# 考虑多轮注浆下MICP加固砂土介质的二维渗流扩散研究*

张志军[1,2],刘秉政[1,2],郑槐淼[2,3],田亚坤[1,2],胡林[1,2],伍玲玲[1,2]

(1.南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳市 421001;
2.湖南省矿山岩土工程灾害预测与控制工程技术研究中心, 湖南 衡阳市 421001;
3.南华大学 经济管理与法学学院, 湖南 衡阳市 421001)

**摘要**:微生物诱导碳酸钙沉淀(Microbially Induced Carbonate Precipitation, MICP)技术因其具有环境友好性与可持续性特征,在尾矿库生态加固工程中展现出显著潜力。然而,微生物注浆过程中渗流扩散的定量化研究仍是制约其应用的关键。针对多轮微生物注浆加固场景,系统考虑砂土介质在渗透系数动态衰减与孔隙率梯度演化过程中对浆液扩散行为的协同作用,通过多尺度试验与理论建模相结合的方式,综合一维砂柱试验、中等尺度二维平面物理模型试验及FLAC3D流固耦合数值模拟,构建了基于柱形扩散理论的渗透扩散半径预测模型。结果表明:垂直维度受重力效应主导,浆液扩散呈现显著非对称性,形成下宽上窄的类宝塔形分布,最终底部扩散半径为顶部扩散半径的3.91倍;水平维度则遵循扩散效果径向衰减规律,加固强度与注浆管中心距呈反比。理论模型验证显示,第2~5轮注浆最大扩散半径与预测值的相对误差范围为43.89%~63.72%,误差范围在合理范围之内。研究结果可为MICP工艺参数优化及工程尺度扩散预测提供定量化理论框架。

**关键词**:尾矿库加固;MICP;柱形扩散理论;渗透扩散半径;数值模拟

**中图分类号**:TD265.4 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)01-0167-10

**Study on Two-Dimensional Seepage Diffusion of MICP-Reinforced Sandy Soil Media Considering Multiple Rounds of Grouting**

*ZHANG Zhijun*[1,2], *LIU Bingzheng*[1,2], *ZHENG Huaimiao*[2,3], *TIAN Yakun*[1,2], *HU Lin*[1,2], *WU Lingling*[1,2]

(1.School of Resources Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;
2.Hunan Province Engineering Technology Research Center for Disaster Predietion and Control on Mining Geotechnical Engineering, Hengyang, Hunan 421001, China;
3.School of Economics, Management and Law, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

**Abstract**: Microbially Induced Carbonate Precipitation (MICP) technology shows remarkable potential in tailings pond ecological reinforcement projects due to its environmental friendliness and sustainability characteristics. However, the quantitative study of seepage diffusion during microbial grouting remains a key constraint to its application. Aiming at multi-round microbial grouting reinforcement scenarios and systematically considering the synergistic effect of the sandy soil medium on the slurry diffusion behaviour during the dynamic attenuation of permeability coefficient and the evolution of porosity gradient, a permeability diffusion radius prediction model based on the column diffusion theory was constructed by combining the multi-scale tests and theoretical modelling with a combination of one-dimensional sand column experiments, intermediate-scale 2D planar physical model experiments, and FLAC3D numerical simulations of coupled flow and solidity. The results are concluded as follows. The vertical dimension is dominated by gravity effect, and the slurry diffusion shows significant asymmetry, forming a pagoda-like distribution with the bottom wide and the top narrow, and the final diffusion radius at the bottom is 3.91 times of the diffusion radius at the top. The horizontal dimension follows the radial attenuation law of diffusion effect, and the reinforcement strength is inversely proportional to the centre distance of the slurry injection pipe. Validation of the theoretical model shows that the relative errors between the maximum diffusion radius and the predicted value for the 2nd to 5th rounds of grouting were 43.89%-63.72%, and the error ranges were within reasonable limits. The research results can provides a quantitative theoretical framework for the optimisation of MICP process parameters and engineering-scale diffusion prediction.

**Key words**: Tailings pond reinforcement, MICP, Column diffusion theory, Permeability diffusion radius, Numerical Simulation

---

* **收稿日期**:2025-01-19

**基金项目**:国家自然科学基金项目(52274167);湖南省"揭榜挂帅"重大科技攻关项目(2021SK1050);湖南省自然科学基金项目(2022JJ40374,2023JJ30516,2024JJ9074);湖南省教育厅重点项目(23A0329,24A0306)

**作者简介**:张志军(1978—),男,河北邢台人,博士,教授,主要研究方向为矿山岩土工程灾害预测与控制。E-mail:zzj181@163.com

**通信作者**:伍玲玲(1987—),女,湖南耒阳人,博士,高级实验师,主要从事矿业资源开发利用的研究。E-mali:wllshmily@foxmail.com

## 0 引言

尾矿库作为金属及非金属矿山废弃物的核心储置设施,其结构失稳引发的溃坝风险将对区域生态安全与人居环境构成重大威胁[1-2]。现行尾矿库加固技术主要依赖物理压实与化学胶结两类方法,然而物理加固存在施工效率低、材料消耗量大等问题,而化学加固则面临化学试剂的环境毒性、长期稳定性不足等局限[3]。相较之下,微生物诱导碳酸钙沉淀技术(Microbially induced carbonate precipitation,MICP)通过脲酶驱动尿素水解生成碳酸盐矿物,在尾矿颗粒间形成生物胶结网络,展现出显著的生态相容性与工程可持续性优势[4]。

MICP加固效能的核心制约因素在于注浆过程中渗流扩散的时空演化规律。现有研究主要聚焦于微观尺度下的反应机制:何想等[5]构建了一个用于微生物注浆的可视化平台,详细观察了在微生物注浆加固过程中碳酸钙晶体的沉积状况,进而对其在时间和空间上的分布模式、沉积方式和生长速率进行量化;赵常等[6]基于微生物诱导碳酸盐沉淀原理,采用有限元软件进行多物理场耦合模拟,验证了注浆扩散中碳酸钙的沉积分布;王腾等[7]提出了梯度砂柱概念,基于多孔介质理论,深入研究了矿化过程中的微观机制,并使用多种注浆技术来观察梯度砂柱在固化后的特性。值得注意的是,介质粒径显著制约微生物迁移效率,当土体细粒含量(<0.075 mm)超过临界阈值时,孔隙堵塞效应将导致反应液渗透深度受限,引发浅层胶结富集,从而加速了整体加固效果的弱化[8-9]。在宏观加固机理研究方面,李揽月等[10]同时使用巴氏芽孢杆菌和地衣芽孢杆菌两种微生物,通过研究铀尾砂加固过程中对铀元素固化的影响,证实地衣芽孢杆菌在铀尾砂中铀元素迁移和砂土加固方面都具有显著的改善效果。JOSHI等[11]利用粉煤灰改良的细菌浆液,用于混凝土裂缝的加固,展现出优异的力学恢复强度,渗透系数显著降低。LIU等[12]系统探究了合成纤维(0.3%掺量)、椰壳纤维与多重微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)处理的协同增强效应。试验数据表明,纤维-MICP协同作用使生物砖抗弯强度由1 185 kPa提升至1 210 kPa,同时应变能力从1.0%显著增至2.3%,成功实现了材料刚度与延展性的同步优化。SU等[13]发现MICP改性后的生物炭提高了水合速率、增强了力学性能、增加了基质相容性,并产生了更均匀和有效的填料,这些改进可归因于MICP改性生物炭的致密性增加及其在调节钙矾石壳结构中形成的作用。然而,传统一维砂柱与小型模型试验难以表征复杂边界条件下的瞬态渗流特性[14],沙小兵等[15]将数值模拟同模型试验相结合,观察到在中等模型下的微生物注浆固结效果。李佳良等[16]使用中尺度模型探究钙源与轮数对MICP覆膜效果的影响,得出当氯化钙作为钙源时,在经历了3轮或更多轮的处理之后,覆膜的效果达到了相当高的水平,但当处理周期超出5轮时,覆膜的效果并没有明显的提升。尽管上述研究取得了重要进展,但砂土的渗透系数动态衰减与孔隙率梯度演化过程中对浆液扩散的协同效应尚未完全考虑,特别是多轮注浆过程中渗流扩散半径的定量表征仍存在理论空白。

本研究创新性地构建了一维砂柱-中等二维平面模型的多尺度试验体系,结合柱形扩散理论模型与FLAC3D流固耦合数值模拟,并引入渗透系数衰减方程$k(T)$与孔隙率梯度演变方程$n(T)$,建立了最大扩散半径($R$)与加固轮次($T$)的非线性函数关系$R(T)=f(k,n,T)$,系统揭示多轮注浆条件下渗透系数($k$)、孔隙率($n$)与扩散半径($R$)的动态响应机制,以期为MICP技术在尾矿库工程中的工艺参数优化与扩散预测提供定量化理论依据。

## 1 材料

### 1.1 石英砂

本文采用石英砂作为试验材料,其成分与铀尾砂基本一致。该石英砂的颗粒级配参照南方某铀尾矿库实地取样的铀尾砂进行配制,具体石英砂颗粒级配如图1所示。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)对石英砂的物理参数进行了测定,结果见表1。

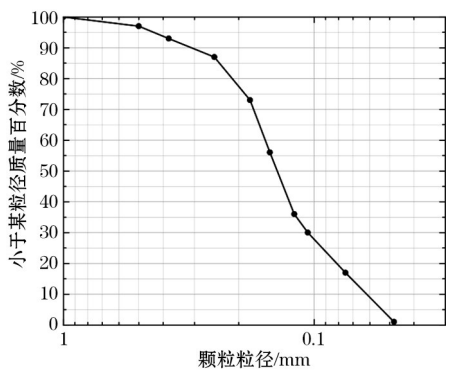



**图1 石英砂颗粒级配**

**Fig.1 Quartz sand particle grading diagram**

**表 1 石英砂物理参数**

**Table 1 Physical parameters of quartz sand**

| 含水率/% | 干密度/(g/cm³) | 孔隙率/% | 孔隙比 | 相对密度 |
|---|---|---|---|---|
| 20 | 1.54 | 45 | 0.31 | 2.8 |

### 1.2 微生物和胶结液

本试验选用巴氏芽孢杆菌(Bacillus pasteurii, ATCC 11859)作为功能菌株,其激活、扩增及胶结液配制流程包括 4 个步骤。

(1) 菌种活化。从超低温冷冻箱中取出冷藏菌株,在无菌操作台内刮取少量菌株,接种于含 10 mL 液体培养基的 CASO -尿素培养基(配方:酪蛋白胨 15 g/L、大豆蛋白胨 5 g/L、氯化钠 5 g/L,pH=7.3)中,充分混匀。将混合液置于 30 ℃摇床培养 48 h,随后在固体平板培养基(含 20 g/L 尿素的 CASO 琼脂)上连续划线,并于 30 ℃恒温生化培养箱中继续培养 48 h。采用紫外分光光度计测定 OD600 值,将菌液浓度控制在 0.9～1.1 范围内。观察到乳白色菌落形成时,表明菌种已成功激活。

(2) 液体扩增培养。从平板上挑取单一菌落,接种至液体培养基中(配方:酪蛋白胨 15 g、大豆蛋白胨 5 g、氯化钠 5 g,去离子水定容至 900 mL),并于 30 ℃、150 r/min 条件下振荡培养。尿素溶液(20 g/100mL)需单独配制并通过 0.22 μm 滤器灭菌,避免高温高压导致分解。

(3) 培养基制备与灭菌。混合液(酪蛋白胨、大豆蛋白胨、氯化钠)与尿素溶液分别用 1 mol/L NaOH 和盐酸(水∶酸=10∶1)调节至 pH=7.3。混合液及相关器械(移液管、滤器等)经 121 ℃高温高压灭菌 20 min,尿素溶液灭菌后通过无菌滤器与混合液按比例(混合液∶尿素=900 mL∶100 mL)混合。

(4) 胶结液配制。将等体积的 1 mol/L 氯化钙溶液与 1 mol/L 尿素溶液混合,用于后续微生物诱导碳酸钙沉淀试验。

## 2 试样制备及测试方法

### 2.1 试样制备

为优化脱模流程,在模具内部设置了厚 0.25 mm 的透明聚丙烯塑料板内套筒。按照压实试验规范,采用分层填充法将石英砂逐层填入模具,经分层压实后形成直径为 39.1 mm、高度为 80 mm 的标准圆柱形试样。共制备 40 个样品,按加固轮次分为 5 组,每组包含 8 个试样。

试样制备完成后,采用小型注浆泵实施注浆加固。每轮注浆按以下顺序进行:首先注入 23 mL 菌液,随后注入 46 mL 胶结液(由等体积尿素溶液与氯化钙溶液混合组成),保持菌液与胶结液 1∶2 的体积比例。每次注浆操作间隔 24 h,完成 2 次注浆(即一轮加固)后撤出对应组别试样,并在试样表面标记加固轮次。此过程循环进行直至 5 轮加固全部完成,最终获得不同加固轮数的 5 组对比样本。

### 2.2 测试方法

首先对 5 轮一维加固试样开展多参数联合测试:通过渗透系数($k$)测试表征渗流特性、三轴不固结不排水试验获取黏聚力($c$)与内摩擦角($\varphi$)演变规律、压汞试验量化孔隙结构演化特征。基于多轮次试验数据构建 MICP 加固过程中力学-孔隙-渗流参数协同演化数据库,系统解析生物胶结对石英砂多相特性的调控机制。进而依托 FLAC3D 流固耦合模块,构建考虑渗透系数($k$)、内摩擦角($\varphi$)、黏聚力($c$)及孔隙率($n$)随加固轮数动态演化的二维数值模型,并同时开展二维平面模型多轮次注浆试验,最终实现多轮注浆过程中的定量化表征。

#### 2.2.1 渗透系数测试

石英砂的渗透系数通过变水头法进行测定,渗透系数测试装置如图 2 所示。测试过程包括:试样饱和吸水后,定期从流出端口收集滤液,并记录变水头管的水头初始高度和结束高度。对于每个样本,取同等加固轮数的 3 个砂柱,对其渗透系数进行测量,并计算其平均值。渗透系数的计算公式为:

$$k=2.3\frac{aL}{At}\ln\frac{H_1}{H_2} \tag{1}$$

式中:$a$ 为变水头管横截面积,cm²;$A$ 为试样横截面积,cm²;$L$ 为试样高度,cm;$t$ 为间隔时间,s;$H_1$ 为初始水头,cm;$H_2$ 为结束水头,cm。

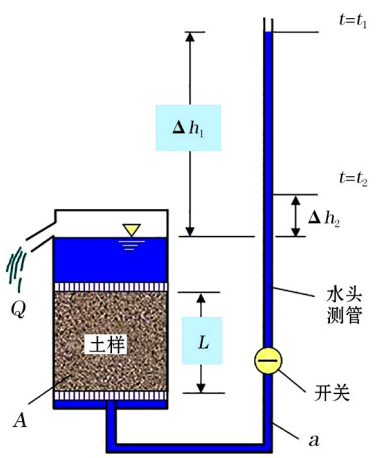



**图 2 渗透系数测试装置**

**Fig.2 Permeability coefficient test device**

2.2.2 压汞测试(MIP)

从 5 组加固砂柱样品的相同位置分别截取尺寸为 13 mm×13 mm×13 mm 的立方体试样。压汞法原理示意见图 3。由于汞对大多数固体材料具有非润湿性(接触角大于 90°),需通过施加外部压力克服汞的表面张力使其进入孔隙,且压力越大,汞能进入的孔径越小。通过压汞试验可获得压力与进汞体积的关系数据,结合 Washburn 方程(见式(2))可计算出石英砂样品的孔径分布:

$$P_r = -2\gamma\cos\theta \tag{2}$$

式中:$P_r$ 为施加的外部压力,MPa;$\theta$ 是汞对固体的接触角,(°);$\gamma$ 是汞的表面张力,mN/m。

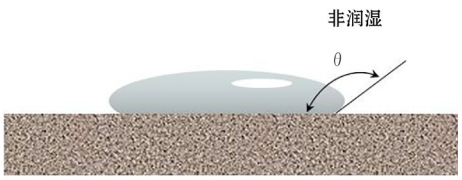



图 3 压汞法原理示意

Fig.3 Schematic diagram of the principle of mercury compression

2.2.3 三轴测试

对 MICP 加固后的砂柱进行不固结不排水三轴强度测试,设置剪切速率为 0.8 mm/min,轴向应变为 15%,三轴试验示意见图 4。

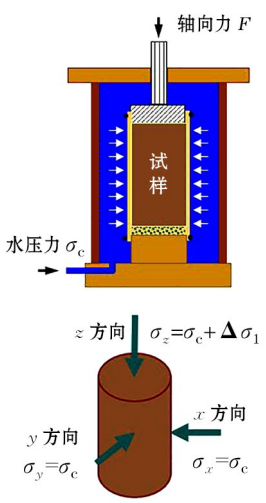



图 4 三轴试验示意

Fig.4 Schematic diagram of triaxial experiment

2.2.4 二维平面大模型

采用透明亚克力板制作二维平面大模型(尺寸为 50 mm×10 mm×50 mm),模型四周封闭、顶部开口,底部按一定间距钻孔,使菌液及胶结液能够流出。该设计既确保与一维砂柱具有相同的注浆条件,又可避免注浆口堵塞。试验所用石英砂的含水率、密度、比重及颗粒级配等参数均与一维砂柱保持一致,铺设时采用分层填筑方式,每层砂体均经过压实处理。在 MICP 注浆加固试验中,通过添加蓝色墨水对浆液进行染色,便于观察渗透扩散形态。二维平面大模型注浆如图 5 所示,注浆管采用透明亚克力材料制成,管长 50 mm,外径 14 mm(内径 10 mm),沿管身每隔 5 mm 在两端开设直径 5 mm 的孔洞。注浆管垂直置于模型正对面中心位置并紧贴侧壁,通过蠕动泵以 186 mL/min 的速率注入菌液与胶结液。浆液从注浆管孔洞中均匀扩散,每轮注浆加固完成后,需测量模型各区域的渗透扩散半径。

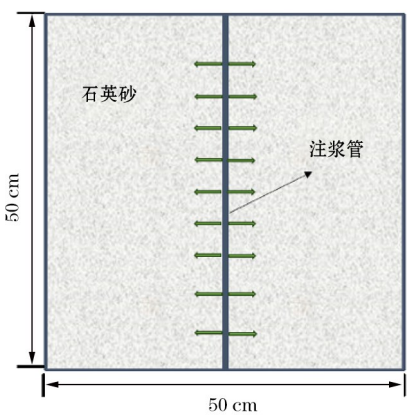



图 5 二维平面大模型注浆示意

Fig.5 Schematic diagram of 2D planar large model grouting

2.2.5 FLAC3D 数值模拟

采用 FLAC3D 软件建立的数值模型由 50×50 个网格单元构成,用于模拟微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)注浆加固石英砂的二维渗流扩散过程。在模拟过程中,模型的上、下边界分别设置为透水边界。数值模拟所用计算参数见表 2,所有参数均基于一维砂柱试验实测数据确定,以最大限度保证物理参数的可靠性。

表 2 数值模拟所用参数

Table 2 Parameters used for numerical simulation

| 内摩擦角 $\varphi$/(°) | 黏聚力 $c$/kPa | 渗透系数 $k$/($\times10^{-3}$ cm·s$^{-1}$) | 菌液与胶结液密度 $\rho$/(kg·m$^{-3}$) |
|---|---|---|---|
| 79.221, 80.372 2, 81.685 9 | 45.6、55.7, 77.9 | 5.17, 3.87, 3.34, 3.13, 2.84 | 1 025 |

## 3　结果与讨论

### 3.1　渗透系数与加固效果分析

渗透系数随加固轮数的变化如图 6 所示。从图 6 中可以看出，不同加固轮次下一维砂柱模型的渗透系数($k$)呈现显著衰减特征，其变化规律与生物胶结度(以碳酸钙含量表征)呈现强负相关性[17-18]。具体而言，初始轮次(1 轮)渗透系数为 $5.17\times10^{-3}$ cm/s，随加固轮次递增依次降低至 $3.87\times10^{-3}$ cm/s(2 轮)、$3.34\times10^{-3}$ cm/s(3 轮)、$3.13\times10^{-3}$ cm/s(4 轮)及 $2.84\times10^{-3}$ cm/s(5 轮)。这一现象源于多轮注浆过程中微生物-流体-孔隙介质的动态交互作用：多轮注浆形成的胶结网络显著缩小优势渗流通道孔径，而后续轮次通过生物成核点增殖与团簇结构演化，进一步诱导次生孔隙填充效应，导致渗透系数呈阶梯式衰减。

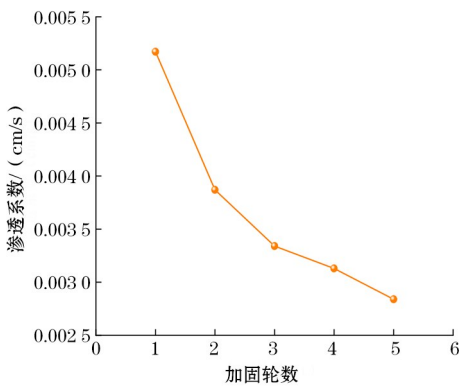



**图 6　渗透系数随加固轮数变化**

**Fig.6　Variation of permeability coefficient with reinforcing times**

渗透系数衰减速率($\Delta k/k$)呈现显著的非线性特征，首轮至第 2 轮降幅达 25.1%，随后依次递减 13.7%(2～3 轮)、6.3%(3～4 轮)及 9.2%(4～5 轮)。分析 3～4 轮次衰减速率反弹现象原因如下：当胶结度增加到一定程度时，局部孔隙堵塞引发渗流路径迂曲度激增，导致流体剪切力增强并冲刷弱胶结区域，从而带走了部分碳酸钙晶体。胶结的石英砂柱如图 7 所示。从图 7 可以看出，砂柱轴向胶结效果呈非均质性，上部区域因优先固化形成胶结富集层，而中、下部受此影响，胶结度显著降低，最终导致试样脱模时底部出现结构断裂现象。这一结果证实，MICP 加固效果受控于渗流-反应-胶结耦合动力学过程，其空间非均衡性引发了加固体的渐进式破坏风险。

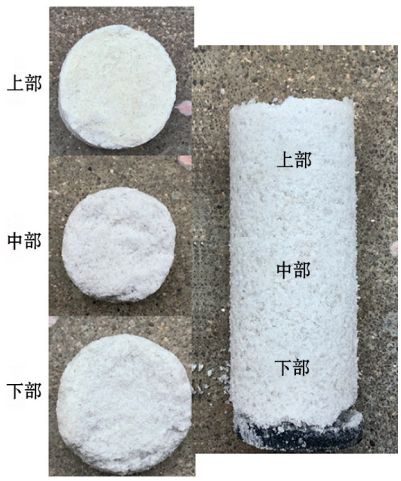



**图 7　胶结的石英砂柱**

**Fig.7　Columns of cemented quartz sand**

本研究揭示的渗透系数衰减规律与渗流固化不均匀性特征，为尾矿库 MICP 加固工艺优化提供了关键约束条件：需通过注浆速率调控与多轮次间歇策略平衡胶结效率与渗透性退化矛盾，避免过早达到生物胶结阈值而诱发工程失效。

### 3.2　三轴试验下的应力-应变分析

不同加固轮数一维砂柱的三轴试验结果如图 8 所示。其中，图 8(a)至图 8(c)分别展示了不同加固轮数对石英砂柱在不同围压(100 kPa、200 kPa、300 kPa)下的应力-应变曲线的影响。由于 1 轮加固与 2 轮加固强度不够，无法进行三轴试验，因此只选取 3，4，5 轮加固的砂柱开展试验。试验数据显示，在轴向荷载的影响下，所有曲线的变化模式大体一致，并可以被分为 4 个不同的阶段：在初始阶段，砂柱主要受到孔隙压缩的影响，其体积逐渐缩小，导致应力会随着应变的增加而迅速增大；在第二个阶段，随着荷载逐渐增大，试样的内部偏应力迅速攀升至峰值强度；到第三个阶段，偏应力开始逐渐减少，试样的内部结构开始遭受破坏，裂缝迅速扩散并交叉，从而形成了宏观的滑移面；在第四个阶段，偏应力减少并逐渐稳定，即便在轴向应变达到 15%的情况下，试样已经完全损坏，但仍然保持了一定的残余强度。最后，通过摩尔-库伦准则计算得到 3 轮加固的黏聚力为 45.6 kPa、内摩擦角为 79.221°；4 轮加固的黏聚力为 55.7 kPa、内摩擦角为 80.372 2°；5 轮加固的黏聚力为 77.9 kPa、内摩擦角为 81.685 9°。可见，随着注浆轮数的递增，加固后的石英砂孔隙被胶结物质填充，密实度得到提升，相邻的石英砂颗粒之间形成了碳酸钙颗粒胶结，从而增强了石英砂的整体力

学性能,并且其黏聚力与内摩擦角也不断增大。因此,为保证数值模拟的准确性,将所测 3,4,5 轮加固样品的黏聚力与内摩擦角数据用于后续的数值模拟。

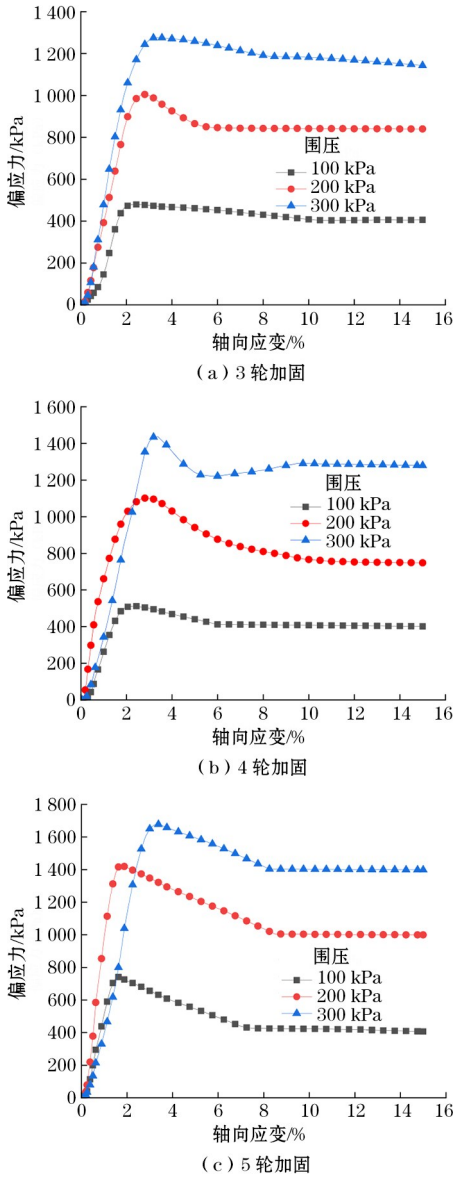



**图 8 不同加固轮数一维砂柱应力-应变曲线**

**Fig.8 Curves of stress-strain for one-dimensional sand columns with different number of reinforcing times**

### 3.3 孔隙分析

侵入汞的累积孔体积与孔径关系曲线如图 9 所示。观察图 9 可知:3 轮加固后试样的主峰孔径为 0.030 1 mm;随着加固次数增加至 4～5 轮,孔径分布曲线逐渐向小孔径方向偏移,主峰孔径稳定在 0.022 6 mm;4 轮与 5 轮加固试样的孔径分布曲线形态无明显差异。这表明多次加固作用下,材料的特征孔径可稳定维持在约 0.022 6 mm 水平,后续加固不再引起显著变化。

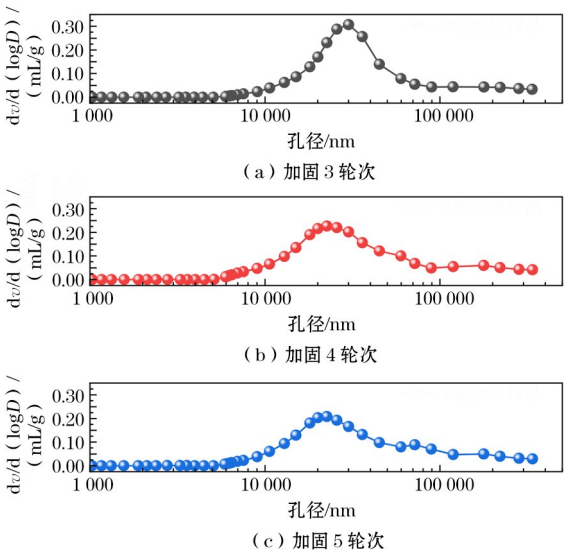



**图 9 侵入汞的累积孔体积与孔径关系**

**Fig.9 Relationship between cumulative pore volume and pore size for intruding mercury**

### 3.4 渗流扩散分析

#### 3.4.1 二维平面大模型渗流扩散情况与数值模拟

基于一维砂柱试验揭示的渗透衰减规律,本研究进一步通过二维平面模型揭示了多轮 MICP 注浆的渗流扩散空间异质性特征,二维平面大模型渗透扩散效果如图 10(a)所示。试验结果表明:浆液垂直扩散形态受重力效应调控,随着加固轮次增加(3～5 轮),扩散区垂直剖面呈现显著的非对称性演化,最终形成下宽上窄的类宝塔形分布(最终底部扩散半径为顶部扩散半径的 3.91 倍)。这一现象源于生物胶结液与水的密度差($\Delta\rho$=0.25 g/cm$^3$)引发的重力驱动流,导致浆液优先沿优势渗流通道向下迁移并在底部形成滞留区,这与文献[19]的研究结果相似;同时,水平扩散模式呈现以注浆管为中心的辐射状衰减特征,以注浆管为中心,向四周辐射,颜色由深蓝变为浅蓝,再往外呈淡蓝(颜色标识见电子版),这一现象与文献[20]关于 MICP 碳酸钙随注浆口分布相吻合,即碳酸钙的含量会随着与注浆点距离的增加而减少。

为验证扩散机制的普适性并指导工程参数优化,基于一维砂柱渗透系数衰减、内摩擦角及黏聚力等数据,构建了考虑生物胶结-渗流耦合效应的二维数值模型(见图 10(b))。数值模拟效果显示:垂直扩散形态与实际注浆结果的相对误差小于 5%;

水平扩散衰减范围与染色法扩散半径实测值高度吻合。这表明数值模型可有效预测多轮注浆下扩散边界的动态演化，并为工程尺度注浆轮次优化提供量化工具。

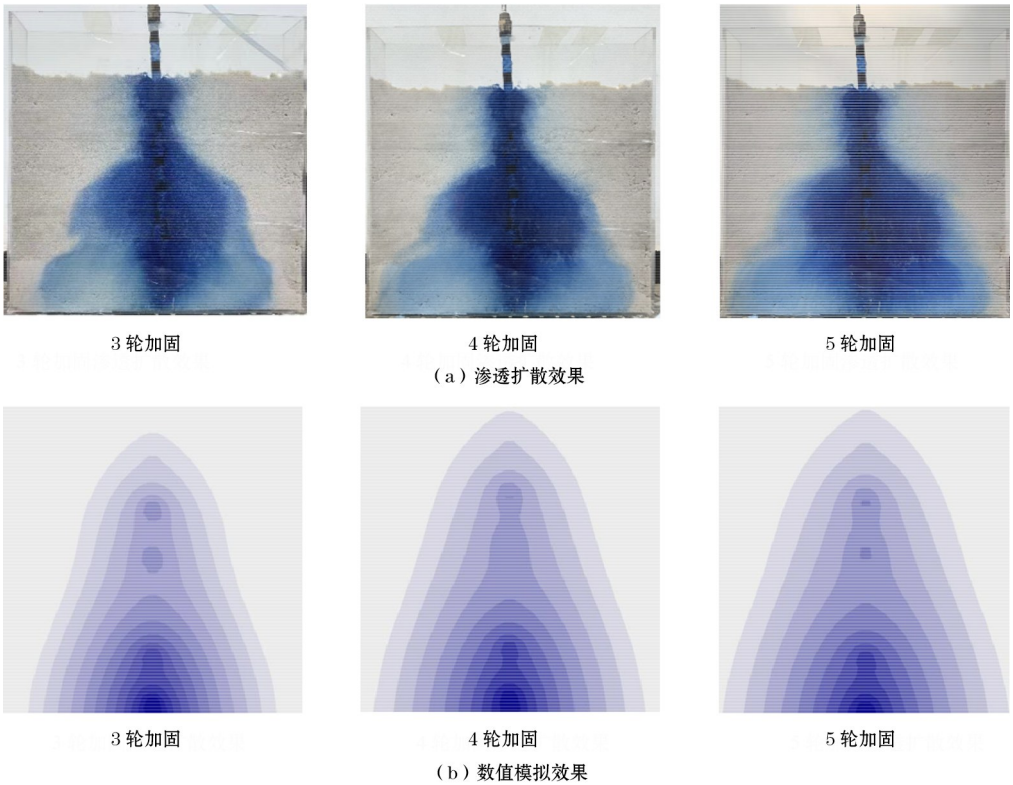



**图 10　二维平面大模型渗透扩散效果与数值模拟效果**

**Fig.10　Permeability diffusion effect and numerical simulation effect of 2D planar lagel model**

值得注意的是，第 3 轮注浆后注浆管下部出现局部胶结堵塞现象(浆液上升示意如图 11 所示)，其形成机制可归因于：底部区域在重力效应下生物胶结液富集导致方解石晶体在近场快速沉积；多轮次形成的胶结网络显著降低局部渗透系数($k$ 降低 35.3%)，诱发后续浆液绕流效应。该堵塞体迫使后续注浆液流场发生重构，形成“上升－侧向扩散”的复合运移模式。

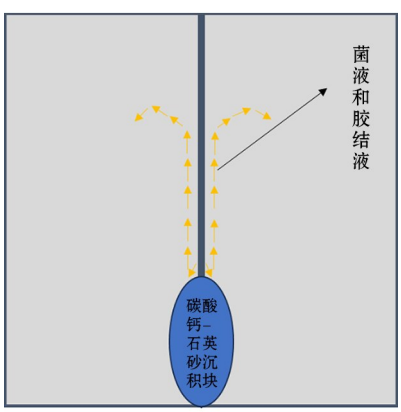



**图 11　浆液上升示意**

**Fig.11　Schematic diagram of slurry rise**

3.4.2　二维平面大模型渗流扩散规律

加固后的渗透扩散半径如图 12 所示。从图 12 中可以看出，模型上部扩散半径($R_{top}$)显著低于下部($R_{bottom}$)，其机理可归因于注浆口近场区域的流体动力学特性与生物胶结耦合效应。

(1) 注浆口附近的高流量($Q$=186 mL/min)导致尿素水解产物($CO_3^{2-}$、$OH^-$)因对流迁移速率高，从而抑制了胶结的局部沉积。

(2) 重力作用在此区域的弱化，进一步削弱了胶结液滞留能力，致使上部难以形成稳定的扩散锋面。模型下部渗透扩散半径随注浆轮次呈现先快速扩展后渐近饱和的特征，其动力学机制与孔隙结构演化密切相关。初期注浆(1～3 轮)时，粗颗粒骨架($d_{50}$=0.13 mm)主导的孔隙网络为菌液迁移提供了优势通道，扩散半径平均增速达 3.33 mm/轮；而后期(≥4 轮)因生物胶结作用引发孔隙率显著降低，细观压汞分析显示大孔隙(>0.022 6 μm)体积占比下降约 30%(见图 9)，导致渗流路径迂曲度倍增，微生物迁移效率下降。当注浆轮次达到临界值

(5 轮)时,注浆口近端孔隙堵塞率趋近饱和,渗透系数($k=2.84\times10^{-3}$ cm/s)与扩散半径($R_{max}=22.75$ cm)均进入稳定状态。因此,对于加固超过 5 轮的注浆工况,其扩散规律可通过建立与第 5 轮注浆参数的等效映射关系进行预测,这为工程实践中注浆轮次优化提供了理论判据。

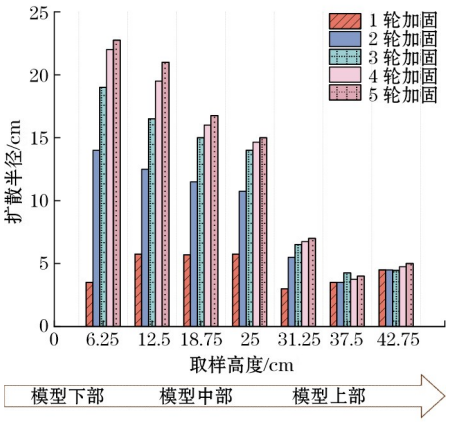



**图 12 加固后的渗透扩散半径**

**Fig.12 Infiltration diffusion radius after reinforcement**

式(3)展示了大模型加固轮数($T$)与对应渗透系数($k$)之间的拟合函数关系式:

$$k=-0.001\ln(T)+0.005 \tag{3}$$

基于加固轮次($T$)与大模型孔隙率($n$)的演化关系分析,图 13 揭示了二者间的非线性衰减规律。

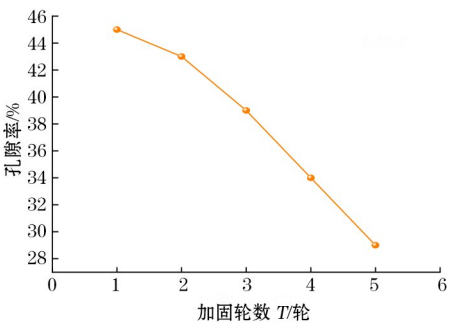



**图 13 加固轮数和孔隙率的关系**

**Fig.13 Relationship between of number of reinforcing times and porosity**

其数学表征可通过式(4)所示的拟合函数进行量化:

$$n=-0.5T^2-1.1T+46.8 \tag{4}$$

进而基于柱形扩散理论可推导渗透扩散半径($R$)的表达式:

$$R=\sqrt{\frac{2kpt'}{n\beta\ln\dfrac{R}{r_0}}} \tag{5}$$

式中:$R$ 为扩散半径,cm;$p$ 为注浆压力,cm(以换算水头柱高表示,下同);$r_0$ 为注浆头半径,cm;$t'$为注浆时间,s;$\beta$ 为浆液黏度与水的黏度比。

随后通过联立渗透系数演化模型(见式(3))与孔隙率衰减方程(见式(4)),构建扩散半径与加固次数的函数关系:

$$R_{max}=\sqrt{\frac{2k(T)pt'}{n(T)\beta\ln\dfrac{R}{r_0}}} \tag{6}$$

将 1~5 轮注浆参数代入式(6),计算得到理论最大扩散半径($R_{max}$),并与实际注浆最长扩散半径(定义为模型底部最大实测值)进行误差对比分析。需特别说明:柱形扩散公式(见式(5))假设渗流场呈轴对称分布(即上下部扩散半径相等),而实际 MICP 注浆过程中因重力效应导致扩散半径呈现“上短下长”特征(见图 10(a)),故工程实践中应以底部实测最长半径作为有效性评价基准。此外,首轮注浆(1 轮)因未形成稳定胶结层,最长扩散半径未达底部区域,该现象与文献[21]所做试验吻合。综上,式(6)经过迭代,计算得出第 2~5 轮的注浆理论半径,并与实际半径进行对比,结果见表 3。

**表 3 注浆理论半径与注浆实际半径的最大值误差**

**Table 3 Maximum error between theoretical radius of grouting and actual radius of grouting**

| 加固轮次 | 注浆理论半径/cm | 注浆实际半径/cm | 误差/% |
|---|---|---|---|
| 2 | 7.856 | 14.00 | 43.89 |
| 3 | 8.094 | 19.00 | 57.40 |
| 4 | 8.200 | 22.00 | 63.72 |
| 5 | 8.560 | 22.75 | 62.37 |

由表 3 可知,误差率为 43.89%~63.72%,平均误差为 56.85%,试验数据与理论计算数据之间的差异都是可以被接受的[22]。因此数据可信,还要注意,加固轮次的增加伴随不可控因素增大,误差随之扩大。因此在多轮注浆时,要做充足考虑。

## 4 结论

本研究通过一维砂柱试验与中等尺度二维平面模型试验的多尺度耦合研究,结合柱形扩散理论模型与 FLAC3D 流固耦合数值模拟,系统揭示了多轮 MICP 注浆过程中渗透系数($k$)、孔隙结构演化与扩散半径($R$)的动态响应机制。

(1) 一维砂柱试验表明,渗透系数($k$)随加固轮次($T$)呈现指数衰减规律。初始轮次时,渗透系数为 $5.17\times10^{-3}$ cm/s,随着轮次递增,渗透系数逐步降低至 $3.87\times10^{-3}$ cm/s、$3.34\times10^{-3}$ cm/s、$3.13\times10^{-3}$ cm/s 及 $2.84\times10^{-3}$ cm/s;砂柱轴向胶结非均质性显著:碳酸钙沉淀(白色区域)主要富集于砂柱上部,中、下部因优先流效应胶结度骤降,导致试样脱模时底部发生结构性断裂;三轴不排水剪切试验证实,黏聚力与内摩擦角随加固轮次呈非线性增长,其强化速率与孔隙率衰减梯度呈强相关性。

(2) 压汞试验表明,生物胶结作用显著重构孔隙结构:3 轮注浆后优势孔径由初始的 0.038 2 mm 降至 0.030 1 mm(降幅 21.2%),4～5 轮注浆进一步收敛至 0.022 6 mm。4 轮、5 轮的孔径含量几乎无显著变化,即加固后的孔径维持在 0.022 6 mm 左右,孔径之后不会发生明显的改变。

(3) 二维平面模型浆液扩散规律为浆液垂直扩散形态受重力效应调控。随着加固轮次从 3 轮增加至 5 轮,扩散区垂直剖面呈现显著的非对称性演化,最终形成下宽上窄的类宝塔形分布(最终底部扩散半径为顶部扩散半径的 3.91 倍)。水平扩散模式呈现以注浆管为中心的辐射状衰减特征;数值模拟效果也与注浆效果相吻合,验证了扩散机制的普适性。

(4) 扩散半径演化分析表明,模型上部因注浆口近端高流速抑制胶结沉积,导致渗透半径受限;中下部受重力驱动流作用,初期扩散速率较高,后期因孔隙堵塞增长放缓。基于修正柱形扩散公式的理论模型显示,2～5 轮注浆最大扩散半径与实测值的相对误差范围为 43.89%～63.72%,该结果与工程尺度注浆的“临界优先”准则相符。

**参考文献**(References):


[1] ROSE R L, MUGI S R, SALEH J H. Accident investigation and lessons not learned: AcciMap analysis of successive tailings dam collapses in Brazil[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 236: 109308.

[2] 朱远乐,王淇萱,刘文岗,等.尾矿库灾害风险防控研究现状及发展态势[J].武汉大学学报(工学版),2024,57(8):1054-1064.
ZHU Yuanle, WANG Qixuan, LIU Wengang, et al. Research status and development trend of disaster risk prevention and control of tailings pond[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2024, 57(8): 1054-1064.

[3] 王楠,王琼,叶为民,等.微生物加固技术研究进展[J].水文地质工程地质,2024,51(5):231-244.
WANG Nan, WANG Qiong, YE Weimin, et al. Research progress of microbial reinforcement technology [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(5): 231-244.

[4] LU T, WEI Z A, HESHAM E N, et al. Effect of chemical environment on copper tailings reinforced by microbially induced carbonate precipitation [J]. Construction and Building Materials, 2023, 400: 132894.

[5] 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):1005-1012.
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): 1005-1012.

[6] 赵常,何想,胡冉,等.微生物矿化动力学理论与模拟[J].岩土工程学报,2022,44(6):1096-1105.
ZHAO Chang, HE Xiang, HU Ran, et al. Kinetic theory and numerical simulation of biomineralization[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(6): 1096-1105.

[7] 王腾,钟东生,周茗如,等.基于多孔介质理论的微生物固化砂土试验及模拟[J].材料导报,2023,37(增刊 1):163-169.
WANG Teng, ZHONG Dongsheng, ZHOU Mingru, et al. Simulation test of microbial solidified sand based on porous media theory[J]. Materials Reports, 2023, 37(Suppl. 1): 163-169.

[8] LIUFU Z Y, YUAN J, SHAN Y, et al. Effect of particle size and gradation on compressive strength of MICP-treated calcareous sand[J]. Applied Ocean Research, 2023, 140: 103723.

[9] 张茜,叶为民,刘樟荣,等.基于生物诱导碳酸钙沉淀的土体固化研究进展[J].岩土力学,2022,43(2):345-357.
ZHANG Qian, YE Weimin, LIU Zhangrong, et al. Advances in soil cementation by biologically induced calcium carbonate precipitation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(2): 345-357.

[10] 李揽月,伍玲玲,胡林,等.关于两种微生物协同加固铀尾砂及防止铀元素迁移的试验研究[J].矿业研究与开发,2022,42(9):138-145.
LI Lanyue, WU Lingling, HU Lin, et al. Experimental study on synergistic reinforcement of uranium tailings by two microorganisms and prevention of uranium migration[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(9): 138-145.

[11] JOSHI S, GOYAL S, SUDHAKARA R M. Bio-consolidation of cracks with fly ash amended biogrouting in concrete structures[J]. Construction and Building Materials, 2021, 300: 124044.

[12] LIU S H, DU K, HUANG W, et al. Improvement of erosion-resistance of bio-bricks through fiber and multiple MICP treatments[J]. Construction and Building Materials, 2021, 271: 121573.

[13] SU Y L, QU F L, MENG Y, et al. Microbial-induced carbonate precipitation (MICP) modified biochar for low-carbon cementitious materials[J]. Construction and Building Materials, 2024, 451: 138644.

[14] NASSAR M K, GURUNG D, BASTANI M, et al. Large-scale experiments in microbially induced calcite precipitation (MICP): reactive transport model development and prediction[J]. Water Resources Research, 2018, 54(1): 480-500.

[15] 沙小兵,陈润泽,张书航.考虑渗透系数变化的 MICP 加固钙质砂抗液化特性数值模拟研究[J].科技创新与应用,2024,14(35):70-76.
SHA Xiaobing, CHEN Runze, ZHANG Shuhang, et al. Numerical simulation study on liquefaction resistance of MICP reinforced calcareous sand considering variation of permeability coefficient[J]. Technology Innovation and Application,2024,14(35):70-76.

[16] 李佳良,杜强,刘旭梅,等.钙源及处理轮次对砂黄土 MICP 覆膜效果的影响[J/OL].土木与环境工程学报(中英文):1-11[2025-01-19]. https://link.cnki.net/urlia.50.1218.tu.20250105.1992.004.
LI Jialiang, DU Qiang, LIU Xumei, et al. Influence of calcium source and treatment cycles on MICP coating effect of sandy loess[J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering:1-11[2025-01-19]. https://link.cnki.net/urlia.50.1218.tu.20250105.1992.004.

[17] WHIFFIN V S, VAN PAASSEN L A, HARKES M P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique[J]. Geomicrobiology Journal,2007,24(5):417-423.

[18] CHOI S G, WANG K J, CHU J. Properties of biocemented, fiber reinforced sand[J]. Construction and Building Materials,2016,120:623-629.

[19] LI X W, TAO J L, VAN PAASSEN L A. Reactive transport modeling of microbial-induced calcite precipitation treatment through shallow underwater injection[J]. Computers and Geotechnics,2024,174:106601.

[20] 兰润扬,林锴,唐朝生,等.基于高密度电阻率成像技术的 MICP 浆液入渗过程监测研究[J].高校地质学报,2024,30(5):577-584.
LAN Runyang, LIN Kai, TANG Chaosheng, et al. Characterizing the infiltration process of MICP treated sand soil using electrical resistivity tomography[J]. Geological Journal of China Universities,2024,30(5):577-584.

[21] 马国梁.微生物加固非均质多孔介质机理研究[D].重庆:重庆大学,2023.
MA Guoliang. Mechanisms of microbial reinforcement of inhomogeneous porous media[D]. Chongqing: Chongqing University,2023.

[22] 阮文军.基于浆液黏度时变性的岩体裂隙注浆扩散模型[J].岩石力学与工程学报,2005(15):2709-2714.
RUAN Wenjun. Spreading model of grouting in rock mass fissures based on time-dependent behavior of viscosity of cement-based grouts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005(15):2709-2714.