

碳纳米管增强水泥基材料力学性能研究

李兴焱*, 张晓东

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2025年3月4日; 录用日期: 2025年4月3日; 发布日期: 2025年4月14日

摘要

碳纳米管(CNTs)因其独特的结构特性和卓越的力学、电学及热学性能,在材料科学领域受到了广泛关注,将碳纳米管添加到水泥基材料中,可以显著提升这些材料的抗压强度、抗折强度和耐久性。该篇综述旨在综合评述碳纳米管在增强水泥基材料力学性能方面的研究进展,包括关键发现和创新成果。同时,探讨了碳纳米管在水泥基材料中的分散性问题,及其对材料力学性能的影响,以及国内外在该领域的研究现状。鉴于碳纳米管在水泥基体中的有效分散仍是一个挑战,还分析了多尺度的重要性、新型分散技术的开发以及复合掺合物的研究,并预测未来的研究方向将聚焦于提升碳纳米管的生产工艺、功能化研究、耐久性研究以及创新应用的探索。这些研究有望使碳纳米管在提升水泥基材料力学性能方面发挥更加重要的作用,进而推动建筑材料科学的进步与发展。

关键词

碳纳米管, 水泥基复合材料, 力学性能, 分散技术

Study on the Mechanical Properties of Cement-Based Materials Enhanced by Carbon Nanotubes

Xingyan Li*, Xiaodong Zhang

School of Civil Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: Mar. 4th, 2025; accepted: Apr. 3rd, 2025; published: Apr. 14th, 2025

Abstract

Carbon nanotubes (CNTs) have attracted extensive attention in the field of materials science due to

*通讯作者。

their unique structural properties and excellent mechanical, electrical and thermal properties, and the addition of carbon nanotubes to cement-based materials can significantly improve the compressive strength, flexural strength and durability of these materials. The purpose of this review is to comprehensively review the research progress of carbon nanotubes in enhancing the mechanical properties of cement-based materials, including key findings and innovations. At the same time, the dispersion of carbon nanotubes in cement-based materials, their influence on the mechanical properties of materials, and the research status in this field at home and abroad are discussed. In view of the fact that the effective dispersion of carbon nanotubes in cement matrices is still a challenge, the importance of multi-scale, the development of new dispersion technologies and the research of composite admixtures are analyzed, and it is predicted that the future research direction will focus on improving the production process of carbon nanotubes, functionalization research, durability research and exploration of innovative applications. These studies are expected to make carbon nanotubes play a more important role in improving the mechanical properties of cement-based materials, and then promote the progress and development of building materials science.

Keywords

Carbon Nanotubes, Cementitious Composites, Mechanical Properties, Dispersion Technology

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

在材料科学领域，碳纳米管有独特的一维纳米结构和卓越的力学、电学及热学性能，作为纳米材料在微观层面展现出的优异性能[1]，使得在宏观应用中，尤其是在作为增强剂应用于水泥基复合材料时，显示出巨大的潜力[2]。

在水泥基材料领域，碳纳米管的应用已经实现了从最初的物理混合阶段的超越[3]。目前研究重点是不同尺度上的相互作用，以及性能的全面提升。从宏观延伸到纳米级别，表现出碳纳米管与水泥基体之间的相互作用，对于水泥基复合材料的力学行为有很重要的作用。碳纳米管在材料中的分散状态、与基体的界面结合程度和分布均匀性，被认为是决定其性能表现的核心要素[4]。

碳纳米管提高了水泥基材料的强度和韧性，为材料增加自感应和自修复等重要功能，而且为材料在现代建筑领域的应用中创造了新的可能性。然而碳纳米管的分散、与水泥的相容和成本效益分析，一直都是目前研究亟待克服的障碍。碳纳米管对环境和人体健康的潜在影响，今后也应该考虑和评估。

未来的研究方向，需要深入探索碳纳米管与水泥基材料的相互作用机制，开发更有效的分散和复合技术，评估在实际应用中的性能和安全性。本文总结了碳纳米管增强水泥基材料力学性能的研究背景、国内外研究现状和在此方向的创新点，和未来的研究方向，为今后该领域的研究提供了全面的方向，促进了碳纳米管在水泥基材料中应用的深入理解和进一步的研究。

2. 碳纳米管的基本性质

碳纳米管是一维纳米材料，是材料科学领域重点研究对象。作为特殊碳形态，有独特蜂窝状纳米级中空结构，内部碳原子经 sp₂ 杂化构成稳定共价键网络。从管壁数量角度分析，碳纳米管可划分成单壁和多壁两类。依据结构特征，又能细分为扶手椅型、锯齿型和螺旋型三种构型，螺旋型碳纳米管具有手性特征，而扶手椅型和锯齿型碳纳米管并无此手性特征。碳纳米管有卓越的力学性能、优异的电导性能、

出色的热导率、良好的化学稳定性以及强大的吸附能力，这些性质使碳纳米管在材料科学、电子器件、能源存储和转换、以及生物医学等多个领域展现出广泛的应用潜力，见表 1：

Table 1. Principle table of carbon nanotube properties
表 1. 碳纳米管性质原理表

性质	原理	参考文献
力学性能	高强度共价键构成的管状结构、高长径比以及与基体材料的有效界面相互作用。	[5]
导电性能	碳纳米管由石墨烯片卷成的空心圆柱体，使得碳纳米管具有独特的导电性能。碳纳米管内部的碳原子键合形式为 sp^2 和 sp^3 ，因为卷起动作重新混合了 π 和 σ 轨道，形成了一定曲率的网格结构，所以对碳纳米管的导电性能有重要影响。	[6]
热导性能	复合材料中通过增强界面热导和形成有效的热传导路径，提升材料的整体热导率，受到碳纳米管与基体间的界面热导。	[7]-[9]
化学性质	能够在表面和内部进行化学反应，形成新的结构和材料，通过内部结构改变形成的“纳米芽”。	[10] [11]
吸附性能	基于独特的结构特性，高比表面积和多孔性，以及通过掺杂过渡金属原子（如 Fe、Co、Ni、Cu）来调节电子性质，增强对特定分子的吸附能力和催化活性。	[12] [13]

3. 碳纳米管在水泥基材料中应用

碳纳米管在水泥基材料中应用主要是提高材料的力学性能、耐久性和功能性，研究者们也在探索更有效的碳纳米管分散方法，使碳纳米管在水泥基材料中均匀分散的同时，考虑到环境和健康的影响。

3.1. 碳纳米管的分散性

碳纳米管之间存在强范德华力，而且倾向于聚集成束，不易分散，导致不能完全发挥作用。因此，在制备碳纳米管增强水泥基材料力学性能之前，首先需要提高碳纳米管在水泥基材料中的分散性[14]。

在水泥基材料中，纳米材料的分散技术是多种多样的，目的都是提升复合材料中各组分的均匀性与稳定性，来增强材料的综合性能，其中碳纳米管通过在水泥基体中的均匀分布，减少团聚现象，来优化材料的力学、耐久性和功能性。物理分散方法如超声、机械搅拌和球磨，分别利用超声波空化效应、剪切力和研磨介质的碰撞摩擦来分散碳纳米管，其中超声分散适用于多种溶剂和碳纳米管类型，但长时间高功率处理可能损伤碳纳米管结构；机械搅拌操作简单、成本低，但对于高长径比的碳纳米管分散效果有限；球磨法适用于大规模生产，但可能导致碳纳米管切断，降低其长径比。化学分散方法包括表面活性剂法和共价修饰法，前者通过吸附降低碳纳米管表面能，操作简单，但过量表面活性剂可能影响材料性能；后者通过化学反应改变表面性质，提高分散性，但可能改变碳纳米管的本征性质。选择分散方法时，需综合考虑应用需求、碳纳米管特性、材料配方及制备工艺等因素。单壁碳纳米管因具有更高的长径比、更好的导电导热性能以及优异的力学性能，适用于对性能要求较高的电子器件、传感器和高性能复合材料等领域；多壁碳纳米管因良好的机械稳定性和相对较低的成本，在增强复合材料、导电油墨和一些结构材料的应用中更有优势。

好的分散技术可以让研究者充分发挥碳纳米管在水泥基材料中的增强作用，可以显著提高材料的力学性能、耐久性和功能性[15]-[17]。碳纳米管在溶剂和聚合物基质中的分散很重要。Youn Kim 等人[18]研究表明，使用聚乙烯吡咯烷酮作为分散剂时，碳纳米管分散稳定性优于脱氧胆酸钠和十二烷基苯磺酸钠的分散剂。所以选择合适的分散剂，能优化碳纳米管在水泥基材料中的应用。除却超声、机械搅拌以及球磨等传统方法之外，近年来，微波辅助分散与等离子体处理等新兴技术也取得了引人注目的进展。微波辅助分散运用微波加热的方式，促使碳纳米管在溶剂中迅速分散开来，能够切实有效地减少团聚现

象, 提升分散效率, 适用于对温度较为敏感的聚合物体系。等离子体处理则借助高能粒子对碳纳米管表面进行轰击, 以此改变表面化学性质, 增强亲水性, 进而提升碳纳米管在水性体系中的分散性能。此方法具备环境友好的特性, 且处理耗时较短。

碳纳米管分散性可以通过一些仪器进行表征, 表征方法包括激光粒度分析、扫描电镜(SEM)、原子力显微镜(AFM)和透射电子显微镜(HR-TEM), 可以分析粒径分布和单根碳纳米管的分散情况。与原始状态相比, 分散后的碳纳米管表现为游离单根增多, 曲率减小, 团聚体明显减少, 弯曲缠绕程度降低[19], 如图 1 所示:

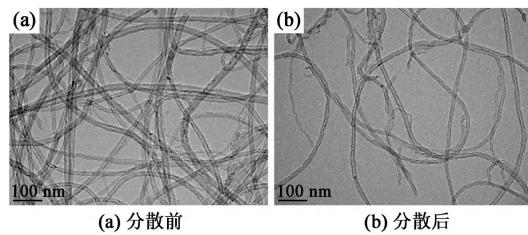


Figure 1. TEM diagram of carbon nanotubes before and after dispersion [19]

图 1. 分散前后碳纳米管 TEM 图[19]

在表征方式层面, 激光粒度分析与 Zeta 电位分析, 已然成为评定碳纳米管分散成效的关键方法。激光粒度分析可精准测定碳纳米管的粒径分布状况, 对分散工艺参数的优化大有裨益。而 Zeta 电位分析, 则是借由对碳纳米管表面电荷的测量, 来评估溶液里的稳定程度, 进而为表面活性剂或者分散剂的选用及应用提供指引。

3.2. 水泥基材料力学性能

碳纳米管对水泥基材料的抗压强度和抗折强度有显著的提升作用, 而不同直径和掺量的多壁碳纳米管对水泥基材料的抗压强度和抗折强度却有不同的影响[20]。戚瑞等人[21][22]研究表明, 掺量为 0.1 wt% 和 0.2 wt% 的多壁碳纳米管在直径为 10~20 nm 时, 抗压强度提升最为明显, 而直径为 40~60 nm 时抗折强度提升最为显著。李相国等人[23]研究表明, 随着多壁碳纳米管掺量的增加, 水泥基复合材料的 3 天、7 天、28 天的抗折抗压强度都有不同程度的增大, 特别是 28 天抗折强度随着多壁碳纳米管掺量的增加, 呈现先增大后减小的趋势, 在多壁碳纳米管掺量为 0.1% 时, 28 天抗折强度达到最大 13.6 MPa。抗压强度并没有随着多壁碳纳米管掺量出现明显的变化, 只是有略微的增长。通过独特的纳米尺度效应和优异的力学性能, 能够有效地增强水泥基材料的抗压和抗折能力, 依赖于碳纳米管的掺量和尺寸, 适当的掺量和尺寸可以最大化地提升水泥基材料的力学性能。这些差异源于分散方法、碳纳米管类型、实验条件及材料配方的不同。有效的分散技术如超声分散和表面活性剂法能显著提升碳纳米管的分散效果, 而单壁和多壁碳纳米管因性能和成本差异适用于不同领域。未来研究应优化分散技术、探索碳纳米管与其他材料的协同效应, 并评估其长期性能和环境安全性。

碳纳米管的加入能够有效降低水泥基材料中的孔隙率, 优化孔隙结构, 能够提升材料的力学性能。Haixu Yang 等人[24]研究表明, 碳纳米管有高比表面积特性, 能够填充水泥基材料中的微小孔隙, 减少大孔隙的数量, 能提高材料的整体密实度。通过实验结论得到, 碳纳米管能够优化水泥基材料的孔隙结构, 不仅增强了材料的性能, 也拓宽了在建筑和基础设施等领域的应用前景。

此外碳纳米管还能加速水泥的水化反应过程, 可以生成更多的高密度水化硅酸钙凝胶(HD C-S-H), 凝胶的增加对提高材料的弹性模量和压痕硬度很重要[25]。碳纳米管还能改善材料的微观结构, 降低孔隙率, 通过优异的分散性与相容性, 能够有效地传递应力, 使在受到外力作用时, 材料能够更有效地抵抗

裂缝的扩展，从而显著增强了水泥基材料的韧性，为水泥基材料的性能提升提供了新的视角[26]。

碳纳米管通过独特的力学、电学和热学性能，能够在微观尺度上促进水泥水化、改善孔结构、增强界面过渡区、填充微孔隙；在宏观尺度上提高水泥基材料的强度和韧性，而且适量的碳纳米管掺量和良好的分散性对于实现增强效果很重要，它们还能提高材料的耐久性，抗氯离子渗透性能，来延长材料在复杂环境下的使用寿命[27]。

4. 国内外研究现状分析成果

水泥基材料有着很好的力学性能和耐久性，用于生产建造各个领域，是土木工程中用的最广泛的建筑材料之一。但其脆性大、抗拉强度较低、易开裂的特性对实际工程结构应用的耐久性有不利影响，国内外很多学者为了解决该问题，通过碳纳米管的加入，来增强水泥基材料相关性能[28] [29]。

4.1. 国内外研究现状分析

国内学者在该研究领域深入挖掘，表 2 是通过 CiteSpace 对国内众多学者在碳纳米管研究领域情况分析，选取中介中心性大于 0.1 的关键点进行说明。其中碳纳米管广泛受到关注，频数也是最高的。可以观察到国内在碳纳米管增强水泥基材料的力学性能研究方面取得了积极进展，在提升材料的抗压强度、抗折强度以及改善微观结构方面效果显著。施韬等人[30]研究表明，通过添加适量的碳纳米管，可以加速水泥的水化反应进程，优化基体的微观孔隙结构，从而显著提高水泥基复合材料的弹性模量及压痕硬度，见表 2：

Table 2. List of important research areas

表 2. 重要研究领域表

频数	中介中心性	年份	关键词
36	0.77	2014	力学性能
81	0.58	2014	碳纳米管
13	0.58	2014	微观结构
7	0.54	2014	水泥砂浆
6	0.49	2016	耐久性
6	0.48	2019	水泥净浆
2	0.43	2014	微结构
7	0.39	2015	电阻率
6	0.39	2016	压敏性
3	0.31	2016	压敏性能
1	0.28	2020	稳定性
5	0.22	2017	压阻效应
3	0.16	2017	分散性
2	0.15	2014	硅灰
3	0.14	2014	砂浆
2	0.14	2023	损耗因子
4	0.11	2014	分散方法

CiteSpace 依据网络结构和聚类清晰度提供 Q 值模块值和平均轮廓值 S 值两个参数，两个参数表征聚类效果的好坏，Q 值大于 0.3，认为聚类的结构是显著的，S 值大于 0.5，认为聚类是合理的，S 值大于

0.7, 聚类高效率且具有说服力。图 2 是关键词聚类图, 本次分析共聚类成十大板块, 且 Q 值是 0.8171, 大于 0.3, S 值是 0.9461, 大于 0.7, 表明该聚类分析是显著且高效率并且具有说服力, 见图 2:

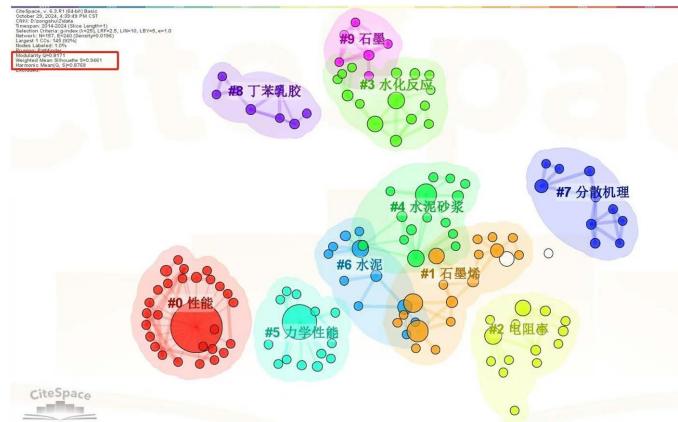


Figure 2. Cluster diagram

图 2. 聚类图

图 3 是关键词时间线图, 展示了 2014 年到 2024 年间某个研究领域的关键词演化情况。从图中内容来看, 该领域涉及到水泥基材料的力学性能, 主要是与碳纳米管增强力学性能相关的研究。从 2014 年开始, 碳纳米管等关键词的出现且随着时间推移而变得更加突出, 说明在增强水泥基材料力学性能方面的研究越来越受到关注。力学性能作为水泥基材料的核心属性, 也一直是研究的热点。总的来说, 时间线图显示了碳纳米管增强水泥基材料力学性能研究领域的发展脉络, 从基础的力学性能研究, 到材料的微观结构和电学性能的综合考量, 反映了该领域研究的深度和广度都在不断扩展, 见图 3:

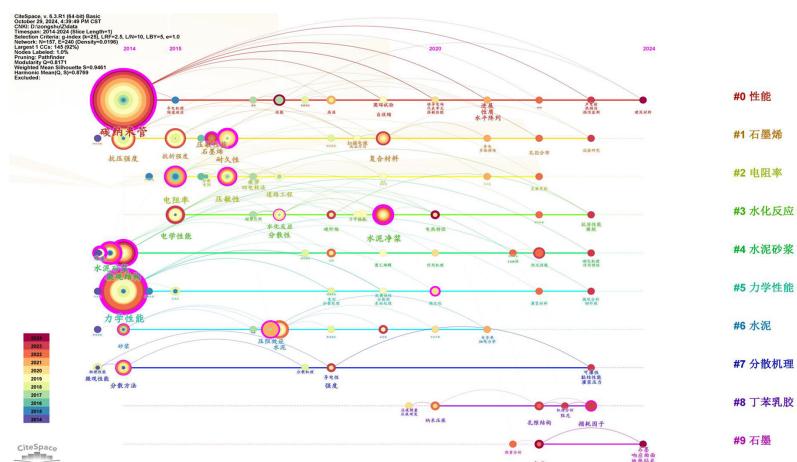


Figure 3. Timeline

图 3. 时间线图

国外目前在探索如何改善碳纳米管在水泥基材料中的分散性, 以及如何通过调整微观结构来优化材料性能。图 4 是使用 CiteSpace 软件生成的关键词共现图, 揭示了国外在碳纳米管增强水泥基材料力学性能方面的研究现状, 显示了研究的广度和深度, 通过关键词, 我们可以了解到作为增强材料, 碳纳米管是最突出的, 因为有优异的力学和电学性能而被广泛应用, 来提高水泥基材料的性能, 是该领域的研究重点和未来的发展方向, 见图 4:

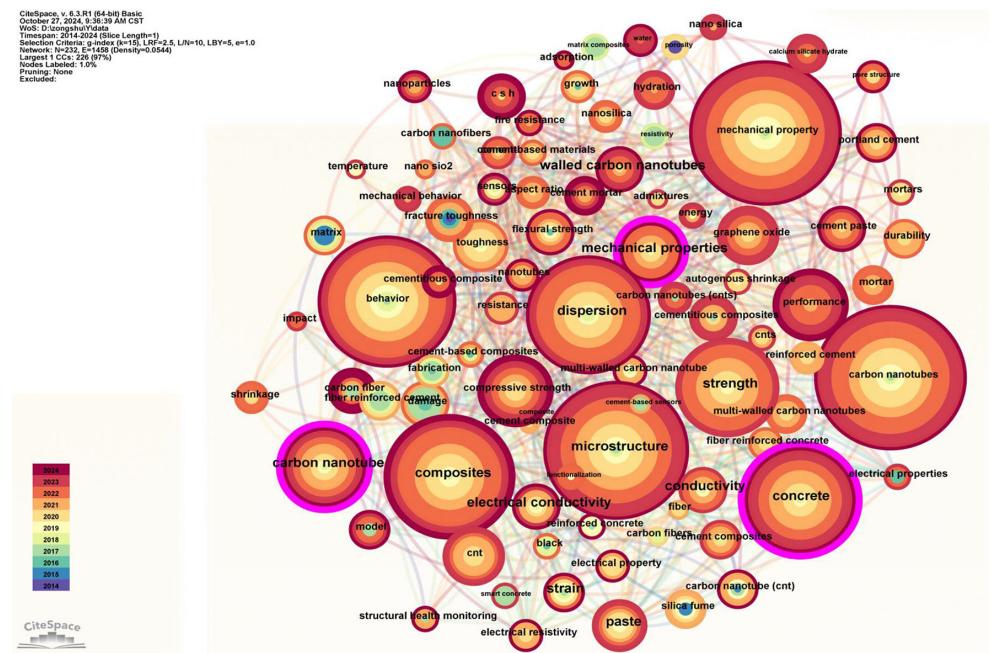
**Figure 4.** Keyword co-occurrence diagram

图 4. 关键词共现图

图 5 是使用 CiteSpace 软件生成的关键词突现图，在 2014 年和 2015 年，力学性能的研究强度最高，表明是碳纳米管增强水泥基材料研究的基础和核心领域，揭示了国外在碳纳米管增强水泥基材料的力学性能方面的研究现状，显示了研究热点的转移和新趋势的出现，可以帮助识别当前的研究前沿和未来可能的研究方向，见图 5：

Top 21 Keywords with the Strongest Citation Bursts

Keywords	Year	Strength	Begin	End	2014-2024
mechanical properties	2014	5.04	2014	2015	
matrix	2014	3.23	2014	2015	
strain	2014	2.99	2014	2018	
fracture toughness	2014	2.76	2014	2016	
carbon nanofibers	2014	2.49	2014	2016	
damage	2015	4.52	2015	2017	
mortar	2016	3.24	2016	2017	
fabrication	2016	2.94	2016	2018	
electrical conductivity	2016	2.65	2016	2017	
conductivity	2016	3.86	2017	2018	
resistivity	2017	3.29	2017	2018	
matrix composites	2017	3.29	2017	2018	
fiber reinforced cement	2017	3.27	2017	2018	
sensors	2016	3.07	2017	2018	
electrical resistivity	2016	2.89	2017	2018	
paste	2015	2.89	2018	2019	
durability	2019	3.81	2019	2021	
fly ash	2020	2.79	2020	2021	
water	2022	3.81	2022	2024	
calcium silicate hydrate	2020	3.26	2022	2024	
performance	2018	3.09	2022	2024	

Figure 5. Emergence

图 5. 突现图

综上所述，国内外在碳纳米管增强水泥基材料的力学性能方面的研究得到了一定的进展，但仍面临诸多挑战，未来的研究需要在改善碳纳米管的分散性、增强效果以及环境安全性等方面进行更深入的探索。

4.2. 主要研究成果

21世纪之后，建筑材料领域迎来了新的发展契机，其中碳纳米管的引入，无疑为水泥基材料性能的提升开启了一个全新的时代篇章。碳纳米管属于纳米级别的材料，它所具备的力学、电学以及热学性质相当独特，使在传统水泥基材料领域存在着诸多潜在应用可能，所以，它受到了来自各方的广泛瞩目。在大背景之下，针对碳纳米管在水泥基材料中的应用展开的相关研究，已然成为学术界以及工业界共同聚焦的热点所在。Li Guangzhi 等人[31]研究表明，通过添加适量的碳纳米管，可以显著改善胶凝材料的力学性能，而且，碳纳米管能够填充并桥接水泥中的微裂缝，抑制微裂缝的萌生和扩展。碳纳米管可以提高水泥基材料的抗冻融性能和耐腐蚀性能，还可以使水泥基复合材料具有多功能性，如自感测、电磁屏蔽和能量收集等智能应用[32]。

清华大学化工系魏飞教授和张如范副教授团队在碳纳米管的耐疲劳性能研究上取得了重大突破，首次以实验形式测试了厘米级长度单根碳纳米管的超耐疲劳性能，该项研究显示，碳纳米管展现出惊人的超长耐疲劳寿命，在大应变循环拉伸测试条件下，单根碳纳米管可以被连续拉伸上亿次而不发生断裂，并且在去掉载荷后，其抗拉强度依然能保持初始强度的90%以上[33]。

5. 结论

本文分析了国内外对碳纳米管提升水泥基材料力学性能方面的研究进展，碳纳米管独有的增强水泥基材料强度和耐久性的优势，未来碳纳米管研究需要着重关注以下方面：如何规模化生产技术以降低成本、提高纯度；功能化数值模拟、试验研究来优化属性、拓宽应用；探索与其他纳米材料的协同效应；研究在水泥基材料中的耐久性；预测碳纳米管在技术创新发展中的应用潜力。未来研究方向为：

- (1) 碳纳米管通过多尺度分析(宏观、细观、微观、纳观)增强水泥基材料力学性能，优化设计和应用[34]。
- (2) 新型分散技术如化学修饰和超声处理，提高碳纳米管均匀分布，增强界面相容性。
- (3) 复合掺合物如石墨烯与碳纳米管的协同作用，提升电导率、热导率和电磁干扰屏蔽性能，推动材料科学发展[35]。

基金项目

LJKMZ20220979 辽宁省教育厅面上项目。

参考文献

- [1] 翟萍, 王宇, 李广海. 碳纳米管的力学性能及碳纳米管复合材料研究[J]. 力学进展, 2002, 32(4): 563-578.
- [2] 龚楠楠, 付饶, 孙昌梅, 等. 碳纳米管增强聚合物复合材料的合成及应用进展[J]. 材料化学前沿, 2017, 5(3): 70-79.
- [3] 朱建平, 冯爱虎, 王希建, 等. 纳米材料在水泥基材料中的应用研究进展[J]. 化工新型材料, 2013, 41(10): 162-164.
- [4] 高建龙. 碳纳米管/聚合物复合材料电学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2009.
- [5] 宋九鹏, 肇研, 李学宽, 等. 高韧性低黏度碳纳米管/聚醚酰亚胺/聚醚醚酮纳米复合材料的研究(英文) [J]. 新型炭材料(中英文), 2024, 39(4): 715-728.
- [6] Zhang, F., Liu, X., Yang, C., Chen, G., Meng, Y., Zhou, H., et al. (2024) Insights into Robust Carbon Nanotubes in Tribology: From Nano to Macro. *Materials Today*, **74**, 203-234. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2024.03.001>
- [7] 范桃桃, 李晓拓, 肖文凯. 碳纳米管对环氧树脂热导率影响的模拟研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52(1):

77-82.

- [8] Quan, G., Wu, Y., Li, W., Li, D., Liu, X., Wang, K., et al. (2024) Construction of Cellulose Nanofiber/Carbon Nanotube Synergistic Network on Carbon Fiber Surface to Enhance Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Composites. *Composites Science and Technology*, **248**, Article ID: 110454. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2024.110454>
- [9] Zou, H., Feng, Y., Tang, X., Zhang, X. and Qiu, L. (2024) Interfacial Thermal Conduction Mechanism of Polypyrrole/Carbon Nanotube Composites. *Composites Science and Technology*, **245**, Article ID: 110346. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2023.110346>
- [10] 碳纳米管内壁参与化学反应首次被发现[J]. 化学工业与工程, 2011, 28(5): 53.
- [11] Chavhan, J., Rathod, R., Tandon, V., Umare, S. and Patil, A. (2022) Structural and Physico-Chemical Properties of Electroactive Polyamide/multi-Walled Carbon Nanotubes Nanocomposites. *Surfaces and Interfaces*, **29**, Article ID: 101765. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.101765>
- [12] Yang, J.C., Zhang, M.K., Zhang, Y.Q., et al. (2024) Density Functional Theory Study of Adsorption and Dissociation of CH_2Cl_2 on The Surfaces of Transition Metal (Fe, Co, Ni, and Cu)-Doped Carbon Nanotubes. *Chemical Physics Impact*, **8**, Article ID: 100437.
- [13] Zhao, H., Xi, Z., Wang, Q., Miao, C. and Liu, C. (2024) Investigation on Open Water Adsorption Performance of Multi-Walled Carbon Nanotubes Modified Mil-96(Al). *Journal of Solid State Chemistry*, **334**, Article ID: 124677. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2024.124677>
- [14] 展咪咪. 原位生长碳纳米管的制备及对砂浆压敏和力学性能的影响[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2020.
- [15] 丁会敏, 杨光, 唐诗洋, 等. 碳纳米管分散研究现状[J]. 黑龙江科学, 2023, 14(20): 25-28.
- [16] Zhang, H., Cao, S. and Yilmaz, E. (2023) Carbon Nanotube Reinforced Cementitious Tailings Composites: Links to Mechanical and Microstructural Characteristics. *Construction and Building Materials*, **365**, Article ID: 130123. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130123>
- [17] 李春, 朱大亮, 梁帅锋, 等. 碳纳米管在水泥基中的分散性研究现状及展望[J]. 山西建筑, 2022, 48(22): 104-109.
- [18] Kim, Y., Hong, J.S., Moon, S.Y., Hong, J. and Lee, J.U. (2021) Evaluation of Carbon Nanotubes Dispersion in Aqueous Solution with Various Dispersing Agents. *Carbon Letters*, **31**, 1327-1337. <https://doi.org/10.1007/s42823-021-00285-8>
- [19] 张好强, 吴昱鑫, 张傲, 等. 碳纳米管分散性及功能化表征方法的研究现状[J]. 炭素技术, 2024, 43(2): 1-5, 70.
- [20] 陈星宇. 改性碳纳米管增强水泥基复合材料的力学性能及微观研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 中原工学院, 2018.
- [21] 戚瑞. 不同直径碳纳米管水泥基材料力学特性及抗冻性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2019.
- [22] 戚瑞, 田威, 王峰, 等. 不同直径碳纳米管对水泥基试样力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(3): 653-658.
- [23] 李相国, 明添, 刘卓霖, 等. 碳纳米管水泥基复合材料耐久性及力学性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(5): 1497-1502.
- [24] Yang, H., Shen, Z., Zhang, M., Wang, Z. and Li, J. (2024) Mechanical Properties and Microstructure of Cement-Based Materials by Different High-Temperature Curing Methods: A Review. *Journal of Building Engineering*, **96**, Article ID: 110464. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110464>
- [25] 李伟娜, 李晔, 李晶, 等. 碳纳米管改性水泥基复合材料力学性能研究[J]. 混凝土, 2022(8): 97-101.
- [26] 张鹏, 代小兵, 付世东, 等. 纳米粒子和 PVA 纤维增强水泥基复合材料抗裂性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(9): 2923-2928, 2934.
- [27] 刘巧玲. 碳纳米管增强水泥基复合材料多尺度性能及机理研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2015.
- [28] 牛荻涛, 何嘉琦, 傅强, 等. 碳纳米管对水泥基材料微观结构及耐久性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(5): 705-717.
- [29] 陈念慈, 李若菲, 黄点秋, 等. 碳纳米管对水泥基材料微观结构的影响研究[J]. 当代化工研究, 2024(9): 37-40.
- [30] 施韬, 朱敏, 李泽鑫, 等. 碳纳米管改性水泥基复合材料的研究进展[J]. 复合材料学报, 2018, 35(5): 1033-1049.
- [31] Li, G., Shi, X., Gao, Y., Ning, J., Chen, W., Wei, X., et al. (2023) Reinforcing Effects of Carbon Nanotubes on Cement-Based Grouting Materials under Dynamic Impact Loading. *Construction and Building Materials*, **382**, Article ID: 131083. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131083>
- [32] Ramezani, M., Dehghani, A. and Sherif, M.M. (2022) Carbon Nanotube Reinforced Cementitious Composites: A Comprehensive Review. *Construction and Building Materials*, **315**, Article ID: 125100. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125100>
- [33] Bai, Y., Yue, H., Wang, J., Shen, B., Sun, S., Wang, S., et al. (2020) Super-Durable Ultralong Carbon Nanotubes. *Science*,

369, 1104-1106. <https://doi.org/10.1126/science.aay5220>

- [34] Zhang, X., Lei, X., Jia, X., Sun, T., Luo, J., Xu, S., *et al.* (2024) Carbon Nanotube Fibers with Dynamic Strength up to 14 GPa. *Science*, **384**, 1318-1323. <https://doi.org/10.1126/science.adj1082>
- [35] Zhou, E., Xi, J., Guo, Y., Liu, Y., Xu, Z., Peng, L., *et al.* (2018) Synergistic Effect of Graphene and Carbon Nanotube for High-Performance Electromagnetic Interference Shielding Films. *Carbon*, **133**, 316-322. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.03.023>