

Flexible Electrical Impedance Imaging Sensor Based on Laser Direct Writing^{*}

DONG Fugui¹, JU Kuan¹, LIU Qi¹, ZHANG Xuan¹, GAO Yang^{1,4*},
XIAO Biao², JIAO Ling³, XUAN Fuzhen¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

2. Shanghai Institute of Special Equipment Inspection and Technical Research, Shanghai 200062, China;

3. SupeZET (Jingjiang) Equipment Manufacturing Co., Ltd., Jingjiang Jiangsu 214500, China;

4. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Electrical impedance tomography (EIT) based on flexible conductive film has the capability to visually demonstrate external stimuli in a two-dimension manner, showing the potentials in structural health monitoring, human-machine interface, and human health monitoring. So far, the method to develop the conductive film for EIT is through spraying, dip-coating, and injection of conductive materials, in which the procedure to obtain the conductive ink is necessary and complicated. Regarding this, laser direct writing, a high-efficient and scalable method, is developed to fabricate graphene-film based EIT sensor. Through the precise control of the laser focus offset and the electrical properties anisotropy of the graphene is optimized. Then, the graphene-based EIT sensor is applied to monitor spatial cracks, spatial circular holes and impact damage. The results show that the sensing film can realize spatial damage monitoring, the maximum positioning error is 5.3%, and the minimum area ratio estimation error is 8.3%, which has a prospect in the field of structural health monitoring.

Key words: flexible thin film sensor; structural health monitoring; laser direct writing; EIT; electrical anisotropy

EEACC: 7230

doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2022.012.003

基于激光直写的柔性电阻抗成像传感器研究^{*}

董富贵¹, 鞠 宽¹, 刘 琦¹, 章 轩¹, 高 阳^{1,4*}, 肖 飇², 焦 玲³, 轩福贞¹

(1. 华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237; 2. 上海市特种设备监督检验技术研究院, 上海 200062;

3. 卓然(靖江)设备制造有限公司, 江苏 靖江 214500; 4. 武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074)

摘要: 基于柔性导电薄膜的电阻抗成像技术能够实现对外界刺激的二维可视化传感, 在结构健康监测、人机交互、人体体征监测等领域具有广泛的应用前景。然而, 现有的柔性导电薄膜多采用喷涂、浸涂和填充等方法来制备, 需获取均匀分散导电浆料、且步骤较为复杂。采用激光直写技术这一高效、可规模化的加工方法, 制备了一种新型柔性石墨烯导电薄膜用于电阻抗成像技术。通过调节激光焦点偏距优化了石墨烯传感器的电学性质各向异性。基于激光直写的柔性石墨烯电阻抗传感器可以用于空间裂纹、空间圆孔和筒体撞击的损伤监测。研究结果表明: 该传感器可以实现空间损伤监测, 最大定位误差为 5.3%, 最小面积比例估计误差为 8.3%, 在结构健康监测领域具有广阔的应用前景。

关键词: 柔性薄膜传感器; 结构健康监测; 激光直写技术; EIT; 电学性质各向异性

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2022)12-1603-08

传感器作为一类获取外界信息的重要器件, 是工业和社会智能化转型的重要支撑, 在结构健康监测、智慧医疗、人机交互等领域具有广泛的应用前

景。现有传感器多通过构成传感器网络^[1]来实现大规模分布式传感, 进而提升感知信息的准确性和可靠性, 但也面临布线复杂和分辨率低的技术难题。

项目来源: 国家自然科学基金项目(51835003, 61804054); 武汉光电国家研究中心开放基金项目(2020WNLOKF007)

收稿日期: 2021-12-24 修改日期: 2022-04-01

为了解决这些问题,一些学者将柔性薄膜传感器与电阻抗成像技术(Electrical Impedance Tomography, EIT)相结合,实现了对外界刺激的二维可视化传感^[2-4],有效解决了大规模传感布线复杂和分辨率低的问题^[5-7]。

实现柔性电阻抗成像传感应用的前提条件之一是获得大面积、导电良好的薄膜,且薄膜的制备方法需具有高效、可规模化的特点。目前,研究者通常采用喷涂^[8-10]、真空灌注树脂成型^[11-12]和填充^[13]等方法来获得所需要的柔性薄膜传感器。Gupta 等^[8]采用喷枪喷涂的方法制备了一种网格石墨烯薄膜传感器来实现应变和裂纹监测。首先石墨烯纳米片被分散在聚乙烯醇溶液中制备油墨,然后用喷枪将油墨喷涂在聚酯网格上获得薄膜传感器。喷涂可以实现薄膜传感器快速生产,但是油墨制备过程中存在着纳米导电材料分散性差的技术难题。Dai 等^[12]将浸涂过碳纳米管的无纺布作为传感层,然后利用真空灌注树脂成型制备了一种压力薄膜传感器。当传感器受到外界压力时,传感器中包裹碳纳米管的无纺布被压缩,纤维丝的接触面增加使电阻减小。这种模仿纤维复合材料制备方法制备的薄膜传感器具有良好的机械性能,但是制备过程复杂、器件灵敏度低。Shin 等^[13]将室温等离子液体填充到内嵌有微通道的硅酮弹性体制备了一种触觉薄膜传感器,实现了表面接触大小和位置的检测。由于这种办法采用的传感材料是室温等离子液体,解决了分散性差的问题,但是微通道的制备和电极接入困难。

近年来,激光直写(Laser Direct Writing, LDW)技术作为一种新型的传感器制造技术受到了研究人员的广泛关注。LDW 通过激光直接在聚合物薄膜表面诱导生成活性传感层,可以一步完成柔性薄膜传感器制备,大大简化了制备过程。这为我们提供了一种可规模化的传感器制备方法。例如,Xuan 等^[14]通过激光直写技术在 Ecoflex 薄膜上制备了一种碳化硅基应变薄膜传感器。Ecoflex 薄膜在激光诱导下,表层硅氧烷被直接转化为连续的碳化硅传感层,碳化硅活性材料合成和形成薄膜器件一步完成,最高应变灵敏度系数(Gauge Factor, GF)为 2.47×10^5 。Liu 等^[15]利用二氧化碳激光器在聚酰亚胺薄膜(Polyimide, PI)上制备了一种石墨烯应变薄膜传感器。PI 薄膜在二氧化碳激光束的照射下,表层材料被直接碳化形成连续石墨烯传感层,石墨烯的合成和形成连续薄膜一步完成,它的最高 GF 为 112。虽然目前已经可以利用激光直写技术制备柔性薄膜传感器,但是鲜有见到将激光直写薄膜传感

器结合 EIT 技术应用于大规模分布式传感的相关研究。针对此,本文首先利用激光直写制备了一种大面积石墨烯薄膜传感器,然后通过调节激光焦点偏距的办法优化了传感器的电学性质各向异性。最后基于 EIT 技术将优化后柔性石墨烯传感器应用于空间裂纹损伤、空间圆孔损伤和筒体表面撞击损伤监测。

1 实验部分

1.1 实验材料和传感器制备

制备 EIT 传感器的 PI 薄膜(东莞市凯坤电子科技有限公司)厚度为 0.125 mm。用于激光碳化 PI 的激光为购置于雪谷公司的激光雕刻机(XG-1690A 7W)。连接传感器电极引脚和铜导线的导电银浆和环氧导电胶从深圳市鑫威电子材料有限公司购得。

EIT 传感器的制备过程如图 1 所示,首先将 PI 薄膜粘贴在玻璃板上,然后通过激光诱导碳化的方式在 PI 薄膜表面形成含石墨烯的传感层。为了能够测试传感器的器件性能,传感层的预留电极位置被接上电极。为了实现传感层和铜导线之间良好的电传导,传感层预留电极处先被涂上一层导电银浆,然后再用导电环氧树脂将铜线固定在电极上。

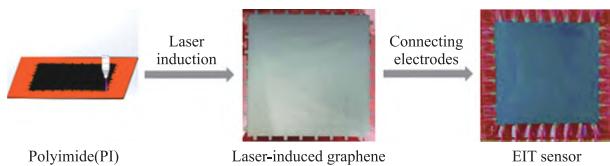


图 1 激光直写碳基导电薄膜制备 EIT 传感器

由于激光直写过程中,激光的加工方向可能会引起导电薄膜的各向异性,因此,为了厘清碳基传感层的电学各向异性,本文对其与激光运行方向平行(横向电阻 R_x , 图 2(a) 中上图)和垂直(横向电阻 R_y , 图 2(a) 中下图)的电学性能进行了系统研究。图 2(b) 是应用于实际信号感知的大面积 32 电极

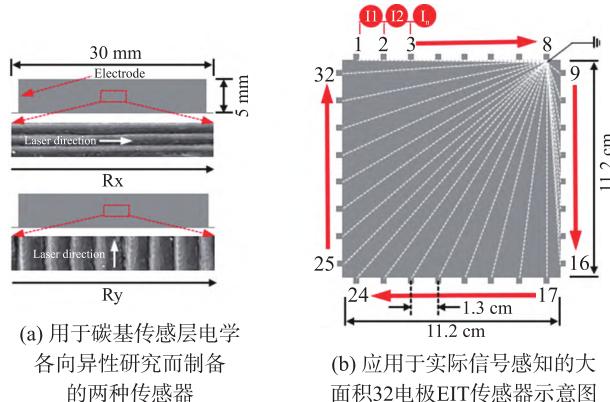


图 2 用于碳基传感层的电学各向异性分析的 EIT 传感器

EIT 传感器示意图, 传感器尺寸为 11.2 cm × 11.2 cm。

1.2 样品的表征

美国 HORIBA 公司的 HR800 的拉曼光谱仪被用来对 PI 膜的碳化情况进行分析。采用 Tescan 公司型号为 Tescan Mira 3 高分辨场发射扫描电子显微镜对 PI 膜表面和断面的微观形貌进行研究。采用日本 JEM-2100 高分辨透射电镜对传感材料的微观结构进行研究。

1.3 传感层均匀性测试

实验中采用安捷伦数据采集仪 34972A 测量两电极传感器的电阻。通过计算两电极传感器横向电阻和纵向电阻的比值来研究激光加工过程中焦点偏距对传感层电学性质各向异性的影响。

由于传感层在平行于激光运行方向的碳层结构与垂直于激光运行方向的碳层结构不相同, 所以会导致传感层出现电学性质各向异性的情况。传感层电学性质的各向异性会影响到 EIT 测量数据的准确性^[16-17]。为了提高 EIT 测量数据的准确性, 我们希望得到电学性质各向异性程度低的传感层。影响传感层电学性能的激光加工参数有四个, 分别是速度、功率、激光线间距和焦点偏距。激光线间距一定时, 传感层的电学性质各向异性主要受到激光焦点偏距的影响, 所以在本实验中我们固定激光的速度和功率分别为 4 000 mm/min 和 5.6 W 来研究激光焦点偏距对传感层电学性质各向异性的影响。在本实验中我们将图 2(a) 上的两电极传感器的电阻定义为横向电阻 R_x , 图 2(a) 下的两电极传感器的电阻定义为纵向电阻 R_y , 它们的比值 R_y/R_x 定义为传感层的各向异性程度。通过研究不同焦点偏距条件下传感层的电学性质各向异性程度, 确定获得传感层均匀度好的最佳激光工艺参数。

1.4 EIT 成像方法和测试

EIT 成像的目标是通过测量由激励电流引起的边界电压获得导电体内部的电导率分布。EIT 问题主要包括正问题和反问题两个方面。正问题是在已知导电体激励电流和导电体内部电导率分布的条件下求解导电体边界的电压值, 正问题是适定的, 具有唯一确定的解。反问题是在已知激励电流和测得导电体边界电压的情况下求解导电体内部电导率分布。反问题的解是不稳定的, 换句话说就是激励电流和边界电压一定时, 导电体内部电导率分布有很多种情况。所以反问题的求解是复杂而又具有挑战的, 研究者们通过从求解正向问题获得的灵敏度矩阵再结合先验条件和最优化理论逐步探索出求解反

问题的办法。

正向问题的介绍从方程(1)开始, 它表示导电体内部的电导率分布和其边界测量电压的控制方程是二维 Laplace 方程^[11]

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

式中: σ 是导电体内部的电导率分布, u 是导电体上的电势分布。由于方程(1)的解析解在导电体形状比较复杂时不容易得到, 所以我们通过有限元方法对问题的求解进行简化。首先我们需要通过变分法获得 Laplace 方程的弱解形式

$$\iint_{\Omega_n} \nabla \phi \cdot \sigma_n \cdot \nabla u dx dy = 0 \quad (2)$$

式中: Ω_n 代表监测的导电域, ϕ 被用来描述每个节点上的电压值。为了让模型与实际情况更加符合, 我们采用全电极模型(考虑电极接触电阻影响)

$$\int_{E_l} \sigma \frac{\partial u}{\partial n} ds = I_l \quad (3)$$

$$u + z_l \sigma \frac{\partial u}{\partial n} = V_l \quad (4)$$

式(3)描述在边界激励电流在与边界电极相连接的单元 E_l 上引起的电势变化, I_l 是电极注入电流, z_l 是电极接触电阻, n 是边界的单位法向量, V_l 是电极电势。式(4)描述了接触电阻会导致测量电压下降的实际物理现象。最终基于方程(1)和相应边界条件(3)、(4)的有限元问题解的矩阵形式可以描述为

$$\begin{bmatrix} A_M + A_Z & A_Z \\ A_W^T & A_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$[A_M]$ 是方程(1)的常用系统矩阵, $[A_W^T]$, $[A_D]$ 和 $[A_Z]$ 设定了全电极模型的边界条件^[18]。

关于反向问题, 我们采用差分成像的方法对电导率变化分布进行成像。更具体地说, 我们采取了最大后验值方法, 它是 Adler 和 Guardo 开发的一种一步线性成像方法^[19]。这种方法没有迭代过程, 成像速度快, 可用于实时成像。最大后验值方法首先对非线性的前向问题通过灵敏度矩阵 J 进行线性化近似处理。然后通过成像图像先验信息的假设改善 EIT 反问题的欠定性, 同时通过对测量噪声的高斯假设减弱测量电压中的噪声信号的影响。最后通过计算测量信号下成像信号的最大后验估计, 获得电导率变化的解

$$\Delta \sigma = [(J^T W J + \lambda R)^{-1} J^T W] \Delta U \quad (6)$$

式中: 雅可比矩阵 J 可以把内部电导率变化映射到边界电极的电压变化。算法中为了减小测量数据中的高斯白噪声误差的影响, W 矩阵使用测量电压的

方差计算得到:

$$W_{i,i} = \frac{1}{a_i} (W_{i,j} = 0 \text{ for } i \neq j) \quad (7)$$

式中: a_i 是测量电压的方差。 \mathbf{R} 是为了改善反问题的欠定性而引入的先验信息。 λ 是正则化超参数,用来权衡测量数据和先验信息矩阵对电导率空间分布的影响程度。为了能够得到良好的成像效果,正则化超参数的选择十分关键。有许多算法可以用来选择超参数,例如L-curve,广义交叉验证法(Generalized cross-validation, GCV)和固定噪声系数(Noise factor, NF)法^[20]。在这些超参数选择方法中固定噪声系数表现优异,它提供了一种与配置无关的超参数选择且能实现良好图像重建。参考文献中建议的取值范围0.5~2^[20],在本研究中我们选取NF=1来计算超参数。

如图2所示,本实验中电阻抗成像所采用的测量方式是文献中介绍的相邻激励-共地测量的方案^[12]。电流激励采用的依然是常规的相邻激励模式;在电压测量过程中选取8号电极作为接地电极,测量剩余电极与接地电极之间的电压。在激励和测量过程有几点特别的地方需要声明:在电流激励过程中不能将接地电极作为激励电极;在电压测量过程中,为了减小接触电阻变化的影响,不测量接地电极与激励电极之间的电压。一次电流激励过程可以获得30个电压测量,所以一个完整的电阻抗数据集包含870(29×30)个电压测量值。在采集数据的过程中,用电化学工作站提供5 mA的恒定电流,用安捷伦数据采集仪34972A采集边界电压值。

1.5 定位误差计算

我们首先使用质心方程来确定局部电导率变化区域的位置。局部电导率变化区域中心的坐标定义为单个元素的电导率变化乘以质心之和,再除以局部区域电导率变化之和。

$$x_{cm} = \frac{\sum_1^N \Delta\sigma_i x_i}{M} \quad y_{cm} = \frac{\sum_1^N \Delta\sigma_i y_i}{M} \quad (8)$$

定位误差定义为重建区域中心的坐标与实际坐标的差值除以传感器尺寸。

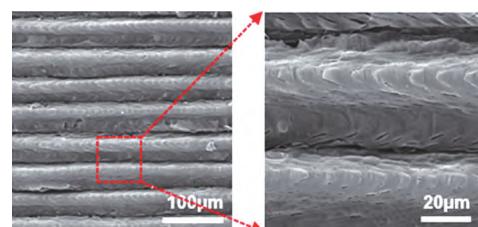
$$e_x = \frac{x_{cm} - x}{H} \times 100\% \quad e_y = \frac{y_{cm} - y}{L} \times 100\% \quad (9)$$

2 结果与讨论

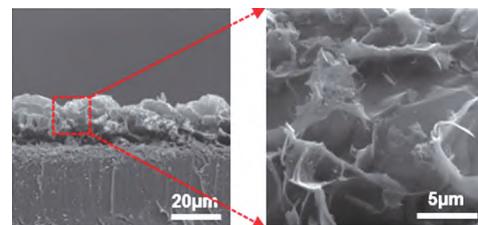
2.1 激光直写碳基薄膜表征

图3(a)给出的是激光直写碳基传感层的表面SEM图。从图中可以看到传感层表面存在一些沟、

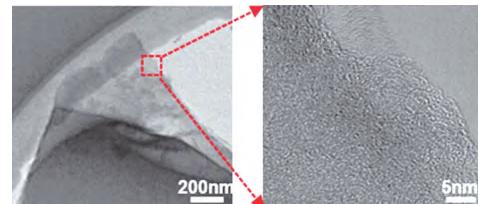
脊和微裂纹(长度10 μm,宽度2 μm),这些均匀分布的沟和脊碳层结构导致了激光直写制备的EIT传感器的电学各向异性。图3(b)展示的是传感层的截面图,传感层的厚度大约是22 μm。从截面图可以看出,激光直写的碳基薄膜具有多孔化的片层结构。图3(c)是碳基传感层的TEM图。激光直写制备的碳基片层结构含有丰富的褶皱并在表面显示石墨烯条纹特征^[21]。图3(d)给出的是碳基材料的拉曼光谱图,具有典型的碳基材料特征峰:位于~1350 cm⁻¹的D峰,位于~1580 cm⁻¹的G峰和位于~2700 cm⁻¹的2D峰。其中,D峰通常被认为是碳基材料的无序振动峰,主要用于判断其缺陷和无序程度。G峰是碳基材料的主要特征峰,是由于碳在sp²轨道的振动引起的,主要用于判断其对称性和有序度。 I_D/I_G 表明石墨化程度,其数值小于1,代表碳基传感层的石墨化程度好,缺陷较少。2D峰是双声子共振二阶峰,2D峰的出现进一步证实激光直写所获材料中含有石墨



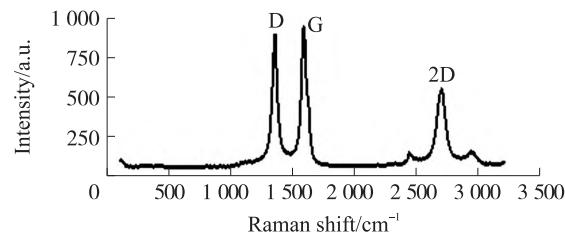
(a) 激光碳化的聚酰亚胺薄膜表面SEM照片



(b) 激光碳化的聚酰亚胺薄膜断面SEM照片



(c) 激光碳化的聚酰亚胺薄膜TEM照片



(d) 激光碳化的聚酰亚胺薄膜拉曼图

图3 激光直写碳基传感层的表征

烯的成分,且可以用于辅助判别石墨烯层数。 I_{2D}/I_G 数值小于 1 说明我们得到的是多层石墨烯。

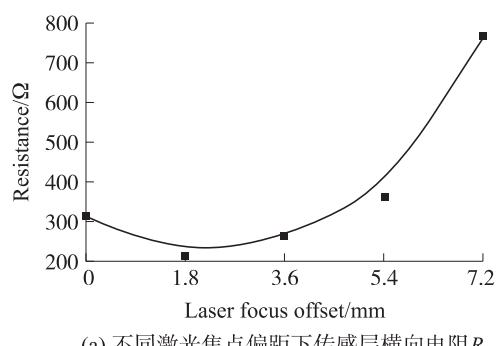
2.2 激光焦点偏距对传感层电学性质的影响

在激光速度 4 000 mm/min, 激光功率 5.6 W 和激光线间距 50 μm 的条件下, 研究激光焦点偏距(0~7.2 mm)对激光直写制备的传感层电学性质的影响。从实验结果(表 1 和图 4)可以看出激光线间距一定时, 传感层的横向电阻 R_x 和纵向电阻 R_y 都随着焦点偏距的增加呈现先降低后增加的趋势, 这与文献中报道的结果一致^[22]。在激光线间距一定

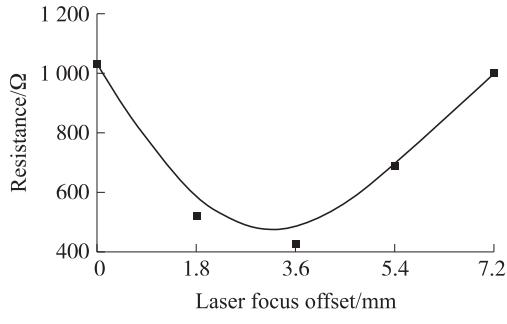
时, 激光焦点偏距的改变主要会产生两方面的影响。一方面是激光能量密度的变化, 激光焦点偏距增加, 激光能量密度逐渐降低, 激光碳化能力下降; 另一方面是光斑重叠区域的变化, 激光焦点偏距增加光斑重叠区域增加, 传感器均匀度增加。在 PI 薄膜靠近激光焦点时, 传感器均匀度是传感器电阻的主要影响因素, 传感器电阻随着均匀度的增加而减小; 当 PI 薄膜远离激光焦点时, 激光碳化能力成为传感器电阻的主要影响因素, 传感器电阻随着激光碳化能力的下降而增加。

表 1 不同激光焦点偏距下碳基导电薄膜横向和纵向电阻

Line spacing/μm	Direction	Resistance/Ω				
		$d=0$ mm	$d=1.8$ mm	$d=3.6$ mm	$d=5.4$ mm	$d=7.2$ mm
50	R_x	313	212	262	364	767
	R_y	1 029	518	428	689	1 003



(a) 不同激光焦点偏距下传感层横向电阻 R_x



(b) 不同激光焦点偏距下传感层纵向电阻 R_y

图 4 激光焦点偏距对传感层电阻影响

表 2 和图 5 给出了激光焦点偏距对传感层电学各向异性的影响。传感层的电学各向异性随着激光焦点偏距的增加而减弱。这是由于随着激光焦点偏距的增加, 两条激光斑点重叠区域增大, 传感层均匀度增加, 电学性质各向异性减弱。激光焦点偏距对传感层电学性质各向异性的影响并不是线性下降的。起初随着激光焦点偏距的增加, 电导率各向异性急剧下降; 然后影响逐渐减弱, 在这段时期会出现数值起伏的情况。

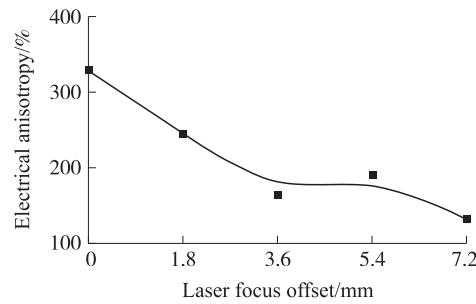


图 5 不同激光焦点偏距下石墨烯传感器电学性质各向异性

表 2 不同激光焦点偏距下两电极石墨烯传感器电学性质各向异性

Line spacing/μm	Electrical anisotropy/%				
	$d=0$ mm	$d=1.8$ mm	$d=3.6$ mm	$d=5.4$ mm	$d=7.2$ mm
50	328.8	244.3	163.4	189.3	130.8

2.3 激光直写碳基 EIT 传感器在结构健康监测中的应用

本文主要研究了激光直写碳基 EIT 传感器在损伤监测方面的应用。如图 6(a)所示, 我们用刀片在传感层表面切割出一个 42 mm 长狭窄缺口来模拟

裂纹。图 6(b) 和 6(c) 显示了切割前后传感器的 EIT 重建图。可以看出重建图像 100% 覆盖了模拟裂纹。从重建图中可以看出, 传感层表面出现裂纹之后, 切割区域的电导率发生了明显的变化。同样从对所有单元电导率变化的统计分析图 6(d) 也可

以看出,模拟裂纹的出现使得 EIT 重建单元中出现了电导率增大的单元 (-32 S/m 、 -24 S/m 和 -16 S/m)。裂纹的中心位置与重建图像的损伤中心基本一致,EIT 重建可以定位裂纹损伤。重建图像中裂纹的分辨率较低,这是差分成像算法的主要问题^[23]。尽管如此,实验结果能够证明使用激光直写的碳基 EIT 传感器来监测大纵横比的不连续性裂纹损伤是可行的。

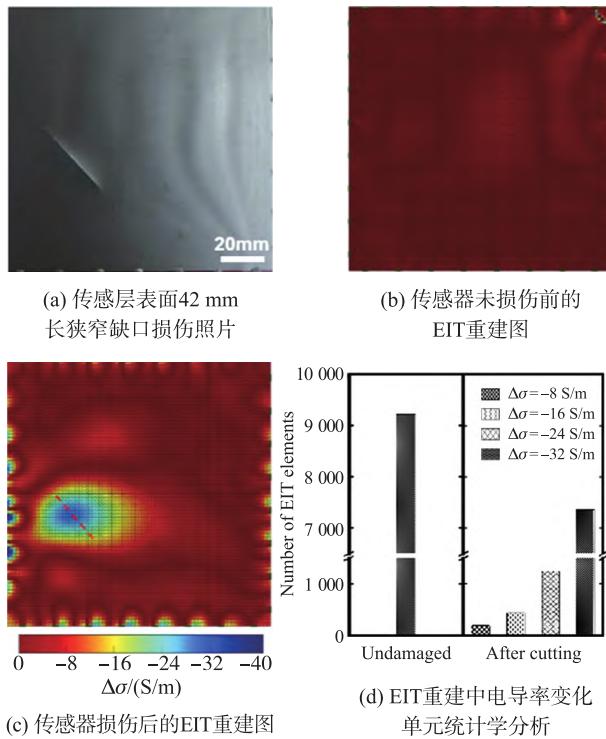


图 6 EIT 传感器裂纹损伤监测

接着我们进一步在传感层表面制造了圆孔型的损伤,图 7(a)是三次圆孔损伤后的传感器层实物图,三个损伤圆孔的直径分别是 30 mm , 15 mm 和 20 mm 。它们分别占传感层总面积的 7.2% , 1.8% 和 3.2% 。对三次圆孔切割损伤分别进行 EIT 重建,图 7(b)、7(c)和 7(d)分别是三次损伤后的 EIT 重建图,三次成像的损伤面积分别占总面积的 7.2% , 9% 和 12.2% 。重建图像损伤位置用实线圈表示,实际损伤位置用虚线圈表示。重建图像损伤位置出现一定偏差,这可能是由我们采用的优化后的传感器依然具有一定的电学性质各向异性(130.8%)导致的。利用 1.5 节定义的计算公式对重建结果进行定位误差计算,结果如图 7(b)~7(d)所示,最大定位误差 5.3% 。另外,重建损伤的大小与实际损伤相比变小了,从图 7(d)看出重建损伤的直径分别为 25 mm , 12 mm 和 18 mm 。但是,重建损伤区域与实际损伤区域大小的比例关系近似一致。这说明了该 EIT 传感器具有在多个损伤中识别损伤区域大小的

能力。为了定量研究不同损伤的 EIT 重建情况,我们对不同损伤情况的 EIT 重建单元进行了统计学分析,结果如图 7(e)。可以看出随着破坏圆孔数的增加,象征着未损伤区域大小的单元(电导率变化 -8 S/m)数量逐渐下降,代表损伤区域大小的单元(电导率变化 -16 S/m , -24 S/m 和 -32 S/m)数量逐渐增加。

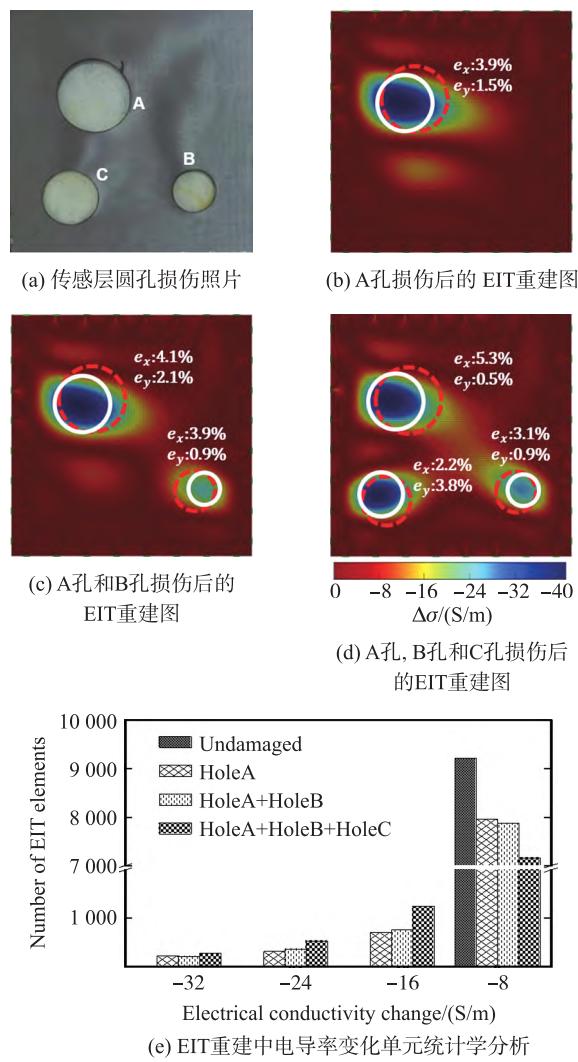


图 7 EIT 传感器圆孔损伤监测

为了研究 EIT 重建单元数与实际损伤面积大小的关系,我们对统计数据做进一步处理,结果见表 3。为了研究损伤面积比例估计误差,我们引入理想 EIT 重建单元数 N_{ideal} 。相同电导率变化的统计单元数的总和根据损伤面积按比例分配得到的 EIT 单元数被称为理想 EIT 重建单元数,计算结果见表 4。实际 EIT 重建单元数和理想 EIT 重建单元数的最大差值被定义为估计损伤大小比例关系的最大误差,计算结果整理见表 5。从表 5 可以看出选取电导率变化为 -24 S/m 的统计结果来反映实际损伤面积大小的比例关系最准确,最大误差为 8.3% 。

这一点可以从重建图像中得到解释。如图 7(b), 7(c) 和 7(d) 所示, 大面积损伤 A 的存在会导致小面积损伤 B 的重损伤单元 (-32 S/m) 减少; 损伤区

域增多会导致先验条件引起轻损伤单元 (-16 S/m) 增加; 所以中等损伤单元 (-24 S/m) 可以更加准确地反映实际损伤大小的比例关系。

表 3 实际 EIT 重建单元数统计结果

Hole damage	Number of actual EIT reconstruction elements N_{actual}				
	Area ratio/%	$\Delta\sigma = -32 \text{ S/m}$	$\Delta\sigma = -24 \text{ S/m}$	$\Delta\sigma = -16 \text{ S/m}$	$\Delta\sigma \neq -8 \text{ S/m}$
A	7.8	225	315	713	1 253
A&B	9	214	365	759	1 338
A&B&C	12.2	273	535	1 249	2 057
Total	29	712	1 215	2 721	4 648

表 4 理想 EIT 重建单元数计算结果

Hole damage	Number of ideal EIT reconstruction elements N_{ideal}				
	Area ratio/%	$\Delta\sigma = -32 \text{ S/m}$	$\Delta\sigma = -24 \text{ S/m}$	$\Delta\sigma = -16 \text{ S/m}$	$\Delta\sigma \neq -8 \text{ S/m}$
A	7.8	192	327	732	1 250
A&B	9	221	377	844	1 442
A&B&C	12.2	300	511	1 145	1 955

表 5 损伤面积比例关系估计的误差结果

Hole damage	$N_{\text{actual}}/N_{\text{ideal}}/\%$			
	$\Delta\sigma = -32 \text{ S/m}$	$\Delta\sigma = -24 \text{ S/m}$	$\Delta\sigma = -16 \text{ S/m}$	$\Delta\sigma \neq -8 \text{ S/m}$
A	117.5	96.4	97.4	100.2
A&B	96.8	96.8	89.9	92.8
A&B&C	91.1	104.7	109.1	105.2
Maximum error	26.3	8.3	19.2	12.4

最后我们将实验制备的大面积 EIT 传感器粘贴在圆筒表面来监测圆筒受到的冲击损伤。图 8 展示的是 EIT 传感器的圆筒撞击损伤监测图, 图 8(a) 和 8(b) 是圆筒未受到撞击之前的实物图和 EIT 重建图, 可以看出重建图像并未产生异常; 图 8(c) 和 8(d) 是圆筒受到撞击之后的实物图和 EIT 重建图, 两个图对比观察可以发现, 重建图像在圆筒受到撞击区域发生电导率变化, 且重建图像中的损伤区域位置和大小与实际冲击损伤基本一致。至于损伤程度的评估, 由于缺少必要的冲击损伤评估手段, 这项工作将在后续的研究中进一步完善。

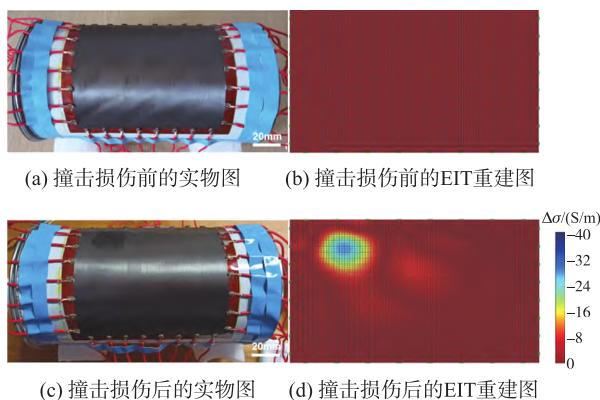


图 8 EIT 传感器的圆筒撞击损伤监测图

3 结论

本文通过激光直写制备了碳基 EIT 传感器。首先研究了不同激光焦点偏距对传感层电学各向异性的影响, 在 $50 \mu\text{m}$ 的线间距, 7.2 mm 偏焦距下获得了电导较为均匀的石墨烯传感层。然后采用工艺优化后的 EIT 传感器进行了损伤感知的应用研究。我们主要设计了三种损伤类型, 一种是具有大长宽比的裂纹损伤, 另一种是圆孔型损伤, 最后我们通过将 EIT 传感器粘贴在筒体表面监测其受到的撞击损伤。实验结果表明, EIT 传感器能有效检出和定位损伤的位置, 显示了其在结构健康监测领域的应用前景。同时, 需要指出, 目前采用的 EIT 重建算法还存在损伤位置偏移和损伤面积被低估的情况, 需后续对相关算法进行改进。

参考文献:

- [1] Wan S, Bi H, Zhou Y, et al. Graphene Oxide as High-Performance Dielectric Materials for Capacitive Pressure Sensors [J]. Carbon, 2017, 114: 209–216.
- [2] Tallman T N, Gungor S, Wang K W, et al. Tactile Imaging and Distributed Strain Sensing in Highly Flexible Carbon Nanofiber/Polyurethane Nanocomposites [J]. Carbon, 2015, 95: 485–493.

- [3] Silvera-Tawil D, Rye D, Soleimani M, et al. Electrical Impedance Tomography for Artificial Sensitive Robotic Skin: A Review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(4): 2001–2016.
- [4] Lee H S, Kwon D G, Cho H D, et al. Soft Nanocomposite Based Multi-Point, Multi-Directional Strain Mapping Sensor Using Anisotropic Electrical Impedance Tomography [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 39837.
- [5] Bera T K, Nagaraju J. A MATLAB Based Boundary Data Simulator for Studying the Resistivity Reconstruction Using Neighbouring Current Pattern [J]. *Journal of Medical Engineering*, 2013, 2013: 193578.
- [6] Tawil D S, Rye D, Velonaki M. Improved Image Reconstruction for an EIT-Based Sensitive Skin with Multiple Internal Electrodes [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, 27(3): 425–435.
- [7] Loyola B R, Saponara V L, Loh K J, et al. Spatial Sensing Using Electrical Impedance Tomography [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(6): 2357–2367.
- [8] Gupta S, Vella G, Yu I N, et al. Graphene Sensing Meshes for Densely Distributed Strain Field Monitoring [J]. *Structural Health Monitoring*, 2020, 19(5): 1323–1339.
- [9] Loyola B R, Briggs T M, Arronche L, et al. Detection of Spatially Distributed Damage in Fiber-Reinforced Polymer Composites [J]. *Structural Health Monitoring*, 2013, 12(3): 225–239.
- [10] Chen Y, Yu M, Bruck H A, et al. Compliant Multi-Layer Tactile Sensing for Enhanced Identification of Human Touch [J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(12): 125009.
- [11] Dai H B, Gallo G J, Schumacher T, et al. A Novel Methodology for Spatial Damage Detection and Imaging Using a Distributed Carbon Nanotube-Based Composite Sensor Combined with Electrical Impedance Tomography [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2016, 35(2): 26.
- [12] Dai H, Thostenson E T. Large-Area Carbon Nanotube-Based Flexible Composites for Ultra-Wide Range Pressure Sensing and Spatial Pressure Mapping [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(5): 48370–48380.
- [13] Shin, Hee-Sup, Duchaine, et al. Soft Tactile Skin Using an Embedded Ionic Liquid and Tomographic Imaging [J]. *Journal of Mechanisms & Robotics Transactions of the Asme*, 2015, 7(2): 021008.
- [14] Gao Y, Li Q, Wu R, et al. Laser Direct Writing of Ultrahigh Sensitive SiC-Based Strain Sensor Arrays on Elastomer Toward Electronic Skins [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 29(2): 1806786.
- [15] Luo S, Hoang P T, Tao L. Direct Laser Writing for Creating Porous Graphitic Structures and Their Use for Flexible and Highly Sensitive Sensor and Sensor Arrays [J]. *Carbon*, 2016, 96: 522–531.
- [16] Gallo G J, Thostenson E T. Spatial Damage Detection in Electrically Anisotropic Fiber-Reinforced Composites Using Carbon Nanotube Networks [J]. *Composite Structures*, 2016, 141: 14–23.
- [17] Abascal J, Arridge S R, Atkinson D, et al. Use of Anisotropic Modelling in Electrical Impedance Tomography; Description of Method and Preliminary Assessment of Utility in Imaging Brain Function in the Adult Human Head [J]. *Neuroimage*, 2008, 43(2): 258–268.
- [18] David H. Electrical Impedance Tomography: Methods, History and Applications [J]. *Medical Physics*, 2005, 32(8): 2731.
- [19] Adler A, Guardo R. Electrical Impedance Tomography: Regularized Imaging and Contrast Detection [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1996, 15(2): 170–179.
- [20] Graham B M, Adler A. Objective Selection of Hyperparameter for EIT [J]. *Physiological Measurement*, 2006, 27(5): S65–S79.
- [21] Ye R, James D K, Tour J M. Laser-Induced Graphene [J]. *Accounts of Chemical Research*, 2018, 51: 1609–1620.
- [22] 王进, 周如东, 张宁, 等. 1 064 nm 光纤激光器直写聚酰亚胺成碳工艺参数研究 [J]. *中国激光*, 2021, 48(10): 122–130.
- [23] Hallaj M, Pourghaz M. Electrical Impedance Tomography-Based Sensing Skin for Quantitative Imaging of Damage in Concrete [J]. *Smart Materials & Structures*, 2014, 23(8): 085001.

董富贵(1997—),男,在读硕士,主要从事传感器在结构健康监测中的应用研究,3321721257@qq.com;



轩福贞(1970—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事智能传感和结构损伤早期检测/在线监测预警技术研究,fzxuan@ecust.edu.cn。



高阳(1983—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光微纳加工和结构健康监测方面的研究,yanggao@ecust.edu.cn;

