

露井联采边坡爆破振动响应与安全控制

张博洋¹, 李祥龙^{1,2,3}, 王浩^{1,4}, 胡涛¹, 王建国¹, 刘金保^{1,5},

陈钊云^{1,6}

- (1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;
2. 云南省教育厅爆破新技术工程研究中心, 云南 昆明 650033;
3. 教育部云南高等研究院, 云南 昆明 650093;
4. 国能神东煤炭集团有限责任公司大柳塔煤矿, 陕西 榆林 719315;
5. 云南磷化集团有限公司, 云南 昆明 650600;
6. 西南联合研究生院, 云南 昆明 650500)

摘要: 在露井联采过程中, 为了控制井下中深孔爆破振动对露天边坡的破坏, 采用现场振动监测、理论计算、数值模拟方法, 研究露天边坡的动力响应规律。通过对监测数据进行回归分析, 得出考虑高程条件下的露天边坡振动衰减规律, 并对振动主频及频谱能量进行了分析。采用 MIDAS GTS NX 软件, 建立了边坡岩体以及重点考虑断层的矿区三维数值模型, 研究了爆破荷载作用下不同方位边坡的动态响应规律。结果表明: 井下中深孔爆破作用下, F1 断层因波阻抗变化导致振动响应显著衰减, 其断层所在边坡表面形成潜在滑动带, 且反射波干涉导致邻近断层区域振速异常增大; 东帮边坡振速及拉应力峰值最高且随高程单调递减, 揭示岩体特性主导能量衰减, 弱化了高程放大效应; 南帮边坡则受断层调制作用呈现不规则响应。通过拟合应力与振速之间的关系, 利用极限拉应力准则并考虑边坡工程安全性系数推导出振速安全阈值为 10.52 cm/s。基于安全阈值调整爆破参数后, 既保障了邻近露天边坡的安全, 同时保障了爆破效果, 验证了参数优化的工程价值。

关键词: 露井联采; 井下中深孔爆破; 爆破振动; 边坡动力响应; 安全阈值; 参数优化

中图分类号: O383; TD235; O521.9

文献标志码: A

随着浅部易采资源日趋减少, 露天转地下开采已成为众多矿山维持生产、提高资源利用效率的关键转型路径。但此过程伴随频繁爆破所激发的振动波, 会显著影响边坡岩体的稳定状态, 潜在的引发滑坡、失稳等灾害, 矿山安全运营受到威胁。若边坡失稳, 将直接威胁矿区作业人员安全及生产设施的正常运行。因此, 深入研究爆破振动作用下边坡的动力响应特性, 对于保障矿山安全高效开采及实现可持续发展具有重要意义。

已有研究表明, 边坡地形突变会显著增强爆破振动的高程放大效应^[1], 且该效应仅在一定高程差范围内显著^[2], 考虑高程修正的萨道夫斯基公式预测精度更优, 且断层对振速衰减存在显著影响^[3], 振动台试验揭示了含断层边坡的动力破坏机制^[4], 并建立了相应的边坡损伤评价方法^[5]。

数值模拟是边坡动力分析的重要手段: 井下爆破引起的边坡振速衰减慢于露天爆破^[6], 时程分析可有效反映边坡动态响应过程^[7], 含软弱夹层边坡的动力响应与岩体固有模态密切相关^[8], 结合模拟与稳定性分析可确定振速安全阈值^[9]。近年来, 有关露井联采条件下边坡动力响应的研究多聚焦于露天爆破, 且多局限于理论分析、现场监测或数值模拟中的单一手段, 特别是在利用数值模拟

收稿日期: 2026-06-23 修回日期: 2026-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(52274083); 云南省“兴滇英才支持计划”产业创新人才专项(KKXY202421005); 云南省重大科技专项(202202AG050014)

作者简介: 张博洋(2002-), 男, 硕士, 主要从事岩石破碎及工程爆破研究. E-mail: 18385956666@163.com

通讯作者: 李祥龙(1981-), 男, 博士, 教授, 主要从事岩石破碎及工程爆破研究. E-mail: lx100014002@163.com

时,大多数研究采用简化后的边坡模型,不能真实反映地貌特征,显然不足以评估爆破地震波对边坡结构的实际危害。因此,本研究以拉拉铜矿露井联合开采为工程背景,对爆破振动采取现场监测,利用 MIDAS GTS NX 构建矿区含断层边坡的模型,通过研究井下中深孔爆破作业下的露天边坡动力响应与振速安全阈值,以改进现有爆破振动造成的危害效应评价方法、优化爆破参数,确保工程安全高效实施。

1 工程背景

拉拉铜矿落洞矿区,当前使用露天与地下联合的开采模式: +1890 m 以上为露天开采, +1890 m 以下转为地下开采,采场主体地质构造为 F1 区域性断裂带,该断裂带构成矿区南缘边界控制性构造。该矿地下采场主要采用分段空场嗣后充填法,分段高度一般在 10~20 m 范围内。采用中深孔爆破,钻凿上向扇形深孔,孔径为 $\Phi 80$ mm,每排布置 7~14 个孔,孔深 3.0 m~24.3 m 不等,平均孔深 12.6 m,炮孔排距 1.7 m,孔底距为 1.4 m~2.6 m,采用黏性粒状硝铵炸药进行耦合装药,填塞长度约 1 m,一般每次爆破 5~10 排。受露井联合采叠加影响,矿区边坡应力场复杂,局部已出现垮塌滑落如图 1 所示,急需开展爆破振动下边坡动力响应研究以防控失稳风险。

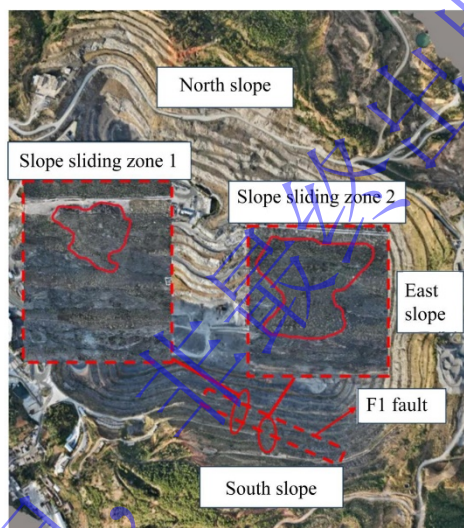


图 1 露天边坡滑落现象
Fig.1 Open-pit slope sliding phenomenon

2 现场振动监测

2.1 边坡监测点布置

在边坡 1986、2034 平台共布置 7 个监测点如图 2 所示,采用 Blast-Q 型高精度测振系统采集振动数据,通过改进萨道夫斯基公式拟合衰减规律,并分析主频与频谱能量特征。

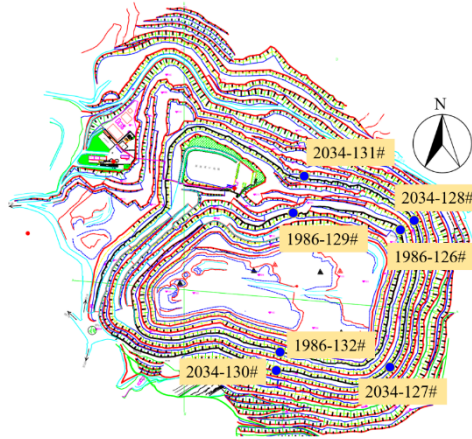


图2 现场振动监测点布置示意图
Fig.2 The layout diagram of field vibration monitoring points

2.2 监测结果

该工程边坡位于爆源上方，由于传感器 X、Y 方向是固定的而爆区位置会经常性发生变化，因此，每次测试均需根据测点与爆区的空间关系进行数据校正：若指向爆心为传感器的 Y 方向则将所得数据纠正为径向分量；与之垂直的 X 方向数据则纠正为切向分量，Z 方向因始终竖直向上，不必进行调整。每次爆破均在 7 个监测点同步采集数据，累计采集 68 次井下中深孔爆破的振动信号，监测点覆盖了 1986 平台与 2034 平台的不同高程台阶，兼顾了爆源正上方（东帮边坡）及侧向（南帮边坡）不同方位的振动响应。通过对数据进行质量控制与异常值筛选，最终得到 333 组有效监测数据。

2.3 监测结果分析

2.3.1 峰值振速分析

现有研究表明，在爆破点低于监测点的上坡地形条件下，传统萨道夫斯基公式对于振速的预测误差比较大。一些研究案例中，预测误差可以达到 50% 以上^[10]。改进后预测模型加入了高程修正因子，能更好地反映这类地形条件下振动波的传播规律。改进萨道夫斯基公式以爆心距 R 和高程差 H 为自变量，不要求测点严格共线；本研究 333 组数据覆盖不同水平距离和高程组合，保证了拟合的统计有效性。引入高程差 H 的修正公式^[11]如下：

$$V = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \left(\frac{|H|}{R} \right)^\beta \quad (1)$$

式中： V 为质点的峰值振速，cm/s； Q 为最大一段起爆药量，kg； $|H|$ 为测点位置与爆心之间高程差绝对值，m； R 为爆心距，m； K 为与场地有关的系数； α 为地质条件相关参数， β 为高程影响系数。

将式（1）两边同时取对数得：

$$\ln V = \ln K + \alpha \ln \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} + \beta \ln \frac{|H|}{R} \quad (2)$$

根据式（1）、（2）式对现场数据进行回归分析，得到爆破振动在露天边坡的衰减拟合结果如图 3 所示，所推导出的不同方向质点以及矢量叠加的峰值振速衰减规律模型如 **Error! Reference source not found.**所示。

表 1 各方向及合速度的峰值振速衰减规律模型

Table 1 The peak vibration velocity attenuation law models of velocity in each direction and resultant velocity

Direction	Peak vibration velocity attenuation model	Coefficient of determination
Radial	$V_x = 1553.83 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{2.03} \left(\frac{ H }{R} \right)^{-0.12}$	0.78
Tangential	$V_y = 1513.38 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{2.12} \left(\frac{ H }{R} \right)^{-0.25}$	0.76
Vertical	$V_z = 838.19 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.95} \left(\frac{ H }{R} \right)^{0.12}$	0.70
Vector superposition	$V_s = 1272.27 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.92} \left(\frac{ H }{R} \right)^{-0.12}$	0.72

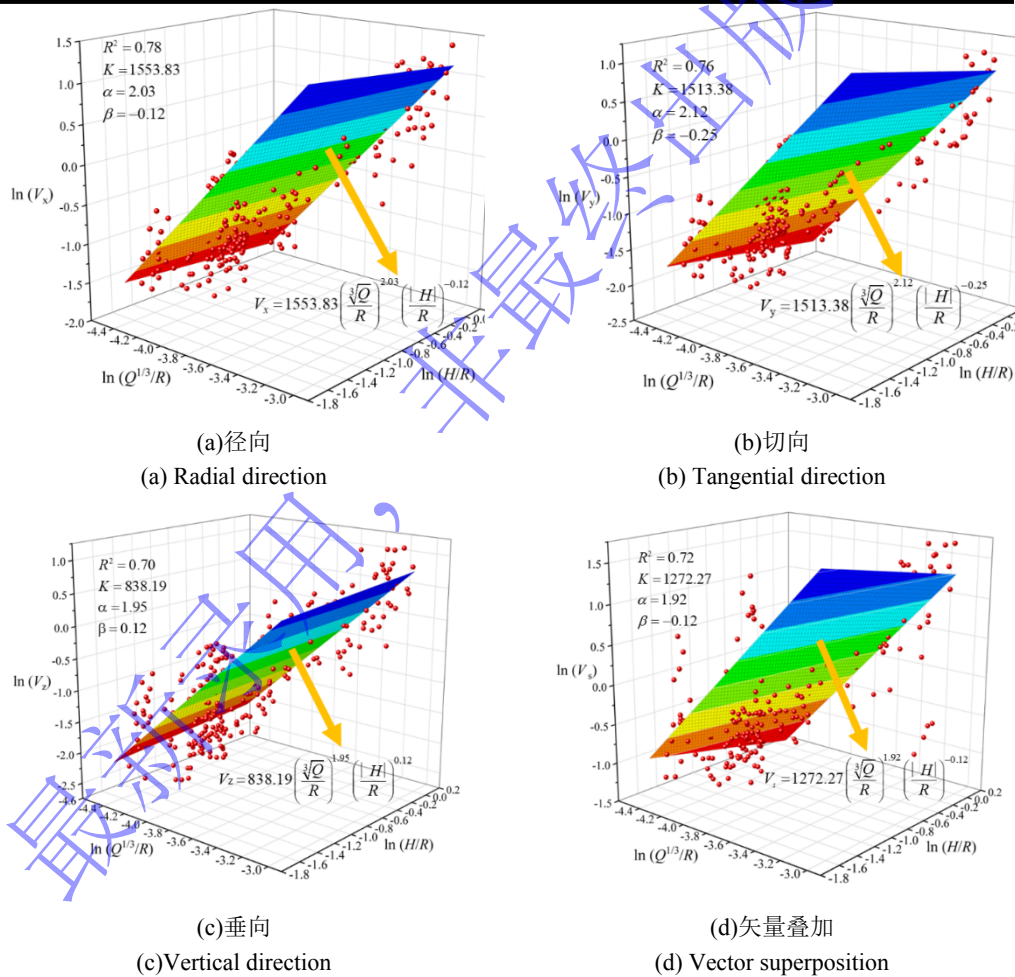


图3 各方向及合速度非线性回归散点拟合图

Fig.3 Scatter plot with nonlinear regression fit of velocity in each direction and resultant velocity

同理采用传统萨道夫斯基公式对上述数据进行回归拟合, 所得到的3个方向及矢量叠加后的峰值振速衰减规律拟合决定系数 R^2 仅在 0.50~0.60 这个区间, 而由表 1 可知, 基于高程效应的改进萨道夫斯基公式 3 个方向及矢量叠加后的峰值振速衰减规律拟合决定系数 R^2 均超过 0.70, 拟合效果得到了显著提高, 改善后的萨道夫斯基公式可以更有效地反映边坡台阶的爆破振动特征和规律。

这为科学评估地下生产爆破对边坡的影响提供了依据。

2.3.2 主振频率分析

动力学分析表明,若爆破振动优势频率与边坡岩体固有振动频率相匹配,将诱发其产生共振现象,致使岩体动态响应显著增强,并加剧工程结构的破坏进程。基于此,结合结构物的固有频率,“振速 - 频率”双因素判据近年来已被学术界广泛用于结构安全评价^[12-13]。为得到上述 333 组振动监测数据三个方向主振频率的直观分布特征,以 10 Hz 的频率变化为一个区间,来划分主振频率范围,所得到的频率主要分布区间如图 4 所示。可以发现三个方向的主振频率普遍超过 10 Hz,主要分布在 10~50 Hz 范围内,其中 10~20 Hz 频段呈现显著集中趋势,而一般岩质边坡固有振动频率在 2~10 Hz 区间^[14],这表明地下采场爆破,所产生振动波对边坡产生的动力扰动效应处于可控范围。

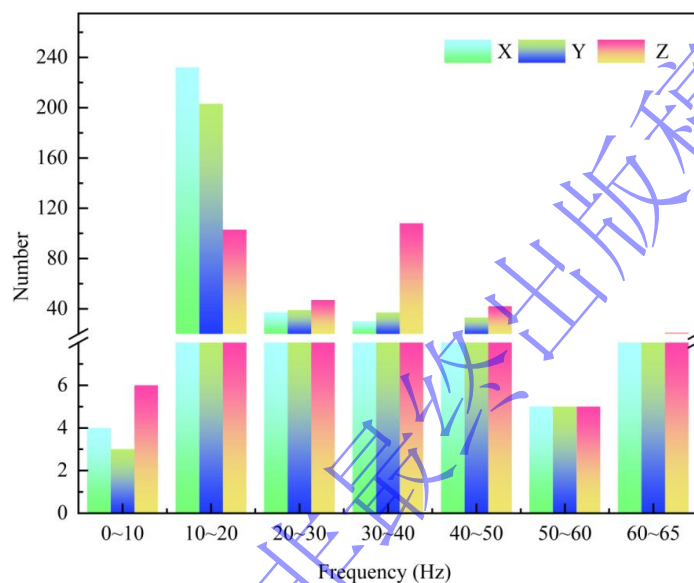


图 4 主振频率分布

Fig.4 Dominant vibration frequency distribution

2.3.3 振动信号频谱能量分析

对振动信号采用希尔伯特黄变换进行能量分析^[15]。选取井下某次中深孔爆破中的边坡振动数据,爆源中心与各监测点的位置关系如图 5 所示。

选取南帮边坡 127 号(2034 平台)、130 号(2034 平台)、132 号(1986 平台)三个测点,均位于 F1 断层带附近,沿爆源径向分布,水平距离分别为 299.7 m、91.2 m、39.1 m,对比发现:3 个监测点均在 X 方向上的峰值振速最大,其中 132 监测点距离爆源水平距离最近、与爆源高程差最小,所测到的峰值振速也相较其他两个监测点大,127 监测点与 130 监测点与爆源的高程差相同,爆源水平距离越大,峰值振速就越高。对这 3 个监测点 X 方向振速的振动信号进行能量分析,对应的振动波形和三维能量分布见图 6 和图 7 所示。

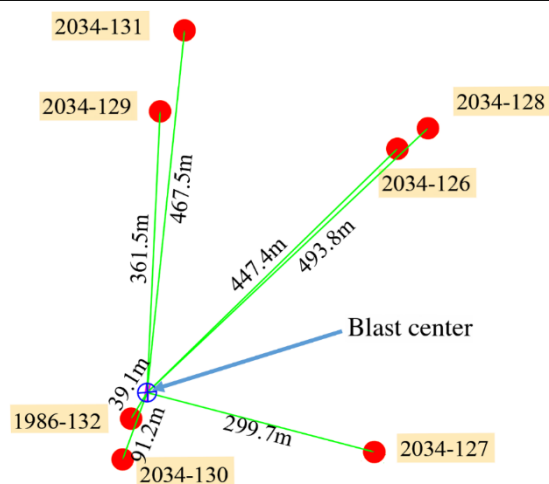


图 5 各监测点与爆源中心的位置关系

Fig.5 Positional relationship between monitoring points and explosion source

分析图 7 可知, 132 监测点高程为 1986 m, 与爆源中心水平距离 39.1 m, 该点较大振动能量集中于 0~20 Hz 频段, 峰值能量出现在 10~20 Hz。130 监测点高程升至 2034 m, 水平距离增大至 91.2 m, 随着高程与水平距离的同时增加, 其较大振动能量分布扩展至 10~40 Hz 频段, 峰值能量迁移至 20~30 Hz, 可发现较大能量分布频带明显展宽, 且主振频带向高频方向移动。127 监测点相比于 130 监测点, 高程未发生变化但水平距离增加了 208.5 m, 峰值能量主要分布在 30~40 Hz 频段。主振频带继续向高频带扩展。上述分析中 127、130、132 监测点位于南帮边坡且处于 F1 断层带附近, 该断层带由发育程度各异的不定倾向节理裂隙及岩土介质构成。从结构动力学的角度分析, 爆破荷载作用下的边坡是一个多自由度有阻尼的振动系统, 有多阶固有频率。爆破地震波在这片区域的边坡岩体里传播。高程和水平距离越大, 主要能量分布的频带就越宽, 主振频带也越往高频走。因为裂隙发育的岩体结构有多种振型, 爆破地震波产生了综合响应。后续进行动力响应分析, 应该重点考虑 F1 断层带。

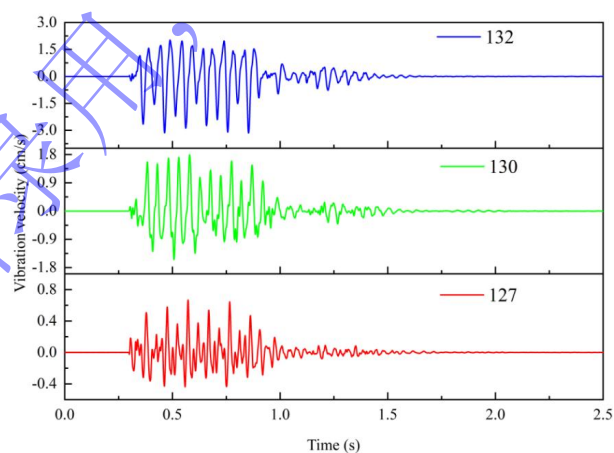


图 6 不同监测点 X 方向振速时程曲线

Fig.6 Vibration velocity time history curves of different monitoring points in X direction

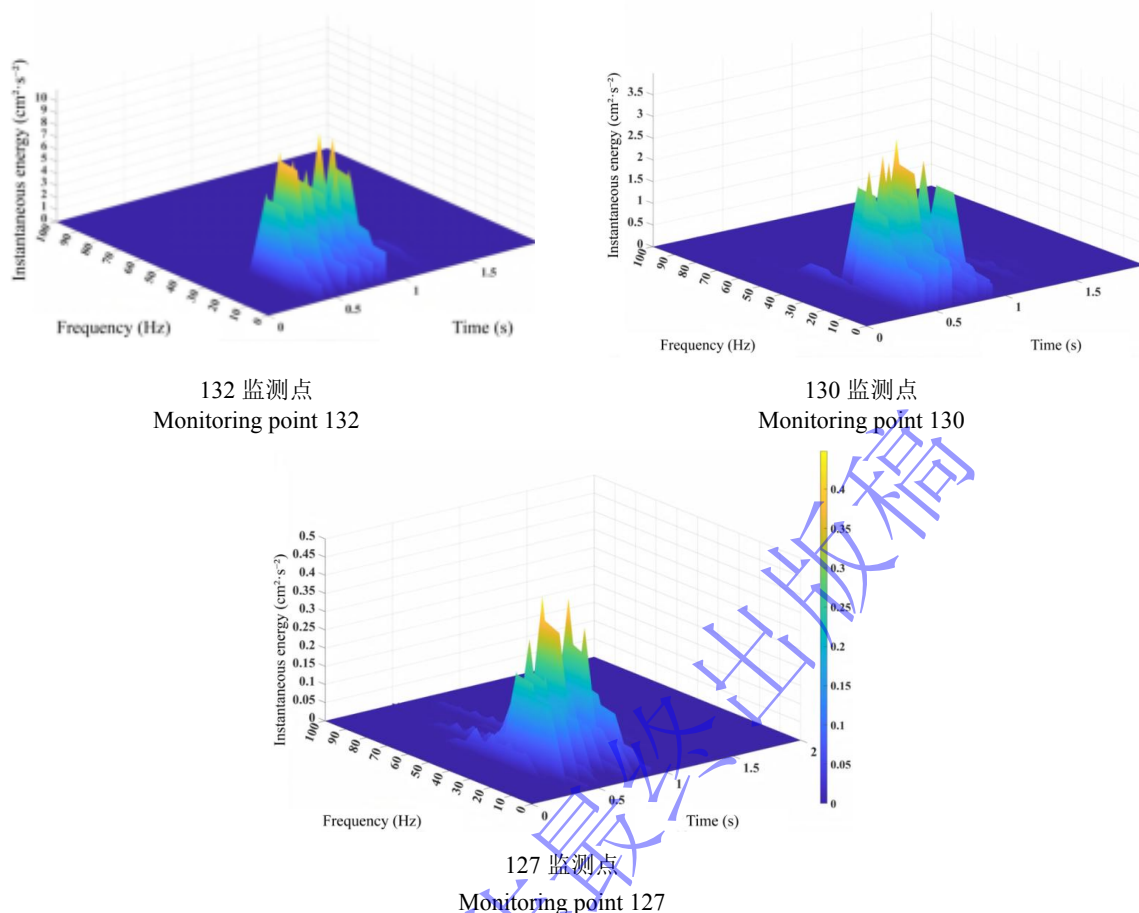


图 7 不同监测点对应的三维能量图谱

Fig.7 Three-dimensional energy spectrum corresponding to different monitoring points

3 数值建模及验证

3.1 模型建立及参数选择

为了推进研究井下中深孔爆破作用下露天边坡的动力响应特征, 本文使用软件 MIDAS GTS NX 进行模拟。本研究基于拉拉铜矿露天采场的最终设计平面图, 结合现场实地勘测数据, 对该矿区的终了平面图进行了优化处理。通过整合勘测数据, 对边坡轮廓线进行了高程赋值。通过岩层分布特征对模型进行分区, 构建出与拉拉铜矿露天边坡高度吻合的三维数值仿真模型。拉拉铜矿的露天边坡的三维数值模型见 **Error! Reference source not found.**。

通过地形生成器构建的地表经拉伸处理后, 其三维边坡模型展现出长 1200 m、宽 650 m、最高处约 600 m 的特征。数值模拟的精确度与网格尺寸密切相关, 精细化网格划分能提升模拟精度, 但过密的网格划分会显著降低计算效率, 因此计算选择混合型网格^[16], 将网格尺寸设置为 15 m, 通过划分, 构建了包含 177397 个单元和 125070 个节点的网格系统。

模型上表面则设置为自由边界, 其侧面与底面施加静态边界以显著减弱人工边界反射效应。阻尼效应在数值模拟中得以体现存在很大的困难, 通常在工程中为了达到最佳拟合结果, 通过建立阻尼参数与现场振动监测数据的迭代反演优化流程, 实现计算结果与实测值耦合根据试算, 本模拟采用的最小临界阻尼比为 0.05。针对模型不同岩体力学参数的选取, 参考同一矿山相关研究成果^[17], 选取结果如表 2 所示。

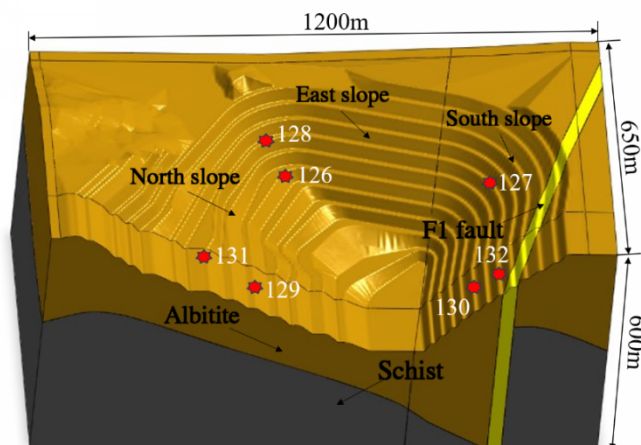


图 8 边坡三维模型图
Fig.8 Slope 3D Model Diagram

表 2 岩体力学参数选取表

Table 2 Selection table of rock mass mechanical parameters

Lithology	Elastic modulus(GPa)	Tensile strength(MPa)	Poisson's ratio	Cohesion(MPa)	Internal friction angle(°)	Density(g/cm ³)
Albitite	7.80	4.89	0.24	1.2	38.21	2.82
Schist	7.68	2.43	0.29	1.02	36.16	2.98
F1 fault	0.60	1.02	0.35	0.1	28.05	2.50

3.2 爆破荷载等效过程

(1) 爆破荷载施加形式

为了简化大模型地下开采中深孔爆破振动效应的数值计算，相关研究表明可在模型内部建立与现场爆破尺寸一致的空腔，并在其表面施加等效时程荷载^[18]。本研究采用该方法，使用等效荷载加在同排炮孔连心线所在的竖直平面上。选用三角形脉冲荷载形式作为等效荷载，该荷载需确定的关键参数包括峰值强度、压力上升时间及总作用时间。

(2) 等效爆破荷载峰值强度的确定

爆破荷载峰值强度为炸药爆炸后爆生气体作用于炮孔壁的峰值压力。拉拉铜矿井下中深孔爆破采用耦合装药方式，其峰值强度为炸药爆轰时产生的爆轰波阵面压力（C-J 压力）的 50%^[19]，即：

$$P_0 = \frac{P_D}{2} = \frac{\rho_e D^2}{2(\gamma + 1)} \quad (3)$$

式中：P₀ 为耦合装药下的爆破荷载的峰值压力，KN；P_D 为 C-J 压力，KN；ρ_e 为炸药密度，kg/m³；D 为爆轰速度，m/s；γ 为等熵指数，一般取值为 3。

要得到等效爆破荷载的峰值强度。按照圣维南原理的等效原则，把原来作用在圆形孔壁的环形

压力 P_0 ，转换成沿炮孔中心线分布的等效线荷载。等效压力的计算式如下^[20]：

$$P_e = (2r_0 / d)P_0 \quad (4)$$

式中： P_e 为等效峰值压力，KN； r_0 为炮孔半径，m； d 为相邻炮孔间距，m。

(3) 爆破荷载作用时间

等效边界面上作用的是三角形脉冲荷载。有两个参数需要确定：压力上升需要的时间 t_r 和总作用时长 t_s 。爆破荷载压力上升需要的时间为^[21]：

$$t_r = 12\sqrt{\bar{r}^{2-\mu}} Q_h^{0.05} / K_v \quad (5)$$

爆破荷载总作用时长为：

$$t_s = 84\sqrt[3]{\bar{r}^{2-\mu}} Q_h^{0.2} / K_v \quad (6)$$

式中： K_v 为岩体体积压缩模量； $\bar{r}$ 为比例距离； μ 为岩体泊松比； Q_h 为单个炮孔装药量，kg。

3.3 数值模拟验证

为验证模型建立以及爆破荷载加载方式的合理性，在数值模型中选取与实际生产现场一致的爆破地点来进行测点振速现场监测数据与模拟结果的对比验证。对应于现场现场生产的尺寸大小，预设一个长宽高分别为 50 m、15 m、50 m 的立方体空腔，根据爆破设计方案的各项爆破参数，再由式 (3) ~ (6) 分别计算可得等效荷载的峰值压力为 54 MPa；爆破荷载压力上升阶段的时长是 10 ms；总作用时长为 91 ms，并将计算所得的等效时程荷载施加在所设立空腔的 10 m 上端，具体加载面分布如图 9 所示。

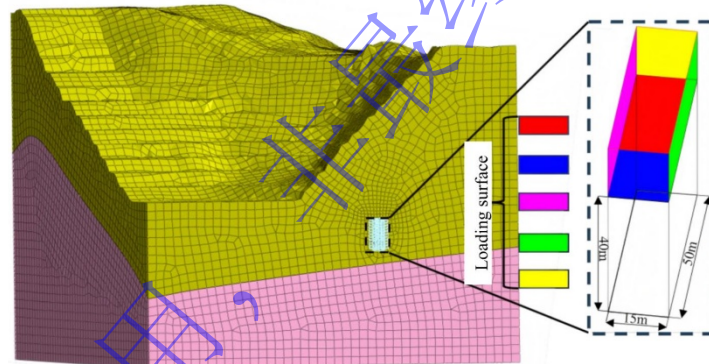


图 9 爆破荷载施加示意图

Fig. 9 Schematic diagram of blasting load application

由图 8 (a) 可知实际现场监测位置在数值模型中的对应关系，将得到的模拟计算的结果以及现场振动监测数据记录于表 3。根据表 3 实测数据记录显示，各方向质点峰值振速分布在 0.319~2.314 cm/s 区间，而数值模型输出的质点峰值振速则处于 0.345~2.831 cm/s 区间，其中 X 方向的平均误差为 18.40%，Y 方向的平均误差为 17.36%，Z 方向的平均误差为 22.57%，量级一致性良好，验证了模型可靠性。现场监测仅提供离散点数据，验证后的数值模型可提取任意位置响应，为建立振速-应力关系及确定安全阈值提供依据，二者形成互补。

表 3 各监测点质点振动数据对比

Table 3 Comparison of particle vibration data at each monitoring point

Monitoring point	PPV (cm/s)					
	Measured X	Simulated X	Measured Y	Simulated Y	Measured Z	Simulated Z
126	0.604	0.615	1.123	1.180	0.689	0.607
127	2.117	2.532	2.314	2.361	2.139	2.831
128	0.874	0.806	0.716	0.67	0.562	0.508

129	0.319	0.345	0.55	0.346	0.409	0.352
130	1.423	1.399	1.054	1.305	0.381	0.525
132	0.782	1.196	0.725	0.815	0.405	0.526
Average error		18.40 %	17.36 %	22.57 %		

3.4 位移及剪切应变增量响应

由于施加的等效荷载在 10 ms 时到达峰值, 因此选取 10 ms 时的计算结果来进行分析。图 10 为爆破荷载下 X、Y、Z 方向的位移云图, 由图 10 (a) 可以得出, X 方向露天边坡坡面整体位移都不显著, 离空腔最近边坡的坡脚区域形成显著的位移集中带, 直观反映爆破冲击的侧向推挤效应。由图 10 (b) 可以看出, 边坡在爆破荷载条件下主要沿着 Y 轴的负方向位移, 其中南帮边坡的坡面整体位移量较大。由图 10 (c) 可知边坡在自重以及爆破荷载的影响下沿着 Z 方向负方向位移, 在坡顶处的位移量是最大的。

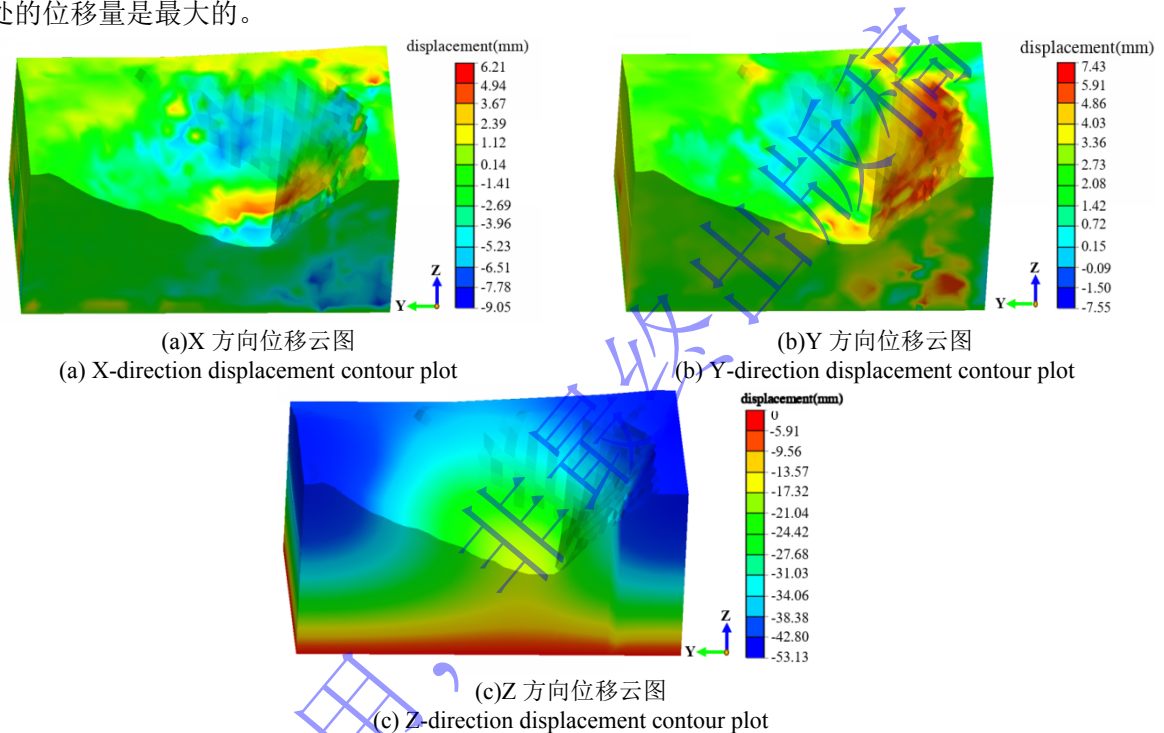


图 10 爆破荷载下不同方向位移云图

剪应变增量的大小, 可以用来判断边坡的潜在的滑动面 (带), 剪应变增量大的区域, 通常对应潜在的滑动面 (带)。变形破坏大多沿着这个区域发展, 剪应变的增量小或者变化不大的区域, 不容易有潜在滑动面。这些地方的变形和破坏程度也比较小。由图 11 可知, 剪切带主要分布在 F1 断层所在区域的坡体表面, 体现为上方的岩体沿剪切带的下切落下, 这与现场实际情况相印证, 再次证明了数值模型的合理性。

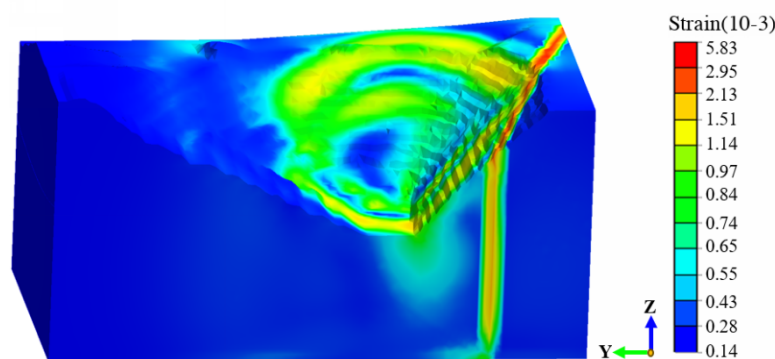


图 11 爆破荷载下剪切应变增量云图

3.5 边坡振动响应

边坡的振动响应主要用结构的峰值振速和峰值拉应力来分析^[9]。拉拉铜矿在露井联采条件下矿体主要集中于东帮边坡的坡底正下方，即东帮边坡位于爆源正上方，而南帮、北帮边坡位于爆源侧边，东帮、南帮、北帮的边坡高度和边坡角都不一样。三帮边坡的爆破振动动力响应特性也存在差异。北帮边坡坡度较缓，稳定性比东帮、南帮好。因此，在东帮、南帮边坡和 F1 断层坡面上，按高程从低到高各选 7 个监测点。分别分析处于不同位置的露天边坡的峰值拉应力和峰值振速的变化规律。监测点的布置如图 12 所示，模拟结果如图 13 所示。

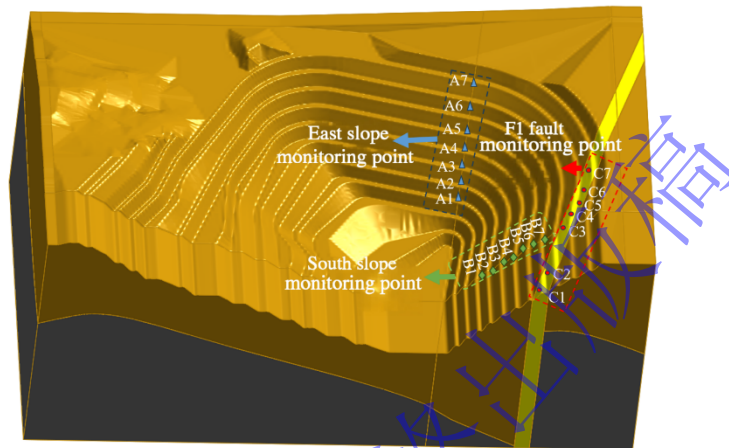


图 12 监测点选取位置
Fig.12 Selection of monitoring points

由图 13 (a)、图 13 (b) 可知，东帮边坡随着监测点 (A1~A7) 高程从低到高依次递增，所监测到的峰值振速以及峰值拉应力呈现单调递减的规律，尽管相关研究中得出振速对高程效应通常具有显著敏感性，但在东帮边坡中并不明显，这表明该区域岩体参数与几何特性对爆破能量传播产生主导性衰减效应。南帮边坡随着监测点 (B1~B7) 高程从低到高依次递增，所监测到的峰值振速及峰值拉应力呈现先上升后下降再上升的变化趋势，说明高程效应的放大作用有限，而出现爆破振动速度增大的监测点 B7 临近断层带，断层带的不规则界面导致波阻抗变化和反射波干涉，造成局部振速异常。

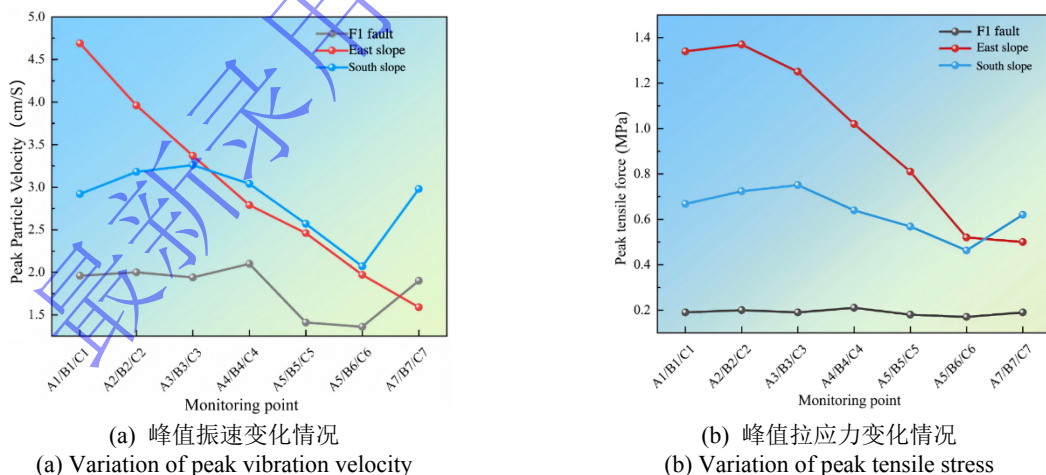


图 13 不同区域各监测点峰值振速、拉应力及变化情况

Fig.13 Peak vibration velocity, tensile stress and their change of each monitoring point in different regions

3.6 边坡振速安全阈值

由于爆破荷载对边坡的稳定性弱化作用较强，其引发的地震波抵达边坡表面之际，受自由面效应的作用，地震波会在边坡表面发生反射现象，进而在坡面产生拉应力^[22]。这种拉应力会导致坡面岩体内部产生许多微小裂隙，极有可能引发局部坍塌或者滚石等地质灾害，工程结构的稳定性受到严重威胁，所以需要爆破荷载下的边坡稳定性制定一个合理依据。

根据动力响应分析结果,可以发现南帮边坡、F1 断层、东帮边坡这些关键区域监测点的峰值振速与峰值拉应力分布特征较为相似,因此,试图从统计角度建立两者的函数关系,图 14 表明:边坡关键区域的各监测点峰值振速和峰值拉应力之间存在线性关系,所得的拟合方程如表 4 所示。

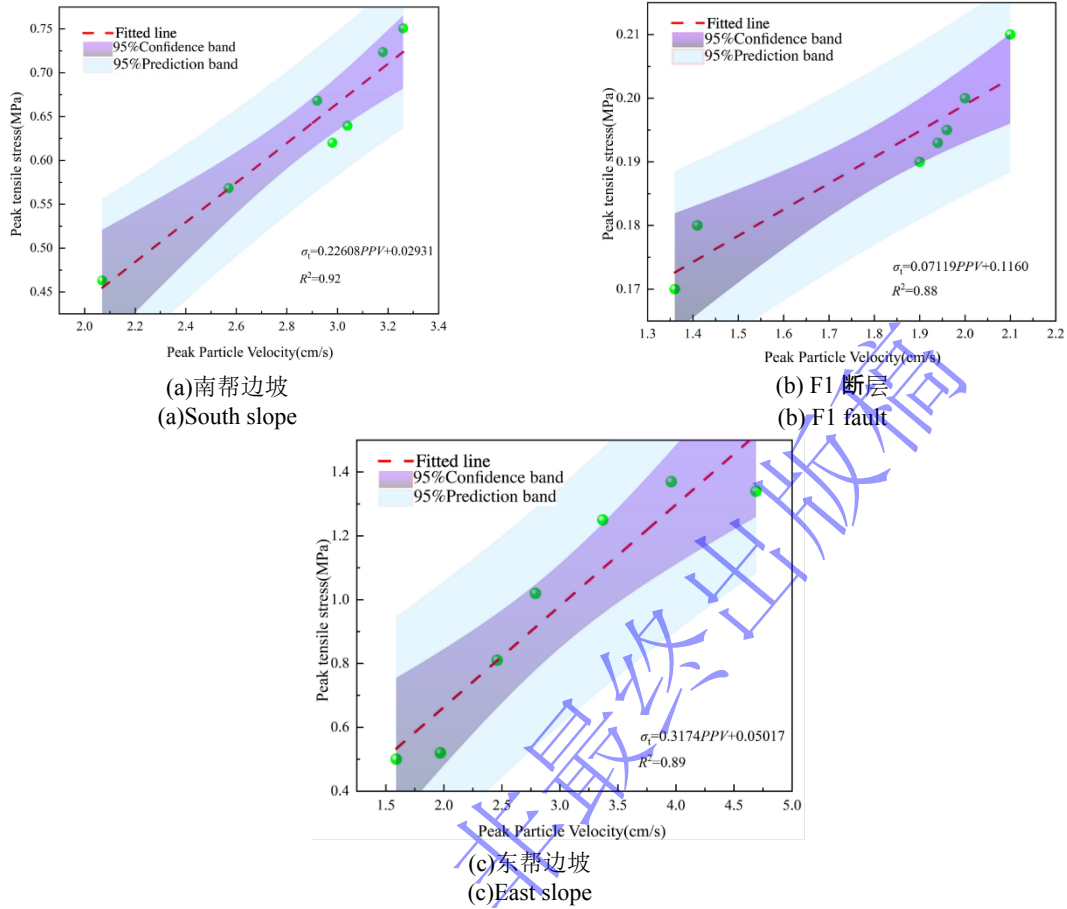


图 14 边坡关键区域的峰值振速-峰值拉应力拟合曲线

Fig. 14 Fitting curve of peak vibration velocity-peak tensile stress in key area of slope

表 2 关键区域各监测点峰值振速与峰值拉应力的线性拟合公式

Table 4 The linear fitting formula for peak vibration velocity and peak tensile stress of each monitoring point in the key

area		
位置	线性拟合公式	决定系数
South slope	$\sigma_t = 0.22608PPV + 0.02931$	0.92
F1 fault	$\sigma_t = 0.07119PPV + 0.1160$	0.88
East slope	$\sigma_t = 0.31740PPV + 0.05017$	0.89

在爆破动荷载作用下,岩体的动态强度会有一定的提高。岩体的静态抗拉极限强度与动态抗拉极限强度的关系如下^[23]:

$$\sigma_t = K_\alpha \sigma_{ID} \quad (7)$$

式中: σ_t 为岩体动态抗拉强度, MPa; K_α 为岩体强度增大系数, 通常取 1.24~1.48, 本研究

取中间值 1.36; σ_{ID} 为岩体单轴抗拉强度, MPa。

南帮、东帮边坡坡面岩体大多为钠长岩，其单轴抗拉强度为 4.89 MPa，代入式（7）中，得到南帮、东帮边坡坡面岩体的动态抗拉强度为 6.65 MPa，F1 断层岩体单轴抗拉强度为 1.02 MPa，同理得到动态抗拉的强度为 1.39 MPa，把上述三个区域岩体的动态抗拉强度代入表 4 中的拟合方程，可得南帮边坡、东帮边坡、F1 断层的振速阈值分别为 29.28、20.79、17.89 cm/s。由于该矿区露天边坡作为永久性高边坡，若发生落石、塌方或滑坡等地质风险事件，将直接危及作业人员安全并破坏地下采场正常生产。为保证矿山边坡工程的安全稳定，需基于工程重要性对安全阈值进行修正。按照《建筑边坡工程技术规范》（GB 50330-2013），本矿区露天边坡是永久性高边坡，安全等级为一级。同时参照《爆破安全规程》（GB 6722-2014）对永久性的岩石高边坡的严格要求，考虑爆破振动的累积损伤效应，最终确定重要性修正系数 C_i 取为 1.7。

基于极限拉应力准则下的所得安全判据，同时计入边坡工程重要性修正系数后，可重新得到南帮边坡、东帮边坡、F1 断层的振速阈值分别为 17.22、12.23、10.52。前面的研究表明，该矿区露天边坡的振动频率主要分布在 10~50 Hz。《爆破安全规程》（GB 6722-2014）对矿山永久性岩石高边坡的爆破振动安全评价标准规定如下：当结构物振动频率 $10 \text{ Hz} < f_0 < 50 \text{ Hz}$ 时，其爆破振速控制阈值范围应为 8~12 cm/s，综合考虑，本研究最终取安全振动速度为 10.52 cm/s。

4 基于最大单段药量的现场爆破参数优化

通过上文现场振动监测数据回归分析得到了 K 、 α 、 β 值，经过数值模拟分析，该矿山露天边坡的安全振速为 10.52 cm/s。根据改进后的萨道夫斯基公式，可以反推出最大单段药量的计算式：

$$Q_x = 0.000616 \frac{R^{2.8227}}{|H|^{-0.1773}} \quad (8)$$

$$Q_y = 0.000875 \frac{R^{2.6462}}{|H|^{-0.3538}} \quad (9)$$

$$Q_z = 0.001176 \frac{R^{3.1846}}{|H|^{0.1846}} \quad (10)$$

选取某次爆区离边坡台阶较近的情况进行爆破参数优化调整，爆区处于 1860 水平，距离最近边坡台阶水平距离仅 7 m，高程差为 102 m，根据式（8）-（10）计算得出最大单段安全药量应为 497.59 kg。依据矿山目前设计的开采方案，最大单段药量为 646 kg，因此需对该采场进行药量控制。为控制最大单响药量，在装药过程中通过在每个炮孔采用空气间隔分两段装药，使同一排相邻炮孔的装药截止面呈现锯齿状，将最大单段药量调整为 353 kg，每排中深孔分 2 段毫秒延期起爆，延期间隔时长为 50 ms，排间炮孔改为错开布置。优化后的矿房中深孔爆破参数如表 5 所示。

表 3 矿房中深孔爆破参数表

Table 5 Parameter table of deep hole blasting in mine room

Burden (m)	Maximum charge per delay (kg)	Hole bottom spacing (m)	Empty hole length (m)	Delay time (ms)
1.8	353	2.7	2.0~3.0	50

两个监测点的爆后振动时程曲线如图 15 所示，图中显示，127 监测点的最大峰值振速为 4.45 cm/s，132 监测点为 1.67 cm/s。两个监测点的数值都在安全阈值以内。

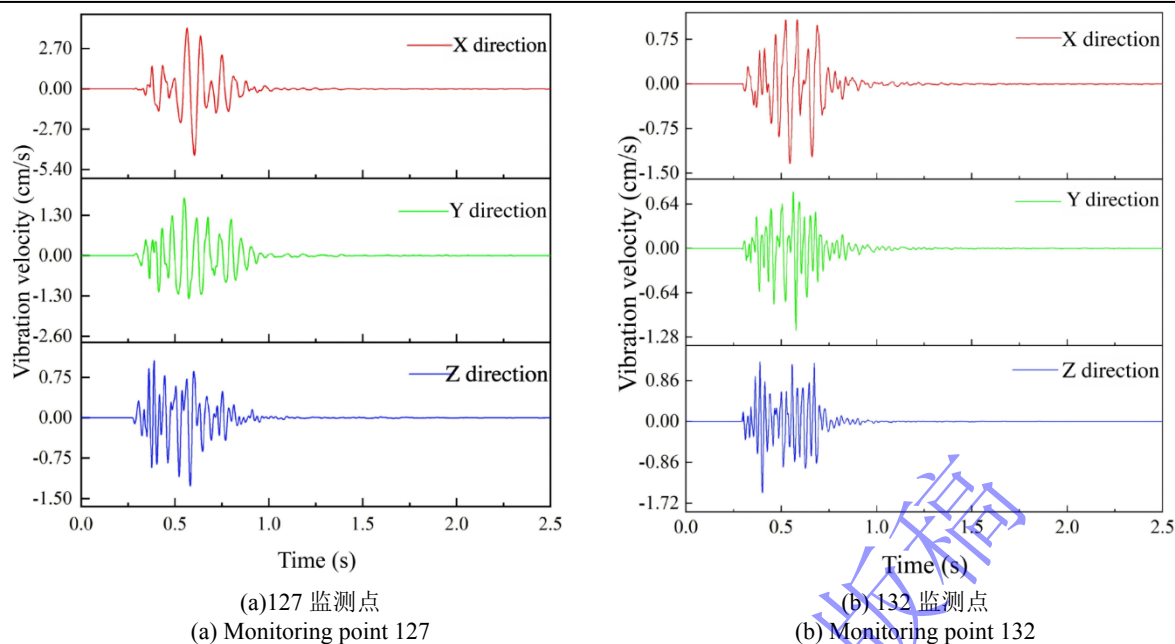


图 15 现场两监测点振动时程曲线

Fig.15 Vibration time history curves of two monitoring points on site

5 结 论

综合对井下上向扇形中深孔爆破现场的振动监测及数值模拟, 分析了露天边坡爆破振动响应特性, 得出以下结论。

(1) 对井下中深孔爆破荷载作用下的露天边坡质点振动进行跟踪监测, 综合分析质点峰值振速、主振频率和振动信号能量, 通过回归分析, 揭示地震波在边坡传播的衰减规律, 得到爆区的振动衰减系数 K 、 α 、 β , 为优化爆破参数提供了参考依据。

(2) 数值模拟结果显示, 爆破荷载作用下, 露天边坡不同区域的位移、峰值振速和峰值拉应力都有相应的响应, 基于极限拉应力准则得出了露天边坡峰值拉应力与峰值振速之间的关系, 考虑边坡工程重要性系数和相关安全规程, 最终计算得出边坡振动的安全阈值为 10.52cm/s。

(3) 利用现场监测数据拟合出衰减系数, 结合数值模拟得到的安全阈值, 计算得出安全最大单段药量。对于邻近边坡, 通过预留一定长度的空孔降低单孔装药量、同排炮孔分两段起爆、排间炮孔错开布置等措施, 有效降低了爆破荷载对邻近边坡的扰动, 同时保证了矿岩的破碎效果, 验证了参数优化方案的工程适用性。

参考文献

- [1] 陈明, 卢文波, 李鹏, 等. 岩质边坡爆破振动速度的高程放大效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2189-2195.
CHEN Ming, LU Wenbo, LI Peng, et al. Elevation amplification effect of blasting vibration velocity in rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11): 2189-2195. (in Chinese)
- [2] 张小军, 汪旭光, 崔新男, 等. 台阶高度对爆破振动高程效应的影响研究[J]. 中国矿业, 2020, 29(3): 124-129.
ZHANG Xiaojun, WANG Xuguang, CUI Xinnan, et al. Study on the influence of step height on the elevation effect of blasting vibration [J]. China Mining Magazine, 2020, 29(3): 124-129. (in Chinese)
- [3] 何丽平, 汪晓俊, 郭剑雄, 等. 砂泥岩互层岩质边坡爆破振动衰减规律现场试验研究[J]. 高压物

理学报,2023,37(05):174-183.

He Liping, WANG Xiaojun, GUO Jianxiong, et al. Field Experimental Research on Blasting Vibration Attenuation Law of Sand-Mudstone Interbedded Rock Slope [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023,37(05):174-183. (in Chinese)

[4] Wei T, Fan X, Xia M, et al. Hanging wall effects on cross-fault slope failures: Shaking table experiment insights[J]. Engineering Geology, 2025,350:107985.

[5] Meng W, Yuan S, Jiang G. Dynamic Response Mechanisms and Damage Analysis of Slopes Via Wave Theory and Rainfall Shaking Table Tests[J/OL]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2025.

[6] 陈思远,周传波,蒋楠,等.露天转地下采深影响下爆破振动速度传播规律[J].爆破, 2016,33(3):23-30.

CHEN Siyuan, ZHOU Chuanbo, JIANG Nan, et al. Propagation Law of Blasting Vibration Velocity Influenced by Mining Depth during Transition from Open-pit to Underground Mining[J]. Blasting, 2016,33(3):23-30. (in Chinese)

[7] 许名标,彭德红.边坡爆破振动测试及响应规律 ANSYS 时程分析[J].岩石力学与工程学报, 2012,31(S1):2629-2635.

XU Mingbiao, PENG Dehong. Blasting vibration tests and ANSYS time-history analyses of slope responses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012,31(S1):2629-2635. (in Chinese)

[8] 周逸飞,刘汉香,朱星,等.含软弱夹层岩质边坡的模态分析及其对边坡地震动力响应影响的初步研究[J].地震工程与工程振动, 2020,40(1):223-232.

ZHOU Yifei, LIU Hanxiang, ZHU Xing, et al. Modal analysis of rock slope with a weak interlayer and its influence on seismic dynamic response of slope[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020,40(1):223-232. (in Chinese)

[9] 马冲,詹红兵,姚文敏,等.爆破振动作用下含软弱夹层边坡稳定性及安全判据[J].爆炸与冲击, 2018,38(3): 563-571.

MA Chong, ZHAN Hongbing, YAO Wenmin, et al. Stability and safety criterion of a slope with weak interlayer under blasting vibration[J]. Explosion and Shock Waves, 2018,38(3):563-571. (in Chinese)

[10] 张鹏飞,袁永,何运华,等.基于 GRA-EPSO-SVM 模型的露天矿山爆破振动速度预测[J].煤炭科学技术, 2025,53(07):105-115.

Zhang Pengfei, Yuan Yong, He Yunhua, et al. Blasting vibration velocity prediction of open pit mines based on GRA-EPSO-SVM model[J]. Coal Science and Technology, 2025,53(07):105-115. (in Chinese)

[11] 唐海,李海波.反映高程放大效应的爆破振动公式研究[J].岩土力学, 2011, 32(3): 820-824.

TANG Hai, LI Haibo. Study of blasting vibration formula of reflecting amplification effect on elevation[J]. Geotechnical mechanics, 2011, 32(3):820-824. (in Chinese)

[12] 言志信,彭宁波,江平,等.爆破振动安全标准探讨[J].煤炭学报, 2011,36(08):1281-1284.

YAN Zhixin, PENG Ningbo, JIANG Ping, et al. Research about blasting vibration safety criteria[J]. Journal of China Coal Society, 2011,36(08):1281-1284. (in Chinese)

[13] 张声辉,刘连生,钟清亮,等.露天边坡爆破地震波能量分布特征研究[J].振动与冲击, 2019,38(07):224-232.

ZHANG Shenghui, LIU Liansheng, ZHONG Qingliang, et al. Energy distribution characteristics of blast seismic wave on open pit slope[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019,38(07):224-232. (in Chinese)

[14] 吴超,周传波,蒋楠,等.露天转地下开采边坡爆破振动小波能量分析[J].爆破, 2015,32(03):100-104.

- Wu Chao, Zhou Chuanbo, Jiang Nan, et al. Wavelet Energy Analysis of Blasting Vibration of Mining Slope in Open Pit to Underground Transition[J]. *Blasting*, 2015,32(03):100-104. (in Chinese)
- [15] 杜瑞锋,裴向军,贾俊,等.含软弱夹层岩质边坡在爆破地震波下的试验研究[J].*土木工程学报*, 2021,54(04):95-106.
- DU Ruifeng, PEI Xiangjun, JIA Jun, et al. Experimental study on rock slope with weak interlayer under blasting seismic wave[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2021,54(04):95-106. (in Chinese)
- [16] 谢承煜,罗周全,贾楠,等.露天爆破振动对临近建筑的动力响应及降振措施研究[J].*振动与冲击*,2013,32(13):187-193.
- XIE Chengyu, LUO Zhouquan, JIA Nan, et al. Study on dynamic response of open-pit blasting vibration to adjacent buildings and vibration reduction measures [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013,32(13):187-193. (in Chinese)
- [17] 林逸晖.落幽矿露井联采模式下地下采矿方法研究[D].云南:昆明理工大学,2023.
- LIN Yihui. Research on underground mining method under open-well combined mining mode in Luodang Mine [D].Yunnan : Kunming University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [18] 蒋楠.露天转地下开采边坡爆破动力特性研究[D].湖北:中国地质大学,2013.
- JIANG Nan. Study on blasting dynamic characteristics of open pit to underground mining slope[D].Hubei :China University of Geosciences, 2013. (in Chinese)
- [19] 李启月,李易,韦佳瑞,等.中远场振动有限元分析中微差爆破荷载的等效施加方法研究[J].*矿冶工程*,2016,36(02):1-5.
- LI Qiyue, LI Yi, WEI Jiarui, et al. Equivalent load of millisecond blasting assumed in the finite element analysis for blasting vibration in middle and far field[J].*Mining and Metallurgical Engineering*, 2016,36(02):1-5. (in Chinese)
- [20] 张玉成,杨光华,胡海英,等.爆破振动对建(构)筑物影响数值计算模型及安全判据的研究[J].*土木工程学报*,2015,48(S2):22-29.
- ZHANG Yucheng, YANG Guanghua, HU Haiying, et al. Study on numerical model and safety criterion of the influence of blasting vibration on buildings and structures [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015,48(S2):22-29. (in Chinese)
- [21] 张鹏,刘宇,周永利,等.露天煤矿台阶边坡爆破振速的高程放大效应研究[J].*煤炭科学技术*, 2020,48(05):216-221.
- ZHANG Peng, LIU Yu, ZHOU Yongli, et al. Study on elevation amplification effect of blasting vibration velocity of bench slope in surface mine [J].*Coal Science and Technology*, 2020,48(05):216-221.(in Chinese)
- [22] 董源,胡英国,刘美山,等.均质岩石高边坡开挖爆破累积损伤的演化机制研究[J].*岩土力学*, 2025,(09):1-14.
- DONG Yuan, HU Yingguo, LIU Meishan, et al. Evolution mechanism of cumulative damage caused by excavation blasting in high homogeneous rock slopes [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2025,(09):1-14. (in Chinese)
- [23] 徐杰,李祥龙,王建国,等.露井联采台阶爆破对井下巷道振动的影响[J].*高压物理学*
- XU Jie, LI Xianglong, WANG Jianguo, et al. Effect of Bench Blasting on Vibration in Underground Roadways during Open Pit-Underground Combined Mining[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2025,39(05):87-104. (in Chinese)

Blasting Vibration Response and Safety Control of Slopes under Combined

Open-Pit and Underground Mining

ZHANG Boyang¹, LI Xianglong^{1,2,3}, WANG Hao^{1,4}, HU Tao¹, WANG Jianguo¹,
LIU Jinbao^{1,5}, CHEN Keyun^{1,6}

*(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650093, Yunnan, China;*

*(2. Advanced Blasting Technology Engineering Research Center of Yunnan Provincial
Department of Education, Kunming 650033, Yunnan, China;*

*3. Yunnan Institute for Advanced Studies, Ministry of Education, Kunming 650093, Yunnan,
China;*

*4. China Energy Shendong Coal Group Co, Ltd. Daliuta Coal Mine, Yulin 719315, Shaanxi,
China;*

5. Yunnan Phosphate Chemical Group Co., Ltd., Kunming 650600, Yunnan, China;

6. Southwest United Graduate School, Kunming 650500, Yunnan, China)

Abstract: In the process of open-pit and underground combined mining, in order to control the damage of underground medium-length hole blasting vibration to open-pit slope, the dynamic response law of open-pit slope is studied by means of field vibration monitoring, theoretical calculation and numerical simulation. Through the regression analysis of the monitoring data, the vibration attenuation law of the open-pit slope considering the elevation condition is obtained, and the main frequency and spectrum energy of the vibration are analyzed. Using MIDAS GTS NX software, a three-dimensional numerical model of slope rock mass and mining area with emphasis on fault is established, and the dynamic response law of slope in different directions under blasting load is studied. The results show that under the action of underground medium-length hole blasting, the vibration of F1 fault is significantly attenuated due to the change of wave impedance, and the potential sliding zone is formed on the surface of the slope where the fault is located, and the reflection wave interference leads to the abnormal increase of vibration velocity in the adjacent fault area. The peak values of vibration velocity and tensile stress of the east slope are the highest and decrease monotonously with the elevation, which reveals that the rock mass characteristics dominate the energy attenuation and weaken the elevation amplification effect. The south slope shows irregular response due to fault modulation. By fitting the relationship between stress and vibration velocity, the safety threshold of vibration velocity is deduced to be 10.52 cm / s by using the ultimate tensile stress criterion and considering the safety coefficient of slope engineering. After adjusting the blasting parameters based on the safety threshold, the safety of the adjacent open-pit slope is guaranteed, and the blasting effect is guaranteed, which verifies the engineering value of parameter optimization.

Key words: combined open-pit and underground mining; underground medium length-hole blasting; blast vibration; slope dynamic response; safety threshold; parameter optimization