DOI: 10.3901/JME.2021.07.215

石墨烯/柔性聚乳酸自传感复合材料结构 3D打印与性能研究*

田小永 闫万权 黄 兰 王清瑞 李涤尘

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 西安 710049)

摘要: 为了深入研究石墨烯复合材料压阻特性, 解决压阻复合材料定量传感问题, 实现自传感结构变形监测, 通过球磨混合工艺和单螺杆挤出工艺制备了石墨烯/柔性聚乳酸复合丝材, 采用材料挤出成形 3D 打印作为石墨烯/柔性聚乳酸自传感复合材料的结构成型工艺, 对导电高分子复合材料的压阻特性展开研究, 探究了不同载荷条件对复合材料压阻特性的影响规律, 为实现自传感结构变形监测提供了可靠的依据。最后搭建了基于 LabVIEW 和实时数据采集模块的自传感结构变形重构实时监测系统, 通过建立平面弯曲变形传感单元的计算模型, 使用阵列传感单元实现了结构变形重构实时监测功能, 其中重构形状误差低于 3%。

关键词: 石墨烯复合材料; 压阻特性; 3D 打印; 自传感; 变形重构

中图分类号: TH16; TB33

Graphene/Flexible Poly(lactic Acid) Self-sensing Composite Structures 3D Printing and Performance

TIAN Xiaoyong YAN Wanquan HUANG Lan WANG Qingrui LI Dichen

(State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract: In order to further study piezoresistive properties of graphene composites, solve the problem of quantitative sensing through piezoresistive composites, and realize the deformation monitoring of self-sensing structure, oxide graphene/flexible poly lactic acid (rGO/flexPLA) composites are prepared by ball mill mixing process and single screw extrusion process, and material extrusion modeling 3D printing process is used as the structure forming process of rGO/flexPLA self-sensing composite material. Piezoresistive properties of the conductive polymer composites are studied. The influence of different load conditions on the piezoresistive properties of composite materials is explored, and it provided a reliable basis for realizing self-sensing structural deformation monitoring. Finally, a real-time monitoring system for morphing and reconstruction of self-sensing structures based on LabVIEW and real-time data acquisition module is built. By establishing the calculation model of the plane bending deformation sensing unit, the array sensing unit is used to realize the real-time monitoring function of structural deformation reconstruction, and the reconstructed shape error is less than 3%.

Key words: graphene composites; piezoresistive properties; 3D printing; self-sensing; deformation reconstruction

0 前言

传感技术是关于从自然信息源中筛选、获取特定信息并进行信息处理和转换的一门多学科交叉技术, 被称为当代信息技术三大支柱之一。在自然界

中, 传感现象早已遍布生物生命全过程, 比如人体通过各种传感神经可以感受温度和湿度, 可以感知触觉和痛觉等一些外界环境的刺激, 进而对环境条件做出一系列基于自身安全性和舒适性考虑的反应。类似的, 在工程实际中, 工作运行中的机械结构, 也需要各种传感器来感知自身和工作环境的变化, 才能在工作中保障执行动作操作的完成度和安全性, 例如, 在自激励或者环境激励条件下能够完

* 国家自然科学基金(52075422)和王宽诚教育基金会资助项目。
20201020 收到初稿, 20210215 收到修改稿

成特定动作的智能可控变形结构^[1]；能够改变机翼拱曲度和跨度形状而进入到巡航、徘徊、探索等不同飞行模式的变形翼结构^[2-6]；能够在无人操作时进行自动伸展的智能可展开天线结构^[7]等。对于这些智能变形结构而言，获知结构自身形状和位置信息，是确保功能实现的重要环节。

随着材料科学、柔性电子技术、智能变形、仿生机器等领域的发展，对传感材料提出了柔性化、可拉伸、有弹性、轻质、灵活等要求。具有代表性的光纤光栅传感器得到较为广泛的研究和应用^[8]，其通过干涉、衍射等光物理现象实现传感功能，但仍然受到成本高，布设复杂，刚度大，不适合监测大变形量，极易发生失效或者性能退化等一些因素的制约。以热塑性聚合物为基体材料的传感复合材料则能够很好地适应这些发展要求，也因此得到了众多研究者的关注。石墨烯具有许多非常适合传感复合材料应用的特性，本身的轻量化、优异的力、电、热学特性以及压阻效应特性以及极大的比表面积使其备受研究者青睐^[9-10]，成为最受欢迎的压阻复合材料导电填料之一，被广泛应用于压阻复合材料的传感系统及应变自传感结构的开发^[11-12]。

然而传统的制造手段对于石墨烯压阻复合材料传感器的成型与应用产生了限制，例如化学气相沉积^[13]、浇铸^[14]、旋涂^[15]等方法，不仅制造过程费时费力、设备复杂，而且限制了传感器形状结构的设计，非常不利于高性能复合材料自传感结构的设计与成型。近年来 3D 打印技术的飞速发展，为石墨烯压阻复合材料在传感器领域的应用提供了新的思路。一方面 3D 打印工艺为压阻复合材料传感结构设计提供了足够的灵活性^[16-19]，另一方面 3D 打印为嵌入式传感结构成型，实现结构的应变自传感功能提供了可靠的研究手段^[20-23]。其中，通过将材料加热至熔融态并通过打印喷嘴挤出实现成型制造的材料挤出成型工艺，与热塑性复合材料属性十分契合，且因为设备简单已成为复合材料传感结构成型最常用的 3D 打印工艺。STANO 等^[24]使用 AlfaOhm 导电 PLA 丝材打印四个应变片嵌入热塑性聚氨酯基体结构制成称重传感器，在最高 100 g 的测试范围内，所获得灵敏度为 0.088 mV/(V·g)，相比于金属应变片有明显的优势。近年来，3D 打印石墨烯复合材料的研究，多数还停留在复合材料成型性、力学性能和导电性能上的研究工作^[25-28]。目前现有的石墨烯压阻复合材料自传感结构 3D 打印相关研究中，主要以测试压阻复合材料产生应变后的阻值变化、灵敏度系数研究为主^[29-31]，较少深入研究复合

材料压阻特性及其影响因素，尚未涉及复合材料自传感结构变形监测系统设计与性能分析，这使得石墨烯压阻传感复合材料走向传感应用还具有具有一定的挑战性。

因此，本文提出对 3D 打印石墨烯复合材料压阻特性开展深入研究，重点解决压阻复合材料定量传感问题，实现自传感结构变形监测系统的设计与试验验证，探索石墨烯复合材料自传感结构的实际应用。首先，制备石墨烯/柔性聚乳酸复合材料丝材，采用多材料挤出成型 3D 打印工艺实现自传感复合材料结构的制造；其次，采用单轴拉伸测试方法，对复合材料的压阻特性进行系列试验测试，分析载荷类型对石墨烯复合材料压阻特性的影响；最后，基于 LabVIEW 和实时数据采集模块搭建了 3D 打印复合材料自传感结构变形及重构的实时监测系统，通过建立平面纯弯曲变形重构传感单元计算模型，使用阵列传感单元实现了结构变形重构与实时监测。

1 试验方法

1.1 复合材料丝材制备

本研究使用还原氧化石墨烯(青岛天源达石墨有限公司生产)作为导电填料，柔性聚乳酸(美国 NatureWorks, IngeoTM4032D)作为绝缘基体材料制备压阻复合材料。基于螺杆挤出成型工艺，使用 SHSJ-25 型耗材挤出试验机进行复合材料丝材的制备。

将柔性聚乳酸(flexPLA)粉末原料置于电鼓风干燥箱内进行预干燥处理，设置温度为 40℃(略小于材料 T_g)，经过 3 h 的干燥后粉末质量维持稳定。将干燥后的 flexPLA 粉末和石墨烯(rGO)加入刚玉球磨罐中，保证研磨球和复合粉末的质量比为 1:1，后将刚玉球磨罐置于 KQM-X/B 型试验室行星球磨机(咸阳金宏通用机械有限公司)，设置球磨罐自转转速为 360 r/min，为保障充分混合设置球磨时间为 3 h。

采用螺杆挤出机制备 rGO/flexPLA 复合丝材如图 1 所示，丝材直径精度控制在 $1.75\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$ 的范围内的丝材，表面质量良好。

图 1 3D 打印 rGO/flexPLA 复合丝材

1.2 复合材料 3D 打印

本研究采用多材料挤出成形 3D 打印工艺设备 (Creator Pro, 浙江闪铸三维科技有限公司), 实现了压阻传感复合材料与绝缘聚合物构成一体化成形。

用于单轴拉伸测试的试样与挠曲变形自传感结构由绝缘聚合物基底与压阻复合材料打印线条组成, 如图 2a、2b 所示。单轴拉伸试样为 GB1040-92 塑料拉伸性能试验方法中的 I 型试样, 挠曲变形自传感结构为自行设计, 绝缘部分均采用聚乳酸 (Polylactic acid, PLA) 作为基体材料。

图 2 绝缘基底材料测试试样

在打印过程中, 绝缘部分打印完成后, 打印机切换至右喷头在试样绝缘部分上表面进行石墨烯复合材料结构的打印, 最终实现完整试样的成形。待试样冷却后以导电银胶作为电极材料, 在复合材料上固定距离两端将铜导线与复合材料进行粘接, 以此来降低电极端的接触电阻, 减小测量误差, 打印过程及所得试样如图 3 所示。

图 3 打印过程及所得试样结构

1.3 压阻性能测试系统与变形重构测试系统

复合材料压阻性能测试电路设计采用伏安法原理。为了获得连续试时电阻值数据, 搭建了由电阻测量电路、数据采集卡 (8 通道 USB6003, National Instruments, NI)、LabVIEW 实验室虚拟仪器工程平

台 DAQ 数据采集模块组成的电阻测量系统, 对被测试样的电压值进行实时采集, 并在 LabVIEW 中通过欧姆定律将电压数据转换为被测试样的连续实时电阻数据。为了测得石墨烯复合材料的应变灵敏度系数, 使用单轴拉伸测试力学试验机 (PLD-5, 西安力创材料检测技术有限公司) 为试样提供稳定的准确的应变载荷, 同时, 通过上述试样连续实时电阻测量系统对试样在被拉伸变形过程中的电阻变化进行实时监测。

搭建了基于 LabVIEW 软件图形化编程环境, 面向压阻复合材料变形传感器结构的集成信号采集、处理、图形化显示的实时虚拟仪器系统, 用于变形监测实现自传感结构的变形重构。

2 石墨烯复合材料压阻性能

为了解决压阻复合材料定量传感问题, 需要对所得 rGO/flexPLA 复合材料的压阻性能进行测定, 充分了解其压阻特性, 为复合材料自传感结构的设计与应用提供理论基础。

2.1 石墨烯复合材料电导率与渗滤阈值测定

根据导电渗流理论^[32], 复合材料的导电性能将在其渗滤阈值处发生突变, 此时导电填料初步形成的不稳定导电网络在外力作用下会使复合材料电导率发生较大的变化, 即便显出较高的应变灵敏度。为探究 rGO/flexPLA 复合材料的渗滤阈值, 获取具有较高灵敏度的复合材料, 对石墨烯质量分数分别为 1%、2%、3%、4%、5% 的复合丝材打印试样进行了电导率测量, 结果图 4 所示。

图 4 rGO/flexPLA 复合材料 3D 打印试样渗滤阈值拟合

可以明显地观察到在石墨烯含量 3% 到 4% 范围内, 复合材料电导率出现了超过 3 个数量级的增长, 可知 rGO/flexPLA 复合材料打印试样的渗流阈值在 3% 到 4% 之间。由于材料的电导率为

$$\sigma = \frac{L}{RS} \quad (1)$$

式中, R 为复合材料电阻; L 为复合材料的长度; S 为复合材料横截面面积。根据由经典渗滤公式两边取对数可推导得到的拟合公式

$$\begin{cases} \lg \sigma \propto t \cdot \lg(p - p_c) & p > p_c \\ \lg \sigma \propto -s \cdot \lg(p_c - p) & p < p_c \end{cases} \quad (2)$$

式中, p 为复合材料导电粒子含量; p_c 为复合材料渗滤阈值; t 、 s 为临界指数, 又称为渗滤系数; σ 为对应导电粒子含量为 p 时复合材料的电导率。根据式(2), 在 3% 到 4% 含量范围内, 以 0.1% 为间隔取点进行拟合, 取最小拟合残差平方和以及最大相关系数的拟合值。得到了复合材料 3D 打印试样的渗滤阈值为 3.5%, 如图 4a、4b 所示。

2.2 载荷条件对压阻性能的影响

为了能够详细了解石墨烯复合材料在不同模式的应变载荷下的压阻行为, 我们通过单轴拉伸测试, 选择位移控制模式, 对 rGO/flexPLA-4% 试样分别进行了单次拉伸应变载荷与循环拉伸的应变载荷测试。通过分析材料应变与电阻相对变化量关系和应变灵敏度系数等测试结果, 掌握石墨烯复合材料的压阻性能。

为表征传感结构的灵敏程度, 我们使用应变灵敏度系数(Gauge factor, GF)作为衡量指标

$$GF = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon} \quad (3)$$

即材料电阻相对变化量随变形应变变化的灵敏度。

2.2.1 单次拉伸应变载荷

首先选择位移控制模式, 设置较高的加载速度, 对试样加载不同位移幅值的脉冲式拉伸应变载荷。设置加载位移速率为 36 mm/min, 应变速率为 67%/min, 得到石墨烯复合材料脉冲式拉伸应变载荷压阻响应曲线和 GF 曲线, 如图 5a、5b 所示。从图中可以看到, 在应变约为 2% 以内表现为线性压阻响应, 应变大于 2% 表现为非线性压阻响应, 其 GF 曲线在过了初期快速增长阶段后同样分为线性段和非线性段。

图5 脉冲式拉伸应变载荷压阻响应曲线与 GF 曲线

随后降低加载速率至 2 mm/min, 应变速率 3.7%/min, 对试样加载连续斜坡式拉伸应变载荷, 得到石墨烯复合材料压阻响应曲线和 GF 曲线, 如图 6a、6b 所示。观察拉伸应变及其电阻相对变化量曲线及其拟合曲线, 得到试样的电阻相对变化量是应变的二次函数, 即在斜坡式拉伸应变载荷条件下, 石墨烯复合材料的压阻响应是非线性的, 如图 6a 所示。同时其 GF 值过了快速增长阶段后, 呈近似线性增长趋势, 如图 6b 所示。

图6 连续斜坡式拉伸应变载荷压阻响应曲线与 GF 曲线

根据 rGO/flexPLA-4% 复合材料在两种不同类型的载荷下表现出的不同压阻行为, 可以推断出拉伸载荷的加载速度对于复合材料的压阻性能具有一定程度的影响。因此对试样进行 0~36 mm/min 范围内不同加载速率下的连续斜坡式拉伸应变载荷测试, 得到复合材料的压阻响应曲线和 GF 曲线, 如图 7a、7b 所示。

图7 不同斜坡拉伸速率下试样的压阻行为

从图 7a 中可以看出拉伸速率在 0~10 mm/min 范围内, 对材料的压阻响应影响并不显著, 速率达

到 36 mm/min 则在应变超过约 2% 之后, 压阻响应出现明显的急剧增大。而在图 7b 中, 我们可以观察到材料应变灵敏度 GF 曲线在应变前期约 0~1% 应变范围内的快速增长阶段, 以及应变后期的趋于稳定或者平稳增长的阶段, 并且在较小的拉伸速率下, 表现为趋于稳定, 而在 10 mm/min 的拉伸速率开始表现为平稳增长趋势。

为探究该现象的原因, 使用 SEM HITACHI SU3500 扫描电子显微镜对被拉伸测试后的试样表面进行观察, 观察结果如图 8 所示。可以看到试样石墨烯复合材料表面出现明显的裂纹, 这是因为复合材料处于较大速率拉伸状态时, 基体材料无法较充分地进行应力松弛, 从而出现裂纹, 出现压阻响应急剧增大, 这也说明较大速率的变形易导致复合材料传感结构出现不可逆的损伤, 实际应用中应尽量避免。

图 8 试样石墨烯复合材料表面拉伸裂纹

2.2.2 循环拉伸应变载荷

为测试复合材料压阻性能的稳定性的, 检测其结构变形传感功能的可靠性, 对试样进行 1 000 次循环拉伸测试, 加载速率设置为 36 mm/min, 拉伸幅值为 1.45%, 得到石墨烯复合材料循环压阻响应曲线, 如图 9 所示。从图 9 中可以看到随循环次数的增加, 复合材料的压阻响应逐渐减小, 并在约 100 次后逐渐趋于稳定, 在后 900 次拉伸中便显出较好的稳定性。

图 9 复合材料 1 000 次循环压阻响应

3 自传感结构变形重构

基于上述章节中对石墨烯复合材料压阻性能的研究, 我们将石墨烯复合材料作为薄片结构的变形检测及重构的传感结构材料, 打印具有线性传感单元的自传感挠曲变形结构。基于有限单元法的思想, 将连续完整的变形结构离散成为一个个不可再拆分的线型单元结构进行插值计算, 实现挠曲变形自传感结构的变形重构。

3.1 基于变形函数的结构重构方法

相比于只承受弯矩的纯弯曲变形的结构, 受弯矩和剪力共同作用而发生平面横力弯曲的结构更为常见, 在平面横力弯曲变形结构中, 弯曲变形轴线上各点的应变等形位信息呈现非均匀变化, 因此想要实现结构变形的重构也就更加困难, 比较典型的模型就是悬臂结构模型。

图 10 悬臂结构模型及其简化结构单元

为实现悬臂结构的变形自传感及形状重构, 将复合材料沿轴线打印至挠曲变形薄片结构表面并分解为数个传感单元, 对每个结构单元视为纯弯曲变形结构进行简化分析, 如图 10 所示。首先分析简化后的纯弯曲结构单元, 在薄片结构发生纯弯曲变形的过程中, 距离中性层以上距离为 a 的同一层面上各点应变处处相同。因此薄片结构平面纯弯曲变形的弯曲曲率 k 、圆心角 θ 与应变之间的关系推导过程如下。

在中性层和传感单元外表面, 有弧长公式

$$\begin{cases} L = \frac{\theta}{k} \\ L(1 + \varepsilon) = \frac{\theta}{k_1} \end{cases} \quad (4)$$

式中, k 为中性层曲率; k_1 为传感单元中间层曲率; L 为传感单元原长; θ 为弧长 L 所对应的圆心角。而中性层与传感单元中间层曲率间的关系有

$$\begin{cases} \frac{1}{k_1} = \frac{1}{k} + a \\ a = \frac{h}{2} + h_1 \end{cases} \quad (5)$$

由上述关系式可推导出薄片结构平面纯弯曲变形的变形模式为

$$\begin{cases} k = \frac{\varepsilon}{a} \\ \theta = L \frac{\varepsilon}{a} \end{cases} \quad (6)$$

而对于整个悬臂结构, 其挠曲线弹性曲线方程

$$w(x) = \frac{Px^2}{6EI}(3L_0 - x) \quad (7)$$

式中, P 为施加在悬臂梁自由端的力; E 为梁的弹性模量; I 为梁结构的惯性矩。在控制自由端位移的方式加载的情况下, 通过代入两端位移边界条件可推导出挠曲线控制位移加载方式的弹性曲线方程

$$w(x) = \frac{w_m x^2}{2L^3}(3L_0 - x) \quad (8)$$

式中, w_m 为在自由端加载的挠度。根据挠曲线方程, 挠曲线上任意点偏转角度以及挠曲率为

$$\begin{cases} \theta = \frac{dw}{dx} = \frac{3w_m}{2L^3}(2L_0 x - x^2) \\ k = \frac{d^2w}{dx^2} = \frac{3w_m}{L^3}(L_0 - x) \end{cases} \quad (9)$$

根据卡门大挠度薄板弯曲理论, 薄板中性层纵向应变为纵向位移 u 和挠度 w 引起的纵向应变叠加而成, 且根据平面纯弯曲模型分析所得式(6), 距离中性层 a 的外层应变可表示为

$$\varepsilon_{x,a} = \frac{du}{dx} + \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 + ak \quad (10)$$

又根据物理方程组

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_y) \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \mu\sigma_x) \end{cases} \quad (11)$$

由于加载位移载荷在 Y 轴方向不变, 可知边界条件 $\varepsilon_y=0$, 可解得

$$\varepsilon_x = \frac{1-\mu^2}{E}\sigma_x \quad (12)$$

又加载方式为薄片 X 轴方向一端固定, 一端只加载 Z 方向位移载荷, 在 X 方向不受约束, 因此有边界

条件 $(\sigma_x)_{x=L} = 0$, 结合式(10)可解得

$$\frac{du}{dx} = -\frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 \quad (13)$$

$$\varepsilon_{x,a} = ak \quad (14)$$

故而有薄片结构平面横力弯曲位移模式

$$\begin{cases} x = L_0 - \frac{L^3}{3aw_m} \varepsilon_{x,a} \\ w = \frac{w_m}{2L_0^3} x^2 (3L_0 - x) \end{cases} \quad (15)$$

使用连续阵列传感单元进行变形重构时, 本质上是以每一个传感单元所检测的平均应变作为该传感单元中心点的等效应变, 来近似挠曲线上相应位置的变形应变。再结合式(15), 通过对每个传感单元所测的应变及其中心点 x 轴坐标值计算 w_m , 将具有最小残差平方和的 w_m 作为检测的挠曲线最大挠度值, 最后通过挠曲线方程进行完整挠曲变形重构。

3.2 试验验证与误差分析

为了得到较高的应变灵敏度系数, 同时保障材料具有稳定的可测量电阻信号, 选用 rGO 含量为 4% 的 rGO/flexPLA 复合材料打印挠曲变形试样进行试验。试验过程中将具有 8 个传感单元的试样一端固定在平台上, 垂直于挠曲加载的方向, 再连接测量电路和采集卡端口, 通过高度尺对结构进行定量的挠度加载。通过各传感单元中心结点应变与坐标值计算近似最大挠度值 w_m , 以最小残差的拟合值作为重构计算的结构变形最大挠度值, 再以重构的最大挠度值 w_m , 根据挠曲变形公式(15)进行插值计算挠曲线上各点, 最后通过 XY 图像显示在实时系统的用户界面中实时显示重构的形状。

如图 11 所示, 分别为加载 30 mm、50 mm、70 mm、90 mm 挠度载荷的重构挠曲线, 可以看到根据函数插值法原理进行结构挠曲变形重构的可以实现重构计算得到的最大挠曲值相对应的一整条完整的挠曲线。这则体现出了变形函数插值法具有更加广的插值范围, 也可以叫做对变形重构传感范围以外的形状的预测。

对比图 11 分别在挠度载荷为 30 mm、50 mm、70 mm、90 mm 下试验传感单元测试的重构挠曲线, 发现挠度载荷越大, 曲线末端重构结构与理论结果偏差越大。但随加载挠度值得增大, 实际重构挠曲线的误差区别并不明显, 并且最大重构误差出现在挠度值 30 mm 时, 误差均不大于 3% 的重构结果说明了通过函数插值法进行挠曲变形重构的可行性。

图 11 结构挠曲变形重构挠曲线

为探究传感单元数目对于变形重构误差的影响, 我们针对不同传感单元数目进行挠曲变形重构的试验测试。如图 12 所示, 为挠度载荷 50 mm 下, 分别通过 2~8 个传感单元进行挠曲变形重构曲线与理论曲线的对比图。可以看到, 传感单元数目过少时出现了较明显的重构偏差, 且误差会随着传感单元数目的增加而减小, 最终误差大小趋于稳定, 使用 6 与 8 个传感单元进行重构的误差已经十分接近。

图 12 阵列单元传感挠曲变形重构曲线及其局部放大图

该试验结果说明通过函数插值法进行挠曲变形重构对于传感单元划分的数目有一定的底线要求, 同时也要考虑一定的经济性, 并非单元数目越多结

果误差越小, 而是达到一定的单元数目变形重构结果误差就会控制在一个良好的范围内, 根据所得重构挠曲线可知将自传感结构长度方向上的传感部件六等分为单元阵列即可得到较小的误差。

目前已有类似方法使用离散光纤传感器对悬臂结构变形重构的研究, 其重构误差为 2.7%^[33]。而在本研究中由 2 个传感单元进行挠曲变形重构时, 重构的最大挠度误差最大为 6.9%, 其他误差按数目增加顺序分别为 3.66%、2.67%与 2.68%, 达到了几乎相同的重构精度, 证明了石墨烯复合材料作为自传感结构的传感部件的可行性。

4 结论

(1) 制备了石墨烯/柔性聚乳酸复合传感材料, 满足了新型传感材料轻质、柔性化等需求, 并通过多材料挤出成形 3D 打印工艺将其用于自传感复合材料结构的制造, 解决传统的制造手段对于石墨烯压阻复合材料的成形与应用产生的限制问题。

(2) 所制备的石墨烯含量为 4%以上的石墨烯复合丝材以及 3D 打印试样具有良好的电导率; 深入了解了石墨烯复合材料在不同模式的应变载荷及应变速度下的压阻行为, 掌握了石墨烯复合材料的压阻性能, 为实现变形传感功能提供可靠的依据。

(3) 通过传感单元阵列结构与变形函数插值法的设计, 并基于 LabVIEW 平台的自传感结构变形重构实时系统, 完成了复合材料自传感结构的挠曲变形重构, 实现了复合材料自传感结构变形的实时监测, 对促进石墨烯压阻传感复合材料走向传感应用的进一步发展具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] WANG Q, TIAN X, HUANG L, et al. Programmable morphing composites with embedded continuous fibers by 4D printing[J]. Materials & Design, 2018, 155: 404-413.
- [2] MA Z, CHEN X. Fiber Bragg gratings sensors for aircraft wing shape measurement: Recent applications and technical analysis[J]. Sensors, 2019, 19(1): 55.
- [3] YIN W, FU T, LIU J, et al. Structural shape sensing for variable camber wing using FBG sensors[C]// Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2009: 72921H.
- [4] GARCÍA I, ZUBIA J, DURANA G, et al. Optical fiber sensors for aircraft structural health monitoring[J]. Sensors, 2015, 15(7): 15494-15519.
- [5] SANTE R D. Fiber optic sensors for structural health

- monitoring of aircraft composite structures: Recent advances and applications[J]. *Sensors*, 2015, 15(8): 18666-18713.
- [6] GHERLONE M, CERRACCHIO P, MATTONE M. Shape sensing methods: Review and experimental comparison on a wing-shaped plate[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2018, 99: 14-26.
- [7] ZHOU J, CAI Z, ZHAO P, et al. Efficient sensor placement optimization for shape deformation sensing of antenna structures with fiber Bragg grating strain sensors[J]. *Sensors*, 2018, 18(8), 2481-2501.
- [8] LEE B H, KIM Y H, PARK K S, et al. Interferometric fiber optic sensors[J]. *Sensors*, 2012, 12(3): 2467-2486.
- [9] 杨文彬, 张丽, 刘菁伟, 等. 石墨烯复合材料的制备及应用研究进展[J]. *材料工程*, 2015, 43(3): 91-97.
- YANG Wenbin, ZHANG Li, LIU Jingwei, et al. Progress in research on preparation and application of graphene composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2015, 43(3): 91-97.
- [10] ZHENG Q B, IP W H, LIN X Y, et al. Transparent Conductive films consisting of ultralarge graphene sheets produced by langmuir-blodgett assembly[J]. *ACS Nano*, 2011, 5(7): 6039-6051.
- [11] YAO H B, GE J, WANG C F, et al. A flexible and highly pressure-sensitive graphene-polyurethane sponge based on fractured microstructure design[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(46): 6692-6698.
- [12] HARISH D, KARTIK Y, MATHILDA S, et al. Embedded piezoresistive pressure sensitive pillars from piezoresistive carbon black composites towards a soft large-strain compressive load sensor[J]. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2019, 285: 645-651.
- [13] PAN F, CHEN S, LI Y, et al. 3D graphene films enable simultaneously high sensitivity and large stretchability for strain sensors[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018: 1803221.
- [14] AGEE S K. Embedded large strain sensors with graphene-carbon black-silicone rubber composites [J]. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2018, 282: 206 -214.
- [15] TRAN Q T. An all-elastomeric transparent and stretchable temperature sensor for body-attachable wearable electronics[J]. *Adv. Mater.*, 2016, 28: 502-509.
- [16] ZHANG S, CAI L, LI W, et al. Fully printed silver - nanoparticle - based strain gauges with record high sensitivity[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2017, 3(7): 1700067.
- [17] VATANI M, LU Y, ENGBERG E D, et al. Combined 3D printing technologies and material for fabrication of tactile sensors[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2015, 16(7): 1375-1383.
- [18] KIM K, PARK J, SUH J, ET al. 3D printing of multiaxial force sensors using carbon nanotube (CNT)/thermoplastic polyurethane (TPU) filaments[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2017, 263: 493-500.
- [19] GUO S, QIU K, MENG F, et al. 3D printed stretchable tactile sensors[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(27): 1701218.
- [20] SAARI M, XIA B, COX B, et al. Fabrication and analysis of a composite 3D printed capacitive force sensor[J]. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2016, 3(3): 137-141.
- [21] AGARWALA S, GOH G L, YAP Y L, et al. Development of bendable strain sensor with embedded microchannels using 3D printing[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 263: 593-599.
- [22] SONG J H, KIM Y T, CHO S, et al. Surface - embedded stretchable electrodes by direct printing and their uses to fabricate ultrathin vibration sensors and circuits for 3D structures[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(43): 1702625.
- [23] YAO X, LUAN C, ZHANG D, et al. Evaluation of carbon fiber-embedded 3D printed structures for strengthening and structural-health monitoring[J]. *Materials & Design*, 2017, 114: 424-432.
- [24] GIANNI S, ATTILIO D N, ANNAMARIA L, et al. Additive manufacturing and characterization of a load cell with embedded strain gauges[J]. *Precision Engineering*, 2020, 62: 113-120.
- [25] GNANASEKARAN K, HEIJMANS T, van BENNEKOM S, et al. 3D printing of CNT- and graphene-based conductive polymer nanocomposites by fused deposition modeling[J]. *Applied Materials Today*, 2017, 9: 21-28.
- [26] FOO C Y, LIM H N, MAHDI M A, et al. Three-dimensional printed electrode and its novel applications in electronic devices[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 7399.
- [27] WEI X, LI D, JIANG W, et al. 3D printable graphene composite[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 11181.
- [28] ZHANG Di, CHI Baihong, et al. Fabrication of highly conductive graphene flexible circuits by 3D printing[J]. *Synthetic Metals*, 2016, 217: 79-86.
- [29] AN B, MA Y, LI W, et al. Three-dimensional multi-recognition flexible wearable sensor via graphene aerogel printing[J]. *Chemical Communications*, 2016, 52(73): 10948-10951.
- [30] MUTH J T, VOGT D M, TRUBY R L, et al. Embedded 3D printing of strain sensors within highly stretchable elastomers[J]. *Adv. Mater.*, 2014, 26(36): 6307-6312.

- [31] HUANG K, DONG S, YANG J, et, al. Three-dimensional printing of a tunable graphene- based elastomer for strain sensors with ultrahigh sensitivity[J]. Carbon, 2019, 143: 63-72.
- [32] RAJAGOPAL C, SATYAM M. Studies on electrical conductivity of insulator-conductor composites[J]. Journal of Applied Physics, 1978, 49(11): 5536-5542.
- [33] 何超. 基于光纤光栅的飞行器结构健康监测技术研究

[D]. 南京：南京航空航天大学，2015.

HE Chao. Aircraft structure health detection based on fiber bragg grating[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.

作者简介：田小永(通信作者)，男，1981 年出生，博士，教授，博士研究生导师。主要研究方向为多材料、复合材料 3D 打印(增材制造)技术及其应用。

E-mail: leoxyt@mail.xjtu.edu.cn