

碳纳米薄膜复合材料冲击损伤研究

马瑛剑^{1,3} 沈 星¹ 李春威² 魏嘉成³ 汪雅婷³

(1. 南京航空航天大学航空学院, 南京 210016; 2. 中航通飞华南飞机工业有限公司, 珠海 519090;
3. 珠海领航复合材料科技有限公司, 珠海 519090)

摘要: 冲击损伤对复合材料结构安全运行有重要影响, 亟需发展结构健康监测技术来及时发现冲击损伤。提出制备碳纳米纤维薄膜的方法, 并共固化在复合材料层板表层, 通过电阻层析成像技术重建冲击损伤引起的表层电导率变化分布图像对冲击损伤进行监测和识别。分别采用了 Tikhonov 正则化(吉洪诺夫正则化)和 SpaRSA(可分离近似稀疏重建算法)稀疏正则化方法来重建损伤图像。对复合材料层板进行了冲击试验和损伤识别试验, 结果表明: 电阻层析成像与碳纳米纤维薄膜相结合对冲击损伤识别是有效的; Tikhonov 正则化和 SpaRSA 稀疏正则化方法都能对损伤引起的碳纳米纤维薄膜层的电导率变化进行重建, 两者在损伤中心位置的识别方面差别较小, 但在损伤尺寸的识别方面都有一定不足, 通过图像融合将两者的识别结果进行整合, 可以提高损伤识别的准确度。

关键词: 复合材料; 冲击损伤; 碳纳米纤维薄膜; 电阻层析成像; Tikhonov 正则化; SpaRSA 稀疏正则化

中图分类号: TB33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2025)04-0732-07

Study on Impact Damage of Carbon Nanofilm Composites

MA Yingjian^{1,3}, SHEN Xing¹, LI Chunwei², WEI Jiacheng³, WANG Yating³

(1. College of Aeronautics, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. AVIC GA Huanam Aircraft Industry Co., Ltd., Zhuhai 519090, China; 3. Zhuhai Pilot Composites Science and Technology Co., Ltd., Zhuhai 519090, China)

Abstract: Impact damage has a significant impact on the safe operation of composite structures, and there is an urgent need to develop structural health monitoring technology to detect impact damage in a timely manner. This paper proposes a method for preparing carbon nanofiber films and co-curing them on the surface of composite laminates. The distribution image of surface conductivity changes caused by impact damage is reconstructed using electrical resistance tomography technology to monitor and identify impact damage. Tikhonov regularization and SpaRSA sparse regularization methods were respectively used to reconstruct the damage image. Impact tests and damage identification tests were conducted on composite laminates, and the results have showed that the combination of electrical resistance tomography and carbon nanofiber film is effective for impact damage identification; both Tikhonov regularization and SpaRSA sparse regularization methods can reconstruct the electrical conductivity changes of carbon nanofiber film layers caused by damage. The difference between the two methods in identifying the location of the damage center is small, but both methods have certain shortcomings in identifying the size of the damage. Integrating the identification results of the two methods through image fusion can improve the accuracy of damage identification.

Key words: composites; impact damage; carbon nanofiber film; electric resistance tomography; Tikhonov regularization; SpaRSA sparse regularization

收稿日期: 2025-03-24; 修订日期: 2025-05-18

通信作者: 沈星, 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: shenx@nuaa.edu.cn。

引用格式: 马瑛剑, 沈星, 李春威, 等. 碳纳米薄膜复合材料冲击损伤研究[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(4): 732-738. MA Yingjian, SHEN Xing, LI Chunwei, et al. Study on impact damage of carbon nanofilm composites[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics(Natural Science Edition), 2025, 57(4): 732-738.

纤维增强聚合物复合材料因具有比传统金属材料更高的比刚度和比强度而被应用于各种工程领域^[1-2]。对复合材料结构安全运行有重要影响的因素之一是冲击损伤,其可能导致复合材料结构力学性能的严重降低。因此,需要对复合材料结构进行定期检测,及时发现冲击损伤并评估其危害^[3-4]。超声波和X射线是用于复合材料结构损伤无损检测的有效方法,但均要求结构停止使用并进行拆卸检测^[5-6]。

近年来结构健康监测作为一种实时、连续检测的补充方法越来越受到重视。结构健康监测是通过安装在结构上的传感器来实现对损伤的识别^[7]。这些传感器,包括光纤和压电等传感器,通常在制造过程中嵌入复合材料中。如光纤布拉格光栅传感器具有尺寸小、重量轻和耐腐蚀性好等优点^[8]。Choi等^[9]将用于复合材料结构中的应变模式检测,通过应变场的变化来获取冲击损伤信息。Rathod等^[10-11]使用内置压电传感器来发现细丝缠绕复合管中的结构缺陷。尽管这些嵌入式传感器方法具有一定优势,但在复合材料中引入了非结构特征,可能会引起应力集中,也会使制造过程复杂化。近年来,最初为生物医学应用而开发的电阻层析成像技术被探索用于复合材料结构健康监测^[12-13]。电阻层析成像通过沿着域空间边界收集的一系列电压-电流测量来映射域空间变化的电导率/电阻率分布,可对复合材料结构进行损伤检测、定位和可视化,而不会对结构本身性能带来负面影响。如Nonn等^[14]在碳纤维层板中注入电流并测量其边界电压响应,通过电阻层析成像来重建层板中的电导率变化分布,并采用4个标准对其重建结果进行了评估,发现对角电流注入和差分评估的结果最好。范文茹等^[15]结合碳纤维复合材料常见损伤、阻抗分布等先验知识,采用改进的基于 L_1 范数稀疏正则化算法,对复合材料层板中的单孔和双孔损伤进行了检测,获得了较好的图像重建效果。Thomas等^[16]通过将纳米炭黑填料分散到环氧树脂基体中以形成导电通路,赋予玻璃纤维复合材料导电能力,并用电阻层析成像获得了冲击损伤的图像。郑一飞等^[17]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,通过电阻层析成像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。

基于上述研究,本文提出一种聚丙烯腈(PAN)碳纳米纤维薄膜,将其共固化于复合材料结构表面形成传感层,通过电阻层析成像对冲击损伤进行识别。为了更好地重建电导率变化分布图

像,分别采用基于 L_2 范数和 L_1 范数的正则化方法进行图像重建和图像融合。通过试验验证所提方法的有效性。

1 碳纳米纤维薄膜复合材料制备

1.1 碳纳米纤维薄膜的制备

碳纳米纤维薄膜由聚丙烯腈溶液通过静电纺丝、预氧化、碳化等步骤制备得到。首先将PAN溶解在N,N-二甲基甲酰胺(DMF)中,配制成质量分数为10%的混合溶液,并在磁力搅拌器上加热搅拌,转速为1 000 r/min,温度为55℃,由此得到淡黄色透明的前驱体溶液。然后将前驱体溶液倒入尖端装备了20 G针头的10 mL针筒中,设定纺丝推进器的注射速率为0.4 mL/h,调节收丝距离为15 cm。开启高压电源,在针尖上施加15 kV的高压,控制收丝滚筒转速为400 r/min,在硅胶离型纸上电纺6 h,所得粗产品在烘箱内60℃烘干12 h,得到白色PAN纳米纤维膜,如图1(a)所示。

接着将PAN纳米纤维膜裁剪成合适大小,放置在两块石墨板之间,放入高温管式炉中进行碳化。先以1℃/min的升温速率升至280℃,并在280℃保温75 min,使PAN纳米膜完全热稳定、环化,再预氧化保温60 min后使用真空泵抽真空,除去空气并及时通入氩气;随后,以3℃/min的升温速率升温至1 000℃下高温碳化,并保温1 h;最后设定降温速率为3℃/min至室温。所得到的碳纳米纤维(CNF)膜如图1(b)所示。



(a) PAN nanofiber membrane



(b) Sample preparation and cutting of carbon fiber membrane

图1 碳纳米纤维薄膜的制备

Fig.1 Preparation of carbon nanofibre films

1.2 复合材料层板的制备

为了将碳纳米纤维薄膜用于复合材料冲击损伤监测,制备了含碳纳米纤维薄膜表层的复合材料层板试件。层板试件采用玻璃纤维编织布预浸料铺叠而成,共 10 层,在表面覆盖碳纳米纤维薄膜,如图 2(a)所示。复合材料层板试件的成型采用热压罐工艺,铺层前在工作台上涂抹脱模剂,铺层过程中使玻璃纤维预浸料层间无气泡形成以确保试件质量。铺层完毕后,使用有孔隔离膜包裹好玻璃纤维预浸料,在隔离膜之上铺设吸胶毡后用真空袋密封抽真空,如图 2(b)所示。之后将工作台推入热压罐中进行热压固化程序,压力维持在 7 个标准大气压,使用中温对玻璃纤维预浸料进行固化,从室温以 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升温至 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$,在 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下保温 90 min,自然降温至 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下脱模即可得到所制备的层板试件并切割为所需尺寸。

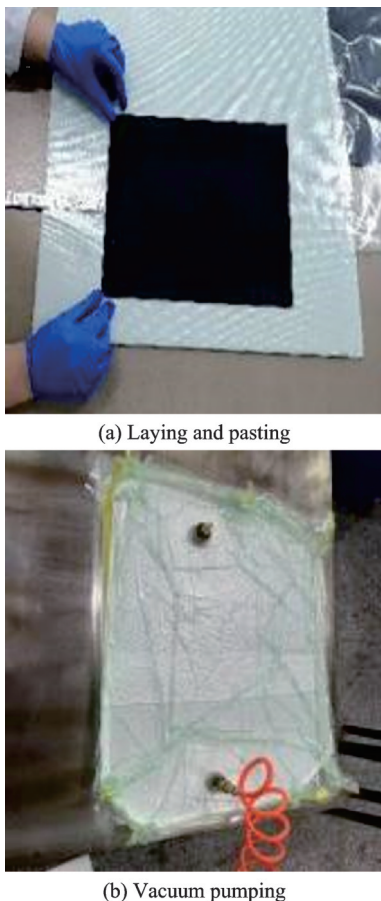


图 2 复合材料层板试件热压罐工艺成型

Fig.2 Autoclave processing of composite laminates

冲击损伤试验使用的试件如图 3 所示,试件尺寸为 $150\text{ mm}\times 120\text{ mm}$ 。根据电阻层析成像原理,需要在碳纳米纤维薄膜的边界布置若干个电极组成的阵列,在传感层注入一定电流的同时,测量边界上电势的分布作为电阻层析成像的信息来源。

采用导电银漆作为电极材料,在碳纳米纤维薄膜的边缘均匀布置 20 个电极,电极包围的监测区域尺寸为 $150\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 。待电极布置好后,使用导电银胶将细导线与电极相连,并采用热风枪对导线和电极的连接部分加热,以加快导电银胶的固化,提高导线和电极的连接强度。当所有的电极都与导线连接后,采用万用表对导线以及电极进行连通性测试,保证所有电路的通畅,然后将导线另一端与电阻层析成像测试系统连接。

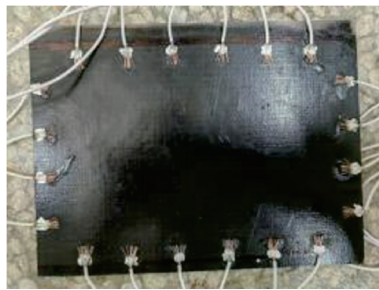


图 3 布置了电极和导线的复合材料层板试件

Fig.3 Composite laminate specimens instrumented with electrodes and wires

2 电阻层析成像方法

2.1 正问题与逆问题

电阻层析成像是电学成像技术之一,通过在导电物体边界电极上注入电流和测量电压来推断整个物体中电导率或电阻率的变化及其分布。它包括正问题和逆问题两个方面,其中正问题是基于给定的介质电导率和边界条件确定边界电势,而逆问题是根据测量的边界电势重建电导率或电阻率分布^[18]。

对于正问题,给定物体内部的电导率分布 σ ,在边界电极注入电流,根据 Maxwell 方程和似稳场假设,物体内部和边界上的电势分布函数 φ 分别满足

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = 0 \quad (1)$$

$$J = \sigma \nabla \varphi \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (2)$$

式中: J 为电流密度, $\mathbf{n}$ 为边界法线方向的单位向量。对于一般形状的物体,很难通过理论方法求得正问题的解析解,需要对物体离散化并通过有限元法进行求解。

对于逆问题,边界电势 V 与电导率分布 σ 之间的关系可记为

$$V = F(\sigma) + e \quad (3)$$

式中: F 为理论或数值计算的前向算子, e 为由模型误差和测量误差造成的偏差值。在电阻层析成像中已知初始电导率的情况下,可对式 (3) 进行线性近似得到

$$\Delta V = S \Delta \sigma \quad (4)$$

式中: $\Delta V = V - V_0$, $\Delta\sigma = \sigma - \sigma_0$, S 为灵敏度矩阵。

由于灵敏度矩阵具有很强的病态性,电阻层析成像重建是典型的不适定问题,通常需要附加先验信息转化为如下的问题,由正则化方法来求解

$$\Delta\sigma^* = \arg \min_{\Delta\sigma} \left(\frac{1}{2} \|\Delta V - S\Delta\sigma\|_2^2 + \alpha R(\Delta\sigma) \right) \quad (5)$$

式中:等号右端第一项为残差项,第二项为正则化项, R 为正则化函数, α 为控制残差项与正则化项权重的正则化参数。

2.2 重建算法

为了获得式(5)中电导率变化 $\Delta\sigma$ 的稳定解,传统上采用数学家 Tikhonov 提出的正则化方法^[18],即采用基于 L_2 范数的正则化项 $R = \|\Delta\sigma\|_2^2$,由此式(5)转化为

$$\Delta\sigma^* = \arg \min_{\Delta\sigma} \left(\frac{1}{2} \|\Delta V - S\Delta\sigma\|_2^2 + \alpha \|\Delta\sigma\|_2^2 \right) \quad (6)$$

对于 Tikhonov 正则化方法,对式(6)右端表示的泛函求导可获得其解为

$$\Delta\sigma^* = (S^T S + \alpha I)^{-1} S^T \Delta V \quad (7)$$

但是, Tikhonov 正则化方法也存在一定的不足,基于 L_2 范数的正则化项会引起解的过度平滑,模糊电导率变化分布的边界,导致图像分辨能力变差,在进行损伤识别时夸大损伤的尺寸。近年来稀疏正则化由于可增强解的稀疏性、提高图像分辨能力而在电阻层析成像领域受到重视^[19]。因此,本文除采用传统的 Tikhonov 正则化方法外,也采用可分近似稀疏重构 SpaRSA 方法对电导率变化分布进行求解^[20]。

对于 SpaRSA 方法,式(5)的正则化将由基于 L_1 范数的正则化项替代,记为

$$\Delta\sigma^* = \arg \min_{\Delta\sigma} \left(\frac{1}{2} \|\Delta V - S\Delta\sigma\|_2^2 + \alpha \|\Delta\sigma\|_1 \right) \quad (8)$$

式中: $\|\Delta\sigma\|_1$ 为 $\Delta\sigma$ 的 L_1 范数,表征了 $\Delta\sigma$ 的稀疏性。

对于式(8),可采用一种加速的迭代收缩阈值(IST)算法进行求解,具有计算速度快、重建效果好的优点。该算法将式(8)分解成如式(9)所示的子问题来求解

$$\Delta\sigma^{i+1} = \arg \min_x \left(\frac{1}{2} \|x - v^i\|_2^2 + \frac{\alpha}{\beta^i} \|x\|_1 \right) \quad (9)$$

式中: $\Delta\sigma^{i+1}$ 为第 $i+1$ 迭代步获得的电导率变化值, x 为第 i 迭代步获得的结果, β^i 为第 i 迭代步的步长。

由于这些子问题是可分离的,则式(9)可转换为

$$\Delta\sigma_j^{i+1} = \arg \min_x \left(\frac{(x - v_j^i)^2}{2} + \frac{\alpha}{\beta^i} \|x\| \right) \quad (10)$$

式中: $j=1, 2, \dots, n$, n 为 $\Delta\sigma$ 离散后的数量。

式(8~10)可由式(11)进行迭代求解,即

$$\arg \min_x \left(\frac{(x - v_j^i)^2}{2} + \frac{\alpha}{\beta^i} |x| \right) = \text{soft} \left(v_j^i, \frac{\alpha}{\beta^i} \right) \quad (11)$$

式中 $\text{soft}(\cdot)$ 为软阈值函数。

3 冲击损伤识别试验验证

3.1 冲击损伤试验

采用电阻层析成像方法重建冲击引起的碳纳米纤维薄膜电阻率或电导率变化图像,以反映复合材料冲击损伤的情况,需要在复合材料层板受到冲击之前和之后分别获取碳纳米薄膜边界的电势值。电阻层析成像测试使用 KEITHLEY 2261 精密电源和 KEITHLEY 2701 数字万用表进行。

为了获取边界电势信息,需要使用电流源在碳纳米纤维薄膜层中注入一定的电流同时进行测量。采用的是相邻激励-相邻测量模式,即将两个相邻的电极作为激励电极对在其中注入激励电流,然后再同时测量剩余各相邻电极对的电势。以如图3所示的20个电极为例,首先在(1,2)两个电极中注入激励电流,同时在(3,4)、(4,5)、(5,6),..., (18,19)、(19,20)等电极对测量电势,共计17个边界电势数据;然后将激励电极对移动至(2,3),注入激励电流同时测量获得17个边界电势数据;以此类推,在所有相邻的17个电极对中依次注入激励电流后,共获得 $17 \times 20 = 340$ 个边界电势数据。使用的激励电流大小均为 100 mA,在层板试件冲击之前获得的碳纳米薄膜边界电势数据如图4(a)所示。

电势数据测试完毕后,对复合材料层板进行冲击试验。冲击试验使用 InstronCEAST(英斯特朗)9350 落锤试验机进行,如图5(a)所示。将试件使用夹子固定在试验机底座夹具后,再将落锤提升至相应的高度自由落下对试件施加冲击,选用的冲击能量为 30 J。如图5(b)所示为冲击在层板正面造成的损伤。从图中可以看出,在层板正面产生了一个直径约 18 mm 的圆形凹坑损伤,表面的碳纳米纤维薄膜层也出现了破裂。

在冲击试验之后,采用电阻层析成像测试系统再次对碳纳米纤维薄膜层边界的电势值,测试所使用的激励电流以及激励和测量模式与冲击前的完

全一样。在复合材料层板试件冲击之前获得的碳纳米薄膜边界电势数据如图 4(b)所示。对比图 4(a)和图 4(b)可以看出,冲击前后获取的碳纳米薄

膜边界电势数据相差不大,这是因为相对整个层板来说,冲击造成的损伤相对面积较小,碳纳米纤维薄膜局部电性能变化对电势分布的总体影响也较小。将冲击前后每个相邻电极对测量得到的电势进行相减并除以对应电极对冲击前的电势值,如图 4(c)所示。从图中可以看出,对于大部分电极对,损伤引起的电势变化都很小,但对于少量的电极对,影响较为明显,电势相对变化超过了 5%。

3.2 损伤识别结果

首先采用 Tikhonov 正则化方法对边界电势数据进行处理,重建碳纳米薄膜电导率变化分布如图 6(a)所示。从图中可以看出,Tikhonov 正则化重建的电导率变化分布图像有一明显的深色区域,表示电导率显著降低,其位置与真实的冲击损伤位置比较接近,但其包含的区域面积较大,明显大于实际的损伤区域。接着采用 SpaRSA 算法对边界电势数据进行处理,重建碳纳米薄膜电导率变化分布如图 6(b)所示。从图中可以看出,SpaRSA 算法重建的电导率变化图像在中心偏左有一表示电导率显著降低的深色区域,与真实冲击损伤位置比较接近,但区域的大小比 Tikhonov 正则化重建的图像更接近于真实损伤的大小,表明 SpaRSA 稀疏正则化在重建损伤尺寸方面比 Tikhonov 正则化具有更好的效果。但 SpaRSA 稀疏正则化重建的图像在电极附近有一些伪影,这可能与碳纳米薄膜本身的不均匀性有一定关联,未来需要在理论和试验方面进行深入的探究,减少伪影的影响,提高损伤成像的质量。

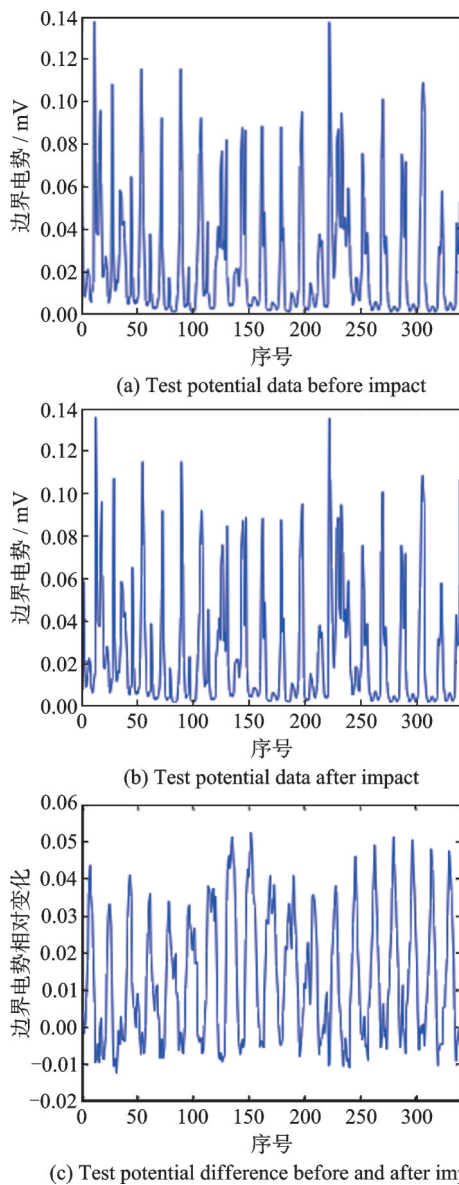


图 4 碳纳米纤维薄膜相邻激励/相邻测量边界电势数据
Fig.4 Boundary potential data of adjacent excitation/adjacent measurement for carbon nanofiber thin films

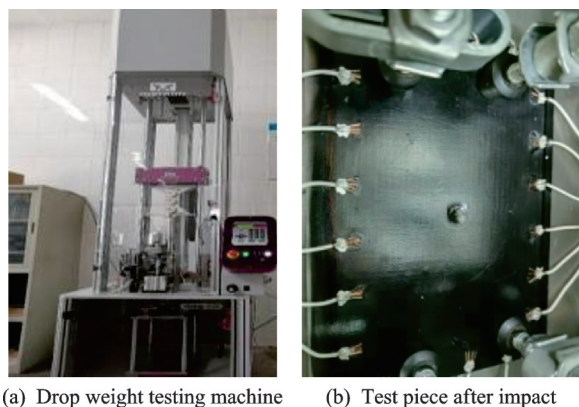


图 5 低速冲击试验
Fig.5 Low-velocity impact test

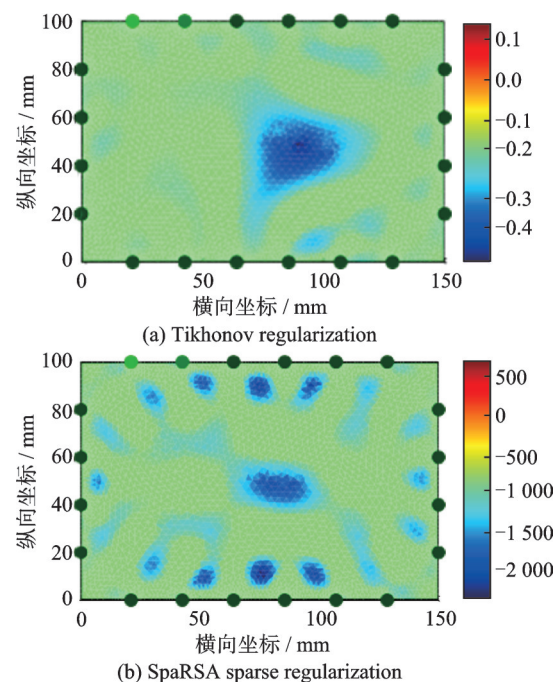


图 6 电阻层析成像结果
Fig.6 Results of electrical resistance tomography

为了综合两种方法,分别对两者的成像结果归一化并设置一定的阈值进行二值化处理,分别如图7(a)和图7(b)所示。然后对两者取交集进行图像融合,融合结果如图7(c)所示。图中用红色实线圆圈标出了实际冲击损伤,可以看出,图像融合后的识别损伤位置和面积相比前两种方法更接近实际损伤。

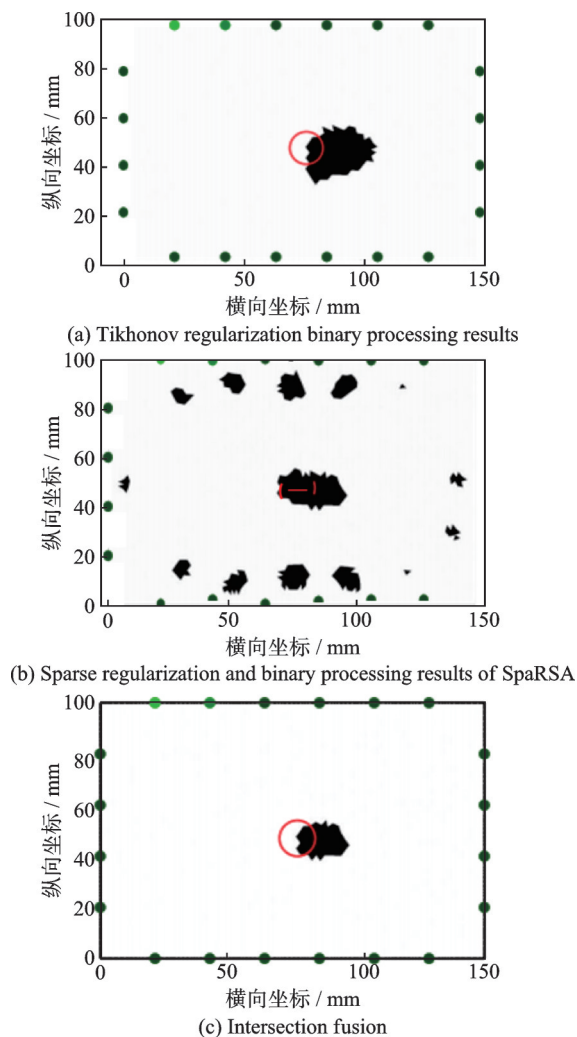


图7 二值化损伤识别结果

Fig.7 Binary damage identification results

4 结 论

(1) 碳纳米纤维薄膜作为一种新型的纳米材料,可与复合材料结构共固化形成传感层,通过其电阻特性的变化对外物冲击引起的损伤进行监测是可行的。

(2) 电阻层析成像是一种低成本、非破坏性的损伤监测方法,将其与碳纳米纤维薄膜相结合对外物冲击损伤识别是有效的。

(3) Tikhonov正则化和SpaRSA稀疏正则化方法都能对损伤引起的碳纳米纤维薄膜层的电导率变化进行重建,以反映有关损伤的位置和尺寸信

息,两者在损伤中心位置的识别方面差别较小,但在损伤尺寸的识别方面都有一定不足,通过图像融合将两者的识别结果进行整合,可提高损伤识别的准确度。

参考文献:

- [1] 秦铭泽,张伟涛,姬晓晨,等. 复合材料在我国航空航天与轨道交通领域中的应用研究[J]. 热加工工艺, 2024, 53(6): 6-9.
QIN Mingze, ZHANG Weitao, JI Xiaochen, et al. Research on the application of composite materials in the field of aerospace and rail transit in China[J]. Thermal Working Technology, 2024, 53(6): 6-9.
- [2] 刘勇,李倩楠,李国超,等. 纤维增强树脂基复合材料在船舶领域的应用综述[J]. 江苏科技大学学报, 2024, 38(1): 27-35.
LIU Yong, LI Qiannan, LI Guochao, et al. A review on the application of fiber-reinforced resin matrix composites in the field of shipbuilding[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology, 2024, 38(1): 27-35.
- [3] 沈真,杨胜春,陈普会. 复合材料抗冲击性能和结构压缩设计许用值[J]. 航空学报, 2007, 28(3): 561-566.
SHEN Zhen, YANG Shengchun, CHEN Puhui. Impact resistance performance and structural compression design allowable values of composite materials[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(3): 561-566.
- [4] TOWSKYFYAN H, BIGURI A, BOARDMAN R, et al. Successes and challenges in non-destructive testing of aircraft composite structures[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(3): 771-791.
- [5] SPYTEK J, MROWKA J, PIECZONKA L, et al. Multi-resolution non-contact damage detection in complex-shaped composite Laminates ates using ultrasound [J]. NDT & E International, 2020, 116: 102366.
- [6] GARCEA S C, WANG Y, WITHERS P J. X-ray computed tomography of polymer composites[J]. Composites Science and Technology, 2018, 156: 305-319.
- [7] 武湛君,渠晓溪,高东岳,等. 航空航天复合材料结构健康监测技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2016, 15: 92-102.
WU Zhanjun, QU Xiaoxi, GAO Dongyue, et al. Research progress of structural health monitoring technology for aerospace composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 15: 92-102.
- [8] YEAGER M, TODD M, GREGORY W, et al. Assessment of embedded fiber Bragg gratings for structural health monitoring of composites[J]. Structural

- Health Monitoring, 2017, 16(3): 262-275.
- [9] CHOI B H, KWON I B. Strain pattern detection of composite cylinders using optical fibers after low velocity impacts[J]. Composites Science and Technology, 2018, 154: 64-75.
- [10] RATHOD V T, RAJU G, UDPA L, et al. Multi-mode guided wave extraction capabilities using embedded thin film sensors in a composite laminated beam [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 309: 112040.
- [11] DZIENDZIKOWSKI M, KURNYTA A, DRAGAN K, et al. In situ barely visible impact damage detection and localization for composite structures using surface mounted and embedded PZT transducers: A comparative study[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 78: 91-106.
- [12] LOYOLA B R, LA SAPONARA V, LOH K J, et al. Spatial sensing using electrical impedance tomography[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(6): 2357-2367.
- [13] BALTOPOULOS A, POLYDORIDES N, PAMBAGUIA 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.
- [14] NONN S, SCHAGERL M, ZHAO Y, et al. Application of electrical impedance tomography to an anisotropic carbon fiber-reinforced polymer composite laminate for damage localization[J]. Composites Sciences and Technology, 2018, 160: 231-236.
- [15] 范文茹, 王勃, 李靓瑶, 等. 基于电阻抗层析成像的 CFRP 结构损伤检测[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(11): 2177-2183.
- FAN Wenru, WANG Bo, LI Jingyao, et al. Damage detection of CFRP structure based on electrical impedance tomography[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(11): 2177-2183.
- [16] THOMAS A J, KIM J J, TALLMAN T N, et al. Damage detection in self-sensing composite tubes via electrical impedance tomography[J]. Composites Part B, 2019, 177: 107276.
- [17] 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(4): 67-73.
- ZHENG Yifei, YAN Gang, GUO Shuxiang. Damage identification of composite structures based on printed sensing layer impedance imaging[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(4): 67-73.
- [18] 王化祥. 电学层析成像[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- WANG Huaxiang. Electrical impedance tomography [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [19] 徐冰心, 周秀玲. 稀疏表示理论及其在图像处理中的应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.
- XU Bingxin, ZHOU Xiuling. Sparse representation theory and its application in image processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2019.
- [20] WRIGHT S, NOWAK R, FIGUEIREDO M. Sparse reconstruction by separable approximation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(7): 2479-2493.

(编辑:夏道家)