

各向异性碳纤维复合材料的方向性涡流检测*

徐 帅¹, 程 军¹, 杨继全¹, 刘益剑¹, 裘进浩²

(1. 南京师范大学江苏省三维打印装备与制造重点实验室 南京, 210023)

(2. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

摘要 根据碳纤维复合材料(carbon fiber reinforced polymer, 简称 CFRP)的层合结构和电各向异性,提出一种基于 $A-\Phi$ (矢量磁位-标量电位)的电磁有限元数值分析方法。采用 COMSOL 多物理场仿真软件对数值方法实现并建立各向异性复合材料层合板分析模型,利用仿真得到感应出的涡流密度在平面和厚度方向的分布规律,以及复合材料板铺层方向、裂纹缺陷以及激励电流频率对涡流线圈阻抗幅值和相位的影响,并通过实验进行了验证。结果表明,一定范围内裂纹缺陷越大、频率越高,线圈阻抗变化就越大,涡流检测效果更好,且正交铺层复合材料板的检测效果明显优于单向铺层复合材料板。

关键词 涡流检测;碳纤维复合材料;有限元分析;电各向异性;COMSOL 软件

中图分类号 TM154.2;TH865

引 言

复合材料是由两种或两种以上单一材料复合而成的多相材料^[1]。与单一材料相比,复合材料因其轻质高强等众多优点,目前在航空航天、风力发电等工业领域得到了广泛的应用^[2-3]。尽管如此,复合材料在生产使用过程中仍然会产生缺陷。复合材料的缺陷检测方法有多种,例如超声检测、射线检测、红外热波检测等,但每种方法都有其特定的应用范围和优缺点^[4]。对于可导电的金属或非金属材料(如碳纤维复合材料),可以采用电涡流法进行检测。涡流检测是基于载流线圈与导体间的电磁感应原理实现的,由于无接触、自动化程度高、速度快及无需表面处理等优点而得到了广泛的应用^[5]。

碳纤维复合材料由碳纤维和树脂基体复合而成,表现为多相性和各向异性,因此无法从以往的经验推断出其中的涡流分布和线圈阻抗变化规律,必须通过测试分析结合数值计算来研究。近年来,国内外学者在复合材料电学特性分析^[6-8]、数值分析^[9-12]和涡流检测^[13-16]方面开展了大量的研究工作,取得了丰富的研究成果。但这些研究仍然存在很多问题,表现为研究对象单一和不够深入,主要集中于验证性的实验观察以及怎样提高信号的分辨率

上,获得的信息有限,没有突出材料和缺陷的特点。在电学特性和数值分析方面只针对复合材料的涡流或导电性进行分析,没有将二者结合,特别是层合板的方向性和界面对涡流分布和线圈阻抗的影响没有得到深入研究。

基于以上背景,笔者以 CFRP 为对象,根据其层合结构和电各向异性,利用有限元方法对涡流场与电学方向性的关系进行了深入系统的分析,提出一种基于 $A-\Phi$ 的各向异性电磁有限元数值分析方法,以便有效地处理 3 阶电磁场量的计算和层间涡流的连续性问题。利用 COMSOL 软件使方法实现并建立相应的仿真模型,计算得到涡流密度在平面和厚度方向的分布规律以及材料中的裂纹缺陷对涡流分布和线圈阻抗的影响,并通过实验验证了模拟分析的有效性。

1 复合材料中电磁涡流场数值模型

1.1 各向异性电磁特性参数

碳纤维复合材料由多个碳纤维/树脂片层按特定方向顺序叠合而成,每层的电导率呈现出正交各向异性,沿纤维方向电导率高,垂直纤维方向电导率

* 国家自然科学基金资助项目(51605229);江苏省高校自然科学基金资助项目(16KJB460016,17KJB510031);中国博士后科学基金资助项目(2016M601844);江苏省重点研发计划资助项目(BE2018010)

收稿日期:2018-09-12;修回日期:2018-12-10

低,厚度方向最小。为了简化仿真分析,在数值模型中,应将复合材料的单个片层等效成均匀连续材料,采用3阶张量矩阵表示电导率 σ 和磁导率 μ 。电流密度 \mathbf{J} 和电场强度 \mathbf{E} 之间的关系^[17]如下

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (1)$$

引入坐标变换矩阵 \mathbf{G}

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

得到式(3)所示的电导率张量 $\overline{\overline{\sigma}}$

$$\overline{\overline{\sigma}} = \mathbf{G}^{-1} \sigma \mathbf{G} \quad (3)$$

$$\overline{\overline{\sigma}} = \begin{bmatrix} \sigma_L \cos^2\theta + \sigma_T \sin^2\theta & \frac{\sigma_L - \sigma_T}{2} \sin^2\theta & 0 \\ \frac{\sigma_L - \sigma_T}{2} \sin^2\theta & \sigma_L \sin^2\theta + \sigma_T \cos^2\theta & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{CP} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: σ_L, σ_T 分别为CFRP沿纤维方向和垂直纤维方向的电导率; σ_{CP} 为层间电导率,通常为 σ_T 的一半; θ 为纤维角度。

由于碳纤维和树脂都是非铁磁性的,CFRP的磁导率是一个接近于 μ_0 的常数。为了保证方程的对称性,笔者采用3阶张量矩阵来表示磁导率,记为 $\overline{\overline{\mu}}$,写成如下的形式

$$\overline{\overline{\mu}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中: $\overline{\overline{\mu}}$ 为对角阵,3个轴的分量均为 μ_0 。

1.2 复合材料电磁场求解方程

为了对碳纤维复合材料中的涡流场进行有限元分析,需要列出电磁场控制方程。电磁场控制方程的基础是麦克斯韦方程组,但是直接将麦克斯韦方程用于数值计算会造成未知量过多、方程组过于庞大的状况。为了减少未知数的个数以减少计算量,引入矢量磁位 \mathbf{A} 和标量电位 Φ 作为控制方程中的未知数

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (6)$$

$$\mathbf{E} = -\partial \mathbf{A} / \partial t - \nabla \Phi \quad (7)$$

其中: \mathbf{B} 和 \mathbf{E} 分别为磁感应强度和电场强度。

因此,笔者基于 $\mathbf{A}-\Phi$ 列出电磁场控制方程,将研究的场域 V 分成涡流区 V_1 和非涡流区 V_2 两部分, V_{12} 为 V_1 和 V_2 的交界面,如图1所示。在涡流区,电场和磁场都需要描述;在非涡流区,只需要描述磁场。

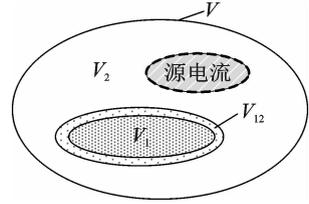


图1 涡流检测仿真求解域

Fig.1 Solution domain of eddy current testing simulation

基于 $\mathbf{A}-\Phi$ 电磁位对法的涡流场计算控制方程^[18]如下。

在 V_1 内

$$\begin{cases} \nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) - \nabla (\mu^{-1} \nabla \cdot \mathbf{A}) + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \sigma \nabla \Phi = 0 \\ \nabla \cdot \left(-\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \sigma \nabla \Phi \right) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

在 V_2 内

$$\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) - \nabla (\mu^{-1} \nabla \cdot \mathbf{A}) = \mathbf{J}_s \quad (9)$$

同时,标量电位 Φ 的引入能使两种导电介质交界面处的电流密度连续性得到满足,保证在复材板不同方向层的交界上,电流密度的法向分量 J_{1n} 和 J_{2n} 连续。

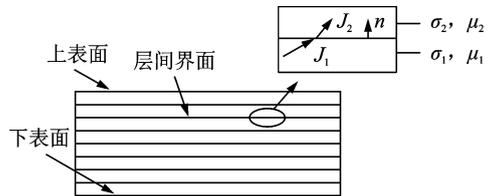


图2 复合材料层合板结构

Fig.2 Structural outline of laminates

如图2所示,将复合材料界面两侧电流密度的法向分量用矢量磁位和标量电位表示

$$J_{1n} = -\sigma_1 \frac{\partial A_{1n}}{\partial t} - \sigma_1 \left(\frac{\partial \Phi}{\partial n} \right)_1 \quad (10)$$

$$J_{2n} = -\sigma_2 \frac{\partial A_{2n}}{\partial t} - \sigma_2 \left(\frac{\partial \Phi}{\partial n} \right)_2 \quad (11)$$

在库伦规范条件下,为了满足

$$J_{1n} = J_{2n} \quad (12)$$

必须有

$$\sigma_1 \left(\frac{\partial \Phi}{\partial n} \right)_1 - \sigma_2 \left(\frac{\partial \Phi}{\partial n} \right)_2 = (\sigma_2 - \sigma_1) \frac{\partial A_n}{\partial t} \quad (13)$$

由上式可见, Φ 的梯度在交界面上有跃变,从而保证了电流的连续性。

2 基于 COMSOL 软件的涡流场仿真

2.1 电涡流检测仿真模型的建立

利用 COMSOL 仿真软件的 AC/DC 模块建立电涡流检测(eddy current testing, 简称 ECT)有限元仿真模型,并在软件中设置基于 $A-\Phi$ 电磁位对的涡流场控制方程进行计算,如图 3 所示。

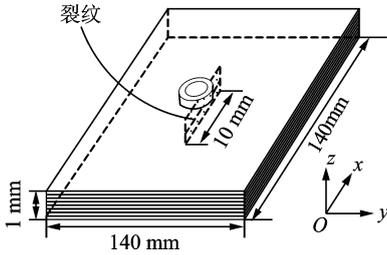


图 3 ECT 仿真模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ECT simulation model

ECT 仿真模型由空心的扁平线圈(内径为 1.2mm、外径为 3.2mm、高为 0.8mm、匝数为 140)和 CFRP 板组成,并在板模型中设置裂纹区域,裂纹中心位于 $x=0, y=0$ 处。表 1 列出了模型参数的详细信息。

表 1 ECT 模型参数

Tab. 1 The parameters of the ECT model

变量	参数值
材料	CFRP 矩形板
试件尺寸	150mm×150mm×1mm
裂纹形状	矩形,长为 10 mm,宽为 0.2 mm
裂纹深度	100%(裂纹深度与试件厚度比值)
	ID(内侧裂纹,板上靠近线圈一侧)50%
f/kHz	200, 500, 1 000, 2 000
线圈提高/mm	0.5
输入电流/A	1/140

2.2 复合材料中涡流密度计算

首先利用 COMSOL 软件,分别对无裂纹单向铺层(0°)₈和正交铺层($0^\circ/90^\circ$)₄的 CFRP 板中的涡流分布进行了仿真分析。根据电导率测量结果^[19],CFRP 板中单向片层的 3 阶电导率可以按照 $\sigma_L=2\ 000\text{S/m}, \sigma_T=200\text{S/m}, \sigma_{CP}=100\text{S/m}$ 进行赋值;正交铺层的 CFRP 板奇数片层的电导率按 $\sigma_L=2\ 000\text{S/m}, \sigma_T=200\text{S/m}, \sigma_{CP}=100\text{S/m}$ 进行赋值;偶数片层中电导率按照 $\sigma_L=200\text{S/m}, \sigma_T=20\ 000\text{S/m}, \sigma_{CP}=100\text{S/m}$ 进行赋值。仿真结果如图 4 所示,其中 1~3, 4~6 分别为单向复合板和正交复合板沿 x, y, z 轴方向的感应电流密度分布。 x 方向为 0° 方向, y 方向为 90° 方向, z 方向为板厚方向。

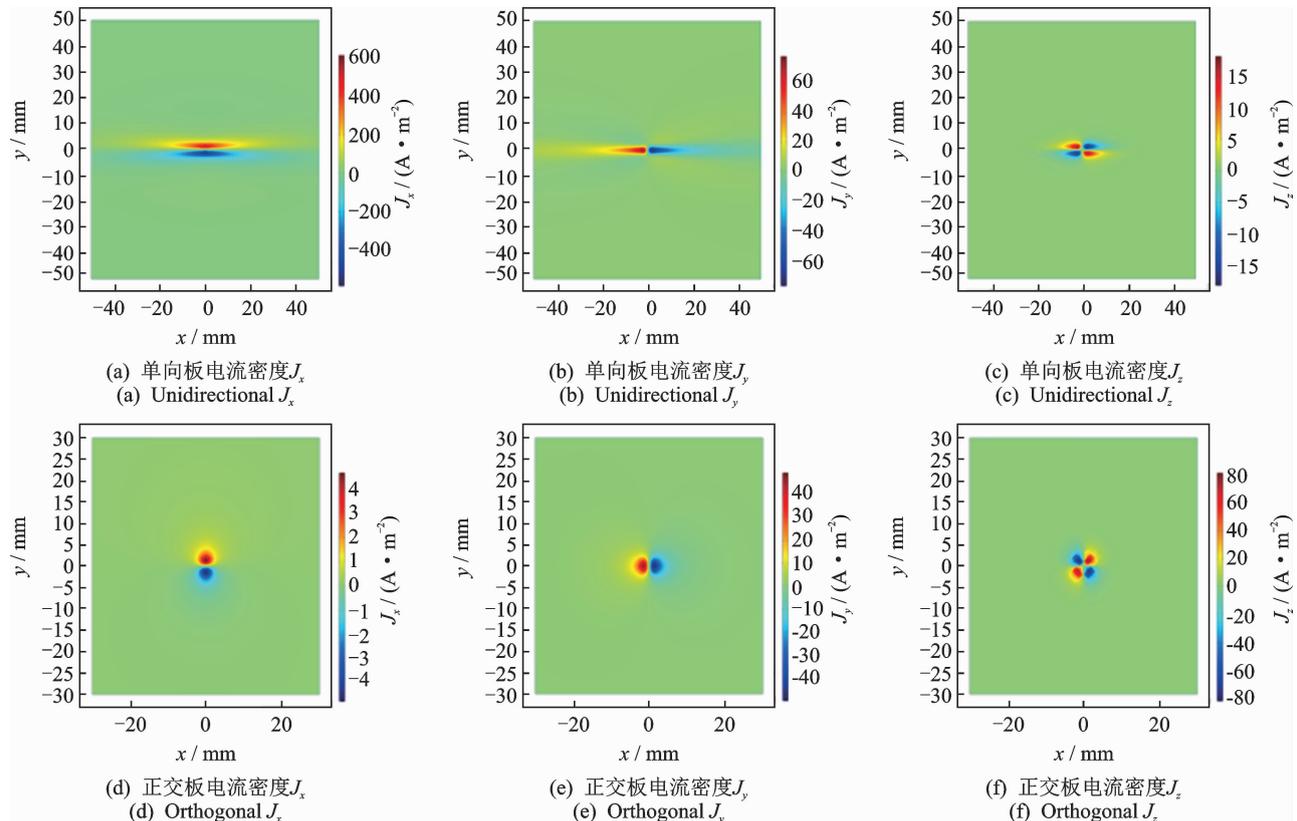


图 4 单向和正交复合板沿 x, y, z 方向的感应电流密度

Fig. 4 Induced current density along x, y, z directions in unidirectional and orthogonal composite plates

由于电流总是沿着电导率较大的方向传播,观察图4(a~c),单向铺层的CFRP板上的感应电流密度沿 x 轴方向(纤维方向)被拉长,沿 y 和 z 轴方向(垂直纤维和厚度方向)被压缩;观察图4(d~f),正交铺层的复合材料板上的感应电流密度沿 x 轴方向(纤维方向)和沿 y 轴方向(垂直纤维方向)分布是相似的,比较均匀。因此,从仿真结果可以得到,复合材料铺层方式的不同会导致各个方向上导电性的不同,呈现出电各向异性。

3 裂纹和频率对线圈阻抗的影响

在涡流检测中被测导体的导电性大小和损伤情况主要通过线圈的阻抗变化表现出来,线圈的阻抗包含了很多被测对象的信息。因此,通过不同裂纹尺寸、不同线圈输入电流频率对线圈阻抗造成的影响对涡流方向性检测进行了半定量分析。

3.1 裂纹缺陷对线圈阻抗的影响

首先,根据2.2节的方法对CFRP板进行涡流检测仿真计算,观察裂纹对复合材料涡流场分布的影响,如图5所示,图(a)、图(b)分别为裂纹单向板和正交板涡流密度幅值图。

对图5进行分析,当CFRP板中存在裂纹时,线

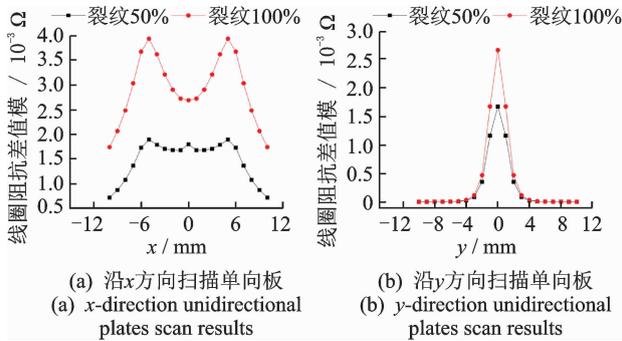


图6 线圈探头阻抗差值模

Fig. 6 The absolute value of the impedance difference of the coil

对图6进行分析,可知不同的裂纹深度对得到的线圈阻抗值的影响不同,与50%深度裂纹相比,100%裂纹对线圈阻抗值的影响更大。同时,由于正交板的铺层为 $(0^\circ/90^\circ)_4$ 方式,整体导电性要优于单向复合材料板,对正交板测量得到的阻抗差值模要远远大于单向板。

3.2 频率对线圈阻抗的影响

探头线圈由铜导线绕制而成,因此有电阻 R 存

圈产生的磁场将不能在缺陷区域感应出电涡流,因此该区域的涡流密度值为0。同时,由于正交板的整体导电性优于单向板,因此正交板中的裂纹引起的涡流变化更加明显。

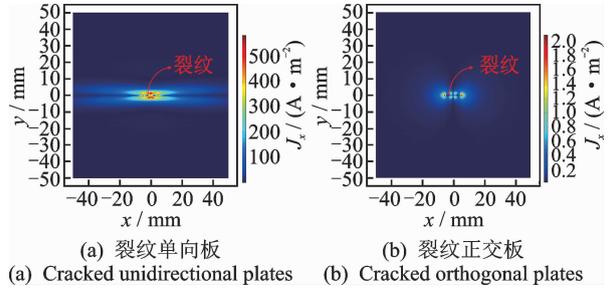


图5 裂纹单向和正交板在 $x=0$ 处的涡流密度幅值图

Fig. 5 Image of eddy density amplitude at $x=0$ at cracked unidirectional and orthogonal plates

接着,对模型中的线圈探头设置运动属性,分别沿 x 轴方向和 y 轴方向对无裂纹和有裂纹(深度为100%,50%)单向板和正交板进行方向性扫描。提取从 $x=-10\sim 10\text{mm}$ 、探头每移动1mm步长时线圈的阻抗值,并对测量无裂纹和有裂纹板得到的阻抗值进行差分运算,绘制出如图6所示的线圈阻抗差值模曲线。图6(a,b)和(c,d)分别为沿 x,y 轴方向测量单向和正交复合材料板所得数据绘制的曲线图。

在,向线圈中通入角频率为 ω 的交变电流,线圈本身会产生电磁场,从而磁通量发生变化,这将改变线圈的特性并产生另外一种电流阻力,称为感抗 X ,所以涡流线圈阻抗 Z 为

$$Z = R + jX \quad (14)$$

$$X = \omega L \quad (15)$$

其中: L 为线圈电感。

依次取输入电流频率为200,500,1000,2000kHz,并计算CFRP板无裂纹和有裂纹(100%,

50%)时线圈在 $x=0$ 处的阻抗幅值及相位角,结果如图 7 所示。图 7(a,b)和(c,d)分别为对单向板和正交

板测量得到的试件板无缺陷和有缺陷(100%,50%)时线圈阻抗的幅值差值折线图和相位折线图。

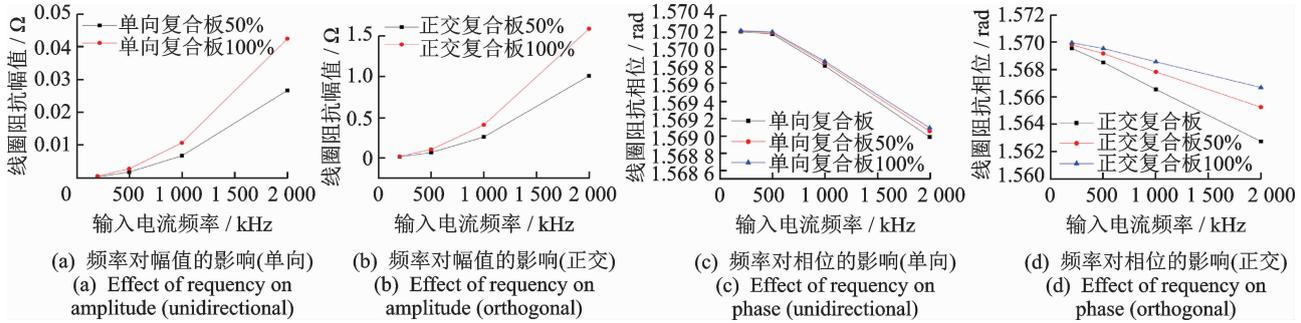


图 7 电流频率对涡流线圈阻抗幅值和相位的影响

Fig. 7 Influence of current frequency on impedance amplitude and phase of eddy current coils

由图 7(a,b)可以看出,随着频率的增加,线圈阻抗差值随之增加,100%裂纹时线圈阻抗值比 50%时大。对图 8(c,d)数据进行分析,涡流线圈的相位角表示成

$$\varphi = \arctan(\omega L / R) \quad (16)$$

随着输入电流频率的增加,相位角随之减小。相位滞后是涡流检测中一个非常重要的现象,表现为内部损伤引起的线圈阻抗变化和表面损伤引起的阻抗变化相比,在时域上呈现一个滞后。频率相同时,检测 100%裂纹板时线圈阻抗相位角比 50%裂纹板的相位角大。因此,可以利用相位滞后现象获得损伤的深度信息,估算出损伤的确切深度。

4 实验验证

为了对碳纤维复合材料涡流检测方向性数值分析的有效性进行验证,笔者基于 ECT 二维平面自动扫查系统进行了实验测量,如图 8 所示。



图 8 ECT 自动扫查系统

Fig. 8 ECT automatic scanning system

首先,对 CFRP 板进行二维平面扫查,选择空心圆柱形线圈探头,激励频率为 2MHz。对单向铺层和正交铺层的 CFRP 板扫查,图 9(a,b)分别为对单向板和正交板的扫描成像结果,像素点强度用电

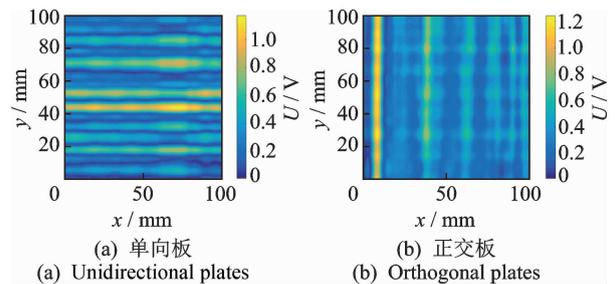


图 9 复合板扫描成像

Fig. 9 Composite plate scanning imaging

压幅值 V 表示。

从图像中的条纹可清楚分辨出 CFRP 板中纤维的铺层形式,且对正交板检测时得到的信号幅值大于单向板。实验结果与仿真中板的感应电流密度分布相对应,符合沿纤维方向电导率大、正交板的整体导电性要优于单向板的规律。

接着,制备出两块带裂纹的正交板,裂纹长度分别为 10 和 20mm,板厚为 2mm。利用圆片铣刀在板表面加工出 50%和 100%深度的狭缝裂纹,宽度约为 0.2mm,如图 10 所示。

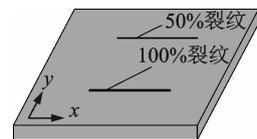


图 10 裂纹损伤复合材料板

Fig. 10 Cracked composite plate

利用二维平面自动扫查系统对裂纹板进行扫查,结果如图 11 所示。图 11(a,b)分别为对 10 和 20mm 裂纹成像结果。由图 11 可以看出裂纹长度的差异,50%裂纹位于上部,信号值较小。

最后,分别提取图 11(b)上对应 $y=15\text{mm}$ 与

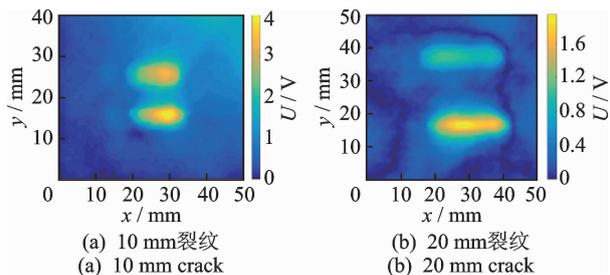


图 11 10mm 和 20mm 裂纹正交板涡流检测

Fig. 11 Eddy current detection of 10 mm and 20 mm cracked orthogonal Plates

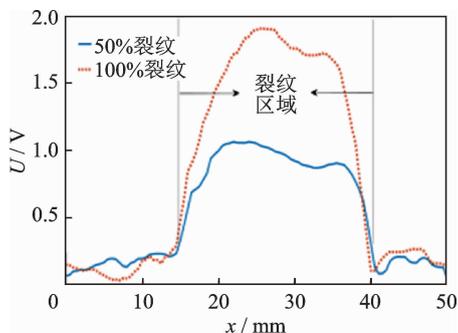
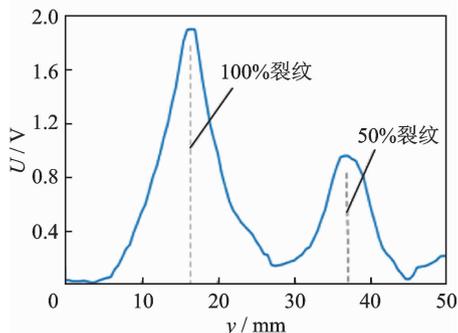
(a) 沿x轴扫描
(a) Scanning along x axis(b) 沿y轴扫描
(b) Scanning along y axis

图 12 线性扫描信号幅值

Fig. 12 Amplitude of linear scanning signal

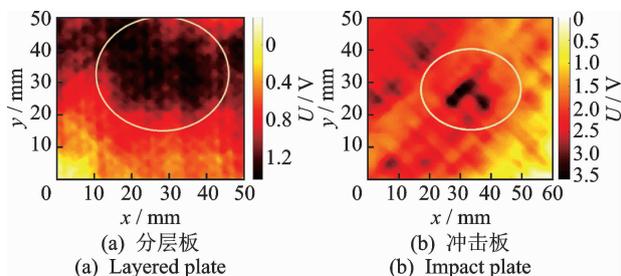


图 13 分层板和冲击板的涡流检测

Fig. 13 Eddy current detection of layered and impact plate

$y=35\text{mm}$ 处沿 x 轴直线扫描信号幅值,如图 12(a) 所示;再提取图 11(b)上对应 $x=30\text{mm}$ 处沿 y 轴直线扫描信号幅值,如图 12(b)所示。将图 12(a,b)与

图 6(c,d)对比可以看出,实验数据与仿真数据所绘曲线形状和变化趋势的吻合度很高。

为了进一步说明涡流法的可靠性,分别对两块四方向 CFRP 板中分层、冲击损伤进行了涡流检测,测量结果如图 13 所示,层合板方向角为 $(\pm 45^\circ, 0^\circ$ 和 90° ,厚度为 2mm。分层是在制备的时候离上表面 0.5mm 的深度上嵌入一张 $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ 的塑料薄膜,冲击损伤是一个 1kg 的锤头从 2m 高处自由落体坠落到板上形成的。由图 13 可以看出,分层和冲击损伤区域由于存在层间分离和纤维开裂,与周围无损区域相比差异明显,颜色较深,信号值较大。

以上实验结果充分说明了涡流法用于碳纤维复合材料的无损探伤具有很好的效果。同时,验证了本研究对于各向异性碳纤维复合材料涡流检测方向性数值分析的有效性。

5 结论

1) 各向异性复合材料中的电涡流沿着导电性大的方向被拉伸,在导电性小的方向被压缩,根据涡流分布可对复合材料的铺层方式进行分析,为复合材料中的缺陷定位提供重要的支撑数据。

2) 裂纹缺陷会引起复合材料中涡流的畸变,不同铺层方式的复材板中涡流畸变形式不同,这对研究涡流检测方向性具有重要的指导作用。

3) 复合材料的导电性越好,电涡流法对其检测的精度就越高。正交铺层的 CFRP 板的检测精度优于单向铺层板。

4) 复材板和裂纹参数、输入电流频率会对缺陷检测的精度造成不同程度的影响,这对研究涡流检测的结果分析和优化具有很大的帮助。

参 考 文 献

- [1] 邢丽英, 蒋诗才, 周正刚. 先进树脂基复合材料制造技术进展[J]. 复合材料学报, 2013, 30(2):1-9.
Xing Liying, Jiang Shicai, Zhou Zhenggang. Progress of manufacturing technology development of advanced polymer matrix composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30 (2): 1-9. (in Chinese)
- [2] 武高辉. 金属基复合材料发展的挑战与机遇[J]. 复合材料学报, 2014, 31(5):1228-1237.
Wu Gaohui. Development challenge and opportunity of metal matrix composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31 (5): 1228-1237. (in Chinese)

- [3] 马立敏, 张嘉振, 岳广全, 等. 复合材料在新一代大型民用飞机中的应用[J]. 复合材料学报, 2015, 32(2): 317-322.
Ma Limin, Zhang Jiazhen, Yue Guangquan, et al. Application of composites in new generation of large civil aircraft [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(2): 317-322. (in Chinese)
- [4] 曹彦鹏, 许宝杯, 何泽威, 等. 红外热成像信号处理技术的研究进展[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(2): 219-227.
Cao Yanpeng, Xu Baobei, He Zewei, et al. Research progress on infrared thermal imaging signal processing technology [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(2): 219-227. (in Chinese)
- [5] 陈雪峰, 杨志勃, 田绍华, 等. 复合材料结构损伤识别与健康监测展望[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(1): 1-10.
Chen Xuefeng, Yang Zhibo, Tian Shaohua, et al. Structural damage identification and health monitoring of composite materials[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(1): 1-10. (in Chinese)
- [6] Park J B, Hwang T K, Kim H G, et al. Experimental and numerical study of the electrical anisotropy in unidirectional carbon-fiber-reinforced polymer composites [J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(1): 57-66.
- [7] Yin Wuliang, Philip J, Umesh S, et al. Noncontact characterization of carbon-fiber-reinforced plastics using multi-frequency eddy current sensors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(3): 738-743.
- [8] Xu Xiaojuan, Ji Hongli, Qiu Jinhao, et al. Interlaminar contact resistivity and its influence on eddy currents in carbon fiber reinforced polymer laminates[J]. NDT & E International, 2018, 94: 79-91.
- [9] Menana H, Feliachi M. An integro-differential model for 3-D eddy current computation in carbon fiber reinforced polymer composites[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(4): 756-763.
- [10] 杨海峰, 吴子燕, 孙蓬, 等. 基于逆有限元的应变模态损伤检测方法[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(1): 147-152.
Yang Haifeng, Wu Ziyang, Sun Peng, et al. Strain modal damage detection method based on inverse finite element [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(1): 147-152. (in Chinese)
- [11] Mizukami K, Mizutani Y, Todoroki A, et al. Detection of in-plane and out-of-plane fiber waviness in unidirectional carbon fiber reinforced composites using eddy current testing[J]. Composites Part B Engineering, 2016, 86: 84-94.
- [12] 程军. 碳纤维复合材料的电磁涡流无损检测技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [13] Heuer H, Schulze M H. Eddy current testing of carbon fiber materials by high resolution directional sensors[C] // Smart Materials, Structures and NDT in Aerospace. Montreal, Canada: NDT, 2011.
- [14] Koyama K, Hoshikawa H, Kojima G. Eddy current nondestructive testing for carbon fiber reinforced composites[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2013, 135(4): 1-5.
- [15] He Yunze, Tian Guiyun, et al. Non-destructive testing of low-energy impact in CFRP laminates and interior defects in honeycomb sandwich using scanning pulsed eddy current[J]. Composites Part B, 2014, 59(3): 196-203.
- [16] Cheng Liang, Tian Guiyun. Surface crack detection for carbon fiber reinforced plastic (CFRP) materials using pulsed eddy current thermography[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(12): 3261-3268.
- [17] Cheng Liang, Tian Guiyun. Comparison of nondestructive testing methods on detection of delaminations in composites[J]. Journal of Sensors, 2012, 4(3): 276-283.
- [18] Cheng Jun, Qiu Jinhao, Ji Hongli, et al. Application of low frequency ECT method in noncontact detection and visualization of CFRP material [J]. Composites Part B Engineering, 2017, 110: 141-152.
- [19] Xin Li. Eddy current techniques for non-destructive testing of carbon fibre reinforced plastic (CFRP)[D]. England: University of Manchester, 2012.



第一作者简介:徐帅,男,1993年9月生,硕士生。主要研究方向为复合材料涡流检测技术等。

E-mail: 171802036@stu.njnu.edu.cn

通信作者简介:程军,男,1986年5月生,博士、副教授、硕士生导师。主要研究方向为电磁无损检测技术。

E-mail: chengjun@njnu.edu.cn