

引用本文: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(5):124-131.

YAN Yong-dong, XU Peng-fei, YAO Jia-cheng, et al. Properties of Nano-reinforced Recycled Concrete Adopting Ultrasonic Dispersion Technology[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(5): 124-131.

DOI:10.19815/j.jace.2019.09005

超声分散处理的纳米再生混凝土基本性能

延永东¹, 徐鹏飞¹, 姚嘉诚¹, 陆春华¹, 袁天军²

(1. 江苏大学 土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013; 2. 中交四公局第三工程有限公司, 北京 100123)

摘要:为了充分发挥纳米材料在提升再生混凝土基本性能方面的作用,分别采用 SiO_2 , Al_2O_3 , CaCO_3 和石墨烯(GNP)4种纳米材料与减水剂、水混合,经 30 min 超声分散后添加适量水泥制成纳米强化浆液,然后将再生骨料浸泡于浆液中 30 min,筛分晾干后形成纳米强化再生骨料。对采用此种骨料制备的混凝土进行抗压性能测试和微观结构检测。结果表明:采用超声分散后的纳米浆液能够有效包裹于再生骨料的表面,使其界面过渡区的微观结构得到改善;纳米强化浆液浸泡粗骨料的方式能有效地提高再生混凝土的抗压强度,其中浸泡于 0.2% 纳米 SiO_2 强化浆液、取代率为 50% 的纳米强化再生混凝土抗压强度最高,分别比未强化的再生混凝土和普通混凝土提高 24.3%, 33.1%; 纳米材料填充了混凝土内的部分孔隙,提高了再生混凝土的密实度。所得结果可为再生混凝土的性能提升提供技术支持。

关键词:再生混凝土;骨料强化;纳米技术;超声分散;界面过渡区

中图分类号: TU528.45

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2020)05-0124-08

Basic Performance of Nano-reinforced Recycled Concrete Adopting Ultrasonic Dispersion Technology

YAN Yong-dong¹, XU Peng-fei¹, YAO Jia-cheng¹, LU Chun-hua¹, YUAN Tian-jun²

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China;

2. Third Engineering Co. Ltd of CCCC Fourth Highway Engineering Co. Ltd, Beijing 100123, China)

Abstract: In order to effectively improve the basic performance of nano-materials in recycled concrete, ultrasonic technology was introduced. Four different types of nano-materials (SiO_2 , Al_2O_3 , CaCO_3 and GNP) were investigated respectively. Firstly, the nano-material was mixed with water reducer and water. After 30 min of ultrasonic dispersion, nano-strengthened slurry was obtained with proper amount of cement. Then the recycled aggregate was soaked in the slurry for 30 min. Finally, nano-enhanced recycled aggregate was gained after screening and drying. Compressive strength and microstructure of the recycled coarse aggregate concrete were tested. The results show that the nano-slurry after ultrasonic dispersion can effectively wrap around recycled aggregate and improve the microstructure of interface transition zone. Immersing coarse aggregate in nano-enhanced slurry can effectively increase the compressive strength of recycled coarse aggregate concrete. The compressive strength of nano-reinforced recycled concrete

收稿日期:2019-09-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51608233, 51778272, 51878319)

作者简介:延永东(1982-),男,陕西榆林人,副教授,工学博士,博士后, E-mail: yand@ujs.edu.cn.

immersed in 0.2% nano-SiO₂ reinforced slurry with 50% substitution of recycled coarse aggregate is 24.3% and 33.1% higher than unreinforced recycled concrete and ordinary concrete respectively. The nano-material fills up some original pores in the concrete and improves the compactness of the recycled concrete. The results obtained are considerably valuable for the performance improvement in recycled concrete.

Key words: recycled aggregate concrete; aggregate strengthening; nano-technology; ultrasonic dispersion; interfacial transition zone

0 引 言

再生混凝土(Recycled Aggregate Concrete,RAC)采用处理后的废弃混凝土作为粗骨料,可以将废弃混凝土进行有效的回收利用^[1],既可以减少固体废弃物对环境的破坏,又能节约砂石等资源,是混凝土行业实现可持续发展的重要途径之一。然而,由于再生骨料表面附着大量的水泥砂浆,使得原本就是混凝土最薄弱的界面过渡区(Interfacial Transition Zone,ITZ)的性能再次降低,导致再生混凝土的质量低于普通混凝土^[2-3]。采用一定的技术手段来提高再生混凝土界面过渡区和浆体内的密实度对再生混凝土的充分利用有重要意义。

纳米材料粒径极小,且具有表面效应、尺寸效应和界面效应,已有研究表明,采用适当的方法将其加入混凝土可以改善混凝土的微观结构,提高其力学性能^[4]。张津践^[5]将再生骨料直接浸泡在纳米溶液中,发现 1%(质量分数)的纳米 CaCO₃ 溶液能快速渗透并填充再生混凝土的界面过渡区和微裂缝中;李文贵等^[6]通过将不同纳米材料以分散液的形式加入混凝土搅拌机中,发现纳米硅溶胶能够很好地改善 RAC 界面过渡区微观结构;朱从进等^[7]将 0.2% 的纳米 Al₂O₃ 先与减水剂和部分水混合之后搅拌,制成纳米氧化铝混合液,然后直接倒入混凝土搅拌机中,改善了混凝土界面过渡区的微观结构;Palla 等^[8]直接在大掺量粉煤灰混凝土中添加纳米 SiO₂,使得混凝土的界面过渡区更加密实,抗压强度提高了 25% 左右;李媛媛^[9]将制备的纳米 CaCO₃ 胶体以喷洒加搅拌的方式使得强化浆液均匀地附着在再生细骨料的表面,较好地提高了再生混凝土的干燥收缩性能。目前国内外学者在不同纳米材料种类及强化方法上对再生混凝土界面过渡区和微裂缝的填充效应以及抗压强度方面的研究结果存在差异甚至相互冲突。因此,有必要针对再生混凝土界面过渡区的特点选择最为有效的纳米材料,并制定更为有效的纳米强化方法。

本文选择了 4 种常用的纳米材料来配置再生混凝土,并在制备纳米强化浆液时采用超声分散来克服纳米材料在混凝土内的团聚现象,然后分别采用 SEM 电镜扫描、EDS 能谱分析、抗压强度测试等方式对纳米强化再生粗骨料混凝土的基本性能进行了研究,以期得出超声分散技术及纳米材料种类对再生混凝土性能的影响。

1 试验设计及试验过程

1.1 试验材料

试验所用材料:水泥采用鹤林牌普通硅酸盐水泥 P. O42.5;粗骨料采用粒径为 5.0~25.0 mm 连续级配的天然碎石;再生粗骨料取自校内建筑拆除后的废弃混凝土,使用年限已达 20 年,破碎筛分成 5.0~25.0 mm 连续级配;细骨料采用河砂,细度模数为 2.7;水为自来水;采用中科行的科研专用纳米材料和上海启臣的聚羧酸高性能减水剂,参数如表 1、2 所示。

表 1 纳米材料参数

Tab. 1 Parameters of Nanomaterials

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaCO ₃	GNP
纯度/%	99.8	99.9	99.0	99.4
粒径/nm	15.0	30.0	30.0	0.5~20.0
分子量	60.08	101.96	100.09	

表 2 聚羧酸高性能减水剂性能

Tab. 2 Properties of Polycarboxylic Acid Superplasticizer

参数	指标	检验结果
外观	类白色	灰白色偏淡黄
含水率/%	≤3.00	1.81
pH 值	5.0~7.5	7.1
水泥净浆流动度/mm	≥220×0.95	280
混凝土减水率/%	≥25.0	26.2
混凝土含气量/%	≤4.0	1.7

1.2 纳米强化再生粗骨料的制备

考虑到减水剂及纳米材料在水中难以溶解,易形成团簇状难溶物^[10]。因此使用 230T 型超声波分散仪,将混有减水剂(掺量为水泥质量的 1%)和纳

米材料(掺量为水泥质量的 0.2%)的混合液超声乳
化,以此来充分发挥减水剂对纳米材料的分散作用。
待母液制备完成之后按水灰比 0.5 添加水泥,并充
分拌合,制得纳米强化浆液,随后将通过骨料筛分去
除多余杂质的再生粗骨料浸泡于纳米浆液中,改性
30 min 之后将骨料和浆液分离并晾晒风干,完成再
生骨料的纳米强化。为了比较超声法的强化效果,
以同样的配比制备了未超声分散的对比组。工艺流
程如图 1 所示。

1.3 混凝土配合比设计

依据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—
2011)和《再生骨料应用技术规程》(JGJ/T 240—
2011)进行配合比设计,设计的混凝土编号及配合比
如表 3 所示。表 3 中 NAC 为天然骨料混凝土(Na-
ture Aggregate Concrete, NAC), RAC, NRAC 和
MRAC 分别为骨料取代率为 50%的普通再生混凝
土和纳米强化再生混凝土以及未超声分散的对比
组;混凝土类型中的分子式表示的是纳米强化浆液
或纳米材料的种类;每组制备 3 个边长为 150 mm
的标准试块。通过减水剂的调整,各组混凝土均获
得较好的和易性。普通再生混凝土的坍落度比天然
骨料混凝土降低了 17%,这是由于再生粗骨料表面
附着大量的水泥砂浆及破碎时产生不规则棱角所
致^[11];纳米强化技术能够将再生混凝土的流动性提
高 15.2%左右,有效提升了再生混凝土的工作性能。

1.4 试验设备及方法

首先利用纳米强化后的骨料制备再生混凝土试

块,将其放入标准养护箱中进行养护。当养护时间
达 7,14,28 d 时,取出试块,依据《普通混凝土力学
性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)进行不同
龄期试块的抗压强度试验。然后在完成抗压试验的
试块上,用 BJQF 型裂缝测宽仪对纳米强化再生混
凝土界面过渡区的厚度进行观察和测量。随后破碎
立方体试块,选取包含 ITZ 的试验样品(面积 5
mm² 左右,厚度小于 10 mm)。放入无水乙醇中进
行超声清洗,以去除附着于样品表面的杂质,取出
试样喷金处理后进行电镜扫描。最后使用高性能 X
射线能谱仪(Energy Dispersive X-Ray Spectroscop-
y)对样品中特定的区域进行 EDS 能谱分析。

2 试验结果及分析

2.1 再生骨料强化结果分析

天然骨料(NA)、再生骨料(RA)以及纳米强化
再生骨料(超声分散组 NRA 和未超声分散组
MRA)的表面形态如图 2 所示。可以看出,天然骨
料与未强化的再生骨料相比,再生骨料的表面更加
粗糙,棱角分明且包裹着旧砂浆,旧砂浆与骨料的
界面比较明显,而且再生骨料由于人工破碎存在微
裂缝和新的破碎面。经过纳米强化浆液改进之后
的再生骨料,可以明显地看出其表面包裹了一层较
薄的灰色物质,这一包裹层主要是粗骨料在浸泡
过程中,纳米强化浆液附着在其表面,经水泥水化
、风干之后形成。此物质不仅覆盖了旧水泥石和
骨料的界面,而且填充了再生骨料的微裂缝。未超
声分散组纳米

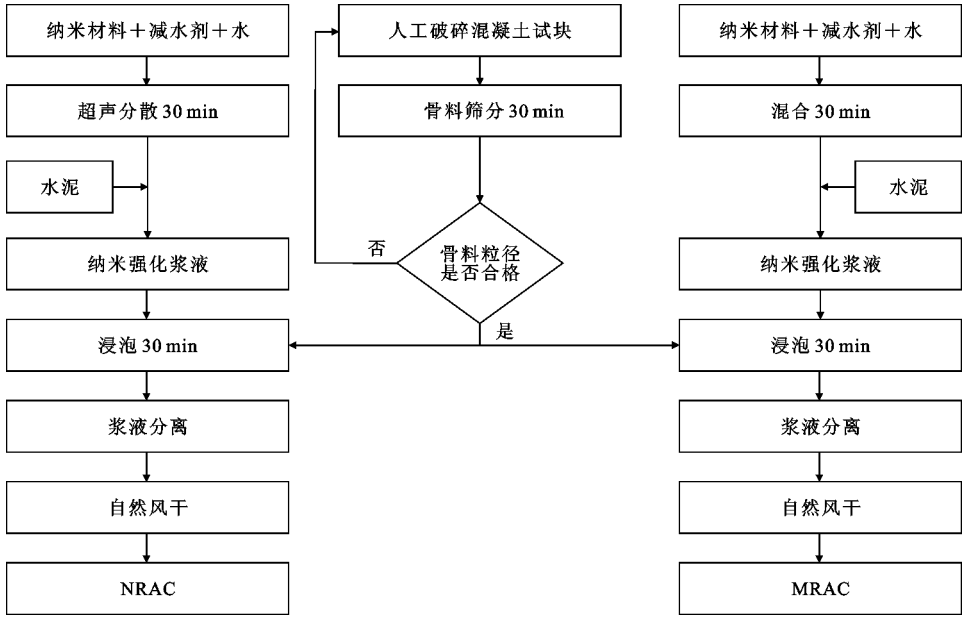


图 1 纳米强化再生骨料制备的工艺流程

Fig. 1 Process Flow for Preparation of Nano-reinforced Recycled Aggregate

表 3 混凝土配合比

Tab.3 Mix Proportions of Concrete

混凝土类型	各材料用量/(kg·m ⁻³)									坍落度/ mm	
	水泥	砂	水	天然骨料	普通再生 骨料	纳米强化再生骨料					减水剂
						SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaCO ₃	GNP		
NAC	361	608	195	1 235.0						0.72	158
RAC	361	608	195	617.5	617.5					0.72	131
NRAC-SiO ₂	361	608	195	617.5		617.5				0.72	182
MRAC-SiO ₂	361	608	195	617.5		617.5				0.72	174
NRAC-Al ₂ O ₃	361	608	195	617.5			617.5			0.72	176
MRAC-Al ₂ O ₃	361	608	195	617.5			617.5			0.72	161
NRAC-CaCO ₃	361	608	195	617.5				617.5		0.72	180
MRAC-CaCO ₃	361	608	195	617.5				617.5		0.72	159
NRAC-GNP	361	608	195	617.5					617.5	0.72	178
MRAC-GNP	361	608	195	617.5					617.5	0.72	172

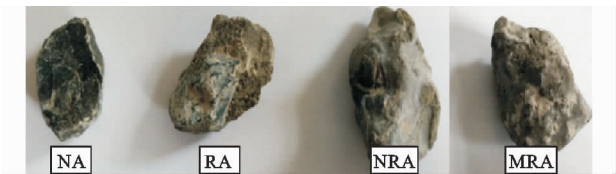


图 2 天然骨料、再生骨料以及纳米强化再生骨料的表面形态

Fig. 2 Surface Morphology of Nature Aggregate, Recycle Aggregate and Nano-reinforced Recycle Aggregates

强化再生骨料与超声分散组纳米强化再生骨料的表面形态基本相同。

纳米强化浆液不仅从宏观上改善了再生骨料的性能,而且在微观上对水泥水化反应起到了不同程度的影响。研究表明适量纳米 SiO₂ 和纳米 CaCO₃ 均能有效地促进 C-S-H 凝胶的生成,并填充水泥基的微孔从而增加其密实度^[4,12];纳米 Al₂O₃ 与水泥具有天然的相容性,能够有效提高水泥硬化浆体的密实程度^[7];纳米 GNP 片层上的含氧基团对水泥水化产物的形成具有模板效应与填充作用,能够优化水化产物的形状^[13]。因此下文进一步研究纳米强化浆液对再生骨料界面过渡区的影响。

2.2 力学性能试验结果及分析

2.2.1 抗压强度

混凝土立方体抗压强度试验结果如图 3,4 所示。从图 3 中可以看出:①配合比相同的情况下,50%骨料取代率的再生混凝土 7,14,28 d 的抗压强度均比普通混凝土高出 7%左右,可能是此时 2 种粗骨料形成更优的级配^[14],但目前关于产生强度突变的取代率及原因仍存在分歧,并没有统一的结论,因此还需要结合骨料的粒径、级配和微观结构等因

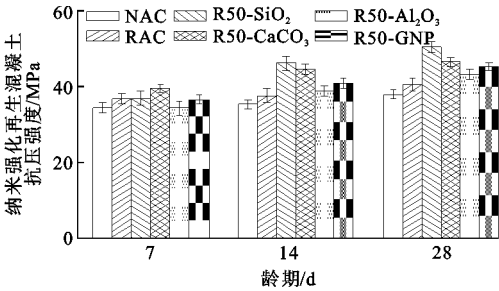


图 3 不同种类纳米强化再生混凝土抗压强度

Fig.3 Compression Strength of Different Kinds of Nano-reinforced Recycled Concrete

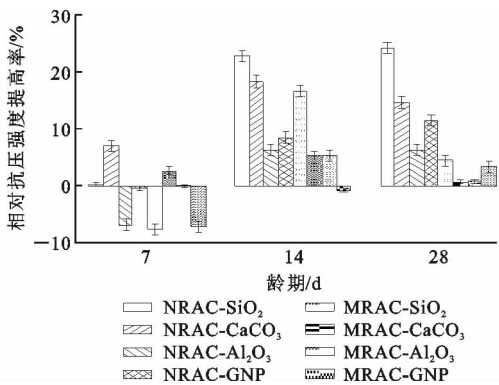


图 4 相对抗压强度提高率(以 RAC 为基准)

Fig.4 Relative Compressive Strength Improvement Rate (Based on RAC)

素进一步分析^[15-16];②从不同龄期的强度来看,纳米强化技术可使普通再生混凝土 7 d 和 28 d 抗压强度最大分别提高 7%和 24.3%,可见随着龄期增加,纳米强化技术对再生混凝土的抗压强度提升愈加显著;③从不同纳米强化浆液对再生混凝土抗压强度的影响来看,纳米 SiO₂ 浆液强化效果最佳,其 28 d 抗压强度比普通混凝土提高了 33.1%,比再生混凝

土提高了 24.3%，纳米 Al_2O_3 强化浆液提升效果最弱，仅仅提高了 11.2%。

从图 4 中可以看出：①纳米材料的添加阻碍了再生混凝土早期强度的形成，但纳米 CaCO_3 却能有效提高再生混凝土的早期强度，这是因为纳米 CaCO_3 消耗一定量的水泥水化产物 C_3A ，从而加速水泥水化反应的进行，反应式为 $\text{CaCO}_3 + 12\text{H}_2\text{O} + 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ，然而随着龄期的增长这一优势被纳米 SiO_2 所取代；②未采用超声分散技术的纳米强化再生混凝土的抗压强度提高率均小于使用超声分散技术的再生混凝土，28 d 差值最大的为纳米 SiO_2 改性再生混凝土，提高率可达 19.83%，因此将超声分散技术应用于纳米 SiO_2 材料中的效果最显著。由于未使用超声分散技术的强化效果有限，因此下文不再对其进行讨论。

2.2.2 抗压破坏形态

再生混凝土的抗压破坏形态如图 5 所示。可以看出：①NAC, RAC 和 NRAC 的破坏形式基本相同，混凝土贯通裂缝大都是沿着受压方向生长，同时由于压力试验机上涂抹润滑剂的原因，因此并未出现典型的倒“八”字裂纹^[17]，如图 5(a), (c) 所示；②混凝土内部的非稳定裂缝首先在粗骨料的界面过渡区产生，随后扩展到细骨料的界面过渡区，其中部分贯通裂缝明显绕过了纳米强化再生骨料的界面过渡区，甚至出现了贯通骨料的裂缝，如图 5(b), (d) 所示(其他纳米强化再生混凝土也出现了类似的现象)；③对抗压破坏后的试块进行裂缝类型和数目的统计分析(表 4)，并忽略表层无法判别的裂缝类型，结果显示纳米 SiO_2 强化浆液改性之后，骨料贯穿裂缝达到 32%，分别为 NAC 和 RAC 的 6 倍和 10 倍左右，从一定程度上说明纳米 SiO_2 强化浆液改性后的界面过渡区不再是混凝土最薄弱的区域^[4,18-19]。

2.3 再生混凝土细观试验结果及分析

2.3.1 细观组成分析

纳米强化再生混凝土细观实物图如图 6 所示。可以看出，再生骨料被纳米强化浆液包裹，隔断了其与新砂浆之间的接触，降低了其对 ITZ 的不利影响，因此将非 100%再生骨料取代率的纳米强化再生混凝土看作是由再生骨料、再生骨料和旧砂浆的界面过渡区(ITZ1)、旧砂浆、纳米浆液包裹层、纳米浆液包裹层和新砂浆的界面过渡区(ITZ2)、新砂浆、新砂浆和天然骨料的界面过渡区(ITZ3)、天然骨料组成的八相复合材料；或者再生骨料取代率为

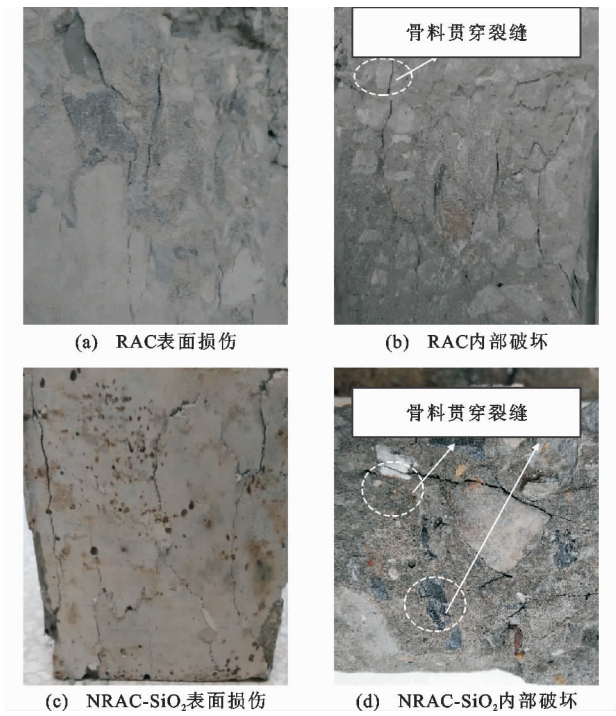


图 5 纳米强化再生混凝土抗压破坏形态
Fig. 5 Compressive Failure Mode of Nano-reinforced Recycled Concrete

表 4 再生混凝土裂缝类型统计分析结果
Tab. 4 Statistical Analysis Results of Fracture Type of Recycled Concrete

混凝土类型	裂缝类型所占比例/%			合计裂缝数
	贯穿裂缝	过渡区裂缝	砂浆裂缝	
NAC	5.4	44.6	50.0	56
RAC	7.8	51.6	40.6	64
NRAC-SiO ₂	32.1	20.5	47.4	78
NRAC-Al ₂ O ₃	16.3	25.6	58.1	43
NRAC-CaCO ₃	23.2	27.6	49.2	69
NRAC-GNP	20.8	30.6	48.6	72

注：对单一类型的裂缝只记录 1 次；对同时贯穿砂浆和界面过渡区的裂缝记录 2 次；对同时贯穿砂浆和骨料的裂缝记录 2 次；对同时贯穿砂浆、界面过渡区和骨料的裂缝记录 3 次；对表面无法判别裂缝类型的裂缝不进行统计。

100%的六相复合材料，即没有天然骨料和 ITZ3，而非传统的四相复合材料^[20]或五相复合材料^[21]组成。

2.3.2 微观形貌检测及元素分析

通过电镜扫描得到的不同纳米强化浆液增强混凝土界面过渡区的微观形貌如图 7 所示，其中虚线区域为 EDS 能谱分析区域。可以看出：①由于样品制备过程中存在机械压力，NAC, RAC 和 NRAC- Al_2O_3 样品沿着界面过渡区产生了 1 条微裂缝[图 7(a), (b), (d)]，但 NRAC- SiO_2 ，NRAC- CaCO_3 和 NRAC-Cn 的界面过渡区并未产生裂缝，可见超

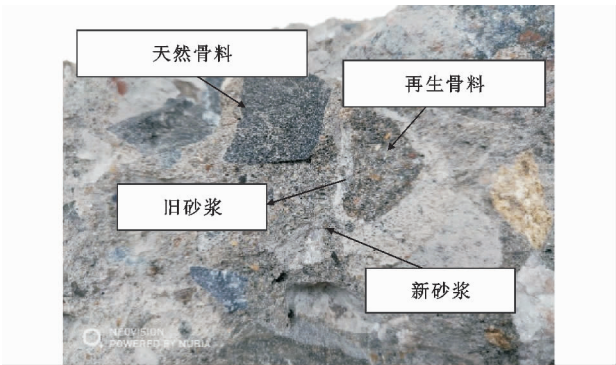


图 6 纳米强化再生混凝土细观实物图

Fig. 6 Mesoscopic Physical Map of Nano-reinforced Recycled Concrete

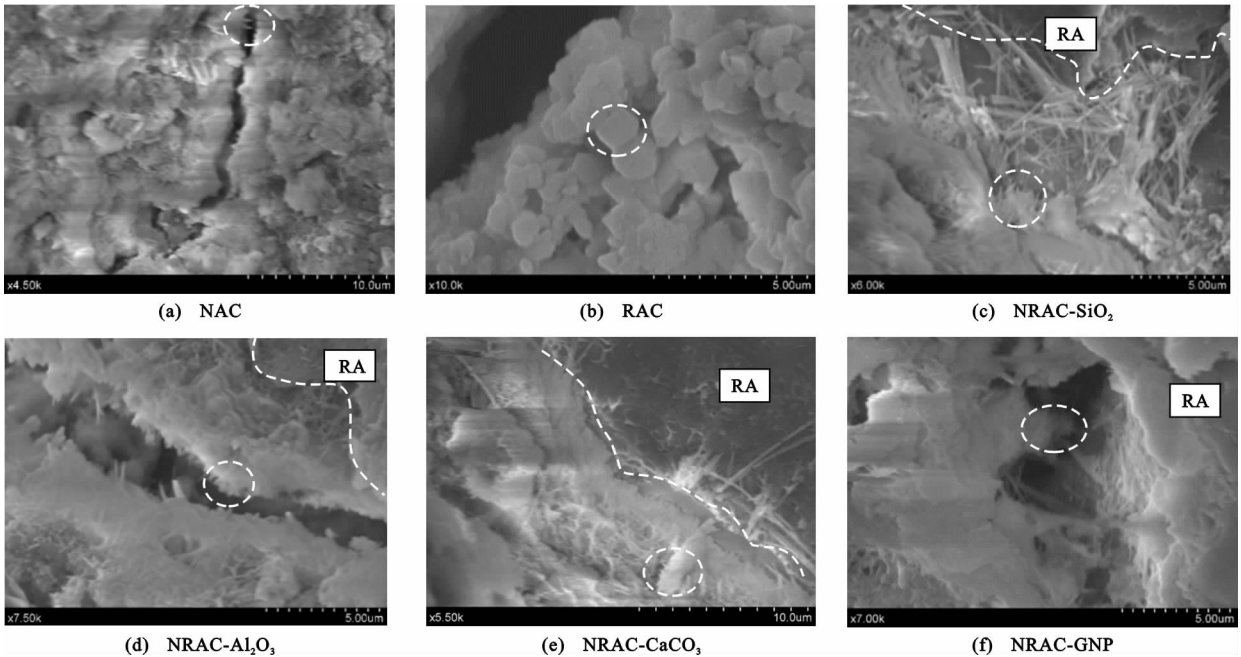


图 7 不同混凝土界面过渡区微观形貌

Fig. 7 Micro-morphology of Different Concrete ITZs

物的生成,但是针棒状的 AFt 晶体搭接并不紧密,CSH 凝胶产量稀少,降低了界面过渡区的密实度;④掺加纳米 GNP 浆液的再生混凝土内生成了较粗大的针棒状 AFt 晶体,晶体之间仅有少量的 C—S—H 凝胶填充,其界面过渡区存在较大的孔隙,说明纳米 GNP 浆液对水泥水化产物的生长形态和数量分布有一定的影响,如图 7(f)所示。

为了更准确地分析界面过渡区微观形貌的成因,对 SEM 图中用虚线标记的位置进行 EDS 能谱分析,结果如表 5 所示。通过 EDS 能谱分析,可以判断出物质的元素组成,其中 C—S—H 凝胶是由 Ca、Si、H、O 等元素组成,但也掺杂着少量的 Al、S、Fe 等元素,这说明 C—S—H 与 AFt/AFm 和 CH 交错生长^[22];Ca、Si、Al 等元素在界面过渡区的含量

声分散方法对纳米 SiO₂、纳米 CaCO₃ 和纳米 GNP 界面过渡区的强度有所提升;②由于再生骨料比普通骨料的吸水率大,导致普通再生混凝土界面过渡区的水化产物减少,大量的六方板状 CH 晶体成层片状堆叠在一起,其界面过渡区的孔隙明显多于普通混凝土^[9],如图 7(b)所示;③与普通再生混凝土相比,纳米 SiO₂ 和纳米 CaCO₃ 强化浆液改性的再生混凝土界面过渡区的水化产物更丰富,如针棒状 AFt 晶体相互搭接形成网状结构,并有部分 C—S—H 凝胶填充于孔隙骨架结构中,使得界面过渡区的微观结构更加致密,如图 7(c),(e)所示,另外从图 7(d)可见,纳米 Al₂O₃ 浆液虽然促进了水泥水化产

表 5 混凝土界面过渡区样品点元素分布

Tab. 5 Element Distribution of Sample Points of Concrete ITZ

混凝土类型	各元素质量分数/%						
	O	Al	Si	S	Ca	Fe	C
NAC	42.0	0.0	34.3	0.0	12.0	0.0	11.7
RAC	35.4	0.0	10.3	1.6	50.1	2.6	0.0
NRAC-SiO ₂	38.4	0.9	42.6	2.6	11.4	1.4	2.7
NRAC-Al ₂ O ₃	39.4	10.3	22.7	3.8	12.8	0.8	10.1
NRAC-CaCO ₃	44.5	0.4	1.7	0.0	45.5	0.0	8.1
NRAC-GNP	41.2	1.8	18.9	0.7	21.2	0.0	16.4

异常提高,说明超声分散方法能够有效地将纳米材料分散到 ITZ2 中,且部分纳米材料可填充到水化产物的孔隙结构中,从而改善了界面过渡区的微观

结构。

3 结 语

(1)采用超声分散后的纳米浆液浸泡再生骨料,可使纳米材料有效地包裹于再生骨料的表面,修补再生骨料的微裂缝。

(2)纳米强化浆液浸泡粗骨料的方式能有效地提高再生混凝土的抗压强度;其中浸泡于 0.2% 纳米 SiO_2 强化浆液、取代率为 50% 的纳米强化再生混凝土抗压强度最高,分别比未强化的再生混凝土和普通混凝土提高 24.3%,33.1%。

(3)不同纳米材料对水泥水化产物的生成产生了不同程度的影响,其中纳米 SiO_2 对抗压强度的改性效果最为显著,促使水泥水化产物形成更加致密均匀的网状结构,同时部分纳米材料填充了混凝土的内部孔隙,提高了再生混凝土的密实度。

参考文献:

References:

- [1] 曹万林,赵羽习,叶涛萍.再生混凝土结构长期工作性能研究进展[J].哈尔滨工业大学学报,2019,51(6):1-17.
CAO Wan-lin,ZHAO Yu-xi, YE Tao-ping. A Review of Recent Advances in the Long-term Working Characteristic of Recycled Concrete Structure[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2019,51(6):1-17.
- [2] 肖建庄,吴磊,范玉辉.微波加热再生粗骨料改性试验[J].混凝土,2012(7):55-57.
XIAO Jian-zhuang, WU Lei, FAN Yu-hui. Test on Modification of Recycled Coarse Aggregate by Microwave Heating[J]. Concrete,2012(7):55-57.
- [3] 肖倍,安旭文,杨瑞,等.再生混凝土基本力学性能试验及其影响因素研究[J].混凝土,2018(11):32-36,40.
XIAO Bei, AN Xu-wen, YANG Rui, et al. Experimental Research on Basic Mechanical Characteristics of Recycled Aggregate Concrete and Influencing Factors[J]. Concrete,2018(11):32-36,40.
- [4] 徐晶,王先志.纳米二氧化硅对混凝土界面过渡区的改性机制及其多尺度模型[J].硅酸盐学报,2018,46(8):1053-1058.
XU Jing, WANG Xian-zhi. Effect of Nano-silica Modification on Interfacial Transition Zone in Concrete and Its Multiscale Modelling[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2018,46(8):1053-1058.
- [5] 张津践.再生混凝土纳米强化技术及微观结构分析[D].杭州:浙江大学,2012.

- ZHANG Jin-jian. Recycled Concrete's Nano-enhancement Technology and Microstructural Analysis[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2012.
- [6] 李文贵,龙初,罗智予,等.纳米改性再生骨料混凝土破坏机理研究[J].建筑材料学报,2017,20(5):685-691,786.
LI Wen-gui, LONG Chu, LUO Zhi-yu, et al. Investigation on Failure Mechanism of Nanomodified Recycled Aggregate Concrete[J]. Journal of Building Materials,2017,20(5):685-691,786.
- [7] 朱从进,白二雷,许金余,等.纳米氧化铝对混凝土静动态力学性能的影响[J].硅酸盐通报,2016,35(8):2575-2580,2589.
ZHU Cong-jin, BAI Er-lei, XU Jin-yu, et al. Effect of Nano-alumina on Quasi-static and Dynamic Properties of Concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2016,35(8):2575-2580,2589.
- [8] PALLA R, KARADE S R, MISHRA G, et al. High Strength Sustainable Concrete Using Silica Nanoparticles[J]. Construction and Building Materials,2017,138:285-295.
- [9] 李媛媛.纳米强化对再生细骨料制品性能的影响及作用机理研究[D].杭州:浙江大学,2017.
LI Yuan-yuan. Research on the Effect and Mechanism of Nano-strengthening on the Properties of Cement-based Products with Recycled Fine Aggregate[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2017.
- [10] 朱勇年,张鸿儒,孟涛,等.纳米 SiO_2 改性再生骨料混凝土工程应用研究及实体性能监测[J].混凝土,2014(7):138-144.
ZHU Yong-nian, ZHANG Hong-ru, MENG Tao, et al. Performance of Nano- SiO_2 Modified Recycled Aggregate Concrete Applied in a Real Project[J]. Concrete,2014(7):138-144.
- [11] 肖建庄,张鹏,张青天,等.海水海砂再生混凝土的基本力学性能[J].建筑科学与工程学报,2018,35(2):16-22.
XIAO Jian-zhuang, ZHANG Peng, ZHANG Qing-tian, et al. Basic Mechanical Properties of Seawater Sea-sand Recycled Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2018,35(2):16-22.
- [12] 詹培敏,孙斌祥,何智海,等.纳米碳酸钙对水泥基材料性能影响的研究进展[J].硅酸盐通报,2018,37(3):881-887,910.
ZHAN Pei-min, SUN Bin-xiang, HE Zhi-hai, et al. Research Progress of Effect of Nano-calcium Carbonate on the Properties of Cement-based Materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2018,37(3):

- 881-887,910.
- [13] 曹明莉,张会霞,张 聪. 石墨烯对水泥净浆力学性能及微观结构的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报,2015,47(12):26-30.
- CAO Ming-li,ZHANG Hui-xia,ZHANG Cong. Effect of Graphene on Mechanical Properties and Microstructure of Cement Paste[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2015,47(12):26-30.
- [14] 肖建庄,李佳彬,孙振平,等. 再生混凝土的抗压强度研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,2004,32(12):1558-1561.
- XIAO Jian-zhuang,LI Jia-bin,SUN Zhen-ping,et al. Study on Compressive Strength of Recycled Aggregate Concrete[J]. Journal of Tongji University:Natural Science,2004,32(12):1558-1561.
- [15] 杨海涛,田石柱. 尺寸效应对再生混凝土的影响[J]. 中南大学学报:自然科学版,2016,47(11):3818-3823.
- YANG Hai-tao,TIAN Shi-zhu. Influence of Size Effect on Properties of Recycled Concrete[J]. Journal of Central South University:Science and Technology,2016,47(11):3818-3823.
- [16] 陈宗平,徐金俊,郑华海,等. 再生混凝土基本力学性能试验及应力-应变本构关系[J]. 建筑材料学报,2013,16(1):24-32.
- CHEN Zong-ping,XU Jin-jun,ZHENG Hua-hai,et al. Basic Mechanical Properties Test and Stress-strain Constitutive Relations of Recycled Coarse Aggregate Concrete[J]. Journal of Building Materials,2013,16(1):24-32.
- [17] 汪振双,王宝民,苏昊林,等. 橡胶颗粒对再生混凝土耐久性影响[J]. 哈尔滨工业大学学报,2015,47(6):109-112.
- WANG Zhen-shuang,WANG Bao-min,SU Hao-lin,et al. Influence of Rubber Particles on Durability of Recycled Coarse Aggregate Concrete[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2015,47(6):109-112.
- [18] ZHANG M H,ISLAM J. Use of Nano-silica to Reduce Setting Time and Increase Early Strength of Concretes with High Volumes of Fly Ash or Slag[J]. Construction and Building Materials,2012,29:573-580.
- [19] ZHANG M H,ISLAM J,PEETHAMPARAN S. Use of Nano-silica to Increase Early Strength and Reduce Setting Time of Concretes with High Volumes of Slag [J]. Cement Concrete and Composites,2012,34(5):650-662.
- [20] SUN G W,ZHANG Y S,SUN W,et al. Multi-scale Prediction of the Effective Chloride Diffusion Coefficient of Concrete[J]. Construction and Building Materials,2011,25(10):3820-3831.
- [21] 应敬伟,肖建庄. 模型再生混凝土氯离子非线性扩散细观仿真[J]. 建筑材料学报,2013,16(5):863-868.
- YING Jing-wei,XIAO Jian-zhuang. Meso-level Simulation of Chloride Nonlinear Diffusion in Modeled Recycled Aggregate Concrete [J]. Journal of Building Materials,2013,16(5):863-868.
- [22] 彭 晖,戈娅萍,杨振天,等. 氧化石墨烯增强水泥基复合材料的力学性能及微观结构[J]. 复合材料学报,2018,35(8):2132-2139.
- PENG Hui,GE Ya-ping,YANG Zhen-tian,et al. Mechanical Properties and Microstructure of Graphene Oxide Reinforced Cement-based Composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2018,35(8):2132-2139.