

文章编号:1007-9629(2022)10-1027-07

混菌矿化增强再生粗骨料的物理力学性能

张家广*, 陈景琦, 孟庆玲, 许顺顺, 刘元珍

(太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原 030024)

摘要:为克服单一微生物培养成本高且矿化鲁棒性不足的缺陷,提出了一种混菌矿化增强再生粗骨料物理力学性能的方法.通过筛选矿化效率较高的好氧嗜碱混菌,考察了混菌矿化对再生粗骨料物理力学性能和混凝土抗压强度的影响.结果表明:相同增强时间下,混菌比纯菌呈现出更优异的矿化增强效果;随着混菌矿化增强时间的延长,再生粗骨料吸水率和压碎指标呈现出先减小后增大的趋势,最优增强时间为 15 d;采用矿化增强再生粗骨料制备的再生混凝土抗压强度提高幅度达到 22.1%.

关键词:再生粗骨料;微生物矿化沉积;混菌;物理力学性能;最优增强时间

中图分类号:TU528

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.10.005

Physical and Mechanical Properties of Recycled Coarse Aggregate Enhanced by Mixed Bacterial Mineralization

ZHANG Jiaguang*, CHEN Jingqi, MENG Qingling, XU Shunshun, LIU Yuanzhen

(College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: To overcome the high cultivation cost and low robustness of single microorganism, a method of mixed bacteria mineralization to enhance the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregate was proposed. A kind of aerobic mixed bacteria with high mineralization efficiency was selected. The effect of mixed bacteria mineralization on physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates, and the compressive strength of recycled concrete was investigated. The results show that under the same enhancement time, mixed bacteria exhibit much better mineralization enhancement effect than pure bacteria. With the extension of the enhancement time of mixed bacteria mineralization, the water absorption and crushing index of recycled coarse aggregate decrease firstly, and then increase. The optimal enhanced time is 15 days. The compressive strength of recycled concrete prepared by mineralized reinforced recycled coarse aggregate increases by 22.1%.

Key words: recycled coarse aggregate; microbially induced carbonate precipitation; mixed bacteria; physical and mechanical property; optimal enhanced time

再生混凝土粗骨料(RCA)表面附着一些旧水泥砂浆,且在破碎过程中其表面和内部会产生大量裂纹,因此具有密度小、吸水率高、界面黏结力差等缺点^[1-2].目前,再生粗骨料性能增强的方法主要有物理方法^[3-4]、化学方法^[5-6]和微生物矿化方法^[7-9].物理方法和化学方法存在成本高、能耗大、处理工艺复杂等缺点.微生物矿化沉积(MICP)方法利用的是矿化微生

物的碳酸钙诱导沉积功能,且因沉淀物耐久性能良好并易附着胶结于砂浆和骨料表面,从而可以有效填充或黏结具有渗透性的有孔介质^[10-11].

Wang等^[7]研究发现微生物增强再生骨料的质量增长率达 2.5%,吸水率降低幅度达到 20%.Qiu等^[8]研究发现微生物增强再生骨料的性能明显提高.Wu等^[9]研究发现粒径较小的再生骨料增强效果更好.然

收稿日期:2021-08-15; 修订日期:2021-09-23

基金项目:山西省应用基础研究计划项目(201901D211087);山西省高等学校科技成果转化培育项目(2020CG023);山西省高等学校科技创新项目(2019L0324)

第一作者(通讯作者):张家广(1984—),男,山东菏泽人,太原理工大学副教授,硕士生导师,博士. E-mail: zhangjiaguang@tyut.edu.cn

而,当前大多学者用于骨料增强处理的矿化微生物为单一类型的微生物(纯菌),而纯菌矿化过程需要适宜的环境条件,其抵御环境变化的鲁棒性不足,且培养费用较高.与纯菌相比,多种矿化微生物组成的微生物群(混菌)矿化效率更高,培养费用仅为纯菌的1/3左右^[12-14].

综上,为提高再生粗骨料物理力学性能增强效果并显著降低其处理成本,本文提出了一种混菌矿化增强再生粗骨料物理力学性能的方法,并对矿化增强处理的再生粗骨料物理力学性能、再生混凝土坍落度和抗压强度进行试验研究,验证了提出的再生粗骨料性能增强方法的有效性.

1 试验

1.1 微生物选用与培养

为了比较好氧混菌与好氧纯菌的矿化增强效率,采用科式芽孢杆菌作为纯菌.将菌种冻干粉活化后,按照好氧型微生物的常规接种和培养方法,利用液体培养液对芽孢杆菌进行大量培养.培养液配比为:每1 L超纯水中加入胰蛋白胨10 g、酵母浸粉5 g、氯化钠10 g.培养液在摇床中经30℃、转速120 r/min恒温培养24 h后,得到含芽孢杆菌菌体和孢子的菌液,再将所得菌液用超纯水稀释至其在600 nm波长处的吸光值 $OD_{600}=1.0$.

由于不同碳源条件下筛选的微生物无机碳转化率差别较大,为了得到最优无机碳转化率下的好氧嗜碱混菌,本文以山西省晋中市污水处理厂活性污泥花园土壤为微生物源,在好氧条件下,以不同底物为碳源,筛选出具有优异矿化沉积能力的微生物群落.经过对比分析发现,以乳酸为碳源的好氧嗜碱混菌合成碳酸盐能力最强,这与Tziviloglou等^[15]的研究结果相吻合.好氧混菌培养液配比为:每1 L超纯水中加入乳酸1 670 μL 、氯化铵0.007 g、微量元素10 mL、矿物质10 mL.好氧混菌的富集方法为:在150 mL的锥形瓶中分别加入10 mL污泥混合液和100 mL好氧混菌培养液,用 Na_3PO_4 将其pH值调至11.0,用耐高温组培封口膜覆盖瓶口,在33℃恒温振荡培养箱中培养2 d;接着将上层清液去除,取下层底部的污泥混合溶液在相同操作下进行连续传代富集,每隔1个周期(2 d)重复上述操作,直至筛选出目标菌群;最后将富集驯化完成的微生物用甘油冷冻法置于-80℃冰箱中保存.

1.2 再生粗骨料的性能测试

1.2.1 再生粗骨料的选用

再生粗骨料含碎砖(RMA)和再生粗骨料不含

碎砖(RPCA)购买自河北邯郸某再生骨料厂,粒径为5~20 mm,其表观密度分别为2 576、2 586 kg/m^3 ,吸水率(质量分数,文中涉及的吸水率、水灰比等均为质量分数或质量比)分别为7.4%、6.1%,粉碎指数分别为16%、15%.再生粗骨料的物理力学性能介于GB/T 25177—2010《混凝土用再生粗骨料》中的Ⅱ、Ⅲ类粗骨料之间.

1.2.2 再生粗骨料矿化增强方法

为了考察不同再生粗骨料吸附微生物方法对混菌矿化增强再生粗骨料效率的影响,设计了4种再生粗骨料增强方法,并用混菌对RMA进行了浸泡.浸泡增强过程中向溶液中及时泵入氧气以保持恒定的溶解氧浓度,且浸泡增强采用的营养物质(nutrients)为质量浓度65 g/L的乳酸钙溶液,并用2 mol/L的NaOH溶液将其pH值调节为7.0.RMA矿化增强方法示意图见图1.图1中:RMA-U为仅采用营养物质溶液对RMA进行浸泡,增强时间为10 d;RMA-D为将好氧嗜碱混菌与营养物质混合溶液对RMA进行浸泡,增强时间为10 d;RMA-V为先将保存的混菌利用超纯水重悬为菌液,菌液 OD_{600} 值为1.0,通过负压吸附锅将RMA在-0.06 MPa的压力下吸附好氧嗜碱混菌菌液20 min,然后放入营养物质溶液中浸泡增强5 d,最后将RMA再次吸附菌液并浸泡增强5 d;RMA-M为先将RMA真空吸附好氧嗜碱混菌20 min,然后将部分混菌与营养物质混合溶液对RMA进行浸泡,增强时间为10 d.此外,为了避免增强处理后残留营养物质对再生混凝土工作性能和力学性能的不利影响,对矿化增强后的再生粗骨料用清水连续浸泡3次.

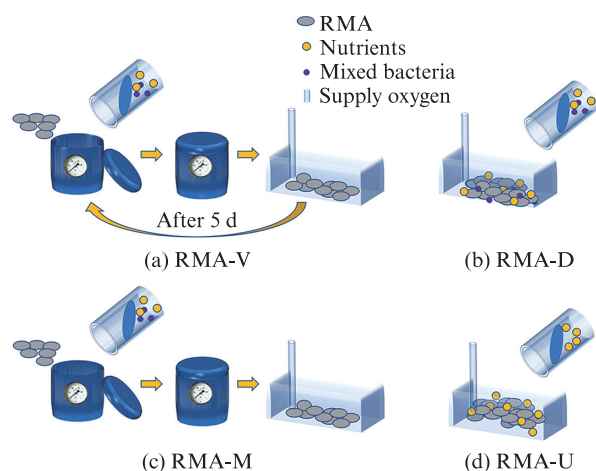


图1 RMA矿化增强方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of RMA mineralization enhancement methods

1.2.3 再生粗骨料矿化增强效果测试

为确定最优粗骨料矿化增强时间,采用混菌和RMA-V的增强方法,设置增强时间 $t=5、10、15、20\text{ d}$ ^[16].增强处理完毕后,将再生粗骨料取出放入 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱烘干至恒重,并依据GB/T14685—2011《建筑用卵石、碎石》,分别测试不同增强时间下再生粗骨料的质量增长率 W 、表观密度 ρ_A 、吸水率 w 和压碎指标 δ_a .

超声波处理过程中,再生粗骨料表面弱结合的颗粒会从骨料表面脱落,因此质量损失率可以间接反映沉淀物与骨料表面的黏结效果^[7].将烘箱干燥处理过的再生粗骨料进行超声波脉冲测试,考察骨料表面沉淀物与骨料表面的黏结效果.具体测试方法为:将样品放置在 1 mm 筛上,浸入超声波容器中,加入超纯水没过样品,以 40 kHz 的频率向样品施加超声脉冲 5 min ,收集经过超声处理后的样品,置于 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干至恒重.经过超声波处理后的再生粗骨料质量损失率,即超声波质量损失率 W_U ,根据文献^[7]来计算.

为研究不同微生物对再生粗骨料物理力学性能的影响,采用RMA-V的增强方法,制备了混菌矿化增强RMA和RPCA,分别记为RMA-MB、RPCA-MB;纯菌矿化增强RMA和RPCA,分别记为RMA-PB、RPCA-PB.

1.3 再生混凝土坍落度和抗压强度测试

1.3.1 再生混凝土配合比

水泥为太原狮子头水泥厂生产的42.5级普通硅酸盐水泥;再生粗骨料为RMA和RPCA;砂子为某砂石场的中砂,其表观密度为 $2\,600\text{ kg/m}^3$,含泥量为 0.4% ,细度模数为 2.6 ;减水剂为太原某厂家的聚羧

酸高性能减水剂;水为自来水.

混凝土的水灰比 $m_w:m_c=0.47$,配合比 $m(\text{骨料}):m(\text{砂}):m(\text{水泥}):m(\text{水}):m(\text{减水剂})=1\,140.00:588.00:457.00:215.00:3.43$.根据骨料对试件进行命名:将天然骨料制备的普通混凝土记为NAC(对照组);将未经微生物矿化增强的RMA、RPCA制备的混凝土记为RAC-U、MAC-U;将经混菌矿化增强的RMA、RPCA制备的混凝土记为RAC-MB、MAC-MB;将经纯菌矿化增强的RMA、RPCA制备的混凝土记为RAC-PB、MAC-PB.

1.3.2 坍落度和抗压强度测试

根据GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》,测试再生混凝土的坍落度.根据GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》,测试再生混凝土的立方体抗压强度,试件尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$,且在标准条件下养护 28 d .

2 结果及分析

2.1 再生粗骨料表观分析

混菌矿化增强前后RMA的表观图见图2.由图2可见:未经矿化增强的RMA表面附着较多的旧砂浆,且碎砖表面存在较多的裂纹;经混菌矿化增强后,再生粗骨料和碎砖表面均附着了1层淡黄色矿化沉淀,该沉淀物有效地将旧砂浆和裂纹包裹填充,从而提高了再生粗骨料的物理力学性能.由此可见,混菌矿化能够在再生粗骨料的缺陷部位形成1层矿物沉淀,其与骨料具有较好的黏结性,可有效实现矿化修复骨料缺陷的目的.

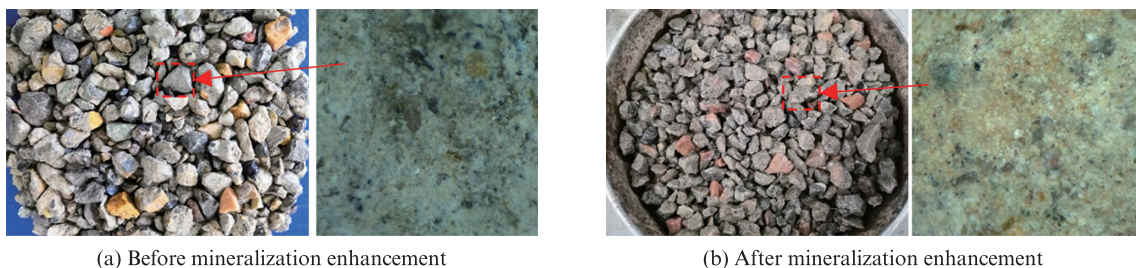


图2 混菌矿化增强前后RMA的表观图

Fig. 2 Surface images of RMA before and after mineralization enhancement by mixed bacterial

2.2 再生粗骨料物理力学性能增强效果

2.2.1 微生物的影响

不同微生物对再生粗骨料物理力学性能的影响见图3,由图3可见:与RMA、RPCA相比,RMA-MB、RMA-PB、RPCA-MB的质量增长率和表观密度均显著提高,吸水率、压碎指标和超声波处理

质量损失率均显著降低;RMA-MB的质量增长率和表观密度均高于RMA-PB,而其吸水率、压碎指标和超声波处理质量损失率均低于RMA-PB.由此可见,微生物矿化能够有效提高再生粗骨料的物理力学性能,且混菌矿化比纯菌矿化表现出更加优异的增强效果.这可能是因为微生物矿化沉积的碳酸钙沉淀

有效修复了再生粗骨料表面的缺陷部位,提高了其物理力学性能.与纯菌相比,混菌由不同菌落组成,其抗环境冲击能力更强,且混菌的菌落之间能够相互交换

代谢物或传递分子信号,使得混菌能够承担更多或者更复杂的任务,从而使混菌矿化鲁棒性更强,能够呈现出效率更高和稳定性更强的矿化沉积能力^[12-14].

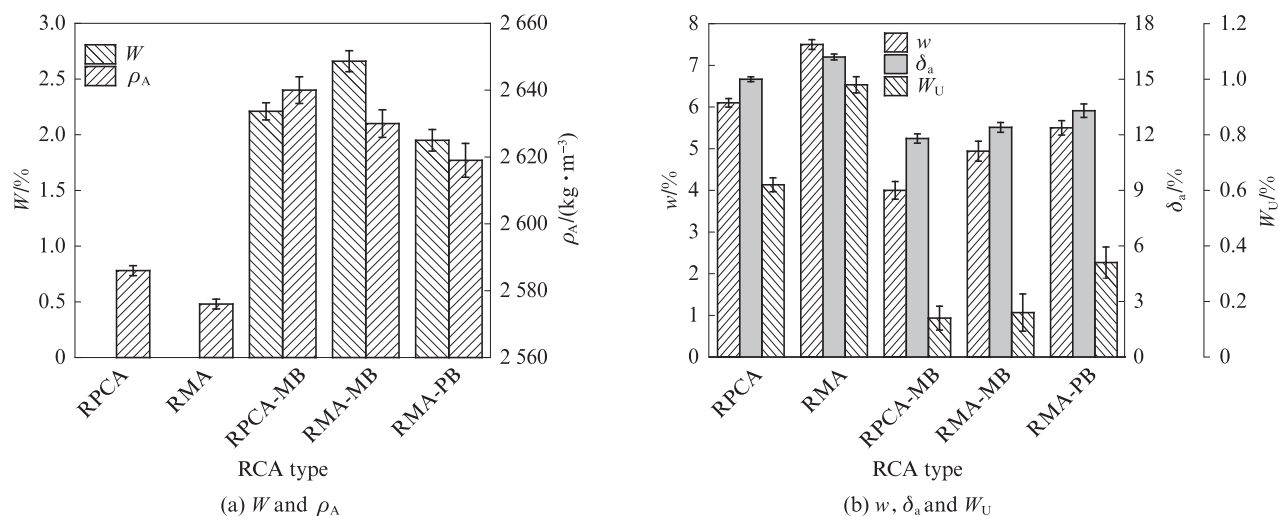


图3 不同微生物对再生粗骨料物理力学性能的影响

Fig. 3 Effect of different microorganisms on physical and mechanical properties of RCA

由图3还可见,与RPCA、RMA相比,RPCA-MB和RMA-MB的质量增长率分别为2.21%、2.66%,表观密度提高幅度均为2.1%,吸水率降低幅度分别为34.4%、34.6%,压碎指标降低幅度分别为21.3%、23.1%。由此可见,再生粗骨料是否含碎砖对混菌矿化增强其物理力学性能的影响很小,混菌矿化增强对含碎砖的再生粗骨料性能提高幅度略高于不含碎砖的再生粗骨料。

2.2.2 增强方法的影响

不同增强方法对RMA物理力学性能的影响见图4。由图4可见:与RMA相比,经混菌矿化增强处理后,RMA的质量和表观密度有一定程度的提高,吸水率、压碎指标和超声波处理质量损失率均降低;RMA-D的质量增长率最高,达到3.1%,RMA-V的质量增长率为2.8%,为RMA-D的90.3%;RMA-V表观密度最大,达到2623 kg/m³,比RMA提高了1.8%。由此可见,与其他增强方法相比,RMA-V呈现出更好的质量和表观密度增强效果。与RMA相比,RMA-V的吸水率、压碎指标、超声波处理质量损失率降低幅度最大,降低幅度分别达到26.0%、18.1%、65.3%。混菌矿化能够有效降低RMA的吸水率和压碎指标,且采用2次真空吸附混菌的RMA-V呈现出更高的吸水率和压碎指标降低程度。这可能是因为通过真空吸附方法,将混菌主动地吸附至RMA表面的孔隙和微裂纹中,当浸泡营养物质溶液时,混菌矿化可以在骨料缺陷部位进行原位修复,减少了沉淀

物在骨料无缺陷部位的附着,从而呈现出比直接浸泡混菌和营养物质溶液更高的骨料性能增强效率。

2.2.3 增强时间的影响

不同增强时间对RMA-V物理力学性能的影响见图5。对再生粗骨料的质量增长率和表观密度而言:随着增强时间的延长,RMA-V的质量增长率和表观密度逐渐提高;当增强时间为5~20 d时,RMA-V的质量增长率和表观密度变化与增强时间呈近似线性关系;经过20 d矿化增强后,RMA-V的质量增长率达到2.9%,表观密度达到2656 kg/m³,比RMA提高了3.1%。对再生粗骨料的吸水率和压碎指标而言:随着矿化增强时间的延长,RMA-V的吸水率和压碎指标呈现先降低后提高的趋势;当增强时间为0~15 d时,RMA-V的吸水率和压碎指标随着增强时间的延长而不断降低,当增强时间达到15 d时,其吸水率和压碎指标达到最低值,分别为4.1%、11.2%,与RMA相比,降低幅度分别达到44.6%、30.0%;当增强时间大于15 d时,RMA-V的吸水率和压碎指标随着增强时间的延长缓慢增加。对再生粗骨料的超声波质量损失率而言:随着矿化增强时间的延长,RMA-V的超声波质量损失率逐渐降低,但其降低幅度逐渐减小;当矿化增强时间超过15 d后,RMA-V超声波质量损失率降低幅度很小,基本保持在0.1%左右。综上,延长混菌矿化增强时间能够有效提高再生粗骨料吸水率和压碎指标降低程度,但矿化增强时间存在最优值15 d,增强时间超

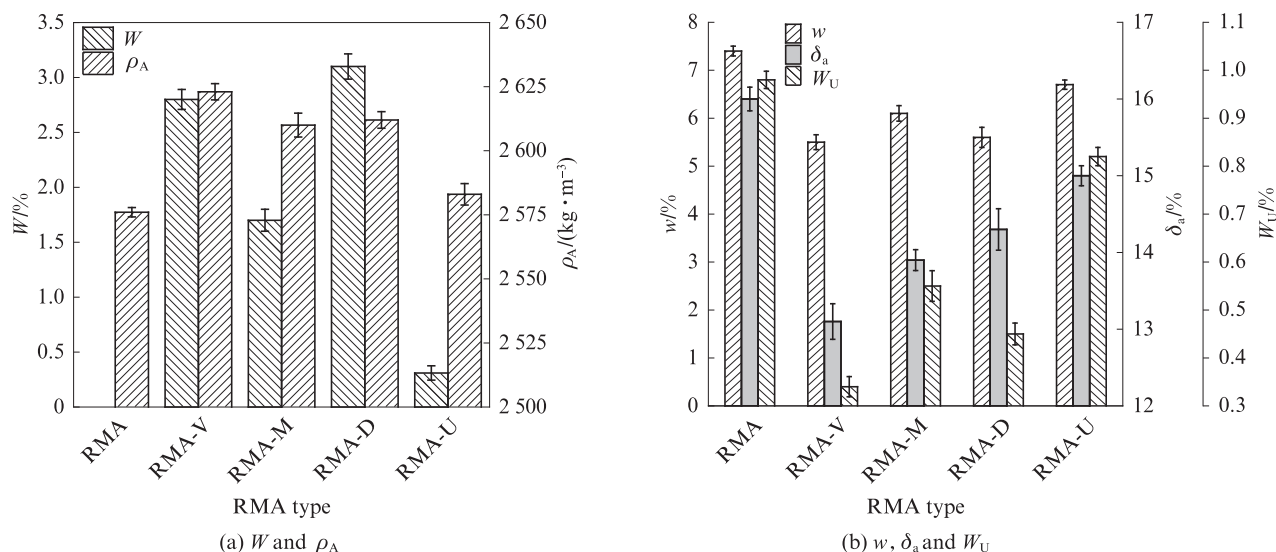


图4 不同增强方法对RMA物理力学性能的影响

Fig. 4 Effect of different enhancement methods on physical and mechanical properties of RMA

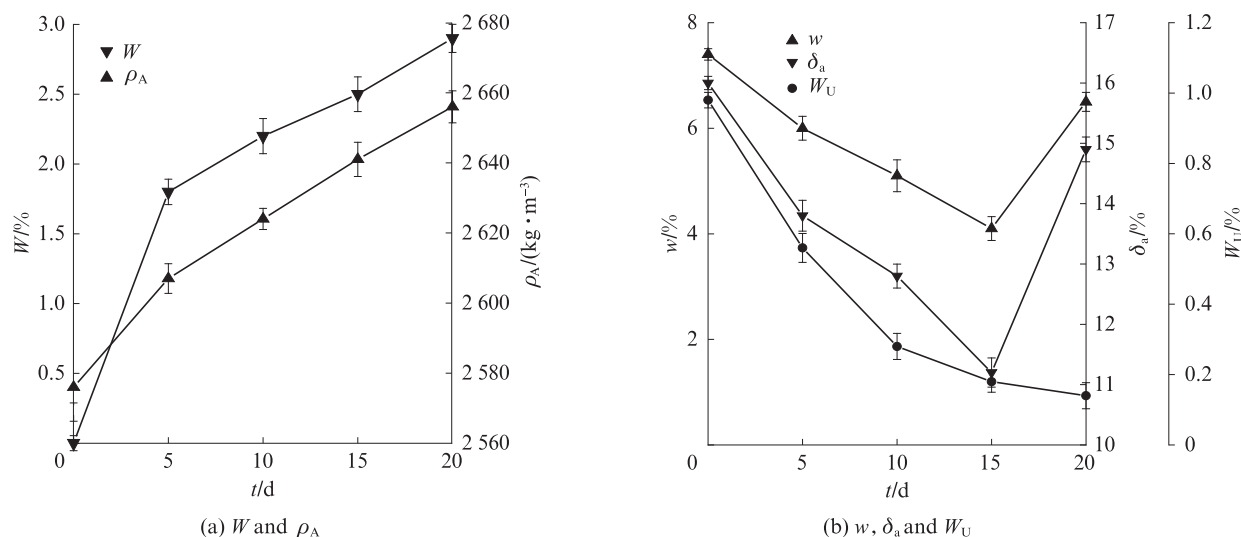


图5 不同增强时间对RMA-V物理力学性能影响

Fig. 5 Effect of different enhanced time on physical and mechanical properties of RMA-V

过该最优值后,再生粗骨料吸水率和压碎指标反而会出现升高.这可能是因为如果增强时间过长,微生物矿化附着在再生粗骨料表面的沉淀物厚度较大,将使后续生成的碳酸钙沉淀密实度降低,并且与已附着沉淀物之间的黏结力降低.

2.3 再生混凝土坍落度与抗压强度

再生混凝土的坍落度和抗压强度见图6.由图6可见:与NAC相比,RAC-U、RMC-U坍落度均出现明显降低;再生粗骨料经微生物矿化处理后,混凝土的坍落度得到明显提高,RAC-PB、MAC-PB坍落度比RAC-U、RMC-U分别提高了9.5%、15.8%,而RAC-MB、MAC-MB分别提高了17.1%、27.4%,可见用混菌矿化增强比纯菌矿化增强再生粗骨料对再

生混凝土坍落度提高的幅度更大;MAC-U的抗压强度低于RAC-U,表明再生粗骨料中含碎砖对混凝土抗压强度会产生不利影响;对再生粗骨料进行混菌和纯菌矿化增强后,再生混凝土的抗压强度得到明显提高;与RAC-U、MAC-U相比,RAC-PB、MAC-PB抗压强度分别提高了17.8%、10.8%,而RAC-MB、MAC-MB抗压强度分别提高了22.1%、19.0%,表明采用混菌矿化增强粗骨料比纯菌矿化增强粗骨料对再生混凝土抗压强度的提高幅度更大.综上,微生物矿化增强再生粗骨料能够显著地提高再生混凝土的坍落度和抗压强度,且混菌矿化增强呈现出比纯菌矿化增强更加优异的提高效果.这可能是因为微生物矿化沉积的碳酸钙沉淀提高了再生

粗骨料的物理力学性能,从而提高了其与水泥基材料界面过渡区的强度.在相同环境条件下,混菌能够

表现出比纯菌更高的矿化增强效率,从而更加有效地提高再生混凝土的工作性能和力学性能.

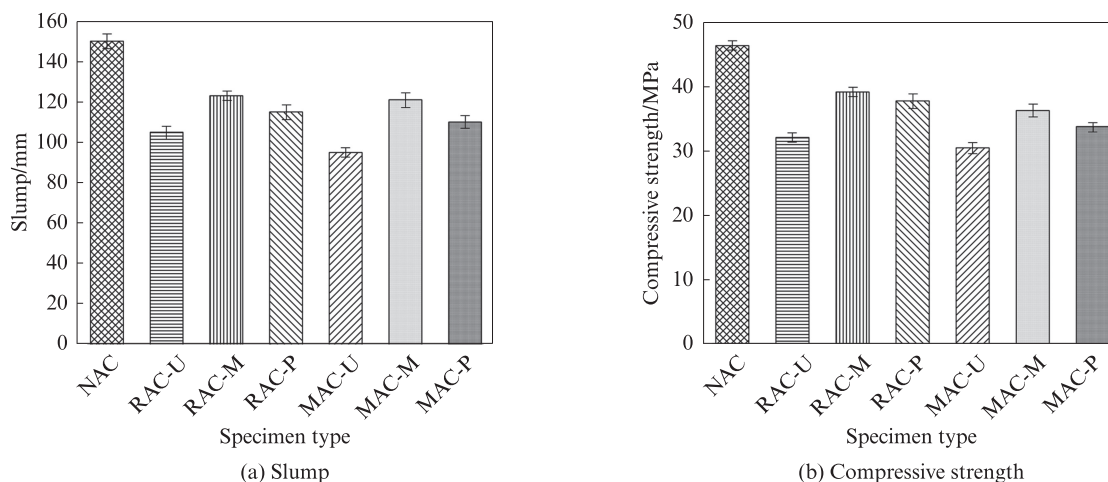


图6 再生混凝土的坍落度和抗压强度

Fig. 6 Slump and compressive strength of recycled concrete

2.4 微观结构分析

再生粗骨料表面的SEM图见图7.由图7可见:未经矿化增强处理的再生粗骨料表面附着一些旧砂浆,且存在微裂缝,使其物理力学性能低于天然骨料;经过微生物矿化增强处理后的再生粗骨料表面生成一层碳酸钙沉淀,沉淀物较密实、均匀地附着在骨料表面,并且将旧砂浆与微裂缝有效包

裹,在宏观角度表现为再生粗骨料的表观密度提高、吸水率与压碎指标降低等现象,从而实现增强再生粗骨料物理力学性能的目的;与纯菌矿化相比,混菌矿化在再生粗骨料表面所生成的碳酸钙沉淀晶体之间连接更加紧密,沉淀厚度更大,这与本文测试得到的再生粗骨料物理力学性能变化规律相吻合.

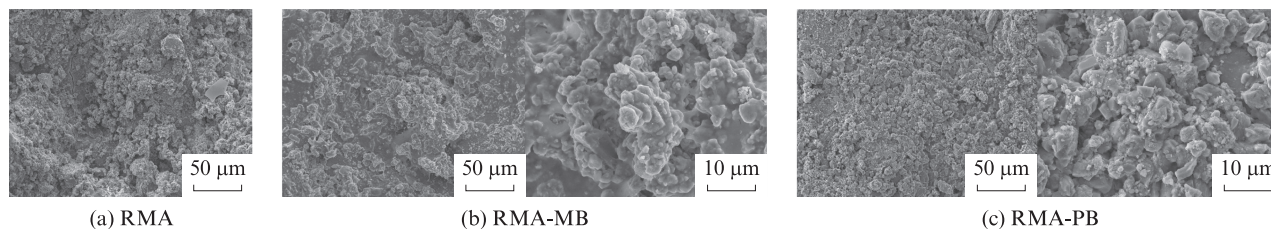


图7 再生粗骨料表面的SEM图

Fig. 7 SEM images of the surface of RCA

3 结论

(1)相同环境条件下,好氧混菌矿化比纯菌矿化表现出更好的再生粗骨料性能增强效果.再生粗骨料类型对混菌矿化增强粗骨料物理力学性能的影响很小;采用2次真空吸附混菌比直接浸泡再生粗骨料表现出更好的再生粗骨料性能增强效果,混菌在再生粗骨料表面所生成的碳酸钙沉淀晶体之间连接更加紧密.

(2)随着增强时间的延长,再生粗骨料吸水率和压碎指标呈现出先减小后增大的趋势,矿化增强时间存在最优值15 d,增强时间超过该最优值后再生粗

骨料性能可能出现降低.经15 d的矿化增强后,再生粗骨料吸水率和压碎指标降低幅度可分别达44.6%、30.0%.

(3)采用混菌矿化增强再生粗骨料比采用纯菌矿化增强粗骨料对再生混凝土坍落度和抗压强度的提高幅度更大,可分别达到27.4%、22.1%.

参考文献:

- [1] 刘超,吕振源,肖建庄,等.再生骨料的微生物载体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.
LIU Chao, LÜ Zhenyuan, XIAO Jianzhuang, et al. Carrier properties of recycled aggregates and its application in self-healing

- concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(6): 1337-1344.(in Chinese)
- [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.
DUAN Zhenhua, JIANG Shanshan, XIAO Jianzhuang, et al. Effect of moisture condition of recycled coarse aggregate on the properties of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3):545-550.(in Chinese)
- [3] 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 Jianzhuang, WU Lei, FAN Yuhui. Test on modification of recycled coarse aggregate by microwave heating[J]. Concrete, 2012(7):55-57.(in Chinese)
- [4] AKBARNEZHAD A, ONG K, ZHANG M H, et al. Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(8): 3469-3479.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] WANG J Y, VANDEVYVERE B, VANHESSCHE S, et al. Microbial carbonate precipitation for the improvement of quality of recycled aggregates[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 156:355-366.
- [8] QIU J S, TNG D Q S, YANG E H. Surface treatment of recycled concrete aggregates through microbial carbonate precipitation[J]. Construction and Building Materials, 2014, 57: 144-150.
- [9] WU C R, ZHU Y G, ZHANG X T, et al. Improving the properties of recycled concrete aggregate with bio-deposition approach[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 94: 248-254.
- [10] WIKTOR V, JONKERS H M. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2011, 33(7):763-770.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] ZHANG J G, ZHOU A J, LIU Y Z, et al. Microbial network of the carbonate precipitation process induced by microbial consortia and the potential application to crack healing in concrete[J]. Scientific Reports, 2017, 7:14600.
- [14] DA SILVA F, DE BELIE N, BOON N, et al. Production of non-axenic ureolytic spores for self-healing concrete applications[J]. Construction and Building Materials, 2015, 93:1034-1041.
- [15] TZIVILOGLOU E, WIKTOR V, JONKERS H M, et al. Selection of nutrient used in biogenic healing agent for cementitious materials[J]. Frontiers in Materials, 2017, 4:15.
- [16] BUNDUR Z B, AMIRI A, ERSAN Y C, et al. Impact of air entraining admixtures on biogenic calcium carbonate precipitation and bacterial viability[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 98:44-49.