

数码雷管精细化爆破设计在绿色建材生产成本控制中的应用

王志伟

中国电建集团华中投资有限公司, 湖北 武汉 430000

[摘要]数码雷管凭借高精度延时与可编程特性,为矿山爆破工程提供了精细化设计与成本控制的新路径。本文系统阐述了数码雷管精细化爆破设计的理论基础与关键技术,分析了其在生产成本控制中的作用机制。研究表明,数码雷管通过微差时间的精准调控和起爆网络的优化设计,能够有效改善爆破碎度、降低大块率、减少爆破振动。以某大型矿山为例,数码雷管精细化爆破方案使矿山开采钻孔数量及炸药单耗降低,爆破质量提高,综合成本降低,同时显著减少了粉尘和噪声污染,为实现绿色矿山建设目标提供了技术支撑。

[关键词]数码雷管;精细化爆破;成本控制

DOI: 10.33142/ect.v4i7.20143

中图分类号: TD235.2

文献标识码: A

Application of Refined Blasting Design of Digital Detonators in Cost Control of Green Building Materials Production

WANG Zhiwei

PowerChina Central China Investment Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract: Digital detonators, with their high-precision delay and programmable characteristics, provide a new path for refined design and cost control in mining blasting engineering. The system elaborates on the theoretical basis and key technologies of fine blasting design for digital detonators, and analyzes its mechanism of action in production cost control. Research has shown that digital detonators can effectively improve blasting fragmentation, reduce block rate, and minimize blasting vibration through precise control of micro delay time and optimized design of detonation network. Taking a large mine as an example, the refined blasting scheme of digital detonators reduces the number of drilling holes and explosive consumption, improves blasting quality, reduces comprehensive costs, and significantly reduces dust and noise pollution, providing technical support for achieving the goal of green mine construction.

Keywords: digital detonator; fine blasting; cost control

引言

传统的爆破技术中,非电导爆管雷管的延期精度受生产工艺的影响较大,段别划分较少,不能达到爆破能量分布精确的目的。数码雷管用电子控制模块来控制起爆,延期精度达到 0.1ms,可以做到逐孔起爆、波形叠加优化。该技术的突破使得爆破设计由原来的依靠经验来决定,变为现在的可以控制和精确的设计方式。在绿色矿山建设的大环境下,怎样借助数码雷管的技术优势达成爆破效果和成本控制的双重目的,成了矿山工程领域的一个重要课题。以某大型矿山为依托,对数码雷管精细化爆破设计的理论框架和技术路线进行系统探究,给同类型的矿山提供可以借鉴的经验。

1 数码雷管精细化爆破设计与成本控制的理论基础

数码雷管精细化爆破设计的关键就是把爆破过程从

经验判断转为定量控制。它的理论基础主要是爆炸力学、岩石破碎学和最优化控制理论这三个方面。爆炸力学和岩石破碎理论给精细化爆破提供物理基础。岩石在爆破作用下有动态的力学响应特性,应力波在岩体中传播、反射、叠加,产生复杂的应力场分布。合理微差时间是由多种因素共同决定的,应力波干涉理论认为相邻炮孔爆炸产生的应力波在岩体里相互叠加会增大破碎效果、提高能量利用率。数码雷管高精度延时使应力波叠加由偶然变成可控,设计者可以依据岩石波速、孔网参数来准确计算延时,从而达到最大破岩能量的目的。最优化理论给爆破参数设计赋予数学手段。爆破效果和孔网参数、装药结构、延时时间之间存在着复杂的非线性关系,传统的办法不能形成精确的解析模型。利用破碎分布模型、能量分布模型等经验公式,结合现场试验数据反演得到以块度分布、振动峰值、

成本函数为目标的多目标优化模型。数码雷管具有可编程性,理论上的最佳方案可以转化成实际的起爆方案,从而达到设计、模拟、验证的闭环控制。

全生命周期成本理论把成本控制的眼光从一次爆破拉到整个生产链条上来。传统的成本控制只关注炸药、雷管的直接消耗,忽略了破碎质量对后面工序的连锁影响。数码电子雷管和传统的雷管相比,从根本上解决了雷管生产、运输、使用、管理过程中存在的安全问题,广泛应用于各种复杂环境下的爆破工程。全生命周期成本理论认为钻孔、爆破、二次破碎、铲装、运输、粗碎都应归入同一个核算体系中,用吨矿综合成本作为评价标准,而不能只看单次爆破耗材最低。

2 数码雷管精细化爆破设计关键技术

2.1 爆破参数优化设计

爆破参数的优化设计属于精细化爆破第一步,涵盖孔网参数、装药构造、炸药单耗等诸多变量间的协调优化^[1]。数码雷管的加入使参数设计由静态优化变成动态优化,延

时时间成了一个独立可调的主要变量。孔网参数的确定要兼顾岩石力学性质、台阶高度、孔径等各方面因素。中深孔爆破合理的微差时间选择影响着爆破块度分布,过大或者过小的微差时间都会使大块率升高,研究表明最优微差时间与岩石波速、孔间距呈正相关。根据上述原理,利用数码雷管的延时调节性能,对岩性不同的区段采用不同的孔网参数及延时组合方式以达到准确匹配的目的。

在装药结构优化方面,采用数码雷管加空气间隔装药、径向不耦合装药等,可以改善能量释放曲线。根据合理的起爆点位置及延时以控制炸药能量的释放过程,即先形成贯通裂隙网络,再扩展破碎区,从而达到较好的破碎效果并控制振动强度的目的。采用数码电子雷管预控界面爆破试验方案之后,采场边坡预控界面清楚可见,半壁孔痕率基本可达 70%以上,超欠挖量基本控制在 32cm 以内。图 1 参数优化设计图,阐明上述参数协同优化的逻辑关系。这一结果验证了数码雷管在轮廓控制方面的显著优势。

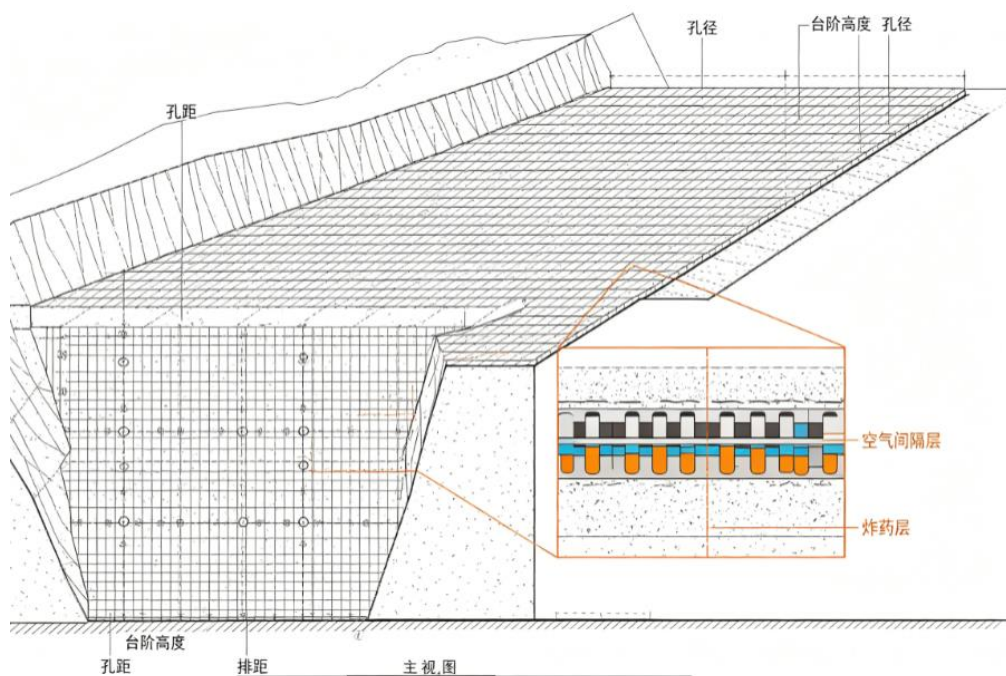


图 1 爆破参数优化设计示意图

2.2 起爆网络精细化控制

起爆网络是数码雷管技术优势的载体,它对孔间延时、排间延时、起爆顺序三个方面的控制都很精细。孔间延时确定属于起爆网络设计的关键部分。研究发现,合理的孔间延时可以使岩石破碎介质的传播时间和应力波作用的时间最优。采用菱形布孔,孔间间隔为单炮孔爆破地震波的半周期,S型串联起爆顺序的微差爆破网络,在水平距

离起爆点 3~18m 处,比原矿场爆破方案下有效应力增大 24.8%。由此可知,利用起爆顺序、延时的组合来提高破碎效果,在保证炸药用量不变的情况下可以得到较好的结果。图 2 是孔间延时、排间延时、起爆顺序三者之间相互关系的可视化展示。

排间延时设计主要是考虑自由面形成时间、岩石抛掷速度。前排炮孔起爆之后,岩石要经过一段时间的位移和

裂隙扩展,才会有新的自由面产生,后排炮孔才能达到最好的破碎效果。数码雷管可以依据前排爆破振动波形以及岩石位移监测数据,对后排延时进行实时调节,排间时序在合适的延时范围^[2]。起爆网络拓扑优化要考虑雷管数量的经济性。大规模露天爆破用全数码方案虽然控制精度高,

但是雷管用量大、成本高。融合延时起爆网络方案采用的是数码雷管和导爆索直接连接的方式,该种融合方式既能保证控制的精确性,又不会造成太大的经济负担,是大规模推广使用的可行方案。

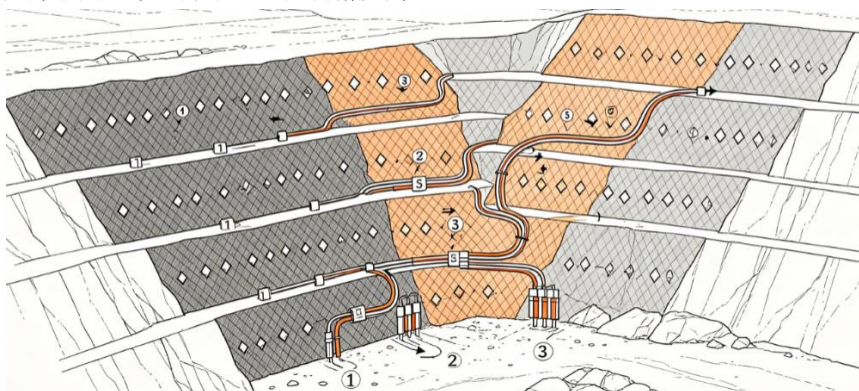


图2 起爆网络精细化控制示意图

3 数码雷管精细化爆破设计对于生产成本控制的作用机理

3.1 降低钻孔与爆破作业成本

钻孔成本占爆破总成本的比例最高,钻孔成本的优化空间主要是孔网参数的合理放大。传统爆破受时间控制,为了保证破碎效果以及减小爆破振动,一般会加大布孔密度,增加钻米数。数码雷管高精度延时,在相同的振动控制条件下,使用更稀疏的孔网参数也可以达到预期效果^[3]。孔间距由5m增大到6m时,每万平方米钻孔数减少约30%,相应的人工、油耗、钻头损耗都随之降低。与此同时,逐孔起爆技术使单孔装药量可以独立设计,克服了由于段别限制造成的超装或者欠装问题,炸药单耗可降低10%~15%,爆破成本降低,经济效益较好。年产千万吨级的大型露天矿山,仅火工品成本一项一年节支可达上百万元。

3.2 提升矿岩破碎质量

破碎质量是评价爆破效果好坏的关键指标,它会直接影响后面工序的效率以及成本。数码雷管精细化爆破就是对能量分布进行优化,从而达到控制块度的目的。理想的爆破块度应该在上下限之间:过大造成二次破碎增多,过小造成能量浪费、粉矿率上升。岩石块度受诸多因素共同作用,国内外许多学者已就合理微差时间对块度分布的控制机理展开研究,经验证明通过延时优化可以使均匀性指数提高15%~20%。数码雷管可以对不同岩性段的孔间延时进行设定,软岩区用较大的延时来保证应力波充分衰减,硬岩区用较小的延时来强化叠加效应,从而达到岩性和爆破参数的动态匹配。

3.3 减少二次破碎及装运成本

二次破碎属于矿山生产中的隐性成本,常常因为爆破效果不好而大大增加二次破碎的工作量。大块矿石需要在采场或者粗碎前进行二次破碎,不但会增加设备、人工等费用,还会占用铲装设备、运输车辆的工作时间。精细化爆破采用块度分布优化,把大块率控制在可以接受的范围之内^[4]。数码电子雷管的延期精度比传统的雷管高得多,同一个区域爆破后岩石块度更加均匀,可以减少二次破碎的成本,不会出现机械设备能耗过高的问题。铲装效率上均匀的块度分布使铲斗充满系数增大,铲齿磨损减小,单斗循环时间缩短。

3.4 降低安全环保治理投入

安全和环保成本在矿山经营中所占的比重越来越大,数码雷管精细化爆破则能很好地解决相关问题。爆破振动控制上,逐孔起爆技术把单段最大起爆药量降到单孔药量水平,振动峰值大大减小。爆破振动峰值大幅度下降,爆区附近充填体得到很好的保护,垮塌现象明显减少。对于靠近村庄、建筑物或者有保护要求的边坡区段,需要使用隔振沟、减震孔等主动防护手段来减小被动式防冲加固体系所受到的压力。粉尘和噪声的控制属于绿色矿山建设的重点考核指标。数码雷管把裸露导爆索的爆炸过程中的噪声、冲击波排除在外,起爆网络可以在地表完成检测和设置,减少人员在爆区的暴露时间。采用合理的填塞长度和覆盖方式可以减少爆破粉尘的产生量,使爆破粉尘产生量降低25%~30%,相应的降尘设施投资和维护费用也随之降低。

4 数码雷管精细化爆破设计应用效果分析

4.1 爆破质量改善效果

某大型矿山使用了数码雷管精细化爆破方案。该矿山主要生产建筑骨料，对爆破碎度有严格的要求，过细的粉碎会降低成品率，块度过大的碎石会增大破碎机的负荷。项目实施前用传统的导爆管雷管逐排起爆，大块率（粒径大于 800mm）一直保持在 5%~8%之间，粉矿率（粒径小于 5mm）大约为 12%，破碎质量不稳定。采用数值模拟和现场试验相结合的方法，得到适合于不同岩性地区的最佳延时组合。坚硬花岗岩区用孔间延时 15ms、排间延时 65ms 的方式，利用应力波叠加来达到效果，风化岩区用孔间延时 25ms、排间延时 100ms 的方式，防止过度粉碎。表 1 给出的是方案优化前后主要爆破质量指标的对比。

表 1 爆破质量指标优化对比

指标	优化前	优化后	变化幅度
大块率 (>800mm)	6.8%	2.9%	-57.4%
粉矿率 (<5mm)	11.5%	8.2%	-28.7%
块度均匀性指数	1.52	1.83	+20.4%

大块率降到 3%以下，粉矿率控制在 8.5%以内，块度分布更集中，符合骨料生产线入料要求。爆破后爆堆形态规整，没有根底残留，为后面铲装作业打下了良好的基础。

4.2 生产效率提升效果

爆破质量提高，就会直接影响到采掘、运输等下游工序。铲装环节，均匀的块度分布使液压挖掘机铲斗充满系数由原来的 0.82 提高到现在的 0.91，单斗有效装载量增大。配合优化后的爆堆形状使挖掘机移动距离变短，单循环作业时间比原来少 10%左右。运输阶段，合格块度避免了溜井堵塞、旋回破卡料状况出现，破碎机台时处理量亦提高。爆破作业本身也受益于精细化设计。逐孔起爆网络可以在地面完成检测和连接，减少了爆区内作业时间。用数码电子雷管网络爆破时，按照逐孔起爆的要求，地表传爆雷管的数量得到了极大的减少，电子手持起爆器可以给网络的检测带来很大的方便。单次爆破的组网时间由原来的 45min 缩短到现在的 25min，检测的可靠性大大提高，消除了由于网络故障造成的拒爆和补爆。

4.3 综合成本控制效果

成本核算是衡量技术经济性的最终标准。该矿山创建了全生命周期成本核算体系，把钻孔、爆破、二次破碎、铲装、运输、粗碎全部纳入统一核算，用每吨合格料综合成本来评价。优化后，综合成本大大降低。二次破碎成本下降明显。由于大块率大幅度降低。炸药、雷管成本同步

降低，数码雷管单价高于传统雷管，但是总用量减少、融合网络应用抵消了单价差异。

4.4 绿色开采效益评价

绿色矿山创建要促使爆破技术朝着环保化、智能化迈进。数码雷管精细化爆破对环境效益和社会效益的贡献也不能忽视。振动控制上，逐孔起爆使最大单段药量减小 25%，爆破振动峰值从原来的 2.5cm/s 降到 1.5cm/s 以下，矿区周边 200m 范围内民房的振动响应都处于安全范围内，没有再出现居民的振动投诉。粉尘控制上配合合理的填塞长度、爆前洒水等措施，爆破粉尘产生量降低，采场环境空气质量有所改善。数码雷管能较好地控制粉尘、噪声，还能利用视频对爆破作业现场进行全方位的监视，很好地实现了绿色环保的爆破要求。数码雷管消除了导爆索网络所造成的连续爆鸣声，对周围环境的声学影响大大减小。从安全效益上来说，数码雷管具有在线检测、身份识别的功能，可以对整个雷管的使用过程进行全方位的控制，从根本上消除雷管的流失、误爆等现象。

5 结语

数码雷管精细化爆破设计依靠高精度延时控制以及起爆网络改进，达到爆破过程定量化、可控化的目的。以某大型矿山为例，对数码雷管技术进行了系统的理论研究，得出结论认为数码雷管技术融合了爆炸力学、最优化理论、全生命周期成本理论，形成了一套完整的理论基础，从技术上讲，爆破参数优化、起爆网络精细化控制是主要的技术，从成本控制上讲，精细化爆破通过降低钻孔作业量、提高破碎质量、减少二次破碎、降低安全环保投入等方式实现综合成本的明显下降，经济效益和环境效益兼得。

[参考文献]

- [1]陈辉,张晓丹,佟晓勇.松软岩体数码电子雷管深孔爆破高效成井研究[J].新疆大学学报(自然科学版中英文),2026,43(1):106-115.
- [2]许振嘉.准楔形复式掏槽及数码电子雷管的爆破试验研究[J].能源与环境,2025(5):52-54.
- [3]李龙福,汪禹,江东平,等.基于数码电子雷管起爆特性的预裂爆破技术试验研究[J].金属矿山,2024(7):152-158.
- [4]贺晓峰.绿色矿山建设中露天台阶爆破技术的应用及发展探究[J].冶金管理,2023(15):28-30.

作者简介：王志伟（1988—），男，高级工程师，浙江大学工学学士，现就职于中国电建集团华中投资有限公司，分公司工程管理部主任，长期从事水利水电、矿山工程管理工作。