

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.02.010

井下垂直深孔爆破堵塞长度的 作用机理与工程实证^{*}

潘俊¹, 罗志华², 史秀志¹, 邱贤阳¹, 李小元³

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083; 2. 深圳市中金岭南凡口铅锌矿有限公司, 韶关 512325;
3. 广西中金岭南矿业有限责任公司, 来宾 546100)

摘要: 井下垂直深孔爆破因自由面受限、能量释放通道单一, 对堵塞长度高度敏感, 其合理取值直接影响爆破能量利用与块度分布。文章借助理论分析、模型试验、LS-DYNA 数值模拟和现场试验, 探究堵塞长度对垂直深孔爆破的影响。理论分析显示: 在抵抗线 5 cm 条件下, 堵塞长度 5 cm 时孔内应力衰减最慢。模型试验采用混凝土试块, 固定抵抗线 5 cm, 设置堵塞长度 0 cm、2 cm、4 cm、5 cm 四组方案, 结果表明: 爆破漏斗半径和爆堆质量随堵塞长度增加先升后稳, 5 cm 时漏斗半径达 7.9 cm, 爆堆质量 207.96 g, 块度均匀性最佳。在现场试验中, 按照相似比换算后采用 1.0 m 堵塞, 获得块度均匀且无冲孔现象, 验证了 5 cm 为最优堵塞长度的结论。研究成果为优化井下垂直深孔爆破工艺提供了理论与实践依据。

关键词: 堵塞长度; 垂直深孔爆破; 孔壁应力; 等效漏斗半径; 爆破效果

中图分类号: **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)02-0101-13

Research on Fracture Control Mechanism and Practical Validation for Blocking Length Optimization in Underground Vertical Deep-hole Blasting

PAN Jun¹, LUO Zhi-hua², SHI Xiu-zhi¹, QIU Xian-yang¹, LI Xiao-yuan³

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Shenzhen Zhongjin Lingnan Fankou Lead-zinc Mine Co., LTD., Shaoguan 512325, China;
3. Guangxi Zhongjin Lingnan Mining Co., Ltd., Laibin 546100, China)

Abstract: Vertical deep hole underground blasting operations exhibit significant sensitivity to stemming length due to constrained free surface and singular energy release pathways, with this parameter critically influencing both explosive energy efficiency and fragmentation characteristics. This study investigates the impact of stemming length on vertical deep-hole blasting through theoretical analysis, scaled experiments, LS-DYNA simulations, and field validation, with theoretical results indicating that optimal stress-wave preservation occurs at a 5 cm stemming length when using a 5 cm burden distance. The experimental study employed concrete specimens with a constant burden distance

收稿日期 (Date of reception): 2025-10-16

网络首发日期 (Published online): 2025-11-19

作者简介: 潘俊 (2001-), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事矿山控制爆破方面研究, (E-mail) 1946139489@qq.com。

通信作者: 罗志华 (1994-), 男, 江西丰城人, 助理采矿工程师、研究生, 主要从事采矿、爆破技术管理工作, (E-mail) 1172445900@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52374152); 广西重点研发项目 (2022AB31023)

About the author: PAN Jun (2001-), male, born in Nanyang city, henan province, master degree, mainly engaged in research on mine controlled blasting, (E-mail) 1946139489@qq.com.

Corresponding author: LUO Zhi-hua (1994-), male, born in Fengcheng city, jiangxi province, assistant mining engineer, postgraduate, mainly engaged in mining and blasting technology work, (E-mail) 1172445900@qq.com.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52374152), Guangxi Key Research and Development Project (2022AB31023)

of 5 cm and tested four distinct stemming configurations: 0 cm, 2 cm, 4 cm, and 5 cm. The results show that both the blasting crater radius and ejecta mass initially increased, then plateaued as the stemming length increased, achieving optimal performance at 5 cm with a crater diameter of 7.9 cm, an ejecta mass of 207.96 g, and the most uniform fragmentation distribution. Field trials employing a 1.0 m stemming length after similarity ratio conversion demonstrated uniform fragmentation without cratering effects, thereby validating the 5 cm optimal length determination. These findings establish both theoretical foundations and practical guidelines for enhancing vertical deep-hole blasting performance in underground operations.

Key words: stemming length; vertical deep-hole blasting; hole wall stress; equivalent blasting crater radius; blasting effect

VCR (Vertical Crater Retreat) 作为我国地下金属矿山广泛采用的回采工艺,其核心特点是通过在采场上部硐室向下布置垂直深孔,利用下部硐室形成自由面,实现矿岩的高效崩落。在这一过程中,药包两端通常采用炮泥进行堵塞,堵塞长度的设置不仅决定炸药能量在孔内外的分配,还直接影响漏斗半径、块度分布和孔壁稳定性^[1,2]。若堵塞过短,易发生冲孔,导致能量外泄与安全隐患;若堵塞过长,则有效能量衰减,矿岩破碎不足,造成大块率升高和出矿效率下降。因此合理确定堵塞长度对于提高爆破效率、降低大块率和保障采场安全生产具有现实意义。

传统的爆破漏斗理论常以球形药包(点源)/瞬时点爆荷载为基础来推导冲击波与孔壁应力的分布规律。这一近似在药包体积小、作用距离远大于药包尺寸时较为合理,但对于井下深孔长药柱/线装雷管(即药柱长度与作用半径可相比的情形),点源假设的适用性会受限。为此,本文在理论阐述中明确以下两点,一是承认点源(球形药包)理论的经典价值及其作为标度分析起点的便利性,二是在涉及深孔长药柱时,采用线源修正的思路——即将长药柱视为沿孔分布的连续能量输入,并以数值仿真验证点源近似的适用范围与误差界限。

国内外学者已围绕爆破堵塞长度开展了大量研究,成果主要集中在以下方面:在理论分析层面,早期研究多将堵塞物运动近似为刚体运动,忽略初始压缩位移,推导出堵塞物速度与加速度的变化规律^[3-5];叶志伟针对隧道爆破堵塞结构的运动规律与长度优化^[6],对炮孔堵塞结构进行了受力分析;段继超分析爆生气体压力作用下堵塞物在炮孔中受力特性^[7],给出大直径深孔炮孔合理堵塞长度;后续研究进一步考虑堵塞物的压缩过程,李启月等通过建立运动方程明确了合理堵塞长度的计算方法^[8];Zhang 等指出提升堵塞效果^[9],以阻止爆生气体从孔口冲出,对于获得理想的爆破块度是极其重要的。在数值模拟层面,学者们通过应力场分析探究最佳

堵塞长度,如张艳军针对煤矿井下炮孔堵塞密封性差甚至不堵塞所导致爆破效果不佳的问题运用了有限元分析软件建立了 3 m × 3 m 的二维混凝土断面模型^[10];丁希平等则发现台阶爆破中堵塞区有效应力场随堵塞长度增加呈指数衰减^[11],为堵塞长度的量化研究提供了参考;郭东明根据岩体中应力波的理论^[12],利用 LS-DYNA 软件进行模拟分析,提出提高堵塞长度延长爆炸能量作用时间,提高了爆破效率,现场应用取得了良好的效果;陈思佑和汪海波等^[13,14],为研究不同堵塞材料及堵塞长度对硬岩隧道直眼掏槽爆破效果的影响,依托工程实例,采用 ANSYS/LS-DYNA 仿真模拟软件建立三维数值模型,对 5 种不同堵塞条件展开研究。梁禹等针对水下钻孔爆破^[15],任少峰等针对聚苯乙烯泡沫不耦合装药爆破^[16],均通过数值模拟得出了不同场景下的合理堵塞长度;另有研究聚焦堵塞长度对爆破振动的影响,付军等通过分析振动衰减规律优化堵塞参数^[17]。在试验研究层面,王洋等通过平行双自由面岩体爆破试验,揭示了堵塞长度对爆破能量传递的影响机制,进一步验证了理论与模拟结果的合理性。

尽管现有研究已在台阶爆破、隧道爆破和 underwater 爆破等场景取得一定成果,但这些工艺与井下垂直深孔环向掏槽爆破存在本质差异。VCR 爆破往往在深部采场内实施,其自由面仅依赖天井形成,炮孔深度可达数十米以上,同时受采场围岩约束和空间狭窄影响,能量释放路径受限,堵塞区成为控制能量耦合与破碎效果的关键环节。与隧道爆破多自由面、浅孔短堵塞的特点不同,VCR 爆破中堵塞长度的选择直接关系到能量在孔内累积还是逸散,对防止冲孔、降低大块率和维持矿柱稳定性尤为敏感。因此现有成果难以直接借鉴,亟需针对该工艺开展系统研究。

本文则是从理论、实验、模拟与现场四个层面展开研究。首先通过理论分析揭示不同堵塞长度下孔壁应力演化与能量传递规律,其次利用混凝土模型试验量化爆破漏斗半径和爆堆质量的变化特征,再

次借助 LS-DYNA 数值模拟对比不同堵塞工况下的裂纹扩展与能量衰减过程;最后在矿山现场开展工业性试验验证相似准则下的堵塞效果。本研究不仅构建了 VCR 爆破堵塞长度与破碎效果的因果链条,还为现场堵塞长度的优化提供了量化依据,可直接服务于深部矿山减小大块率、提升出矿效率和保障安全生产的实践需求。

1 炮孔孔壁应力演化过程分析

图 1(a) 是井下深孔的装药及堵塞结构图,图 1(b) 是井下垂直深孔爆破技术的回采工艺。堵塞的目的是充分利用炸药能量进行破岩并获得更好的爆破效果,即优化利用堵塞效应,确保在堵塞结构被冲

出爆破孔之前完成岩石破碎过程。若堵塞长度不合理,易引发采场爆破大块或过粉,造成炮孔冲孔等危害,见图 1(c),这不仅使炸药爆炸能量无法高效利用,还会影响矿山开采的安全性和效率。

爆破过程中,堵塞物在爆生气体急速膨胀作用下先压缩再以刚体的形式孔口移动,由于压缩时间过短,爆生气体瞬间充满炮孔,此时可认为爆生气体为理想气体,并以准静态压力作用于炮孔孔壁。此时爆生气体的状态方程为^[18,19]

$$pV^\gamma = \text{const} \quad (1)$$

式中: p 为爆生气体压力, Pa; V 为爆生气体体积, m^3 ; γ 为绝热指数,一般取 3。

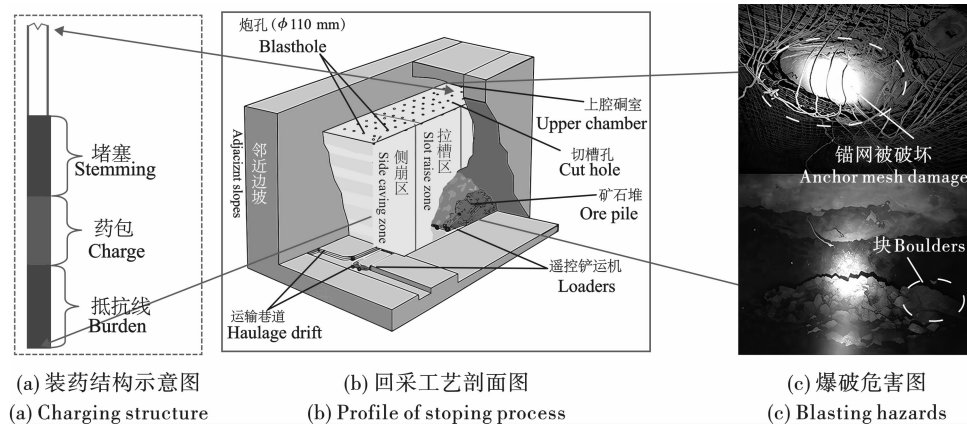


图 1 采矿工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mining process

(1) 双向堵塞作用下孔壁应力上升分析

孔内爆炸荷载上升过程很短暂,其上升时间约等于爆轰波传递至自由面的时间。

$$t_r = \frac{L_1}{V_x} \quad (2)$$

式中: L_1 为抵抗线长度, m; V_x 为荷载上升速度, m/s 。

根据三角形函数描述爆炸荷载可知,孔内应力上升过程中变化过程表达式为^[20]

$$P(t) = \frac{t}{t_r} p_r \quad (3)$$

(2) 双向堵塞作用下孔壁应力衰减分析

结合图 1,根据牛顿第二定律,药包上下端堵塞物的加速度分别为

$$\begin{cases} a(t_+) = \frac{p(t)}{L_2 \rho_s} - g - \frac{4\lambda f}{dL_2 \rho_s} L_2 \\ a(t_-) = \frac{p(t)}{L_1 \rho_s} + g - \frac{4\lambda f}{dL_1 \rho_s} [L_1 - h(t)] \end{cases} \quad (4)$$

式中: ρ 为堵塞物密度, kg/m^3 ; L_2 为上端堵塞长

度, m; λ 为侧压系数; μ 为泊松比; d 为炮孔直径, m; g 为重力加速度, m/s^2 ; f 为堵塞物与孔壁的摩擦系数。

堵塞物在孔内 t 时间运动的位移为

$$h(t) = \int_0^t \int_0^t a(t) dt, (0 \leq t \leq t_1) \quad (5)$$

其中 t_1 满足: $h_+(t_1) = L_1$

堵塞物冲出的体积为

$$V_1 = \frac{1}{4} \pi d^2 h(t) = \frac{1}{4} \pi d^2 h_+(t) + \frac{1}{4} \pi d^2 h_-(t) \quad (6)$$

式中, V_1 为堵塞物运动让出的炮孔体积(气体膨胀体积), m^3 。

药包下端 L_1 堵塞物冲出炮孔之前,孔壁所受气压衰减规律为

$$p(t) = p_a \left[\frac{V_0}{V_0 + V_1} \right]^\gamma, (0 \leq t \leq t_1) \quad (7)$$

式中, V_0 为爆生气体初始体积, m^3 。

为了将现场束状孔/多孔爆破的能量与模型试验进行可比化处理,我们采用“等效单孔”与几何相

似缩放的办法,将工程现场的多孔/束状装药等效为一个单一的等效炮孔并据此计算等效长径比。首先连续装药与“条形药卷/线装雷管”在表述上保持一致,现场若采用沿孔连续或分段装药(通常以若干条药卷或若干并列小孔群组成束状装药),其总体爆炸能量可通过所有分孔的装药体积或质量求和得到。为了便于与单孔模型试验比较,本文将多孔装药在等长条件下按面积守恒原则换算为一个等效单孔直径,其公式为

$$D_{eq} = \sqrt{\sum_{i=1}^N d_i^2} \quad (8)$$

式中: D_{eq} 为等效单孔直径; N 为并列孔或并列药卷的数量; d_i 为第*i*个并列孔的直径。等效单孔的等效药包长径比以等效单孔直径为分母、等效药包长度为分子,定义为

$$\frac{L}{D} \bigg|_{eq} = \frac{L_{eq}}{D_{eq}} \quad (9)$$

式中, L_{eq} 为等效药包长度。可取为束状孔中沿孔方向上总的装药等效长度或采用工程上定义的等效药包长度,其次,几何相似系数的确定遵循线性尺度的定义

$$\lambda = \frac{L_{field}}{L_{model}} \quad (10)$$

公式中 λ 为几何相似系数, L_{field} 为现场选定的代表性长度, L_{model} 为模型中对应的代表性长度。以某一代表性长度量在现场与模型间的比值作为线性相似系数 λ ,模型其它尺寸按该比例等比缩放,体积/质量按 λ^3 放大。

(3) 模型试验实例

将模型试验爆破参数代入上文中方程式(3)~(7),即可得到深孔爆破中堵塞长度对孔内压力的影响。在本算例中,炮孔直径 d 为0.004 m,炮孔抵抗线 L_1 为0.05 m,药包长度 L 为0.03 m,堵塞长度 L_2 为0.01~0.05,炸药爆速 D_c 为6300 m/s,摩擦系数 f 为0.055,炸药密度 ρ_0 为1250 kg/m³,堵塞物密度 ρ_s 为1800 kg/m³,岩石弹性模量 E 为13.0 GPa,泊松比为0.28。

2 模型试验

2.1 材料选取

混凝土模型试块采用棒磨砂骨料与42.5级普通硅酸盐水泥配制,配合比按质量计为:水泥:棒磨砂:水=3:3:1(质量配比),配合物料在振实后配制密度目标约为2400 kg/m³。混凝土拌合物采用机械拌和,浇筑后养护条件为标准养护(20±2℃,相对湿度≥95%),并在28 d取样进行力学性能测试。

为保证实验可重现,本文在材料选取中记录并报告下列物理力学参数:固体密度、28 d柱状抗压强度、抗拉强度(劈裂试验)、杨氏模量、泊松比、含水率与超声波纵波速。试件尺寸与试验数量按试验方案要求制备(每组不少于3件重复试验),并给出均值±标准差作为表征。

爆破装药体系采用线装雷管(电子雷管+起爆器)作为点火与装药形式。雷管线装药的线质量密度为1.0 g/cm(即每米线装药质量约100 g/m),单段炸药长度为3 cm(每个药包质量约3.0 g)。采用江西新余国泰雷管,外径为0.73 mm。由于雷管具体的爆速与猛度依赖于雷管类型与装药组成,本文在数值模拟与能量计算中采用厂商提供的参数,典型线装雷管的标称爆速为6000~7000 m/s,装药密度约1.6~1.8 g/cm³(示例范围)。为保证实验数据的严谨性,现场试验前对所用雷管进行台架点火试验以确认其实际爆速、起爆时间延迟与可靠性,并将检测数据记入报告。此外,堵塞材料采用常规炮泥,其物理性质(密度、含水率、压实程度)需在每组试验中记录并控制一致,以避免因堵塞材料状态差异带来的干扰,模型试验所用单雷管能量与现场深孔的长药柱能量级存在本质差异,因此本文把小尺度试验作为揭示趋势与机理的工具,而通过仿真中的线源等效加载与几何相似换算将该机理推广至现场尺度,避免直接外推绝对碎块尺寸。

2.2 实验方案

试验在控制条件下一次性完成四组对照试验,编号分别为1,2,3,4。固定抵抗线为5 cm,堵塞长度分别为0 cm、2 cm、4 cm和5 cm,每一堵塞工况设置三次平行试验以保证重复性,所有试件尺寸、混凝土龄期、装药量、雷管型号及起爆顺序一致,堵塞材料的压实措施与压实密度在各组间严格保持相同。试验过程先按随机化顺序布置并点火,以降低次序效应,爆后立即记录并测。选取0,2,4,5 cm四个堵塞长度,既兼顾对照又便于捕捉非线性响应。0 cm作为空堵对照以体现不堵塞下的能量外泄与冲孔风险;5 cm基于理论分析与先期仿真被判定为可能的最优区间,且按几何相似比20相当于现场约1.0 m,因此为关键检验点;2 cm与4 cm为分布在0~5 cm区间的中间水平,用以解析堵塞长度对漏斗半径、块度与孔内时程的变化趋势并定位“临界区间”或拐点。步长设计兼顾了实验量能与检测灵敏度(较大步长便于识别“先增后稳”趋势),同时满足模型几何与施工可行性。

2.3 试验结果分析

模型爆破试验完成之后,在混凝土试块底部可

以明显地观察到爆破漏斗,收集爆破后产生爆堆碎块,对其进行称重和筛分。如图 2 和图 3 分别为形成漏斗和爆堆情况。

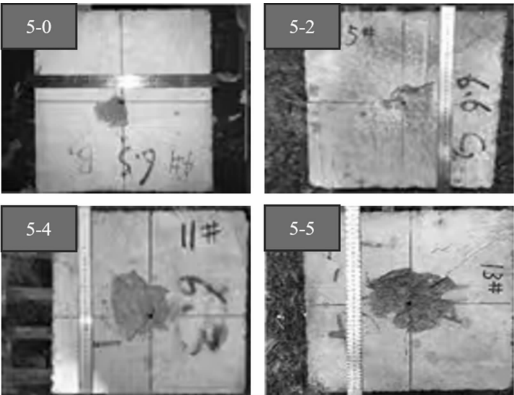


图 2 模型试验爆破漏斗示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the blasting crater in the model test

(1) 爆破漏斗尺寸分析

图 2 中蓝色框内(5-4)表示抵抗线为 5 cm;堵

塞长度为 4 cm。用刻度尺以炮孔中心为起点,每旋转 30°测量一次漏斗直径,依次测六次直径后求其平均值,以此得出漏斗的半径大小。如下表 1 可知,抵抗线为 5 cm 时,爆破漏斗半径随堵塞长度的增大而增大,但继续增加填塞长度,其漏斗半径增加幅度逐渐放缓。

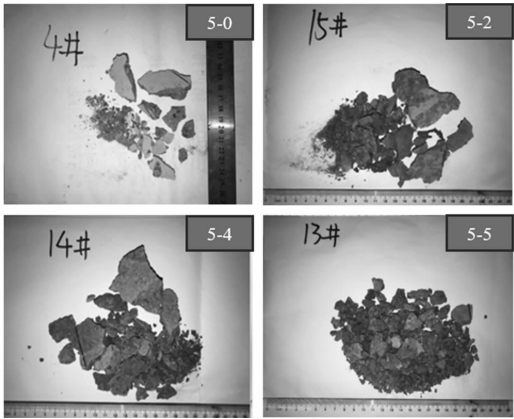


图 3 模型试验爆堆示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the model test and its muckpile

表 1 模型试验爆破漏斗数据

Table 1 Data of the model test blasting funnel

编号 Number	1	2	3	4
漏斗半径 r (均值 $\pm \sigma$) Funnel radius r/cm (mean $\pm \sigma$)	3.7 ± 0.10	4.9 ± 0.12	6.7 ± 0.20	7.9 ± 0.25
漏斗体积 V Funnel volume V/cm^3	106.09	246.4	629.92	1032.62
测得爆堆质量(均值 $\pm \sigma$) The mass of the reactor explosion/g was measured(mean $\pm \sigma$)	45.12 ± 2.5	102.34 ± 3.1	168.77 ± 4.2	207.96 ± 5.0
堆积密度 = 质量/体积 Bulk density/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}) = \text{mass}/\text{volume}$	0.425	0.415	0.268	0.201
D_{10}/mm	5	7	10	12
D_{50}/mm	40	32	26	20
D_{80}/mm	120	95	78	60
均匀度系数 $N = D_{80}/D_{10}$ The uniformity coefficient $N = D_{80}/D_{10}$	24	13.6	7.8	5

(2) 爆堆质量分析

采用筛分法对爆堆质量、块度进行收集与统计。试验中,对每次爆破后的小碎石块进行收集,采用标准检验筛 GB/T6003.1—2012 网筛对收集的爆破石块进行筛分,该网筛分为 1#~12#共计 12 层,网筛孔径从 0~40 mm 依次分布。在筛分过程中,先将单次实验中收集的石块放入第 12 层中,盖上 12 层网筛盖子,按照标准对网筛进行晃动,使得石块能一一落入其对应的孔径筛网当中,最后对各筛网中石

块进行收集称重。以此得出实验中爆破块度分布详细情况。如表 2。

从图表可以看出,堵塞不足时,爆生气体快速沿孔道逸散,孔内压力下降迅速,裂隙扩展时间短,整体破碎效果偏粗且大块率高。随堵塞长度增加,药气能更充分地耦合到围岩裂隙中,促进裂纹拓展与内部二次破碎,从而使粒级趋于细化与均匀。当堵塞长度继续增大并接近临界值时,爆破破坏由中心向边缘转变为以反射拉伸波为主的破坏机制——边

缘块体未获得充分的二次冲击能量,二次破碎不足,导致局部最大块尺寸出现反弹性的增大。

表 2 不同堵塞长度下爆堆质量与最大块度
Table 2 Detonation mass and maximum block size under different blockage lengths

编号 Number	堵塞长度 Blockage length/cm	爆堆质量 Detonation mass/g	最大块度 Maximum block size/mm
1	0	46.66	29
2	2	90.28	38
3	4	153.99	36
4	5	207.96	41

为获取爆堆的空间粒级分布,本研究在模型试验中对每个试件进行了分层筛分与逐层统计。分层筛分按以下步骤实现,爆破实验结束后,将模型箱平稳定。按预设方案在模型箱侧壁精确标记各层边界面。分层过程遵循“由上至下、逐层剥离”的原

则,关键在于避免上下层物料混杂,以保持爆堆的原始空间结构。表层使用实验室刮刀与小铲,将标记线以上的表层物料全部收集,放入预先编号的样品袋中。中底层为最大限度减少对下伏土层的扰动,采用“垂直壁面法”即先在某侧挖出一个小型垂直剖面,形成清晰、干净的层理界面,然后从此剖面开始,水平向内逐片刮取本层物料。每完成一层,立即清理工具和工作台面,防止颗粒残留造成交叉污染。模型试件按轴向分为三层(表层、中层、底层),层厚根据堆高取 3~4 cm(模型试验采用表层 0~3 cm/0~4 cm 等),每层作为独立样本称重并按统一筛网系列(>80 mm、80~40 mm、40~20 mm、20~10 mm、10~5 mm、<5 mm)筛分,记录每层各筛级质量。每层由累计通过率插值得到 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{80} ,并计算该层的大块率(按 >50 mm 阈值)。每组试验取 $n=3$ 重复并报告均值±标准差。实验结果如表 3 所示。

表 3 模型试件内部分层筛分
Table 3 Layered screening inside the model specimen

编号 Sample	层级 Layer	层级质量 Layer mass/g	$D_{10}/$ mm	$D_{50}/$ mm	$D_{80}/$ mm	大块率 > 50 mm Big rate > 50 mm/%
1	表层(0~3 cm) Surface(0~3 cm)	18.00	8	60	140	55.0
	中层(3~6 cm) Middle(3~6 cm)	15.00	4	35	110	30.0
	底层(6~9 cm) Bottom(6~9 cm)	12.12	3	25	90	19.0
1 总计 Total 1	—	45.12	—	40(整体) 40(Overall)	—	≈34.8
2	表层(0~3 cm) Surface(0~3 cm)	42.00	10	50	130	40.0
	中层(3~6 cm) Middle(3~6 cm)	35.00	6	30	100	18.0
	底层(6~9 cm) Bottom(6~9 cm)	25.34	4	16	70	7.5
2 总计 Total 2	—	102.34	—	32(整体) 32(Overall)	—	≈18.5
3	表层(0~3 cm) Surface(0~3 cm)	70.00	15	38	95	15.0
	中层(3~6 cm) Middle(3~6 cm)	55.00	8	28	80	6.0
	底层(6~9 cm) Bottom(6~9 cm)	43.77	6	20	60	3.5
3 总计 Total 3	—	168.77	—	26(整体) 26(Overall)	—	≈6.2
4	表层(0~3 cm) Surface(0~3 cm)	80.00	20	30	70	5.0
	中层(3~6 cm) Middle(3~6 cm)	70.00	9	18	50	1.0
	底层(6~9 cm) Bottom(6~9 cm)	57.96	6	12	40	0.0
4 总计 Total 4	—	207.96	—	20(整体) 20(Overall)	—	≈0.0

实验结果显示,堵塞长度对爆堆的空间粒级分布和大块率有显著影响。总体上,随着堵塞长度由

0 cm 增至 5 cm,样品的总体中值粒径 D_{50} 呈持续减小趋势(由约 40 mm→32 mm→26 mm→20 mm),同

时总体大块率($>50\text{ mm}$)显著下降(由 $\approx 34.8\% \rightarrow 18.5\% \rightarrow 6.2\% \rightarrow 0\%$)。这一宏观变化与先前记录的漏斗半径与爆堆总质量的“先增后稳”趋势相一致;堵塞适当增加时既能扩大漏斗、增加碎块产出,又能改善粒级均匀性与减少超大块。分层分析揭示了表层与内部的不同响应。所有工况中,表层(堆体顶层)粒级均明显偏粗、且大块率最高;向下到中层与底层, D_{50} 逐层减小、均匀度提高。这表明表面部分受抛散、二次堆积和风化等过程影响更大,而堆体内部更能反映初始裂缝扩展与二次破碎的真实效果。以 4 组(堵塞 5 cm)为例,表层 $D_{50} \approx 30\text{ mm}$,而底层 $D_{50} \approx 12\text{ mm}$,整体大块率趋近 0%,说明在该堵塞条件下内部裂缝连通性与能量利用达到了最优化的状态。层间对比还显示,堵塞长度的改善首先在内部层体现——中底层的 D_{50} 随堵塞长度增加出现更明显的下降,而表层的改善相对滞后。这一点支持气体在孔内滞留并向裂隙内渗透、促进裂缝纵横发展并实现内部二次破碎的机理假设:适度堵塞延长了高压作用时程,使内部裂纹体系得到更多“二次破碎机会”,从而使内层粒级细化最为显著。

3 数值模拟

3.1 模型建立

为了研究堵塞长度对爆破效果的影响,采用数值模拟分析爆炸过程中试块等效漏斗半径变化情况,数值模拟中采用与现场一致的炸药、岩石、堵塞等材料,本次模拟实验参照几何相似理论,根据几何相似系数为 20,药包长度 0.6cm 则建模长度为 0.3 cm,模拟以堵塞长度为变量,共分堵塞长度 1 ~ 5 cm 五组,模型尺寸长宽高分别为 40 cm、40 cm、30 cm;在建模的同时,模型中 ALE 空间的直径为 5 倍的炮孔直径,ALE 与部分石块单元重合。模型中忽略重力的影响。岩石模型单元大小为 5 mm × 5 mm,炸药、堵塞、ALE 采用渐变网格。

在本研究中,之所以以受控的混凝土模型试验作为数值模型初步验证的基准,主要出于两点考虑,一是模型试验条件可控、重复性高,有利于在已知边界/材料参数下对数值模型中的材料本构、阻尼、荷载替代及接触/破碎参数进行逐项校准。二是小尺度试验便于获取完整的实验观测(如堆积质量、粒级分布、漏斗几何、破碎面形态),这些量对于校准仿真输出尤为重要。基于此校准后的数值模型被用于尺度放大与机制分析,通过在仿真中采用线源/分段点荷载等方法模拟长药柱效应并进行敏感性分析,我们可将模型级别的机理认识推广至现场尺度。见图 4。

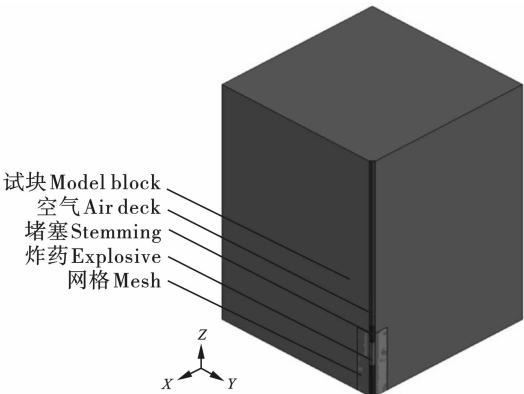


图 4 四分之一模型示意图
Fig. 4 Schematic iagram of the quarter model

3.2 材料参数选取

1) 混凝土 RHT 材料模型

本文数值模拟采用混凝土 RHT 本构模型^[21],该模型中的弹性极限面方程、最大失效面方程和残余强度方程可用于描述混凝土在爆炸冲击荷载作用下的初始屈服强度、失效强度和残余强度的变化规律。

2) 炮泥材料模型

炮孔采用炮泥进行堵塞,因此选用土壤(*MAT_SO-LI_AND_FOAM)和泡沫材料模型^[22,23]。见表 4、表 5。

表 4 试块 RHT 材料模型的计算参数

Table 4 Calculation parameters of the RHT material model of the test block

f_c/GPa	α_0	$\rho_0/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	A_1/GPa	A_2/GPa	A_3/GPa	β_c	β_t	T_1/GPa
20.5	1.0	2151	35.27E9	39.58E9	9.04E9	0.049	0.049	18.85E9
T_2/GPa	G/GPa	P_{cr}/GP	$\dot{\epsilon}_0^c$	$\dot{\epsilon}_0^t$	$\dot{\epsilon}^c$	$\dot{\epsilon}^t$	D_2	B
0.0	5.25	6.83E6	3.0E-5	3.0E-6	3.0E25	3.0E25	1.0	0.0105
g_t^*	N	Q_0	f_s^*	A_f	n_f	f_t^*	g_c^*	ξ
0.70	0.156	0.6805	0.18	1.60	0.61	0.1	0.53	0
p_{comp}	A	ϵ_p^m	D_1	n	B_1	B_2		
6E9	1.28	0.058	0.01	3	1.22	1.22		

表 5 炮泥材料模型的计算参数

Table 5 Calculation parameters of the gun mud material model

RO	ET	$BULK$	A_0	A_1	A_2	PC	VCR	REF	EPS_2
1800	1.6E7	1.3E12	3.3E8	13100	1.2E10	0.0	0.0	0.0	0.05
EPS_3	EPS_4	EPS_5	EPS_6	EPS_7	EPS_8	EPS_9	EPS_{10}	P_1	P_2
0.09	0.11	0.15	0.19	0.21	0.22	0.25	0.3	0.0	3.4E9
P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}		
4.53E9	6.76E9	1.27E9	2.08E10	2.71E10	3.92E10	5.66E10	1.23E11		

不同堵塞长度时,孔壁应力衰减速度不同,堵塞长度越小,衰减速度越快,反之亦然。将图 2 的荷载加载在炮孔孔壁以代替炸药如图 5 所示。

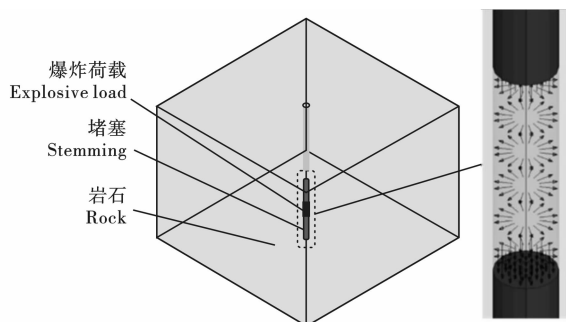


图 5 爆炸荷载施加示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the application of explosion load

3.3 不同堵塞长度下爆破效果分析

通过数值模拟,针对抵抗线长度为 5 cm,堵塞长度分别为 1~5 cm 的情况,对由此形成的等效爆破漏斗半径进行深入分析。根据图 6 和图 7 的结果分析,随着堵塞长度的增加,等效爆破漏斗半径起初迅速扩大,随后趋于稳定。在堵塞长度为 4 cm 与 5 cm 的情况下,两者的爆破漏斗半径差异较小,等效爆破漏斗半径的增长率接近于零。因此,可以得出结论,在抵抗线为 5 cm 的条件下,最佳的堵塞长度应为 5 cm。

进一步分析可以看到,等效漏斗半径随堵塞长度的“先增后稳”并非单一几何现象,而是孔内压力历时与能量传递方式发生系统性转变的反映,较短的堵塞不足以滞留炸药气体,导致孔内压力峰值低且作用时程短,能量主要以瞬时冲击形式逸散,裂缝萌生早但扩展受限,最终表现为高大块率,随着堵塞长度增大,孔内形成了更长的高压持续期,气体能够持续作用于裂隙并促成裂隙的横向连通与二次破碎,从而使漏斗体量与碎块均匀性同步改善,表现为漏斗半径增长且块度趋细。当堵塞长度接近某一临界区间时,破坏机制在空间分布上出现结构性变化,中心区的破碎仍以气体压缩—剪切作用为主,而边缘区开始出现由波动、反射与拉伸效应支配的破坏

样式。此时,虽然漏斗外廓已接近极限(几何意义上的“最大化”),但能量在空间上的分配变得不均匀——漏斗边缘常以拉伸反射波为主导,应力脉动频谱中低频成分增强,导致边缘块体在初次断裂后缺乏足够的二次冲击与摩擦能量完成更细碎化过程,进而出现局部最大块尺寸的“反弹”现象。见图 8。

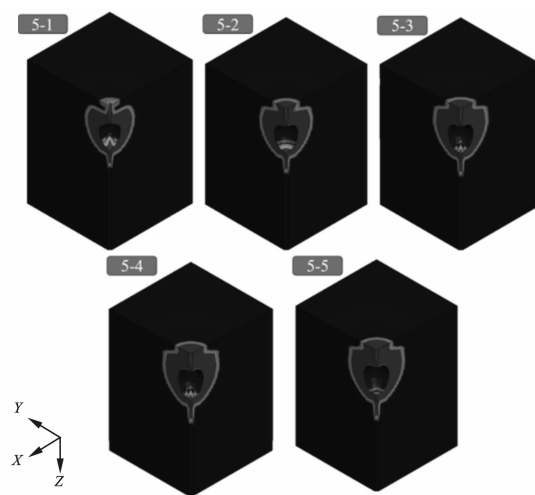


图 6 不同堵塞长度下爆破漏斗损伤模型图

Fig. 6 Shows the damage model diagram of the blasting funnel under different blockage lengths

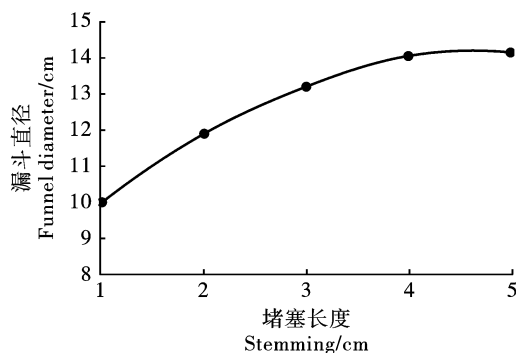


图 7 不同堵塞长度下等效爆破漏斗半径

Fig. 7 Equivalent blasting crater radii under different stemming lengths

试验显示随着堵塞长度由 1 cm 增至 5 cm,爆堆质量呈明显增加趋势——分别约 52.3 g、102.3 g、

150.5 g、194.6 g、207.6 g。质量增量在小堵塞向中等堵塞(1→2 cm、2→3 cm)阶段较大(约增长近一倍和约47%),而在4→5 cm阶段显著放缓(仅约6%~7%),表明随堵塞长度继续增加,爆堆质量的边际收益递减。该规律与等效漏斗半径“先增后稳”的变化一致:适度增大堵塞可延长孔内高压时程、提高炸药能量向围岩的耦合,因而显著增加碎矿量;但当堵塞接近临界区间时,能量分配趋于饱和且出现波动/反射效应,导致质量增加趋缓。

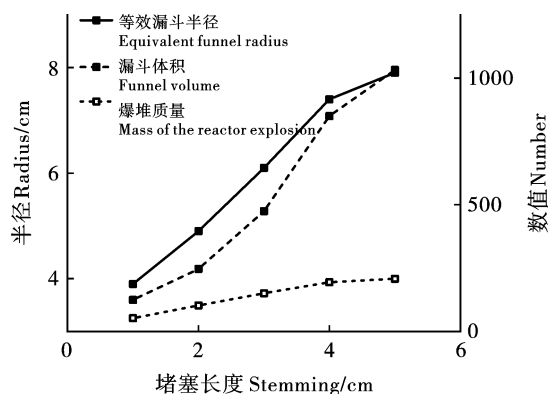


图8 不同堵塞长度下等效爆破漏斗体积

Fig. 8 Equivalent blasting crater volume under different stemming length

从模拟对实验观测的互证角度看,本节的深化分析表明,仅以漏斗半径作为爆破效果的唯一判据容易掩盖孔内动力学的时程差异与能量利用效率的变化。仿真所揭示的孔内压力保持时间、裂纹连通性演化以及能量耗散路径,为实验中观测到的“块度先细化后在临界区反弹”的非单调行为提供了物理解释,也为现场尺度推广提供了更可靠的判据体系。

4 现场实验

4.1 现场爆破模拟实验与模型试验相似关系分析

为了更好地将模型试验研究成果转化为现场运用,并进一步验证相似试验的合理性,对现场多孔爆破进行数值模拟,在束状孔条件下,炮孔间距为炮孔直径的3~8倍^[23,24], $L_d = (3 \sim 8)l$,现场掏槽采用四孔掏槽,炮孔数量较多,因此,相邻炮孔间距0.56 m,对称炮孔间距为0.8 m。用装药药包进行装药,抵抗线为1 m,堵塞长度为1 m,等效炮孔直径为180 mm。现场爆破模拟模型材料参数与模型试验材料参数一致,为了降低边界应力波反射对模拟结果的影响,模型长宽均为8 m,高为5 m,网格划分尺寸为0.1 m。见图9。

多孔数值模拟中,其孔壁荷载施加如下图10所

示。通过公式计算得出整个爆破过程中,孔壁应力上升时间约为0.19 ms,孔壁峰值荷载为1.94 GPa,堵塞物冲出炮孔时间约3 ms,当堵塞物冲出炮孔后,爆生气体迅速冲出炮孔,孔壁应力快速衰减,所以本次模拟以3 ms作为爆破结束时间点。

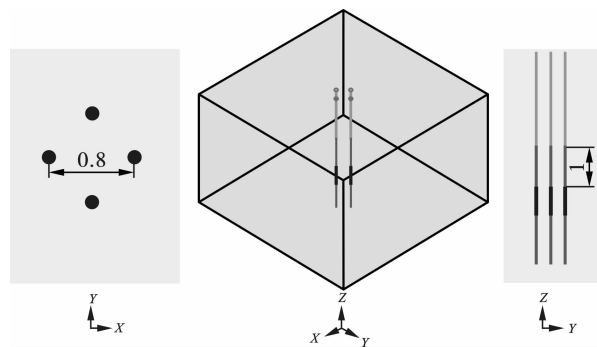


图9 现场爆破模型示意图(单位:m)

Fig. 9 Schematic diagram of the on-site blasting model(unit:m)

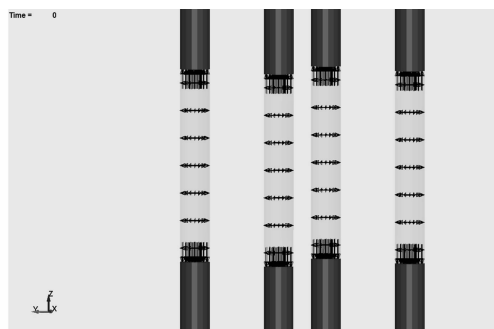


图10 现场爆破孔壁荷载施加示意图

Fig. 10 Schematic diagram of on-site blasting hole wall load application

需要强调的是,爆破破岩过程包含两个时程与机理上明显不同的阶段,一是应力波主导阶段,由炸药瞬时释放产生高幅值应力波,主要在极短时间内(次毫秒到毫秒量级)沿围岩传播并诱发初级断裂,二是气体—孔口作用阶段,由爆生气体在孔内膨胀并向裂隙内浸入,作用时间远长于应力波(本研究通过理论估算与仿真得到气体冲出孔口约为3 ms),对裂缝的持续扩展和二次破碎起重要作用。因此,以3 ms作为气体作用的结束标志是合理的,但并不等同于将整个爆破破裂过程视为终止。

由图11可知,束状孔爆破后在模型表面与模型内部能够形成与单孔爆破形状相似的爆破漏斗。束状孔爆破后由其内部失效程度可知,多孔起爆能够有效提高爆破作用深度^[25]。结合图2中的实验可知,模型试验漏斗半径为7.9 cm,而现场多孔爆破后等效半径为1.7 m,为模型试验漏斗尺寸的22.27

倍,表明束状孔爆破等效爆破孔径的合理性。由现场爆破束状孔爆破等效药包长径比约为 3.04,模型试验中,采用的药包长径比为 3.75,均为球状药包爆破,两者药包长度比值约为 21.3。现场爆破与模型试验爆破效果比值与几何相似比基本一致,均在 20 附近,为方便现场运用,对结果进行取整为 20。综上可知,采用相似试验能够有效研究井下爆破问题。

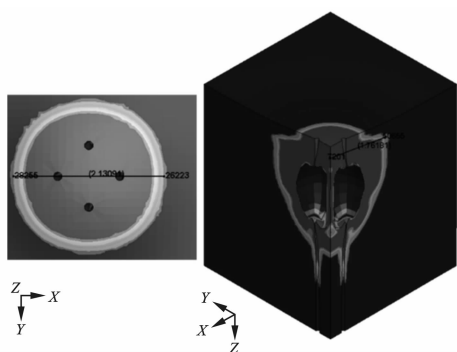


图 11 现场爆破数值模拟与模型试验爆破效果示意图

Fig. 11 Schematic diagram of on-site blasting numerical simulation and model test blasting effect

4.2 工程实例

为了将本文的研究成果运用于现场,本文以 Sh-500 m S3#矿房采场为试验采场。模型中药包长度 3 cm,堵塞为 5 cm,抵抗线为 5 cm,根据几何相似系数为 20,则对应实际抵抗线约为 1 m,堵塞长度为 1 m。

(1) 采场概况

如图 12 所示,Sh-500m S3#矿房采场垂直矿体走向布置,采场宽度 18.0 m,长度 51.0 m,(截取了部分)采场布置 10 排炮孔,绿色为拉槽区的炮孔位置。排距指相邻两排炮孔中心线之间的距离,取值范围为 1.8 ~ 2.2 m,列距指同一排内相邻两孔中心线之间的间距,取值为 2.0 m,需要特别说明的是,文中提及的“抵抗线 ≈ 1.0 m”是指从炮孔中心到自由面(或预期崩落面)在水平/径向方向上的有效距离,用于判断能量耦合与堵塞设计,它不同于描述布孔密度的孔间中心距(排距/列距)。而“堵塞长度 1.0 m”是指孔内装药顶部的填充段长度。两者是不同的概念。

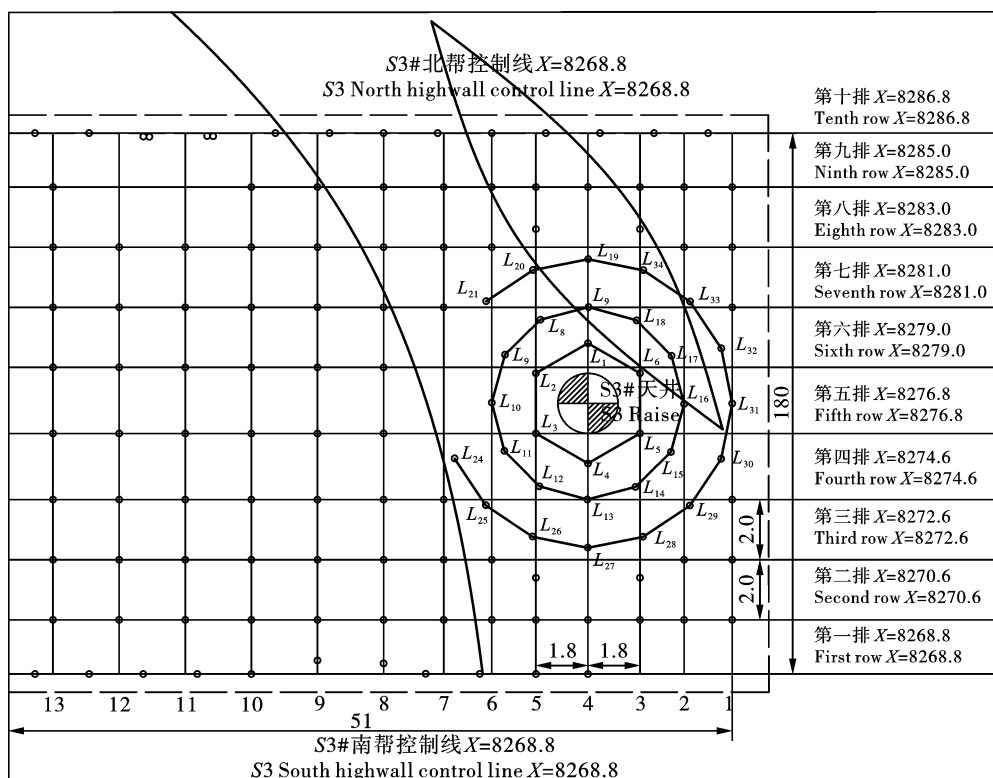


图 12 采场炮孔布置平面图

Fig. 12 Layout plan of the blastholes in the stope

(2) 试验采场爆破范围

本文在 Sh-500m S3#矿房采场进行爆破试验,爆破范围为第 1 列至第 7 列,共计 51 个炮孔,现场孔内采用条形药卷(药卷尺寸 $R = 90$ mm, $L =$

0.6 m),底部留抵抗线 1.0 m,每层装药 1 条,堵塞为 1.0 m 河砂并由数码电子雷管起爆,因此单层装药与抵抗线所占的孔深约为 $0.6 + 1.0 = 1.6$ m(即每层占用孔深约 1.6 m)。

(3) 爆破效果分析

试验采场垂直深孔爆破效果如图13所示,拍摄爆堆时将随身带的小矿泉水瓶掷于上方用做参照物。

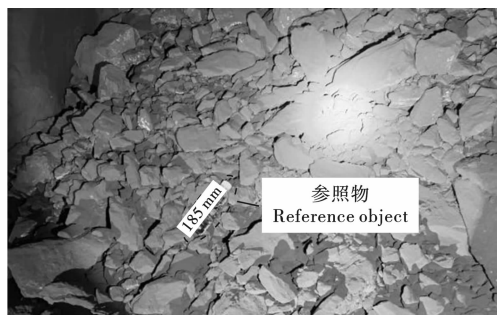


图13 现场试验爆破效果示意图

Fig. 13 Schematic diagram of the blasting effect of the on-site test

将上述爆堆图片导入 WipFra 块度识别软件中进行图像处理(图中小矿泉水瓶为参照物,尺寸为185 mm),获得块度分布曲线,块度处理结果如图14,块度分布曲线如图15。

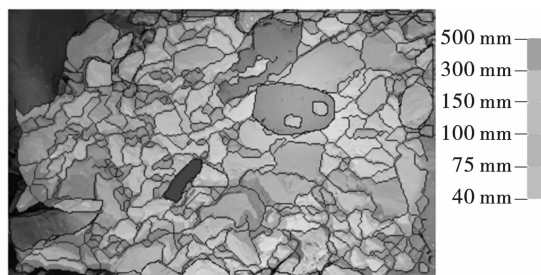


图14 WipFrag 块度识别结果

Fig. 14 WipFrag fragmentation identification result

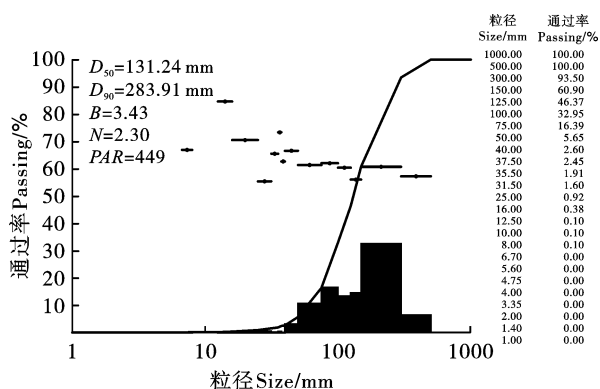


图15 块度分布曲线

Fig. 15 Fragmentation distribution curve

D_{50} 代表爆区有50%的颗粒粒径小于该粒径, D_{99} 代表爆区有99%的颗粒粒径小于该粒径 mm, B 表示曲线的起伏程度, N 表示均匀度系数, N 越大代

表所测材料越均匀, PAR 表示分析处理的粒子数。由爆堆块度分析结果可知,平均尺寸小于500 mm的爆堆占比为100%;(300,500] mm的爆堆占比为6.5%;(100,300] mm的爆堆占比为60.55%;小于100 mm的爆堆占比为32.95%。

由于凡口铅锌矿的矿石溜井格栅规格为500 mm×500 mm,因此在上述分析中将岩石尺寸大于500 mm视为大块。此实验采场爆堆块度均匀,对于大块而言,大块率0%,符合要求。试验结果表明:在该堵塞长度条件下,能够更为充分地利用爆炸能量,提高了现场爆破作业的效能。

5 结论

堵塞长度是垂直深孔类爆破中决定能量传递与破碎效果的关键控制参数。本文研究表明堵塞长度对漏斗体量、爆堆质量与粒级分布具有显著影响。得出以下结论:

(1) 试验产物的粒级统计和堆积形态为工程参数选择提供了必要的经验基础,但仅依赖几何量(例如漏斗外廓)来评价爆破效果容易忽视孔内动力学的时程差异与能量流向的变化,因此实验结果应与其他判据结合使用以形成更全面的评价体系。

(2) 通过分析孔内压力时程、裂纹扩展模式与能量分配路径,仿真揭示了为何存在一个“最优堵塞区间”,并解释了在临界附近出现最大块尺寸非单调变化的物理机制。

(3) 仿真结果表明,不同堵塞工况下孔内的压力保持时间、应力波的反射与拉伸组分以及裂纹网络的连通性是决定破碎最终状态的关键因素,因而仿真与试验在功能上呈互补关系——试验验证宏观效果,仿真揭示微观一时程机理。

参考文献 (References)

- [1] ZHANG Zong-guo, QIU Xian-yang, SHI Xiu-zhi, et al. Optimization of the matching relationship between the stemming length and minimum burden in cut blasting of large-diameter long-hole stopes [J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2023, 9(1): 1-22.
- [2] 秦声, 吴德义, 樊凌川. 巷道爆破掘进炮孔堵塞长度合理确定[J]. 中国矿山工程, 2021, 50(4): 1-4.
- [2] QIN Sheng, WU De-yi, FAN Ling-chuan. Reasonable calculating stemming length in the bore hole of blasting roadway [J]. China Mining Engineering, 2021, 50(4): 1-4. (in Chinese)

- [3] 王姝媛,张昌锁,韩秉呈. 井下单自由面深孔爆破堵塞结构运动规律及长度确定[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2025,44(2):1-11.
- [3] WANG Shu-yuan,ZHANG Chang-suo,HAN Bing-cheng. Motion law and length determination of stemming structures in underground mine's single free-face deep-hole blasting[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science Edition),2025,44(2):1-11. (in Chinese)
- [4] 罗 勇,沈兆武. 炮孔合理堵塞长度的研究[J]. 岩土工程技术,2006,20(1):25-28.
- [4] LUO Yong,SHEN Zhao-wu. Study on stemming length in hole-charged blasting[J]. Geotechnical Engineering Technology,2006,20(1):25-28. (in Chinese)
- [5] 赵新涛,程贵海,冯国建. 炮孔堵塞长度的计算与实验研究[J]. 力学季刊,2010,31(2):165-171.
- [5] ZHAO Xin-tao,CHENG Gui-hai,FENG Guo-jian. Calculation and experimental study of blast-hole stemming length[J]. Quarterly Journal of Mechanics,2010,31(2):165-171. (in Chinese)
- [6] 叶志伟,陈 明,杨建华,等. 隧道爆破炮孔堵塞结构运动规律与长度优化研究[J]. 中国公路学报,2024,37(8):204-215.
- [6] YE Zhi-wei,CHEN Ming,YANG Jian-hua,et al. Movement law and length optimization of stemming structure in tunnel blasting[J]. China Journal of Highway and Transport,2024,37(8):204-215. (in Chinese)
- [7] 段继超,宗 琦,汪海波,等. 冲击作用下囊袋式炮孔堵塞结构性能试验研究[J]. 爆破,2023,40(3):24-30.
- [7] DUAN Ji-chao,ZONG Qi,WANG Hai-bo,et al. Experimental study on blocking structure performance of bag-type under impact[J]. Blasting,2023,40(3):24-30. (in Chinese)
- [8] 李启月,刘冰川,陈 亮,等. 深孔爆破一次成井炮孔合理堵塞长度[J]. 科技导报,2013,31(19):15-19.
- [8] LI Qi-yue,LIU Bing-chuan,CHEN Liang,et al. Blast-hole reasonable stemming length for raise excavation using one-step deep-hole blasting[J]. Science and Technology Review,2013,31(19):15-19. (in Chinese)
- [9] ZHANG Zong-xian,QIAO Yang,CHI Li-yuan,et al. Experimental study of rock fragmentation under different stemming conditions in model blasting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2021,143:104797.
- [10] 张艳军,雷美荣,张东让,等. 爆炸荷载作用下小口径炮孔堵塞数值模拟[J]. 爆破,2023,40(2):75-79.
- [10] ZHANG Yan-jun,LEI Mei-rong,ZHANG Dong-rang,et al. Numerical simulation of small hole stemming under blast load[J]. Blasting,2023,40(2):75-79. (in Chinese)
- [11] 丁希平,王中黔,冯叔瑜. 堵塞长度对台阶爆破作用影响的数值模拟[J]. 煤炭学报,2001(4):370-373.
- [11] DING Xi-ping,WANG Zhong-qian,FENG Shu-yu. Simulation on effect of stemming length to deep hole bench blasting[J]. Journal of China Coal Society,2001(4):370-373. (in Chinese)
- [12] 郭东明,蓝樊革,张 伟,等. 炮孔堵塞长度对爆破效果的影响研究[J]. 爆破,2023,40(3):108-115,142.
- [12] GUO Dong-ming,LAN Fan-ge,ZHANG Wei,et al. Study of influence of stemming length on blasting effect[J]. Blasting,2023,40(3):108-115,142. (in Chinese)
- [13] 陈思佑,姚颖康,朱 丹,等. 不同堵塞条件下硬岩隧道直眼掏槽破岩效果数值模拟研究[J]. 江汉大学学报(自然科学版),2024,52(3):5-15.
- [13] CHEN Si-you,YAO Ying-kang,ZHU Dan,et al. Numerical simulation study on rock breaking effect of burn cut in hard rock tunnel under different blocking conditions[J]. Journal of Jiangnan University(Natural Science Edition),2024,52(3):5-15. (in Chinese)
- [14] 汪海波,魏国力,宗 琦,等. 节理发育岩体巷道掘进爆破数值模拟与应用研究[J]. 黄金科学技术,2018,26(3):342-348.
- [14] WANG Hai-bo,WEI Guo-li,ZONG Qi,et al. Numerical simulation and application research on joint development rock roadway blasting excavation[J]. Gold Science and Technology,2018,26(3):342-348. (in Chinese)
- [15] 梁 禹,吴 立,左清军,等. 水下钻孔爆破堵塞长度的数值模拟研究[J]. 爆破,2011,28(1):92-94,97.
- [15] LIANG Yu,WU Li,ZUO Qing-jun,et al. Numerical simulation of stemming length in underwater drilling and blasting[J]. Blasting,2011,28(1):92-94,97. (in Chinese)
- [16] 任少峰,周 俊,王 彬,等. 聚苯乙烯泡沫不耦合装药爆破试验研究[J]. 爆破,2018,35(2):67-71.
- [16] REN Shao-feng,ZHOU Jun,WANG Bin,et al. Experimental study of polystyrene foam with uncoupling charge blasting[J]. Blasting,2018,35(2):67-71. (in Chinese)
- [17] 付 军,郝亚飞,曹进军,等. 大孔径爆破堵塞技术优化研究与应用[J]. 爆破,2019,36(4):150-154.
- [17] FU Jun,HAO Ya-fei,CAO Jin-jun,et al. Optimization of stemming technology in large diameter borehole blasting and its application[J]. Blasting,2019,36(4):150-154. (in Chinese)
- [18] 王 洋,史秀志,苟永刚,等. 平行双自由面岩体爆破炮孔堵塞效应研究[J]. 振动与冲击,2016,35(15):80-85.
- [18] WANG Yang,SHI Xiu-zhi,GOU Yong-gang,et al. Blast hole stemming length effects of rock blasting with paral-

- lel double-free-surface [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(15): 80-85. (in Chinese)
- [19] 王文洋, 罗志华, 张宗国. 孔底抵抗线对 VCR 爆破的影响研究[J]. 采矿技术, 2022, 22(5): 158-161.
- [19] WANG Wen-yang, LUO Zhi-hua, ZHANG Zong-guo. Research on the influence of hole bottom resistance line on VCR blasting [J]. Mining Technology, 2022, 22(5): 158-161. (in Chinese)
- [20] 罗伟, 朱传云, 祝启虎. 隧洞光面爆破中炮孔堵塞长度的数值分析[J]. 岩土力学, 2008(9): 2487-2491.
- [20] LUO Wei, ZHU Chuan-yun, ZHU Qi-hu. Numerical simulation of stemming length in tunnel smooth blasting [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(9): 2487-2491. (in Chinese)
- [21] 蒲磊. 不同加载方式下隧道爆破振动特征分析[J]. 爆破, 2018, 35(1): 42-48.
- [21] PU Lei. Study on vibration characteristics of tunnel blasting under different loading modes [J]. Blasting, 2018, 35(1): 42-48. (in Chinese)
- [22] LIU Fei, GUO Zi-ru, LV Hua-yong, et al. Test and analysis of blast wave in mortar test block [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 108: 80-85.
- [23] BAKHSHANDEH A H, MOZDIANFARD M R, SIAMAKI A. Predicting of blasting vibrations in Sarcheshmeh copper mine by neural network [J]. Safety Science, 2010, 48: 319-325.
- [24] 陈何, 万串串, 王湖鑫. 束状孔当量球形药包爆破漏斗的模型研究[J]. 金属矿山, 2021(5): 36-42.
- [24] CHEN He, WAN Chuan-chuan, WANG Hu-xin. Study on blasting crater model of the equivalent spherical charge of bunch-holes [J]. Metal Mine, 2021(5): 36-42. (in Chinese)
- [25] 史秀志, 田建军, 王怀勇. 束状孔当量球形药包爆破漏斗试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2008(5): 83-85.
- [25] SHI Xiu-zhi, TIAN Jian-jun, WANG Huai-yong. Blasting crater experiment and research on equivalent spherical charge by bundle-holes [J]. Mining Research and Development, 2008(5): 83-85. (in Chinese)

(上接第90页)

- [24] 路燕泽, 王立杰, 连欢超, 等. 大直径深孔分段爆破切井掏槽方式优化[J]. 工程爆破, 2025, 31(1): 17-23, 88.
- [24] LU Yan-ze, WANG Li-jie, LIAN Huan-chao, et al. Optimization of cutting mode of large diameter and deep hole blasting [J]. Engineering Blasting, 2025, 31(1): 17-23, 88. (in Chinese)
- [25] 冯婷, 夏治园, 杨帆, 等. 孔内多分段掏槽爆破数值模拟及实验研究[J]. 火工品, 2025(1): 83-88.
- [25] FENG Ting, XIA Zhi-yuan, YAGN Fan, et al. Numerical simulation and experimental study on multi-segment cut blasting in hole [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2025(1): 83-88. (in Chinese)
- [26] GINGOLD A. Smoothed particle hydrodynamics theory and application to non-spherical stars [J]. Monthly Notice of Royal Astronomical Society, 1977, 181: 375-389.
- [27] LUCY L B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis [J]. The Astrophysical Journal, 1977, 8(12): 1013-1024.
- [28] LIU Kai, LI Qi-yue, WU Cheng-qing, et al. A study of cut blasting for one-step rase excavation based on numerical simulation and field blast tests [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018(109): 91-104.
- [29] 桂玮, 宗琦, 汪海波, 等. 基于 RHT 模型的立井掏槽爆破空孔布置方式对破岩效果影响研究 [J/OL]. 工程爆破: 1-13. [2025-06-14]. <https://link.cnki.net/doi/10.19931/j.EB.20240309>.
- [29] GUI Wei, ZONG Qi, WANG Hai-bo, et al. Research on the influence of vertical shaft grooving and blasting hole arrangement on rock braeaking effect based on RHT model [J/OL]. Engineering Blasting: 1-13. [2025-06-14]. <https://link.cnki.net/doi/10.19931/j.EB.20240309>. (in Chinese)
- [30] 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, 25(1): 80-85.
- [30] WANG Kai, ZHANG Zhi-yu, GAO Teng-fei. Application of air interval charge for deep hole bench blasting in an open pit mine [J]. Engineering Blasting, 2018, 25(1): 80-85. (in Chinese)
- [31] 韩崇刚. 空气间隔装药对混凝土爆破效应的数值模拟 [J]. 工程爆破, 2018, 24(2): 15-20.
- [31] HAN Chong-gang. Numerical simulation of the blasting effects of air decking charge on the concrete [J]. Engineering Blasting, 2018, 24(2): 15-20. (in Chinese)