

Optimization of Medium and Deep Hole Blasting Parameters and Blasting Effect Control Technology

Huaiyu Liu

Zijin Mining Co., Ltd., Wulate Back Banner, Bayannur, Inner Mongolia, 015500, China

Abstract

As a core technology in mining, infrastructure construction, and related engineering fields, the scientific design of parameters for medium-deep hole blasting directly determines blasting efficiency, construction safety, and economic costs. In recent years, with the advancement of intelligent blasting technology, parameter optimization has shifted from empirical design to an integrated approach combining "theoretical calculation, numerical simulation, and field testing." This paper addresses the key challenges in parameter design for medium-deep hole blasting. By integrating test results of rock mass physical and mechanical parameters, it focuses on optimizing critical indicators such as hole diameter, depth, hole network parameters, and explosive consumption. Additionally, it proposes supporting technical measures like vibration control and flying rock protection, providing technical references for similar projects.

Keywords

medium-deep hole blasting; parameter optimization; rock mass classification; blasting vibration; effect control

中深孔爆破参数优化及爆破效果控制技术

刘怀宇

乌拉特后旗紫金矿业有限公司, 中国·内蒙古 巴彦淖尔 015500

摘要

中深孔爆破作为矿山开采、基建施工等工程领域的核心技术,其参数设计的科学性直接决定爆破效率、施工安全及经济成本。近年来,随着智能爆破技术的发展,参数优化已从经验设计转向“理论计算-数值模拟-现场试验”的一体化模式。本文针对中深孔爆破参数设计的核心难点,结合岩体物理力学参数测试结果,重点优化孔径、孔深、孔网参数、炸药单耗等关键指标,同时提出振动控制、飞石防护等配套技术措施,为同类工程提供技术借鉴。

关键词

中深孔爆破; 参数优化; 岩体分级; 爆破振动; 效果控制

1 引言

中深孔爆破凭借钻孔深度大(通常5-20m)、单次爆破方量大、作业效率高的优势,已广泛应用于露天矿山剥离与采矿、公路铁路路堑开挖、水利枢纽基坑施工等工程场景。与浅孔爆破相比,中深孔爆破能有效减少钻孔工作量、降低爆破次数,但其爆破能量传递路径复杂,受岩体不均质性、参数匹配度等因素影响显著,易出现大块率过高、爆破振动超标、飞石距离失控等问题,不仅增加后续破碎成本,还可能引发安全事故。

2 中深孔爆破技术特征及影响因素

2.1 技术特征分析

中深孔爆破的核心特征体现在“深孔”带来的能量分布差异:其一,钻孔深度增加导致炮孔间应力叠加效应显著,

合理的孔网参数可实现能量均匀传递,避免出现应力集中或爆破盲区;其二,深孔爆破的炸药装药长度大,装药结构对爆破效果影响突出,连续装药适用于均质硬岩,间隔装药则可降低软岩区域的过度破碎;其三,深孔爆破的自由面控制难度大,需通过合理设置起爆顺序,创造多向自由面以提高破碎效率。

与浅孔爆破相比,中深孔爆破的单位爆破成本降低30%-50%,但对参数设计的精度要求更高。例如,孔距偏差超过10%就可能导致大块率上升20%以上,炸药单耗每增加0.1kg/t,将使每吨矿石开采成本增加0.5-0.8元。因此,参数优化是中深孔爆破技术的核心环节。

2.2 影响因素

影响参数优化的核心因素主要包括三类:一是岩体自身特性,如岩石的抗压强度、抗拉强度、岩体完整性系数、节理裂隙发育程度等,这些参数直接决定了岩体的抗爆能力和破碎难度;二是工程技术要求,不同工程对爆破后岩石的块度分布、开挖边坡稳定性、周边构筑物的安全距离等均有

【作者简介】刘怀宇(1992—),男,中国内蒙古巴彦淖尔人,本科,工程师,从事采矿研究。

明确规定,是参数优化的约束条件;三是爆破器材性能,炸药的爆速、爆力、猛度,雷管的延期精度、起爆可靠性等,直接影响爆破能量的释放规律和传递效率,是参数设计的物质基础。在优化过程中,需将三者有机结合,通过理论计算、数值模拟与室内试验相结合的方法,实现参数的科学配置^[1]。

3 中深孔爆破核心参数优化方法

3.1 参数优化的核心原则

中深孔爆破参数优化需遵循“岩体适配、安全高效、经济合理”三大原则:一是根据岩体分级结果确定参数基准值,避免“一刀切”式设计;二是将爆破振动、飞石等安全指标作为约束条件,确保参数设计符合安全规范;三是综合考虑钻孔成本、炸药成本及后续破碎成本,实现总成本最低化。同时,参数优化需采用“正向设计-反向验证”的闭环模式,通过现场试验修正理论计算结果。

3.2 关键参数优化设计

3.2.1 孔径与孔深优化

孔径(d)与孔深(L)是中深孔爆破的基础参数,需结合钻孔设备能力、岩体特性及爆破任务确定。孔径选择需匹配炸药直径,通常炸药直径为孔径的0.6-0.8倍,以保证装药密度。对于露天矿山,常用孔径为90-150mm,其中90mm孔径适用于中硬岩($R_c=30-60\text{MPa}$),150mm孔径适用于硬岩($R_c > 60\text{MPa}$)。

孔深优化需区分垂直孔与倾斜孔:垂直孔孔深= L_1+L_2 ,其中 L_1 为台阶高度, L_2 为超深,超深通常取台阶高度的10%-15%,用于克服底盘抵抗过大导致的根底问题;倾斜孔(倾角 $70^\circ-85^\circ$)孔深= $L_1/\sin\theta+L_2$ (θ 为孔倾角),倾斜孔可减少大块率,但钻孔效率较低。例如,某铁矿台阶高度12m,岩体为II级硬岩,采用110mm垂直孔,超深取1.5m,孔深设计为13.5m,有效避免了根底残留。

3.2.2 孔网参数优化

孔网参数包括孔距(a)、排距(b)及底盘抵抗线(W_d),是决定爆破效果的核心指标,三者需满足 $a/b=1.2-1.5$ (菱形布孔)或 $a/b=1.0-1.2$ (矩形布孔)的比例关系,以实现应力均匀叠加。底盘抵抗线是孔网参数设计的关键,其计算公式为:

$$W_d=K_d \times d \times \sqrt{R_c/10}$$

其中, K_d 为底盘抵抗线系数,硬岩取25-30,中硬岩取30-35,软岩取35-40; d 为孔径(mm); R_c 为岩石单轴抗压强度(MPa)。

孔距 $a=K \times W_d$, K 为孔距系数,根据起爆方式调整:逐排起爆 $K=1.2-1.3$,微差起爆 $K=1.3-1.5$ 。例如,某铜矿采用130mm孔径, $R_c=55\text{MPa}$,硬岩 K_d 取28,计算得 $W_d=28 \times 130 \times \sqrt{(55/10)}=28 \times 130 \times 2.345 \approx 8670\text{mm}$,取8.7m;采用微差起爆 $K=1.4$,孔距 $a=1.4 \times 8.7 \approx 12.2\text{m}$,排距 $b=a/1.4 \approx 8.7\text{m}$,形成菱形布孔。

3.2.3 炸药单耗优化

炸药单耗(q)是单位体积岩体所需的炸药量,直接影响爆破成本与破碎效果,其理论计算公式为:

$$q=q_0 \times f(R_c) \times f(K_v) \times f(H)$$

其中, q_0 为基准炸药单耗(硬岩取 $0.35-0.45\text{kg/m}^3$,中硬岩取 $0.25-0.35\text{kg/m}^3$,软岩取 $0.15-0.25\text{kg/m}^3$); $f(R_c)$ 为岩石强度修正系数, R_c 每增加10MPa,系数增加0.1; $f(K_v)$ 为岩体完整性修正系数, K_v 每降低0.1,系数降低0.08; $f(H)$ 为台阶高度修正系数, H 每增加5m,系数增加0.05。

实际工程中,需通过正交试验法优化炸药单耗。例如,某石灰石矿以 q 、 a 、 b 为试验因素,每个因素取3个水平,进行 $L_9(3^3)$ 正交试验,结果表明当 $q=0.32\text{kg/m}^3$ 、 $a=10\text{m}$ 、 $b=8\text{m}$ 时,大块率($> 500\text{mm}$)最低,为8.5%,较原参数降低12%^[2]。

3.2.4 装药结构与起爆顺序优化

装药结构优化需根据岩体均匀性调整:均质岩体采用连续装药,确保能量均匀释放;非均质岩体采用间隔装药,在软岩段减少装药密度,硬岩段增加装药密度。间隔装药的间隔长度通常为0.5-1.0m,间隔材料采用炮泥或空气柱,空气柱间隔可降低爆破振动峰值20%-30%。

起爆顺序优化的核心是采用微差起爆技术,通过控制相邻炮孔的起爆时差(25-50ms),使前排爆破形成的自由面为后排爆破提供有利条件,同时避免应力波叠加导致的振动超标。起爆网络采用“孔内延期+孔外延期”的复式网络,孔内使用高精度延期雷管控制排间时差,孔外使用导爆管控制孔间时差,确保起爆可靠性。

3.3 参数优化的数值模拟验证

数值模拟是参数优化的重要工具,可通过ANSYS/LS-DYNA软件模拟爆破过程中的应力分布、岩体破碎及振动传播规律。以某公路路堑爆破工程为例,原参数为 $a=8\text{m}$ 、 $b=6\text{m}$ 、 $q=0.3\text{kg/m}^3$,模拟结果显示爆破振动速度达 1.8cm/s ,超过规范限值(1.5cm/s)。通过优化孔距至7m、炸药单耗至 0.27kg/m^3 ,模拟振动速度降至 1.3cm/s ,大块率从15%降至9%,为现场施工提供了可靠依据。

4 中深孔爆破效果控制技术体系

爆破效果控制是中深孔爆破工程的核心目标,其控制范围涵盖破碎块度、爆破振动、飞石危害、边坡稳定性等多个维度,需建立“事前预防、事中控制、事后评估”的全流程技术体系,确保爆破效果满足工程要求。

4.1 破碎块度控制

破碎块度是衡量爆破效果的核心指标,直接影响后续铲装、运输效率和生产成本。理想的破碎块度应满足“最大块度小于挖掘机斗容的1/3,块度分布均匀”的要求。控制破碎块度的关键技术包括:一是优化孔网参数,通过调整炮孔密集系数和抵抗线,确保爆破能量在岩体中均匀分布,避

避免因能量集中或不足导致的大块或粉化；二是采用分段装药结构，针对岩体不同深度的坚固程度差异，设置不同的药包位置和药量，实现分层破碎；三是利用预裂爆破技术，在主爆区与保留岩体之间设置预裂孔，通过预裂孔形成的裂隙引导主爆区能量释放，减少大块产生。此外，还可通过在炮孔内设置聚能管，增强炸药的定向破碎作用，提升块度均匀性。对于已产生的大块，可采用二次破碎技术（如浅孔爆破、机械破碎）进行处理，但需控制二次破碎的炸药用量，避免影响周边岩体稳定性^[3]。

4.2 爆破振动控制

爆破振动是中深孔爆破最主要的环境影响因素，过大的振动可能导致周边构筑物开裂、边坡失稳等问题，其控制需遵循“源头减量、传播阻隔、监测预警”的原则。

源头减量技术的核心是优化起爆参数，通过采用微差起爆技术，将总炸药量分散到多个段次，控制单段起爆药量，避免能量集中释放。单段起爆药量的计算可采用萨道夫斯基公式： $V=K \times (Q^{1/3}/R)^{\alpha}$ ，其中V为允许振动速度(mm/s)，Q为单段起爆药量(kg)，R为爆破中心至构筑物的距离(m)，K、 α 为场地系数（需通过现场试验确定）。根据周边构筑物的安全等级（如民房、桥梁、隧道），确定允许振动速度，再反算单段起爆药量。例如，对于距离爆破区50m的民房，允许振动速度取2.0mm/s，若K=200、 $\alpha=1.8$ ，则单段起爆药量应控制在50kg以内。

传播阻隔技术主要通过设置减震沟、缓冲层等措施，削弱振动波的传播能量。减震沟通常设置在主爆区与构筑物之间，沟深应大于振动波的传播深度（一般取3-5m），沟宽取0.5-1.0m，通过沟内空气的缓冲作用降低振动波强度；缓冲层则在爆区周边铺设沙袋、橡胶垫等柔性材料，吸收振动能量。此外，合理选择爆破部位，避开岩体中的软弱夹层和断层，避免振动波在软弱结构面处产生放大效应。

监测预警技术是振动控制的重要保障，需在爆破前布设振动监测仪（如拾震器、数据采集仪），监测点应设置在距离爆区最近的构筑物基础、边坡坡顶等关键位置，实时采集振动速度和频率数据。若监测数据超过允许值，需立即调整爆破参数（如减少单段药量、增大延期时间），确保振动控制在安全范围内。

4.3 飞石危害控制

飞石是中深孔爆破最危险的安全隐患，其飞行距离可达数百米，易造成人员伤亡和设备损坏，控制飞石需从“限制初速度、阻挡飞行路径”两方面入手。

限制飞石初速度的核心是优化装药和堵塞参数。堵塞长度是控制飞石的关键，堵塞长度过短，炸药能量易从孔口泄漏，导致飞石初速度增大；堵塞长度过长，会降低炸药能量利用率。通常堵塞长度取(20-35)d，对于孔径130mm的炮孔，堵塞长度应不小于2.6m。堵塞材料优先选用炮泥（由黏土和砂按3:1混合制成），其密度大、可塑性强，能有效封堵孔口，减少能量泄漏。同时，控制装药高度，确保药包顶部与堵塞段之间留有足够的缓冲距离，避免炸药直接作用

于堵塞物。

阻挡飞行路径的关键是设置安全防护措施，常用的防护方式包括炮孔覆盖和爆区围挡。炮孔覆盖可采用“铁丝网+沙袋”或“帆布+钢筋网”的组合形式，覆盖物需牢固固定在炮孔上方，防止被爆破气流掀翻；爆区围挡则在爆区周边设置高度2-3m的防护栏，栏内铺设防护网，阻挡飞石飞出。此外，还需明确爆破安全警戒范围，根据飞石最大可能飞行距离（通常取200-300m）设置警戒区，爆破前清空区内人员和设备，确保安全。

4.4 边坡稳定性控制

在边坡开挖工程中，中深孔爆破可能导致边坡岩体产生裂隙，影响边坡稳定性，其控制需结合“爆破设计与边坡支护”的一体化思路。

爆破设计阶段，需采用“预裂爆破+光面爆破”的组合技术，在边坡轮廓线处设置预裂孔和光面孔。预裂孔的起爆时间早于主爆孔，通过爆破形成一条连续的裂隙，阻断主爆区振动波向边坡岩体的传播；光面孔则在主爆孔起爆后起爆，通过控制装药量和起爆顺序，使边坡面平整，减少超挖和欠挖。预裂孔和光面孔的间距应小于主爆孔，通常取80-100cm，装药量为中深孔的1/3-1/2，采用不耦合装药结构，避免炸药直接作用于孔壁。

爆破后需及时对边坡进行支护处理，根据边坡高度和岩体稳定性，采用锚杆支护、喷锚支护或挡土墙支护等方式。锚杆支护通过将锚杆植入边坡岩体内部，增强岩体的整体性；喷锚支护则在锚杆基础上喷射混凝土，形成保护层，防止岩体风化；挡土墙支护适用于边坡坡度较陡的场景，通过墙体承受边坡岩体的侧压力。此外，还需定期对边坡进行监测，采用全站仪、位移计等设备监测边坡的沉降和位移，若发现异常变形，及时采取加固措施^[4]。

5 结语

中深孔爆破参数优化需以岩体分级为基础，核心在于实现孔径、孔深、孔网参数、炸药单耗等指标与岩体特性的精准匹配，可有效降低大块率与爆破振动，提升爆破效率。配套的振动控制、飞石防护等技术，形成了全流程爆破效果控制体系，解决了中深孔爆破的安全与效率矛盾。随着技术的不断创新，中深孔爆破将在安全、高效、绿色的方向上实现更大突破。

参考文献

- [1] 王金刚,高展.崩落法开采矿山中深孔爆破参数的优化[J].河北冶金,2025,(07):73-79+92.
- [2] 谷亚州,李闯,陈南海,等.扇形中深孔爆破孔网参数优化研究[J].矿业研究与开发,2025,45(04):96-103.
- [3] 孙刚友,金爱兵,武耀硕,等.急倾斜薄矿脉硬岩中深孔爆破参数优化研究[J].金属矿山,2025,(04):174-183.
- [4] 刘国栋,于鹏辉,刘伟军,等.三山岛金矿中深孔爆破参数混沌优化反演研究[J].现代矿业,2025,41(02):57-61.