

节理特性对应力波传播及爆破效果的影响规律研究

赵安平^{1,2}, 冯春³, 郭汝坤³, 李世海³, 贾建军⁴

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 页岩气与地质工程院重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院力学研究所 流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190; 4. 鞍钢矿业爆破有限公司, 辽宁 鞍山 114046)

摘要: 建立节理岩体一维分析模型并进行量纲分析, 探讨节理特性对应力波传播规律的影响。单节理时, 应力波通过节理后出现了明显的延时和振幅衰减, 但主频无明显变化; 多节理时, 随着节理间距及节理数量的增加, 透射应力波幅值均有所降低, 且节理岩体等效波速随着节理数量的增加而线性减小。采用连续-非连续单元方法 (CDEM), 探讨节理强度、节理刚度、节理刚度/强度、节理间距、节理倾角等参数对爆破效果的影响规律, 并通过平均破碎尺寸、极限破碎尺寸、大块率、系统破裂度及等效损伤因子等指标进行综合评价。计算结果表明: 爆破效果随着节理强度(刚度)的降低而逐渐变差, 当节理的强度(刚度)达到岩块强度的 1/1 000 后, 更低的节理强度(刚度)对爆破效果的影响不大; 当节理强度和刚度取为岩块的 1/1 000 时, 节理间距越密集, 爆破效果越差, 但节理倾角对爆破效果的影响不大。节理岩体中爆破时, 爆破能量被圈闭在炮孔与附近的节理面之间, 导致炮孔附近区域过于破碎, 而远离炮孔的区域破碎较少; 因此, 爆区内节理的发育程度与爆破效果之间存在负相关关系。

关键词: 岩石力学; 节理岩体; 应力波; 台阶爆破; 破碎尺寸; 大块率; 损伤因子

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)09 - 2027 - 10

Effect of joints on blasting and stress wave propagation

ZHAO Anping^{1, 2}, FENG Chun³, GUO Rukun³, LI Shihai³, JIA Jianjun⁴

(1. Key Laboratory of Institute Shale Gas and Geoengineering, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
4. ANSTEEL Blasting Co., Ltd., Anshan, Liaoning 114046, China)

Abstract: A one dimensional model for jointed rock is established and dimension analysis is carried out to investigate the effect of joints on stress wave propagation. For a single joint, the stress wave exhibited obvious time delay and amplitude attenuation, but there was no significant change in the main frequency. For multiple joints, the amplitudes of transmitted stress waves were reduced as the spacing and number of joints increased. The equivalent wave velocity in the jointed rock masses was reduced linearly as the number of joints increased. The influence of several joint parameters, such as the strength, stiffness, spacing and dip angle, on the blasting effect was discussed by using the Continuous-Discontinuous Element Method, which was then comprehensively

收稿日期: 2018 - 03 - 22; **修回日期:** 2018 - 05 - 29

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0801603); 广东宏大爆破股份有限公司“基于数字模拟的露天爆破设计软件”研发项目

Supported by National Key Research and Development Plan(Grant No. 2016YFC0801603) and Guangdong Hongda Blasting Co., Ltd. “Design Software of Open Air Blasting Based on Digital Simulation” Research and Development Projects

作者简介: 赵安平(1982 -), 男, 2006 年毕业于山西大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: zhaoanping0205@163.com。通讯作者: 冯春(1982 -), 男, 现任高级工程师、博士研究生。E-mail: fengchun@imech.ac.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0270

evaluated in terms of several indexes such as the average fragmentation sizes, limit fragmentation sizes, percentage of massive blocks, system fragmentation degree and equivalent damage factor. The calculated results show that the blasting effect become worse gradually as the decreasing of strength(stiffness) of joint. When the strength(stiffness) of the joint is smaller than one thousandth of that of rock, the strength(stiffness) of joint has little influence on the blasting effect. When the strength(stiffness) of the joint is one thousandth of that of rock, the blasting effect is worse as the joints come closer, however, the dip angle of the joints has little influence on the blasting effect. Due to the fact that the blasting energy is trapped between the blast hole and adjacent joints during blasting in the jointed rock mass, the area near the blast hole is always over fragmented, whereas the area far away from the blast hole is under fragmented. A negative correlation is thus found between the development degree of the joints within the blasting area and the blasting effect.

Key words: rock mechanics; jointed rock masses; stress wave; bench blasting; fragmentation sizes; percentage of massive blocks; damage factor

1 引言

节理普遍存在于岩体中,对于岩体强度起关键性影响作用,对岩体的动态力学特性有重要影响^[1]。目前为止,国内外学者已经开展了不少关于岩体动力学方面的研究。其中,分离式霍普金森压杆被广泛采用。J. C. Li 和 G. M. Ma^[2]利用改进的分离式霍普金森压杆(SHPB)装置,进行了应力波传播的实验研究,并证实节理厚度和含水量对填充岩节理的动态应力-应变关系有显著影响。X. Chen 等^[3]采用改良的分离式霍普金森压杆装置,进行应力波在人工岩缝中传播的实验研究,揭示了其透射系数与接触面接触情况的关系。F. Dai 等^[4]利用分形霍普金森压力杆系统,对短柱试样的岩石动力抗压强度进行了量化,并利用巴西盘试样对岩石的动力抗拉强度进行了定量分析。W. Wu 等^[5]在3个低加载速率下,对非填充接点和填充接点进行了劈裂霍普金森压杆实验研究。Y. Ju 等^[6]利用 SHPB 技术和分形几何方法,对节理岩体应力波传播特性进行了实验和理论研究,结果表明,粗糙的节理面显著地影响了节理岩体的应力波传播和能量耗散。

另外,爆破作为岩体破碎的常用方法,在许多工程项目中应用广泛。岩体破碎过程中,随着传播距离的增大,炸药爆炸后所产生的冲击波迅速衰减为应力波,应力波对岩体破碎具有非常重要的作用^[7]。节理、裂隙使炸药与岩体之间的作用变得极为复杂,减弱了应力波的作用,改变了岩体的破坏模式,对爆破效果产生了极大的影响,国内外学者对此已有较为深入的研究^[8]。王明洋和钱七虎^[9]结合实际地质特征,根据节理与断层的几何关系,探讨了节理、裂隙对应力波的影响规律;L. Miranda 等^[10]通过声

波测试实验,分析了花岗岩岩体试样表面粗糙或光滑的节理特征对于声波传播的影响;潘长春等^[11]以富含天然裂隙的岩体为材料,通过模型实验,就岩体节理、裂隙对爆破振动波传播规律的影响做了详细研究。

但是,实验不能全面地反映多节理、裂隙对爆破效果的影响,而数值模拟却很好地弥补了这一缺陷。因此,近年来有不少学者采用数值计算方法来研究。刘婷婷等^[12]选用离散元方法(UDEC),重点研究了应力波在一组平行充填节理岩体中的传播规律,发现节理特性(厚度、间距、数量)与透射系数之间存在一定的关系;叶海旺和王进^[13]利用有限单元法,以爆破过程中应力场的分布和能量的传播为突破口,探讨了爆破效果受岩体节理、裂隙的影响;张秀丽等^[14]采用不连续变形分析方法(DDA),对应力波在非充填节理处的传播规律进行了研究;赵坚等^[15]采用 UDEC 和 Auto-dyna-2D 相结合的方法,模拟了爆炸波在非充填节理岩体中的传播;肖定军等^[16]采用有限元软件(ANSYS/LS-Dyna),分析了顺倾岩质边坡在爆炸冲击波作用下,抵抗线、夹层初始厚度及夹层倾角3个因素对岩体软弱夹层的变形影响规律;陶连金等^[17]通过颗粒流离散元程序 PFC,定量分析了不同分布形式的节理对于岩体爆破的影响程度。

从上述研究现状可以看出,中外学者在岩体中节理的不同物理力学性质和几何特征对爆破效果的影响方面研究还相对较少。本文在前人研究的基础上,首先探讨了应力波在节理岩体中传播时,节理间距、节理数量等参数对应力波幅值衰减、等效波速降低的影响规律;而后,基于连续-非连续数值模拟方法 CDEM^[18-19],研究了节理强度、节理刚度、节理间距、节理倾角等参数对爆破效果的影响规律。

2 节理对应力波传播规律的影响

2.1 力学分析

当应力波从一种介质传播到另一种声阻抗不同的介质时, 将发生应力波的透射、反射及折射现象。当应力波由材料 1 垂直入射至材料 2 时, 则折射现象消失, 仅存在应力波的透射及反射现象, 并可给出透射应力波及反射应力波的计算公式^[20]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_R &= F\sigma_1 \\ \sigma_T &= T\sigma_1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: σ_1 , σ_R 及 σ_T 分别为入射应力波、反射应力波及透射应力波; F 及 T 分别为反射系数及透射系数, 且可以用下式表示:

$$\left. \begin{aligned} F &= (1-n)/(1+n) \\ T &= 2/(1+n) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $n = (\rho c)_1 / (\rho c)_2$ 为声阻抗比, ρ 为材料密度, c 为材料中的波速, 下标 1 及 2 分别表示第 1 及第 2 种材料。

由式(1)和(2)可以看出:

(1) 如果 $n < 1$ (应力波由“软”向“硬”入射), 则 $F > 0$, 此时反射波和入射波同号(反射加载), 透射应力波从幅值上来说强于入射波($T > 1$)。在特殊情况下, 当 $(\rho c)_2 \rightarrow \infty$ (即 $n \rightarrow 0$) 时, 相当于应力波在刚壁(固定端)的反射, 这时 $T = 2$, $F = 1$ 。

(2) 如果 $n > 1$ (应力波由“硬”向“软”入射), 则 $F < 0$, 此时反射波和入射波异号(反射卸载), 透射应力波从幅值上来说弱于入射波($T < 1$)。在特殊情况下, 当 $(\rho c)_2 \rightarrow 0$ (即 $n \rightarrow \infty$) 时, 相当于弹性波在自由表面(自由端)的反射, 此时 $T = 0$, $F = -1$ 。

节理岩体是由薄层弱波阻抗的节理及厚层强波阻抗的基岩相互交叠形成的二元结构。应力波在节理岩体中传播时, 节理特性及基岩特性均会对应力波的透、反射产生影响。为了研究应力波在节理岩体中传播时振幅及波速的变化规律, 建立如图 1 所示的分析模型。

此分析模型中的自变量包括: (1) 基岩的波阻抗(z_r)、波速(c_r)、强度(S_r); (2) 节理的波阻抗(z_j)、波速(c_j)、强度(S_j)、厚度(ΔH)、节理间距(ΔL)、节理数量(N); (3) 入射应力波的峰值(σ_{ip})、峰值时间(T_{ip})及持续时间(T_{il}); (4) 围岩应力(σ_g)。

此分析模型中的因变量包括: 透射应力波的峰值(σ_{Tp})、节理岩体的等效波速(c_{jr})。

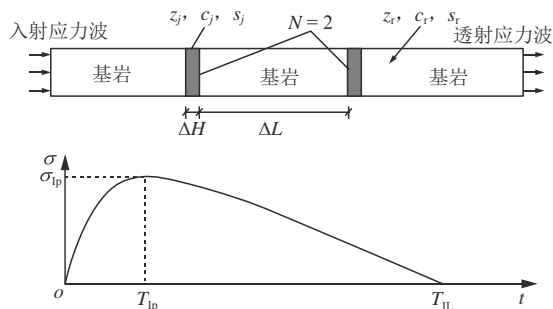


图 1 节理岩体中应力波传播规律分析模型

Fig.1 Analysis model of stress wave propagation in jointed rock masses

建立自变量及因变量间的函数关系为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{Tp}, c_{jr} &= f(z_r, c_r, S_r, z_j, c_j, S_j, \Delta H, \Delta L, \\ &N, \sigma_{ip}, T_{ip}, T_{il}, \sigma_g) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

以基岩波速 c_r 、入射波峰值 σ_{ip} 及入射波持续时间 T_{il} 为基本量, 建立无量纲关系式:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{ip}}, \frac{c_{jr}}{c_r} &= f\left(N, \frac{z_r c_r}{\sigma_{ip}}, \frac{z_j}{z_r}, \frac{c_j}{c_r}, \frac{\Delta H}{\Delta L}, \frac{\Delta L}{c_r T_{il}}, \right. \\ &\left. \frac{T_{ip}}{T_{il}}, \frac{\sigma_g}{\sigma_{ip}}, \frac{S_r}{\sigma_{ip}}, \frac{S_j}{\sigma_{ip}}\right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

设基岩参数、节理参数、围岩应力及入射应力波的形式为定值, 则式(4)可进一步简化为

$$\frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{ip}}, \frac{c_{jr}}{c_r} = f\left(N, \frac{\Delta L}{\Delta H}\right) \quad (5)$$

由式(5)可得, 透射应力波的幅值及持续时间仅与节理数量(N)及基岩与节理的厚度比($\Delta L/\Delta H$)有关。采用数值模拟探讨上述关系。建立如图 2 所示的一维连续-非连续数值模型(采用 1 000 个六边形网格划分)。模型长 10 m, 网格尺寸为 1 cm, 节理厚度为 5 cm, 模型左、右两侧均为无反射边界, 在模型左侧施加半正弦的压缩波, 幅值为 1 MPa, 脉宽为 1 ms。基岩参数及节理参数如表 1 所示。

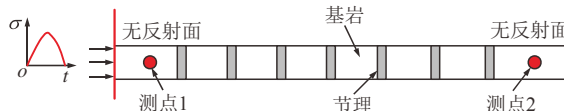


图 2 节理岩体中应力波传播的数值模型

Fig.2 Numerical model of stress wave propagation in jointed rock masses

表 1 基岩参数及节理参数

Table 1 Base rock parameters and joint parameters

类别	密度/(kg · m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比
基岩	2 500	50	0.25
节理	2 000	2	0.35

取节理数量 N 为 2, 3, 4, 5, 6, 节理间距 ΔL 为 0.2, 0.5, 0.8, 1.1, 1.4 m, 共形成 25 组算例。计算所得透射应力波幅值与入射应力波幅值的比如图 3 所示。由图 3 可得, 相同节理间距的情况下, 随着节理数量的增大, 透射应力波幅值逐渐减小; 相同节理数量的情况下, 随着节理间距的增大, 透射应力波幅值亦逐渐减小。

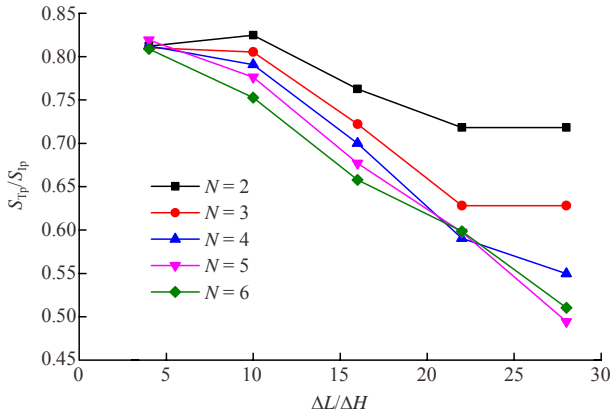


图 3 透射应力波幅值与节理间距及节理数量的关系

Fig.3 The relationships of amplitude of transmitted stress with joint spacing and number of joints

计算结果表明, 随着节理数量的增大, 等效波速(c_{jr})将线性减小, 但节理间距对等效波速的影响不大(见图 4)。

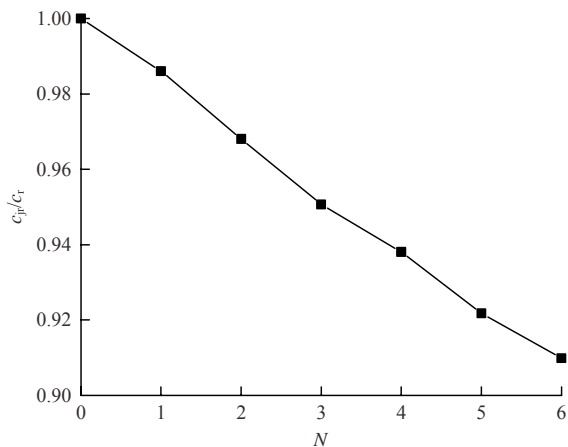


图 4 节理岩体等效波速与节理数量的关系

Fig.4 Relationship between equivalent wave velocity and number of joints of jointed rock masses

2.2 模型试验

由两块条状花岗岩拼接形成 1 道节理, 两块花岗岩尺寸均为 10 cm×10 cm×1 m, 拼接后节理缝为 0.5~1.0 mm, 缝中填速凝水泥。

如图 5 所示, 采用力锤(橡胶锤)在敲击点 1 及敲击点 2 各击打 5 次, 并利用 BZ144, BZ126 及 BZ132 三支加速度传感器记录垂直方向的振动情

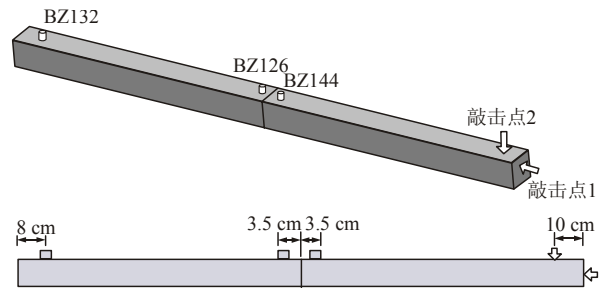


图 5 锤击点及传感器位置

Fig.5 Hammering point and sensor positions

况。敲击点 1 位于端面正中(模拟 P 波), 敲击点 2 距离右端 10 cm(模拟 S 波), BZ144 距离节理面 3.5 cm, BZ126 距离节理面 3.5 cm, BZ132 距离左端 8 cm。

经过统计, 重复试验 3 组, 每组敲击点 1 和敲击点 2 各敲击 5 下, 对传感器 BZ144 和 BZ126 所测数据结果求平均值, 结果如表 2 所示。

表 2 延时及振幅变化

Table 2 Delay and amplitude changes

波型	延时/ms	波峰衰减率/%	波谷衰减率/%
P 波	0.165 5	52.32	66.00
S 波	0.276 9	86.33	81.40

从试验结果来看, 不管是纵波(P 波)还是横波(S 波), 通过节理后都有一定的延时, 相比较来说, S 波要比 P 波延时时间更长; 此外, 不管是 P 波还是 S 波, 通过节理后波的振幅都有一定程度的衰减, 且 S 波衰减幅度更大。

3 节理对爆破效果影响的数值模拟

3.1 数值方法及计算模型简介

本文的数值模拟主要采用连续-非连续单元方法(CDEM), 该方法的理论基础是拉格朗日方程:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial v_i} \right) + \frac{\partial L}{\partial u_i} = Q_i \quad (6)$$

式中: u_i, v_i 为广义坐标; L 为拉格朗日系统的能量; Q_i 为非保守力所做的功。

炸药模型为朗道点火爆炸模型, 输入参数包括装药密度、爆速、爆热、点火点位置、点火时间 5 个参数。岩体采用弹性-损伤-断裂模型进行描述, 其中, 单元表征材料的弹性特性, 输入参数包括密度、弹性模量及泊松比; 虚拟界面表征材料的损伤断裂特征, 输入参数包括单位面积法向及切向刚度、黏聚力、内摩擦角、抗拉强度、拉伸断裂能及剪切

断裂能。

3.2 计算方案及计算参数

本文采用二维平切面模型进行分析, 建立如图 6 所示的双临空面露天矿爆破模型。

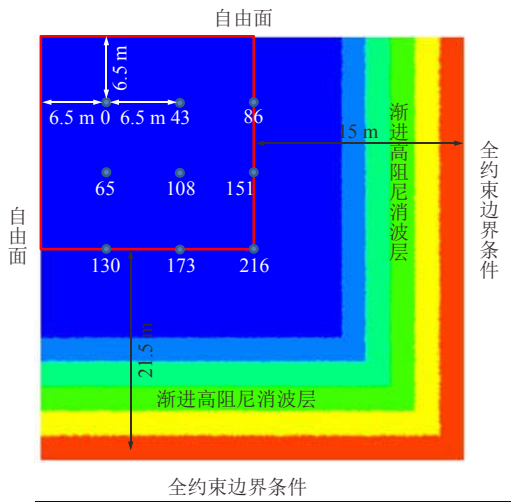


图 6 露天矿爆破模型
Fig.6 Blasting model of open-pit mine

该模型的炮孔直径为 250 mm, 共分 3 排, 每排 3 个炮孔, 布孔形式为矩形布孔, 相邻炮孔间的距离均为 6.5 m。模型的上侧和左侧为自由面, 右侧和下侧为全约束边界条件, 在最外侧炮孔和边界条件之间设置 10 m 渐进的高阻尼消波层, 从炮孔向边界阻尼系数系数依次为 0.15, 0.30, 0.45, 0.60, 0.75, 图 6 中红色框内区域为爆破块度统计区域。采用 Gmsh 软件进行网格划分, 共划分 16.18 万个三角形单元。

为了研究岩体节理对爆破效果的影响, 本文共探讨节理强度、节理刚度、节理强度/刚度、节理间距、节理倾角 5 种岩体节理物理力学性质对爆破效果的影响规律, 计算模型如图 6 所示, 图中蓝色线条为节理, 节理间距为 S , 节理倾角为 α 。炸药参数如表 3 所示。

表 3 炸药参数
Table 3 Explosive parameters

装药密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	爆轰速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	爆热/($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
1 150	4 250	3.4

岩石(赤铁矿)的损伤破裂过程采用弹性 - 损伤 - 破裂模型进行模拟, 单元采用弹性模型, 虚拟界面采用断裂能模型, 拉伸断裂能为 400 J/m^2 , 剪切断裂能为 $8 000 \text{ J/m}^2$ 。其他参数如表 4 所示。

表 4 岩石参数

Table 4 Rock parameters

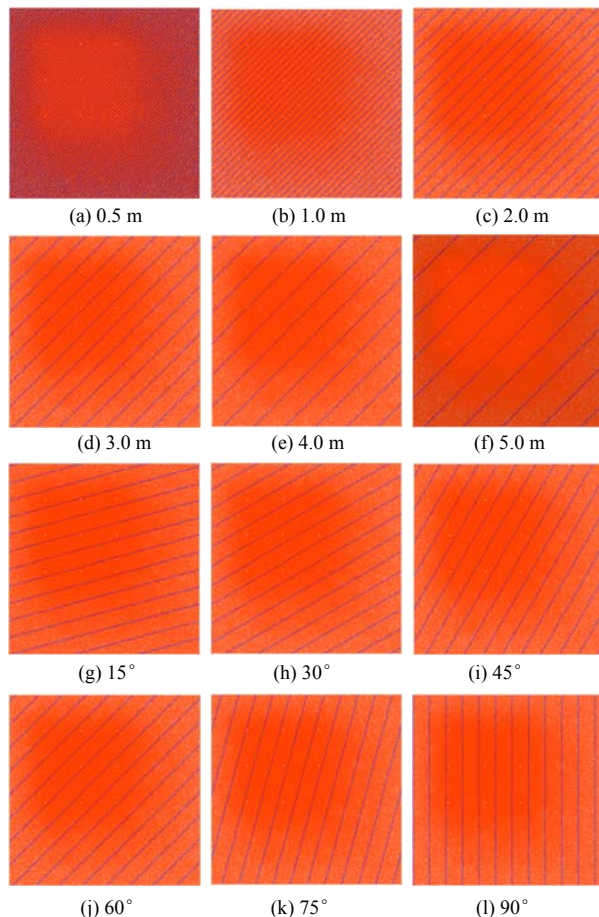
普氏系数	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	法向刚度/($\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$)	切向刚度/($\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/($^\circ$)
15.4	3 200	60	0.25	5 000	5 000	36	12	40

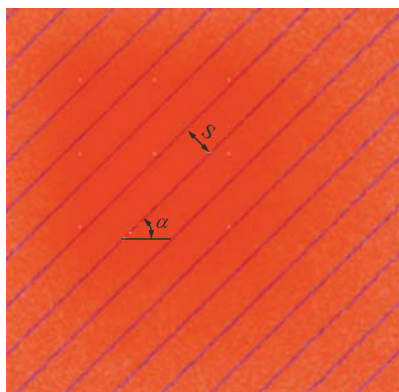
当研究节理强度影响时, 固定节理单位面积法向及切向刚度均为 $5 000 \text{ GPa/m}$, 节理间距 $S = 3.0 \text{ m}$, 节理倾角为 45° , 改变节理强度, 节理强度依次取岩体强度的 $1, 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$ 倍。

当研究节理刚度影响时, 固定节理强度为岩体强度, 节理间距 $S = 3.0 \text{ m}$, 节理倾角为 45° , 改变节理刚度, 节理刚度依次取初始刚度的 $1, 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$ 倍。

考虑到节理的存在会导致强度和刚度的同时降低, 因此, 研究节理刚度 - 强度共同的影响规律, 此时, 固定节理间距为 $S = 3.0 \text{ m}$, 节理倾角为 45° , 同时改变节理的刚度和强度, 依次取为岩体的 $1, 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$ 倍。

当研究节理间距影响时, 固定节理强度和刚度为岩体的 $1/1 000$ 倍, 节理倾角为 45° , 改变节理间距, 节理间距依次取 $0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 \text{ m}$, 如图 7 所示。





(m) 节理示意图

图7 赤铁矿岩体不同节理间距、倾角的计算模型

Fig.7 Calculation model of hematite rock with different joint spacings and joint inclinations

当研究节理倾角影响时，固定节理刚度和强度为岩体的 1/1 000 倍，节理间距为 3.0 m，改变节理倾角，节理倾角依次取 15°，30°，45°，60°，75°，90°。

3.3 评价指标

为了评价不同节理性质下的爆破效果，本文对爆破后统计区域的块度分布特征进行全面地统计分析，本文除沿用文献中的平均破碎尺寸(d_{50})、极限破碎尺寸(d_{90})、系统破裂度(F_r)、大块率(B_r)4 个评价指标外，新增加平均损伤因子指标。各指标的含义及获取方式如下：

(1) 平均破碎尺寸(d_{50})：块度分布曲线中通过率为 50%时对应的尺寸；该值越大，爆区内块体尺寸的平均值越大，表征爆破效果越差。

(2) 极限破碎尺寸(d_{90})：块度分布曲线中通过率为 90%时对应的尺寸；该值越大，爆区内的大块尺寸越大，表征爆破效果越差。

(3) 系统破裂度(F_r)：已经发生破裂的虚拟界面面积与总虚拟界面面积的比值；该值越大，数值模型越破碎，表征爆破效果越好。

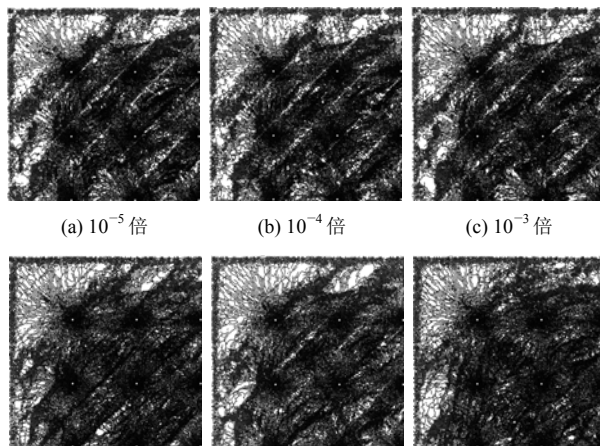
(4) 大块率(B_r)：特征尺寸超过 0.9 m 的岩块体积与岩块总体积的比值，值越大表征爆破效果越差。

(5) 平均损伤因子(D)：破碎块体损伤的加权平均值，表征破碎块体内部的损伤程度，值越大表明爆破效果越好。

3.4 计算结果分析

(1) 节理强度对爆破效果的影响

不同节理强度下，爆区内岩体的最终破碎效果如图 8 所示。由图 8 可直观看出，爆破载荷激活了几乎所有的预设节理面，在自由边界处有密集的反向拉伸破坏现象。从爆破的最终破碎效果图可以看



(a) 10^{-5} 倍 (b) 10^{-4} 倍 (c) 10^{-3} 倍

(d) 10^{-2} 倍 (e) 10^{-1} 倍 (f) 1 倍

图8 不同节理强度的爆区破碎效果

Fig.8 The fragmentation effect in blasting area with different joint strengths

出，当节理强度为岩体强度时，爆破效果最好，当节理刚度小于岩体刚度的 1/1 000，刚度继续减小，破碎效果图变化不大。

不同节理强度的破碎块度级配曲线如图 9 所示，从图 9 中可知，爆破效果随着节理强度的减小逐渐变差，节理强度和岩体强度一致时，爆破效果最好，当节理强度小于岩体强度的 1/1 000 后，统计区域的级配曲线变化不大。经过数据处理得到平均破碎尺寸、极限破碎尺寸、系统破裂度、大块率、平均损伤因子等评价指标如表 5 所示。从表 5 可看出，节理强度和岩体强度一致时，爆破效果最好，即岩石越均匀爆破效果越好。

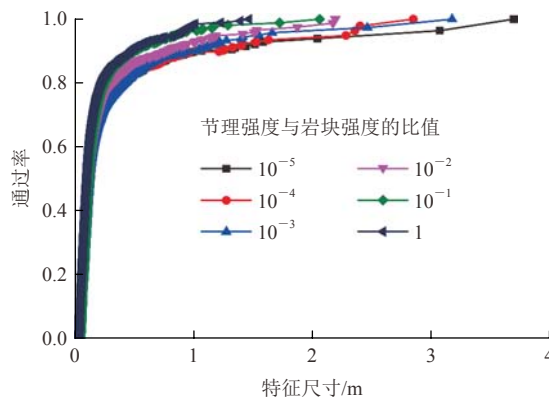


图9 不同节理强度的破碎块度级配曲线

Fig.9 Grading curves of fragmentation degree of rocks with different joint strengths

(2) 节理刚度对爆破效果的影响

不同节理刚度下，爆区内岩体的最终破碎效果如图 10 所示。由图 10 可直观看出，爆破载荷激活了所有的预设节理面，节理面附近岩石严重破碎，在自由边界处没有密集的反向拉伸破坏现象，低刚

表 5 不同节理强度的爆破破碎评价指标取值
Table 5 The evaluation indexes of blasting fragmentation of different joint strengths

节理强度与岩块强度比值	平均破碎尺寸/m	极限破碎尺寸/m	大块率/%	系统破裂度	平均损伤因子
10^{-5}	0.129	1.070	10.3	0.689	0.215
10^{-4}	0.129	1.240	10.4	0.686	0.215
10^{-3}	0.129	1.020	10.0	0.688	0.210
10^{-2}	0.123	0.790	7.5	0.709	0.183
10^{-1}	0.118	0.512	4.0	0.728	0.164
1	0.116	0.475	1.5	0.740	0.171

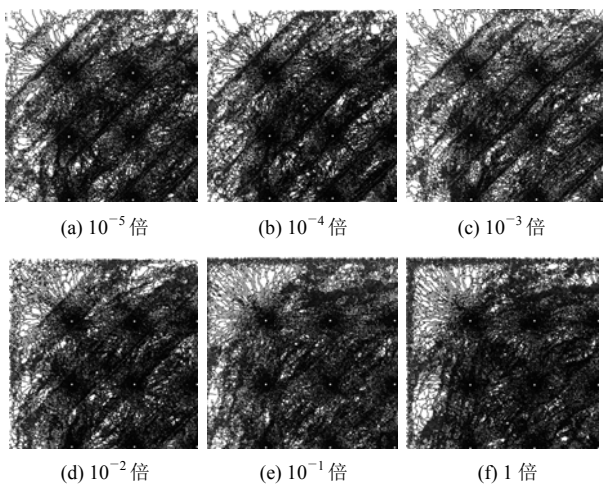


图 10 不同节理刚度的爆区破碎效果

Fig.10 The blasting fragmentation effect of rocks with different joints stiffnesses

度的节理区域减弱了应力波对自由边界的反向拉伸作用, 应力波在第一次通过节理位置时就发生了应力波的反射。

不同节理刚度的破碎块度级配曲线如图 11 所示。由图 11 可知, 爆破效果随着节理刚度的减小而逐渐变差, 当节理的刚度小于岩体刚度的 1/1 000 时, 统计区域的级配曲线变化不大。经过数据处理

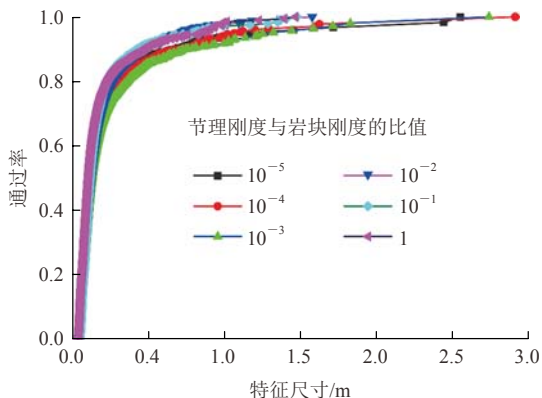


图 11 不同节理刚度的破碎块度级配曲线

Fig.11 The fragmentation degree distribution curves of rocks with different joint stiffnesses

得到平均破碎尺寸、极限破碎尺寸、系统破裂度、大块率、平均损伤因子等评价指标如表 6 所示。从表 6 可看出, 节理刚度和岩体刚度一致时, 爆破效果最好, 即岩石越均匀爆破效果越好。

表 6 不同节理刚度的爆破破碎评价指标取值
Table 6 The evaluation indices of blasting fragmentation of different joint stiffnesses

节理刚度与岩块刚度比值	平均破碎尺寸/m	极限破碎尺寸/m	大块率/%	系统破裂度	平均损伤因子
10^{-5}	0.127	0.683	6.4	0.695	0.135
10^{-4}	0.129	0.738	5.7	0.696	0.134
10^{-3}	0.131	0.764	8.3	0.687	0.132
10^{-2}	0.126	0.482	2.2	0.687	0.151
10^{-1}	0.117	0.438	2.5	0.738	0.171
1	0.116	0.475	1.5	0.740	0.171

(3) 节理刚度(强度)对爆破效果的影响

在工程实际中, 节理的性质相比于岩块而言不仅强度较低, 而且刚度也会低于岩块。将节理强度和刚度同时按照一定比例折减取值, 不同节理强度(刚度)下, 爆区内岩体的最终破碎效果如图 12 所示。由图 12 可直观看出, 爆破载荷激活了所有的预设节理面, 节理面附近岩石严重破碎, 在自由边界处没有密集的反向拉伸破坏现象, 低刚度的节理区域减弱了应力波对自由边界的反向拉伸作用, 应力波在第一次通过节理位置时就发生了应力波的反射。

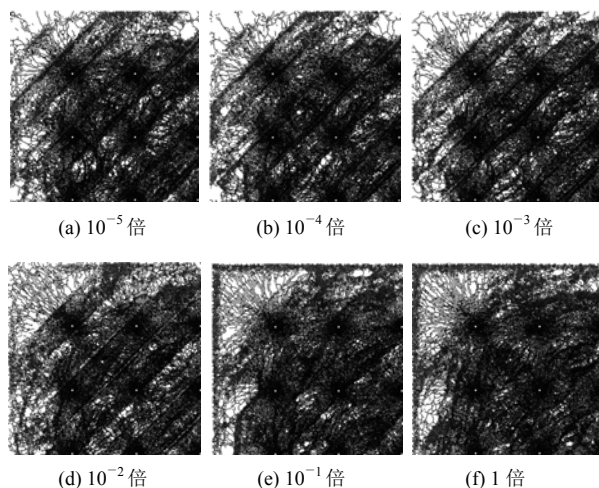


图 12 不同节理刚度(强度)的爆区破碎效果

Fig.12 The fragmentation effect of the blasting area of rocks with different joint stiffnesses and strengths

不同节理刚度(强度)的破碎块度级配曲线如图 13 所示。从图 13 中可知, 爆破效果随着节理刚度(强度)的减小而逐渐变差。经过数据处理得到平均破碎尺寸、极限破碎尺寸、系统破裂度、大块率、

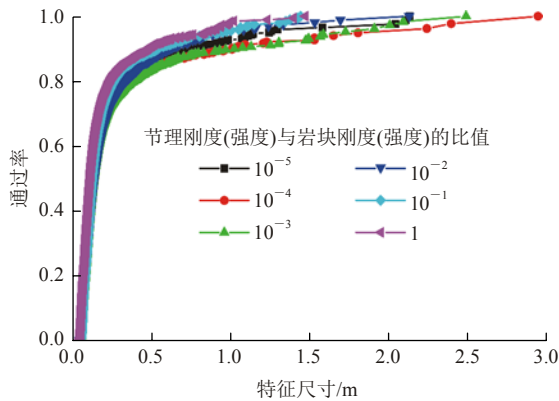


图 13 不同节理刚度(强度)的破碎块度级配曲线

Fig.13 The fragmentation degree distribution curves of rocks with different joint stiffnesses and strengths

平均损伤因子等评价指标如表 7 所示。从表 7 可看出，节理刚度和岩体刚度一致时，爆破效果最好，即岩石越均匀爆破效果越好。

表 7 不同节理刚度(强度)的爆破破碎评价指标取值

Table 7 The evaluation indexes of blasting fragmentation of different joint stiffnesses and strengths

节理刚度(强度)与岩块刚度(强度)的比值	平均破碎尺寸/m	极限破碎尺寸/m	大块率/%	系统破裂度	平均损伤因子
10^{-5}	0.128	0.771	7.0	0.689	0.202
10^{-4}	0.128	1.010	10.2	0.685	0.199
10^{-3}	0.131	1.080	10.0	0.680	0.198
10^{-2}	0.133	0.614	4.2	0.691	0.192
10^{-1}	0.120	0.540	4.4	0.725	0.166
1	0.116	0.475	1.5	0.740	0.171

(4) 节理间距对爆破效果的影响

当研究节理间距影响时，固定节理强度和刚度为岩体的 10^{-3} 倍，节理倾角为 45° ，改变节理间距，节理间距依次取 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 m。不同节理间距下，爆区内岩体的最终破碎效果如图 14 所示。

由图 14 可直观看出，当前节理参数下，随着节理间距的减小，爆破效果逐渐变差。低刚度节理区域减弱了应力波对自由边界的反向拉伸作用，导致自由表面的破碎较少，节理的存在使得应力波在传

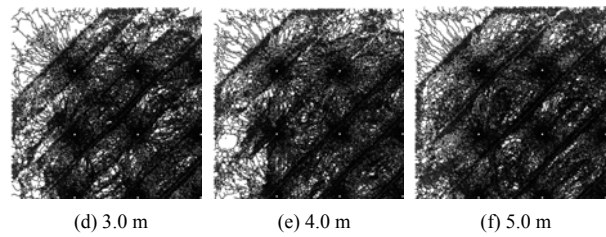
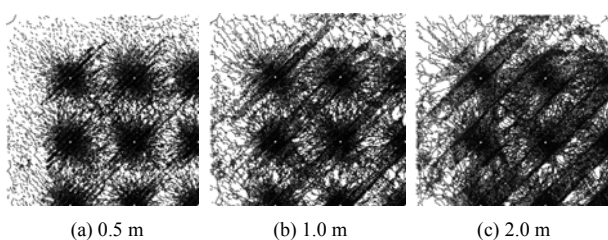


图 14 不同节理间距的爆区破碎效果

Fig.14 The blasting fragmentation effect of rocks with different joint spacings

播过程中能量大幅度衰减，当节理很密集时，岩体的破坏仅仅发生在炮孔附近，对远处岩体的破碎效果明显减弱。

不同节理间距的破碎块度级配曲线如图 15 所示。由图 15 可知，爆破效果随着节理间距的减小而逐渐变差。经过数据处理得到平均破碎尺寸、极限破碎尺寸、系统破裂度、大块率、平均损伤因子等评价指标如表 8 所示。平均破碎尺寸随着节理间距的增大逐渐减小，极限破碎尺寸随着节理间距的增大逐渐减小，大块率随着节理间距的增大而减小，系统破裂度随着节理间距的增大而增大，平均损伤因子整体变化不大。从各指标的值可看出，节理间距越大时，爆破效果最好，即岩石越均匀爆破效果越好。

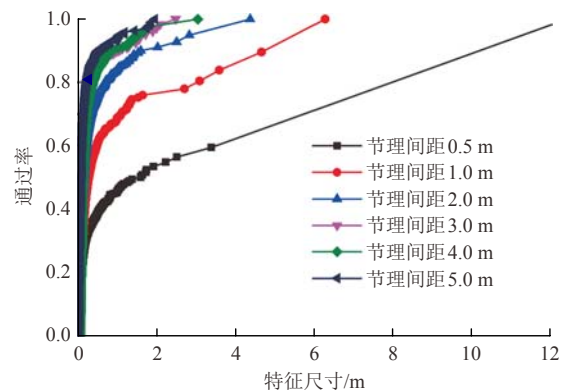


图 15 不同节理间距的破碎块度级配曲线

Fig.15 Grading curves of fragmentation degree of rocks with different joint spacings

表 8 不同节理间距的爆破破碎评价指标取值

Table 8 The evaluation indices of blasting fragmentation with different joints spacings

节理间距/m	平均破碎尺寸/m	极限破碎尺寸/m	大块率/%	系统破裂度	平均损伤因子
0.5	1.600	15.000	54.5	0.433	0.290
1.0	0.284	4.670	31.5	0.501	0.220
2.0	0.158	1.610	16.0	0.620	0.193
3.0	0.131	1.050	10.0	0.680	0.198
4.0	0.134	0.889	9.5	0.677	0.190
5.0	0.116	0.517	5.8	0.732	0.198

(5) 节理倾角对爆破效果的影响

当研究节理倾角影响时, 固定节理刚度和强度为岩体的 10^{-3} 倍, 节理间距为 3.0 m, 改变节理倾角, 节理倾角依次取 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90° 。不同节理倾角情况下, 爆区内岩体的最终破碎效果如图 16 所示。从图 16 中可直观地看出, 当节理倾角变化时, 爆破的破碎效果变化不大。

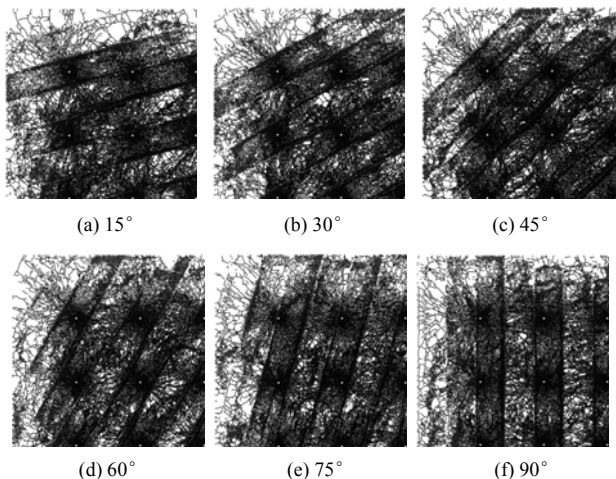


图 16 不同节理倾角的爆区破碎效果

Fig.16 The blasting fragmentation effect of rocks with different joint inclinations

不同节理倾角的破碎块度级配曲线如图 17 所示。从图 17 中可知, 爆破效果随着节理倾角的变化有微小变化, 但整体差异不大, 节理倾角为 45° 时爆破效果最好。

经过数据处理得到平均破碎尺寸、极限破碎尺寸、系统破裂度、大块率、平均损伤因子等评价指标如表 9 所示。从表 9 中可以看出, 各个破碎评价指标值随着节理倾角变化不大, 节理倾角为 45° 时, 爆破效果最好。

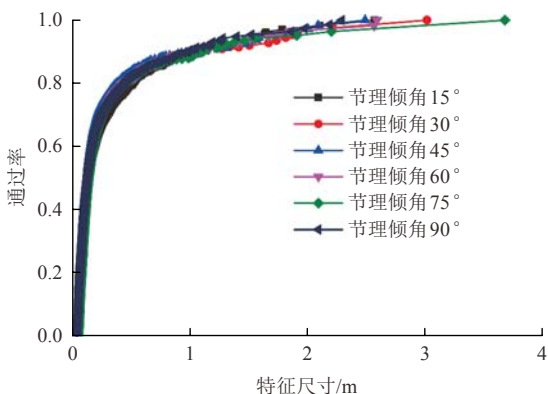


图 17 不同节理倾角的破碎块度级配曲线

Fig.17 The fragmentation degree distribution curves of rocks with different joint inclinations

表 9 不同节理倾角的爆破破碎评价指标取值

Table 9 The evaluation indices of blasting fragmentation with different joint inclinations

节理倾角/ $^{\circ}$	平均破碎尺寸/m	极限破碎尺寸/m	大块率/%	系统破裂度	平均损伤因子
15	0.145	1.130	10.8	0.648	0.176
30	0.137	1.040	10.7	0.666	0.190
45	0.131	1.050	10.0	0.680	0.198
60	0.137	1.060	10.4	0.662	0.185
75	0.138	1.110	11.7	0.666	0.187
90	0.138	0.982	9.5	0.666	0.184

4 结 论

分析了应力波在节理岩体中透、反射的机制及一般规律, 探讨了节理特性对应力波传播规律的影响; 应用连续 - 非连续方法(CDEM), 探讨了节理强度、节理刚度、节理刚度(强度)、节理间距、节理倾角等节理物理力学性质和几何特征对爆破效果的影响规律。得出如下主要结论:

- (1) 相同节理数量下, 随着节理间距的增大, 透射应力波幅值逐渐减小; 相同节理间距下, 随着节理数量的增大, 透射应力波幅值亦逐渐减小。
- (2) 节理力学参数不变时, 节理岩体等效波速仅与节理数量有关, 随着节理数量的增大, 等效波速线性减小。
- (3) 应力波通过节理后出现了明显的延时和振幅衰减的现象(节理对横波的影响大于纵波), 而主频无明显变化。
- (4) 爆区岩体的损伤破碎效果随着节理强度的降低而逐渐变差, 当节理强度达到岩块强度的 $1/1\ 000$, 更低的节理强度不会引起爆破效果的过大变化。
- (5) 损伤破碎效果随着节理刚度的降低而逐渐变差, 低刚度的节理区域会影响应力波的传播和衰减, 使得应力波的影响局限在炮孔与首个节理面圈定的范围内, 并导致该区域岩体出现过于破碎, 而其他区域的岩体破碎不充分。
- (6) 当节理强度和刚度取为岩块的 $1/1\ 000$ 时, 随着节理间距的减小, 爆破效果逐渐变差; 节理强度和刚度取为岩块的 $1/1\ 000$ 时, 节理倾角对爆破效果的影响不大, 但倾角为 45° 时的爆破效果还是略好于其他角度的效果。

参考文献(References):

[1] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 82 -

- 87.(CAI Meifeng. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002: 82 - 87.(in Chinese))
- [2] LI J C, MA G W. Experimental study of stress wave propagation across a filled rock joint[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(3): 471 - 478.
- [3] CHEN X, LI J C, CAI M F, et al. Experimental study on wave propagation across a rock joint with rough surface[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(6): 2 225 - 2 234.
- [4] DAI F, HUANG S, XIA K, et al. Some fundamental issues in dynamic compression and tension tests of rocks using split Hopkinson pressure bar[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43(6): 657 - 666.
- [5] WU W, LI J C, ZHAO J. Loading rate dependency of dynamic responses of rock joints at low loading rate[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2011, 45(3): 421 - 426.
- [6] JU Y, SUDAK L, XIE H P. Study on stress wave propagation in fractured rocks with fractal joint surfaces[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(13): 4 256 - 4 271.
- [7] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013: 234.(DAI Jun. Rock dynamics and blasting theory[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013: 234.(in Chinese))
- [8] 李秀虎, 郭连军, 潘博, 等. 节理岩体爆破数值模拟研究[J]. 辽宁科技大学学报, 2017, 40(5): 390 - 395.(LI Xiuhu, GUO Lianjun, PAN Bo, et al. Numerical simulation of blasting in jointed rock mass[J]. Journal of University of Science and Technology Liaoning, 2017, 40(5): 390 - 395. (in Chinese))
- [9] 王明洋, 钱七虎. 爆炸应力波通过节理裂隙带的衰减规律[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 42 - 46.(WANG Mingyang, QIAN Qihu. Attenuation law of explosive wave propagation in cracks[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(2): 42 - 46.(in Chinese))
- [10] MIRANDA L, CANTINI L, GUEDES J, et al. Applications of sonic tests to masonry elements: influence of joints on the propagation velocity of elastic waves[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(6): 667 - 682.
- [11] 潘长春, 徐颖, 宗琦. 基于单孔爆破的节理裂隙减振模型试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(7): 255 - 261.(PAN Changchun, XU Ying, ZONG Qi. Tests for vibration reduction model of joint fracture based on single-hole blasting[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(7): 255 - 261.(in Chinese))
- [12] 刘婷婷, 李新平, 李海波, 等. 应力波在充填节理岩体中传播规律的数值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增2): 3 552 - 3 560. (LIU Tingting, LI Xinping, LI Haibo, et al. Numerical study on stress wave propagation across filled joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Supp.2): 3 552 - 3 560.(in Chinese))
- [13] 叶海旺, 王进. 节理岩体爆破数值模拟[J]. 爆破, 2009, 26(4): 13 - 16.(YE Haiwang, WANG Jin. Numerical simulation of blasting in rock mass with joints and fractures[J]. Blasting, 2009, 26(4): 13 - 16.(in Chinese))
- [14] 张秀丽, 焦玉勇, 刘泉声, 等. 节理对爆炸波传播影响的数值研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 717 - 721.(ZHANG Xiuli, JIAO Yuyong, LIU Quansheng, et al. Numerical study on effect of joints on blasting wave propagation in rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 717 - 721.(in Chinese))
- [15] 赵坚, 陈寿根, 蔡军刚, 等. 用 UDEC 模拟爆炸波在节理岩体中的传播[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(2): 4 - 8.(ZHAO Jian, CHEN Shougen, CAI Jungang, et al. Simulation of blast wave propagation in jointed rock mass using UDEC[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2002, 31(2): 4 - 8.(in Chinese))
- [16] 肖定军, 张继春, 蒲传金, 等. 爆破作用下岩体顺倾软弱夹层的变形规律研究[J]. 爆破, 2010, 27(4): 1 - 5.(XIAO Dingjun, ZHANG Jichun, PU Chuanjin, et al. Study on deformation law of down_dip weak intercalation in rock under blasting[J]. Blasting, 2010, 27(4): 1 - 5.(in Chinese))
- [17] 陶连金, 董洪昌, 孟涛, 等. 节理岩体爆破的颗粒流离散元的模拟研究[J]. 爆破, 2013, 30(4): 14 - 19.(TAO Lianjin, DONG Hongchang, MENG Tao, et al. Simulation study of blasting of jointed rock mass using PFC[J]. Blasting, 2013, 30(4): 14 - 19.(in Chinese))
- [18] 冯春, 李世海, 刘晓宇. 一种基于颗粒接触的二维无网格方法及其在高速冲击模拟中的应用[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(3): 292 - 299.(FENG Chun, LI Shihai, LIU Xiaoyu. A 2D particle contact-based meshfree method and its application to hypervelocity impact simulation[J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(3): 292 - 299.(in Chinese))
- [19] 冯春, 李世海, 郝卫红, 等. 基于 CDEM 的钻地弹侵彻爆炸全过程数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(13): 11 - 18.(FENG Chun, LI Shihai, HAO Weihong, et al. Numerical simulation for penetrating and blasting process of EPW based on CDEM[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(13): 11 - 18.(in Chinese))
- [20] 李世海, 冯春, 周东, 等. 滑坡研究中的力学方法[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 432 - 434.(LI Shihai, FENG Chun, ZHOU Dong, et al. Mechanical methods in landslide research[M]. Beijing: Science Press, 2018: 432 - 434.(in Chinese))