

张鹏,刘宇,周永利,等.露天矿背波台阶边坡受爆破振动的影响[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2021,36(2):1-6.
doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.02.001

ZHANG P, LIU Y, ZHOU Y L, et al. Influence of Blasting Vibration on the Back Wave Bench Slope of Open Pit [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021,36(2):1-6. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.02.001

露天矿背波台阶边坡受爆破振动的影响

张鹏^{1*},刘宇²,周永利²,陈帅¹,王志留¹,缪伟²,张鹏姣²

(1.中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083;2.神华准格尔能源有限责任公司,内蒙古 鄂尔多斯 010300)

摘要:针对露天矿背波台阶边坡的爆破振动高程放大效应,基于FLAC^{3D}研究了爆源与台阶边坡在不同水平距离、不同高程差的情况下,背波台阶坡面的高程放大效应.结合哈尔乌素露天煤矿北端帮工程实际,对该露天矿北端帮工程进行现场监测,并将监测结果与数值模拟结果进行对比分析,进一步验证了背波台阶坡面的高程放大效应.该结论对后续工程和类似工程具有一定指导和参考价值.

关键词:背波台阶坡面;台阶边坡;爆破振动;数值模拟;爆破振动监测

中图分类号:TD824.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2021)02-0001-06

Influence of Blasting Vibration on the Back Wave Bench Slope of Open Pit

ZHANG Peng¹, LIU Yu², ZHOU Yongli², CHEN Shuai¹, WANG Zhiliu¹, MIAO Wei², ZHANG Pengjiao²

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Shenhua Zhungeer Energy Co., Ltd., Ordos 010300, China)

Abstract: Aiming at blasting vibration altitude amplify effect of open pit bench slope, the altitude amplify effect of back-wave bench slope was studied, under the condition of different horizontal distance and height difference between explosion source and step slope based on FLAC^{3D}. Combined with the engineering site in the north end of Haerwusu Open Pit Mine, the vibration parameters were monitored in the north end of the open-pit mine and the monitoring results and the numerical simulation results were compared and analyzed. The research above had further verified blasting vibration altitude amplify effect of back-wave bench slope. This conclusion provides guidance and reference value for follow-up projects and similar projects.

Keywords: back slope wave; bench slope blasting vibration; numerical simulation; vibration monitoring

目前,针对爆破作用下边坡的高程放大效应的研究较多^[1-6],且这些研究以现场测试或实验数据分析为主.郭学彬等^[7]提出高程放大效应是一种坡面效应,坡面效应的大小与测点相对于坡面的位置以及坡面本身的情况有关,根据不同爆破振动测试实例,分析了不同类型坡面的高程放大效应;万鹏鹏等^[8]通过对台阶地形爆破振动进行现场实测,认为鞭梢效应和坡面效应是影响台阶地形放大效应的主要因素.

近年来,数值模拟技术也被应用到高程放大效应研究中,并取得了一定的成果.蒋楠等^[4]采用数值模

收稿日期:2019-11-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51274209)

*通信作者,E-mail:1213838359@qq.com

型计算表明:对于同一边坡坡面监测点,随着水平距离和高程差的增大,爆破振动速度以衰减为主,在同一水平处,随着边坡坡度的增加,爆破振动速度也以衰减为主,但存在高程放大效应占主导的现象;陈明等^[9]采用有限元数值模拟研究岩质边坡开挖爆破高程放大效应;张云鹏等^[10]从边坡角度变化的方向出发,对角度变化对爆破振动高程放大效应的影响进行数值模拟分析;孙文诚等^[11]利用数值模拟手段对水平距离与埋深变化情况下的台阶地形爆破振动速度放大现象进行了研究,并结合现场爆破振动监测进行了验证;刘光汉等^[12]针对某露天矿爆破工程的特点,通过现场爆破振动测试,结合数值模拟方法研究了爆破振动的高程放大效应;唐海等^[13]的研究表明,凸形地形垂直向的放大效应大于水平向,放大效应具有方向性。

以往学者主要是针对迎波台阶坡面在爆破振动作用下的高程效应进行研究,对于背波^[7]台阶坡面的研究较少,但是工程实际中背波台阶坡面的情况也较为常见.本文通过数值模拟研究了背波台阶坡面的高程放大效应,并结合哈尔乌素露天煤矿(哈矿)北端帮边坡工程实例,对台阶边坡在背波情况下的高程放大效应进行了验证,为台阶边坡在背波情况下的安全问题提供一定的借鉴。

1 背波台阶坡面的高程放大效应研究

通过改变爆源位置,即分别在不同水平距离和不同高程水平施加爆破荷载来研究背波台阶坡面的高程放大效应。

1.1 模型与参数

利用 FLAC^{3D} 建立边坡数值模型见图 1. 边坡分为 4 个台阶, 台阶高度和宽度均为 25 m, 共布置 8 个监测点, 每个台阶布置 2 个监测点, 台阶上部 and 下部各 1 个. 监测点编号由台阶一的下部监测点为 1#, 台阶二的下部监测点为 2#, 以此类推, 台阶一的上部监测点为 5#, 台阶二的上部监测点为 6#.

本次模拟实验采用工程实际中哈矿北端帮的岩石参数, 根据现场工程地质条件, 确定边坡以砂岩为主, 并结合现场试验与室内实验, 哈尔乌素露天煤矿北端帮边坡砂岩的岩石力学参数: 泊松比为 0.38, 密度为 2.3 g/cm³, 弹性模量为 19.3 MPa, 切线模量为 7.0 GPa, 内摩擦角为 29°, 黏聚力为 27.2 MPa.

在模拟计算过程中, 假设模型材料是连续、均质、各向同性的. 模型顶面及坡面为自由面, 左面、右面、下面 3 个面均采用安静边界(quiet boundary).

采用等效荷载法施加爆破荷载, 根据文献[14]的研究成果, 爆炸荷载采用三角波荷载, 作用时间假设为 7 ms, 其中上升波时间为 1 ms, 下降波时间为 6 ms. 荷载峰值 σ_m 由式(1)和式(2)确定^[15].

$$\sigma_m = P_w \left(\frac{1}{\bar{r}} \right)^\alpha; \quad (1)$$

$$P_w = \frac{\rho_w D^2}{1 + K}. \quad (2)$$

式中: P_w 为药包中心处爆轰波产生的平均初始压力, N/m²; \bar{r} 为比例半径, $\bar{r} = R/R_w$ (R 为离药包轴线的距离, m; R_w 为药包横切面半径, mm); α 为与岩石及炸药种类有关的常数, 对于大多数岩石, $\alpha \approx 1.5$; ρ_w 为装药密度, kg/m³; D 为炸药的爆轰速度, m/s; K 为等熵指数, 与装药密度相关, 当 $\rho_w < 1.2$ g/cm³ 时, $K = 2.1$, 当 $\rho_w > 1.2$ g/cm³, $K = 3$.

相关参数取值: $K = 3$, $\bar{r} = 120$ m, $\rho_w = 1.5$ g/cm³, $D = 3\ 200$ m/s, $R_w = 25$ mm.

FLAC^{3D} 动力计算中应考虑阻尼, 由于瑞利阻尼理论与常规动力分析方法类似, 计算得到的速度响应规律比较符合实际, 所以采用瑞利阻尼. 使用瑞利阻尼必须确定最小中心频率 f_{\min} 和最小临界阻尼比 ξ_{\min} . 瑞利阻尼是与频率相关的, 采用对模型做无阻尼动力计算的方法确定中心频率, 通过对模型进行无阻尼的

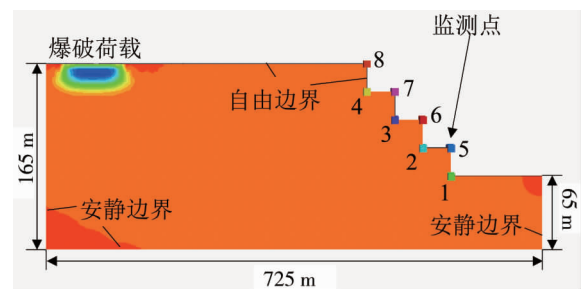


图 1 边坡数值模型

自振计算,得到一个振荡周期需要的时间约为 0.2 s,据此可以计算出模型的自振频率 f_{\min} 约为 5 Hz.利用经验方法,直接选取岩土体的阻尼比 ξ_{\min} 为 0.5%^[16].

1.2 爆源与台阶边坡不同水平距离

因现场监测部分的距离分别为 420, 510, 608 m,所以爆破荷载分别从距离台阶边坡 200, 300, 400, 500, 600 m 的位置施加.爆破荷载与台阶边坡的相对位置如图 1 所示.爆区与台阶边坡在不同水平距离的情况下,利用 FLAC^{3D} 得到峰值振速如图 2 所示.

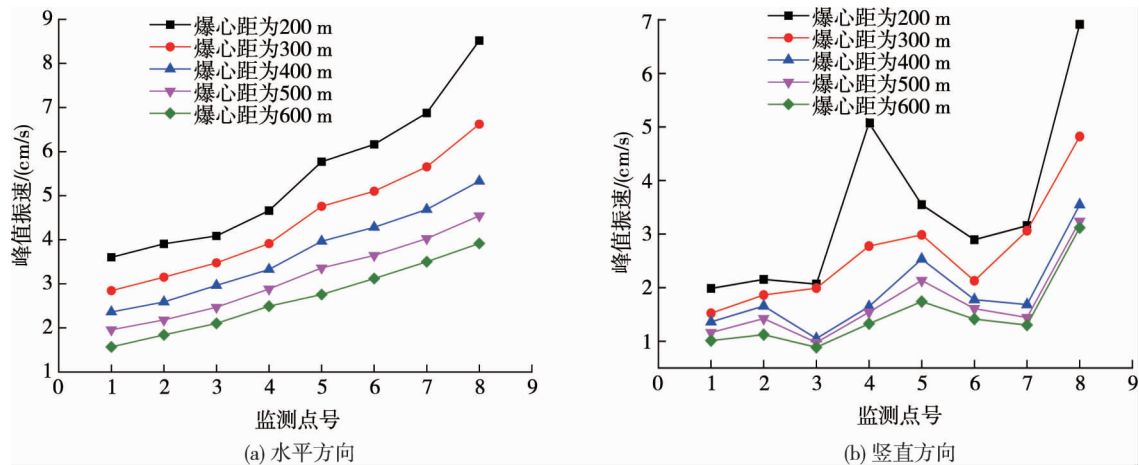


图2 监测点峰值振速

由图 2 可知:边坡质点水平方向的峰值振速随着与爆源水平距离的增加不断减小;各条曲线均大致呈现出向上倾斜的趋势,监测点编号越小,爆心距越远,峰值振速越小;当台阶边坡与爆源水平距离为 200 及 200 m 以上时,台阶均呈现出高程放大现象;5[#]~8[#] 监测点为台阶上部测点,1[#]~4[#] 监测点为台阶下部测点,台阶上部测点均大于台阶下部测点,即呈现出高程放大效应.

不同爆心距时,对台阶的振速放大系数(坡顶与坡脚振动速度之比)进行计算,其随爆心距的变化规律如图 3 所示.

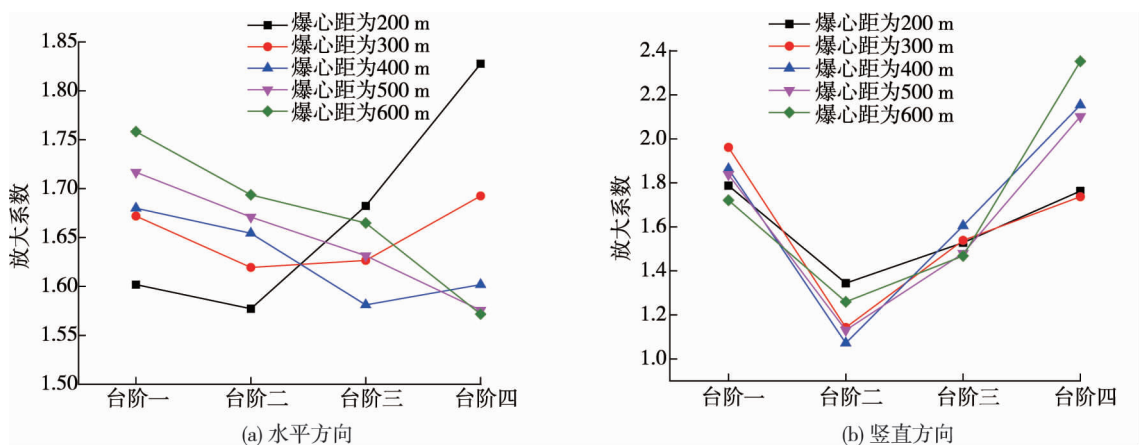


图3 台阶振速放大系数

由图 3 可知:水平方向的振速放大系数呈现明显的分区,爆源与台阶边坡的水平距离越大,下部台阶的高程放大效应越显著,上部台阶的高程放大效应越弱;竖直方向边坡出现局部高程放大效应,台阶二在竖直方向的振速放大系数相较于其他台阶出现明显减小,即高程放大效应呈减弱状态;边坡质点高程放大效应呈现出明显的方向性,竖直方向大于水平方向,对比水平方向和竖直方向的振速放大系数可知,竖直方向明显大于水平方向.

1.3 不同爆源高程

爆源在 115 m 水平时的边坡数值模型如图 4 所示.爆源在 165, 115, 65, 15 m 水平的不同高程情况

下,利用FLAC^{3D}得到的监测点峰值振速和台阶振速放大系数分别如图5和图6所示。



图4 爆源在115 m水平时边坡数值模型

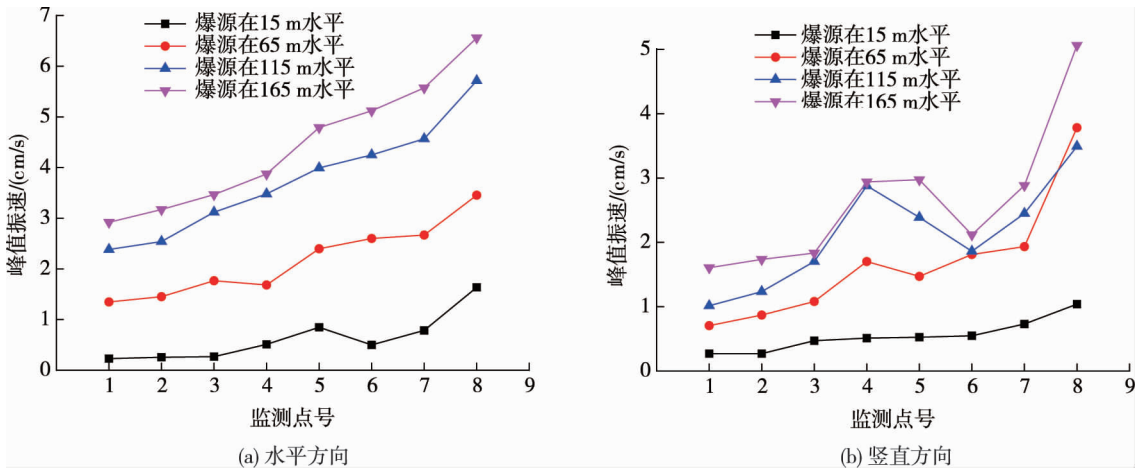


图5 监测点峰值振速

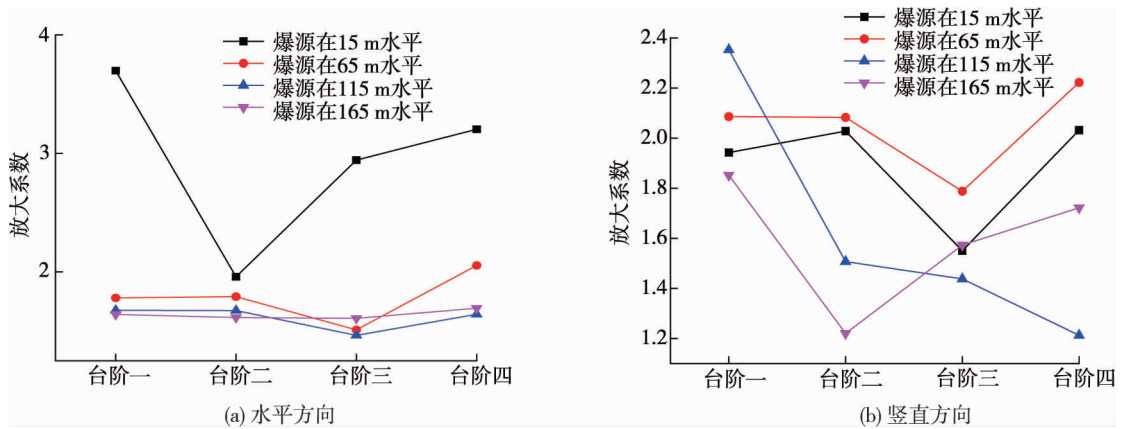


图6 台阶振速放大系数

由图5可知:边坡质点峰值振速随着爆区高程的减小不断减小;各条曲线均大致呈现出向上倾斜的趋势,监测点编号越小,爆心距越远,峰值振速越小;峰值振速曲线整体随着爆区高程的减小不断下降。

由图6可知:台阶边坡各台阶均呈现出高程放大效应;台阶边坡水平方向的振速放大系数随着爆源高程的减小,高程放大效应越显著;台阶边坡垂直方向的振速放大系数高程的放大效应未呈现出明显规律。

爆源在15 m水平时水平方向的振速放大系数明显高于爆源在其他水平的振速放大系数,爆源在15 m水平时的边坡数值模型如图7所示。 β 为爆破水平与相邻斜坡面的夹角,分析认为此时 β 偏小,振动波绕射、反射、叠加等作用大,导致边坡放大系数的明显放大。



图7 爆源在15 m水平时的边坡数值模型

2 背波台阶坡面高程效应工程实例验证

随着哈矿和黑岱沟露天煤矿(黑矿)的不断开采和剥离,在哈矿北端帮和黑矿南端帮形成了复合边帮.黑矿应用抛掷爆破技术进行岩体的破碎,其爆破振动过程影响了哈矿北端帮的稳定.在黑矿爆破作用的影响下,哈矿北端帮成为背波台阶坡面,黑矿的爆破区域分为南北炮区.两矿相对位置如图 8 所示.

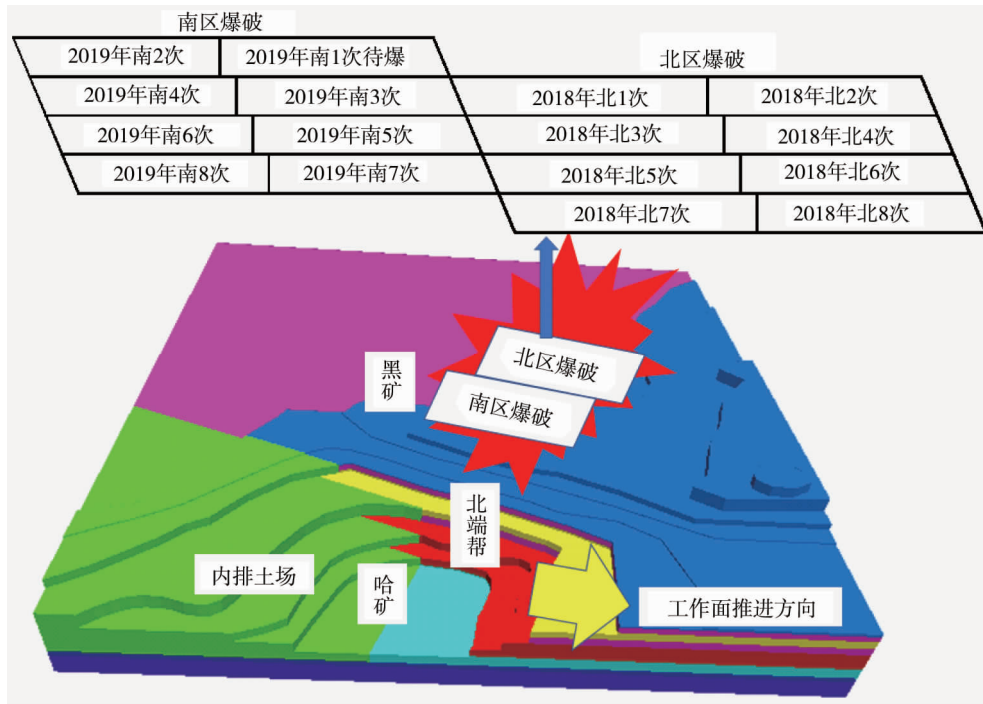


图 8 爆破区域边坡相对位置

哈矿北端帮开采深度达到 135 m,共 4 个台阶,各台阶高度为 30, 30, 45, 30 m,台阶上现场布置的监测点如图 9 所示.

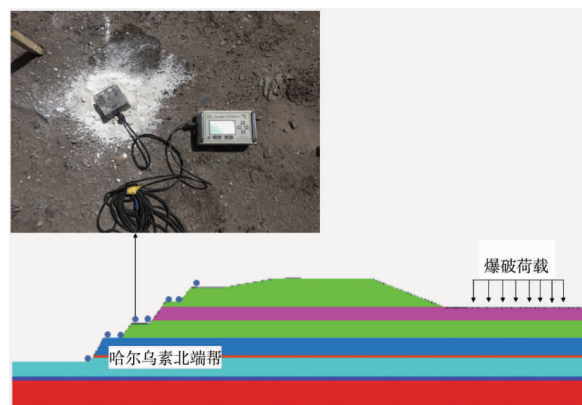


图 9 现场监测

本工程中抛掷爆破使用数码雷管,台阶平均高度 45 m,平均孔深 48 m,孔径 250 mm,孔距 12 m,排距 6~7 m,8 ms 内一次起爆最大药量为 10.45 t.

由于黑矿实际生产时的爆破区域相对于哈矿北端帮位置的改变,在 3 次现场监测中,爆源与哈矿北端帮的距离分别为 420, 510, 608 m,得到的监测点水平方向的峰值振速结果见图 10.

现场实测和数值模拟水平方向的峰值振速结果显示:哈矿北端帮整体呈现高程放大效应,峰值振速随着与爆源水平距离的增加不断减小.哈矿编号 1100 台阶监测点水平方向的峰值振速明显放大.分析认为编号 1100 台阶的峰值振速明显高于其他台阶的峰值振速.

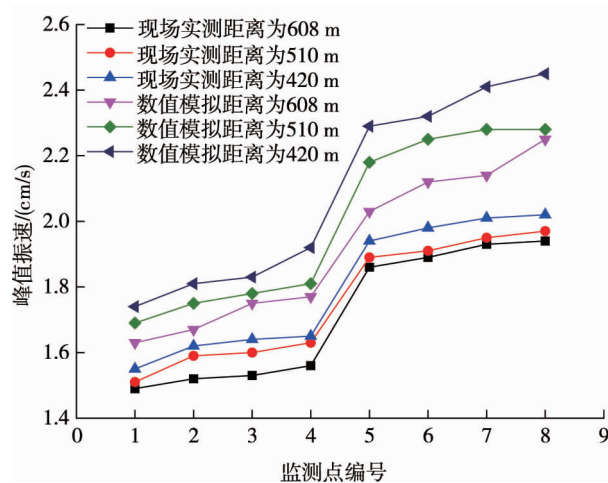


图10 监测结果

3 结论

1) 背波台阶坡面边坡质点峰值振速随着与爆源水平距离的增大不断减小,随着爆源高程的增大呈增大趋势。

2) 背波台阶坡面与爆源的水平距离越大,下部台阶的高程放大效应越明显,上部台阶的高程放大效应越弱,背波坡面的高程放大效应呈现明显的分区现象。爆源高程越小,台阶边坡水平方向的振速放大系数越大,高程放大效应越显著,台阶边坡垂直方向的振速放大系数高程放大效应未呈现出明显规律。

3) 背波台阶坡面的高程放大效应呈现出明显的方向性,垂直方向放大效应较水平方向更加显著。

4) 哈矿北端帮边坡整体呈现高程放大效应,编号1100台阶水平方向的峰值振速明显放大,应重点关注,并采取一定的安全保护措施。

参考文献:

- [1] 贺永俊,杨珊.基于FLAC^{3D}数值模拟厚大矿体开采方案与采场稳定性研究[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2015,30(1):8-14.
- [2] 马文瀚,方先知,戴塔根,等.爆破振动对地质遗迹影响的数值模拟分析[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2009,24(4):28-32.
- [3] 王银涛,张昌锁,张胜利.露天矿爆破振动边坡高程效应[J].矿业研究与开发,2015,35(4):56-59.
- [4] 蒋楠,周传波,平雯,等.岩质边坡爆破振动速度高程效应[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(1):237-243.
- [5] 陆文,郭学彬.爆破地震效应中的沟槽减震作用研究[J].矿业安全与环保,2001(1):11-12.
- [6] 张伟康,谢永生,吴顺川,等.矿山边坡爆破振动高程放大效应研究[J].金属矿山,2015(3):68-71.
- [7] 郭学彬,肖正学,张志呈.爆破振动作用的坡面效应[J].岩土力学与工程学报,2001,20(1):83-87.
- [8] 万鹏鹏,璩世杰,许文耀,等.台阶爆破质点振速的高程效应研究[J].爆破,2015,32(2):29-32.
- [9] 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.
- [10] 张云鹏,杨曦,李岩,等.坡面角对爆破高程放大效应影响的数值模拟分析[J].矿业研究与开发,2017,37(7):23-25.
- [11] 孙文诚,张伟,尹国新,等.台阶地形爆破振动放大效应研究[J].矿业研究与开发,2019,39(8):28-33.
- [12] 刘光汉,周建敏,余红兵.爆破振动高程放大效应研究[J].矿业研究与开发,2015,35(12):84-87.
- [13] 唐海,李俊如.凸形地貌对爆破震动波传播影响的数值模拟[J].岩土力学,2010,31(4):1289-1294.
- [14] Henrych J, Abrahamson G R. The Dynamics of Explosion and Its Use[J].Journal of Applied Mechanics, 1980,47(1):218.
- [15] 高金石,张继春.爆破破岩机理动力分析[J].金属矿山,1989(9):7-12.
- [16] 刘波,李涛,韩彦辉.土木工程FLAC/FLAC 3D实用教程[M].北京:机械工业出版社,2018.