

基于印刷传感层电阻抗成像的复合材料结构损伤识别



郑一飞,严刚*,郭树祥

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

摘要: 本文提出通过丝网印刷技术,将石墨烯导电碳油墨以及银浆油墨印刷在复合材料结构表面形成智能传感层,对复合材料结构中的损伤进行监测和识别。采用准静态压痕的方式在复合材料结构中引入多个损伤,通过在印刷传感层的边界电极依次注入微小的电流,测量获得损伤前后传感层边界电压变化,重建损伤引起的电导率变化图像,从而提供有关损伤的信息。试验结果表明,该印刷传感层性能良好,重建的电导率变化图像能够较好地反映损伤的数量、位置和近似尺寸,为复合材料结构中损伤的定量监测和识别提供了一种有前景的应用技术。

关键词: 复合材料结构; 损伤监测和识别; 印刷传感层; 电阻抗成像

中图分类号: V241

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2020.04.011

复合材料因比模量大、比强度高、抗疲劳性能好等优点,在航空领域得到广泛应用^[1]。如波音 787 客机的复合材料用量达到结构重量(质量)的 50%。但复合材料结构在长期使用中,不可避免会受到损伤,如不能及时发现,将导致灾难性后果。因此,应用结构健康监测系統及时获取损伤信息,对准确评估结构完整性、提高飞行安全具有重要意义^[2]。

针对复合材料结构中的损伤,目前已经研制了很多类型的传感器,并发展了相应方法对其进行连续在线监测^[3-4]。其中基于光纤传感器和应变、基于压电传感器和超声导波的结构健康监测技术被认为非常有应用前景,经过 20 多年研究已逐渐成熟并开始向实际结构应用转化^[5-6]。但随着材料、电子、信息等学科的发展,新的传感和监测方法也不断涌现,与现有技术相互补充^[7],如基于各种印刷技术制备的传感器以其成本低、易与结构集成等优点而被应用到结构健康监测领域。

早期发展的印刷传感器以监测应变为主,如 Zhang 等通过丝网印刷和喷墨印刷的方法将碳油墨蛇形应变传感器印制在柔性聚合物基底上,将其粘贴在结构试件上进行的

拉伸和疲劳试验结构表明,印刷传感器具有优良的性能和可靠性,以及比传统应变片更高的灵敏系数,并在 4000 $\mu\epsilon$ 、10⁵ 疲劳次数下仍有良好的线性特征^[8]; Zymelka 等基于碳浆油墨,采用丝网印刷的方式制备了全向应变传感器,并以阵列的形式监测结构的变形,试验结果表明应变数据可有效反映并定位到裂纹发生的位置^[9]。近来,新形式和新物理量测量的印刷传感器也不断发展,如 Liao 等应用石墨烯等纳米材料的压阻特性,印刷制作了可以接收超声导波的薄膜传感器,由此可以代替传统的压电晶片传感器用于损伤监测^[10]; Bekas 等在修补的复合材料结构表面喷墨印刷了环形的叉指型传感器,用于监测修补部位的脱黏以及冲击损伤^[11]。但现有印刷传感器的研究大多局限于监测结构中的单个损伤,还未采用印刷传感器对结构中多个损伤的监测和识别进行系统研究。

本文提出应用丝网印刷方法在复合材料结构表面直接印刷智能传感层,结合电阻抗成像技术对结构中的多个损伤进行监测,识别出损伤的数量、位置和大致尺寸,进行了试验研究来验证所提出技术和方法的有效性。

收稿日期: 2019-10-11; 退修日期: 2020-01-14; 录用日期: 2020-03-19

基金项目: 航空科学基金(2017ZA52005); 机械结构力学及控制国家重点实验室自主课题(MCMS-I-0218G01); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

*通信作者.Tel.: 13951965703 E-mail: yangang@nuaa.edu.cn

引用格式: Zheng Yifei, Yan Gang, Guo Shuxiang. Damage detection for composite structures by using printed sensing layer and electrical impedance tomography[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(04): 67-73. 郑一飞, 严刚, 郭树祥. 基于印刷传感层电阻抗成像的复合材料结构损伤识别[J]. 航空科学技术, 2020, 31(04): 67-73.

1 印刷传感层的制备

本文首先制备了玻璃纤维层合板作为基础结构,用于在其表面印刷智能传感层,并进行损伤监测和识别试验。将10层厚度为0.2mm的玻璃纤维平纹布进行手工铺层,均匀涂布混合固化剂的环氧树脂,并保证层间无气泡且纤维布被树脂完全浸渍。铺层完毕后,使用重物压实,在常温下固化24h成形,并裁剪成尺寸为200mm×200mm的试件,其厚度为2.1mm。

采用丝网印刷的方式将导电油墨印刷在层合板表面作为智能传感层。丝网印刷的网版图案在CAD软件中设计,传感层的尺寸为100mm×100mm,在其四周边界等距离布置16个电极并与导电线路连接,导电线路的宽度为2mm。图1(a)为传感层的印刷流程:(1)将层合板安放在丝网印刷台上,在其上部放置传感层网版;(2)在网版的上表面一侧倒入石墨烯导电碳油墨,用刮刀倾斜一定的角度将油墨从网版一侧刮到另一侧,印刷得到石墨烯导电碳油墨传感层;(3)将印刷了传感层的层合板放置在100℃的烘箱中,固化10min后取出;(4)将导电线路网版按照与传感层对应的位置放置在层合板上,在网版上表面一侧倒入银浆油墨,用同样的方法将导电线路印刷在层合板表面,在烘箱中固化10min后得到导电线路。图1(b)为印刷了传感层和导电线路的玻璃纤维复合材料层合板。

2 电阻抗成像

电阻抗成像是医学领域以生物体内电阻抗的分布或变化为重建目标的一种无损成像技术^[12],近年来被引入复合材料结构健康监测领域,用于对导电的碳纳米复合材料结构进行损伤识别,取得了良好的效果^[13-14]。

电阻抗成像包括正问题和逆问题两个方面的内容。正问题是在已知物体内部电导率分布情况下,计算由边界电流激励信号而产生的内部场域电势分布。通常注入的电流频率很低,电流场可作为稳态场处理,电压—电流关系由带有适当边界条件的拉普拉斯方程决定,即:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = 0 \quad (\text{在 } \Omega \text{ 中}) \quad (1)$$

$$\varphi = \varphi_0 \quad (\text{在 } \Gamma_1 \text{ 上}) \quad (2)$$

$$\sigma \frac{\delta \varphi}{\delta n} = -J_n \quad (\text{在 } \Gamma_2 \text{ 上}) \quad (3)$$

式中: φ 为场域 Ω 内电势分布函数, σ 为内部电导率分布, φ_0 为给定边界 Γ_1 上的电势, J_n 为给定边界上 Γ_2 的电流密度。

通过正问题的求解可以获得场域内边界电压值变化和电导率变化之间的对应关系,即灵敏度矩阵 A 。由于解析

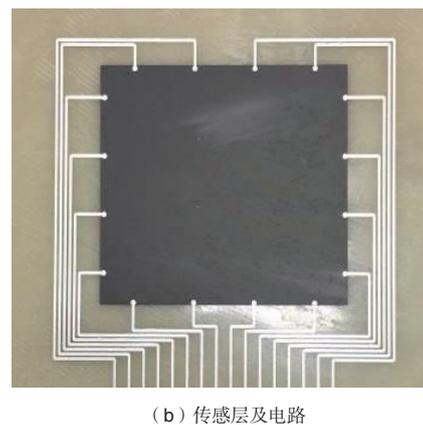
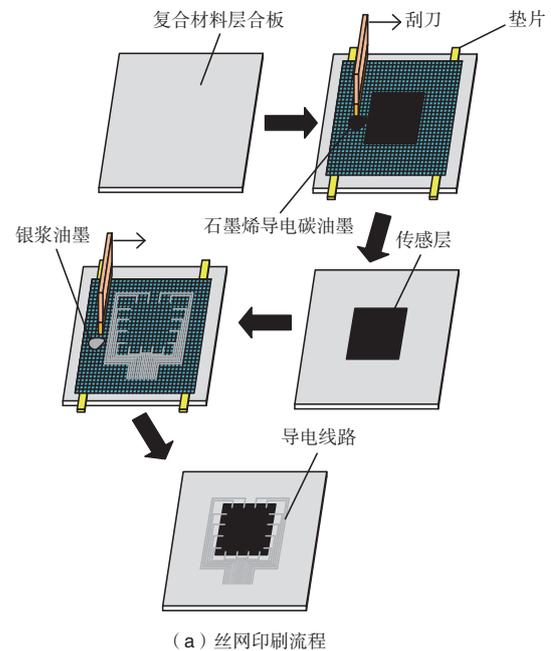


图1 印刷传感层的制备

Fig. 1 Fabrication of the printed sensing layer

法的困难性,通常选用有限元法结合 Geselowitz 灵敏度定理计算得到灵敏度矩阵^[15],即:

$$A_{ij} = \int_{\Omega} \nabla u_i \cdot \nabla u_j d\Omega \quad (4)$$

式中: u_i 为第 i 个激励电极对作用下的电势, u_j 为单位电流激励作用下的第 j 个测量电极对的电势。

电阻抗成像的逆问题即由边界电压的测量值,通过适当的重建算法,获得场域内电导率或其变化的分布状态。常用的动态成像算法大多基于灵敏度理论,即:

$$\Delta V = A \Delta \sigma \quad (5)$$

式中: ΔV 和 $\Delta \sigma$ 分别为边界电压的变化量和场域内电导率的变化量。

由于灵敏度矩阵的病态性,通常采用最小二乘法来求

解场域内电导率的变化量,即:

$$\Delta\sigma^* = \arg \min_{\Delta\sigma} (\|A\Delta\sigma - \Delta V\|^2) \quad (6)$$

式中: $\Delta\sigma^*$ 为最小二乘法求解后的场域内电导率变化量。但式(6)仍然是不适定的,需要采用正则化获得稳定解。常用的正则化方法为 Tikhonov 正则化,通过引入正则化参数 $\lambda (\lambda > 0)$,令 $L = \lambda I, I$ 为单位矩阵,将式(6)转化为^[16]:

$$\Delta\sigma^* = \arg \min_{\Delta\sigma} (\|A\Delta\sigma - \Delta V\|^2 + \|L\Delta\sigma\|^2) \quad (7)$$

式中: $\|L\Delta\sigma\|^2$ 为正则化项。

由于式(7)右端关于 $\Delta\sigma$ 的泛函是光滑的,可直接令其导数为零,求得 $\Delta\sigma$ 的极小值作为式(7)的正则化近似解,即:

$$\Delta\sigma^* = (A^T A + \lambda^2 I)^{-1} A^T \Delta V \quad (8)$$

式(8)给出的 Tikhonov 正则化解中,正则化参数的选择很关键,决定计算速度和成像质量。当参数取值过小,计算结果接近问题的真实解,但会影响解的稳定性;当参数取值过大时,计算结果会偏离真实解,严重影响解的准确性。本文中选用 L 曲线法来选取正则化参数^[17]。L 曲线法通过将

式(7)中的正则化项和残差项进行对比来寻找一种平衡关系确定最优正则化参数,使得正则化项和残差项都比较稳定。该方法形成的图形类似于 L 形状曲线,其拐点(平衡点)对应的参数值即为所选取的最优正则化参数。

3 损伤监测过程

本文通过采用端部为直径 10mm 半球的压头在万能试验机上进行准静态压痕试验,在复合材料层合板中引入损伤。如图 2(a)所示,复合材料层合板在压头的准静态压缩作用下会产生损伤,表面印刷传感层的相应部位也会受到破坏,从而引起传感层在该区域电导率的显著下降。试验中,压头的压缩速率设置为 1mm/s,压头与层合板之间产生的最大接触力约为 2500N,如图 3(b)所示。分别进行了三次准静态压痕试验,依次在复合材料层合板中造成了单损伤、双损伤以及三损伤三种损伤情况。图 3(a)和图 3(b)分别为从正面和反面观察到的损伤情况。由于存在内部分层损伤,使得反面观察到的实际损伤尺寸要比正面观察到的偏大一些。

根据电阻抗成像原理,为了对这三种损伤情况进行成像识别,共需要测试 4 组传感层的边界电压值(分别为无损

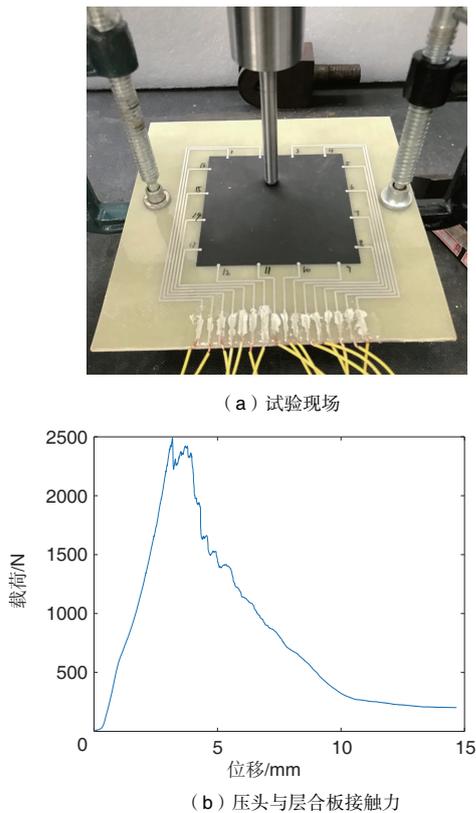


图2 准静态压痕试验及载荷—位移曲线

Fig.2 Quasi-static indentation test and load-displacement curve

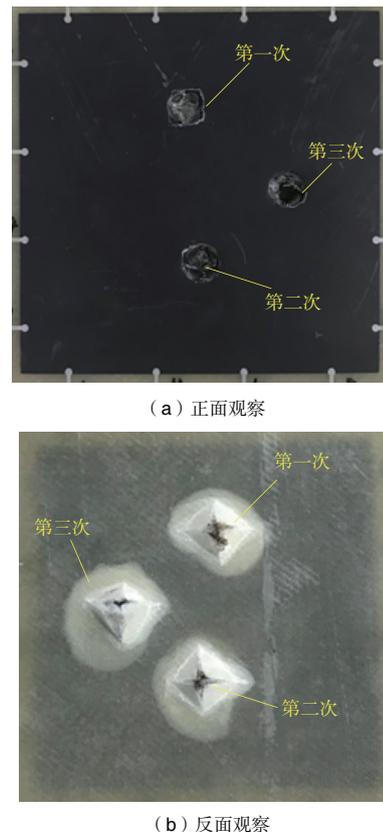


图3 损伤情况

Fig. 3 Damage situation

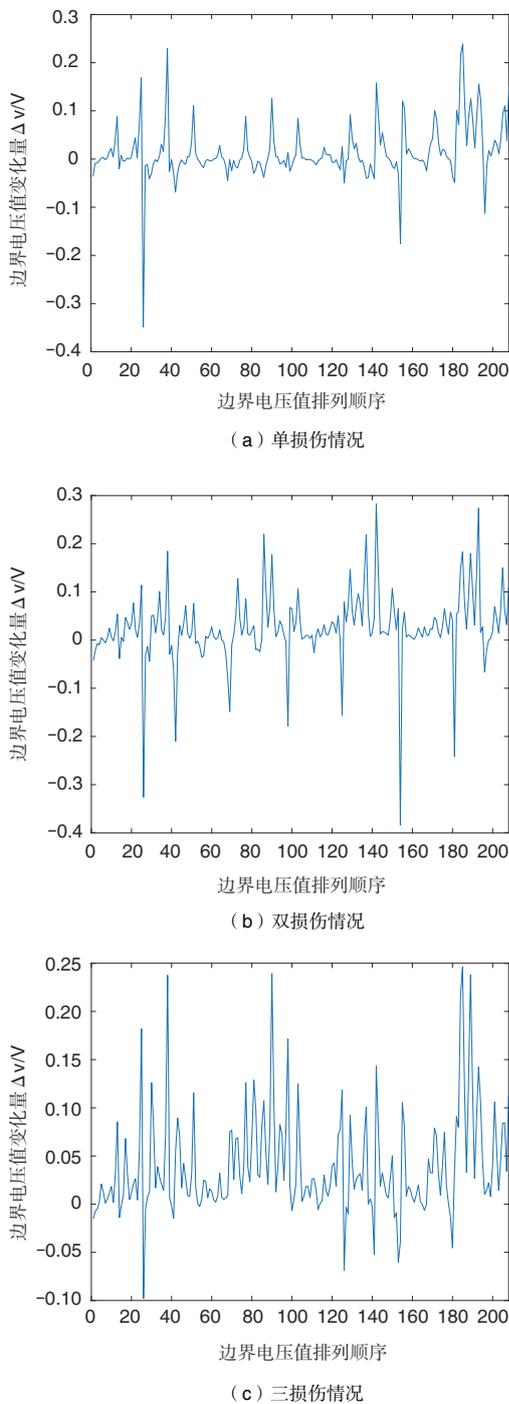


图4 准静态压痕前后边界电压差值

Fig. 4 Boundary voltage difference before and after quasi-static indentation

伤时、第一次压痕试验后、第二次压痕试验后以及第三次压痕试验后)。每组测试中,选用相邻电极模式对传感层边界电压进行测量,共有16组相邻电极对;当电流激励一组电极对时,依次测量与电流激励无关的余下13组电极对间的电压值。试验中采用的激励电流大小均为100mA,每

组测试共激励16次,测得 $13 \times 16 = 208$ 个边界电压值。测试完成后,对应三种损伤情况,形成三组边界电压差值,如图4所示。利用电阻抗成像算法对这三组电压差值进行电导率变化重建,可以以图像的形式反映有关损伤的信息。

4 损伤识别结果

基于Tikhonov正则化算法对前述边界电压差值数据进行处理,可以重建获得由于损伤而引起的电导率变化图像。图5为对第一组边界电压差值进行反演成像时,采用L曲线法选取的正则化参数,其值为0.0007997。图6(a)为与图5对应的单损伤情况下重建的电导率变化分布图。用同样的方法可以确定其他两种损伤情况的正则化参数,并重建电导率变化图像。图6(b)和图6(c)分别为双损伤和三损伤情况下重建的电导率变化分布图。从图6可以观察到,颜色变深的区域对应该处的电导率发生显著下降,代表了在该区域发生了损伤;确定这些电导率显著下降的区域就可以获得有关损伤数量的信息。

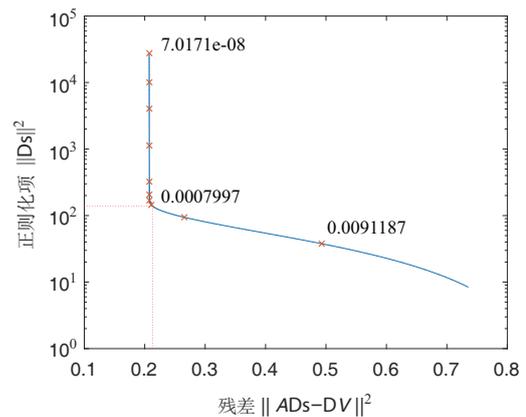


图5 L曲线方法确定正则化参数

Fig.5 Determination of regularization parameters by L-curve method

进一步,为了识别出损伤的位置及尺寸信息,取阈值为-0.5对图像进行二值化处理。图7(a)为对图6(c)三损伤情况进行二值化处理的结果,可以观察到所识别损伤的位置和形状。为了和真实损伤进行定量对比,提取出图7(a)中损伤轮廓,并采用最小二乘法拟合为椭圆形,如图7(b)所示。真实损伤轮廓拟合为圆形并在图中标注以进行对比。表1给出了拟合的重建损伤和实际损伤坐标信息以及位置误差和尺寸误差,包括损伤中心位置坐标 (x_i, y_i) 、长轴 a_i 、短轴 b_i 、圆心距 d_i 、正面面积误差 S_{fi} 、反面面积误差 S_{bi} ($i=1,2,3$) (坐标系原点设在传感层左下角点, x 轴和 y 轴分别与

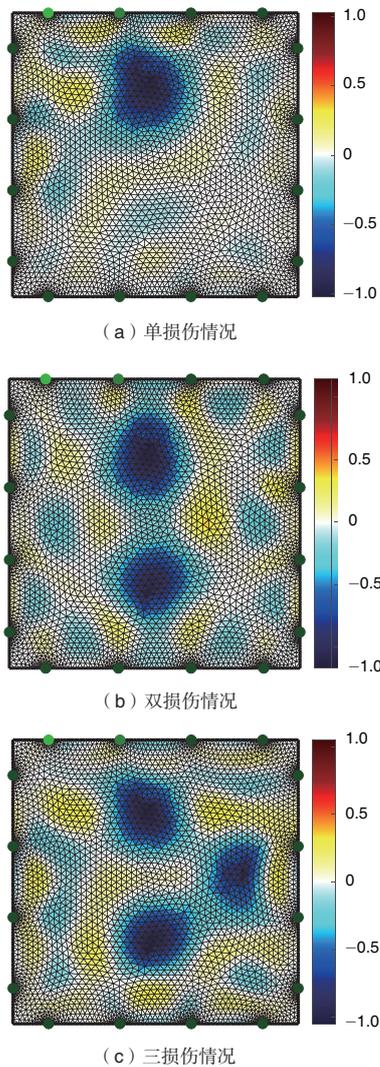


图6 电导率变化重建识别损伤结果

Fig. 6 Electrical conductivity change reconstruction results

传感层的下边界和左边界一致)。从图 7(b)和表 1 可以看出重建损伤的位置和真实损伤的位置接近,重建损伤的尺寸比正面观察的损伤尺寸偏大,但与反面观察的损伤尺寸接近。

5 结论

本文将石墨烯导电碳油墨和银浆油墨通过丝网印刷在复合材料层合板表面制备了智能传感层,结合电阻抗成像技术对损伤进行监测和识别。进行了试验研究,采用Tikhonov正则化算法重建了由多个准静态压痕损伤引起的传感层电导率变化图像,并通过进一步图像处理获取了有关损伤的重要信息。试验结果表明,利用丝网印刷制备传感层对复合材料结构进行健康监测是可行和有效的,重建的电导率变化图

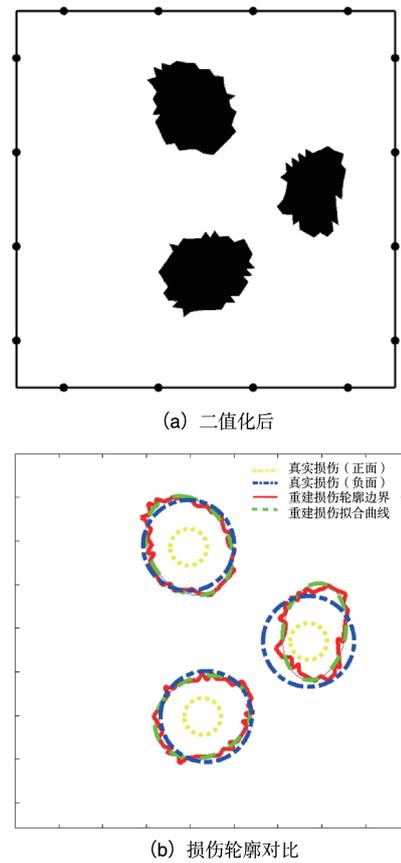


图7 损伤轮廓重建结果

Fig.7 Damage contour reconstruction results

像能够较好地反映损伤的数量、位置和近似尺寸,可以进一步为复合材料结构的完整性评估提供有效信息。 **AST**

参考文献

[1] 蔡菊生. 先进复合材料在航空航天领域的应用[J]. 合成材料老化与应用, 2018, 47(6): 94-97.
Cai Jusheng. Application of advanced composite materials in aerospace field [J]. Aging and Application of Synthetic Materials, 2018, 47(6): 94-97. (in Chinese)

[2] 王利恒. 复合材料飞机结构健康监测系统的若干问题探讨[J]. 航空科学技术, 2011(5): 63-66.
Wang Liheng. Discussion on composite structural health monitoring system [J]. Aeronautical Science & Technology, 2011(5): 63-66. (in Chinese)

[3] 刘晓明, 王国才, 熊峻江. 飞机结构健康监测中的信息获取技术[J]. 航空科学技术, 2012(3): 56-60.
Liu Xiaoming, Wang Guocai, Xiong Junjiang. Access to information technology of aircraft structure health monitoring

表1 重建损伤与真实损伤对比(单位:mm)
Table 1 Comparison of reconstructed damage and real damage

参数	第一个损伤						第二个损伤						第三个损伤					
	(x_1, y_1)	a_1	b_1	d_1	$S_{\beta 1}$	$S_{\beta 1}$	(x_2, y_2)	a_2	b_2	d_2	$S_{\beta 2}$	$S_{\beta 2}$	(x_3, y_3)	a_3	b_3	d_3	$S_{\beta 3}$	$S_{\beta 3}$
真实损伤 (正面观察)	(46,75)	5	5	1	463 %	1.6 %	(51,30)	5	5	1	441% 3.9%	3.2 339% 52%	(78,50)	5	5	3.2	339%	52%
真实损伤 (反面观察)	(46,75)	12	12				(51,30)	12	12				(78,50)	13	13			
重建损伤	(46,76)	13.5	10.5				(50,30)	13	10.5				(79,53)	13	8.5			

[J]. Aeronautical Science & Technology, 2012(3): 56-60. (in Chinese)

- [4] 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. Outlook on structural damage identification and health monitoring of composite materials [J]. Vibration, Testing and Diagnosis, 2018, 38(1): 1-10. (in Chinese)

- [5] 周玉敬, 任明伟, 刘刚, 等. 基于FBG传感技术的复合材料T型加筋板低速冲击损伤监测 [J]. 复合材料学报, 2019, 36(10): 2266-2274.

Zhou Yujing, Ren Mingwei, Liu Gang, et al. Low-velocity impact damage monitoring of composite T-stiffened panels based on FBG sensors [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(10): 2266-2274. (in Chinese)

- [6] 鲍峤, 袁慎芳, 邱雷, 等. 基于阵列传感器的复合材料结构损伤MUSIC成像方法 [J]. 复合材料学报, 2017, 34(2): 456-462.

Bao Qiao, Yuan Shenfang, Qiu Lei, et al. A damage imaging method based on MUSIC algorithm of linear sensor array for composite structure [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(2): 456-462. (in Chinese)

- [7] 孙侠生, 肖迎春. 飞机结构健康监测技术的机遇与挑战 [J]. 航空学报, 2014, 35(12): 3199-3212.

Sun Xiasheng, Xiao Yingchun. Opportunities and challenges of aircraft structural health monitoring [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(12): 3199-3212. (in Chinese)

- [8] Zhang Yuzheng, Anderson N, Bland S, et al. All-printed strain sensors: building blocks of the aircraft structural health monitoring system [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2017, 253: 165-172.

- [9] Zymelka D, Togashi K, Ohigashi R, et al. Printed strain sensor array for application to structural health monitoring[J].

Smart Materials and Structures, 2017, 26(10): 105040.

- [10] Liao Y, Duan F, Zhang H, et al. Ultrafast response of spray-on nanocomposite piezoresistive sensors to broadband ultrasound[J]. Carbon, 2019, 143: 743-751.

- [11] Bekas D, Sharif-Khodaei Z, Aliabadi F. A smart multi-functional printed sensor for monitoring curing and damage of composite repair patch [J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(8): 085029.

- [12] 王晖, 高建波, 骆剑平. 电阻抗成像技术 [J]. 北京生物医学工程, 2006, 25(2): 209-212.

Wang Hui, Gao Jianbo, Luo Jianping. Review of electrical impedance tomography [J]. Beijing Biomedical Engineering, 2006, 25(2): 209-212.(in Chinese)

- [13] Baltopoulos A, Polydorides N, Pambaguan L, et al. Exploiting carbon nanotube networks for damage assessment of fiber reinforced composites [J]. Composites Part B, 2015, 76: 149-158.

- [14] Gallo G, Thostenson E. Spatial damage detection in electrically anisotropic fiber-reinforced composites using carbon nanotube networks[J]. Composite Structures, 2016, 141: 14-23.

- [15] Vauhkonen M. Electrical impedance tomography and prior information [D]. Finland: University of Kuopio, 1997.

- [16] 刘继军. 不适定问题的正则化方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

Liu Jijun. Regularization method and application of ill-posed problems [M]. Beijing: Science Press, 2005.(in Chinese)

- [17] Hansen P C. Analysis of discrete ill-posed problems by means of the L-curve [J]. SIAM Review, 1992, 34(4): 561-580.

(责任编辑 王为)

作者简介

郑一飞(1995-)男, 硕士。主要研究方向: 复合材料结构

健康监测。

Tel: 13016980671 E-mail: zhengyifei@nuaa.edu.cn

严刚(1981-)男,副教授,博士。主要研究方向:结构健康监测。

Tel: 13951965703

E-mail: yangang@nuaa.edu.cn

郭树祥(1976-)男,副教授,博士。主要研究方向:结构完整性评估。

Tel: 15251870112

E-mail: nuaagsx@nuaa.edu.cn

Damage Detection for Composite Structures by Using Printed Sensing Layer and Electrical Impedance Tomography

Zheng Yifei, Yan Gang*, Guo Shuxiang

State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract: In this paper, an intelligent sensing layer is proposed to detect and identify damage by directly printing conductive graphene-doped carbon ink and silver ink on the surface of composite structure through screen printing technology. Quasi-static indentation method is adopted to introduce multiple sites of damage in the composite structure, and then tiny currents are sequentially injected into the electrodes pairs on the boundary of the printed sensing layer. According to the corresponding measured change of boundary voltages before and after damage, the images about the distribution of electrical conductivity change caused by the damage are reconstructed, providing useful information about the damage. Experimental results have demonstrated that, the printed sensing layer is well performed and the reconstructed tomographic images can successfully indicate the number, locations and approximate sizes of the damage, providing a promising technique for quantitative damage detection and identification for composite structures.

Key Words: composite structure; damage detection and identification; printed sensing layer; electrical impedance tomography

Received: 2019-10-11; **Revised:** 2020-01-14; **Accepted:** 2020-03-19

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (2017ZA52005); Research Fund of State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures (MCMS-I-0218G01); A Project Funded by the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions

*Corresponding author. Tel. : 13951965703 E-mail: yangang@nuaa.edu.cn