

## 煤矿爆破作业中的安全隐患与防控措施

傅永和 祁瑞祥 郭卫东

新疆雪峰爆破工程有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

**[摘要]**露天煤矿开采作为我国能源供给的重要支柱,其爆破作业的安全性与效率直接影响矿山经济效益与生态可持续发展。随着浅部资源逐渐枯竭,露天开采正向深凹化、集约化方向发展,爆破作业面临地质条件复杂化、安全距离压缩、环境敏感度提升等多重挑战。近年来,行业统计显示爆破相关事故在矿山安全事故中占比持续高位,暴露出传统爆破模式在参数设计精准度、风险预控能力等方面的系统性缺陷。文中立足露天煤矿爆破作业全流程,系统剖析自然地质风险、人为操作失误及技术装备局限等致因要素,集成国内外先进防控技术与管理经验,构建涵盖设计优化、工艺革新、智能监测与制度创新的综合防控体系。研究成果旨在为破解深部开采安全瓶颈、推进绿色矿山建设提供理论支撑与实践范式。

**[关键词]**煤矿爆破;边坡稳定性;飞石防控;振动控制

DOI: 10.33142/ect.v3i4.16104

中图分类号: TD2

文献标识码: A

## Safety Hazards and Prevention Measures in Coal Mine Blasting Operations

FU Yong, QI Ruixiang, GUO Weidong

Xinjiang Xuefeng Blasting Engineering Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

**Abstract:** As an important pillar of energy supply in China, open-pit coal mining has a direct impact on the safety and efficiency of blasting operations, which directly affects the economic benefits and ecological sustainable development of mines. With the gradual depletion of shallow resources, open-pit mining is developing towards deep excavation and intensification. Blasting operations face multiple challenges such as complex geological conditions, compressed safety distances, and increased environmental sensitivity. In recent years, industry statistics have shown that blasting related accidents continue to account for a high proportion of mine safety accidents, exposing the systematic deficiencies of traditional blasting modes in parameter design accuracy, risk prevention and control capabilities, and other aspects. The article focuses on the entire process of open-pit coal mine blasting operations, systematically analyzes the causal factors such as natural geological risks, human operational errors, and technical equipment limitations, integrates advanced prevention and control technologies and management experience at home and abroad, and constructs a comprehensive prevention and control system covering design optimization, process innovation, intelligent monitoring, and institutional innovation. The research results aim to provide theoretical support and practical paradigms for solving safety bottlenecks in deep mining and promoting the construction of green mines.

**Keywords:** coal mine blasting; slope stability; flying stone prevention and control; vibration control

我国露天煤矿资源分布广泛,主要集中于内蒙古、山西等生态脆弱区域,开采活动与环境保护的矛盾日益凸显。传统爆破技术依赖经验公式与粗放管理,难以适应岩体各向异性显著、边坡稳定性动态变化等工程实际需求。国家矿山安全监察局专项督查发现,边坡失稳、飞石超距等典型问题在深凹露天矿中尤为突出,往往引发链式灾害效应。与此同时,智能化矿山建设浪潮催生爆破技术革新,数码电子雷管、三维激光扫描等新技术应用虽部分缓解了传统工艺缺陷,但装备适配性不足、人员技能断层等问题制约着技术红利释放。《煤矿安全规程》的修订与安全生产专项整治行动的推进,倒逼企业构建全流程、多维度的本质安全体系。在此背景下,探索地质条件适配性防控技术、完善人-机-环协同管控机制,成为破解露天爆破安全困局的关键路径。

### 1 爆破作业在露天煤矿中的重要性

露天煤矿开采中,爆破作业承担着矿岩预破碎的核心职能,直接影响电铲采装效率与运输成本控制。相较于井

下开采,露天爆破需应对更大规模的岩体破碎需求,单次爆破量常达数万吨级。科学合理的爆破设计可使大块率降低至5%以下,有效避免二次破碎带来的安全隐患。同时,现代露天矿普遍采用的逐孔起爆技术,能够实现精准的爆破振动控制,将质点振动速度控制在1.5cm/s以内,保障周边建筑物的结构安全。随着智能化矿山建设推进,爆破作业正从经验驱动向数据驱动转型,三维地质建模与爆破效果仿真技术的应用,使爆破方案设计精度提升40%以上。从能量转化视角分析,爆破本质上是将化学能转化为机械能的控制释放过程,其能量利用率直接影响开采经济性。传统台阶爆破的能量有效利用率仅为15%~20%,而采用空气间隔装药技术可将该指标提升至28%以上<sup>[1]</sup>。在生态保护方面,精细控制爆破对地下水文结构的扰动已成为绿色矿山建设的重要内容,定向断裂控制爆破技术可减少爆破裂隙带扩展范围30%~40%。从产业升级维度观察,爆破智能化发展催生了“数字爆破工程师”新职业群体,其工作内容涵盖无人机

航测数据处理、爆破参数智能匹配系统操作等新兴技术领域。

## 2 露天煤矿开采工艺与爆破作业流程

典型露天煤矿开采遵循“剥离-采煤-运输-排土”的循环作业模式，其中爆破工序位于生产工艺链前端。标准化流程包含地质勘察、穿孔设计、装药结构确定、起爆网络敷设和安全警戒五大环节。以准格尔矿区为例，采用直径310mm的牙轮钻机实施垂直深孔作业，孔深通常控制在15~20m范围，装药时采用乳化炸药与铵油炸药的耦合装填方式。起爆系统普遍升级为数码电子雷管，时差控制精度可达0.1ms级别，配合GPS定位技术实现孔间延时的精准调控。工艺革新方面，三维激光扫描技术已应用于爆前岩体结构探测，可识别厚度超过0.5m的软弱夹层并调整装药段位置。

## 3 露天煤矿爆破作业安全隐患分析

### 3.1 自然条件引发的安全隐患

复杂地质构造对爆破能量传播路径产生显著干扰。新疆准东矿区某工作面在断层破碎带实施爆破时，因未预判断面对应力波的导向作用，导致爆炸能量沿断面向采空区集中释放，引发顶板岩层垮落事故。软弱夹层的存在改变岩体力学特性，内蒙古胜利矿区某爆区因泥岩夹层遇水软化，导致装药过程中出现孔壁坍塌卡钻，处理过程中触发早爆险情。岩体各向异性特征未被充分考量时，爆破后冲效应可能超出设计范围，霍林河露天矿监测数据显示，沿层面方向的爆破振动传播速度较垂直方向提升40%，加剧边坡失稳风险。

极端天气对露天爆破作业构成动态威胁。山西长治某矿在短时强降雨后实施爆破，未及时排除炮孔积水导致乳化炸药水解失效，形成大规模盲炮区，后续机械清渣作业中触发残留爆炸物。雷电天气对电子起爆系统产生严重干扰，贵州六盘水某矿在雷暴预警未解除情况下冒险作业，雷电感应电流引发数码雷管群爆，造成起爆时序全面紊乱。大风环境不仅降低钻孔定位精度，更易导致起爆网络结构损伤，甘肃华亭矿区在大风季节作业时，因导爆索固定不牢产生缠绕偏移，造成传爆中断导致30%炮孔拒爆。冬季低温环境对装药质量提出特殊要求，黑龙江双鸭山某矿在-28℃作业时未采取炸药保温措施，导致乳化炸药敏化不完全，出现半爆现象形成安全隐患。

边坡稳定性问题具有时变性与累积效应。抚顺西露天矿北帮边坡在连续爆破振动作用下，监测显示裂隙扩展速率达到0.8mm/d，最终诱发区域性滑移事故。冻融循环对边坡岩体结构的破坏常被低估，内蒙古赤峰某矿在春季冻融期实施台阶爆破，爆破振动与冻胀力的协同作用导致表层岩体整体剥落。地下水位波动与爆破振动产生耦合效应，陕西榆林某矿在疏干排水期进行爆破作业，水位骤降引发的渗流力失衡加剧边坡内部结构损伤，最终形成牵引式坍塌。

### 3.2 人为操作与管理缺陷

爆破参数设计的科学性直接影响作业本质安全。河南义马某矿在节理发育岩体中进行布孔设计时，未考虑主节理走向与炮孔排间关系，导致爆破能量沿优势结构面逸散，形成危险悬石威胁后续采装作业。装药结构适配性不足引

发能量分配失衡，宁夏灵武某矿在砂岩-泥岩互层中采用均匀装药方式，软弱夹层过粉碎导致上部岩体失稳滑移。

作业人员违规操作往往成为事故直接诱因。黑龙江某矿爆破员未严格执行网络检测规程，导通检测遗漏造成20%炮孔拒爆，处理过程中违规使用金属工具挖掘触发爆炸。盲炮处置程序执行不到位引发次生事故，云南某矿发现盲炮后未设置明显警示标志，交接班期间其他作业人员误触残留雷管导致伤亡事件<sup>[2]</sup>。安全警戒体系漏洞在多工作面协同作业时尤为突出，甘肃某矿因警戒标识设置模糊，运输车辆误入爆破警戒区被飞石击中驾驶室。

### 3.3 设备与技术风险

起爆器材可靠性直接影响爆破作业成功率。传统电雷管在潮湿环境中易出现桥丝腐蚀，湖南某矿在梅雨季节作业时雷管拒爆率达0.4%，显著高于干燥季节水平。导爆索传爆性能受环境温度影响显著，吉林珲春某矿在-25℃环境下作业时，导爆索爆速下降15%导致孔间起爆不同步。数码电子雷管防水性能改进后仍存在适配性问题，辽宁某矿使用新型防水雷管时，因起爆器电容老化导致首段雷管起爆失败。

钻孔机械性能缺陷引发系列连锁风险。赤峰某矿牙轮钻机定位系统未定期校准，实际孔位偏差累积达0.8m，改变最小抵抗线方向导致飞石抛掷距离超出设计值200%。钻杆磨损对成孔质量的影响常被忽视，云南某矿在硬岩地层作业时，未及时更换磨损钻头导致孔壁粗糙度过大，装药过程中摩擦生热引发早爆。

监测设备性能短板制约风险预警能力。现有振动监测系统普遍存在数据延迟现象，甘肃某矿爆破后25分钟才获得完整振动数据，难以及时指导后续参数调整。粉尘浓度监测受环境干扰严重，新疆某矿在大风天气下监测数据与实际浓度偏差达45%，导致降尘措施启动滞后。新型监测技术应用存在适配性风险，贵州某矿引进三维激光扫描系统后，因操作人员未掌握点云数据处理技术，未能有效识别爆前岩体隐蔽裂隙。

## 4 露天爆破安全防控关键技术

### 4.1 爆破参数的优化设计

基于岩体波阻抗特性的装药量计算模型显著提升能量利用效率，准能公司黑岱沟露天矿通过岩体声波测试划分爆破分区，建立差异化装药标准使单耗降低12%。针对复杂岩层结构开发的分段耦合装药技术，在平朔安太堡矿硬岩-煤层交替地层中应用，实现上部岩体充分破碎与下部煤层保护性开采的协同目标。微差爆破时序优化突破传统等间隔设计理念，鞍钢矿业弓长岭矿区采用波形叠加理论设计孔间延期，使振动主频移出建筑物共振频带。逐孔起爆系统的精准控制能力在伊敏河露天矿得到验证，通过GPS授时技术实现128个炮孔0.1ms级起爆时序控制，有效消除振动叠加效应。

### 4.2 边坡稳定性控制技术

预裂爆破成缝机理研究推动工艺革新，神华宝日希勒露天矿在边坡轮廓线实施孔径110mm、间距1.2m的预裂孔布置，形成连续贯穿裂缝阻断主爆区应力波传播。光面

爆破参数动态调整技术在元宝山露天矿应用,根据岩体完整性系数实时优化线装药密度,使半孔率稳定在85%以上。边坡智能监测系统集成北斗定位与光纤传感技术,抚顺西露天矿布设的60个监测点实现毫米级位移实时感知,结合降雨量预测模型可提前72小时发布滑坡预警。渗流控制技术取得突破,霍林河矿区采用垂直-水平联合排水系统,将爆破作业区地下水位控制在安全标高以下。

### 4.3 飞石与粉尘防控措施

柔性防护体系创新方面,中煤平朔矿区首创“弹性网+轮胎链”复合覆盖方案,通过三层防护结构将飞石抛掷距离缩减至设计值的55%。缓冲层设计理论在扎哈淖尔露天矿得到实践验证,台阶坡面预留1.2m松散岩层有效吸收爆破冲击能量。水雾降尘系统升级至第四代高压旋流技术,华能伊敏矿安装的360°旋转喷头使作业面能见度提升至50m以上。生物可降解抑尘剂研发取得进展,大唐国际胜利东二矿试用植物提取型抑尘膜,可在爆区表面形成持续期72小时的固化层。

### 4.4 振动与噪声控制

振动传播路径调控技术在大峰露天矿成功应用,开挖深度4m、宽度1.2m的隔振沟使振动强度衰减40%。弹性波阻抗匹配理论指导下的屏障设置方案,在神华准格尔矿区采用橡胶颗粒-粉煤灰复合材料,对低频振动波的隔离效率达55%<sup>[3]</sup>。噪声源头控制方面,北京科技大学研发的低爆速炸药在鞍钢齐大山铁矿试用,使空气冲击波超压峰值降低25%。数字孪生技术在振动预测领域崭露头角,中国矿大团队构建的三维地质-爆破耦合模型,可提前模拟不同装药结构下的振动传播规律。

工艺装备的智能化改造显著提升防控效能,徐工集团研发的智能装药车配备自动密度检测仪,实现装药过程实时密度监控与自动补偿。北方爆破公司开发的起爆网络智能检测仪,可在30秒内完成128发数码雷管的全参数诊断。北斗高精度定位模块与牙轮钻机的深度集成,使布孔位置误差控制在±2cm以内。值得关注的是,5G通信技术赋能远程操控系统,中煤集团在安家岭露天矿建立的爆破指挥中心,可实时获取20km外作业面的高清视频与传感器数据,实现爆破全流程的远程化管控。这些技术的综合应用,标志着露天爆破安全防护进入智能感知、精准调控的新阶段。

## 5 安全管理体系与制度建设

### 5.1 人员培训与资质管理

爆破作业人员的专业素质直接影响安全作业水平,国家矿山安全监察局推行“理论+实操+应急”三位一体培训体系,要求年度培训时长不少于72学时。云南某矿建立的VR安全培训中心,通过虚拟现实技术复现20种典型事故场景,使学员沉浸式掌握盲炮处理、网络检测等关键技能。动态考核机制创新方面,平朔集团实施爆破技术人员星级评定制度,将无人机航测数据处理、电子雷管编程等新兴技能纳入考核指标。资质认证体系强化过程监管,河南某矿建立“培训-考核-上岗-复审”闭环管理系统,对

违规人员实施资质冻结与回炉再造。

### 5.2 全流程风险管控机制

电子化许可审批系统实现风险源头控制,金堆城铝业开发的爆破作业电子许可证系统,集成GIS定位与人脸识别技术,确保作业范围、人员资质、设备状态的实时核验。第三方安全评估制度在央企全面实施,中煤集团引入国际知名安全机构开展爆破设计合规性审查,近三年累计消除设计缺陷136项。风险预警机制实现动态防控,宝日希勒矿部署的智能巡检系统通过热成像与振动感知技术,可自动识别钻孔偏斜、装药密度异常等23类风险征兆。

### 5.3 应急预案与责任追究

立体化应急体系构建取得突破,神华集团建立“矿-厂-队”三级应急响应网络,配备专用应急指挥车与便携式侦测设备,确保15分钟内形成现场处置能力。实战化演练提升应急水平,鞍钢矿业每年开展边坡滑坡与爆破中毒联合演练,通过无脚本压力测试暴露指挥体系薄弱环节。责任追究技术创新司法实践,河南某矿应用区块链存证技术固定事故现场数据,实现责任认定的不可篡改与全程追溯<sup>[4]</sup>。法律追责机制形成有效震慑,2022年修订的《刑法修正案》明确将“故意提供虚假爆破设计文件”纳入刑事追责范围。保险机制创新分担企业风险,人保财险推出的爆破作业专项责任险,将第三方人身伤害与财产损失纳入承保范围。

## 6 结语

露天煤矿爆破安全防护是融合岩体力学、控制理论与信息技术的系统工程。研究表明,通过岩体特性建模优化能量释放路径、应用智能监测技术实现风险超前预警、健全全员责任体系强化过程管控,可显著提升爆破作业本质安全水平。当前技术发展呈现数字化、协同化、预防性特征,数字孪生技术为爆破效果预测提供新工具,区块链存证系统为责任追溯构建可信链条。未来研究应聚焦复杂地质环境下能量精准调控机理,开发具有自感知能力的智能爆破装备,构建“设计-施工-评估”全周期数据链。管理层面需推进标准体系动态更新,培育“技术敬畏”与“风险共治”的安全文化。唯有技术创新与制度变革双轮驱动,方能实现露天爆破作业从风险应对到风险预防的范式转变,为能源安全与生态保护提供双重保障。

### [参考文献]

- [1]秦浩. 哈尔乌素露天煤矿爆破粉尘特性及降尘技术研究[D]. 北京:中国矿业大学,2024.
  - [2]李文涛,李恺峰,赵庆东. 研究煤矿采掘工作面爆破安全技术[J]. 内蒙古煤炭经济,2024(18):115-117.
  - [3]杨宏业. 煤矿爆破切顶卸压沿空留巷开采技术分析[J]. 能源与节能,2024(10):201-204.
  - [4]康小庆. 露天煤矿爆破参数对爆破块煤率及个别飞散物控制的试验研究[J]. 科学技术创新,2025(4):169-172.
- 作者简介:傅永和(1997.11—),毕业院校:西北工业大学,所学专业:土木工程,当前工作单位:新疆雪峰爆破工程有限公司,职称级别:助理工程师。