

DOI: 10.7672/sjgs2025220137

# 再生骨料强化技术及其对自密实混凝土性能的影响研究

高晴川<sup>1</sup>, 林喜华<sup>1</sup>, 袁棕<sup>1</sup>, 廖方正<sup>1,2</sup>, 李婉婷<sup>1</sup>, 胡克涛<sup>1</sup>, 李知微<sup>1</sup>

(1. 中建西部建设集团第四(广东)有限公司, 广东 广州 511400;

2. 中建环保建材科技(广州)有限公司, 广东 广州 510440)

[摘要] 针对再生骨料高吸水与低强度特性导致自密实混凝土性能下降的问题, 提出复合预处理方法, 即预湿与裹浆协同改性。通过对比浸泡法、喷淋法和高压水气法, 确定喷淋法效率更高, 并结合粉煤灰-矿渣复合浆液对再生骨料进行包裹强化。试验结果表明, 该方法显著提高了骨料密实性与界面性能。在30%替代率下, 预处理组再生骨料自密实混凝土坍落度降幅减小, 满足SF1级自密实混凝土要求, 28d抗压强度与天然骨料基准组相当; 在50%替代率下, 抗压强度损失可控, 劈裂抗拉强度较未处理组明显改善。结果表明, 预湿裹浆法可有效提升再生骨料自密实混凝土的综合性能。

[关键词] 再生骨料; 自密实混凝土; 工作性能; 力学性能; 试验

[中图分类号] TU528

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)22-0137-05

## Study on Enhancement Technology of Recycled Aggregate and Its Effect on the Properties of Self-compacting Concrete

GAO Qingchuan<sup>1</sup>, LIN Xihua<sup>1</sup>, YUAN Zong<sup>1</sup>, LIAO Fangzheng<sup>1,2</sup>,  
LI Wanting<sup>1</sup>, HU Ketao<sup>1</sup>, LI Zhiwei<sup>1</sup>

(1. China Construction Western Group Fourth (Guangdong) Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511400, China;

2. China Construction Environmental Protection Building Materials Technology (Guangzhou) Co., Ltd.,  
Guangzhou, Guangdong 510440, China)

**Abstract:** To address the performance degradation of self-compacting concrete caused by the high water absorption and low strength of recycled aggregates, a composite pretreatment method combining pre-wetting and slurry coating modification was proposed. Comparative analysis of immersion, spraying, and high-pressure water-air methods identified spraying as the most efficient technique. And combined with the fly ash-slag composite slurry, the recycled aggregates are encapsulated and strengthened. Experimental results demonstrate that this approach significantly enhances aggregate density and interfacial properties. At a 30% replacement ratio, the pretreatment group exhibited reduced slump loss in recycled aggregate self-compacting concrete, meeting the SF1 requirements for self-compacting concrete, while achieving 28-day compressive strength comparable to the natural aggregate reference group. At a 50% replacement ratio, the compressive strength loss remained controllable, and the splitting tensile strength showed marked improvement compared to the untreated group. These research results indicate that the pre-wetting combined with slurry coating method effectively enhances the overall performance of recycled aggregate self-compacting concrete.

**Keywords:** recycled aggregate; self-compacting concrete; workability; mechanical properties; tests

## 0 引言

随着我国城市旧改项目的大力推进, 每年产生的大量建筑废弃物已成为亟待解决的环境与资源难题, 如废弃混凝土和砖石等。如何高效处理这些

建筑废弃物,并将其转化为可再生混凝土,实现资源循环利用,是推动城市建设绿色低碳转型的重要课题<sup>[1-3]</sup>。再生骨料疏松多孔,具有较高的吸水性和较低的密度,将再生骨料加入自密实混凝土中会降低混凝土的工作性能<sup>[4-5]</sup>。Kisku等<sup>[6]</sup>发现在自密实混凝土中,平均抗压强度极限降低值约为30%。魏伟等<sup>[7]</sup>通过试验证实预湿可以优化自密实混凝土的工作性能,并且预湿程度70%时工作性能最好。Tang等<sup>[8]</sup>对再生骨料预湿处理后掺入混凝土中,发现预湿处理后的再生骨料混凝土流动度基本保持稳定,但V形漏斗值和抗离析性能随再生骨料替代率的增加而提高。吴春杨等<sup>[9]</sup>通过试验证实非连续级配的再生骨料可配制出满足工作性能要求的自密实混凝土,当再生骨料取代率为50%时工作性能最好。Shaban等<sup>[10]</sup>利用不同火山灰胶凝材料浆体对再生骨料进行裹浆处理,研究发现粉煤灰-水泥-纳米SiO<sub>2</sub>浆体对再生骨料的改性作用强化最优。国内外研究人员对再生骨料自密实混凝土已开展广泛研究,但仍存在再生骨料预处理工艺效率低、成本高、改性技术单一等问题。本文在整理多种预处理技术基础上,提出协同优化方案,对再生骨料进行强化,并系统研究不同替代率下预处理再生骨料对C60级再生骨料自密实混凝土工作性能与力学性能的影响。

## 1 原材料

选用P·O 52.5级普通硅酸盐水泥,粉煤灰为Ⅱ级粉煤灰,矿粉选用S95级,比表面积在(435±20)m<sup>2</sup>/kg;粗骨料选用5~20mm的连续级配碎石,分为天然粗骨料和再生骨料,再生骨料压碎值为14.1%,吸水率为6.7%;细骨料为湿法机制砂,细度模数为2.35;减水剂为聚羧酸高性能减水剂,推荐掺量为1%时,减水率为25%。

## 2 再生骨料预处理方式对比

### 2.1 裹浆法

#### 1) 预湿方式

采用浸泡、喷淋与高压水汽对再生骨料进行预湿处理,并分别于5,10,20,30min和1h时测定其孔隙饱和度,结果如表1所示。基于试验数据开展吸水过程的模拟预测,如图1所示。

由表1可知,再生骨料在3种预湿方式下均能达到饱和吸水,饱和速率为浸泡>喷淋>高压水汽。在吸水过程中,喷淋方式在后期吸水速度显著加快;浸泡方式前期吸水较快,但后期逐渐减缓;而高压水汽方式在前期与后期吸水速度均较慢,处理效率低。综合对比,喷淋处理在再生骨料处理中效果

表1 预湿方式对再生骨料孔隙饱和度的影响

Table 1 Influence of pre-wetting methods on the pore saturation of recycled aggregates

预湿方式	孔隙饱和度/%				
	5min	10min	20min	30min	1h
浸泡	82.50	84.50	89.30	93.60	98.10
喷淋	75.50	80.30	84.10	89.30	93.20
高压水汽	62.90	66.40	69.90	78.30	89.90

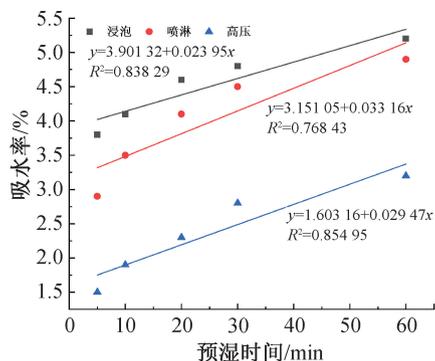


图1 不同预湿方式的吸水预测拟合

Fig.1 Prediction fitting of water absorption for different pre-wetting methods

最佳。

#### 2) 裹浆工艺

在水灰比为0.45与0.8条件下,进行粉煤灰与矿渣的单掺(试验编号为F1,F2,K1,K2)及复掺(试验编号为FK1,FK2)试验,对经过喷淋预湿1h后达到饱和吸水的再生骨料进行裹浆强化,测试结果如表2所示。

表2 再生骨料裹浆改性结果

Table 2 Results of modified cementitious material with recycled aggregates

编号	粉煤灰/g	矿渣/g	水灰比	压碎值/%	吸水率/%	表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	
基准组	F0	0	0	14.1	6.7	2 480	
单掺	F1	1 000	0.45	13.4	6.4	2 490	
	F2	1 000	0.80	12.6	5.8	2 510	
	K1	0	1 000	0.45	13.8	6.5	2 490
	K2	0	1 000	0.80	12.1	5.3	2 530
复掺	FK1	500	500	0.45	12.5	5.5	2 520
	FK2	500	500	0.80	10.3	4.2	2 560

由表2可知,经改性处理后,再生骨料的压碎值和吸水率均有所下降。粉煤灰与矿渣均属火山灰材料,再生骨料浸渍于其浆液中时,旧砂浆中的氢氧化钙可与火山灰材料中的活性组分(如SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等)发生化学反应,生成胶凝产物,填充再生骨料的细微裂缝,并在其表面形成1层致密的固化外壳,从而改善其性能。在水灰比为0.8时,采用粉煤灰与矿渣复掺改性时,再生骨料的压碎值降低了

26.9%,吸水率下降了37.3%,强化效果最显著。

## 2.2 酸/碱溶液浸泡法

采用氢氧化钠-水玻璃复合溶液(通过氢氧化钠将水玻璃模数由2.8调整至1.5,浓度10%)与5%聚乙烯醇(PVA)溶液,分别以单一和复合方式对再生骨料进行24h浸泡强化,固定浸泡时间与浓度,系统评估强化后骨料的吸水率、压碎指标和表观密度变化(见表3)。

表3 再生骨料溶液浸泡预处理性能结果

Table 3 Performance results of recycled aggregates solution soak pretreatment

改性方法	氢氧化钠与水玻璃	PVA	氢氧化钠与水玻璃、PVA
压碎值/%	13.28	13.58	12.98
吸水率/%	6.22	6.41	5.87
表观密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	2490	2480	2510

由表3可知,改性后再生骨料的压碎指标与吸水率均降低,表观密度提高。其中,氢氧化钠-水玻璃处理使压碎值下降了5.8%,吸水率降低了7.2%;PVA疏水改性使压碎值下降了3.7%,吸水率下降了4.3%;而两者复合处理时强化效果最优,压碎值降幅达7.9%,吸水率下降了12.4%。从作用机理来看,水玻璃可与骨料旧砂浆中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应生成水化产物,有效填充孔隙,提高密实度;PVA作为高分子聚合物,既可渗入微裂缝起填充作用,又能在骨料表面形成疏水薄膜,阻断水分侵入,从而协同增强骨料性能。

对比不同再生骨料预处理方式可知,矿渣与粉煤灰复掺、水灰比控制在0.8时,改性效果最显著,且裹浆法在安全性与操作便捷性方面更好。因此,本试验最终选用喷淋预湿结合FK2配比裹浆作为再生骨料的预处理方法。

## 3 配合比设计

依据JGJ/T 283—2012《自密实混凝土应用技术规程》,对目标强度等级为C60的自密实再生混凝土

进行了配合比初步设计,再生骨料取代率分别设定为10%,30%,50%,并设置了基准组、普通替代组及预处理替代组。其中基准组所用骨料为天然粗骨料,普通替代组所用骨料为未采用裹浆法进行预处理的再生骨料,预处理替代组所用骨料为采用FK2配合比的裹浆法进行预处理的再生骨料,配合比如表4所示。

试验采用100mm×100mm×100mm的立方体非标准试块测定混凝土抗压强度。试块经标准养护至7,28d龄期后,置于压力试验机上,以0.5MPa/s的加载速度匀速施压,直至试块破坏。通过倒桶时间、坍落度和J环试验评估混凝土的流动性,并采用U形箱试验和T500测定其抗离析性能和填充性能。

## 4 试验结果及分析

### 4.1 工作性能

#### 4.1.1 坍落度和J环扩展度

新拌再生骨料自密实混凝土在不同再生骨料取代率及裹浆法下的坍落度与J环扩展度测试结果如图2所示。结果表明,所有组别试块的间隙通过性(passing ability, PA)均表现良好,满足技术要求。随着再生骨料取代率的提高,混凝土的扩展度逐渐减小,而间隙通过性则呈先上升后下降的趋势。经裹浆法预处理后,再生骨料取代率对扩展度的不利影响明显减弱,各取代率下的PA值均达到PA2等级要求,原因在于裹浆处理填充了再生骨料的表面孔隙,吸水减少,从而在拌合过程中增加了混凝土内部的游离水分,有效改善浆体流动性,进而提高了再生骨料自密实混凝土的扩展度<sup>[11]</sup>。

#### 4.1.2 U形箱、V形漏斗和T500

新拌再生骨料自密实混凝土在不同再生骨料取代率及裹浆法预处理方式下,U形箱填充高度、V形漏斗排空时间及T500的测试结果分别如图3,4所示。由图3,4可知,V形漏斗排空时间处于6.8~18.9s,T500处于6.85~12.1s,除C60-Y-1组满足《自密实混凝土应用技术规程》中SF2级自密实混

表4 各试验组配合比

Table 4 Mix proportion of each experimental group

试验组	水胶比	砂率/%	水泥/kg	矿粉/kg	硅灰/kg	机制砂/kg	碎石/kg	再生骨料/kg	再生骨料替代率/%	外加剂/%
基准组	C60	0.31	41	380	100	30	720	1030	0	2.5
普通替代组	C60-1	0.31	41	380	100	30	720	927	103	2.5
	C60-2	0.31	41	380	100	30	720	721	309	2.5
	C60-3	0.31	41	380	100	30	720	515	515	2.5
预处理替代组	C60-Y-1	0.31	41	380	100	30	720	927	103	2.5
	C60-Y-2	0.31	41	380	100	30	720	721	309	2.5
	C60-Y-3	0.31	41	380	100	30	720	515	515	2.5

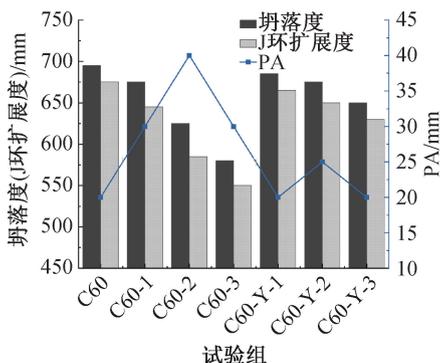


图2 坍落度、J环扩展度和PA试验结果

Fig. 2 Slump, J-ring spread, and PA test results

凝土性能要求,其余组均满足SF1级自密实混凝土性能的要求。随着再生骨料替代率的上升,普通替代组和预处理替代组的U形箱填充高度逐渐下降,V形漏斗排空时间和T500逐渐上升,表现出工作性、填充性、自密实性的劣化,但通过再生骨料的预湿裹浆处理使得这种劣化趋于平缓,可能原因是再生骨料通过预湿和表面裹浆处理,其上的微裂缝和孔隙被填充封闭,提高了浆体中游离水的含量,进一步优化新拌混凝土的自密实性能。15%替代率下,再生骨料自密实混凝土各项性能与基准组趋同,30%替代率下的再生骨料自密实混凝土各项性能基本满足《自密实混凝土应用技术规程》中SF1级自密实混凝土的要求,证明优选的裹浆法预处理方式能有效改善再生骨料的各项性能。

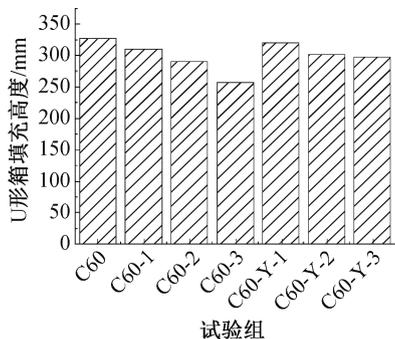


图3 U形箱填充高度测试结果

Fig. 3 U-shaped box filling height test results

## 4.2 力学性能

### 4.2.1 抗压强度

新拌再生骨料自密实混凝土在不同再生骨料替代率以及裹浆法预处理方式下,养护龄期分别为7,28d时的立方体抗压强度如图5所示。由图5可知,随着再生骨料替代率的提高,各龄期抗压强度均呈现先增大后减小的趋势,普通替代组在10%,30%,50%再生骨料替代率下,28d抗压强度相较基准组分别下降7.7%,6.2%,11.6%。预处理替代组

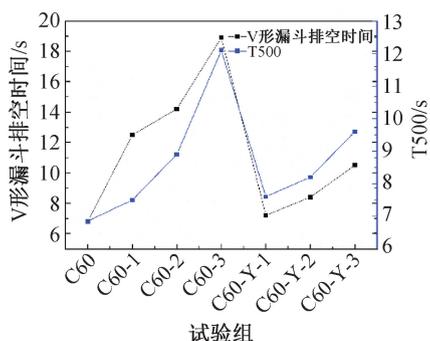


图4 V形漏斗排空时间和T500测试结果

Fig. 4 V-shaped funnel emptying time and T500 test results

在10%,30%,50%再生骨料替代率下,28d抗压强度较基准组分别下降3.8%,0.1%,9.3%,发展趋势与Tuyan等<sup>[12]</sup>研究成果相近。

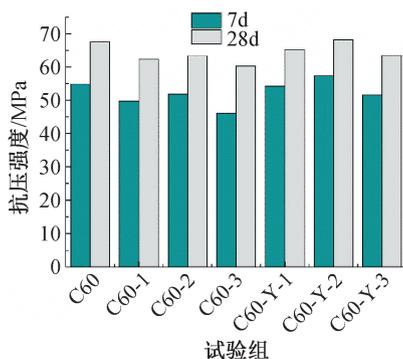


图5 各龄期再生骨料自密实混凝土抗压强度

Fig. 5 Compressive strength of recycled aggregate self-compacting concrete at various ages

同一龄期下的预处理替代组较普通替代组抗压强度有明显提高,主要原因是再生骨料进行预湿裹浆处理后,再生骨料在硬化过程中缓慢释放水分,促进未水化水泥颗粒持续水化,发挥内养护作用,提升了后期密实度。通过浆体包裹填充再生骨料表面孔隙、降低骨料吸水率,同时裹浆层还发挥了弹性模量缓冲区的作用,减少应力集中引发的界面裂缝。

### 4.2.2 劈裂抗拉强度

新拌再生骨料自密实混凝土在不同再生骨料替代率以及裹浆法预处理方式下的劈裂抗拉强度如图6所示。由图6可知,随着再生骨料替代率的提高,各龄期劈裂抗拉强度均呈现先增大后减小的趋势,普通替代组在10%,30%,50%再生骨料替代率下,28d劈裂抗拉强度相较基准组分别下降14.7%,9.8%,21.3%。预处理替代组在10%,30%,50%再生骨料替代率下,28d劈裂抗拉强度相较基准组分别下降8.9%,3.3%,16.4%。再生骨料自密实混凝土对劈裂抗拉强度的影响更显著,主要是由

于劈裂抗拉强度对界面缺陷更敏感,受拉时裂缝通常直接从界面薄弱区或孔隙处萌生然后迅速开展,且当再生骨料替代率较高时,部分再生骨料不能被浆体完全包裹,表面孔隙及裂缝暴露在外使得界面缺陷密度进一步增加,严重影响再生骨料自密实混凝土的力学性能。

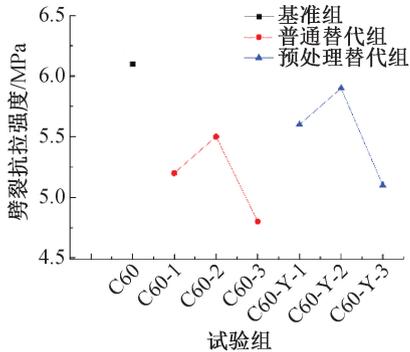


图6 各龄期再生骨料自密实混凝土劈裂抗拉强度  
Fig. 6 Split tensile strength of self-compacting concrete with recycled aggregates of different ages

## 5 结语

1) 喷淋预湿技术结合粉煤灰与矿渣复掺裹浆(粉煤灰:矿渣=1:1,水灰比0.8)对再生骨料改性效果最佳,压碎值下降26.9%,吸水率降低37.3%。预湿裹浆法通过填充孔隙、形成致密外壳,显著提升骨料性能,且操作安全便捷,优于酸碱溶液浸泡法。

2) 再生骨料替代率增加导致再生骨料自密实混凝土坍落度和J环扩展度下降,但经预处理后再生骨料表面光滑度提升,游离水释放优化浆体流动性,坍落度和J环扩展度降幅趋缓,U形箱填充高度和抗离析性得到改善。30%替代率以内,预处理组基本满足SF1级自密实混凝土性能要求。

3) 预处理组在30%替代率时,28d抗压强度与基准组持平,50%替代率时下降9.3%。各替代率下预处理组劈裂抗拉强度较基准组下降了3.3%~16.4%,降幅较普通组减少了5%~6%。

### 参考文献:

[1] 肖建庄,张航华,唐宇翔,等. 废弃混凝土再生原理与再生混凝土基本问题[J]. 科学通报,2023,68(5):510-523.  
XIAO J Z,ZHANG H H,TANG Y X, et al. Principles for waste concrete recycling and basic problems of recycled concrete[J]. Chinese science bulletin,2023,68(5):510-523.

[2] BELIN P,HABERT G,THIERY M, et al. Cement paste content and water absorption of recycled concrete coarse aggregates[J]. Materials and structures,2014,47(9):1451-1465.  
[3] AGRELA F,SÁNCHEZ DE JUAN M,AYUSO J, et al. Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete[J]. Construction and building materials,2011,25(10):3950-3955.  
[4] SINGH N,SINGH S P. Carbonation and electrical resistance of self compacting concrete made with recycled concrete aggregates and metakaolin[J]. Construction and building materials,2016,121:400-409.  
[5] GRDIC Z J,TOPLICIC-CURCIC G A,DESPOTOVIC I M, et al. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate [J]. Construction and Building Materials,2010,24(7):1129-1133.  
[6] KISKU N, RAJHANS P, PANDA S K, et al. Microstructural investigation of recycled aggregate concrete produced by adopting equal mortar volume method along with two stage mixing approach [J]. Structures,2020,24:742-753.  
[7] 魏伟,闫革,贾保正,等. 预湿再生粗骨料对自密实混凝土工作性能及力学性能影响的研究[J]. 武汉理工大学学报,2024,46(6):22-27.  
WEI W,YAN G,JIA B Z, et al. Performance and microstructure analysis of self-compacting recycled concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology,2024,46(6):22-27.  
[8] TANG W C, RYAN P C, CUI H Z, et al. Properties of self-compacting concrete with recycled coarse aggregate[J]. Advances in materials science and engineering,2016(1):2761294.  
[9] 吴春杨,马剑,潘志宏,等. 非连续级配再生粗骨料自密实混凝土基本力学性能试验研究[J]. 建筑结构,2015,45(10):69-73.  
WU C Y, MA J, PAN Z H, et al. Experimental study on basic mechanical properties of self-compacting recycled concrete with discontinuous graded recycled coarse aggregate [J]. Building structure,2015,45(10):69-73.  
[10] SHABAN W M, YANG J, SU H L, et al. Properties of recycled concrete aggregates strengthened by different types of pozzolan slurry [J]. Construction and building materials, 2019, 216: 632-647.  
[11] 牟新宇,于子浩,鲍玖文,等. 自密实再生混凝土工作及力学性能研究进展[J]. 硅酸盐通报,2022,41(5):1638-1648.  
MOU X Y, YU Z H, BAO J W, et al. Workability and mechanical properties of self-compacting recycled concrete: a review [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2022, 41(5): 1638-1648.  
[12] TUYAN M, MARDANI-AGHABAGLOU A, RAMYAR K. Freeze-thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate[J]. Materials & design,2014,53:983-991.