

# 纳米改性再生骨料高性能混凝土性能研究

朱周鑫

上海益景和检测技术有限责任公司, 上海市, 201100;

**摘要:** 为改善再生骨料高性能混凝土的基本性能, 利用纳米材料改性再生骨料, 研究其对混凝土力学性能和耐久性能的影响。结果表明: 纳米改性再生骨料可降低其压碎值和吸水率。纳米 SiO<sub>2</sub>(NS)改性再生骨料对混凝土的改善效果最优, 纳米 CaCO<sub>3</sub> 和石墨烯的改善效果良好, 纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的改善效果相对较差。NS 改性后混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度分别提高了 24.1%和 20%, 渗水高度和氯离子电通量分别减小了 29.4%和 23.9%。研究可推动纳米改性再生骨料高性能混凝土应用。

**关键词:** 高性能混凝土; 纳米 SiO<sub>2</sub>; 纳米 CaCO<sub>3</sub>; 改性再生骨料; 力学性能; 耐久性能

**DOI:** 10.69979/3029-2727.26.04.068

随着资源保护意识的提升, 利用再生骨料取代天然骨料制备混凝土逐渐成为研究热点。但与天然骨料相比, 再生骨料存在压碎值大和吸水率高等缺点, 导致再生骨料混凝土性能较差<sup>[1]</sup>。为改善再生骨料高性能混凝土的基本性能, 通常对再生骨料进行改性处理。常见方法是采用纳米溶液对再生骨料进行裹浆处理, 例如纳米 SiO<sub>2</sub>(NS)、纳米 CaCO<sub>3</sub>(NC)、纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(NA)和石墨烯(GNP)。经纳米溶液处理后的再生骨料可降低其孔隙率, 提高混凝土的力学性能<sup>[2-5]</sup>。然而, 现有研究主要集中在纳米改性后混凝土的力学性能, 且未对各纳米材料的改善效果对比。

本文利用 NS、NC、NA 和 GNP 对再生骨料进行改性处理, 研究其对混凝土力学性能和耐久性能的影响。研究可推动纳米改性再生骨料高性能混凝土应用。

## 1 试验方案

### 1.1 试验材料

试验所用胶凝材料包括 P.O 52.5 普通硅酸盐水泥、SF90 硅灰和 I 级粉煤灰。NS、NC、NA 和 GNP 的纯度均达到 99%以上。减水剂采用聚羧酸高效减水剂, 减水率为 30%。再生粗骨料由废弃混凝土破碎而成, 天然粗骨料采用 5mm~25mm 连续级配碎石。细骨料使用连续级配河砂。

### 1.2 纳米改性再生骨料的制备

由于纳米材料在水中难以分散, 采用全自动超声波清洗机以 500W 的功率对纳米溶液分散 20min, 得到纳米分散溶液(质量分数 3%)。然后, 将纳米分散溶液与水泥以 1: 1 的比例混合均匀, 采用自然浸泡的方式将再生骨料浸泡在混合溶液中。浸泡 48h 后, 将再生骨料从溶液中取出并晾晒至饱和面干, 完成纳米改性再生骨料的制备。天然骨料、未改性再生骨料和纳米改性再生骨料的压碎值和吸水率如表 1 所示。

表 1 骨料压碎值和吸水率

项目	天然骨料	再生骨料	NS 改性再生骨料	NC 改性再生骨料	NA 改性再生骨料	GNP 改性再生骨料
压碎值(%)	13.5	18.7	10.1	11.7	13.5	12.6
吸水率(%)	3.82	6.07	3.76	3.99	4.18	4.01

### 1.3 配合比设计

试验采用 NS、NC、NA 和 GNP 对再生骨料进行改性处理, 共制备 4 组纳米改性再生骨料高性能混凝土

(NS-RHPC、NC-RHPC、NA-RHPC、GNP-RHPC)、1 组再生骨料高性能混凝土(RHPC)和 1 组天然骨料高性能混凝土(NHPC), 试件编号及配合比如表 2 所示。

表 2 试验配合比(kg/m<sup>3</sup>)

试件编号	水泥	粉煤灰	硅灰	天然粗骨料	再生粗骨料	改性再生粗骨料	砂	水	减水剂
NHPC	455	130	65	915	0	0	748	137	10.6
RHPC	455	130	65	0	915	0	748	137	10.6
NS-RHPC	455	130	65	0	0	915	748	137	10.6
NC-RHPC	455	130	65	0	0	915	748	137	10.6
NA-RHPC	455	130	65	0	0	915	748	137	10.6
GNP-RHPC	455	130	65	0	0	915	748	137	10.6

注: NS-RHPC 表示 NS 改性再生骨料高性能混凝土, NC-RHPC、NA-RHPC 和 GNP-RHPC 同理。

### 1.4 试验方法

混凝土力学性能测试标养 28d 试块的抗压强度和劈

裂抗拉强度。混凝土耐久性能测试标养 28d 试块抗水渗透性能和抗氯离子渗透性能。抗水渗透性能试验采用上直径 175mm、下直径 185mm、高度为 150mm 的圆台型试件。试验起始压力为 0.1MPa，逐渐加压至 3.6MPa 并恒压 24h 后，将试件从中部劈开并测试其渗水高度。抗氯离子渗透性能试验采用直径为 100mm、高度为 50mm 的圆柱体试件。通电电压为 60V，持续 6h 后，通过测量试件的总通电量评价混凝土的抗氯离子渗透性能。

## 2 结果分析

### 2.1 力学性能

图 1 和图 2 分别为 NS、NC、NA 和 GNP 改性再生骨料高性能混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度结果。由图可知，纳米改性再生骨料提高了混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度，且优于 NHPC 的力学性能。相比于 RHPC，NS、NC、NA 和 GNP 改性再生骨料后，混凝土的抗压强度分别提高了 24.1%、19.4%、11.1%和 16.7%，劈裂抗拉强度分别提高了 20%、13.3%、6.7%和 16.7%。NS 改性再生骨料对混凝土力学性能的提升效果最显著，抗压强度可达 134MPa，劈裂抗拉强度可达 7.2MPa，NA 改性再生骨料的提升幅度最小。不同纳米材料对再生骨料混凝土力学性能的改善效果不同，这是由于，一方面 NS 颗粒可与旧水泥砂浆中的 Ca(OH)<sub>2</sub> 生成 C-S-H 凝胶，填充再生骨料的微裂缝和孔隙，提高再生骨料的压碎值；另一方面，包覆在再生骨料表面的 NS-水泥混合物继续参与体系内的水化反应，提高混凝土的力学性能<sup>[3]</sup>。NA 颗粒虽然可以促进 C-S-H 凝胶的形成，但相比于 NS 颗粒，C-S-H 凝胶的产量相对稀少，对混凝土力学性能的提升幅度也相对较小。NC 颗粒利用其晶核效应，促进 C-S-H 凝胶的形成，改善了再生骨料与砂浆界面过渡区的孔径，进而提高混凝土的力学性能<sup>[2]</sup>。GNP 颗粒主要利用其模板效应，通过控制水泥水化产物的尺寸、形状及形成路径，间接提高混凝土力学性能<sup>[1]</sup>。

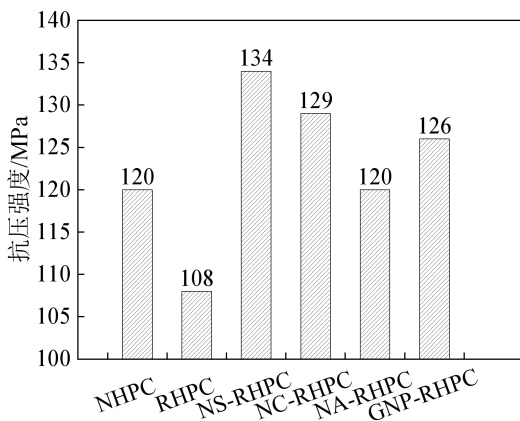


图 1 纳米改性再生骨料对抗压强度的影响

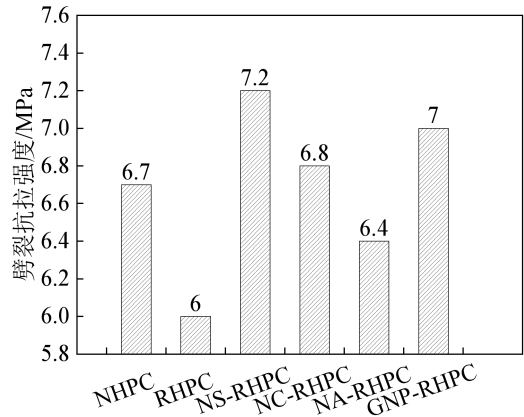


图 2 纳米改性再生骨料对劈裂抗拉强度的影响

### 2.2 耐久性能

#### 2.2.1 抗水渗透性能

图 3 为 NS、NC、NA 和 GNP 改性再生骨料对高性能混凝土抗水渗透性能的影响。各纳米材料改善了混凝土抗水渗透性能，NS 颗粒的改善效果最显著。相比于 RHPC，NS 改性再生骨料高性能混凝土的渗水高度降低了 29.4%，渗水高度为 26.1mm；其次为 GNP 颗粒，混凝土的渗水高度降低了 22.6%；NC 改性后混凝土的渗水高度降低了 18.8%；NA 改性后混凝土的渗水高度降低了 20.7%。纳米改性再生骨料对混凝土抗水渗透性能的改善作用源于对混凝土内部孔隙的优化作用。由于 NS 颗粒与 Ca(OH)<sub>2</sub> 反应直接生成的 C-S-H 凝胶，显著优化了混凝土的孔隙结构，因此对混凝土的抗水渗透性能改善效果最优<sup>[3]</sup>。

#### 2.2.2 抗氯离子渗透性能

NS、NC、NA 和 GNP 改性再生骨料对高性能混凝土抗氯离子渗透性能的影响如图 4 所示。纳米改性再生骨料后，混凝土的抗氯离子渗透性能显著提高。相比于 RHPC，NS、NC、NA 和 GNP 改性再生骨料后，混凝土的电通量分别减小了 23.9%、21.4%、12.3%和 14.4%。NS 颗粒改性再生骨料的效果最佳，混凝土电通量为 609.6c，NA 改性再生骨料的效果相对较差。NS 颗粒与水泥的混合浆液在再生骨料表面形成致密区域，该区域生成的 C-S-H 凝胶具有较低的钙硅比，增强了再生骨料的物理性能并包裹住再生骨料。这使得氯离子的渗透路径从穿透骨料更改为绕过骨料边缘，同时改善了再生骨料与旧砂浆界面过渡区的孔隙结构，有助于提高混凝土的抗氯离子渗透性能<sup>[5]</sup>。虽然 NA 与水泥的混合浆液也改善了再生骨料的物理性能，但 C-S-H 凝胶产量较少，混凝土致密性较低，对混凝土抗氯离子渗透性能的改善

效果相对较差。

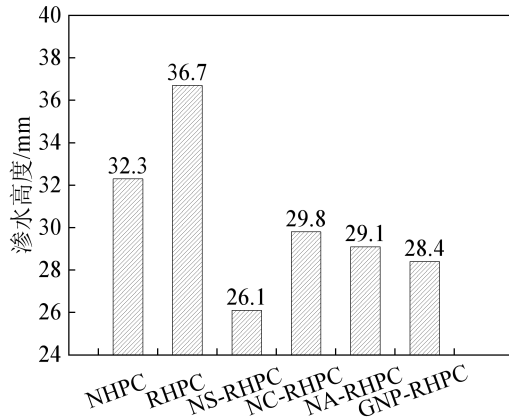


图3 纳米改性再生骨料对抗水渗透性能的影响

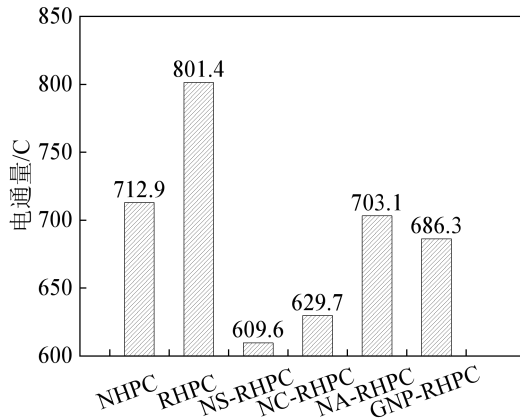


图4 纳米改性再生骨料对抗氯离子渗透性能的影响

### 3 结论

本研究开展 NS、NC、NA 和 GNP 纳米改性再生骨料对高性能混凝土力学性能和耐久性能的影响:

(1) 纳米改性再生骨料的压碎值和吸水率低于未改性的再生骨料。

(2) NS 改性再生骨料对混凝土力学性能和耐久性能

的改善效果最佳, 其次为 NC 和 GNP, NA 的改善效果相对较差。相比于再生骨料混凝土, NS 改性再生骨料混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度分别提高了 24.1% 和 20%, 渗水高度和氯离子电通量分别减小了 29.4% 和 23.9%。

(3) 纳米改性再生骨料高性能混凝土可显著改善混凝土的力学性能和耐久性能, 具有一定应用前景。

### 参考文献

- [1] 郭凯, 马浩辉, 王强. 氧化石墨烯对再生混凝土界面过渡区的影响[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(05): 217-224.
- [2] 邓友生, 张克钦, 付云博, 等. 纳米碳酸钙改性再生混凝土抗压性能研究[J]. 公路, 2023, 68(04): 319-324.
- [3] 马书山, 张勇, 杨淑娟, 等. 纳米材料改性对再生粗骨料性能的影响研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2023, (02): 73-78.
- [4] 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(05): 124-131.
- [5] 鲍玫文, 张洪锐, 方晓龙, 等. 纳米二氧化硅改性再生粗骨料混凝土性能的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(08): 2045-2053.

作者简介: 朱周鑫(1998—), 男, 汉族, 安徽省安庆市人, 硕士, 研究方向: 固废资源化利用。