

露天矿山中深孔爆破成型质量控制关键技术分析

徐 伟

易普力股份有限公司, 湖南 长沙 410221

[摘要]在露天矿山开采时,深孔爆破属于高效破碎岩石的关键技术,其成型质量对后续铲装、运输和选矿作业的效率、成本有着直接影响。此文在分析深孔爆破技术特点后,探讨影响爆破成型质量的主要因素,如钻孔精度、装药结构、起爆网络设计和地质条件匹配等关键环节。以典型矿山案例为例,利用实测和仿真手段验证多种质量控制技术的适用性与效果,提出将优化爆破参数配置和智能监测手段相结合的质量控制方法。研究显示,系统化控制手段能显著提高爆破成型质量并减少大块率和震动污染,推广价值良好。

[关键词]露天矿山;深孔爆破;成型质量;质量控制;技术分析

DOI: 10.33142/ucp.v2i4.17306

中图分类号: TD235

文献标识码: A

Analysis of Key Technology for Quality Control of Deep Hole Blasting Forming in Open-pit Mines

XU Wei

Explosives Corporation Limited, Changsha, Hunan, 410221, China

Abstract: Deep hole blasting is a key technology for efficient rock fragmentation in open-pit mines, and its forming quality has a direct impact on the efficiency and cost of subsequent shoveling, transportation, and beneficiation operations. After analyzing the characteristics of deep hole blasting technology, this article explores the main factors that affect the quality of blasting forming, such as drilling accuracy, charge structure, detonation network design, and geological condition matching. Taking a typical mining case as an example, the applicability and effectiveness of various quality control technologies are verified through actual measurement and simulation methods. A quality control method combining optimized blasting parameter configuration and intelligent monitoring methods is proposed. Research shows that systematic control methods can significantly improve the quality of blasting forming and reduce the rate of large blocks and vibration pollution, and have good promotion value.

Keywords: open-pit mines; deep hole blasting; molding quality; quality control; technical analysis

引言

矿山资源开发强度不断提高,露天矿山对爆破技术有了更高要求,深孔爆破成型质量尤其如此,这已成为采矿效率的重要制约因素,而传统爆破作业存在孔位偏差大、装药不均匀、起爆时序不合理等问题,进而导致岩体破碎不均匀、爆后大块率高,作业连续性受到严重影响,深入研究深孔爆破成型质量控制技术,提升资源利用率、降低生产成本,有着很大的理论意义和实际价值,本文从技术路径、控制参数和案例实践出发,对成型质量控制的关键技术进行系统分析。

1 深孔爆破成型质量影响因素分析

1.1 钻孔质量对爆破成型的作用

深孔爆破成型质量首要受钻孔质量影响,爆破孔布置的空间几何精度直接与钻孔的准确性和稳定性相关且能量分布的均匀性以及岩体破碎效果也受其影响。实际爆破施工时,若孔位偏差过大、孔深不足或超深、孔斜倾角不一致等问题一旦出现,爆破网络结构就会紊乱,炸药分布不均,能量释放不均匀,从而形成不规则破碎带,使大块率和盲炮率增加,严重影响装载与运输效率。钻孔质量高就会具备孔位精确、孔深一致、孔壁完整这些特点,从而

保障后续装药作业顺利进行,为理想的爆破几何形态奠定基础。爆破设计与实施时,必须使用高精度钻孔设备和实时监测技术,提升钻孔施工的一致性和可控性,加强作业人员的培训和工艺管理,降低人为因素造成的误差,这样才能最大程度保障爆破孔的几何质量。

1.2 装药结构与炸药性能匹配性

要实现能量高效传递和岩体均匀破碎,核心在于让装药结构与炸药性能合理匹配,不同岩性和开采条件对炸药类型、装药方式要求不同,若炸药密度、爆速、起爆敏感度与地质条件不匹配,很容易浪费能量、爆破失败或者局部过爆,破坏岩体完整性,甚至引发次生灾害,而分段装药、空段布设、耦合与非耦合装药等结构形式能有效调整爆破能量释放强度和作用范围,精准控制爆区破碎程度,要根据矿石性质选合适炸药,硬岩环境选高爆速高密度炸药增强破碎力,松软岩体得避免过度破碎,装药时,装填密度和填塞材料质量得严格控制,以保证爆破能量按既定路径传递,实现理想破碎效果,装药设计得结合地质条件和爆破目标全面优化。

1.3 起爆网络设计对爆破效果的影响

爆破能量的时序释放与爆区岩体的解体方向直接由

起爆网络设计的合理性决定,起爆网络设计是实现爆破效果控制的关键技术之一,起爆顺序不合理时能量易聚集或相互干扰,会产生飞石、震动过大、岩体抬起等问题从而影响到爆破的安全性与成型质量。电子雷管延时网络如今被广泛应用,能实现毫秒级延时控制以调整起爆顺序与方向,逐段推进、控制破碎和应力释放过程,进而减少大块率和盲炮现象。网络结构形式有集中起爆、分散起爆、环形与直线式等,要依据工作面形状、岩体节理方向与采矿工艺进行差异化设计,设计时得结合数值模拟手段预测爆区应力场变化以优化延时布置方案,确保起爆顺序和岩体力学响应协调匹配,科学地设计起爆网络可提升爆破效率与成型精度,并且能有效控制环境影响与成本支出。

2 关键控制技术研究与应用

2.1 高精度导向钻孔技术

提升深孔爆破质量控制水平,高精度导向钻孔技术是重要手段,其关键在于钻孔施工时要让孔位、孔深和孔向保持高度一致以最大程度降低钻孔偏差引发爆破失效的风险,传统钻孔法大多靠人工定位与机械导向,地质条件、设备稳定性、操作人员技术水平等因素容易对其产生影响从而使钻孔会有偏移、歪斜、塌孔等状况进而导致装药不均、爆区应力分布失衡,近年来为解决这些问题钻孔导向系统逐渐推广,它把激光测量、GPS 导航和地质扫描技术结合起来并用三维地质建模和自动控制算法让钻机作业全程实现数字化、精细化管理,实时钻进监控系统能监测钻头阻力、钻进速度和孔壁稳定性从而可及时调整钻进参数、预防孔道异常以提高孔位精度,这些高精度导向技术的运用既提高了孔间距与孔向的一致性,也给后续精准装药、控制爆区形态提供重要技术支撑是深孔爆破成型精度提升的基本保障。

2.2 分段装药与填塞优化技术

要实现爆破能量空间调控、提高岩体破碎均匀性,分段装药与填塞优化技术很关键,炸药分布在多个装药段间,再结合合适的空段或者间隔填塞材料,爆破能量就能在纵向呈梯度释放,从而控制破碎范围并减少过爆和欠爆现象。实际应用时,需根据岩体节理裂隙分布、爆破孔深度和爆区结构特征,采用连续装药、阶梯装药或者变距装药的方式,并运用耦合与非耦合装药策略,让能量密度和爆区结构实现最优匹配。填塞材料的选择和布置也很重要,高质量填塞既能确保能量定向释放,又能抑制气体外泄,还能防止飞石和塌孔这些安全隐患,膨润土、湿沙和专用封堵剂是常用填塞材料,要根据孔径大小、岩体稳定性以及施工便利性灵活选用。

2.3 延时起爆技术与时序优化

控制爆破能量释放顺序让岩体有序解体,延时起爆技术与时序优化是核心手段,与传统毫秒雷管起爆方式相比,现代电子雷管技术能精确到微秒级进行延时控制,极大提高了起爆时序的灵活性和可靠性。爆破作业时合理设计延时时间和起爆方向,让相邻爆破孔在应力释放窗口期依次

起爆,可形成理想的叠加波场和破裂路径,实现岩体均匀破碎并减少大块形成和次生振动。延时设计要综合考虑孔距、岩性、节理方向、孔深等参数,还要利用数值模拟手段预测应力集中区以科学配置延时网络结构,梯形、对角线、同心圆、单向推进式等是常见的延时布置形式,适用于不同形状和规模的工作面。起爆控制上采用智能起爆控制系统,可实现多段起爆同步协调,避免误爆和起爆失败风险。

3 智能化监测与质量评估手段

3.1 爆前三维孔位检测系统

保障深孔爆破几何精度、实现全过程质量控制的关键环节是爆前三维孔位检测系统。传统爆破施工时设计的孔位空间位置与实际的常有偏差且复杂地质条件下偏差更明显,这直接影响装药结构和起爆网络的合理性,而引入三维激光扫描、地质雷达、钻机定位系统和全站仪集成技术就能对已钻孔位精准三维建模以得到孔深、孔倾角、孔距和偏移数据,进而能及时修正设计方案、优化装药布置。这个系统一般结合数字矿山平台快速处理数据、动态可视化数据,让工程师在爆破前准确掌握孔网状态以防止孔位误差造成爆破异常,部分高端系统还有钻进过程同步跟踪、偏差报警功能从而能对孔位质量进行全过程自动化管控。应用这类技术可提升钻孔和爆破设计的一致性并为后续精准施工和效果预测提供科学依据,这是智能爆破控制体系的重要组成部分。

3.2 爆破过程振动与声波监测

评估爆破能量释放效果、掌握爆区反应过程以及预警环境影响的技术手段之一是爆破过程的振动与声波监测系统。爆破瞬间大量能量释放并以振动波和冲击波向周围介质传播,设备、人员和环境可能受影响,通过布设地震检波器、声波传感器与高速采集仪,在爆区及周边重点区域设置监测点,就能实时记录爆破振动强度、频率、传播速度和波形特征,这些数据可判断爆破能量是否达标、爆破时序是否准确,也能分析爆后岩体结构变化与地质响应特征,有助于爆区稳定性评估,结合爆破声波频谱分析还可识别盲炮、过爆等隐患事件,实现爆破安全实时诊断与控制,爆破振动监测数据是环保评估的关键依据,能让矿山企业满足政府监管和周边居民安全距离要求。

3.3 爆后岩体成型质量数字化评估

检验深孔爆破效果的直接方式是评估爆后岩体成型质量,传统上靠人工观察和简易测量难以全面准确地反映实际破碎状态,数字化矿山技术发展起来后人工经验逐渐被数字化评估手段取代而成为成型质量控制的主流方法,三维激光扫描建模、无人机航测、图像识别和点云分析等典型手段能快速获取爆后岩堆的形貌、粒径分布和爆堆轮廓等数据并建立高精度数字模型,再和爆前设计模型对比分析以定量评估破碎效果、大块率、堆积均匀性和装载效率,借助图像智能识别算法和颗粒分析软件可自动识别岩

块尺寸分布避免人为误差从而提高评估效率和客观性,数字化评估结果还能反过来指导钻孔优化、装药调整和延时修正以构建“设计-施工-评估-优化”闭环控制体系。

4 典型案例分析与技术优化建议

4.1 某铁矿深孔爆破质量控制案例

某大型露天铁矿长期受岩体坚硬、节理发育不均、钻孔精度不够等问题困扰,导致爆破成型质量不稳定,爆堆大块率高、装药效率低、爆破振动扰民等状况常出现,深孔爆破成型质量控制技术体系引入后,矿山使用高精度导向钻机系统并结合三维孔位测绘手段,使爆前钻孔偏差差控制在 $\pm 10\text{cm}$ 以内,还引入分段装药技术,不同岩性段采用不同耦合系数的装药结构,在起爆设计里应用电子雷管延时系统以优化起爆方向和时间序列,使爆堆能逐层推进式崩落,监测数据显示,改进后单次爆破爆堆平均大块率从18%降到6.5%,装药效率提高约22%,振动峰值降30%,整体作业效率和安全水平显著提升,这案例说明全过程控制手段协同使用能有效提高深孔爆破作业的可控性和成型质量,经济与技术效益良好。

4.2 爆破参数调整与经济效益对比

深孔爆破作业里要想实现技术经济协调发展,优化与调整爆破参数起着决定性作用,以这个铁矿为例选优化前后典型爆破参数对比,原方案孔距3.5m、排距4.0m、单孔装药量180kg并用毫秒雷管起爆,优化后孔距微调至3.0m、排距调到3.8m且装药结构用分段非耦合方式、爆速提到5500m/s并换用电子雷管系统,对比数据表明优化方案单次爆破材料成本虽提高约12%,但装药效率提高、破碎粒径均匀、运输机械磨损减少且每吨矿石综合采装成本整体降低约8.6%,爆破后需二次破碎的矿块数量减少47%且设备停机与维护时间也减少,长远运营看参数调整的综合效益远超初始投入,这证明科学的爆破参数配置不仅提高作业质量还有明显经济优势且在类似地质条件下值得推广应用。

4.3 控制技术推广应用面临的问题与对策

深孔爆破质量控制技术在工程实践中成效显著,但在

推广应用时却有不少瓶颈,部分中小型矿山技术底子差,没有高精度钻机、三维测量设备、电子雷管系统,完整的智能爆破体系根本搞不起来,而且一线作业人员对新技术学得不好,理解有偏差,操作也不规范,影响技术效果的稳定性和重复性,高端装备和智能系统一开始投入很多钱,企业做短期决策时会犹豫,要解决这些问题可从三个方面着手:政府和行业组织要制定激励政策,让矿山企业赶紧更新智能化设备;要加强技术培训,让作业人员更懂爆破控制技术并提高操作能力;要推进“爆破+数字矿山”融合发展,利用数据采集、模型分析和智能决策平台降低技术门槛并提高作业标准化程度。

5 结语

深孔爆破成型质量得到控制是露天矿山开采效率与安全水平提升的关键,钻孔精度控制、装药结构优化、延时起爆设计和智能化监测手段协同应用能显著改善爆破效果、降低成本、减少对环境的影响,典型案例证明控制技术有实用价值且能带来经济效益,推广时虽有技术和管理方面的挑战,但装备升级、人员培训加上政策支持就能有效推动该技术普及应用,以后这技术在数字化矿山建设里将起到更核心的作用。

【参考文献】

- [1]李方.提高露天矿山深孔台阶爆破质量的方法措施[J].世界有色金属,2024(20):216-219.
 - [2]户方远.某露天矿山深孔爆破改进实践[J].世界有色金属,2024(19):229-231.
 - [3]刘雅弟.基于长九神山露天矿山深孔台阶爆破参数优化与应用研究[D].安徽:安徽理工大学,2023.
 - [4]文家荣.露天矿山深孔台阶爆破技术的现状与发展趋势[J].中国金属通报,2023(4):4-6.
 - [5]李胜林,梁书锋,李晨,刘殿书.露天矿山深孔台阶爆破技术的现状与发展趋势[J].矿业科学学报,2021,6(5):598-605.
- 作者简介:徐伟(1983.10—),武汉科技大学,采矿工程,就单位:易普力股份有限公司,担任部门副职,职称级别:爆破工程中级工程师。