

复杂地质条件下矿山爆破飞石、震动危害控制对策研究

简江松

中国葛洲坝集团易普力股份有限公司禹州分公司 河南 许昌 452570

摘 要: 矿山爆破是资源开采的核心手段,但复杂地质条件下爆破飞石和震动危害的不可控性显著增加,严重威胁人员设备安全及周边环境稳定。本文从复杂地质条件的特殊性出发,系统分析了断层破碎带、节理裂隙发育区、岩性突变界面及含水构造等地质因素对爆破飞石和震动危害的放大机制,揭示了地质结构面对爆炸能量传播路径的偏转与聚集效应。在此基础上,分别从飞石控制和震动控制两个维度,提出了涵盖爆破参数精细化设计、装药结构优化、微差起爆技术、预裂与缓冲爆破、数字化监测反馈等系统化控制对策。进一步探讨了飞石与震动危害的内在关联性及协同控制原则。研究旨在为复杂地质条件下的矿山爆破安全施工提供系统的理论指导与技术对策框架。

关键词: 复杂地质条件; 矿山爆破; 爆破飞石; 爆破震动; 危害控制

引言

爆破作业是矿山露天开采和地下掘进中最主要的破岩手段,其效率高、成本低的优势使其在可预见的未来仍不可替代。然而,爆破所产生的次生效应——飞石和震动——始终是矿山安全生产面临的主要威胁。飞石可能伤及人员设备、损坏周边构筑物;震动则可能诱发边坡失稳、地表沉陷乃至地震波传播范围内的建筑物损伤。在复杂地质条件下,这些问题更为尖锐。断层、破碎带、节理密集区、岩性突变界面等地质不连续面的存在,使爆炸能量的传播与耗散规律发生显著畸变,飞石的抛掷方向和距离难以预判,震动峰值速度和频率成分出现异常放大。长期以来,爆破危害控制主要依托经验公式和现场试验,对地质条件的考量较为粗略。面对复杂地质条件,这种“平均化”的控制思路往往失效,需要在深入理解地质因素影响机理的基础上,采取更具针对性的技术对策。本文从复杂地质条件的工程特征出发,系统分析其对飞石和震动危害的影响路径,进而分别提出两类危害的控制技术措施,并探讨二者的协同管理原则,以期复杂地质条件下矿山爆破安全控制提供理论依据和技术参考。

1 复杂地质条件对爆破危害的影响机理

1.1 复杂地质条件的类型及其对爆炸能量传播的影响

与爆破危害控制相关的复杂地质条件主要包括:断层破碎带——岩体完整性被破坏,爆炸应力波在穿越断层时发生反射、折射和模式转换,能量分布规律被打乱;节理裂隙密集区——多组结构面将岩体切割成块状

或碎裂状,爆生气体沿裂隙优先膨胀,能量泄漏通道增加;岩性突变界面——不同波阻抗岩层的界面处,应力波的透射与反射系数发生突变,可能造成局部能量聚焦;含水构造——地下水对岩体强度有软化作用,同时水的不可压缩性改变了应力波的传递特性^[1]。上述地质条件的影响本质上是破坏了爆炸能量在均匀介质中传播的“有序性”,使原本可按经验估算的飞石范围和震动强度变得高度不确定。

1.2 地质结构面对飞石抛掷规律的畸变效应

飞石的产生源于爆轰气体驱动的岩块加速过程。在完整岩体中,飞石的抛射方向主要取决于最小抵抗线方向和炮孔布置参数,具有较好的可控性。但在复杂地质条件下,结构面的存在改变了这一规律:当炮孔穿越断层或密集节理带时,爆炸能量优先沿结构面释放,形成“定向导流”效应,飞石可能沿结构面方向获得异常高的初始速度,向非预期的方向抛射,抛掷距离可能超过常规经验公式预测值的2~3倍。此外,结构面与自由面的组合可能形成楔形体,在爆生气体的楔入作用下产生“弹射”效应,小尺寸岩块可能以极高的初速度飞出,其轨迹难以预测。

1.3 地质构造对爆破震动传播的放大机制

爆破震动的强度通常以质点峰值振动速度来衡量,其传播衰减一般服从负幂指数规律。然而,在复杂地质条件下,该衰减规律可能被严重扰乱。凸起地形和山脊部位对地震波产生地形放大效应,顶部振动速度可比平坦地形高出50%~100%;断层带两侧的波阻抗差异使

应力波在界面处发生反射叠加,在断层上盘可能形成震动能量积聚区;而松软破碎带对低频波具有滤波放大作用,可能改变震动信号的主频,使其与周边建筑物的自振频率接近,增加共振破坏风险。更为复杂的是,多条结构面组合可能形成“波导”效应,使震动能量沿特定方向远距离传播而衰减甚缓,扩大了震动的危害范围。

2 爆破飞石危害的系统化控制对策

2.1 基于地质条件的爆破参数精细化设计

控制飞石的根本在于合理设计爆破参数,使其与当前地质条件相匹配,而非机械套用统一参数。在断层破碎带或节理密集区域,应适当减小炮孔直径和药卷直径,降低单孔装药量,控制爆生气体的初始压力峰值,从源头上削弱飞石的驱动能量^[2]。孔网参数应根据现场实际裂隙间距进行调整——在裂隙发育区缩小孔距、增大抵抗线,使炸药能量更多地用于岩体内部破碎而非推动表面岩块抛掷。同时,堵塞长度是控制飞石的关键参数之一,在复杂地质条件下应适当加大堵塞长度(不宜小于孔径的30倍),并确保堵塞材料密实度,防止爆生气体过早从孔口冲蚀而出,带出大量碎石。

2.2 合理的装药结构与孔口防护措施

装药结构的优化是飞石控制的另一重要手段。在断层带或岩性分界面附近,可采用“分段装药”或“空气间隔装药”结构,减少炸药与孔壁的直接接触面积,降低粉碎区范围,使更多能量转化为岩体破裂功而非驱动碎块动能。对于抵抗线不均匀的区域,可采用“底部加强、上部减弱”的不耦合装药方式,使能量分布与岩体阻抗分布相协调。在孔口防护方面,应根据飞石威胁等级采取相应措施:对于一般区域,可采用砂袋或碎石压盖孔口,利用重力抑制孔口碎石的初始加速度;对于靠近保护对象(如工业场地、运输道路)的爆区,应采用钢架胶皮网或钢丝网进行全面覆盖,确保即使产生飞石也不会飞离爆区边界。

2.3 爆破方向的选择与安全警戒范围的合理确定

爆破方向直接影响飞石的主要抛掷方向。在复杂地质条件下,应充分利用地质结构面产状信息来选择最优的爆破抛掷方向——原则上应避免抵抗线方向与断层或节理主方向一致,防止结构面成为飞石的“滑道”而放大抛掷距离。对于多面临空的台阶爆破,应优先选择朝向空旷地带抛掷的方案,减小对重要保护目标的威胁。安全警戒半径的确定不能简单按《爆破安全规程》查表取值,而应根据现场地质条件进行修正:断层破碎带和裂隙密集区应取规程值的1.5~2.0倍,并采用“试爆+震

动监测”的方法进行动态校核。同时,应建立警戒区内的清场确认制度,确保起爆前所有人员撤离至安全距离以外。

2.4 特殊地质区域的主动防护措施

对于地质条件极端复杂的局部区域(如大断层交汇处、严重风化囊状区),被动防护难以保证安全,应采取主动干预措施。可采用“预裂爆破”预先切割隔离带,将复杂地质区域与主爆区分割,阻断飞石能量向保护方向传递的路径。具体做法是在主爆区与保护对象之间钻凿预裂孔,采用小孔径、小药量不耦合装药先行起爆,形成贯穿裂缝,该裂缝对后续爆破的应力波和爆生气体具有显著的隔振和阻飞作用^[3]。对于孤立的破碎岩块或探头石,可在主爆之前采用浅孔弱爆单独处理,避免其主爆中成为“飞弹”。这种“先预处理、后整体爆破”的作业模式,虽然增加了施工工序,但能大幅降低飞石失控风险。

3 爆破震动的多维度控制对策

3.1 最大单段药量的严格限制与微差起爆技术

控制爆破震动的核心准则是限制同时起爆的最大药量,因为震动强度与单段起爆药量的 $1/2$ 至 $2/3$ 次方成正比。在复杂地质条件下,该原则的重要性更为突出——地质放大效应意味着同等药量可能产生远大于预期的震动响应,因此单段药量取值应比常规条件更保守,通常按常规设计值的70%~80%控制。微差起爆技术是实现药量分散化的主要手段:通过合理设置各炮孔或各组炮孔之间的延迟时间(一般为25~75ms),使地震波在时间轴上分散到达,避免多个波列同相叠加。在断层发育区,延迟时间应适当延长至上限值,因为应力波在破碎岩体中传播速度降低,需要更长的间隔才能确保波形不叠加。微差顺序的设计还应考虑地质界面对波传播方向的影响,使波列尽量沿衰减较快的方向传播。

3.2 预裂爆破与减震沟的隔振作用

预裂爆破不仅用于飞石隔离,也是控制震动传播的有效手段。预裂缝形成后,其两侧的岩体被彻底切断,应力波传播至裂缝处发生反射和绕射,大部分能量被阻挡在爆源一侧,透过裂缝继续传播的能量通常不超过入射能量的20%~30%。对于重要的保护对象(如临近的边坡、巷道、建筑物),在爆源与被保护物之间开挖减震沟(浅沟或深沟)同样有效——沟槽破坏了地表岩土的连续性,阻断了面波的传播路径^[4]。减震沟的深度和宽度应根据地震波波长确定,通常沟深不小于波长的 $1/4$,宽度不小于0.5m。预裂孔和减震沟的组合使用可

获得更优的隔振效果。

3.3 起爆顺序与延期时间的震动波形调控

微差爆破的震动效应不仅取决于总药量,更取决于各段别药量产生的波列在时间和空间上的叠合关系。通过调整起爆顺序和延期时间,可以主动调控振动波形的相位,利用波列之间的相消干涉来降低合成振动幅值。对于复杂地质条件,应根据现场震动监测数据,运用波形叠加原理进行延期时间的精细优化——采用逐孔起爆技术替代传统的排间微差,使每一个炮孔成为一个独立的震源,通过孔间延时的合理设置(通常为8~25ms),使相邻孔的振动波形尽可能错峰或反相叠加。这种“分散震源、错位叠加”的控制策略,可以在不降低爆破效果的前提下显著削弱远场震动强度。但需注意,地质条件的不均匀性可能导致实际波形与理论预测偏差较大,因此须以现场实测波形数据为基准进行动态调优,而非固守初始设计值。

3.4 震动监测与反馈校正的动态控制循环

震动的复杂性要求控制对策必须是动态的而非静态的。应建立“爆破前预测→爆破中监测→爆破后分析→参数校正”的闭环控制流程。在每个爆区布设至少3个监测点(近区、中区和远区各一),使用振动记录仪记录三向振动速度和主频。将实测数据与设计预测值进行对比,识别震动异常放大的方向、频率成分和衰减规律。在此基础上,对后续爆破参数进行校正:若某方向的震动衰减慢于预期,可调整爆破抛掷方向或在该方向增设减震措施;若某频率成分异常突出,可调整微差时间以改变震动信号的频谱分布。通过2~3轮“监测-校正”循环,逐步建立适用于当前地质条件下的最优爆破参数组合,实现震动控制的持续优化。

4 飞石与震动危害的协同控制原则

飞石控制和震动控制之间存在内在关联与潜在冲突。例如,减小孔径和单孔药量有利于同时抑制飞石和震动,方向一致;但加强堵塞在抑制飞石的同时可能使爆炸能量更充分地约束在孔内并转化为地震波,反而

增加震动强度,两者存在矛盾。协同控制的核心是寻找多目标均衡点。建议采用以下原则:优先满足震动控制——因为震动影响的边界远大于飞石,一旦超标可能引起法律纠纷和结构损伤,是不可逾越的红线;在震动达标的前提下优化飞石防护——通过覆盖、警戒和方向调整等措施降低飞石风险,而非盲目降低药量;利用预裂和缓冲爆破实现双重收益——预裂既能隔振又能阻飞,是协同控制的首选措施。爆破方案设计应采用多目标优化思路,以震动峰值速度、飞石最大距离和爆破破碎效果为约束条件,寻求可调参数(孔径、孔距、排距、装药结构、微差时间)的可行域交集。

5 结语

复杂地质条件下矿山爆破飞石和震动危害的不可预测性显著增强,其根源在于地质结构面对爆炸能量传播规律的深刻扰动。本文系统分析了断层、节理、岩性界面和含水构造等典型地质条件对飞石抛掷方向和距离、震动传播衰减和频率特征的畸变机理,明确了地质因素对爆破危害的放大效应。在此基础上,从爆破参数设计、装药结构优化、微差起爆技术、预裂隔振措施以及动态监测反馈等方面,分别提出了飞石控制和震动控制的系统化对策,并探讨了两种危害的协同控制原则。核心认识在于:复杂地质条件下爆破危害的有效控制,必须建立在对特定地质条件的精细认知之上,依赖静态经验公式和统一规程是远远不够的,应采用“一区一策、动态调优”的差异化控制策略,并将监测反馈作为不断逼近安全最优参数的核心手段。

参考文献

- [1] 汪旭光,郑炳旭,宋锦泉.工程爆破理论与技术进展[J].爆破,2022,39(1):1-10.
- [2] 卢文波,陈明,严鹏.爆破地震波传播与衰减规律研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(7):1321-1332.
- [3] 杨年华,张志毅,金福初.爆破飞石控制技术研究现状与发展[J].工程爆破,2020,26(3):1-8.
- [4] 李夕兵,官凤强,王少锋.复杂条件矿山爆破灾害防控理论与技术[J].中国有色金属学报,2022,32(2):509-522.