

露天矿山爆破质量与安全协同优化策略研究

余 鹏 方臆丞

四川芙蓉川南建设工程有限公司 四川 宜宾 644000

【摘要】：随着我国社会经济持续发展，对矿产资源的需求量日益增长，露天矿山作为资源供给的重要基地，其开采效率与安全性备受关注。爆破作为露天矿山开采的核心工艺环节，其质量优劣直接决定了后续采装、运输及破碎等工序的作业效率、资源回收率、生产成本以及整体作业安全。本文系统梳理了露天矿山常用爆破技术的原理与适用条件，深入剖析了爆破参数对开采质量与安全的多维影响机制。研究结合磨儿沟石灰石采石场的现场试验数据，从爆破参数精准设计、智能化技术融合、人员素养提升及管理体系构建等多个维度，提出了爆破质量与安全协同优化的系统策略。结果表明，通过科学优化爆破方案、精细化控制爆破参数、并辅以现代信息技术与严格的安全管理，可显著提升爆破破碎效果，有效降低大块率与爆破振动等负面效应，最终实现露天矿山安全、高效、绿色与经济的可持续发展目标。

【关键词】：露天矿山；爆破质量；爆破安全；参数优化；协同控制；智能爆破

DOI:10.12417/2705-0998.26.06.025

1 引言

露天矿山开采是我国矿产资源供给的主要方式，其生产规模与效率直接影响国家资源战略安全。在这一生产链条中，爆破作业作为岩体破碎与剥离的首要环节，其质量与安全性构成了整个开采过程的基石。优质的爆破效果不仅能显著提升采装效率、降低二次破碎成本，更能从源头上保障边坡稳定、控制飞石与振动危害，从而实现对人员、设备和周边环境的有效保护。然而，随着浅部资源的日益枯竭，露天开采正逐步转向深部、复杂地质条件区域，传统的爆破方法与粗放的管理模式已难以满足新时期对“安全、高效、绿色”开采的严苛要求。因此，探索爆破质量与安全之间的内在联系，并寻求二者的协同优化路径，具有极其重要的理论价值与现实意义。本文立足于当前露天矿山爆破技术发展现状，融合爆破质量控制和安全管理双重视角，旨在构建一套系统化的协同优化策略，为提升我国露天矿山整体开采水平提供有益参考。

2 露天矿山常用爆破技术及其特征分析

爆破技术的合理选择是保障爆破效果与安全的前提。当前，露天矿山根据地质条件、环境要求及生产目标，主要采用以下几类爆破技术。

2.1 传统钻爆法

该方法技术成熟、操作简便、经济性高，是中硬岩层中应用最广泛的技术之一。其典型技术参数包括：钻孔深度 10-15m，孔径 90-150mm，炸药单耗约为 0.3-0.6kg/m³，孔网参数（孔距与排距）一般控制在 4-7m 之间。该方法的有效性高度依赖于对现场岩性的准确判断与参数的适时调整^[1]。

2.2 控制爆破技术

为应对复杂环境与高安全标准要求，控制爆破技术应运而生，其核心在于对爆破能量释放与破碎过程的精确控制。

微差爆破：利用毫秒级延时雷管，按既定顺序起爆炮孔，

使炮孔间产生应力叠加与岩石碰撞，从而显著降低爆破振动与飞石，并改善破碎粒度^[2]。

预裂爆破：在主爆区爆破前，沿设计轮廓线先行爆破形成一条贯穿裂缝。该裂缝能有效阻隔主爆区应力波和爆生气体对保留岩体的破坏，是维护边坡稳定性的关键技术^[3]。

光面爆破：通过精确设计周边眼的间距、装药结构及不耦合系数，使爆破后形成的岩面平整光滑，最大限度地减少超欠挖，保护围岩完整性。其不耦合系数通常控制在 1.2-2.5 之间，装药密度需根据岩体硬度（软岩 70-120g/m，硬岩 150-250g/m）进行精细化设定^[4]。

2.3 电子雷管起爆系统

该系统采用数码电子雷管进行网路布置，可避免杂散电流、静电和射频电等电磁干扰可能引发的早爆事故，极大地提升了在雷雨天气、高压线附近等复杂电磁环境下作业的安全性。同时，其高精度的延时性能为优化爆破效果提供了保障^[1]。

2.4 深孔微差爆破技术

该技术将深孔钻孔与微差起爆相结合，通过合理的孔网布置与起爆时差设计，利用岩体之间的相互挤压和碰撞作用，不仅能够有效降低地震效应，还能改善爆堆形态，降低大块率，特别适用于大规模、高效率的深部开采场景^[4]。

3 爆破质量对开采效率与安全的影响机理

爆破质量是影响矿山整体经济效益与安全状况的决定性因素之一，其影响贯穿于从岩体破碎到矿石运输的全过程。

3.1 爆破质量的核心评价体系

一个全面的爆破质量评价体系应包含以下关键指标：

大块率：是衡量岩体破碎程度的最直接指标，过高的大块率将严重制约装运设备效率，并增加二次破碎成本与安全风险^[1]。

爆堆形态与松散度：理想的爆堆应集中、松散适度，便于电铲高效采装。

超欠挖量：反映了爆破轮廓的控制精度，直接影响边坡稳定性、资源回收率与后续支护成本^[1]。

爆破有害效应：包括地震波、空气冲击波、飞石和噪音等，这些是评估爆破作业对周边环境和设施安全影响的核心依据^[4]。

3.2 关键爆破参数的作用机制

炸药类型与性能：炸药的爆速、密度、抗水性等性能应与其所爆破的岩性及环境条件相匹配。例如，ANFO 炸药成本低、威力适中，但在含水炮孔中需采用乳化炸药或水胶炸药等抗水品种^[1]。

钻孔参数：孔径、孔深、孔距和排距共同决定了爆破能量在岩体中的分布密度与作用范围。过大的孔网参数会导致能量不足，产生大块；过小则可能造成过度粉碎和能量浪费^[4]。

装药结构与起爆技术：采用分段装药、空气间隔装药等结构可以优化能量分布，改善上部岩体的破碎效果。而起爆顺序和延时间隔的精确设计，则是控制爆破振动、引导岩块抛掷方向的关键^[4]。

3.3 爆破质量与安全的耦合关系

低质量的爆破往往是安全事故的诱因。例如，不合理的参数设计可能导致爆炸能量释放失控，引发远距离飞石，危及人员设备；过大的爆破振动可能诱发边坡潜在滑面的活化，造成滑坡事故；而盲炮、拒爆等处理不当，则构成极大的瞬时安全威胁^[3]。因此，提升爆破质量本身就是保障矿山安全的最有效措施之一。

4 影响爆破安全的关键因素深度解析

除了爆破质量本身，以下因素也直接制约着爆破作业的安全水平。

4.1 爆破参数设计的科学性与适应性

爆破设计并非一成不变，必须建立在对矿区地质构造、岩体力学特性、节理裂隙发育情况充分勘察的基础上。设计人员若仅凭经验而忽视具体地质条件的动态变化，极易导致参数选择失当，例如底盘抵抗线过大造成根底，过小则导致飞石过远，从而埋下安全隐患。

4.2 作业人员的专业素养与安全意识

爆破作业具有极高的专业性和风险性。操作人员不仅需要熟练掌握装药、填塞、连线等工艺流程，更必须具备强烈的安全责任意识 and 应对突发状况的能力。任何疏忽，如填塞长度不足、警戒不到位，都可能酿成严重事故。

4.3 爆破器材的可靠性与管理规范性

电子雷管、导爆索、炸药等器材的性能质量与存储、运输、使用环节的规范性直接关系到爆破的成败与安全。劣质、过期或受潮的器材极易导致拒爆、半爆，而管理混乱则可能造成器材流失，引发社会安全问题。

4.4 环境与地质条件的动态变化

水文地质条件（如地下水、软弱夹层）、气候条件（如温度、雷电）的突变，都会对爆破效果与安全构成挑战。例如，雨季爆破需重点关注炸药的防水和边坡的稳定性。

5 爆破质量与安全协同优化的系统策略

为实现爆破质量与安全的统一提升，需采取多措并举的系统工程策略。

5.1 推动爆破参数的精准化与动态优化

以磨儿沟石灰石采石场的优化实践为例，通过系统的现场试验与数据分析，对关键爆破参数进行了如下调整（效果对比如表 1 所示）：

将台阶高度从 12m 适度降低至 10m，提高了炸药能量利用率。

将钻孔直径从 140mm 优化至 110mm，并缩小孔网参数（从 5.6m×5m 调整至 4.6m×4m），增强了岩石的破碎均匀性。

严格控制单位炸药消耗量与超深，降低了爆破成本与振动强度。

优化后，大块率从 25% 显著降至 9%，爆破振动速度从 23mm/s 降至 18mm/s，在提升效率的同时，大幅增强了作业安全性^[1]。

表 1 爆破参数优化实施效果对比

爆破参数	优化前	优化后	变化幅度	效果评价
台阶高度/m	12	10	-16.67%	提高炸药利用率，改善破碎效果
钻孔直径/mm	140	110	-21.42%	优化能量分布，控制飞石
孔距×排距/m	5.6×5	4.6×4	-17.86%/-20.00%	增强破碎均匀性，降低大块率
单位炸药消耗/(kg/m ³)	0.42	0.38	-9.52%	降低直接爆破成本
大块率/%	25	9	-64%	显著提升后续工序效率
振动监测速度/(mm/s)	23	18	-21.74%	提升周边环境与设施安全性

5.2 深度融合智能化与信息化技术

将大数据、人工智能、物联网等现代技术引入爆破作业全过程。

智能设计：利用爆破模拟软件，基于地质模型进行参数仿真与方案优选。

智能监测：布置物联网传感器网络，实时采集爆破振动、噪音、飞石轨迹及空气冲击波数据，建立爆破有害效应数据库^[4]。

智能反馈：通过数据分析，构建爆破效果智能评估系统，为下一次爆破设计提供精准的反馈与优化建议，形成“设计-施工-监测-反馈”的闭环智能管理。

5.3 构建高素质专业化人才队伍与责任体系

强化培训与认证：实行严格的爆破作业人员持证上岗与周期性复训制度，内容涵盖新技术、新工艺及应急救援知识。

落实安全生产责任制：明确从爆破设计师、现场技术员到安全员、爆破员的各级职责，将安全指标与绩效考核挂钩，激发全员主动安全意识^[4]。

5.4 完善应急救援与风险预控机制

制定专项应急预案：针对盲炮、早爆、边坡失稳等典型风险，制定详尽的应急处置流程，并定期组织基于VR技术的模拟演练，提升人员实战反应能力^[4]。

参考文献：

- [1] 王文恒,霍雨,薛开纪.爆破质量对露天矿山的开采影响及优化策略探讨[J].江西煤炭科技,2025(2):99-101.
- [2] 李明元,姚金宝.露天矿山微差爆破电子雷管短时间设置在降振中的实践应用[J].西部煤矿工程,2024,36(07):88-91.
- [3] 龙跃聪.露天矿山开采爆破与安全问题的研究[J].世界有色金属,2021(13):100-101.
- [4] 高永胜.露天矿山爆破技术对矿山安全的影响[J].世界有色金属,2025(10):120-122.

建立风险预控体系：推行爆破作业前的安全条件确认制度，对人员、设备、环境进行系统性风险辨识与评估，将事故隐患消除在萌芽状态。

6 结论与展望

(1) 协同优化是必然路径：爆破质量与安全是露天矿山高效开采不可分割的一体两面，必须通过系统性的协同优化策略，实现二者从“矛盾”到“统一”的转变。

(2) 精准化与智能化是核心方向：基于地质条件的爆破参数精准化设计是基础，而与现代信息技术的深度融合，实现爆破过程的数字化、智能化管控，是未来提升爆破质量与安全水平的必然趋势。

(3) 管理与技术并重是根本保障：再先进的技术也需通过人的规范操作和严格的管理制度才能发挥作用。因此，构建涵盖技术、人才、管理、应急的“四位一体”安全保障体系，是实现矿山长效安全生产的根本。

未来，随着智能传感、5G+通信、岩石破碎机理等研究的不断深入，露天矿山爆破将向着更加“安全、精准、低碳、高效”的方向演进，为我国矿业的高质量发展提供坚实的技术支撑。