

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.06.004

岩石动态特性对爆破振动能量分布的影响^{*}

于妍宁 徐振洋 郭连军 张大宁

辽宁科技大学矿业工程学院(辽宁鞍山,114000)

[摘 要] 为了从爆破振动能量分布角度研究破碎能量利用问题,结合露天铁矿岩石动态特性,使用 EEMD 方法分析爆区磁铁矿、绿泥岩与混合岩的动态特性对振动能量分布的影响规律。结果表明:动抗拉强度与弹性模量最低的混合岩,爆破振动能量的分布最为均匀,振动能量在 50 Hz 以下的频带出现了分散的多个峰值,90% 以上的振动能量集中在 20 ~ 80 Hz;随着岩石动抗拉强度与弹性模量的减小,爆破振动能量在整体上的分布向高频发展,总能量与瞬时能量峰值均明显降低,用于岩石破碎的爆炸能量比例提升,且爆破远区振动能量分布频带增宽,有利于岩体完整性保护。

[关键词] 采矿工程;爆破;EEMD;爆破振动;能量

[分类号] TD235.1+1

引言

岩石动态特性对爆破振动的影响研究由来已久^[1-2],岩石的霍普金森(Hopkinson)压杆试验也表明,破碎岩石的有效吸能是输入能量减掉反射能和透射能^[3]。针对不同的岩性,炸药能量释放的过程中,传递到岩体的能量有多少是用来破碎岩石,又有多少转变成了无用的地震波扩散掉,是值得深入研究的问题。

集合经验模式分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)是针对非平稳、非线性信号的有效分析方法,在爆破振动信号分析中已有较多应用。陈仁祥等^[4]利用 EEMD 可有效抑制模态混叠的特性,提出了基于 EEMD 的振动信号自适应降噪方法。王二猛等^[5]为了研究不同段数爆破振动信号的反应谱特性,利用 EEMD 分解对爆破振动的加速度信号进行低通滤波去噪处理,获得了准确清晰的加速度曲线。赵明生等^[6]的研究结果表明,EE-MD 方法的信噪比高,能充分保留信号固有的非平稳特性,得到的 IMF 分量具有明显的实际物理意义,适用于爆破振动信号的去噪处理。

本文主要利用 EEMD 方法,研究了鞍钢矿业公司大孤山铁矿爆区不同岩体的动态特性对爆破振动能量分布的影响。

1 岩石动态特性测试

在大孤山铁矿爆区分别收集磁铁矿、混合岩与

绿泥岩样本,加工制成圆柱状(厚 20 mm,直径 38 mm),通过 Hopkinson 压杆试验获得不同应变率下各种岩石的动抗拉强度与弹性模量^[7],结果如表 1、表 2 所示。

表 1 岩石动抗拉强度

Tab. 1 Dynamic tensile strength of rocks

MPa

应变率	150	250	350
磁铁矿	141	195	218
绿泥岩	133	185	201
混合岩	132	173	196

表 2 岩石弹性模量

Tab. 2 Elastic modulus of rocks

MPa

应变率	150	250	350
磁铁矿	256.430	259.540	290.730
绿泥岩	248.222	336.790	359.165
混合岩	201.833	240.635	265.469

2 爆破振动信号的频谱特征

2.1 工程背景

大孤山铁矿每年产矿石约 700 万吨,采用露天台阶爆破方式开采,台阶高度 12 m。为了获得可靠的对比结果,爆破孔网在不同岩性爆区中均使用相

* 收稿日期:2015-03-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51474123)

作者简介:于妍宁(1983~),女,硕士,讲师,主要从事爆破工程理论的研究。E-mail:yuyanning0223@163.com

通信作者:徐振洋(1982~),男,博士,讲师,主要从事爆破工程与岩石破碎的研究。E-mail:xuzhenyang10@foxmail.com

同设计方案,孔距 7.5 m,排距 6.0 m,钻孔孔径 250 mm,超深 1.5 m,使用混装乳化炸药,测试爆速为 5 200 m/s。采用逐孔起爆方式,孔内使用 400 ms 孔内延期雷管,爆破网路如图 1 所示。

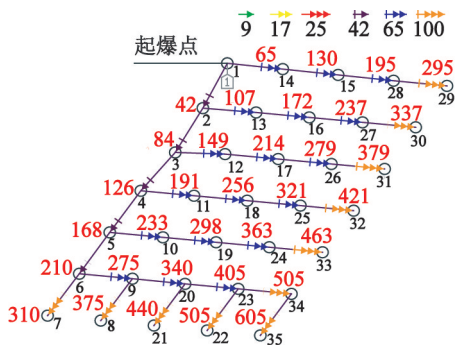


图 1 爆破网路(单位:ms)
Fig. 1 Blasting network(unit:ms)

2.2 爆破振动监测结果

选择较平整场地,进行爆破振动监测,测振仪由爆区中心出发,沿直线布置,间隔为 30、50、120 m,监测结果如表 3 所示; s 为测振仪与爆源的距离,m。

由表3可以看出,磁铁矿振速峰值随距离增加衰减较慢,且主振频率较低;绿泥岩振速峰值衰减较快,主振频率较高。由于岩石的动态特性不同,对爆破振动信号的传播规律有着较大的影响,在相同爆破参数条件下,随着岩石动抗拉强度与弹性模量的降低,距爆源中心相同距离处,振速峰值降低,主

表 3 振动监测结果

种类	振速峰值/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)			主振频率/Hz		
	$s=30$	$s=50$	$s=120$	$s=30$	$s=50$	$s=120$
磁铁矿	4.97	4.84	2.46	23.1	21.2	21.0
绿泥岩	4.33	1.83	1.34	26.1	36.2	30.6
混合岩	4.85	2.45	1.73	23.4	23.9	24.7

振频率升高。

3 爆破振动信号能量分布特征

EEMD 方法能对非平稳信号进行平稳化处理,把信号中不同时间频率范围的波动或趋势逐层分解后产生一组不同特征尺度的数据列^[8]。它在待分解信号中加入随机的白噪声序列,这个白噪声信号会均匀分布在整个信号的时频空间,此时待分解信号的不同频率尺度就会融合到由白噪声相应频率尺度上,然后通过 EEMD 分解这个复合信号,得到一组 IMF 分量。不断重复上述过程,得到各 IMF 分量的“集合体”,因为白噪声的零均值特性,对各个“集合体”进行平均就能使白噪声互相抵消,消除了 EEMD 算法固有的模态混叠问题^[9-10]。

三维能量谱可以表示非平稳信号的能量在时频谱上的分布,实现了频域和时域的统一。3 组信号的三维能量谱如图 2~图 4 所示。

这 3 组信号振动持续的时间都符合爆破网路总

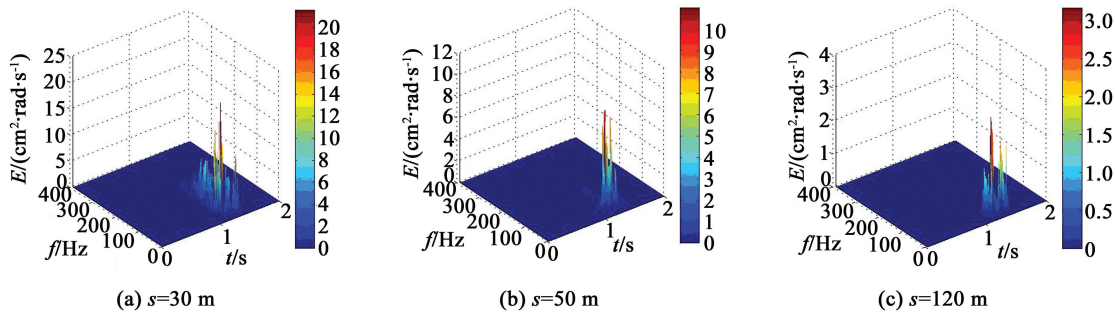


图 2 磁铁矿爆破振动信号三维能量谱
Fig. 2 Three-dimensional energy spectrum of magnetite

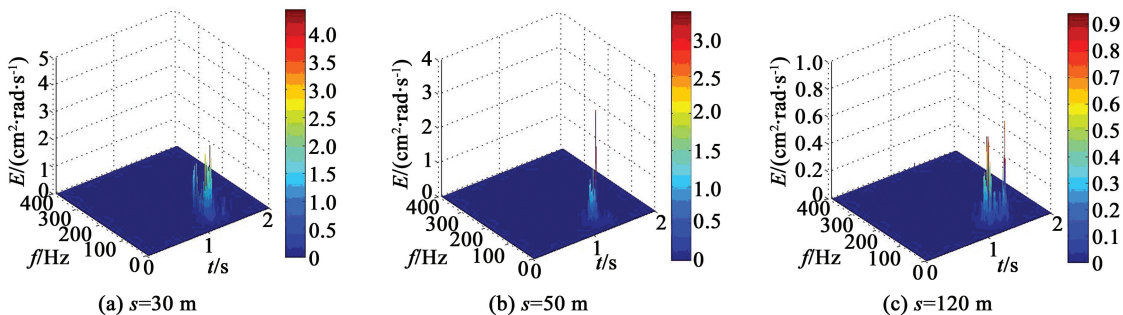


图 3 绿泥岩爆破振动信号三维能量谱
Fig. 3 Three-dimensional energy spectrum of chlorite schist

延期时间, 30、50、120 m 处的信号分别在 1.15、1.22、1.34 s 出现了第一个最大瞬时能量。随着岩石动抗拉强度与弹性模量的降低, 能量峰值出现的时间也在推后。瞬时能量体现的是振速与频率的共同作用^[11]。最大瞬时能量能够引起岩石的结构位移增量, 当最大瞬时能量超越岩石的最大允许位移, 岩石结构将发生破坏。在振动总能量衰减的前提下, 当瞬时能量未对岩石形成直接破坏时, 那么产生的累积损伤程度也会大大降低。

爆破过程中, 大部分的爆炸能量并未用于岩石破碎^[12-13]。建立岩石破碎断裂面的形成与炸药能量之间的基本守恒关系:

$$E_v + E + E_e = E_j. \quad (1)$$

式中: E_j 为炸药爆炸传递至岩体内的能量; E_e 为岩石碎块形成的动能与热能等损耗; E 为岩石破碎形成断裂面所消耗的能量; E_v 为爆区外部质点获得的弹性振动能量。

由以上 3 组信号可以看出, 在炸药爆速为 5 200 m/s 时, 混合岩的爆破向爆区外部传播的振动能量最低, 用于岩石破碎的能量高于磁铁矿和绿泥岩。

4 分析与讨论

为了获得岩石动态特性对振动能量分布的影响关系, 计算振动能量在总频带内的分布比例, 3 组信号的能量分布如图 5 ~ 图 7 所示。

这 3 组信号的能量的增减基本是随着距离爆源中心距离变化的, 在装药量基本一致的情况下, 爆心

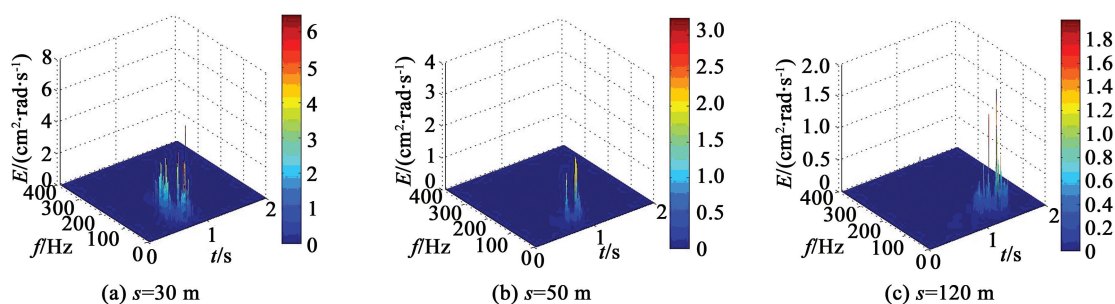


图 4 混合岩爆破振动信号三维能量谱

Fig. 4 Three-dimensional energy spectrum of agmatite

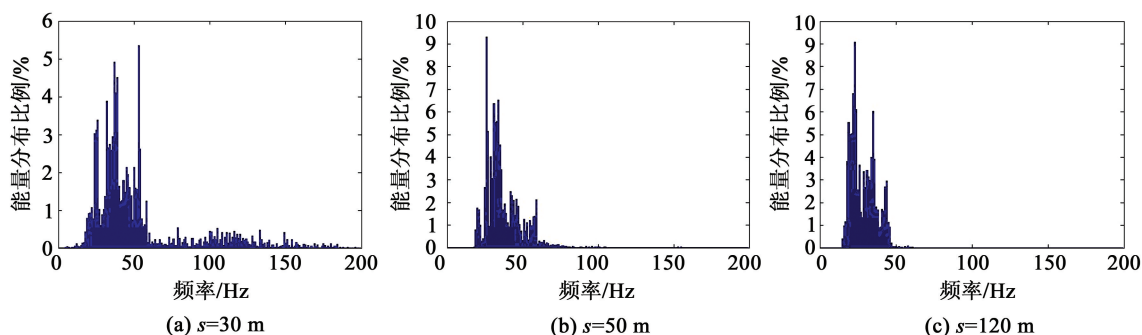


图 5 磁铁矿能量分布比例图

Fig. 5 Energy distribution of magnetite

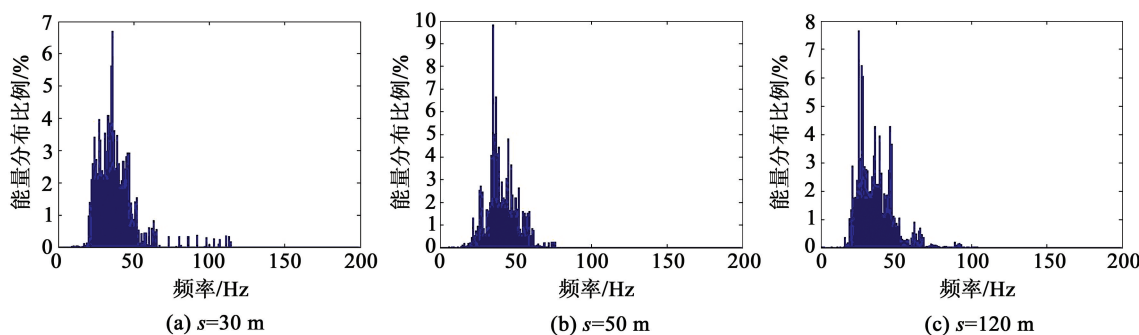


图 6 绿泥岩能量分布比例图

Fig. 6 Energy distribution of chlorite schist

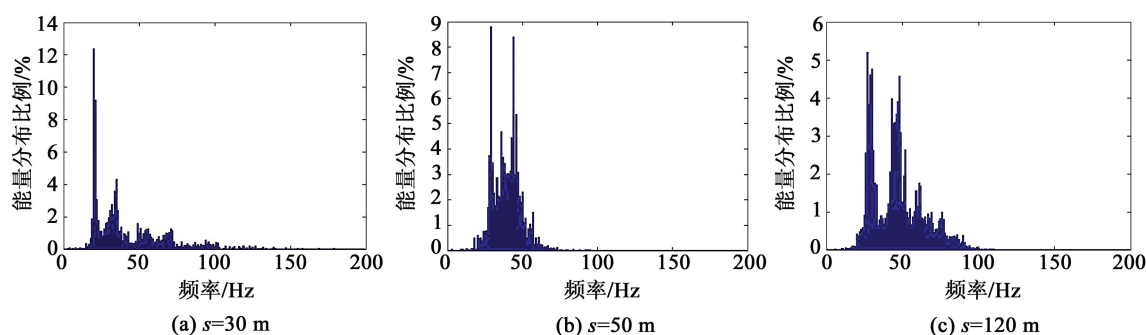


图 7 混合岩能量分布比例图

Fig. 7 Energy distribution of agmatite

距的增加使得爆破信号的总能量降低。信号的能量分布较为均匀,能量出现了几个峰值,很好地避开了信号的叠加。90%以上的频带能量分布主要集中在20~80 Hz范围内,爆破振动没有在低频集中出现;80 Hz以上的能量仅占总能量的5%左右,较少会有超过100 Hz的频率。

图5~图7中,爆破振动能量分布是以1 Hz为单位进行计算的,如此便可以很方便地计算出信号在某个频带内的能量分布比例,只需选取需要分析的横坐标值,对纵坐标的数值进行累加即可。经过计算爆破振动能量分布可以看出,磁铁矿的振动信号能量峰值在50 Hz以下频带内出现的比例高于其他两类岩石;绿泥岩的50 Hz以内的低频能量所占比例较高,说明了爆破参数与磁铁矿和绿泥岩动态特性的匹配不是最佳状态;混合岩的能量分布较为均匀,主要能量分布在20~80 Hz,且并未出现明显的较高峰值,体现出振动能量分布的稳定性,是爆破参数与岩石动态特性合理匹配的体现。

在爆破的中远区,虽然振动能量频带有些靠近低频,但是绝对能量是最低的。资料已表明,振动能量频率越高对爆区后方未爆岩体的完整性越有利^[14]。爆破地震波传播过程中随距离的增长整体上有向低频发展的趋势,针对不同岩性,控制爆破地震波能量在高、低频的分布,提高高频部分所占比例,降低爆破远区的低频振动能量,高频振动分量对岩体内损伤与原始裂隙发展的作用非常有限。

5 结论

主要研究了大孤山铁矿的磁铁矿、混合岩和绿泥岩的动态特性与爆破振动能量分布的影响,得到以下主要结论:

1) 动抗拉强度与弹性模量最低的混合岩,爆破振动能量的分布最为均匀,瞬时能量在80 Hz以下的频带出现了分散为多个峰值,90%以上的振动能量集中在20~80 Hz。

2) 随着岩石动抗拉强度的减小、弹性模量的增大,爆破远区的振动能量在整体上的分布更向高频发展,振动能量大小与瞬时能量峰值均明显降低,向爆区外部传播的振动能量最低。混合岩的爆破中,用于岩石破碎的能量明显高于磁铁矿和绿泥岩。

3) 混合岩爆破方案的振动能量在主频带内分布最为均匀,瞬时能量在40 Hz以下的频带出现了多个较大峰值,爆破参数与岩石动态特性匹配最为合理。磁铁矿的50 Hz以内的低频能量所占比例最高,爆破参数与磁铁矿动态特性的匹配是最不合理的。

参 考 文 献

- [1] WANG Q Z, LI W, XIE H P. Dynamic split tensile test of flattened Brazilian disc of rock with SHPB setup [J]. Mechanics of Materials, 2009, 41 (3): 252-260.
- [2] WANG Q Z, LI W, SONG X L. A method for testing dynamic tensile strength and elastic modulus of rock materials using SHPB [J]. Pure and Applied Geophysics, 2006, 163 (5): 1091-1100.
- [3] DAI F, CHEN R, XIA K. A semi-circular bend technique for determining dynamic fracture toughness [J]. Experimental Mechanics, 2010, 50 (6): 783-791.
- [4] 陈仁祥, 汤宝平, 马婧华. 基于 EEMD 的振动信号自适应降噪方法 [J]. 振动与冲击, 2012, 31 (15): 82-86.
CHEN R X, TANG B P, MA J H. Adaptive denoising method based on ensemble empirical mode decomposition for vibration signal [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31 (15): 82-86.
- [5] 王二猛, 赵明生. 不同段数爆破地震波的反应谱分析 [J]. 工程爆破, 2012, 18 (4): 23-26.
WANG E M, ZHAO M S. Response spectrum analysis of blasting seismic wave with different segments [J]. Engineering Blasting, 2012, 18 (4): 23-26.
- [6] 赵明生, 梁开水, 罗元方, 等. EEMD 在爆破振动信号去噪中的应用 [J]. 爆破, 2011, 28 (2): 17-20, 59.
ZHAO M S, LIANG K S, LUO Y F, et al. Application of EEMD in blasting vibration signal de-noising [J]. Blasting

- ting, 2011, 28(2): 17-20, 59.
- [7] 郑永强. 大孤山铁矿岩石动态特性与爆破振动实验研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2013.
- ZHENG Y Q. The research on dynamic characteristics of Dagushan iron and blasting vibration[D]. Anshan: Liaoning University of Science and Technology, 2013.
- [8] 李夕兵, 凌同华, 张义平. 爆破振动信号分析理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 114-128.
- LI X B, LING T H, ZHANG Y P. Analysis of blast vibration signals theories and methods [M]. Beijing: Science Press, 2009: 114-128.
- [9] 曹冲锋, 杨世锡, 杨将新. 大型旋转机械非平稳振动信号的 EEMD 降噪方法[J]. 振动与冲击, 2009, 28(9): 33-37.
- CAO C F, YANG S X, YANG J X. De-noising method for non-stationary vibration signals of large rotating machineries based on ensemble empirical mode decomposition [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(9): 33-37.
- [10] HUANG N E, WU M L C, LONG S R, et al. A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis [J]. Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2003, 459 (2037): 2317-2345.
- [11] 刘强, 周瑞忠, 刘宇航. 地震动瞬时能量谱与结构位移响应关系研究[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(5): 46-51.
- LIU Q, ZHOU R Z, LIU Y H. Research on relation between instantaneous energy spectrum of earthquake ground motion and displacement response of structures [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(5): 46-51.
- [12] SANCHIDRIÁN J A, SEGARRA P, LÓPEZ L M. Energy components in rock blasting [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(1): 130-147.
- [13] SAHARAN M R, MITRI H S, JETHWA J L. Rock fracturing by explosive energy: review of state-of-the-art [J]. Frag Blast: International Journal for Blasting and Fragmentation, 2006, 10 (1/2): 61-81.
- [14] 王振宇, 梁旭, 陈银鲁, 等. 基于输入能量的爆破震动安全评价方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2492-2499.
- WANG Z Y, LIANG X, CHEN Y L, et al. Study of safety evaluation method of blasting vibration based on input energy [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2492-2499.

Influence of Rock Dynamic Characteristics on Distribution of Blasting Vibration

YU Yanning, XU Zhenyang, GUO Lianjun, ZHANG Daning

College of Mining Engineering, Liaoning University of Science and Technology (Liaoning Anshan, 114051)

[ABSTRACT] The usage of crushing energy was researched based on the energy distribution of blasting vibration. Combined with the dynamic characteristics of open pit mine rock, the influences of blasting vibration energy's distribution have been analyzed using EEMD method. It could be shown from the results that the blasting vibration energy of agmatite, which has the lowest dynamic tensile strength and elastic modulus, is most evenly distributed. In principal frequencies band, multiple instantaneous energy peaks appear at frequencies which are below 50 Hz. More than 90% of the vibration energy concentrates in 20 ~ 40 Hz. With the decrease of dynamic tensile strength and the elastic modulus, the blasting vibration energy in the far zone tends to be distributed at high frequencies overall, the vibration of energy and instantaneous energy peak values are decreased significantly, and the explosion for rock fragmentation has the maximum energy. Besides, the distribution band of blasting energy in blasting far zone is broaden, which is advantageous to protect the integrity of rocks.

[KEY WORDS] mining engineering; blasting; EEMD; blasting vibration; energy