

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.03.025

工业电子雷管逐孔起爆适用条件及其局限性*

陈运成^{1,2}, 刘文汇^{1,2}, 李萍丰^{1,2}, 张万忠^{1,2}

(1. 非煤露天矿山安全智能开采国家矿山安全监察局重点实验室, 肇庆 526530;
2. 宏大爆破工程集团有限责任公司, 广州 510000)

摘要: 随着工业电子雷管技术的成熟与逐孔起爆的推广应用, 该技术因其精确延时、有效减振及改善破碎块度的特点, 在露天爆破工程中受到广泛关注。然而, 在实际工程应用中, 尤其是在特定地质与爆破条件下, 逐孔起爆仍存在一定的技术局限性有待系统分析。研究基于清远某石灰石矿山的工程实践(台阶高度15 m, 孔径152 mm), 通过理论分析与现场对比试验, 探讨逐孔起爆在大抵抗线等复杂工况下的适用性。结果表明: 在该类条件下, 由于逐孔起爆采用“单孔顺序做功”机制, 爆炸能量易向侧向自由面释放, 导致作用于底盘抵抗线的能量相对不足, 岩石破碎效果受到影响, 根底率有所上升。与排间起爆方式相比, 逐孔起爆的爆堆抛掷距离较小, 松散系数降低约4%整体抛掷能力存在一定差距。基于应力波与爆炸气体联合作用理论, 进一步阐释了排间起爆通过应力波叠加与气体协同作用实现岩体整体抬升, 更有利于克服大抵抗线并优化爆堆形态。研究系统归纳了逐孔起爆的适用条件, 指出其更适用于振动控制要求高、中硬以下且节理发育均匀的岩体条件, 而在极坚硬岩体、厚结构面发育或对抛掷率与松散度要求较高的爆破工程中需谨慎使用或进行针对性优化。本研究旨在为不同工程条件下起爆网路的合理选择与精准设计提供理论参考与实践依据。

关键词: 工业电子雷管; 逐孔起爆; 排间起爆; 破岩机理; 底盘抵抗线; 爆堆形态; 适用条件

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)03-0249-08

Applicable Conditions and Limitations of Industrial Electronic Detonator in Hole-by-hole Initiation

CHEN Yun-cheng^{1,2}, LIU Wen-hui^{1,2}, LI Ping-feng^{1,2}, ZHANG Wan-zhong^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Safe Intelligent Mining of Non-coal Open-pit Mines, National Mine Safety Administration, Zhaoqing 526530, China; 2. Hongda Blasting Engineering Group Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: The advancement of industrial electronic detonator technology and growing implementation of hole-by-hole initiation methods have drawn significant interest in open-pit blasting operations owing to their precise timing control, effective vibration mitigation capabilities, and potential for enhanced rock fragmentation. However, in practical engineering applications, especially under particular geological and blasting conditions, hole-by-hole initiation demonstrates some technical constraints that need systematic examination. This study, grounded in field operations at a Qingyuan limestone mine with a 15 m bench height and a 152 mm blast-hole diameter, explores the feasibility of

收稿日期 (Date of reception): 2025-10-09

网络首发日期 (Published online): 2025-11-19

作者简介: 陈运成 (1991-), 男, 安徽省淮北市, 在职研究生, 高级爆破工程师, 从事露天矿山爆破施工, (E-mail) 563618010@qq.com。

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项基金资助项目 (2024ZD1003406); 非煤露天矿山安全智能开采国家矿山安全监察局重点实验室开放课题基金资助项目 (2024-K03, 2024-K05)

About the author: CHEN Yun-cheng (1991-), male, born in Huaibei city, Anhui province, senior blasting engineer and part-time master's candidate, specializing in surface mining blasting, (E-mail) 563618010@qq.com.

Fund Programs: National Major Science and Technology Project for Deep Earth Exploration and Mineral Resources Exploration (2024ZD1003406), Open Fund Project of the National Mine Safety Administration Key Laboratory for Safe and Intelligent Mining of Non-coal Open-pit Mines (2024-K03, 2024-K05)

hole-by-hole initiation in challenging scenarios, including large resistance lines, by combining theoretical analysis with field comparative tests. The findings reveal that under these specific conditions, the sequential action of single holes' in hole-by-hole initiation channels explosive energy predominantly toward lateral free surfaces, resulting in inadequate energy distribution at the toe line. This phenomenon adversely affects rock fragmentation quality and elevates toe zone failure occurrences. The experimental results demonstrate that hole-by-hole initiation generates notably shorter muck pile throw distance compared to row-by-row initiation, accompanied by an approximate 4% decrease in bulking factor and generally diminished throwing performance. Building upon the synergistic mechanism of stress wave propagation and explosive gas expansion, this research provides additional clarification on how row-by-row initiation facilitates comprehensive rock mass displacement through coordinated stress wave interference and gas pressure interaction, thereby demonstrating superior performance in addressing large resistance lines and improving muck pile morphology. The research comprehensively outlines the optimal application scenarios for hole-by-hole initiation, emphasizing its effectiveness in vibration-critical zones and moderately hard rock formations with uniformly distributed joints. Conversely, thick structural planes or projects demanding high material displacement and fragmentation are not suitable. These findings offer both theoretical foundations and practical recommendations for appropriate detonation network selection and precision design across diverse engineering contexts.

Key words: electronic detonator; hole-by-hole initiation; row-by-row initiation; rock-breaking mechanism; toe burden; blast mound morphology; applicable conditions

工业电子雷管作为第三代起爆器材,凭借其微秒级延时精度与可编程控制的优势^[1],推动了现代爆破工程向精准化方向发展。在此基础上发展的逐孔起爆技术,通过为每个炮孔设定独立的起爆延时,旨在实现应力波的定向叠加与岩石的碰撞破碎,被广泛视为提升爆破效果的重要技术路径。目前,国内外已有不少研究与应用案例指出,该技术在降低爆破振动^[2]、改善破碎块度均匀性以及保护边坡稳定性方面具备潜在优势^[3,4],使其在爆破工程中的应用逐渐增多,成为现场实践中的重要发展方向之一。

在清远某石灰石矿爆破项目的施工实践中发现,当面临大底盘抵抗线(大于 35 倍装药直径)、工作面存在较厚节理层或要求高抛掷率等特定工况时,逐孔起爆技术的实际效果与理论预期之间存在一定差距。具体表现为:(1)根底现象较为突出;第一排炮孔因“单孔顺序做功”的机理,爆炸能量易向侧向自由面释放,导致作用于底盘抵抗线方向的能量相对不足,底部岩石破碎不充分,残留根底高度可达 0.8 ~ 2 m;(2)爆堆形态未达预期:爆堆表现出抛掷距离小、松散度低的特征,其抛掷率与松散度在某些条件下低于排间起爆,可能影响后续铲装效率。这些现象提示,逐孔起爆技术的适用性与其所处地质条件和工程目标密切相关,有必要进一步探讨其优势发挥的边界条件。由此引出本文关注的核心问题:逐孔起爆的技术效果是否受制于特定的地质与爆破条件?其破岩机理在不同抵抗线条件下是否存在局限性?

为系统分析上述问题,本文基于工程实践,采用

理论分析与现场对比试验相结合的研究方法。首先,从破岩机理出发,依据应力波与爆炸气体联合作用理论,分析逐孔起爆与排间起爆在应力场分布、能量释放路径及岩石破碎机制方面的本质差异,阐释各自的作用逻辑。其次,在清远某矿区设计并开展现场对比试验,在控制地质条件、孔网参数等变量的基础上,分别采用逐孔与排间起爆方式,量化比较两者在根底率、爆堆松散系数、抛掷率等关键指标上的表现。最终,结合试验数据与理论分析,明确逐孔起爆技术的适用条件与局限,为工程中选择与优化起爆方式提供参考依据。

1 逐孔与排间起爆破岩机理的理论分析

1.1 逐孔起爆破岩机理分析

逐孔起爆技术的核心在于“单孔、异步、顺序”起爆,每个炮孔作为一个独立的爆破单元,按精确设计的微差延时依次激活。

优势机理:其理想破岩过程表现为一种“接力”模式。首先,前方炮孔起爆后,其爆破应力场尚未完全消散,后方炮孔随即起爆,二者产生的应力波在时空上产生叠加,增强了岩体中的应力场强度,有助于改善岩石的中间破碎块度^[5]。其次,先爆炮孔为后爆炮孔创造了一个新的、更近的自由面,使得后方孔的反射拉伸波作用更为充分。最后,这种将总炸药能量在时间上进行分散的“异步起爆”模式,能显著降低爆破振动效应,降幅可达 25% ~ 50% 尤其适用于对振动敏感的区域^[6]。

劣势机理(针对大抵抗线):该机制的固有弊端

在第一排炮孔面临大底盘抵抗线时暴露无遗。如图1所示,对于第二个孔,其仅拥有侧面和上部两个自由面,而关键的底盘抵抗线方向是一个巨大的岩石约束体。单个炮孔的能量有限且作用时间短暂,根据最小抵抗线原理,爆炸能量会优先向阻力最小的

侧向自由面释放,这导致能量严重向侧向释放^[7],岩体过早向侧面移动和隆起,而无法使底部岩石产生充分的破碎或塑性变形,最终形成“抬不起来”的坚硬根底。

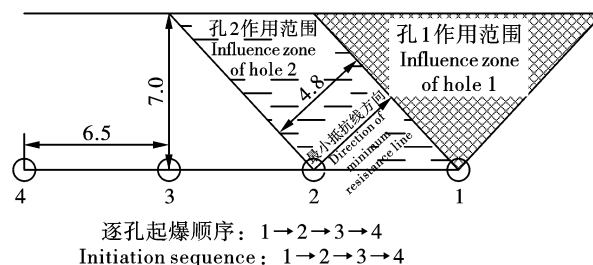


图1 逐孔起爆单个炮孔爆破方向分析图

Fig. 1 Analysis diagram of blasting direction for a single blasthole in hole-by-hole initiation

同时,由于单孔独立作用,爆炸能量缺乏协同效应,其对岩体的整体抛掷矢量合力较弱,抛掷能力的不足,根据能量守恒定律和动能定理,推导出岩石抛掷初速度 v_0 (m/s)

$$\eta E = \frac{1}{2} m v_0^2$$

所以有

$$v_0 = \sqrt{\frac{2\eta E}{m}}$$

式中: η 为炸药能量利用率(表示炸药能量中转化为岩石动能的比例); E 为炸药爆炸能量,J; m 为抛掷岩体质量,kg。逐孔起爆由于能量分散,爆轰气体作用时间短,其能量利用率 η 比排间起爆低^[8],故其抛掷初速度比排间起爆低,导致抛掷效果不佳、松散度低。

1.2 排间起爆破岩机理分析

排间起爆采用“同排协同、排间顺序”的起爆模式,即同排炮孔同时起爆,排与排之间按一定微差时间顺序起爆。

优势机理(针对大抵抗线与爆堆松散度):该模式的核心优势在于其产生的协同效应。同排炮孔同时起爆,其产生的应力波在孔间连线方向相互叠加,能在岩体中形成一个更为强大和均匀的应力场,同排炮孔同时起爆时,孔间应力场叠加,这种叠加效应使孔间连线方向的应力显著增强,有利于形成贯穿裂隙,形成贯穿的破裂面^[9]。关键在于爆炸气体的准静态压力作用:同排炮孔的爆炸气体压力会形成一个强大的合力,此合力对台阶底部岩石产生一个整体的“抬升”和“撬动”作用。这种整体性的抬升力,能更有效地克服底盘抵抗线的约束,从而能有效

“撬松”并位移底部岩石,显著减少根底。同时,这种强大的整体推力赋予爆堆更高的抛掷动能和更合理的运动序列,通过排间延时控制,实现“抛掷-堆积”的动态平衡,使得爆堆松散度更大、抛掷距离更适宜。

劣势机理:排间起爆的局限性同样源于其协同性。同排孔齐爆导致最大单段药量增加,使得爆破振动峰值通常高于逐孔起爆。此外,后排孔在起爆时面临的夹制作用较大,若参数设计不当,易产生大块或过粉碎现象。

1.3 机理对比总结

为清晰展示两种起爆方式的内在差异,特总结其对比如表1所示。

2 现场试验设计与效果对比分析

2.1 工程概况

为验证前述理论分析,本研究在清远某露天石灰石矿山进行了严格的现场对比试验。试验区地质条件稳定,岩石普氏坚固性系数 $f=8\sim10$,岩石密度约为 2.7 g/cm^3 ,岩体内发育有两组主要节理,间距 $1\sim2\text{ m}$,对爆破能量传播与岩块破碎形态有显著影响。

试验采用 15 m 固定台阶高度,钻孔直径为 152 mm 。采用三角形布孔方式,孔距 6.5 m ,排距 4.3 m ,超深 1.5 m ,以确保钻孔精度一致。炸药采用现场混装乳化炸药(密度 1.15 g/cm^3),实施第1排连续装药(反向起爆),后排间隔装药结构。试验区的关键特征在于第1排孔面临 $6\sim7\text{ m}$ 的底盘抵抗线,为对比两种起爆方式的优劣创造了典型的条件。

表 1 逐孔起爆与排间起爆破岩机理综合对比表

Table 1 Comprehensive comparison of rock breaking mechanisms between hole-by-hole initiation and row-by-row initiation

特性指标 Characteristic indicator	逐孔起爆 Hole-by-hole initiation	排间起爆 Row-by-row initiation
核心特征 Core feature	单孔、异步、顺序 Single-hole, asynchronous, sequential	同排协同、排间顺序 Intra-row synergy, inter-row sequential
自由面利用 Free face utilization	顺序创造新自由面 Sequentially creates new free faces	固定自由面方向 Fixed free face direction
应力波叠加 Stress wave superposition	时间上的连续叠加 Continuous superposition in time	空间上的集中叠加 Concentrated superposition in space
能量作用方式 Energy action mode	分散利用, 易侧向释放 Dispersed utilization, prone to lateral release	集中利用, 定向协同抬升 Concentrated utilization, directional synergistic lifting
抵抗线克服能力 Resistance-line overcoming capability	弱, 大抵抗线时易产生根底 Weak, prone to toe formation under large resistance lines	强, 能有效克服大抵抗线 Strong, effective in overcoming large resistance lines
爆堆形态 Muck pile morphology	抛掷率相对小, 松散度相对低 Relatively smaller throw distance, relatively lower looseness	抛掷率相对大, 松散度相对好 Relatively larger throw distance, relatively better looseness
爆破振动 Blasting vibration	相对小 Relatively small	相对较大 Relatively large
典型适用条件 Typical applicable conditions	振动敏感区域, 中硬以下岩石, 节理发育均匀的岩体, 块度均匀度要求高 Vibration-sensitive areas, medium-hard or softer rock, rock mass with uniformly developed joints, scenarios requiring high fragmentation uniformity	大抵抗线工况, 要求高抛掷率、高松散度的工况 Conditions with large resistance lines, scenarios requiring high throw distance and high looseness

2.2 试验方案设计

本研究采用控制变量法进行试验设计。在相邻且地质条件相近的爆区, 分别实施两种起爆方案, 确保除起爆网络这一核心变量外, 所有钻孔参数、装药结构及单孔药量均保持一致。

方案 A(逐孔起爆): 采用高精度工业电子雷管实施典型的逐孔起爆。设计孔间延时为 17 ms, 排间延时为 42 ms, 形成斜线顺序起爆。

方案 B(排间起爆): 采用同型号工业电子雷管实施排间顺序起爆。设计排间延时为 65 ms, 同排炮孔同时起爆。

为保障数据的科学性与可靠性, 每组试验均重复 3 次, 并综合运用 RTK 及三维激光扫描等手段, 对爆破全过程及爆后效果进行全方位、量化的数据采集。见表 2。

2.3 效果对比与分析

1) 爆堆形态效果对比

(1) 现象描述

方案 A(逐孔起爆)形成的爆堆形态集中而紧

实, 爆堆塌落高度和抛掷距离沿传爆方向逐渐减小。方案 B(排间起爆)的爆堆松散度为的理想形态, 爆堆塌落高度和抛掷距离适中, 且均大于逐孔起爆, 便于铲装。图 2 列出两组爆堆形态对比图。

(2) 数据分析

通过 RTK 和三维激光扫描获得的量化数据清晰地揭示了两者的差异。方案 B 的爆堆松散系数(爆堆体积与原岩体积的比值)达到 1.48, 比方案 A(1.42)提升了 4.0% 同时, 方案 B 的抛掷距离比方案 A 提高 7% 此外, 通过油锤二次解小的油耗分析, 方案 B 爆堆大块率较方案 A 低 14% 具体数据分析如表 3。

通过爆破视频分析, 排间起爆时, 岩块呈现出“层状推进”的整体运动模式, 其协同抛掷效应赋予了岩体更高的初始动能。而逐孔起爆的岩块运动表现为“分散喷射”, 能量释放分散, 缺乏统一的抛掷方向, 导致爆堆抛掷距离小、松散度相对低。这完美地解释了为何在对抛掷率和爆堆松散度有要求的生产爆破中, 排间起爆的综合表现更为优异。

表 2 现场试验关键参数对照表
Table 2 Comparison table of key parameters in field tests

参数类别 Parameter category	方案 A(逐孔起爆) Scheme A(hole-by-hole initiation)	方案 B(排间起爆) Scheme B(row-by-row initiation)
孔网参数(孔距×排距) Hole pattern(Spacing×Burden)	6.5 m×4.3 m	6.5 m×4.3 m
炮孔排数 Number of rows	3	3
底盘抵抗线 Toe burden	(6~7) m	(6~7) m
第一排单孔装药量 Charge per hole(1st row)	250 kg	250 kg
第二、三排单孔装药量 Charge per hole(2nd & 3rd rows)	200 kg	200 kg
起爆时序 Initiation timing	孔间 17 ms, 排间 42 ms Hole delay:17 ms, Row delay:42 ms	排间 65 ms Row delay:65 ms
核心特征 Core characteristic	单孔、异步, 应力波顺序叠加 Single-hole, asynchronous, sequential stress wave superposition	同排协同作用, 排间顺序起爆 Intra-row synergistic action, inter-row sequential initiation

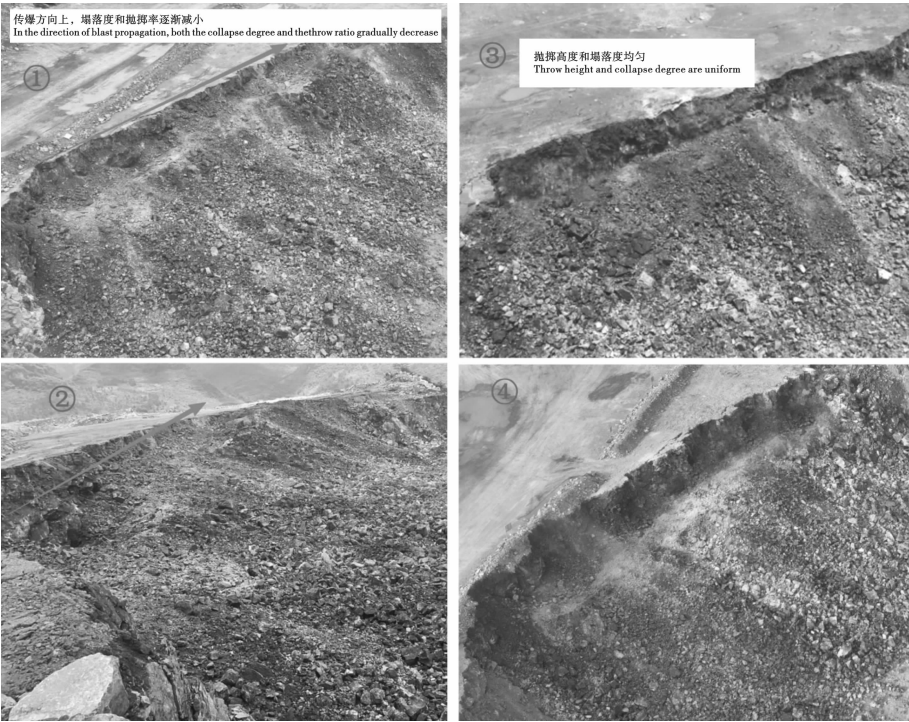


图 2 逐孔起爆和排间起爆爆堆形态对比图(①②是逐孔逐孔起爆、③④是排间起爆)
Fig. 2 Muck pile profiles; hole-by-hole vs. row-by-row initiation
(①②: Hole-by-hole initiation; ③④: Row-by-row initiation)

2) 克服大抵抗线能力对比

(1) 现象描述

方案 A(逐孔起爆)爆破后,抵抗线大于 $45D$ (D 为炮孔直径)时,台阶底部出现连续且明显的根底,平均高度在 0.8~2 m 之间,必须用浅孔爆破进行二

次处理,严重影响了生产效率。相比之下,方案 B(排间起爆)爆后台阶底板平整,可见根底极少,坡面规整,为后续铲装作业创造了理想条件。图 3 列出逐孔起爆和排间起爆根底情况对比图。

表 3 爆堆形态量化对比表

Table 3 Quantitative comparison of muck pile profiles

评价指标 Evaluation metric	方案 A(逐孔起爆) Scheme A (Hole-by-hole initiation)	方案 B(排间起爆) Scheme B (Row-by-row initiation)	改善幅度 Improvement
爆堆松散系数 Muck pile looseness coefficient	1.42	1.48	4%
抛掷距离/m Throw distance/m	28 ~ 40	41 ~ 43	7%左右 Approx. 7%
爆堆塌落高度/m Muck pile settling height/m	1 ~ 5	3.6 ~ 5.3	40%左右 Approx. 40%
油锤解小油耗(L/万吨岩石) Fuel consumption of hydraulic hammer(L/10 kt rock)	64	55	14%左右 Approx. 14%

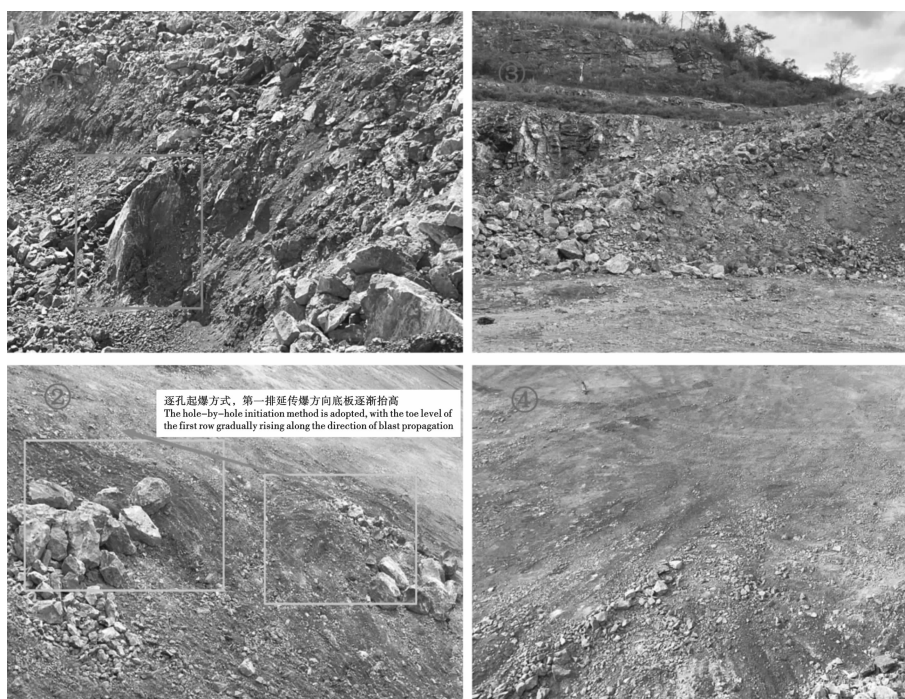


图 3 逐孔起爆和排间起爆后根底情况对比图(①②是逐孔逐孔起爆,③④是排间起爆)

Fig. 3 Toe rock; hole-by-hole vs. row-by-row initiation

(①②: Hole-by-hole initiation; ③④: Row-by-row initiation)

(2) 数据分析

我们对根底情况进行了量化统计。如表 4 所示,方案 A 第一排的根底率(根底长度占调查区域长度的百分比)高达 32.7% 而方案 B 仅为 5.4% 降幅达 83.5%。同时,方案 A 的平均根底高度为 1.05 m,是方案 B(0.25 m)的 4 倍以上。这些数据无可辩驳地证明,在大抵抗线条件下,排间起爆在克服根底方面具有明显优势。

这一结果有力地印证了第二章的理论分析。排间起爆通过同排炮孔应力波的叠加与爆炸气体合力的“协同抬升”效应,显著增大了作用于底盘抵抗线

方向的压力和持续时间,从而有效地“撬松”并位移了底部岩石。而逐孔起爆受制于“最小抵抗线原理”,单孔能量优先向侧向自由面释放,导致作用在底部约束区的有效能量密度不足,最终形成难以克服的根底。

3 逐孔起爆技术的优劣势综合讨论与适用条件界定

基于前述系统的理论分析与严谨的现场试验验证,我们应将工业电子雷管逐孔起爆技术视为一项在特定条件下具有优势的精准工具,在实际工程中

应依据具体地质条件与爆破目标加以应用。

表 4 根底效果量化对比表
Table 4 Quantitative comparison of toe rock effects

评价指标 Evaluation metric	方案 A(逐孔起爆) Scheme A (Hole-by-hole initiation)	方案 B(排间起爆) Scheme B (Row-by-row initiation)	改善幅度 Improvement
第一排根底率/% Toe failure rate-1st row/%	21.7%	3.7%	83%
第一排平均根底高度/m Average toe height-1st row/m	1.05 m	0.25 m	76%
坡脚破碎程度 Fragmentation at toe	一般,存在大块 Fair, with presence of large blocks	充分,块度均匀 Thorough, with uniform fragmentation	显著改善 Significant improvement

3.1 逐孔起爆技术的优势再确认

在特定的工程目标与地质环境下,逐孔起爆技术展现出其不可替代的价值,必须予以客观承认和充分利用:

1)卓越的爆破振动控制:通过将总炸药能量在时间上“化整为零”,能显著降低爆破振动强度。研究表明,在相同总药量下,其质点峰值振速可比排间起爆降低 30%~50%这使其成为临近居民区、重要建(构)筑物、高边坡等环境敏感区域的首选方案。

2)优异的岩石破碎质量:通过后排炮孔顺序创造新的、更佳的自由面,并利用应力波的多次叠加作用,能有效促进岩石的二次破碎,提高块度均匀性。这一优势对于石料加工场、建筑骨料生产等对成品料规格有严格要求的工程十分重要。

3)突出的作业灵活性与控制精度:工业电子雷管的高精度、可编程延时特性,使得工程师能够设计极其复杂的起爆网路,实现对爆破抛掷方向、岩石破碎过程乃至最终爆堆形态的精准控制,特别适用于复杂环境下的轮廓爆破、特种形状控制爆破。

3.2 逐孔起爆技术的劣势与局限性总结

本文的核心分析之一,在于揭示逐孔起爆技术固有的局限性,尤其在以下工况中表现显著:

1)大抵抗线工况下的根底问题:这是其破岩机理导致的固有弊端。当第一排炮孔面临过大底盘抵抗线(如 $>45D$)或岩石极其坚硬完整(单轴抗压强度 $>100\text{ MPa}$)时,能量优先侧向释放,导致底部破碎不充分,根底风险剧增。

2)爆堆抛掷与松散能力不足:在对爆堆抛掷率、松散度有高要求的矿山剥离、强化开采等场景下,其分散的能量释放模式缺乏整体抛掷动能,效果通常不如排间起爆,直接影响后续采装效率。

3)对地质条件与施工精度的高敏感性

(1)地质适应性:在存在较厚节理层(厚度 $>1\text{ m}$)或节理发育极不均匀的岩体中,爆炸能量易沿软弱面逸散,岩石内挤压不充分,导致大块率升高。

(2)施工精度要求:其效果严重依赖于精确的孔网参数测量和科学的延时设计。钻孔偏差或参数设计不当,易导致爆破效果显著恶化。

3.3 逐孔起爆技术的适用条件界定与决策体系

综上,工业电子雷管逐孔起爆技术的应用必须严格遵循其适用条件。我们据此构建一个“地质-工程-设计”三维决策体系,为工程实践提供清晰的科学依据。见表 5。

核心优化应用建议:

1)坚守底线原则:严格测量并控制第一排孔的底盘抵抗线,这是决定逐孔起爆成败的生命线。一旦超标,优先考虑斜孔钻孔等技术措施进行优化。

2)实施混合起爆模式:敢于突破单一模式的束缚。在需要兼顾降振与爆堆效果的复杂工况下,强烈推荐采用“区内排间、区间接力”的混合起爆模式。

3)进行精准延时优化:孔间延时需进行精心计算与现场试验校准。一般而言,在坚硬岩体中可适当缩短延时(如 $1.5\sim3\text{ ms/m}$)以增强应力波叠加;在中硬岩体中可采用常规延时(如 $3\sim5\text{ ms/m}$),以找到最佳的“应力叠加”窗口,避免各孔“各自为战”。

4 结论与展望

通过系统的理论分析、严谨的现场对比试验与深入的综合讨论,对工业电子雷管逐孔起爆技术的破岩机理、应用效果及适用条件进行了审视与研究,得出以下核心结论:

表 5 逐孔起爆技术适用条件决策矩阵

Table 5 Decision matrix for applicable conditions of hole-by-hole initiation technology

决策维度 Decision dimension	适宜条件 Suitable conditions	不适宜条件 Unsuitable conditions	优化或慎用措施 Optimization/Precautions
地质条件 Geological conditions	中硬以下岩石($f < 10 \sim 12$) 节理均匀发育(间距 $< 1\text{ m}$) 无厚层软弱夹层 Medium-hard or softer rock ($f < 10 \sim 12$) Uniformly developed joints (spacing $< 1\text{ m}$) Absence of thick, weak interlayers	极坚硬完整岩石($f > 15$) 厚层状结构或软弱夹层 不均匀风化带 Extremely hard and intact rock($f > 15$) Thick-bedded structures or weak interlayers Unequally weathered zones	底部增强装药 加密孔网参数 Bottom charge enhancement Denser hole pattern parameters
工程需求 Engineering requirements	振动控制为第一要求 块度均匀性要求高 复杂环境安全控制 Vibration control is the primary requirement High fragmentation uniformity required Safety control in complex environments	高抛掷率、高松散度要求 快速采装工况 无特殊振动限制 High throw distance and high looseness required Rapid mucking and loading operations No specific vibration restrictions	考虑排间起爆 采用混合起爆模式 Consider row-by-row initiation Adopt hybrid initiation patterns
设计参数 Design parameters	底盘抵抗线 $W < 45D$ 炮孔密集系数 $m < 1.5$ Toe burden $W < 45D$ Burden-to-Spacing ratio $m < 1.5$	底盘抵抗线 $W > 45D$ 炮孔密集系数 $m > 1.5$ Toe burden $W > 45D$ Burden-to-Spacing ratio $m > 1.5$	采用斜孔钻进 精确测量抵抗线 优化孔网参数 Inclined hole drilling Precise measurement of burden Optimize hole layout parameters

1)证实了逐孔起爆技术在大抵抗线工况下的固有弊端。理论与试验均表明,由于其“单孔顺序做功”的破岩机理,爆炸能量会优先向侧向自由面释放,导致作用于底盘抵抗线方向的有效能量严重不足。

2)揭示了排间起爆在特定条件下的不可替代性。对比研究凸显了排间起爆“同排协同做功”机理的独特优势。通过应力波叠加与爆炸气体合力产生的“协同抬升”效应,其在抵抗线方向的有效能量利用率高于逐孔起爆,从而能更有效地克服大抵抗线、减少根底,并提供更强的整体抛掷动能以形成更利于采装的爆堆形态。

3)明确了逐孔起爆的优势场合并界定了其技术边界。本研究辩证地指出,逐孔起爆在爆破振动控制与岩石块度优化方面具有排间起爆难以比拟的优势。其适用条件可归纳为:地质上,宜用于中硬以下、节理发育均匀的岩体;工程目的上,应优先服务于振动敏感区。

4)本文所明确的逐孔起爆技术适用条件决策矩阵,可为现场的爆破优化设计提供实践指南。

展望:未来研究可进一步聚焦于逐孔与排间起爆混合模式的精准化设计、基于不同岩性与节理特

征的精准延时模型,从而不断完善爆破技术理论体系,推动爆破作业向更安全、高效、经济的方向发展。

参考文献 (References)

- [1] 张英豪,张泽楠. 数码电子雷管应用问题的探讨[J]. 火工品,2018(4):54-57.
- [1] ZHANG Ying-hao,ZHANG Ze-nan. Discussion on the application of digital electronic detonators[J]. Initiators & Pyrotechnics,2018(4):54-57. (in Chinese)
- [2] 吴礼军,王鑫尧. 城区基坑开挖爆破振动预测及控制研究[J]. 爆破,2023,40(3):206-211,235.
- [2] WU Li-jun,WANG Xin-yao. Prediction and control of blasting vibration in urban foundation pit excavation[J]. Blasting,2023,40(3):206-211,235. (in Chinese)
- [3] 兰小平. 数码电子雷管逐孔起爆网路延时时间应用探讨[J]. 工程爆破,2019,25(2):57-66.
- [3] LAN Xiao-ping. Discussion on the application of delay time in hole-by-hole initiation network with digital electronic detonators[J]. Engineering Blasting,2019,25(2):57-66. (in Chinese)