

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.02.004

珊瑚礁灰岩水下钻孔爆破破裂特征试验研究^{*}

钟冬望^{1a,1b},熊伟^{1a,1b},孟庆山²,司剑峰^{1a,1b},伍岳^{1a,1b}

(1. 武汉科技大学 a. 理学院; b. 湖北省智能爆破工程技术研究中心, 武汉 430065;

2. 中科院 武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘要: 在海洋的开发建设过程中,往往涉及到水下珊瑚礁岩的爆破开挖。为研究珊瑚礁灰岩水下钻孔爆破的破裂特征,选用4种类型的珊瑚礁灰岩模拟了3种水深情况下的单孔爆破试验,分析了不同水深条件下礁灰岩试样炮孔附近的破坏、径向裂纹和块度分布。结果表明:礁灰岩炮孔周围破坏情况与岩石强度有关,珊瑚灰岩和珊瑚砾块灰岩试样炮孔周围观察不到明显的破坏现象,生物砂砾块灰岩炮孔周围表面能观察到明显的崩落;爆破后试件表面裂纹的数量和宽度会随着水压的增加而减少;天然裂隙的存在会导致爆炸应力波的传播路径和作用方式发生改变从而阻断裂隙的扩展;水下珊瑚砾屑灰岩爆破的大块率会随着水深的增加而增加,且块度分布符合 swebrec 分布函数。

关键词: 水下钻孔爆破;珊瑚礁灰岩;外观分析;径向裂纹;块度分布;Swebrec 分布函数

中图分类号: TV135.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)02-0024-08

Experimental Study on Fracture Characteristics of Underwater Drilling and Blasting of Coral Reef Limestone

ZHONG Dong-wang^{1a,1b}, XIONG Wei^{1a,1b}, MENG Qing-shan², SI Jian-feng^{1a,1b}, WU Yue^{1a,1b}

(1. a. College of Science; b. Hubei Province Research Center of Intelligent Blasting Engineering Technology, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: In the process of ocean development, blasting excavation of underwater coral reef limestone is often involved. In order to study the fracture characteristics of coral reef limestone after underwater drilling and blasting, four types of coral reef limestone were used to simulate single hole blasting tests under three water depth conditions. The failure zone around the hole, radial crack and fragmentation distribution of reef limestone specimens under different water depth were analyzed. The results show that no obvious failure zone around the hole is observed in coral limestone and coral gravel limestone specimens. For the biological gravel limestone, obvious cavity can be observed on the surface around the blast hole. The number and width of apparent cracks of the specimen after blasting decreases with the increase of the water pressure. The boulder yield increases with the increase of water depth, and the block size distribution of underwater drilling and blasting of coral reef limestone conforms to the swebrec distribution.

Key words: underwater drilling blasting; coral reef limestone; appearance analysis; radial cracks; fragmentation distribution; swebrec distribution function

收稿日期:2021-02-20

作者简介:钟冬望(1963-),男,博士、教授,从事矿山工程力学、爆炸理论及其应用等方面的教学与研究工作,(E-mail) 1057831589@qq.com。

通讯作者:孟庆山(1974-),男,博士、研究员,从事珊瑚礁岛礁工程地质和力学特性方面的研究工作,(E-mail) qsmeng@whrsm.ac.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(51574184、41877267);中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA13010200)

水下钻孔爆破被广泛应用于河岸、海岸、岛礁,等水下岩体的拆除或开挖工程中。与露天爆破相比,在水下钻孔爆破中,由于自由面上的能量反射和水体本身的晃动耗散,会损失大约30%的额外能量^[1]。因此,要在安全的前提下尽量提高设计精

度。目前,爆破设计主要基于经验,设计不当可能导致爆破效果不佳或者危害过大。其中,块度大小与预期不一致是一个亟待解决的问题。为了提高碎石效率,同时降低实际操作中的振动危害,采用了许多改进措施,例如增加炸药装填量,减小钻孔深度以及增加炮孔密度等^[2]。为了总体上改善爆破设计,必须科学的理解单孔周围岩石破裂特征。通常,爆炸引起的破坏区域包括炮孔膨胀区^[3],压碎区,破裂区及弹性震动区^[4]。

珊瑚礁灰岩是属于海相生物成因的碳酸盐类灰岩,广泛分布于我国海域中。根据礁灰岩结构特征和组分划分,礁灰岩的分为珊瑚灰岩,珊瑚砾块灰岩,生物砂砾块灰岩,珊瑚砾屑灰岩,生物砂砾屑灰岩,珊瑚藻石砂砾屑灰岩,生物砾砂屑灰岩,含砾砂屑灰岩,生物砂屑灰岩九种类型^[5]。目前,针对珊瑚礁灰岩的力学研究相对较少,王新志等对礁灰岩进行了物理性质和力学性质测试,发现珊瑚礁灰岩的孔隙率较大,抗压强度较低但峰后残余强度^[6]。孟庆山,范超等通过霍普金森压杆研究了礁灰岩的动态力学特性^[7],发现礁灰岩的单轴冲击荷载下礁灰岩主要发生沿轴向的张拉破坏,且主要发生在生物组分、珊瑚砾块与珊瑚藻的胶结面等薄弱部位。但是,关于水下爆炸荷载作用下的礁灰岩的特征还没有进行研究。目前,水下破岩机理的试验研究大部分都是采用混凝土制作的试样来模拟岩体。赵根通过深水条件下爆破破碎效果模型试验,提出了水下爆破块度预测模型和 underwater 炸药单耗的修正公

式^[8]。而珊瑚礁灰岩是一种多孔隙的生物成因岩体,当岩体受到爆炸载荷时,爆炸应力波和爆炸气体膨胀压力共同作用是破坏岩石的主要因素,天然孔隙和裂缝的存在对岩石的动力特性和应力波的传递有十分重要的影响^[9]。随着国家对海洋资源的开发,一系列岛礁爆破工程的设计急需研究珊瑚礁灰岩在水下爆破荷载作用下的破碎特征。因此,本文利用珊瑚礁灰岩这种特殊的水下岩体,进行了一系列的爆破试验,研究了不同水深对水下钻孔爆破礁灰岩破碎性能的影响,得出了一些规律性的成果,对工程中珊瑚礁灰岩爆破设计具有一定的参考意义。

1 模型实验

1.1 试验方案

试验所用的礁灰岩试件为某海域内的珊瑚礁灰岩岩心,试件高 120 mm,直径为 84 mm。本次试验所用的珊瑚礁灰岩有珊瑚灰岩,珊瑚砾块灰岩,生物砂砾块灰岩,珊瑚砾屑灰岩四种类型,如图 1(a)所示。取部分代表性岩体进行了力学测试,其具体的物理力学参数如表 1 所示。在试样上钻取孔深为 65 mm,直径为 8 mm 的炮孔。为了模拟不同水深的水下爆破环境,通过武汉科技大学智能爆破技术研究中心的可模拟 200 m 水深爆炸容器(图 1(b))加压进行模拟。为模拟围压,在爆破试验前,试件基底需与加工的底座利用螺丝固定,试件周围利用同等大小的橡胶圈包裹,橡胶圈外在用铁皮固定,见图 1(c)。

表 1 礁灰岩的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of reef limestone

礁灰岩类型	珊瑚灰岩	珊瑚砾块灰岩	生物砂砾块灰岩	珊瑚砾屑灰岩
抗压强度/MPa	43.22	34.44	25.98	5.20
弹性模量/GPa	20.57	14.93	13.73	5.09

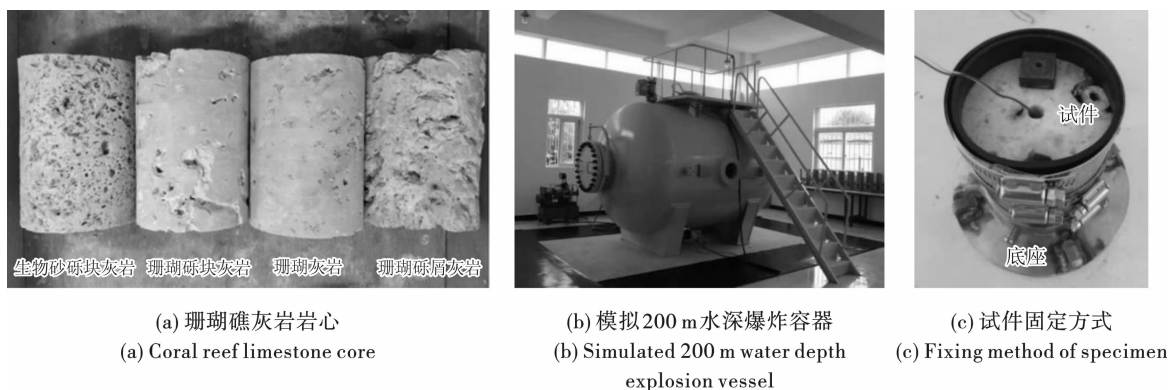


图 1 试验设备图

Fig. 1 Experimental equipment diagram

1.2 试验过程

采用单个炮孔的圆柱体进行爆破试验是目前存在的最简单也最常用的试验方式,它已经被用于研究多种外部因素对爆破效果的影响^[10,11]。本次试验针对四种不同类型的圆柱体珊瑚礁灰岩试样分别进行了水下 50 m、100 m、150 m 三种水深的爆破试验。其中,三个水深分别对应 0.5 MPa、1 MPa、1.5 MPa 三个压强;本次试验所用药包采用经过特殊处理的防水药包,药量通过精度为 0.01 g 的小量程电子秤确定,均为 0.1 g,装药深度 30 mm。利用溶胶堵塞炮孔,堵塞长度为 35 mm,且装药方式均为耦合装药。在所有的设备准备完成后,封闭爆炸容器的人孔并将爆炸容器内加满水,将固定并装药完成后的的试件通过自制的可控制托盘从装药口放置在爆炸容器内部中间的平台。封闭爆炸容器,利用试压泵加压到目标压强,达到该压强后关闭试压泵并起爆。试验分组及每个试件的质量如表 2 所示。爆破完成后泄压并从装药口取出试样,将固定装置和橡胶皮移除,分析每个试件的破碎特征。

2 实验结果与讨论

试验表明,礁灰岩爆后的破裂情况与强度有关,强度最低的珊瑚砾屑灰岩试样在爆破后均破碎成

块;强度相对较高的珊瑚灰岩,珊瑚砾块灰岩,生物砂砾块灰岩试样在爆破后未破碎成块,但都能观察到明显的破坏现象。

表 2 试验分组情况
Table 2 Experimental grouping

礁灰岩类型	试样编号	水压/MPa	药量/g	质量/g
珊瑚灰岩	Q4	0.5	0.1	1721.0
	Q5	1.0	0.1	1726.5
	Q6	1.5	0.1	1694.5
珊瑚砾块灰岩	M8	0.5	0.1	1568.0
	M3	1.0	0.1	1551.5
	M7	1.5	0.1	1438.0
生物砂砾块灰岩	Z5	0.5	0.1	1403.5
	Z6	1.0	0.1	1399.5
	Z9	1.5	0.1	1429.0
珊瑚砾屑灰岩	R11	0.5	0.1	1034.5
	R8	1.0	0.1	1209.5
	R6	1.5	0.1	1230.5

2.1 破碎块度分布

珊瑚砾屑灰岩试样在爆后都破碎成块,采用自制的托盘和纱网收集并统计块度分布情况。三种水深情况下爆破后的破碎块度如图 2 所示。

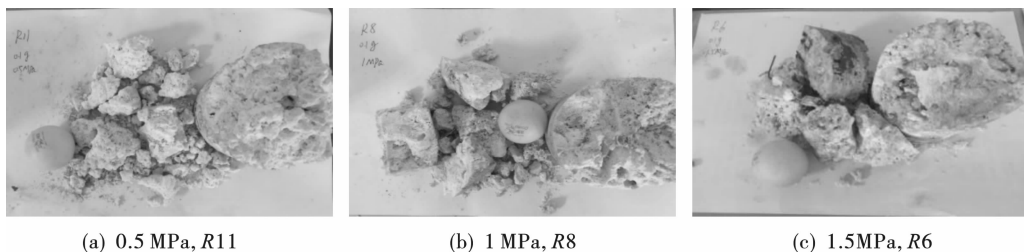


图 2 不同水压下珊瑚砾屑灰岩爆破后破碎块度图

Fig. 2 Fragmentation of coral gravel limestone after blasting under different water pressures

对于实验的基底部分,由于基底被固定,模拟的是工程中的地基部分,因此在统计块度分布时将不考虑基底部分。试验后发现,块度小于 30 mm 以下的基本为粉末,测量粒径的难度很大,因此将 30 mm 以下的块度一起统计,并定义为小块。将块度称重并测量直径后统计如表 3 所示,得到珊瑚砾屑灰岩爆破后块度前四大块的质量占比-直径分布图如图 3。

从图 3 中可以看出,在不同水压下,爆破后珊瑚砾屑灰岩破碎的最大块随着水压的增大明显增大。1 MPa 和 1.5 MPa 水压与 0.5 MPa 相比,前四块的直径与水压的关系也十分明显,即随着水压的增大,块度的直径也随之增大。说明在水下钻孔爆破中,

礁灰岩爆破后破碎的大块率随着水压明显上升。而对于 1 MPa 和 1.5 MPa 的水压,仅仅在最大块存在明显的规律,这是由于珊瑚礁灰岩在形成过程中与海洋中的生物介质有十分明显的关系。孟庆山,范超等通过霍普金森压杆对礁灰岩进行了动态力学实验^[7],发现生物组分与珊瑚砾块及藻类的胶结面的抗拉强度极低,是礁灰岩的脆弱部分。而在较高的冲击荷载下,岩质和生物组分一起破碎为细小碎块,生物组分对试件的弱化作用相对减小。在该试验中,水压间隔在 1 MPa 时,生物组分对礁灰岩的影响也相对变小。

表 3 三种水压情况下试件爆后的块度分布

Table 3 Fragment size distribution after explosion under three kinds of water pressure

0.5 MPa R11			1 MPa R8			1.5 MPa R6		
块度直径/ mm	质量 占比/%	累计质量 占比/%	块度直径/ mm	质量 占比/%	累计质量 占比/%	块度直径/ mm	质量 占比/%	累计质量 占比/%
<30	34.22	34.22	<30	30.38	30.38	<30	6.39	6.39
34	4.10	38.32	30	1.46	31.85	31	1.31	10.07
35	4.25	42.57	34	1.69	33.54	32	1.63	11.70
40	4.00	46.57	35	1.91	35.45	35	2.92	14.62
41	5.27	51.83	40	2.64	38.09	40	2.18	16.80
45	4.10	55.94	50	3.23	41.33	57	13.28	30.09
50	12.35	68.29	60	7.52	48.85	58	14.59	44.68
51	14.24	82.53	65	16.66	65.51	63	16.73	61.41
54	17.47	100.00	77	34.49	100.00	96	38.59	100.00

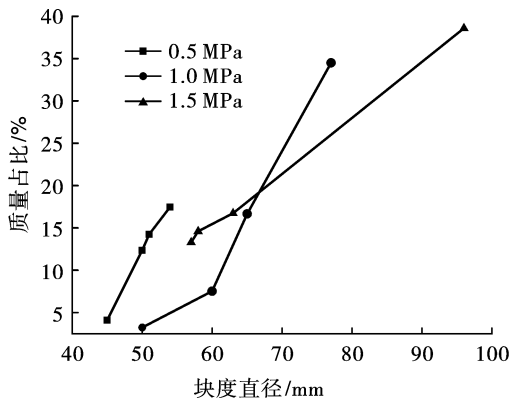


图 3 不同水压下珊瑚砾屑灰岩前四块质量占比-直径分布图

Fig. 3 Proportion-diameter distribution of the first four blocks of coral gravel limestone under different water pressures

关于爆破块度的分布函数,国内外学者依据大量的数据提出了多种经验模型。目前, Finn Ouchterlony 提出的 Swebrec 分布函数相应用比较广泛^[12]。其具体表达形式如下

$$P_{Sweb} = 1 / \left\{ 1 + \left[\frac{\ln(x_{max}/x)}{\ln(x_{max}/x_{50})} \right]^b \right\} \quad (1)$$

式中: P_{Sweb} 的有效范围为, $0 < x \leq 1$; x_{max} 、 x_{50} 分别为最大块度尺寸和平均尺寸, mm; b 为波动指数, 也称为自然破碎特征指数。

通过表 3 中的数据, 我们可以得到三种水压情况下的平均块度 x_{50} 和最大块度 x_{max} , 得到的数据如表 4 所示。

将三种水压情况下的块度按照 swebrec 分布函数进行拟合, 如图 4 所示, 在水压为 1 MPa 和 1.5 MPa 时, 该函数具有拐点, 根据 swebrec 函数的性质, 该分布函数具有一个拐点 x_{inf}

$$\frac{x_{inf}}{x_{max}} = \left(\frac{x_{50}}{x_{max}} \right)^{(b-1)/b} \quad (2)$$

当 b 趋近于 1 时, x_{inf} 趋近于 x_{max} ; 当 b 趋近于 2 时, x_{inf} 趋近于 x_{50} ; 当 b 继续增大时, x_{inf} 的值将会移到 x 的较小值然后又回到 x_{50} 。

表 4 三种水压情况下试件爆后的块度分布特征

Table 4 Fragmentation distribution characteristics of specimens under three kinds of water pressure

水压/ MPa	试件	x_{50} / mm	x_{max} / mm	b	R^2
0.5	R11	40.5	54	0.77	0.977
1.0	R8	62.0	77	0.51	0.958
1.5	R6	60.0	96	2.62	0.971

拟合完成后的相关性系数 R^2 都在 0.95 以上。说明 Swebrec 分布函数不仅适合露天爆破的块度分布, 在水下爆破时, 珊瑚砾屑灰岩的块度分布同样符合 Swebrec 块度分布函数。见图 4。

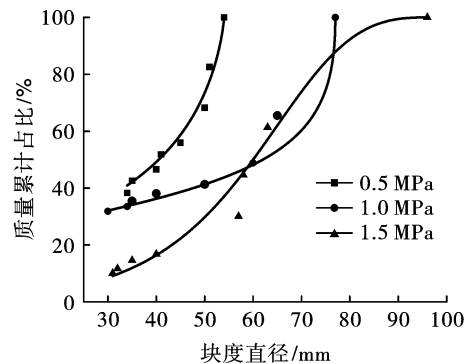


图 4 珊瑚砾屑灰岩 Swebrec 块度分布函数拟合图

Fig. 4 Fitting diagram of swebrec block size distribution function of coral gravel limestone

2.2 爆后炮孔附近外观分析

试验发现炮孔附近的破裂情况与强度有关,生物砂砾块灰岩在炮孔附近能够观察到破坏,而强度高的礁灰岩炮孔周围观察不到明显的破坏。在炮孔外,礁灰岩受到强烈的三向非均匀压缩应力作用,形成一个以压碎和剪切破坏为主的压碎区。由于压碎区在以药柱为中心的岩体横向切面上,因此只能分析爆后炮孔附近的外观。试验后发现,礁灰岩试样在爆破后表现出明显的损伤,但破坏形式和其他陆地上的岩石有明显区别。对于部分礁灰岩,爆破会

扩大原有的天然裂隙,炮孔和天然裂隙贯穿。图5(a)所示为M3爆破后的图片,虽然炮孔周围观察不到明显的破坏区域,但在炮孔和天然裂隙之间的细屑将会崩落,导致炮孔和天然裂隙贯通。生物砂砾块灰岩试样在爆后炮孔周围的质地明显不同于外部区域,试样Z5、Z6、Z9在炮孔周围可观察到较为明显的破坏现象,即炮孔周围有礁灰岩碎屑崩落。如图5(b)所示,圆圈内为生物砂砾块灰岩爆后炮孔附近的破坏形式。

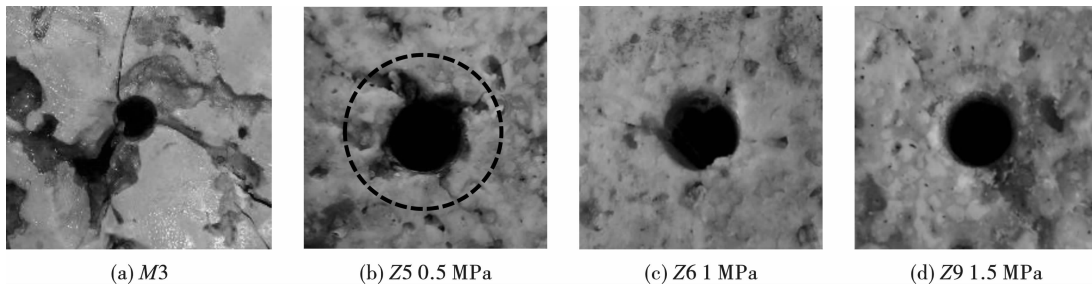


图5 炮孔附近破坏形式示意图

Fig. 5 Schematic diagram of failure mode near blast hole

通过图5(b)、(c)、(d)可以看出,珊瑚礁灰岩在爆破后炮孔周围的破坏形式与一般岩石爆破后的炮孔周围的破坏外观存在明显区别。对于一般岩石爆破后,炮孔周围会形成明显的圆周型裂纹,但是在本次试验中,礁灰岩的炮孔附近并没有观察到特别明显的径向和切向裂纹,而是在炮孔附近发生了细小碎屑的崩落。这可能是径向裂纹与切向裂纹共同作用的结果。随着水深的增加,生物砂砾块灰岩炮孔附近的破坏也在发生变化,即50 m水深条件下能够观察到明显的崩落,而在150 m水深时,崩落的现象变的不是十分明显。

为了进一步的了解爆后礁灰岩炮孔外观的特性,可以通过压碎区的半经验公式来推断影响炮孔附近外观特性的主要因素。

Esen S, Onederra 等人提出了计算压碎区半径的半经验公式^[13]

$$Rc = 0.812r_h(CZI)^{0.219} \quad (3)$$

$$CZI = p_b^3 / (K\sigma_c^2) \quad (4)$$

$$K = E_d / (1 + v_d) \quad (5)$$

式中: r_h 为炮孔直径; p_b 为炮孔压力; σ_c 为抗压强度; E_d 为动态杨氏模量; v_d 为动态泊松比。

利用理想爆轰理论确定爆轰压力

$$P_{CJ} = \frac{\rho_0 D_{CJ}^2}{\gamma + 1} \quad (6)$$

式中: P_{CJ} 、 D_{CJ} 、 ρ_0 和 γ 分别为CJ爆压Pa,CJ爆

速(m/s),未反应炸药密度(kg/m^3)和绝热指数。对于完全耦合孔的钻孔压力可以通过下式给出

$$P_b = \frac{P_{CJ}}{2} \quad (7)$$

可以看出,在同种岩石的情况下,压碎区的半径是与爆速呈正比关系的,而根据赵根在其博士论文中给出的资料^[8],在10 m水深中浸泡一段时间后,乳化炸药的爆速会下降11%;而当水深增加到30 m时,爆速将衰减26%。这是本试验中炮孔附近的破坏随着水深的增加变得不明显的主要原因。

李春军通过数值模拟及理论分析认为^[14],在保持其他条件不变的情况下,爆炸腔内的爆生气体压力相对于静水压力而言要大得多,即使在数百米水下,对爆破体增加的水压力仅为几个兆帕,与爆生气体压力相比显得微不足道。因此,水深对生物砂砾块灰岩炮孔附近破坏形式的影响主要是因为炸药爆速随水深变化引起的,由于水深变化而引起的静水压力变化对其影响很小。

2.3 表观裂纹分析

对于珊瑚灰岩,珊瑚砾块灰岩,生物砂砾块灰岩三种类型的珊瑚礁灰岩,爆后也产生了径向裂纹,大部分圆柱形礁灰岩试样在爆炸后会产生三条随机分布并贯穿试件的裂纹。除Q4试件以外,试件Q5、Q6、M7伴随细小裂纹扩展向礁灰岩边界;试件M8、M3裂纹较粗且贯穿试件,Z5、Z6、Z9也有更加微

小的裂纹扩展向试件边界。图6展示了9个试样在爆后的裂纹图片(其中绿色线条为不易在图中观察到的微小裂纹)。

三种水压情况下两种试样在爆后的裂纹数量统计如表5。通过表5可以看出,除了Q4因为炸药爆燃或冲炮未产生裂纹以外,其他试样的裂纹和水压

都有很明显的关系。150 m 水压条件下三种礁灰岩都只产生两条贯穿裂纹,而50 m 水深条件下裂纹数量都在3条以上;且随着水深的增加,裂纹的宽度也在减小。即对于同种类型的礁灰岩,爆破产生的裂纹数量和宽度都会随着水压的增加而减小。

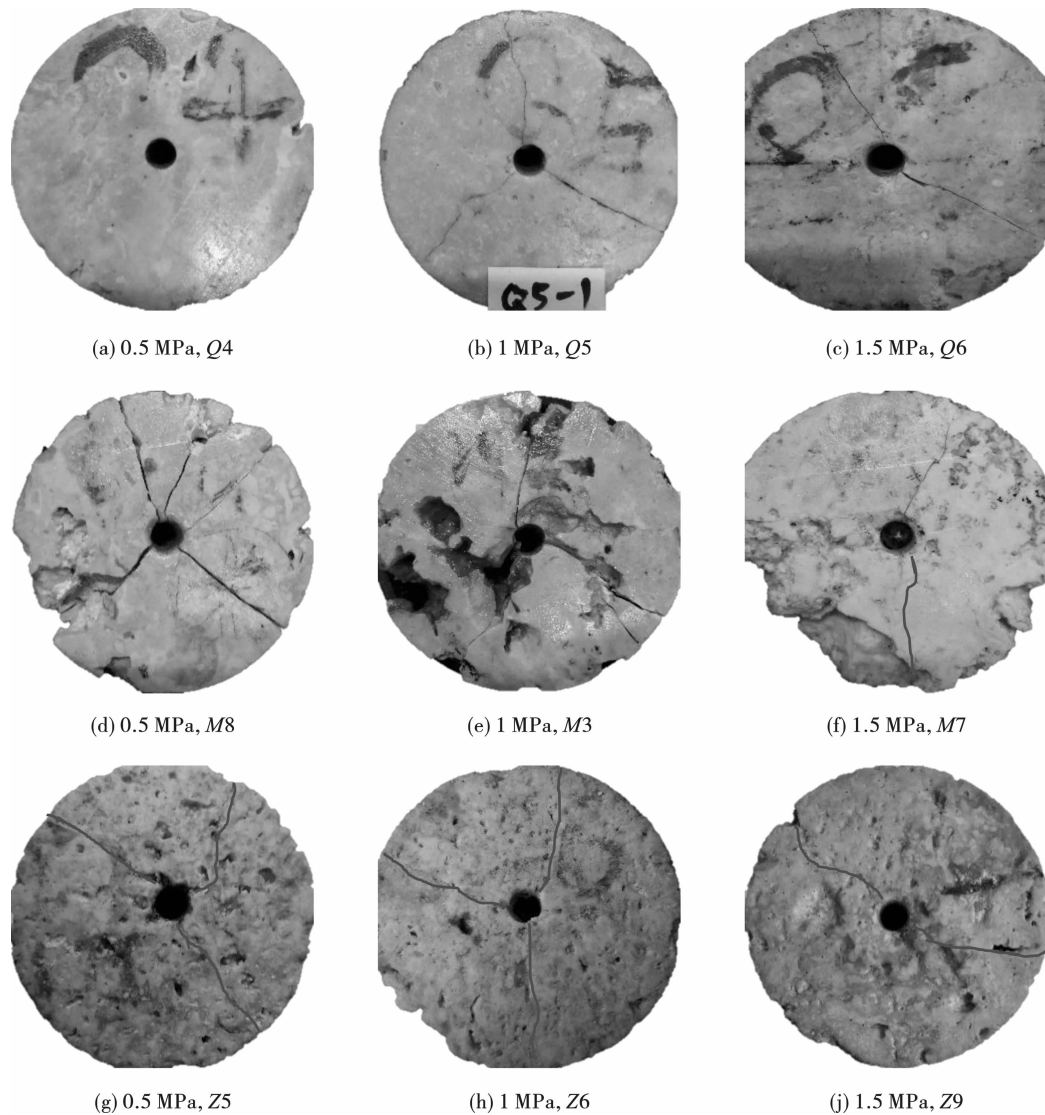


图6 不同水压下礁灰岩裂纹情况

Fig. 6 Cracks of reef limestone under different water pressures

表5 三种水压情况下试件爆后的裂纹数量

Table 5 Number of cracks after explosion under three kinds of water pressure

试样编号	Q4	Q5	Q6	M8	M3	M7	Z5	Z6	Z9
水压/MPa	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5
裂纹数量	0	3	2	4	3	2	3	3	2

试验后发现,在相同水深条件下,对于强度较低的生物砂砾块灰岩试样,爆破产生的裂隙反而十分微小,强度较高的珊瑚灰岩类和珊瑚砾块灰岩相比要小得多。D Su 等通过在 PMMA 材料中预制天然

裂缝的试验发现^[9],天然裂缝对于爆破裂纹的产生具有十分重要的影响。天然裂隙的存在改变了爆炸应力波的传播路径及试件本身的力学性质,爆后试件将会形成圆周型裂纹。岩体内天然裂隙的存在对

爆炸应力波的影响主要有两个方面^[15]:一方面天然裂隙的存在会导致应力波在裂隙处发生反射和透射,从而改变了爆炸应力波的传播路径及其性质,进而改变了应力波对介质的作用形式;另一方面,爆炸应力波本身在天然裂隙处也会发生相互作用,使爆炸应力波的能量大量损耗。在本文的试验中,强度较低的珊瑚砾块灰岩试件的天然孔隙众多,从图6中可以看出,礁灰岩的裂纹扩展会受到天然孔隙的引导而顺着孔隙贯通试件,说明应力波在裂隙处发生了反射和透射,天然裂隙改变了应力波的传播路径和作用形式。另一方面,爆炸应力波自身在天然裂隙处的相互作用也导致能量在天然孔隙中消耗较多。由于这两个方面的共同影响,导致生物砂砾块灰岩爆生裂纹十分微小。即在同种水深的条件下,由于生物砂砾块灰岩众多的天然裂隙阻断了应力波的传播,改变了应力波的传播路径和作用方式,从而导致珊瑚砾块灰岩的裂隙十分微小。

3 结论

通过对四种类型的珊瑚礁灰岩(珊瑚灰岩,珊瑚砾块灰岩,生物砂砾块灰岩,珊瑚砾屑灰岩)进行三种不同水深的单孔爆破试验后,主要得出以下结论:

(1)水下珊瑚砾屑灰岩爆破的大块率随水深的增加而升高且块度分布符合 *swabrec* 分布函数, *swabrec* 分布函数对水下礁灰岩爆破设计具有一定的指导意义。

(2)礁灰岩的破坏情况与岩石强度有关,珊瑚灰岩和珊瑚砾块灰岩在炮孔周围观察不到明显的破坏区,但在天然缺陷处会形成贯穿裂纹;生物砂砾块灰岩在炮孔附近能够观察到明显的破坏区域,且该区域会出现崩落现象。

(3)同种类型的珊瑚礁灰岩爆破后裂纹形成与水深有明显的关系,裂纹的数量和宽度会随着水深的升高而减小。

(4)对于强度较低以及天然孔隙较多的生物砂砾块灰岩,天然裂隙处会阻断应力波的传播,还会导致爆炸应力波的传播路径和作用方式发生改变,导致在同种水深条件下,生物砂砾块灰岩爆后裂纹的宽度明显要小于珊瑚灰岩和珊瑚砾块灰岩。

参考文献 (References)

[1] BIGGS JM. Introduction to structural dynamics[M]. New York: McGraw-Hill, 1964: 315-28.
[2] X F Li, H B Li, G K Zhang. Damage assessment and blast

vibrations controlling considering rock properties of underwater blasting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 121. doi. org/10. 1016/j. ijrmms. 2019. 06. 004.

- [3] Z X Zhang. Rock fracture and blasting: theory and applications[M]. OXFORD: Butterworth-Heinemann, 2015.
[4] 李夕兵. 凿岩爆破工程[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2011.
[5] 王新志. 南沙群岛珊瑚礁工程地质特性及大型工程建设可行性研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2008.
[5] WANG Xin-zhi. Study on engineering geological properties of coral reefs and feasibility of large project construction on nansha islands[D]. Wuhan: The Chinese Academy of Sciences(Institute of Rock and Soil Mechanics), 2008. (in Chinese)
[6] 王新志, 汪 稔, 孟庆山, 等. 南沙群岛珊瑚礁礁灰岩力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2221-2226.
[6] WANG Xin-zhi, WANG Ren, MENG Qing-shan, et al. Research on characteristics of coral reef calcareous rock in Nansha Islands[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2221-2226. (in Chinese)
[7] 孟庆山, 范 超, 曾卫星, 等. 南沙群岛珊瑚礁灰岩的动态力学性能试验[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 190-197.
[7] MENG Qing-shan, FAN Chao, ZENG Wei-xing, et al. Tests on dynamic properties of coral-reef limestone in South China Sea[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 190-197. (in Chinese)
[8] 赵 根. 深水条件下围堰拆除爆破技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.
[8] ZHAO Gen. Research on blasting technology for cofferdam demolition in deep water[D]. Hefei: University of Science and Technology of China. (in Chinese)
[9] D Su, Y Kang, F Yan, et al. Crack propagation law affected by natural fracture and water jet slot under blast loading[J]. Combustion Explosion and Shock Waves, 2018, 54(6): 747-756.
[10] CHI L Y, ZHANG Z X, AALBERG A, et al. Experimental investigation of blast-induced fractures in rock cylinders[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(8): 2569-2584.
[11] FINN Ouchterlony, JOSE A, SANCHIDRIAN, et al. Percentile fragment size predictions for blasted rock and the fragmentation-energy fan[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017(50): 751-779.
[12] F Ouchterlony, J A Sanchidrián. A review of development

- of better prediction equations for blast Fragmentation [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019(11):1094-1109.
- [13] ESEN S, ONEDERRA I, BILGIN H A. Modelling the size of the crushed zone around a blasthole[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2003,40(4):485-495.
- [14] 李春军,吴立,李红勇,等.不同水深条件下水下钻孔爆破破岩机理研究[J].爆破,2015,32(4):123-127.
- [14] LI Chun-jun, WU Li, LI Hong-yong, et al. Rock breaking mechanism of underwater drilling blasting on different depths [J]. Blasting, 2015, 32(4):123-127. (in Chinese).
- [15] 粟登峰.水射流割缝辅助岩石爆破定向致裂机理研究[D].重庆:重庆大学,2017.
- [15] SU Deng-feng. Study on the directional fracturing mechanism of rock blasting with water jet slotting assisted[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese).
- 英文编辑:何松
-
- (上接第23页)
- [6] 张宪堂,陈士海.考虑碰撞作用的节理裂隙岩体爆破块度预测研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(8):1141-1146.
- [6] ZHANG Xian-tang, CHEN Shi-hai. Study on the prediction of blasting fragmentation of jointed rock mass considering collision effect [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8):1141-1146. (in Chinese)
- [7] 周先平,李彦坡,吴新霞,等.岩体爆破块度控制技术新进展[J].水利水电技术,2018,49(S1):7-13.
- [7] ZHOU Xian-ping, LI Yan-po, WU Xin-xia, et al. New advance of control technique for blasting fragment-size of rock mass [J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 2018, 49(S1):7-13. (in Chinese)
- [8] 王仁超,朱品光.基于随机森林回归方法的爆破块度预测模型研究[J].水力发电学报,2019,38(1):89-101.
- [8] WANG Ren-chao, ZHU Pin-guang. Study on blasting fragmentation prediction model based on random forest regression method [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(1):89-101. (in Chinese)
- [9] 周后友,池恩安,张修玉,等. $\phi 42$ mm 炮孔空气间隔装药爆破对岩体破碎效果的影响研究[J].爆破,2018,35(4):63-68.
- [9] ZHOU Hou-you, CHI En-an, ZHANG Xiu-yu, et al. Influence of air-decking charge blasting with $\phi 42$ mm mm blast hole on rock fragmentation [J]. Blasting, 2018, 35(4):63-68. (in Chinese)
- [10] 吴发名,刘勇林,李洪涛,等.基于原生节理统计和爆破裂纹模拟的堆石料块度分布预测[J].岩石力学与工程学报,2017,36(6):1341-1352.
- [10] WU Fa-ming, LIU Yong-lin, LI Hong-tao, et al. Prediction of rock mass block distribution based on native joint statistics and blasting crack simulation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(6):1341-1352. (in Chinese)
- [11] 张正宇,张文焯,吴新霞,等.现代水利水电工程爆破[M].北京:中国水利水电出版社,2003:110-111.
- [11] ZHANG Zheng-yu, ZHANG wen-xuan, WU xin-xia, et al. Blasting of modern water conservancy and Hydropower Engineering [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2003:110-111. (in Chinese)
- [12] 王民寿,蒋晓明,隆文非.修正 KUZ-RAM 数模预报爆破堆石料块度[J].四川水力发电,1999(4):77-80,83-100.
- [12] WANG min-shou, JIANG Xiao-ming, LONG Wen-fei. Modified Kuz-Ram numerical model for predicting the fragmentation of blasting rockfill [J]. Sichuan Hydropower, 1999(4):77-80, 83-100. (in Chinese)
- [13] 刘迪,徐全军,温尊礼,等.岩体的节理裂隙对爆破块度分布的影响分析[J].西部探矿工程,2016,28(3):188-191.
- [13] LIU Di, XU Quan-jun, WEN Zun-li, et al. Analysis on the influence of rock mass joints and fissures on blasting fragmentation distribution [J]. Western Exploration Engineering, 2016, 28(3):188-191. (In Chinese)
- [14] 吴新霞,彭朝辉,张正宇,等.Kuz-Ram 模型在堆石坝级配料开采爆破中的应用[J].长江科学院院报,1998,15(4):40-42,46.
- [14] WU Xin-xia, PENG Zhao-hui, ZHANG Zheng-yu, et al. Application of Kuz-Ram model in graded material ming-ing of rockfill dam [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1998, 15(4):40-42, 46. (in Chinese)
- [15] 周辉,罗伟,王学兵,等.岩石系数 A 值在预测爆破块度分布中的应用[J].工程爆破,2018,24(4):19-24.
- [15] ZHOU Hui, LUO Wei, WANG Xue-bing, et al. Application of rock coefficient a value in prediction of blasting fragmentation distribution [J]. Engineering blasting, 2018, 24(4):19-24. (in Chinese)
- 英文编辑:陈东方