

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2025.01.010

台阶爆破预裂缝宽度对降振效果的影响规律*

张奇峰^① 马力^① 张建国^② 王晓民^① 马宁^①

^①西安科技大学能源学院(陕西西安,710054)

^②中煤西安设计工程有限责任公司(陕西西安,710054)

[摘要] 爆破振动是影响露天矿边坡稳定的重要因素之一。通常采用预裂爆破控制爆破振动效应,降低爆破振动对边坡稳定性的影响。预裂缝宽度是影响降振效果的关键指标。基于预裂缝降振原理,研究预裂缝宽度对优化预裂爆破设计、提高降振效果与保障矿山安全生产具有重要意义。为了研究预裂缝宽度对降振效果的影响规律,结合爆破地震波构成及传递理论,分析了预裂缝对爆破地震波的降振原理,利用数值模拟验证了预裂缝宽度对爆破地震波传递和衰减规律的影响。采用物理相似模拟与数值模拟实验,以质点的峰值振速为判据,针对不同预裂缝宽度时的降振效果进行了定量分析。结果表明:预裂缝宽度由2 cm增加到4 cm时,峰值振速衰减曲线下降趋势急剧,各测点监测的减振率显著增加;随后,预裂缝宽度继续增加到5 cm,峰值振速衰减曲线下降趋势变得平缓,减振率平均增幅为3.25%。随着测点与预裂缝距离的增加,振降效果也随之增加,但增幅会逐渐变得缓和,减振率总体呈现先急、后缓的趋势。

[关键词] 爆破;预裂缝;降振;相似模拟;数值模拟

[分类号] TD235.37

Influence Law of the Width of Pre Cracks on Vibration Reduction in Bench Blasting

ZHANG Qifeng^①, MA Li^①, ZHANG Jianguo^②, WANG Xiaomin^①, MA Ning^①

^① College of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology (Shaanxi Xi'an, 710054)

^② China Coal Xi'an Design Engineering Co., Ltd. (Shaanxi Xi'an, 710054)

[ABSTRACT] Blasting vibration is one of the important factors affecting the stability of the slope of open-pit mines. Pre splitting blasting is usually used to control the blasting vibration, thereby reducing the impact of blasting vibration on the stability of the slope. The width of pre cracks is a key indicator affecting the vibration reduction. The study on the width of pre cracks is of great significance for optimizing pre crack blasting design, improving vibration reduction, and ensuring safe production in mines. In order to investigate the influence of the width of pre cracks on vibration reduction, principles of vibration reduction of pre cracks on blasting seismic waves were analyzed based on the theory of wave generation and transmission. The influence of pre cracks on the transmission and attenuation law of blasting seismic waves was verified by numerical simulation. A quantitative analysis was conducted on the vibration reduction of the width of pre cracks using physical similarity simulation and numerical simulation experiments, with the peak velocity of particles as the criterion. The results indicate that when the width of pre cracks increases from 2 cm to 4 cm, the attenuation curve of the peak velocity decreases sharply, and the vibration reduction rate monitored at each measuring point increases significantly. Subsequently, as the width of pre cracks continues to increase to 5 cm, the decreasing trend of the attenuation curve of peak velocity becomes gentle, with an average increase in vibration reduction rate of 3.25%. As the distance between the measuring point and the pre crack increases, the vibration reduction rate also increases, but the increase gradually becomes gentle. The vibration reduction rate shows an overall trend of first increasing and then decreasing.

[KEYWORDS] blasting; pre crack; vibration reduction; similarity simulation; numerical simulation

* 收稿日期:2024-05-17

基金项目:国家自然科学基金(51604264)

第一作者:张奇峰(2000—),男,硕士研究生,研究方向为露天采矿理论与方法。E-mail:3147068184@qq.com

通信作者:马力(1986—),男,副教授,硕士,研究方向为露天采矿理论与方法。E-mail:mali217@xust.edu.cn

0 引言

爆破是露天矿山生产中的重要环节。炸药爆炸在岩体中引起的应力波和爆生气体共同作用,将岩体破碎^[1]。按照距爆源距离及向外传播过程中的能量损失,爆炸应力波可为冲击波、应力波和弹性地震波^[2]。弹性地震波虽不足以引起岩体的破裂,但能引起未爆区岩石的弹性振动,造成岩石强度下降,威胁到未爆区岩体的边坡稳定性和采场的正常生产,给矿山带来重大的经济损失和安全威胁^[3,4]。如何有效地控制和降低爆破振动对周围环境的影响是爆破施工中急需解决的问题。

国内外学者在爆破地震波传播机理、爆破振动预测与控制、爆破振动安全准则等多个领域都获得了丰富的研究成果^[5-6],并制定了一套针对建筑物的爆破安全控制标准^[7]。由于爆炸冲击波对爆炸区域周边建筑物的影响^[8],为确保爆区周边被防护物在工程爆破中的安全性,须评估并控制爆破引起的地震影响^[9]。众多工程实践证明,质点的峰值振速(PPV)与结构失效之间存在较好的相关关系。

依据爆破地震波的成因和传播特性,从传播途径的角度提出了多种有效的降振措施。李龙福等^[10]基于现场实验,分析并验证了采用预裂爆破能有效降低爆破峰值振速;张袁娟等^[11]提出了预裂爆破+减振沟组合降振方法,运用数值模拟得出:预裂爆破+减振沟组合比单一预裂爆破的降振效果更好,并通过现场监测论证了结论的正确性;卢子冬等^[12]对爆破振动波的衰减和对作业循环速度的影响等问题,提出了聚氯乙烯(PVC)空气间隔预裂爆破法,相较于常规爆破,降振率达到 57%;张士磊^[13]在节理裂隙发育区域采用预裂爆破,通过对爆破前、后岩体裂隙的发育情况进行分析,得出了预裂爆破能有效地降低爆破后边坡的裂隙发育和损伤;项荣军等^[14]采用萨道夫斯基公式非线性回归、傅里叶变换方法等对测试数据进行了分析和研究,计算不同延期时间下掏槽爆破的合成振动波形来优选微差延期时间;丁小华等^[15]基于国内外矿山预裂爆破参数计算的的经验公式,开发了预裂爆破参数智能化设计软件,并运用设计软件为黑岱沟露天矿大孔径、高台阶预裂爆破设计出了合理的参数;吴礼军等^[16]为研究复杂环境下城区基坑开挖时的爆破振动预测及控制措施,依托现场爆破实验分析了质点峰值振速与主振频率的响应规律,并基于以上 2 个因素提出了爆破振动预测方法。

因在矿山工程中实现方便、可行性高且降振效果显著,预裂爆破常被用于矿山的高台阶深孔爆破,用以防范爆破振动带来的次生危害^[15]。预裂爆破能使岩石在预定的裂隙面上发生裂纹,从而实现岩石的控制性破碎。爆破形成的地震波在岩体介质中传播^[17],遇到预裂缝时,波场复杂变化,造成波的能量消耗,降低爆破地震波的峰值振速,从而达到降低爆破振动效应的目的。

学者们对预裂缝降振进行了相关研究,但关于预裂缝参数对降振效果的影响尚停留在定性分析阶段。本文中,将定量研究不同预裂缝宽度条件下的降振效果,为优化爆破参数设计、降低爆破振动、保障矿山生产安全提供理论依据与科学指导。

1 预裂缝对爆破地震波传播的影响

1.1 爆破地震波的构成及特性

鉴于预裂缝使地表岩体不连续,在爆破振动监测中仅考虑体波的影响。体波根据波动的传播方向与粒子的振动方向可分为 S 波(横波)、P 波(纵波)。S 波在固体介质内传播时,会在固体介质中产生相应的剪切变形;从固体中传播遇到液体、气体时,几乎发生完全反射^[18]。P 波在介质内传播时,对介质产生拉压作用,使质点产生疏密相间的纵向波动。

1.2 预裂降振原理

炸药爆炸产生的地震波与预裂后的裂隙相遇时,可能在裂隙与岩石交界面上发生衍射、反射等现象。露天矿预裂爆破如图 1 所示。与裂隙相遇时,一部分能量会被反弹回来,从而削弱爆炸产生的冲击力,达到减振的效果^[19]。本质是在遇到裂隙时,S 波完全反射,部分 P 波产生透射与折射。实践表明,采用预裂爆破或开挖减振沟都能有效地降低爆破振动,但是都不可避免地会受到绕射的影响^[20]。当爆破地震波穿过预裂缝时,2 个波阻抗分界面的

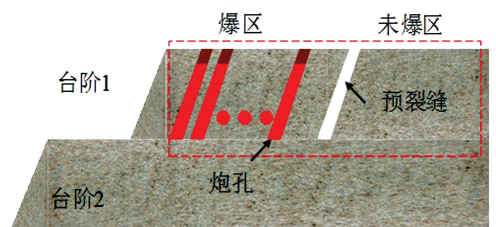


图 1 露天矿预裂爆破示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pre-splitting blasting in the open-pit mine

出现,将使反射波与折射波在空间上的传播方向先后发生改变;当透射波再次穿过预裂缝时,会发生第二次透射和反射,引起波场的复杂变化,透射波与反射波在预裂缝发生会聚,产生干涉现象^[21]。如图2所示。

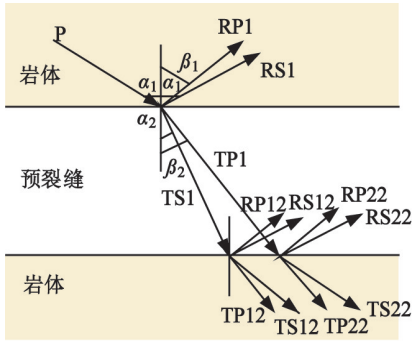


图2 P波倾斜入射时的传播特性

Fig. 2 Propagation characteristics of P-wave at oblique incidence

根据 Zoeppritz 方程^[21],当入射角不为0时,根据 Snell 原理,P波可以分解为反射纵波 RP1、透射纵波 TP1、反射横波 RS1 和透射横波 TS1,并且满足以下关系:

$$\frac{v_{RP1}}{\sin \beta_1} = \frac{v_{RS1}}{\sin \alpha_1} = \frac{v_{TP1}}{\sin \beta_2} = \frac{v_{TS1}}{\sin \alpha_2} \quad (1)$$

式中: α_1 为反射横波与自由面法线的夹角; α_2 表示折射横波与透射面法线的夹角; β_1 表示反射纵波与透射面法线的夹角; β_2 表示折射纵波与透射面法线的夹角。

2 物理模拟实验设计

2.1 相似模型及测点布置

参照露天矿原位爆破台阶,制作长×宽×高=3.0 m×0.4 m×0.4 m 的水泥模型。同时,在距离模型一侧10 cm处,预留1个空孔放置雷管;20 cm处,分别预留2~5 cm宽的沟槽来模拟不同的预裂缝宽度。测点沿中轴线方向呈直线型布置,如图3所示。

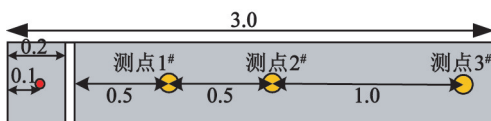


图3 测点布置示意图(单位:m)

Fig. 3 Layout of measuring points (Unit: m)

预裂缝宽度变化的实验方案:在保持其他参数不变的条件,分别设置预裂缝的宽度为2、3、4、5

cm 进行实验,具体参数设定如表1所示。由于爆破振动呈指数关系衰减,传感器采用非等间距布置,三维速度传感器布置在缝后50、100、200 cm处的测点上,传感器底面应平行于测点与爆心的连线方向。同时,需要调整传感器位置,使上部的水平指示器内的气泡位于指示器的正中心,以保证测量的准确性。采用工业数码电子雷管,管体长度为80 mm,装药量为0.5 g。空孔中安放雷管后,用湿水泥堵塞。

表1 预裂缝尺寸变化方案

Tab. 1 Changes in the size of pre cracks

| 方案 | 缝宽/cm | 缝深/cm | 缝长/cm |
|-----|-------|-------|-------|
| I | 2 | 23 | 40 |
| II | 3 | 23 | 40 |
| III | 4 | 23 | 40 |
| IV | 5 | 23 | 40 |

2.2 预裂缝宽度变化对降振效果的影响

目前,对于质点振速衰减规律的研究一般采用萨道夫斯基经验公式:

$$v = k \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (2)$$

式中: v 表示质点的峰值振速; R 为爆心与测点的距离; Q 为同时起爆最大药量; k 、 α 分别为与岩石性质有关的相关系数和衰减系数。

通过监测,得到预裂缝宽度从2~5 cm时不同测点上各个方向以及合矢量方向上的质点峰值振速衰减曲线。如图4所示,当预裂缝宽度由2 cm增加到4 cm时,振速衰减曲线下降趋势明显;预裂缝宽度进一步增加后,峰值振速衰减曲线的衰减率变化不大。同时,随着测点水平距离的增加,各方向上的峰值振速衰减曲线的降幅都逐渐减小,最后基本趋于定值。不同预裂缝宽度条件下的振动速度衰减曲线拟合表达式见表2。

对不同预裂缝宽度下每个测点的减振率进行计算,结果见图5。当预裂缝宽度从2 cm增大至4 cm时,每个测点所监测到的地震波衰减率都有明显的提高;预裂缝宽度从4 cm增大到5 cm,减振率平均增幅仅为3.25%,基本上保持不变。与此同时,随着测点与预裂缝之间趋势距离的增加,减振率也随之增加。如图5减振率变化所示,减振率曲线的平均斜率逐渐减小,表明增加幅度会逐渐变得缓和,总体呈现出先急、后缓的趋势。

为方便描述降振效果,引入减振率 λ 来表征降振效果的好坏,即

$$\lambda = \frac{v_0 - v_i}{v_0} \times 100\% \quad (3)$$

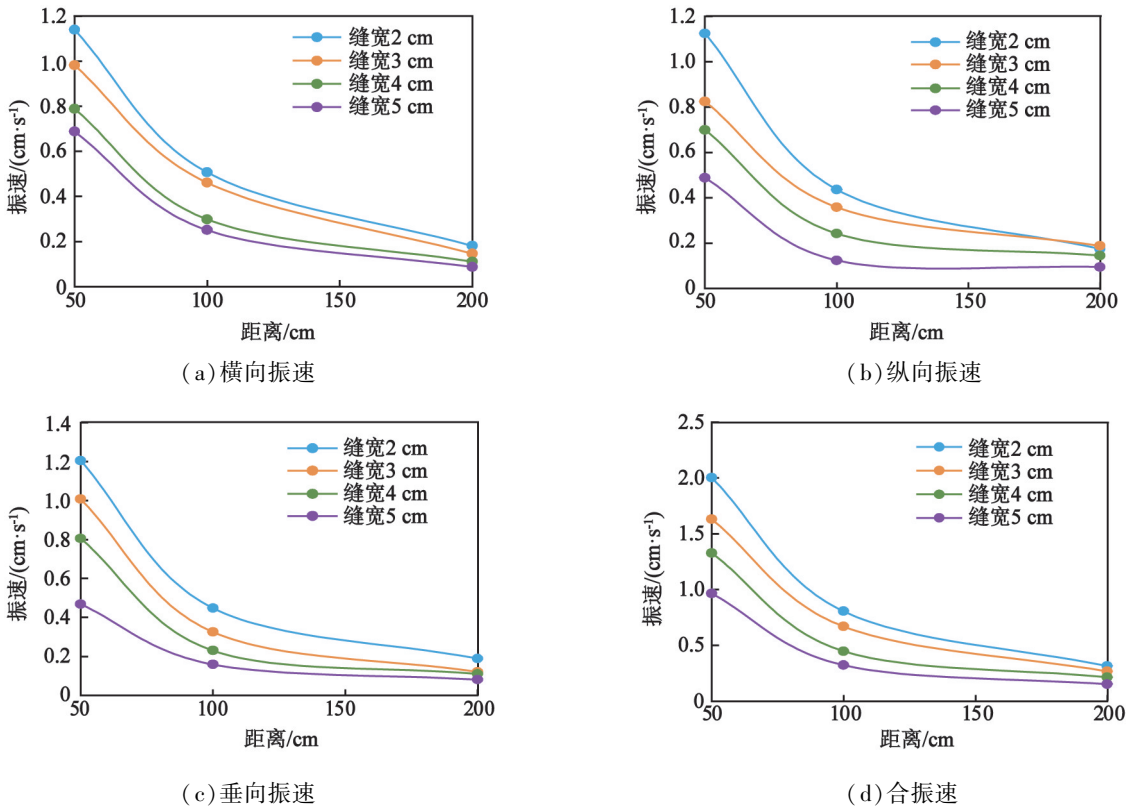


图 4 不同方向上质点峰值振速的衰减曲线

Fig. 4 Attenuation curves of peak vibration velocity of particles in different directions

表 2 峰值振速衰减公式及相关系数

Tab. 2 Attenuation formulas of peak vibration velocity and correlation coefficients

| 缝宽/cm | 拟合公式 | R^2 |
|-------|---|---------|
| 2 | $v = 18.593 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{1.323}$ | 0.999 6 |
| 3 | $v = 14.423 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{1.295}$ | 0.998 2 |
| 4 | $v = 15.80 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{1.472}$ | 0.996 2 |
| 5 | $v = 11.704 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{1.485}$ | 0.996 7 |

式中: v_0 为缝前起始峰值振速; v_i 为各个测点的峰值振速; $i = 1, 2, 3$ 。

3 爆破振动数值模拟

3.1 模型材料选取

岩石采用 Johnson-Cook 材料模型。本次模拟采用 Linear 状态方程。结合岩石抗压、不抗拉这一特性,添加专门的失效关键字 Mat_Add_Erosion 来表征这一特性,定义最大拉应力失效破坏准则来模拟岩石破碎。同时,参考物理相似实验,数值模型中炸药、岩石和空气的材料参数见表 3 ~ 表 5。

采用 LS-DYNA 软件自带高爆炸药材料 * Mat_High_Explosive_Burn 来模拟炸药,结合 JWL 状态方程。JWL 状态方程是用来描述高能炸药爆轰产物迅速膨胀的经验公式,数据来源于物理实验。爆轰产物的气压

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (7)$$

式中: p 代表压力; V 代表相对体积; E_0 代表初始内能; A, B, R_1, R_2, ω 为炸药的材料常数。

采用流固耦合算法时,需要配合空气作为耦合

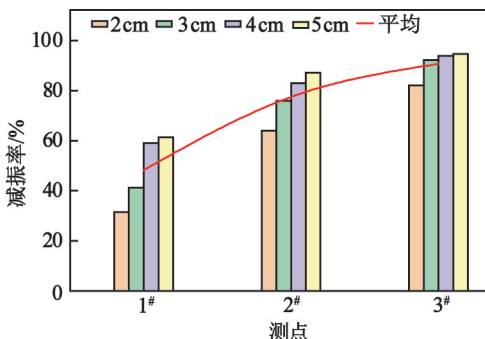


图 5 减振率随预裂缝宽度的变化趋势

Fig. 5 Variation of vibration reduction rate with the width of pre cracks

表3 岩石的材料参数

Tab.3 Material parameters of the rock

| 密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 弹性模量/GPa | 泊松比 | 屈服应力/MPa | 切线模量/MPa | 抗拉强度/MPa | 抗压强度/MPa |
|--|----------|------|----------|----------|----------|----------|
| 2 630 | 50 | 0.16 | 40 | 12.50 | 24 | 70 |

表4 炸药的材料参数

Tab.4 Material parameters of the explosive

| 密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 爆速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | A | B | R_1 | R_2 | w | E_0/GPa |
|--|---------------------------------------|------------------------|---------------------|-------|-------|------|------------------|
| 1 200 | 3 000 | 3.264×10^{10} | 3.600×10^9 | 4.5 | 1.1 | 0.35 | 6.0 |

表5 空气的材料参数

Tab.5 Material parameters of the air

| 密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | C_0 | C_1 | C_2 | C_3 | C_4 | C_5 | C_6 | E |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| 1.293 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.4 | 0.4 | 0 | 0 |

材料一起使用。空气的状态方程为

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 - (C_4 + C_5 + C_6\mu^2)E。 \quad (8)$$

式中: p 为气压; E 为单位介质体积内能; C_i 为常数, $i=1,2,\dots,6$ 。

3.2 爆破模型的建立

采用弹性材料对有、无预裂缝的工况进行二维预计算,确保采用此数值模拟的合理性和可行性,初步探究预裂缝存在时波的传递和能量降低的规律。计算完成后,观察应力在岩石中的传播及绕射情况,如图6所示。其中,图6(a)与图6(b)是不设置预裂缝的应力传播等值线云图。可以看出:应力随着传播距离的增大而减小,同时受到顶部自由面反射的作用,总体传播趋势较稳定。图6(c)与图6(d)为设置了预裂缝的应力等值线云图。对比图6(a)

与图6(c),可以明显地看出预裂缝对波传递的阻隔作用;对比图6(b)与图6(d),可以看出预裂缝的自由面对波的反射及部分波的透射,也反映出波绕过预裂缝的传播过程。

在模型中预裂缝的前、后及距离预裂缝一定距离分别布置A、B、C、D 4个测点,在无预裂缝的模型相同位置也布置对应的测点,如图6所示。测点振速时程曲线如图7所示。可以看出,水平方向的峰值振速受预裂缝的影响程度较大,即水平方向的振速主要受S波影响,在遇到预裂缝时符合S波的特性,几乎全部反射,缝后峰值振速下降幅度很大;竖直方向的速度主要受P波影响,在遇到预裂缝时,有一定的折射与反射,缝后的峰值振速有所下降,缝前的峰值振速有所增大。同时,振动的到达时间也相对较晚,缝后质点的峰值振速也缓慢增加,是绕射

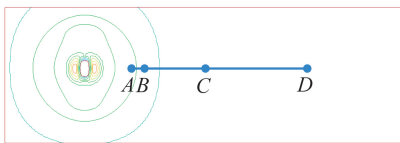
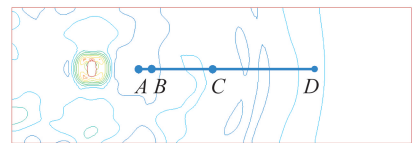
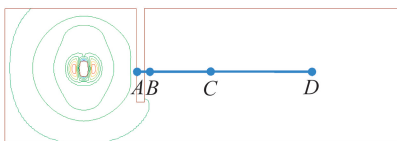
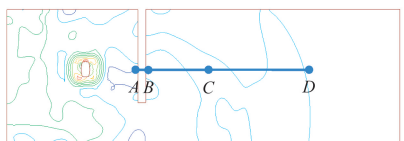
(a) $t = 4 \text{ ms}$, 无预裂缝(b) $t = 16.5 \text{ ms}$, 无预裂缝(c) $t = 4 \text{ ms}$, 有预裂缝(d) $t = 16.5 \text{ ms}$, 有预裂缝

图6 应力等值线云图

Fig.6 Cloud map of the stress contour

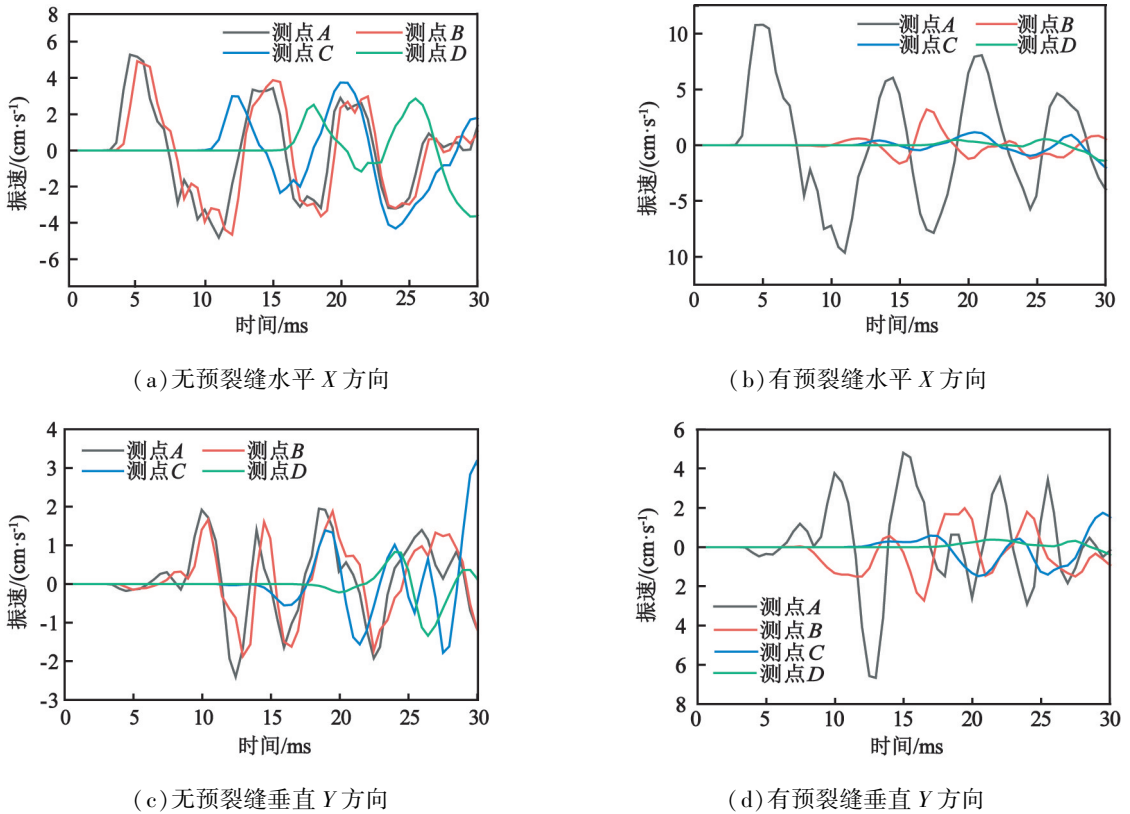


图 7 测点的振速时程曲线

Fig. 7 Time history curves of vibration velocity at the measuring point

波与透射波相叠加的结果。

为了方便研究,更容易观察预裂缝对波的阻挡作用,将图 1 的露天矿台阶爆破模型结合相似模拟简化为图 8 中所示模型。建立数值模型,并划分网格进行计算,在 XOZ 面设置对称边界。除顶部为自由边界外,其余皆设置为无反射边界,以模拟半无限岩体。针对实验模型验证,采用国际单位制 $m\text{-kg-s}$ 建立数值对称模型。

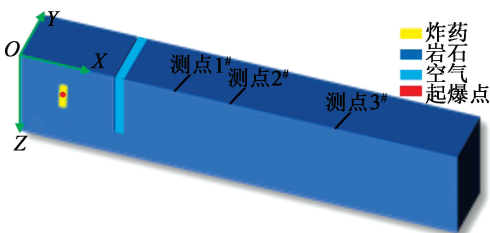


图 8 台阶模型剖面图

Fig. 8 Cross section of step model

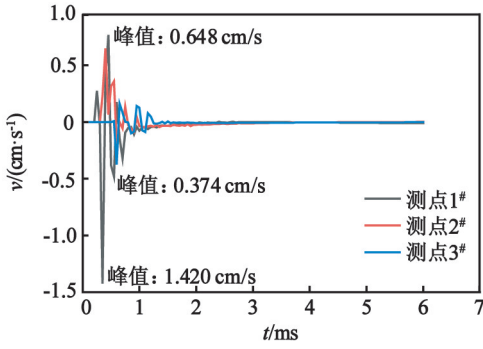
台阶长为 3 m、宽为 0.2 m、高为 0.4 m。炮孔深度 5 cm、直径 4 cm。根据实际物理模型,在预裂缝后 50、100、200 cm 处分别布置测点 1#~3#。在此基础上,模拟缝宽 2 cm 到 5 cm 条件下的爆破振动衰减规律。

根据数值模拟结果,提取测点数据,得到不同预裂缝宽度条件下距离预裂缝 50、100、200 cm 处的 X 方向的振速时程曲线,如图 9 所示。对不同预裂缝宽度条件下测点 X 方向的峰值振速,计算处理后可得减振率,如图 10 所示。

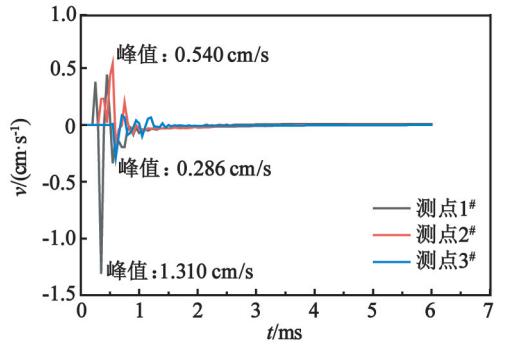
分析可得,与预裂缝的距离分别为 50、100、200 cm 处测点的 X 方向峰值振速的衰减规律与物理相似实验一致。随着测点与预裂缝之间距离的增加,各测点的减振率均逐渐增加,测点 1# 的平均减振率为 64.525%,测点 2# 的平均减振率为 84.535%,测点 3# 的平均减振率为 91.5275%。如图 10 所示,平均减振率曲线的斜率逐渐减小,预裂缝宽度从 4 cm 增加到 5 cm 时,减振率平均增幅不超过 5%,说明减振率的增幅会逐渐减少。同时,随着预裂缝宽度的增加,减振率也随之增加。

4 结论

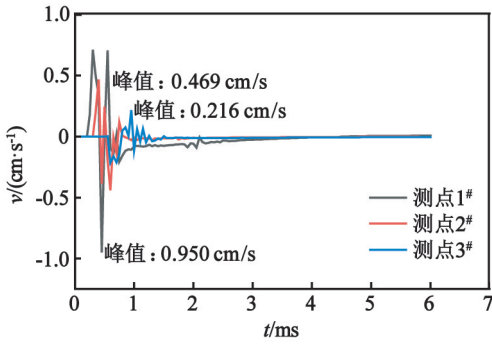
1) 通过爆破地震传播波理论及构成分析,推导得出了预裂缝的降振基本原理。S 波受预裂缝影响最大,大部分都被反射。并采用数值模拟验证了 X 方向的振速受 S 波的主导。



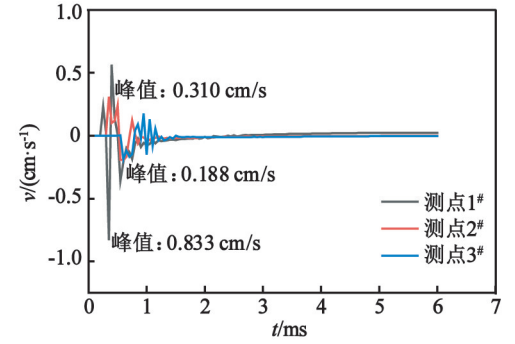
(a) 缝宽 2 cm



(b) 缝宽 3 cm



(c) 缝宽 4 cm



(d) 缝宽 5 cm

图9 不同测点处 X 方向的振速时程曲线

Fig.9 Time history curves of vibration velocity at different measuring point in X-direction

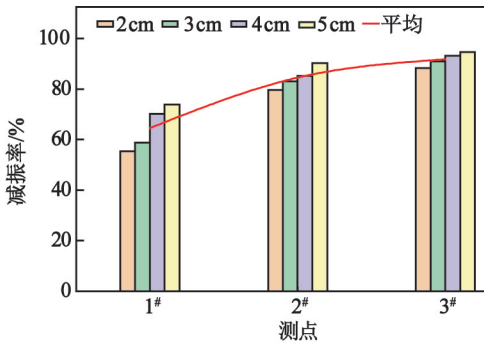


图10 减振率随预裂缝宽度的变化趋势

Fig.10 Variation of vibration reduction rate with the width of pre cracks

2) 预裂缝宽度由 2 cm 增加到 4 cm 时,峰值振速衰减曲线下降趋势急剧,各测点监测的减振率显著增加;随后,继续增加预裂缝宽度到 5 cm,峰值振速衰减曲线下降趋势变得平缓,减振率平均增幅仅为 3.25%。

3) 随着测点距预裂缝距离的增加,减振率也随之增加,但增幅会逐渐变得缓和,减振率总体呈现先急、后缓的趋势。

参考文献

[1] 金旭浩, 卢文波. 爆破漏斗理论探讨[J]. 岩土力学, 2002, 23(增刊1): 205-208, 219.
JIN X H, LU W B. Discussion on blasting crater theory [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23 (Supl. 1): 205-208, 219.

[2] 杨建华. 深部岩体开挖爆破与瞬态卸荷耦合作用效应[D]. 武汉: 武汉大学, 2014: 4-6.
YANG J H. Coupling effect of blasting and transient release of in-situ stress during deep rock mass excavation [D]. Wuhan: Wuhan University, 2014: 4-6.

[3] 杨国勇, 于江浩. 将军戈壁二号露天煤矿爆破振动对排土场边坡稳定性影响[J]. 露天采矿技术, 2023, 38(2): 75-78.
YANG G Y, YU J H. Influence of blasting vibration on slope stability of dump in Jiangjun Gobi No. 2 Open-Pit Coal Mine [J]. Opencast Mining Technology, 2023, 38(2): 75-78.

[4] 张雪亮, 黄树棠. 爆破地震效应[M]. 北京: 地震出版社, 1981.

[5] 凌同华. 爆破震动效应及其灾害的主动控制[D]. 长

- 沙:中南大学,2004:59-63.
- LING T H. Blast vibration effect and initiative control of vibrational damage [D]. Changsha: Central South University, 2004: 59-63.
- [6] 李洪涛. 基于能量原理的爆破地震效应研究[D]. 武汉:武汉大学,2007:127-128.
- LI H T. Study on effect of blast-induced seismic based on energy theory [D]. Wuhan: Wuhan University, 2007: 127-128.
- [7] 卢文波,李海波,陈明,等. 水电工程爆破振动安全判据及应用中的几个关键问题[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(8):1513-1520.
- LU W B, LI H B, CHEN M, et al. Safety criteria of blasting vibration in hydropower engineering and several key problems in their application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1513-1520.
- [8] 钱七虎,陈士海. 爆破地震效应[J]. 爆破,2004,21(2):1-5.
- QIAN Q H, CHEN S H. Blasting vibration effect [J]. Blasting, 2004, 21(2): 1-5.
- [9] 宗琦,汪海波,周胜兵. 爆破地震效应的监测和控制技术研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(5):938-945.
- ZONG Q, WANG H B, ZHOU S B. Research on monitoring and controlling techniques considering effects of seismic shock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 938-945.
- [10] 李龙福,汪禹,江东平,等. 基于数码电子雷管起爆特性的预裂爆破技术试验研究[J]. 金属矿山,2024(7):152-158.
- LI L F, WANG Y, JIANG D P, et al. Experimental study on pre-splitting blasting technology based on initiation characteristics of digital electronic detonator [J]. Metal Mine, 2024(7): 152-158.
- [11] 张袁娟,刘梦珍. 爆破振动组合降振方法的减震效果研究[J]. 河南工程学院学报(自然科学版),2024,36(1):21-24.
- ZHANG Y J, LIU M Z. Study on the vibration reduction effect of combined vibration reduction method of blasting vibration [J]. Journal of Henan University of Engineering (Natural Science Edition), 2024, 36(1): 21-24.
- [12] 卢子冬,南俊,宋晓鸣. 露天矿临近最终边帮控制爆破技术[J]. 爆破,2021,38(4):96-100,114.
- LU Z D, NAN J, SONG X M. Controlled blasting technology of open-pit mine final side [J]. Blasting, 2021, 38(4): 96-100, 114.
- [13] 张士磊. 预裂爆破作用下节理岩质边坡损伤区测试研究[J]. 爆破,2020,37(3):74-77,94.
- ZHANG S L. Damage zone test of jointed rock slope under pre-split blasting [J]. Blasting, 2020, 37(3): 74-77, 94.
- [14] 项荣军,刘传鹏,李胜林,等. 隧道内部爆破振动传播规律与降振技术研究[J]. 爆破,2023,40(4):82-88,200.
- XIANG R J, LIU C P, LI S L, et al. Research on blasting vibration propagation law and vibration reduction technology for tunnel excavation [J]. Blasting, 2023, 40(4): 82-88, 200.
- [15] 丁小华,李克民,任占营,等. 露天矿高台阶预裂爆破技术的发展及应用[J]. 矿业研究与开发,2011,31(2):94-97.
- DING X H, LI K M, REN Z Y, et al. Development and application of high bench pre-splitting blasting technique in surface mine [J]. Mining Research and Development, 2011, 31(2): 94-97.
- [16] 吴礼军,王鑫尧. 城区基坑开挖爆破振动预测及控制研究[J]. 爆破,2023,40(3):206-211,235.
- WU L J, WANG X Y. Study on prediction and control of blasting vibration in urban foundation pit excavation [J]. Blasting, 2023, 40(3): 206-211, 235.
- [17] 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(2):42-46.
- WANG M Y, QIAN Q H. Attenuation law of explosive wave propagation in cracks [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995(2): 42-46.
- [18] 吕小彬,吴佳晔. 冲击弹性波理论与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2016:19-25.
- [19] 孙宁新,雷明锋,张运良,等. 软弱夹层对爆炸应力波传播过程的影响研究[J]. 振动与冲击,2020,39(16):112-119,147.
- SUN N X, LEI M F, ZHANG Y L, et al. A study on the influence of weak interlayer on the propagation process of explosion stress wave [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(16): 112-119, 147.
- [20] 范留明,李宁. 软弱夹层的透射模型及其隔震特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(14):2456-2462.
- FAN L M, LI N. Transmission model of weak intercalation and its vibration isolation properties [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14): 2456-2462.
- [21] 杨年华. 爆破振动理论与测控技术[M]. 北京:中国铁道出版社,2014:60-63.