

矿山爆破作业中飞石控制技术与安全防护措施

戚洛瑞

四川路桥矿业投资开发有限公司 四川 成都 610000

【摘要】：矿山爆破作业中飞石飞溅会对人员和设备造成严重威胁，直接影响生产安全与效率。飞石产生的主要因素包括爆破参数不合理、岩体结构复杂以及现场防护措施不足。采用优化炸药布置、控制爆破段长、设置防护挡板及安全警示系统等技术，可以有效减小飞石飞溅范围和速度，同时提升现场安全管理水平。实践表明，飞石控制技术与防护措施的综合应用能够显著降低事故发生率，改善作业环境，确保矿山爆破安全稳定进行。

【关键词】：矿山爆破；飞石控制；安全防护；作业安全

DOI:10.12417/2705-0998.26.08.023

引言

矿山爆破过程中，飞石飞溅速度快、能量大，常造成人员伤亡和设备损坏，成为爆破作业中最危险的环节之一。飞石产生与爆破设计、岩体结构及作业环境密切相关，缺乏有效控制易导致事故频发。通过科学的爆破参数优化、飞石控制技术应用以及安全防护措施配置，可以显著降低飞石危害，实现作业安全和效率双提升。深入研究飞石运动规律及防护方法，有助于指导现场操作和安全管理，为矿山爆破提供实用技术支撑。

1 飞石产生规律与影响因素分析

1.1 岩体结构特征对飞石运动的影响

岩体的结构特征直接决定了爆破过程中飞石的运动路径与能量分布。裂隙发育程度、节理方向及岩体密度影响应力传递和爆破能量释放方式，裂隙密集区域能量迅速集中，导致飞石速度增加并形成不规则抛射轨迹。岩体的层理、孔隙率及风化程度也改变破碎块体的质量和体积，影响飞石飞行距离和散布范围。对不同岩性采取精准的能量布置和支护策略，可以有效引导飞石运动方向并降低危险性。岩体非均质性会产生局部高应力区，使飞石运动呈现明显的非线性和局部集中效应，需要在设计阶段充分评估岩体特征对飞石运动的影响。

1.2 爆破参数与飞石产生关系

爆破参数是影响飞石生成和扩散的重要因素。炸药装填量、孔径布置、孔距及爆破顺序直接控制应力波的传递方式和岩体破碎程度。过量装药会造成岩体过度破碎和高能飞石形成，而不足装药则可能产生块体不完整破碎，飞石运动呈现随机性和不可控性。延时爆破与分段爆破技术能够调节应力集中，分散能量释放，从而降低飞石的速度和抛射高度^[1]。爆破深度和孔径角度影响破碎块体的受力状态和动能转换效率，合理参数设计有助于控制飞石分布范围并提升现场安全水平。在工程实践中，精细化参数调整成为飞石控制的重要手段。

1.3 现场环境对飞石扩散的作用

现场环境条件对飞石运动轨迹和分布范围产生显著影响。地形起伏、地表阻挡和周边障碍物改变飞石飞行路径，造成局

部能量集中或偏移。空气动力学因素，如风向、风速和气压差异，能对小块飞石产生偏移作用，影响散布规律。作业区空间布局决定飞石可能进入区域的范围及潜在危险程度，边坡角度与开采断面高度直接影响飞石抛射距离和落点位置。环境温度和湿度对岩体脆性及破碎模式存在调节作用，从而间接影响飞石形成与扩散。综合分析环境条件与爆破动力特性，有助于预测飞石运动趋势，为防护措施设计提供科学依据。

2 爆破设计优化技术应用

2.1 炸药布置方式改进

炸药布置方式是控制爆破效果和飞石扩散的核心环节，对岩体破碎模式和飞石运动方向具有决定性作用。优化炸药孔径、孔深及装药量分布，可以使能量释放均匀，避免局部过度破碎和高能飞石形成。孔间距、孔列排列及装药密度设计必须根据岩体结构、节理分布和层理走向进行精准匹配，使应力波沿预定方向传递，控制飞石抛射路径。多孔分布策略通过分散爆破能量，降低岩块飞行速度和高度，同时减少不规则块体生成。非均质岩体区域需要采用差异化布药策略，将高能区域与低能区域能量调控匹配，避免局部能量集中造成危险飞石。辅助措施如爆破孔顶封闭、底部缓冲层填充和孔间衬管技术可以进一步引导岩体破碎方向，实现能量的合理转化。

2.2 分段爆破与延时技术优化

分段爆破与延时技术是减少飞石飞溅和改善破碎效果的关键手段。通过将长孔或大断面岩体分段爆破，能量释放被分解为若干阶段，降低瞬间能量集中导致的高能飞石生成概率。延时爆破采用精确的起爆延时序列，使爆破冲击波按预定顺序传递，削弱岩块瞬间加速度，同时引导破碎块体沿安全方向运动。延时间隔必须结合岩体结构特征、节理发育及孔距布置精确计算，以避免波能干扰或叠加造成局部高能块体飞溅。对复杂断层或非均质岩体，可采用多级延时布控策略，形成缓冲破碎区域，使能量逐层释放并实现破碎均匀化。分段与延时技术结合应用，不仅控制飞石运动高度和飞行距离，还能够降低爆破震动对周边结构的冲击，改善作业环境安全^[2]。优化的延时

序列和分段方案为高风险开采区提供安全保障，同时兼顾生产效率与破碎质量的综合提升。

2.3 爆破参数合理化控制方法

爆破参数控制是飞石生成管理的核心技术环节，包括装药量、孔径、孔深、孔距及起爆顺序等要素。合理化控制通过匹配岩体强度、密实度和节理特征，确保爆破能量沿设计方向传递，降低不规则飞石生成。装药量过大易形成高能飞石，过小则岩块破碎不充分，参数调整需要基于动力学模型和岩体力学特性计算优化。孔径与孔深比例直接影响冲击波在岩体内传播效率，合理设计可减少岩块块体质量过大而产生飞行惯性。孔距与孔列排列需根据应力分布分析进行调整，优化孔距可以调节局部应力集中，控制岩体破碎范围和块体飞行路径。起爆顺序设计需结合延时技术，使能量在空间和时间上均匀释放，防止高能集中区出现危险飞石。参数合理化控制方法通过计算模拟、实测反馈和持续优化，实现飞石运动可预测性，为现场安全防护提供技术支撑，同时提升爆破效率与破碎均匀性，为高风险矿山开采提供科学依据。

3 飞石控制措施的工程实践

3.1 防护挡板与安全屏障设置

防护挡板和安全屏障是飞石控制的关键工程措施，其设计必须结合飞石运动规律和能量分布进行科学布置。挡板材料需具备高强度、高韧性和耐冲击性能，以吸收和分散飞石动能，减缓飞石冲击速度，降低破坏力。安全屏障的高度、厚度及排列方式需依据岩体破碎块体的飞行距离和角度精确计算，以形成有效的飞石拦截区。多层防护结构能够在不同高度和方向形成阻挡屏，增强整体防护效果。固定与可调节结合的屏障设计，使其能够适应不同爆破段、不同岩性及环境条件下的飞石分布变化。支撑结构与地基设计需保证在高压冲击下不产生位移或倒塌，确保长期稳定性。

3.2 地表和周边作业区保护措施

地表及周边作业区保护措施通过分区管理和工程隔离技术，形成有效的飞石防护体系。地表覆盖措施可采用缓冲层和岩屑覆盖，将飞石动能在接触地面时有效消耗，减少反弹和二次飞溅风险^[3]。周边作业区通过设置安全隔离带、物理屏障和缓冲区，确保飞石无法进入人员和设备集中区域。作业区布局设计需结合地形坡度、断面高度及周边障碍物，优化飞石运动路径和落点分布。防护措施的材料选择和厚度设计应与爆破能量和岩石强度相匹配，实现动能有效衰减。管理手段与工程措施结合，可在不同爆破段灵活调整保护范围和防护强度，满足高效率作业同时保证安全。系统化的地表与周边保护措施能够形成多层防护屏障，实现对飞石的全过程控制，为矿山爆破作业提供安全保障和可持续管理模式。

3.3 现场监测与风险评估技术

现场监测与风险评估技术通过实时数据采集和分析，实现对飞石运动趋势和潜在危险的动态控制。高精度测量仪器可捕捉岩体破碎、飞石抛射速度和方向，形成完整的飞石分布图谱，为防护设施布置和爆破参数调整提供依据。基于监测数据的风险评估模型能够量化不同区域和作业条件下的危险等级，预测高风险区并指导现场管理措施。结合地理信息系统和动力学仿真技术，可进行飞石运动模拟，优化屏障位置、缓冲层厚度及作业区布局。监测系统与爆破控制方案联动，实现动态反馈与参数修正，降低飞石非预期扩散的可能性。风险评估技术的应用不仅提升作业安全性，还可形成数据闭环，为持续优化飞石控制技术提供科学依据，实现工程实践与技术管理的深度融合。

4 安全防护体系建设

4.1 作业人员防护装备配置

作业人员防护装备配置是保障爆破作业安全的基础措施，需要根据飞石运动特性和作业环境进行科学选择与布局。防护装备应具备高强度抗冲击性能，能够有效抵御高速飞石冲击，同时兼顾舒适性和灵活性，以保证作业效率。头部、防护面罩、身体和四肢防护装置需满足国家安全标准和行业规范，材料应具备轻质高韧性，能够吸收和分散冲击能量。装备配备应结合作业区域风险等级，重点防护高危区域的作业人员。防护装备管理体系应包括定期检查、维护和更新，以确保长期有效性。

4.2 安全警示与隔离管理

安全警示与隔离管理是控制飞石风险扩散的关键环节，通过明确作业边界、设置警示标识和隔离区域，实现危险源的可视化和作业区的物理隔离。警示标识应采用高可视性设计，结合颜色、图形和光源提醒，确保作业现场各区域风险等级清晰可辨。隔离管理通过设置安全围栏、缓冲区和临时隔离带，将飞石运动范围与人员、设备活动区域有效分开，减少误入高风险区域的可能性^[4]。作业计划应与隔离措施协同设计，根据不同爆破段和环境条件动态调整安全区域范围。结合监测技术和现场巡视，能够实时评估隔离效果和警示措施有效性，保障飞石防控体系的动态执行。系统化安全警示与隔离管理为爆破作业提供空间安全控制基础，降低非预期风险扩散的可能性。

4.3 操作规程与培训制度

操作规程与培训制度是确保安全防护体系高效运行的核心保障，通过明确作业流程、风险控制措施和应急操作要求，规范爆破作业全过程。操作规程应包括飞石控制技术应用、个人防护装备使用、爆破参数调整和现场安全管理标准，形成制度化、可操作的管理手册。培训制度通过理论讲解、技能演练和模拟应急操作，提高作业人员对飞石风险的识别能力和防护操作能力。培训内容需结合新型飞石控制技术和防护措施的应用

用,强化实操能力和现场适应性。定期复训和评估机制保证操作规范落实到位,防止因操作不当导致飞石事故。通过严格操作规程和系统化培训,能够形成技术措施与人员管理的双重防护,提升矿山爆破作业安全水平,实现飞石防控目标的有效落地。

5 综合评价与应用分析

5.1 飞石控制技术的实际效果

飞石控制技术在矿山爆破中通过优化炸药布置、分段爆破和延时技术实现对岩体破碎和飞石运动的精确调控。技术应用能够显著降低高能飞石形成概率,使飞石飞行距离和散布范围可预测化。通过动力学模拟与现场监测数据对比,发现能量分布均匀的爆破方案减少了岩块的非规则运动,提高飞石控制精度。多层次的技术措施有效引导飞石沿安全方向落地,降低作业区危险暴露率,为高风险开采段提供可靠的安全保障。技术实践显示,控制策略与实际工程条件的匹配程度直接决定飞石防控效果和现场安全性。

5.2 安全防护措施实施效果

安全防护措施在矿山爆破作业中通过防护屏障、隔离区和警示标识形成物理和视觉阻隔,对飞石运动起到关键约束作用^[5]。实施效果显示,多层防护结构能够有效吸收飞石动能并控

制落点分布,缓解冲击对作业区和设备的潜在破坏。隔离带和缓冲区的科学布置提高作业区空间安全等级,减少人员暴露风险。结合监测与动态调整,安全防护措施能够适应不同岩性和爆破段特性,实现持续有效防护。系统性实施使飞石控制与作业管理紧密结合,确保爆破过程高效、安全开展。

5.3 技术与管理的综合提升分析

技术与管理的综合提升通过飞石控制方案与安全防护体系的协同应用,实现矿山爆破作业的整体风险管控。爆破设计优化与防护工程措施结合,使飞石运动规律可预测,飞石危险区域得到有效控制。现场监测与动态风险评估支持管理决策,实现技术参数和防护设施的实时调整,增强系统适应性。操作规程与培训制度确保管理措施与技术手段高效执行,形成全流程闭环管理。综合提升不仅改善作业安全性,还优化作业效率和破碎质量,为矿山爆破提供技术管理一体化支持,形成可持续安全管理模式。

6 结语

飞石控制技术与系统安全防护措施是确保矿山爆破作业安全与效益的重要支撑。从飞石运动规律分析、爆破设计优化到工程实践落实与安全体系建设,构建了完善的技术与管理链条,能够有效限制飞石危害范围,提升作业安全性与操作精度,为矿山爆破安全治理提供可操作的工程思路和技术依据。

参考文献:

- [1] 杨飞江.采矿工程中爆破技术的优化策略与安全控制研究[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(10):107-110.
- [2] 许宏东,吴茜梅,李志军.矿山爆破作业中爆破振动控制技术探究[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(3):065-068.
- [3] 李文一,张岩,魏繁,孙礼霖,王哲.逐孔爆破技术在大型石灰石矿山开采中的研究与运用[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(2):010-013.
- [4] 杨威江.矿山岩土台阶爆破施工控制技术分析[J].中国厨卫,2025,24(10):301-303.
- [5] 陈斌.矿山爆破作业,时刻紧绷“安全之弦”[J].广东安全生产技术,2025(7):42-43.