

# 岩土介质中冲击震动波传播规律的微震试验研究

高明仕<sup>1</sup>, 窦林名<sup>1</sup>, 张农<sup>1</sup>, 牟宗龙<sup>1</sup>, 王恺<sup>1,2</sup>, 杨百顺<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221008; 2. 中国煤炭工业协会, 北京 100083)

**摘要:** 冲击矿压(岩爆)造成矿山巷道及开采空间的破坏, 主要原因也是由于冲击震源产生的震动波传播扰动而引起的。采用 TDS - 6 微震信号数据采集试验系统, 通过地面不同场地介质进行的微震试验, 得到沿传播距离各个拾震器位置的能量变化曲线, 并对分析不同场地介质中冲击震动波传播能量衰减指数的差异。试验结果表明, 岩土介质中冲击震动能量沿传播距离呈乘幂关系衰减。能量衰减指数 $\eta$ 在完整坚硬致密介质中很小, 而在松散软弱孔隙介质中明显增大, 而且能量初始衰减很快, 到一定距离后则变得非常微弱。这些结论为进一步研究巷道围岩冲击震动破坏机制、巷道围岩防冲抗震的强弱结构控制原理等奠定理论基础。

**关键词:** 采矿工程; 试验研究; 岩土介质; 冲击震动波; 传播规律; 能量衰减指数

**中图分类号:** TD 324

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2007)07 - 1365 - 07

## EXPERIMENTAL STUDY ON EARTHQUAKE TREMOR FOR TRANSMITTING LAW OF ROCKBURST IN GEOMATERIALS

GAO Mingshi<sup>1</sup>, DOU Linming<sup>1</sup>, ZHANG Nong<sup>1</sup>, MU Zonglong<sup>1</sup>, WANG Kai<sup>1,2</sup>, YANG Baishun<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Recourses and Mine Safety, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China; 2. China National Coal Association, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The transmitting and attenuation laws of stress wave in rocks are important and hot research issues in geotechnical engineering and mining engineering. The major reason that roadway or working face is destroyed by rockburst is also the transmitting wave of earthquake tremor. Using TDS - 6 seismic experiment instrument, the experiment on the transmitting law of earthquake tremor is carried out for different rocks; and energy attenuation curve is achieved with analyzing the different above-mentioned curves. Experimental results reveal that shock energy attenuates exponentially with the distance from the explosive center. The energy attenuation index  $\eta$  is considerably small in intensified rock and soil media, but much larger in weak or soft media apparently. The energy attenuates quickly in the beginning, and it will disappear after certain distances. These conclusions provide the theoretical basis for studying the failure mechanism of roadway surrounding rock subjected to rockburst and forming the control principle of strong-soft-strong structure for roadway to prevent rockburst.

**Key words:** mining engineering; experimental study; geomaterials; shock wave; transmitting law; energy attenuation index

**收稿日期:** 2006 - 09 - 19; **修回日期:** 2007 - 03 - 17

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50490270, 50474068, 50674085); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2005CB221504); “十一五”国家科技支撑计划(2006BAK04B02); 中国矿业大学科技基金资助项目(2006B002)

**作者简介:** 高明仕(1970 -), 男, 博士, 1992年毕业于中国矿业大学采矿工程系采矿工程专业, 现任副教授, 主要从事巷道围岩控制、深部巷道冲击矿压灾害防治等方面的教学与研究工作。E-mail: cumt\_gms@163.com

## 1 引言

天然岩石中含有很多夹杂、孔洞、裂纹或许多微结构，而天然岩体同时还有各种节理、层面和地质结构。当岩体中产生的应力波向四周传播时，它将随着几何扩散而发生衰减外，又受到岩体的塑性、非线性和黏性等阻尼作用，其能量大大衰减。岩体塑性、非线性和黏性受地质条件的影响，其岩性的随机性也将增大，所以岩体中应力波的传播是一个非常复杂的问题，目前还无法从理论上给出统一的关系表达式<sup>[1, 2]</sup>。一些学者<sup>[3~8]</sup>分别研究了砂岩、盐岩、石灰岩和混凝土等应力波的传播规律，并用拉格朗日分析法得到了部分岩石介质的动态本构关系，但多以强冲击近场力学效应为主。

本文采用中国矿业大学和国家地震局共同研制的 TDS-6 微震信号数据采集试验系统，通过地面不同场地介质进行的微震试验，记录震动波沿空旷场地岩土介质传播过程中在不同时段处应力波的传播信号数据，采用 MATLAB 7.0 软件对实测应力波数据进行处理，得到不同地点的震动加速度时程曲线和沿传播距离各个拾震器位置的能量变化曲线。对比分析了不同介质中冲击震动波传播能量衰减指数的差异，揭示应力波在不同物性参数的岩土介质中传播的衰减特点。试验结论为进一步研究巷道围岩冲击震动破坏机制和形成冲击地压巷道围岩的强弱结构控制原理<sup>[9~11]</sup>奠定理论基础。

## 2 试验仪器、方案及过程

### 2.1 TDS-6 微震信号与数据采集试验系统简介

TDS-6 微震信号与数据采集试验系统由 6 个微震信号采集子站和 1 个中心主站组成，主站配备数据接收单元和数据记录器，形成记录文件、波形回放显示，完成事件记录和定位。子站设有单分向微振仪、频率选择及无线传送等单元。子站留有有线传输接口，可以将微弱的震动信号通过电缆传送到中心主站；一点与多点网络通讯方式，频分实时传送，中心站在屏幕上实时显示接受信号波形、并将数据记录到计算机硬盘。

该试验系统最大的特点是拾震灵敏度高、拾震频率范围宽和系统实时性能好，实现无线传输工程振动检测。试验系统主要技术指标及参数：振动频段：1.0~80.0 Hz；振动灵敏度：20 (V·s)/m；数据

采集：16 位 A/D 变换；采样率 1 000 次/s；最长记录时间>120 min；振动中心频率：10, 35 和 70 Hz；载波频率：450 MHz；接受灵敏度：0.3  $\mu$ V；发射功率：1.5 W；工作温度：-10  $^{\circ}$ C~+50  $^{\circ}$ C。

### 2.2 试验方案

(1) 选择 4 种不同完整性(松散性)的场地。第 1 试验场地是相对完整和坚硬的砂石场地，第 2 试验场地是硬度较低但完整连续的细砂场地，第 3 试验场地是松散破碎的小石块场地，第 4 试验场地为坚硬完整的水泥地。

(2) 在一空地，用定量炸药充当震源，距离震源 3 m 处开始，间隔 10 m 沿直线距离设置拾震子站，一共设置 6 台拾震器子站；主站放在子站的圆弧中心位置处，以接受分站采集到的震动信号；试验方案示意图图 1。

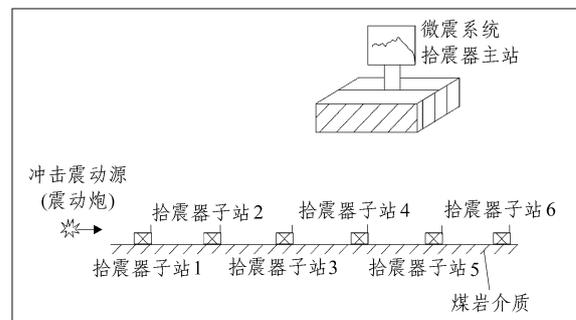


图 1 拾震器布置示意图

Fig.1 Schematic diagram of seismometer allocation

(3) 在每一种介质场地重复试验不少于 3 次。

### 2.3 试验过程

试验是在一采石场进行的，试验监测参数设置如下：通带旋钮：0~100 Hz；触发阈值：1.5；扫描时间：2 s；幅度范围：500 mV；STA/LTA 时间：0.1 s/(1.0 s)；选择触发记录方式。试验过程以第 1 试验场地为例给出，见图 2。

### 2.4 信号采集及原始数据保存

由试验现场直接得到的原始信号如图 3~6 所示。

## 3 数据处理及结果分析

### 3.1 震动加速度时程曲线

将 TDS-6 微震系统采集并记录的反映震动大小的信号电压值的原始数据转换为 Access 数据库文件，再利用系统自定的换算关系换算为对应子站



图 2 第 1 试验场地仪器布设及场地介质实照

Fig.2 Photographs of seismometer layout and field medium of the first experimental site

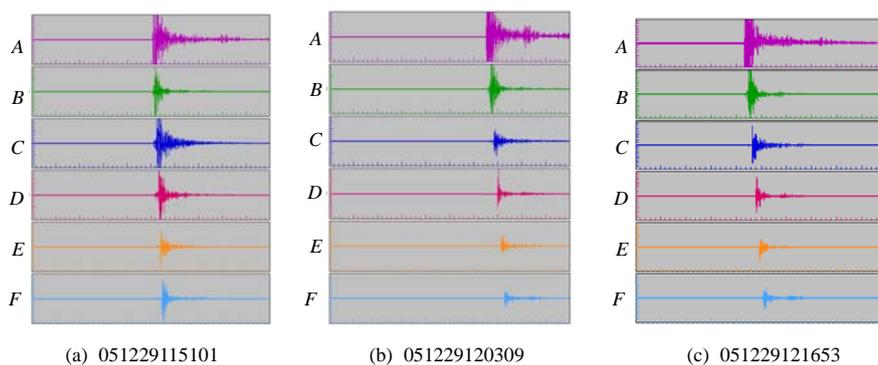


图 3 第 1 试验场地信号采集

Fig.3 Ground signal collection of the first experimental site

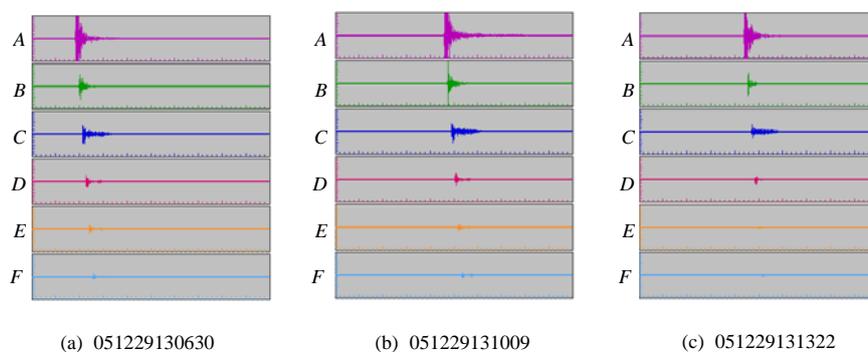


图 4 第 2 试验场地信号采集

Fig.4 Ground signal collection of the second experimental site

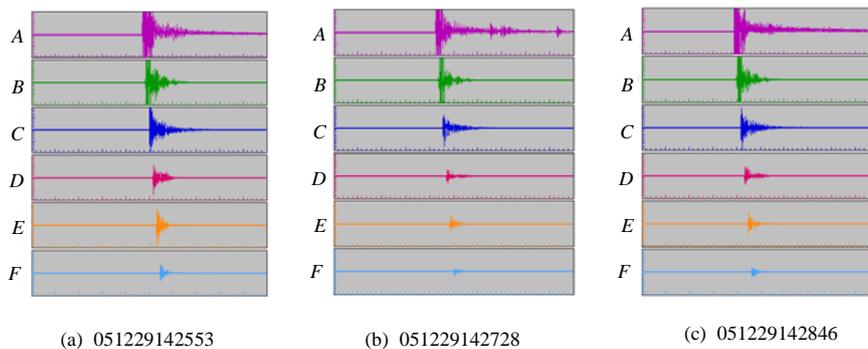


图 5 第 3 试验场地信号采集

Fig.5 Ground signal collection of the third experimental site

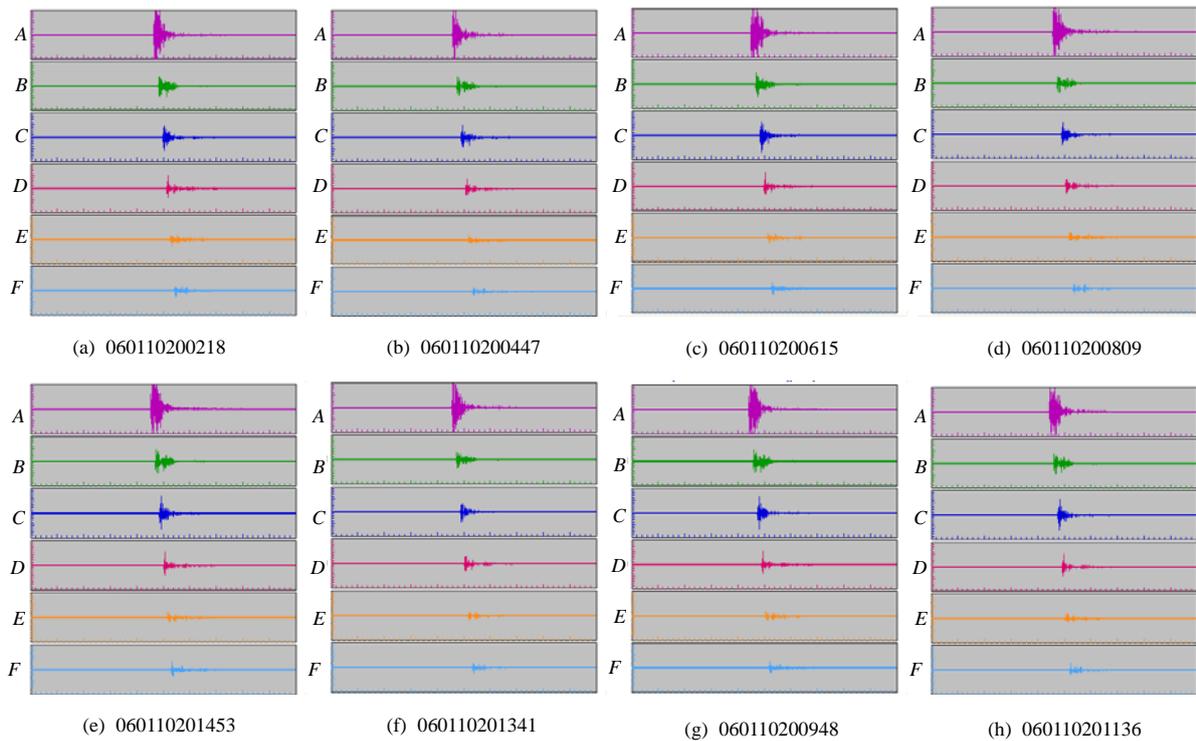


图6 第4试验场地信号采集

Fig.6 Ground signal collection of the fourth experimental site

位置处介质质点垂直方向的震动加速度数据库文件, 经过 Excel 和 MATLAB 7.0 等软件处理, 得到了每一次试验各子站所对应的地面介质质点的垂直方向的震动加速度时程曲线, 限于篇幅仅给出第 2 场地其中一次试验各拾震器位置加速度时程曲线, 如图 7 所示。

### 3.2 震动加速度最大幅值变化曲线

4 种不同场地介质各个拾震器位置最大加速度变化曲线如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 距离震源较远处幅值很大, 但沿传播距离增加, 震动加速度沿传播距离呈乘幂关系衰减, 在相对完整和连续性较好的介质如水泥地、大块砂石地中震动剧烈程度衰减较小, 而在松散和孔隙度大的介质如砂土地、小石块场中震动剧烈程度衰减趋势较大。说明岩土介质中裂缝、节理及孔洞等导致波的震动幅度降低, 对波传递有较大的吸收和阻尼作用, 而且这种吸收和阻尼作用随着传递介质的完整性、硬度、孔隙率等参数的变化而变化, 这些指标越趋向良性, 震动烈度衰减越小, 反之则衰减越大。

### 3.3 冲击震动波能量衰减特性

要精确地计算出冲击震动波传播过程中在各个拾震器位置处的震动能量是非常困难的, 根据

TDS - 6 微震试验系统内部设计自定的震动加速度幅值与震动烈度的对应关系(见图 9)<sup>[12]</sup>、震动烈度与震级的关系(见图 10)<sup>[13, 14]</sup>可以回归震动加速度幅值与震级之间的运算关系。震级与能量之间表达式<sup>[15]</sup>为

$$\lg E = 1.8 + 1.9M_L \quad (1)$$

式中:  $M_L$  为震级。

由式(1)可得到计算各拾震器位置震动能量与震动加速度之间的计算公式, 即

$$E = 10^{3.784 + 9 + 0.827 \ln a} \quad (2)$$

式中:  $a$  为震动加速度( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$ )。

利用式(2)可计算出 4 个试验场地各拾震器位置冲击震动波能量值, 进而得到冲击震动波沿传播距离的衰减特征曲线, 如图 11 所示。

从上面能量衰减变化曲线可以看出, 能量的衰减变化趋势同震动加速度的变化趋势, 随传播距离增大能量也呈乘幂关系  $E = E_0 I^{-\eta}$  衰减, 初始衰减依然很快, 到一定距离后衰减幅值减小。因此可以推论出应力波在岩土介质中传播过程, 公用参量(加速度、速度、位移、应力、应变和能量)均遵循乘幂关系  $E = E_0 I^{-\eta}$  的衰减规律。这个关系式也不同于常见文献中列出的  $E = E_0 e^{-\eta}$  关系式。

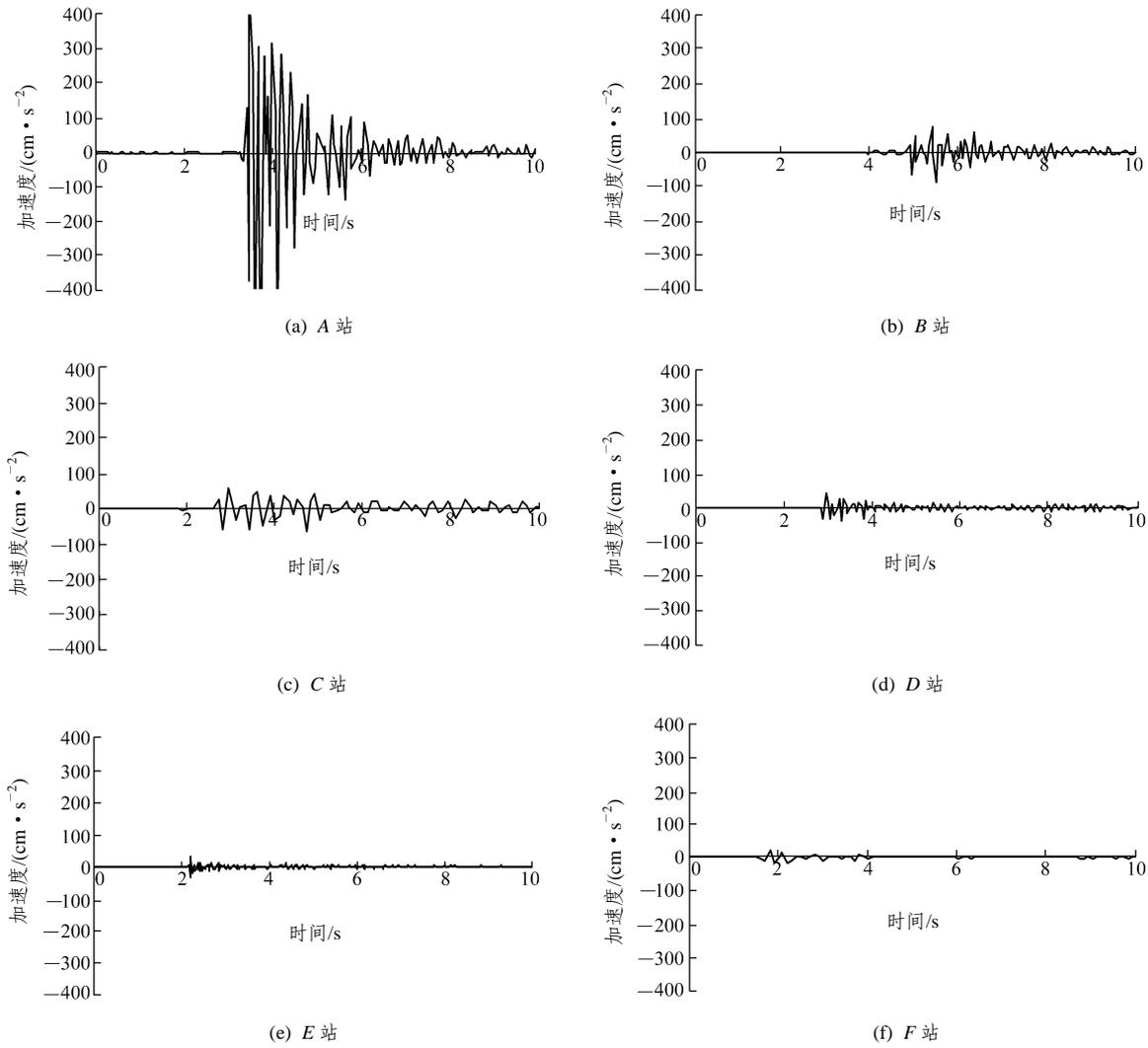


图 7 第 2 试验场地各拾震器位置加速度时程曲线(051229130630)

Fig.7 Time-history curves of acceleration of seismometer at the second experimental site(051229130630)

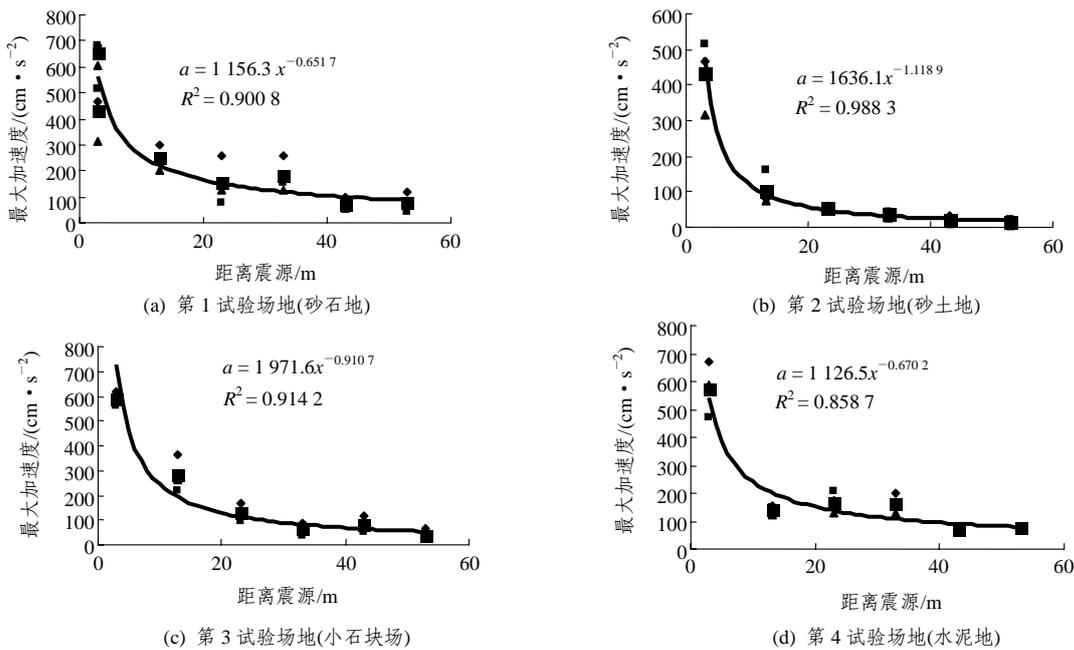


图 8 各试验场地拾震器位置最大加速度变化曲线

Fig.8 Variation curves of the maximum acceleration of seismometer for various experimental sites

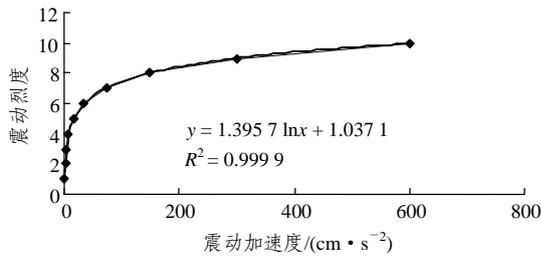


图9 震动加速度与震动烈度的关系<sup>[12]</sup>

Fig.9 Relationship between tremor acceleration and intensity<sup>[12]</sup>

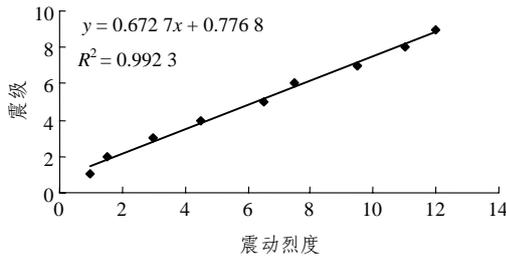


图10 震动烈度与震级的关系<sup>[13, 14]</sup>

Fig.10 Relationship between intensity and magnitude level<sup>[13, 14]</sup>

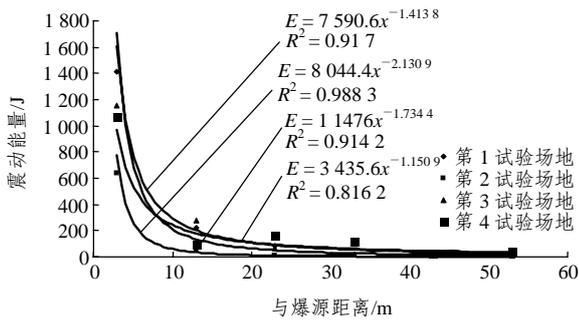


图11 4个试验场地各拾震器位置震动能量变化曲线

Fig.11 Curves of energy variation of seismometers for the four experiments

同时发现,在4种介质中能量衰减指数随介质的完整性、硬度、孔隙率等性能指标的变化而不同,这些指标越趋向良性,衰减指数越小;反之,衰减指数越大。例如在水泥地介质中衰减指数为1.1509,而在细砂土介质中衰减指数达到了2.1309。

### 3.4 误差分析与重现性说明

4个试验场地各拾震器位置冲击震动波能量原始数据见表1。因为采用的震源埋设深度的不同和震源掩盖封闭程度无法完全相同,从而有可能造成冲击震动波沿水平方向传播到达同一位置子站时能量的差异、人工丈量距离布设子站位置的误差,也可能造成试验的误差,不过试验的目的是得到不同

表1 4个试验场地各拾震器位置冲击震动波能量原始数据

Table 1 Original energy data for the seismometers of shock wave collected from the four experimental sites

场地编号	拾震器位置/m	最大加速度/(cm·s <sup>-2</sup> )				对应震动能量/J
		第1次	第2次	第3次	平均	
第1试验场地	3	683.02	678.270	605.11	655.47	1409.06
	13	301.87	248.910	199.84	250.2	225.11
	23	259.46	73.430	122.61	151.835	86.95
	33	259.60	156.300	121.99	179.30	119.33
	43	95.47	64.210	55.84	71.84	20.918
第2试验场地	53	117.06	44.950	68.36	76.79	23.73
	3	468.04	516.020	315.56	433.21	640.34
	13	78.09	160.130	74.10	104.10	42.37
	23	59.03	54.490	50.54	54.69	12.43
	33	42.61	43.390	25.34	37.11	5.94
第3试验场地	43	33.50	20.750	9.88	21.38	2.08
	53	22.72	20.630	7.79	17.05	1.35
	3	621.80	560.910	589.40	590.70	1155.80
	13	360.93	217.720	265.11	281.25	281.27
	23	167.22	92.450	129.69	129.78	64.49
第4试验场地	33	88.649	39.510	60.91	63.02	16.29
	43	114.14	49.352	83.27	82.25	27.06
	53	63.84	21.000	32.01	38.95	6.52
	3	672.03	470.110	587.06	576.40	1103.08
	13	152.93	150.400	121.64	141.66	76.19

介质中震动能量与水平传播距离之间的关系,对于同一介质人工丈量距离布设子站位置的误差自然就会消除,所以对于具体的岩土介质试验得到的能量衰减曲线及拟合的表达式是可靠的,同时也具有重现性,从第4试验场地所做的8次试验得到的结果就说明了这一点。还需说明的是,在这类现场测试中,由于爆炸的空间位置、拾震器的安设、响应特征等因素可能带来的差异,试验误差及重现性将在

今后进一步验证。

## 4 结 论

通过 TDS - 6 微震信号数据采集试验系统, 研究了冲击震动波在 4 种不同实际原位场地介质中的传播效应和能量衰减特点, 得到以下主要结论:

(1) 冲击震动波的震动烈度随距离震源位置的增加呈乘幂关系减弱, 且与介质的完整性、强度、孔隙率等性能指标有密切关联, 介质对冲击震动波的吸收程度随介质的破碎度和松散度的增大而增大。

(2) 能量的衰减变化趋势同震动加速度的变化趋势, 随传播距离增大能量也呈乘幂关系  $E = E_0 l^{-\eta}$  衰减, 初始衰减依然很快, 到一定距离后衰减幅值减小。

(3) 能量衰减指数  $\eta$  也随介质的变化而不同, 在完整坚硬致密介质中很小, 而在松散软弱孔隙介质中明显增大。

### 参考文献(References):

- [1] 宋守志. 固体介质中的应力波[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1989.(SONG Shouzhi. Stress wave in solid media[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1989.(in Chinese))
- [2] 李夕兵, 古德生. 岩石冲击动力学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994.(LI Xibing, GU Desheng. Rock impact dynamics[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1994.(in Chinese))
- [3] 吴文, 徐松林, 杨春和, 等. 盐岩冲击特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3 613 - 3 620.(WU Wen, XU Songlin, YANG Chunhe, et al. Testing studies on response behaviour of rock salt to impacting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3 613 - 3 620.(in Chinese))
- [4] GRADY D E, KIPP M E. The micromechanics of impact fracture of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1979, 16(6): 293 - 302.
- [5] TRUNIN R F. Shock compressibility of condensed materials in strong shock waves generated by underground nuclear explosive[J]. Physics Uspekhi, 1994, 37(11): 1 123 - 1 146.
- [6] 寇绍金, 虞吉林, 杨根宏. 石灰岩中应力波衰减机制的试验研究[J]. 力学学报, 1982, 14(6): 583 - 588.(KOU Shaojin, YU Jilin, YANG Genhong. Testing studies on attenuation mechanics of stress wave in limestone[J]. Journal of Mechanics, 1982, 14(6): 583 - 588.(in Chinese))
- [7] GOLDSMITH W, POLIVKA M, YANG T. Dynamic behaviour of concrete[J]. Experimental Mechanics, 1966, 6(2): 65 - 69.
- [8] 李夕兵, 陈寿如, 古德生. 岩石在不同加载波下的动载强度[J]. 中南矿冶学院学报, 1994, 25(3): 301 - 304.(LI Xibing, CHEN Shouru, GU Desheng. Dynamic strength of rock under impulse loads with different stress waveforms and Durations[J]. Journal of Central-south Institute of Mining and Metallurgy, 1994, 25(3): 300 - 304.(in Chinese))
- [9] 高明仕. 冲击矿压巷道围岩的强弱结构控制机制研究[博士学位论文][D]. 徐州: 中国矿业大学, 2006.(GAO Mingshi. Study on the strong-soft-strong structure control mechanism of roadway subjected to rockburst[Ph. D. Thesis][D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2006.(in Chinese))
- [10] 姜耀东, 赵毅鑫, 宋彦琦, 等. 放炮震动诱发煤矿巷道动力失稳机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3 131 - 3 136.(JIANG Yaodong, ZHAO Yixin, SONG Yanqi, et al. Analysis of blasting tremor impact of roadway stability in coal mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3 131 - 3 136.(in Chinese))
- [11] 李庶林, 尹贤刚, 郑文达, 等. 凡口铅锌矿多通道微震监测系统及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2 048 - 2 053.(LI Shulin, YIN Xiangang, ZHENG Wenda, et al. Research on multi-channel microseismic monitoring system and its application to Fankou lead-zinc mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2 048 - 2 053.(in Chinese))
- [12] 北京泰润齐科技有限公司. TDS - 6 微震仪使用说明书[R]. 北京: 北京泰润齐科技有限公司, 2005.(Beijing Tairunqi Co., Ltd.. TDS - 6 shock instrument user's manual[R]. Beijing: Beijing Tairunqi Co., Ltd., 2005.(in Chinese))
- [13] 郭履灿, 赵凤竹. 震级与震源参数测定[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1986.(GUO Lucan, ZHAO Fengzhu. Earthquake magnitude and earthquake source parameter determination[M]. Beijing: China Science and Technique Press, 1986.(in Chinese))
- [14] 谢毓寿. 地震烈度[M]. 北京: 地震出版社, 1988.(XIE Yushou. Earthquake intensity[M]. Beijing: Earthquake Press, 1988.(in Chinese))
- [15] 窦林名, 何学秋. 冲击矿压防治理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001.(DOU Linming, HE Xueqiu. Theory and technique of rockburst prevention[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2001.(in Chinese))