)
- [9] 姚悦,傅中秋,徐捷,等. 顶板与 U 肋焊缝水平裂纹钻孔止裂参数研究[J]. 工业建筑,2018,48(10):40-45.
(YAO Yue, FU Zhongqiu, XU Jie, et al. Research on stop-hole parameters for horizontal crack of U-rib to deck weld joint [J]. Industrial construction,2018,48(10):40-45.)
- [10] YAMADA T, SHIRAIISHI A, OKUNO M, et al. Application of electromagnetic testing to orthotropic steel deck [C]// 6th international conference on bridge maintenance, safety and management. Florida: CRC Press-Taylor & Francis Group,2012.
- [11] TSUKAMOTO A, HATO T, ADACHI S, et al. Development of three-channel HTS-SQUID inspection system for orthotropic steel decks of expressway bridges [J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2019,29(5):1601005.
- [12] BHUIYAN M Y, LIN B, GIURGIUTIU V. Acoustic emission sensor effect and waveform evolution during fatigue crack growth in thin metallic plate [J]. Journal of intelligent material systems and structures,2018,29(7):1275-1284.
- [13] WANG K, TONG L, ZHU J, et al. Fatigue behavior of welded T-joints with a CHS brace and CFCHS chord under axial loading in the brace [J]. Journal of bridge engineering,2013,18(2):142-152.
- [14] 吉伯海,袁周致远,傅中秋,等. 钢箱梁疲劳裂纹特征超声波检测方法试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2016,47(6):2023-2029.
(JI Bohai, YUAN Zhouzhiyuan, FU Zhongqiu, et al. Fatigue crack features in steel box girder by ultrasonic testing [J]. Journal of central south university (science and technology), 2016,47(6):2023-2029.)
- [15] 张清华,张登科,崔闯,等. 基于超声导波的钢桥面板纵肋对接焊缝疲劳裂纹检测方法[J]. 中国公路学报,2022,35(6):101-112.
(ZHANG Qinghua, ZHANG Dengke, CUI Chuang, et al. Fatigue crack detection method based on ultrasonic-guided waves for the longitudinal rib butt weld of steel decks [J]. China journal of highway and transport,2022,35(6):101-112.)
- [16] 石林泽,程斌. 钢桥面板疲劳裂纹监测的 Lamb 导波传播特征的机理研究[J]. 公路,2022,67(7):151-156.
(SHI Linze, CHENG Bin. Study on propagation mechanism of lamb guided waves for OSDs fatigue crack monitoring [J]. Highway,2022,67(7):151-156.)
- [17] 高峰,周虹,黄超. 基于相控阵激光超声的裂纹衍射增强试验研究[J]. 振动与冲击,2022,41(3):37-44.
(GAO Feng, ZHOU Hong, HUANG Chao. Tests for crack diffraction enhancement based on phased array laser ultrasound [J]. Journal of vibration and shock,2022,41(3):37-44.)
- [18] 于丽波,艾军,董延超. 基于条件随机场的钢箱梁正交异性板疲劳微裂纹检测[J]. 中国测试,2019,45(5):17-25.
(YU Libo, AI Jun, DONG Yanchao. Fatigue crack detection for orthotropic plate of steel box girder based on conditional random fields [J]. China measurement & test,2019,45(5):17-25.)