•化学工程与材料工程•

DOI:10.12454/j.jsuese.202400558

本刊网刊

纳米SiO_2对再生骨料混凝土性能及微观结构的影响

张珅侨[1],俞家珺[1],李浩雄[1],张　征[1],张明明[2],王文海[1*]

(1.中国建筑第八工程局有限公司,上海 200112;2.西京学院 土木工程学院,陕西 西安 710123)

摘　要:优化处理再生骨料可以有效改善再生混凝土的性能,促进其高效和安全应用。本研究采用普通搅拌和纳米材料增强再生骨料裹浆搅拌方法制备了9组不同纳米二氧化硅(nano-SiO_2,NS)含量的再生混凝土,测试了其工作性能、抗压强度、电通量值和抗冻性能,并采用核磁共振(NMR)和扫描电镜(SEM)揭示了NS含量和搅拌方式对再生骨料混凝土界面过渡区和孔结构的影响机理。结果表明:NS可显著增加浆体黏度,增强再生粗骨料的裹浆能力,适量NS的加入有利于改善再生混凝土力学性能和耐久性能;但NS掺量超过0.8%后,其掺量对混凝土界面过渡区和孔隙结构的影响趋于稳定,且NS的团聚现象会不利于其力学性能与耐久性能的发展;与普通搅拌方法相比,NS裹浆再生骨料搅拌方法配制的混凝土力学性能、抗渗性能和抗冻性能更优,其冻融后的质量损失和相对动弹性模量损失均低于普通搅拌方法配制的混凝土;微观结构测试表明,NS裹浆再生骨料搅拌方法配制的混凝土有害孔数量比普通搅拌方法配制的混凝土更少,且其新界面过渡区的质量更优。

关键词:纳米增强;再生骨料裹浆;再生混凝土;力学性能;抗冻性能;界面过渡区

中图分类号:TU258.01　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-3246(2026)03-0356-09

利用建筑拆除废弃物破碎、筛分、洗涤后获得的再生粗骨料生产再生骨料混凝土不仅可以缓解混凝土用碎石原料短缺的问题,还能促进废混凝土的回收利用,具有广阔的应用前景[1]。然而,较天然粗骨料而言,再生粗骨料表面粗糙,棱角较多,表观密度较小,吸水率较高且界面过渡区较多[2]。因此,利用再生骨料部分或全部替换天然骨料而得到的再生骨料混凝土性能与天然骨料混凝土相比较差[3–5]。针对这一问题,研究者们提出了各种物理和化学加固方法来改善再生粗骨料性能,以及尝试添加一些高水化活性材料来改善再生混凝土的性能。

纳米材料(如SiO_2、$CaCO_3$、TiO_2等)因其独特的表面、尺寸和界面等效应已被成功应用于提升水泥基材料的性能[6–8]。其中,纳米二氧化硅(nano-SiO_2,NS)因具有较强的火山灰活性、填充效应和成核效应而备受关注。近年来,国内外研究者在采用NS溶胶浸泡预处理再生粗骨料增强其物理力学性能和将NS内掺入混凝土中改善其微观界面结构等方面开展了大量研究[9–12]。这些研究一致认为,NS的加入不仅能显著增大水泥浆体的黏度及增强骨料裹浆能力,还能参与二次水化反应,可有效改善混凝土中的界面过渡区和孔隙结构[13–16],有利于增强再生骨料混凝土力学性能和耐久性能[17–19]。在关于NS内掺入混凝土研究的基础上,高国华等[20]提出了纳米NS增强骨料裹浆技术,其研究表明骨料裹浆工艺可使NS的定向纳米增强和整体纳米改性作用协同互补,因此采用骨料裹浆工艺制备的混凝土性能更优。此外,有研究[21–24]同样表明,从改进搅拌工艺入手,通过给骨料“造壳”,可有效改善混凝土中的孔隙结构,并优化界面过渡区;多步搅拌可使得胶凝材料充分水化和均匀分散,有利于进一步改善混凝土的骨料包裹性和均质性,提升水泥基质和界面过渡区的密实度。目前,尽管NS和多步搅拌工艺在改善混凝土性能方面均已取得一定的成功,但有关水化活性材料和骨料裹浆技术结合使用对再生骨料混凝土性能影响研究仍鲜有报道。

基于上述问题,本文采用普通搅拌工艺和NS增

收稿日期:2024 – 07 – 19　　**修回日期:**2024 – 08 – 26　　**网络出版日期:**2024 – 09 – 25

基金项目:陕西省教育厅青年创新团队建设科研攻关项目(22JP098)

作者简介:张珅侨(1970—),男,高级工程师. 研究方向:高性能混凝土材料开发与应用. E-mail:18591762233@163.com

* **通信作者:**王文海,高级工程师, E-mail:18894577252@163.com

强骨料裹浆搅拌工艺制备了9组不同NS含量的再生混凝土，测试了其工作性能、抗压强度、电通量值和抗冻性能，并利用NMR和SEM试验分析了不同NS含量和搅拌工艺对再生骨料混凝土界面过渡区和孔结构的影响，旨在揭示NS含量和搅拌工艺对再生骨料混凝土性能的影响机理和规律，以期为再生粗骨料在混凝土工程中的安全和高效应用提供依据。

1　试　验

1.1　试验材料

水泥采用42.5级普通硅酸盐水泥（P·O 42.5），其主要性能指标见表1；二氧化硅采用气相亲水型NS，比表面积为375 m^2/g，二氧化硅含量大于99.8%；P·O 42.5与NS主要化学成分占比见表2。表2中，LOSS为烧失量，细骨料为普通河砂，细度模数为2.89，级配曲线符合二区中砂要求。粗骨料采用5～25 mm连续级配再生骨料，含水率为4.4%，24 h吸水率为6.6%。减水剂采用聚羧酸高性能减水剂，减水率为28%；水为普通自来水。

表1　水泥的物理力学性能指标

Tab. 1　Physical and mechanical properties of cement

比表面积/($m^2\cdot kg^{-1}$)	凝结时间/min		安定性	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
	初凝	终凝		3 d	28 d	3 d	28 d
352	260	330	合格	4.8	6.9	21.1	45.8

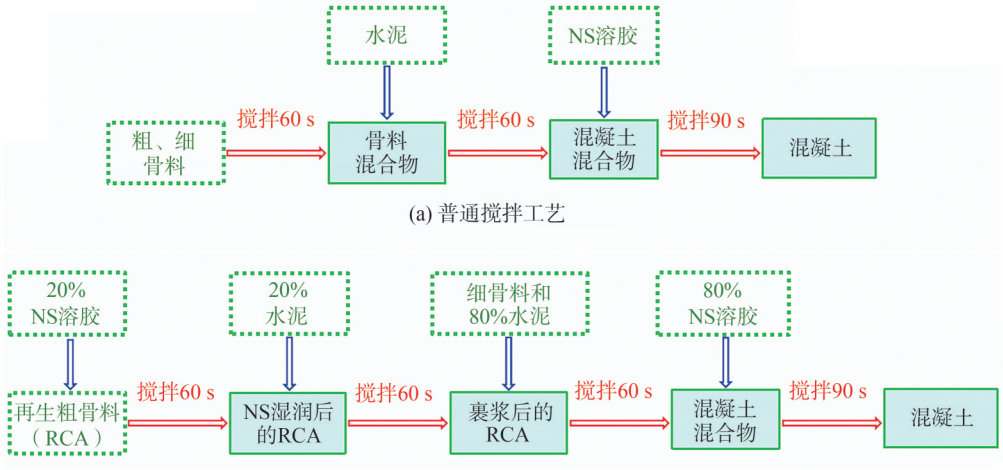
表2　水泥和NS的主要化学成分

Tab. 2　Chemical composition of cement and NS

化学组成	CaO/%	Fe_2O_3/%	SiO_2/%	SO_3/%	Al_2O_3/%	MgO/%	Na_2O/%	K_2O/%	LOSS/%
P·O 42.5	58.6	3.7	23.6	3.2	7.4	1.5	0.7	0.8	0.5
NS	0	0	>99.8	0	0	0	0	0	0.2

1.2　裹浆搅拌方法和配合比

再生骨料吸水率高且吸水较快，因此其拌合用水量除净用水量外还应考虑附加用水量，即再生骨料在混凝土拌合物中吸收的水量，按再生骨料吸水达到饱和面干状态时的90%取值[25]。由于本文不同配合比所采用的再生骨料类型和质量相同，净用水量与附加用水量在配合比中统一表示。在保持混凝土配合比不变的前提下，采用NS增强再生骨料裹浆搅拌工艺和普通搅拌工艺分别制备4种不同NS掺量（水泥质量的0.4%、0.8%、1.2%和1.6%）的再生骨料混凝土。两种搅拌工艺的操作流程对比如图1所示。



(a) 普通搅拌工艺

(b) NS增强再生骨料裹浆搅拌工艺

图1　两种混凝土搅拌工艺操作流程对比

Fig. 1　Cmparison of operational procedures of two concrete mixing techniques

混凝土配合比见表3。表3中，PC为普通搅拌配制的NS再生混凝土，GC为NS增强再生骨料裹浆搅拌配制的再生混凝土。

在搅拌之前须先将亲水型NS和减水剂倒入试验用水中配制成NS溶胶，普通搅拌工艺中NS溶胶一次性加入，NS增强再生骨料裹浆搅拌工艺中NS溶胶分批加入。NS增强再生骨料裹浆搅拌方法的操作流程如下：首先，将再生粗骨料倒入搅拌锅中，接着将20%的NS溶胶加入并搅拌1.0 min，使再生骨料润湿并充分吸附NS。然后，倒入20%的水泥并搅拌1.0 min，使再生骨料被水泥充分包裹。紧接着，将细骨料和剩余水泥倒入搅拌锅中并搅拌1.0 min。最后，将剩余的NS溶胶倒入搅拌锅中混合至均匀（约1.5 min），并进行试件成型、脱模和养护。可以看出，在上述两种搅拌工艺中，NS增强再生骨料裹浆搅拌方法比普通搅拌方法用时多出1.0 min，用于完成再生骨料的裹浆操作。该过程将NS溶胶的20%添加到了再生骨料中，可使得NS溶胶在再生骨料表面更为均匀地分散，有利于在后续搅拌过程中增加再生骨料表面裹浆层厚度和裹浆的黏度，改善混凝土的骨料包裹性和均质性。

表3 混凝土配合比

Tab. 3 Mixture proportions of MS concrete

kg/m^3

试样编号	水泥	NS	砂	RCA	水	减水剂
C0	380.00	0	781	1 079	176.6	3.04
PC1/GC1	378.48	1.52	781	1 079	176.6	3.80
PC2/GC2	376.96	3.04	781	1 079	176.6	4.56
PC3/GC3	375.44	4.56	781	1 079	176.6	4.94
PC4/GC4	373.92	6.08	781	1 079	176.6	5.70

注:用水量为净用水量(160.0 kg/m^3)和附加用水量(16.6 kg/m^3)之和。

1.3 试验方法

1.3.1 拌合物工作性测试

按照标准《普通混凝土拌合物性能试验方法》(GB/T 50080—2016)[26]规定,用坍落度和扩展度试验方法对拌合物和易性进行测量,坍落度、扩展度试验采用坍落度试验桶。在进行试验时,应同时对混凝土拌合物流动性、黏聚性和保水性进行观察。

1.3.2 力学性能测试

采用《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)[27]中规定的方法进行不同配合比混凝土的抗压强度测试,所用试件为 100 mm×100 mm×100 mm立方体试件。

1.3.3 抗渗性和抗冻性测试

待养护龄期达到28 d后,根据标准[27]中规定的快冻法和电通量法测试混凝土的抗冻性和抗氯离子渗透性能。抗冻试件为100 mm×100 mm×400 mm的棱柱体试件,所用设备为SF–300型混凝土快速冻融试验机。电通量试件为高50 mm、直径100 mm的圆柱体试件,测试主要仪器为CABR–BSY型混凝土真空饱水仪和CABR–RCMP6型混凝土电通量测定仪。

1.3.4 NMR试验

核磁共振(NMR)测试采用核磁共振微观结构分析系统(型号:MacroMR12-150H-I),试件为100 mm×100 mm×100 mm立方体试件。在达到养护龄期后,采用CABR–BSY型混凝土真空饱水仪对样品进行真空负压保水处理,然后将样品包裹在塑料薄膜中进行NMR测试。

1.3.5 SEM试验

在抗压强度测试完成后的试件上截取0.5 cm×0.5 cm左右的试样,立即放入无水乙醇中终止水化7 d,然后放入(60±5) ℃的真空干燥箱中烘干至恒重,将真空干燥的样品表面喷金后进行测试。采用TESCAN CLARA超高分辨率场发射扫描电子显微镜(SEM)对混凝土试样的微观形貌进行分析,电子图像分辨率为0.9 nm,加速电压为30～200 kV。

2 结果与讨论

2.1 工作性能分析

表4为不同NS掺量及搅拌工艺配制的混凝土工作性能记录。由表4可以看出,当控制减水剂用量调节混凝土坍落度值较为相近时,随着NS掺量的增加,再生混凝土的减水剂用量明显增加。其原因为,NS的表面能作用和高比表面积增加了混凝土体系的需水量[13],导致水泥浆体中的自由水减少,混凝土体系的用水量增大。此外,从表4还可以看出,适量NS的加入对再生骨料裹浆能力的提升有积极作用,可有效改善混凝土的保水性和流动性;但过量NS会导致其黏聚性变差。这是因为NS的表面能效应和高比表面积作用使其易于吸附在水泥或骨料颗粒表面,可有效促进骨料和水泥颗粒的结合。但同时NS的增黏作用和较大的比表面积会导致混凝土的拌和用水量增大,对混凝土工作性能产生不利影响,这也是再生混凝土扩展度随NS掺量的增加先增大后降低的原因。总体来看,适量的NS加入可以提升再生骨料裹浆层的质量,使得再生骨料之间的相对滑动能力增强,再生混凝土工作性能改善[28]。但是,过多的NS加入会导致混凝土体系的蓄水量增加和浆体的流动性变差,进一步导致再生骨料填充层与裹浆层的水泥浆体分布不均匀,再生混凝土工作性能变差。

表4 混凝土工作性能

Tab. 4 Fresh concrete workability

试样编号	NS掺量/%	坍落度/mm	扩展度/mm	保水性	流动性	黏聚性
C0	0	220	430	大量泌水	差	差
PC1	0.4	210	460	少量泌水	较差	较差
PC2	0.8	220	480	良好	良好	良好
PC3	1.2	200	500	良好	良好	良好
PC4	1.6	200	470	良好	良好	较黏
GC1	0.4	200	450	少量泌水	较差	较差
GC2	0.8	210	570	良好	良好	良好
GC3	1.2	200	550	良好	良好	良好
GC4	1.6	210	490	良好	较差	较黏

GC组试样与PC组试样表现出相同的变化规律,其需水量均随着NS掺量的增加而提高,拌和物的扩展度随NS掺量的增加先增大后降低。区别在于,相同减水剂用量情况下,GC组混凝土试样的坍落度和扩展度略高于PC组试样。分析其原因为,裹浆搅拌工艺使得NS可以在再生骨料表面吸附得更多且更为均匀,可以更有效地降低骨料之间的咬合效应,增强骨料间的相对滑动能力,提高混凝土体系的流动性。

2.2　抗压强度分析

图 2 为不同 NS 掺量及搅拌工艺配制的混凝土抗压强度对比。从图 2 可以看出，尽管 NS 的加入使不同龄期 PC 和 GC 试样的抗压强度均有明显增加，但早期强度比后期强度的增加更为明显。这是因为 NS 较高的火山灰活性能促进水泥水化反应的进行，NS 在早期可以充分发挥填充效应、化学作用和填充作用。尽管水化后期 NS 的填充效应同样可以使水泥石基体更加致密，但水化反应已基本完成，NS 的填充效应和化学作用使混凝土强度的提升受到限制。此外，当 NS 掺量不超过 0.8% 时，再生混凝土强度随着 NS 掺量的增加明显增加；但当 NS 掺量超过 0.8% 后，再生混凝土强度变化趋于稳定。这是因为 NS 到达一定掺量后其填充效应和填充作用同样会趋于饱和，对再生混凝土抗压强度的增强效果趋于稳定。另外，NS 掺量过多极易引发团聚，容易在混凝土中形成孔洞等缺陷，不利于混凝土强度的发展[1,6,20]，这可能是 NS 掺量超过 0.8% 后再生混凝土试样抗压强度降低的主要原因。

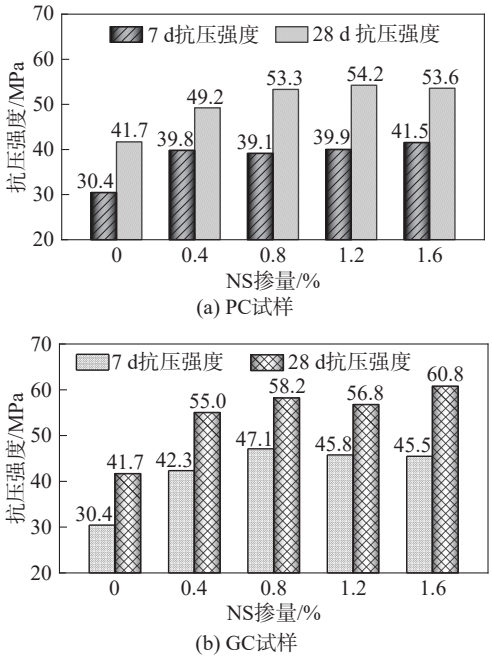


图 2　不同 NS 掺量及搅拌工艺配制的混凝土抗压强度对比

Fig. 2　Comparison of compressive strength of concrete prepared with different NS and mixing processes

对比图 2(a)和(b)可以看出，当 NS 掺量相同时，GC 试样的强度要明显高于 PC 试样，这说明 NS 增强骨料裹浆搅拌工艺可使得再生骨料混凝土抗压强度提升更多。这归因于裹浆搅拌工艺可使 NS 预先充分吸附在再生骨料表面，使得再生骨料表面和新界面过渡区内的 NS 含量远高于水泥浆体中的 NS 含量，NS 的火山灰反应消耗了新老界面过渡区中的氢氧化钙并填充其孔隙，进一步增加了界面区域的致密度。致使 NS 对混凝土体系新界面过渡区及再生骨料中的旧界面过渡区的改善效果更为明显，使得 GC 混凝土试样强度提高更为明显。

2.3　抗渗性分析

图 3 为不同混凝土试样的 28 d 电通量值测试结果。当 NS 掺量分别为 0.4%、0.8%、1.2% 和 1.6% 时，PC 试样电通量值分别比 C0 低 10.0%、37.0%、41.6% 和 40.6%；GC 试样电通量值分别比 C0 低 25.6%、47.5%、48.4% 和 45.2%。从图 3 可以看出，随着 NS 掺量的增加，PC 试样和 GC 试样的抗氯离子渗透性能均表现为先提高后趋于平稳（GC 试样甚至出现略微降低），且 PC 试样电通量值均大于 GC 试样。数据表明，当 NS 掺量不超过 0.8% 时，NS 的加入有利于改善混凝土的抗氯离子渗透性能。其原因主要有以下两个：第一，NS 与砂浆（包括再生骨料表面老砂浆和新砂浆）中的 $Ca(OH)_2$ 反应生成 C–S–H 凝胶，对氯离子起吸附作用，可以在很大程度上降低氯离子通过率；第二，NS 的成核效应和填充效应细化了新砂浆孔隙、老砂浆孔隙和微裂缝，提高了混凝土的密实度，降低了混凝土体系中微小孔的联通概率，对氯离子的迁移起到一定阻滞效果。当 NS 掺量超过 0.8% 后，一方面，其化学效应、成核效应和填充效应趋近于饱和；另一方面，过多掺量的 NS 极易引发团聚，容易在混凝土中形成孔洞，这就导致其对混凝土抗渗性能的提升效果不再显著甚至有所降低。

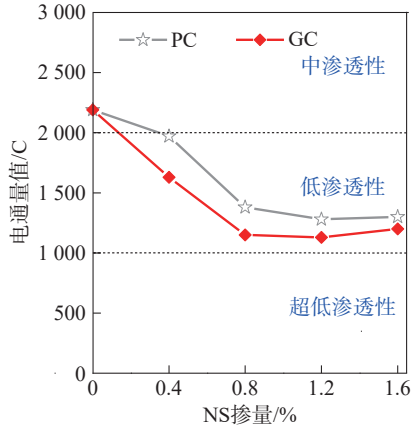


图 3　不同混凝土试样的 28 d 电通量值测试结果

Fig. 3　Test results of 28 d electric flux for various concrete samples

2.4　抗冻性能分析

一般情况下，可通过冻融循环前后的质量变化和相对动弹性模量衡量各混凝土试样的抗冻性能。质量损失越大表明混凝土的抗冻性能越差；相对动弹性模量越小则混凝土的损伤越严重。图 4 为不同混凝土试样质量损失率随冻融循环次数的变化情况。从图 4 可以看出，冻融后再生混凝土的质量损失率随着 NS 掺量的增加逐渐减小。当 NS 掺量超过 0.8% 后，尽管可以

看到GC试样的质量损失率略低于PC试样，但相同搅拌方式配制的混凝土试样的质量损失随NS掺量的变化几乎不太明显。这说明适量的NS能提高混凝土的抗冻性能，降低混凝土冻融循环后的质量损失率；但过量NS的加入不会再继续提高混凝土抗冻性能。此外，NS含量相同时，GC试样的质量损失率明显低于PC试样，说明采用裹浆搅拌工艺配制的混凝土质量损失更小，抗冻性能更优，这与上述力学性能与抗渗性能的变化规律一致。

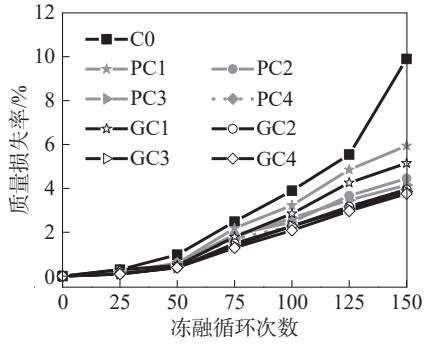


图4 混凝土试样质量损失率随冻融循环次数的变化

Fig. 4 Variations in mass loss rate of concrete specimens versus freeze-thaw cycles

各混凝土试样相对动弹性模量随冻融循环次数的变化如图5所示。从图5可以看出，NS的加入可有效降低再生混凝土的动弹性模量损失。当NS掺量不超过0.8%时，PC试样与GC试样的动弹性模量损失均随其掺量的增加明显减小。当NS掺量超过0.8%后，尽管PC试样动弹性模量损失随着NS掺量的增加仍略有减小，但降低幅度并不明显。与此同时，GC试样动弹性模量损失随NS掺量变化不明显。总体来看，混凝土冻融后的相对动弹性模量随纳米NS掺量的增加而增加；但当NS掺量超过0.8%后，其相对动弹性模量的变化规律不明显。这一现象与质量损失和强度的变化规律一致，其原因为适量NS加入可以充分发挥其高活性、火山灰效应和填充效应，可以有效改善混凝土体系的孔隙结构和界面过渡区，提高其抗冻性能。然而，当NS达到某一含量后，其火山灰反应和填充效应已趋向于饱和，其掺量对混凝土孔隙结构的影响趋于稳定，甚至NS的团聚现象会不利于其力学性能与耐久性能的发展。

值得注意的是，与质量损失规律相似，NS增强骨料裹浆搅拌方法配制的混凝土比普通搅拌方法配制的混凝土表现出更低的动弹性模量损失。数据表明前者的抗冻性能更好，其冻融后的动弹性模量损失更小。这是因为NS增强骨料裹浆搅拌方法不仅能有效改善再生混凝土的新界面过渡区和孔隙结构，而且NS增强骨料裹浆搅拌方法还可以使得混凝土体系的结构分布更加均匀和致密，有利于再生混凝土抗冻性能的进一步增强。

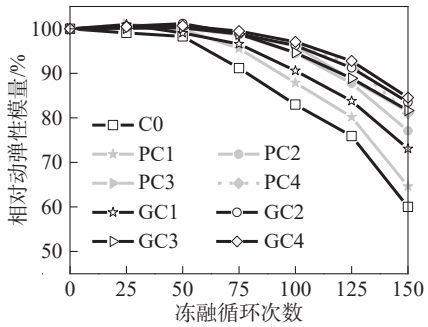


图5 混凝土试样相对动弹性模量随冻融循环次数的变化

Fig. 5 Variations in relative dynamic elastic modulus of concrete specimens versus freeze-thaw cycles

2.5 NMR分析

NMR试验结果以T_2谱曲线表示，T_2谱面积与孔隙水含量呈线性相关[29–31]。横向弛豫时间越长，孔隙半径越大；纵向信号强度越高，孔隙数量越多。图6为不同混凝土试样的T_2谱曲线。

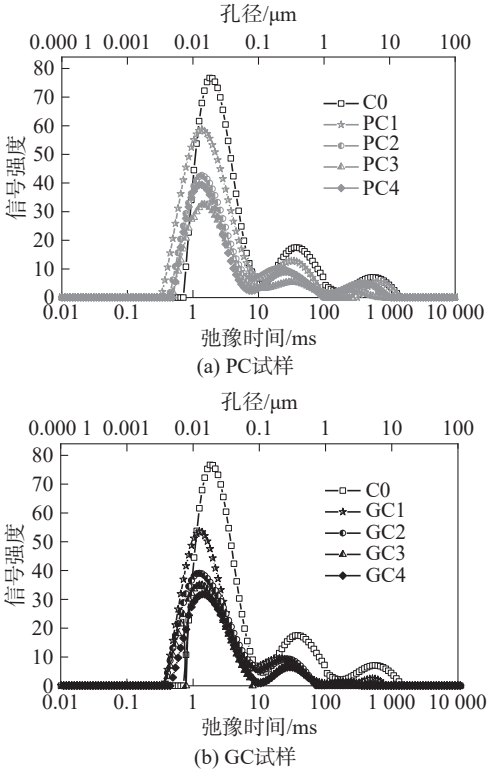


图6 不同混凝土试样的T_2谱曲线

Fig. 6 T_2 curves of different concrete samples

随着纳米NS掺量的增加，PC试样与GC试样的T_2谱面积均出现了明显减小，且峰值有所左移。这说明NS的加入可以有效优化混凝土体系的孔隙结构，因为在部分NS增强再生混凝土界面过渡区的同时，剩余NS还可以有效改善水泥基体的孔隙结构，降低混凝土体系的孔隙率。此外，当NS含量超过0.8%后，T_2谱曲线的变化并不明显，这一现象与上述力学性能

和耐久性能的测试结果相吻合（NS 含量超过 0.8% 后强度、电通量和抗冻性的差异并不显著）。其主要原因为 NS 达到某一含量后其火山灰反应和填充效应已趋向于饱和，其掺量对混凝土孔隙结构的影响趋于稳定。对比图 6（a）和（b）可以看出，NS 含量小于 0.8% 时 GC 试样的 T_2 谱面积均小于 PC 试样。数据表明，NS 含量相同时，GC 试样孔隙率更小。因为裹浆搅拌工艺不仅可以更好地改善再生混凝土中（新和老）界面过渡区和孔隙结构，还能使得再生骨料表面的裹浆层更为密实和均匀，从而使得混凝土体系的分布更加均匀和致密；这也是 GC 混凝土试样力学性能和耐久性能优于 PC 试样的原因。

2.6　SEM 分析

图 7 为 C0、PC3 和 GC3 试样的新界面过渡区和孔结构 SEM 图像。

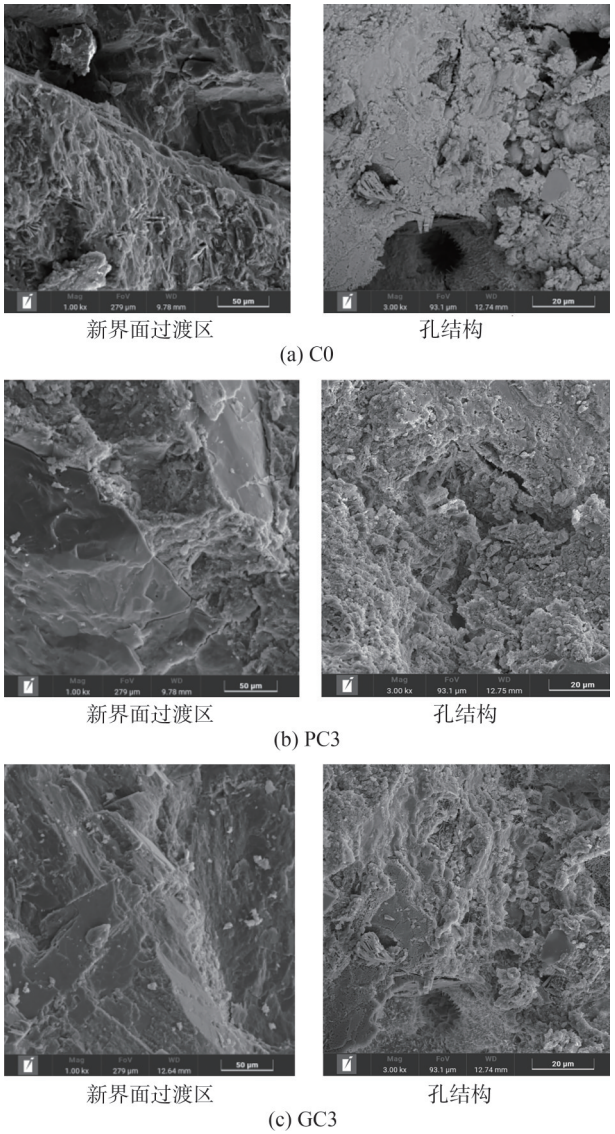


图 7　C0、PC3、GC3 试样 SEM 图

Fig. 7　SEM images of C0, PC3, GC3 samples

由图 7 可以看出，C0 混凝土的界面过渡区较为松散，界面过渡区和硬化水泥浆中存在较多和较大的孔洞，混凝土体系的孔隙结构较差。与普通再生混凝土 C0 相比，加入 NS 的再生料混凝土 PC3 中界面过渡区得到了明显的改善，界面区域内 C–S–H 的生成更为密集，界面过渡区和硬化水泥浆中孔洞数量和尺寸有明显减小。其原因为，NS 的填充作用和填充效应有利于优化混凝土的孔隙结构，降低混凝土体系的孔隙率；另一方面，NS 的火山灰反应可以消耗 $Ca(OH)_2$ 并生成 C–S–H 凝胶，同样有利于降低混凝土体系的孔隙率。

此外，对比 PC3 和 GC3 试样可以发现，尽管两组试样的孔隙结构和界面过渡区结构均优于 C0 试样，但 GC3 试样中再生骨料与基质的结合则更为紧密。其原因为，NS 裹浆搅拌工艺不仅可使得再生骨料的裹浆层厚度进一步增加，还能使裹浆层更为均匀和致密，有助于更好地改进再生混凝土体系的界面过渡区和孔隙结构。可以确定，与普通搅拌工艺相比，对界面过渡区的改善是 NS 裹浆搅拌工艺能够有效提高再生混凝土抗压强度、抗氯离子渗透性能和抗冻性的主要原因。

3　结　论

本文结合新型纳米材料和骨料裹浆技术，分别采用普通搅拌工艺和 NS 增强骨料裹浆搅拌工艺制备了不同 NS 含量的再生混凝土；系统开展了搅拌工艺及其在不同 NS 含量条件下的室内混凝土宏观力学性能试验，并结合扫描电镜和核磁共振等测试手段分析了 NS 含量和搅拌工艺对再生骨料混凝土的微观作用机理，得出以下主要结论：

1）在 NS 于拌和水中可以良好分散的前提下，NS 可显著增加浆体黏度。NS 的加入可以增强再生粗骨料的裹浆能力，改善混凝土的黏聚性和保水性，但同时会增加混凝土的用水量。

2）无论是裹浆工艺还是普通搅拌工艺，NS 的掺量为 0.8% 时，再生混凝土的工作性能、强度、抗渗性和抗冻性能可同时达到最优；但更高的 NS 掺量可能会导致其部分性能降低。

3）微观分析表明，适量 NS 的加入不仅能有效改善混凝土界面过渡区的微观结构，还有利于基体的致密化和孔隙率的下降。但 NS 掺量超过 0.8% 后，其对再生混凝土界面和孔隙结构的影响趋于稳定，且会导致部分孔隙结构的劣化。

4）裹浆搅拌工艺可使 NS 的定向纳米增强作用和整体纳米改性作用协同互补。当 NS 掺量相同时，NS 裹浆再生骨料搅拌工艺制备的再生混凝土力学性能和耐久性能均优于普通搅拌工艺制备的再生混凝土。

参考文献：

[1] Bao Jiuwen, Zhang Hongrui, Fang Xiaolong, et al. Properties of recycled coarse aggregate concrete modified by silica nanoparticles: A short review[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(8): 2045–2053. [鲍玖文, 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(8): 2045–2053.]

[2] Zhao Zengfeng, Yao Lei, Xiao Jianzhuang, et al. Development on accelerated carbonation technology to enhance recycled aggregates[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2022, 50(8): 2296–2304. [赵增丰, 姚磊, 肖建庄, 等. 再生骨料 CO_2 碳化强化技术研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(8): 2296–2304.]

[3] Li Wengui, Xiao Jianzhuang, Sun Zhihui, et al. Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches[J]. Construction and Building Materials, 2012, 35: 1045–1055.

[4] Zhu Lihua, Ning Qiujun, Han Wei, et al. Compressive strength and microstructural analysis of recycled coarse aggregate concrete treated with silica fume[J]. Construction and Building Materials, 2022, 334: 127453.

[5] Shi Caijun, Li Yake, Zhang Jiake, et al. Performance enhancement of recycled concrete aggregate-A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 466–472.

[6] Liang Sheng, Cui Hongzhi, Xu Danyue. Properties of nano-SiO_2 modified lightweight aggregate concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(2): 498–505. [梁圣, 崔宏志, 徐丹玥. 纳米 SiO_2 改性轻骨料混凝土性能[J]. 复合材料学报, 2019, 36(2): 498–505.]

[7] Chatterjee K A. Nanotechnology and sus-tainable concrete: A uniquely emerging synergy[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, 43(10): 1385–1395. [Chatterjee K A. 纳米技术和可持续发展混凝土: 独特的新兴组合(英文). 硅酸盐学报, 2015, 43(10): 1385–1395.]

[8] Shaikh F, Chavda V, Minhaj N, et al. Effect of mixing methods of nano silica on properties of recycled aggregate concrete[J]. Structural Concrete, 2018, 19(2): 387–399.

[9] Ling Yifeng, Zhang Peng, Wang Juan, et al. Effect of PVA fiber on mechanical properties of cementitious composite with and without nano-SiO_2[J]. Construction and Building Materials, 2019, 229: 117068.

[10] Singh L P, Zhu W, Howind T, et al. Quantification and characterization of C–S–H in silica nanoparticles incorporated cementitious system[J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 79: 106–116.

[11] Xiao Jianzhuang, Li Biao, Zhang Kaijian, et al. Dynamic mechanical properties of nano-silica aggregate concrete under uniaxial compression[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2021, 49(1): 30–39. [肖建庄, 李标, 张凯建, 等. 纳米二氧化硅改性再生混凝土的单轴受压动态力学性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 30–39.]

[12] Yang Haibin, Monasterio M, Zheng Dapeng, et al. Effects of nano silica on the properties of cement-based materials: A comprehensive review[J]. Construction and Building Materials, 2021, 282: 122715.

[13] Chithra S, Senthil Kumar S R R, Chinnaraju K. The effect of colloidal nano-silica on workability, mechanical and durability properties of high performance concrete with copper slag as partial fine aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2016, 113: 794–804.

[14] Li Wengui, Huang Zhengyu, Cao Fangliang, et al. Effects of nano-silica and nano-limestone on flowability and mechanical properties of ultra-high-performance concrete matrix[J]. Construction and Building Materials, 2015, 95: 366–374.

[15] Erdem S, Hanbay S, Güler Z. Micromechanical damage analysis and engineering performance of concrete with colloidal nano-silica and demolished concrete aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2018, 171: 634–642.

[16] Gao Chang, Huang Liang, Yan Libo, et al. Mechanical properties of recycled aggregate concrete modified by nano-particles [J]. Construction and Building Materials, 2020, 241: 118030.

[17] Wang Yonggui, Hughes P, Niu Haicheng, et al. A new method to improve the properties of recycled aggregate concrete: Composite addition of basalt fiber and nano-silica[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 236: 117602.

[18] Chen Xuefei, Jiao Chujie. Microstructure and physical properties of concrete containing recycled aggregates pre-treated by a nano-silica soaking method[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 51: 104363.

[19] Li Long, Xuan Dongxing, Sojobi A O, et al. Development of nano-silica treatment methods to enhance recycled aggregate concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 118: 103963.

[20] Gao Guohua, Huang Weidong, Li Chuanhai. Improvement of frost resistance for concrete by coating aggregate with nano-SiO_2[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(1): 45–53. [高国华, 黄卫东, 李传海. 纳米 SiO_2 增强骨料裹浆对混凝土抗冻性能的改善[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(1): 45–53.]

[21] Li Z, Ding S, Yu X, et al. Multifunctional cementitious composites modified with nano titanium dioxide: A review[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 111: 115–137.

[22] Zhu Yaguang, Kou Shicong, Poon C S, et al. Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 35(1): 32–38.

[23] Zhang Peng, Wan Jinyi, Wang Kejin, et al. Influence of nano-SiO_2 on properties of fresh and hardened high performance concrete: A state-of-the-art review[J]. Construction and Build-

ing Materials,2017,148:648–658.

[24] Wang Xinyue,Dong Sufen,Ashour A,et al.Effect and mechanisms of nanomaterials on interface between aggregates and cement mortars[J].Construction and Building Materials,2020,240:117942.

[25] Ferreira L,de Brito J,Barra M.Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties [J].Magazine of Concrete Research,2011,63(8):617–627.

[26] 中华人民共和国住房和城乡建设部.普通混凝土拌合物性能试验方法:GB/T 50080—2016[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.

[27] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.

[28] Jiao Dengwu,An Xiaopeng,Shi Caijun,et al.Effects of paste thickness on coated aggregates on rheological properties of concrete[J].Journal of the Chinese Ceramic Society,2017,45(9):1360–1366.[焦登武,安晓鹏,史才军,等.骨料裹浆厚度对混凝土流变性能的影响[J].硅酸盐学报,2017,45(9):1360–1366.]

[29] Adesanya E,Ohenoja K,Kinnunen P,et al.Properties and durability of alkali-activated ladle slag[J].Materials and Structures,2017,50(6):255.

[30] Zhang Mingming,Liu Tong,Yang Haipeng,et al.Crack resistance,permeability,and microstructural analysis of recycled aggregate concrete with SAP[J].Construction and Building Materials,2024,430:136479.

[31] Li Jielin,Kaunda R B,Zhou Keping.Experimental investigations on the effects of ambient freeze-thaw cycling on dynamic properties and rock pore structure deterioration of sandstone[J].Cold Regions Science and Technology,2018,154:133–141.

Effect of Nano-SiO_2 on Performances and Microstructure of Recycled Aggregate Concrete

ZHANG Shenqiao[1], *YU Jiajun*[1], *LI Haoxiong*[1], *ZHANG Zheng*[1], *ZHANG Mingming*[2], *WANG Wenhai*[1*]

(1.China Construction Eighth Engineering Bureau Co., Ltd., Shanghai 200112, China;
2.School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an 710123, China)

Abstract:

Objective This study combines new nanomaterials with aggregate wrapping technology. Nine groups of recycled concrete with different Nano-SiO_2 (NS) contents were prepared using both the ordinary mixing process and the NS-reinforced aggregate mixing process. Concrete performance tests under different mixing processes and NS content conditions were systematically carried out to reveal the influence and mechanism of NS content and mixing process on recycled aggregate concrete performance, providing a basis for the safe and efficient application of recycled coarse aggregate in concrete engineering.

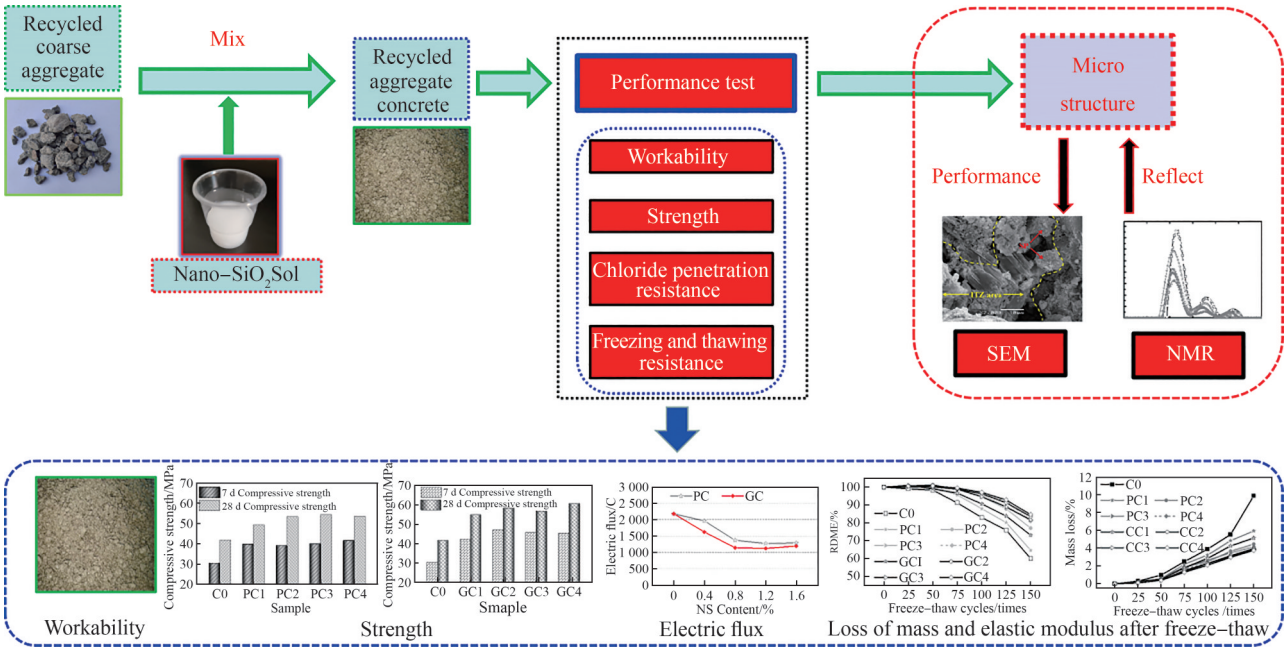
Methods First, the slump and slump flow of each group of fresh concrete samples were tested during mixing, and their fluidity, cohesion, and water retention were recorded and compared. Second, the compressive strength, electric flux value, and frost resistance of each group were tested and evaluated. Finally, the microscopic mechanisms of NS content and mixing process effects on recycled aggregate concrete were analyzed using scanning electron microscopy (SEM) and nuclear magnetic resonance (NMR).

Results and Discussions The performance tests of fresh concrete show that, provided NS is well dispersed in mixing water, it significantly increases slurry viscosity and enhances the ability of recycled coarse aggregate to be coated by slurry. The 28 d compressive strength of PC samples increased by 18.1%, 27.8%, 30.1%, and 28.5% at NS contents of 0.4%, 0.8%, 1.2%, and 1.6%, respectively. The corresponding increases for GC samples were 32.0%, 39.7%, 36.1%, and 45.7%, respectively. At NS contents of 0.4%, 0.8%, 1.2%, and 1.6%, the electric flux value of recycled concrete prepared by ordinary mixing decreased by 10.0%, 37.0%, 41.6%, and 40.6%, respectively. For the aggregate-wrapping mixing process, the reductions were 25.6%, 47.5%, 48.4%, and 45.2%, respectively. After 150 freeze-thaw cycles, the relative dynamic elastic modulus and mass loss of the C0 sample were 60% and 9.9%, respectively. For PC1–PC4, the relative dynamic elastic modulus values were 64.6%, 77.1%, 81.4%, and 81.1%, and the mass losses were 5.9%, 4.5%, 4.2%, and 4.0%, respectively. For GC1–GC4, the relative dynamic elastic modulus values were 73.6%, 83.5%, 81.6%, and 84.6%, and the mass losses were 5.2%, 4.0%, 3.9%, and 3.8%, respectively. Overall, compressive strength, impermeability, and frost resistance show similar trends. These properties increase significantly with NS content when it is below 0.8%. However, for both mixing processes, the influence of NS content on the interface and pore structure becomes stable when the NS content exceeds 0.8%, and agglomeration of NS may negatively affect some mechanical or durability properties. Additionally, at the same NS content, recycled concrete prepared by the NS-reinforced aggregate mixing process shows better mechanical properties and durability than that prepared by the ordinary mixing process. Microstructural tests show that the T_2 spectral area of recycled concrete decreases significantly, and the peak shifts to the left with increasing NS content. Meanwhile, the formation of C–S–H in the interfacial transition zone becomes denser, and the number and size of pores are significantly reduced. This is because NS enhances the interfacial transition zone while also improving the pore structure of the cement matrix and reducing overall porosity. Notably, this optimization effect is more pronounced in concrete prepared by the NS-reinforced aggregate mixing process.

Conclusions The addition of NS effectively improves the microstructure of the interfacial transition zone and promotes matrix densification and reduced porosity. The wrapped slurry mixing process enables the directional nano-reinforcement effect and overall nano-modification effect of NS to act synergistically, further enhancing mechanical properties and durability. When the NS content is 0.8%, the workability, strength, impermeability, and frost resistance of recycled concrete are optimized simultaneously. However, higher NS content may reduce some properties.

Key words: nano enhancement; recycled aggregate wrapped slurry; recycled concrete; mechanical properties; freezing resistance; interface transition zone

Graphical abstract:



（编辑　陈　雪）

引用格式: Zhang Shenqiao,Yu Jiajun,Li Haoxiong,et al.Effect of nano-SiO_2 on performances and microstructure of recycled aggregate concrete[J].Advanced Engineering Sciences,2026,58(3):356–364.[张珅侨,俞家珺,李浩雄,等.纳米 SiO_2 对再生骨料混凝土性能及微观结构的影响[J].工程科学与技术,2026,58(3):356–364.]