

岩体爆破累积损伤效应声波频谱特征分析^{*}

闫长斌¹, 路晓明²

(1. 郑州大学 土木工程学院, 郑州 450001; 2. 郑州科技学院 土木建筑工程学院, 郑州 450064)

摘要:为揭示岩体爆破损伤累积扩展规律及其与岩体声学变化特性之间的内在联系,在某地下工程围岩中进行了10次小药量爆破岩体损伤的现场声波测试。为充分利用岩体声波测试信号中的有效信息,弥补单纯声波速度分析的不足,基于快速傅立叶变换(FFT)探讨了声波在爆破损伤岩体中传播时的衰减特性,分析了主频、频域内最大振幅等岩体声学参数随爆破次数不断增加的变化特性。研究表明,随着爆破次数增加,岩体声波频谱特征呈现如下变化规律:(1)岩体爆生裂隙不断增加和扩展,声波测试信号中的高频成分不断被吸收,低频成分所占比例增加,主频向低频方向偏移,频谱曲线畸变程度增加;(2)声波主频比和频域最大振幅比均呈非线性降低趋势,频域最大振幅比对岩体爆破损伤的敏感性高于声波主频比;(3)随着爆心距的增大,岩体声波频谱变化程度逐渐减弱。

关键词: 爆破损伤; 累积效应; 声波测试; 频谱特征; 快速傅立叶变换

中图分类号: TD235; TU459 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-0836(2017)02-0499-07

Analysis on Acoustic Frequency Spectrum Characters of Rock Mass Blasting Cumulative Damage Effects

Yan Changbin¹, Lu Xiaoming²

(1. School of civil engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450003, P.R. China; 2. School of civil engineering and Architecture, Zhengzhou University of Science and Technology, Zhengzhou 450064, P.R. China)

Abstract: In order to reveal the cumulative extension law of rock mass blasting damage and the internal relation between blasting cumulative damage effect and acoustic variation characters, in-situ acoustic measurement of rock mass damage caused by little charge blasting for ten times was carried out in surrounding rock of a undergrounding engineering. In order to make best use of the effective information of rock mass acoustic signals and remedy the shortage of simple acoustic velocity analysis, the attenuation characteristics of acoustic wave propagating in rock mass with blasting damage were discussed based on Fast Fourier Transform (FFT). The variation characters of rock mass acoustic parameters such as basic frequency and the maximum amplitude in frequency domain were analyzed with the increasing of blasting time. Research results show that the high frequency components of acoustic signals are absorbed gradually with the increasing and extension of blasting cracks in rock mass, and the proportion of low frequency components grows up constantly. At the same time, there is a shift to the direction of low frequency for basic frequency, and the distortion of frequency spectrum curves is bigger. There is a non-linear decline for both basic frequency ratio and the maximum amplitude ratio in frequency domain, while the latter is more sensitive to blasting damage than the former. The variability of rock mass frequency spectrum becomes weakening with the increasing of distance from blasting center.

Keywords: blasting damage; cumulative effect; acoustic measurement; frequency spectrum characters; Fast Fourier Transform

* 收稿日期: 2016-10-09(修改稿)

作者简介: 闫长斌(1979-), 男, 河南台前人, 博士, 副教授, 主要从事岩石力学与工程方面的研究工作。

E-mail: yanchangbin_2001@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(U1504523); 河南省高等学校重点科研项目(15A410001)

0 引言

声波在岩体介质传播过程中,携带出极其丰富的信息,这些声学信息是岩体内部结构特征的综合反映^[1]。目前,从岩体声波测试信号中获取有用声学参数的途径主要有两种^[2-3]:一是从声波时域信号中获取声速(声波首波波速)、声波衰减系数(声波首波振幅衰减)及声波时域最大振幅等声学参数。二是从声波频域信号中获取主频率、频域最大振幅及能量等声学参数。理论和实践表明,岩体爆破损伤可以通过岩体声速变化反映出来,应用声波速度变化特性研究岩体爆破损伤及其累积效应是一种有效的方法^[4-7]。国内外学者运用声波探测技术研究岩体爆破损伤、岩体质量分级、岩体动力参数测定等许多问题时也主要是利用了声波速度变化特性。

实际上,声波作为一种信息载体,在传播过程中携带了与岩体力学性质、完整性以及损伤特性等相关的各种信息,声波测试所获得的岩体声速变化特性只是反映岩体爆破损伤的其中一个指标,单纯的岩体声速测试和分析将会丢失许多有用信息。鉴于此,在开展岩体声速研究的同时,许多学者开始关注声波衰减理论与试验研究^[8-9],并努力寻求声波频域信号变化特征与岩体力学性质和爆破损伤特性之间的内在联系。然而,岩体声波衰减理论与频谱特性研究还存在许多不足,岩体声波衰减与频谱特性研究成果远不如岩体声速研究成果丰富^[1]。研究发现^[10-11],声波频谱特性(波形、主频与能量等)与岩体动态损伤存在较好的一致性,声波频谱特性是可以反映岩体爆破累积损伤程度与范围的另一个不可多得的声学指标。有研究表明^[9,11-12],声谱特征反映了岩体损伤破坏过程中裂隙产生、发展直至破裂的全过程,声谱特征值的变化幅度比声速变化大得多,敏感得多^[13],尤其是主频和能量的变化,对岩体损伤特性特别灵敏。声谱作为岩体声波测试中的重要动力学参数之一,在评价岩体爆破损伤及其累积效应方面无疑具有重要的理论和实际意义。对声波测试信号进行频谱分析,弥补了单纯声速分析的不足,可以得到更多、更有效的信息。

在开展小药量爆破岩体损伤现场声波测试研究的基础上,探讨了声波测试信号在爆破损伤岩体中传播时的衰减特性,重点分析了主频、频域内最大振幅等岩体声波频谱参数随爆破次数不断增加

的变化特性。研究成果对于深度揭示多次爆破作用下岩体爆破累积损伤效应具有重要意义,同时进一步丰富和完善了岩体声学理论研究及其应用。

1 岩体爆破累积损伤效应声波测试

1.1 试验点布置与测试仪器

试验地点为厂坝铅锌矿李家沟矿区 1 202 m 水平 73-75 勘探线之间的某巷道(图 1)。岩性为灰色似层状大理岩,岩层倾向 197°,倾角 75°~85°;岩石坚硬,弱~微风化,节理裂隙不发育。

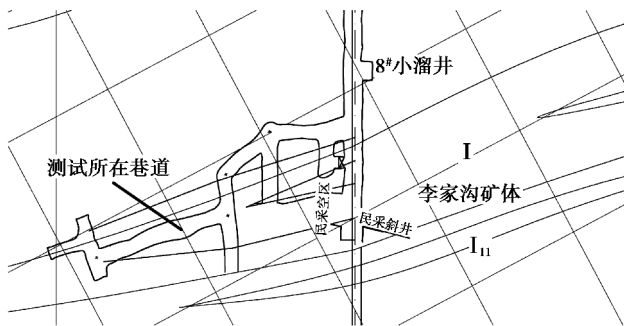


图 1 试验点所在位置平面图

Fig.1 Location of testing points

声波测试孔和爆破孔均布置在巷道一侧的边墙上。本次测试共有 9 个测试孔和 1 个爆破孔。为测试方便,所有钻孔均水平向下倾斜 5°,所有钻孔保持平行,钻孔位置情况如图 2。为满足钻孔深度要求,所有钻孔均采用 YGZ-90 型中深孔凿岩机施工,钻孔深度均为 4.90~5.00 m,钻孔孔径均为 $\phi 60$ mm。测试仪器选用中科智创岩土技术有限公司的 RSM-SY5 智能型声波仪。

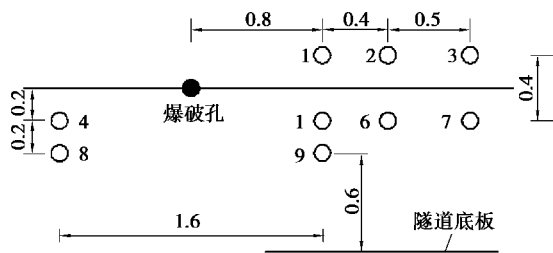


图 2 钻孔位置示意图(单位:m)

Fig.2 Sketch of drilling position(unit: m)

1.2 模拟爆破与声波测试过程

试验研究采用小药量模拟爆破的声波测试,共进行了 10 次爆破。10 次模拟爆破均在爆破孔中进行。声波测试方法采用跨孔测试方式,测试过程中发射探头始终与接收探头保持平行。施工过程中 7#测试孔和 2#测试孔在孔底部贯通,二者之间

存在局部破碎带。在声波测试时,7#孔和2#孔作废。测试剖面线共5条,编号分别为4-5,8-9,1-5,1-6和3-6,如图2所示。测试时,先用塑料软管把即将进行测试的2个钻孔注满水,然后把换能器插到孔底。完成测试参数设置,测试开始以后,将2个声波换能器从测试孔底部开始逐渐同步向孔口移动,每次移动距离为0.20 m。

2 岩体爆破累积损伤效应声波测试信号频谱变化特征

2.1 声波测试信号快速傅里叶分析(FFT)

傅立叶(Fourier)变换是声波信号频谱分析最常用的方法之一。简文彬等^[14]利用FFT方法,对某地下工程围岩声波测试信号进行了频谱分析,通过比较完整岩石和地下工程岩体声波测试信号之间的频谱差异,判断了岩体质量的好坏。赫建明等^[15]采用室内模型实验方法测定了爆炸加载前后试件声波信号,分析得到了声速、波幅及频率的变化规律,计算得到了岩石爆破损伤指标。杨军等^[16]进行了岩石冲击损伤超声波实验,利用FFT方法,分析了频谱特征与岩石损伤之间的关系。

傅立叶级数和傅立叶积分可广义地统称为傅立叶变换,傅立叶分析是建立在傅立叶级数和傅立叶积分这两种计算方法基础上的。对于已知的一些函数,可通过傅立叶级数和积分给出解析解,但对于实测的声波波形记录曲线,一般不能写出精确的数学函数关系式。声波测试信号是离散数字信号,是一系列的离散数值序列 $\{X_0, X_1, X_2, \dots, X_n, \dots\}$,对此有限的离散数值序列 $\{X_n\}$ 进行傅利叶变换,称为有限离散傅利叶变换(DFT)。

设样本(一个波形)长度为 T ,采样间隔 Δt ,采样点数为 $N(N$ 一般取偶数),设 $N=16$,则 N 个采样点的数值构成离散值序列:

$$\{X_m x(m\Delta t) [m = 0, 1, 2, \dots, (N - 1)]\} \quad (1)$$

式中, m 号采样点处的时刻 $t_k = m\Delta t$,该时刻的数据为 $X_m = x(m\Delta t)$,于是就可得到在区间 $[0, T]$ 内 $x(t)$ 的有限傅利叶级数。

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{N/2} a_k \cos \frac{2km\pi}{N}t + \sum_{k=1}^{(N/2)-1} b_k \sin \frac{2km\pi}{N}t \quad (3)$$

式中,傅利叶系数 a_k, b_k 分别为:

$$\begin{cases} a_k = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m \cos \frac{2km\pi}{N} \\ b_k = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m \sin \frac{2km\pi}{N} \end{cases} \quad (4)$$

式中,与 a_k 对应的 $k=0, 1, 2, \dots, (N/2)$;与 b_k 对应的 $k=0, 1, 2, \dots, [(N/2)-1]$ 。

离散傅立叶变换解决了在计算机上实现傅立叶变换的问题,但运算量很大,特别是在计算点数较多时更为突出。如不能解决快速算法,DFT仍然是不实用的。为此,1965年柯立(Cooley J W)和杜开(Tukey)提出了DFT的快速算法,并编制了相应的计算程序,后来称之为快速傅利叶变换(FFT)。快速傅利叶变换(FFT)不是一种新的理论,而是计算有限傅利叶变换的快速方法。

2.2 声波测试信号的典型频谱曲线

大量研究表明^[16-18]:在应力和变形达到极限程度之前,岩体损伤程度、疲劳裂纹扩展与动应力大小、主频大小、爆破作用次数以及岩体特性等因素有关。利用岩体声学特性揭示爆破损伤及其累积过程,不仅可以在时域内分析岩体声速、波形参数随爆破次数增加的变化规律,还可以从频域内分析主频、频域内最大振幅等岩体声学参数随爆破次数增加的变化特性。声波脉冲穿过岩体时,由于岩体介质的非均质性和各向异性特点,导致接收到的声波能量发生衰减,声波频谱曲线发生畸变。随着爆破次数的不断增加,岩体中裂纹数量逐渐增加,裂纹规模不断增大,岩体声波发生反射、折射和散射的次数亦随之增加,从而导致声波传播路径逐渐延长,声波速度降低,声波能量衰减程度亦不断增加;随着爆破次数的增加,岩体损伤程度不断加剧,岩体完整性逐渐降低。岩体裂纹等结构面起到低通滤波器作用,声波中的高频成分逐渐被吸收,低频成分所占比例增加,主频向低频方向偏移,频谱曲线畸变程度增加。10次模拟爆破后,通过傅立叶变换得到岩体声波测试信号的主频 f_0 、频域最大振幅 $A_{f,\max}$ 如表1、表2,典型曲线如图3所示。

从表1、表2和图3中可看出,爆破前后剖面4-5的频谱曲线有明显变化,并且随着爆破次数的增加,主频和频域最大振幅逐渐变小,能量逐渐被吸收。爆破前4.8 m孔深处剖面4-5的声波主频为43.496 kHz,频域最大振幅为230.074 mV;经过10次模拟爆破后,其主频变为23.362 kHz,频域最大振幅为80.923 mV;爆破前后,剖面1-5、1-6的频谱曲线也呈现出类似的变化规律,但声波主频和频域最大振幅的变化程度有所减轻。这与岩体各向异性和爆心距的大小有关,距离爆源越远,岩体损伤程度越轻,声波频谱参数受到的影响越小,与爆破前相比变化程度越小。

表 1 10 次爆破后声波测试信号主频变化规律

Table 1 Variation law of acoustic signals basic frequency after ten times blasting

剖面编号	孔深 位置/m	声波主频/kHz										
		爆破前	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次
4-5	4.8	43.5	42.87	42.11	41.73	42.16	41.99	39.89	37.29	34.38	28.56	23.36
	4.6	43.19	43.67	42.95	42.5	41.56	40.89	39.09	38.33	35.04	29.92	24.06
	4.4	44.21	43.58	43.13	41.29	40.1	40.33	38.96	38.64	36.12	28.87	25.14
8-9	4.8	47.11	48.16	46.5	43.76	42.63	41.35	40.69	38.5	36.17	30.75	25.88
	4.6	48.314	49.92	47.47	43.69	42.59	41.28	41.96	40.76	38.59	32.13	27.36
	4.4	48.66	50.85	49.52	46.22	43.65	41.99	40.34	38.79	37.19	32.93	28.46
1-5	4.8	31.2	30.25	29.39	29.39	29.42	29.29	28.96	28.54	28.2	26.36	24.67
	4.6	31.82	31.35	31.02	30.39	30.12	29.86	29.26	28.95	28.52	27.03	25.16
	4.4	31.03	30.22	30.02	30.56	30.24	29.47	28.58	29.02	28.95	26.24	24.88
1-6	4.8	37.62	36.84	37.01	36.25	36.37	35.95	36.16	35.74	35.25	33.85	32.47
	4.6	37.9	36.43	38.23	37.35	36.86	36.28	35.08	36.14	35.58	34.14	33.61
	4.4	38.04	37.63	38.14	37.88	37.36	37.21	37.79	36.42	36.05	33.94	32.82
3-6	4.8	35.16	35.64	36.13	35.95	35.64	35.31	35.31	35.43	35.05	34.33	35.01
	4.6	35.02	35.52	34.41	36.32	35.87	35.39	35.18	34.86	34.65	34.12	34.92
	4.4	35.75	36.26	36.42	36.22	35.81	36.42	37.01	36.91	36.23	35.82	34.92

表 2 10 次爆破后声波测试信号频域最大振幅变化规律

Table 2 Variation law of the maximum amplitude of acoustic signals in frequency domain after ten times blasting

剖面编号	孔深 位置/m	频域最大振幅/mV										
		爆破前	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次
4-5	4.8	230.074	184.333	133.724	129.694	125.995	103.763	101.635	94.3479	89.8454	80.9229	80.9229
	4.6	185.605	160.186	141.528	136.197	131.48	129.78	128.278	122.735	121.413	112.909	92.1883
	4.4	208.206	183.19	155.529	150.361	146.478	133.797	125.121	109.851	104.082	86.3464	64.6868
8-9	4.8	204.641	169.41	163.223	151.784	145.259	123.937	123.047	117.4	112.196	86.6023	72.7363
	4.6	204.641	174.13	154.598	153.286	130.843	120.303	117.672	110.071	92.2728	75.8655	70.0383
	4.4	231.621	227.178	206.893	182.667	167.221	163.221	152.294	114.101	107.111	84.0624	72.4038
1-5	4.8	203.258	195.72	184.648	173.703	160.449	142.741	137.347	124.398	121.972	108.593	93.8347
	4.6	198.089	184.091	182.082	172.272	165.077	163.757	157.907	137.966	123.883	114.51	96.7057
	4.4	201.88	198.38	182.959	175.348	165.931	154.329	149.227	139.604	132.859	101.494	94.1534
1-6	4.8	214.609	208.341	199.225	191.965	187.973	181.266	176.202	172.915	168.525	151.494	134.153
	4.6	185.082	183.631	177.554	171.762	167.734	163.542	156.251	152.762	148.267	133.856	118.593
	4.4	162.173	160.932	155.34	153.476	147.986	144.001	138.863	132.273	128.798	106.977	95.2852
3-6	4.8	139.36	135.208	136.224	138.98	137.717	133.802	136.454	139.469	132.534	139.565	136.285
	4.6	160.041	159.097	161.261	156.139	153.245	157.885	163.602	162.681	158.878	156.274	157.669
	4.4	154.802	153.541	155.179	151.717	153.463	154.098	152.878	156.662	154.794	151.979	152.548

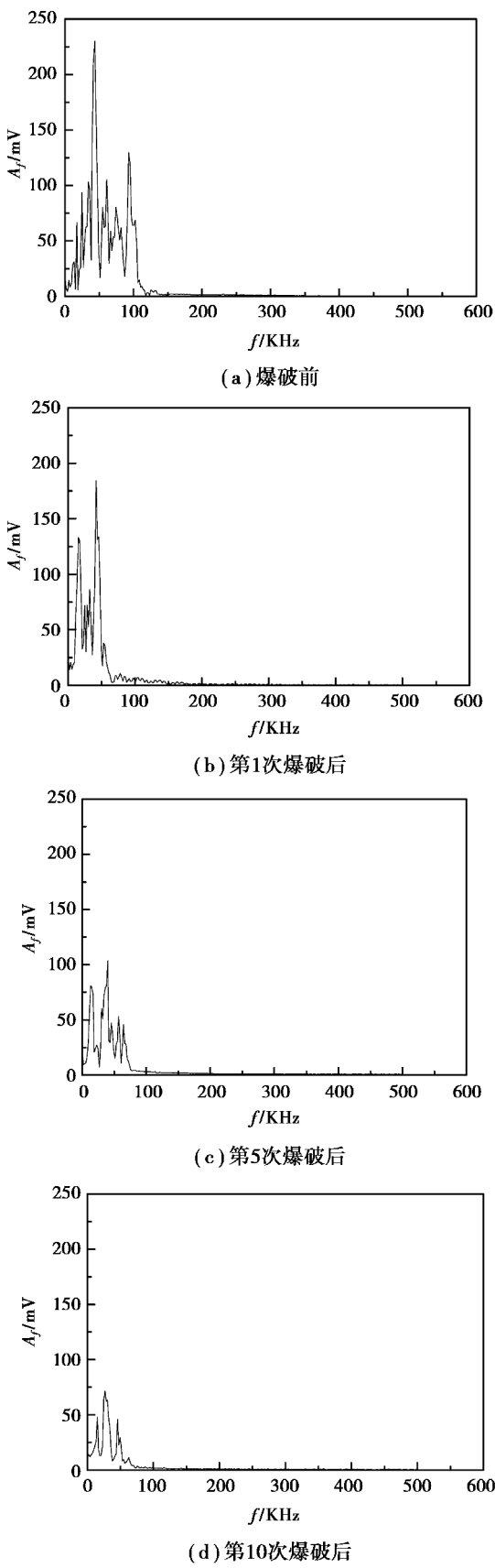


图 3 4.8 m 孔深处 4-5 剖面声波频谱
Fig.3 Acoustic frequency spectrum of section 4-5 at 4.8 m

另外,由于岩体的各向异性特征,爆破前剖面 4-5、8-9 与剖面 1-5、1-6、3-6 的声波主频存在一定差异。例如,爆破前 4.8 m 孔深处剖面 4-5 的声波主频为 43.496 kHz,而爆破前 4.8 m 孔深处剖面 1-5 的声波主频仅为 31.203 kHz。爆破前后以及随着爆破次数的增加,剖面 3-6 的频谱曲线几乎没有发生变化,原因是剖面 3-6 与爆源之间的距离较大,岩体基本上没有受到爆破的影响。

2.3 主频比和频域最大振幅比变化特征

对表 1 中的声波测试信号主频 f_0 以及表 2 中的频域最大振幅 $A_{f,max}$ 进行归一化处理,可以得到主频比和频域最大振幅比变化规律。主频比 $\bar{f}_0 = f_{0,i}/f_{0,0}$ ($i=0,1,2\cdots,10$),其中 $f_{0,i}$ 为第 i 次爆破后的声波测试信号主频, $f_{0,0}$ 为爆破前的声波测试信号主频;频域最大振幅比 $\bar{A}_{f,max} = A_{f,max}^i/A_{f,max}^0$ ($i=0,1,2\cdots,10$),其中 $A_{f,max}^i$ 为第 i 次爆破后的声波测试信号的频域最大振幅, $A_{f,max}^0$ 为爆破前的声波测试信号的频域最大振幅。 $\bar{n}=i/N$ ($i=0,1,2\cdots,10$),其中 N 为总爆破次数。经归一化处理后,可得 $\bar{f}_0-\bar{n}, \bar{A}_{f,max}-\bar{n}$ 关系曲线,如图 4、图 5 所示。

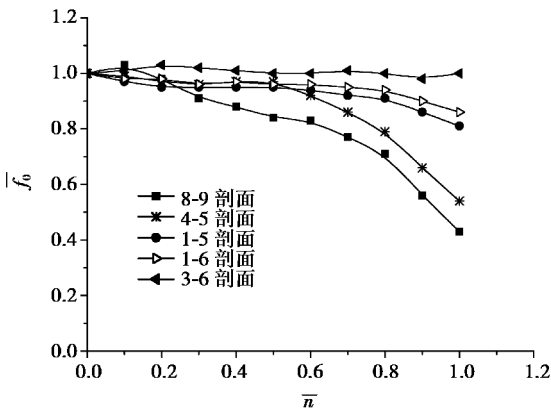


图 4 4.8 m 孔深处各剖面声波主频比变化
Fig.4 Variation law of acoustic signals basic frequency of all sections at 4.8 m

从图 4、图 5 可看出:

- (1) 随着爆破次数的不断增加,剖面 4-5、8-9、1-5、1-6 的声波主频比和频域最大振幅比均呈非线性降低趋势。
- (2) 随着爆心距的增大,这种降低趋势逐渐减弱。对于剖面 3-6 来说,其声波主频比变化曲线和频域最大振幅比变化曲线接近水平直线,几乎没有发生变化。

(3) 尽管声波主频和频域最大振幅只能反映声波测试信号频谱特性变化的局部特征,但二者对爆破次数的灵敏程度不同。随着爆破次数的不断增加,频域最大振幅比的降低程度大于同等条件下的声波主频比的降低程度。对比图 4 和图 5 不难发现,频域最大振幅比的最小值小于 0.40,而声波主频比的最小值大于 0.40。另外,剖面 1-5 的频域最大振幅比降低程度明显大于声波主频比降低程度。

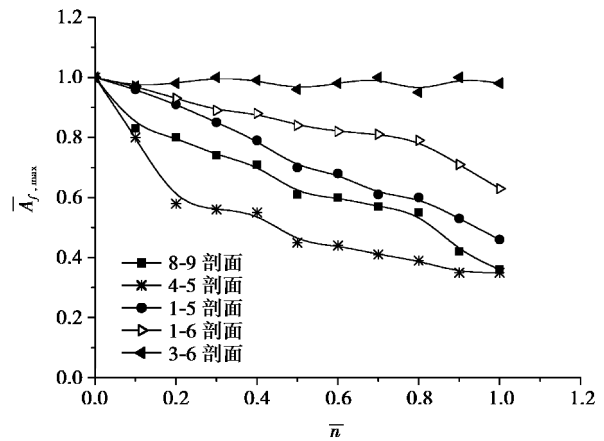


图 5 孔深 4.8 m 处各剖面声波频域最大振幅比变化
Fig.5 Variation law of acoustic signals maximum amplitude in frequency domain of all sections at 4.8 m

3 结论

为揭示岩体爆破损伤累积扩展规律及其与岩体声学变化特性之间的内在联系,充分利用岩体声波测试信号中的有效信息,弥补单纯声波速度分析的不足,在 10 次小药量模拟爆破岩体损伤现场声波测试的基础上,利用快速傅立叶变换(FFT)分析了声波测试信号的主频、频域内最大振幅等岩体声学参数随爆破次数不断增加的变化特性。

(1) 随着爆破次数的增加,岩体内的爆生裂隙不断增加和扩展,声波测试信号中的高频成分不断被吸收,低频成分所占比例增加,主频向低频方向偏移,频谱曲线畸变程度增加。

(2) 随着爆破次数的不断增加,声波主频比和频域最大振幅比均呈非线性降低趋势。

(3) 频域内最大振幅比对爆破损伤累积的敏感性高于同等条件下的声波主频比。

(4) 随着爆心距的增大,岩体声波测试信号的频谱参数变化程度逐渐减弱。

参考文献 (References)

[1] 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):79-86.(Zhao Mingjie, Xu Rong. The present situation and prospect of the acoustic properties research in rock [J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute, 2000, 19(2): 79-86. (in Chinese))

[2] Valdeon L, Freitas M H D, King M S. Assessment of the quality of building stones using signal processing procedures [J]. Quarterly Journal of Geophysical Research, 1996, 29(4): 299-308.

[3] Meglis I L, Chow T M, Martin C D. Assessing in situ microcrack damage using ultrasonic velocity tomography [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2005, 42(1): 25-34.

[4] 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 Changbin, Xu Guoyuan, 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. (in Chinese))

[5] 闫长斌,王贵军,石守亮,等. 岩体爆破损伤声波测试信号频谱特征的小波(包)分析[J].岩石力学与工程学报,2010,29(7): 1496-1502. (Yan Changbin, Wang Guijun, Shi Shouliang, et al. Analysis on the acoustic wave frequency spectrum characters of rock mass under blasting damage based on wavelet (packet) transformation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(7): 1496-1502. (in Chinese))

[6] Yang R T, Rocque P, Katsabanis P. Measurement and analysis of near-field blast vibration and damage [J]. Geotechnical & Geological Engineering, 1994, 12(3): 1699-182.

[7] 熊健,梁利喜,刘向君,等. 川南地区龙马溪组页岩岩石声波透射实验研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(5): 1071-1077. (Xiong Jian, Liang Xiangxi, Liu Xiangjun, et al. Experimental study on acoustic penetration through the Longmaxi formation shale rock in south region of Sichuan Basin [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(5): 1071-1077. (in Chinese))

[8] 李锡润.岩体声波衰减测量方法的研究[J].煤炭学报,1997,22(4): 385-388. (Li Xirun. Study on measure

- method of acoustic wave attenuation in mine rock mass [J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(4): 385-388. (in Chinese))
- [9] Butt S D, Mukherjee C, Lebars G. Evaluation of acoustic attenuation as an indicator of roof stability in advancing headings [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2001, 37(10): 1123-1131.
- [10] 陈达力.岩石超声谱测试技术[J].岩石力学与工程学报, 1993, 13(1): 59-68. (Chen Dali. Rock ultrasonic spectrum measurement technology [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, 13(1): 59-68. (in Chinese))
- [11] 王让甲.声波岩石分级和岩石动弹性力学参数的分析研究[M].北京:地质出版社, 1997. (Wang Rangjia. Analysis on rock classification and dynamic elastic mechanics parameters by acoustic wave [M]. Beijing: Geology Press, 1997. (in Chinese))
- [12] 陈枫, 孙宗颀, 徐纪成.岩石压剪断裂过程中的超声波谱特性研究[J].工程地质学报, 2000, 8(2): 164-168. (Chen Feng, Sun Zongqi, Xu Jicheng. Study on the ultrasonic wave spectrum in cracked rock specimen on compressive-shear loading [J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(2): 164-168. (in Chinese))
- [13] Best A I, McCann C, Sothcott J. The relationships between the velocities, attenuations and petrochemical properties of reservoir sedimentary rocks [J]. Geophysical Prospecting, 1994, 42(2): 151-178.
- [14] 简文彬, 吴振祥, 邓鼎兴.某地下工程围岩的声波频谱特性[J].岩土力学, 2003, 24(增1): 623-626. (Jian Wenbin, Wu Zhenxiang, Deng Dingxing. On the character of frequency spectrum for an underground engineering wall rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(Supp.1): 623-626. (in Chinese))
- [15] 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 College of Science and Technology, 2004, 24(1): 49-52. (in Chinese))
- [16] 杨军, 金乾坤, 黄风雷.岩石爆破理论模型及数值计算[M].北京:科学出版社, 1999. (Yang Jun, Jin Qiankun, Huang Fenglei. Theoretical models and numerical calculation of rock blasting [M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese))
- [17] 闫长斌, 王贵军, 王泉伟, 等.岩体爆破累积损伤效应及其动力失稳机制研究[M].郑州:黄河水利出版社, 2011. (Yan Changbin, Wang Guijun, Wang Quanwei, et al. Study on cumulative damage effect of rock burst and its dynamic instability mechanism [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2011. (in Chinese))
- [18] 闫长斌, 李国权, 陈东亮, 等.基于岩体爆破累积损伤效应的 Hoek-Brown 准则修正公式[J].岩土力学, 2011, 32(10): 2951-2957. (Yan Changbin, Li Guoquan, Chen Dongliang, et al. Amended expressions of Hoek-Brown criterion based on blasting cumulative damage effects of rock mass [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 2951-2957. (in Chinese))