

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2021.12.014

# 不同载体载入微生物 对混凝土修复性能的影响研究<sup>①</sup>

戴煜伦, 谢春燕, 符超, 柳京, 吴达科

西南大学 工程技术学院, 重庆 400715

**摘要:** 本文采用陶粒、活性炭颗粒、硅藻土 3 种多孔材料作为微生物载体, 从力学性能和耐久性方面对带裂缝的微生物混凝土的自修复进行了研究并筛选出性能更好的载体. 结果表明: 陶粒提高混凝土性能最有效, 抗压与抗折强度分别提高了 9.14%, 17.19%, 活性炭对混凝土性能提升一般, 抗压与抗折强度分别提升了 5.3%, 9.43%, 而硅藻土对混凝土力学性能影响较小, 抗压与抗折强度分别提升了 4.22%, 5.47%; 3 种载体均降低了混凝土的吸水率, 均提高了混凝土耐久性, 同时固菌载体使得混凝土吸水率大幅度降低; 3 种载体中陶粒修复性能最佳, 宜用作混凝土裂缝修复.

**关键词:** 载体; 微生物; 裂缝; 混凝土; 陶粒; 硅藻土; 活性炭

中图分类号: TU502

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2021)12-0095-06

## On Influence of Microorganism Loaded with Different Carriers on Concrete Repair Performance

DAI Yulun, XIE Chunyan, FU Chao, LIU Jing, WU Dake

College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

**Abstract:** In this paper, three kinds of porous materials, ceramsite, activated carbon particles and diatomite, were used as microbial carriers to study the self-repair of microbial concrete with cracks from the aspects of mechanical properties and durability, and the carriers with better performance were screened out. The results show that the ceramsite is the most effective to improve the concrete properties, and the compressive strength and bending strength increased by 9.14% and 17.19%, respectively. Activated carbon has a general improvement of concrete properties, the compressive strength and bending strength increased by 5.3% and 9.43%, respectively. Diatomite has little effect on the mechanical properties of concrete, the compressive strength and bending strength increased by 4.22% and 5.47%, respectively. The three kinds of carriers all reduce the water absorption of concrete and improve the durability of concrete, while the sol-

① 收稿日期: 2021-05-28

基金项目: 中央高校基本科研业务费(XDJK2018C038, XDJK2013B014); 重庆市技术创新与应用发展项目(cstc2019jcsx-gksbX0158).

作者简介: 戴煜伦, 硕士研究生, 主要从事混凝土结构研究.

通信作者: 吴达科, 博士, 副教授.

id bacteria carrier makes the water absorption of concrete greatly reduce. Among the three carriers, ceramsite has the best repair performance and is suitable for the repair of concrete cracks.

**Key words:** carrier; microbial ;cracks; concrete; ceramsite; Diatomaceous earth; activated carbon

混凝土结构或构件在制备及服役过程中不可避免地会出现微裂缝,更易受到水与其他化学物质的腐蚀,导致耐久性低、寿命周期短等问题,因此对混凝土修复有重要意义,而微生物自修复的提出很好地解决了这一问题.研究表明<sup>[1-2]</sup>,利用微生物诱导碳酸钙矿化技术,通过内掺微生物可实现混凝土缺陷的自修复,提高混凝土耐久性. Dick 等<sup>[3]</sup>选择合适的芽孢杆菌,可在开裂的石灰石表面沉积出碳酸钙,大大降低了石灰石表面毛细吸水系数; Varennyam 等<sup>[4]</sup>用巨芽孢杆菌 ATCC14581 作为内掺微生物研究其对混凝土抗压强度和抗渗性能的影响,发现由于微生物诱导碳酸钙的沉积,混凝土抗渗及抗压强度均明显增加; Wang 等<sup>[5]</sup>采用微胶囊应用于装载球形芽孢杆菌孢子修复混凝土裂缝,发现含有细菌修复剂样本的裂缝修复率达到 48%~80%; 王剑云等<sup>[6]</sup>将固载菌株加入水泥基材料中,发现水泥基材料的抗压、抗折强度均提高,孔结构更细化. Wasim 等<sup>[7]</sup>将枯草芽孢杆菌作为内掺微生物研究混凝土裂缝的自修复,发现微生物诱导矿化碳酸钙产生使内部结构更紧密,从而使得混凝土抗压强度提高. 载体作为储存并维持细菌活性的场所,其性质对微生物混凝土的修复性能至关重要<sup>[8]</sup>, 王世儒<sup>[9]</sup>通过研究硅藻土对高性能再生混凝土性能的影响,发现了 3% 体积掺量的硅藻土对修复混凝土抗压强度效果最佳. 徐晶等<sup>[10]</sup>采用多孔陶粒作为微生物载体掺入有裂缝的混凝土,发现其抗压强度恢复率达到 63%. 目前市面上应用较多的材料有陶粒、活性炭颗粒、硅藻土,因为这些多孔材料本身具有一定的吸附性,内部的孔隙为微生物提供了生存场所,使得微生物能够在混凝土内部高 pH、小孔径的条件下进行矿化反应.

本文以陶粒、活性炭颗粒、硅藻土 3 种微生物载体为研究对象,掺入带裂缝混凝土中并从力学性能和耐久性方面研究了微生物混凝土的自修复性能.

## 1 试验材料与方法

### 1.1 菌种培养

研究选用菌种为巴氏芽孢杆菌 ATCC11859,培养基成分如下:经高压蒸汽灭菌锅 101 kPa、121 °C 灭菌 30 min 后的超纯水 400 mL、胰蛋白胍 6 g、大豆蛋白胍 2 g、NaCl 2 g、尿素 20 g,用 2 mol/L 的 NaOH 溶液和 HCl 溶液将培养基 pH 调至 7.5 左右,再将巴氏芽孢杆菌接种到灭菌后的培养基中,并置于振荡箱中以 30 °C, 125 r/min 转速恒温培养 48 h 后得到菌液.

### 1.2 试件制作

本试验采用的原材料有:

- 1) P·O·42.5 级普通硅酸盐水泥,基本物理性质如表 1;
- 2) 石子:粒径为 5~31 mm,参配比例 15%,压碎值 19.8%,含泥量 0.3%;
- 3) 骨料:重庆地区普通中砂,含泥量 1.7%,系度模数为 2.7;
- 4) 载体:市售小粒径花卉多孔陶粒砂(粒径范围 0.5~1 mm)、活性炭颗粒 AR20-50 目、硅藻土;
- 5) 减水剂:聚羧酸系高性能减水剂,减水率为 37%.

依据规范<sup>[11]</sup>,抗折试件尺寸选用 40 mm×40 mm×160 mm,抗压、吸水率试件尺寸选用 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm.

表 1 普通硅酸盐水泥各项指标

密度 (kg·m <sup>-3</sup> )	烧失量 /%	初凝时间 /min	终凝时间 /min	28 d 抗压强度 /MPa	28 d 抗折强度 /MPa
3100	2.41	180	260	47.3	8.1

载体对比试验选择掺入载体的量为 5%, 试件成型配合比如表 2 所示, 将清洗烘干后的载体放入菌液中浸泡 24 h 后掺入到砂浆中, 试件通过钢板制造裂缝, 裂缝尺寸为宽 0.5 mm、深 20 mm, 待混凝土试件静置成型 24h 后脱模, 拔掉钢板, 将其放入 20℃ 且湿度大于 90% 的混凝土标准养护室养护 28 d.

### 1.3 抗压强度

采用 YAD-2000 微机控制全自动压力试验机, 取出经 7 d, 28 d 养护的试件, 将试件放在压力试验机的压板之间, 连续均匀地加荷(加荷速度为 0.5~1.5 kN/s), 直至试件破坏, 记录破坏荷载<sup>[12]</sup>. 按式(1)计算立方体抗压强度  $f_{m, cu}$ <sup>[13]</sup> 为

$$f_{m, cu} = \frac{N_u}{A} \quad (1)$$

式中:  $N_u$ —试件的破坏荷载(N),  $A$ —试件的受压面积 ( $\text{mm}^2$ ).

表 2 含裂缝的水泥砂浆试件配合比

编号	水 /g	水泥 /g	砂 /g	硅藻土 /g	活性炭 颗粒/g	陶粒 /g	菌 /mL	底物 /g
I	250	500	1 500	/	/	/	/	10
II	250	500	1 500	/	/	/	100	10
III	250	500	1 500	25	/	/	/	10
IV	250	500	1 500	25	/	/	100	10
V	250	500	1 500	/	25	/	/	10
VI	250	500	1 500	/	25	/	100	10
VII	250	500	1 500	/	/	25	/	10
VIII	250	500	1 500	/	/	25	100	10

### 1.4 抗折强度

用湿布擦去试件表面的水分和砂粒, 将试件放入夹具内, 使试件成型时的侧面与夹具的圆柱接触, 调整夹具, 使杠杆在试件折断时的位置尽量接近平衡位置; 以  $50 \pm 10$  N/s 的速度进行加荷, 直到试件被折断, 记录破坏荷载  $F_t$ . 按式(2)计算试件的抗折强度  $R_f$  为

$$R_f = \frac{1.5F_t L}{b^3} \quad (2)$$

式中:  $F_t$  为破坏荷载(N),  $L$  为支撑圆柱之间的距离(mm),  $b$  为棱柱体正方形截面的边长(mm).

### 1.5 吸水率

样品先在烘箱中 40℃ 烘干至恒质量, 在样品表面涂防水涂料, 只在有裂缝的地方留 40 mm×70.7 mm 的区域不涂, 称试件质量为  $m_0$ ; 将试件放入恒温水箱中, 水深  $20 \pm 2$  mm, 底面朝下, 在 1, 2, 4, 8, 12, 24, 48, 72, 120, 240, 360 h 时间间隔内, 将样品取出用湿毛巾擦拭表面称质量, 称试件质量为  $m_1$ . 按式(3)计算吸水系数  $W$  为

$$W = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \quad (3)$$

式中:  $m_0$ —初始质量(g),  $m_1$ —浸水后试件质量(g).

## 2 结果与讨论

### 2.1 抗压强度

将 3 种不同的载体硅藻土、陶粒、活性炭颗粒分别掺入试样, 所得的试件 7 d 和 28 d 的抗压强度如图 1 所示. 只掺活性炭颗粒、陶粒试件的抗压强度明显比不掺载体的对照组抗压强度高, 而掺硅藻土的试件抗压强度与对照试件相差不大, 3 种载体抗压强度值从大到小依次为陶粒、活性炭颗粒、硅藻土. 将活性炭颗粒少量掺入试件中使得砂浆内部孔隙度降低, 整体强度有一定程度的提高, 但总孔隙度随活性炭颗粒掺入量的增加而增加, 一般最优比为活性炭颗粒占细骨料质量的 1%~2%<sup>[14]</sup>; 当陶粒掺量较少时, 陶粒本身的

多孔结构具有一定的吸水作用,陶粒周围的水灰比会有所下降,陶粒周围水泥砂浆的强度会升高,同时陶粒与水泥砂浆之间的粘结强度增加,从而使试件整体抗压强度增加<sup>[15]</sup>; Degirmenci 等<sup>[16]</sup>的实验显示含有 5% 水泥质量的硅藻土的含量最适宜,随后硅藻土含量增加,试件的抗压强度降低. 图 1 中硅藻土的抗压强度值没有明显变化,主要是硅藻土的掺入适宜,若掺入量过多,水泥细度增加,水泥的需水量将增加,砂浆内部孔隙率增加,强度降低. 3 种固菌载体掺入混凝土修复裂缝前后的抗压强度如表 3, 3 种固菌载体掺入到混凝土中对混凝土裂缝进行修复后抗压强度有所提升,其中,

硅藻土提升 4.22%, 活性炭颗粒提升 5.3%, 陶粒提升 9.14%, 抗压强度的提高,意味着载体能够保护细菌在混凝土环境中正常存活,细菌能够正常反应;抗压强度修复率不高,主要是因为载体掺入量较少,载于载体中的细菌量少,使得矿化反应不能在裂缝内彻底进行. 从图 1 可以看出,直接在混凝土中掺菌的试件,7 d 抗压强度显著提高,28 d 抗压强度提升不大,主要是因为细菌直接掺入到混凝土中,严苛的环境使得细菌活性降低,矿化反应不明显,强度提升不显著.

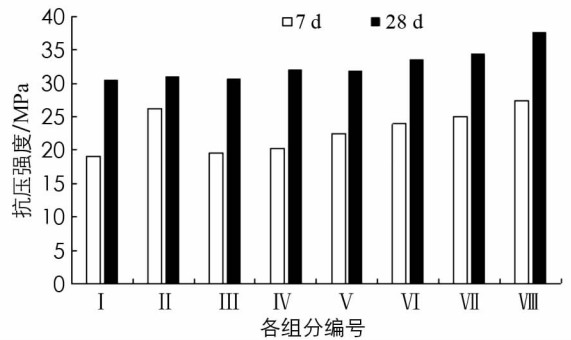


图 1 各组分试件 7 d 和 28 d 的抗压强度

表 3 试件的 28 d 抗压强度修复率

载体	修复前/MPa	修复后/MPa	修复率/%
硅藻土	30.76	32.06	4.22
活性炭颗粒	31.89	33.58	5.3
陶粒	34.56	37.72	9.14

## 2.2 抗折强度

只掺细菌的试件和分别只掺硅藻土、陶粒、活性炭颗粒的试件 7 d, 28 d 的抗折强度如表 4 所示. 其中, 硅藻土抗折强度与对照试件相差不大, 活性炭颗粒、陶粒抗折强度比对照试件强度高, 活性炭颗粒 7 d, 28 d 抗折强度与原试件相比分别提升了 22.3%, 19.4%, 陶粒 7 d, 28 d 抗折强度分别提升了 45.3%, 28.7%. 与图 1 抗压强度对比, 试件的抗折强度变化趋势与抗压强度一致. 根据表 5, 3 种固菌载体的掺入也使修复后的混凝土抗折强度有所提升, 与表 3 对比, 可以看出各组试件的抗压强度修复率与抗折强度修复率有所对应, 各载体的抗压强度修复率与抗折强度修复率基本一致. 通过两种强度的对比试验结果, 表明试验结论的准确性.

表 4 试件的抗折强度

编号	7d/MPa	28d/MPa
I	3.09	5.15
III	3.28	5.3
V	3.78	6.15
VII	4.49	6.63

表 5 试件的 28 d 抗折强度修复率

载体	修复前/MPa	修复后/MPa	修复率/%
硅藻土	5.3	5.59	5.47
活性炭颗粒	6.15	6.73	9.43
陶粒	6.63	7.77	17.19

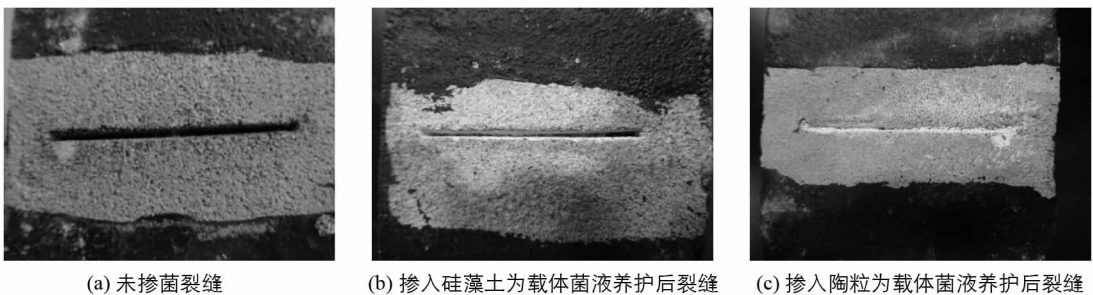
## 2.3 吸水率

图 2 为各组试件吸水率曲线. 普遍认为, 吸水率与抗渗透性有直接联系, 吸水率越低, 混凝土的抗渗透性越好, 其耐久性也越好. 由图 2 可知, 试件吸水率由大到小编号依次为 I, III, V, IV, VI, VII, II, VIII, 同

时明显可以看出, 加入 3 种载体的试件的吸水率由大到小依次为硅藻土、活性炭颗粒、陶粒. 其中, 在 96 h 时, 未掺菌的硅藻土、活性炭颗粒、陶粒吸水率相对于对照试件, 分别降低了 29%, 33%, 45%, 分析其原因, 陶粒和活性炭颗粒的掺入使得砂浆与载体粘结, 导致孔隙度降低, 从而使得吸水率降低. 掺入菌种的硅藻土、活性炭颗粒、陶粒在 96 h 时, 相对于原试件吸水率分别降低了 38%, 40%, 49%, 说明了固载菌种和营养物质, 使芽孢萌发为活菌, 通过代谢矿化作用产生的碳酸钙沉淀修复了混凝土裂缝, 使得材料的密实性提高, 吸水率降低, 混凝土的耐久性提高.

## 2.4 裂缝修复情况

图 3(a)可见未掺菌的试件自修复效果不显著, 在养护后表面裂缝没有明显变化. 图 3(b)为掺入硅藻土载体的菌液养护完成后, 裂缝稍深处被少量  $\text{CaCO}_3$  沉积填充. 图 3(c)为掺入陶粒载体的菌液养护完成后, 裂缝表面被大量  $\text{CaCO}_3$  沉积填充. 由此说明载体作为储存并维持细菌活性的场所, 其性质对微生物混凝土的修复性能至关重要, 在本次试验中, 陶粒作为载体的修复效果最佳.



(a) 未掺菌裂缝

(b) 掺入硅藻土为载体菌液养护后裂缝

(c) 掺入陶粒为载体菌液养护后裂缝

图 3 部分试件裂缝修复情况

## 3 结 论

- 1) 载体作为储存并维持细菌活性的场所, 其性质对微生物混凝土的修复性能至关重要, 使用了载体的微生物组自修复性能更好;
- 2) 3 种载体降低了混凝土的吸水率, 固菌载体提高了混凝土的密实度, 使得吸水率大幅度降低, 提高了混凝土的耐久性, 陶粒作为载体在吸水率方面效果最佳;
- 3) 利用微生物诱导  $\text{CaCO}_3$  矿化技术, 通过内掺微生物可实现混凝土裂缝的自修复, 恢复混凝土性能;
- 4) 根据试验结果分析, 陶粒提高混凝土性能最有效, 抗压与抗折强度分别提升了 9.14%, 17.19%; 活性炭对混凝土性能提升一般, 抗压与抗折强度分别提升了 5.3%, 9.43%; 而硅藻土对混凝土力学性能影响较小, 抗压与抗折强度分别提升了 4.22%, 5.47%; 陶粒在 3 种载体中修复性能最好, 可优先应用到混凝土裂缝修复.

受试验材料和条件限制, 本文未研究出陶粒的最优掺量, 后续可对掺量范围进行深入研究.

## 参考文献:

- [1] 张 鹏, 冯竞竞, 陈 伟, 等. 混凝土损伤自修复技术的研究与进展 [J]. 材料导报, 2018, 32(19): 3375-3386.
- [2] 钱春香, 李瑞阳, 潘庆峰, 等. 混凝土裂缝的微生物自修复效果 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(2): 360-364.

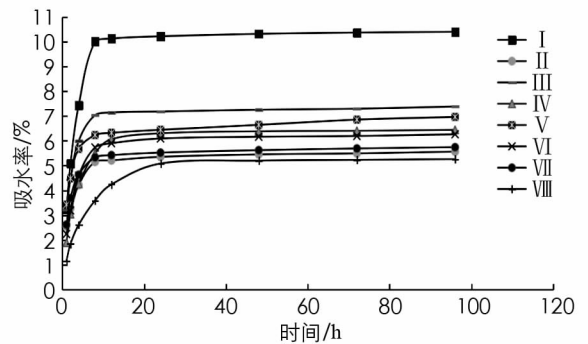


图 2 各组分试件的吸水率曲线

- [3] DICK J, WINDT W, GRAEF B, et al. Bio-Deposition of a Calcium Carbonate Layer on Degraded Limestone by Bacillus Species [J]. Biodegradation, 2006, 17(4): 357-367.
- [4] VARENYAM A, PAN X L. Improved Strength and Durability of Fly Ash-Amended Concrete by Microbial Calcite Precipitation [J]. Ecological Engineering, 2011, 37(4): 554-559.
- [5] WANG J Y, SNOECK D, VLIERBERGHE S V, et al. Application of Hydrogel Encapsulated Carbonate Precipitating Bacteria for Approaching a Realistic Self-Healing in Concrete [J]. Construction and Building Materials, 2014, 68: 110-119.
- [6] 王剑云, 钱春香, 王瑞兴, 等. 海藻酸钠固载菌株在水泥基材料表面防护中的应用研究 [J]. 功能材料, 2009, 40(2): 348-351.
- [7] WASIM K, MUHAMMAD B E. Crack Healing in Concrete Using Various Bio Influenced Self-Healing Techniques [J]. Construction and Building Materials, 2016, 102: 349-357.
- [8] 吕宣惠. 不同基质载体表面微生物种群特性分析 [J]. 价值工程, 2019, 38(5): 238-240.
- [9] 王世儒. 煅烧硅藻土对高性能再生混凝土性能的影响研究 [J]. 建材发展导向, 2016, 14(16): 52-54.
- [10] 徐 晶, 王彬彬. 陶粒负载微生物的混凝土开裂自修复研究 [J]. 材料导报, 2017, 31(14): 127-131.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 砌筑砂浆配合比设计规程: JGJ/T 98-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑砂浆基本性能试验方法标准: JGJ/T 70-2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [13] 杨兴据, 王森佩, 唐诗宇, 等. 无机-有机改性土物理力学性能试验研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2018, 43(10): 80-86.
- [14] 思亚余, 马芹永, 白 梅, 等. 活性炭储能混凝土力学性能试验与分析 [J]. 煤炭技术, 2019, 38(10): 34-37.
- [15] 王宇峰. 陶粒水泥混凝土经济型配合比 [J]. 山西交通科技, 2020(3): 32-43.
- [16] DEGIRMENCI N, YILMAZ A. Use of Diatomite as Partial Replacement for Portland Cement in Cement Mortars [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1): 284-288.

责任编辑 汤振金