

露天矿山开采爆破与安全研究

牛立洲

中国建筑材料工业建设西安工程有限公司桃江分公司 湖南益阳 413000

摘要: 露天矿山开采中, 爆破技术是关键环节。本文阐述爆破原理、方法分类及参数设计理论, 分析安全风险来源、传播机制与评价方法, 构建安全控制技术体系, 提出人-机-环系统分析、安全绩效评价等管理模型, 并探讨智能化管理趋势。旨在提升露天矿山爆破安全水平, 保障人员与设备安全, 实现矿山开采的可持续发展。

关键词: 露天矿山; 爆破技术; 安全风险; 安全控制; 智能化管理

引言

随着矿产资源需求增加, 露天矿山开采规模扩大, 爆破作业成为重要手段。然而, 爆破作业存在诸多安全风险, 如早爆、拒爆、飞石、振动等, 威胁人员与设备安全, 影响周边生态环境。深入研究露天矿山开采爆破与安全问题, 构建科学的安全管理体系, 提升爆破作业安全性, 对保障矿山安全生产、促进资源可持续利用具有重要意义。

一、露天矿山爆破技术基础

(一) 爆破原理与作用机制

炸药能量释放包含物理化学两个过程。化学过程表现为炸药受外界激发后快速发生分解反应, 释放大热量与高压气体, 形成高温高压的爆轰产物; 物理过程则是这些爆轰产物以极高速度向周围介质膨胀, 推动周围岩体产生运动^[1]。岩石破碎依赖应力波传播与气体膨胀的协同作用。应力波首先作用于岩石, 在岩石内部形成裂隙; 随后高压气体涌入裂隙, 使裂隙进一步扩展、贯通, 最终实现岩石破碎。自由面与最小抵抗线对爆破效果影响显著。自由面为岩石破碎提供了移动空间, 自由面数量越多, 岩石破碎越充分; 最小抵抗线决定了爆轰能量的作用方向与强度, 过小易导致飞石产生, 过大则会造成炸药能量浪费, 降低破碎效率。

(二) 爆破方法分类

浅孔爆破与深孔爆破适用场景存在明显差异。浅孔爆破孔径较小、孔深较浅, 适用于小规模开采、二次破碎或地形复杂区域; 深孔爆破孔径较大、孔深较深, 适用于大规模台阶开采, 能提高开采效率并降低单位开采成本。预裂爆破与光面爆破注重边界控制。预裂爆破在

主爆区之前起爆, 预先在边坡或保留岩体上形成连续裂隙, 减少主爆区爆破对边界岩体的破坏; 光面爆破则通过控制装药量与起爆顺序, 使爆破后岩壁保持平整, 降低对周边岩体的扰动。微差爆破通过优化时间间隔实现高效破碎。合理的时间间隔能让前一组炮孔爆破形成的自由面为后一组炮孔提供辅助, 同时减少各组炮孔爆破振动的叠加, 降低对周边环境的影响。

(三) 爆破参数设计理论

孔径、孔深、间距与排距需满足特定几何关系。孔径与孔深需根据开采台阶高度、岩石性质确定, 孔深通常略大于台阶高度; 间距与排距需匹配孔径, 确保炸药能量能均匀作用于岩体, 避免出现欠爆或过爆现象。单位炸药消耗量需与岩石性质精准匹配。岩石硬度越高、致密性越强, 所需单位炸药消耗量越大, 需通过岩石力学试验确定合理数值, 确保既能实现有效破碎, 又能避免炸药浪费。起爆网络设计需注重可靠性分析。串联网络结构简单但一处故障会导致整体失效; 并联网络可靠性较高但线路布置复杂; 混合式网络结合两者优势, 需根据爆破规模与现场条件选择合理的类型, 确保起爆信号能稳定传递至每个炮孔, 保障爆破作业有序进行。

二、露天矿山爆破安全风险分析

(一) 风险来源与分类

露天矿山爆破安全风险有多种来源。早爆可能因外界冲击、高温或静电引发, 导致爆破作业提前启动, 打破预设安全流程, 对未撤离人员与设备构成直接威胁; 拒爆是部分炮孔未按设计起爆, 残留炸药与雷管在后续清理或开采中易受扰动, 构成持续隐患; 飞石由爆破能量集中作用于岩体薄弱部位产生, 高速飞溅岩石可跨越数百米, 对周边设施与人员造成硬性冲击。次生灾害同

样不容忽视。爆破振动通过岩体或土壤传播，可能使周边边坡出现新裂隙，影响构筑物基础稳定性，还可能导致地表微小沉降；冲击波以高压波形式扩散，损伤近距离设备外壳，也对人员造成物理冲击；粉尘在爆破破碎中大量产生，长期悬浮影响作业能见度，还会附着周边植被、渗入表层土壤，影响生态环境^[2]。设备故障与人为操作失误也诱发风险。爆破器材在高温潮湿环境存储不当致性能失效，起爆装置线路松动或错接，或是作业人员未按规定逐孔检查炮孔装药质量、未在警戒区域设明显标识，都会增加安全事故发生概率。

（二）风险传播机制

爆破安全风险传播遵循能量释放的链式反应规律。初始风险事件如早爆或拒爆发生后，释放的能量会触发后续连锁反应，例如拒爆残留的炸药可能在后续铲装作业中被机械碰撞引发二次爆炸，扩大事故影响范围。多因素耦合作用会放大风险影响。振动与冲击波共同作用时，对构筑物墙体的振动频率与冲击力度叠加，破坏程度会远超单一因素作用效果；飞石与粉尘结合，高速飞石携带粉尘扩散，不仅扩大物理冲击范围，还会让粉尘覆盖区域进一步扩大，加剧环境危害。空间距离与屏障能有效抑制风险扩散。随着与爆破中心距离增加，振动、冲击波强度会按一定规律逐渐衰减，对远处构筑物的影响显著降低；设置钢筋混凝土防护挡墙、利用山体地形遮挡等屏障措施，可直接阻挡飞石运动路径，同时削弱粉尘扩散动力，减少粉尘扩散范围，降低风险对周边居民区与生态区域的影响。

（三）安全评价方法

故障树分析通过构建逻辑结构评估风险。以爆破事故为顶事件，向下分解导致事故的中间事件与基本事件，如将“飞石伤人”分解为“装药量过大”“最小抵抗线不足”等，梳理各事件间的逻辑关系，明确引发事故的关键路径，为针对性防控提供方向，尤其适合复杂事故的根源分析。事件树分析聚焦路径概率推导。从初始事件如“起爆装置故障”出发，分析后续可能出现的“及时发现故障停止作业”“未发现故障继续爆破”等不同发展路径，结合历史数据计算各路径发生概率，识别高风险发展方向，为事故预防提供概率性依据。模糊综合评价用于划分安全等级。结合爆破作业环境的地形复杂度、技术参数的合理性、管理措施的完善程度等多类指标，通过模糊数学方法对各指标进行量化评估，综合判断整体安全水平，划分“安全”“较安全”“风险较高”“危

险”等不同安全等级，为作业方案优化与风险管控提供直观参考，尤其适用于复杂地形下的大规模爆破作业评估。

三、安全控制技术体系

（一）本质安全设计

本质安全设计需从爆破器材选择与装药结构优化入手。炸药类型选择需适配矿山实际条件，乳化炸药具有良好抗水性能，适合潮湿或有水作业环境，能减少水分对炸药性能的影响；铵油炸药成本较低且稳定性较强，适合干燥露天条件下的大规模爆破，可根据岩体硬度与作业环境灵活选用^[3]。起爆器材可靠性优化是安全保障关键，雷管需具备精准延期性能，确保起爆时序符合设计要求；导爆索需提升抗拉伸与抗冲击能力，避免在搬运或安装过程中出现断裂，减少起爆系统失效风险。装药结构设计直接影响能量分布，连续装药结构能让炸药能量均匀作用于岩体，适合整体性强的岩石破碎；间隔装药结构通过在药柱间设置空气或惰性介质，可降低局部区域炸药能量密度，减少过度破碎与飞石产生，实现能量的精准调控。

（二）防护技术措施

防护技术措施通过物理屏障与智能监测提升安全水平。缓冲垫层与覆盖材料能有效吸收爆破能量，缓冲垫层选用厚度适中的橡胶或泡沫材料，铺设在炮孔上方可削弱爆轰产物对地表的冲击，覆盖材料如高强度编织布、钢丝网需多层叠加铺设，能阻挡飞石运动，降低飞石飞溅速度与距离。预裂带与减震沟可发挥振动衰减作用，预裂带深度需超过主爆孔深度，通过预先形成的裂隙切断振动波传播路径，减震沟宽度与深度根据爆破规模确定，利用沟内空气介质消耗振动能量，两者结合能显著降低爆破振动对周边构筑物的影响。智能监测系统依托传感器实时捕捉数据，振动传感器需均匀布置在爆破区域周边关键位置，可采集爆破过程中的振动强度与频率，冲击波传感器安装在高处无遮挡处，能记录冲击波传播速度与压力变化，数据经无线传输系统实时反馈至控制平台，一旦超出安全阈值立即发出声光预警，为现场处置争取时间。

（三）应急管理策略

应急管理策略需覆盖事故溯源、预案调整与生态恢复。事故树分析作为逆向溯源方法，从已发生的事故现象出发，如飞石伤人、振动超标等，逐步追溯导致事故的直接原因与间接原因，梳理出从隐患到事故的发展链

条,明确各环节存在的漏洞,为后续改进措施制定提供依据。应急预案需具备动态调整能力,每季度根据矿山开采进度、地形变化与气象条件更新预案内容,结合近期事故案例优化救援人员调度、设备调配与物资供应模型,确保预案与实际情况高度适配。事后恢复需构建生态修复技术框架,针对爆破造成的植被破坏选用耐旱、耐贫瘠的本土植物进行补种,播种密度根据土壤肥力确定,对受粉尘污染的土壤采用清水淋洗或施加有机改良剂处理,分阶段开展修复工作,逐步恢复矿山生态环境,实现开采与生态保护的平衡。

四、爆破安全管理的理论模型

(一)人-机-环系统分析

人-机-环系统分析需统筹人员、设备与环境三要素。操作人员技能水平与心理状态需通过量化方式定期评估,技能水平可通过爆破作业考核成绩、实操完成质量等指标衡量,每季度开展一次综合测评;心理状态可借助专业测评工具监测,在高强度作业周期前增加测评频次,避免因疲劳、焦虑等因素导致操作失误^[4]。设备故障率需实现动态预测与维护,通过收集设备运行时长、关键部件损耗数据,建立故障预测模型,提前识别潜在故障风险,制定针对性维护策略,如每月检查易损部件磨损情况、根据运行数据优化设备运行参数,减少设备突发故障对爆破安全的影响。环境因素敏感性分析需聚焦地质与气候条件,地质方面需评估岩体稳定性、岩层分布对爆破效果的影响,每半年更新一次地质勘察数据;气候方面需关注风速、降水等因素对粉尘扩散、炸药性能的作用,结合短期天气预报调整爆破作业时间,为爆破方案调整提供依据。

(二)安全绩效评价体系

安全绩效评价体系需构建科学的指标与决策机制。指标权重分配需平衡安全性、效率性与经济性,安全性指标侧重事故发生率、隐患整改率等,效率性指标关注爆破作业进度、资源利用效率,经济性指标涵盖成本控制、效益产出,通过专家论证与历史数据验证合理分配权重,全面反映爆破安全管理水平。多目标决策模型可有效支撑评价过程,层次分析法(AHP)能将定性与定量指标结合,明确各指标重要程度;逼近理想解排序法(TOPSIS)可对不同爆破方案的绩效水平进行排序,选出最优方案,适用于多方案对比选择场景。持续改进需

依托PDCA循环机制,计划阶段结合年度安全目标制定实施策略,执行阶段按周跟踪管理措施落实情况,检查阶段每月评估绩效与目标差距,处理阶段每季度总结经验并优化方案,形成管理闭环,推动安全绩效持续提升。

(三)智能化管理趋势

智能化管理趋势依托新技术提升管理效能。物联网(IoT)可实现爆破监测的数据融合,通过在炮孔周边、边坡区域部署各类传感器,实时采集人员位置、设备状态、环境参数等数据,经5G网络传输至管理平台进行整合分析,打破数据孤岛,实现全方位监测,尤其适用于大规模露天矿山的分布式监测需求。人工智能(AI)能强化风险模式识别与预测,通过学习近五年历史爆破数据,挖掘风险发生的规律与特征,提前识别高风险场景,如异常振动、飞石超标等,在风险萌芽阶段发出预警,辅助管理人员制定防控措施。数字孪生技术可发挥爆破场景模拟价值,构建与实际矿山一致的虚拟模型,模拟不同爆破参数、环境条件下的作业效果,在虚拟环境中验证方案可行性后再应用于实际作业,优化爆破方案设计,减少实际作业中的安全风险,推动爆破安全管理向智能化、精准化转型。

结束语

露天矿山开采爆破与安全研究是保障矿山安全生产的关键。通过构建本质安全设计、防护技术措施与应急管理策略,形成完整的安全控制技术体系;运用人-机-环系统分析、安全绩效评价等模型,提升安全管理水平;借助物联网、人工智能等新技术,推动智能化管理转型。未来,需持续优化爆破技术与安全管理,实现露天矿山开采的高效、安全与可持续发展。

参考文献

- [1] 刘志旭.露天矿山工程开采技术及施工安全管理分析[J].世界有色金属,2024(21):193-195.
- [2] 杨飞,董恒超.露天矿山爆破振动传播规律研究[J].有色矿冶,2024,40(06):15-18.
- [3] 袁江.露天矿山爆破安全困境与防治措施[J].能源与节能,2024,(11):304-306.
- [4] 石恩国,崔维华,张奇伟.露天矿山爆破钻孔形态和施工方法的研究[J].中国水泥,2024,(S1):169-170.