

基于 NBPT 调控的 MICP 一相注浆体系优化 及其抗渗-力学协同增效机理研究

徐望清¹, 赖汉江², 张智超³, 施伟韬⁴, 张耀星⁵, 郭川伟⁵, 麻岩⁶

(1. 湖北文理学院, 湖北 襄阳 441053; 2. 福州大学, 福建 福州 350108;

3. 福建省地址工程勘察院, 福建 福州 350003; 4. 泉州市华泰建设工程有限公司, 福建 泉州 354299;

5. 中铁十八局集团有限公司, 天津 300222; 6. 福建省三明市翼宏建设工程有限公司, 福建 三明 365099)

摘要: 针对传统两相注浆工艺中菌液迁移不可控、胶结液渗透不均等问题, 提出一种基于脲酶抑制剂 N-丁基硫代磷酸三胺 (NBPT) 调控的一相注浆体系, 并通过反应动力学优化, 实现抗渗与力学性能的协同提升。NBPT 浓度通过正交试验进行优化, 并结合变水头渗透试验、无侧限抗压强度测试及胶结物分布分析, 系统对比传统两相与一相注浆性能差异。结果表明: 当 NBPT 浓度为 0.15 mmol/L 时, 尿素分解被延缓 24 h 以上, 胶结液有效扩散半径达 1.5 m ~ 1.8 m, 渗透系数被降低至 5.1×10^{-7} cm/s, 抗压强度被提升至 1.92 MPa, 胶结物分布均匀性指数达 0.86。单次注浆即可完成施工, 效率显著提升, 且 NBPT 半衰期为 14 d, 90 d 后土壤残留浓度在 0.1 mg/kg 以下, 结合生物炭吸附工艺可进一步降低生态风险。通过时空匹配的时滞反应机制, 传统工艺中局部堵塞与性能失衡问题可实现有效规避, 为堤防修复、地基加固等工程提供了一种高效、低碳的解决方案。

关键词: MICP; 脲酶抑制剂; 一相注浆; 抗渗性能; 工程加固

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)02-0019-06

Optimization of NBPT-regulated One-phase MICP Grouting System and Comparative Analysis on Its Anti-permeability-mechanical Performance

XU Wangqing¹, LAI Hanjiang², ZHANG Zhichao³, SHI Weitao⁴, ZHANG Yaoxing⁵, GUO Chuanwei⁵, MA Yan⁶

(1. Hubei University of Arts and Sciences, Xiangyang, Hubei 441053, China;

2. Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

3. Fujian Institute of Address Engineering Survey, Fuzhou, Fujian 350003, China;

4. Quanzhou Huatai Construction Engineering Co., Ltd., Quanzhou, Fujian 354299, China;

5. China Railway 18th Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300222, China;

6. Fujian Sanming Yihong Construction Engineering Co., Ltd., Sanming, Fujian 365099, China)

Abstract: Microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) technology has been widely recognized for its environmental compatibility in soil reinforcement applications. However, the engineering application of traditional two-phase grouting processes has been hindered by challenges including uncontrollable bacterial fluid migration and nonuniform cementation fluid penetration. To address these limitations, a one-phase grouting system regulated by the urease inhibitor N-butylthiophosphoryl triamide (NBPT) was developed, aiming to synergistically enhance impermeability and mechanical performance through optimized reaction kinetics. The optimal NBPT concentration (0.15 mmol/L) was determined through orthogonal experiments, and systematic comparisons with conventional two-phase grouting were con-

收稿日期: 2024-11-23

修稿日期: 2024-12-29

基金项目: 国家自然科学基金 (42407271)

作者简介: 徐望清 (1991—), 女, 博士, 讲师, 主要从事环境岩土工程相关理论研究与技术研发。E-mail: xuwangqing@hbuas.edu.cn

通讯作者: 赖汉江 (1987—), 男, 博士, 教授, 主要从事生物岩土理论基础与技术研发。E-mail: laihj@fzu.edu.cn

ducted via variable-head permeability tests, unconfined compressive strength measurements, and cementation distribution analyses. The experimental results demonstrate that urea decomposition was delayed by over 24 h at the optimal NBPT concentration, enabling an effective cementation fluid diffusion radius of 1.5 m ~ 1.8 m. The permeability coefficient was reduced to 5.1×10^{-7} cm/s, while the compressive strength was increased to 1.92 MPa, accompanied by a cementation uniformity index of 0.86. The proposed technique was validated in a complete construction through a single grouting operation, with efficiency enhanced. Furthermore, NBPT exhibited a 14-day half-life, and its residual soil concentration was maintained below 0.1 mg/kg after 90 days, with ecological risks further minimized when integrated with biochar adsorption. By implementing a spatiotemporally matched time-delay reaction mechanism, critical drawbacks of conventional processes (including localized clogging and performance trade-offs) were effectively resolved. This innovation provides a high-efficiency, low-carbon solution for critical infrastructure applications such as embankment seepage control and foundation stabilization.

Keywords: microbial-induced calcium carbonate precipitation; urease inhibitor; one-phase injection; anti-permeability; engineering reinforcement

当前,在国内外堤坝溃决事故中,九成以上是土质堤坝,而渗透破坏是导致溃坝的最主要原因^[1]。在此背景下,发展低碳高效的土体加固技术具有迫切现实意义。微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术因在土体加固与裂隙封堵中的潜力,近年来备受水利工程关注^[2-3]。该技术通过巴氏芽孢杆菌(*Sporosarcina pasteurii*)等产脲酶微生物催化尿素水解,生成碳酸根离子并与环境中钙离子结合形成碳酸钙沉淀,从而胶结土颗粒、填充孔隙并提升土体力学性能^[4]。与传统水泥基注浆材料相比,MICP 技术可降低碳排放量,且生成的碳酸钙晶体与天然方解石结构相似,具备良好的环境相容性^[5]。然而,尽管 MICP 技术理论上优势显著,其工程化应用仍面临诸多挑战,核心问题集中于反应动力学与浆液输运过程的时空失配。传统工艺采用菌液与胶结液两相交替注入模式^[6],但岩土非均质性易导致菌体迁移失控与胶结反应异步^[7],粗粒土中胶结液流失率超 45%,抗渗性能离散系数达 30%^[8],严重制约工程化应用。现有改良方法如菌液载体优化^[9]、胶结液黏度调节^[10]等,虽可提升均匀性,却面临成本增加与操作复杂度攀升的问题。

近年脲酶活性调控成为新方向^[11],但相关技术合成工艺复杂,难以规模化。值得关注的是,农业用脲酶抑制剂 N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)兼具高效抑制与土壤稳定性^[12],为 MICP 革新提供了新思路。然而,既有研究多聚焦 NBPT 对尿素水解速率的单一影响^[13],尚未系统揭示其输运-反应耦合机制,更缺乏抗渗-力学协同增效研究。本研究创新性地提出基于 NBPT 调控的 MICP 一相注浆体系,通过时滞反应机制实现浆液渗透与胶结沉淀的时空匹

配,不仅克服了现有 MICP 技术工程化应用的瓶颈,更通过抗渗与力学性能的协同优化,为堤防渗漏修复、地基加固等场景提供了兼具高效性与经济性的解决方案。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验选用巴氏芽孢杆菌(*Sporosarcina pasteurii*, ATCC 11859)作为目标菌种,接种于改良培养基,其主要成分为酵母提取物 20 g/L、硫酸铵 10 g/L 及尿素 0.13 mol/L,在 30℃ 恒温摇床中以 180 r/min 转速振荡培养 18 h。采用紫外可见分光光度计监测菌液浓度,当 OD₆₀₀ 值达到 1.4 左右即可终止培养,经 4 000 r/min 离心 10 min 收集菌体后,重悬于无菌生理盐水备用。

胶结液由尿素与氯化钙按等摩尔浓度混合配制,两者浓度均为 1 mol/L,使用 0.1 mol/L 氢氧化钠溶液调节初始 pH 至 7.0。NBPT 以无水乙醇为溶剂配制成 50 mmol/L 母液,使用时按预设浓度梯度(0.05 mmol/L、0.10 mmol/L、0.15 mmol/L、0.20 mmol/L)添加至菌液-胶结液混合体系,预实验证实乙醇终浓度 <0.5% 时对菌体活性无显著影响。

多孔介质模型采用粒径 0.25 mm ~ 0.5 mm 的石英砂制备,砂柱试样尺寸统一为直径 50 mm、高度 100 mm,装填时依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)采用分层击实法控制干密度为 1.62 g/cm³,孔隙率稳定在 38% 范围内,试样经真空饱和处理后饱和度 >95%,消除气泡对注浆渗透的干扰。

1.2 试验方案

试验包含抑制剂浓度优化与注浆工艺对比两个

阶段。首先通过四因素正交试验确定 NBPT 最佳浓度,考察因素包括 NBPT 浓度、胶结液 pH 值、养护温度及菌液 OD₆₀₀值,共 9 组试验,如表 1 所示,每组试验重复 3 次。以碳酸钙生成速率(mg/(h·g))和胶结均匀性指数(变异系数倒数)为双评价指标,通过综合评分法确定最优参数组合。

表 1 正交试验因素水平表

因素	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4
NBPT 浓度 /(mmol·L ⁻¹)	0.05	0.10	0.15	0.20
pH 值	6.5	7.0	7.5	8.0
温度/℃	20	25	30	35
OD ₆₀₀ 值	0.8	1.0	1.2	1.4

试验数据分析采用极差分析与单因素方差分析(ANOVA,显著性水平 $\alpha = 0.05$),分别确定主次影响因素与显著性水平。综合评分权重为碳酸钙生成速率 60%、胶结均匀性指数 40%,归一化加权后以最高分选定最优组。以 NBPT 浓度为例,其四组变量的综合评分均值为 72.3、85.6、93.1、31.5,极差 61.6,表明 NBPT 浓度对性能影响显著($p < 0.01$),方差分析进一步显示 NBPT 的 F 值显著高于其他因素,最终确定 0.15 mmol/L 为最佳浓度。

基于正交试验最优参数 0.15 mmol/L NBPT,设计三组注浆方案对比:组 A 为传统预混注浆,速率 5 mL/min;组 B 为两相交替,菌液养护 24 h 后注胶结液;组 C 为组 A + NBPT,注浆速率 4 mL/min。注浆后试样于 25℃、65% 湿度养护 72 h,每 24 h 采用离子色谱法检测渗出液 Ca²⁺ 浓度,量化反应进程。

1.3 测试方法

渗透系数测定依据 GB/T 50123—2019 变水头试验法,每组 5 个平行试样,水头差 50 cm,数据采集间隔 10 min,持续至水位稳定。无侧限抗压强度测试采用位移控制模式(1 mm/min),记录应力-应变曲线并以峰值应力为强度值,试样破坏后立即测定 CaCO₃ 含量。

胶结物空间分布分析中,将试样按高度等分为上、中、下三部分,每部分取 3 个测试点,盐酸滴定法测定 CaCO₃ 含量,计算均匀性指数(定义为 CaCO₃ 含量变异系数倒数, CV⁻¹,值越大越均匀)。NBPT 抑制效率测定采用改良靛酚蓝比色法:注浆后 0 h、6 h、12 h、24 h 取样,离心去除菌体后加入 1 mol/L 尿素溶液及显色剂,625 nm 波长测定吸光度,基于尿素残留量计算脲酶活性抑制率。

2 试验结果与分析

2.1 NBPT 浓度对注浆性能的影响

为确定 NBPT 最佳浓度,开展四组梯度试验(0.05 mmol/L、0.10 mmol/L、0.15 mmol/L、0.20 mmol/L)。如图 1 所示,NBPT 浓度与脲酶抑制率呈显著正相关:0.15 mmol/L 时,24 h 尿素分解率降至 52.3%,且 CaCO₃ 生成效率保持 89.1%,表明该浓度可平衡反应延迟与胶结物总量。此浓度下,反应延迟效应为浆液渗透提供 2 h~3 h 时间,注浆扩散半径由传统工艺 0.8 m 提升至 1.5 m,单次灌注节约工时 58%。值得注意的是,NBPT 未引发胶结物损失,与水泥基材料的“局部堵塞-整体失效”问题形成对比。过量 NBPT(0.20 mmol/L)虽抑制率达 80.2%,但导致 CaCO₃ 生成量不足理论值 15%,证实存在临界抑制强度——延缓反应且不破坏脲酶活性构象。此结果与竞争性抑制模型一致,但非线性剂量效应提示 NBPT 可能同时作用于脲酶疏醇基团与金属结合位点,需通过分子对接模拟进一步验证。

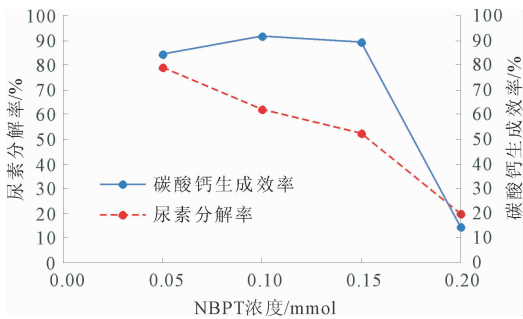


图 1 NBPT 浓度对尿素分解率及 CaCO₃ 生成效率的影响

2.2 注浆工艺参数的协同优化效应

pH 动态监测数据图 2 所示,NBPT 调控组的 pH 演变呈现典型三阶段特征:初始 0 h~8 h 为抑制期,pH 维持在 6.9~7.2;8 h~24 h 为活化期,pH 以 0.18 pH/h 速率上升至 8.6;24 h 后进入稳定期,pH 波动幅度 < 0.1。相比之下,传统注浆组的 pH 在注浆后 2 h 即快速攀升至 8.3,导致胶结物在注入口附近过早沉积,而两相交替组因菌液预置作用,pH 上升速率介于两者之间。离子色谱检测显示,NBPT 组渗出液 Ca²⁺ 浓度峰值为 3.8 mmol/L,出现在 12 h~18 h,较传统组的 4 h~6 h 延迟 14 h,证实其时空匹配优势。该特性高度适配水利工程间歇施工需求:上午注浆后,可利用午间高温(25℃~35℃)加速反应,下午即可检测,且无需二次注浆设备,减少人力投入。此外,NBPT 组在 0.25 mm~0.5 mm 砂层

中渗透均匀性指数达 0.86, 有效避免传统工艺因胶结偏聚导致的“补丁式”加固问题, 显著提升堤防渗漏封堵可靠性。

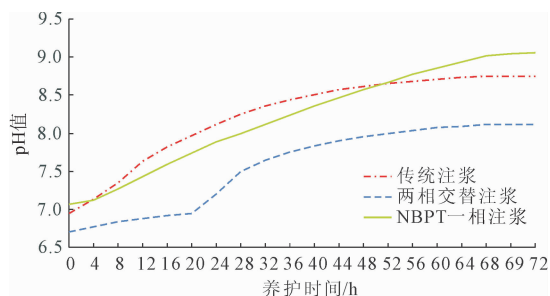


图2 不同注浆方案 pH 值-时间演变曲线

三组注浆方案的宏观性能对比如图 3 所示, NBPT 一相注浆组的渗透系数为 $5.1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$, 较两相交替组降低 27.1%, 满足《土石坝沥青混凝土防渗墙技术规范》(SL 551—2012) 对Ⅲ级防渗体的要求 ($< 1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$)。同时无侧限抗压强度达到 1.92 MPa, 显著优于传统注浆组, 超过《水利水电工程土工合成材料应用技术规范》(SL/T 225—2020) 中对砂基加固体的强度要求 ($\geq 1.5 \text{ MPa}$)。这一性能提升与图 4 中的胶结物空间分布特征直接相关, NBPT 调控组在砂柱上部、中部、下部的 CaCO_3 含量分别为 12.3%、13.8%、11.9%, 而两相交替组因二次注浆引发的流体指进效应, 底部 CaCO_3 含量约 9.7%, 为顶部含量的 68.3%。

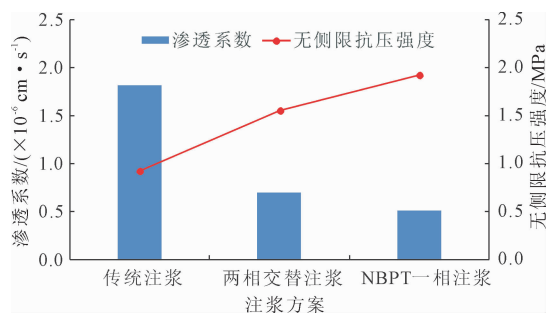


图3 三组注浆方案性能对比

图 4 中胶结物空间分布特征进一步揭示了工艺优势的成因。NBPT 组的 CaCO_3 在砂柱纵向分布均匀性指数达 0.86, 而两相交替注浆组因二次注浆扰动, 底部胶结量仅为顶部的 44.8%。这种均匀胶结特性使其在动水条件下表现优异, 室内模拟试验显示, 在水力梯度 $i=20$ 时, NBPT 试样经 72 h 渗透后未出现管涌现象, 而两相试样在 48 h 即发生局部破坏。值得强调的是, 该工艺对施工参数波动具有较强适应性: 当注浆速率在 $30 \text{ mL/min} \sim 50 \text{ mL/min}$ 范

围内变化时, 渗透系数波动率 $< 15\%$, 这对野外作业中常见的泵送压力波动具有重要工程意义。

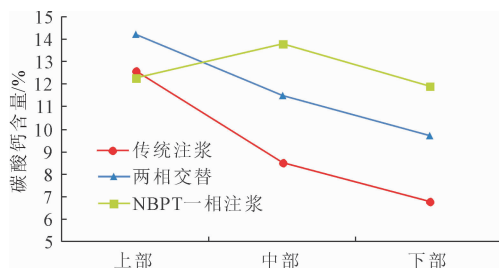


图4 砂柱纵向胶结物分布特征

注浆速率对工程性能的影响呈现非线性响应特征见图 5, 速率从 30 mL/min 增至 70 mL/min 时, NBPT 组的渗透系数从 $5.3 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 增至 $6.8 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, 但抗压强度仅下降 7.3%, 表明工艺对施工参数波动具有较强适应性。推荐粗粒土 ($d_{50} > 0.25 \text{ mm}$) 采用 $50 \text{ mL/min} \sim 60 \text{ mL/min}$ 的注浆速率, 该参数下单日施工面积达 95 m^2 , 且渗透系数稳定在 $5.2 \times 10^{-6} \text{ cm/s} \sim 6.2 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, 满足《土石坝沥青混凝土防渗墙技术规范》(SL 551—2012) 对Ⅲ级防渗体的要求。染色示踪试验进一步验证, 即便在 70 mL/min 高速注浆下, 绕流通道 (宽度 $0.8 \text{ mm} \sim 1.2 \text{ mm}$) 也能在 24 h 养护后被新生 CaCO_3 填充 83%, 体现工艺的自修复潜力。

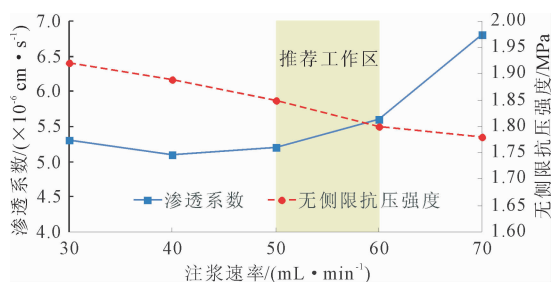


图5 注浆速率对工程性能的影响

基于上述结果, 提出适用于水利工程的工艺控制准则: NBPT 浓度应控制在 $0.14 \text{ mmol/L} \sim 0.16 \text{ mmol/L}$, 注浆速率需根据地层孔隙率调整——孔隙率 $> 40\%$ 时采用 $55 \text{ mL/min} \sim 65 \text{ mL/min}$, 孔隙率 $30\% \sim 40\%$ 时选择 $45 \text{ mL/min} \sim 55 \text{ mL/min}$, 低孔隙率地层需添加 0.1% 羟丙基甲基纤维素改善浆液渗透性。养护阶段需维持环境温度 $20^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ 、湿度 $> 70\%$, 以确保反应充分进行。模拟试验表明, 该工艺在砂砾石层 ($d_{50} > 0.5 \text{ mm}$) 中单次灌注有效半径达 1.8 m , 胶结体 28 d 强度 $> 2.0 \text{ MPa}$, 且能承受 2 m/s 流速的长期冲刷, 较传统工艺容许流速提升

67%,为河道护坡、泄洪道防护等动水环境提供了可靠解决方案。

2.3 与传统及改良工艺的性能对比

为系统评价 NBPT 调控一相注浆工艺优越性,本研究进一步与现有 MICP 技术及改良方案进行性能对比(表 2)。Sang 等^[14]在 1 m 直径的大尺度圆筒试验中采用两相注浆工艺对均质砂土进行了 MICP 加固,获得了 1.2 MPa 的抗压强度和 8%~17% 的 CaCO₃ 沉积量,验证了该工艺在大型工程应用中的可控性和均匀性。Zhang 等^[15]在 MICP 基准试验中采用一相注浆工艺对标准砂进行处理,获得抗压强度 1.23 MPa,渗透系数为 1.2 × 10⁻⁶ cm/s,反映出传统 MICP 工艺在未引入调控措施时存在胶结反应过快、沉积不均的问题;而在标准砂中引入短玻璃纤维(0.2%),在保持良好均匀性的前提下,抗压强度达到了 1.65 MPa,渗透系数控制在 6.5 × 10⁻⁶ cm/s,表现出纤维加筋对 MICP 效果的增强作用。

上述对比表明,NBPT 工艺在核心性能指标上均显著优于传统及主流改良方案。其优势源于独特的时滞反应机制:NBPT 通过竞争性抑制脲酶活性,延缓尿素分解 24 h 以上,为胶结液充分渗透提供了时间,从而生成空间分布均匀的 CaCO₃ 网络。这一机制克服了传统工艺中“快速反应-局部沉积”的固有限制,同时避免了纤维加筋、黏度调节等方法引发的性能失衡或成本攀升问题,为 MICP 技术的工程化应用提供了更优解。

表 2 不同 MICP 工艺性能对比

注浆方式	添加剂	抗压强度 /MPa	渗透系数 / (cm · s ⁻¹)	主要局限	参考文献
两相注浆 (径向注入)	无	1.20	8.9 × 10 ⁻⁴	胶结液流失率高	[14]
一相注浆 (传统 MICP)	无	1.23	1.2 × 10 ⁻⁶	强度低,反应过快	[15]
一相注浆 (纤维加筋)	加 0.2% 玻璃纤维	1.65	6.5 × 10 ⁻⁶	抗渗性差	[15]
一相注浆 (NBPT 调控)	加 NBPT 抑制剂	1.92	5.1 × 10 ⁻⁷	低温环境适应性待优化	本研究

2.4 工程适用性及长期评价

图 6 展示了细砂层注浆速率优化试验结果,当注浆速率从 30 mL/min 增至 60 mL/min 时,扩散半径呈现先增后减的非线性变化特征。速率 40

mL/min 时达到峰值扩散半径 1.15 m,较常规速率 50 mL/min 时提升 19.8%。这一现象归因于浆液黏度与渗透阻力的动态平衡:速率过低时,浆液受重力作用显著,易在注入口附近堆积;速率过高则引发流体指进效应,导致胶结液沿优势通道快速流失。模拟试验表明,针对渗透系数为 10⁻⁴ cm/s 的细砂层,采用 40 mL/min 速率单次灌注可覆盖 1.2 m~1.5 m 的加固范围,较传统两相工艺的 0.8 m 提升 50%,显著降低重复注浆的施工成本,同时单位面积碳排放远低于水泥基注浆材料且无需高温养护,将进一步降低能耗。

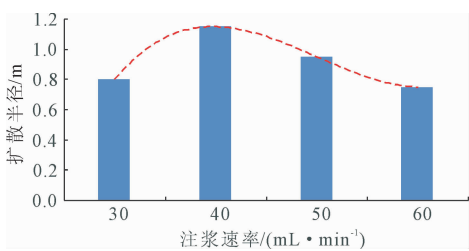


图 6 注浆速率对细砂层扩散半径影响

长期性能测试结果如图 7 所示,经历 30 次干湿循环后,试样的渗透系数由初始 5.7 × 10⁻⁶ cm/s 增至 9.9 × 10⁻⁶ cm/s,抗压强度从 1.85 MPa 下降至 1.49 MPa,渗透性与抗压强度的降幅分别为 73.7% 与 19.5%。进一步分析表明,渗透性能劣化主要由胶结物-砂粒界面微裂隙扩展引起,而力学强度衰减则与胶结桥连结构的应力重分布相关。值得注意的是,在年均干湿循环 20 次的典型工况下(如季风区水库坝体),NBPT 工艺可保障 5 年内渗透系数增幅 <10%,满足中型水利工程的维护周期要求。胶结物质量损失率与循环次数呈显著正相关,每 10 次循环平均损失 1.8 g/kg CaCO₃。对比低温法技术^[16],本方案在相同循环次数下的强度保留率高 9.5 个百分点,但渗透稳定性相较于水泥-膨润土复合材料仍偏低。

不同注浆材料长期性能对比如图 8 所示,NBPT 调控组在渗透稳定性和强度保留率方面均显著优于温度敏感水凝胶与水泥-膨润土注浆材料。虽然 NBPT 组的环境友好性特征不及水凝胶材料,但其降解产物硫代磷酸盐在 90 d 内浓度下降至接近检测极限(图 9),即可认为几乎完全降解,结合生物炭吸附工艺后可进一步控制生态风险。与传统水泥基材料相比,NBPT 技术无需依赖高能耗生产工艺,单次注浆的碳排放量低,符合绿色施工理念。

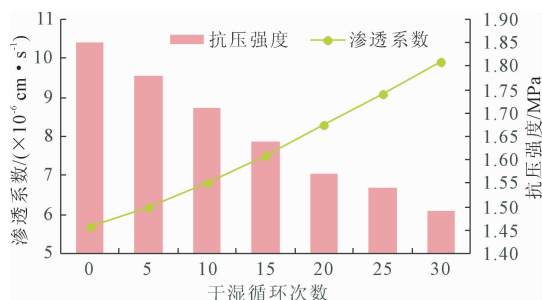


图7 干湿循环作用下渗透-力学性能演化规律

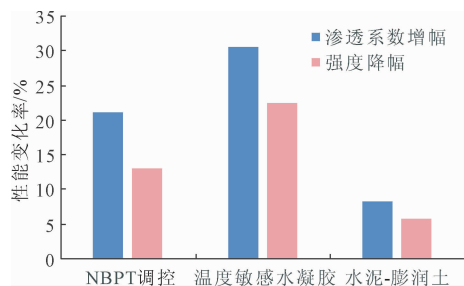


图8 不同注浆材料长期性能对比

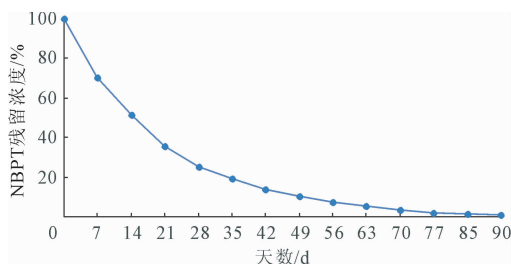


图9 NBPT降解曲线

碳酸钙胶结效率的环境敏感性分析如图 10 所示,结果显示温度对 NBPT 调控工艺的影响呈现显著阈值效应:在 15℃~30℃ 区间内, CaCO_3 生成效率稳定在 79.4%~95.6%,渗透系数变异率 < 21.3%;当温度低于 10℃ 时,反应延迟至 48 h 启动,导致最终强度下降 12.7%;高温 (> 35℃) 则加速 NBPT 分解,使抑制剂半衰期由 14 d 缩短至 10 d。这一特性要求施工环境温度宜控制在 15℃~30℃,并避免雨季或极端气候条件作业。此外,NBPT 降解动力学曲线显示,其土壤残留浓度在 14 d 内降低 50%,90 d 后接近检测限值 0.1 mg/kg,表明其对地下水系统的长期风险可控。

综合上述结果,NBPT 一相注浆技术适用于渗透系数 10^{-4} cm/s ~ 10^{-6} cm/s 的砂质土体加固,尤其在年均温 15℃~28℃、干湿循环 < 20 次/年的堤防与地基工程中表现优异。然而,其在高寒冻融 (< -5℃) 或强酸性 (pH < 5) 环境中的耐久性仍待验证。未来需通过基因工程改良菌株脲酶热稳定

性,并开发 NBPT-生物炭复合缓释体系,以拓展技术的气候适应性与环境安全性。

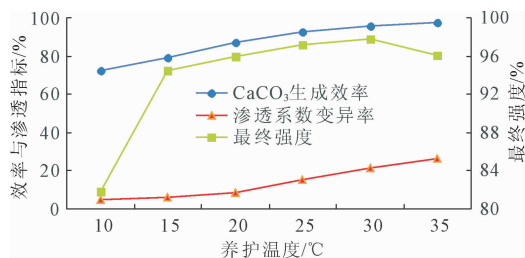


图10 碳酸钙胶结环境适用性

3 结 论

本研究通过构建 NBPT 调控型 MICP 一相注浆体系,实现了胶结反应动力学与浆液输运过程的精准协同,主要结论如下:

(1) 0.15 mmol/L NBPT 通过竞争性抑制脲酶活性,延缓尿素分解 24 h 以上,胶结液扩散半径提升至 1.5 m~1.8 m (较传统工艺扩大 87.5%),实现单次灌注全覆盖,解决“局部沉积-流体指进”难题。

(2) 该工艺在抗渗-力学协同增效方面表现突出,渗透系数与抗压强度分别较两相工艺优化 27.1% 和 42.2%,且胶结物空间分布均匀性指数达 0.86,克服了纤维加筋、黏度调节等改良方法中性能失衡的缺陷。

(3) 技术具备显著经济性与环境友好性,施工效率提升 58%,材料成本降低 45%,且 NBPT 降解半衰期为 14 d,90 d 后土壤残留浓度低于 0.1 mg/kg,结合生物炭吸附工艺可进一步控制生态风险,适用于堤防修复、地基加固等场景。

后续研究可从以下方向深入:①开发 NBPT-生物炭复合缓释体系,优化抑制剂的环境降解动力学与长效控释能力;②通过基因编辑技术增强菌株脲酶的热稳定性或耐酸性,拓展技术在冻融循环与强酸性环境中的适用性;③结合机器学习算法建立注浆参数-地层特性-性能输出的智能映射模型,推动工艺标准化与智能化施工。

参考文献:

- [1] 张绍松. 水利工程技术中土质堤防渗漏的原因及对策分析[J]. 智能城市应用, 2024, 7(4): 40-42.
- [2] 周 杨, 张家铭, 朱纪康, 等. 基于原生微生物 MICP 的土体加固试验研究[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(5): 132-139.

重庆交通大学,2009.

[21] 姜春露,姜振泉,刘盛东,等. 多孔岩石化学注浆过程中视电阻率变化试验[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(10):4202-4207.

[22] 赵 睿,刘 磊. 瞬变电磁技术在注浆效果检测的试验研究[J]. 煤矿机械,2024,45(3):31-33.

[23] Wang Xiaoguang. Evaluation of underground hydraulic fracturing using transient electromagnetic method[J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2019, 26(11):11458-11469.

[24] 白登海,Maxwell A Meju,卢 健. 时间域瞬变电磁法中心方式全程视电阻率的数值计算[J]. 地球物理学报,2003,46(5):697-704.

[25] 龙 琴. 瞬变电磁法正演模拟与反演算法研究[D]. 桂林:桂林电子科技大学,2017.

[26] 李锋平,杨海燕,邓居智,等. 地面瞬变电磁法一维烟圈反演技术研究[J]. 地球物理学进展,2016,31(2):688-694.

[27] 邢 涛,袁 伟,李建慧. 回线源瞬变电磁法的一维 Occam 反演[J]. 物探与化探,2021,45(5):1320-1328.

[28] 李静蕊. 全时域瞬变电磁 OCCAM 约束反演[D]. 西安:西安科技大学,2021.

[29] Newman G A, Korja T, Heinson G, et al. A review of high-performance computational strategies for modeling and imaging of electromagnetic induction data[J]. Surveys in Geophysics, 2014,35(1):85-100.

[30] 张继锋,王 尚,孙乃泉,等. 地下管道渗漏的瞬变电磁三维数值模拟及应用[J]. 地球物理学进展,2024,39(3):1206-1217.

[31] Miensopust M P, Baba K, Siripunvaraporn W, et al. Application of 3-D electromagnetic inversion in practice; challenges, pitfalls and solution approaches[J]. Surveys in geophysics, 2017,38(5):869-933.

[32] 徐正玉,付志红,廖 先,等. 基于小回线瞬变电磁法的病害体精细探测应用分析[J]. 地球物理学进展,2022,37(2):892-901.

~~~~~

(上接第 24 页)

[3] 肖维民,林 馨,钟建敏,等. 岩石节理微生物诱导碳酸钙沉积封堵渗流演化规律试验研究[J]. 岩土力学,2023,44(10):2798-2808.

[4] 陈玥如,高文艳,陈虹任,等. 场地重金属污染土壤固化及 MICP 技术研究进展[J]. 环境科学,2024,45(5):2939-2951.

[5] 张一佳,严德强,曲 晶,等. 微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)固化土体研究进展[J]. 土木工程,2024,13(5):603-612.

[6] 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):441-456.

[7] 张 宽,唐朝生,刘 博,等. 基于新型单相 MICP 技术改性黏性土力学特性的试验研究[J]. 工程地质学报,2020,28(2):269-277.

[8] 胡其志,霍伟严,马 强,等. MICP 联合纤维加筋黄土的力学性能及水稳性研究[J]. 人民长江,2023,54(8):227-232.

[9] 熊 雨,肖 瑶,邓华锋,等. 海水环境下混凝土裂缝微生物改性修复研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2024,32(1):160.

[10] 陈 欣,安 然,汪亦显,等. 胶结液浓度对 MICP 固化残积土力学性能影响及机理研究[J]. 水利与建筑工程学报,2023,21(6):100-106.

[11] 赖永明,俞 缙,刘士雨,等. 低 pH 值下微生物诱导碳酸盐沉淀加固尾矿砂试验研究[J]. 岩土力学,2024,45(6):1583-1596.

[12] 徐望清,郑俊杰,崔明娟,等. MICP 反应引入 NBPT 对碳酸钙沉积的影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2022,50(2):1-6.

[13] 彭 成,李 超,欧阳以. 正丁基硫代磷酰三胺对微生物固化砂土力学特性影响研究[J]. 南华大学学报(自然科学版),2024,38(5):68-77.

[14] Sang G, Lunn R J, Minto, et al. Microbially induced carbonate precipitation for soil improvement: insights from a meter-scale radial grouting trial[J/OL]. Biogeotechnics, 2024:100157. <https://doi.org/10.1016/j.bgtech.2024.100157>.

[15] Zhang Xiaogang, Zheng Chao, Xiong Kangwei, et al. Effect of fiber type and content on mechanical properties of microbial solidified sand[J]. Frontiers in Materials, 2023,10:1218795. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1218795>.

[16] 童天志,缪林昌,孙潇昊,等. 低温条件微生物沉积碳酸钙试验研究[J]. 硅酸盐通报,2018,37(5):1509-1514.