DOI:10. 19431/j. cnki. 1673-0062. 2022. 01. 002

混凝土裂缝微生物修复技术的研究现状与进展

陈业伟[1], 郑仲剑[2], 裴炎炎[2], 汪岩渠[2], 吴梦帆[2]

(1. 中建四局建设发展有限公司,福建 厦门 361006;2. 福建工程学院 生态环境与城市建设学院,福建 福州 350118)

摘　要:文章回顾了近些年混凝土裂缝微生物修复技术的国内外研究现状,探讨了修复裂缝的微生物及其修复机理,阐述了微生物修复裂缝的两种方式,分析总结了修复过程的内外影响因素,给出了裂缝的修复质量评价方法,展望了微生物技术在修复混凝土裂缝的发展前景。

关键词:混凝土裂缝;微生物;修复;影响因素;修复评价

中图分类号:TU755.7　　**文献标志码**:A

文章编号:1673-0062(2022)01-0007-08　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Research Status and Progress of Microbial Repair Technology for Concrete Cracks

CHEN Yewei[1*], ZHENG Zhongjian[2], PEI Yanyan[2], WANG Yanqu[2], WU Mengfan[2]

(1. China Construction Fourth Engineering Bureau Construction Development Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361006, China;2. School of Ecological Environment and Urban Construction, Fujian University of Technology, Fuzhou, Fujian 350118, China)

Abstract:This article reviews the current domestic and foreign research status of microbial repair technology for concrete cracks in recent years. Among them, the article first discusses the microbes and repair mechanisms of crack repair, and secondly, explains two ways of repairing cracks by microorganisms. Finally, it analyzes and summarizes the internal and external influencing factors of the repair process, and gives the repair quality evaluation method. At the end of the article, we look forward to the development prospects of microbiological technology in repairing concrete cracks.

key words:concrete cracks;microorganisms;repair;influencing factors;repair evaluation

---

收稿日期:2021-08-03

基金项目:国家自然科学基金项目(面上)(52070043)

作者简介:陈业伟(1981—),男,高级工程师,主要从事绿色建筑、混凝土修复等方面的研究。E-mail:chengyewei@cscec.com

0　引　言

混凝土因为具有良好的抗压能力和耐久性,被广泛应用于各类建筑工程中。然而混凝土在凝结硬化的过程中会因温湿度变化而引起不均匀收缩或膨胀,以及在服役期间由外荷载引起材料内应力,这些都容易使混凝土产生裂缝[1]。裂缝形成后,有害的液体和气体可以通过裂缝腐蚀水泥基体并造成损坏,所以裂缝会降低混凝土的使用寿命。然而传统的裂缝修复方法如表面处理法、填充法以及灌浆法等,对修复混凝土内部微裂缝具有一定的局限性,另外修复过程所使用的一些化学用品可能对环境有害。

微生物诱导碳酸钙沉淀(microbial-induced calcite precipitation,MICP)技术在近些年是国外土木工程领域的研究热点,具有生产能耗低,低碳环保等优势,逐渐引起国内学者的注意。混凝土裂缝微生物修复技术是基于 MICP 技术原理,利用微生物沉积出碳酸钙以实现填充修复裂缝的目的。相比于其他修复方式,修复过程不会对环境造成伤害,在未来具有很大的潜力。因此,研究修复混凝土裂缝的微生物、修复机制、影响修复过程的因素、修复方式,以及裂缝修复效果评价,对提高混凝土裂缝修复效果,延长混凝土的使用年限具有重要意义。

1　微生物修复裂缝机理研究

目前,已发现能在自然条件下参与修复裂缝的微生物有光合生物、硫酸盐还原菌、硝酸盐还原菌和脲酶菌。目前,利用微生物修复裂缝主要有两种方式:一种是先配置修复菌液和修复底物,后将混凝土浸泡在修复菌液中,覆膜养护数天;另外一种将微生物和修复底物负载在载体上,将载体与骨料一同拌和掺入混凝土中,裂缝开展后,空气和水分穿过裂缝“激活”微生物,微生物诱导矿化出碳酸钙填充修复裂缝。修复过程涉及复杂的生物化学反应,微生物本身性质以及修复过程易受 pH 值、钙离子和其他因素影响,这导致裂缝的修复质量不同,选择裂缝抗水渗透率以及一些化学表征手段可以帮助评价裂缝质量。

1.1　修复裂缝微生物

脲酶能催化降解尿素产生碳酸根离子,为碳酸钙的沉积创造了条件。不少学者发现诸如巴氏芽孢八叠球菌、球形芽孢球菌以及枯草芽孢杆菌等微生物,能够产生脲酶,混凝土经脲酶微生物修复后的效果见表 1。裴迪等[2]分析总结了不同的微生物所分泌的脲酶活性,发现巴氏芽孢杆菌的米氏常数 K_m 值在 40 ~ 130 mmol/L 范围,催化降解尿素能力明显高于其他微生物所分泌的脲酶。另外由于混凝土主要成分为氢氧化钙,这使得内部环境不仅密闭且呈高碱性,所以采用的微生物生命力旺盛,且具有足够的耐碱能力。研究发现,巴氏芽孢杆菌不仅可以在厌氧环境下产生脲酶,而且耐受碱性,这为高效修复裂缝提供了微生物选择。然而,氨气的溢出是该菌修复过程中的一个弊端,经过学者研究发现,在没有脲酶的情况下,其他一些微生物也可修复裂缝。

表 1　微生物修复后混凝土性能变化

Table 1　Changes of concrete properties after microbial repair

序号	微生物种类	修复后性能(28 d)
1	巴氏芽孢八叠球菌	抗压强度提升 33%,透水性下降 40%
2	球形芽孢杆菌	抗压强度提升 51%
3	枯草芽孢杆菌	抗压强度提升 23%
4	大肠杆菌	抗压强度提升 22.62%
5	葡萄球菌	抗压强度提升 19.26%

张家广等[3]将好氧型的科氏芽孢杆菌固定在膨胀珍珠岩上,养护 28 d 后发现,宽度 1.22 mm 以下的裂缝被修复。*T. reesei.* (*ATCC*13631)是一种寄生于植物的真菌,X. F. Wang 在植株上将其提取出,并用作修复剂置于混凝土中,发现耐碱性强于细菌,而且不会产生有害物质[4]。另外,也有研究发现,蓝藻可在光合作用中吸收二氧化碳,在胞内转化成碳酸根离子[5]。根据这一特点,将蓝藻配置成修复液,覆膜养护混凝土试件,并给予自然光照射。实验结果表明蓝藻会诱导沉积出与水泥基相容性极佳的方解石型碳酸钙。

寻找能耐受混凝土的高碱性、生命力旺盛、存活时间长、诱导矿化效率高、修复过程无有害物质的环境友好型微生物是接下来的一个研究方向。此外,如若需将微生物固定在载体上,微生物也应具备载负性等优点。

1.2　微生物修复机理

根据相关研究,修复机理可分为两种,一种是由厌氧微生物主导的酶化反应,即厌氧微生物借助自身分泌产生某种特定的酶,催化分解底物,促进裂缝修复。比如巴氏芽孢菌可在厌氧条件下,

利用自身产生的脲酶将尿素水解成 NH_4^+ 和 CO_3^{2-},CO_3^{2-} 与螯合在修复菌细胞壁的 Ca^{2+} 沉积,形成方解石型碳酸钙。修复过程中关键一步在于脲酶催化降解尿素,环境中高浓度的尿素分子顺浓度梯度穿过细胞膜进入胞内,在尿素水解酶的作用下发生水解反应。水解反应中的物质转化过程可分成两步:第一步,尿素($CO(NH_2)_2$)经脲酶的催化下,水解成氨(NH_3)和氨基甲酸酯(NH_2COOH);第二步,氨基甲酸酯(NH_2COOH)自发水解成氨(NH_3)和碳酸(H_2CO_3)(式(1)~(2))。胞内的 pH 值因氨的形成而上升,使得碳酸根离子被电离出。另外,巴氏菌特有的胞外高密度负电荷吸引聚集了大量的钙离子,在阴阳离子的静电作用以及碱性条件下,以细胞为成核位点,沉积出碳酸钙晶体(式(3)~(4))。另一种则是由好氧微生物主导的呼吸作用的裂缝修复,即微生物通过好氧呼吸释放二氧化碳,与胞外游离的钙离子结合出碳酸钙。目前研究发现一些好氧微生物可分解某些有机碳源(乳酸钙、甲酸钙)成二氧化碳,见式(5)~(6),以及另一类好氧微生物如产碳酸酐酶菌则直接捕获空气中的二氧化碳,矿化出碳酸钙。

$$CO(NH_2)_2+H_2O \xrightarrow{\text{脲酶}} NH_3+NH_2COOH \quad (1)$$

$$NH_2COOH+H_2O \longrightarrow NH_3+H_2CO_3 \quad (2)$$

$$H_2CO_3 \longrightarrow 2H^++CO_3^{2-} \quad (3)$$

$$CO_3^{2-}+Ca^{2+} \longrightarrow CaCO_3 \quad (4)$$

$$CaC_6H_{10}O_6+6O_2 \longrightarrow CaCO_3+5CO_2+5H_2O \quad (5)$$

$$Ca(CHO_2)_2+O_2+Ca(OH)_2 \longrightarrow 2CaCO_3+2H_2O \quad (6)$$

混凝土内部高度缺氧,经过学者的筛选研究,厌氧菌属中巴氏芽孢杆菌显示出极佳的耐受性。经过比选,发现巴氏芽孢菌在以尿素和氯化钙为底物的情况,诱导矿化效率高[6],这提升了碳酸钙沉积速度,缩短了裂缝的修复周期,另外好氧菌在代谢过程不产生氨气,在将来的研究中具有很大的潜力。

2　不同环境对微生物修复机制的影响分析

生物的诱导矿化沉积碳酸钙是生物化学过程,作为修复主体——微生物受外界影响较大,研究影响微生物矿化的内外因素对裂缝修复效果有着直接的意义。大量研究表明,影响微生物诱导矿化沉积的主要因素是裂缝处的 pH 值和钙离子浓度等[7-8]。影响因素分析见图 1[8]。

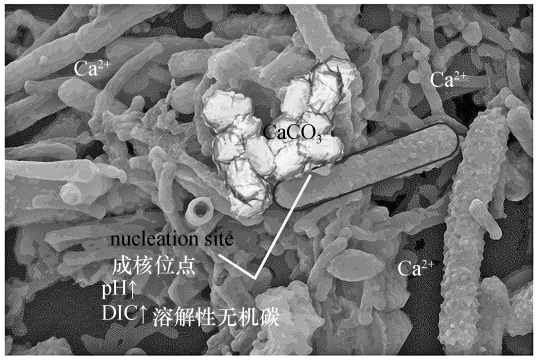


图 1　影响裂缝修复因素分析

Fig. 1　Analysis of factors affecting crack repair

2.1　pH 值

水泥等胶凝材料水化时会产生大量 $Ca(OH)_2$,导致混凝土内部环境是高度碱性的,pH 值高达 12~13[9],而环境中的水分会将裂缝处的酸碱度稀释至 9 到 11 之间。混凝土裂缝内部的碱性环境对修复裂缝的微生物活性影响最大,包括酶活性、繁殖率以及芽孢萌发率等。经过严格筛选,发现脲酶菌属于嗜碱菌,在碱性环境下其细胞活性较高,另外在水解尿素的过程中产出氨气,促使环境水溶液的酸碱度上升,直接加速碳酸钙晶体沉积。有前人配置巴氏芽孢杆菌 *ATCC*11859 菌液修复裂缝,发现杆菌在 pH 为 9 时所分泌的脲酶活性最佳。如图 2 所示[10],当 pH 值升至 13 时,尿素的水解效率下降了 75%,这导致碳酸钙沉积速度下降。有报道显示,若修复菌以芽孢形态掺入混凝土,这对于微生物存活率的提升是一个很重要的手段,而其中 pH 值则是直接影响了芽孢的萌发率。罗顺等[11]在单因素实验中测定了混凝土自修复菌 *Bacillus sp.* 芽孢在不同 pH 条件下的萌发率,结果显示,较适宜的 pH 值在 10 左右,萌发率最高可达 86.25%,而 pH 在 8 或 12 时,芽孢的萌发率仅在 30% 左右。

2.2　钙离子

钙离子作为沉积碳酸钙的重要物料,从反应动力学的角度来看,其浓度直接影响了沉积速度。另外,微生物的活性也会受到钙离子等金属离子的影响,所以钙离子对微生物修复裂缝过程的起到了重要的影响。

钱春香等[12]的研究结果表明,高浓度的钙离子有利于细菌微生物矿化沉积的速度和裂缝的修复效果,利用扫描电镜观察发现,沉积物质呈花生颗粒状。然而钙离子浓度并非越大越好,V. S.

Whiffin[13] 和张越[14] 的研究表明,脲酶在高浓度的钙离子下,脲酶活性会出现明显的下降。另外根据 L. Chaurasia 等[15] 研究表明,当钙离子的浓度过高时,实验所采用的巴氏芽孢菌所分泌的脲酶量呈现下降的趋势,主要原因是静电引力作用,Ca^{2+} 聚集在细菌细胞壁表面,以及沉积出来的碳酸钙留存在细胞壁表面,造成脲酶无法释放,导致脲酶的量下降。如图 3 所示[16],Ca^{2+} 聚集在细菌表面。由于水泥在水化过程中会产生氢氧化钙,混凝土的裂缝中依旧存在一些游离态的钙离子,因此修复剂中钙离子的浓度可以适当减小。另外,所提供的钙离子的种类也会影响诱导过程。郝小虎[17] 研究了不同无机钙源对微生物矿化沉积的影响,测定了三种钙源在相同时间诱导沉积的碳酸钙质量大小,发现氯化钙的效果最好,诱导出的晶体质量可达 1.989 g。

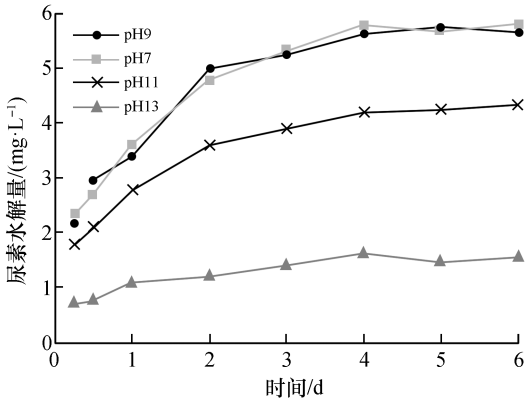


图 2　不同初始 pH 对水解尿素的影响

Fig. 2　Effect of different initial pH on urea hydrolysis

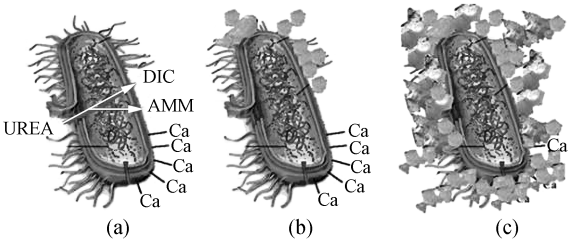


图 3　钙离子聚集在细菌外部

Fig. 3　Calcium ions accumulate outside the bacteria

2.3　其他因素

除了 pH 和钙离子的浓度这两个因素,成核位点和溶解性无机碳浓度亦会影响诱导矿化过程。成核位点指的是矿化基质中形成矿物晶胶的位置,也就是矿物晶体的生长点。由于修复微生物的细胞壁表面呈负电性,这吸引了呈正电的钙离子聚集在细胞壁表面,最终碳酸钙以晶体形式在细胞壁上“生长”,即成核位点细胞壁上。如图 4 所示[18],利用扫描电镜观察到细菌胞外存在一定数量的 1 μm 大小的花生状的碳酸钙晶体。有研究表明,通过控制修复菌液的浓度来调整成核位点的数量,可对裂缝的修复效率产生影响。H. A. Algaifi 等[10] 发现,当细菌细胞浓度不同,尿素水解量随之变化,如图 5 所示[10],当达到 10^8 cells/mL 时,尿素被完全水解。赵茜[19] 的微生物诱导碳酸钙沉淀矿化土壤实验中表明,当反应底物中钙离子浓度为 0.5 mol/L 的情况下,微生物诱导出的碳酸钙产量会随菌液的浓度的提高而不断上升。当巴氏芽孢杆菌菌液的 OD_{600} 为 0.4 时,碳酸钙的产率为 62%,而 OD_{600} 升高至 0.7 时,产率上升至 83%,修复天数缩短了 4 d。

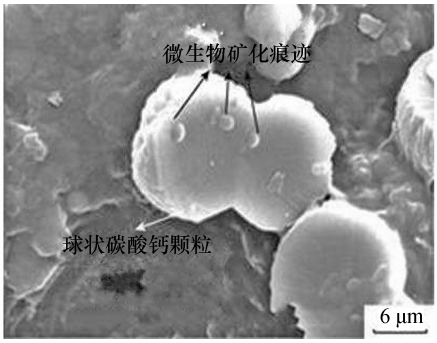


图 4　碳酸钙晶体在胞外“生长”

Fig. 4　Calcium carbonate crystals “grow” outside the cell

修复所需的碳酸根浓度与裂缝处的无机碳浓度有着密切的关系[9],即 CO_2 浓度对碳酸钙的产量,裂缝的修复效果有着重要的影响。裂缝处的 CO_2 主要有三个来源,微生物分解底物过程、呼吸作用以及局部裂缝富集的 CO_2[11]。钱春香[20] 采用能捕获空气中的 CO_2 的芽孢杆菌修复裂缝时,发现杆菌在富集的 CO_2 的环境下,能加快裂缝的修复速度。实验结果表明,经 5 d 的修复后,混凝土试件的抗渗水能力大大提升,裂缝在一个月后完全被修复成功。另外有研究表明[17],碳酸钙产量会随 CO_2 浓度的增大呈先升后平缓的趋势,微生物所分泌酶的数量限制了碳酸钙的产量。

3　微生物修复方式及修复质量评价

3.1　微生物修复方式

学者经研究发现,若在混凝土浇筑过程中,直接掺入微生物,会大大降低成活率,所以,微生物

修复裂缝主要有两种方式:第一种是将修复菌与营养物质配置成溶液,再覆膜灌注修复;第二种是用载体固定保护微生物和修复底物,再将载体掺入混凝土中,裂缝展开后,微生物自动修复混凝土。

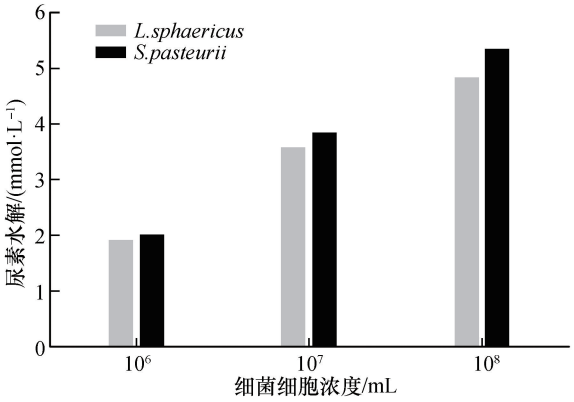
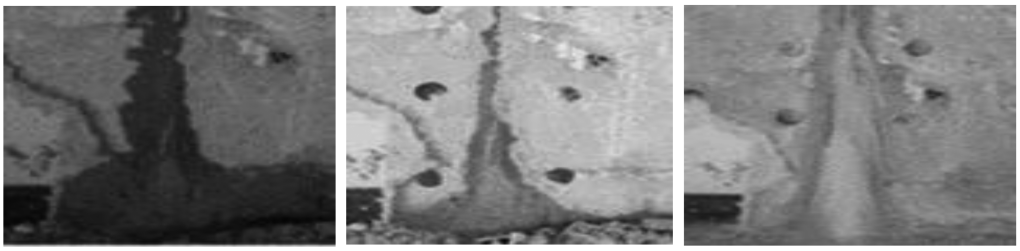


图 5　细菌细胞浓度对尿素水解的影响

Fig. 5　Effect of bacterial cell concentration on urea hydrolysis

王亚奇等[21]测试了修复菌液修复裂缝前后的混凝土试件的力学指标,并比较了修复菌液与环氧胶液、聚合物水泥在修复后的耐久性能,发现混凝土试件经菌液修复后,抗压强度提升了 20% 左右,劈裂抗拉强度则提升了 120%,测定耐久性的电通量显示为 845 C,优于其他两种材料。张越等采用巴氏芽孢菌菌液治理某小区地下室的漏水外墙裂缝中,经 4 个月的修复,如图 6 所示[14],发现外墙表面无可见裂缝,且无水渗出。丁鹏[22]的研究表明,当灌浆的菌液体积远大于裂缝的容积时,并不断增加循环灌注次数,则裂缝修复的效果就越好。虽然用修复菌液直接覆膜灌注修复裂缝这种方法具有修复效率高的优点,但也存在人为被动修复的缺点,对于一些细小微裂缝,无法实现主动发现并修复。



(a)灌浆前　　(b)灌浆两周后　　(c)灌浆四个月

图 6　灌浆前后裂缝观察比较

Fig. 6　Comparison of the appearance of cracks before and after grouting

若将微生物芽孢负载在特定材料上,不仅可以很好地包覆细菌芽孢和营养物质,抵抗碱度,还可在裂缝产生后,激活微生物自动开始修复裂缝[23],修复具体过程如图 7[24]。H. Xu 等[25]将巴氏芽孢杆菌固定在废弃汽车轮胎的细小颗粒上,经实验发现,除了能愈合裂缝外,还使试块的抗裂性得到了提升。钮政等[26]尝试采用膨胀珍珠岩,用来固定细菌芽孢,比较了分别采用偏高岭土、水泥浆和未包裹膨胀珍珠岩的裂缝修复效果,发现用水泥包裹的膨胀珍珠岩作为载体,不仅裂缝修复效果好,而且与混凝土相容性好。李玉白[27]采用乙基纤维素微胶囊作为载体,当裂缝穿过微胶囊,微胶囊破裂,在萌发剂的作用下,巴氏芽孢菌被激活并开始修复裂缝,经过 30 d 修复,裂缝几乎被完全修复。刘超等[28]采用再生骨料作为载体,并将载体置于菌液中,在真空的条件下,菌液能被紧紧吸附在载体上,最后将载体恒温烘干。研究发现,经过 28 d 的修复,采用再生骨料作为载体的微生物可将 0.27 mm 以下的裂缝修复成功。表 2 列出了近几年已发表的研究中所采用的微生物负载载体。

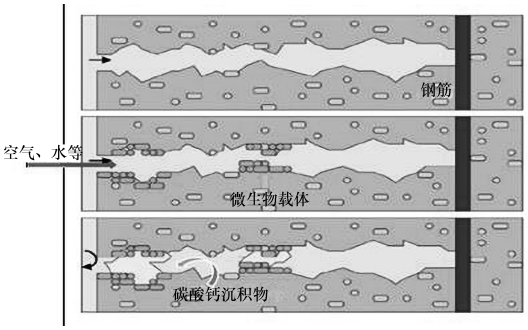


图 7　载体负载微生物修复裂缝机制

Fig. 7　Mechanism of carrier loaded microorganism repairing cracks

表 2　载体和微生物种类

Table 2　Carrier and microorganism types

研究者	载体材料	微生物种类
C. Liu 等[29]	硅藻土和膨胀珍珠岩	巴氏芽孢杆菌
钱春香等[18]	琼脂	碳酸酐酶微生物
徐晶等[30]	陶粒、硫铝酸钙水泥、硅灰	巴氏芽孢杆菌
Q. Zhan 等[31]	膨胀蛭石	巴氏芽孢杆菌
J. Y. Wang 和 N. De Belie[32]	硅藻土	巴氏芽孢杆菌

3.2　裂缝修复效果评价

目前对于裂缝的修复效果主要从三个方面评价,通过性能测试进行宏观评价,晶体观察分析微观表征效果以及建立模型预测长期修复效果。抗水渗透性能是评价混凝土开裂后耐久性的重要因素,目前通常评价混凝土抗水渗透性能借鉴土壤渗透系数的测定方法,测定单位时间下,穿透试件的水量,即渗透系数。钱春香团队[33]利用自制的装置,探究渗透系数和裂缝面积修复率在不同修复时间的变化趋势,结果表明,试件经过 30 d 的养护修复,裂缝处没有出现渗水,微生物修复下的试件的渗透系数下降至 1.28×10^{-8} m/s,面积修复率(宽度 0.4 mm 以下裂缝)可达 90% 以上,而且抗弯强度相比于无修复的试件,提升了 110%。对裂缝处沉积物质的微观分析来说,现代材料分析技术是重要的表征手段,比如 X 射线衍射(X-rays diffraction,XRD)、扫描电子显微镜(scanning electron microscope,SEM)和 X 射线能谱分析(energy dispersive X-ray spectroscopy,EDS)、XRD 可定性定量分析裂缝沉积晶体种类和数量,SEM 可放大观察裂缝表面晶体的沉积形貌[34],EDS 可定量分析物质的组成元素与含量。M. Luo 等[35]研究微生物自愈合混凝土,发现 0.3 mm 宽的裂缝经过 20 d 的微生物自愈合,裂缝外观被修复至完全愈合。为探究修复裂缝的沉积物的形貌以及是否为微生物所诱导矿化的碳酸钙,采用研究现代分析技术对其验证。结果显示,SEM 显示裂缝处沉积物呈片状致密堆积形态,EDS 能谱和 XRD 图谱表明沉积物为方解石型碳酸钙。另外,金泽康[36]为研讨微生物在微生物修复与混凝土龄期的关系,建立裂缝的自修复作用动力学和修复速率模型,拟合数值 R^2 达到 0.998 说明模型可靠,该模型预测了修复效果指标——面积修复率和抗水渗透修复率随混凝土龄期增长而变化的规律。结果表明在龄期 32 d 内,面积修复率和抗水渗透修复率保持上升,微生物在龄期内始终处于修复状态。

4　结　论

裂缝是影响混凝土耐久性的关键因素,将现代微生物技术作为修复路径之一,在未来有望从根本上解决裂缝修复难、工艺复杂、繁琐等问题。本文探讨了微生物修复裂缝的修复机理及其影响因素,得出可以通过合理选择修复微生物和修复方式,以及优化裂缝修复条件,提升裂缝的修复质量的结论。

随着近些年绿色智能建筑的不断研究发展,自愈混凝土的应用具有很大的潜力,将微生物修复裂缝与自愈混凝土相结合是一个具有重要意义的研究方向。对微生物自愈混凝土加强研究,可将微生物芽孢负载在载体,并内置于混凝土中,待产生外部裂缝后,实现微生物自动诱导矿化碳酸钙沉积,完成混凝土裂缝自修复工作。然而,根据目前微生物主动修复裂缝的研究表明,如果要实现微生物自修复混凝土裂缝,还需要解决一系列问题:第一,裂缝修复均匀性问题。应该保证微生物能沿裂缝深处同时开始修复,避免裂缝表面修复完成后,空气与水无法进入纵深处激活芽孢,无法修复深层裂缝。第二,载体对混凝土本身的影响。载体的加入会占据骨料的位置,而骨料的数量和位置是决定混凝土的强度的重要因素,所选载体材料应发挥骨料传递应力作用,不会降低混凝强度。第三,微生物载体的掺量的问题。载体的掺量是保证经微生物诱导的碳酸钙产量能够填充裂缝的孔隙。如果在裂缝较多的位置上,载体的掺量少,那沉积出来的碳酸钙不足以修复全部的裂缝但如果掺量过多,又会使得建筑的建设成本上升。第四,其他微生物争夺营养基。其他微生物也会随空气进入裂缝,如果接触到修复微生物的营养基,并争夺营养物质,可能会导致修复微生物的数量和存活率下降。

参考文献:

[1] 彭伟. 基于规范的多跨 PC 连续梁桥检测评估研究[J]. 南华大学学报(自然科学版),2018,32(4):76-83.

[2] 裴迪,刘志明,胡碧茹,等. 巴氏芽孢杆菌矿化作用机理及应用研究进展[J]. 生物化学与生物物理进展,

2020,47(6):467-482.

[3] 张家广,许顺顺,冯涛,等. 不同矿化微生物对混凝土裂缝自修复效果影响[J]. 清华大学学报(自然科学版),2019,59(8):607-613.

[4] WANG X F,YANG Z H,FANG C,et al. Evaluation of the mechanical performance recovery of self-healing cementitious materials-its methods and future development: A review[J]. Construction and building materials,2019,212(1):400-421.

[5] DIGHTON J,WHITE J F. The fungal community:Its organization and role in the ecosystem[M]. Boca Raton: CRC press,2017:25-30

[6] VIJAY K,MURMU M,DEO S V. Bacteria based self-healing concrete:A review[J]. Construction and building materials,2017,152(1):1008-1014.

[7] SARACHO A C,HAIGH S K,JORAT M E. Flume study on the effects of microbial induced calcium carbonate precipitation (MICP) on the erosional behaviour of fine sand[J]. Géotechnique,2020,71(12):1751-7656.

[8] YUN S L,WOOJUN P. Current challenges and future directions for bacterial self-healing concrete[J]. Applied microbiology and biotechnology,2018,102(7):3059-3070.

[9] WU M,HU X,ZHANG Q,et al. Growth environment optimization for inducing bacterial mineralization and its application in concrete healing[J]. Construction and building materials,2019,209(1):631-643.

[10] ALGAIFI H A,BAKAR S A,SAM A R M,et al. Insight into the role of microbial calcium carbonate and the factors involved in self-healing concrete[J]. Construction and building materials,2020,254(2):119258.

[11] 罗顺,刘冰,张金龙,等. 混凝土自修复菌 *Bacillus sp.* 芽孢生产和萌发条件的优化[J]. 深圳大学学报(理工版),2020,37(1):25-32.

[12] 钱春香,任立夫,罗勉. 基于微生物诱导矿化的混凝土表面缺陷及裂缝修复技术研究进展[J]. 硅酸盐学报,2015,43(5):619-631.

[13] WHIFFIN V S. Microbial $CaCO_3$ precipitation for the production of biocement[D]. Perth: Murdoch University,2004:12-23.

[14] 张越,郭红仙,程晓辉,等. 微生物诱导碳酸钙沉积技术治理某地下室渗漏的现场试验[J]. 工业建筑,2013,43(12):138-143.

[15] CHAURASIA L,BISHT V,SINGH L P,et al. A novel approach of biomineralization for improving micro and macro-properties of concrete[J]. Construction and building materials,2019,195(3):340-351.

[16] DE MUYNCK W,DE BELIE N,VERSTRAETE W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review[J]. Ecological engineering,2010,36(2):118-136.

[17] 郝小虎. 微生物矿化增强膨胀珍珠岩保温板性能试验研究及机理分析[D]. 太原:太原理工大学,2019:42-44.

[18] 任立夫,钱春香. 碳酸酐酶微生物沉积碳酸钙修复水泥基材料表面裂缝[J]. 硅酸盐学报,2014,42(11):1389-1395.

[19] 赵茜. 微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)固化土壤实验研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2014:19-21.

[20] 钱春香,任立夫,荣辉,等. 一种用于修复水泥基材料裂缝的方法:201310301782.8[P]. 2013-10-09.

[21] 王亚奇,丁文胜,张金飞,等. MICP 修补液与传统混凝土裂缝修补材料的对比研究[J]. 混凝土与水泥制品,2018(5):10-14.

[22] 丁鹏. 微生物灌浆修复混凝土裂缝碳酸钙沉积规律研究[D]. 济南:山东建筑大学,2020:42-45.

[23] SAFAEI F,KHORASANI S N,RAHNAMA H,et al. Single microcapsules containing epoxy healing agent used for development in the fabrication of cost efficient self-healing epoxy coating[J]. Progress in organic coatings,2018,114(1):40-46.

[24] JONKERS H M. Self healing concrete:a biological approach[M]. Self healing materials. Berlin: Springer,2007:195-204.

[25] XU H,LIAN J,GAO M,et al. Self-healing concrete using rubber particles to immobilize bacterial spores[J]. Materials,2019,12(14):2313.

[26] 钮政,李珠,张家广,等. 载体包裹材料对微生物矿化修复混凝土裂缝效果的影响[J]. 新型建筑材料,2019,46(6):14-18.

[27] 李玉白. 混凝土中微生物自修复的微观修复过程及表征[D]. 深圳:深圳大学,2018:24-34.

[28] 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.

[29] LIU C,XU X,LV Z,et al. Self-healing of concrete cracks by immobilizing microorganisms in recycled aggregate[J]. Journal of advanced concrete technology,2020,18(4):168-178.

[30] 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.

[31] ZHAN Q,ZHOU J,WANG S,et al. Crack self-healing of cement-based materials by microorganisms immobilized in expanded vermiculite[J]. Construction and building materials,2021,272(1):121610.

[32] WANG J Y,DE BELIE N,VERSTRAETE W. Diatomaceous earth as a protective vehicle for bacteria applied for self-healing concrete[J]. Journal of industrial microbiology and biotechnology,2012,39(4):567-577.

(下转第 51 页)

备陶粒研究[J]. 生物化工,2020,6(6):51-53.
[12] 柴春镜,宋慧平,冯政君,等. 粉煤灰陶粒的研究进展[J]. 洁净煤技术,2020,26(6):11-22.
[13] CAO Y,LIU R,XU Y F,et al. Effect of SiO_2,Al_2O_3 and CaO on characteristics of lightweight aggregates produced from MSWI bottom ash sludge (MSWI-BAS)[J]. Construction and building materials,2019,205:368-376.
[14] RILEY C M. Relation of chemical properties to the bloating of clays[J]. Journal of the American ceramic society,1951,34(4):121-128.
[15] QI Y,DAI B,HE S,et al. Effect of chemical constituents of oxytetracycline mycelia residue and dredged sediments on characteristics of ultra-lightweight ceramsite[J]. Journal of the Taiwan institute of chemical engineers,2016,65:225-232.
[16] 刘俊鹏,张曙光,周建国,等. 不同烧结助剂对垃圾焚烧飞灰形成陶粒和玻璃化的影响[J]. 环境工程,2016,34(增刊 1):753-756.
[17] 刘富强,聂永丰,刘锋. 调质对垃圾焚烧飞灰烧结处理的影响[J]. 环境工程学报,2008,2(11):1551-1554.
[18] 王雷,金宜英,聂永丰,等. 垃圾焚烧飞灰烧结特性[J]. 环境工程,2009,27(增刊):406-411.
[19] 李润东,王建平,王雷,等. 垃圾焚烧飞灰烧结过程重金属迁移特性研究[J]. 环境科学,2005,26(6):186-189.
[20] 王乐乐,杨鼎宜,刘亚东,等. 轻质污泥陶粒研制及其膨胀机理的探讨[J]. 混凝土,2013(4):40-43.
[21] 范锦忠. 提高陶粒膨胀率的有效措施[J]. 砖瓦,2009(9):97-101.
[22] 梁标,蔡德所,莫崇勋. 利用底泥制备烧胀陶粒技术的研究进展[J]. 功能材料,2020,51(11):11017-11024;11030.
[23] 洪雁翔,宁寻安,路星雯,等. 氯化剂对铁尾矿焙烧过程中重金属挥发的影响[J]. 中国环境科学,2020,40(5):2276-2286.
[24] 王野,李娜,田书磊,等. 垃圾焚烧飞灰热处理过程中 Zn 的挥发机理研究[J]. 中国环境科学,2019,39(2):706-712.
[25] 刘敬勇,孙水裕. 焚烧飞灰高温过程中重金属的挥发及其氯转化特征[J]. 环境科学,2012,33(9):3279-3287.
[26] 罗任宏,李菁若,张东长,等. 生活垃圾焚烧飞灰的资源化利用概况[J]. 环境影响评价,2019,41(4):63-66.
[27] 朱雁鸣,王建伟,陈春霞,等. 熔融法处理垃圾焚烧飞灰过程中重金属分离浓缩的效果研究[J]. 环境卫生工程,2018,26(5):16-20.

(上接第 13 页)

[33] QIAN C,CHEN H,REN L,et al. Self-healing of early age cracks in cement-based materials by mineralization of carbonic anhydrase microorganism[J]. Frontiers in microbiology,2015(6):1225.
[34] AL-SALLOUM Y,HADI S,ABBAS H,et al. Bio-induction and bioremediation of cementitious composites using microbial mineral precipitation: A review[J]. Construction and building materials,2017,154(1):857-876.
[35] LUO M,QIAN C,LI R. Factors affecting crack repairing capacity of bacteria-based self-healing concrete[J]. Construction and building materials,2015,87(2):1-7.
[36] 金泽康,张旋,李敏,等. 微生物自修复混凝土裂缝自修复动力学模型[J]. 材料导报,2020,34(增刊 2):1194-1200.