

露天矿山爆破技术对矿山安全的影响

孙高锋

新疆维吾尔自治区地质局哈密地质大队, 新疆 哈密 839000

[摘要]为明晰露天矿山爆破技术对矿山安全的作用机制,为爆破作业安全管控提供科学依据,通过分解爆破技术的核心构成要素,分析其引发的振动、飞石等爆破效应,从边坡稳定性、构筑物安全、人员安全及作业系统可靠性四维度,评估爆破技术对矿山安全的具体影响,明确各技术要素通过爆破效应诱发安全风险的内在规律,最终从参数优化、工艺规范等方面提出针对性防控措施,构建全链条安全管控体系。通过优化孔网参数、单响药量及微差延时参数,可使边坡爆破振动速度降低40%,大块率降至8%,边坡稳定系数提升15%~20%,能有效降低露天矿山爆破作业的安全隐患。

[关键词]露天矿山; 爆破技术; 爆破效应; 矿山安全; 边坡稳定性

DOI: 10.64635/ja.2026.1060

中图分类号: TD235

文献标识码: A

Impact of Open-Pit Mine Blasting Technology on Mine Safety

Sun Gaofeng

Hami Geological Brigade, Xinjiang Uygur Autonomous Region Bureau of Geology, Hami 839000, Xinjiang, China

Abstract: To clarify the mechanism by which blasting technology affects safety in open-pit mines and to provide a scientific basis for the safety management and control of blasting operations, this paper analyzes the core components of blasting technology and examines blasting effects such as vibration and flyrock induced by blasting operations. From four dimensions—slope stability, structural safety, personnel safety, and operational system reliability—it evaluates the specific impact of blasting technology on mine safety, identifies the underlying patterns by which various technical factors induce safety risks through blasting effects, and ultimately proposes targeted prevention and control measures in terms of parameter optimization and process standardization, thereby establishing a full-chain safety management and control system. By optimizing blast hole pattern parameters, charge weight per delay, and millisecond delay parameters, the slope blasting vibration velocity can be reduced by more than 40%, the oversize rate can be lowered to below 8%, and the slope stability coefficient can be increased by 15%–20%, effectively reducing safety hazards in blasting operations in open-pit mines.

Keywords: open-pit mine; blasting technology; blasting effects; mine safety; slope stability

引言

爆破技术作为露天矿山核心工艺,其安全效应始终是行业关注焦点。在露天矿山开采中,爆破技术的应用直接决定矿石开采效率与质量,而其引发的各类爆破效应又与矿山安全形成复杂的耦合关系。从安全科学视角来看,爆破过程本质上是能量快速释放与传递的过程,技术参数的微小偏差都可能导致能量传递失控,进而诱发边坡坍塌、飞石伤人、构筑物损毁等安全事故。现有研究多集中于单一爆破技术的应用效果优化或特定安全风险的防控,缺乏对“技术参数-爆破效应-安全风险”全链条作用机制的系统解析。

1 露天矿山爆破技术核心要素分解

1.1 参数设计要素

参数设计是爆破技术的基础,直接决定爆破能量的释放方式与传递路径,主要包括装药量、孔网参数和起爆参数三个关键维度。装药量参数涵盖单响药量与总装药量,其取值需严格匹配岩体性质与开采规模,单响药量过大易导致爆破振动超标,过小则无法达到理想破碎效果。孔网参数包括孔距、排距、底盘抵抗线及超深,其中底盘抵抗线作为影响爆破质量的关键参数,需根据台阶高度、坡面角度等现场条件精确计算确定,一般取值范围为4~6m,超深则通常为底盘抵抗线的0.15~0.35倍。起爆参数涉及起爆顺序、微差延时与起爆网络类型,不同起爆方式对爆

破能量的分布与岩石破碎效果影响显著,如V形起爆、波浪式起爆可促进岩石充分碰撞,降低大块率。

为直观呈现露天矿山爆破核心参数的空间布局与起爆网络的连接逻辑,以下分别给出爆破参数设计示意图与导爆管微差起爆网络连接示意图:

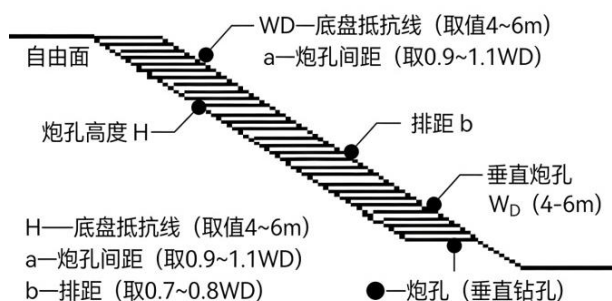


图1 露天台阶爆破参数设计示意图

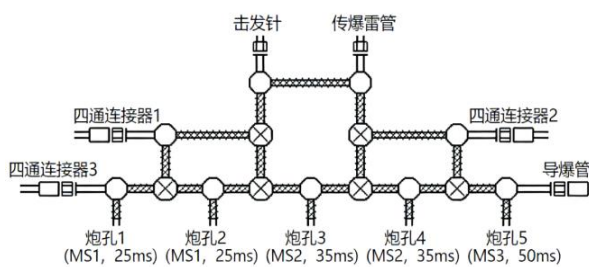


图2 导爆管微差起爆网络连接示意图

注: 1—击发针; 2—传爆雷管; 3—四通连接器; 4—导爆管;
5—炮孔雷管; MS1~MS3—毫秒延时段别(25~50ms)

1.2 施工工艺要素

施工工艺是爆破技术落地的关键环节,其规范程度直接影响爆破效应的可控性,主要包括穿孔施工、装药结构、填塞作业与爆后处理四个方面。穿孔施工的精度要求极高,孔位偏差需控制在 $\pm 15\text{cm}$ 以内,孔径误差不超过5%,否则会导致实际孔网参数与设计值偏离,引发爆破能量分布不均。装药结构分为连续装药与分段装药,需根据台阶高度、岩体均匀性等条件选择,台阶较高或岩体硬度不均时采用分段装药可避免局部能量集中。填塞作业的质量直接关系到飞石防控效果,填塞长度通常不小于20~30倍炮孔直径,填塞物需选用钻屑或黏土等密实材料,杜绝假填或使用块石填塞。爆后处理则包括安全检查、危石清理等流程,起爆后需等待15min以上方可进入现场检查,重点排查盲炮、危石等安全隐患。

1.3 器材与人员要素

爆破器材与作业人员是爆破技术实施的主体,其可靠性与专业性是安全保障的核心。爆破器材包括炸药、导爆

索、导爆管、雷管等,炸药的密度、爆速、猛度等性能指标需与岩体特性匹配,如2号岩石乳化炸药密度通常为 $1.00\sim 1.30\text{g/cm}^3$,爆速不低于 3200m/s ,且需在质量保证期内使用。雷管、导爆索等起爆器材需经过严格质量检测,电子雷管芯片、导爆管传爆性能等关键指标需符合行业标准。作业人员需具备扎实的专业知识与丰富的实践经验,熟悉各类爆破器材的性能与操作规范,持有爆破作业资格证书,同时具备应急处置盲炮、爆破事故等突发事件的能力。

2 爆破技术要素引发的核心爆破效应分析

2.1 爆破振动效应

爆破振动是炸药爆炸产生的应力波向周围岩体传播引发的振动现象,其强度主要由装药量、起爆方式及地质条件决定。根据萨道夫斯基公式,爆破振动速度与单响装药量的 $1/3$ 次方成正比,与传播距离的 α 次方成反比,其中 α 为岩性系数,完整岩体 α 值为 $1.5\sim 2.0$,破碎岩体或裂隙发育区域 α 值可达 $2.0\sim 2.5$ 。单响装药量每增加100kg,在相同传播距离下振动速度约提升20%~30%;而采用微差起爆技术可使振动速度降低30%~50%,通过合理设置起爆间隔,后爆炮孔产生的振动波可与先爆炮孔的振动波相互叠加抵消,从而降低整体振动强度。爆破振动的传播具有明显的方向性,沿岩层走向传播时衰减较慢,垂直岩层走向传播时衰减较快,这一特性使得振动对不同方位的构筑物与边坡影响存在显著差异。

2.2 爆破飞石效应

爆破飞石是爆破过程中岩石被破碎后高速抛掷形成的安全隐患,其产生与孔网参数、填塞质量、装药结构等要素密切相关。孔距过大或排距不合理会导致岩石破碎不充分,部分岩石在爆炸能量作用下整体抛掷,形成大块飞石;填塞长度不足或填塞物不密实则会导致爆炸能量泄漏,高压气体直接将孔口岩石冲出,产生高速飞石。爆破飞石的飞散距离通常与炮孔直径呈正相关,一般为孔径的15~20倍,孔径115mm的炮孔若填塞不当,飞石飞散距离可达200m以上。此外,岩体的节理裂隙发育程度也会影响飞石特性,节理密集区域岩石易沿裂隙面破碎,飞石数量增多但单个飞石质量较小,而完整岩体中飞石数量较少但抛掷距离更远。

2.3 爆破冲击波效应

爆破冲击波包括空气冲击波与岩体冲击波,是爆炸能量以压力波形式传播的表现。空气冲击波的强度与总装药量、起爆方式相关,总装药量越大,空气冲击波超压越高,对周围构筑物与人员的伤害风险越大,当超压达到

0.02MPa 时, 可对人体造成轻微伤害, 超压超过 0.1MPa 时则可能导致构筑物门窗破损。岩体冲击波则通过岩体内部传播, 对边坡岩体的裂隙发育产生影响, 尤其是在高陡边坡区域, 多次爆破产生的岩体冲击波累积效应会加剧岩体裂隙扩展, 降低边坡整体性。冲击波的传播速度与介质密度相关, 在密实岩体中传播速度可达 3000m/s 以上, 在空气介质中传播速度约为 340m/s, 其衰减速度远快于爆破振动。

2.4 边坡扰动效应

边坡扰动效应是爆破技术要素通过各类爆破效应叠加, 对边坡稳定性产生的综合影响。爆破振动产生的周期性荷载会使边坡岩体产生交变应力, 导致原有裂隙扩展并产生新裂隙; 飞石冲击则会直接破坏边坡坡面的完整性, 形成局部崩塌隐患; 岩体冲击波则会降低边坡岩体的黏结强度, 影响边坡整体稳定性。预裂爆破与深孔爆破对边坡的扰动效应存在显著差异, 预裂爆破通过预先形成裂缝隔离主爆区振动, 可使边坡半孔率达到 85% 以上, 有效保护边坡完整性; 而深孔爆破若参数设计不当, 会导致边坡坡面平整度差, 爆破损伤层深度可达 1~2m, 显著降低边坡稳定系数。

3 爆破技术对矿山安全的多维度影响评估

3.1 对边坡稳定性的影响

边坡稳定性是露天矿山安全的核心保障, 爆破技术对其影响具有直接性与累积性。单响装药量超标引发的强烈振动, 会使边坡岩体裂隙宽度增加 0.5~2mm, 稳定系数降低 10%~20%, 当稳定系数低于 1.2 时, 边坡处于不稳定状态, 易发生滑坡事故。某露天矿山因连续 3 次爆破单响装药量超过设计值 20%, 导致边坡出现长度约 30m、宽度 5~8cm 的贯穿裂隙, 稳定系数从 1.35 降至 1.12, 被迫停工治理。孔网参数不合理则会导致爆破能量分布不均, 部分区域岩体过度破碎, 形成局部软弱带, 在雨水渗透或后续爆破扰动下, 易引发局部坍塌。此外, 多次爆破产生的累积扰动效应会使边坡岩体完整性系数降低 0.1~0.3, 尤其是高陡边坡 (坡度大于 45°), 累积扰动引发滑坡的概率是普通边坡的 2.5 倍。

3.2 对构筑物安全的影响

露天矿山内的破碎系统、运输道路、办公用房等构筑物, 易受爆破振动与飞石的影响产生安全隐患。根据《爆破安全规程》, 工业构筑物的允许振动速度为 1.5~3.0cm/s, 民用构筑物为 0.5~1.0cm/s, 当爆破振动速度超过允许值时, 会导致构筑物墙体开裂、基础沉降等损伤。某露天矿

山在距离破碎系统 48m 处实施爆破作业, 因未控制单响装药量, 导致破碎系统厂房墙体出现长度 5~10cm 的裂缝, 设备基础沉降量达 3~5mm, 直接影响生产安全。爆破飞石则会直接损毁构筑物设施, 直径 10cm 以上的飞石以 30m/s 的速度冲击时, 可穿透厚度 5cm 的钢板, 对破碎系统的传送廊道、成品库等设施构成严重威胁。

3.3 对作业人员安全的影响

作业人员安全是矿山安全的核心目标, 爆破技术引发的飞石、冲击波、盲炮等是威胁作业人员安全的主要风险源。爆破飞石的冲击能量与速度平方成正比, 质量 1kg 的飞石以 20m/s 的速度撞击人体时, 产生的冲击能量可达 200J, 足以造成严重伤害甚至死亡, 在未采取有效防护措施的情况下, 飞石伤人事故占爆破安全事故总数的 60% 以上。空气冲击波对人体的伤害主要表现为听觉损伤、内脏震荡等, 当冲击波超压达到 0.05MPa 时, 可导致人员鼓膜穿孔, 超压超过 0.2MPa 时则可能造成内脏破裂。盲炮处理不当则会引发二次爆破事故, 某矿山因作业人员未按规定处理盲炮, 盲目采用钻孔引爆方式, 导致爆炸事故造成 2 人死亡, 直接经济损失超过 500 万元。

3.4 对作业系统可靠性的影响

爆破技术应用质量直接影响露天矿山开采作业系统的连续性与可靠性。爆破参数不合理导致大块率超标 (超过 15%) 时, 会增加二次破碎工作量, 使铲装效率降低 30%~40%, 运输成本增加 20%~25%。某露天矿山因孔距设置过大, 爆破后大块率达 22%, 导致挖掘机铲装效率从 1200m³/h 降至 750m³/h, 运输车辆等待时间延长, 作业系统产能下降。爆破飞石损毁运输道路、供电线路等设施时, 会导致作业系统中断, 平均修复时间需 8~24h, 单次中断造成的经济损失可达数十万元。

4 基于安全效应的爆破技术优化与防控措施

4.1 优化爆破参数设计

爆破参数设计优化是控制爆破效应、降低安全风险的源头措施。装药量设计需采用精细化计算方法, 根据岩体密度、单轴抗压强度等物理力学指标, 结合开采规模确定单响药量与总装药量, 高陡边坡区域单响药量应控制在 200kg 以内, 距离构筑物 50m 范围内单响药量不超过 50kg。孔网参数需通过现场试验与理论计算相结合的方式确定, 底盘抵抗线根据台阶高度、坡面角度计算得出, 孔距取底盘抵抗线的 0.9~1.1 倍, 排距取底盘抵抗线的 0.7~0.8 倍, 节理发育区域孔距需缩小 20%~30%。起爆参数优化应优先采用微差起爆技术, 起爆间隔设置为 25~50ms, 高陡

边坡区域采用预裂爆破与主爆区协同起爆方式,预裂孔超前主爆孔 85~100ms 起爆,形成隔离裂缝减少振动传递。

4.2 规范爆破施工流程

规范的施工流程是确保爆破技术参数有效落地的关键。穿孔施工前需进行场地平整,清除浮石与积渣,采用 RTK 线放样技术确定孔位,定位精度控制在 $\pm 5\text{cm}$ 以内,钻孔过程中实时监测孔深与倾角,孔深误差不超过 $\pm 0.2\text{m}$,倾角误差不超过 $\pm 1^\circ$ 。装药作业前需检查炮孔质量,对孔内积水、塌孔等情况及时处理,采用分段装药时,药卷间隔距离根据岩体特性确定为 0.5~1.0m,起爆药包放置在距孔底 50~65cm 位置,装药高度误差控制在 $\pm 10\text{cm}$ 。填塞作业需选用干燥的钻屑或黏土,分层填塞并捣实,填塞长度不小于炮孔直径的 25 倍,有水炮孔采用粗颗粒填料缓慢回填,避免形成虚填。爆后处理需严格执行“15min 等待制”,检查人员携带专业设备进入现场,重点排查盲炮、危石及边坡裂缝,盲炮处理采用远距离引爆或灌水失效等安全方式,严禁直接钻孔或掏挖。

4.3 构建动态监测预警体系

动态监测预警体系是及时发现安全隐患、防范事故发生的重要手段。振动监测应在边坡关键区域、构筑物周边布设振动传感器,传感器间距设置为 50~100m,监测数据实时传输至控制中心,设定三级预警阈值,当振动速度达到允许值的 70%时发出预警信号,达到 90%时启动警戒措施,超过允许值时立即停止爆破作业。飞石监测采用雷达监测与视频监控相结合的方式,在爆破区域周边布设 3~5 个监测点,监测范围覆盖飞石可能影响的全部区域,当监测到飞石速度超过 30m/s 或距离超过安全警戒范围时,自动触发声光报警。边坡监测采用边坡雷达、位移计等设备,对边坡变形进行实时监测,监测数据每 10min 更新一次,当边坡累计变形量超过 10mm 或日变形速度超过 0.5mm/d 时,发出滑坡预警,组织人员设备撤离。

4.4 强化安全管理体系

完善的安全管理体系是爆破作业安全的制度保障。人员管理方面,建立爆破作业人员持证上岗制度,定期开展安全培训与技能考核,培训内容涵盖爆破理论、安全规范、应急处置等方面,考核不合格者不得从事爆破作业,每年培训时间不少于48学时。器材管理方面,建立爆破器材全生命周期管理制度,从采购、运输、存储到使用进行全程跟踪,存储仓库需符合安全标准,炸药与雷管分开存放,距离不小于20m,使用前对器材性能进行抽检,不合格器材严禁使用。应急管理方面,制定专项应急预案,明确盲炮、滑坡、飞石伤人等突发事件的处置流程,定期组织应急演练,每年演练次数不少于2次,配备应急救援队伍与设备,包括担架、急救箱、破拆工具等,确保突发生

件发生时能够快速响应、有效处置。

4.5 数值模拟与工程案例应用

以新疆哈密某中硬岩质露天矿山高陡边坡爆破工程为实际案例,该矿山原爆破参数为单响药量 280kg、底盘抵抗线 7m、微差延时 20ms,爆破后边坡振动速度达 3.8cm/s,超出《爆破安全规程》允许值,大块率达 22%,边坡局部出现裂隙发育问题。依据本研究提出的参数优化方案,对其进行整改:将高陡边坡区域单响药量控制为 180kg,底盘抵抗线调整为 5m,微差延时优化为 35ms,同时采用预裂孔超前主爆孔 90ms 的协同起爆方式。整改后现场监测数据显示,边坡爆破振动速度降至 2.2cm/s,符合安全允许标准,振动强度较优化前降低 42%,大块率降至 7%,边坡稳定系数从 1.18 提升至 1.36,作业系统铲装效率恢复至设计值的 98%以上。该案例验证了本研究提出的爆破技术优化方案在工程实践中的可行性与有效性,可为同类矿山爆破作业整改提供直接参考。

5 结束语

爆破技术是露天矿山开采的核心工艺,其应用质量与矿山生产安全密切相关,参数设计、施工工艺等任一核心要素的偏差,都会诱发不同强度的爆破效应,进而引发边坡坍塌、飞石伤人等各类安全事故。结合技术要素、爆破效应与安全风险的作用规律,构建的全链条安全管控体系,为爆破作业安全管理提供了系统化方案。本研究提出的爆破参数体系、施工规范及防控措施,特别适用于新疆哈密及周边地区的中硬岩质露天矿山。矿山开采中需结合现场实际严格落实管控措施,强化动态监测与应急管理,才能从源头防控风险,保障露天矿山开采作业安全、有序推进,为新疆地区露天矿山爆破作业的安全标准化实施提供工程实践支撑。

[参考文献]

- [1]丁国忠.试论露天矿山爆破技术对矿山安全的影响[J].中国金属通报,2022(16):34-36.
- [2]陈晶晶,林万青,刘翼.露天矿山高陡边坡安全爆破施工技术[J].爆破,2025,42(2):105-110.
- [3]朱国强.露天矿山爆破开采施工技术研究[J].建筑机械,2025(1):151-155.
- [4]唐天富.某露天矿山运用预裂爆破技术控制边坡稳定性[J].有色金属设计,2025,52(1):27-30.
- [5]候钦玉.露天矿山开采中深孔爆破技术的应用研究[J].科技与创新,2025(17):114-116120.

作者简介:孙高锋(1984.10—),毕业院校:第二炮兵工程学院,所学专业:机械电子工程,当前就职单位:新疆维吾尔自治区地质局哈密地质大队,职称级别:机电中级,有注册安全工程师。