[文章编号] 1003－4684(2025)01-0087-05

微生物固化纤维加筋黄土影响因素试验研究

胡其志[1,2]，霍伟严[1,2]，马 强[1,2]，陶高梁[1,2]

(1 湖北工业大学土木建筑与环境学院，湖北 武汉 430068；
2 湖北省桥梁安全监控技术与装备技术工程中心，湖北 武汉 430068)

[摘 要] 微生物诱导碳酸钙沉淀技术是近年来土体加固的热门研究领域，但其单独用于加固细粒土时效果往往不佳。对黄土开展纤维加筋与微生物固化相结合，探究不同微生物固化养护时间与养护温度下加筋黄土的强度与水稳定性规律。通过三轴剪切试验、崩解试验、BET 测试分析了养护时间（7 d、14 d、28 d）与养护温度（5 ℃、15 ℃、35 ℃）对微生物固化纤维加筋黄土固化效果的影响。研究结果表明：1)随着微生物固化养护时间的增加，试样的抗剪强度与水稳定性均有所提高，但养护后期试样抗剪强度增幅不明显，水稳定性有小幅度降低；2)较高的养护温度对于微生物固化具有积极作用，试样的抗剪强度与水稳定性随温度的升高而增大；3)微生物固化作用主要表现为在代谢过程中生成碳酸钙沉淀，与加筋纤维共同作用使得土体孔隙减少，增大试样的比表面积。

[关键词] 黄土；微生物；玄武岩纤维；三轴试验；崩解试验

[中图分类号] TU444 [文献标识码] A

受气候及成因等多重因素影响，黄土常表现出湿陷性，强度低，通常不能满足工程建设的需要。目前在黄土改良方面多采用水泥、矿渣、石灰等固化剂，国内外相关研究也已取得了较为丰硕的成果[1-2]。以上加固方式虽然效果明显但普遍存在能耗高、施工周期长的问题，而且部分固化剂属于强碱性物质，有一定生物毒性，对环境污染较大，不符合目前国家环境保护和可持续发展的要求。因此探索一种环保、高效的黄土改良方法对于黄土地区生态治理具有重要意义。

近年来，越来越多的学者开始关注微生物固化技术(简称 MICP)。微生物固化技术的原理主要为利用微生物代谢过程中产生的脲酶，催化胶结液中的尿素，使其水解产生 CO_3^{2-}，CO_3^{2-} 再与胶结液中 Ca^{2+} 反应生成碳酸钙沉淀[3]。现阶段对于 MICP 技术加固方法的研究主要集中在灌浆法和浸泡法，但由于黄土颗粒较细，适用于粗粒土的微生物灌浆等方式对于细粒土的加固效果可能并不明显。已有的相关研究表明，通过拌合的方式可以将 MICP 技术有效应用于细粒土的固化改良[4]，但固化效果通常有限。为此，部分学者将 MICP 技术与纤维加筋技术相结合[5]，一方面利用纤维的加筋效果提高土体的物理力学性能，另一方面利用纤维提高细菌的附着率，二者优势互补，提高了 MICP 技术的工程实用价值。

拌合法作为一种较为便捷的 MICP 固化操作方法，其固化效果易受内在材料因素与外界环境因素的影响，但目前大部分研究都是针对菌液与胶结液体积比、钙源种类、胶结液浓度、纤维掺量等内在因素[6-8]，对于外部环境因素影响的研究较为少见。由于拌合过程中需考虑土体的含水率，一般菌液与胶结液的用量都低于灌浆等方式，因此，固化过程中细菌的活性和胶结液的利用率就显得尤为重要，直接关乎整体固化效果。有学者指出，随着养护时间的增加，固化试样强度增幅将逐渐降低[9-10]，但在水稳性方面的研究较为缺乏。同时，温度的变化同样对巴氏芽孢杆菌活性有着一定影响，已有的相关研究大多基于 20℃－40℃范围内[11-12]，温度范围较小，关于养护温度对固化效果的规律总结尚不充分。

为此，采用拌合法，将菌液、胶结液、纤维与土体直接拌合，对纤维加筋黄土开展三轴剪切试验、崩解试验，分析不同养护时间与养护温度对于纤维加筋黄土强度及水稳性的影响。结合 BET 测试，从微观的角度来探讨养护时间与养护温度对固化效果的影响规律。

[收稿日期] 2022－12－13
[基金项目] 国家自然科学基金(52478338)
[第一作者] 胡其志(1969－)，男，湖北红安人，工学博士，湖北工业大学教授，研究方向为岩土工程。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用微生物菌株为巴氏芽孢杆菌(Sporosarcina pasteurii,ATCC11859),购自上海保藏生物技术中心。其以冻干粉形态保存于真空冻干管内,需使用溶解液激活后进行扩大培养,冻干粉与溶解液如图 1 所示。扩大培养采用液体培养基,每升培养基内含有胰蛋白胨 10 g、酵母浸粉 5 g、氯化钠 10 g,配置好的培养基需置于 120 ℃高温灭菌锅中灭菌 30 min,待冷却后加入 20 g 尿素,随后将菌株接种至培养基内恒温震荡培养。设置培养箱转速为 200 r·min^{-1},温度为 30 ℃恒温,培养 40 h 后,利用分光光度计测得菌液的 OD600 值为 0.709(OD600 值用以表征细菌数量,每单位 OD600 值约 7.09×10^7 个细菌)。



图 1 冻干粉与溶解液

胶结液由 $CaCl_2$、尿素配制而成,其中 $CaCl_2$ 为 MICP 过程提供足够的钙源,尿素为微生物代谢提供所需要的能量。由于单个试样胶结液用量较少,为保证固化效果[13],采用浓度为 1.5 mol/L 的胶结液,其中,尿素与氯化钙浓度比为 2∶1。

试验所用黄土取自淮安郊区,原状土呈黄褐色,其物理指标如表 1 所示。试验所用纤维为玄武岩纤维粗纱,外表呈古铜色,其长度为 18 mm,密度 2.699 g/cm^3,纤维丝直径 17.4 μm,初始形状为长条状,充分拌合即可分散为丝状,图 2 分别展示了玄武岩纤维与拌合后黄土。

表 1 黄土的基本物理指标

塑限/%	液限/%	塑性指数	最大干密度/(g·cm^{-3})	最优含水率/%
16.7	29.7	13	1.74	20

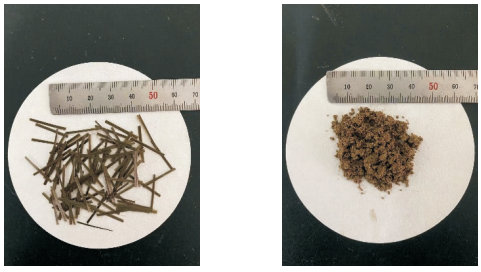


图 2 玄武岩纤维与拌合后黄土

1.2 试样制备与试验方案

将黄土风干碾碎后过 1 mm 筛备用,为保证不同试验参数试样的可比性,控制土样干密度为 1.58 g/cm^3,含水率为 20%,参考以往研究经验[14],玄武岩纤维掺量取 0.4%,菌液与胶结液体积比取 4/6。制样前,取过筛后的黄土与菌液、纤维充分搅拌混合,直至玄武岩纤维粗纱分散为丝状,静置半小时后,加入胶结液再次搅拌均匀。制样采用铁质模具,称取每层所需拌合均匀后的黄土,分 3 层进行人工击实。其中三轴剪切试验试样尺寸为 39.1 mm×80 mm,崩解试验试样尺寸太高易造成试样在崩解过程中倾倒,故取 39.1 mm×50 mm 作为崩解试验试样尺寸。制备好的试样脱模后在不同温度条件下分别养护 7、14、28 d,随后进行三轴剪切试验和崩解试验。

表 2 试验分组及参数设置

试样编号	养护温度/℃	养护时间/d	养护环境
T1	5	28	恒温箱
T2	15	28	恒温箱
T3	35	28	室内
T4	35	14	室内
T5	35	7	室内

表 2 给出了不同试样的具体试验参数,为尽可能模拟实际工程环境,养护时间分别设置 7、14、28 d,养护温度结合我国黄土分布较为广泛的山西、陕西地区四季平均最高气温,分别设置 5、15、35 ℃,其中 35 ℃为室内常温下养护,5、15 ℃为恒温箱养护,所有试样在养护过程中,均不考虑环境湿度的影响。

1.3 测试方法

1)三轴剪切试验

采用 TSZ-2 型全自动三轴仪进行固结不排水剪切试验,对固化完成后的试样进行真空抽气饱和处理,随后进行固结,待固结完成后开始剪切。考虑到采用拌合法的 MICP 固化难以处理深部土体,故试验围压分别取 50、100、150 kPa,剪切速率为 0.05 mm/min。

2)崩解试验

为评价不同养护时间与养护温度对固化试样水稳定性的影响,对试样开展崩解试验。崩解试验采用自制崩解仪,装置示意图与实物图如图 3 所示。试验装置主要由电子天平(精度为 0.01 g)、崩解盒、金属网、计时器等部分组成。其中,崩解盒由透明亚克力材料制成,便于观察试样的崩解过程,金属网网孔大小为 1 cm×1 cm,由四条细线连接金属网四个边角,细线通过上方支架固定,可以自由调整高度。

试验前在崩解盒内装入适量水，静置一段时间后将天平读数归零，调整好细线长度后，将试样置于金属网上，缓慢浸入水中，待天平读数不变后开始计时，每隔 30 s 记录一次天平读数。由于试样受重力、拉力、浮力三力平衡，故试样崩解率可通过下式计算得到：

$$P(T_x)=\frac{M(T_x)-M_0}{M_S} \tag{1}$$

式中：$P(T_x)$ 为崩解率；M_s 为试样完全崩解后天平的读数；M_0 为试样刚浸入水中时天平的读数；$M(T_x)$ 为 T 时刻时，天平读数。

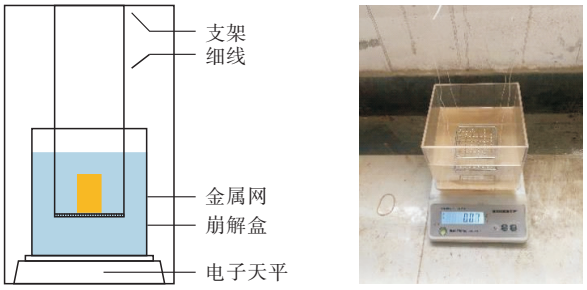


图 3　崩解仪示意图和实物

3）BET 测试

在微生物固化过程中，碳酸钙沉淀生成量对于试样固化效果有着明显影响[15]，但对其填充效果的研究较为少见，利用 Micromeritics ASAP 2460 比表面积与孔径分析仪，对不同养护条件下黄土试样的比表面积与孔径进行分析，采用氮气吸附法，为减少压实度对于结果的影响，不同试样取样部位均相同。

2　结果与讨论

2.1　三轴剪切试验结果

不同养护条件与围压下试样的应力−应变曲线如图 4−6 所示。随着围压的增加，在 35 ℃下养护 7 d 的黄土试样应力−应变曲线由弱软化型向弱硬化型发展，而所有温度下的养护 14、28 d 试样应力应变曲线均表现为弱硬化型，没有明显的峰值强度，这是由于养护时间为 7 d 时，试样内部生成的碳酸钙含量较少，无法在土颗粒之间形成有效连接。当养护时间达到 14 d 后，所有黄土试样的应力−应变曲线持续呈上升趋势，故取应变 15%时的强度作为峰值强度。在养护温度为 35 ℃，围压 50 kPa 时，养护28 d黄土试样峰值强度最高，为 202.8 kPa，较养护 14 d 与 7 d 分别提高 10.69%、35.8%，在围压为 100、150 kPa 时，较养护 7 d 试样，养护 14、28 d 试样峰值强度同样有较大幅度提升，养护 14 d 后，继续养护至 28 d 峰值强度提升较小，考虑到养护时间与养护环境对于试样最终含水率的影响，养护 14 d 后强度的增长可能并不是由于细菌的固化作用，而是由于试样最终含水量降低，峰值强度有所提高。

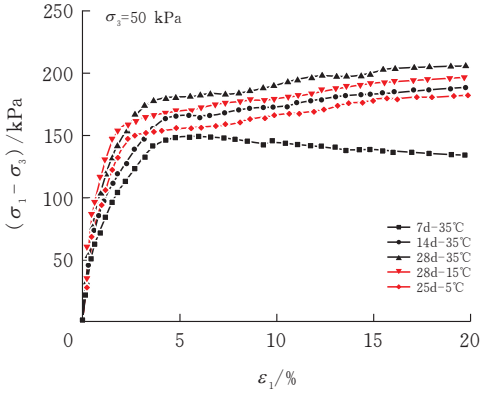


图 4　围压 50 kPa 时不同养护条件试样应力−应变曲线

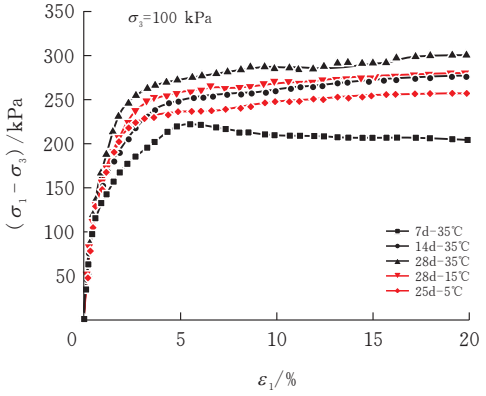


图 5　围压 100 kPa 时不同养护条件试样应力−应变曲线

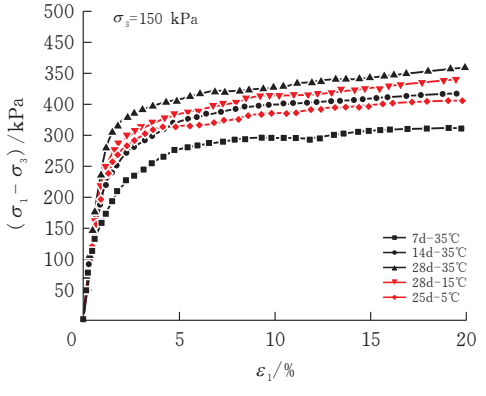


图 6　围压 150 kPa 时不同养护条件试样应力−应变曲线

不同养护温度下养护 28 d 试样的应力−应变趋势基本一致，随着温度的升高，土体强度也逐渐提高，围压为 50 kPa 时，养护温度为 35℃的黄土试样峰值强度较 15 ℃、5 ℃分别提高 5.9%、13.4%，需要注意的是，当养护温度为 5 ℃时，养护 28 d 试样的强度低于在 35 ℃下养护 14 d 试样，结合已有的研究成果可以发现[16]，温度对于微生物诱导碳酸钙的生成量有明显影响，在一定温度范围内，温度越高，生成的碳酸钙量越多，虽然在低温条件下黄土试

样的强度较高温条件下有所降低，但仍高于 35 ℃下养护 7 d 试样，表明温度对于固化效果有一定影响，但是在 5～35℃范围内微生物固化仍可以有效加固土体。无论在何种方案下进行养护，在应变达到 6%后应力−应变曲线均有小幅度波动现象，这是由于试样压缩后，内部纤维出现断裂、团聚，但波动幅度均较小。

由图 7 可知，养护时间和养护温度对于加筋黄土的黏聚力有较大影响，但对内摩擦角的影响较小。随着养护时间的增加，黏聚力不断提高，较养护 7 d 试样，养护 14 d 试样的黏聚力提升了 35.7%，继续养护至 28 d，黏聚力增幅明显降低，增幅低于 10%。养护温度对于加筋黄土黏聚力的影响较小，随着养护温度的降低，土体黏聚力有小幅度下降。虽然固化过程中生成的碳酸钙沉淀对土体内摩擦角有一定影响，但由于纤维的掺入，弱化了碳酸钙与土颗粒之间的连接作用，因此所有试样的内摩擦角变化幅度均不大。

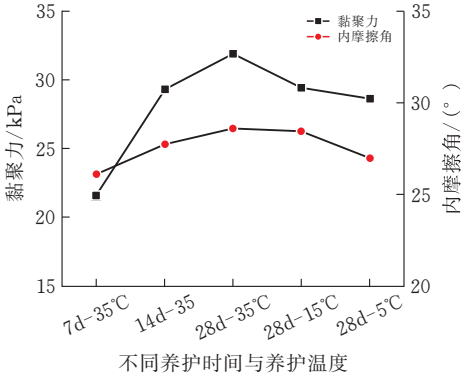


图 7 不同养护条件下试样的内摩擦角和黏聚力

2.2 崩解试验结果

不同养护条件下，微生物固化纤维加筋黄土的崩解率曲线如图 8 所示，其整个崩解过程大致可以分为 0a、ab、bc 三个阶段。

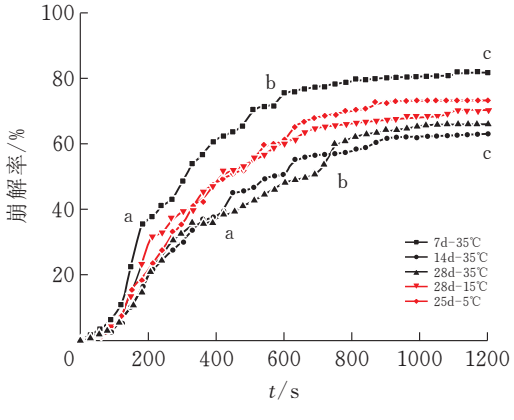


图 8 不同养护条件下试样的崩解率曲线

在 0a 阶段，试样入水后产生大量气泡，前2 min 崩解率较小，随着外层土体的脱离，崩解率开始快速提高，其中 35 ℃下养护 7 d 试样在此阶段崩解率可达 35%，养护 14 d 与养护 28 d 试样在此阶段崩解率基本一致，略低于 5 ℃、15 ℃下养护 28 d 试样。

当试样外层土体快速崩落后，即进入 ab 阶段，崩解率增速放缓，此阶段崩解过程十分不规律，主要是由于纤维的作用，将土颗粒连接成大小不一的土块，在崩解过程中，会呈现块状崩解[17]。

当 ab 阶段结束后，试样崩解率逐渐趋于稳定，由于 7 d-35 ℃试样在 ab 段结束时崩解率已达 75%，所以在崩解 10 min 后即趋于稳定，28 d-5 ℃、28 d-15 ℃试样在 11 min 后开始进入此阶段，而 14 d-35 ℃、28 d-35 ℃试样分别在14.5 min、12.5 min 后，崩解趋于稳定。

最终，所有试样在 20 min 内崩解率均未能达到 100%，在 35 ℃条件下，养护 14 d 试样最终崩解率最低，为 62.96%，养护 7 d 与 28 d 试样最终崩解率均高于 14 d 试样，分别为 81.96%、66.37%，而所有养护 28 d 试样水稳定性与强度趋势基本一致，随着养护温度的增高，试样最终崩解逐渐降低。

2.3 BET 测试分析

图 9 为 T1 试样氮气吸脱附曲线，鉴于所有试样按照 IUPAC 分类其等温线均属于Ⅲ型等温线[18]，故取 T1 试样等温线为例。随着相对压力的增加，黄土试样吸附量增长得十分缓慢，当 P/P_0 大于 0.8 后，吸附量开始大幅度增长，在临近饱和压力时吸附体积上升最为明显，结合脱附曲线，可以说明试样内部多为长条状孔隙，且孔结构十分不规整。

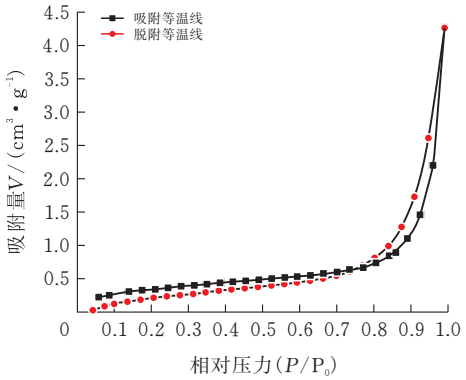


图 9 T1 试样氮气吸脱附曲线

不同试样比表面积与介孔平均孔径如表 3 所示，随着养护时间与养护温度的增加，固化过程中生成的碳酸钙沉淀对于试样内部的孔隙填充率逐渐增大，表现为试样比表面积有明显增加，孔径则有所减小。在相同养护温度条件下，养护时间从 7 d 增加至 14 d 时，试样比表面积增加 50.6%，平均孔径降低 20%，继续养护至 28 d 后，较养护 14 d 试样比表面积增幅仅为 3.2%，平均孔径无明显差异。而所有

养护 28 d 试样,随着养护温度的提高,试样比表面积分别增加 12.3%、13.8%,平均孔径分别降低 7.8%、9.1%。

表 3　不同试样比表面积与孔径测试结果

试样编号	比表面积/($m^2 \cdot g^{-1}$)	平均孔径(介孔)/nm
T5	1.3076	19.575 44
T4	1.9695	15.530 07
T3	2.0329	15.258 90
T2	2.0071	15.478 71
T1	1.7862	16.799 34

3　结论

通过对加筋黄土进行 MICP 固化处理,结合三轴剪切试验、崩解试验和 BET 测试,研究了不同养护时间与养护温度对固化黄土试样强度与水稳性的影响,主要结论如下:

1)经 MICP 拌合固化处理的纤维加筋黄土在养护 7 d 后,其固化效果未能达到最佳;在不控制环境湿度的前提下,养护 14 d 土体抗剪强度即趋于稳定,继续养护至 28 d 强度提升不大;随着养护温度的提高,试样抗剪强度有不同程度的提高,在一定温度范围内,固化效果与温度成正比,虽然在低温条件下固化效果会较高温条件下有所降低,但仍然可以有效提高土体的强度。

2)在相同养护温度条件下,相较于养护 7 d 和 28 d 试样,养护 14 d 试样的水稳定性最强,最终崩解率最低,较养护 7 d 试样崩解率降低了约 20%,略低于养护 28 d 试样;养护温度对于黄土水稳定性的影响与抗剪强度趋势基本一致,随着养护温度的提高,试样最终崩解率逐渐降低。

3)MICP 固化纤维加筋黄土的主要作用体现为微生物诱导生成碳酸钙沉淀,填充土颗粒与纤维之间的缝隙;在相同养护温度条件下,养护至 14 d 后,黄土试样的比表面积与孔径基本上不再改变;在相同养护时间条件下,黄土试样的比表面积随着养护温度的增高而增大,平均孔径随着养护温度的增高而减小。

[参 考 文 献]

[1] 艾志军.磷石膏-水泥改良黄土动力特性试验[J].岩土工程技术,2021,35(05):341-346.

[2] CHENG Z. Strength tests and numerical simulations of loess modified by desulfurization ash and fly ash[J]. Materials, 2022, 15(02) : 512-512.

[3] 何稼,楚剑,刘汉龙,等.微生物岩土技术的研究进展[J].岩土工程学报,2016,38(04):643-653.

[4] 王子文,魏然,蔡红,等.营养液浓度和微生物活性对 MICP 固化淤泥质土强度的影响[J].中国水利水电科学研究院学报,2020,18(06):486-493.

[5] 李赛,雷学文,刘磊,等.玉米须加筋微生物固化淤泥的抗剪强度试验研究[J].科学技术与工程,2021,21(32):13837-13844.

[6] 付佳佳,姜朋明,纵岗,等.微生物拌和固化海相粉土的抗压强度试验研究[J].人民长江,2021,52(01):167-172.

[7] 程果,汪时机,李贤,等.微生物固化纤维加筋砂质黏性紫色土试验研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(06):1829-1838.

[8] 梁仕华,牛九格,房采杏,等.营养液钙源对微生物固化砂土效果影响的试验研究[J].防灾减灾工程学报,2018,38(05):781-786.

[9] 岳建伟,张宝玺,赵丽敏,等.改良 MICP 技术加固土体强度与养护天数的关系研究[J].河南大学学报(自然科学版),2020,50(06):707-716.

[10] 肖维民,傅业姗,朱占元,等.微生物诱导碳酸钙沉积胶结岩石节理的抗剪强度特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(S1):2750-2759.

[11] 刘忠,肖水明,刘飞飞,等. 微生物诱导碳酸钙沉积固化建筑渣土抗风蚀扬尘影响因素的试验研究[J]. 工业建筑,2022,52(11):71-78.

[12] DENG J, DENG H, ZHANG Y, et al. Experimental study on microbial-induced calcium carbonate precipitation repairing fractured rock under different temperatures[J]. Sustainability, 2022, 14(18):11770.

[13] 岳建伟,黄轩嘉,邢旋旋,等.基于 MICP 改良黄河泥沙颗粒级配的试验研究[J].工程科学与技术,2021,53(03):89-98.

[14] 李沛达,骆亚生,陈箐芮,等.玄武岩纤维加筋黄土承载比试验研究[J].水文地质工程地质,2021,48(01):131-137.

[15] 程瑶佳,唐朝生,刘博,等.基于石灰石粉钙源的微生物固化砂土试验研究[J].高校地质学报,2021,27(06):746-753.

[16] 彭劼,何想,刘志明,等.低温条件下微生物诱导碳酸钙沉积加固土体的试验研究[J].岩土工程学报,2016,38(10):1769-1774.

[17] 安宁,晏长根,王亚冲,等.聚丙烯纤维加筋黄土抗侵蚀性能试验研究[J].岩土力学,2021,42(02):501-510.

[18] 何余生,李忠,奚红霞,等.气固吸附等温线的研究进展[J].离子交换与吸附,2014,20(04):376-384.

Experimental Study on Influencing Factors of Microbial Solidified Fiber Reinforced Loess

HU Qizhi[1,2], HUO Weiyan[1,2], MA Qiang[1,2], TAO Gaoliang[1,2]

(1 *School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*; 2 *Hubei Provincial Bridge Safety Monitoring Tech. and Equipment Tech. Engin. Center, Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: Microbial induced calcium carbonate precipitation technology is a popular research field in recent years, but it is often not effective when used alone to reinforce fine grained soil. The fiber reinforcement and microbial curing were combined to explore the strength and water stability of the reinforced loess under different microbial curing time and curing temperature. The effects of curing time (7 d, 14 d, 28 d) and curing temperature (5 ℃, 15 ℃, 35 ℃) on curing effect of microbial solidified fiber-reinforced loess were analyzed by triaxial shear test, disintegration test and BET test. The results showed that: 1) With the increase of microbial curing time, the shear strength and water stability of the samples were improved, but the increase of shear strength was not obvious in the late curing period, and the water stability decreased slightly; 2) Higher curing temperature has a positive effect on microbial curing, and the shear strength and water stability of the sample increase with the increase of temperature; 3) The solidification of microorganisms is mainly manifested as the formation of calcium carbonate precipitates in the metabolic process, and the interaction with the reinforced fiber reduces the porosity of the soil and increases the specific surface area of the sample.

Keywords: loess; microorganism; basalt fiber; triaxial test; disintegration test

[责任编校: 裴 琴]

(上接第 86 页)

Study on the Influence of SiO_2 Aerogel on Acrylate Reflective Thermal Insulation Coatings

PENG Na, ZHANG Gaowen

(*Hubei Provincial Key Laboratory of Green Materials for Light Industry, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *Hubei*, *China*)

Abstract: In this paper, a new reflective thermal insulation coating was made of acrylic emulsion as the base material, SiO_2 aerogel, rutile TiO_2 and hollow ceramic microsphere as functional fillers. The effects of SiO_2 aerogel dosage, dispersant type and dosage, pH of solution, dispersion speed and time on the dispersion stability of SiO_2 aerogel and the influence of SiO_2 aerogel dosage on the heat insulation effect of coating were studied. The results show that a uniform SiO_2 aerogel slurry could be made under the following conditions: SiO_2 aerogel 1.0%, dispersant 0.75%, wetting agent 0.2%, pH 6.5, agitation rate 800r/min, and dispersing time 50 min. The reflective thermal insulation coating containing 1.0% of SiO_2 aerogel had a thermal diffusivity as low as 0.16 mm 2/s and a temperature difference of 5.8℃ in thermal insulation test, showing a good thermal insulation effect.

Keywords: thermal insulation coating; acrylic emulsion; SiO_2 aerogel; dispersant

[责任编校: 张 众]