

基于 LS-DYNA 的楔形切割拉槽爆破数值模拟研究及应用^①

陈帮洪¹, 陈星明², 武尚荣¹, 费志文¹

(1.昆明有色冶金设计研究院股份公司, 云南 昆明 650231; 2.西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 某矿西二采区采用无底柱分段崩落法开采, 1 546 m 分段楔形切割拉槽存在拉槽高度过大导致爆破效果不佳的问题。针对该问题进行了楔形切割拉槽爆破研究。基于 RHT 本构模型标定矿岩参数, 采用 LS-DYNA 软件, 运用流固耦合算法, 确定矿岩损伤阈值为 0.4; 对比分析不同拉槽宽度方案的爆破成槽效果, 结果表明: 拉槽高度固定为 23 m 时, 矿岩有效损伤率随着拉槽宽度增加呈单峰曲线变化; 最佳拉槽宽度为 24 m, 此时矿岩有效损伤率达到峰值 0.692 5。基于该参数设计拉槽方案, 现场试验结果表明, 爆破成形空间达标率超过 85%, 爆堆块度分布合理, 安息角约 40°。

关键词: 无底柱分段崩落法; 切割拉槽; RHT; 本构模型; 数值模拟; 损伤; 拉槽爆破

中图分类号: TD853; TD235

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.02.008

文章编号: 0253-6099(2025)02-0047-07

Numerical Simulation of Blasting with Wedge Cut Based on LS-DYNA Software and Its Application

CHEN Banghong¹, CHEN Xingming², WU Shangrong¹, FEI Zhiwen¹

(1. Kunming Engineering & Research Institute of Nonferrous Metallurgy Co., Ltd., Kunming 650231, Yunnan, China; 2. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China)

Abstract: The western No.2 mining area of a certain mine adopts the non-pillar sublevel caving in mining, and excessive wedge cut height in the 1 546 m sublevel leads to poor blasting effect. To address this problem, blasting with wedge cut was specially studied. Firstly, the rock parameters were calibrated based on the RHT constitutive model and the damage threshold of the rock was determined to be 0.4 by a fluid-structure interaction analysis with the LS-DYNA software. A comparative analysis of the cut blasting effects with different cut width shows that with the cut height fixed at 23 m, the effective damage rate of the rock presents a unimodal distribution with an increase in cut width. The optimal cut width is found to be 24 m, with which the effective damage rate of the rock can reach a peak value of 0.692 5. Based on these parameters, the on-site application of designed cutting scheme indicates that over 85% of blast-forming space can meet the requirement, presenting a reasonable fragment distribution of muck pile, with the angle of repose at approximately 40°.

Key words: non-pillar sublevel caving method; cut; RHT; constitutive model; numerical simulation; damage; cut blasting

切割拉槽作为无底柱分段崩落法开采的核心环节, 直接影响矿石回采率与开采安全性。矿山一般采用切割平巷+天井的施工方式形成切割拉槽, 但该方法工程量大、施工复杂, 尤其在软破碎矿体中易引发安全事故^[1-2]。此外, 工作面浮石堆积、通风不良等问题进一步威胁作业安全。楔形切割拉槽法采用多进路开挖同步形成大型切割槽, 可有效克服以上问题, 显著提

升施工效率并简化流程。然而, 楔形切割拉槽法受爆破夹制效应制约, 对布孔参数与起爆精度要求严苛, 需通过优化孔网布置和爆破参数改善岩体破碎形态, 为后续爆破创造有效自由面, 才能提升整体爆破效果。

为提高切割拉槽效率与爆破效果, 众多学者系统探究了炮孔对称性、掏槽方式、节理特征等对爆破效果的影响^[3-7], 并进行了现场验证, 在动力学分析、裂纹扩

① 收稿日期: 2024-10-27

作者简介: 陈帮洪(1984—), 男, 四川乐山人, 硕士, 助理工程师, 主要从事地下采矿及岩石力学方面的研究工作。E-mail: 13550815784@163.com

展机理等方面取得显著进展,但仍存在以下不足:试验验证与工程应用转化不足,理论体系尚未完善;多样化的切割拉槽布置方式缺乏普适性验证与推广;数值模拟多直接引用标准材料参数,未充分考虑实际岩体特性对爆破过程的动态影响。

基于此,本文以某矿西二采区为工程背景,采用 LS-DYNA 软件,运用流固耦合算法,对不同楔形拉槽布置方式的爆破损伤范围进行数值模拟,通过标定合理材料模型参数,结合数值模拟与现场试验,优化布孔方案,为选取高效、安全的楔形切割拉槽布置方式提供依据。

1 材料本构参数确定及验证

1.1 流固耦合算法

采用流固耦合(ALE)算法对爆破进行数值模拟,该方法能有效解决大变形条件下爆破损伤问题。首先构建炸药与空气域的耦合体系,其中空气域被定义为 ALE 多物质空间,以模拟动态流动;其次,建立炸药单元与岩石单元之间的动态相互作用,通过共节点连接方式实现炸药与空气域单元的界面耦合。流固耦合算法爆炸数值模拟如图 1 所示。

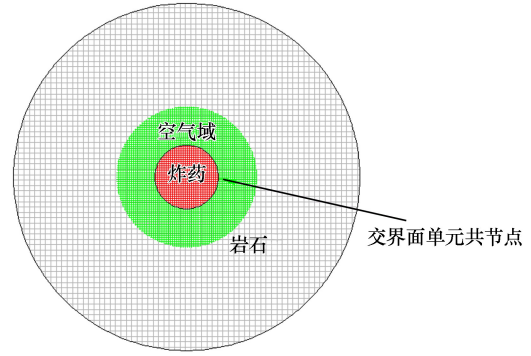


图 1 流固耦合算法爆炸数值模拟示意图

Fig. 1 Numerical simulation of blasting parameters by fluid-structure interaction analysis

1.2 材料模型参数确定

1.2.1 岩石材料模型

采用 RHT (Riedel-Hiermaier-Thoma) 本构模型为材料模型,该模型考虑了爆破动荷载作用下岩石材料的破坏强度对冲击压力、应变速率、应变硬化和损伤软化的影响,适用于岩体爆破损伤演化数值模拟^[8]。根据相关研究^[9]理论计算得到某矿西二采区矿岩物理力学参数以及 RHT 本构模型材料参数见表 1~2。

表 1 某矿西二采区矿岩物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical properties of rock in western No.2 mining area of a mine

抗拉强度/MPa	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	抗剪强度		剪切模量/GPa	抗压强度比	剪压强度比
				C/MPa	$\varphi/(\text{°})$			
12.9	90	115	0.25	1.05	45	46	0.143	0.35

表 2 某矿西二采区矿岩 RHT 本构模型材料参数

Table 2 Material parameters of rock in western No.2 mining area based on RHT constitutive model

参数符号	参数取值	参数符号	参数取值	参数符号	参数取值
密度 $\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 700	状态方程参数 B_0	1.68	拉伸应变速率指数 β_1	0.018 2
初始孔隙度 α_0	1.014 9	状态方程参数 B_1	1.68	参考压缩应变速率 $\dot{\epsilon}_0^c/\text{s}^{-1}$	3.0×10^{-5}
孔隙开始压碎时压力 p_{cl}/MPa	30	状态方程参数 T_1/GPa	27.648	参考拉伸应变速率 $\dot{\epsilon}_0^t/\text{s}^{-1}$	3.0×10^{-6}
孔隙压实时压力 p_{comp}	0.6	状态方程参数 T_2	0	失效压缩应变速率 $\dot{\epsilon}^c/\text{s}^{-1}$	3.0×10^{25}
孔隙度指数 n_p	3.0	压缩屈服面参数 g_c^1	0.4	失效拉伸应变速率 $\dot{\epsilon}^t/\text{s}^{-1}$	3.0×10^{25}
多项式系数 A_1/GPa	27.648	拉伸屈服面参数 g_t^*	0.7	初始损伤参数 D_1	0.04
多项式系数 A_2/GPa	46.449	剪切模量缩减系数 ζ	0.48	损伤参数 D_2	1.0
多项式系数 A_3/GPa	28.389	失效面参数 A	2.508 9	最小破坏残余应变 ϵ_p^m	0.015
洛德角相关系数 B	0.067	失效面指数 N	0.722 3	最小失效应变 A_f	1.62
压缩应变速率指数 β_c	0.013 8	拉压子午参数 Q_0	0.68	残余应力强度指数 n_f	0.6

1.2.2 炸药及空气材料模型

炸药爆破时会生成高温、高压气体。本文采用 JWL EOS 模型预测爆轰压力,其计算公式如下^[10]:

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

式中: P 为爆轰压力; V 为爆轰产物相对体积; E_0 为爆轰产物比内能; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 均为 JWL 参数。矿山楔形拉槽采用 2# 岩石粉状乳化炸药,状态方程参数如表 3 所示。

ALE 算法采用 * MAT_NULL 空气材料作为空物

质材料模型,使用 *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程表征材料热动力学性质,状态方程为:

$$P_1 = (C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3) + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E_0 \quad (2)$$

式中: P_1 为气体膨胀压强,kPa; μ 为空气材料比体积; $C_0 \sim C_6$ 均为空气材料状态方程参数,取值如表 4 所示。

表 3 2#岩石粉状乳化炸药状态方程参数

Table 3 Parameters of equation of state for rock powder explosive No.2

爆轰压力 P/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	比内能 E_0/GPa	初始相对 体积 V'
9	586	21.6	5.81	1.77	0.28	7.38	1.0

表 5 某矿楔形拉槽爆破压碎区和裂隙区半径计算参数

Table 5 Calculation parameters for radius of damage zone and fracture zone in wedge cut blast

岩石密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	岩石抗压强度/ MPa	岩石抗拉强度/ MPa	泊松比	岩石波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	初始裂纹 密度	岩石弹性模量/ GPa	炸药密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	炸药爆速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
2 700	90	12.9	0.25	3 200	0.06	115	1 300	4 000

损伤岩体耦合装药条件下,柱状药包爆炸冲击波造成的压碎区半径 R_1 计算公式^[11]为:

$$R_1 = r_b \left[\frac{\sqrt{2}\rho C \rho_0 V_0^2 B_0}{(1+k)(\rho C + \rho_0 V_0)(1-D_0)\sigma_{cd}} \right]^{(1-D_0)/\alpha} \quad (3)$$

$$D_0 = 1 - \left[1 + \frac{16(1-\mu_c^2)C_d}{9(1-2\mu_c)} \right]^{-1} \quad (4)$$

式中: D_0 为岩石初始损伤值; μ_c 为岩石损伤后的泊松比, $\mu_c = \mu_a(1-16C_d/9)$, μ_a 为岩石损伤前的泊松比; C_d 为损伤引起的裂纹密度; α 为岩体应力波衰减指数,取 2.25; ρ 为岩石密度, kg/m^3 ; C 为岩石中冲击波传播速度, m/s ; V_0 为炸药爆速, m/s ; ρ_0 为炸药密度, kg/m^3 ; k 为等熵指数,取 2.1; B_0 为某点应力状态相关系数; σ_{cd} 为岩石单轴动态抗压强度,MPa。

爆生气体对岩体的作用是一个准静态过程。忽略裂隙体积,根据爆轰热力学理论以及裂隙区岩体应力状态和损伤定义,柱状耦合装药条件下爆生气体静态作用下的裂隙区半径计算公式^[12]为:

$$R_2 = \sqrt{\frac{P_y}{\sigma_{td}(1-D')}} \cdot R_1 \left(\frac{\sigma_{cd}}{\sigma_{td}} \right)^{\frac{1-D_0}{\beta}} \quad (5)$$

式中: R_2 为爆生气体与冲击波作用下裂隙区半径,m; P_y 为裂隙区岩石内气体压力,取 $0.6P_c$, P_c 为透射入岩石的冲击波初始压力,MPa; D' 为岩石二次损伤因子,取 0.3; β 为裂隙岩体应力波衰减指数, $\beta = 2 - bD_0$, b 为侧向应力系数; σ_{td} 为岩石动态单轴抗拉强度,MPa。

根据表 5 和公式(3)~(5),计算得到楔形拉槽爆破压碎区和裂隙区半径如表 6 所示。

表 4 空气材料状态方程参数

Table 4 Parameters of equation of state for air materials

空气密度 $\rho_{\text{air}}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E_0/kPa
1.29	0	0	0	0	0.4	0.4	0	2.5

1.3 矿岩参数验证及损伤阈值确定

1.3.1 矿岩压碎区与裂隙区半径计算

为验证数值模拟中材料参数与建模方法的合理性,基于某矿无底柱分段崩落法实际工程参数(2#岩石粉状乳化炸药、孔径 80 mm,参数详见表 5),进行楔形拉槽爆破压碎区与裂隙区半径数值模拟结果与理论值的对比。

表 6 楔形拉槽爆破压碎区和裂隙区半径

Table 6 Radius of damage zone and fracture zone in wedge cut blast

冲击波初始压力 P_c/GPa	侧向应力 系数 b	岩体初始 损伤 D_0	压碎区 半径 R_1/m	裂隙区 半径 R_2/m
8.377	0.25	0.15	0.14	3.08

1.3.2 参数验证模型建立

为了分析楔形孔爆破过程中爆生气体和爆炸应力波共同作用过程,采用 LS-DYNA 软件建立楔形孔二维准平面应变模型,见图 2,模型尺寸长 17.5 m,宽 11.2 m;楔形孔排距 1.2 m,间距 7.5 m,耦合装药直径 8 cm,空气域直径取 5 倍装药直径,为 40 cm。边界条件为透射边界。

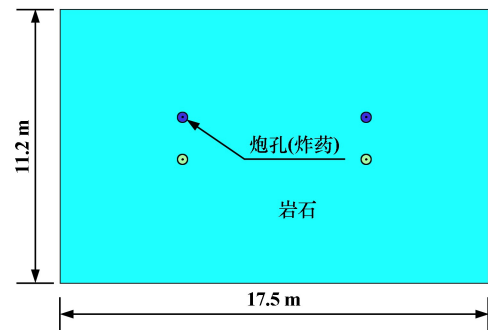


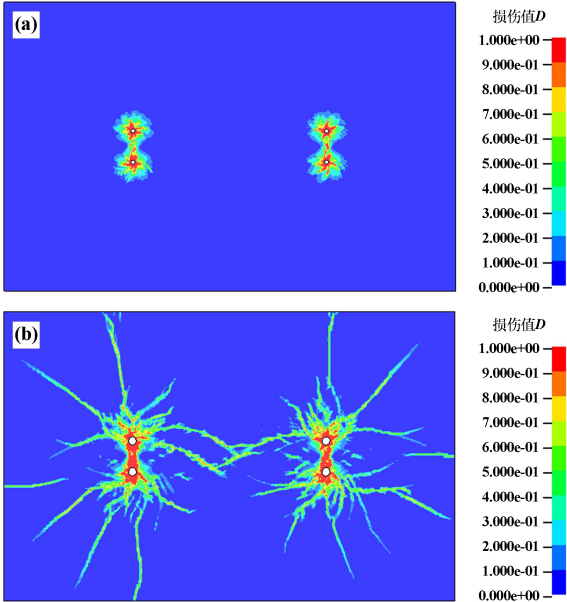
图 2 楔形孔模型

Fig. 2 Numerical model of wedge hole

1.3.3 模拟结果及分析

楔形孔同步起爆时的爆破损伤演化特征如图 3 所

示。相邻炮孔因间距较小产生贯穿效应,孔壁周围形成高损伤区(损伤值 $D=1$);压碎区表现为冲击波引发的径向塑性压缩损伤,裂隙区表现为由应力波衰减与爆生气体“气楔作用”共同诱导的放射状裂纹网络^[13]。模拟结果中损伤分区的力学机制与实际爆破理论高度吻合,验证了 RHT 岩石本构模型参数的可靠性。



(a) $t = 339 \mu s$ 时损伤分布; (b) 最终损伤分布

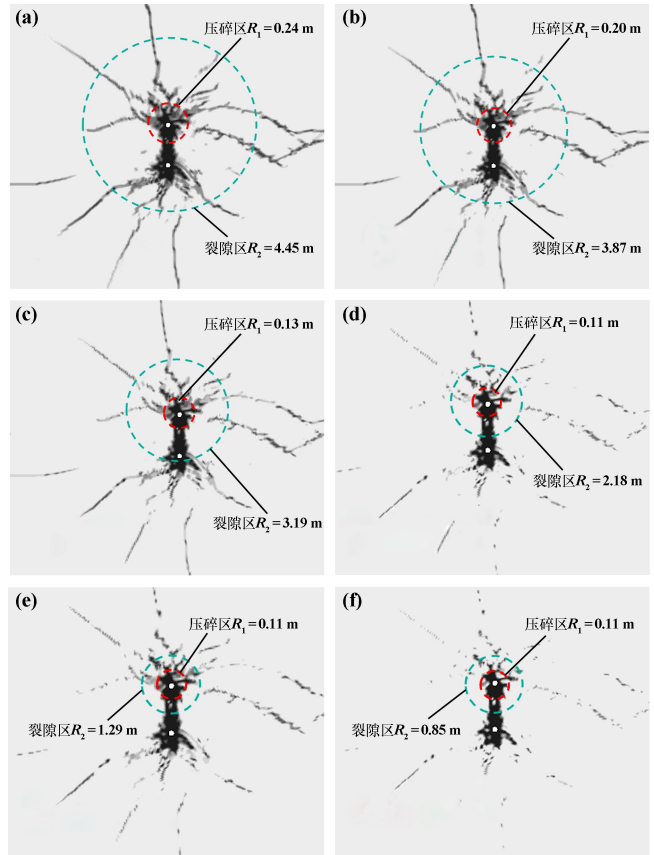
图3 楔形孔爆破损伤分布 ($0 < D < 1$)

Fig.3 Blasting damage distribution of wedge cut ($0 < D < 1$)

为确定岩石爆破损伤的有效阈值,结合压碎区与裂隙区动态响应特征进行分析。根据爆炸能量衰减规律,裂隙区因应力波与爆生气体作用形成贯通裂纹,但损伤程度随能量耗散逐步降低;弹性振动区仅引发岩石力学参数弱化,无宏观破坏。这表明当损伤值超过临界阈值时,岩石才会发生不可逆破坏。

LS-PREPOST 软件后处理损伤分布范围如图4所示。由图4可得, $0.7 < D < 1$ 时,损伤区完全缺失裂隙带且压碎区半径为 0.11 m ($< 0.14 \text{ m}$),显著偏离理论值,表明该阈值过大; $0.4 < D < 1$ 时,损伤分布呈现完整的径向裂隙网络(位于裂隙区理论半径内),压碎区半径为 0.13 m ,虽略大于计算值(虚线圆域),但考虑网格尺寸限制导致的微裂隙模拟偏差,该阈值下损伤分区与表6数据吻合度高。

矿岩不同损伤范围楔形孔压碎区和裂隙区变化如图5所示。 $0.4 < D < 1$ 时,压碎区与裂隙区半径值与理论预测较为一致,进一步验证其作为有效损伤阈值的合理性。损伤阈值 $D=0.4$ 可定义为矿岩爆破损伤的临界阈值。



(a) $0.2 < D < 1$; (b) $0.3 < D < 1$; (c) $0.4 < D < 1$; (d) $0.5 < D < 1$; (e) $0.6 < D < 1$; (f) $0.7 < D < 1$

图4 不同损伤值区间岩石破坏分布范围

Fig.4 Rock failure range in different damage value intervals

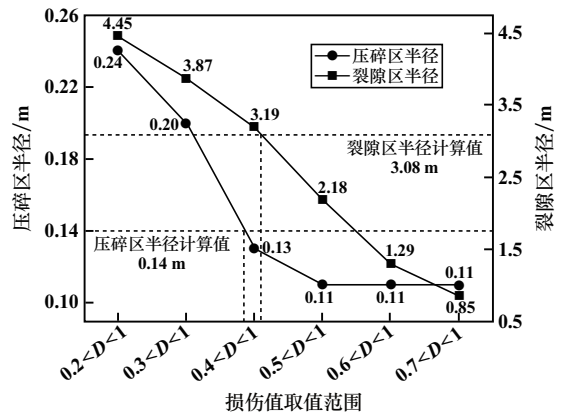


图5 矿岩不同损伤范围楔形孔压碎区和裂隙区变化

Fig.5 Changes in damage zone and fracture zone of wedge hole for rock with different damage values

2 楔形切割拉槽爆破方案

2.1 孔底距确定

扇形炮孔单孔破岩面积最大时,孔底距 a 与裂隙区半径 R_2 的关系^[11]为:

$$a = 1.23R_2 \quad (6)$$

按照某矿西二采区楔形切割拉槽参数布置,炮孔倾角大于 45°时,根据式(6),取实际孔底距为 3.7 m 布孔,炮孔密集系数为 1.559。

2.2 切割拉槽爆破方案建立

炸药单耗 2.8 kg/m³,反向起爆,连续耦合装药,长短交错的“W”形堵塞方式,拉槽高度固定为 23 m,拉槽宽度 15~30 m,每隔 3 m 建立一个模型,共计 6 个模型,每个模型总装药量 Q_w 和装药长度 L 见表 7。

表 7 楔形切割拉槽模拟方案

Table 7 Simulation scheme of wedge cut

方案	拉槽高度 H/m	拉槽宽度 d/m	装药量 Q_w/kg	装药长度 L/m
1	23	15	1 110.9	221.3
2	23	18	1 333.1	265.6
3	23	21	1 555.3	309.8
4	23	24	1 777.4	354.1
5	23	27	1 999.6	398.3
6	23	30	2 221.8	442.6

2.3 数值模型建立

切割拉槽爆破模型如图 6 所示,模型由切割平巷顶板、两侧垂直孔及顶部楔形孔所组成。楔形炮孔的布孔中心位于切割平巷中心线和进路中心线交点。模型计算采用 g-cm- μ s 单位制,设定岩石、炸药、空气域网格单元尺寸分别为 6、3、4 cm。

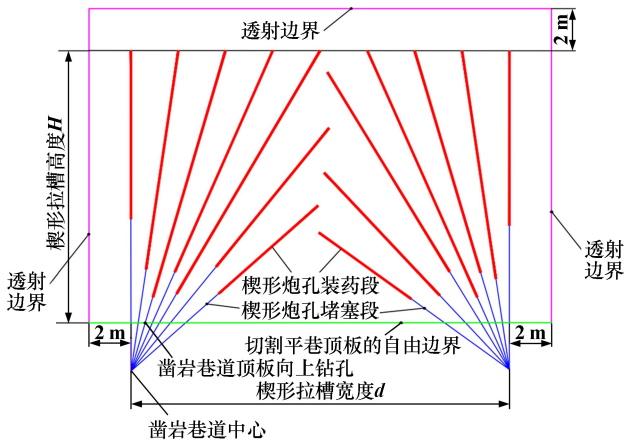


图 6 切割拉槽爆破模型

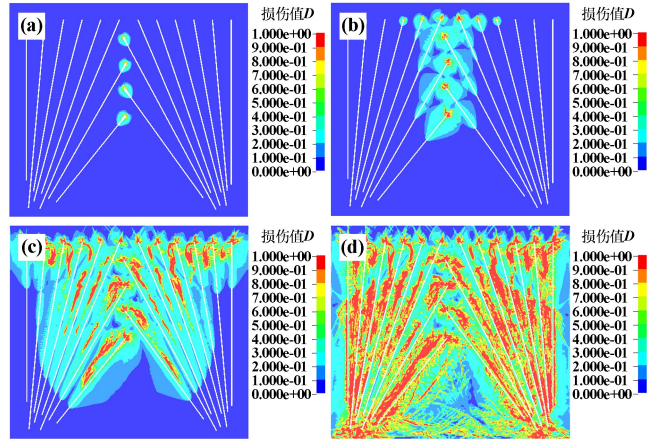
Fig. 6 Cut blasting model

3 楔形切割拉槽爆破数值模拟

3.1 爆破原始损伤演化情况

各时段爆破原始损伤演化情况如图 7 所示,炸药从掏槽底部起爆,爆炸后应力波以锥形形式向自由

面传播,由于楔形掏槽底部炮孔距离比较近,990 s 时应力波阵面发生叠加,叠加后的波阵面以弧形形式向自由面传播,炮孔底部附近岩石受到的压应力大于其抗压强度,呈现压缩破坏形态。反向起爆应力波从顶部向自由面附近发生反射、叠加,使得拉槽顶部区域岩石破坏更显著。



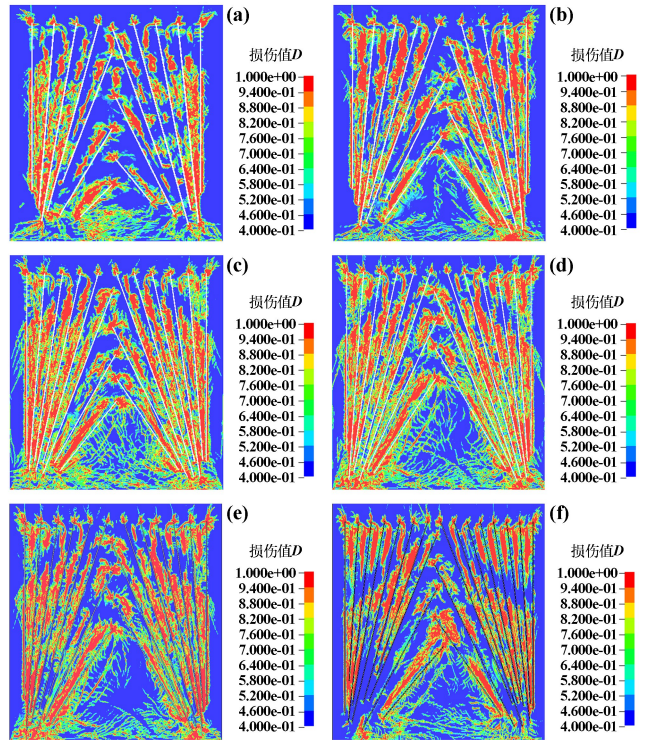
(a) 390 s; (b) 990 s; (c) 2 670 s; (d) 5 609 s

图 7 各时段爆破原始损伤演化情况

Fig. 7 Evolution of original damage at different stages of blasting

3.2 有效损伤率变化规律

不同拉槽方案下最终有效损伤分布如图 8 所示。



(a) 方案 1; (b) 方案 2; (c) 方案 3;

(d) 方案 4; (e) 方案 5; (f) 方案 6

图 8 不同拉槽方案下最终有效损伤分布

Fig. 8 Final effective damage range under different cut designs

由图8可知,岩石有效损伤区形状大体一致。受布孔方式的限制,靠近自由面炮孔有效损伤区分布更为密集(楔形拉槽模型两侧),导致爆破能量在炮孔间产生叠加效应,自由面应力波产生反射拉伸破坏,使得模型在靠近自由面区域以及炮孔间有效损伤区范围显著增大。

各模型有效损伤区分布存在一定差异,主要是模型宽度不同导致炮孔倾角变化。随着拉槽宽度的增加,炮孔倾角逐渐变小,能量叠加区域发生相应变化,具体表现为各模型顶部及中心处有效损伤区随着拉槽宽度增大先增大后减小。如图8(e)、(f)所示,模型中部和顶部的部分区域损伤值低于0.4,可视未发生有效损伤,可推断这些区域未发生岩石破坏。

采用有效损伤率表征不同拉槽宽度条件下的拉槽爆破效果。有效损伤率是指拉槽爆破平面模型中有效损伤($0.4 < D < 1$)区域面积与整个拉槽爆破模型区域面积的比值。根据图8,计算得到各方案有效损伤率如表8所示。

表8 各方案有效损伤率

Table 8 Effective damage rate of each scheme

方案1	方案2	方案3	方案4	方案5	方案6
0.603 5	0.632 6	0.671 3	0.692 5	0.674 6	0.640 0

表8表明,拉槽高度23 m条件下,楔形拉槽区域有效损伤率随着拉槽宽度增加呈先升后降趋势。这主要是拉槽宽度变化导致楔形孔布置角度调整,进而改变爆破应力波的传播导向特性,不同宽度下爆生气体的压力分布差异引发岩石破碎与抛掷空间不均衡。基于ORIGIN软件GaussAmp模型对有效损伤率-拉槽宽度数据进行拟合,建立有效损伤率 Q 与拉槽宽度 d 的定量关系方程,具体表达式为:

$$Q = 0.58 + 0.11e^{(0.5 \frac{d-24.23}{4.92})^2} \quad (7)$$

4 现场试验验证

4.1 切割拉槽方案

某矿山1546 m分段首次楔形切割拉槽位于4#~8#进路端部的矿岩界面。该拉槽净高度23 m,拉槽宽度24 m,炮孔布置如图9所示,炮孔直径80 mm,以6#进路中心为界,右侧为1~10排炮孔,左侧为1'~10'排炮孔,每排布置4个中深孔。

4.2 拉槽空间质量

拉槽爆破后,观测楔形拉槽成槽的空间形态,实测底部宽度约25 m,高度约20 m,如图10所示。计算得

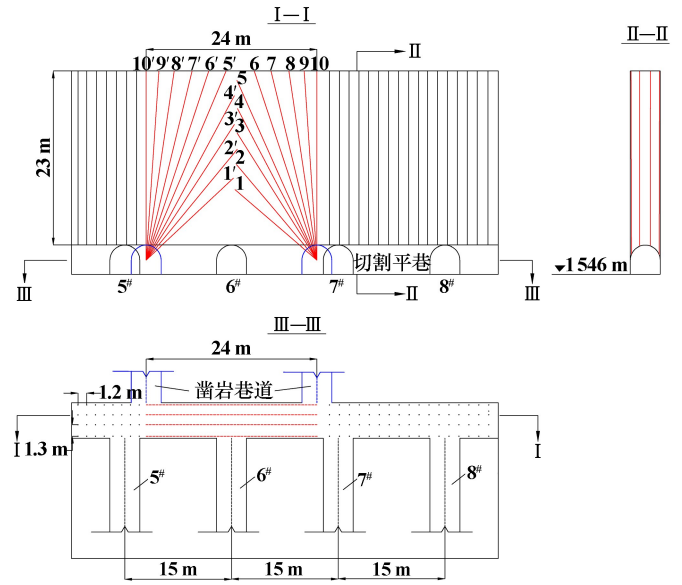


图9 楔形拉槽炮孔布置

Fig. 9 Borehole arrangement for wedge cut

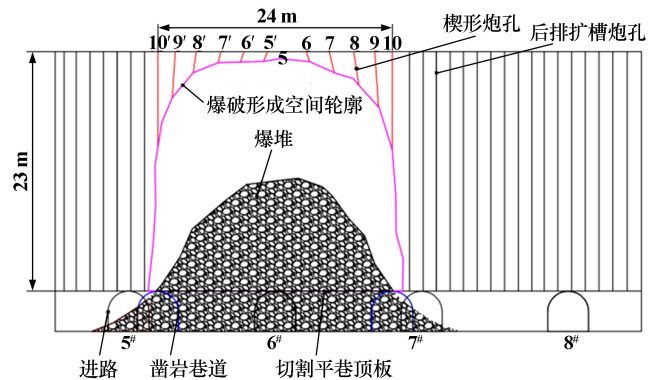


图10 爆破后现场空间形态

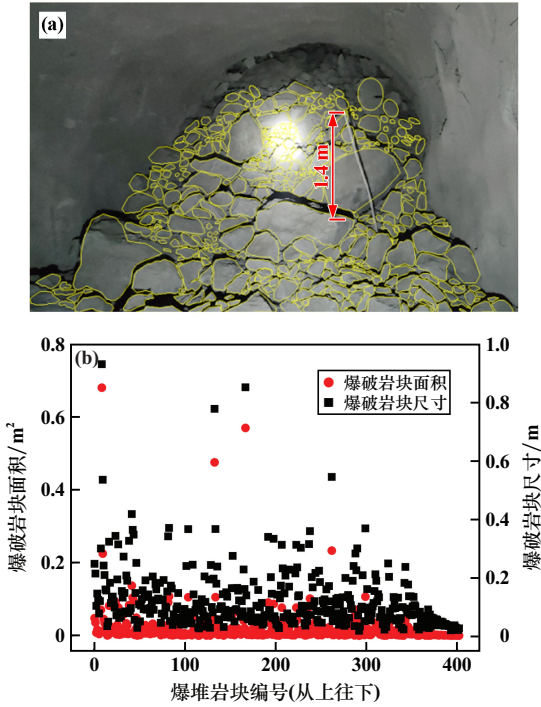
Fig. 10 On-site space formed after blasting

出爆破形成空间面积535 m²,体积2675 m³,超过设计拉槽空间的85%。假设矿岩松散系数为1.23,推算出本次爆破的爆堆体积约为3291 m³。现场统计拉槽后累计出矿量580 t,铲运机斗容为6 m³,折合爆堆体积约3480 m³,与推测的爆堆体积相差不大,从侧面表明推测的拉槽空间形态与实际形成空间相差不大。

4.3 爆堆形态及块度大小分析

在切割平巷中观测爆破后爆堆形态,爆堆自然安息角约40°。对6#进路拉槽爆破爆堆照片进行处理,并分析爆堆块度,如图11所示。由图11可知,爆破大块主要分布在爆堆中下区域,爆破块度面积范围为0~0.68 m²,主要分布在0~0.2 m²;等效尺寸范围为0~0.93 m,主要分布在0~0.3 m。对爆破块度尺寸分布进行分级,结果如表9所示。由表9可知,块度大于0.3 m的矿石仅占36.29%,而块度小于0.3 m的小块

和粉状矿石占 63.71%,小型块度矿石居多,表明切割拉槽爆破效果较好,达到了预期目标。



(a) 块度圈定; (b) 块度统计
图 11 爆破块度统计分析

Fig. 11 Statistical analysis of blasting fragmentation

表 9 楔形拉槽爆破后爆堆块度统计表

Table 9 Statistics of fragmentation for muck pile block after wedge cut blast

分级/m	所占面积/m ²	比例/%
>0.6	1.72	21.16
0.3~0.6	1.23	15.13
0.1~0.3	4.33	53.25
<0.1	0.85	10.46
合计	8.13	100.00

5 结论

1) 基于理论分析与经验参数标定,确定采区矿岩 RHT 本构模型参数,采用 LS-DYNA 软件,运用流固耦合算法进行数值模拟,对比压碎区/裂隙区理论半径与损伤分布特征,最终确定该矿区爆破有效损伤阈值为 $0.4 < D < 1$ 。

2) 楔形切割拉槽爆破数值模拟揭示了不同拉槽宽度下爆破损伤演化规律,有效损伤率随着拉槽宽度增加呈单峰曲线变化,即拉槽高度一定时,随着拉槽宽度增大,楔形拉槽区域有效损伤率呈现先增大后减小的变化特性。

3) 拉槽宽度 24 m 时矿岩有效损伤率达到峰值 0.692 5,现场试验结果表明该方案爆破成形空间达标率超 85%,爆堆块度分布合理,安息角约 40°,验证了 RHT 本构模型参数体系与损伤阈值选取的可靠性。

参考文献 (References):

[1] 郭东明,李旭鹏,王汉军,等. 益新煤矿中心大空孔掏槽爆破现场试验研究[J]. 中国矿业, 2016,25(4):82-86.
GUO Dongming, LI Xupeng, WANG Hanjun, et al. Field test on center big empty hole in cut blasting in Yixin Coal Mine[J]. China Mining Industry, 2016,25(4):82-86.

[2] 魏可心,徐振洋,王雪松,等. 填塞长度对岩体爆破损伤效果的影响研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(3):16-21.
WEI Kexin, XU Zhenyang, WANG Xuesong, et al. Influence of stemming length on damage effect of rock blasting[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(3):16-21.

[3] 张袁娟,王凤凰,王幸荣. 预裂缝宽度对爆破效果影响研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(2):31-33.
ZHANG Yuanjuan, WANG Fenghuang, WANG Xingrong. Influence of pre-split fracture width on blasting effect[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(2):31-33.

[4] 何松林,杨仁树,丁晨曦,等. 金属矿山硬岩巷道分阶段掏槽爆破数值模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2024,52(增刊1):37-46.
HE Songlin, YANG Renshu, DING Chenxi, et al. Numerical simulation of phased cut blasting in hard rock roadway of metal mine[J]. Coal Science and Technology, 2024,52(S1):37-46.

[5] 蒋克文,王海亮,郭建,等. 大空孔直眼掏槽有效应力分布规律模拟研究[J]. 煤炭技术, 2023,42(7):30-34.
JIANG Kewen, WANG Hailiang, GUO Jian, et al. Simulation study on effective stress distribution law of large empty hole straight cut[J]. Coal Technology, 2023,42(7):30-34.

[6] 费鸿禄,邓政,蒋安俊,等. 硬岩巷道深孔掏槽数值模拟与试验研究[J]. 爆破, 2019,36(1):29-37.
FEI Honglu, DENG Zheng, JIANG Anjun, et al. Numerical simulation and experimental study on deep hole cutting in hard rock roadway[J]. Blasting, 2019,36(1):29-37.

[7] 钱至桥,赵明生,池恩安,等. 复式楔形掏槽在大断面隧道掘进中的应用研究[J]. 爆破, 2024,41(2):86-95.
QIAN Zhiqiao, ZHAO Mingsheng, CHI En'an, et al. Application of double wedge cutting in large cross-section tunnel excavation[J]. Blasting, 2024,41(2):86-95.

[8] 李洪超. 岩石 RHT 模型理论及主要参数确定方法研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2017.
LI Hongchao. Rock RHT model theory and determination method of main parameters[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2017.

[9] 李洪超,陈勇,刘殿书,等. 岩石 RHT 模型主要参数敏感性及其确定方法研究[J]. 北京理工大学学报, 2018,38(8):779-785.
LI Hongchao, CHEN Yong, LIU Dianshu, et al. Study on the sensitivity and determination method of main parameters of rock RHT model[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2018,38(8):779-785.

(下转第 59 页)

- proved unascertained measure theory[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(4):39-43.
- [2] 张忠辉,安龙,吴大伟,等. 焦家金矿巷道围岩松动圈测试与破碎岩体支护技术[J]. 金属矿山, 2019(12):56-61.
ZHANG Zhonghui, AN Long, WU Dawei, et al. Field detection of roadway surrounding rock loose zone and support technology of broken rock mass in Jiaojia Gold Mine[J]. Metal Mine, 2019(12):56-61.
- [3] 汪学清,吴帅军,唐红平,等. 深部巷道钻孔卸压对巷道稳定性的影响及钻孔参数确定[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):1-5.
WANG Xueqing, WU Shuaijun, TANG Hongping, et al. Impact of pressure-relief borehole on stability of deep roadway and determination of drillings parameters[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(3):1-5.
- [4] 宋维康,郝帅龙. 深部开采软岩巷道围岩支护技术研究与应用[J]. 煤矿现代化, 2018(4):82-84.
SONG Weikang, HAO Xuelong. Research and application of surrounding rock support technology for soft rock roadway in deep mining[J]. Coal Mine Modernization, 2018(4):82-84.
- [5] 赵志强,马念杰,刘洪涛,等. 巷道蝶形破坏理论及其应用前景[J]. 中国矿业大学学报, 2018,47(5):969-978.
ZHAO Zhiqiang, MA Nianjie, LIU Hongtao, et al. A butterfly failure theory of rock mass around roadway and its application prospect[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018,47(5):969-978.
- [6] 谢学斌,谢和荣,田昕雨,等. 开挖扰动下矿柱损伤破裂失稳细观机制研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(2):30-36.
XIE Xuebin, XIE Herong, TIAN Tingyu, et al. Meso-mechanism of damage and failure of pillars by excavation disturbance[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019,39(2):30-36.
- [7] 曹平,张科,万琳辉,等. 金川矿山深部采掘条件下岩石力学研究与实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2012,31(7):1334-1341.
CAO Ping, ZHANG Ke, WAN Linhui, et al. Study and practice of rock mechanics in Jinchuan mine under deep exploitation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012,31(7):1334-1341.
- [8] 侯公羽,梁金平,李小瑞. 常规条件下巷道支护设计的原理与方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022,41(4):691-711.
HOU Gongyu, LIANG Jinping, LI Xiaorui. Research on principles and methods of roadway support design under conventional conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022,41(4):691-711.
- [9] 何富连,张广超. 深部破碎软岩巷道围岩稳定性分析及控制[J]. 岩土力学, 2015,36(5):1397-1406.
HE Fulian, ZHANG Guangchao. Analysis and control of stability of the fractured soft rock surrounding a deep roadway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015,36(5):1397-1406.
- [10] 李学彬,杨仁树,高延法,等. 杨庄矿软岩巷道锚杆与钢管混凝土支架联合支护技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015,32(2):285-290.
LI Xuebin, YANG Renshu, GAO Yanfa, et al. Study on combined support technology of bolt-mesh-shotcrete and concrete filled steel tubular supports for soft rock roadway in Yangzhuang mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015,32(2):285-290.
- [11] 周军强,凌涛,龙明华,等. 泥-砂岩混合地层隧道施工围岩稳定性数值模拟分析[J]. 矿冶工程, 2023,43(1):35-39.
ZHOU Junqiang, LING Tao, LONG Minghua, et al. Numerical simulation of surrounding rock stability during construction of tunnel with mud-containing sandstone stratum[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(1):35-39.
- [12] 马念杰,郭晓菲,赵志强,等. 均质圆形巷道蝶形冲击地压发生机理及其判定准则[J]. 煤炭学报, 2016,41(11):2679-2688.
MA Nianjie, GUO Xiaofei, ZHAO Zhiqiang, et al. Occurrence mechanisms and judging criterion on circular tunnel butterfly rock burst in homogeneous medium[J]. Journal of China Coal Society, 2016,41(11):2679-2688.
- [13] 马念杰,赵希栋,赵志强,等. 掘进巷道蝶形煤与瓦斯突出机理猜想[J]. 矿业科学学报, 2017,2(2):137-149.
MA Nianjie, ZHAO Xidong, ZHAO Zhiqiang, et al. Conjecture about mechanism of butterfly-shape coal and gas outburst in excavation roadway[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2017,2(2):137-149.
- 引用本文:王胜开,刘家明,朱志根,等. 超深巷道围岩应力变化规律及支护技术[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):54-59.
WANG Shengkai, LIU Jiaming, ZHU Zhigen, et al. Stress variation law and support technology for surrounding rock in ultra-deep roadways[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):54-59.

(上接第53页)

- [10] 谭铨,姜维,姚团. 切割拉槽中深孔孔内分段爆破数值模拟[J]. 工程爆破, 2023,29(6):52-60.
TAN Cheng, JIANG Wei, YAO Nan. Numerical simulation of segmented blasting in deep hole of cutting groove[J]. Engineering Blasting, 2023,29(6):52-60.
- [11] 刘智权. 大间距无底柱分段崩落法回采爆破参数的研究[D]. 武汉:武汉科技大学, 2005.
LIU Zhiquan. Study on blasting parameters of large spacing sublevel caving method without sill pillar[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2005.
- [12] 林杰,刘少光,李广斌,等. 基于灰色关联理论深孔切割槽爆破块度影响因素分析及参数优化[J]. 矿冶工程, 2023,43(5):6-10.
LIN Jie, LIU Shaoguang, LI Guangbin, et al. Influencing factors analysis and parameter optimization for rock fragmentation by deep-hole cut blasting based on grey correlation analysis[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(5):6-10.
- [13] 王卫华,刘洋,张理维,等. 基于RHT模型双孔同时爆破均质岩体损伤的数值模拟[J]. 黄金科学技术, 2022,30(3):414-426.
WANG Weihua, LIU Yang, ZHANG Liwei, et al. Numerical simulation of homogeneous rock mass damage by double-hole simultaneous blasting based on RHT model[J]. Gold Science and Technology, 2022,30(3):414-426.
- 引用本文:陈帮洪,陈星明,武尚荣,等. 基于LS-DYNA的楔形切割拉槽爆破数值模拟研究及应用[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):47-53.
CHEN Banghong, CHEN Xingming, WU Shangrong, et al. Numerical simulation of blasting with wedge cut based on LS-DYNA software and its application[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):47-53.