引文格式：张少军，张家广，马奥炜，等. 混菌矿化对不同粒径再生骨料物理力学性能影响研究[J]. 太原理工大学学报，2026，57(5)：956-963.

ZHANG Shaojun, ZHANG Jiaguang, MA Aowei, et al. Effect of mineralization of non-axenic bacteria on the physical and mechanical properties of recycled aggregates with different particle sizes [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(5): 956-963.

混菌矿化对不同粒径再生骨料物理力学性能影响研究

张少军[1]，张家广[1]，马奥炜[1]，陈景琦[1]，刘元珍[1]，周爱娟[2]

（1. 太原理工大学 土木工程学院，山西 太原；2. 太原理工大学 环境科学与工程学院，山西 太原）

摘 要：【目的】微生物矿化能显著提升再生骨料物理力学性能。提出一种基于好氧混菌矿化增强再生骨料性能的方法，并对基于混菌矿化的不同粒径再生骨料性能增强效率进行优化。**【方法】**首先与纯菌矿化增强方法进行比较，验证好氧混菌矿化增强再生骨料性能有效性，接着探究在不同粒径再生骨料中增强时间对其性能增强效果的影响，最后测试基于混菌矿化增强骨料的再生混凝土抗压强度和塌落度。**【结果】**试验结果表明：好氧混菌比代谢纯菌对增强骨料物理力学性能呈现出更显著效果；再生骨料粒径越小，其增强效果越显著，粒径较大的再生骨料存在明显的最佳增强时间，吸水率和压碎指标比未增强骨料降幅分别达21.4%和27.8%；再生混凝土经混菌矿化增强骨料后的抗压强度和塌落度增幅最大分别可达15.3%和16.8%。

关键词：混菌矿化；再生骨料；骨料粒径；物理力学性能；再生混凝土

中图分类号：TU528 **文献标识码：**A

DOI：10.16355/j.tyut.1007-9432.20240222 **文章编号：**1007-9432(2026)05-0956-08

Effect of Mineralization of Non-axenic Bacteria on the Physical and Mechanical Properties of Recycled Aggregates with Different Particle Sizes

ZHANG Shaojun[1], ZHANG Jiaguang[1], MA Aowei[1], CHEN Jingqi[1], LIU Yuanzhen[1], ZHOU Aijuan[2]

(1. *College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China*; 2. *College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China*)

Abstract: 【Purposes】 Microbial mineralization can significantly improve the physical and mechanical properties of recycled aggregates. A method of enhancing the properties of recycled aggregates with the mineralization of aerobic non-axenic bacteria is proposed. The enhancement efficiency of recycled aggregates with different particle sizes based on the mineralization of non-axenic bacteria is optimized. **【Methods】** Compared with the method of axenic bacteria mineralization, the enhancement effectiveness of the mineralization of aerobic non-axenic bacteria on the properties of recycled aggregates was verified. Then, the effect of enhancement time on the properties of recycled aggregates with

收稿日期：2024-04-01；**修回日期：**2024-05-21

基金项目：中央引导地方科技发展资金项目(YDZJSX20231B005)；山西省基础研究计划自然科学研究面上项目(202203001221065)

第一作者：张少军，硕士研究生，(E-mail)zhangshaojun580@163.com

通信作者：张家广，博士，副教授，主要建筑垃圾资源化利用与自修复混凝土研究，(E-mail)zhangjiaguang@tyut.edu.cn

different particle sizes was investigated. Finally, the compressive strength and slump of recycled concrete prepared with enhanced aggregates by the mineralization of non-axenic bacteria were tested. **【Results】** The results show that aerobic non-axenic bacteria , compared with axenic bacteria, exhibit more marked efficiency in physical and mechanical properties enhancement of recycled aggregates. The enhancement of recycled aggregates exhibits higher efficiency if smaller particle sizes of aggregates are used. The recycled aggregates with larger particle sizes exhibit an obvious optimal enhancement time. The water absorption and crushing index could decrease by 21.4% and 27.8%, respectively, compared with the non-enhanced aggregates. The maximum increasing extents of compressive strength and slump of recycled concrete with enhanced recycled aggregates by mineralization of non-axenic bacteria reach 15.3% and 16.8%, respectively.

Keywords: mineralization of non-axenic bacteria; recycled aggregate; particle size of aggregate; physical and mechanical property; recycled concrete

再生混凝土骨料表面包裹旧水泥砂浆，且在破碎处理时产生孔隙和微裂纹等缺陷，致使其孔隙率和吸水率高于天然骨料，同时表现出较低的表观密度，且与水泥基材料的界面黏结性能较差，进而使再生混凝土的力学性能与耐久性能显著降低[1-3]。因此，有必要针对再生骨料性能不足提出合理的增强方法，以提高其物理力学性能。再生骨料现有增强方法大致可分为三类：物理法[4,5]、化学法[6,7]和微生物矿化[8]。物理法采用颗粒整形或微波加热等技术去除再生骨料表面的旧水泥砂浆，该方法处理时间短、效率较高，但能耗大且容易对骨料造成二次损伤。化学法采用硅酸钠溶液、硅烷聚合物乳液或者水泥-硅灰浆液等化学溶液对再生骨料进行浸泡和干燥处理，将再生骨料表面旧砂浆进行包裹，并修复其表面微裂纹，以改善再生骨料表面孔隙结构，该方法可以显著提高再生骨料物理力学性能，但成本较高、处理工序复杂、容易造成二次污染。

微生物矿化增强再生骨料方法能使骨料性能显著提升，此方法在骨料表面利用微生物矿化能力形成碳酸钙沉淀，进而使再生骨料表面的缺陷得以修复。微生物矿化沉淀物与再生骨料及混凝土基体兼容性较好，且具有成本低、节能环保、无二次污染等优点[9,10]，近年来得到学者的广泛关注。通过微生物矿化增强再生骨料的方式目前主要采用的微生物类型有：科氏芽孢杆菌和巴氏芽孢杆菌，且骨料处理方法主要采用浸泡方式[11-13]。Feng 等[11]对再生骨料采用巴氏芽孢杆菌进行矿化增强处理，同时再生骨料通过浸泡法养护增强。实验结果表明，微生物经过矿化增强处理 14 d 后，再生骨料吸水率下降了 31.4%。Liu 等[12]选择巴氏芽孢杆菌作为矿化微生物，考察了微生物矿化增强法对再生细骨料的影响，研究结果表明，相较于再生混凝土骨料，再生混凝土骨料含碎砖的增强效果更好，经过 7 d 浸泡法增强处理后，其吸水率与压缩指标分别降低了 12.6% 与 26.3%。然而，纯菌需适宜环境条件才能更好发生矿化反应，对环境变化的适应能力较弱，且培养成本较高。相较于纯菌而言，不同群落组成的混菌表现出更强的抗环境冲击能力，其矿化鲁棒性更强，矿化沉积能力表现出更高的效率和更强的稳定性，且培养费用显著降低[14]。

为了提高再生骨料性能增强效率并显著降低其处理费用，课题组基于好氧混菌矿化提出一种提升再生骨料性能的方法，并在前期研究中初步验证了该骨料增强方法的有效性[15]。然而，前期工作中并未开展不同粒径再生骨料增强效率优化的研究[16-18]。本文开展基于好氧混菌矿化的不同粒径物理力学性能增强效率优化研究，明确不同粒径再生骨料最优增强时间。首先考察混菌矿化增强处理时间对不同粒径再生骨料物理性能增强效果的影响，然后分析骨料表面矿化沉淀物微观形貌，最后研究骨料增强对再生混凝土坍落度和抗压强度的提升效果。

1　试验

1.1　混菌筛选与培养

为了对比好氧代谢纯菌和好氧混菌的骨料矿化增强效率，混菌采用课题组自行筛选的好氧混菌，好氧代谢纯菌采用购自北京百欧博伟生物技术有限公司的科式芽孢杆菌。对科式芽孢杆菌菌种冻干粉采用液体培养液进行活化培养，培养液配比为：胰蛋白胨 10 g、超纯水 1 L、酵母提取物 5 g、氯化钠 10 g。倒置涂有菌液的固体培养基板，将细菌置于恒温 30 ℃的培养箱中进行 48 h 的培养，获得目标

菌液,并稀释菌液使其OD_{600}值达到1.2。

课题组的好氧混菌主要来源于太原理工大学园林土壤和山西晋中污水处理厂的活性污泥。实验以乳酸为碳源,在好氧环境中进行,旨在选出矿化沉积能力优异的菌群。混菌培养液成分为:矿物质10 mL、碳源乳酸1 670 uL、氯化铵0.007 g和微量元素10 mL。混菌筛选富集过程为:首先将100 mL培养基与10 mL污泥混合物加入到150 mL锥形瓶中,用Na_3PO_4将pH值调至11,在培养箱中进行振荡培养2 d,同时培养箱内温保持在30 ℃,接着把上清液从锥形瓶中倒出,把污泥混合物留在锥形瓶的底部;最后倒出上清液进行换水操作,将污泥混合物保留在锥形瓶中,同时加入选择性培养基100 mL以此来实现富集连续,取2 d的操作周期开展重复筛菌,直到完成目标菌群的筛选。

1.2 再生骨料增强处理

为了验证好氧混菌矿化对再生骨料增强处理的有效性,对基于不同微生物矿化的再生骨料物理力学性能增强效果进行测试,设计3组测试组,其中未经增强处理再生骨料为RMA组,未经科氏芽孢杆菌矿化增强再生骨料为RMA-P组,好氧混菌矿化增强再生骨料为RMA-M组,骨料采用10～26 mm的再生骨料。为了考察混菌矿化对不同粒径再生骨料增强效果的影响,设计3个测试组,CRA-L、CRA-M与CRA-S组,分别为10～20 mm的大粒径、5～10 mm的中等粒径和小于5 mm的小粒径(再生细骨料)再生骨料测试组。分别对不同粒径再生骨料增强处理0、5、10、15和20 d,以考察不同增强时间对再生骨料增强效果的影响。

再生骨料取自太原市拆除的某锅炉厂混凝土结构,将破碎后的骨料过筛分级,筛分出不同粒径再生骨料清洗后备用。再生骨料增强处理采用浸泡法,增强处理过程为:首先使用灭菌后的酵母浸粉溶液(5 g/L)对扩培得到的好氧混菌进行重悬,控制菌液浓度OD_{600}值为1.4,然后将好氧混菌采用负压吸附方式固载至再生骨料表面缺陷处,将处理后的骨料置入温度为30 ℃的营养物质中采用浸泡法进行增强处理。增强处理采用65 g/L乳酸钙溶液为营养物质溶液,并采用氢氧化钠调节溶液pH值为9.0,增强处理过程中用电动氧气泵装置进行供氧并及时测试溶解氧浓度。

1.3 再生混凝土配合比

为了考察好氧混菌矿化增强再生骨料对混凝土工作性能和力学性能的提升效果,设计9个混凝土测试组,其中NAC组为普通混凝土对照组,RUC组表示采用未增强再生粗骨料制备的混凝土,RMC组表示采用好氧混菌矿化增强再生粗骨料制备的混凝土;考虑不同骨料级配时再生粗骨料的孔隙率、比表面积等物理特性不同,设置了3组不同粒径范围的再生粗骨料制备再生混凝土,以考察不同级配再生粗骨料对再生混凝土性能的影响,其中NAC-1、RUC-1、RMC-1混凝土测试组采用粒径为5～16 mm的再生粗骨料,NAC-2、RUC-2、RMC-2混凝土测试组采用粒径为5～20 mm的再生粗骨料,NAC-3、RUC-3、RMC-3混凝土测试组采用5～26 mm的再生粗骨料。再生混凝土的配合比为m(骨料):m(砂):m(水泥):m(水):m(减水剂)=1 140:588:457:215:3.43,水灰比为0.47。水泥使用42.5级普通硅酸盐水泥,采购自太原狮头水泥厂。NAC组普通混凝土的粗骨料使用天然碎石,含泥量为0.8%,吸水率为0.7%,压碎指标为6.7%,采购自太原市某砂石厂。RUC组和RMC组再生混凝土采用再生粗骨料100%等质量替代天然骨料。混凝土细骨料均采用河砂,其含泥量为0.4%,表观密度为2 600 kg/m^3,细度模数为2.7,在山西太原的某砂石厂采购。RMC组再生混凝土的再生粗骨料均经过混菌矿化增强处理,增强处理时间为15 d。

1.4 性能测试方法

实验对再生骨料表观密度、质量增加率、压碎指标和吸水率的测试依据《建筑用卵石、碎石》(GB/T 14685—2011)。混凝土试块在相对湿度95%以上、温度为20±2 ℃的标准环境条件下养护28 d,混凝土坍落度的测试依据《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016)进行,按《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)进行混凝土立方体抗压强度的测试。为了分析再生骨料表面矿化沉淀物微观形貌,取样骨料表面沉淀物,同时将其研磨成粉末状,把样品在300目筛网中过滤,接着进行干燥处理,将其置于烘干器中,温度保持105 ℃,在喷金设备中对样品表面进行喷金处理,使其具有优良的导电性进行SEM分析,采用JEOL JSM-IT800型(产自日本)扫描电子显微镜进行SEM微观结构分析。

2 结果与分析

2.1 混菌矿化增强骨料有效性与骨料表观分析

2.1.1 微生物类型对再生骨料物理力学性能的影响

图1为采用不同微生物矿化增强对再生骨料物

理力学性能的影响。由图 1(a)可以看出，经纯菌(科氏芽孢杆菌)增强处理后的RMA-P组和经好氧混菌矿化处理后的RMA-M测试组骨料质量增长率分别为0.88%和0.91%，RMA-M组骨料比未增强再生骨料提高了1.2%，混菌矿化呈现出更好的骨料增强效果；RMA-P组和RMA-M组骨料表观密度分别为2 590和2 594 kg/m^3，两组较RMA对照组均有增强，且增强效果接近。从图 1(b)可知，相对于未增强骨料，微生物矿化增强测试组的骨料吸水率均呈现明显降低，RMA-M测试组的再生骨料吸水率从7.0%下降至5.9%，下降幅度为15.7%，RMA-P测试组再生骨料吸水率从7.0%下降至6.17%，下降幅度为11.8%；经混菌矿化增强后，RMA-M组和RMA-P组骨料的压碎指标分别降低了19.6%和16.4%，相较于未增强骨料，混菌矿化表现出优于纯菌的增强效果。以上实验结果表明，微生物矿化能够显著提升再生骨料的物理力学性能，且相比于科氏芽孢杆菌，好氧混菌矿化再生骨料增强效果表现更佳。这可能是因为相比于纯菌，混菌的组成为不同群落，在环境冲击下表现出更好的对抗能力，同时代谢物交换和分子信号传递能够在菌落间得以实现，其矿化鲁棒性更强，矿化沉积能力表现出更高的效率和更强的稳定性。

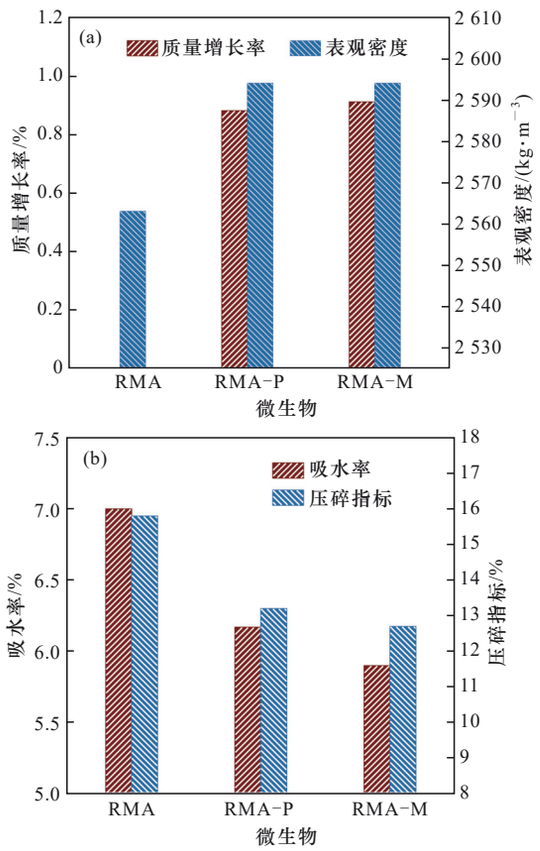


图 1　不同微生物矿化增强对再生骨料物理力学性能影响

Fig. 1　Effects of different microbial mineralizations on physical and mechanical properties of recycled aggregates

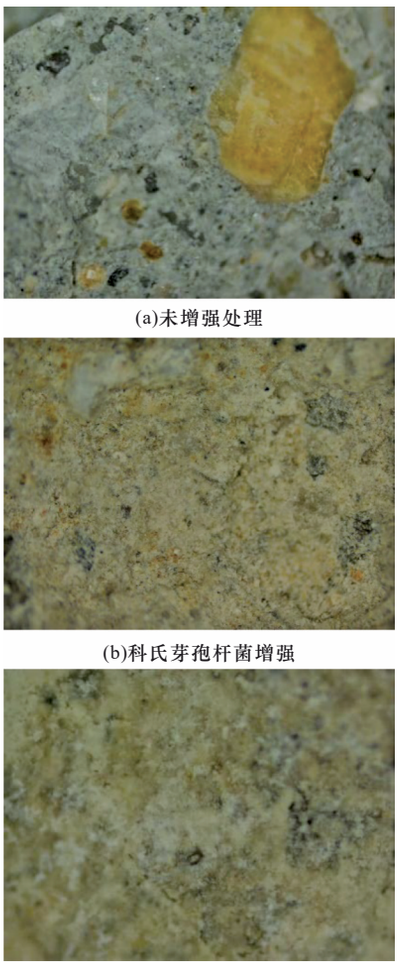
2.1.2　再生骨料表观分析

不同微生物矿化增强的再生骨料表观图如图 2 所示。由图 2 可知，旧水泥砂浆覆盖在未进行增强处理再生骨料的表面，同时有许多裂纹存在于旧砂浆和骨料表面，再生骨料通过微生物矿化增强后，有淡黄色颗粒的晶体在骨料表面进行包裹，该颗粒对存在孔隙和裂纹的骨料具有较好的修复效果，进而显著提升再生骨料的性能，由图 2 还可知，再生骨料的矿化增强采用科氏芽孢杆菌时，深颜色的颗粒晶体松散布置于骨料表面，而再生骨料的矿化增强采用好氧混菌时，沉积物更加密实，说明好氧混菌在再生骨料表面呈现更高的矿化沉积效率。以上研究结果表明，针对骨料缺陷部分好氧混菌表现出更好的修复能力，同时沉淀物与再生骨料间的黏结性更好，从而增强再生骨料性能。

2.2　混菌矿化增强时间对不同粒径再生骨料性能和表面沉淀物的影响

2.2.1　增强时间对不同粒径再生骨料性能的影响

图 3 为不同混菌矿化增强时间对各粒径再生骨料质量增长率和表观密度的影响。从图 3 可以看出，经过 20 d 矿化增强后大粒径、中等粒径和小粒径再生骨料质量增长率分别为1.63%、1.8%和3.25%，与未增强再生骨料相比，各粒径再生骨料均有显著提升；经 20 d 矿化增强后，大粒径再生骨料表观密度达2 613 kg/m^3，比未增强再生骨料提高1.4%；中等粒径再生骨料表观密度达2 666 kg/m^3，比未增强再生骨料提高1.8%；小粒径再生骨料表观密度达2 598 kg/m^3，比未增强再生骨料提高1.9%；混菌矿化对小粒径测试组再生骨料呈现更好的增强效果。从图 3(a)和(b)可知，大粒径和中等粒径测试组再生骨料质量增长率和表观密度随着增强时间的延长呈现出正相关线性增长趋势；从图 3(c)可知，小粒径组骨料质量增长率和表观密度随着增强时间的延长在前期呈现相同规律，但矿化增强 10 d 后幅度逐渐放缓，增强时间为 10 d 时质量增长率为3.0%，表观密度增幅为1.4%。随着矿化增强时间的延长，再生骨料质量和表观密度提高并且小粒径骨料性能提升效果更好的原因为：混菌矿化生成的碳酸钙沉淀逐渐包裹再生骨料表面，并有效修复填充骨料表面旧水泥砂浆的微裂缝和孔洞；再生骨料粒径越小，相同骨料体积下碳酸钙沉淀物与骨料表面接触面积更大，可以为混菌提供更多的



(a)未增强处理

(b)科氏芽孢杆菌增强

(c)好氧混菌增强

图2 不同微生物矿化增强的再生骨料表观图

Fig. 2 Apparent photos of recycted aggregates enhanced by different microbial mineralizations

附着空间与成核位点，从而导致骨料表面碳酸钙沉积效率更高。

图4为混菌矿化不同增强时间对不同粒径再生骨料压碎指标和吸水率的影响。从图4可以看出，大粒径、中等粒径和小粒径测试组再生骨料吸水率最大降低幅度分别为21.4%、27.4%和30.7%，表明混菌矿化对小粒径再生骨料呈现更好的增强效果。由图4(a)可见，大粒径测试组再生骨料压碎指标和吸水率随着延长增强时间呈现的趋势为先降后增，当矿化增强时间为15 d时再生骨料压碎指标和吸水率处于最小值，吸水率和压碎指标分别为5.5%和11.4%，降低幅度分别为21.4%和27.8%，出现这一现象可能是由于增强时间过长导致再生骨料表面沉淀物间形成了新的孔隙，进而使再生骨料吸水率增大。由图4(b)可见，随着增强时间的延长，中等粒径再生骨料吸水率呈现的趋势为逐渐下降，在15 d矿化增强后中等粒径骨料吸水率下降幅度

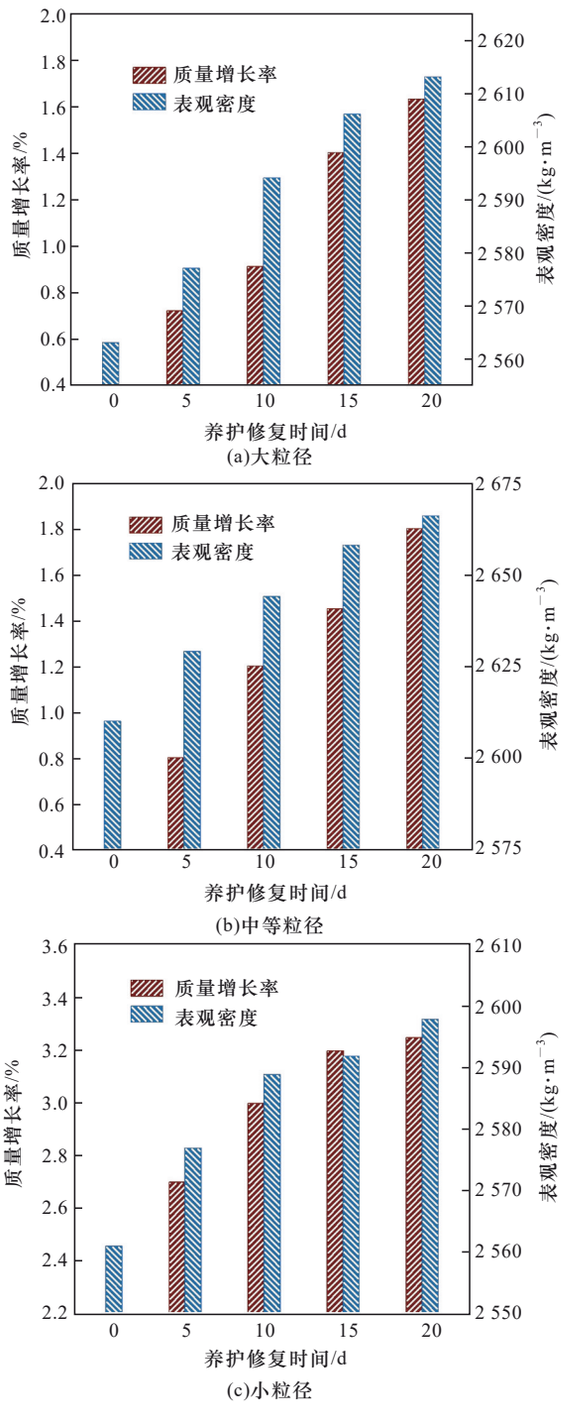


图3 增强时间对不同粒径再生骨料质量增长率和表观密度的影响

Fig. 3 Effects of enhanced time on weight increase and apparent density of recycled aggregates with different particle sizes

逐渐放缓，矿化增强时间为15 d时，吸水率和压碎指标分别为4.55%和10.6%，降低幅度分别达25.4%和19.7%。由图4(c)可见，小粒径再生骨料吸水率和压碎指标随着增强时间的延长均呈现下降趋势，矿化增强10 d后小粒径骨料吸水率降低幅度显著放缓，增强时间10 d时其吸水率和压碎指标分别为7.87%和21.2%，降低幅度分别为29.7%和

18.1%。以上研究结果表明，大粒径再生骨料存在最优增强时间，其最优增强时间为 15 d；对于中等粒径和小粒径再生骨料，考虑骨料增强时间过长，处理费用显著提高，其最优增强时间可分别取 15 d 和 10 d。

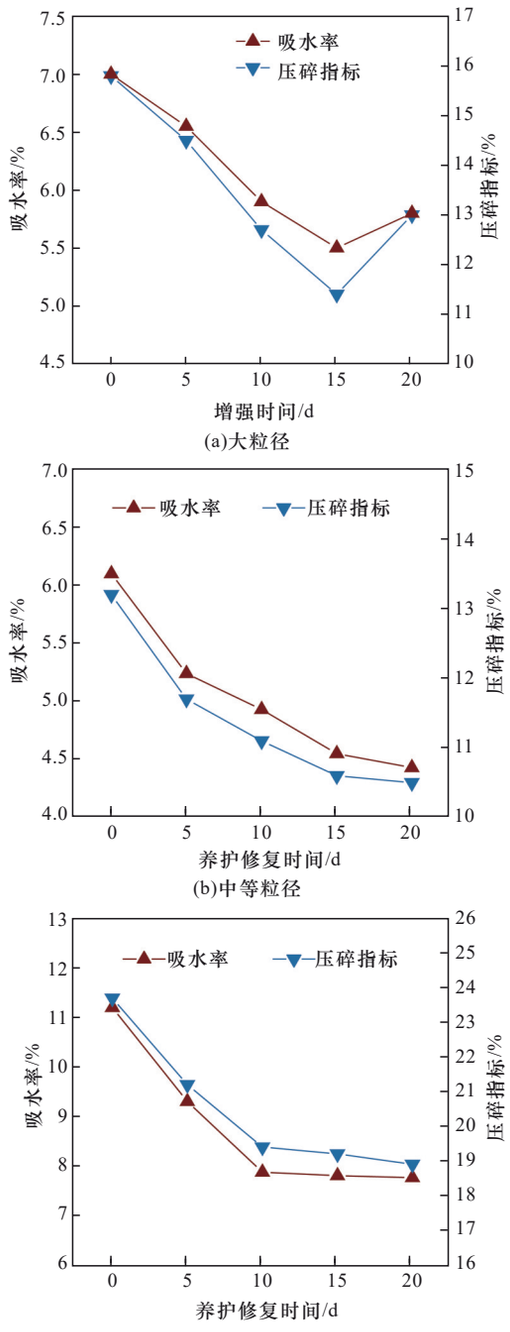


图 4　增强时间对不同粒径再生骨料吸水率和压碎指标的影响

Fig. 4　Effects of enhancing time on water absorption and crushing index of recycled aggregates with different particle sizes

2.2.2　增强时间对骨料表面矿化沉淀物微观形貌的影响

不同好氧混菌矿化增强时间下大粒径测试组再生骨料表面矿化沉淀物微观形貌如图 5 所示。由图 5 可知，随着增强处理时间的延长，再生骨料表面经好氧混菌矿化增强产生的碳酸钙晶体粒径逐渐增大，同时各晶体间发生互相连接现象，生成较大尺寸的晶团，相互堆叠的晶团性能表现得更加稳定，从而对骨料表面的缺陷进行覆盖、填充，进而使骨料物理力学性能显著提高；再生骨料经矿化增强处理后的表面沉淀物也呈现微生物生长、存活所遗留的孔状痕迹。从图 5 中还可以看出，矿化增强 15 d 之前，矿化晶体逐渐增多并附着在再生骨料表面，矿化增强 15 d 时矿化晶体均匀密实覆盖再生骨料表面，再生骨料缺陷被有效修复，然而矿化增强 15 d 后，由于再生骨料表面已被较多的矿化晶体包裹，新生成的矿化沉淀仅附着在已沉积的沉淀物表面，导致其相互堆叠形成较为疏松多孔的晶体层，这与大粒径测试再生骨料吸水率和压碎指标变化规律相吻合。

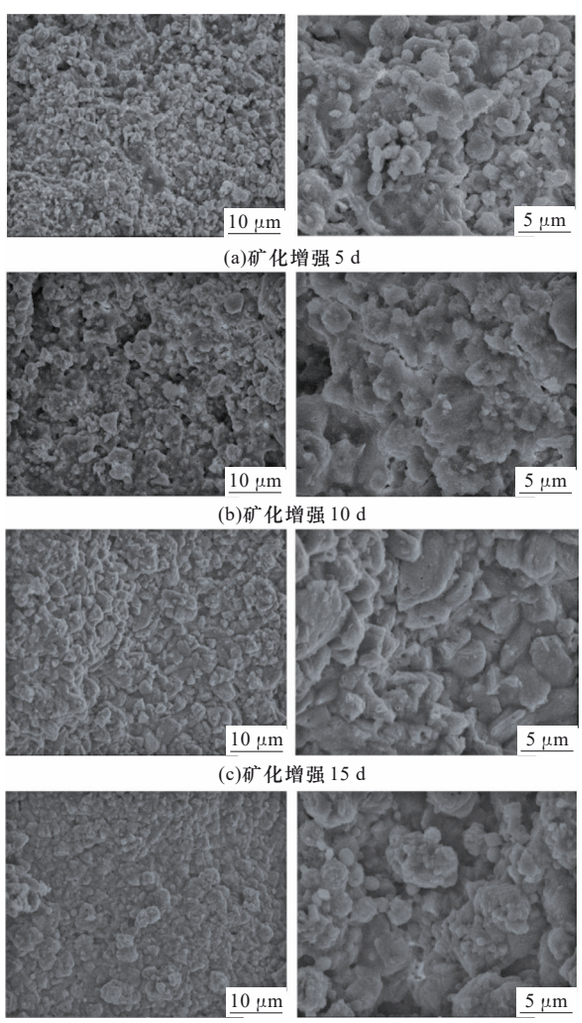
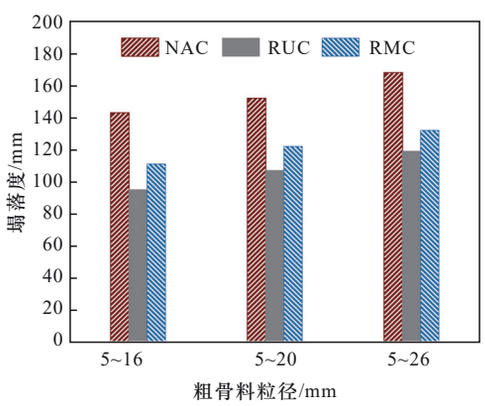


图 5　不同混菌矿化增强时间下大粒径再生骨料表面沉淀物 SEM 图

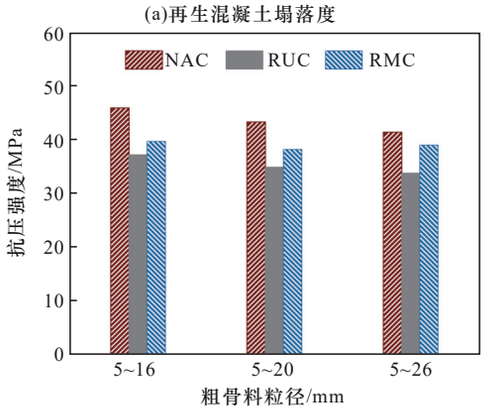
Fig. 5　SEM images of precipitates on the surface of large-size recycled aggregates with different mineralization enhancement time

2.3 再生混凝土坍落度与抗压强度

图6为不同级配再生混凝土坍落度和抗压强度。从图6(a)可以看出,各测试组混凝土的塌落度随粗骨料最大粒径的增大而逐渐增大,这可能是因为再生骨料最大粒径的增加,使得其比表面积减小,致使在拌制混凝土过程中包裹骨料的水泥浆的用量减少,进而在相同水灰比和水泥量下,大粒径测试组的混凝土坍落度得以提高;与对应级配的NAC测试组相比,RUC-1、RUC-2和RUC-3组混凝土坍落度分别降低33.6%、29.6%和29.2%,表明掺入未增强再生骨料会显著减小混凝土塌落度;与对应级配的RUC测试组相比,RMC-1、RMC-2和RMC-3组混凝土塌落度分别增大16.8%、14.0%和10.9%,表明掺入混菌矿化增强再生骨料可以有效增大混凝土塌落度,但混凝土塌落度增大幅度随着粗骨料最大粒径增大而逐渐降低。



(a)再生混凝土塌落度



(b)再生混凝土抗压强度

图6 不同级配再生混凝土塌落度和抗压强度

Fig. 6 Slump and compressive strength of recycled aggregate concretes with different aggregate gradations

从图6(b)中可以看出,随着粗骨料最大粒径的增大,各测试组混凝土抗压强度逐渐降低,但再生混凝土抗压强度比普通混凝土降低幅度更小,原因可能是由于骨料粒径增大致使骨料与砂浆基体之间的界面过渡区更加薄弱,从而导致混凝土抗压强度降低;与对应级配的NAC测试组相比,RUC-1、RUC-2和RUC-3组混凝土抗压强度分别降低18.9%、19.4%和18.4%,表明掺入未增强再生骨料会显著降低混凝土抗压强度;与对应级配的RUC测试组相比,RMC-1、RMC-2和RMC-3组混凝土抗压强度分别提高6.7%、9.4%和15.3%,表明掺入混菌矿化增强再生骨料可以有效提高混凝土抗压强度,并且混凝土抗压强度提高幅度随着粗骨料最大粒径增大而逐渐增大。

3 结语

本文验证了再生骨料经混菌矿化增强后物理力学性能显著提升,同时考察了不同粒径再生骨料通过混菌矿化增强后对物理力学性能及不同级配再生混凝土塌落度和抗压强度的影响,主要结论如下:

1)相较于好氧代谢纯菌而言,再生骨料采用好氧混菌矿化增强后表现出更好的物理力学性能,骨料表面沉淀物更加密实;随着增强处理时间延长,好氧混菌矿化在骨料表面形成的沉淀物晶体粒径逐渐增大,从而有效地覆盖和填充再生骨料表面缺陷。

2)经混菌矿化增强处理,再生骨料各粒径组均显著提高其物理力学性能,且越小的再生骨料粒径表现出越出色的增强效果;再生骨料粒径较大组的压碎指标和吸水率随着延长矿化增强时间呈先降后增趋势,15 d为最优矿化增强时间,与未增强骨料相比,再生骨料吸水率和压碎指标降幅分别可达21.4%和27.8%。

3)随着骨料最大粒径的增大,混菌矿化增强再生骨料对混凝土塌落度的增大幅度逐渐降低,而混凝土抗压强度提高幅度则逐渐提高,再生混凝土塌落度和抗压强度最大提高幅度分别可达16.8%和15.3%。

参考文献:

[1] 刘超,吕振源,肖建庄,等. 再生骨料的微生物载具性及其在自修复混凝土中的应用[J]. 建筑材料学报,2020,23(6):1337-1344.

[2] 段珍华,江山山,肖建庄,等. 再生粗骨料含水状态对混凝土性能的影响[J]. 建筑材料学报,2021,24(3):545-550.

[3] Ouyang K，Liu J H，Liu S H，et al. Influence of pre-treatment methods for recycled concrete aggregate on the performance of recycled concrete：A review[J]. Resources Conservation and Recycling，2023，188：106717.

[4] 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.

[5] Akbarnezhad A，Ong K C G，Zhang M H，et al. Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates[J]. Construction and Building Materials，2011，25(8)：3469-3479.

[6] 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.

[7] Liu T J，Wang Z Z，Zou D J，et al. Strength enhancement of recycled aggregate pervious concrete using a cement paste redistribution method[J]. Cement and Concrete Research，2019，122：72-82.

[8] Liu G，Tosic N，De La Fuente A. Recycling of macro-synthetic fiber-reinforced concrete and properties of new concretes with recycled aggregate and recovered fibers[J]. Applied Science，2023，13(4)：2029.

[9] Wiktor V，Jonkers H M. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete[J]. Cement & Concrete Composites，2011，33(7)：763-770.

[10] Zhang J G，Liu Y Z，Feng T，et al. Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete[J]. Construction and Building Materials，2017，148：610-617.

[11] Feng Z Y，Zhao Y X，Zeng W L，et al. Using microbial carbonate precipitation to improve the properties of recycled fine aggregate and mortar[J]. Construction and Building Materials，2020，230：116949.

[12] Liu K W，Ouyang J Z，Sun D S，et al. Enhancement mechanism of different recycled fine aggregates by microbial induced carbonate precipitation[J]. Journal of Cleaner Production，2022，379：134783.

[13] Zhang R，Xie D Z，Wu K，et al. Optimization of sodium alginate aided bio-deposition treatment of recycled aggregates and its application in concrete[J]. Cement & Concrete Composites，2023，139：105031.

[14] Zhang J G，Zhao C，Zhou A J，et al. Aragonite formation induced by open cultures of microbial consortia to heal cracks in concrete：Insights into healing mechanisms and crystal polymorphs[J]. Construction and Building Materials，2019，224：815-822.

[15] 张家广，陈景琦，孟庆玲，等. 混菌矿化增强再生粗骨料的物理力学性能[J]. 建筑材料学报，2022，25(10)：1027-1033.

[16] 花素珍，张家广，高沛，等. 增强再生骨料固载混菌的混凝土裂缝自修复性能[J]. 复合材料学报，2023，40(11)：6299-6310.

[17] Gong Y F，Chen P，Lin Y J，et al. Improvement of recycled aggregate properties through a combined method of mechanical grinding and microbial-induced carbonate precipitation[J]. Construction and Building Materials，2022，342：128093.

[18] Han R K，Xu S S，Zhang J G，et al. Insights into the effects of microbial consortia-enhanced recycled concrete aggregates on crack self-healing in concrete[J]. Construction and Building Materials，2022，343：128138.

（编辑：杨　鹏）