

DOI: 10.11779/CJGE20240753

菌丝-麦麸-砂复合轻质土的强度形成机理研究

苟乐宇, 张先伟*, 王港, 严蕾, 朱华亮

(中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 菌丝-麦麸-砂复合轻质土 (MBLS) 是一种由真菌菌丝、麦麸、砂土组成的绿色型轻质土工材料, 因其质量轻、无污染等优势受到了广泛关注。目前对 MBLS 的宏观力学特性研究较多, 但对微观特征研究较少。通过 X 射线衍射试验、傅里叶红外光谱试验、扫描电子显微镜试验和 X 射线能谱试验对菌丝-麦麸-砂复合轻质土的强度形成机理进行研究。试验发现, 菌丝定殖后的试样没有生成新的矿物种类, 仅包含文石与方解石, 但矿物含量、结晶尺寸和结晶度发生变化, 文石与方解石的变化规律不同; 菌丝定殖过程与颗粒发生氧化反应, 定殖后的试样官能团发生明显变化, 伴有多糖、酯类化合物与无机产物生成, 颗粒表面疏水性提升。菌丝吸附并穿透钙质砂表面的孔隙和裂纹进行定殖, 定殖过程伴随已有碳酸钙矿物的溶解与文石型碳酸钙的生成。MBLS 试样强度的形成是生物化学和生物物理共同作用的结果。菌丝细胞外壁和胞外聚合物的极性基团首先与颗粒表面负电荷、金属阳离子以氢键、吸附、共沉淀和结晶 (文石型碳酸钙) 等方式结合形成微型团聚体; 菌丝生长对的颗粒挤压与牵引作用将团聚体扩大, 菌丝串联各团聚体、填充孔隙并最终组成菌丝-麦麸-砂复合轻质土的强度。本研究对绿色环保型的轻质土工材料研发与应用有一定的研究意义。

关键词: 真菌; 轻质土; 微观结构; 强度; 微生物加固技术

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2025)11-2334-11

作者简介: 苟乐宇(1992—), 男, 博士, 主要从事特殊土力学与环境岩土方面的研究工作。E-mail: gly.p.m.a@gmail.com。

Strength formation mechanism of mycelium bio-composites lightweight soil

GOU Leyu, ZHANG Xianwei, WANG Gang, YAN Lei, ZHU Hualiang

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Mycelium-wheat bran-sand composite lightweight soil (MBLS) is a lightweight geotechnical material composed of fungal mycelium, wheat bran, and sand. It has attracted significant attention due to its lightweight and environmentally friendly properties. At present, there have been many studies on its macroscopic mechanical properties, while relatively few studies have been conducted on its microscopic characteristics. This paper investigates the strength formation mechanism of MBLS using X-ray diffraction, Fourier-transform infrared spectroscopy, scanning electron microscopy, and X-ray energy spectroscopy. The results indicate that fungal colonization did not generate new mineral species, with only aragonite and calcite present. However, changes are observed in mineral content, crystallite size, and crystallinity, with distinct patterns of change for aragonite and calcite. During colonization, oxidation reactions occur between the fungus and the particles, resulting in significant alterations to the functional groups on the sample surfaces. This process leads to the formation of polysaccharides, ester compounds, and inorganic products, which enhances the hydrophobicity of the particles. The mycelium adheres to and penetrates the pores and cracks on the surface of calcareous sand, dissolving existing calcium carbonate minerals and forming aragonite-type calcium carbonate. The strength of the MBLS specimens results from the combined effects of biochemical and biophysical processes. Polar groups from the fungal cell walls and extracellular polymers initially bond with the negatively charged surfaces of the particles and metal cations through hydrogen bonding, adsorption, co-precipitation, and crystallization, forming microaggregates. The growth of the mycelium applies pressure and traction on the particles, enlarging the aggregates. The

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42372313); 国家资助博士后研究人员计划项目 (GZC20241888) This work was supported by General Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42372313) and Postdoctoral Fellowship Program of CPSF (Grant No. GZC20241888)

收稿日期(Received): 2024-07-29 修回日期(Revised): 2024-12-12 接受日期(Accepted): 2025-01-08 网络出版日期(Online): 2025-01-09

*通信作者 (E-mail: xwzhang@whrsm.ac.cn)

mycelium then links the aggregates and fills the voids, ultimately forming the mycelium-sand composite lightweight soil. This study provides insights for the development and application of green and environmentally friendly lightweight geotechnical materials.

Key words: fungi; lightweight soil; microstructure; strength; microbial biocementation technology

0 引言

全球每年产生大量的麦麸、棉籽皮和秸秆等农业副产物。预计到 2025 年全球农业副产物的全年总量将增加到 22 亿吨。以麦麸为例, 其含有大量的木质纤维素是农畜和微生物生长的营养来源^[1]。但限于处理技术与成本等原因, 除少量用于动物饲料外, 大部分被焚烧后填埋处理, 排放的一氧化碳 (CO)、二氧化碳 (CO₂) 和颗粒物 (PM10 和 PM2.5) 对环境产生严重危害。如何绿色高效地利用副产物成为了一个重要问题。

近年来, 以真菌和麦麸或商业木质素组成的菌丝复合类材料/技术的发展引起土木工程的关注。该技术将真菌作为“生物水泥”, 通过真菌代谢产物菌丝将松散的混合物“黏结”为一个整体。目前除用于建筑板材等非承重材料的生产外^[2], 该技术在岩土工程方向也有潜在的应用场景。Salifu 等^[3]在木质纤维素与砂土混合物接种 *Pleurotus ostreatus* 真菌后发现, 砂土的疏水性显著增加, 试样的抗冲性得到显著提升。Zhang 等^[4]向砂土中接种 *Pleurotus ostreatus* 真菌后发现, 与未处理砂土相比, 真菌生长后试样的临界流速提高和侵蚀率降低, 砂土抗侵蚀能力得到提升。Lim 等^[5]向砂土中接种 *Rhizopus oligosporus* 真菌后发现, 真菌对试样强度的增强主要归因于黏聚力的增加。毕银丽等^[6]发现对紫花苜蓿根系同时接种真菌丛枝菌根真菌 (*Arbuscular mycorrhizal fungi*) 和深色有隔内生真菌 (*Dark septate endophytes*) 后可有效提升根系抗拉强度及根土复合体抗剪强度, 根土的黏聚力在 20~30 cm 深度范围显著提升 (贡献率达 186%)。苟乐宇等^[7]利用 *Pleurotus ostreatus* 真菌、麦麸和砂制备菌丝-麦麸-砂轻质土工材料后发现, 菌丝的加入提升了试样的抗剪强度, 限制试样的体变, 且在低围压条件下 (约 100 kPa) 和小应变阶段更显著。

真菌作为生态系统重要的一环, 不仅在生态系统循环起到重要作用, 在岩土工程的抗冲刷、边坡加固和轻质回填等领域也有一定的应用潜力。目前研究多集中在宏观力学特性, 对试样强度形成的微观机理研究相对较少。为加深真菌在岩土工程的应用广度, 特别针对未来岛礁工程建设对轻质材料的可能潜在需求, 作者提出了由菌丝、麦麸和钙质砂组成的轻质土, 并进行了静力学特性研究^[7]。本文其基础上, 进一步

对菌丝-麦麸-砂复合轻质土进行 X 射线衍射、傅里叶红外光谱、扫描电子显微镜和 X 射线能谱试验, 以期揭示菌丝-麦麸-砂复合轻质土的强度形成机理, 为未来真菌类加固技术的机理研究提供思路。

1 材料、试样制备与静力学强度特性

菌丝-麦麸-砂混合轻质土 (MBLS) 主要由真菌菌丝、麦麸和砂土组成 (图 1 (a))。菌丝由真菌代谢长生, 真菌选择糙皮侧耳菌 (*Pleurotus ostreatus*)。麦麸为真菌生长提供支点、营养物质 (木质纤维素、碳水化合物等) 和轻质材料的作用 (例如 EPS 颗粒和橡胶颗粒)。砂土选择中国某海域的钙质砂。钙质砂平均粒径 $D_{50}=1.50$ mm, 不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 分别为 3.8, 0.62, 最大干密度 ρ_{dmax} 和最小干密度 ρ_{dmin} 分别为 1.508 g/cm³ 和 1.228 g/cm³。钙质砂的元素分布如表 1 所示。

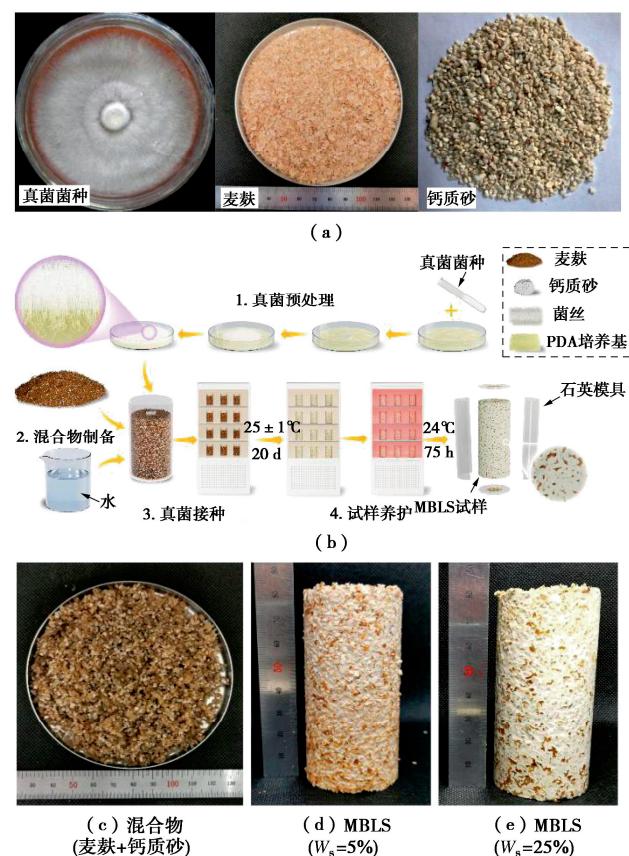


图 1 试验材料、试样制备流程与代表性试样

Fig. 1 Pictures of materials, sample preparation process and representative specimens

表 1 钙质砂元素分布

Table 1 Elemental distribution of carbonate sand

单位: %

Sr	Br	Fe	Ca	K	C	S	P	Si	Al	Mg	Na
1.691	0.619	0.132	93.636	0.361	0.127	0.321	0.265	0.267	0.172	1.8	0.609

Pleurotus ostreatus MBLS (后简称 MBLS) 的制备流程分为真菌预处理、混合物制备、真菌接种和养护 4 个步骤。MBLS 的制备思路是向试样顶部接种真菌, 利用真菌代谢产物的菌丝作为黏结剂, 将麦麸和钙质砂混合物 (图 1 (c)) 进行黏结。MBLS 试样制备流程见图 1 (b), 具体制备流程详见文献[7]。图 1 (d), (e) 的代表性试样编号 “ $W_s = X\%$ ” 为麦麸含量, W_s 按照下式计算:

$$W_s = \frac{W_M}{W_M + W_G} \times 100 \quad (1)$$

式中: W_M 和 W_G 分别为麦麸和钙质砂的干重。

对 MBLS 和麦麸-砂混合物 (无菌丝试样) 进行静力排水剪切试验后发现, 菌丝的存在改变试样的结构, 显著地提升了试样强度、限制了变形。测试条件下 (25~200 kPa), MBLS 的最大偏应力与初始弹性模量的范围分别为 129.3~558 kPa 和 25.4~33.5 MPa。与麦麸-砂混合物相比, 低围压下 (<100 kPa) MBLS 最大偏应力与初始弹性模量的最大提升幅度分别达到 34.7%, 54.8%; MBLS 表现出一定的结构性, 包络线为折线型, 低围压下试样强度的增大归因于黏聚力的增加。MBLS 试样的静力学强度特性研究详见文献[7]。

2 微观试验方案与方法

2.1 XRD 试验

对材料中的钙质砂、麦麸和 MBLS 试样 (5% 和 25% 麦麸含量) 进行 XRD 试验, 分析试样中的矿物成分、结晶度和晶体尺寸的变化。XRD 试验采用 BRUCKER D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪进行, 采用 Cu-K α 辐射, 工作电压 20~60 kV, 工作电流 10~60 mA, 扫描速度 2° /mm, 采样步长为 0.02°, 扫描范围 10°~90°。结晶度利用里特维尔德法 (Rietveld Method) 进行计算分析; 晶体尺寸通过谢乐公式 (Scherrer equation) 计算, 如下所示:

$$L = \frac{\lambda k}{\beta_{1/2} \cos \theta} \quad (2)$$

式中: L 为平均晶体尺寸 (nm); λ 为特征峰 X 射线波长 (nm), 取 1.54056 Å; κ 为谢乐常数, 取 0.89; $\beta_{1/2}$ 为特征峰的半峰宽 (rad); θ 为 Bragg 衍射角 (°)。

2.2 FT-IR 试验

对材料中的钙质砂、麦麸和 MBLS ($W_s = 5\%$) 试样进行 FT-IR 试验。为了探究真菌生长后钙质砂和麦麸后官能团的差异, 还分别对 MBLS 试样剥离出的钙质砂-菌丝混合体 (仅包含钙质砂和菌丝) 和麦麸-菌丝混合物 (仅包含麦麸和菌丝) 进行 FT-IR 分析。FT-IR 试验在 Nicolet IS10 红外光谱仪上进行, 试验波数范围是 400~4000 cm⁻¹, 光谱仪分辨率 4 cm⁻¹, 信噪比 50000:1, 扫描 32 次。

2.3 SEM 和 EDS 试验

对不同麦麸含量 MBLS 试样 ($W_s = 5\%, 25\%$) 进行 SEM 试验, 分析 MBLS 试样微观结构的变化。SEM 试验使用仪器为日立 SU8020 超高分辨率场发射扫描电子显微镜。由于菌丝是从 MBLS 试样的顶部向底部生长, 为了最大程度减小试样制备对试样的扰动, 将 MBLS 样品沿轴向被分割, 从试样中心部分分割出尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm 的试块。将试块进行冷冻干燥处理, 然后在真空条件下喷金, 在 30 kV 的工作电压下进行成像。SEM 成像后, 对特性区域与特定点进行 EDS 扫描分析。具体试验方案如表 2 所示。

表 2 试验方案

Table 1 Test plan

试验类型	检测材料	试验目的
XRD	钙质砂、麦麸、MBLS。	矿物种类、结晶度、晶体尺寸变化
FT-IR	钙质砂、麦麸、钙质砂-菌丝混合物、麦麸-菌丝混合物、MBLS。	化学键变化
SEM	MBLS	微观结构变化
EDS		化学元素变化

需要说明的是, 由于宏观力学试验的有效围压较小 (25~200 kPa), 且试样中含有一定比例的麦麸减弱竖向荷载对钙质砂的破碎作用。上述微观试验分析暂不考虑颗粒破碎对结果的影响。

3 试验结果及分析

3.1 XRD 试验

图 2 为钙质砂、麦麸、5% 和 25% 麦麸含量 MBLS 试样的 X 衍射图谱。可以看出, 钙质砂中只含有方解

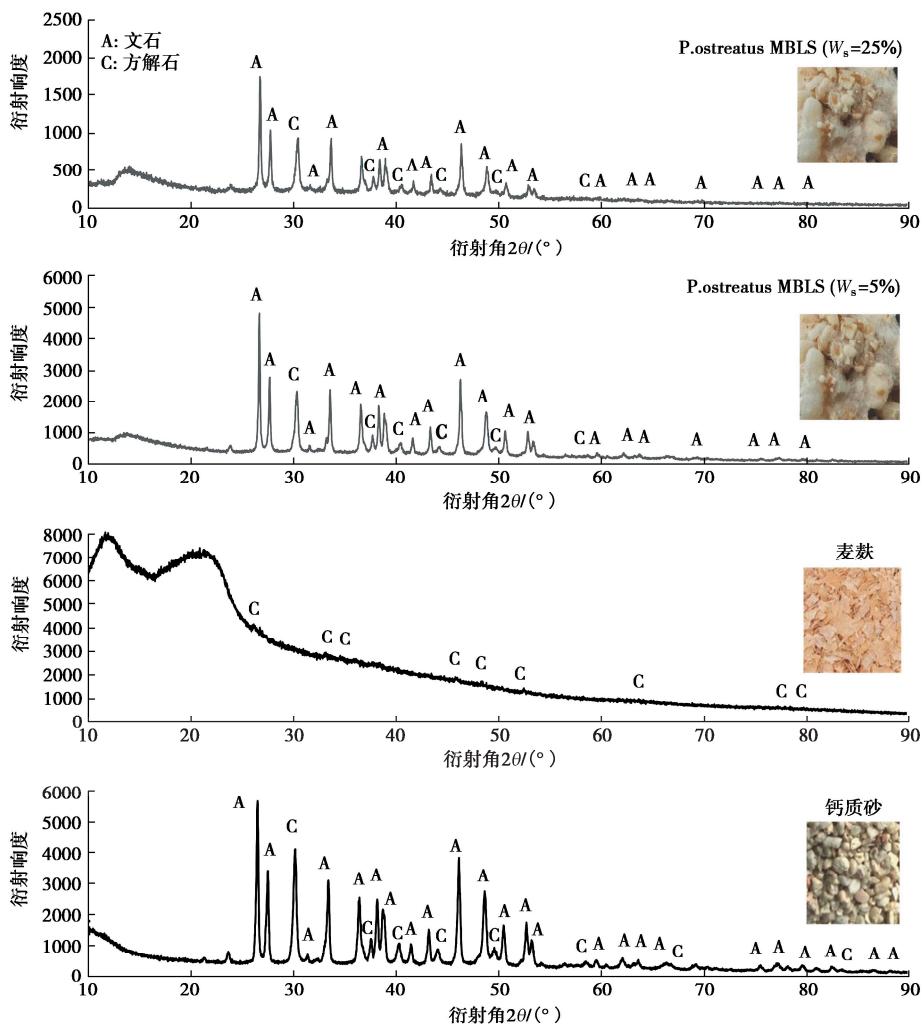


图 2 X 射线衍射谱

Fig. 2 X-ray diffraction pattern

石和文石两种矿物, 且文石的特征峰强度明显高于方解石的强度。麦麸只含有方解石, 但含量极少。不同麦麸含量 MBLS 试样与钙质砂的衍射峰值出现的位置基本相同, 对应特征峰的面积和强度有所降低, 未出现新的衍射峰, 说明真菌生长后 MBLS 试样内未产生新的矿物种类。

图 3 是钙质砂和 MBLS 试样的结晶度的对比图。需要说明的是, 由于麦麸中仅有方解石且含量极低, 结晶度计算仅对钙质砂和 MBLS 试样进行。可以看出, 麦麸含量由 5% 增至 25%, MBLS 试样结晶度由 75.93% 降至 60.37%, 远低于钙质砂的结晶度 (88.28%)。结晶度的降低归因于真菌生长中发生不同形式的氧化过程。菌丝细胞壁和胞外聚合物中含有大量的羟基、羧基、酰胺基等功能基团。功能基团的氧化造成钙质砂和麦麸表面的大分子 C 链或大分子基环间的氧桥断裂, 致使部分结晶区发生破损, 逐步向非结晶区过渡, 试样结晶度降低^[8]。

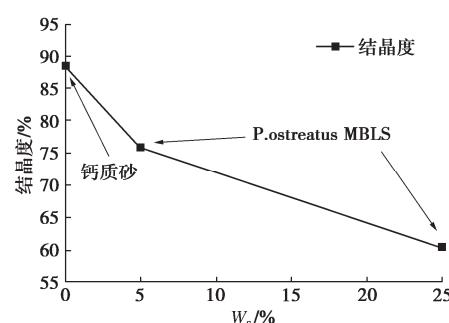


图 3 MBLS 和钙质砂试样的结晶度

Fig. 3 Crystallinity of MBLS and carbonate sand specimens

图 4 给出了矿物占比与晶体尺寸的变化。与钙质砂相比, 真菌生长后试样的矿物占比与晶体尺寸发生了明显变化, 但不同矿物的变化规律不同。以 5% 麦麸含量 MBLS 试样为例, 其文石含量为 71.2%, 晶体尺寸 21.2 nm, 较钙质砂的文石含量与晶体尺寸分别上升 4.86%, 32.37%。方解石含量为 28.8%, 晶体尺寸 26.4 nm, 较钙质砂的方解石含量与晶粒尺寸分别下降 10.28% 和上升 24.53%。由于麦麸中的文石矿物

成分极少,因此MBLS试样内的文石含量的变化主要归因于真菌的生长过程。菌丝外壁和分泌胞外聚合物的羟基等极性官能团与钙质砂和麦麸表面的钙离子发生配位,在菌丝外壁和钙质砂接触界面处诱导碳酸钙的结晶和成核,改变了文石和方解石晶体尺寸大小和质量占比。这与已有研究结果相似。Livne等^[9]通过XRD和透射电子显微镜对云芝(*T.versicolor*)菌丝代谢后的产物进行研究后发现,菌丝定殖后产生大量针状文石以及少量方解石和球霰石,并发现菌丝细胞壁是初级结晶体形成与成核的重要载体。

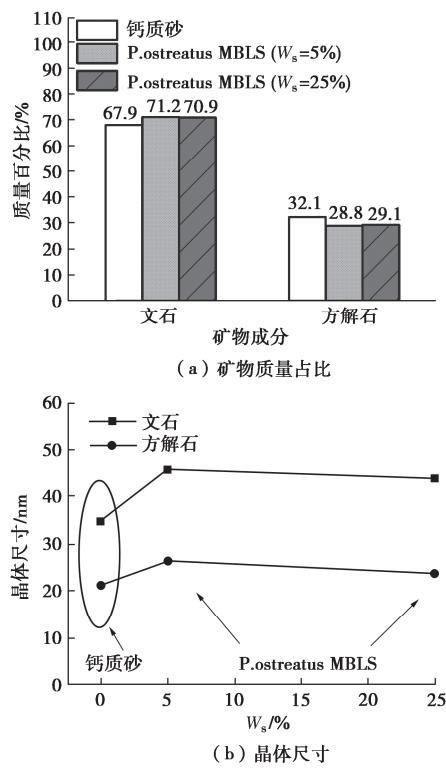


图 4 MBLS 和钙质砂中矿物成分与晶体尺寸

Fig. 4 Mineral compositions and crystal sizes in MBLS and carbonate sand

3.2 FT-IR 试验

图 5 为钙质砂、钙质砂-菌丝混合体、麦麸、麦麸-菌丝混合体和 MBLS 试样的 FT-IR 图谱。可以看出,MBLS 试样(图 5(e))的官能团是钙质砂-菌丝混合物(图 5(b))和麦麸-菌丝混合物(图 5(d))官能团的集合。

对比钙质砂和钙质砂-菌丝混合物可以发现(图 5(a)、(b)),由于含有海洋生物骨骼遗骸的成因^[10],钙质砂具有羟基(-OH)、羰基(C=O)等一定数量的官能团。钙质砂-菌丝混合物的谱图形式与钙质砂的相似,但部分吸收峰的位置和强度存在差异。钙质砂-菌丝混合物在 3424 cm⁻¹ 波数处的-OH 伸缩振动的吸收峰和 1788 cm⁻¹ 和 1786 cm⁻¹ 波数范围的 C=O 伸缩振动峰都要弱于钙质砂中-OH (3429 cm⁻¹) 和 C=O

(1788 cm⁻¹) 锋的强度。这说明菌丝的定殖发生了氧化反应,破坏了钙质砂表面的-OH 与 C=O 结构。饱和烷基结构的 C-H 键伸缩振动峰(2980~2852 cm⁻¹)、酚羟基、醚和醇键吸收峰(1300~1000 cm⁻¹)和 C-O 键伸缩振动峰(1206 cm⁻¹ 和 1047 cm⁻¹)的增强说明菌丝作用后钙质砂的芳环侧链基团增加。芳香环侧链基团具有疏水性,使得菌丝定殖后的试样表面疏水特性增强,这也解释了文献[11]中真菌生长后试样渗透性的增强。

从图 5(a)、(b) 还可以看出,钙质砂和钙质砂-菌丝混合物谱图中的方解石特征峰(2547~2498 cm⁻¹、1746 cm⁻¹、1742 cm⁻¹、875~556 cm⁻¹)有明显的差异。钙质砂-菌丝混合物在 1742 cm⁻¹ 波段处的吸收峰明显弱于钙质砂的 1745 cm⁻¹ 的吸收峰强度,而在 2547~2498 cm⁻¹ 波数范围的吸收峰更是几乎消失,说明真菌生长后钙质砂的方解石型碳酸钙含量减少。但文石型碳酸钙特征峰(1083 cm⁻¹ 和 1082 cm⁻¹)则表现出相反的趋势。钙质砂-菌丝混合物在 1082 cm⁻¹ 的文石型碳酸钙特征峰的宽度和强度都大于钙质砂,说明菌丝定殖后钙质砂中的文石型碳酸钙含量增大,这与 XRD 的结果相一致。

从麦麸和麦麸-菌丝混合物的红外谱图(图 5(c)、(d))可以看出,两种试样均出现-OH、C=O、苯环、碳氧键(C-O)和碳碳双键(C=C)等典型的木质素、纤维素和半纤维素的吸收峰。麦麸和麦麸-菌丝混合体官能团在 2700~1000 cm⁻¹ 波数范围出现明显差异。在真菌定殖后,麦麸中脂肪对应的 C=O 伸缩振动峰(1734 cm⁻¹)明显减弱(1732 cm⁻¹),而蛋白质对应的 C=O 伸缩振动峰(1641 cm⁻¹)明显增强(1632 cm⁻¹),说明麦麸中的木质素侧链内的 C=O 发生了氧化反应,麦麸-菌丝混合物的含氧量增加。另一方面,与麦麸中的糖吸收特征峰相比(1244~1338 cm⁻¹),麦麸-菌丝混合物的特征峰强度更高(1260~1041 cm⁻¹),说明菌丝定殖后的氧化还原反应增加了糖特征峰的 C-O 键和酯类化合物的数量,而糖的增加为菌丝的定殖吸附提供了基础,进一步增强了菌丝与介质的接触强度。

综上,真菌在 MBLS 内生长过程中发生氧化反应,并伴随酯类化合物、芳香族化合物与无定型碳酸钙(文石)的生成,可以推测菌丝通过有机物黏结与无机物沉淀的混合方式对钙质砂和麦麸进行结合。

3.3 SEM 和 EDS 试验

图 6, 7 分别是 5%, 25% 麦麸含量 MBLS 试样的微观电镜扫描照片。图中亮白色颗粒为钙质砂;片状纤维物为麦麸;细枝状纤维物为菌丝。从图 6 可以看出,5% 麦麸含量 MBLS 试样(P-W5) 内存在明显的

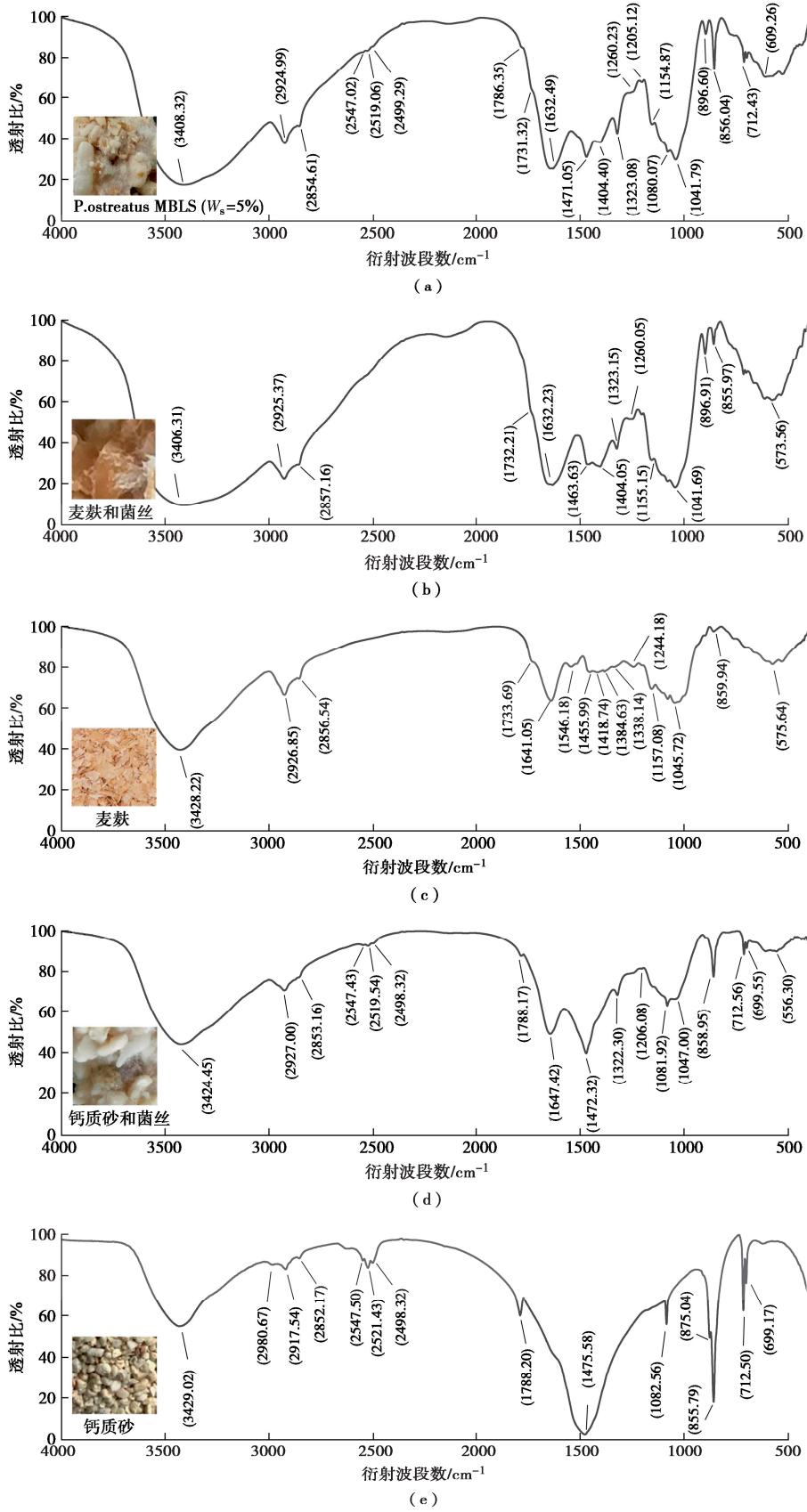


图 5 傅里叶红外光谱

Fig. 5 Fourier transform infrared spectroscopy

架空孔隙和粒间孔隙, 颗粒表面和部分孔隙间被菌丝包裹与填充。试样内存在明显的砂-砂接触和砂-麦麸

接触, 且砂-砂接触数量多于砂-麦麸接触数量。300 倍扫描图(图 6(d))可以看到, 菌丝呈扁平状腔体

结构, 直径在 1~3 μm 。菌丝附着在钙质砂和麦麸表面或穿刺钙质砂的内孔和麦麸纤维的沟壑中进行定殖。菌丝生长过程中伴随有不同方向的分枝, 分枝通过相互交错和缠绕后形成菌丝“网络”, 即菌丝体。菌丝体填充钙质砂和麦麸间的孔隙, 像“桥梁”一样建立起钙质砂与麦麸间的“联系”, 形成了砂-菌丝-麦麸的团聚体。随着麦麸含量的增大, 25%麦麸含量 MBLS 试样(图 7 (a))内的架空孔隙和粒间孔隙增多, 砂-砂接触逐渐减少, 砂-麦麸的点/面接触逐渐增多。砂-砂/砂-麦麸之间同样可以观察到大量的菌丝体, 菌丝体在颗粒之间形成黏结键。

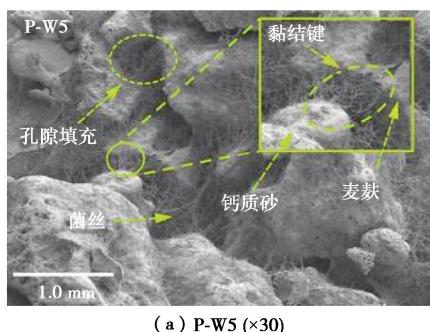
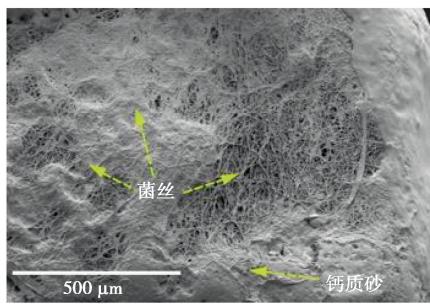
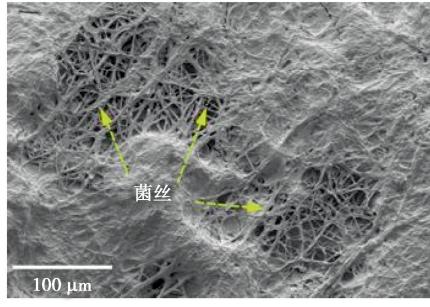
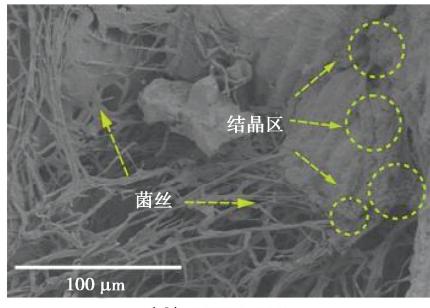
(a) P-W5 ($\times 30$)(b) P-W5 ($\times 100$)(c) P-W5 ($\times 300$)(d) P-W5 ($\times 500$)

图 6 5%麦麸含量 MBLS 的微观结构

Fig. 6 Micro-structure of MBLS with 5% wheat bran content

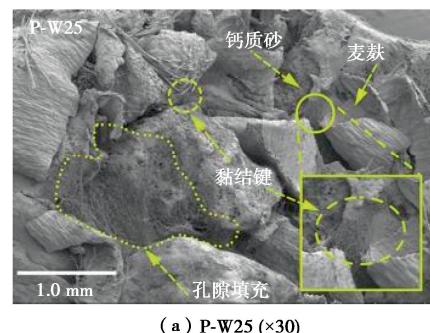
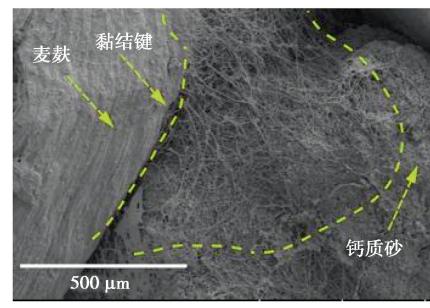
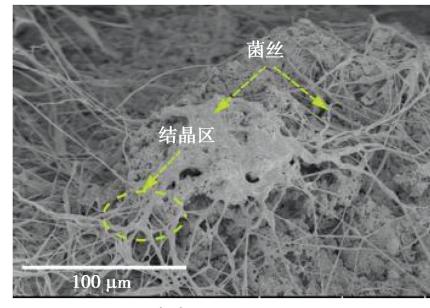
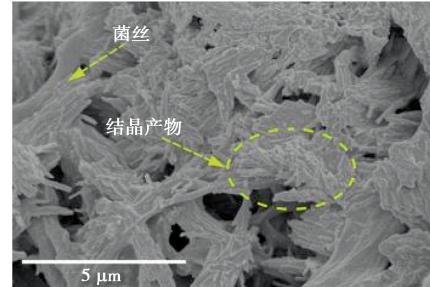
(a) P-W25 ($\times 30$)(b) P-W25 ($\times 100$)(c) P-W25 ($\times 500$)(d) P-W25 ($\times 10000$)

图 7 25%麦麸含量 MBLS 的微观结构

Fig. 7 Micro-structure of MBLS with 25% wheat bran content

此外可以发现, 菌丝体黏附或穿刺钙质砂表面后形成“瘢痕”状印记, 钙质砂被“侵蚀”(图 7 (c)), 并伴有碎屑散落。这是由于菌丝在向触性的引导下, 沿钙质砂表面或渗入内孔等薄弱处寻找营养物质。菌丝在生长过程中, 端部产生的剪应力与细胞膨胀产生的膨胀压力共同加速钙质砂内孔和裂缝等薄弱处的磨损与破碎。破碎后的颗粒增大了与菌丝的接触面积, 有利于有机酸等生物化学的作用^[12-13], 进一步加速 MBLS 试样中钙质砂的溶解与剥离。

另外, 从图 7 (d) 中发现, 菌丝表面以及与颗粒连接处附着大量的针状结晶物质。进行 EDS 分析后

发现(图 8), Ca 元素最多, 其次是 C、O 和 Mg, 晶体点位扫描结果与之相似, 说明该晶体是碳酸盐矿物。结合 XRD、FT-IR 和 EDS 结果后可以认为, 菌丝在定殖过程中伴随着已有碳酸钙的分解和文石型碳酸钙的生成。

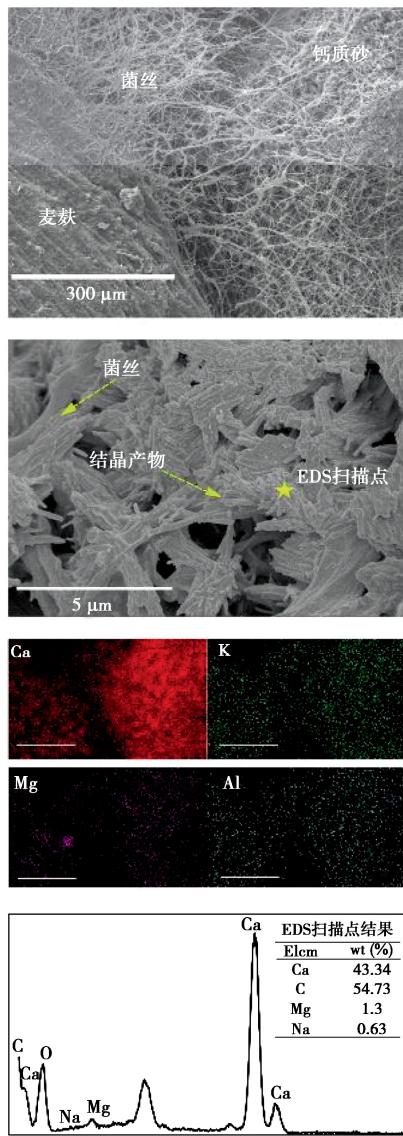


图 8 25% 麦麸含量 MBLS 能量色散谱

Fig. 8 Energy dispersive spectroscopy (EDS) of MBLS with 25% wheat bran content

碳酸盐矿物沉淀需要的钙离子和碳酸根离子(CO_3^{2-})等离子环境主要由钙质砂和菌丝提供。钙质砂自身富含大量的 CO_3^{2-} , 菌丝生长呼吸产生的二氧化碳(CO_2)与试样内的水结合后会在菌丝壁附近生成一定量的碳酸(H_2CO_3), 其进一步分解出氢离子(H^+)和碳酸根离子(CO_3^{2-})(式(3)~(5))。真菌分泌的低分子量有机酸(例如丙酮酸(CH_3COCOOH)和柠檬酸($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$)等^[14])溶解钙质砂中的矿物, 丰富了试样内的可溶性碳酸盐, 为后续碳酸盐矿物质的

沉淀提供所需的离子环境(式(6)~(10))。而真菌细胞外壁富含几丁质可以为碳酸盐矿物的成核位点^[15], 降低了成核所需的自由能。游离的碳酸根与钙质砂表面和游离的钙离子结合后, 最终在真菌菌丝表面发生文石型碳酸钙沉淀(式(11))。真菌在 MBLS 试样内诱导碳酸钙沉淀机制如图 9 所示。

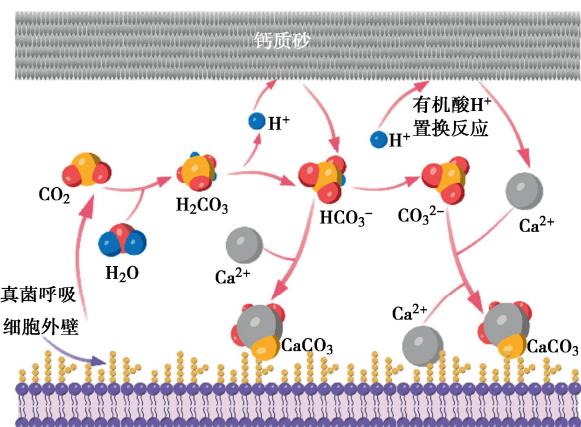
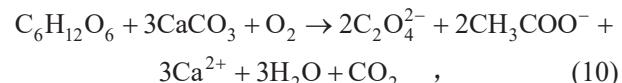
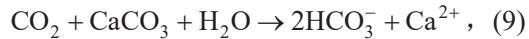
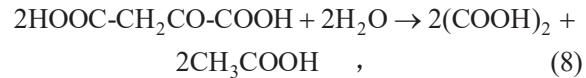
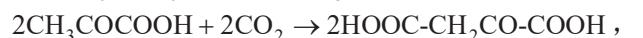
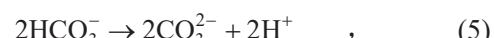


图 9 真菌诱导碳酸钙沉淀机制图

Fig. 9 Diagram of mechanism of fungal-induced calcium carbonate precipitation

4 MBLS 强度形成机理

与传统轻质土工材料中水泥等水化产物的化学黏结不同, MBLS 试样的形成依赖真菌代谢的产物菌丝。借鉴菌根和植物根系固土理论并结合上述微观试验结果, 本文认为菌丝-麦麸-砂复合轻质土的强度形成机理分为菌丝的生物化学作用和生物物理作用。

菌丝的生物化学作用按照产出物的方式可以分为自有黏结作用和分泌黏结作用。自有黏结作用主要与菌丝外壁的 β -葡聚糖与外壁电荷有关。 β -葡聚糖中的羟基等极性基团与介质表面的水分子发生质子反应, 水解生成的 H^+ 通过静电反应与钙质砂与麦麸表面

的负电荷结合形成氢键，促使菌丝吸附在其表面^[16]。另外，菌丝外壁带有大量负电荷会加速细胞外壁直接与钙质砂和麦麸表面的正电荷结合以达到吸附效果。

菌丝的分泌黏结作用与菌丝分泌的胞外聚合物 (extracellular polymeric substances) 有关。胞外聚合物含有大量的多糖 (例如硬葡聚糖等)^[17]，其中含有大量带负电荷的氨基 ($-NH_2$)、甲基 ($-CH_3$)、羧基 ($-COOH$) 和羟基 ($-OH$)。极性基团与钙质砂和麦麸中的二价和三价阳离子 (Al^{3+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等) 的离子交换点位产生吸附作用^[18] 并形成有机质-矿物复合体。多价金属阳离子和有机物以共沉淀或结晶的方式在菌丝和矿物表面形成黏结单元，使钙质砂、麦麸和菌丝形成稳定团聚体。FT-IR 中的 $(CO_3)^{2-}$ 的不对称和对称伸缩峰 (2547 cm^{-1}) 的回缩、文石型碳酸钙特征峰 (1083 cm^{-1} 和 1082 cm^{-1}) 的出现以及 SEM 中发现的结晶体共同佐证了上述观点。相关方程式见式 (3) 到式 (10)。

多糖的存在是初步形成团聚体的关键，这一点在植物根系与微生物改善土壤水土特性的研究中也已经得到了证实。Martin 等^[19]发现胞外多糖在多价阳离子存在的土壤中形成团聚体的稳定性更高。Chenu 等^[20]发现硬葡聚糖吸附在黏土矿物表面并形成了有机矿物网络，填充了孔隙并提升了高岭石和蒙脱石的水稳定性。Caesar-Tonthat 等^[16]发现担子菌真菌分离物中的岩藻糖有在土壤中起到黏结作用，即担子菌对土壤团聚体的形成归因于其产生的多糖物质。

生物物理作用与菌丝物理强度与形成菌丝体的结构强度有关。在菌丝生长过程中，菌丝顶端产生的一定膨胀压力与剪应力，在与胞外聚合物和有机酸的共同作用下，局部颗粒被菌丝分解，并沿着菌丝生长方向重新排列^[21-22]。通过菌丝生长过程中的挤压和推动等一系列物理力学作用，使钙质砂和麦麸向已形成的小型团聚体 (粒径 $0.053\sim0.25\text{ mm}$) 靠拢，逐渐汇聚形成大型团聚体 (粒径 $>0.25\text{ mm}$) (见图 6)。从 SEM 结果中可以发现 (见图 7 (a) 和 (b))，钙质砂与麦麸表面被大量的菌丝缠绕，试样内孔隙被菌丝体填充，菌丝自身强度与填充挤密作用不能被忽略。作为菌丝体的组成单元，菌丝的强度主要由菌丝壁的几丁质提供。Stocks 等^[23]和 Zhao 等^[24]研究发现赤藓糖多孢菌 (*Saccharopolyspora erythraea*) 和巢状曲霉 (*Aspergillus nidulans*) 的菌丝体壁的弹性模量在 $110\sim140\text{ MPa}$ 。菌丝体起到“网兜”的作用，限制了团聚体的移动与变形。

综上，MBLS 的强度形成主要归因于真菌生长过程中菌丝外壁和胞外聚合物中的多糖和菌丝体对混合粒料 (钙质砂和麦麸) 缠绕、填充等的共同作用。菌

丝细胞壁和胞外聚合物中的极性基团与钙质砂和麦麸表面负电荷、金属阳离子结合，以氢键、吸附、共沉淀和结晶 (文石型碳酸钙) 等方式附着并黏结在钙质砂和麦麸表面，形成了微型团聚体。菌丝的生长过程中产生挤压和牵引作用，将分散的细颗粒向团聚体靠拢，使得团聚体不断扩大。菌丝的持续生长填充了团聚体间的孔隙，挤密了试样内部结构，将各分散的团聚体黏结整合为一个整体，最终形成了菌丝-麦麸-砂复合轻质土。结合静力学试验结果^[7]可以推测，MBLS 强度来源不仅包含颗粒间的摩擦形成的力链，也包含真菌菌丝黏结颗粒形成团聚体的黏结作用与菌丝体网络束缚作用。相关机理示意图如图 10 所示。

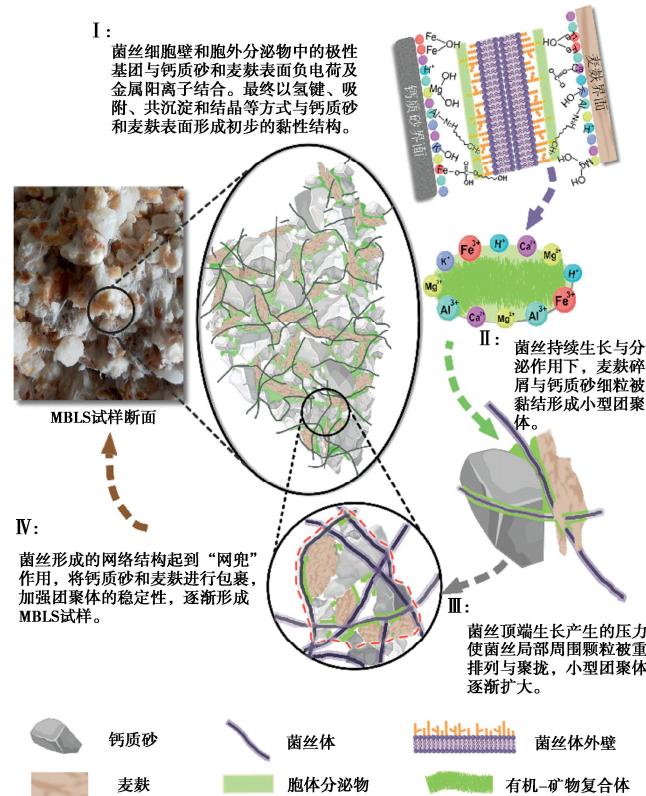


图 10 菌丝-麦麸-砂复合轻质土的形成机理示意图

Fig. 10 Schematic diagram of formation mechanism of MBLS

5 讨 论

由上述试验结果可见，菌丝-麦麸-砂复合轻质土形成的关键是真菌的正常生长。真菌诱导文石和方解石型碳酸钙沉淀是菌丝黏附颗粒并形成团聚体的一个重要机制。相似的，Zhang 等^[5]发现在标准 ASTM 砂中接种 *Pleurotus ostreatus* 后，颗粒表面生成了方解石、草酸钙一水和二水化合物，从而增强砂土的抗侵蚀能力。在菌种相同的前提下，产生碳酸盐矿物类型的差异可能与砂土的选择有关。菌丝-麦麸-砂复合轻质土使用的钙质砂含有锶 (Sr) 和溴 (Br) (见表 1)。在方解石晶格中加入部分阳离子 (例如 Sr、Ba 或 Pb)

(Pb)) 会促进形成文石的形成^[25]。由于文献[5]中缺乏对应信息, 这一假设需要在获得标准 ASTM 砂中的元素种类后才能得到证实。

另一方面, 与其他微生物加固技术类似, 微生物与颗粒之间的黏结或加固程度决定了加固体的变形和强度。由于菌丝密度小、质量轻且单根菌丝直径仅为 1~3 μm , 无法采用植物根系加固中常用的根系体直接称量法, 也无法像微生物诱导碳酸钙沉淀 (MICP) 技术中利用酸洗法统计微生物产物 (碳酸钙) 的含量。因此, 未来需要探索能够精确量化菌丝含量和分布区域等重要参数的技术手段, 以便建立菌丝与试样强度之间的深层关系。

此外, 相较于当前成熟的 MICP 技术, 由于生物特性和繁殖方式的差异, MBLS 的总生产周期较长 (约 25 d), 这不仅延缓了工程进度, 还无形中增加了成本。针对这一问题, 可以借鉴发泡聚苯乙烯 (EPS) 砌块的应用经验, 采用工厂预制与现场施工相结合的模式。当前, 作者正致力于优化制备技术, 力求尽早实现现场接种与养护一体化的工艺。

6 结 论

本文利用多种微观测试手段对菌丝-麦麸-砂复合轻质土 (MBLS) 的强度形成机理进行研究。主要得到以下 3 点结论。

(1) XRD 结果显示, 菌丝定殖后没有改变矿物种类, 但矿物含量、结晶尺寸和结晶度发生了变化。定殖后试样内文石的含量增大, 方解石含量减少, 两种矿物的结晶度均降低。FT-IR 分析结果显示菌丝定殖后试样内多糖、酯类化合物和文石型碳酸钙含量增大, 颗粒表面的疏水性增大。

(2) SEM 试验发现 MBLS 试样中的菌丝不仅吸附在钙质砂和麦麸表面, 而且可以穿过表面孔隙或裂纹进行生长与定殖, 并伴随已有碳酸钙的溶解与文石型碳酸钙的生成。菌丝在颗粒之间形成的菌丝体起到填充试样内部孔隙和包裹颗粒的作用。

(3) MBLS 试样强度的形成是真菌菌丝的生物化学和生物物理共同作用的结果。菌丝细胞壁和胞外聚合物中的极性基团与钙质砂和麦麸表面负电荷、金属阳离子以氢键、吸附、共沉淀和结晶 (文石型碳酸钙) 等方式附着与黏结在钙质砂和麦麸表面, 形成微型团聚体。菌丝的生长过程中产生挤压和牵引力推动细颗粒向团聚体靠拢, 在菌丝体包裹作用下团聚体不断扩大。菌丝体进一步将各个团聚体进行聚拢, 填充团聚体间的孔隙, 挤密了试样, 提升了试样强度。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益

冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 苟乐宇设计研究内容, 张先伟提供研究指导, 苟乐宇完成试验与结果分析, 苟乐宇和张先伟参与论文的写作和修改。王港、严蕾和朱华亮提供支持性贡献。参与论文所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。The research was designed by GOU leyu, and supervised by ZHANG Xianwei. The experiments and results analysis were conducted by GOU leyu. The manuscript was written and revised by GOU leyu and ZHANG Xianwei. Supporting contributions were provided by WANG Gang, YAN Lei, and ZHU Hualiang. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

参考文献:

- [1] GUERRIERO G, HAUSMAN J F, STRAUSS J, et al. Lignocellulosic biomass: Biosynthesis, degradation, and industrial utilization[J]. Engineering in Life Sciences, 2016, 16(1): 1-16.
- [2] ATTIAS N, DANAI O, ABITBOL T, et al. Mycelium bio-composites in industrial design and architecture: Comparative review and experimental analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 246: 119037.
- [3] SALIFU E, EL MOUNTASSIR G. Fungal-induced water repellency in sand[J]. Géotechnique, 2021, 71(7): 608-615.
- [4] LIM A, ATMAJA P C, RUSTIANI S. Bio-mediated soil improvement of loose sand with fungus[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020, 12(1): 180-187.
- [5] ZHANG X J, FAN X D, WANG C, et al. A novel method to improve the soil erosion resistance with fungi[J]. Acta Geotechnica, 2023, 18(5): 2827-2845.
- [6] 毕银丽, 罗睿, 王双明. 接菌对紫花苜蓿根系抗拉性及根菌复合土体抗剪强度影响[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2182-2192. (BI Yinli, LUO Rui, WANG Shuangming. Effect of inoculation on the mechanical properties of alfalfa root system and the shear strength of mycorrhizal composite soil[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2182-2192. (in Chinese))
- [7] 苟乐宇, 李飒, 张先伟. 菌丝-砂复合轻质土的静力强度特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(10): 2590-2598. (GOU Leyu, LI Sa, ZHANG Xianwei. Study on static strength of mycelium bio-composites lightweight soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(10): 2590-2598. (in Chinese))
- [8] 张新玲, 王立海, 高珊. 小兴安岭 4 树种健康材和腐朽材结晶度的试验[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(7): 83-84,

- [125] (ZHANG Xinling, WANG Lihai, GAO Shan. Crystallinity of healthy and rotten wood of several tree species in Xiaoxing'an mountain[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2010, **38**(7): 83-84, 125. (in Chinese))
- [9] LIVNE A, MIJOWSKA S C, POLISHCHUK I, et al. A fungal mycelium templates the growth of aragonite needles[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2019, **7**(37): 5725-5731.
- [10] 刘崇权, 汪 稔. 钙质砂物理力学性质初探[J]. *岩土力学*, 1998, **19**(1): 32-37, 44. (LIU Chongquan, WANG Ren. Preliminary research on physical and mechanical properties of calcareous sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1998, **19**(1): 32-37, 44. (in Chinese))
- [11] 荀乐宇, 刘西周, 李 飚, 等. 菌丝复合轻质土的制备及力学特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, **43**(10): 1933-1940, 1958. (GOU Leyu, LIU Xizhou, LI Sa, et al. Preparation and mechanical properties of composite mycelial lightweight soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, **43**(10): 1933-1940, 1958. (in Chinese))
- [12] 窦传伟, 连 宾. 一株岩生真菌对方解石的风化作用[J]. *矿物学报*, 2009, **29**(3): 387-392. (DOU Chuanwei, LIAN Bin. Microbial weathering of calcite by rock-inhabiting fungi[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2009, **29**(3): 387-392. (in Chinese))
- [13] 李 涵, 蔡 林, 姚奇志, 等. 真菌的生物地质作用及其在环境修复中的应用[J]. *高校地质学报*, 2015, **21**(3): 382-394. (LI Han, CAI Lin, YAO Qizhi, et al. Fungal involvement in biogeological processes and application to environmental bioremediation[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2015, **21**(3): 382-394. (in Chinese))
- [14] VERRECCHIA E P. Litho-diagenetic implications of the calcium oxalate-carbonate biogeochemical cycle in semiarid Calcretes, Nazareth, Israel[J]. *Geomicrobiology Journal*, 1990, **8**(2): 87-99.
- [15] MANOLI F, KOUTSOPoulos S, DALAS E. Crystallization of calcite on chitin[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1997, **182**(1/2): 116-124.
- [16] CAESAR-TONTHAT T C. Soil binding properties of mucilage produced by a basidiomycete fungus in a model system[J]. *Mycological Research*, 2002, **106**(8): 930-937.
- [17] NICHOLS K A, HALVORSON J J. Roles of biology, chemistry, and physics in soil macroaggregate formation and stabilization[J]. *The Open Agriculture Journal*, 2013, **7**(1): 107-117.
- [18] GREENLAND D J, LINDSTROM G R, QUIRK J P. Organic materials which stabilize natural soil aggregates[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1962, **26**(4): 366-371.
- [19] MARTIN J P. Decomposition and binding action of polysaccharides in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1971, **3**(1): 33-41.
- [20] CHENU C. Influence of a fungal polysaccharide, scleroglucan, on clay microstructures[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1989, **21**(2): 299-305.
- [21] CHENU C, STOTZKY G. Interactions between microorganisms and soil particles: an overview[M]// (IUPAC Series on Analytical and Physical Chemistry of Environmental Systems, Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [22] GOSS M J. Consequences of the Activity of Roots on Soil[M]// Plant Root Growth: An Ecological Perspective, Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1991.
- [23] STOCKS S M, THOMAS C R. Strength of mid-logarithmic and stationary phase *Saccharopolyspora erythraea* hyphae during a batch fermentation in defined nitrate-limited medium[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2001, **73**(5): 370-378.
- [24] ZHAO L M, SCHAEFER D, XU H X, et al. Elastic properties of the cell wall of *aspergillus nidulans* studied with atomic force microscopy[J]. *Biotechnology Progress*, 2005, **21**(1): 292-299.
- [25] WRAY J L, DANIELS F. Precipitation of calcite and aragonite[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1957, **79**(9): 2031-2034.