

基于多因素微生物固化矿山渣土力学试验研究

庞宇彤*, 任新超

(鄂尔多斯应用技术学院土木工程学院, 鄂尔多斯 017000)

摘要:目的 对松散矿山渣土进行加固, 解决鄂尔多斯地区矿山渣土再利用的问题。**方法** 采用微生物诱导碳酸钙沉淀技术, 改良矿山渣土提高其力学特性, 增强抗压性能。通过控制滴注速率、胶结液浓度、菌液和胶结液滴注轮数三个变量, 开展无侧限抗压强度试验, 分析三个变量对无侧限抗压强度的影响。**结果** 胶结液滴注速率为 2.5 mL/min 时无侧限抗压强度最大, 较其他两种速率滴注的试样无侧限抗压强度均有显著增大; 胶结液浓度为 2.0 mol/L 时强度最大, 达到了 1.65 MPa; 滴注轮数为 8 轮时试样强度最大, 达到了 11.6 MPa。**结论** 随着胶结液浓度的增大其无侧限抗压强度逐渐增加, 不同菌液与胶结液滴注轮数对加固试样的强度影响较为明显, 强度均随轮数的增加呈正比增加的关系。研究结果可为鄂尔多斯矿区渣土再利用的影响因素提供参考。

关键词: 微生物固化; 矿山渣土; 无侧限抗压强度

0 引言

鄂尔多斯市鄂托克旗蕴藏着丰富的矿产资源。由于矿产资源属于不可再生资源, 各种固体废物不断积累, 对于生态环境的破坏无法想象。因此, 在可持续发展视域下, 需要对矿山渣土进行固化。微生物诱导碳酸钙沉淀技术(MICP)是环保土体加固新技术之一, 该技术是利用细菌分泌的脲酶水解尿素生成 CO_3^{2-} , 并与周边环境 Ca^{2+} 相结合形成碳酸钙晶体充填在土颗粒之间孔隙中, 使得土样黏结成一体, 进而实现了对土体加固的目的。

目前, 国内外已有不少学者对 MICP 技术在土体加固的应用进行了研究^[1], 而针对矿区渣土的加固处理, 则鲜有涉及。李驰等^[2]采用 EICP 法对分散土进行改性, 通过针孔法、双密度仪、碎石法等测试方法对其进行改性, 发现经微生物矿化处理后, 其抗分散性能明显提高, 其中以脲酶为基质的微生物改性剂效果最好。王绪民等^[3]采用 MICP 对泥岩进行改性, 研究不同粒径、不同制备工艺及 MICP 对泥岩中碳酸钙析出的影响, 探索其修复泥岩稳定的可行性。赵茜^[4]研究不同酸碱条件下, pH 值对细菌生长繁殖情况和菌液脲酶活性影响, 得出结论: 微生物一般都有一个最适生长的 pH 值, 但是微生物的生长繁殖并不局限在这个最佳值附近, 且 pH 在 6~9 时对细菌影响很小。冯焯钧^[5]开展胶结液浓度对细菌脲酶活性的影响分析, 研

究发现胶结液浓度在 0.5~1.0 mol/L 范围内, 碳酸钙含量随着浓度的升高而增加较为明显, 同时通过增加浓度可提高碳酸钙生成量, 但是当浓度超过 1.0 mol/L 时碳酸钙转换率出现明显降低。目前研究多集中于影响砂土改良因素等研究^[6-9], 对于矿山渣土的加固研究尚有缺乏, 因此, 基于上述研究, 对三个变量进行了无侧限抗压强度试验, 即滴注速率、胶结液浓度、菌液和胶结液滴注轮数, 探究三个因素对矿山渣土试样无侧限抗压强度影响, 可为鄂尔多斯矿山地区的渣土再利用、防沙固沙和生态环境治理与应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验所用矿山渣土

本试验使用矿渣来源于鄂尔多斯市鄂托克旗某矿废料, 选取 5 个取样点, 坐标为(N111.236°, E39.868°), 室内试验测试结果可得渣土最大干密度 $\rho_{\text{dmax}}=1.913$, 最优含水率 $\omega_{\text{op}}=9.26$ 。采用筛分法测得矿渣土样的级配曲线如图 1, 其不均匀系数 $C_u=11.7(>10)$, $C_c=1.65(1\sim3)$, 根据《土工试验方法标准》GB/T 50123—2019^[10] 矿渣土定位级配良好。

1.2 固化菌种

本研究采用巴氏芽孢杆菌作为菌种, 其浓度以 OD_{600} (指菌悬液在 600 nm 波长处的吸光值)表示, 细菌培养、扩

基金项目: 2024 年自治区级大学生创新创业训练计划项目《基于微生物固化的矿山渣土力学特性与微观机理试验研究》(S202414532009)。

* 通信作者: 庞宇彤, 硕士, 助教, 研究方向为岩土工程相关领域研究。E-mail: 15601323622@163.com

大培养以及提取方法参考现有研究。选择 LB 配方作为菌液培养基, 由 20 g/L 的酵母提取物、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (10 g/L)、尿素 (20 g/L) 以及去离子水组成。采用分光光度计测定巴氏芽孢杆菌的生长特征曲线, 如图 2 所示。在 0~2 h 时, 细菌细胞开始分裂, 缓慢生长, 此时处于生长迟缓期, 细菌浓度低; 在 2~12 h 细菌处于对数生长期, 细菌已经适应环境并开始大量分裂, 以几何级数生长, 在 12~48 h 进入稳定期, 细菌增殖与死亡趋于动态平衡。因此, 本试验用于固化渣土的菌液 OD_{600} 在 1.9~2.0, 培养时间为 48 h。

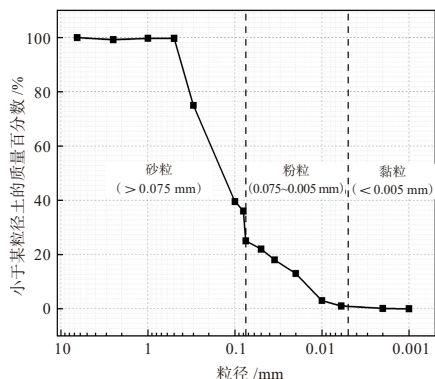


图 1 矿山渣土颗粒分布曲线

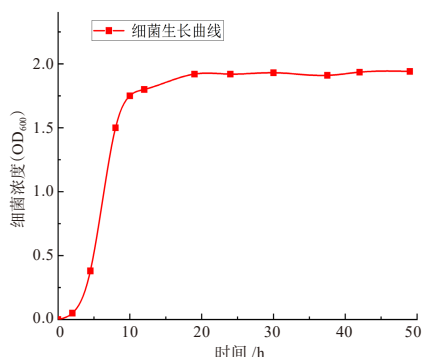


图 2 巴氏芽孢杆菌生长特性曲线

1.3 试验设计

为探究胶结液浓度对微生物固化矿山渣土力学性能的影响, 本试验选取的胶结液材料为尿素 $[\text{CO}(\text{NH}_2)_2]$ 和氯化钙 (CaCl_2) , 配制胶结液为 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 和 CaCl_2 混合溶液, 设计 1.5、2.0、2.5、3.0 mol/L 四种不同浓度的胶结液 $[\text{CaCl}_2 : \text{CO}(\text{NH}_2)_2]$ 比值为 1 : 1。本试验设置 27 个工况, 每组试样制备 3 个平行试样, 试样的变量分别为胶结液浓度 (胶结液由尿素和氯化钙组成)、滴注速率、灌注轮数 (首先通过蠕动泵以 1 mL/min 速度向样品内注入菌液, 间隔 3 h 再滴入胶结液, 滴入速度根据不同工况设定, 这是一个循环的终点, 间隔 12 h 即可进行下一循环滴注, 注入菌液和胶结液 1.2V), 试样固化方案如表 1 所示。试验制备过程中采用拌合的方式将菌液与渣土充分混匀, 分成五层均匀铺设至模具中, 每层使用击实锤击实后进行刮毛处理

直至两端光滑平整无明显凹陷现象, 制备直径 39.1 mm、长度 80 mm 的试样静置 24 h 后将配制好的胶结液滴入。

表 1 微生物固化试验方案

试验组	胶结液浓度 / (mol/L)	胶结液滴注速率 / (mL/min)	胶结液与菌液滴注轮数
A ₁	1.0	1.5	4、6、8
A ₂	1.5	1.5	4、6、8
A ₃	2.0	1.5	4、6、8
B ₁	1.0	2.5	4、6、8
B ₂	1.5	2.5	4、6、8
B ₃	2.0	2.5	4、6、8
C ₁	1.0	3.5	4、6、8
C ₂	1.5	3.5	4、6、8
C ₃	2.0	3.5	4、6、8

2 结果与分析

2.1 胶结液滴注速率对无侧限抗压强度的影响

从图 3 中可以看出, 胶结液滴注速率为 2.5 mL/min 时所对应的无侧限抗压强度最高, 此时最大值达到了 1.65 MPa 左右; 胶结液滴注速率为 1.5 mL/min 时, 此时试样的无侧限抗压强度位于其他两个速率之间, 其强度值在 0.7~1.7 MPa 范围内; 当胶结液速率达到 3.5 mL/min 时, 试样的无侧限抗压强度最低, 其强度值在 0.7~1.2 MPa 范围内。随着滴注速率的提高, 试样的无侧限抗压强度平均值逐渐下降, 滴注速率为 1.5 mL/min 较 3.5 mL/min 无侧限抗压强度平均值提高了 9.77%, 综合考虑, 胶结液滴注速率对固化矿山渣土试样的无侧限抗压强度具有一定的影响。

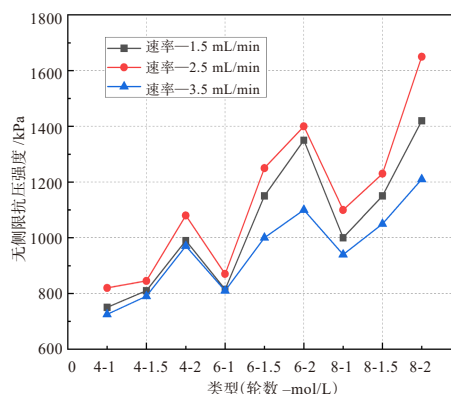


图 3 滴注速率对无侧限抗压强度的影响规律

2.2 胶结液浓度对无侧限抗压强度的影响

如图 4 所示, 三种胶结液浓度分别为 1、1.5、2 mol/L, 相应的无侧限抗压强度均有增大的趋势, 尤其当胶结液浓度为 2.0 mol/L 时试样的无侧限抗压强度最大, 最高可达 1.65 MPa; 当胶结液浓度为 1.5 mol/L 时试样的无侧限抗压强度处于中等水平, 此时试件的无侧限抗压强度为 0.8~1.1 MPa; 当胶结液浓度为 1.0 mol/L 时试样的无

侧限抗压强度在 0.78~1.1 MPa 范围内。随着胶结液浓度的升高, 其无侧限抗压强度值在逐渐增大, 胶结液浓度为 2.0 mol/L 时试样的无侧限抗压强度较 1.0 mol/L 时增加了 38.87%, 此时可以说明胶结液浓度对固化矿山渣土无侧限抗压强度影响较为明显。

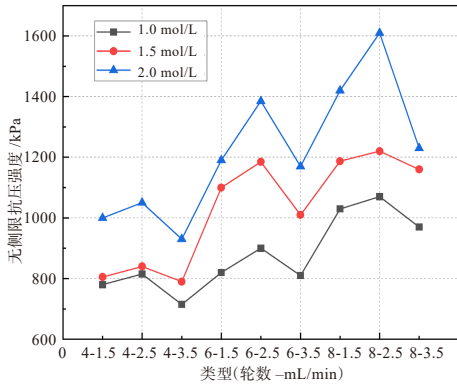


图 4 胶结液浓度对无侧限抗压强度影响规律

2.3 菌液与胶结液滴注轮数对无侧限抗压强度的影响

图 5 所示为菌液与胶结液滴注轮数对无侧限抗压强度的影响规律。三种不同滴注轮数对应的无侧限抗压强度亦是依次递增, 当滴注轮数为 8 轮时试样的无侧限抗压强度最高, 最大值达到了 1.6 MPa 左右; 滴注轮数为 6 轮时试样的无侧限抗压强度居中, 其值在 0.8~1.35 MPa 范围内; 当滴注轮数为 4 轮时试样的无侧限抗压强度最低, 其值在 0.8~1.05 MPa 范围内。胶结液与菌液滴注轮数为 8 时的无侧限抗压强度平均值较滴注轮数为 4 轮时提高了 40.34%。由此可以得出胶结液与菌液的滴注轮数对试样的无侧限抗压强度有较为明显的影响。基于以上试验结果选择最优加固方案, 在不同工况固化试验中, 胶结液浓度为 2.0 mol/L, 胶结液滴注速率为 2.5 mol/min, 菌液与胶结液滴注轮数为 8 轮时的试样无侧限抗压强度最高, 达到了 1.65 MPa。

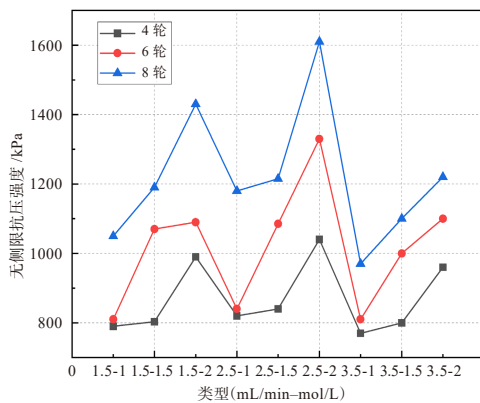


图 5 菌液与胶结液滴注轮数对无侧限抗压强度影响规律

3 讨论与结论

本文通过微生物固化技术对鄂尔多斯某露天矿山渣土

进行改良, 开展胶结液滴注速率、胶结液浓度、菌液与胶结液滴注轮数对其无侧限抗压强度影响分析, 得出结论: ①胶结液滴注速率与无侧限抗压强度不呈正比的关系, 而是 2.5 mL/min 速率是无侧限抗压强度最大, 较其他两种速率滴注的试样无侧限抗压强度均有显著增大。由此可知滴注速率并非越快其强度越高, 这是由于速率过快时菌液与胶结液无法充分发生反应, 生成碳酸钙含量少导致其强度低。②随着胶结液浓度的增大, 其无侧限抗压强度逐渐增加, 即胶结液浓度为 2.0 mol/L 时强度最大, 达到了 1.65 MPa。胶结液浓度增大, 可以有效提高矿山渣土的抗压强度, 胶结液中的 Ca^{2+} 与菌液中的 CO_3^{2-} 结合效率更高, 胶结生成晶体填充在土颗粒之间。③不同菌液与胶结液滴注轮数对加固试样的强度影响也较为明显, 强度均随轮数的增加呈正比增加的关系, 本试验中滴注轮数为 8 轮时试样强度最大, 达到了 11.6 MPa。当滴注速率在一个合适的范围内, 菌液与胶结液滴注轮数的增大可有效提高试样的强度。

参考文献

- [1] 赵志峰, 孔繁浩. 土体环境对微生物诱导碳酸钙沉积加固海相粉土的影响研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(4): 608-614, 692.
- [2] 李驰, 史冠宇, 武慧敏, 等. 基于脲酶诱导碳酸钙沉积的微生物矿化技术在分散性土改良中应用的试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 333-342.
- [3] 王绪民, 崔芮, 王铖. 微生物诱导碳酸钙沉淀胶结加固泥岩试验研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(25): 10372-10378.
- [4] 赵茜. 微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)固化土壤实验研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- [5] 冯焯钧. 微生物诱导碳酸钙沉积固化红色松散砂岩机理研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [6] 张银峰, 万晓红, 李娜, 等. 微生物加固黏土的影响因素与机理分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(2): 246-254.
- [7] SUN X H, MIAO L C, TONG T Z, *et al.* Study of the effect of temperature on microbially induced carbonate precipitation [J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(3): 627-638.
- [8] CHENG L, SHAHIN M A, CHU J. Soil bio-cementation using a new one-phase low-pH injection method [J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(3): 615-626.
- [9] ORAL C M, ERCAN B. Influence of pH on morphology, size and polymorph of roomtemperature synthesized calcium carbonate particles [J]. Powder Technology, 2018, 339: 781-788.
- [10] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.