

引文格式: 王晓强, 张旭, 陈兴凌, 等. 基于新型 PES/TPU/PVP/CNT 薄膜传感器的复合材料层合板固化与损伤监测[J]. 航空制造技术, 2026, 69(19): 26020162.

WANG Xiaoqiang, ZHANG Xu, CHEN Xingling, et al. Cure and damage monitoring of composite laminates using novel PES/TPU/PVP/CNT membrane sensors[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(19): 26020162.

基于新型 PES/TPU/PVP/CNT 薄膜传感器的复合材料层合板固化与损伤监测

王晓强¹, 张旭¹, 陈兴凌¹, 刘芳飞², 马旭霞¹, 熊宏³

(1. 沈阳航空航天大学航空宇航学院, 沈阳 110136;

2. 沈阳航空航天大学材料科学与工程学院, 沈阳 110136;

3. 中国科学院深海科学与工程研究所, 三亚 572000)

[摘要] 复合材料层合板凭借优异力学性能被广泛应用于航空领域,但其损伤演化迅速、初期损伤难以监测等问题限制了复合材料层合板的进一步应用。本文采用相转变-真空自组装备制备刚柔并济的仿生薄膜传感器,实现了其在玻璃纤维层合板中的低损伤嵌入并成功监测了复合材料固化及弯曲损伤过程。薄膜传感器电导率达 7680 S/cm,在可恢复范围内灵敏度 GF 值为 4.01,极限应变 4.24%,强度达 13.58 MPa。在层合板固化监测中,传感器可清晰识别升温、保温和冷却 3 个阶段。经 DMA 验证,通过传感器信号突变可得出树脂凝胶点温度,最高信号变化率达 35%。在层合板的落锤冲击与循环三点弯曲试验中,该传感器均表现出高度线性的响应特性。嵌入中性面的传感器能准确捕捉层合板的损伤与最终失效前的阶跃信号。该传感器实现了复合材料结构从制备到失效的全过程监测,为航空复合结构健康监测提供了可行途径。

关键词: 结构健康监测;碳纳米管传感器;智能复合材料;弯曲试验;固化监测

中图分类号: V261.97;V214.8

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.26020162



王晓强

教授,博士,研究方向为复合材料结构健康监测。

复合材料层合板凭借高比强度、轻量化和优化自由度高的特点被认为是航空航天领域的未来材料,但其堆叠结构使得损伤不易从外部察觉且演化较快,因此对其结构进行健康监测尤为重要^[1-4]。现行的健康监测手段多通过外部粘接或固定时间段监测,Marrazzo 等^[5]开发了纯模拟光纤安全监控系统,经历 5 次加热和冷却后监测结果依然准确,体现了该方案在恶劣环境中的安全监测能力。Liang 等^[6]采用纤维布拉格光栅 (FBG) 测量复合燃料罐在室温和低温加压试验下的应变和温度。Xu

等^[7]提出了一种用于超音速飞机实时状态监测的掺杂 Mn 的 0.67BiFeO₃-0.33BaTiO₃ 陶瓷传感器,在高温短磁场环境下,展现出了比其他同类传感器更优的结构监测能力。基于超声导波的无损监测是目前较为前沿的研究方向,Zhang 等^[8]使用激光超声导波对 CFRP 层合板的剥离损伤成像框架进行了优化,监测覆盖率最高达 85.11%。然而,以上方式都存在不可忽略的缺陷,外部缠绕或粘贴的传感器受环境影响大且脱粘风险高,内部嵌入的光纤光栅或压电陶瓷传感器虽然避免了脱粘和外部环境的

收稿日期: 2026-05-11; 退修日期: 2026-06-08; 录用日期: 2026-07-27

基金项目: 辽宁省“兴辽英才计划”(XLYC2203026); 海南省科技人创新项目(KJRC2023D37)

影响,但受极化方向限制易损坏,且应用于结构健康监测时多伴随着异质结构的引入与局部厚度变化引来的应力集中、分层缺陷。例如 Yang 等^[9]对嵌入光纤光栅的 GFRP 层合板进行了数值模拟,发现在光纤嵌入的富树脂区内始终观察到空隙,这降低了局部应变向光纤的传递效率,并促进了损伤的局部化;而非接触式的激光导波可能会造成表面烧蚀,且难以用于埋入式或隐蔽区域监测,无法实现实时监测。

为了避免该问题,研究者们采用了无线传感和在层合板介质中分散传感填料的方式。Rajendran^[10]通过 MWCNT/r-GO/PEDOT 制备新型贴片天线,实现了对复合材料悬臂梁的多向应变传感。Wang^[11]和 Shi^[12]等分别将石墨烯纳米片和碳纳米管分散在环氧树脂中,制备了具有传感层的 GFRP 层合板,灵敏度值(GF)高达 26 和 34。然而,无线传感器易受电磁干扰,在航空、特种装备等严苛环境中服役面临极大挑战,由于层合板多采用环氧树脂等固化后刚度较大的介质,导电材料对介质进行了进一步增强^[13-14],使得传感器的柔韧性较差,且导电填料的单分散工艺难度较大,大规模工业化应用仍具有较大研究潜力^[15]。

柔性薄膜传感器能够实现轻量化与结构功能一体化,并具备优异的形态适配性和抗疲劳性能。采用石墨烯、聚苯硫醚、PEEK 等特种材料制备的传感器基底还能对层合板起到增韧作用。Wang 等^[16]通过构建高稳定性的 MXene/CNT/CuNPs 结构,实现了对复合材料冲击信号的高灵敏度监测。Liu 等^[17]调配了超低浓度二维纳米材料墨水,并使用 3D 打印将其制成分层多孔结构的压力传感器,实现了功能与结构的可控调节。但目前膜基传感器的力学性能与健康监测能力总呈现此消彼长的现象。高刚度传感器往往具有优秀的传感

系数,适于层间监测,但监测阈值较低,在机翼风摆等大变形场景下监测能力有限;高韧性传感器提供了较高的监测阈值和 GF 值,但嵌入层合板时常常由于树脂冲刷而破坏本身的导电网络。

使用相转变法制备的变孔隙非对称结构,能够通过腔体存储导电层的方式大幅减弱该现象^[18]。本研究通过在聚醚砜/热塑性聚氨酯/聚乙烯吡咯烷酮(PES/TPU/PVP)仿生皮肤上真空自组装碳纳米管(CNT),制备了新型 PES/TPU/PVP/CNT 柔性传感器,该传感器基底通过空气-水相转变形成了类似人体皮肤的脂肪叶-神经末梢-汗腺的结构,下部为海绵状多孔隙,上部排列指状腔,CNT 嵌入其中形成了紧密的传感层。该传感器具有更宽的传感范围与更高的灵敏度,PVP 作为增容剂与制孔剂,在铸膜液中增加体系稳定性与相转变时的结构控制^[19];PES 搭建了微结构骨架,TPU 包覆骨架,发挥“柔性铰链”作用,提高膜的韧性与传感范围。通过对该薄膜传感器进行拉伸测试,获得其灵敏度与拉伸强度,然后将传感器嵌入层合板并进行固化,实现层合板的固化过程监测。对固化后的

层合板进行多次落锤冲击、循环弯曲及弯曲破坏试验,以验证传感器在结构服役与破坏情况下的监测性能。本文所制备的传感器旨在兼顾刚度与柔韧性,实现二者的协同优化,为嵌入式结构健康监测提供了一种可行途径。

1 试验及方法

1.1 试验材料

传感器制作使用的多壁碳纳米管(MWCNT)从中国科学院获得。在薄膜制备过程中,用于制备分散体的聚乙烯吡咯烷酮(PVP-K30,分析纯)和 1-甲基-2-吡咯烷酮(NMP,分析纯)均由国药化学试剂有限公司提供,聚醚砜(PES, Ultrason E6020P)和热塑性聚氨酯(TPU, Elatollan 1185A)均购自巴斯夫公司。层合板采用威海光威复合材料有限公司提供的玻璃纤维预浸料(G15000)制备,具体材料参数见表 1。

1.2 传感器制备

如图 1 所示,称取 11 g PES 加入 82 g NMP 中,在 60 °C 条件下以磁力搅拌 3 h;随后称取 4 g PVP,分少量多次加入溶液中,待 PVP 完全溶解后继续搅拌 30 min;最后缓慢加入 3 g

表 1 材料参数

Table 1 Parameters of materials

材料	参数	规格
玻璃纤维预浸料	纤维类型	ER468G
	树脂类型	6509
	树脂含量	33% ± 3%
	层厚/mm	0.125
多壁碳纳米管	管径/nm	3~15
	管长/ μm	15~30
	比表面积/(m^2/g)	250~270
聚乙烯吡咯烷酮	K 值	27.0~32.4
	pH 值	3.0~5.0
1-甲基-2-吡咯烷酮	分子量	99.13
	相对密度 d_4^{20}	1.032

TPU,待其完全溶解后关闭加热,继续搅拌1 h。将溶解后的铸膜液静置12 h,随后使用涂膜器在玻璃板上均匀涂膜,在空气中静置15~20 s,使液体膜表层溶剂挥发以诱导微相分离(气相诱导相分离);将玻璃板快速平行浸入水中,进行非溶剂诱导相分离;待多孔膜从玻璃板上剥离20 min后,转移至乙醇溶液中保存,以去除残留NMP。

使用水性多壁碳纳米管粉末制备传感浆料,表面活性剂采用曲拉通X-100。称取400 mg碳纳米管粉末与5 mL表面活性剂进行充分研磨,将研磨后的固体浸泡在800 mL去离子水中20 min,随后将混合溶液倒入搅拌器中,以300 r/min的转速搅拌3 h。搅拌后的混合溶液倒入离

心瓶,以6000 r/min的速度离心处理30 min,获得MWCNT分散液。将制备好的多孔基底滤膜置于真空抽滤器,倒入分散液进行真空抽滤,使导电填料与聚合物基质实现自组装。自组装完成后冷冻干燥,得到直径为10 cm的复合薄膜。制备好的复合薄膜可任意裁剪,两端使用导电银浆固定,并通过导电铜丝连接,由此获得复合传感器试件。用于对比试验的巴基纸按现有文献的方式制得^[20]。

1.3 嵌入传感器的GFRP层合板制备

玻璃纤维增强塑料(GFRP)层合板采用模压工艺制造。用于三点弯曲和低速冲击试验的GFRP层合板预浸料按[0/90]_{8s}顺序铺层。三点弯曲测

试的试件被裁切为150 mm×15 mm的矩形,将传感器夹在板件第2~3层、第15~16层和第30~31层;落锤冲击测试的试件尺寸为150 mm×100 mm,传感器被夹在第15~16层之间。所有试件的传感器两侧各附有一根导电铜丝用于机电测量。将传感器嵌入预浸料后放入模具,嵌入式传感器自上而下编号为S1、S2、S3,其中S1位于第2~3层之间,S2位于第15~16层之间,S3位于第30~31层之间。在模具的空隙处粘贴热电偶K,以监测层合板制造过程中的实际温度情况。首先在室温下加压,等待阻值稳定后进行升温固化,模压成型的固化压力为2 MPa,固化温度为130 °C,固化时间为2 h,随后保压冷却至40 °C以消除残余应力,避免试件变形。试件取出后用砂

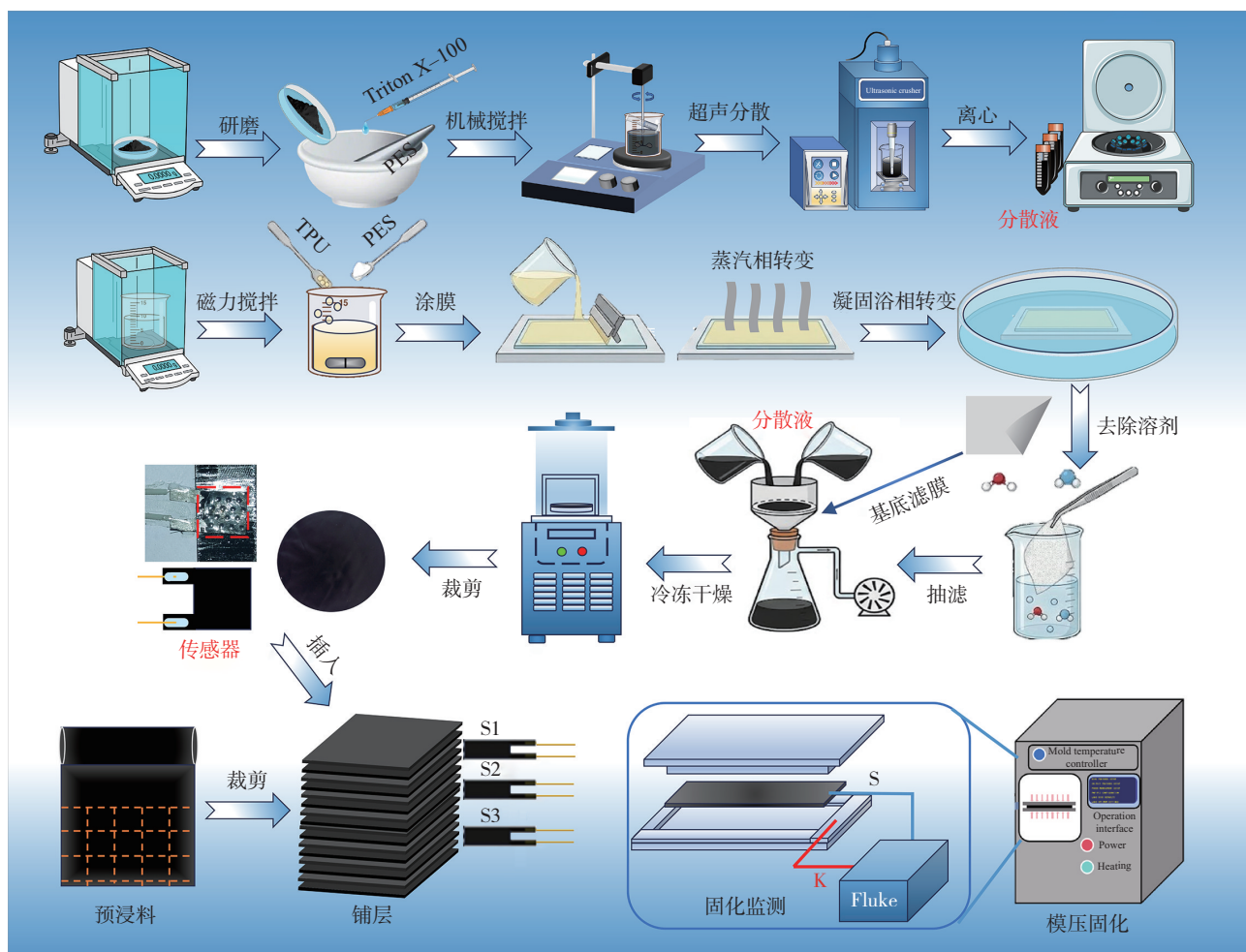


图1 传感器的制备流程

Fig.1 Preparation process of sensors

纸打磨边缘以确保尺寸准确,边缘粗糙度小于 $3.2\text{ }\mu\text{m}$ 。

1.4 材料表征与试验设置

如图2所示,使用四探针电阻测试仪测量和记录样品的电导率。传感器的灵敏度测试在薄膜拉伸机上进行,加载速率为 0.5 mm/min ;层合板固化过程数据使用 FLUKE (2638A HYDRA SERIES III) 进行采集。使用动态热机械分析仪(DMA)对层合板固化过程中的凝胶点进行分折,DMA 试件尺寸为 $60\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 2\text{ mm}$,加载频率 1 Hz ,升温速率设置为 $3\text{ }^{\circ}\text{C/min}$,保温 2 h 。连续落锤冲击试验采用落锤冲击试验机,冲头为半球形,直径 16 mm ,冲击能量依次为 4.496 J 、 6.744 J 、 8.992 J 、 11.24 J 、 13.488 J 。依据 GB/T 3356—2014《定向纤维聚合物基复合材料弯曲性能试验方法》,使用力学万能试验机对试件进行三点弯循环负载和断裂测试,加载头和支座半径 R 为 5 mm ,跨厚比为 $16:1$,加载速度为 2 mm/min ,循环加载载荷依次为 200 N 、 400 N 、 600 N 、 800 N ,各载荷水平循环5次并连续加载,弯曲强度与应变由式(1)和式(2)计算。

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2\omega h^2} \quad (1)$$

$$\varepsilon_f = \frac{6\delta h}{L^2} \quad (2)$$

式中, P 为试样承受的载荷; L 为跨距; h 为试样厚度; ω 为试样宽度; δ 为试样在跨距中央的挠度。

受制造误差影响,不同传感器初始阻值存在一定误差,但相对电阻变化率可有效消除该影响。采用式(3)定义的电阻变化率 k 来表征传感器对结构的健康监测情况。

$$k = \frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R - R_0}{R_0} \quad (3)$$

式中, R 为传感器在试验过程中返回的实际电阻; R_0 为传感器的初始电阻; ΔR 为传感器电阻的变化量,即试验过程中实际电阻与初始电阻的差值。

取固化后的含传感器层合板,沿垂直传感器平面方向线切割取样,经打磨抛光处理后,使用光学显微镜 BX53M (Olympus) 观察传感器与预浸料的界面形貌。式(1)适用于均质各向同性梁。由于本文层合板铺层属于准各向同性层合板,故采用该工程简化公式,精确应力分析需基于经典层合板理论。

2 结果与讨论

2.1 传感器性能

宏观上,传感薄膜表面呈现出质地均匀且富有光泽的黑色,如图3所示,由于采用了柔性组分的基底膜,传感器可以按照任意形状裁剪,且抗

弯折能力优于传统巴基纸,聚醚砜组分的存在又增强了膜的极限强度,使得复合膜能够在保证紧密贴合监测结构的同时又不容易断裂。测厚仪测得的复合膜平均厚度约为 0.12 mm ,典型的五点电导率测试测得薄膜平均电导率为 7680 S/cm 。

图4(a)展示了传感器在拉伸试验中的应力-应变曲线,图4(b)展示了传感曲线和传感器的应变灵敏度曲线。在拉伸试验中,传感器呈现出典型的分段线性响应;初始拉伸阶段,薄膜处于小应变舒展过程,传感器表现出缓慢的线性行为;当应变到达 1.17% 时,刚性骨架、碳纳米层和柔性铰链共同受力,GF值达 4.01 ,此时为传感器的主要监测领域,若卸载传感器仍可恢复至原始状态。随着拉伸的进行,刚性骨架开始进入断裂阈值,传感器进入灵敏但不可恢复阶段,GF值高达 587.34 ,但该过程演化迅速,薄膜随即发生断裂。最终传感器的强度达 13.58 MPa ,极限应变 4.24% ,均优于传统巴基纸,表现出较高的结构监测性能。表2对比了巴基纸^[21-22]与复合薄膜传感的性能。

结构上,复合传感器的部分导电填料填充于基底膜的指状腔内,并与表面相连,形成钉扎结构,有利于对导电网络的固定,防止层合板固化时

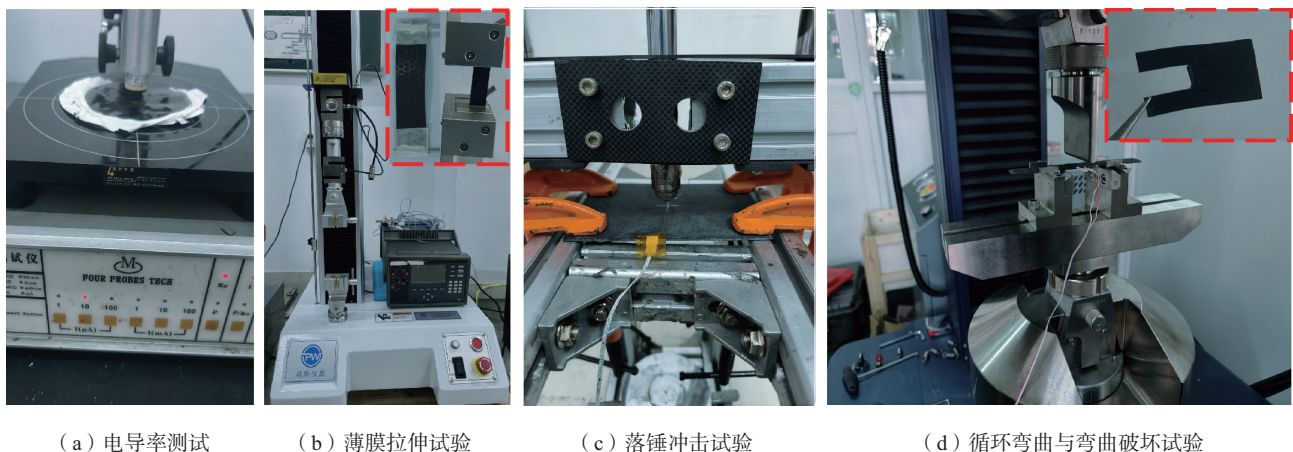


图2 材料表征与试验

Fig.2 Material characterization and experiment

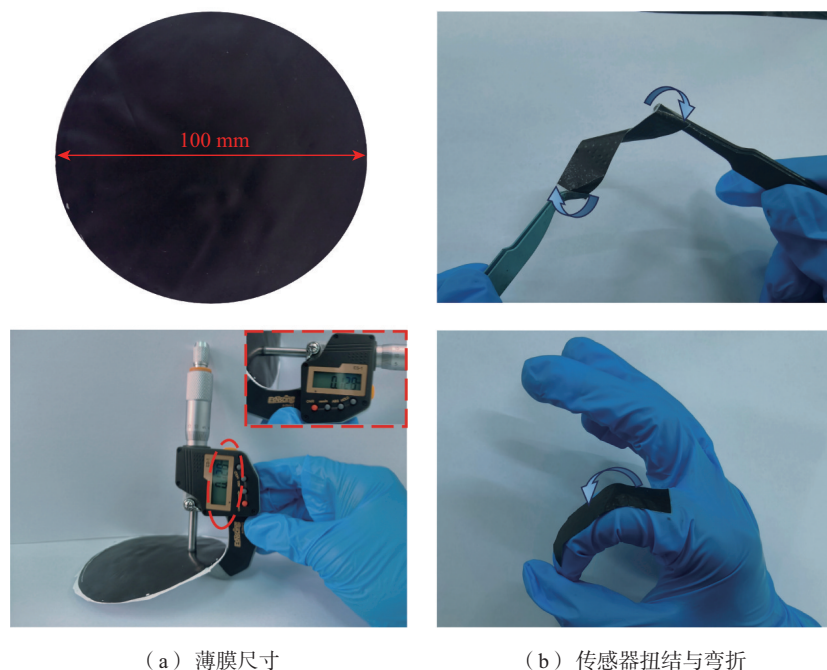


图3 传感薄膜特征
Fig.3 Characteristics of sensing film

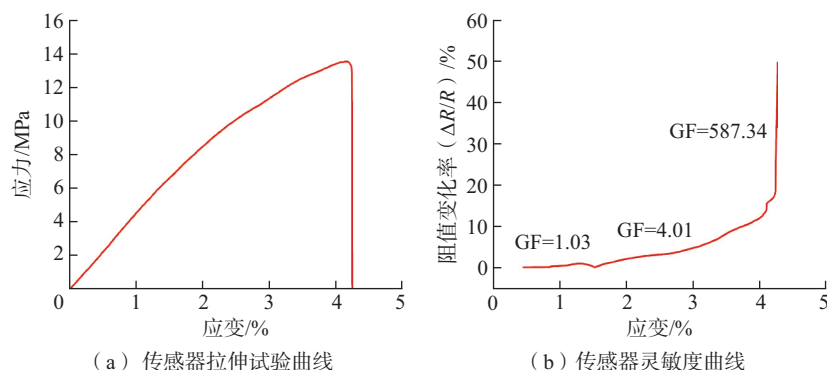


图4 传感器性能表征
Fig.4 Sensor performance characterization

表2 传感器性能对比

Table 2 Comparison of sensor performance

属性	复合传感器	巴基纸 ^[21-22]
断裂强度/MPa	13.58	7.57
灵敏度	4.01	2.92
最大应变/%	4.24	0.76
平均厚度/mm	0.12	0.09

树脂冲刷传感器而破坏导电网络。如图5所示^[23],传感器正面由碳纳米管之间相互搭接而成,其灵敏度取决于碳纳米管填料自身的导电性与碳纳米管之间导电网络的搭建。碳纳

米管的本质电阻 R_i 和隧穿电阻 R_T 共同组成了电阻式传感器的感应阻值。在结构受力时,传感器同步变形,碳纳米管之间的间隙发生变化,导致隧穿电阻变化,而本质电阻几乎不受变

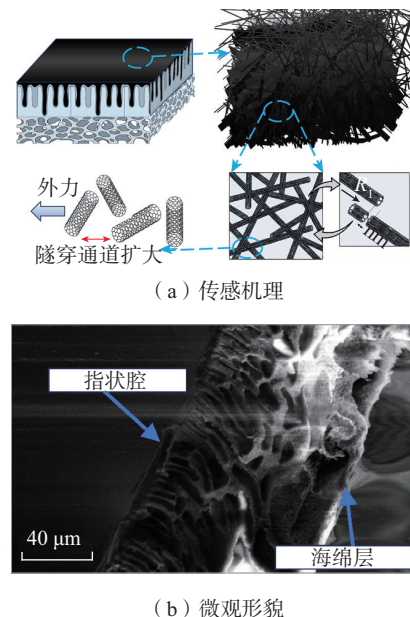


图5 传感器传感机理及基底微观形貌^[23]
Fig.5 Sensor sensing mechanism and substrate microscopic morphology^[23]

形影响,最终表现为传感器传感数值的变化。

2.2 层合板制造监测

对预浸料进行的DMA测试曲线如图6所示,通过储能模量曲线和阻尼因子曲线可以对预浸料的动态固化行为进行分析。储能模量随时间增加表现出先降后增的趋势,这与预浸料中的树脂状态有关。随着温度升高,基体变软,层合板弹性性能下降,储能模量降低。当温度达到120℃左右时,储能模量快速上升,阻尼因子曲线此时出现一个峰值,即图6(a)中点B,这是因为交联反应使树脂黏度发生变化,层合板开始固化。树脂从液态转变为固态,该温度点被称为凝胶点。本研究DMA测试气氛为静态空气,初始温度26℃,当测试进行到32 min时凝胶点出现,此时温度为122℃。

固化过程测得的传感曲线如图7所示。如图7(a)所示,整体上传感信号可分为两个阶段,其变化速度先快后慢,该趋势与层合板的固化状态相关。由于传感器灵敏度高,监测曲线细节丰富,为便于清晰分析,本文

将图7(a)细分为升温与保温阶段和冷却阶段,如图7(b)和(c)所示,并进一步将升温与保温阶段分为3个阶段。在第一阶段,传感器的电阻快速增大,当温度从40℃升到130℃时,传感信号变化率最高达35%。在第二阶段,传感器电阻突降,且降低趋势与布控方式相关,贴近下模具的S3突变迅速,其次是S2、S1。所有传感器在突变后保温过程中缓和下降,逐渐趋于稳定值。最后进入冷却阶段,如图7(c)所示,随着温度的降低,传感器信号缓慢上升,变化幅值不足4%,相对于整个制造监测过程几乎可忽略。

初始升温阶段,随着树脂分子链松弛、流动性增强,树脂渗入碳纳米管网络的空隙撑开导电网络,导致导电网络结构膨胀,连接点分离甚至破裂,隧穿电阻逐渐增大。受重力作用,树脂向下流动,置于底层的传感器浸润最充分,其电阻变化

率的峰值也最高,如点A所示。位于中性层的传感器树脂浸润程度适中且远离固化热源,信号波动平缓,电阻变化率最大值居中,如点B所示。在模压过程中,上模和下模温度设定相同,但因热量传导存在滞后,S1实际升温略慢于S3,S1处于树脂相对贫乏区域,但距离上加热板更近,热效应仍存在,因此峰值最小,如点C所示。由此,可通过多传感器信号差异大致推断其在厚度方向的位置。当温度升至120℃左右时,树脂达到凝胶点,开始由液态向固态转变,交联密度增加,体系黏度迅速增大,使层合板树脂收缩,碳纳米管导电网络在收缩力的作用下接触点位增多、导电隧道缩短,使传感信号突然下降。这在传感信号曲线上表现为一个突变峰值,即点A、B、C。可由该突变所处的温度大致推断层合板制造过程中的树脂状态。值得一提的是,在此温度下,复合膜体系中

的热熔性分子也开始与树脂体系交互,最终在降温阶段形成良好的共混界面,提高了传感器的稳定性。图7(c)展示了S3在冷却阶段的信号变化率与温度的关系。在降温阶段,电阻变化率主要受碳纳米管负温度系数影响,随温度降低而缓慢上升,且已经有研究证明碳纳米管网络的阻值与温度拟合度可达98%^[24],但变化幅值不足4%,远小于固化引起的信号变化。传感器在完成固化监测后阻值增加约30%,这是由于树脂的浸润与固化将传感网络撑开,隧穿通道增大。该现象在其他研究也有发现,固化后的传感器依然具有稳定的阻值和传感能力^[25]。

为区分温度效应与固化收缩对传感器电阻的贡献,利用固化降温阶段(30~130℃)的数据对传感器进行了原位热输出标定,如图8所示。该阶段层合板已完全固化,树脂收缩基本完成,传感器电阻变化主要来源于碳纳米管网络的负温度系数效应。以S3为例,在30~130℃范围内,整体变化幅度为3.4%。线性拟合结果表明,两者呈现良好的线性关系($R^2=0.9506$),温度系数 $\alpha \approx -0.037\%/^{\circ}\text{C}$ 。据此推算,在升温至130℃后的保温阶段,由热输出引起的电阻变化在4%以内,而实测总电阻变化高达35%,因此固化收缩引起的电阻变化占主导。该标定结果同时表明,传感器在层合板固化过程中被树脂浸润,

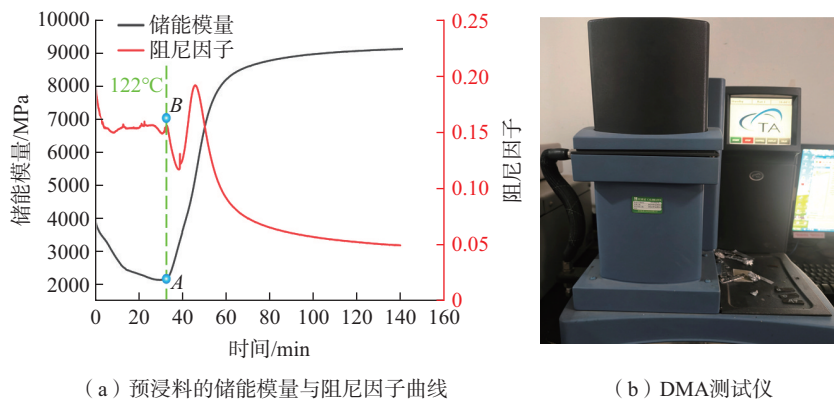


图6 预浸料DMA测试
Fig.6 DMA test for prepreps

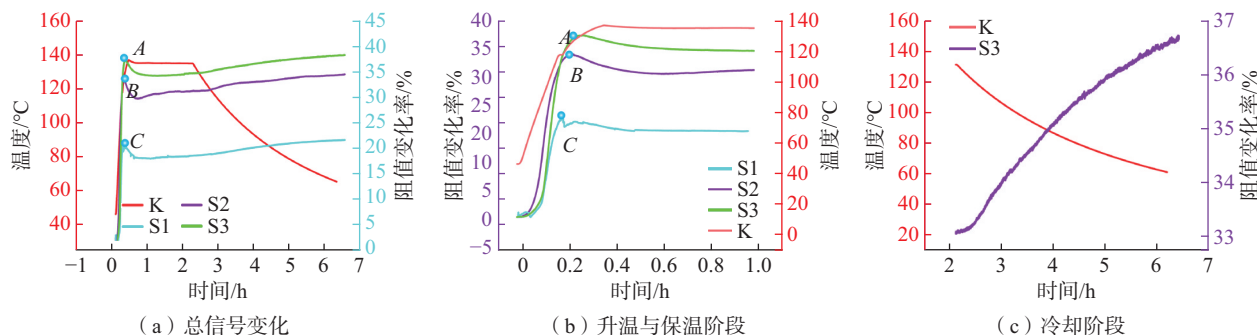


图7 GFRP层合板固化监测
Fig.7 Monitoring of GFRP laminate curing

固化后由于树脂的存在,阻值较原始阻值增大。在20~130℃范围内,传感器的热输出具有极佳线性度和可重复性,适用于常规热固性复合材料固化工艺窗口的原位监测,温度效应带来的干扰可忽略不计。

2.3 层合板落锤冲击和循环弯曲监测

将传感器与数据采集器相连,用于记录传感器在受力状态下的响应数据。落锤冲击试验获得的传感器响应曲线如图9(a)所示,点A、B、C、D、E为冲击能量梯度上升的冲击点,传感器对冲击载荷表现出了迅速的线性响应。薄膜传感器的电阻变化率随着冲击能量的增大而增大,层合板受到冲击后传感器迅速弯折,信号大幅度阶跃,随后层合板回弹,传感

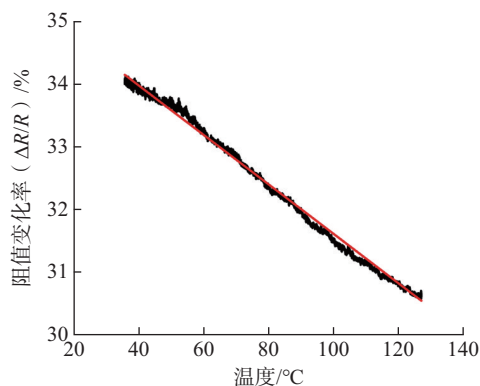
器信号下降。传感器在每次冲击后均监测到了层合板的回弹过程,最后信号恢复至平稳状态。循环弯曲的传感信号与力学曲线如图9(b)所示,嵌入层合板的传感器在层合板受循环载荷作用时表现出了高度线性与信号跟随性,每当载荷归零时,传感器同步恢复至初始值的98%以上,最大漂移不超过2%,表明传感器具有良好的重复性。载荷每提升200 N,传感器响应同步提升。这对于复合材料在服役过程中受力情况的监测具有重要意义。

2.4 层合板三点弯曲断裂过程监测

为验证传感器的嵌入对层合板整体结构和力学性能的影响,对嵌入和未嵌入传感器的层合板进行三点弯曲试验,所得应力-应变曲线如图

10(a)所示。嵌入传感器的层合板最大弯曲应力较未嵌入传感器层合板下降1.68%,这可能与铜丝的接入有关,但对层合板的宏观弯曲强度的影响可被忽略。采用光学显微镜观察了含传感器层合板的截面形貌,如图10(b)所示。从试件截面可清晰地辨识0°和90°铺层,传感器在预浸料之间形成了均匀连续的界面。传感器上下界面平直、无波浪状扭曲和大孔隙,表明其在模压固化过程中未发生位置偏移或褶皱。值得一提的是,传感器基底在固化过程中与90°层形成了“钉扎”式的相互渗透。这一界面构型一方面保证了载荷传递效率,使传感器能够准确感知层合板内部的应力-应变状态;另一方面增强了界面结合强度,避免了因界面滑移引起的信号滞后或失真。

三点弯曲传感信号只取位于试件中间位置的S2,这避免了在固化阶段S1的树脂匮乏和S3的树脂极端填充,且该位置处于中性面、远离模具加热端,保证制造过程中温度对传感器的影响最小。由三点弯曲试验获得的应力、传感信号随试验时间的双轴图如图11(a)所示。由于传感器灵敏度高,将0.18%之前的小应变传感响应单独放大显示于图11(b),并与图11(a)中相应的时间-应力曲线作为对比。



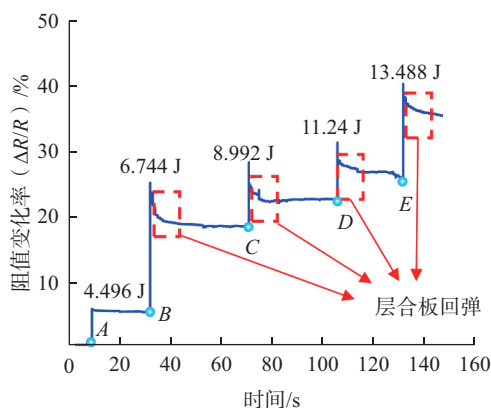
(a) 温度效应曲线



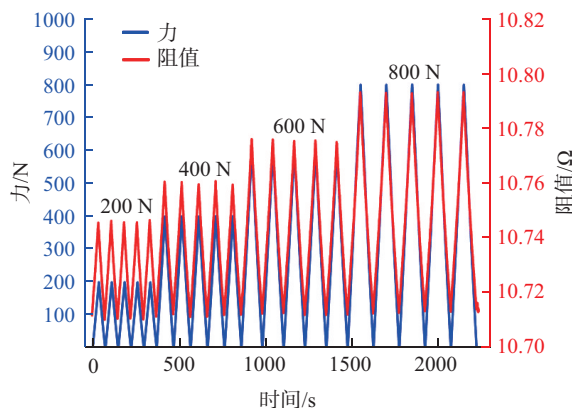
(b) 温度效应试验

图8 嵌入式传感器的温度效应

Fig.8 Temperature effect of embedded sensors



(a) 梯度能量冲击下传感器的响应



(b) 循环弯曲下传感器的响应

图9 嵌入传感器层合板的冲击与循环弯曲试验曲线

Fig.9 Impact and cyclic bending test curves of the embedded sensor laminated plate

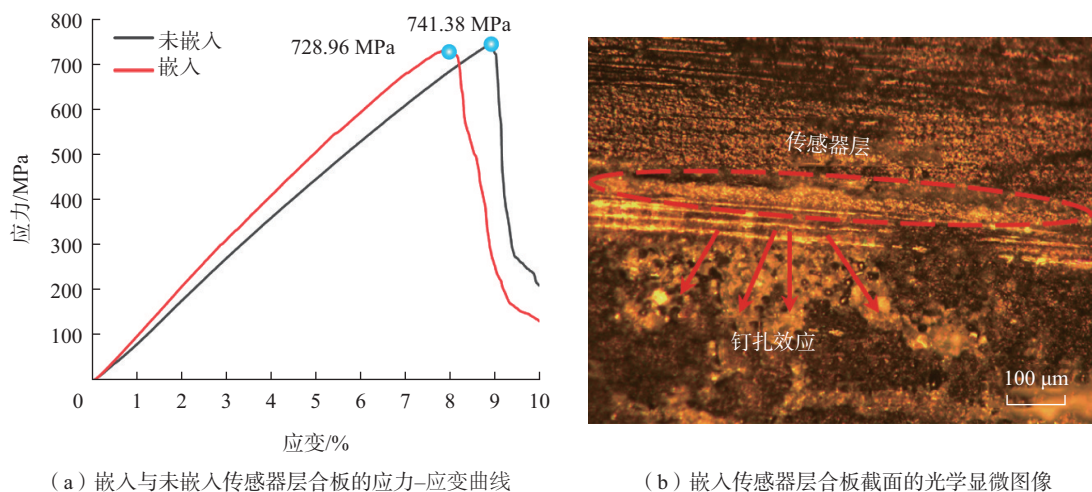


图10 嵌入传感器对层合板的影响
Fig.10 Influence of embedded sensors on laminated plates

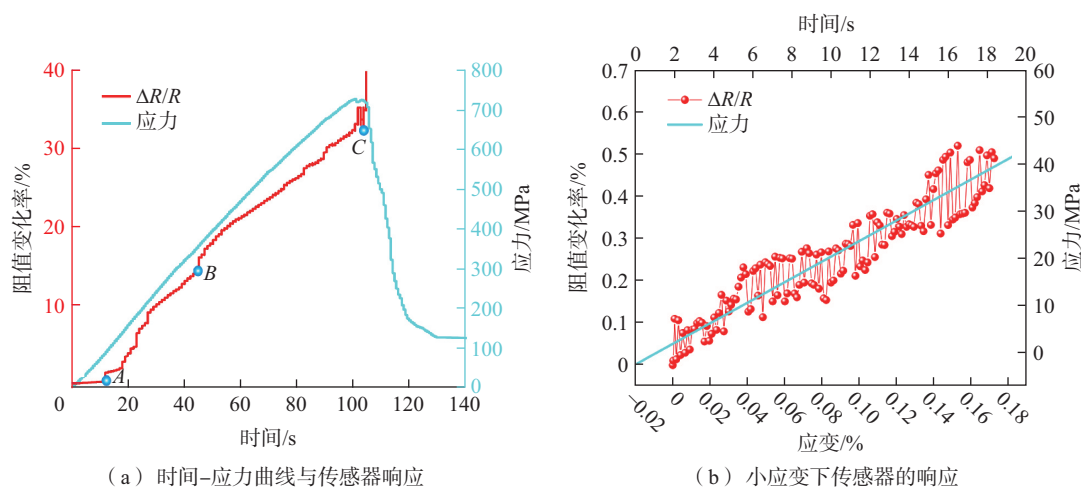


图11 嵌入传感器层合板的三点弯曲试验
Fig.11 Three-point bending experiment of the embedded sensor laminate

经过共固化后,传感器阻值有所上升,但仍具备结构监测能力。由图11可知,在点A前的低加载状态下,传感器响应随应变增加近似线性上升,在点A处传感曲线进行了一次小幅阶跃,表明层合板开始进入塑性阶段。在点B处,层合板弯曲应力曲线开始出现非线性行为,传感信号曲线斜率发生变化,层合板内部开始出现分层;下部90°层由于只依靠树脂基体承受拉力,开始出现微裂纹。此时传感器信号进行了第二次阶跃,但由于裂纹的萌生迅速而微弱,阶跃信号相应较小。随着加载的继续,裂纹迅速扩展,同

时其他90°层也开始出现损伤,层合板出现明显的断裂声,传感器信号出现连续阶跃,最终在弯曲应力达到728.96 MPa时,层合板失效。传感曲线同时在点C处出现最大幅值的阶跃,对应层合板内部严重损伤的产生与扩展,如分层和纤维断裂,传感器导电网络受损,阻值信号趋于无穷大。值得一提的是,在力学曲线下降前的力保持阶段,传感器信号就已经出现反复的跳跃现象,这证明传感器在复合材料结构毁灭性裂纹扩展的危险阈值下的监测能力与高灵敏度。该曲线表明,碳纳米管传感器能够有效捕捉层合板在

弯曲加载下的损伤演化过程,具有响应快、灵敏度高的特点,适用于复合材料结构的在线健康监测。

3 结论

(1) 采用相转变-真空自组合法制备的PES/TPU/PVP/CNT复合薄膜传感器电导率达7680 S/cm,最大应变变为4.24%,拉伸强度为13.58 MPa,灵敏度GF值最高达587.34,兼具优异的导电性、柔韧性和力学强度,优于传统巴基纸传感器。

(2) 通过引出电极的方式成功实现了薄膜传感器在GFRP层合板中的嵌入,传感器与树脂体系形成良

好的共混界面,截面光镜显示传感器与预浸料界面结合紧密,未见脱粘、孔隙或分层等缺陷。力学对比试验表明,嵌入传感器后层合板弯曲强度仅下降1.68%,证实了传感器的嵌入未对层合板宏观力学性能产生显著影响。

(3) 嵌入层合板的传感器在固化监测过程中能够清晰识别升温、保温和冷却3个阶段,在温度从40℃上升至130℃时,传感信号变化率最高达35%,且可通过传感信号的不同大致推断传感器位置,由传感信号突变峰值可有效获取层合板固化过程中的凝胶点温度信息。

(4) 嵌入式传感器在共固化后仍保持高灵敏响应。在落锤冲击与循环弯曲载荷下表现出高度线性响应及良好的信号跟随性。在三点弯曲断裂试验中,传感器依次捕捉到层合板初始损伤、分层与严重损伤前的关键信号。当层合板达到极限载荷发生断裂时,传感器导电网络同步受损,电阻信号趋于无穷大,完整记录了从弹性变形到灾难性破坏的全过程损伤演化信息,展现出优异的渐进损伤监测能力。该传感器实现了从制备、服役到最终失效的全过程监测,为航空复合材料结构健康监测提供了可行的技术方案。

综上,本研究制备的PES/TPU/PVP/CNT薄膜传感器成功实现了复合材料层合板制造-服役-损伤的全过程结构健康监测,为航空复合材料智能结构的一体化监测提供了可行方案。当前研究主要验证了该传感器在平面层合板、室温环境下的可行性,其在湿热/盐雾等复杂服役环境下的长期稳定性、曲面构件中的嵌入工艺,以及冲击能量-传感信号-冲击损伤面积之间的精确定量模型仍有待后续深入研究。

参考文献

[1] 熊健,李志彬,刘惠彬,等. 航空航天轻质复合材料壳体结构研究进展[J]. 复合材料学报, 2021, 38(6): 1629-1650.

Xiong Jian, Li Zhibin, Liu Huibin, et al. Advances in aerospace lightweight composite shell structure[J]. Acta Materialae Compositae Sinica, 2021, 38(6): 1629-1650.

[2] 杨露露,刘芮豪,王志成,等. 航空复合材料结构健康监测:研究进展及其智能化趋势[J]. 航空制造技术, 2025, 68(17): 42-66.

Yang Lulu, Liu Ruihao, Wang Zhicheng, et al. Health monitoring for aerospace composite structures: Research progress and trends in intelligence[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(17): 42-66.

[3] Laux T, Bullock R C, Thomsen O T, et al. Lay-up effect on the open-hole shear strength of composite laminates[J]. Composites Science and Technology, 2023, 239: 110044.

[4] Singh T, Sehgal S. Structural health monitoring of composite materials[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2022, 29(4): 1997-2017.

[5] Marrazzo V R, Fienga F, Laezza D, et al. Full analog fiber optic monitoring system based on arrayed waveguide grating[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(15): 4990-4996.

[6] Liang Z H, Liu D B, Wang X, et al. FBG-based strain monitoring and temperature compensation for composite tank[J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 127: 107724.

[7] Xu S J, Wang C Q, Ye L X, et al. Mn-doped $0.67\text{BiFeO}_3-0.33\text{BaTiO}_3$ ceramic sensor for high-temperature structural health monitoring[J]. Ceramics International, 2024, 50(18): 34331-34337.

[8] Zhang H, Zhang L J, Sun J, et al. Research on delamination damage imaging of CFRP laminate based on laser ultrasonic guided waves[J]. Measurement, 2026, 265: 120379.

[9] Yang L, Gao J N, Zhang R Z, et al. Microscale modeling and damage mechanisms of fiber-reinforced composites with perpendicularly embedded optical fibers[J]. Polymer Composites, 2026, 47

(7): 6550-6560.

[10] Rajendran D, Lakshmanan A, Tegenkamp C, et al. Highly-sensitive carbon/polymer nanocomposite for wireless multi-directional strain sensing[J]. Composites Part B: Engineering, 2025, 307: 112876.

[11] Wang Q Q, Tian Y, Duongthipthewa A, et al. An embedded non-intrusive graphene/epoxy broadband nanocomposite sensor co-cured with GFRP for in situ structural health monitoring[J]. Composites Science and Technology, 2023, 236: 109995.

[12] Shi L W, Wang J, Zhang H R, et al. A high-performance and sensitive strain sensor based on MWCNT/epoxy for micro-strain monitoring of steel structure[J]. Polymer Composites, 2026, 47(2): 1363-1381.

[13] Jia W B, Xuan H J, Yu J J, et al. Enhanced inter-laminar and high-velocity impact resistance of CF/epoxy composites via carboxylated CNTs[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2026, 41: 5694-5711.

[14] Uetsuji Y, Fujiwara Y, Araki F, et al. Multiscale study on nonlinear mechanical properties of CNT-reinforced CFRTP: Comparison of reinforcing effects of CNT-grafted interphase and CNT-dispersed matrix[J]. Composites Part B: Engineering, 2025, 305: 112720.

[15] Li S H, Chen H X, Cai Z M, et al. Enhancement of energy storage performance in polymer dielectrics via monodisperse ZrO_2 nanoparticles as nanofiller[J]. Small, 2025, 21(23): 2500743.

[16] Wang Y, Cui X Y, Lu S W, et al. Highly stable two-dimensional MXene/CNT/CuNPs sensor for impact damage monitoring of composite materials[J]. Measurement, 2025, 253: 117884.

[17] Liu S Y, Liu X M, Cui X Y, et al. 3D printed MXene/rGO hierarchical porous structure based on ultralow-concentration 2D nanomaterial inks for highly sensitive pressure sensing[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 496: 154250.

[18] Cui X Y, Miao C J, Lu S W, et al. Strain sensors made of MXene, CNTs, and TPU/PSF asymmetric structure films with large tensile recovery and applied in human

health monitoring[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(51): 59655–59670.

[19] Dehban A, Hosseini Saeedavi F, Kargari A. A study on the mechanism of pore formation through VIPS-NIPS technique for membrane fabrication[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2022, 108: 54–71.

[20] 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.

[21] Danish M, Luo S D. A new route to enhance the packing density of buckypaper for superior piezoresistive sensor characteristics[J]. Sensors, 2020, 20(10): 2904.

[22] Yee M J, Mubarak N M, Khalid M, et al. Synthesis of polyvinyl alcohol (PVA) infiltrated MWCNTs buckypaper for strain sensing application[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 17295.

[23] Cui X Y, Wang Y, Lu S W, et al. Mechanical enhancement and high linearity health monitoring of composite materials based on CNTs/PSF/PI film sensor with ultra-low SWCNTs doping content[J]. Nanoscale, 2024, 16(12): 6176–6189.

[24] Lu S W, Zhao C X, Zhang L, et al. *In situ* monitoring the manufacturing process of polymer composites with highly flexible and sensitive GNP/MWCNT film sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 285: 127–133.

[25] 邢飞, 李皓鹏, 章令晖, 等. 导电纳米材料用于树脂基复合材料成型过程和结构健康监测的研究进展[J]. 材料导报, 2025, 39(24): 259–267.

Xing Fei, Li Haopeng, Zhang Linghui, et al. Conductive nanomaterial-based sensors: From process monitoring to structural health monitoring of resin matrix composites—A review[J]. Materials Reports, 2025, 39(24): 259–267.

Cure and Damage Monitoring of Composite Laminates Using Novel PES/TPU/PVP/CNT Membrane Sensors

WANG Xiaoqiang¹, ZHANG Xu¹, CHEN Xingling¹, LIU Fangfei², MA Xuxia¹, XIONG Hong³

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

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

3. Institute of Deep-Sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, China)

[ABSTRACT] Composite laminates are widely used in the aerospace industry due to their excellent mechanical properties; however, issues such as rapid damage progression and the difficulty of detecting initial damage have limited their further application. This paper employs a phase-transition–vacuum self-assembly method to fabricate a bionic thin-film sensor that combines rigidity and flexibility, enabling its low-damage embedding into glass fiber laminates and successfully monitoring the curing and flexural damage processes of composite materials. The thin-film sensor has a conductivity of up to 7680 S/cm, a sensitivity (GF value) of 4.01 within the recoverable range, a limit strain of 4.24%, and a strength of 13.58 MPa. When monitoring the curing of laminates, the sensor can clearly distinguish between the three stages of heating, temperature holding, and cooling. As verified by DMA, the resin gel point temperature can be determined from sudden changes in the sensor signal, with a maximum signal change rate of 35%. In drop-weight impact and cyclic three-point bending tests on laminates, the sensor demonstrated highly linear response characteristics. Sensors embedded in the neutral plane can accurately capture damage and step signals in the laminate prior to ultimate failure. This sensor enables full-process monitoring of composite structures from fabrication to failure, providing a viable approach for health monitoring of aerospace composite structures.

Keywords: Structural health monitoring; Carbon nanotube sensor; Smart composite; Bending test; Cure monitoring

(责编 阳光)