

基于四电极法的 CFRP 结构损伤检测研究*

范文茹^{1,2}, 雷建¹, 董玉珊¹, 薛倩¹

(1. 中国民航大学电子信息与自动化学院 天津 300300; 2. 天津市过程检测与控制重点实验室 天津 300072)

摘要:碳纤维复合材料(CFRP)被广泛用于航空航天领域,实现其结构健康监测对提高适航审定的损伤容限探测水平、降低检测成本具有重要意义。针对飞机使用的CFRP层压结构材料,利用碳纤维的自传感特点及结构损伤的电学敏感特性,基于四电极法提出3种激励模式下的电阻抗无损检测方法,以实现非侵入、无辐射、低成本的快速无损结构健康监测。利用有限元分析软件COMSOL构建各向异性CFRP层压板模型,通过提取有效电压差与电压灵敏度参数,对比分析不同类型结构损伤检测效果,从而获取适用于CFRP层压板结构损伤检测的最优激励测量模式。综合实验结果表明,双电极激励模式整体表现较优。

关键词:碳纤维复合材料;电阻抗检测;四电极法

中图分类号: TH878 O441.4 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4020

Damage detection of CFRP laminate structure based on four-probe method

Fan Wenru^{1,2}, Lei Jian¹, Dong Yushan¹, Xue Qian¹

(1. College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Process Measurement and Control, Tianjin 300072, China)

Abstract: Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) is widely applied in aerospace field, the implementation of structural health monitoring is significant to improve the detection level of damage tolerance during the process of airworthiness certification and reduce test cost. Aiming at the CFRP laminate structure used in airplane, the self-sensing and the sensitive electrical characteristics of CFRP structural damage are utilized. A non-destructive impedance test method based on four-probe is proposed to realize fast structural health monitoring with non-invasion, non-radiation and low cost. The anisotropic CFRP laminate models are built with COMSOL finite element software, and comparative analyses of the effect of different types of structural damages detection are conducted by extracting the effective voltage difference and voltage sensitivity parameter. Therefore, the optimal incentive measurement model for CFRP laminate structure damage detection can be obtained. Comprehensive experimental results show that the excitation of double electrodes has a better overall performance.

Keywords: carbon fiber reinforced polymer(CFRP); impedance detection; four-probe method

1 引言

碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)与传统金属材料相比,具有优越的物理化学性能,如高比模量、高比强度、耐腐蚀、抗疲劳、易隐形、优良的化学稳定性以及材料性能可设计^[1-2]。这使CFRP被广泛应用于航空航天军工及民用工业、体育用品

领域,如波音787、空客A380、国产C919及工业机器人、赛车。但CFRP在制造及使用中可能会发生结构损伤:如冲击损伤、分层、纤维断裂,而且在表面完好的状态下CFRP内部可能存在致命损伤。所以,为满足飞机适航符合性验证需求,针对CFRP构件的结构健康无损检测方法研究是必需的^[3-5]。

目前,常用复合材料结构损伤检测方法有目测、敲击、渗透、超声、射线、涡流、红外成像等^[6-7]。但这些方法

具有一定针对性,需要复杂检测设备、专业人员、较长检测时间且无法实现结构损伤早期预测与诊断,不利于生产及服务的可靠持续运行。所以,亟需研究一种方便、快捷、低成本结构健康检测方法。根据碳纤维自传感特点及结构损伤电学敏感特性提出的电学阻抗检测技术,以其非侵入、无辐射、响应快等优点在碳纤维复合材料无损检测领域已逐步受到国内外学者的广泛关注^[8-13]。

美国维吉尼亚理工学院 Park G 等人^[14]开展了复合材料加强混凝土墙的电阻抗无损检测实验研究; Peairs D. M. 等人^[15]开发了应用于复合材料 C 形梁结构的低成本电阻抗检测设备,验证了电阻抗法在复合材料构件结构损伤检测领域的有效性。美国 MIT 的 Skessler S. S. 等人^[16]采用电阻抗检测技术对复合材料构件损伤类型、大小及定位进行了实验研究^[16]。韩国 Park S 等人^[17]采用无线电阻抗测量技术对碳纤维增强水泥层压结构的脱胶损伤进行了检测研究,证实了电阻抗检测技术的可适用性。Na S 等人^[18]采用压电陶瓷材料来对玻璃纤维层压板试样的脱黏和切割损伤进行电阻抗谱监测,验证了利用压电陶瓷材料可采用更低的共振频率范围提高检测效率等。

本文基于四电极阻抗测量法,针对各向异性 CFRP 层压板构件结构损伤,提出 3 种激励测量模式,通过模拟不同结构损伤形式(冲击、分层、裂纹),验证该方法对 CFRP 层压板构件结构损伤早期诊断的可行性,并获取相对较优的激励测量模式。

2 电学检测原理

2.1 CFRP 电特性

根据 CFRP 各向异性,在碳纤维复合材料中定义电导率张量 Σ° ,如下式所示:

$$\Sigma^\circ = \begin{bmatrix} \Sigma_1^\circ & 0 & 0 \\ 0 & \Sigma_2^\circ & 0 \\ 0 & 0 & \Sigma_3^\circ \end{bmatrix}_{(e_1, e_2, e_3)} \quad (1)$$

式中: e_1 为纤维方向, e_2 与 e_3 分别为垂直纤维方向与厚度方向。设置电导率比 $\lambda = \Sigma_1^\circ / \Sigma_2^\circ$ 。本文中,完整无损纤维各向电导率分别为 $\Sigma_2^\circ = \Sigma_3^\circ = 1 \text{ S/m}$, $\Sigma_1^\circ = \lambda \Sigma_2^\circ$ 。45° 纤维及 -45° 纤维各向电导率通过 0° 纤维电导率与旋转矩阵公式计算获得。

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

45° 纤维电导率如下式所示:

$$\Sigma^\circ(45^\circ) = \Sigma^\circ \cdot \mathbf{R}(45^\circ) \quad (3)$$

2.2 电学检测原理

通常情况电学检测忽略磁场效应,只考虑电场特性,场域电位与电导率分布满足拉普拉斯方程^[19-20]:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla u) = 0 \quad (4)$$

其边界条件采用全电极模型为:

$$u + z_l \sigma \frac{\partial u}{\partial n} = U_0 \quad x \in e_l, l = 1, \dots, L$$

$$\int_{e_l} \sigma \frac{\partial u}{\partial n} dS = I_l \quad x \in e_l, l = 1, \dots, L$$

$$\sigma \frac{\partial u}{\partial n} = 0 \quad x = \partial\Omega \setminus \bigcup_{l=1}^L e_l \quad (5)$$

式中: σ 为区域 Ω 内的电导率分布, u 为区域 Ω 内的电位分布, U_0 为边界 $\partial\Omega$ 的测量电压, I_l 为电极 l 的注入电流, z_l 为电极 l 与内部介质的接触阻抗。

四电极阻抗测量法为 4 条引线分别形成电流回路和电压测试回路,可以规避接触阻抗对测量结果的影响。四电极测量原理图如图 1 所示, z_x 为待测材料, z_l 为接触阻抗。

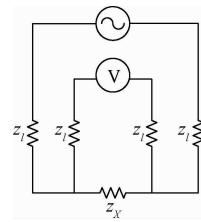
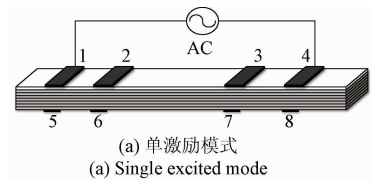


图 1 四电极测量原理

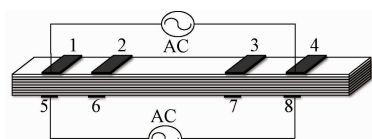
Fig. 1 Four electrodes measuring schematic

2.3 激励模式

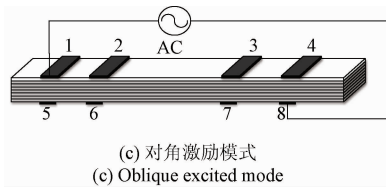
CFRP 层压板上、下表面均放置 4 个电极。采用 3 种电流激励模式: 1) 单电极激励, 上表面 1-4 电极作为激励电极, 分别测 2-3、6-7 电极间的电压, 如图 2(a) 所示; 2) 双电极激励, 上表面 1-4 与下表面 5-8 电极同时作为激励电极, 分别测 2-3、6-7 间的电压, 如图 2(b) 所示; 3) 对角电极激励, 对角 1-8 电极作为激励电极, 分别测 2-3、6-7 间的电压, 如图 2(c) 所示。



(a) 单激励模式
(a) Single excited mode



(b) 双激励模式
(b) Double excited mode



(c) 对角激励模式
(c) Oblique excited mode

图2 电流激励模式

Fig.2 Current injection patterns

2.4 评价指标

针对上述3种激励模式,提出电势差均值及电压灵敏度两种指标。设图2仿真模型中2、3、6、7号电极电势大小分别为 V_2 、 V_3 、 V_6 、 V_7 , 则其相邻电极电势差为 $\Delta U_{23} = V_2 - V_3$, $\Delta U_{67} = V_6 - V_7$ 。取上下表面电势差均值为 $\bar{U} = (\Delta U_{23} + \Delta U_{67})/2$, 其灵敏度计算公式为:

$$S = \left| \frac{\bar{U} - \bar{U}^0}{\bar{U}^0} \times 100\% \right| \quad (6)$$

式中: \bar{U}^0 为无损伤时的电势差均值, \bar{U} 为有损伤时的电势差均值。

3 仿真实验

3.1 仿真模型的建立

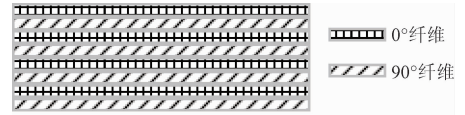
本文使用 COMSOL 软件以单层碳纤维(长 100 mm、宽 25 mm、厚 0.25 mm)为基础构建两种八层结构类型 CFRP 层压板模型:1) 正交模型 ($[0/90^\circ]_4$) 以下简称 A 板,如图 3(a)所示。2) 准各向同性模型 ($[0/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_2$) 以下简称 B 板,如图 3(b)所示。材料上、下表面均放置 4 个电极,内侧两电极相距 60 mm,外侧两电极相距 80 mm,如图 3(c)所示。

不同损伤类型时,CFRP 的 0° 纤维初始电导率为 $\{1\ 0\ 0\ 0, 0\ 1\ 0, 0\ 0\ 1\}$, 90° 纤维初始电导率为 $\{1\ 0\ 0, 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\}$, 45° 纤维及 -45° 纤维各向电导率通过式(2)、(3)求得。相同损伤类型时不同电导率比,各电导率如表 1 所示。图 4 所示为不同激励模式下 COMSOL 中的电场分布。以下将对冲击、分层以及裂纹 3 种损伤模型进行仿真,各模型缩写如表 2 所示。

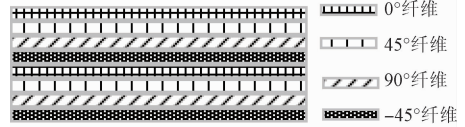
表1 电导率比不同时各个方向的电导率值

Table 1 All directions of conductivity value under different conductivity ratio

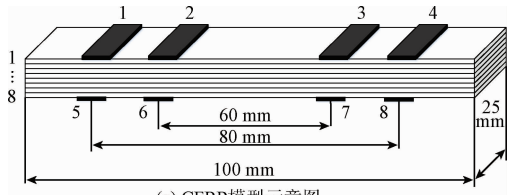
λ	$\sum_1 / (S \cdot m^{-1})$	$\sum_2 / (S \cdot m^{-1})$	$\sum_3 / (S \cdot m^{-1})$
1 000	1 000	1	1
100	100	1	1
10	10	1	1
2	2	1	1
0.5	0.5	1	1



(a) A板示意图
(a) A plate schematic diagram



(b) B板示意图
(b) B plate schematic diagram



(c) CFRP模型示意图
(c) Model for CFRP

图3 CFRP 模型示意图

Fig.3 Model for CFRP

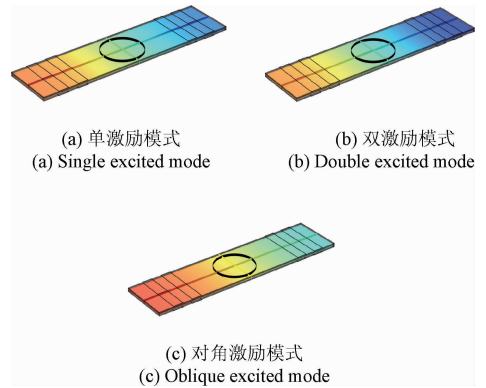


图4 不同激励模式时冲击损伤的电场分布
Fig.4 3D field distribution of impact damage under different current injection patterns

表2 各模型缩写具体意义

Table 2 Specific description of model abbreviations

模型缩写	具体意义
I_{1A} 、 J_{1B}	A、B 板在电导率比为 1 000 时受到不同程度冲击的模型
I_{2A} 、 I_{2B}	A、B 板不同电导率比在受到 10% 冲击改变时的模型
D_{1A} 、 D_{1B}	A、B 板在电导率比为 1 000 发生不同层间分层的模型
D_{2A} 、 D_{2B}	A、B 板不同电导率比发生 1/2 层间分层的模型
C_{1A} 、 C_{1B}	A、B 板在电导率比为 1 000 时发生不同长度裂纹的模型
C_{2A} 、 C_{2B}	A、B 板不同电导率比时发生 5 mm 裂纹的模型

3.2 冲击损伤

图5所示为冲击模型透视图,中心圆柱为冲击区域。冲击损伤通过分别改变冲击强度和电导率比 \sum_3 构建两种模型:1) I_1 是 A、B 板在受到不同程度冲击时的模型,冲击区域的电导率在其初始电导率基础上依次改变 10%、20%、...、90%。例如 0° 碳纤维电导率改变 10% 时,即从 $\{1\ 000\ 0\ 0,0\ 1\ 0,0\ 0\ 1\}$ 改变到 $\{1\ 100\ 0\ 0,0\ 1.1\ 0,0\ 0\ 1.1\}$,如表3所示。 45° 纤维及 -45° 纤维各向电导率改变方式与 0° 纤维类似。2) I_2 是不同初始电导率比 λ (见表1)下 A、B 板受到 10% 冲击改变时的模型。 I_{1A} 、 I_{2A} 是 A 板冲击模型, I_{1B} 、 I_{2B} 是 B 板冲击模型。

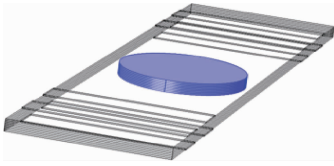


图5 冲击模型透视图

Fig. 5 The perspective view of impact model

表3 不同程度冲击损伤下各个方向的电导率值

Table 3 All directions of conductivity value under different impact damage

电导率 改变量	$\sum_1 / (S \cdot m^{-1})$	$\sum_2 / (S \cdot m^{-1})$	$\sum_3 / (S \cdot m^{-1})$
1.0	1 000	1.0	1.0
1.1	1 100	1.1	1.1
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
1.9	1 900	1.9	1.9

CFRP 受到不同冲击时,A、B 板 \bar{U} 均是逐步减小的,如图6(a)、(b)所示;不同电导率比下的 CFRP 受到相同冲击时, \bar{U} 的灵敏度 S 随着电导率比的增加而减小,如图7(a)、(b)所示。由图6、7可见,采用双电极激励模式时,电压均值 \bar{U} 最高且灵敏度 S 也最优。

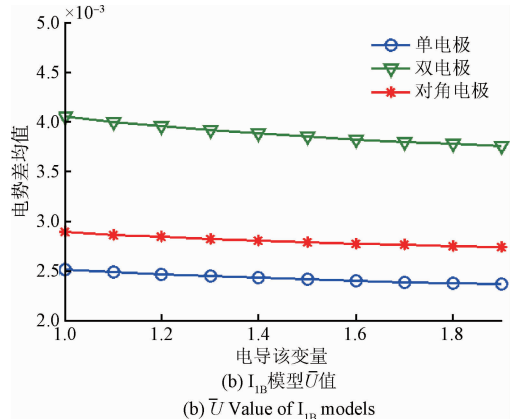
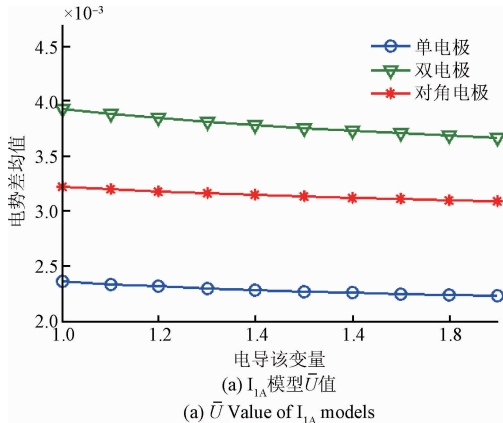


图6 I_1 模型 \bar{U} 值

Fig. 6 \bar{U} Value of I_1 Models

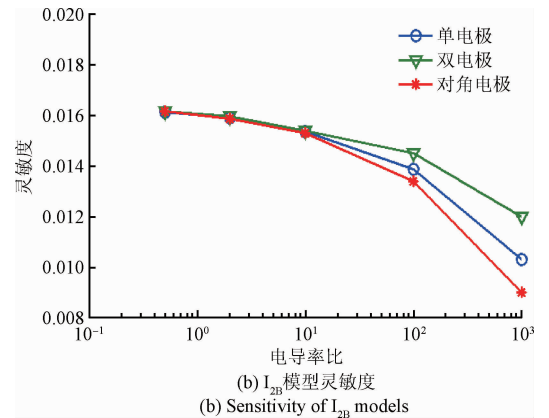
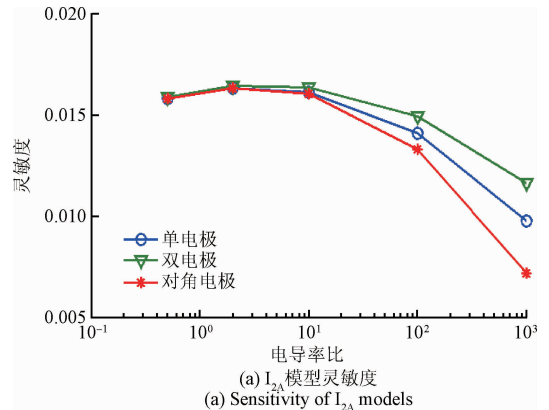


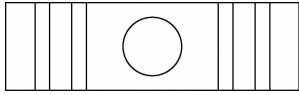
图7 I_2 模型灵敏度

Fig. 7 Sensitivity of I_2 models

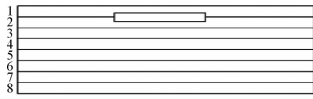
3.3 分层损伤

图8所示为分层损伤模型:半径为 10 mm,高度为 0.25 mm 圆形分层损伤设置在相邻两层板之间。分层损伤通过分别改变分层位置和电导率比 λ 构建两种模型:1) D_1 是设置了 7 种分层的模型,即 1-2 分层,2-3 分层,

..., 7-8 分层, 如图 8(b) 所示; 此时 0° 纤维初始电导率为 $\{1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\}$, 90° 纤维、 45° 纤维及 -45° 纤维电导率在 0° 纤维基础上通过式 (2)、(3) 得到。2) D_2 是 CFRP 发生 1-2 层间分层时不同电导率比 (见表 1) 的模型。为方便仿真, 分层处电导率为 1×10^{-9} S/m。 D_{1A} 、 D_{2A} 是 A 板分层模型, D_{1B} 、 D_{2B} 是 B 板分层模型。



(a) CFRP 分层透视俯视图
(a) The perspective vertical view when CFRP delaminates

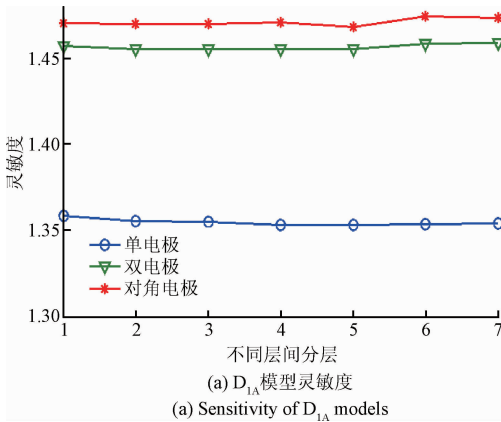


(b) CFRP 分层透视正视图
(b) The perspective front view when CFRP delaminates

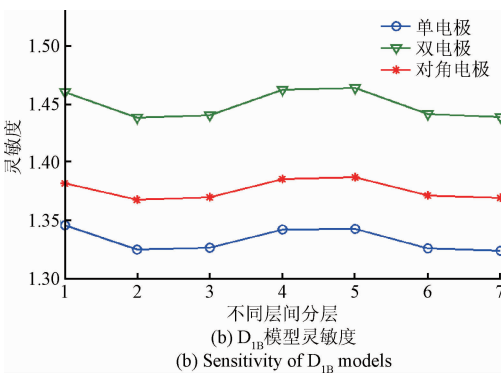
图 8 CFRP 分层透视图

Fig. 8 The perspective view when CFRP delaminates

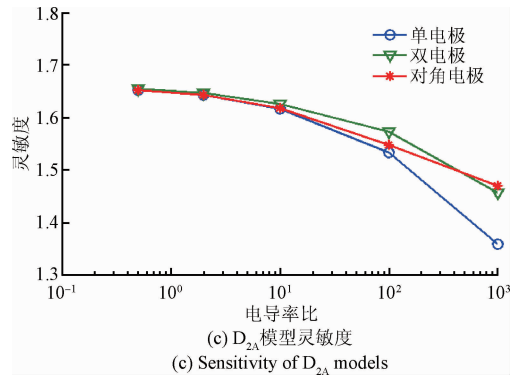
两种模型计算灵敏度曲线如图 9 所示。当 CFRP 发生不同层间分层时, 对于 A 板, 双电极与对角电极激励模式相对较好; 对于 B 板, 双电极激励模式较好。不同电导率比下的 CFRP 分层损伤模型中, A、B 板均是双电极激励模式灵敏度较优。因此, 分层损伤时双电极激励模式总体表现较优。



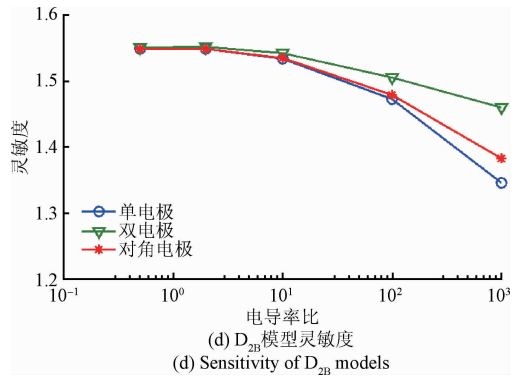
(a) D_{1A} 模型灵敏度
(a) Sensitivity of D_{1A} models



(b) D_{1B} 模型灵敏度
(b) Sensitivity of D_{1B} models



(c) D_{2A} 模型灵敏度
(c) Sensitivity of D_{2A} models



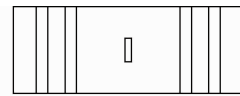
(d) D_{2B} 模型灵敏度
(d) Sensitivity of D_{2B} models

图 9 CFRP 分层模型灵敏度

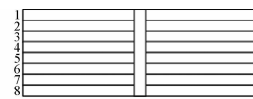
Fig. 9 Sensitivity of CFRP delamination models

3.4 裂纹损伤

裂纹损伤模型如图 10 所示, 裂纹宽度为 1 mm 且贯穿材料板。裂纹长度依次设置为 5、8、11、14、17 mm。仿真通过分别改变裂纹长度和电导率比 λ 构建两种模型: C_1 是不同裂纹长度, 材料板电导率设置与 D_1 相同。 C_2 为 5 mm 裂纹长度时不同电导率比 (见表 1)。为方便仿真, 裂纹处电导率为 1×10^{-9} S/m。 C_{1A} 、 C_{2A} 是 A 板裂纹模型, C_{1B} 、 C_{2B} 是 B 板裂纹模型。



(a) CFRP 裂纹模型俯视图
(a) The vertical view of CFRP crack model



(b) CFRP 裂纹模型透视图
(b) The perspective front view of CFRP crack model

图 10 CFRP 裂纹模型图

Fig. 10 CFRP crack model

CFRP 发生不同长度裂纹时, 双电极激励模式灵敏度最高、对角电极激励模式次之, 如图 11(a)、(b) 所示;

不同电导率比下,CFRP 发生长度均为 5 mm 裂纹时,对于 A 板,双电极激励模式灵敏度相对较好,对角电极激励模式次之。而对于 B 板则是对角电极激励模式灵敏度较优,单电极与双电极激励模式表现相近,如图 11(c)、(d) 所示。总体而言,对于裂纹损伤双电极激励模式较优。

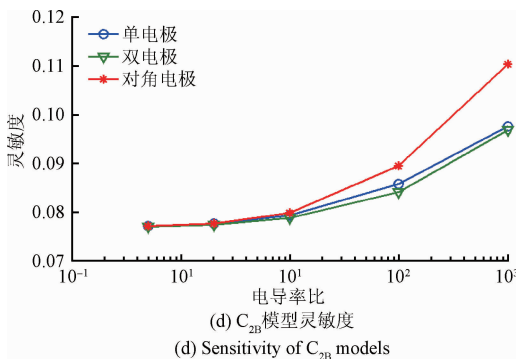
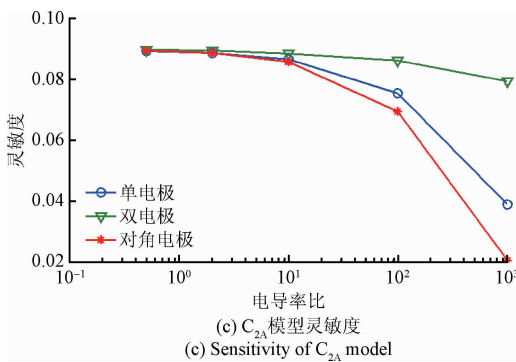
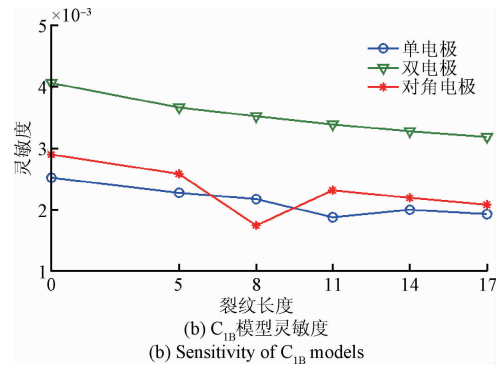
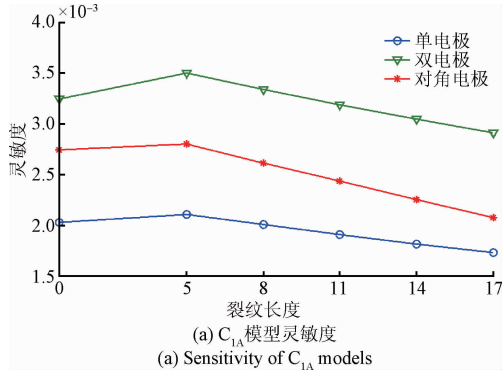


图 11 CFRP 裂纹模型灵敏度

Fig. 11 Sensitivity of CFRP crack models

4 实验验证

基于上述仿真结果,利用 LCR 测量仪 Keysight 4980A 对上述激励模式进行实验验证,如图 12(a) 所示。实际测量中,采用 1 kHz、20 mA 电流激励信号。实验所用被测试样均为 $[0/90^\circ]_4$ 铺层结构的 CFRP 层合板,尺寸为长 100 mm、宽 25 mm、厚 0.2 mm。将按照图 3 所示,在材料上下表面电极区域进行打磨,去除其表层树脂,然后利用导电银胶将导线贴附于材料表面,如图 12(b) 所示。制作多块 CFRP 试样后,进行无损试样测量,获取各自不同激励模式下电压数据 \bar{U}° 。接着利用电钻对试样进行损伤加工,分别制作损伤试样 1、2、3,如图 12(c)、(d) 所示,并对各损伤试样进行测量,获取其不同激励模式下相应的 \bar{U} 。最后,通过计算灵敏度 S 比较不同激励模式测量效果,如图 13 所示。由测量结果可见,3 种激励模式下电压测量值均可体现材料损伤的发生。而三者比较,双电极激励模式,在 3 个损伤试样检测中的灵敏度表现,相对最优。

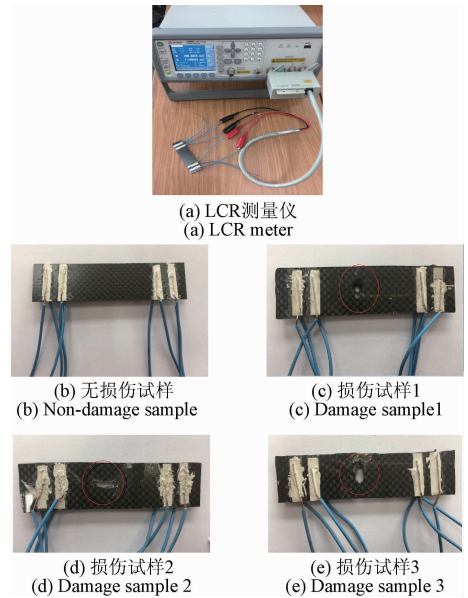


图 12 实际测量系统与 CFRP 试样

Fig. 12 Measurement system and CFRP sample

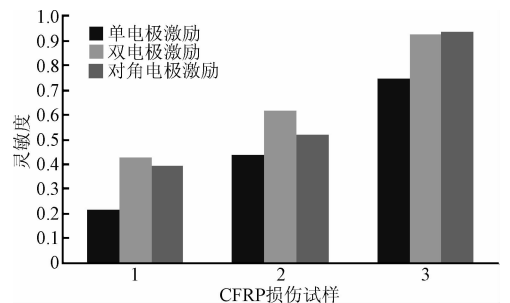


图 13 CFRP 损伤试样电压灵敏度对比

Fig. 13 Sensitivity contrast of CFRP damage samples

5 结 论

结合CFRP材料常见损伤特点,构建CFRP不同层压类型板常见损伤模型,选取3种电流激励模式进行四电极阻抗检测,提取并对比分析各损伤模型电势差均值及灵敏度值。COMSOL仿真实验以及实测系统验证了基于四电极法阻抗测量用于CFRP层压板结构损伤检测的可行性,且双电极电流激励模式在两种层压类型CFRP板的冲击、分层、裂纹损伤模型中综合表现较好。上述研究结果为进一步开展结构损伤检测提供了一定的研究基础。

参考文献

- [1] 温银堂, 赵丽梅, 张玉燕, 等. 基于ECT的复合材料构件胶层缺陷检测[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(8): 1783 - 1791.
WEN Y T, ZHAO L M, ZHANG Y Y, et al. Defect detection of the adhesive layer of composite component based on the ECT Technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(8): 1783-1791.
- [2] 邹达懿, 王鹏飞. 复合材料平尾有限元建模方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(7): 24-27.
ZOU D Y, WANG P F. Investigation of finite element method for composite horizontal tail plane [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2012, 31(7): 24-27.
- [3] 孙亚杰, 张永宏, 刘青山, 等. 基于相控阵的结构损伤范围监测与图像表征[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11): 2582-2588.
SUN Y J, ZHANG Y H, LIU Q SH, et al. Phased array based structural damage range monitoring and imaging analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(11): 2582-2588.
- [4] 任吉林, 曾亮, 张丽攀, 等. 碳纤维复合材料涂层厚度涡流法测量的研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(12): 2662-2668.
REN J L, ZENG L, ZHANG L P, et al. Research on thickness measurement of carbon fiber composite coating with eddy current testing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(12): 2662-2668.
- [5] 王珍珍, 任鹏, 程鸿伟, 等. 新型加固用智能碳纤维板及感知性能试验[J]. 中国测试, 2016, 42(3): 113-117.
WANG ZH ZH, REN P, CHENG H W, et al. New smart carbon fiber reinforced polymer plate for Strengthening and its sensing performance test [J]. China Measurement & Test, 2016, 42(3): 113-117.

- [6] DEROBERT X, AUBAGNAC C, ABRAHAM O. Comparison of NDT techniques on a posttensioned beam before its autopsy [J]. NDT and E International, 2002, 35(8): 541-548.
- [7] 刘怀喜, 张恒, 马润香. 复合材料无损检测方法[J]. 无损检测, 2003, 25(12): 632-634.
LIU H X, ZHANG H, MA R X. Nondestructive testing techniques for composite materials [J]. Nondestructive Testing, 2003, 25(12): 632-634.
- [8] VAVOULIOTIS A, PAIPETIS A, KOSTOPULOS V. On the fatigue life prediction of CFRP laminates using the electrical resistance change method [J]. Composites Science and Technology, 2011, 71(5): 630-642.
- [9] BALTOPOULOS A, POLYDORIDES N, PAMBAGUIAN L, et al. Damage identification in carbon fiber reinforced polymer plates using electrical resistance tomography mapping [J]. Journal of Composite Materials, 2013, 47(26): 3285-3301.
- [10] LOYOLA B R, SAPONARA V L, LOH K J, et al. Spatial sensing using electrical impedance tomography [J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(6): 2357-2368.
- [11] 杨节标, 张林文, 胡中永. 大型复合材料结构件检测技术研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2013(3): 122-126.
YANG J B, ZHANG L W, HU ZH Y. Research progress in test technology of large-scale composite component [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2013(3): 122-126.
- [12] 范文茹, 郝魁红, 许燕斌. 开放式电阻抗成像激励策略研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 1269-1275.
FAN W R, HAO K H, XU Y B. Research on excitation strategy of open electrical impedance tomography [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(6): 1269-1275.
- [13] 徐勇超, 董恩生. 军用飞机复合材料构件损伤的检测技术[J]. 中国计量学院学报, 2009, 20(1): 31-36.
XU Y CH, DONG EN SH. The detection technology for damages of composite components on military aircraft [J]. Journal of China University of Metrology, 2009, 20(1): 31-36.
- [14] PARK G, CUDNEY H H, INMAND D J. Impedance-based health monitoring of civil structural components [J]. Journal of Infrastructure System, 2000, 6(4): 153-160.
- [15] PEAIRS D M, PARK G, INMAN D J. Reducing the cost of impedance-based structural health monitoring [C].

- Proceedings of SPIE ,2002, 4702(6):701-709.
- [16] KESSLER S S, SPEARONING S M, ATALLA M J, et al. Damage detection in composite materials using frequency response methods [J]. Composites Part B: Engineering, 2002, 33(1): 87-95.
- [17] PARK S, KIM J W, LEE C, et al. Impedance-based wireless debonding condition monitoring of CFRP laminated concrete structures [J]. NDT&E International, 2011, 44(2): 232-238.
- [18] NA S, LEE H K. Resonant frequency range utilized electro-mechanical impedance method for damage detection performance enhancement on composite structures [J]. Composite Structures, 2012, 94(8): 2383-2389.
- [19] 刘晓龙, 严佩敏. 基于二元模型的电阻抗成像方法 [J]. 电子测试技术, 2016, 39(7): 58-61.
LIU X L, YAN P M. Electrical impedance imaging method based on dual models [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(7): 58-61.
- [20] 汪剑鸣, 代月霞, 王琦, 等. 基于小波多分辨分析和 LSQR 的快速 EIT 图像重建算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(4): 518-525.
WANG J M, DAI Y X, WANG Q, et al. Fast reconstruction of EIT images based on multi-resolution

analysis and LSQR iterative algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(4): 518-525.

作者简介



范文茹, 分别在 2006 年、2008 年和 2011 年于天津大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为中国民航大学讲师, 主要研究方向为电学检测技术。

E-mail: wenrufan@hotmail.com

Fan Wenru received her B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Tianjin University in 2006, 2008 and 2011, respectively. Currently, she is a lecturer in Civil Aviation University of China. Her main research interest is electrical detection technology.



雷建, 2015 年于安徽理工大学获得学士学位, 现为中国民航大学硕士研究生, 主要研究方向为电学检测技术。

E-mail: caucray@163.com

Lei Jian received his B. Sc. degree in 2015 from Anhui University of Science and Technology. Now he is a graduate student in Civil Aviation University of China. His main research interest is electrical detection technology.