

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.01.007

宽孔距低威力混装乳化炸药耦合装药 预裂爆破施工技术研究与应^{*}

陈运成¹, 杨志勇², 管伟明³, 赵明生¹, 朱伟¹, 刘刚¹, 李铁龙¹, 侯得峰²

(1. 宏大爆破工程集团有限责任公司, 广州 510000; 2. 新疆天池能源有限责任公司, 昌吉 831700;
3. 新疆大学, 乌鲁木齐 830017)

摘要: 预裂爆破技术是保障露天矿山边坡开挖轮廓面平整与岩体稳定的关键工艺。传统预裂爆破方法存在钻孔工程量大、施工成本高、效率低下等问题。为解决这些技术经济瓶颈, 作者研究提出并系统探讨了一种宽孔距低威力混装乳化炸药耦合装药预裂爆破施工技术。研究以某露天矿山左侧380平台变质砂岩边坡工程为背景, 针对其岩石硬度高(坚固性系数 $f=12\sim 16$)、岩体结构完整的特点, 深入剖析了该技术应用中的核心技术难点: 孔距增大至(18~25)倍孔径(以140 mm孔径为例, 孔距达3.0 m)导致的应力波叠加效应减弱与裂纹贯通难度增加; 底部耦合装药与上部空气间隔组合的装药结构对能量精准分配与“气刃效应”利用的更高要求。基于应力波传播理论与爆生气体准静态压力作用机理, 进行了系统的方案设计, 设计了底部耦合装药(保证裂纹起裂)、上部空气间隔(促进裂纹延伸)的装药结构; 采用了基于电子雷管的精确延时起爆网路, 确保预裂孔先响并于孔间形成协同应力场。应用结果表明: 爆后半孔率平均达85.2%, 预裂面平整度偏差控制在 ± 8.7 cm。通过钻孔量减少50%、电子雷管替代导爆索(成本降幅达84%)及混装炸药车高效装药(效率提升5倍以上), 使每平方米预裂面综合成本降低46.6%。宽孔距低威力混装乳化炸药耦合装药预裂爆破技术先进、经济显著、安全可靠, 成功解决了传统工艺的诸多弊端, 为类似地质条件下的露天矿山边坡控制爆破提供了可复制、可推广的综合解决方案, 具有广阔的工程应用前景。

关键词: 预裂爆破; 宽孔距; 混装乳化炸药; 耦合装药; 经济效益

中图分类号: TD235 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2026)01-0058-04

Research and Application of Presplitting Blasting Construction Technology Using Coupled Charging with Wide Hole Spacing and Low-energy Bulk Emulsion Explosives

CHEN Yun-cheng¹, YANG Zhi-yong², GUAN Wei-ming³, ZHAO Ming-sheng¹,
ZHU Wei¹, LIU Gang¹, LI Tie-long¹, HOU De-feng²

(1. Hongda Blasting Engineering Group Co., Ltd., Guangzhou, 510000, China; 2. Xinjiang Tianchi Energy Co., Ltd., Changji 831700, China; 3. School of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Wulumuqi 830017, China)

收稿日期 (Date of reception): 2025-09-26

网络首发日期 (Published online): 2025-10-23

作者简介: 陈运成(1991-), 男, 安徽省淮北市人, 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)

Abstract: Presplit blasting serves as an essential technique for maintaining optimal excavation profile integrity and enhancing rock mass stability in open-pit mining operations. Traditional presplit blasting techniques are plagued by excessive drilling requirements, prohibitive construction expenses, and suboptimal operational efficiency. To address these technical and economic constraints, this study introduces and comprehensively examines an innovative technique: wide-spacing presplit blasting with low-power, bulk-loaded explosives and a coupled-charging configuration. This investigation focuses on the engineering of metamorphic sandstone slopes at the 380 platform on the left side of a specific open-pit mining operation, which serves as the research context for the study. This study addresses the critical technical challenges in implementing the novel method under conditions of high rock hardness (strength factor $f = 12 \sim 16$) and intact rock mass structure, focusing on two key aspects: the diminished superposition effect of stress waves and the enhanced difficulty of crack coalescence resulting from significantly increased borehole spacing (18 ~ 25 times the borehole diameter, e. g., 3.0 m spacing for a 140 mm diameter holes); and the stringent requirements for precise energy distribution and optimal utilization of the “air wedge effect” imposed by the unique charging configuration that combining bottom-coupled charges with upper decked air gaps. Based on stress wave propagation theory and explosion gas quasi-static pressure mechanisms, this study develops an optimized blasting design featuring bottom-coupled charges for effective crack initiation combined with upper decked air gaps to facilitate crack propagation, while employing an electronic detonator-based precision delay initiation network to ensure prioritized presplit hole detonation and coordinated inter-hole stress field development. Field application demonstrated outstanding performance metrics: the technique achieved an average half-hole preservation rate of 85.2% while maintaining presplit surface deviation within 8.7 cm. The innovative approach yielded substantial economic benefits, including a 50% reduction in drilling volume, an 84% cost saving through electronic detonator substitution for detonating cord, and more than fivefold efficiency gains via bulk explosive loading systems, collectively reducing comprehensive costs per square meter by 46.6%. This advanced wide-spacing, low-power, bulk-loaded emulsion explosive coupled charge presplit blasting technology represents a technically sophisticated, economically viable, and operationally reliable solution that effectively addresses conventional method limitations. The successful implementation establishes a replicable framework for slope control blasting in analogous open-pit mining environments, demonstrating significant potential for widespread engineering applications.

Key words: presplitting blasting; wide hole spacing; bulk emulsified explosive; coupled charge; economic benefit

预裂爆破技术是现代工程爆破中的重要分支,广泛应用于露天矿山开采、水利水电工程、交通基础设施建设等领域的轮廓控制和边坡保护。该技术通过在主体爆破前沿设计轮廓线形成一条连续的预裂缝,有效阻断爆破应力波的传播,减轻对保留岩体的破坏,从而获得平整稳定的开挖面。随着工程建设规模的不断扩大和对环境保护要求的日益提高,传统预裂爆破技术逐渐暴露出钻孔工程量大、施工成本高、作业效率低等局限性。

为克服这些技术经济瓶颈,本文提出并系统研究了一种创新性的宽孔距低威力混装乳化炸药耦合装药预裂爆破施工技术。该技术通过多项技术创新,包括增大孔距范围、优化装药结构、采用低威力现场混装乳化炸药等,在保证预裂效果的前提下,显著降低了施工成本,提高了作业效率,减少了环境影响。本研究基于爆破力学理论和应力波传播原理^[1],结合现场试验和工程应用,深入分析了宽孔距预裂爆破的技术难点、成缝机理和参数优化方

法^[2],为该技术的推广提供了理论依据和实践指导。

1 工程概况

1.1 工程背景

某大型露天矿山左侧 380 平台需要进行边坡预裂爆破施工,总长度 90 m,宽度约 14 m,台阶高度 15 m。该矿山采用台阶式开采方式,对最终边坡的稳定性和平整度有严格要求。传统的预裂爆破方法在该矿区的应用中暴露出钻孔密度大、作业周期长、成本高等问题,亟需技术创新和工艺改进。

1.2 地质条件分析

矿区岩性以未风化变质砂岩为主,岩石坚固性系数 $f = 12 \sim 16$,属于中硬至坚硬岩层。岩体结构完整,节理裂隙轻微发育,岩体完整性系数 K_v 约为 0.75,岩石密度 2.65 g/cm^3 ,抗压强度 $85 \sim 120 \text{ MPa}$,抗拉强度 $5 \sim 8 \text{ MPa}$,弹性模量 $35 \sim 45 \text{ GPa}$,泊松比 $0.22 \sim 0.25$ 。

2 技术难点分析

2.1 孔距增大对预裂效果的影响机理

传统预裂爆破孔距一般为 $(8 \sim 12)D$ (D 为孔径),而本研究将孔距扩大至 $(18 \sim 25)D$,这一变化带来了多方面的技术挑战:

1) 应力波叠加效应减弱:根据应力波传播理论,两个相邻炮孔同时起爆时,在其连心线上会产生应力叠加效应。孔距增大导致应力波传播距离增加,能量衰减加剧,叠加效应减弱。计算表明,当孔距从1.5 m增大到3.0 m(孔径140 mm),应力波峰值压力衰减约40%,这直接影响裂缝的起裂和扩展。

2) 裂纹贯通难度增加:预裂缝的形成需要相邻炮孔产生的裂纹在孔间中点位置汇合贯通。孔距增大后,裂纹扩展路径延长,需要更高的能量保证裂纹充分扩展。特别是在岩性不均匀或存在节理裂隙的情况下,裂纹可能偏离预设方向,导致预裂缝不连续。

3) 装药量分配优化:孔距增大意味着单孔负担的预裂面积增加,需要重新计算和优化装药量。装药量不足会导致裂缝扩展不充分,而过量装药则可能造成孔壁过度破碎,影响半孔率。

2.2 装药结构设计的挑战

能量分布优化:采用底部耦合装药、上部空气间隔的装药结构,需要精确控制能量在炮孔内的分布。耦合装药段产生高强度应力波,用于起裂径向裂纹;空气间隔段则利用爆生气体的准静态压力作用,促进裂纹延伸和贯通。两者比例不当会影响预裂效果。

空气间隔效应:空气间隔长度对爆破效果有重要影响。适当的空气间隔可以延长爆生气体作用时间,提高能量利用率,形成"气刃效应"。但间隔过长会导致应力波强度不足,难以起裂有效裂纹;间隔过短则类似连续装药,容易造成孔壁过度破碎。

堵塞质量保证:堵塞长度和质量直接影响爆破能量利用率和爆破安全。堵塞过短或不密实,会导致爆生气体过早逸散,降低爆破效果,并产生爆破飞石等安全隐患。

2.3 起爆时序设计的复杂性

应力场叠加优化:预裂孔需要先于主爆孔起爆,形成预裂缝后再进行主体爆破。但预裂孔之间的起爆时序也需要优化,合适的微差起爆可以促进应力波叠加,增强预裂效果。

电子雷管延时设置:电子雷管提供了精确的延

时控制能力,但需要科学确定最佳延时时间。延时过短可能造成应力波过早叠加,延时过长则失去叠加效应。

3 理论分析与方案设计

3.1 预裂爆破理论基础

应力波传播理论:炸药爆炸瞬间,产生高强度冲击波,在炮孔壁上形成初始径向裂纹。随后,应力波以压缩波的形式向外传播,在炮孔连心线方向产生拉应力集中。当相邻两孔的应力波在连心线中点相遇叠加时,其合成的拉应力值超过岩体的动态抗拉强度,岩体便被拉断,形成一条贯穿的初始微裂纹^[3]。这个过程为后续的气体作用创造了先决条件。

爆生气体作用机理:应力波作用后,高温高压的爆生气体紧随其后,像楔子一样挤入由应力波产生的初始裂纹中。由于气体作用时间远长于应力波,其产生的准静态压力使裂纹尖端产生巨大的应力集中,从而驱使裂纹稳定地、持续地向前延伸。相邻炮孔产生的裂纹在气体压力的共同作用下,最终相互贯通,形成平整的预裂面^[4]。这一过程可用断裂力学理论分析,裂纹扩展的条件为

$$K_I \geq K_{IC}$$

式中: K_I 为应力强度因子; K_{IC} 为岩石断裂韧度。

裂纹贯通机制:相邻炮孔产生的裂纹在孔间中点附近汇合贯通,形成连续预裂缝。这一过程需要保证每个炮孔产生的裂纹有足够长度,通常要求裂纹长度不小于孔距的一半。

3.2 爆破参数优化设计

基于裂纹扩展理论和实际工程经验,孔距 a 与孔径 D 的关系确定为: $a = (18 \sim 25)D$,与最后一排主爆孔或缓冲孔的排距: $b = (15 \sim 23)D$

对于孔径140 mm的情况,取 $a = 3.0$ m。这一参数通过现场试验验证,在岩性条件类似的情况下可保证预裂缝充分贯通。

1) 装药结构设计:采用底部耦合装药、上部空气间隔的装药结构,装药结构示意图如图1。耦合装药长度根据台阶高度和岩石性质确定,一般为孔深的 $1/5 \sim 1/3$;堵塞长度取 $(15 \sim 18)D$ 。

2) 装药量计算:单孔装药量按以下公式计算

$$Q = KqabH$$

式中: Q 为单孔装药量,kg; K 为与孔深有关的系数,孔深大于10 m取 $1.0 \sim 1.2$,孔深小于10 m取 $0.7 \sim 1.0$; q 为炸药单耗, kg/m^3 ,取 $0.25 \sim 0.35$; a 为孔距,m; b 为排距,m; H 为台阶高度,m。

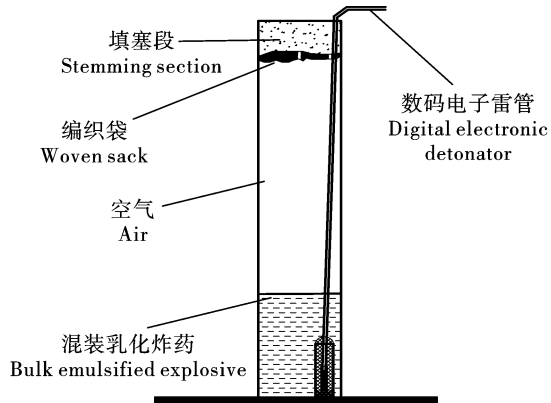


图 1 装药结构示意图

Fig. 1 Explosive charge structure diagram

3) 起爆时序设计: 预裂孔采用同时起爆或微差起爆, 微差时间取 1 ~ 3 ms; 预裂孔与辅助孔之间的起爆间隔取 25 ~ 50 ms; 辅助孔与主爆孔之间的起爆间隔按常规爆破设计。

4 结果与讨论

4.1 预裂效果评价

爆后效果图如图 2、图 3, 通过现场试验和工程应用, 对本工法的预裂效果进行了系统评价:

1) 半孔率统计分析: 在 380 平台爆破区选择了 10 个监测断面, 每个断面测量 20 个预裂孔, 共计 200 个孔的半孔率数据。统计结果表明, 平均半孔率达到 85.2%, 其中硬岩区域 ($f \geq 14$) 半孔率为 87.6%, 中硬岩区域 ($f = 12 \sim 14$) 半孔率为 82.3%, 均超过规范要求的标准 (硬岩 $\geq 80\%$, 中硬岩 $\geq 60\%$)。

2) 裂缝扩展观察: 通过孔内摄像和表面观察, 发现预裂缝宽度一般为 5 ~ 15 mm, 连续性好, 无明显错台现象。预裂缝深度超过设计轮廓线, 保证了主体爆破时应力波的阻断效果。



图 2 爆后效果 1

Fig. 2 Blasting result 1



图 3 爆后效果 2

Fig. 3 Blasting result 2

4.2 爆破参数优化分析

1) 孔距与半孔率关系: 通过对比不同孔距条件下的预裂效果, 发现当孔距在 $(18 \sim 25)D$ 范围内时, 半孔率随孔距增大呈缓慢下降趋势, 但均能满足工程要求。当孔距超过 $25D$ 时, 半孔率显著下降, 预裂缝连续性变差。

2) 装药结构对比分析: 对比了两种装药结构的效果: ①全孔耦合装药; ②底部耦合 + 上部空气间隔。结果表明, 第二种装药结构 (底部耦合 + 上部空气间隔) 的综合效果最佳, 既能保证裂缝充分起裂和扩展, 又能控制孔壁破坏程度。

3) 堵塞长度影响: 通过试验发现, 堵塞长度在 $(15 \sim 18)D$ 范围内时, 爆破能量利用率最高, 爆破噪声和飞石控制效果最好。堵塞长度过短时, 爆生气体过早逸散, 能量利用率低; 堵塞过长时, 孔口部分岩石破碎不充分。

4.3 经济效益分析

与传统预裂爆破方法相比, 本技术在多个方面显示出显著的经济优势:

1) 钻孔成本节约: 孔距从 1.5 m 增大到 3.0 m, 钻孔数量减少 50%, 钻孔成本相应降低。实际测算表明, 每平方米预裂面的钻孔成本降低 50%。

2) 爆破材料成本优化: 与传统的预裂爆破相比, 虽然单孔装药量有所增加, 但由于孔数减少, 总装药量略有降低, 且主装药由小直径乳化炸药改为混装乳化炸药。更重要的是, 采用电子雷管代替导爆索, 起爆材料成本从 6.0 元/ m^2 降至 0.94 元/ m^2 , 节约 5.06 元/ m^2 。

3) 综合成本对比: 每平方米预裂面的综合成本节约比例达 46.6%。

4) 效率提升效益: 采用混装炸药车装药, 施工效率比人工装药提高 5 倍以上, 工期大幅缩短, 间接经济效益显著。