

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.04.007

## 露天深孔台阶径轴双重空气间隔装药 爆破试验研究\*

谢红星<sup>1</sup>, 于明亮<sup>1</sup>, 喻智<sup>2</sup>, 彭军伟<sup>1</sup>, 单浩田<sup>1</sup>

(1. 广东爆破工程有限公司, 广州 510700; 2. 福州大学, 福州 350108)

**摘要:** 硬岩露天骨料矿山爆破块度级配分布对于矿山铲装运输、矿石破碎、成品销售等后续工艺流程有着重要影响。为解决此类矿山常见的大块率、粉矿率、炸药单耗高的问题,基于空气间隔装药爆破理论开发和验证了在炮孔径向和轴向均设置空气间隔的露天深孔台阶爆破径轴双重空气间隔装药技术。研究结果表明:优化轴向空气间隔装药参数可降低矿石大块率及粉矿率 87.0% 和 60.1%;同时优化径向和轴向间隔装药参数可降低矿石大块率和粉矿率 81.2% 和 92.3%;破碎锤使用时间、平均炸药单耗下降 19.9% 和 5.2%, 预计矿山每年节约采矿成本 77.17 万元。

**关键词:** 露天采矿; 台阶爆破; 空气间隔装药; 爆破块度; 爆破试验

中图分类号: TD235 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2025)04-0062-08

## Experimental Study on Radial-axial Dual Air-deck Blasting Technique in Deep-hole Open-pit Mining

XIE Hong-xing<sup>1</sup>, YU Ming-liang<sup>1</sup>, YU Zhi<sup>2</sup>, PENG Jun-wei<sup>1</sup>, SHAN Hao-tian<sup>1</sup>

(1. Guandong Blasting Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510700, China;

2. Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** The fragment size distribution in hard rock open-pit aggregate surface mining operations plays a crucial role in determining efficiency across downstream processes including loading, hauling, crushing, and product quality control. To address prevalent challenges including excessive boulder production, fine particle generation, and explosive consumption efficiency in hard rock quarries, this study developed and tested an innovative blasting method featuring simultaneous radial and axial air deck configurations within drill holes based on air deck blasting principles. The common issues of high boulder formation, fines content, and powder factor in such mines, a radial-axial dual air-deck blasting technique was proposed and experimentally validated based on the air-deck blasting theory, in which air-decks are arranged both along the radial and axial of the borehole. Experimental results demonstrate that adjusting and optimizing the axial air-deck parameters can reduce the proportions of boulders and fines by 87.0% and 60.1%, respectively. While combined radial-axial optimization achieves 81.2% and 92.3% reduction rates, respectively, when both radial and axial air-deck parameters are optimized. Furthermore, the use time of hydraulic hammers decreased by 19.9% and 5.2%, with an estimated annual cost saving of 771,700 RMB for the mine.

收稿日期 (Date of reception): 2025-10-21

网络首发日期 (Published online): 2025-12-15

作者简介: 谢红星 (1983-), 男, 湖北襄阳人, 高级工程师、学士, 主要从事工程爆破、矿山开采研究, (E-mail) 303340102@qq.com。

通信作者: 于明亮 (1994-), 男, 甘肃武威人, 高级工程师、硕士, 主要从事工程爆破、矿山开采研究, (E-mail) 1064602920@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (52304127)

About the author: XIE Hong-xing (1983-), male, born in Xiangyang city, Hubei province, senior engineer, bachelor degree, mainly engaged in research on engineering blasting and mining, (E-mail) 303340102@qq.com.

Corresponding author: YU Ming-liang (1994-), male, born in Wuwei City, Gansu province, senior engineer, master degree, mainly engaged in research on engineering blasting and mining, (E-mail) 1064602920@qq.com.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (52304127)

draulic breakers and the average powder factor decreased by 19.9% decreased hydraulic breaker usage, and 5.2% lower explosive consumption and projected annual cost reductions exceeding resulting in an estimated annual cost saving of 771,700 CNY for the mining operation.

**Key words:** open-pit mining; bench blasting; air-deck charging; rock fragmentation; trial blast

深孔台阶爆破技术是当前硬岩露天矿山破碎矿岩最为经济有效的技术手段,爆破效果的优劣对铲装运输、矿石破碎、成品销售等后续流程有重要影响<sup>[1,2]</sup>。作为凿岩爆破效果的主要评价指标,合理的爆生岩块级配分布对保障矿山产量、提高企业经济效益极为关键。基于此,开展旨在获取合理爆生岩块级配分布的露天深孔台阶爆破参数优化是广大硬岩露天矿山技术进步的关键科学问题之一。

当前,连续柱状装药及间隔装药是露天深孔台阶爆破主要的炮孔装药结构类型。其中,连续柱状装药意指炮孔内装填足量的炸药,炸药在径向上与炮孔、在轴向上与孔底岩石及孔口堵塞紧密接触,爆炸能量能够直接从炸药传播至炮孔周边岩体中。间隔装药意指炮孔内炸药在部分区域与炮孔之间存在耦合介质,在该区域炸药不与炮孔周围岩体直接接触,爆炸能量需经耦合介质传播后方能进入岩体中。而在间隔装药结构方面,空气间隔装药技术在露天深孔台阶爆破中研究最为深入、应用最为广泛。

20 世纪 50 年代,前苏联 Melnikov 和 Marchenkov 首先提出用于优化爆破块度级配分布的空气间隔装药技术<sup>[3,4]</sup>,有效解决了连续柱状装药导致的炮孔周围岩石过度粉碎引发的大块率高、粉矿率高的现场问题。其后,该技术被大量学者和工程技术人员研究和推广,显著提高了矿山开采效益。如钟立辉等利用激波管原理以及应力波在不同介质的反射与透射理论<sup>[5]</sup>,详细分析了孔底空气间隔装药结构对应 5 个反射与透射面上应力波的传播作用过程。李章超等基于 JKSimBlast 爆破模拟软件设计了两因素五水平全因素组合试验<sup>[6]</sup>,获得了空气间隔器长度对于大块率、能量分布的影响规律。张肯等采用理论分析<sup>[7]</sup>、GDEM-BlockDyna 数值模拟及现场优化试验分析了爆堆形态随装药结构的变化规律。王静等通过混凝土模型试验和有限元数值模拟<sup>[8]</sup>,研究了底部空气间隔长度对于孔底岩石损伤的影响规律。此外,白和强和张昭采用孔底间隔装药技术解决了缅甸七星塘矿山开采爆破中含水孔装药施工的困难<sup>[9]</sup>,获得了良好的爆破效果及经济效益。杨明等采用空气间隔装药爆破技术有效降低了江西省邓家山骨料矿山的爆破矿石粉矿率<sup>[10]</sup>。金鑫等在吉朗德露天煤矿开展了空气间隔装药爆破试

验<sup>[11]</sup>,获得了合理中部间隔装药能够获得与连续柱状装药类似爆破块度级配分布的研究结论。可见,学术界和工程界通过多年学术研究和工程检验已经在空气间隔装药爆破理论及现场应用方面取得了系列重要研究成果,但既有研究多单独关注轴向或者径向间隔装药技术,鲜有径向空气间隔装药技术与轴向空气间隔装药技术结合起来共同解决工程难题。通常,径向间隔装药的应用效果重在通过缩小粉碎圈避免炮孔周边矿岩过度粉碎,而轴向间隔装药在降低爆破单耗、控制爆炸能量分布上有较大的优势,将径向和轴向空气间隔装药技术结合起来应用于露天深孔台阶爆破有望在控制爆破块度级配分布的同时获得降低炸药单耗等有益工程优化效果。有鉴于此,本文在空气间隔装药理论的基础上提出了径轴双重空气间隔装药技术,通过广东揭阳银坑和桃园矿系列爆破试验验证了该间隔装药技术的理论合理性和技术可行性。研究成果对于优化爆破块度级配分布、提高矿山企业经济效益、推动爆破工程技术进步有重要的理论和应用价值。

## 1 径轴双重空气间隔装药方法

### 1.1 空气间隔装药爆破过程

采用连续柱状装药开展爆破作业时,炸药爆炸形成的爆轰产物将直接轰击炮孔孔壁,进而在炮孔周边形成粉碎圈,同时造成质点位移并扩张爆腔<sup>[12]</sup>。其后,冲击波在对岩石做功的过程中能量迅速衰减,直至在粉碎区的边缘衰减成应力波。同时,应力波的压应力作用使得岩石中沿环向形成拉应力。鉴于岩石压拉强度比高的固有特性,应力波在炮孔周围形成径向和环向拉伸裂纹。待应力波传播过程结束,爆生气体对爆生裂纹网络产生气楔作用并进一步扩展裂纹网络,岩石碎块最终在气体剩余膨胀能量作用下向外抛掷<sup>[13]</sup>。

学术界通常认为:与连续柱状装药方式相比,空气间隔装药中,爆炸冲击波在传播过程中会在空气间隔中产生缓冲效应,极大程度降低孔壁初始冲击压力,进而显著减少甚至消除炮孔附近的粉碎性破坏区域<sup>[14]</sup>。其后,来自爆生气体的冲击波波阵面和堵塞或者孔底反射引起冲击波波阵面,将以不同速度在不同位置作用产生二次和后续系列加载波,进

而有效扩展爆炸初始裂隙网络<sup>[15]</sup>。可见,此过程中爆轰产物能量将首先储存在空腔中,其后以附加应力波形式对岩石介质形成多次加载,减少岩石粉碎过程消耗的爆炸能量,延长应力波对于炮孔周边介质的作用时间,有效提升爆破效果。

### 1.2 空气间隔装药初始压力计算方法

根据凝聚态炸药爆轰理论<sup>[16]</sup>,炮孔内爆生气体的初始平均压力为

$$p_0 = \frac{1}{8}\rho D^2 \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为炸药的密度,kg/m<sup>3</sup>;D为炸药的爆速,m/s。

炸药爆破过程中,爆生气体通常以 $p_k$ 作为临界压力(通常为200 MPa)在炮孔中发生等熵绝热膨胀,其气体膨胀过程遵循理想气体方程<sup>[16]</sup>

$$pV^\gamma = C \quad (2)$$

式中, $\gamma$ 为理想气体等熵指数, $\gamma = 1.3$ 。

当爆生气体膨胀为临界压力 $P_k$ 时的气体体积 $V_k$ 为

$$V_k = \left(\frac{P_H}{P_k}\right)^{1/\gamma} V_c \quad (3)$$

式中: $P_H$ 为炸药的爆压; $V_c$ 为装药体积。

若 $V_k < V_b$ ( $V_b$ 为去掉炮泥体积后的炮孔体积),则爆生气体膨胀至充满整体炮孔时的准静应力为

$$P_d = P_k \left(\frac{P_H}{P_k}\right)^{\frac{\gamma}{k}} \left(\frac{V_c}{V_b}\right)^\gamma \quad (4)$$

式中: $V_c$ 为炮孔装药体积,m<sup>3</sup>;d<sub>c</sub>为炮孔装药直径,m; $L_c$ 为装药长度,m; $V_b$ 为爆生气体膨胀时所占体积,m<sup>3</sup>。

### 1.3 空气间隔装药结构

空气间隔装药从装药结构的角度可以分为径向不耦合空气间隔装药和轴向空气不耦合装药;此外,轴向空气不耦合装药按照空气间隔所处位置又可以分为顶部空气间隔不耦合装药、中部空气间隔不耦合装药和底部空气间隔不耦合装药<sup>[17,18]</sup>。在轴向空气间隔方法方面,技术人员开发了木棍圆盘式、竹筒、充气式<sup>[14,19]</sup>、PVC管等不同类型的轴向空气间隔器<sup>[20]</sup>,可以满足现场工程应用需要。而在径向空气间隔方面,技术人员通常使用大直径炮孔装填小直径成品药卷的方式实现不耦合装药<sup>[21]</sup>。

### 1.4 径轴双重空气间隔装药技术

相较于连续柱状装药,径向空气间隔装药主要是通过减少炮孔周围粉碎圈来优化爆炸能量分布,进而在保证爆破效果的同时降低炸药单耗。轴向空气间隔装药则可以通过炮孔轴向上的冲击波反射形

成二次和系列加载波,进而延长应力波作用时间,提高爆破效果。基于此,本文提出径轴双重空气间隔装药技术,该技术意指在径向和轴向上均形成不耦合装药结构,期望在保证爆破效果的同时降低炸药单耗、控制爆生岩块级配分布。

## 2 工程应用

### 2.1 工程概况

为加快广东揭阳“一城两园”城市蓝图建设步伐,广东揭阳惠来县设有银坑村矿区建筑用花岗岩矿和桃园村矿区建筑用花岗岩矿,采用露天开采方法、凿岩爆破工艺开采建筑用花岗岩碎石,以保障中石油炼化项目、揭阳理工学院、国家电投前詹码头等当地重大建设工程项目的石料需求。银坑矿及桃园矿地理位置紧密相邻,距离广东揭阳惠来县约22 km,矿区有公路与城市相连,交通运输便利。银坑矿矿体岩性主要为灰白色、浅灰色和浅肉红色二长花岗岩,桃园矿为灰色似斑状黑云二长花岗岩与灰白色二长花岗岩,两矿设计年生产量均为90万m<sup>3</sup>。该矿岩石平均单轴抗压强度分别为154 MPa和192 MPa,在爆破过程中产生的大块二次机械解小效率极低,矿山相关规程要求不可采用爆破的方法二次解小,故大块率的控制是提高铲装效率、降低二次解小成本的关键。粉矿率高会导致碎石加工过程中相对滞销的水洗砂、泥饼的占比升高,使产品价值降低,基于上述原因,较低的大块率和粉矿率是本矿山控制爆破效果的重要评价指标。见图1。

### 2.2 银坑矿径轴双重空气间隔装药爆破试验

为探究轴径向间隔装药技术的现场适用性,研究团队在银坑矿开展了三次径轴双重空气间隔装药试验,具体爆破试验参数如表1所示。

爆破试验过程按照炮孔布置、炮孔验收、装药、堵塞、起爆网络连接、起爆、爆后检查、结果分析的步骤开展试验研究。其中,装药环节分轴向及径向不耦合装药两部分。轴向间隔装药主要通过炮孔内布置空心PVC管实现,径向不耦合装药则通过在直径115 mm炮孔内填装直径90 mm乳化炸药实现。在装药过程中底部加强装药段耦合装药,径向不耦合段采用炮绳吊装炸药卷实现,径轴双重空气间隔装药示意图和炮孔具体装药过程如图2所示。

爆破试验后,在爆堆中布置表征爆生岩块尺寸的标靶,采用图像分析技术对爆破效果评估如下:

为对比分析爆破结果,设定681 mm与10 mm分别为矿山大块及粉矿尺寸阈值。由图3可知,

1号、2号、3号爆破试验的大块率分别为56.37%、28.92%、7.31%，而粉矿率分别为4.14%、0.08%、1.64%。对比1号与2号爆破试验可知，当轴向间隔长度由3.0 m缩短至2.5 m时，大块率及粉矿率分别由56.37%和4.14%下降至28.92%和0.08%。对比2号与3号爆破试验，在将第三排炮孔轴向间隔位置由6.5 m调整至7.5 m时，大块率及粉矿率

分别由28.92%和0.08%调整至7.31%及1.64%。可见，轴向间隔装药段长度及间隔位置对于露天深孔台阶爆破效果有较大影响，合理调整轴向间隔装药参数能够有效优化爆破效果。同时，经过技术人员现场检验，3号爆破试验爆生岩块尺寸完全符合矿山生产要求，径轴双重空气间隔装药技术在银坑矿得到成功应用。



图1 银坑村矿区建筑用花岗岩矿与桃园村矿区建筑用花岗岩矿  
Fig. 1 Yinkeng village and Taoyuan village construction granite mine

表1 银坑矿爆破试验参数

Table 1 Trial blast parameters of Yinkeng Mine

试验爆破参数 Trial blast parameters	单位 Unit	试验编号 No.		
		1 First	2 Second	3 Third
台阶高度 Bench height	m	15	15	15
超深 Sub-drilling	m	1.5	1.5	1.5
孔径 Hole diameter	mm	115	115	115
药卷直径 Explosive diameter	mm	90	90	90
底盘抵抗线 Bench burden	m	3.5	3.5	3.5
孔距 Spacing	m	6	6	6
排距 Burden	m	3	3	3
堵塞长度 Stemming length	m	3	3	3
单耗 Powder factor	kg/m <sup>3</sup>	0.32	0.32	0.32
间隔段长度 Interval length	m	3	2.5	2.5
轴向间隔位置(第一排) Axial interval position( first row)	m	6.5	6.5	6.5
轴向间隔位置(第二排) Axial interval position( second row)	m	8.5	8.5	8.5
轴向间隔位置(第三排) Axial interval position( third row)	m	6.5	6.5	7.5

### 2.3 桃园矿径轴双重空气间隔装药爆破试验

基于银坑矿轴向间隔装药爆破试验，研究团队进一步在桃园矿开展了改变径向不耦合系数的径轴双重空气间隔装药爆破试验。其基本原理在于，维持孔内轴向不耦合装药试验参数不变的基础上，在

炮孔内同时装填直径分别为70 mm和90 mm的乳化炸药药卷，实现炮孔径向与轴向上的双重间隔装药。

具体爆破试验参数如表2所示。



图2 炮孔装药

Fig. 2 Borehole charging

表2 桃园矿爆破试验参数

Table 2 Trial blast parameters of Taoyuan Mine

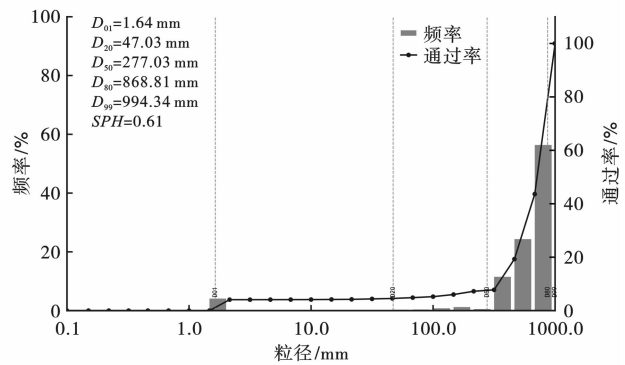
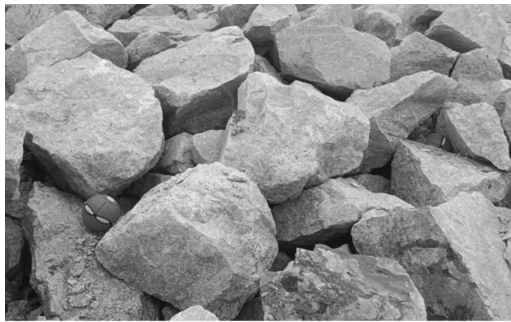
试验爆破参数 Trial blast parameters	单位 Unit	试验编号 No.		
		1 First	2 Second	3 Third
台阶高度 Bench height	m	4	5	6
超深 Sub-drilling	m	15	15	15
孔径 Hole diameter	mm	1.5	1.5	1.5
药卷直径 Explosive diameter	mm	115	115	115
底盘抵抗线 Bench burden	m	90/70	90/70	90/70
孔距 Spacing	m	3.5	3.5	3.5
排距 Burden	m	6	6	6
堵塞长度 Stemming length	m	3.1	3.1	3.1
单耗 Powder factor	kg/m <sup>3</sup>	3	3	3
间隔段长度 Interval length	m	0.31	0.31	0.31
轴向间隔位置(第一排) Axial interval position( first row)	m	3	2.5	2.5
轴向间隔位置(第二排) Axial interval position( second row)	m	6.5	6.5	6.5
轴向间隔位置(第三排) Axial interval position( third row)	m	8.5	8.5	8.5

爆破试验过程严格按照炮孔布置、炮孔验收、装药、堵塞、起爆网路连接、起爆、爆后检查、结果分析的步骤开展试验研究。爆破试验后,采用图像识别技术开展块度分析并获得分析结果如下:

在采用 681 mm 和 10 mm 作为岩块大块和粉矿尺寸阈值分析爆破结果后,可知:4、5、6 号爆破试验的大块率分别为 36.17%、26.93% 和 6.79%,粉矿率分别为 1.81%、0.07% 和 0.14%。对比 4 号和 5 号爆破试验可知,随着轴向间隔长度由 3.0 m 下降

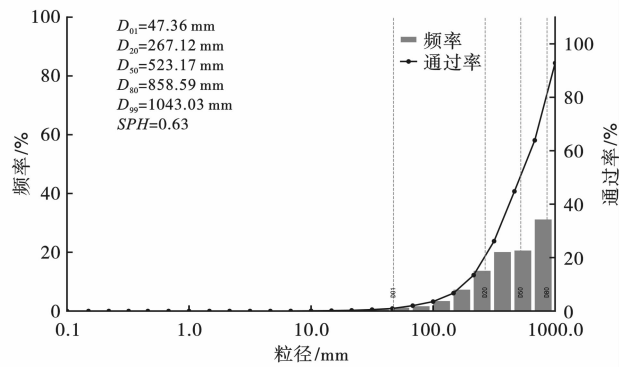
至 2.5 m,大块率和粉矿率分别由 36.17% 和 1.81% 下降至 26.93% 和 0.07%。对比 5 号和 6 号爆破试验可知,当第三排炮孔轴向间隔段位置由 6.5 m 上升至 7.5 m 时,大块率和粉矿率分别由 26.93% 和 0.07% 调整至 6.79% 和 0.14%。此外,对比 4、5、6 号试验与 1、2、3 号试验,当将炮孔内部分 90 mm 乳化炸药药卷替换为 70 mm 乳化炸药药卷后,炸药单耗由 0.32 kg/m<sup>3</sup> 下降至 0.31 kg/m<sup>3</sup>。可见,基于轴向空气间隔、径向变直径空气间隔的径

轴双重空气间隔装药技术优化一方面能优化爆破块度分布,同时也能通过降低炸药单耗提高企业经济效益。见图 3、图 4。



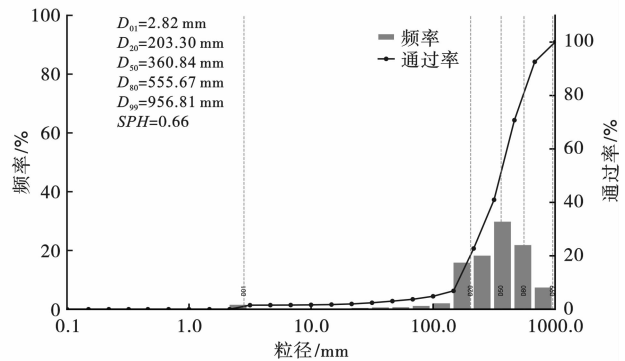
(a) 1号爆破试验块度分析

(a) Fragmentation analysis of trial blast No. 1



(b) 2号爆破试验块度分析

(b) Fragmentation analysis of trial blast No. 2



(c) 3号爆破试验块度分析

(c) Fragmentation analysis of trial blast No. 3

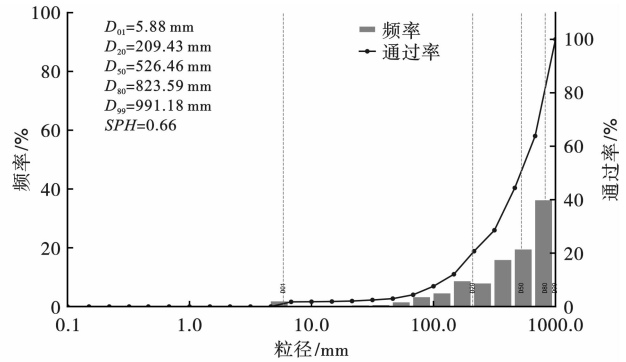
图 3 银坑矿爆破试验结果

Fig. 3 Trial blast results of Yinkeng Mine

## 2.4 社会经济效益分析

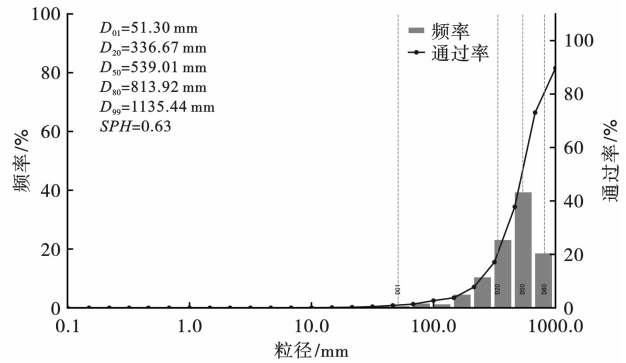
自 2023 年 9 月至 2024 年 6 月,径轴双重空气间隔装药技术在银坑矿及桃园矿推广使用。对比技术应用前后破碎锤使用时间、炸药单耗及雷管单耗后发现:采用径轴双重空气间隔技术开展爆破作业后,炮锤使用时间由 11.83 h/万吨下降至 9.49 h/万吨,平均每万吨矿石破碎锤工作时间下降 19.9%;

平均炸药单耗由  $0.331 \text{ kg/m}^3$  下降至  $0.308 \text{ kg/m}^3$ ,下降了 5.2%;平均雷管单耗由 122 发/万  $\text{m}^3$  提升至 152 发/万  $\text{m}^3$ ,提升了 24.6%,对比未采用径轴双重空气间隔装药技术开展爆破作业,考虑轴向间隔段 PVC 耗材、雷管增加量等费用后,每年能为矿山节约开采成本约 77.17 万元。



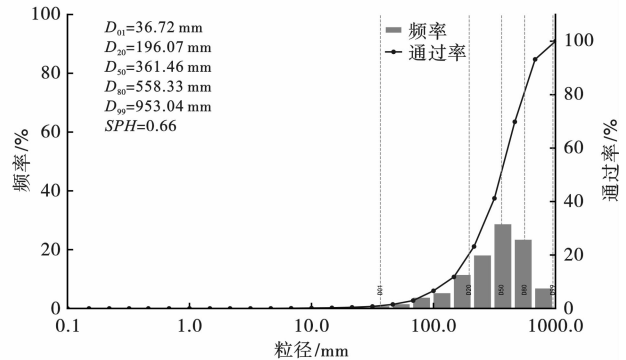
(a) 4号爆破试验块度分析

(a) Fragmentation analysis of trial blast No. 4



(b) 5号爆破试验块度分析

(b) Fragmentation analysis of trial blast No. 5



(c) 6号爆破试验块度分析

(c) Fragmentation analysis of trial blast No. 6

图4 桃园矿爆破试验结果

Fig. 4 Trial blast results of Taoyuan Mine

### 3 结论

依托广东揭阳银坑及桃园矿区建筑用花岗岩矿采石工程,本文基于空气间隔装药理论开发并验证了径轴双重空气间隔装药爆破技术,取得了降低大块率、粉矿率、破碎锤使用时间、炸药消耗、采矿成本的工程应用效果,获得了可观的企业经济效益,对于其他矿山类似问题有一定借鉴意义。

#### 参考文献 (References)

[1] 叶海旺,余梦豪,刘 聪,等. 基于爆破块度控制的空

气间隔装药台阶爆破参数优化[J]. 爆破, 2024, 41(4): 84-90, 100.

[1] YE Hai-wang, YU Meng-hao, LIU Cong, et al. Bench blasting parameters optimization with air-decked charge structure based on fragmentation control[J]. *Blasting*, 2024, 41(4): 84-90, 100. (in Chinese)

[2] ZHANG Zong-xian, SANCHIDRIÁN J A, OUCHTERLONY F, et al. Reduction of fragment size from mining to mineral processing: a review[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(1): 747-778.

[3] MELNIKOV MARCHENKOV. Effective methods of appli-

- cation of explosion[C]//12th U. S. Symposium on Rock Mechanics(New York AIME). 1971:359-378.
- [4] MELNIKOV N V. Charge construction influence on explosion operations efficiency[R]. Gosgortekhzdat,1962.
- [5] 钟立辉,蒋志明,于永纯,等. 孔底空气间隔装药增强破碎作用研究[J]. 工程爆破,2023,29(4):43-51.
- [5] ZHONG Li-hui,JIANG Zhi-ming,YU Yong-chun,et al. Study on enhanced fragmentation effects of bottom air-decked charge[J]. Engineering Blasting,2023,29(4):43-51. (in Chinese)
- [6] 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.
- [6] 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)
- [7] 张肯,于燕,刘犇,等. 基于GDEM-BlockDyna的不同装药结构对爆堆形态影响研究[J]. 爆破,2024,41(2):127-135.
- [7] ZHANG Ken,YU Yan,LIU Ben,et al. Study on the influence of different charge structures on morphology of explosion pile based on GDEM-BlockDyna[J]. Blasting,2024,41(2):127-135. (in Chinese)
- [8] 王静,顾云,李飞,等. 不同空气间隔长度对炮孔底部岩石损伤影响研究[J/OL]. 金属矿山,2024:1-13. [2025-11-10]. <https://link.cnki.net/urlid/34.1055.TD.20240613.1153.004>.
- [8] WANG Jing,GU Yun,LI Fei,et al. Study on the influence of different air interval lengths on the rock damage at the bottom of the gun hole [J/OL]. Metal Mine,2024:1-13. [2025-11-10]. <https://link.cnki.net/urlid/34.1055.TD.20240613.1153.004>. (in Chinese)
- [9] 白和强,张昭. 缅甸七星塘矿山孔底间隔装药技术的实验与应用[J]. 工程爆破,2017,23(5):63-66.
- [9] BAI He-qiang,ZHANG Zhao. Test and application of the hole-bottom interval charging technology in Myanmar Ky-isintaung mine[J]. Engineering Blasting,2017,23(5):63-66. (in Chinese)
- [10] 杨明,张锦华,赵凯轩,等. 基于空气间隔技术的灰岩爆破粉矿率优化方法研究[J]. 爆破,2025,42(3):95-105.
- [10] YANG Ming,ZHANG Jin-hua,ZHAO Kai-xuan,et al. Optimization method for powder ore rate in limestone blasting based on air-decking technology[J]. Blasting,2025,42(3):95-105. (in Chinese)
- [11] 金鑫,高佳明,苏宏伟,等. 露天矿深孔台阶爆破间隔装药爆破试验研究[J]. 爆破,2023,40(2):42-47.
- [11] JIN Xin,GAO Jia-ming,SU Hong-wei,et al. Experimental study on interval charging blasting of deep hole bench blasting in open pit mine[J]. Blasting,2023,40(2):42-47. (in Chinese)
- [12] 宗琦,杨吕俊. 岩石中爆炸冲击波能量分布规律初探[J]. 爆破,1999(2):1-6.
- [12] ZONG Qi,YANG Lu-jun. Shock energy distribution of column charge in rock[J]. Blasting,1992(2):1-6. (in Chinese)
- [13] 汪旭光. 爆破设计与施工[M]. 北京:冶金工业出版社,2011.
- [14] 苗小虎,喻智,谭期仁,等. 纳米比亚湖山铀矿空气间隔装药试验研究[J]. 中国矿业,2020,29(8):165-168.
- [14] MIAO Xiao-hu,YU Zhi,TAN Qi-ren,et al. Experimental study on air-deck charge of Husab uranium mine in Namibia[J]. China Mining Magazine,2020,29(8):165-168. (in Chinese)
- [15] 朱红兵,卢文波,吴亮. 空气间隔装药爆破机理研究[J]. 岩土力学,2007(5):986-990.
- [15] ZHU Hong-bing,LU Wen-bo,WU Liang. Research on mechanism of air-decking technique in bench blasting[J]. Rock and Soil Mechanics,2007(5):986-990. (in Chinese)
- [16] 张志呈. 定向断裂控制爆破[M]. 重庆:重庆出版社,2000.
- [17] 吴亮,朱红兵,卢文波. 空气间隔装药爆破研究现状与探讨[J]. 工程爆破,2009,15(1):16-19.
- [17] WU Liang,ZHU Hong-bing,LU Wen-bo. An overview and discussion of the study on air-decking blasting[J]. Engineering Blasting,2009,15(1):16-19. (in Chinese)
- [18] 吴亮,卢文波,钟冬望,等. 混凝土介质中空气间隔装药的爆破机理[J]. 爆炸与冲击,2010,30(1):58-64.
- [18] WU Liang,LU Wen-bo,ZHONG Dong-wang,et al. Blasting mechanism of air-decked charge in concrete medium[J]. Explosion and Shock Waves,2010,30(1):58-64. (in Chinese)
- [19] 楼晓明,王振昌,黄小彬,等. 新型空气间隔器的研发与试验研究[J]. 福州大学学报(自然科学版),2018,46(4):561-567.
- [19] LOU Xiao-ming,WANG Zhen-chang,HUANG Xiao-bin,et al. Research & development and experimental study on new type air-spacer[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition),2018,46(4):561-567. (in Chinese)