

文章编号:1006-9941(XXXX)XX-0001-12

孔内分层装药爆破破岩成腔机理及应用

程兵^{1,2,3},叶福³,汪泉³,徐颖^{1,2},程扬帆³,李洪伟³,王梦想¹

(1. 安徽理工大学 矿山地下工程教育部工程研究中心, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽 淮南 232001; 3. 安徽理工大学 化工与爆破学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 为了研究孔内分层装药爆破破岩成腔机理,首先通过理论分析和模型试验探究孔内分层装药对深孔掏槽破岩成腔效果的影响,并采用数值模拟揭示岩体破坏抛掷历程与破岩成腔机理,通过现场试验验证其应用效果。结果表明:孔内分层装药能够实现炸药能量的均匀分布和先后释放,可以消除槽腔上部大块岩石、削弱槽腔底部围岩的约束作用,从而达到96.5%的成腔效率;数值模拟实现了爆破历程的可视化,并且模拟结果证实了能量的均匀分布和先后释放对破岩成腔的有利作用;与传统掏槽爆破技术相比,采用孔内分层装药掏槽技术,循环进尺和炮孔利用率分别提高了0.45 m和17.3%,炸药和雷管单耗分别降低了0.42 kg·m⁻³和0.21 PCS·m⁻³,证实了孔内分层装药掏槽技术在深孔爆破中的适用性。

关键词: 深孔掏槽;孔内分层装药;破岩成腔;数值模拟;现场试验

中图分类号: TJ51;TD236

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2025040

0 引言

目前,钻爆法仍然是交通隧道、矿山井巷等地下工程开挖的主要手段。在地下掘进爆破中,掏槽爆破的作用是开创新自由面,降低后续其他炮孔的爆破难度。因此,良好的掏槽效果是实现高效钻爆掘进的关键所在^[1-3]。研究人员针对掏槽爆破开展了诸多研究工作,并取得了一系列研究成果。例如,在爆破参数方面,龚敏等^[4]研究了爆破参数对浅孔硬岩掏槽爆破的影响规律,结果表明:适量增加掏槽孔的装药量和倾斜角度可以提高掏槽效果。徐帮树等^[5]针对节理发育大断面隧道爆破破岩效率低下的难题,对掏槽孔的布置形式和单孔装药量进行了优化设计。章逸锋等^[6]基于爆炸应力波和爆生气体联合破岩理论,建立了掏槽孔粉碎区

和裂隙区的计算公式,进而为实际直孔掏槽爆破参数设计提供了理论依据。在预设空孔方面,Chandrakar等^[7]研究了不同空孔数量下掏槽区域岩石的破坏特征,揭示了浅孔掏槽爆破破岩特性随空孔数量的变化规律。左进京等^[8]和陶子豪等^[9]分别通过模型试验和数值模拟,探索了空孔直径对槽腔岩体破裂特征、槽腔成型形态尺寸以及岩块抛掷飞散速率的影响规律。在起爆形式方面,胡建华等^[10]构建了孔底起爆浅孔掏槽爆破的三维有限元模型,并运用单元失效算法揭示了槽腔岩体破坏历程。高启栋等^[11]研究了起爆点位置对槽腔岩体损伤分布的影响规律,并提出了一种邻孔反向传爆法用于实现槽腔岩体的均匀破坏。在装药结构方面,Gao等^[12]探究了不同装药直径下硬岩浅孔掏槽爆破的岩体破坏情况,然后通过增大掏槽孔装药直径消除了槽腔大块岩石。程兵等^[13]研究了侧向切缝装药对硬岩浅孔掏槽效果的影响,证实了通过该装药可以提高槽腔岩体的破碎程度。根据上述可以看出,现有研究大都集中于浅孔掏槽爆破的破岩机理及应用研究。

在地下掘进中采用浅孔爆破,虽然炮孔利用率较高,但单循环进尺较低、循环转换期间辅助作业占用时间较长。于是,深孔爆破应运而生,用于提升单循环进尺、缩短施工周期^[14-15]。但是,孔深的增加会增强围

收稿日期:2025-03-03;修回日期:2025-03-22

网络出版日期:2025-06-23

基金项目:安徽省自然科学基金(2408085QA029);深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室开放基金(SKLMRDPC23KF05);矿山地下工程教育部工程研究中心开放基金(JYBGCZX2023105)

作者简介:程兵(1995-),男,博士,讲师,主要从事爆破理论与技术研究。e-mail:2022053@aust.edu.cn

通信联系人:程扬帆(1987-)男,博士,教授,主要从事爆炸科学与工程研究。e-mail:cyf518@mail.ustc.edu.cn

引用本文: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,DOI:10.11943/CJEM2025040.

CHENG Bing, YE Fu, WANG Quan, et al. Mechanisms of Rock Breaking and Cavity Formation of Hole-inner Layered Charge Blasting[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), DOI:10.11943/CJEM2025040.

岩约束作用,导致破岩成腔效果达不到设计要求,进而影响整体钻爆掘进效率。为解决深孔掏槽爆破中存在的问题,本课题组^[16]前期设计在掏槽孔使用孔内分层装药,并通过有限元模拟初步揭示了应力波传播规律,但是对其破岩成腔机理仍然认识不足。因此,本研究以孔内分层装药为研究对象,通过理论分析和模型试验揭示其对深孔掏槽破岩成腔效果的影响;然后,利用光滑粒子流体动力学-有限元法(SPH-FEM)算法开展数值模拟,探究孔内分层装药的岩石破坏抛掷历程和破岩成腔机理;最后,结合现场试验探究该装药在深孔掏槽爆破中的应用效果。

1 试验设计与理论分析

1.1 装药结构设计

图1为孔内连续装药和孔内分层装药的结构示意图。如图1a所示,传统孔内连续装药是将炸药连续装填于炮孔底部,剩余长度采用炮泥进行封堵;在实际爆破时,炮孔内部所有炸药一次性起爆。如图1b所示,孔内分层装药则是将炸药分为上、下两层进行装填,两层装药之间与孔口剩余长度均采用炮泥进行封堵;在实际爆破时,下层装药的起爆时间滞后于上层装药。

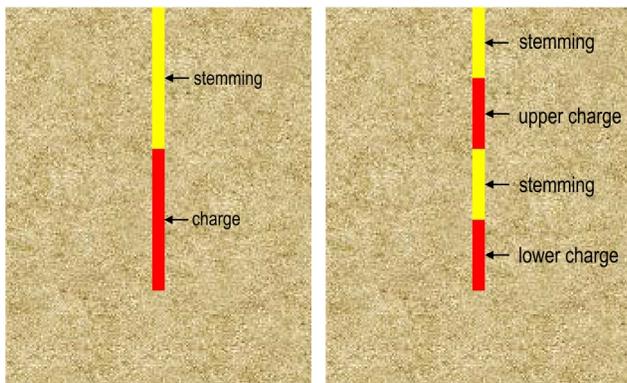


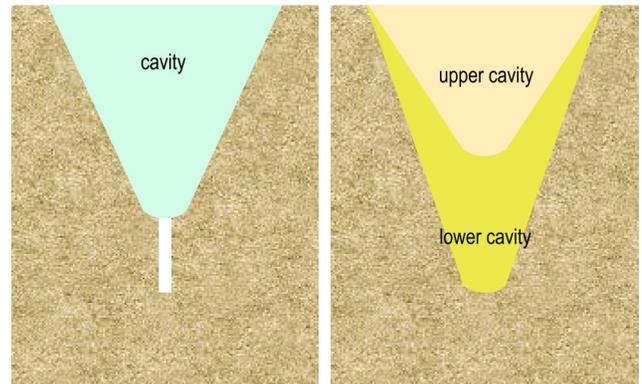
图1 装药结构示意图

Fig.1 Diagram of charge structure

1.2 爆破效果理论分析

对于孔内连续装药深孔掏槽爆破,存在两方面问题:一方面,炸药能量集中于炮孔底部,导致上部未装药区段的岩体难以充分破碎,爆后容易产生大块岩石;另一方面,由于仅有掌子面作为自由面,随着孔深增加围岩约束作用会显著增强,将会导致底部岩体无法抛掷成腔,最终爆破效果如图2a所示。

对于孔内分层装药深孔掏槽爆破,具有两方面优势:在空间上,炸药分层装填使得爆炸能量分布更加均匀,可以避免槽腔上部产生大块岩石,改善槽腔岩体破碎效果;在时间上,通过延时起爆改变了能量释放顺序,上层装药先行爆破创造出新自由面,可以削弱围岩约束作用,降低底部岩石抛掷成腔的难度,最终爆破效果如图2b所示。



a. hole-inner continuous charge b. hole-inner layered charge

图2 爆破效果示意图

Fig.2 Diagram of blasting effects

综上,通过孔内分层装药改变炸药能量的空间分布和释放时序,从而消除上部大块岩石、克服底部围岩的约束作用。借助这种极为有利的时、空条件,在深孔掏槽时便可以将槽腔内部岩体充分破坏和完全抛出,得到符合设计要求的掏槽腔体。

2 试验部分

2.1 试验材料

工业二硝基重氮酚(Diazodinitrophenol, DDNP),密度 $0.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,爆速 $3500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,淮南舜泰化工有限责任公司; $\Phi 6 \text{ mm}$ 薄壁热塑管,广州市菲达思电子有限公司; $\Phi 8 \text{ mm}$ 聚氯乙烯管,上海露比环保科技有限公司; $P\cdot O 32.5$ 水泥,淮南市八公山水泥厂;40目筛网过滤后的淮河黄砂;模具为内径400 mm、壁厚4 mm、高度400 mm的304不锈钢筒;FD 150/200型发爆器,营口飞亚科技有限公司。

2.2 试验方法

按照 $m_{\text{cement}}:m_{\text{sand}}:m_{\text{water}}=1:4:1$ 的配合比进行制备水泥砂浆,并采用模具制备两组直径400 mm、高度380 mm的爆破模型。与此同时,制备立方体标准试件测试其物理力学性能参数,得到水泥砂浆密度为

2350 kg·m⁻³、弹性模量 26.3 GPa、抗压强度 22.4 MPa、抗拉强度 2.0 MPa。同时,在两组模型的顶部中心位置预埋 $\Phi 8$ mm 聚氯乙烯管,可以得到深度 200 mm 的炮孔。采用 $\Phi 6$ mm 薄壁热塑管制备长度 100 mm 和 50 mm 的柱形药包,两种长度的柱形药包内部分别装填 3.0 g 和 1.5 g 工业 DDNP,热塑管内设有扭结的漆包线用于高压放电引爆工业 DDNP。对于孔内连续装药爆破模型,在炮孔内部装填长度为 100 mm 的柱形药包,剩余长度进行密实封堵。对于孔内分层装药爆破模型,上、下层均按照 50 mm 柱形药包和 50 mm 封堵炮泥进行组合装填。在完成上述工作以后对两组模型实施爆破,结束后收集爆落的岩石、观测槽腔纵向剖面,分析最终破岩成腔效果,结果如图 3 所示。

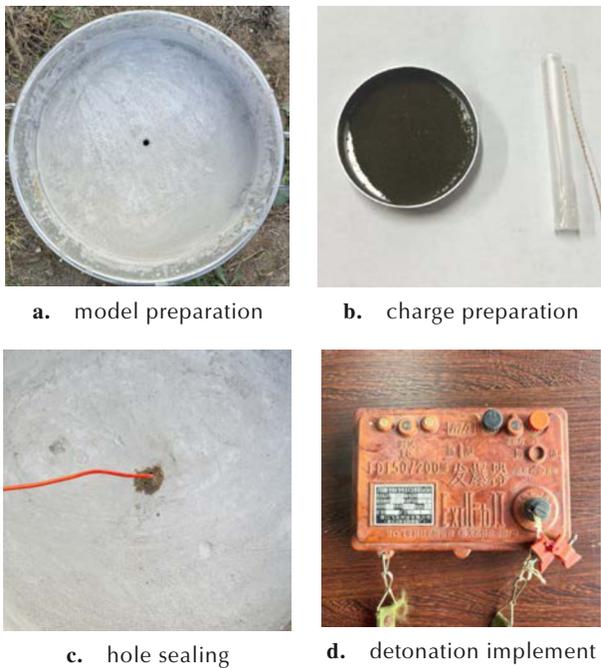


图3 爆破模型试验过程示意图

Fig.3 Diagram of blasting model experiment process

2.3 爆破试验结果

图 4 是掏槽爆破后收集的岩石碎块。如图 4a 所示,对于孔内连续装药爆破模型,岩石破碎块径大部分在 70 mm 以上,个别岩石的块径甚至超过了 120 mm。而对于孔内分层装药爆破模型,岩石破碎比较均匀,块径基本上在 20~60 mm 范围内,如图 4b 所示。可以看出,采用孔内分层装药进行深孔掏槽爆破,可以降低槽腔岩体的破碎块径,避免大块岩石的形成。

采用微分法在某个剖面上每隔 0.5 cm 测量一次深度,基于深度数据绘制掏槽爆破后槽腔的纵向剖面,结果如图 5 所示。当采用孔内连续装药时,槽腔整体

呈倒锥形漏斗状,槽腔的开口宽度为 26.0 cm、深度为 12.8 cm,实际成腔深度仅达到设计掏槽深度的 64.0%(图 5a);如图 5b 所示,当采用孔内分层装药时,槽腔整体也呈倒锥形漏斗状。不过,此时槽腔的开口宽度为 25.5 cm、深度为 19.3 cm,实际成腔深度达到了设计掏槽深度的 96.5%。与前者相比,虽然后者的槽腔开口宽度略有减小,但是槽腔深度增加了 6.5 cm,掏槽效率提高了 32.5%。

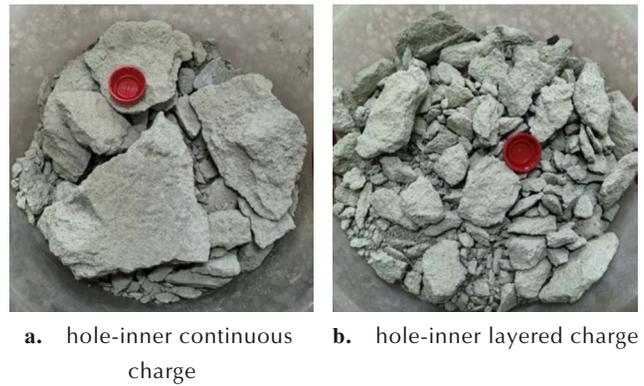


图4 爆后岩石块径分布图

Fig.4 Distribution of rock fragments after blasting

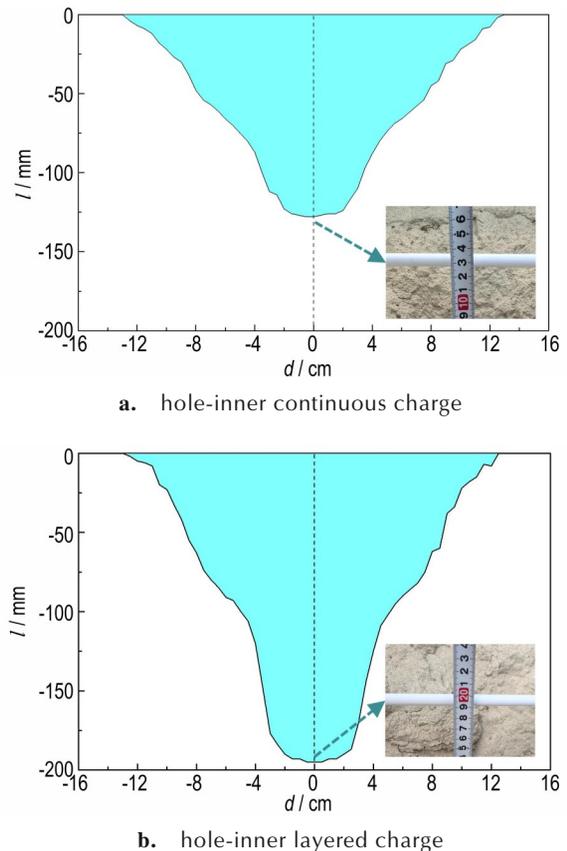


图5 槽腔纵向剖面图

Fig.5 Longitudinal section view of groove cavity

根据上述试验结果分析可以看出,采用孔内分层装药进行深孔掏槽爆破,不仅消除了槽腔上部大块岩石,而且还显著提升了掏槽成腔效率,试验结果证明了理论分析的正确性。

3 数值模拟

由于现有测试水平有限,模型试验只能展示最终破岩与成腔效果,难以直观地揭示破岩成腔机制,而数值模拟可为探究岩石爆破机理提供有效途径。但是,槽腔岩体抛掷属于大变形问题,传统有限元法(FEM)在计算时极易出现网格畸变现象,不仅影响求解精度,甚至导致计算中断。近年来,光滑粒子流体动力学(SPH)作为一种无网格算法备受关注,它能有效解决爆炸领域的大变形问题^[17-19]。因此,本研究采用SPH-FEM法开展数值模拟,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,二者之间通过固结耦合算法传递力学信息,模型周围则采用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建立两组爆破模型,模型几何尺寸为500 mm×500 mm×500 mm(如图6所示)。两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,并且对于孔内分层装药爆破模型,下层装药比上层装药起爆时间滞后5 ms。为了简化计算将炮孔填塞材料等效为岩石进行计算,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,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,为了减少边界应力波反射的影响,除了模型顶部作为临空面以外,模型周围其他五个面均需设置无反射边界条件^[20]。

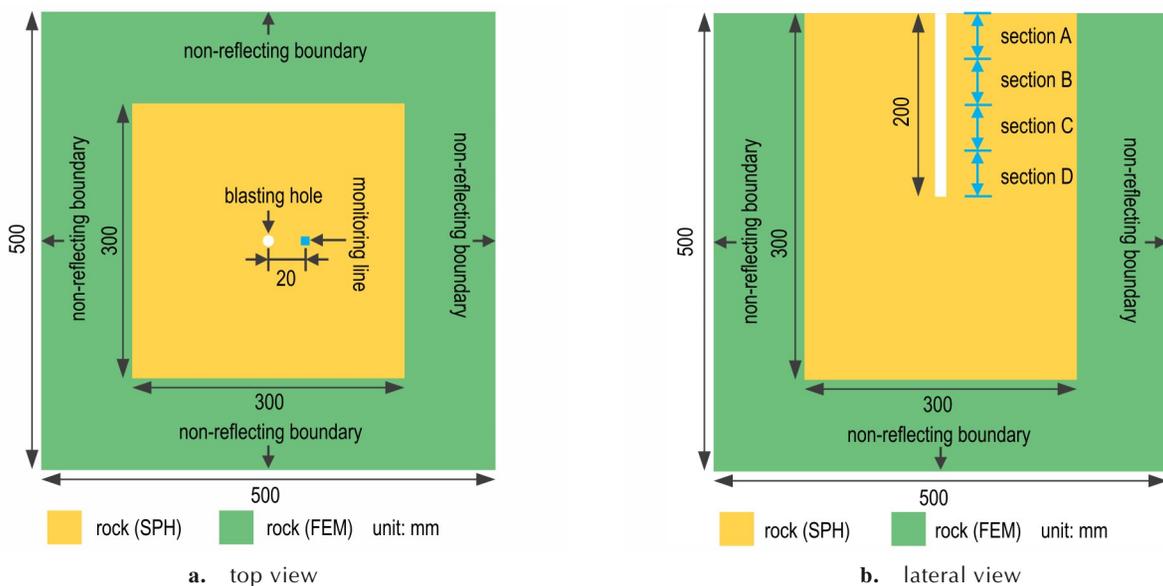


图6 数值模型几何尺寸与测线布置示意图

Fig.6 Diagram of geometric dimensions and monitoring line layout for numerical models

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^[21-22],其中JWL状态方程表达式为:

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

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

知工业DDNP的密度和爆速分别为 $0.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $3500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,与文献[23]中炸药的密度和爆速($1.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $3600 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)接近,因此工业DDNP状态方程参数可根据文献[23]进行同等设置,具体状态方程参数见表1。

表1 工业DDNP状态方程参数^[23]

A_e / GPa	B_e / GPa	R_1	R_2	ω	E_0 / GPa
214.4	0.182	4.2	0.9	0.15	4.192

模型试验中采用水泥砂浆作为岩石相似材料,所以采用HJC(Holmquist-Johnson-Cook)模型模拟岩石的动态响应历程^[24-25]。该模型能够有效地模拟工程材料在高静水压力和高应变率下的动态力学行为,因此在爆炸冲击领域的结构响应特性研究方面得到了广泛应用。岩石的主要材料参数已列于表1,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^[26],具体本构参数见表2。

表2 岩石本构参数^[26]

Table 2 Constitutive parameters of rock

A	B	C	N	ε_0	ε_{fmin}	S_{fmax}	ρ_c/MPa
0.66	1.34	0.0018	0.845	1.0×10^{-6}	0.01	80	13.8
μ_c	ρ_l/GPa	μ_1	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa	D_1	D_2
0.0075	1.096	0.15	85	-171	208	0.04	1.0

Note: A is the normalized cohesive strength. B is the normalized cohesive strength. C is the strain rate coefficient. N is the pressure hardening exponent. ε_0 is the quasi-static threshold strain rate. ε_{fmin} is the amount of plastic strain before fracture. S_{fmax} is the normalized maximum strength. ρ_c and μ_c are the crushing pressure and crushing volumetric strain, respectively. ρ_l and μ_1 are the locking pressure and locking volumetric strain, respectively. K_1 , K_2 , and K_3 are the pressure constants. D_1 and D_2 are the damage constants.

3.3 模拟结果与分析

3.3.1 爆破过程

将采用SPH-FEM法建立的孔内连续装药数值模型提交至LS-DYNA求解,然后利用LS-PREPOST输出孔内连续装药的爆破过程(如图7所示)。根据图7可以看出,炸药从炮孔底部开始起爆,并沿轴线方向向上传爆。炸药爆炸释放的能量在周围岩体中激起应力波,应力波呈弧形波阵面向上传播,并对炮孔周围岩体造成破坏。当孔内的炸药传爆结束后,应力波还会继续向上传播。但是,由于未装药段不能继续提供爆炸能量,所以上半段应力波强度发生衰减,低强度应力波容易导致岩石破坏不充分。随后,爆轰产物开始向外膨胀,上方靠近临空面的岩体开始隆起,3.5 ms时刻出现明显的鼓包现象。随着爆生气体的持续膨胀作用,鼓包现象愈加明显,直到8.9 ms时刻有岩体被抛掷出来,最终在临空面形成一个槽腔。

根据图7还可以看出,所抛出的岩石呈现明显的大块,且基本都来自槽腔上部,槽腔底部几乎没有岩石抛出。产生这种现象的原因在于:一方面,炸药装填于炮孔下半段,上部岩石在低强度应力波作用下未能充分破坏,所以产生了大块岩石;另一方面,随着孔深增加围岩的夹制作用变强,在围岩夹制作用和上部大块

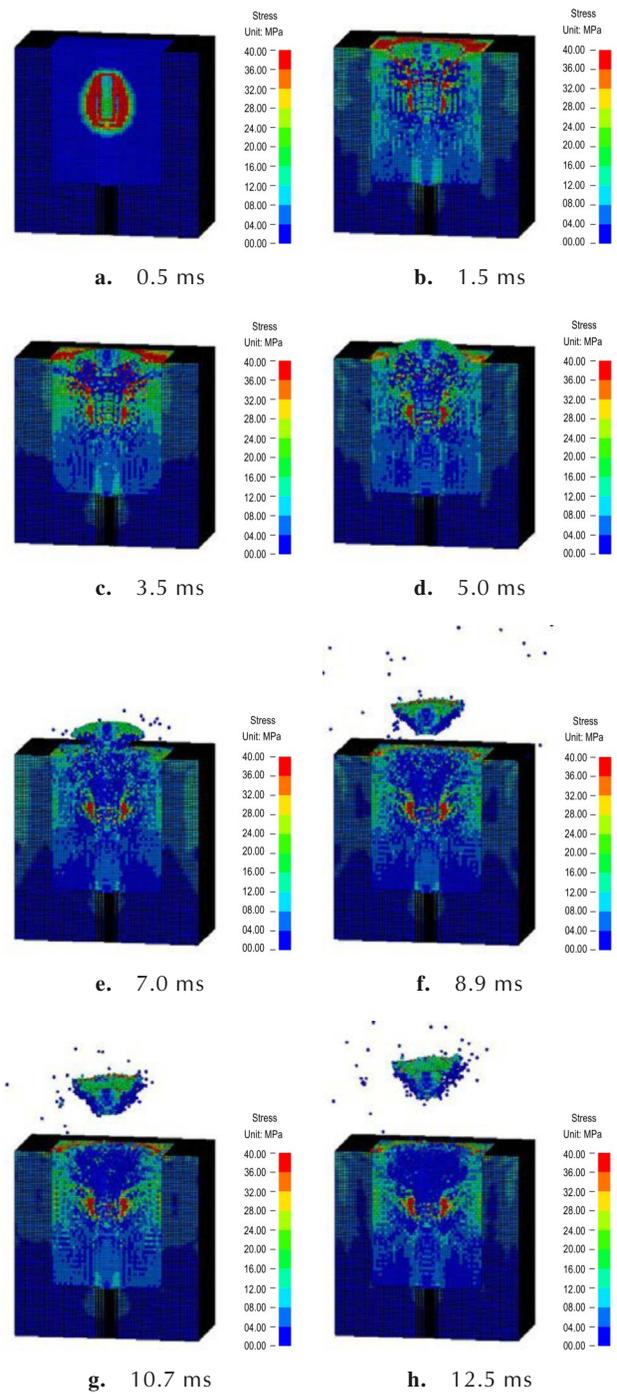


图7 孔内连续装药爆破过程模拟图

Fig.7 Simulation of blasting process of hole-inner continuous charge

阻碍作用的共同影响下,槽腔底部岩石难以抛出。

将采用SPH-FEM法建立的孔内分层装药数值模型提交至LS-DYNA求解,然后利用LS-PREPOST先后输出上、下层装药的爆破过程(如图8和图9所示)。根据图8可以看出,当上层装药爆炸以后,炸药释放的能量在周围岩体中激起应力波,对岩体造成破坏。紧

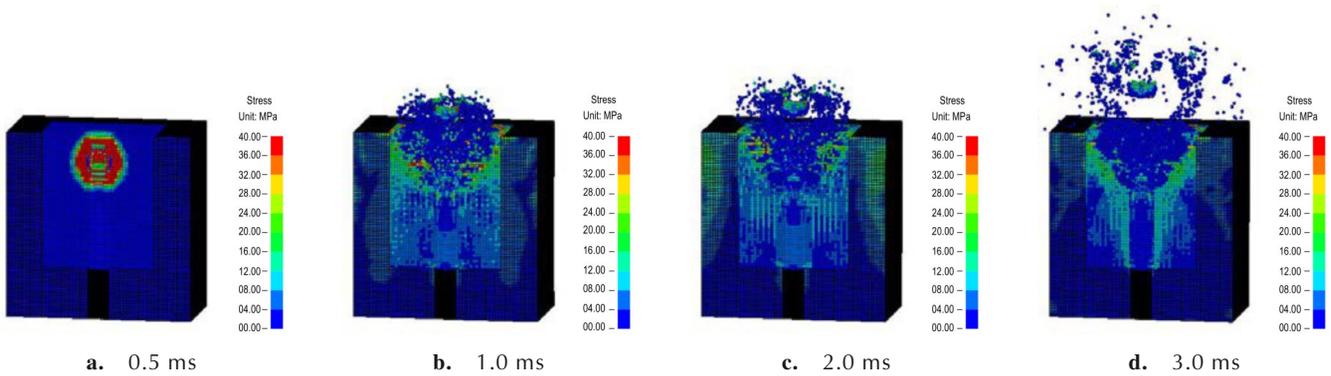


图8 上层装药爆破过程模拟图

Fig.8 Simulation of upper charge blasting process

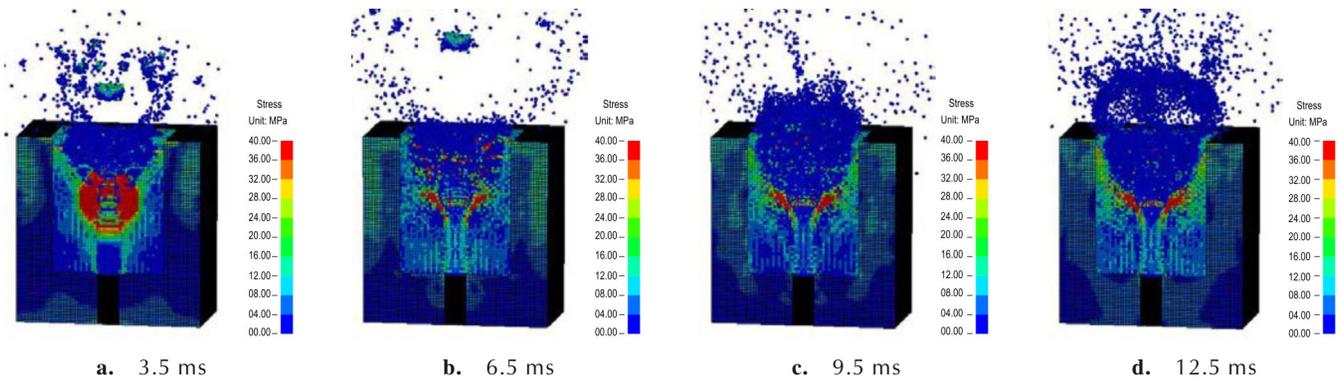


图9 下层装药爆破过程模拟图

Fig.9 Simulation of lower charge blasting process

接着,在爆生气体的膨胀作用下,1.0 ms时刻上部岩体开始向上抛掷,3.5 ms时刻上部岩体已经被完全抛掷出去,进而形成了上部槽腔。根据图9可以看出,下层装药的爆破过程和上部装药类似,炸药爆炸后在周围岩体中激起应力波,对岩体造成破坏。然后,在爆生气体膨胀作用下,7.5 ms时刻下部岩体开始向上抛掷,12.5 ms时刻上部岩体已经被完全抛掷出去,进而形成了下部槽腔。

根据图8和图9还可以看出,所抛出的岩石基本上没有明显的大块,且上、下层装药爆破能够分别将槽腔上部、底部岩石抛掷出去。产生这种现象的原因在于:一方面,炸药分层装填,能量在空间上分布比较均匀,可以避免大块岩石的产生;另一方面,通过延时起爆改变能量释放时序,上层装药先行爆破创造了临空面削弱了底部的围岩约束作用,有利于底部岩石的抛掷成腔。

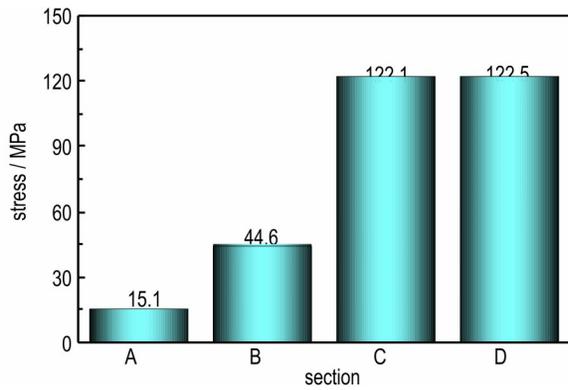
3.3.2 应力分布特征

为了进一步揭示炸药分层装填对能量空间分布的影响,在数值模型中距离炮孔中心20 mm处,取一条

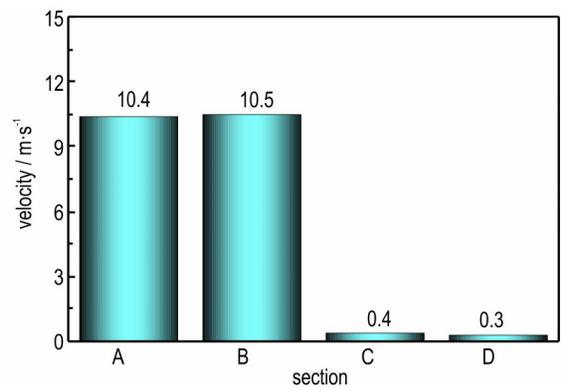
垂直于临空面的测线。该测线等长度分为4个区段,即A段(0~50 mm)、B段(50~100 mm)、C段(100~150 mm)、D段(150~200 mm)。然后,每个区段均匀设置5个测点,然后借助LS-PREPOST输出每个测点的峰值应力,并计算各区段测点的平均峰值应力,对比两种模型中4个区段平均峰值应力的大小。

图10是各区段平均峰值应力分布图。如图10a所示,当采用孔内连续装药时,A、B、C、D4个区段的平均峰值应力分别为15.1,44.6,122.1,122.5 MPa,A、B区段的平均峰值应力远小于C、D区段,底部应力场强度高于上部应力场,表明炸药能量主要集中于炮孔底部。如图10b所示,当采用孔内分层装药时,A、B、C、D四个区段的平均峰值应力分别为44.3,121.4,44.9,120.9 MPa,A区段和C区段平均峰值应力接近,B区段和D区段平均峰值应力接近,下半部分的应力分布和上半部分几乎一致,表明炸药能量的空间分布比较均匀。

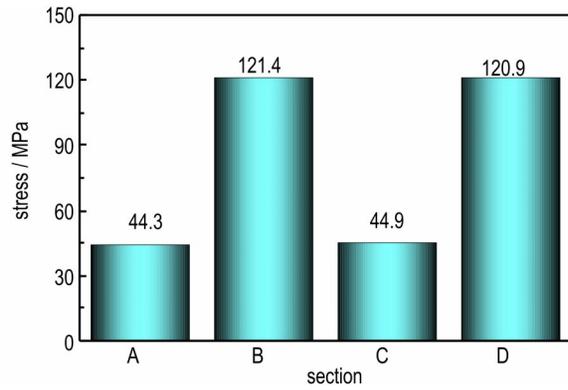
根据图10还可以看出,与采用孔内连续装药相比,采用孔内分层装药时A区段的平均峰值应力提高



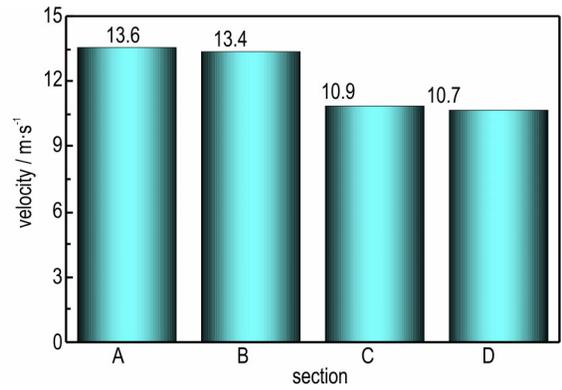
a. hole-inner continuous charge



a. hole-inner continuous charge



b. hole-inner layered charge



b. hole-inner layered charge

图 10 各区段平均峰值应力分布图

Fig.10 Distribution of average peak stress of sections A-D

了 2.93 倍, B 区段的平均峰值应力提高了 2.72 倍, 整个上半区段的平均峰值应力提高了 2.78 倍。可见, 炸药能量在空间上的均匀分布, 促使上半区段应力场强度得到显著提高。正是因为如此, 才避免了在槽腔上部产生大块岩石, 从而改善槽腔岩石的破碎效果。

3.3.3 抛掷速度分析

为了进一步揭示炸药分层装填对围岩约束作用的影响, 利用 3.3.2 节所述测线和测点, 借助 LS-PREPOST 输出每个测点的抛掷速度, 并计算各区段测点的平均抛掷速度, 对比两种模型中 4 个区段平均抛掷速度的大小, 通过抛掷速度大小间接阐明围岩约束作用的变化情况。

图 11 是各区段平均抛掷速度分布图。如图 11a 所示, 当采用孔内连续装药时, A、B、C、D 四个区段的平均抛掷速度分别为 10.4, 10.5, 0.4, 0.3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。可见, A、B 区段岩石具有较大的平均抛掷速度, 能够被抛掷出槽腔; C、D 区段的平均抛掷速度接近于零, 只是在爆炸载荷作用下发生微小位移, 但是并未能够被抛掷出槽腔。如图 11b 所示, 当采用孔内分层装药时,

图 11 各区段平均抛掷速度分布图

Fig.11 Distribution of average throwing velocity of sections A-D

A、B、C、D 四个区段的平均抛掷速度分别为 13.6, 13.4, 10.9, 10.7 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 虽然 A、B 区段岩体和 C、D 区段岩体的抛掷速度具有一定的差异, 但是各区段的平均抛掷速度都高于孔内连续装药时的最大平均抛掷速度, 说明此时槽腔上部岩体和下部岩体都能够被抛掷出槽腔。

根据上述数据可以进一步分析, 当采用孔内连续装药时, 由于下部岩体距离临空面较远, 所受到的围岩约束作用很大, 因此下部 C、D 区段岩石难以抛出, 并导致整个下半区段平均抛掷速度接近于零。采用孔内分层装药时, 由于上层装药先行爆破为下层装药爆破提供了新自由面, 围岩对底部岩体的约束作用减弱, 因此下部 C、D 区段岩石能够被抛掷出槽腔, 并且整个下半区段平均抛掷速度达到了 10.8 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

3.3.4 成腔效果分析

为了进一步比较成腔效果, 在 LS-PREPOST 后处理程序当中利用 Measurement 功能测量两种模型中的槽腔深度, 并将数值模拟和模型试验中的成腔深度

进行对比,验证模拟结果的可靠性。

图 12 是不同模型的成腔深度对比图。根据图 12 可以看出,当在数值模拟中采用孔内连续装药时,槽腔深度为 12.5 cm;当采用孔内分层装药时,槽腔深度为 19.5 cm。模拟结果与试验结果接近,成腔深度的相对误差不超过 5%,表明模拟结果具有良好的可信度^[27-28]。而且,模拟结果中的成腔深度再次有力证明了,采用孔内分层装药进可以显著改善深孔掏槽爆破的成腔效果。

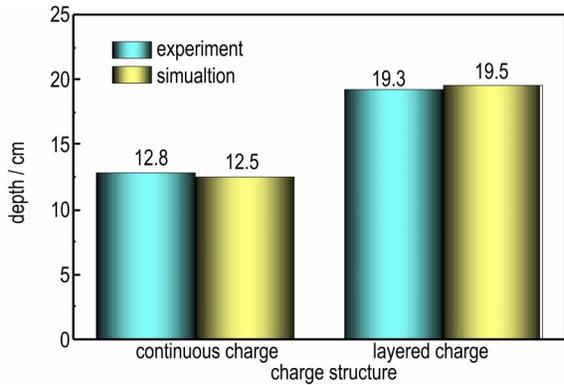


图 12 成腔深度对比图

Fig.12 Comparison of cavity forming depth

根据上述模拟结果分析可以看出,孔内分层装药通过调控能量的分布特征与释放时序,可以提高槽腔上部应力强度以消除大块岩石,降低底部围岩约束作

用以使下部岩石充分抛出,进而最终改善深孔掏槽爆破的破岩成腔效果。模拟结果与理论分析、试验结果相互验证,证实了孔内分层装药在深孔掏槽中的有效性。

4 现场应用

4.1 工程概况与爆破方案

现场试验在某煤矿岩巷进行,试验区段巷道穿过的岩层主要为砂岩,坚固性系数为 7~9。现场使用三级煤矿许用水胶炸药和煤矿许用电子雷管作为爆破器材。在该岩巷钻爆掘进中,原方案采用含中心集能孔的楔形掏槽,掏槽孔深度 2.8 m,其他炮孔深度 2.6 m,各类炮孔均采用孔内连续装药。但是深孔掏槽爆破破岩成腔效果差,进而导致整体掘进效率达不到设计要求,经统计原方案的循环进尺、炮孔利用率、炸药单耗、雷管单耗分别为 2.00 m、76.9%、2.26 kg·m⁻³、2.00 PCS·m⁻³。

为了改善深孔掏槽效果,提高该岩巷钻爆掘进效率,设计将掏槽孔原先采用的孔内连续装药调整优化为孔内分层装药,其他炮孔布置和爆破参数保持不变。然后,实施若干次钻爆掘进试验,对优化后的整体爆破效果进行统计分析。图 13 所示是炮孔布置和掏槽孔装药结构。

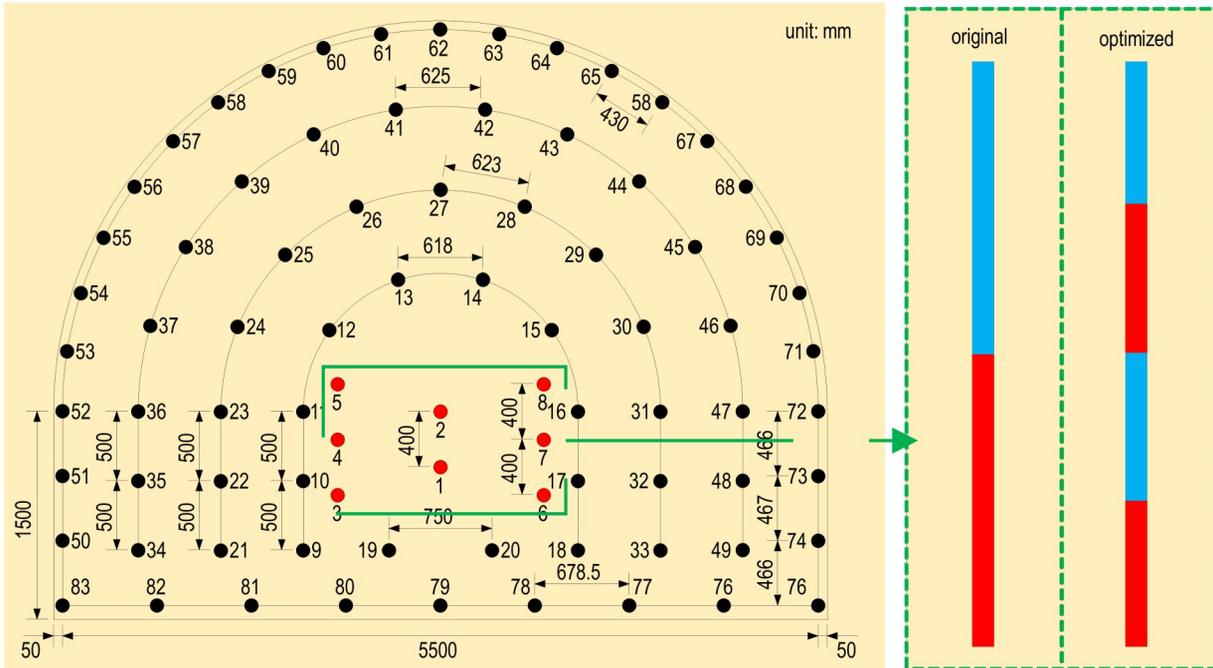


图 13 炮孔布置和掏槽孔装药结构示意图

Fig.13 Diagram of hole arrangement and cutting hole charge structure

4.2 应用效果分析

表3是原方案和优化方案的整体爆破效果对比。根据表3可以看出,采用优化后的爆破方案,循环进尺、炮孔利用率和炸药单耗分别为2.45 m、94.2%、1.84 kg·m⁻³。与原方案相比,循环进尺增加了0.45 m,平均炮孔利用率提高了17.3%,炸药和雷管单耗降低了0.42 kg·m⁻³和0.21 PCS·m⁻³。可见,采用孔内分层装药掏槽技术,可以显著提高深孔掏槽破岩成腔效果,进而提高地下硐室的钻爆掘进效率和降低其钻爆掘进成本。

表3 整体爆破效果对比

Table 3 Comparison of overall blasting effects

evaluation index	original program	optimized program	difference
cycle advance /m	2.00	2.45	0.45
hole utilization / %	76.9	94.2	17.3
specific charge / kg·m ⁻³	2.26	1.84	-0.42
specific detonator / PCS·m ⁻³	2.00	1.79	-0.21

5 结论

(1)通过孔内分层装药实现炸药能量的均匀分布和先后释放,可以消除上部大块岩石、削弱底部围岩的约束作用,进而提高深孔掏槽爆破破岩成腔效果。通过相似模型试验,证实了采用孔内分层装药时岩石破碎块径均匀,能够实现96.5%的良好成腔效率。

(2)利用SPH-FEM法开展数值模拟,能够直观揭示孔内分层装药的破岩成腔机理。一方面,分层装药使得能量空间分布变得均匀,使得上半区段的应力强度提高了2.78倍,避免了在槽腔上部产生大块岩石;另一方面,上层装药先行爆破为下层装药提供了新自由面,围岩对底部岩体的约束作用减弱,下半区段岩石能够被抛掷出槽腔,其抛掷速度高达10.8 m·s⁻¹。

(3)在地下深孔钻爆掘进中采用孔内分层装药掏槽技术,循环进尺增加了0.45 m,炮孔利用率提高了17.3%,炸药和雷管单耗分别降低了0.42 kg·m⁻³和0.21 PCS·m⁻³,爆破效果明显优于常规孔内连续装药掏槽爆破技术。

参考文献:

[1] WU H J, JIA J Y, GONG M, et al. Optimization of relief hole

blasting satisfying synergistic constraints of rock-breaking area and hole-bottom minimum burden[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024, 154: 106074.

[2] 王雁冰,张航,杨仁树,等.掏槽孔超深深度对爆破效果的影响[J].工程科学学报,2023,45(2):182-194.

WANG Yan-bing, ZHANG Hang, YANG Ren-shu, et al. Experiment study on overdepth coefficient of the cut hole in coal mine roadway excavation blasting[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(2): 182-194.

[3] 程兵,汪海波,宗琦,等.基于切缝装药定向预裂的中深孔掏槽爆破研究[J].振动与冲击,2023,42(3):322-329.

CHENG Bing, WANG Haibo, ZONG Qi, et al. Mid-deep hole cutting blasting technology based on slit charge directional presplitting[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(3): 322-329.

[4] 龚敏,文斌,王华.掏槽参数对煤矿岩巷爆破效果的影响[J].爆炸与冲击,2015,35(4):576-584.

GON Min, WEN Bing, WANG Hua. Influences of cut parameters on blasting effect in rock roadway of coal min[J]. *Exploration and Shock Waves*, 2015, 35(4): 576-584.

[5] 徐帮树,张万志,石伟航,等.节理裂隙层状岩体隧道掘进爆破参数试验研究[J].中国矿业大学学报,2019,48(6):1248-1255.

XU Bang-shu, ZHANG Wan-zhi, SHI Wei-hang, et al. Experimental study of parameters on tunneling blasting in jointed layered rock mass[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(6): 1248-1255.

[6] 章逸锋,李洪超,张智宇,等.角柱形垂直掏槽爆破参数研究[J].地下空间与工程学报,2024,20(1):31-41.

ZHANG Yi-feng, LI Hong-chao, ZHANG Zhi-yu, et al. Research on blasting parameters of prism vertical cutting[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2024, 20(1): 31-41.

[7] CHANDDRAKAR S, PAUL P, SAWMLIANA C. Influence of void ratio on "Blast Pull" for different confinement factors of development headings in underground metalliferous mines[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 108: 103716.

[8] 左进京,杨仁树,肖成龙,等.煤矿井巷中空孔掏槽爆破模型实验研究[J].矿业科学学报,2018,3(4):335-341.

ZUO Jin-jing, YANG Ren-shu, XIAO Cheng-long, et al. Model test of empty hole cut blasting in coal mine rock drivage[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2018, 3(4): 335-341.

[9] 陶子豪,李祥龙,胡启文,等.掏槽爆破成腔空孔效应数值模拟研究与分析[J].兵工学报,2024,45(12):4246-4258.

TAO Zi-hao, LI Xiang-long, HU Qi-wen, et al. Study and analysis on numerical simulation of cavity effect of cut blasting[J]. *Acta Armamentarii*, 2024, 45(12): 4246-4258.

[10] 胡建华,杨春,周科平,等.单楔形掏槽爆破腔体时空演化及应用[J].中南大学学报(自然科学版),2017,48(12):3309-3315.

HU Jian-hua, YANG Chun, ZHOU Ke-ping, et al. Temporal-spatial evolution and application of blasting cavity

- of single wedge cutting [J]. *Journal of Central South University*, 2017, 48(12): 3309-3315.
- [11] 高启栋, 靳军, 王亚琼, 等. 隧道掏槽爆破中起爆点位置对爆炸能量传输的影响作用及其比选研究 [J]. *中国公路学报*, 2022, 35(5): 140-152.
GAO Qi-dong, JIN Jun, WANG Ya-qiong, et al. study on influence law of initiation position on transmission of explosion on energy and its comparison and selection in tunnel cutting blasting [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(5): 140-152.
- [12] GAO P f, ZONG Q, CHENG B, et al. Investigation on cutting blasting efficiency of hard rock tunnels under different charge diameters [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12: 9906.
- [13] 程兵, 汪泉, 汪海波, 等. 侧向环形切缝装药爆破效应及其在硬岩掏槽中的应用 [J]. *含能材料*, 2023, 31(12): 1245-1254.
CHENG Bing, WANG Quan, WANG Hai-bo, et al. Blasting effects and of lateral annular slit charge and application in hard rock cutting [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(12): 1245-1254.
- [14] 杨国梁, 姜琳琳, 杨仁树. 复式楔形深孔掏槽爆破研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(5): 755-760.
YANG Guo-liang, JIANG Lin-lin, YANG Renshu. Investigation of cut blasting with duplex wedge deep holes [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2013, 42(5): 755-760.
- [15] 张召冉, 杨仁树. 岩石巷道“多阶段”掏槽技术及应用研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 30(3): 551-559.
ZHANG Zhao-ran, YANG Ren-shu. Multi-step cutting technology and its application in rock roadways [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 30(3): 551-559.
- [16] CHENG B, WANG Q, WANG H B, et al. Research on the mechanism and application of wedge cutting blasting with hole-inner delay [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 11383.
- [17] 杨建华, 吴泽南, 姚池, 等. 地应力对岩石爆破开裂及爆炸地震波的影响研究 [J]. *振动与冲击*, 2020, 39(13): 64-70.
YANG Jian-hua, WU Ze-nan, YAO Chi, et al. Influences of in-situ stress on blast-induced rock fracture and seismic waves [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(13): 64-70.
- [18] 程兵, 汪海波, 宗琦. 基于 SPH-FEM 耦合法切缝药包爆破机理数值模拟 [J]. *含能材料*, 2020, 28(4): 300-307.
CHENG Bing, WANG Hai-bo, ZONG Qi. Numerical simulation on blasting mechanism of slotted cartridge based on coupled SPH-FEM algorithm [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(4): 300-307.
- [19] 蔡静静, 徐轩, 陈占扬, 等. 孔内空气间隔对有/无金属罩聚能装药定向侵彻效果的影响 [J]. *含能材料*, 2024, 32(7): 726-736.
CAI Jing-jing, XU Xuan, CHEN Zhan-yang, et al. Effect of air gap in borehole on directional penetration of shaped charge with/without metal liner [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2024, 32(7): 726-736.
- [20] 赵立财. 隧道水压爆破中不同轴向往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 Li-cai. Ground surface vibration response law of different axial charge structures in tunnel hydraulic blasting [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2025, 38(1): 172-179.
- [21] 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 Hong-lu, WANG Tian-heng, JING Guang-jie. On mechanism and prevention of sympathetic detonation of bench blasting in water-rich fissure open-pit mine [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2025, 45(1): 168-184.
- [22] 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 Jun-xiao, ZHAO Zhi-qiang, SU Hong, et al. Test study on effects of decoupling coefficient on slot blast effect [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2024, 43(23): 260-269.
- [23] 张鑫, 刘泽功, 常帅, 等. 爆破荷载作用下煤岩本构模型参数特性研究 [J]. *振动与冲击*, 2025, 44(5): 263-277.
ZHANG Xin, LIU Zegong, CHANG Shuai, et al. Parametric characteristics of coal rock constitutive model under blasting load [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2025, 44(5): 263-277.
- [24] 毛翔, 何成龙, 陈大勇, 等. 主动围压下岩石爆破裂纹扩展及邻近巷道动态响应 [J]. *兵工学报*, 2024, 45(12): 4323-4338.
MAO Xiang, HE Chenglong, CHEN Dayong, et al. Rock blasting crack propagation and dynamic response of adjacent roadway structure under active confining pressure [J]. *Acta Armamentarii*, 2024, 45(12): 4323-4338.
- [25] 杨帅, 刘泽功, 张健玉, 等. 爆炸荷载作用下深部煤体损伤特征试验研究 [J]. *振动与冲击*, 2024, 43(19): 276-286.
YANG Shuai, LIU Ze-gong, ZHANG Jian-yu, et al. Test study on damage features of deep coal body under explosive load [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2024, 43(19): 276-286.
- [26] 苗春贺, 陈丽娜, 单俊芳, 等. 水泥砂浆抗弹性能研究 [J]. *高压物理学报*, 2021, 35(2): 111-121.
MIAO Chun-he, CHEN Li-na, SHAN Jun-fang, et al. Research on the ballistic performance of cement mortar [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2021, 35(2): 111-121.
- [27] 王须民, 张之凡, 张桂勇, 等. 不同介质中爆炸荷载对层冰结构的破坏效应研究 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2025, 46(1): 10-17.
WANG Xu-min, ZHANG Zhi-fan, ZHANG Gui-yong, et al. Damage effects of layer ice subjected to explosion loads in different media [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2025, 46(1): 10-17.
- [28] 任颖博, 蒋楠, 周传波, 等. 深基坑爆破减振孔作用下围护桩结构减振效应研究 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2024, 55(7): 2737-2750.
REN Ying-bo, JIANG Nan, ZHOU Chuan-bo, et al. Effect of vibration damping of retaining pile structure under the action of damping holes of deep foundation blasting [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2024, 55(7): 2737-2750.

Mechanisms of Rock Breaking and Cavity Formation of Hole-inner Layered Charge Blasting

CHENG Bing^{1,2,3}, YE Fu³, WANG Quan³, XU Ying^{1,2}, CHENG Yang-fan^{3*}, LI Hong-wei³, WANG Meng-xiang¹

(1. Engineering Research Center of Underground Mine Construction of Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. School of Chemical and Blasting Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: To study the mechanisms of rock breaking and cavity formation by hole-inner layered charge blasting, the influence of hole-inner layered charges on the rock breaking and cavity formation of deep hole cutting was first investigated through theoretical analysis and model experiments. Then, numerical simulations were carried out using SPH-FEM algorithm to reveal the processes of rock breaking and throwing as well as the mechanisms of rock breaking and cavity formation. Finally, field tests were conducted to explore its application effects. The results show that the hole-inner layered charge could realize the uniform distribution and release of explosive energy, which could eliminate the large rock in the upper cavity and weaken the constraint effect of the surrounding rock in the bottom cavity, so as to achieve the cavity formation efficiency of 96.5%. The numerical simulation realized the visualization of the blasting process. The simulation results confirmed the beneficial effect of uniform energy distribution and sequential release on rock breaking and cavity formation. Compared with traditional cutting blasting technique, using the hole-inner layered charge cutting technique, cycle footage and hole utilization were increased by 0.45 m and 17.3%, respectively, the specific charge and detonator were reduced by $0.42 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ and $0.21 \text{ PCS}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively. The results demonstrated the applicability of hole-inner layered charge cutting technique in deep hole blasting.

Key words: deep hole cutting; hole-inner layered charge; rock breaking and cavity formation; numerical simulation; field test

CLC number: TJ51; TD236

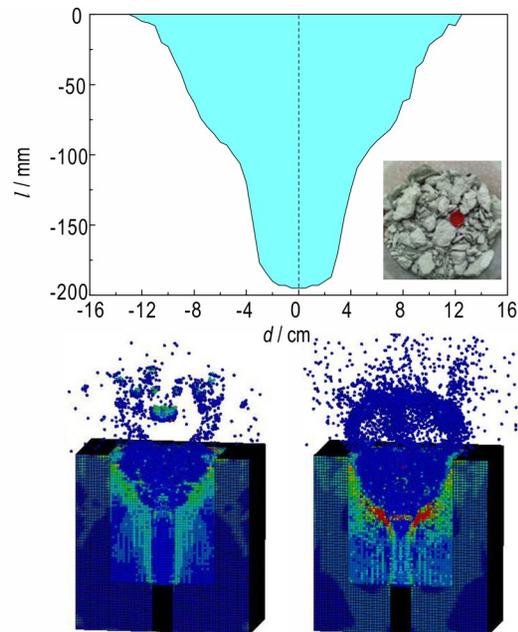
Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2025040

Grant support: Anhui Provincial Natural Science Foundation (2408085QA029); Open Research Grant of State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines (SKLMRDPC23KF05); Open Research Grant of Engineering Research Center of Underground Mine Construction of Ministry of Education (JYBGCCZX2023105)

(责编: 高毅)

图文摘要:



To explore the mechanisms of rock breaking and cavity formation of hole-inner layered charge, the rock fragmentation and cavity forming characteristics were obtained through model experiments. The SPH-FEM algorithm was used to simulate the breaking and throwing process of rock mass in the cutting cavity.