

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.04.008

急倾斜薄矿脉中深孔爆破围岩夹制作用机理及 定量表征方法*

王智¹, 安龙¹, 孙星^{1,2}, 符洲云¹

(1. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 沈阳 110819; 2. 西和县中宝矿业有限公司, 陇南 742199)

摘要: 以甘肃某金矿急倾斜薄矿脉为工程背景, 针对急倾斜薄矿脉中深孔爆破围岩夹制作用大, 矿石贫损大的问题, 采用现场调查、PMMA(有机玻璃)爆破模型试验与数值模拟相结合的方法, 深入探究了薄矿脉爆破围岩夹制作用机理, 提出并建立了围岩夹制作用的定量表征方法。开展 PMMA 爆破模型试验, 分析了薄矿脉不同采幅条件下的爆生裂纹分布规律, 结果表明: 薄矿脉采幅减小, 降低了炮孔周围爆破粉碎区以及破裂区的半径, 抑制了爆破裂纹的发育。开展了不同薄矿脉采幅条件下的爆破数值模拟, 结果表明: 薄矿脉采幅减小, 爆破自由面处反射叠加的爆破能量减小, 爆破破岩的体积也相应减小, 更多的爆破能量以动能的形式散逸不能有效破岩。基于爆破能量分析结果, 提出了薄矿脉爆破夹制系数的定量表征方法, 即采用半无限工况和窄幅工况下爆破自由面中心点处的总能量峰值之比来定义夹制系数, 并用该指标来表征夹制作用的大小, 进而通过采幅宽度和岩体力学参数建立了爆破夹制系数预测模型, 为急倾斜薄矿脉中深孔爆破参数的优化设计提供了理论依据和技术支持。

关键词: 急倾斜薄矿脉; 中深孔; 夹制作用; 自由面宽度; 定量表征

中图分类号: TD235.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2024)04-0061-12

Mechanism and Quantitative Characterization Method of Rock Clamping Effect in Medium-deep Hole Blasting of Steeply Inclined Narrow Vein Mining

WANG Zhi¹, AN Long¹, SUN Xing^{1,2}, FU Zhou-yun¹

(1. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of
Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
2. Xihe County Zhongbao Mining Co., Ltd., Longnan 742199, China)

Abstract: Since the problems of significant rock clamping effect and ore depletion were caused by deep hole blasting in steeply inclined thin veins, a combination of on-site investigation, PMMA (organic glass) blasting model experiment and numerical simulation was used to explore the mechanism and a quantitative characterization method of rock clamping effect by taking a gold mine in Gansu Province as the engineering background. Firstly, to analyze the distribution pattern of blasting cracks under different mining conditions of thin ore veins, a PMMA blasting model ex-

收稿日期 (Date of reception): 2024-03-26

网络首发日期 (Published online): 2024-09-15

作者简介: 王智 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事爆破工程研究, (E-mail) zwagcd@qq.com。

通讯作者: 安龙 (1987-), 男, 博士、副教授, 主要从事矿体开采和爆破工程研究, (E-mail) anlong@mail.neu.edu.cn。

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFC2903802)

About the author: WANG Zhi (1998-), male, master degree candidate, mainly engaged in researching blasting engineering, (E-mail) zwagcd@qq.com.

Corresponding author: AN Long (1987-), male, Ph. D, associate professor, mainly engaged in researching ore body mining and blasting engineering, (E-mail) anlong@mail.neu.edu.cn.

Fund Programs: National Key Research and Development Program of China (2022YFC2903802)

periment was conducted. The results show that reducing the mining width of the thin ore veins reduces the radius of blasting crushing and fracture areas around the blast hole and suppresses the development of blasting cracks. Furthermore, different blasting conditions of thin ore vein mining were simulated. The results show that as the mining width of thin ore veins decreases, the blasting energy reflected and superimposed at the blasting-free surface decreases, and the volume of blasting rock decreases accordingly. Meanwhile, more blasting energy is dissipated as kinetic energy, which could not be effectively used to break the rock. Finally, a quantitative characterization method for the clamping coefficient of thin ore vein blasting was proposed based on the analysis of blasting energy. A clamping coefficient was defined by the ratio of the total energy peak at the center point of the blasting free surface under semi-infinite and narrow amplitude working conditions, and this index characterized the size of the clamping effect. As a result, a prediction model for the blasting clamping coefficient was established through the mining width and rock mechanics parameters. The study of this paper can provide a theoretical basis and technical support for the optimization design of deep hole blasting parameters in steeply inclined thin ore veins.

Key words: steeply inclined narrow vein mining; medium-deep hole; clamping effect; free surface width; quantitative characterization

薄矿脉由于厚度小 (≤ 2 m) 其开采一直是矿业领域中的一个挑战性问题, 当前国内急倾斜薄矿脉矿山的开采方法仍以浅孔留矿法、分采充填法等浅孔落矿方法为主, 但其存在安全性差、工艺复杂、生产能力小、劳动强度大等问题, 制约着急倾斜薄矿脉矿山的安全、绿色、经济、高效开采^[1,2]。随着矿山技术装备进步, 具有安全性高、生产能力大等优势急倾斜薄矿脉中深孔落矿方法开始受到重视。但急倾斜薄矿脉中深孔爆破受到围岩极大的夹制作用, 使得爆破效果难以精准控制, 从而导致矿石贫损大的难题, 如图 1。为此, 认识薄矿脉中深孔爆破围岩夹制作用机理并进行量化的表征是实现薄矿脉中深孔高效精细开采的核心所在。

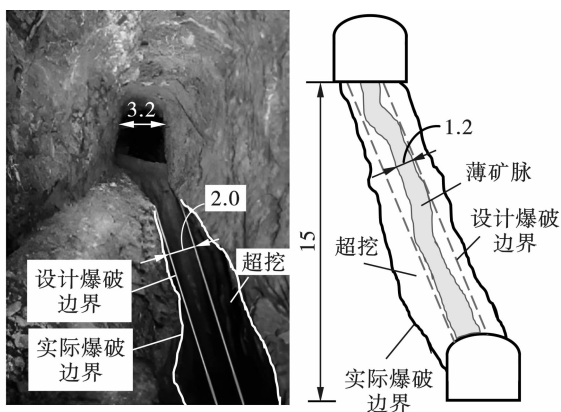


图 1 急倾斜薄矿脉中深孔爆破效果示意图(单位:m)
Fig. 1 Medium-deep hole blasting effect of steeply narrow vein mine(unit:m)

针对急倾斜薄矿脉中深孔开采围岩对爆破的夹制作用, Clark, 黄文钿、张宗宪、陆家佑、张志呈等针对薄矿脉中深孔爆破提出了小直径炮孔爆破的理念^[3-7]。И И 帕克罗斯基提出了采用自由面宽度

定量表征围岩夹制作用的方法^[8]。Vishwakarma 等研究了薄矿脉开采抵抗线、炮孔孔径与矿石回收率的定量关系^[9]。安龙等采用数值模拟手段^[10], 以爆破漏斗体积指标, 量化薄矿脉爆破的围岩夹制程度。以上研究虽然分析了围岩夹制作用对薄矿脉爆破效果的影响规律, 初步提出了量化的表征方法, 但在揭示薄矿脉中深孔爆破围岩夹制作用机理, 建立围岩夹制作用与爆破效果之间的量化关系等方面尚需进一步研究。

许多学者认为有机玻璃 (PMMA) 在爆炸作用下与岩石的断裂力学性质相近^[11,12], 且能取得较好试验结果。杨仁树等人采用 PMMA 对柱状药包的爆破效果进行研究^[13], 确定了爆破破坏、损失范围; 蒲传金等人采用 PMMA 研究了不同情况下爆破裂纹扩展规律^[14,15], 为岩体爆破设计提供了理论依据。采用均质透明 PMMA 板, 使用微量黑索金用于施加爆破载荷, 分析不同自由面宽度下的裂纹形成情况以及爆破作用效果对比, 来进一步认识夹制作用。

依托甘肃某金矿急倾斜薄矿脉, 开展中深孔爆破围岩夹制作用机理及定量表征方法研究。采用现场调查、岩石力学试验、PMMA 爆破试验和数值模拟等方法, 研究薄矿脉采幅以及岩石力学性质对急倾斜薄矿脉中深孔爆破效果的影响, 量测爆破裂纹的分布特征, 分析爆破应力波以及爆破能量的传递与转化规律, 进而揭示急倾斜薄矿脉中深孔爆破的围岩夹制作用机理。在此基础上, 提出围岩夹制作用的量化表征指标与方法, 进而建立了考虑采幅和岩石物理力学参数的围岩夹制系数预测模型, 为急倾斜薄矿脉中深孔爆破参数设计与爆破效果精准控制提供理论支撑。

1 工程背景

甘肃某金矿为石英脉型金矿床,矿脉厚度0.5 ~ 2.5 m,平均倾角 70°,属于典型的急倾斜薄矿脉。矿体和围岩节理裂隙不发育,矿岩体均稳定。矿山建矿以来一直采用浅孔留矿法开采,近年来随着自身扩产增效的需求以及矿山开采设备与技术的快速发展,该金矿计划采用中深孔开采方法替代传统的浅孔留矿法,提出了分段空场嗣后充填采矿方法如图2所示。该方法分段高度 12.5 m,其中巷道高 2.5 m,回采爆破高度 10 m,采场走向长度 30 ~ 50 m,采场每一分段底部施工脉外分段巷道、沿脉

凿岩巷道和出矿联络巷,分段的顶部施工充填巷,该巷道同时也作为上一分段回采的凿岩巷使用。在采场中央或一端施工切割天井,以切割天井为自由面进行回采爆破。当分段采场全部回采完毕后,即可自顶部充填巷向下进行采场的充填,采用废石 + 尾砂进行空区充填。该方法采场布置与回采工艺均较为简单,其关键技术是如何精准控制中深孔爆破效果,降低矿石的损失和贫化。

在该金矿开展现场取样调查,分别开展室内岩石单轴压缩试验,常规三轴压缩试验和巴西劈裂试验,得到典型矿石和围岩的物理力学参数,作为本研究数值模拟的岩石基础参数。

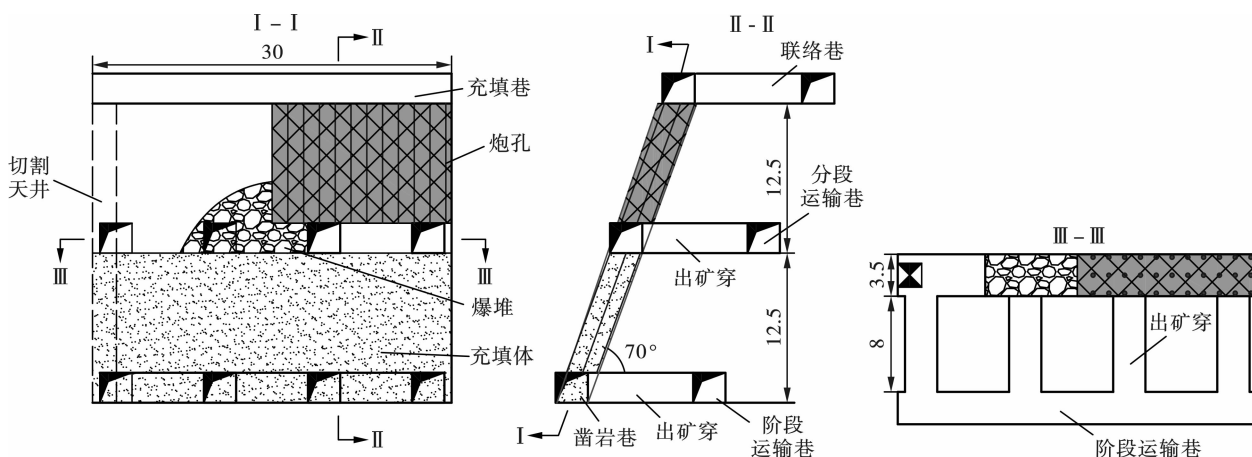


图2 急倾斜薄矿脉中深孔开采方法(单位:m)

Fig. 2 Medium-deep hole blasting mining method of steeply narrow vein mine(unit:m)

2 PMMA (有机玻璃) 爆破模型试验

为研究薄矿脉窄小采幅条件下爆破裂纹的分布特征,以 PMMA 板为爆炸介质,开展爆破模型试验。

本次试验地点在抚顺某炸药厂,炸药采用黑索金,将黑索金炸药制作成药卷,药卷直径 4 mm,高度 10 mm,采用 DD-13 微型雷管起爆,该雷管直径 3 mm,高度 7 mm,起爆采用远端电起爆的方式,如图3。

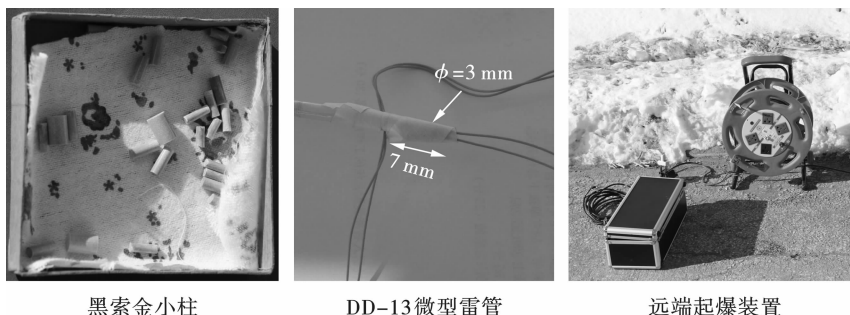


图3 爆源及起爆装置

Fig. 3 Explosive source and initiating device

2.1 PMMA 板参数

PMMA 板尺寸为 400 mm × 400 mm × 10 mm,设置 PMMA 爆破模型试验的几何相似比为 40,分别设置半无限自由面条件和薄矿脉窄小采幅条件。通过

在薄板一侧中央位置切割不同宽度的凹槽来模拟不同的薄矿脉采幅宽度,为避免 PMMA 边部自由面的影响,切槽深度设计为 50 mm。模拟矿体厚度为 0.2 m、0.4 m、0.6 m、0.8 m 和 1.0 m 的薄矿脉工

况,对应的 PMMA 模型中凹槽宽度分别为 5 mm、10 mm、15 mm、20 mm 和 25 mm。炮孔位于 PMMA 薄板凹槽中线位置,直径 4 mm,抵抗线参数为 25 mm。如图 4。PMMA 材料的关键力学参数根据相关文献[16,17]测量或计算得出,具体数值见表 1。

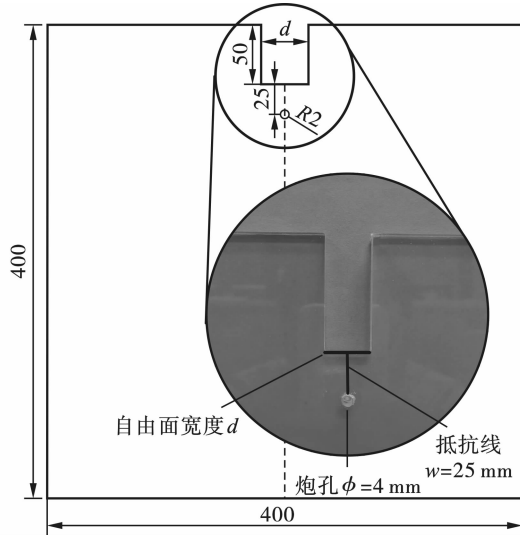


图 4 PMMA 板尺寸(单位:mm)

Fig. 4 Dimensions of PMMA panels(unit:mm)

表 1 PMMA 板力学参数

Table 1 Mechanical parameters of PMMA panels

参数	单位	数值
密度 ρ	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1160
泊松比 ν	-	0.31
纵波速度 C_p	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	2320
横波速度 C_s	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1260
动态弹性模量 E_d	GPa	6.1
断裂能量 G_c	$\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$	133

2.2 试验结果

爆破试验效果如图 5 所示。在爆炸载荷作用下,炮孔附近产生了明显的粉碎区、破裂区以及宏观裂纹。对比 6 种方案的爆破结果可知,当采幅宽度 $d=5$ mm 时,出现了粉碎区和破裂区,但裂纹少且不明显;当采幅宽度 $d=10 \sim 20$ mm 时,出现明显裂纹,但裂纹均未贯通到自由面;当 $d=25$ mm 时,裂纹明显且贯通到自由面,但未形成爆破漏斗;当自由面处于半无限条件时,形成明显爆破漏斗,爆破漏斗半径为 27.9 mm。

在此基础上进一步对爆破粉碎区半径、破裂区半径以及裂纹发育情况进行定量分析。图 6(a) 给出了爆破粉碎区半径、破裂区半径随采幅宽度的变化规律,由图可以看出,粉碎区半径基本不变,而破裂区半径在采幅宽度为 $d=5 \sim 20$ mm 时呈波动状,

采幅再增加后,破裂区半径明显增加。

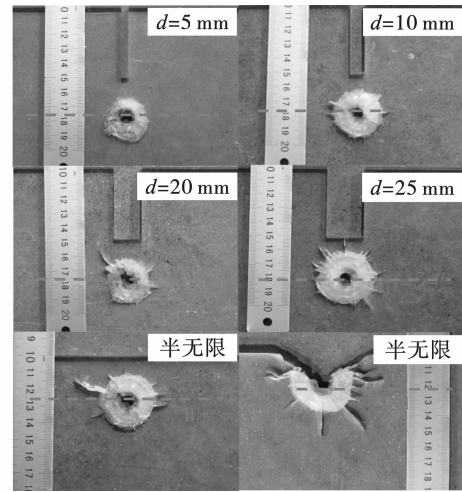


图 5 PMMA 板爆破试验结果

Fig. 5 Explosion test results of PMMA panels

进一步分析爆破裂纹扩展,考虑自由面对裂纹发育的诱导作用,人为地将 PMMA 板划分为两个区域,以过炮孔中心平行于自由面的虚线为界,将 PMMA 板分为 I、II 两个区域, I 区为靠近自由面区域; II 区为远离自由面区域。

从裂纹来看,在图 6(b)中,随着采幅宽度较小, I、II 区的裂纹平均长度呈阶梯式下降,在 $d > 20$ mm 段,裂纹平均长度有明显减小;当采幅宽度 $10 \text{ mm} < d < 20$ mm 时,长度基本不变;在采幅宽度为 $d < 10$ mm 时,出现较小幅度减小。对比 I、II 区发现, $d < 20$ mm 时,裂纹平均长度接近; $d > 20$ mm 后, I 区的裂纹平均长度明显大于 II 区,说明自由面对爆破有着明显的引导作用且该作用随着宽度减小而减弱。由图 6(c)可见,随着采幅宽度较小, I、II 区的裂纹最大长度都呈减小状态,且在 $d < 25$ mm 时近似线性。对比 I、II 区发现,当采幅宽度 $10 \text{ mm} < d < 25$ mm 时, I 区的裂纹最大长度明显大于 II 区。

通过 PMMA 爆破模型试验可知:随着薄矿脉采幅宽度减小,炮孔爆破粉碎区和破裂区半径都显著减小,且抑制了爆生裂纹的长度,但窄幅自由面对爆破裂纹仍存在显著的诱导作用。

3 薄矿脉中深孔爆破数值模拟研究

采用 LS-DYNA 数值模拟软件开展急倾斜薄矿脉中深孔爆破数值模拟研究。考虑到薄矿脉中深孔爆破围岩夹制作用产生的主要原因是中深孔爆破的自由面宽度(采幅)减小而导致的,因此,本文在数值模拟部分主要考虑采幅大小对中深孔爆破效果的

影响。根据甘肃某金矿的矿脉厚度变化,数值模拟方案分别设置采幅宽度为 $d=0.5\text{ m}$ 、 $d=1.0\text{ m}$ 、 $d=1.5\text{ m}$ 、 $d=2.0\text{ m}$ 和 $d=2.5\text{ m}$ 等5种薄矿脉回采工

况,同时设置无自由面爆破($d=0\text{ m}$)和半无限自由面爆破($d=+\infty$)两种工况作为对比方案。

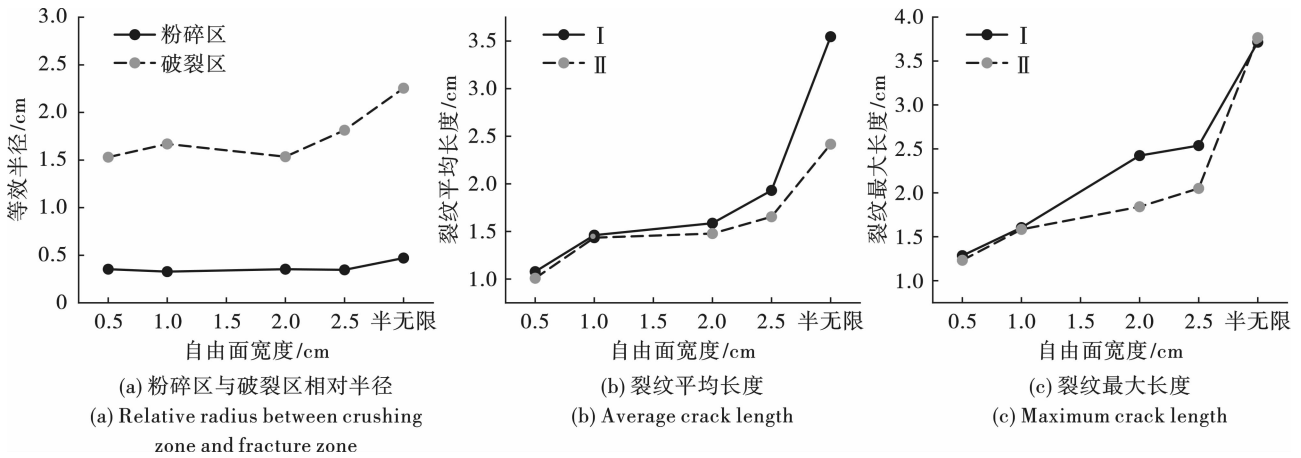


图6 物理试验爆破效果

Fig. 6 Physical experiment blasting effect

3.1 数值模型建立

依据甘肃某金矿薄矿脉的赋存产状及所采用的采矿方法设计确定数值模型的尺寸,其中数值模型为长方体,长8 m、宽3.5 m、高11 m,矿脉位于模型长度方向的中央,矿脉走向长度与模型宽度相等,倾角 70° ,厚度与采幅宽度相等。数值模型中只设置

一个炮孔^[4,10,18],抵抗线为1 m,炮孔直径50 mm、倾角为 70° 、孔深10.6 m,采用连续耦合装药,使用2#岩石乳化炸药,装药长度9.1 m,填塞长度1.5 m,采用底部起爆方式。数值模型如图7所示,模型除去采幅面为自由表面,其余均为无反射边界。

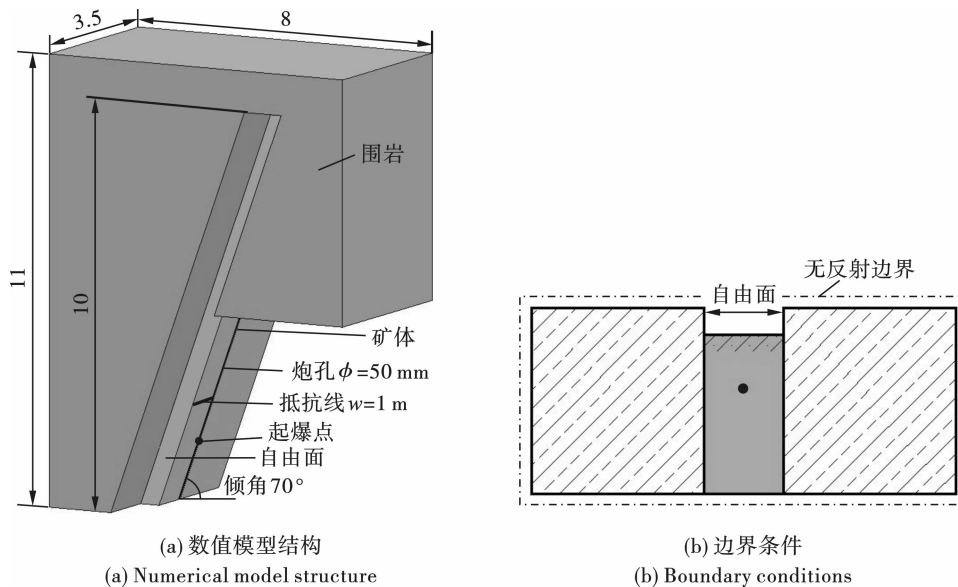


图7 数值模型及边界条件(单位:m)

Fig. 7 Numerical models and boundary conditions (unit: m)

采用 LS-DYNA 动力分析有限元软件进行爆破数值计算,考虑炸药、空气、矿岩以及填塞体等不同介质在爆破过程中的物态转换,爆破数值计算采用流固耦合算法,其中炸药、空气介质采用 Euler 网

格,矿岩、填塞采用 Lagrange 网格。计算过程采用 HJC 本构模型,基于室内岩石力学试验结果进行 HJC 模型参数的标定^[19],标定的部分关键参数见表2。炸药采用 JWL 状态方程描述

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

式中： P 为压力； V 为相对体积； A 、 B 、 ω 、 R_1 、 R_2 为状态方程基本参数； E_c 为初始体积爆轰能；炸药相关参数见表 2；表中 ρ_e 为炸药密度； D 为爆速，计算得到药包和岩石的波阻抗匹配系数 $\xi = 0.48$ 。

空气可视为无粘性的理想气体，爆炸后的气体膨胀传播可视为绝热过程，采用 NULL 材料和 LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程描述

$$P = C_0 + C_1 V + C_2 V^2 + C_3 V^3 + (C_4 + C_5 V + C_6 V^2) E_c$$

式中： P 为压力； V_0 为相对体积； $C_0 \sim C_6$ 为常数且 $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$ ， $C_4 = C_5 = 0.4$ ，相关参数见表 2。

表 2 数值模型主要参数

Table 2 Main parameters of the numerical model

	参数	单位	数值
矿岩 参数	矿岩密度 ρ	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2600
	剪切模量 G	GPa	11.43
	单轴抗压强度 f_c	MPa	82.79
	单轴抗拉强度 T	MPa	4.58
	泊松比 ν	-	0.20
	损伤常数 D_1	-	0.04
	损伤常数 D_2	-	1
炸药 参数	炸药密度 ρ_e	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1150
	炸药爆速 D	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	5122
	状态方程常数 P	GPa	9.53
	状态方程常数 A	GPa	276.2
	状态方程常数 B	GPa	8.44
	状态方程常数 R_1	-	5.2
	状态方程常数 R_2	-	2.1
	状态方程常数 ω	-	0.53
空气 参数	初始体积爆轰能 E_c	$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$	3870
	空气密度 ρ_a	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1.29
	相对体积 V_0	-	1.0
	初始体积内能 E_a	$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$	0

3.2 爆破效果的评价指标

急倾斜薄矿脉中深孔爆破效果评价的核心指标是爆破超欠挖尺寸，因此，选择合适的指标与方法准确评价爆破超欠挖尺寸是爆破数值模拟分析的关键问题。当前，判别爆破载荷作用下的岩体损伤、破坏的指标和方法主要有岩体质点峰值振动速度 (PPV) 判据^[20]、基于塑性体积应变的判据^[21]、最大拉应力判据等^[22]。岩体爆破主要包含炮孔附近的压剪破坏以及自由面附近的反射拉伸破坏两种破坏模

式^[23,24]，因此本文采用最大拉应力和最大剪应变复合破坏准则进行爆破失效破坏程度的评估，设定最大拉应力阈值为岩石抗拉强度 4.58 MPa，剪应变阈值为 0.015。宏观显示上，通过在 LS-DYNA 软件中添加 * MAT_ADD_EROSION 关键字来对超过阈值范围的单元进行删除，通过统计失效区域范围，可直接获取爆破超欠挖尺寸。

3.3 数值模拟结果分析

本文采用最大拉应力和最大剪应变复合破坏准则进行爆破失效破坏程度的评估，变采幅条件下的爆破破坏区三维形态如图 8 所示。当不存在自由面时，爆破形成的破坏区为近似圆柱体且破坏区直径小，仅为 0.392 m。当存在自由面时，可以看出，受到自由面的反射拉伸作用影响，爆破破坏区成漏斗形态，且受到围岩的夹制作用，不同采幅宽度，爆破漏斗的宽度有所不同。在抵抗线为 1 m 条件下，当采幅宽度为 0.5 m 时，爆破漏斗平均面积为 0.5472 m²；当采幅宽度达 2.5 m 时，爆破漏斗最大剖面面积为 1.7818 m²，最小剖面面积为 0.6801 m²，平均面积为 1.5642 m²；而半无限自由面条件下，爆破漏斗最大剖面面积为 1.9072 m²，最小剖面面积为 0.8634 m²，平均面积为 1.5856 m²。

统计变采幅条件下的爆破破坏区体积，绘制采幅宽度与爆破破坏区体积的关系曲线如图 9 所示。由图可知，随着采幅宽度的增加，爆破破坏区体积也随之增大，但破坏体积的增长速率相应降低。在无自由面条件下，爆破破坏体积仅为 0.95 m³，当采幅为 0.5 m 时，爆破破坏体积为 5.03 m³，当采幅为 2.5 m 时，爆破破坏体积增长至 14.72 m³，对应半无限自由面条件下爆破破坏体积为 14.93 m³。

对比爆破拉应力分布以及爆破破坏区形态及尺寸模拟结果，可以看出，受到薄矿脉采幅宽度制约，中深孔爆破的自由面宽度也随之减小，导致拉应力作用范围以及作用强度降低，进而产生爆破的夹制作用。

4 薄矿脉中深孔爆破能量传播规律

岩石爆破是一种复杂的过程，涉及多个物理场的相互耦合作用。研究岩石爆破的本质是研究炸药在爆炸过程中能量的释放、传递和转化。采用数值模拟手段分析爆破拉应力分布规律和等效岩体失效破坏程度能够直观地反映围岩夹制作用对爆破效果的影响，然而却难以从本质上解释薄矿脉爆破围岩的夹制机理，因此本文从爆破能量的角度进行更深入的分析。

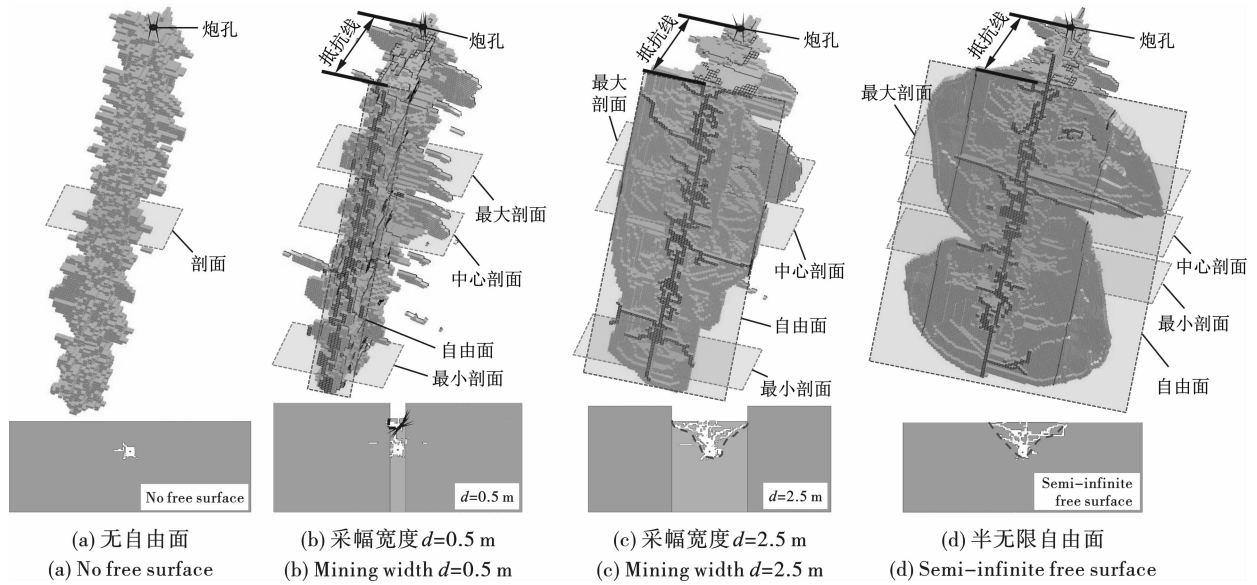


图8 爆破破坏区对比分析

Fig. 8 Comparative analysis of blasting damage areas

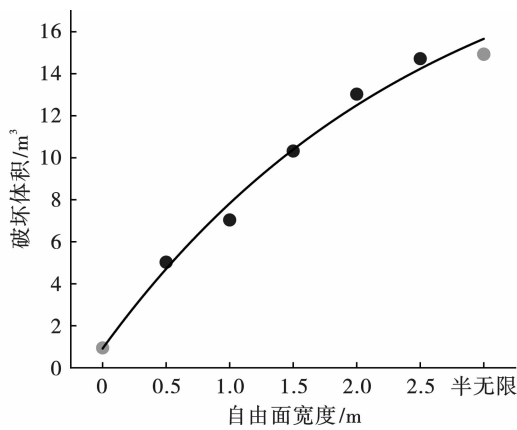


图9 变采幅宽度条件下爆破破坏区体积对比分析

Fig. 9 Comparative analysis of the volume of blasting damage area under the condition of variable mining width

炸药在起爆后,会产生冲击波能和气体膨胀能这两部分能量。其中,冲击波能中的动能和应变能是衡量岩石破碎效果的关键指标^[25]。动能可以进一步细分为平动动能、转动动能和振动动能,并可以通过动能方程进行计算,动能方程可以描述炸药爆炸释放的动能与岩石破碎表面的相互作用。而应变能可表示为岩石所受的应力、应变以及体积的乘积。岩石爆破过程中,一部分能量用于岩体的破碎,其余的能量虽然也对岩体做功,但是未实现岩体的破碎,以动能和应变能的形式耗散。基于此,本文开展急倾斜薄矿脉中深孔爆破能量传播规律分析。

基于能量守恒定律,按照岩石爆破效果,将炸药释放的能量 E_E 划分为^[26]

$$E_E = E_F + E_S + E_K + E_{NM} \quad (2)$$

式中: E_F 为岩石产生裂纹消耗的能量; E_S 为转化为振动波的能量; E_K 为破碎岩块的动能; E_{NM} 为放热、空气冲击波、噪音等其他难以测量的能量。

急倾斜薄矿脉窄幅自由面条件下岩体爆破,窄小的自由面宽度使得爆破应力波的反射拉伸破岩范围显著降低,大量爆炸能量以振动能和应变能的形式散逸,没有起到有效破岩的作用。

采用岩体 PPV 值来表示爆破动能分布,不同采幅条件下的模拟结果如图 10 所示,由图可知,对比薄矿脉窄幅自由面爆破与半无限自由面爆破结果,薄矿脉窄幅自由面工况条件下,爆破应力波在自由面处的反射破岩区域明显减小,而在窄幅自由面以外区域,岩体 PPV 值与无自由面工况下的 PPV 相近,更多的爆破能量不能用于破岩散逸至围岩中。即在爆破参数不变的情况下,自由面宽度越小,散逸到围岩的能量就越多,爆破矿体的能量利用率就越低。

根据数值计算结果,在爆破应力分布趋于稳定后,统计不同采幅工况下爆破动能与应变能,划分爆破破岩能量与散逸能量,其结果如图 11 所示。由图可以看出,散逸的应变能明显多于散逸的动能,其中散逸应变能随着窄幅自由面宽度的增加,呈指数下降,当自由面宽度从 0.5 m 增大 2.5 m 时,爆后散逸到围岩的应变能从 740.92 kJ 下降至 164.02 kJ,下降了 576.9 kJ,下降率达 77.86%;而散逸的动能近似直线下降,当自由面宽度从 0.5 m 增大 2.5 m 时,散逸到围岩的动能从 147.05 kJ 下降至 85.14 kJ,仅下降了 61.91 kJ,下降率达 42.10%。

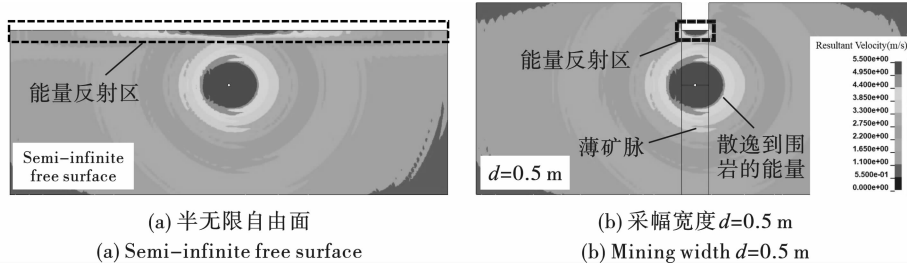


图 10 不同自由面工况下岩体爆破动能分布规律

Fig. 10 Distribution law of kinetic energy in rock mass blasting of different free surface conditions

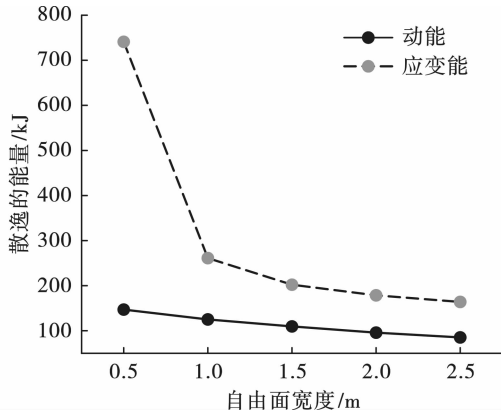


图 11 爆破散逸能量

Fig. 11 Explosive escape energy

薄矿脉中深孔爆破夹制作用产生的根本原因是其矿脉的采幅减小,因此在窄小爆破自由面附近监测爆破能量的变化规律,将有助于解释薄矿脉爆破的围岩夹制作用机理。如图 12 所示,在爆破自由面附近设置爆破能量监测区,当距自由面距离小于 0.2 m 时,窄幅条件下的爆破能量与无自由面条件下能量差值大于 20%,出现了明显的应力波反射现象,故设监测区厚度为 0.2 m,监测区长度为采幅宽度。在炮孔与自由面中点的连线上设置两个监测点,监测点 1 位于自由面中点,监测点 2 距离自由面垂距 0.25 m。

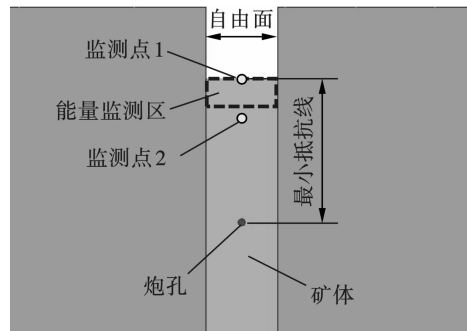


图 12 数值模拟监测点布置图

Fig. 12 Numerical simulation monitoring points

根据数值计算结果,计算采幅宽度 $d = 0.5 \text{ m}$ 工况与半无限自由面工况的等尺寸自由面监测区域内爆破动能与应变能指标,如图 13 所示。由图可以看出,炸药爆破后监测区域内的动能和应变能随时间呈现快速上升后下降的变化趋势。对比半无限自由面工况的能量计算结果,采幅宽度 $d = 0.5 \text{ m}$ 工况的动能峰值和应变能峰值均发生了不同程度的降低,其中动能从 6.83 kJ 降至 5.77 kJ 降低了 15.52%,应变能从 8.99 kJ 降至 5.12 kJ 降低了 43.05%,表明薄矿脉中深孔爆破的采幅减小导致其破岩能量的降低,宏观表现为围岩对爆破的夹制作用。

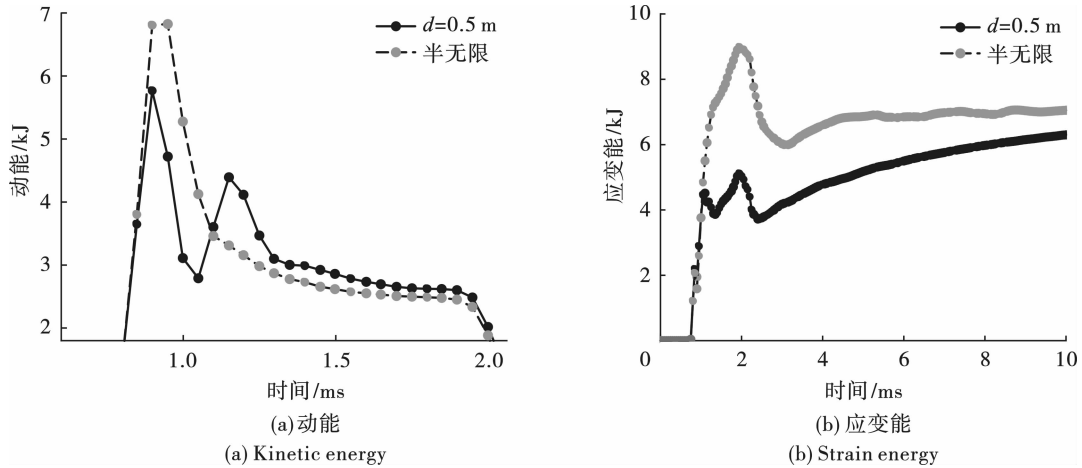


图 13 薄矿脉中深孔爆破自由面处能量传播规律

Fig. 13 Energy propagation law at the free surface of medium-deep hole blasting in narrow vein mine

统计不同采幅工况下监测点1和2的能量随时间变化规律,监测结果如图14所示。由图14(a)可以看出,在采幅宽度 $d=0.5\text{ m}$ 工况下,炸药爆破后在短时间内两个监测点处的能量达到峰值,随后呈梯段下降,直至趋于稳定。两个监测点处的能量随时间的变化规律相似,其监测点1处的峰值能量为 881.07 kJ ,较监测点2处的能量 441.88 kJ 大近2倍。对于不同采幅工况下监测点1和监测点2处的

峰值能量变化规律,如图14(b)所示,随着采幅宽度的增加,监测点2处的峰值能量呈缓慢增加的趋势,但整体增加量较小;监测点1处的峰值能量随着采幅宽度的增加而增大,且当采幅小于等于 0.5 m 时,峰值能量增加速率大,当采幅宽度大于等于 1.5 m 时,峰值能量增加速率降低。从能量分布角度,当采幅减小后对于监测点2处的影响较小,但是对自由面近区(0.2 m)范围影响较大。

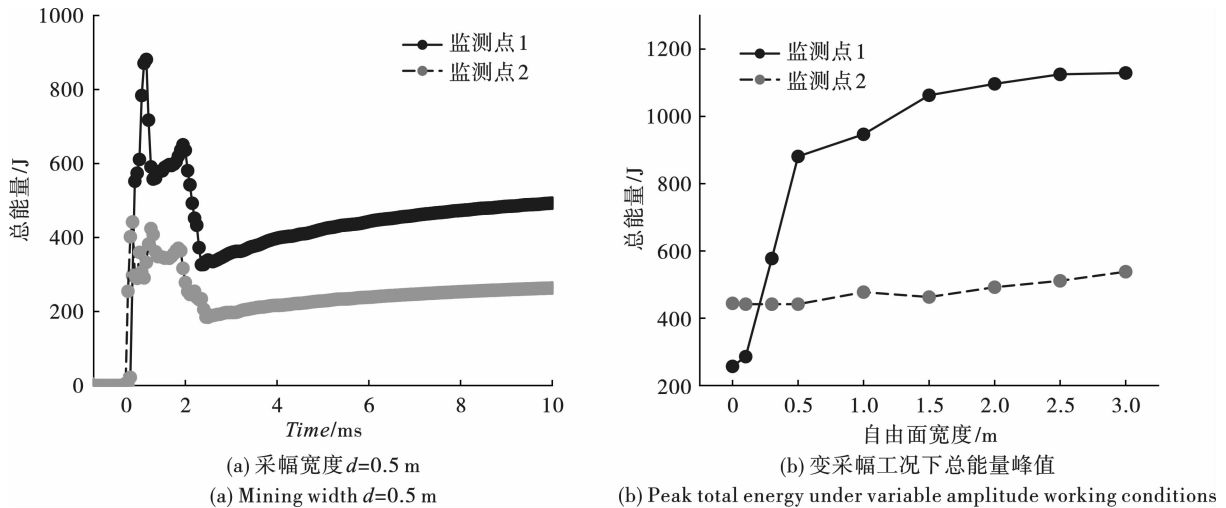


图14 监测点能量分析

Fig. 14 Energy analysis of monitoring points

综合薄矿脉窄幅条件下的爆破能量分析可知,由于薄矿脉采幅宽度减小,一方面,导致更多的爆破能量散逸不能有效破岩;另一方面,在爆破自由面处爆破能量也相应减小。

5 夹制作用的定量表征与预测

通过以上分析可以看出,采幅宽度的减小是引起爆破夹制作用的根本原因,上文已经从岩体失效破坏和能量分布的角度分析了由于采幅减小而引起的爆破围岩夹制作用,但是为了进一步指导薄矿脉中深孔爆破的参数选择,需要对薄矿脉中深孔爆破围岩的夹制作用进行量化分析。

5.1 夹制作用的定量表征方法

在能量分析部分,自由面附近的爆破能量变化能够较好地反映出薄矿脉窄幅条件下爆破围岩的夹制作用,因此,采用自由面中心点处的总能量峰值指标来表征夹制作用的大小,基于此,提出夹制系数 K ,其计算方法如下式

$$K = \frac{M_l}{M_x} \quad (3)$$

式中: M_x 为薄矿脉窄幅工况下爆破自由面中心点处的总能量峰值; M_l 为对应半无限自由面工况下

爆破自由面中心点处的总能量峰值。

根据围岩夹制系数的计算方法可知,该系数越大,表示爆破自由面处的爆破能量越低,则破岩难度越大,夹制作用越明显,当夹制系数为1时,爆破不存在围岩夹制作用。依据数值计算结果,计算不同采幅工况下的围岩夹制系数,如图15所示。由图可以看出,随着采幅宽度增加,夹制系数不断减小,从无自由面条件下增加到半无限自由面条件下,夹制系数从4.40下降至1.00,下降率达77.27%。

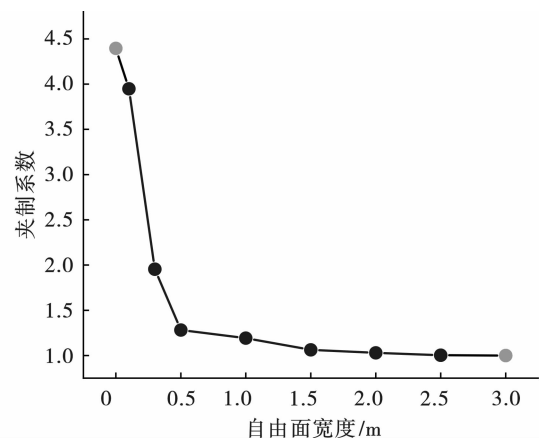


图15 围岩夹制系数

Fig. 15 Surrounding rock clamping coefficient

5.2 薄矿脉爆破夹制作用的影响因素

薄矿脉采幅的减小是引起爆破围岩夹制作用的根本原因,但是不同的岩体力学特性所表现出的夹制作用也不相同,为此本文在采幅宽度因素分析的基础上,进一步分析围岩力学特性对薄矿脉爆破围岩夹制作用的影响。考虑岩体的物理力学特性,选择矿岩抗压强度 f_c 、抗拉强度 T 、弹性模量 E ,表征完整岩石的力学特性,选择岩体波阻抗匹配系数 ξ 表征岩体的完整性。根据前文分析,当采幅宽度 $d \leq 0.5$ m时,爆破夹制作用显著,因此,以采幅宽度 $d = 0.5$ m的薄矿脉爆破工况为基础条件,对以上四个因素进行单一变量分析,具体数值计算方案见表3。

表3 岩体力学特性数值计算方案
Table 3 Numerical calculation scheme for rock mechanics characteristics

序号	f_c/MPa	T/MPa	E/GPa	ξ
1	99.35	4.58	27.21	0.48
2	91.07	4.58	27.21	0.48
3	74.51	4.58	27.21	0.48
4	66.23	4.58	27.21	0.48
5	82.79	5.50	27.21	0.48
6	82.79	5.04	27.21	0.48
7	82.79	4.12	27.21	0.48
8	82.79	3.66	27.21	0.48
9	82.79	4.58	32.65	0.48
10	82.79	4.58	29.93	0.48
11	82.79	4.58	24.49	0.48
12	82.79	4.58	21.77	0.48
13	82.79	4.58	27.21	0.40
14	82.79	4.58	27.21	0.43
15	82.79	4.58	27.21	0.53
16	82.79	4.58	27.21	0.60

数值计算结果如图16所示,由图可以看出,岩石的抗压强度、波阻抗匹配系数与急倾斜薄矿脉中

$$K^* = \frac{M_l^*}{M_x^*} = \frac{0.5816f_c^* - 0.2147T^* - 0.737E^* + 0.2459\xi^* + 0.0125}{0.3687f_c^* - 0.0557T^* - 0.3537E^* + 0.0930\xi^* - 0.8976e^{-1.3405d^*} + 1.235} \quad (4)$$

通过以上夹制系数预测模型对不同采幅宽工况下的围岩价值系数进行预测,预测结果如表4所示。对比数值计算结果与模型预测结果,可以看出预测模型的误差较小,最大误差为8.39%,满足应用要求。在此基础上,即可采用这一模型对不同薄矿脉工况条件下的围岩夹制系数进行预测分析,为爆破参数的设计提供理论和数据支撑。

深孔爆破破坏体积呈正比关系,抗拉强度、弹性模量与爆破破坏体积呈反比关系,四个影响因素中抗拉强度指标对爆破破坏尺寸的影响最大,波阻抗匹配系数指标对爆破破坏尺寸影响最小。

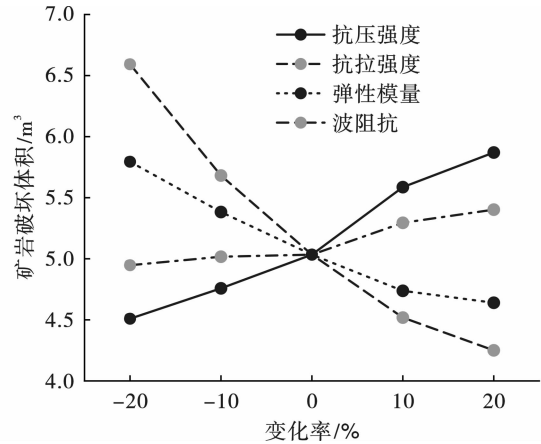


图16 不同岩体力学参数条件下爆破破坏范围对比分析
Fig. 16 Comparative analysis of blasting failure range of different rock mechanics parameters

在以上分析基础上,基于爆破数值模拟结果,对抗压强度、抗拉强度、弹性模量、波阻抗匹配系数和采幅宽度等因素进行均值方差归一化处理,通过加权回归分析方法,分析归一化后的各因素对急倾斜薄矿脉爆破围岩夹制作用的敏感性及其影响权重。计算结果表明,采幅宽度对夹制作用的影响权重最大达0.3455,抗压强度影响权重最小为0.1016,各因素对夹制作用的影响权重排序为:采幅宽度 > 抗拉强度 > 波阻抗匹配系数 > 弹性模量 > 抗压强度。

5.3 夹制系数预测模型

依据爆破数值计算结果,采用非线性拟合方法建立薄矿脉中深孔爆破围岩夹制系数的预测模型,根据模型的拟合结果可知所获得其极差 R 、 R^2 以及调整后的 R^2 均大于0.9,且 F 统计量的显著系数小于0.05,说明模型拟合效果较好,具有较高的准确性,得到的归一化围岩夹制系数 K^* 预测模型如式(4)

6 结论

基于甘肃某金矿急倾斜薄矿脉,通过现场调查、PMMA爆破模型试验和数值模拟方法对薄矿脉中深孔爆破围岩夹制作用进行研究,并从能量角度实现对薄矿脉夹制作用的定量表征。获得主要结论如下:

表4 夹制作用爆破模拟结果与验证

Table 4 Simulation results and verification of blasting with clamping effect

d/m	f_c/MPa	T/MPa	E/GPa	ξ	数值计算结果	预测结果	误差
0.1	82.79	4.58	27.21	0.48	3.9485	3.7021	0.2464
0.3	82.79	4.58	27.21	0.48	1.9545	1.9871	-0.0326
0.5	82.79	4.58	27.21	0.48	1.2817	1.3199	-0.0382
1.0	82.79	4.58	27.21	0.48	1.1929	1.0928	0.1001
1.5	82.79	4.58	27.21	0.48	1.0624	1.0377	0.0247
2.0	82.79	4.58	27.21	0.48	1.0296	1.0218	0.0078
2.5	82.79	4.58	27.21	0.48	1.0037	1.0102	-0.0065

1)通过 PMMA 爆破模型试验,发现随着薄矿脉采幅宽度减小,炮孔爆破粉碎区和破裂区半径都显著减小,且抑制了爆生裂纹的长度,但窄幅自由面对爆破裂纹仍存在显著的诱导作用。

2)分析了薄矿脉爆破矿岩体宏观破坏规律,由于受到薄矿脉采幅宽度制约,当采幅宽度从 2.5 m 降至 0.5 m 时,爆破破坏体积呈加速下降规律,体积降幅达到 65.83%。

3)分析了薄矿脉爆破的能量分布特征,可知随着薄矿脉采幅宽度减小,一方面,导致更多的爆破能量散逸不能有效破岩;另一方面,在爆破自由面处爆破能量峰值明显下降。

4)采用自由面中心点处的总能量指标来表征夹制作用的大小,提出了薄矿脉爆破围岩夹制系数 K 的定量表征方法。建立了包含采幅宽度以及岩石力学参数的围岩夹制系数预测模型,并对模型进行检验,模型最大误差为 8.39%,能较好满足预测需求。

参考文献 (References)

- [1] DOMINY S, CAMM G S, PHELPS. Narrow vein mining-A challenge to the operator[J]. Mine Planning and Equipment Selection, 1997:125-132.
- [2] 安龙,徐帅,李元辉,等. 急倾斜薄矿脉深孔落矿工艺参数优化[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013,34(2):288-292.
- [2] AN Long, XU Shuai, LI Yuan-hui, et al. Deep hole blasting parameters optimization for steeply inclined thin vein [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2013,34(2):288-292. (in Chinese)
- [3] CLARK L M. Minimizing dilution in open stope mining with a focus on stope design and narrow vein longhole blasting[D]. Vancouver: University of British Columbia, 1998.
- [4] 黄文钊. 薄矿脉崩矿的夹制作用[J]. 江西冶金, 1982(3):22-24.
- [4] HUANG Wen-dian. The clamping effect of thin ore vein collapse[J]. Jiangxi Metallurgy, 1982(3):22-24. (in Chinese)
- [5] ZHANG Z-X, HOU D-F, GUO Z, et al. Experimental study of surface constraint effect on rock fragmentation by blasting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020,128:1-11.
- [6] LAN R, WANG Z, LU J, et al. The influence of the number of free surfaces on the energy distribution and attenuation law of blasting vibration signals from peripheral holes: field experiment and simulation[J]. Frontiers in Earth Science, 2023,11:1-11.
- [7] 张志呈,张顺朝. 论工程爆破中自由面与爆破效果的关系[J]. 西南科技大学学报, 2003,18(3):30-33.
- [7] ZHANG Zhi-cheng, ZHANG Shun-zhao. On the Relationship between the free face and the blasting effect of engineering blasting[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2003,18(3):30-33. (in Chinese)
- [8] 张天锡. 炮孔爆破中残孔长度与夹制作用浅析[J]. 爆破, 2000,17(3):1-5.
- [8] ZHANG Tian-xi. Simple analysis on the length of remains of hole and action of clipping[J]. Blasting, 2000,17(3):1-5. (in Chinese)
- [9] VISHWAKARMA A K, HIMANSHU V K, DEY K. Evaluation of optimum burden for the excavation of narrow vein ore deposits using numerical simulation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024,57:945-960.
- [10] AN L, SUORINENI F T, XU S, et al. A feasibility study on confinement effect on blasting performance in narrow

- vein mining through numerical modelling [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 112: 84-94.
- [11] KUTTER H K, FAIRHURST C. On the fracture process in blasting [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1971, 8(3): 181-202.
- [12] ROSSMANITH H P, DAEHNKE A, NASMILLNER R E K, et al. Fracture mechanics applications to drilling and blasting [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1997, 20(11): 1617-1636.
- [13] XIAO C, YANG R, DING C, et al. Blasting damage of double cylindrical charges based on fractal theory [J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2023, 1-10.
- [14] PU C, YANG X, ZHAO H, et al. Numerical study on crack propagation under explosive loads [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2022, 38(1): 1-14.
- [15] PU C, YANG X, ZHAO H, et al. Numerical investigation on crack propagation and coalescence induced by dual-borehole blasting [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 157: 1-17.
- [16] 蒲传金, 杨鑫, 肖定军, 等. 爆炸载荷下双孔裂纹扩展的数值模拟研究 [J]. *振动与冲击*, 2022, 41(15): 300-311.
- [16] PU Chuan-jin, YANG Xin, XIAO Ding-jun, et al. Numerical simulation of double-hole crack propagation under explosion load [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(15): 300-311. (in Chinese)
- [17] ZHOU X-P, FU L, JU W, et al. An experimental study of the mechanical and fracturing behavior in PMMA specimen containing multiple 3D embedded flaws under uniaxial compression [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2019, 101: 207-216.
- [18] 安龙. 急倾斜薄矿脉开采矿岩移动规律与崩落控制研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- [18] AN Long. Gravity flow of broken rocks and the control of rock blasting in mining narrow steeply dipping veins [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015. (in Chinese)
- [19] 闻磊, 李夕兵, 吴秋红, 等. 花岗斑岩 Holmquist-Johnson-Cook 本构模型参数研究 [J]. *计算力学学报*, 2016, 33(5): 725-731.
- [19] WEN Lei, LI Xi-bing, WU Qiu-hong, et al. Study on parameters of Holmquist-Johnson-Cook model for granite porphyry [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2016, 33(5): 725-731. (in Chinese)
- [20] LU W, LENG Z, HU H, et al. Experimental and numerical investigation of the effect of blast-generated free surfaces on blasting vibration [J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2016, 22(11): 1374-1398.
- [21] 郭子红, 刘新荣, 刘保县, 等. 基于塑性体积应变的岩石损伤变形特性实验研究 [J]. *实验力学*, 2010, 25(3): 293-298.
- [21] GUO Zi-hong, LIU Xin-rong, LIU Bao-xian, et al. Experiment study of rock damage deformation characteristics based on plastic volumetric strain analysis [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2010, 25(3): 293-298. (in Chinese)
- [22] 朱传云, 喻胜春. 爆破引起岩体损伤的判别方法研究 [J]. *工程爆破*, 2001(1): 12-16.
- [22] ZHU Chuan-yun, YU Sheng-chun. Study on the criterion of rockmass damage caused by blasting [J]. *Engineering Blasting*, 2001(1): 12-16. (in Chinese)
- [23] WANG Z, WANG H, WANG J, et al. Finite element analyses of constitutive models performance in the simulation of blast-induced rock cracks [J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 35: 1-12.
- [24] 毕程程. 华山花岗岩 HJC 本构参数标定及爆破损伤数值模拟 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [24] BI Cheng-cheng. Calibration of HJC constitutive parameters of Huashan granite and its blasting damage numerical simulation [D]. Hefei: Hefei University Of Technology, 2018. (in Chinese)
- [25] 冷振东, 高启栋, 卢文波, 等. 岩石钻孔爆破能量调控理论与应用技术研究进展 [J]. *金属矿山*, 2023, 52(5): 64-76.
- [25] LENG Zhen-dong, GAO Qi-dong, LU Wen-bo, et al. Research progress in theory and technology of energy regulation for rock drilling and blasting [J]. *Metal Mine*, 2023, 52(5): 64-76. (in Chinese)
- [26] SANCHIDRIÁN J A, SEGARRA P, LÓPEZ L M. Energy components in rock blasting [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(1): 130-147.