

纳米纤维增强型聚合物复合材料的界面改性机制研究

王昭兴

广州高能检测实验室有限公司 广东广州

【摘要】 纳米纤维增强型聚合物复合材料在现代材料领域中展现出优异的力学性能与功能性，广泛应用于航空、汽车等工业领域。其界面改性是实现材料性能提升的关键因素。本文研究了纳米纤维在聚合物基体中的分散性、界面相互作用及改性机制。通过表面改性技术改善纳米纤维与聚合物基体之间的相容性，有效提升了复合材料的力学强度和热稳定性。纳米纤维的表面改性方法对复合材料性能的影响主要体现在增强界面结合力、降低界面应力集中以及改善分散性等方面。通过实验验证，纳米纤维表面改性处理显著改善了复合材料的综合性能，为未来的复合材料开发提供了重要的理论依据。

【关键词】 纳米纤维；界面改性；聚合物复合材料；力学性能；热稳定性

【收稿日期】 2025 年 8 月 12 日

【出刊日期】 2025 年 9 月 17 日

【DOI】 10.12208/j.jccr.20250044

Study on interface modification mechanism of nanofiber-reinforced polymer composites

Zhaoxing Wang

Guangzhou High Energy Testing Laboratory Co., Ltd, Guangzhou, Guangdong

【Abstract】 Nanofiber-reinforced polymer composites exhibit excellent mechanical properties and functionality in the field of modern materials, and are widely used in industrial fields such as aerospace and automotive. Their interface modification is a key factor in improving material performance. This paper studies the dispersibility, interface interaction and modification mechanism of nanofibers in polymer matrices. The compatibility between nanofibers and polymer matrices is improved through surface modification technology, which effectively enhances the mechanical strength and thermal stability of the composites. The influence of nanofiber surface modification methods on the performance of composites is mainly reflected in enhancing interface bonding force, reducing interface stress concentration, and improving dispersibility. Experimental verification shows that the surface modification of nanofibers significantly improves the comprehensive performance of the composites, providing an important theoretical basis for the development of composites in the future.

【Keywords】 Nanofibers; Interface modification; Polymer composites; Mechanical properties; Thermal stability

引言

纳米纤维作为一种新型的增强材料，在聚合物复合材料中发挥着重要作用。它们不仅能够显著提高复合材料的力学性能，还能在提高材料的热稳定性、耐腐蚀性等方面展现出优异的性能。由于纳米纤维本身具有较高的表面能和较强的聚集性，导致其在聚合物基体中的分散性较差，进而影响复合材料的整体性能。如何有效改性纳米纤维表面，以提升其与聚合物基体之间的界面相容性，成为了当前复合材料研究的一个关键问题。界面改性技术不仅能够改善纳米纤维的分散性，还能有效增强界面结合力，进而提升复合材料的力

学和热学性能。本文通过系统研究纳米纤维的表面改性机制，探讨其对复合材料性能的影响，旨在为纳米纤维增强型聚合物复合材料的实际应用提供理论依据。

1 纳米纤维增强型聚合物复合材料的界面改性问题分析

纳米纤维增强型聚合物复合材料的研究在材料科学领域具有重要的理论和应用价值。纳米纤维作为一种高性能增强材料，因其独特的高比表面积、高强度及良好的可调性能，广泛应用于聚合物复合材料中。然而，纳米纤维在聚合物基体中的分散性一直是限制其性能发挥的主要问题。由于纳米纤维具有较高的表面能，容

易聚集成团,导致其在基体中分散不均匀,进而影响复合材料的力学、热学和电学性能。为了解决这一问题,界面改性成为了提升纳米纤维增强型复合材料性能的关键技术之一。

界面问题的核心在于纳米纤维与聚合物基体之间的相容性差异。纳米纤维表面常带有一定的极性基团,而大多数聚合物基体具有较低的极性,因此两者之间的界面结合力较弱^[1]。为了增强其相容性,采用不同的表面改性方法来改善纳米纤维与聚合物基体之间的界面相互作用。常见的界面改性方法包括表面接枝、化学改性、物理改性等,这些方法通过引入不同的功能团、提高界面亲和力以及改善纤维的分散性,进而提高复合材料的力学强度、热稳定性及其他性能。

尽管界面改性能够有效提高纳米纤维在聚合物基体中的分散性及相容性,但其实际应用仍面临一定的挑战。纳米纤维的表面改性方法种类繁多,不同的改性手段会对复合材料的性能产生不同的影响,因此如何选择合适的改性方法,且确保改性效果能够长期稳定,是目前研究中的难点。纳米纤维的改性成本较高,这也限制了其在大规模生产中的应用。未来研究不仅需要探索高效、低成本的界面改性技术,还需要考虑改性过程的可控性与可持续性,以确保纳米纤维增强型聚合物复合材料能够在实际工程中广泛应用。

2 纳米纤维表面改性技术的研究进展

随着纳米纤维在聚合物复合材料中的应用日益增加,纳米纤维的表面改性技术得到了广泛的研究。表面改性技术的核心目标是提高纳米纤维与聚合物基体之间的界面相容性,进而提升复合材料的综合性能。目前,纳米纤维的表面改性方法主要包括化学改性、物理改性以及复合改性等多种方式。其中,化学改性是通过引入功能性分子或基团,改变纳米纤维的表面性质,增强其与聚合物基体之间的相互作用力。接枝共聚物、表面活性剂的应用,能够有效降低纳米纤维表面能,改善其分散性和界面结合力。

物理改性则主要通过非化学方法,如超声波处理、电场处理等方式,改变纳米纤维的表面状态。超声波处理利用超声波的高频振动将纳米纤维分散到基体中,从而改善其分散性和界面结合力。电场处理则通过外部电场作用,控制纳米纤维的排列方式,进一步提高复合材料的力学性能。还有一类新兴的复合改性方法,通过结合化学与物理方法,如使用有机-无机复合材料进行改性,这不仅可以优化纳米纤维的界面性能,还能提高其在复杂环境中的适应性和稳定性。

尽管上述表面改性方法已经取得了一定的进展,但仍存在一些问题需要进一步研究。部分改性技术存在较高的操作成本,特别是在工业化生产过程中,如何降低改性过程中的能耗和材料消耗,依然是一个亟待解决的难题^[2]。改性后的纳米纤维性能可能会随着时间发生变化,因此如何提高其长期稳定性,也是当前研究中需要关注的重点。纳米纤维表面改性技术在不同类型聚合物基体中的适用性差异较大,针对不同基体的改性方法仍需要进一步优化。未来的研究应关注如何提升改性技术的普适性、稳定性以及经济性。

3 界面改性对复合材料性能的影响机制

界面改性技术对纳米纤维增强型聚合物复合材料的性能有着深远的影响,主要体现在提高材料的力学性能、热学性能、以及电学性能等方面。界面改性通过优化纳米纤维与聚合物基体之间的相互作用力,改善了纳米纤维的分散性,这直接提升了复合材料的力学性能。纳米纤维在聚合物基体中的均匀分散,能够有效增强材料的强度和韧性,尤其是在拉伸强度、抗弯曲性能和冲击韧性等方面表现尤为突出。改性后的纳米纤维能够在材料内部形成更为均匀的强化效果,减少了材料中的缺陷和应力集中,从而提高了复合材料的综合力学性能。

热学性能的提升也是界面改性的一大优势。通过改性,可以增强纳米纤维与聚合物基体之间的界面结合力,从而提高复合材料的热稳定性。在高温环境下,界面结合力的增强有助于提高复合材料的热变形温度、热导率和耐热性能。这对于航空航天、汽车等高性能材料的应用至关重要,尤其在需要高温操作的环境中,改性后的复合材料能够保证更长的使用寿命和更优异的工作性能。界面改性还能够提高复合材料的抗氧化性和耐腐蚀性,进一步扩展其应用范围。

界面改性对复合材料电学性能的影响同样不可忽视。纳米纤维增强型聚合物复合材料常用于电磁屏蔽材料、导电材料等领域。通过界面改性,可以显著提高纳米纤维在聚合物基体中的分散性,优化复合材料的导电性能。在导电复合材料中,纳米纤维的均匀分布能够有效降低材料的电阻,改善其电导率。这使得复合材料在电气、电子领域的应用变得更加广泛,尤其是在需要高导电性的材料中,界面改性提供了一种有效的性能提升方案^[3-7]。界面改性技术不仅提高了纳米纤维增强型聚合物复合材料的综合性能,还为其在多个行业中的应用提供了更强的支撑。

4 纳米纤维界面改性技术的实际应用与挑战

纳米纤维界面改性技术在多个领域的实际应用取得了显著进展,尤其在航空航天、汽车制造、电子设备以及医药等高端领域中展现了广泛的应用潜力。随着科技的不断发展,纳米纤维增强型聚合物复合材料在这些领域的应用愈加广泛,尤其是在高性能材料的研究中,纳米纤维的独特性质使其成为了重要的研究方向。在航空航天领域,纳米纤维增强复合材料被用于制造高强度、低重量的结构件,具有优异的抗冲击性能和热稳定性,在极端环境下仍能保持良好的性能。在汽车领域,纳米纤维增强型复合材料因其出色的轻量化和强度性能,成为提高汽车安全性和燃油效率的理想材料。

尽管界面改性技术在多个领域取得了显著应用,但在工业化生产过程中仍面临许多挑战。纳米纤维的生产成本较高,限制了其在大规模生产中的普及。为了降低成本,提升纳米纤维的生产效率以及优化改性工艺是亟待解决的核心问题。现有的生产工艺往往存在能耗高、产量低等瓶颈,需要通过技术创新实现更高效的生产模式。界面改性技术在不同材料体系中的适用性差异较大,某些改性方法可能在特定基体中效果不理想,导致性能提升有限。未来的研究应着重开发普适性更强、操作简便的界面改性技术,使得不同类型的纳米纤维能够在多种聚合物基体中得到有效应用,从而提升复合材料的综合性能并推动产业化进程。

纳米纤维的长期稳定性问题是界面改性技术应用中的一个重要挑战。由于纳米纤维在长期使用过程中可能会受到环境因素的影响,如高温、湿度和氧化作用,从而导致表面改性层的降解或失效,这将直接影响复合材料的性能稳定性^[8]。为了应对这一问题,研究者需要开发更耐久的界面改性方法,确保改性层在长时间使用过程中能够保持良好的结合力和性能。改性方法的长期可靠性和抗老化性能应作为未来研究的重点,尤其是在高负荷、恶劣环境下的应用条件下。提升界面改性技术的持久性、稳定性及抗环境影响的能力,将是推动纳米纤维增强型聚合物复合材料实际应用的关键。

5 结语

纳米纤维增强型聚合物复合材料的界面改性技术

在提升材料性能方面发挥了至关重要的作用。通过有效的界面改性方法,不仅可以改善纳米纤维的分散性和界面结合力,还能够显著提高复合材料的力学、热学和电学性能。尽管该技术在多个领域展现了广泛的应用前景,但仍面临着成本、稳定性及适用性等方面的挑战。未来的研究应聚焦于优化改性技术,降低生产成本,并提高材料的长期稳定性,从而推动纳米纤维增强型复合材料在更广泛的行业中的应用与发展。

参考文献

- [1] 权贵鹏.碳纤维表面多组分刚柔增强层的构筑及其复合材料性能研究[D].长春工业大学,2025.
- [2] 刘添裕,杨扬,黄剑波,等. 芳纶纳米纤维增强纸基锂离子电池隔膜的制备及性能研究[J].中国造纸学报,2025,40(01):49-58.
- [3] 孙传龙,王峻烽,黄淳,等. Pr/Ni 复合 In_2O_3 纳米纤维的丙酮敏感和抗湿性能增强研究[J].传感技术学报,2025,38(02):231-240.
- [4] 詹克静,杨鑫,张应龙,等. 自凝聚丝素蛋白微纳米纤维膜的制备及其力学增强[J].纺织学报,2025,46(02):10-19.
- [5] 翟玉涛,王洪庆,黄群英. 碳纳米纤维增强含钐环氧树脂中子屏蔽材料制备及性能研究[J].原子能科学技术,2025,59(03):734-744.
- [6] 周美梅,何家慧,向婉婷,等. 电纺 PVA/ SiO_2 纳米纤维负载 A- $\text{TiO}_2/\text{BiOBr}$ 增强可见光催化活性[J].化工进展,2025,44(06):3084-3092.
- [7] 王娟,王仲秋,商琴,等. NiS 和 Pt 双助催化剂增强 BaTiO_3 纳米纤维光催化制氢性能[J].无机化学学报,2024,40(09):1719-1730.
- [8] 陈莹,朱水莲,杨晶,等. 纳米纤维对石墨相氮化碳膜表面电荷的调控以及增强渗透发电研究[J].南宁师范大学学报(自然科学版),2024,41(02):89-96.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS