

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.03.015

不耦合式间隔器研制及其在某露天矿山现场应用

付强¹, 赵昌鑫¹, 张耀², 李佳乐¹, 张博洋³

(1. 金堆城钼业股份有限公司, 渭南市华州区 714102; 2. 渭南市公安局治安支队, 渭南市临渭区 714000;

3. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 武汉 430070)

摘要: 针对渭南某露天矿山炸药能量利用率低, 爆堆块度尺寸分布不合理的问题。基于间隔装药理论研制出一种专用于混装乳化炸药的不耦合式间隔器, 采用 LS-DYNA 分析软件构建数值模型, 针对性模拟连续装药、BJQ 间隔装药及新型不耦合式装药三种装药结构的爆破过程, 获取各装药结构下的爆破应力云图, 分析不同装药模式对应的应力分布特征差异, 并结合现场优化实验对模拟出的数据进行有效验证。研究结果表明: 研制出的不耦合式间隔装置很好满足了间隔装药的工程需求, 应力分布范围明显增加。现场采用不耦合式间隔装药后, 爆堆的大块率降低了 7.14%, 粉矿率降低了 10.08%, 平均块度上升了 5 cm, 改善了矿山中存在的炸药单耗高, 块度分布不均匀的问题, 降低了后续铲装运输的成本, 为类似矿山的装药结构优化提供借鉴。

关键词: 混装乳化炸药; 不耦合式间隔器; 爆堆块度; 大块率; 粉矿率

中图分类号: TD235.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2026)03-0151-09

Development of a Decoupled Spacer and its Field Application in Open-pit Mine

FU Qiang¹, ZHAO Chang-xin¹, ZHANG Yao², LI Jia-le¹, ZHANG Bo-yang³

(1. Jinduicheng Molybdenum Co., Ltd., Huazhou District, Weinan 714102, China;

2. Public Security Detachment, Weinan Public Security Bureau, Linwei District,

Weinan 714000, China; 3. School of Resources and Environmental Engineering,

Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: To address the issues of low explosive energy utilization and suboptimal fragmentation distribution at an open-pit mine in Weinan, this study developed a specialized decoupled spacer for bulk emulsion explosives based on spaced charging theory. Using LS-DYNA software, a numerical model was developed to simulate blasting processes with three distinct charging structures: continuous charging, BJQ-spaced charging, and the novel decoupled charging method. Blasting stress nephograms were generated for each charging structure, enabling comparative analysis of stress distribution characteristics across different charging modes. Field optimization experiments successfully validated the numerical simulation results for the evolution of rock stress distribution. The results demonstrate that the developed decoupled spacing device effectively meets engineering requirements for spaced charging while significantly expanding stress distribution ranges. Field implementation reduces boulder yield by 7.14% and fine ore yield by

收稿日期 (Date of reception): 2025-11-17

网络首发日期 (Published online): 2025-12-25

作者简介: 付强 (1985-), 男, 采矿工程师, 从事采矿设计、爆破设计及施工等, (E-mail) 263288200@qq.com。

通信作者: 张博洋 (2000-), 男, 新疆维吾尔自治区伊犁哈萨克自治州伊宁市人, 采矿工程专业研究生, (E-mail) zby20000513@163.com。

About the author: FU Qiang (1985-), male, mining engineer, mainly engaged in mining design, blasting design and construction, (E-mail) 263288200@qq.com.

Corresponding author: ZHANG Bo-yang (2000-), male, born in Yining city, Ili Kazakh autonomous prefecture, Xinjiang Uygur autonomous region, master degree, postgraduate student, mainly engaged in mining engineering, (E-mail) zby20000513@163.com.

10.08%, while increasing the average fragment size by 5 cm. This solution addresses issues of high explosive consumption and uneven fragmentation, lowers subsequent loading and transportation costs, and provides valuable references for charging structure optimization in similar mining operations.

Key words: mixed emulsion explosives; decoupled spacers; fragmentation; boulder yield; fine ore yield

随着矿山爆破中深孔爆破技术的发展,以混装车为载体的现场混装炸药的使用占比在矿山爆破用药中越来越大。乳化炸药现场混装技术集生产、运输和装药于一体^[1],具有爆破效果好、安全、计量准确和机械化程度高等显著特点,但炸药单耗相对较高,导致能量浪费,因此需要优化原有的装药结构。通过合理的优化装药结构,能在降低成本的基础上改善爆破效果,提高矿山的经济效益。随着研究的不断深入,众多国内外学者研究表明,空气间隔装药能够有效改善上述存在的问题。其中在理论研究方面,早在 20 世纪 40 年代, Melnikov 等通过室内试验提出采用间隔装药来减少爆破装药量^[2],降低炮孔的爆压峰值;王银涛等通过实验研究发现^[3],在炮孔顶部设置空心 PVC 管作为间隔装置时发现,当管体长度调整为 1.2 m 时,岩石破碎均匀性及抛掷距离等关键指标均达到最优状态。明锋等阐述了耦合装药爆破在孔壁压力增加^[4],炸药能量利用率较高,提高岩石的破碎能力,降低炸药消耗量,从而达到安全高效节约用药的目的。李章超基于 JKSim-Blast 软件和现场试验^[5],发现采用空气间隔装药结构爆破后大块率平均降低 9.24%,爆破效果最好。梁瑞则运用岩石爆破损伤模型结合数值模拟方法^[6],从损伤演化角度揭示了空气装药与常规装药对岩石破坏过程的差异规律。值得关注的是, Roy 等将该技术应用于矿山开采实践^[7],不仅改善了爆

破质量,还显著降低了炸药消耗量并提升经济效益。与此同时,苗小虎系统梳理了空气间隔装药理论体系^[8],在现有间隔装置研究基础上,提出了基于弹性理论的空气柱长度计算方法。

目前,该渭南市金堆城矿山生产爆破的过程中,炸药能量利用率较低,爆堆整体大块率较高,中尺寸矿块占比较少,导致生产作业效率降低,并对后续骨料筛分工艺产生影响。针对此问题,需优化原有装药结构以提升中尺寸矿山粒径占比。因此,基于空气间隔装药技术,研制出一种不耦合式间隔器用以优化矿山原有的装药结构,结合采用 LS-DYNA 有限元软件开展不同装药结构的爆破效果数值分析对比,模拟应力变化规律,然后基于模拟结果,在现场进行优化试验,分析优化后的装药结构对爆堆块度分布的影响。

1 矿区地质概况

研究矿山位于陕西省渭南市,台阶坡面角为 75°。当前爆破作业采用现场混装乳化炸药,矿山当前的主要矿石类型为安山玢岩和花岗斑岩。现场采样后通过室内试验测试岩石物理性质与力学参数,结合矿山地质资料得出的岩石物理力学参数见表 1。同时通过现场调查得出矿山生产的爆破参数与炸药性能,结果见表 2,表 3。

表 1 岩石试件力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock specimens

岩石类型 Rock Type	密度 Density/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水率 Moisture content%	抗拉强度 Tensile strength/MPa	抗压强度 Compressive strength/MPa	粘聚力 Cohesion c/MPa	内摩擦角 Internal friction angle $\varphi/^\circ$	弹性模量 Elastic modulus/GPa	泊松比 Poisson's ratio μ/μ
安山玢岩 Andesite porphyrite	2.57	1.66	1.6	20.2	2.73	35.4	3.88	0.30
花岗斑岩 Granite porphyry	2.49	2.01	4.7	50.5	5.03	42.6	13.01	0.24

通过分析表中数据并结合矿山的地质资料,得出矿山当前使用炸药单耗较高,爆堆整体大块率较高,中尺寸矿块占比较少,导致生产作业效率降低,并对后续骨料筛分工艺产生影响。针对此问题,需优化原有装药结构以提升中尺寸矿山粒径占比。

2 混装乳化炸药不耦合式间隔器的研发

2.1 设计思路

间隔装药方式是降低炸药单耗,优化块度分布的最优途径,但间隔装药方式的应用需要借助间隔

器以实现间隔装药,目前间隔装置使用较多的是 BJJ 间隔器,工程效果显著^[9],但在现场使用过程中,会受到多重条件的限制,影响爆破效果。因此,需要针对当前矿山研发出一种新型的不耦合式间隔器。

表 2 露天台阶爆破参数
Table 2 Open-pit bench blasting parameters

钻孔参数 Drilling parameters						
钻孔形式 Drilling pattern	炮孔直径 Hole diameter d/mm	钻孔孔深 Drilling depth l/m	堵塞长度 Stemming length l_d/m	超深 Subdrill l_c/m	孔距 Spacing a/m	排距 Burden b/m
垂直孔 Vertical hole	250	13.5	6.0	1.5	8.10	6.20

台阶参数 Bench parameter		装药参数 Charge parameters			起爆参数 Initiation parameters	
台阶高度 Bench height	台阶坡面角 Bench slope angle $\alpha/^\circ$	装药方式 Charging method	炸药单耗 Powder factor $q/(\text{kg}\cdot\text{t}^{-1})$	单孔装药量 Charge per hole Q/kg	孔间延时 Inter-hole delay/ ms	排间延时 Inter-row delay/ ms
12.0	71	连续装药 Continuous charge	0.32	464	25	65

表 3 现场炸药参数
Table 3 On-site explosives parameters

炸药类型 Explosive type	密度 Density $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	爆破速度 Detonation velocity $D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	波阻抗 Wave impedance $Z/(\text{pa}\cdot\text{s}^{-1})$	爆热 Detonation heat $Q_v/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	爆压 Blasting pressure/ GPa
现场混装乳化炸药 Site mixed emulsion explosive	1260	5010	6.31e6	3.4e6	7.9

不耦合式空气间隔器研发的思路是:能够在炮孔中形成空气间隔的同时起到相邻被隔离药柱之间的传爆功能,既不影响爆轰波传爆,也不增加额外的电子雷管,提高了空气间隔装药设计的灵活性和精细度,也不改变传统孔底起爆技术的装药方法,简化了空气间隔装药的施工工艺,降低工人劳动强度。具体的设计思路是通过装置上下两个托盘将混装乳化炸药段分割成两部分,在中间形成一个不耦合装药的腔,通过孔底起爆,利用中间的药柱实现爆轰波在孔内的传爆,从而达到设计要求,不耦合间隔器间隔装药结构如图 1 所示。

2.2 结构设计

根据不耦合式间隔器的设计思路,不耦合式间隔器的结构应包括自密封支撑托盘,柔性管,逆止阀与支撑板。

(1)自密封支撑托盘:托盘的设计是不耦合式空气间隔器的关键环节,间隔器设计采用一种自密封性支撑托盘,特点包括橡胶材质和薄厚相间的扇形结构,如图 2 所示。这种设计允许托盘在炮孔内既能向内收缩,也能向外拉伸膨胀,从而有效地密封炮孔,防止炸药流入上下托盘之间的空腔。这种密

封机制在上下两个托盘之间形成一个同心圆柱形空腔,有效实现了间隔功能。

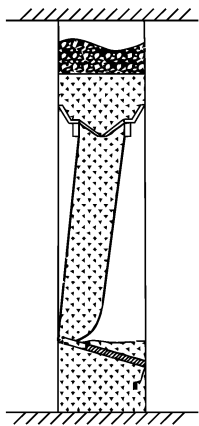


图 1 不耦合间隔器间隔装药示意图
Fig. 1 Charge diagram with the decoupled spacer

(2)柔性管:柔性管可以采用大口径又可弯折的柔性袋进行制作,也可以采用 PVC 管进行制作,如图 3 所示。这两种材料各有优缺点。柔性袋由于其柔韧性和可弯折性,适用于复杂的地形和地质条件,能够更好地适应现场的具体需求。而 PVC 管刚

性较强,其预置性和均匀的装药分布能够使爆炸能量更加集中,提高爆破效果。

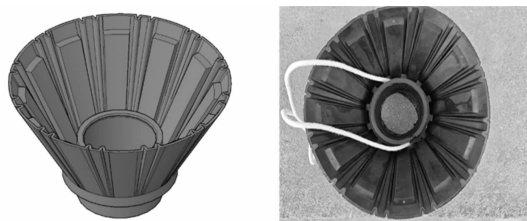


图 2 自密封支撑托盘

Fig. 2 Self-sealing support tray



图 3 柔性管材料实物图

Fig. 3 Physical drawing of flexible pipe materials

(3)逆止阀:逆止阀一般采用橡胶材质防止混装乳化炸药的膨胀导致炸药外溢,从而影响支撑效果,橡胶材质的逆止阀可以有效地阻止炸药在膨胀时向错误方向流动,确保其在正确的方向和位置膨胀,从而达到预期的支撑效果,如图 4 所示。

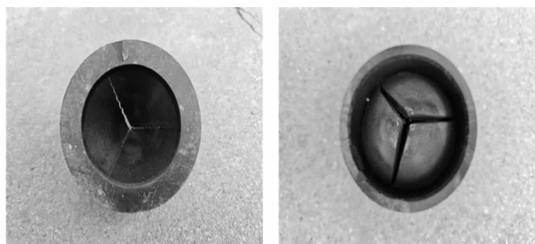


图 4 逆止阀装置

Fig. 4 Check valve device

(4)支撑板:支撑板通常采用木板结构,其支撑方式主要分为单边支撑和拱结构支撑两种。该装置的核心功能在于防止间隔器在支撑作业时,因承受自身及上部重力荷载而发生下沉位移,从而避免因支撑结构失稳导致的间隔装药失效问题。具体结构如图 5 所示。

2.3 样品制作

间隔器样品的制作过程较为简单,制作过程大体分为三步。

首先确定好逆止阀在托盘的安装位置,确保其能够有效防止逆流,检查逆止阀阀瓣方向,确保方向

与装药方向一致,其次将逆止阀放置在托盘内,并且与托盘的连接面贴合通过托盘和逆止阀上的预留孔,使用铁钉或铁丝将逆止阀固定在托盘内。最后将支撑板布置在柔性管的指定位置。待所有结构完成连接固定后,最终形成适配混装乳化炸药的耦合式间隔装药器,实物结构如图 6 所示。

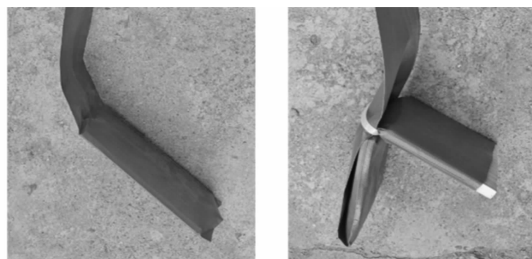


图 5 支撑板结构图

Fig. 5 Structure of support plate

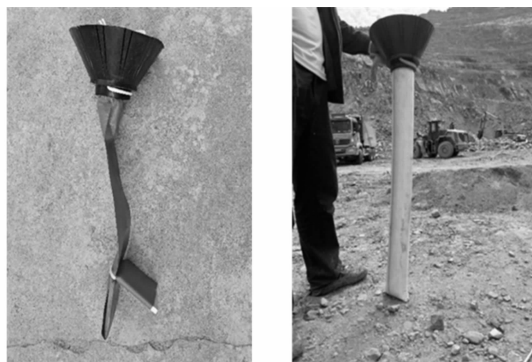


图 6 不耦合式间隔器实物图

Fig. 6 Physical diagram of decoupled spacer

2.4 技术优势

针对矿山当前使用的混装乳化炸药研制出的新型不耦合式间隔器,与 BJQ 间隔器相比,新型不耦合式间隔器具有以下技术优势:

(1)具有被隔离药柱之间的自传爆功能,可以上下传爆,没有方向性。

(2)简化了空气间隔装药工艺,提高了间隔装药效率。

(3)由于具有传爆功能,孔内只需设置一个起爆点。不仅减少了起爆器材和炸药使用量,降低了爆破成本,而且可以实现多点间隔,大大提高了间隔装药设计的灵活性和精细度。

(4)间隔器长度可灵活调整,提高了间隔装药设计的精细化。

不耦合式间隔器的上述优势,为爆破参数优化提供了可行的解决途径和方向。现场试验中若采用混装乳化炸药不耦合式间隔装药装置,可以优化矿山原有的装药结构,降低炸药单耗,提高装药效率,

改善爆破效果。

3 不同装药结构对爆破应力场的影响分析

3.1 装药结构数值模型的建立

为了进一步对比不同装药结构对岩石损伤的影响,根据矿山实际工况,基于 LS-dyna 分别建立连续装药结构,BJQ 间隔装药结构以及不耦合式间隔装药结构。模型总高度为 13.5 m,宽度为 8 m,坡面角 75°,抵抗线为 1.8 m,建立两排炮孔,炮孔直径为 250 mm、堵塞长度 6 m、装药高度 7.5 m,中段炸药与上下两段药柱共节点,直径为 75 mm。单元型选取 Solid164,堵塞、炸药、空气采用共节点网格划分且采用 ALE 算法,岩石采用 Lagrange 算法,单位制为 cm-g- μ s。模型坡顶面,坡面与坡底面均为自由面,其余面条件为无反射边界。模型详细尺寸参数

如图 7 所示^[10-13]。

(1)连续式装药结构:该结构采用三段式设计,自上而下依次由岩体、连续分布的炸药段及堵塞段构成模型如图 7(a)所示。

(2)BJQ 间隔器的间隔装药结构:该装药结构采用四段式构造,自上而下依次为岩体、上部炸药段、BJQ 间隔器形成的空气间隔段、下部炸药段及堵塞段。通过在上下装药段分别设置双起爆点,实现自两端向中间的双向起爆模式,结构模型如图 7(b)所示。

(3)不耦合间隔装药结构:由岩体、主炸药段、中部间隔段及堵塞段构成。其核心创新在于间隔段内布置少量传爆炸药,通过该中间炸药实现能量传递,既保持间隔装药优势,又确保爆轰波稳定传播,模型如图 7(c)所示。

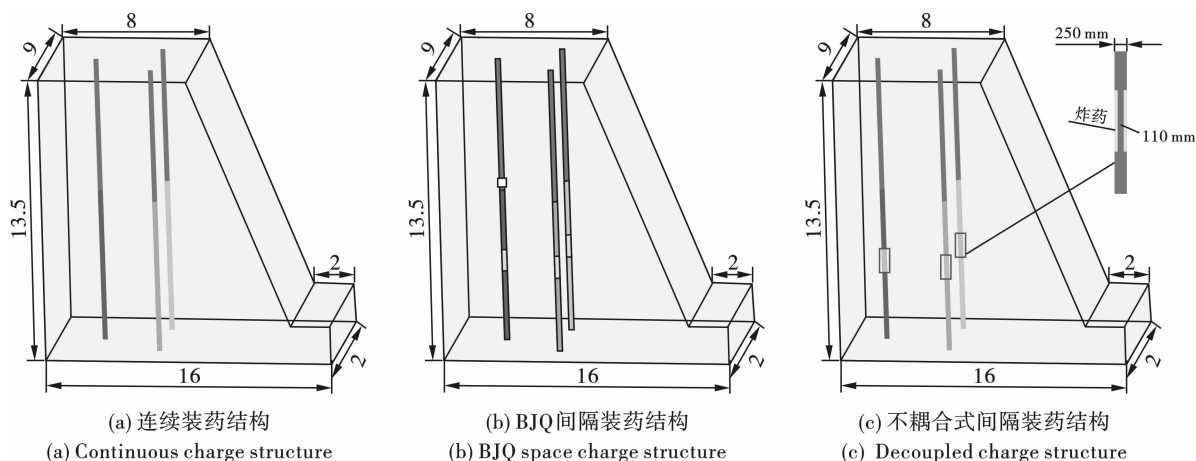


图 7 不同装药结构对应的数值计算模型示意图(单位:m)

Fig. 7 Schematic diagram of numerical calculation models corresponding to different charge structures(unit:m)

3.2 装药结构对岩石破碎效果的影响规律分析

数值计算后得到不同装药结构下岩石的应力效果,剖面应力云图如图 8 所示,分别对应 $t_1 = 400 \mu$ s, $t_2 = 1000 \mu$ s, $t_3 = 2000 \mu$ s, $t_4 = 4000 \mu$ s。

从图 8(a)可以明显看出,在连续装药结构下,当炮孔底部炸药起爆后,产生的应力波从爆心开始向四周岩体传播,炮孔上段应力分布面积区域明显大于底部,台阶整体应力分布面积较大。

图 8(b)可以明显看出,BJQ 间隔器装药结构的爆破作用机理表现为上下炸药段同步起爆后,两列应力波向中部空气间隔区域传播并产生矢量叠加,应力场在间隔段呈现明显衰减,导致该区域岩体破碎范围显著缩小,同时台阶整体破碎区域的分布面积较连续装药结构较少。

与之形成对比的是新型不耦合式装药结构,如图 8(c)所示,该结构通过改进能量传递机制实现了更优的爆破效果。底部起爆产生的应力波在空气间隔界面发生反射,增强了底部岩体的破碎作用范围。间隔段内设置的传爆炸药单元实现了中部能量传递,既维持了爆轰波的连续传播特性,又避免了因遇到空气发生反射导致的能量损失。

通过对不同装药结构的应力云图对比分析可知,不耦合式间隔装药结构显著改善了爆破能量分布效果。在该装药结构作用下,台阶爆破应力场的分布范围显著增加,整体能量分配更为合理。

为了进一步评估不同装药结构对应的应力变化,通过后处理软件 LS-PREPOST 分别选择炮孔中心点的不同位置作为测点,分析对应的压力-时间变

化曲线,测点位置如图9所示。

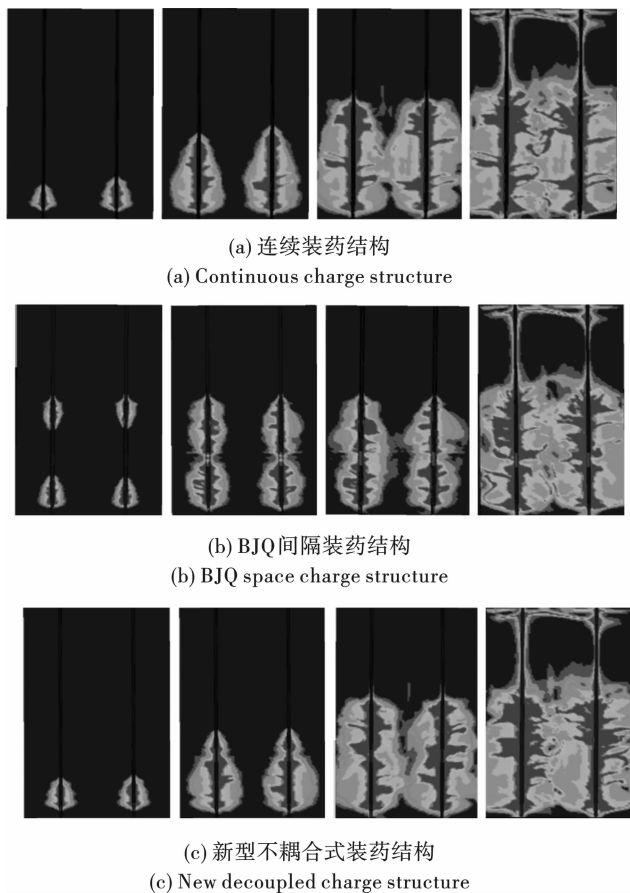


图8 不同装药结构对应的应力损伤云图

Fig. 8 Stress damage cloud chart corresponding to different charge structures

不同位置的测点应力时程曲线如图10所示:图10中abcd分别为监测点ABCD处应力损伤,从图10(a)可以看出,对于堵塞段,不同装药结构下的应力变化曲线基本一致,连续装药的峰值应力明显高于其他装药结构,这是因为连续装药结构炸药能量相对较高,能对岩石直接作用形成更大的作用力。图10(b)可以看出,爆炸反应迅速发生,高温高压的气体与冲击波产生,因为装药结构的应力变化过程基本一致,在能量传播阶段,当采用BJQ间隔装药时,部分应力冲击波遇到空气时会发生反射,形成反向应力波,此时测点应力会第二次到达峰值,其中因为普通空气间隔装药的空气缓冲层介质多于其他结构,因此应力较高连续装药结构的应力开始持续衰减。图10(c)可以看出,对于中部测点,采用BJQ间隔装药后,采用上下同时起爆,上端药柱爆破后会产生爆破漏斗,导致应力会发生衰减,采用不耦合式间隔器后,中部仍有部分炸药,在缓冲层的高温气体与应力波共同作用下,应力高于其他装药结构。最后

根据图10(d),可以看出,底部应力曲线变化基本一致,不耦合式间隔器装药结构与BJQ间隔装药结构第二次的峰值较低,部分能量到达间隔段反射后进行应力叠加,因此应力会低于连续装药结构。

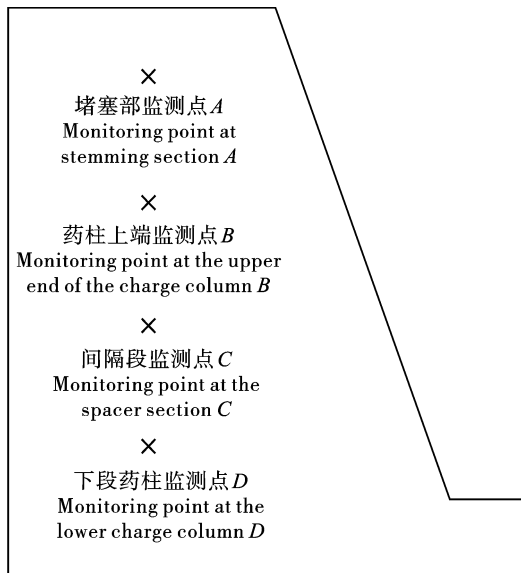


图9 测点位置

Fig. 9 Location of measuring points

综合对比发现,不耦合式间隔装药技术既能提升岩石破碎效率,又能实现应力场的均匀扩散,展现出更优的工程适用性。

4 现场试验

4.1 现场爆破试验参数

为了验证不耦合式间隔装药对爆破效果的影响,在现场开展优化后的爆破对比试验,左侧20个孔采取1.0 m的不耦合式间隔装药,右侧孔正常连续装药。选定爆破的台阶水平为458平台,爆区的布孔图如图11所示,爆破参数如表4所示。

4.2 试验过程与结果分析

整体爆破过程如图12所示,从图可以看出,爆破开始后起爆后,爆炸能量迅速传递到岩体中,自由面岩石在反射应力波的作用下首先开始破坏。此时,岩石内部产生裂纹并扩展,裂纹的扩展方向与应力波的传播方向有关。由于爆炸气体的膨胀作用,岩石开始出现“鼓包”运动,即岩体局部向外鼓起,随着爆炸能量的持续作用,岩块被破碎并抛掷,岩块在抛掷后,最终在重力作用下堆积形成爆堆。

优化前后的爆堆尺寸图像,如图13所示。爆后利用Split-desktop 4.0块度分析软件分别在爆堆表面和内部选取多个区域对爆堆进行处理分析^[14,15]。块度分析后得到优化前后的爆堆不同尺寸块度的占比见表5。

表 4 爆破试验参数
Table 4 Blasting test parameters

最大孔距 Maximum spacing/m	最小孔距 Minimum spacing/m	最大排距 Maximum burden/m	最小排距 Minimum burden/m	钻孔孔深 Drilling depth/m	超深 Subdrill/m
8.1	6.2	5.69	4.66	13.5	1.5
单孔装药量 Charge per hole/kg	平均孔距 Average spacing/m	平均排距 Average burden/m	间隔长度 Deck length/m	前排孔至坡顶线平均距离 Average distance from the front row holes to the crest line/m	单位消耗量 Powder factor/ ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)
440	7.81	5.3	1.0	2.1	0.28

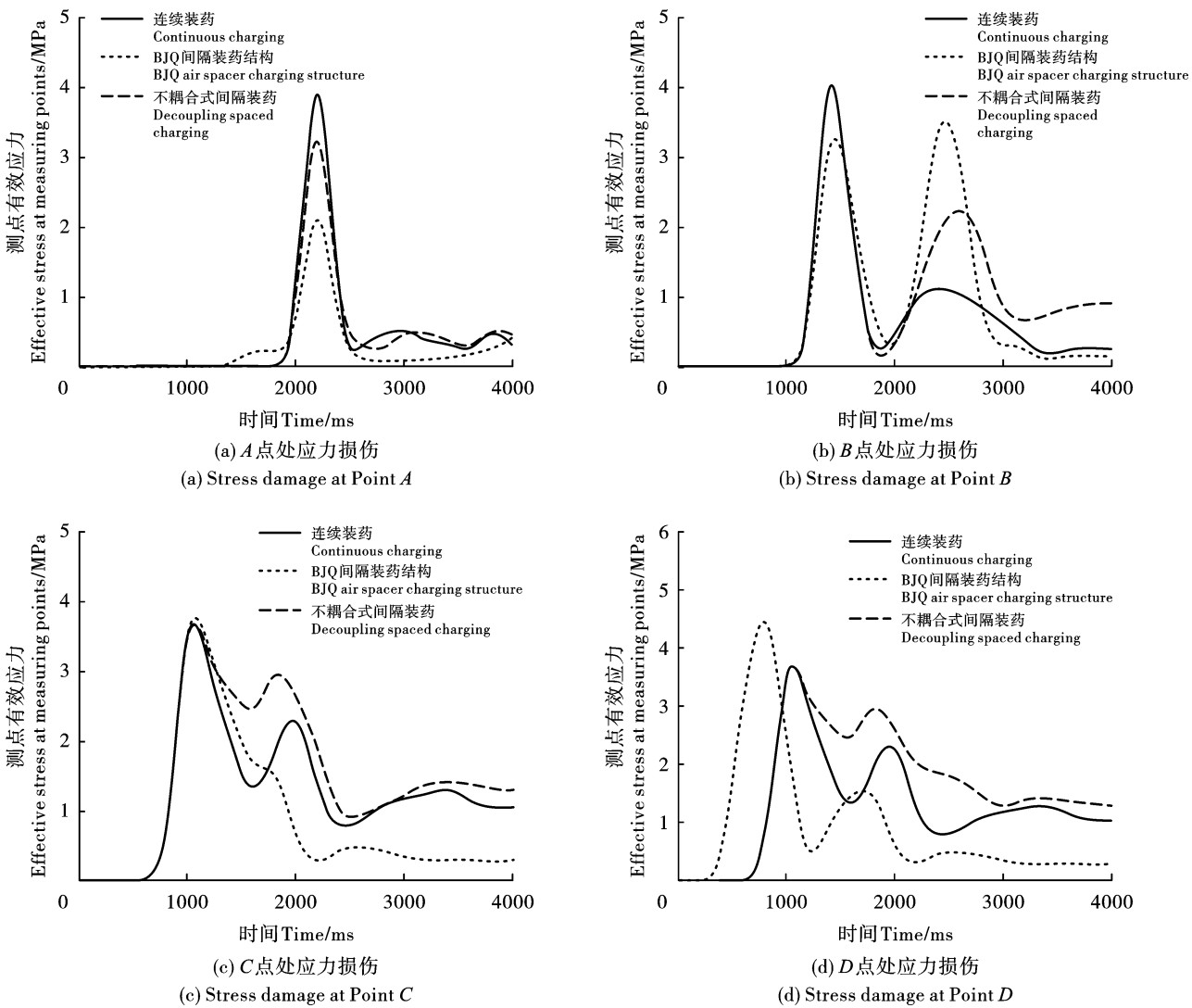


图 10 不同装药结构对应的应力损伤变化规律

Fig. 10 Variation law of stress injury corresponding to different charge structures

优化前后爆堆相关参数对比见表 6。对比爆堆尺寸占比,结合表 5,表 6 可以得出结论:采用不耦合间隔装药结构不仅降低了炸药的单耗。且爆破后的爆堆粉矿占比降低了 10.08%,大块占比降低了 7.14%,平均块度有所上升,有利于后续矿山进行铲装运输作业。

5 结论

针对渭南某露天矿山混装乳化炸药使用过程中存在的能量浪费,爆堆块度分布不均匀的问题,研制出一款专用于混装乳化炸药的不耦合式间隔装置,并通过 LS-Dyna 有限元软件与现场试验对爆破效果

进行验证,取得以下结论:

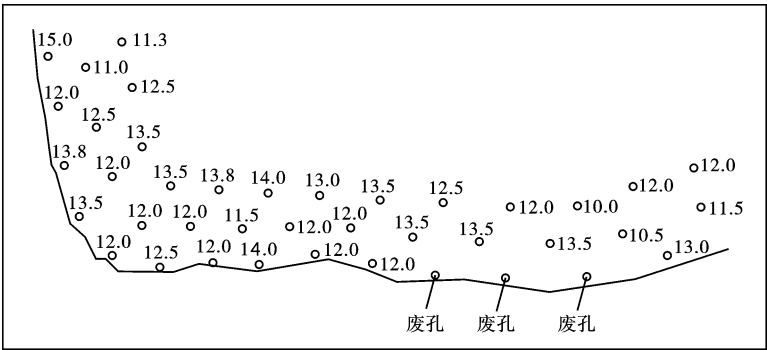


图 11 爆区布孔图

Fig. 11 Hole diagram of the burst zone

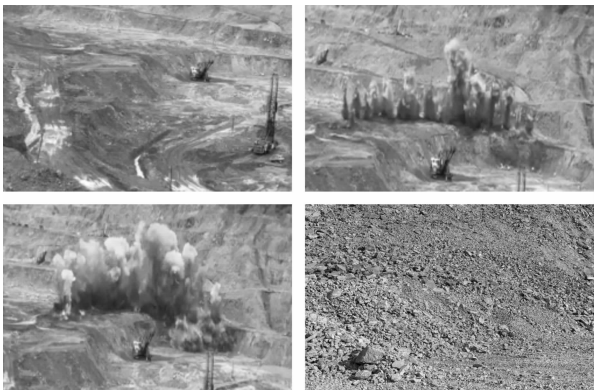
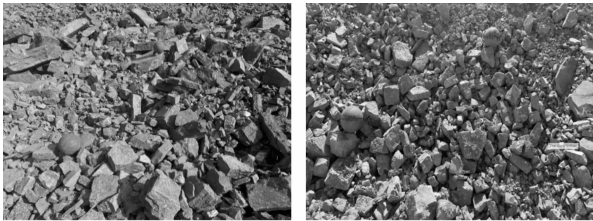


图 12 爆破过程

Fig. 12 Blasting process

于混装乳化炸药的不耦合式间隔装置,为后续现场优化装药结构提供理论基础。



(a) 优化前

(a) Before optimization

(b) 优化后

(b) After optimization

图 13 装药结构优化前后爆堆块度效果对比

Fig. 13 Comparison of the effect of the reactor explosion before and after the optimization of the charge structure

(1) 针对矿山现有爆破参数,研制出一款专用

表 5 优化前后的爆堆不同尺寸块度的占比

Table 5 The proportion of different block sizes in the explosion pile before and after optimization

爆破区域 Blasting area	爆堆位置 Muck pile position	岩块尺寸 Rock block size/mm						
		0 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 50	50 ~ 100	100 ~ 200	200 ~ 600	> 600
		各粒径占比/%						
优化前 爆破效果 Blasting effect before optimization	上部 Upper part	16.72	13.25	16.85	10.35	16.19	15.70	10.94
	中部 Middle part	15.27	13.28	12.14	16.48	19.88	16.50	6.45
	底部 Bottom part	7.25	10.91	10.46	11.03	14.63	21.35	24.37
	平均 Average	13.08	12.48	13.15	12.62	16.90	17.85	13.92
优化后 爆破效果 Blasting effect after optimization	上部 Upper part	6.40	14.50	16.70	12.10	20.50	27.20	2.60
	中部 Middle part	2.32	3.40	9.03	26.70	23.71	30.08	4.76
	底部 Bottom part	0.28	5.74	11.89	20.30	25.09	23.72	12.98
	平均 Average	3.00	7.88	12.54	19.70	23.10	27.00	6.78

表 6 优化前后爆破效果分析

Table 6 Analysis of blasting effects before and after optimization

试验方案 Test scheme	炸药单耗 Powder factor/ (kg · t ⁻¹)	松散系数 Bulking factor/ η	坡面角 Slope face angle/ $^{\circ}$	大块率 Boulder yield/%	粉矿率 Fine ore yield/%	平均块度 Average fragmentation/cm
优化前 Before optimization	0.32	1.38	23	13.92	13.08	25
优化后 After optimization	0.28	1.42	29	6.78	3.00	35

(2)通过模拟不同装药结构的应力分布效果发现,与其他装药结构相比,不耦合式间隔装药结构不仅保持了大范围应力分布的优势,单一起爆点的设计还避免了能量提前泄漏,显著提升了能量利用率。

(3)采用优化后的参数与装药方式,爆堆大块率得到了明显优化;炸药单耗由0.32 kg/t下降到了0.28 kg/t,大块率降低了7.14%,粉矿率降低了10.08%,极大优化了爆破效果。

参考文献 (References)

- [1] 余圣华. 乳化炸药现场混装技术在铜山口铜矿露采爆破中的应用[J]. 采矿技术, 2023, 23(2): 89-91.
- [1] YU Sheng-hua. Application of emulsion explosive on-site mixing technology in open-pit blasting of TongShanKou Copper Mine[J]. Mining Technology, 2023, 23(2): 89-91. (in Chinese)
- [2] MELNIKOV, MARCHENKO. Effective methods of application of explosion energy in mining and construction[J]. The 12th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS) American Rock. Rolla, Missouri, 1971, 11: 359-378.
- [3] 王银涛, 白和强, 刘坚, 等. 空气间隔装药技术在露天矿山的应用[J]. 露天采矿技术, 2021, 36(2): 59-61, 65.
- [3] WANG Yin-tao, BAI He-qiang, LIU Jian, et al. The application of air interval charging technology in open-pit mines[J]. Opencast Mining Technology, 2021, 36(2): 59-61, 65. (in Chinese)
- [4] 明锋, 祝文化, 李东庆. 水耦合装药爆破在隧道掘进中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(5): 1008-1013.
- [4] MING Feng, ZHU Wen-hua, LI Dong-qing. Application of water-coupled charge blasting in tunnel excavation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(5): 1008-1013. (in Chinese)
- [5] 李章超, 徐帅, 李金平, 等. 基于JKSimBlast的露天台阶爆破空气间隔装药结构优化研究[J]. 爆破, 2023, 40(1): 50-56, 68.
- [5] LI Zhang-chao, XU Shuai, LI Jin-ping, et al. Optimization study of air interval charge structure for open-pit bench blasting based on JKSimBlast[J]. Blasting, 2023, 40(1): 50-56, 68. (in Chinese)
- [6] 梁瑞, 祁芳霞, 周文海, 等. 不同损伤模型下偏心不耦合装药爆破特性[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(9): 98-105.
- [6] LIANG Rui, QI Fang-xia, ZHOU Wen-hai, et al. Blasting characteristics of eccentric uncoupled charges under different damage models[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2024, 41(9): 98-105. (in Chinese)
- [7] PAL-ROY P, SINGH R B, MONDAL S K. Air-deck blasting in opencast mines using low cost wooden spacers for efficient utilisation of explosive energy[J]. Journal of Mines, Metals and Fuels, 1995, 43(8): 5pp.
- [8] 苗小虎, 喻智, 谭期仁, 等. 纳米比亚湖山铀矿空气间隔装药试验研究[J]. 中国矿业, 2020, 29(8): 165-168.
- [8] MIAO Xiao-hu, YU Zhi, TAN Qi-ren, et al. Experimental study on air-deck charge of Husab uranium mine in Namibia[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(8): 165-168. (in Chinese)
- [9] 郭正勇, 金书明, 刘占忠, 等. BJQ空气间隔器在千业水泥厂矿山的应用[J]. 建材世界, 2010, 31(4): 53-55.
- [9] GUO Zheng-yong, JIN Shu-ming, LIU Zhan-zhong, et al. Application of BJQ air spacer in qian-ye cement industry mine[J]. The World of Building Materials, 2010, 31(4): 53-55. (in Chinese)
- [10] 辛春亮, 薛再清, 涂建, 等. 有限元分析常用材料参数手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [10] XIN Chun-liang, XUE Zai-qing, TU Jian, et al. Handbook of common material parameters for finite element analysis[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2020. (in Chinese)
- [11] 俞海玲, 牟海鹏. 基于ANSYS/LS-DYNA的岩石爆破数值模拟分析[J]. 山东煤炭科技, 2024, 42(2): 122-125, 131.
- [11] YU Hai-Ling, MOU Hai-Peng. Numerical simulation analysis of rock blasting based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2024, 42(2): 122-125, 131. (in Chinese)
- [12] 张阳, 王利军, 陈国瑞, 等. 现场混装乳化炸药在地下铁矿的爆破漏斗试验及应用[J]. 工程爆破, 2023, 29(3): 80-84.
- [12] ZHANG Yang, WANG Li-jun, CHEN Guo-rui, et al. Blasting crater experiment and application with on-site mixing technology of emulsion explosive in underground iron mine[J]. Engineering Blasting, 2023, 29(3): 80-84. (in Chinese)
- [13] 汪大为, 王志亮, 汪书敏. 基于RHT本构的隧道爆破参数优化与振动损伤数值研究[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 129-136.
- [13] WANG Da-wei, WANG Zhi-liang, WANG Shu-min. Numerical study of tunnel blasting parameter optimization and vibration damage based on the RHT constitutive model[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 129-136. (in Chinese)
- [14] 王宇涛. 基于RHT本构的岩体爆破破碎模型研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2015.
- [14] WANG Yu-tao. Study on blasting fracture model based on RHT constitutive structure[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2015. (in Chinese)
- [15] 叶海旺, 余梦豪, 刘聪, 等. 基于爆破块度控制的空气间隔装药台阶爆破参数优化[J]. 爆破, 2024, 41(4): 84-90, 100.
- [15] YE Hai-wang, YU Meng-hao, LIU Cong, et al. Blasting fragmentation control by air-decked charge structure blasting parameters optimization[J]. Blasting, 2024, 41(4): 84-90, 100. (in Chinese)