

DOI: 10.11779/CJGE201402007

中尺度复杂岩体应力波传播特性的微震试验研究

彭府华¹, 李庶林^{2*}, 程建勇³, 贾宝珊³

(1. 长沙矿山研究院, 湖南 长沙 410012; 2. 厦门大学, 福建 厦门 361005; 3. 洛阳栾川钼业集团股份有限公司, 河南 洛阳 471500)

摘要: 采用全数字型多通道微震监测系统, 对深部复杂采空区岩体和上部露天台阶絮渣岩体分别进行了现场爆破应力波传播特性试验, 利用 P 波触发时间和传播距离组成的离散点进行线性拟合, 得出应力波传播速度, 结果显示深部复杂采空区岩体和上部絮渣岩体明显出现两个层状速度模型。利用应力波振幅和传播距离组成的离散点进行曲线拟合, 并对应力波信号进行频谱分析和滤波处理, 研究应力波的衰减特性。试验结果表明, 应力波振幅随传播距离的增加而减小, 且在数值上呈乘幂衰减; 应力波衰减系数和应力波频率成正比, 数值上呈三次多项式关系, 高频成分应力波衰减更加明显。利用试验数据, 分别计算出深部复杂采空区岩体和上部絮渣岩体的平均品质因子, 计算结果分别为 4.055 和 2.478, 两者远小于一般原岩的岩体品质因子, 说明复杂采空区和絮渣的存在对应力波的传播有很大影响。

关键词: 微震试验; 复杂岩体介质; 波速; 衰减特性; Q 值

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)02-0312-08

作者简介: 彭府华(1987-), 男, 硕士, 从事采矿与矿山岩石力学的研究工作。E-mail: fuhupeng@126.com。

Experimental study on characteristics of stress wave propagation in mesoscale and complex rock mass by microseismic monitoring

PENG Fu-hua¹, LI Shu-lin², CHENG Jian-yong³, JIA Bao-shan³

(1. Changsha Institute of Mining Research, Changsha 410012, China; 2. Xiamen University, Xiamen 361005, China; 3. China

Molybdenum Co., Ltd., Luoyang 471500, China)

Abstract: By using the digital multi-channel microseismic monitoring system, the characteristics of blast stress wave propagation in deep complex and mined-out area and upper fractured rock mass are tested. The wave velocity is acquired by the curve fitting method, which uses the P wave triggering time and propagation distance. The results show that the wave velocities in deep complex and mined-out rock mass and upper fractured rock mass are obviously different. Fitted the curve by using the stress wave amplitude and propagation distance, it is found that the stress wave amplitude decreases in the form of power when the propagation distance increases. By using the signal spectrum analysis and filtering, the attenuation coefficient and frequency are in cubic polynomial relations, and the attenuation of the high-frequency wave is more obvious. The average quality factors in deep complex and mined-out area and upper fractured rock mass, are calculated and they are 4.055 and 2.478, far less than those of the original rock mass, indicating that the mined-out area and fracture have great influence on the stress wave propagation.

Key words: microseismic test; complex rock mass; wave velocity; attenuation characteristic; Q value

0 引言

应力波在岩体介质中的传播特性一直是岩土工程和地球物理领域热门的研究课题, 受岩体介质不同和介质的不连续性等因素影响, 应力波传播特性非常复杂, 没有一个统一的定量关系。针对应力波在岩体介质中的传播特性, 国内外学者做了大量的工作, 如吴文等^[1]、寇绍全等^[2]分别对盐岩、石灰岩、砂岩和玄武岩等不同岩体介质中应力波传播特性进行了室内试验研究, 这些研究为单层连续岩体介质应力波传播特性提供了理论参考; 聂建新等^[3]、夏唐代等^[4]对土

介质中气体和流体对应力波传播特性的影响进行了研究, 王大兴等^[5]、杜启振等^[6]、宋林等^[7]针对岩体中节理、孔隙和缺陷对应力波传播规律做了大量工作, 这方面的研究针对的是岩体介质的不连续性; 黄玉龙等^[8]对广东地区的地震波衰减模型进行了研究, 并得出了衰减 Q 值随频率 f 的关系式^[8], 裴顺平等^[9]对川滇地区横波 Q 值的动态变化特征进行了研究, 为进一步理解地震的孕育发生提供证据, 国外学者 Hasegawa^[10]

收稿日期: 2013-06-14

*通讯作者

对加拿大部分地区地层中地震波的衰减进行了研究, Burger 等^[11]对北美东部地区地壳构造对地震波衰减影响做了大量研究; 不过, 这些研究大多是针对地球物理勘探和地震研究开展的岩层中地震波的研究, 属于大尺度概念上的测试分析。在国内矿山方面, 叶根喜等^[12]对煤矿岩层中穿层和顺层地震波的衰减进行了测试研究, 高明仕等^[13]对矿山岩体介质应力波传播特性进行了测试和理论研究, 这些测试研究有一定的参考价值。但前者的研究仅仅针对岩层而言, 并且只是对振幅衰减进行了研究, 后者仅限于对岩土体的能量衰减研究, 没有涉及矿山具体的工程问题。目前国内的研究还没有专门针对采空区、露天台阶(含絮渣)岩体这种中尺度岩体的应力波传播特性的实测和深入的理论研究。

洛钼集团三道庄露天矿为地下转露天开采矿山, 在地下转露天之前为国有、私人等多家企业开采的地下矿山。后来经开采秩序整顿和整合后, 转为现今的露天开采方式, 并在露天开采境界内的下方矿体中存在大量的原地下开采空区。为了保证生产过程中人员和设备的安全, 防止发生重大地压灾害, 在露天矿 D 区建立了一套 48 通道全数字型微震监测系统, 实现对 D 区采空区的全天候、实时和立体监测, 监控露天开采作业台阶和井下老采空区的稳定性^[14]。由于 D 区存在深部复杂多重采空区和絮渣(塌陷和经爆破处理的上部采空区围岩体)等影响, 应力波传播特性比原岩中传播特性复杂得多, 因此, 笔者所在课题组对这种中尺度特复杂岩体应力波传播特性进行微震试验研究, 利用已安装的全数字型微震监测系统, 采用在指定位置进行人工爆破方式产生爆破应力波, 主要研究该介质中的应力波传播速度模型、应力波衰减特性和岩体的品质因子等问题, 为进一步开展该矿的地下采空区稳定性、边坡台阶安全性的微震监测评价研究提供理论基础。

1 试验研究测试内容

由于该矿开采境界内采空区多, 开采环境条件复杂, 在采用微震监测技术进行地压监测时, 必须掌握应力波在不同的复杂岩层条件环境下的一些基本特性。本研究就针对地下采空区、露天台阶矿岩层(絮渣层)的波传播特性如波速、衰减特性和 Q 值等开展相关的现场测试和研究工作, 以便得到不同条件下的波传播特性。

1.1 应力波波速

图 1 为波速计算模型图, 传感器距离震源分别为 d_1, d_2, \dots, d_n , 接收到爆破应力波的触发时间分

别为 t_1, t_2, \dots, t_n 。

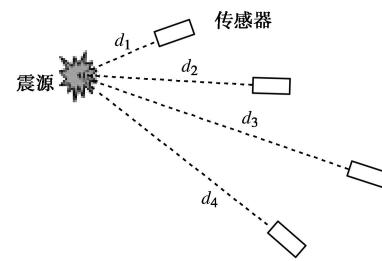


图 1 波速计算模型

Fig. 1 Computational model for wave velocity

各传感器之间的距离差分别为 $\Delta d_{12} = d_2 - d_1$, $\Delta d_{13} = d_3 - d_1 \dots \Delta d_{ij} = d_j - d_i$ ($i, j = 1 \sim n$, 且 $j > i$)。

各传感器触发时间差分别为 $\Delta t_{12} = t_2 - t_1$, $\Delta t_{13} = t_3 - t_1 \dots \Delta t_{ij} = t_j - t_i$ ($i, j = 1 \sim n$, 且 $j > i$)。

Δd_{ij} ($i, j = 1 \sim n$, 且 $j > i$) 为应力波传播任意距离, 其必然对应于应力波传播这一距离所需的时间 Δt_{ij} , 而波速计算公式为

$$V = \frac{\Delta d_{ij}}{\Delta t_{ij}} = \frac{d_j - d_i}{t_j - t_i} \quad (1)$$

采用离散点 $(\Delta t_{ij}, \Delta d_{ij})$ 作为直线拟合的对象, 即假设各离散点为函数 $\Delta d = V \Delta t + b$ 上的点, 采用最小二乘法, 拟合出直线, 则直线的斜率 V 即为应力波的平均波速, 残值 b 为该方法存在的误差。

1.2 衰减系数

由于岩体介质的非完全弹性, 加上采空区和絮渣等原因, 应力波在传播过程中能量会在介质中被损耗和吸收, 使应力波的振幅衰减。

设在均匀介质中沿 x 方向传播的平面谐波, 其位移为

$$u(x, t) = A(x) \exp[i(kx - \omega t)] \quad (2)$$

式中, $A(x)$ 为应力波的振幅, k 为无损耗时的圆波数, ω 为圆频率。

现讨论波从 x 传播到 $x + \Delta x$, 由于衰减造成应力波振幅的相对变化为

$$[A(x + \Delta x) - A(x)]/A(x) = -\alpha \Delta x \quad (3)$$

这个变化与 Δx 成正比, 其比例系数 α 显然是一个表征介质损耗特征的一个指数, 负号表示衰减。当 $\Delta x \rightarrow 0$ 时, 则有

$$\frac{dA(x)}{dx} = -\alpha A(x) \quad (4)$$

解此微分方程, 得

$$A(x) = A_0 e^{-\alpha x} \quad (5)$$

式中, A_0 表示震源强度。式 (5) 表明波的振幅随着传播距离的增加按指数规律衰减。衰减的快慢取决于系数 α , α 称为应力波的衰减系数。

对于两个不同位置 x_1 , x_2 ($x_1 < x_2$), 相应振幅为 $A(x_1)$, $A(x_2)$, 则衰减系数近似为

$$\alpha \approx 1/(x_2 - x_1) \ln[A(x_1)/A(x_2)] \quad , \quad (6)$$

衰减系数的单位为 dB/m。

1.3 品质因子

由于介质的非完全弹性性质, 应力波在传播过程中能量被吸收而使振幅衰减。为了描述介质吸收特性的强弱, 地球物理领域中引入了一个无量纲的因子“ Q ”, 被称为介质的品质因子。 Q 值是用来度量介质中振动或波动能量的非弹性衰减率的物理量, 是介质所固有的特性。

品质因子 Q 是描述岩体对应力波吸收特性的一种表达方式, 又称内摩擦或耗散因数, 即一个周期内或一个波长距离内, 振动所损耗的能量与总能量之比的倒数。可以表示为

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta E}{E} \quad . \quad (7)$$

观测波动振幅随距离的衰减, 对于某一特定振相的振幅 A 随距离 r 的变化, 可以设法连续追踪观测。波在一个波长 λ 的距离内的变化为 ΔA , λ 由圆频率 ω 和相速度 v , 按 $\lambda = \frac{2\pi v}{\omega}$ 确定。这时, $\Delta A = \frac{dA}{dr} \lambda$, 代

入式 $\frac{1}{Q} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta E}{E}$, 有

$$\frac{dA}{dr} = -\frac{\omega}{2vQ} A \quad . \quad (8)$$

式 (8) 的解为

$$A(r) = A_0 e^{-\alpha f / 2vQ} \quad . \quad (9)$$

令 $\alpha = \frac{\omega}{2vQ} = \frac{\pi f}{vQ}$ 为波动振幅随距离的衰减系数,

则有

$$A(r) = A_0 e^{-\alpha f} \quad , \quad (10)$$

并有

$$Q = \frac{\pi f}{v\alpha} \quad . \quad (11)$$

2 试验测试方案

2.1 微震监测测试系统简介

根据洛钼露天矿生产与安全管理的需要, 首先针对该矿的 D 区开展地压多通道微震监测应用研究。根据 D 区地下采空区大小及地表露天开采范围, 建立的微震监测系统为国际上先进的多通道全数字型监测系统, 由 8 台数据采集仪组成。这 8 台数据采集仪分别在地表露天台阶上分配 18 个通道, 井下采空区的 1070 和 1160 m 水平共分配 30 个通道, 使得传感器形成空间立体分布, 实现对 D 区地表露天台阶与对应的井下采空区范围的地压进行同时步立体监测。

该微震监测系统携带 44 个加速度传感器, 其中 42 个为单轴加速度传感器、2 个为三轴加速度传感, 一共占用 48 个通道。传感器的工作平率为十几个 Hz 至 10^4 Hz, 设置的系统采集微震事件的频率为十几个 Hz 至 5000 Hz。

本文的研究就是利用这套全数字型微震监测系统, 开展针对洛钼露天矿矿岩体的应力波传播特性研究。

2.2 深部复杂采空区岩体应力波传播特性实验方案

在对深部复杂采空区岩体应力波传播特性进行试验研究时, 应避免上部絮渣的影响。根据 D 区深部复杂采空区和上部絮渣的分布特点, 并考虑到传感器的位置, 选择人工爆破点位置如图 2 所示。

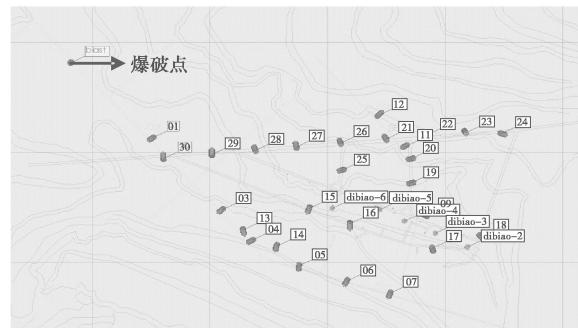


图 2 爆破点和传感器位置平面图

Fig. 2 Location of blasting and sensors

采用潜孔钻机钻凿直径 140 mm、深 21.6 m 的钻孔, 孔底装药点的坐标为 $N=4962.5$, $E=5565.9$, $D=1382.2$ 。该坐标可视为试验中震源点坐标, 爆破点位置与传感器的空间关系见图 3 所示。

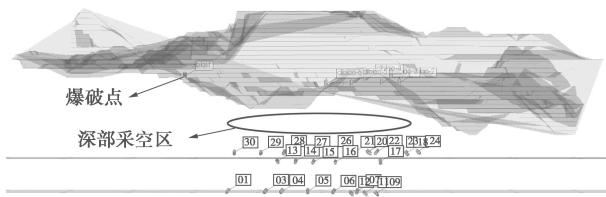


图 3 爆破点和传感器位置立体图

Fig. 3 3D location of blasting and sensors

炸药为乳化炸药, 装药量 20 kg, 通过爆破漏斗鲍列斯科夫公式验算, 这种爆破方式不会产生飞石。

2.3 上部絮渣岩体应力波传播特性实验方案

本次试验方案是利用地表台阶上靠近 D 区絮渣附近的 5 个传感器来接受爆破应力波。考虑到上部絮渣岩体很破碎、预计应力波衰减较大的缘故, 因此, 选择的爆破点位置距离地表传感器较近, 见图 4 所示。

采用潜孔钻机钻凿直径 140 mm、深 10 m 的钻孔, 孔底装药点的坐标为 $N=4751.8$, $E=6016.5$, $D=1391$ 。该坐标可视为试验中震源点坐标, 爆破点位置与台阶上絮渣周围的监测传感器的平面关系见图 4 所示。

炸药为乳化炸药, 装药量 24 kg, 通过爆破漏斗鲍

列斯科夫公式验算, 这种爆破方式不会产生飞石。

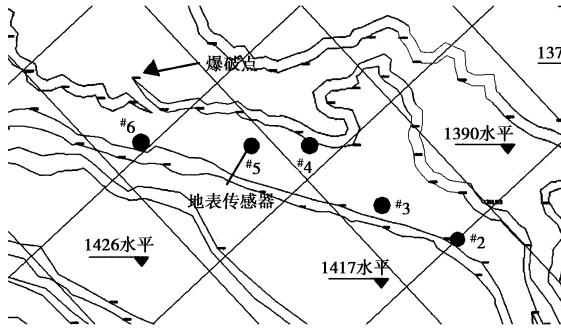


图 4 爆破点和传感器位置平面图

Fig. 4 Location of blasting and sensors

3 试验数据处理及分析

3.1 深部复杂采空区岩体应力波传播特性实验数据 分析

爆破点于 2013 年 1 月 2 号 10:18 起爆, 爆破效果较好, 爆破应力波触发了井下所有的 30 个传感器, 各个传感器接收的波清晰、干扰小。图 5 为部分传感器实测接收的波形图。

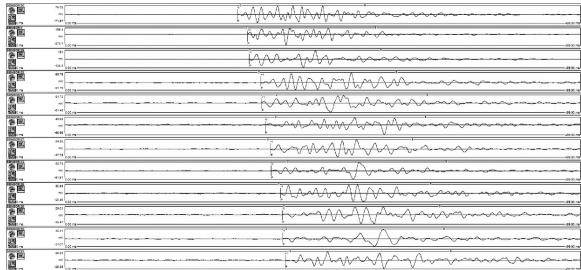


图 5 爆破应力波波形图

Fig. 5 Blasting stress wave

(1) 波速计算

应力波在非均匀介质中的传播速度不是一个常数, 它和介质本身、裂隙和断裂面等因数有关, 这里计算的是应力波在某区域传播过程中的平均速度。根据上述波速计算方法, 利用获得的 P 波触发时间 i 和传感器至震源点距离 d 组成的离散点来拟合波速, 下表 1 为波速计算数据。

表 1 波速计算数据

Table 1 Velocity data

传感器 编号	触发时间 i /ms	传感器至震源点 距离 d /m	振幅 /mV
30	171.3	310.1015	76.02
1	178.4	364.1869	156.00
29	180.5	355.3935	131.00
13	191.8	478.8244	61.48
28	193.9	405.1786	81.12
3	201.5	481.0792	66.95
27	201.9	459.1641	54.95
14	206.9	532.7578	52.73
26	210.7	520.5273	30.88
21	214.1	587.9765	26.81
15	218.3	534.2797	40.41
25	218.3	536.7724	35.47
12	223.3	616.0225	49.90

从表 1 的数据中按波速计算方法选取离散函数点 $(\Delta d_1, \Delta t_1), (\Delta d_2, \Delta t_2), \dots, (\Delta d_n, \Delta t_n)$ 作为直线拟合的对象, 从离散点的分布可以看出其近似于分布在一条直线附近, 可以采用直线对其进行拟合分析。通过拟合分析, 得到拟合方程、均方差和拟合直线, 见图 6 所示。

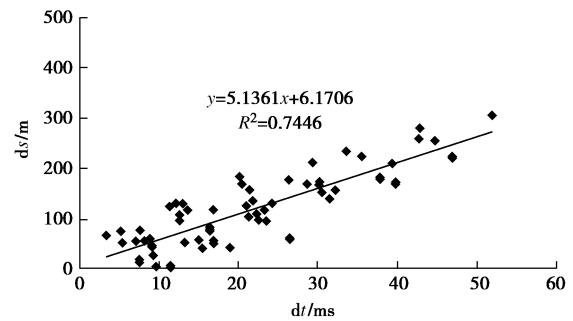


图 6 波速拟合

Fig. 6 Velocity fitting

通过上述分析, 得到平均波速计算结果为 $V_p = 5136.1 \text{ m/s}$ 。

(2) 应力波衰减特性

由于介质的非完全弹性, 应力波在传播过程中能量被吸收而使振幅减小。根据各个传感器的位置、传感器接收传感器波形的最大幅值, 对实测得到的微震信号的振幅—距离散点图进行回归分析, 得到图 7 所示的衰减关系图和回归分析曲线方程。由于在采空区附近的传感器受到采空区的影响较为明显, 使得图 7 中位置最近的 3 个传感器的振幅值比较分散, 这直接导致了回归分析中的相关系数较小。但由于传感器较多、分析数据较多, 分析的结果还是基本能反映其衰减规律的。从图 7 的分析结果可知, 应力波振幅随传播距离基本呈乘幂关系衰减。应力波的衰减和应力波本身的频率也有关系, 一般来说, 高频应力波在传播过程中衰减的更快, 因此, 在研究衰减之前有必要计算应力波的频率范围。图 8 为利用 MATLAB 对^{#1} 传感器信号频谱分析结果。

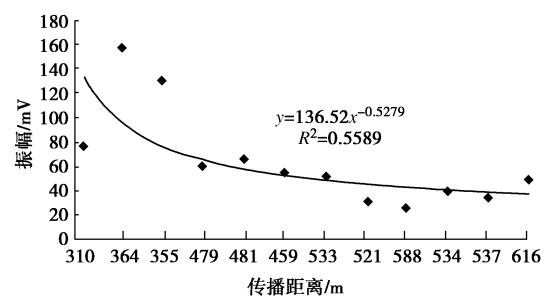


图 7 应力波振幅随传播距离变化曲线

Fig. 7 Change of wave amplitude with propagation distance

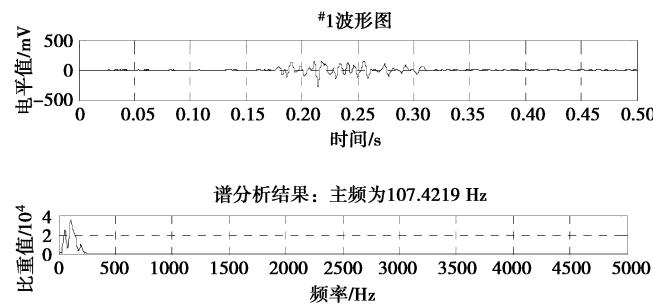


图 8 #1 传感器信号频谱分析

Fig. 8 Spectral analysis of sensor signal No. 1

利用这种频谱分析方法, 分别对其他传感器波形进行频谱分析, 可得到各个传感器监测到的信号的主频, 其结果见表 2。

表 2 各传感器波形主频

Table 2 Wave frequencies of all sensors

传感器编号	主频 f /Hz	传感器编号	主频 f /Hz
30	126.950	26	68.360
29	97.660	14	24.410
1	107.420	15	34.180
27	19.530	25	63.480
13	78.125	21	48.830
3	48.830	12	48.828

从主频计算结果可知: 最大主频为 126.95 Hz, 最小主频为 19.53 Hz, 应力波的频率在 0~240 Hz 左右, 因此, 考虑分别计算频率在 0~40, 40~80, 80~120, 120~160, 160~200 和 200~240 Hz 的衰减系数。计算某段频率范围的衰减系数就需要将频率范围外的波形滤除, 这时利用带通滤波器 (Butterworth) 对原波形进行滤波处理。图 9 就是根据上述方法对各个通道监测信号进行滤波后得到的微震信号波形图。

利用 $\alpha \approx 1/(x_2 - x_1) \ln[A(x_1)/A(x_2)]$ 分别计算衰减系数的平均值, 表 3 是衰减系数计算结果。

表 3 衰减系数计算结果

Table 3 Results of attenuation coefficient

频率范围/Hz	衰减系数 α
0~40	0.010634
40~80	0.010822
80~120	0.017082
120~160	0.019421
160~200	0.024328
200~240	0.046785
平均衰减系数	0.021512

从图 10 可以看出, 衰减系数随应力波频率增大而增大, 并且频率越大衰减系数增大的变化趋势越快。国内外许多学者对衰减系数和频率的关系也做了一定的研究, 目前能得出的结论是衰减系数和频率有关, 且在一定范围内, 两者呈正比关系, 但在数值上并没

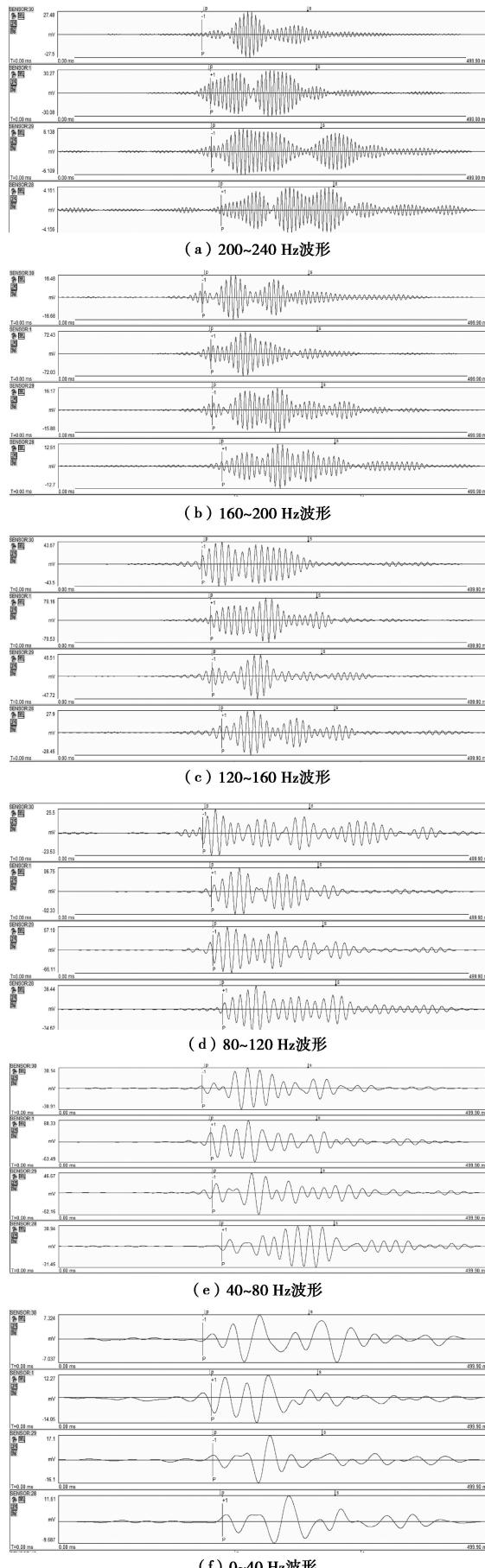


图 9 滤波后波形

Fig. 9 Filtered waveforms

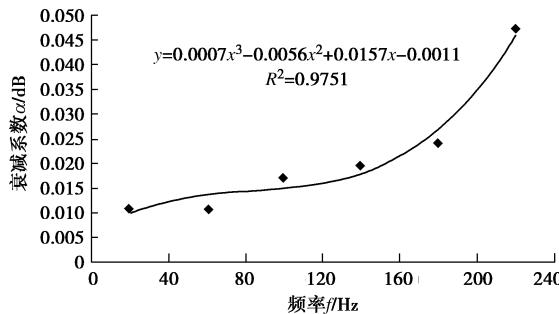


图 10 衰减系数随频率变化曲线

Fig. 10 Change of attenuation coefficient with frequency

有统一的关系。本文根据试验结果, 采用最小二乘法拟合, 结果显示利用3次多项式拟合曲线最为理想, 本试验中应力波频率和衰减系数的关系在数值上近视为 $y=0.0007x^3-0.0056x^2+0.0157x-0.0011$ 。

(3) 岩体品质因子

利用前面 Q 值的计算公式, 对深部复杂采空区岩体的品质因子计算所得的结果见表4。

表 4 品质因子计算结果

Table 4 Results of Q value

频率范围/Hz	品质因子 Q
0~40	2.300
40~80	4.520
80~120	4.300
120~160	5.040
160~200	5.030
200~240	3.140
平均值	4.055

从表中可以看出本次试验计算得出的品质因子平均值为4.055, 说明了这种含复杂采空区的中尺度岩体的品质因子明显较小。在地震学研究中, 利用监测到的较低频率地震波计算地层的品质因子一般都在100以上; 也有学者对很多岩石样本进行了室内试验, 此时使用高频应力波, 计算出大多数岩石的品质因子在几十到上百不等。地震研究的对象是厚大的地壳岩层, 实验室研究的是近乎完整的岩石试样, 其 Q 值相对较大, 反映了岩层和岩样的相对完整性。而对于矿山开采范围中的微震监测, 相对应力波长而言其采空区尺度的影响是不可忽视的, 获得较小的 Q 值, 则正好说明岩体中采空区对应力波传播中的衰减影响较大。

3.2 上部絮渣岩体应力波传播特性实验数据分析

现场试验测试的爆破点于2013年1月16日上午10:40起爆。地表台阶上位于絮渣附近的#2~#6传感器接收到爆破微震信号, 这些传感器接收到的波形清晰可见、质量较好, 波形如图11所示。

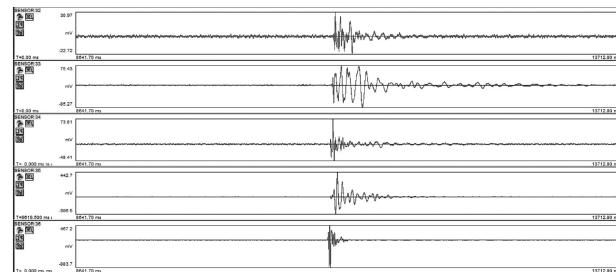


图 11 爆破应力波波形

Fig. 11 Blasting stress wave

(1) 波速计算

利用获得的P波触发时间*i*和传感器至震源点距离*d*来拟合波速, 表5为计算波速的数据。

从表5的数据中按波速计算方法选取离散函数点($\Delta d_{ij}, \Delta t_{ij}$)作为直线拟合的对象, 从离散点的分布可以看出, 可以采用直线对其进行拟合分析。通过拟合分析, 得到拟合方程、均方差和拟合直线, 见图12所示。

表 5 波速计算数据

Table 5 Velocity data

传感器 编号	距离震源距离 /m	触发时间 /ms	最大振幅值 /mv
d-6	57.28627	10988.7	883.7
d-5	92.73981	11009.5	442.7
d-4	137.5379	11010.5	79.71
d-3	194.4015	11021.2	73.81
d-2	253.7075	11036.6	30.97

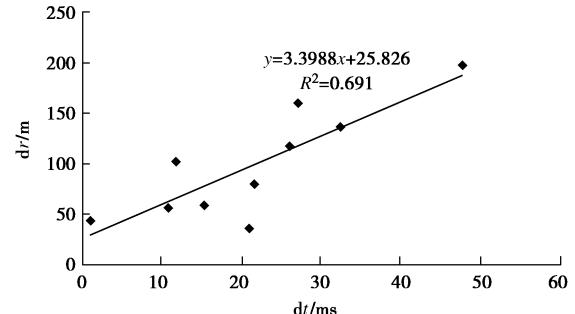


图 12 波速拟合

Fig. 12 Velocity fitting

通过上述的分析和计算, 得到本次试验所获得的絮渣岩体中应力波传播平均速度为3398.8 m/s。

(2) 应力波衰减特性

进一步对振幅和距离之间的关系进行拟合分析, 得到振幅随距离衰减的关系, 见图13所示。从图中可以看出应力波振幅随距离呈乘幂衰减, 而且其拟合的效果很好, 相关系数达到0.9317。

通过频谱分析结果可知, 上述爆破产生的应力波主频在20 Hz左右。利用带通进行滤波, 考虑频率在0~20, 20~40, 40~60和60~80 Hz范围内的衰减

情况，并利用 $\alpha \approx 1/(x_2 - x_1) \ln[A(x_1)/A(x_2)]$ 分别计算衰减系数，表 6 是衰减系数计算结果；图 14 为应力波衰减系数和应力波频率关系曲线。

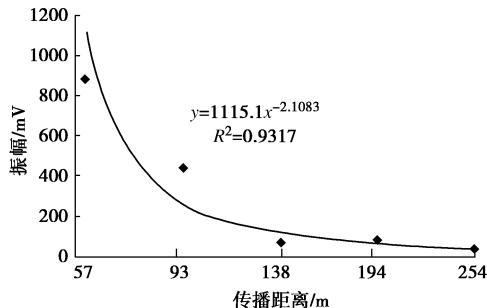


图 13 应力波振幅随传播距离变化曲线

Fig. 13 Change of wave amplitude with propagation distance

表 6 衰减系数计算结果

Table 6 Results of attenuation coefficient

频率范围	衰减系数
0~20	0.011893
20~40	0.015907
40~60	0.017716
60~80	0.039799
平均衰减系数	0.021329

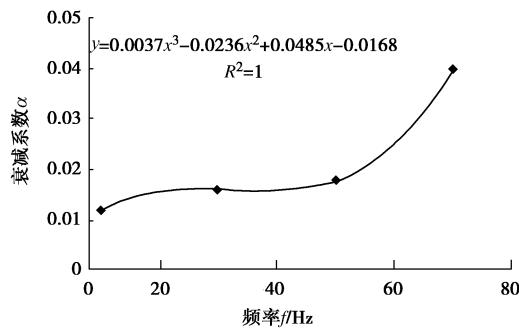


图 14 衰减系数随频率变化曲线

Fig. 14 Change of attenuation coefficient with frequency

(3) 品质因子

利用前述的品质因子的概念，针对絮渣的岩体 Q 值进行计算，所得结果见表 7。

表 7 品质因子计算结果

Table 7 Results of Q value

频率范围	品质因子
0~20	1.555
20~40	2.325
40~60	4.175
60~80	1.858
平均值	2.478

4 结 论

通过深部复杂采空区岩体和上部絮渣岩体爆破应力波试验及数据分析，得出了以下 4 点结论。

(1) 深部复杂采空区岩体中应力波的平均传播速度为 5136.1 m/s，上部絮渣岩体中应力波的平均传播速度为 3398.8 m/s，明显出现了两个层状波速模型，这为微震监测技术应用，特别是微震定位研究提供了重要参数。

(2) 随着应力波传播距离的增加，应力波能量逐渐减小，应力波振幅在数值上呈乘幂衰减，在深部复杂采空区岩体和上部絮渣岩体中的衰减指数分别为 0.5279 和 2.1083，可见絮渣对应力波的传播影响比采空区大的多；应力波衰减系数和频率成正比关系，衰减系数和应力波频率在数值上呈三次多项式关系，高频成分的应力波衰减更为明显。

(3) 深部复杂采空区岩体的平均品质因子为 4.055，上部絮渣岩体平均品质因子为 2.478，可知含复杂采空区岩体和絮渣岩体品质因子远小于一般原岩的岩体品质因子，说明复杂采空区和絮渣的存在对应力波的传播有极大影响。

(4) 波速、应力波衰减系数和岩体品质因子可以为微震监测技术的后续应用研究做理论参考，这些指标随时间的动态变化量在一定程度上还反应岩体内部的变化程度，可以作为评价岩体完整性的参考指标。

参 考 文 献：

- [1] 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): 3613 - 3620. (WU Wen, XU Song-lin, YANG Chun-he, et al. Testing studies on response behaviour of rock salt to impacting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3613 - 3620. (in Chinese))
- [2] 寇绍全, 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(6): 582 - 588. (KOU Shao-quan, YU Ji-lin, YANG Gen-hong. An experimental study of the stress wave propagation along a limestone bar[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1982(6): 582 - 588. (in Chinese))
- [3] 聂建新, 杨顶辉, 巴晶. 含泥质低孔渗各向异性黏弹性介质中的波频散和衰减研究[J]. 地球物理学报, 2010, 53(2): 385 - 392. (NIE Jian-xin, YANG Ding-hui, BA Jing. Velocity dispersion and attenuation of waves in low-porosity-permeability anisotropic viscoelastic media with clay[J]. Chinese J Geophys, 2010, 53(2): 385 - 392. (in Chinese))
- [4] 夏唐代, 周新民. 气饱和土体弹性波的传播特性[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2006, 5(6): 711 - 720. (XIA Tang-dai, ZHOU Xin-min. Propagation characteristics of elastic plane waves in air-saturated soils[J]. Journal of

- Southern Yangtze University (Natural Science Edition), 2006, 5(6): 711 - 720. (in Chinese))
- [5] 王大兴, 辛可锋, 李幼铭, 等. 地层条件下砂岩含水饱和度对波速及衰减影响的实验研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(3): 908 - 914. (WANG Da-xing, XIN Ke-feng, LI You-ming, et al. An experimental study of influence of water saturation on velocity and attenuation in sandstone under stratum conditions[J]. Chinese J Geophys, 2006, 49(3): 908 - 914. (in Chinese))
- [6] 杜启振, 孔丽云, 韩世春. 裂缝诱导各向异性双孔隙介质波场传播特征[J]. 地球物理学报, 2009, 52(4): 1049 - 1058. (DU Qi-zhen, KONG Li-yun, HAN Shi-chun. Wavefield propagation characteristics in the fracture-induced anisotropic double -porosity medium[J]. Chinese J Geophys, 2009, 52(4): 1049 - 1058. (in Chinese))
- [7] 宋林, 邵珠山, 吴敏哲. 应力波在节理岩体中的传播特性探析[J]. 煤炭学报, 2011, 36(增刊 2): 241 - 246. (SONG Lin, SHAO Zhu-shan, WU Min-zhe. Theoretical analysis on propagation characteristic of stress waves in jointed rock[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S2): 241 - 246. (in Chinese))
- [8] 黄玉龙, 郑斯华, 刘杰, 等. 广东地区地震动衰减和场地响应的研究[J]. 地球物理学报, 2003, 46(1): 54 - 61. (HUANG Y L, ZHENG S H, LIU J, et al. Attenuation of ground motion and site response in Guangdong region[J]. Chinese J Geophys, 2003, 46(1): 54 - 61. (in Chinese))
- [9] 裴顺平, 刘杰, 马宏生, 等. 川滇地区横波Q值动态变化[J]. 地球物理学报, 2010, 53(7): 1639 - 1652. (PEI Shun-ping, LIU Jie, MA Hong-sheng, et al. Dynamic variation of S-wave Q value beneath Sichuan-Yunnan, China[J]. Chinese J Geophys, 2010, 53(7): 1639 - 1652. (in Chinese))
- [10] HASEGAWA H. Attenuation of ground motion in the Canada shield[J]. Bull Seism Soc Am, 1985, 75(6): 1569 - 1582.
- [11] BURGER R, SOMERVILLE P, BARKER J, et al. The effect of crustal structure on strong ground motion attenuation relations in eastern North America[J]. Bull Seism Soc Am, 1987, 77(2): 420 - 430.
- [12] 叶根喜, 姜福兴, 郭延华, 等. 煤矿深部采场爆破地震波传播规律的微震原位试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 1053 - 1058. (YE Gen-xi, JIANG Fu-xing, GUO Yan-hua, et al. Experimental research on seismic wave attenuation by field microseismic monitoring in a deep coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 1053 - 1058. (in Chinese))
- [13] 高明仕, 窦林名, 张农, 等. 岩土介质中冲击震动波传播规律的微震试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1365 - 1371. (GAO Min-shi, DOU Lin-ming, ZHANG Nong, et al. Experimental study on earthquake tremor for transmitting law of rockburst in geomaterials[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1365 - 1371. (in Chinese))
- [14] 彭府华, 程建勇, 贾宝珊, 等. 洛钼三道庄露天矿D采区多通道微震监测可行性研究[J]. 采矿技术, 2013, 13(1): 33 - 36. (PENG Fu-hua, CHENG Jian-yong, JIA Bao-shan, et al. Feasibility study of the multichannel microseismic monitoring in Luomu open pit mine D Area[J]. Mining Technology, 2013, 13(1): 33 - 36. (in Chinese))
- [15] AKI K, RICHARDS P G. Quantitative seismology theory and methods (Vol 1) [M]. New York: W H Freeman and Company, 1980.
- [16] 张宵, 李术才, 张庆松, 等. 大型地下含水体对地震波特殊发射规律的现场正演试验研究[J]. 地球物理学报, 2011, 54(5): 1367 - 1374. (ZHANG Xiao, LI Shu-cai, ZHANG Qing-song, et al. Field-testing study on seismic reflection response of large-scale underground water-bearing body[J]. Chinese J Geophys, 2011, 54(5): 1367 - 1374. (in Chinese))
- [17] 王辉. 用于岩体质量评价的地震波Q值计算方法[J]. 工程地质学报, 2006, 14(5): 699 - 702. (WANG Hui. Computational methods of seismic Q values for evaluation of rock mass quality[J]. Journal of Engineering Geophy, 2006, 14(5): 699 - 702. (in Chinese))
- [18] 汪素云, 裴顺平, 许忠淮, 等. 利用M1振幅研究地壳横波Q值 I : 不同构造区的衰减特征[J]. 地球物理学报, 2007, 50(6): 1740 - 1747. (WANG Su-yun, PEI Shun-ping, XU Zhong-huai, et al. Crustal S-wave Q estimated from M1 amplitude I : Attenuation in different tectonic regions of China[J]. Chinese J Geophys, 2007, 50(6): 1740 - 1747. (in Chinese))