

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0496

基于聚能射流的岩石定向劈裂机制*

刘迪¹, 顾云¹, 孙飞¹, 李飞¹, 陈顺禄², 刘勤杰¹

(1. 核工业南京建设集团有限公司, 江苏 南京 211102;

2. 南京君缘科爆工程技术有限公司, 江苏 南京 211135)

摘要: 基于岩石材料脆性断裂模型分析, 从提高炸药能量向岩石断裂表面能转换效率的角度, 提出采用预切槽和多点聚能射流冲击岩石进行裂纹引导与扩展, 实现岩石定向劈裂。设计了一种可用于岩石劈裂的聚能装药, 利用数值计算方法研究了岩石类脆性材料在聚能射流冲击作用下的定向劈裂机制, 并计算比较了不同形状金属杆射流对岩体的冲击劈裂效果。分析计算该聚能装药射流形成与岩石的侵彻断裂过程, 得出用于岩石劈裂的最佳聚能装药结构与炸高。实验成功用 2 枚聚能装药将岩石试块按预制方向劈裂, 测试获得的岩石表面应力峰值约 0.5~0.8 MPa。结果表明, 采用该聚能装药在 25 mm 炸高下能够形成长径比约 1:3 的楔形金属杆射流, 沿着控界面预先设计的切槽方向, 多点设置聚能装药, 同时起爆后形成楔形金属杆射流冲击岩石, 产生了较好的定向劈裂效果。该方法将爆炸能量精准导入控界面并有效地转换成岩石断裂表面能, 从而提升了岩石定向劈裂的效果及炸药的能量利用率, 研究结果可为大范围岩体开挖精确控界爆破切割装置设计及降低工程爆破危害提供参考。

关键词: 聚能装药; 岩石断裂表面能; 定向劈裂; 控界爆破

中图分类号: O389; TJ51

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Directional splitting mechanism of rock based on shaped charge jet

LIU Di¹, GU Yun¹, SUN Fei¹, LI Fei¹, CHEN Shunlu², LIU Qinjie¹

(1. Nuclear Industry Nanjing Construction Group Co., Ltd., Nanjing 211102, Jiangsu, China;

2. Junyuan Kebao Nanjing Engineering Technology Co., Ltd., Nanjing 211135, Jiangsu, China)

Abstract: Based on the brittle fracture model of rock materials, from the perspective of improving the conversion efficiency of explosive energy to the fracture surface energy of rock materials, it is proposed to use pre-cutting and multi-point shaped charge jet impact on rocks for crack fracturing and propagation, achieving directional rock splitting. A shaped charge that can be used for rock splitting was designed, while the directional splitting mechanism of rock-like brittle materials under the impact of shaped charge jet is studied using numerical method, by which the impact splitting effects of different shapes of high-speed metal rods on rocks are calculated and compared. The formation of the shaped charge jet and the impact fracture process on the rock are analyzed by using numerical simulation, and the optimal shaped charge structure and explosion height for splitting are obtained. In the experiment, 2 shaped charges were used to successfully split the rock samples followed the design direction, and the peak stress on the rock surface obtained from the test were about 0.5–0.8 MPa. The results show that using this shaped charge can form a wedge-shaped metal rod with a length-to-diameter ratio of about 1 : 3 at an explosion offset of 25 mm. The shaped charges are set at multiple points along the pre-cutting direction of the designed rock control interface, and at the same time, the wedge-shaped metal rod jets are formed after explosion, which impact the rock and produce a good directional splitting effect. This technology accurately introduces explosive energy into the control interface and converts it into rock

* 收稿日期: 2022-11-07; 修回日期: 2023-03-11

基金项目: 江苏省地质矿产勘查局科技创新项目(2020KY07)

第一作者: 刘迪(1988—), 男, 硕士研究生, 工程师, laudi0321@outlook.com

通信作者: 孙飞(1989—), 男, 硕士研究生, 工程师, 1326662880@qq.com

fracture surface energy effectively, thereby improving the effective utilization rate of explosives, providing reference for the design of precise control blasting cutting devices for large-scale rock excavation and reducing blasting hazards.

Keywords: shaped charge; rock fracture surface energy; directional splitting; boundary control blasting

核电厂的基坑负挖多采用爆破法施工, 如何控制建基面爆破开挖后的平整度越来越受到重视。尤其在核岛底板的开挖施工中, 对底板平整度及保留岩层免受损伤的要求更高。核岛底板开挖时, 若要一次爆破至建基面的设计标高, 则会对开挖形成的建基面质量和基岩爆破振动控制产生不利影响。因此, 爆破时不应使建基面岩体产生大量的爆破裂隙, 使岩体节理裂隙、层理等弱面继续恶化, 导致岩体承载强度弱化。以往的传统做法是开挖至邻近底板时保留一定的基岩厚度, 进行分层爆破。该方法成本较高, 工程质量也难以达到技术标准要求^[1], 且针对爆破产生的过度超挖部分, 通常采用混凝土置换, 会造成巨大的经济损失。综上所述, 因核电设施对安全、质量的严苛要求, 使其对爆破技术提出了挑战。传统做法的弊端显而易见, 因此通过控界切割形成基坑的方法将成为核电岩石开挖施工重点控制工艺之一。

岩石切割和碎裂的方法很多, 除最常用的炸药钻爆法以外, 还有人工切割法^[2]、静态膨胀剂开挖法、机械开挖法等。炸药钻爆法: 按一定网孔参数进行机械钻孔, 孔内设置炸药、雷管, 以一定时间间隔进行联网爆破; 人工切割法: 用钢钎凿眼, 将钢楔放入眼中, 多个钢楔形成一条线, 再将钢楔打入岩石中逐步将岩石切割; 静态膨胀剂开挖法^[3]: 将膨胀剂按一定比例与水混合搅匀后灌入钻孔内, 并堵塞孔口, 经过密闭反应后, 能产生很大的膨胀压力作用于孔壁, 并沿着钻孔形成裂缝, 从而使岩体开裂; 机械开挖法^[4]: 采用金刚石圆盘锯进行切割或采用金刚石串珠绳锯进行岩石开挖。

采用传统钻爆法进行岩石爆破开挖时, 产生的新岩石断面通常界面平整度不高, 也无法控制爆破后的岩石块度。目前, 在核电站基础开挖工程以及爆破敏感区域附近的岩石开挖工程中, 精确爆破逐渐成为主流, 利用聚能射流原理进行精确爆破成为研究的热点。

聚能射流研究在国外起步较早, 形成聚能射流的装药通常由炸药和金属药型罩构成, 起爆后爆轰波的波阵面压迫药型罩, 使罩各部分不断碰撞挤压变形后以流体形态向前运动, 逐步形成高温、高速、高能量密度的金属聚能射流。聚能射流研究经过一百多年的快速发展, 已经形成较成熟的理论体系。

一些研究者^[5-6]将线型聚能切割器应用于定向断裂控制爆破, 利用金属射流直接作用于炮孔周围的岩体, 形成初始诱导裂隙, 高温、高压爆轰气体的准静态载荷和应力波动态加载于裂隙尖端, 使裂隙进一步扩展。郭德勇等^[7]研究了聚能爆破载荷下控制岩体爆生裂隙的发育与扩展力学模型。肖正学等^[8]分析了多孔爆破时裂纹发展的变化规律, 提出孔壁裂纹扩展速度计算式, 发现裂纹的长度和数量随应力波的增大而增大。

申涛等^[9]研究了切缝药包爆炸, 发现在定向爆破过程中, 切缝管能够有效控制爆炸能量的释放和爆生气体的力学行为。李清等^[10-11]分析了双孔点射流聚能药卷、半管射流聚能药卷定向断裂爆破的断裂力学特征, 两种药卷都可实现岩石的定向断裂爆破, 形成较好的断裂面。刘敦文等^[12]设计了一种可以改变能量分配的新型多向聚能管药柱, 在炮孔壁上, 多向聚能爆破产生多个聚能方向的定向裂纹, 降低了爆炸粉碎区和过度破碎的能耗, 提高了破裂区的能量利用率, 验证了多向聚能药柱设计是可行有效的。Luo 等^[13]研究了在岩石中聚能定向断裂控制爆破的裂纹起裂与扩展机理。Yin 等^[14]在炮孔中采用圆柱 V 型双槽线性聚能装药, 配合微秒级微差爆破, 获得了定向裂缝最长、非定向裂缝少、对围岩损伤小的爆破效果。Shu 等^[15]设计了一种可用于孔内切割的 π 型聚能线性切割器, 将传统线性切割器侵彻深度提高了 73.3%。陈伟^[16]给出了聚能爆破能够继续扩展的孔内压力公式, 对环向射流致裂岩石机理进行了论述。

在炮孔中引入初始预制裂纹有助于爆生裂纹沿切槽方向扩展, 形成优势裂纹, 在切槽周围形成较强的拉伸应力, 使爆生裂纹沿切槽方向优先扩展, 最终形成定向断裂。杨仁树^[17]研究了双炮孔切槽方式下, 两个炮孔间的贯穿裂纹和炮孔外侧裂纹扩展的动态行为, 贯穿裂纹尖端的动态应力强度因子大于外

侧裂纹的, 应力波在炮孔间叠加, 增加了炮孔间区域的应力场, 应力波以及由界面反射的拉伸波在裂纹尖端散射、绕射, 从而影响裂纹的扩展。

上述研究者提出的多为线型聚能切割器, 类似的爆炸试验结果显示, 线型聚能射流对岩体表面的冲击破坏范围大, 但向岩体内部侵彻能力较弱。若要切割形成一定厚度的岩体断裂面, 所需的爆炸能量远大于岩体控界面断裂所需的断裂表面能, 不仅会造成爆炸能量浪费, 而且对周围环境造成的危害难以控制。

本文中, 针对岩石爆破开挖边界炮孔间岩体如何爆破控制形成精确断裂面, 而保留岩层避免受损伤问题, 基于高速聚能射流对岩石冲击作用与岩石冲击断裂机理, 提出预切槽和多点聚能射流劈裂岩石控界面切割方法。利用正交数值模拟分析法得到优化设计聚能装药结构, 分析对比不同形状金属杆射流对岩石定向劈裂、不同炸高下聚能装药对岩石侵彻的效果, 得到最佳射流形状及炸高设置, 采用岩石试块多点聚能射流爆炸冲击定向劈裂试验进行验证。

1 岩石聚能控界切割原理

岩石聚能控界切割原理为: 沿控界面设计方向在炮孔壁岩体表面预切割一条导向切槽, 沿切槽间隔布置若干聚能装药。聚能装药同时爆炸后产生高速聚能杆状射流冲击岩石, 挤压成孔并产生初始裂纹, 裂纹沿切槽方向延伸, 同时向垂直于切槽的岩体内部发展, 将岩体快速劈裂; 同时, 爆炸产物助力裂纹面继续扩展, 使炮孔间的裂纹贯穿形成平整的新岩石断裂界面。相较于传统的炮孔爆破和线型装药聚能切割等方法, 多点聚能控界切割方法使爆炸能量能精准导入至设计断裂面, 炸药爆炸能量转换成岩石断裂表面能的效率、炸药能量利用率以及岩石切割效率等都得以提升。

岩石聚能控界切割技术的关键点有两部分: 一是聚能装药的设计, 目的是形成特定形状的杆状射流; 二是岩石表面的预处理, 在岩石表面用机械切割器沿设计断裂面方向预制一条导向切槽, 用以控制岩石断裂方向并提供初始裂纹, 如图 1 所示。

通过正交数值模拟分析, 结合爆破工程典型炮孔聚能装药设计经验, 设计一种聚能装药, 装药口径 28 mm、高 30 mm, 如图 2 所示; 药型罩为锥形平底罩, 锥角 90°, 罩壁厚 1.5 mm。

该聚能装药在特定炸高下能形成杆状射流, 高速的金属射流冲击侵彻岩石, 使岩石沿导向切槽方向开裂。在爆炸冲击波及爆炸产物膨胀的综合作用下, 裂纹会持续扩展, 起到增强切割岩石的效果。

从断裂力学能量的角度来分析该问题^[18], 裂纹扩展条件为岩石等脆性材料断裂产生的表面能增加率等于裂纹扩展释放的弹性势能释放率, 即:

$$\frac{dW}{dl} = \frac{dG}{dl} \quad (1)$$

式中: W 为弹性势能, G 为增加的表面能, l 为裂纹长度。

岩石受高速射流冲击后成孔, 孔内产生的环向压力超过其抗拉强度时开始产生裂纹, 并在裂纹尖端出现应力集中, 随着应力的持续增大, 初始裂纹进一步向外延伸扩展, 直至失稳破坏。由于裂纹产生后,

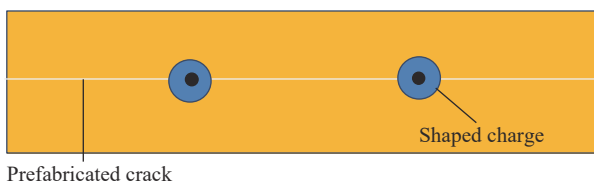


图 1 岩石聚能控界切割示意图

Fig. 1 Directional split blasting

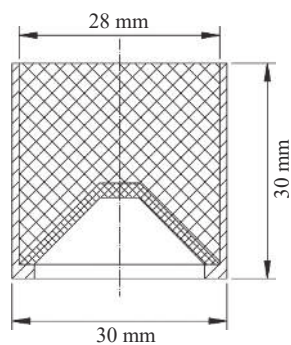


图 2 杆状聚能装药

Fig. 2 Rod shaped charge

岩石力学模型发生了根本变化, 传统的弹性理论已不再适用, 需应用断裂力学中的应力强度因子来表述有关力学参量。

在射流冲击力作用下, 沿预切割槽两边优先产生裂纹, 初始裂纹沿水平和垂直方向开始扩展, 形成扇形裂纹。在裂纹扩展过程中, 射流在岩石材料入射处产生的挤压力对于裂纹尖端可视为集中力, 可将三维裂纹简化为二维集中力断裂模型进行断裂力学分析^[19], 模型如图 3 所示。其中图 3(a)为裂纹沿预槽方向扩展的模型, 图 3(b)为裂纹沿垂直于岩石表面向岩石内部扩展的模型。

图 3(a)的集中力断裂模型为无限介质中心裂纹处有一对集中力的情况, 其应力强度因子可表示为:

$$K = \frac{2q(t)}{\sqrt{\pi l}} \quad (2)$$

式中: l 为裂纹尖端至中心的距离 (裂纹长度), $q(t)$ 为集中冲击力。

根据断裂判据, 当裂纹尖端应力强度因子达到岩石断裂强度 K_c 时, 裂纹开始扩展, 即:

$$K_c = \frac{2q(t)}{\sqrt{\pi l}} \quad (3)$$

则裂纹长度 l 与集中冲击力的关系为:

$$l = \frac{4q^2(t)}{K_c^2 \pi} \quad (4)$$

式(4)为单点射流冲击时的横向裂纹长度, 在多点射流冲击岩石情况下, 集中冲击力 $q(t)$ 在部分位置形成叠加而产生变化, 具体根据冲击点分布而定。从式(4)可知, 裂纹长度与环向集中冲击力的平方成正比, 为产生良好的断裂效果, 采用杆状楔形射流冲击岩石。如图 3(b)等有限尺寸带裂纹体的应力场和应力强度因子在目前很难得到数学解析解^[20], 本文中利用数值计算方式对其进行分析计算。

2 岩石定向劈裂数值计算

采用显式有限元分析程序 AOTUDYN 进行计算, 该软件主要模拟流体、固体在高速冲击或动态载荷条件下的响应和耦合分析, 广泛应用于弹道学、战斗部设计、穿甲和爆轰等问题的分析研究。效仿人工切割法将钢楔打入岩石中逐步将岩石切割原理, 分析聚能装药金属射流对岩石冲击劈裂过程, 建立数值模拟模型, 研究不同形状高速金属射流冲击对岩石劈裂效果的影响, 用于指导聚能药型罩的设计, 以及计算分析金属射流冲击下岩石断裂过程以及裂纹形成机制, 并与现场试验结果对比。

2.1 模型建立

由于爆炸聚能射流产生过程中炸药能量主要用于形成射流, 为了突出射流形状对裂纹扩展的影响, 忽略聚能射流形成过程及爆轰产物作用等因素, 对聚能射流的定向劈裂数值计算进行简化。简化后的模型参数为: 聚能装药所形成的射流质量约 12 g, 平均速度 1200 m/s, 因此直接采用 2 枚速度为 1200 m/s 的金属楔形杆对岩石进行冲击。2 枚金属楔形杆分别采用三种材料、质量相同, 形状不同的金属楔形杆进行计算对比, 几何上呈现为长度不同, 尾部直径不同的圆台形, 尺寸如表 1 所示。

岩石模型尺寸为 115 cm×80 cm×80 cm, 岩石中间预设切槽, 切槽宽 5 mm、深 5 mm。整体侵彻初始模型如图 4 所示。

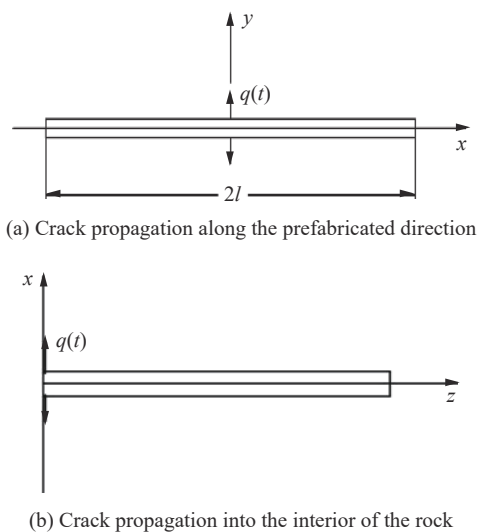


图 3 集中力断裂模型

Fig. 3 Concentrated force fracture model

表 1 金属楔形杆的尺寸

Table 1 Dimensions of metal wedges

楔形杆	长度/mm	头部直径/mm	尾部直径/mm
A	29.0	2	8.0
B	20.8	2	9.8
C	16.4	2	11.2

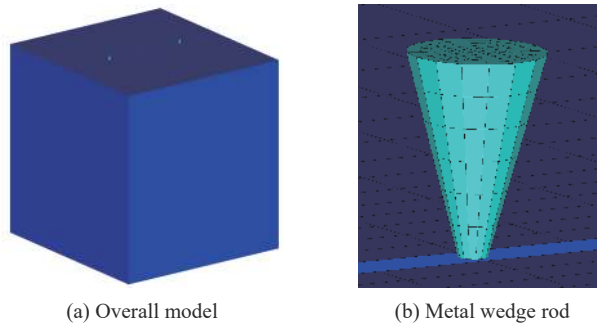


图 4 侵彻初始计算模型

Fig. 4 Initial calculation model

2.2 模型材料

金属杆(紫铜材料)、岩石材料均采用高压冲击状态方程。冲击波速度和质点速度之间具有如下线性关系:

$$u = c_0 + S u_p \tag{5}$$

高压冲击状态方程具有如下形式:

$$p = p_H + \Gamma \rho (e - e_H) \tag{6}$$

其中:

$$p_H = \frac{\rho_0 c_0^2 \mu (1 + \mu)}{[1 - (S - 1)\mu]^2}, \quad e_H = \frac{1}{2} \frac{p_H}{\rho_0} \left(\frac{\mu}{1 + \mu} \right), \quad \eta = \frac{\rho}{\rho_0}, \quad \mu = \eta - 1 \tag{7}$$

式(5)~(7)中: u 、 u_p 分别为冲击速度、质点速度, S 为 $u-u_p$ 曲线的斜率系数, c_0 为 $u-u_p$ 曲线的截距, 近似于材料的绝热声速; p 为压力, p_H 为冷压, Γ 为 Grüneisen 系数, ρ 为材料密度, ρ_0 为初始材料密度, e 为内能。

模型材料的高压冲击状态方程参数见表 2。

表 2 高压冲击状态方程参数

Table 2 Shock EOS parameters

材料	$c_0 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	S	Γ
岩石	3340	1.500	2.0
紫铜	3958	1.497	2.0

2.3 计算结果分析

2.3.1 聚能控界切割机制

在有预制切槽的情况下, 金属杆的冲击能量被用于岩石整体劈裂, 裂纹沿着预切槽方向向两边扩展, 随后向下贯穿整个岩体, 将岩石整齐劈裂成两半, 切槽起到了精准控制界面的作用。图 5~6 为 0.07、0.30 ms 时岩石爆炸应力波与损伤断裂扩展图, 可以看到, 金属杆冲击岩石后, 在岩石中产生应力波, 两个初始应力波传播并相互作用, 随后继续在岩体中传播, 超过拉应力极限的区域将发生断裂损伤。根据断裂力学原理, 由于预切槽的存在, 应力在切槽尖端集中, 材料断裂韧度在预切槽方向最小, 因此会在此方向形成裂缝并扩展, 裂纹在 2 ms 左右停止扩展。

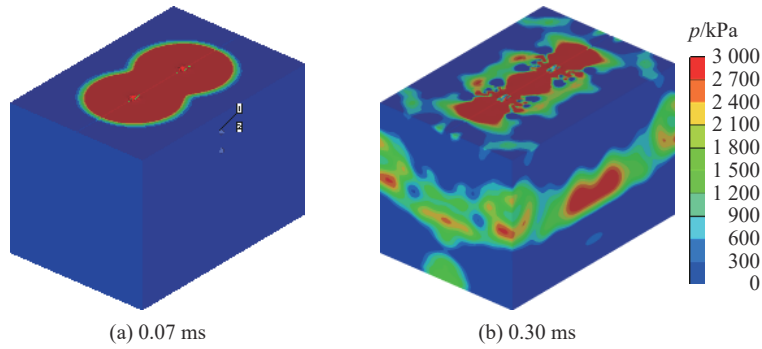


图 5 岩石中爆炸应力云图

Fig. 5 Explosion stress contours in rocks

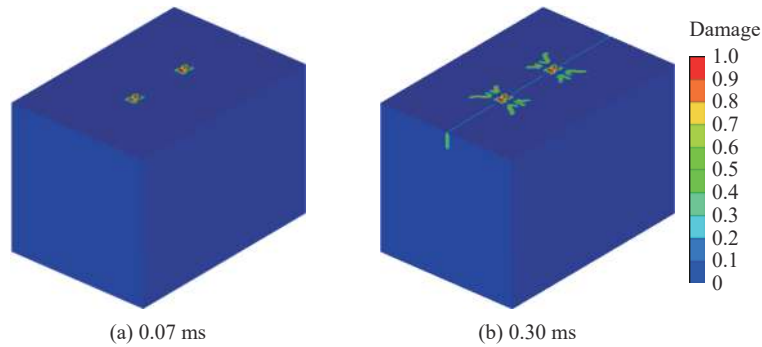


图 6 岩石中爆炸损伤云图

Fig. 6 Explosion damage contours in rocks

2.3.2 不同形状金属杆的岩石劈裂效果对比

A、B、C 三种不同形状的楔形金属杆具有相同的动能, 向岩石试块冲击, 产生不同程度劈裂效果, 如图 7 所示。其中长径比最大的金属杆 A 最终劈裂深度为 24 cm, 金属杆 B 最终劈裂深度为 46 cm, 长径比最小的金属杆 C 最终劈裂深度为 38 cm。由此可知, 长径比约 3 : 1 的楔形金属杆 B 对岩石具有较好的冲击劈裂效果, 能够将更多的冲击动能转换为产生有效断裂的岩石表面能。过于细长或者短粗的形状对于岩石劈裂都较为不利。

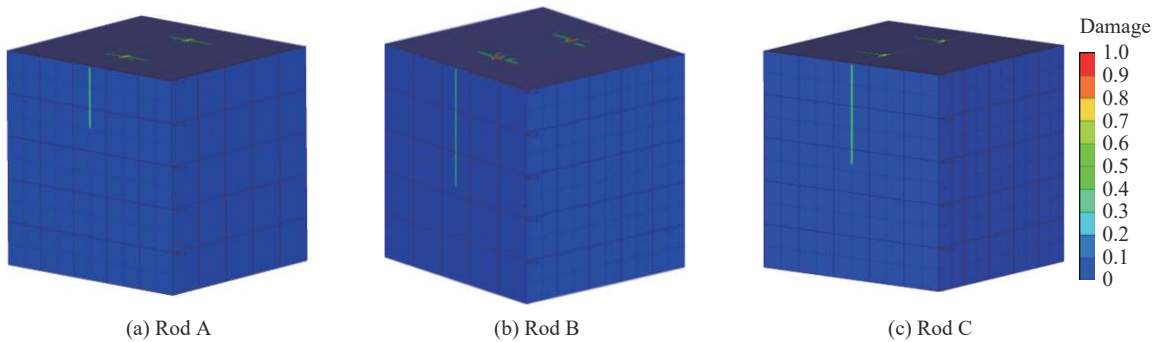


图 7 岩石损伤云图

Fig. 7 Rock damage contours

3 聚能装药侵彻数值计算

聚能装药通过改变药型罩形状和炸高, 可以产生不同形状的高速金属射流, 利用本文中设计的聚能装药, 在不改变药型罩形状的前提下, 设置不同炸高即可形成三种典型形状的楔形射流。对应上述所得

到的模拟结果, 采用二维数值仿真方法, 计算该聚能装药的射流形成过程; 从射流侵彻、爆炸冲击波和爆轰产物的作用等综合因素考虑, 进一步研究不同炸高下射流形态以及对岩石的侵彻破坏效应, 获得劈裂效果较好的射流形状, 得出用于形成岩石控界面贯穿裂纹的最佳炸高。

3.1 模型建立

聚能装药侵彻岩石计算采用 Euler 求解器进行, 模型轴对称, 网格渐变, 最小网格尺寸 0.2 mm, 模型边界采用无反射边界。岩石和金属材料参数与前述相同, 炸药材料为 B 炸药, 采用经典 JWL 状态方程。分别计算 10、25、55 mm 三种炸高下的数值模型。模型初始状态如图 8 所示。



图 8 聚能装药初始模型

Fig. 8 Model of initial shaped charge

3.2 计算结果分析

3.2.1 不同炸高下射流形态分析

图 9 为 10、25、55 mm 三种炸高下聚能装药形成的不同形态的射流。其中, 10 mm 炸高下, 药型罩形成 EFP(explosively formed projectile), 长径比约为 1 : 1; 25 mm 炸高下, 药型罩形成楔形射流, 长径比约为 3 : 1; 55 mm 炸高下, 形成长杆式射流, 长径比约为 10 : 1。

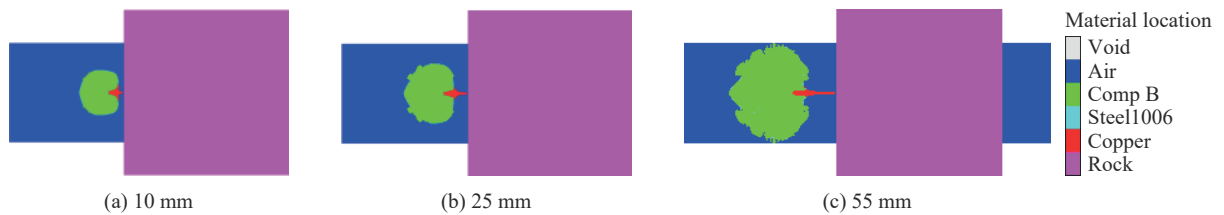


图 9 不同炸高下形成的射流形态

Fig. 9 Jet patterns under different burst heights

从射流形状来分析, 25 mm 炸高下形成的射流成楔形, 头部较尖, 如图 10 所示, 符合上述计算结果中对岩石劈裂效果最好的形状。如图 11 所示, 计算楔形射流内部速度分布可以看出, 射流头部速度为 3400 m/s,

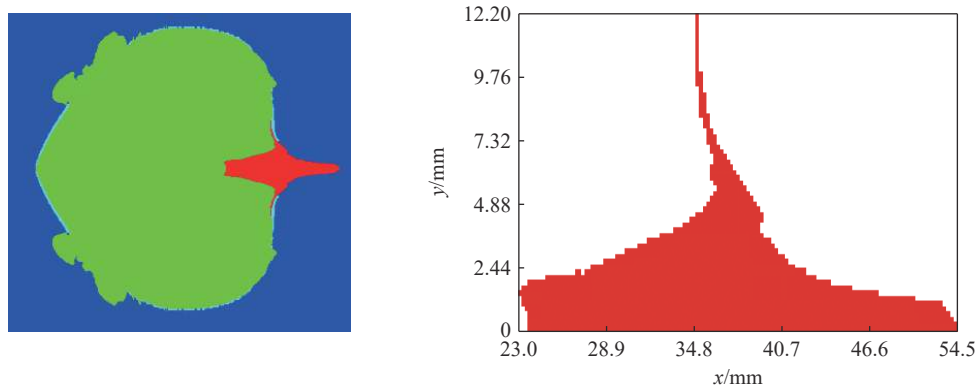


图 10 25 mm 炸高下形成的楔形射流

Fig. 10 The wedge jet formation at 25 mm height

尾部速度为 600 m/s, 平均速度为 1 290 m/s。从如图 12 所示的射流整体速度时程曲线可知, 射流在 0.01 ms 时达到整体平均速度峰值, 可知炸药能量已经完全作用于药型罩上, 射流动能已经达到峰值。

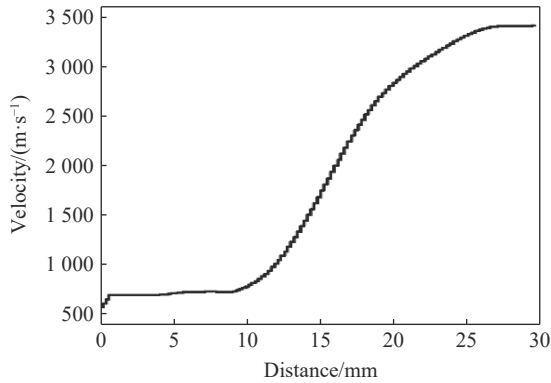


图 11 楔形射流速度分布

Fig. 11 Velocity distribution of wedge jet

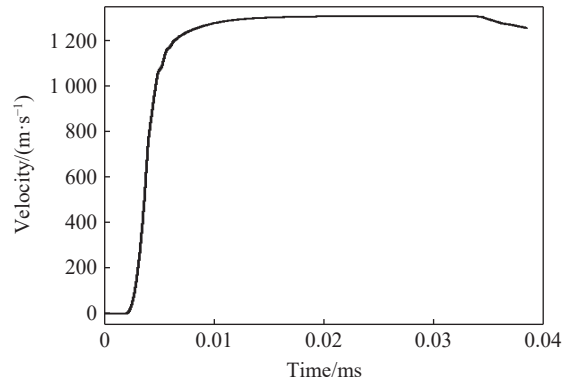


图 12 射流整体速度时程曲线

Fig. 12 Time-history curve of jet overall velocity

3.2.2 不同炸高下射流侵彻破坏效应分析

分析不同炸高下形成的射流对岩石的侵彻破坏效应。如图 13 所示, 10 mm 炸高下, 射流对岩石的侵彻深度较小, 成坑口径 12 mm。射流在岩石入射面消耗了大量动能, 粉碎区范围 50 mm 左右, 并在周围 172 mm 范围内产生大量裂纹, 炸药能量主要用于岩石表面的断裂和破碎; 25 mm 炸高下, 射流对岩石的侵彻深度更大, 在周围形成 10 条主要裂纹, 炸药能量主要用于裂纹产生和侵彻; 55 mm 炸高下, 射流头部速度更高, 炸药能量主要用于侵彻, 产生的挤压应力较小。

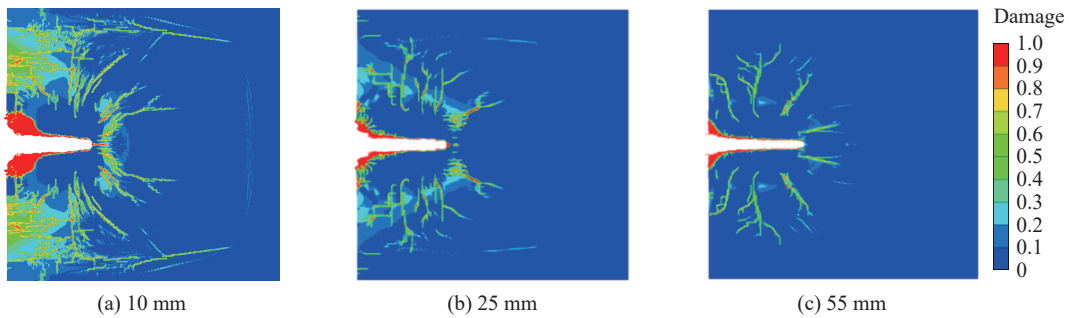


图 13 不同炸高下射流侵彻损伤云图

Fig. 13 Jet penetration damage contour under different conditions of burst height

综上所述, 本文设计的聚能装药在 25 mm 炸高下产生的射流对岩石综合侵彻破坏, 更有利于裂纹在岩石材料内部的进一步楔入劈裂。

4 定向劈裂试验

4.1 试验设置

为验证多点聚能装药的岩石定向劈裂效果, 进行了现场试验, 采用设计的 2 枚聚能装药在 25 mm 炸高下对岩石试块进行控界切割试验。

试验用的石块如图 14 所示, 试件尺寸为 1.15 m×1.45 m×1.00 m。试验前在石块顶面上用机械切割机切出一条切槽, 预切槽宽 4 mm、深 6.9 mm, 沿预切槽布置 2 个直径 28 mm 的定位浅孔, 对应于浅孔设置 2 个聚能装药。采用 PVDF 传感器测量岩石中的应力波强度, 传感器粘贴于岩石试件侧面, 位于 2 个聚能装药中间位置, 传感器 1 距顶面 10 cm, 传感器 2 距顶面 20 cm。

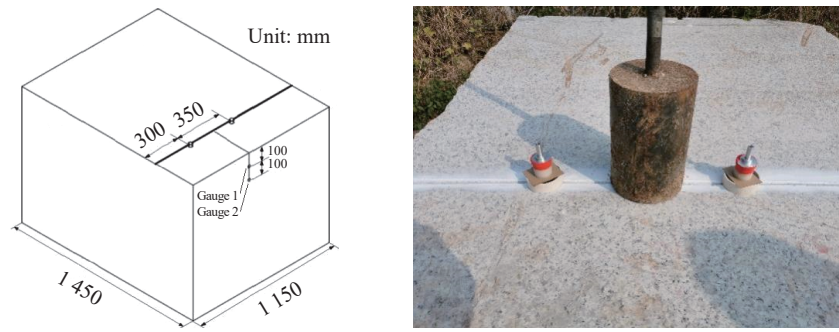


图 14 试验设置

Fig. 14 Experimental set up

4.2 试验结果与分析

4.2.1 岩石断裂结果

由图 15 可以看出,在多点聚能装药爆炸作用下,岩石被破坏,裂纹除了沿岩石预切槽延伸外,在岩石垂直方向上劈裂扩展,基本与上表面垂直,裂纹长度约 38 cm,岩石试块几乎被整体劈裂,劈裂方向与预期基本一致,与上述数值模拟结果也基本一致。

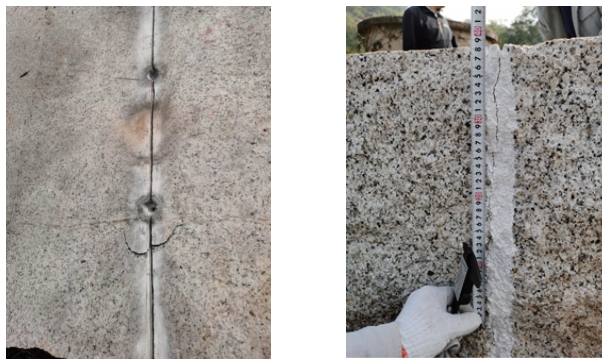


图 15 岩石断裂效果

Fig. 15 Effects of rock fracturing

4.2.2 应力分析

通过岩石试块侧面传感器所测得的应力数据(图 16)可知,由于电雷管起爆时间的误差问题,在岩石表面测得两个应力波峰,两次应力波间隔约 2 ms,测点 1 的两个峰值大约为 0.5 MPa,测点 2 的峰值大约为 0.6~0.8 MPa,两次峰值叠加的数值与该点的数值模拟应力峰值计算结果(2 MPa)接近。测点 1、2 所在位置为冲击形成的应力波叠加位置,由图 5(b)也可以看出,是岩石试块表面应力最大的位置。该处应

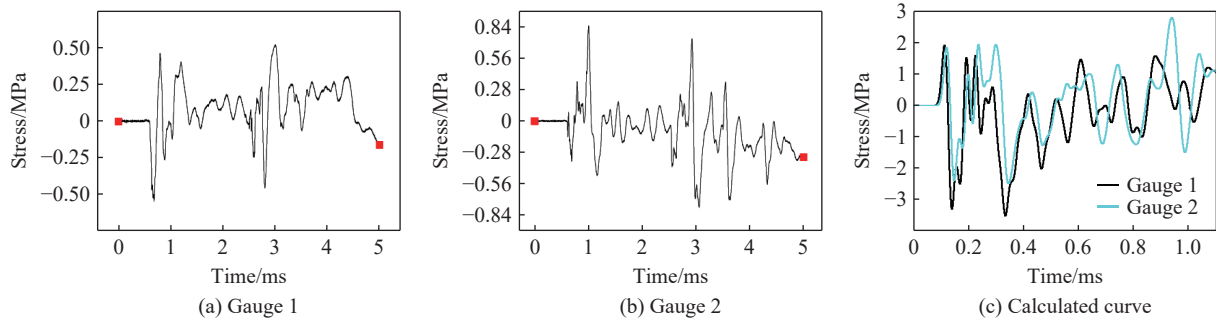


图 16 岩石侧面应力曲线

Fig. 16 Curves of rock side stress

力波压力远小于一般的岩石抗拉强度, 所以不会形成无效断裂, 既保证了切割面的平整又降低了炸药用量。相对于传统爆破作业中的炸药直接爆炸作用, 控界切割减少了炸药的非有效能量耗散, 大大降低了爆炸对周围环境的危害。在实际工程应用中, 利用该试验成果, 在炮孔中双向设置多个聚能装药, 采用导爆索串联起爆, 在聚能射流、爆炸冲击波和爆轰产物的综合作用下, 增强了岩石中裂纹扩展效果。

5 结 论

基于高速聚能射流对岩石的冲击作用和岩石冲击断裂机理, 提出了多点聚能射流岩石控界切割方法, 采用数值模拟和现场试验研究, 得到以下结论。

(1) 优化设计了一种可用于岩石劈裂的聚能装药, 该聚能装药在特定炸高下能形成楔形射流, 用于劈裂岩石等脆性材料。

(2) 利用数值模拟方法研究了岩石类脆性材料在多点聚能射流冲击作用下的定向劈裂机制, 分析了在射流作用下岩石试块的应力波传播过程和断裂损伤过程, 对比不同形状的楔形金属杆对岩石的冲击劈裂效果, 得出长径比在 1 : 3 左右的楔形金属杆的劈裂效果最佳。

(3) 利用数值模拟方法, 分析计算了聚能装药射流形成过程与岩石冲击侵彻过程, 通过对比 10、25、55 mm 炸高下形成的射流形态和岩石损伤效果, 获得了该装药用于劈裂的最佳炸高为 25 mm。

(4) 现场实验成功用 2 枚聚能装药将岩石试块按预制方向劈裂, 且在岩石表面测试得到的应力波峰值压力远小于一般岩石抗拉强度。对比传统的钻爆法爆破以及线性聚能切割爆破, 本文中提出的多点聚能射流岩石控界切割方法优势突出: 炸药能量利用率高, 实现了岩石控界面的精准切割与环境友好。

参考文献:

- [1] 王飞. CAP1400 核岛负挖保护层爆破施工技术探讨 [J]. *煤炭技术*, 2015, 34(11): 323–325. DOI: 10.13301/j.cnki.ct.2015.11.125.
WANG F. Discussion on blasting construction technology of protection layer excavation in cap1400 nuclear island [J]. *Coal Technology*, 2015, 34(11): 323–325. DOI: 10.13301/j.cnki.ct.2015.11.125.
- [2] 蒋跃飞, 张正忠, 王璞, 等. 国内石材开采方法综述 [J]. *露天采矿技术*, 2014(1): 10–14. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9816.2014.01.004.
JIANG Y F, ZHANG Z Z, WANG P, et al. Summary of domestic stone mining method [J]. *Opencast Mining Technology*, 2014(1): 10–14. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9816.2014.01.004.
- [3] 姜楠, 徐全军, 龙源, 等. 大孔径静态破碎膨胀压力特性及布孔参数分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(4): 467–472. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)04-0467-06.
JIANG N, XU Q J, LONG Y, et al. Expansive pressure characteristic and borehole parameter analysis on large scale borehole soundless cracking [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(4): 467–472. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)04-0467-06.
- [4] 陈礼干, 廖原时. 圆盘锯与串珠锯组合开采石材方法 [J]. *石材*, 2009(8): 18–24. DOI: 10.3969/j.issn.1005-3352.2009.08.007.
CHEN L G, LIAO Y S. Mining stones by circle saw combined with wire saw [J]. *Stone*, 2009(8): 18–24. DOI: 10.3969/j.issn.1005-3352.2009.08.007.
- [5] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 304–319.
DAI J. Dynamic behaviors and blasting theory of rock [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002: 304–319.
- [6] 张志呈. 定向断裂控制爆破 [M]. 重庆: 重庆出版社, 2000: 109–138.
ZHANG Z C. Directional fracture control of blasting [M]. Chongqing: Chongqing Press, 2000: 109–138.
- [7] 郭德勇, 赵杰超, 张超, 等. 煤层深孔聚能爆破控制孔作用机制研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(4): 919–930. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1038.
GUO D Y, ZHAO J C, ZHANG C, et al. Mechanism of control hole on coal crack initiation and propagation under deep-hole cumulative blasting in coal seam [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(4): 919–930. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1038.

- [8] 肖正学, 张志呈, 郭学彬. 断裂控制爆破裂纹发展规律的研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(4): 546–549. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2002.04.019.
XIAO Z X, ZHANG Z C, GUO X B. Research on crack developing law of rock fracture controlled blasting [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(4): 546–549. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2002.04.019.
- [9] 申涛, 罗宁, 向俊序, 等. 切缝药包爆炸作用机理数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(5): 1172–1180. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0410.
SHEN T, LUO N, XIANG J X, et al. Numerical simulation on explosion mechanism of split-tube charge holders [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(5): 1172–1180. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0410.
- [10] 李清. 爆炸致裂的岩石动态力学行为与断裂控制试验研究 [D]. 北京: 中国矿业大学 (北京), 2009: 114–124.
LI Q. Experiment of fracture behaviors and control for crack propagation under blasting load [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2009: 114–124.
- [11] 李清, 郭阳, 刘航, 等. 切槽定向断裂控制爆破的数值模拟研究 [J]. *矿业研究与开发*, 2015, 35(12): 79–83. DOI: 10.13827/j.cnki.kyyk.2015.12.018.
LI Q, GUO Y, LIU H, et al. Numerical simulation on pre-notched directional fracture blast [J]. *Mining R&D*, 2015, 35(12): 79–83. DOI: 10.13827/j.cnki.kyyk.2015.12.018.
- [12] 刘敦文, 蔡才武, 唐宇, 等. 微风化花岗岩多向聚能爆破破岩试验研究 [J]. *工程爆破*, 2020, 26(2): 9–16. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2020.02.002.
LIU D W, CAI C W, TANG Y, et al. Experimental study on rock breaking by multi-direction cumulative blasting of slightly weathered granite [J]. *Engineering Blasting*, 2020, 26(2): 9–16. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2020.02.002.
- [13] LUO Y, ZHAO S W. Study on orientation fracture blasting with shaped charge in rock [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material*, 2006, 13(3): 193–198. DOI: 10.1016/s1005-8850(06)60042-x.
- [14] YIN Y, SUN Q, ZOU B P, et al. Numerical study on an innovative shaped charge approach of rock blasting and the timing sequence effect in microsecond magnitude [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(9): 4523–4542. DOI: 10.1007/s00603-021-02516-w.
- [15] SHU Y, SHAO P, LI Z H, et al. Linear hypercumulation formation mechanism for π -type shaped charge [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2022, 47(3): e202100162. DOI: 10.1002/prop.202100162.
- [16] 陈伟. 环向聚能装药的数值模拟与应用研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015: 65–66.
CHEN W. Numerical simulation and application of radial shaped charge [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015: 65–66.
- [17] 杨仁树, 王雁冰, 岳中文, 等. 定向断裂双孔爆破裂纹扩展的动态行为 [J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(6): 631–637. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)06-0631-07.
YANG R S, WANG Y B, YUE Z W, et al. Dynamic behaviors of crack propagation in directional fracture blasting with two holes [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(6): 631–637. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)06-0631-07.
- [18] 张金浩. 高应力条件下坚硬脆性岩石断裂特性研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020: 17–25.
ZHANG J H. Study on fracture characteristics of hard and brittle rock under high stress [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020: 17–25.
- [19] ANDERSON T L. *Fracture Mechanics Fundamentals and Applications* [M]. Third Edition. Boca Raton, FL, USA: Taylor & Francis Group, 2005: 64–65.
- [20] 黄维扬. 含裂纹半无限大板受集中力作用的应力强度因子 [J]. *航空学报*, 1992, 13(3): 170–176.
HUANG W Y. Stress intensity factors for a semi-infinite plate with a crack under concentrated forces [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1992, 13(3): 170–176.

(责任编辑 曾月蓉)