7月

2009年

JOURNAL OF CHINA COAL SOCIETY

文章编号:0253-9993(2009)07-0917-05

## 基于岩体声波损伤特性的露天台阶爆破试验

胡刚

(黑龙江科技学院资源与环境工程学院,黑龙江哈尔滨 150027)

摘 要:基于声波岩体损伤定义,采用 StrataViewTM R24 Exploration Seismograph 爆炸震动测试仪 和克浪公司生产的 KDH-SWA-3C-60A 型 MVSP 三分量测井检波器,利用锤击叠加作震源对 台阶爆破钻凿的炮孔进行了声波测试试验,研究了爆区附近岩体的损伤.结果表明:经历过冲击 载荷扰动的岩体与未受扰动前相比,其纵波波速均降低,接收波的主频向低频移动,岩体的纵波 速度和横波速度之比也发生劣化;损伤区的范围可以用波速的变化来划分,在爆破设计施工中, 应该考虑爆破损伤区的影响.

关键词: 声波; 损伤特性; 台阶爆破; 波速; 爆炸冲击 中图分类号: TD231.1 **文献标识码:** A

# Experiment of open-pit bench blast based on the sound wave-induced damage properties of rock masses

#### HU Gang

(Department of Resources and Environmental Engineering, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Haerbin 150027, China)

**Abstract**: Based on the definition of sound wave-induced damage to rock masses, studied the damages to the rock mass adjacent to the blast areas in sound wave detection experiments, using accumulated hammer strikes as the explosive source, and the Strata View TM R24 Exploration Seismograph and the KDH – SWA – 3C – 60A Class MVSP three-component seismometer as detection tools. The results show that when sound waves travel through rock masses which experience impact loads, the compression ware velocity decreases, the frequency of the waves received decreases, and the ratio of the compression ware velocity over the shear wave velocity deteriorates. The scales of the damage areas can be divided by the difference of wave speed. In designing and operating engineering blasting, the impact of the damage areas should be taken into account.

Key words: sound wave; damage property; bench blasting; wave velocity; blast-induced shock

岩体是一种非均质材料,不同方向的力学特性不同,同一方向拉压特性不同,而且随尺度变化,各向 异性主方向还会发生变化<sup>[1]</sup>;应力状态不同,其破坏方式不同<sup>[2]</sup>,破坏的临界条件也不同,即屈服准则 不同<sup>[3]</sup>.一方面,岩体是由包含断层、软弱夹层、节理面等天然间断面相互组合形成的具有初始损伤特 性的地质体,岩体的初始损伤不仅改变了岩体的强度,也改变了岩体的弹性模量、爆破波的衰减及侧向应 力系数等物理力学参数.另一方面,台阶爆破时,临近爆源的岩体由于受到爆破作用的影响,使后面岩体 的损伤不同程度的加剧,这也对岩体爆破效果产生影响.刘军等<sup>[4]</sup>对单孔台阶爆破中保留岩体的损伤特

收稿日期: 2008-08-12 责任编辑: 常 琛

基金项目:黑龙江省教育厅普通高校骨干教师创新能力资助计划 (1152G034)

作者简介: 胡 刚 (1968—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 教授, 硕士生导师. Tel: 0451-88037337, E-mail: huhaoshi@163.com

918	煤	炭	学	报	2009 年第 34 卷

征进行了数值模拟;赫建明等<sup>[5]</sup>对爆炸冲击作用导致岩体损伤进行了实验室模型试验研究;王代华等<sup>[6]</sup> 对露天边坡在爆破作用下损伤特征利用岩芯进行了试验研究;蒲传金等<sup>[7]</sup>对光面爆破中保留岩体的损伤 规律通过取样岩芯的声波测试进行了分析;常来山对露天矿边坡岩体损伤规律通过损伤力学、断裂力学以 及 FLAC<sup>3D</sup>进行了损伤演化规律的数值模拟分析<sup>[8]</sup>.这些研究,从理论和实验方面揭示了露天台阶爆破损 伤规律的基本特征,但是很少考虑岩体的初始损伤的影响.

#### 1 损伤变量的定义

声波不仅对各类岩石(岩体)有一定的穿透力和分辨力,能够有效地探测材料内部的缺陷,而且它 在介质中传播时,与介质相互作用,携带了与岩石(岩体)物理、力学性质相关的大量的各种信息.因 此用岩体的波速定义损伤变量 *D* = 1 - (*v*<sub>P</sub>/*v*<sub>m</sub>)<sup>2</sup>,其中,*v*<sub>P</sub>,*v*<sub>m</sub>分别为岩石损伤前后的弹性纵波速度.由于 在损伤前后材料中的弹性纵波速度很容易测定,不会对材料本身造成破坏影响,所以损伤的演化意义也比 较明确.

#### 2 岩体声波测试试验

试验测试选择在北京郊区凤山温泉石灰石矿进行.矿区石灰岩矿体上盘为侏罗系安山岩不整合覆盖,下盘为馒头组紫色页岩.矿体总体走向 NE36°,东矿区矿层向南东倾斜,倾角为30~40°,自北西向南东,由老到新顺序分布.全矿共分3个矿体,中间夹2个大夹层(以泥质灰岩为主,并有少量页岩和脉岩侵入体).

设计台阶高度 14 m, 炮孔超深 3 m, 两台 阶一并段. 布孔采用梅花交错布孔方式, 孔网 参数为 3.0 m × 7.0 m, 一般爆破带宽度为 9 ~ 15 m. 采场穿孔设备为潜孔钻, 孔径 200 mm, 炮孔深度为 17 m. 爆破所用炸药为铵油炸药、 2 号岩石炸药,爆破网路为排间毫秒延时爆破 网路. 单孔装药量为 160 kg. 矿山设计最终边 坡角 55°, 工作台阶坡面角 75°.

试验是在台阶上的炮孔中进行声波测试. 声波测试采用美国劳伦公司生产的 Strata-ViewTM R24 Exploration Seismograph 爆炸震动 测试仪,检波器采用克浪公司生产的 KDH – SWA – 3C – 60A 型 MVSP 三分量测井检波器. 用锤击叠加作震源,炮孔壁的物理结构不受破 坏.检波器的推靠装置采用可充放气的气囊, 把检波器紧紧地压靠在炮孔壁上,可得到很好 的耦合效果.观测完毕后,操作员给气囊放 气,检波器可以在井中自由移动,顺利移到下 一个观测点.炮孔波速测量数据见表 1.图 1 为距爆区不同点处测试波形的频谱图.

### 3 爆区附近岩体的损伤

表1 炮孔波速测量数据	Table 1	Statistics of wa	ave velocity detected around blast holes
		表1	炮孔波速测量数据

序号	孔深⁄ m	距台阶 距离/m	纵波速度/ (m・s <sup>-1</sup> )	横波速度/ (m・s <sup>-1</sup> )	$v_{\rm P}/v_{\rm S}$	损伤 变量
1	17	6.0	2 690	1 450	1.86	0.21
2	17	9.2	2 760	1 530	1.80	0.17
3	17	11.3	2 990	1 720	1.74	0.03
4	17	13.5	3 010	1 800	1.67	0.01
5	17	13.5	2 990	1 680	1.80	0.02
6	17	13.0	3 020	1 700	1.78	0.01
7	17	13.7	3 030	1 900	1.70	0
8	17	10.4	2 760	1 470	1.88	0.17
9	17	5.8	2 750	1 490	1.86	0.18
10	17	2.0	1 680	730	2.30	0.69
11	17	9.0	2 910	1 650	1.76	0.08
12	17	6.5	2 740	1 560	1.76	0.18
13	17	2.2	1 760	720	2.44	0.66
14	17	2.0	1 970	840	2.35	0.58
15	17	1.9	1 620	690	2.35	0.71
16	17	4.2	1 970	820	2.40	0.57
17	17	6.3	2 650	1 530	1.73	0.23
18	17	9.7	2 800	1 530	1.83	0.15

炸药在岩体内爆炸后,造成岩体不同程度的变形和破坏,其作用范围通常可分为爆破近区、中区和远 区3个主要部分.近区与中区岩体的爆破机理、碎块形成规律及其计算机模拟等各方面都已进行了较广泛 第7期





Fig. 1 Spectrum of shapes of wave at different spots adjacent to the blast areas

而深入的研究. 然而,至今对远区岩体爆破作用效应所做的研究十分有限,主要以地震波对远区岩体表面 建筑物、构筑物等的振动特性和安全性分析居多,对远区岩体本身是否松裂以及松裂机制的分析却很少. 尽管远区岩体内的爆炸荷载已衰减到不足以造成岩石破裂,但对于比岩石强度低得多的节理、层理等弱面 而言,则可能由此引起这些弱面的一部分松裂,造成远区岩体的"内伤",降低其承载能力.

#### 3.1 波速与距离的关系

根据现场实际测量,爆区附近岩体的纵波和横波速度与距爆区距离的关系如图2所示.



图 2 岩体波速与距爆区距离的关系

Fig. 2 Relation between the wave velocity and distance from blast areas

根据实验所得的结果可以看出,在爆炸冲击载荷作用下,岩体内部产生的损伤导致超声波的传播速度 明显减小,随着距爆区距离的增大,超声波波速衰减的幅度降低.文献[5]对岩体的损伤进行了实验室 模拟试验,文献[6]对现场取样的岩芯进行了试验.对于本次试验,根据现场实际测量台阶爆破后坐 2 m,因此,在距离炮孔4 m 处,波速降低了40%,在距离炮孔8m 处,波速降低了20%,在距离12 m 处,波速降低了7%,在距离16 m 处,波速就不在降低了.

相比之下,在近距离处,不论是实验室试验还是现场试验得出的结论都比现场实际测量的数据要小一些,在距离炮孔 12 m 以上时,则与现场测量的数据接近.主要有以下几个原因:

(1)在实验室模拟试验中,模型的制作很难考虑材料的初始损伤,即使人工加入初始损伤,也很难 考虑到天然岩体中各种产状的宏观结构的影响,造成实验室试验的结果比较小,数据也比较有规律.

(2)实验室模拟试验波速测量是采用爆破后钻取的岩芯的数据,岩芯比较完整,爆破对它的影响相 对就要差一些.

## 920 煤 发 学 报 2009 年第34 卷

(3) 文献 [6] 的现场试验,是在爆区后 20 m 的位置,在爆前与爆后分别朝向爆区的方向,倾角为 45°钻取 2 个岩芯,然后测量岩芯的波速.这就意味着测量时没有考虑岩体宏观结构的影响,并且测量的 深度也不一致.本次试验是在爆后保留岩体上钻凿的炮孔中,从 7 m 到 17 m 位置测量的数据,因此造成 了结果的差异.而在距离炮孔 12 m 以上时,由于爆破作用的影响已经很小,又不考虑岩体的初始损伤, 使测量结果与文献 [6] 的结果相接近.

#### 3.2 岩体损伤与距离的关系

根据损伤的定义,由爆前、爆后岩体的纵波速度,可求出不同位置岩体损伤的变化,如图3(a)所示.



图 3 岩体损伤、岩体主频与距爆区距离的关系 Fig. 3 Relation of rock masses damage, frequency of rock masses and distance from blast areas

图中岩体的损伤没有考虑岩体的初始损伤,完全是由爆破引起的岩体损伤的变化. 从图3(a)可以 看出,爆破虽然没有使岩体产生破坏从母岩中剥落下来,但是已经在保留岩体中产生了不同程度的破坏, 爆破近区的破坏尤为严重. 与文献 [5] 实验室试验的结果对比,表明了爆破对含有裂隙、节理等宏观结 构的材料,比对均质材料造成的损伤要更严重一些,具体表现在波速的降低程度要大一些. 这也从另一方 面证明了爆破对岩体初始损伤的加剧作用.

因此,在破裂区和振动区间存在一个爆破损伤区.损伤区是破裂区和振动区的过渡,在损伤区中虽然 没有明显的炮震裂纹,但实际上岩体已经产生损伤.通过现场试验和实验室试验的对比可知,在损伤区中 的损伤大小,取决于岩体的初始损伤的大小,其中微裂纹的作用不大,而诸如节理、裂隙、空洞等宏观构 造起主要作用.

在本次试验中,爆破后损伤区的范围很大,一直到距台阶边缘13m处波速才没有明显的降低,这个 区域已经差不多涵盖了下一次放炮的范围.因此,应该合理考虑损伤区对炮孔布置、装药结构及装药量的 影响.

#### 3.3 主频与距离的关系

主频与距爆区距离的关系如图3(b)所示,相关性系数0.77.从图3(b)可以看出,由于爆炸冲击载荷作用使得岩体内部产生严重损伤,从而使得超声波在损伤岩体内传播时产生很大程度的变化. 根据实验数据显示,主频从125 Hz 变化为50 Hz,并且超声波波幅的大小也产生了明显的衰减. 由此可见,爆炸冲击载荷对岩体所造成的损伤使得超声波的传播条件劣化,从而造成了声波在岩体内部传播时产生衰减. 同时岩体的纵波速度和横波速度之比也发生变化,趋于劣化.

#### 4 结 论

爆破对岩石的损伤作用体现在对岩石力学性能劣化和岩体完整性降低2个方面.爆破对岩体的损伤作 用程度与岩石距爆点的距离和爆破条件有关:随着距炮孔距离的增加,爆破损伤岩体的强度和弹性模量增 大,声速增加,泊松比减小,损伤程度减弱. (1)现场实验结果表明,经历过冲击载荷扰动的岩体,与未受扰动前相比,其纵波波速均降低,接收波的主频向低频移动,岩体的纵波速度和横波速度之比也发生劣化.

- (2) 在破裂区和振动区间存在一个爆破损伤区. 而损伤区中的损伤大小, 宏观构造起主要作用.
- (3) 损伤区的范围可以用波速的变化来划分.
- (4) 在爆破设计施工中, 应该考虑爆破损伤区的影响.

应该指出的是,随着超声波测试技术在岩石工程中的应用不断深入,运用超声波研究岩石的损伤特性,并进一步提出简单实用的岩石损伤演化的超声波理论模型已显得愈来愈重要.

#### 参考文献:

[1] 赵阳升,王笑海,段康廉,等. 岩体各向异性的尺度变换不对称性 [J]. 岩石力学与工程学报,2002,21 (11): 594-597.

Zhao Yangsheng, Wang Xiaohai, Duan Kanglian, et al. Unsymmetry of scale transformation of rock mass anisotropy [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21 (11): 594-597.

- [2] 陶振宇. 岩石力学的理论与实践 [M]. 北京: 水利出版社, 1982.
- [3] 俞茂宏, 昝月稳, 范 文, 等. 20世纪岩石强度理论的发展——纪念 Mohr-Coulomb 强度理论 100 周年 [J]. 岩石力 学与工程学报, 2000, 19 (5): 545-550.

Yu Maohong, Zan Yuewen, Fan Wen, et al. Advances in strength theory of rock in 20 century—100 years in memory of the Mohr-Coulomb strength theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19 (5): 545-550.

[4] 刘 军, 王树仁, 高全臣. 单孔台阶爆破中保留岩体损伤特征的数值模拟 [J]. 爆炸与冲击, 2003, 23 (3): 241-247.

Liu Jun, Wang Shuren, Gao Quanchen. Numerical simulation of rock remain damage characteristics under single hole bench blast [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23 (3): 241-247.

[5] 赫建明,赵学亮,柳崇伟.爆炸冲击作用导致岩体损伤的模型试验研究 [J].西安科技学院学报,2004,24 (1): 49-52.

He Jianming, Zhao Xueliang, Liu Chongwei. Model experiment of the rock damage under blasting condition [J]. Journal of Xi'an University of Science & Technology, 2004, 24 (1): 49 – 52.

[6] 王代华,刘 军,柏德强,等. 露天边坡在爆破作用下损伤特征的试验研究 [J]. 煤炭学报, 2004, 29 (5): 532-535.

Wang Daihua, Liu Jun, Bai Deqiang, et al. Experimental study on the damage characteristics of the slope under blasting [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29 (5): 532-535.

[7] 蒲传金,郭学彬,张志呈,等.光面爆破对边坡保留岩体损伤规律分析 [J].西南科技大学学报,2006,21 (2): 26-29.

Pu Chuanjin, Guo Xuebin, Zhang Zhicheng, et al. Analysis of smooth blasting for damnification of slope remaining rock mass [J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2006, 21 (2): 26-29.

[8] 常来山. 眼前山露天矿边坡岩体损伤规律研究 [J]. 金属矿山, 2007 (5): 59-61.
 Chang Laishan. Study on slope rockmass damage law of yanqianshan open pit [J]. Metal Mine, 2007 (5): 59-61.