



岷江龙溪口水下岩体钻爆的爆破能量特征研究

滕树强¹, 吴 亮², 代 颖³, 刘汉龙²

(1. 四川港航建设工程有限公司, 四川 成都 610023;

2. 武汉科技大学 理学院, 湖北 武汉 430065; 3. 西南交通大学, 四川 成都 610097)

摘要: 为研究岷江龙溪口水下岩体钻爆的破岩效率, 建立动力有限元模型, 对比水与空气耦合介质对爆炸能量传递效率的影响, 分析露天与水下爆破中岩体动力响应与能量特征。结果表明, 水耦合装药条件下爆炸传入岩体的爆破能量和传递效率大于空气耦合装药条件, 可见水介质耦合可以增强破岩效果。在水耦合装药条件下, 覆水条件对初始阶段爆炸应力波的传播不存在影响; 当压缩应力波从自由面反射后, 露天水耦合爆破的单元动能以及内能较大, 说明在水下爆破中与自由面接触的水介质抑制了岩体的运动并吸收了部分爆破能量。水下爆破需要增加炸药单耗才能获得露天水耦合同样的爆破效果。

关键词: 水下爆破; 露天爆破; 应力波; 爆破能量

中图分类号: U615.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)10-0104-06

Blasting energy characteristics during underwater rock drilling and blasting in Longxikou of Minjiang River

TENG Shuqiang¹, WU Liang², DAI Ying³, LIU Hanlong²

(1. Sichuan Port and Channel Construction Engineering Co., Ltd., Chengdu 610023, China;

2. College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;

3. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610097, China)

Abstract: To study the rock-breaking efficiency of underwater rock drilling and blasting in Longxikou of the Minjiang River, we build a dynamic finite element model to compare the influences of the water-coupled and air-coupled medium on the blasting energy transmission efficiency. Meanwhile, we also analyze the dynamic response and energy characteristics of rock in open-pit and underwater blasting. The results indicate that the blasting energy and transmission efficiency transmitted into the rock in water-coupled powder charge conditions are greater than those in air-coupled powder charge conditions, which shows that a water-coupled medium can enhance the rock-breaking effect. In the water-coupled powder charge conditions, the water-covering conditions have no effect on the propagation of initial explosive stress waves. When the compressive stress wave is reflected from the free surface, the unit kinetic energy and internal energy of open-pit water-coupled blasting are relatively large. This indicates that the water medium in contact with the free surface in underwater blasting suppresses the rock mass movement and absorbs some of the blasting energy. Underwater blasting needs to increase the explosive unit consumption to obtain the same blasting effect as open-pit water coupling.

Keywords: underwater blasting; open-pit blasting; stress wave; blasting energy

“一横两纵”的四川水运以岷江作为进出川的主通道之一, 向内连接经济发达的川南、成都平原等主要地区, 向外经长江与海洋连通, 成为联

系下游地区的重要通道。目前, 按照“以航为主、航电结合、以电补航”的原则对岷江(乐山—宜宾段)航电资源进行开发, 建立 4 个上游梯级枢纽工

收稿日期: 2023-06-07

作者简介: 滕树强 (1979—), 男, 高级工程师, 从事水运工程施工管理。

程: 犍为、老木孔、龙溪口和东风岩, 并治理下游约 81 km 河段, 航道维护尺度采用 2.0 m × 60 m × 500 m (水深 × 宽 × 弯曲半径), 使岷江下游全河段达到Ⅲ级航道标准, 船闸闸室有效尺度为 220 m × 34 m × 4.5 m (闸室长 × 闸室宽 × 门槛水深), 以达到“整治下游、渠化上中游”的目标。由于岷江龙溪口部分航道中存在礁石, 为达到Ⅲ级航道标准, 须对礁石进行爆破以满足通航水流条件。

目前, 石方开挖的主要方法仍然是钻孔爆破。然而, 水下炸礁不同于普通的露天爆破, 其面临着更复杂的施工环境, 如水环境和水压。水下爆破与陆地爆破相比, 由于水与空气介质的特性存在差异, 导致炸药爆破产生的能量与冲击波的传播过程存在明显差异。水压作用使炸药的性能发生改变, 同时水压不仅影响爆炸能量的传输, 而且水作为媒介把炸药爆炸产生的冲击波与爆生气体荷载传给岩体, 岩体在动荷载的作用下产生破碎, 其破碎过程也受到深水环境的影响, 主要表现为水对应力波入射和反射破岩影响以及破岩能量的调节作用^[1]。近年来, 刘磊等^[2]通过水下炸礁爆破试验, 确定爆破施工工艺和参数, 解决了沉管基槽水下炸礁高精度控制问题; 于建新等^[3]基于动力有限元数值模型, 分析水下单孔爆破对岩体的损伤及上部水体的影响、不同起爆位置与多孔爆破对围岩的损伤规律; 喻灿星等^[4]探索水下炸礁施工过程中的关键技术, 通过精细设计孔网参数等方法, 顺利实施水下礁石爆破; Wu 等^[5-6]采用流固耦合的数值计算方法研究了水下爆破破碎及块体运动堆积的规律。目前, 研究者主要通过炸药单耗与水深关系讨论岩体爆破破碎机理及块度控制, 也讨论水下岩体特性对破碎的效果影响, 初步建立块度与能耗的关系, 但水对应力波的入射和反射破岩效应、水下爆破破岩能量的分布特征还未开展研究。

本文通过数值模拟的方法建立台阶爆破的模型, 通过分析部分区域和单元的应力曲线、与能量曲线对比研究浅水岩体钻爆中爆破能量分布特征与露天爆破之间的差异, 从而揭示浅水岩体钻

爆的破岩机理, 为工程设计与施工提供理论支持。

1 模型的建立

1.1 几何模型

为研究水下岩体钻爆中爆炸能量传输与岩体破碎的关系, 本文采用动力有限元程序建立三维模型, 分析水下与露天岩体爆破的破岩机理。该模型由岩体、空气(水)、炸药和堵塞组成。模型如图 1 所示, 模型的长度、宽度和高度分别为 14.110、5.000 和 13.000 m, 炮孔深度为 8.000 m, 炮孔半径为 0.055 m, 装药半径为 0.045 m, 装药长度为 5.500 m, 堵塞长度为 2.500 m, 空气(水层)厚度为 3.000 m。空气、水和炸药 3 种物质采用欧拉网格建模, 而堵塞和岩体固态物质采用拉格朗日网格建模, 计算采用任意拉格朗日-欧拉 (arbitrary Lagrange-Euler, ALE) 流固耦合算法。基于研究问题的对称性, 建立了 1/2 模型以减少计算, 炮孔纵截面为对称边界, 其他外边界为无反射边界。定义关键字 *DATABASE_GLSTAT 和关键字 *DATABASE_MATSUM 以实现模型整体和局部能量的输出。为了确保元素在模拟过程中不断耦合, 欧拉网格在建模过程中与拉格朗日网格重叠。

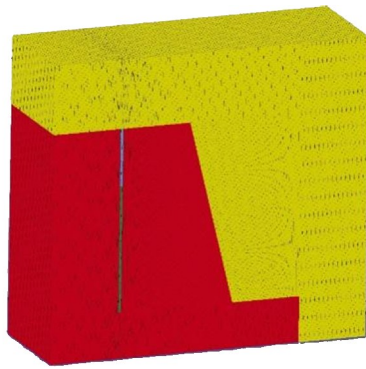


图 1 计算模型

1.2 炸药模型参数

本文设计装药段中部为起爆点。炸药爆轰模型采用关键字 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN, 爆轰产物采用 JWL 状态方程描述^[7]:

$$p_e = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V_e} \right) e^{-R_1 V_e} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V_e} \right) e^{-R_2 V_e} + \frac{\omega E_e}{V_e} \quad (1)$$

式中: p_e 为爆轰产物的压力, GPa; V_e 为炸药初

始相对体积, 取 1; E_e 为炸药初始比内能, GPa, 取 4.129 GPa; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为 JWL 方程参数, 分别取 214.400 GPa、0.182 GPa、4.20、0.90、0.15。炸药密度 ρ_0 为 1 300 kg/m³, 爆速 v_{OD} 为 4 500 m/s, 爆压为 9.7 GPa。

1.3 岩体和堵塞材料模型参数

岩体和堵塞材料采用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 模型进行计算, 该模型可以反映应变速率材料的运动硬化以及各向同性硬化, 还能描述应变速率的变化效应和破坏效应。屈服应力和应变速率之间的关系采用 Cowper-Symonds 模型描述,

公式为:

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/P} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_{p,e}) \quad (2)$$

式中: σ_y 为岩体屈服应力, MPa; $\dot{\varepsilon}$ 为应变率; C 、 P 为 Cowper-Symonds 模型的应变速率参数; β 为运动硬化和各向同性硬化引起的硬化参数, $0 < \beta < 1$; σ_0 为岩体介质的初始屈服应力, MPa; $\varepsilon_{p,e}$ 为有效塑性应变; E_p 为硬化塑性模量, MPa, 其值为 $E_0 E_t / (E_0 - E_t)$, 其中 E_0 、 E_t 分别为杨氏模量、剪切模量, MPa。

岩体和堵塞材料的物理力学参数见表 1^[8]。

表 1 岩体和堵塞材料的物理力学参数

| 材料 | $\rho /$ (kg·m ⁻³) | $E_0 /$ GPa | ν | $\sigma_0 /$ MPa | $E_t /$ GPa | C | P | $R_c /$ MPa | $R_t /$ MPa |
|----|-----------------------------------|----------------|-------|---------------------|----------------|------|------|----------------|----------------|
| 岩体 | 2 700 | 68.000 | 0.240 | 150.0 | 7.000 | 2.63 | 3.96 | 150 | 20 |
| 堵塞 | 2 170 | 6.700 | 0.250 | 39.2 | 0.600 | 2.63 | 3.96 | 30 | 5 |

注: ν 为泊松比, R_c 为单轴抗压强度, R_t 为单轴抗拉强度。

1.4 空气和水模型参数

空气和水介质采用 MAT_NULL 模型计算。采用 EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程作为空气的状态方程, 即:

$$p_a = C_0 + C_1 \mu_a + C_2 \mu_a^2 + C_3 \mu_a^3 + (C_4 + C_5 \mu_a + C_6 \mu_a^2) E_a \quad (3)$$

式中: p_a 为空气压力, Pa; $C_0 \sim C_6$ 为常数, 其中 C_4 和 C_5 设置为 0.4, 其他设置为 0^[9]; μ_a 为空气体积应变参数, 其值为 $1/(V_a - 1)$, 其中 V_a 为空气相对体积; E_a 为单位体积空气的初始能量, Pa, 取 0.25 MPa。空气的密度取 1.29 kg/m³。

水由 EOS_GRUNEISEN 状态方程描述, 公式为:

$$p_w = \frac{\rho_w C^2 \mu [1 + (1 - \gamma_0/2) \mu - (a/2) \mu^2]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \cdot \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \cdot \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a \mu) E_w \quad (4)$$

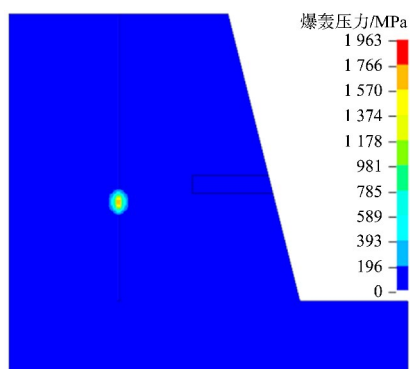
式中: p_w 为水压, Pa; ρ_w 为水的初始密度, 取 1 020 kg/m³; a 为初始体积校正系数, 取 0; C 为剪切-压缩波速度曲线的截距, 取 1 650 m/s;

γ_0 为 GRUNEISEN 常数, 取 0.5; S_1 、 S_2 和 S_3 为剪切-压缩波速度曲线的斜率系数, 分别取 2.560 0、-1.986 0 和 0.226 8; E_w 为单位体积水的初始能量, Pa, 取 0 Pa; μ 为体积变化率。

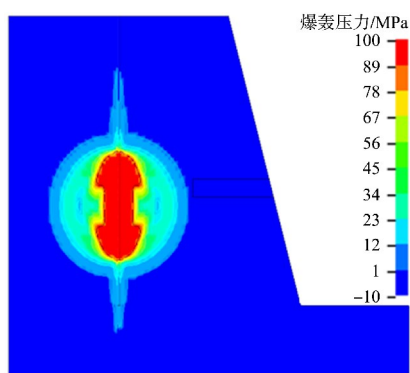
2 数值模拟结果及分析

2.1 爆炸作用过程

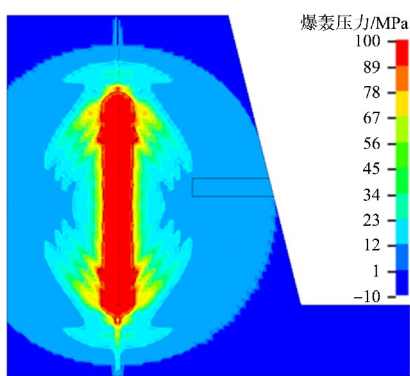
计算模型中起爆点设置在炸药中部。计算结果显示, 炸药起爆瞬间, 在炸药中部产生爆轰压力波, 随后爆轰压力波沿炮孔轴向往两端传播, 当爆轰压力波沿竖直方向往两端分别传播至炸药顶部和炮孔底部并发生反射, 炸药爆轰压力随时间传播的过程如图 2 所示。同时, 炸药能量通过耦合介质传递给炮孔壁, 产生的冲击波在岩石介质中传播。由于冲击波在传播过程中能量消耗而衰减, 当冲击波压力峰值低于岩石介质的动态抗压强度, 便成为压缩应力波继续在岩石中传播。由图 2 可看出, 当中部炸药起爆时, 炸药两端的应力会比较高, 而中部爆轰压力的传播会呈柱状, 在 $t = 0.75$ ms 时刻, 压缩应力波传播至自由面并开始发生反射。



a) 0.05 ms



b) 0.30 ms



c) 0.75 ms

图 2 不同时刻压力云图

2.2 爆炸能量的传递

实际露天土石方爆破工程中, 药卷直径通常小于炮孔直径, 这种情况为不耦合装药爆破。当炮孔无水时, 空气为耦合介质。假如炸药与孔壁间充满水时, 称为水耦合装药爆破, 也有学者称为水不耦合装药爆破, 都是指炸药与炮孔壁间空隙被水介质充填的装药爆破, 只是参

考对象不同。由于水下爆破是在水环境中进行的爆破作业, 所以炸药与炮孔之间不可避免地存在水介质。为对比分析水与空气耦合对爆炸能量的传递效率, 选择露天台阶爆破模型进行计算。根据模型的特点, 选择靠近自由面的岩体区域进行分析, 选择的区域如图 3 所示。监测区的单元动能、内能以及总能量时程曲线见图 4。计算结果表明: 水耦合条件下爆炸能量传递效率显著高于空气耦合装药, 原因是水介质具有不可压缩性, 故具有更好的传递爆炸能量的效果。

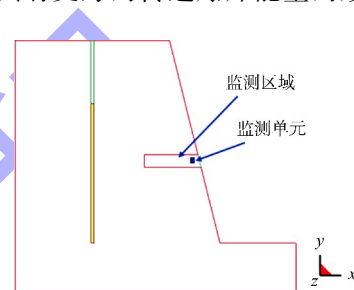
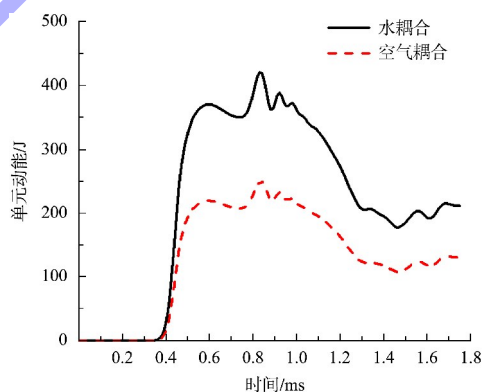
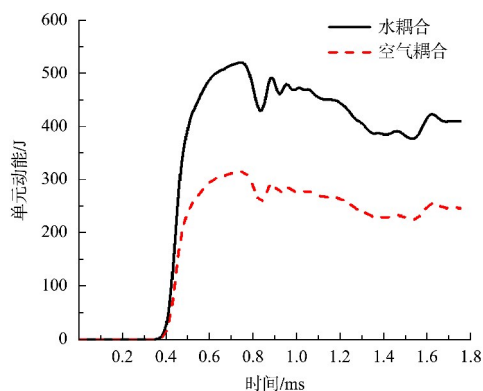


图 3 监测区域



a) 单元动能



b) 单元内能

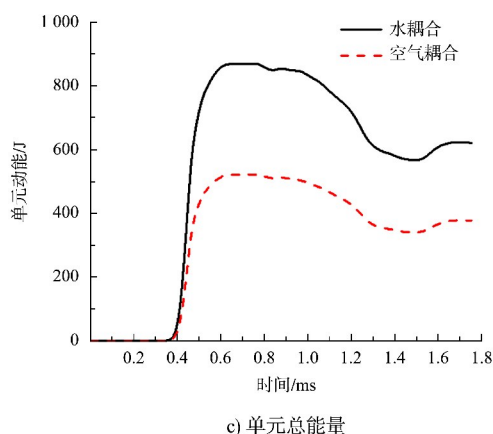


图4 临自由面水耦合和空气耦合的部分单元能量时程曲线

2.3 覆水条件对岩体动力响应及爆破能量的影响

为有效分析覆水条件对岩体动力响应及爆破能量的影响,需要保证炸药爆炸传递给岩体的爆炸能量相同。因此,采用水耦合装药结构计算露天与水下岩体的爆破动力响应。鉴于单元的受力状态常采用最大与最小主应力表示,因此,利用后处理软件分别输出水下爆破和露天水耦合爆破2种工况下监测单元的应力时程曲线,将2种工况下主应力放在同一曲线图上进行对比分析,见图5(应力为负代表压应力,为正代表拉应力)。

炸药爆炸后,当压缩应力波传至监测单元时,该单元压应力迅速增大,见图5b)的压应力峰值,随后压缩应力波传到自由面反射成为拉伸应力波,拉伸应力波传到监测单元时,单元的拉应力峰值迅速增大,见图5a)的拉应力峰值。由于岩石属于脆性材料,其抗拉强度远低于其抗压强度,再结合靠近自由面处的岩石单元应力状态,可判断此处岩石破坏的主导作用为拉应力,当拉应力超过岩石介质的抗拉强度时,单元将发生拉伸破坏。计算结果表明,浅水爆破与露天水耦合爆破中,爆炸产生的应力波到达监测单元的时刻与峰值均相同,说明覆水条件对爆炸应力波初始阶段的传播几乎无影响;当压缩应力波从自由面反射后,露天水耦合爆破的拉应力峰值大于水下爆破的拉应力峰值,说明自由面水介质的存在吸收了部分爆破能量。

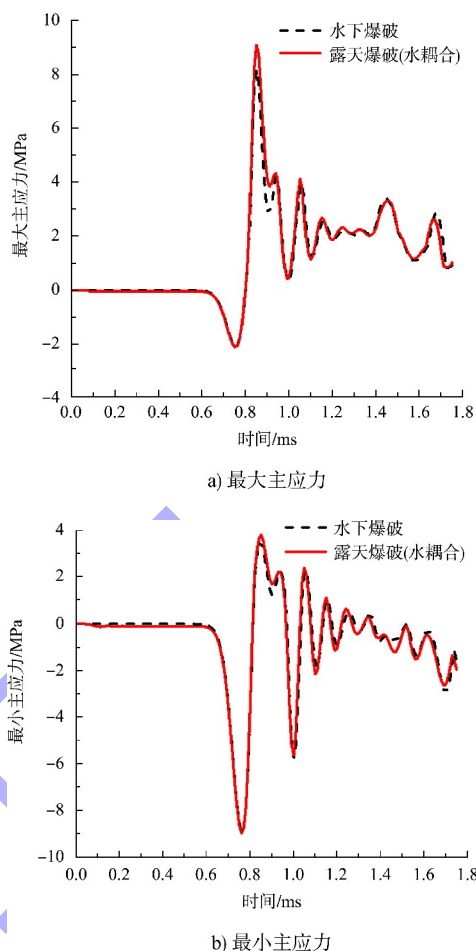
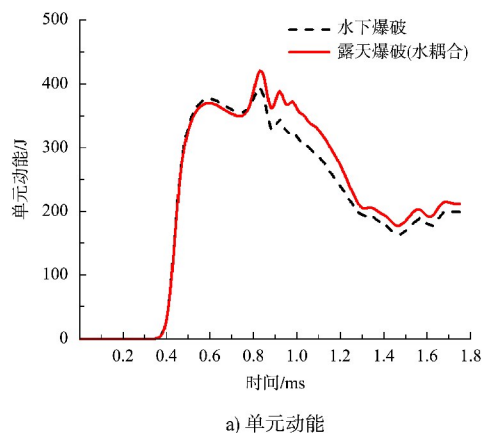


图5 单元最大和最小主应力时程曲线

监测区的单元动能、内能以及总能量时程曲线见图6。可以看出,在爆炸压缩应力波作用阶段,水下爆破与露天水耦合爆破的能量传递与耗散基本相同,在拉伸应力波作用阶段露天水耦合爆破的动能以及内能都要大一些,其原因是空气自由面反射的拉伸应力波大于水介质情况,使得单元向外的运动与变形更显著。



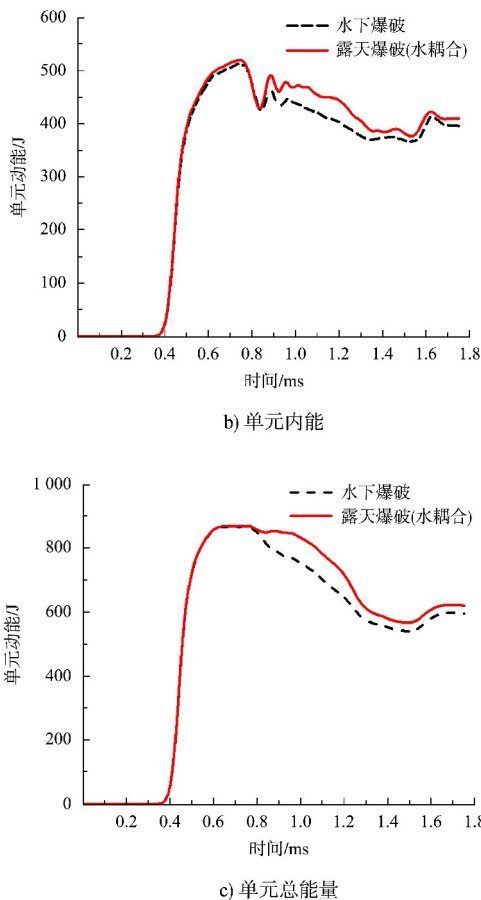


图 6 临自由面水下爆破与露天水耦合爆破的部分单元能量时程曲线

3 结论

- 1) 水耦合装药条件下爆破能量的传递效率大于空气耦合装药条件。
- 2) 在水耦合装药条件下，露天水耦合爆破中压缩应力波在自由面上的反射大于水下爆破，且其产生的抛掷速度和位移大于水下爆破，有利于岩体的破碎。
- 3) 在水耦合装药条件下，覆水条件对初始阶

段爆炸应力波的传播不存在影响；当压缩应力波从自由面反射后，露天水耦合爆破的单元动能及内能都大，说明自由面水介质的存在抑制了岩体的运动，并吸收了部分爆破能量。

参考文献：

- [1] 张正宇, 张文煊, 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.
- [2] 刘磊, 李义彬, 刘钊, 等. 沉管基槽水下炸礁高精度控制技术[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(12): 97-101.
- [3] 于建新, 李真珍, 高帅杰, 等. 水下深孔爆破岩石裂纹扩展及损伤规律[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(7): 2907-2913.
- [4] 喻灿星, 覃国杰, 曾丽. 内河航道水下炸礁钻孔爆破技术研究[J]. 工程爆破, 2021, 27(4): 58-63.
- [5] WU L, LIANG Z J, CHEN M, et al. Experiments and fluent-engineering discrete element method-based numerical analysis of block motion in underwater rock-plug blasting[J]. Applied sciences, 2023, 13(1): 1-19.
- [6] WU L, LIANG Z J, CHEN M. Experiments and simulation of block motion in underwater bench blasting [J]. Scientific reports, 2023, 13: 1-14.
- [7] FAN Y, MIAO X Z, GAO Q D, et al. Influence of water depth on the range of crushed zones and cracked zones for underwater rock drilling and blasting [J]. International journal of geomechanics, 2022, 22(10): 1-16.
- [8] 李桐, 陈明, 叶志伟, 等. 不同耦合介质爆破爆炸能量传递效率研究[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(6): 4-14.
- [9] 吴亮, 卢文波, 钟冬望, 等. 混凝土介质中空气间隔装药的爆破机理[J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(1): 58-64.

(本文编辑 王璁)

编辑部声明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动，他们建立伪网站，利用代理投稿、审稿等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明，从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿、审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址：www.sygcc.com.cn，敬请广大读者和作者周知并相互转告。

《水运工程》编辑部