

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.03.005

露天煤矿规模爆破大块产生机理及块度控制研究^{*}

徐洪艳¹, 陈辉^{2,3,4}, 张敬刚¹, 周文斌¹, 高飞², 吕金星^{2,3,4}, 吴兵兵¹

(1. 新疆雪峰爆破工程有限公司, 昌吉回族自治州 831100; 2. 新疆大学 地质与矿业工程学院, 乌鲁木齐 830047;

3. 新疆矿产资源绿色开发与生态修复省部共建协同创新中心, 乌鲁木齐 830047;

4. 新疆绿色爆破工程技术研究中心, 昌吉回族自治州 831100)

摘要: 为解决露天煤矿爆破规模扩大过程中出现的大块率高和块度统计方法缺失两个问题, 首先通过理论推导爆炸能量分布规律, 揭示大规模爆破能量分布不均的原因, 选用理论计算模型, 确定排除应力波叠加干扰的合理延期时间; 其次, 根据不同起爆位置应力波传播规律, 选取中间起爆的方法破碎正常爆破区, 用双点起爆方法破碎地表有硬岩区域; 最后, 运用摄影法对观测点数据进行多项式拟合, 用拟合后的曲线代表整体爆堆情况。结果表明, 岩石大块主要来源于三个方面: ①台阶坡面与第一排炮孔之间的岩石大块; ②炮孔堵塞段的大块; ③地表硬岩大块。针对大规模炮区三种大块易发形式, 进行第一排设置斜孔, 所有炮孔中间起爆, 和硬岩区加装辅助药包的三种改进。现场实践结果表明: 通过改进起爆位置、延期时间, 爆破效果优于改进前, 大大提高硬岩挖装效率, 降低大块处理成本。爆后结合块度分析软件 and 数据处理分析大块率, 大块率下降约 50%, 验证了理论准确性, 为后续大规模爆破设计提供了理论指导和设计样板。

关键词: 大规模爆破; 爆炸能量传播规律; 爆破块度; 大块产生机理; 块度分析与控制

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)03-0042-12

Study on Generation Mechanism of Boulders and Fragmentation Control in Production Blasting at Surface Coal Mines

XU Hong-yan¹, CHEN Hui^{2,3,4}, ZHANG Jing-gang¹,
ZHOU Wen-bin¹, GAO Fei², LYU Jin-xing^{2,3,4}, WU Bing-bing¹

(1. Xinjiang Xuefeng Blasting Engineering Co., Ltd., Changji 831100, China;

2. School of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

3. Provincial and Ministerial Co-constructed Collaborative Innovation Center for Green
Development and Ecological Restoration of Mineral Resources in Xinjiang, Urumqi

830047, China; 4. Xinjiang Green Blasting Engineering Technology Research

Center, Changji Hui Autonomous Prefecture 831100, China)

收稿日期 (Date of reception): 2025-09-28

网络首发日期 (Published online): 2025-10-23

作者简介: 徐洪艳 (1983-), 男, 新疆乌鲁木齐人, 学士、正高级工程师, 主要从事矿山爆破方向的研究, (E-mail) 122760522@qq.com.

通信作者: 陈辉 (1985-), 男, 新疆伊犁人, 博士、副教授, 主要从事矿山爆破及安全方向的研究与教学工作, (E-mail) chenui@xju.edu.cn.

基金项目: 露天矿穿孔爆破全过程智能化关键技术及成套装备研发 (自治区科技计划项目-重点研发专项) (2024B01005); 超高海拔区战略性
金属矿产绿色安全高效露天开采关键技术研发 (自治区科技计划项目-重大专项) (2024A03001)

About the author: XU Hong-yan (1983-), male, born in Urumqi city, Xinjiang uygur autonomous region, bachelor degree, senior professional engineer, mainly engaged in research on mine blasting, (E-mail) 122760522@qq.com.

Corresponding author: CHEN Hui (1985-), male, born in Ili kazakh autonomous prefecture, Xinjiang uygur autonomous region, Ph. D, associate professor, mainly engaged in research and teaching in mining blasting and safety, (E-mail) chenui@xju.edu.cn.

Fund Programs: Research and development of key technologies and complete sets of equipment for intelligent full-process perforation and blasting in open-pit mines (2024B01005), Research and development of key technologies for green, safe, and efficient open-pit mining of strategic metal minerals in ultra-high altitude areas (2024A03001)

Abstract: To address the challenges of excessive boulder yield and inadequate methods for quantifying fragmentation during blast scale-ups in surface coal mining, this research theoretically analyzes the distribution law of explosion energy and identifies the causes of irregular energy dispersion in large-scale blasting operations. A theoretical calculation model was employed to establish optimal, reasonable delay intervals that effectively eliminate stress wave interference effects. Building on stress-wave propagation characteristics, the study implemented intermediate initiation for standard blasting zones and employed dual-point initiation to effectively fracture surface-hard rock formations based on detonation-position dynamics. The photographic analysis method was employed to perform polynomial fitting of observation point data, with the fitted curve representing overall blasting performance. The results indicate that the boulders mainly originate from three sources: (1) the rock mass between the bench slope face and the first row of blast holes, (2) the stemming section of the blast holes, and (3) the surface hard rock. Aiming at these boulder generation mechanisms in extensive blasting areas, three key modifications were implemented: installing inclined front-row holes, adopting central initiation for all blast holes, and supplementing auxiliary charges in hard-rock sections. Field implementation demonstrates significant improvements in blasting performance through optimized initiation positions and delay timing, resulting in enhanced hard rock excavation efficiency and reduced boulder processing costs. Post-blast analysis using fragmentation assessment software and data processing reveals an approximately 50% reduction in boulder yield, validating theoretical models and establishing practical guidelines and design frameworks for subsequent large-scale blasting operations.

Key words: large-scale blasting; the propagation law of explosion energy; blasting fragments; generation mechanism of boulder; fragmentation analysis and control

煤炭煤电煤化工与绿色矿业是新疆“八大产业集群”的两个重要组成部分,随着以“八大产业集群”为支撑的现代产业体系快速建设^[1],对能源的需求也日益增大。中国能源结构是以煤炭为主^[2],煤炭化工与绿色矿业作为与煤炭能源最相关的两个产业集群,迫切需要发展高质生产力,提高产能。新疆煤矿主要采用露天开采的方法,赋存量巨大,然而,目前的煤矿开采效率受到了技术瓶颈制约,这种制约主要反映在不能规模化的煤炭开采技术与日渐扩大的能源需求不匹配。

煤矿开采技术不能适应规模化开采,主要存在两个方面的问题:1)煤矿开采时,受矿山地质条件制约,传统的爆破方法,无法满足爆破规模化的需求。2)已有的一些大规模爆破尝试,爆破后大块率高且块度不均匀,极大影响挖装效率,从而影响矿山生产效率。

近年来,国内外学者通过分析岩石破碎机理、调整起爆药包位置,改变爆破参数,控制爆炸能量更多对岩石破碎做功,达到了减少大块的目的。如栾龙发、庙延钢通过高速摄影机^[3],捕捉了台阶爆破时的岩石破碎过程,通过图像比对,探讨了爆破时台阶表面的岩石运移规律。杨军考虑到逐孔起爆时^[4],自由面会发生改变从而影响爆破效果,提出了露天台阶爆破岩石破碎楔块理论,用数值模拟方法验证了该理论更接近于真实的岩石破碎情况。李成晓、杨仁树提出了一种基于分散装药和分段爆轰的深孔

切孔爆破理论^[5],并在现场利用该理论进行爆破设计,爆破后,岩石粒度均匀,有效控制大块率。段宗银采用数值模拟方法通过改变不耦合系数、炸药单耗、爆破参数和填塞条件^[6],进行模拟爆破试验,对爆破后的块度进行筛分统计分析,以优化爆破参数和实现对爆破块度的控制和预测。吴亮、宗琦等对柱状药包及其不同装药结构的能量分布做了深入的理论研究^[7,8]。田振农对炸药爆轰过程中的炮腔进行了数值模拟^[9],得到了炮腔内能量分布特征。肖思友分析了高地应力条件下^[10],爆破硬岩的破碎特性与能量分布。孟佳乐、尹忠昌、李章超、戴林运用数值模拟手段^[11-14],优化了台阶爆破参数与炮孔填塞方法,提高了爆轰过程中的炸药能量利用效率,在工程实践中有效降低了大块率。

杨龙进行了顶部、中部、底部起爆的数值模拟试验^[15],比较了不同起爆位置的孔壁压力,研究了不同起爆位置的岩石破碎效果。Italo A Onederra 模拟完全耦合炸药引起的岩石破碎情况^[16]。刘亮的数值模拟试验证明^[17],正向起爆对孔底的破碎效果较好,能有效防止根底产生。马瑞龙通过应变片监测了圆柱形炮孔的径向压力变化^[18],得到了应力波应变特性及传导机制。李海波通过爆破振动监测和声波试验^[19],得到了在振动波传导过程中的岩石损伤特征。Yi Changping 提出了一种基于损伤概念的岩体爆破裂缝形成方法和基于有限元法的碎片尺寸分布评估方法^[20],对大规模爆破岩体裂缝扩展与大块

统计方法给予我们启发。高启栋、冷振东、杨仁树、郭杨对孔内起爆位置进行了深入研究^[21-25],探究了爆破振动规律和裂纹扩展情况,在孔底、孔口、中间起爆三种基础上,还分析了侧向起爆、双点起爆的应力场分布规律,结合工程实践,探究了不同起爆方法的岩石破碎效果,有效降低了大块率。

然而这些理论并不能解释大规模爆破过程中大块的产生原因,未充分分析大规模爆破中的大块来源。同时大规模爆破的数值模拟无法还原出爆破现场出现的问题,因此无法通过数值模拟手段来对大规模爆破进行参数优化。因此,基于爆炸能量分配与应力波传播理论,讨论高效利用爆炸能量的大规模爆破起爆方式,分析大规模爆破大块来源并对大规模爆破设计提出多种改进措施,最后在现场进行

两次大规模爆破试验,取得良好爆破效果,有效控制大块率。

1 矿山概况

研究区位于新疆昌吉回族自治州五彩湾天池能源南露天煤矿,如图 1 所示。该矿区地貌形态为残丘状的剥蚀平原,地势总体北高南低,地形有利于自然排水。矿区内无常年流动的地表水流,气候干燥。矿区水文地质条件简单,台阶岩体由泥岩、砂岩等岩石互层构成。矿区内台阶高 15 m,爆破孔为 16 m 深,装药长度为 12.5 m,堵塞长度 3.5 m。

本采用反向起爆,延期时间为孔间 37 ms,排间 75 ms,地表硬岩区炮孔内双药包同时起爆。试验 1 爆破参数如表 1 所示,炮区设计如图 2 所示。

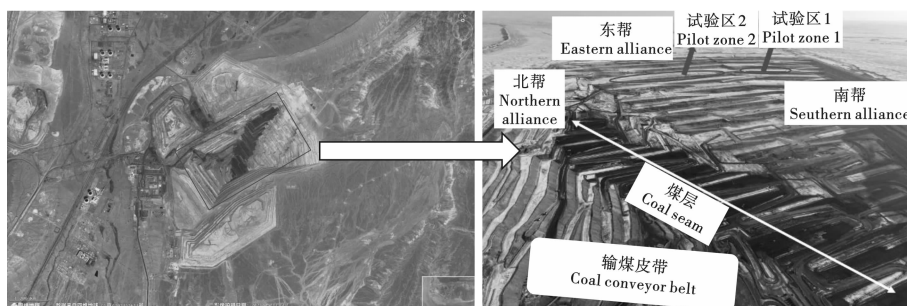


图 1 南露天煤矿卫星拍摄图及俯瞰图

Fig. 1 Satellite shooting map and overlooking map of South Surface Coal Mine

表 1 试验 1 爆破参数表

Table 1 Test 1 table of blasting parameters

	孔数 Number of holes/piece	孔径 Hole diameter/mm	孔深 Hole depth/m	孔斜 Pitch/ Degree	孔距 Spacing/m	排距 Burden/m	装药长度 Charging length/m
第一排 Front row	24	152	16	80	8.3	6.1	12.5
地表硬岩区 Surface hard rock area	48	152	16	90	8.3	6.1	12.5
正常爆破区 Normal blasting zone	135	152	16	90	8.3	6.1	12.5
预裂区 Pre-splitting zone	9	152	16	60	8.3	6.1	不耦合装药 Uncoupled charging

在此前进行台阶宽度为 55 m 的爆破时,为适应大规模爆破,采用 152 mm 大直径炮孔,并且遵循大孔距小排距原则,孔排距设置为 8.5 m × 6 m,采用反向起爆,延期时间为孔间 37 ms,排间 75 ms。由于未对爆炸能量进行分析,且没能够考虑到大规模炮区岩性复杂程度,爆破后岩石大块率常在 10% ~ 25% 之间,严重影响挖装。

2 规模爆破岩石大块产生原因分析

2.1 中间起爆与反向起爆的能量分布特征

在互层岩体中,岩体层理方向影响爆生气体对岩体的作用,在水平、倾斜、竖直层理中,倾斜、竖直层理相对水平层理爆生气体泄漏较多,能量利用率低^[26]。研究区内部岩体层理方向为倾斜,倾角约

$4^\circ \sim 10^\circ$, 对于有自由面一侧的岩体, 受到爆生气体的抛掷作用而飞出; 而对于后排没有临空面的岩体, 由于爆生气体随着自由面岩体的破碎抛出而泄露, 受到爆生气体的破坏作用减弱^[27]。岩石破碎主要由应力波与反射波主导, 所以在考虑岩石破碎时, 着重分析应力波压缩作用及反射波拉伸作用。出于对

岩体破碎及抛掷效果的考虑, 在工程实践中, 常采用大孔径炮孔反向起爆的方法进行深孔台阶爆破, 大孔径意味着装入炸药多, 爆速高, 孔内爆炸能量大, 反向起爆可以明显提高爆轰产物作用时间, 提高能量利用率。但是随着爆破规模化, 这种方法也显现出了由于爆炸能量分配不均导致的根底及块度不均问题。

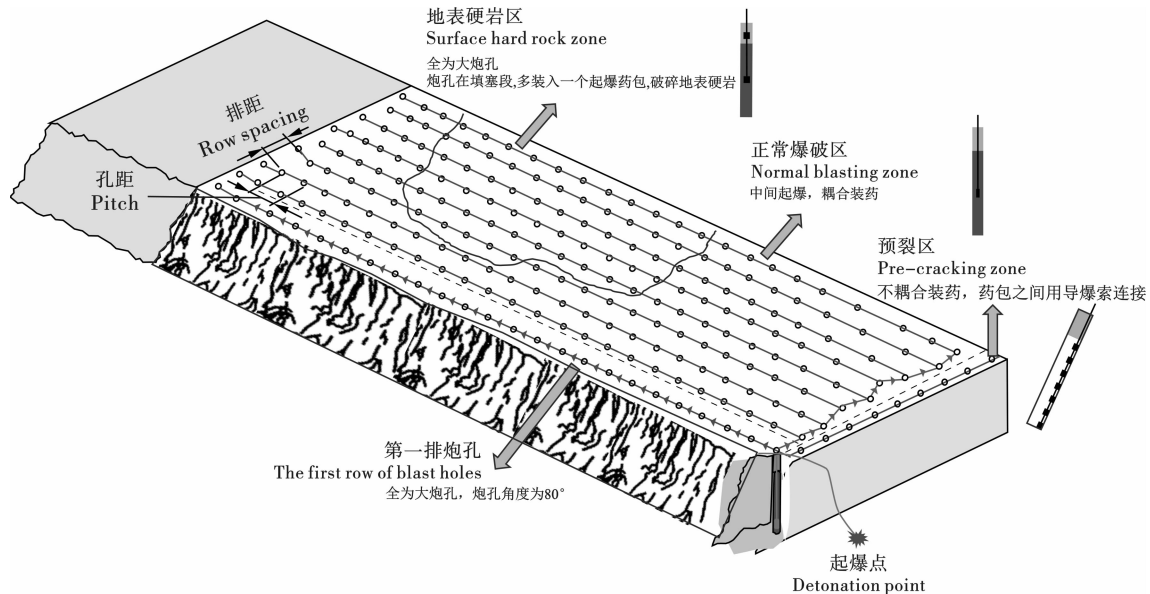


图2 试验1炮区规划示意图

Fig. 2 Test 1 area planning diagram

张宝平分析了柱状炸药爆轰过程中^[28], 起爆位置对爆轰能量的影响。如下式所示

$$E_a = \frac{1}{27} \rho_0 A D_j^2 \left(a + \frac{11}{16} b \right) \quad (1)$$

$$E_b = \frac{1}{27} \rho_0 A D_j^2 \left(\frac{11}{16} a + b \right) \quad (2)$$

式中: a, b ($a \leq b$) 为起爆点两端药包的长度, 炮孔长度 $l = a + b$, 炸药的初始密度为 ρ_0 ; 初始爆轰速度为 D_j ; 药包横截面积为 A ; E_a, E_b 分别为起爆位置左右两侧的爆轰能量。

假使对炮孔进行反向起爆, 则使 $a = 0$, 可得 b 端爆轰能量为

$$E_{b\text{孔底}} = \frac{b}{27} \rho_0 A D_j^2 \quad (b = l) \quad (3)$$

假设为中间起爆, $a = b$, 那么 a 端与 b 端能量相等, b 端爆轰能量为

$$E_{b\text{中间}} = \frac{1}{27} \frac{27}{16} \frac{l}{2} \rho_0 A D_j^2 \left(b = \frac{l}{2} \right) \quad (4)$$

用式(3)比式(4), 孔底起爆 b 端能量是中间起爆 b 端能量的 1.19 倍。

由计算可知, 孔底起爆能量主要向炸药段上部分配, 底部易形成根底如图 3(a) 所示, 中间起爆能

量主要向炸药段两端分配。如图 3(a)、3(b) 所示, 当起爆药包位于孔底时, 由于上部有填塞, 且炸药在传爆时, 上部炸药会被压缩, 故对炮孔上部岩石破碎较差, 炮孔填塞段大于中部起爆。另外, 反向起爆时, 反射波会对台阶底部进行拉伸破坏, 影响台阶平整度。而且, 反向起爆以爆破地震耗散的能量大于中间起爆^[29], 所以理论上中部起爆爆炸能量利用率更高。

2.2 逐孔爆破合理延期时间的确定

为了使炮区岩石破碎更彻底, 对延期时间改进。依据 Zhang 的研究^[30], 当炮孔间起爆的延期时间差 (t) 满足下式时, 炮孔之间几乎不可能存在应力波叠加现象。

$$t \geq 2L_p + \frac{2S - R_{fg}}{c_p} \quad (5)$$

式中: L_p 为应力波的波长, m ; c_p 为 P 波的波速, m/s ; R_{fg} 为岩石的破碎范围, m ; S 为孔距。为简化理论计算模型, 假定岩石的破碎范围等于孔距 S , 应力波的波长 L_p 等于爆轰波的波长 L_{BP} 。其中爆轰波的波长可通过下式计算

$$L_{BP} = m_{bp} \times T_{det} \quad (6)$$

式中: m_{bp} 通常依据基于烟箱技术的试验确定,

由于试验技术难度较大,所以参考张宗贤《Rock fracture and blasting》中的参考值取 4; T_{det} 为炸药传爆总时间,可以依据装药长度 L 除以炸药爆速 D 得

到。此外,装药长度、排距和孔距分别取为 12.5 m、6.1 m 和 8.3 m。

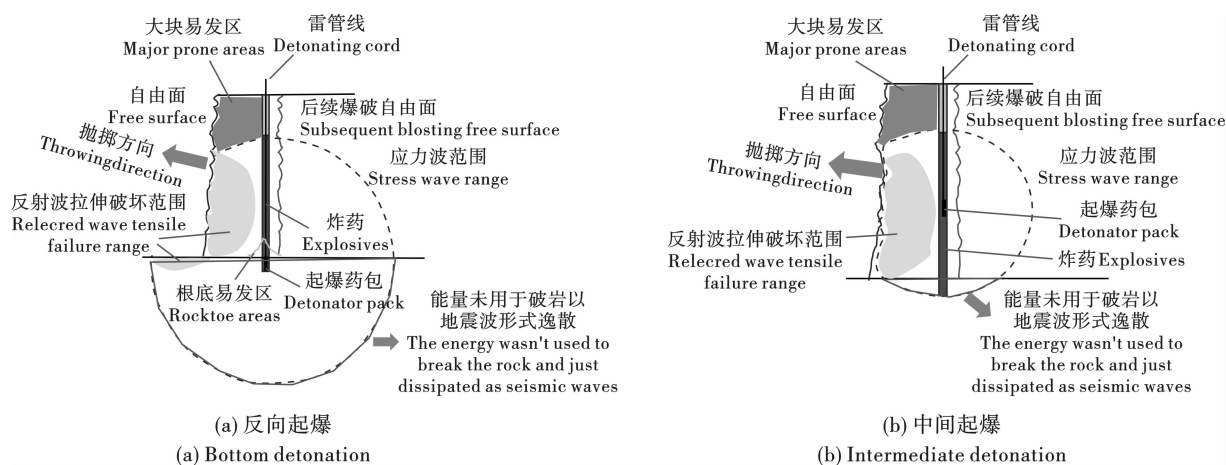


图 3 爆轰过程结束时两种起爆位置的能量分布情况

Fig. 3 The energy distribution of the two initiation positions at the end of the detonation process

将各种参数代入式(5)、式(6)式计算,能产生应力波叠加的最大延期时间为 36.2 ms,因此,将本次规模化爆破试验孔间延期时间设置为 36.2 ms 以上,排除应力波叠加干扰作用。

2.3 大块产生机理及试验改进方法

此前反向起爆产生的大块主要由三部分组成:

①台阶坡面与第一排炮孔之间的大块,②炮孔堵塞段的大块,③地表硬岩大块。

第一种大块是由于爆破时初始自由面临空,导致边排孔爆破后,破碎岩石飞出,同时应力波与爆生气体逸散,这部分逸散的应力波与爆生气体未对岩石做功,导致前排块度大。为改善前排爆破效果,将边排孔角度调整为 80°。

炮孔堵塞段大块是由于炮孔上部堵塞段未装药造成的,一般情况下,为解决炮孔堵塞段的大块,常采用在排间钻辅助浅孔的方法,然而大规模爆破钻孔多,在冗杂的钻孔作业上再加上钻辅助孔的任务,严重影响钻孔效率,根据上述公式推导,当延期时间设置为 36.3 ms 以上,应力波几乎不存在叠加现象,故可以用后续炮孔爆炸逸散的爆生气体,挤压拉伸之前炮孔堵塞段的岩石,从而破碎大块。

岩石破碎是由于应力波压缩岩石的压力大于岩石的单轴抗压强度,在大规模炮区内部,地表岩性不单一,常见有地表硬岩,而爆轰波经过传导、衰减后,到达地表,无法克服地表硬岩的单轴抗压强度,故地表有硬岩大块产生。丁晨曦运用分型损伤原理^[31],量化分析了正向与反向起爆条件下的岩石损伤与破裂情况,分析结果表明,无论正向起爆还是反向起

爆,炮孔堵塞介质都会消耗爆生气体能量,影响地表岩石破碎^[29]。如图 4 所示,正常爆破区地裂缝发育,爆堆有隆起,形态正常,硬岩区仅发现正常爆破区内部的岩石堆积,未见明显裂缝,硬岩爆破效果差。针对地表硬岩,在硬岩区炮孔堵塞段加入辅助药包,帮助破碎地表硬岩。如图 4 所示,利用辅助药包的高爆速、爆压,可以有效破碎硬岩,并形成反射波拉伸硬岩,增大顶部硬岩破碎区域,减小硬岩块度。硬岩区改进后如图 5 所示,在改进前地表硬岩,受反射波拉伸作用,形成裂缝,岩石块度较大,改进后,地表硬岩受辅助药包高爆速、高爆热、高爆压作用,有效粉碎岩石。对比改进前与改进后,改进后岩石粉碎区大大减小,裂隙更发育,爆炸能量利用率更高。见表 2。



图 4 改进前地表硬岩破碎效果

Fig. 4 Effect of surface hard rock crushing before improvement

2.4 块度统计方法及改进前爆破块度

爆破块度是露天矿台阶爆破效果分析的重要指标。由于露天深孔台阶爆破的单次破岩方量较大,

岩石块度统计不便,现阶段常用的块度测量方法大致分为两类:一类是直接测量法,包括筛分法、二次岩块统计法和表面量测法;另一类是间接测量法,如摄影法、爆堆装载量法和经验公式预估法。直接测量法精确度较高,但工作效率较低,严重时甚至会影响生产效率,因此不适用于大规模爆破块度统计。

间接测量法中的图像处理技术具有方便快捷等特点,随着计算机等相关学科的发展,Split-Desktop、WipFrag 等成熟的图像处理应用程序已被广泛用于计算和识别爆破块度分布特征,这些软件通过内置算法解决了图像处理的部分缺陷。

表 2 大块类型与改进方法对应表
Table 2 Table of boulder types and corresponding improvement methods

大块类型 Boulder types	产生原因 Causes	改进方法 Improvement method
台阶坡面与第一排炮孔大块 Boulders from the rock mass between the bench slope face and the first row of blast holes	爆生气体主要转化为动能或直接逸散 Explosive gases mainly convert to kinetic energy or directly dissipate	将炮孔角度设置为 80°降低底盘抵抗线 Set blast hole angle to 80° to reduce bottom resistance line
炮孔填塞段大块 Boulders from the stemming section of the blast holes	由于未装药导致填塞段岩石块度较大 Oversized rock size in stemming section due to no explosive charge	设置合理延期时间,提高孔间岩石碰撞 Set reasonable delay time to increase rock collision between holes
地表硬岩大块 Boulders from the surface hard rock	硬岩层在地表出露,且填塞段未装药,硬岩块度较大 Hard rock layers exposed on surface, and stemming section has no explosive charge, resulting in large hard rock blocks	在地表硬岩地区炮孔填塞段加装起爆药包,辅助破碎 Install detonation charges in blast hole stemming sections in surface hard rock areas to assist fragmentation

通过理论计算可知,中间起爆能量利用率比底部起爆利用率更高,故所有炮孔调整为中间起爆
Theoretical calculations show that middle initiation has a higher energy utilization rate than bottom initiation,so all blast holes are adjusted to middle initiation

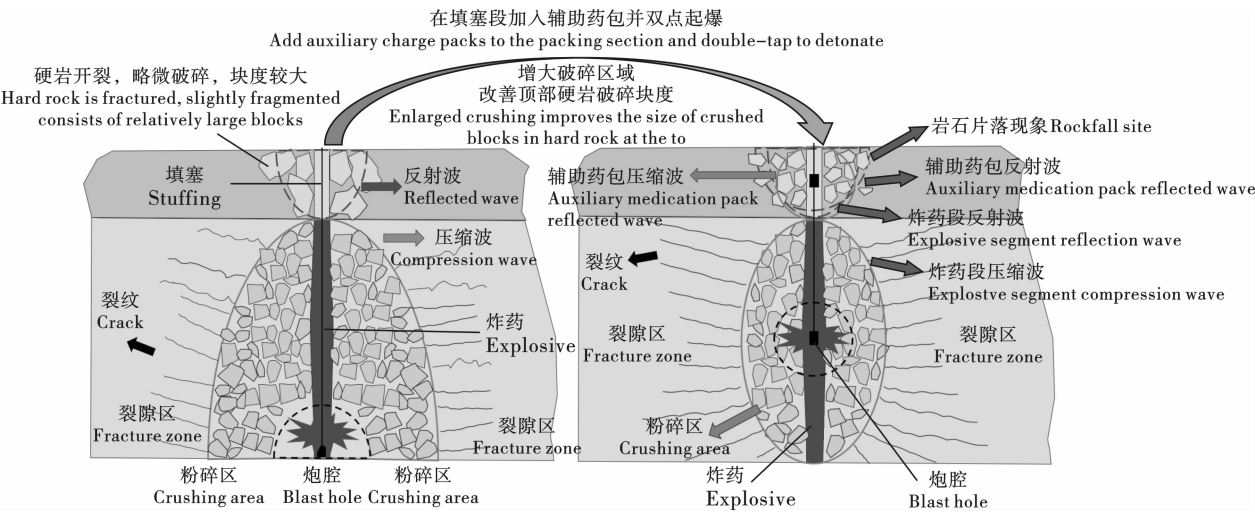


图 5 填塞段有无辅助药包破岩过程及效果图

Fig. 5 Process and effect diagram of rock breaking with or without auxiliary charge in filling section

由于规模爆破台阶长度较大,从单一拍摄点获取并分析岩石块度照片的方法具有偶然性,无法代表整个自由面的岩石块度情况。根据相关分析,大块来源主要有三种,但在工程实践中,由于三种大块岩性相差不大,难以区分,因此提出一种规模爆破综

合大块率分析方法。为分析整体大块情况,本方法首先采用 WipFrag 软件进行分析,获取每个大块统计点的大块情况;随后,将大块数据导入 Origin 软件,其中 x 轴为大块直径(单位为 mm), y 轴为超过对应大块直径的比率。该矿规定直径超过 1000 mm

的岩石为大块,在图中 $x=1000$ 时, y 轴对应值为大块率。最后,将观测点数据进行多项式拟合,并用拟合后的曲线代表整体爆堆情况,拟合公式如式(7)所示

$$y = intercept + B_1x + B_2x^2 \quad (7)$$

拟合曲线比散点连线粗,是由于为提高拟合曲线的准确性,设置了误差值为 2%。由图 6 拟合曲线可知,当 $x=1000$ 时, R^2 为 0.9865,表明拟合效果良好,改进前规模爆破大块率在 23.53% ~ 27.53% 之间,大块率偏高。

3 改进后规模爆破试验流程、方案及岩石块度分析

3.1 规模爆破试验流程

基于不同起爆位置应力波释放理论与规模爆破大块产生机理,结合实地炮区勘测,对炮区内部岩性不同区域进行分区设计,将炮区分为地表硬岩区与

正常爆破区,开展大规模爆破块度控制试验,试验流程图 7 所示。

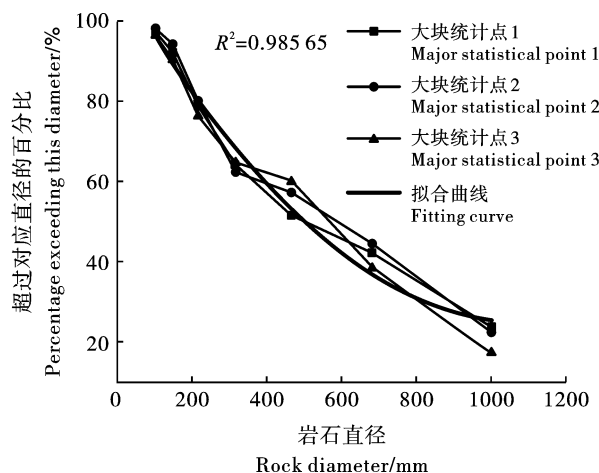


图 6 大块分析

Fig. 6 Boulder analysis

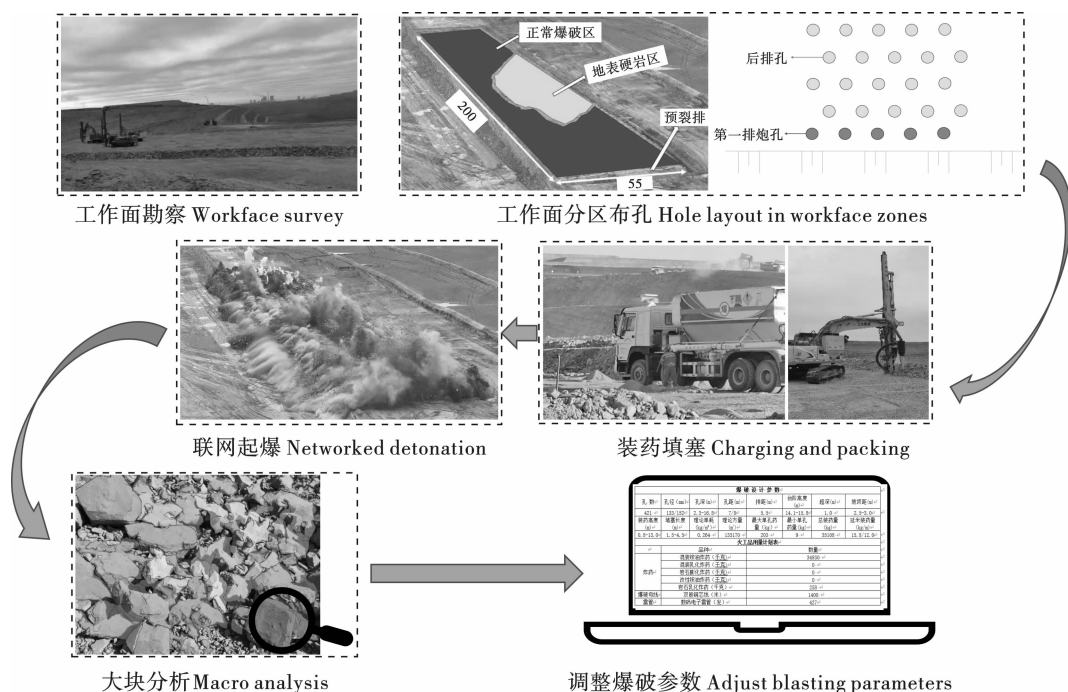


图 7 试验流程图

Fig. 7 Test flow chart

3.2 规模爆破试验方案 1 及岩石块度分析

试验 1 炮区位于该煤矿东帮,根据现场勘察,炮区岩性以泥岩砂岩为主,地表硬岩区顶部为泥质砂状结构,属于硬岩。爆破区域无含水层、无裂缝,结构相对稳定。本次试验施工工艺为露天深孔岩石松动爆破,采用数码电子雷管逐孔逐孔起爆网路进行起爆,其中正常爆破区中间起爆,硬岩区双点同时起爆。试验 1 近景如图 8 所示,台阶剖面及工作面分区如图 9 所示。

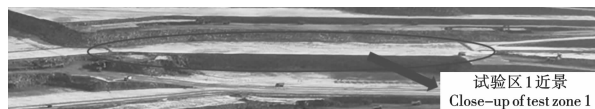


图 8 试验区 1 近景

Fig. 8 Test area 1

本次爆破试验,遵循大孔距小排距原则,孔径为 152 mm 炮孔,为防止爆破振动过大对边帮造成损害,特在炮区靠边帮出设置一系列预裂孔,阻断爆破地震传导。共计 216 孔,其中地表硬岩区 48 孔,预裂区 9

孔,正常爆破区 159 孔(包含第一排 24 个 80°炮孔)。

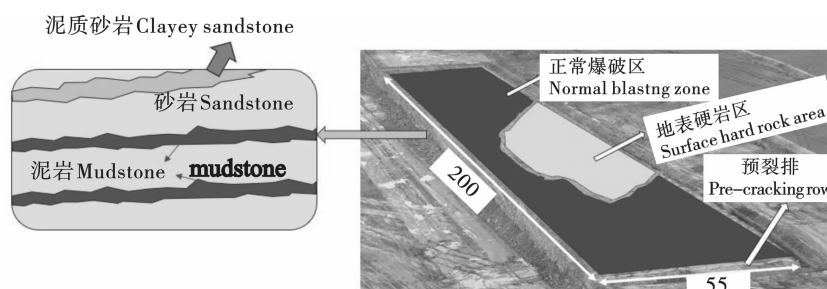


图9 台阶剖面及工作面分区

Fig. 9 Bench section and working face

炮孔孔距 8.3 m,排距 6.1 m,台阶高度 15 m,孔深 16 m,装药长度 12.5 m,堵塞长度 3.5 m,理论方量 $1.65 \times 10^5 \text{ m}^3$,总装药量 $4.6926 \times 10^4 \text{ kg}$,理论单耗 $2.844 \times 10^2 \text{ g/m}^3$,采用斜线反向起爆,延期时间为孔间 37 ms,排间 75 ms,地表硬岩区炮孔内双药包同时起爆。试验 1 爆破参数如表 1 所示,炮区设计如图 2 所示。

爆破后检查炮区,预裂孔爆破正常,边坡稳定,爆堆伸出约 22 m,飞石距离约 46 m,地表硬岩破碎效果好,经开挖后,爆破区内部无大块及根底,自由面大块率通过现场拍照后,将图片导入 Wipfrag 软件进行分析,将三个统计点的分析数据导出至 Origin,通过多项式拟合得到本次试验整个爆区的大块曲线,如图 10 所示,拟合曲线 $R^2 = 0.99068$,曲线对各点拟合良好,能反映整体块度情况。拟合曲线显示,超过 1000 mm 的大块率应在 8.248% ~ 12.248%。起爆时刻图与爆破效果统计如图 11 所示。大块率分析如图 10 所示,硬岩区地表爆破效果如图 12 所示。整个炮区内部冲孔效应明显,说明炸药单耗还有下降空间,在下次规模化爆破试验中应适当提高单孔负担面积。

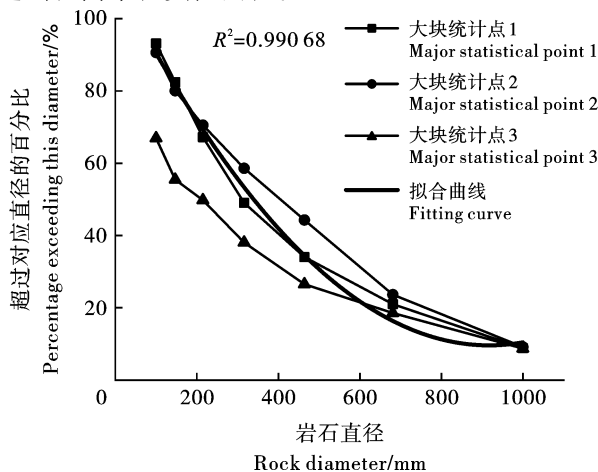


图10 大块率分析

Fig. 10 Boulder yield analysis

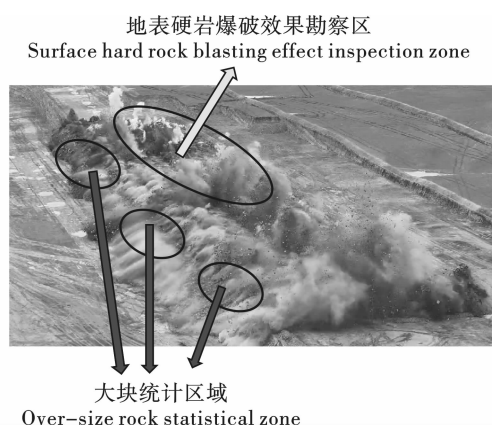


图11 起爆时刻及爆破效果统计位置

Fig. 11 Detonation time and statistical location of blasting effect

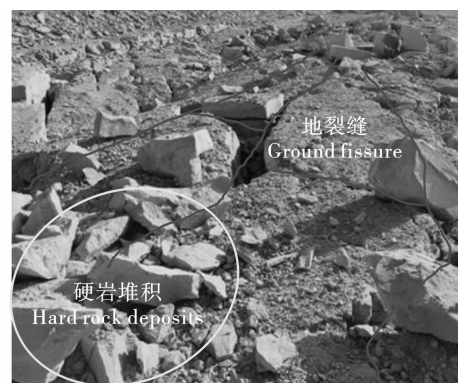


图12 硬岩破碎效果

Fig. 12 Hard rock crushing effect

3.3 规模爆破试验方案2及岩石块度分析

试验二本次试验炮区位于该煤矿东帮,根据现场勘察,工作面岩性与试验 1 基本相同,以泥岩砂岩为主,地表硬岩区顶部为泥质砂状结构,属于硬岩。爆破区域无透水现象、无裂缝,结构稳定试验区 2 近景如图 13 所示。本次试验施工工艺为露天深孔岩石松动爆破,采用数码电子雷管逐孔逐孔起爆网路进行起爆,其中正常爆破区中间起爆,硬岩区双点同

时起爆。

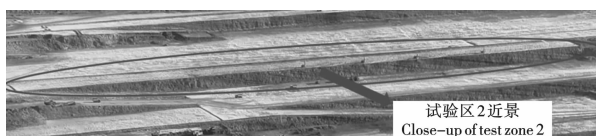


图 13 试验区 2 近景

Fig. 13 Test area 2 close shot

试验 2 依旧遵循大孔距小排距原则,但在试验 1 的单孔负担面积基础上有所提高。试验 1 孔距 8.3 m,排距 6.1 m,单孔负担面积为 50.72 m²,本次试验孔距 8.3 m,排距 6.8 m,单孔负担面积为 56.44 m²。

本次试验为防止爆破振动过大对边帮造成损害,特在炮区靠边帮出设置一系列预裂孔,阻断爆破地震传导,炮区内共计 280 孔。其中地表硬岩区 45 孔,预裂区 8 孔,大小孔组合爆破区 227 孔(含第一排 35 孔)。台阶高度 15 m,孔深 16 m,装药长度 13 m,堵塞长度 3.5 m,理论方量 $2.64 \times 10^5 \text{ m}^3$,总装药量 $6.4131 \times 10^4 \text{ kg}$,理论单耗 $2.429 \times 10^2 \text{ g/m}^3$,采用斜线反向起爆延期时间为孔间 37 ms,排间 75 ms,地表硬岩区炮孔内双药包同时起爆。

试验 2 工作面分区布孔示意图如图 14 所示,炮区设计如图 15 所示。爆破参数如表 3 所示。

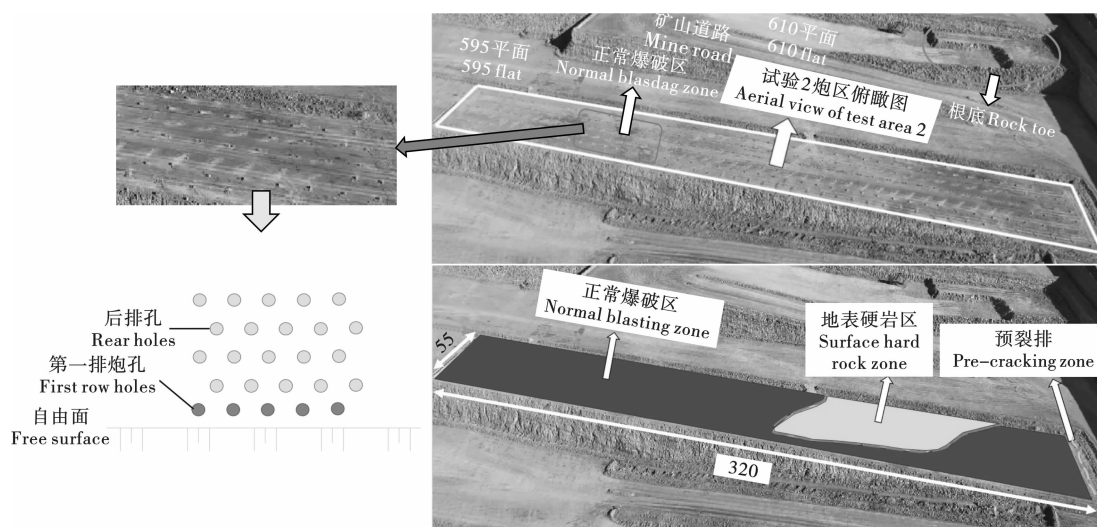


图 14 试验 2 工作面分区布孔示意图

Fig. 14 Test 2 working face

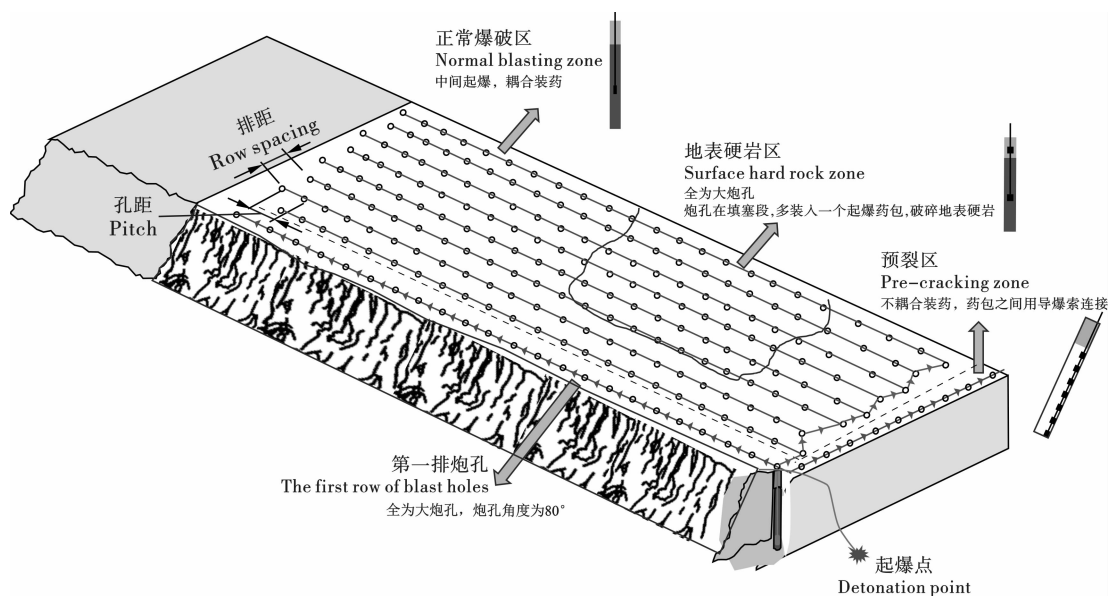


图 15 试验 2 炮区规划示意图

Fig. 15 Test 2 blast area planning diagram

表 3 试验 2 爆破参数
Table 3 Test 2 blasting parameters

	孔数 Number of holes/piece	孔径 Hole diameter/mm	孔深 Hole depth/m	孔斜 Pitch/ Degree	孔距 Spacing/m	排距 Burden/m	装药长度 Charging length/m
第一排 Front row	35	152	16.5	80	8.3	6.8	13
地表硬岩区 Surface hard rock area	45	152	16.5	90	8.3	6.8	13
正常爆破区 Normal blasting zone	192	152	16.5	90	8.3	6.8	13
预裂区 Pre-splitting zone	8	152	16.5	90	8.3	6.8	不耦合装药 Uncoupled charging

爆破后检查炮区,预裂孔爆破正常,边坡稳定,爆堆伸出约 18 m,飞石距离约 36 m,地表硬岩破碎效果好,开挖后,爆破区内部无大块及根底,软岩区无冲孔,能量释放均匀,岩石松动效果好,地表硬岩区爆炸能量充足,硬岩破碎整体效果优于试验 1。起爆时刻与爆破效果统计位置如图 16 所示。如图 17 所示,拟合曲线 $R^2=0.99272$,曲线对各点拟合良好,能反映整体块度情况。拟合曲线显示,超过 1000 mm 的大块约占 6.38%。硬岩区地表爆破效果如图 18 所示。

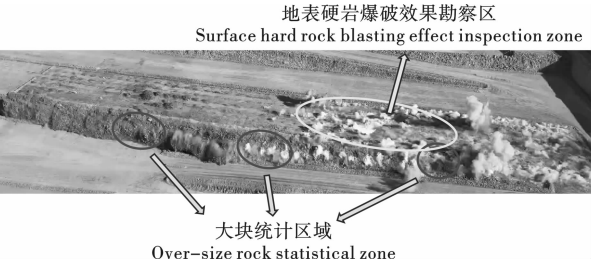


图 16 起爆时刻与爆破效果统计位置
Fig. 16 Detonation time and statistical location of blasting effect

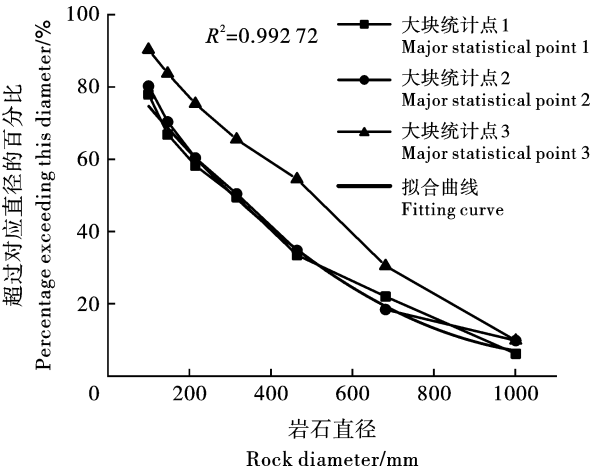


图 17 大块率分析
Fig. 17 Boulder yield analysis

3.4 改进前后规模爆破岩石块度对比分析

将改进前、试验 1、试验 2 的拟合曲线导入,如图 19 所示。从图中可以明显看到改进了起爆位置、延期时间后规模爆破大块率大大下降,下降约 50%。对比试验 1 与试验 2 发现,试验二在提高单孔负担面积、降低炸药单耗后,400 mm 以内的小块岩石明显增多,块度分布更加均匀,这表示中间起爆时,爆炸能量释放与应力波传播可能需要更大空间才能够均匀释放,后续可以进行更大孔网参数的试验,找到最适合中间起爆的孔排距。

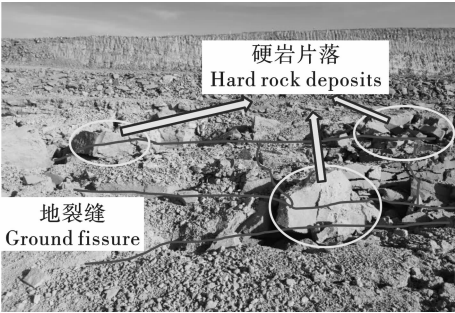


图 18 地表硬岩破碎效果
Fig. 18 Effect of surface hard rock fragmentation

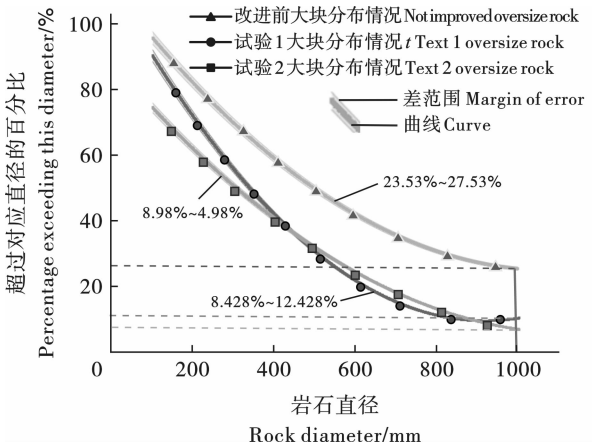


图 19 大块拟合曲线对比
Fig. 19 Comparison of boulder yield fitting curves

3 结论

1) 通过理论分析和试验验证, 揭示了大规模爆破中爆炸能量分布不均的原因, 并提出了合理的爆破延期时间。中间起爆方法能更好地分配能量, 提高能量利用率, 减少大块的产生。因此, 选择中间起爆作为大规模爆破的最佳起爆方式, 并通过合理设置延期时间来优化爆破效果。

2) 大规模爆破中大块的主要来源包括: ①台阶坡面与第一排炮孔之间的岩石大块; ②炮孔堵塞段的大块; ③地表硬岩区的大块。通过分析这些大块的来源, 明确了改进措施, 并为后续的爆破设计提供了优化方向。

3) 针对不同类型的大块, 采取了相应的改进措施: ①对于台阶坡面与第一排炮孔之间的大块, 调整炮孔角度为 80° , 并通过调整延期时间来有效提高能量利用率; ②对于炮孔堵塞段的大块, 采用合理的延期时间以避免应力波叠加, 充分利用爆生气体对岩石的破碎作用; ③对于地表硬岩区的大块, 在硬岩区域的炮孔堵塞段加入辅助药包, 从而提高硬岩破碎效果, 减少大块率。现场 2 次规模爆破试验结果表明, 采用中间起爆和合理的延期时间后, 整体大块率减少约 50%, 验证了理论分析的正确性。

参考文献 (References)

- [1] 张 华, 李树峰. 新疆煤炭资源开发影响因素分析及评价体系研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(S1): 1-5.
- [1] ZHANG Hua, LI Shu-feng. Analysis and evaluation system on influence factors of coal resource development in Xinjiang[J]. Coal Engineering, 2023, 55(S1): 1-5. (in Chinese)
- [2] 霍 超. 新疆煤炭资源分布特征与勘查开发布局研究[J]. 中国煤炭, 2020, 46(10): 16-21.
- [2] HUO Chao. Research on distribution characteristics and exploration and development layout of coal resources in Xinjiang[J]. China Coal, 2020, 46(10): 16-21. (in Chinese)
- [3] 栾龙发, 庙延钢. 深孔台阶爆破岩石移动规律的研究[J]. 中国工程科学, 2005(S1): 248-251.
- [3] LUAN Long-fa, MIAO Yan-gang. The rock moving regularity in deep hole bench explosion[J]. Strategic Study of CAE, 2005(S1): 248-251. (in Chinese)
- [4] 杨 军, 任 光, 于 琦, 等. 台阶爆破岩石破碎楔块理论及数值模拟研究[J]. 爆破, 2015, 32(3): 55-61, 90.
- [4] YANG Jun, REN Guang, YU Qi, et al. Wedge theory of rock fragmentation for bench blasting and its numerical simulation[J]. Blasting, 2015, 32(3): 55-61, 90. (in Chinese)
- [5] LI Cheng-xiao, YANG Ren-shu, WANG Yan-bing, et al. Theory and numerical simulation of deep hole cut blasting based on dispersed charge and staged detonation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2023, 169: 105453.
- [6] 段宗银, 施发伍, 张良贵. 爆破块度分布与控制的模拟试验研究[J]. 爆破, 2010, 27(2): 45-48, 83.
- [6] DUAN Zong-yin, SHI Fa-wu, ZHANG Liang-gui. Simulation test on distribution and control of blasting fragmentation[J]. Blasting, 2010, 27(2): 45-48, 83. (in Chinese)
- [7] 吴 亮, 卢文波, 宗 琦. 岩石中柱状装药爆炸能量分布[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 735-739.
- [7] WU Liang, LU Wen-bo, ZONG Qi. Distribution of explosive energy consumed by column charge in rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 735-739. (in Chinese)
- [8] 宗 琦, 孟德君. 炮孔不同装药结构对爆破能量影响的理论探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 641-645.
- [8] ZONG Qi, MENG De-jun. Influence of different kinds of hole charging structure on explosion energy transmission[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 641-645. (in Chinese)
- [9] 田振农, 张乐文, 李世海. 岩体中爆腔内压力脉动特征和爆炸能量分布的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(8): 1247-1252.
- [9] TIAN Zhen-nong, ZHANG Le-wen, LI Shi-hai. Numerical simulation of pulsation features of pressure in explosion cavity and distribution of explosive energy in rock blasting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(8): 1247-1252. (in Chinese)
- [10] 肖思友, 姜元俊, 刘志祥, 等. 高地应力下硬岩爆破破岩特性及能量分布研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(15): 143-149.
- [10] XIAO Si-you, JIANG Yuan-jun, LIU Zhi-xiang, et al. Hard rock blasting energy distribution and fragmentation characteristics under high earth stress[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(15): 143-149. (in Chinese)
- [11] 孟佳乐, 黄永辉, 张智宇, 等. 基于 SPH 露天台阶的爆破优化[J]. 有色金属工程, 2024, 14(5): 120-129.
- [11] MENG Jia-le, HUANG Yong-hui, ZHANG Zhi-yu, et al. Optimization of open pit step blasting based on SPH[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024, 14(5): 120-129. (in Chinese)
- [12] 尹忠昌, 宋俊生, 王文翰. 深孔爆破的炮孔封堵机理及参数优化研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(4): 21-

- 29.
- [12] YIN Zhong-chang, SONG Jun-sheng, WANG Wen-han. Research on plugging mechanism and parameter optimization of long hole blasting[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(4): 21-29. (in Chinese)
- [13] 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.
- [13] LI Zhang-chao, XU Shuai, LI Jin-ping, et al. Optimization research of air decking charge structure for bench blasting based on JKSimBlast[J]. Blasting, 2023, 40(1): 50-56, 68. (in Chinese)
- [14] 戴 林,李思维. 黑山露天矿爆破参数优化数值模拟研究[J]. 爆破, 2021, 38(4): 101-107.
- [14] DAI Lin, LI Si-wei. Numerical simulation of blasting parameters optimization in Heishan open-pit mine[J]. Blasting, 2021, 38(4): 101-107. (in Chinese)
- [15] LONG Yong, ZHONG Ming-shou, XIE Quan-min, et al. Influence of initiation point position on fragmentation by blasting in iron ore[C]//Rock Fragmentation by Blasting: The 10th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, 2012 (Fragblast 10). Taylor & Francis Books Ltd, 2013: 111-116.
- [16] ONEDERRA I A, FURTNEY J K, SELLERS E, et al. Modelling blast induced damage from a fully coupled explosive charge[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 58: 73-84.
- [17] 刘 亮,郑炳旭,陈 明,等. 起爆方式对台阶爆破根底影响的数值模拟分析[J]. 爆破, 2015, 32(3): 49-54.
- [17] LIU Liang, ZHENG Bing-xu, CHEN Ming, et al. Numerical simulation analysis of influence of different detonation methods on bedrock in bench blasting[J]. Blasting, 2015, 32(3): 49-54. (in Chinese)
- [18] 马瑞龙,王昕捷,孙志民,等. 球形和柱形炸药近场爆炸冲击波载荷特性[J/OL]. 兵工学报: 1-15. [2025-09-11]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2176.tj.20240328.1001.002>.
- [18] MA Rui-long, WANG Xin-jie, SUN Zhi-min, et al. Characteristics of near-field explosion shock wave loads from spherical and cylindrical explosives[J/OL]. Acta Armamentarii: 1-15. [2025-09-11]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2176.tj.20240328.1001.002>. (in Chinese)
- [19] LI Hai-bo, XIA Xiang, LI Jian-chun, et al. Rock damage control in bedrock blasting excavation for a nuclear power plant[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(2): 210-218.
- [20] YI Chang-ping, SJOBERG Jonny, JOHANSSON Daniel, 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.
- [21] 高启栋,靳 军,王亚琼,等. 孔内起爆位置对爆破振动场分布的影响作用规律[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(10): 138-152.
- [21] GAO Qi-dong, JIN Jun, WANG Ya-qiong, et al. Acting law of in-hole initiation position on distribution of blast vibration field[J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(10): 138-152. (in Chinese)
- [22] 冷振东,卢文波,范 勇,等. 侧向起爆条件下的爆炸能量分布及其对破岩效果的影响[J]. 爆炸与冲击, 2007, 37(4): 661-669.
- [22] LENG Zhen-dong, LU Wen-bo, FAN Yong, et al. Explosion energy distribution by side initiation and its effects on rock fragmentation[J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 37(4): 661-669. (in Chinese)
- [23] 冷振东,范 勇,卢文波,等. 孔内双点起爆条件下的爆炸能量传输与破岩效果分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(12): 2451-2462.
- [23] LENG Zhen-dong, FAN Yong, LU Wen-bo, et al. Explosion energy transmission and rock-breaking effect of in-hole dual initiation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(12): 2451-2462. (in Chinese)
- [24] 杨仁树,郭 洋,李 清,等. 中间起爆柱状药包爆炸应力应变场演化规律[J]. 煤炭学报, 2019, 44(11): 3423-3431.
- [24] YANG Ren-shu, GUO Yang, LI Qing, et al. Evolution law on explosive stress and strain field of column charges at middle detonation position[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11): 3423-3431. (in Chinese)
- [25] 郭 洋,李 清,杨仁树,等. 三维模型柱状药包爆生裂纹扩展规律研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(10): 133-140, 184.
- [25] GUO Yang, LI Qing, YANG Ren-shu, et al. Study on explosion-induced crack propagation law of cylindrical charge in three-dimensional model[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(10): 133-140, 184. (in Chinese)
- [26] 邱 鹏,李沁远,梁卫国,等. 层理方向对煤爆破断裂及破碎的影响效应[J/OL]. 煤炭学报: 1-13. [2025-10-17]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2025.0930>.
- [26] QIU Peng, LI Qin-yuan, LIANG Wei-guo, et al. Effects of bedding directions on coal blast-induced fracture and fragmentation[J/OL]. Journal of China Coal Society: 1-13. [2025-10-17]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2025.0930>. (in Chinese)