

文章编号: 1001-1455(2009)03-0275-06

爆炸冲击载荷作用下岩石的损伤实验*

颜 峰, 姜福兴

(北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 基于声波测试原理, 利用 RSM-SY5 智能型声波仪, 对某露天矿围岩在爆破冲击荷载作用下产生的损伤进行了现场实验研究。研究表明: 爆破冲击荷载对距离爆源 7 m 范围内的岩石会造成损伤破坏, 其损伤程度随着岩石与爆源距离的增大而减小; 岩体声波速度随着爆破次数的不断增加而逐渐降低, 多次爆破对岩石具有损伤累积效应; 多次爆破的累积损伤不是单次爆破损伤的简单叠加, 具有非线性特性, 且距离爆源越近爆破累积损伤效应越明显。

关键词: 爆炸力学; 损伤; 爆炸载荷; 岩石; 损伤度; 声速; 累积损伤

中图分类号: O383; TD315 **国标学科代码:** 130·35 **文献标志码:** A

1 引言

在露天矿开采活动中, 无论采用何种控制爆破方式, 炸药爆炸所产生的冲击载荷都不可避免地会对距离爆源一定范围内的岩体产生损伤。在爆炸冲击波和应力波的作用下, 爆源附近岩体形成破碎区, 矿岩被破裂形成碎块, 从原岩上分离; 在爆源远区, 岩块间形成一系列连通或不连通的裂缝, 产生裂隙和损伤带。实验研究^[1-3]和数值模拟^[4-5]都证实了爆炸冲击荷载确实对一定范围内的岩石造成了损伤破坏。损伤破坏后的岩体在外界压力作用下, 损伤进一步演化, 造成围岩的承载能力及稳定性降低。我国现行的《工程岩体分级标准》(GB50218-94)指出: 对矿山采掘工程的围岩进行工程定级时应该考虑爆破开挖对围岩稳定性的影响。因此, 探测爆炸冲击载荷作用下的岩体损伤, 对优化爆破参数、加固围岩和指导露天矿边坡工程稳定设计等都具有理论和实际意义。

2 岩体损伤原理

2.1 爆炸载荷作用下的岩石损伤

炸药在岩石中爆炸时, 岩石的破裂、破碎及抛掷是爆炸冲击波和应力波作用下的一个相当复杂的动力学过程, 造成岩石损伤的能量是通过冲击波和应力波获得的^[6-7]。

在炸药爆炸瞬间, 高温高压作用在炸药与孔壁之间的空气中形成空气冲击波, 并瞬时作用在炮孔周围岩石上。由于冲击波的峰值压力远远高于岩石的抗压强度, 造成药包周围岩石被极度压碎形成粉碎区。粉碎区范围很小却消耗了冲击波的大部分能量, 使得在粉碎区界面上冲击波衰减成应力波。应力波在粉碎区外的岩石中传播, 使得应力波通过区域的岩石径向受压, 切向受拉。由于岩石本身抗拉性弱, 使它在拉应力的作用下产生径向裂隙。岩石中的径向裂隙区是岩石爆破损伤需要研究的主要区域, 它的扩展范围对工程爆破优化设计有着重要意义。

2.2 岩体损伤对声波传播速度的影响

实际工程中的岩石是存在于一定的地应力环境或外部荷载作用下的具有初始损伤的地质体材料, 岩石的损伤会对其力学特性^[8]和声学特性^[9-10]产生重大影响。岩石介质声波测试技术就是利用岩石的声学特性来探测岩石的内部结构和物理力学特性。目前, 这项技术已广泛应用于岩体动弹性参数测定、

* 收稿日期: 2007-12-27; 修回日期: 2009-01-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(40674017)

作者简介: 颜 峰(1975—), 男, 博士研究生。

岩体内缺陷(如断层、溶洞和软弱夹层)探测、地基和岩体加固效果检测、地下洞室松动圈探测和爆破损伤破坏范围等方面^[11-12]。

岩体中宏观、微观结构面的变化对岩体中声波传播特征产生的作用是影响岩体工程特性本质的因素。声波在岩石中传播时,其走时、振幅、频谱和岩石的结构及应力状态有着一定的对应关系,即随着岩体(岩石)的破碎程度增加、结构松软、应力降低,声波会相应产生波速降低、振幅减小、波形变坏、频谱中的主频向低端移动。在爆破载荷作用下,爆破近区岩体产生新裂缝,同时由于应力波作用,已经存在的节理、裂隙不断扩展、成核、贯通,形成主裂缝。声波到达结构界面时,将产生反射、散射和绕射等作用。因此,这些微裂缝和宏观断裂延长了传播路径,降低了声波速度,而且声速降低程度与裂缝数量、宽度有着密切关系。根据声速的变化特征,可以判别爆破对岩体的损伤情况,这就是应用声波测试技术研究爆破作用下围岩损伤的理论依据。

3 描述岩体损伤特征的参数

包含裂纹的弹性固体的可压缩性要高于不含裂纹的理想固体,并且裂纹对材料的力学性质的影响非常显著。包含裂纹的弹性固体的弹性模量一般较无裂纹的理想固体低,因此岩石弹性模量或可压缩性的变化能够反映岩石内部的损伤状况。文献[13]按弹性模量的变化定义了损伤因子

$$D = 1 - E/E_0 \quad (1)$$

式中: E_0 、 E 分别为材料损伤前、后的弹性模量。

根据弹性力学理论,有

$$E = \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu} \rho v^2 \quad (2)$$

假定爆破前后的岩体密度近似相等,爆破前后的泊松比也近似相等,则可得

$$D = 1 - (v/v_0)^2 \quad (3)$$

式中: v_0 、 v 分别为爆破前、后岩体的声波速度。

我国制定的《水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范》(SL 47-94)规定,当爆破后岩石波速变化率($\eta = 1 - v/v_0$)大于 10% 时,即判定岩体受到爆破损伤破坏,对应的岩体损伤阈值 $D = 0.19$ 。

4 露天矿爆破岩石损伤现场测试

4.1 测点布置

现场测试在某露天矿-20 m 水平进行,该矿采场自东向西开采,测试孔均布置在开采台阶上,距离开采面较远,如图 1 所示。测试孔采用 YG90 型中深孔钻机施工,施工过程保证所有钻孔平行,钻孔深度均为 4.0 m,孔径均为 60 mm。18 个声波测试孔排成 3 排 6 列,排距 2 m,列距 2.5 m。其中, S1~S6 为发射孔, R1~R12 为接受孔, B1~B6 为爆破炮孔。

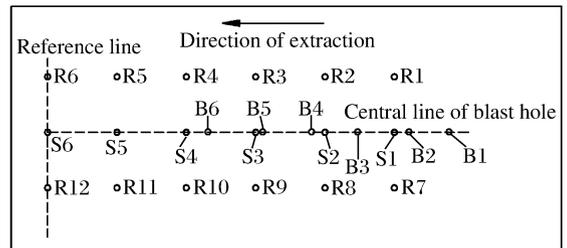


图 1 测孔位置布设示意图

Fig. 1 Arrangement of measurement holes

4.2 测试仪器

测试仪器采用中国科学院武汉岩土力学研究所生产的 RSM-SY5 智能型声波仪,目前,该仪器在我国工程界广泛用于测试岩石、混凝土及其他非金属材料内部的性能。其主要性能为:双通道,最小采样间隔 0.1 ps, 12 位 A/D 转换,定点或浮点增益范围 1~10 000,多种触发方式与电平选择,具有简单频谱分析功能。采用收发分开的双孔增压式换能器,其频率为 60 kHz,信号放大增益在 -20~80 db 范围内可调。

4.3 测试过程

本次现场实验研究采用小药量爆破模拟测试,共进行了 6 次爆破,具体爆破参数见表 1。设 R6、S6 和 R12 这 3 个孔圆心所在的直线为基准线,表 1 中 Q 表示装药量, h 表示装药深度, x 表示炮孔中心到基准线的距离。测试前,对声波测试参数进行仔细设置,包括测试剖面编号、采样率、增益、延迟时间、校零、孔口位置、孔距以及测孔与爆源的距离等。在距离测试时,采用 1 发 2 收的跨孔测试方式,如 S1 孔发射时,R1 和 R7 孔接受,S2 孔发射时,R2 和 R8 孔接受。测试过程中发射探头与接收探头均放置在孔底,孔深相同保证了发射探头与接收探头平行。为了查明爆破前围岩中声波速度的分布情况,确定既有爆破开挖对围岩的损伤和扰动的程度与深度,爆破前,首先对所有声波孔进行测试,并以此估计原岩区域范围。

表 1 岩体爆破参数

Table 1 Blast parameters of rock mass

测试序号	Q/g	h/m	x/m	炸药类型	充填效果
1	300	4.01	15.56	乳化炸药	较好
2	300	4.06	13.80	乳化炸药	较好
3	300	4.03	11.99	乳化炸药	较好
4	300	3.99	10.11	乳化炸药	较好
5	300	3.99	8.27	乳化炸药	较好
6	300	4.01	5.49	乳化炸药	较好

5 测试结果及分析

5.1 单次爆破对岩石的损伤

爆破前,先测试各对测孔之间岩石的声速。第 1 次爆破后,用同样的方法再次测试测孔间岩石的声速,测试结果如表 2 所示,表中 r 为测孔与爆源的距离。为便于分析,将 R1~R6 测点所在线定义为第 1 剖面,R7~R12 测点所在线定义为第 2 剖面。

表 2 第 1 次爆破前后岩石声速

Table 2 Sound wave velocities in rock mass before and after the first blast

测孔	r/m	$v_0/(m/s)$	$v/(m/s)$	$[(v-v_0)/v_0]/\%$	测孔	r/m	$v_0/(m/s)$	$v/(m/s)$	$[(v-v_0)/v_0]/\%$
R1	3.25	4 832	3 762	22.14	R7	3.05	4 820	3 682	23.61
R2	5.75	4 854	4 231	12.83	R8	5.55	4 855	4 216	13.16
R3	8.25	4 907	4 585	6.56	R9	8.05	4 890	4 551	6.93
R4	10.75	4 920	4 815	2.13	R10	10.55	4 958	4 806	3.07
R5	13.25	4 956	4 896	1.21	R11	13.05	4 956	4 877	1.59
R6	15.75	4 962	4 914	0.97	R12	15.55	4 980	4 923	1.14

将表 2 中的测试结果代入(3)式中,即可得到各对测孔之间岩石的损伤程度。图 2 给出了岩石损伤程度随测点与爆源距离的变化曲线。

对图 2 中各测试数据进行不同类别的回归分析,得到如表 3 所示的回归结果。从回归分析结果可以看出,岩石损伤随距离呈非线性变化。如果以岩体损伤阈值 $D=0.19$ 为标准,根据测试回归分析结果,可以认为距爆源 7 m 范围内的岩石受到爆破损伤破坏。

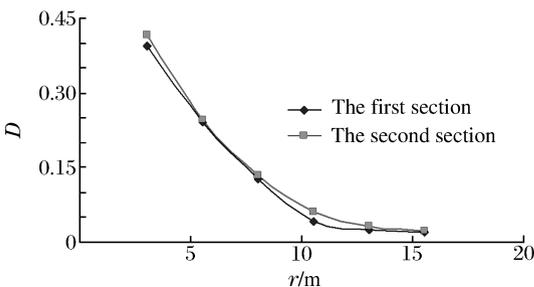


图 2 与爆源不同距离处的岩石损伤因子
Fig. 2 Rock damage at different distance

表 3 测试结果回归分析

Table 3 Regression analysis of measurement results

回归类型	回归曲线方程	相关系数
对数	$D = -0.253 \ln r + 0.68$	0.987
乘幂	$D = 5.36 r^{-1.96}$	0.967
指数	$D = 0.93 e^{-0.26r}$	0.988
多项式	$D = 0.003 2r^2 - 0.091r + 0.66$	0.999

5.2 多次爆破对岩石的累积损伤

要研究多次爆破对岩体的累积损伤,必须避开既有爆破开挖损伤的影响,即选择的研究点要位于原岩区域。单次爆破对岩体的损伤测试结果表明,距离爆源 7 m 以外的岩石可以认为没有受到爆破损伤破坏。声速测试中 R4、R5、R6、R10、R11 和 R12 几个点的声速降低比较小,可以认为这些测点位于未受破坏区域,因此,选择 R4 和 R10 来研究多次爆破对岩石的累积损伤。表 4 列出了 6 次爆破后每次声速测试结果。

表 4 多次爆破后岩石声速测试结果

Table 4 Sound wave velocities in the rock mass after blasts

爆破次数	R4			R10		
	r/m	v ₀ /(m/s)	[(v-v ₀)/v ₀]/%	r/m	v ₀ /(m/s)	[(v-v ₀)/v ₀]/%
1	10.75	4 815	2.13	10.55	4 806	3.07
2	9.02	4 678	4.92	9.12	4 762	3.95
3	7.27	4 481	8.92	7.30	4 469	9.86
4	5.49	3 998	18.74	5.35	4 010	19.12
5	3.83	3 587	27.09	3.78	3 666	26.06
6	2.06	2 520	48.78	1.96	2 416	51.27

注:R4、R10 测孔的爆前声速 v₀ 分别为 4 920、4 958 m/s,距爆源的距离 r 分别为 10.75、10.55 m/s。

从表 4 中可以看出,随着爆破次数的增加,岩石的声速单调递减,但是当测点距离爆源大于 7 m 时,声速减小的梯度比较小;当测点距离爆源小于 7 m 时,声速迅速减小,且距离越近减小的梯度越大。这也说明,认为 7 m 范围内的岩石受到爆破损伤破坏是成立的。图 3 给出了岩石损伤随爆破次数的变化。

图 3 说明,岩体损伤度随爆破次数的增加呈现单调递增趋势。然而,6 次爆破后岩石损伤增加的最终值并不是每一次爆破后岩石损伤的简单叠加,而是一种非线性累积关系,说明爆破累积损伤效应的累积过程具有非线性特性。

为了进一步研究多次爆破对岩体造成的累积损伤效应,对前 4 次爆破后的测试结果进行分析。表 5 为第 2~4 次采掘爆破后测试得到的岩石声速。图 4 为根据测试结果计算所得的不同爆破次数下岩石损伤与距离的关系曲线。

从表 4 的声速测试结果和图 4 的岩石损伤与距离关系曲线可以看出:(1) 在爆破影响范围(本文测试结果表明该矿为 7 m 左右)之内,以距离爆源相同距离的岩石为研究对象,其爆破损伤度 D 随着爆破次数的增加而增加。这说明多次爆破对岩石具有累积损伤效应,而且这种累积损伤不是简单的叠加关系。(2) 距离爆源相同距离的岩石,第 1 次爆破后每次爆破的累积损伤增量(损伤度 D 的增加量),都小于第 1 次爆破后的损伤,说明第 1 次爆破对岩石的损伤最大。(3) 距离爆源越近,爆破冲击载荷对岩石的累积损伤效应越明显。

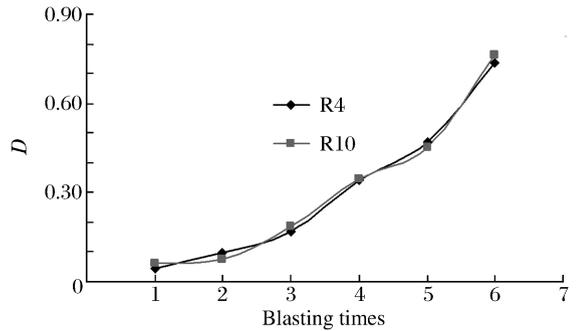


图 3 岩石累积损伤与爆破次数关系曲线
Fig. 3 Relation between cumulative damage of rock mass and blasting times

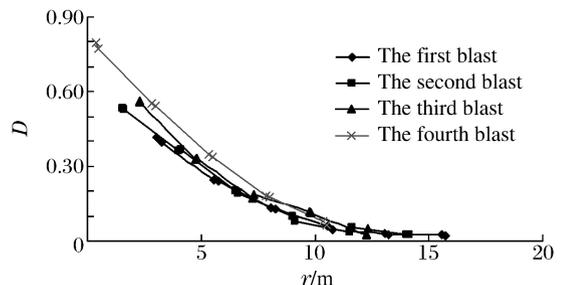


图 4 不同爆破次数下岩石损伤与距离关系曲线
Fig. 4 Relation between rock damage and distance under different blasting times

表5 不同爆破次数下岩石声速测试结果

Table 5 Sound velocity of rock measurement at different blasting times

测孔	第2次		第3次		第4次	
	r/m	$v/(m/s)$	r/m	$v/(m/s)$	r/m	$v/(m/s)$
R1	1.52	3 306				
R2	4.02	3 879	2.27	3 219	0.49	2 316
R3	6.52	4 383	4.77	4 023	2.99	3 324
R4	9.02	4 678	7.27	4 481	5.49	3 998
R5	11.52	4 872	9.77	4 658	7.99	4 502
R6	14.02	4 905	12.27	4 896	10.49	4 802
R7	1.62	3 317				
R8	4.12	3 865	2.30	3 231	0.35	2 197
R9	6.62	4 398	4.80	4 002	2.85	3 268
R10	9.12	4 762	7.30	4 469	5.35	4 010
R11	11.62	4 826	9.8	4 670	7.85	4 485
R12	14.12	4 920	12.3	4 859	10.35	4 783

6 结 语

(1) 工程爆破会对一定范围内的岩石造成损伤,其损伤程度随着岩石与爆源距离的不同而不同,岩石与爆源距离的增大,其爆破损伤程度减小。测试结果表明,在该矿山爆破损伤影响的范围在7 m左右。(2) 多次爆破对岩石具有损伤累积效应。岩体声波速度随着爆破次数的不断增加而逐渐降低,损伤度具有非线性累积规律,爆破累积损伤效应的累积过程具有非线性特性。(3) 多次爆破作用对岩体的累积损伤随着与爆源距离的改变而变化,距离爆源越近,爆破累积损伤效应越明显。(4) 岩石第1次受到爆破影响造成的损伤大于而后的多次爆破中单次爆破造成的累积损伤量。

参考文献:

- [1] 夏红兵,徐颖,宗琦,等. 爆炸荷载作用下裂隙岩体内损伤范围的观测研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 795-798.
XIA Hong-bing, XU Ying, ZONG Qi, et al. Observation study of fissure rock damage range under blasting load [J]. Rock and Soil Mechanic, 2007, 28(4): 795-798.
- [2] 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 Dai-hua, LIU Jun, BAI De-qiang, et al. Experimental study on the damage characteristics of the slope under blasting[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(5): 532-535.
- [3] Holmberg R, Maki K. Case examples of blasting damage and its influence on slope stability[C]// Brawner C O. Third International Conference on Stability in Surface Mining. Vancouver, 1981: 773-793.
- [4] Hao H, Wu C H, Zhou Y X. Numerical analysis of blast-induced stress waves in a rock mass with anisotropic continuum damage models, part I: Equivalent material property approach[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2002, 35(2): 79-94.
- [5] 丁希平,冯叔瑜,王中黔. 超深对深孔台阶爆破作用影响的数值模拟[J]. 中国矿业, 2000, 9(2): 30-33.
DING Xi-ping, FENG Shu-yu, WANG Zhong-qian. Numerical simulation of influence of subdrilling on deep-hole bench blasting[J]. China Mining Magazine, 2000, 9(2): 30-33.
- [6] 崔新壮,李卫民,段祝平. 爆炸应力波在各向同性损伤岩石中的衰减规律研究[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(1): 76-80.
CUI Xin-zhuang, LI Wei-min, DUAN Zhu-ping, et al. Stress wave attenuation in isotropic damaged rocks[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(1): 76-80.
- [7] 胡刚,郝传波,景海河. 爆炸作用下岩石介质应力波传播规律研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(3): 270-273.
HU Gang, HAO Chuan-bo, JING Hai-he. Study of the laws of stress wave propagation in rock bar under blasting

- loading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2001,26(3):270-273.
- [8] 杨小林,员小有,吴忠,等. 爆破损伤岩石力学特性的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*,2001,20(4):436-439.
YANG Xiao-lin, YUAN Xiao-you, WU Zhong, et al. Experimental study on mechanical properties of blasting damaged rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001,20(4):436-439.
- [9] 赵明阶,徐蓉. 岩石声学特性研究现状及展望[J]. *重庆交通学院学报*,2000,19(2):79-85.
ZHAO Ming-jie, XU Rong. The present situation and prospect of the acoustic properties research in rock[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong Institute*, 2000,19(2):79-85.
- [10] 韩放,纪洪广,张伟. 单轴加卸荷过程中岩石声学特性及其与损伤因子关系[J]. *北京科技大学学报*,2007,29(5):452-455.
HAN Fang, JI Hong-guang, ZHANG Wei. Relationship between the acoustic characteristics and damage variable in the process of uniaxial loading and unloading[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2007,29(5):452-455.
- [11] 闫长斌,徐国元,杨飞. 爆破动荷载作用下围岩累积损伤效应声波测试研究[J]. *岩土工程学报*,2007,29(1):88-93.
YAN Chang-bin, XU Guo-yuan, YANG Fei. Measurement of sound waves to study cumulative damage effect on surrounding rock under blasting load[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007,29(1):88-93.
- [12] 孙成栋. 岩石声学测试[M]. 北京:地质出版社,1981.
- [13] 谢和平. 岩石混凝土损伤力学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1998.

Experiment on rock damage under blasting load

YAN Feng*, JIANG Fu-xing

(*Civil and Environmental Engineering School,*

University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the sound velocity measurement theory, using RSM-SY5 intelligent sound wave apparatus, damage of the surrounding rock under blasting load in a strip iron mine was studied by in-situ tests on sound waves. It is shown that the damage range of the surrounding rock caused by blasting excavation is 7 m in this strip iron mine, and the damage degree decreases with the increase of the distance of the surrounding rock from the blasting center. The sound velocity in rock mass decreases gradually with the increase of the blasting times and it means that the repeated blasting loads present a cumulative damage effect to rock mass. The cumulative damage is not the simple addition of the damage induced by the repeated single blasting loads, and takes on a non-linear increase. And the shorter the distance of the rock mass from the blasting center is, the more distinct the cumulative damage effect is.

Key words: mechanics of explosion; damage; blasting load; rock; damage degree; sound velocity; cumulative damage

* Corresponding author; YAN Feng

E-mail address: yfengustb@163.com

(责任编辑 曾月蓉)