

超声分散碳纳米管的研究进展

张文湘

湘潭市桥梁维护管理处, 湖南 湘潭

收稿日期: 2025年5月16日; 录用日期: 2025年6月18日; 发布日期: 2025年6月26日

摘要

针对碳纳米管(CNT)在复合材料应用中面临分散不均、易团聚的问题, 其分散性提升已成为材料科学领域的研究热点。本文系统综述了近年来碳纳米管分散技术的研究进展。首先, 分析了物理分散法中球磨处理的技术原理、分散效果及存在的局限性; 其次, 探讨了共价化学修饰与非共价化学修饰两类化学方法的分散, 并评述了不同修饰策略对材料性能的影响规律; 进而, 详细阐述了超声分散技术的作用机理及其在碳纳米管分散中的优化应用。基于现有研究, 本文展望了未来方向, 建议通过多尺度表征技术深入解析分散机制, 开发绿色高效的分散新方法, 并拓展碳纳米管在新能源、电子器件、航空航天等前沿领域的应用研究。

关键词

碳纳米管, 分散技术, 超声分散, 表征手段

Research Progress on Ultrasonic Dispersion of Carbon Nanotubes

Wenxiang Zhang

Xiangtan Bridge Maintenance and Management Office, Xiangtan Hunan

Received: May 16th, 2025; accepted: Jun. 18th, 2025; published: Jun. 26th, 2025

Abstract

The inhomogeneous dispersion and agglomeration tendencies of carbon nanotubes (CNTs) in composite materials have become a key research focus in materials science. This paper systematically reviews recent advances in CNT dispersion technologies. First, the technical principles, dispersion efficacy, and limitations of ball milling in physical dispersion methods are analyzed. Subsequently, two chemical approaches—covalent chemical modification and non-covalent chemical modification—are examined, with an evaluation of how different functionalization strategies influence

material properties. Furthermore, the mechanistic principles of ultrasonic dispersion technology and its optimized application for CNT dispersion are elaborated. Based on current research, future directions are proposed, including in-depth exploration of dispersion mechanisms via multiscale characterization techniques, development of green and efficient dispersion methods, and expansion of CNT applications in cutting-edge fields such as new energy, electronic devices, and aerospace.

Keywords

Carbon Nanotubes, Dispersion Techniques, Ultrasonic Dispersion, Characterization Methods

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

碳纳米管(CNT)凭借其卓越的力学性能、导电性和导热性,在复合材料领域具有广阔的应用前景。研究表明,即使添加极低含量的 CNT 用量(0.01~0.05wt%),也能显著提升胶凝材料的机械性能,这主要是归因于 CNT 的高比表面积优异的机械特性[1]。随着纳米材料科学的进步,如何通过物理、化学及界面调控等手段实现碳纳米管在基体材料中的均匀分散,已然成为当前研究的关键课题。然而,碳纳米管在实际应用易发生团聚和分散不均的问题,这严重制约了其性能的发挥。已有研究证实,水泥基材料中 CNT 的增强效率与分散质量密切相关[2]。为改善分散性,研究者探索了多种方法,包括超声处理、机械混合、化学修饰以及分散剂的使用等[3]-[7]。其中,理想的分散策略应在保持 CNT 本征化学结构的前提下,实现其稳定、均匀的分散。特别值得注意的是,在胶凝材料体系中,以悬浮液形式引入 CNT 被证明是最有效的添加方式。而制备稳定悬浮液的关键技术,通常以超声分散为核心,并结合其他辅助方法(如化学修饰或机械搅拌)以进一步提升分散效果。鉴于分散机制的研究对实现碳纳米管在水相或有机溶剂体系中的单分散至关重要,本文系统总结了于超声分散及其复合技术的最新进展,深入探讨了 CNT 的分散机理,以为碳纳米管分散技术的优化提供理论依据,并推动其在复合材料中的实际应用。

2. 碳纳米管的分散技术概述

2.1. 物理分散方法

物理分散方法通过施加机械外力削弱碳纳米管间的范德华力作用,从而实现团聚体的解离与分散。这类方法虽然操作简便,但单独使用时往往难以达到理想的分散效果,因此常需要与化学分散法配合使用。在机械分散法中,基于外力作用机制的不同,主要可分为超声分散、高速搅拌和球磨分散等技术路线。其中,其中超声分散法与球磨分散法因各自独特优势最具应用价值。

超声分散法利用高频超声波(通常 20~40 kHz)产生的空化效应实现纳米级分散,如图 1 所示[8]:当声波在液体介质中传播时,形成的微气泡瞬间崩溃可产生局部高温(约 5000 K)、高压(50 MPa)和强烈冲击波,这种极端物理条件能有效剥离碳纳米管团聚体。该方法具有三大显著特点:能量集中,可针对性破坏强团聚结构;分散均匀性高,不易产生局部过粉碎;处理时间短,通常 10~30 分钟即可达到理想效果。但需注意控制超声功率和处理时间,避免空化效应导致碳纳米管管壁缺陷。超声分散法最早被发现用来改善聚合物纳米复合材料,不仅在整个分散过程中保持稳定,还使得碳纳米管分散得比较均匀。研究表明,超声分散法在多种应用中表现出显著效果。例如,采用超声分散法处理纳米材料,并将其添加到水

泥中制备纳米强化浆液，发现超声分散后的纳米浆液能够修补再生骨料的微裂缝，显著提高混凝土的抗压强度[9]。在综合分散策略中，超声技术与其他分散方法的协同效应尤为突出，其空化作用可提供初始解团聚动能，而生物协同、表面活性剂修饰、机械搅拌或化学功能化等辅助手段则能维持体系的长期分散稳定性。这种联合分散模式不仅显著提高了分散效率，还降低了能耗，为碳纳米管的规模化应用提供了新的技术路径，具体提升将在本文第二部分深入探讨。

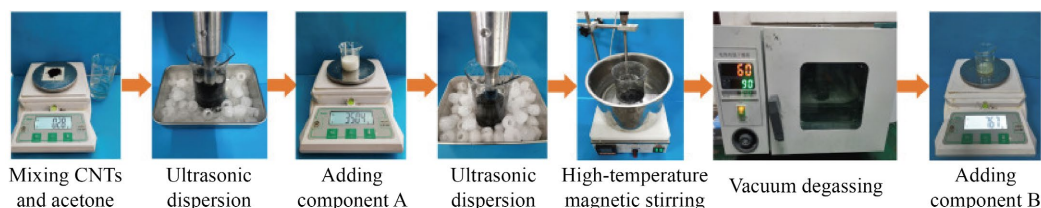


Figure 1. Ultrasonic dispersion of carbon nanotubes [8]

图 1. 超声法分散碳纳米管[8]

另外球磨方法也有其独特的优势：首先，该方法操作流程简单，对设备要求较低；其次，具有出色的规模化处理能力，单次可处理大量样品；更重要的是支持连续化生产，这使其在粉末涂料、陶瓷复合材料和水泥基复合材料等工业化应用场景备受青睐。球磨分散的具体机制原理是将碳纳米管与研磨介质共同置于旋转容器中，随着容器的转动，研磨介质被提升至一定高度后自由下落，见图 2 [10]。在此过程中，研磨介质与碳纳米管发生剧烈碰撞，产生的机械能够足以破坏碳纳米管团聚体。球磨法最早被提出可用于大规模制备短碳纳米管。研究表明，碰撞能量与分散效果呈正相关，更高的能量可产生更小的分散单元。值得注意的是，该方法还存在“碾断效应”，即过长的处理时间可能导致碳纳米管结构损伤，反而增加其堆积密度，加剧二次团聚现象。尽管球磨法在碳纳米管粉末涂料等领域已有广泛应用，但仍存在明显局限：一方面，为达到理想分散效果往往需要较长的处理时间；另一方面，分散效果的重复性和稳定性仍有待提高[11]。这些局限性促使研究者不断探索优化方案，如通过控制球磨参数或结合其他分散技术来提升综合性能。

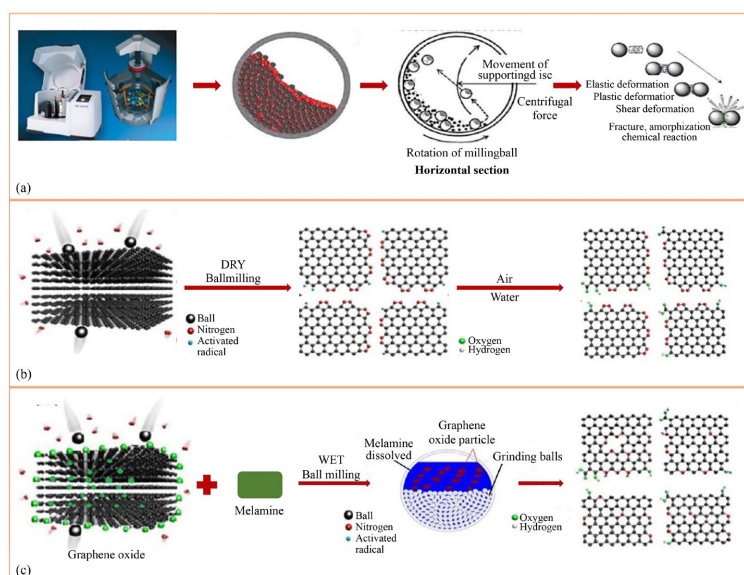


Figure 2. Sintering method for dispersion of carbon nanotubes [10]

图 2. 球磨法分散碳纳米管[10]

2.2. 化学分散方法

化学分散法相较于物理分散法具有显著优势，能够实现更稳定、均匀的碳纳米管分散体系。该方法的核心原理是通过对碳纳米管表面进行化学改性，显著提升其在溶液中的溶解性和分散稳定性[12]-[15]。根据作用机理的不同，化学分散法主要分为共价化学修饰和非共价化学修饰两种方式。共价化学修饰通过化学反应在碳纳米管表面共价接枝羧基、羟基等官能团，从根本上改变其表面化学性质。这种方法虽然能显著增强碳纳米管与溶剂的相容性，但不可避免地会破坏碳纳米管的原有结构，可能影响其本征性能。非共价化学修饰利用表面活性剂、聚合物或生物大分子等修饰剂，通过 π - π 堆积、疏水作用或静电吸附等非共价相互作用实现对碳纳米管的包覆。这种方法的重大优势在于保持碳纳米管结构完整性的同时改善其分散性。

影响化学分散效果的关键参数包括修饰剂类型、修饰剂浓度、反应时间以及溶液 pH 值等。研究表明，化学分散法因其高效性和分散稳定性在众多领域获得广泛应用。然而，该方法仍存在一定局限性，共价修饰可能损害碳纳米管的优异性能，而非共价修饰体系的稳定性则高度依赖于修饰剂与碳纳米管之间的相互作用强度，在复杂环境中可能存在解吸附风险[12]-[15]。

2.3. 综合分散方法

物理分散和化学分散法各具优势，但也存在明显局限性，如表 1。为获得更优的分散效果并提高效率，研究者通常将两种方法结合使用。这种复合分散策略虽然工艺复杂、成本较高，但在工业化生产、高性能复合材料和能源存储等领域具有重要应用价值，其关键在于优化参数以平衡分散效果与经济性。例如，高压均质与化学分散联用，将 MWCNT、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)分散剂和去离子水配制成 0.1%悬浮液，经高压均质处理后，通过冷冻干燥和高温处理获得改性碳纳米管粉末。该方法可使碳纳米管在环氧树脂中稳定分散，且对树脂黏度影响较小[16]。此外，超声-离心分散法使用 PVP 作为分散剂，通过搅拌和超声处理制备分散液，再经离心获得均匀稳定的碳纳米管悬浮液[17]。

Table 1. Comparison of carbon nanotube dispersion methods
表 1. 碳纳米管分散方法的对比

序号	方法	原理	优点缺点	适用范围
1	超声分散法	利用超声波产生的高频振动在液体中形成强烈的空化效应，这一过程产生局部极端高压和高温、高速微射流等物理效应，能够有效撕裂碳纳米管团聚体，克服范德华力等相互作用，同时超声波产生的机械剪切力进一步促进分散。	优点：时间短、分散效果均匀、不易产生局部粉碎； 缺点：在液体中进行，超声作用范围小，超声仪器要求高。	在液体中分散，其分散效果由超声波仪器参数决定，分散能耗大，分散量小。
2	球磨分散法	利用研磨介质作用撞击碳纳米管团聚使其分散。	优点：对设备要求低，可用于规模化生产； 缺点：球磨后易二次团聚、易导致碳纳米管形状破坏，能耗大。	对团聚分散要求不高，分散数量多的情况下。
3	化学分散法	对碳纳米管表面改性，从而在液体中相互排斥从而起到分散的目的。	优点：能耗低，与液体相容性好； 缺点：表面改性影响碳纳米管本征性能。	与碳纳米管分散后的用途相关。

3. 超声分散技术及其在碳纳米管分散中的应用

3.1. 超声分散的基本原理

超声分散是一种利用超声波能量来实现颗粒(如碳纳米管)在液体中均匀分散的技术。其作用机理主要基于空化效应、微流效应和机械振动效应的协同作用。具体过程为超声波处理器将电能转化为机械振动,通过液体介质(水或溶剂)传播时产生周期性压缩和膨胀,导致微小气泡的形成、生长和激烈破裂(即空化效应),这一过程会释放大量能量并产生局部高压和冲击波,从而有效破坏颗粒间的团聚作用,实现纳米材料的均匀分散[18]。

3.2. 超声分散的优缺点

超声分散作为碳纳米管(CNTs)分散领域的高效物理方法,具有显著的技术优势和应用价值。该方法通过超声空化效应产生的局部高压和微射流,能够快速破坏碳纳米管间的范德华力,在较短时间内实现均匀分散。超声良好的性能使其可与其他分散方法协同使用,进一步提升分散效果。然而,该方法仍存在若干技术局限性。超声空化产生的强烈冲击可能导致碳纳米管断裂,特别是单壁碳纳米管(SWCNTs)的结构完整性更易受损。长时间或高功率处理会显著缩短碳纳米管长度,进而影响其力学和电学性能。高黏度或高表面张力液体会削弱空化效应,降低分散效率。另外,高质量超声设备(尤其是高功率探头)价格昂贵,且存在探头磨损问题,增加了使用维护成本。

3.3. 超声分散与其他分散方法的结合

3.3.1. 超声 - 生物分散结合

超声 - 生物分散联用技术通过生物分子(如 DNA、蛋白质、多糖等)与碳纳米管间的特异性相互作用,结合超声空化效应,实现了碳纳米管的高效稳定分散,见图 3 [19]。研究表明,单链 DNA 分子中的碱基可与碳纳米管通过 π - π 堆叠作用形成稳定分散体系[19]。该技术在实际应用中展现出显著优势, DNA 分散的 MWCNTs 复合材料在最佳配比下,拉伸强度和剪切强度分别达到 46.81 MPa 和 19.64 MPa,较纯环氧树脂(EP 相)提升 68.38%和 50.96%。动态机械热分析(DMTA)分析显示其储能模量增至 2722 MPa,提升 24.7% [20]。采用鲑鱼精 DNA (ssDNA)分散的 MWCNTs-OH 改性泡沫混凝土,在 2%添加量时抗压强度提升 174%,且表现出更优的流动性和孔结构均匀性(80%孔隙直径 $< 200 \mu\text{m}$)。SEM 观察证实 MWCNTs-OH 与水合产物形成致密交织结构,显著增强材料性能[21]。

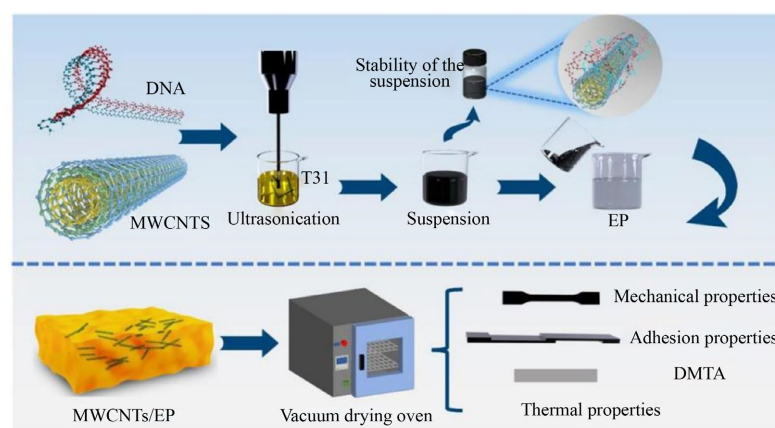


Figure 3. Dispersion of carbon nanotubes with ultrasonic combined with DNA dispersant [19]

图 3. DNA 作分散剂与超声结合分散碳纳米管[19]

3.3.2. 超声 - 机械分散结合

研究表明,采用超声 - 磁力搅拌复合分散方法时,当 MWCNTs 添加量增至 1.5wt.%并在 70%功率幅度的 UDM 工艺处理后,MWCNTs-环氧复合材料的拉伸强度和断裂能分别提升 21%和 36%,同时表现出优于纯环氧树脂的热稳定性,这主要归因于 MWCNTs 在基体中的均匀分散[22]。0.2wt.%MWCNTs 悬浮液采用磁力搅拌 - 超声 - 表面活性剂(NaDC)复合分散时,材料弯曲强度和抗压强度分别提升 35.4%和 29.5% [23]。0.5%wt.% MWCNTs 通过磁力搅拌 - 超声 - 聚羧酸盐复合分散后,抗压强度提高 25% [24]。导电浆料研究表明,球磨 8 h 的 MWCNTs 浆料 IG/ID 值达 1.058 (电阻率 94.36 mΩ·cm),优于超声 3h 的 0.985 (115.7 mΩ·cm),表明球磨能更好地保持 MWCNTs 结构完整性[25]。0.2wt%CNT 经 4 h 机械搅拌 + 1.5 h 超声处理后,28 d 抗压强度提高 12%,且 0.3wt.%纳米材料使 C-S-H 弹性模量从 28 GPa 增至 34 GPa [26]。

3.3.3. 超声 - 化学分散结合

超声 - 化学分散联用技术通过协同超声波的空化效应与化学分散剂(如表面活性剂、聚合物、聚合物等)的稳定性,显著提升了碳纳米管的分散效果,如表 2。研究证实,石墨烯纳米带(GNRs)在去离子水和碱性溶液中的分散性经超声 - 表面活性剂处理后分别提高 8.5%和 25.7%。这种均匀分散促进了水化反应和 C-S-H 聚合,使 28 天抗压/抗拉强度分别提高 17%和 33%,同时孔隙率降低 14.6% [27]。采用石墨烯量子点(GQDs)辅助超声法制备的 G-CLDH 复合材料(0.8wt.%添加量),其 28 天抗压强度达 56.5 MPa,较对照组(46.2 MPa)提升 22.3%,氯离子结合值达 40.67 mg/g,提升 58.6% [28]。

Table 2. Comparison of ultrasonic dispersion with other dispersion methods

表 2. 超声分散与其他分散方法对比

结合方法	技术原理	应用	性能提升效果	优点	缺点
超声与生物分散	利用生物分子(如 DNA、蛋白质)与碳纳米管间的 π - π 堆叠等特异性相互作用,结合超声空化效应实现高效分散	- DNA 分散的 MWCNTs/环氧树脂复合材料 - ssDNA 分散的 MWCNTs-OH 改性泡沫混凝土	- 拉伸强度提升 68.38%,剪切强度提升 50.96% [20] - 抗压强度提升 174%,孔隙结构更均匀(80%孔隙直径 < 200 μm [21])	- 生物相容性高,环境友好 - 分散稳定性优异	- 生物分子成本较高 - 适用溶剂范围有限
超声与机械分散	通过超声空化效应与机械外力(如磁力搅拌、球磨)协同作用,破坏碳纳米管团聚体	- 磁力搅拌 - 超声复合处理的 MWCNTs/环氧树脂 - 球磨 - 超声联用的 MWCNTs 导电浆料 - 机械搅拌 - 超声处理的 CNT/水泥基材料	- 拉伸强度提升 21%,断裂能提升 36% [22] - 浆料导电性更优(IG/ID 值 1.058) [25] - 水泥 28 天抗压强度提升 12%,C-S-H 弹性模量增至 34 GPa [26]	- 分散效率高,适合工业化 - 可控性强	- 机械力可能损伤碳纳米管结构 - 能耗较高
超声与化学分散	超声空化效应与化学分散剂(表面活性剂、聚合物等)协同作用,通过静电稳定或空间位阻效应提升分散性	- 超声 - 表面活性剂处理的石墨烯纳米带(GNRs)/水泥基材料 - 石墨烯量子点辅助超声的 G-CLDH 复合材料	- 抗压强度提升 17%,抗拉强度提升 33%,孔隙率降低 14.6% [27] - 28 天抗压强度提升 22.3%,氯离子结合能力提升 58.6% [28]	- 分散稳定性极佳 - 可适配多种溶剂体系	- 化学残留可能影响材料性能 - 部分分散剂成本较高

4. 未来展望

碳纳米管(CNTs)分散技术作为材料科学的重要研究方向,其未来发展应重点关注多尺度表征技术应

用、绿色分散技术开发和工业化应用研究三个维度。通过整合原子力显微镜(AFM)、透射电子显微镜(TEM)、X 射线衍射(XRD)等先进表征手段,建立从微观结构到宏观性能的系统分析方法,深入揭示碳纳米管分散机制及其与基体的相互作用规律,为工艺优化提供理论支撑。针对现有方法存在的能耗高、污染大等问题,重点发展基于绿色化学修饰和生物分子辅助的新型分散技术,实现环境友好型生产。着力解决实验室技术向产业化转化的关键问题,通过工艺参数优化和质量控制,确保大规模生产中分散效果的稳定性与一致性。

碳纳米管的分散性能是决定复合材料性能的关键因素,其均匀性直接影响材料的力学、电学和热学特性。未来研究应重点关注性能协同优化和新型分散剂开发。在确保分散均匀性的基础上,通过界面工程和功能化修饰等手段,强化碳纳米管-基体界面相互作用,实现复合材料力学强度和导电/导热性能的同步提升。此外,重点研发基于生物分子、聚合物和纳米材料的新型高效分散剂,深入研究其与碳纳米管的相互作用机制,优化使用参数,以获得最佳的分散稳定性和界面相容性。

碳纳米管分散技术研究具有显著的跨学科特征,其未来发展需要整合材料科学、化学、物理学和生物学等多学科优势。重点研究方向包括智能化工艺优化、纳米复合技术创新和技术集成应用。首先,应用人工智能和大数据分析技术,实现分散工艺参数的精准调控,提升分散效率和质量稳定性。其次,结合先进纳米技术,开发新型多功能复合材料,拓展碳纳米管在高新科技领域的应用空间。最后,通过多方法协同优化、新型分散剂开发和多尺度表征技术融合,最终实现碳纳米管在复合材料中的高效均匀分散,促进其在新能源、电子信息和航空航天等战略领域的产业化应用。

参考文献

- [1] Konsta-Gdoutos, M.S., Metaxa, Z.S. and Shah, S.P. (2010) Multi-Scale Mechanical and Fracture Characteristics and Early-Age Strain Capacity of High Performance Carbon Nanotube/cement Nanocomposites. *Cement and Concrete Composites*, **32**, 110-115. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.10.007>
- [2] SaezdeIbarra, Y., *et al.* (2006) Atomic Force Microscopy and Nanoindentation of Cement Pastes with Nanotube Dispersions. *Physica Status Solidi*, **203**, 1076-1081.
- [3] Yu, J., Grossiord, N., Koning, C.E. and Loos, J. (2007) Controlling the Dispersion of Multi-Wall Carbon Nanotubes in Aqueous Surfactant Solution. *Carbon*, **45**, 618-623. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2006.10.010>
- [4] Woo, J.-S., Jin, A.-H., Yun, H.-D., *et al.* (2025) Effects of Ultrasonication on Electrical and Self-Sensing Properties for Fiber-Reinforced Cementitious Composites Containing MWCNTs. *Journal of Material Research and Technology*, **34**, 1509-1528.
- [5] Bannov, A.G., Golovakhin, V., Gudyma, T.S. and Kurmashov, P.B. (2025) Influence of Ball Milling on the Electrical Properties of Epoxy Composites Filled with Carbon Nanofibers. *Diamond and Related Materials*, **152**, Article 111909. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.111909>
- [6] Tao, Z., Zhao, Y., Wang, Y. and Zhang, G. (2024) Recent Advances in Carbon Nanotube Technology: Bridging the Gap from Fundamental Science to Wide Applications. *C*, **10**, Article 69. <https://doi.org/10.3390/c10030069>
- [7] Zhang, S., Wang, R., Zhang, J. and Yuan, Y. (2025) Enhancing Dispersion and Mechanical Properties of Carbon Nanotube-Reinforced Cement-Based Material Using Polymer Emulsions. *Cement and Concrete Composites*, **157**, Article 105910. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105910>
- [8] Wang, Y., Wang, H., Chen, Y. and Zhou, W. (2025) Enhancing Fracture Toughness of Al/CFRP Joints Bonded with CNT-Modified Epoxy Adhesive Using Ultrasonic Adhesive-Impact Bonding Process. *Journal of Materials Research and Technology*, **36**, 5559-5573. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.04.134>
- [9] 延永东, 徐鹏飞, 姚嘉诚, 等. 超声分散处理的纳米再生混凝土基本性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(5): 124-131.
- [10] Kumar, M., Xiong, X., Wan, Z., Sun, Y., Tsang, D.C.W., Gupta, J., *et al.* (2020) Ball Milling as a Mechanochemical Technology for Fabrication of Novel Biochar Nanomaterials. *Bioresource Technology*, **312**, Article 123613. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123613>
- [11] Cao, L., Chen, B., Wan, J., Shen, J. and Li, J. (2023) Improving Carbon Nanotube Dispersion in Aluminum Matrix Composite Powders by a Repeating-Deformation Ball Milling Process. *Materials Characterization*, **201**, Article 112986.

- <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2023.112986>
- [12] 陆富龙. 碳纳米管对水泥基材料的作用机理研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广州大学, 2019.
 - [13] 董怀斌, 李长青, 邹霞辉. 电场诱导碳纳米管在聚合物中定向有序排列的研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(3): 427-433+442.
 - [14] 杜润红, 闫伟, 杜春良, 等. 外加电场对碳纳米管在正丁醇中的定向分散[J]. 天津工业大学学报, 2020, 39(4): 15-19+25.
 - [15] 彭刚, 蔡晓兰, 周蕾. 碳纳米管的分散性研究进展[J]. 化工新型材料, 2015, 43(9): 39-41.
 - [16] 卜路霞, 李京京, 高琳琳, 等. SDBS 对多壁碳纳米管悬浮液分散性的影响[J]. 电镀与精饰, 2019, 41(7): 10-13.
 - [17] 杜健民, 刘政, 庄文娟, 等. 分散剂 PVP 和 PC 对 MWCNTs 的分散效果及机理研究[J]. 混凝土, 2023(4): 64-68.
 - [18] Gopalakrishnan, K., Birgisson, B., Taylor, P. and Atttoh-Okine, N.O. (2011) Nanotechnology in Civil Infrastructure. Springer, 1-1272. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-16657-0>
 - [19] Zheng, M., Jagota, A., Semke, E.D., Diner, B.A., Mclean, R.S., Lustig, S.R., *et al.* (2003) DNA-Assisted Dispersion and Separation of Carbon Nanotubes. *Nature Materials*, **2**, 338-342. <https://doi.org/10.1038/nmat877>
 - [20] Li, Q., Peng, X., Zhong, X., Zhou, Y., Luo, T. and Zhang, X. (2024) Deoxyribonucleic Acid-Enhanced Carbon Nanotube Dispersed Epoxy Resin Composites: Mechanical and Thermal Properties Study. *Polymer Composites*, **45**, 15857-15877. <https://doi.org/10.1002/pc.28875>
 - [21] Zhang, X., Luo, T., Zhong, X., Zhou, Y., Peng, X. and Zhao, C. (2025) High-Performance Foam Concrete Containing Multi-Wall Carbon Nanotubes and ssDNA. *Construction and Building Materials*, **458**, Article 139523. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139523>
 - [22] Ghosh, P.K., Kumar, K. and Chaudhary, N. (2015) Influence of Ultrasonic Dual Mixing on Thermal and Tensile Properties of MWCNTs-Epoxy Composite. *Composites Part B: Engineering*, **77**, 139-144. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.028>
 - [23] Luo, J., Duan, Z. and Li, H. (2009) The Influence of Surfactants on the Processing of Multi-Walled Carbon Nanotubes in Reinforced Cement Matrix Composites. *Physica Status Solidi (A)*, **206**, 2783-2790. <https://doi.org/10.1002/pssa.200824310>
 - [24] Collins, F., Lambert, J. and Duan, W.H. (2012) The Influences of Admixtures on the Dispersion, Workability, and Strength of Carbon Nanotube-OPC Paste Mixtures. *Cement and Concrete Composites*, **34**, 201-207. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.013>
 - [25] 马青青, 陈男, 龚泽晖, 陈海龙. 球磨和超声对碳纳米管导电浆料综合性能的影响研究[J/OL]. 材料导报, 1-14. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20241227.1351.003.html>, 2025-06-25.
 - [26] Huang, H., Teng, L., Gao, X., Khayat, K.H., Wang, F. and Liu, Z. (2022) Effect of Carbon Nanotube and Graphite Nanoplatelet on Composition, Structure, and Nano-Mechanical Properties of C-S-H in UHPC. *Cement and Concrete Research*, **154**, Article 106713. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106713>
 - [27] Piao, T., Li, P., Im, S., Liu, J., Choi, H. and Bae, S. (2024) Impacts of Graphene Nanoribbon Dispersion and Stability on the Mechanical and Hydration Properties of Cement Paste: Insights from Surfactant-Assisted Ultrasonication. *Journal of Building Engineering*, **96**, Article 110469. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110469>
 - [28] Long, W., Liu, J., Zheng, S. and He, C. (2024) A Novel Ultrasonic Method to Exfoliate CLDH toward Improving Mechanical and Chloride Binding Properties of Cementitious Composites. *Journal of Cleaner Production*, **441**, Article 140990. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140990>