

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.03.012

预裂爆破作用下节理岩质边坡损伤区测试研究

张士磊

(中铁十九局集团矿业投资有限公司,北京 100161)

摘要: 随着我国大型露天矿开采深度的加大,高陡露天边坡的稳定性问题已经成为当前露天开采矿山亟待解决的关键难题,特别是在爆破载荷作用下,高陡边坡极易产生坡体表面岩体开裂甚至局部滑坡,为露天矿山开采带来了巨大安全隐患。为研究高陡节理岩质边坡在爆破载荷作用下的损伤特征,合理优化露天爆破参数,以太钢袁家村露天矿西边帮节理发育区域为工程依托,研究预裂爆破作用下节理岩质边坡的损伤区发展规律。采用数字钻孔摄像手段,测定爆破前后钻孔裂隙发育程度,测试结果表明:随着爆破距离的增加,岩体内部裂隙发育程度逐级递减,裂隙宽度逐渐减小,当距爆破点9 m以上,爆破对岩体裂隙无影响。采用爆破振动手段,监测围岩质点振动速度指标,监测结果表明:依据我国爆破振动安全标准,爆破损伤区范围不超过9 m。结合现场钻孔摄像和爆破振动结果,可得到袁家村露天矿西边帮预裂爆破的岩体损伤区范围为9 m。

关键词: 岩质边坡;预裂爆破;节理;损伤监测

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)03-0074-04

Damage Zone Test of Jointed Rock Slope under Pre-split Blasting

ZHANG Shi-lei

(China Railway 19th Bureau Group Mining Investment Co Ltd, Beijing 100161, China)

Abstract: With the increase of mining depth of large-scale open pit mine in China, the stability of high-steep open-pit slope has become a key problem in the current open-pit mines. Especially under the action of blasting loads, the surface rock mass cracking, and the high-steep slopes are prone to form the landslide hazard, which bring huge safety hidden trouble for open pit mining. In order to investigate the damage characteristics of high-steep jointed rock slope under blasting load and optimize open-pit mine blasting parameters. Based on the joint development area of the west slope of Yuanjiacun open-pit mine in Taiyuan Iron, the damage zone development law of jointed rock slope under pre-split blasting was studied. The digital drilling imaging method was used to measure the rock fracture development degree of the borehole before and after blasting. The test results showed that with the increase of the distance between test point and blasting hole, the development degree of crack inside the rock mass decreased step by step, and the width of crack gradually decreased. When the distance was more than 9 m, there was no effect on rock mass fracture for blasting. The vibration velocity index of the surrounding rock mass was monitored, and the results showed that the blasting damage zone also did not exceed 9 m. Combined with the results of digital drilling imaging and blasting vibration test, the rock mass damage area of pre-split blasting in the west slope of Yuanjiacun open-pit mine was in 9 m.

Key words: rock slope; pre-split blasting; joint; damage monitoring

收稿日期:2020-04-10

作者简介:张士磊(1984-),男,工程师、硕士研究生,主要从事采矿、爆破技术研究及应用工作,(E-mail)764257366@qq.com。

随着我国资源需求量的增长,国内大型金属露天矿的深度也逐渐增加。目前,边坡高度超过200 m的露天矿山已有几十余座。随着边坡高度的

增加,爆破诱发的地质灾害在大型露天矿中已经成为首要工程灾害,节理发育岩质边坡尤为严重。因此,必须对高陡节理岩质边坡在爆破载荷作用下的动态响应进行深入研究,确定爆破诱发节理松弛与岩体损伤的范围与程度,这些为爆破设计优化、边坡稳定性分析与监测提供了重要的科学指导。

针对爆破所引起的岩体损伤,国内外学者开展了大量的研究工作,提出了多种爆破载荷作用下的岩石损伤变量和岩体损伤模型如 GK 损伤模型, TCK 损伤模型和 KUS 损伤模型等。针对爆破载荷作用下的边坡稳定性问题,国内外学者开展了大量的研究,采用数值计算的手段研究边坡岩体裂隙失稳扩展的扰动机制;采用探地雷达结合超声波技术进行岩体损伤区的精准探测;从爆破能量角度,构建节理裂隙滑动模型,监测爆破质点峰值振动速度,进而确定边坡的稳定性;从爆破力学角度,考虑爆破载荷和边坡表面卸荷双重作用下的边坡安全系数计算等^[1-7]。但是,岩体是由岩块与裂隙构成的天然材料,其构造具有复杂性和多样性,尤其节理与裂隙的存在使得岩体强度具有明显的各向异性特点,同时岩体强度也具有明显的离散性与差异性,因此采用理论分析研究节理岩体动力损伤是极其复杂岩石力学问题^[8-12]。

以太原钢铁袁家村露天矿西帮节理发育区域的最终境界预裂爆破为工程依托,利用钻孔摄像与爆破振动测试方法获取节理岩体在冲击载荷下的损伤特征,为工程的边坡稳定性分析与爆破设计优化提供理论指导。

1 工程概述

袁家村矿区位于山西省岚县梁家庄乡袁家村,矿区南北走向长 4.2 km,东西走向宽 1.5 ~ 2.6 km。矿区共有矿体 21 个,其中 10 号矿体规模最大,为开采主矿体,其形态为一巨大的扁豆体。矿体全长 2600 m,平均厚度 154.6 m,平均延深 612.1 m,走向 NNE,倾向 SEE,倾角 70° ~ 80°。根据铁矿赋存环境条件,袁家村铁矿属于大型露天铁矿,埋藏深度深,开采以后将由山坡露天开采转为深凹开采。开采深度达到地表以下 300 ~ 400 m。边坡垂直高度将达到 600 ~ 700 m。随着边坡的加高加陡,边坡稳定性将越来越差,尤其在爆破冲击作用下,露天矿西帮节理发育区域的稳定性更难以保证。目前爆破至 1670 阶段已经出现了顺倾向的节理滑移,为此采用预裂爆破抑制边坡稳定性的恶化。见图 1、图 2。



图 1 露天矿全貌

Fig. 1 Panorama of open pit mines



图 2 节理滑移

Fig. 2 Site blasting hole and test hole distribution diagram

2 爆破损伤测试方案

太钢袁家村露天采场台阶设计高度 15 m,并段后为 30 m,台阶坡面角度 65°。由于采场西部 1665-1575 台阶已临近边坡最终境界,加之节理发育,爆破前采用预裂爆破控制边坡稳定性。此次爆破区域岩性为绢云母片岩,上部边坡岩石风化严重极不稳定,节理裂隙较发育,岩石硬度系数 $f = 5 \sim 8$ 。预裂爆破分为缓冲孔和预裂孔,各孔均采用倾斜孔,倾角为 65°。各爆破孔均选用宣化机械厂生产的 JK580 液压潜孔钻机,为了方便施工,预裂孔、缓冲孔钻孔直径均为 115 mm。根据太钢铁矿岩石特性相关区域以往预裂爆破经验,预裂爆破的孔距为 1.5 m,缓冲孔的孔、排间距定为:3 m × 4 m,不耦合系数为 2.5。预裂爆破装药量,按经验数据确定采用 11.25 kg,每个缓冲孔装药量为 90 kg,采用预裂药柱间隔不耦合装药结构的装药形式,为了克服底部夹制底部采用三根 $\phi 60$ 的预裂药柱连续装药,接着采用 $\phi 45$ 预裂药柱采用 15 组一虚一实的装药结构,预裂孔填塞高度 1.5 m,缓冲孔装药采用耦合装药。

为了准确获取岩体节理开裂与岩体损伤情况,在 1605 平台设置观测孔,其中 A、B、C 为钻孔摄像观测孔,各孔相距 3 m,并且在 A、B、C 孔响应位置进行爆破振动测试。见图 3。

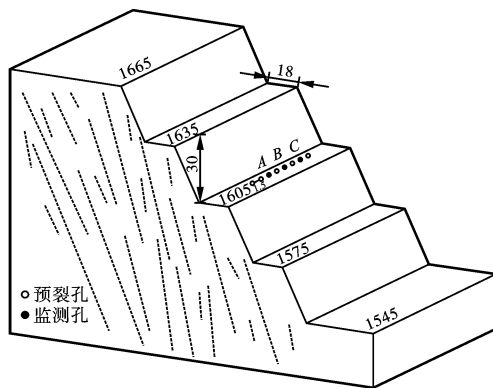


图3 监测方案(单位:m)

Fig. 3 Monitoring scheme(unit:m)

3 钻孔摄像测试

3.1 钻孔摄像技术

数字钻孔摄像技术是集电子技术、视频技术、数字技术和计算机技术于一身的地质勘查新方法。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4。

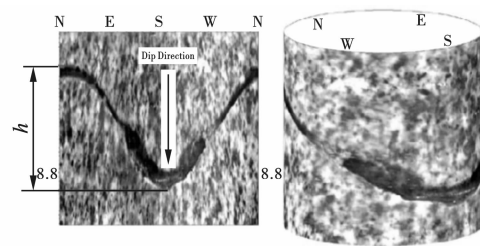


图4 钻孔摄像技术成像原理示意图

Fig. 4 Borehole camera technology imaging principle sketch map

3.2 钻孔摄像测试结果

此次测试在露天矿西帮1605平台进行,该平台采用分步预裂爆破,一次起爆6个炮孔。在预裂爆破前,先对A、B、C三个爆破孔进行钻孔摄像扫描;爆破后再对三个钻孔进行一次钻孔扫描,通过爆破前后对比获取预裂爆破的损伤范围。图5为A、B、C三个爆破孔在16.5~17m区间孔壁裂隙发育情况。A孔裂隙网络较为复杂,不受原生裂隙影响,最大裂隙宽度达到12mm;B孔裂隙倾角接近60°,与原生裂隙倾角十分接近,最大裂隙宽度达到8mm;C孔裂隙倾角多为80°以上,接近竖直方向,最大裂隙宽度达到2mm。对比3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,裂隙宽度逐渐减小,距离爆破点9m外,原生节理没有明显的开裂现象。

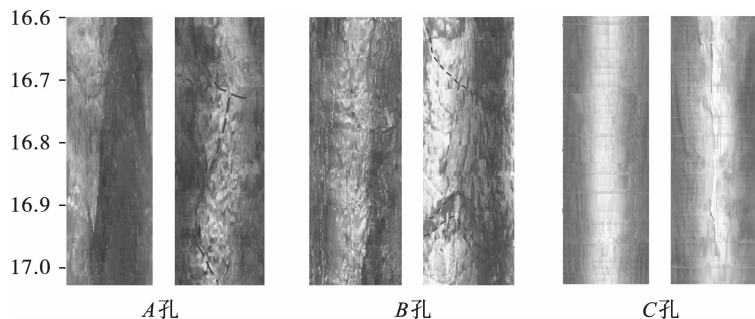


图5 钻孔摄像测试结果

Fig. 5 Borehole camera test results

4 爆破振动测试

4.1 爆破振动设备

此次爆破振动测试采用NUBOX-8016爆破振动智能监测仪,这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。

4.2 爆破振动测试结果

为了有效对比钻孔摄像结果,爆破振动布设的位置与钻孔摄像位置一致,参看图3;1#、2#、3#为振动测试监测位置,通过上述三个测点的爆破振动获取了距离爆破点三个方向的爆破振动速度参见图6。1#测点的主振频率为28.2 Hz、最大振动速度为-16.63 cm/s,2#测点的主振频率为32.1 Hz、最大振动速度为-13.9 cm/s,3#测点的主振频率为

50 Hz、最大振动速度为 11.43 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不超过 12 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 9 m 以内为爆破损伤区。

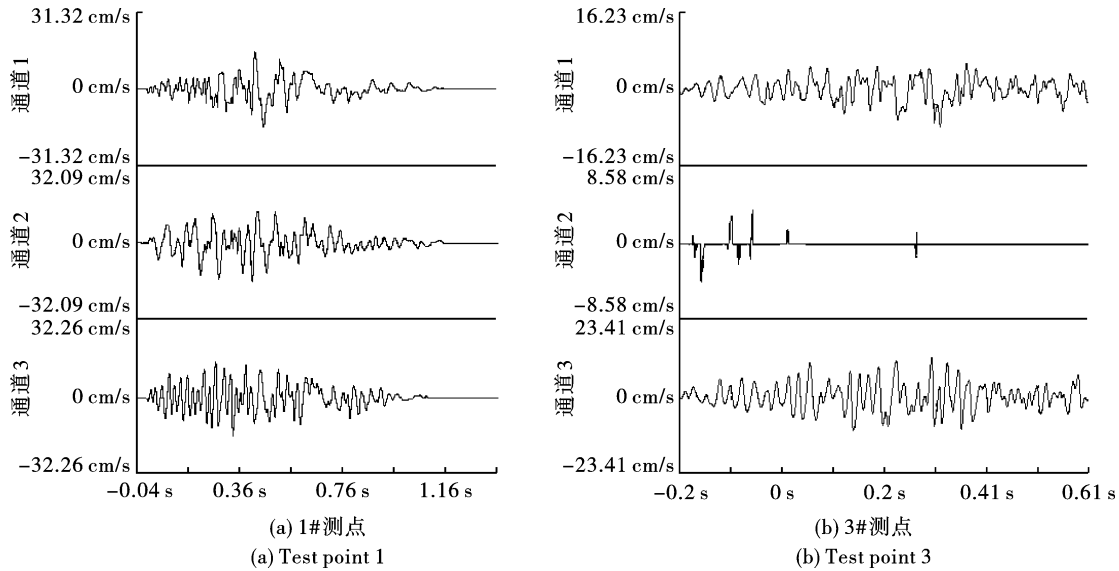


图 6 现场爆破振动测试结果
Fig. 6 Field blasting vibration test results

综合考虑钻孔摄像与爆破振动的测试结果,袁家村露天矿预裂爆破时,其节理边坡的爆破损伤区大致范围为距炮区 9 m 之内。

5 结论

针对爆破荷载作用下高陡岩质边坡的稳定性问题,开展研究,得到如下结论:

- (1) 以袁家村露天矿为工程依托,选取西边帮节理发育区域为测试地点,建立数字钻孔摄像与爆破振动测试手段相结合的现场爆破损伤监测方案。
- (2) 基于数字钻孔摄像监测结果可知,随着爆破距离的增加,岩体内部裂隙发育程度逐级递减,裂隙宽度逐渐减小,距离爆破点 9 m 外,原生节理没有明显的开裂现象。
- (3) 基于现场爆破振动监测结果可知,随着爆破距离的增加,爆破峰值质点振动速度逐渐降低,以我国爆破振动安全标准为指标,得到在距离爆破点 9 m 以内为爆破损伤区。

参考文献 (References)

[1] 严 鹏,邹玉君,卢文波,等. 基于爆破振动监测的岩石边坡开挖损伤区预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2016,35(3):538-548.
[1] YAN Peng,ZOU Yu-jun,LU Wen-bo,et al. Predicting the damage zone of rock slopes under blasting excavation based on vibration monitoring [J]. Chinese Journal of

Rock Mechanics & Engineering, 2016, 35 (3) : 538-548. (in Chinese)
[2] 王智德,夏元友,周 雄,等. 顺层岩质边坡爆破的振动控制及损伤特性[J]. 爆炸与冲击,2017,37(1):27-36.
[2] WANG Zhi-de,XIA Yuan-you,ZHOU Xiong,et al. Blasting vibration control and damage characteristics of bedding rock slopes [J]. Explosion & Shock Waves, 2017, 37(1) : 27-36. (in Chinese)
[3] 雷 刚,李元辉,徐世达,等. 基于 FLAC3D 模拟的深部岩体爆破损伤规律研究[J]. 金属矿山,2017(10): 135-140.
[3] LEI Gang,LI Yuan-hui,XU Shi-da,et al. Simulation study on blasting damage law of deep rock mass based on FLAC3D[J]. Metal Mine, 2017 (10) : 135-140. (in Chinese)
[4] 曹兰柱,王 珍,王 东. 边坡受爆破振动损伤及其稳定性分析[J]. 中国安全科学学报,2018,28(2):75-80.
[4] CAO Lan-zhu,WANG Zhen,WANG Dong. Law of blasting vibration damage and stability analysis to slope in open-pit mine [J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(2) : 75-80. (in Chinese)
[5] 杨仁树,许 鹏. 爆炸作用下介质损伤破坏的分形研究[J]. 煤炭学报,2017,42(12):3065-3071.
[5] YANG Ren-shu,XU Peng. Fractal study of media damage under blasting loading[J]. Journal of China Coal Society, 2017,42(12) :3065-3071. (in Chinese)