

# 载体保护下诱导碳酸钙对水泥砂浆微裂隙的修复作用

郑明明<sup>1</sup>, 张亚伟<sup>1</sup>, 胡云鹏<sup>1</sup>, 周洪<sup>2</sup>, 李之军<sup>1</sup>, 姚雷<sup>3</sup>, 王治林<sup>1</sup>, 白世卿<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川成都 610059;

2. 中国地质调查局军民融合地质调查中心, 四川成都 610036;

3. 四川省地质工程勘察院集团有限公司, 四川成都 610072)

**摘要:** 微生物诱导碳酸钙沉淀可有效填补和修复水泥浆凝结过程中难以避免的水化裂隙, 提高水泥石力学强度和抗渗性能, 从而可减少诱发的水泥微裂缝质量问题。文章以矿化性能良好的枯草芽孢杆菌为研究对象, 通过菌种的活化与扩大培养、向水泥浆中不同方式的添加, 测试和评价了不同工艺配方与养护条件下的水泥石力学和抗渗性能。结果表明: 环境温度、pH值、钙源浓度分别是影响杆菌矿化能力的主要因素, 水泥浆的碱性环境(pH值11~13)对杆菌的活性有明显的抑制作用, 最大降低矿化能力达15.1%。多孔、吸附性好的页岩陶砂载体可有效降低碱性环境对杆菌活性的影响, 相比于直接添加, 载体附菌的添加方式可使水泥石抗压、抗折强度和抗渗压力分别提升11.5%、14.8%和33.3%。当菌液吸附率从0%增加到35%时, 微生物水泥石的抗压、抗折强度和抗渗压力分别增加10.8%、47.0%以及25.0%。由此可知, 研究的微生物微裂隙修复方法可有效提升水泥环力学和抗渗性能, 结论可为固井水泥石质量提升和微生物水泥浆应用推广提供良好的指导和借鉴作用。

**关键词:** 水泥水化微裂隙; 微生物修复; 载体保护; 力学性能; 抗渗性能; 水泥强度; 枯草芽孢杆菌

**中图分类号:** TU525.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)S1-0042-09

## Repair mechanism of induced calcium carbonate on microcracks of cement mortar under carrier protection

ZHENG Mingming<sup>1</sup>, ZHANG Yawei<sup>1</sup>, HU Yunpeng<sup>1</sup>, ZHOU Hong<sup>2</sup>,

LI Zhijun<sup>1</sup>, YAO Lei<sup>3</sup>, WANG Zhilin<sup>1</sup>, BAI Shiqing<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geological Disaster Prevention and Geological Environment Protection of Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China;

2. Civil-Military Integration Geological Survey Center of China Geological Survey, Chengdu Sichuan 610036, China;

3. Sichuan Geological Engineering Survey Institute Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610072, China)

**Abstract:** Microbial-induced calcium carbonate precipitation can effectively fill and repair the inevitable hydration cracks during the cement slurry consolidation process, enhancing the mechanical strength and impermeability of cement stone, thereby reducing many induced well cementing quality issues. This paper focuses on *Bacillus subtilis* with good mineralization properties, investigating the mechanics and impermeability performance of cement stone under different process formulations and curing conditions, after activation and expansion cultivation of bacterial strains and their addition to cement slurries in various ways. The results indicate that environmental temperature, pH, and calcium

收稿日期: 2024-07-27 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.S1.007

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 42272363); 四川省科技计划项目(编号: 2023NSFSC0432); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研究课题(编号: SKLGP2023Z019)

第一作者: 郑明明, 男, 汉族, 1988年生, 副教授, 地质工程专业, 博士, 从事地质工程与地下工程方面的教学和科研工作, 四川省成都市成华区二仙桥东三路1号, mingming.zheng513@163.com。

引用格式: 郑明明, 张亚伟, 胡云鹏, 等. 载体保护下诱导碳酸钙对水泥砂浆微裂隙的修复作用[J]. 钻探工程, 2024, 51(S1): 42-50.

ZHENG Mingming, ZHANG Yawei, HU Yunpeng, et al. Repair mechanism of induced calcium carbonate on microcracks of cement mortar under carrier protection[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1): 42-50.

source concentration are the main factors affecting the mineralization ability of the bacteria. The alkaline environment of the cement slurry (pH: 11~13) has a significant inhibitory effect on bacterial activity, with a maximum reduction in mineralization ability of 15.1%. Porous and adsorbent shale ceramic sand carriers can effectively mitigate the influence of alkaline environment on bacterial activity. Compared to direct addition, the addition of carrier+bacteria can respectively increase the compressive strength, flexural strength, and impermeability pressure of cement stone by 11.5%, 14.8%, and 33.3%. When the adsorption rate of the bacteria solution increases from 0% to 35%, the compressive strength, flexural strength, and impermeability pressure of microbial cement stone increase by 10.8%, 47.0%, and 25.0% respectively. Therefore, the microbial cement slurry studied can effectively improve the mechanical and impermeability properties of cement stone, providing valuable guidance and reference for enhancing well cementing quality and promoting the application of microbial cement slurries.

**Key words:** microcracks of cement hydration; microbial remediation; carrier protection; mechanical properties; impermeability performance; cement strength; bacillus subtilis

## 0 引言

水泥基材料在基础建设、建筑结构和环保工程等领域发挥着重要作用,早已成为现代社会建设与可持续发展的基础。而被广泛应用于隧道、桥梁、建筑领域的水泥浆材,起着填缝、补漏和加固的重要角色,保障了工程结构的稳定性、耐久性和安全运行<sup>[1-2]</sup>。然而,由于水泥水化放热反应引起的体积膨胀和内部应力积聚,导致难以避免的水化微裂隙形成<sup>[3]</sup>,降低强度和抗渗性,进而加剧水泥构件在承载过程中裂隙的生成<sup>[4-5]</sup>。针对于水泥构件裂隙的修复则必不可少,包括表面修补、注浆、搭接、喷涂和热处理等修复的传统手段<sup>[6-8]</sup>,都属于被动式修复,存在粘结强度低、耐久性差和成本高等缺点,同时所修复的裂隙尺寸存在局限性,对于较小尺寸裂隙(宽度非找矿 0.05 mm)难以发挥修复作用<sup>[9-10]</sup>。

主动式裂隙修复方法,包括本征型和外源型自修复式,能够有效克服强度低、耐久性差和裂隙尺寸受限的缺点,在需要长期维护和耐久性要求高的工程中应用更加广泛<sup>[11-13]</sup>。然而依然存在如本征型自修复效率低、外源型修复剂和载体成本高、环保性差的问题。外源型修复方法衍生的微生物自修复法,可诱导碳酸钙沉淀填充微裂隙而实现修复,由于微生物具有长时间生存的特性<sup>[14]</sup>,作用持久,其来源广泛、繁殖培养经济性好且绿色环保,并且成本低廉,使其具有较大的潜力<sup>[15]</sup>。

微生物自修复法主要通过微生物将环境中钙离子经过代谢形成碳酸钙沉淀,填充于微裂隙内从而实现修复,提高力学和抗渗性能<sup>[16]</sup>。环境温度和钙源影响微生物活性和矿化速率,是影响微裂隙修复效果的重要因素。过高或过低的温度都不利于

微生物矿化的进行,而 25~45 °C 是良好温度区间<sup>[10,17]</sup>,大多数的隧道环境则是微生物修复运用的绝佳场所,较大的湿度更促进了修复效果的提升。水泥浆的碱性环境对绝大部分微生物的代谢起抑制作用<sup>[18-19]</sup>,影响矿化过程和碳酸钙沉淀效率,从而影响修复效果。针对微生物耐碱性能的驯化和包覆方法是降低碱性环境影响的有效手段<sup>[20-21]</sup>。驯化过程存在难度大、周期长、性能稳定性差等问题。相比之下,包覆方法更为简单便捷,常用的包覆工艺包括载体、微胶囊等。微胶囊需要裂缝开裂时的准确触发方能起效,不同裂隙的开裂力度势必会降低微胶囊开裂率。而载体需要多孔和吸附性好的特点,然而存在降低水泥构件力学强度的问题,如常用的蒙脱石、珍珠岩等<sup>[22-23]</sup>。因此,急需探寻一种成熟的微生物修复工艺,降低碱性环境影响的同时,确定合理的工艺参数范围,增强对水泥基材料微裂隙的修复效果。

基于此,本文拟开展载体保护下的微生物诱导碳酸钙修复微裂隙影响研究,旨在评价碱性环境对微生物矿化性能的影响,确定不同工艺参数对修复效果的定量影响,形成隧道环境下水泥砂浆裂隙的微生物修复工艺,从而为微生物修复技术应用提供借鉴和参考。

## 1 实验方法

### 1.1 菌种与载体的选择

水泥浆的碱性环境更适合于嗜碱菌,常见的包括巴氏芽孢杆菌、枯草芽孢杆菌等。脲解型的巴氏芽孢杆菌由于尿素的参与和氨气的形成,易劣化强度和产生气味。而枯草芽孢杆菌在微生物诱导碳

酸钙沉淀(MICP)过程中不会产生有害气体,同时会产生二氧化碳,促进水泥砂浆中碳酸钙的形成,因而选为待实验菌种。

载体作为微生物的负载主体,应具有良好的吸附性。同时,还要有良好的和易性以及使水泥砂浆的力学性能和流动性满足要求。常用的载体通常会对水泥砂浆力学性能的负面影响较大。而页岩陶砂是以天然页岩为原料,经高温、焙烧精制而成的建筑材料,自身具有一定的强度,其对菌液的吸附率高且一定加量范围内能提升水泥砂浆力学性能。

### 1.2 实验仪器与材料

实验主要仪器包括用于细菌扩大培养的 ZHTY-50S 型振荡培养箱、2000 型可见光光度计、协助载体吸附菌液的 RS-1 型真空泵,水泥砂浆制备用

的 HZ-15 型水泥砂浆搅拌机、YH-40B 型标准恒温恒湿养护箱,水泥砂浆性能测试用的 CDUT-ZJ01 型力学强度测试仪、SS-15 型水泥砂浆抗渗仪等。

实验材料主要有枯草芽孢杆菌菌种 A TCC6633、乳酸钙(99%)、普通硅酸盐水泥 PO 42.5R、天然河沙、页岩陶砂、蛋白胨、牛肉膏、琼脂等。

### 1.3 实验方案

所涉及的实验主要包括微生物活化和扩大培养,载体负载菌液、水泥砂浆制备、试样养护和性能测试(如图 1 所示)。细菌活化、扩大培养采用常规工艺在超净工作台内操作,载体负载菌液包括常规浸泡和真空吸附法,实验中所有器械均经过高温高压灭菌锅进行消毒杀菌。具体如下:

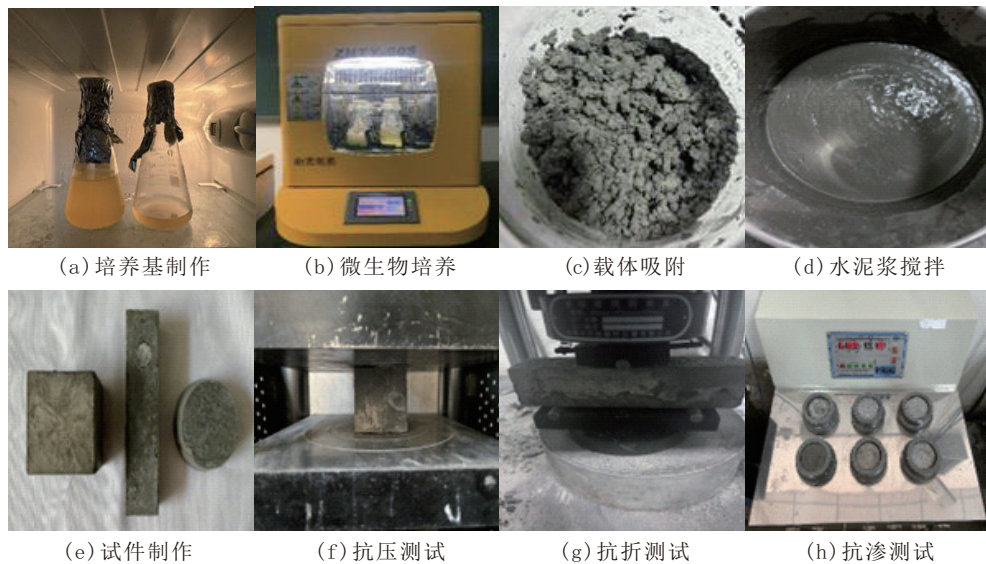


图 1 微生物水泥浆制备实验

按照表 1 中的配方将各组分放入烧杯后搅拌制备培养基,用灭菌棉花与双层纱布进行封口并用报纸包好后进行高温高压灭菌,后冷藏待用。取少量冻干菌粉进行溶解,取部分溶解液接种在斜面培养基上,后放入霉菌培养箱内以 30 °C 培养 24 h。取适量液体培养基装入三角瓶中,并取 3 mL 菌液接种其中后用纱布双层封口,放入振荡培养箱中培养 24 h。分别采用真空和常压吸附,取适量微生物菌液与粉碎筛选后的页岩陶砂混合所需时长,后在 28 °C 下烘干。将水、水泥、砂、微生物自修复剂及乳酸钙加入之水泥砂浆搅拌机进行搅拌,后将砂浆倒入至模具中,并在振动台上震动至气泡消除,然后放入恒温

恒湿水浴养护箱养护所需时间后脱模。最后进行抗压强度、抗折强度以及抗渗压力的测试并对比分析,每个试样制作 3 个测试后取平均值。

表 1 培养基配方

名称	蛋白胨/ g	牛肉膏/ g	NaCl/ g	ddH <sub>2</sub> O/ L	琼脂/ g
液体培养基	10	3	5	1	—
斜面培养基	10	3	5	1	15

水泥砂浆的水灰砂比选用常见取值的 2:2:1。温度选用适宜枯草芽孢杆菌生长的范围,取 24~32 °C。钙源选用乳酸钙,以避免常见的氯化钙易产

生氯离子的问题。实验过程中不涉及驯化的问题,在此基础上,考察不同粒径和加量载体对水泥砂浆力学性能的影响、页岩陶砂粉菌液吸附率随时间和方式的变化,以及不同掺入方式、乳酸钙加量、养护温度和菌液吸附率等工艺参数对水泥砂浆7和28 d单轴抗压、抗折和抗渗性能的影响。

## 2 结果分析

### 2.1 酸碱环境对枯草芽孢杆菌活性的影响

实验中通过HCL、NaHCO<sub>3</sub>和NaOH来调节培养基pH值,形成pH值在6~13之间的环境,并观测细菌生长情况,通过分光光度计来测试微生物数量,以微生物浓度趋于平稳的24 h时的OD值作为最后参考值评价过程中枯草芽孢杆菌活性,结果如图2所示。由图2可知,溶液环境由酸性到碱性的过程中,枯草芽孢杆菌活性先逐渐增大,在pH值为9时活性最高,随着pH值继续增大,其活性不断降低。在pH值为11~13的水泥浆碱性环境中,相比于峰值,其活性降低了12.3%~38.3%,降幅明显,且呈加快趋势。而在弱酸性环境中,枯草芽孢杆菌的活性就呈现断崖式下跌,仅为峰值时的34.6%,一定程度上也说明了其嗜碱性的特质,在酸性环境中难以生长和繁殖。

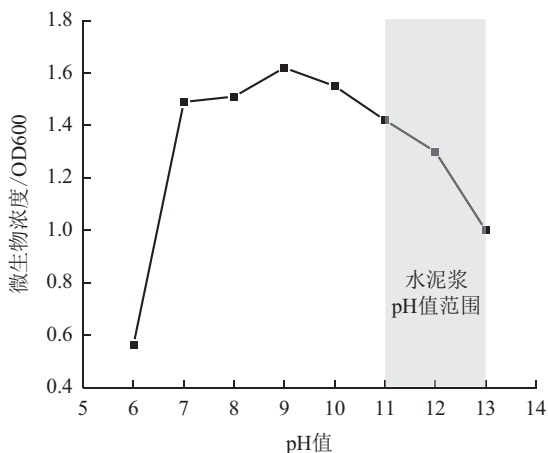


图2 不同pH值下枯草芽孢杆菌活性变化

另一方面,虽然枯草芽孢杆菌为嗜碱菌,然而水泥浆的碱性环境对其的活性也有较大的影响,因此用于水泥浆裂隙修复时,为保证修复效果,需要进行相应的处理以降低强碱性环境的不利影响。

### 2.2 载体粒径和加量对水泥砂浆力学性能的影响

不同类型和粒径分布的颗粒在堆积过程中会形成不同密实度的堆积体,从而会不同程度上影响其孔隙和强度等性质,这一紧密堆积理论对水泥基材料配合比设计的优化有着重要的意义。载体对于水泥砂浆类似于比砂更细一级的骨料,势必会影响固化后水泥砂浆力学和抗渗性能。对载体粒径和加量的优选必不可少。实验中通过土工筛将粉碎后的页岩陶砂粉筛分成5种不同的粒径范围,探究加量在1%~6%范围内时对7 d水泥试样单轴抗压强度的影响,从而进一步优选载体参数,结果如图3所示。

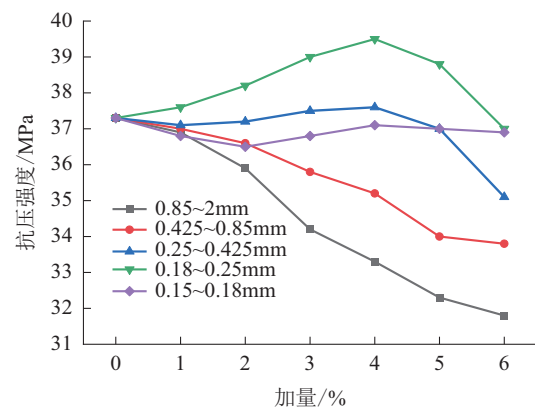


图3 页岩陶砂粉对水泥砂浆强度的影响

由图3可知,当粒径在0.425~0.85 mm(20~40目)及以粗时,随着页岩陶砂粉加量的增加,强度逐渐降低,且基本呈线性趋势。而当粒径在0.25~0.425 mm(40~60目)及以细时,随着页岩陶砂粉加量的增加,强度先升高后逐渐降低,基本呈单峰趋势,且加量在4%时,出现峰值强度,这一范围内,峰值强度随粒径的增大,先增加后减小。当页岩陶砂粉粒径在0.18~0.25 mm(60~80目),加量为4%时,水泥砂浆强度最大,故取这一粒径和加量为后续实验开展的基础。

载体以吸附的方式将细菌存储在多孔结构内,降低碱性环境的影响,合理的吸附方式和吸附时间是保证后续修复效果的重要工序。在确定页岩陶砂粉粒径和加量的基础上,继续开展吸附方式的研究,过程中分别评价常压浸泡吸附和真空负压浸泡吸附两种方式下菌液吸附率随时间的变化情况,结果如图4所示。由图4可知,常压浸泡吸附下,随着

浸泡时间的增长,吸附率先快速增加后逐渐趋于稳定,浸泡12 h达最大吸附量,为27.8%,后基本稳定在这一数值。真空负压浸泡吸附中,浸泡15 min便达最大吸附量,为36.9%。真空负压浸泡吸附所需的时间远少于常压浸泡吸附,且最大菌液吸附率也高于常压浸泡吸附。

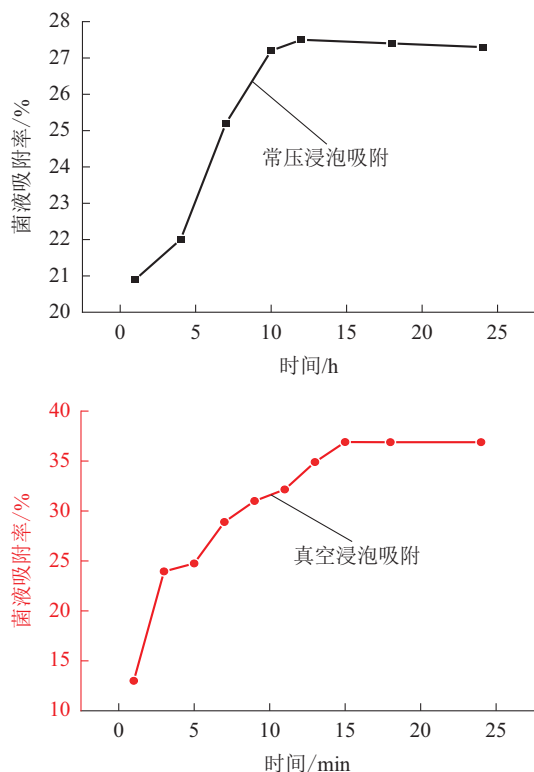


图4 不同吸附方式下菌液吸附率随时间的变化

### 2.3 工艺参数对微裂隙修复效果的影响

载体工艺已经确定的基础上,将进行微生物载体掺入、水泥砂浆养护和性能评价实验。过程中取菌液掺入方式、养护温度、菌液量、乳酸钙掺量为主要变量考察其对微裂隙修复效果的影响。取标准养护7和28 d后水泥砂浆抗压强度和抗渗压力为主要评价指标。

#### 2.3.1 菌液掺入方式

菌液直接掺入和由载体吸附后再掺入两种方式下,水泥砂浆试样的抗压强度和抗渗压力结果如图5所示。由图5可知,在水泥砂浆制作过程中,相比于将菌液直接掺入,利用载体吸附后再掺入所制得水泥砂浆试样的7、28 d抗压强度和28 d抗渗压力分别提升了4.52%、12.80%和42.86%,利用载体吸附再掺入的方式获得水泥砂浆试样性能更好,表

明利用页岩陶砂粉对菌液有良好的保护效果,降低了碱性环境对枯草芽孢杆菌活性的不良影响。另外,28 d抗压强度的提升率远高于7 d强度,同时也说明了枯草芽孢杆菌对微裂隙的修复是一个长期作用过程,在7~28 d期间有一个修复作用的猛增阶段。

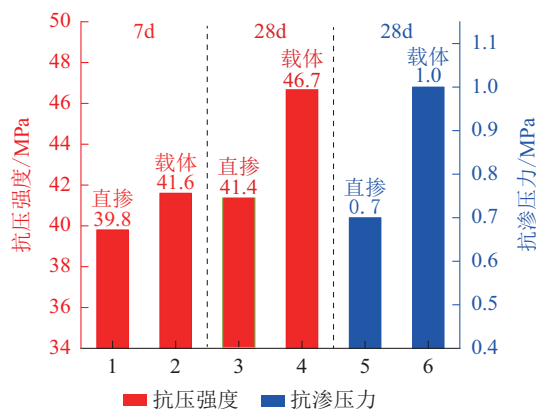


图5 菌液掺入方式对水泥砂浆性能的影响

#### 2.3.2 乳酸钙掺量

钙源掺量影响微生物诱导碳酸钙的量,从而影响对水泥砂浆微裂隙的修复性。由图6可知,随着乳酸钙掺量的增加,水泥砂浆试样抗压强度和抗渗压力都呈现先增加后略微减小的趋势。乳酸钙掺量在1.6%时,抗压强度和抗渗压力达到最大值,相比于未掺试样,其7、28 d抗压强度和28 d抗渗压力分别增长了5.05%、7.60%和25.0%,当掺量增加至2.4%时,抗压强度和抗渗压力都有所下降,分别降低了1.6和0.1 MPa。由此可知,乳酸钙掺量的掺量控制在合理范围内时会对水泥砂浆性能产生有利影响,当过量时,会降低水泥砂浆力学和抗渗性能,影响水泥水化反应和与硫酸钙等反应形成不稳定化合物是可能的原因<sup>[24-25]</sup>。

#### 2.3.3 养护温度

养护温度直接影响微生物代谢的活性,对枯草芽孢杆菌的矿化能力有重要影响。其对水泥石性能的影响趋势与乳酸钙的影响类似。随温度的升高,水泥砂浆试样抗压强度和抗渗压力都呈现先增加后减小的趋势(图7)。当养护温度为36℃时,水泥砂浆试样的7、28 d强度和抗渗压力达到最大值,相比于最开始的24℃时,强度和抗渗压力分别增长了14.63%、14.85%和50.0%,当温度继续升高至

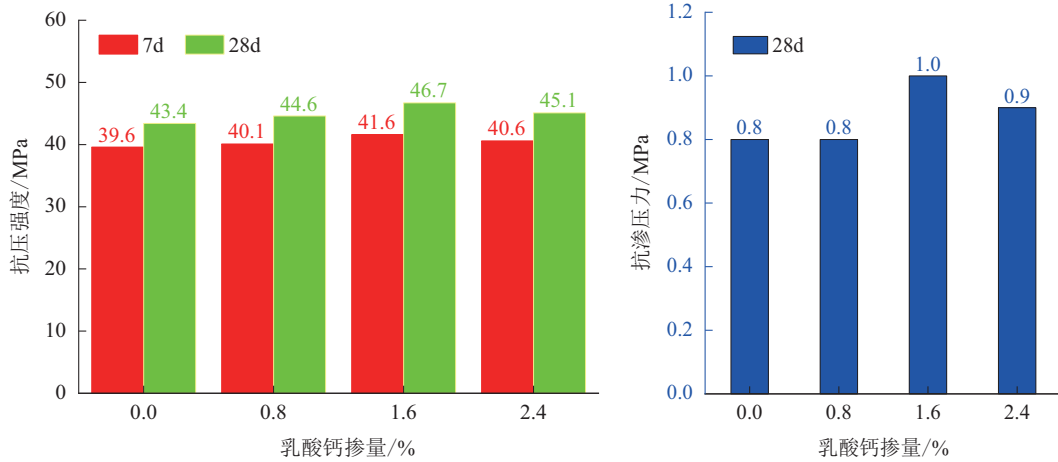


图 6 乳酸钙掺量对水泥砂浆性能的影响

40 °C时,强度和抗渗压力却有所降低,从而表明温度为 36 °C时,枯草芽孢杆菌的活性和矿化性能达到最优值。

### 2.3.4 菌液吸附率

菌液吸附率直接反应了单位质量载体所含菌

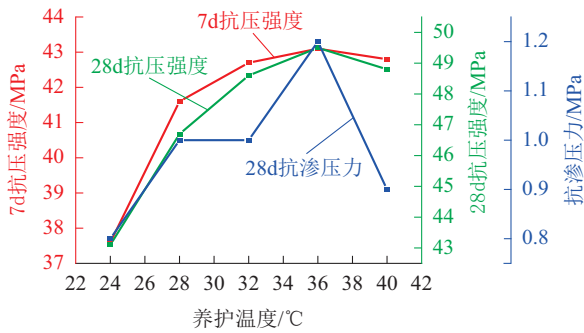


图 7 养护温度对水泥砂浆性能的影响

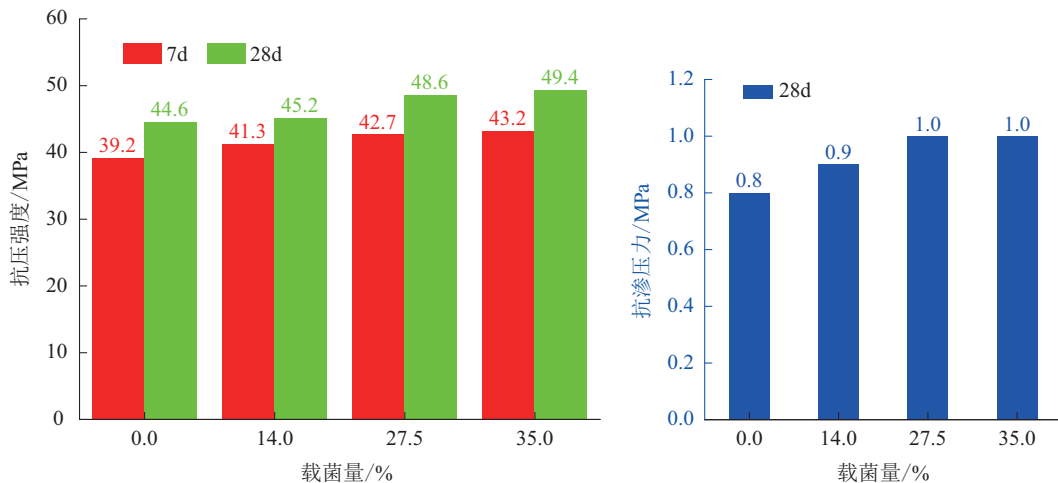


图 8 菌液吸附率对水泥砂浆性能的影响

量的多少。由图 8 可知,随着载菌量由 0 逐渐增加到 35% 的过程中,7、28 d 抗压强度和 28 d 抗渗压力逐渐提升了 10.20%、10.76% 和 25.0%,其对抗压强度和抗渗压力的作用也呈现逐渐提升的作用,随着细菌数量的增加,其矿化沉淀的碳酸钙量逐渐增加,对裂隙的修复作用增强与既有认知保持一致的一致性。随着吸附率从 27.5% 增加至 35% 时,力学强度有所上升而抗渗压力并没有增加,可能的原因是抗渗压力升高幅度未达到仪器最小精度从而未被测出。常压下载体的菌液吸附率最高为 27.5%,真空吸附时可达 35% 以上,结合菌液吸附率对水泥砂浆性能的影响可知,真空吸附的方式对提升水泥砂浆裂隙的修复效果更为有利。

### 3 讨论

#### 3.1 载体对枯草芽孢杆菌的保护作用(菌液掺入方式对微裂隙修复效果的影响)

水泥浆的pH值一般在11~13之间,为强碱性,具体大小因水泥的类型和成分有所区别。pH值较高时会影响生物大分子的结构,表现为连接DNA的氢键在高pH值下会分解,促进微生物的变性并破坏活性<sup>[26]</sup>。嗜碱菌通过对脂质、蛋白质结构和机制的进化修改能适应碱性环境,并在pH值为8~10之间时生长最好<sup>[27-28]</sup>,如枯草芽孢杆菌、科氏芽孢杆菌等。而水泥浆的碱性环境仍高于一般嗜碱菌的最佳生存环境,难以发挥其自身的矿化性能以及对水泥石微裂隙的修复作用。

载体作为一种良好的媒介,可一定程度上降低碱性环境对微生物的影响。可作为微生物载体的材料较多,如氧化硅等多孔材料、凝胶<sup>[29]</sup>等天然聚合物,聚丙烯酸等合成材料,蒙脱石、珍珠岩等矿物质材料,蛋白质纳米颗粒,以及蒙脱石、珍珠岩等矿物质材料<sup>[30-32]</sup>。其保护作用主要包括物理保护、化学保护、营养供给、稳定性增强以及调控微环境5个方面,机制主要都是隔绝外部不良环境,增加微生物在环境中的稳定性和抗逆性,延长其存活时间<sup>[30, 33]</sup>。然而,在载体选型过程中,其自身的力学性能对水泥石强度的影响也非常重要,诸多载体均满足多孔和良好吸附等性能,然而大多会对水泥石强度产生不利影响(图9),如珍珠岩、水凝胶、活性炭等<sup>[34-38]</sup>,在水泥基材料中的应用,对强度起促进作用的载体种类较少、且加量范围窄。因此在载体选型中,载体掺入后对水泥石强度影响的评价极为重要。

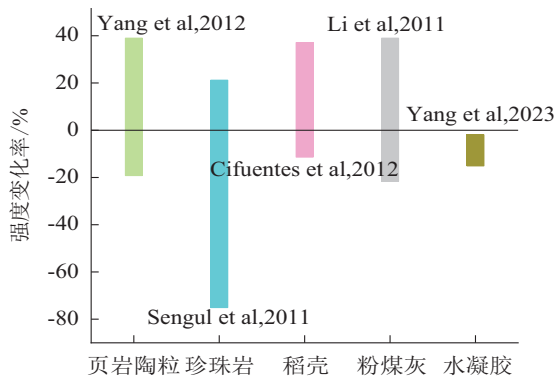


图9 不同载体对水泥基材料力学强度的影响<sup>[29,32,34,37-38]</sup>

#### 3.2 微生物水泥浆最优性能工艺参数选择

载体保护对提高微生物活性的作用十分显著,此外,微生物诱导碳酸钙效率的主要影响因素还包括种类、浓度、诱导温度等。不同类型微生物诱导沉淀的碳酸钙具有不同的胶结性能和修复效果,同时对不同环境的适用性也不同,根据条件所需选取适合的微生物种类是前提,水泥基材料中非脲解型嗜碱菌无疑是良好的选择。

微生物诱导碳酸钙的量越多,对裂隙的填充和胶结作用越好,从而修复效果也越好,随着填充率的增加,强度恢复率可从不到10%提升至近60%(图10)。诱导碳酸钙的量与其活性、数量以及钙源数量有关。微生物活性越高,其代谢活动越强,代谢活动越强诱导产生更多的碳酸钙沉淀;同理,微生物数量越多,诱导的碳酸钙量也越多。因此,载体的菌液吸附率越高越好,真空吸附法所负载的菌液量和速率高于常压吸附,是更优的方式。另外,钙源的选择上,乳酸钙的效果优于氯化钙,可避免氯离子的腐蚀作用,然而,乳酸钙存在明显最优加量,并非越多越好,文中结论与既有研究<sup>[24]</sup>结论较为一致。

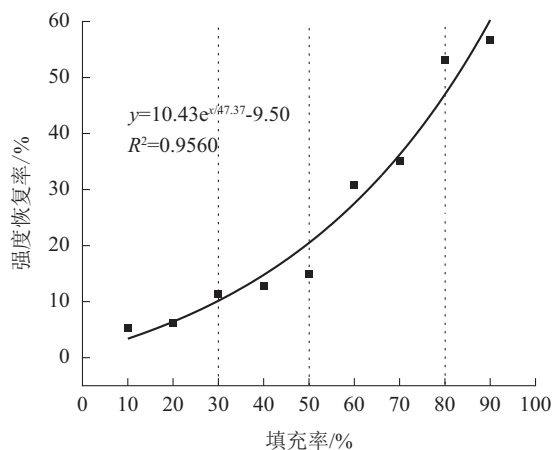


图10 强度恢复率随裂隙中碳酸钙填充率的变化<sup>[5]</sup>

微生物活性的影响因素较多,主要包括温度等。自然界中是嗜温菌所占比例最大,其通常温度在20~45℃时活性较好。而前面结果也表明,枯草芽孢杆菌最适宜温度为36℃,与既有研究<sup>[39-40]</sup>中的37℃结论接近,主要区别在于本研究中的温度取值幅差略大。同时,温度可以影响沉淀反应的平衡常数和化学反应的动力学速率,温度越高,碳酸钙的

晶体尺寸越大,不同尺寸碳酸钙对材料力学性能的影响也不同<sup>[5]</sup>。

综合文中所探究的因素,水泥砂浆中选用枯草芽孢杆菌,配合粒径在0.18~0.25 mm(60~80目)、加量为4%的页岩陶砂载体,真空法固载菌液使菌液吸附率在36.9%,乳酸钙的加量在1.6%时,对水泥砂浆的微裂隙修复效果最好。温度因使用的环境不同而不同,当温度在36℃左右时,能达到更好的修复效果。

#### 4 结论

针对水泥基材料水化过程中难以避免的水化微裂隙修复问题,采用微生物诱导碳酸钙沉淀的主动式修复工艺,通过载体对微生物的保护降低碱性环境的影响。探究了载体粒径和加量、pH值、温度、菌液吸附率、钙源加量等对修复效果的影响,主要结论如下:

(1)水泥浆的碱性环境对枯草芽孢杆菌繁殖速率影响极大,峰值降幅可达38.3%,而页岩陶砂载体可有效降低碱性环境对菌的影响,提升其对水泥砂浆的修复效果,最大使抗压强度和抗渗压力分别提升了12.80%和42.86%。

(2)页岩陶砂载体的粒径和加量显著影响水泥砂浆力学性能,当粒径在0.18~0.25 mm(60~80目),加量为4%时,水泥砂浆强度达到最大。相比于常压法,真空法可获得菌液吸附率更高的富菌载体,且可大幅度缩短吸附时间,提高效率。

(3)温度、菌液吸附率和钙源加量等是影响枯草芽孢杆菌对水泥砂浆微裂隙修复效果的主要因素,当乳酸钙加量在1.6%、菌液吸附率为36.9%且温度在36℃左右时,修复效果最佳。

#### 参考文献:

[1] Kurtis K E. Innovations in cement-based materials: Addressing sustainability in structural and infrastructure applications[J]. *Mrs Bulletin*, 2015,40(12):1102-1108.

[2] Song X, Song X, Liu H, et al. Cement-based repair materials and the interface with concrete substrates: Characterization, Evaluation and Improvement[J]. *Polymers*, 2022,14(14857).

[3] Kong W, Wei Y, Wang Y, et al. Development of micro and macro fracture properties of cementitious materials exposed to freeze-thaw environment at early ages [J]. *Construction and Building Materials*, 2021,271(121502).

[4] Grudemo A. Microcracks, fracture mechanism, and strength of

the cement paste matrix [J]. *Cement and Concrete Research*, 1979,9(1):19-33.

[5] Wang K, Zheng M, Yan S, et al. Study on the influence mechanism of calcium carbonate particles on mechanical properties of microcrack cement [J]. *Construction and Building Materials*, 2024,411(134563).

[6] Li H, Yang H, Li X. Investigation on the working performance of a non-dispersible grouting material for the crack repairment of underwater structures [J]. *Construction and Building Materials*, 2023,407(133558).

[7] Yuan P, Zhang B, Yang Y, et al. Application of polymer cement repair mortar in underground engineering: A review [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023,19(e02555).

[8] Guo T, Liu K, Li X, et al. Effects of thermal treatment on the fracture behavior of rock-concrete bi-material specimens containing an interface crack [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2023,127(104071).

[9] 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(2SI):230-235.

[10] Fan Q, Fan L, Quach W, et al. Application of microbial mineralization technology for marine concrete crack repair: A review [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023,69(106299).

[11] Nguyen M, Fernandez C A, Haider M, et al. Toward self-healing concrete infrastructure: review of experiments and simulations across scales [J]. *Chemical Reviews*, 2023.

[12] Wang J, Tang J, Chen D, et al. Intrinsic and extrinsic self-healing fiber-reinforced polymer composites: A review [J]. *Polymer Composites*, 2023,44(10):6304-6323.

[13] Feng J, Yap X Y, Gao J, et al. Rapid self-sealing of macro cracks of cementitious composites by in-situ alginate crosslinking [J]. *Cement and Concrete Research*, 2023,165(107074).

[14] 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(2SI):230-235.

[15] Raza A, El Ouni M H, Khan Q U Z, et al. Sustainability assessment, structural performance and challenges of self-healing bio-mineralized concrete: A systematic review for built environment applications [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023,66(105839).

[16] Dharmabiksham B, Kavya C, Kapilan S. The experimental performance of durability and strength to repair for micro cracks in a self-healing bacterial concrete [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2023.

[17] Muhammad J B, Shehu D, Usman S, et al. Biodegradation potential of 2,4 dichlorophenoxyacetic acid by *Cupriavidus campinensis* isolated from rice farm cultivated soil [J]. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2023,8:100434.

[18] Wang D, Guan F, Feng C, et al. Review on Microbially Influenced Concrete Corrosion [J]. *Microorganisms*, 2023,11(20768).

[19] Liu Y, Ali A, Su J, et al. Microbial-induced calcium carbonate precipitation: Influencing factors, nucleation pathways, and application in waste water remediation [J]. *Science of the Total Environment*, 2023,860(160439).

[20] Zhao C, Toufigh V, Zhang J, et al. Enhancing biomineraliza-



- tion process efficiency with trained bacterial strains: A technical perspective[J]. *Biogeotechnics*, 2023,1(2):100017.
- [21] Zheng Y, Wang P, Wei Y, et al. Untargeted metabolomics elucidated biosynthesis of polyhydroxyalkanoate by mixed microbial cultures from waste activated sludge under different pH values[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 331(117300).
- [22] Ge J, Xu F, Wei H, et al. The Influence Mechanism of Interfacial Characteristics between CSH and Montmorillonite on the Strength Properties of Cement-Stabilized Montmorillonite Soil [J]. *Materials*, 2023,16(714122).
- [23] Jaworska B, Stanczak D, Lukowski P. The Influence of Waste Perlite Powder on Selected Mechanical Properties of Polymer-Cement Composites[J]. *Buildings*, 2024,14(1811).
- [24] Li Y, Wang Q, Sun J, et al. Properties and reaction mechanism of magnesium phosphate cement modified by calcium lactate[J]. *Construction and Building Materials*, 2024,419(135565).
- [25] Xing J, Zhou Y, Peng Z, et al. The influence of different kinds of weak acid salts on the macro-performance, micro-structure, and hydration mechanism of the supersulfated cement[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023,66(105937).
- [26] Palanisamy M. Bacterial concrete: A review [J]. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2017,8:588-594.
- [27] Mat Yajit N L, Fazlin Hashim N H, Illias R M, et al. Expression and biochemical characterization of a novel thermostable alkaline beta-1,3-1,4-glucanase (lichenase) from an alkaliphilic *Bacillus lehensis* G1 [J]. *Protein Expression and Purification*, 2024,219.
- [28] Padan E, Bibi E, Ito M, et al. Alkaline pH homeostasis in bacteria: New insights [J]. *Biochimica Et Biophysica Acta-Biomembranes*, 2005,1717(2):67-88.
- [29] Yang J, Duan X, Qiu J, et al. Application of superabsorbent polymer hydrogel to crack self-sealing of cement-based materials [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 51(0454-5648(2023)51:11<3015:GXSSZS>2.0.TX;2-J11):3015-3024.
- [30] Gong Y, Niu Q, Liu Y, et al. Development of multifarious carrier materials and impact conditions of immobilised microbial technology for environmental remediation: A review [J]. *Environmental Pollution*, 2022,314(120232).
- [31] Feng C, Zong X, Cui B, et al. Application of carrier materials in self-healing cement-based materials based on microbial-induced mineralization[J]. *Crystals*, 2022,12(7976).
- [32] Li S, Tang X, Sun Z. Study on the mechanics capability of high performance concrete mixed with fly ash II [J]. *Concrete*, 2011(1002-3550(2011)4<86:CJFMHG>2.0.TX;2-Z4):86-88.
- [33] Su Y, Jin P. Application of encapsulated expanded vermiculites as carriers of microorganisms and nutrients in self-repairing concrete[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2022,187(108672).
- [34] Sengul O, Azizi S, Karaosmanoglu F, et al. Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete [J]. *Energy and Buildings*, 2011,43(2-3):671-676.
- [35] 司亚余. 活性炭储能相变混凝土制备与力学性能试验研究 [D]. 淮南:安徽理工大学,2020.
- [36] 刘宜思, 庞建勇, 姜平伟, 等. 电厂稻壳灰水泥砂浆流动度及力学性能研究 [J]. *安徽理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 40(6):54-60.
- [37] Cifuentes H, Leiva C, Medina F, et al. Effects of fibres and rice husk ash on properties of heated HSC [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2012,64(5):457-470.
- [38] Yang W, He Z, Yang Y. Experimental study on the influence of ceramist properties compressive strength of shale ceramist concrete [C]//Zhangjijie, China: Trans Tech Publications, 2012.
- [39] Korsten L, Cook N. Optimizing culturing conditions for *Bacillus subtilis* [J]. *South African Avocado Growers' Association Yearbook*, 1996,19:54-58.
- [40] Jamil B, Hasan F, Hameed A, et al. Isolation of *Bacillus subtilis* MH-4 from soil and its potential of polypeptidic antibiotic production [J]. *Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2007,20(1):26-31.

(编辑 荐华)