

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020110904

珊瑚碎屑颗粒内孔隙特性微观试验研究*

张 钰¹, 丁选明^{1,2}, 彭 宇¹, 蒋春勇¹

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 珊瑚碎屑是一种特殊的岩土材料, 其显著特征是存在大量的内孔隙。为了深入揭示珊瑚碎屑内孔隙特性, 通过电镜扫描(SEM)和压汞试验(MIP), 分别定性和量化地分析了珊瑚碎屑颗粒表面及内部孔隙形态特征和分布规律。结果表明: 珊瑚碎屑存在由珊瑚虫生长和微生物共生形成的两类大小、形态及分布不同的内孔隙; 珊瑚碎屑的整体孔隙度为9%~25%, 由珊瑚虫生长而形成的孔隙等效直径为10~200 μm ; 由微生物形成的孔隙面孔隙度低, 孔隙直径多为4 μm 以下, 且等轴或不等轴孔隙占绝大部分。

关键词: 珊瑚碎屑; 内孔隙; 电镜扫描试验; 压汞试验; 图像处理

中图分类号: TU451 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)03-0497-07

Experimental Study on Inner Pore Morphology of Coral Clastic Particles

ZHANG Yu¹, DING Xuanming^{1,2}, PENG Yu¹, JIANG Chunyong¹

(1. College of civil engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing 400045, China)

Abstract: Coral clast is a special material in geotechnical engineering, containing massive inner pores. In order to thoroughly determine the inner pore morphology of coral clastic particles, scanning electron microscope (SEM) and mercury injection test (MIP) were used in this paper, and distributions of surface and internal inner pore morphologies were characterized qualitatively and quantitatively, respectively. The results reveal that two types of inner pores with different sizes, geometry morphologies and distributions formed by coral polyps and symbiotic microorganism growing process exist in coral clast particles. Inner porosities of coral clast particles range from 9% to 25%, and the equivalent pore diameters of coral polyps growing pores are between 10 and 100 μm . In comparison, the symbiotic microorganism growing pores present a low surface inner porosity, with major equivalent pore diameters under 4 μm , and equiaxial and unequal axis pores have been the dominant portion.

Keywords: coral clasts; inner pore; scanning electron microscope; mercury injection test; image processing

* 收稿日期: 2020-04-27; 修回日期: 2020-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(51878103, 41831282)资助

作者简介: 张钰(1997—), 男, 硕士研究生。主要从事土力学及桩基力学性能方面的研究。E-mail: zyyx2003@163.com

通讯作者: 丁选明(1980—), 男, 教授, 博导。主要从事地基基础工程方面的研究。E-mail: dxmhu@163.com

引言

我国的南海海域有分布较广的珊瑚岛礁,目前正在以珊瑚礁岩为地基兴建大量的战略性工程,但珊瑚礁岩的易碎性、多孔性和高压缩性,使得这一特殊岩土的工程力学性质与陆相岩土差异较大,因此近年来,珊瑚礁的岩土地基问题成为学术界关注的热点。

珊瑚碎屑是典型的高钙质颗粒,主要由文石和方解石组成^[1],独特的生物成因使珊瑚碎屑除具有传统的粒间孔隙外,还存在大量的颗粒内孔隙^[2],这一特性对其破碎性、压缩性、饱和度和强度等力学性质都有显著影响^[3-7]。刘崇全^[8]通过电镜扫描(SEM)首次发现了珊瑚砂的内孔隙形态与分布;吕海波等^[9]采用压汞法测定了珊瑚砂的孔径大小及分布特性;陈海洋^[10]、朱长歧等^[11]采用不同试验方法度量了珊瑚砂颗粒的分形维数、面孔隙度、孔隙大小和形状系数等;蒋明镜等^[12]通过电镜扫描技术分析了珊瑚砂孔隙的连通性,认为大部分孔隙仅存在于表面且不连通,进而推测内部孔隙度远小于面孔隙度。

上述工作为珊瑚类工程材料的孔隙特性研究奠定了基础,但主要集中于材料表面孔隙的形状、大小等方面,而对珊瑚碎屑颗粒的内孔隙结构特征研究尚需深入。本文通过电镜扫描(SEM)和压汞试验(MIP),结合图像数字化技术,定性和定量分析珊瑚碎屑颗粒的表面及内部孔隙形态特征,并探讨其分布规律,以期为这种材料的工程应用提供参考。

1 试验方法

1.1 试样制备

试验用珊瑚碎屑取自南海某岛礁,X射线衍射仪(XRD)的分析结果如图1所示,其主要成分是 CaCO_3 。制作图2所示的试样,在恒温烘干箱中以 65°C 温度烘干3天。为了不破坏其内孔隙形态和结构,用小型合金刀沿珊瑚骨骼主生长轴方向切出5个粒径为 $3\sim 5\text{ mm}$ 、表面平整的珊瑚碎屑颗粒试样,编号为1~5。

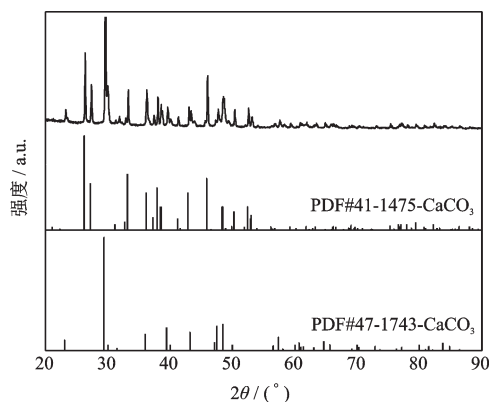


图1 珊瑚碎屑的XRD物相分析结果
Fig.1 XRD analysis result of coral clasts



图2 珊瑚碎屑试样
Fig.2 Coral clasts samples

1.2 电镜扫描

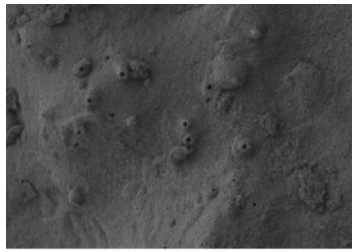
1.2.1 试验过程

在重庆大学材料学院实验室采用SBC-12小型离子溅射仪对试样进行喷金预处理后,应用Zeiss Auriga FIB-SEM双束电镜系统进行扫描。设备的主要参数为:分辨率 $1.0\text{ nm}@15\text{ kV}\sim 1.9\text{ nm}@1\text{ kV}$,放大倍数 $12\sim 1\,000\,000$ 倍,加速电压 $0.1\sim 30\text{ kV}$ 。喷金时间为 20 s 、次数为6次。在碎屑表面被金粉完全覆盖后,对每个样品分别进行100、200、500、1 000、2 000、3 000倍和4 000倍的放大倍率扫描成像。

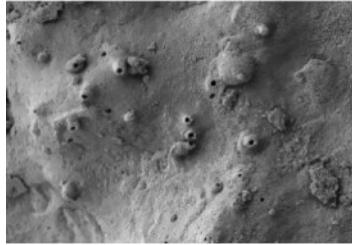
1.2.2 电镜扫描(SEM)图像处理及孔隙信息获取

SEM图像中存在的随机噪声会干扰孔隙信息的获取,影响结果精度,故本文在对比高斯滤波、盒式滤波、中值滤波、递归滤波、非局部均值滤波等5种常用降噪滤波算法后,采用非局部均值滤波算法对扫描所得照片进行降噪处理^[13-14],以达到在保留有效图像信息的同时,最大程度过滤噪声干扰像素的目的。降噪前后的对比图像如图3所示。

降噪处理后,通过阈值分割和二值化处理^[15]方法提取内孔隙信息。依据滤波后的灰度图像选定最优灰度阈值,赋值灰度值大于该阈值的像素(即



(a) 滤波前

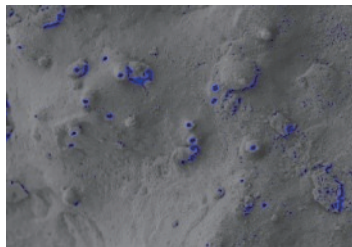


(b) 滤波后

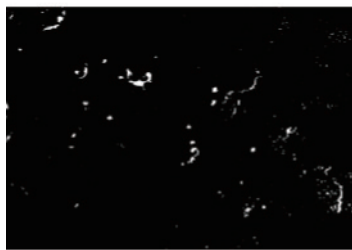
图3 图像降噪处理前后对比

Fig.3 Comparison between the images before and after the noise reduction process

珊瑚碎屑颗粒骨架)为1,赋值小于该阈值的像素(即内孔隙)为0,以有效分离碎屑骨架与内孔隙,获得内孔隙图像信息,如图4所示。



(a) 阈值分割



(b) 二值化处理

图4 珊瑚碎屑内孔隙提取过程

Fig.4 Extracting process of inner pores in coral clasts

1.3 压汞试验

加压使汞进入固体材料孔隙,当汞的表面张力与外加压力平衡时,被汞入侵的孔隙体积是压力的函数,即:

$$Pr = -2\sigma\cos\theta \quad (1)$$

式中, P 为外加压力; r 为圆柱体孔隙的半径; θ 为汞

对材料的接触角,常取为 140° ; σ 为汞的表面张力系数,常取为 $0.48\text{ N/m}^{[16]}$ 。

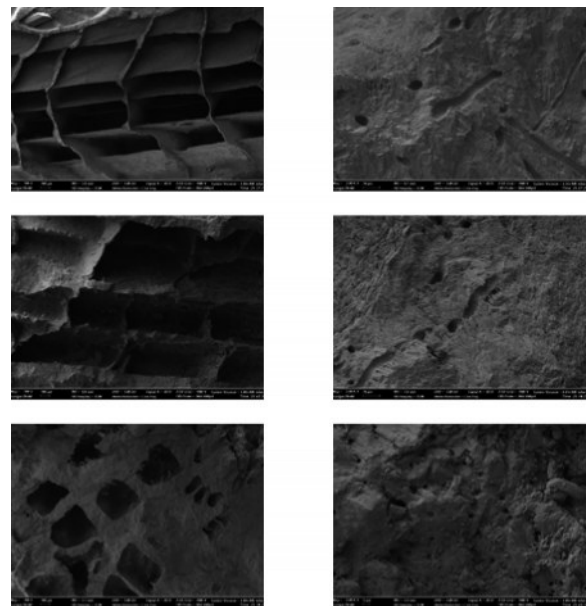
压汞试验采用重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室的Poremaster-33全自动压汞仪完成,配套有一个高压和两个低压样品分析站,低压范围为 $1.5\sim 350\text{ kPa}$,高压范围为 $140\sim 231\text{ kPa}$;可测量的孔径分布范围为 $0.0064\sim 950\ \mu\text{m}$,其中,对于直径在 $7\ \mu\text{m}$ 以上的孔隙,采用低压样品分析站进行测量。均采用逐级加压的方式完成试验,得到注汞及退汞两类曲线。由于滞迟现象和汞的残留将极大干扰退汞曲线的精确度^[17-18],本文基于注汞曲线来分析珊瑚碎屑的内孔隙特征。

2 试验结果及分析

2.1 内孔隙形态及成因分析

由SEM图像,观察到珊瑚碎屑颗粒存在两种形态与尺度的内孔隙:(1)在500倍及以下的低放大倍数图像中,内孔隙呈长方体状,类似竹节,且排列规律,每个孔隙之间被骨架隔开,孔隙长度约为上百微米级,如图5(a)所示;(2)在1000倍及以上的高放大倍数图像中,孔隙为微小圆孔,且由表面伸入碎屑内部,分布分散,孔隙直径约为 $1\sim 4\ \mu\text{m}$,如图5(b)所示。

造礁珊瑚为珊瑚虫生长过程中分泌的碳酸钙外



(a) 珊瑚虫生长形成孔隙

(b) 共生微生物形成孔隙

图5 珊瑚碎屑两类孔隙电镜扫描图

Fig.5 SEM images of two types of inner pores in coral clasts

骨骼沉积物,珊瑚幼虫找到固着环境后,体壁基部外胚层细胞分泌钙质底盘和边缘外壁,随着幼虫向上生长,软体不断上移,骨骼累加,并逐渐分泌出隔壁、横板、鳞板、泡沫板等纵横向结构^[19]。已有研究表明,珊瑚常与藻类、细菌、真菌等微生物共生而形成共生功能体^[20],这些微生物也以珊瑚的碳酸钙骨骼为生长场所,并造成对珊瑚骨骼的侵蚀现象^[21-24],M. Zubia等^[25]还在造礁珊瑚骨骼中发现了鞭鞘藻的钻孔痕迹(5 μm)和钻孔织线藻的孔洞(2 μm);谢露华等^[26]在珊瑚的隔壁中也发现了不同于正常珊瑚孔洞的微孔,其直径约1 μm;叶承等^[27]在鹿角杯型珊瑚骨骼的鳞板及环壁结构上观察到了直径约2 μm的侵蚀孔洞及残留的钻孔生物。图5(b)所获的微小圆孔极可能为此类珊瑚共生或穴居微生物的生活痕迹或遗骸,具体信息尚待深入分析。

2.2 珊瑚碎屑颗粒表面孔隙参数计算

基于图像处理后的500、1 000、2 000、3 000倍和4 000倍放大倍率扫描成像,对碎屑颗粒表面的微小圆孔进行孔隙形态特征(面孔隙度、等效孔隙直径分布、孔隙形状系数)参数的计算分析。

2.2.1 面孔隙度

面孔隙度 n_a 定义为孔隙面积 S_a 与总面积 S 之比:

$$n_a = \frac{S_a}{S} \times 100\% \quad (2)$$

其中,总面积为图像中所有孔隙与珊瑚碎屑骨架面积的总和。 n_a 的统计结果如图6所示,可见珊瑚碎屑颗粒的面孔隙度低于4%,且颗粒之间差异较大。

2.2.2 等效孔隙直径分布

由SEM扫描结果,本文的1 000倍放大成像捕获了更多的微小圆孔,且相对于低放大倍数而言避开了大尺寸孔隙的影响,故选择该放大倍数下的图像进行等效孔隙直径的分布分析。将孔径大小分为3个类型,即:① $0 \mu\text{m} < D \leq 4 \mu\text{m}$;② $4 \mu\text{m} < D \leq 10 \mu\text{m}$;③ $10 \mu\text{m} < D \leq 100 \mu\text{m}$,分类统计结果如图7所示。由图7可见,3号试样的三类孔隙占比相当;其余试样直径在 $0 \sim 4 \mu\text{m}$ 的孔隙数量极多,占总孔隙数的60%~90%;直径在 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 的孔隙占比小于14%;未发现直径大于 $100 \mu\text{m}$ 的孔隙。

2.2.3 孔隙平面形状系数

孔隙平面形状系数 K_f 用于衡量孔隙与圆的相似程度,可按式计算:

$$K_f = \frac{P_1}{P} = \frac{\sqrt{4\pi S}}{P} \quad (3)$$

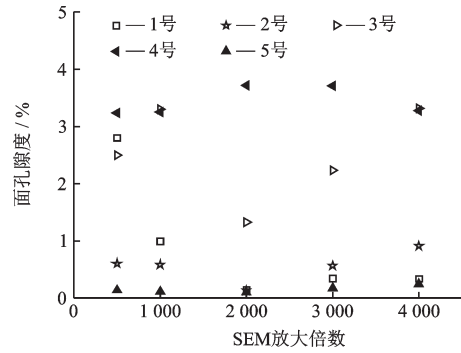


图6 珊瑚碎屑的面孔隙度

Fig.6 Surface porosity of coral clasts

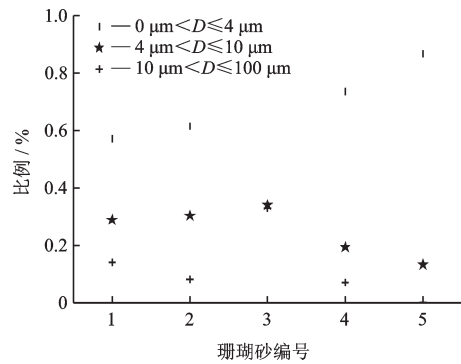


图7 珊瑚碎屑表面孔径分布曲线

Fig.7 Surface pore size distribution of coral clasts

式中, S 为孔隙面积; P_1 为当量圆的周长; P 为孔隙周长。

上式表明孔隙与圆的相似程度越大时,其平面形状系数越大。由于孔隙通常为非标准几何平面,可将其视为椭圆形^[28],并依据其长半轴与短半轴的比值分为三个类别:当比值小于1.5时,为等轴孔隙(比值为1.5时, $K_f=0.97$);当比值在1.5~10时,为不等轴孔隙(比值为10时, $K_f=0.47$);当比值在10以上时,为缝隙状孔隙,且比值越大,孔隙平面形状系数 K_f 越小。本文1 000倍放大成像SEM图中孔隙的形状统计结果见表1。

孔隙平面形状系数的理论最大值为1,但对于

表1 不同形状内孔隙占比情况

Table 1 Percentage of varied shapes of inner pores

珊瑚碎屑编号	单位: %		
	等轴孔隙 (>0.97)	不等轴孔隙 (0.47~0.97)	缝隙状孔隙 (<0.47)
1	24.0	69.3	6.7
2	28.3	66.0	5.7
3	3.2	79.0	17.7
4	37.6	60.6	1.8
5	40.0	60.0	0.0

极微小的孔隙,在进行像素参数计算时将产生误差,使得形状系数值大于1。为提高结果准确度,本文只采用孔隙像素面积值大于10的孔隙参与计算^[11]。可见,珊瑚碎屑微小圆孔中等轴或不等轴孔隙占绝大部分,占比平均值为93%,其中不等轴孔隙多于等轴孔隙;缝隙状孔隙极少。

2.3 珊瑚碎屑颗粒整体孔隙参数计算

由于SEM图像只能观察到珊瑚碎屑颗粒的表面孔隙,无法获取颗粒内部孔隙的形态特征,故依据压汞试验结果来分析颗粒的整体孔隙度和孔隙直径分布。

2.3.1 整体孔隙度

通过注汞体积换算得到孔隙度 n :

$$n = 100 \left(1 - \frac{\rho_{\text{Hg}}}{\rho_{\text{He}}} \right) \quad (4)$$

式中, ρ_{Hg} 为汞的密度; ρ_{He} 为氦的密度。

按上式计算的珊瑚碎屑试样颗粒孔隙度与孔隙总表面积的结果见表2。可见,珊瑚碎屑试样的颗粒整体孔隙度在9.44%~25.84%,所有试样的均值为17.85%,其中4号珊瑚碎屑的孔隙度最高,3号珊瑚碎屑的孔隙度最低。压汞试验所得的颗粒整体孔隙度包含了珊瑚生长形成的大孔隙和由微生物形成的微孔隙,且既包含了颗粒表面孔隙,又包含了与外表面连通的内部孔隙,故所得结果远高于前述SEM图像统计计算的由微生物形成的微小圆孔的面孔隙度(均小于4%),例如,4号试样的颗粒整体孔隙度(约25.8%)约为其SEM图计算面孔隙度(约0.3%)的86倍,结合SEM图像可知,其颗粒的整体孔隙在尺度和数量上都远大于由微生物形成的微孔隙。

2.3.2 整体等效孔隙直径分布

基于注汞曲线所得孔隙分布曲线如图8所示,

表2 珊瑚碎屑颗粒的孔隙统计结果

Table 2 Statistical results of porosity of coral clastic particles

试样编号	孔隙度/%	孔隙总表面/ ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)
1	24.153 5	0.686 5
2	12.514 8	0.175 1
3	9.440 2	1.675 7
4	25.838 9	1.727 0
5	12.074 3	0.653 4

纵坐标为孔径分布密度 E 的对数坐标, E 可按下式计算:

$$E = \frac{dV}{d(\lg D)} \quad (5)$$

式中, V 为注汞体积; D 为孔隙直径。

可见,孔隙直径在0.01~0.030 μm 、0.32~3.98 μm 、10~200 μm 三个区间内的分布密度较大。前述SEM图像及1000放大倍数下的面等效孔径分析结果表明,微生物形成的微小孔隙的直径多为0~4 μm ,与压汞试验所得的0.01~0.030 μm 、0.32~3.98 μm 结果相一致,说明微生物形成的孔隙直径基本在4 μm 以下。压汞试验中,未发现直径大于200 μm 的孔隙,而SEM图像中观察到由珊瑚生长形成的孔隙大多为80~300 μm ,其原因为:珊瑚生长形成的竹节状孔隙是被隔膜隔断的封闭孔隙,与外界并不连通,致使压汞试验时汞无法被压入,所以只能测量颗粒表面的孔隙或是少量内部的连通孔隙;式(5)将孔隙等效为球形计算时,位于颗粒表面的孔隙由于在制样时被人为剖开,不再是一个完整的孔隙,因此按照注汞体积换算的等效直径小于其真实直径。

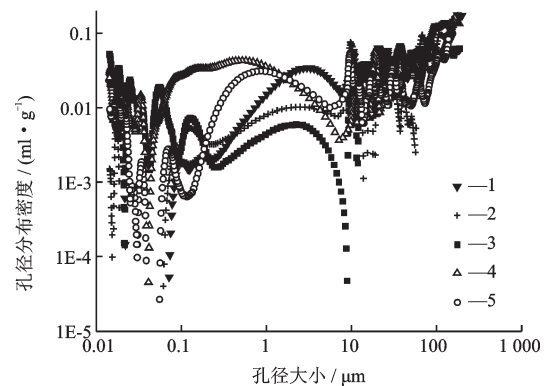


图8 珊瑚碎屑颗粒孔隙分布曲线

Fig.8 Pore diameter curves of coral clastic particles

3 结论

(1)南海岛礁的珊瑚碎屑存在两种内孔隙:其一为珊瑚虫生长形成的方形结构,几何尺寸较大,排布整齐规律;其二为微生物共生形成的微小圆孔,直径较小、分布分散、无明显规律性。

(2)共生微生物形成的孔隙面孔隙度低,孔隙直径多为4 μm 以下,等轴或不等轴孔隙占绝大部分。

(3)珊瑚碎屑试样的整体孔隙度为9%~25%,

珊瑚虫生长形成的孔隙等效孔径为10~200 μm。

参考文献:

- [1] 王瑞,余克服,王英辉,等.珊瑚礁的成岩作用[J].地球科学进展,2017,32(3):221-233.
Wang R, Yu K F, Wang Y H, et al. The diagenesis of coral reefs[J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(3): 221-233. (in Chinese)
- [2] 汪稔,吴文娟.珊瑚礁岩土工程地质的探索与研究——从事珊瑚礁研究30年[J].工程地质学报,2019,27(1):202-207.
Wang R, Wu W J. Exploration and research on engineering geological properties of coral reefs-engaged in coral reef research for 30 years[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(1): 202-207. (in Chinese)
- [3] 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.
Liu Ch Q, Wang R. Preliminary research on physical and mechanical properties of calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 1998, 19(1): 32-37. (in Chinese)
- [4] 王刚,叶沁果,查京京.珊瑚礁砂砾料力学行为与颗粒破碎的试验研究[J].岩土工程学报,2018,40(5):802-810.
Wang G, Ye Q G, Zha J J. Experimental study on mechanical behavior and particle crushing of coral sand-gravel fill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(5): 802-810. (in Chinese)
- [5] 丁选明,吴琪,刘汉龙,等.建筑物下珊瑚砂地基动力响应振动台模型试验研究[J].岩土工程学报,2019,41(8):1408-1417.
Ding X M, Wu Q, Liu H L, et al. Shaking table tests on dynamic response of coral sand foundation under buildings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(8): 1408-1417. (in Chinese)
- [6] 马启锋,刘汉龙,肖杨,等.高应力作用下钙质砂压缩及颗粒破碎特性试验研究[J].防灾减灾工程学报,2018,38(6):1020-1025.
Ma Q F, Liu H L, Xiao Y, et al. Compression and particle breakage features of calcareous sand under high stress[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(6): 1020-1025. (in Chinese)
- [7] Peng Y, Ding X M, Xiao Y, et al. Detailed amount of particle breakage in non-uniformly graded sands under one-dimensional compression[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, 57(8): 1-8.
- [8] 刘崇权.钙质土土力学理论及工程应用[D].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,1999.
Liu Ch Q. The theory of calcareous soils mechanics and its application in engineering [D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1999. (in Chinese)
- [9] 吕海波,汪稔,孔令伟.钙质土破碎原因的细观分析初探[J].岩石力学与工程学报,2001,20(增1):890-892.
Lyu H B, Wang R, Kong L W. Preliminary mesoscopic analysis on factors of breakage in calcareous soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(Sup 1): 890-892. (in Chinese)
- [10] 陈海洋.钙质砂的内孔隙研究[D].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2015.
Chen H Y. Study of the inner pore in calcareous sand [D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
- [11] 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.
Zhu Ch Q, Chen H Y, Meng Q Sh, et al. Microscopic characterization of intra-pore structures of calcareous sands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1831-1836. (in Chinese)
- [12] 蒋明镜,吴迪,曹培,等.基于SEM图片的钙质砂连通孔隙分析[J].岩土工程学报,2017,39(增1):1-5.
Jiang M J, Wu D, Cao P, et al. Connected inner pore analysis of calcareous sands using SEM [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(Sup 1): 1-5. (in Chinese)
- [13] Liu H, Yang C H, Pan N, et al. Denoising 3D MR images by the enhanced non-local means filter for rician noise [J]. Magnetic Resonance Imaging, 2012, 28(10): 1485-1495.
- [14] Manjon J, Carbonell C J, Lull J, et al. MRI denoising using non-local means[J]. Medical Image Analysis, 2008, 12(4): 514-523.
- [15] 周博,库泉,吕珂臻,等.钙质砂颗粒内孔隙三维表征[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2019,52(增1):41-48.
Zhou B, Ku Q, Lyu K Zh, et al. Three-dimensional characterization of inner pores in calcareous sand particles [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2019, 52(Sup 1): 41-48. (in Chinese)
- [16] Smith D M, Gallegos D P, Stermer D L. Mercury porosimetry in random sphere packings: breakthrough pressure and pore structure determination[J]. Powder Tech-

- nology, 1987, 53: 11-22.
- [17] Dong H, Gao P, Ye G. Characterization and comparison of capillary pore structures of digital cement pastes [J]. *Materials and Structures*, 2017, 50(2): 154-166.
- [18] 曹培, 丁志军. 基于 MIP 和 CT 试验的钙质砂孔隙分布特征研究 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2019, 17(3): 55-59.
Cao P, Ding Zh J. Pore distribution of calcareous sand by MIP and CT scan methods [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2019, 17(3): 55-59. (in Chinese)
- [19] 董金南, 殷鸿福. 古生物学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
Tong J N, Yin H F. *Paleontology* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007. (in Chinese)
- [20] Bourne D, Morrow K, Webster N. Insights into the coral microbiome: underpinning the health and resilience of reef ecosystems [J]. *Annual Review of Microbiology*, 2016, 70: 317-340.
- [21] Gutner-Hoch E, Fine M. Genotypic diversity and distribution of *Ostreobium quekettii* within scleractinian corals [J]. *Coral Reefs*, 2011, 30: 643-650.
- [22] 赵宽, 张婷, 陈天然. 南海北部滨珊瑚骨骼微生物侵蚀 [J]. *热带海洋学报*, 2019, 38(6): 74-79.
Zhao K, Zhang T, Chen T R. Micro-bioerosion in porites corals in the northern South China Sea [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2019, 38(6): 74-79. (in Chinese)
- [23] 耿涛年, 姚雪梅, 张颖, 等. 两种蔷薇珊瑚骨骼微结构观察及钙化过程分析 [J]. *热带海洋学报*, 2017, 36(1): 56-64.
Geng T N, Yao X M, Zhang Y, et al. Skeletal microstructure observations and calcification process analysis of two species of *Montipora* [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2017, 36(1): 56-64. (in Chinese)
- [24] 徐建军, 谢子强, 肖逸林, 等. 不同发育阶段的黄癣蜂巢珊瑚共生虫黄藻多样性 [J]. *微生物学通报*, 2018, 45(9): 1916-1921.
Xu J J, Xie Z Q, Xiao Y L, et al. Diversity of symbiodinium associated with *favia favus* at different life stages [J]. *Microbiology China*, 2018, 45(9): 1916-1921. (in Chinese)
- [25] Zubia M, Peyrot-Clausade M. Internal bioerosion of *Acropora formosa* in Réunion (Indian Ocean): microborer and macroborer activities [J]. *Oceanologica Acta*, 2001, 24: 251-262.
- [26] 谢露华, 韦刚健. 南海北部滨珊瑚微结构的 SEM 分析及其对气候记录重建的意义 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(3): 1-8.
Xie L H, Wei G J. SEM studies on the microstructure of porites coral from the northern South China Sea: implications for paleoclimate record reconstruction [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(3): 1-8. (in Chinese)
- [27] 叶承, 黄晖, 张成龙. 鹿角杯形珊瑚骨骼构造和显微结构的研究 [J]. *热带海洋学报*, 2013, 32(2): 102-111.
Ye Ch, Huang H, Zhang Ch L. Skeletal architecture and microstructure of calcifying coral *pocillopora damicornis* [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2013, 32(2): 102-111. (in Chinese)
- [28] 朱春润, 索科洛夫 B H. 成都粘性土孔隙性的微观研究 [J]. *地质灾害与环境保护*, 1994, 5(3): 37-47.
Zhu Ch R, Sokolov B H. Microscopical study of porosity of Chengdu clay [J]. *Geological Hazards and Environment Preservation*, 1994, 5(3): 37-47. (in Chinese)

(本文责编: 赵霞)