引用格式：程思译，马河川，张宏凯．纤维增强复合材料结构健康监测技术研究进展[J]．材料工程，2026，54(5)：148-166.
CHENG Siyi, MA Hechuan, ZHANG Hongkai. Research progress in structural health monitoring technologies for fiber-reinforced composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2026, 54(5): 148-166.

纤维增强复合材料结构健康监测技术研究进展

程思译[1,2]，马河川[1,3]，张宏凯[1*]
（1 西安交通大学 机械工程学院，西安 710049；2 浙江理工大学 机械工程学院，杭州 310018；
3 重庆文理学院 智能制造工程学院，重庆 402160）

摘要：纤维增强复合材料以高比强度、高比模量、优良疲劳与耐腐蚀性能，在航空航天、交通运输及能源等领域得到广泛应用。然而，在严苛服役环境下，其内部损伤的隐蔽演化可能导致突发性失效，亟须高效的结构健康监测（structural health monitoring，SHM）技术。本文综述了该领域的研究进展，从离线无损检测（包括超声、X 射线/CT、红外热成像、声发射）和在线监测（表面式应变计、压电、光纤传感器，嵌入式光纤、电阻及压电传感器）两方面系统分析了原理、性能优势以及主要局限。对比结果表明：离线技术精度高但无法实时，在线技术可实现动态监测，但存在深度不足与信号解析能力有限等问题。最后，概述了未来发展关键方向，包括传感器与结构的协同设计、多功能损伤感知以及面向模式识别和预测性维护的智能信号处理，为复杂服役条件下复合材料的智能化监测提供参考。

关键词：纤维增强复合材料；结构健康监测；无损检测；嵌入式传感；损伤监测
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000702　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000702
中图分类号：TB332　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)05-0148-19

Research progress in structural health monitoring technologies for fiber-reinforced composites

CHENG Siyi[1,2], MA Hechuan[1,3], ZHANG Hongkai[1*]
（1 School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2 School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;
3 School of Intelligent Manufacturing Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China）

Abstract: Fiber-reinforced composites, renowned for their high specific strength, high specific modulus, exceptional fatigue resistance, and outstanding corrosion resistance, are extensively utilized across the aerospace, transportation, and energy industries. Nevertheless, under severe service conditions, the latent progression of internal damage can precipitate sudden failure, underscoring the pressing need for effective structural health monitoring (SHM) technologies. This review comprehensively summarizes the latest advancements in this field, conducting a systematic analysis of the principles, performance merits, and principal limitations of both offline nondestructive testing methods (encompassing ultrasound, X-ray/CT, infrared thermography, and acoustic emission) and online monitoring techniques (including surface-mounted strain gauges, piezoelectric and fiber-optic sensors, as well as embedded optical fiber, resistive, and piezoelectric sensors). Comparative analysis reveals that offline techniques boast high accuracy but are devoid of real-time capability, while online techniques facilitate dynamic monitoring yet are hampered by limited penetration depth and signal interpretation capabilities. Finally, the paper delineates key avenues for future development, such as the co-design of sensors and structures, multifunctional damage sensing, and intelligent signal processing for pattern recognition and predictive maintenance, offering a valuable reference for the intelligent monitoring of composites under complex service conditions.

Key words: fiber-reinforced composite; structural health monitoring; nondestructive testing; embedded sensing; damage monitoring

纤维增强复合材料具有高比强度、高比模量、优良疲劳与耐腐蚀性能，已在多个高科技领域得到广泛应用，涵盖航空航天、汽车制造和风力发电等关键行业，包括飞机机翼、火箭外壳、车身框架、内饰部件、风电叶片和机舱外壳等典型构件[1-3]。这些应用不仅突显了复合材料的轻量化优势，还推动了相关产业的创新发展。这些应用领域和需求多种多样，涵盖从高空高速飞行到海洋深水作业的极端环境。因此，复合材料将面临严苛条件如高低温、高频振动、化学腐蚀、多轴疲劳载荷和突发冲击等复杂承载场景[4]。这些场景往往交织出现，例如，航空器在高空遭遇湍流和辐射，汽车在城市道路经受反复制动和碰撞，风电机组在海上承受波浪和盐雾侵蚀[5]。在这些严苛条件下，复合材料的损伤模式多样且隐蔽，通常在外部无明显迹象的情况下逐步积累，主要包括（树脂）基体破坏、纤维断裂、纤维/树脂界面脱粘和分层等形式[6]。这些损伤往往源于材料微观结构的非均匀性和服役环境的复杂性，难以通过常规检查及早发现。可能引发灾难性的后果，造成不可逆的损失和连锁反应[7-8]。

实际应用中复合材料构件失效引发的典型事故包括：(1)在航空航天领域，飞机机翼断裂或航天器太阳能翼板受微陨石撞击产生坑洞，可能导致空中结构解体或能源供给系统失效。(2)在风力发电领域，叶片折断可能导致发电机组倾覆，不仅中断电力供应并造成能源短缺，还可能引发连锁环境灾害，如碎片散落污染周边区域，影响生态平衡。(3)在工业领域，复合材料压力容器爆裂可能释放高压气体或化学物质，引发爆炸或泄漏事故，不仅造成工业现场的人员伤亡和财产破坏，还可能污染空气和水源，引发长期的环境与健康危机。(4)在船舶领域，螺旋桨叶片断裂可能引发推进系统故障，在恶劣海况下造成船舶失控或沉没，不仅威胁海上贸易和人员安全，还可能引发油污泄漏等环境灾难。这些例子凸显了损伤监测的紧迫性，只有通过及时干预，才能避免从微小缺陷演变为系统性失效。特别是在无人值守的应用场景中，在线监测功能不仅能提供实时数据反馈，还能显著降低人工巡检的风险和成本，确保结构安全与运营连续性。

基于上述损伤情况，非常需要实时了解复合材料内部的损伤状态，及时发现潜在破坏以避免更大损失和灾难性后果。为此，结构健康监测（structural health monitoring，SHM）技术应运而生。SHM 技术是一种多学科集成的系统方法，涉及传感技术、微纳制造、信号处理、数据分析、人工智能等要素，通过在材料中嵌入或附着传感器（如压电传感器、光纤传感器或应变计）实时采集响应信号，例如应变变化、振动模式、电学阻抗或声发射波形，从而监测损伤的发生、位置、模式和发展演化[9-10]。这种技术类似于人体健康监测系统，能实现从被动维护向主动预测的转变，例如在复合材料结构中集成分布式传感网络，连续评估内部应力分布和缺陷扩展，支持在线预警和决策优化[11-13]。SHM 技术的优势在于其非破坏性、高效性和可扩展性，提升结构的整体可靠性和安全性。

尽管纤维增强复合材料涵盖了从金属基、陶瓷基到聚合物基的广泛范畴，但鉴于应用场景的普遍性与监测需求的紧迫性，本文将讨论范围明确限定于航空航天、交通运输及风电能源领域应用最为广泛的聚合物基复合材料。重点关注以碳纤维增强树脂基复合材料（carbon fiber reinforced plastics，CFRP）和玻璃纤维增强树脂基复合材料（glass fiber reinforced resin based composite material，GFRP）为代表的复合材料。对于金属基或陶瓷基复合材料，仅在涉及特定高温环境下的特种传感器应用时做简要讨论，不作为本文的主要论述对象。

1　纤维增强复合材料离线检测技术

SHM 技术在纤维增强复合材料领域的应用日益重要，能够实时评估材料的完整性、损伤状态和性能退化，避免突发失效并优化维护策略。随着复合材料在航空航天、能源和交通等高风险领域的广泛推广，如何全面、可靠地监测其健康状况已成为全球材料科学和工程领域的热点研究方向。现有的 SHM 技术主要分为离线检测技术和在线监测技术两大类，前者强调高精度评估，但需中断结构服役进行停机操作，后者则注重实时感知和动态跟踪，但面临传感器集成与信号处理的挑战[14-15]。这些技术的演进源于 20 世纪中叶的无损检测基础，随着数字化和智能化的进步，已从被动检查向主动监测转型[16]。本文将对这些技术的现状进行详细介绍，系统讨论其原理、应用场景、优势与局限性，并分析其在纤维增强复合材料中的适应性。

离线检测技术，以无损检测技术（non-destructive testing technology，NDT）为主，是指在材料制造完成后的定期维护阶段，通过外部设备对复合材料进行非实时、无损评估，主要有两种用途：识别生产后的缺陷检测和因服役导致的内部隐蔽。为了区别于缺陷检测，本研究将主要讨论损伤检测用途。该技术的发展历史可追溯到 20 世纪 50 年代的工业应用，最初用于金属材料，后逐步扩展到复合材料领域，其优势在于高分辨率、可靠性和无需永久嵌入传感器，从而避免

对结构性能的干扰[17-18]。在纤维增强复合材料中，这些方法已较为成熟，并在航空航天、汽车和风电等行业广泛适应。本文将分类介绍几种典型NDT技术，涵盖其原理、实施方式和实际案例，以展示其在复合材料损伤检测中的作用。

1.1 超声检测

超声检测是NDT领域的核心技术，包括脉冲回波法、透射法和相控阵超声等变体。超声波探伤的基本原理是：定向发射的超声波束在被测工件中传播时遇到缺陷，即产生波的反射和衰减，经信号处理后获得缺陷信号。缺陷显示主要有三种基本方式[19]：A扫(A-scan)显示缺陷深度与反射信号幅度；B扫(B-scan)显示缺陷纵向分布及其深度；C扫(C-scan)则呈现平面分布形态。

其中，超声C扫是复合材料无损检测与评估中应用广泛且重要的方法。该技术基于超声C扫与B扫成像原理，可实现复合结构的超声视觉无损检测。目前，基于单声源的超声C扫描成像检测技术仍是复合材料检测领域最常用的检测手段。相较于破坏性检测方法，该技术不会损伤被测物体，且能获得更优检测结果。水浸式超声C扫检测最为常用，其以水为耦合剂，使超声波通过水介质进入试样进行检测。Hasiotis等[20]利用超声波C扫描技术检测添加到碳纤维复合材料中的人为缺陷，实现了缺陷的确定和表征，并精确测量了试件的厚度。Shiino等[21]使用超声波C扫描来检测由温度变化引起的热应力对碳纤维层压板造成的损坏。他们的工作证实了温度变化会在复合材料的低孔隙率中引起裂纹。

阵列超声检测技术因其更高的检测精度和灵活性，已逐步取代常规超声检测方法，广泛应用于航空航天领域复杂结构和特殊材料的无损检测和评价。Wong等[22]使用由64个压电元件组成的二维超声阵列换能器来测量各向异性碳纤维片材的全弹性常数矩阵，这不同于传统的非破坏性地确定碳纤维复合材料的弹性性质的方法，这是一种原位非破坏性地测试复合材料弹性性质的方法。相控阵超声波检测技术是一种基于阵列换能器的多通道测试方法，可以使用相位控制将声波偏转和聚焦在试件内部的指定区域，具有更灵活的波束控制能力、更高的检测灵敏度、分辨率和测量覆盖范围。因此，可以使用相控阵超声检测复合材料不同的缺陷类型如图1所示，如分层缺陷[23]、剥离缺陷[24-25]、孔隙缺陷[26]。Caminero等[27]制备具有不同材料、形状、尺寸和埋深的预埋分层缺陷的样品，并研究分层方法和厚度对测试结果的影响。Lamarre[28]实现了对风力发电机叶片用碳纤维复合材料中1.5 mm小缺陷的检测，可检测出剥离、孔隙等缺陷。

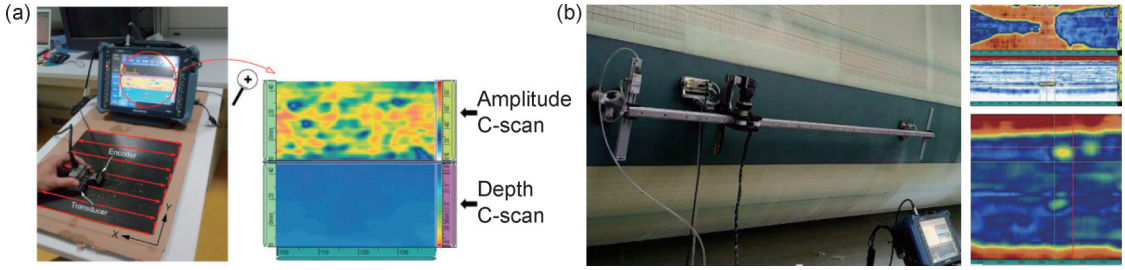


图1 相控阵超声检测复合材料不同的缺陷类型

(a)分层缺陷[23]；(b)剥离[24-25]、孔隙缺陷[26]

Fig.1 Phased array ultrasonic testing for different defect types in composites

(a)delamination defects[23]; (b)debonding[24-25] and porosity defects[26]

1.2 X射线和计算机断层扫描

X射线和计算机断层扫描(CT)提供高精度三维成像，其原理是利用X射线扫描穿透材料，捕捉衰减的X射线信号并将其转换成电子信号，经过处理后重建内部结构图像，从而提供待测物体内部结构。该技术特别适合检测微小孔隙，不仅能识别孔隙的体积分布，还能通过三维重建精确量化孔隙，从而准确评估缺陷的大小和体积[29]。

因此，X射线和CT扫描方法被很多聚焦于解决复合材料孔隙率问题的工作大量使用。Stamopoulos等[30]利用X射线计算机断层扫描技术评估碳纤维复合材料孔隙率对其力学性能的影响，并辅以机械测试程序。他们的研究结果清楚地表明，复合材料中孔隙的存在极大地损害了其结构完整性。Dilonardo等[31]意识到无损评价方法的必要性，并引入了一种基于CT技术的创新方法来综合评价CFRP孔隙度。

对于具有大宽度的物体，或者因为分辨率要求需要物体非常靠近X射线源，可能难以对非常小的缺陷进行高分辨率检测，从而妨碍全方位扫描。为此，一种新的CT技术被开发——可变焦距X射线CT。它

可通过检查远离受损表面区域的不同厚度位置的切片，对可变变焦技术的重建质量进行定性分析。如图 2(a)所示[32]，这种技术可以清楚地检测复合材料层压板的分层和损伤。

考虑到损伤演化过程中初始裂纹的尺寸极小，微结构中微裂纹的识别需要具有更高空间分辨率的无损检测技术。Sun 等[33]研究了碳纤维复合材料在不同低速撞击能量下的撞击响应和损伤，并使用微型计算机断层扫描对样品的损伤进行可视化和定量分析(图 2(b))。结果表明，在 65 J 能量下，试样表现出最好的抗冲击损伤能力，并且随着冲击能量的增加，损伤体积和面积呈指数增加。

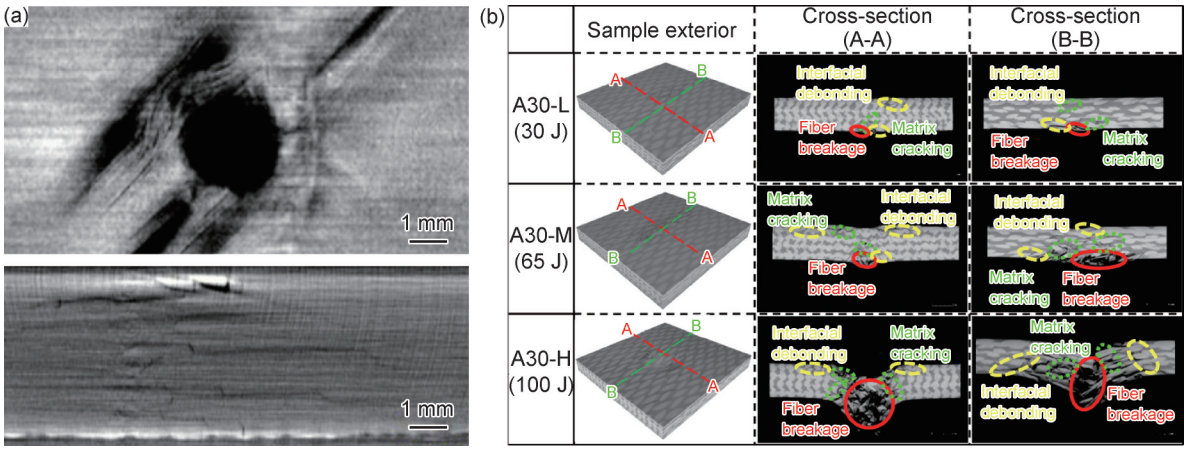


图 2　X 射线和 CT 扫描法　(a)可变焦距 X 射线 CT[32]；(b)微型计算机断层扫描[33]

Fig.2　X-ray and CT scanning methods　(a)variable-focus X-ray CT[32]; (b)micro-computed tomography[33]

总之，CT 技术在快速生成高质量样本断层成像方面表现良好。通过对 CT 图像的深入分析和处理，可以洞察被检测对象的空间定位、形状和大小等关键属性。通过这种高精度和快速的 CT 成像能力能够有效地获得复合材料内部的三维信息，如缺陷、层分离、脱粘和冲击损伤，为理解损伤机制和制定失效准则提供了有价值的视角。然而，值得注意的是，对于具有复杂几何形状的样本，与方向不敏感相关的问题仍然存在，需要持续努力来提高定性故障检测。

1.3　红外热成像

红外热成像是一种非接触光学方法，广泛用于检测复合材料的缺陷，如脱层、孔隙和断裂。其原理是通过外部热源激励材料表面，捕捉热异常分布来识别缺陷，例如分层区域的热扩散差异导致的温度梯度[34]。红外热成像主要分为脉冲热成像(pulsed thermal imaging，PT)、锁相热成像(lock-in thermography，LIT)和热波雷达成像(thermal wave radar imaging，TWRT)[35]。材料的热物性差异是红外热成像检测的基础。碳纤维具有较高的轴向热导率，热波在面内的传递速度较快，有利于快速扫描，但也容易导致缺陷边缘模糊；相比之下，玻璃纤维作为热的不良导体，热扩散率低，虽然检测所需加热时间较长，但在特定条件下能获得对比度更锐利的缺陷边界。

图 3 为红外热成像法[36-37,39]PT 技术是红外热波无损检测领域中发展最早、应用最广泛的技术之一。这种技术包括用高能光源(如激光、卤素灯或闪光灯)短暂加热测试物体，通常为毫秒级，并利用内部缺陷或界面引起的热阻变化来改变表面温度。这些变化由红外热像仪记录，随后通过先进的后处理算法进行分析，对内部缺陷进行无损评估。Liu 等[36]介绍了一种检测碳纤维增强复合材料层间裂纹的新方法。该方法基于激光线热成像技术，并与传统的锁相热成像技术进行了比较，建立了三维有限元模型来模拟激光热成像过程，重点研究了激光功率和脉冲宽度这两个关键参数对检测结果的影响。LIT 技术是 20 世纪 90 年代初发展起来的一种先进的数字无损检测技术，其使用单频正弦调制热激励源来加热测试对象。这种技术可以准确评估材料的表面和内部缺陷。与 PT 不同，LIT 使用锁相算法从测试对象表面的温度场提取振幅和相位信息。通过调整激发频率，提供了更宽的检测范围和更大的检测深度[35]。De Oliveira 等[37]提出了一种表征碳纤维增强塑料 CFRP 冲击损伤的有效方法，将光学锁相热成像与光学脉冲错位散斑成像相结合。Dong 等[38]利用红外锁相热成像技术对 CFRP 复合材料中的分层缺陷进行无损检测，显著提高了亚表面缺陷检测和表征的准确性。

TWRT 技术以其高效率和高灵敏度而日益成为纤维增强复合材料无损检测的重要手段。与传统的红外热成像技术相比，在探测深层缺陷方面具有独特的优势，但也面临着挑战：低调制频率会降低分辨率，

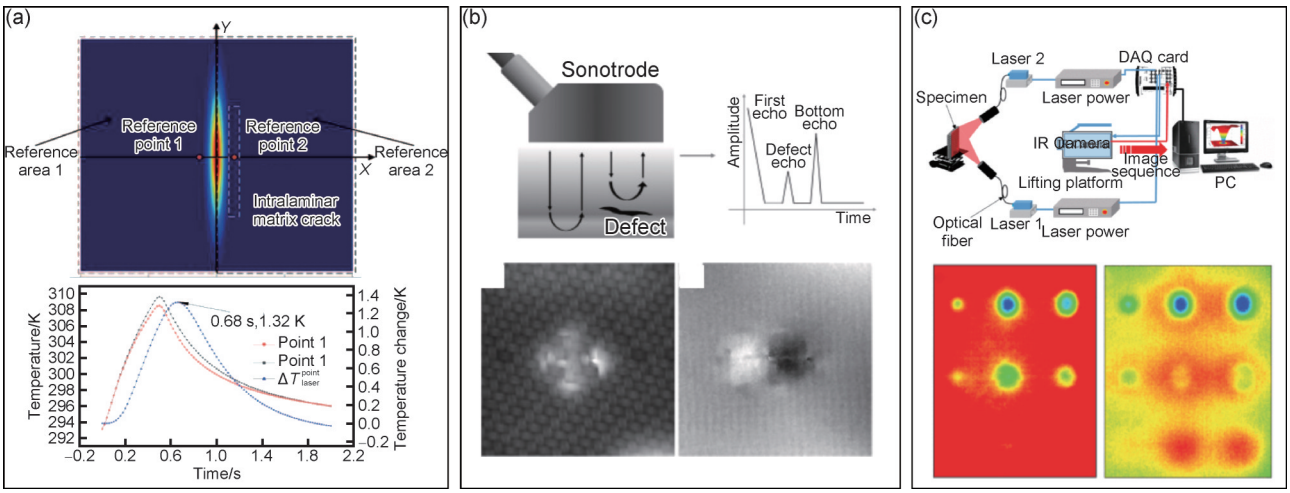


图3 红外热成像法

(a)脉冲热成像[36];(b)锁相热成像[37];(c)热波雷达成像[39]

Fig.3 Infrared thermography methods[37]

(a)pulsed thermography[36];(b)lock-in thermography[37];(c)thermal-wave radar imaging[39]

过度的热流刺激会增加热损伤的风险。因此,平衡这些因素对于优化实际应用中的检测性能至关重要。Wang 等[39]主要研究了横向热流抑制(lateral heat flow suppression,THFS)技术对热波雷达热成像检测碳纤维复合材料层压板表面下缺陷的影响。该研究引入THFS以增强行波管对横向热扩散和不均匀加热的抵抗力,提供了THFS原理的详细解释。通过仿真和实验研究,证明了THFS显著增强了缺陷区域和非缺陷区域的区分,从而提高了缺陷检测的准确性。

总之,红外热成像技术是无损检测纤维增强复合材料的关键工具之一。作为一种高效的非侵入性技术,在捕捉复合材料结构表面的温度分布方面表现出色。红外热成像允许通过对热图像的深入分析来及时检测潜在的缺陷,例如裂缝、孔隙和脱层。但是,考虑环境温度和背景辐射对结果的潜在影响很重要,因为这项技术主要提供定性分析,而不是定量数据。

1.4 声发射检测

声发射检测是一种被动监听方法,如图4所示[42,44,49],其原理是通过安装在材料表面的传感器捕捉损伤事件产生的瞬态弹性波信号,实现对内部损伤的实时定位和评估[40]。声发射探头用于捕捉测试结构在负载下的微小表面振动并将其转换为模拟信号。经过前置放大器放大这些模拟信号的强度并将其数字化,最后进行数据处理形成声发射波形。声发射检测的核心主要围绕声发射波形分析和从波形中提取关键特征,并将波形和特征与损伤事件、损伤模式进行对应[41]。声发射信号的特征与基体材料的韧性密切相关。在脆性基体(如环氧树脂)复合材料中,基体开裂往往产生高幅值、短持续时间的突发型信号;而在增韧基体或热塑性复合材料中,由于塑性变形的存在,信号衰减较快,且容易出现低幅值的连续型信号,这对信号采集系统的阈值设定与特征提取提出了针对性的要求。

Bourchak 等[42]利用声发射检测碳纤维增强复合材料层压板中由静载荷和疲劳载荷引起的各种类型损伤,通过对静载荷和疲劳测试中声发射能量的应力-应变分析,可以深入了解复合材料板材在不同载荷条件下的损伤累积情况。孙贺等[43]提出了一种在线监测CFRP的基于声发射的损伤预测方法,解决了碳纤维材料在变形或运行过程中造成损伤的复杂性。通过分析来自试样上不同位置的声发射信号,可以获得声发射的模态识别信息。这些研究表明,随着损伤的累积,高频分量信号的波动可以作为复合材料层合板失效的早期预警,为在线结构健康监测提供了有价值的见解。

声发射检测还可以使用多个传感器组成网络,实现对信号源的定位。Liu 等[44]提出了一种基于多传感器阵列和数据场理论分析的圆柱壳结构声发射源定位方法。通过对传感器进行分组,可以估计最短的P波传播距离,并可以应用解析推导和迭代定位方法,有效地解决圆柱壳结构中声发射源定位的挑战。然而,由于声发射信号在各向异性CFRP中传播的复杂性质,声发射源定位仍可能出现一些偏差。为了提高定位精度,齐添添等[45]引入了时间反转聚焦增强技术,以满足基于时间反转原理的声发射定位要求,提高了CFRP损伤定位源的精度。

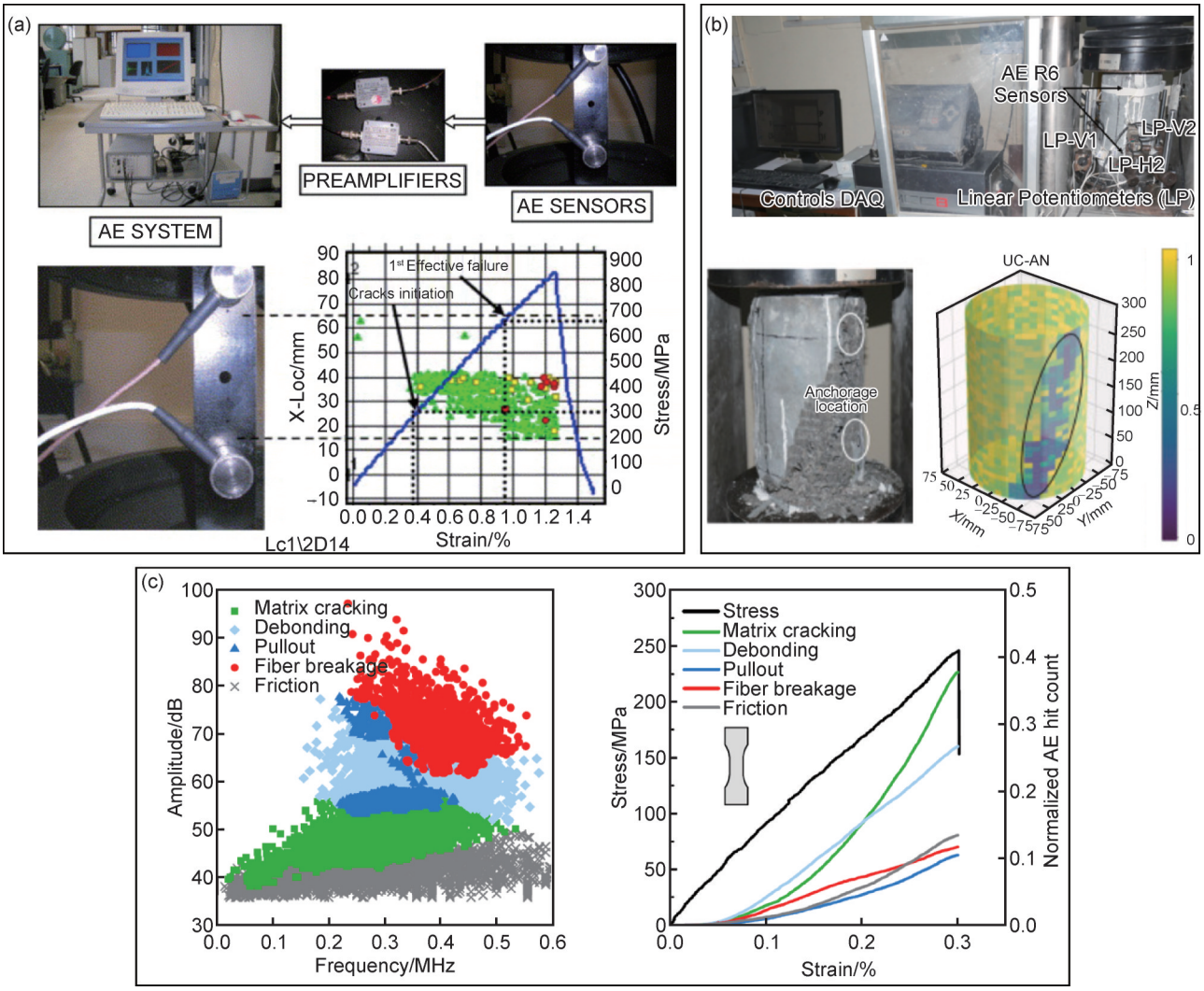


图 4　声发射方法

(a)声发射检测损伤[42]；(b)声发射定位[44]；(c)损伤模式识别[49]

Fig.4　Acoustic emission methods

(a)damage detection by acoustic emission[42]; (b)acoustic emission localization[44]; (c)damage mode identification[49]

此外，由于声发射的波形包含丰富特征，如峰值频率、幅度、持续时间和能量分布等，可以实现信号解析，通过分析这些声波特征（如频率分量）来分类损伤模式以及分析损伤演化过程[46-48]。Almeida 等[49]提出了一种基于监督机器学习的声发射信号分类方法，首先对复合材料的纤维、基体和界面进行单独表征，提取各损伤机制的特征指纹；然后使用 K-最近邻算法训练模型，准确率达 88%。复合材料的拉伸测试中，该方法识别出矩阵裂纹和纤维断裂等机制的位置、时间和强度，支持损伤机制的深入理解。Cui 等[46]开发了一种实时损伤识别方法，用于 2.5D SiC_f/SiC 复合材料，通过声发射结合 K-means 聚类和改进去卷积技术，分类矩阵裂纹、界面脱粘、纤维束断裂和单纤维断裂等机制；结合有限元分析，揭示了偏心载荷角度对断裂行为的影响，导致能量耗散增加和断裂韧性显著提高，支持损伤演化规律的分析。

在工程应用方面，声发射技术目前是复合材料压力容器检测的标准手段之一。在氢能源汽车储氢瓶的打压测试中，通过布置在瓶身表面的声发射传感器网络，能够实时捕捉纤维断裂声音信号。一旦声发射撞击数或能量累积速率超过安全阈值，系统即判定结构存在重大缺陷并停止加压，有效预防了灾难性爆破事故。

总之，声发射检测技术对于检测 CFRP 材料的内部缺陷和损伤非常有效。声发射对微小缺陷的敏感性、准确的损伤检测和定位、损伤起始信息以及损伤模式（如脱层和裂纹）的识别是该技术的显著优势。尽管如此，声发射检测技术也存在一定的局限性：如背景噪声干扰大、信号解释复杂；需要先进的滤波算法；主要用于实验室或控制环境下的离线评估，无法

完全避免停机需求。

1.5 离线检测技术小结

表1总结了不同离线检测技术的比较，包括原理、优势、局限性和典型应用。通过该表可以看出，不同方法在精度、成本和适用性上存在互补性，形成了一个多层次的检测体系。

表1 纤维增强复合材料离线检测技术比较

Table 1 Comparison of offline inspection technologies for fiber-reinforced composites

Technology	Principle	Advantage	Limitation	Application
Ultrasonic testing	Acoustic wave reflection	High resolution; internal defect detection	Requires couplant; time-consuming	Aerospace components
X-ray/CT	Radiographic imaging	3D visualization	Radiation hazard; high equipment cost	Pressure vessels
Infrared thermography	Thermal anomaly detection	Non-contact; rapid scanning	Surface-sensitive; environmental interference	Large-scale structures
Acoustic emission	Transient elastic waves	High sensitivity; rast response	High noise susceptibility; complex signal analysis	Aerospace structures

尽管这些离线检测技术在精度、成熟度和工业应用上具有显著优势，已成为复合材料质量保障的标准工具，但其本质上的离线性质要求中断结构服役进行停机操作，这不仅增加了时间成本和物流负担，还无法实现对动态损伤过程的实时跟踪，例如在复合材料承受循环载荷时的渐进失效。此外，对厚壁或复杂几何结构的穿透深度有限，易受材料异质性干扰，且依赖昂贵设备和专业人员，限制了其在偏远或连续运行场景中的推广。这些局限性凸显了传统NDT的被动性，推动了研究界向在线监测技术的转变，以实现从事后评估向主动预防的范式转换，从而更好地适应复合材料在高动态环境下的需求。

2 纤维增强复合材料在线监测技术

鉴于离线检测技术的停机要求和动态局限性，在线监测技术应运而生，成为SHM领域的发展重点。在线监测技术旨在实现复合材料在服役状态下的连续、实时损伤评估，无需中断操作，从而捕捉动态损伤过程如疲劳裂纹扩展或冲击响应。这种技术的兴起源于20世纪80年代的传感器集成革命，随着物联网和无线通信的进步，已从简单信号采集向智能数据分析演进。其核心优势在于预防性维护、减少意外停机和提升结构安全性。在线监测技术主要分为两类：表面（外部）监测技术和嵌入式（内部）监测技术。前者通过附着于材料表面的传感器实现非侵入式数据采集，易于安装但深度有限；后者则将传感器嵌入材料内部，实现原位感知，但面临相容性和耐久性挑战。以下将详细介绍表面在线监测技术，涵盖其原理、应用和现状，以突出其在复合材料SHM中的作用。

2.1 表面在线监测技术

表面在线监测技术通过将传感器直接附着于复合材料的外表面来实现实时数据采集和损伤评估，这种方法无需修改材料内部结构，安装简便且成本相对较低，常用于航空翼面、汽车车身和风电叶片的动态监测。随着微机电系统和柔性电子学的进步，表面技术正向无线化和多功能集成方向发展，但仍需应对环境干扰和表面损伤的挑战。以下将分类介绍几种典型表面在线监测方法。

2.1.1 应变计

应变计是最基础且广泛应用的表面在线监测方法，其原理基于电阻应变效应，即当材料变形时，附着在其表面的金属箔或半导体应变片会发生电阻变化，从而量化局部应变和应力分布。在1843年，Wheatstone描述了在机械应变的作用下电导体中电阻变化的效应。1938年，西蒙斯和鲁格几乎同时但独立地发明了应变计。1952年，“金属箔应变片”首次被提及[50-51]。发展至今，应变计可分为以下三种主要类型，如图5(a)所示：金属丝应变计、箔式应变计、薄膜应变计[52]。

金属丝应变片主要用于两种应用场景。第一种是利用受压导体的应变效应。通常将一段锰铜合金丝绕成线圈，置于气体或液体压力测量区域，线圈电阻的变化即为传感器输出的信号[53]。第二种是利用受拉应变敏感材料的应变效应。应变片可以是“悬挂式”的，即金属丝固定在两个支架之间，作为弹性元件；也可以是“粘贴式”的，即将金属丝传感器通过薄纸或薄膜粘贴到基板上[54]。箔式应变计是最常见的粘合式传感器类型之一。由于其引线面积较大，与线式传感器相比，能提供更可靠的连接[55]，可以附着在各种曲面上（图5(b)）。箔式应变片通常采用康铜、镍铬合金等金属材料，以及钛铝合金等其他材料，钛

铝合金可以测量高达12%的应变[56]。薄膜应变计是通过在基底上沉积敏感材料来实现的，基于铋、钛、硅、锗等的薄膜应变计已被广泛使用。这种应变计的薄层厚度约为15～30 μm，最薄甚至仅有3 μm（图5(c)），在动态模式下以及高温下测量应变时具有显著优势[57-59]。

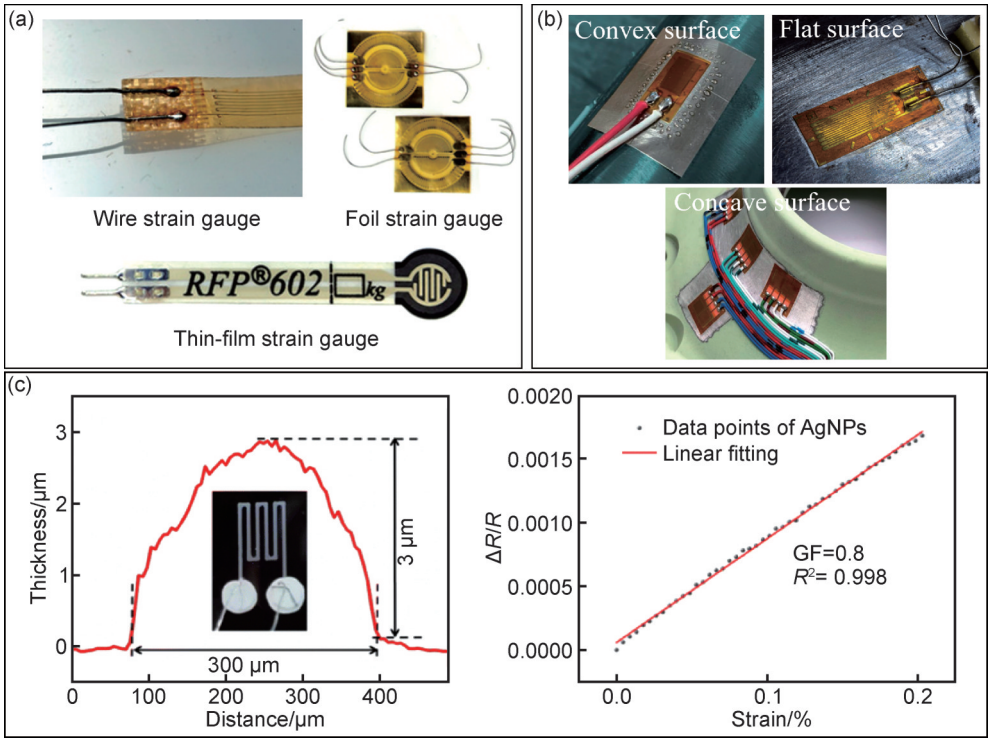


图5　应变计种类、安置及性能

(a)常用应变计种类[52]；(b)应变计安置在不同曲面上[55]；(c)硅基应变计的厚度表征和灵敏度曲线[59]

Fig.5　Types, placement, and performance of strain gauges

(a)common types of strain gauges[52]; (b)strain gauges mounted on different curved surfaces[55]; (c)thickness characterization and sensitivity curve of silicon-based strain gauges[59]

总之，应变计的优势在于高精度（可达微应变级）、响应快速和易于集成数据采集系统，但存在温度补偿和长期黏附稳定性问题，存在假阳性信号。

2.1.2　表面压电传感器

表面压电传感器的代表是锆钛酸铅（PZT）传感器，又称PZT压电陶瓷片。PZT具有压电效应强、频带宽、体积小、质量轻、成本低、稳定性好等优点，在SHM中得到了广泛应用[60-61]。其工作原理是当发射器转换信号时，压电接收器将参考信号与接收信号进行比较。如果发生故障，结构的固有频率和相位会发生变化，PZT传感器会发出故障报警。

Jerold等[62]使用有限元建模和实验程序来详细研究与智能压电材料结合的复合材料层压板的响应。将PZT固定在碳纤维增强聚合物层压板上进行悬臂配置来测量应变，结果显示，粘贴在复合材料上的传感器可以应用于受冲击和高压应用的飞机和航天结构的状态监测。Kergosien等[63]将SHM系统直接集成到材料中。在高压釜中固化嵌入PZT换能器的复合层压板。通过机电阻抗、X射线和激光多普勒测振仪测量来检测嵌入PZT的绝缘性、完整性和兰姆波产生能力。Jiang等[64]开发了一种可拆卸的PZT传感器，并将其用于主动传感，以检测钢梁和加固复合材料板之间的剥离损伤（图6(a)）。实验结果表明，3个脱胶区域的小波包能量指数随着脱胶程度的增加而降低。因此，通过使用可拆卸的PZT传感器，主动传感方法可以有效地检测钢梁和加固复合材料板之间的剥离。Feng等[65]开发了一种基于压电PZT换能器电路印刷技术的新型诊断膜（图6(b)）。诊断膜取代了传统的PZT传感器电缆连接，并且显著降低了主机结构的质量。

在工程应用方面，压电传感器网络已被应用于老旧飞机的延寿计划与结构热点监测中。通过在机身壁板或接头等应力集中区域布置PZT压电晶片，利用主动导波扫描技术，能够定期监测螺栓孔周边的微裂纹扩展情况。这种按需监测模式替代了部分昂贵且耗时的拆解检查，显著降低了维护成本。

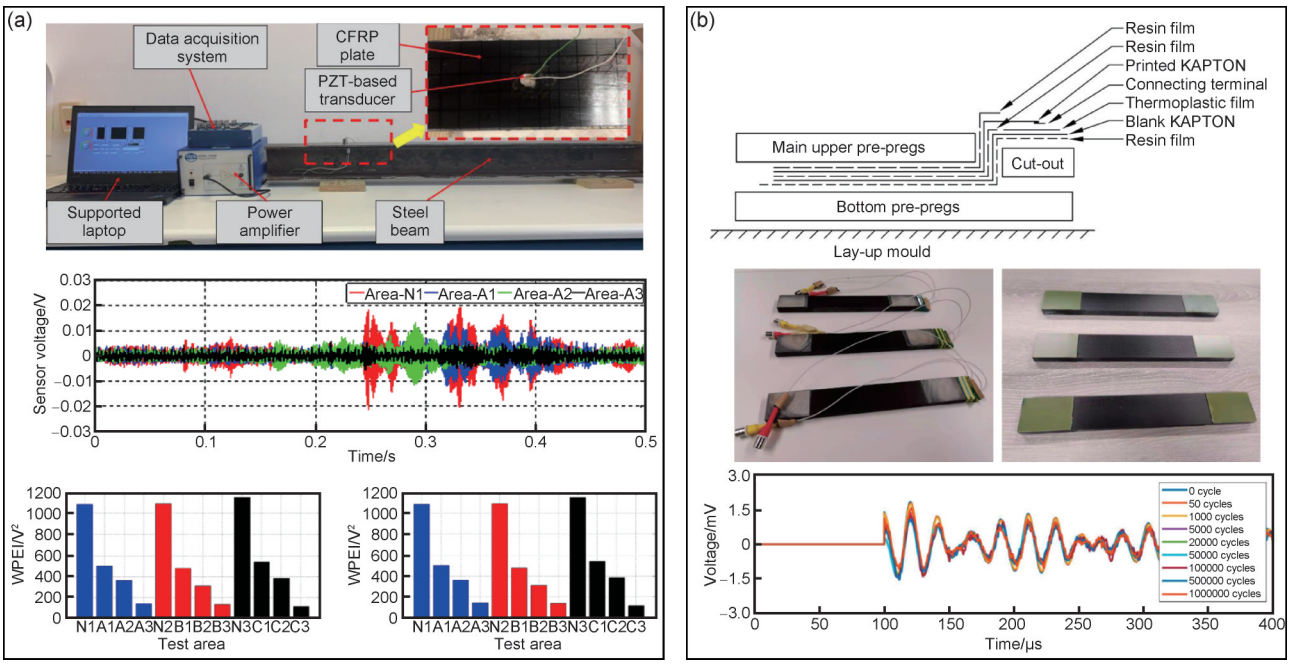


图6 表面压电传感器

(a)可拆卸PZT传感器[64];(b)基于电路印刷和PZT换能器的诊断膜[65]

Fig.6 Surface piezoelectric sensors

(a)detachable PZT sensor[64];(b)diagnostic film based on printed circuitry and PZT transducers[65]

总之,基于锆钛酸铅材料的结构健康监测已得到广泛应用,包括智能复合材料主动传感方法和基于机电阻抗的损伤监测技术。然而,其也存在一些缺陷和挑战,如脆性、温度敏感性、曲面结构附着性和电极腐蚀等。

2.1.3 表面光纤传感器

光纤传感技术主要基于两种物理原理实现应变、温度等参数的测量:光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating,FBG)技术和分布式光纤(distributed optical fiber,DOF)传感技术。FBG传感器的工作原理是监测外部扰动(如应变或温度变化)引起的布拉格波长偏移。当宽光谱光源照射到布拉格光栅上时,只有与布拉格波长相同的光会被反射,布拉格波长由式(1)所示[66]:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \tag{1}$$

式中:λ_B为布拉格反射波长;n_{eff}为周期性折射率变化区域的有效折射率;Λ为相邻相同折射率区域之间的距离。当光栅受到扰动时,布拉格波长会发生偏移,这种偏移可以通过反射光谱或透射光谱来检测。当复合材料发生应变或温度变化时,布拉格波长的偏移量$\Delta\lambda_B$可表述为[67-68]:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B\left[(1-p_e)\varepsilon+(\alpha_\Lambda+\alpha_n)\Delta T\right] \tag{2}$$

式中:p_e为光纤的有效光弹系数;ε为光纤受到的轴向应变;ΔT为温度变化量;α_Λ为光纤的热膨胀系数;α_n为光纤的热光系数。该式表明,应变和温度变化分别通过改变光栅周期和有效折射率引起布拉格波长的偏移,为光纤布拉格光栅在应力和温度传感中的应用提供了理论基础。

虽然FBG是最常见的光纤传感技术,但只能在被监测结构上的特定位置进行监测,无法覆盖整个区域。为了应对SHM系统面向大型结构的监测需求,近年来研究人员开始关注DOF传感技术。DOF系统能够利用单根光纤同时监测数十公里范围内的物理参数,例如应变和温度,从而实现对大型复合材料结构进行连续的分布式监测[69-70]。对于表面式附着光纤传感系统,光纤传感器在复合材料表面主要采用黏接、机械夹具和混合工艺三类方法。黏接技术凭借操作简便和基材适应性广的特点,成为最常用的固定方式[71]。环氧树脂是最常用的黏合剂,因为环氧树脂是复合材料系统的首选树脂。直接粘贴的方法的优势在于操作简便、便于维护,主要用于因制造工艺或结构限制而无法嵌入的大型构件。

例如,Shin等[72]利用DOF监测风机叶片上的冲击载荷。在长为22 m、功率为660 kW的风机叶片表面不同位置粘贴了9对纵向和横向的FBG传感器,在叶片表面特定位置施加载荷以模拟冲击事件,实现了对任意位置的冲击进行监测,并将采集的信号与背景噪声区分。Sai等[73-74]利用FBG传感器阵列在18层碳/环氧复合材料板上检测冲击事件。将6个FBG传感

器排列成两个直角等腰三角形，通过Morlet小波变换分析弹性波传播时间差，理论上实现冲击源定位。研究发现，当冲击源靠近传感器阵列时，定位误差较高，因冲击源与传感器间距离D及传感器间距离d减小，弹性波不再近似平面波。随后，采用多种神经网络方法改进定位精度，显著提升了冲击源定位准确性。Sun等[75]提出利用FBG传感器检测复合材料中的裂纹。将FBG附着在不同厚度的层合板表面，并在拉伸载荷下进行测试(图7(a))。结果显示，FBG波长移位及光谱模式与复合材料裂纹密度高度相关。裂纹萌生前，中心波长随载荷增加呈比例移位；裂纹形成时，光谱发生畸变并展宽，出现次级波长峰。随着裂纹密度增加，次级波长峰从主波长峰分离；在高裂纹密度下，光谱回归至未受损状态，波长模式略有差异。Fernández等[76]使用FBG传感器评估商业飞机碳纤维复合材料驾驶舱结构。在全尺寸驾驶舱中安装FBG和应变计，如图7(b)所示。测试各种条件，结果显示FBG与应变计测量存在波动差异。在初始压缩阶段，可通过FBG检测到缺陷；而高载荷下，发现部分FBG纤维发生断裂。

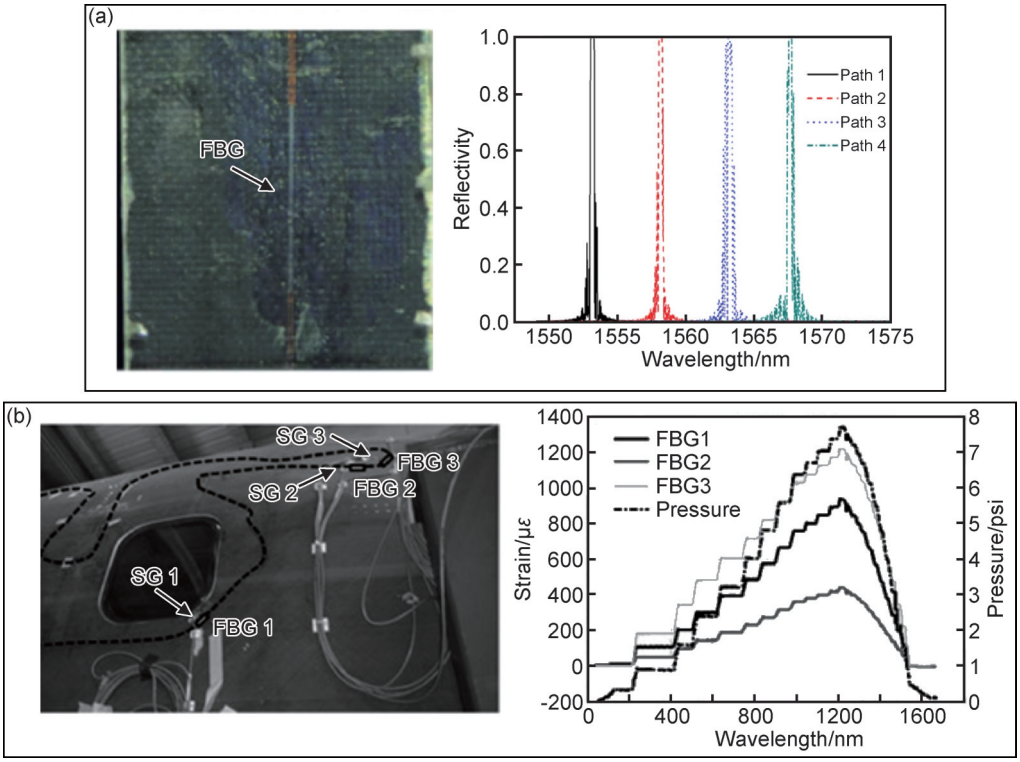


图7　基于表面光纤技术的结构健康监测

(a)FBG传感器附着在碳纤维层合板表面[75]；(b)FBG传感器分布置于飞机驾驶舱表面[76]

Fig.7　Structural health monitoring based on surface fiber-optic technology

(a)attaching FBG sensors to surface of carbon-fiber laminate[75]; (b)distributing FBG sensors on surface of aircraft cockpit[76]

在实际应用方面，光纤传感器已在大型航空结构中得到验证。例如，波音与空客公司在多款机型的机翼全尺寸静力实验及疲劳测试中，利用埋入式或表面贴装的光纤光栅阵列，成功监测了机翼蒙皮在极端载荷下的应变分布，其测量精度与传统应变片相当，但布线质量显著降低。此外，在海上风电领域，光纤传感器也被广泛植入百米级叶片的根部，用于实时监测风载荷引起的动态应变，指导叶片的变桨控制。

总之，表面光纤传感器在复合材料结构健康监测中具有显著优势。其主要优点包括操作简便、适应性广及高灵敏度。黏结技术以环氧树脂为主，结合机械夹具或混合工艺，适用于无法嵌入光纤的大型构件，维护便捷。然而，表面光纤传感器的不足在于，FBG仅限局部点监测，覆盖范围有限；DOF系统虽能分布式监测，但对复杂结构的适应性和抗噪能力仍需改进。此外，还需考虑外部环境作用下，黏结效果是否牢固和光纤传感器是否会损坏。

综上所述，这些表面在线监测技术在易于安装、更换和维护方面表现出色，已在复合材料的实际工程中得到广泛验证，例如通过无线集成实现远程数据传输，推动了SHM的智能化发展。其非侵入性设计避免了对材料力学性能的显著影响，同时提供了实时反

馈,支持预测性维护策略。然而,这些方法的主要不足在于监测深度有限,主要局限于表面或近表面损伤,无法有效探测内部缺陷,如深层分层或界面脱粘;此外,易受环境因素(如温度波动、振动噪声或表面污染)干扰,导致信号准确性下降,且在空气动力学敏感的应用(如航空翼面)中可能增加额外质量或阻力。这些局限性限制了表面技术的全域监测能力,随着对结构-功能一体化的需求增加,研究界正转向嵌入式监测技术,以实现更深入、兼容的损伤感知。

2.2 嵌入式在线监测技术

嵌入式在线监测技术通过将传感器直接集成于复合材料内部来实现原位、连续的损伤评估,这种方法将监测功能与材料结构无缝融合,避免了外部附着的局限性,常用于航空航天部件、风电叶片和压力容器的深度监测。随着纳米技术和复合工艺的进步,嵌入式技术正向高兼容性和多模态感知方向发展,但需应对植入过程对材料性能的影响和信号提取的复杂性。以下将分类介绍几种典型嵌入式在线监测方法,涵盖其工作原理、实施方式和实际案例。

2.2.1 嵌入光纤技术

相比于表面光纤技术,嵌入光纤技术具有更高的感测精度、更低的传感器损坏风险、原位结构监测能力以及免受环境扰动的众多优势。研究人员已将FBG嵌入各种类型的纤维增强复合材料中,用于测量各种参数。其中,主要用于监测三种应用场景:固化过程监测[77-78]、应变与热感知[79-80]、损伤监测与定位[81-84]。下面将主要讨论损伤监测与定位。

Oromiehe等[81]探讨了使用双FBG传感器系统检测层压板损伤的可行性。将单个FBG传感器纵向嵌入单向玻璃纤维的第2层和第3层之间,并在FBG上方放置人工重叠缺陷以模拟分层和裂纹生长。通过评估损伤和无缺陷样本的波长移位曲线,结果显示:损伤层压板的光谱峰不如无缺陷样本突出,这是由于人工缺陷阻碍了热传输。Freire等[82]探讨了FBG作为应变传感器用于修复工业钢管道复合层压板的潜力。在研究中,金属损失区域的钢管道样本通过12层碳/环氧层压板修补,两个FBG传感器嵌入层压板层间,另外3个FBG直接附着于缺陷表面,如图8(a)所示。管道加压至爆裂,结果显示缺陷区域附近的FBG记录到更高压力和应变,尤其在内层。Li等[83]利用FBG作为应变传感器,对3D编织复合结构进行SHM。FBG在碳/环氧编织过程中嵌入,研究发现,低编织角度下波长峰变化与施加应变为非线性关系,可能由于额外弯曲效应,而该效应随编织角度增加逐渐消失。进一步调查了3D六向编织复合材料的嵌入FBG损伤检测。通过施加冲击损伤、内部裂纹、孔洞和线性划痕等损伤,观察到损伤样本的波长峰波动明显不同于原始样本[84]。Li等[85]提出了一种嵌入式FBG传感器用于单向碳纤维复合材料的固化过程监测和冲击识别。首先,如图8(b)所示,在制造过程中将FBG嵌入预浸料中,监测应变变化以评估弹性模量和树脂状态。随后,开发了基于SVR和BP神经网络的堆叠集成学习模型,通过数百次冲击训练,使用FBG记录的应变响应进行定位和识别。

总之,嵌入式光纤技术在复合材料损伤监测中展示了显著潜力,但仍面临挑战。主要问题包括光纤的脆性导致其在嵌入后容易断裂,尤其在高应力或冲击环境下;此外,嵌入过程可能破坏复合材料的力学性能,如降低层间强度或引入微观缺陷,从而影响整体结构耐久性和承载能力。这些局限性要求进一步优化嵌入工艺和保护措施,以平衡监测功能与材料性能。

2.2.2 嵌入式电阻传感器

嵌入式电阻传感器通常利用导电材料(如碳纳米管(CNTs)、石墨烯、MXene等)作为敏感元件,嵌入复合材料的层间或基体中,其原理基于电阻率对损伤诱发的微观变化(如裂纹导致的断路或接触电阻增加)的响应,从而监测内部应变、裂纹扩展。值得注意的是,电阻法监测技术的适用性高度依赖于增强纤维的导电性能。该技术天然适用于具有优良导电性的碳纤维增强复合材料,通过监测碳纤维网络电阻的变化即可表征内部损伤。而对于玻璃纤维或芳纶纤维等绝缘材料,则必须通过添加碳纳米管、石墨烯等导电填料构建导电网络,才能实现类似的自感知功能。

碳纳米管是复合材料中用于涂层织物传感器的最常用的纳米材料,因为具有大的长径比,并且与几乎所有类型的涂层技术兼容[86]。Zhang等[87]通过喷涂CNTs于碳纤维预浸料制备智能复合材料,提高了断裂韧性,并在双悬臂梁测试中监测断裂响应。在结构健康监测方面,该传感器对载荷-位移响应表现出高敏感性。Pinto等[88]将CNTs喷涂在玻璃纤维表面形成薄膜并以此作为复合材料的传感器(图9(a))。玻璃纤维复合材料进行拉伸和弯曲过程中,通过监测CNTs薄膜的电阻变化实现对应变和损伤的监测。

石墨烯是一种二维片层材料,相比于一维的碳纳米管,在灵敏度方面有进一步提升。Rodríguez-González等[89]开发了一种自感知夹层结构,使用石墨烯涂层玻璃纤维织物作为压阻面层,黏合到Nomex蜂窝芯,通过VARTM工艺制造,并在整个过程中监测压阻响应。提出了Ramberg-Osgood模型表示弯曲压阻行为,以及指数增长模型表示压缩响应,结果表明,

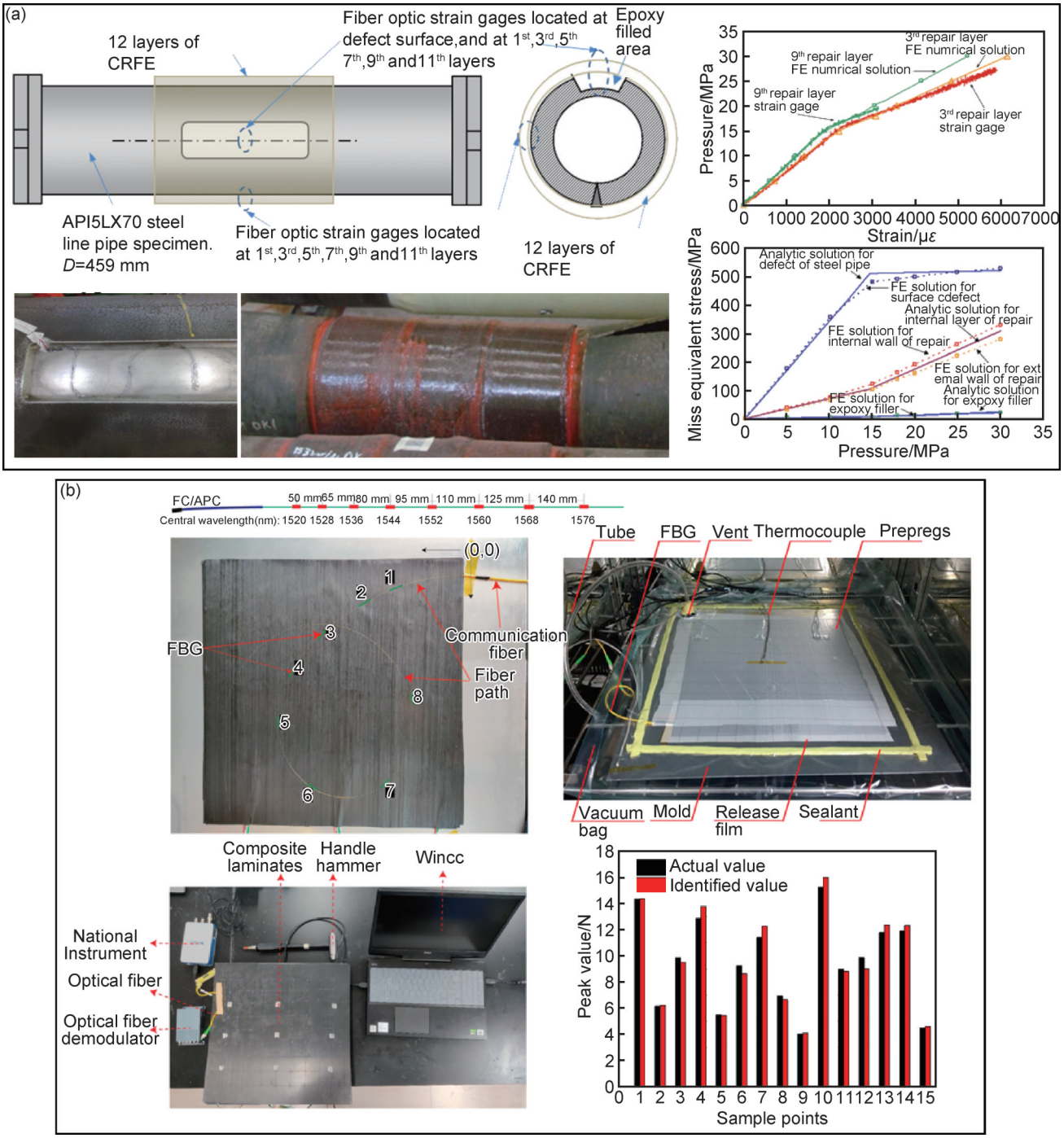


图 8　基于嵌入式光纤技术的结构健康监测

(a)管道表面层合板中嵌入 FBG 实现损伤监测[82]；(b)碳纤维层合板中嵌入 FBG 实现损伤定位[85]

Fig.8　Structural health monitoring based on embedded fiber-optic technology

(a)embedding FBGs into surface laminate of pipelines for damage monitoring[82]; (b)embedding FBGs in carbon-fiber laminate for damage localization[85]

该结构适用于航空负载承载结构的在线健康监测和诊断。UdDin 等[90]利用还原氧化石墨烯(rGO)涂覆玻璃织物传感器制备了具有蜂窝夹层的复合材料，并在弯曲和压缩测试中监测响应，如图 9(b)所示。传感器对芯厚度、宽度和跨度长度等参数敏感，并成功捕捉了压缩载荷。与石墨烯和碳纳米管相比，基于 MXene 的传感器因其卓越的导电性而表现出了优异的结构健康监测能力。类似于其他纳米材料，MXene 可通过简单的溶液浸涂方法轻松涂覆于非导电基材如玻璃纤维织物上。Duongthipthewa[91]等制备了涂覆不同氧化石墨烯(GO)和 MXene 配置的玻璃纤维/环氧预浸料，用于结构健康监测。并通过疲劳测试验证了整合智能传感器的复合材料的长期耐久性，结果表明此类混合系统在可穿戴设备和智能电子等领域具

有潜力。Irfan 等[92]对 MXene 和 rGO 涂覆织物传感器进行了比较研究，用于树脂灌注过程监测和结构健康监测(图 9(c))。基于MXene的高导电性，其涂覆织物传感器在单调和循环弯曲测试中显示出优越敏感性。结果显示，在制造和结构应用过程中发生的任何物理变化都可以通过MXene电阻的相关变化来检测。

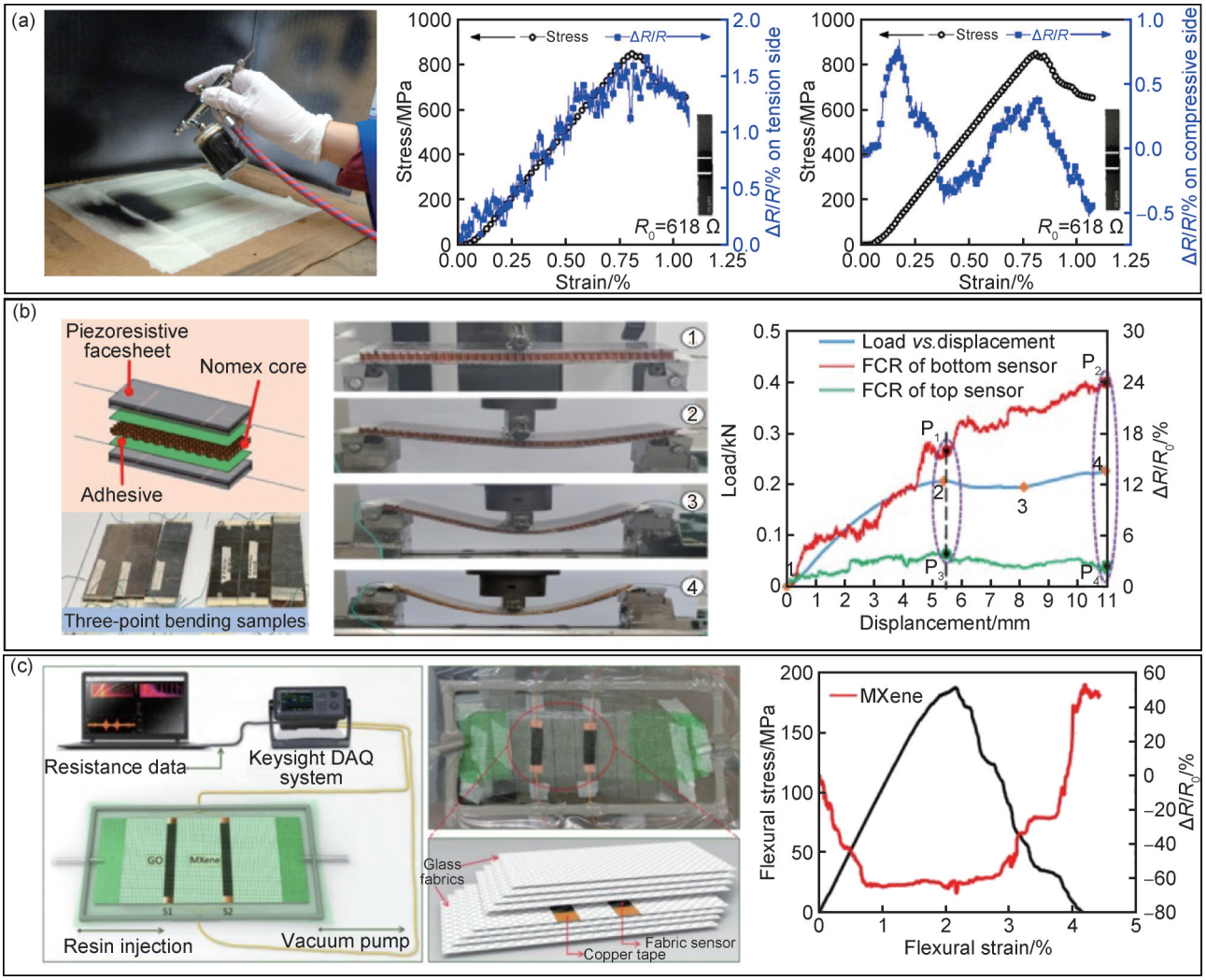


图 9　利用不同导电材料的嵌入式电阻传感方案

(a)喷涂 CNTs 薄膜[88]；(b)嵌入 rGO 薄膜[90]；(c)织物表面涂覆 MXene[92]

Fig.9　Embedded resistive sensing schemes using different conductive materials

(a)sprayed CNT thin film[88]; (b)embedded rGO film[90]; (c)MXene coating on fabric surface[92]

总之，嵌入式电阻传感器在复合材料损伤监测中展示了显著潜力，但仍面临挑战。主要问题包括导电填料的分散不均可能导致信号不稳定或局部弱点；此外，嵌入过程可能降低复合材料的力学性能，如减少整体强度或引入界面缺陷，从而影响结构的耐久性和承载能力。这些局限性要求进一步优化填料分布和兼容设计，以平衡监测功能与材料性能。

2.2.3　嵌入式压电传感器

嵌入式压电传感器主要以压电聚合物为主，因为压电陶瓷往往脆性较大，不利于植入。压电聚合物以聚偏氟乙烯(PVDF)及其共聚物为主，其加工性能良好，可通过挤出成型、注塑成型和压缩成型等方式制备[93]。通常加工成薄膜形式嵌入复合材料的层间，作为传感功能层。例如，Greminger 等[94]开发了一种新型碳纤维增强复合材料，使用 PVDF 作为基体材料，利用碳纤维作为电极并以 Kevlar 层作为介电介质，实现集成负载传感。优化极化参数后，复合材料显示出有效的压电系数，确认了其用于原位 SHM 的潜力。Grob 等[95]引入了基于脱氢氟化 PVDF 铁电预浸料的多功能复合材料，全集成压电传感机制。在弯曲和拉伸测试中，能够感测损伤发生时间和严重性，与传统方法相当，且不影响层间结构完整性。此外，还有使

用其他材料制备压电薄膜的工作，如 Yuan 等[96]开发了聚丙烯腈/钛酸钡（PAN/$BaTiO_3$）纳米纤维膜传感器，嵌入复合材料中，实现实时损伤监测（图 10(a)）。传感器提高了层间剪切强度，并在机械载荷下产生电信号，监测分层失效。

此外，还可以通过纺丝工艺将其制备成传感纤维，以纤维或织物形式嵌入复合材料中，实现传感功能。例如，Hofmann 等[97]开发了基于纺织织物的压电传感器，将 PVDF 纤维集成到 FRP 增强结构中，避免引入额外组件；弯曲测试结果显示传感器信号与施加载荷直接相关，极化过程可显著增强压电效应，适用于在线过程和 SHM（图 10(b)）。Jung 等[98]评估了由碳织物和 PVDF 带组成的智能网格织物，嵌入复合层压板中，用于实时结构完整性诊断；冲击测试表明，传感器信号通过频率分析可关联材料失效模式，并通过失败指数有效量化损伤程度和累计损伤，支持非破坏性监测。

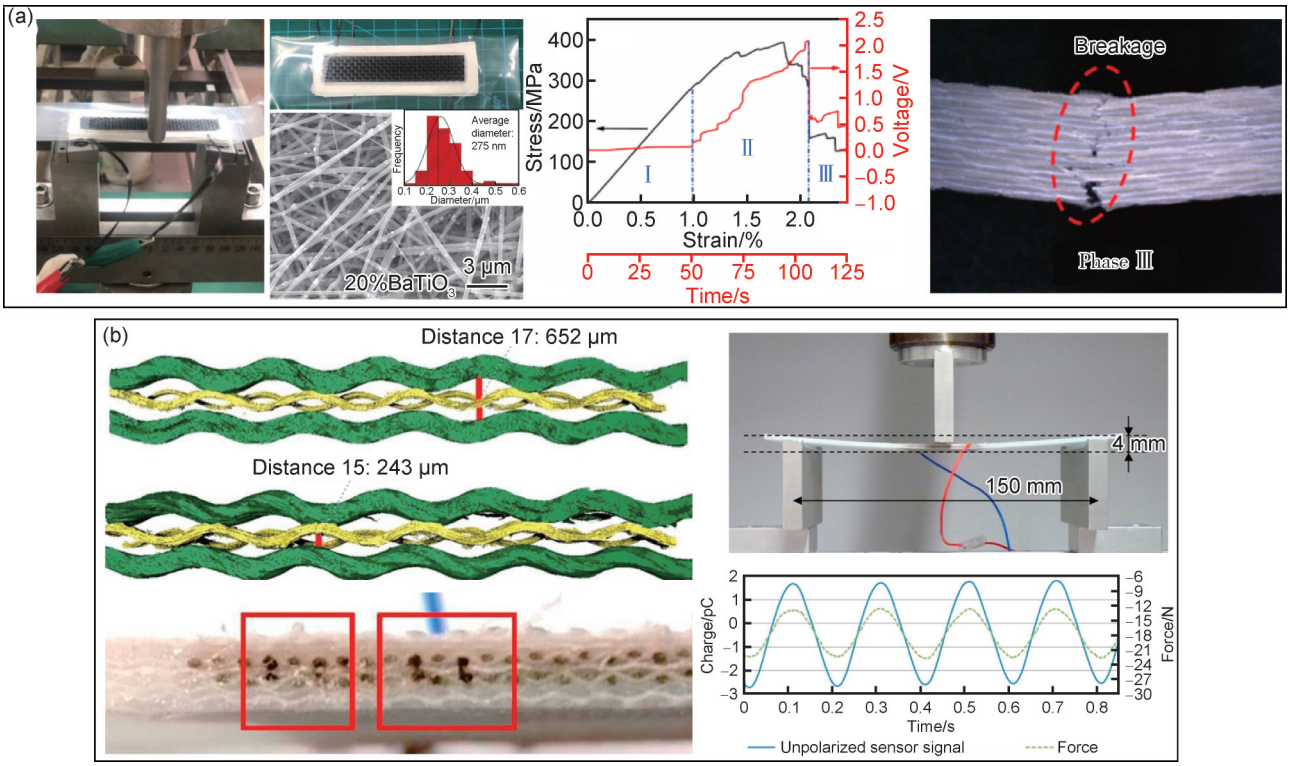


图 10　基于不同形态的嵌入式压电传感器

（a）嵌入式压电薄膜[96]；（b）嵌入式压电传感纤维[97]

Fig.10　Embedded piezoelectric sensors of different forms

(a)embedded piezoelectric film[96]; (b)embedded piezoelectric sensing fiber[97]

总之，嵌入式压电传感器在复合材料 SHM 中的应用虽已取得进展，但仍面临若干挑战。压电聚合物（如 PVDF）虽柔韧性更好，但极化过程复杂，可能引入热应力或界面不匹配，影响长期稳定性；此外，嵌入后往往降低复合材料的力学性能，如减少层间剪切强度或引入微观缺陷，进而缩短整体耐久性。这些局限性要求进一步优化材料配方、嵌入工艺和保护层设计，以提升兼容性和可靠性。

3　当前挑战与未来研究方向

总体而言，现有的嵌入式电阻传感器和压电传感器在监测功能上仍较为初步，主要依赖电阻值的突变（如断路引起的阻抗跃升）或压电脉冲信号（如应力诱发的电压峰值）来判断损伤的存在与否，难以实现对信号的深度解析，例如精准定位损伤位置、识别损伤模式或评估损伤演化过程。这种功能粗浅性限制了其在复杂服役环境下的应用价值。尽管一些非嵌入式方法，如声发射检测或表面压电陶瓷片的导波监测，能够通过波形分析实现损伤定位和模式识别，但嵌入式技术尚未达到类似水平，亟须整合先进信号处理算法来弥补这一差距。

综上所述，现有的纤维增强复合材料监测方案，包括离线检测和在线监测技术各具优缺点。离线技术精度高、成熟度好，但需停机操作，无法满足动态需求；在线表面技术安装便捷、非侵入性强，但监测深度

有限、易受环境干扰；嵌入式技术实现了原位感知和功能一体化，但相容性差、信号解析浅显。纤维增强复合材料监测技术比较见表2，表中说明了现有监测技术的优势与局限性，通过对比不同类型技术的性能，突显其整体不足，这些差距凸显了当前SHM技术的瓶颈。

表2 纤维增强复合材料监测技术比较

Table 2 Comparison of monitoring technologies for fiber-reinforced composites

Technology type	Advantage	Limitation
Offline inspection	High precision & maturity; detailed internal imaging; supports partial intelligent analysis	Requires downtime (non-real-time); bulky equipment; poor structural compatibility; relies on manual analysis; lacks dynamic evolution assessment
Online surface monitoring	Easy installation; non-intrusive; real-time data acquisition; low maintenance; partial structural compatibility	Limited depth (surface only); susceptible to environmental interference; moderate compatibility; basic analysis (detection only); lacks pattern recognition & evolution analysis
Online embedded monitoring	*In-situ* sensing; real-time monitoring; integrated functionality; enhanced structural compatibility	May degrade mechanical properties; compatibility needs optimization; basic analysis (detection only); lacks precise localization & damage mode identification

由以上分析可知，现有的纤维增强复合材料SHM技术在航空航天、汽车制造和风力发电等领域虽有广泛应用，但仍面临实时性、兼容性和智能化的多重挑战。国内外围绕嵌入式传感和信号处理的创新开展了大量工作，核心目标是实现损伤监测的功能一体化和智能化。面向实际工程应用，以下4个关键科学问题亟待解决：

(1)如何设计嵌入式传感器，实现损伤监测功能与复合材料力学性能的协同增强

嵌入式传感器的协同增强是SHM技术实现结构-功能一体化的基础，直接影响监测系统的可靠性和复合材料的整体性能。在实际应用中，传感器的嵌入需确保不牺牲力学指标，如强度、韧性和疲劳寿命，而是通过协同设计实现性能提升。然而，实现这一目标面临多重难题。首先，现有的嵌入式方案(如压电薄膜或压阻薄膜传感器)往往引入异质界面，导致应力集中和微观缺陷，造成力学性能退化，例如层间剪切强度下降或裂纹萌生。其次，传感材料的相容性调控方法有限，大多依赖于表面改性或共固化工艺，但这些方法对纳米级界面控制精度不足。此外，传统设计忽略了多功能协同，如传感功能与力学增强的平衡，限制了其在高载荷环境下的应用。综上所述，直接设计嵌入式传感材料以实现功能协同增强存在材料选择、界面优化和性能权衡等方面的挑战，如何从微观机理入手，开发新型材料体系，使监测功能与力学性能有机融合，仍是复合材料SHM领域的关键难题。

(2)如何构建高效传感网络，支持全域损伤的实时感知和精准定位

高效传感网络的构建是实现复合材料全域监测的核心，能够支持实时感知和毫米级坐标定位，而不依赖外部设备，从而避免侵入性干扰。然而，这一问题的解决面临技术瓶颈。首先，现有的非嵌入式网络在覆盖范围和响应速度上有限，且面临复杂环境因素干扰；嵌入式网络则同样面临强度与功能权衡的难题。其次，网络构建需克服信号干扰和精度损失，如多传感器间的串扰或环境噪声影响，导致定位误差增大；同时，避免外部设备意味着需集成自供电和无线传输，但当前技术在能效和稳定性上不足。此外，传统方法多依赖像素级阵列，缺乏高分辨率坐标求解算法，限制了精准定位的实现。综上所述，构建高效传感网络存在网络布局、信号稳定性与非侵入性设计的多重挑战，如何优化阵列结构和算法，实现实时全域感知与精准定位，仍是推动SHM向智能化转型的悬而未决问题。

(3)如何开发信号处理算法，从混杂数据中提取多维特征，实现损伤模式识别、演化分析和预测性维护

先进信号处理算法是SHM技术实现“智能解析”的关键，能够从混杂信号中提取特征，支持损伤模式识别和演化预测，从而指导维护决策。然而，这一领域的发展仍面临显著障碍，特别是针对嵌入式传感方案，因为传统无损检测技术(如声发射)已在信号解析上较为成熟，甚至能通过波形特征分析实现损伤模式识别，而嵌入式技术往往缺乏类似深度。首先，现有的嵌入式方法多局限于简单判断信号变化，如电阻阻值的突变或压电信号的脉冲，仅用于检测损伤有无，许多工作直接忽略了对信号的解析，无法挖掘潜在信息。其次，即使有些解析存在，也较为粗浅，通常针对特定场景，如仅判断拉伸或弯曲载荷下的破坏阶段，而未深入探索信号的多维特征。此外，虽然一些工作引入机器学习工具来识别个别特征，但这些方法往往限于特定场景，例如仅针对穿孔损伤或特定构件(如工字梁)的复合材料，缺乏泛化能力，无法适应多样化

的材料和载荷条件，目前尚未有工作通过解析自制嵌入式传感器信号来实现损伤模式识别。综上所述，开发信号处理算法存在信号深度提取、场景泛化和模式识别等方面的难题，如何整合深度学习和多模态数据融合，实现从混杂信号到智能研判的跃升，仍是复合材料SHM领域的核心挑战。

(4)如何融合数据驱动与智能算法，实现海量监测数据的深度挖掘与闭环预测

数据驱动的智能化处理是未来在线监测技术发展的核心引擎，直接决定了监测系统能否从“被动诊断”向“主动预测”跨越。在实际应用中，面对复杂服役环境下产生的海量且高维的监测数据，传统的信号处理方法往往难以应对，必须依赖人工智能(AI)算法的深度融合。然而，实现这一目标面临多重技术壁垒。首先，现有的监测数据往往伴随强环境噪声和非线性特征，传统算法难以有效清洗和降噪，导致特征提取的准确性不足。其次，虽然卷积神经网络等深度学习模型在图像识别领域表现优异，但在复合材料损伤特征(如微裂纹或分层)的端到端提取中，仍面临样本标注成本高、小样本训练困难等问题，限制了其对微弱信号的识别精度。此外，现有的寿命预测模型多基于理想实验环境，缺乏对复杂载荷历史的记忆能力，结合长短期记忆网络进行时间序列建模时，难以兼顾计算效率与长期预测的稳定性。综上所述，融合数据驱动与智能算法存在数据质量治理、模型泛化能力提升及实时计算资源受限等方面的挑战，如何构建“先进传感＋智能算法”的闭环模式，实现结构性能退化趋势的精准预测，仍是推动复合材料SHM向智能化转型的核心挑战。

4　结束语

纤维增强复合材料作为现代工程的核心材料，其损伤监测技术的进步直接关系到产业安全和可持续发展。本文系统回顾了SHM技术的背景、现状和问题，强调了嵌入式压电传感在功能一体化方面的优势。通过理论与实验的结合，揭示了现有技术的瓶颈，并提出协同增强、全域定位和智能解析的未来方向。展望未来，随着微纳制造、人工智能和5G通信的融合，SHM将实现更高水平的智能化，推动复合材料向自愈、自适应结构演进，为航空航天等领域的创新提供支撑。

参考文献

[1] YANG L N, HAN P, GU Z. Grafting of a novel hyperbranched polymer onto carbon fiber for interfacial enhancement of carbon fiber reinforced epoxy composites[J]. Materials and Design, 2021, 200:109456.

[2] UNTERWEGER C, DUCHOSLAV J, STIFTER D, et al. Characterization of carbon fiber surfaces and their impact on the mechanical properties of short carbon fiber reinforced polypropylene composites[J]. Composites Science and Technology, 2015, 108: 41-47.

[3] MAMALIS D, MURRAY J J, MCCLEMENTS J, et al. Novel carbon-fibre powder-epoxy composites: interface phenomena and interlaminar fracture behaviour[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 174:107012.

[4] CHEN X M, HUI Y Z, ZHANG J B, et al. Single multifunctional MXene-coated glass fiber for interfacial strengthening, damage self-monitoring, and self-recovery in fiber-reinforced composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 259:110713.

[5] 刘青旭，陈海峰，BRYANSKY Anton，等. 航天复合材料结构健康监测技术应用进展[J]. 复合材料学报，2024，41(9)：4563-4588.
LIU Q X, CHEN H F, ANTON B, et al. Progress in application on health monitoring technology for aerospace composite structures [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(9): 4563-4588.

[6] WANG B, ZHONG S C, LEE T L, et al. Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: a state-of-the-art review[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2020, 12(4): 168781402091376.

[7] BABU J, SUNNY T, PAUL N A, et al. Assessment of delamination in composite materials: a review[J]. Journal of Engineering Manufacture, 2016, 230(11): 1990-2003.

[8] LI B, ZHANG L, YANG B. Grain refinement and localized amorphization of additively manufactured high-entropy alloy matrix composites reinforced by nano ceramic particles *via* selective-laser-melting/remelting[J]. Composites Communications, 2020, 19: 56-60.

[9] HASSANI S, MOUSAVI M, GANDOMI A H. Structural health monitoring in composite structures: a comprehensive review[J]. Sensors, 2022, 22(1): 153.

[10] LI J B, ZHANG Z F, FU J Y, et al. Mechanical properties and structural health monitoring performance of carbon nanotube-modified FRP composites: a review[J]. Nanotechnology Reviews, 2021, 10(1): 1438-1468.

[11] LUAN C C, YAO X H, ZHANG C, et al. Large-scale deformation and damage detection of 3D printed continuous carbon fiber reinforced polymer-matrix composite structures[J]. Composite Structures, 2019, 212: 552-560.

[12] SAEEDIFAR M, FOTOUHI M, AHMADI NAJAFABADI M, et al. Prediction of quasi-static delamination onset and growth in laminated composites by acoustic emission[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 85: 113-122.

[13] RŮŽEK R, LOHONKA R, JIRONČ J. Ultrasonic C-scan and shearography NDI techniques evaluation of impact defects identification[J]. NDT & E International, 2006, 39(2): 132-142.

[14] CAWLEY P. Structural health monitoring: closing the gap between research and industrial deployment[J]. Structural Health Monitoring, 2018, 17(5): 1225-1244.

[15] MITRA M, GOPALAKRISHNAN S. Guided wave based structural health monitoring: a review[J]. Smart Materials and Struc-

tures,2016,25(5):053001.
[16] WORDEN K, CROSS E J, DERVILIS N, et al. Structural health monitoring: from structures to systems-of-systems [J]. IFAC-papersonline, 2015, 48(21):1-17.
[17] ROCHA H, SEMPRIMOSCHNIG C, NUNES J P. Sensors for process and structural health monitoring of aerospace composites: a review[J].Engineering Structures,2021,237:112231.
[18] CIAMPA F, MAHMOODI P, PINTO F, et al. Recent advances in active infrared thermography for non-destructive testing of aerospace components[J].Sensors,2018,18(2):609.
[19] WANG B C, HE P J, KANG Y N, et al. Ultrasonic testing of carbon fiber-reinforced polymer composites[J]. Journal of Sensors, 2022,2022:5462237.
[20] HASIOTIS T, BADOGIANNIS E, TSOUVALIS N G. Application of ultrasonic C-scan techniques for tracing defects in laminated composite materials[J]. Strojniški Vestnik-Journal of Mechanical Engineering,2011,2011(3):192-203.
[21] SHIINO M Y, FARIA M C M, BOTELHO E C, et al. Assessment of cumulative damage by using ultrasonic C-scan on carbon fiber/epoxy composites under thermal cycling[J]. Materials Research,2012,15(4):495-499.
[22] WONG V K, HU Y, THAM Z W, et al. Measurement of elastic constant matrix of carbon fiber composites with an ultrasonic 2D-array transducer[J].IEEE Sensors Journal,2022,22(6):5562-5570.
[23] 曹弘毅,马蒙源,丁国强,等.复合材料层压板分层缺陷超声相控阵检测与评估[J].材料工程,2021,49(2):149-157.
CAO H Y, MA M Y, DING G Q, et al. Delamination defects testing and evaluation of composite laminates using phased array ultrasonic technique [J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(2):149-157.
[24] LI X, FU R, YANG B. Full focus 3D phased array ultrasonic testing of carbon fiber composites[J]. Non-destructive Testing, 2021, 45(4):31-34.
[25] GRONDIN E. Adaptive focusing technology for the inspection of variable geometry composite material [C]. Proceedings of the 12th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2018), Gothenburg, Sweden, 2018:11-15.
[26] 李树健,周永超,陈蓉,等.考虑孔隙缺陷的CFRP微观切削仿真与实验研究[J].复合材料学报,2023,40(1):625-636.
LI S J, ZHOU Y C, CHEN R, et al. Simulation and experimental study of CFRP micro cutting considering voids defects[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2023,40(1):625-636.
[27] CAMINERO M A, GARCÍA-MORENO I, RODRÍGUEZ G P, et al. Internal damage evaluation of composite structures using phased array ultrasonic technique: impact damage assessment in CFRP and 3D printed reinforced composites[J].Composites Part B:Engineering,2019,165:131-142.
[28] LAMARRE A. Improved inspection of composite wind turbine blades with accessible advanced ultrasonic phased array technology[C]. 15th Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing (APCNDT2017), Singapore, 2017:1-8.
[29] INÊS SILVA M, MALITCKⅡ E, SANTOS T G, et al. Review of conventional and advanced non-destructive testing techniques for detection and characterization of small-scale defects[J]. Progress in Materials Science,2023,138:101155.
[30] STAMOPOULOS A G, TSERPES K I, PRUCHA P, et al. Evaluation of porosity effects on the mechanical properties of carbon fiber-reinforced plastic unidirectional laminates by X-ray computed tomography and mechanical testing[J]. Journal of Composite Materials,2016,50(15):2087-2098.
[31] DILONARDO E, NACUCCHI M, DE PASCALIS F, et al. High resolution X-ray computed tomography: a versatile non-destructive tool to characterize CFRP-based aircraft composite elements[J].Composites Science and Technology,2020,192:108093.
[32] NIKISHKOV Y, KUKSENKO D, MAKEEV A. Variable zoom technique for X-ray computed tomography[J].NDT & E International,2020,116:102310.
[33] SUN M Y, ZHANG D T, QIAN K. Visualization and quantification of low-velocity impact damage of three-dimensional braided CFRP composites by micro-computed tomography[J]. Heliyon, 2022,8(12):e12110.
[34] 林隆荣,伏喜斌,黄学斌,等.复合材料缺陷的红外热成像检测研究[J].机电工程,2019,36(6):628-632.
LIN L R, FU X B, HUANG X B, et al. Defects detection of composite materials based on infrared thermography[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine,2019,36(6):628-632.
[35] HAN S L, LI Q Z, CUI Z, et al. Non-destructive testing and structural health monitoring technologies for carbon fiber reinforced polymers: a review [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2024,39(4):725-761.
[36] LIU C M, LI B, GAO F, et al. Intralaminar crack detection for carbon fiber reinforced polymers based on laser-line thermography [C]//2022 8th International Conference on Mechanical Engineering and Automation Science (ICMEAS). Wuhan: IEEE, 2022: 178-184.
[37] DE OLIVEIRA B C F, NIENHEYSEN P, BALDO C R, et al. Improved impact damage characterisation in CFRP samples using the fusion of optical lock-in thermography and optical square-pulse shearography images[J]. NDT and E International, 2020, 111:102215.
[38] DONG Y F, ZHAO B W, YANG J X, et al. Two-stage convolutional neural network for joint removal of sensor noise and background interference in lock-in thermography[J].NDT and E International,2023,137:102816.
[39] WANG F, LIU J Y, DONG B Y, et al. Optimization of thermal-wave radar thermography by transverse heat flow suppression technique for accurate defect detection of CFRP laminates[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70:4505710.
[40] 童国炜,周循道,黄林轶,等.声发射检测信号分析及源定位方法研究[J].仪表技术与传感器,2021(5):96-100.
TONG G W, ZHOU X D, HUANG L Y, et al. Acoustic emission signal analysis and source localization method research[J]. Instrument Technique and Sensor,2021(5):96-100.
[41] SAEEDIFAR M, ZAROUCHAS D. Damage characterization of laminated composites using acoustic emission: a review[J]. Composites Part B:Engineering,2020,195:108039.
[42] BOURCHAK M, FARROW I R, BOND I P, et al. Acoustic

emission energy as a fatigue damage parameter for CFRP composites[J].International Journal of Fatigue,2007,29(3):457-470.

[43] 孙贺,李伟,张璐莹,等.基于模态声发射的碳纤维复合材料损伤研究[J].中国测试,2021,47(5):16-23.
SUN H,LI W,ZHANG L Y,et al.Research on damage of carbon fiber composites based on modal acoustic emission[J].China Measurement & Test,2021,47(5):16-23.

[44] LIU C Y,SHANG X Y,MIAO R X.Acoustic emission source location on a cylindrical shell structure through grouped sensors based analytical solution and data field theory[J].Applied Acoustics,2022,192:108747.

[45] 齐添添,陈尧,何才厚,等.碳纤维复合材料声发射源定位实验研究[J].复合材料科学与工程,2020(6):5-9.
QI T T,CHEN Y,HE C H,et al.Experimental research on acoustic emission source localization for carbon fiber composite[J].Composites Science and Engineering,2020(6):5-9.

[46] CUI J,LUO H Y,WANG R Z,et al.Damage identification and fracture behavior of 2.5D SiC_f/SiC composites under coupled stress states[J].Materials and Design,2024,241:112964.

[47] DU J B,WANG H,CHEN C,et al.Damage classification and evolution in composite under low-velocity impact using acoustic emission,machine learning and wavelet packet decomposition[J].Engineering Fracture Mechanics,2024,306:110238.

[48] LU H,ZHENG T,ZHANG L,et al.Damage identification of plain-woven composites at $T > T_g$ using AE:damage clustering and initiation detection[J].Composites Science and Technology,2024,257:110823.

[49] ALMEIDA R S M,MAGALHÃES M D,KARIM M N,et al.Identifying damage mechanisms of composites by acoustic emission and supervised machine learning[J].Materials & Design,2023,227:111745.

[50] STEIN P K.Strain gage history and the end of the twentieth century[J].Experimental Techniques,2001,25(2):15-16.

[51] HOFFMANN K.An introduction to stress analysis and transducer design using strain gauges[M].HBM Pfungstadt,Germany,2012.

[52] SHCHEGOLKOV A V,SHCHEGOLKOV A V,KAMINSKII V V,et al.Polymer composites with nanomaterials for strain gauging:a review[J].Journal of Composites Science,2025,9(1):8.

[53] SWAINGER K H.Electrical resistance wire strain-gauges to measure large strains[J].Nature,1947,159(4028):61-62.

[54] SHEPHERD R.Strain measurement using vibrating-wire gages:the development and use of a simple type of vibrating-wire strain gage for field measurements,together with the necessary ancillary equipment,is described[J].Experimental Mechanics,1964,4(8):244-248.

[55] SINHA N K.Use of foil strain gauges in ice over a wide loading rate[J].Cold Regions Science and Technology,1989,16(2):145-158.

[56] ORT W.New developments in foil strain-gage transducers[J].Experimental Techniques,1983,7(8):19-23.

[57] PAN X C,LIN F,WU C,et al.Additive-manufactured platinum thin-film strain gauges for structural microstrain testing at elevated temperatures[J].Micromachines,2022,13(9):1472.

[58] HEMPEL M,NEZICH D,KONG J,et al.A novel class of strain gauges based on layered percolative films of 2D materials[J].Nano Letters,2012,12(11):5714-5718.

[59] ZHAO Y,LIU J,YING Y H,et al.Temperature self-compensation thin film strain gauges based on nano-SiO_2/AgNP composites[J].Journal of Materials Chemistry C,2024,12(32):12491-12498.

[60] WANG B,SUN Y F,LI Y Z,et al.Debonding damage detection in CFRP plate-strengthened steel beam using electromechanical impedance technique[J].Sensors,2019,19(10):2296.

[61] ROH H D,LEE H,PARK Y B.Structural health monitoring of carbon-material-reinforced polymers using electrical resistance measurement[J].International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology,2016,3(3):311-321.

[62] JEROLD J B J,VASANTHANATHAN A.Smart piezo-bonded carbon fibre/epoxy composite structure:experiments and finite element simulation[J].Materials Research Express,2022,9(4):045702.

[63] KERGOSIEN N,GAVÉRINA L,RIBAY G,et al.Lead zirconate titanate transducers embedded in composite laminates:the influence of the integration method on ultrasound transduction[J].Materials,2023,16(8):3057.

[64] JIANG J,JIANG J W,DENG X W,et al.Detecting debonding between steel beam and reinforcing CFRP plate using active sensing with removable PZT-based transducers[J].Sensors,2020,20(1):41.

[65] FENG T Y,FERRI ALIABADI M H.Structural integrity assessment of composites plates with embedded PZT transducers for structural health monitoring[J].Materials,2021,14(20):6148.

[66] ZENG H Y,YAN R J,XU L,et al.Application study on fiber Bragg grating sensors in damage monitoring of sandwich composite joints[J].Journal of Sandwich Structures & Materials,2020,22(5):1542-1563.

[67] SZEBÉNYI G,BLÖßL Y,HEGEDÜS G,et al.Fatigue monitoring of flax fibre reinforced epoxy composites using integrated fibre-optical FBG sensors[J].Composites Science and Technology,2020,199:108317.

[68] ZHANG W F,ZHANG M,WANG X Y,et al.The analysis of FBG central wavelength variation with crack propagation based on a self-adaptive multi-peak detection algorithm[J].Sensors,2019,19(5):1056.

[69] CIMINELLO M,BOFFA N D,CONCILIO A,et al.Stringer debonding edge detection employing fiber optics by combined distributed strain profile and wave scattering approaches for non-model based SHM[J].Composite Structures,2019,216:58-66.

[70] ZHU P Y,XIE X B,SUN X P,et al.Distributed modular temperature-strain sensor based on optical fiber embedded in laminated composites[J].Composites Part B:Engineering,2019,168:267-273.

[71] NOSSEIR A E S,SLEJKO E A,CERVONE A,et al.Composite structures with embedded fiber optic sensors:a smart propellant tank for future spacecraft applications[J].Acta Astronautica,2024,223:144-158.

[72] SHIN C S,CHEN B L,CHENG J R,et al.Impact response of a wind turbine blade measured by distributed FBG sensors[J].Materials and Manufacturing Processes,2010,25(4):268-271.

[73] SAI Y Z, JIANG M S, SUI Q M, et al. FBG sensor array-based-low speed impact localization system on composite plate[J]. Journal of Modern Optics, 2016, 63(5): 462-467.
[74] SAI Y Z, ZHAO X X, WANG L L, et al. Impact localization of CFRP structure based on FBG sensor network[J]. Photonic Sensors, 2020, 10(1): 88-96.
[75] SUN L L, WANG J H, HU H X, et al. A real-time NDT method based on FBG sensor spectrums to detect the transverse matrix cracks in composite materials[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2020, 39(2): 44.
[76] FERNÁNDEZ R, GUTIÉRREZ N, JIMÉNEZ H, et al. On the structural testing monitoring of CFRP cockpit and concrete/CFRP pillar by FBG sensors[J]. Advanced Engineering Materials, 2016, 18(7): 1289-1298.
[77] ROCHA H, SEMPRIMOSCHNIG C, NUNES J P. Small-diameter optical fibre sensor embedment for ambient temperature cure monitoring and residual strain evaluation of CFRP composite laminates produced by vacuum-assisted resin infusion[J]. CEAS Space Journal, 2021, 13(3): 353-367.
[78] OROMIEHIE E, GANGADHARA P B, COMPSTON P, et al. *In-situ* simultaneous measurement of strain and temperature in automated fiber placement (AFP) using optical fiber bragg grating (FBG) sensors[J]. Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science, 2017, 3(2): 52-61.
[79] MOHANTA S, PADARTHI Y, GUPTA J, et al. Insight into the nondestructive performance evaluation of fiber-reinforced polymer composite laminate immersed in produced water using embedded fiber Bragg grating sensor[J]. Polymer Composites, 2021, 42(9): 4717-4727.
[80] BASU M, GHORAI S K. Strain sensing in fiber-reinforced polymer laminates using embedded fiber Bragg grating sensor[J]. Fiber and Integrated Optics, 2014, 33(4): 279-298.
[81] OROMIEHIE E, PRUSTY B G, RAJAN G, et al. Optical fiber Bragg grating sensors for process monitoring in advanced composites[C]//2016 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS). Catania: IEEE, 2016: 1-5.
[82] FREIRE J L F, PERRUT V A, BRAGA A M B, et al. Use of FBG strain gages on a pipeline specimen repaired with a CFRE composite[J]. Experimental Techniques, 2015, 39(5): 70-79.
[83] LI Y, WAN Z K, LI J L. Research on health monitor for three-dimensional braided composite material[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 48/49: 1389-1394.
[84] LI P, WAN Z K. Study on the damages detection of 3 dimensional and 6 directional braided composites using FBG sensor[C]//2019 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). Xiamen: IEEE, 2020: 3272-3274.
[85] LI J, YU Y H, QING X L. Embedded FBG sensor based impact identification of CFRP using ensemble learning[J]. Sensors, 2021, 21(4): 1452.
[86] TIAN G L, SHI Y H, DENG J X, et al. Low-cost, scalable fabrication of all-fabric piezoresistive sensors *via* binder-free, *in-situ* welding of carbon nanotubes on bicomponent nonwovens[J]. Advanced Fiber Materials, 2024, 6(1): 120-132.
[87] ZHANG H, LIU Y, KUWATA M, et al. Improved fracture toughness and integrated damage sensing capability by spray coated CNTs on carbon fibre prepreg[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 70: 102-110.
[88] PINTO B, KERN S, KU-HERRERA J J, et al. A comparative study of a self strain-monitoring carbon nanotube film and carbon fibers under flexural loading by electrical resistance changes[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2015, 628: 012098.
[89] RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ J A, RUBIO-GONZÁLEZ C. Influence of graphene nanoplatelet concentration on the electrical, mechanical, and piezoresistive properties of glass fiber/epoxy composites[J]. Polymer Composites, 2022, 43(5): 3276-3289.
[90] UD D I, ASLAM N, MEDHIN Y, et al. Electromechanical behavior of self-sensing composite sandwich structures for next generation more electric aerostructures[J]. Composite Structures, 2022, 300: 116169.
[91] DUONGTHIPTHEWA A, ZHOU H M, WANG Q Q, et al. Non-additive polymer matrix coated rGO/MXene inks for embedding sensors in prepreg enhancing smart FRP composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 270: 111108.
[92] IRFAN M S, ALI M A, KHAN T, et al. MXene and graphene coated multifunctional fiber reinforced aerospace composites with sensing and EMI shielding abilities[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2023, 165: 107351.
[93] ZHANG Y F, WU X J, GUO Q W, et al. Advances in sensors technologies for composites structural health monitoring[J]. Composite Structures, 2025, 370: 119448.
[94] GREMINGER M A, HAGHIASHTIANI G. Fabrication, polarization, and characterization of PVDF matrix composites for integrated structural load sensing[J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(4): 045038.
[95] GROO L, INMAN D J, SODANO H A. Dehydrofluorinated PVDF for structural health monitoring in fiber reinforced composites[J]. Composites Science and Technology, 2021, 214: 108982.
[96] YUAN L J, FAN W, YANG X, et al. Piezoelectric PAN/$BaTiO_3$ nanofiber membranes sensor for structural health monitoring of real-time damage detection in composite[J]. Composites Communications, 2021, 25: 100680.
[97] HOFMANN P, WALCH A, DINKELMANN A, et al. Woven piezoelectric sensors as part of the textile reinforcement of fiber reinforced plastics[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 116: 79-86.
[98] JUNG K C, CHANG S H. Performance evaluation of smart grid fabrics comprising carbon dry fabrics and PVDF ribbon sensors for structural health monitoring[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 163: 690-701.

收稿日期: 2025-11-29; **录用日期**: 2025-12-30

通讯作者: 张宏凯(1992—),男,助理教授,博士,主要研究方向为工程材料先进制造,联系地址:陕西省西安市碑林区咸宁西路28号西安交通大学(710049),E-mail: hkzhang@xjtu.edu.cn

(本文责编:张宝玲)