引文格式： *张崇浩，卢细菊，蔡子墨，等. 激光制造双模态传感系统及在复合材料的应用[J]. 航空制造技术，2026, 69(21): 26020051.*

ZHANG Chonghao, LU Xiju, CAI Zimo, et al. Laser in-situ fabrication of dual-modal sensing system based on composite materials[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(21): 26020051.

激光制造双模态传感系统及在复合材料的应用

张崇浩[1]，卢细菊[2]，蔡子墨[1]，苗楚阳[1]，王　辰[2]，李徐辉[2]，侯宇誉[1]，徐凯臣[1]

（1. 浙江大学流体动力基础件与机电系统全国重点实验室，杭州 310058；
2. 中国商飞上海飞机制造有限公司，上海 201324）

［摘要］ 高性能复合材料已成为航空航天核心构件的首选材料，然而其结构健康监测长期受制于附加式传感器带来的寄生质量与异质界面力学失配问题的制约。本研究创新性地开展了激光制造双模态传感系统在复合材料上的原位监测研究，并以聚醚醚酮复合材料为基底作示例，实现了感知系统与高性能复合材料结构的一体化集成。通过原位构筑机械互锁，将电路界面粘附强度提升至工业最高等级5B，改善了复杂服役工况下的界面退化问题。此外，通过激光诱导纳米颗粒增强互连，构筑了方阻低至0.11 Ω/sq的互联电路。根据聚醚醚酮的特性，利用激光原位生成了I_D/I_G=0.96的碳基传感单元。本研究为大型航空航天构件实现低成本、零附加质量及全寿命周期的数字化监测提供了一种新思路。

关键词： 激光制造；复合材料的原位监测；双模态传感系统；氧化铜油墨；复合微结构；激光诱导碳

中图分类号： V25；V26；V19　　**文献标志码：** A　　**DOI：** 10.16080/j.issn1671-833x.26020051

Laser In-Situ Fabrication of Dual-Modal Sensing System Based on Composite Materials

ZHANG Chonghao[1], LU Xiju[2], CAI Zimo[1], MIAO Chuyang[1], WANG Chen[2], LI Xuhui[2], HOU Yuyu[1], XU Kaichen[1]

(1. State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
2. COMAC Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324, China)

[ABSTRACT] High-performance composites have become the material of choice for core aerospace components. However, structural health monitoring for these structures has long been limited by the extra weight of add-on sensors and the mechanical mismatch between different materials. This study proposed an innovative approach for the in-situ monitoring of composites using a laser-manufactured dual-modal sensing system. With polyether ether ketone composites adopted as a substrate, a sensing network was successfully integrated directly into the high-performance composite structure. By creating a mechanical interlock in-situ, the circuit's adhesion strength was improved to the highest industrial standard 5B, mitigating interface degradation under complex service conditions. Furthermore, laser-induced nanoparticles were utilized to enhance the connections, and an interconnect circuit with a sheet resistance as low as 0.11 Ω/sq was fabricated. Based on the properties of polyether ether ketone, carbon-based sensing units with an I_D/I_G ratio of 0.96 were generated in-situ via laser irradiation. This research offers a new strategy for achieving low-cost, zero-added-mass, and full-life-cycle digital monitoring of large aerospace components.

收稿日期： 2026-02-24；**退修日期：** 2026-04-09；**录用日期：** 2026-05-12

基金项目： 国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金项目（COMAC-SFGS-2024-570）；国家自然科学基金（525B2085）；浙江省自然科学基金（LR26E050002）

通信作者： 徐凯臣，研究员，博士，研究方向为柔性电子制造。
侯宇誉，博士，研究方向为极端环境柔性感知。

Keywords: Laser manufacturing; In-situ monitoring of composite materials; Dual-modal sensing system; Copper oxide ink; Composite microstructure; Laser induced carbon

随着新一代航空航天装备向超大型化[1]、高机动性及长寿命周期演进[2–4]，高性能复合材料[5–7]因其卓越的比强度和力学性能，成为构建机身机翼等核心构件的基石。在复杂的服役环境下，实现对构件结构健康的实时监测，是保障飞行安全与降低维护成本的战略诉求[8–10]。然而，如何在不牺牲复合材料轻量化优势的前提下，赋予其多模态的感知能力，是该领域亟待解决的问题[11–13]。

传统的结构监测主要依赖于外贴式的传感器[14]，这种附加式集成策略[15–16]会额外增加大量引线与封装外壳[17]，违背了航空航天轻量化的初衷[18]。其次，传感器与复合材料基底之间的刚度失配[19–21]易导致界面剥离或失效[22]，不仅会使导电网络出现微裂纹，更会在热循环或机械振动工况下导致功能层的整体剥离，从而引发传感信号的突变或失效。尽管现有的柔性电子技术[23]尝试通过贴合的方式改善传感系统的稳定性[24–25]，但仍难以从根本上解决刚度失配引发的问题。

激光能够诱导物质（如复合材料）改变性质，原位构筑功能器件，以解决刚度失配引发的问题。通过激光诱导还原金属氧化物前驱体油墨[26–28]和激光诱导碳化[29–30]，可以在聚合物表面原位生成导电路径与传感单元。然而，在聚苯硫醚（Polyphenylene sulfide，PPS）及聚醚醚酮（Polyether ether ketone，PEEK）等复合材料上，激光原位生成的金属层界面结合力微弱[31]，且导电性与纯金属仍存在一定差距[32]。在复合材料体系内通过激光直写技术实现超低阻抗的互联网络与双模传感功能，已成为轻量化集成传感系统中的关键技术。

本文提出了一种双模态传感系统激光结构功能一体化制造新方法，适用于高性能复合材料原位监测。该方法以航空航天领域广泛应用的PEEK复合材料为典型验证对象，通过多波长激光加工平台实现了复合微结构织构、金属互联网络还原和碳基传感单元碳化的全流程原位集成。通过激光参数的精准调控，实现了复合材料构件表面界面增强、电路制备与功能单元构筑，为传统附加式传感集成与现有激光直写技术在复合材料上存在的界面剥离、阻抗过高与信号失真等问题提供了新思路。试验结果表明，制备的结构功能一体化传感系统能够实现对环境温度与动态应变的实时监测。本研究为复合材料结构的内生感知功能集成提供了一种全新的技术路线，对推动航空航天智能结构的工程化应用具有重要意义。

1 试验及方法

氧化铜金属油墨前驱体的配制：材料包括聚乙烯吡咯烷酮（Polyvinyl pyrrolidone，PVP，分子量10K，上海）、异丙醇（Isopropanol，IPA，纯度98%，上海沪试）、氧化铜纳米线（Copper oxide nanorods，粒径40~60 nm，北京普西唐生物科技有限公司）。首先在试管中加入0.5 g PVP，而后加入3 mL IPA，使用磁力搅拌加热器在40 ℃下以1200 r/min持续2 h；往试管中加入3 g氧化铜纳米线并超声破碎处理直至均匀分散。

氧化铜金属掺杂油墨前驱体的配制：材料包括PVP、IPA、氧化铜纳米线、铜纳米颗粒（Cu NanoParticles，Cu NPs，粒径60~100 nm，上海Meryer）。首先在试管中加入0.5 g PVP，而后加入3 mL IPA，使用磁力搅拌加热器在40 ℃下以1200 r/min持续2 h，往试管中加入3 g氧化铜纳米线和0.5 g Cu NPs并超声破碎处理直至均匀分散。

互连铜线的制备：使用IPA和去离子水清洗PEEK基底，将1.5 mL制备的氧化铜金属油墨前驱体滴在基底表面上并使用旋涂仪以1350 r/min转速旋涂15 s，使氧化铜金属油墨前驱体均匀涂覆在基底上，而后采用连续绿光激光器（532 nm波长，FOTIA–355–5–30–W，中国INNO Laser）将干燥的氧化铜油墨膜转化为互连铜线。

复合微结构的制作：首先，用紫外纳秒激光（355 nm波长，Genesis CX532–5000 STM，美国Coherent）构筑一级微结构，激光加工参数为加工次数2次、加工速度150 mm/s、功率0.2 W、频率30 kHz、开光延时300 μs、关光延时100 μs、结束延时300 μs、拐角延时100 μs；而后用紫外纳秒激光构筑二级微结构，激光加工参数为加工次数4次、功率0.16 W，其余参数同上。

碳基传感单元的制作：用二氧化碳激光（10.6 μm波长，VLS 2.50，UNIVERSAL Laser System Inc.）选择性诱导碳基传感单元图案，激光参数为激光功率2.1 W、加工速度50 mm/s、每英寸脉冲数量500。

双模传感系统的制造：选用尺寸为60 mm×30 mm×2 mm的PEEK板材作为基底，经无水乙醇、去离子水依次清洗1 min并吹干，使用紫外纳秒激光按照预设互连电路版图刻蚀，在PEEK基底表面构筑仿生机械互锁复合微结构；随后将氧化铜金属掺杂油墨前驱体均匀旋涂于基底表面，60 ℃干燥10 min获得氧化铜油墨薄膜，使

用532 nm连续激光器对油墨薄膜图案化扫描，将其转化为铜互连电路；采用10.6 μm二氧化碳激光器图案化扫描，在PEEK基底表面原位碳化生成碳基传感单元；最后涂覆导电铜浆实现碳基传感单元、铜互联网络与外接信号采集电子元件的电学连接，室温固化8 h后即完成激光双模态传感系统的制备。

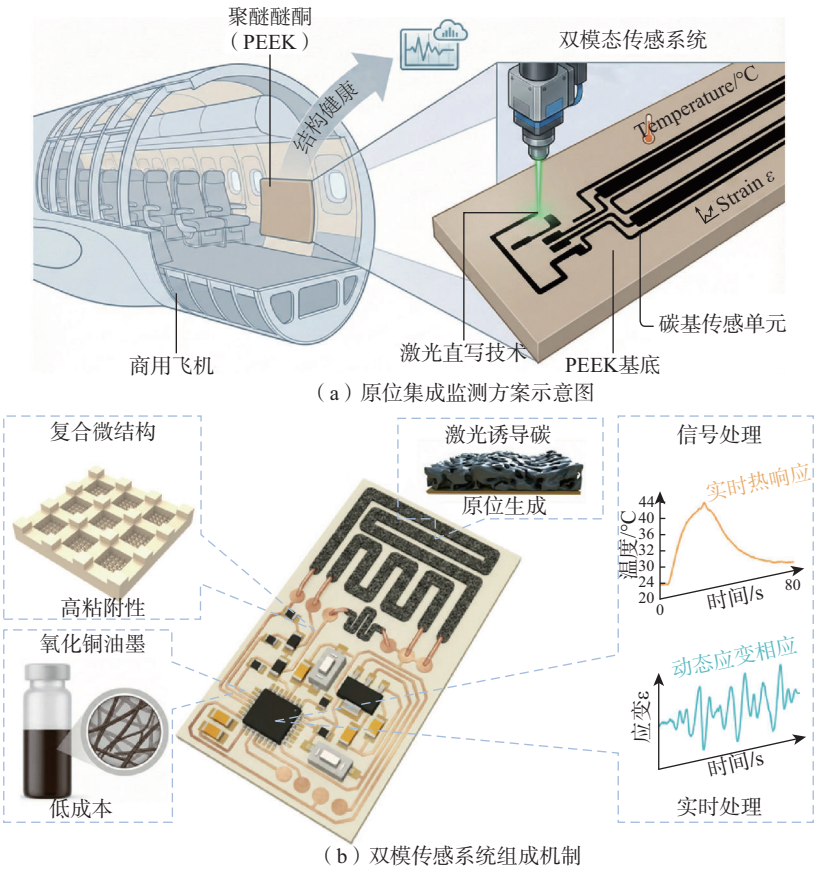
材料表征：通过共聚焦显微镜（OLS 5000，Olympus，日本）采集复合微结构的三维形貌信息；采用扫描电子显微镜（Gemini 300，ZEISS，德国）表征碳基传感单元的表面形貌；通过拉曼光谱仪（LabRAM HR Evolution，HORIBA France SAS，法国）表征碳基传感单元。

复合微结构的表征：胶带剥离测试使用高粘性胶带进行（VHB，3M，与金属的粘附力值为1100 kPa），首先通过施加2 kg的载荷将胶带粘附到铜涂层上，在安装夹具之后，将PEEK基底固定到测试机（Lichen，中国）上，然后以1 mm/s的速度进行剥离，记录平均拉力为2 N，通过四探针电阻测量仪（HPS2662，Helpass，中国）测量互连铜线的初始方阻及胶带剥离后的方阻。

双模传感系统的表征：在温湿度箱（HYH-TH-49DH，环仪仪器，中国）内进行0~120 ℃和50%湿度恒定的温度循环测试；使用万能试验拉伸仪器进行应变响应测试；信号通过数据记录仪（MR8875，Hioki，日本）记录。

2 结果与讨论

本文提出了一种面向未来数字化航空航天构件的原位集成监测方案（图1）。在飞机客舱等大型复杂热塑性复合材料结构件表面，利用激光直写技术直接在高性能复合材料（以PEEK为例）基底上实现了轻量化传感网络的生成。该技术不同于传统复杂的封装与粘贴工艺，通过激光诱导原位生成碳基传感单元，能够对环境温度与结构应变实时感知，为结构健康监测提供了一种原位生成式的方案。如图1（a）所示，展示了利用激光直写技术在飞机客舱PEEK复合材料构件上直接构筑传感网络的流程，用于实现对温度和应变的实时感知。本文设计了一种受壁虎启发的复合微结构，通过激光刻蚀出的机械互锁复合微结构大幅提升了互连导线与基底间的界面结合力。在功能材料方面，采用低成本的氧化铜油墨作为导电前驱体，在激光光热效应下原位烧结并还原为高导电铜互连路径。此外，激光原位生成的碳基



（a）原位集成监测方案示意图

（b）双模传感系统组成机制

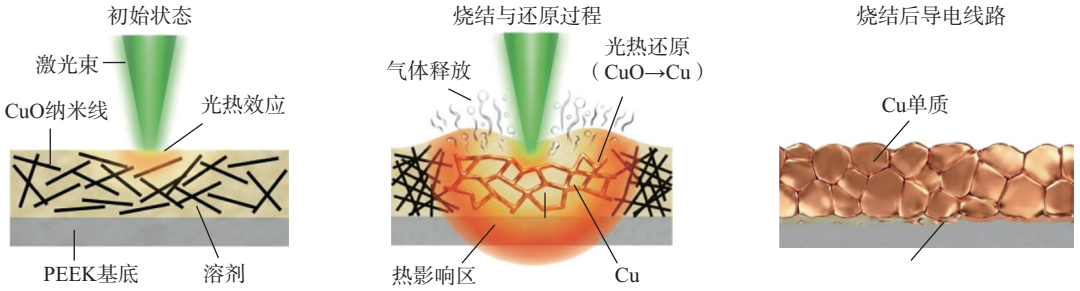
图1 航空航天复合材料上原位集成的双模态传感系统

Fig.1 In-situ integrated dual-modal sensing systems for intelligent aerospace composites

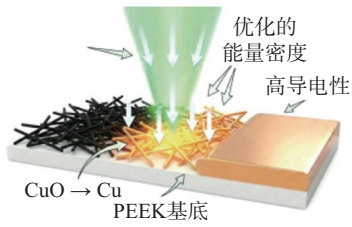
材料构成了系统的双模态敏感元件，传感信号通过集成的信号处理单元进行后端处理，实现了对热与动态载荷的实时同步监测。如图1(b)所示，包括基于仿生壁虎脚掌设计的复合微结构(实现高粘附力)、低成本氧化铜(CuO)油墨前驱体、原位生成的碳基传感单元以及用于实时信号采集与处理的电子系统。这种全原位集成架构显著降低了传感器的质量，为构建数字化感知机体提供了坚实的技术支撑。

2.1 激光还原烧结高电导率、高粘附性铜互连导线

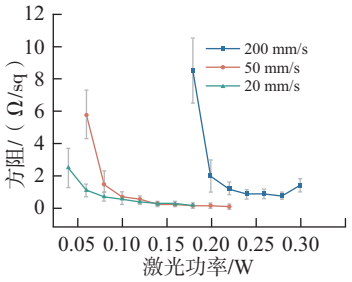
如图2所示，激光烧结还原氧化铜油墨技术具有高分辨率和低成本的特点，但是激光烧结后的铜单质存在导电差和粘附性低的问题。通过对激光烧结氧化铜进行机理分析，并精确调节激光烧结参数，结合油墨成分优化，可以改善烧结后铜单质的导电性能[32]。原始油墨包含固相的氧化铜纳米线和液相的有机载体，即溶剂与分散剂，如IPA、PVP(图2(a)的初始状态)。氧化铜对可见光具有



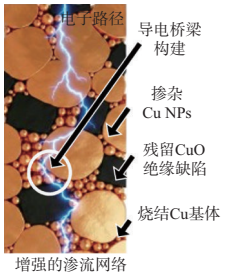
(a) 激光诱导CuO油墨还原烧结过程和微观演化机制



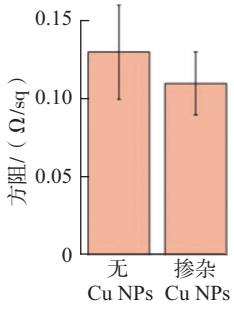
(b) 基于激光功率密度优化的电导率调控机理示意图



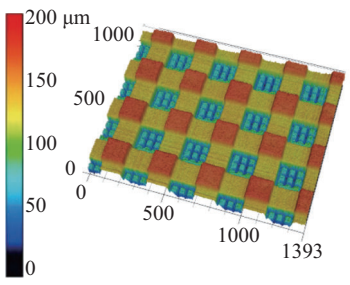
(c) 激光功率密度与电导率关系图



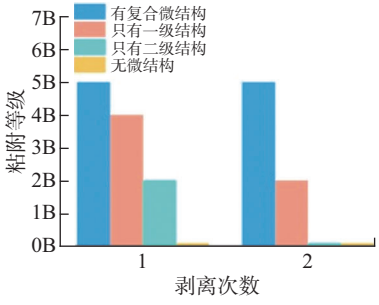
(d) 铜纳米颗粒掺杂构筑“导电桥梁”的渗透网络增强机制



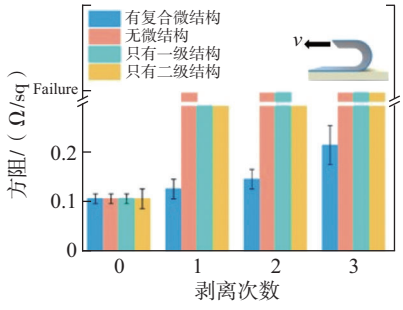
(e) 加入铜纳米颗粒后电导率提升



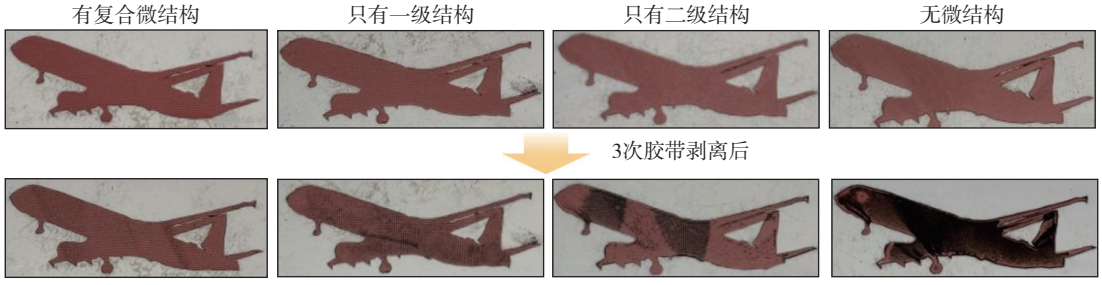
(f) 具有高深径比特征的棋盘格状复合微结构三维共聚焦形貌特征



(g) ASTM D3359—17标准粘附测试等级



(h) 标准粘附胶带剥离测试电学稳定性数据图



(i) 标准粘附胶带剥离测试涂层完整性照片

图2 激光还原烧结高电导率、高粘附性铜互连导线

Fig.2 Laser reductive sintering of high-conductivity, high-adhesion copper interconnect wires

极高的吸收率，当激光照射在涂布于复合材料基底上的氧化铜纳米线油墨层时，光子能量被氧化铜纳米线吸收并迅速转化为晶格振动热能，使油墨层局部温度急剧升。在高温场中，油墨中的有机组分（如IPA、PVP）发生热分解或脱水反应，原位生成具有强还原性的分子。这些还原剂将氧化铜还原为金属铜，同时伴随气体快速逸出，新生成的金属铜原子或纳米团簇具有极高的表面能。在热力学驱动下，颗粒间的接触点发生快速的原子扩散或局部熔化，形成连接颗粒的烧结颈，这是导电通路建立的开始。随着金属铜颗粒的生成，它们在激光辐照下产生局域表面等离子体共振，显著增强对激光能量的吸收，从而进一步加速周围材料的还原和烧结（图2(a)的烧结与还原过程）。激光烧结过后，原本独立的纳米线融合成连续致密的多晶铜网络（图2(a)的烧结后导电线路）。

激光烧结参数主要包括激光功率和激光扫描速度，其中激光功率是影响氧化铜烧结还原的主要因素，在相同激光扫描速度下，随着激光功率增大，反应温度升高，促使氧化铜充分反应形成铜单质（图2(b)），改善方阻；但过大的激光功率会造成被还原后的铜单质在过高的温度下氧化回氧化铜。激光扫描速度对该过程也有一定影响，当激光功率一定时，激光扫描速度决定了区域内的总能量输入以及反应时间，激光扫描速度越低，氧化铜的反应越充分，得到的铜单质方阻越小，最优方阻为0.13 Ω/sq；但是过低的扫描速度会显著降低加工效率，同时导电性提升非常小，收益很低（图2(c)）。

为了进一步提升烧结铜单质的导电性能，在原油墨配方中添加铜纳米颗粒。烧结后的铜单质呈较大的颗粒状，铜单质颗粒间可能会存在残留氧化铜，形成绝缘缺陷，而铜纳米颗粒可以在绝缘缺陷缝隙处构筑导电桥梁（图2(d)）。添加铜纳米线可以改善由该缺陷引起的导电性降低问题，方阻从0.13 Ω/sq降低至0.11 Ω/sq（图2(e)）。

针对铜单质对基底粘附性较差的问题，本文提出了一种复合微结构（图2(f)），可以显著增强铜单质和基底之间的粘附性。该结构呈棋盘格状周期分布，由凸起方块与凹陷区交错排列，凹陷区内嵌有序微柱状阵列。定义凸起方块及凹陷区为一级结构，柱状阵列为二级结构。为了定量描述表面微结构几何参数对粘附强度的贡献，本文参考了Gent等[33]建立的弹性粘附模型，该模型认为表观粘附强度G_a''与平滑表面的本征粘附强度G_a之间的关系为

$$G_a'' \approx G_a\left[1+4\cdot\varnothing\cdot\frac{l}{a}\right] \tag{1}$$

式中，a为孔半径；l为深度；$\varnothing$为微孔开口面积占总表面积的比例。式(1)表明，粘附增强因子与微结构的深径比成正比。激光加工能够制造出深径比极高的深孔或沟槽，意味着即使本征粘附强度G_a不变，仅通过几何结构的优化，表观粘附强度理论上也可以提高10倍以上。这解释了为何激光诱导的深层微结构比简单的喷砂粗糙化（通常深径比较低）具有更好的粘附效果。

根据ASTM标准粘附性测试结果可知，该复合微结构显著增强了铜单质和基底之间的粘附性，并达到了最高粘附等级5B。其中起主要作用的部分为二级结构，通过式(1)也可知，增加深径比和面积分数，可以提高表观粘附强度（图2(g)）。胶带剥离测试表明，具有复合微结构的样品方阻基本不变，未经微结构处理的样品表面则是在胶带剥离一次之后，铜单质绝缘，只有单级结构的样品导电性变化情况相对于未处理样品有显著提升（图2(h)）。通过胶带剥离的照片更能看出复合微结构对铜单质和基底间粘附性的显著提升，在胶带剥离3次之后，有复合微结构的样品几乎无变化，未处理样品表面的铜单质几乎全被剥离（图2(i)）。

2.2 激光原位诱导碳基传感单元

红外激光作用可使含碳聚合物前驱体（如聚酰亚胺、木材、酚醛树脂等）发生化学键断裂与重组，演变为具有sp^2杂化特征的三维多孔碳物质（图3(a)）。对于石墨化程度较高的碳物质，载流子浓度接近简并态，运送机制受电子–声子散射主导，呈现正温敏特性。根据Drude模型[34]，电阻率与温度呈线性关系。在相互搭接的石墨烯片层之间，电子通过量子隧道效应穿过绝缘势垒是主要的导电方式。电阻与石墨烯层间距呈指数关系[35]，即使是纳米级的间距变化也会引起宏观电阻的显著改变。这一机制主导了小应变范围（<1%）的高灵敏度响应，使得含碳物质能够检测微弱信号。同时激光扫描路径赋予了含碳物质宏观上的各向异性结构，形成应变敏感的各向异性。

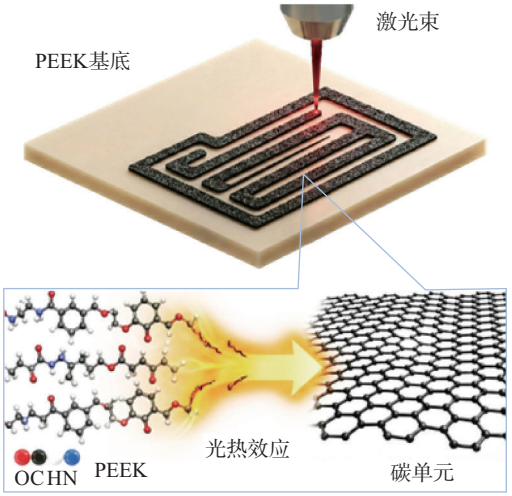
通过扫描电子显微镜图像可以观察到激光对材料表面的显著改性。图3(b)清晰地展示了原始基材与激光作用区之间的界限，激光扫描区域由原本平整的表面转变为具有明显起伏的碳化层，进一步放大显示，生成的碳基材料呈现出典型的三维多孔网络结构。这种蓬松、类泡沫状的形貌是由于激光瞬时高能量导致基材中的聚合物组分发生光热降解，逸出的气体在碳化过程中形成了丰富的微纳孔隙。这种高比表面积的多孔结构为传感单元提供了更多的活性位点。拉曼光谱进一步证实了材料的石墨化特征，D峰归因于sp^3杂化或碳晶格中的缺陷、边缘及无序结构；G峰代表sp^2碳原子的面内振动，反映了材料的石墨化程度；2D峰证明了石墨烯类晶格结构的生成（图3(c)），计算得出I_D/I_G=

0.96。较高的D峰强度和接近1的比值表明，在该激光加工下，生成的激光诱导石墨烯含有较多的结构缺陷和边缘活性位点，这通常与激光快速升温/降解过程中的非平衡态转变有关。虽然I_D/I_G较高，但明显的G峰和2D峰表明材料已成功实现了高度碳化并形成了连续的导电网络，能够满足传感器对导电性和稳定性的需求。

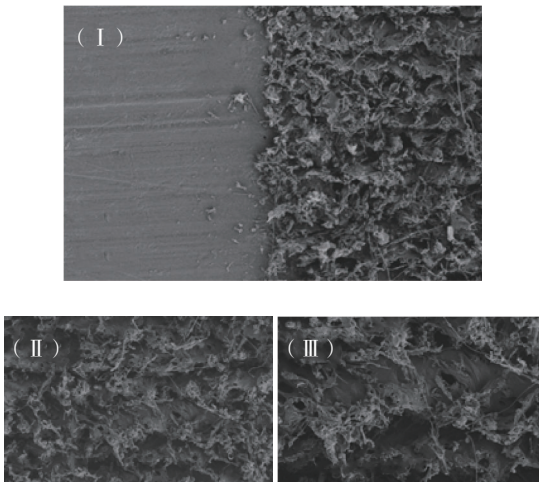
本文研究了碳基传感单元的温度响应特性，如图3(d)所示，在–10~110 ℃的环境温度范围内，材料的相对电阻变化率与温度表现出优异的线性正相关关系。值得注意的是，通过调节激光加工功率(1.8~2.2 W)，可以实现对传感单元温度灵敏度的有效调控。这种灵敏度的可调性归因于不同激光能量密度下碳网络微观形貌及石墨化程度的差异。为验证传感器的热稳定性，对其进行了长周期的温度循环测试(图3(e))，结果显示，电阻响应曲线在多个循环周期内未观察到明显的信号漂移。此外，该传感单元展现出良好的应变感知能力。图3(f)记录了传感器在0.2%~0.8%递增应变下的实时响应，随着拉伸应变的增加，电阻变化率呈台阶状稳定上升，证明了其较高的应变分辨力。进一步对应变传感器进行循环载荷测试(图3(g))，输出信号保持了一致性与波形完整性，未出现明显的疲劳损伤或迟滞现象。

2.3 基于复合材料的激光原位制造双模传感系统

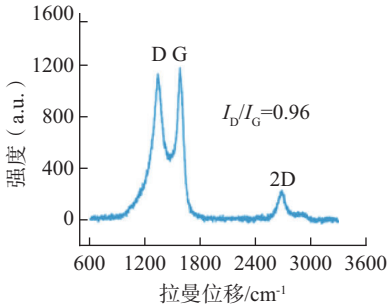
图4展示了激光原位诱导技术与微电子工艺集成后的全系统表现。后端系统以集成了ADC数模转换



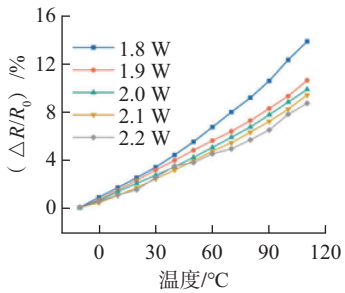
(a) 激光诱导PEEK碳化示意图



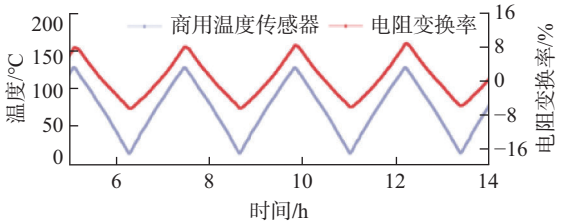
(b) 碳化产物微观形貌表征SEM图



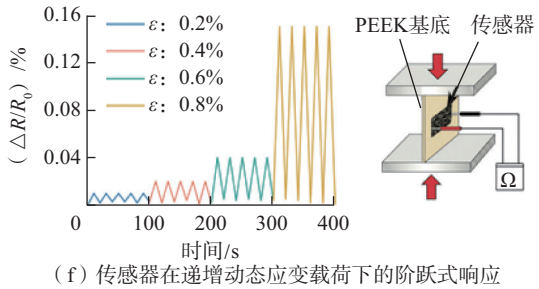
(c) 碳基单元的拉曼光谱



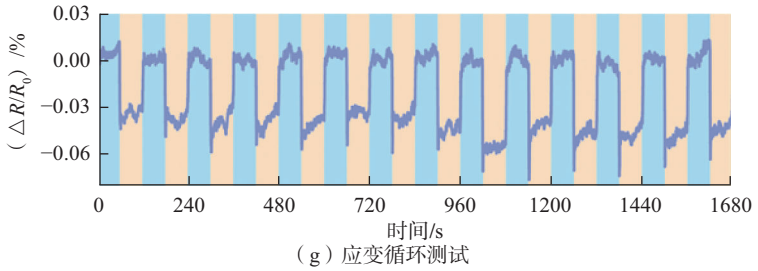
(d) 不同激光功率加工的传感单元的温度响应曲线



(e) 传感器在长周期宽温区循环测试下的动态响应



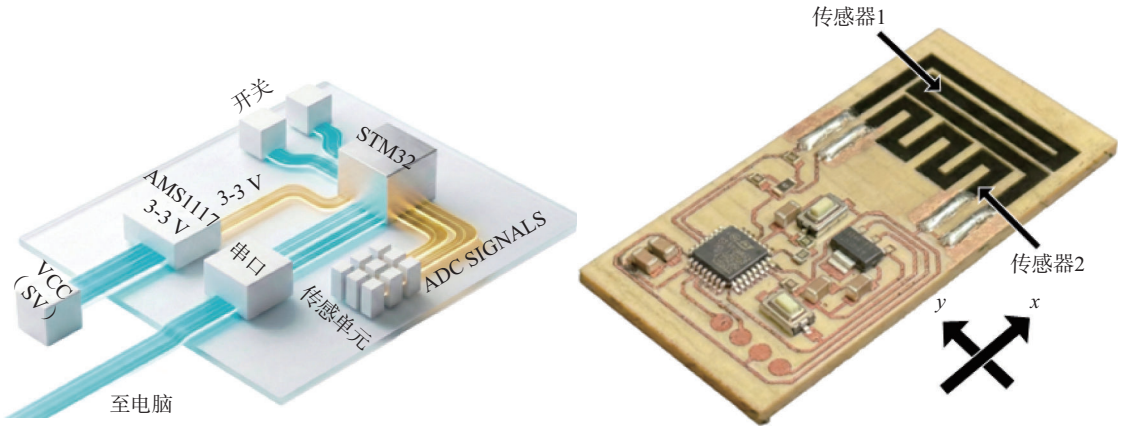
(f) 传感器在递增动态应变载荷下的阶跃式响应



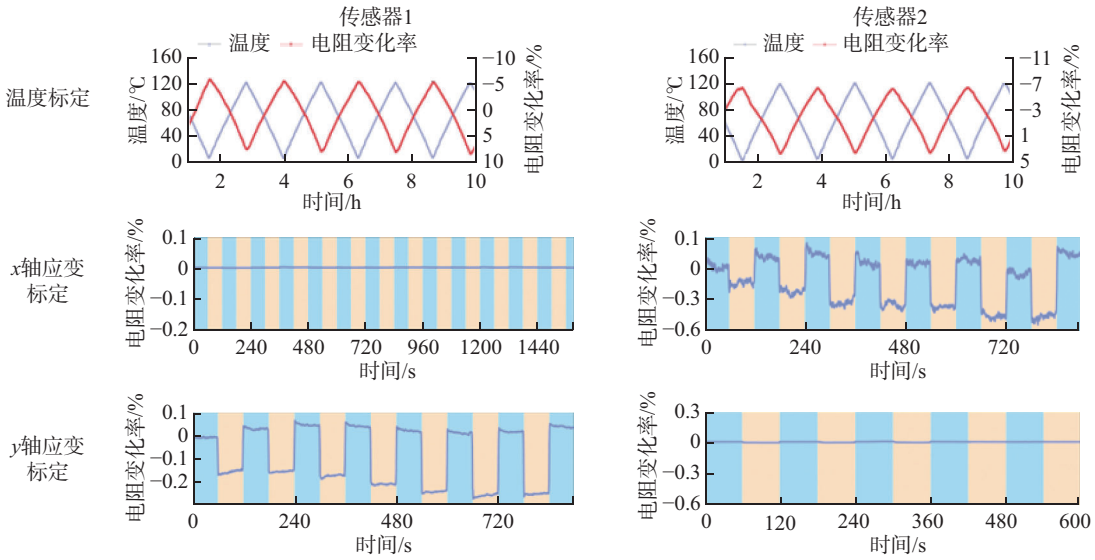
(g) 应变循环测试

图3 激光原位诱导碳基传感单元

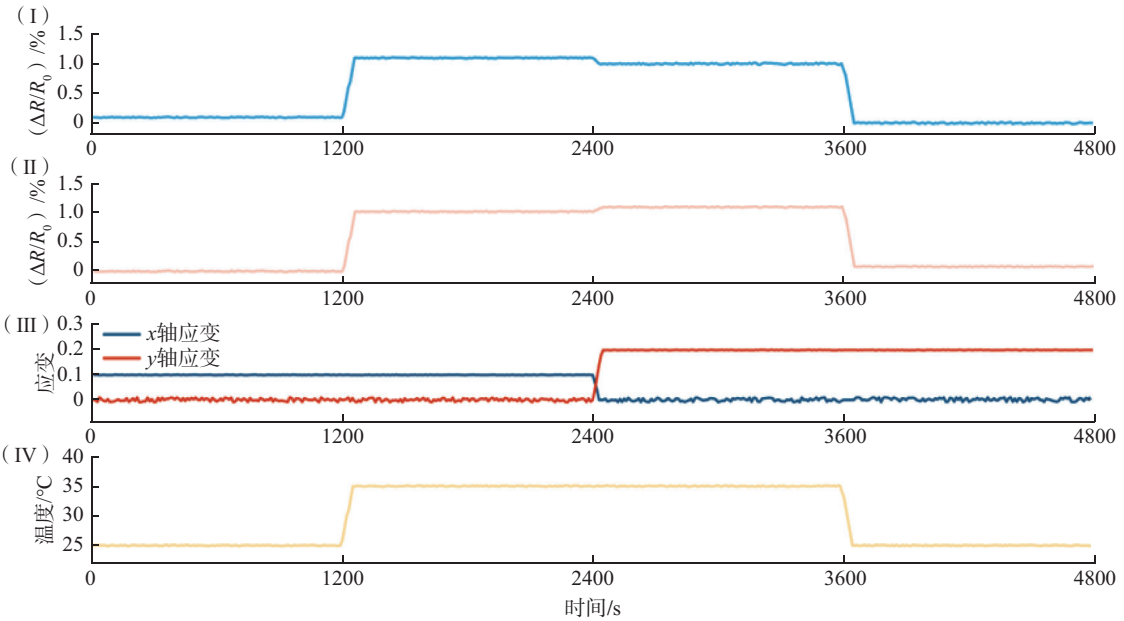
Fig.3 Laser in-situ induced carbon-based sensing unit



（a）系统架构与电路逻辑示意图　　（b）一体化集成系统实物原型



（c）对传感器1和传感器2进行温度及*xy*轴应变标定



（d）传感器信号图像及双模态信号解耦后的图像

图4　基于复合材料的激光原位轻量一体化双模传感系统

Fig.4　Laser-induced in-situ lightweight integrated dual-modal sensing system based on composite materials

器、数据处理单元及串口通信单元的低功耗单片机STM32L031K6T6为核心，实现信号采集、信号处理及通信功能（图4(a)）。系统的感知核心由两个激光诱导碳基单元组成：传感器1与2通过几何结构的差异化设计解耦温度信号和应变信号（图4(b)），可以观察到电路与具有微纳结构的基底实现了高度融合。这种原位加工工艺赋予了传感单元卓越的界面粘附性能，确保了系统在复杂工作环境下工作的稳定性。

通过引入特定的蛇形拓扑结构设计，可以人为诱导传感单元产生显著的应变感知各向异性。具体而言，传感器1的几何拓扑使其x轴应变敏感度显著低于y轴，而传感器2则通过正交化的结构设计实现了敏感方向的翻转，即y轴应变响应远弱于x轴。结合式(2)所述的解耦算法及试验标定获取的系数矩阵$\boldsymbol{K}$，即式(3)，该系统能够实现对环境温度(ΔT)、x轴应变(ε_x)及y轴应变(ε_y)的实时分离，受系统设计条件的制约，当前架构的实时解耦能力上限为双模态信号同步输入（图4(c)）。

$$\begin{bmatrix}\Delta T\\ \varepsilon_x\\ \varepsilon_y\end{bmatrix}=\boldsymbol{K}^{-1}\cdot\begin{bmatrix}\dfrac{\Delta R_1}{R_{1,0}}\\ \dfrac{\Delta R_2}{R_{2,0}}\end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix}\Delta R_1/R_{1,0}\\ \Delta R_2/R_{2,0}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0.1 & 1 & 0.01\\ 0.1 & 0.02 & 0.4\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\Delta T\\ \varepsilon_x\\ \varepsilon_y\end{bmatrix} \tag{3}$$

当系统捕捉到包含温度变化(ΔT)与机械应变(ε)的耦合信号后，后端处理单元利用标定的灵敏度矩阵进行差分运算，在算法层面分别提取出温度信号和应变信号。这种结构设计与算法层的协同方案，有效抑制了多模态信号间的交叉干扰，确保了系统在复杂载荷工况下多维度感知信号的能力。为了验证前述双模态信号解耦逻辑的有效性，开展了多阶段变工况加载试验。试验在0~4800 s范围内设置了4组力–热交叉耦合状态：初始阶段（0~1200 s）仅施加x轴应变ε_x=0.1并维持室温25 ℃；随后（1200~2400 s）在恒定应变下提高温度至35 ℃；在2400~3600 s阶段完成应变主轴切换ε_y=0.2，并于最后阶段（3600~4800 s）恢复室温25 ℃。对比传感器1（图4(d)–Ⅰ）与传感器2（图4(d)–Ⅱ）的原始混叠响应，通过应用式(3)的解耦模型，系统成功输出了相互独立的应变(ε_x,ε_y)与温度标量（图4(d)–Ⅲ，Ⅳ）。解耦输出曲线不仅有效滤除了交叉干扰，且与设定的动态边界条件精准吻合，这有力地证明了该系统在复杂多场耦合环境下的高保真感知能力。

3 结论

（1）本文提出并验证了一种适用于高性能复合材料原位监测的双模态传感系统激光结构功能一体化制造新方法，并以PEEK复合材料为例制作了一个双模态感知系统。该传感系统展现了对环境温度与动态应变的原位实时监测和高保真感知能力。

（2）优化的油墨配方和激光烧结工艺成功构建了方阻低至0.11 Ω/sq的高性能铜导电网络。

（3）复合微结构在互连铜线和基底之间建立了稳固的机械互锁机制，使电路粘附强度达到工业级5B标准，解决了异质界面粘附性差的问题。

（4）原位诱导生成的碳基传感单元(I_D/I_G=0.96)展现出对环境温度及微小应变的极高灵敏度。

参 考 文 献

[1] Soni R, Verma R, Kumar Garg R, et al. A critical review of recent advances in the aerospace materials[J]. Materials Today: Proceedings, 2024, 113: 180–184.

[2] Dorfman M R, Dwivedi G, Dambra C, et al. Perspective: Challenges in the aerospace marketplace and growth opportunities for thermal spray[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2022, 31(4): 672–684.

[3] Peters A B, Zhang D, Chen S, et al. Materials design for hypersonics[J]. Nature Communications, 2024, 15: 3328.

[4] Rahn A, Schuch M, Wicke K, et al. Beyond flight operations: Assessing the environmental impact of aircraft maintenance through life cycle assessment[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 453: 142195.

[5] Guney Yilmaz S, Ferik E, Birak S B, et al. High-performance thermoplastic nanocomposites for aerospace applications: A review of synthesis, production, and analysis[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2026, 45(1–2): 237–267.

[6] Haris N I N, Hassan M Z, Ilyas R A, et al. Dynamic mechanical properties of natural fiber reinforced hybrid polymer composites: A review[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 19: 167–182.

[7] Mousavi S R, Zamani M H, Estaji S, et al. Mechanical properties of bamboo fiber-reinforced polymer composites: A review of recent case studies[J]. Journal of Materials Science, 2022, 57(5): 3143–3167.

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

[9] Hou Y Y, Wang D F, Itoh T, et al. Maximizing modulation efficiency to minimize 1/*f* noise in magnetoresistance[J]. Measurement, 2023, 207: 112396.

[10] Broer A A R, Benedictus R, Zarouchas D. The need for

multi-sensor data fusion in structural health monitoring of composite aircraft structures[J]. Aerospace, 2022, 9(4): 183.

[11] Philibert M, Yao K, Gresil M, et al. Lamb waves-based technologies for structural health monitoring of composite structures for aircraft applications[J]. European Journal of Materials, 2022, 2(1): 436–474.

[12] Kosova F, Altay Ö, Ünver H Ö. Structural health monitoring in aviation: A comprehensive review and future directions for machine learning[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2025, 40(1): 1–60.

[13] Wang Y, Hu S G, Xiong T, et al. Recent progress in aircraft smart skin for structural health monitoring[J]. Structural Health Monitoring, 2022, 21(5): 2453–2480.

[14] Swiatlowska P, Sit B, Feng Z, et al. Pressure and stiffness sensing together regulate vascular smooth muscle cell phenotype switching[J]. Science Advances, 2022, 8(15): eabm3471.

[15] Cai J Y, Du M J, Li Z L. Flexible temperature sensors constructed with fiber materials[J]. Advanced Materials Technologies, 2022, 7(7): 2101182.

[16] Pang Q, Hu H T, Zhang H Q, et al. Temperature-responsive ionic conductive hydrogel for strain and temperature sensors[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(23): 26536–26547.

[17] 张卫红, 唐长红 . 航空航天装备的轻量化: 挑战与未来[J]. 航空学报, 2024, 45(5): 1–7.

Zhang Weihong, Tang Changhong. Lightweighting of aerospace and aeronautical equipment: Challenges and perspectives[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(5): 1–7.

[18] Nagaraju S B, Priya H C, Girijappa Y G T, et al. Lightweight and sustainable materials for aerospace applications[M]//Lightweight and Sustainable Composite Materials. Amsterdam: Elsevier, 2023: 157–178.

[19] Ogunleye R O, Rusnáková S, Javořík J, et al. Advanced sensors and sensing systems for structural health monitoring in aerospace composites[J]. Advanced Engineering Materials, 2024, 26 (22): 2401745.

[20] Hou Y Y, Yuan W L, Wang D F, et al. A low 1/*f* noise tunnel magnetoresistance accelerometer[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 9502511.

[21] Zhang W Q, Zhang L, Liao Y B, et al. Conformal manufacturing of soft deformable sensors on the curved surface[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2021, 3(4): 042001.

[22] Cai Z M, Miao C Y, Zhang C H, et al. Bio-inspired hybrid laser direct writing of interfacial adhesion for universal functional coatings[J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(49): 2408354.

[23] Yuk H, Wu J J, Sarrafian T L, et al. Rapid and coagulation-independent haemostatic sealing by a paste inspired by barnacle glue[J]. Nature Biomedical Engineering, 2021, 5(10): 1131–1142.

[24] Lu P P, Li X, Xu J Y, et al. Bio-inspired interlocking structures for enhancing flexible coatings adhesion[J]. Small, 2024, 20 (30): e2312037.

[25] Wang F, Liao X B, Wang H Y, et al. Bioinspired mechanically interlocking holey graphene@SiO_2 anode[J]. Interdisciplinary Materials, 2022, 1(4): 517–525.

[26] Hou Y Y, Xie H B, Li Y B, et al. A laser-induced wide-range thin-film temperature sensor without additional anti-oxidative encapsulations[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2025, 7(6): 065508.

[27] Hou Y Y, Xu Y H, Cai Z M, et al. Decoupled approaches for multimodal flexible sensor systems[J]. Nano Research, 2025, 18(8): 94907673.

[28] Peng P, Li L H, He P, et al. One-step selective laser patterning of copper/graphene flexible electrodes[J]. Nanotechnology, 2019, 30 (18): 185301.

[29] Zou Y, Zhong M, Li S C, et al. Flexible wearable strain sensors based on laser-induced graphene for monitoring human physiological signals[J]. Polymers, 2023, 15(17): 3553.

[30] Zhang Y H, Zhang Y C, Sun M Y, et al. Multifunctional flexible sensor based on cracked laser-induced graphene for tactile perception and self-healable applications[J]. ACS Applied Nano Materials, 2024, 7(17): 21170–21180.

[31] Liang H, Zhang S, Liu Y W, et al. Merging the interfaces of different shape-shifting polymers using hybrid exchange reactions[J]. Advanced Materials, 2023, 35: 2202462.

[32] 蔡子墨, 匡翠方, 杨华勇, 等 . 激光融合制造及在柔性微纳传感器的应用[J]. 中国激光, 2024, 51(4): 236–265.

Cai Zimo, Kuang Cuifang, Yang Huayong, et al. Hybrid laser manufacturing and applications in flexible micro-nano sensors[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(4): 236–265.

[33] Gent A N, Lin C W. Model studies of the effect of surface roughness and mechanical interlocking on adhesion[J]. The Journal of Adhesion, 1990, 32(2–3): 113–125.

[34] Chatzakis I, Sharma S. Temperature dependence of conductivity and mobility and electro-phonon coupling strength in graphene determined from electron relaxation rates[J]. AIP Advances, 2025, 15(7): 075131.

[35] Zheng H R, Ren Q C, Mei L, et al. Graphene-based tunneling strain sensors: A mechanism study[J]. ACS Applied Nano Materials, 2024, 7(20): 23696–23702.

（责编　七七）