

纳米材料改性混凝土的力学性能与耐久性研究

罗文林

陆丰市忠建实业有限公司 广东汕尾

【摘要】 纳米材料作为一种新型功能材料，广泛应用于混凝土改性以提升其力学性能和耐久性。本文系统研究了纳米材料对混凝土微观结构的影响机制，分析了不同纳米材料掺入对混凝土抗压强度、抗折强度及耐久性能的改善效果。通过实验和理论相结合的方法，揭示了纳米粒子在混凝土中的分散状态及其增强机理，进而提出优化混凝土配比的技术路径。纳米材料能有效提高混凝土的致密性和抗化学侵蚀能力，显著延长结构的使用寿命，为混凝土材料的高性能设计提供了理论依据和实践指导。

【关键词】 纳米材料；混凝土改性；力学性能；耐久性；微观结构

【收稿日期】 2025 年 4 月 17 日

【出刊日期】 2025 年 5 月 26 日

【DOI】 10.12208/j.jer.20250245

Research on the mechanical properties and durability of nanomaterial modified concrete

Wenlin Luo

Lufeng Zhongjian Industrial Co., Ltd., Shanwei, Guangdong

【Abstract】 Nanomaterials, as a new type of functional material, are widely used in concrete modification to enhance its mechanical properties and durability. This article systematically studies the influence mechanism of nanomaterials on the microstructure of concrete, and analyzes the improvement effect of different nanomaterials on the compressive strength, flexural strength, and durability performance of concrete. By combining experimental and theoretical methods, the dispersion state and reinforcement mechanism of nanoparticles in concrete were revealed, and a technical path for optimizing the concrete mix ratio was proposed. Nanomaterials can effectively improve the density and chemical resistance of concrete, significantly prolong the service life of structures, and provide theoretical basis and practical guidance for the high-performance design of concrete materials.

【Keywords】 Nanomaterials; Concrete modification; Mechanical properties; Durability; Microstructure

引言

混凝土作为现代建筑的主要结构材料，其性能的提升直接影响建筑结构的安全性和耐久性。传统混凝土在长期使用过程中存在力学性能下降和耐久性不足的问题，亟需通过材料改性技术加以解决。纳米材料凭借其独特的物理化学性质，在改善混凝土性能方面展现出巨大潜力。纳米粒子的引入不仅能够优化混凝土的微观结构，提高密实度，还能增强其抗裂性和抗腐蚀能力，显著提升混凝土的整体性能。当前，纳米材料改性混凝土的研究逐渐成为材料科学和结构工程领域的热点，相关机理及应用效果的深入探讨对于推动混凝土技术的创新具有重要意义。本文围绕纳米材料对混凝土力学性能和耐久性的影响展开，结合实验与理论分析，探讨其改性效应和应用前景。

1 纳米材料在混凝土中的作用机理分析

纳米材料在混凝土中的作用机理主要体现在其独特的尺寸效应和表面效应，这些特性使得纳米粒子能够显著改变混凝土的微观结构和宏观性能。纳米粒子的尺度通常在 1 到 100 纳米之间，具有极高的比表面积和活性，这使它们能够与水泥基材料中的水化产物产生更紧密的化学反应。通过填充混凝土中的毛细孔隙，纳米材料显著提高了混凝土的密实性，从而减少了水分和有害离子的渗透路径，提升了混凝土的抗渗性和耐久性。纳米粒子作为晶核促进剂，能够加速水泥的水化反应，促进更多致密的水化产物生成，提高混凝土的早期强度和整体力学性能。

纳米材料的分散状态对混凝土的性能发挥起到关键作用。良好的分散不仅能够充分发挥纳米粒子的填充和活性功能，还能避免因团聚引起的微观缺陷，影响混凝土的整体均匀性。为了实现理想的分散效果，通常

采用表面改性技术或超声分散技术,增强纳米粒子与水泥浆体的相容性。分散均匀的纳米粒子在混凝土中形成纳米级的骨架结构,增强了混凝土的微观连接力和裂缝阻止能力,从而显著改善其抗裂性能和疲劳寿命。纳米材料的界面作用也极为重要,纳米粒子能够在水泥石与骨料界面处形成过渡层,改善界面结合强度,提升复合材料的整体性能。

2 纳米材料对混凝土力学性能的影响研究

纳米材料掺入混凝土体系中,对其力学性能的提升表现出显著的积极影响,尤其是在抗压强度、抗折强度以及弹性模量等关键指标上体现得尤为明显。纳米粒子由于其极高的比表面积和活性,可以有效促进水泥水化反应速率,加速水化产物的生成,从而形成更加致密的水泥基骨架结构。这种微观结构的优化减少了混凝土内部的孔隙率和微裂缝,提高了混凝土的整体密实性和均匀性,最终使材料的承载能力得到增强。实验结果显示,纳米材料的适量掺加能够显著提高混凝土的早期强度,满足工程对快速硬化材料的需求。

纳米材料在混凝土中的分散均匀性直接影响其力学性能的发挥。均匀分散的纳米粒子可以在水泥浆体中形成有效的微观骨架,增强微观裂缝的阻断能力,提升混凝土的抗裂性能和韧性表现。通过控制纳米材料的掺量和分散方式,可以调节混凝土的微观结构,从而优化其抗弯和抗拉性能。纳米材料改善了骨料与水泥浆的界面结合强度,强化了界面过渡区,降低了界面缺陷对混凝土整体强度的影响。这些变化有效增强了混凝土抵抗外部载荷作用下的变形能力,提高了其弹性模量和能量吸收能力。

除了力学性能的提升,纳米材料还赋予混凝土更优异的耐久性能,间接促进力学性能的长期稳定性。纳米粒子通过填充孔隙和催化水化反应,提高了混凝土的致密度,减少了腐蚀介质的渗透途径,延缓了内部钢筋的腐蚀过程。混凝土结构在复杂环境下承受的化学和物理侵蚀得以显著减缓,力学性能的衰减速度也随之降低。纳米材料的引入不仅改善了混凝土的短期力学性能,更重要的是延长了其使用寿命和承载能力,体现出在工程应用中的广阔前景和实际价值。

3 纳米材料改性混凝土的耐久性评价

纳米材料改性混凝土的耐久性评价主要围绕其抗化学侵蚀能力、抗冻融性能以及抗碳化性能展开。纳米粒子的引入极大改善了混凝土的微观结构,显著降低了孔隙率和毛细孔连通性,这使得有害介质如氯离子、硫酸盐等难以渗透进入混凝土内部。通过形成致密的

水泥石网络,纳米材料有效阻止了腐蚀介质对钢筋的侵害,提升了钢筋混凝土结构的耐腐蚀性和耐久寿命。实验数据表明,纳米二氧化硅和纳米氧化铁等常用纳米材料能够增强混凝土的密实性,显著减缓腐蚀介质的扩散速度,延缓了钢筋锈蚀和混凝土劣化的进程。

在抗冻融性能方面,纳米材料的掺入显著提升了混凝土的抗裂性和抗冻融循环能力。冻融循环过程中,水分在孔隙中冻结膨胀引发微裂纹和剥落,严重影响混凝土结构的稳定性。纳米粒子通过填充细微孔隙和改良水泥基体的微观连接,增强了混凝土的内在致密性,减少了冻融循环中水分的渗入和冰晶的形成。纳米材料还能增强混凝土的弹性模量和韧性,提升其抵抗冻融损伤的能力。实验表明,纳米材料改性混凝土在经过多次冻融循环后,力学性能衰减明显减缓,结构表面也保持较好的完整性,表现出优异的耐久性。

抗碳化性能是混凝土耐久性评价的重要指标,纳米材料的加入有效延缓了混凝土的碳化进程。碳化导致混凝土内部 pH 值下降,破坏了钢筋保护层,促使钢筋腐蚀加速。纳米材料通过促进水泥水化反应,生成更多的 C-S-H 凝胶,增强了混凝土的致密性和碱性储备,有效阻碍了二氧化碳的扩散。纳米粒子形成的微观结构不仅提升了碳化深度的抗力,还改善了界面过渡区的稳定性,减少了碳化过程中产生的微裂缝。耐久性测试结果显示,纳米材料改性混凝土的碳化深度明显低于普通混凝土,展示出更优越的长期抗碳化性能。整体而言,纳米材料通过多方面机制强化混凝土的耐久性能,为高性能混凝土的设计与应用提供了坚实的技术支撑。

4 纳米材料改性混凝土性能优化策略

纳米材料改性混凝土性能的优化离不开对纳米粒子种类、掺量及其分散技术的系统研究和合理控制。不同类型的纳米材料,如纳米二氧化硅、纳米氧化铁、纳米羟基磷灰石等,在混凝土中表现出各自独特的功能特性。纳米二氧化硅以其高反应活性和优异的填充效应,能够促进水泥水化反应,生成更多的 C-S-H 凝胶,显著提升混凝土的密实性和强度。而纳米氧化铁不仅参与水泥水化,还能改善混凝土的抗腐蚀性能,增强其耐久性。针对不同工程需求,选择适宜的纳米材料类型成为性能优化的关键环节。合理确定纳米材料的掺量对于发挥其最佳效果至关重要。过量掺加可能导致纳米粒子团聚,形成微观缺陷,反而降低混凝土性能。

纳米材料的分散技术直接影响其在混凝土中的均匀分布和性能发挥。由于纳米粒子具有较强的团聚趋

势,若未能实现充分分散,纳米材料的活性和填充作用将大打折扣,甚至产生性能劣化。采用超声波分散、机械搅拌以及表面改性等方法对纳米材料进行预处理是提高其分散性的有效手段。表面改性技术通过引入功能性官能团,增强纳米粒子与水泥浆体的界面结合力,减少粒子间的静电吸引力,有助于实现均匀分布。合理设计混凝土配合比,调整水胶比和掺合料比例,也能够辅助纳米材料的分散与功能发挥,达到整体性能的优化。高效分散的纳米粒子能更充分地参与水泥水化和微结构改造,显著提升混凝土的强度、韧性和耐久性。

在纳米材料改性混凝土的性能优化过程中,还需综合考虑工程应用环境和长期服役条件。不同环境下混凝土所面临的化学腐蚀、冻融循环、碳化等劣化机制各异,针对具体工况制定相应的纳米材料改性方案十分必要。在海洋环境或含氯盐环境中,应优先选用具有优良抗氯离子侵蚀能力的纳米材料,并加强混凝土的密实性以阻止腐蚀介质渗透;在寒冷地区,则需注重纳米材料对抗冻融性能的提升,通过提高混凝土的韧性和孔隙结构的优化,减缓冻融引起的损伤。结合纳米材料的改性作用与其他掺合料如粉煤灰、矿渣微粉等的协同效应,能够实现复合材料性能的进一步提升。通过多因素协同优化,纳米材料改性混凝土的整体性能能够达到工程设计的高标准要求,满足结构安全性和耐久性的双重目标,为未来高性能混凝土的发展提供可靠保障。

5 结语

纳米材料改性混凝土通过优化微观结构,显著提升了力学性能和耐久性,为混凝土材料的高性能应用提供了新的技术路径。合理选择纳米材料种类与掺量,结合先进的分散技术,能够充分发挥纳米粒子的作用机理,改善混凝土的密实性和抗裂性能。针对不同环境工况制定针对性改性方案,有效延长混凝土结构的使用寿命。未来,纳米材料与其他功能材料的协同应用将

成为提升混凝土综合性能的重要方向,为建筑工程的安全性和可持续发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 方莹,文祝.多尺度碳纤维改性混凝土的力学性能及抗冻性[J].硅酸盐通报,2024,43(11):4004-4011.
- [2] 王少芹.纳米改性混凝土材料研究进展[J].居舍,2024,(28): 67-70+73.
- [3] 吴英哲,衷从浩,张金龙,等.纳米材料改性水泥基材料性能研究进展[J].广州建筑,2024,52(04):109-114.
- [4] 杨瑞禧,徐钟,周彦森,等.纤维和纳米材料增强稻壳灰地质聚合物混凝土的力学性能及改性机理研究[C]//中国材料研究学会.中国材料大会 2024 暨世界材料大会 2024 论文集.成都理工大学环境与土木工程学院;地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室成都理工大学;,2024:61-72.
- [5] 朱明皓.玄武岩纤维改性对混凝土力学性能及抗硫酸盐性能的影响研究[D].辽宁工程技术大学,2024.
- [6] 翟思敏,黄金霞.纳米填料改性环氧树脂建筑保温材料的制备及性能研究[J].功能材料,2024,55(03):3102-3106+3121.
- [7] 章婷.聚合物改性纳米碳酸钙及其在水泥基材料中的应用[D].合肥工业大学,2023.
- [8] 李良平.纳米 SiO₂ 改性玻璃纤维混凝土力学性能与试验研究[D].南华大学,2023.

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/>

