

引文格式: 马强, 汪英, 卢少微, 等. 嵌入碳纳米薄膜传感器的复合材料结构裂纹扩展监测[J]. 航空制造技术, 2025, 68(17): 116–121.  
MA Qiang, WANG Ying, LU Shaowei, et al. Crack propagation monitoring of composite structures embedded with buckypaper sensors[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(17): 116–121.

## 嵌入碳纳米薄膜传感器的复合材料结构裂纹扩展监测\*

马强<sup>1</sup>, 汪英<sup>2</sup>, 卢少微<sup>3</sup>, 刘新华<sup>2</sup>, 李鹏云<sup>1</sup>

(1. 沈阳航空航天大学民用航空学院, 沈阳 110136;

2. 沈阳航空航天大学航空宇航学院, 沈阳 110136;

3. 沈阳航空航天大学材料科学与工程学院, 沈阳 110136)

[摘要] 对嵌入碳纳米薄膜传感器的复合材料进行静态拉伸试验, 以验证碳纳米薄膜传感器具有监测复合材料裂纹扩展的能力。以玻璃纤维复合材料为例, 研究了裂纹产生各个阶段的碳纳米薄膜传感器的电阻响应特征。通过电阻变化率来预测裂纹产生的阶段, 从而实现对复合材料裂纹的监测。将复合材料试件分别拉伸至裂纹的起始、扩展及试件断裂阶段, 观察碳纳米薄膜传感器电阻变化率的变化。传感器电阻变化率随裂纹发展阶段的不同而呈现不同的变化趋势。通过截面金相显微试验获得传感器附近的截面图像, 直观证明了碳纳米薄膜传感器具有监测复合材料裂纹扩展的能力。

关键词: 静态拉伸; 碳纳米薄膜传感器; 裂纹监测; 金相显微试验; 复合材料健康监测

中图分类号: V214.8; TP212

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.17.116

### Crack Propagation Monitoring of Composite Structures Embedded With Buckypaper Sensors

MA Qiang<sup>1</sup>, WANG Ying<sup>2</sup>, LU Shaowei<sup>3</sup>, LIU Xinhua<sup>2</sup>, LI Pengyun<sup>1</sup>

(1. College of Civil Aviation, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

3. College of Materials Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

[ABSTRACT] The static tensile test was conducted on composite materials embedded with buckypaper sensor to verify the ability of buckypaper sensors to monitor the crack propagation in composite materials. Taking glass fiber composites as an example, the resistance response of buckypaper sensors at various stages of crack generation was studied. The stage of crack generation is predicted by the change rate of resistance, so as to realize the monitoring of composite crack. The composite specimens were stretched to the crack initiation, propagation and fracture stages, respectively. Observe the change of the resistance change rate of the buckypaper sensor. The change rate of sensor resistance shows different trends with different stages of crack development. The cross-section image near the sensor is obtained by cross-section metallographic microscopic test. It is proved that the buckypaper sensors has the ability to monitor the crack propagation of composite materials.

**Keywords:** Static tensile; Buckypaper sensors; Crack monitoring; Metallographic microscopic test; Composite material health monitoring

\* 基金项目: 航空科学基金(20220003054001); 教育部春晖计划国际合作项目(HZKY20220428); 沈阳市关键技术攻关计划(23-407-3-39)。

复合材料的广泛应用源于其独特的性能组合,包括高比强度、轻量化、耐腐蚀性、优异的热稳定性及特定的电磁性能等<sup>[1-2]</sup>。这些特性使得复合材料成为许多行业中替代传统材料的理想选择,推动了其在航空航天、汽车、建筑、能源等领域的广泛应用<sup>[3-4]</sup>。然而,复合材料在使用过程中经常会出现损伤,且多数损伤是不可逆的。具体损伤形式有很多,包括裂纹<sup>[5]</sup>、疲劳损伤<sup>[6]</sup>、界面失效<sup>[7]</sup>、凹陷和划痕等。其中,裂纹是最常见的损伤类型,其产生原因包括应力集中、制造缺陷、环境因素、疲劳载荷等多种可能因素<sup>[8]</sup>。复合材料出现裂纹可能会导致结构强度减弱,从而引发更严重的安全隐患,尤其是在高强度和高可靠性的应用场景下。目前针对复合材料裂纹的实时在线监测技术研究的较少,因此,对复合材料裂纹进行有效的监测对于保证结构的安全可靠至关重要。

结构健康检测技术(SHM)是指利用各种传感器和检测方法来监测和评估结构状态和健康状况的技术<sup>[9]</sup>。有效的健康监测有助于预测和评估复合材料结构的寿命和性能,常用的监测方法包括非破坏性检测和传感器监测等。陈西茜<sup>[10]</sup>搭建了一套基于Lamb波的起重装备疲劳裂纹监测系统,并对疲劳缺陷进行了监测。李鲲等<sup>[11]</sup>提出了一种基于压电陶瓷传感器(PZT)信号识别的裂纹检测新方法,可以方便地确定裂纹位置和周向裂纹长度范围。He等<sup>[12]</sup>提出了一种基于有源导波和光纤应变监测的多源非均质传感器监测策略,用于CFRP复合材料层合板孔边裂纹的定量诊断。王田天等<sup>[13]</sup>结合扩展有限元和支撑向量回归方法提出一种新的孔边裂纹监测方法,实现对裂纹长度的实时监测。

然而,利用有限元法和无损检测方法存在一定缺陷。如材料在使用过程中情况较为复杂,有限元模拟不能完全与实际情况一致。无损检测需要的设备较复杂,有时可能需要拆卸试件进行单独的检测等。有些传感器体积较大,嵌入复合材料内部会影响复合材料的各项性能<sup>[14]</sup>。传感器是健康监测的重要手段,鉴于以上传感器的不足,本文提出一种用于裂纹监测的新型传感器。通过真空抽滤技术制备出碳纳米薄膜传感器,并将其与复合材料层压板共同固化,使其与复合材料试件变化具有良好的同步性。通过静态拉伸试验,对裂纹的起始、扩展及试件断裂阶段的传感器电阻变化率进行观测,最后借助金相显微试验验证裂纹检测的准确性。

## 1 原理

经真空抽滤后的碳纳米薄膜样品和SEM图像如图1所示。其中,碳纳米管(CNTs)的排列随机且均匀,可认为其具有各向同性,且许多CNTs之间相互连接,或

存在间隙。这些相互交叉的CNTs就组成了导电网络<sup>[15]</sup>。

CNTs相互组成的导电网络中电阻的形成主要有两种方式,即本征电阻 $R_i$ 和隧间电阻 $R_t$ 。本征电阻为CNTs自身的电阻;隧间电阻是指由于CNTs之间存在较小的间隙,电子通过隧穿效应越过间隙而产生的电阻,具体的电阻形式如图2(a)所示。故碳纳米薄膜传感器的电阻计算公式为

$$R_c = R_i + R_t \quad (1)$$

电阻变化率 $(\Delta R/R_0)$ 定义为

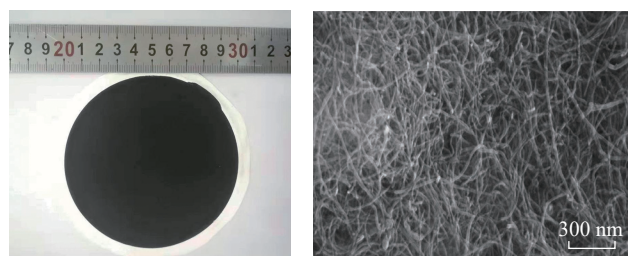
$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R - R_0}{R_0} \quad (2)$$

式中, $R$ 为碳纳米薄膜传感器在拉伸过程中的实际电阻; $R_0$ 为碳纳米薄膜传感器在拉伸之前的初始电阻; $\Delta R$ 为电阻的变化,即实际电阻减去初始电阻。由于CNTs自身的本征电阻很小,因此相比于隧间电阻可以忽略不计。即碳纳米薄膜传感器的电阻主要由CNTs之间的隧间电阻决定。在拉伸过程中,如图2(b)所示,CNTs之间有的连接被破坏,由本征电阻变为隧间电阻,且原本的CNTs之间的距离被拉大,使隧间电阻变大。将CNTs嵌入复合材料试件中,电阻可以随着CNTs之间的纳米级变化而变化。因此碳纳米薄膜传感器非常灵敏,能够满足试验的要求。

## 2 碳纳米薄膜传感器的研制及性能分析

### 2.1 碳纳米薄膜传感器的研制

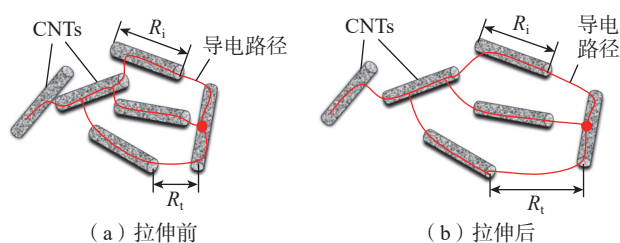
本研究所使用的多壁碳纳米管(MWCNTs)由中



(a) 原始宏观图像 (b) 扫描电镜图像

图1 碳纳米薄膜宏观和微观图像

Fig.1 Macro and micro images of buckypaper



(a) 拉伸前 (b) 拉伸后

图2 碳纳米薄膜传感器拉伸前后的导电原理图

Fig.2 Conductive schematic diagram of buckypaper sensor before and after stretching

国科学院成都化学有限公司生产,纯度高于95%、长度10~30 nm、直径5~12 nm。碳纳米薄膜传感器的制作流程如图3所示,具体步骤为:(1)将600 mg MWCNTs与5 mL Triton X-100充分混合并研磨后,溶于200 mL去离子水溶液中;(2)将混合溶液在转速200 r/min的搅拌机中搅拌2 h,在6000 r/min的离心机中离心30 min,分散完成后将溶液喷射到0.45 mm多孔直径的过滤膜上,并通过喷雾真空抽滤装置抽滤;(3)将带有滤纸的MWCNTs薄膜放入烘箱中,干燥约8 h;(4)利用导电银浆将碳纳米薄膜连接到柔性电路上;(5)最终得到厚度45~55 μm、直径1 cm的碳纳米薄膜传感器。

### 2.2 传感器的性能研究

材料孔径分布是展示材料微观形貌的重要手段之一,可以用于材料的性能评估,判断材料的适用性和性能。本次测定通过氮气吸脱附法,并结合Barret-Joyner-Halenda (BJH)模型对传感器孔径进行计算,最终计算出碳纳米薄膜传感器的孔径大小主要为30~40 nm。

电导率描述了材料对电场的响应能力,是材料导电性能的重要参数。本研究采用四探针电阻测量仪(RTS-8,广州四探针科技)进行电导率测试,相关参数设置为探针间距0.5 mm、测试电流1mA、修正因子1.59。通过计算得出碳纳米薄膜传感器的电导率σ为(3300 ± 20) S/m。

传感器的灵敏度是指传感器对被测量信号变化的响应程度,通常定义为传感器电阻变化率与应变的比值。通过静态拉伸试验得到应变阶段的应变和电阻变化率曲线,以断裂阶段的2号传感器为例进行计算。具体结果如表1所示。

在静态拉伸试验中,对传感器依次施加0%~10%、0%~20%、0%~30%的应变循环,得到图4所示的电阻变化率曲线。在连续的加载卸载试验中,传感器每个循环的ΔR/R<sub>0</sub>曲线趋势基本相同,说明传感器具有良好的

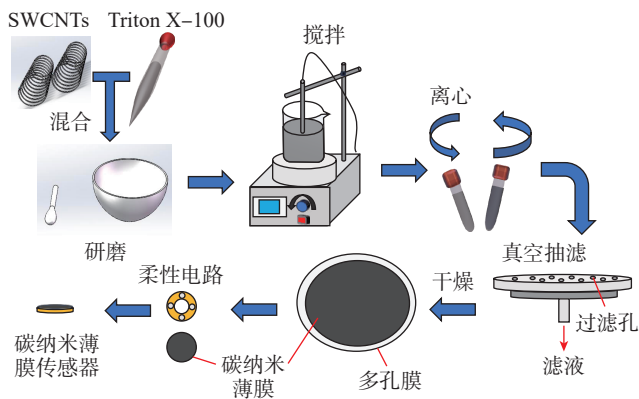


图3 碳纳米薄膜传感器的制作流程

Fig.3 Production process of buckypaper sensor

表1 碳纳米薄膜传感器的灵敏度及拟合度

Table 1 Sensitivity and fitting degree of buckypaper sensor

应变区域	灵敏度S	拟合度
0%~19.2%	11.16	0.993
19.2%~37%	14.77	0.991
37%~45.8%	31.72	0.985

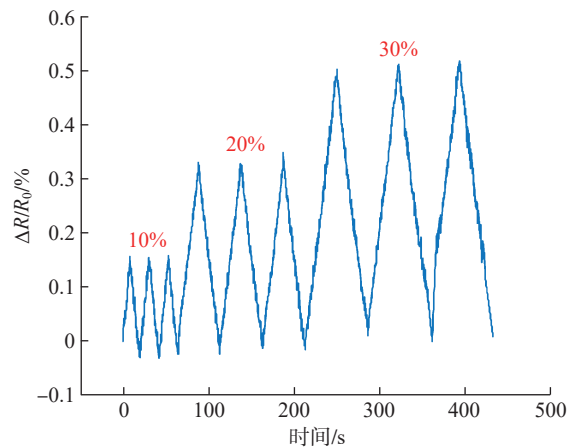


图4 在0%~10%、0%~20%、0%~30%的应变循环下碳纳米薄膜传感器的电阻变化率

Fig.4 Resistance change rate of buckypaper sensor under strain cycle of 0%~10%, 0%~20%, 0%~30%

稳定性。

## 3 试验

### 3.1 试验条件及试验方案

拉伸试验在GOTECH AI-7000-LA-20型伺服控制拉伸试验机(深圳市祥敏仪器有限公司)上进行。如图5所示,传感器编号从上至下分别为1、2、3。通过机器十字头运动以1 mm/min的速度向样品施加位移。在位移加载过程中,碳纳米薄膜传感器的电阻信号采用Fluke Hydra(Fluke公司)收集。在静态平衡状态下,试件开始进行拉伸测试,3个试件分别拉伸至裂纹的起始、扩展及试件断裂,然后将试件的截面展开并抛光,采用金相显微镜DM5000X(重庆澳浦光电技术有限公司)观察试件截面的微观形态。

### 3.2 嵌入碳纳米薄膜传感器的复合材料层压板制作

本研究采用单向玻璃纤维预浸料6501/G15000/33%(威海光威复合材料有限公司),尺寸为250 mm × 30 mm,层数为10层。将碳纳米薄膜传感器嵌入到第5层和第6层之间,共嵌入3个碳纳米薄膜传感器,编号分别为1、2、3。同样,采用单项玻璃纤维预浸料制作用于拉伸的垫片,尺寸为50 mm × 30 mm,具体传感器位置及试件

的尺寸如图6所示。进行模具脱模处理时,将预浸料密封在真空袋系统中,固化过程采用制造商推荐的工艺参数,在平板硫化机中将温度从室温加热至120℃保持2h,压力为2MPa。制备黏结剂时,将环氧树脂与固化剂咪唑按质量比50:1的比例混合均匀,通过黏结剂将垫片与复合材料板连接,黏结剂固化工艺与复合材料板制作方法一致。

### 3.3 复合材料结构裂纹扩展监测

碳纳米薄膜传感器的电阻由两部分组成,其中隧间电阻占主要部分。在复合材料拉伸过程中,碳纳米薄膜传感器的电阻变化反映了复合材料损伤的演化程度,为评估裂纹的发展提供了条件。复合材料裂纹的产生主要分为3个阶段,分别为裂纹的起始、扩展及复合材料试件的断裂。

#### 3.3.1 裂纹起始阶段监测

图7(a)所示为玻璃纤维复合材料在静态拉伸试验中拉伸至裂纹起始时应变与应力和传感器 $\Delta R/R_0$ 的关系。1号传感器在应变为 $2.376 \times 10^{-3}$ 之后存在波动,可能是由于试件振动产生的,但总体趋势正确。在应变为 $5.176 \times 10^{-3}$ 时,2号碳纳米薄膜传感器 $\Delta R/R_0$ 出现突变,从3.394%增大至10.294%,应力从255.14MPa减小至499.53573MPa。说明此时纤维之间的基体断裂,导致碳纳米薄膜

小至230MPa。这是由于碳纳米薄膜传感器附近出现裂纹,部分应力被释放,CNTs之间距离被拉大,隧间电阻增大,使传感器 $\Delta R/R_0$ 增大。图7(b)为试件在2号传感器附近的截面金相显微图像,可以清晰地看到试件此时存在裂纹,证明碳纳米薄膜传感器可以准确地监测出裂纹起始阶段。图7(c)所示为裂纹起始时的试件图片。

#### 3.3.2 裂纹扩展阶段监测

图8(a)所示为玻璃纤维复合材料在静态拉伸试验中拉伸至裂纹扩展阶段时应变与应力和传感器 $\Delta R/R_0$ 的关系。在阶段I,当应变变为 $3.596 \times 10^{-3}$ 时,2号碳纳米薄膜传感器 $\Delta R/R_0$ 出现突变,从12.298%增加至30.149%,同时应力从523.44838MPa减小至499.53573MPa。说明此时纤维之间的基体断裂,导致碳纳米薄膜

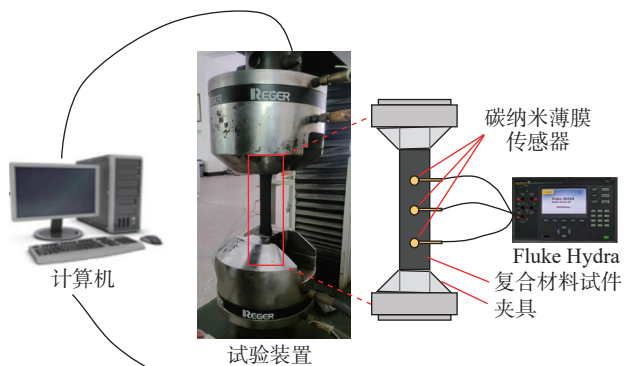


图5 试件拉伸示意图

Fig.5 Schematic diagram of specimen stretching

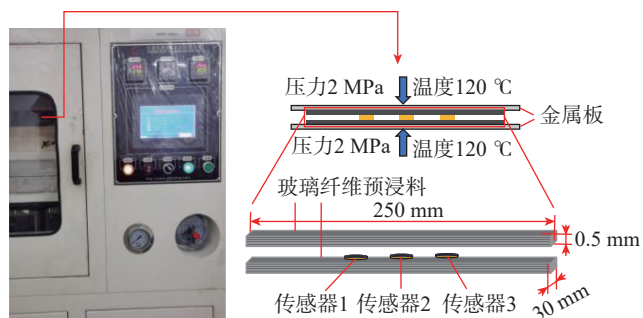
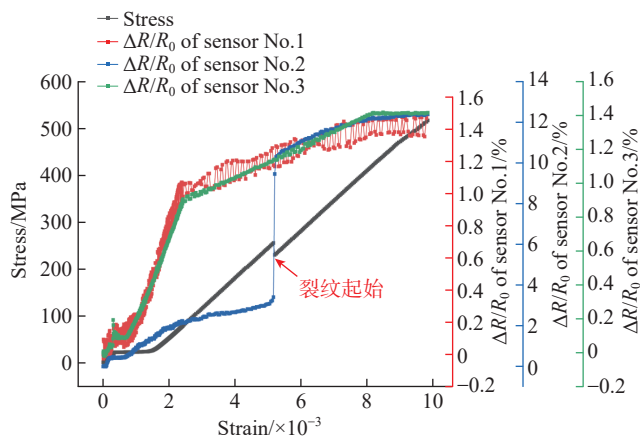
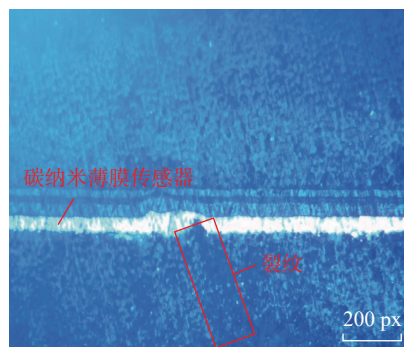


图6 试件的尺寸及制造工艺

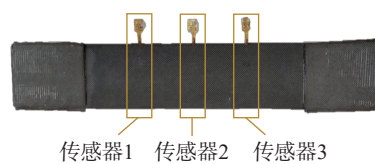
Fig.6 Size and manufacturing process of specimen



(a) 应力、 $\Delta R/R_0$ 随应变的变化曲线



(b) 试件在2号传感器附近截面金相显微图片



(c) 裂纹起始时的试件图片

图7 裂纹起始阶段传感器电阻变化率图像和试件图片

Fig.7 Image of sensor resistance change rate and specimen image at crack initiation stage

传感器 CNTs 之间距离被拉大。原本的导电路径被破坏，导致隧间电阻增大，同时部分应力被释放。这些现象均说明在 2 号传感器附近产生了裂纹。

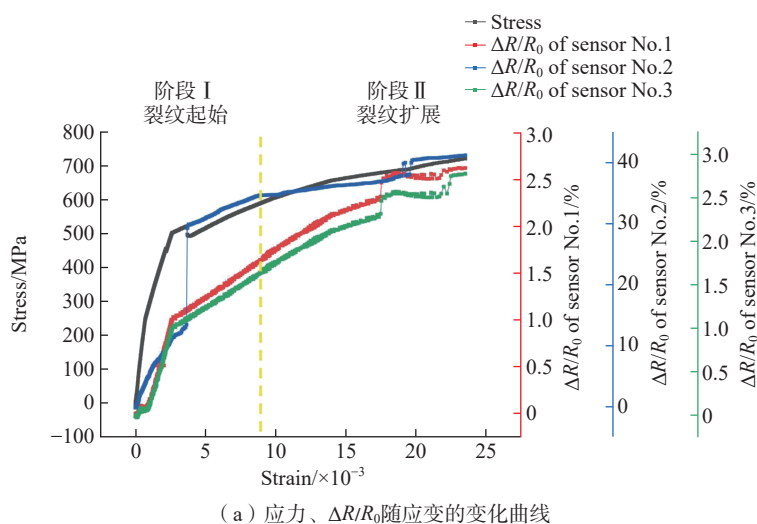
在阶段 II，当应变为  $17.504 \times 10^{-3}$  时，1 号传感器和 3 号传感器  $\Delta R/R_0$  同时存在突变，1 号传感器  $\Delta R/R_0$  从 2.319% 增加至 2.568%。3 号传感器  $\Delta R/R_0$  从 2.319% 增加至 2.468%。结果表明，此时复合材料的基体断裂，1 号和 3 号传感器附近出现裂纹，导致 CNTs 之间的距离被拉大，隧间电阻增加。

在随后的阶段，3 个传感器  $\Delta R/R_0$  都存在小的突变，说明基体持续出现小的断裂，裂纹正在扩展。图 8 (b) 为试件在 2 号传感器附近的截面金相显微图像。可以

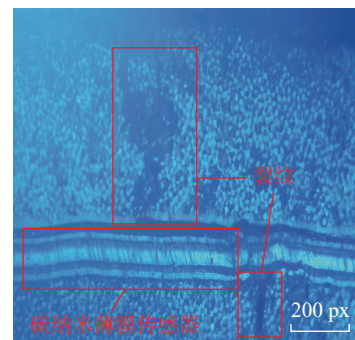
明显看出，碳纳米薄膜传感器的上下表面都存在着明显的裂纹，证明碳纳米薄膜传感器可以准确监测裂纹扩展阶段。图 8 (c) 所示为裂纹扩展阶段的试件图片。

### 3.3.3 试件断裂阶段监测

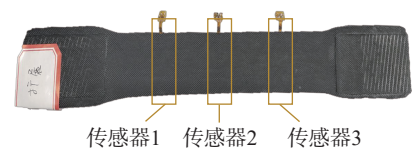
图 9 (a) 所示为玻璃纤维复合材料试件在静态拉伸试验中拉伸至断裂时应变与应力和传感器  $\Delta R/R_0$  的关系。由图 9 (a) 可知，前半部分与裂纹的起始及扩展相似。在阶段 I，应变为  $5.416 \times 10^{-3}$  时，2 号传感器  $\Delta R/R_0$  从 6.842% 增加至 19.658%，同时应力从 315.52074 MPa 减少至 303.95157 MPa。说明 2 号传感器附近复合材料的基体断裂，部分应力被释放，导致 CNTs 之间距离增大，隧间电阻增大，这些现象证明了复合材料试件在 2 号传



(a) 应力、 $\Delta R/R_0$  随应变的变化曲线



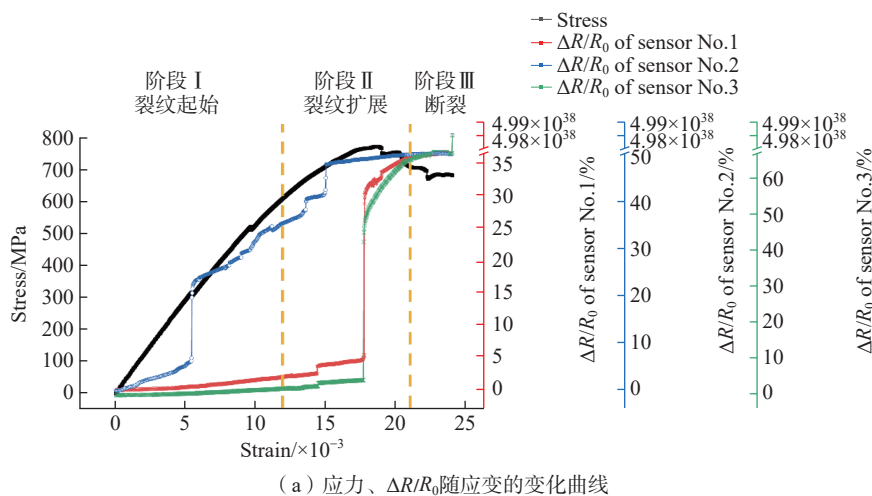
(b) 试件在 2 号传感器附近截面金相显微图片



(c) 裂纹扩展阶段的试件图片

图 8 裂纹扩展阶段传感器电阻变化率图像和试件图片

Fig.8 Image of sensor resistance change rate and specimen image at crack growth stage



(a) 应力、 $\Delta R/R_0$  随应变的变化曲线



(b) 断裂时的试件图片

图 9 断裂阶段传感器电阻变化率图像和试件图片

Fig.9 Images of sensor resistance change rate and specimen at fracture stage

感器附近产生了裂纹。当应变为  $14.372 \times 10^{-3}$  时,1 号和 3 号传感器  $\Delta R/R_0$  几乎同时存在小的突变,1 号传感器  $\Delta R/R_0$  从 2.548% 增加至 3.648%,3 号传感器  $\Delta R/R_0$  从 2.468% 增加至 3.316%,说明在 1 号和 3 号传感器附近出现复合材料基体断裂,产生了裂纹。随后  $\Delta R/R_0$  持续上升,当应变为  $14.984 \times 10^{-3}$  时,2 号传感器  $\Delta R/R_0$  从 44.91% 增加至 47.751%;当应变为  $17.672 \times 10^{-3}$  时,1 号传感器  $\Delta R/R_0$  从 5.488% 增加至 28.706%,3 号传感器  $\Delta R/R_0$  从 4.147% 增加至 42.387%。以上情况说明在 1 号和 3 号传感器附近基体产生较大的裂纹,导致传感器电阻急剧增加。

在阶段 II 变为阶段 III 时,即在应变为  $19.008 \times 10^{-3}$  时,应力达到最大值 773.49879 MPa,之后应力开始减小,证明此时进入即将断裂阶段。当应变为  $24.02 \times 10^{-3}$  时,传感器  $\Delta R/R_0$  突然急剧增加,变为  $4.98 \times 10^{38}$ ,但此时试件还没有断裂,在 2 s 之后试件断裂。说明传感器中 CNTs 之间距离变为无穷大,此时传感器在复合材料内部已经破坏,但表面还未破坏,传感器可以准确地预测接下来的试件断裂。图 9 (b) 为试件断裂时的图片。在即将断裂前,传感器能出现明显的波动,说明碳纳米薄膜传感器能很好地预测复合材料失效。

## 4 结论

由于复合材料在服役过程中经常会产生裂纹,影响其结构的安全性和使用寿命,本文提出了一种基于嵌入碳纳米薄膜传感器的复合材料裂纹监测方法,得出以下结论。

(1) 通过真空抽滤的方法制备了碳纳米薄膜传感器。碳纳米薄膜传感器的电阻变化主要由隧间电阻  $R_t$  决定,传感器通过内部 CNTs 的微观位置变化使得隧间电阻改变,从而可以反映出材料的损伤状态。

(2) 分别将试件拉伸至裂纹的起始、扩展及断裂阶段,传感器的电阻变化与裂纹发展的阶段具有良好的同步性。在裂纹起始、扩展及试件断裂时,都伴随着传感器电阻变化率的突变。

(3) 通过对复合材料裂纹的监测,可以帮助复合材料制品及时发现裂纹损伤,并提前预警,从而避免潜在的事故和损失,同时延长复合材料的使用寿命。

## 参考文献

- [1] HUANG X H, SU S Y, XU Z D, et al. Advanced composite materials for structure strengthening and resilience improvement[J]. Buildings, 2023, 13(10): 2406.
- [2] LI L, CUI Y J, ZHANG Z X, et al. Preparation of graphene/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> composite varnish with excellent corrosion-resistant and electromagnetic shielding properties[J]. Ceramics International, 2020, 46(14): 22876–22882.

[3] TIWARY A, KUMAR R, CHOCHAN J S. A review on characteristics of composite and advanced materials used for aerospace applications[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 51: 865–870.

[4] KURKIN E I, SADYKOVA V O. Application of short fiber reinforced composite materials multilevel model for design of ultra-light aerospace structures[J]. Procedia Engineering, 2017, 185: 182–189.

[5] MORBITZER P C, SCHUKRAFT J, LOHR C, et al. In-situ SEM investigation on the damage behavior of an interpenetrating metal ceramic composite[J]. Composite Structures, 2023, 321: 117278.

[6] QUAN S L, ZHANG Y H, LIN P S. Fatigue damage quantitative evaluation of carbon fiber composites at different stress ratios based on nonlinear ultrasonic[J]. Results in Physics, 2023, 51: 106695.

[7] GODA I, PADAYODI E, RAOELISON R N. Recent advances in modeling and simulation approaches for fiber/matrix interface failure in FRP composites[J/OL]. International Journal of Mechanical Sciences, [2023–07–29]. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecs.2023.108648>.

[8] ALONSO L, BARBARÁN J, CHEN J, et al. Middleware and communication technologies for structural health monitoring of critical infrastructures: A survey[J]. Computer Standards & Interfaces, 2018, 56: 83–100.

[9] HOLDSWORTH S. Creep-fatigue crack growth in power plant steels[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2016, 69(2): 353–358.

[10] 陈西茜. 基于 Lamb 波的起重装备疲劳裂纹监测技术与实验研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2017.

CHEN Xixi. Fatigue crack detection technology and experimental research of the hoisting equipment based on lamb wave[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2017.

[11] 李鲲, 肖逸飞, 徐阳, 等. 基于压电陶瓷传感器的管道裂纹敲击定位法[J]. 石油机械, 2020, 48(6): 118–125.

LI Kun, XIAO Yifei, XU Yang, et al. Pipeline crack location using knocking locating method based on piezoceramic transducer[J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(6): 118–125.

[12] HE M Y, LIANG Z H, WANG Y S, et al. Quantitative diagnosis of fatigue hole-edge crack in composite laminates using guided wave and optical fiber feature fusion[J]. Measurement, 2024, 225: 114052.

[13] 王田天, 王钦民, 阳劲松, 等. 基于光纤布拉格光栅的孔边疲劳裂纹监测研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(5): 1614–1625.

WANG Tiantian, WANG Qinmin, YANG Jinsong, et al. Research on hole-edge crack quantification based on fiber Bragg grating[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(5): 1614–1625.

[14] 朱路佳. 埋入式光纤智能复合材料传感与力学性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.

ZHU Lujia. Research on sensing and mechanical properties of embedded optical fiber smart composite materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.

[15] BULDUM A, LU J P. Contact resistance between carbon nanotubes[J]. Physical Review B, 2001, 63(16): 161403.

通信作者: 卢少微, 教授, 博士, 研究方向为多功能纳米复合材料。

(责编 阳光)