

DOI:10.11918/202509079

导电聚合物复合材料在交通领域的研究进展

董泽蛟¹, 万珊宏¹, 梁明², 周涛¹, 曹丽萍¹

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 山东大学 齐鲁交通学院, 济南 250002)

摘要: 聚合物基导电复合材料以其优异的导电性能、与基体结构协同变形的特性,以及原位监测功能在交通领域的研究和应用日益受到重视。为推动应用并厘清当前研究的关键问题和未来发展方向,综述了近年来聚合物基导电复合材料在交通领域的研究进展。首先,从材料组成与制备工艺入手,分析各种基体材料(聚丙烯、环氧树脂等)、导电填料(碳纳米管、石墨烯,以及金属颗粒等)对复合材料综合性能的影响作用,探讨了不同制备技术(溶液混合、熔融共混法等)对复合材料综合性能的调节作用。其次,综述了聚合物基导电复合材料的性能测试,分析其温敏和力敏等功能特性随温度场、力场等复杂环境因素的影响规律。随后,探讨了聚合物基导电复合材料的导电机理,重点分析如何通过不同的导电填料分散和相互作用来实现导电性增强。最后,介绍了聚合物基导电复合材料作为传感器的实际应用,探讨其在交通基础设施以及智能交通管理等方面的应用实例及其实际效果。基于当前研究成果与技术挑战,可以看出,聚合物基导电复合材料在交通领域广泛应用的可能性和潜在的发展空间,同时,也需要注意聚合物基传感器在耐久性和实用性等方面仍存在一定的技术难题和提升空间。

关键词: 交通领域;导电复合材料;聚合物基体;制备工艺;机敏性能;传感

中图分类号: TU599

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)12-0120-21

Research progress of polymer-based conductive composites in the field of transportation

DONG Zejiao¹, WAN Shanhong¹, LIANG Ming², ZHOU Tao¹, CAO Liping¹

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, China)

Abstract: Polymer-based conductive composites have garnered increasing attention in the field of transportation, owing to their outstanding electrical conductivity, synergistic deformation characteristics with matrix structures, and in-situ monitoring capabilities. To facilitate their broader application, elucidate prevailing research challenges as well as prospective development trajectories, this research provided a comprehensive review of recent advances in polymer-based conductive composites within the transportation domain. Firstly, viewing from the material composition and preparation process, the influences of various matrix materials (such as polypropylene and epoxy resin) and conductive fillers (such as carbon nanotubes, graphene and metal particles et.) on the comprehensive performances of composite materials were analyzed, and the regulatory effects of different preparation techniques, such as solution mixing and melt blending method, on the comprehensive performance of composite materials were discussed. Secondly, the performances characterization of polymer-based conductive composites were reviewed, delineating how functional properties, such as temperature sensitivity and mechanical responsiveness, vary under complex environmental factors like temperature and force fields. Thirdly, the conductive mechanisms underlying polymer-based composites were then explored, with a focus on how the dispersion and interaction of distinct conductive fillers contribute to enhanced conductivity. Finally, the practical applications of these composites as sensors were presented, emphasizing their deployment in transportation infrastructure and intelligent traffic management, along with an assessment of their operational efficacy. Based on the current research findings and technical challenges, it is evident that polymer-based conductive composites hold substantial promise for widespread application in transportation. Nevertheless, the challenges concerning sensors durability and functionality warrant further innovation and improvement.

Keywords: transportation sector; conductive composite material; polymer matrix; preparation process; sensitive performance; sensing

收稿日期: 2025-09-18; 录用日期: 2025-10-09; 网络首发日期: 2025-11-06

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20251106.1026.006>

基金项目: 国家自然科学基金(52378447); 国家重点研发计划(2024YFE0214600); 黑龙江省自然科学基金研究团队(TD2022E001)

作者简介: 董泽蛟(1979—), 男, 教授, 博士生导师; 梁明(1990—), 男, 教授, 博士生导师; 周涛(1992—), 男, 副教授, 博士生导师

通信作者: 万珊宏, wanshsry@163.com

传感器在交通基础设施结构健康监测方面不可或缺,常见的传感器包括光纤式、电阻式、振弦式,以及压电式传感器等^[1-2]。然而,传感器在实际工程应用中面临诸多挑战:1) 现有传感器与部分监测结构间模量差异较大,难以有效协同变形,导致测量准确度不高,特别是被测结构为低模量介质^[3];2) 部分种类传感器加工工艺复杂,成本高且需要专用的解调设备,限制其大规模应用;3) 复杂施工及服役环境中易损坏、成活率低、耐久性差,使用寿命显著低于被测结构^[4]。因此,开发高性能、高精度、易于制造、耐用性高且成本低新型传感器是目前该领域的研究热点^[5-6]。

近年来,聚合物基导电复合材料的迅猛发展引起了广泛关注,因其独特的性能在多个领域显示出巨大的应用潜力,包括交通乃至航天领域等^[7]。这类材料通常是在聚合物基体中复合一种或多种导电材料,旨在结合各材料的优势,从而形成性能更优的新型功能材料^[8-9]。聚合物基导电复合材料制备工艺简便,无需额外封装(特定需求除外),能够对外界刺激(如温度、湿度和受力等)做出直接反应,并通过信号传递,实现对结构健康状况的实时监测和预测。当结构出现损害时,复合材料亦会明显地响应。研究表明,聚合物基导电材料在电阻率范围为

$10 \sim 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 内能够有效感知并响应外部环境的变化,适合用于传感元器件的制造^[10]。基于此,国内、外学者针对聚合物基导电复合材料进行了大量的实验研究,并取得了一系列重要的理论成果,并探索其在交通领域的应用。

基于此,考虑到聚合物基导电复合材料在交通领域具有深厚的应用潜力,本文系统梳理已有文献,探讨聚合物基导电复合材料的材料选择及其基体材料与导电材料的复合工艺,系统总结其电学、力学、机敏,以及复杂条件下的耐久性能,进而探讨其在传感器中的实际应用,并提出未来研究建议,以期推动该领域的发展。

1 聚合物基复合导电材料的导电机理

聚合物基复合导电材料以其优良的导电性能和力敏特性,主要与其内部导电网络结构密切相关。因此,众多学者对复合材料的导电机理进行了深入研究(图1),侧重于两个方面:导电通路的形成和电子的迁移机制。导电通路的形成主要围绕渗滤理论和有效介质理论展开,而电子迁移的研究则集中在隧道理论上^[11]。尽管这些理论从不同角度描述了导电材料的导电机理,并能相互补充,但各自存在局限性,尚无法全面解释复合导电材料的导电性能。

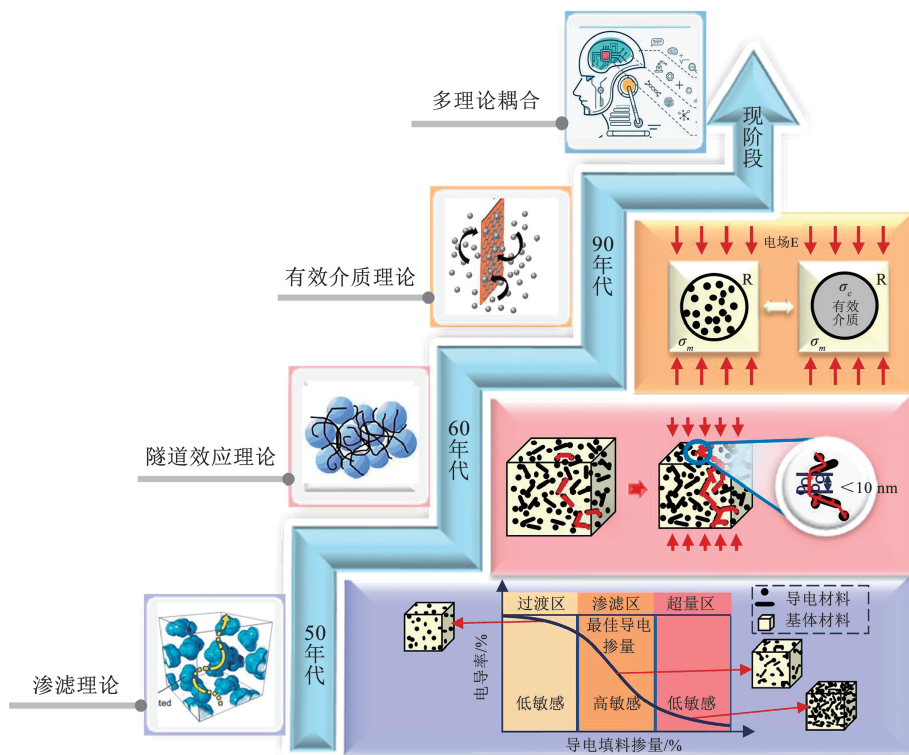


图1 复合材料导电机理示意

Fig. 1 Schematic diagram for conductive mechanisms of composite material

1.1 渗滤理论

渗滤理论,又称接触导电理论,广泛应用于材料

研究中,主要描述导电复合材料的电导率变化与导电填料掺量之间的关系^[12],即在导电填料达到临界

浓度时,材料内部形成连续导电网络,从而显著提升复合材料的电导率现象。而导电填料的临界值被称为渗滤阈值^[13]。具体而言,当导电填料接近渗滤阈值 $\sigma(\nu)$ 时,复合材料的电导率、热导率和扩散性等性能会显著变化,甚至能达到几个数量级的提升。此时复合材料实现从绝缘态向半导体,甚至导体状态的转变^[14]。

渗滤理论将导电填料之间的连接关系简化为点与点之间的几何连接,为复合材料的导电性提供了明确、清晰且直观模型^[15]。该理论认为,导电通道的形成需要导电粒子彼此接触,或粒子间的间距在 1 nm 以内形成电气上等价的键链。渗滤导电理论的提出源于对机敏材料渗滤效应的研究。渗滤理论的核心在于对渗滤阈值的研究。许多学者围绕渗滤阈值建立了一系列经验性模型,重要的有 Zallen^[16]和 Stauffer^[17]建立的渗滤理论。该理论可由以下关系式表示:

$$\sigma(\nu) = \sigma_0(\nu - \nu_c)^n \quad (1)$$

式中: $\sigma(\nu)$ 为机敏材料电导率, σ_0 为导电填料电导率, ν 为填料质量分数, ν_c 为渗滤阈值, n 为常数(一般为 1.65 ~ 2.00)。

渗滤理论易于建立模型,能够从宏观角度描述填料质量分数与导电性之间的关系。通过确定临界渗滤阈值,预测复合材料在不同导电填料质量分数下的导电性能变化,因此受到广泛接受和应用。然而,有研究表明,渗滤理论主要关注填料的宏观分布,未能充分考虑导电填料在微观尺度上的形状、尺寸及其相互作用,其预测能力有所下降^[18]。

1.2 隧道效应理论

通过对渗滤导电理论的研究发现,当复合导电材料基体中的导电填料掺量增加至一定值时,电阻率才会显著降低。这主要是因为导电粒子之间开始相互接触,形成有效的导电路径。然而,一些研究人员指出,即使在导电填料未直接接触的情况下,复合导电材料仍会表现出导电性^[19-20]。由此可见,复合导电材料的导电性能并不完全依赖于导电填料在基体中相互搭接,更在于导电粒子之间的间距。

隧道跃迁现象属于量子力学的范畴^[21],描述了在导电填料之间由于量子力学的隧穿效应,当相邻导电粒子之间的距离较大时,聚合物基体形成隔离层,这使得相邻导电粒子之间建立起具有一定势能的势垒^[22]。电子可以通过热振动被激活,获得足够的能量跨越导电填料与绝缘基体之间的薄层,形成隧道电流,从而在填料之间形成微弱的导电路径^[23]。该理论对于解释低填料质量分数下的导电性具有重要意义。1963年,Simmons^[24]首次定义了

隧道效应中的基本隧道电流:

$$I = \frac{3a^2\sqrt{2m\varphi}}{2d} \left(\frac{e}{h}\right)^2 V \exp(-4\pi d \sqrt{\frac{2m\varphi}{h^2}}) \quad (2)$$

式中: a^2 为导电粒子间距的有效横截面积, m 为电子的质量, φ 为相邻导电粒子间的势垒高度, d 为相邻导电粒子间的最小间距, e 为电子的电荷量, h 为普朗克常数, V 为机敏材料上施加的电压。

在低填料质量分数下,导电填料尚未形成连续的导电网络,电子需要通过填料间的微小空隙进行隧穿传输。隧道效应依赖于填料间距和隧穿势垒的高度,填料间距越近,隧穿效应越显著,导电性越高。通过调控填料的分散性和表面功能化,可以有效提升隧穿传导的效率,从而提高复合材料的整体导电性能。经公式推断,当导电粒子的距离在 10 nm 以内时,即可通过隧道跃迁实现电导^[25]。隧道效应的效应依赖于填料间距和界面性质,具体电子跃迁过程涉及复杂的物理变化过程,难以通过简单模型进行全面描述。

1.3 有效介质理论

有效介质理论(effective medium theory, EMT)是研究二元随机分布体系中电子传输行为的一种有效方法。其基本假设是填料在基体中以均匀方式分布,每个填料占据一个有效的介质环境。与渗滤理论不同,EMT更适用于描述填料未完全形成连续导电网络时的导电行为,提供了在不同填料质量分数下材料电导率的连续变化描述^[15]。为了更准确地描述导电渗流现象,McLachlan等^[26]结合了Maxwell无限稀释模型和有效介质理论,探讨了导电颗粒的形态及其分布对导电性的影响,提出了有效介质的普适方程,具体表达式为

$$\frac{(1-\varphi)(\sigma_1^{1/w} - \sigma_m^{1/w})}{\sigma_1^{1/w} + A\sigma_m^{1/w}} + \frac{\varphi(\sigma_1^{1/w} - \sigma_m^{1/w})}{\sigma_h^{1/w} + A\sigma_m^{1/w}} = 0 \quad (3)$$

式中: $A = (1 - \varphi_c) / \varphi_c$ 为复合材料的有效电导率, φ 为导电颗粒的体积分数, φ_c 为渗流阈值, σ_1 、 σ_h 、 σ_m 分别为复合体系中基体材料、填充颗粒和机敏材料的电导率, w 为机敏材料的形貌参数,表征材料形成导电网络的难易程度,并与颗粒尺寸有关。

有效介质理论提出,复合导电材料的导电性不仅与导电材料的特性有关,也与基体材料的性质密切相关。该理论适用于分析复杂的多相复合导电材料体系,能够较好地解释不同相在导电性能中的相互作用。然而,值得注意的是,该理论尚未充分探讨基体材料与导电材料之间界面在复合导电材料中所扮演的角色^[27]。

1.4 多理论耦合

近年来,随着计算能力的提升和多尺度模拟技

术的发展,研究者开始将渗滤理论、隧道效应理论和有效介质理论进行耦合,以更全面地描述聚合物基复合导电材料的导电机理。例如,多尺度模拟方法通过结合宏观渗滤、微观隧道效应,以及界面特性,构建了更为精确的导电模型。这些模型不仅能够预测材料在不同填料质量分数下的导电,还能揭示界面特性对导电行为的调控机制。此外,机器学习技术也被引入到导电材料研究中,通过大数据分析和模型训练,进一步优化了多理论耦合模型的预测精度^[28]。这些新兴研究为高性能导电复合材料的设计与优化提供了新的思路和方法。

因此,聚合物基复合导电材料的导电机理主要围绕渗滤理论、隧道效应理论、有效介质理论,以及多理论耦合而展开。这些理论从不同角度揭示了导电性能的形成机制,并相互补充,为材料的设计与优化提供了重要的理论依据。然而,每种理论存在一定的局限性:1) 渗滤理论易于建立模型,适用于高填料质量分数下导电网络形成的解释,但未能充分考虑导电填料在微观尺度上的形状、尺寸及其相互作用,以及界面特性的影响缺乏深入探讨,限制了其在多相复合体系中的应用;2) 隧道效应描述填料未完全接触时的导电性能方面具有显著优势,特别是在低填料质量分数下,能够有效解释电导率的微弱变化,但隧道效应理论依赖于复杂的物理过程,难以通过简单模型全面描述电子跃迁行为;3) 有效介质理论适用于分析复杂的多相复合体系,但对基体材料与导电材料之间界面特性的影响尚未充分,限制了其在界面主导导电行为体系中的应用,且对填料形态和分布的简化处理可能导致其预测精度不足;4) 多理论耦合模型涉及宏观、微观,以及界面特性的综合,计算复杂度高,难以实现高效、快速的模拟。

渗滤理论、隧道效应理论、有效介质理论,以及

多理论耦合模型在解释聚合物基复合导电材料的导电机理方面取得了显著进展,但仍有以下研究空白和挑战:1) 界面特性的深入研究。界面在复合导电材料中扮演着重要角色,其特性对导电性能具有显著影响,未来研究应重点关注界面结构与导电性之间的耦合关系,探索界面调控对导电性能的优化机制;2) 多尺度模型的构建。现有理论主要宏观或微观单一尺度描述导电行为,缺乏多尺度模型的整合,未来研究应结合宏观渗滤、微观隧道效应,以及界面特性,构建多尺度导电模型,以更全面地揭示导电机理;3) 填料形态与分布的精确控制。导电填料的形状、尺寸及其分布对导电性能具有重要影响,研究应探索填料形态与分布的精确调控方法,以提高复合材料的导电性能;4) 理论与实验的结合。现有理论框架仍需通过实验验证和优化,未来研究应加强理论与实验的结合,通过实验数据验证理论模型的准确性,并基于实验结果进一步完善理论框架。综上所述,聚合物基复合导电材料的导电机理研究已取得重要进展,但仍需在界面特性、多尺度模型、填料控制及理论与实验结合等方面进一步深化研究。这些研究将为高性能导电复合材料的设计与优化提供更为坚实的理论基础。

2 聚合物基复合导电材料组成及制备工艺

聚合物基导电复合材料主要由聚合物基体和导电材料两部分组成(图 2)。在聚合物基体中掺入特定的导电填料,所制得的复合材料展现出优良的导电性能,并对温度、力场等外部条件的变化具有敏感性,从而体现出温敏、力敏等功能特性^[29]。因此,聚合物基导电复合材料的性能关键在于材料组成与制备工艺,这部分为后续的深入研究与应用开发奠定了坚实基础。

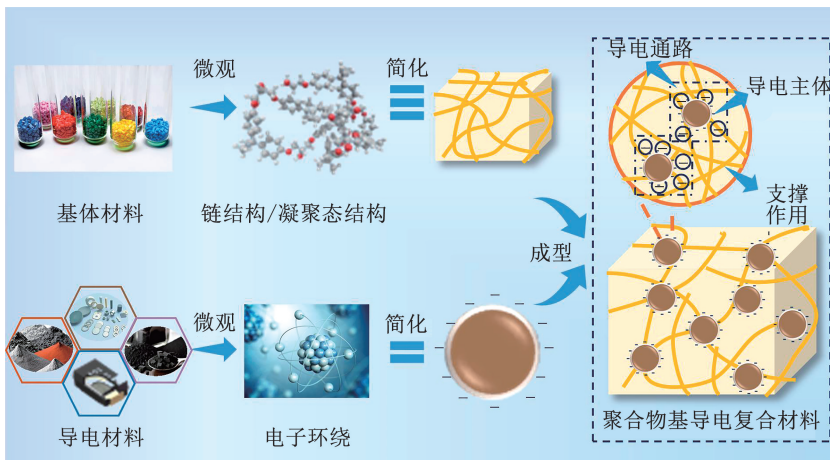


图 2 基体材料及导电材料网络结构图

Fig. 2 Matrix material and conductive material network structure diagram

2.1 基体材料的选择

聚合物基导电复合材料的性能很大程度上取决于基体材料的选择。基体材料为聚合物基复合材料提供机械支撑和加工性能,抵抗外界腐蚀和环境因素的影响,还需与导电填料形成良好的界面相互作用以实现内部导电网络的信息传递。

目前常用的基体材料可分为热固性树脂、热塑性树脂以及混合基体系统三大类^[30],见表 1。热固性树脂如环氧树脂与酚醛树脂等因其交联网络结构和高热稳定性被广泛使用,其能够提高复合材料的电导率与机械强度。然而,其不可逆固化过程限制了回收再利用。热塑性树脂如聚丙烯(Polypropylene, PP)则因其熔融加工性成为工业化生产的首选^[31],其具有优异的机械性能、良好的耐热性、低成

本、易加工和可完全回收等特点。但由于其成型温度高、黏度大及与纤维的黏接性能差等特点,需通过增容剂改善界面黏附,导致整体成本较高^[32]。

在道路材料领域,基体的选择需综合考虑导电性、力学性能、加工性和环境适应性。热固性树脂适用于高稳定性和耐高温场景,而热塑性树脂则更适合大规模生产和可回收需求。混合基体系统通过优化材料组合,进一步降低了渗流阈值,提升了导电网络的形成效率^[33-34],为聚合物基导电复合材料在智能道路、交通等领域的应用提供了更多可能性。未来研究应着重于开发低成本、高性能的基体材料,并通过合理的材料组合设计,满足道路工程对导电复合材料的多样化需求,推动其在现代交通基础设施中的广泛应用。

表 1 聚合物基导电复合材料的基体材料分类及特性

Tab. 1 Classification and properties of polymer based conductive composites

基体类型	细类	优点	局限性
热固性树脂	环氧树脂	高耐热性、尺寸稳定性	不可回收、固化工艺复杂
	酚醛树脂		
热塑性树脂	聚丙烯(PP)	可重复加工、成本低	耐温性较差(<200℃)
	聚乙烯(PE)		
	聚氯乙烯(PVC)		
	尼龙塑料(PA6)		
混合基体系统	环氧/聚乙烯(PE)共混物 聚酰亚胺(PI)/聚偏氟乙烯(PVDF)	协同效应(如 PI 提升 PVDF 耐温性)	相容性需通过增容剂改善

2.2 导电材料的选择

导电材料是决定聚合物基导电复合材料电性能的关键组成部分,为整体复合材料提供必要的导电网络。导电填料的分布特性与物理性能直接影响其压阻性,能够通过与聚合物基体形成导电路径,从而感知应力、应变、挠度、裂纹、湿度和温度等变化^[35]。

不同类型的导电材料可影响复合材料的导电能力和应用领域。在选择导电材料时,需考虑其导电机理、相容性和成本等因素。根据导电材料属性,聚合物基复合材料通常可分为:金属导电填料、碳基导电填料、陶瓷导电填料,以及导电聚合物^[36],也可按照导电材料尺度进行分类,见表 2。

表 2 聚合物基导电复合材料的导电材料分类及特性

Tab. 2 Classification and properties of conductive materials based conductive composites

类别	导电材料类型	材料	特点
导电材料类型	金属导电填料	镍粉、钢纤维、铝粉、四氧化三铁、二氧化钛	优异的导电性,但可能引起氧化和腐蚀问题
	碳基导电填料	碳纤维、石墨、石墨烯、碳纳米管、炭黑	优越的导电率和力学性能,轻质,增强复合材料性能
	陶瓷导电填料	碳化硅	良好的稳定性、优异的电导率,但其脆性、高成本及加工难度等方面有所限制
	导电聚合物	聚苯胺、聚吡咯	柔韧性好,导电性可调并且环境稳定性良好
导电材料尺度	纳米级材料 (1.0 ~ 100.0 nm)	石墨烯、碳纳米管、四氧化三铁、二氧化钛、 炭黑、聚苯胺(纳米纤维)	具有极高的比表面积,表现出显著的量子效应和表面效应,但相对而言分散性差、制备成本高
	微米级材料 (0.1 ~ 100.0 μm)	镍粉、铝粉、碳纤维、石墨(片状或颗粒状, 微米级)、碳化硅	表现出较好的机械强度和导电性,但界面结合不够紧密,会影响性能
	毫米级及以上材料 (>100.0 μm)	钢纤维、石墨(块状或大颗粒)	机械强度和稳定性较高,但比表面积较低,质量较大

金属填料具有优异的电导率^[37],但在高温环境中易发生氧化,导致导电性能下降,且稳定性较差。此外,金属填料的密度通常较大,在搅拌过程中容易出现沉降现象,从而造成导电材料的分布不均。为解决这一问题,研究人员提出了通过不同的表面处理技术来提高金属填料在聚合物基体中的相容性。碳基材料如碳纳米管和石墨烯凭借其高比表面积、优越的导电性质和优良的力学性能,成为设计新型导电复合材料的关键材料^[27,38]。但是其成本较高,分散性差影响导电网络的形成,从而影响最终材料的导电性能^[39-40]。陶瓷填料如碳化硅具有良好的热稳定性、化学稳定性和良好的机械性能等特点^[41],但相较前两种填料导电性能较差,且其脆性、高成本、相容性和加工难度大,限制了其应用。导电聚合物如聚苯胺和聚吡咯因其可调节导电性、环境稳定性和易性而受到关注^[36],通过与其他聚合物的共混,应用范围不断扩大。

在导电复合材料的设计中,需综合考虑导电性、力学性能、成本和加工性等因素。通过合理选择和组合不同材料,如金属填料与碳基材料的协同使用,可以优化复合材料的综合性能,满足特定应用需求。未来研究应着重于填料的分散性、降低成本,并探索新型复合材料的应用潜力,以推动导电复合材料在道路工程等领域的广泛应用。通过科学地设计和优化,导电复合材料有望在智能道路、融雪化冰、交通监测等领域发挥重要作用,为现代交通基础设施的发展提供技术支持。

2.3 复合材料的制备工艺

良好的制备工艺须具备较好的重复性,并能够

实现大规模生产^[42]。目前,聚合物基导电复合材料的制备方法多种多样。在复合材料制备过程中,导电材料的分散对整体材料的性能有着至关重要的影响^[43]。聚合物基复合材料的另一个显著需求是成型加工的便利性。因此,聚合物基导电复合材料的制备工艺具有两个主要部分:分散工艺(溶液混合工艺、熔融共混工艺)和固化工艺^[44]。两者共同决定了复合材料的微观结构、导电网络的形成,以及最终性能。

2.3.1 分散工艺

分散工艺是导电复合材料制备的核心环节,直接影响导电填料的分布状态和复合材料的电学性能^[45]。理想的分散应确保填料均匀分布于聚合物基体中,避免团聚,从而形成高效的导电网络。然而,由于纳米或纤维状材料的范德华力作用以及基体材料的高黏度或固态特性,会增加复合材料的分散难度。不良的分散可能导致基体材料中形成薄弱区域或应力集中,从而损害复合材料的力学性能和耐久性^[46]。目前,主要的分散方法包括溶液混合^[47]和熔融共混^[48]等技术。

1) 溶液混合工艺。是将导电材料加入分散剂中,然后将分散后的混合溶液与基体材料混合^[39],见图3。在复合材料的加工中,通常采用物理分散和化学分散两种溶液混合方法。物理分散适合于易于分散的导电材料。当基体材料在常温或加热后呈现较低黏度时,可采用球磨法^[49]和机械搅拌法^[50]进行搅拌。对于高黏度的基体材料,利用低沸点的分散剂(如水或酒精)对导电材料进行超声分散或机械搅拌,最后再通过加热去除分散剂^[51]。

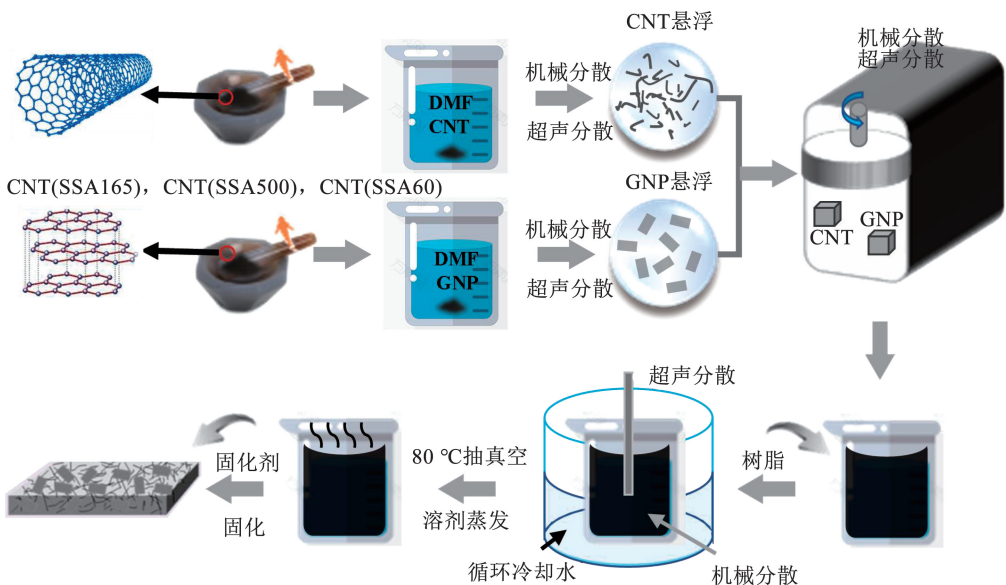


图3 溶液混合工艺示意^[52]

Fig. 3 Solution mixing process diagram^[52]

化学分散主要用于不易分散的导电材料,通常需要通过表面改性来改善其可操作性,可通过共价改性(如官能化)或非共价改性(如添加表面活性剂)实现^[53]。共价改性通过酸性氧化或引入特定官能基团来改善导电材料的亲水性,从而增强其分散性。非共价改性则依赖于表面活性剂与导电材料之间的范德华力、 $\pi-\pi$ 相互作用或氢键,通过增强导电材料与基体材料的界面相互作用,提升复合材料的力学性能^[54]。

2) 熔融共混工艺。是指在聚合物的黏流温度以上,利用不同混炼设备(如双辊混炼机、密闭式混炼机、挤出机)进行分散和混合。熔融混合不仅满足了聚合物的熔融状态需求,还依赖机械剪切实现不同组分的均匀混合,从而达到良好的粒子分散^[55]。加热温度是聚合物熔融的重要条件,其设置和调节不仅影响聚合物的熔融状态,也直接关系到各组分的混合程度。温度过高或过低均会影响共混效果。因此,温度的设定通常以聚合物共混物各组分的熔点为基准^[56]。

与溶液混合法相比,熔融复合方法具有更高的

经济性,适合大规模生产,已成功应用于将碳纳米管、炭黑、膨胀石墨、石墨烯等导电填料与聚合物结合以制备导电复合材料,从而使聚合物和填料的生产更加多样化^[57]。

2.3.2 固化工艺

通过混合工艺制备的聚合物共混物可采用多种成型工艺进行加工,包括注射成型、压缩成型,以及挤压成型等^[58]。这些成型方法可根据实际工程需求,采用注胶机或者直接导入模具中形成特定形状的道路材料构件。固化作为成型工艺的关键环节,其质量直接影响最终产品的性能。固化剂的掺量是决定成型后聚物品质的核心参数:当掺量不足时,可能导致固化不完全,致使材料力学性能下降;而掺量过高则易引发剧烈反应,在材料内部产生大量缺陷,影响其耐久性。此外,时间也是影响成型质量的重要因素,其长短与复合材料的固化程度呈显著相关性。通过合理控制固化参数,可获得性能优异的导电复合材料,为智能道路建设提供重要的材料基础,见图 4。优化后的固化工艺可显著提升材料的综合性能,为道路工程应用提供可靠保障。

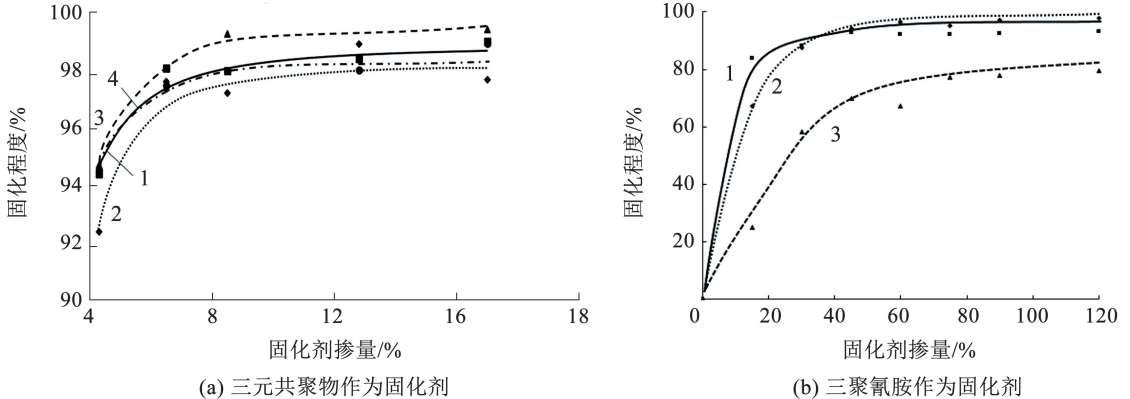


图 4 固化程度随固化剂掺量及固化时间的变化曲线^[59]

Fig. 4 Curves of curing degree with curing agent content and curing time^[59]

聚合物基导电复合材料的制备工艺是决定其功能性能的核心环节,见图 5。分散工艺通过溶液混合或熔融共混技术,旨在实现导电填料在聚合物基体中的均匀分布,避免团聚,从而形成高效的导电网络。溶液混合工艺适用于小规模实验,通过物理或化学分散方法提升填料的分散性;而熔融共混工艺则更适合大规模生产,利用高温和机械剪切实现均匀混合。固化工艺则通过注胶、压缩或挤压成型等方法,结合固化剂的合理添加和固化时间的控制,确保复合材料最终成型并具备优异的力学和电学性能。总体而言,良好的制备工艺需兼顾重复性、可操

作性和规模化生产能力,以满足导电复合材料在工业应用中的多样化需求。

3 聚合物基复合导电材料的性能测试

聚合物基复合导电材料在实际应用中需经受复杂环境因素的考验,包括长期荷载作用、温度波动,以及湿度变化等。这些因素不仅影响材料的电学、力学和机敏性能,还对其在应用过程中的测量精度提出了更高要求。因此,系统开展室内实验和理论分析,全面评估材料性能,是推动其工程应用的重要基础。

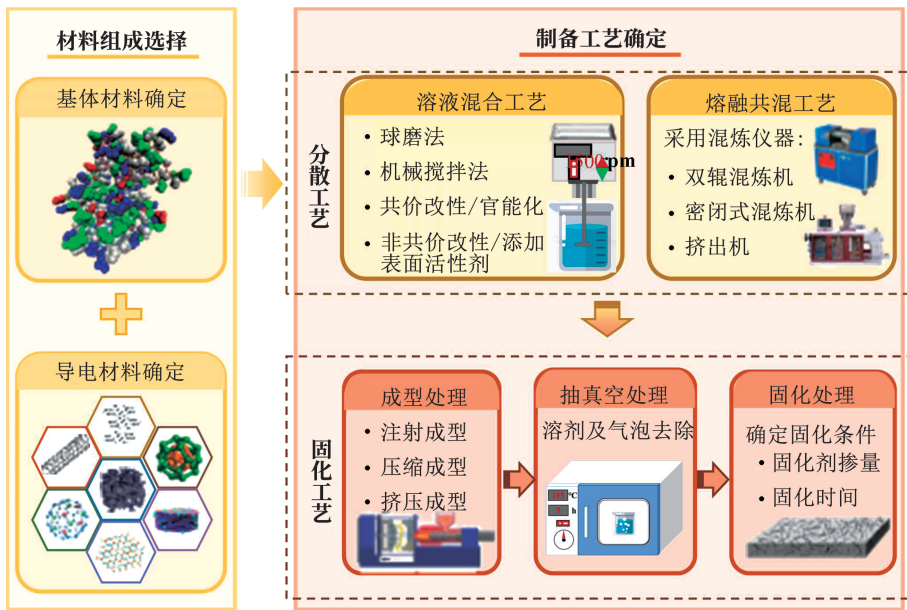


图 5 聚合物基导电复合材料的材料选择及工艺确定流程

Fig. 5 Material selection and process determination of polymer based conductive composites

3.1 电学性能测试

电学性能测试是评估聚合物基复合导电材料功能性能的核心环节。通过测试电阻率和电导率等关键,可全面表征材料的导电能力,为其在道路工程中的适用性提供科学依据。电阻率或电导率是评价材料电学性能的主要指标,其测量精度直接影响性能的可靠性。电极的选择、布置和电阻测量方法均对

测试结果有显著影响^[60]。电阻率测试主要采用双探针法和四探针法^[61]。1) 双探针法操作简便,但可能引入接触电阻,导致测量误差;2) 四探针法通过消除接触电阻的影响,显著提高了测量精度,非常适合用于高精度电学测试。如图 6 所示,双探针法和四探针法均可使用粘贴式电极和嵌入式电极技术,以满足不同实验条件和需求,测试得到复合材料的电学性能。

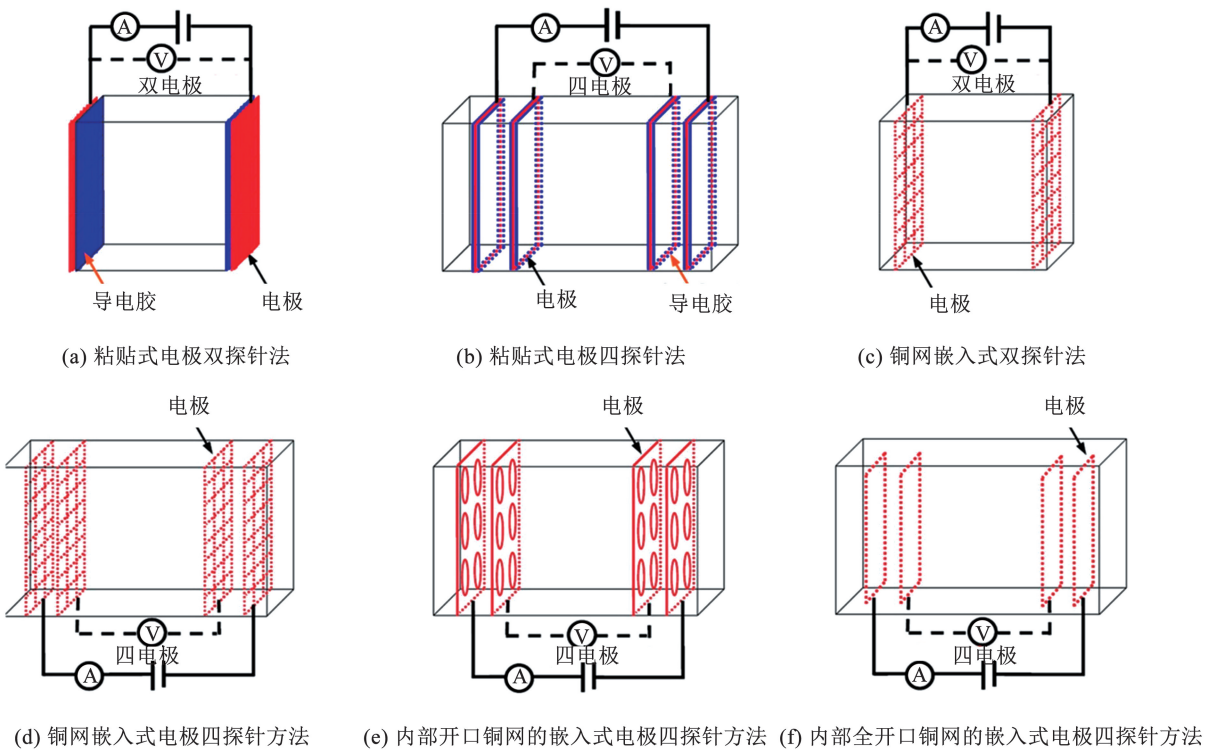


图 6 聚合物基导电材料的电极构型示意^[61]

Fig. 6 Schematic diagram of electrode configuration of polymer-based conductive materials^[61]

由于纯聚合物基体具有绝缘特性,其导电性能极差,因此通过添加导电填料构建导电网络是提升电学性能的关键^[61-62]。电学性能与导电填料的质量分数有关,还受到许多其他因素的影响^[63],包括:1) 填料类型和形状。碳纳米管、石墨和金属颗粒等填料各具特性,对复合材料的电导率有显著影响,适合不同的应用需求^[64-65];2) 颗粒尺寸。填料尺寸会影响渗流阈值。较长的碳纤维更容易形成连续的导电网络,降低电阻率;而较短的纤维可能导致更高的渗流阈值,影响电导率^[66];3) 填料的分散程度。填料在基体中的均匀分布对电导率提升至关重要。不均匀分布可能导致局部导电回路,影响整体的电学性能。

通过对电学性能的系统研究,为优化填料的种类与比例、改进生产工艺等提供了理论依据,推动聚合物基导电复合材料的广泛应用。因此,电学性能测试不仅是材料性能的基石,也是推动智能材料和智能系统研究与发展的重要途径。

3.2 力学性能测试

力学性能测试是评估复合导电材料在工程应用中可靠性和稳定性的关键环节。复合导电材料常需承受复杂环境条件和长期荷载作用,因此对其强度、刚度和耐久性提出了更高要求。作为由聚合物基体与导电复合而成的创新材料,其力学性能显著区别于单一组分材料^[67]。通过系统测试和分析力学性能,可评估材料在实际应用中承受压力、拉伸,以及其他外力的能力,为其在智能路面、结构健康监测等领域的应用提供科学依据。

力学性能测试采用以下方法,来全面评估复合导电材料的力学特性:1) 拉伸测试。用于测定材料的抗拉强度、延伸率和弹性模量。通过拉伸样品并记录应力-应变曲线,可分析材料的拉伸性能;2) 压缩测试。用于评估材料压缩状态下的力学性能,如抗压强度和弹性模量;3) 弯曲测试。用于测定材料的弯曲强度和刚度,通过施加弯曲载荷分析其变形能力^[68-69]。

聚合物基复合材料展示出相似的应力-应变曲线特征,通常呈现 3 个阶段^[70]。1) 弹性变形阶段。应变与应力呈近似线性关系,材料表现出弹性特性,应力消除后可恢复原状。此阶段的斜率即为弹性模量;2) 塑性变形阶段。随着应力增加,应力-应变曲线趋于平缓,最大应力为材料的抗压或抗拉强度;3) 断裂阶段。当应力超过材料的极限强度,样品发

生断裂,断裂伸长率反映了复合材料的拉伸断裂韧性和延性,见图 7^[71]。

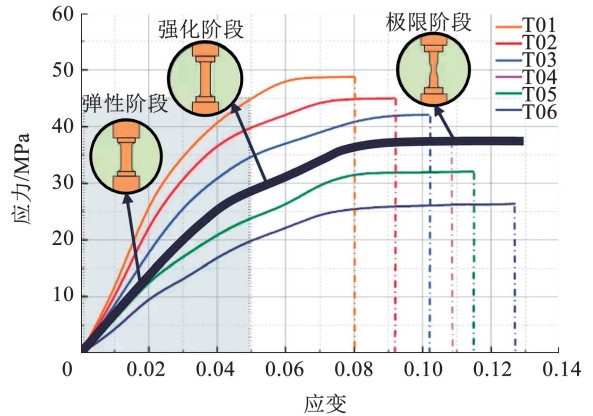


图 7 复合材料的应力-应变曲线图^[71]

Fig. 7 Stress-strain curves of composite materials^[71]

复合导电材料的力学性能受多种因素影响,主要包括:1) 基体和填料性质。基体的强度和模量通常低于导电材料,但在合适的配比和分散条件下,导电填料可显著增强复合材料的整体力学性能。例如,碳纤维和纳米材料通常具有较高的强度和刚度^[72-73];2) 填料类型与掺量。不同填料对力学性能的影响显著,某些碳基材料(如石墨)虽可提升导电性能,但可能导致抗压强度降低^[74];3) 填料分散性。填料在基体中的分散程度直接影响力学性能,均匀分散的填料可更有效地形成增强网络,提升材料力学性能^[75]。

聚合物基复合导电材料在应用中具有一个显著优势,可根据特定环境条件选择基体材料和导电填料,制备成多种形状的复合材料,以实现与被测环境的协同变形,从而提高测量精度。根据应用条件,通过优化基体材料与导电填料组合,确保抗压强度、弹性模量等力学参数满足实际使用要求^[76]。

综上所述,力学性能测试是评估复合导电材料性能和应用价值的重要手段。通过系统分析和准确测量力学性能,可为材料在实际应用提供坚实依据,进一步推动复合材料的创新与发展。

3.3 机敏性能测试

机敏性能是复合导电材料在应力、温度等环境变化下展现出的响应能力。通过系统测试机敏性能,可评估材料在实际应用中的响应特性,确保其在多变环境中的耐久性和可靠性。

3.3.1 压敏性能

压敏性能测试用于评估材料在受压条件下的电响应能力,是保障复合导电材料在动态负载下长期

稳定工作的基础。测试通常通过施加单调或循环压缩负载,并实时监测材料的电阻变化(如电阻变化率 $\Delta R/R_0$)完成。在单调压缩条件下,随着荷载增加, $\Delta R/R_0$ 呈上升趋势,这是由于压缩过程中导电颗粒间距减小,导致内部导电网络结构改变^[77]。当荷载超过承载极限时,材料内部结构可能发生永久性损伤,导致电阻无法恢复至初始状态。

影响压敏性能的主要因素包括:1) 荷载幅值。更高的施加荷载会导致更显著的电阻变化;2) 循环次数。疲劳加载可能引起材料损伤,影响电阻变化的稳定性;3) 材料分散性。导电粒子在基体中的分布与接触程度直接影响电阻变化特性^[78],见图 8。综上所述,压敏性能测试在交通和结构健康监测等领域具有重要应用价值。

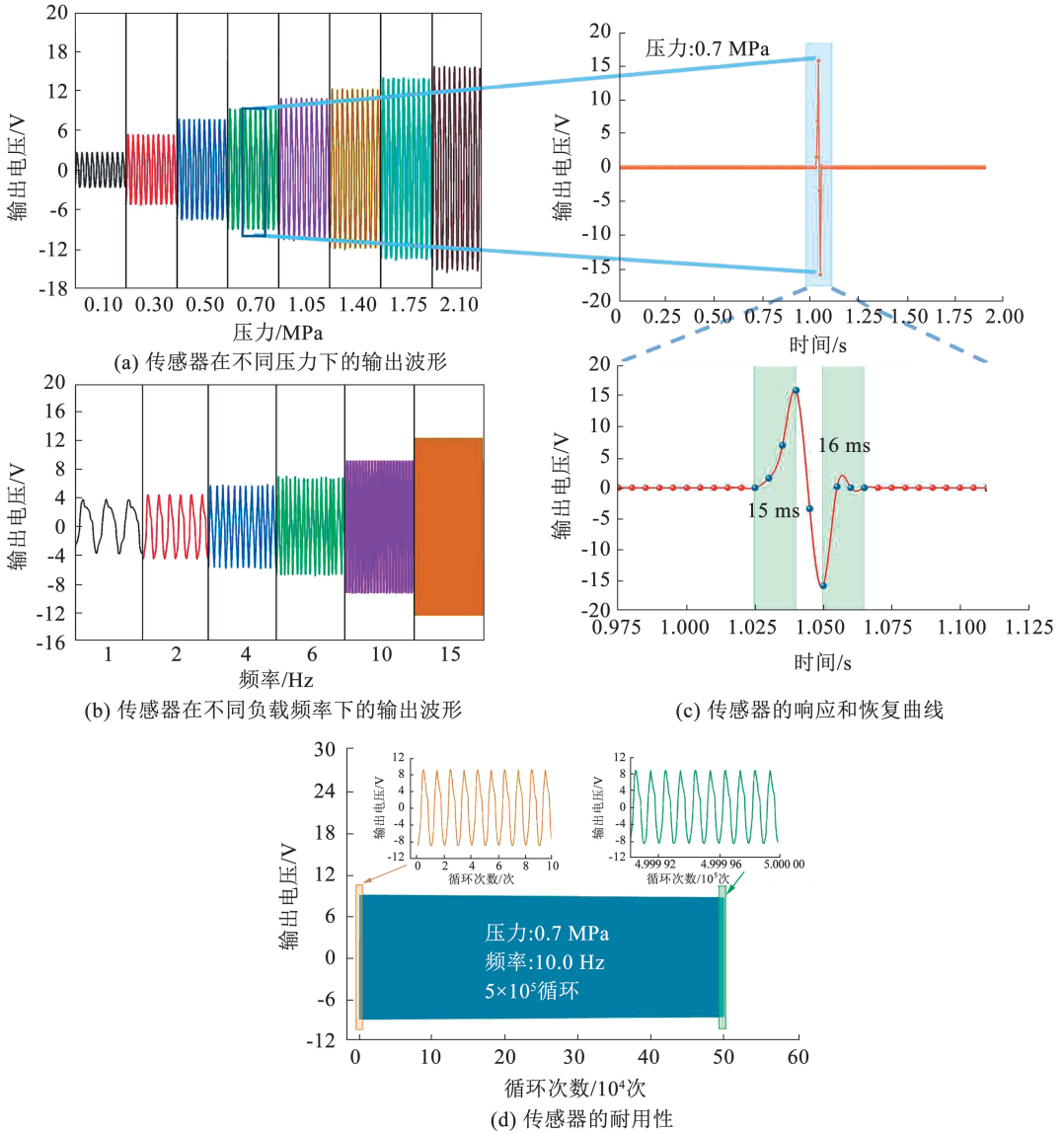


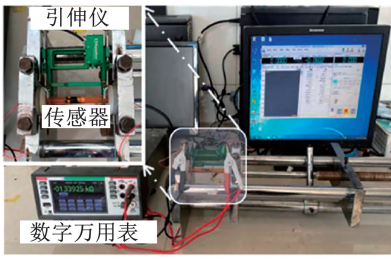
图 8 压电传感器的压敏特性^[79]

Fig. 8 Pressure-sensitive properties of the piezoelectric sensor^[79]

3.3.2 拉敏性能

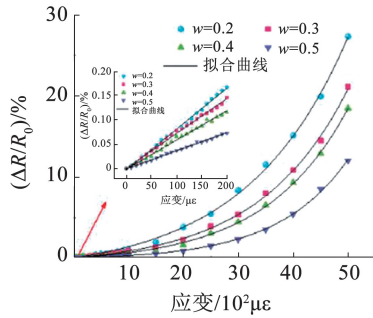
拉敏性能测试用于评估材料在拉伸条件下的电响应能力,对动态监测应用具有重要意义。通过单调或循环拉伸实验,监测电阻变化率($\Delta R/R_0$)与应力的关系。在单调拉伸过程中,随着拉应力增加,导电材料间距增大,导致 $\Delta R/R_0$ 上升;卸载阶段, $\Delta R/R_0$ 相应减少,且重复性良好,见图 9^[80]。

影响复合材料拉敏性能的因素,与压敏性能的因素相似:1) 加载幅度。超过弹性形变范围时,电阻变化可能不可逆^[25];2) 材料脆性。材料受本身脆性的影响在拉伸时易出现早期失效;3) 材料分散性。导电材料的分布与分散显著影响拉敏性能。拉敏性能测试可帮助预测材料在不同环境条件下的表现,确保其在基础设施监测和安全评估中的可靠性。

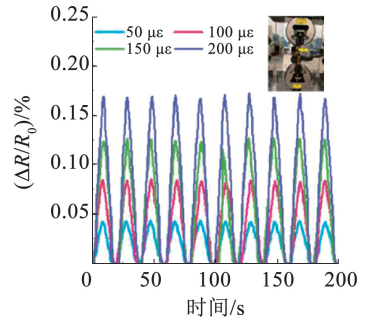


传感器校准

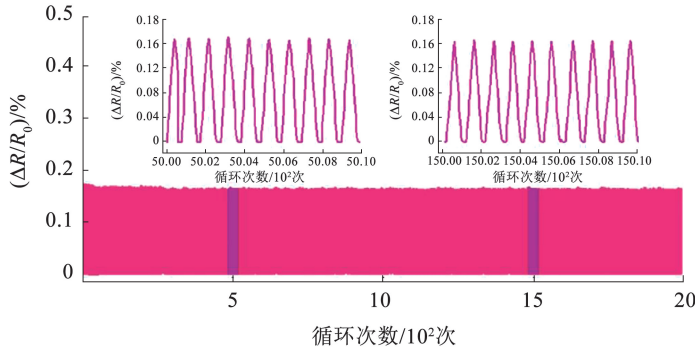
(a) 应变电阻响应测试系统



(b) 拉伸应变与相对电阻变化之间的关系



(c) 不同应变幅下的自感行为



(d) 开发的应变传感器的可重复性和耐用性

图 9 施加/不施加电场时具有不同的应变传感器特性^[81]

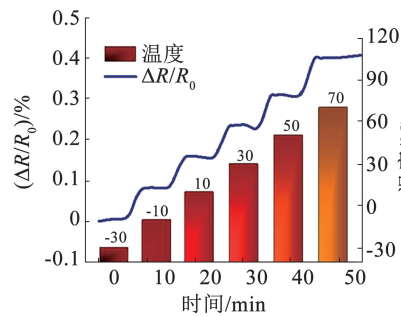
Fig. 9 Distinct strain sensor properties with/without electrical field applied^[81]

3.3.3 温敏性能

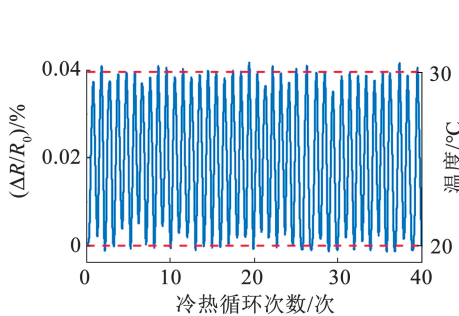
温敏性能测试揭示温度变化对材料电阻率的影响,对材料在极端温度环境下的稳定性及应用潜力具有重要意义。通过将样品置于不同温度环境中,监测电阻变化率,分析温度对电阻的影响。研究表明,随着温度升高或降低,电阻率相应变化,显示出材料对温度变化的敏感性(图 10)^[29]。

影响材料温敏性能的主要因素包括:1) 温度变

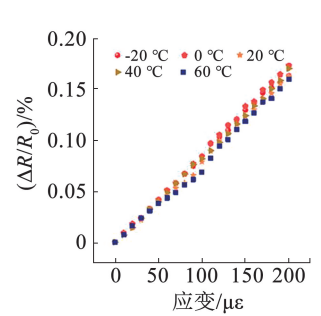
化速率。快速温度变化可能导致材料内部应力分布不均;2) 材料组成。不同基体和填料组合温度敏感性有显著影响,即无取向和混沌的导电网络容易随着温度变化而变形,从而表现为不同的应变感应行为^[82];3) 历史加载状态。材料加载历史可能影响其电阻响应。温敏性能测试是确保复合导电材料在各种气候条件下可靠应用的重要步骤,有助于实现实时环境监测和智能材料的开发^[81]。



(a) 电阻在 -30 ~ 70 °C 的逐步变化



(b) 在多个加热-冷却循环中保持稳定的电阻响应



(c) -20~60 °C 范围内应变响应的校准曲线

图 10 电场可调 CNT/EP 纳米复合材料的温度传感^[81]

Fig. 10 Temperature sensing of the electrical field-tunable CNT/EP nanocomposite^[81]

3.4 耐候性与耐久性测试

聚合物基复合导电材料在实际应用中需经受复杂环境因素的长期作用,包括长期的荷载作用、温度波动、湿度变化,以及极端环境条件(如湿热循环、冻融循环和老化等)。这些因素不仅影响材料的电学、力学和机敏性能,还对其在应用过程中的测量精度和长期稳定性提出了更高要求。因此,系统开展

耐候性与耐久性测试,全面评估该类材料在极端条件下的性能退化情况,是推动其工程应用的重要基础。

3.4.1 湿热循环测试

湿热测试用于评估材料在高湿度和温度交替变化条件下的性能稳定性。在湿热环境中,聚合物基体可能吸水 and 膨胀,导致内部应力分布不均,进而影响导电网络的完整性和力学性能。测试方法包括将

样品置于高温、高湿环境中一定时间后,再转移至低温、低湿环境中循环多次,监测其电阻率、力学强度和微观结构的变化^[83]。研究表明,湿热循环可能导致导电填料的氧化或腐蚀,降低材料的导电性和力学强度。因此,优化基体材料的耐水性和导电填料的抗氧化性能是提升材料湿热稳定性的关键^[84]。

3.4.2 冻融循环测试

冻融循环测试用于评估材料在低温冻结和高温

融化交替条件下的性能变化。冻融循环可能导致聚合物基体内部产生微裂纹,破坏导电网络结构,进而影响材料的导电性和力学性能。测试方法包括将样品置于低温环境(如 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)冻结一定时间后,再转移至常温环境融化,循环多次后监测其电阻率、抗压强度和弹性模量的变化,见图 11。研究表明,冻融循环可能导致导电填料脱落或基体材料脆化,进而降低材料整体性能^[85]。

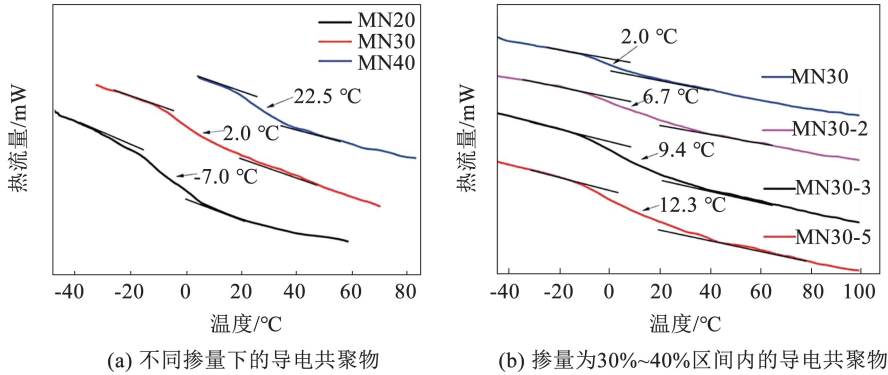


图 11 不同冻融循环的导电共聚物的 DSC 等温线^[85]

Fig. 11 DSC isothermal curves of conductive copolymers under different freeze-thaw cycles^[85]

3.4.3 老化测试

老化测试用于评估材料在长期使用过程中性能的退化情况。老化因素包括紫外线辐射、氧化和化学腐蚀等,可能导致聚合物基体的降解和导电填料的失效。测试方法包括将样品置于加速老

化环境中(如紫外线照射或高温氧化环境)一定时间后,监测其电阻率、力学强度和微观结构的变化,见图 12。研究表明,老化可导致导电填料的氧化或基体材料的脆化,降低材料的导电性和力学强度^[86]。

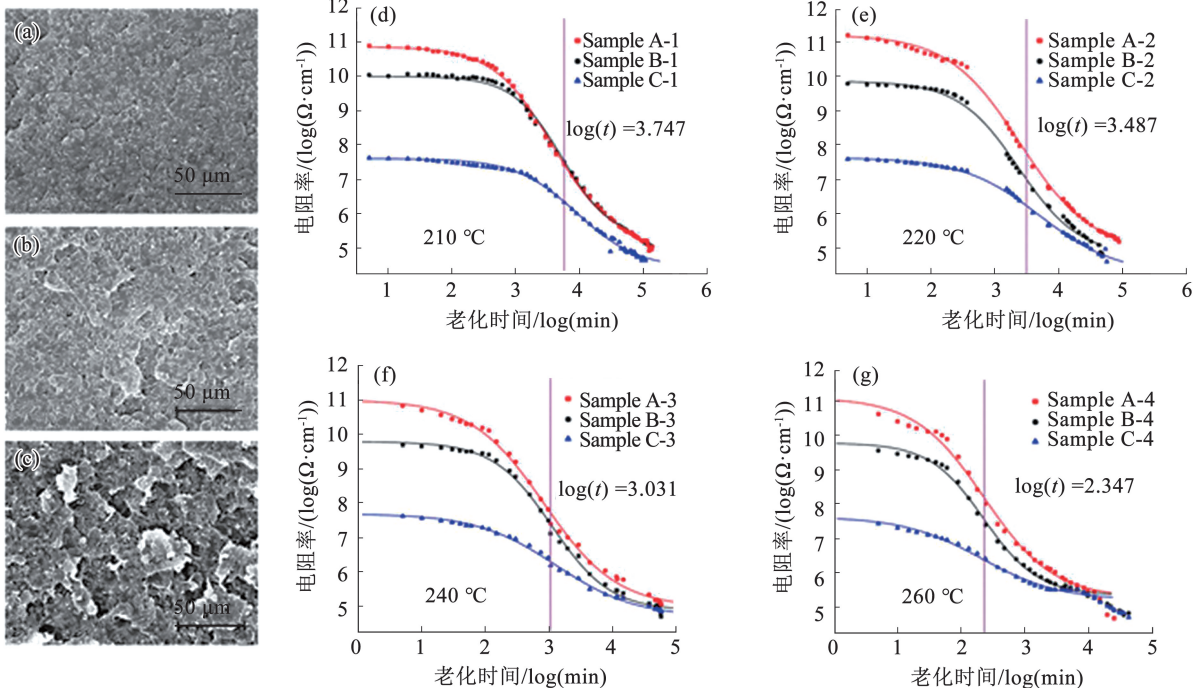


图 12 不同老化条件下碳纳米管复合导电材料的微观及电学性能变化^[86]

Fig. 12 Microscopic and electrical performance changes of carbon nanotube composite conductive materials under different aging conditions^[86]

3.4.4 极端条件下耐久性

在极端环境条件下,聚合物基复合导电材料的导电性和力学强度可能显著下降,影响其在实际应用中的可靠性。通过优化材料设计和测试方法,可提升其在极端环境下的性能保持能力。例

如,选择具有优异耐候性的基体材料(如氟化聚合物)和抗氧化性能的导电填料(如镀银碳纤维),可显著提升材料的耐久性,见图 13。此外,通过表面涂层或封装技术,进一步保护材料免受环境因素的侵蚀。

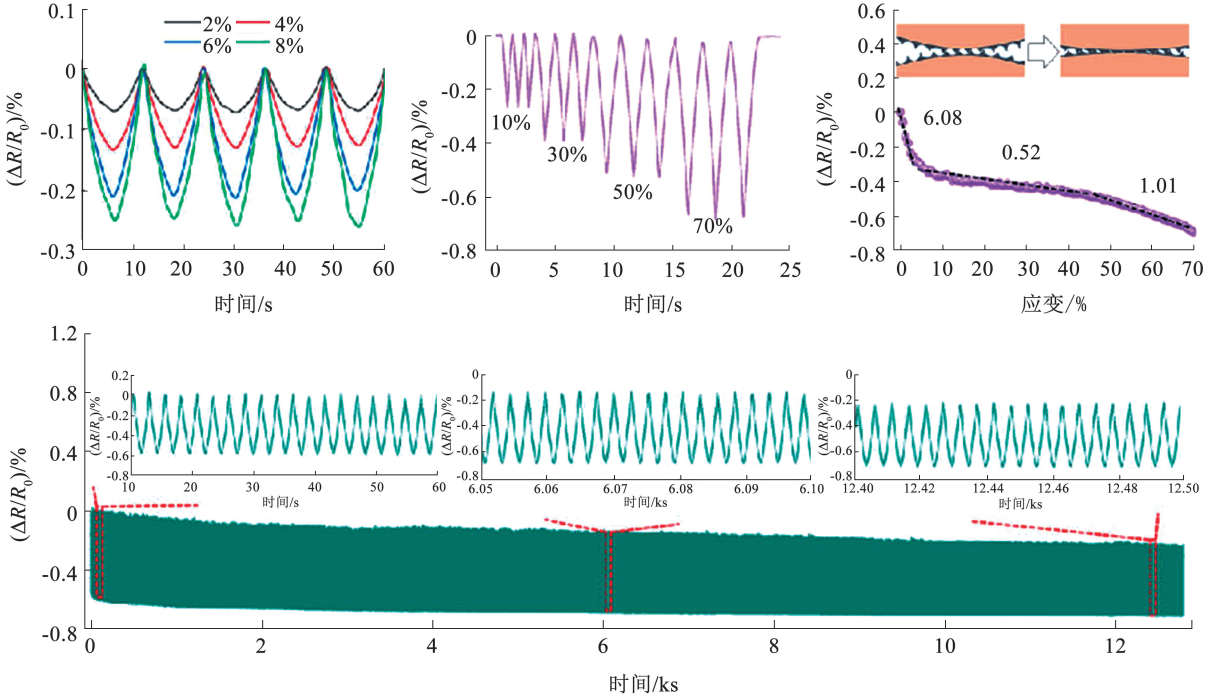


图 13 50%应变下 5 000 次循环测试的耐久性表现^[87]

Fig. 13 Durability performances under 50% strain after 5 000 cycles of testing^[87]

综上所述,复合导电材料能够有效监测结构内部、应变,以及温度变化^[25],在智能路面、结构健康监测等领域展现出广泛的应用前景。通过优化材料设计和测试方法,可进一步提升其机敏性能。通过系统分析和优化材料在极端环境下的性能变化,可为材料的设计和应用提供科学依据,并进一步推动其在结构健康监测、智能交通管理等领域的创新应用。

4 聚合物基复合导电材料在交通领域的应用

聚合物基复合导电材料凭借其优异的电学性能、力学可调性和环境适应性,在交通工程领域展现出广阔的应用前景。从交通基础设施和智能交通管理两个维度,系统综述了聚合物基导电复合材料的具体应用、技术特点,以及存在的不足,见表 3、图 14。

表 3 聚合物基复合导电传感器应用的关键参数及性能差异

Tab.3 Key parameters and performance differences of polymer-based composite conductive sensors applications

传感器类型	精度	成本	耐久性	不足
多壁碳纳米管/环氧树脂导电复合材料	应变:100 με			高温高压环境下的长期稳定性问题
碳纤维/环氧树脂导电复合材料	形变: ± 0.1 mm			微小损伤的检测灵敏度较低
镍粉/硅橡胶基导电复合材料	响应时间: < 0.1 s	相较于传统的		大规模部署的经济性和可操作性不足
回收聚合物导电复合材料	形变: ± 0.1 mm	应变片、传感器	较好(> 3 a)	长期稳定性以及复杂条件下精度问题
无线嵌入式碳纳米管基应变传感器	形变: ± 0.1 mm	降低 30% 左右		传感器测量精度及长期稳定性问题
EVIzero/碳微纤维复合导电材料	误差: < 20%			抗干扰能力、长期耐久性问题
镍粉/硅橡胶复合导电材料	准确率: 95%			复杂交通环境中的综合应用能力问题

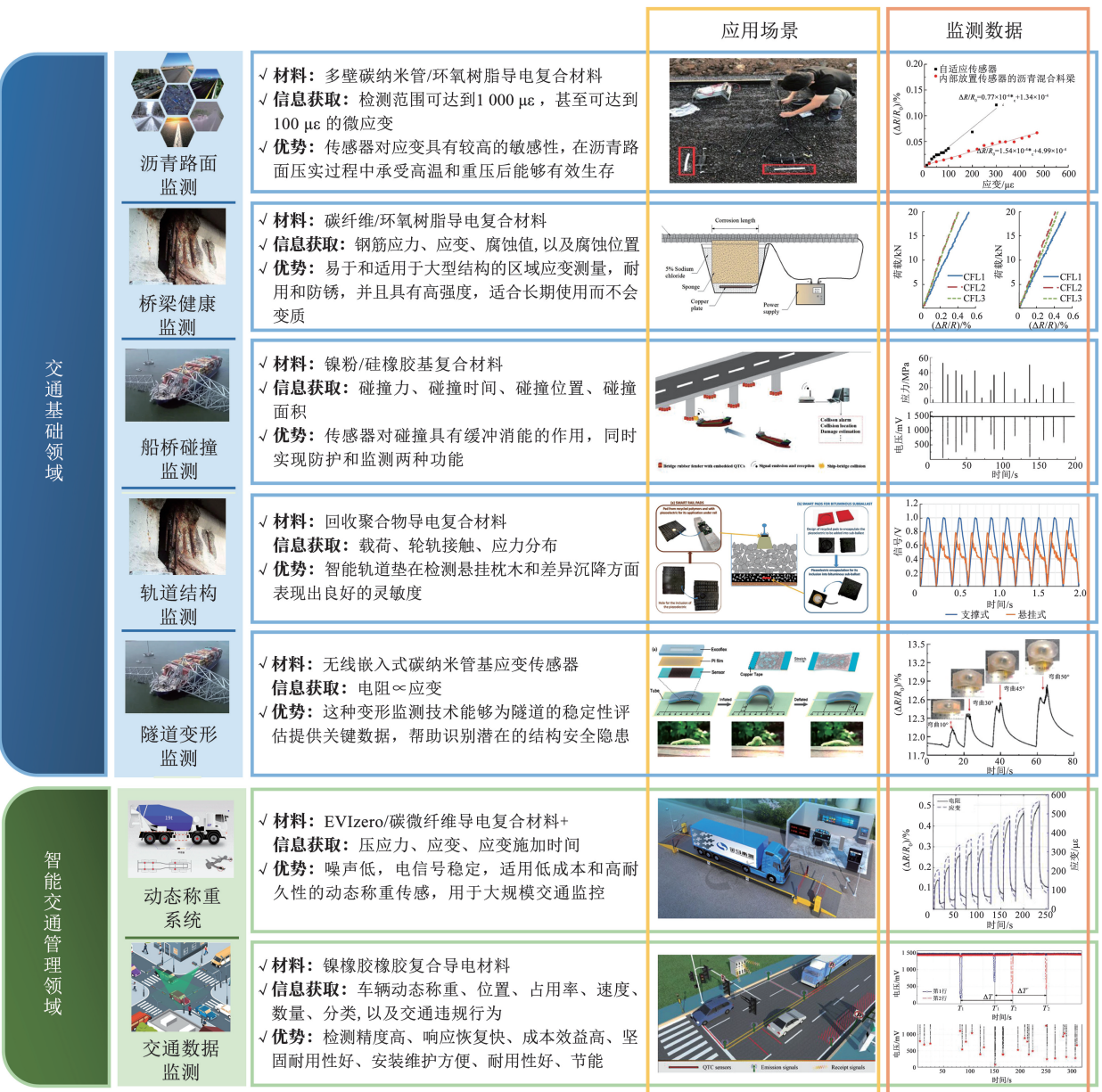


图 14 聚合物基导电材料在交通领域的应用

Fig. 14 Application of polymer based conductive materials in the field of transportation

4.1 交通基础设施领域

4.1.1 沥青路面监测领域

以多壁碳纳米管/环氧树脂导电复合材料为例的聚合物基导电材料在沥青路面应变监测领域展现出显著优势。该材料通过电阻变化实现路面结构内部应力-应变的实时监测,其测量因子可达 26.04,较传统金属应变传感器(通常约为 2)提升了一个数量级。研究表明,优化碳纳米管掺量可有效调节复合材料的力学性能,使其在沥青路面压实过程中能够耐受高温和重压,同时保持优异的传感性能。该传感器在 1 000 $\mu\epsilon$ 微应变范围内具有可靠的检测能力,最小可检测至 100 $\mu\epsilon$ 微应变,表现出良好的重复性和应变敏感性^[43,88]。工程应用表明,将其安装至路面中可监测重载交通条件下应变的动态变

化,其灵敏度较传统传感器提高 10 倍,使用寿命超过 3 a,显著降低了维护成本。

此外,石墨烯和碳纳米纤维等新型导电也被广泛应用于路面应变传感器的研发。这些材料不仅保持了优异的高导电性,其独特的微观结构还显著提升了传感器的耐久性和抗干扰能力,为监测系统的可靠性提供了有力保障。然而,尽管这些材料在实验室条件下表现出优异的性能,其在高温高压环境下的长期稳定性仍需进一步验证。同时,较高的材料成本和规模化应用的技术瓶颈也限制了其在工程实践中的推广^[89]。

4.1.2 桥梁结构健康监测

碳纤维/环氧树脂复合材料(Carbon fiber line sensors, CFL)传感器在桥梁结构健康监测领域具有

重要应用价值。作为自感知传感器,CFL 通过监测混凝土构件内部的应变变化,可有效评估钢筋腐蚀程度和混凝土表面损伤情况。其工作原理基于钢筋锈蚀引发的混凝土应变信号变化,通过电信号实现结构损伤的实时监测。CFL 传感器具有操作简便、区域应变测量能力强等优势,其耐用性、防锈性和高强度特性确保了长期监测的可靠性^[90]。

随着传感技术的进步,多种聚合物基导电复合材料已被成功应用于桥梁健康监测系统。这些材料能够实时监测混凝土结构的裂纹扩展和应变分布,为维护决策提供关键数据支持,显著提升了结构安全性和耐久性^[91]。同时,CFL 传感器与传统应变片相比,检测精度提高 15%,安装成本降低 20%。然而,现有技术仍存在以下局限:1)对微小损伤的检测灵敏度有待提高;2)传感器的安装工艺较为复杂,可能影响监测精度;3)长期使用过程中的信号稳定性仍需进一步验证。

4.1.3 船桥碰撞监测

近年来,以聚合物为基体的导电复合材料在船桥碰撞监测领域展现出显著的应用潜力^[92]。其中,镍粉/硅橡胶基导电复合材料因其优异的柔韧性、环境适应性和可设计性。该传感器通过机械共混法制备,可实现船桥碰撞的实时监测与防护一体化。该监测系统采用钢球-混凝土试件模拟船舶船头与桥墩的刚性碰撞。系统通过实时分析电信号变化,可准确获取撞击力、撞击时间,以及撞击位置等关键参数监测数据通过无线传输至控制中心^[93],为事故预警和应急响应提供重要依据。

该复合材料传感器在船桥碰撞监测中展现出良好的可行性和可靠性,但该系统的实际应用仍面临一些挑战:首先,复杂环境对传感器长期稳定性的影响需要进一步评估;其次,大规模部署的经济性和可操作性仍需验证;最后,多传感器协同监测网络的构建和数据分析算法的优化也是未来研究的重点方向。

4.1.4 轨道结构监测

基于导电聚合物材料的智能传感器在轨道结构中的应用逐渐受到重视,尤其是在轨道垫和沥青道砟中的集成,展现了其在监测交通和轨道状态方面的潜力。以回收聚合物(50%的 HPDE 和 50%回收橡胶颗粒)制成的智能垫片为例,该材料不仅具有良好的环境适应性和机械性能,还能通过电阻变化实时反映轨道结构的应力状态,监测列车质量、轮轨接触不规则性,以及轨道上部结构性能方面的能

力^[94]。此外,导电聚合物复合材料还具备裂纹检测、温度监测,以及疲劳损伤评估等多功能特性,同时成本降低 30%左右,为轨道结构的全面监测提供了可能。尽管导电聚合物材料在轨道监测中展现出良好应用前景,但仍存在一些亟待解决的问题:长期服役环境下的耐久稳定性以及复杂条件下监测精度影响。

4.1.5 隧道变形监测

无线嵌入式碳纳米管基应变传感器作为新型隧道监测材料,具有独特的性能优势^[95]。将现已有无线嵌入式碳纳米管基应变传感器嵌入隧道或粘贴于隧道内壁,其高导电性和优异的机械性能使其能够精确感知隧道结构的微小变形^[96]。通过实时监测电阻变化,该传感器可实现对结构应变的精确测量,检测精度可达到 $\pm 0.1 \text{ mm}$,显著提高了行车安全性。此外,碳纳米管网络对裂缝扩展具有高度敏感性,该技术能够准确反映裂缝的萌生和扩展过程,为隧道维护决策提供科学。尽管碳纳米管传感器在隧道监测中展现出良好应用前景,但仍面临一些技术挑战:传感器测量精度及长期稳定性问题需要进一步验证。

4.2 智能交通管理领域

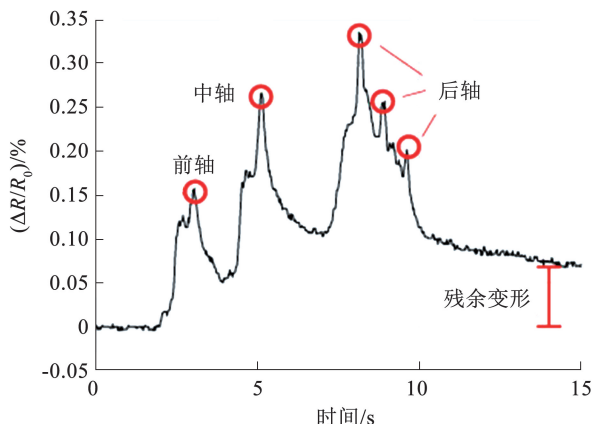
4.2.1 动态称重系统

基于 EVIzero 商业黏合剂和碳微纤维的新型动态称重(weigh-in-motion, WIM)传感器,充分展现了聚合物导电材料在智能交通监测领域的应用优势^[97-98]。该复合材料与基础路面材料具有相似性,确保了良好的界面相容性和长期稳定性。其独特的导电网络结构不仅实现了高灵敏度,还显著降低了制造成本^[99],与传统压电传感器相比,总成本可降低至 10%。作为路面本身的一部分,这种路面本身的传感器通过适当的嵌入式设计,解决了传感器与结构的黏合不良问题,从而进一步提高了对恶劣环境的耐用性^[100]。该种新型动态称重传感器已在意大利罗维戈聚合物生产工厂完成制造,并部署于一条主要服务道路上。该传感器能够有效监测工厂日常运营中频繁通行的卡车,并实现车辆质量的实时估算,其测量误差控制在 20%以内,见图 15。这一实际应用验证了所开发传感器的现场适用性,同时为后续优化设计提供了重要数据支持。通过在运营道路上开展进一步测试,研究人员将能够针对更高车速和多样化车辆类型等实际运行条件,对传感器的性能进行系统性优化,从而提升其在实际交通环境中的可靠性和适用性^[101]。

这种新型动态称重传感器不仅适用于大规模交通监控,也为未来交通安全与管理提供了可能性,能够在一定程度上优化交通流量,提高交通效率。但



(a) 触发传感系统的车辆图片



(b) 电阻时程的相关变化以及由于车轴出现引起的峰值

图 15 WIM 系统的典型输出^[101]

Fig. 15 Typical output of the WIM system^[101]

4.2.2 交通数据监测

量子隧道复合材料(quantum tunneling composites, QTC)作为一种新型聚合物导电复合材料,凭借其独特的量子隧道效应和优异的压阻特性,已成为新一代智能交通监测系统的核心功能材料。通过将尖状球形镍粉嵌入硅橡胶基体中,该材料实现了基于量子隧道效应的压力-电导率响应机制。这种结构不仅赋予了材料高灵敏度和快速响应特性,还确保了良好的环境适应性和长期稳定性。在实际交通监测中,QTC 材料具有响应速度快、灵敏度高、稳定性好等优势,并展现出优异的综合性能:能够实时检测车辆存在、行驶质量、位置、占用率、数量,以及分类等多种交通参数^[102];在不同车速和测试环境下均保持高检测精度;具有快速响应和恢复特性,适用于长期实时监测^[21]。这些优势为构建更安全、高效、智能的交通系统提供了强有力的保障。Liang 等^[103]基于 PVDF/PZT/CNTS 压电传感器设计了一种用于道路交通信息传感、监测和能量收集的集成系统,并成功应用于真实高速公路(济潍高速公路)。在设计车速为 30、60 km/h 时,后桥质量为 5 t(0.35 MPa)、10 t(0.70 MPa)和 15 t(1.05 MPa)时,对车辆前、后轴质量进行了精确控制和加载试验。这些结果揭示了压电传感器在车辆超速和超载监测、科学道路管理和收集车辆运动能量等方面的巨大潜力,然而,压电复合材料的填料、微纳米结构设计、制备工艺等方面需要进一步研究,以保证复合材料各方面性能的稳定。

虽然导电复合材料具有快速响应的特性,但在

是现有动态称重传感器在抗干扰能力、长期耐久性方面略有不足,同时针对配套的数据融合与智能分析技术尚不成熟。

高精度监测需求下,其响应速度与精度之间的平衡仍需优化。同时,目前的导电复合材料传感器主要对单一或少数几种交通参数(如车辆存在、质量等)进行监测,难以实现多参数、多功能集成,限制了传感器在复杂交通环境中的综合应用能力。因此开发多功能集成传感器,实现对多种交通参数的同步监测。

聚合物基导电复合材料凭借其优异的电学性能、力学可调性和环境适应性,在交通工程领域展现出广阔的应用前景(表 3)。从交通基础设施到智能交通管理,这些材料在沥青路面监测、桥梁结构健康监测、船桥碰撞监测、轨道结构监测,以及隧道变形监测等方面均取得了显著的技术突破。然而,尽管实验室条件下的性能表现令人鼓舞,其在实际工程中的应用仍面临诸多挑战。首先,材料在高温、重压等极端环境下的长期稳定性尚未得到充分验证,这直接影响了其在大规模部署中的可靠性。此外,现有技术对微小损伤的检测灵敏度、抗干扰能力,以及多参数集成功能等方面仍有待进一步提升。未来研究应着重于开发更具环境适应性和耐久性的新型复合材料,优化大规模部署的经济性,并发展先进的数据融合与智能分析技术,以充分发挥聚合物基导电复合材料在智能交通系统中的潜力,为构建更安全、高效、智能的交通基础设施提供强有力的技术支持。

5 结 论

目前,聚合物导电复合材料作为传感器应用在交通领域已成为研究热点,而随着导电纳米材料种类及制备工艺的不断丰富和完善,其应用的范围和

形式更加多元化。因此,本文总结当前研究成果,分析存在的问题,并展望未来发展方向,对于推动该领域技术进步与产业应用具有指导意义。相应结论如下:

1) 聚合物导电复合材料为交通领域智能化发展提供了新路径。聚合物基复合导电材料导电机理包括渗滤理论、隧道效应理论、有效介质理论,以及多理论耦合模型,深入研究聚合物基导电复合材料导电原理可为今后设计和优化复合材料提供坚实理论依据,为提升交通基础设施功能性与智能化水平提供技术支撑。

2) 聚合物导电复合材料组成与制备工艺是其在交通领域应用研究的核心。通过科学选择基体材料与导电填料,并优化分散及固化工艺,能显著提高该类材料的电学和力学性能。实现其在交通领域的应用不仅依赖于材料设计的创新,还需推进生产工艺标准化的研究。

3) 聚合物导电复合材料性能测试是保障其在交通领域应用的关键环节。通过系统的电学性能、力学性能、机敏性能、耐候性与耐久性测试,能够全面评估该类材料在交通领域复杂服役环境下的表现,为材料的优化与改进提供了数据支撑,并推动其在交通领域实体工程中的应用。

4) 聚合物导电复合材料尽管在交通基础设施和智慧交通管理等方面得到了广泛应用,但其在交通领域仍面临环境适应性、长期稳定性和生产成本等挑战。亟须加强新兴技术研究,突破现有瓶颈。在未来的发展中,凭借其在智能交通、先进材料和可持续发展方面的潜力,有望在交通领域实现更广泛的应用。与此同时,聚合物基导电复合材料的未来发展需要突破传统材料科学的局限,积极探索与新兴技术的跨学科融合,如人工智能、储能技术、智能网联技术等。通过充分利用这些跨学科融合带来的发展机遇,聚合物基导电复合材料必将推动交通行业的创新与转型,为未来交通基础设施智能化提供更先进的解决方案,并促进其可持续发展,具有深远意义。

参考文献

[1] WANG Haining, ZHOU Ruoling, TIAN Yao, et al. Road-use optical fiber sensors: structural design optimization and perception performance [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2025, 2025: 7117229. DOI: 10.1155/adce/7117229

[2] DONG Zejiao, SONG Hongyang, MA Xianyong, et al. Intelligent weigh-in-motion system using embedded MEMS sensors for pavement monitoring [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and*

Measurement, 2024, 73: 2530411. DOI: 10.1109/TIM.2024.3457928

[3] WANG Huaping, XIANG Ping, JIANG Lizhong. Strain transfer theory of industrialized optical fiber-based sensors in civil engineering: a review on measurement accuracy, design and calibration [J]. *Sensors and Actuators A-Physical*, 2019, 285: 414. DOI: 10.1016/j.sna.2018.11.019

[4] WIJAYA H, RAJEEV P, GAD E. Distributed optical fibre sensor for infrastructure monitoring: field applications [J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 64: 102577. DOI: 10.1016/j.yofte.2021.102577

[5] SU Linping, LUAN Xuehao, QIU Zhengmei, et al. Sensing performance and optimizing encapsulation materials of a coordinated epoxy-encapsulated sensor for strain monitoring of asphalt pavement layered structures [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(10): 9811. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3164879

[6] 卫军, 吴志强, 董荣珍. 基于石墨烯复合薄膜的应变传感器及性能分析 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(3): 619

WEI Jun, WU Zhiqiang, DONG Rongzhen. Performance analysis of strain sensor based on graphene composite film [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2020, 51(3): 619. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2020.03.006

[7] KAUR G, ADHIKARI R, CASS P, et al. Electrically conductive polymers and composites for biomedical applications [J]. *RSC Advances*, 2015, 5(47): 37553. DOI: 10.1039/C5RA01851J

[8] OVID' KO I A. Enhanced mechanical properties of polymer-matrix nanocomposites reinforced by graphene inclusions: a review [J]. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2013, 34(1): 19

[9] POTTS J R, DREYER D R, BIELAWSKI C W, et al. Graphene-based polymer nanocomposites [J]. *Polymer*, 2011, 52(1): 5. DOI: 10.1016/j.polymer.2010.11.042

[10] SHCHEGOLKOV A V, SHCHEGOLKOV A V, KAMINSKII V V, et al. Smart polymer composites for electrical heating: a review [J]. *Journal of Composites Science*, 2024, 8(12): 522. DOI: 10.3390/jcs8120522

[11] 刘东. 碳纤维树脂基复合材料机敏性研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2002

LIU Dong. Smart properties research of carbon fiber reinforced resin composite [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2002

[12] NAN Cewen. Physics of inhomogeneous inorganic materials [J]. *Progress in Materials Science*, 1993, 37(1): 1. DOI: 10.1016/0079-6425(93)90004-5

[13] PÖTSCHKE P, ABDEL-GOAD M, ALIG I, et al. Rheological and dielectrical characterization of melt mixed polycarbonate-multiwalled carbon nanotube composites [J]. *Polymer*, 2004, 45(26): 8863. DOI: 10.1016/j.polymer.2004.10.040

[14] NAN Cewen, SHEN Yang, MA Jing. Physical properties of composites near percolation [J]. *Annual Review of Materials Research*, 2010, 40: 131. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070909-104529

[15] 张永泉. CNT/PDMS 柔性传感材料性能及其结构裂缝感知特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017

ZHANG Yongquan. Research on properties of cnt/pdms flexible sensing material and its monitoring of structural crack [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017

- [16] JIN Zheng, LIANG Fei, LU Wenzhong, et al. Effect of particle sizes of nickel powder on thermal conductivity of epoxy resin-based composites under magnetic alignment[J]. *Polymers*, 2019, 11(12): 1990. DOI: 10.3390/polym11121990
- [17] ALLAOUI A, BAI Suo, CHENG Huiming, et al. Mechanical and electrical properties of a MWNT/epoxy composite[J]. *Composites Science and Technology*, 2002, 62(15): 1993. DOI: 10.1016/S0266-3538(02)00129-X
- [18] 朱清华. 碳纤维/硅橡胶复合材料的拉敏特性及应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011
ZHU Qinghua. Studies on the pulling sensibility and applications of carbon fiber/siliconerubber composites [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011
- [19] ZHANG Xiangwu, PAN Yi, ZHENG Qiang, et al. Time dependence of piezoresistance for the conductor-filled polymer composites [J]. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 2000, 38(21): 2739. DOI: 10.1002/1099-0488(20001101)38:21<2739:AID-POLB40>3.0.CO;2-O
- [20] KIMURA T, YOSHIMURA N, OGISO T, et al. Effect of elongation on electric resistance of carbon-polymer systems[J]. *Polymer*, 1999, 40(14): 4149. DOI: 10.1016/S0032-3861(98)00719-8
- [21] HAN Baoguo, DING Siqi, YU Yan, et al. Design and implementation of a multiple traffic parameter detection sensor developed with quantum tunneling composites[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(9): 4845. DOI: 10.1109/JSEN.2015.2429674
- [22] RUSCHAU G R, YOSHIKAWA S, NEWNHAM R E. Resistivities of conductive composites[J]. *Journal of Applied Physics*, 1992, 72(3): 953. DOI: 10.1063/1.352350
- [23] MEDALIA A I. Electrical conduction in carbon black composites [J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 1986, 59(3): 432. DOI: 10.5254/1.3538209
- [24] MATTHEWS N, HAGMANN M J, MAYER A. Comment: "Generalized formula for the electric tunnel effect between similar electrodes separated by a thin insulating film" [J. *Appl. Phys.* 34, 1793 (1963)] [J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 123(13): 136101. DOI: 10.1063/1.5019788
- [25] SWOLFS Y, MEERTEN Y, HINE P, et al. Introducing ductility in hybrid carbon fibre/self-reinforced composites through control of the damage mechanisms[J]. *Composite Structures*, 2015, 131: 259. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.04.069
- [26] MCLACHLAN D S, BLASZKIEWICZ M, N EWNHAM R E. Electrical resistivity of composites [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1990, 73(8): 2187. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1990.tb07576.x
- [27] 武新胜. 多壁碳纳米管/环氧树脂复合机敏材料的性能及制备工艺研究[D]. 济南: 山东大学, 2017
WU Xinsheng. Research on properties and preparation technology of multi-walled carbon nanotubes/epoxy composite smart materials [D]. Jinan: Shandong University, 2017
- [28] 郭青成. 基于 BP 神经网络及多目标优化的铜基复合材料结构设计及优化[D]. 西安: 西安理工大学, 2024
GUO Qingcheng. Design and optimization of copper matrix composite structure based on BP neural network and multi-objective optimization[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2024. DOI:10.27398/d.cnki.gxalu.2024.000820
- [29] 陶瑞. 基于应变检测的 PA66 基机敏材料性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2017
TAO Rui. Study on the properties of PA66-based smart material for strain monitoring[D]. Jinan: Shandong University, 2017
- [30] BARTOLI M, TORSELLO D, PIATTI E, et al. Pressure-responsive conductive poly(vinyl alcohol) composites containing waste cotton fibers biochar[J]. *Micromachines*, 2022, 13(1): 125. DOI: 10.3390/mi13010125
- [31] HSISSOU R, SEGHIRI R, BENZEKRI Z, et al. Polymer composite materials: a comprehensive review[J]. *Composite Structures*, 2021, 262: 113640. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113640
- [32] LIU Wei, WEI Baochun, XU Fujun. Investigation on the mechanical and electrical properties of carbon nanotube/epoxy composites produced by resin transfer molding [J]. *Journal of Composite Materials*, 2017, 51(14): 2035. DOI: 10.1177/0021998316667541
- [33] BREUER O, TCHOUDAKOV R, NARKIS M, et al. Electrical properties of structured HIPS/gamma-irradiated UHMWPE/carbon black blends[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2000, 40(4): 1015. DOI: 10.1002/pen.11229
- [34] LEBEDEV S M, GEFLE O S, AMITOV E T, et al. Conductive carbon nanotube-reinforced polymer composites and their characterization [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2016, 23(3): 1723. DOI: 10.1109/TDEL.2016.005667
- [35] MURUGARAJ P, MAINWARING D E, MORA-HUERTAS N. Electromechanical response of semiconducting carbon-polyimide nanocomposite thin films[J]. *Composites Science and Technology*, 2009, 69(14): 2454. DOI: 10.1016/j.compscitech.2009.06.018
- [36] 汪莎莎, 李延昂, 邓慧婵, 等. 用于电化学执行器的非金属电极材料研究进展[J]. *科学通报*, 2024, 69(增刊1): 578
WANG Shasha, LI Yanang, DENG Huichan, et al. Research progress of non-metallic electrode materials for electrochemical actuators[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2024, 69(Sup 1): 578. DOI:10.1360/TB-2023-0
- [37] ZAABA N F, ISMAIL H, SAEED A M. A review: metal filled thermoset composites[J]. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2022, 61(1): 13. DOI: 10.1080/25740881.2021.1948058
- [38] 赵冬梅, 李振伟, 刘领弟, 等. 石墨烯/碳纳米管复合材料的制备及应用进展[J]. *化学学报*, 2014, 72(2): 185
ZHAO Dongmei, LI Zhenwei, LIU Lingdi, et al. Progress of preparation and application of graphene/carbon nanotube composite materials[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2014, 72(2): 185. DOI: 10.6023/A1308
- [39] ZHANG X, YAO Z, GE Z, et al. Piezoresistive characterization of polyethylene terephthalate-graphite composite [J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2017, 45(1): 303. DOI:10.1520/jte20160026
- [40] LU J R, WENG W G, CHEN X F, et al. Piezoresistive materials from directed shear-induced assembly of graphite nanosheets in polyethylene[J]. *Advanced Functional Materials*, 2005, 15(8): 1358. DOI: 10.1002/adfm.200400298
- [41] MOMOHJIMOH I, HUSSEIN M A, AL-AQEELI N. Recent advances in the processing and properties of alumina-CNT/SiC nanocomposites [J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(1): 86. DOI: 10.3390/nano9010086

- [42] 丘龙斌, 孙雪梅, 仰志斌, 等. 取向碳纳米管/高分子新型复合材料的制备及应用[J]. 化学学报, 2012, 70(14): 1523
QIU Longbin, SUN Xuemei, YANG Zhibin, et al. Preparation and application of aligned Carbon nanotube/polymer composite material [J]. Acta Chimica Sinica, 2012, 70(14): 1523. DOI: 10.6023/A1203
- [43] XIN Xue, LIANG Ming, YAO Zhanyong, et al. Self-sensing behavior and mechanical properties of carbon nanotubes/epoxy resin composite for asphalt pavement strain monitoring [J]. Construction and Building Materials, 2020, 257: 119404. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119404
- [44] BYRNE M T, GUN'KO Y K. Recent advances in research on carbon nanotube-polymer composites [J]. Advanced Materials, 2010, 22(15): 1672. DOI: 10.1002/adma.200901545
- [45] GUPTA S, DHARAMVIR K, JINDAL V K. Elastic moduli of single-walled carbon nanotubes and their ropes [J]. Physical Review B, 2005, 72(16): 165428. DOI: 10.1103/physrevb.72.165428
- [46] 詹达富. 石墨烯水泥基复合材料的制备及机敏性能研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2021
ZHAN Dafu. Preparation and research on mechanical sensitivity of graphene cement-based composite[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2021. DOI: 10.26943/d.cnki.gbjzc.2021.000051
- [47] 边成香, 徐学诚, 杨国光, 等. 磺化聚苯乙炔/多壁碳纳米管复合材料导电特性和机理的研究[J]. 化学学报, 2007, 65(6): 525
BIAN Chengxiang, XU Xuecheng, YANG Guoguang, et al. Studies on conductive properties and mechanism of composites: sulfonated polyphenylacetylene/multiwalled carbon nanotubes [J] Acta Chimica Sinica, 2007, 65(6): 525. DOI: 10.3321/j.issn:0567-7351.2007.06.008
- [48] 王彪, 孙广平, 孙国恩, 等. 聚丙烯/多壁碳纳米管复合材料的热性能和流变性能[J]. 高分子学, 2006, 37(3): 408
WANG Biao, SUN Guangping, SUN Guoen, et al. The thermal characterization and rheology behavior of pp/MWNTs nanocomposites [J]. Acta Polymerica Sinica, 2006, 37(3): 408. DOI: 10.3321/j.issn:1000-3304.2006.03.007
- [49] TUCHO W M, MAUROY H, WALMSLEY J C, et al. The effects of ball milling intensity on morphology of multiwall carbon nanotubes [J]. Scripta Materialia, 2010, 63(6): 637. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2010.05.039
- [50] COETZEE D, VENKATARAMAN M, MILITKY J, et al. Influence of nanoparticles on thermal and electrical conductivity of composites [J]. Polymers, 2020, 12(4): 742. DOI: 10.3390/polym12040742
- [51] 杨楠. 纳米碳纤维聚氨酯基复合材料机敏特性研究及工程应用[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2020
YANG Nan. Study and engineering application of sensitive properties of nono-carbon fiber polyurethane matrix composites[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2020. DOI: 10.27009/d.cnki.gdblu.2020.000018
- [52] XIN Xue, LUAN Xuehao, SU Linping, et al. The innovative self-sensing strain sensor for asphalt pavement structure: substitutability and synergy effects of graphene platelets with carbon nanotubes in epoxy composites [J]. Frontiers in Materials, 2022, 9: 824364. DOI: 10.3389/fmats.2022.824364
- [53] WANG Baomin, ZHAO Ruying. Dispersion of graphene in aqueous solution [J]. Russian Journal of Physical Chemistry A, 2018, 92(8): 1558. DOI: 10.1134/S003602441808006X
- [54] TKALYA E E, GHISLANDI M, DE WITH G, et al. The use of surfactants for dispersing carbon nanotubes and graphene to make conductive nanocomposites [J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2012, 17(4): 225. DOI: 10.1016/j.cocis.2012.03.001
- [55] 张先叶. 氧化石墨烯、碳纳米管增强聚酯复合材料的制备及性能[D]. 天津: 天津工业大学, 2019
ZHANG Xianye. Preparation and properties of graphene oxide and carbon nanotube reinforced polyester composites [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2019. DOI: 10.27357/d.cnki.gtgyu.2019.000036
- [56] 潘峰. RDP-NP/Mg(OH)₂/ZnO/ABS 无卤阻燃体系的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007
PAN Feng. Research on preparation and properties of the halogen-free flame retardant RDP-NP/Mg(OH)₂/ZnO/ABS [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007
- [57] HE Wenyang, MA Jing, KANG Luhan, et al. Highly sensitive and stretchable CB/GNPs-TPU strain sensor with porous microstructure for multifunctional strain sensing [J]. Materials Today Communications, 2024, 41: 110800. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.110800
- [58] XIN Xue, QIU Zhengmei, LUAN Xuehao, et al. Novel conductive polymer composites for asphalt pavement structure in situ strain monitoring: Influence of CB/CNT and GNP/CNT nano/micro hybrid fillers on strain sensing behavior [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(5): 3945. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3140934
- [59] PUGACHEVA T A, KURBATOV V G, VAGANOV E V, et al. Curing of Poly(styrene-co-methyl methacrylate-co-2-hydroxyethyl methacrylate) terpolymers in the presence of amino compounds of different structures [J]. Polymers, 2023, 15(9): 2187. DOI: 10.3390/polym15092187
- [60] WU Jianmin, LIU Jianguo, YANG Fei. Three-phase composite conductive concrete for pavement deicing [J]. Construction and Building Materials, 2015, 75: 129. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.11.004
- [61] 韩宝忠, 韩宝国, 王艳洁, 等. 测试导电复合材料直流电阻的四端电极法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(10): 1677
HAN Baozhong, HAN Baoguo, WANG Yanjie, et al. DC four-electrode method for electrical resistance measurement of conductive composites [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(10): 1677
- [62] ETIKA K C, LIU Lei, HESS L A, et al. The influence of synergistic stabilization of carbon black and clay on the electrical and mechanical properties of epoxy composites [J]. Carbon, 2009, 47(13): 3128. DOI: 10.1016/j.carbon.2009.07.031
- [63] KU-HERRERA J J, PACHECO-SALAZAR O F, RÍOS-SOBERANIS C R, et al. Self-sensing of damage progression in unidirectional multiscale hierarchical composites subjected to cyclic tensile loading [J]. Sensors, 2016, 16(3): 400. DOI: 10.3390/s16030400
- [64] LIU Xiaoming, WU Shaopeng, LI Ning, et al. Self-monitoring

- application of asphalt concrete containing graphite and carbon fibers [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition)*, 2008, 23 (2): 268. DOI: 10.1007/s11595-006-2268-2
- [65] AVILÉS F, OLIVA-AVILÉS A I, CEN-PUC M. Piezoresistivity, strain, and damage self-sensing of polymer composites filled with carbon nanostructures[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2018, 20(7): 1701159. DOI: 10.1002/adem.201701159
- [66] CHIARELLO M, ZINNO R. Electrical conductivity of self-monitoring CFRC[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2005, 27(4): 463. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2004.09.001
- [67] LI Jiuyang, WANG Zhenwei, GUO Jinpeng, et al. Study on physical and mechanical properties of complex-phase conductive fiber cementitious materials[J]. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2024, 63(1): 20240041. DOI: 10.1515/rams-2024-0041
- [68] SHAH A H, LI Xiao, XU Xiaodong, et al. Evaluation of mechanical and thermal properties of modified epoxy resin by using acacia catechu particles [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2019, 225: 239. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2018.12.063
- [69] 李趁趁, 高丹盈, 黄承逵. 碳纤维与玻璃纤维增强聚合物复合材料耐久性[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2009, 41(2): 150
LI Chenchen, GAO Danying, HUANG Chengkui. Durability of carbon and glass fiber reinforced polymer composites[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2009, 41(2): 150. DOI: 10.3321/j.issn:0367-6234.2009.02.034
- [70] PINTO R, MONASTYRECKIS G, ABOELANIN H M, et al. Mechanical properties of carbon fibre reinforced composites modified with star-shaped butyl methacrylate [J]. *Journal of Composite Materials*, 2022, 56(6): 951. DOI: 10.1177/00219983211065206
- [71] XIN Xue, RONG YU, SU Linping, et al. Dynamic mechanical and chemorheology analysis for the blended epoxy system with polyurethane modified resin[J]. *Journal of Renewable Materials*, 2021, 10(4): 1081. DOI: 10.32604/jrm.2022.018021
- [72] CHENG Yingwen, LU Songtao, ZHANG Hongbo, et al. Synergistic effects from graphene and carbon nanotubes enable flexible and robust electrodes for high-performance supercapacitors [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(8): 4206. DOI: 10.1021/nl301804c
- [73] RAZAQ A, BIBI F, ZHENG Xiaoxiao, et al. Review on graphene-, graphene oxide-, reduced graphene oxide-based flexible composites: from fabrication to applications [J]. *Materials*, 2022, 15(3): 1012. DOI: 10.3390/ma15031012
- [74] JARA A D, BETEMARIAM A, WOLDETINSAE G, et al. Purification, application and current market trend of natural graphite: a review[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019, 29(5): 671. DOI: 10.1016/j.ijmst.2019.04.003
- [75] LUO Ting, WANG Qiang. Effects of graphite on electrically conductive cementitious composite properties: a review[J]. *Materials*, 2021, 14(17): 4798. DOI: 10.3390/ma14174798
- [76] XIN Xue, HUI Junyao, CHEN Lin, et al. Monitoring the internal conditions of road structures by smart sensing and in situ monitoring technology: a review[J]. *Applied Sciences*, 2025, 15(7): 3945. DOI: 10.3390/app15073945
- [77] LI Jialu, CAI Junyi, YU Jianyong, et al. The rising of fiber constructed piezo/triboelectric nanogenerators: from material selections, fabrication techniques to emerging applications [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(44): 2303249. DOI: 10.1002/adfm.202303249
- [78] ZUBAIR U, NADEEM N, ABID H A, et al. Highly resilient carbon nanotubes/poly (vinylidene fluoride) colloidal coated knitted fabrics as proficient sensing and energy harvesting implements [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 666: 131279. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2023.131279
- [79] LIANG Ming, WANG Jianjiang, SU Linping, et al. Versatile lamellar wrap-structured PVDF/PZT/CNTs piezoelectric sensor for road traffic information sensing, monitoring, and energy harvesting [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 497: 154554. DOI: 10.1016/j.cej.2024.154554
- [80] WICHMANN M H G, BUSCHHORN S T, GEHRMANN J, et al. Piezoresistive response of epoxy composites with carbon nanoparticles under tensile load [J]. *Physical Review B*, 2009, 80(24): 245437. DOI: 10.1103/physrevb.80.245437
- [81] SU Linping, XIN Xue, LIANG Ming, et al. Electric field-tunable self-sensing nanocomposites with aligned CNTs for in-situ pavement health monitoring: electrodynamic alignment, sensor development, and performance validation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 481: 148300. DOI: 10.1016/j.cej.2023.148300
- [82] NANKALI M, NOURI N M, NAVIDBAKHS 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. DOI: 10.1039/D0TC00373E
- [83] CHEN Cheng, LIN Kaige, WU Mingming, et al. Micro-Nano Dual-Scale All-Polymer particles for construction of superwetting surface with controllable wettability and Hot-Water-Repellency [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 445: 136810. DOI: 10.1016/j.cej.2022.136810
- [84] GANGINENI P K, GUPTA K B N V S G, PATNAIK S, et al. Recent advancements in interface engineering of carbon fiber reinforced polymer composites and their durability studies at different service temperatures[J]. *Polymer Composites*, 2022, 43(7): 4126. DOI: 10.1002/pc.26716
- [85] XIN Xue, HUI Junyao, CHEN Lin, et al. Monitoring the internal conditions of road structures by smart sensing and in situ monitoring technology: a review[J]. *Applied Sciences*, 2025, 15(7): 3945. DOI: 10.3390/app15073945
- [86] 朱天宜. 聚合物基导电复合材料三维多孔微结构的构建及其压阻传感性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2025
ZHU Tianyi. Construction of three-dimensional porous microstructures of polymer-based conductive composites and their piezoresistive sensing performance [D]. Shanghai: Donghua University, 2025. DOI: 10.27012/d.cnki.gdhuu.2025.000175
- [87] ZHAO Huhu, YAN Shuang, JIN Xianghu, et al. Tough, self-healable and conductive elastomers based on freezing-thawing strategy[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 402: 125421. DOI: 10.1016/j.cej.2020.125421

- [88] LIANG Qizhen, NYUGEN M T, MOON K S, et al. A kinetics study on electrical resistivity transition of in situ polymer aging sensors based on carbon-black-filled epoxy conductive polymeric composites (CPCs) [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2013, 42(6): 1114. DOI: 10.1007/s11664-013-2525-z
- [89] MA Chuanyi, XIN Xue, ZHANG Ning, et al. Encapsulation for sensing element and its application in asphalt road monitoring[J]. *Coatings*, 2023, 13(2): 390. DOI: 10.3390/coatings13020390
- [90] FOUAD N, SAIFELDEEN M A, HUANG Huang, et al. Corrosion monitoring of flexural reinforced concrete members under service loads using distributed long-gauge carbon fiber sensors [J]. *Structural Health Monitoring*, 2018, 17(2): 379. DOI: 10.1177/1475921717698973
- [91] FORINTOS N, CZIGANY T. Multifunctional application of carbon fiber reinforced polymer composites: electrical properties of the reinforcing carbon fibers-A short review [J]. *Composites Part B-Engineering*. 2019, 162: 331. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.10.098
- [92] 尹锡军. 船桥碰撞及桥墩防撞设施研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2009
YIN Xijun. Study on Funabashi collisions and anti-collision bridge pier facilities[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2009
- [93] 郑乔锋. 场致隧道效应材料在结构健康监测中的应用研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019
ZHENG Qiaofeng. The application of field assisted quantum tunneling enabled composites to structural health monitoring [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. DOI:10.26991/d.cnki.gdllu.2019.001423
- [94] SOL-SÁNCHEZ M, CASTILLO-MINGORANCE J M, MORENO-NAVARRO F, et al. Piezoelectric-sensored sustainable pads for smart railway traffic and track state monitoring: full-scale laboratory tests [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 301: 124324. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124324
- [95] 张永芳, 文镜茜, 董丽虹, 等. 基于碳纳米管及其复合材料的柔性应变传感器研究进展 [J]. *材料导报*. 2024, 38(14): 66
ZHANG Yongfang, WEN Jingqian, DONG Lihong, et al. Research progress of high performance strain sensors based on carbon nanotubes and their composite [J]. *Materials Reports*, 2024, 38(14): 66. DOI: 10.11896/cldb.23050046
- [96] AFZAL A, KAUSAR A, SIDDIQ M. Role of polymeric composite in civil engineering applications: a review [J]. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2020, 59(10): 1023. DOI: 10.1080/25740881.2020.1719141
- [97] BIRGIN H B, LAFLAMME S, D'ALESSANDRO A, et al. A weigh-in-motion characterization algorithm for smart pavements based on conductive cementitious materials [J]. *Sensors*, 2020, 20(3): 659. DOI: 10.3390/s20030659
- [98] WANG Yizhe, LUO Ruifa, YANG Xiaoguang. Urban traffic state sensing and analysis based on ETC data: a survey [J]. *Applied Sciences*, 2025, 15(12): 6863. DOI: 10.3390/app15126863
- [99] BIRGIN H B, D'ALESSANDRO A, CORRADINI A, et al. Self-sensing asphalt composite with carbon microfibers for smart weigh-in-motion [J]. *Materials and Structures*, 2022, 55(5): 138. DOI: 10.1617/s11527-022-01978-w
- [100] DARDER M, ARANDA P, RUIZ-GARCÍA C, et al. The meeting point of carbonaceous materials and clays: toward a new generation of functional composites [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(27): 1704323. DOI: 10.1002/adfm.201704323
- [101] BORKE BIRGIN H, D'ALESSANDRO A, FAVARO M, et al. Field investigation of novel self-sensing asphalt pavement for weigh-in-motion sensing [J]. *Smart Materials and Structures*, 2022, 31(8): 085004. DOI: 10.1088/1361-665X/ac7922
- [102] SARKAR M, KWEON O, KIM B I, et al. Synergizing autonomous and traditional vehicles: a systematic review of advances and challenges in traffic flow management with signalized intersections [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2024, 25(12): 19203. DOI: 10.1109/TITS.2024.3450471
- [103] LIANG Ming, WANG Jianjiang, SU Linping, et al. Versatile lamellar wrap-structured PVDF/PZT/CNTs piezoelectric sensor for road traffic information sensing, monitoring, and energy harvesting [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 497: 154554. DOI: 10.1016/j.cej.2024.154554

(编辑 张红)