

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.03.014

开采爆破作用下台阶岩体损伤区分布规律研究

陈立军

(中铁十九局集团矿业投资有限公司 新巴尔虎右旗分公司,满洲里 021400)

摘要: 露天矿台阶爆破对于爆区后侧岩体具有极强扰动,对于边坡稳定性及爆破参数设计具有显著影响。以乌山露天矿爆破开采为研究背景,进行现场爆破震动监测和爆破前后钻孔摄像现场测试,利用应变软化本构模型对露天台阶爆破区域后方的岩体损伤区进行了理论计算。根据岩体变形、应力、塑性区以及破坏程度等指标确定了岩体损伤范围与损伤程度,并利用钻孔摄像与爆破振动测试结果对理论分析进行了验证。研究表明:乌山露天矿台阶爆破后,分析得到岩体损伤区的范围大致为20 m,其中1~2 m范围岩体以拉破坏为主,台阶整体为剪切破坏。研究结果为后续边坡稳定性分析与爆破参数优化提供了基础数据。

关键词: 边坡损伤;应变软化;钻孔摄像;爆破振动

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)03-0085-05

Distribution Law of Damage Zone in Bench Rock Mass under Mining Blasting

CHEN Li-jun

(China Railway 19 Bureau Group Mining Investment Co LTD, Manzhouli 021400, China)

Abstract: Bench blasting in open-pit mine has a strong disturbance to the rock mass behind the blasting zone, which has a significant impact on the slope stability and blasting parameter design. Based on the mining blasts of Wushan open-pit mine, the monitoring of blasting vibrations and the field tests by borehole camera before and after blasting are carried out. The damage area of rock mass behind the bench blasting zone of is calculated theoretically by strain softening constitutive model. According to the deformation, stress, plastic zone and damage degree of rock mass, the damage extent and degree of rock mass are determined, and the theoretical analysis is verified by the results of borehole camera and blasting vibration tests. The results show that the damage area of rock mass is about 20 m. In the nearest 1~2 m range, the rock mass is mainly damaged by tensile failure, and the overall bench damage is shear failure. Furthermore, these results can provide some basic data for the following slope stability analysis and blasting parameters optimization.

Key words: slope damage; strain softening; borehole camera; blasting vibration

爆破冲击荷载作用下岩质边坡的损伤特性研究,一直是隧道、矿山和水电洞室工程中的研究难点^[1-3]。同时,由于爆破损伤诱发的边坡失稳也是常见的工程地质灾害,动态响应分析可以作为边坡稳定性分析的基础^[4-6]。近年来,国内外学者通过现

场监测、室内试验以及数值计算等各种方式,对岩质边坡在爆破荷载下的动态响应展开了广泛研究。现场监测方面,谢全敏等对龙滩水电站蠕变体边坡的爆破振动进行观测、分析及处理,得到了爆破地震波衰减经验公式^[7];欧阳建华等研究了某凸形岩质边坡爆破开挖工程中的爆破扰动对边坡稳定性的影响^[8],确定了该岩质边坡的质点振动速度安全阈值,同时根据边坡质点振动的跟踪监测数据得到了

收稿日期:2020-04-30

作者简介:陈立军(1976-),男,项目经理、学士,主要从事矿山生产管理,(E-mail)632545110@qq.com。

质点的振动衰减规律。室内试验方面,钟冬望等通过室内模型试验研究了边坡岩体在爆破冲击荷载作用下的动力特性^[4],结果表明爆破振动波在边坡上的传播和衰减特性与平地不同,坡顶质点振速存在放大效应,同时发现减震沟可降低爆破振动强度,减小振动对边坡稳定性的影响;江云星等采用室内相似材料试验研究分析了边坡在爆破过程中产生的爆破振动规律及岩体内部产生的力学效应^[10],在一定程度上揭示了边坡失稳机理。数值计算方面,费鸿禄等基于强度折减法及时程分析法^[11],应用有限元软件 ANSYS 对爆破荷载作用下的某矿山边坡安全系数变化规律进行研究,发现随着爆破次数的增加,边坡安全系数逐渐降低,最多时可降低 35.2%;胡英国等基于 LS-DYNA 二次开发的累计损伤仿真技术,研究了光面爆破和预裂爆破方式下开挖损伤区的变化全过程^[12],得到了不同开挖方式下边坡岩体损伤的演化规律。

在露天矿山中,由于边坡岩体在爆破冲击与卸荷作用,边坡内部裂隙不断发育,最终导致露天矿浅部岩体长期处于松弛状态^[13-15]。这样不仅难以评估边坡的稳定性,而且造成爆破成本的提高。为此,以满洲里乌努格吐山铜钼矿为研究背景,结合台阶爆破利用应变软化本构模型对爆破作用下台阶动态响应进行了理论分析,并结合钻孔摄像与爆破振动监测对分析结果进行验证,确定了台阶的损伤范围与损伤程度,为后续边坡稳定性分析与爆破设计优化提供理论基础。

1 工程概述

乌努格吐山铜钼矿位于内蒙古自治区呼伦贝尔大草原腹地新巴尔虎右旗境内,属于受火山机构控制的陆项次火山斑岩型铜钼矿床。铜钼矿设计境界内有铜矿石量 4.2 亿 t,钼矿石量 10 亿 t。一期采剥总量 6088.81 万 m³,二期采剥总量 3030 万 m³,三期采剥总量 15 000 万 m³。矿区勘探范围在 420 ~ 710 勘探线间,以 F7 断层为界将矿床分为南北 2 个矿段。矿带为一长环形,长轴长 2600 m,短轴宽 1350 m,走向 50°左右,总体倾向北西,倾角从东向西由 85°渐变成 75°,南北 2 个转折端处均内倾,倾角为 60°,北矿段环形中部有宽达 900 m 左右的无矿核部,南矿段环形中部无矿核部宽为 150 ~ 850 m。矿体赋存标高为 200 ~ 850 m,厚度为 10 ~ 300 m,平均厚度大于 100 m,根据矿体赋存条件采用露天开采。见图 1。

2 损伤区检测结果

为了准确获取台阶爆破后损伤区的分布规律,

本次测试采用钻孔摄像与爆破振动两种测试手段。由于乌山铜矿台阶爆破时采用分步爆破,即先对 A、B 两排炮孔爆破,然后再爆破 C、D、E 后三排,因此在 A、B 两排炮孔起爆前,利用钻孔摄像对 C、D、E 后三排炮孔进行三维扫描获得节理发育情况,并在钻孔位置布设四台爆破振动测试仪,监测爆破波的衰减规律。



图 1 露天矿全貌

Fig. 1 Panorama of open pit mines

2.1 钻孔摄像

数字钻孔摄像技术是近些年研发的地质勘查新方法。该方法将 360 的钻孔孔壁用平面图像来表示,利用坐标建立三维信息从而获得地质构造的三维结构。该方法解决了钻孔内的工程地质信息采集的完整性和准确性问题,通过对钻孔孔壁进行无扰动的原位摄像记录,直接对孔壁进行研究,避免了钻孔取芯工程的扰动影响,比钻孔岩芯更能反映钻孔内的实际情况,得到的结果更加可信和直观,见图 2。图 3 所示为现场钻孔测试作业。

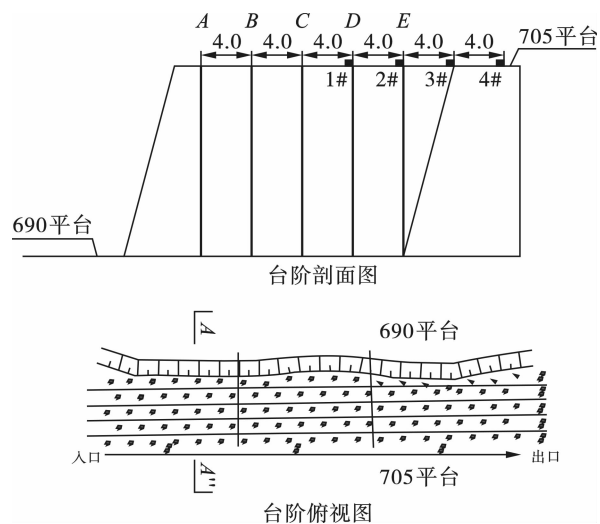


图 2 钻孔摄像与爆破振动监测方案(单位:m)

Fig. 2 Borehole camera and blasting vibration monitoring scheme(unit:m)

图 4 为 C、D、E 孔爆破前后的对比图,通过对比可以清楚观测到 C 孔裂隙发育明显,并且与近水平向裂隙发育居多,其中孔深在 4.1 m 产生了接近 5 cm 的裂隙;D 孔裂隙发育次之,裂隙以近斜向 45°

发育,最大裂隙 2~5 mm;E 孔裂隙发育不明显,出现微小的近垂直向裂隙。对比三个钻孔裂隙发育程度,随着爆破距离的增加,岩体内部裂隙发育程度逐级递减。根据裂隙发育情况,初步判断在距爆区 12 m 范围内均为岩体损伤区。如图 5 为现场爆破后地表破坏情况。



图 3 钻孔摄像测试现场

Fig. 3 Borehole camera test site

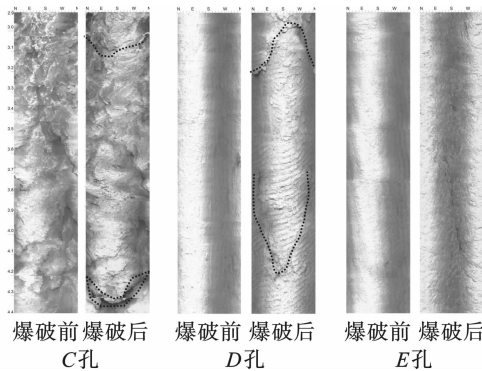


图 4 钻孔摄像测试结果

Fig. 4 Borehole camera test results

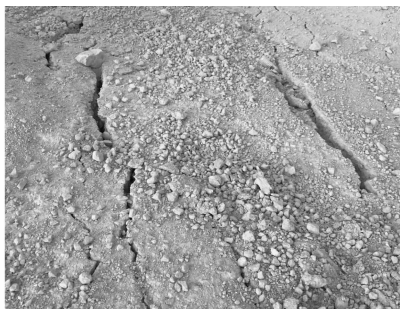


图 5 地表破坏

Fig. 5 Surface damage

2.2 爆破振动

此次现场爆破振动测试采用 NUBOX-8016 爆破振动智能监测仪,他是一款采用全新技术设计的新一代智能爆破测振仪,它能够最大程度地简化爆破测振现场工作流程,爆破现场自动设置触发电平,达到一键完成爆破测振操作的智能化效果,同时可靠性、稳定性大大增强,续航时间也显著增加。其主要

功能特点如下:自动设置触发电平,一键完成测量工作;测量范围:0.0047~35 cm/s;续航能力:典型应用模式下,可支持 40 h。

图 6 为爆破振动测点 1#和 4#的三向振动监测。其中,1#测点的主振频率为 24.4 Hz、最大振动速度为 -35.1 cm/s,2#测点的主振频率为 22.1 Hz、最大振动速度为 -31.9 cm/s,3#测点的主振频率为 19.8 Hz、最大振动速度为 -31.9 cm/s,4#测点的主振频率为 18.3 Hz、最大振动速度为 -25.1 cm/s。参考我国爆破振动安全标准,主振频率在 $10 \text{ Hz} \leq f \leq 50 \text{ Hz}$ 是,其质点振动速度为三分量中的最大值未超过 25 cm/s 时,可以认为是安全区域,因此根据爆破振动测试结果可以判断在距离爆破点 16 m 以内为爆破损伤区。

综合考虑钻孔摄像与爆破振动的测试结果,乌山铜矿台阶爆破时其边坡的爆破损伤区范围在距离起爆位置 12~16 m 区间。

3 数值模拟分析

为了准确获得乌努格吐山铜钼矿露天矿台阶的损伤区分布规律,利用 FLAC3D 计算软件对爆破过程进行计算分析,通过应变软化本构模型分析台阶在爆破荷载作用下的损伤特性,并结合质点振动速度、位移、塑性区以及破坏接近度评价边坡损伤情况,并与现场监测结果进行比较,对露天台阶的损伤特性有更全面的认识和判断。

3.1 计算模型

根据露天矿台阶的设计方案,台阶高度为 15 m,每个钻孔间的距离为 4 m,建立台阶爆破的二维模型,模型共计 4812 个单元,7998 个节点。由于动力计算分析中,计算模型的边界条件会导致振动波在边界处产生反射波,这种反射现象会对数值分析结果的准确性造成很大影响。为了解决该问题,采用了 Lysmer 和 Kuhlemeyer 提出的透射边界。计算模型中边坡除坡顶面为自由边界外,其余五个侧面均设为透射边界。见图 7。

3.2 计算参数与爆破波

岩体力学计算参数的确定,采用常规单轴压缩、直剪实验与巴西劈裂实验测得。本次计算主要是为了获得台阶爆破后岩体的损伤情况与分布规律,因此在计算时采用应变软化本构模型,岩体损伤后力学强度参数利用真三轴力学试验获得,岩体材料的物理力学参数如表 1 所示。

动力荷载的确定是动力计算的关键,也是难点。本次数值分析中,动力荷载直接采用现场监测得到的爆源近点速度时程曲线,即:现场 1#的速度时程曲线,如图 8 所示。由于在黏滞边界动态分析中,速

度与加速度不能直接作用在模型边界,因此,根据下述公式将速度-时程曲线转换成应力-时程曲线后,再施加在模型边界上。

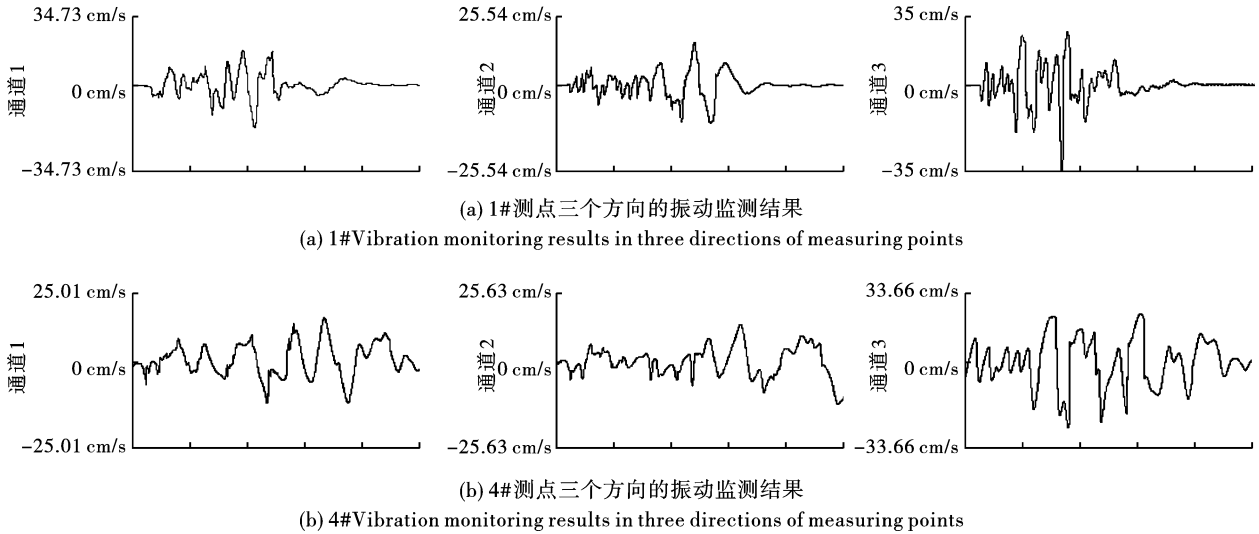


图6 现场爆破振动测试结果
Fig.6 Field blasting vibration test results

表1 岩体计算参数

Table 1 Calculating parameters of rock mass

弹性模量 E/GPa	泊松比	抗拉强度/ MPa	粘聚力/MPa		内摩擦角/°	
			初始	残余	初始	残余
9.3	0.25	1.05	1.5	0.5	35.4	15

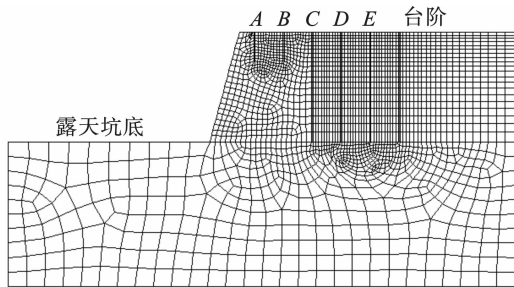


图7 计算模型
Fig.7 Computational model

$$\sigma_n = -2\rho C_p v_n \quad (1)$$

$$\sigma_s = -2\rho C_s v_s \quad (2)$$

式中: σ_n 为施加的法向应力荷载; σ_s 为施加的切向应力荷载; ρ 为介质的密度; C_p 、 C_s 分别为P波和S波在介质中传播速度; v_n 、 v_s 分别为输入质点的法向和切向振动速度。

3.3 计算结果

计算分析表明,爆破作用导致台阶前端岩体位移速率较大,其最大位移速度超过了100 cm/s,从台阶前段向台阶后缘其位移速度迅速衰减。根据台阶爆破后的塑性区云图可以发现,爆破对于台阶的破坏范围较大,水平范围在16 m左右,竖直方向接

近20 m。通过塑性区的破坏类型可以发现,爆破振动导致台阶以剪切破坏为主,在爆破孔底部1~2 m范围出现张拉破坏。

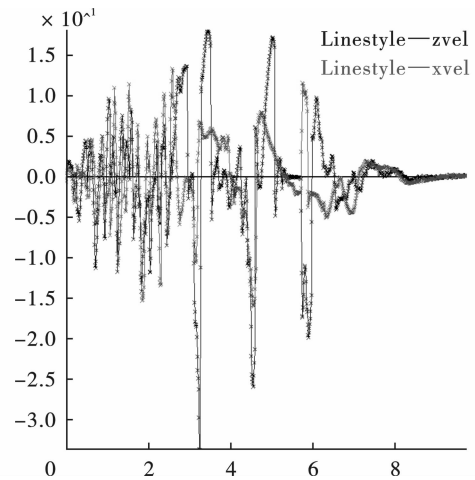


图8 爆破振动速度时程曲线
Fig. 8 Time-history curve of blasting vibration velocity

对于岩石材料,等效塑性剪应变是描述材料不可逆变形的评价变量。对于以剪切破坏机制为主的岩石材料,常常以此为变量来定义应变软化函数。可以假设,当岩石破坏时,存在一个临界的塑性剪应变值作为界定破坏的判据,这个判据是一个材料参

数。因此就可以通过等效塑性剪应变来定义一个评价材料变形破坏过程中损伤程度的指标,称之为破坏度。根据计算结果可以发现,爆破振动虽然导致

台阶岩体塑性区范围很大,但是台阶损伤主要在台阶前端岩体,爆区后岩体损伤严重区域大致距离起爆点 2~3 m 范围。见图 9。

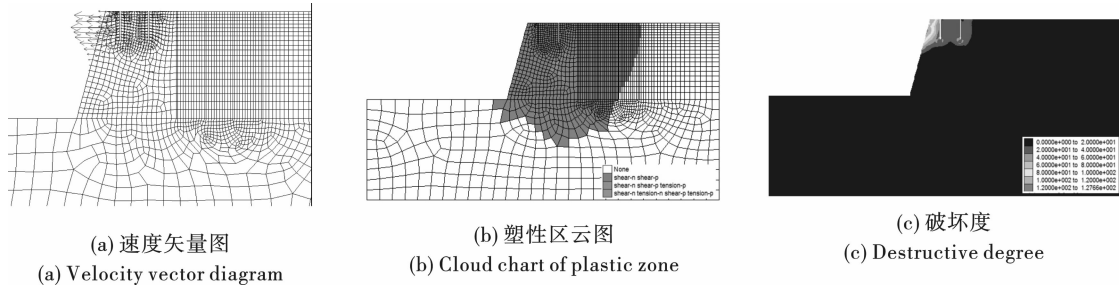


图 9 计算结果
Fig.9 Calculation results

4 结论

通过对乌山铜钼矿进行现场爆破震动监测和爆破前后钻孔摄像现场测试,得到如下露天矿台阶爆破结论:

(1)通过现场爆破震动测试与数值分析证明,露天矿台阶爆破阶段爆破振动波对于岩体具有明显的损伤效应。

(2)以乌山铜钼露天矿台阶爆破为例,研究其损伤区的边界距离爆破点大致在 12~16 m 区间,整个台阶以剪切破坏为主,孔底 1~2 m 范围以拉伸破坏为主,而且台阶破坏集中在前端岩体。

(3)爆破震动与钻孔摄像结合进行分析,研究成果对于台阶乃至边坡稳定性分析,爆破参数优化提供了理论支撑。

参考文献 (References)

[1] 范勇,江璐,卢文波,等.圆形隧洞爆破荷载与瞬态卸荷作用围岩应变能效应研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(8):1855-1866.
[1] FAN Yong,JIANG Lu,LU Wen-bo,et al. Study on strain energy effect of surrounding rock under blasting load and transient unloading of circular tunnel[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering,2017,36(8):1855-1866. (in Chinese)
[2] 王志佳,张建经,付晓.模型试验的分离相似设计方法-以锚索格构加固边坡模型试验为例[J].岩土力学,2016,37(9):2617-2623.
[2] WANG Zhi-jia,ZHANG Jian-jing,FU Xiao. Separation similarity design method of model test - Taking the model test of anchor cable lattice reinforcement slope as an example[J]. Geotechnical Mechanics,2016,37(9):2617-2623. (in Chinese)
[3] 卞康,刘建,胡训健,等.含顺层断续节理岩质边

坡地震作用下的破坏模式与动力响应研究[J].岩土力学,2018,39(8):3029-3037.
[3] BIAN Kang,LIU Jian,HU Xun-jian,et al. Study on failure mode and dynamic response of rock slope with bedding intermittent joints under earthquake action[J]. Geotechnical Mechanics,2018,39(8):3029-3037. (in Chinese)
[4] 周东升,杨凤芸,武帅萌.边坡稳定性分析方法研究现状与展望[J].露天采矿技术,2017,32(7):28-30.
[4] ZHOU Dong-sheng,YANG Feng-yun,WU shuai-meng. Research status and prospect of slope stability analysis method[J]. Open Pit Mining Technology,2017,32(7):28-30. (in Chinese)
[5] 赵永,杨天鸿,张鹏海,等.基于微震参数的岩体损伤过程数值模拟分析[J].采矿与安全工程学报,2018,35(1):213-220.
[5] ZHAO Yong,YANG Tian-hong,ZHANG Peng-hai,et al. Numerical simulation analysis of rock mass damage process based on microseismic parameters[J]. Journal of Mining and Safety Engineering,2018,35(1):213-220. (in Chinese)
[6] 杨天鸿,张锋春,于庆磊,等.露天矿高陡边坡稳定性研究现状及发展趋势[J].岩土力学,2011,32(5):1437-1451.
[6] YANG Tian-hong,ZHANG Feng-chun,YU Qing-lei,et al. Research status and development trend of high and steep slope stability in open pit[J]. Geotechnical Mechanics,2011,32(5):1437-1451. (in Chinese)
[7] 谢全敏,夏元友,李新平.龙滩水电站蠕变体边坡的爆破振动控制研究[J].岩石力学与工程学报,2003(11):1929-1932.
[7] XIE Quan-min,XIA Yuan-you,LI Xin-ping. Study on blasting vibration control of creep slope of Longtan Hydropower Station[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering,2003(11):1929-1932. (in Chinese)