

爆破条件下三维边坡动力响应特征及稳定性分析

马勤为¹,何文^{1,2*},石文芳^{1,2},聂闻³

- 1.江西理工大学矿业工程学院,江西 赣州 341000;
- 2.江西理工大学稀有金属资源安全高效开采江西省重点实验室,江西 赣州 341000;
- 3.中钢集团马鞍山矿山研究总院股份有限公司,安徽 马鞍山 243000



摘要:针对某露天矿山边坡发生多处局部小型破坏的问题,采用数值模拟方法开展了爆破条件下三维边坡动力响应特征及稳定性分析。首先,基于矿山现有爆破工艺开展了边坡的动力响应特征及稳定性分析;然后,探讨了单段药量变化对三维边坡的爆破振速和安全系数的影响规律,优化了单段最大药量;最后,对三维边坡在单段最大药量条件下的动力响应特征进行了分析,并结合边坡安全系数和质点峰值振动速度对边坡稳定性进行了综合评价。结果表明:在初始单段药量的作用下,爆破对边坡水平方向振速的影响最为显著,主方向峰值振速为16.40 cm/s,超出振速的安全允许范围,边坡安全系数为1.13,处于局部失稳状态。通过调整优化单段药量,确定了单段最大允许药量为200 kg,此时主方向峰值振速为10.60 cm/s,处于安全允许范围,边坡安全系数提升至1.20,处于稳定状态。

关键词:三维边坡;爆破;稳定性;安全系数;振速;单段最大药量

中图分类号:TD235 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)06-1155-12 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2025.06.110
引用格式:马勤为,何文,石文芳,等.爆破条件下三维边坡动力响应特征及稳定性分析[J].黄金科学技术,2025,33(6):1155-1166.MA Qinwei, HE Wen, SHI Wenfang, et al. Analysis of Dynamic Response Characteristics and Stability of Three-Dimensional Slope Under Blasting Conditions[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(6): 1155-1166.

露天开采是国内矿产资源开采的重要方式(王忠鑫等,2024),爆破作为露天开采的高效开挖手段得到了广泛应用(吴世然等,2021)。但是,爆破产生的振动具有幅值大和频率高等特点(董英健等,2019),其危害控制是矿山安全领域的关键难点(杜军等,2024)。随着开采深度的增加,爆破振动严重影响高陡边坡的稳定性,可能引发滑坡灾害。例如:贵州某铝土矿因爆破振动与雨水侵蚀耦合作用发生崩塌(陈阳等,2024),加里曼丹矿因爆破引发多起边坡破坏事件(Deb et al, 2011),四川某矿因地质条件与爆破振动共同作用导致顺层滑坡(胡卸文等,2004)。因此,有必要对爆破振动进行控制及优

化(何理等,2024),以保证矿山边坡的安全。

以往研究表明,爆破振动对顺倾边坡稳定性的影响显著且持久,监测显示其影响周期可达10 d,累积变形呈阶梯状加速增长(姜旭桐等,2023)。通过Sadovsky回归方程和数值模拟分析,明确了振动波的传播范围(Su et al, 2022)。Li et al(2022)揭示了爆破振动波三维传播规律,提出了小直径缓冲减振爆破技术可有效控制边坡动力响应。基于爆破荷载的尖点突变模型显示,失稳风险与荷载幅值成正相关,与频率成负相关(周子涵等,2020)。随着爆破工程的不断增多,爆破安全预测也日益受到重视(Yin et al, 2018),其中伪静态法适用于快速

收稿日期:2025-03-11;修订日期:2025-05-16

基金项目:国家自然科学基金项目“爆破与降雨交互作用下露天矿边坡稳定性连续预测”(编号:52474223)和江西省学位与研究生教育教学改革研究项目“以自主性试验和工程实例为驱动的《岩土动力学及其应用》课程教学改革与实践”(编号:JXYJG-2017-12)联合资助

作者简介:马勤为(2000—),男,安徽淮北人,硕士研究生,从事露天矿山稳定方面的研究工作。E-mail:m18256186833@163.com

*通信作者:何文(1981—),男,广东中山人,副教授,从事矿山岩石力学和岩土工程测试技术方面的研究工作。E-mail:herman3@163.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

评估,而动力学模型能够更精确地表征动力响应特征(Singh et al, 2024)。值得注意的是,机器学习预测模型通过整合多源参数显著提升了预测精度(黄晶柱等, 2023)。此外,现场监测与数值模拟协调研究发现,水平径向振动速度对稳定性影响最为显著(王子一等, 2023),数值模拟进一步揭示黏聚力是影响稳定性的关键因素,提高内摩擦角,可有效降低失稳风险(林令鑫等, 2023)。这些成果为优化爆破设计和边坡防护提供了重要的技术支持。

综上所述,目前关于爆破振动对矿山边坡稳定性影响及安全预测的研究较为丰富,但存在明显的三维分析不足:首先,现有研究大多基于二维简化模型,难以准确地反映三维边坡的空间动力响应特征;其次,缺乏对单段药量变化引起的边坡三维振动场分布规律的研究。本文基于Midas-GTS有限元软件,对某露天矿山边坡在爆破荷载作用下的三

维边坡动力响应特征进行了分析,并结合安全系数及质点峰值振动速度对边坡稳定性进行评价。通过分析不同单段药量对边坡质点振速和稳定性的影响规律,确定了单段最大药量,并探讨了其对边坡稳定性的影响。

1 工程背景

某矿山地形属于中低山构造侵蚀山地,山系属武夷山脉南段东列山的隆升地段,强烈的侵蚀作用造成深沟峡谷纵横,悬崖常高达百米以上,山脉走向NE,区内中部为最高标高(+1 063 m),最大高差为865 m。矿区范围内因海拔高,地形落差大,气候条件较复杂,风力和雨量偏大,夏秋多有灾害性风雨袭击,主峰顶周围为雷击区,夏季常有雷电袭击。矿区岩层较为复杂,包含花岗斑岩、花岗岩、英安玢岩和隐爆角砾岩等,岩石物理力学参数见表1。

表1 岩石物理力学参数

Table 1 Rock physical and mechanical parameters

岩石名称	弹性模量/GPa	泊松比	容重/(kN·m ⁻³)	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗压强度/MPa
中细粒花岗岩	66.37	0.23	25.19	6.56	43.0	38.63
隐爆角砾岩	89.33	0.20	25.88	7.82	42.1	34.08
花岗斑岩	20.17	0.33	22.74	2.01	40.4	26.83
地开石化细粒花岗岩	15.34	0.36	22.64	2.10	39.5	23.14

根据工程勘查资料,矿区采场现处于生产建设阶段,边坡正处于剥离形成过程中。边坡主要台阶高度为25 m,平台宽度为30 m,边坡角为45.3°。边坡的几何形态保存基本较好,局部出现小范围的楔型、崩塌和滑坡等破坏,主要集中在矿区东南角。在东南角选取剖面进行分析,剖面位置如图1所示。矿山现场爆破参数见表2。

2 爆破荷载及模型

2.1 模型建立

本文采用Midas-GTS软件对爆破荷载作用下边坡的动力响应特征及稳定性进行分析,具体岩石物理力学参数见表1。根据剖面图建立三维模型,模型尺寸严格遵守实际工程比例,在网格划分过程中,依据王海兵等(2016)的研究成果,网格尺寸应小于波长的1/16。经计算,本模型爆破主频对应的

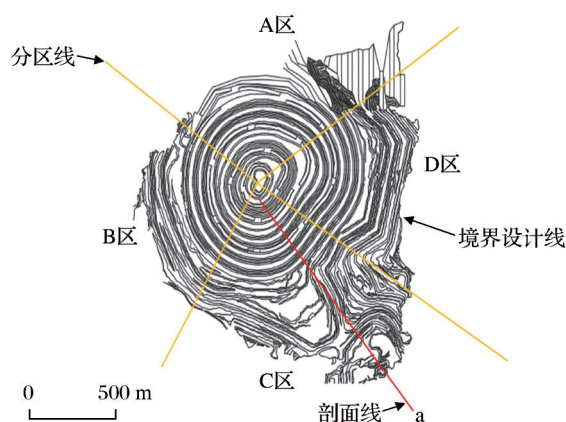


图1 边坡剖面位置

Fig. 1 Location of slope profile

波长为53.33 m,最大网格尺寸应控制在3.33 m以内,因此本模型单元网格长度设置为2 m,以提高计算精度。最终本模型共建立了59 430个节点,48 075个单元,重力为Z方向(边坡垂直方向)。在

表2 矿山现场初始爆破参数

Table 2 Initial blasting parameters of mine site

参数	数值	参数	数值
装药密度 $\rho_0/(g \cdot cm^{-3})$	1.23	炮孔长度 l_0/m	27.5
炸药爆速 $D/(m \cdot s^{-1})$	3 500	岩石体积压缩模量 K/GPa	36
装药直径 r_0/mm	120	泊松比 μ	0.23
炮孔直径 r_b/mm	140	单段药量 Q/kg	250
装药长度 l_0/m	18	爆心距 R/m	30

岩层接触面处,设置了摩擦接触命令,以准确模拟不同岩层间的力学相互作用。爆破荷载施加于坡脚处的岩体表面,具体位置为高程48.5~75.5 m范围内的坡面区域。该区域对应于实际工程中的钻孔装药段,荷载方向垂直于坡面指向岩体内部。在数值模型中,通过曲面动力模块在该区域施加三角波形的爆破荷载,随后进行弹性边界的施加。边界条件设置考虑了相邻边坡的影响,模型左右两侧约束Y方向(横向)位移,背面约束X方向(水平方向)位移(Chugh, 2003)。监测系统沿边坡倾向布置,从坡顶开始每隔一个台阶设置一个监测点,最后一个监测点位于距离爆源30 m处,以确保全面覆盖边坡的关键区域,并准确捕捉爆破振动的空间分布特征,三维边坡有限元模型如图2所示。

2.2 爆破荷载确定

对边坡模型施加三角脉冲荷载波形,以达到模拟真实爆破振动的传播速率。首先,需要确定荷载峰值,以模拟爆破冲击波的峰值,另外还需要对加压时间和卸荷时间进行计算。爆破峰值荷载的计算公式(吴旭敏, 2023)为

$$P_{max} = \frac{1}{2} \rho_0 D^2 \left(\frac{r_0}{r_b} \right)^6 \left(\frac{l_0}{l_b} \right)^3 n \quad (1)$$

式中: r_0 为装药直径(mm); D 为炸药爆速(m/s); r_b 为炮孔直径(mm); l_0 和 l_b 分别为装药长度(m)和炮孔长度(m); n 为炸药爆轰产物膨胀碰撞孔壁时的压力增大系数,取值为8~11,此处 $n=10.5$ 。

对于加压时间和卸荷时间,计算公式(张博等, 2024)分别为

$$t_r = 11 \sqrt{R^{2-\mu}} Q^{0.05} / K \quad (2)$$

$$t_s = 11 \sqrt[3]{R^{2-\mu}} Q^{0.2} / K \quad (3)$$

式中: t_r 为上升段作用时间; t_s 为下降段作用时间; R 为监测点9到爆心的距离,取30 m。

根据表2的参数,计算得到峰值荷载 $P_{max} = 8\ 785.7\ MPa$,上升段时间 $t_r = 0.0124\ s$,下降段时间 $t_s = 0.0882\ s$ 。爆破冲击波时间极短(刘华丽等, 2020),作用时间仅为 $10^{-6} \sim 10^{-1}\ s$,且动力荷载的加压时间为 $10^{-3} \sim 10^{-1}\ s$,计算结果符合要求。

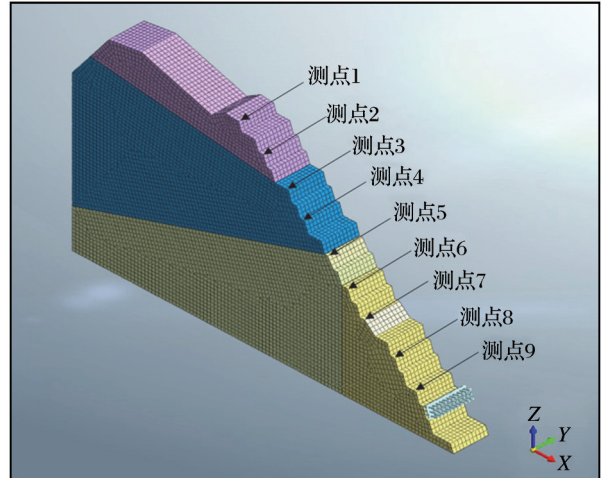


图2 三维边坡有限元模型

Fig. 2 Three-dimensional slope finite element model

3 初始爆破条件下边坡稳定性分析

3.1 动力响应特征分析

边坡在爆破荷载作用下监测点振速即可表征动力响应特征,图3所示为初始爆破条件下边坡的振速特征。从边坡的X方向振速图[图3(a)]中可以看出曲线波动强烈,表现为快速的振动响应。爆破振动速度峰值最大值约为16.40 cm/s,并在0.1 s左右迅速衰减至0,与施加的三角形爆破荷载的规律吻合。从边坡的Y方向振速图[图3(b)]中可以看出,虽然存在明显的初始波动,但总体振速较低,振动较为均匀且衰减速度较快。从边坡的Z方向振速图[图3(c)]中可以看出,爆破振动速度峰值小于X方向、大于Y方向爆破振动速度峰值,振动响应也较为均匀,衰减速度与Y方向一致。合成振速显示的是各个方向振速的综合响应,最初在极短时间内振速达到峰值,振速峰值为16.89 cm/s,与X方向峰值差值较小,且衰减极为迅速,随着时间的推移振速快速减小,在0.2 s内降低到接近0[图3(d)]。总体表明,在爆破荷载的作用下,边坡动力响应具有明显的方向异性,X方向振动最为显著,尤其在

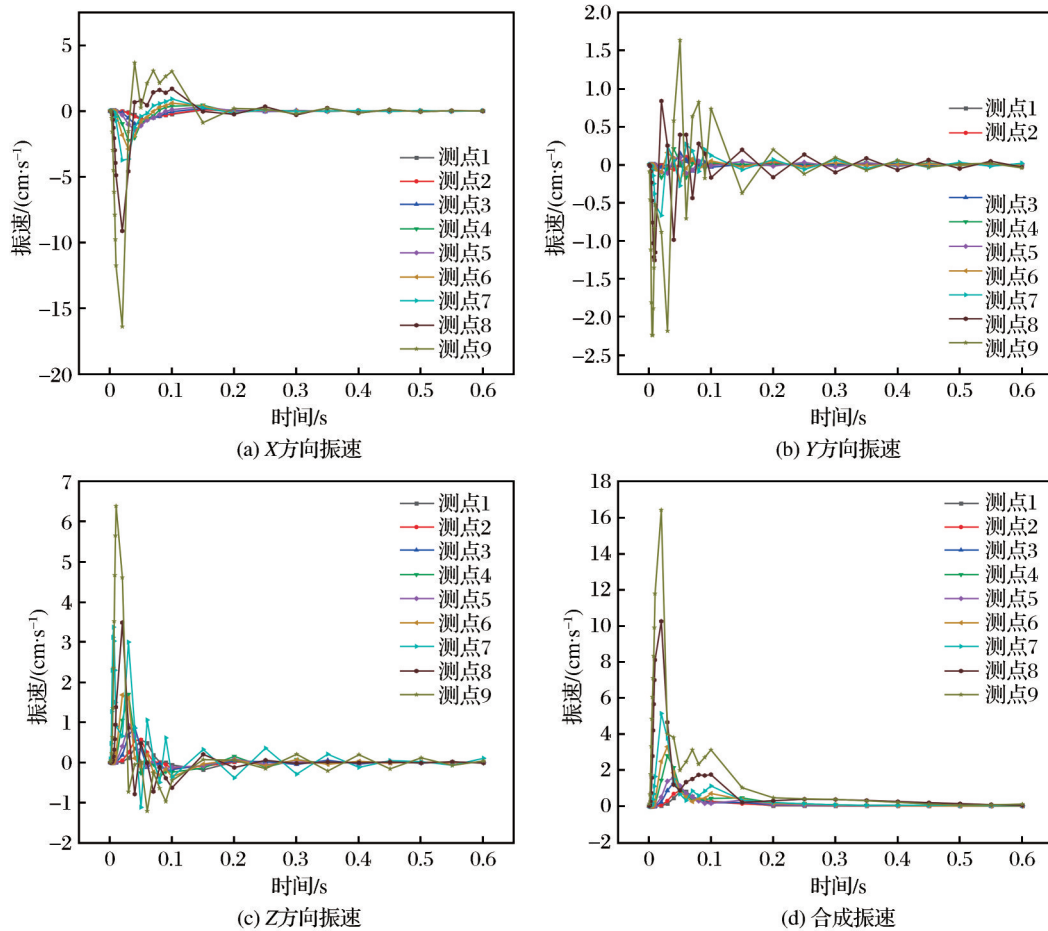


图3 初始爆破条件下边坡的振速特征

Fig. 3 Vibration velocity characteristics of slope under initial blasting conditions

爆破初期和爆源附近区域响应最为强烈。

对监测点振动特征进行分析,边坡动力响应呈现明显的空间衰减特性。距离爆源最近的坡脚区域(测点7~测点9)振动最为剧烈,X方向峰值振速达16.40 cm/s,直接承受爆破冲击作用;随着传播距离的增加,坡中区域(测点4~测点6)X方向振速衰减至1.44~2.88 cm/s,但仍可能引发应力重分布和裂隙扩展;最远的坡顶区域(测点1~测点3)受爆破影响最小,X方向振速维持在1 cm/s以下。这种“近强远弱”的振动传播规律表明,坡脚是爆破荷载的主要作用区,若不加以控制,可能会导致局部崩塌或不稳定,而坡中区域作为振动传播的关键过渡带,其潜在在稳定性问题同样不容忽视。

3.2 峰值振速特征分析

峰值振速是爆破工程中的一个关键参数,可作为评价结构安全的指标(李振阳等,2024),初始爆

破条件下边坡各监测点的峰值振速如图4所示。由图4可知,各监测点的振速峰值随爆源距离的增加呈衰减趋势,其中1号监测点振速最低,9号监测点振速最大,表明振速峰值与爆源距离之间存在负相关关系,即距离爆源越近,振动影响越显著。通过对比不同方向的振速峰值发现,X方向振速峰值最大,数值为16.40 cm/s;Z方向振速峰值次之,为6.37 cm/s,Y方向振速峰值最小,为2.24 cm/s,表明爆破荷载在X方向的影响最突出,Y方向影响最小,X方向对合成振速起主导作用。上述结果表明,爆破振动能量在传播过程中存在明显的方向性差异,X方向是振动控制的关键方向。

在初始单段药量作用下,振动波频率如图5所示,主振频率为15.56 Hz,参考《爆破安全规程》(GB 6722-2014)可知:当主频处于10 Hz≤f≤50 Hz范围时,永久性岩石高边坡安全允许质点振动速度

范围为8~12 cm/s。然而,质点峰值振动速度通常指3个方向中的最大分量值,所在方向被称为主方向,X方向峰值振速最大,因此主方向为X方向,主方向峰值振速为16.40 cm/s,超出安全允许范围,为确保边坡安全,需降低振速峰值。

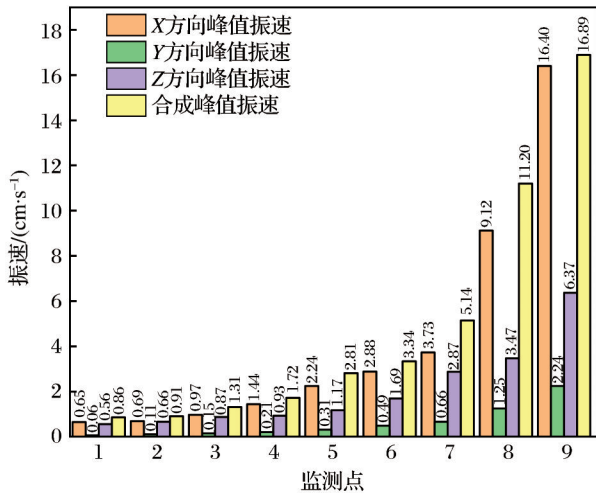


图4 初始爆破条件下边坡各监测点的峰值振速

Fig. 4 Peak vibration velocity of each monitoring point of the slope under initial blasting conditions

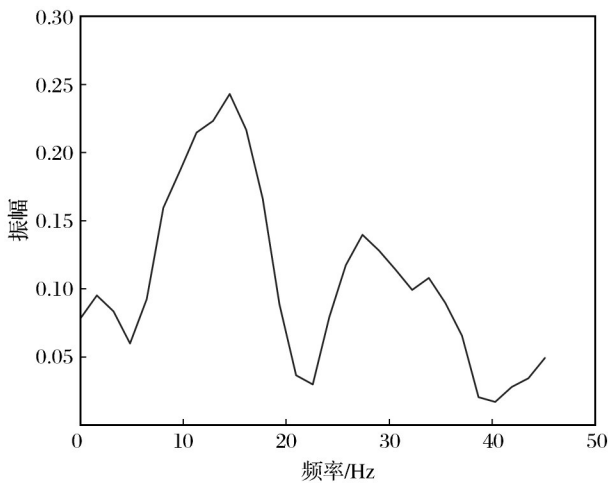


图5 初始爆破条件下接收波频率

Fig. 5 Received wave frequency under initial blasting conditions

3.3 边坡稳定性分析

边坡位移和塑性区是评估边坡稳定性的关键指标,前者反映爆破荷载下的变形情况,后者揭示潜在滑坡位置。图6所示为初始爆破条件下边坡位移云图,从图中可以看出,在爆破荷载作用下

X方向位移最大值为2.94 cm,Y方向位移最大值为 4.43×10^{-2} cm,Z方向位移最大值为 4.61×10^{-1} cm,总位移最大值为3.43 cm。其中,X方向位移在3个方向中最大,表明边坡变形主要集中在X方向上,即爆破荷载施加方向为X反方向,直接激发岩体的水平振动,根据应力波传播理论,P波在自由面反射后产生拉伸波,导致水平方向质点位移幅值增大。

图7所示为初始爆破条件下边坡的塑性区云图,从图中可以看出,边坡塑性变形主要集中在坡脚(爆源)处,在坡脚处贯通。数值计算应用强度折减法原理(孙文超等,2025),通过逐步降低材料的抗剪强度参数,直至计算模型无法收敛。经计算,边坡安全系数为1.13,低于《非煤露天矿边坡工程技术规范》(GB51016-2014)对高陡I级边坡在爆破荷载作用下1.18~1.23的安全系数要求,表明边坡处于局部失稳状态,潜在滑面位于坡脚区域。这一结果与前述振动速度的分布规律相互印证,进一步验证了坡脚区域受爆破荷载的影响最为显著。

4 单段药量优化及降振效果分析

4.1 单段药量的优化

基于上述分析,为确保边坡安全,需降低振速峰值并提高稳定性。单段药量是影响爆破振速的主要因素之一,通过优化单段药量,可以有效控制振速峰值,从而提升边坡稳定性。

根据萨道夫斯基公式(李启月等,2024)反推出最小单段药量公式,表示为

$$Q_{\min} = \left(\frac{V}{k} \right)^{3/\alpha} \cdot R^3 \quad (4)$$

式中: Q_{\min} 为最小单段药量; V 为允许振速; k 为场地系数; α 为衰减系数。

根据《爆破安全规程》(GB6722-2014)规定,振速 V 取最小值8 cm/s; k 为场地系数,硬岩取50~150,根据场地实际情况取150; α 取1.5,此处爆心距 R 为测点9的爆心距,取30 m。经过计算得出最小单段药量 $Q=74.84$ kg,因此,为优化单段药量,分别选取75,100,125,150,175,200,225 kg进行三维数值模拟计算,在保持其他爆破参数不变的情况下,分析单段药量对边坡动态响应特性及稳定性的

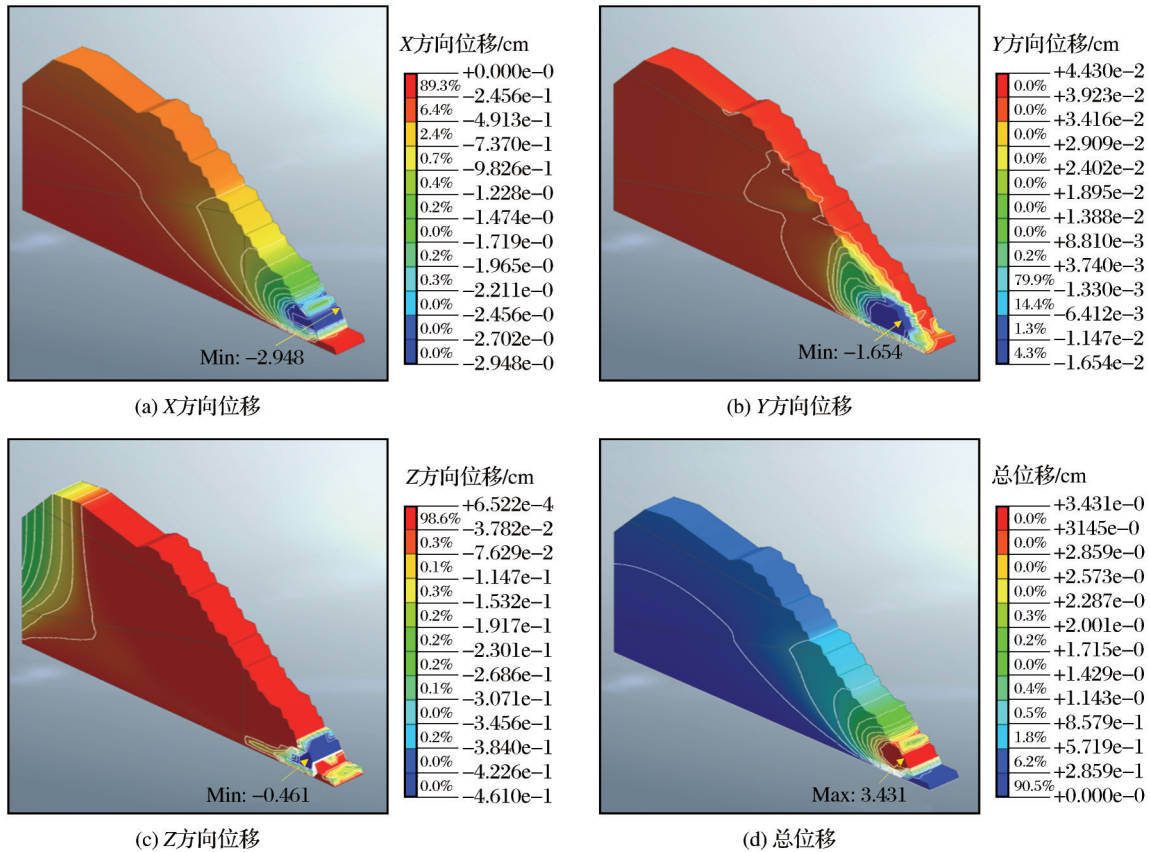


图6 初始爆破条件下边坡的位移云图

Fig. 6 Displacement cloud maps of slope under initial blasting conditions

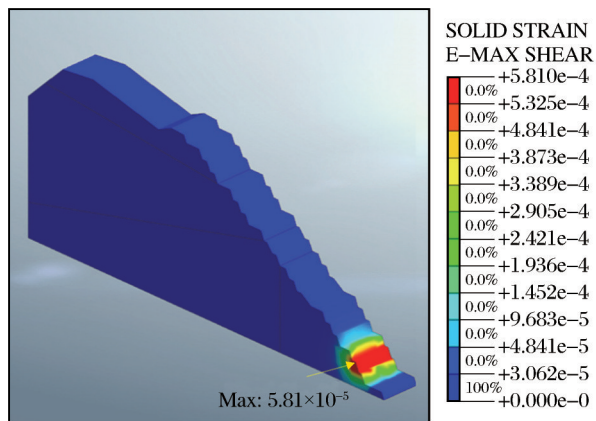


Fig. 7 Plastic zone cloud map of the slope under initial blasting conditions

影响。由于测点9的振速在所有测点中最大,因此重点分析不同单段药量下测点9的振速变化规律。计算结果如图8所示,从图中可以看到,不同单段药量引起的振速曲线变化趋势相似,但峰值振速大

小有所差异。随着单段药量的增大,各方向振速峰值逐渐增大,其中,75 kg振速峰值最低,225 kg振速峰值最高,表明单段药量的增加导致爆破荷载强度增大,进而使边坡振动响应幅度显著增强。

图9所示为不同单段药量条件下测点9的峰值振速。由图9可知,随着单段药量的增加,X方向振速峰值从2.64 cm/s增加至12.51 cm/s,Y方向振速峰值从0.46 cm/s增加至1.83 cm/s,Z方向振速峰值从0.69 cm/s增加至2.72 cm/s。其中,X方向增幅最为显著,表明爆破对边坡的影响具有明显的方向性特征,X方向作为爆破应力波的主要传播方向,其动力响应最为敏感。

由于单段药量的改变,接收波主频也随之变化。表3所示为不同单段药量下的接收波主频,均处于10~50 Hz范围内。根据《爆破安全规程》(GB6722-2014),该频率范围内的安全允许振速为8~12 cm/s。由图9可知,当单段药量为200 kg时,主方向峰值振速为10.60 cm/s,处于安全允许范围内。因此,确

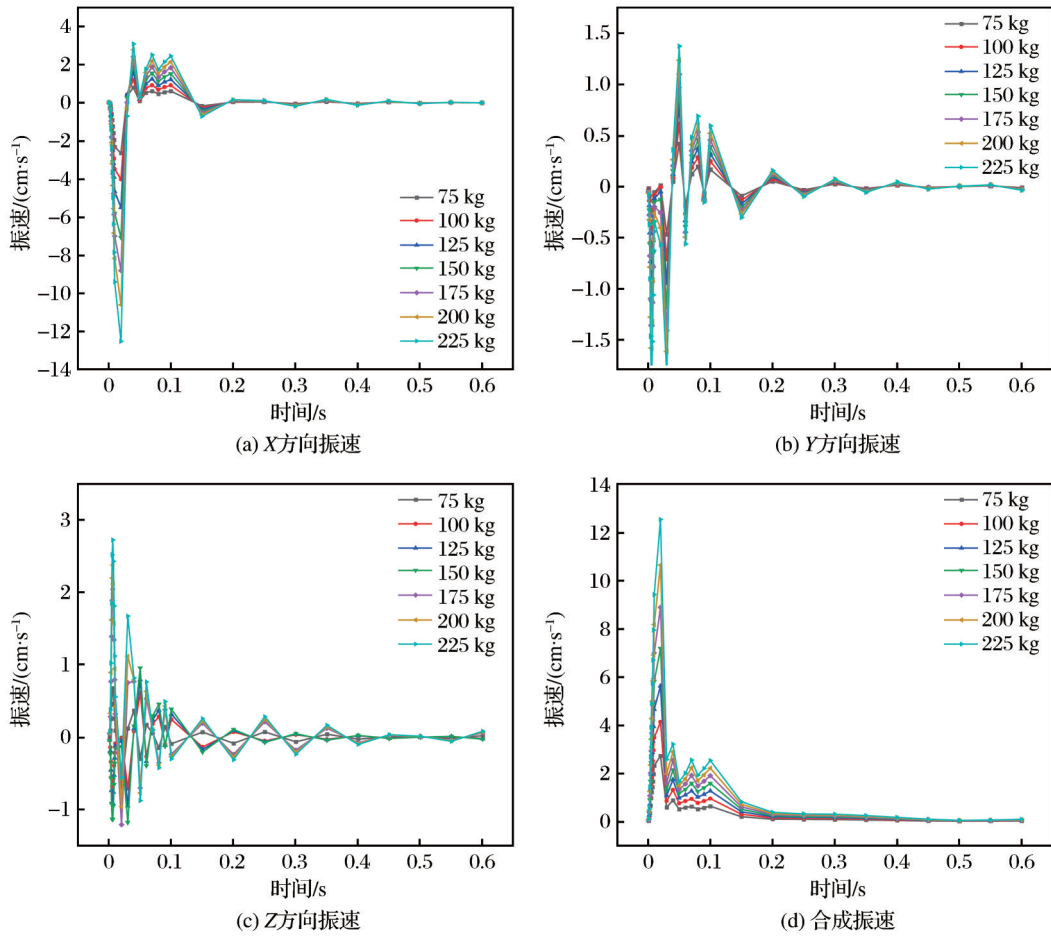


图8 不同单段药量测点9的振速

Fig. 8 Vibrational velocity of measuring point 9 for different single-segment charge

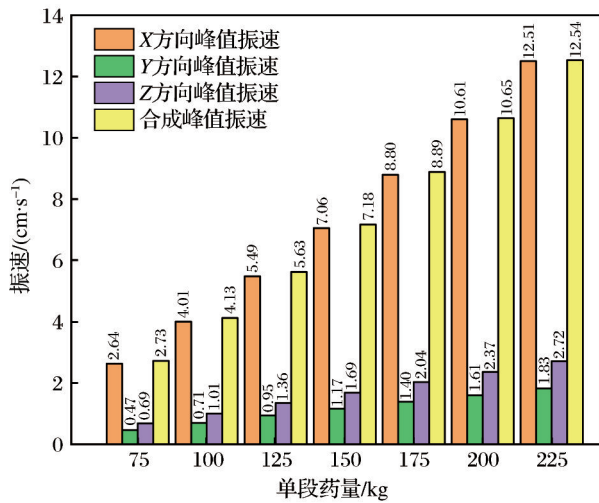


图9 不同单段药量测点9的峰值振速

Fig. 9 Peak vibration velocity of measuring point 9 for different single-segment charge

表3 不同单段药量下的接收波主频

Table 3 Dominant frequency of received wave under different single-segment dosages

药量/kg	主频	药量/kg	主频
75	17.6	175	13.4
100	14.5	200	16.4
125	15.7	225	14.3
150	20.0		

定 200 kg 为满足安全要求的单段最大药量。

基于振速分析结果,单段药量为 200 kg 时振动速度满足《爆破安全规程》(GB6722-2014)的允许阈值。为进一步确定单段最大允许药量,本研究对不同单段药量作用下边坡安全系数变化规律进行了定量分析,如图 10 所示。由图 10 可知,单段药量从 75 kg 增大至 100 kg,安全系数降低了 3.4%;单段

药量从 100 kg 增大至 125 kg, 安全系数降低了 2.0%; 单段药量从 125 kg 增大至 150 kg, 安全系数降低了 3.5%; 单段药量从 150 kg 增大至 175 kg, 安全系数降低了 2.7%; 单段药量从 175 kg 增大至 200 kg, 安全系数降低了 1.9%; 单段药量从 200 kg 增大至 225 kg, 安全系数降低了 2.7%。其中, 单段药量在 175~200 kg 范围内, 安全系数降幅最为平缓, 表明该区间具有最佳的安全—效益平衡特性。基于前文所述, 在爆破荷载作用下边坡安全系数应处于 1.18~1.23, 计算结果表明, 单段药量在 75~200 kg 范围内, 边坡安全系数均满足规范要求, 而单段药量为 225 kg 时, 边坡安全系数为 1.17, 处于欠稳状态。从边坡安全角度考虑, 选择 200 kg 作为单段最大药量。

4.2 优化后边坡降振效果分析

基于 200 kg 单段药量作用下边坡的振速特征 (图 11) 和 200 kg 单段药量作用下边坡的各监测点

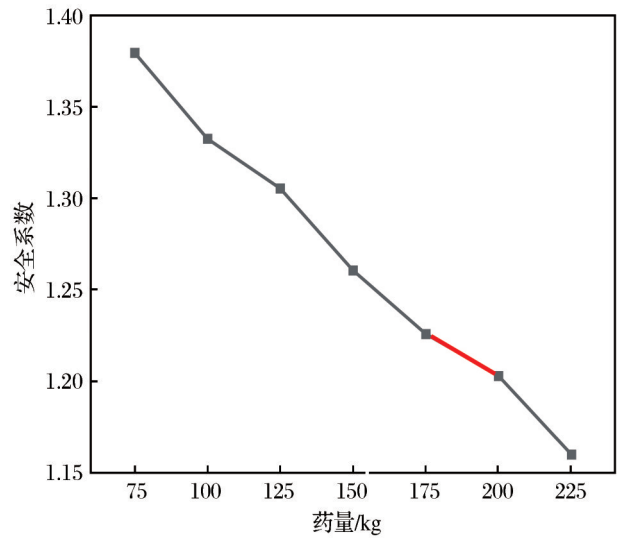


图 10 不同单段药量作用下边坡的安全系数变化规律

Fig. 10 Variation law of safety coefficient of slope under the action of different single-segment charge

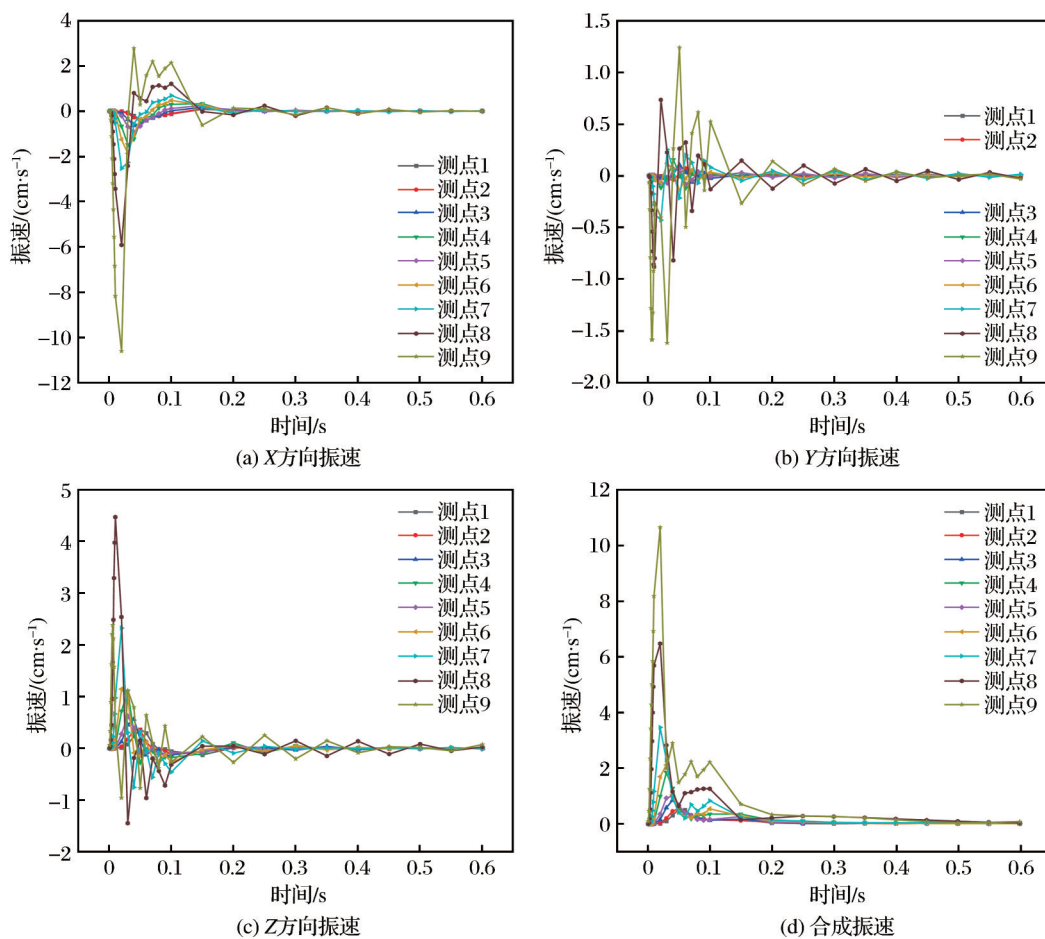


图 11 200 kg 单段药量作用下边坡的振速特征

Fig. 11 Vibration velocity characteristics of slope under the action of 200 kg single-stage charge

峰值振速(图 12),通过分析不同方向的振速变化,得出以下规律特征: X 方向峰值振速为 10.60 cm/s,

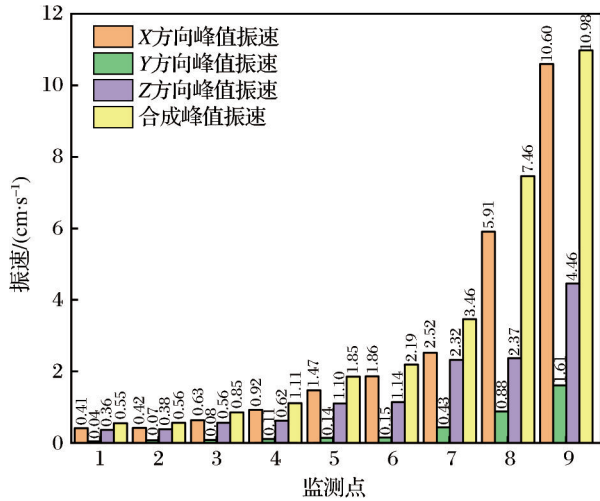


图 12 200 kg 单段药量作用下边坡的各监测点峰值振速
Fig. 12 Peak vibration velocity of each monitoring point of the slope under the action of 200 kg single-stage charge

较 250 kg 单段药量爆破荷载作用下边坡呈现显著降低,且振速衰减曲线与初始单段药量工况保持高度相似,这是由于爆破荷载波形虽幅值增大,但仍保持三角波特征,未改变荷载作用时程特性; Y 方向振速峰值仅降低至 1.61 cm/s,降低比例明显低于 X 方向,表明该方向对药量变化的敏感性较弱; Z 方向振速则表现出中等敏感性,峰值振速降低至 4.46 cm/s,其空间分布呈现典型的三维衰减特征。从总振速矢量合成结果来看,最大合成振速与 X 方向振速峰值差值较小,这一现象从能量分布角度印证了边坡动力响应的各向异性特征:爆破荷载产生的振动能量主要沿 X 方向传播,这与边坡岩体结构面的优势方位及爆破源—坡体空间几何关系密切相关,进一步验证了 X 方向作为爆破振动主效应方向的控制地位。

对 200 kg 单段药量作用下边坡稳定性进行了分析,图 13 为 200 kg 单段药量作用下边坡的位移云图。由图 13 可知,相较于初始爆破条件下边坡

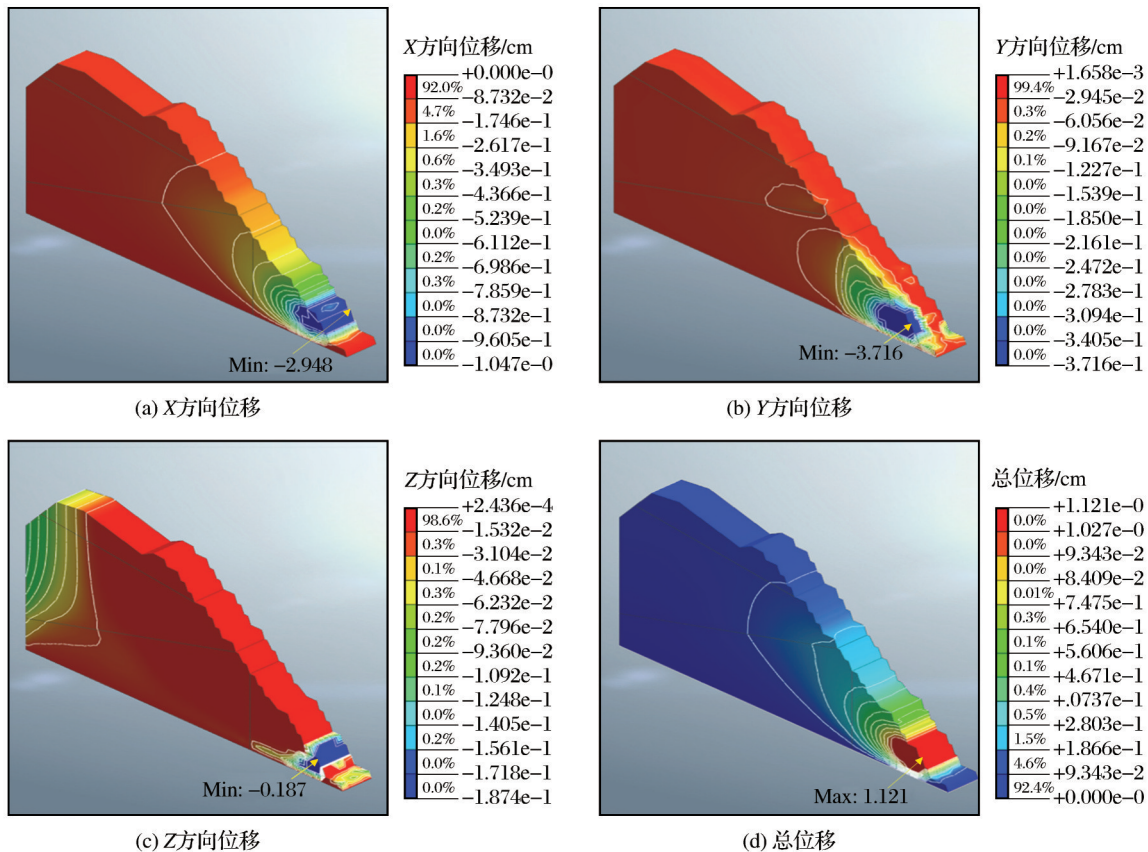


图 13 200 kg 单段药量作用下边坡的位移云图

Fig. 13 Displacement cloud map of slope under the action of 200 kg single-stage charge

的位移(图8),200 kg单段药量引起的位移场范围显著减小。 X 方向位移影响范围从坡脚延伸至380 m处,最大位移值为1.04 cm; Y 方向位移影响范围延伸至330 m处,最大位移值为0.37 cm; Z 方向位移影响范围变化较小,但最大位移值减小为0.18 cm。总位移影响范围扩展至420 m,最大位移值为1.12 cm。通过对比3个方向的位移分布特征可以发现, X 方向位移值最大,表明边坡在 X 方向的振动效应最为显著,这一现象与振速分布规律具有一致性,进一步验证了 X 方向作为爆破振动主效应方向的控制地位。图14展示了200 kg单段药量作用下边坡的塑性区变形,与初始爆破条件下边坡的塑性区云图(图8)相比,此时边坡塑性区范围显著减小,塑性区仍然贯通坡脚处。同时,边坡安全系数提升至1.20,符合规范要求,整体处于稳定状态。

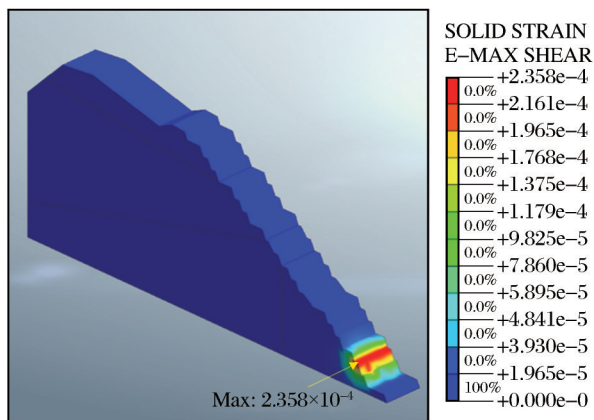


图14 200 kg单段药量作用下边坡的塑性区云图

Fig. 14 Plastic zone cloud map of slope under the action of 200 kg single-stage charge

5 结论

对初始爆破条件下三维边坡的动力响应特征及稳定性进行了初步评价,开展了爆破单段药量的优化研究,最后对单段最大药量条件下三维边坡进行了稳定性分析。得出如下主要结论:

(1)在初始爆破条件下,三维边坡水平方向(X 方向)的振动响应最为显著,主方向的质点峰值振速为16.40 cm/s,超出安全允许范围(8~12 cm/s),边坡的安全系数为1.13,低于规范要求的1.18,处于局部失稳状态。

(2)随着单段药量的增加,振速峰值不断增加,边坡安全系数逐渐降低。单段药量从75 kg增加至225 kg,边坡的主方向质点峰值振速从2.64 cm/s升高至12.51 cm/s,安全系数从1.38降低至1.17,最终确定单段最大药量为200 kg。

(3)当单段药量为200 kg时,边坡主方向峰值振速为10.60 cm/s,安全系数为1.20,处于规范要求范围,边坡处于稳定状态。结合边坡安全系数和质点峰值振动速度,对边坡稳定性进行了更准确的评价。

参考文献(References):

- Chugh A K, 2003. On the boundary conditions in slope stability analysis [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 27(11): 905-926.
- Deb D, Kaushik K N R, Choi B H, et al, 2011. Stability assessment of a pit slope under blast loading: a case study of pasir coal mine [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 29(4): 419-429.
- Li X S, Li Q H, Hu Y J, et al, 2022. Study on three-dimensional dynamic stability of open-pit high slope under blasting vibration [J]. Lithosphere, (Special 4): 6426550.
- Singh P, Jayanthu S, 2024. Pseudo-static and dynamic analysis of mine rock slope under the influence of production blasting [J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 41(6): 3197-3209.
- Su H Y, Ma S, 2022. Study on the stability of high and steep slopes under deep bench blasting vibration in open-pit mines [J]. Frontiers in Earth Science, 10: 990012.
- Yin Z Q, Hu Z X, Wei Z D, et al, 2018. Assessment of blasting-induced ground vibration in an open-pit mine under different rock properties [J]. Advances in Civil Engineering, (1): 4603687.
- 陈阳,吕辉,毕莹,等,2024.国内外典型露天矿山坍塌事故案例分析与启示 [J]. 中国煤炭, 50(4): 63-67. Chen Yang, Lü Hui, Bi Ying, et al, 2024. Analysis and enlightenment of typical collapse accidents in open-pit mines at home and abroad [J]. China Coal, 50(4): 63-67.
- 董英健,郭连军,徐振洋,等,2019.露天矿台阶爆破对邻近巷道的振动监测及分析 [J]. 中国矿业, 28(6): 128-132. Dong Yingjian, Guo Lianjun, Xu Zhenyang, et al, 2019. Monitoring and analysis of vibration of adjacent roadway by bench blasting [J]. China Mining Magazine, 28(6):

- 128-132.
- 杜军,花良奎,厉美杰,等,2024.露天采场台阶爆破萨道夫斯基公式的线性回归分析[J].爆破,41(4):181-186,204.Du Jun, Hua Liangkui, Li Meijie, et al, 2024. Linear regression analysis on Sadovsky formula for open-pit bench blasting[J].Blasting, 41(4):181-186, 204.
- 何理,殷琳,钟冬望,等,2024.爆破振动强度、波形与频谱研究综述:预测及主动控制[J].爆破,41(3):189-204,262. He Li, Yin Lin, Zhong Dongwang, et al, 2024. Research review on blast vibration intensity, waveform and spectrum: prediction and active control [J]. Blasting, 41(3):189-204, 262.
- 胡卸文,吕小平,李廷强,2004.四川某矿山边坡失稳机理及稳定性评价[J].山地学报,22(2):224-229.Hu Xiewen, Lü Xiaoping, Li Tingqiang, 2004. Sliding mechanism and stability evaluation for mining slope at a mining area of Sichuan[J].Journal of Mountain Research, 22(2):224-229.
- 黄晶柱,钟依禄,黄裘俊,等,2023.基于高斯过程回归矿山爆破飞石距离预测模型[J].工程爆破,29(2):73-79,108. Huang Jingzhu, Zhong Yilu, Huang QiuJun, et al, 2023. Prediction model of blasting flyrock distance in mine based on Gaussian process regression [J]. Engineering Blasting, 29(2):73-79, 108.
- 姜旭桐,李万涛,王克军,2023.露天矿山顺倾边坡变形规律研究[J].中国安全生产科学技术,19(增刊1):25-30.Jiang Xutong, Li Wantao, Wang Kejun, 2023. Study on deformation law of inclined slope in open pit mine[J].Journal of Safety Science and Technology, 19(Suppl.1):25-30.
- 李启月,肖宇航,魏快快,等,2024.露天边坡体爆破振动特性研究[J].黄金科学技术,32(3):491-500.Li Qiyue, Xiao Yuhang, Wei Kuaikuai, et al, 2024. Characterization of blasting vibration in open slopes [J]. Gold Science and Technology, 32(3):491-500.
- 李振阳,张宝岗,熊信,等,2024.基于 PSO-XGBoost 的露天矿山 PPV 预测模型研究[J].黄金科学技术,32(4):620-630.Li Zhenyang, Zhang Baogang, Xiong Xin, et al, 2024. Research on PPV prediction model of open-pit mine based on PSO-XGBoost [J]. Gold Science and Technology, 32(4):620-630.
- 林令鑫,王振伟,黄科伟,等,2023.爆破作用下别斯库都克露天矿边坡变形破坏机理[J].露天采矿技术,38(6):48-51. Lin Lingxin, Wang Zhenwei, Huang Kewei, et al, 2023. Slope deformation and failure mechanism of Beskuduk open-pit mine under blasting action [J]. Open-cast Mining Technology, 38(6):48-51.
- 刘华丽,刘影,谢全民,2020.爆破地震效应影响因素评估分析[J].爆破,37(1):147-151,158.Liu Huali, Liu Ying, Xie Quanmin, 2020. Assessment and analysis of influencing factors of explosive seismic effect [J].Blasting, 37(1):147-151, 158.
- 孙文超,王君豪,徐文杰,等,2025.基于物质点法的高速公路弃渣场稳定性及灾害动力学分析[J].岩土力学,46(3):991-1000.Sun Wenchao, Wang Junhao, Xu Wenjie, et al, 2025. Stability and disaster dynamics analysis of highway debris dump site based on material point method [J].Rock and Soil Mechanics, 46(3):991-1000.
- 王海兵,张海波,田宙,等,2016.岩石动力学计算中的网格效应及机理研究[J].兵工学报,37(10):1828-1836. Wang Haibing, Zhang Haibo, Tian Zhou, et al, 2016. Mesh size effect and its mechanism research in numerical calculation of rock dynamics [J]. Acta Armamentarii, 37(10):1828-1836.
- 王忠鑫,田会,王东,等,2024.露天采矿科学目标的演变与未来发展趋势[J].煤炭学报,49(增刊1):129-153. Wang Zhongxin, Tian Hui, Wang Dong, et al, 2024. Evolution and future development trend of scientific objectives of open-pit mining [J]. Journal of China Coal Society, 49(Suppl.1):129-153.
- 王子一,吴桂义,罗畅,等,2023.多次爆破振动下陡边坡振动响应及稳定性研究[J].爆破,40(3):158-169,176. Wang Ziyi, Wu Guiyi, Luo Chang, et al, 2023. Study on vibration response and stability of steep slope under multiple blasting vibrations [J].Blasting, 40(3):158-169, 176.
- 吴世然,刘广鑫,陈育权,等,2021.老挝南公1水电站非衬砌溢洪道岩体爆破开挖技术[J].爆破,38(3):31-37.Wu Shiran, Liu Guangxin, Chen Yuquan, et al, 2021. Rock blasting excavation technology for unlined spillway of Namkong 1 hydropower station in Laos [J]. Blasting, 38(3):31-37.
- 吴旭敏,2023.花桥镇露天矿南部岩质高边坡稳定性及治理研究[D].昆明:昆明理工大学.Wu Xumin, 2023. Study on the stability and treatment of high rock slope in the south of Huaqiaozen open-pit mine [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology.
- 张博,王一凡,王智阳,等,2024.黑河连接洞开挖爆破对黑河引水洞稳定性的影响[J].水电能源科学,42(10):127-130,114. Zhang Bo, Wang Yifan, Wang Zhiyang, et al, 2024. Impact of excavation blasting of the Heihe connection tunnel on the stability of water diversion tunnel [J]. Water Resources and Power, 42(10):127-130, 114.

周子涵,陈忠辉,王建明,等,2020.爆破荷载作用下露天矿边坡稳定性的突变研究[J].岩土力学,41(3):849-857,868. Zhou Zihan, Chen Zhonghui, Wang Jianming, et al,

2020. Catastrophe analysis of open-pit slope stability under blasting load [J]. Rock and Soil Mechanics, 41 (3) : 849-857, 868.

Analysis of Dynamic Response Characteristics and Stability of Three-Dimensional Slope Under Blasting Conditions

MA Qinwei¹, HE Wen^{1,2}, SHI Wenfang^{1,2}, NIE Wen³

1. School of Mining Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China;
2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Safe and Efficient Mining of Rare Metal Resource, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China;
3. Sinosteel Ma'anshan Mining Research Institute Co., Ltd., Ma'anshan 243000, Anhui, China

Abstract: In addressing the issue of multiple localized small-scale failures on the slope of an open-pit mine, this study utilized numerical simulation methods to examine the dynamic response characteristics and stability of a three-dimensional slope under blasting conditions. Initially, an analysis was conducted on the slope's vibration velocity, displacement, and plastic zone, based on the existing blasting process parameters of the mine. Subsequently, the study investigated the impact of variations in single-stage explosive charge on the blasting vibration velocity and safety factor of the three-dimensional slope, thereby establishing the relationship between single-stage charge, slope dynamic response, and safety factor, and optimizing the maximum single-stage charge. Finally, the dynamic response characteristics of the three-dimensional slope under the optimized maximum single-stage charge were analyzed, and a comprehensive stability evaluation of the slope was performed by considering both the safety factor and the peak particle vibration velocity. The findings demonstrate that, under the initial single-stage charge, blasting exerted the most pronounced effect on horizontal vibration velocity, with a principal-direction peak vibration velocity of 16.40 cm/s, surpassing the safe allowable threshold. The maximum horizontal displacement of the slope reached 2.94 cm, and the slope safety factor was calculated at 1.13, falling short of regulatory standards and indicating a state of localized instability. The plastic zone exhibited interconnectivity at the slope toe, suggesting localized failure in that region. As the single-stage charge was increased, the peak vibration velocity consistently escalated, while the safety factor progressively diminished. Specifically, when the single-stage charge was augmented from 75 kg to 225 kg, the vibration velocity rose from 2.73 cm/s to 12.54 cm/s, and the safety factor decreased from 1.38 to 1.17. Through optimization analysis, the maximum permissible single-stage charge was identified as 200 kg. Under these conditions, the principal-direction peak vibration velocity was 10.60 cm/s, remaining within the safe allowable range, and the slope safety factor improved to 1.20, thereby satisfying regulatory requirements and indicating a stable state. The research results provide a scientific basis for blasting construction and stability control of the open-pit mine slope, offering valuable insights for similar engineering projects. Additionally, the study reveals the specific mechanisms of blasting vibration effects on slope dynamic response, providing important theoretical support for mine safety production and slope stability management.

Key words: three-dimensional slope; blasting; stability; safety coefficient; vibration velocity; single-stage maximum charge