

# 微生物改性再生细骨料与性能研究

冯璋曜 叶 铖

(浙江数智交院科技股份有限公司 杭州 310030)

**[摘要]** 再生骨料表面附着旧砂浆且存在缺陷限制了其在混凝土结构中的应用,但经过合理改性其性能可以达到混凝土结构的使用要求。本文研究了一种微生物诱导碳酸钙沉淀改性再生细骨料的方法及其效果。研究了微生物诱导沉淀的最优条件并依此改性再生细骨料,并研究了改性方法和改性时间对改性效果的影响。结果发现,微生物在 pH=9.5、细菌浓度为  $10^8$  个/ml、钙源浓度为 0.55mol/L、不振动的条件下培养,可诱导产生大量碳酸钙沉淀。利用得到的微生物对骨料进行静置改性 7 天,可显著降低骨料的表观密度和饱和面干吸水率。结果表明,利用依照优选得到的条件培养微生物对再生细骨料进行改性,可提高再生细骨料性能。

**[关键词]** 再生骨料; 微生物诱导碳酸钙沉淀; 微生物改性

## 1 引言

我国作为建设大国,对于混凝土的需求也与日俱增。但是,建筑业的欣欣向荣势必导致相关建筑材料的大量消耗,而混凝土生产必需的砂石是不可再生资源,这就导致近年来砂石资源的问题。石矿是人类从地球上开采和使用的第二大资源,全世界砂石骨料产量约 400 亿吨,预计到 2020 年用量达到 820 亿吨,而我国砂石骨料储量缺口巨大<sup>[1]</sup>。此外,由于既有建筑达到使用年限需要拆除或由于自然灾害等导致既有建筑毁坏也会产生大量的建筑废弃物。据测算,我国到 2030 年前还要产生 150 亿到 200 亿吨的建筑废物,其中以废旧混凝土、废旧粘土烧结砖、废旧陶瓷、废旧玻璃等为主<sup>[2]</sup>。借鉴发达国家经验,将建筑垃圾转化为骨料并再次应用于建设工程成为解决上述问题的优选方法。

然而,再生骨料的微观结构比天然骨料复杂<sup>[3]</sup>。在再生骨料生产过程中,老砂浆会形成微裂缝并具有很高的孔隙率,成为了再生骨料最薄弱的环节,进而影响到混凝土的强度<sup>[4]</sup>。建筑废弃物的回收再利用已在发达国家得到推

广和广泛应用,特别是应用于对于骨料消耗量巨大,但是要求较低的道路工程之中。但在中国,建设和拆除废弃物仍未能得到较好的回收利用。

为了改善再生骨料的性能,从而提升再生骨料混凝土的宏观性能,推广再生骨料混凝土的应用,各国学者提出了各种改性的方法一些学者提出利用物理方法改性骨料,通过破碎、加热、摩擦等物理方法得到更高质量的骨料<sup>[5,6]</sup>。但是,物理方法往往会释放大量的粉尘、CO<sub>2</sub>,并消耗大量的能源<sup>[7]</sup>。另有一些学者则提出可以利用化学溶液浸泡骨料,来改善骨料的表面特性<sup>[8,9]</sup>。但是化学方法耗时耗力,且存在污染环境的风险<sup>[10]</sup>。还有一些学者提出利用碳化过程强化再生骨料的方法<sup>[10,11]</sup>。碳化改性再生骨料技术可能会影响再生骨料混凝土的耐久性,因此,目前仍在研究进程中。此外,因为在水泥基材料中,纳米二氧化硅具有“填充效应”和“加速效应”,一些学者也将纳米二氧化硅用于强化再生骨料<sup>[12,13,14]</sup>。但纳米材料由于价格昂贵,纳米改性技术存在着成本较高的问题。

收稿日期: 2020-08-01

作者简介: 冯璋曜 (1994- ), 男, 助理工程师, 主要从事桥梁设计工作。

受微生物成岩现象的启发,有学者曾利用微生物诱导碳酸钙沉淀进行了裂缝修复<sup>[15,16]</sup>和自修复胶凝材料<sup>[17]</sup>的研究。目前的研究成果发现蓝藻<sup>[18]</sup>、硫酸盐还原菌<sup>[19]</sup>、假坚强芽孢杆菌<sup>[16]</sup>、巴氏芽孢杆菌<sup>[17]</sup>等菌种具有诱导产生碳酸钙沉淀的能力;特别是巴氏芽孢杆菌,因其良好的抗逆性能在近几年的研究中被多次应用。

基于此,近年来有学者尝试将微生物诱导沉淀用于改性再生骨料。Qiu<sup>[20]</sup>、Grabiec<sup>[21]</sup>、García-González<sup>[22]</sup>等利用微生物碳酸盐沉淀(MCP)对再生粗骨料进行了改性研究,论证了微生物对再生骨料的可行性和有效性。Wang<sup>[23]</sup>等通过对微生物改性粗骨料的研究,发现经过两次浸泡处理的骨料性能更佳并且用处理过的骨料制成混凝土的性能大大提高。然而对于微生物改性诱导沉淀和微生物改性再生骨料的工艺的研究尚不充分,且已发表成果均集中在对再生粗骨料的改进研究,再生细骨料生物改性尚未有文献报道。

因此,本文对微生物改性再生细骨料进行了研究。试验分为两部分进行。首先对微生物诱导产生沉淀的最优条件进行探究,通过不同条件下产生沉淀的质量选择微生物诱导沉淀的最有条件。然后利用最优微生物诱导沉淀改性再生细骨料,对微生物改性再生细骨料的工艺进行研究并通过测量吸水率和质量变化分析改性后再生细骨料的物理性能变化。

## 2 微生物诱导产生碳酸钙沉淀试验研究

### 2.1 试验方案

#### 2.1.1 微生物及扩增

本试验使用的巴氏芽孢杆菌(DSM 33)购自德国微生物及细胞保藏中心(DSMZ)。研究中使用的液体培养基均以超纯水为溶剂,具体培养基成分见表1。

表1 增殖培养基成分

成分	胰蛋白胨	NaCl	尿素
含量	20g/L	5g/L	20g/L

将微生物激活后,根据表1中配方配置增殖培养基,将增殖培养基在121℃环境下高压蒸

汽灭菌20min,得到完全无菌的培养基。随后,在无菌条件下,菌液接种到灭菌后的液体培养基中,将其置于温度为30℃、转速为130rpm的摇床中培养24h,得到扩增菌液。随后,根据试验用量需求选择配置足量的增殖培养基。灭菌后,每100ml增殖培养基接种5ml扩增菌液,置于上述条件摇床中培养24h,可得到含有足量菌体的菌液。随后,将含有足量菌体的菌液置于高速离心机中,在9000rpm的条件下离心20分钟得到高度浓缩的细菌细胞。将其全部溶解在增殖培养液中,以增殖培养液为对照进行光密度测定( $\lambda=600\mu\text{m}$ ),得到菌液浓度。

#### 2.1.2 微生物培养条件

##### (1) 沉淀培养基和沉淀量

本试验中使用的沉淀培养基成分见表2。使用氢氧化钠(1N溶液)和盐酸(1N溶液)调节pH。为了模拟天然环境中骨料杂菌较多的情况,在沉淀培养阶段不再进行任何灭菌处理。

表2 沉淀培养基成分

成分	胰蛋白胨	NH <sub>4</sub> Cl	尿素	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	CaCl <sub>2</sub>
含量	3g/L	10g/L	20g/L	2.12g/L	根据具体试验确定

沉淀试验使用锥形瓶作为试验容器。每次沉淀试验结束后,将得到的含有沉淀产物的锥形瓶静止十分钟,将液体全部倒出并过滤,使大部分沉淀留在锥形瓶中。最终,本试验中的沉淀质量 $M_p$ 依公式(1)计算:

$$M_p = M_3 - M_2 - M_1 \quad (1)$$

式中: $M_p$ 为试验得到的总沉淀质量; $M_1$ 为试验前,烘干后冷却至室温的锥形瓶的质量; $M_2$ 为试验前烘干后的滤纸的质量; $M_3$ 为试验后烘干的滤纸和锥形瓶的总质量。

##### (2) 微生物诱导沉淀效率试验

为研究微生物诱导产生碳酸钙沉淀的效率,本试验在不同钙源浓度下对比加入微生物的微生物诱导沉淀和不加入微生物的无机沉淀的沉淀质量。具体沉淀条件见表3。

表3 微生物诱导沉淀与自然沉淀比较试验

Test no.	钙离子浓度	微生物	Test no.	钙离子浓度	微生物
V <sub>0.05</sub>	0.05mol/L	Yes	V <sub>0.4</sub>	0.4mol/L	Yes
V <sub>0.05-non</sub>		No	V <sub>0.4-non</sub>		No
V <sub>0.1</sub>	0.1mol/L	Yes	V <sub>0.55</sub>	0.55mol/L	Yes
V <sub>0.1-non</sub>		No	V <sub>0.55-non</sub>		No
V <sub>0.25</sub>	0.25mol/L	Yes	V <sub>0.7</sub>	0.7mol/L	Yes
V <sub>0.25-non</sub>		No	V <sub>0.7-non</sub>		No

(3) 微生物沉淀条件优选试验

为研究不同 pH、温度、时间、细菌浓度、钙源浓度和振动对微生物诱导产生沉淀质量的影响，得到最优的微生物沉淀条件，本试验进行了不同条件下的沉淀试验，见表 4。最优微生物沉淀条件将应用于后续的微生物改性再生细骨料试验。

表4 微生物培养条件优化试验

Test no.	pH	温度 (°C)	微生物浓度 (cells/ml)	钙离子浓度 (mol/L)	振动条件
P <sub>1</sub>	8.5	30	1.85×10 <sup>8</sup>	0.05	No
P <sub>2</sub>	9	30	1.85×10 <sup>8</sup>	0.05	No
P <sub>3</sub>	9.5	30	1.85×10 <sup>8</sup>	0.05	No
P <sub>4</sub>	10	30	1.85×10 <sup>8</sup>	0.05	No
P <sub>5</sub>	10.5	30	1.85×10 <sup>8</sup>	0.05	No
C <sub>1</sub>	9.5	30	1.85×10 <sup>8</sup>	0.05	No
C <sub>2</sub>	9.5	30	1.85×10 <sup>8</sup>	0.1	No
C <sub>3</sub>	9.5	30	1.85×10 <sup>8</sup>	0.25	No
C <sub>4</sub>	9.5	30	1.85×10 <sup>8</sup>	0.4	No
C <sub>5</sub>	9.5	30	1.85×10 <sup>8</sup>	0.55	No
C <sub>6</sub>	9.5	30	1.85×10 <sup>8</sup>	0.7	No
B <sub>1</sub>	9.5	30	2.23×10 <sup>6</sup>	0.55	No
B <sub>2</sub>	9.5	30	2.23×10 <sup>7</sup>	0.55	No
B <sub>3</sub>	9.5	30	2.23×10 <sup>8</sup>	0.55	No
B <sub>4</sub>	9.5	30	2.23×10 <sup>9</sup>	0.55	No
T <sub>1</sub>	9.5	25	2.23×10 <sup>7</sup>	0.55	No
T <sub>2-non</sub>	9.5	30	2.23×10 <sup>7</sup>	0.55	No
T <sub>2-vibrate</sub>	9.5	30	2.23×10 <sup>7</sup>	0.55	Yes
T <sub>3</sub>	9.5	37	2.23×10 <sup>7</sup>	0.55	No

为了研究振动对沉淀效果的影响，将 T<sub>2-vibrate</sub> 组放置于温度为 30℃、转速为 130rpm 的

摇床中培养，而 T<sub>2-non</sub> 放置于温度为 30℃ 的恒温培养箱中培养。

2.1.3 XRD 分析

得到沉淀产物后，取其足量的沉淀产物 (3g 左右) 研磨至 300 目 (45μm) 以下。铜靶，连续扫描，步长 0.01°，扫描时间 300s，2θ 扫描范围 10~80°。得到数据后，可利用软件分析得到其沉淀物质以及晶体类型。

2.2 分析与讨论

2.2.1 微生物诱导沉淀与无机沉淀对比

微生物诱导沉淀与无机沉淀的最终沉淀质量，见图 1。根据试验结果可知，微生物诱导沉淀的沉淀质量远大于无机沉淀的沉淀质量，证明微生物能高效地诱导产生碳酸钙沉淀。在不同钙源浓度下，微生物促进沉淀效率如图 1 所示。

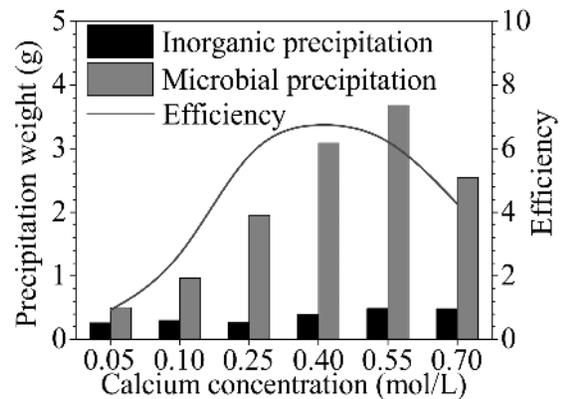


图1 微生物诱导沉淀与自然沉淀比较结果

试验结果还表明：随着钙源浓度的增加，微生物诱导产生碳酸钙沉淀的质量开始也随之增加，在钙源浓度达到 0.55mol/L 时，达到顶峰。同时，由图 1 可知，当钙源浓度达到 0.25mol/L 时，微生物促进沉淀效率已经达到较高水平，并在钙源浓度达到 0.55mol/L 后出现下降。这表明在钙源浓度为 0.25~0.55mol/L 时，微生物的活性较高，诱导沉淀的能力最强。

2.2.2 微生物沉淀的最优条件

试验测得的不同沉淀条件下沉淀质量，见表 5、图 2~图 6。

表5 不同条件下的沉淀质量

		沉淀重量 (g)					
pH		P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	
		0.476	0.481	0.505	0.501	0.527	
钙离子		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>
浓度		0.464	0.505	1.256	1.775	1.901	1.808
微生物		B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>		
浓度		0.547	1.648	1.991	1.985		
温度 &		T <sub>1</sub>	T <sub>2-non</sub>	T <sub>2-vibrate</sub>	T <sub>3</sub>		
振动		0.354	0.401	0.348	0.462		

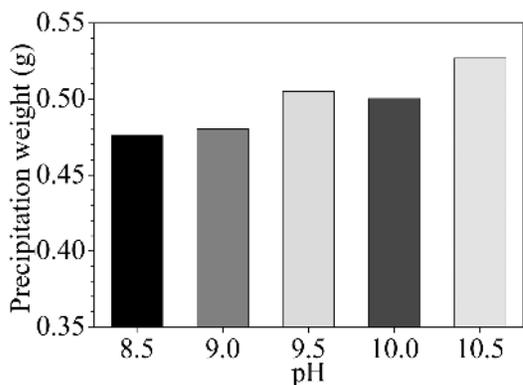


图2 pH对于改性效果的影响

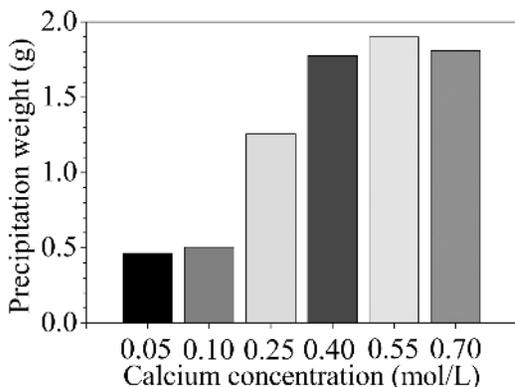


图3 钙离子浓度对于改性效果的影响

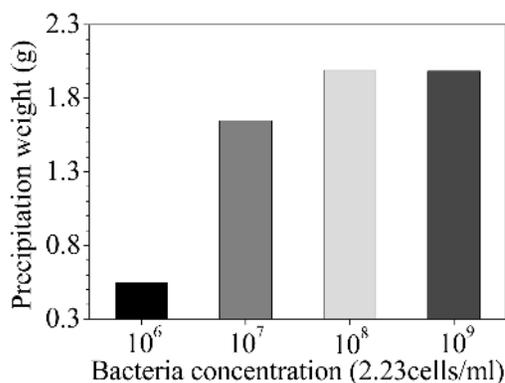


图4 微生物浓度对于改性效果的影响

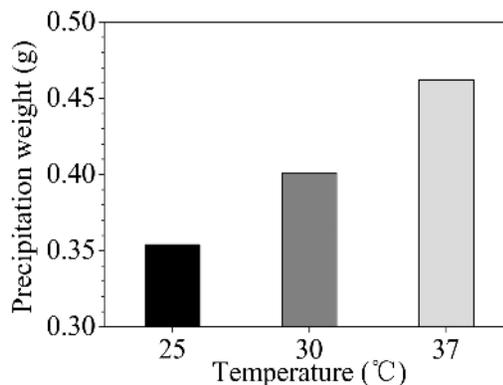


图5 温度对于改性效果的影响

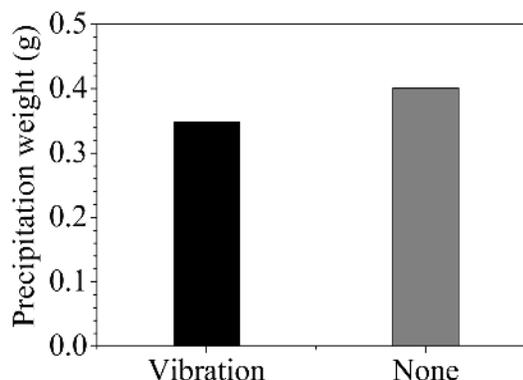


图6 振动对于改性效果的影响

从图2可知：随着pH升高，总体上产生的碳酸钙沉淀质量在上升；在pH=10.5时，达到最高。这与Qiu<sup>[18]</sup>的研究结果有所不同，其论文中指出，巴氏芽孢杆菌的最适培养环境是pH=9.5。分析pH=9.5~10.5的数据，其沉淀质量分别为0.505g、0.501g、0.527g，误差在5%左右，因此，笔者认为这可能是由于接种菌种部分特性不同导致。综合试验结果和文献建议，本试验选择pH=9.5作为最终试验使用的最适pH。

从图3可知：钙离子浓度上升后，碳酸钙沉淀质量增加，当钙离子浓度达到0.55mol/L时，沉淀质量达到最大值；随后随着钙离子浓度的增加，沉淀质量减少，说明钙离子对于菌体诱导生成沉淀具有一定的促进作用，但也具有饱和效应。所以，本试验选择0.55mol/L钙源浓度作为后续再生细骨料改性试验条件。

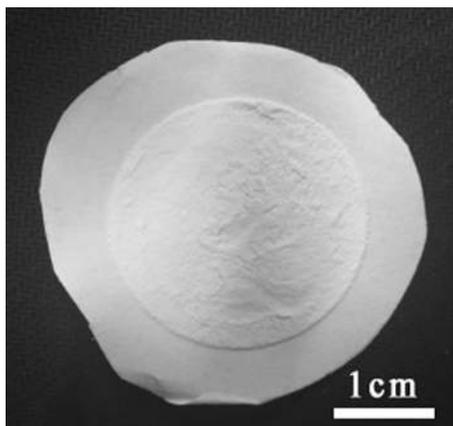
从图4可知：当细菌浓度在10<sup>8</sup>个/ml以下

时, 沉淀质量较少; 当细菌浓度达到  $10^8$  个/ml 时, 沉淀质量达到较大值; 之后随着细菌浓度的增加, 沉淀质量基本不再增加。由此, 本试验选择将细菌浓度控制在  $10^8$  个/ml 左右作为后续再生细骨料改性条件。

从图 5 可知: 随着温度的升高, 沉淀质量增加。由于诱导沉淀的本质是酶促反应推动化学平衡, 所以温度可以提高酶的化学活性, 从而更快地促进沉淀产生。但是由于增加温度会使得能耗更高, 所以在本试验中选择  $30^\circ\text{C}$  作为试验温度。

由图 6 可知: 在振动条件下, 沉淀质量较少。这可能是因为振动条件使得锥形瓶中不断得到氧气补充, 而本研究使用的巴氏芽孢杆菌属于兼性厌氧菌, 氧气可能会抑制其酶促反应的效率, 导致沉淀产量减少。

### 2.2.3 沉淀产物的 XRD 分析



(a) 附着于滤纸上的沉淀



(b) 锥形瓶内的沉淀

图 7 微生物诱导产生的沉淀

取试验中的沉淀, 见图 7, 对其进行 XRD 分析, 结果如图 8 所示, 对比数据库发现, 得到的沉淀产物与碳酸钙的方解石结晶类型最为相近。从图 8 可知, 沉淀的 XRD 分析波峰与数据库中的碳酸钙方解石晶体波峰基本一致, 可判定产生结晶沉淀主要为方解石晶体。存在小部分波峰不重合现象, 导致这种现象可能有两个原因: 一是, 沉淀培养基碱性较高, 在诱导产生碳酸钙晶体前, 已经有部分微溶的氢氧化钙晶体产生; 二是, 可能是在烘干过程中, 培养基中残留的化学成分, 影响了 XRD 结果。

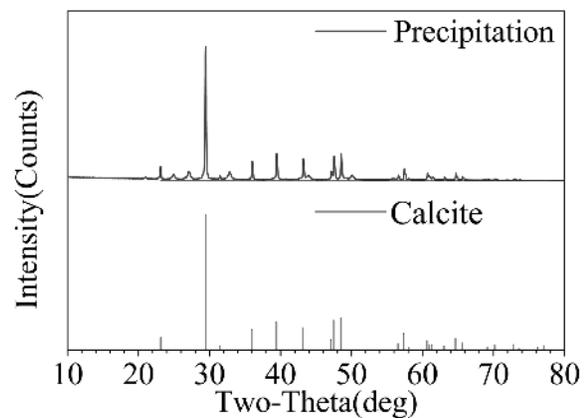


图 8 微生物诱导得到沉淀的 XRD 图

## 3 微生物改性再生细骨料试验研究

### 3.1 研究方案

#### 3.1.1 再生细骨料材料性能

本试验采用某企业提供的再生细骨料, 根据国家规范《GB/T25176-2010 混凝土和砂浆用再生骨料》及《GB/T14684-2011 建筑用砂》进行细骨料级配、表观密度、饱和面干吸水率测试。骨料颗粒级配, 见表 6。试验当天水温为  $20^\circ\text{C}$ , 测得再生细骨料的表观密度与饱和面干吸水率见表 7。从表 7 中, 可知本试验中的再生细骨料吸水率较高, 这是由于企业提供的再生细骨料未做除粉处理, 原材料含粉量较高导致。

表 6 再生细骨料 (RFA) 颗粒级配

颗粒尺寸 / $\mu\text{m}$	<150	150	300	600	1180	2360	4750	9500
质量/g	25.58	64.45	94.61	68.21	62.70	116.30	63.50	0

表 7 再生细骨料性能

	1st	2nd	均值
表观密度	2526 kg/m <sup>3</sup>	2541 kg/m <sup>3</sup>	2530 kg/m <sup>3</sup>
吸水率	25.2%	29.1%	27.2%

### 3.1.2 微生物改性细骨料试验

根据第 2 节的试验研究成果，微生物诱导沉淀的最适培养条件为：pH=9.5、温度=30℃、钙源浓度=0.55mol/L、细菌浓度=10<sup>8</sup>个/mL、不振动。采用上述试验条件培养得到的细菌对细骨料进行改性，并针对改性时间和改性方法等参数进行试验设计，见表 8。

表 8 改性骨料方法优化

Test no.	骨料质量 (g)	改性时间 (天)	搅拌
RFA <sub>1-1</sub>	100	3	No
RFA <sub>1-2</sub>	100	7	Yes
RFA <sub>1-3</sub>	100	7	No
RFA <sub>1-4</sub>	100	14	No

为了研究搅拌对改性效果的影响，对 RFA<sub>1-2</sub>组每隔 12 小时使用玻璃棒对培养液搅拌一次，每次搅拌将玻璃棒插入至容器底部，匀速搅拌 3~4 次使细骨料充分与培养液混合，然后继续静置沉淀，而 RFA<sub>1-3</sub>组作为对照组，持续静置沉淀。

### 3.1.3 再生细骨料改性效果分析试验

细骨料改性后，覆盖在再生细骨料表面的沉淀质量  $M_w$  依公式 (2) 计算：

$$M_w = M_{RFA-P} - M_{RFA} \quad (2)$$

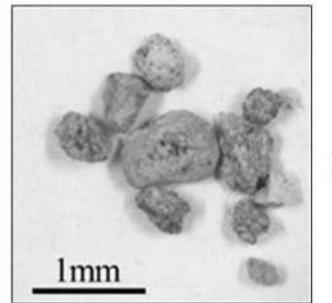
式中： $M_w$  为改性后覆盖在再生细骨料表面的沉淀的总质量； $M_{RFA-P}$  为改性后，饱和面干状态下的表面覆盖有沉淀的再生细骨料的总质量； $M_{RFA}$  为改性前，饱和面干状态下的再生细骨料的总质量。

根据国家规范《GB/T25176-2010 混凝土和砂浆用再生骨料》及《GB/T14684-2011 建筑用砂》进行改性后的再生细骨料的饱和面干吸水率测试，并与未改性再生细骨料进行对比分析。

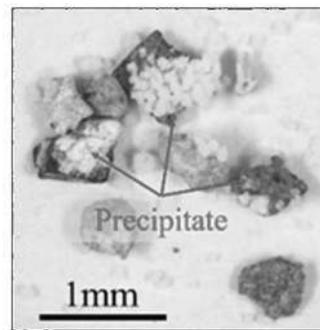
## 3.2 分析与讨论

### 3.2.1 微生物改性再生细骨料

没有经过改性处理的再生细骨料如图 9 (a) 所示。经过改性后的再生细骨料，在空气中风干后如图 9 (b) 所示。



(a) 未改性骨料



(b) 改性后骨料

图 9 改性前后骨料外观对比

在风干后的改性再生细骨料表面可观察到覆盖有白色的碳酸钙沉淀，且碳酸钙沉淀具有较好的粘结性能，可将分散的再生细骨料粘结在一起，可以提高其在混凝土中粘结能力。可见，微生物对再生细骨料具有一定的改性效果。

### 3.2.2 改性前后再生骨料性能对比

采用微生物诱导沉淀技术改性后的再生细骨料，测得改性后骨料质量变化和骨料性能，如表 9 所示。对比未改性的再生细骨料的性能变化，如图 10 -11 所示。

表 9 改性后骨料性能变化

Test no.	RFA <sub>1-1</sub>	RFA <sub>1-2</sub>	RFA <sub>1-3</sub>	RFA <sub>1-4</sub>
质量变化 (g)	0.77	2.18	4.74	3.73

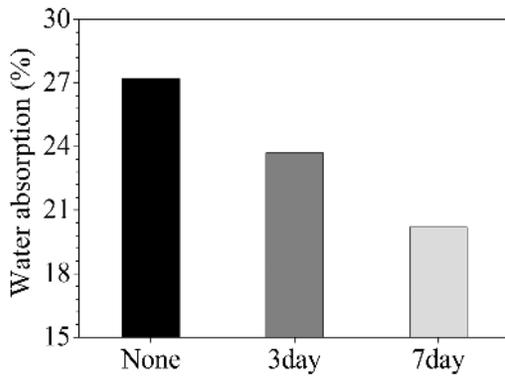


图 10 改性时间对吸水率的影响

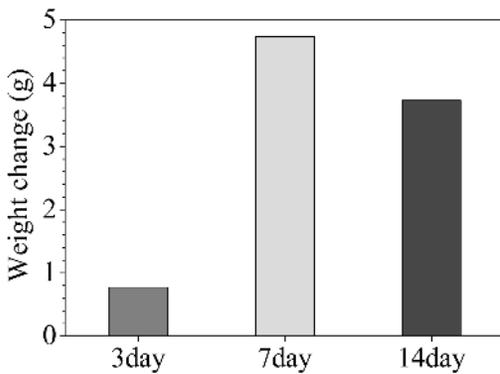


图 11 改性时间对质量变化的影响

从图 10 可知，将未改性的再生细骨料和经过不同时间改性后的再生细骨料进行性能对比，改性 3 天后骨料饱和面干吸水率减少了 12.9%；改性 7 天后骨料饱和面干吸水率减少了 25.7%。由此可见，微生物改性再生细骨料会降低其饱和面干吸水率。同时，改性 7 天后饱和面干吸水率的降低远大于改性 3 天后的饱和面干吸水率降低，证明了在本试验中经过 7 天的微生物改性，再生细骨料表面的孔洞有显著减少。

从表 9 可知，微生物对再生细骨料有一定的改性效果。在经过一段时间的改性后，再生细骨料的质量均有所增加。从图 11 可知，在本试验中，在改性时间为 7 天时，改性后的再生细骨料质量达到最大；而当改性时间为 14 天时，其质量减小，可见存在一个最优改性时间，这可能是由于微生物新陈代谢产生的酸性物质溶解了部分沉淀。最优改性时间尚待更多的试验研究。表 9 中的数据显示，搅拌降低了再生

细骨料的改性后的质量变化，其原因可能也是搅拌使得培养液中氧气含量提高，导致了微生物的酶活性受到抑制，这与 2.2.2 节中的试验现象相符。

#### 4 结论

本试验研究了微生物改性再生细骨料的改性方法和改性效果。通过试验比较了在不同的环境条件下，微生物产生碳酸钙沉淀效果，测试了改性再生骨料的性能变化。得到如下结果：

(1) 微生物可以诱导产生一定量的沉淀，且沉淀主要成分为方解石型碳酸钙晶体。

(2) 根据试验结果并考虑经济成本，本研究推荐巴氏芽孢杆菌最佳诱导沉淀培养条件为：pH = 9.5、细菌浓度 =  $10^8$  cells/ml、钙源浓度 = 0.55mol/L、温度 = 30℃、不振动。

(3) 微生物改性再生细骨料可以使细骨料表面覆盖具有一定粘结能力的碳酸钙沉淀，使得再生细骨料的饱和面干吸水率降低，起到改性效果；同时，在本试验中，微生物改性再生细骨料效果在 7 天时最佳，但由于试验设计测试点较少，最优的改性时间仍有待进一步研究。

#### 参考文献

- [1] Schandl H, Fischer-Kowalski M, West J, et al. Global Material Flows and Resource Productivity: Forty Years of Evidence [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2017.
- [2] 杨德志, 王栋民, 陈忠平, 杨金国. 大力发展建筑废渣再生建材是时代德呼唤——建筑废渣再生建材大发展之二 [C]. 西安: 第三届中国固废处理与生态材料学术与技术交流会, 2018: 5-7.
- [3] Hongru Zhang. Deterioration Mechanism of Recycled Aggregate Concrete (RAC) Based on Interface Parameters and the Application of RAC [D]. Zhejiang University, 2016.
- [4] Dimitriou G, Savva P, Petrou M. Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete [J]. *Construction & Building Materials*, 2018, 158: 228-235.
- [5] Shima H, Tateyashiki H, Matsuhashi R, Yoshida Y. An advanced concrete recycling technology and its applicability assessment through input - output analysis [J]. *Adv Concr Technol* 2005; 3 (1): 53 - 67.
- [6] LI Qiu-yi, LI Yun-xia, ZHU Chong-ji. The influence of a particle shape correcting technique in properties of recycled coarse aggregate [J]. *Materials Science and Technology*,

- 2005, 13 (6): 579-502.
- [7] Quattrone M, Angulo S C, John V M. Energy and CO<sub>2</sub> from high performance recycled aggregate production [J]. Resources Conservation & Recycling, 2014, 90 (7): 21-33.
- [8] S. C. Kou, C. S. Poon. Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates [J]. Cement & Concrete Composites, 2010, 32 (8): 649-654.
- [9] Hwang J P. Enhancing the durability properties of concrete containing recycled aggregate by the use of pozzolanic materials [J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2013, 17 (1): 155-163.
- [10] D. X. Xuan, B. J. Zhan, C. S. Poon. Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates [J]. Cement & Concrete Composites, 2016, 65: 67-74.
- [11] Zhan B. J., Poon C. S., Liu Q, et al. Experimental study on CO<sub>2</sub> curing for enhancement of recycled aggregate properties [J]. Construction and Building Materials, 2014, 67: 3-7.
- [12] Mukharjee B B, Barai S V. Influence of Nano-Silica on the properties of recycled aggregate concrete [J]. Construction & Building Materials, 2014, 55 (2): 29-37.
- [13] Mukharjee B B, Barai S V. Influence of incorporation of nano-silica and recycled aggregates on compressive strength and microstructure of concrete [J]. Construction & Building Materials, 2014, 71: 570-578.
- [14] Zhang H, Zhao Y, Meng T, et al. The modification effects of a nano-silica slurry on microstructure, strength, and strain development of recycled aggregate concrete applied in an enlarged structural test [J]. Construction & Building Materials, 2015, 95: 721-735.
- [15] Jonkers H M, Thijssen A, Muyzer G, et al. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete [J]. Ecological Engineering, 2010, 36 (2): 230-235.
- [16] Stocks-Fischer S, Galinat J K, Bang S S. Microbiological precipitation of CaCO<sub>3</sub> [J]. SOIL BIOLOGY & BIOCHEMISTRY. 1999, 31 (11): 1563-1571.
- [17] Chen H, Qian C, Huang H. Self-healing cementitious materials based on bacteria and nutrients immobilized respectively [J]. Construction & Building Materials, 2016, 126: 297-303.
- [18] Ehrlich H L. Geomicrobiology: its significance for geology [J]. EARTH-SCIENCE REVIEWS. 1998, 45 (1-2): 45-60.
- [19] Peckmann J, Paul J, Thiel V. Bacterially mediated formation of diagenetic aragonite and native sulfur in Zechstein carbonates (Upper Permian, Central Germany) [J]. SEDIMENTARY GEOLOGY. 1999, 126 (1-4): 205-222.
- [20] Qiu J, Tng D Q S, Yang E. Surface treatment of recycled concrete aggregates through microbial carbonate precipitation [J]. Construction and Building Materials. 2014, 57: 144-150.
- [21] Grabiec A M, Klama J, Zawal D, et al. Modification of recycled concrete aggregate by calcium carbonate biodeposition [J]. Construction & Building Materials, 2012, 34 (34): 145-150.
- [22] García-González J, Wang J, Belie N D, et al. Quality improvement of mixed and ceramic recycled aggregates by biodeposition of calcium carbonate [J]. Construction & Building Materials, 2017, 154: 1015 - 1023.
- [23] Wang J, Vandevyvere B, Vanhessche S, et al. Microbial carbonate precipitation for the improvement of quality of recycled aggregates [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 156.
- [24] Y. F. Xu. Experimental and numerical simulation study on material and beam behaviors of concrete made with manufactured sand. [D]. Zhejiang University, 2017.