

# 纳米改性混凝土的力学性能优化及抗氯离子侵蚀耐久性研究

石磊

412702\*\*\*\*\*5553

**摘要：**混凝土作为土木工程领域应用最广泛的建筑材料之一，其力学性能与耐久性直接决定了建筑结构的安全性和使用寿命。然而，传统混凝土存在强度提升受限、抗氯离子侵蚀能力弱等问题，在海洋工程、地下工程等复杂服役环境中易出现性能劣化，严重影响结构稳定性。纳米材料凭借其独特的尺寸效应、表面效应和界面效应，为混凝土性能优化提供了新的技术路径。本文从理论层面系统分析纳米材料对混凝土力学性能的优化机制，深入探讨其提升混凝土抗氯离子侵蚀耐久性的作用原理，结合现有研究成果梳理不同纳米材料的改性效果差异及应用关键技术，最后展望纳米改性混凝土在未来土木工程领域的发展方向，为相关研究与工程实践提供理论参考。

**关键词：**抗氯离子侵蚀；耐久性；改性机制

**DOI:** 10.69979/3060-8767.25.10.081

## 引言

随着我国基建向海洋、地下等复杂环境延伸，对混凝土性能要求提高。传统混凝土水化易形成孔隙，既使抗压、抗拉等力学性能难满足高强度工程需求，又为氯离子等侵蚀介质提供通道，导致钢筋锈蚀、混凝土开裂剥落，缩短结构寿命，海洋环境下其寿命缩短 30%-50%，每年因钢筋锈蚀损失数百亿元。

本文围绕纳米改性混凝土相关性能展开研究，阐述影响机制、分析核心原理、探讨影响因素，结合应用现状指出问题与发展方向，为其规模化应用提供理论支撑。

## 1 纳米材料对混凝土力学性能的优化机制

混凝土的力学性能好坏，主要由胶凝材料的水化程度、内部孔隙结构特点以及骨料与胶凝材料界面过渡区（ITZ）的性能决定。纳米材料能通过调控混凝土的水化过程、改善其微观结构，实现力学性能的优化，具体可从三方面分析。

### 1.1 调控水化反应进程，提升胶凝材料强度贡献

水泥水化是混凝土形成强度的关键环节，水泥颗粒与水反应会生成水化硅酸钙（C-S-H）凝胶、氢氧化钙（ $\text{Ca(OH)}_2$ ）等产物，其中 C-S-H 凝胶对混凝土强度起决定性作用。在传统混凝土中，水泥颗粒水化存在“包裹效应”——外层水化产物形成后，会阻碍水分向水泥颗粒内部渗透，导致内部水泥颗粒无法充分水化，使得胶凝材料对强度的贡献降低。

纳米材料具有高比表面积和强表面活性，能充当水

化反应的“晶核”，推动水泥颗粒分散与水化。以纳米二氧化硅为例，其表面有大量羟基（-OH），可与水泥水化产生的  $\text{Ca(OH)}_2$  发生二次反应，生成更多 C-S-H 凝胶。一方面，二次反应消耗混凝土内部的  $\text{Ca(OH)}_2$ ，减少其在界面过渡区的聚集，避免因  $\text{Ca(OH)}_2$  晶体定向排列导致界面强度下降；另一方面，新增的 C-S-H 凝胶能填充水泥颗粒间的空隙，提高胶凝材料的致密性。此外，纳米材料还能加快水泥水化反应速度，缩短混凝土凝结时间，促进早期强度发展，特别适合对早期强度有较高要求的工程场景，如预制构件生产、抢修工程等。

不同纳米材料对水化反应的调控效果不同：纳米二氧化硅活性较高，与  $\text{Ca(OH)}_2$  的二次反应能力最强，对混凝土后期强度提升效果显著；纳米碳酸钙活性相对较低，主要通过晶核作用促进水泥早期水化，更利于早期强度提升；纳米二氧化钛则兼具水化调控与光催化性能，在提高强度的同时，还能让混凝土具备自清洁功能。因此，实际应用中需根据工程对混凝土强度发展阶段的需求，选择合适的纳米材料。

### 1.2 改善内部孔隙结构，降低应力集中效应

混凝土内部的孔隙是导致其力学性能下降的重要因素，孔隙的尺寸、分布及连通情况直接影响抗压、抗拉强度。传统混凝土在水化过程中，因水分蒸发、气泡残留等，会形成从纳米级到微米级的多级孔隙结构，其中连通孔隙不仅会降低混凝土致密性，还会在受力时产生应力集中，成为裂缝萌生的源头。

纳米材料的粒径远小于传统矿物掺合料，能有效填

充混凝土内部的微小孔隙,实现“纳米级填充”效应。一方面,纳米颗粒可填充水泥水化产物间的间隙,减少毛细孔隙的数量与尺寸;另一方面,纳米材料与水泥水化产物结合形成的复合结构,能阻断连通孔隙的形成,提升混凝土整体致密性。从力学性能角度看,致密的孔隙结构可降低应力集中效应,当混凝土承受外力时,裂缝的萌生与扩展会受到抑制,进而提高其抗压强度、抗拉强度及弹性模量。

### 1.3 增强界面过渡区性能,提升整体力学协同性

混凝土是由骨料、胶凝材料和界面过渡区组成的复合材料,界面过渡区是连接骨料与胶凝材料的关键部分,也是混凝土力学性能的薄弱环节。传统混凝土中,界面过渡区的水化产物排列松散,存在较多孔隙和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体,导致其强度远低于胶凝材料本体,当混凝土承受外力时,裂缝容易先在界面过渡区萌生并扩展,进而影响整体力学性能。

纳米材料可通过界面作用改善界面过渡区的微观结构,提高其强度与黏结性能。一方面,纳米颗粒能吸附在骨料表面,作为水化反应的晶核,促进 C-S-H 凝胶在骨料表面生成与生长,让界面过渡区的水化产物更致密;另一方面,纳米材料与骨料、胶凝材料间的界面作用力较强,能增强三者间的黏结强度,减少界面过渡区的孔隙与缺陷。此外,纳米材料还能抑制  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体在界面过渡区的聚集与定向排列,避免因晶体结构缺陷导致界面强度降低。

界面过渡区性能的提升,能增强混凝土各组份间的力学协同性,使外力在骨料与胶凝材料间均匀传递,减少局部应力集中,从而显著提高混凝土的抗拉强度、抗折强度及抗冲击性能,有效改善传统混凝土“抗压不抗拉”的性能短板。

## 2 纳米材料提升混凝土抗氯离子侵蚀耐久性的作用原理

氯离子侵蚀是导致混凝土结构耐久性下降的重要原因,氯离子通过渗透、扩散进入混凝土内部,破坏钢筋表面钝化膜引发锈蚀。纳米材料可通过改善混凝土致密性、调控氯离子传输路径及增强界面稳定性,显著提升其抗氯离子侵蚀能力,具体作用原理可从三方面分析。

### 2.1 降低混凝土渗透性,阻断氯离子传输通道

氯离子进入混凝土的主要途径是孔隙渗透与扩散,

混凝土渗透性直接影响氯离子侵入速率。传统混凝土因存在较多连通孔隙,渗透性较高,氯离子易快速到达钢筋表面。纳米材料能通过改善混凝土微观结构降低渗透性,进而阻断氯离子传输通道。

如前文所述,纳米材料可填充混凝土内部微小孔隙,减少毛细孔隙数量与连通性,提升整体致密性。致密结构会延长氯离子渗透路径、增大渗透阻力,降低其渗透速率。同时,纳米材料与水泥水化产物反应生成的 C-S-H 凝胶吸附能力强,可通过物理吸附固定部分氯离子,进一步减少向钢筋表面的传输量。此外,纳米材料还能改善界面过渡区性能,减少其孔隙与缺陷。传统混凝土中界面过渡区是氯离子渗透的主要通道,其性能提升可进一步降低混凝土渗透性,增强抗氯离子侵蚀能力。

### 2.2 调控水化产物组成,增强氯离子结合能力

混凝土对氯离子的结合能力是影响抗侵蚀性能的关键,水化产物(如 C-S-H 凝胶、AFt 等)可通过化学结合或物理吸附固定氯离子,减少自由氯离子含量,而自由氯离子是引发钢筋锈蚀的主因,因此提升结合能力可降低锈蚀风险。

纳米材料能通过调控水泥水化产物组成与结构,增强氯离子结合能力。一方面,纳米材料促进水泥充分水化,生成更多 C-S-H 凝胶,其大比表面积与丰富活性位点可通过物理吸附和化学结合(如离子交换)固定氯离子,提升结合量;另一方面,纳米材料与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的二次反应会减少  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  含量,而  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  会降低混凝土对氯离子的结合能力,因此二次反应可间接提升结合能力。

不同纳米材料的提升效果存在差异:纳米二氧化硅与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  二次反应能力最强,生成的 C-S-H 凝胶最多,对结合能力提升最显著;纳米碳酸钙主要促进早期水化生成更多水化产物,提升效果相对较弱,但在早期抗氯离子侵蚀方面有优势。

### 2.3 增强混凝土结构稳定性,抑制侵蚀损伤扩展

氯离子侵入后,除引发钢筋锈蚀,还会与水化产物反应生成膨胀性产物(如 Friedel 盐),导致混凝土内部产生膨胀应力,引发开裂、剥落等损伤。纳米材料可通过增强结构稳定性,抑制损伤扩展,提升抗氯离子侵蚀耐久性。

首先,纳米改性混凝土微观结构更致密、界面黏结

性能更强,能承受更大膨胀应力,减少因膨胀产物导致的开裂;其次,纳米材料提升了混凝土的抗拉强度与抗折强度,当因膨胀应力产生微小裂缝时,较强的抗拉性能可抑制裂缝扩展,避免发展为宏观裂缝,维持结构完整性;此外,纳米材料还能改善混凝土的抗冻融与抗碳化性能,减少其他侵蚀因素与氯离子的协同作用,进一步提升耐久性。

### 3 纳米改性混凝土的应用现状与发展方向

#### 3.1 应用现状

近年来,纳米改性混凝土在土木工程领域应用研究进展显著,已在部分重点工程试点应用。海洋工程中,用于跨海大桥、海洋平台等结构浇筑,如某跨海大桥桥墩用掺入纳米二氧化硅的混凝土,提升抗氯离子侵蚀能力,延长维护周期;地下工程里,用于地铁隧道、地下管廊等,改善抗渗性和抗裂性,减少侵蚀;预制构件生产中,因其早期强度发展快、力学性能优,用于预制梁、板等生产,提高效率和质量。

然而,其规模化应用面临挑战:一是纳米材料成本高,使纳米改性混凝土价格高,限制普通工程应用;二是纳米材料分散性问题未解决,搅拌易团聚,影响改性效果;三是长期性能数据不足,缺乏复杂环境服役监测数据,工程设计人员对其性能稳定性有顾虑。

#### 3.2 发展方向

针对现存问题,结合材料科学与土木工程发展趋势,未来纳米改性混凝土研究与应用可向以下方向推进:

第一,开发低成本纳米材料及复合改性技术。降低纳米材料成本是关键,可优化制备工艺、利用工业废弃物制备纳米材料,同时开展纳米材料与传统矿物掺合料复合改性研究,提升效果、减少掺量、降低成本。

第二,优化纳米材料分散技术与施工工艺。纳米材料分散性影响改性效果,需开发高效分散技术,如表面改性处理、研发专用搅拌设备;结合工程需求,优化施工工艺,确保施工与力学性能稳定。

第三,加强长期性能研究与标准体系建设。长期性能数据是广泛应用支撑,需开展更多长期暴露和加速老化试验,研究性能演化规律;加快建立标准体系,明确技术指标、性能要求及检测方法,提供规范指导。

第四,拓展多功能纳米改性混凝土研发。随着工程对混凝土性能要求多元化,可研发兼具多种功能的纳米改性混凝土,如制备自修复、自清洁等功能的混凝土,提升耐久性,适用于特定工程。

### 4 结论

本文从理论层面分析纳米材料对混凝土力学性能与抗氯离子侵蚀耐久性的优化机制,探讨纳米改性混凝土应用现状与发展方向,得出结论如下:

纳米材料通过调控水泥水化、改善孔隙结构、增强界面过渡区性能,优化混凝土力学性能。纳米二氧化硅提升后期强度,纳米碳酸钙利于早期强度发展,最佳掺量依材料与工程确定。

纳米材料通过降低渗透性、增强氯离子结合能力、提升结构稳定性,提升混凝土抗氯离子侵蚀耐久性。致密微观结构与界面过渡区性能改善是阻断氯离子传输、抑制侵蚀的核心机制。

纳米改性混凝土已在海洋、地下工程试点应用,但面临成本高、分散性差、长期性能数据不足等问题。未来需开发低成本材料、优化工艺、加强研究、拓展研发,推动规模化应用。

纳米改性混凝土作为新型高性能材料,可解决传统混凝土性能短板。随着技术突破与标准完善,必将在土木工程领域发挥重要作用,支撑基础设施安全与寿命提升。

### 参考文献

- [1] 李晗,高丹盈,赵军. 纤维纳米混凝土力学性能和抗氯离子渗透性能的研究[C]//2012:39-45.
- [2] 李星辰. 氯盐环境下石墨烯改性水泥基材料耐久性研究[D]. 江苏大学,2021.
- [3] 袁连旺. 纳米 SiO<sub>2</sub> 改性混凝土的抗氯离子渗透和抗冻性能研究[D]. 济南大学,2017.
- [4] 延永东,高生宇,姚嘉诚,等. 复掺渗透结晶材料和纳米二氧化硅混凝土抗氯离子侵蚀性能研究[J]. 混凝土, 2022(007):000.
- [5] 黄振. 纳米混凝土力学性能及耐久性研究[D]. 沈阳大学,2016.