

DOI: 10.7672/sgjs2026040025

再生骨料界面改性对高强混凝土性能的影响研究

叶冕

(深圳市建工集团股份有限公司, 广东 深圳 518000)

[摘要] 为了提高再生骨料在高强混凝土中的应用性能,研究了2种改性方法(水泥浆涂层处理和地质聚合物浆料处理)对再生骨料性能的影响,以及改性后再生骨料在高强混凝土中的宏观性能和微观结构变化。通过工作性能、力学性能、孔隙结构和微观结构的测试,探讨不同改性方法对再生骨料高强混凝土性能的提升效果。研究结果表明,水泥浆和地质聚合物浆料改性均显著改善了骨料与水泥基体之间的界面结合力,尤其是地质聚合物浆料,其生成的硅铝酸盐凝胶形成了致密的凝胶结构,进一步增强了混凝土的微观密实性和力学性能,在100%替代天然骨料时,地质聚合物改性再生骨料混凝土坍落度为220mm,抗压强度为95MPa,渗透孔隙率低于15%。

[关键词] 混凝土;再生骨料;水泥浆;地质聚合物浆料;微观结构

[中图分类号] TU528

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)04-0025-05

Study on Effects of Interfacial Modification of Recycled Aggregate on Performance of High-strength Concrete

YE Mian

(Shenzhen Construction Engineering Group Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China)

Abstract: To improve the performance of recycled aggregates in high-strength concrete, this paper investigates the effects of two modification methods (cement paste treatment and geopolymer paste treatment) on the properties of recycled aggregates, as well as the macroscopic performance and microstructural changes of modified recycled aggregates in high-strength concrete. Through testing of workability, mechanical properties, pore structure, and microstructure, the enhancement effect of different modification methods on the performance of recycled aggregate-based high-strength concrete was explored. The results show that both cement paste and geopolymer paste modifications significantly improve the interface bonding between aggregates and cement matrix, with geopolymer paste treatment exhibiting a more pronounced effect. The silica-aluminate gel formed by geopolymer modification creates a dense gel structure, further enhancing the microstructural compactness and mechanical properties of concrete. When 100% of natural aggregates are replaced, the geopolymer-modified recycled aggregate concrete exhibits a slump of 220mm, compressive strength of 95MPa, and permeable porosity lower than 15%.

Keywords: concrete; recycled aggregates; cement paste; geopolymer paste; microstructure

0 引言

随着全球建筑业的快速发展,大量建筑废弃物的产生对自然资源和生态环境造成了巨大压力。其中,废弃混凝土量最大,年产生量达25亿t^[1]。再生骨料(recycled aggregates, RA)作为从废弃混凝土中回收而来的材料,被广泛应用于新混凝土的生产中,不仅能够减少自然骨料的开采,还可以有效缓解建筑废弃物对环境的污染。高强混凝土以其优

异的力学性能成为现代建筑领域的研究热点。由于高强混凝土对力学性能和耐久性的要求非常高,再生骨料的引入需克服其固有缺点,如吸水率高、孔隙率大、表面粗糙等,以确保最终满足工程需求^[2]。

再生骨料的孔隙率较高会导致界面过渡区劣化,进而影响高强混凝土的整体性能。尽管一些研究通过优化混凝土配合比和使用外加剂改善了再生骨料高强混凝土的性能,但界面问题仍是影响其性能的主要瓶颈^[3-4]。为了解决上述问题,研究者开发了多种再生骨料表面改性技术,包括化学处

理、水泥浆涂层处理和机械处理等。其中,化学处理通过酸碱反应去除骨料表面的附着砂浆,提高 RA 表面活性;水泥浆涂层处理通过在骨料表面形成致密的水泥基涂层增强其界面结合力;而机械处理则通过磨损去除表面弱质层。最近,利用工业废弃物制备的地质聚合物浆料作为改性材料逐渐受到关注,这种方法不仅具有良好的物理化学性能,还能进一步提升再生骨料的环境友好性和经济性^[5]。本文旨在对比水泥浆和地质聚合物浆料改性对再生骨料在高性能混凝土中的性能影响,系统研究改性后再生骨料在不同掺量下的工作性能、力学性能、孔隙结构及微观结构的变化规律。

1 材料与方法

1.1 原材料

再生骨料来源于某建筑废弃物回收厂,如图 1 所示。通过筛分和清洗后得到粒径为 4.75~31.5mm 的粗骨料。天然骨料的平均粒径为 16mm,再生骨料的平均粒径为 18mm。选择 3 种粒径的砂子作为细骨料使用。其中,细砂、中砂和粗砂的中位粒径分别为 176,498,840 μm ,粒径分布如图 2 所示。



a 天然骨料

b 再生骨料

图 1 骨料形貌

Fig. 1 Aggregate morphology

高性能混凝土的胶凝材料由 P·O 42.5 硅酸盐水泥和硅灰组成。水泥密度为 3.25g/cm³,比表面积为 350m²/kg;硅灰密度为 2.45g/cm³,比表面积为 27 000m²/kg,SiO₂ 含量为 97.76%。粉煤灰的密度为 2.2g/cm³,比表面积为 360m²/kg。矿渣粉的密度为 2.9g/cm³,比表面积为 500m²/kg。二者的化学成分通过 X 射线荧光光谱(XRF)测试获得,如表 1 所示。减水剂固含量为 30%,其减水率超过 30%,能够显著改善混凝土的工作性能。碱性激发剂包括 Na₂SiO₃(密度约 1.5g/cm³)和 NaOH(易溶固体)。

1.2 配合比设计

未经改性的再生骨料在高性能混凝土中的应用可能导致强度和耐久性下降。因此,分别采用水泥浆和地质聚合物浆料对再生骨料进行改性。水泥浆改性是将硅酸盐水泥和硅灰按比例混合后加入水和减水剂,搅拌均匀,将再生骨料浸泡于浆料中

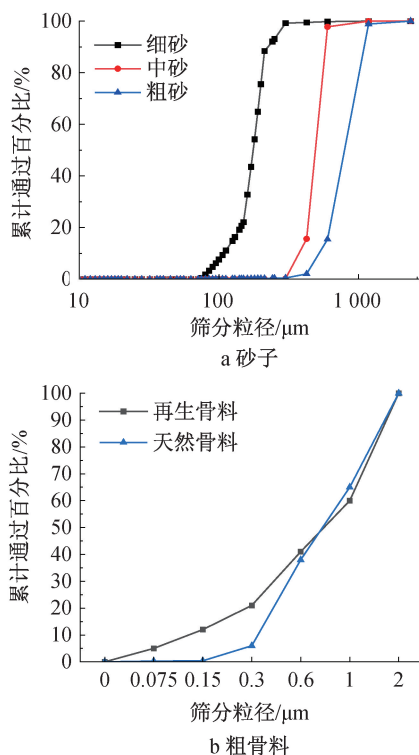


图 2 骨料粒径分布

Fig. 2 Particle size distribution of aggregates

表 1 胶凝材料的化学组成

Table 1 Chemical composition of cementitious

材料	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
水泥	4.37	66.63	19.06	3.51	1.75	0.65	0.21	3.50
硅灰	—	1.85	93.90	0.59	0.27	0.86	0.17	—
粉煤灰	27.65	6.54	52.34	8.43	1.23	1.15	0.67	1.99
矿渣粉	13.21	41.86	34.56	1.12	7.37	0.63	0.42	0.87

10min,之后取出晾干。地质聚合物浆料改性方法则是制备碱性激发剂溶液与粉煤灰、矿渣粉和硅灰混合,形成浆料,浸泡再生骨料 10min,然后取出并在 40℃ 环境中养护,改性剂配合比如表 2 所示。试验主要研究预处理后再生骨料对高性能混凝土各项性能的影响,水胶比为 0.35,高性能混凝土样品编号和具体配合比如表 3 所示。

表 2 水泥浆和地质聚合物浆改性剂配合比

Table 2 Mix proportions of cement paste and geopolymer

材料	水泥浆	地质聚合物浆料
水泥	80	—
粉煤灰	—	50
矿渣粉	—	20
硅灰	10	2
水	30~40	—
硅酸钠	—	20
氢氧化钠	—	10
减水剂	1	—
液固比	—	35~40

表 3 再生骨料增强高强混凝土配合比设计

Table 3 Mix designs of RA reinforced high-strength concrete

编号	水泥	硅灰	天然骨料	再生骨料	水泥浆改性再生骨料	地聚物浆改性再生骨料	水	减水剂	kg · m ⁻³		
									细	中	粗
RA0	828	92	1 080	0	—	—	322	27.6	573.8	382.5	318.8
RA25-U	828	92	810	270	—	—	322	27.6	573.8	382.5	318.8
RA50-U	828	92	540	540	—	—	322	27.6	573.8	382.5	318.8
RA75-U	828	92	270	810	—	—	322	27.6	573.8	382.5	318.8
RA100-U	828	92	0	1 080	—	—	322	27.6	573.8	382.5	318.8
RA25-C	828	92	810	—	270	—	322	27.6	573.8	382.5	318.8
RA50-C	828	92	540	—	540	—	322	27.6	573.8	382.5	318.8
RA75-C	828	92	270	—	810	—	322	27.6	573.8	382.5	318.8
RA100-C	828	92	0	—	1 080	—	322	27.6	573.8	382.5	318.8
RA25-G	828	92	810	—	—	270	322	27.6	573.8	382.5	318.8
RA50-G	828	92	540	—	—	540	322	27.6	573.8	382.5	318.8
RA75-G	828	92	270	—	—	810	322	27.6	573.8	382.5	318.8
RA100-G	828	92	—	—	—	1 080	322	27.6	573.8	382.5	318.8

1.3 制备方法

按照配合比称取各原料,将胶凝材料和粗细骨料加入搅拌机中,搅拌 2min 得到干粉料。然后,向干粉料中加入一半的水,继续搅拌 2min 后缓慢加入剩余的水和减水剂,搅拌 5min。搅拌完成后,立即进行新拌混凝土性能的测试。将混凝土浆体分别倒入尺寸为 100mm×100mm×100mm 和 100mm×100mm×400mm 的模具中,振动 20~30s 后用塑料薄膜覆盖样品,防止水分蒸发。样品在 24h 后脱模,并储存于标准养护室中,直至进行后续测试。

根据 GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》,对新拌混凝土的坍落度进行测试;根据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》,对混凝土的抗压强度、抗弯强度和吸水率进行测试。所有试验均取 3 个试件的平均值作为最终结果。混凝土的渗透孔隙率采用真空饱和法进行测试,试件的规格为直径 100mm、高度 50mm。

2 改性后再生骨料性能

采用水泥浆和地质聚合物浆料对再生骨料进行改性后,其物理力学性能得到了显著改善,如表 4 所示。未处理再生骨料的吸水率为 6.5%,显著高于天然骨料,同时相对密度和密度偏低,压碎值高达 31.5%,表明其孔隙率较高、结构较为疏松,力学性能较差^[6]。经过水泥浆改性后,吸水率降低,相对密度和密度提高,压碎值下降,表明水泥浆能够通过填充再生骨料表面的孔隙和裂纹,有效降低其吸水率,同时提高骨料的密实性和抗压能力。相比之下,地质聚合物浆料改性后的性能进一步提高,地质聚合物的高黏度及其反应生成的硅铝酸盐凝胶,使其对骨料表面孔隙的填充和密封效果

优于水泥浆,显著提高了再生骨料的密实度和力学性能。

表 4 再生骨料物理力学性质

Table 4 Characteristics of RA

类型	相对密度	吸水率/%	密度/(g · cm ⁻³)	压碎值/%
未处理	2.46	6.5	14.2	31.5
水泥浆改性	2.53	4.0	15.5	28.5
地质聚合物浆改性	2.60	2.5	16.0	27.5

3 改性对再生骨料增强高强混凝土性能的影响

3.1 工作性能

不同再生骨料掺量下,混凝土的流动性如图 3 所示。未处理再生骨料混凝土的流动性较差,随着再生骨料掺量的增加,混凝土的坍落度从 195mm 逐渐降低至 170mm,表明未处理骨料的高吸水性显著降低了混凝土的流动性。水泥浆改性后,坍落度有所增加,表明水泥浆改性在改善骨料的界面结合力和减少吸水性方面发挥了积极作用,尤其在掺量 50% 和 75% 时,坍落度相对较高(208mm 和 215mm)。地质聚合物浆料改性显示了最佳效果,尤其在高掺量(75% 和 100%)时,坍落度几乎没有明显下降,说明地质聚合物浆料不仅能有效填充骨料表面孔隙,还能通过其高反应活性和凝胶化作用增强流动性,保持较好的施工性。

3.2 力学性能

不同再生骨料掺量下混凝土的力学性能如图 4 所示。未处理再生骨料的抗压强度随着掺量的增加逐渐降低,掺量达到 100% 时,抗压强度明显下降,这与未处理再生骨料较高的吸水率和较差的界面过渡区性能有关^[7]。经过水泥浆改性后,混凝土的抗压强度在各掺量下均有明显提升,特别是 50% 掺量下,抗压强度接近 100MPa,表明水泥浆的填充

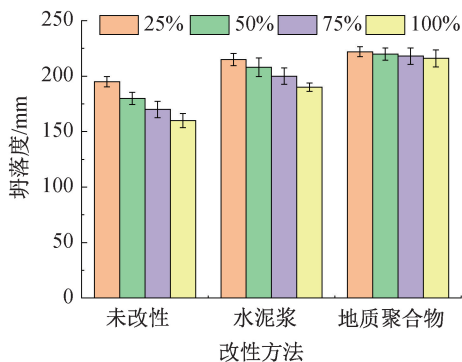


图3 不同再生骨料掺量下混凝土的流动性

Fig. 3 Slump of concrete at different RA dosages

和界面增强作用在一定掺量下效果显著。然而,随着掺量增加(75%和100%),抗压强度仍有所下降,表明水泥浆改性在高掺量时效果有限。地质聚合物浆料改性再生骨料的抗压强度提升效果更为显著。在所有掺量下,其抗压强度均高于水泥浆改性组。尤其在25%和50%掺量时,抗压强度分别为100,95MPa,接近未掺再生骨料的高强混凝土性能(102MPa)。这说明地质聚合物浆料能够通过其高黏度和化学反应生成的硅铝酸盐凝胶,有效改善再生骨料的界面性能和整体强度,使混凝土在高掺量情况下仍具备较高的抗压强度^[8-9]。

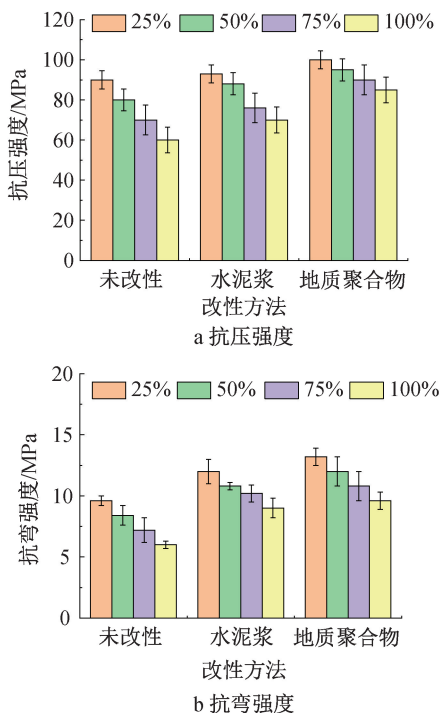


图4 不同再生骨料掺量下混凝土的力学性能

Fig. 4 Mechanical performance of concrete at different RA dosages

再生骨料掺量和处理方式对高强混凝土的抗弯性能影响显著,但与抗压强度的变化趋势存在一

定差异。随着掺量的增加,未经处理的再生骨料抗弯强度明显下降,100%掺量时仅为6MPa。表明未处理再生骨料的较高孔隙率和较弱的界面结合力更显著地削弱了抗弯性能,因为抗弯强度对界面过渡区的敏感性更高。水泥浆改性后,抗弯强度在各掺量下均有不同程度提升,尤其是在50%掺量下达到最大值12MPa,较未改性组显著提升。这表明水泥浆的填充效应不仅改善了骨料的吸水率,还在一定程度上增强了界面结合力。但随着掺量增加到75%和100%,抗弯强度下降幅度更大(相比抗压强度),这可能是由于改性效果不足以全面弥补高掺量再生骨料引起的整体界面性能劣化。地质聚合物浆料改性表现出对抗弯强度的显著改善效果。即使在100%掺量时,抗弯强度仍达到9.6MPa,表现出较强的稳定性,表明地质聚合物浆料不仅通过化学反应生成高强度的硅铝酸盐凝胶填充骨料表面,还在高掺量条件下通过界面过渡区的增强作用抵消了再生骨料的不利影响。同时,在25%掺量时,抗弯强度为13.2MPa,为所有组别的最高值,表明低掺量条件下,地质聚合物浆料改性能够最大程度发挥再生骨料的潜力。

3.3 孔隙结构

不同再生骨料掺量时混凝土的渗透孔隙率如图5所示,随着再生骨料掺量的增加,未处理再生骨料混凝土的渗透孔隙率随着掺量增加而显著上升。在掺量100%时,孔隙率接近22%,表明未处理骨料的高吸水性导致混凝土的孔隙结构较为疏松,增加了渗透性。水泥浆改性后,渗透孔隙率有所下降,特别是掺量50%和75%时,水泥浆通过填充骨料表面孔隙有效提高了混凝土的密实性。地质聚合物浆料改性表现出最佳效果,渗透孔隙率最小,说明地质聚合物浆料能够显著改善再生骨整体密实性^[10]。

3.4 微观结构

再生骨料增强高强混凝土的微观结构如图6所示。未改性再生骨料混凝土的微观结构孔隙较大,水泥基体和骨料之间的界面过渡区较为松散。水泥浆通过填充骨料表面的孔隙和裂缝,优化了界面过渡区,减少了孔隙率,显著提高了混凝土的微观密实性^[11-13]。地质聚合物浆料的改性效果最为显著,水泥基体和骨料之间的界面更加紧密,表面形成了大量的凝胶体结构,促进了水泥浆与骨料的良好结合,从而提高了混凝土的力学性能。

4 结语

1)水泥浆和地质聚合物浆料改性均提高了混

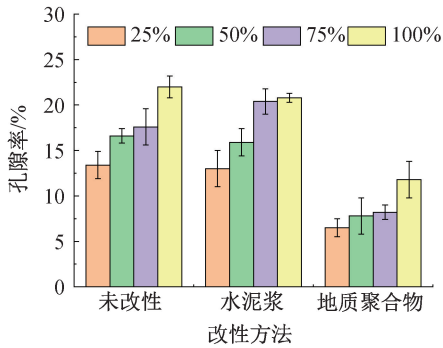
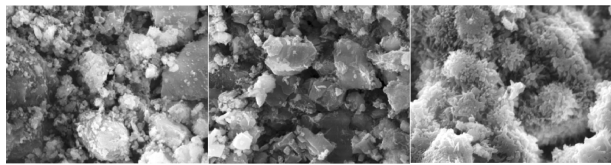


图 5 不同再生骨料掺量时混凝土的渗透孔隙率

Fig. 5 Permeable porosity of concrete at different RA dosages



a 未改性 b 水泥浆改性 c 地质聚合物浆料改性

图 6 养护 28d 混凝土的微观结构

Fig. 6 Microstructure of concrete after curing for 28 days

混凝土的流动性。水泥浆改性使坍落度在 50% 和 75% 掺量时分别为 208, 215mm, 而地质聚合物浆料改性在高掺量下(75% 和 100%) 可维持较高的坍落度, 显示其在增强工作性方面的优势。

2) 水泥浆改性提高了抗压强度, 尤其在 50% 掺量时接近 100MPa, 但高掺量下抗压强度有所下降。地质聚合物浆料改性在所有掺量下均表现出较高的抗压强度。

3) 水泥浆改性可有效降低渗透孔隙率。地质聚合物浆料改性效果最佳, 可增强混凝土的密实性。

参考文献:

- [1] BABU V S, MULLICK A K, JAIN K K, et al. Strength and durability characteristics of high-strength concrete with recycled aggregate-influence of processing [J]. *Journal of sustainable cement-based materials*, 2015, 4 (1): 54-71.
- [2] WANG B, YAN L B, FU Q N, et al. A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete [J]. *Resources, conservation and recycling*, 2021, 171: 105565.
- [3] 周黑撇. 再生骨料高强混凝土材料的制备及性能研究[J]. *功能材料*, 2019, 50(6): 75-78, 82.
- ZHOU H P. Preparation and properties of recycled aggregate high strength concrete [J]. *Journal of functional materials*, 2019, 50 (6): 75-78, 82.
- [4] 刘凯华, 陈钿渊, 邹超英, 等. 再生粗骨料强化工艺对再生混凝土力学性能及耐久性能的影响[J]. *混凝土*, 2024(6): 134-137, 142.

LIU K H, CHEN D Y, ZOU C Y, et al. Effect of enhancement methods for recycled coarse aggregate on mechanical performance and durability of recycled concrete[J]. *Concrete*, 2024(6): 134-137, 142.

- [5] TANG W, KHAVARIAN M, YOUSEFI A, et al. Influence of mechanical screened recycled coarse aggregates on properties of self-compacting concrete[J]. *Materials*, 2023, 16(4): 1483.
- [6] BAI G L, ZHU C, LIU C, et al. An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties[J]. *Construction and building materials*, 2020, 240: 117978.
- [7] AJDUKIEWICZ A, KLISZCZEWICZ A. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC[J]. *Cement and concrete composites*, 2002, 24(2): 269-279.
- [8] 杨豪杰, 张腾元, 杨友青, 等. 硅灰水泥浆液改性再生骨料混凝土配合比设计及其性能研究[J]. *造纸装备及材料*, 2024, 53(11): 79-81.
- YANG H J, ZHANG T Y, YANG Y Q, et al. Mix proportion design and performance study of recycled aggregate concrete modified by silica fume cement slurry [J]. *Papermaking equipment & materials*, 2024, 53(11): 79-81.
- [9] 杨燕英, 陈正, 李静, 等. 火山灰浆液改性再生粗骨料对混凝土性能的影响[J]. *混凝土与水泥制品*, 2023(7): 85-89.
- YANG Y Y, CHEN Z, LI J, et al. Effects of recycled coarse aggregates modified by pozzolanic ash slurry on the performance of concrete[J]. *China concrete and cement products*, 2023 (7): 85-89.
- [10] 张玉栋, 张佳帅, 贾吉龙, 等. 粗骨料全替代再生混凝土的孔结构与力学性能分析[J]. *硅酸盐通报*, 2024, 43(8): 3005-3016, 3033.
- ZHANG Y D, ZHANG J S, JIA J L, et al. Analysis of pore structure and mechanical properties of recycled concrete with full replacement of coarse aggregate [J]. *Bulletin of the Chinese ceramic society*, 2024, 43(8): 3005-3016, 3033.
- [11] 潘威, 张韶华, 甘春燕. 再生粗骨料对 C80 高强混凝土性能的影响[J]. *公路*, 2019, 64(12): 255-259.
- PAN W, ZHANG S H, GAN C Y. Effect of recycled coarse aggregate on properties of C80 high strength concrete [J]. *Highway*, 2019, 64(12): 255-259.
- [12] 高晴川, 林喜华, 袁棕, 等. 再生骨料强化技术及其对自密实混凝土性能的影响研究[J]. *施工技术(中英文)*, 2025, 54(22): 137-141.
- GAO Q C, LIN X H, YUAN Z, et al. Study on enhancement technology of recycled aggregate and its effect on the properties of self-compacting concrete [J]. *Construction technology*, 2025, 54 (22): 137-141.
- [13] 宋承哲, 王苓力, 何尧. 全再生混凝土力学性能及应力应变关系研究[J]. *施工技术(中英文)*, 2025, 54(15): 20-25.
- SONG C Z, WANG L L, HE Y. Study on mechanical property and stress-strain relationship of fully recycled aggregate concrete[J]. *Construction technology*, 2025, 54(15): 20-25.