



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2309815

引用格式:高瑜,邢家伟,王晓荣,等.核磁共振作用下微生物矿化风沙土材料的微观孔隙[J].科学技术与工程,2025,25(5):2066-2073.

Gao Yu, Xing Jiawei, Wang Xiaorong, et al. Microscopic pores of microbial mineralized aeolian sandy soil materials under the action of nuclear magnetic resonance[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(5): 2066-2073.

核磁共振作用下微生物矿化风沙土材料的微观孔隙

高瑜^{1,2,3}, 邢家伟¹, 王晓荣^{1,2,3*}, 韩红伟¹, 樊促遥¹

(1. 内蒙古工业大学土木工程学院, 呼和浩特 010051; 2. 地质技术与岩土工程内蒙古自治区工程研究中心, 呼和浩特 010051;

3. 沙旱区地质灾害与岩土工程防御自治区高等学校重点实验室, 呼和浩特 010051)

摘要 为探究微生物诱导碳酸钙沉淀(microbially induced calcite precipitation, MICP)技术矿化改良风沙土材料的耐久性, 采用0.08%高分子吸水树脂(MICP+A)和0.37%黄原胶(MICP+B)对传统MICP材料改良。通过核磁共振技术对不同周期的高低温循环和紫外照射两种环境下的微观结构进行研究, 考察矿化风沙土材料的耐久性。结果表明, MICP+A材料和MICP+B材料孔隙度均随循环周期的增加而上升; 在20个周期的高低温循环试验和15个周期的紫外线照射试验, MICP+A材料均表现出良好的耐久性, 与传统MICP材料相比孔隙度增量分别下降约1.8倍和1.1倍; 在高低温循环和紫外线照射下, 碳酸钙晶体结构发生改变, 土体的中等粒径孔隙占比增加, 使3种材料的 T_2 谱第2个峰均高于试验前的峰值。试验表明高分子吸水树脂能够提高传统MICP试件的耐久性能, 此研究为微生物矿化岩土材料在沙漠地区治理的工程应用提供基础实验依据。

关键词 生物岩土; 微生物矿化风沙土材料; MICP; 核磁共振实验; 高低温循环; 紫外照射试验

中图分类号 TU441+.5;

文献标志码 A

Microscopic Pores of Microbial Mineralized Aeolian Sandy Soil Materials under the Action of Nuclear Magnetic Resonance

GAO Yu^{1,2,3}, XING Jia-wei¹, WANG Xiao-rong^{1,2,3*}, HAN Hong-wei¹, FAN Cu-yao¹

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. Inner Mongolia Engineering Research Center of Geological Technology and Geotechnical Engineering, Hohhot 010051, China; 3. Key Laboratory of Geological

Hazards and Geotechnical Engineering Defense in Sandy and Drought Regions at Universities of Inner Mongolia Autonomous

Region, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

[Abstract] In order to explore the durability of microbially induced calcite precipitation (MICP) technology to improve the durability of aeolian sandy soil materials, 0.08% polymer absorbent resin (MICP+A) and 0.37% xanthan gum (MICP+B) were used to improve the traditional MICP materials. The microstructure of different cycles of high and low temperature cycle and ultraviolet irradiation was studied by nuclear magnetic resonance technology, and the durability of mineralized sandy soil materials was investigated. The results show that the porosity of both MICP+A and MICP+B materials increases with the increase of cycling cycles. In 20 cycles of high and low temperature cycling tests and 15 cycles of ultraviolet irradiation tests, the MICP+A material shows good stability, and the porosity increment decreases by about 1.8 times and 1.1 times, respectively, compared with the conventional MICP material. Under high and low temperature cycling and ultraviolet irradiation, the crystal structure of calcium carbonate is altered and the percentage of medium-sized pores in the soil increases, causing the 2nd peak of the T_2 spectra of all three materials to be higher than the pre-test peak. The test shows that the polymer water-absorbing resin can improve the stability performance of the traditional MICP specimens, and this study provides a basic experimental basis for the engineering application of microbial mineralized geotechnical materials in the treatment of desert areas.

[Keywords] biogeotechnical rock; microbial mineralization of sandy soil materials; MICP; NMR experiment; high and low temperature cycle; ultraviolet irradiation test

沙漠化灾害是全球最为严重的自然灾害之一^[1], 土地沙漠化严重破坏了生态环境, 导致土地

利用减少、质量下降, 甚至使许多人成为“生态难民”, 对人类的生存构成严重的威胁^[2]。

收稿日期: 2023-12-12 修订日期: 2024-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(12262031); 内蒙古自治区科技计划关键技术攻关项目(2021GG0344); 内蒙古自治区科技计划(2022YFSH0047)

第一作者: 高瑜(1984—), 女, 汉族, 河南新乡人, 博士, 副教授。研究方向: 沙旱区岩土工程灾害及防御。E-mail: yuyu_183@126.com。

* 通信作者: 王晓荣(1983—), 女, 汉族, 内蒙古鄂尔多斯人, 博士, 副教授。研究方向: 盐渍土灾害防治。E-mail: wangxiaorong@imut.edu.cn。

近年来,微生物诱导碳酸钙沉淀(microbially induced calcite precipitation, MICP)技术作为一种新型环保的岩土处理技术被提出。通过微生物诱导矿化作用,使细小、松散、无黏聚力的风沙土颗粒聚集在一起,从而提高土体的强度^[3-6]。同时,具有高效性、可控性、低碳环保无污染等优点^[7-10],为沙漠治理提供了新思路。国外学者 Bang 等^[11]最早将 MICP 技术应用于防尘处理,表明 MICP 技术能有效增强土体的抗风蚀能力; Gomez 等^[12]首次将 MICP 技术应用于野外,研究表明 MICP 技术极大改善了松散砂土的抗侵蚀效果。国内李驰教授团队等^[13]首次在国内进行了现场试验,表明 MICP 技术矿化风沙土覆膜在 210 d 后仍具有一定的强度。但由于沙漠环境恶劣,昼夜交替所带来温差和紫外线的侵蚀会逐渐降低矿化土体耐久性^[14-15]。

为了提高 MICP 技术对土体的矿化强度和耐久性能,许多学者通过外加剂来改善矿化土体的性能。谢约翰等^[16]将纤维掺量为土体的 0.15% 时, MICP 技术矿化土体强度提高 76.2% 的同时还降低了脆性破坏;李昊等^[17]也证实纤维的掺入能够显著提高 MICP 技术矿化砂土的残余强度,并表现出良好的抗雨蚀能力;马国梁等^[18]研究发现,在菌液中加入一定量的高岭土,能够提高固化粗砂的抗软化能力及湿强度;熊雨等^[19]表明在矿化过程中掺入 10% 的火山灰会改变提高固菌率和胶结物生成量,使矿化土体的强度提升;而李弘妍^[20]发现在掺入 0.08% 的高分子材料时矿化土体强度提升了 220%,同时,将传统 MICP 试件浸泡在多糖物质黄原胶中,能提高试件的黏聚力,使试件的破坏形式由脆性破坏转变为塑性破坏。相对于其他学者研究,文献^[20]中的高分子材料与黄原胶有着对环境友好、取材容易、适用范围广等优点,能很好地改善微生物矿化沙土的力学性能,但高分子材料和黄原胶能否在沙漠环境治理中提高矿化土体的耐久性还有待验证。

基于此,现利用高分子吸水树脂和黄原胶对微生物矿化风沙土技术进行改良,通过高低温循环试验、紫外线照射试验、核磁共振试验以及 SEM 电镜试验,探究改良后的矿化材料在高低温环境和紫外线照射环境下不同周期的微观机理,对材料的耐久性进行评价。

1 试验材料

1.1 岩土基质

试用土取自乌兰布和沙漠东部边缘,风沙土粒径主要集中在 0.05 ~ 0.25 mm,粒径小于 0.25 mm

的土颗粒占总质量的 91%,土体天然密度为 1.615 g/cm³,土粒密度为 2.64 g/cm³,颗粒中值粒径 D_{50} 为 0.17 mm,颗粒表面光滑,磨圆度好,易流动,风沙土的颗粒级配曲线如图 1 所示。

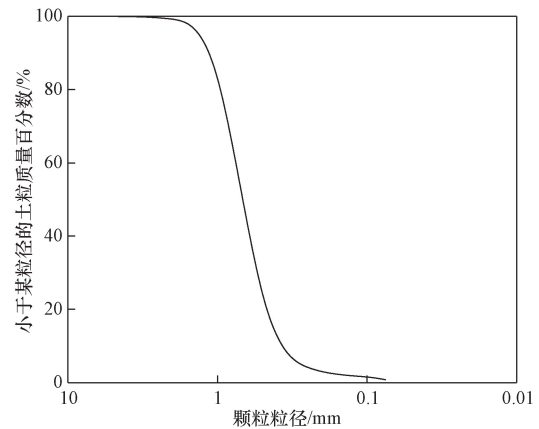


图 1 风沙土的颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of aeolian sandy soil

1.2 微生物菌液

选用巴氏芽孢杆菌 (*Sporosarcina pasteurii*) (ATCC11859),属化能异养生物,细长杆状,长度为 2 ~ 3 μm 。菌种活化与培养的主要方式是通过液体培养基^[20]进行培养。冷藏需通过 30 $^{\circ}\text{C}$ 的恒温箱下培养,经 200 r/min 离心 20 min 后加入新的液体培养基使用,并在每次活化或转接结束后,利用电导率仪对菌液脲酶进行活性测定,并用分光光度计测量在 600 nm 波长处的吸光值 (OD_{600}) 表征菌液浓度。

1.3 胶结液

胶结液的主要成分为 NH_4Cl 、Urea 和营养肉汤、 Na_2CO_3 以及 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,这些成分的作用是给微生物提供尿素、钙源,以及细菌生长所需营养物质和适的环境,保证细菌能够在脱离培养基的环境中继续生长繁殖并继续发挥其水解尿素的作用。实验中胶结液浓度为 0.5 mol/L,尿素和钙离子最佳物质的量比为 1:1,为了给细菌创造适应的环境,胶结营养液 pH 调为 9。

1.4 改性添加剂

高分子吸水树脂主要化学成分为低交联型聚丙烯酸钠盐,分子式是 $(\text{CH}_2\text{COONa})_n$,水溶性直链高分子聚合物。物理状态为白色粉末或颗粒,无色无味,遇水膨胀,易溶于苛性钠水溶液,吸湿性极强,具有亲水和疏水基团的高分子化合物,如图 2(a) 所示。

黄原胶的分子式为 $(\text{C}_{35}\text{H}_{49}\text{O}_{29})_n$,是一种呈淡黄色的粉末状物质,稍带臭味,无毒无害,易溶于冷、热

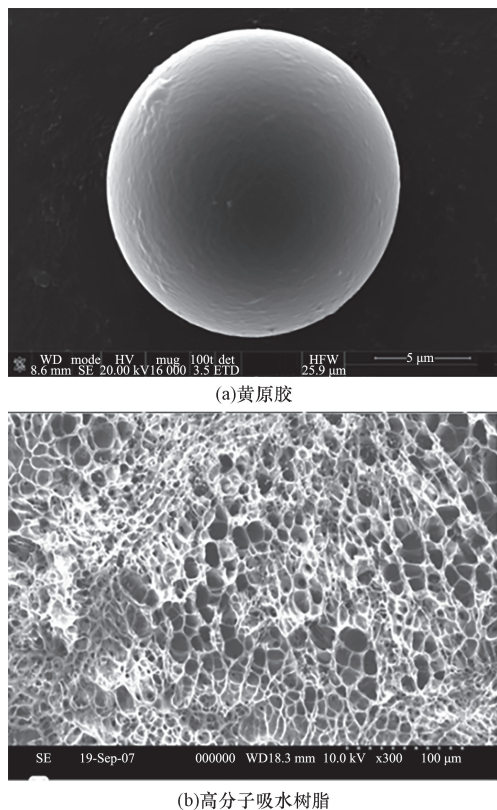


图2 改性添加剂
Fig.2 Modified additives

水中,遇水分散、乳化并且溶于水后变成稳定的亲水性黏稠胶体,如图2(b)所示。

2 试验方法

2.1 试件制备方法

(1)矿化试件的制备:根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)规范^[21]将风沙土与菌液搅拌均匀倒入柔性模具中,制备成为20 mm×40 mm的MICP试件,如图3(a)所示,放入配好的胶结营养液中,通入氧气泵,让其自然反应7 d后取出拆模晾干。

(2)改良试件:添加高分子吸水树脂(A)制备成MICP+A试件,其中高分子材料掺入比为沙土质量的0.08%;将传统MICP试件浸泡在黄原胶溶液



(a) 高低温核磁试件(20 mm×40 mm) (b) 浸泡在营养液中的试件

图3 试件制作
Fig.3 Specimen making

中制备成MICP+B试件,黄原胶溶液含量为0.37%,将一定质量的黄原胶加入适量蒸馏水中,搅拌均匀制备成黄原胶溶液^[19]。

(3)试验装置:自制的自由渗透法反应器如图3(b)所示,利用柔性土工模具固定试件,将试件放在支架上,使营养液自由渗透试件中,提高菌液和营养液的利用率,使得脲酶水解过程更充分。

2.2 矿化风沙土耐高低温性能试验

将3种试件放置于高低温试验机,如图4(a)所示,根据沙漠现场温度检测,高低温范围为高温70℃,低温-20℃,每个周期为24 h,其中升温阶段2 h,恒定高温阶段10 h,降温阶段2 h,恒定低温阶段10 h;试验时间共20个周期,其中分别于1、3、5、7、10、15、20周期。

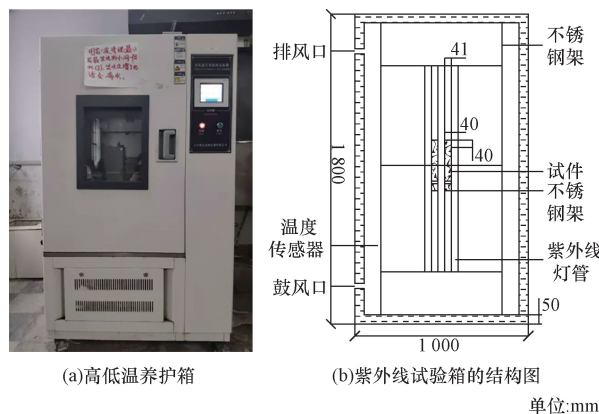


图4 试验设备

Fig.4 Experimental installation

2.3 矿化风沙土耐紫外线照射试验

试验自制室内紫外侵蚀环境箱,如图4所示。光源为紫外线照射强度较小的紫外荧光灯,UVA340紫外灯管,其参数值为:直径38 mm,总长1 200 mm,功率40 W,电压220 V。为了防止紫外线照射过程中产生过高的温度,造成试件的热老化破坏,每8 h关闭灯管20 min。紫外线照射周期共设置1、3、5、7、10、15个周期,根据参考文献^[22]等确定紫外线照射强度,按照能量照射总量相等的原则换算成室内紫外线照射时间,如表1所示。

表1 室内紫外线照射时间
Table 1 Indoor UV exposure time

周期	室内照射时长/h	紫外线照射总量/(MJ·m ⁻²)
1	69.7	4.2
3	209	12.8
5	348.67	21.33
7	488.13	28.87
10	697	42.67
15	1 046	64

2.4 微观试验

核磁共振试验:核磁共振技术的工作原理是根据流体在多孔介质物质孔洞内的氢原子发出的核磁共振信号与孔洞尺寸的正相关性,来进行物质微观孔隙结构的分析。在试验中使用纽迈的 Macro MR12-150H-1 型核磁共振仪,磁体的温度维持在 $(32 \pm 0.02)^\circ\text{C}$,探测器线圈的直径为 60 mm,共振频率设置为 11.854 MHz,待测样品的共振频率 T_w 为 5 000 Hz,回波数量 N 为 10 000,以研究 MICP 矿化饱和和样品的 T_2 谱的变化和孔隙度的变化规律。

SEM 试验:对传统 MICP 试件、MICP + A 试件和 MICP + B 试件在高低温循环和紫外线照射周期前后进行电镜扫描,对比 3 种试件在两种不同环境下的微观现象,反映 3 种试件的耐久性。

3 试验结果与分析

3.1 微生物矿化试件孔隙度分析

孔隙度反映了试样内部孔隙的存在情况,它是指试样中孔隙的体积与整个试样体积的比值。孔隙度越大,表明试样内孔隙多,材料结构越松散。反之,孔隙度小,则试样孔隙少,材料越紧密。在高低温循环和紫外线照射这两种自然环境下,MICP 试件、MICP + A 试件和 MICP + B 试件孔隙度的变化呈现出一致的规律,随着循环周期的增加。其中,MICP + A 试样的孔隙度最小,14.07%,其次 MICP + B 试样,为 17.75%,传统 MICP 试样孔隙最大,为 20%。随着试验周期的延长,不同试样的孔隙度也有所不同。通过引入孔隙度变化率 W ,更好地衡量试样的耐久性。

$$W = \frac{G_n - G_0}{G_0} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: W 为孔隙度变化率; G_n 为 n 个试验周期后试件的孔隙度; G_0 为初始孔隙度。

高低温环境下,如图 5 所示,3 种材料在经历高低温循环后,孔隙度均呈现不同程度的增长。传统 MICP 试件在经历高低温循环后,孔隙度变化率虽然随循环周期增长,但变化率较小,增长趋势缓慢;在经历 20 周期后,传统试件的孔隙度变化率增长至 17.12%,孔隙度增长 3.23%,而 MICP + A 试件的孔隙度变化率最小为 11.87%,孔隙度增长 1.79%;而对于 MICP + B 试件在第 20 周期孔隙度变化率达到最大为 37.22%,孔隙度增长 6.76%。

紫外线照射下,如图 6 所示,传统 MICP 试件的孔隙度随照射周期逐渐增大,但曲线变化较缓,经历 15 个周期后试件的孔隙变化率增加 23.66%,孔隙度增加了 5.18%。在 MICP + A 试件中孔隙度的

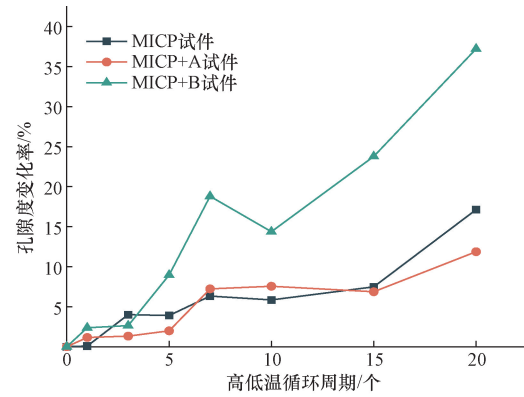


图5 高低温循环后孔隙度变化率

Fig. 5 Porosity change rate after UV cyclic irradiation

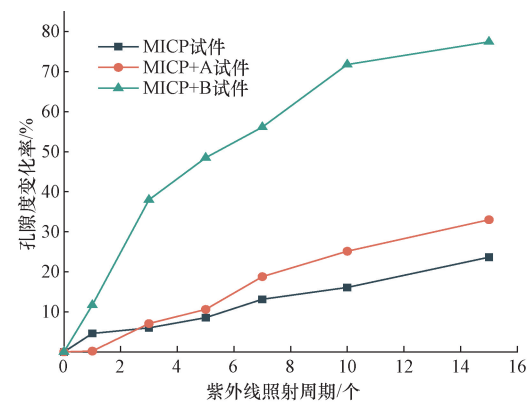


图6 紫外线循环照射后孔隙度变化率

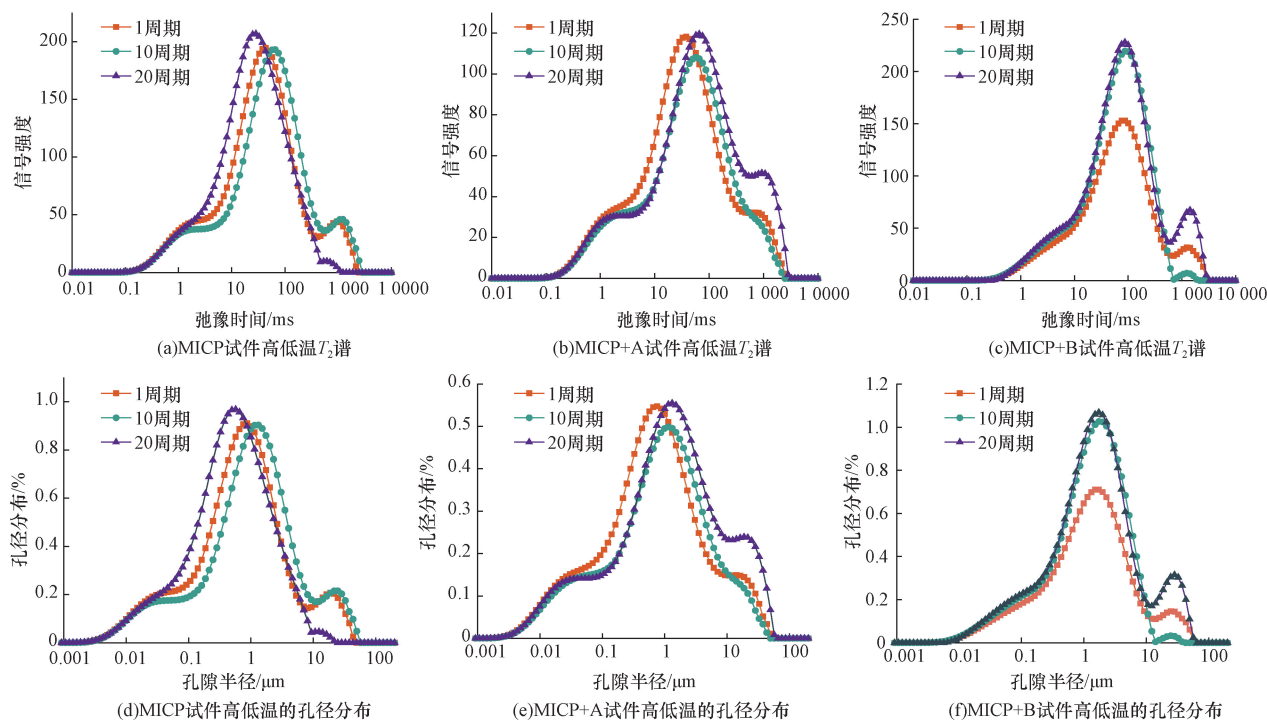
Fig. 6 Porosity change rate after high and low temperature cycles

变化明显,经过 15 个照射周期后试件孔隙度变化率增加了 34.76%,孔隙度增加了 4.8%。MICP + B 试件的孔隙度变化曲线波动最大,从第 1 个周期到第 3 个周期孔隙度变化率增加了 23.5%;在照射结束时试件的孔隙度变化率增加了 77.44%,孔隙度增长了 11.19%。

3.2 矿化试件的 T_2 谱和孔径分布的变化规律

在试件完全浸水的状态下,水分会影响其孔隙,导致试件内部结构的变化,从而产生不同的弛豫特性。 T_2 谱实际上是试件内部各种大小孔隙中的水信号的叠加后进一步拟合得出。 T_2 谱的分布能够反映试件内部孔隙的分布情况,其中不同的谱峰代表不同类型的孔径,而峰的数量则代表各种孔径类型的连通性。谱图的面积与试件中孔隙的含量成正比,而孔径分布则是指材料中各种类型的孔的孔径所占的数量或体积的百分比^[23]。

高低温环境下,如图 7 所示,传统 MICP 试件在经过高低温循环交替试验的试件,随着循环周期次数的增加, T_2 谱弛豫曲线峰谱面积逐渐增大,这表明试件内出现了许多大孔隙,但是随着循环次数的增

图7 高低温循环后 T_2 谱和孔径分布Fig. 7 T_2 spectrum and pore size distribution after high-low temperature cycle

加,大孔隙占比减少,中小型孔隙占比增加,这是因为在高低温的循环交替,矿化阶段发育较差的碳酸钙结晶会随着高温作用变成熔融状态,高温阶段的结束进入低温阶段后,逐渐硬化,经过多个高低温循环交替,导致发育较好的碳酸钙晶体也发生了融化,所以,碳酸钙最终凝聚在大孔隙内并逐渐硬化,生成许多 $0.4 \mu\text{m}$ 左右的小孔隙。高低温循环下 MICP + A 试件的 T_2 谱主峰右移,小孔隙率增大,大孔隙占同样减小,但孔隙面积小于传统 MICP 材料,而 MICP + B 材料随着高低温循环试验的增加, T_2 谱和孔径分布图都有较为明显的变化,在 20 周期后试件 MICP + B 第二个谱峰面积明显增大,大孔隙明显增多。

紫外线照射下,经历不用周期的紫外线照射后,如图 8 所示,传统 MICP 试件的第 2 个弛豫峰要远高于未经照射的试件,说明照射后小孔隙含量增多, T_2 谱图的主峰值基本不变,第 3 个弛豫峰明显随周期增加而减小。在紫外线照射下的 MICP + A 试件的 T_2 谱的面积逐渐增大,小孔隙的占比增加,主要以 $1 \mu\text{m}$ 为主;而 MICP + B 试件经历照射后出现第 3 个弛豫峰,且随着周期的增加,第 3 个峰的面积逐渐增大,与传统 MICP 试件的相似。

3.3 微观机理分析

从试件表面取些许小块进行电镜试验,观察试件在两种环境下的 15 个周期后的微观变化。如图 9 所示,可以明显看出,高低温循环后的试件表面

碳酸钙形状呈现熔融状态,并且表现不再致密,呈现黏稠状质感,而紫外线照射下 3 种试件表面碳酸钙结构未有明显的改变。在紫外线照射和高低温循环两种不同的环境下, MICP + A 试件下的熔融碳酸钙以及碳酸钙晶体表面孔洞均少于传统 MICP 试件。由于 MICP + B 试件是采用先矿化后浸泡的方法制备,所以试件外侧黄原胶含量多于内侧,导致 MICP + B 试件本身黄原胶含量分布就不均匀,黄原胶老化流失后,呈现出传统 MICP 试件。

3 种试件在高低温循环和紫外线照射下,3 种试件的孔隙半径主要集中在 $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ 。其中, MICP + A 试件表现出较好的耐久性能,这是因为由于高分子材料均匀拌入试件内,促进了菌液流通,使矿化过程中土体碳酸钙生成量更加均匀,减小了土体孔隙度,提高了矿化材料的耐久性,但 MICP + A 试件中的高分子材料含有 $\text{C}=\text{C}$ 键,仅需少量的能量即可破坏,所以在高低温循环和紫外线照射的作用下,表面高分子材料逐渐老化,试件表面孔隙度增加,而对内部影响较小,所以,孔隙度增长幅度低。 MICP + B 试件中的黄原胶极易溶于水且大部分分布在试件的外部,其主要成分为碳水化合物,而在高低温与紫外线照射的作用下很容易会被去除^[24-25],所以,前期试件孔隙度变大的主要是外部黄原胶老化,土体孔隙间的黄原胶消散,当黄原胶完全消散后, MICP + B 试件失去黄原胶的包裹,所以出现与传统 MICP 试件相同的现象。

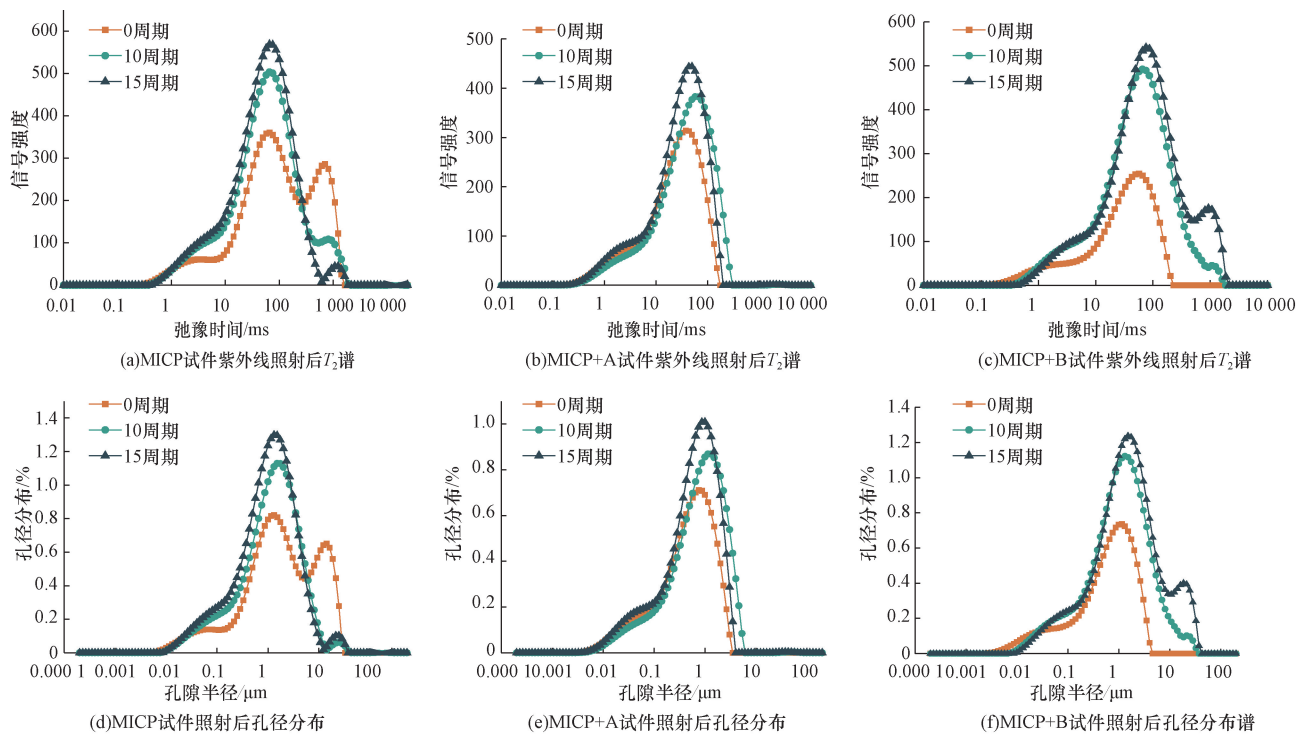


图8 紫外线照射后的 T_2 谱和孔径分布

Fig. 8 T_2 spectrum and pore size distribution after ultraviolet irradiation

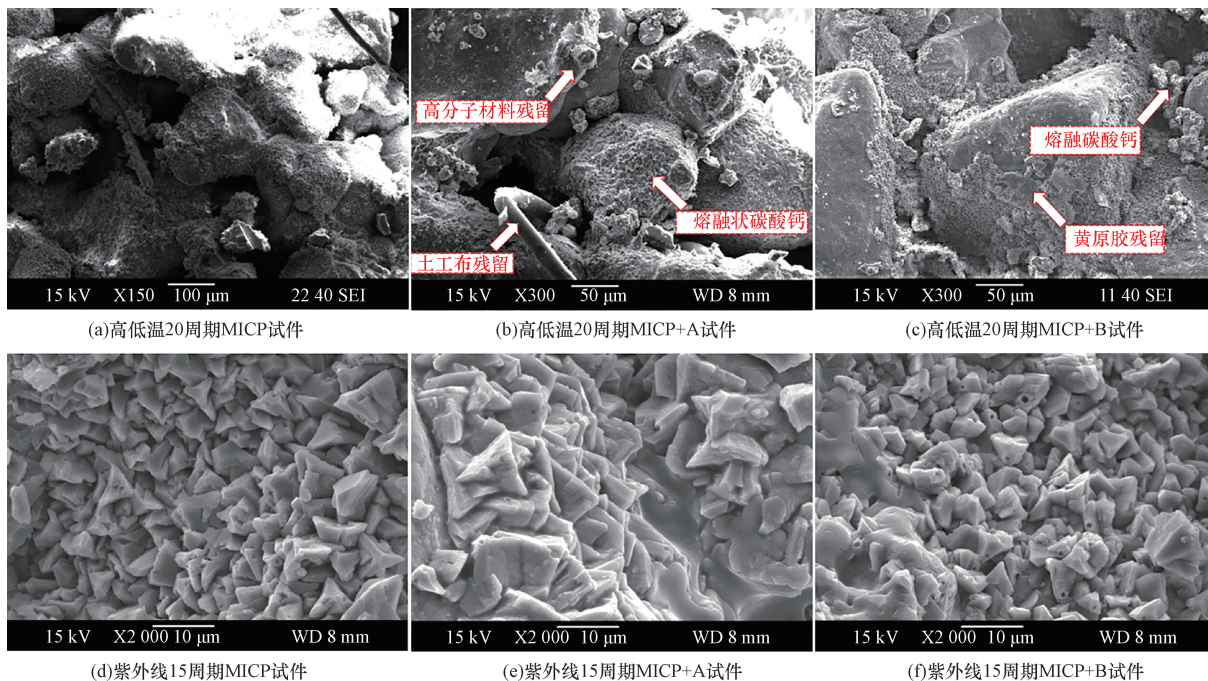


图9 高低温 20 个周期和紫外线 15 个周期的电镜扫描

Fig. 9 Scanning electron microscope 20 cycles of high and low temperature and 15 cycles of ultraviolet radiation

4 结论

内蒙古气候环境复杂,季节性温差较大,日照时间充足。基于 MICP 技术进行矿化改良,提高风沙土材料的耐久性和稳定性,通过高低温试验、紫

外照射试验并联合岩土微观核磁技术研究矿化材料的微观性能。得出以下结论。

(1)随着高低温循环周期的增加,3 种材料的孔隙度均有不同程度的上升。在 20 周期下, MICP 试件、MICP + A 试件、MICP + B 试件孔隙度分别上升

3.23%、1.79%、6.76%，MICP + A 材料表现出了良好的耐久性。

(2)在紫外线照射试验中,3种材料的孔隙度上升幅度大于高低温循环试验,其中 MICP 试件、MICP + A 试件、MICP + B 试件孔隙度分别上升 5.18%、4.8%、11.19%,MICP + A 材料仍保持良好的耐久性能,而 MICP + B 试件损伤较大,孔隙度变化率增加 77.44%。

(3)在同等条件下,随着高低温循环和紫外线照射周期增加,3种试样的 T_2 谱所表现出的规律相似,但 MICP + A 试件的 T_2 谱强度最低,这表明高分子吸水树脂对风沙土耐久性的提高具有良好的作用。

MICP + A 材料出色的耐久性,确保了更长的服务周期。针对这个特性,可将它应用于流动性沙丘的固定,通过降低风力和水流对土壤的侵蚀,进而有效地保护并促进生态环境的改善。对于中国北方地区来说,增强风沙土材料的耐久性和稳定性对当地生态状况和推动经济进步具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Jiang L, Jiapaer G, Bao A, et al. Monitoring the long-term desertification process and assessing the relative roles of its drivers in central Asia[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 104: 195-208.
- [2] 卢琦,雷加强,李晓松,等. 大国治沙:中国方案与全球范式[J]. *中国科学院院刊*, 2020, 35(6): 656-664.
Lu Qi, Lei Jiaqiang, Li Xiaosong, et al. China's combating desertification; national solutions and global paradigm[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(6): 656-664.
- [3] Meng H, Gao Y, He J, et al. Microbially induced carbonate precipitation for wind erosion control of desert soil: field-scale tests[J]. *Geoderma*, 2021, 383: 114723.
- [4] Liu L, Liu H, Stuedlein A, et al. Strength, stiffness, and microstructure characteristics of biocemented calcareous sand[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, 56(10): 1502-1513.
- [5] 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.
Yue Jianwei, Zhang Baoxi, Zhao Limin, et al. Mechanical properties of soil strengthened by improved microbially induced calcite precipitation technology[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(18): 7702-7710.
- [6] 李驰,刘世慧,周团结,等. 微生物矿化风沙土强度及孔隙特性的试验研究[J]. *力学与实践*, 2017, 39(2): 165-171, 184.
Li Chi, Liu Shihui, Zhou Tuanjie, et al. The strength and porosity properties of MICP-treated aeolian sandy soil[J]. *Mechanics in Engineering*, 2017, 39(2): 165-171, 184.
- [7] Whiffin V, Paassen L, Harkes M. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2007, 24(5): 417-423.
- [8] 李驰,田蕾,董彩环,等. MICP 技术联合多孔硅吸附材料对铈铅复合污染土固化/稳定化修复的试验研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(2): 307-316.
Li Chi, Tian Lei, Dong Caihuan, et al. Experimental study on zinc-lead composite contaminated soil solidified/stabilized by MICP technology combined with porous silicon adsorption materials[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(2): 307-316.
- [9] Gao Y, Wang L, He J, et al. Denitrification-based MICP for cementation of soil: treatment process and mechanical performance[J]. *Acta Geotechnica*, 2022, 17(9): 3799-3815.
- [10] 许鹏旭,冷劲,彭劼,等. 微生物与水泥固化南海珊瑚砂的强度及微观特征对比试验[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(16): 6642-6649.
Xu Pengxu, Leng Meng, Peng Jie, et al. Comparative test on the strength and microscopic characteristics of coral sand in the south china sea cured by microorganisms and cement[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(16): 6642-6649.
- [11] Bang S, Min S. Application of microbially induced soil stabilization technique for dust suppression[J]. *International Journal of Geo-Engineering*, 2011, 3(2): 27-37.
- [12] Gomez M, Martinez B, Dejong J, et al. Field-scale bio-cementation tests to improve sands[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 2015, 168(3): 206-216.
- [13] 李驰,王硕,王燕星,等. 沙漠微生物矿化覆膜及其耐久性的现场试验研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(4): 1291-1298.
Li Chi, Wang Shuo, Wang Yanxing, et al. Field experimental study on stability of bio-mineralization crust in the desert[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(4): 1291-1298.
- [14] 郑邴,马巍,邴慧. 冻融循环对土结构性影响的试验研究及影响机制分析[J]. *岩土力学*, 2015, 36(5): 1282-1287, 1294.
Zheng Yun, Ma Wei, Bing Hui. Impact of freezing and thawing cycles on structure of soils and its mechanism analysis by laboratory testing[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(5): 1282-1287, 1294.
- [15] 黄明,张瑾璇,靳贵晓,等. 残积土 MICP 灌浆结石体冻融损伤的核磁共振特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(12): 2846-2855.
Huang Ming, Zhang Jinxuan, Jin Guixiao, et al. Magnetic resonance image experiments on the damage feature of microbial induced calcite precipitated residual soil during freezing-thawing cycles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(12): 2846-2855.
- [16] 谢约翰,唐朝生,尹黎阳,等. 纤维加筋微生物固化砂土的力学特性[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(4): 675-682.
Xie Yuehan, Tang Chaosheng, Yin Liyang, et al. Mechanical behavior of microbial-induced calcite precipitation (MICP)-treated soil with fiber reinforcement[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(4): 675-682.
- [17] 李昊,唐朝生,尹黎阳,等. MICP-FR 协同作用改善钙质砂的力学性能及抗侵蚀试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(10): 1941-1949.
Li Hao, Tang Chaosheng, Yin Liyang, et al. Experimental study on surface erosion resistances and mechanical behavior of MICP-FR-treated calcareous sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(10): 1941-1949.
- [18] 马国梁,何想,路桦铭,等. 高岭土微粒固载成核微生物固化

- 粗砂强度[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(2): 290-299.
- Ma Guoliang, He Xiang, Lu Huaming, et al. Strength of bio-cemented coarse sand with kaolin micro-particle improved nucleation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(2): 290-299.
- [19] 熊雨, 邓华锋, 李建林, 等. 火山灰增强微生物固化砂土效果的试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(12): 3403-3415.
- Xiong Yu, Deng Huafeng, Li Jianlin, et al. Experimental study of MICP-treated sand enhanced by pozzolan[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(12): 3403-3415.
- [20] 李弘妍. 基于 MICP-B 技术固化砂性土的试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2017.
- Li Hongyan. Experimental study on solidification of sandy soil based on MICP-B technology[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2017.
- [21] 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.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Geotechnical test method standard: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Publishing House, 2019.
- [22] 李晓兰. 西北强紫外线地区老化沥青的再生及其粘附特性的微观机理研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
- Li Xiaolan. Study on micro mechanism of regeneration and adhesion characteristics of aged asphalt in northwest china with strong ultraviolet radiation[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2022.
- [23] 高健. 巴彦高勒矿区煤矸石路用性能研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2018.
- Gao Jian. Study on coal gangue road performance in Bayan Gaole mining area[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2018.
- [24] Weng Z, Wang L, Liu Q, et al. Improving the unconfined compressive strength of red clay by combining biopolymers with fibers [J]. Journal of Renewable Materials, 2021, 9(8): 1503-1517.
- [25] 王世锋, 李鑫, 周倩玉, 等. 透明隔热抗紫外涂料的研究进展[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(13): 5167-5178.
- Wang Shifeng, Li Xin, Zhou Qianyu, et al. Recent advances in transparent heat insulation and ultraviolet resistant coatings[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(13): 5167-5178.