

阶段采场“品”字形无井切槽爆破机理研究

安龙¹, 韩琳¹, 王智¹, 孙星^{1,2}

(1. 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;

2. 山东黄金集团 西和县中宝矿业有限公司, 甘肃 陇南 742199)

摘要: 针对阶段采场切割立槽爆破施工难度大、成本高的问题,以山东某矿山为工程背景,开展阶段采场“品”字形无井切槽爆破机理研究。采用LS-DYNA数值模拟方法,分析“品”字形无井切槽爆破与垂直深孔落矿阶段矿房法无井切槽爆破的差异性,揭示了“品”字形无井切槽爆破的多自由面效应。数值计算结果表明,“品”字形无井切槽爆破方法,在侧向自由面与底部自由面组合作用下,柱状炮孔在长度方向上爆破应力分布更加均匀,增加了爆破在自由面处的破岩能力,降低了爆破对未爆区的损伤,提高了爆破能量的利用率。综合比较,“品”字形无井切槽爆破方法超挖率降低了23.2%,有效破岩应力增加12 MPa,未爆区围岩振动值降低了16.7%,大幅改善了阶段采场的切槽爆破效果。

关键词: 阶段采场;切槽爆破;自由面;等效应力;爆破振动

中图分类号: TD 235 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)11-1612-10

Research on Blasting Mechanism of “Pin”-Shaped Slotting Without Raise in Sublevel Stope

AN Long¹, HAN Lin¹, WANG Zhi¹, SUN Xing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China.; 2. Shandong Gold Group Xihe County Zhongbao Mining Co., Ltd., Shandong Gold Group, Longnan 742199, China. Corresponding author: AN Long, E-mail: 965961946@qq.com)

Abstract: To response to high difficulty and cost in the blasting operation for cutting vertical slots in sublevel stope, a mine in Shandong as the engineering background is used to conduct research on the blasting mechanism of the “pin”-shaped slotting without raise in sublevel stope. The LS-DYNA numerical simulation method is employed to analyze the differences between the “pin”-shaped without raise cutting blasting and the VCR method cutting blasting. The study reveals the multi-free-surface effect of the “pin”-shaped blasting for slot cutting. The numerical results show that under the combined action of lateral and bottom free surfaces, the blasting stress distribution of the cylindrical blastholes in the “pin”-shaped without raise cutting blasting method is more uniform along their length, enhancing the rock-breaking capability at the free surfaces, reducing damage to the unexploded area, and improving the utilization of blasting energy. Through comprehensive comparison, the overbreak rate of the “pin”-shaped without raise cutting blasting method is reduced by 23.2%, the effective rock-breaking stress is increased by 12 MPa, and the vibration values of the surrounding rock in the unexploded area are reduced by 16.7%, significantly improving the blasting effect of slot cutting in sublevel stope.

Key words: sublevel stope; slot blasting; free face; equivalent stress; blasting vibration

倾斜/急倾斜中厚以上矿体在我国金属矿山中储量丰富,为提高开采该类矿体的生产能力和效率,降低矿石生产成本,对于矿岩相对稳固

的矿体,其开采方法趋向结构参数大型化和回采爆破集中化。阶段空场嗣后充填法作为典型的大结构参数开采方法被广泛应用于该类矿体。

阶段空场嗣后充填法的应用虽然能够显著提高采场的生产能力和效率,降低矿石生产成本,但是也带来了深孔爆破控制难题.影响采场深孔爆破效果的关键因素之一是要保障回采爆破具有充分的自由面和补偿空间.阶段空场嗣后充填法通过切割立槽的方式为深孔回采爆破提供自由面和补偿空间.由于阶段采场切割立槽高度大、宽度窄,深孔拉槽爆破难度大,切割立槽爆破质量差,因此,如何保障切割立槽的施工质量是当前阶段空场嗣后充填法开采亟待解决的关键技术之一.

当前阶段空场嗣后充填法切割立槽的施工方法主要有两大类:第一类为有井切割拉槽方法,该方法首先切割天井和横巷,在切割天井一侧或两侧施工平行深孔,以切割天井为自由面进行深孔拉槽爆破.由于采场高度大,采用该方法爆破拉槽时存在切割天井施工成本高、难度大、深孔拉槽爆破效果差等难题.采用爆破法进行切割天井施工时易出现“沙漏型”不利形态或天井倾斜等问题,影响后续的深孔拉槽爆破效果;另外,由于阶段采场切割立槽的高度大、宽度窄,深孔拉槽爆破时会受到极大的围岩夹制作用,严重影响阶段采场切割立槽的形态,甚至造成切割立槽施工失败,无法为后续的回采爆破提供充分的自由面和爆破补偿空间.第二类为无井切割拉槽方法,该方法以底部切割平巷为自由面,基于球状药包爆破的利文斯顿爆破漏斗理论,采用自下而上分层爆破的方法进行切割拉槽,该方法不需要施工切割天井,避免了切割天井施工难度大、成本高、安全性差等问题,降低了采切工程量,因此无井切割拉槽方法近年来被广泛采用.但是该方法在爆破时只有一个自由面,存在一次爆破分层小,爆破效果控制难度大等问题^[1-3].

针对阶段空场嗣后充填法爆破拉槽存在的问题,国内学者开展了大量的研究.针对切割天井施工难度大、施工质量差等问题,研发了切割井钻机,可实现切割天井的机械施工.针对有井切割拉槽方法的深孔爆破控制问题,任玉凤等^[4]通过改变装药结构以及调整爆破顺序,减小了爆破损伤范围,改善了爆破质量.针对阶段切割立槽爆破存在的夹制作用难题,李启月等^[5]采用不等高分层、设置中间分层等多种技术,来减小切割拉槽爆破的夹制作用,实现一次爆破成槽深度达到 32 m.史秀志等^[6-7]采用高精度数码雷管短微差爆破的方式,降低爆破夹制作用和爆破振动

效应.罗根平等^[8]从爆破参数设计、设备选型等方面进行优化和改进,优化炮孔布置方式以及孔网参数,进而降低深孔爆破拉槽的夹制作用.针对传统无井切割拉槽方法爆破分层高度低、爆破超欠挖严重、爆破边界不平整、对相邻区域围岩损伤大等问题,李延春等^[9]通过优化封堵长度,提高炮孔炸药能量利用率的方法,改善了爆破效果.李金跃等^[10]综合考虑孔网参数、起爆方式、分层高度等多个因素对爆破效果的影响,优化参数,改善了切割拉槽爆破效果.Liu 等^[11-12]通过深孔预裂爆破的方法,降低了无井切割拉槽方法爆破产生的超欠挖尺寸.综上所述,当前对无井切割拉槽方法的研究主要集中于爆破微差时间精准控制、爆破孔网参数优化、炮孔堵塞技术以及基于预裂孔的爆破边界控制技术等方面,以上研究成果在一定程度上推进了无井切割拉槽方法的应用,但是该方法在爆破效果控制、分层爆破高度等方面仍存在诸多难题,且关于切槽爆破的自由面效应尚待深入研究.

为此,本文以山东某矿山低品位倾斜厚大矿体阶段空场嗣后充填法开采为工程背景,开展阶段采场“品”字形无井切槽爆破机理研究,分析“品”字形无井切槽爆破与 VCR 法无井切槽爆破的差异性,揭示“品”字形无井切槽爆破的多自由面效应,并开展现场工业试验,验证“品”字形无井切槽爆破效果.

1 “品”字形无井切割拉槽方法

1.1 VCR 法无井切割拉槽方法

VCR 法无井切割拉槽方法主要是利用球状药包爆破的利文斯顿爆破漏斗理论,以底部切割横巷为自由面,自下而上分层爆破成槽的一种切割拉槽方法.

VCR 法无井切割拉槽方法的爆破空腔由每一分层内的多个爆破漏斗相互叠加形成,该方法在进行切槽爆破时存在爆破边界不平整以及爆破夹制作用大等问题.爆破边界不平整易产生爆破堵孔和装药困难,同时引起爆破边界的超挖,影响回采爆破.单自由面切槽爆破夹制作用大,易出现“爆不开”切槽失败,以及“爆太开”超挖严重等问题.典型无井切割拉槽方法如图 1 所示.

1.2 “品”字形梯段式无井切割拉槽方法

针对传统无井切割拉槽方法存在的问题,本文采用“品”字形梯段式无井切割拉槽方法,该方

法通过改变无井切割拉槽爆破的顺序,为主要切槽爆破创造侧向和底部两个自由面.具体的工艺过程如下:首先爆破切割槽中央位置的炮孔,通过先爆孔再切割槽中央位置形成一定高度的先行天井,创造侧向爆破自由面,通过侧向自由面与底部自由面的组合进行分层内其余炮孔的爆破.该方法的爆破拉槽顺序呈上向梯段式布置,爆破空间呈“品”字形,待爆破接近阶段采场切割立槽的顶部凿岩巷道时,进行一次破顶爆破.“品”字形梯段式无井切割拉槽方法如图2所示.

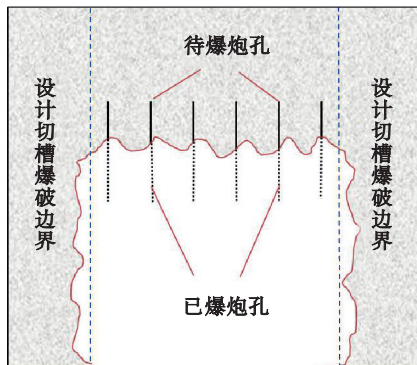


图1 无井切割拉槽方法

Fig. 1 Method of cutting and slotting without raise

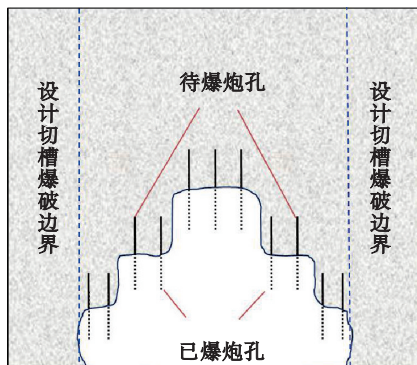


图2 “品”字形无井切割拉槽方法

Fig. 2 Cutting and slotting method of “pin” shaped without raise

“品”字形梯段式无井切割拉槽方法在未增加切割天井工程的前提下,既利用了底部的自由面和补偿空间,又利用了“品”字形上向梯段爆破后形成的侧向自由面,即利用了多自由面对爆破的诱导作用.这种切槽爆破方法从应用效果上提高了破岩效率、减少爆破的后冲效应、降低爆破对未爆孔的影响、提高一次分层爆破的高度、减少爆破的超欠挖量、提升切割槽的施工质量,但是对于“品”字形无井切割拉槽爆破的多自由面作用机理尚不清晰.

1.3 “品”字形切槽爆破孔网参数及回采顺序设计

1) 岩石力学参数. 经过现场岩石力学调查,该矿山低品位矿体区域矿岩石平均单轴抗压强度为 126.67 MPa,单轴抗拉强度为 4.25 MPa,弹性模量为 60.33 GPa,泊松比为 0.21,内聚力为 12.3 MPa,内摩擦角为 56.30°.

2) 炮孔直径. 本设计采用深孔凿岩,考虑炮孔直径与炮孔偏斜以及爆破孔网参数之间的关系,综合国内外矿山施工经验^[13],本文设计用于阶段采场切槽爆破的深孔直径为 100 mm.

3) 炸药单耗. 考虑切槽爆破时围岩的夹制作用,应适当增加爆破的炸药单耗,统计中深孔、深孔回采爆破的炸药单耗为 0.3~0.5 kg/t,切槽爆破的炸药单耗为 0.8~1.3 kg/t,因此本文设计“品”字形无井切割拉槽方法的爆破炸药单耗为 1.0 kg/t.

4) 炮孔间排距. 根据爆破产生的破裂区范围计算炮孔的间排距. 统计国内外矿山爆破数据,取炮孔粉碎区半径为炮孔直径的 2.5 倍,炮孔的间排距为爆破破裂区半径的 2 倍,爆破破裂区半径的计算公式为

$$R_1 = \left(\frac{\sigma_{cd}}{\sigma_{td}} \right)^{\frac{1-D_0}{\beta}} R_c. \quad (1)$$

式中: R_c 为粉碎区半径,m; D_0 为初始损伤因子,一般取 0.125~0.150; β 为应力波传播衰减指数,一般取 1.5~2.0; σ_{cd} 为动态抗压强度,取 $\sigma_{cd}=3\sigma_c$, σ_c 为单轴抗压强度; σ_{td} 为动态抗拉强度,取 $\sigma_{td}=6\sigma_t$, σ_t 为抗压强度.

根据式(1)计算可得,本文设计炮孔爆破破裂区半径为 0.788 m,炮孔的间排距为 1.58 m.为增大爆破增量,本文设计炮孔的间排距为 1.5 m.

5) 填塞长度与装药长度. 设计分层爆破高度为 3 m,装药高度为 2 m,填塞高度为 1.0 m.

6) 微差时间. 本文采用电子数码雷管控制微差时间,采用小微差爆破的方式,微差时间为 25 ms.

根据以上切槽爆破参数进行“品”字形梯段式无井切割拉槽设计.将完整的切割拉槽过程分为 3 个阶段:中央先爆孔爆破阶段、品字形梯段爆破阶段和破顶爆破阶段.

本文设计切割立槽的长度为 13 m,宽度为 3.8 m,共设计了 9 排炮孔,每排布置 3 个炮孔.将 P4 排、P5 排和 P6 排炮孔作为先爆孔,形成每一分层的先行天井,为分层其他排炮孔爆破提供自由

面和补偿空间,设计如图3所示.

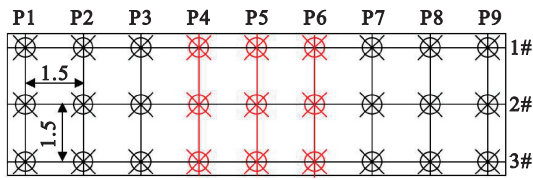


图3 “品”字形爆破拉槽方法炮孔布置

Fig. 3 Layout of the holes for the “pin”-shaped blasting slotting method

根据爆破设计,本次拉槽爆破可分为10次爆破循环.第一次爆破形成了中央先行天井,第2~9次爆破为品字形梯段爆破,第10次爆破为最后的破顶爆破.

“品”字形梯段爆破切槽方案具体爆破顺序如图4所示.

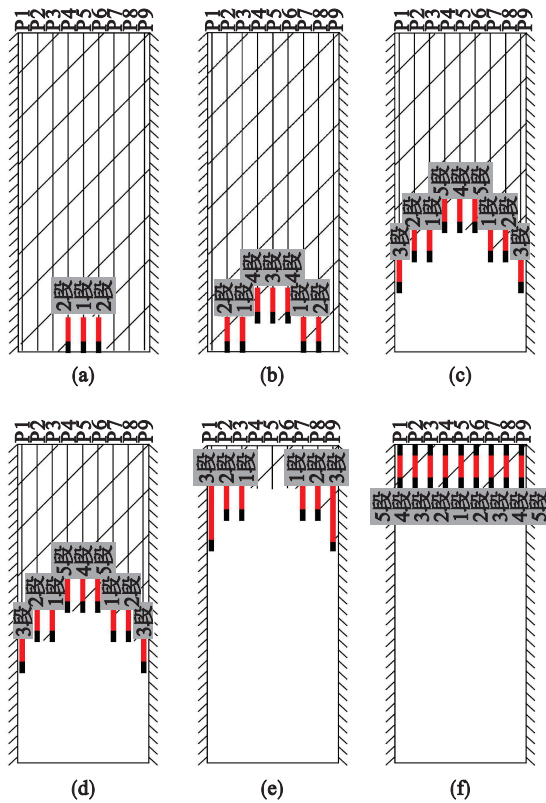


图4 “品”字形梯段切槽爆破顺序

Fig. 4 Blasting sequence of “pin”-shaped blasting slotting

- (a) — 第1次爆破; (b) — 第2次爆破; (c) — 第4次爆破;
- (d) — 第5次爆破; (e) — 第9次爆破; (f) — 第10次爆破.

2 阶段采场无井切槽爆破数值模拟

2.1 数值模拟方案

为对比无井切割拉槽方法与“品”字形梯段

式无井切割拉槽方法在爆破破岩机理上与爆破效果上的不同,本文采用LS-DYNA爆破数值模拟方法进行2种切槽爆破方案的计算分析.

根据上文“品”字形梯段式无井切割拉槽方法的爆破孔网参数设计结果,建立相应的数值模型,炮孔分布如图4所示,爆破每层高度为3 m,装药长度2 m,堵塞长度1 m,起爆点设置在孔底,依据上文设计的爆破顺序,进行微差起爆.

建立无井切割拉槽方法数值模型,孔网参数与“品”字形梯段式无井切割拉槽方法一致,孔径为100 mm,间排距为1.5 m,爆破分层高度为3 m,各段爆破之间的微差时间为25 ms,无井切割拉槽方法分层内的起爆顺序从中央炮孔到两侧依次微差起爆,完成拉槽共分10次爆破循环,如图5所示.

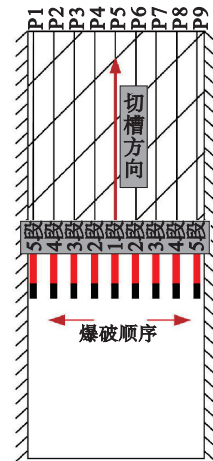


图5 无井切割拉槽方法爆破顺序

Fig. 5 Blasting sequence for method of cutting and slotting without raise

2.2 数值模型建立

依据LS-DYNA软件中的对称设置,本文所建立的数值模型为真实模型的1/4,模型如图6所示,模型高为31.5 m、长为9.5 m、宽为4.85 m,采用流固耦合算法模拟炸药爆炸作用.底部自由面设置自由边界,模型对称面设置对称边界,其余边界面设置为无反射边界.

2.3 本构关系及材料参数

1) 岩石材料参数. 岩石爆破过程中炸药瞬时爆炸产生巨大能量,使得岩石处于大应变、高应变率和高压力的状态, HJC (Holmquist-Johnson-Cook)模型考虑了材料损伤、应变率效应以及静水压力对于屈服应力的影响,能较好地描述岩石在高速撞击及爆破作用下所产生的损伤、破碎及断裂或层裂等行为,因此本

文数值计算中岩体材料采用HJC模型.根据前文给出的该矿段岩石物理力学参数并结合相关文献^[12]确定了数值模拟中HJC模型的参数,如表1所示.

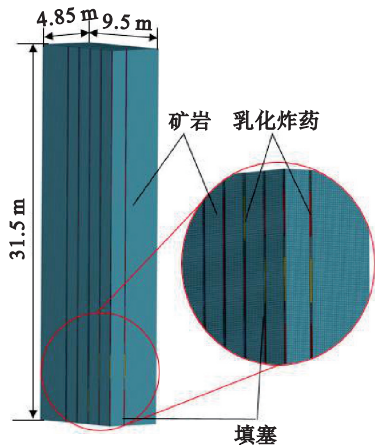


图6 LS-DYNA数值模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the LS-DYNA numerical model

2) 炸药材料参数.现场爆破采用2#岩石乳化炸药,在LS-DYNA程序中采用**MAT_HIGH_*

EXPLOSIVE_BURN 高性能炸药材料模型和JWL (Jones-Wilkins-Lee) 状态方程,描述爆炸过程中爆炸产物的体积、压力以及能量特性,其表达式如式(2)所示,根据相关文献^[12]确定了2#岩石乳化炸药的参数如表2所示.

$$p = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V}. \quad (2)$$

式中: p 为爆轰压力; V 为相对体积; E_0 为初始比内能; A, B, R_1, R_2, ω 为材料常数.

3) 空气材料参数.数值模型中的空气介质采用空气材料模型**MAT_NULL*,以线性多项式**EOS_LINER_POLYNOMIAL*表示其状态方程:

$$p = C_0 + C_1 V + C_2 V^2 + C_3 V^3 + (C_4 V + C_5 V^2 + C_6 V^3) E_0. \quad (3)$$

式中, $C_0 \sim C_6$ 为方程相关参数.该空气材料模型的具体参数见表3.

4) 侵蚀算法.本文通过定义损伤模型来分析爆破产生的超欠挖量值.由于在切槽爆破中,岩石的破坏以拉伸破坏为主,因此,本文通过定义关键字**MAT_ADD_EROSION*来定义矿体受到拉伸应力的失效条件,以岩石的单轴抗拉强度作为其损伤阈值.

表1 HJC模型参数

Table 1 Parameters of HJC model

$\rho_0 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	G / MPa	σ_c / MPa	A	B	C	N	T / MPa	P_c	μ_c	p_f / MPa	μ_1	K_1 / GPa	K_2 / GPa	K_3 / GPa
2 700	24 929.7	126.67	0.55	1.77	0.009 7	0.77	4.25	17	0.002 53	2 500	0.38	3.1	6	8.4

表2 炸药材料参数

Table 2 Parameters of explosive material

$\rho_0 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	P_{ej} / GPa	A / GPa	B / GPa	R_1	R_2	$E_0 / (\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3})$	V_0	ω
1 150	5 122	9.53	276.2	8.44	5.199	2.099	3 870	1.0	0.5

表3 空气材料参数

Table 3 Parameters of air

$\rho_a / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	V_0
1.29	0	0	0	0	0.4	0.4	0	1.0

2.4 爆破结果分析

图7为无井切割拉槽方法与“品”字形无井切割拉槽方法的数值计算出的爆破破坏范围.其中黑色矩形为设计爆破边界,设计边界到最外侧炮孔的距离 $\Delta d=0.5 \text{ m}$,灰色部分为爆破后产生的空腔范围,其超出黑色矩形的灰色失效区即为爆破超挖部分.

由图7可以看出,无井切割拉槽方法与“品”字形阶梯爆破切割拉槽方法都存在爆破超挖,但“品”字形爆破所产生的爆破边界更为平整,且整体上超挖深度小于无井切割拉槽方法.

对两方案每次爆破超挖深度进行统计,结果

如图8所示,无井切割拉槽方法随爆破次数的增加,超挖深度呈现稳定的波动状态;而“品”字形阶梯爆破切槽随爆破次数的增加,超挖深度呈现先下降后稳定波动,最后上升的趋势.这是由于“品”字形阶梯爆破在第一次爆破前还未形成侧向自由面,与无井切割拉槽方法类似,因此2种方法在第一次爆破时超挖的深度相差不大,而随着侧向自由面形成,“品”字形阶梯爆破的超挖深度有明显下降.无井切割拉槽方法单次爆破超挖深度平均为 0.616 m ,“品”字形阶梯爆破切槽方案超挖深度稳定波动段平均超挖深度为 0.5 m ,对比两曲线,使用“品”字形阶梯爆破切槽方法比无

井切割拉槽方法平均超挖深度降低了 23.2%, 计算总超挖体积减小了 124.2 m³.

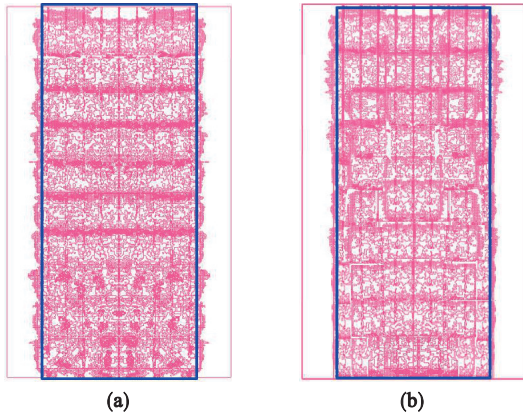


图 7 数值模拟失效区域

Fig. 7 Failure zone of numerical simulation

(a) 无井切槽失效范围; (b) “品”字形切槽失效范围.

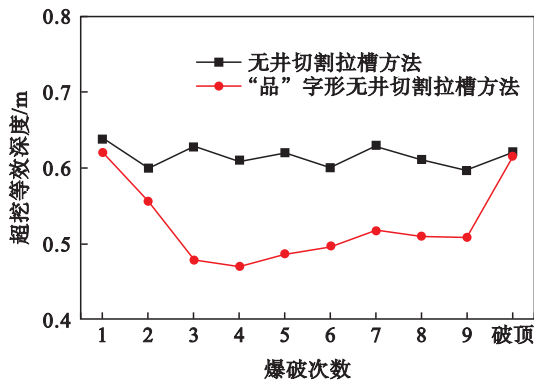


图 8 超挖等效深度

Fig. 8 Equivalent depth of over excavation

3 “品”字形无井切槽爆破破岩机制

3.1 爆破应力场分析

图 9 为无井切割拉槽方法和“品”字形阶梯爆破模拟的 Mises 等效应力云图. 由图可以看出, 采用无井切割拉槽方法时, 上部应力叠加形态很不均匀, 因此爆破后容易形成凹凸不平的爆破边界, 会对上部炮孔产生破坏, 直接影响下次的爆破装药, 导致后续所爆空腔形态与设计方案存在很大偏差; 而“品”字形爆破时, 上部应力叠加形态更为平整, 爆破后能够形成清晰而平整的爆破边界, 可以为下一次爆破提供更好的条件.

图 10 和图 11 是无井切割拉槽方法底部自由面和“品”字形阶梯爆破切割拉槽方案侧向自由面处的爆破过程应力云图.

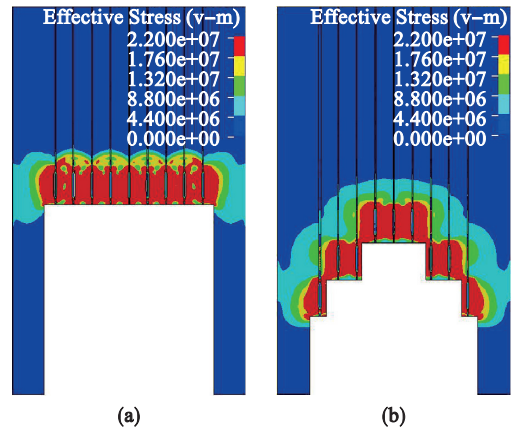


图 9 爆破应力叠加云图

Fig. 9 Superposition nephogram of blasting stress

(a) 无井切槽爆破应力云图;

(b) “品”字形阶梯爆破应力云图.

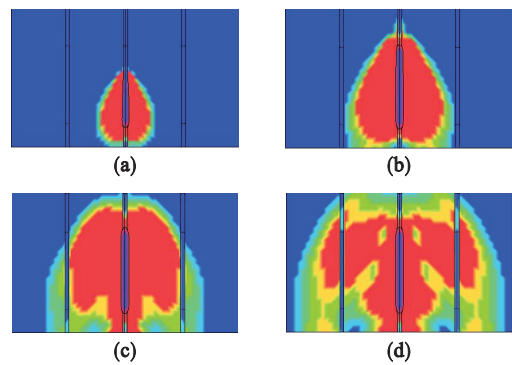


图 10 无井切割拉槽爆破过程应力云图

Fig. 10 Blasting stress nephogram of cutting and slotting without raise

(a) $t=0.005$ ms; (b) $t=0.01$ ms;

(c) $t=0.015$ ms; (d) $t=0.02$ ms.

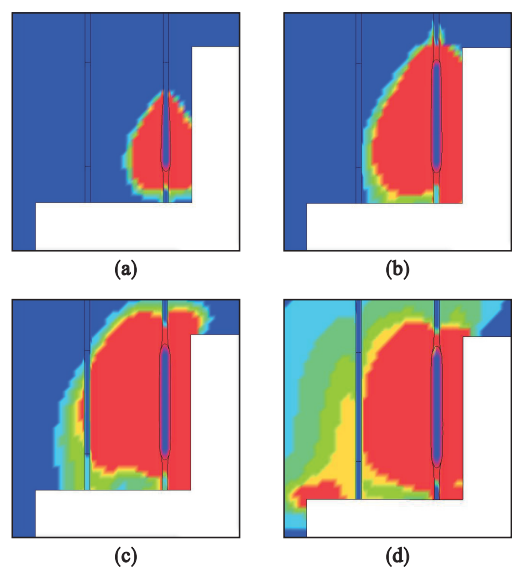


图 11 “品”字形爆破过程应力云图

Fig. 11 Blasting stress nephogram of “pin” shaped

(a) $t=0.005$ ms; (b) $t=0.01$ ms;

(c) $t=0.015$ ms; (d) $t=0.02$ ms.

由图 10 可以看出,无井切割拉槽方法由于只有底部自由面,炸药开始爆炸后,应力波迅速向下传播,当应力波传播至底部自由面时,应力波发生反射,而在围岩夹制作用下,应力波经过反射后向上部影响的范围有限,因此使得上部产生凹凸不平的破坏面。

由图 11 可以看出,“品”字形爆破切槽当炸药起爆后产生的应力波同时向下和侧面传播,且由于侧面的抵抗小,因此应力波向侧向自由面的传播速度更快,当应力波到达侧向自由面时产生拉应力,在侧向自由面处产生破坏,而且“品”字形爆破应力波在炮孔长度方向上应力分布更均匀,对相邻未爆炮孔的影响明显小于无井切割拉槽方法。

对比 2 种方法自由面处应力峰值及振动速度峰值,在无井切割拉槽方法的底部自由面与“品”字形爆破切割拉槽方法的底部自由面和侧向自由面上设置监测点,底部自由面上的监测点设置在相邻两炮孔中间,侧向自由面上的监测点设置在侧向自由面的中心位置.监测点具体布置如图 12 所示。

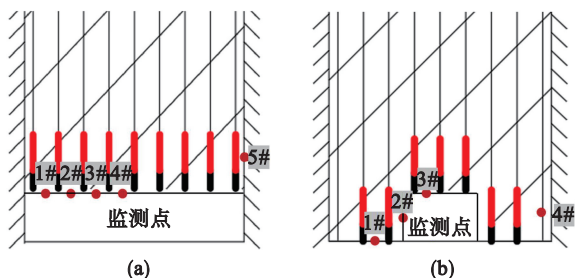


图 12 监测点布置

Fig. 12 Layout of the supervision points

(a)一无井切槽监测点; (b)一“品”字形监测点。

图 13 是 2 种方法底部自由面监测点等效应力峰值的对比.由图 13 可以看出,无井切割拉槽方法底部自由面监测点上的应力峰值随爆破次数增加基本保持稳定,“品”字形阶梯爆破切割拉槽方案底部自由面上的应力数值随爆破次数的增加呈现稳定波动的状态,二者在曲线形态上差别不大,但从数值上看存在很大的差异,无井切割拉槽方法底部自由面上的等效应力峰值平均为 52 MPa,而“品”字形爆破底部自由面上的应力峰值平均约为 15 MPa,无井切割拉槽方法底部自由面上的等效应力峰值约为“品”字形爆破切槽方案底部自由面上的应力峰值的 3~5 倍。

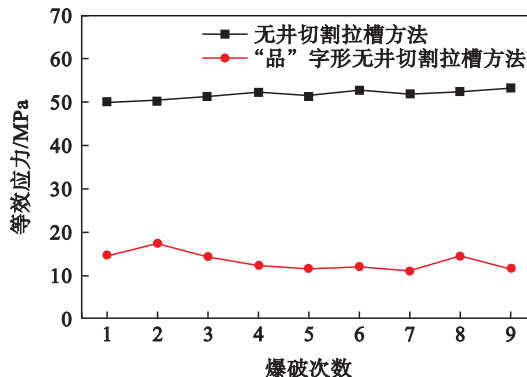


图 13 底部自由面监测点等效应力峰值对比

Fig. 13 Comparison of equivalent stress peaks on bottom free surface

图 14 是 2 种方法自由面处等效应力峰值的对比分析.由图 14 可以看出,“品”字形爆破切槽方法在自由面上等效应力峰值随爆破次数的增加先减小而后趋于稳定,并且“品”字形爆破切槽方法自由面上的等效应力峰值产生在侧向自由面上;“品”字形爆破切槽方案侧向自由面上的应力峰值远大于无井切割拉槽方法底部自由面上的有效应力峰值,2 种方法在自由面处的等效应力峰值相差最大值达到 30 MPa,“品”字形爆破切槽侧向自由面应力峰值平均为 65 MPa,而无井切割拉槽方法底部自由面上的应力峰值平均为 52 MPa,侧向自由面上平均应力峰值相较于底部自由面上平均应力峰值提高了 25%，“品”字形爆破切槽方法在侧向自由面处产生更强的反射拉伸作用,诱导向侧向自由面爆破。

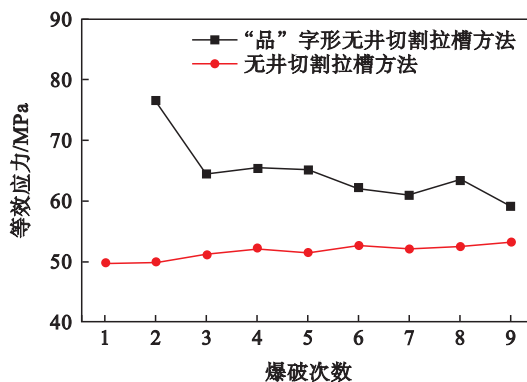


图 14 自由面等效应力峰值对比

Fig. 14 Comparison of stress peaks on free surface

图 15 是 2 种方法在设计爆破边界位置上等效应力峰值的对比.从整体上看,无井切割拉槽方法在设计爆破边界上的等效应力峰值随爆破次数增加而增大,“品”字形无井切割拉槽方法在设计爆破边界上的等效应力峰值随爆破次数

增加先增大而后趋于稳定波动状态,二者的曲线形态差别不大;从数值上看,无井切割拉槽方法和“品”字形无井切割拉槽方法在设计爆破边界上的应力峰值变化幅度都不是很大,但是随着爆破次数的增加,两曲线之间的差值逐渐增大。

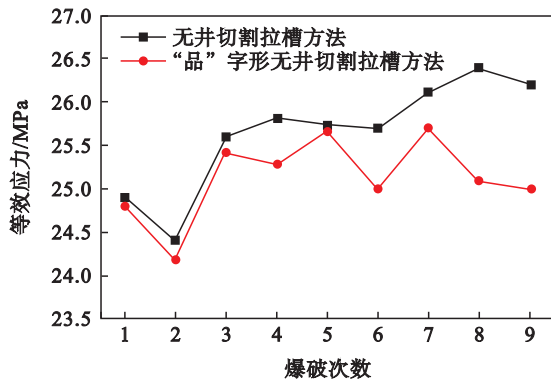


图 15 设计爆破边界应力峰值对比

Fig. 15 Comparison of peak stress of expected blasting boundary

3.2 爆破振动传播

图 16 和图 17 是无井切割拉槽方法底部自由面和“品”字形无井切割拉槽方法侧向自由面处的质点速度场,用以分析爆破过程中 2 种方法振动速度传播规律。

可以看出无井切割拉槽方法炸药爆破之后,炸药附近质点速度在爆破后向四周呈球状传播,此时各质点的速度基本一致,随着质点速度向底部自由面传播,而沿炮孔方向向上传播的速度基本不受影响,可以看出底部单自由面对爆破破岩的诱导作用有限。“品”字形爆破切槽方案炸药爆破后炸药附近质点速度向四周呈椭球状传播,这是因为由于侧向自由面的诱导作用,沿炮孔方向传播速度很快,相较于单自由面爆破,侧向自由面及底部自由面同时发挥作用,破岩效率更高。

为了定量地分析 2 种爆破方式在自由面处质点的振动速度传播上的区别,在无井切割拉槽方法及“品”字形阶梯爆破切割拉槽方法的底部自由面上均匀地选取 7 个监测点,并且在“品”字形阶梯爆破切割拉槽方法的侧向自由面上均匀地选取 7 个监测点,记录监测点的运动速度峰值,如图 18 所示。

对比 2 种方法在底部自由面处质点的运动速度峰值,可以看出:无井切割拉槽方法和“品”字形爆破切槽方法底部自由面上的质点振动速度都呈现均匀分布的特征,无井切割拉槽方法底部

自由面上的质点振动速度平均值为 4.3 m/s,“品”字形爆破切槽方法底部自由面上的质点振动速度平均值为 3.5 m/s;“品”字形爆破切槽方法在侧向自由面上质点运动速度呈现先增大后减小的状态,这是由于侧向自由面的存在,运动速度在炮孔方向上传播很快,这导致在侧向自由面上速度最大的点在起爆点位置的上部;而整体上由于侧向自由面的爆破诱导作用,侧向自由面上质点的振动速度要大于底部自由面上质点的振动速度,侧向自由面上质点振动速度平均值为 5.5 m/s,这也表明侧向自由面的存在大大提升了破岩的效率。

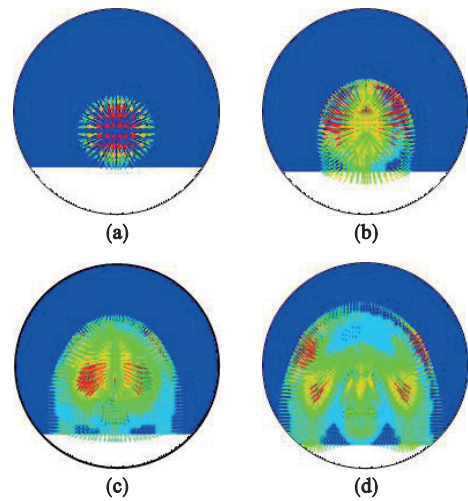


图 16 底部自由面质点速度分布

Fig. 16 Velocity distribution of particle on bottom free surface

(a)— $t=0.005$ ms; (b)— $t=0.01$ ms;
(c)— $t=0.015$ ms; (d)— $t=0.02$ ms.

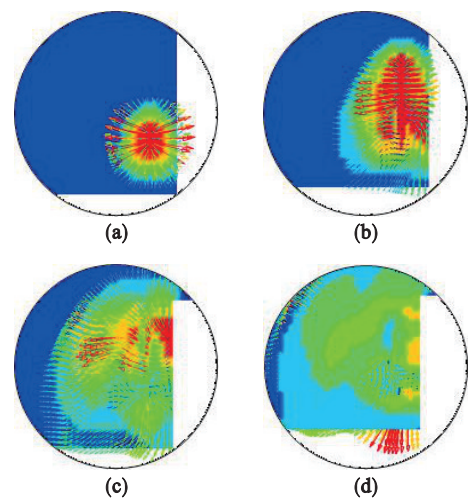


图 17 侧向自由面质点速度分布

Fig. 17 Velocity distribution of particle on lateral free surface

(a)— $t=0.005$ ms; (b)— $t=0.01$ ms;
(c)— $t=0.015$ ms; (d)— $t=0.02$ ms.

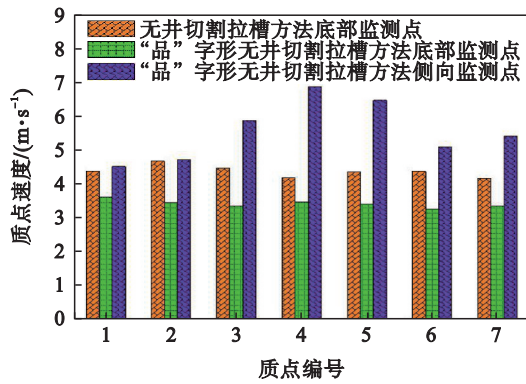


图 18 自由面监测点振动速度

Fig. 18 Vibration velocity of supervision point on free surface

图 19 为 2 种方法在设计爆破边界上监测点的振动速度对比图.可以看出:2 种爆破方式在设计爆破边界处产生的爆破振动变化规律基本一致,整体上都随着爆破次数的增加稳定波动,而且振幅都很小,无井切割拉槽方法在实际爆破边界上的爆破振动速度最大为 1.0 m/s,平均为 0.9 m/s,“品”字形切槽方法爆破振动速度最大为 0.8 m/s,平均为 0.75 m/s,平均爆破振动速度降低了 16.7%;整体来看,无井切割拉槽方法比“品”字形无井切割拉槽方法在设计爆破边界处产生的爆破振动更大,这是由于“品”字形无井切割拉槽方法产生的能量更多地用于破岩,而传播到设计爆破边界上的能量减少,从而产生的爆破振动更小,因此对围岩的损伤也会更小.这与之前从应力场的角度分析得到的结果一致.

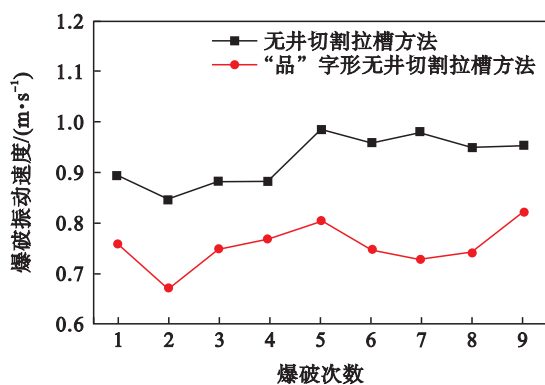


图 19 设计爆破边界爆破振动速度

Fig. 19 Blasting vibration velocity of design blasting boundary

4 现场工业试验

在该金矿-380 m 中段低品位矿体阶段开采区域进行“品”字形无井切槽爆破现场工业试验.

工业试验选定为 46#勘探线 3802#采场,按照本文所确定的“品”字形无井切槽爆破参数进行现场施工与爆破,爆破后形成的切割拉槽两侧壁面整齐,部分半壁孔清晰可见,达到了预期的爆破效果,现场爆破结果如图 20 所示.



图 20 现场切槽爆破效果

Fig. 20 Field slotting blasting effect

5 结 论

1) 采用经验方法得到了“品”字形无井拉槽方法的爆破参数:孔间和排距均为 1.5 m,装药长度为 2 m,填塞长度为 1 m,微差时间为 25 ms,炸药单耗为 1.0 kg/t.确定了每次爆破高度以及“品”字形爆破顺序.

2) 对比爆破损伤体积计算结果,相较于 VCR 法切槽爆破方法,“品”字形无井切槽爆破方法的超挖率降低了 23.2%,超挖体积减小了 124.2 m³.

3) “品”字形无井切槽爆破方法在自由面上有效应力提高了 25%,提高了爆破能量的利用率.

4) 2 种切槽爆破方法振动波传播规律的分析结果表明:“品”字形无井切槽爆破方法在自由面处围岩振动值增高了 27.4%,在未爆区围岩振动值降低了 16.7%,减小了爆破对围岩的损伤.

参考文献:

- [1] Sekisov A G, Lavrov A. Applicability of in situ leaching and divided blasting combination [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 262(1): 012062.
- [2] Persson P A, Holmberg R, Lee J. Rock blasting and explosives engineering [M]. Boca Raton: CRC Press, 2018: 263-283.
- [3] Qiao W. Application of controlled blasting technology in mountain excavation under complex conditions [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 558(2): 022045.
- [4] 任凤玉, 翟会超. VCR 法开掘采空区充填井技术研究 [J]. 有色金属(矿山部分), 2012, 64(1): 45-47, 62. (Ren Feng-yu, Zhai Hui-chao. Study on VCR method to excavate packed well of gob [J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2012, 64(1): 45-47, 62.)

(下转第 1628 页)