

DOI: 10.16285/j.rsm.2023.0933

柱状药包侧向爆破下抵抗线对岩石 破碎特性的影响研究

李萍丰¹, 王秀龙², 闫小兵¹, 马正腾¹, 彭建宇², 张凤鹏²

(1. 湖南涟邵建设工程(集团)有限责任公司, 湖南 长沙 410001;

2. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 为研究抵抗线对柱状药包侧向爆破下岩石破碎特性的影响, 采用波动理论, 分析了自由面处的应力状态; 采用直铜丝电爆炸模拟柱状药包爆破, 开展了侧向爆破破岩的物理模型试验; 再借助超高速摄像技术, 观测了试件表面裂纹网的演化过程; 结合爆破漏斗区形态、尺寸和碎块分布特征, 研究了不同抵抗线下柱状药包爆破破岩特性。结果表明, 抵抗线是控制岩石爆破破裂模式、破坏区形态和碎块块度大小的重要因素。随抵抗线增加, 裂纹发育速度与密度减小, 裂纹网覆盖范围增加, 优先贯穿裂纹由横向转变为环向裂纹。此外, 模型试验结果表明, 破裂区短轴随抵抗线增加而增加。结合自由面处应力状态, 利用最大拉应变准则对此进行了解释。建立了碎块块度与能量单耗之间的关系, 研究成果为岩石工程爆破设计优化提供参考。

关 键 词: 柱状药包; 抵抗线; 破裂模式; 破坏区形态; 块度

中图分类号: TD 235

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2024) 05-1388-09

Effects of burden on rock crushing characteristics under lateral detonation of cylindrical charges

LI Ping-feng¹, WANG Xiu-long², YAN Xiao-bing¹, MA Zheng-teng¹,
PENG Jian-yu², ZHANG Feng-peng²

(1. Hunan Lianshao Construction Engineering (Group) Co., Ltd., Changsha, Hunan 410001, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: To investigate the effects of burden on rock crushing characteristics under lateral detonation of cylindrical charges, we analyzed the stress state at the free surface using the wave theory. Afterward, to simulate the cylindrical charge detonation, the physical experiment of lateral rock fragmentation was conducted using direct copper wire electro-explosion. The evolution process of surface crack network of the specimen was observed using ultra-high-speed camera technology. The impact of cylindrical charge detonation on rock properties was studied by combining the morphology, dimensions, and distribution characteristics of the blasting crater with different burdens. The results demonstrated that the burden is a crucial factor for controlling the fracture mode, morphology of failure zone, and fragment size during rock blasting. As the burden increased, the crack propagation velocity and density gradually decreased, while the range of crack network expanded, and the preferential propagation direction of cracks changed from transverse to circumferential. Furthermore, the experimental results indicated an increasing trend in the short axis of the fracture zone as the burden increased. Through analyzing the stress state at the free surface, the maximum tensile strain criterion was applied to justify this phenomenon. Finally, the relationship between fragment size and energy consumption was established. Our research findings provide a reference for optimizing the design of rock engineering blasting.

Keywords: cylindrical charge; burden; fracture mode; morphology of failure zone; fragment size

收稿日期: 2023-06-27

录用日期: 2023-08-30

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 52274114)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52274114).

第一作者简介: 李萍丰, 男, 1966 年生, 博士, 正高级工程师, 主要从事智能爆破方面的研究工作。E-mail: hdbplpf@163.com

通讯作者: 王秀龙, 男, 1995 年生, 博士研究生, 主要从事爆破理论与技术方面的研究工作。E-mail: wxl2816@163.com

1 引言

柱状装药结构是隧道、地下采场、露天边坡等爆破工程中常用的装药形式。相比集中装药,柱状药包爆破对侧向的作用强度远高于轴向,因此自由面布置在柱状药包的侧面。炸药爆破破岩时,在抵抗线方向的爆炸波行程最短,岩石所受阻力最小,是爆破作用的主导方向。抵抗线是影响爆破效果的一个关键的参数。研究抵抗线对柱状药包侧向爆破破岩过程的影响具有重要意义。

岩石在爆炸荷载作用下的破坏特征对岩石动力学研究具有重要意义,科研人员针对柱状药包爆破破岩问题开展了大量的研究。王观石等^[1]应用复数理论,建立了应力波在岩石中振动和波动频率之间的关系,分析了应力波幅值随时空衰减的关系。Zuo等^[2]通过高速纹影试验得到柱状药包爆炸冲击波的传播形式,根据模型试验与理论模型得到了柱状波下的裂纹扩展特征。柴少波等^[3-4]基于时域递归分析方法,对入射应力波在非线性岩体结构面上的反射与透射进行了分析,推导出应力与质点振动速度之间的关系。岩石内应力波随传播距离增加而不断衰减,合理的抵抗线大小是爆破设计与施工必须考虑的重要参数之一,Zhu等^[5-6]利用数值模拟研究了不同抵抗线下爆破漏斗的裂纹扩展过程,得到露天台阶爆破最优的药包埋深。雷振等^[7]采用爆破破岩与断裂力学理论,结合不同抵抗线下的爆破模型试验研究了柱状装药爆炸荷载下爆腔能耗随抵抗线的变化规律。安龙等^[8]研究了薄矿脉开采时抵抗线对爆破裂纹密度的影响。周继国等^[9]基于相似理论采用浇筑模型试验,研究了台阶爆破时破碎能与最小抵抗线的关系,从能量角度给出了最佳抵抗线计算方法。上述研究成果为认识不同抵抗线下岩石爆破破裂行为的差异性提供了有价值的参考。然而,关于柱状药包侧向爆破下抵抗线对岩石动态断裂行为以及破碎特性影响等方面的问题,仍然有待进一步研究。

由于炸药危险性高,其使用受到严格管控,导致室内爆破模型试验难以开展。而金属丝电爆炸能够产生数百 MPa 甚至 GPa 量级的冲击波,为开展室内爆破模型试验提供了良好的方法。例如,闫广亮等^[10-11]开展了电爆炸破碎岩石类脆性材料试验方法研究,并利用该方法研究了静压应力下硬岩漏斗爆破动态过程与破坏特征。陈士海等^[12]采用电火花震源代替传统炸药,研究了爆破地震波在围岩中的传播规律。为此,本文通过电爆炸技术提供爆源,

以模拟炸药爆破,利用爆破模型试验研究了柱状药包侧向爆破时抵抗线对岩石的动态断裂过程的影响,分析了破碎块度以及岩石破碎能耗特征,结合理论研究探讨了破裂区尺寸的变化规律。

2 理论分析

2.1 自由面上应力波的反射

根据柱状波在固体介质中的传播特性,可以将柱状药包起爆后沿径向传播的柱状波简化一维平面波(P波)进行分析^[13]。如图1所示,取自由面处任意一点建立坐标系 $o-xyz$,半无限弹性介质的自由表面为 xoy 面, y 轴与图面垂直。

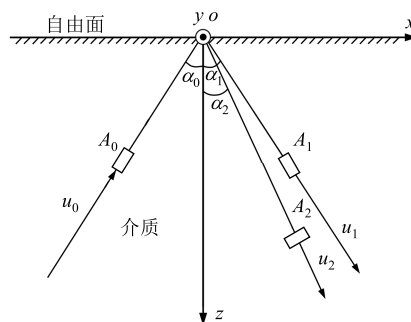


图1 P波在自由边界入射与反射

Fig.1 P-wave incidence and reflection at free boundary

当入射纵波传播至自由面后,会形成反射纵波和反射横波。设图1中各波产生的位移为 u_n , 下标 $n=0, 1, 2$ 时分别表示入射纵波、反射纵波与反射横波的位函数; α_n 为各波与自由面法线所呈角度, $n=0, 1, 2$ 时分别表示纵波入射角、反射纵波反射角与反射横波反射角。根据平面波动理论,可知波的位移表达式由下式表示:

$$u_n = A_n \exp[i(k_n x \sin \alpha_n + k_n z \cos \alpha_n - \omega_n t)] \quad (1)$$

式中: A_n 为波的振幅; k_n 为波数,即 2π 距离上波的重复次数; ω_n 为频率,即 2π 时间内的振动次数 ($n=0, 1, 2$); i 为虚数; t 为时间。

在自由面处根据 Snell 定律可得

$$\left. \begin{aligned} \alpha_0 &= \alpha_1 \\ \frac{\sin \alpha_0}{\sin \alpha_2} &= \frac{C_p}{C_w} = \sqrt{\frac{2(1-\mu)}{1-2\mu}} = \chi \\ k_0 &= k_1 \\ \omega_0 &= \omega_1 = \omega_2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: C_p 为纵波波速; C_w 为横波波速; μ 为泊松比; χ 为反射系数。

于是可以确定自由面处入射波与反射波的波幅之间关系如下:

$$\left. \begin{aligned} \frac{A_1}{A_0} &= 1 - 2(2\sin^2 \alpha_0 - \chi^2)^2 / \left[2\sin 2\alpha_0 \sin \alpha_0 \cdot \sqrt{\chi^2 - \sin^2 \alpha_0} + (2\sin^2 \alpha_0 - \chi^2)^2 \right] \\ \frac{A_2}{A_0} &= 2\chi \sin 2\alpha_0 (\chi^2 - 2\sin^2 \alpha_0) / \left[2\sin 2\alpha_0 \sin \alpha_0 \cdot \sqrt{\chi^2 - \sin^2 \alpha_0} + (2\sin^2 \alpha_0 - \chi^2)^2 \right] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

纵波自爆源向外传播,并以不同角度入射到自由面。根据其位移表达式可知,其质点振动速度 v_n 为

$$v_n = -iA_n \omega_n \exp[i(k_n x \sin \alpha_n + k_n z \cos \alpha_n - \omega_n t)] \quad (4)$$

由式(2)可知,自由面处纵波与横波的频率 ω_n 相等,其峰值振动速度 $v_{n \max}$ 可以用振幅 A_n 与频率 ω_n 表示为

$$v_{n \max} = A_n \omega_n \quad (5)$$

由式(5)可知,入射波与反射波的峰值振动速度的比值与其振幅比值相等,且由于各应力波应力 σ_n 与其质点速度 v_n 遵循线性关系,即 $\sigma_n = v_n \rho C_n$ 。其中, ρ 为介质密度, C_n 为波速。因此可得到入射纵波应力 σ_i 、反射纵波应力 σ_r 和反射横波应力 τ_r 之间的关系:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{A_1}{A_0} \sigma_i = K_0 \sigma_i \\ \tau_r &= \frac{A_2}{A_0 \chi} \sigma_i = K_1 \sigma_i \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: K_0 为反射纵波应力系数; K_1 为反射横波应力系数。

由式(1)~(6)可得图2所示自由面处任意一点的入射应力波与反射应力波之间的关系,从图中可以看出,反射波应力系数随纵波入射角度增加

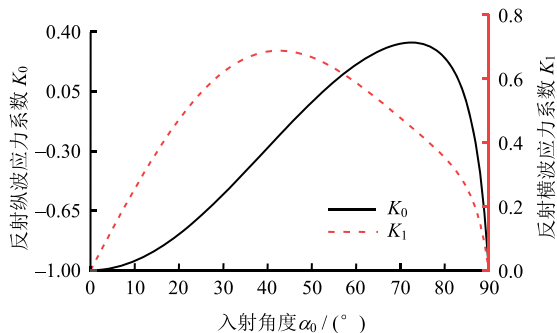


图2 P波入射角度与反射应力波系数之间的关系 ($\mu=0.2$)
Fig.2 Relationships between P-wave incident angle and reflected stress wave coefficients ($\mu=0.2$)

呈现先增加后减小的趋势。当纵波垂直入射时,反射纵波系数 K_0 为-1,反射横波系数 K_1 为0,也就是说,当纵波垂直入射到自由面时,不产生反射横波,此时压缩应力波转换为拉伸应力波。

2.2 自由面应力状态分析

由药包产生的压缩应力波传播至自由面产生反射拉伸应力波,如图3所示,自由面上任意一点 P 受入射纵波和反射纵波引起的径向应力与切向应力,反射横波引起的剪应力共同作用。

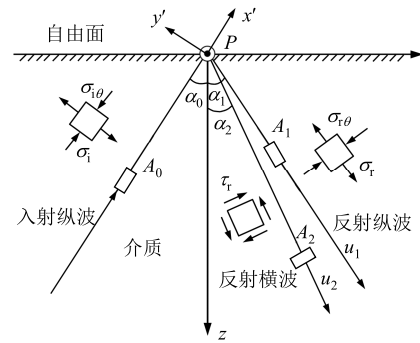


图3 P点应力状态

Fig.3 Stress state of point P

根据应力波衰减规律可知,上述应力有如下关系:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_i &= P_0 (l / r_b)^{-\eta} \\ \sigma_{i\theta} &= -\lambda \sigma_i \\ \sigma_{r\theta} &= -\lambda \sigma_r \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: P_0 为作用于炮孔壁的初始载荷; l 为药包中心至自由面任意一点的距离, $l = w / \cos \alpha_0$, 其中 w 为药包中心至自由面的最短距离,即最小抵抗线长度值,为叙述方便本文均简称为抵抗线; r_b 为炮孔半径; η 为应力波衰减系数, $\eta = 2 - [\mu / (1 - \mu)]$; $\sigma_{i\theta}$ 、 $\sigma_{r\theta}$ 分别为入射纵波和反射纵波引起的切向应力; λ 为侧向压力系数, $\lambda = \mu / (1 - \mu)$ 。

以入射点 P 为原点,入射纵波传播方向为 x' 轴,平面内垂直于其方向为 y' 轴建立平面直角坐标系,对应力波进行叠加,可得到当前坐标系下入射点 P 应力 $\sigma_{x'}$ 、 $\sigma_{y'}$ 、 $\tau_{x'y'}$ 为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{x'} &= \sigma_i + \sigma_r \cos^2 2\alpha_0 + \sigma_{r\theta} \sin^2 2\alpha_0 + 2\tau_r \sin(\alpha_0 + \alpha_2) \cos(\alpha_0 + \alpha_2) \\ \sigma_{y'} &= \sigma_{i\theta} + \sigma_r \sin^2 2\alpha_0 + \sigma_{r\theta} \cos^2 2\alpha_0 - 2\tau_r \sin(\alpha_0 + \alpha_2) \cos(\alpha_0 + \alpha_2) \\ \tau_{x'y'} &= (\sigma_{r\theta} - \sigma_r) \sin 2\alpha_0 \cos 2\alpha_0 + \tau_r [\cos^2(\alpha_0 + \alpha_2) - \sin^2(\alpha_0 + \alpha_2)] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

进一步求得最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 为

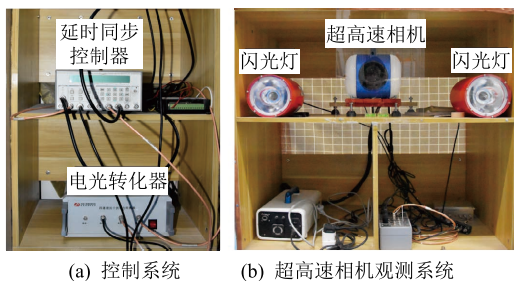
$$\sigma_1 = \frac{\sigma_{x'} + \sigma_{y'}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x'} - \sigma_{y'}}{2}\right)^2 + \tau_{x'y'}^2} \quad (9)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_{x'} + \sigma_{y'}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x'} - \sigma_{y'}}{2}\right)^2 + \tau_{x'y'}^2}$$

入射与反射应力波相互作用达到材料破坏断裂条件,则会引引起材料破坏。结合式(1)~(9)可得到拉伸主应力值,利用上述公式,可根据强度理论判断岩石是否达到破坏条件。

3 试验平台与方案

水泥砂浆试件具备良好的均质性,常用于研究岩石在爆破载荷作用下的破坏问题^[14-15]。因此,本文采用水泥砂浆试件开展模型试验。如图4所示,试验平台由控制系统、超高速相机观测系统与电爆炸系统组成。延时同步控制器通过电光转化器将电信号转换为光信号,控制超高速相机与电爆炸系统同时工作。Kirana-05M超高速相机拍摄图片的分辨率为924像素×768像素,最高拍摄速率为5×10⁶帧/s,能够以微秒级别捕捉到岩石爆破裂纹发育过程。电爆炸系统额定工作电压为60 kV,最大储能为7.2 kJ,可精准控制输出能量。



(a) 控制系统

(b) 超高速相机观测系统



(c) 电爆炸系统

图4 试验平台
Fig.4 Test platform

本文参考巷道掘进工程中爆破设计参数,依据1:100几何相似比进行试验研究。试验中金属丝直径为0.4 mm,试件抵抗线值设计为6、8、10 mm共

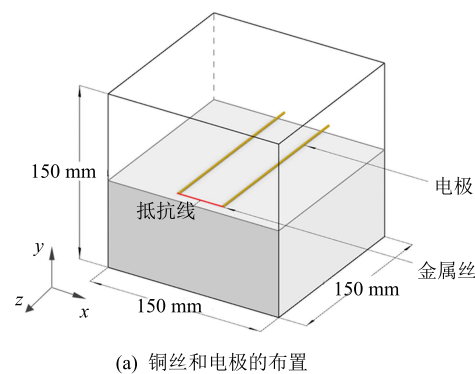
3种,对应炮孔孔径为40 mm,抵抗线值为0.6、0.8、1.0 m 3种工况。依据岩石物理力学性质试验规程,采用尺寸φ50 mm×100 mm圆柱体测定试样的单轴抗压强度、弹性模量、泊松比、密度与纵波波速,采用尺寸φ50 mm×25 mm圆柱体测定试样的抗拉强度,上述所得参数均采用5个试样所测结果的平均值作为最终的基本参数,试件基本参数见表1。

表1 试件基本参数

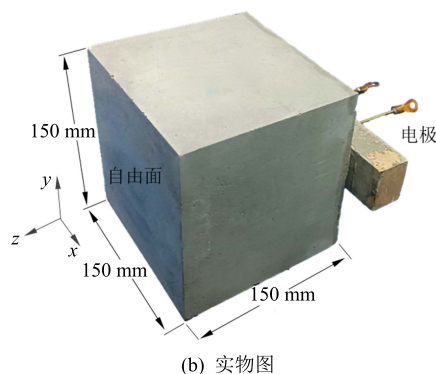
Table 1 Basic parameters of specimen

抗压强度 / MPa	抗拉强度 / MPa	弹性模量 / GPa	泊松比	密度 / (g·cm ⁻³)	纵波波速 / (m·s ⁻¹)
35.56	3.70	9.10	0.20	2.06	4 306.25

采用铜丝作为爆源,布置方式如图5(a)所示。正负电极与铜丝预埋于长×宽×高为150 mm×150 mm×150 mm的水泥砂浆试件中。铜丝直径为0.4 mm、长为40 mm,图5(b)为加工好的试件。



(a) 铜丝和电极的布置



(b) 实物图

图5 水泥砂浆试件

Fig.5 Cement mortar specimen

本文设置输入铜丝电压为±10 kV,依据下式可知,输入能量为0.8 kJ。

$$Q = \frac{1}{2}CU^2 \quad (10)$$

式中: Q 为金属丝电爆炸能量; C 为电容,试验设备额定电容 $C = 4 \times 10^{-6}$ F; U 为输入电压。

为了保证试验结果的可靠性,每种工况进行 3 次重复性试验。也就是说,共开展了 9 个试件的爆破试验。为方便后续描述,对试件进行编号,如 6 mm-1 表示抵抗线值为 6 mm 的第 1 个试件。

4 试验结果分析

4.1 裂纹的动态扩展过程

本节给出了 3 种抵抗线下裂纹的动态扩展过程,图 6(a)为 6 mm 抵抗线下试件的破裂过程。可以看出,在 50 μs 时自由面上已形成多条横向、径向及环向纵横交错的裂纹网,其中靠近金属丝的横向裂纹有强光与爆破粉尘出现;100~200 μs 时试件在爆炸冲击作用下剥离破碎并向外抛掷,大量爆破粉尘从裂纹网中溢出;图 6(b)为 8 mm 抵抗线下试件的破裂过程,可见在 50 μs 时已生成多条平行于金属丝的横向裂纹,100 μs 时以横向裂纹为中心向外扩展生成多条径向裂纹,爆破粉尘自环向裂纹处溢出,此时裂纹网基本形成,150~200 μs 时裂纹网持续发育,爆破粉尘沿环向裂纹呈现多点溢出状态;图 6(c)为 10 mm 抵抗线下试件的破裂过程,可见在 50 μs 时只有 2 条与铜丝平行的横向裂纹,100 μs 时

裂纹长度与宽度均比前两者小,只有少量爆破粉尘从环向裂纹局部溢出;150 μs 时爆破粉尘沿环向裂纹由单点转向多点溢出,上部环向裂纹开始发育,200 μs 时环向裂纹形成并与径向裂纹贯通,此时自由面处裂纹网已基本形成,裂纹发育速度、密度相较于前两者均减小,而覆盖面积增加。

上述分析表明,抵抗线值不同时,试件自由面裂纹网扩展模式既存在共性特征,又存在明显差异,其共同点表现为:①爆破初期试件表面均是以平行铜丝的横向裂纹为主导,之后以横向裂纹为中心各种裂纹持续向外发育;②环向裂纹对其他裂纹具有阻断作用且滞后于其他裂纹出现,环向裂纹控制着裂纹网边界范围。而其差异性主要表现在以下两方面:①爆破粉尘优先溢出的裂纹不同,6 mm 抵抗线下优先从靠近金属丝的横向裂纹处溢出,抵抗线为 8 mm 与 10 mm 优先从环向裂纹处溢出,也就是说,金属丝到自由面的贯穿裂纹随抵抗线值增加由横向裂纹转变为环向裂纹。②裂纹网的发育速度、密度和破坏范围不同,抵抗线小的试件裂纹网发育速度快、密度大,但破坏范围小,且裂纹分布均匀,抵抗线大的则相反。

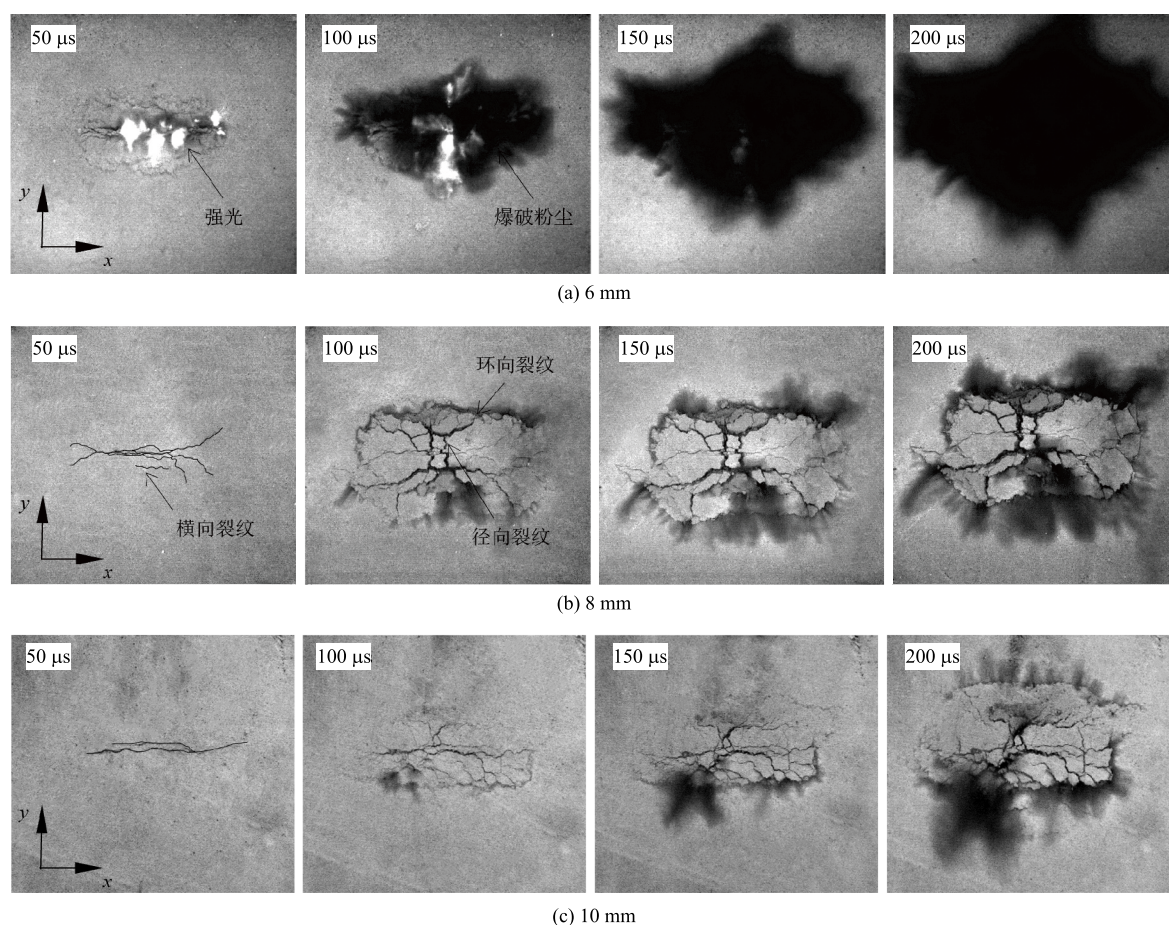


图 6 不同抵抗线下试件的裂纹扩展过程
Fig.6 Crack propagation process of samples under different burdens

4.2 爆破漏斗形态特征

图7给出了自由面处爆破漏斗形态扫描图。由于炸药在试件内部爆炸会引发强烈的压力变化,靠近爆源处在强冲击波作用下粉碎,如图7(a)所示形成的粉碎区,此时冲击波迅速衰减为应力波并继续向外传递,粉碎区外在应力波作用下出现显著的弹性变形、破碎与抛掷,最终形成爆破漏斗结构^[16-19]。

从图7(a)~7(c)中可以看出,在同一抵抗线条件下,不同试件呈现出一致的爆破漏斗形态特征,确保了试验的稳定性与可重复性。总体来看,不同抵抗线下的爆破漏斗边界面均近似为椭圆形,其中随抵抗线值增加,短轴长度随之增加,而长轴长度变化不大,也就是说,抵抗线值增加对柱状药包短轴方向的破坏范围影响较大,而对于长轴方向影响较小。

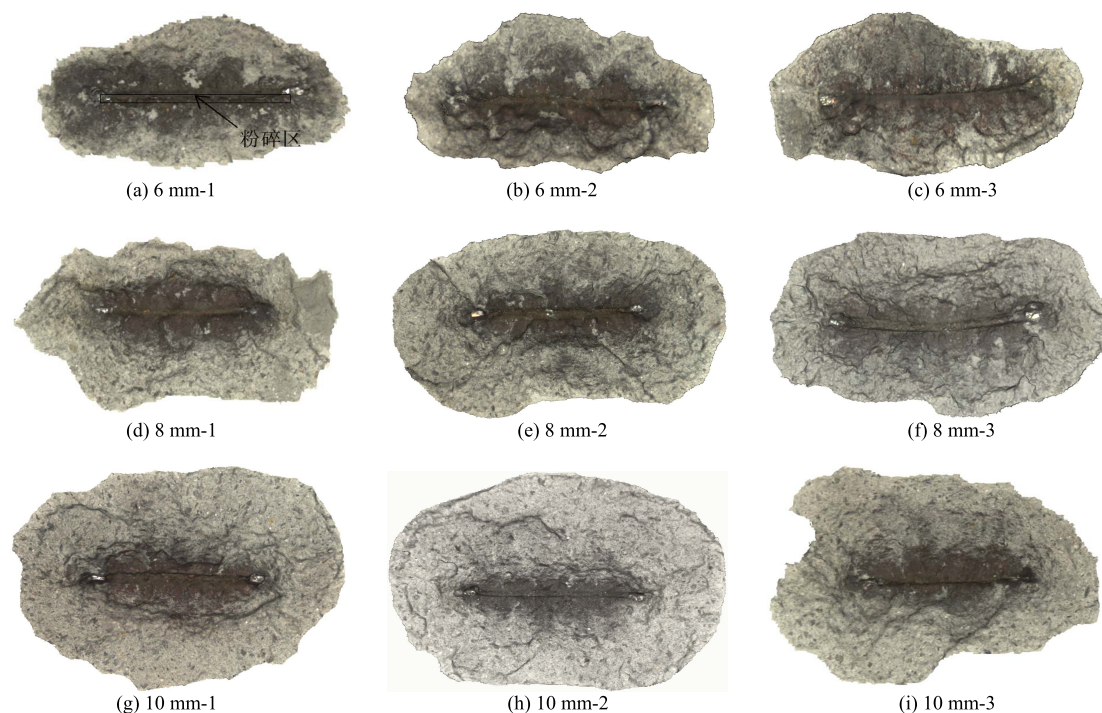


图7 爆破漏斗形态扫描图

Fig.7 Scanning diagrams of blasting crater shape

为进一步对爆破漏斗区量化分析,统计了爆破漏斗短轴长度与体积特征参数,如图8所示。从图中可以看出,漏斗短轴长度与体积随着抵抗线值的增加而增加,抵抗线值为6 mm时漏斗短轴长度与体积最小,均值分别为28.82 mm与4 220 mm³,抵抗线为10 mm时漏斗短轴长度与体积最大,均值分别达

到56.43 mm与14 756 mm³。值得注意的是,在爆炸能量一定时,随抵抗线值增加,漏斗短轴长度与体积均出现增加的试验结果,结合裂纹的动态扩展过程可以发现,自由面裂纹网发育速度与密度随抵抗线值增加而减小。

结合式(9)可知,自由面处的主应力分布状态,以最大拉应变准则验证上述不同抵抗线下爆破破裂区尺寸的变化,假设试件在破坏前处于线弹性状态,在不考虑柱状药包的端部效应情况下,取试验中垂直于炮孔的y-z截面作为研究对象,计算破坏边界即短轴长度随抵抗线值的变化规律,基于最大拉应变强度理论,可得强度条件:

$$\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) \leq [\sigma] \quad (11)$$

式中: σ_2 为中主应力, $\sigma_2 = -\mu(\sigma_1 + \sigma_3)$; $[\sigma]$ 为许用拉应力。

结合式(1)~(9)对式(11)进行求解,计算参数:抵抗线值分别为6、8、10 mm,纵波波速

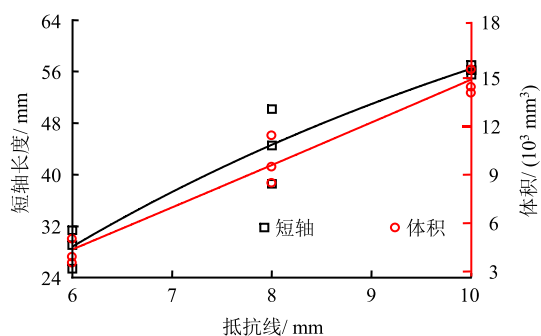


图8 抵抗线与爆破漏斗特征参数关系

Fig.8 Relationships between burden and characteristic parameters of blasting crater

$C_p = 4\,306\text{ m/s}$, 泊松比 $\mu = 0.2$, 由于金属丝在固体中发生电爆炸会产生强电磁干扰, 现有手段难以精准捕捉到准确值, 因此在式中取初始载荷 $P_0 = 1\,000 \sim 2\,000\text{ MPa}$ 进行讨论。图 9 为 $P_0 = 1\,000\text{ MPa}$ 时在自由面处产生的拉应力 σ 与入射角 α_0 的关系图。

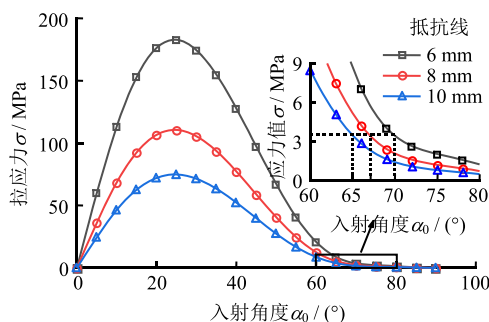


图 9 自由面处拉应力 σ 与入射角 α_0 关系图 ($P_0 = 1\,000\text{ MPa}$)
Fig.9 Relationships between tensile stress σ at free surface and incident angle α_0 ($P_0 = 1\,000\text{ MPa}$)

从图 9 可以看出, 当应力波垂直入射自由面时, 自由面所受拉应力 $\sigma = 0\text{ MPa}$, 随着入射角度增加, 自由面处应力值先增加后减小, 并逐渐趋向于 0 MPa 。通过对比不同抵抗线下应力曲线可以看出, 达到自由面处的应力值随抵抗线值增加呈减小趋势。试验中试件的抗拉强度为 3.7 MPa , 也就是说 $[\sigma] = 3.7\text{ MPa}$, 从图中可知, 6、8、10 mm 抵抗线条件下达到强度条件的角度为 70° 、 67° 和 65° 。

基于上述计算可得到 $P_0 = 1\,000 \sim 2\,000\text{ MPa}$ 时的试件破坏边界, 图 10 为理论计算与试验统计结果。从图中可以看出, 随抵抗线值增加, 短轴长度的计算结果与试验结果均呈现增加趋势。其中试验结果平均增长率约为 24% , 而理论计算平均增长率约为 10% , 这是由于理论计算模型为线弹性体, 而水泥砂浆为弹塑性材料, 当应力值超过一定程度时, 试件在塑性状态下的变形会导致应力集中甚至产生裂

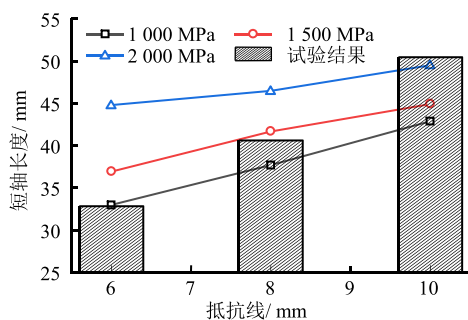


图 10 理论计算与试验结果对比图
Fig.10 Comparisons of theoretical results and experimental data

纹, 由此造成了理论与试验误差产生, 但总体趋势较为吻合。

4.3 碎块尺寸及分布特征

采用 Rosin-Rammler 分布函数描述爆破后碎块分布特征^[20-22], 其表达式如下:

$$Y = 1 - \exp\left[-(X/X_0)^m\right] \quad (12)$$

式中: Y 为筛余累计概率; X 为碎块粒径; X_0 为特征粒径; m 为均匀性指数。

对上式取两次对数可得

$$\ln\{\ln[1/(1-Y)]\} = m \ln X - m \ln X_0 \quad (13)$$

令 $Y^* = \ln\{\ln[1/(1-Y)]\}$, $A = m$, $X^* = \ln X$, $B = -m \ln X_0$, 可化为

$$Y^* = AX^* + B \quad (14)$$

利用 Rosin-Rammler 分布函数对筛分结果进行进一步分析。根据式 (14) 可得每个试件碎块分布线性拟合方程及相关参数如表 2 所示。可以看出, 这些数据拟合结果的最低相关性系数 R^2 为 0.896 , 大部分高于 0.95 。因此, 认为碎块分布符合 Rosin-Rammler 分布函数。

表 2 碎块分布拟合方程及相关参数
Table 2 Fragment distribution fitting equations and related parameters

编号	拟合方程	特征粒径 X_0/mm	均匀性 指数 m	决定系数 R^2
6 mm-1	$Y^* = 1.093X^* - 0.081$	1.086	1.093	0.980
6 mm-2	$Y^* = 1.149X^* - 0.165$	1.202	1.149	0.896
6 mm-3	$Y^* = 1.184X^* - 0.097$	1.103	1.184	0.993
8 mm-1	$Y^* = 0.927X^* - 1.178$	3.396	0.927	0.963
8 mm-2	$Y^* = 0.960X^* - 1.295$	3.722	0.960	0.985
8 mm-3	$Y^* = 0.893X^* - 1.163$	3.239	0.893	0.990
10 mm-1	$Y^* = 0.914X^* - 1.599$	5.190	0.914	0.971
10 mm-2	$Y^* = 0.877X^* - 1.476$	4.710	0.877	0.952
10 mm-3	$Y^* = 0.910X^* - 1.623$	5.451	0.910	0.957

图 11 为抵抗线值与碎块特征参数的关系, 其中, 特征粒径 X_0 为碎块特征尺寸, 反映了岩石破碎的难易程度, X_0 值越大表征岩石越难破碎。直线斜率 m 为均匀性指数, 反映了碎块分布的离散程度。 m 值越小, 表征碎块尺寸分布越离散。从图 11 中可以看出, 随着抵抗线增加, 特征粒径 X_0 均值由 1.130 mm 增加至 5.117 mm , 而均匀性指数 m 的均值由 1.142 减小至 0.900 。表明随抵抗线值增加, 破碎难度与碎块离散性增加。

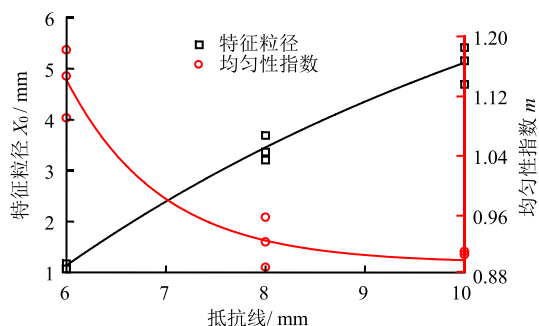


图 11 抵抗线与碎块特征参数关系

Fig.11 Relationships between burden and characteristic parameters of fragments

进一步对不同抵抗线下试件的爆破能耗特性进行分析,采用爆炸能量单耗 q 这一指标,即破碎单位体积岩石所消耗的能量来描述能耗特性:

$$q = Q/V \quad (15)$$

式中: q 为爆破破碎能量单耗(mJ/mm^3); V 为爆破漏斗体积(mm^3)。

图 12 为特征粒径 X_0 与能量单耗 q 之间的关系,可以发现,当能量单耗增加时,碎块块度呈指数函数减小趋势。具体而言,当能量单耗较小时,适当增加能量单耗可以明显改善岩石破碎效果,因为此时随能量单耗的增加,碎块块度会快速减小。然而,当能量单耗较高时,通过提高能量单耗来增加岩石破碎程度的方法难以取得好的效果,反而会造成能量的浪费,因为此时随能量单耗的增加,碎块块度并没有明显减小。综上所述,对于不同能耗情况下的岩石破碎,可以依据已建立的碎块块度参数与能量单耗关系进行调控,从而增加能量利用率、降低成本,达到最佳工程爆破效果,研究成果为确定合理、安全高效的爆破设计参数提供参考。

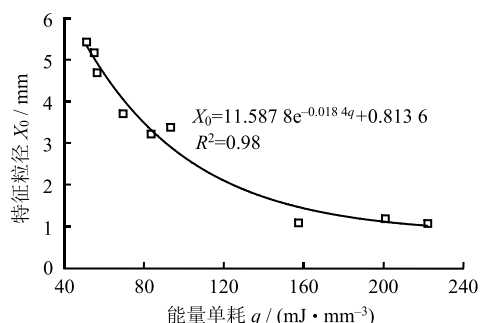


图 12 特征粒径与能量单耗关系

Fig.12 Relationship between characteristic particle size and energy consumption

5 结 论

本文采用理论方法研究了不同抵抗线下爆破破

裂区尺寸的变化规律。利用铜丝作为爆源,模拟柱状药包爆破,开展了柱状药包侧向爆破破岩的物理模型试验,观测了试件表面裂纹网的演化过程,结合爆破漏斗区形态、尺寸和碎块分布特征,研究了不同抵抗线下柱状药包爆破破岩特性。主要结论如下:

(1) 平行于爆源的横向裂纹主导着试件初期的破坏模式,径向与环向裂纹先后以横向裂纹为中心发育,环向裂纹具有阻断横向与径向裂纹发育扩展的特性,并且决定了爆破破坏边界范围。随抵抗线值增加,爆源到试件表面的贯穿裂纹由横向裂纹转变为环向裂纹,裂纹网的发育速度与密度降低。

(2) 基于波动理论分析了自由面处的应力状态,利用最大拉应变准则计算出柱状药包破裂区边界,结合物理模型爆破试验得出,柱状药包侧向爆破下形成的爆破漏斗边界面近似为椭圆形,随着抵抗线值增加,爆破漏斗边界面的短轴及破坏区体积随之增加。

(3) 采用 Rosin-Rammler 分布函数描述爆破后碎块分布特征,抵抗线值由 6 mm 增加至 10 mm,特征粒径 X_0 均值由 1.130 mm 增加至 5.117 mm,均匀性指数 m 均值由 1.142 减小至 0.900。分析结果表明,随抵抗线值增加,岩石的爆破破碎难度与碎块分布的离散性均呈现增加的趋势。

(4) 碎块块度随能量单耗增加呈指数型衰减趋势。当能量单耗较小、碎块块度较大时,碎块块度对能量单耗变化敏感度高,适度增加能量单耗就能明显改善爆破破碎效果;而能量单耗较高、碎块块度较小时,能量单耗增加不能有效改善碎块尺寸。利用建立的碎块块度与能量单耗之间关系,可对碎块块度及爆破能量利用进行综合评价分析,为岩石工程爆破设计及参数优化提供参考。

参 考 文 献

- [1] 王观石,李长洪,胡世丽,等. 岩体中应力波幅值随时空衰减的关系[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3487-3492.
WANG Guan-shi, LI Chang-hong, HU Shi-li, et al. A study of time-and spatial-attenuation of stress wave amplitude in rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(11): 3487-3492.
- [2] ZUO J P, YANG R S, MA X M, et al. Explosion wave and explosion fracture characteristics of cylindrical charges[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2020, 135: 104501.
- [3] 柴少波,李建春,李海波. 柱面波在节理岩体中的传播特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(3): 523-530.
CHAI Shao-bo, LI Jian-chun, LI Hai-bo. Propagation

- characteristics of cylindrical wave in joint rock masses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(3): 523-530.
- [4] 柴少波, 周涛, 田威, 等. 考虑岩体应力的结构面中应力波传播特性分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(S01): 9.
CHAI Shao-bo, ZHOU Tao, TIAN Wei, et al. Analysis of stress wave propagation through a rock structural plane considering rock mass stresses[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(S01): 9.
- [5] ZHU Z M. Numerical prediction of crater blasting and bench blasting[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2009, 46(6): 1088-1096.
- [6] ZHU Z M, XIE H P, MOHANTY B. Numerical investigation of blasting-induced damage in cylindrical rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2008, 45(2): 111-121.
- [7] 雷振, 黄永辉, 陈文梦, 等. 爆炸冲击荷载下扩腔体积和能耗随抵抗线的变化规律研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(4): 66-71.
LEI Zhen, HUANG Yong-hui, CHEN Wen-meng, et al. A study on the variation of cavity volume and energy dissipation with resistance line under blast impact load[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2021, 40(4): 66-71.
- [8] 安龙, 张家华, 李元辉, 等. 急倾斜薄矿脉夹制作用下中深孔爆破模拟与参数优化[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(4): 567-574.
AN Long, ZHANG Jia-hua, LI Yuan-hui, et al. Simulation and parameters optimization of medium deep hole blasting in steeply narrow vein mine under confinement[J]. **Journal of Northeastern University (Natural Science)**, 2022, 43(4): 567-574.
- [9] 周继国, 张智宇, 王建国, 等. 最小抵抗线对岩石破碎块度影响的能量分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1): 135-142.
ZHOU Ji-guo, ZHANG Zhi-yu, WANG Jian-guo, et al. Energy analysis on the effect of minimum burden on rock fragmentation[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2021, 17(1): 135-142.
- [10] 闫广亮, 张凤鹏, 郝红泽, 等. 电爆炸破碎岩石类脆性材料实验方法与应用[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3203-3211.
YAN Guang-liang, ZHANG Feng-peng, HAO Hong-ze, et al. Experimental method and application of electrical explosion for breaking rock-like brittle materials[J]. **Journal of China Coal Society**, 2021, 46(10): 3203-3211.
- [11] YAN G L, ZHANG F P, KU T, et al. Experimental study and mechanism analysis on the effects of biaxial in-situ stress on hard rock blasting[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2023, 56: 3709-3723.
- [12] 陈士海, 宫嘉辰, 胡帅伟. 爆破荷载下围岩及支护锚杆动力响应特征模型试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(12): 3910-3918.
CHEN Shi-hai, GONG Jia-chen, HU Shuai-wei. Model test study on dynamic response characteristics of host rock-mass and supporting bolt under blasting load[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(12): 3910-3918.
- [13] 郭德勇, 张超, 朱同功. 地应力对煤层深孔聚能爆破致裂增透的作用[J]. 工程科学学报, 2022, 44(11): 1832-1843.
GUO De-yong, ZHANG Chao, ZHU Tong-gong. Effect of in-situ stress on the cracking and permeability enhancement in coal seams by deep-hole cumulative blasting[J]. **Chinese Journal of Engineering**, 2022, 44(11): 1832-1843.
- [14] PENG J Y, WANG X L, ZHANG F P, et al. Influences of the burden on the fracture behaviour of rocks by using electric explosion of wires[J]. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, 2022, 118: 103270.
- [15] ZHANG F P, PENG J Y, QIU Z, et al. Rock-like brittle material fragmentation under coupled static stress and spherical charge explosion[J]. **Engineering Geology**, 2017, 220: 266-273.
- [16] JIANG X Y, YAN S L, LIU W. An experimental research and analysis of the law of explosive stress wave propagation of cylindrical charge[J]. **Applied Mechanics and Materials**, 2012, 137: 24-29.
- [17] GAO C, KONG X, FANG Q. Experimental and numerical investigation on the attenuation of blast waves in concrete induced by cylindrical charge explosion[J]. **International Journal of Impact Engineering**, 2023: 174: 104491.
- [18] 刘啸, 华心祝, 黄志国, 等. 应力波作用下含大型结构面岩体垮塌动力失稳机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(10): 2003-2014.
LIU Xiao, HUA Xin-zhu, HUANG Zhi-guo, et al. Dynamic collapse mechanisms of rock mass with large structural planes under stress waves[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(10): 2003-2014.
- [19] 刘瑞峰, 朱哲明, 刘邦, 等. 爆炸荷载下砂岩动态断裂特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(3): 445-454.
LIU Rui-feng, ZHU Zhe-ming, LI Bang, et al. Experimental study on dynamic fracture characteristics of sandstones under blasting[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(3): 445-454.
- [20] FIGUEIREDO J, TORRES V, CRUZ R, et al. Blasting fragmentation study using 3D image analysis of a hard rock mine[J]. **Applied Sciences**, 2023, 13(12): 7090.
- [21] VESILIND P A. The Rosin-Rammler particle size distribution[J]. **Resource Recovery and Conservation**, 1980, 5(3): 275-277.
- [22] KINYUA E M, JIANHUA Z, KASOMO R M, et al. A review of the influence of blast fragmentation on downstream processing of metal ores[J]. **Minerals Engineering**, 2022, 186: 107743.