引用格式：卢少微，刘新华，王晓强，等. 智能复合材料研究进展：基于碳纳米管的功能化与工程应用[J]. 材料工程，2026，54(8)：119-133.
LU Shaowei，LIU Xinhua，WANG Xiaoqiang，et al. Advances in smart composite materials：functionalization and engineering applications based on carbon nanotube[J]. Journal of Materials Engineering，2026，54(8)：119-133.

智能复合材料研究进展：基于碳纳米管的功能化与工程应用

卢少微[1*]，刘新华[2]，王晓强[2]，李　斌[3]，王　琦[3]，郭　洋[3]
（1 沈阳航空航天大学 材料科学与工程学院，沈阳 110136；
2 沈阳航空航天大学 航空宇航学院，沈阳 110136；3 山东省创新发展研究院，济南 250000）

摘要：纤维增强聚合物基（fiber reinforced polymer，FRP）复合材料具有轻质、高比强度、耐疲劳和抗腐蚀等优点，被广泛应用于航空航天、轨道交通等领域。然而，在服役过程中产生的内部损伤往往具有隐蔽性，存在安全隐患。智能复合材料的出现，为在改善力学性能的情况下集成结构健康监测提供了极具潜力的解决方案。本文首先介绍了碳纳米管（carbon nanotube，CNT）增强 FRP 复合材料的制备方法，在此基础上进一步综述了 CNT 用于复合材料结构健康监测的研究现状，具体可分为嵌入式碳纳米管传感器在基础力学试件和工程构件中的健康监测以及复合材料自监测技术，其中复合材料自监测技术又分为树脂基体改性和纤维接枝两种方法。最后，综述了 CNT 改性 FRP 复合材料在工业应用、多场耦合环境下传感器监测稳定性等方面的挑战，并展望了增强体系与健康监测技术“结构-功能”一体化发展方向，以推动智能复合材料转向工业规模生产的关键一步。

关键词：碳纳米管；FRP 复合材料；结构健康监测；自监测
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2026.000145　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2026.000145
中图分类号：TB33　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)08-0119-15

Advances in smart composite materials: functionalization and engineering applications based on carbon nanotube

LU Shaowei[1*]，LIU Xinhua[2]，WANG Xiaoqiang[2]，LI Bin[3]，WANG Qi[3]，GUO Yang[3]
（1 College of Materials Science and Engineering，Shenyang Aerospace University，Shenyang 110136，China；
2 College of Aerospace Engineering，Shenyang Aerospace University，Shenyang 110136，China；
3 Shandong Institute of Innovation and Development，Jinan 250000，China）

Abstract：Fiber reinforced polymer (FRP) composites offer advantages such as lightweight construction, high specific strength, fatigue resistance, and corrosion resistance, making them widely applicable in aerospace, rail transit, and other sectors. However, internal damage that occurs during service is often concealed, posing potential safety risks. The advent of intelligent composite materials presents a promising approach for integrated structural health monitoring while enhancing mechanical properties. This paper introduces the preparation methods for carbon nanotube (CNT) reinforced FRP composites. Building on this foundation, the current state of research regarding CNT applications for structural health monitoring of composite materials is reviewed. This research can be categorized into two main areas: health monitoring using embedded carbon nanotube sensors in basic mechanical specimens and engineering components, and the self-monitoring technology of composite materials. The self-monitoring technology is further divided into two methods: resin matrix modification and fiber grafting. Finally, the challenges of CNT-modified FRP composites in industrial applications and sensor monitoring stability in multi-field coupling environments are reviewed, and the development direction of ‘structure-function’ integration of reinforcement system and health monitoring technology is prospected, so as to promote the key step of

intelligent composite materials to industrial scale production.

Key words: CNT; FRP composite material; structural health monitoring; self-monitoring

纤维增强聚合物基(fiber reinforced polymer, FRP)复合材料因其轻质、高强、耐蚀性佳等优点,在航空航天、轨道交通等工业中逐渐发挥着重要作用[1],在波音 787 客机中,复合材料占比已达到 50%[2]。随着对FRP复合材料性能需求的不断提升,传统FRP复合材料在服役期间局限性逐渐凸显。首先,界面问题是限制发挥纤维强度的主要因素,界面结合强度不足导致的基体微裂纹、纤维脱粘等微观损伤将在复合材料内部拓展,进而导致结构整体失效,及时发现这些不可见损伤可以防止复合材料发生灾难性破坏[3]。其次,层间韧性不足导致冲击载荷下裂纹极易在层间区域萌生和扩展,进而发展为分层损伤。第三,在FRP复合材料服役期间,为确保结构完整性和可靠性,需结合各种无损检测技术进行探伤,但大多数方法需要对FRP复合材料结构进行停机检查,不适合提供长期监测应用[4],现有传感器(光纤光栅、压电陶瓷)不仅会增加结构质量,还会大大降低传感器与基体的界面兼容性,限制FRP复合材料的进一步发展。

结构健康监测技术作为无损检测方法局限性的解决方案,近年来受到了极大的关注,通过结构健康监测系统评估材料微观结构中的缺陷和损伤演变,可以在结构失效前采取预防措施,在保证结构部件可靠性的同时最大限度减少维护成本,降低运行风险[5-6]。

碳纳米管(carbon nanotube, CNT)是一种由碳原子以 sp^2 杂化方式排列成六边形的无缝圆柱形管,依据碳原子层数可分为单壁碳纳米管(single-walled carbon nanotube, SWCNT)和多壁碳纳米管(multi-walled carbon nanotube, MWCNT)[7-8]。CNT具有优异的力学、电学等性能,CNT的密度仅为钢的1/6~1/7,但抗拉强度可达50~200 GPa,约为钢的5倍,弹性模量可达1 TPa[9],电导率可达 10^5 S/m[10],自1991年Iijima发现CNT以来[11],这种一维纳米结构引起了广泛的研究兴趣,2000年初被首次应用于FRP复合材料,之后逐渐发展为FRP复合材料力学增强及结构健康监测的重要组成部分[12-13],作为增强材料,CNT通过机械互锁、裂纹桥接、裂纹偏转等机制显著提升界面结合强度和层间断裂韧性,改善FRP复合材料的强度、刚性、韧性、耐磨性等力学性能[14],另一方面,CNT在FRP复合材料内部形成三维导电网络,利用FRP复合材料损伤前后CNT电阻变化与应力应变的关系确认损伤位置、尺寸,实现FRP复合材料的结构健康监测[5,15]。CNT的加入对增强FRP复合材料力学性能及发现FRP复合材料的潜在损伤具有重要意义,近年来,研究人员不断开展CNT增强FRP复合材料研究,CNT增强FRP复合材料及结构健康监测发展脉络如图1所示,本文系统综述了FRP复合材料的研究进展,主要涵盖CNT增强FRP复合材料制备方法及力学性能改善、嵌入式碳纳米管传感器健康监测研究现状以及FRP复合材料自监测研究现状。

1 CNT改性FRP复合材料的制备

CNT在用作FRP复合材料增强相时,根据CNT的掺杂形式,可将含有CNT的聚合物复合材料分为四种类型:(1)CNT单独作为填料分散在聚合物基体中[16];(2)CNT接枝在增强纤维表面,或者分散在聚合物基体中,与增强纤维构成复合材料[17-19];(3)CNT与多种纳米材料混杂在一起,在聚合物中产生协同效应[20];(4)CNT被加工为宏观尺度纤维,之后与聚合物复合构成复合材料[21];本文主要针对前两种类型进行介绍。

在实现CNT增强FRP复合材料工程应用之前,必须解决几个关键问题。首先,CNT在聚合物基体中难以均匀分散,分散稳定性差;其次,CNT表面化学惰性导致其与基体界面结合强度低,限制了载荷传递效率;第三,在复合材料液体成型过程中,纤维增强体对CNT的过滤效应导致沿树脂流动方向CNT含量逐渐降低,引起材料性能的异质性。经过研究人员不断努力,可通过多种方法实现CNT增强FRP复合材料的制备,包括树脂基体改性法、CNT层间嵌入法、纤维表面修饰法、CNT定向排列法等,不同制备类型及具体操作方法如图2所示。通过CNT在复合材料内部形成渗流网络,有助于增强力学性能并赋予复合材料优异的电性能,进而实现FRP复合材料的健康监测。

1.1 树脂基体改性法

在CNT增强FRP复合材料制备工艺中,将CNT直接分散在树脂基体中是使用最早、发展较为成熟的方法之一,已有大量工作证实CNT的引入可以显著提升FRP复合材料的力学性能,包括拉伸、冲击和疲劳性能[22-25],采用该方法制备CNT增强FRP复合材料在很大程度上依赖于CNT在树脂基体中的分散效果[13]。CNT较大的长径比、强烈的范德华力及π-π相互作用导致其在树脂基体中难以形成长期稳定的分

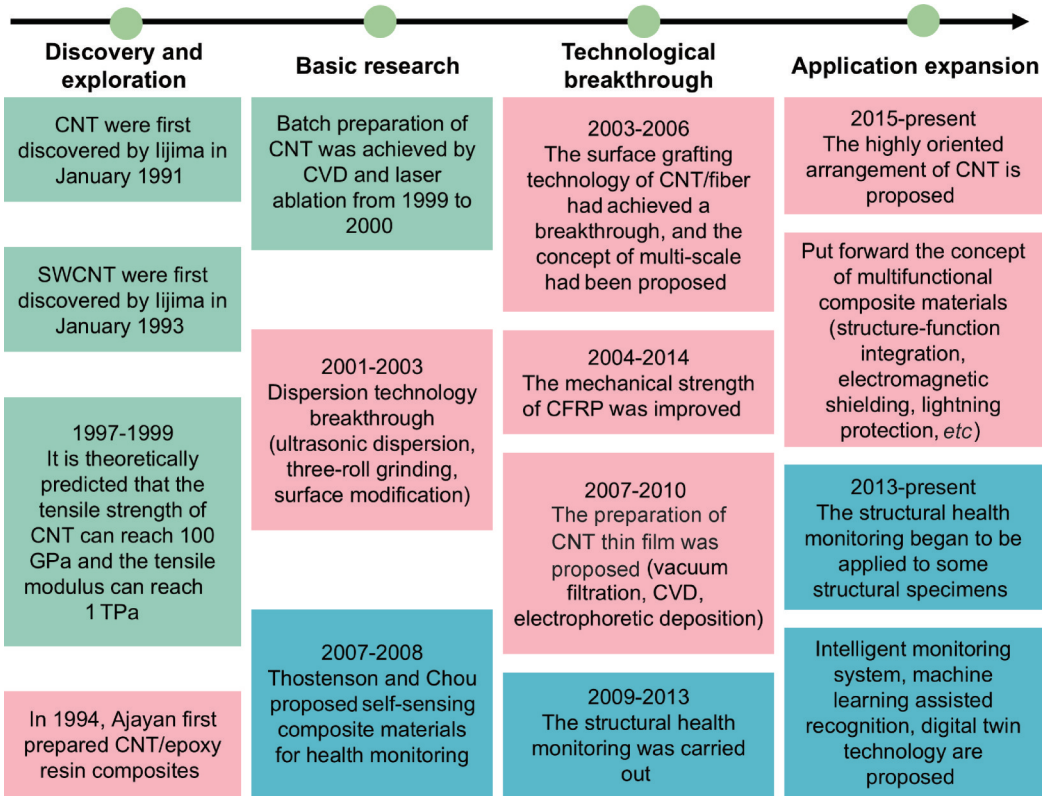


图 1　CNT 改性 FRP 复合材料及健康监测发展图谱

Fig.1　CNT modified FRP composites and health monitoring development map

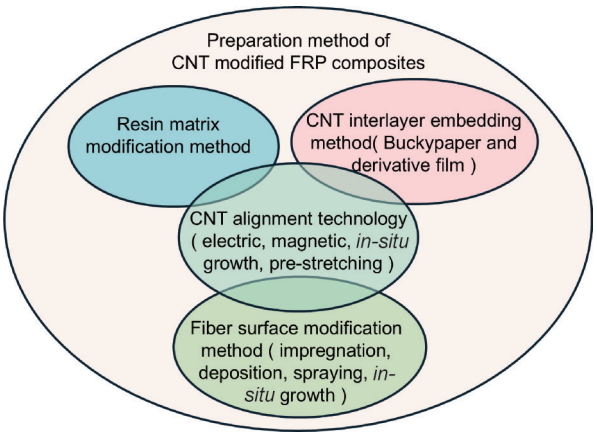


图 2　CNT 改性 FRP 复合材料制备方法汇总

Fig.2　Summary of preparation methods of CNT modified FRP composites

散体[26-27],但 CNT 的分散性可以通过多种方法进行改善,如共价键改性、非共价键改性和物理分散,共价键改性和非共价键改性是分散稳定性的保障,物理分散是实现稳定分散的必要方法,在物理分散方法中,多通过施加外力实现碳纳米管的解团聚,包括高速剪切、高压均质、球磨、超声波分散、三辊研磨、双螺杆挤出等。然而,当 CNT 质量分数过高时,会导致分散困难或固化过程中的二次团聚,降低 FRP 复合材料的性能[28],高质量分数 CNT 改性树脂带来的高黏度问题也会限制某些成型工艺(如缠绕成型、拉挤成型)的应用。这些技术的主要挑战之一是改进分散工艺,提升 CNT 在树脂基体中的分散效果,降低 CNT 浓度,进而控制 CNT 分散后树脂黏度。

1.2　CNT 层间嵌入法

CNT 层间嵌入法是将巴基纸或其衍生薄膜加入 FRP 复合材料层间,在增强复合材料力学性能的同时作为内嵌传感器,巴基纸是通过物理或化学方法在二维平面上填充碳纳米管阵列形成的碳纳米管网络结构,内部碳纳米管相互缠绕,保留了碳纳米管的原始性质,在不损失碳纳米管优异性能的情况下,更容易与 FRP 复合材料形成混杂增强,而且层间嵌入巴基纸可以在不改变工艺的情况下直接应用于现有 FRP 复合材料的制备,同时可通过控制巴基纸厚度实现 CNT 含量控制[14,29]。目前已在提升复合材料Ⅱ型层间剪切强度、压缩性能、耐湿热性能、拉伸强度、耐冲击性能等方面得到验证,同时赋予了复合材料健康监测功能[30-34]。

1.3　纤维表面修饰法

第三种方法是利用 CNT 对增强纤维表面进行改性从而增强 FRP 复合材料力学性能,各种沉积技术已被用于在纤维或织物表面接枝碳纳米管,包括浸渍涂层、电泳沉积、喷雾涂层、化学气相沉积等[33]。

浸渍涂层是在纤维表面沉积CNT最简单和经济的方法，通过控制分散液中CNT分散性、浓度、溶剂类型和纤维浸渍时间从而实现纤维表面涂层控制[35]；电泳沉积则是在衬底与对电极之间施加电场，将悬浮在分散液中的CNT涂覆在一起的方法，涂覆质量主要取决于分散液中CNT的浓度、分散液的稳定性、沉积时间和施加电压的大小，与浸渍法相比可在纤维表面生成更加均匀和连续的CNT；喷涂是另一种CNT沉积技术，可在纤维和织物表面形成纳米涂层，尤其适用于不规则形状。CNT在分散液中的稳定均匀分散对喷涂后CNT在纤维表面的分布起着重要作用[36-37]；化学气相沉积是一种成熟的制备CNT的方法，通过在载体上负载催化剂和在气相中循环碳源气体来实现CNT在纤维上的生长，通过该方法在纤维表面生长的CNT可与纤维实现共价键结合，结合力更强[13,38-40]。

通过控制CNT在增强纤维上的接枝可以实现优良的力学性能和功能化的设计目标，但CNT接枝需要严格控制工艺条件、技术装备和操作环境，并不适合大批量CNT增强FRP复合材料的生产，未来研究需在兼顾生产效率与经济效益的同时，着力避免CNT生长过程中因纤维损伤及催化剂残留导致的性能下降问题；在浸渍涂层、电泳沉积、喷雾涂层等方法中，仍需解决分散液稳定性差的问题，在保证CNT均匀分散与结构完整性的前提下，实现与基体的高强结合，并兼顾工艺的可发展性与经济性。

1.4 CNT定向排列技术

随着树脂基体改性和纤维接枝技术的发展，CNT在FRP复合材料中的定向排列成为进一步实现力学增强和健康监测技术的另一有效方法，这从Ⅰ型断裂和CNT改性后Ⅰ型断裂测试结果（提升50%～100%）得到了证实[18,41]，目前实现CNT定向排列的方法可分为三类：第一种是原位生长法，通过化学气相沉积等方法直接在基底上制备CNT，这种方法制备过程较为复杂且仅适用于制备薄膜复合材料[42]，Yang等[43]通过化学气相沉积在碳纤维表面制备了垂直排列的CNT网络，三点弯曲测试表明最大弯曲强度较未处理试件提高了27.1%，破坏模式由沿环氧胶层的分层破坏转变为贯穿厚度方向的裂纹扩展，证实了采用化学气相沉积法可实现CNT在纤维表面沉积并实现排列控制，避免了CNT分散体在复合材料制造过程中纤维的过滤问题；第二种是在液相加工过程中，通过外加电场、磁场等外部力实现CNT的定向排列，在电场排列过程中，需要严格控制电场频率和电场强度，以避免碳纳米管向电极一侧的迁移或介质的介电击穿[44]，采用磁场能够快速实现非接触式CNT定向排列，没有介电击穿现象，但由于CNT磁化率极低，甚至可能是抗磁性，需要较高的磁场强度来实现排列（250000～550000 G），目前已经实现短时间内沿磁场方向CNT定向排列（550000 G磁场下仅需50 ms）[45]，多采用在CNT表面接枝或包覆磁性颗粒以实现低磁场强度下CNT快速排列；第三种方法则是在高温下对聚合物/碳纳米管复合材料进行单轴拉伸或采用静电纺丝的方法将CNT分散液制备成宏观纤维，在施加的单向应力下实现CNT定向排列[46]，通过拉伸挤复合薄膜制备了高对齐度聚苯乙烯/碳纳米管复合材料，使得拉伸模量较CNT随机分散复合材料提升5倍[42]。目前实现CNT定向排列的方法需要复杂的制备工艺和特定的设备，距离实现工业化CNT定向排列还有很长的路要走。

2 碳纳米管传感器/FRP复合材料的健康监测

FRP复合材料在诸多领域有着广泛的应用，为提升结构的可靠性，对FRP复合材料进行无损检测和实时结构健康监测势在必行，通过集成现场结构健康监测系统，CNT已被用于在FRP复合材料内部构建电子流通的渗流网络，提供使用电阻监测复合材料内部损伤的可能性，CNT网络在FRP复合材料内部像神经网络一样，可以感知结构变形、裂纹萌生和扩展，本部分总结了碳纳米管传感器的传感机理、CNT在FRP复合材料健康监测中的应用，其中应用部分为：高性能、可集成传感介质的“碳纳米纸传感器”与材料、传感功能一体化的“自监测复合材料”。

2.1 碳纳米管的压阻效应与传感机理

依据CNT在FRP复合材料内部的存在形式和分布状态，可将碳纳米管传感器分为嵌入式薄膜传感器、基体掺杂改性传感器及CNT/纤维接枝传感器，三种传感器的主要工作原理均是利用外部激励使得带电载流子发生隧穿效应影响接触电阻变化，进而使得传感器电阻发生变化。碳纳米管传感器导电网络的总电阻有两个来源，一是CNT自身结构所带的本征电阻，二是CNT纵横交错形成的接触点处的接触电阻。碳纳米管传感器与复合材料一体成型后，内部孔隙被树脂分子填充，接触电阻主要由CNT之间的隧穿效应引起，即当CNT之间的距离足够小时，在电子隧道效应的作用下，CNT上的自由电子会穿越到邻近的CNT上，从而在连接处产生接触电阻。CNT具有较高的弹性模量和抗拉强度，传感器在受到外力作用时，CNT自身变化很小，主要依靠CNT之间相对位置

改变而引起变化,所以CNT传感器的电阻因应变发生变化时,其接触电阻的变化起到主要作用,本征电阻影响可忽略不计,因此CNT传感器内部的隧穿效应在应变传感时,起到了主要作用,碳基纳米传感器的传感机理如图3(a)所示[47],对于复合材料结构健康监测而言,结构会因施加机械力而产生应变,对应变变化的响应能力可用灵敏度(gauge factor,GF)进行表示,定义为相对电阻变化($\Delta R/R_0$)与施加应变(ε)的比率,见式(1):

$$GF=\frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon} \tag{1}$$

式中:$\Delta R=R-R_0$,R是传感器实时电阻,R_0是无负载时传感器的初始电阻。

CNT传感器在不同监测范围内呈现出不同的响应机制,如图3(b)所示[48-49],当试件受到低应力时,外加应力主要通过改变相邻CNT之间的隧穿距离来调节传感器总电阻,此时电阻变化率略有增加且电阻变化保持可逆性,外力卸载后传感器电阻信号可恢复至初始值。随着应力水平的逐渐增加,CNT网络内部的局部导电通路开始断裂和重新搭接:一方面,部分原本直接接触的CNT发生滑移或分离,导致导电通路永久失效;另一方面,微裂纹开始在材料内部萌生,裂纹尖端附近的CNT连接被破坏,电阻变化速率开始增加,同时电阻信号中不可逆电阻变化率逐渐增加。当达到高应力区时,复合材料发生层间开裂、纤维断裂等宏观损伤,CNT传感器内部导电网络受到不可逆破坏,大部分导电通道被完全断开,电阻值出现急剧跃迁甚至趋于绝缘状态。

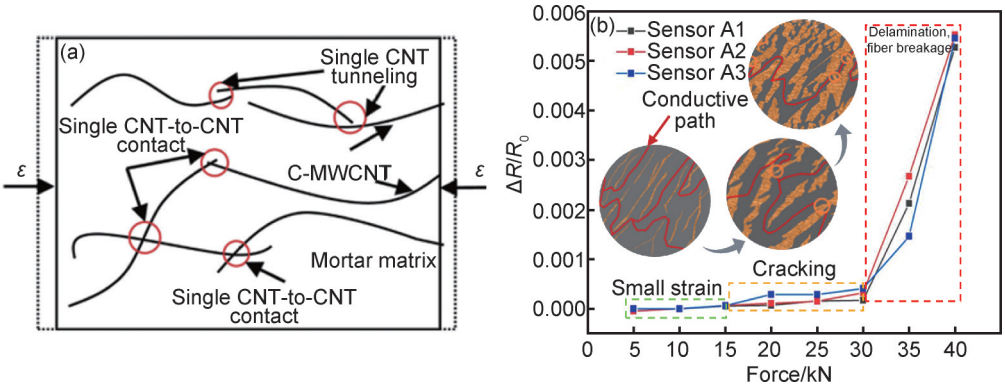


图3　传感器传感机理示意图

(a)碳纳米管传感器导电网络机理示意图[47];(b)不同损伤阶段传感器响应趋势及传感器传感机理示意图[48-49]

Fig.3　Schematic diagram of sensor sensing mechanism

(a)schematic diagram of sensing mechanism of carbon nanotube sensor[47];

(b)sensor response trend and sensor sensing mechanism diagram of different damage stages[48-49]

由于CNT在复合材料中的分布位置不同,三种传感器在监测精度及适用场景呈现显著差异,具体参数对比如表1所示[1,6,38,49-54]。嵌入式薄膜传感器通过将预成型的碳纳米管薄膜嵌入复合材料层间形成独立的传

表1　嵌入式薄膜传感器、基体掺杂改性传感器及CNT/纤维接枝传感器参数对比汇总表[1,6,38,49-54]

Table 1　Summary of parameters comparison of embedded thin film sensor, matrix doping modified sensor and CNT/fiber grafting sensor[1,6,38,49-54]

Sensor type	Embedded thin film sensor	Matrix doping modified sensor	CNT/fiber grafting sensor
Monitoring accuracy	High (damage location can be realized according to array control)	Middle (can be adjusted according to CNT content)	Middle (for the resin-fiber interface region)
Monitoring range	Local	Integral structure	Local or integral structure (mainly monitoring resin-fiber interface area)
GF	≈2-9	≈3.6-20	≈2.3-30
Linearity	>0.98	>0.98(small strain) Nonlinearity (large strain)	>0.98(small strain) Nonlinearity (large strain)
Manufacturability	Excellent (can be directly embedded inside the composite material)	Medium (CNT is easy to agglomerate or affect the viscosity of the resin)	Poor (additional fiber treatment required)
Response time	≈80 ms	≈120 ms	≈70 ms

感层，其信号主要反映薄膜所在区域的局部应变状态，监测精度更高，适用于局部应力分析与损伤监测，但其监测范围较小；基体掺杂改性传感器可实现结构整体平均应变的实时感知与损伤监测，可真正实现“材料即传感器”的优势，但高碳纳米管含量可能影响树脂工艺性，监测精度较嵌入式薄膜传感器低；CNT/纤维接枝传感器则是在增强纤维表面构建导电层，对纤维-树脂界面状态极为敏感，在早期界面损伤预警方面具有独特优势，可通过控制接枝长度及位置实现传感器阵列布控。三种传感器的差异在于CNT在复合材料内部的存在形式及位置，这种差异决定了对不同类型损伤的敏感性，在实际应用中可根据监测需求进行选择或协同使用。

2.2 基于嵌入式薄膜传感器的监测方法

2.2.1 基础试件的全寿命健康监测

大量研究探索了将碳纳米管薄膜传感器集成到FRP复合材料中，以实现对制造和服役过程中全寿命周期的实时监测，均利用电阻的变化来监测材料内部的状态，为树脂相变、固化动力学和损伤演化研究提供参考。

在几项研究中，碳纳米管传感器被广泛应用于复合材料制造及加热过程，用于实时监测FRP复合材料树脂流动和相变行为。例如，Lu等[55]通过层层组装的方法制备了碳纳米管传感薄膜，并将其嵌入液态复合材料成型试件中（如图4(a)所示），当树脂浸润传感器时，破坏了三维导电网络，隧道效应导致传感器电阻增加，这种电阻变化可实时跟踪内部夹层对树脂流速和渗透率的影响，为液态复合材料成型过程的质量控制提供新的技术，此外，在固化过程中，传感器的电阻变化与温度诱导的树脂黏度变化、树脂渗透、交联收缩及冷却阶段温度变化均呈现出不同的变化趋势，通过对传感器电阻变化率的分析可实现树脂相变监测和固化度定量分析，依据集成在FRP复合材料内部传感器电阻变化率-温度对应关系还可实现FRP复合材料玻璃化转变温度分析，最大误差仅为4 ℃，实现FRP复合材料制备-服役全流程在线评估[56-58]。Karlsson等[59-60]采用垂直排列的碳纳米管薄膜研究了真空袋固化过程中GFRP的局部固化行为，除实现固化过程监测外还监测到抽真空阶段真空压强变化，并证明固化后的GFRP内部传感器可实现200～450 K的温度监测和应变监测，应变监测精度低至100 με。

除固化过程监测外，大量的工作集中在利用碳纳

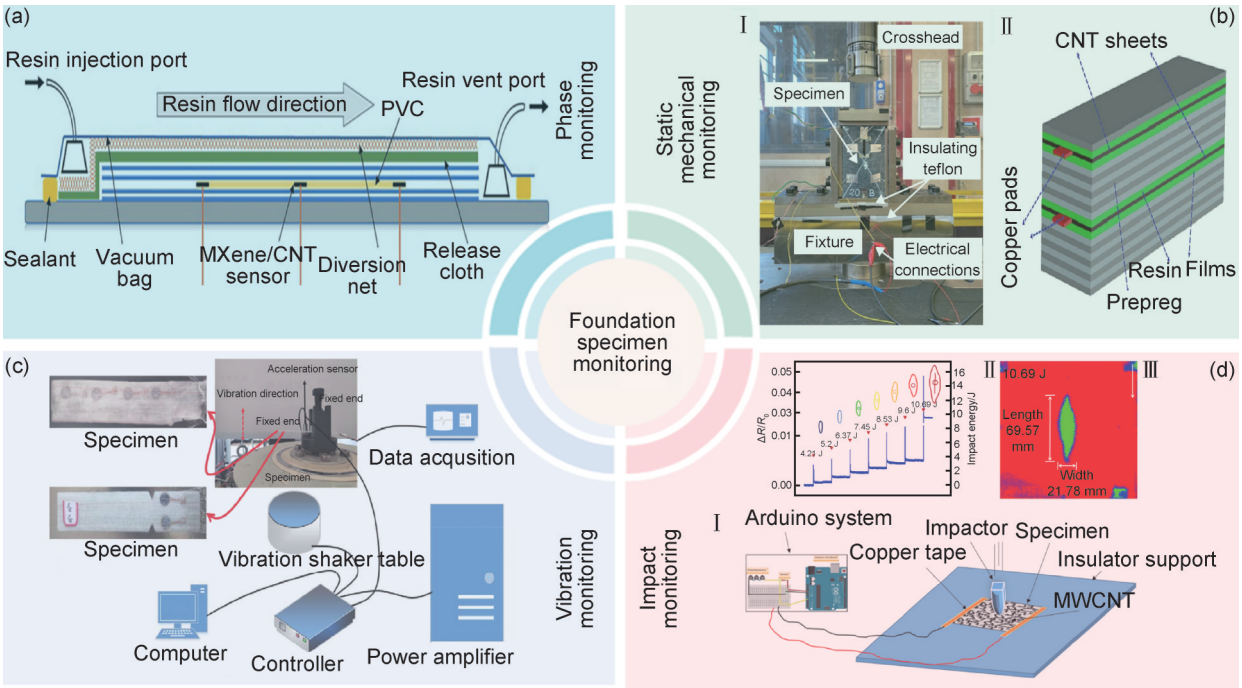


图4 复合材料基础试件健康监测示意图

(a)树脂浸润过程监测示意图[55]；(b)压缩监测实物图及传感器嵌入示意图[62-63]；(c)振动监测实物图[67-68]；(d)冲击监测示意图、不同冲击能量下传感器响应曲线及损伤区域超声C扫描图片[69-71]

Fig.4 Health monitoring diagram of composite foundation specimen

(a)resin infiltration process monitoring diagram[55]; (b)compression monitoring photo and sensor embedding diagram[62-63]; (c)vibration monitoring physical map[67-68]; (d)impact monitoring diagram, sensor response curve under different impact energy and ultrasonic C-scan image of damage area[69-71]

米管传感器对机械载荷下的复合材料服役状况进行在线监测与评估。Wang等[61]通过将碳纳米管传感器附着在GFRP表面,通过单轴循环拉伸实验证实了用于应变监测的可行性,灵敏度随应变的增加而不断增大,在0~43000 με范围内平均灵敏度为9。Pinello等[62]证实嵌入碳纳米管传感器不会损害GFRP的力学性能(图4(b)),同时可实现拉伸、低速冲击和冲击后压缩损伤的监测[63]。Lu团队[31,64]提出了一种全新的CNTs/PSF/PI传感器,该传感器在实现FRP复合材料健康监测的同时可将复合材料的拉伸强度提高1.68倍。除准静态载荷下FRP复合材料监测外,针对疲劳、冲击、振动等动态载荷下FRP复合材料损伤监测也开展了研究,在FRP复合材料疲劳损伤监测方面,通过将传感器电阻变化率与FRP复合材料内部应力变化和损伤积累相关联,依据传感器阵列的响应位置及趋势实现了室温及低温下(77 K)拉伸疲劳裂纹萌生与扩展的监测[63,65-66]。在振动损伤方面,Jiang等[67-68]使用碳纳米管传感器来监测GFRP层合板的低周和高周振动疲劳(图4(c)),发现传感器电阻呈现出一个特有演变规律:在振动下传感器电阻逐渐增加并趋于稳定,电阻的阶梯式变化与微裂纹的产生和发展相对应,在30万次高周疲劳后,传感器仍保持了显著的稳定性,证实了其适用于复合材料结构的长期振动监测。在冲击损伤监测方面(图4(d)[69-71]),通过将碳纳米管传感器嵌入FRP复合材料内部,实现了FRP复合材料冲击能量、损伤位置、损伤尺寸的监测,指出碳纳米管传感器有效监测距离为20 mm,最小监测能量为4.21 J。

这些研究展示了碳纳米管传感器在FRP复合材料中的基础研究进展,表明通过碳纳米管传感器电阻变化可精确捕捉材料在制备及外部载荷作用下的化学、物理演变过程,展示出优异监测性能,表明碳纳米管传感器已成为连接复合材料基础研究与工程应用的关键桥梁,推动了智能复合材料的发展。

2.2.2　工程构件的健康监测与损伤预警

近年来,碳纳米管传感器已经由基础试件健康监测发展到复合材料结构健康监测,它们独特的高灵敏度、高柔性和可嵌入特征,使其在评估关键工程结构包括螺栓连接结构、修补结构、复合材料缠绕压力容器、风电叶片等方面得到了应用。在这些不同的应用中,碳纳米管传感器的电阻随机械应变、损伤累积和环境因素的变化而发生可预测的变化,从而实现结构完整性实时评估。

通过将碳纳米管传感器嵌入复合材料螺栓连接结构内部,依据传感器电阻变化实现了螺栓预紧力、扭矩监测,之后通过将不同的电阻变化与逐渐发生的损伤扩展相关联,建立了四阶段的风险评估系统(如图5(a)所示),依据风险评估系统提出了拉伸载荷与振动载荷下螺栓连接结构失效评估方法,这种从基础试件级损伤监测到结构试件级失效预测的发展,说明碳纳米管传感器对复合材料结构试件监测的适用性[50,68,72-73]。在复合材料修补结构监测方面(图5(b)[74-75]),不断优化复合材料修补方法及修补后试件损伤健康监测研究,最大修补效率可达完整试件的93.8%,在修补后依据传感器电阻变化实现了试件拉伸损伤、压缩损伤、层间开裂及海水侵蚀等方面的实时损伤监测,传感器在结构失效前可发出预警信号,同时可依据传感器信号进行服役载荷状况回溯,作为复合材料结构事后取证分析的有力参考,为修复结构的服役提供安全保证,此外,在经历20000次疲劳循环后传感器信号漂移仅有0.011,当以阵列形式布置时,传感器产生0.004信号阶跃可判断传感器布控位置处出现疲劳损伤,实现损伤的精确定位,显著提高了对大规模修补构件的诊断价值[4,48,74-75]。

复合材料缠绕压力容器(composite overwrapped pressure vessel,COPV)是另一个结构健康监测应用较为广泛领域,其中机械应变、内部压力变化、温度变化和疲劳损伤的相互作用产生了复杂的监测要求。通过在内部嵌入和外部粘贴碳纳米管传感器(图5(c)[76-77]),系统地研究了COPV的内压、应变状态及弹塑性变形、温度、疲劳损伤及损伤定位,指出与粘贴式传感器相比,嵌入式传感器呈现出更快的响应时间,在监测初始损伤方面更具有优势,最小监测应变低至700 με。通过对比嵌入在COPV内部轴向传感器和周向传感器信号,发现传感器在COPV轴向在相同载荷下表现出比周向传感器更大的电阻变化和残余电阻。在3000次水压疲劳实验过程中传感器呈现出较为稳定的响应信号,传感器的响应在前500次循环中保持稳定,表明COPV没有内部损伤,随后电阻变化率逐渐增加,表明COPV结构内部开始出现微裂纹萌生及扩展[76-80]。Wang等[81]则通过设计新型碳纳米管/环氧树脂传感器,通过固化在飞机壁板表面实现了冲击损伤监测与定位。

以上研究揭示了嵌入式碳纳米管传感器对于复合材料健康监测的机理:首先,从可逆到不可逆电阻变化的转变始终标志着结构永久性损伤的开始,无论是层合板中的微裂纹形成、螺栓连接接头中的过载、COPV内压或疲劳导致的损伤。其次,通过将传感器电阻变化进行区分(完全可恢复、部分不可恢复、完全不可恢复)为实现结构安全运行和损伤预警提供了有

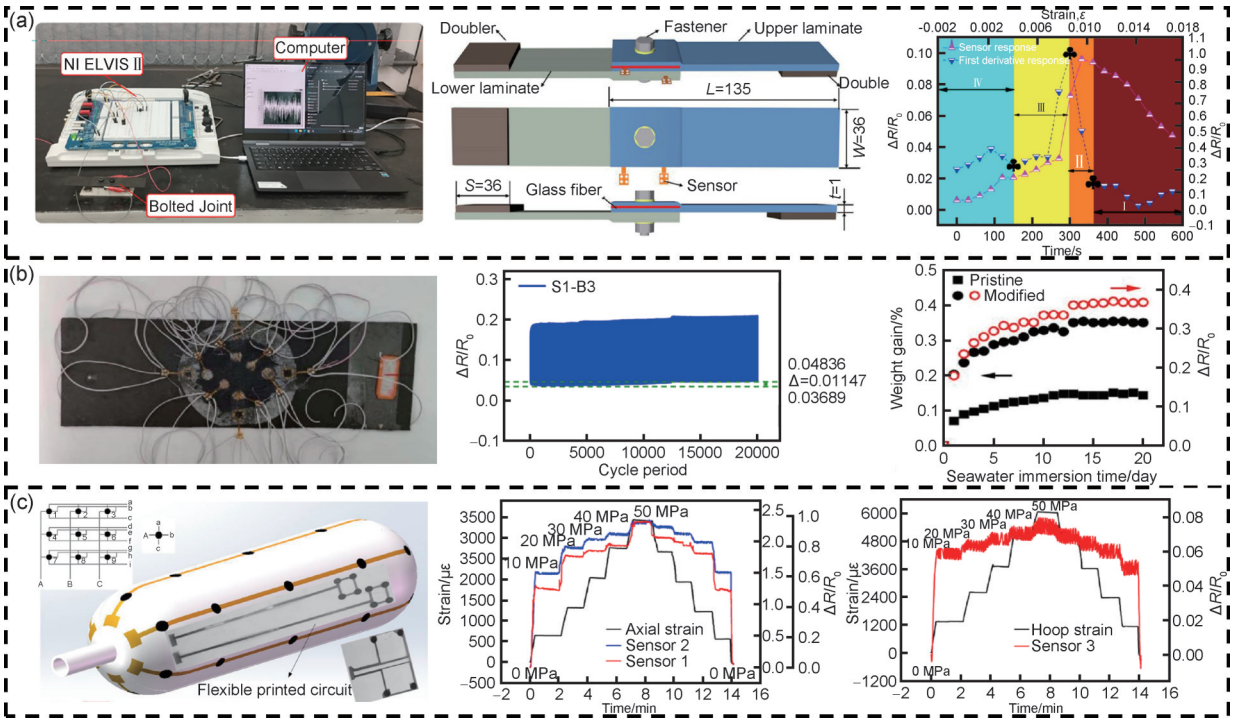


图5 复合材料工程构件健康监测汇总图

(a)螺栓连接结构扭矩、预紧力监测图片及损伤响应曲线[50,68,72];(b)布控传感器阵列复合材料修补结构实物图及疲劳、海水侵蚀监测曲线[48,74-75];(c)COPV健康监测示意图及轴向、环向水压监测曲线[76-77]

Fig.5 Summary diagram of health monitoring of composite engineering components

(a)bolt connection structure torque, preload monitoring pictures and damage response curve[50,68,72]; (b)the physical map of the composite repair structure of the distributed sensor array and the monitoring curve of fatigue and seawater erosion[48,74-75]; (c)COPV health monitoring diagram and axial and circumferential water pressure monitoring curves[76-77]

力的诊断工具。第三,传感器响应与加载历史和结构设计都有内在联系,依据传感器电阻变化不仅可实现实时监测,还可以对载荷历史进行分析以改进结构设计。随着这些传感器技术的成熟和对其响应机制的更好理解,将其集成到下一代复合材料结构中,有望将传统材料转变为能够在其整个工作寿命期间进行连续健康评估的智能自感知系统。

2.3 复合材料制备与服役过程的自监测方法

复合材料自监测技术是将CNT分散在基体中或涂覆在纤维上,在复合材料内部形成导电网络,依靠机械应变或损伤对导电网络的扰动实现健康监测的目的,自监测可以在增强力学性能的前提下实现结构健康监测需求,可通过调整CNT含量实现灵敏度、监测范围设计,经过与现有技术(应变片、DIC、声发射、XCT)的对比验证,已证实了复合材料自监测技术在多种损伤模式和加载条件下的可靠性。可以在整个复合材料生命周期中实现制造过程、损伤检测和结构完整性评估。

目前常用的复合材料自监测技术可以通过以下几种途径实现:(1)基体改性法:将CNT分散至树脂基体中,在树脂基体内部形成导电网络,进而实现复合材料自监测技术;(2)整体接枝法:将CNT接枝在纤维表面,使得复合材料整体具有导电性,依据监测需求选取对应位置进行信号采集;(3)局部接枝法:将CNT接枝在部分纤维表面,使复合材料内部沿某一方向或局部具有导电性,通过监测导电纤维的电阻变化实现复合材料的自监测。

基体改性是目前实现复合材料自监测使用较为广泛的方法,通过分散CNT使整个复合材料构件对应变和损伤均具有潜在的监测能力,但需严格控制CNT含量大于渗流阈值及分散均匀性以控制传感性能的稳定性,目前已开展大量基体改性以实现复合材料自监测功能的相关工作,通过将CNT分散至树脂基体中,可明显改善复合材料力学性能,拉伸强度可提升60%,断裂伸长率可提升101%,剪切强度可提升14%,弯曲强度最大可提升8%,并且展现出了优异的抗疲劳性和耐紫外线辐照能力,依据复合材料自身的传感效果可实现复合材料后固化制度优化以及复合材料拉伸、弯曲、层间剪切、疲劳裂纹等损伤萌生及扩展监测[6,54,82-83]。在基体改性的基础上,Sánchez-

Romate 等[51]提出了一种使用CNT改性的环氧树脂胶膜,通过标准试件和复合材料修补板材验证了其粘接强度和传感能力,指出CNT的加入并未对力学性能产生负面影响,其自监测能力与声发射信号和应变场变化有较高的吻合性,可用于复合材料板材修复和自监测(图6(a)[6,51,82])。

整体接枝法则是与基体改性互补的策略,通过化学气相沉积、涂层等方法在纤维表面接枝CNT,在纤维/基体界面处构建传感单元(图6(b))[52,84-85],Su等[52]利用化学气相沉积将CNT直接生长在玻璃纤维上,通过采集CNT涂覆纤维的电阻变化,实现了真空辅助树脂传递模塑过程的原位监测,固化后嵌入在复合材料内部碳纳米管传感器保留了传感能力,显示出用于制造过程控制和服役过程健康监测的双重功能,在服役过程监测中传感器表现出30.2的灵敏度和低至500 με的监测极限。Uribe-Riestra 等[84]则通过数字图像相关法和X射线计算机断层扫描技术验证了该方法在四点弯曲过程中对基体损伤、纤维断裂和分层监测的可靠性,指出该方法可以有效地监测不可见的损伤模式,通过在复合材料不同位置连接多对导线,依据不同位置处测试信号还可实现复合材料断裂韧性测试时分层长度监测,监测精度为3 mm[85]。

局部接枝法则是通过在特定纤维或铺层方向上进行选择性接枝CNT,在局部或沿某一方向形成特定导电路径,较整体接枝法能够实现更精确的监测精度,在局部接枝法制备传感器过程中,可通过控制碳纳米管接枝位置、长度、密度实现传感性能设计与阵列布控,Dai 等[86]通过在玻璃纤维局部接枝CNT实现了传感器阵列布控(图6(c))[86-88],实现了复合材料VARTM成型过程中真空压强、树脂流动前沿和固化过程中的相变变化,传感器还可实现复合材料内部干斑识别和服役过程监测。通过将导电纤维编织在复合材料内部,可实现复合材料单轴拉伸下纵向、横向、星型试件损伤监测及冲击损伤监测,其中在沿拉伸方向监测已取得较大进展(灵敏度为2.3,最小监测应变极限为30 με),在横向和星型试件监测性能还有待进一步提升[87];在冲击损伤定位方面,Jia 等[88]通过将碳纳米管纱线编织进三维编织碳纤维复合材料中实现了碳纤维复合材料冲击损伤监测,依据奇异值分解算法实现了冲击损伤定位监测,测量坐标误差小于1 mm。Park 等[89]针对航空复合材料结构的健康监测需求,开发了一种可嵌入的碳纳米管纤维传感器并配套设计了无线SHM传感器节点,嵌入到机翼蒙皮中进行了2G和4G加载测试,验证了嵌入式CNT传感器在大型航空结构中的可行性,研究同时指出,CNT传感器对温度变化较为敏感,未来需通过温度补偿算法进一步提高其实用性,Yang团队[90]则证明了采用局部接枝法在COPV健康监测中的可行性并对其水压疲劳过程中轴向和周向损伤变化进行了分析,最小监测极限为200 με,传感器在5700个循环周期内呈现出稳定的监测状态,可根据传感器响应实现压力容器服役状况监测。

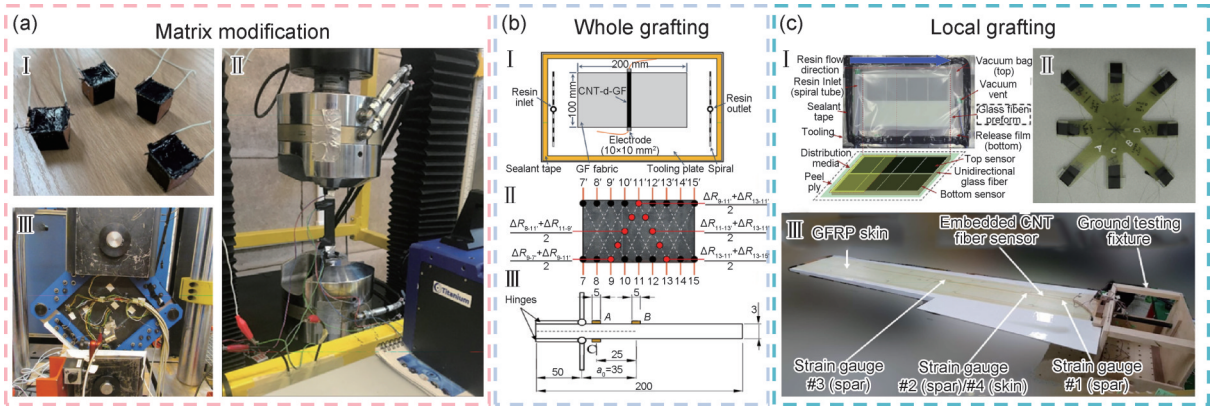


图6　复合材料自监测汇总图

(a)采用基体改性法进行树脂相变、拉伸、压缩健康监测试样实物图[6,51,82];(b)采用整体接枝法进行树脂浸润、四点弯曲及裂纹长度监测示意图[52,84-85];(c)采用局部接枝法进行树脂浸润、星型试件拉伸、机翼蒙皮振动监测实物图[86-88]

Fig.6　Composite material self-monitoring summary diagram

(a)photo of resin phase transition, tensile, and compression health monitoring using matrix modification method[6,51,82];
(b)schematic diagram of resin infiltration, four-point bending and crack length monitoring by integral grafting method[52,84-85];
(c)photo of resin infiltration, star specimen stretching, and wing skin vibration monitoring by local grafting method[86-88]

2.4　温湿度交叉敏感性补偿机制及信号解耦方法

CNT传感器在传感器领域得到了广泛应用。然而,环境温度和湿度变化会对CNT传感器产生显著影响,给实际应用中的多参数变化引起的信号变化解耦

带来了严峻挑战，具体来说，纯CNT薄膜的电阻率随环境中湿度的升高而增大，随温度的增加而降低，且温度对传感器信号响应的影响更为明显[91]，当传感器嵌入至聚合物内部后，从温度影响效应来看，内部导电路径形成及破坏受到聚合物基体分子链段热运动的影响，具体表现为：温度改变聚合物分子链运动能力，进而影响CNT导电网络连通效率；影响CNT与聚合物基体间的界面接触势垒，导致接触电阻随温度发生变化[92]。从湿度影响的效应看，环境湿度可通过改变聚合物基体介电常数和水分子在CNT表面的吸附状态来影响电阻信号，湿度对传感器信号的影响强度与聚合物材料类型密切相关，不同聚合物材料在水汽环境中的吸湿性存在显著差异[93]。迄今为止，主要通过在材料层面和在信号解耦层面消除温、湿度干扰。

在材料层面，主要通过材料复合设计来实现，例如，通过将正温度系数的石墨烯与负温度系数的CNT进行掺杂，利用两者相反的温阻趋势，实现材料层面的温度自补偿，在20～80 ℃范围内电阻变化仅为1.2 Ω，经过100次循环后仍有良好的稳定性[94]。Ma等[95]提出了一种疏水二氧化钛/碳纳米管/炭黑传感器，其温度系数在－10～70 ℃范围内接近于0，二氧化钛的疏水效果使得传感器具有抗湿度影响效果。Niu等[96]通过集成工艺制备了碳纳米管/石墨烯/聚二甲基硅氧烷复合材料，在－20～40 ℃的温度范围内表现出低温度敏感性和强疏水性，得到的拉伸/压缩双模式应变传感器在整个温度区间内保持稳定的灵敏度系数和长期可靠性。

在信号解耦方面，温湿度补偿法使用较早发展较为成熟，郭小辉等[97]以碳纳米管/炭黑/硅橡胶为力敏材料、碳纤维/硅橡胶为温敏材料设计了柔性三维力-温度复合传感器阵列，采用STM32F103微处理器和LabVIEW搭建信号采集系统进行温度补偿，有效消除了温度对力信号的干扰，通过将温敏单元与压敏单元同基底集成，实现了原位温度信息获取与实时校正，但该方法需引入额外敏感材料与复杂制备工序，增加了器件集成难度。在电路层面，惠斯通电桥是抑制信号干扰的经典方法，当桥路两侧电阻元件对温度和湿度的响应特性相近时，通过差分输出有效抵消环境干扰分量。Leemets等[93]在设计碳纳米管/聚二甲基硅氧烷多模态应变传感器时采用惠斯通电桥结构来平衡电阻输出信号的湿度漂移，发现碳电极相较于铜电极具有更优异的电气稳定性和机械稳定性。Li等[98]以碳纳米线圈为弹性骨架、CNT为导电介质构建了全碳柔性多功能传感器，利用碳纳米线圈和CNT对温度和湿度的本征电学响应，将传感介质划分为不同功能单元进行平面化集成，实现了应变（最高100%）、温度（7～400 K）和相对湿度（10%～80%）三种信号的同步监测。

随着人工智能技术的进步，算法层面解析在传感器信号温度-湿度动态解耦中展现出巨大潜力，Yuan等[99]提出包括物理参数抑制、阵列布控消除以及基于空间-时间分离与机器学习的先进算法在内的多层级技术路线。Yao等[100]结合多线性回归算法构建了温-湿度解耦模型，实现了对CNT传感器电阻信号的准确分离，该传感器温度检测范围覆盖－10～140 ℃，相对湿度检测范围为11%～100%，信号分离精度可满足环境变化评估和人体生理感知监测的需求，该方法仅需单一器件即可完成温湿度的同步检测，无须对传感器材料进行复杂的异质组分调控，降低了制备门槛。Cheng等[101]采用鲸鱼优化算法对CNT基电离气体传感器进行温度补偿建模，提升了变温条件下气体检测结果的准确性。

2.5 CNT改性FRP复合材料电磁屏蔽研究进展

除力学性能增强与结构健康监测外，CNT改性FRP复合材料在电磁屏蔽方面同样展现出重要的潜力。电磁屏蔽的基本原理在于通过反射、吸收和多重反射三种机制对入射电磁波能量进行衰减[102]。反射机制取决于材料内部自由载流子与电磁波之间的相互作用，当电磁波入射到材料表面时，波阻抗的突变导致部分能量被反射回周围空间，一般来说，材料的电导率越高，其屏蔽效果越强。吸收机理则是电磁波在材料内部传输时通过介电损耗或磁损耗将电磁波能量转化为热能，导电网络的连续性、界面极化效应以及材料的电磁参数共同决定了吸波能力。此外，当电磁波通过多孔结构或多层界面时，多次反射可延长电磁波在材料内部的传播路径，从而增加吸收效率。对于CNT/FRP复合材料而言，CNT在基体中形成的三维导电网络是屏蔽性能的核心，CNT的长径比直接影响CNT的分散性和网络连通性进而显著影响材料电导率，促进反射损耗[103]；丰富的界面和空隙结构则有利于增强吸收损耗，减少反射造成的二次电磁污染。Chen等[104]通过逐层真空辅助过滤制备了具有梯度孔径CNT薄膜，在X波段实现了31.7 dB的平均总屏蔽效能。Kim等[105]进一步采用热压法制备了兼具导电率梯度与孔隙率梯度的聚偏氟乙烯/碳纳米管复合材料，其顶层高孔隙率纯聚偏氟乙烯层用于阻抗匹配，底层高导电CNT层用于电磁损耗，中间过渡层逐步增强电磁波耗散，该材料实现了60.5 dB的电磁屏蔽效能和0.77的吸收系数，显著降低了反射率，为吸收主导型屏蔽材料设计提供了制备思路。

通过将CNT与石墨烯、MXene等二维材料共混或引入多孔结构可进一步协同增强界面极化效应,增加电磁波在材料内部的多重反射概率和吸收损耗,从而提升以吸收为主的屏蔽效能,同时多孔结构还有助于降低材料密度、满足轻量化需求[106],Lin等[102]采用常压干燥法制备了各向异性的石墨烯/纤维素纳米纤维气凝胶,利用一维纤维素纳米纤维与二维多层石墨烯构建了纳米至微米尺度的多级界面,显著增强了界面极化损耗,在X波段的最小反射损耗达−51.48 dB,有效吸收带宽为5.52 GHz,且极化损耗占比超过90%,该研究首次建立了极化峰频率与最小反射损耗频率之间的直接对应关系,为频率选择性吸波材料设计提供了理论指导。Qiao等[106]受牛重瓣胃的多层级褶皱结构启发,利用定向冷冻干燥和热亚胺化工艺,首次制备出具有“宏观结构设计+微观叶状褶皱+纳米级碳纳米管桥接”三级结构层次的聚酰亚胺/CNT气凝胶,密度仅18.6 mg/cm^3,X波段的电磁屏蔽效能高达71 dB,在350 ℃高温下屏蔽效能提升5%,经历500次压缩循环后结构保持率>90%,并表现出约−0.28的负泊松比和宽应变范围(0.5%~70%)的稳定压阻传感性能。Tang等[107]提出了一种基于热阻网络与相变水凝胶的温度响应型智能屏蔽材料,将MXene与CNT组装的导电网络嵌入至由聚乙烯醇和聚N-异丙基丙烯酰胺构建的互穿温敏水凝胶中,当温度超过31 ℃时,水凝胶发生疏水塌缩,微观结构从层状转变为球形孔,同时MXene与CNT的界面接触电阻因热激发而显著增大,导致整体电导率下降约2个数量级,实现了在X波段9.3~53.9 dB的调节范围,为先进智能电磁屏蔽的设计提供了一种新的途径。

3　结论与未来展望

本文对CNT改性FRP复合材料的研究工作进行了综述。介绍了CNT改性FRP复合材料的各种制备技术、添加CNT对FRP复合材料力学性能的影响。此外,本文还对碳纳米管-纤维增强聚合物基复合材料健康监测的最新研究进展进行了综述。随着巴基纸的应用、碳纳米管/纤维接枝技术和分散技术的发展,CNT改性FRP复合材料的制备、加工和微观结构控制已日趋成熟,目前对CNT改性FRP复合材料增强机理及健康监测原理已经很清楚。然而,在CNT改性FRP复合材料工程应用及健康监测仍存在一些挑战,亟须在以下方面取得突破:

(1)当前制备技术核心矛盾在于CNT的分散性与结构完整性二者难以兼得。物理分散易导致再团聚,化学功能化虽改善分散性却损伤碳纳米管本征结构,而碳纳米管/纤维接枝技术在规模化连续性方面仍显不足。未来应发展温和、高效、可工业化的分散技术,提升分散质量与速度,降低碳纳米管含量,从而实现CNT改性FRP复合材料制备过程中的工艺控制和降低成本。

(2)对于CNT增强FRP复合材料长期可靠性验证、标准化测试方法研究较少,有待提出相关标准。

(3)碳纳米管传感器的性能尚不够稳定,无法像光纤光栅传感器、应变片传感器一样批量生产,对碳纳米管传感器的监测范围、灵敏度仍需进一步标定。

(4)由于碳纤维的导电性,有待提出针对碳纤维复合材料的健康监测技术,随着复合材料服役环境的复杂化,温度、湿度等对传感器稳定性的影响还有待进一步探究,同时对多种激励下传感器信号解耦也提出了更高要求。

(5)随着健康监测技术需求的发展,对于数据快速采集、多批次信号处理、远距离无线传输需求逐渐增加,对于自修复复合材料、机器学习辅助损伤识别也提出了更高要求。

(6)碳纳米管传感器在健康监测领域展现出高灵敏度、轻质及可集成等突出优势,但在实际工程服役环境中,如航空发动机舱、高压储罐、机翼蒙皮等构件面临温度、湿度大幅波动的复杂工况,温度与湿度对传感器电阻信号的交叉干扰成为其走向工程应用的核心瓶颈,极易将环境扰动误判为结构应变或损伤信号,从而引发虚警或漏检。为突破这一瓶颈,未来的发展方向应聚焦于:开发固有的温、湿度不敏感性、低耦合性和高可集成性的新型复合材料体系;建立标准化的温湿度交叉干扰测试与评估规范;探索面向可穿戴应用的嵌入式、实时动态解耦模型,从而推动CNT传感器在复杂环境下的大规模部署。

(7)CNT改性FRP复合材料已取得显著进展,但当服役环境向高温、强电磁辐射、大温差等极端条件拓展时,树脂基体固有的热稳定性与界面可靠性不足逐渐成为制约其应用的关键瓶颈。针对这一挑战,未来研究应聚焦于自支撑纯碳基/二维材料多功能复合薄膜的发展,规避聚合物基体的热软化、分解及界面脱粘问题;同时利用碳基/二维材料本征的高电导率与介电特性,协同实现优异的电磁屏蔽、吸波及热管理性能,通过层间插层、异质界面工程或纳米孔道设计进一步集成传感、电磁屏蔽、储能等多功能特性。应着力探索多组分多层异质结构协同设计,发展高效可控且可宏量制备的自支撑薄膜组装技术,系统研究极端环境下热-力-电-辐照多场耦合作用时的微观演化与性能衰减机制,融合机器学习加速新型二维材料

及其复合薄膜的筛选与结构优化，为面向航空航天、高频通信及极端环境探测等领域的新一代多功能电磁屏蔽材料提供了全新的设计范式。

随着各类装备执行任务的多样化、复杂化，结构设计对轻量化和高可靠长寿命的要求越来越高，FRP复合材料在各类结构中得到了大量使用，CNT增强FRP复合材料正朝着“结构-功能一体化”的方向持续演变。未来研究的核心在于制备工艺、力学增强、多功能化三者之间的协同机制，通过多尺度界面设计、智能化工艺集成与低成本规模化制造，最终实现高性能智能复合材料在航空航天、新能源及基础设施等领域的工程应用。

参考文献

[1] De B, Bera M, Bhattacharjee D, et al. A comprehensive review on fiber-reinforced polymer composites: raw materials to applications, recycling, and waste management[J]. Progress in Materials Science, 2024, 146: 101326.

[2] Alemour B, Badran O, Hassan M R. A review of using conductive composite materials in solving lightening strike and ice accumulation problems in aviation[J]. Journal of Aerospace Technology and Management, 2019, 11: 23.

[3] Tao Y P, Zhang R M, Hu X M, et al. A comprehensive review on fiber-based self-sensing polymer composites for *in situ* structural health monitoring[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2025, 8(5): 339.

[4] Zhang L, Wang X, Lu S W, et al. Fatigue damage monitoring of repaired composite wind turbine blades using high-stability buckypaper sensors[J]. Composites Science and Technology, 2022, 227: 109592.

[5] 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.

[6] Park K, Scaccabarozzi D, Sbarufatti C, et al. Coupled health monitoring system for CNT-doped self-sensing composites[J]. Carbon, 2020, 166(prepublish): 193-204.

[7] Iijima S, Ichihashi T. Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter[J]. Nature, 1993, 363(6430): 603-605.

[8] Bethune D S, Kiang C H, de Vries M S, et al. Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls[J]. Nature, 1993, 363(6430): 605-607.

[9] Kinloch I A, Suhr J, Lou J, et al. Composites with carbon nanotubes and graphene: an outlook[J]. Science, 2018, 362(6414): 547-553.

[10] Kim S B, Kim C H, Lee S Y, et al. Carbon materials and their metal composites for biomedical applications: a short review[J]. Nanoscale, 2024, 16(35): 16313-16328.

[11] Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon [J]. Nature, 1991, 354(6348): 56-58.

[12] Li G Z, Zhang J Q, Chai J J, et al. Cryogenic mechanical performance and gas-barrier property of epoxy resins modified with multi-walled carbon nanotubes[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 89: 738-745.

[13] Islam M H, Afroj S, Uddin M A, et al. Graphene and CNT-based smart fiber-reinforced composites: a review[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(40): 2205723.

[14] 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.

[15] 郭妙才，赵大方，鹿海军. 碳纳米管/石墨烯杂化碳纤维织物复合材料的力学、导电和雷击性能[J]. 复合材料学报，2025，42(8)：4487-4498.
Guo M C, Zhao D F, Lu H J. Mechanical properties, electrical conductivities and lightning strike damage behaviors of CNT/graphene modified carbon fabric reinforced composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(8): 4487-4498.

[16] Ananthasubramanian P, Sahay R, Raghavan N. Investigation of the surface mechanical properties of functionalized single-walled carbon nanotube (SWCNT) reinforced PDMS nanocomposites using nanoindentation analysis[J]. RSC Advances, 2024, 14(22): 15249-15260.

[17] Haghgoo M, Ansari R, Hassanzadeh-Aghdam M K. Prediction of electrical conductivity of carbon fiber-carbon nanotube-reinforced polymer hybrid composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 167: 728-735.

[18] Garcia E J, Wardle B L, John Hart A. Joining prepreg composite interfaces with aligned carbon nanotubes[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008, 39(6): 1065-1070.

[19] Bansal S A, Khanna V, Twinkle, et al. Small percentage reinforcement of carbon nanotubes (CNTs) in epoxy(bisphenol-A) for enhanced mechanical performance [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 61: 275-279.

[20] Luo X L, Yang G D, Schubert D W. Electrically conductive polymer composite containing hybrid graphene nanoplatelets and carbon nanotubes: synergistic effect and tunable conductivity anisotropy[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2022, 5(1): 250-262.

[21] Jiang X R, Gong W B, Qu S X, et al. Understanding the influence of single-walled carbon nanotube dispersion states on the microstructure and mechanical properties of wet-spun fibers[J]. Carbon, 2020, 169: 17-24.

[22] Diabb Zavala J M, Leija Gutiérrez H M, Segura-Cárdenas E, et al. Manufacture and mechanical properties of knee implants using SWCNTs/UHMWPE composites[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2021, 120: 104554.

[23] Demircan O, Ibrahim M H I. Enhanced tensile and flexural properties in carbon nanotubes and modified carbon nanotubes added carbon fiber-reinforced epoxy resin thermoset composites[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2025, 34(17): 18787-18798.

[24] Wang P F, Zhang X, Lim G, et al. Improvement of impact-resistant property of glass fiber-reinforced composites by carbon nanotube-modified epoxy and pre-stretched fiber fabrics[J]. Journal of Materials Science, 2015, 50(18): 5978-5992.

[25] Singh N K, Rawat P, Singh K K. Impact response of quasi-isotropic asymmetric carbon fabric/epoxy laminate infused with MWCNTs[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2016, 2016: 7541468.

[26] Gao C Q, Guo M Y, Liu Y K, et al. Surface modification methods and mechanisms in carbon nanotubes dispersion[J]. Carbon, 2023, 212: 118133.

[27] Zhou Y H, Fu S H, Huang X, et al. Review of mechanisms and strategies for enhancing thermal and mechanical properties of energetic materials via carbon nanotubes[J]. Carbon, 2026, 246: 120898.

[28] Grimmer C S, Dharan C K H. High-cycle fatigue of hybrid carbon nanotube/glass fiber/polymer composites[J]. Journal of Materials Science, 2008, 43(13): 4487-4492.

[29] Wang X Q, Zhou C, Ma C K, et al. Research on damage repair of carbon fiber composite laminates based on carbon nanotube films [J]. Applied Composite Materials, 2026, 33(2): 48.

[30] Shin Y C, Kim S M. Enhancement of the interlaminar fracture toughness of a carbon-fiber-reinforced polymer using interleaved carbon nanotube buckypaper[J]. Applied Sciences, 2021, 11(15): 6821.

[31] 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.

[32] El Moumen A, Tarfaoui M, Hassoon O, et al. Experimental study and numerical modelling of low velocity impact on laminated composite reinforced with thin film made of carbon nanotubes[J]. Applied Composite Materials, 2018, 25(2): 309-320.

[33] Almousa H A, De Luca H G, Anthony D B, et al. Uniform and scalable carbon nanotube growth on carbon fibers: insights from experimental dynamic snapshots and computational fluid dynamics [J]. Carbon, 2026, 248: 121138.

[34] 宋粲, 葛磊, 王丽丽, 等. 碳纳米管膜层间增强增刚玻纤织物复合材料压缩强度的实验与数值模拟[J]. 复合材料学报, 2026, 43(5): 2797-2810.
Song C, Ge L, Wang L L, et al. Experiment and numerical simulation of compressive strength of interlaminar reinforced and stiffened glass fiber fabric composites with CNT films[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2026, 43(5): 2797-2810.

[35] Dastorian Jamnani B, Hosseini S, Rahmanian S, et al. Grafting carbon nanotubes on glass fiber by dip coating technique to enhance tensile and interfacial shear strength[J]. Journal of Nanomaterials, 2015, 2015: 149736.

[36] 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.

[37] Yuan Y, Yao X, Ma Y, et al. Impact properties of multi-wall carbon nanotubes modified composites [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2018, 46(3): 1261-1268.

[38] Boroujeni A Y, Al-Haik M. Carbon nanotube-carbon fiber reinforced polymer composites with extended fatigue life[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 164: 537-545.

[39] Sharma S P, Lakkad S C. Impact behavior and fractographic study of carbon nanotubes grafted carbon fiber-reinforced epoxy matrix multi-scale hybrid composites [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 69: 124-131.

[40] Qin W Z, Chen C, Zhou J P, et al. Synergistic effects of graphene/carbon nanotubes hybrid coating on the interfacial and mechanical properties of fiber composites[J]. Materials, 2020, 13(6): 1457.

[41] Blanco J, García E J, Guzmán de Villoria R, et al. Limiting mechanisms of mode Ⅰ interlaminar toughening of composites reinforced with aligned carbon nanotubes [J]. Journal of Composite Materials, 2009, 43(8): 825-841.

[42] Tang Z H, Huang Q Y, Liu Y J, et al. Uniaxial stretching-induced alignment of carbon nanotubes in cross-linked elastomer enabled by dynamic cross-link reshuffling[J]. ACS Macro Letters, 2019, 8 (12): 1575-1581.

[43] Yang G M, Cheng F, Zuo S H, et al. Growing carbon nanotubes *in situ* surrounding carbon fiber surface via chemical vapor deposition to reinforce flexural strength of carbon fiber composites[J]. Polymers, 2023, 15(10): 2309.

[44] Gupta P, Rajput M, Singla N, et al. Electric field and current assisted alignment of CNT inside polymer matrix and its effects on electrical and mechanical properties[J]. Polymer, 2016, 89: 119-127.

[45] Braga Nogueira Branco R, Schwarz J, Barkauskas T N, et al. Insertion of aligned CNTs into the intralaminar regions of conventional prepreg-based CFRP laminates using magnetically responsive CNTs[J]. Composites Science and Technology, 2025, 271: 111345.

[46] 王瑞林, 瞿俊豪, 黄海波, 等. 定向碳纳米管/丁苯橡胶复合材料的摩擦学各向异性行为研究[J]. 材料工程, 2024, 52(5): 179-187.
Wang R L, Qu J H, Huang H B, et al. Anisotropic behavior of frictional performance of aligned carbon nanotubes/styrene butadiene rubber composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52 (5): 179-187.

[47] Rashid I A, Irfan M S, Gill Y Q, et al. Stretchable strain sensors based on polyaniline/thermoplastic polyurethane blends[J]. Polymer Bulletin, 2020, 77(3): 1081-1093.

[48] Wang X Q, Li B, Zhang D Q, et al. Strain monitoring using carbon nanotube Buckypaper sensor on composite repaired structure[J]. Applied Physics A, 2021, 127(12): 935.

[49] Dong H, Sun J C, Liu X M, et al. Highly sensitive and stretchable MXene/CNTs/TPU composite strain sensor with bilayer conductive structure for human motion detection[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(13): 15504-15516.

[50] Preto E, Barboni P R, Malmonge J A, et al. Detection of torque variation in bolted joints structures using a new sensor made of natural rubber filled with carbon black and carbon nanotubes[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2025, 36 (8): 531-542.

[51] Sánchez-Romate X F, García C, Rams J, et al. Structural health monitoring of a CFRP structural bonded repair by using a carbon nanotube modified adhesive film[J]. Composite Structures, 2021, 270: 114091.

[52] Su Y Y, Xu L, Zhou P Y, et al. Carbon nanotube-decorated glass

fibre bundles for cure self-monitoring and load self-sensing of FRPs[J].Composites Communications,2021,27:100899.

[53] Parente J M, Pereira J N, Silva A P, et al. Synergistic effects of graphene and carbon nanotubes on the piezoresistive strain sensing of epoxy composite laminates under bending loads[J].Composites Part A,2025,198:109136.

[54] Gao Z Q,Han Q,Liu J B,et al.Dispersion of carbon nanotubes improved by ball milling to prepare functional epoxy nanocomposites [J].Coatings,2023,13(3):649.

[55] Zhang L, Lu Y, Lu S W, et al. *In situ* monitoring of sandwich structure in liquid composite molding process using multifunctionalMXene/carbon nanotubesensors[J].Polymer Composites,2022, 43(4):2252-2263.

[56] Lu S W,Zhao C X,Zhang L,et al.Real time monitoring of the curing degree and the manufacturing process of fiber reinforced composites with a carbon nanotube buckypaper sensor[J].RSC Advances,2018,8(39):22078-22085.

[57] Lu S W,Chen D,Wang X Q,et al.Monitoring the manufacturing process of glass fiber reinforced composites with carbon nanotube buckypaper sensor[J].Polymer Testing,2016,52:79-84.

[58] Lu S W,Chen D,Wang X Q,et al.Monitoring the glass transition temperature of polymeric composites with carbon nanotube buckypaper sensor[J].Polymer Testing,2017,57:12-16.

[59] Karlsson T,Hallander P,Liu F,et al.Sensing abilities of embedded vertically aligned carbon nanotube forests in structural composites:from nanoscale properties to mesoscale functionalities[J]. Composites Part B:Engineering,2023,255:110587.

[60] Karlsson T,Dutta A,Hallander P,et al.*In-situ* cure monitoring of structural composite by embedment of vertically aligned carbon nanotube forests[J].Composites Part B:Engineering,2025,293:112105.

[61] Wang X Q, Lu S W, Ma K M, et al. Tensile strain sensing of buckypaper and buckypaper composites[J]. Materials & Design, 2015,88:414-419.

[62] Pinello L,Bhavik P,Giglio M,et al.Exploiting the self-sensing capabilities of buckypapers for *in-situ* monitoring of impacts and compression after impact on GFRP panels[J].Composite Structures,2026,375:119787.

[63] Boztepe S, Liu H, Heider D, et al. Novel carbon nanotube interlaminar film sensors for carbon fiber composites under uniaxial fatigue loading[J].Composite Structures,2018,189:340-348.

[64] Cui X, Miao C, Lu S, 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.

[65] Takeda T,Shindo Y,Wei Z J,et al.Fatigue failure and electrical resistance behaviors of carbon nanotube-based polymer composites under uniaxial tension-tension loading in a cryogenic environment[J].Journal of Composite Materials,2015,49(4):457-463.

[66] Kravchenko O G, Pedrazzoli D, Bonab V S, et al. Conductive interlaminar interfaces for structural health monitoring in composite laminates under fatigue loading[J]. Materials & Design, 2018, 160:1217-1225.

[67] Jiang X W,Wang Z,Lu S W,et al.Vibration monitoring for composite structures using buckypaper sensors arrayed by flexible printed circuit[J].International Journal of Smart and Nano Materials,2021,12(2):198-217.

[68] Zhang L,Zhang B B,Lu S W,et al.Damage evolution monitoring and failure level evaluation of composite bolted joints by MXene/CNTs sensors[J].Polymer Composites,2024,45(3):2415-2426.

[69] Wang Y,Li H M,Lu S W,et al.Impact localization of composite laminates based on weight function compensation localization algorithm of thin film sensors[J]. International Journal of Smart and Nano Materials,2023,14(2):139-154.

[70] Al-Bahrani M,Cree A.A simple criterion to evaluate the degree of damage in composite materials after sudden impact loads by exploiting the MWCNTs piezoresistive property[J].Carbon,2019, 150:505-517.

[71] Wang Q X,Ma C K,Yang D X,et al.Quantitative monitoring of impact damage to composite structures using blade coated MXene sensors[J].Composites Communications,2023,40:101609.

[72] Zhang L,Zhang B B,Lu S W,et al.Tensile and vibration fatigue monitoring of composite laminate bolted joints with local enhancement using buckypaper sensors[J].Structural Health Monitoring, 2025:14759217251353766.

[73] Sanli A,Demirkale B,Kanoun O.Real-time detection of loosening torque in bolted joints using piezoresistive pressure-sensitive layer based on multi-walled carbon nanotubes reinforced epoxy nanocomposites[J].Scientific Reports,2025,15:4830.

[74] Wang X Q,Fan X R,Lu S W,et al.Structural health monitoring of stitch repaired composite structure with Buckypaper sensors and MXene sensors[J]. Polymer Composites, 2022, 43(12): 9193-9204.

[75] Hu W L,Sun Z J,Yang L L,et al.Structural health monitoring of repairs in carbon-fiber-reinforced polymer composites by MWCNT-based multiscale sensors[J].Energies,2022,15(22):8348.

[76] Wang X Q, Lin L Y, Lu S W, et al. Evaluation of embedded buckypaper sensors in composite overwrappedped pressure vessels for progressive damage monitoring[J].Composite Structures, 2022,284:115223.

[77] Zhang L,Qu X Q,Lu S W,et al.Temperature and strain monitor of COPV by buckypaper and MXene sensor combined flexible printed circuit[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022,47(6):4211-4221.

[78] Zhang L,Qu X Q,Zhao Z P,et al.Health monitoring of composite pressure vessels through omnidirectional buckypaper sensor array [J].Applied Physics A,2022,128(3):178.

[79] Zhang L,Qu X Q,Lu S W,et al.Damage monitoring and locating of COPV under low velocity impact using MXene sensor array [J].Composites Communications,2022,34:101241.

[80] Lin L Y,Wang X Q,Yang B,et al.Conditionmonitoring of composite overwrap pressure vessels based on buckypaper sensor and MXene sensor[J].Composites Communications,2021,25:100699.

[81] Wang W, Zhang R, Lu S, et al. Screen-printed SWCNT/epoxy resin sensors with ultra-low SWCNT doping content: health monitoring of composite structures[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2025, 199: 109815.

[82] Jafarypouria M, Mahato B, Abaimov S G. Real-time cure monitoring via carbon nanotube networks enables mechanical property optimization in post-cured epoxy resins[J]. Carbon Letters, 2025, 35(5): 2349-2363.

[83] Dong M, Tomes O, Soul A, et al. Hybrid $Ti_3C_2T_x$ MXene and carbon nanotube reinforced epoxy nanocomposites for self-sensing and structural health monitoring[J]. ACS Applied Nano Materials, 2024, 7(3): 3314-3325.

[84] Uribe-Riestra G, Heredia-Lozano J, Rivero-Ayala M, et al. Electrical monitoring of structural health of multiscale hierarchical composites using fibers modified by graphenic sheets or carbon nanotubes[J]. Composites Communications, 2025, 58: 102553.

[85] Tzounis L, Zappalorto M, Panozzo F, et al. Highly conductive ultra-sensitive SWCNT-coated glass fiber reinforcements for laminate composites structural health monitoring[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 169: 37-44.

[86] Dai H B, Thostenson E T. Scalable and multifunctional carbon nanotube-based textile as distributed sensors for flow and cure monitoring[J]. Carbon, 2020, 164: 28-41.

[87] Sebastian J, Schehl N, Bouchard M, et al. Health monitoring of structural composites with embedded carbon nanotube coated glass fiber sensors[J]. Carbon, 2014, 66: 191-200.

[88] Jia M R, Wan Z K. Internal damage analysis of braided composites embedded in carbon nanotube yarn[J]. Applied Sciences, 2022, 12(1): 51.

[89] Park J, Lee J R. Strain measurements of an aircraft wing using embedded CNT fiber sensor and wireless SHM sensor node[J]. Functional Composites and Structures, 2022, 4(3): 035004.

[90] Xiao B, Yang B, Xuan F Z, et al. *In-situ* monitoring of a filament wound pressure vessel by the MWCNT sensor under hydraulic fatigue cycling and pressurization[J]. Sensors, 2019, 19(6): 1396.

[91] Nankali M, Nouri N M, Navidbakhsh M, et al. Highly stretchable and sensitive strain sensors based on carbon nanotube-elastomer nanocomposites: the effect of environmental factors on strain sensing performance[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2020, 8(18): 6185-6195.

[92] Guo D J, Pan X D, He H. Effects of temperature on MWCNTs/PDMS composites based flexible strain sensors[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(11): 3202-3212.

[93] Leemets K, Mäeorg U, Aabloo A, et al. Effect of contact material and ambient humidity on the performance of MWCNT/PDMS multimodal deformation sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 283: 1-8.

[94] Ramalingame R, Bautista-Quijano J R, de Farias Alves D, et al. Temperature self-compensated strain sensors based on MWCNT-graphene hybrid nanocomposite[J]. Journal of Composites Science, 2019, 3(4): 96.

[95] Ma J, Liu Q, Yang L Y, et al. A flexible, highly accurate, and stable pressure sensor with anti-interference from temperature, sweat, and humidity[J]. Advanced Materials Interfaces, 2023, 10(6): 2201528.

[96] Niu S C, Chang X T, Wang D S, et al. Low-temperature strain sensors based on integral molding cured CNTs/GNPs/PDMS composites with tensile and compressive strain responses, respectively[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2024, 375: 115548.

[97] 郭小辉,黄英,袁海涛,等.柔性复合传感器阵列信号采集及温度补偿系统[J].电子测量与仪器学报,2014,28(11):1254-1261.
Guo X H, Huang Y, Yuan H T, et al. Design on signal acquisition and temperature compensation system of flexible composite sensor array[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(11): 1254-1261.

[98] Li C W, Yang S T, Guo Y, et al. Flexible, multi-functional sensor based on all-carbon sensing medium with low coupling for ultrahigh-performance strain, temperature and humidity sensing[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 426: 130364.

[99] Yuan Y B, Zhang W Q, Yang J Y, et al. Recent advances in decoupling strategies for soft sensors[J]. Advanced Science, 2026, 13(17): e14499.

[100] Yao X, Gao C, Pan M J, et al. A flexible bionic bimodal sensor with distinguishing temperature and humidity signals[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 526: 171368.

[101] Cheng Z Z, He G F, Liang C W, et al. The WOA-LSSVM temperature compensation technology for carbon nanotube-based ionizing gas sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(21): 35212-35220.

[102] Lin J P, Liu J R, Zhang K X, et al. Ambient-pressure-dried aerogel amplifies interfacial polarization toward high-efficiency microwave absorption[J]. Advanced Functional Materials, 2026, 36(15): e20336.

[103] Da Silva T F, Dos Anjos E G R, Da Silva T F, et al. Impact of MWCNT aspect ratio on the processing and functional properties of buckypaper for EMI shielding applications[J]. ACS Omega, 2026, 11(7): 11672-11684.

[104] Chen R, Xiao Y X, Shi X M, et al. Preparation of gradient-structured ultrathin flexible carbon nanotube film and its electromagnetic interference shielding performance[J]. Materials Letters, 2026, 418: 140738.

[105] Kim D, Nguyen N K, et al. Absorption-dominated electromagnetic interference shielding via dual-gradient functionalized carbon nanotube composites[J]. ACS Applied Nano Materials, 2026, 9(2): 1173-1182.

[106] Qiao S Y, Chen H M, Zhao Y H, et al. Bioinspired polyimide/carbon nanotube aerogels with core-radiating and omasum-like morphology toward excellent electromagnetic shielding and superior elasticity[J]. Advanced Materials, 2025, 37(44): e13423.

[107] Tang J Y, Gao Y, Li T, et al. Thermoresistive network in phase-transition hydrogel: achieving on/off switchable electromagnetic interference shielding[J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35(36): 2504959.

基金项目:山东省创新发展研究院智库课题研究项目(2024CFYZK015)
收稿日期:2026-03-16;**录用日期**:2026-05-27
通讯作者:卢少微(1973—),男,教授,博士,研究方向为聚合物基复合材料健康监测,联系地址:辽宁省沈阳市沈北新区道义南大街37号沈阳航空航天大学材料科学与工程学院(110136),E-mail:lushaowei_2005@163.com

(本文责编:齐书涵)