

微生物诱导碳酸钙沉淀孔隙尺度加固 机理及模拟进展

楚亚杰¹, 荆留杰², 冯殿垒¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 中铁工程装备集团有限公司 电气与智能技术研究院, 郑州 450016)

摘要: 微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)是一种新兴的加固技术,具有胶结强度高、环境扰动小等优点,但在实际工程应用中仍存在碳酸钙沉淀分布不均匀、成本较高及现场监测难度大等挑战。为揭示 MICP 固化机理,系统分析了孔隙尺度 MICP 加固过程中的关键生化反应与传质过程。MICP 加固过程涉及微生物新陈代谢产生脲酶诱导尿素水解,从而产生碳酸钙沉淀以填充多孔介质的颗粒间隙,降低结构的孔隙率与渗透率,显著提升结构强度。结合微流控芯片实验研究,梳理了细菌浓度、脲酶活性、胶结液浓度、温度、灌浆方式和土体性质等因素对沉淀分布均匀性及固化效果的影响规律。同时,结合研究目的,从模型完整性、多物理场耦合度等角度总结孔隙尺度 MICP 数值模型的研究进展和不足。最后,对潜在的研究方向进行了展望。

关键词: 微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP); 孔隙尺度; 加固机理; 不均匀固结; 数值模拟

中图分类号: TU44; Q939.99; X172 文献标志码: A

Advances in Mechanism and Simulation of Microbially Induced Calcite Precipitation at Pore Scale

CHU Yajie¹, JING Liujie², FENG Dianlei¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Institute of Electrical and Intelligent Technology, China Railway Engineering Equipment Group Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China)

Abstract: Microbially induced calcite precipitation (MICP) is an emerging reinforcement technology known for its high bonding strength and minimal environmental impact. However, its engineering applications still face

challenges, such as non-uniform precipitation distribution, high costs, and difficulties in field monitoring. To explore the mechanisms of microbial reinforcement, we investigate the key biochemical reactions and mass transport processes involved in MICP at the pore scale. During MICP, the microbial metabolism produces urease, which catalyzes the hydrolysis of urea, inducing calcite precipitation. The precipitation fills the interparticle voids in porous media, reducing the porosity and permeability, and significantly enhancing the structural strength. Based on microfluidic chip experimental results, we investigate the impact of factors on the precipitation distribution and reinforcement effectiveness, such as bacterial concentration, urease activity, cementation solution concentration, temperature, injection strategies, and soil properties. Furthermore, we review the progress and limitations of pore-scale MICP numerical models, focusing on model completeness and multi-physics coupling. Finally, we discuss potential research directions.

Keywords: microbially induced calcite precipitation (MICP); pore scale; reinforcement mechanism; non-uniform cementation; numerical simulation

在城市基础设施建设中,常面临土壤承载力不足的问题,需要对不良地基进行加固与改良。传统的物理和化学方法如机械夯实、换填垫层及化学灌浆等大多依赖人造材料,生产与使用过程能耗高且伴随污染物的产生。在“碳中和”背景下,传统土壤改良方法已

收稿日期: 2024-10-22

基金项目: 国家自然科学基金(12572231, 42207198); 中央高校基本科研业务费专项资金; 浙江省宁波市重点技术研发项目(2024Z258)

第一作者: 楚亚杰, 博士生, 主要研究方向为孔隙尺度微生物诱导碳酸钙矿化过程模拟。
E-mail: yajiechu@tongji.edu.cn

通信作者: 冯殿垒, 研究员, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为计算水动力学模型与方法、微生物系统数值模拟及流-固-土耦合过程模拟。E-mail: dianleifeng@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

难以满足环境与工程的双重需求,因此亟需一种低碳高效、环境友好的新型地基改良技术。

微生物在自然界能量转换和物质循环中发挥着重要作用。例如,通过固氮、分解有机质及调控土壤结构等方式改善土壤性质^[1]。微生物诱导矿化能够改变土壤理化性质及几何结构,提升力学性能,在岩土与地质工程中展现出应用潜力^[1]。近年来,微生物岩土工程迅速发展,其中微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)成为研究热点。该技术利用微生物代谢产物脲酶催化尿素水解,生成的 CO_3^{2-} 可与 Ca^{2+} 结合形成 CaCO_3 沉淀,填充孔隙或裂缝,从而降低孔隙率和渗透率,显著提升土壤强度、刚度和抗渗透性能^[2]。MICP技术已应用于土壤加固、裂缝修复及抗侵蚀等方面^[3-5]。此外,MICP技术具有稳定性与无毒性,因此可被应用于文物保护,如石刻^[6]、陶瓷^[7]等;同时,相关生物清洗技术也应用于古书画与丝织品的揭展^[8]、清洗及修复^[9]。

然而,MICP技术的规模化应用仍面临以下多方面挑战:

(1)孔隙结构复杂性。自然土壤孔隙结构的高度异质性导致反应物难以均匀分布,沉淀堵塞输运通道后更难进入多孔介质深部,从而引起加固强度不均匀^[10]。

(2)离子干扰效应。除 Ca^{2+} 外,土壤中的 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 等离子会诱导多种沉淀共存,其物理化学性质差异造成加固效果不同。

(3)监测困难。在地下环境中,实时监测MICP过程演化具有挑战性。传统破坏性采样无法反映动态过程,非破坏性方法虽有潜力^[11-12],但实际应用时仍需采用破坏性方法布设监测设备,从而影响原有

土体状态。

(4)反应溶液配比优化。溶液配比、注入方式与速率等参数需精细调控^[13],不合适的配比会导致沉淀过早沉积并堵塞通道,引起加固不均匀。

以往有关MICP的研究,多集中于固化效果、影响因素及工程应用。然而,对于沉淀分布不均匀现象,尚缺乏系统机理分析。现有微生物矿化机理研究^[14]未能结合关键影响因素对沉淀过程进行分析,也缺乏对MICP加固机理的系统总结。为此,在孔隙尺度上结合影响沉淀分布的关键因素,对MICP固化原理与加固机理进行总结。结合微流控芯片实验,分析细菌吸附、尿素水解、晶体成核等过程对沉淀分布及孔隙率变化的影响,并结合砂柱实验,探究上述微观过程对沉淀分布影响的宏观体现。同时,引入数值模拟方法,通过流动-反应传质-沉淀的多物理场耦合,重现MICP过程沉淀模式演化及孔隙结构变化。实验与数值模拟方法相结合,有助于深化对沉淀不均匀成因的认识,为提升加固均匀性提供理论支撑。

1 MICP化学反应原理与实验系统

1.1 反应原理

基于尿素水解过程的MICP技术具有成本低、反应过程易控制^[15]等优点,该过程在24 h内即可达到约90%的 CaCO_3 化学转化效率^[16],能效较高。图1所示为尿素水解反应过程。尿素水解的核心在于细菌产生脲酶并催化。常用于MICP的菌种见表1,其中巴氏芽孢杆菌(*Sporosarcina pasteurii*, ATCC 11859)最为常用。

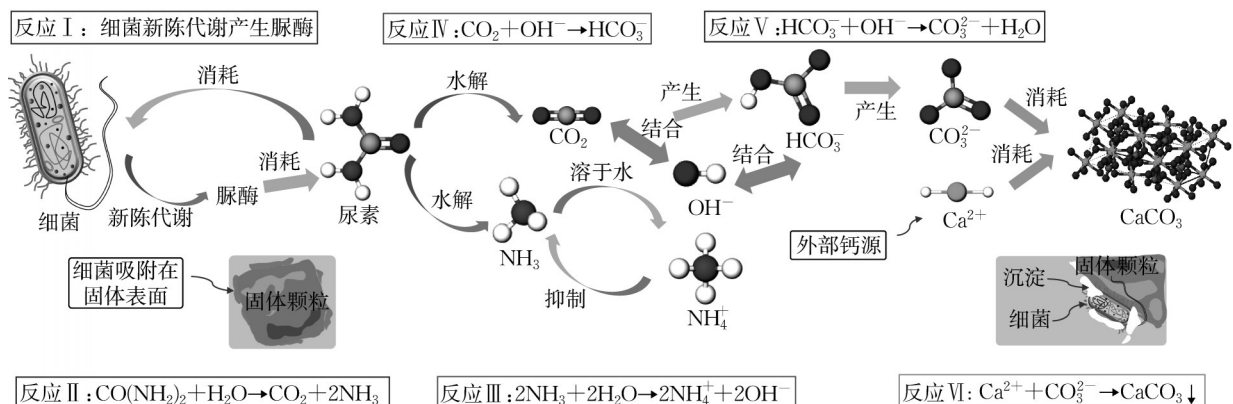


图1 脲酶菌诱导 CaCO_3 沉淀(主要以方解石晶体类型存在)产生过程示意

Fig.1 Schematic diagram of the CaCO_3 precipitation (mainly calcite) process induced by urease bacteria

表1 MICP过程中常用的菌种类型

Tab.1 Commonly used bacterial species in the MICP process

菌种	特点	参考文献
巴氏芽孢杆菌 <i>Sporosarcina pasteurii</i>	MICP中最常用的菌种,广泛存在于自然界土壤中,是已知产脲酶活性最高的菌种	[17]
枯草芽孢杆菌 <i>Bacillus subtilis</i>	通过基因工程改造获得产生脲酶的能力	[18]
贝氏芽孢杆菌 <i>Bacillus velezensis</i>	可产生脲酶,在添加天然聚合物(如瓜尔胶)条件下,产生沉淀的效率更高	[19]
考克氏菌 <i>Kocuria flava</i>	可产生脲酶、耐铜菌株,能够显著减少污染土壤中的铜含量	[20]
蜡样芽孢杆菌 <i>Bacillus cereus</i>	可产生脲酶,适用性强,耐高碱性和高温环境	[21]

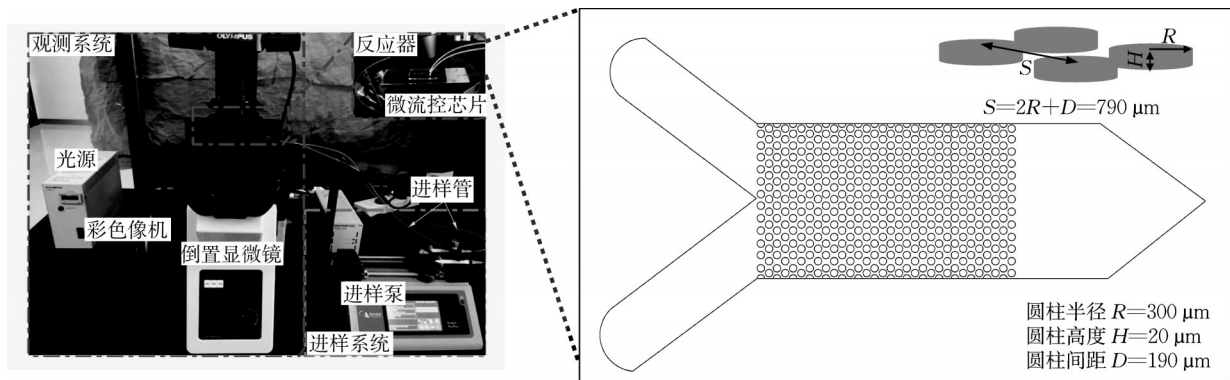
巴氏芽孢杆菌在代谢过程中消耗尿素产生脲酶,尿素在脲酶催化下发生脲解,生成 CO_2 和 NH_3 。 NH_3 可提供碱性环境,促进 CO_2 向 CO_3^{2-} 转化^[22]。土壤中若存在 Ca^{2+} ,其与 CO_3^{2-} 结合即形成 CaCO_3 沉淀。实际工程中通常需外加 Ca^{2+} 以产生足够的沉淀量。

1.2 微流控芯片实验系统

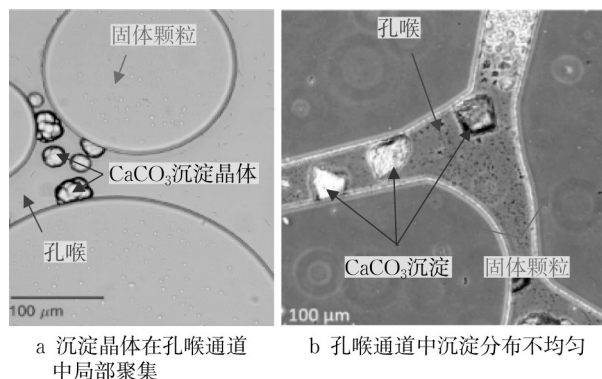
CaCO_3 的固结取决于晶体的成核方式、生长顺序和位置等,涉及结晶学、渗流力学和微生物学等多学科^[23]。由于缺乏对固结过程的直接观测,因此以往研究多依赖于固结完成后的实验结果。常规室内

实验、扫描电镜(SEM)和CT扫描只能获取最终的 CaCO_3 分布,无法捕捉形成过程^[23],因此需要更合适的观测手段。

细菌直径约为 $0.5\sim 3.0\ \mu\text{m}$ ^[2], CaCO_3 晶体通常为 $5\sim 100\ \mu\text{m}$ ^[24],因此通过孔隙尺度观测可捕捉沉淀积聚与孔隙结构的演化。微流控芯片技术可胜任该研究。微流控是利用 $10\sim 100\ \mu\text{m}$ 微通道操纵微小流体的技术^[25],已广泛应用于基因、免疫及微生物等领域。研究人员借助微流控芯片实现了对MICP动态全过程的观测。图2所示为微流控芯片实验系统。

图2 微流控芯片实验系统^[23,26]Fig.2 Microfluidic chip experimental system^[23,26]

研究人员通过微流控实验观测到了 CaCO_3 沉淀分布不均匀现象(见图3)。

图3 MICP微流控实验中 CaCO_3 沉淀分布不均匀现象^[27-28]Fig.3 Nonuniform distribution of CaCO_3 precipitation in the MICP microfluidic experiment^[27-28]

细菌在电荷作用下倾向附着于固体颗粒表面, CaCO_3 沉淀在局部积聚,导致狭窄孔喉更易堵塞,进而影响反应物运输和沉淀分布,但形成的沉淀可填充颗粒间孔隙并黏合相邻颗粒^[29-30],从而提升结构整体性。因此,影响沉淀填充孔隙过程的因素都会作用于MICP固结效果,分析这些因素对运输与沉淀分布的影响机制,有助于理解MICP加固机理并提升沉淀分布均匀性。微流控实验与实际土壤环境存在差异,但优势在于能直观展示沉淀形成与孔隙结构演化过程,便于总结反应物运输和沉淀分布规律。为了将研究结果应用于实际工程,可通过多尺度实验验证影响规律的适用性,即先在微流控尺度总结沉淀分布规律,再通过室内或现场实验检验研究结果在宏观尺度的适用性。

2 MICP加固机理

CaCO_3 沉淀在微观尺度上的分布特征会影响固化后结构的宏观力学性能。Xiao等^[31]的MICP固化路面实验表明,加固后路面强度随深度呈先增大后减小趋势。SEM图像显示, CaCO_3 晶体能够“桥接”颗粒并填充孔隙,浅土层颗粒间的“桥接”现象更明显,这与加固后路面的力学表现相符。固化后结构破坏时,“桥接”晶体断裂并随孔隙率演化^[32]。此外,晶体抵抗破坏的能力受化学键类型与强度^[33]、各向异性^[34]等因素影响,这表明 CaCO_3 晶体类型对MICP固化效果产生影响。因此,在孔隙尺度上研究MICP过程,有助于明确沉淀分布的影响因素及加固机理,对提升沉淀效率和固化结构力学性能具有重要意义。

细菌细胞壁带有负电荷^[22],注入的 Ca^{2+} 易吸附

在细菌表面,使沉淀分布受细菌分布影响。目前对MICP过程沉淀形成有2种解释^[35-37]:其一,细菌提供成核位点,沉淀沿颗粒表面生长并逐渐包裹细菌(见图4);其二,细菌仅通过脲酶水解尿素产生 CO_3^{2-} 、提升pH值促进沉淀,而沉淀晶体的生长与细菌无直接关系。Wang等^[35]在微流控实验中观测到细菌周围的成核过程。成核位点数量会影响沉淀晶体形态。Cheng等^[38]发现,在较低脲酶活性下固化结构无侧限抗压强度(UCS)更高,并借助沉淀晶体生长与成核竞争机制解释该现象^[39]。结果显示,脲酶活性高时,众多微生物分布于孔隙和颗粒表面,提供大量成核位点,而晶体的粒径与数量成反比,因此新生晶体粒径较小($2\sim 5\ \mu\text{m}$), CO_3^{2-} 主要被新晶体所消耗;脲酶活性较低时,高浓度 Ca^{2+} 使溶液过饱和,新晶体在原有晶体上继续生长,粒径达到 $20\sim 50\ \mu\text{m}$ ^[40]。

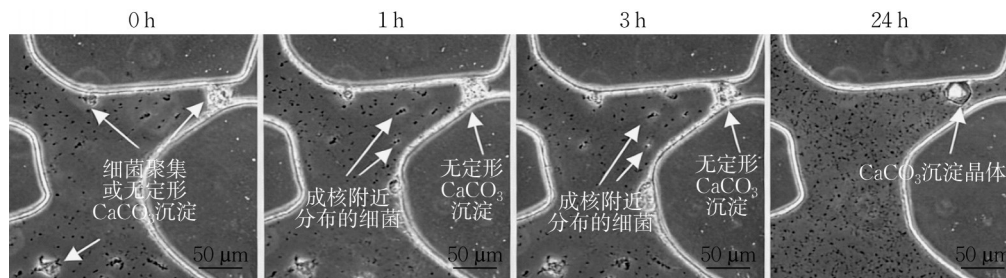


图4 MICP微流控实验中微生物周围的成核现象^[35]

Fig.4 Nucleation phenomena around bacteria in the MICP microfluidic experiment^[35]

细菌在电荷作用下吸附在土壤颗粒表面,使 CaCO_3 沉淀分布于颗粒表面并填充孔隙(见图5),从而降低孔隙率和渗透率并提高土体强度。Ferris等^[41]指出,MICP过程中 CaCO_3 的产生经历3个阶段:过饱和和溶液形成、成核位点产生以及在成核位点上形成晶体。通过分析各阶段中成核位点与沉淀分布,可探究影响沉淀产生的关键因素。需要注意的是, CaCO_3 晶体的形态(类型、尺寸和外形等)随溶液浓度、反应条件等因素的变化而演化。通常从晶体出现到形态稳定, CaCO_3 会经历球霏石、文石到方解石等形态^[42-43],其中方解石最为稳定,是MICP过程中主要存在的沉淀类型^[42]。因此,分析 CaCO_3 沉淀分布与固结效果时需结合沉淀晶体类型进行判断。

由上述可知,在MICP过程中,尿素水解产生的 CaCO_3 沉淀会积聚在固体颗粒表面,逐步填充相邻颗粒间的孔隙,实现“桥接”并形成胶结沉淀模式(见图6)。通过该模式可连接颗粒、降低渗透性^[44]并增强结构整体性能。沉淀在颗粒表面积聚会改变颗粒形状,使孔隙缩短甚至消失,从而影响多孔介质中的

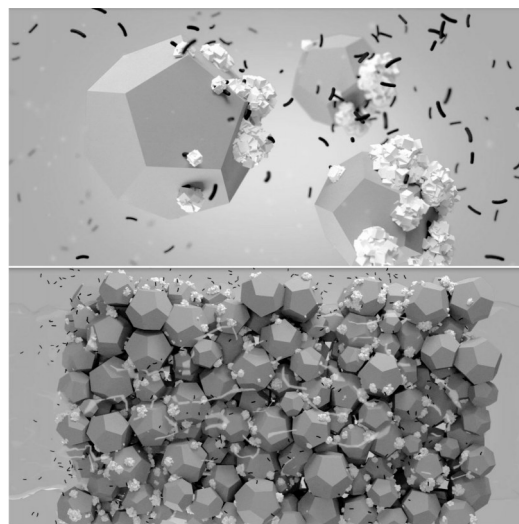


图5 MICP技术改良土壤过程^[17]

Fig.5 Soil improvement using MICP technology^[17]

流动、反应传质与沉淀过程。如图6所示,沉淀填充孔隙影响结构渗透率。不同的填充方式源于不同的沉淀模式,连接颗粒的能力也不同,进而影响加固性能。Feng等^[45]对不同沉淀模式及其形成过程进行

了阐述:表面涂层模式由颗粒表面细菌诱导,可随沉淀增加转变为胶结或混合模式;若沉淀最初出现在孔隙内部,则形成孔隙填充模式。沉淀模式反映了晶体形态的演化过程,直观展现了MICP固化机理。

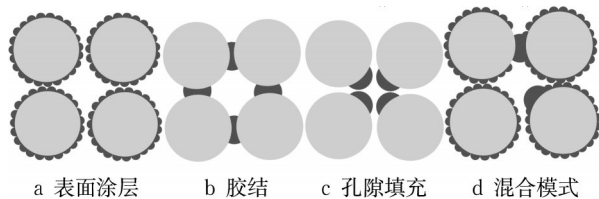


图6 CaCO_3 沉淀模式示意^[28,46]

Fig.6 Schematic diagram of CaCO_3 precipitation patterns^[28,46]

3 MICP固化影响因素

MICP固化效果受多种因素综合影响。为清晰揭示各因素的作用机制与相对重要性,可将其划分为3类:①基本反应物相关因素(物质、组分),包括细菌浓度、脲酶活性及胶结液浓度,这些因素直接决定生化反应速率、沉淀形成位置与类型,细菌浓度和脲酶活性影响尿素水解速率及成核位置^[47],胶结液浓度(尿素与 Ca^{2+} 浓度)控制沉淀生长速度与晶体稳定性^[42];②环境因素(温度),温度影响细菌生长、脲酶活性及晶体类型,在适宜温度范围(如 $20\sim 35^\circ\text{C}$)内,细菌与脲酶活性增强,有利于形成稳定的方解石晶体^[48],极端温度会降低细菌活性,导致沉淀效率下降及分布不均^[38,48];③物质运输相关因素(注浆策略与岩土物理性质),注浆策略(灌浆方式、间歇时长、流速)影响沉淀在孔隙中的运输与分布^[49],合理策略可使细菌及胶结液运输至更远区域,提高均匀性,岩土物理性质(颗粒直径、级配、饱和度)影响孔隙结构与运输路径,决定沉淀能否有效“桥接”颗粒,实现良好的固化效果。

3.1 反应物相关因素

3.1.1 细菌浓度

MICP过程由细菌诱导,因此细菌分布是影响沉淀分布的关键因素之一。在多孔介质中,细菌迁移可由胶体过滤理论描述^[50]:细菌在布朗扩散、拦截和沉降作用下滞留在颗粒表面,该滞留过程不可逆,且沿流动路径呈对数线性分布^[51]。细菌迁移还受系统离子强度影响,依据DLVO(Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek)理论^[50],离子强度升高会增强细菌附着、减少可迁移细菌,导致分布更加不均匀。研

究表明,随着细菌浓度和脲酶活性的增加,沉淀晶体直径增大^[42,52],大颗粒沉淀较难被流体冲刷,多孔介质孔喉会被持续积累的沉淀占据,从而产生早期堵塞^[53]。根据胶体过滤理论,高浓度细菌在注入点附近积聚,会诱导大量沉淀生成,使反应入口更易发生堵塞,因此注入较低浓度细菌被认为是提升沉淀均匀性的有效策略之一^[52]。此外,随着反应的进行,系统离子浓度升高,细菌更易被吸附于颗粒表面,进一步阻碍迁移,加剧分布不均,从而在局部诱发沉淀堵塞。

在生物矿化过程中, CaCO_3 沉淀晶体类型会发生演化(见图7),该过程受细菌浓度^[42]、 Mg^{2+} 浓度^[54]等因素影响。不同晶体类型在颗粒形态和稳定性上存在差异(如球霏石为球体,方解石为菱面体),从而影响流动路径和反应过程,进而作用于沉淀分布。细菌作为脲酶提供者,其浓度决定 CaCO_3 的生长速率和晶体形态。Wang等^[42]基于微流控实验研究了不同细菌浓度下 CaCO_3 沉淀。结果表明,中浓度细菌产生初始晶体尺寸小但可逐渐生长的稳定大晶体,在颗粒连接处形成沉淀,有效黏合颗粒、填充孔隙,降低渗透率并提升土壤强度;高浓度细菌虽可产生大量沉淀,但晶体多为低密度、形态不稳定的无定形 CaCO_3 晶体(ACC),在水流作用下易被输送至孔喉并产生堵塞,导致反应减缓、沉淀堆积及分布不均。ACC虽能填充孔隙,但强度远低于稳定 CaCO_3 晶体,无法实现“桥接”作用,因此难以有效提升土体强度。图8所示为不同微生物含量下沉淀分布随时间的变化。

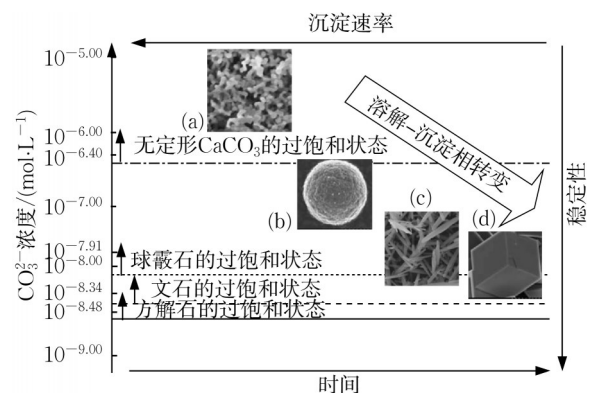


图7 MICP中 CaCO_3 晶体类型演化过程^[42]

Fig.7 Evolution of CaCO_3 crystal types during MICP^[42]

3.1.2 脲酶活性

在MICP过程中,脲酶活性影响反应速率、沉淀

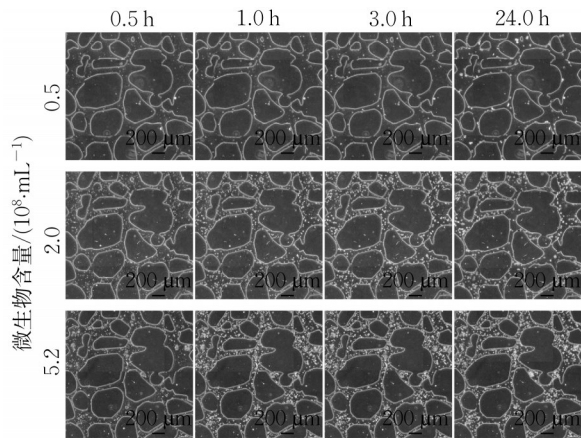


图8 不同微生物含量下 CaCO_3 沉淀分布随时间的变化^[42]
Fig.8 Temporal evolution of CaCO_3 precipitation distribution under different microbial concentrations^[42]

效率^[55]和沉淀模式^[56],进而对沉淀分布的均匀性产生影响。与细菌浓度的影响类似,较低活性的脲酶(如 $\text{OD}_{600}=1.0$)有助于获得更均匀的沉淀分布^[55](见图9),从而在相邻颗粒间形成有效“桥接”^[38,55]。较低脲酶活性使反应速率变慢,但也使微生物等反应物在对流与扩散作用下更远离注入点,进入更深的孔隙结构,不会在入口区域提前堵塞,使MICP过程得以持续进行,最终形成更均匀的沉淀分布。Cheng等^[38]进一步指出,低活性脲酶水解速率慢、 CaCO_3 晶体形成较慢,但其产生的沉淀晶体更能“桥接”颗粒,固化后的UCS更高。低活性脲酶产生的晶体易形成“团簇”,粒径为20~50 μm (约为高活性脲酶的10倍),孔隙被沉淀填充后,这些团簇主要分布在颗粒表面。

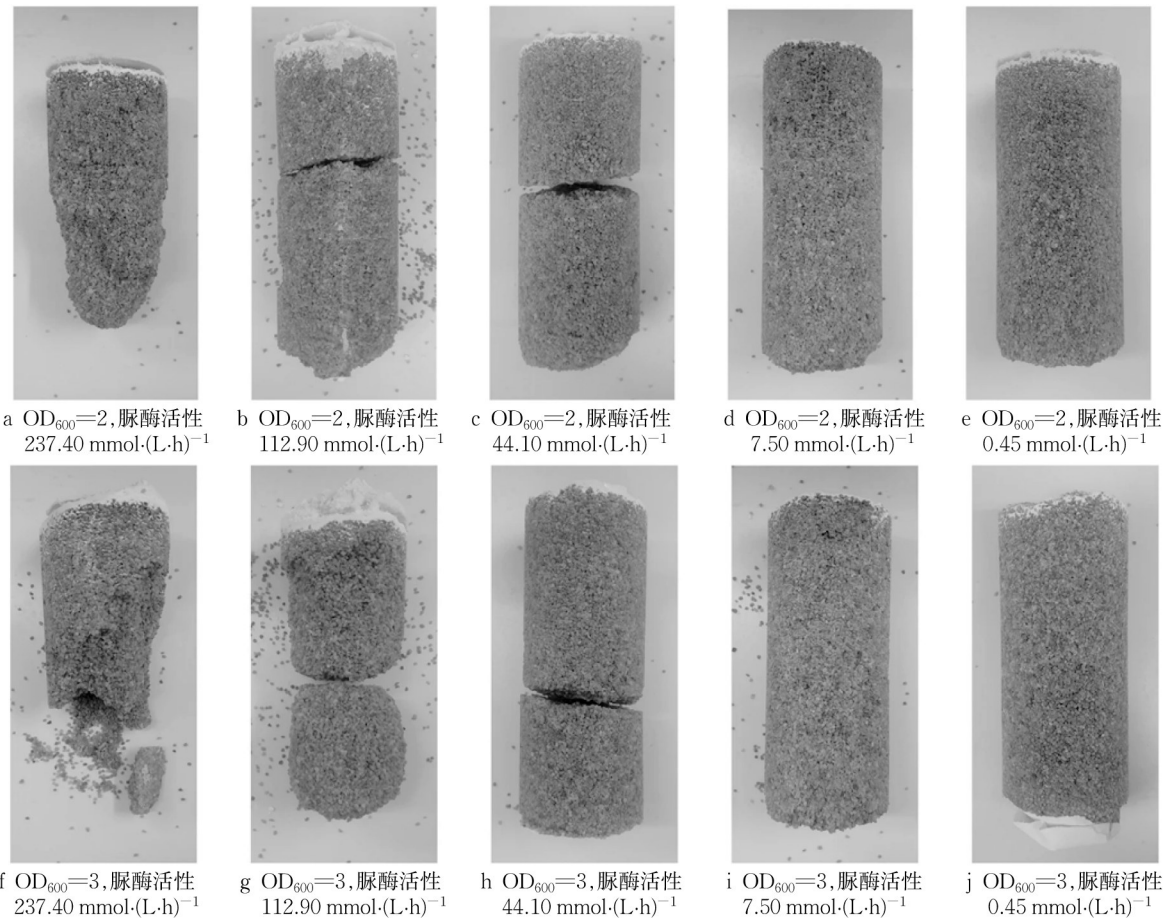


图9 不同脲酶活性下MICP加固后的砂柱试样^[55]

Fig.9 Sand column samples after MICP treatment under different urease activities^[55]

需要指出的是,在实际应用中细菌浓度与脲酶活性相互影响,使沉淀分布呈现非线性演化特征。两者存在协同与制约关系:细菌浓度增加通常伴随脲酶活性提升,加快尿素水解并促进沉淀形成。然

而,高浓度细菌会使局部pH值升高,影响脲酶活性,从而抑制尿素水解,导致局部 CO_3^{2-} 不足,进而引发沉淀分布不均,影响固化效果。由此可知,脲酶活性受细菌浓度制约^[57],当两者同时变化时,细菌浓度将

成为影响沉淀分布的主导因素。

3.1.3 胶结液浓度

由3.1.1和3.1.2节可知,当微生物总量较多且脲酶活性较低时,可提升沉淀效率并获得更均匀的沉淀分布^[55]。胶结液浓度对沉淀分布的影响也遵循类似规律。较低胶结液浓度下, CaCO_3 晶体分布更均匀^[56]; 而高胶结液浓度下则沉淀生成更快^[58], CaCO_3 晶体随机填充孔隙, 分布紊乱。Al Qabany等^[52]的实验结果表明,不同浓度的尿素和 Ca^{2+} 溶液得到的固化强度不同,使用低浓度混合溶液处理的样本具有更高的UCS。低胶结液浓度下产生的沉淀更均质,能够充分填充颗粒孔隙(见图6中孔隙填充模式)并形成有效“桥接”(见图10),从而显著降低渗透率;高胶结液浓度下虽可快速形成较大晶体并造成局部堵塞,但沉淀分布不均匀,导致固化后力学性能提升不如低胶结液浓度下。

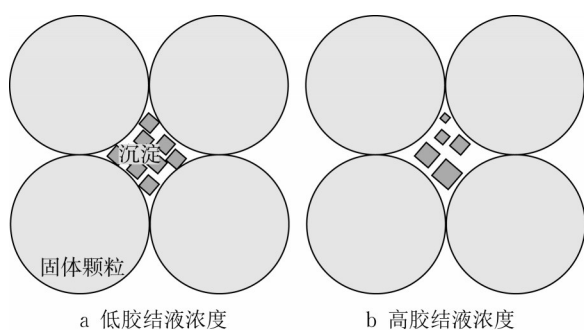


图10 孔喉通道中产生的不同粒径 CaCO_3 沉淀晶体示意(修改自文献^[52])

Fig.10 Schematic diagram of CaCO_3 precipitation crystals with different sizes formed in pore throats (modified from Ref.[52])

然而,胶结液浓度并非越低越好。Lv等^[59]研究了不同胶结液浓度(1.25、1.00、0.10 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)对沉淀晶体类型的影响。结果表明,当浓度为0.10 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,生成沉淀中球霏石占比明显高于方解石。为分析胶结液浓度对沉淀类型的影响,Lv等^[59]基于Michaelis-Menten方程推导了尿素水解速率与尿素浓度的关系,即:

$$v_0 = \frac{v_{\max} c_{\text{urea}}}{K_{m,\text{urea}} + c_{\text{urea}}} \quad (1)$$

式中: v_0 、 v_{\max} 分别为尿素水解的初始速率和最大速率; c_{urea} 为尿素浓度; $K_{m,\text{urea}}$ 为Michaelis常数。当 c_{urea} 远大于 $K_{m,\text{urea}}$ 时,即使 c_{urea} 降低也不会显著影响水解速率;当 c_{urea} 与 $K_{m,\text{urea}}$ 相近时,尿素水解速率随 c_{urea} 降低而显著下降。因此,反应发生时,尿素水解速率随

反应推进逐渐下降,导致沉淀速率下降。此外,Lv等^[59]对不同浓度胶结液的SEM图像分析表明,在0.10 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下沉淀晶体表面可观察到细菌残留,说明细菌未被完全消耗,这表明其他反应物(如 Ca^{2+})也未被完全消耗;同时,有机分子会阻碍沉淀类型由球霏石向方解石转化^[60-61]。上述原因导致了0.10 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度条件下沉淀以球霏石为主。

此外,尿素与 Ca^{2+} 的浓度比值也会影响沉淀分布和效率。Martinez等^[62]发现,当尿素与 Ca^{2+} 浓度比 >1.0 时,副产物(如 NH_4^+)增多,溶液pH值升高(尽管 CaCO_3 沉淀对溶液pH值增加具有缓冲作用),沉淀速率和转化效率提升^[29],但是过快沉淀会堵塞孔喉,降低沉淀均匀性。当尿素与 Ca^{2+} 浓度比 ≤ 1.0 时,副产物较少,pH值变化小,尿素水解减缓^[63]。虽然沉淀效率下降,但是反应物在多孔介质中分布更均匀,更利于形成均匀沉淀^[62]。因此,在实验和工程实践中应合理设置尿素与含 Ca^{2+} 溶液的浓度(如将尿素浓度设为 CaCl_2 的1.5倍^[35,62]),以兼顾较高钙转化率与良好的沉淀均匀性。

实际工程中土壤异质性导致渗透路径不规则、扩散速率不均匀,从而影响沉淀分布。为研究该影响,可利用CT扫描、3D-PMRNN等方法^[64-65]重建真实孔隙结构,结合微流控实验分析反应溶液的渗透扩散规律,提取流速、沉淀量、孔隙率与渗透率的变化特征。

3.2 环境因素(温度)

细菌的生长、衰亡,脲酶活性、尿素水解速率及 CaCO_3 成核等过程均受温度影响^[48,56]。为探究温度对细菌密度、活性和 CaCO_3 晶体形态的影响,Wang等^[48]结合常见工程温度开展微流控实验,监测了4~50 $^{\circ}\text{C}$ 条件下 CaCO_3 晶体的时空演化过程。结果表明,低温(4 $^{\circ}\text{C}$)不影响细菌活性,但会降低生长速率、吸附率及沉淀速率;高温(50 $^{\circ}\text{C}$)显著降低细菌密度和脲酶活性。Rebata-Landa^[66]指出,温度高于60 $^{\circ}\text{C}$ 时细菌死亡, CaCO_3 不再产生。因此,理解温度对 CaCO_3 晶体形成及类型演化的影响有助于提升沉淀分布的均匀性。

Wang等^[48]发现,在4~50 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,沉淀形态由球体向菱面体演化,在35、50 $^{\circ}\text{C}$ 时方解石占比达到100%。其他学者(如Wang等^[35]、Xiao等^[26])也观察到,20 $^{\circ}\text{C}$ 时球体晶体逐渐演化为菱面体。Wang等^[42]还指出,低温虽可通过提高细菌密度增加沉淀量,但产生的晶体尺寸较小,且经历溶解-再沉淀过程需要更长时间。已有研究显示,MICP固化

结构的力学性能主要依赖大尺寸沉淀晶体^[28,38],因此小尺寸晶体虽不易堵塞孔喉并使得沉淀分布均匀,但难以提供足够的加固效果。图11所示为不同温度下MICP产生的CaCO₃晶体形态。可知,在4、50℃时晶体尺寸显著小于20℃时,这与Cheng等^[38]

的观察一致。4、50℃下沉淀分布主要呈现涂层模式(见图6),而20℃下晶体可填充孔隙并形成混合模式,因此室温条件下的固结效果最优。工程实践中,为应对现场温度波动,可选择耐高温性强的菌株,或从当地土壤中筛选适应性菌株。

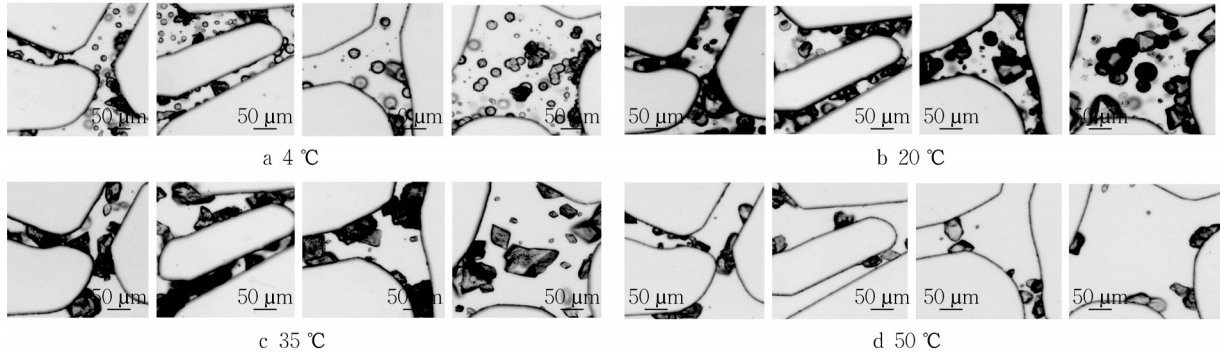


图11 不同温度下MICP产生的CaCO₃晶体形态^[48]

Fig.11 Morphology of CaCO₃ crystals produced by MICP at different temperatures^[48]

3.3 物质运输相关因素

3.3.1 灌浆方式

在MICP过程中,灌浆方式会影响CaCO₃晶体的形态演化、沉淀量和分布均匀性。Zhao等^[49]通过微流控实验比较并行连续、并行间歇和分段间歇3种传统灌浆方式,发现沉淀分布均存在不同程度的不均匀性。并行灌浆易在注入点附近产生大量ACC,说明脲酶与胶结液混合后反应迅速但不充分(见图12)。Weinhardt等^[43]指出,ACC可作为成核位点,在反应早期促进沉淀生成并快速降低渗透率。然而,由于ACC密度小,因此易被流体运移至孔喉并造成堵塞,且随后演化为球霏石或方解石。相比

之下,间歇式灌浆为细菌提供吸附时间,分段灌浆条件下ACC生成速率较低,可减缓孔喉堵塞,有利于细菌运输,使其在系统内分布更均匀。因此,间歇式灌浆沉淀效率通常高于连续式灌浆^[28,62],更能实现颗粒“桥接”,提升固化后的力学性能。Wang等^[47]进一步指出,在分段灌浆条件下,胶结液的注入会冲刷微生物,使其由入口向中心区域运移,从而在反应区域内形成更均匀的分布(见图13),有利于获得均匀CaCO₃沉淀。图13中,左、中、右分别指实验装置的左侧、中间和右侧区域,靠近入口为左侧,远离入口为右侧,溶液由实验装置的左侧入口注入;V_p为溶液装置的孔隙体积。

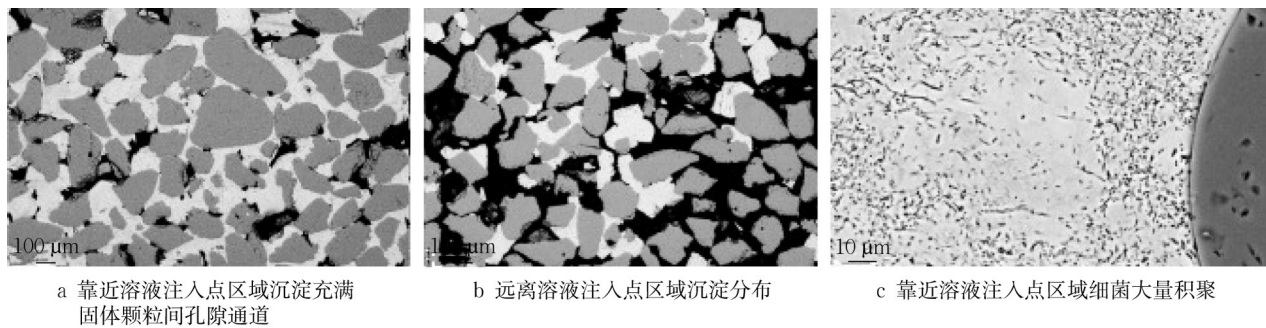


图12 连续注浆时CaCO₃沉淀和细菌分布^[67]

Fig.12 Distribution of CaCO₃ precipitation and bacteria during continuous injection^[67]

然而,传统灌浆方式并非在所有场景中均有效。例如,在油污染土中,Cheng等^[38]发现疏水性油会显著降低细菌固定率,即使采用分段灌浆也难以保持细菌在颗粒表面的附着。通过在CaCl₂溶液中预混

细菌与土壤,利用CaCl₂的絮凝作用提升细菌留存率,从而改善沉淀均匀性。高效灌浆方式的关键在于提高细菌在颗粒表面的吸附量,使细菌在后续注浆冲刷过程中仍能保持较高留存,通过对流与扩散

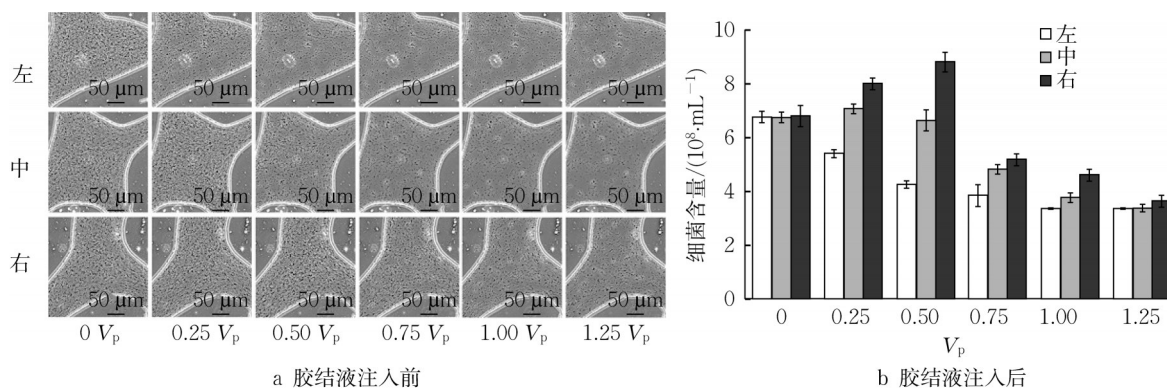


图 13 微流控芯片不同区域微生物分布特征^[47]

Fig.13 Bacteria distribution in different regions of the microfluidic chip^[47]

实现更均匀的分布。MICP 技术工程应用中,可通过数值模拟、现场实验及原位实验确定分段长度、间歇时间与灌浆流速^[68-69]等灌浆参数。

3.3.2 土体饱和度与颗粒直径

土体性质会直接影响 MICP 固化效果^[1]。Cheng 等^[70]发现,较低饱和度有利于 CaCO_3 沉淀分布在颗粒间,产生有效“桥接”。进一步研究显示,相较于 40%、80%、100% 饱和度,20% 饱和度时沉淀更集中于颗粒之间,可有效填充孔隙;固化后在相同沉淀量条件下,低饱和度试样的强度和刚度均优于高饱和度试样^[71]。图 14 表明,100% 饱和度时颗粒完全浸没,沉淀分布位置分散;20% 饱和度时胶结液可“包裹”颗粒,在接触点形成沉淀,增强“桥接”作用(对应图 6 中涂层模式)。因此,100% 饱和度条件下颗粒边界上可能产生过量沉淀,而有效强度主要取决于接触点 CaCO_3 沉淀的有效性,并非沉淀总量^[71]。

土粒粒径与细菌粒径的相容性影响细菌滞留、吸附和运移^[72]。孔隙应足以允许细菌活动,研究表明最适宜的土壤粒径为 50~400 μm ^[73]。土粒粒径不

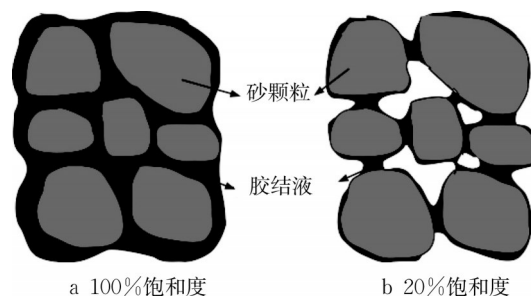


图 14 不同土体饱和度条件下砂土中胶结液分布示意^[71]

Fig.14 Schematic diagram of the distribution of cementation solution in sandy soil under different soil saturations^[71]

仅影响反应物输运,还决定晶体附着位点数量,进而影响固化效果。Mitchell 等^[73]指出,当 CaCO_3 沉淀位于颗粒接触点时固化效果最佳。若孔隙率一致,则级配良好的粗颗粒砂土比级配差的细颗粒砂土具有更快的沉淀速率^[74]。砂粒越小,沉淀黏结的有效面积越大,固化效果越显著^[75]。图 15 展示了颗粒间有效与无效“桥接”。

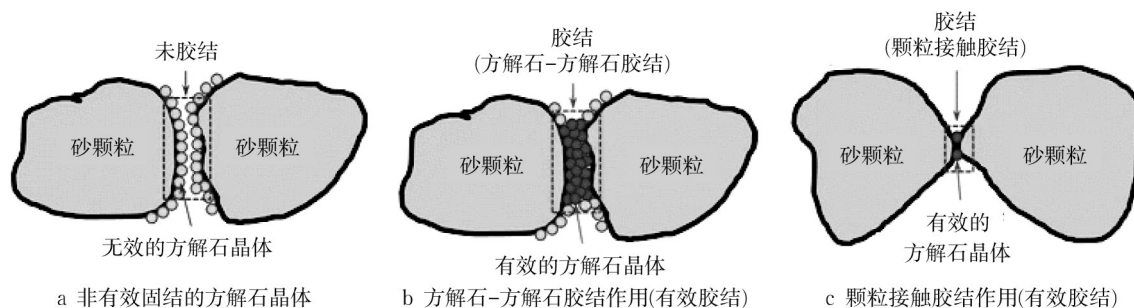


图 15 非有效和有效固结对应的方解石晶体分布示意^[76]

Fig.15 Schematic diagram of calcite distribution corresponding to ineffective and effective consolidation^[76]

3 节探讨了 MICP 过程的关键影响因素及其对沉淀分布和固化效果的影响。对便于观测的物理过

程,实验研究能够揭示其背后机制。然而,对于不透明的多孔介质,许多瞬时现象(如涡旋等)难以通过

传统实验手段直接观察,更无法探究其隐含的物理规律。数值模拟是另一种有效的研究方法。通过实验研究可以构建数值模型,并逐步发展出更先进的数值预测能力。数值模拟能够完整呈现实验难以捕捉的物理过程。因此,为更全面理解 MICP 过程,数值模拟研究不可缺少。

4 孔隙尺度 MICP 数值模型

MICP 过程涉及复杂的流动-反应传质-沉淀多物理场耦合,该过程发生在不透明的多孔介质内部^[77],实验难以直接实时捕捉各变量的空间分布和动态演化。因此,构建可靠的孔隙尺度数值模型成为揭示 MICP 机制及优化应用的重要途径。孔隙尺

度的数值模型特别适合描述微观结构上对流扩散、反应传质过程中物质的空间分布及其动态演化^[78-79]。表2总结了孔隙尺度 MICP 数值模型。表2中,溶度积近似表示为 CO_3^{2-} 与 Ca^{2+} 浓度的乘积。

具体而言,孔隙尺度 MICP 数值模型旨在研究以下关键问题:

(1)生化反应与传质机制。MICP 过程中,生物膜生长、尿素水解、沉淀成核及晶体生长相互耦合,从而决定沉淀的空间分布与演化。Zhang 等^[80]提出了生物膜诱导沉淀的混合相模型,该模型耦合生物膜演化、生化反应和流动剪切过程,指出沉淀主要发生在生物膜与反应物界面,并证实尿素水解速率对沉淀动力学的主导作用。然而,该模型将沉淀视为高黏度流体,未考虑孔隙结构的动态演化。

表2 孔隙尺度 MICP 数值模型

Tab.2 Pore-scale MICP numerical models

模型	流动模型	反应传质模型	沉淀模型	多物理场耦合	沉淀形态演化	生物膜模拟	沉淀溶解	沉淀策略	pH 值变化
	多维孔隙结构构建	细菌流动剪切	沉淀流动剪切						
Zhang 等 ^[80]	否	否	否	流动-反应传质-沉淀	是	是	否	大于溶度积	是
Qin 等 ^[81]	否	是	是	流动-反应传质-沉淀	否	是	是	大于溶度积	是
Nishimura 等 ^[82]	否	否	否	反应传质-沉淀	是	否	是	大于溶度积	否
Razbani 等 ^[83]	是	否	否	反应传质-沉淀	是	否	否	大于溶度积	是
Feng 等 ^[45]	是	是(吸附与流速相关)	是(沉淀与流速相关)	流动-反应传质-沉淀	是	否	否	大于溶度积,沉淀发生传递	否

(2)反应物输运与孔隙结构动态演化。孔隙结构异质性显著影响反应物输运路径和沉淀分布。Qin 等^[81]的孔隙网络模型模拟了流动、生物膜生长、传质和沉淀演化,强调尿素和生物膜分布对沉淀分布的控制作用,但未考虑孔隙结构的动态演化。Feng 等^[45]构建了耦合多物理场的孔隙尺度 MICP 模型,揭示了异质孔隙结构中沉淀分布演化规律及局部流动模式对沉淀分布的影响,并重现了多种沉淀模式(见图16),为理解微生物加固机理提供依据。然而,该模型未考虑生物膜与沉淀耦合过程。

(3)细菌行为与沉淀耦合效应。沉淀分布受细菌吸附与空间分布影响显著。Nishimura 等^[82]提出的耦合模型表明,沉淀分布与细菌群落分布一致,且微生物分布对沉淀空间结构起主导作用。相反,Razbani 等^[83]建立的二维孔隙尺度模型认为,生物量密度对整体沉淀分布的影响有限,沉淀均匀性更受尿素水解速率与沉淀速率的比值控制。两者差异反映了不同模型假设下细菌作用机制的复杂性,有待进一步研究。

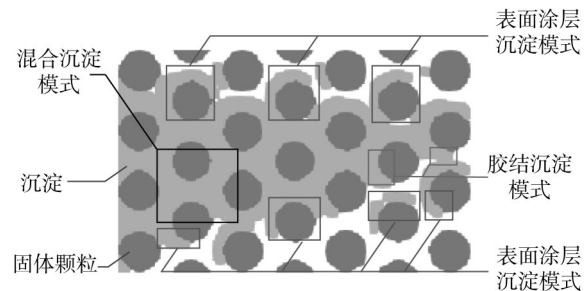


图16 孔隙尺度 MICP 数值模拟中多种沉淀模式

Fig.16 Various precipitation patterns in pore-scale MICP numerical simulations

5 结论与展望

(1)MICP 固化机理。MICP 通过脲酶催化尿素水解生成 CaCO_3 沉淀,沉淀以胶结、表面涂层或孔隙填充等模式填充分布于颗粒之间,实现有效“桥接”,降低孔隙率和渗透率,从而显著提升土体整体强度与刚度。沉淀在颗粒接触点的分布最为关键。

(2)影响因素及其作用机制。关键因素对沉淀分布与固化效果的影响不同。适当降低细菌浓度、

选用低活性脲酶可减缓沉淀速率、改善输运、提升沉淀分布均匀性;合理控制尿素与 Ca^{2+} 浓度比值可避免反应早期堵塞并调控沉淀类型;温度宜保持在20~35℃范围内,极端温度会影响细菌活性与沉淀晶体类型;分段间歇式灌浆有助于提高细菌吸附与沉淀分布均匀性;低饱和度(20%~40%)及粒径为50~400 μm时的土体适合实施MICP技术。

(3)研究方法的进展与应用。微流控实验可直观表征沉淀演化规律;孔隙尺度数值模型通过耦合流动-反应传质-沉淀过程,可预测沉淀分布趋势,并为工程应用提供理论依据。

未来需构建更完备的多物理场模型,并结合微流控实验强化参数反演与模型验证。为推动孔隙尺度研究成果向实际工程应用的转化,未来研究应注重跨尺度实验与数值模拟技术的发展。现场实施需结合土体异质性、地下水流动及温度变化等因素优化灌浆参数,并发展实时监测与反馈控制手段。针对大规模应用,还需关注尿素等材料的来源与可持续性,并探索非脲解路径的MICP技术,以提升技术的经济性与可持续性。

作者贡献声明:

楚亚杰:论文框架构思,论文撰写与修改。

荆留杰:全文审阅。

冯殿奎:论文框架修改,全文审阅。

参考文献:

- [1] 王双娇,李志清,田怡帆,等.微生物岩土工程技术的过去、现在与未来[J].工程地质学报,2024,32(1):237.
WANG Shuangjiao, LI Zhiqing, TIAN Yifan, *et al.* The past, present and future of technology in microbial geotechnical engineering [J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(1): 237.
- [2] QIN W, WANG C Y, MA Y X, *et al.* Microbe-mediated extracellular and intracellular mineralization: environmental, industrial, and biotechnological applications [J]. Advanced Materials, 2020, 32(22): 1907833.
- [3] 刘汉龙,马国梁,肖杨,等.微生物加固岛礁地基现场试验研究[J].地基处理,2019,1(1):26.
LIU Hanlong, MA Guoliang, XIAO Yang, *et al.* In situ experimental research on calcareous foundation stabilization using MICP technique on the reclaimed coral reef islands [J]. Chinese Ground Improvement, 2019,1(1): 26.
- [4] VAN PAASSEN L A. Bio-mediated ground improvement: from laboratory experiment to pilot applications [C]//Geo-Frontiers 2011. Dallas: American Society of Civil Engineers, 2011: 4099-4108.
- [5] MARTIN K K, TIRKOLAEI H K, KAVAZANJIAN E. Field-scale EICP biocemented columns for ground improvement [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2024, 150(8): 05024006.
- [6] 刘汉龙,韩绍康,陈卉丽,等.潮湿环境砂岩质石窟岩体微生物加固补配修复方法[J].土木与环境工程学报,2022,44(6):219.
LIU Hanlong, HAN Shaokang, CHEN Huili, *et al.* Microbial reinforcement and repair method of sandstone grottoes in humid environment [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(6): 219.
- [7] HE X, GU L, ZHANG C, *et al.* Use of MICP with active bioslurry for restoration of fragmented ceramic artifacts: mechanical and fracture behaviors study [J]. Case Studies in Construction Materials, 2025, 22: e04626.
- [8] 闫丽,楼朋竹,武望婷,等.生物揭展剂在古书画文物揭展中的应用[J].文物保护与考古科学,2017,29(3):1.
YAN Li, LOU Pengzhu, WU Wangting, *et al.* Development of a biological method for removing ancient paintings and calligraphy from backings [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2017, 29(3): 1.
- [9] 武发思,张永,苏敏,等.生物技术在文物保护修复中的应用研究进展[J].文物保护与考古科学,2022,34(1):133.
WU Fasi, ZHANG Yong, SU Min, *et al.* Advancement of biotechnology for the conservation and restoration of cultural heritage objects [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2022, 34(1): 133.
- [10] CUNNINGHAM A B, CLASS H, EBIGBO A, *et al.* Field-scale modeling of microbially induced calcite precipitation [J]. Computational Geosciences, 2019, 23(2): 399.
- [11] KIRKLAND C M, ZANETTI S, GRUNEWALD E, *et al.* Detecting microbially induced calcite precipitation in a model well-bore using downhole low-field NMR [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(3): 1537.
- [12] THRANE L W, DAILY R L, THANE A, *et al.* Detecting microbially induced calcium carbonate precipitation in porous systems using low-field nuclear magnetic resonance relaxometry [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146(4): 04020012.
- [13] ARPAJIRAKUL S, PUNGRASMI W, LIKITLERSUANG S. Efficiency of microbially-induced calcite precipitation in natural clays for ground improvement [J]. Construction and Building Materials, 2021, 282: 122722.
- [14] 刘汉龙,赵常,肖杨.微生物矿化反应原理、沉积与破坏机制及理论:研究进展与挑战[J].岩土工程学报,2024,46(7):1347.
LIU Hanlong, ZHAO Chang, XIAO Yang. Reaction principle, deposition and failure mechanisms and theory of biomineralization: progress and challenges [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(7): 1347.
- [15] DHAMI N K, REDDY M S, MUKHERJEE A. Biomineralization of calcium carbonates and their engineered

- applications: a review [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2013, 4: 1.
- [16] AL-THAWADI S M. Ureolytic bacteria and calcium carbonate formation as a mechanism of strength enhancement of sand [J]. *Journal of Advanced Science and Engineering Research*, 2011, 1: 98.
- [17] TERZIS D, LALOUI L. A decade of progress and turning points in the understanding of bio-improved soils: a review [J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2019, 19: 1.
- [18] HOFFMANN T D. Genetic optimisation of bacteria-induced calcite precipitation in *Bacillus subtilis* [J]. *Microbial Cell Factories*, 2021, 20: 1.
- [19] DIKSHIT R, JAIN A, DEY A, *et al.* Microbially induced calcite precipitation using *Bacillus velezensis* with guar gum [J]. *PLOS ONE*, 15(8): 1.
- [20] ACHAL V, PAN X, ZHANG D. Remediation of copper-contaminated soil by *Kocuria flava* CRI1, based on microbially induced calcite precipitation [J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(10): 1601.
- [21] OUALHA M, BIBI S, SULAIMAN M, *et al.* Microbially induced calcite precipitation in calcareous soils by endogenous *Bacillus cereus*, at high pH and harsh weather [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 257: 109965.
- [22] SANG G, LUNN R J, EL MOUNTASSIR G, *et al.* Meter-scale MICP improvement of medium graded very gravelly sands: lab measurement, transport modelling, mechanical and microstructural analysis [J]. *Engineering Geology*, 2023, 324: 107275.
- [23] 何想, 马国梁, 汪杨, 等. 基于微流控芯片技术的微生物加固可视化研究 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(6): 1005.
HE Xiang, MA Guoliang, WANG Yang, *et al.* Visualization investigation of bio-cementation process based on microfluidics [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(6): 1005.
- [24] MURUGAN R, SURAIISKUMAR G K, MUKHERJEE A, *et al.* Influence of native ureolytic microbial community on biocementation potential of *Sporosarcina pasteurii* [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 20856.
- [25] 王志琪. 用于模拟海洋灾害性生物微环境的微流控芯片设计制造方法研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2023.
WANG Zhiqi. Research on design and fabrication method of microfluidic chip for simulating marine catastrophic microenvironment [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2023.
- [26] XIAO Y, HE X, WU W, *et al.* Kinetic biomineralization through microfluidic chip tests [J]. *Acta Geotechnica*, 2021, 16(10): 3229.
- [27] ELMALOGLOU A, TERZIS D, DE ANNA P, *et al.* Microfluidic study in a meter-long reactive path reveals how the medium's structural heterogeneity shapes MICP-induced biocementation [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 19553.
- [28] WANG Y, KONSTANTINOU C, SOGA K, *et al.* Use of microfluidic experiments to optimize MICP treatment protocols for effective strength enhancement of MICP-treated sandy soils [J]. *Acta Geotechnica*, 2022, 17(9): 3817.
- [29] DEJONG J T, MORTENSEN B M, MARTINEZ B C, *et al.* Bio-mediated soil improvement [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(2): 197.
- [30] MINTO J M, TAN Q, LUNN R J, *et al.* 'Microbial mortar'-restoration of degraded marble structures with microbially induced carbonate precipitation [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 180: 44.
- [31] XIAO Y, ASCE M, XIAO W, *et al.* Mechanical performance of biotreated sandy road bases [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2021, 36(1): 1.
- [32] XIAO Y, ZHAO C, SUN Y, *et al.* Compression behavior of MICP-treated sand with various gradations [J]. *Acta Geotechnica*, 2021, 16(5): 1391.
- [33] PHILLIPS J C. Ionicity of the chemical bond in crystals [J]. *Reviews of Modern Physics*, 1970, 42(3): 317.
- [34] JIANG J, YAN Y, HOU D, *et al.* Understanding the deformation mechanism and mechanical characteristics of cementitious mineral analogues from first principles and reactive force field molecular dynamics [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2018, 20: 13920.
- [35] WANG Y, SOGA K, DEJONG J T, *et al.* Microscale visualization of microbial-induced calcium carbonate precipitation processes [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, 145(9): 04019045.
- [36] STOCKS-FISCHER S, GALINAT J K, BANG S S. Microbiological precipitation of CaCO₃ [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(11): 1563.
- [37] DEJONG J T, FRITZGES M B, NÜSSELEIN K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(11): 1381.
- [38] CHENG L, SHAHIN M A, MUJAH D. Influence of key environmental conditions on microbially induced cementation for soil stabilization [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017, 143(1): 04016083.
- [39] GANDHI K S, KUMAR R, RAMKRISHNA D. Some basic aspects of reaction engineering of precipitation processes [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1995, 34(10): 3223.
- [40] OTTERSTEDT J E, BRANDRETH D A. *Small particles technology* [M]. Berlin: Springer, 2013.
- [41] FERRIS F G, PHOENIX V, FUJITA Y, *et al.* Kinetics of calcite precipitation induced by ureolytic bacteria at 10 to 20 °C in artificial groundwater [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(8): 1701.
- [42] WANG Y, SOGA K, DEJONG J T, *et al.* Effects of bacterial density on growth rate and characteristics of microbial-induced

- CaCO₃ precipitates: particle-scale experimental study [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2021, 147(6): 04021036.
- [43] WEINHARDT F, DENG J, HOMMEL J, *et al.* Spatiotemporal distribution of precipitates and mineral phase transition during biomineralization affect porosity-permeability relationships [J]. *Transport in Porous Media*, 2022, 143(2): 527.
- [44] PANDA M N, LAKE L W. A physical model of cementation and its effects on single-phase permeability [J]. *AAPG Bulletin*, 1995, 79(3): 431.
- [45] FENG D, CHU Y, FENG L, *et al.* Pore-scale modeling of the MICP process by using a coupled FEM-LBM-CA model: with a focus on the heterogeneity of the pore structures [J]. *Computers and Geotechnics*, 2024, 172: 106414.
- [46] LIN H, SULEIMAN M T, BROWN D G, *et al.* Mechanical behavior of sands treated by microbially induced carbonate precipitation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016, 142(2): 04015066.
- [47] WANG Y, SOGA K, DEJONG J T, *et al.* A microfluidic chip and its use in characterising the particle-scale behaviour of microbial-induced calcium carbonate precipitation (MICP) [J]. *Géotechnique*, 2019, 69(12): 1086.
- [48] WANG Y, WANG Y, SOGA K, *et al.* Microscale investigations of temperature-dependent microbially induced carbonate precipitation (MICP) in the temperature range 4-50 °C[J]. *Acta Geotechnica*, 2023, 18(4): 2239.
- [49] ZHAO C, XIAO Y, HE X, *et al.* Influence of injection methods on bio-mediated precipitation of carbonates in fracture-mimicking microfluidic chip [J]. *Géotechnique*, 2025, 75(2): 153.
- [50] BROWN D G, JAFFÉ P R. Effects of nonionic surfactants on bacterial transport through porous media [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(19): 3877.
- [51] BARKOUKI T H, MARTINEZ B C, MORTENSEN B M, *et al.* Forward and inverse bio-geochemical modeling of microbially induced calcite precipitation in half-meter column experiments[J]. *Transport in Porous Media*, 2011, 90(1): 23.
- [52] AL QABANY A, SOGA K. Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils [J]. *Géotechnique*, 2013, 63(4): 331.
- [53] DAWOUD O, CHEN C Y, SOGA K. Microbial induced calcite precipitation for geotechnical and environmental applications [C]//*New Frontiers in Geotechnical Engineering*. Dallas: American Society of Civil Engineers, 2014: 11-18.
- [54] BOYD V, YOON H, ZHANG C, *et al.* Influence of Mg²⁺ on CaCO₃ precipitation during subsurface reactive transport in a homogeneous silicon-etched pore network [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 135: 321.
- [55] KONSTANTINOUC, WANG Y, BISCONTIN G, *et al.* The role of bacterial urease activity on the uniformity of carbonate precipitation profiles of bio-treated coarse sand specimens[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 6161.
- [56] MUJAH D, SHAHIN M A, CHENG L. State-of-the-art review of biocementation by microbially induced calcite precipitation (MICP) for soil stabilization[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2017, 34(6): 524.
- [57] 孙潇昊, 缪林昌, 童天志, 等. 微生物诱导碳酸镁沉淀试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(7): 1309.
- SUN Xiaohao, MIAO Linchang, TONG Tianzhi, *et al.* Comparison between microbially-induced calcium carbonate precipitation and magnesium carbonate precipitation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(7): 1309.
- [58] OKWADHA G D O. Optimum conditions for microbial carbonate precipitation[J]. *Chemosphere*, 2010, 81: 1143.
- [59] LV C, TANG C S, ZHU C, *et al.* Environmental dependence of microbially induced calcium carbonate crystal precipitations: experimental evidence and insights[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2022, 148(7): 04022050.
- [60] XU X, HAN J T, CHO K. Formation of amorphous calcium carbonate thin films and their role in biomineralization [J]. *Chemistry of Materials*, 2004, 16(9): 1740.
- [61] SAWADA K. The mechanisms of crystallization and transformation of calcium carbonates [J]. *Pure and Applied Chemistry*, 1997, 69(5): 921.
- [62] MARTINEZ B C, DEJONG J T, GINN T R, *et al.* Experimental optimization of microbial-induced carbonate precipitation for soil improvement [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(4): 587.
- [63] FIDALEO M, LAVECCHIA R. Kinetic study of enzymatic urea hydrolysis in the pH range 4-9 [J]. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 2003, 17: 311.
- [64] ZHANG F, HE X, TENG Q, *et al.* 3D-PMRNN: reconstructing three-dimensional porous media from the two-dimensional image with recurrent neural network[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 208: 109652.
- [65] SANTOS J E, CHANG B, GIGLIOTTI A, *et al.* A dataset of 3D structural and simulated transport properties of complex porous media[J]. *Scientific Data*, 2022, 9(1): 579.
- [66] REBATA-LANDA V. Microbial activity in sediments: effects on soil behavior[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2007.
- [67] TOBLER D J, MACLACHLAN E, PHOENIX V R. Microbially mediated plugging of porous media and the impact of differing injection strategies [J]. *Ecological Engineering*, 2012, 42: 270.
- [68] RAMOS O, KWON T H. Development of bio-grout injection strategy and design guide using reactive transport model for field-scale soil improvement based on microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP)[J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2023, 36: 100509.
- [69] MINTO J M, LUNN R J, EL MOUNTASSIR G.

(下转第275页)