•绿色岩土工程•

DOI:10.12454/j.jsuese.202400513

本刊网刊

黄原胶协同MICP加固珊瑚砂的力学特性和微观机制研究

安　然[1,2],邓　成[2],张先伟[3],革晓航[2],尹　松[3],汪亦显[1*]

(1.合肥工业大学 土木与水利工程学院,安徽 合肥 230009;2.武汉科技大学 城市建设学院,湖北 武汉 430081;
3.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:为了改善珊瑚砂的物理力学特性,解决传统加固技术生态影响大、胶结效果有限的问题,提出了一种利用黄原胶协同微生物诱导碳酸盐沉淀(MICP)的珊瑚砂加固技术。通过开展无侧限抗压强度测试、胶结物质质量分数测定、扫描电子显微镜(SEM)观测、X射线衍射(XRD)分析、计算机断层扫描(CT)及细菌留存率监测等系统性的室内试验,研究了黄原胶掺量对固化珊瑚砂力学特性和微观结构的影响规律,讨论了其加固机理。研究结果表明:经胶结物质质量分数测定试验测得,与未掺入黄原胶的试样相比,掺入0.5%～2.0%黄原胶后的胶结物质的质量分数增加了53.57%～88.43%;在黄原胶掺量为1.0%时,无侧限抗压强度为6.23 MPa,比未掺入黄原胶时提高了2.56倍,说明试样的强度与变形性能得到大幅提高;结合SEM和XRD试验结果,发现黄原胶为碳酸钙晶体重组提供更多的成核位点,形成体积更大的六面体菱形状方解石,并促进"黄原胶–碳酸钙"团聚物的生成,增大颗粒间的黏结力与咬合作用,进而提高颗粒的胶结强度;CT扫描试验表明,黄原胶与MICP的协同改性可有效减小试样孔隙率和等效孔径,优化颗粒的空间排布,提高整体密实度。研究成果对于岛礁珊瑚砂地基加固工程设计和施工具有一定借鉴和参考作用。

关键词:微生物诱导碳酸钙沉淀;珊瑚砂;黄原胶;力学特性;微观机制

中图分类号:TU521　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-3246(2026)03-0155-09

珊瑚砂是一种典型的海洋沉积物,主要由珊瑚生物和其他海洋实体的碳酸钙骨架组成,广泛分布于纬度为30°左右的热带、亚热带的岛屿和沿海地区。岛礁珊瑚砂具有颗粒形状不规则、孔隙率高、强度低、易风化和易破碎等特点[1]。当受到外部载荷或环境变化时,珊瑚砂容易表现出颗粒破碎、体积变形、强度降低等不利特性[2],从而对岛礁基础设施的稳定性产生负面影响。传统的砂土加固改良方法主要有化学灌浆、水泥搅拌等,主要通过使用无机材料与砂土颗粒形成化学或物理胶结,提高土体整体的强度和刚度。然而,这些方法往往伴随着高成本、大能耗、负面生态影响等问题[3–4]。在国家"十四五"规划和"双碳"战略目标推动下,中国近年来大力推动海洋生态环境的可持续发展,实现了海洋资源的合理开发和有效利用。因此,寻找绿色节能环保型的土体加固技术变得尤为关键。

微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)是一种砂土改性的有效方法,MICP利用细菌代谢产生的尿素酶催化尿素水解,释放出氨和碳酸根离子,与水中的钙离子反应生成碳酸钙沉淀,从而填充和胶结砂土颗粒[5]。这种方法具有环境友好、低能耗、胶结物可再生等优点。目前,已有诸多学者利用MICP技术加固珊瑚砂。例如:方祥位等[6–8]对微生物固化珊瑚砂进行了一系列力学试验,深入研究了固化体的损伤本构模型;李昊等[9]在模拟海水环境中利用MICP技术对珊瑚砂进行加固,其结果表明在海水环境中MICP技术的加固效果有显著提高;刘汉龙等[10]进行了微生物加固人工吹填岛礁钙质砂地基试验,经过多轮加固处理后,加固深度最深可达70 cm,无侧限抗压强度最高可达821 kPa。上述研究表明,利用MICP技术加固珊瑚砂

收稿日期:2024－07－02　　**修回日期:**2024－08－07　　**网络出版日期:**2024－09－18

基金项目:国家自然科学基金项目(12102312);中央高校基本科研业务费专项资金(JZ2025HGTB0189);河南省科技攻关项目(242102320294)

作者简介:安　然(1992—),男,副教授.研究方向:特殊土宏–细观试验;本构模型和数值分析.E-mail:anran@wust.edu.cn

* **通信作者:**汪亦显,教授,E-mail:wangyixian2012@hfut.edu.cn

具有一定可行性，但是在传统MICP作用过程中，微生物生成的碳酸钙沉淀产量和质量不高，导致胶结效果不理想，无法满足实际岛礁地基加固工程应用的要求。

为了解决上述问题，一些学者尝试通过添加外加剂来增强MICP技术对岩土体的加固效果，例如，添加纤维[11]、有机高分子[12–13]、无机溶液[14–15]等。黄原胶是一种天然的有机高分子材料，具有高热稳定性、酸碱稳定性、对酶解反应的稳定性，以及环保等优良特性[16]。已有研究表明，黄原胶可以用作改善岩土体工程性能的材料，例如：Reddy等[17]的试验结果表明，在分散性土体中添加黄原胶可以显著提高土体的长期强度和耐久性；Kwon等[18]研究表明，黄原胶能提高黏土的不排水抗剪强度，缩短固结时间；Lee等[19]研究表明，黄原胶能够显著提高无黏性砂土颗粒间的黏聚力，在干燥状态下的黏聚力提高多达14倍。

近年来，一些国内学者也开始尝试将黄原胶和MICP技术结合对岩土体进行加固。林泓民等[20]将黄原胶添加在细菌溶液中，发现黄原胶不仅不会影响微生物活性，而且可以提高试样的成型效果和无侧限抗压强度；杭磊等[21]在MICP胶结液中添加黄原胶，发现经过处理后的砂土完整性和无侧限抗压强度显著提高，MICP过程可以有效提高黄原胶对水流冲刷的耐受性。然而，当前研究尚未关注黄原胶协同MICP固化技术对珊瑚砂的加固效果，且鲜有涉及微观作用机制的研究。

本研究以珊瑚砂为试验对象，探究了黄原胶作为一种外加剂对MICP技术加固珊瑚砂的影响，控制黄原胶的掺量来分析黄原胶对微生物固化珊瑚砂的力学特性和微观结构的影响，通过扫描电子显微镜（SEM）和高分辨率计算机断层扫描仪扫描（CT）等手段，揭示了黄原胶协同MICP技术的作用机制，旨在为岛礁珊瑚砂地基加固提供技术指导。

1 试样材料与试验方法

1.1 试验材料

1.1.1 黄原胶

试验采用一种由野油菜黄单胞杆菌通过发酵工程生产的多糖黄原胶，黄原胶（$C_{35}H_{49}O_{29}$）的基本化学结构是一个由β–D葡萄糖组成的线性主链，该主链通过氢键与一个三糖侧链相连。黄原胶固体通常呈淡黄色粉末状，具有良好的亲水性、假塑性、高剪切稳定性[22]。黄原胶的物理参数如表1所示。

表1 黄原胶的物理参数

Tab. 1 Physical parameters of xanthan gum

指标	数值
分子量/10^4	200～600
灰分/%	9～16
pH耐受范围	3～11
温度耐受范围/℃	10～80
水溶液承托力/(N·cm^{-2})	5×10^{-4}
黏度/(MPa·s)	≥1 200

1.1.2 试验砂样

试验用砂取自中国南海某岛礁的珊瑚砂，其颗粒形状为圆形或近圆形，其主要成分为碳酸钙，占总质量的93%，最大孔隙比和最小孔隙比分别为0.712和0.496，比重为2.65，实测最优含水率为5.6%，最大干密度为1.81 g/cm^3，最小干密度为1.25 g/cm^3，颗粒直径范围为0.05～7.50 mm，中值粒径为0.75 mm，级配曲线如图1所示。

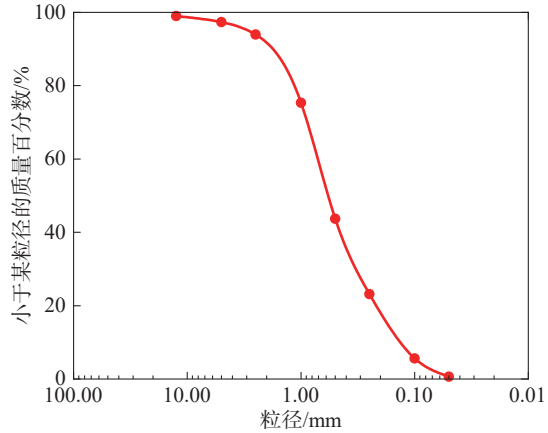


图1 珊瑚砂颗粒级配曲线

Fig. 1 Coral sand grain gradation curve

1.1.3 细菌和培养基

试验使用的细菌是尿素酶阳性芽孢杆菌，能够在碱性环境中生长和诱导碳酸钙沉淀。细菌生长培养基的成分如表2所示。培养基的pH控制在7.8左右。培养基的制备过程如下：在121 ℃高压灭菌25 min后，按1%（体积分数）比例接种，放在30 ℃、125 r/min的恒温振荡培养箱中培养36 h，收集微生物冷藏（2 ℃）直到使用。利用电导率法测定细菌活性，使用可见分光光度计测量600 nm波长处溶液的吸光度（OD_{600}），得出平均脲酶活性为(7.5±0.5) mmol/(L·尿素水解·min)，细菌悬液的平均光密度OD_{600}值为1.2。

表2 培养基成分

Tab. 2 Medium component

成分	胰蛋白胨	蛋白胨	尿素	氯化钠
质量浓度/(g·L^{-1})	37.5	12.5	50	12.5

1.1.4　胶结液

为了对比传统的水基MICP加固方法和黄原胶协同MICP方法的性能，采用两种不同的方法制备胶结液。一种方法是在去离子水中加入1 mol/L尿素和1 mol/L氯化钙，作为传统的水基MICP胶结液。另一种方法是先在传统的水基胶结液中掺入不同珊瑚砂质量百分比的黄原胶，再在磁力搅拌器(450 r/min、60 ℃)下持续搅拌3 h，作为改性MICP胶结液。胶结液成分如表3所示。

表3　胶结液成分

Tab. 3　Composition of cementing fluid

胶结液组别	黄原胶掺量/%	主要成分
MICP	0	
0.5%XG-MICP	0.5	
1.0%XG-MICP	1.0	氯化钙、尿素
1.5%XG-MICP	1.5	
2.0%XG-MICP	2.0	

1.2　试验方法

1.2.1　试样制备

本研究采用自行研制的珊瑚砂灌浆装置进行试样的制备，灌浆装置示意图与固化砂样如图2所示。首先，利用去离子水去除珊瑚砂表面杂质，放入烘箱中设置125 ℃温度烘干。接着，取少量标准粗砂，在模具出浆口处先铺一层1 mm厚的垫层，再铺纱布，并扣上橡胶塞。然后，将珊瑚砂分层填入直径为50 mm、高度为100 mm的圆柱状模具中，每层厚20 mm，每次填入后轻微压实，并且保证层与层之间表面平整，使其干密度达到最大干密度的80%，即1.45 g/cm^3。最后，在模具入浆口处铺上纱布，扣上橡胶塞。在灌浆过程中，为避免胶结液与菌液接触时间过短而使加固效果不理想，利用蠕动泵装置控制灌注速度在2 mL/min以下，整个灌浆过程的温度维持在室温(25±2) ℃。为了保证细菌的吸附量，在循环灌浆前先注入一倍孔隙体积即60 mL胶结液，静置2 h后再注入60 mL菌液，此后，静置6 h后灌入60 mL胶结液，如此循环4次。以上为1轮灌浆批次，重复循环上述过程，达到预定固化次数后停止灌浆。完成灌浆后，将砂柱和模具一起放入(25±2) ℃恒温箱中进行养护。达到预定养护时间后，将砂柱从模具中取出，放入温度为80 ℃的烘箱中烘干，得到固化后的砂柱试样。

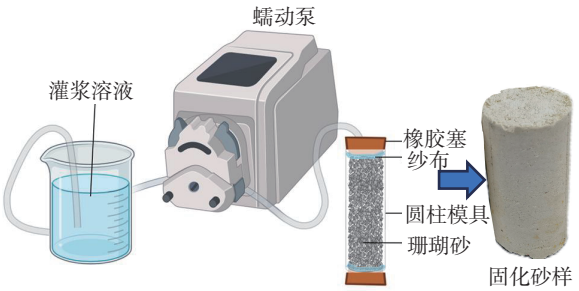


图2　灌浆装置示意图与砂样

Fig. 2　Grouting device and solidified sample

1.2.2　胶结过程的OD_{600}监测

从首次灌入细菌溶液开始，收集灌浆溢出液，利用分光光度计测其OD_{600}值，之后每隔12 h，记录一次OD_{600}值，当OD_{600}数值变为0时则停止监测。

1.2.3　胶结物质质量分数测定

采用称重法进行测定。先使用去离子水多次冲洗试样，将其中的溶质冲净后烘干，再称其质量m_1。试验前的砂样质量为m_2，则胶结物质的质量为m_1与m_2的差值。

1.2.4　SEM和XRD试验

SEM试验使用TESCAN MIRA LM型号仪器，试验前对试样进行抽真空喷金75 s处理。XRD试验使用Bruker D8 Advance型号仪器，2θ衍射角扫描范围为10°～80°，扫描速度为2 °/min，步长为0.02°。

1.2.5　无侧限抗压强度试验

采用YYW-2型无侧限压力仪，设置加载速率为0.8 mm/min，加载至试样破坏，利用千分表记录压力和位移值，从而得到试样的应力应变关系。试样的无侧限抗压强度为3组平行试样的平均峰值应力。

1.2.6　CT扫描试验

分别对MICP和1.0%XG-MICP两种胶结液处理前后的试样进行微观CT扫描，采用skysCan2211系列X射线高精度三维显微镜，最高扫描精度为0.5 μm，管电压为80 kV，管电流为100 μA，扫描的试样在高度方向有1 800个切片。在Avzio软件中分别加载4组CT扫描的二维原始图像(图3(a))，利用Interactive Threshold模块对图像进行阈值分割(图3(b))，重构三维孔隙结构(图3(c))，使用Volume Fraction和Label Analy-

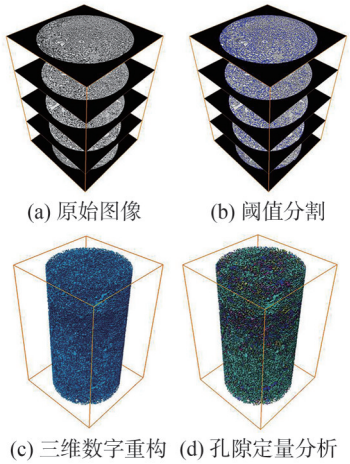


图3　CT图像处理过程示例

Fig. 3　Example of CT image processing procedure

sis模块进行孔隙数据的量化分析(图3(d)),得到砂样的孔隙率和等效孔隙直径等指标。

2 试验结果与分析

2.1 细菌留存率分析

胶结过程中不同试样的灌浆溢出液的OD_{600}如图4所示。由图4可见:试样的灌浆溢出液的OD_{600}均在12 h后迅速下降,MICP试样在48 h后OD_{600}降为0,掺入黄原胶的试样,36 h后OD_{600}全部降为0,说明细菌完全附着总时长均低于MICP处理试样。随着黄原胶掺量从0增加到2.0%,OD_{600}从灌浆前的1.20分别下降至0.41、0.33、0.16、0.25、0.29。其中,当掺入1.0%黄原胶时,OD_{600}的下降幅度最大,并且OD_{600}在24 h就降为0。这说明在相同时间内,使用掺入黄原胶的胶结液进行灌浆,可以保留更多细菌,因此,黄原胶掺量为1.0%时效果最好。这是由于黄原胶在砂颗粒间充当固定介质,有效减少细菌被胶结液冲出,从而提高细菌在试样中的留存率[23]。

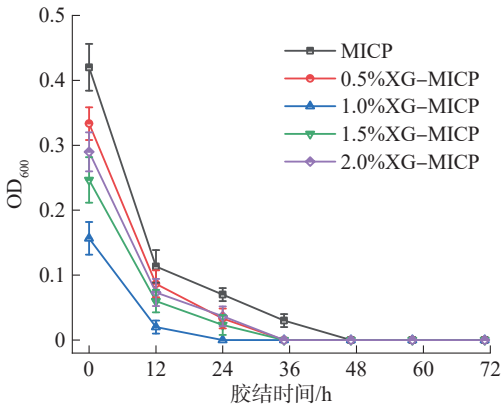


图4 不同试样的灌浆溢出液的OD_{600}变化

Fig. 4 OD_{600} change of grout overflow from different samples

2.2 无侧限抗压强度分析

在MICP作用下不同掺量黄原胶试样的应力-应变曲线、胶结物质质量分数以及无侧限抗压强度分别如图5、6所示。由图5可以看出:对于黄原胶掺量为0的试样,其应力-应变曲线具有明显的峰值,并且达到峰值后下降较快;然而,当掺入黄原胶后,应力-应变曲线整体呈现向右上移动的趋势,试样的弹性阶段明显增长,应力未表现出明显尖锐峰值;并且,当应力达到峰值后下降较缓,试样表现出较好的韧性。由图6可以看出:随着黄原胶掺量的增加,试样的无侧限抗压强度和峰值应变均有不同程度的增加,无侧限抗压强度增加了2.43～3.80 MPa,峰值应变增加了0.5%～1.0%;与MICP试样相比,1.0%掺量黄原胶试样的无侧限抗压强度和峰值应变的增加最为明显,分别增大了2.56倍和1.40倍。

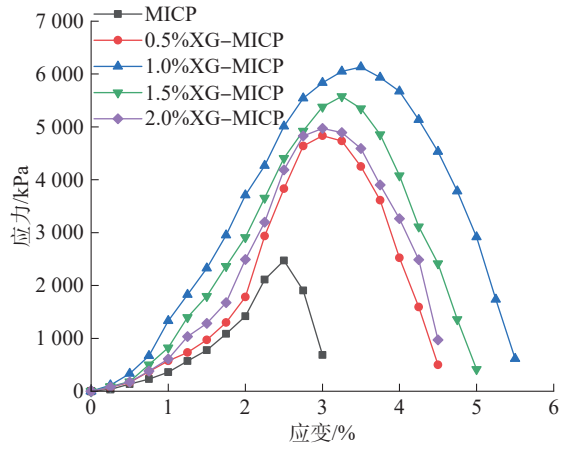


图5 不同掺量黄原胶试样的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of samples with different content of xanthan gum

由图6还可以看出:MICP处理的试样的胶结物质质量分数为13.57%。随黄原胶掺量的增加,各组试样的胶结物质质量分数明显增加,分别为20.84%、25.57%、24.82%和23.37%;当黄原胶掺量为1.0%时,与MICP处理的试样相比,其胶结物质质量分数增加了72.22%,其无侧限抗压强度达到最大,即6.23 MPa,强度最高增加幅度为77.18%。胶结物质质量分数与无侧限抗压强度成正相关,这是由于黄原胶会与砂土粒结合,形成砂土-生物聚合物,从而增加试验的胶结物质质量分数。当掺入的黄原胶超过1.0%时,其胶结物质质量分数呈现下降趋势,这是因为黄原胶水溶液的黏度增加幅度随着溶液浓度增大而增加[24],生成的胶结物质大量堆积在试样的上部和中部,从而影响试样下部胶结物质的生成。

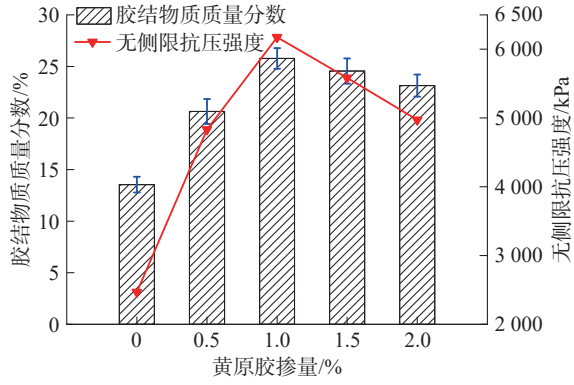


图6 不同掺量黄原胶试样的胶结物质质量分数及无侧限抗压强度

Fig. 6 Binder content and unconfined compressive strength with different mass fractions of xanthan gum

2.3 孔隙率分析

图7展示了MICP和1.0%XG-MICP两种胶结液处理前后的试样面孔隙率空间分布情况。由图7可见:两组胶结前的试样的体孔隙率为56.32%和55.92%。经过胶结处理后,MICP试样的体孔隙率为24.34%,而

1.0%XG−MICP试样的体孔隙率为15.61%，这表明黄原胶可以提高MICP过程的固化效果。对比图7的试样的面孔隙率可知，MICP试样的面孔隙率变化随切片高度增加而波动，其顶部的面孔隙率呈现均匀减小的趋势，而中部及底部的面孔隙率呈现无规则变化。这说明MICP作用下生成的碳酸钙主要集中堆积在试样的上部，并且容易发生堵塞，从而影响试样的整体性。然而，随切片高度增加，1.0%XG−MICP试样的面孔隙率整体呈现均匀变小的趋势，这说明黄原胶可以使MICP生成的碳酸钙更加均匀分布，从而有效增强试样整体的强度。

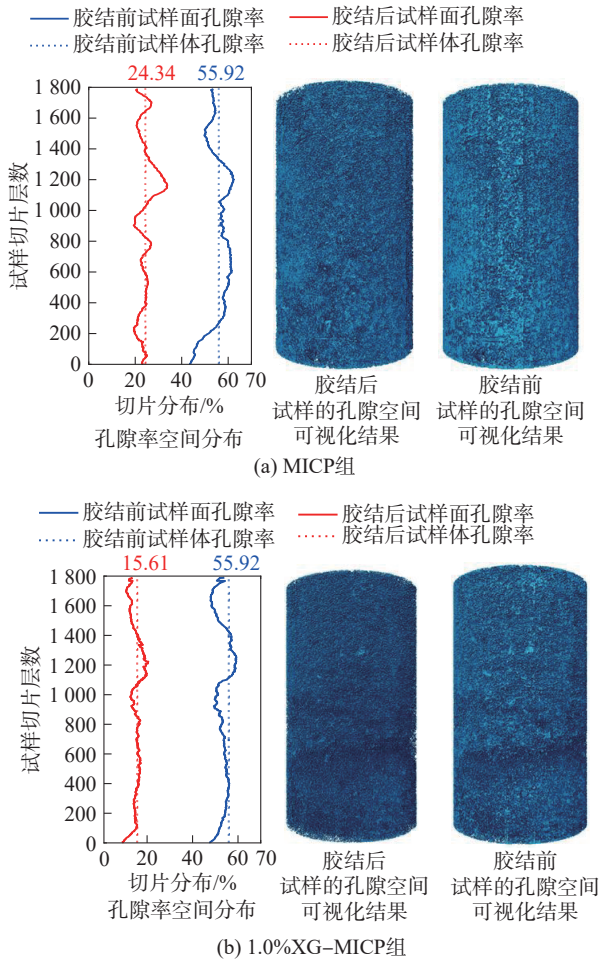


图7　MICP和1.0%XG−MICP试样胶结前后的孔隙率空间分布特征

Fig. 7　Spatial distribution characteristics of porosity of MICP and 1.0%XG−MICP specimens before and after cementation

在分析孔隙直径分布情况时，通过等效法将孔隙归一化为三维球体[25]，从而获得等效孔隙直径d，按照孔隙直径大小将所有孔隙分为8组，图8展示了MICP和1.0%XG−MICP两种胶结液处理前后的试样孔隙直径分布情况。由图8可见，胶结前的试样孔隙直径主要分布在500～1 000 μm之间，经过MICP胶结后的试样孔隙直径主要分布在75～250 μm之间，而经过1.0%XG−MICP胶结后的试样孔隙直径主要分布在25～75 μm之间。这说明黄原胶能够减小MICP试样中的孔隙直径，进一步降低大孔隙占比。

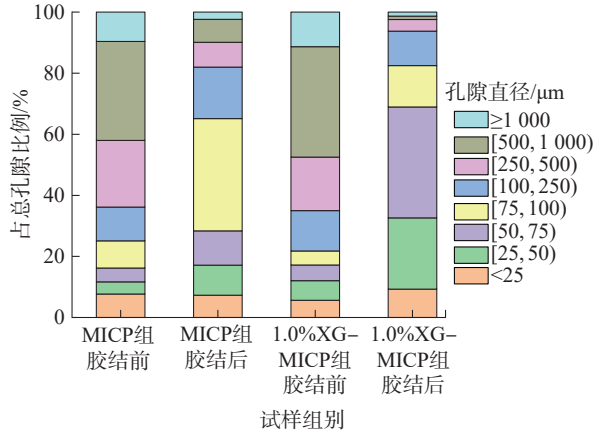


图8　MICP和1.0%XG−MICP试样胶结前后的孔隙直径分布情况

Fig. 8　Pore diameter distribution of MICP and 1.0%XG−MICP specimens before and after cementation

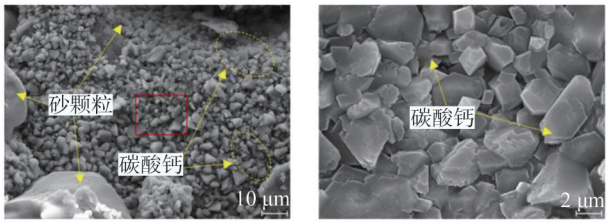
2.4　微观结构分析

在放大10 000倍和50 000倍的条件下，不同试样的SEM微观结构图像如图9所示，图9中，右图为左图的红框局部放大区域。

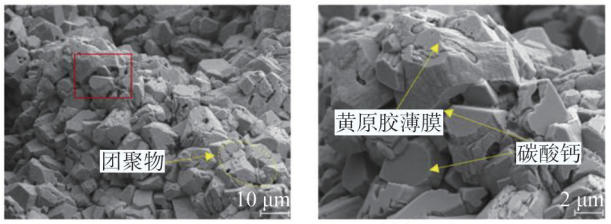
图9(a)为MICP试样的微观图像。由图9(a)可以看出，珊瑚砂颗粒表面生成了一定量不规则形状的碳酸钙晶体，这对孔隙有一定填充作用。然而，由于珊瑚砂颗粒骨架间的孔隙较大，并且生成的碳酸钙晶体未能将珊瑚砂颗粒完全包裹，使碳酸钙晶体对孔隙的填充效果及颗粒间的黏结作用不理想。这主要是因为在MICP过程中，成核位点通常为砂土颗粒表面、胶结液中的固体表面、气体气泡及细菌细胞表面[26]，但是，传统水基胶结液不具有黏性，不能提供足够多的成核位点。

掺入黄原胶后，试样的微观图像如图9(b)～(e)所示。从图9(b)～(e)可以观察到大量碳酸钙晶体，其表面均分布着一层黏性薄膜，该薄膜可以将碳酸钙晶体进行“桥接”。此外，碳酸钙晶体不仅分布在珊瑚砂颗粒表面，而且呈现团状聚集，填充了珊瑚砂颗粒骨架间的大体积孔隙，大大减少孔隙的数量及体积。在自然界中，碳酸钙的晶体类型主要以无定型碳酸钙、球霰石、文石、方解石4种形式存在，其中，方解石是四者中最稳定的形态，其最典型的形貌是六面体菱形状[27]。当黄原胶掺量低于1.0%时，碳酸钙晶体形貌呈现较为规则的六面体菱形状，这是因为黄原胶单链解旋并重新形成松散的多螺旋结构，引导大部分碳酸钙晶体重组形成方解石；当黄原胶掺量超过1.0%时，少

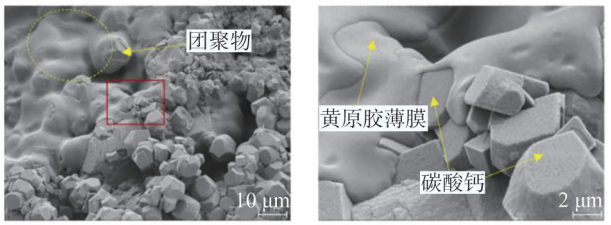
量碳酸钙晶体呈现六面体菱形状，而大部分呈现不规则形状。黄原胶可以与MICP作用形成的碳酸钙相互胶结，形成“黄原胶-碳酸钙”团聚体[28]，这可以更大程度吸附细菌，提供更多成核位点，改变胶结物质的空间大小、数量和分布，从而增强MICP作用下试样的孔隙填充和黏结效果，提高试样的整体强度。



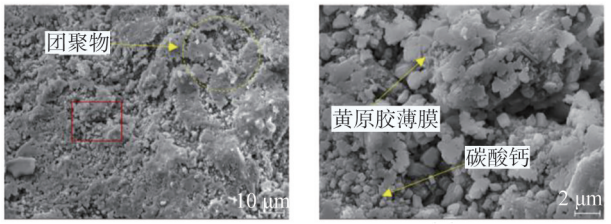
(a) MICP试样



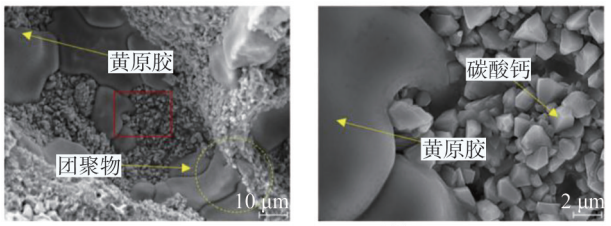
(b) 0.5%XG-MICP试样



(c) 1.0%XG-MICP试样



(d) 1.5%XG-MICP试样



(e) 2.0%XG-MICP试样

图 9　不同试样的微观图像

Fig. 9　Microscopic images of different samples

2.5　矿物成分分析

与PDF卡片(JCPDS PDF2 standard card 05-0586)进行对比分析，不同试样的XRD衍射图谱如图10所示。由图10可见：在未进行MICP作用下的珊瑚砂的XRD衍射图谱中，主要的衍射峰是霰石的特征峰。然而，在MICP作用下试样的XRD衍射图谱中，主要在29.4°出现新衍射峰。当掺入黄原胶后，XRD衍射图谱则在23.0°、29.4°、39.3°和47.5°处出现新的方解石衍射峰。当黄原胶掺量为1.0%时，新衍射峰的峰值最高，说明黄原胶对MICP作用下生成的碳酸钙晶体形貌有调控作用。这验证了SEM测试结果的正确性，即在黄原胶协同MICP固化作用后，生成的碳酸钙晶体主要是六面体菱形状的方解石。

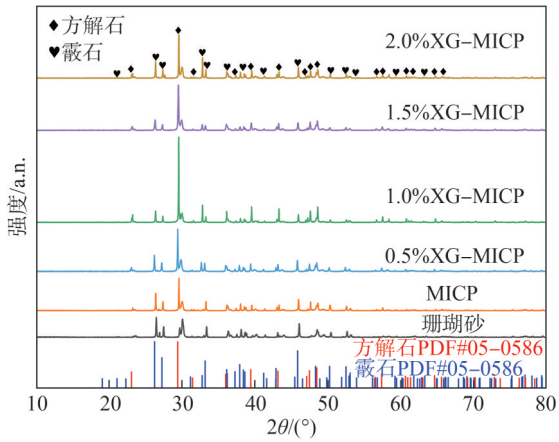


图 10　不同试样的XRD衍射图谱

Fig. 10　XRD patterns of different samples

3　黄原胶增强MICP作用的机制

图11(a)～(d)展示了黄原胶协同MICP的过程。首先，细菌附着在砂土颗粒表面，其代谢产生的胞外聚合物含有负离子基团，这些基团能够吸引胶结液中的钙离子；同时，细菌代谢产生的脲酶水解尿素，产生碳酸根离子；二者结合形成碳酸钙沉淀，从而达到加固砂粒的作用。由于MICP过程中，细菌通常吸附在砂土颗粒表面，所以碳酸钙的成核位点通常覆盖在砂土颗粒表面[29]。然而，胶结液在土体中的渗透性较强，灌浆过程中容易将细菌冲走，导致细菌留存率不理想，生成碳酸钙量较少。此外，灌浆容易使MICP过程中生成的碳酸钙堆积在试样上部，形成堵塞，从而影响反应的进行，降低试样的均匀性和整体强度。

参考Chang等[30]的研究可知，在黄原胶的分子结构中，侧链由甘露糖组成，其中，包含乙酰基、葡萄糖醛酸和甘露糖末端单元，该末端单元与丙酮酸基相连，葡萄糖醛酸和丙酮酸基团使黄原胶带高度负电荷，如图11(e)所示。黄原胶具有高黏附性，可以填充砂粒间的大孔隙，使其有更多的位点供特定的化学官能团与砂土中存在的离子发生化学反应，形成更强的化学键，增强颗粒之间的黏力。如图11(f)所示，由于黄原胶带负电荷，可以增加对钙离子的吸附作用，从而在砂土颗粒之间形成长链形的薄膜，进一步发挥吸附

作用。黄原胶在灌浆过程中可以降低砂土的渗透性，从而增加细菌在砂土中的留存率。黄原胶通过增加钙离子和碳酸根离子结合的成核位点，从而改变碳酸钙颗粒的排列方式，如图11(g)所示，在这种情况下碳酸钙颗粒团聚成一体，形成“黄原胶-碳酸钙”团聚物，如图11(h)所示，会在土颗粒之间形成“桥接效应”，优化砂土颗粒的孔隙结构，大幅度提高土体的密实度和强度。

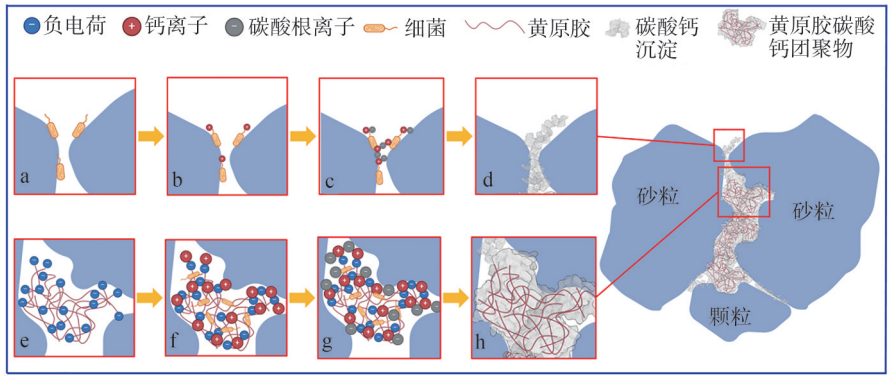


图11　黄原胶协同MICP胶结砂土的机制示意图

Fig. 11　Mechanism diagram of Xanthan gum and MICP cementing sand

4　结　论

本文以珊瑚砂为研究对象，采用黄原胶协同微生物诱导碳酸钙沉淀技术进行加固处理，系统研究了不同黄原胶掺量对固化珊瑚砂的影响规律，得到如下结论。

1)通过测试胶结过程中溢出液的OD_{600}，发现黄原胶能够提高细菌的留存率。与MICP试样相比，掺入0.5%～2.0%黄原胶后，胶结物质的质量分数增加了53.57%～88.43%，无侧限抗压强度分别提高了24.75%～77.18%。在黄原胶的掺量为1.0%时，无侧限抗压强度高达6.23 MPa，与纯MICP对照组相比，试样无侧限抗压强度提高幅度为190%。

2)CT扫描试验结果表明：相比于松散砂样，经MICP处理的砂样孔隙率由56.32%降至24.34%，降幅为31.98%，等效孔径主要分布在75～250 μm之间；掺入1.0%黄原胶后，砂样孔隙率由55.92%降至15.61%，降低了40.31%，等效孔径主要分布在25～75 μm之间。面孔隙率曲线的变化趋势表明掺入黄原胶的试样面孔隙率变化更为均匀，说明黄原胶可进一步减小MICP试样的大孔隙占比，增加砂样密实度。

3)SEM微观图像和XRD结果表明：MICP作用产生的碳酸钙晶体形状不均匀性高，主要分布在珊瑚砂颗粒表面；黄原胶协同MICP固化作用产生的碳酸钙晶体主要是方解石，呈六面体菱形状，并且沉淀量有所提高。

4)黄原胶分子末端带负电荷，且具有高黏度和高黏附性、亲水性及长链特性，为细菌富集提供成核位点，并且可以吸引更多钙离子，减缓渗流速度，留存胶结液，在珊瑚砂粒中形成“黄原胶-碳酸钙”团聚物，从而提升砂粒间的桥接效果，改善孔隙结构与力学效应。

参考文献：

[1] Lü Yaru,Wang Chong,Huang Houxu,et al. Study on particle structure and crushing behaviors of coral sand[J]. Rock and Soil Mechanics,2021,42(2):352-360.[吕亚茹,王冲,黄厚旭,等. 珊瑚砂细观颗粒结构及破碎特性研究[J]. 岩土力学,2021,42(2):352-360.]

[2] Zhu Changqi,Chen Haiyang,Meng Qingshan,et al. Microscopic characterization of intra-pore structures of calcareous sands[J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(7):1831-1836.[朱长歧,陈海洋,孟庆山,等. 钙质砂颗粒内孔隙的结构特征分析[J]. 岩土力学,2014,35(7):1831-1836.]

[3] Zhou Ying,Zhang Hongwei,Cai Bofeng,et al.Synergetic reduction of local pollutants and CO_2 from cement industry[J]. Environmental Science & Technology,2013,36(12):164-168.[周颖,张宏伟,蔡博峰,等. 水泥行业常规污染物和二氧化碳协同减排研究[J]. 环境科学与技术,2013,36(12):164-168.]

[4] Bonacci O,Gottstein S,Roje-Bonacci T.Negative impacts of grouting on the underground karst environment[J].Ecohydrology,2009,2(4):492-502.

[5] An Ran,Gao Haodong,Zhang Xianwei,et al.Mechanical behaviour and microstructure of granite residual biocemented soil by microbially induced calcite precipitation with different cementation–solution concentrations[J].Environmental Earth Sciences,2023,83(1):31.

[6] Fang Xiangwei,Shen Chunni,Chu Jian,et al.An experimental study of coral sand enhanced through microbially-induced precipitation of calcium carbonate[J]. Rock and Soil Mechanics,2015,36(10):2773-2779.[方祥位,申春妮,楚剑,等. 微生物沉积碳酸钙固化珊瑚砂的试验研究[J]. 岩土力学,2015,36(10):2773-2779.]

[7] Fang Xiangwei,Li Jingxin,Li Jie,et al.Damage constitutive model of biocemented coral sand columns under unconfined compression[J].Chinese Journal of Underground

Space and Engineering,2018,14(5):1234−1239.[方祥位,李晶鑫,李捷,等. 珊瑚砂微生物固化体单轴损伤本构模型[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(5):1234−1239.]

[8] Fang Xiangwei,Li Jingxin,Li Jie,et al.Study of triaxial compression test and damage constitutive model of biocemented coral sand columns[J].Rock and Soil Mechanics, 2018,39(Supp1):1−8.[方祥位,李晶鑫,李捷,等. 珊瑚砂微生物固化体三轴压缩试验及损伤本构模型研究[J]. 岩土力学,2018,39(增刊1):1−8.]

[9] Li Hao,Tang Chaosheng,Liu Bo,et al.Mechanical behavior of MICP-cemented calcareous sand in simulated seawater environment[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2020,42(10):1931−1939.[李昊,唐朝生,刘博,等. 模拟海水环境下MICP固化钙质砂的力学特性[J]. 岩土工程学报,2020,42(10):1931−1939.]

[10] Liu Hanlong,Ma Guoliang,Xiao Yang,et al.*In situ* experimental research on calcareous foundation stabilization using MICP technique on the reclaimed coral reef islands[J]. Journal of Ground Improvement,2019,1(1):26−31.[刘汉龙,马国梁,肖杨,等. 微生物加固岛礁地基现场试验研究[J]. 地基处理,2019,1(1):26−31.]

[11] Li Mingdong,Li Lin,Ogbonnaya U,et al.Influence of fiber addition on mechanical properties of MICP-treated sand [J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2016,28(4): 04015166.

[12] Dehghan H,Tabarsa A,Latifi N,et al. Use of xanthan and guar gums in soil strengthening[J]. Clean Technologies and Environmental Policy,2019,21(1):155−165.

[13] Hataf N,Ghadir P,Ranjbar N.Investigation of soil stabilization using chitosan biopolymer[J]. Journal of Cleaner Production,2018,170:1493−1500.

[14] Xu Xichen,Guo Hongxian,Cheng Xiaohui,et al. The promotion of magnesium ions on aragonite precipitation in MICP process[J]. Construction and Building Materials, 2020,263:120057.

[15] Wei Renjie,Peng Jie,Li Liangliang,et al.Accelerated reinforcement of calcareous sand *via* biomineralization with aluminum ion flocculant[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology,2023,195(12):7197−7213.

[16] Huang Chengdong,Bai Xuefang,Du Yuguang.Xanthan gum: Production,properties and application[J].Microbiology,2005, 32(2):91−98.[黄成栋,白雪芳,杜昱光. 黄原胶(Xanthan Gum)的特性、生产及应用[J]. 微生物学通报,2005,32(2): 91−98.]

[17] Reddy J J,Varaprasad B J S.Long−term and durability properties of xanthan gum treated dispersive soils—An eco-friendly material[J].Materials Today: Proceedings,2021,44: 309−314.

[18] Kwon Y M,Chang I,Cho G C.Consolidation and swelling behavior of kaolinite clay containing xanthan gum biopolymer[J].Acta Geotechnica,2023,18(7):3555−3571.

[19] Lee S,Chang I,Chung M K,et al.Geotechnical shear behavior of Xanthan Gum biopolymer treated sand from direct shear testing[J]. Geomechanics and Engineering, 2017, 12 (5):831−847.

[20] Lin Hongmin, Wei Renjie, Li Liangliang, et al. Reinforcement effect of MICP improved by xanthan gum[J]. Henan Science,2022,40(4):618−627.[林泓民,卫仁杰,李亮亮,等. 黄原胶改进MICP加固效果的试验研究[J]. 河南科学, 2022,40(4):618−627.]

[21] Hang Lei,He Jia,Song Wenzhi,et al.Laboratory test on microbially induced carbonate precipitation combined with xanthan gum for sand reinforcement[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization,2021,35(6):29−33.[杭磊,何稼,宋文智,等. 微生物诱导碳酸钙沉积联合黄原胶加固砂土室内试验研究[J]. 粉煤灰综合利用,2021,35(6):29−33.]

[22] Xu Long,Xu Guiying,Liu Teng,et al. The comparison of rheological properties of aqueous welan gum and xanthan gum solutions[J].Carbohydrate Polymers,2013,92(1): 516−522.

[23] Yao Dunfan,Wu Jiao,Niu Shuang,et al.An anionic biopolymer γ−polyglutamate enhanced the microbially induced carbonate precipitation for soil improvement: Mechanical behaviors and underlying mechanism[J].Acta Geotechnica,2022,17(10):4485−4496.

[24] Hu Jianguo,Zhao Ling,Dai Gance. Rheological properties of xanthan gum solutions[J].Journal of East China University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2011,37(1):16−19.[胡建国,赵玲,戴干策. 黄原胶水溶液的流变性能[J]. 华东理工大学学报(自然科学版),2011, 37(1):16−19.]

[25] An Ran,Chen Chang,Niu Yuzhang.μ−CT tests and seepage simulations of residual soil under the influence of wetting−drying cycles[J].Advanced Engineering Sciences,2024,56(2): 228−235.[安然,陈昶,牛玉璋. 考虑干湿循环影响的残积土μ−CT扫描与渗流模拟[J]. 工程科学与技术,2024, 56(2):228−235.]

[26] Zehner J,Røyne A,Sikorski P.Calcite seed-assisted microbial induced carbonate precipitation (MICP)[J].PLoS One, 2021,16(2):e0240763.

[27] Cheng Liang,Cord-Ruwisch R,Shahin M A. Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation[J]. Canadian Geotechnical Journal,2013,50(1):81−90.

[28] Xu Wei,Liu Huang,Lou Yucui,et al.Biomimetic mineralisation of calcium carbonate using xanthan gum as morphology control agent[J].Micro & Nano Letters,2019,14(6):642−644.

[29] Xu Wei,Lou Yucui,Xu Bin,et al.Mineralized calcium carbonate/xanthan gum microspheres for lysozyme adsorption[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2018,120:2175−2179.

[30] Chang I,Im J,Prasidhi A K,et al.Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening[J]. Construction and Building Materials,2015,74:65−72.

Study on Mechanical Properties and Microscopic Mechanism of Xanthan Gum Enhanced Microbial Solidification of Coral Sand

AN Ran[1,2], *DENG Cheng*[2], *ZHANG Xianwei*[3], *GE Xiaohang*[2], *YIN Song*[3], *WANG Yixian*[1*]

(1.School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2.Institute of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;
3.State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract:

Objective This study enhances the physical and mechanical properties of coral sand through an innovative reinforcement technology that utilizes xanthan gum in conjunction with microbial induced calcium carbonate precipitation (MICP). It improves the stability and strength of coral sand, which are critical for various engineering applications, particularly in the construction and reinforcement of island and reef foundations. The significance of this research lies in addressing the limitations of traditional reinforcement methods by incorporating a biopolymer (xanthan gum) into the MICP process, proposing a novel solution with potentially enhanced performance and environmental benefits.

Methods Coral sand samples were prepared with varying xanthan gum contents ranging from 0.5% to 2.0% and were subjected to the MICP process. The microbial culture used in the MICP process facilitated the precipitation of calcium carbonate within the sand matrix. The mechanical properties of the treated coral sand were evaluated using unconfined compressive strength (UCS) tests. These tests measured the maximum load that the samples withstood before failure and provided a quantitative assessment of the reinforcement effect. Scanning electron microscopy (SEM) and X－ray diffraction (XRD) analyses were conducted to observe the microstructural changes and mineralogical composition of the treated samples. These techniques helped explain the nucleation and growth of calcium carbonate crystals facilitated by the presence of xanthan gum. Computed tomography (CT) scanning was utilized to evaluate the internal structure of the samples, with particular focus on porosity and equivalent pore size. This nondestructive method provided insights into the overall compactness and integrity of the reinforced coral sand.

Results and Discussions The addition of xanthan gum resulted in a substantial increase in the binding material within the coral sand. Specifically, the binding material content increased by 53.57% to 88.43% with the incorporation of 0.5% to 2.0% xanthan gum, respectively. This enhancement indicated that xanthan gum effectively raised the formation of binding agents within the sand matrix. The unconfined compressive strength of the samples showed remarkable improvement following the addition of xanthan gum. At a xanthan gum content of 1.0%, the UCS reached 6.23 MPa, representing an increase of 2.56 times compared to the control samples without xanthan gum. This significant improvement in strength demonstrated the effectiveness of xanthan gum in enhancing the load-bearing capacity of coral sand. SEM and XRD analyses revealed that xanthan gum provided additional nucleation sites for the formation of calcium carbonate crystals. The presence of xanthan gum facilitated the growth of larger hexahedral rhombic calcite crystals, which contributed to the formation of “xanthan gum－calcium carbonate” agglomerates. These agglomerates played a crucial role in enhancing the bonding strength between sand particles, producing a more cohesive and stable structure. CT scanning results indicated that the addition of xanthan gum significantly reduced the porosity and equivalent pore size of the coral sand samples. The improved particle arrangement indicated a denser and more compact structure, which enhanced the overall stability and durability of the reinforced sand.

Conclusions Xanthan gum increases the binding material content within the sand matrix, improving cohesion and stability. The unconfined compressive strength of coral sand is significantly enhanced by the addition of xanthan gum, indicating its potential for high-load-bearing applications. Microstructural analysis shows that xanthan gum raises the formation of larger and more stable calcium carbonate crystals, contributing to stronger particle bonding. The reduction in porosity and pore size, as revealed by CT scanning, highlights the improved compactness and integrity of the reinforced sand. The research demonstrates the theoretical and practical significance of using xanthan gum in conjunction with MICP for coral sand reinforcement. The findings provide valuable insights into the design and construction of island and reef foundation reinforcement projects, providing a novel approach that combines biological and chemical methods to achieve superior performance and environmental sustainability.

Key words: microbial induced calcium carbonate precipitation (MICP); coral sand; xanthan gum; mechanical properties; microscopic mechanism

（编辑　赵　婧）

引用格式: An Ran,Deng Cheng,Zhang Xianwei,et al.Study on mechanical properties and microscopic mechanism of xanthan gum enhanced microbial solidification of coral sand[J].Advanced Engineering Sciences,2026,58(3):155–163.[安然,邓成,张先伟,等.黄原胶协同MICP加固珊瑚砂的力学特性和微观机制研究[J].工程科学与技术,2026,58(3):155–163.]