

孔内毫秒延期分段装药爆破效果试验及数值模拟研究

胡子杰¹, 李洪伟¹, 沈立旭², 梁昊¹, 王震², 王伟亲², 马科², 陈叶群³

1. 安徽理工大学 化工与爆破学院, 淮南 232001;
2. 内蒙古康宁矿业股份有限公司, 内蒙古 017000;
3. 安徽雷鸣爆破工程有限责任公司, 安徽淮北, 235000;

摘要: 基于连续装药和常规分段爆破在实际应用中存在大块率高、振动有害效应大等问题, 本文旨在探究孔内毫秒延期变化对分段爆破效果的影响规律, 以期改善破岩质量。通过模型实验结合振动变化和破碎块度分析, 探究孔内延期变化对分段爆破爆破振动、破碎块度等爆破效果的影响, 利用 ANSYS 数值模拟揭示孔内延期分段爆破对岩体造成的损伤及抛掷过程。在模型实验和数值模拟揭示的规律指导下, 通过有限次现场验证对比, 确认在实际工况中孔内毫秒延期的可行性和优势性。实验结果表明: 相同露天矿山工况条件下, 上段 8ms 延期条件下相对于分段无延期爆破大块率降低 3.05%, 爆破近区爆破振动降低 37.98%, 根底残留减少。下段 6ms 延期条件下相对于分段无延期爆破大块率降低 4.19%, 爆破近区爆破振动降低 40.02%, 破碎抛掷效果更好。表明了露天矿山深孔爆破中根据实际情况对分段装药爆破设置合理的孔内毫秒延期, 能有效提高能量利用率, 降低大块率和爆破振动有害效应。

关键词: 孔内延期; 分段起爆; 深孔爆破; 模型试验; 破碎块度分析; ANSYS 数值模拟; 大块率;

引言

当前露天矿山深孔爆破常采用的间隔装药结构不仅能改变应力波的形状, 降低初始压力峰值, 还能有效延长应力作用时间, 降低单耗, 提高炸药的能量利用率。但在实际应用中分段无延期起爆仍然存在大块率、振动有害效应较高的问题。

目前研究人员针对深孔间隔装药分段爆破开展了一系列研究工作, 并取得了一定的成果。

罗开军、占时春等和刘庆等人首先针对矿山孔内孔间延期进行研究, 验证了合理的孔内延期起爆可以有效降低爆破振动^{[1][3]}。张引良等人验证了分段装药结构在露天矿台阶爆破中的应用可有效解决台阶顶部坚硬岩石出现大块或根底等问题^[4]。叶建军等人针对深孔孔内分段爆破技术, 研究装药结构、装药材料、孔内分段延时等重要技术参数。通过合理调控各技术参数, 达到优化深孔爆破效果, 提高爆破效率, 降低爆破成本和有害效应^[5]。

张晓平等人为解决露天大口径深孔爆破普遍存在大块率高的问题, 通过 ANSYS /LS-DYNA 有

收稿日期: xxxx-xx-xx; 修回日期: xxxx-xx-xx

作者简介: 胡子杰 (2002—), 性别男, 硕士研究生, 主要从事岩石破碎理论与技术研究.E-mail:15715693199@163.com

通讯作者: 李洪伟 (1979—), 性别男, 硕士, 教授, 主要从事控制爆破技术研究.E-mail:lihw@aust.edu.cn

限元软件构建了不同装药比例和空气间隔比例的数值模拟,验证上下装药比例为 3:7,空气间隔占比为 15% 时最有利于岩石的破碎块度分布均匀^{Error! Reference source not found.}。张建华等人则利用 LS-DYNA 模拟台阶爆破过程中间隔装药不同装药条件的岩石应力变化规律,验证了当空气间隔长度为 1m 时,岩石应力损伤范围与各测点的平均最大有效应力达到峰值,更有利于提高岩石破碎效果^[9]。程兵等人和梁瑞等人先后在分段起爆中采用 SPH-FEM 流体粒子法研究分段装药爆破作用机理,证实了孔内分层装药掏槽技术在深孔爆破中的适用性^{[12][13]}。

本研究基于某露天矿山爆破工程开展,针对孔内毫秒延期变化对分段装药爆破效果的影响,尤其是孔内上下段不同延期条件下的爆破效果对比。孔内分段装药的起爆顺序决定了两段爆炸应力波与自由面演化的时序耦合方式。“先上后下”(下段延期)以上段先行破碎创造辅助自由面、降低下段夹制作用为特征,有利于振动削弱;“先下后上”(上段延期)以下段先行松动底部岩体、为上段提供底部自由面为特征,有利于底板平整与抛掷。两种模式的应力波叠加路径截然不同,其最优延期时间也因此存在差异。结合模型试验和数值模拟进行研究,先通过模型试验对比不同孔内延期条件下的岩石破碎块度变化和爆破振动变化,分析设置不同孔内延期条件下分段爆破的爆破效果规律。再利用 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟,探究不同延期条件下分段爆破的损伤变化和范围。结合现场试验,验证经过孔内延期优化的分段爆破在实际应用中具有更好的爆破效果。

1 装药结构设计及理论基础

如图 1,为露天矿山爆破传统深孔连续装药结构和分段装药结构。图 1a 为传统孔内连续装药,图 1b 为孔内分层装药,将炸药分为上、下两层进行装填,两层装药之间与孔口剩余长度均采用泥沙进行封堵;在实际爆破时,对上下段雷管设置延期,以达到控制上段优先起爆或下段优先起爆的起爆顺序控制。相比连续装药,分段装药结构允许适当缩小孔网参数和减小填塞,增强了爆炸冲击波对台阶顶部及底部岩石的作用,降低了大块和根底概率,使炸药单耗得以降低。在起爆方式上,先上后下的起爆方式能将上部岩石破碎抛掷,为下部起爆创造新自由面,爆破振动波会在孔内相互抵消从而降低爆破振动;而先下后上的起爆方式则使爆破能量在下部岩体内先充分释放,破碎更充分,再通过上部起爆抛掷出去,能减少填塞高度和增大间隔长度,有助于底板平整和减少超深,同时也可以有效减低爆破振动等有害效应从而优化整体爆破效果。

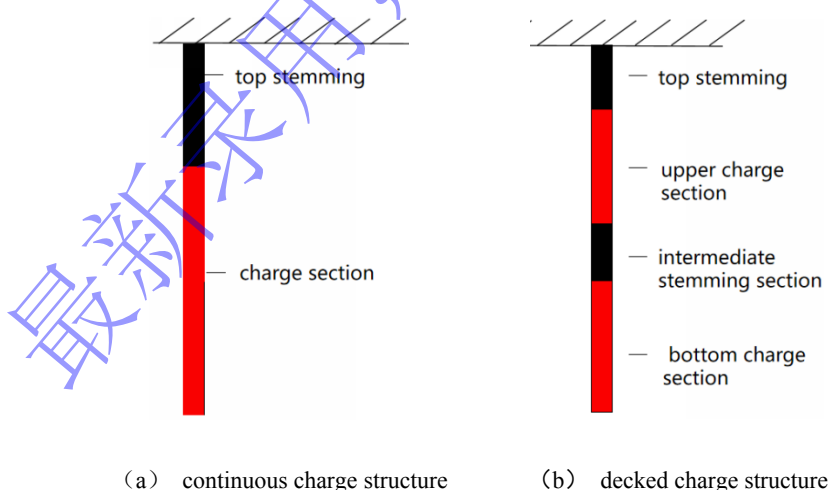


图 1 装药结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of charge structure

2 混凝土试件爆破实验

2.1 实验设计及材料

根据矿山现场勘测的实际情况和模型相似基本理论, 基于量纲分析与相似准则, 确立模型材料与现场岩体之间的物理力学相似关系。模型试验中无量纲物理量(泊松比、应变、内摩擦角等)的相似系数均为 1, 即 $C_\mu=C_\varepsilon=C_\phi=C_{v0}=1^{[27][31]}$, 而密度、应力、弹性模量及介质波阻抗的相似系数分别为 $C_\rho=1.08$ 、 $C_\sigma=2.45$ 、 $C_E=1.25$ 、 $C_{cp}=1.16^{[27][31]}$ 。

在几何相似方面, 受模型尺寸及雷管直径限制, 孔深与孔径相对主导几何比尺存在畸变, 但孔距与抵抗线之比保持一致均为 1.33, 由此确定主导几何相似系数

$$\alpha_L = a_p/a_m = W_p/W_m = 40 \quad (1)$$

式(1)中, a_p :现场实际孔距; a_m :模型试验中的孔距; W_p :现场实际最小抵抗线 W_m :模型试验中的最小抵抗线。

在爆破动力相似与装药量理论换算中, 基于现场实际孔网参数(孔距 4.0 m、排距 3.0 m、台阶高度 19.0 m)得出现场单耗约为 0.333kg/m^3 。

按能量等效原则换算得理论模型铵油炸药当量为 0.575 g, 考虑现场铵油炸药与模型 RDX 爆力值的差异(换算系数 0.65), 理论所需 RDX 装药量为 0.374 g, 进而得到爆破动力相似常数^{[28][32]}

$$C_y = C\sqrt{\sigma_M/\sigma_{bc}} = 0.65 \times \sqrt{1/2.45} \approx 0.415 \quad (2)$$

式(2)中, C :炸药爆力换算系数; σ_M :模型材料抗压强度; σ_{bc} :现场岩石的抗压强度;

该值与前期推导结果吻合, 模型实际采用的两根电子雷管总装药量(约 1.4 g)高于严格体积缩比的理论值, 但从炸药单耗角度校验, 该装药量可作为对几何畸变和模型实际强度较高的补偿^{[28][32]}。模型实际单耗为

$$q_{m\text{实际}} = 1.4 \times 10^{-3} / 1.725 \times 10^{-3} \approx 0.812\text{kg/m}^3 \quad (3)$$

本模型试验研究目的在于探索不同孔内延期时间优劣的相对规律, 由于几何畸变, 本试验的单耗绝对值不具备现场映射意义, 仅用于控制变量下的趋势对比。

选用水泥砂浆材料作为试验材料, 采用与设计类似的材料配比 $m_{\text{水泥}}:m_{\text{黄沙}}:m_{\text{水}}=1:2:0.55$, 得到水泥试块参数如下表 1^[27]

表 1 水泥试块参数表^[27]

Table 1 Parameters of cement test blocks^[27]

Density $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Elastic modulus E/GPa	Compressive strength σ_c/MPa	Tensile strength σ_b/MPa
2210	22.4	27.2	2

通过模具制成长 4m 宽 1.5m 高 0.5m 的水泥模型, 并进行为期 30 天的养护。

设计单孔孔内分段装药爆破模型实验, 根据推导的相似准则和实际爆破方案中孔网参数, 按照相似准则计算得出模型实验的孔间距 10cm 和最小抵抗线 7.5cm, 炮孔深度 25cm, 炮孔直径 10mm, 采用耦合装药垂直打孔, 间隔段使用泥沙间隔。综合考虑模型大小及保护测试仪器的前提下, 在距离爆源 1m、2m 和 3m 处分别设置振动监测点, 针对目标矿山现场设计的实际孔间延期时间为 11-17ms, 将孔内延期划分为 0ms、2ms、4ms、6ms、8ms、10ms 的上下段孔内分段起爆实验, 并使用三台测振仪采集爆破振动信号, 同时收集破碎岩石进行图像采集记录用于后续破碎块度分析。实验示意图如图 2 所示。

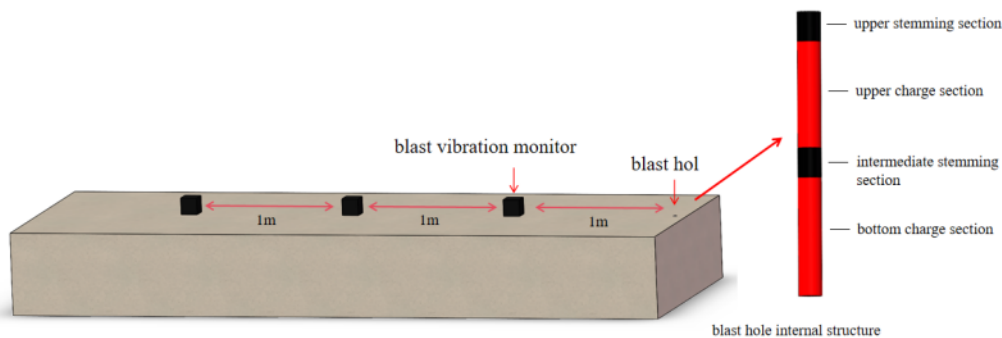


图 2 实验示意图

Fig.2 Schematic diagram of the experiment

2.2 爆后块度测量及分析

针对单孔内分段起爆模型试验爆破后的损伤岩石进行拍照采集,图片处理流程如下图 3。



图 3 识别流程图

Fig.3 Flowchart of the identification process

利用 WipFrag 软件对模型试验后的岩石块度大小进行精确识别分析,将识别后的岩石色块提取并去除杂乱背景,根据实际测量所得到的岩石块度大小设置标尺进行破碎块度筛选。处理完的上下段不同延期条件下的岩石破碎块度识别处理示意图如图 4 图 5 所示:

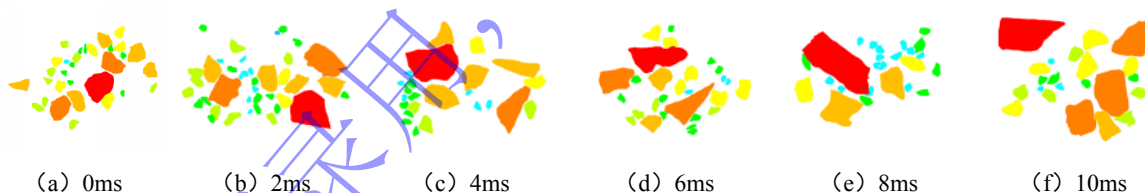


图 4 先上后下起爆破碎块度识别示意图

Fig.4 Schematic diagram of fragmentation size identification for top-to-bottom initiation blasting

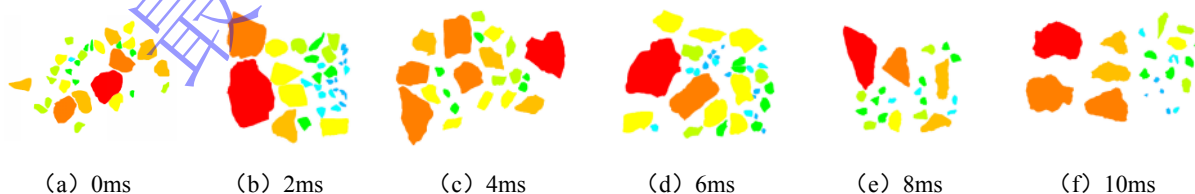
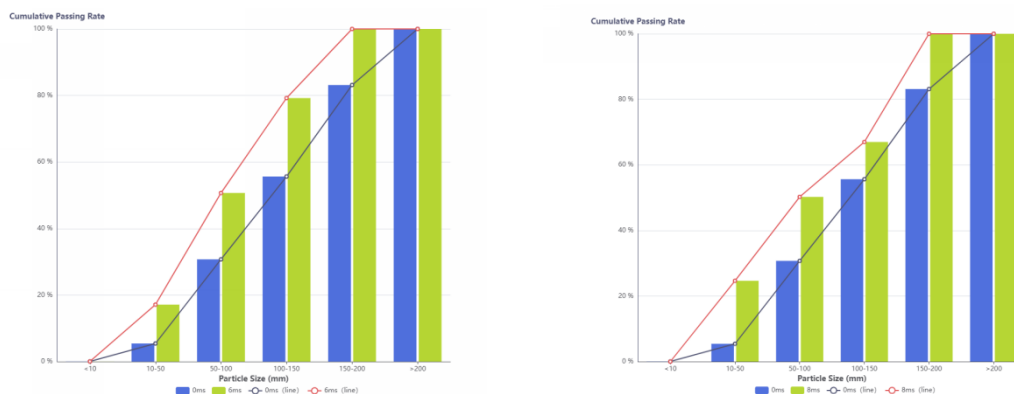


图 5 先下后上起爆破碎块度识别示意图

Fig.5 Schematic diagram of fragmentation size identification for bottom-to-top initiation blasting

将不同大小的破碎岩石进行了边缘识别,然后根据大小划分颜色视图,对识别后的不同岩石直径进行筛选统计,对比破碎岩石通过率,将最佳破碎效果的延期设置与无延期起爆对比的统计结果如图 6 所示:



(a) Fragmentation analysis of lower deck with 6 ms delay (b) Fragmentation analysis of upper deck with 8 ms delay

图 6 块度分析点线图

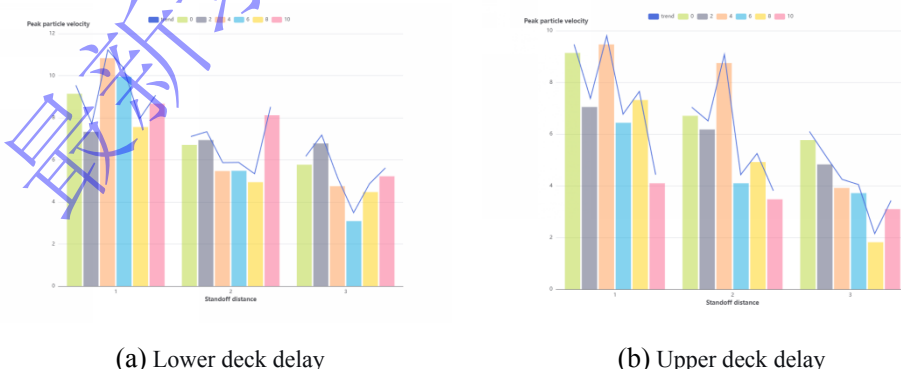
Fig. 6 Point-line chart of fragmentation analysis (lower deck 6 ms delay vs. upper deck 8 ms delay)

结合破碎块度统计，系统分析了孔内延期时间对岩石破碎块度的影响规律。无延期分段起爆条件下，破碎体积约为 250cm^3 ，直径 200mm 以下的通过率为 83.14% ，直径超过 200mm 为大块岩石，此时大块率为 16.86% 。下段 2ms 和 6ms 延期分段起爆条件下，直径 200mm 以下为 100% ，大块率对比无延期分段起爆降低 16.86% 。上段 4ms 、 8ms 和 10ms 延期分段起爆条件下直径 200mm 以下为 100% ，大块率对比无延期分段起爆降低 16.86% 。

但综合分析可知，下段延期分段起爆时 6ms 为最优孔内延期时间，破碎体积约为 450cm^3 ，破碎块度通过率对比无延期分段起爆平均提高 20.14% ，证明此时岩石破碎块度更均匀，中等块度占比最高；采用上段延期起爆时， 8ms 为最优孔内延期时间，破碎体积约为 300cm^3 破碎块度通过率对比无延期分段起爆平均提高 15.91% 。实验结果证明了理论分析的准确性，针对不同起爆顺序设计最优延期时间，才能实现爆破振动减振与岩石破碎块度优化的双重工程目标。同时模型试验大块率仅用于比较同一体系内不同延期方案的优劣，其绝对值与现场大块率不做直接数学换算，仅作为相对趋势的参照。

2.3 振动测试结果及分析

使用 NUBOX-8016 型爆破振动测试仪和 iSensor 智能传感器记录振动信号，分别采集先上后下和先下后上两组起爆顺序的 6 种延期爆破的振动峰值，整理出 12 组有效数据并统计整理，实验结果统计如图 7：



(a) Lower deck delay

(b) Upper deck delay

图 7 振动峰值图

Fig.7 Peak particle velocity (PPV) diagram

由图 a,b 可知，分段延期起爆最大振速整体小于分段无延期起爆，图 a 为下段延期起爆，由振动随距离变化可见 4ms 和 6ms 延期时，最大振速出现了明显的降低，在这两个延期时间条件下，爆破后上下段的爆破振动在传播过程中发生相互抵消衰减，从实验结果上可知在该实验模型中下

段延期起爆设置 6ms 延期时间减震效果最佳, 对比分段间隔无延期起爆, 爆心距 1m 处最大振速降低 34.46%, 爆心距 3m 处最大振速有效降低 46.45%。图 b 为上段延期起爆, 由图可知爆心距为 1m 时, 4ms 延期爆破振动最大, 其它延期时间设置对比无延期可知孔内延期起爆都在一定程度上降低了振动影响。上段延期起爆中, 上段 10ms 延期时整体振动较小, 对比分段无间隔起爆, 爆心距 1m 处最大振速降低 55.14%, 上段设置 8ms 延期最大振速有效降低 36.98%, 但在爆心距 3m 处 10ms 延期最大振速降低 46.27%, 而 8ms 延期最大振速降低 68.46%, 可知在该实验模型中上段延期起爆设置 8ms 延期时间减震效果最佳。

3 SPH-FEM 法数值模拟

基于现有的仪器限制及测试水平, 模型试验只能展示最终破岩效果和爆破振动信号变化情况, 难以直观地揭示分段起爆破岩机制, 而数值模拟可为探究孔内分段起爆的爆破机理提供有效途径。基于流体动力学的应用, 本研究采用 SPH-FEM 法开展数值模拟, 结合两种算法的优点对大变形区域和小变形区域分别采用 SPH 粒子和 FEM 网格进行建模, 二者之间采用固结耦合算法传递力学信息, 模型周围则使用 FEM 网格的边界条件施加方法。

3.1 模型建立

运用 ANSYS/LS-DYNA 和 LS-PREPOST 建立三组爆破模型, 模型几何尺寸为 400mm×375mm×350mm, 台阶高度 250mm 如图 8 所示。

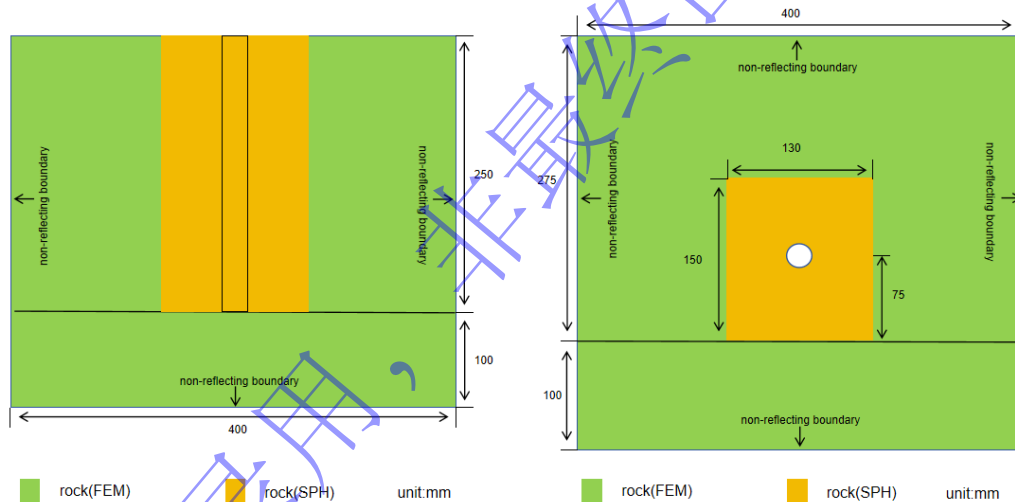
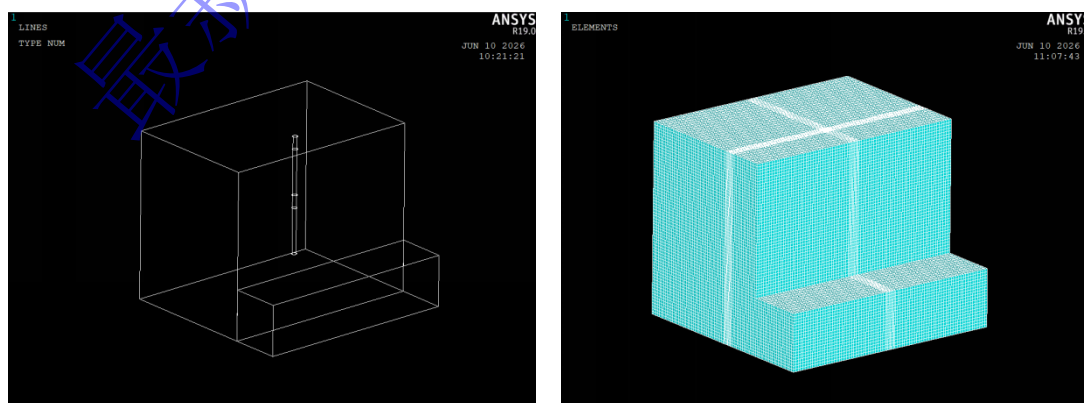


图 8 数值模拟几何尺寸图

Fig. 8 Geometry and dimensions of the numerical model



(a) Bench blasting simulation design

(b) Mesh generation of the blasting bench

图 9 数值模拟 3D 图

Fig. 9 3D illustration of the numerical model

三组爆破模型中的炮孔深度、装药长度、填塞长度、装药直径与模型试验中相同,根据模型实验结果分析,分别设置分段无延期,下段 6ms 延期和上段 8ms 延期。为了简化计算将炮孔填塞材料等效为岩石,对产生大变形的炸药和炮孔近区岩石采用 SPH 粒子进行建模,对变形很小的炮孔远区岩石利用 FEM 网格进行建模如图 9 所示,网格划分 0.5cm,炮孔部分单独划分 4 等分,二者之间的耦合算法使用*CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACE 关键字进行定义。此外,为减少边界应力波反射的影响,将模型顶部,前部与台阶上部作为自由面以外,爆破模型周围其他五个面均设置无反射边界条件^{[27][29]}。

3.2 材料模型与参数

炸药采用*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型和 JWL (Jones-Wilkins-Lee) 状态方程进行模拟^{[19][20]},其中 JWL 状态方程表达式为:

$$p_e = A_e \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B_e \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (4)$$

式中, p :爆轰压力/GPa; A_e 、 B_e :炸药材料参数/GPa; R_1 、 R_2 、 ω :炸药材料常数,无量纲; V 表:爆轰产物相对体积,无量纲; E_0 表示初始比内能, GPa。

已知多孔粒状铵油炸药的密度为 $0.8\text{--}1.1\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,爆速为 $3500\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,与文献^[20] 中炸药的密度和爆速 ($0.88\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $3800\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 接近,因此铵油炸药 (ANFO) 状态方程参数可根据文献^[20] 进行同等设置,具体状态方程参数如表 2:

表 2 ANFO 状态方程参数^[22]
Table 2 ANFO equation of state (EOS) parameters^[22]

Density $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	Detonation velocity $D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Detonation pressure /GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/GPa
0.88	3800	0.14	4.71	0.07	4.05	0.95	0.3	0.07

模型试验中使用水泥砂浆作为岩石相似材料,在 LS-DYNA 自定义材料模型中, MAT_RHT 可以用来模拟爆破荷载下岩石的本构关系^{[21][23]}, RHT 岩石材料的状态方程如式

$$\begin{cases} p(\rho, e) = A_1 \mu + A_2 \mu^2 + A_3 \mu^3 + (B_0 + B_1 \mu) \rho_0 e, \mu > 0 \\ p(\rho, e) = T_1 \mu + T_2 \mu^2 + B_0 \rho_0 e, \mu < 0 \end{cases} \quad (5)$$

岩石的主要材料参数已列于表 3,其他本构参数可根据抗拉强度相近的水泥砂浆参数进行同等设置^{[23][24]},具体本构参数见表 3:

表 3 岩石材料本构参数^{[23][24]}
Table 3 Constitutive parameters of rock material^{[23][24]}

Density $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Elastic modulus E/GPa	Compressive strength σ_c/MPa	A	Tensile strength σ_b/MPa	A_1	A_2/GPa	A_3
2210	22.4	27.2	1.6	2	0.3527	0.3958	0.0904
n/GPa	B_0	B_1	B	T_1/GPa	T_2	D_1	D_2
0.61	1.22	1.22	0.01	0.3527	0.0	0.04	1.0
B^*	G_c^*	G_t^*	p_{el}/GPa	p_{co}/GPa	A_f	N_f	N_p
1.6	0.53	0.7	0.06	0.06	1.6	0.61	3.0

3.3 模拟结果分析

3.3.1 损伤变化分析

将采用 SPH-FEM 耦合方法建立的台阶单孔分段起爆模型通过 LS-DYNA 求解以及 LS-PREPOST 后处理,得到了无延期分段起爆,下段 6ms 延期分段起爆以及上段 8ms 延期分段起爆条件下各 4 个时间点的爆破过程图像。

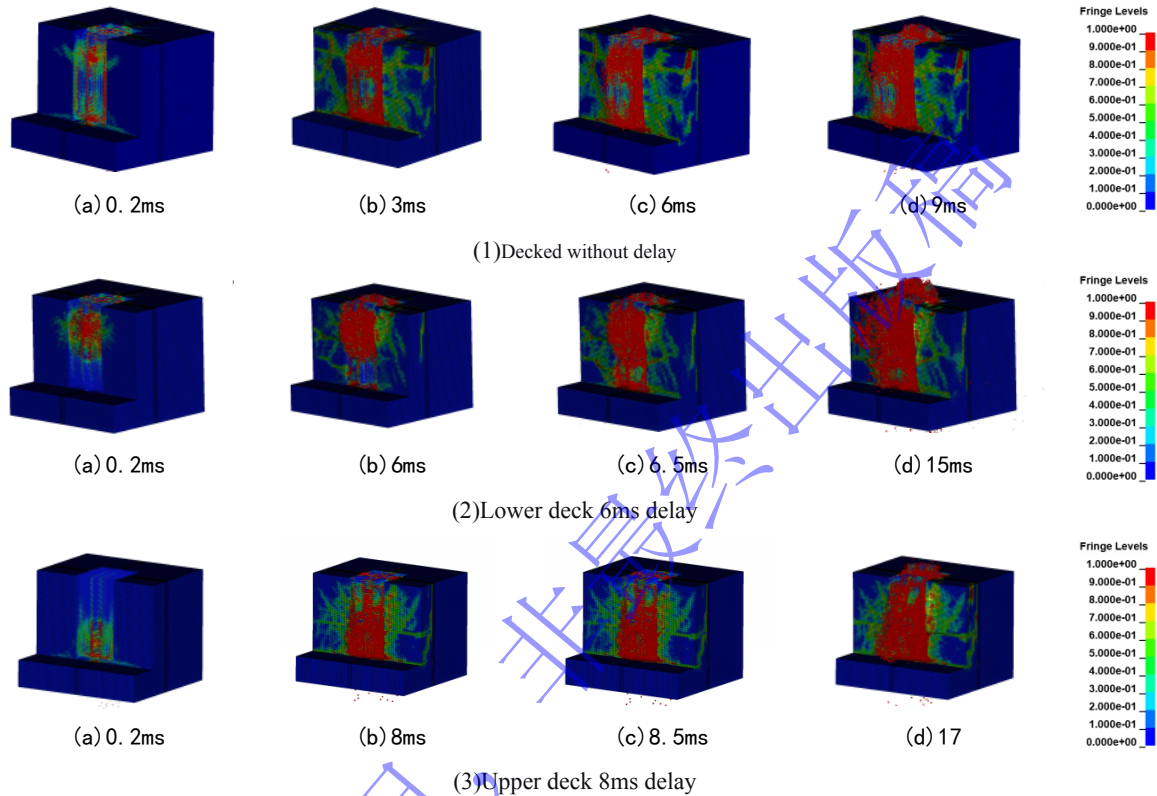


图 10 分段起爆损伤裂纹变化图

Fig. 10 Damage and crack propagation during decked blasting

如图 10 所示,无延期分段间隔起爆后,产生的损伤开始向外蔓延,此时爆炸能量以应力波形式快速传播,使孔壁岩体率先产生初始裂纹,损伤范围在上下装药段近区。由于无延期控制,上段与下段起爆的应力波在爆破区域中部形成叠加效应,导致该区域岩体损伤程度骤增,但边坡临空面方向的约束未得到解除。随时间推移应力波反射产生的应力变化造成局部岩体过度破碎而深部岩体破碎不足,产生大块与根底并存的现象;另一方面,上部岩体未先行爆破解除约束,底部岩体在强夹制作用下难以充分抛掷,最终导致能量利用不充分、破碎块度分布不均匀。下段 6ms 延期分段起爆后,应力波以炮孔为中心向外扩散并对孔壁岩体产生初始的冲击损伤完成边坡岩体初始微裂纹起裂与扩展,为后续破碎与抛掷提供损伤基础。6ms 后下段装药起爆此时上段装药爆破已经在边坡临空面方向形成初步自由面,有效降低了边坡岩体的夹制作用,同时应力波叠加增强破碎效果,爆轰产物向外膨胀推动岩体向上隆起破碎并向外抛掷。

上段 8ms 延期分段起爆时,下段装药率先起爆,爆轰能量以应力波形式传播,在底部集中损伤区,8ms 时下段爆破已经完成了底部岩体的初始破碎与松动,在边坡临空面方向形成了初步的自由面,有效解除了底部岩体的侧向夹制作用。上段装药起爆产生的应力波向下传播,在中部区域发生有序叠加,既避免了无延期起爆时,应力波无序叠加导致的局部过度破碎问题,又利用应力波的叠加效应增强了上中部岩体的破碎效果。

3.3.2 损伤体积变化分析

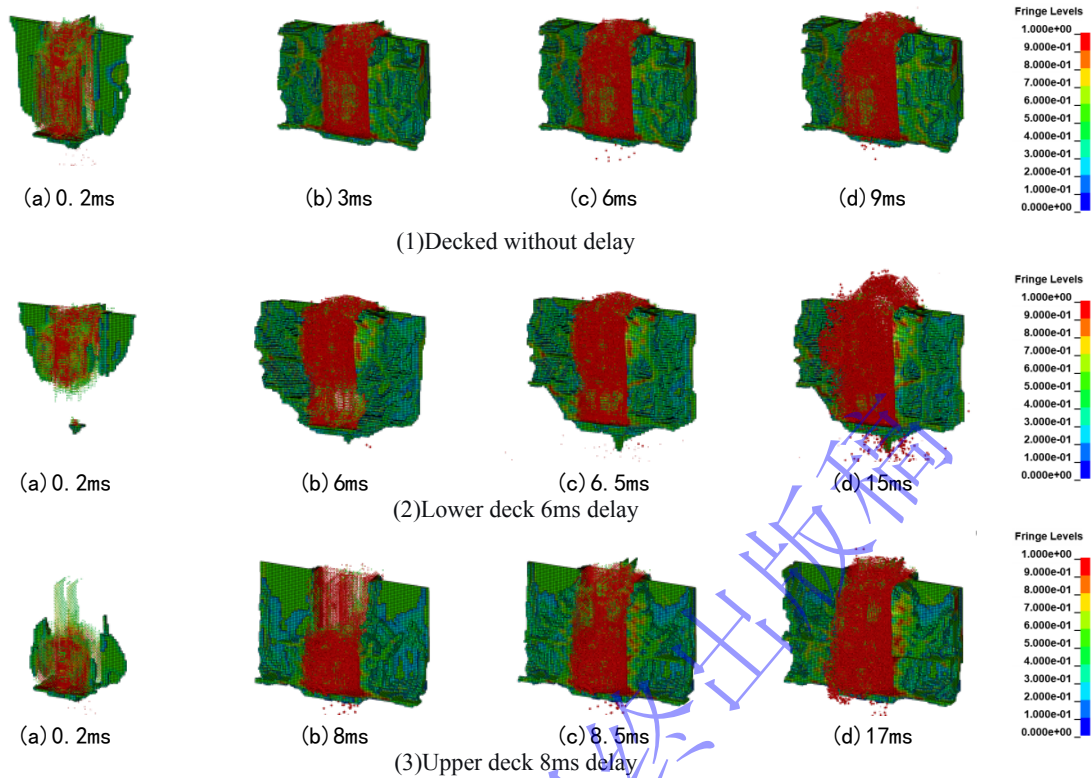


图 11 模拟损伤体积变化图

Fig. 11 Variation of simulated damage volume

如图 11 对比三种延期条件起爆 9ms 后的损伤变化情况, 分段无延期条件下 SPH 和 FEM 部分总损伤体积为 298.5cm^3 , 相比于模型试验误差为 16.24%。下段 6ms 分段起爆条件下 SPH 和 FEM 部分总损伤体积为 568.8cm^3 相比于模型误差为 20.88%。上段 8ms 延期条件下 SPH 和 FEM 部分总损伤体积 388.7cm^3 相比于模型误差为 17.67%。对比分段无延期起爆损伤体积分别提高 90.55%和 30.22%。考虑到实际测量误差, 模拟结果和试验结果较为接近, 表明模拟具有良好的可信度, 且通过模拟证明上下段延期相对与无延期起爆具有更好的爆破效果。

4 现场应用

4.1 现场实验方案

现场试验在内蒙古乌海某露天矿山进行, 该露天矿山岩层以砂岩为主, 整体坚固性系数 7-9, 使用铵油炸药和露天煤矿许用型雷管作为爆破器材, 采用三角型布孔, 台阶高度 19m, 平均孔深 20m, 孔径 90mm, 每次起爆 4 个炮孔, 孔距 4m, 孔间延期 17ms, 对每次起爆设置不同孔内毫秒延期。在不影响生产条件下设计于主炮区最后部分进行分段装药孔内延期爆破实验, 当主炮区起爆结束 150ms 后, 实验炮区开始由前向后起爆。炮孔布置和试验爆破参数如下图 12 表 4 所示。

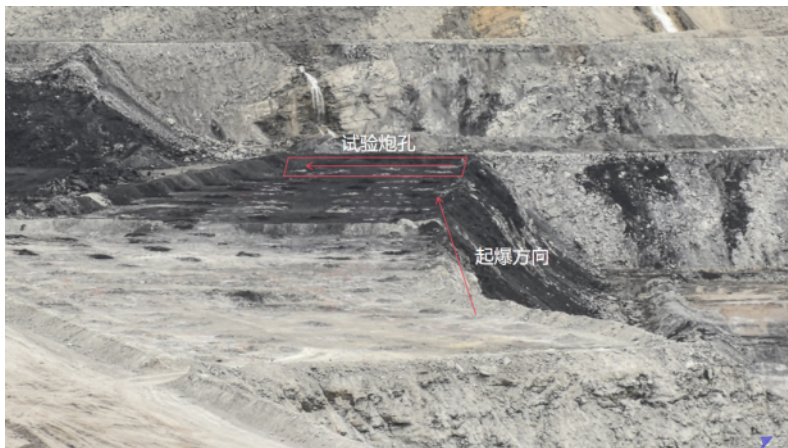


图 12 炮孔布置图

Fig. 12 Blast hole layout

表 4 试验爆破参数表

Table 4 Experimental blasting parameters

Test No.	Schematic of charge structure	In-hole delay	Bench height/m	Toe burden/m	Number of holes	Hole diameter/m	Hole spacing/m	Sand-mud stemming deck/m	Hole depth/m	Stemming height/m	Charge per hole/kg	Powder factor/kg·m ⁻³
A	1 Continuous charge	0	19	2.5	4	90	4	0	19.8	5.8	85	0.305
	2 decked charge	0	19	2.5	4	90	4	2.5	20	3.5	85	0.305
	3 decked charge	Lower deck 6 ms	19	2.5	4	90	4	2.5	19.9	3.4	85	0.305
	4 decked charge	Upper deck 8 ms	19	2.5	4	90	4	2.5	20.1	3.6	85	0.305
B	1 Continuous charge	0	19	2.5	4	90	4	0	20	6	85	0.305
	2 decked charge	0	19	2.5	4	90	4	2.5	20.2	3.7	85	0.305
	3 decked charge	Lower deck 6 ms	19	2.5	4	90	4	2.5	20.1	3.5	85	0.305
	4 decked charge	Upper deck 8 ms	19	2.5	4	90	4	2.5	19.8	3.5	85	0.305

A, B 两组设置孔内微差分段起爆进行重复实验，除设置孔内延期以外其它爆破参数全部沿用现场实际爆破参数，炮孔存在 1m 左右的超深，孔间延期设置 17ms。采用 NUBOX-8016 型爆破振动测试仪和 iSensor 智能传感器记录对爆破振动进行采集，测点布置如下图 13，统计记录实际爆破效果。

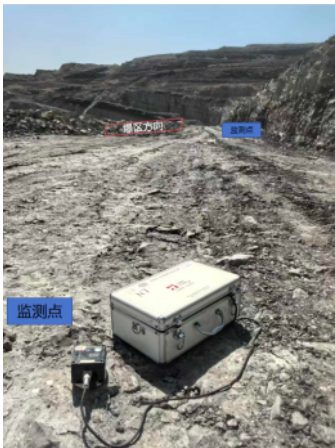


图 13 现场爆破振动监测

Fig. 13 Field blast vibration monitoring

就实际爆破结果可知连续装药存在轻微超挖现象，分段无延期和下段 6ms 延期存在一定的根底不平整的情况，8ms 时无根底和超挖现象。

4.2 大块率统计结果对比

根据矿区现有的铲装设备，将最大外形超过的 1.5m 岩石定为大块岩石，统计结果见表 5。

表 5 大块率统计表

Table 5 Statistics of boulder yield

Test No.	Schematic of charge structure	Total blasted volume of test area	Boulder yield condition			
			Number of boulders	Volume of boulders	Maximum boulder dimension	Boulder yield
A	1 Continuous charge	2030	25	266	2.2	13.10%
	2 Decked without delay	2030	19	152	2.0	7.48%
	3 Lower deck 6 ms	2030	15	61	1.6	3.00%
	4 Upper deck 8 ms	2030	18	88	1.7	4.33%
B	1 Continuous charge	2030	23	213	2.1	10.49%
	2 Decked without delay	2030	21	168	2.0	8.27%
	3 Lower deck 6 ms	2030	13	89	1.9	4.38%
	4 Upper deck 8 ms	2030	22	108	1.7	5.32%

对统计结果进行分析可以得出:装药不变的条件下分段装药方案现场试验平均大块率对比连续装药下降了 3.92%。下段 6ms 延期起爆平均大块率对比连续装药下降了 8.11%，对比分段无延期起爆下降了 4.19%，上段 8ms 延期起爆平均大块率对比连续装药下降了 6.97%，对比分段无延期起爆下降了 3.05%。在模型实验和数值模拟揭示的规律指导下，通过有限次现场验证，确认两种延期方案在实际工况中的可行性和优势性。



图 14 爆后破碎块度展示

Fig. 14 Post-blast fragmentation display

4.3 爆破振动参数对比

表 6 爆破振动速率统计表

Table 6 Statistics of blast vibration velocity

Test No.	Schematic of charge structure	Measuring Point No	Stand off distance/m	x/cm·s ⁻¹	y/cm·s ⁻¹	z/cm·s ⁻¹	PPV/cm·s ⁻¹
A	Continuous charge	1	44	5.43	3.98	3.38	5.43
		2	63	3.31	2.61	2.10	3.31
		3	84	3.18	2.58	2.04	3.18
	Decked without delay	1	38	5.15	2.27	3.63	5.15
		2	60	1.47	1.29	1.41	1.47
		3	77	1.40	0.60	1.06	1.40
	Lower deck 6 ms	1	37	0.97	1.60	3.24	3.24
		2	61	0.61	1.12	2.30	2.30
		3	78	0.75	0.95	1.25	1.25
	Upper deck 8 ms	1	43	2.38	2.80	1.56	2.80
		2	65	2.01	2.27	2.43	2.43
		3	84	1.29	1.34	0.94	1.34
	Continuous charge	1	36	5.07	3.02	2.29	5.07
		2	61	3.52	2.69	1.71	3.52
		3	79	2.73	2.00	1.61	2.73
B	Decked without delay	1	38	3.33	1.83	3.4	3.33
		2	60	2.53	1.98	3.08	3.08
		3	77	0.75	1.06	1.61	1.61
	Lower deck 6 ms	1	42	0.80	1.88	1.90	1.90
		2	64	1.12	1.63	0.99	1.63
		3	82	1.20	1.02	0.76	1.20
	Upper deck 8 ms	1	41	1.89	0.99	2.32	2.32
		2	60	1.97	0.98	1.24	1.97
		3	80	1.47	0.83	1.03	1.47

表 7 爆破降振率统计表

Table 7 Statistics of blast vibration reduction ratio

Test No.	Measuring point No	Continuous charge/cm·s ⁻¹	Decked without delay/cm·s ⁻¹	Lower deck 6 ms/cm·s ⁻¹	Upper deck 8 ms/cm·s ⁻¹	Lower deck 6 ms vibration		Upper deck 8 ms vibration	
						reduction ratio		reduction ratio	
						vs.	vs.	vs.	vs.
						Continuous charge	Simultaneous decked	Continuous charge	Simultaneous decked
A	1	5.43	5.15	3.24	2.80	40.33%	37.09%	48.43%	45.63%
	3	3.18	1.4	1.25	1.34	60.69%	10.71%	57.86%	4.29%
B	1	5.07	3.33	1.90	2.32	62.52%	42.94%	54.24%	30.33%
	3	2.73	1.61	1.20	1.47	56.04%	25.47%	46.15%	8.70%

Table notes:降振率 = (对比方案峰值 - 本方案峰值) / 对比方案峰值 × 100%

由表 6、7 可知,受现场条件影响,测点爆心距存在±5m 误差,但均在设计的 40m、60m 和 80m 的测点距离左右,故而将每组 1 号和 3 号中测点分别对比降振率及其变化趋势,针对 8 次爆破振动速率统计可知,近场 1 号测点处下段 6ms 延期相对于分段无延期起爆平均降振率在 40.02%,远场 3 号测点处相对于分段无延期起爆平均降振率在 18.09%。近场 1 号测点处上段 8ms 延期相对于分段无延期起爆平均降振率在 37.98%,远场 3 号测点处相对于分段无延期起爆平均降振率在 6.5%。综合试验结果可知,在该现场试验条件下下段 6ms 延期和上段 8ms 延期均可有效降低振动。

结论

本文针对孔内分段起爆的延期时间变化对爆破效果的影响机理,采用了模型实验结合 RHT 混凝土损伤演化模型模拟,并通过现场实验进行实际应用,得出以下结论

(1) 通过混凝土模型实验对岩石破碎块度和爆破振动规律分析,证实了孔内毫秒延期分段起爆相较于分段无延期起爆,下段延期 6ms 和上段延期 8ms 时具有更低的爆破振动和较好的岩石破碎效果,可以有效降低爆破振动有害效应,大块率,提高爆破效果。

(2) 采用 SPH-FEM 流体粒子法的数值模拟,模拟混凝土模型孔内分段起爆爆破过程,直观揭示孔内毫秒延期分段起爆变化的损伤机理。对比分段无延期和下段 6ms 延期,上段 8ms 延期的损伤变化,可得孔内分段延期起爆能有效提高能量利用率,同时提高对岩石的损伤效果,有助于底板平整降低爆破有害效应。

(3) 现场应用中,采用下段 6ms 延期相对与分段无延期起爆近端平均降振率 40.02%,远端平均降振率 18.09%,适用于抛掷爆破具有良好的破碎块度和降振率,上段 8ms 延期相对与分段无延期起爆在近区平均降振率 37.98%,远端平均降振率 6.5%适用于松动爆破,保证边坡稳定性和根底平整。

(4) 综合模型实验,数值模拟及现场结果分析,针对实际应用需求对分段装药爆破设置合理的孔内毫秒延期,能有效提高能量利用率,降低大块率和爆破振动有害效应,爆破效果明显优于常规连续装药爆破和孔内无延期间隔装药爆破。

参考文献

- [1] 刘庆, 康强, 赵明生. 孔内微差爆破数值模拟及试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2013, 33(3): 108-110, 121.
LIU Q, KANG Q, ZHAO M S. Numerical simulation and experimental study on micro-displacement blasting within the hole[J]. Mining Research and Development, 2013, 33(3): 108-110, 121.

- [2] 占时春, 李山存. 孔内孔间微差爆破试验研究[J]. 工程爆破, 2006(2): 45-48.
ZHAN S C, LI S C. Research on micro-difference blasting experiments within and between holes[J]. Engineering Blasting, 2006(2): 45-48.
- [3] 罗开军. 孔内孔间微差爆破间隔时间的合理选择[J]. 金属矿山, 2006(4): 4-6.
LUO K J. Rational selection of interval time for micro-differential blasting between holes[J]. Metal Mine, 2006(4): 4-6.
- [4] 张引良, 陈需. 分段装药结构在露天矿台阶爆破中的应用[J]. 露天采矿技术, 2016, 31(S1): 5-7, 11.
ZHANG Y L, CHEN X. Application of segmented charge structure in bench blasting in open-pit mines[J]. Opencast Mining Technology, 2016, 31(S1): 5-7, 11.
- [5] 叶建军, 彭庆波, 王雁冰, 等. 深孔孔内分段爆破技术[J]. 爆破, 2023, 40(2): 61-68.
YE J J, PENG Q B, WANG Y B, et al. Segmental blasting technology for deep holes[J]. Blasting, 2023, 40(2): 61-68.
- [6] 张丹, 段恒建, 曾福洪. 分段爆破地震强度的试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2006(3): 279-283.
ZHANG D, DUAN H J, ZENG F H. Experimental study on seismic intensity of staged blasting[J]. Explosion and Shock Waves, 2006(3): 279-283.
- [7] 辛鹏飞, 关福晨, 郝春晖, 等. 装药结构与孔内延期对露天深孔爆破振动影响研究[J]. 黄金, 2025, 46(3): 50-53.
XIN P F, GUAN F C, HAO C H, et al. Study on the impact of charge configuration and in-hole delay time on vibration during open-pit deep-hole blasting[J]. Gold, 2025, 46(3): 50-53.
- [8] 张晓平, 马建军, 刘令. 露天深孔空气间隔装药爆破的数值模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(33): 13599-13605.
ZHANG X P, MA J J, LIU L. Numerical simulation study on open-pit deep-hole air interval charge blasting[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(33): 13599-13605.
- [9] 张建华, 李佳乐, 张肯, 等. 混装乳化炸药间隔装药技术在某露天矿山现场应用研究[J]. 爆破, 2025, 42(1): 63-70, 96.
ZHANG J H, LI J L, ZHANG K, et al. Application research of interval loading technology for mixed-emulsion explosives at an open-pit mine site[J]. Blasting, 2025, 42(1): 63-70, 96.
- [10] 杨赛群. 基于电子雷管条件下台阶爆破合理延期时间的优选及应用[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2023.
YANG S Q. Optimization and application of reasonable delay time for bench blasting under electronic detonator conditions[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2023.
- [11] 李洪伟, 吴延梦, 潘乐, 等. 基于 DIC 的露天矿山微差爆破模型试验及数值模拟[J]. 金属矿山, 2024(3): 131-139.
LI H W, WU Y M, PAN L, et al. Model test and numerical simulation of bench blasting with millisecond delay in open-pit mine based on DIC[J]. Metal Mine, 2024(3): 131-139.
- [12] 程兵, 叶福, 汪泉, 等. 孔内分层装药爆破破岩成腔机理及应用[J]. 含能材料, 2025, 33(7): 714-724.
CHENG B, YE F, WANG Q, et al. Mechanism and application of cavity formation by layered charge blasting in rock cavities[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2025, 33(7): 714-724.
- [13] 梁瑞, 陈小伟, 周文海, 等. 基于 SPH-FEM 耦合法的连续与分段装药爆破效果数值模拟[J]. 黄金科学技术, 2025, 33(6): 1128-1138.

- LIANG R, CHEN X W, ZHOU W H, et al. Numerical simulation of continuous and segmented charge blasting effects based on the SPH-FEM coupling method[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(6): 1128-1138.
- [14] 王振雄, 顾文彬, 秦入平, 等. 水下深孔爆破间隔装药起爆时差影响的数值模拟[J]. 爆破器材, 2012, 41(3): 8-11, 15.
- WANG Z X, GU W B, QIN R P, et al. Numerical simulation of the impact of time delay in charge placement during underwater deep-hole blasting[J]. Explosive Materials, 2012, 41(3): 8-11, 15.
- [15] 曲艳东, 吴敏, 孔祥清, 等. 深孔连续与间隔装药爆破数值模拟研究[J]. 爆破, 2014, 31(4): 16-21, 81.
- QU Y D, WU M, KONG X Q, et al. Numerical simulation study on continuous and interval charge blasting in deep holes[J]. Blasting, 2014, 31(4): 16-21, 81.
- [16] 高腾飞. 露天矿山空气间隔装药结构研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
- GAO T F. Research on the air-insulated charge structure in open-pit mines[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016.
- [17] 王凯, 张智宇, 高腾飞. 某露天采场深孔台阶爆破空气间隔装药的应用[J]. 爆破, 2018, 35(1): 80-85.
- WANG K, ZHANG Z Y, GAO T F. Application of air interval charge in deep-hole step blasting at an open-pit mining site[J]. Blasting, 2018, 35(1): 80-85.
- [18] 赵立财. 隧道水压爆破中不同轴向装药结构的地表振动响应规律研究[J]. 振动工程学报, 2025, 38(1): 172-179.
- ZHAO L C. Study on the surface vibration response patterns of different axial charge configurations in tunnel hydraulic blasting[J]. Journal of Vibration Engineering, 2025, 38(1): 172-179.
- [19] 费鸿禄, 王天恒, 荆广杰. 露天矿富水裂隙岩体台阶爆破的殉爆机理和防殉爆研究[J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(1): 168-184.
- FEI H L, WANG T H, JING G J. Research on the detonation mechanism and anti-detonation measures for step blasting in water-rich fractured rock masses in open-pit mines[J]. Explosion and Shock Waves, 2025, 45(1): 168-184.
- [20] 靳俊晓, 赵志强, 苏洪, 等. 不耦合系数对割缝爆破效果影响试验研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(23): 260-269.
- JIN J X, ZHAO Z Q, SU H, et al. Experimental study on the influence of uncoupling coefficient on fissure blasting performance[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(23): 260-269.
- [21] 段继超, 宗琦, 汪海波, 等. 起爆顺序对露天台阶爆破效果影响的数值模拟及现场试验[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(5): 109-116.
- DUAN J C, ZONG Q, WANG H B, et al. Numerical simulation and field experiments on the impact of detonation sequence on the blasting effect of open-cut step blasting[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(5): 109-116.
- [22] 刘坚, 王银涛, 武飞岐, 等. 粒状铵油炸药轴向连续装药预裂爆破数值模拟及应用研究[J]. 爆破, 2021, 38(1): 109-115.
- LIU J, WANG Y T, WU F Q, et al. Numerical simulation and application research on axial continuous charge pre-splitting blasting of granular ammonium oil explosives[J]. Blasting, 2021, 38(1): 109-115.
- [23] 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.

- WANG Y T. Research on rock mass blasting fragmentation models based on the RHT constitutive model[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2015.
- [24] 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), 2016.
- LI H C. Research on the theory of rock RHT models and methods for determining key parameters[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2016.
- [25] LI Z, WU Y B, ZHANG X J. Study on explosion impact pressure and damage distribution law of rock powder segmented charge[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 163(Part A): 108517.
- [26] LI X, HUANG G Y, GUO Z W. The fragmentation and its mechanism of the uncoupled charge structure with segmental explosive[J]. Materials & Design, 2022, 223: 111224.
- [27] 邢化岛. 爆炸荷载作用下水泥砂浆试块裂纹扩展及数值模拟研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
- XING H D. Study on crack propagation and numerical simulation of cement mortar samples under explosive load[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2017.
- [28] 李祥龙, 杨长辉, 王建国, 等. 基于模型试验的预裂孔爆破参数优选[J]. 高压物理学报, 2022, 36(2): 190-196.
- LI X L, YANG C H, WANG J G, et al. Optimization of pre-hole blasting parameters based on model testing[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(2): 190-196.
- [29] 周朝兰, 刘志祥, 杨小聪, 等. 残矿回采挤压爆破参数优化的数值模拟[J]. 高压物理学报, 2023, 37(3): 146-157.
- ZHOU C L, LIU Z X, YANG X C, et al. Numerical simulation of parameter optimization for crushing blasting in residual ore mining[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(3): 146-157.
- [30] 孙赛赛. 不同大小抵抗线对爆破地震波衰减规律的影响研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
- SUN S S. Study on the effects of different resistance values on the attenuation characteristics of seismic waves generated by blasting[D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.
- [31] 刘俊轩. 高台阶抛掷爆破模型相似材料的试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- LIU J X. Experimental study on similar materials for high-step throwing explosive models[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015.
- [32] 李洪伟, 吴延梦, 吴立辉, 等. 电子雷管起爆条件下隧道掏槽孔与辅助孔的延时优化试验研究[J]. 高压物理学报, 2023, 37(1): 171-181.
- LI H W, WU Y M, WU L H, et al. Experimental study on delay optimization of tunnel excavation holes and auxiliary holes under electronic detonator initiation conditions[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(1): 171-181.
- [33] YI C P, SJOBERG J, JOHANSSON D, et al. A numerical study of the impact of short delays on rock fragmentation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 100: 250-254.
- [34] 王哲, 高飞, 朱守兴, 等. 分层装药起爆时间间隔对爆破振动影响[J]. 工程爆破, 2026, 32(1): 56-63.
- WANG Z, GAO F, ZHU S X, et al. Influence of initiation time interval of layered charge on blast vibration[J]. Engineering Blasting, 2026, 32(1): 56-63.

Study on Effects of Deep-Hole Decked Blasting Based on In-Hole Delay Optimization

Hu Zijie¹, Li Hongwei¹, Shen Lixu², Liang Hao¹, Wang Zhen¹, Wang Weiqin², Ma Ke², Chen Yequn³

1. School of Chemical and Blasting Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;
2. Inner Mongolia Kangning Mining Co., Ltd., Inner Mongolia 017000, China;
3. Anhui Leiming Blasting Engineering Co., Ltd., Huaibei, Anhui 235000, China.

Abstract: To address the issues of excessive boulder yield and severe blast vibration commonly encountered in continuous charging and conventional decked blasting without in-hole delay, this study investigates the influence of in-hole millisecond delay variations on the fragmentation performance of decked blasting. A series of model-scale blasting experiments were conducted, incorporating vibration monitoring and post-blast fragment size analysis, to systematically evaluate the effects of delay time on blast vibration and rock fragmentation. Numerical simulations using ANSYS/LS-DYNA were performed to reveal the rock damage evolution and muckpile throwing process under delayed decked blasting. Guided by the experimental and numerical results, limited field validation tests were carried out to confirm the feasibility and advantages of optimized in-hole delays under actual working conditions. The experimental results demonstrate that, under identical open-pit mining conditions, the upper-deck 8 ms delay scheme (i.e., bottom deck initiated first) reduces the boulder yield by 3.05 percentage points and the near-field blast vibration by 37.98% compared with decked blasting without delay, while also reducing toe residual. The lower-deck 6 ms delay scheme (i.e., top deck initiated first) reduces the boulder yield by 4.19 percentage points and the near-field blast vibration by 40.02%, with improved fragmentation and throwing performance. It is concluded that setting a reasonable in-hole millisecond delay for decked charge blasting according to site-specific conditions can effectively enhance energy utilization, decrease boulder yield, and mitigate the adverse effects of blast vibration in open-pit deep-hole blasting.

Keywords: In-hole delay; Decked blasting; Deep-hole blasting; Model test; Fragmentation analysis; ANSYS numerical simulation; Boulder yield