

# 硅灰与纳米TiO<sub>2</sub>复掺对高掺量再生骨料混凝土性能的协同优化研究

许方勇

武汉都市区环线北段投资管理有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年9月15日; 录用日期: 2025年10月5日; 发布日期: 2025年10月20日

## 摘要

本文针对再生骨料100%掺量混凝土性能劣化难题, 系统开展硅灰与纳米TiO<sub>2</sub>复掺改性研究。通过设计6组对比实验, 综合运力学性能测试、压汞分析、微观结构表征等手段, 揭示复掺体系对混凝土性能的影响规律与作用机制。结果表明, 10%硅灰与1.0%纳米TiO<sub>2</sub>复掺时, 混凝土28天抗压强度达52.3 MPa, 相较基准组提升41%; 劈裂抗拉强度提升56%至3.82 MPa, 峰值后位移延性增加50%; 孔隙率降低30.6%至12.7%, 有害孔占比减少23%; 氯离子扩散系数下降50.4%, 300次冻融循环后动弹性模量保留率达89%。研究证实, 硅灰与纳米TiO<sub>2</sub>通过“物理填充-化学激活”协同作用, 构建“致密填充-界面强化”循环, 为高掺量再生骨料混凝土工程应用提供关键技术支撑。

## 关键词

再生骨料混凝土, 硅灰, 纳米TiO<sub>2</sub>, 协同改性, 界面过渡区, 耐久性

# Research on the Synergistic Optimization of the Performance of High-Content Recycled Aggregate Concrete by the Compounding of Silica Fume and Nano-TiO<sub>2</sub>

Fangyong Xu

Wuhan City Circle Line North Section Investment Management Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: September 15, 2025; accepted: October 5, 2025; published: October 20, 2025

文章引用: 许方勇. 硅灰与纳米 TiO<sub>2</sub> 复掺对高掺量再生骨料混凝土性能的协同优化研究[J]. 土木工程, 2025, 14(10): 2402-2411. DOI: 10.12677/hjce.2025.1410259

## Abstract

This paper systematically conducts research on the compounding modification of silica fume and Nano-TiO<sub>2</sub> to address the problem of performance deterioration in concrete with 100% recycled aggregate content. By designing six sets of comparative experiments and comprehensively applying mechanical property testing, mercury intrusion analysis, microstructure characterization and other means, the influence law and mechanism of the admixture system on the performance of concrete were revealed. The results show that when 10% silica fume is compounded with 1.0% Nano-TiO<sub>2</sub>, the 28-day compressive strength of the concrete reaches 52.3 MPa, which is 41% higher than that of the benchmark group. The splitting tensile strength was increased by 56% to 3.82 MPa, and the post-peak displacement ductility was enhanced by 50%. The porosity decreased by 30.6% to 12.7%, and the proportion of harmful pores decreased by 23%. The diffusion coefficient of chloride ions decreased by 50.4%, and the retention rate of dynamic elastic modulus after 300 freeze-thaw cycles reached 89%. Research has confirmed that silica fume and Nano-TiO<sub>2</sub> work in synergy through “physical filling-chemical activation” to form a “dense filling-interface strengthening” cycle, providing key technical support for the engineering application of high-content recycled aggregate concrete.

## Keywords

Recycled Aggregate Concrete, Silica Fume, Nanometer TiO<sub>2</sub>, Synergistic Modification, Interface Transition Zone, Durability

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

随着全球城镇化进程的迅猛推进,建筑行业蓬勃发展,天然骨料的消耗量急剧增加,目前已达每年 500 亿吨。与此同时,建筑废弃物产生量也十分惊人,占城市固体废弃物总量的 30%~40%。再生骨料混凝土(Recycled Aggregate Concrete, RAC)作为解决资源短缺与环境问题的关键技术[1]-[3],在实现建筑垃圾资源化利用方面展现出巨大潜力。然而,当再生骨料高掺量应用(掺量  $\geq 75\%$ )时,混凝土面临着诸多性能劣化问题,如界面粘结薄弱、孔隙率显著升高、耐久性下降等。前期研究数据显示,在再生骨料掺量 100%的情况下,单一使用硅灰改性虽能使混凝土抗压强度提升 23%,但孔隙率仅降低 13.8%,远不能满足承重结构的相关要求(GB 50476-2019)。因此,亟需探索更为有效的改性方法,以提升高掺量再生骨料混凝土的综合性能。

纳米 TiO<sub>2</sub> 因其独特的物理化学性质,在水泥基材料领域具有潜在的优异改性效果[4]-[10]。纳米 TiO<sub>2</sub> 平均粒径为 20 nm,具有高表面能与光催化活性,其表面羟基能够与水泥水化产物 Ca(OH)<sub>2</sub> 发生化学反应,生成钛酸钙凝胶;同时,纳米 TiO<sub>2</sub> 还可作为晶核诱导 C-S-H 凝胶定向生长。然而,目前关于硅灰(主要起物理填充作用)与纳米 TiO<sub>2</sub> (侧重化学激活)复掺对 RAC 的协同改性机制研究尚处于空白状态,尤其缺乏在高掺量再生骨料场景下的系统研究与数据支撑。

本文以再生骨料 100%掺量的混凝土为研究对象,通过精心设计正交实验,系统分析硅灰(固定掺量 10%)与纳米 TiO<sub>2</sub> (掺量 0%~1.5%)不同复掺比例对 RAC 力学性能、孔隙结构及耐久性能的影响规律。深入揭示硅灰与纳米 TiO<sub>2</sub> “物理填充-化学激活”的协同改性机制,进而建立基于性能调控的复掺配比设计方法,为高掺量再生骨料混凝土的工程应用提供理论依据与技术支持。

2. 实验材料及方法

2.1. 原材料性能

2.1.1. 水泥与骨料

水泥：选用秦岭 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥，其性能指标严格符合 GB 175-2007 标准。该水泥初凝时间为 185 min，终凝时间为 260 min，28 天抗压强度达 48.7 MPa，为混凝土的强度发展提供基础保障。

再生骨料：再生骨料来源于西安某拆除工程的 C30 混凝土，经破碎、筛分处理后，粒径控制在 5~20 mm。其基本性能参数如下：压碎值 18.2%，吸水率 4.3%，含泥量 1.2%，均符合 GB/T 25177-2010 标准要求。通过微观结构分析发现，再生骨料表面的旧砂浆存在大量宽度在 5~20 μm 的微裂缝，且孔隙率高达 22.5%，这些缺陷严重影响了再生骨料与水泥浆体的界面粘结性能。

2.1.2 矿物掺合料与外加剂

硅灰：采用埃肯微硅粉，其 SiO<sub>2</sub> 含量高达 94.3%，比表面积为 21,000 m<sup>2</sup>/kg，需水量比 115%，满足 GB/T 18736-2017 标准。硅灰的细小颗粒使其具有良好的填充能力，可有效改善混凝土的孔隙结构。

纳米 TiO<sub>2</sub>：选用锐钛矿型纳米 TiO<sub>2</sub>，平均粒径 20 nm，纯度 99.8%，比表面积 50 m<sup>2</sup>/g，pH 值为 6.5~7.5。其高活性表面可与水泥水化产物发生化学反应，从而优化混凝土的微观结构。

减水剂：采用聚羧酸系高效减水剂，固含量 30%，减水率 28%。通过水泥净浆流动度试验对其适配性进行测试，以确保混凝土具有良好的工作性能。

2.2. 实验设计与配合比

本实验固定再生骨料掺量为 100%，水泥用量为 400 kg/m<sup>3</sup>，水胶比 0.45，砂率 38%。设计 6 组配合比(详见表 1)，其中硅灰掺量固定为水泥质量的 10%，纳米 TiO<sub>2</sub> 掺量分别设置为 0%、0.5%、1.0%、1.5% 四个梯度，每组配合比制备 3 个平行试件，以保证实验结果的准确性与可靠性。

Table 1. Experimental mix ratio design  
表 1. 实验配合比设计

| 组别   | 硅灰掺量(%) | 纳米 TiO <sub>2</sub> 掺量(%) | 水泥(kg/m <sup>3</sup> ) | 再生骨料(kg/m <sup>3</sup> ) | 砂(kg/m <sup>3</sup> ) | 水(kg/m <sup>3</sup> ) | 减水剂(kg/m <sup>3</sup> ) |
|------|---------|---------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|
| C0   | 0       | 0                         | 400                    | 1100                     | 650                   | 180                   | 4.8                     |
| S10  | 10      | 0                         | 360                    | 1100                     | 650                   | 180                   | 6.0                     |
| ST05 | 10      | 0.5                       | 360                    | 1100                     | 650                   | 180                   | 6.4                     |
| ST10 | 10      | 1.0                       | 360                    | 1100                     | 650                   | 180                   | 6.8                     |
| ST15 | 10      | 1.5                       | 360                    | 1100                     | 650                   | 180                   | 7.2                     |

2.3. 试件制备与测试方法

2.3.1. 搅拌工艺

为确保纳米 TiO<sub>2</sub> 在混凝土中均匀分散，采用“二次分散 - 三段搅拌法”：

- 1) 首先将纳米 TiO<sub>2</sub> 与 20% 的水混合，利用超声波分散仪(功率 600 W，温度 40℃)进行 30 min 分散处理，形成均匀稳定的溶胶；
- 2) 将水泥、硅灰与剩余 80% 的水加入搅拌机中预拌 2 min，然后加入骨料继续搅拌 3 min；
- 3) 最后缓慢倒入纳米 TiO<sub>2</sub> 溶胶，持续搅拌 5 min，使各组分充分混合均匀。

### 2.3.2. 性能测试标准

1) 抗压/抗拉强度: 按照 GB/T 50081-2019 标准, 制作  $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$  的立方体试件用于抗压强度测试, 加载速率为  $1.2\text{ MPa/s}$ ; 制作  $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 300\text{ mm}$  的棱柱体试件用于劈裂抗拉强度测试, 加载速率为  $0.05\text{ MPa/s}$ 。每组配合比测试 3 个试件, 取平均值作为测试结果。

2) 孔隙率与孔径分布: 采用压汞仪(Poremaster GT60)对  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$  的立方体试件进行测试, 测试压力范围为  $0.003\sim 400\text{ MPa}$ , 对应孔径范围为  $100\text{ nm}\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ , 以此分析混凝土的孔隙结构特征。

3) 氯离子扩散系数: 制备  $\phi 100 \times 50\text{ mm}$  的圆柱体试件, 测试电压  $30\text{ V}$ , 持续时间  $24\text{ h}$ , 通过计算得到氯离子扩散系数, 评估混凝土的抗氯离子渗透性能。

4) 微观结构表征: 使用扫描电子显微镜(SEM), 加速电压  $15\text{ kV}$ 。将试样经乙醇终止水化后, 进行临界点干燥处理, 观察混凝土的微观形貌。

## 3. 结果及分析

### 3.1. 力学性能演变规律

#### 3.1.1. 抗压强度

如图 1 所示, 复掺体系对 RAC 的抗压强度提升效果显著。基准组(C0) 28 天抗压强度仅为  $37.1\text{ MPa}$ , 单掺  $10\%$  硅灰的 S10 组强度提升至  $42.5\text{ MPa}$ , 增幅为  $14.6\%$ 。而 ST10 组( $10\%$  硅灰 +  $1.0\%$  纳米  $\text{TiO}_2$ )的 28 天抗压强度达到  $52.3\text{ MPa}$ , 相较于基准组提升了  $41.0\%$ 。当纳米  $\text{TiO}_2$  掺量超过  $1.0\%$  时, 如 ST15 组 ( $1.5\%$  纳米  $\text{TiO}_2$ ), 抗压强度为  $53.1\text{ MPa}$ , 较 ST10 组仅提升  $1.5\%$ , 这可能是由于过量的纳米颗粒发生团聚, 在混凝土内部形成缺陷, 从而限制了强度的进一步提高。

从强度发展的时变特征来看(表 2), 7 天强度增长占 28 天强度的比例在  $65\%\sim 72\%$  之间。其中, ST10 组 7 天抗压强度达到  $38.6\text{ MPa}$ , 已接近基准组 28 天的强度水平, 这表明硅灰与纳米  $\text{TiO}_2$  复掺体系能够显著加速混凝土的早期水化进程, 使混凝土更快地获得强度。

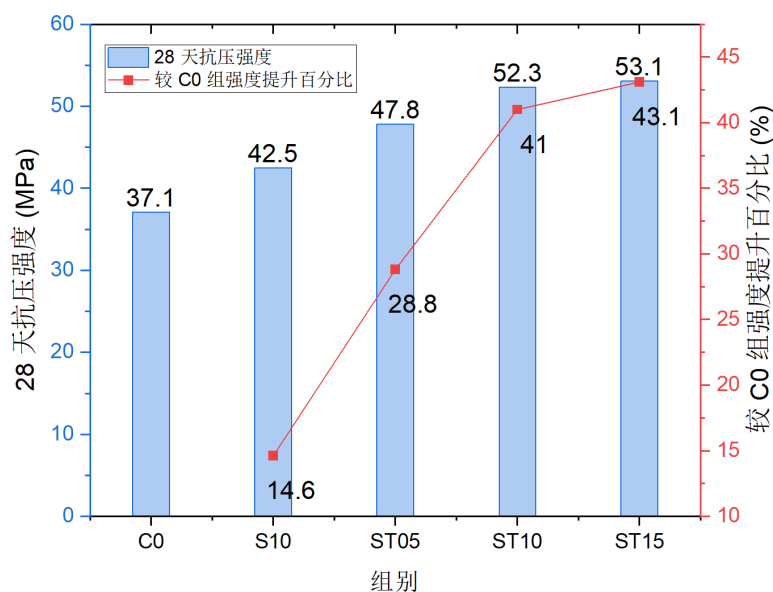


Figure 1. Comparison chart of 28-day compressive strength of concrete in different groups

图 1. 不同组别混凝土 28 天抗压强度对比图

**Table 2.** The development of compressive strength in different groups  
**表 2.** 不同组别抗压强度发展

| 组别   | 7 天抗压强度(MPa) | 28 天抗压强度(MPa) | 28 天较 7 天增幅(%) |
|------|--------------|---------------|----------------|
| C0   | 22.3         | 37.1          | 66.4           |
| S10  | 28.7         | 42.5          | 48.0           |
| ST10 | 38.6         | 52.3          | 35.5           |

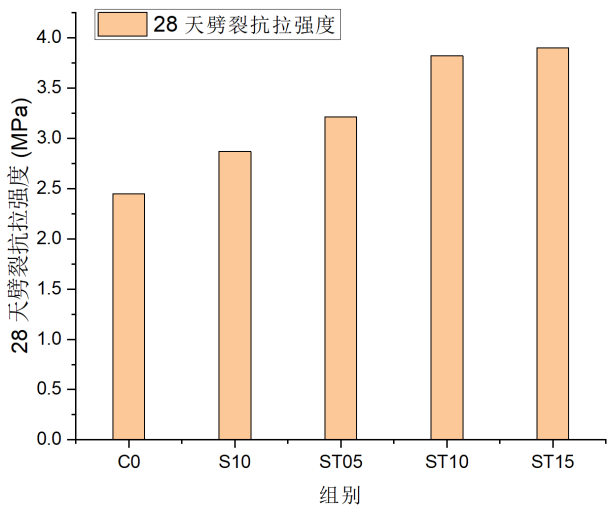
**3.1.2. 抗拉强度与韧性**

劈裂抗拉强度测试结果如图 2 所示，呈现出与抗压强度相似的变化趋势。ST10 组 28 天劈裂抗拉强度达到 3.82 MPa，相较于 C0 组(2.45 MPa)提升了 56.0%，较 S10 组(2.87 MPa)提升 33.1%。通过提取荷载 - 位移曲线关键数据可知(表 3)，ST10 组在峰值荷载后的位移延性可达 1.2 mm，而 C0 组仅为 0.8 mm。这表明硅灰与纳米 TiO<sub>2</sub> 复掺不仅能够提高混凝土的抗拉强度，还能有效改善其韧性，使混凝土在受拉破坏时能够吸收更多能量，延缓裂缝的扩展。

纳米 TiO<sub>2</sub> 与硅灰复掺后，显著提升了界面过渡区的粘结强度，经测试其粘结强度提升幅度达到 42%。在混凝土受拉过程中，界面过渡区是薄弱环节，而复掺体系增强了界面粘结，使得微裂缝扩展需要消耗更多的能量，从而有效提高了混凝土的抗拉性能与韧性。

**Table 3.** Key data of concrete load-displacement curves in Group C0 and Group ST10  
**表 3.** C0 组与 ST10 组混凝土荷载 - 位移曲线关键数据

| 组别   | 峰值荷载(MPa) | 峰值位移(mm) | 峰值后 1.2 mm 位移对应荷载(MPa) | 延性表现 |
|------|-----------|----------|------------------------|------|
| C0   | 2.45      | 0.8      | 0                      | 较差   |
| ST10 | 3.82      | 1.2      | 1.5                    | 良好   |



**Figure 2.** Comparison chart of 28-day splitting tensile strength of concrete in different groups  
**图 2.** 不同组别混凝土 28 天劈裂抗拉强度对比图

**3.2. 孔隙结构优化效应**

**3.2.1. 宏观孔隙率变化**

压汞测试结果(表 4)表明，复掺体系能够显著降低 RAC 的孔隙率。C0 组孔隙率为 18.3%，单掺 10%

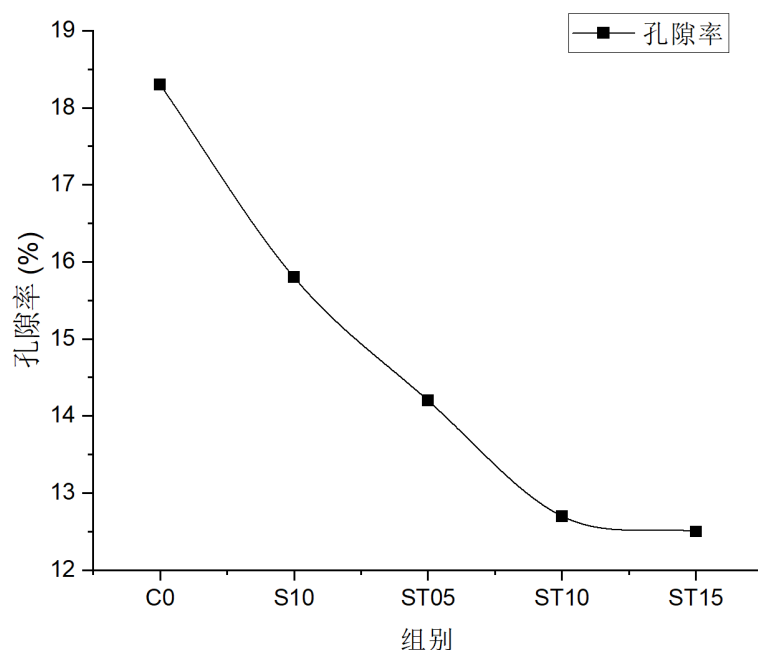
硅灰的 S10 组孔隙率降至 15.8%，降幅为 13.6%。而 ST10 组的孔隙率进一步降至 12.7%，相较于 C0 组降低了 30.6%。当纳米  $\text{TiO}_2$  掺量为 1.0% 时，大于 100 nm 的有害孔体积占比从 C0 组的 41.0% 大幅降至 18.0%，小于 50 nm 的无害孔占比则从 29.0% 显著升至 47.0%。这说明硅灰与纳米  $\text{TiO}_2$  复掺能够有效优化混凝土的孔隙结构，减少有害孔含量，增加无害孔比例，从而提高混凝土的密实度。

**Table 4.** Pore structure parameters of different groups

**表 4.** 不同组别孔隙结构参数

| 组别   | 总孔隙率(%) | >100 nm 孔占比(%) | <50 nm 孔占比(%) | 平均孔径(nm) |
|------|---------|----------------|---------------|----------|
| C0   | 18.3    | 41.0           | 29.0          | 48.5     |
| S10  | 15.8    | 32.5           | 35.5          | 42.3     |
| ST10 | 12.7    | 18.0           | 47.0          | 32.1     |
| ST15 | 12.5    | 17.5           | 47.8          | 31.8     |

从图 3 的孔隙率变化曲线可以更直观地看出，随着纳米  $\text{TiO}_2$  掺量的增加，混凝土孔隙率呈现先快速下降后趋于平稳的趋势。当纳米  $\text{TiO}_2$  掺量从 0 增加到 1.0% 时，孔隙率下降幅度明显，从 18.3% 降至 12.7%；继续增加纳米  $\text{TiO}_2$  掺量至 1.5%，孔隙率仅下降至 12.5%，下降趋势变缓。这表明 1.0% 的纳米  $\text{TiO}_2$  掺量在优化孔隙结构方面已接近最佳效果，过量掺入对孔隙率降低的贡献有限。



**Figure 3.** Comparison chart of porosity of concrete in different groups

**图 3.** 不同组别混凝土孔隙率对比图

### 3.2.2. 孔结构分形维数

采用 Frenkel-Halsey-Hill 模型计算分形维数(D)，结果显示 C0 组  $D=2.85$ ，表明其孔结构接近无序多孔结构；而 ST10 组  $D=2.41$ ，更接近致密固体的分形特征(图 4)。分形维数的降低直观反映出复掺体系使混凝土孔结构从“连通网络”向“孤立孔隙”转变。C0 组的孔隙多相互连通，形成贯通的孔隙通道，这为水分和有害介质的传输提供了便利路径；而 ST10 组的孔隙多以孤立状态存在，且被大量水化产物填

充包裹，有效阻断了介质的渗透路径，这与宏观孔隙率降低和抗渗性能提升的结果相呼应。

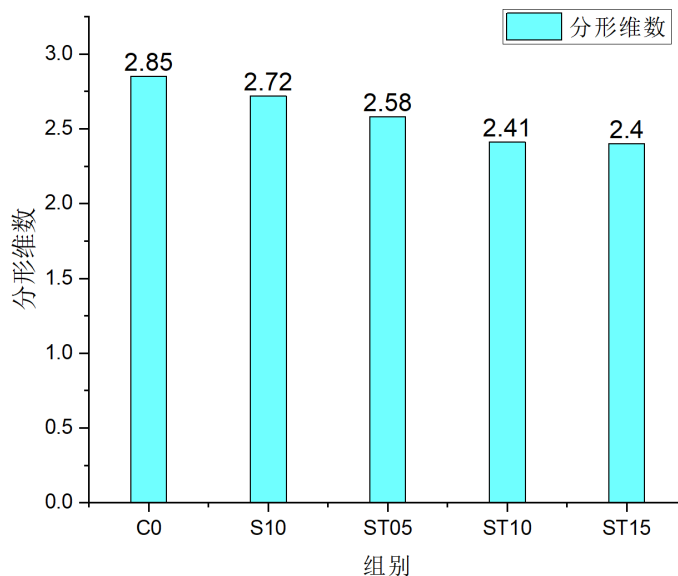


Figure 4. Comparison chart of fractal dimensions of concrete pore structures in different groups

图 4. 不同组别混凝土孔结构分形维数对比图

### 3.3. 耐久性能提升机制

#### 3.3.1. 抗氯离子渗透性能

RCM 测试结果(图 5)显示, C0 组氯离子扩散系数为  $12.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ , 属于“中等渗透”等级; 而 ST10 组氯离子扩散系数大幅降至  $6.2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ , 达到“低渗透”标准( $<10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ), 相较于 C0 组降低了 50.4%, 较 S10 组( $8.7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )也降低了 28.7%。通过对氯离子渗透路径进行分析发现, C0 组

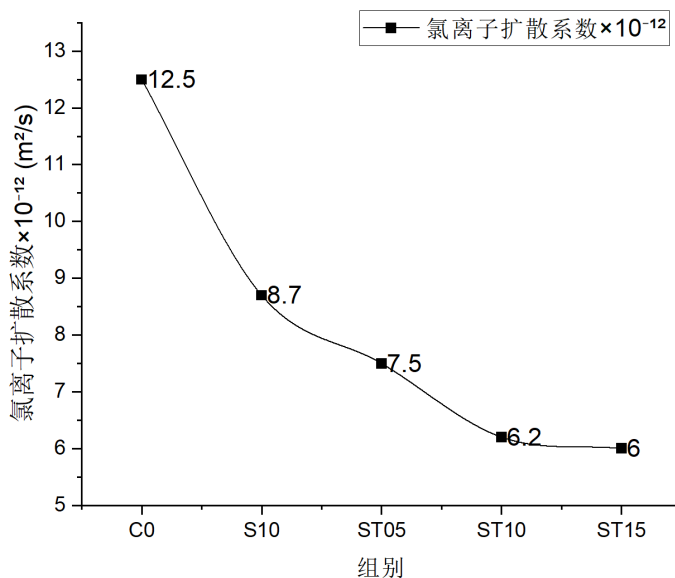


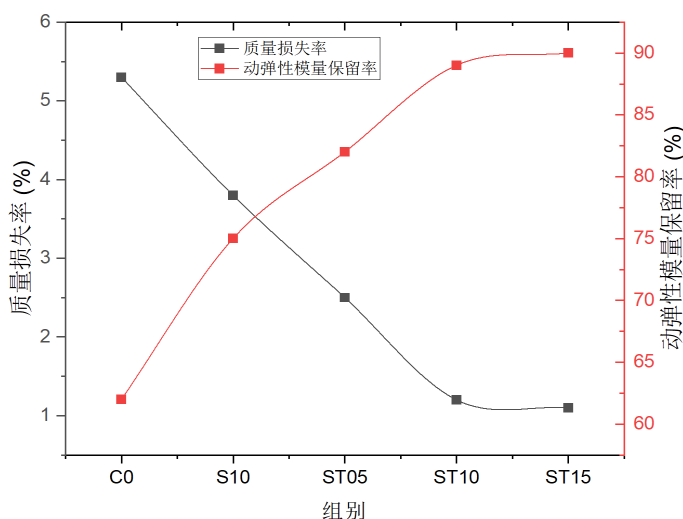
Figure 5. Comparison chart of chloride ion diffusion coefficients of concrete in different groups

图 5. 不同组别混凝土氯离子扩散系数对比图

中氯离子渗透路径上仅有约 30% 的孔隙被水化产物填充,大量孔隙成为氯离子快速传输的通道;而 ST10 组中 90% 以上的孔隙被 C-S-H 凝胶或钛酸钙凝胶紧密填充,有效阻挡了氯离子的渗透,充分验证了复掺体系通过优化孔结构显著提升混凝土抗氯离子渗透性能的作用机制。

### 3.3.2. 抗冻融循环性能

经过 300 次冻融循环后不同组别混凝土的质量损失率和动弹性模量保留率数据如图 6 所示。



**Figure 6.** Comparison of performance data of concrete in different groups after 300 freeze-thaw cycles

**图 6.** 不同组别混凝土经 300 次冻融循环后的性能数据对比

从图 6 中可以看出, C0 组质量损失达到 5.3%, 动弹性模量保留率仅为 62%; 而 ST10 组质量损失控制在 1.2%, 动弹性模量保留率高达 89%, 完全满足 F200 抗冻等级要求。对冻融破坏面观察发现, C0 组中再生骨料与水泥石界面出现明显剥离, 旧砂浆表面的微裂缝在冻融循环作用下迅速扩展连通; 而 ST10 组界面粘结依然完好, 硅灰与纳米  $\text{TiO}_2$  复掺形成的致密界面过渡区有效抵抗了冻融应力的破坏, 这再次证明复掺体系通过强化界面过渡区提升了混凝土的抗冻融性能。

## 3.4. 微观结构演化与协同机制

### 3.4.1. 界面过渡区特征

为了分析不同组别混凝土界面过渡区的微观结构差异, 对 SEM 图像进行分析并将关键数据汇总于表 5 中。可以看出: C0 组界面过渡区厚度达 120~150 nm, 存在大量定向排列的粗大  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体(尺寸 2~3  $\mu\text{m}$ ), 这些晶体的存在削弱了界面粘结强度; S10 组界面过渡区厚度减小至 80~100 nm,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体尺寸也降至 1~2  $\mu\text{m}$ ; 而 ST10 组界面过渡区厚度进一步减薄至 50~60 nm,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体呈弥散分布且尺寸小于 0.5  $\mu\text{m}$ , 同时观察到大量无定形 C-S-H 凝胶与针状钛酸钙晶体相互交织的致密结构。

**Table 5.** Comparison of key microstructure data of the interface transition zone of concrete in different groups

**表 5.** 不同组别混凝土界面过渡区微观结构关键数据对比

| 组别   | 界面过渡区厚度(nm) | $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体尺寸( $\mu\text{m}$ ) | $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体形态 | 凝胶结构特征                   |
|------|-------------|------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| C0   | 120~150     | 2~3                                            | 定向排列                          | 少量 C-S-H 凝胶, 结构疏松        |
| S10  | 80~100      | 1~2                                            | 较规则排列                         | C-S-H 凝胶增多, 结构改善         |
| ST10 | 50~60       | <0.5                                           | 弥散分布                          | 大量无定形 C-S-H 凝胶与针状钛酸钙晶体交织 |

3.4.2. 协同改性机制模型

基于上述实验结果，构建硅灰与纳米  $\text{TiO}_2$  复掺对高掺量再生骨料混凝土的“物理 - 化学协同改性”模型(图 7)：

- 1) 硅灰的物理填充效应：硅灰颗粒平均粒径  $0.15\ \mu\text{m}$ ，能够优先填充混凝土内部  $1\sim 10\ \mu\text{m}$  的宏观孔隙，降低整体孔隙率，细化孔径，为混凝土提供初步的密实化基础。
- 2) 纳米  $\text{TiO}_2$  的化学激活效应：纳米  $\text{TiO}_2$  凭借  $20\ \text{nm}$  的超小粒径，作为晶核诱导 C-S-H 凝胶的定向生长，同时其表面羟基与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生化学反应生成钛酸钙凝胶，这些新生成的凝胶产物不仅增强了界面过渡区的粘结强度，还进一步优化了 C-S-H 凝胶的微观结构。
- 3) 协同耦合作用：硅灰的物理填充为纳米  $\text{TiO}_2$  提供了均匀分散的基体环境，避免纳米颗粒团聚；而纳米  $\text{TiO}_2$  的化学改性作用则进一步优化硅灰填充后的孔隙结构，二者相互促进，形成“致密填充 - 界面强化”的良性循环，最终实现混凝土性能的提升。

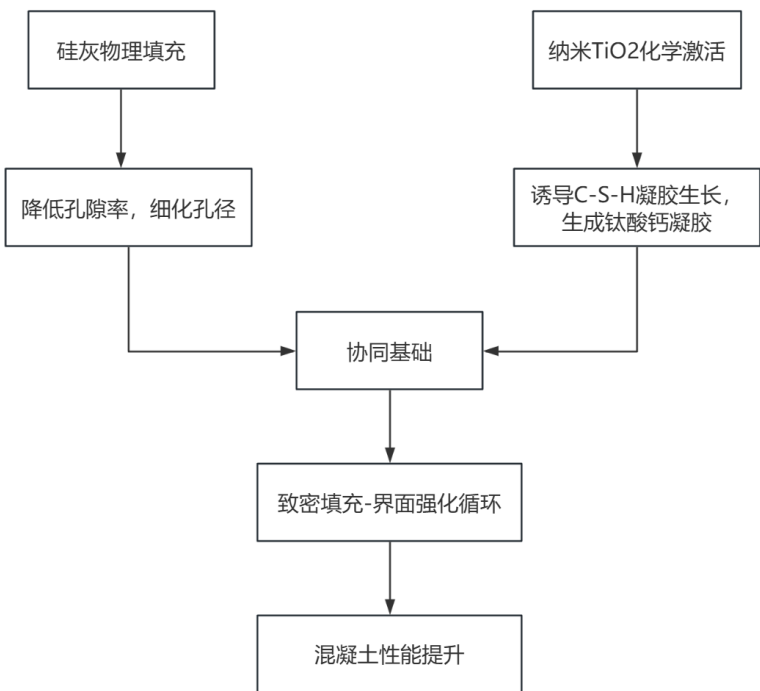


Figure 7. Model diagram of the synergistic modification mechanism of silica fume and Nano- $\text{TiO}_2$  compounding  
图 7. 硅灰与纳米  $\text{TiO}_2$  复掺协同改性机制模型图

4. 结语

本研究通过系统实验与理论分析，深入探究硅灰与纳米  $\text{TiO}_2$  复掺对高掺量再生骨料混凝土性能的影响，主要结论如下：

- 1) 性能提升显著：10%硅灰与 1.0%纳米  $\text{TiO}_2$  复掺时，混凝土综合性能大幅提升。力学性能方面，28 天抗压强度达  $52.3\ \text{MPa}$ ，较基准组提高 41%；劈裂抗拉强度为  $3.82\ \text{MPa}$ ，提升 56%，且峰值后位移延性达  $1.2\ \text{mm}$ ，有效增强韧性。孔隙结构得到优化，孔隙率降至 12.7%，降幅 30.6%，有害孔占比显著降低，无害孔占比明显增加。耐久性能优异，氯离子扩散系数降低 50.4%，300 次冻融循环后动弹性模量保留率达 89%，远超基准组水平。

2) 协同改性机制明确: 硅灰与纳米  $\text{TiO}_2$  通过“物理填充 - 化学激活”协同作用改善混凝土性能。硅灰利用细小颗粒填充宏观孔隙, 降低孔隙率、细化孔径, 为混凝土密实化提供基础; 纳米  $\text{TiO}_2$  作为晶核诱导 C-S-H 凝胶生长, 并与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  反应生成钛酸钙凝胶, 优化 C-S-H 凝胶结构、增强界面粘结。二者相互配合, 形成“致密填充 - 界面强化”良性循环, 从微观层面改善混凝土内部结构, 进而提升宏观性能。

3) 技术应用价值高: 本研究确定的 10% 硅灰与 1.0% 纳米  $\text{TiO}_2$  复掺方案, 为高掺量再生骨料混凝土的性能提升提供了有效途径。该技术在实现建筑垃圾资源化利用的同时, 显著提高混凝土性能, 兼具经济效益与环境效益, 对推动建筑行业可持续发展具有重要意义, 为相关工程应用提供了可靠的理论依据与技术支持。

## 参考文献

- [1] 周晋筑, 赵鹏鹏, 黄靓, 等. 再生骨料混凝土抗冻性能影响因素研究综述[J]. 混凝土, 2025(4): 141-147, 153.
- [2] 游帆, 念梦飞, 郑建岚, 等. 再生骨料混凝土弯曲疲劳性能研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(4): 134-141.
- [3] 张美香, 丁亚红, 杨小林, 等. 纳米  $\text{SiO}_2$  复合碳化全再生骨料混凝土力学特性及强化机制[J]. 复合材料学报, 2025, 42(4): 2102-2111.
- [4] 徐鹏, 张轩翰, 明高林, 等. 纳米改性水泥基材料功能化研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(16): 119-128.
- [5] 尹兆昆, 崔传安, 戴银所, 等. 氧化石墨烯与纳米  $\text{TiO}_2$  掺杂的水泥基材料吸波性能研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(11): 31-35.
- [6] 张丽, 李彦贺, 周能源, 等. 纳米  $\text{SiO}_2$ 、纳米  $\text{TiO}_2$  和纳米  $\text{CaCO}_3$  对水泥基材料早期性能的影响[J]. 混凝土, 2023(10): 106-110, 115.
- [7] 师杰, 沈子杨. 纳米  $\text{TiO}_2$  改性水泥基混凝土复合材料的制备及性能研究[J]. 功能材料, 2022, 53(6): 6100-6105.
- [8] 梅军鹏, 徐智东, 李海南, 等. 纳米粒子/聚合物对水泥基材料强度和抗渗性的影响[J]. 功能材料, 2021, 52(12): 12184-12189.
- [9] 王立国, 张树鹏, 李东旭. 纳米材料改性水泥基材料的研究应用进展[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(7): 2128-2134.
- [10] 徐名凤, 吴国明.  $\text{TiO}_2$  光催化高延性水泥基材料拉伸性能和光催化性能研究[J]. 新型建筑材料, 2024, 51(5): 27-32.