

DOI : 10.16285/j.rsm.2018.1775

珊瑚颗粒力学特性应变率效应试验研究

马林建¹, 李 增¹, 罗棕木¹, 魏厚振², 段力群¹

(1. 陆军工程大学 国防工程学院 爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007; 2. 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:珊瑚单颗粒破碎特性与珊瑚砂高压缩性、剪缩性及良好蠕变性等宏观力学行为密切相关。珊瑚颗粒的应变率效应对不同形式荷载作用下珊瑚砂强度与变形特性研究具有重要意义。对约 300 颗珊瑚颗粒进行 0.1 ~ 50 mm/min 位移速率下的单颗粒破碎试验, 探讨加载应变速率对颗粒破碎强度、破碎模式、破碎能量及破碎分形的影响。结果表明, 珊瑚颗粒破碎强度服从 Weibull 分布规律, 且特征破碎强度随应变率的提高非线性增大; 随着加载速率的增大, 颗粒主劈裂破坏往往先于棱角的局部碎裂和表面研磨, 相应的荷载-位移曲线呈现出由峰前“多峰”向峰后“多峰”现象转变; 珊瑚颗粒破碎能量密度和破碎分形维数同样具有明显的应变率效应, 且均与对数应变率呈线性正相关关系, 表征能量耗散和破碎程度均随加载应变率的增大而增大。

关 键 词:珊瑚颗粒; 应变率效应; 破碎强度; 破碎模式; 破碎能量; 破碎分形

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2019) 12 - 4637 - 07

Experimental study of strain rate effects on mechanical properties of coral particles

MA Lin-jian¹, LI Zeng¹, LUO Zong-mu¹, WEI Hou-zhen², DUAN Li-qun¹

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact, College of Defense Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing, Jiangsu 210007, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract : The macroscopic mechanical behaviors of coral sand, such as high compressibility, shear and creep are closely related to the characteristics of coral particle crushing. The strain rate effect of coral particles is of great significance to study the strength and deformation characteristics of coral sand under different loading forms. The effects of loading strain rate on particle crushing strength, crushing mode and fractal dimension were studied by applying different rates of 0.1-50 mm/min on about 300 coral particles in crushing tests. The analysis results show that the crushing strength of coral grain follows the Weibull distribution law, and the characteristic crushing strength increases nonlinearly with the increasing of strain rate. Due to the increase of loading rate, the main splitting failure of coral particles appears prior to the surface grinding and local fracture, and the corresponding load-displacement curves show a transition of "multi-peak" pre- and post-peak. The fractal dimension and crushing energy density of broken coral grain are also rate-dependent and the positively linear relationship with the logarithm of strain rate indicates that the dissipated energy and damage degree develop with loading rate.

Keywords : coral particle; strain rate effect; crushing strength; crushing mode; fracture energy; fractal crushing dimension

1 引 言

近年来, 为保卫国家海洋领土完整, 维护海洋权益战略部署, 我国南沙海域岛礁工程建设步伐不

断加快。作为岛礁工程建设的主要承载体和建筑材料来源之一, 珊瑚砂基础物理力学特性逐渐成为当前热点研究问题。不同于一般陆源砂, 珊瑚砂是一种 CaCO_3 含量高达 95% 以上的钙质砂, 其主要成分

收稿日期: 2018-09-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No.41877260, No.51808551)。

This work was supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (41877260, 51808551).

第一作者简介: 马林建, 男, 1984 年生, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事地下工程与防护方面的教学和研究工作。

E-mail: patton.4400@163.com

通讯作者: 李增, 男, 1994 年生, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: lzx2447@163.com

为文石、高镁方解石及低镁方解石。由于特殊的生物成因和热带海洋沉积环境,形成了珊瑚砂颗粒高棱角度、多孔隙(含内孔隙)、形状不规则等特点,呈现出低强度、高内摩擦角、易破碎等特性。珊瑚砂颗粒可分为片状、纺锤状和枝状,其球形度为0.75~0.90,长宽比为0.35~0.75,凹凸度位于0.88~0.95之间^[1]。单颗粒相对密度约为2.80,大于传统石英砂的2.65,这是由其矿物组成和内孔隙结构造成的^[2]。

珊瑚砂颗粒特殊的物理性质决定了其与陆源砂性质的显著差别。珊瑚砂的物理性质受区域环境影响存在差异,但总体上珊瑚砂的孔隙比在0.54~2.97之间,远高于石英砂(0.4~0.97),而干密度较石英砂小。与相同粒径范围石英砂相比,珊瑚砂渗透系数在 10^{-6} ~ 10^{-5} m/d之间,且与曲率系数、不均匀系数和粒径大小存在较好的线性相关性^[3]。

珊瑚砂颗粒物理力学特性势必影响其宏观力学行为。现有研究表明珊瑚砂具有高压缩性^[4-6]、剪缩性^[7-9]和良好的蠕变特性^[10-11],皆归因于其形状不规则、内孔隙和易破碎,这些特性也势将影响珊瑚砂的动力学响应。我国岛礁工程处于国防前沿,面临突发军事打击毁伤、严酷海洋环境侵害和人工活动扰动等多重荷载作用,因此,珊瑚砂应变率效应研究对于我国岛礁长期稳定和工程防护具有理论意义和工程应用价值。本文开展不同应变率下珊瑚颗粒力学特性试验研究,探讨加载应变率对颗粒强度概率分布、破碎模式、破碎能量及分形特征等的影响规律。

2 试验方案

用于测试的钙质珊瑚颗粒取自我国某珊瑚岛礁,其圆度和球度均位于0.7~0.9之间,相对密度为2.82,如图1所示。利用X射线衍射技术(XRD)对珊瑚砂样品进行元素分析可知,其 CaCO_3 含量高达97%,由33%~47%文石和53%~67%高镁方解石组成。电镜扫描图像清晰显示出珊瑚砂颗粒的内孔隙结构(见图2),其内部封闭孔隙占全部孔隙的10%。此外,该珊瑚砂颗粒莫氏硬度仅为3~4,相比于石英砂较小。

试验采用电机驱动伺服加载装置,最大加载能力为50 kN,分辨率为0.001 N。经过筛分之后,选取直径在6.5~8.5 mm范围内约300个珊瑚颗粒试样进行破碎试验。将珊瑚单颗粒放置于砧座正中,使得短轴方向与轴向加载方向一致,以较低位移加载速率调节上压头位置,使其底面刚好接触颗粒,

将预加载力控制在10 N左右,再用游标卡尺准确测量上、下压头间的距离作为该试验颗粒的初始直径,如图3所示。具体测试共分5组,每组试样50~60颗,分别以0.1、1、5、10、50 mm/min的恒定位移速率(对应名义应变率分别为 2.3×10^{-4} 、 2.3×10^{-3} 、 1.1×10^{-2} 、 2.3×10^{-2} 、 $1.1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$)加载至颗粒破坏。

单颗粒在集中荷载作用下的破坏本质上是劈拉破坏^[12]。颗粒内部的平均拉伸应力随接触半径与颗粒半径之比的增大而减小,因此,不规则颗粒形状的较大接触半径导致沿加载轴线方向的张拉应力减小,从而使得颗粒破碎的荷载值增大。考虑到形状因素影响,Hiramatsu等^[12]提出了单颗粒破碎强度计算公式:

$$\sigma_f = 1.4 \frac{F_f}{2\pi R^2} \approx 0.9 \frac{F_f}{d^2} \quad (1)$$

式中: σ_f 为颗粒破碎强度; F_f 为峰值荷载; R 为颗粒半径; d 为颗粒直径。



图1 珊瑚颗粒试样

Fig.1 Coral particle samples

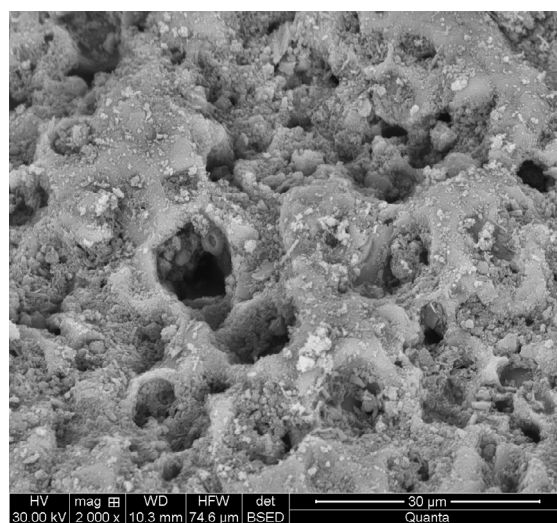


图2 珊瑚颗粒扫描电镜图

Fig.2 Scanning electron images of coral particle



图 3 珊瑚颗粒直径测试

Fig.3 Testing of coral particle diameter

3 试验结果及分析

珊瑚颗粒作为一种脆性材料，由于表面缺陷、内部空隙、颗粒尺寸和形状不规则等均影响其强度的均一性，因此，从统计角度进行分析是合理的途径。一般地，脆性颗粒材料抗拉强度与残余概率之间的关系可以表示为^[13-14]

$$P_s = \exp \left[- \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_{f_0}} \right)^m \right] \quad (2)$$

式中： P_s 为颗粒残余概率； σ_{f_0} 为 37% 残余概率所对应的颗粒拉伸强度，也称为特征抗拉强度； m 为 Weibull 模数，强度数据的离散性随 m 的增大而减小。对式 (2) 左右两边分别取两次对数，得

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{P_s} \right) \right] = m \ln \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_{f_0}} \right) \quad (3)$$

则 m 值可通过双对数坐标系中直线的斜率求得；当 $P_s = 1/e$ 或 $\ln(\ln(1/P_s))=0$ 时， σ_{f_0} 与 σ_f 的值相等。

3.1 颗粒特征抗拉强度

图 4 给出了不同加载速率下珊瑚颗粒破碎强度的概率分布。可以看出，0.1 ~ 50 mm/min 加载速率下，珊瑚颗粒破坏概率分布遵循 Weibull 分布规律，相应的特征抗拉强度分别为 4.86、5.09、5.65、5.99、6.18 MPa，即随着加载速率的提高而逐步增大。图 5 进一步分别给出了式 (3) 对不同应变率下珊瑚颗粒破碎强度数据的拟合结果。由图 4 可以发现，Weibull 模数 m 随着加载速率的增大而略有降低，表明强度数据的离散性有所增加。将特征抗拉强度随应变率变化关系曲线绘于图 6 中，并给出拟合经验关系式：

$$\frac{\sigma_{f_0}}{\sigma_{f_s}} = 1 + 0.28 \frac{(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^{1.36}}{1 + (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^{1.36}}, \dot{\epsilon}_s = 8.45 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} \quad (4)$$

式中： σ_{f_s} 为应变率为 $2.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 时的特征破碎强

度值。具体地， $2.3 \times 10^{-4} \sim 2.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 应变率范围，珊瑚颗粒强度提高不明显；而 $2.3 \times 10^{-3} \sim 1.1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 应变率范围，破碎强度对应变率的敏感性逐步增强，此时强度值显著增大。对比分析表明，本文提出的经验关系式 (4) 的预测曲线与测试结果吻合较好。

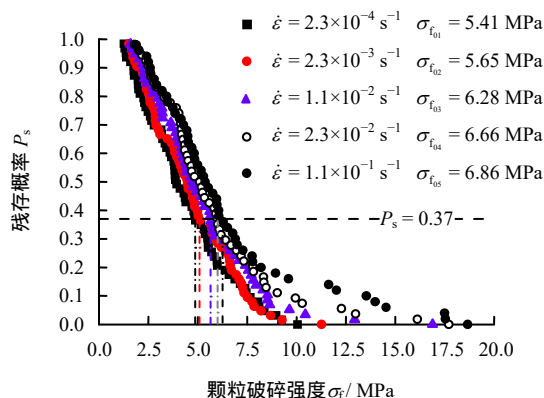


图 4 不同加载速率下珊瑚颗粒破碎强度的概率分布

Fig.4 Statistical distribution of particle crushing strength at different loading rates

3.2 颗粒破坏模式

根据试验获得的荷载-位移曲线和颗粒破坏形态，经过统计分析，不同加载速率下颗粒破碎模式可分为 3 种典型类型，如图 7 所示。低应变率 ($2.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 及以下) 加载时，不同于一般硬脆性材料单峰破坏，在到达最大载荷之前珊瑚颗粒荷载-位移曲线经历多个峰值。这种多峰现象是由于珊瑚颗粒表面棱角突出，外荷载作用下发生研磨或局部断裂先于主劈裂破坏造成的，从图 7(a) 中可以看到试样表面棱角研磨产生的大量碎屑。中等应变率 ($2.3 \times 10^{-3} \sim 1.1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$) 加载时，完整颗粒试样破碎形成粒径大致相等的数块小颗粒，相应的曲线上表现为数个高度基本相同的峰值 (见图 7(b))，表明颗粒最终完全破坏不是由主裂纹引起，而是局部发生断裂破坏。随着加载应变率进一步提高，最显著的特征是曲线的峰后下降段不是单调减小至残余值，而是出现逐步下降的“多峰”。这一现象表明颗粒的主劈裂裂纹在局部破碎发生之前就已充分开展。从图 7(c) 中破碎后的颗粒可以看到，试样被主裂纹劈裂成两半，并掺杂有些许碎屑。

3.3 颗粒破碎能量

颗粒材料在加载过程中所吸收的能量主要以微裂纹萌生、断裂面贯通以及断裂滑移等形式耗散^[15]。脆性颗粒破碎能量通常定义为断裂破碎前的

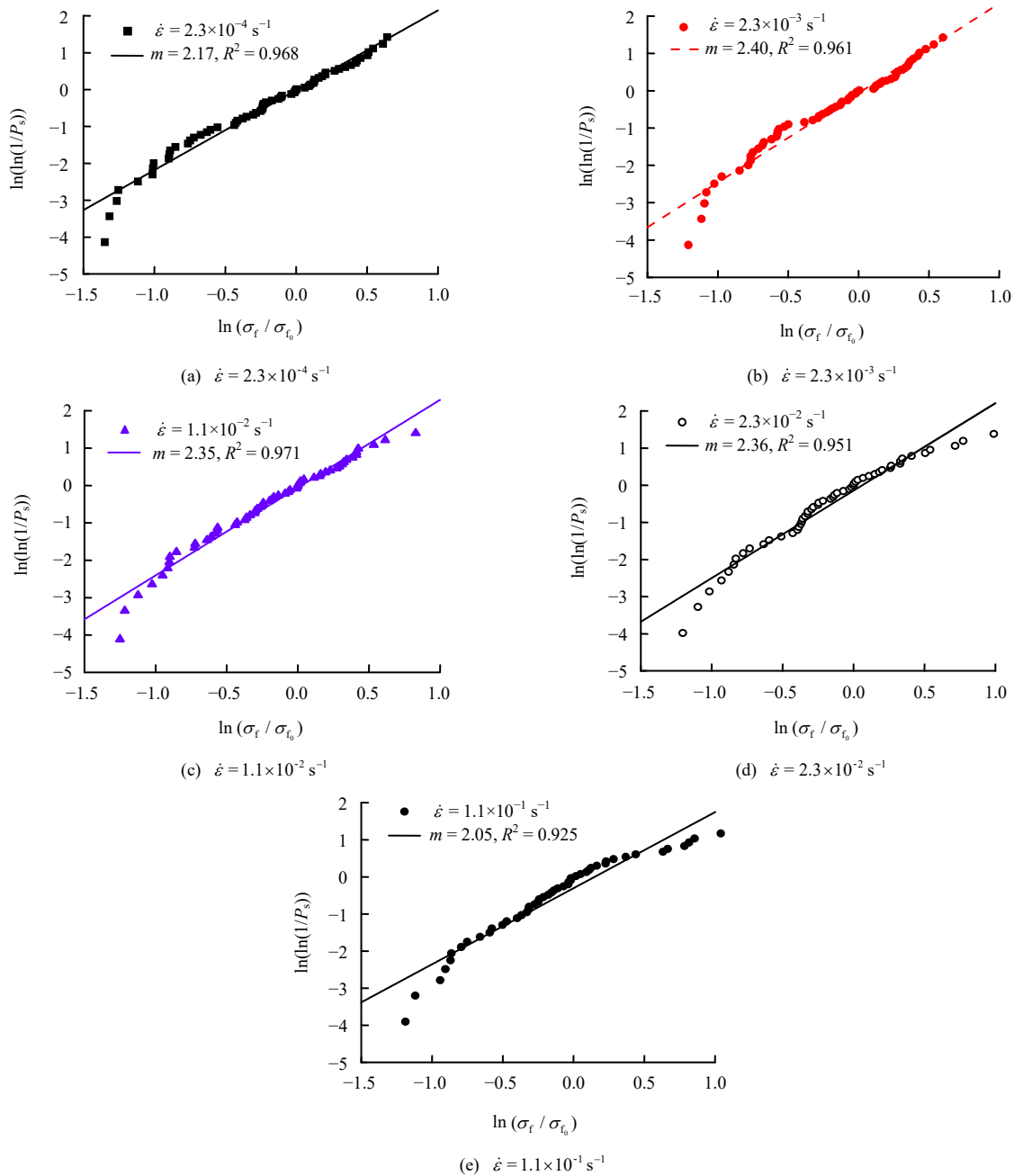


图5 不同加载速率下珊瑚颗粒破碎强度的 Weibull 分布拟合

Fig.5 Weibull distribution fitting of particle crushing strength at different strain rates

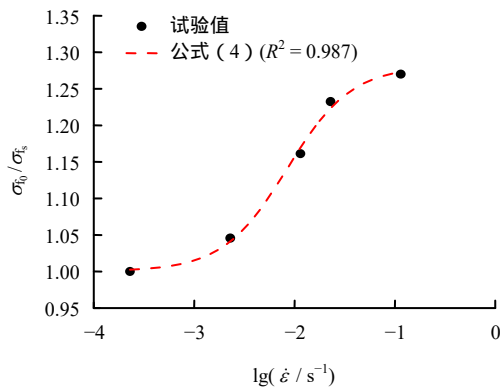
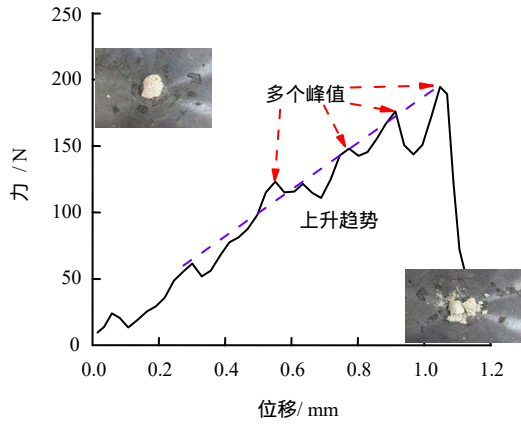


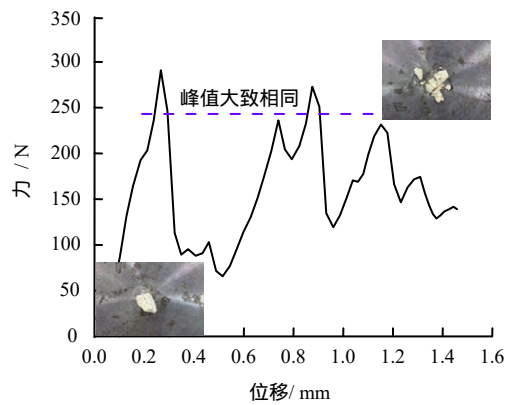
图6 特征破碎强度随应变率发展规律

Fig.6 Development of the characteristic crushing strength with strain rate

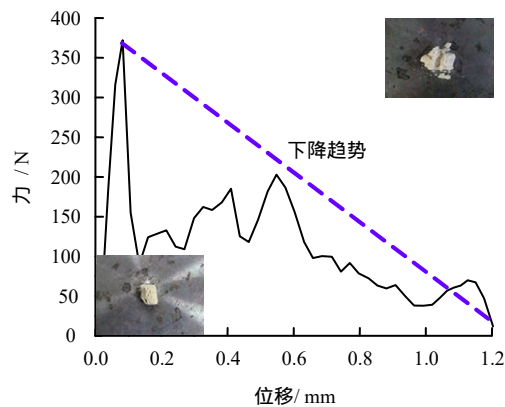
弹性应变能，可以通过积分计算峰值点前力-位移曲线与横坐标轴所围成的面积直接求得。因此，可计算出不同应变率下单颗粒的破碎能量密度，并取其平均值绘于图8中。由图可以看到，随着应变速率的提高，珊瑚颗粒破碎能量密度明显呈现上升趋势。应变速率从 $2.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 增至 $1.1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ，珊瑚颗粒的平均破碎能量密度从 192.61 kJ/m^3 升至 484.88 kJ/m^3 ，增加了 151.74%，这主要是因为较高的加载应变率导致颗粒破碎程度明显提高，单位体积内用于产生裂纹和破裂面所消耗的能量也随之增大。破碎能量密度 E/V 与对数应变率 $\lg \dot{\epsilon}$ 之间的关系可以定量地表示为



(a) mode I



(b) mode II



(c) mode III

图 7 珊瑚颗粒破坏模式及荷载-位移曲线

Fig.7 Fragmentation modes and load-displacement curves of single particles

$$E/V = 109.3 \lg \dot{\epsilon} + 560.1 \quad (5)$$

3.4 颗粒破碎分形

分形几何理论认为物体在某一尺度上局部与整体存在统计意义上的自相似性^[16]，在某种程度上，形态变化在所有测量尺度上都是相同的。颗粒破碎具有分形特征，因此，可以通过分形维数定量

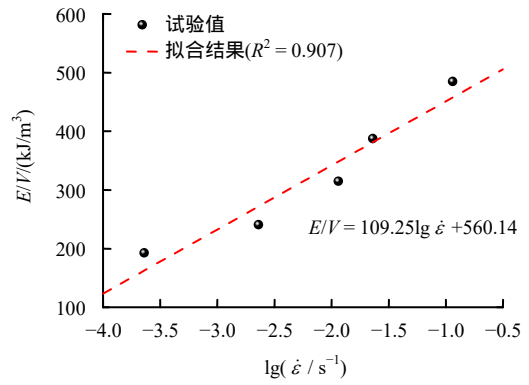


图 8 lg ε̇ 和 E/V 关系

Fig.8 Relationship between lg ε̇ and E/V

地反映颗粒材料破碎程度的高低。根据分形破碎模型，颗粒含有不同层次的表面裂纹、内部孔隙，其分形维数介于 2~3 之间^[17]。假设颗粒的分形维数为 D ，则在二维空间内的维数降为 $D-1$ 。将式 (1) 中颗粒截面积的 d^2 替换为真实截面面积 d^{D-1} ，则可重新定义颗粒材料强度计算公式为

$$\sigma_f^* = 0.9 \frac{F_f}{d^{D-1}} \quad (6)$$

式中： σ_f^* 为颗粒的固有破碎强度，其值不随粒径大小发生变化。联立式 (1) 和式 (6)，可以得到颗粒名义破碎强度 σ_f 与粒径 d 之间的关系式：

$$\sigma_f = \sigma_f^* d^{D-3} \quad (7)$$

图 9 给出了 $2.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 应变率下珊瑚颗粒破碎强度 σ_f 和粒径 d 在双对数坐标系中的分布及线性拟合结果。由式 (7) 可知，拟合直线的斜率为 $D-3$ ，则 $2.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 加载速率下珊瑚颗粒的分形维数为 2.46，比石英砂的分形维数 2.21 略高，表明珊瑚颗粒比普通石英砂更易破碎。不同加载速率下珊瑚颗

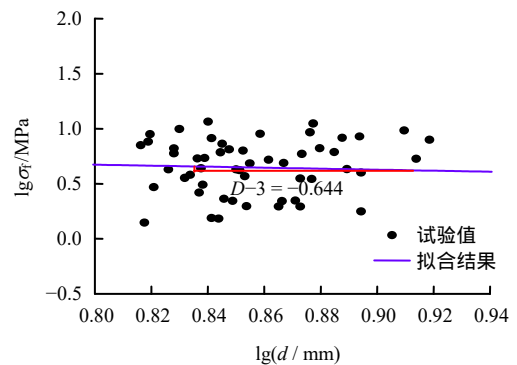


图 9 $2.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 应变率下 $\lg \sigma_f$ 与 $\lg d$ 关系

Fig.9 Relationship between $\lg \sigma_f$ and $\lg d$ at the strain rate of $2.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

粒的分形维数均可由此获得并绘于图 10 中。从图上可以发现, 加载应变率对颗粒破碎维度有显著影响, 且 D 和 $\lg \dot{\epsilon}$ 之间存在良好的线性相关性, 其拟合关系式为

$$D = 0.19 \lg \dot{\epsilon} + 3.02 \quad (8)$$

随着加载应变率的上升 D 值从 2.36 增至 2.87, 表明颗粒的破碎程度也随之提高。

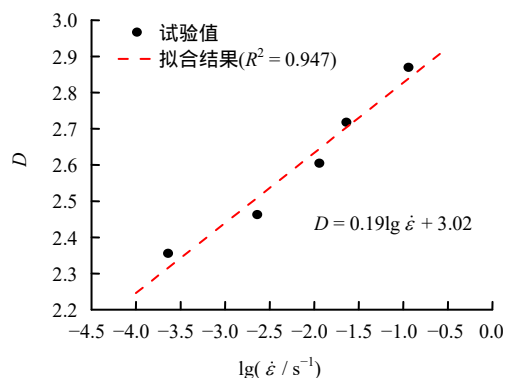


图 10 D 和 $\lg \dot{\epsilon}$ 关系

Fig.10 Relationship between fractal dimension D and $\lg \dot{\epsilon}$

4 结 论

本文共对约 300 颗珊瑚颗粒试样进行了单颗粒破碎试验, 并对试验结果进行 Weibull 统计分析, 研究了加载应变率对颗粒破碎强度、破碎模式及分形维数的影响, 得到以下主要结论:

(1) 珊瑚颗粒试样的破碎强度服从 Weibull 概率分布规律, 且加载率效应对颗粒强度分布的影响较明显。加载速率从 0.1 mm/min 提高至 50 mm/min, 珊瑚颗粒的特征破碎强度从 4.86 MPa 非线性增大至 6.18 MPa, 提高幅度为 27%, 且所提出的经验预测公式与试验数据吻合良好。此外, Weibull 模数略有增加, 表明破碎强度数据的离散性略有增大。

(2) 珊瑚颗粒的破碎可分为 3 种典型模式。受加载速率影响, 珊瑚颗粒荷载-位移曲线呈现出由峰前“多峰”转变为峰后“多峰”现象, 这是由于高应变率下颗粒主劈裂破坏往往要先于表面研磨或棱角的局部碎裂。

(3) 珊瑚颗粒在 $2.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 应变率下的破碎分形维数为 2.46, 比普通石英砂稍大, 映证了珊瑚颗粒的易碎性。颗粒破碎能量和破碎分形维数同样具有明显的应变率效应, 且均与加载应变率的对数呈线性正相关关系, 说明耗散能量和破碎程度皆随应变率的增加而增加。

参 考 文 献

- [1] 张小燕, 蔡燕燕, 王振波, 等. 珊瑚砂高压下一维蠕变分形破碎及颗粒形状分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1753 - 1780.
ZHANG Xiao-yan, CAI Yan-yan, WANG Zhen-bo, et al. Fractal breakage and particle shape analysis for coral sand under high-pressure one-dimensional creep condition[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(5): 1753 - 1780.
- [2] 孙宗勋. 南沙群岛珊瑚砂工程性质研究[J]. 热带海洋, 2000, 19(2): 1 - 8.
SUN Zong-xun. Engineering properties of coral sands in Nansha islands[J]. **Tropic Oceanology**, 2000, 19(2): 1 - 8.
- [3] 钱琨, 王新志, 陈剑文, 等. 南海岛礁吹填钙质砂渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1557 - 1564.
QIAN Kun, WANG Xin-zhi, CHEN Jian-wen, et al. Experimental study on permeability of calcareous sand for islands in the South China Sea[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(6): 1557 - 1564.
- [4] 张家铭, 汪稔, 石祥锋, 等. 侧限条件下钙质砂压缩和破碎特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3327 - 3331.
ZHANG Jia-ming, WANG Ren, SHI Xiang-feng, et al. Compression and crushing behavior of calcareous sand under confined compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(18): 3327 - 3331.
- [5] LADE P V, NAM J, LIGGIO C D, et al. Effects of particle crushing in stress drop-relaxation experiments on crushed coral sand[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2010, 136(3): 500 - 509.
- [6] 沈建华, 汪稔. 钙质砂的工程性质研究进展及展望[J]. 工程地质学报, 2010, 18(增刊): 26 - 32.
SHEN Jian-hua, WANG Ren. Study on engineering properties of calcareous sand[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2010, 18(Suppl.): 26 - 32.
- [7] 张家铭, 张凌, 蒋国盛, 等. 剪切作用下钙质砂颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2789 - 2793.
ZHANG Jia-ming, ZHANG Lin, JIANG Guo-sheng, et al. Research on particle crushing of calcareous sands under triaxial shear[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(10): 2789 - 2793.
- [8] 张家铭, 张凌, 刘慧, 等. 钙质砂剪切特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 1): 3010 - 3015.
ZHANG Jia-ming, ZHANG Ling, LIU Hui, et al. Experimental study on shear properties of calcareous

- sand[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(Suppl.1): 3010 - 3015.
- [9] 余殷鹏, 吕亚茹, 李峰, 等. 珊瑚砂剪切特性试验分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2017, 18(1): 29 - 35.
SHE Yin-peng, LÜ Ya-ru, LI Feng, et al. Experimental analyses of shearing mechanism of coral sand[J]. **Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)**, 2017, 18(1): 29 - 35.
- [10] LADE P V, JR C D L, NAM J. Strain rate, creep, and stress drop-creep experiments on crushed coral sand[J]. **Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering**, 2009, 135(7): 941 - 953.
- [11] LÜ Y, LI F, LIU Y, et al. Comparative study of coral sand and silica sand in creep under general[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2016, 54(11): 1601 - 1611.
- [12] HIRAMATSU Y, OKA Y. Determination of the tensile strength of rock by a compression test of an irregular test piece[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1966, 3(2): 89 - 90.
- [13] WEIBULL W. A statistical distribution function of wide applicability[J]. **Journal of Applied Mechanics**, 1951, 13(2): 293 - 297.
- [14] MCDOWELL G R, BOLTON M D. On the micromechanics of crushable aggregates[J]. **Geotechnique**, 1998, 48(3): 315 - 318.
- [15] 王益栋, 徐永福, 奚悦. 颗粒材料破碎能耗分形理论研究[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(12): 86 - 90.
WANG Yi-dong, XU Yong-fu, XI Yue. Study on particle crushing energy with fractal theory[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2016, 33(12): 86 - 90.
- [16] MANDELBROT B B. The fractal geometry of nature[M]. [S. l.]: W.H. Freeman, 1983.
- [17] 徐永福. 固体颗粒破碎的分维演化规律[J]. 工程地质学报, 2017, 25(5): 1287 - 1292.
XU Yong-fu. Evaluation of fractal dimension of particle breakage[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2017, 25(5): 1287 - 1292.
-
- 上接第 4619 页
- [23] 庞占喜, 刘慧卿, 刘喜林. 多孔介质中气泡的生成机理及流动特性研究[J]. 应用力学学报, 2009, 26(2): 207 - 211, 401.
PANG Zhan-xi, LIU Hui-qing, LIU Xi-lin. Generation mechanisms and flow characteristics of steady foams in porous media[J]. **Chinese Journal of Applied Mechanics**, 2009, 26(2): 207 - 211, 401.
- [24] ELKHOURY J E, DETWILER R L, AMELI P. Dissolution and deformation in fractured carbonates caused by flow of CO₂-rich brine under reservoir conditions[J]. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 2013, 16(Suppl.1): 203 - 215.
- [25] GARZON E, SANCHEZ-SOTO P J, ROMERO E. Physical and geotechnical properties of clay phyllites[J]. **Applied Clay Science**, 2010, 48(3): 307 - 318.
- [26] SCHMITT M, FERNANDES C P, NETO J A B D C, et al. Characterization of pore systems in seal rocks using nitrogen gas adsorption combined with mercury injection capillary pressure techniques[J]. **Marine and Petroleum Geology**, 2013, 39(1): 138 - 149.
- [27] 刘琦, 卢耀如, 张凤娥, 等. 动水压力作用下碳酸盐岩溶蚀作用模拟实验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 1): 96 - 101.
LIU Qi, LU Yao-ru, ZHANG Feng-e, et al. Study of simulation experiment for carbonate rocks dissolution under hydrodynamic pressure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(Suppl.1): 96 - 101.
- [28] ASHBY M F, RAJ R. Diffusion-controlled sliding at a serrated grain boundary[J]. **Scripta Metallurgica**, 4(9): 1970, 737 - 741.
- [29] 高树生, 胡志明, 刘华勋, 等. 不同岩性储层的微观孔隙特征[J]. 石油学报, 2016, 37(2): 248 - 256.
GAO Shu-sheng, HU Zhi-ming, LIU Hua-xun, et al. Microscopic pore characteristics of different lithological reservoirs[J]. **Acta Petrolei Sinica**, 2016, 37(2): 248 - 256.