

# 建筑材料中的生物胶结：综述

达伍德·穆罕默德·阿尔穆斯塔法，穆罕默德·伊克巴尔，易卜拉欣·阿尔苏里曼  
土木工程系，马来亚大学，马来西亚

**摘要：**建筑业的快速发展导致原材料的大量使用，这些原材料面临枯竭的风险。对水泥作为粘结剂的高需求以及用于建筑用途的粘土砖的大量生产加剧了这个问题。这种情况导致其生产过程中的高能耗和碳排放。在这方面，生物水泥被认为是建筑施工的绿色解决方案，因为这种技术对环境友好，能够减少碳排放，从而减缓全球变暖速度。大多数先前发表的文章都集中在微生物诱导的碳酸钙沉淀（MICP）上，其生物胶结的机制与尿素水解的发生有关，这是微生物的脲酶活性产生铵离子和碳酸根离子的结果。然后这些离子将在有利条件下与钙离子反应以沉淀碳酸钙。MICP被研究用于裂缝修复和各种建筑材料的表面处理。研究用于生产建筑材料粘合剂的MICP已成为建筑工程的最新趋势。随着前沿MICP研究的发展，本文有利于回顾MICP在建筑工程中的最新趋势，从而全面了解微生物在生物水泥中的利用。

**关键词：**碳排放；微生物诱导的碳酸钙沉淀；尿素水解；粘合剂；建筑材料

## Bio-Cementation in Construction Materials: A Review

Dawood Muhammad Almustafa, Mohammed Iqbal, Ibrahim Alsuliman  
Department of Civil Engineering, University of Malaya, Malaysia

**Abstract:** The rapid development of the construction sector has led to massive use of raw construction materials, which are at risk of exhaustion. The problem is aggravated by the high demand for cement as binding powder and the mass production of clay bricks for construction purposes. This scenario has led to high energy consumption and carbon emissions in their production. In this regard, bio-cementation is considered a green solution to building construction, because this technology is environmentally friendly and capable of reducing carbon emissions, thus slowing the global warming rate. Most of the previously published articles have focused on microbiologically induced calcium carbonate precipitation (MICP), with the mechanism of bio-cementation related to the occurrence of urea hydrolysis as a result of the urease enzymatic activity by the microbes that yielded ammonium and carbonate ions. These ions would then react with calcium ions under favorable conditions to precipitate calcium carbonate. MICP was investigated for crack repair and the surface treatment of various types of construction materials. Research on MICP for the production of binders in construction materials has become a recent trend in construction engineering. With the development of cutting edge MICP research, it is beneficial for this article to review the recent trend of MICP in construction engineering, so that a comprehensive understanding on microbial utilization for bio-cementation can be achieved.

**Keywords:** carbon emissions, microbiologically induced calcium carbonate precipitation, urea hydrolysis, binders, construction materials

### 引言：

保护地球自然资源已成为人类环境持续存在和繁荣的重要而关键的问题。在过去的两个世纪里，由于快速的工业化、人口的巨大增长以及城市化的持续趋势，大量的自然资源得到了利用。建筑业消耗大量这些天然材料，耗尽自然资源，并导致相关的生态问题。混凝土是

地球上消耗量第二大的材料，仅次于水。但它很容易形成微裂纹并有孔隙。混凝土中的微裂缝和孔隙是非常不受欢迎的，因为它们为水和其他有害物质的进入提供了开放的通道。这会导致钢筋腐蚀并降低混凝土的强度和耐久性。在全球范围内修复混凝土裂缝的成本很高。对于修复裂缝，有多种技术可供使用，但大多数传统修复

系统是基于化学的、昂贵的并且会导致环境和健康危害。最近,微生物诱导的方解石沉淀已被提议作为一种有效的替代修复技术,用于堵塞混凝土中的微裂缝和孔隙。这种细菌修复技术超越了其他技术,因为它基于生物、生态友好、成本效益和耐用。

生物胶结越来越被认为是建筑材料粘结应用的一种绿色解决方案。生物水泥是一种利用微生物生产碳酸钙用于建筑目的的技术。通过微生物诱导的碳酸钙沉淀(MICP),微生物可以与化学成分发生反应,以作为粘合剂的有机-无机化合物形式产生矿物质。已经发表了许多关于应用MICP来提高建筑材料的机械性能的研究文章。就其使用寿命而言,混凝土裂缝对结构性能是有害的。这个问题可以通过应用芽孢杆菌的MICP来修复混凝土裂缝来克服。特别是,MICP已被用于修复混凝土裂缝,通过孔隙堵塞降低混凝土的孔隙率,处理建筑材料的表面,生产用于砂岩砖的生物水泥,在混凝土上诱导表面涂层,以及稳定分散土壤。

对MICP应用的批判性审查可以加深对生物水泥在可持续建筑建设中的作用的理解。通过评估生物水泥建筑材料的机械和化学特性,可以表征它们的坚固性和耐久性。科学证据能够为精细研究微生物在生产与常规资源可比的有形生物基建筑材料中的生物胶结机制铺平明确的方向。因此,本文的目的是提供建筑材料中生物胶结的详细概述。特别概述了不同种类的微生物在建筑材料中诱导碳酸钙沉淀的作用和有效性。

### 一、细菌处理对水泥复合材料抗压强度的影响

基于文献中的证据,MICP已被深入探索使用不同种类的微生物来提高水泥复合材料(如砂浆和混凝土)的抗压强度。*Sporosarcina pasteurii*是研究最多的芽孢杆菌,用于水泥复合材料的MICP应用。*S. pasteurii*是产生脲酶的细菌,能够诱导足够的碳酸钙沉淀,以在混凝土结构中发生生物胶结。细菌的生物胶结机制受尿素水解的影响。从尿素酵母中提取的营养培养基的掺入对于保持巴氏酵母菌处于活跃的代谢状态是必要的。需要注意的是,营养介质导致水泥水化过程延迟,硬化延迟,早期砂浆抗压强度降低。Jonkers和Schlangen报告说,在水泥浆中添加细菌和有机生物矿物前体化合物时,砂浆的抗压性可以降低10%。然而,由于细菌大量沉淀碳酸钙,细菌砂浆的抗压性在28天的生物钙化过程中有所提高。发现细菌砂浆的28天抗压强度与水泥砂浆相容。乳糖母液是乳制品工业的一种工业废水,是一种很好的营养来源,可以支持细菌的生长和脲酶活性。在另一项研究中,据报道,用硝酸钙处理的微生物砂浆的抗压强度是用醋酸钙和氯化钙处理的微生物砂浆的两倍。有趣的是,产生的原生孢子丝菌生物水泥。与巴氏杆菌DSMZ 33产生的

生物水泥相比,无侧限抗压强度(UCS)提高了461%,碳酸钙含量提高了120%。这些发现表明,生物钙化需要时间,因为脲酶的活性和碳化过程细菌需要优化方解石的最大沉淀以结合材料。

一项已发表研究的测试结果表明,在105个细胞 $\text{mL}^{-1}$ 的浓度中加入巴氏沙门氏菌可将混凝土的抗压强度提高22%(从24 MPa增加到28 MPa)。然而,当飞灰的百分比从10%增加到30%作为混凝土中水泥的部分替代物时,强度的提高变得不那么显著。阿梅里等人报道了与稻壳灰用作部分水泥替代物的自密实混凝土的最佳细菌浓度105  $\text{mL}^{-1}$ 细胞相关的类似强度效应。用10%硅灰作为部分水泥替代品的混凝土立方体经巴氏杆菌处理后,在细菌浓度为105细胞 $\text{mL}^{-1}$ 的情况下,测试处理后的水泥样品平均28天抗压强度从36 MPa增加到40 MPa $^{-1}$ 与未处理的相比。显然,在细胞浓度为106  $\text{mL}^{-1}$ 的巴氏杆菌处理后,轻骨料混凝土的抗压强度提高了20%。为了制造生物矿化砂浆,轻质膨胀粘土骨料(LECA)首先在细菌悬浮液中浸泡六天,然后在自来水中浸泡六天。预润湿的轻质细膨胀页岩骨料有效地充当内部养分库,提供延迟的养分和水分释放,支持微生物的代谢状态,从而提高生物矿化砂浆的抗压强度。除此之外,冯等人发现通过*S. pasteurii*处理MICP可以改善砂浆的再生细骨料(RFA)的性能,因为砂浆表面有足够的碳酸钙沉淀。RFA质量的提高导致砂浆的抗压强度增加。应该注意的是,由于化学和微生物胶结之间的协同作用,用水泥或地质聚合物稳定砂,然后进行MICP处理导致抗压强度和刚度显著增加。

芽孢杆菌被认为是革兰氏阳性细菌,可诱导粘合剂填充材料(碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ )沉淀)以提高混凝土的强度和耐久性。据报道,枯草芽孢杆菌的细胞壁能够介导MICP,从而形成 $\text{CaCO}_3$ ,从而使混凝土的抗压性提高15%。另一方面,观察到枯草芽孢杆菌的死细胞和活细胞对混凝土的抗压强度没有积极影响。Mondal和Ghosh[34]研究了在三种细菌细胞浓度(即103细胞 $\text{mL}^{-1}$ 、105细胞 $\text{mL}^{-1}$ 和107细胞 $\text{mL}^{-1}$ )下,枯草芽孢杆菌处理的混凝土的抗压性改进。仅在用105个细胞 $\text{mL}^{-1}$ 的细菌细胞浓度处理后,才记录到混凝土的最高强度改进。然而,另一项研究表明,与对照混凝土相比,经过枯草芽孢杆菌处理的轻骨料混凝土样品(有和没有钢纤维(细菌细胞浓度为107细胞 $\text{mL}^{-1}$ )的抗压强度值略有降低)样品[35]。另一项研究表明,基于 $30 \times 10^5$  CFU  $\text{mL}^{-1}$ [36]的巨大芽孢杆菌细胞的最佳浓度,MICP可以最大限度地提高混凝土强度。在抗压强度为50 MPa的混凝土中,观察到由处理引起的抗压强度增加更为显著,处理后混凝土的抗压强度增加值为25%。这远高于抗压

强度为 30 MPa 的混凝土经过 MICP 处理后 13% 的强度增量。在 Nain 等人的比较实验研究中。[37]，用巨大芽孢杆菌处理的混凝土样品显示出比用枯草芽孢杆菌处理的混凝土样品略高的抗压强度。

已经证明，固化条件，如温度、相对湿度、风速和阳光照射时间会影响生物水泥砂浆的强度。研究中使用的细菌是枯草芽孢杆菌，然后直接添加以诱导水泥砂浆上的生物胶结。温度、相对湿度和风速的增加导致更高的抗压强度，而暴露在阳光下的时间增加降低了生物水泥砂浆的抗压强度。张等人。已经证明，*Bacillus halodurans* 提高了工程水泥复合材料的抗压强度。Shanmuga Priya 等人。报道了使用球形芽孢杆菌提高高强度混凝土（60 MPa）的抗压强度。在含有 10% 稻壳灰作为部分水泥替代物的混凝土中加入 *Aerius* 芽孢杆菌，可将抗压强度从 36 MPa 提高到 40 MPa。除此之外，用巨大芽孢杆菌处理的粉煤灰混凝土作为水泥的部分替代品，在粉煤灰含量为 10% 的情况下，强度提高了 40%。*Bacillus pseudofirmus* 被应用于使用生物沉积法对再生混凝土骨料进行改性。*B. pseudofirmus* 呼吸代谢产生的 CO<sub>2</sub> 被用于通过 MICP 生产碳酸钙，从而提高混凝土的抗压强度。当玉米浆用作芽孢杆菌的生长培养基时，也观察到混凝土抗压强度的显着提高。CT5 用于混凝土处理 [43]。使用浓度为 10<sup>5</sup> 个细胞 mL<sup>-1</sup> 的产方解石菌株 AKKR5 对混凝土进行了处理研究。发现具有细菌菌株 AKKR5 的混凝土的抗压强度在 28 天龄时增加了 11%。然而，混凝土抗压强度降低，因为水泥袋式除尘器粉尘被用作混凝土中 10、20 和 30% 的部分水泥替代品。这些研究表明，评估细菌和营养物质、钙的来源和环境之间的相互作用，以优化碳酸钙的沉淀以用于混凝土的生物胶结目的是相关的。

几项已发表的研究也报道了生物胶结对使用芽孢杆菌以外的细菌的建筑材料的影响。戈什等人。注意到在混合水中添加不同浓度的嗜热厌氧微生物（希瓦氏菌属）可以提高水泥砂浆的抗压强度。添加 10<sup>5</sup> 细胞 mL<sup>-1</sup> 细菌浓度时，水泥砂浆 28 天抗压强度最高增加 25%。强度的提高归因于水泥砂基体孔隙中碳酸钙形式的填充材料的生长。据报道，Bio-OPC 水泥样品是通过细菌碳酸钙沉积在水泥材料上产生的。在 Charpe 等人的一项研究中，在生物 OPC 水泥样品的生产中，使用含有扁豆种子粉（蛋白质源）和糖（碳源）的土壤微生物溶液来代替水。与 OPC 水泥样品相比，生物 OPC 水泥样品的平均抗压强度提高了 23%。班萨尔等人。据报道，从海水中分离出的嗜盐细菌 *Exiguobacterium mexicanum* 可以将混凝土的抗压强度提高 24%。在 28 天后，在硅灰混凝土中加入嗜碱/耐碱细菌后，混凝土的抗压强度提高了大约

10%。实现了甲酸钙介质中的耐碱菌提高水泥砂浆养护 28 天的抗压强度。另一个重要发现表明，通过将三种微生物，即乳酸菌、光合细菌和酵母菌在合适的液体培养基中组合成一种粘合剂，可以产生有效的微生物（EMs）聚生体。结果表明，有效微生物可作为生物减水剂，提高混凝土的抗压强度。这些发现表明，可以研究多种微生物在混凝土上的应用。

可以概括为脲酶活性、细菌细胞浓度以及钙源的类型和浓度影响水泥复合材料中芽孢杆菌的生物胶结过程。除了生物水泥外，水泥复合材料的坚固性还通过加入钢纤维、稻壳灰和硅灰等原材料进一步增强。对于不产生脲酶的微生物，例如希瓦氏菌属的细菌，发现细菌细胞的浓度和营养物质的来源对其碳酸钙沉淀有着显著影响，从而对水泥复合材料产生填充和粘合作用。然而，需要进一步的研究来检查可能导致微生物对水泥复合材料产生生物胶结的其他潜在因素。

## 二、细菌处理对砖抗压强度的影响

MICP 生物砖的生产过程比目前的能源密集型砖生产过程（例如窑烧和利用水泥制造砖块）更具可持续性。在 Bernardi 等人的研究中，通过 MICP 将 *S. pasteurii* 细菌溶液添加到沙子中，通过渗透来生产生物砖。在密封模具以使砖完全饱和之前重复渗滤过程。发现生物砖的最大抗压强度为 2 MPa。Kumar 等人使用相同种类的细菌。制造了抗压强度为 4 MPa 的生物砖，Lambert 和 Randall 生产了抗压强度为 2.7 MPa 的生物砖。应该指出的是，Lambert 和 Randall 测试的生物砖是由磷酸钙和通过尿液稳定过程产生的富含尿素的溶液制成的。卜等人。采用浸泡法，将沙子放入刚性全接触模具中，然后在生物胶结介质中浸泡 7 天，以进行 MICP。生物砖的抗压强度为 1.3 MPa。

加入生物聚合物（瓜尔胶）后，以巴氏酵母菌为微生物剂的生物砖的抗压强度得到了提高，并且可以通过增加处理次数和加入纤维进一步提高强度值。用 50% 的饱和条件处理的生物砖的强度几乎是用 100% 的饱和条件处理的样品的两倍。发现方解石沉淀集中在颗粒的接触点，这导致在 50% 的饱和条件下电阻有更好的提高。对掺入粉煤灰、稻壳灰、再生混凝土骨料、钢渣等废料的生物砖的抗压强度进行了深入研究。使用再生混凝土骨料的生物砌块平均抗压强度达到 4 MPa，强度值与天然骨料相适应。注意到通过 MICP 处理粘液芽孢杆菌后钢渣砖的抗压强度范围为 8 ~ 16 MPa，并且强度随着石灰/钢渣比的增加而增加。碳酸酐酶（CA）菌可用于加速碳化过程，从而解决安全问题，提高钢渣砖的力学性能和耐久性。MICP 对水泥稳定夯土块的表面处理导致抗压强度从 12 兆帕提高到 15 兆帕，这种迹象表明抗压强度总共

增加了 25%。这些发现表明,可以优化具有不同类型细菌的砖的 MICP 工艺,并结合不同类型的回收产品和原材料废料。

可以概括为,生物砖的抗压强度取决于许多因素。这些因素包括微生物的类型、MICP 的条件、初始饱和度、使用的补充或增强原料的类型和数量,以及生物砖的生产方法。这些因素影响了生物砖的强度优化,使其孔隙率最小化,同时由 MICP 引起的结合效果最大化。还观察到,通过应用细菌方解石沉淀进行表面处理可以减少砖的孔隙率,从而提高砖的强度。

### 三、混凝土的真菌处理

真菌在提取或去除重金属方面具有巨大潜力。已经表明,黑曲霉可以有效地克服含有铸造废砂的混凝土中重金属的浸出。此外,曲霉属。分离物可用于处理废铸造砂。用 20% 的处理过的铸造废砂替代混凝土的抗压强度显着提高,与未经处理的混凝土相比,强度值从 23 MPa 增加到 33 MPa。强度的提高归因于真菌孢子在水泥砂基体孔隙中的沉积,这一事实得到了混凝土吸水率从 0.9% 降低到 0.5% 的支持。方等人。揭示了真菌菌株 *Penicillium chrysogenum* CS1 在真菌矿化过程中将砂柱的抗压强度提高了 1.8 MPa。根据所达到的抗压强度,可以推断出这种真菌具有很好的潜力用于生产砖块。

Jin 等人指出,真菌的各种理想特性可用于混凝土的自我修复。真菌最能适应混凝土在其使用寿命期间可能暴露的有害环境,例如低湿度、极端温度、紫外线和高碱度[68]。这种能力意味着由真菌介导的自愈混凝土可以具有长期的自愈能力。真菌分支结构可以为碳酸钙沉淀物提供更多的成核位点和框架支持,从而使真菌碳酸钙与酵母和细菌相比更有效地沉淀。有人提出,与细菌在生物胶结过程中的能力相比,真菌可以密封更宽的裂缝。迄今为止,对该主题的研究仍处于起步阶段,正在探索用于修复混凝土裂缝的合适真菌菌株。初步结果表明,带有里氏木霉孢子的真菌物种具有很大的愈合裂缝的潜力,因为它们在菌丝体中生长良好,并有混凝土晶体和方解石的沉淀。同一研究小组进行的一项研究表明,由于氢氧化钙从混凝土中浸出,因此在高 pH 环境下存活的混凝土板中可以生长构巢曲霉,这促进了碳酸钙的沉淀。与文献中报道的现有细菌相比,需要更多的研究来证明真菌在治愈混凝土裂缝方面的有效性。

最近,Wong 等人发现,乙醇念珠菌的真菌矿化可用于污染沙子作为细骨料的混凝土表面涂层。在 8.5 的初始最佳 pH 值、60 g L<sup>-1</sup> 的氧化钙浓度和 107 个细胞 mL<sup>-1</sup> 的真菌细胞浓度下,经测试,用真菌处理的混凝土立方体的平均 28 天抗压强度为 32.2 MPa,比未经处理的混凝土立方体大 6.27%。与未经处理的混凝土立方

体渗滤液中的重金属浓度 0.22 mg L<sup>-1</sup> 相比,处理过的混凝土立方体渗滤液中的铬浓度降低到低于世界卫生组织 (WHO) 规定的 0.05 mg L<sup>-1</sup> 的规定限值。这证明了真菌矿化对提高强度和降低真菌处理混凝土渗滤液中铬浓度的效率。

综上所述,真菌矿化在建筑材料的裂缝修复和表面处理中发挥了重要作用。通过真菌矿化,几种真菌能够沉淀碳酸钙,从而提高建筑材料的强度。研究还表明,真菌的矿化能够包裹重金属,因此成为处理污染沙子的可行生物技术。然而,真菌在真菌矿化过程中捕获各种类型重金属的亲合力因物种而异。因此,建议未来的研究应该调查各种真菌物种可以捕获的重金属的类型和浓度,这些真菌物种能够诱导碳酸钙沉淀用于处理建筑材料。

### 四、生物水泥建筑材料的吸水性

在 Achal 等人的研究中,铬渣被用于生产砖,其中 MICP 应用了尿素分解细菌芽孢杆菌。CS8 用于表面处理。处理过的砖吸水率低的结果表明它们具有低渗透性。还表明,经过细菌处理的铬渣砖比未经细菌处理的对照砖吸水量少四倍。研究表明,砖表面的细菌沉淀碳酸钙层有效地降低了吸水率和渗透性,从而提高了其工程性能以承受降解过程。据观察,经过细菌处理的铬渣砖能够抵抗雨水的影响,并且随着它们的可浸出性降低而发展出高抗侵蚀性。

Wang 等人对 CaCO<sub>3</sub> 用于修复砖裂缝进行了研究,并将其与使用羟基磷灰石 (HAP) 的类似砖应用进行了比较。进行比较是为了证明 HAP 优于 CaCO<sub>3</sub> 的优势,CaCO<sub>3</sub> 已知在低 pH 水溶液下溶解。与 CaCO<sub>3</sub> 相比,HAP 具有较低的溶解度和溶解速率。与 CaCO<sub>3</sub> 相比,它也被证明具有更高的抗酸侵蚀能力。CaCO<sub>3</sub> 处理砖的吸水率结果是根据单次处理法、多次三天处理法和多次一日处理法的试验得出的。在 14 天处理后,暴露于单次处理方法的砖的吸水率最大减少了 14.40%,这归因于 MICP 没有生成磷酸盐或钙离子。另一方面,当砖经过四个循环的多次处理时,吸水率下降了 18%,与单次处理相比明显高。最后,当砖经过 16 个循环的一天处理时,砖的吸水率明显降低了 57%,这可能与在这种处理下砖中的孔隙最小化有关。这一发现为了解最有效的 CaCO<sub>3</sub> 沉淀技术提供了非常有用的见解,该技术可用于 MICP 以优化砖裂缝的愈合。

Raut 等人研究了生物钙化技术,以使用巴氏杆菌来加强砖砌体。通过长达 28 天的密切监测,在砖砌体生物钙化后使用优化的脲酶生产 (OptU) 介质评估吸水率。进行吸水测试以测量生物钙化砖对水渗透的抵抗力,这可能会影响其强度性能。研究结果表明,含有巴氏杆菌

和 (OptU) 培养基的生物钙化砖的吸水率降低了 48.9%，并且在培养基中添加营养肉汤 (NB) 导致其吸水率降低了与对照砖相比，增加了 19.95%。从这些结果可以看出，在 OptU 培养基中巴氏杆菌的生物钙化作用要大于带有 NB 的巴氏杆菌。这可能与砖块的吸水率降低有关，因为它们 OptU 培养基中用巴氏杆菌处理后增加了耐用性和寿命。

Manzur 等人研究了 MICP 以测量脲酶阳性细菌对提高混凝土吸水性能的功效。选择 24 和 48 小时的细菌培养时间进行混凝土处理。结果表明，由于 MICP，混凝土试样的吸水率降低。在经过 48 和 24 小时细菌处理的混凝土试样的结果中，分别观察到吸水率降低了大约 18% 和 6%。吸水量的大量减少归因于  $\text{CaCO}_3$  的沉淀，它填充了砖骨料的孔隙空间，同时在混凝土中充当了颗粒粘合剂。此外，人们认识到，由于混凝土中碳酸钙沉淀所生长的细菌数量较多，因此较长的细菌潜伏期可能与吸水率的降低有关。

Wu 等人对再生混凝土骨料 (RCA) 进行了研究，该骨料已通过 *B. pseudofirmus* 在呼吸过程中诱导的碳酸钙沉积得到改善。该工艺不同于使用尿素水解沉淀  $\text{CaCO}_3$  的传统方法。RCA 研究的动机是，将建筑行业的拆除混凝土重新用作砂浆骨料是有益的，因为拆除混凝土的处置会增加垃圾填埋场的废物积累，从而退化环境。根据研究结果，发现未经处理的 RCA (U-RCA) 砂浆的吸水率较高，水灰比为 0.5，水灰比为 12.3%，水灰比为 7%，水灰比为 0.35。分别与用天然骨料 (NA) 制备的那些相比，在各自的水与水泥比下，它们分别为 8.3% 和 5%。与 U-RCA 相比，用细菌处理的 RCA (B-RCA) 生产的砂浆吸水率显著降低，0.35 w/c 比分别为 34.9% 和 0.5 w/c 比分别为 25.4%。B-RCA 吸水率的明显下降表明细菌沉积的方解石成功地堵塞了 RCA 的孔隙空间，从而降低了聚集体的吸水能力。这提高了骨料作为砂浆生产原料的质量。

吸水率是衡量建筑材料耐久性的重要参数。众所周知，由于其致密的微观结构和低孔隙率，建筑材料的耐久性随着吸水率的降低而增加。几项研究发现，细菌处理的混凝土的吸水率由于颗粒的紧密包装而降低，这反映在其微观结构上，这可能归因于空隙中存在碳酸钙。然而，应该指出的是，混凝土吸水率的降低百分比因混合设计而异，也取决于细菌处理的方法。从文献结果可以看出，火山灰和废骨料等材料的添加由于细化了混凝土中的孔隙空间，从而降低了细菌处理混凝土的吸水率，从而有效地减少了水的渗漏。Gabriele 等人指出，在细粒混凝土和低质量混凝土骨料的混凝土中，吸水率的降低更为显著。

## 五、生物水泥建筑材料的形态和化学证据

对生物胶结建筑材料的扫描电子显微照片 (SEM) 形貌的文献研究，深入了解了材料内颗粒的结合机制。另一方面，对生物水泥建筑材料化学成分的回顾提供了 MICP 固化它们的机制的信息。在这方面，来自材料的 X 射线衍射 (XRD) 和能量色散 X 射线 (EDX) 的文献发现对于提供表征其生物胶结过程的化学成分的证据非常重要。本节介绍了与这些方面相关的文献的详细分析和讨论。

### 生物胶结砂浆材料和砂浆的微观结构和化学表征

詹和钱以类芽孢杆菌为基础，利用 MICP 研究了沙粒的结合机制。在他们的工作中，根据将生物水泥喷洒在沙粒上的次数来评估沙粒与细菌生物水泥的结合效果。对于沙粒的生物胶结，喷涂过程最多进行了七次。生物胶结砂浆材料的力学性能随着喷涂时间的增加而提高，因为生物胶结过程有效地堵塞了材料的空隙空间，从而使材料的微观结构变得更加致密。在接触七次生物水泥喷雾后，与研究中观察到的生物水泥砂浆材料的所有微观结构相比，发现生物水泥砂浆材料的微观结构最致密，颗粒最紧密堆积。这可能与随着生物水泥喷射次数的增加，碳酸钙含量的增加和生物水泥砂浆材料的平均孔隙率降低有关。詹和钱报告说，通过增加生物水泥喷射次数，发现生物水泥砂浆材料的平均碳酸钙含量和平均孔隙率从 7.08% (一次喷射) 增加到 14.36% (七次喷射)；并分别从 18.3% (一喷) 降低到 13.3% (七喷)。为了量化生物胶结砂浆材料的碳酸钙，采用酸洗法。盐酸溶液用于溶解生物胶结材料样品中的碳酸钙。喷施生物水泥 1 次、3 次、5 次和 7 次的样品的平均碳酸钙量分别为 7.08%、11.56%、13.22% 和 14.36%。七次喷射后在生物胶结砂浆材料上沉淀的最高碳酸钙量为 14.36%，这支持了材料的孔隙空间被有效填充以产生其最致密状态的微观结构发现。

在 Yu 等人发表的著作中，通过最多六次注射生物复合水泥改善了生物砂岩的微观结构，也可以观察到类似的趋势。*S. pasteurii* 用于生产生物复合水泥，最终目的是通过注射提高生物砂岩的机械性能。生物复合水泥的形态特征为不规则的薄片。同样明显的是，随着注入次数的增加，生物砂岩的微观结构变得更加致密。在注入生物复合水泥 6 次后，生物砂岩的微观结构是所有微观结构中最致密的。这归因于生物砂岩中孔隙率的降低，这是由于注入细菌引起的碳酸钙沉淀。细菌碳酸钙充当了密封生物砂岩孔隙空间的粘合剂。该研究的一个局限是没有进行 XRD 测试来量化用生物复合水泥处理的生物砂岩中的碳酸钙量。尽管取得了积极成果，但仍需对注入 6 次以上的生物复合水泥对生物砂岩微观结构的影响进行更多研究，以确保实现生物水泥的优化。

据张等人, MICP 对微生物砂浆微观结构的影响取决于用于生物胶结的钙源类型。三种钙源用于巴氏杆菌诱导的微生物砂浆的生物胶结。这些是乙酸钙、硝酸钙和氯化钙。微生物砂浆采用泵送三批细菌溶液(巴氏杆菌和培养基)、固定液(50 mM 钙源)和营养液(钙源和尿素等摩尔浓度为0.5的混合物)的注浆技术生产。米)。氯化物样品具有光滑的表面和大的六面体碳酸钙晶体。另一方面,硝酸盐样品具有小的六面体形状的碳酸钙晶体。这些六面体碳酸钙晶体很可能是方解石。在醋酸盐样品的显微照片中可以看到针状碳酸钙晶体。晶体的针状形态通常以文石为特征,文石是碳酸钙的三种多晶型物之一。碳酸钙的另外两种多晶型物是球霏石和方解石。重要的是要注意,碳酸钙可以以三种不同的晶相或“多晶型物”中的任何一种结晶:方解石、文石或球霏石,它们都具有相同的  $\text{CaCO}_3$  结构式。结果表明,醋酸盐样品中的碳酸钙由 88% 的文石和 12% 的方解石形成,文石的衍射峰达到最大值  $2\theta = 26.223^\circ$ 。这证实了在醋酸盐样品的显微照片中文石作为主要碳酸钙晶体的存在。

#### 六、生物水泥在施工实践中的应用

在施工实践中, Lors 等人发现 *B. pseudofirmus* 可以诱导碳酸钙沉淀,这为修复在 500 kPa 压力下安装的核结构混凝土墙体微裂缝提供了一种生态友好的解决方案。必须注意的是,在混凝土中碳酸钙晶体形成过程中,细菌在高碱性混凝土环境中存活的能力意味着细菌的存在对水化反应没有负面影响。通过在混凝土墙上喷洒生物沉淀的细菌悬浮液,用碳酸钙密封混凝土墙的微裂缝。观察到混凝土墙的修复表面由于暴露于高压而变形最小。Lors 等人的进一步实验室研究结果表明,混凝土微裂缝中的沉淀碳酸钙可以维持 450 kPa 压力下的气流。这表明由细菌诱导的碳酸钙具有很高的耐压性,并且在高碱性环境中与混凝土具有化学相容性。综上所述,可以肯定,喷洒生物沉淀法对混凝土结构的修复和可持续修复是可行的。

#### 结论

通过对文章的批判性评论可以得出结论,微生物在混凝土、砖和砂浆等建筑材料的生物胶结中发挥了重要作用。微生物诱导生物胶结的有效性在很大程度上取决于微生物类型以及 MICP 的最佳条件。由于其高脲酶活性、生长速率和对钙源的反应性,巴氏杆菌已被确定为建筑材料中 MICP 研究最多的微生物。通过 MICP 沉淀的碳酸钙用作填料和胶结剂,可最大限度地减少建筑材料的孔隙率。除 MICP 外,在建筑材料中添加稻壳灰、硅灰、粉煤灰和铬渣作为部分水泥替代品可以进一步降低其孔隙率。正是通过 MICP 降低了建筑材料的孔隙率,从而改善了它们的机械性能。在这方面, MICP 通过裂

缝修复、表面处理和粘合效果提高了建筑材料的抗压强度并减少了吸水率。来自文献研究的生物胶结建筑材料的扫描电子显微照片和 XRD 结果表明存在方解石,这是 MICP 中微生物沉淀的最稳定的碳酸钙矿物。尽管文献中取得了积极成果,但仍需进一步研究生物水泥建筑材料的耐火性,以全面了解其耐火性。随着研究的推进,生物水泥在建筑材料中的商业化前景似乎十分广阔。

#### 参考文献:

- [1]Krishnapriya S., Venkatesh Babu D.L., Prince Arulraj G. Isolation and identification of bacteria to improve the strength of concrete. *Microbiol. Res.* 2015;174:48 - 55. doi: 10.1016/j.micres.2015.03.009.
- [2]Al-Abidien H.M.Z. Aggregates in Saudi Arabia: A survey of their properties and suitability for concrete. *Mater. Struct.* 1987;20:260 - 264. doi: 10.1007/BF02485921.
- [3]Galetakis M., Soultana A.A. Review on the utilization of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector. *Constr. Build. Mater.* 2016;102:769 - 781. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.204.
- [4]Cheng L., Kobayashi T., Shahin M.A. Microbially induced calcite precipitation for production of “bio-bricks” treated at partial saturation condition. *Constr. Build. Mater.* 2020;231:117095. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117095.
- [5]Qiu J., Tng D.Q.S., Yang E.H. Surface treatment of recycled concrete aggregates through microbial carbonate precipitation. *Constr. Build. Mater.* 2014;57:144 - 150. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.085.
- [6]Safiuddin M., Raman S.N., Zain M.F.M. Utilization of quarry waste fine aggregate in concrete mixtures. *J. Appl. Sci. Res.* 2007;3:202 - 208.
- [7]Felekoglu B., Turkel S., Baradan B. Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Build. Environ.* 2007;42:1795 - 1802. doi: 10.1016/j.buildenv.2006.01.012.
- [8]Prozorov T. Magnetic microbes: Bacterial magnetite biomineralization. *Semin. Cell Dev. Biol.* 2015;46:36 - 43. doi: 10.1016/j.semedb.2015.09.003.
- [9]Van Tittelboom K., De Belie N., De Muynck W., Verstraete W. Use of bacteria to repair cracks in concrete. *Cem. Concr. Res.* 2010;40:157 - 166. doi: 10.1016/j.cemconres.2009.08.025.
- [10]Sureshchandra H.S., Sarangapani G., Kumar B.G. Experimental investigation on the effect of replacement of sand by quarry dust in hollow concrete block for different mix proportions. *Int. J. Environ. Sci. Dev.* 2014;5:15 - 19.