

## 养护温度对 MICP 技术改良伊犁黄土力学性能的影响研究

张艾, 史光明\*, 薛元, 周长江

新疆大学地质与矿业工程学院 新疆乌鲁木齐

**【摘要】**为探究养护温度对微生物诱导碳酸钙沉淀 (Microbially induced carbonate precipitation, MICP) 技术改良伊犁黄土力学性能的影响, 开展了无侧限抗压强度试验, 分析了 25°C、30°C 及 35°C 三种温度下 MICP 处理试样的强度变化规律。结果表明: MICP 处理能显著提升土体强度, 但加固效果受温度影响显著。在 25°C 条件下, 试样峰值强度为 60 kPa, 较未处理试样提高了 16.13%; 当温度升至 30°C 时, 峰值强度达到 81.68 kPa, 增幅为 58.06%; 而在 35°C 下, 峰值强度为 67.50 kPa, 增幅降至 30.64%。可见, 适度升温 (如 30°C) 有助于增强 MICP 的胶结效果, 但温度过高 (如 35°C) 可能抑制微生物活性或沉淀效率, 导致加固效果下降。因此, 在实际工程中应重视温度影响, 在高温环境下需考虑控温、调节菌液活性或结合其他工艺, 以保障 MICP 技术的处理效果与工程可靠性, 为其环境适应性优化提供依据。

**【关键词】**伊犁黄土; 微生物诱导碳酸钙沉淀; 养护温度; 无侧限抗压强度

**【基金项目】**2025 年国家级大创项目: 干湿循环条件下微生物改良伊犁黄土力学特性研究 (202510755012)、自治区高校基本科研业务费科研项目: 微生物固化下伊犁黄土边坡植物适生性及稳定性研究 (XJEDU2025J006)

**【收稿日期】**2025 年 12 月 15 日 **【出刊日期】**2026 年 1 月 16 日 **【DOI】**10.12208/j.sdr.20260006

### Study on the effect of curing temperature on the mechanical properties of Ili loess modified by MICP technology

*Ai Zhang, Guangming Shi\*, Yuan Xue, Changjiang Zhou*

*School of Geological and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang*

**【Abstract】**To investigate the effect of curing temperature on the mechanical properties of Yili loess improved by Microbially Induced Carbonate Precipitation (MICP) technology, unconfined compressive strength tests were conducted. The strength variation patterns of MICP-treated specimens were analysed at temperatures of 25°C, 30°C, and 35°C. Results indicate that MICP treatment significantly enhances soil strength, yet the consolidation effect is markedly influenced by temperature. At 25°C, the peak strength reached 60 kPa, representing a 16.13% increase over untreated specimens. When the temperature rose to 30°C, peak strength reached 81.68 kPa, with an increase of 58.06%. However, at 35°C, peak strength was 67.50 kPa, with the increase rate decreasing to 30.64%. Evidently, moderate temperature elevation (e.g., 30°C) enhances MICP's cementation effect, whereas excessively high temperatures (e.g., 35°C) may inhibit microbial activity or precipitation efficiency, diminishing reinforcement efficacy. Consequently, practical engineering applications must prioritise temperature considerations. In high-temperature environments, measures such as temperature control, adjustment of bacterial suspension activity, or integration with complementary processes should be implemented to safeguard MICP treatment outcomes and structural reliability, thereby providing a basis for optimising its environmental adaptability.

**【Keywords】**Ili loess; Microbially induced carbonate precipitation; Curing temperature; Unconfined compressive strength

\*通讯作者: 史光明

## 1 引言

微生物诱导碳酸钙沉淀 (Microbially induced carbonate precipitation, MICP) 技术作为一种新型、高效、环保的微生物土体改良法, 相较于垫层法<sup>[1]</sup>、强夯法<sup>[2]</sup>或化学灌浆法<sup>[3]</sup>等传统的物理化学加固技术, MICP 技术本质上具有能耗低、过程可控、材料环境友好 (反应物及产物无污染) 等突出优势, 尤其符合当前工程建设向绿色、可持续方向发展的趋势, 其近年来在土体加固、地基加固及遗址保护等领域展现出巨大潜力<sup>[4-6]</sup>。该技术利用产脲酶微生物的代谢活动 (如巴氏生孢八叠球菌), 催化尿素水解, 与钙离子结合生成碳酸钙沉淀, 将松散土颗粒胶结起来, 能够有效改善土体的力学与水力性能<sup>[7-10]</sup>。

黄土在我国西北地区广泛分布, 其中伊犁黄土作为典型代表, 具有结构性强、湿陷性显著、生态脆弱等特性<sup>[11-13]</sup>。在该地区进行工程建设 (如路基、边坡、地基处理) 时, 常需对其不良工程地质性质进行改良, MICP 技术因其低能耗、与自然环境相容性好等优点, 成为该地区黄土改良的重要研究方向之一<sup>[14-17]</sup>。然而, 伊犁河谷地处内陆, 属温带大陆性气候, 季节与昼夜温差变化剧烈, 工程场地温度环境复杂多变<sup>[18]</sup>。温度作为影响微生物生命活动及酶促反应速率的关键物理因素, 必然会对 MICP 过程、改良效果产生深远影响。

因此, 本研究以伊犁黄土为对象, 系统探究不同温度条件下 MICP 技术的改良效果。通过开展一系列室内试验, 分析不同温度养护条件下改良后黄土的无侧限抗压强度种关键工程性质的变化。本研究旨在揭示养护温度对 MICP 改良伊犁黄土的作用机理, 为 MICP 技术在我国西北地区的工程应用提供关键的理论依据, 推动该技术在复杂环境条件下

的科学化、精准化应用。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 原材料

#### 2.1.1 试验土样

试验所用黄土取自新疆伊犁地区某典型黄土边坡。取样深度为地表以下 1.5 米左右, 以减少表层植被和风化作用的影响。取得的原状土样密封保存并运至实验室, 根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)<sup>[19]</sup>对土体进行基本物理性质测定, 结果见表 1。

#### 2.1.2 菌液与胶结液

本试验所用菌株巴氏生孢八叠球菌 (ATCC 11859) 属于芽孢杆菌目, 球菌科, 芽孢八叠球菌属, 购自中国普通微生物菌种保藏管理中心 (CGMCC)。该菌为好氧革兰氏阳性菌, 对尿素水解产物铵离子具有较高耐受性<sup>[20-21]</sup>, 适用于伊犁黄土土体的改良环境。本试验采用 CM0907 尿素培养基 (具体成分见表 2) 进行菌株培养, 主要包含尿素、蛋白胨、牛肉浸膏及琼脂等成分。

菌液浓度采用紫外分光光度计进行测量。使用前仪器需要预热 20 分钟, 并且以未接种培养基为对照, 在 600 nm 波长下测定 OD<sub>600</sub> 值。测定前需要先对双手进行酒精消毒, 然后用移液枪从振荡培养箱取 1 mL 菌液置于比色皿中, 每个样本重复测量至少 3 次, 取平均值作为菌液浓度。本研究中, 处于对数生长后期的菌液 OD<sub>600</sub> 平均值稳定在 1.11±0.1 范围内, 后续改良试验均于此时 (菌液浓度最大时) 进行, 且菌液使用前依照吴泽炬<sup>[22]</sup>、王曦<sup>[23]</sup>等人的研究表明无需进行离心或重悬等处理。

胶结液为尿素和 CaCl<sub>2</sub> 混合溶液, 其中尿素与 CaCl<sub>2</sub> 的摩尔浓度比 1:1 (浓度均为 1 mol/L)。

表 1 土体物理指标

天然含水率 (w%)	天然密度 (g/cm <sup>3</sup> )	干密度 (g/cm <sup>3</sup> )	液限 (%)	塑限 (%)	最优含水率 (w%)	最大干密度 (g/cm <sup>3</sup> )
16.49	16.0	1.38	25.87	17.08	18.77	1.87

表 2 培养基成分表

CM0907 尿素培养基						
固体培养基			液体培养基			
蛋白胨	5.00	g	蛋白胨	5.00	g	
牛肉浸膏	3.00	g	牛肉浸膏	3.00	g	
尿素	20.00	g	尿素	20.00	g	
琼脂	25.00	g	蒸馏水	1.00	L	
蒸馏水	1.00	L	pH			7
pH		7				

## 2.2 试验方法

### 2.2.1 试验方案

为探究养护温度对微生物诱导碳酸钙沉淀 (MICP) 加固伊犁黄土效果的影响规律, 研究采用单因素变量法, 以温度为唯一变量 (25°C、30°C、35°C), 系统设计了不同温度养护下的对比试验。

本次试验采用喷洒合法对土样进行处理, 用等质量的胶结液和菌液来代替蒸馏水配置 18.77% 最优含水率的土样<sup>[10]</sup>。将伊犁黄土、菌液和胶结液喷洒液搅拌均匀后制成直径 39.1mm, 高度 80mm 的标准圆柱体试样, 用保鲜膜包裹、装入塑封袋后, 放入恒温箱中, 分别在 25°C、30°C、35°C 三种不同温度的条件下养护 14d。

为确保试验数据的可靠性和统计学意义, 每组试验均设置 3 个平行样本, 并设置空白对照组进行对照试验。

### 2.2.2 无侧限抗压强度试验

无侧限抗压强度试验按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)<sup>[19]</sup> 相关规定进行。使用“STK.WCX-II 型”无侧限抗压强度试验仪进行测定。试验时, 将试样放置于试验机下承压板上, 对尺寸为  $\Phi 39.1 \text{ mm} \times H 80 \text{ mm}$  的圆柱体试样施加轴向荷载, 加载速率控制在 0.5 mm/min, 直至试样破坏。记录破坏荷载, 得出单轴抗压强度。

## 3 结果与分析

本次试验研究了经 MICP 处理的伊犁黄土试样在 25°C、30°C、35°C 三种不同温度下养护后的无侧限抗压强度试验数据。所有试样的应力-应变曲线均呈现出典型塑性变形特征, 可划分为四个明显的力学行为阶段, 初始弹性阶段、屈服过渡阶段、塑性强化阶段以及颈缩断裂阶段<sup>[24]</sup>。这与传统土体或胶结材料的无侧限曲线有所不同, 反映了 MICP 处理在微观结构中引入的碳酸钙胶结与基质相互作用的复合效应, 见下图 1、图 2。

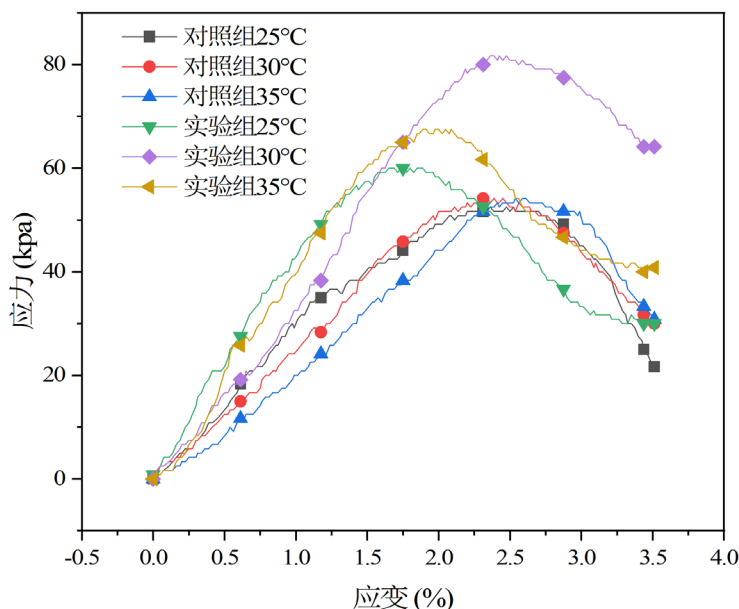


图 1 应力-应变曲线图

### 3.1 应力-应变曲线总体特征分析

由图 1 和图 2 可知, 所有试样在加载初期 (应变 0~0.1%) 均表现出近似线性的弹性响应, 随后进入屈服过渡阶段。与对照试样相比, MICP 处理试样在屈服后并未立即发生破坏, 而是表现出一定的应变硬化特征, 这与碳酸钙胶结网络在受力过程中的逐步破坏机制密切相关。当应变进一步增大至 0.8%~1.2% 范围内时, 多数试样达到峰值强度, 随

后进入软化阶段, 最终在应变达到 3.0%~3.5% 时趋于稳定或发生整体破坏。

### 3.2 养护温度对无侧限抗压强度的影响

图 1 和图 2 表明, 养护温度会显著影响 MICP 试样的胶结效果与强度。在 25°C 养护条件下, 对照组的峰值抗压强度为 51.667 kPa, 而 MICP 处理组为 60 kPa, 强度提升了约 16.13%。这表明微生物有一定的代谢活动, 生成了一定的碳酸钙晶体, 在一

定程度上提高了伊犁黄土的力学强度; 当养护温度为 30°C 时, 是巴氏生孢八叠球菌的最佳培养温度, MICP 处理组的峰值强度也最高为 81.667 kPa, 强度提升了 58.1%。这表明在此温度条件下, 微生物的代谢旺盛, 生成的碳酸钙晶体多、分布均匀, 在土体内部形成了有效的空间网络结构, 显著提高了试样的整体性与承载能力<sup>[25]</sup>; 在 35°C 的较高养护温度下, MICP 处理组的峰值强度降至 67.5 kPa, 较其在 30°C 下的最优强度下降了约 17.3%。这种强度的回落可归因于高温对 MICP 过程的多重影响: 首先, 较高的温度可能抑制了部分功能微生物的代谢活性, 导致脲酶催化效率降低; 其次, 高温下尿素水解反应速率显著加快, 可能导致局部反应环境 (如 pH 升高) 剧烈变化, 影响碳酸钙的成核与晶体生长过程<sup>[27]</sup>; 再者, 过快的沉淀速率可能促使碳酸钙晶体发生粗化或局部过度生长, 从而削弱其在土颗粒间形成的胶结网络的均匀性与连续性。但是, 在 35°C 的养护条件下, MICP 处理组的强度仍比同

温度养护的对照组 (54.167 kPa), 高出 24.6%, 这表明 MICP 技术在较高温度环境下依然具有较好的改良效果。

### 3.3 变形特性与破坏模式分析

从图 1 的应力-应变曲线图可知, 养护温度不仅影响试样的峰值强度, 还显著改变了其变形特性与破坏模式。在 25°C 养护的 MICP 试样中, 试样的变形行为呈现出明显的脆性化趋势, 试样的应力-应变曲线在峰值附近更为陡峭, 达到峰值后的强度下降更为迅速, 表明胶结网络的脆性特征显著<sup>[26]</sup>。30°C 养护时, 应力-应变曲线呈现出较为平滑的上升段与相对平缓的下降段, 表明试样在破坏过程中经历了渐进式的胶结断裂与基质屈服过程, 破坏模式表现为整体剪切破坏与局部压缩破坏的复合形式。在 35°C 养护条件下, 曲线表现出脆性化趋势, 部分试样表现出轻微的应变软化前的应力波动, 这可能是由于高温下形成的不均匀胶结结构在受力过程中发生了阶段性破坏。

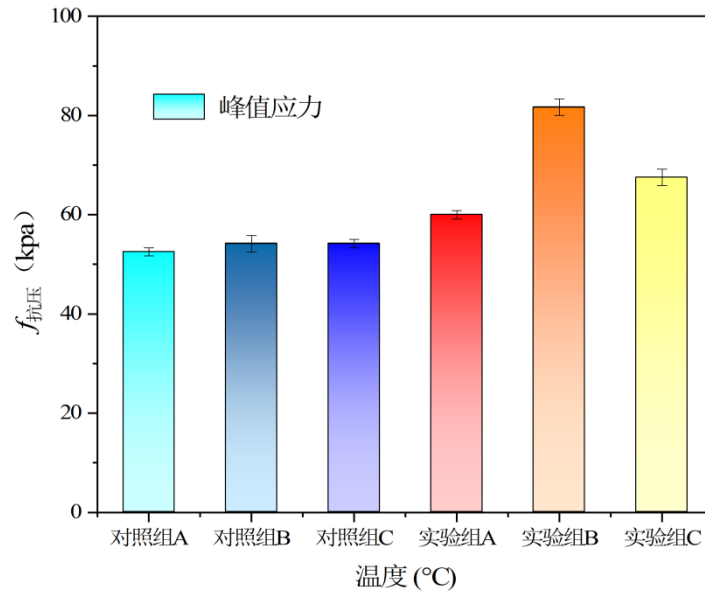


图 2 无侧限峰值强度图

(A=25°C; B=30°C; C=35°C)

本试验结果表明, 30°C 是 MICP 改良伊犁黄土的较优温度条件, 在此温度下的土体可获得最佳的胶结效果与无侧限抗压强度。因此, 在实际的工程中将养护温度控制在接近 30°C 的水平, 才能确保有较好的加固效果。另外, 在 35°C 的较高温度下, MICP 处理仍能显著提升土体强度, 表明该技术在温差显

著或夏季高温的伊犁河谷地区仍具备应用潜力。

但是, 为了确保 MICP 技术在复杂温度环境下的工程可靠性, 有必要采取针对性的适应性调控措施。基于本研究的发现, 并结合伊犁河谷昼夜及季节性温差大的气候特点, 建议在实际应用中可考虑:

(1) 通过简易保温覆盖或选择温度适宜的时段

施工,以减小温度剧烈波动对胶结过程的不利影响;

(2)在高温条件下,可以通过适当的调整工艺参数,如优化菌液活性、延长养护周期或采用分段灌注与养护,以缓解高温可能引起的反应过快或沉淀胶结不均等问题。

综上所述, MICP 技术作为一种环保、高效的土体加固方法,其处理效果具有明显的温度依赖性。通过科学控制养护温度并优化工艺,可充分发挥其工程潜力,推动该技术在伊犁黄土地区的可靠应用与推广。

### 参考文献

- [1] Jefferson I, Evstatiev D, Karastanev D. The treatment of collapsible loess soils using cement materials[C]// Proceedings of the GeoCongress 2008. New Orleans: American Society of Civil Engineers, 2008.
- [2] 曹利, 卞海丁, 张哲, 等. 高能级强夯黄土地基振动衰减规律模型试验研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(15): 6581-6590.
- [3] 钟秀梅, 王谦, 刘钊钊, 等. 干湿循环作用下粉煤灰改良黄土路基的动强度试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增刊 1): 95-99.
- [4] 黄趁趁, 杜强, 曲立强, 等. 钙源及固化方式对 MICP 处理砂黄土均匀性及强度的影响[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文), 1-10, 2025-02-20.
- [5] CHU J, IVANOV V, STABNIKOV V, et al. Microbial method for construction of an aquaculture pond in sand [J]. Géotechnique, 2013, 63(10): 871-875.
- [6] LIU S Y, YU J, ZENG W L, et al. Repair effect of tabia cracks with microbially induced carbonate precipitation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1): 191-204.
- [7] LIU H L, XIAO P, XIAO Y, et al. State-of-the-art review of biogeotechnology and its engineering applications[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(1): 1-14.
- [8] WANG Z Y, ZHANG N, JIN Y, et al. Application of microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) in sand embankments for scouring/erosion control[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2021, 39(12): 1459-1471.
- [9] Fischer S, Galiant JK, Ban SS. Microbiological precipitation of CaCO<sub>3</sub>[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(11): 1563-1571.
- [10] QABANY A. AL, SOGA K. Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils[J]. Géotechnique, 2013, 63(4): 331-339.
- [11] 彭建兵, 林鸿州, 王启耀, 等. 2014. 黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路[J]. 工程地质学报, 22 (4): 684-691.
- [12] Peng J B, Sun P, Igwe O, et al. 2018. Loess caves, a special kind of geohazard on loess plateau, northwestern China[J]. Engineering Geology, 236: 79-88.
- [13] 曹小红, 孟和, 尚彦军, 等. 2020. 伊犁谷地黄土滑坡发育分布规律及成因[J]. 新疆地质, 38(3): 405-411.
- [14] 王茜. 冻融循环作用下 MICP 技术处理黄土的力学性能研究[J]. 水利规划与设计, 2025, (08): 92-97.
- [15] 曹佩娴, 马磊, 司伟, 等. 基于 MICP 技术的巴氏芽孢杆菌固化黄土效果研究[C]//中国公路学会, 中国航海学会, 中国铁道学会, 中国航空学会, 中国汽车工程学会. 2025 世界交通运输大会(WTC2025)论文集(下册). 长安大学公路学院, 2025: 347-353.
- [16] 赵天宇, 安亮, 谌文武, 等. 微生物诱导碳酸钙沉淀加固黄土影响因素试验研究[J]. 科学技术与工程, 2025, 5(04): 1620-1627.
- [17] Liu J, Zhu Z, He J, et al. Experimental study on shear strength and creep properties of loess modified by microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) under freeze-thaw cycles[J]. Case Studies in Construction Materials, 2025, 22: e04119.
- [18] 周昌, 黄顺. 新疆伊犁黄土工程地质特征及致灾机理研究综述[J]. 工程地质学报, 2023, 31(04): 1247-1260.
- [19] 中华人民共和国行业标准编写组. 土工试验方法标准: GB/T 50123-2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [20] Wang Z, Zhang N, Cai G, et al. Review of ground improvement using microbial induced carbonate precipitation (MICP)[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2017, 35(8): 1135-1146.

- [21] Henze J, Randall D. Microbial induced calcium carbonate precipitation at elevated pH values (>11) using *Sporosarcina pasteurii*[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018, 6: 5008–5013.
- [22] 吴泽炬. 冻融和干湿循环作用对 MICP 技术改良分散性土效果的影响研究[D]. 吉林大学, 2024.
- [23] 王曦. 微生物诱导碳酸钙沉淀技术(MICP)改良分散性土的试验研究[D]. 吉林大学, 2023.
- [24] 苏承东, 张振华. 大理岩三轴压缩的塑性变形与能量特征分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, (02): 273-280.
- [25] 岳建伟, 张宝玺, 赵丽敏, 等. 改良微生物诱导碳酸钙沉淀技术加固粉性土力学性能[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(18): 7702-7710.
- [26] 许晓亮, 陈奕恺, 谭德林, 等. 生物聚合物改良花岗岩残积土的力学特性及机理[J/OL]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 1-10[2025-05-20].
- [27] 祝富豪. 钢渣高 pH 环境下巴氏芽孢杆菌驯化及固化风积沙试验研究[D]. 新疆农业大学, 2023.

**版权声明:** ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**OPEN ACCESS**