

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2314882

单向 CFRP 表面缺陷的涡流检测与有限元仿真研究^{*}

黄曼^{1,2} 王婕^{1,2} 周伟^{1,2} 张鹏飞^{1,3} 赵润宇^{1,2} 刘然³

(1. 河北大学质量技术监督学院 保定 071002; 2. 河北大学计量仪器与系统国家地方联合工程研究中心 保定 071002;
3. 中国特种设备检测研究院 北京 100029)

摘要: 针对目前钢制拉索耐腐蚀性差,寿命周期短,同时无法满足当前工程应用中超大跨距的要求,碳纤维复合材料因具有优异的机械性能和稳定的化学性能,为寻找替代钢拉索的新材料拉索提供了新的研究方向。本研究利用实验与数值仿真相结合的方法,开展 CFRP 裂纹损伤结构的涡流场分析与检测。结果表明,当激励频率为 1 250 kHz 时,线圈对碳纤维板索裂纹损伤检测最为敏感。裂纹处信号幅值随裂纹深度的增加而增加;随裂纹宽度的增加呈现先增加后减小的趋势,在裂纹宽度为 1.5 mm 时幅值达到最大值。通过 CFRP 涡流场有限元仿真,能够有效地验证实验结果。涡流检测技术可以有效应用在 CFRP 的损伤缺陷检测当中,为今后利用电磁涡流技术实现 CFRP 拉索的在役缺陷检测提供参考依据。

关键词: 碳纤维拉索;涡流检测;有限元模拟;裂纹损伤

中图分类号: TB33 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4

Eddy current detection and finite element simulation study of surface defects in unidirectional CFRP

Huang Man^{1,2} Wang Jie^{1,2} Zhou Wei^{1,2} Zhang Pengfei^{1,3} Zhao Runyu^{1,2} Liu Ran³

(1. School of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding 071002, China;
2. National & Local Joint Engineering Research Center of Metrology Instrument and System, Hebei University, Baoding 071002, China;
3. China Special Equipment Inspection & Research Institute, Beijing 100029, China)

Abstract: In response to the poor corrosion resistance and short life cycle of the current steel cable, as well as the inability to meet the requirements of the current engineering applications of oversized spans, carbon fiber composites provide a new research direction for finding new materials to replace steel cable ties due to their excellent mechanical properties and stable chemical properties. This study uses a combination of experimental and numerical simulation to carry out the analysis and detection of eddy current fields in CFRP crack damaged structures. The results show that the coil is most sensitive to the detection of crack damage in CFRP cables when the excitation frequency is 1 250 kHz. The amplitude of the signal at the crack increases with the increase of the crack depth; it shows the trend of increasing and then decreasing with the increase of the crack width, and the amplitude reaches the maximum value when the crack width is 1.5 mm. Eddy current inspection technology can be effectively applied in the detection of damage defects in CFRP, providing a reference basis for the future use of electromagnetic eddy current technology to achieve in-service defect detection of CFRP cables.

Keywords: carbon fiber cable; eddy current testing; finite element simulation; crack damage

0 引言

目前,支撑桥梁结构的拉索大多由钢、混凝土构成,存在着不可忽视的疲劳与腐蚀等问题,这严重影响桥梁结构的安全和服役寿命,一般寿命仅有 20 年左右,远低于所设

计的桥梁结构使用寿命^[1-2]。而且由于钢拉索结构复杂,自身重量大,具有明显的垂度效应,同时维护和换索成本高昂,甚至会超过桥梁造价等问题,都制约着钢拉索进一步发展^[3],因此探索新型材料拉索应用于工程结构已经变得愈加重要。

收稿日期:2023-09-30

^{*} 基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3005103)项目资助

碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)具备优良的机械性能,如质量轻、抗蠕变、耐摩擦、高比强度和比刚度等,以及稳定的化学性能等优点^[4-6],能够满足拉索结构大跨度的承载需求以及长期服役寿命,成为拉索结构轻量化发展的重要方向。但受制造工艺和服役条件的影响,碳纤维复合材料仍会伴随着多种缺陷和疲劳的产生^[7],严重影响其本身的机械性能,进而影响服役寿命,增加作业风险。因此,为保证复合材料结构的安全性和可靠性,开展针对 CFRP 损伤的检测是非常必要的。

常用于 CFRP 缺陷检测的无损检测技术主要有超声检测、红外检测等,但这些方法都有一定的局限性。超声可以有效检测 CFRP 内部结构的关键缺陷,如分层和脱粘,但被遮挡的缺陷难以被检测到^[8-9]。热成像无损检测技术由于易受线圈与闪光灯等不均匀加热效应的影响,会导致损伤边缘热成像变得模糊^[10]。而涡流无损检测技术作为电磁检测技术的一种,因检测速度快、非接触、自动化程度高、不需要对检测表面做特殊处理等优势得到了广泛应用^[11-12]。近年来,电磁场涡流无损检测技术在 CFRP 的缺陷定位和表征方面发展迅速,王成飞等^[13]利用设计的新型电磁传感器阵列,对高铁空心轴的内壁和外壁缺陷进行了电磁层析成像检测,并通过仿真和实验验证了方法的有效性。郭太平等^[14]通过搭建高频电磁涡流检测系统实现了对 CFRP 冲击、分层损伤的检测。殷晓康等^[15]采用外穿式旋转电磁场涡流检测探头,搭建电磁场涡流无损检测系统,分析了接收线圈各项参数对检测效果的影响,对钢管表面不同深度裂纹缺陷进行了检测。罗冠一等^[16]采用脉冲涡流方法,结合有限元软件模拟分析了缺陷处磁感应强度 z 轴分量,实现了对 CFRP 层压板冲击和分层两种结构损伤检测。程军等^[17]利用涡流检测技术,结合平切型结构的线圈探头,探究对 CFRP 裂纹的量化表征和分层损伤的有效识别。

碳纤维复合材料的各向异性使其在纤维横向和纤维纵向的导电机制不同,针对复合材料纤维铺层结构对涡流检测的影响开展一些研究。Cheng 等^[18]利用涡流法证明了多向 CFRP 层压板的导电性能明显优于单向 CFRP 层压板,并通过绘制极坐标图表征 CFRP 的各向异性。Zeng 等^[19-20]对利用涡流技术有效检测出了单向 CFRP 的分层损伤。曾辉耀等^[21]研究了共面三矩形线圈探头感应电压信号的变化与单向 CFRP 不同分层缺陷厚度与位置范围的对应关系,对 CFRP 分层缺陷进行了量化评估。张荣华等^[4,22]利用均质化方法建立了平纹编织 CFRP 裂纹与疲劳损伤仿真模型,并通过实验验证了有限元模拟结果的有效性。这些研究证明了涡流检测在 CFRP 损伤检测中有着很好的实际应用前景,但研究方向大多集中复合材料分层损伤检测,对于碳纤维复合材料裂纹缺陷检测的定量研究较少。

为了开展新型 CFRP 拉索损伤检测,本研究采用电磁

场涡流检测技术,设计了含不同裂纹缺陷的 CFRP 板索试件,研究了不同频率下涡流对试件缺陷的影响,利用电磁场涡流检测技术对不同深度和宽度的裂纹损伤试件进行扫描检测与实验分析,结合有限元仿真验证了该方法的有效性,也为 CFRP 拉索损伤的涡流检测奠定基础。

1 涡流检测碳纤维复合材料损伤原理

1.1 涡流检测原理

涡流检测以电磁感应为基础,将检测线圈靠近可导电的碳纤维板索试件,其内部出现闭合回路涡旋流动电流,而涡流产生的磁场又会重新作用于检测线圈,引起阻抗变化,如图 1 所示。因此,基于检测线圈的阻抗变化,可以获得复合材料试件分层、裂纹等损伤缺陷信息,通过分析涡流探头在复合材料试件不同位置得到的阻抗值变化,可以判断试件损伤的类型、尺寸及位置。

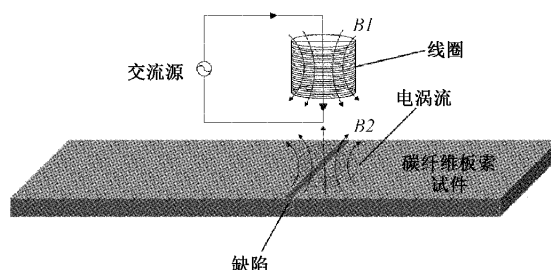


图 1 涡流检测原理

根据涡流检测的阻抗分析法建立涡流检测的等效互感电路模型,如图 2 所示,将线圈和被测试件等效为理想的电阻、电感等电路元件,通以交流电压进行激励。

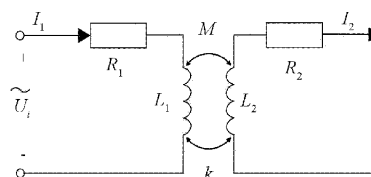


图 2 线圈与被测导体的等效互感电路模型

其中,探头阻抗表示为 $R_1 + j\omega L_1$,探头激励电源表示为 \tilde{U}_i ,探头激励电流为 I_1 。被测试件部分阻抗表示为 $R_2 + j\omega L_2$,被测试件感应回路电流为 I_2 ,其中探头与被测试件均等效为电感 L_1 与 L_2 ,其互感系数定义为 M , k 为 L_1 与 L_2 之间的耦合系数,互感系数 M 与耦合系数 k 的具体关系示为:

$$M = k \sqrt{L_1 L_2} \quad (1)$$

根据基尔霍夫回路电压定律,可得:

$$(R_1 + j\omega L_1)I_1 - j\omega M I_2 = \tilde{U}_i \quad (2)$$

$$(R_2 + j\omega L_2)I_2 - j\omega M I_1 = 0 \quad (3)$$

其中, ω 为激励源角频率。联立式(2)和(3)分别得到探头激励电流 I_1 与被测试件感应回路电流 I_2 。

$$I_1 = \frac{\tilde{U}_i}{\left[R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} R_2 \right] + j \left[\omega L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \omega L_2 \right]} \quad (4)$$

$$I_2 = j\omega \frac{M I_1}{R_2 + j\omega L_2} = \frac{\omega^2 M L_2 + j\omega M R_2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} I_1 \quad (5)$$

因此,求出探头在检测被测试件时等效阻抗为:

$$Z = \frac{U}{I_1} = \left[R_1 + \frac{R_2 \omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \right] + j\omega \left[L_1 - \frac{\omega^3 M^2 L_2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \right] \quad (6)$$

通过上式推理可以看出,当探头施加激励时,被测试件的阻抗除了受自身电阻、电感以及激励频率的影响外,还受到探头与被测试件之间互感系数的影响。在探头扫描过程中,当被测试件存在损伤时,线圈会出现阻抗值变化,并以电压变化的形式呈现,电压与缺陷处信号幅值关系如式(7)所示。因此,本研究采用幅值信息来判定被测试件的损伤程度。

$$A(x, y) = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (7)$$

其中, V_x 表示得到的缺陷信号电压实部信息, V_y 表示得到的缺陷信号电压虚部信息。

1.2 趋肤效应

在交变电流激励下,感应电流主要集中在试件表面,内部涡流密度随深度增加逐渐减小。随着交变电流频率增加,试件表面的涡流密度越大,但渗透深度减小,该现象成为趋肤效应。感应电流在试件中的渗透深度 δ 可表示为:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (8)$$

式中: f 为线圈探头的检测频率; μ 为试件材料磁导率; σ 为试件材料电导率。

2 实验与分析

2.1 检测试件、仪器与参数

1) 检测试件

本研究采用 30 层 T300 单向碳纤维布热压成型,试件尺寸为 100 mm×20 mm×4 mm,通过切割得到含裂纹缺陷的碳纤维板索试件,如图 3 所示,其中纵向裂纹深度尺寸分别为 0.4、0.8、1.2、1.6 mm,轴向裂纹宽度尺寸分别为 2.5、2、1.5、1 mm。

2) 检测仪器与参数

采用 SMART-201 多频涡流检测仪,检测过程不需对试件表面进行处理,检测速度快,探头提离信号小,具有 64 Hz~5 MHz 的检测频率可选范围,扫查过程中对线圈阻抗数据进行实时采集,最大采样率为 20 MB。

检测前,在探头正弦波形不产生失真和饱和的状态下,对检测频率、探头前置增益以及探头驱动进行设定。经过实验比对,将探头前置增益设置为 25 dB,驱动设置为默认

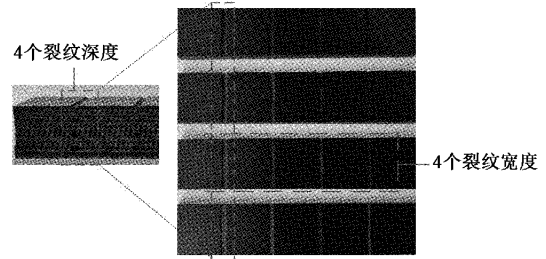


图 3 碳纤维板索试件

值 5,可保证各检测频率下探头正弦波形不产生失真和饱和,具体参数如表 1 所示。

表 1 SMART-201 多频涡流检测仪参数

采样率 (最大)/MB	增益/ dB	驱动	增益比/ Y/X	前置增益/ dB	相位旋转/ (°)
20	31	5	1	25	0

考虑检测材料特性和涡流检测原理,采用笔式涡流探头对 CFRP 板索进行检测。检测探头可以捕获 CFRP 缺陷处的涡流信号,其主要参数信息为幅值和相位。

2.2 检测频率

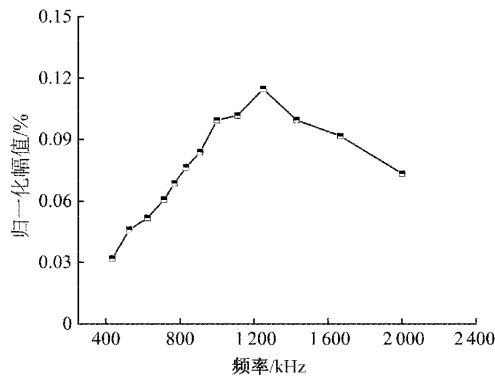
涡流的检测频率大致在几十赫兹至十兆赫兹之间,对于非铁磁性材料的涡流检测频率大概在几百至几千赫兹之间,低频条件下可以获得更大的涡流检测深度,高频条件有利于获得更高的检测灵敏度。由于检测频率的大小会影响频率比,进而影响检测精度,为提高碳纤维复合材料裂纹损伤的检测质量,需要选择合适的检测频率。

实验过程中保持其他参数不变,在固定扫描速度下,改变检测频率,采用分频方式在频率 400~2 000 kHz 内自动匹配频率点,分别为 434.8、526.3、625.0、714.3、769.2、833.3、909.1、1 000、1 111、1 250、1 429、1 667、2 000 kHz,研究激励频率对试件裂纹损伤检测效果的影响,实验结果如图 4 所示。

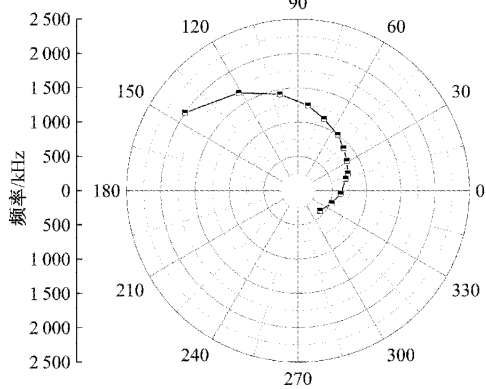
结果表明,涡流强度随频率增加呈现先增加后减小趋势,相位随频率的增加呈现螺旋增长的规律;由图 4(a)可知,当激励频率为 1 250 kHz 时,电涡流强度达到了最大值,表明该频率对复合材料试件裂纹损伤检测最为敏感,可以判断最佳激励频率在 1 111~1 429 kHz 之间,因此本研究选择 1 250 kHz 最佳激励频率对碳纤维复合材料试件裂纹损伤进行电磁涡流检测。

2.3 实验结果与分析

由于自身的特性,采用 1 250 kHz 的频率对 4 种 CFRP 板索固定宽度、不同深度的裂纹损伤进行涡流检测,对裂纹深度进行标定,通过多次检测求取平均值的方式降低由于笔式探头接触范围小以及碳纤维材料不均匀性造成的检测数据误差,对不同损伤状态下获得的缺陷信号幅值进行归一化处理,得到不同缺陷信号幅值变化趋势如图 5(a)所



(a) 幅值变化规律



(b) 相位变化规律

图4 同一缺陷不同频率下幅值与相位变化

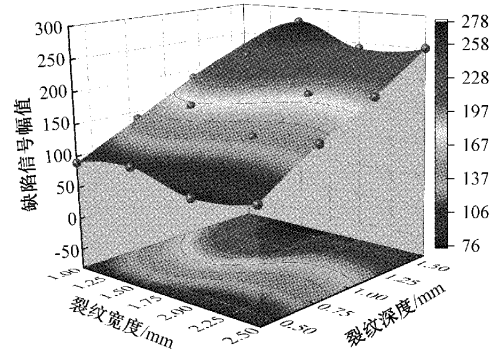
示,由图可知,固定宽度裂纹损伤信号的幅值随裂纹深度的增加而增加。由图5(b)可知,4种不同宽度裂纹缺陷处的相位基本一致或间隔 $k\pi$ 相位。随深度的增加相位出现滞后,这是由于涡流检测时,试件不同深处的缺陷会引起涡流信号矢量点相位发生变化,即涡流信号相位自试件表面向深处成线性滞后,其滞后角度的大小如式(9)所示。

$$\theta_x = \frac{X}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (9)$$

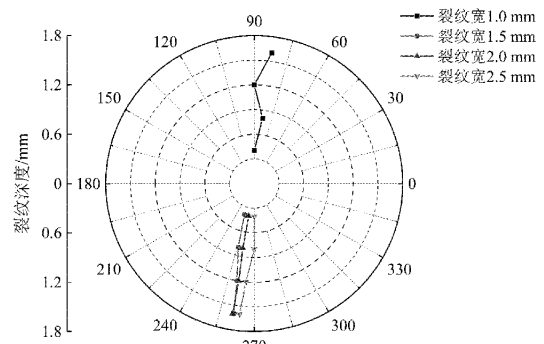
其中, θ_x 为滞后相位角; X 为缺陷深度。

另外,采用频率1250 kHz对4种固定裂纹深度,不同裂纹宽度的损伤进行涡流检测,对裂纹宽度进行标定,多次检测取均值,避免误差,经过归一化处理,得到裂纹处幅值信号随宽度变化的规律如图6(a)所示,缺陷信号的幅值随裂纹宽度的增加呈现出先增加后减小的趋势,在裂纹宽度为1.5 mm时幅值达到最大值。由图6(b)可知,不同宽度裂纹缺陷的相位存在滞后现象,不同深度裂纹缺陷相位信号基本一致或间隔 $k\pi$ 相位。

观察图5(a)和图6(a),在两种不同标定情况下,随裂纹宽度的增加,缺陷处信号幅值都呈现出先增大后减小的趋势;随着裂纹深度的增加,缺陷处信号幅值呈现持续增长的趋势,当裂纹宽度为1.5 mm,深度为1.6 mm时幅值达到最大值,两种情况结果表现一致。

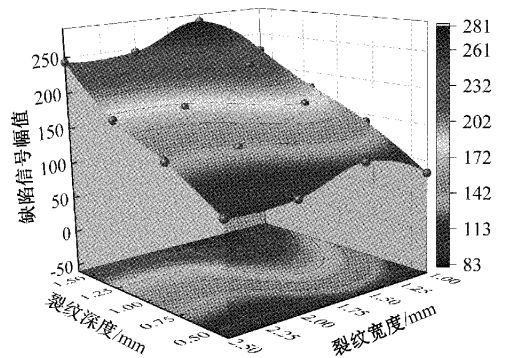


(a) 裂纹深度标定时幅值变化

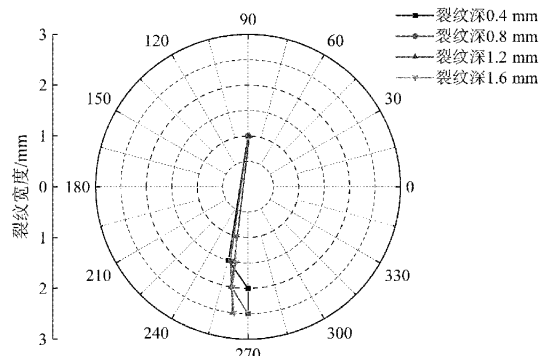


(b) 裂纹深度标定时相位变化

图5 归一化缺陷信号幅值、相位随裂纹深度变化



(a) 裂纹宽度标定时幅值变化



(b) 相位变化规律

图6 归一化缺陷信号幅值、相位随裂纹宽度变化

3 仿真分析与验证

采用有限元方法,研究电磁涡流检测碳纤维板索的涡流分布,分析裂纹缺陷磁通密度与裂纹宽度和裂纹深度的对应关系,阐明碳纤维板索裂纹参数对涡流场分布的影响规律。仿真模型由单向碳纤维板索、线圈和空气域组成,如图 7 所示。其中,空气域设置为 300 mm×300 mm×300 mm 的正方体模型;碳纤维板索长 100 mm,宽 20 mm,高 4 mm,电导率为 124.17 S/m;线圈呈空心圆柱体,由铜线均匀缠绕围成,内径 0.3 mm,外径 1 mm,高 1 mm,线圈匝数为 50,提高高度为 0.5 mm,沿轴线垂直放置于碳纤维板索中心正上方,选择探头为单激励-接收型。

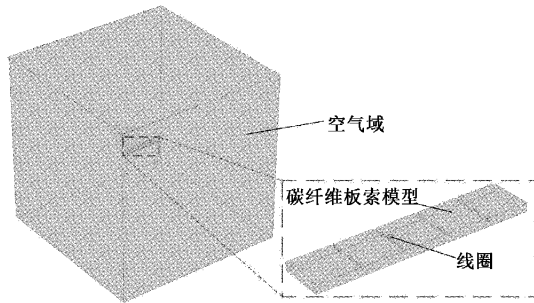


图 7 仿真模型

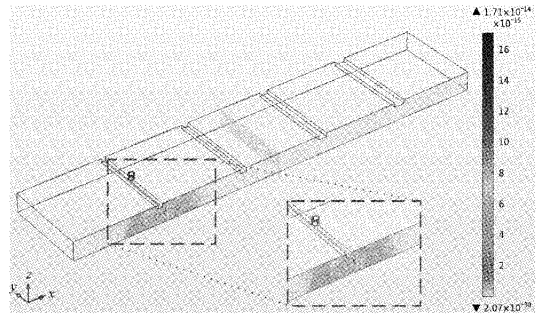
模型构建后进行网格划分,在线圈几何分析下,通过式(5)计算出感应回路电流,在固定频率 1 250 kHz 下进行频域研究,通过安培定律式(10)计算得出磁通密度模。

$$\oint B \cdot d_l = \mu_0 \cdot I \quad (10)$$

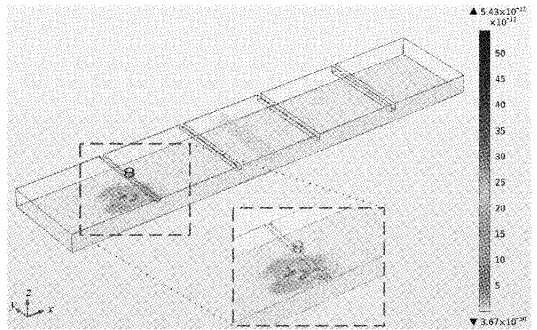
其中, $\oint B \cdot d_l$ 表示磁场回路上的电流, μ_0 为真空磁导率, I 表示通过该回路的电流。

以裂纹损伤宽 1 mm 深 0.4 mm 的试件为例,CFRP 板索裂纹损伤截面和底面电磁场涡流分布仿真结果如图 8 所示。裂纹损伤的存在影响层合板中电磁场分布,裂纹损伤截面的电磁场呈现围绕裂纹分布,在裂纹尖端出现较大的磁通密度模。裂纹损伤底面电磁场呈现近似线圈的圆形分布,由于裂纹损伤的存在,近似圆形电磁场的中心磁通密度模较小,并且不同损伤程度的缺陷反映出不同磁场分布大小。

损伤处的电磁场分布表明,裂纹的纵向尺寸变化对于底面磁通密度变化明显,裂纹的轴向尺寸变化对于截面磁通密度变化明显。因此,对 4 种不同宽度和 4 种不同深度的裂纹损伤进行涡流仿真,并分别在截面和底面计算磁通密度模最大值,结果如表 2 和 3 所示。当裂纹深度一定时,磁通密度模最大值随裂纹宽度的增加呈现先增加后减小的规律;当裂纹宽度一定时,磁通密度模最大值随裂纹深度的增加呈现增加的规趋势。实验结果中的电磁场振幅是指涡流在传播过程中电场或磁场的最大值。磁通密度模与磁场



(a) 宽 1 mm 深 0.4 mm 裂纹截面仿真结果



(b) 宽 1 mm 深 0.4 mm 裂纹底面仿真结果

图 8 宽 1 mm 深 0.4 mm 损伤的涡流仿真结果

强度之间的关系如式(11)所示。

$$B = \mu_0 \cdot H \quad (11)$$

其中, μ_0 为真空中的磁导率, H 为磁场强度。

表 2 不同宽度 CFRP 损伤处磁通密度模

裂纹宽度/mm	裂纹深度/mm	磁通密度模最大值/T
1.0	0.8	1.710×10^{-14}
1.5	0.8	5.860×10^{-14}
2.0	0.8	1.230×10^{-14}
2.5	0.8	0.589×10^{-14}

表 3 不同深度 CFRP 损伤处磁通密度模

裂纹宽度/mm	裂纹深度/mm	磁通密度模最大值/T
1.0	0.4	5.43×10^{-11}
1.0	0.8	5.54×10^{-11}
1.0	1.2	8.88×10^{-11}
1.0	1.6	9.85×10^{-11}

对比仿真结果与实验结果,可以看出二者变化基本一致,随裂纹深度/宽度的变化,缺陷处信号幅值和磁通密度模都表现出良好的线性规律,因此仿真结果有效验证了电磁涡流检测 CFRP 板索缺陷实验的准确性和有效性,表明了涡流无损检测技术用于 CFRP 拉索损伤检测的可行性。

4 结 论

本研究采用电磁涡流无损检测技术对含裂纹损伤碳纤

维板索进行缺陷检测,利用有限元仿真涡流场分布情况,并对实验结果进行验证。通过实验分析,采用1 250 kHz对试件进行涡流检测,结果表明,随裂纹宽度的增加,缺陷处信号幅值都呈现出先增大后减小的趋势;随着裂纹深度的增加,缺陷处信号幅值呈现持续增长的趋势当裂纹宽度为1.5 mm,深度为1.6 mm时幅值达到最大值,缺陷处信号幅值和不同损伤缺陷具有较好的线性相关性和检测分辨率。因此,可将涡流用于CFRP拉索表面损伤识别与检测,同时对电磁涡流检测技术应用在CFRP拉索缺陷检测中提供了一定的参考价值。

信号的幅值会受到探头扫描速度的影响,但本文对于不同扫描速度对检测结果的影响还需要进一步的研究。此外,本研究只对CFRP板型索进行了实验与模拟,对于CFRP绞线索缺陷的检测有待进一步开展。

参考文献

- [1] 方志,周建超,谭星宇.基于高性能材料的超大跨混合梁斜拉桥结构性能研究[J].桥梁建设,2021,51(6):76-84.
- [2] FENG B, WANG X, WU Z S. Fatigue life assessment of FRP cable for long-span cable-stayed bridge[J]. Composite Structures, 2019, 210: 159-166.
- [3] 王安妮,刘晓刚,岳清瑞.碳纤维增强树脂基复合材料及其拉索抗低速冲击性能综述[J].复合材料学报,2022,39(11):5049-5061.
- [4] 张荣华,史可宇,何家俊,等.平纹编织碳纤维复合材料的块均质化建模及其涡流无损检测[J].天津工业大学学报,2020,39(5):61-66.
- [5] 李红利,李硕,修春波,等.基于电磁式阵列传感器的平纹编织碳纤维复合材料检测方[J].天津工业大学学报,2022,41(3):48-54.
- [6] 陈国龙,张帅帅,曹政,等.绝对式科赫分形平面涡流传感器裂纹检测性能研究[J].仪器仪表学报,2022,43(10):98-107.
- [7] TAO C C, ZHANG C, JI H L, et al. On the energy release rate extraction and mixed mode behavior of fatigue cohesive model [J]. Composite Structures, 2020, 239: 112038.
- [8] 钱江,赵满,何远玲.美国舰船复合材料的无损检测技术及评价[J].舰船科学技术,2016,38(15):141-145.
- [9] 刘元林,赵国金,高帅帅,等.碳纤维复合材料缺陷无损检测方法研究[J].煤矿机械,2017,38(12):64-66.
- [10] YI Q, TIAN G Y, MALEKMOHAMMADI H, et al. New features for delamination depth evaluation in carbon fiber reinforced plastic materials using eddy current pulse-compression thermography[J]. NDT & E International, 2019, 102: 264-273.
- [11] 周海婷,厚康,潘红良,等.基于有限元仿真电涡流传感器的结构优化[J].电子测量技术,2016,39(7):15-19.
- [12] 周兆明,刘睿,李亮亮,等.钢材微观组织在线无损检测研究进展与展望[J].电子测量与仪器学报,2023,37(1):1-11.
- [13] 王成飞,刘泽,霍继伟,等.电磁层析高铁空心轴缺陷检测方法研究[J].国外电子测量技术,2020,39(6):132-136.
- [14] 郭太平,裘进浩,程军,等.高频电磁涡流检测系统及实验研究[J].国外电子测量技术,2015,34(11):4-9,13.
- [15] 殷晓康,杨丽强,王伟,等.外穿式集中绕组激励旋转电磁场涡流无损检测系统[J].仪器仪表学报,2021,42(10):239-250.
- [16] 罗冠一,范文茹.基于脉冲涡流的CFRP层压板损伤检测可行性研究[J].计算机仿真,2020,37(6):388-391,400.
- [17] 程军,徐帅,汪步云,等.一种自调零平切型电涡流探头及其在碳纤维复合材料细观成像中的应用[J].机械工程学报,2021,57(4):27-35.
- [18] CHENG J, JI H L, QIU J H, et al. Role of interlaminar interface on bulk conductivity and electrical anisotropy of CFRP laminates measured by eddy current method [J]. NDT & E International, 2014, 68: 1-12.
- [19] ZENG Z W, JIAO S N, DU F, et al. Eddy current testing of delamination in carbon fiber reinforced polymer (CFRP): A finite element analysis [J]. Research In Nondestructive Evaluation, 2018, 29(4): 199-211.
- [20] ZENG Z W, TIAN Q Z, WANG H D, et al. Testing of delamination in multidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates using the vertical eddy current method[J]. Composite Structures, 2019, 208: 314-321.
- [21] 曾辉耀,叶波,张依仃,等.单向碳纤维复合材料分层缺陷垂直涡流检测有限元仿真研究[J].传感技术学报,2020,33(1):45-50.
- [22] 张荣华,史可宇,李硕,等.平纹编织碳纤维增强树脂复合材料离散电导率建模方法[J].复合材料学报,2020,37(12):3119-3127.

作者简介

黄曼,硕士研究生,主要研究方向为碳纤维复合材料电磁无损检测。

E-mail: hm15176321665@163.com

刘然(通信作者),高级工程师,博士研究生,主要研究方向为游乐设施及无损检测。

E-mail: liuranhbu@163.com