

某煤矿岩巷不同爆破方式振动特性研究*

汪海波, 彭恒, 宗琦

(安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要:通过对煤矿坚硬岩石巷道爆破振动监测, 基于萨道夫斯基公式, 回归得到巷道掘进爆破和深孔松动爆破振动速度衰减规律, 并采用小波包变换和 HHT 变换对两种爆破方式的地震波能量分布特征进行了对比分析。研究表明: 在试验煤矿深部地层中, 采用浅孔和分散装药的巷道掘进爆破地震波主振频率高, 主要集中在 150~250 Hz; 集中装药的深孔松动爆破地震波主振频率低, 集中在 40~80 Hz; 硬岩中巷道掘进爆破振动速度衰减规律符合软岩特征, 而深孔松动爆破与硬岩一致, 深孔爆破试验起爆药量没有超出允许单段最大装药量; 低频区爆破地震波能量少, 巷道掘进爆破地震波能量主要集中在 128~277 Hz, 深孔松动爆破地震波能量主要集中在 32~64 Hz, 深孔松动爆破地震波主振频率峰值能量大, 是巷道掘进爆破的 320 倍。

关键词: 煤矿; 岩石巷道; 爆破地震; 掘进爆破; 深孔松动爆破; 衰减规律; 能量分布

中图分类号: TD235 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2018)02-0546-06

Research on Vibration Characteristics of
Different Blasting Mode in Coal Mine Rock Drift

Wang Hai-bo, Peng Heng, Zong Qi

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and
Technology, Huainan, Anhui 232001, P.R. China)

Abstract: By blast vibration monitoring and Sadaovsk formula, blasting particle vibration velocity attenuation law of heading blasting and deep-hole loosening blasting in coal mine hard rock drift is regressed, wavelet packet and HHT is used for blast seism wave energy distribution analysis of the two blasting mode. The results show that in the deep strata, heading blasting with short-hole and dispersed charge, it's blasting seism wave main vibration frequency is high, generally from 150 Hz to 250 Hz; and deep-hole loosening blasting with concentrated charge, it's blasting seism wave main vibration frequency is low, it is from 40 Hz to 80 Hz; although blasting in hard, blast particle vibration velocity attenuation law of heading blasting is belong to soft rock, and attenuation law of deep-hole loosening blasting particle vibration velocity is consistent with its rock mass, initiating charge of deep-hole loosening blasting dose not beyond the allowed maximum charge amount per delay interval; there is little blast seism wave energy in low frequency zone, seism wave energy of heading blasting is concentrated in zone of 128 to 277 Hz, deep-hole loosening blasting seism wave energy is mainly concentrated in 32 to 64 Hz, and its seism wave energy peak value is reliable high, it is 320 times of heading blasting.

Keywords: coal mine; rock drift; blast seism; heading blasting; deep-hole loosening blasting; attenuation law; energy distribution

* 收稿日期: 2017-10-25(修改稿)
作者简介: 汪海波(1983-), 男, 安徽舒城人, 博士, 副教授, 主要从事爆破与冲击动力学等领域的教学与科研工作。
E-mail: wanghb_aust@163.com
基金项目: 国家自然科学基金(51404010, 51374012); 安徽省高校自然科学研究重大项目(KJ2017ZD11); 安徽省科技攻关计划项目(1501041123)

0 引言

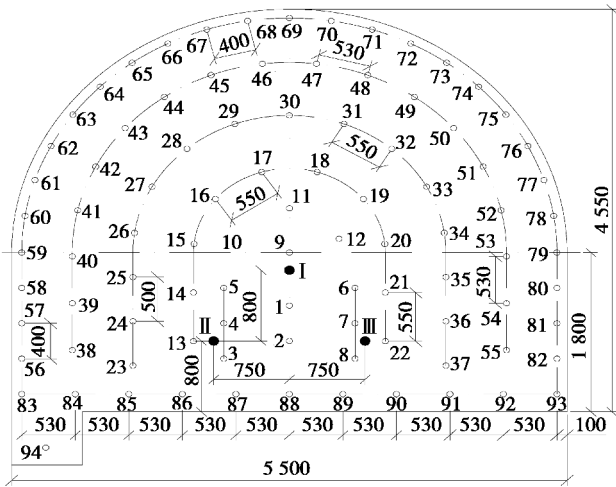
钻孔爆破是地下工程主要的施工方法,剧烈的爆破地震效应会对地下工程结构和围岩造成一定的损伤。对于爆破地震效应,目前广泛采用 M. A. 萨道夫斯基公式来表述地震波的传播衰减规律^[1],且爆破振动的破坏作用与振动强度和频率两个因素相关^[1-2]。而对于爆破振动的频谱分析,早期采用快速傅里叶变换(FFT)^[2-4],随着认识的深入,小波变换^[4-5]、小波包变换^[6]和 HHT 变换^[7-8]等方法相继用以分析爆破地震波信号。由于爆破地震波的频谱、能量分布与爆源形式密切相关,文献[9]通过现场振动监测,对隧洞掘进爆破、地下硐室爆破、露天浅孔与中深孔梯段爆破的爆破地震能量随频率分布进行分析,认为爆破地震主振能量频带随着炮孔直径与深度的增大而趋于集中,且倾向低频方向。文献[10]对台阶爆破和预裂爆破的爆破振动研究表明:爆破振动的主振频随最大单段药量或爆源距的增大而减小,相同爆心距时,预裂爆破的振动主频要高于台阶爆破。文献[11]结合实际工程,探讨了临空面对隧道爆破震动响应的影响,表明地下工程施工时,可通过合理构造临空面来降低爆破施工对既有结构的影响。在煤矿爆破地震效应研究方面,主要通过现场的爆破振动监测分析,得到爆破地震波的衰减规律^[12]、能量分布特征^[13]和爆破对围岩松动圈的影响^[14];文献[15]还采用时-能密度法识别各段雷管的起爆时刻,以确定起爆雷管的实际延迟时间。鉴于爆破振动特性受到爆源形式的影响,本文通过煤矿硬岩巷道掘进和深孔松动爆破振动监测,从爆破振动速度传播规律、主振频率和能量分布 3 个方面对比分析该两种爆破振动特征的差异,为爆破振动控制提供参考。

1 爆破方案与振动监测

1.1 爆破方案与参数

试验巷道为胶带机大巷,埋深标高为-760 m,掘进宽度为 5.50 m、掘进高度为 4.55 m,岩性主要为中性闪长岩,坚固性系数 $f=10\sim12$ 。因岩石坚硬、整体性好,掏槽爆破效率低。为提高掏槽爆破效率,设计在巷道爆破掘进前,先进行深孔松动爆

破以加强掏槽部位岩石松动、破裂。在工作面掏槽位置对称布置 3 个直径 $\phi 75\text{ mm}$ 、深度 30~40 m 炮孔,如图 1 所示。



注:○为掘进爆破炮孔,●为深孔松动爆破炮孔

图 1 炮孔布置图(单位:mm)

Fig. 1 Layout of blast hole (unit: mm)

深孔爆破,采用直径 $\phi 63\text{ mm}$ 三级煤矿许用水胶炸药药柱,单根长 1.0 m、装药 3.0 kg。爆破试验了 2 次:第 1 次孔深 30 m、装药 23 m(69 kg)、封堵 7 m;第 2 次孔深 32 m、装药 25 m(75 kg)、封堵 7 m。采用连续装药、专用封孔器和黄泥封堵;3 个炮孔一次起爆,分别用 1、3、5 段毫秒延期电雷管起爆。

掘进爆破掏槽形式为楔形掏槽,掏槽孔深度 2.4 m、直径 $\phi 40\text{ mm}$,配用 $\phi 35\text{ mm}\times 200\text{ mm}\times 240\text{ g}$ 的药卷;其余炮孔均为深度 2.2 m、直径 $\phi 32\text{ mm}$,配用 $\phi 27\text{ mm}\times 430\text{ mm}\times 300\text{ g}$ 的药卷。炮孔布置如图 1 所示。掏槽孔(图 1 中编号 1~8)、辅助掏槽孔(编号 9~22)、崩落孔(编号 23~55)和周边孔(编号 56~94)依次采用 1~5 段煤矿许用毫秒电雷管引爆,采用三级煤矿许用水胶炸药,总起爆药量 84 kg。

1.2 爆破振动监测

爆破振动选用 Blastmate Series III 振动监测仪,传感器布置在掌子面前方的巷道帮部,巷道掘进爆破时,因掌子面前堆积大量的矸石,布置在耙矸机后方;深孔松动爆破时距离 10~30 m。典型振动速度时程曲线如图 2 所示,具体爆破参数、测点距爆源距离和测试结果如表 1。

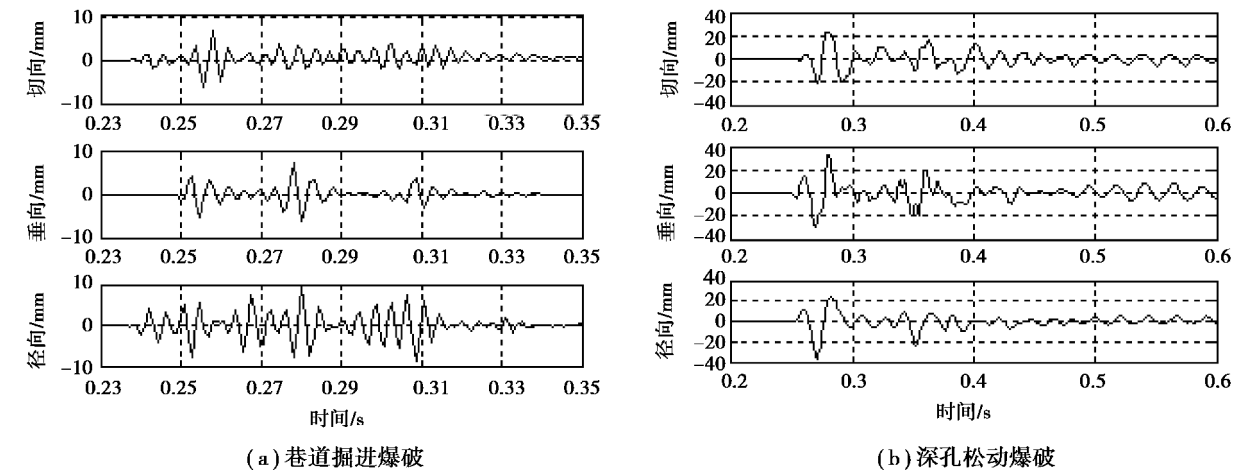


图 2 典型的爆破振动速度波形

Fig. 2 Typical waveform of blast particle vibration velocity

表 1 爆破振动测试结果

Table1 Monitoring results of blast vibration										
序号	最大单段 药量 Q/kg	距离 R/m	振动速度 $V/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$				频率 f/Hz			
			切向 T	垂直 V	径向 L	合速度	切向 T	垂直 V	径向 L	
巷道掘进 爆破	1	11.5	63.7	0.724	0.874	0.837	1.08	173	152	164
	2	13.3	60.7	0.865	0.830	0.343	1.24	160	154	206
	3	10.5	65.8	0.659	0.587	0.879	0.967	148	184	161
	4	12.8	66.5	0.668	0.617	0.985	1.05	104	211	181
	5	13.8	66.5	0.839	0.813	1.040	1.10	110	243	196
	6	13.6	72.0	0.605	0.579	0.898	0.9	119	184	69.8
	7	13.8	70.0	0.688	0.630	0.954	1.03	120	194	91.4
	8	17.4	66.2	0.878	0. 830	1.140	1.25	169	198	219
	9	15.0	66.2	0.853	0.768	0.987	1.15	250	233	231
	10	13.8	68.7	0.705	0.655	0.989	1.02	43	43	236
	11	10.8	68.0	0.530	0.598	0.267	0.94	215	250	219
	12	16.6	65.8	0.839	0.817	1.160	1.21	159	238	160
	13	15.8	71.5	0.617	0.633	1.020	1.13	189	226	160
	14	15.2	57.9	1.137	1.120	0.577	1.48	157	157	159
	15	12.28	63.7	0.832	0.746	0.984	1.10	110	243	196
深孔 松动 爆破	1	69	15.2	4.580	4.68	4.70	6.74	36	54	57
	2	69	17.6	4.270	3.44	4.55	6.17	47	63	55
	3	69	20.1	3.200	3.38	3.91	4.84	63	37	47
	4	75	21.3	4.320	3.12	3.51	5.02	66	74	51
	5	75	24.0	2.400	2.89	3.37	4.92	44	56	38
	6	75	26.5	2.170	2.16	2.40	3.47	69	82	58

注:振动速度切向 T 为爆源中心至测点连线垂直的水平方向;垂直 V 为爆源中心至测点连线垂直的铅垂方向;径向 L 为爆源中心至测点连线方向。

2 爆破振动速度衰减规律

由表 1 和图 2 可见:巷道掘进爆破由于起爆药量、分散装药和距离的关系,振动速度峰值较深孔

松动爆破振动速度峰值要小、振动持续时间要短,振动持续时间分别为 120 ms 和 400 ms。深孔松动爆破有 3 个波峰,这与实际使用雷管相吻合;而巷道掘进爆破径向速度时程曲线中可明显看到 4 个波

峰,分析认为掏槽孔药量大而辅助掏槽孔药量小(图1中编号1~8为掏槽孔,装药1.40 kg/孔;编号9~22为辅助掏槽孔,药量0.84 kg/孔),且两段雷管的延期间隔时间仅25 ms,故辅助掏槽孔波峰未能体现。在3个方向的速度分量中,水平径向速度峰值最大,占总数的73.3%和83.3%,这与文献[10]爆破振动测试结果一致。表1还表

明,巷道掘进爆破振动的主振频率较高,为100 Hz以上;而深孔爆破振动的主振频率主要集中在40~80 Hz。

采用萨道夫斯公式对表1测试结果回归分析^[1],即得到相应的振动速度衰减规律,其中衰减系数 K 和指数 α 如表2,表3为《爆破安全规程》^[1]中给出的参考值。

表2 不同爆破施工的 K 、 α 值
Table 2 K and α values of different blasting construction

参数	巷道掘进爆破				深孔松动爆破			
	切向	垂直	径向	合速度	切向	垂直	径向	合速度
K	626.17	740.1	109.65	266.07	35.48	24	24	30.9
α	2.03	2.1	1.409	1.65	1.49	1.27	1.17	1.13
相关系数	0.823	0.933	0.837	0.901	0.877	0.956	0.924	0.933

表3 不同岩石性质的 K 、 α 值^[1]
Table 3 K and α values of different rock^[1]

岩石性质	K	α
坚硬岩石	50~150	1.3~1.5
中硬岩石	150~250	1.5~1.8
软岩石	250~350	1.8~2.0

将表2和表3进行对比后发现:虽然同是坚硬岩石爆破,巷道掘进爆破衰减系数 K 、 α 值与软岩石取值相符合,而深孔松动爆破的 K 、 α 值与坚硬岩石取值一致。鉴于深孔爆破的单段最大药量比巷道掘进爆破大,仅对深孔爆破的单段最大起爆药量进行计算。试验时封堵7 m,假定爆源中心距掌子面7 m,按合速度计算的掌子面的振动速度为17.43 cm/s;而《爆破安全规程》规定矿山巷道的安全允许振速为15~30cm/s^[1],试验巷道围岩整体

性好、强度高,安全振速可取较大值,按合速度25 cm/s计算,由表2的深孔松动爆破单段最大药量为195.43 kg,相应的装药长度为65.1 m,可见试验的药量处于安全范围内。

3 爆破振动能量分布规律

爆破振动能量分析有FFT变换、小波(包)变换和HHT方法等,研究选用广泛采用的sym5小波基函数对振动信号进行小波包变换。由于测试数据较多,对振幅最大的径向分量进行分析。Blastmate SeriesⅢ振动测试仪的采样频率为1 024 Hz,根据Shannon采样定理,其奈奎斯特频率为512 Hz^[8],则可将测试信号分解为5层,即将信号按16 Hz一个频率带宽进行划分,共32个。两种爆破方式地震波能量随频带分布情况如图3所示。

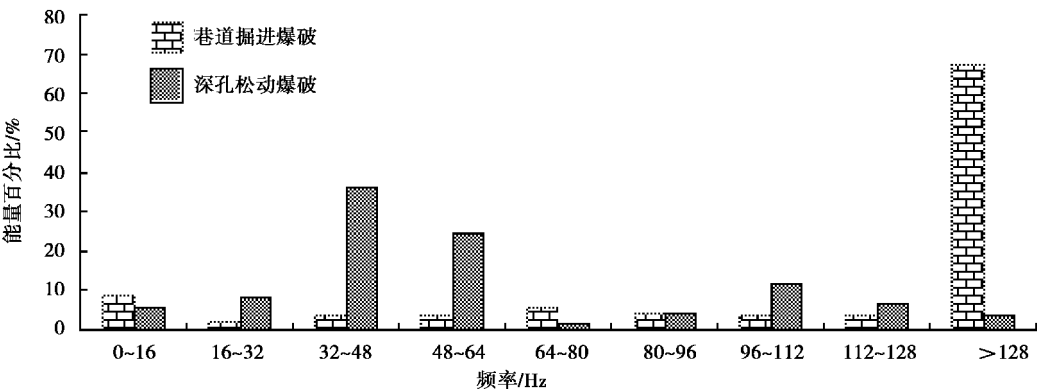


图3 爆破振动能量分布直方图
Fig. 3 Histogram of blast particle vibration energy distribution

由表2和图3对比分析,可以得到以下主要结论:

(1)两种爆破地震波16 Hz以下低频区的能量占总能量比例很小,说明爆破振动的主振频率大于巷道结构的自振频率,对硬岩巷道结构及巷道围岩稳定性振动破坏的可能性较小。

(2)虽然2种爆破试验在同一巷道进行,但2种爆破地震波能量随频率分布差异很大。因与爆破振动频率相关的参数主要是最大单段起爆药量,虽然巷道掘进爆破起爆总药量与深孔松动爆破单段最大起爆药量相差无几,但前者是分散在94个炮孔中,分5个段别起爆,后者则是3个炮孔依次起爆。巷道掘进爆破67.46%的地震波能量集中在128 Hz以上的频带,16~128 Hz间的7个频带能量均小于5%。而深孔松动爆破地震波则有60%的能量集中在32~64 Hz频带范围,16~32 Hz的能量占8.26%。低频区能量越多,爆破对巷道结构的影响程度越大。

为了更好地体现整个时程范围内爆破地震波能量在各个频率上的分布情况,利用HHT变换^[8],得到典型爆破振动信号的边际能量谱如图4所示。

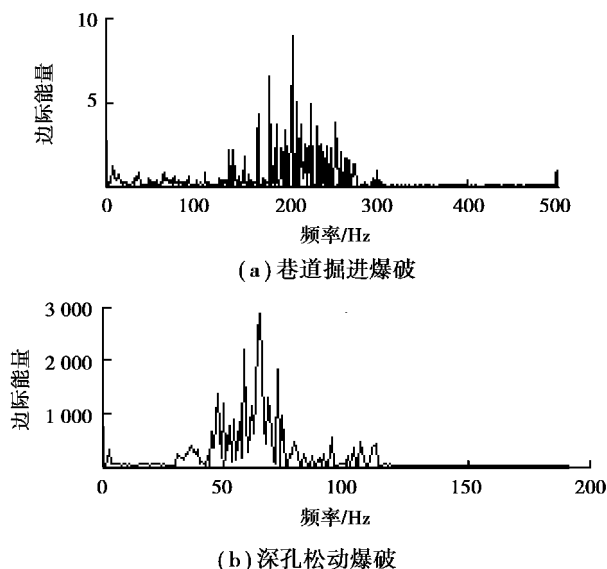


图4 爆破振动的边际能量谱

Fig. 4 Marginal energy spectrum of blast vibration

图4表明了2种爆破地震波能量在各频率上的集中程度,巷道掘进爆破能量集中在128~

277 Hz、深孔松动爆破主要集中在45~74 Hz,与前述结果基本一致;其中巷道掘进爆破能量峰值对应频率为207 Hz、深孔松动爆破为62 Hz。由图4还可看到,2种爆破地震波能量峰值相差达320倍(巷道掘进爆破为8.842、深孔爆破为2871),说明深孔松动爆破由于单段起爆药量大、地震波能量也大,应从装药结构等方面予以控制。

4 结论

(1)采用小直径浅孔、分散装药的巷道掘进爆破振动频率高,主要集中在150~250 Hz;而采用集中装药的深孔松动爆破主振频率在40~80 Hz。

(2)爆破地震波的能量分析表明,深部地层施工爆破振动0~16 Hz的低频区域能量很少,两种爆破地震波能量分布差异很大。在基本相同的工程地质条件下,巷道掘进爆破振动67.46%的能量集中在128~277 Hz频带,深孔松动爆破振动有60%的能量集中在32~64 Hz,且深孔松动爆破振动主振频率能量峰值为巷道掘进爆破的320倍,最大单段起爆药量与爆破振动的主振频率密切相关。

参考文献(References)

- [1] 国家安全生产监督管理总局. 爆破安全规程(GB 6722-2014)[S]. 北京:中国标准出版社,2014. (State administration of work safety. Safety regulations for blasting(GB 6722-2014) [S]. Beijing: China Standard Press, 2014. (in Chinese))
- [2] 郭学彬,肖正学,张继春. 爆破振动频率特性的测试与研究[J]. 中国矿业,2004,13(9):68-71. (Guo Xuebin, Xiao Zhengxue, Zhang Jichun. Testing and study of frequency specific property of blasting vibration [J]. China Mining Magazine, 2004, 13(9): 68-71. (in Chinese))
- [3] 闫长斌,路晓明. 岩体爆破累积损伤效应声波频谱特征分析[J]. 地下空间与工程学报,2017,13(2):499-505. (Yan Changbin, Lu Xiaoming. Analysis on acoustic frequency spectrum characters of rock mass blasting cumulative damage effects [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(2): 499-505. (in Chinese))

- [4] 赵明生,梁开水,余德运,等. 段数对爆破振动信号的时频特性影响分析[J]. 煤炭学报,2012,37(1):55-61. (Zhao Mingsheng, Liang Kaishui, Yu Deyun, et al. Effect of segments on time frequency characteristics of blasting vibration signals[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1): 55-61. (in Chinese))
- [5] 曹野,宋波,陈宏伟. 围岩压力对爆破信号频域能量分布影响研究[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(2):350-357. (Cao Ye, Song Bo, Chen Hongwei. Study on the influence of confining pressure on frequency-domain energy distribution of blasting signal[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(2): 350-357. (in Chinese))
- [6] 李兴华,龙源,纪冲,等. 基于小波包变换的高程差对爆破震动信号影响分析[J]. 振动与冲击,2013,32(4):44-48. (Li Xinghua, Long Yuan, Ji Chong, et al. Influence of height difference based on wavelet packets transformation on blasting vibration signals[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(4): 44-48. (in Chinese))
- [7] 曾一鑫,白春华,王仲琦. 基于 HHT 研究房屋结构对爆炸地震的振动响应[J]. 振动与冲击,2014,33(15):71-75. (Zeng Yixin, Bai Chunhua, Wang Zhongqi. Vibrating response of a residential structure to blast based on HHT[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(15): 71-75. (in Chinese))
- [8] 李夕兵,凌同华,张义平. 爆破震动信号分析理论与技术[M]. 北京:科学出版社,2009. (Li Xibing, Ling Tonghua, Zhang Yiping. Analysis of blast vibration signals theories and methods[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [9] 李洪涛,杨兴国,舒大强,等. 不同爆源形式的爆破地震能量分布特征[J]. 四川大学学报(工程科学版),2010,42(1):30-34. (Li Hongtao, Yang Xingguo, Shu Daqiang, et al. Study on energy distribution characteristics of seismic waves induced by different forms of blasting resource[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(1): 30-34. (in Chinese))
- [10] 杨风威,李海波,刘亚群,等. 台阶与预裂爆破岩体振动特征的对比研究[J]. 煤炭学报,2012,37(8):1285-1291. (Yang Fengwei, Li Haiibo, Liu Yaquin, et al. Comparative study on vibration characteristics of rock mass induced by bench blasting and pre-splitting blasting[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8): 1285-1291. (in Chinese))
- [11] 邵珠山,乔汝佳,王新宇. 临空面对爆破震动强度影响的数值研究[J]. 地下空间与工程学报,2012,8(5):350-357. (Shao Zhushan, Qiao Rujia, Wang Xinyu. Numerical investigation into effect of free surface on the response of blasting induced vibration[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(5): 350-357. (in Chinese))
- [12] 黄文尧,穆朝民,宗琦,等. 水胶药柱深孔预裂爆破弱化综采面硬岩断层分析[J]. 重庆大学学报,2013,36(7):102-107. (Huang Wenyao, Mu Chaomin, Zong Qi, et al. Analysis on weakening hard rock used by long-hole presplitting blast in fully mechanized coal face with water-gel explosive grain[J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(7): 102-107. (in Chinese))
- [13] 宗琦,汪海波,徐颖,等. 基于 HHT 方法的煤矿巷道掘进爆破地震波信号分析[J]. 振动与冲击,2013,32(15):116-120. (Zong Qi, Wang Haibo, Xu Ying, et al. Analysis of blasting seismic wave signal in coalmine roadway excavation based on HHT method[J]. Journal of Vibration And Shock, 2013, 32(15): 116-120. (in Chinese))
- [14] 汪海波,宗琦. 煤矿软岩巷道掘进爆破振动特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(增2):3876-3881. (Wang Haibo, Zong Qi. Study of blasting vibration character of soft rock roadway excavation in coalmine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 32(Supp. 2): 3876-3881. (in Chinese))
- [15] 韩博,马芹永. 煤矿岩巷毫秒延期爆破振动测试与控制技术研究[J]. 煤炭学报,2013,38(2):209-214. (Han Bo, Ma Qinyong. Research on testing and controlling techniques of millisecond delay blasting vibration in coal mine rock roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(2): 209-214. (in Chinese))