

石墨烯增强聚合物复合材料的界面优化与力学性能预测

王 伟

山东万盛新材料有限公司 山东潍坊

【摘要】 石墨烯增强聚合物复合材料因其卓越的力学性能和多功能性，在航空航天、汽车工业等领域得到广泛应用。然而，复合材料的力学性能与界面结构密切相关。本文探讨了石墨烯增强聚合物复合材料的界面优化方法，并基于数值仿真与实验数据对其力学性能进行了预测。通过调节石墨烯与聚合物基体的界面结合强度，可以显著提高复合材料的综合力学性能。进一步的实验验证了理论预测的可靠性，表明界面优化为提升材料性能提供了可行的路径。

【关键词】 石墨烯；聚合物复合材料；界面优化；力学性能；数值仿真

【收稿日期】 2025 年 8 月 17 日

【出刊日期】 2025 年 9 月 20 日

【DOI】 10.12208/j.jccr.20250070

Interface optimization and mechanical properties prediction of graphene-reinforced polymer composites

Wei Wang

Shandong Wansheng New Materials Co., Ltd., Weifang, Shandong

【Abstract】 Graphene-reinforced polymer composites have been widely used in fields such as aerospace and automotive industries due to their excellent mechanical properties and multifunctionality. However, the mechanical properties of these composites are closely related to the interface structure. This paper investigates interface optimization methods for graphene-reinforced polymer composites and predicts their mechanical properties based on numerical simulations and experimental data. By adjusting the interfacial bonding strength between graphene and the polymer matrix, the overall mechanical performance of the composite can be significantly enhanced. Further experiments verify the reliability of the theoretical predictions, indicating that interface optimization provides a feasible approach to improving material performance.

【Keywords】 Graphene; Polymer composites; Interface optimization; Mechanical properties; Numerical simulation

引言

石墨烯作为一种二维材料，因其独特的物理化学性质，成为近年来研究的热点，尤其在增强复合材料方面展现了巨大的应用潜力。石墨烯增强聚合物复合材料因其优异的力学性能，如高强度、高导热性和良好的电导性，受到广泛关注。复合材料的性能不仅依赖于石墨烯本身的特性，还与其与基体材料的界面结合密切相关。优化界面结构，增强石墨烯与聚合物基体之间的粘结力，成为提高复合材料整体性能的关键。本文通过系统的实验研究和数值模拟，探讨了界面优化对力学性能的影响，并预测了不同界面处理方法下材料的力学响应，为复合材料的设计与应用提供理论依据和实践指导。

1 石墨烯与聚合物基体的界面问题分析

石墨烯增强聚合物复合材料的性能与其界面结构密切相关。尽管石墨烯具有高强度、良好的导电性和导热性等优良特性，但在复合材料中，石墨烯与聚合物基体之间的界面结合力通常较弱，限制了复合材料性能的进一步提升。界面问题主要表现为石墨烯的分散性差和界面结合力不足，导致复合材料在加载下容易出现脱层、断裂等问题，从而影响其力学性能。在实际应用中，石墨烯的分散性和均匀性对复合材料的性能至关重要，因此界面优化成为提升材料力学性能的关键。

界面问题的根源之一是石墨烯的亲水性与聚合物基体的亲油性之间的差异，这使得两者之间的界面结合力较弱。石墨烯的表面容易吸附水分和杂质，而聚合物基体通常具有较强的疏水性，导致二者之间的结合力差^[1]。石墨烯的单层结构使其表面能较高，容易聚集

或团聚,这会导致在复合材料中石墨烯的分散不均,进一步影响界面结合。解决界面问题成为提升石墨烯增强聚合物复合材料性能的首要任务。

界面优化的关键在于通过改性石墨烯的表面,增强其与聚合物基体的相容性,从而提高两者之间的界面结合力。化学改性、物理改性和复合改性是常见的优化方法。化学改性可以通过引入不同的功能基团,如羧基、氨基等,来增强石墨烯表面的亲水性或亲油性,从而改善其与聚合物基体的相容性^[2]。物理改性则通过超声分散、球磨等手段,改变石墨烯的分散状态,避免其团聚,提高分散均匀性。复合改性结合了化学和物理手段,能够在多个方面优化界面性能。通过这些方法的组合,可以有效提升石墨烯增强聚合物复合材料的力学性能,为实际应用提供更可靠的材料设计方案。

2 石墨烯增强聚合物复合材料的界面优化方法

石墨烯与聚合物基体的界面优化已成为提升复合材料性能的一个重要研究方向。为了克服界面结合力弱的问题,学者们提出了多种优化方法。化学改性是一种常见的优化手段,通过引入功能基团,如羧基、氨基、羟基等,来增加石墨烯的表面活性和与聚合物基体的相容性。通过化学修饰,石墨烯表面可以形成稳定的亲水性或亲油性结构,从而有效改善石墨烯的分散性,并增强其与基体的相互作用力。比如,使用氧化石墨烯或还原石墨烯进行改性,可显著提升石墨烯的界面结合力,从而提高复合材料的整体性能。

物理改性作为石墨烯增强聚合物复合材料界面优化的一种重要手段,通过改变石墨烯的表面状态或分散方式,能够显著改善其与聚合物基体的结合力。超声波分散和球磨技术是常用的物理方法,通过这些手段可以有效打破石墨烯团聚现象,使其在聚合物基体中更加均匀地分布,从而避免因团聚导致的性能不均匀。均匀分散的石墨烯能够更好地与聚合物基体形成稳定的界面,提高复合材料的力学性能,如增强材料的强度、韧性和抗疲劳性能^[3]。除此之外,热处理和紫外光照射等物理方法也能对石墨烯进行改性,改善其表面特性和界面结合力。热处理能够去除石墨烯表面的氧化层,提升其与聚合物的相容性,而紫外光照射则可用于改变石墨烯表面的化学结构,从而进一步优化界面性能。通过这些物理改性方法,复合材料的力学稳定性和长期耐用性得到有效提高。

复合改性方法结合了化学和物理改性手段,旨在从多个方面提升石墨烯与聚合物基体的界面结合力。通过联合使用表面活性剂、功能化石墨烯和其他改性

剂,可以在界面上形成稳定的结合结构,增强石墨烯的分散性和与聚合物的相容性。这种方法的优势在于可以在不同的条件下优化界面特性,进而提高复合材料的力学性能。复合改性还能够改善石墨烯的功能性,赋予材料更多的附加特性,如抗氧化性、抗腐蚀性等,进一步拓展了石墨烯增强复合材料的应用领域。

3 界面优化对复合材料力学性能的影响

界面优化直接影响石墨烯增强聚合物复合材料的力学性能,尤其是材料的强度、韧性和刚性。通过优化界面结合力,可以显著提高复合材料的力学响应。改善石墨烯与聚合物基体之间的界面结合力能够有效增强复合材料的拉伸强度和抗压强度。在拉伸试验中,优化后的复合材料显示出更高的断裂强度和延伸率,表明界面优化有助于提高材料的抗断裂性能。界面优化还能够增强复合材料的抗弯性能,使其在高负载条件下具有更好的力学稳定性。

韧性是石墨烯增强聚合物复合材料的另一个关键力学性能,尤其在实际应用中,复合材料常常暴露在复杂的外力环境中,如冲击、振动和载荷变化。优化石墨烯与聚合物基体的界面结合力,是提高复合材料韧性的有效手段。通过改善界面结合力,可以减少界面区域的应力集中,进而避免裂纹的初生和扩展。通过表面改性技术,能够提高石墨烯与聚合物基体之间的相容性,增强两者的界面结合力,这使得复合材料在受到外部冲击时,能更好地分散能量,减少局部的应力集中,从而有效提高韧性^[4-7]。界面优化还对材料的耐疲劳性能有显著影响。在长期使用过程中,复合材料往往面临反复加载的情况,界面优化能够减少因加载导致的裂纹扩展,有效延长材料的使用寿命,减缓疲劳损伤的积累。界面优化不仅能提升材料的冲击韧性,还能增强其长期耐久性,确保复合材料在实际工程中的稳定性与可靠性。

除了增强强度和韧性,界面优化还对复合材料的导电性和热导性产生影响。由于石墨烯具有优异的导电性和热导性,优化界面能够促进石墨烯的导电性能在复合材料中的传递,进而提升复合材料的导电性能和热导性能。界面优化后,石墨烯的电子传导效率得到提高,使得复合材料在电气和热管理领域的应用潜力得到进一步提升。综合来看,界面优化能够全方位地提升石墨烯增强聚合物复合材料的力学性能,为其在实际应用中的性能表现提供了保障。

4 基于数值仿真与实验验证的力学性能预测

在石墨烯增强聚合物复合材料的研究中,数值仿

真与实验验证的结合为力学性能预测提供了科学依据。数值仿真作为一种高效的模拟手段,可以帮助研究人员在不进行大量实验的情况下,预测复合材料在不同加载条件下的力学响应。通过有限元分析等数值计算方法,可以模拟石墨烯与聚合物基体之间的界面结合情况,并预测复合材料的力学性能。数值仿真不仅能够提高预测的准确性,还能够通过调节不同参数来优化材料的设计,从而降低实验成本和时间。通过数值仿真,研究人员可以在设计阶段对不同的界面优化策略进行评估,进而为实际制造提供理论依据,避免在实验阶段出现不必要的资源浪费,从而加速新材料的研发进程。

实验验证是对数值仿真结果的有力支持。通过一系列的力学测试,如拉伸试验、压缩试验、弯曲试验等,可以验证不同界面优化方法对力学性能的影响。通过实验数据与数值仿真结果的对比,能够进一步确认界面优化对复合材料力学性能的实际效果。实验结果还可以为数值模型的修正提供依据,使得预测结果更加接近实际应用中的表现。实验验证的另一个重要作用是发现仿真模型中的假设或参数选择可能存在的问题,从而优化仿真过程。比如在实验过程中,复合材料的不同物理特性、不同加载模式等可能会影响仿真结果的准确性,通过实验可以不断调整仿真模型,使其更具实用价值。

基于数值仿真与实验验证的力学性能预测,不仅能够为复合材料的设计提供指导,还能为实际工程应用提供理论依据。通过精确预测复合材料在各种工作条件下的表现,可以确保其在应用中的可靠性与稳定性。数值仿真与实验验证相结合的研究方法,为石墨烯增强聚合物复合材料的优化设计和性能提升提供了有力支持,并为相关领域的技术发展奠定了基础^[8]。此类方法能够确保新材料在不同环境和负载条件下的适应性与稳定性,进一步推动复合材料在航空、汽车等领域的广泛应用。在未来的研究中,随着计算能力的提升和实验技术的发展,数值仿真与实验验证的结合将为复合材料的性能预测和设计提供更加精确的依据。

5 结语

石墨烯增强聚合物复合材料因其优异的力学性能和广泛的应用前景,成为研究的热点。通过优化界面结构,尤其是利用化学改性、物理改性等方法,可以显著提升石墨烯与聚合物基体的结合力,从而改善材料的力学性能、韧性和稳定性。数值仿真与实验验证相结合,为材料的设计与优化提供了可靠的理论依据与实践支持。未来,随着界面优化技术的不断发展,石墨烯增强聚合物复合材料将在各个领域展现出更大的应用潜力,尤其是在航空航天、汽车等高性能领域的应用前景广阔。

参考文献

- [1] 刘贝贝,李正涛. 阳离子聚合物改性氧化石墨烯对水泥基复合材料性能的影响[J].无机盐工业,2025,57(07):80-86.
- [2] 陈慧,杨旭. 石墨烯及其复合材料电磁辐射防护性能研究进展[J].塑料科技,2025,53(06):177-182.
- [3] 吕闯,余梦,吴鹏. 石墨烯及其复合材料导热性能研究[J].化工管理,2025,(16):145-148.
- [4] 牛璐阳.石墨烯泡沫复合材料的制备与热管理应用研究[D].郑州航空工业管理学院,2025.
- [5] 葛畅,田潇,程有亮,等. 二维纳米片/聚合物高阻隔复合材料研究进展[J].包装工程,2025,46(07):34-43.
- [6] 刘小雅,杨伏生. 阻燃聚合物复合材料研究进展[J/OL].材料导报,1-24[2025-09-12].
- [7] 李玉峰,刘丽爽,赵阳,等. 氮磷石墨烯的制备及在聚合物中的应用进展[J].塑料,2024,53(04):50-54+110.
- [8] 黄晓玲,基于两亲纳米氧化石墨烯_聚合物的耐温抗盐驱油体系构建及机理研究.内蒙古自治区,内蒙古大学,2024-07-30.

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