

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.03.022

单基发射药与乳化炸药爆破振动特性对比研究*

薛冰¹, 凌静¹, 陈华东², 张永明², 赵静², 廖学燕³, 林谋金¹

(1. 西南科技大学 环境与资源学院, 绵阳 621010; 2. 泸州北方化学工业有限公司, 泸州 646605;

3. 成都市城市安全与应急管理研究院, 成都 610031)

摘要: 为研究单基发射药爆破振动特性, 开展了单基发射药与乳化炸药爆破振动实验研究, 并对比分析了两种爆破器材的爆破地震波在传播过程的衰减规律和能谱分布规律。利用萨道夫斯基公式和 HHT 方法对实验测得的爆破振动信号进行分析, 得到单基发射药与乳化炸药的爆破振动衰减公式、单基发射药振动的乳化炸药等效系数和边际能量谱等。研究表明: 单基发射药与乳化炸药的爆破振动质点峰值速度随比例距离衰减的趋势相当, 但单基发射药的爆破振动速度及合速度均小于乳化炸药。且本次实验中单基发射药爆破振动的乳化炸药等效系数平均值仅为 0.43, 说明单位质量单基发射药的爆破振动效应要远小于乳化炸药。此外, 单基发射药和乳化炸药爆破振动信号的能量均主要集中于 0~50 Hz, 随着药量增加乳化炸药的能量分布没有明显变化, 而单基发射药振动信号的主频向 15~25 Hz 移动。虽然单基发射药振动信号能量要低于乳化炸药, 但随着实验药量的增加, 单基发射药爆破振动总能量与乳化炸药的差距在减小, 且单基发射药振动信号在 0~10 Hz 频段的能量占比随药量和爆心距变化而波动。

关键词: 单基发射药; 爆破振动; 能谱; 乳化炸药; 比例距离

中图分类号: TD235.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2022)03-0145-06

Comparative Study on Blasting Vibration Characteristics of Single-base Gun Propellant and Emulsion Explosive

XUE Bing¹, LING Jing¹, CHEN Hua-dong², ZHANG Yong-ming²,
ZHAO Jing², LIAO Xue-yan³, LIN Mou-jin¹

(1. School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2. Luzhou North Chemical Industries Co., Ltd., Luzhou 646605, China;

3. Chengdu Institute of Urban Safety and Emergency Management, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to study the blasting vibration characteristics of single-base gun propellant, blast experiments of single-base gun propellant and emulsion explosive were conducted. The attenuation law and energy spectrum distribution of the two materials were compared and analyzed. Sadowski formula and HHT method were used to analyze the experimental vibration signals to obtain the blasting vibration attenuation formula, the equivalence coefficient, and the marginal energy spectrum. The results show that the decay trend of peak velocity of single-base gun propellant and emulsion explosive are similar. But the vibration velocity of single direction and vector sum of the single-base gun propellant is lower than that of the emulsion explosive. The average equivalence coefficient of the single-base gun propellant was only 0.43 in present study, indicating that the blasting vibration effect of unit single-base gun propellant is much weaker than that of the emulsion explosive. In addition, the vibration energy of both the single-base gun propellant and the emulsion explosive was mainly distributed between 0 to 50 Hz. With the increase of charge weight, the blasting vibration energy distribution of emulsion explosive barely changed, whereas the main frequency of the vibration signal of the single-base gun propellant is concentrated within 15~25 Hz. Even though the blasting vibration energy of single-base gun propellant is lower than that of emulsion explosive, the difference of total energy between sin-

gle-base gun propellant and emulsion explosive decreases with the increase of charge weight. In addition, the energy ratio of single-base gun propellant in 0 ~ 10 Hz fluctuates with the charge weight and test distance.

Key words: single-base gun propellant; blasting vibration; energy spectrum; emulsion explosive; scaled distance

爆破振动危害一直是爆破作业中研究和控制的重点,爆破振动达到一定强度会导致周围建构筑物 and 设施设备发生破坏^[1,2]。现有的爆破振动控制研究主要关注减震沟降震^[3,4]、预裂爆破^[5,6]、装药结构和爆破网络优化等措施^[7-10]。除此之外,通过采用新破岩技术降低振动效应也是有效的手段,比如采用静态膨胀破碎^[11]、二氧化碳爆破以及金属燃烧剂弱爆破等技术取得了较好的减震效果^[12,13],但上述技术存在作用时间长、操作复杂或成本高昂等问题,限制其广泛应用。因此有必要寻找满足易操作、低成本、高效率工程应用需求的新型弱振动爆破器材。发射药作为一种常见的爆破器材,常被用于油气井致裂造缝。已有研究表明,其具有较好的破岩能力,做功形式多为燃烧或爆燃,且燃烧峰值压力小于传统工业炸药,在爆破振动控制中具有较强的应用前景^[14,15]。当前,有关发射药爆破的研究主要关注其破岩和致裂性能,针对其爆破振动特性的研究较少。为拓展发射药爆破技术的应用范围,有必要进一步研究其爆破振动特性,为实际工程应用提供参考。

已有研究表明,爆破振动的峰值振动速度大小和主频范围是判断其破坏性的关键参数,因此在爆破器材的爆破振动特性研究中,主要关注其质点峰值速度及其随比例距离的变化规律、爆破振动的能谱分布等^[16]。本研究通过系统开展不同药量的发射药爆破振动实验,采集不同爆心距的爆破振动信号,基于萨道夫斯基公式分析其振动速度衰减规律,利用希尔伯特-黄变换(Hilbert Huang Transform, HHT)方法获得其能谱分布规律,并与相同条件下的乳化炸药爆破振动信号进行对比研究,为发射药爆破振动预测与控制提供参考。

1 爆破振动实验

本次实验使用的3/1单基发射药由泸州北方化

学工业有限公司提供,其采用电点火头引燃;乳化炸药由绵竹兴远特种化工有限公司提供,其采用8#电雷管起爆。为保证爆破材料燃烧和爆轰充分,使用内径30 mm、壁厚2 mm的45#钢外壳加强约束,实验装药照片如图1所示。为获得不同比例距离条件,针对单基发射药和乳化炸药分别进行了3种药量的爆破振动测试,实验药量为20 g、30 g和50 g,并根据爆破材料类型进行相应编号:单基发射药(G20、G30、G50),乳化炸药(E20、E30、E50)。

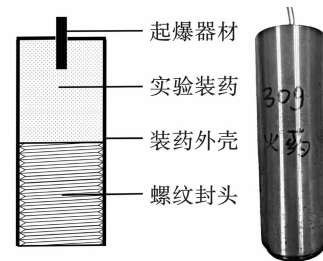


图1 实验装药照片

Fig. 1 Experimental charge

实验在混凝土地面进行,药包中心距混凝土自由面0.5 m,采用砂石填塞。爆破振动信号采集使用Blast-UM型测振仪,采样速率为10 000 Sps,采样时长为2 s,传感器X轴方向指向爆源,Y轴方向与爆源方向垂直,Z轴方向垂直于地面向上。测点爆心距为2~10 m,相邻测点间隔2 m,共计5个测点,布置如图2所示。

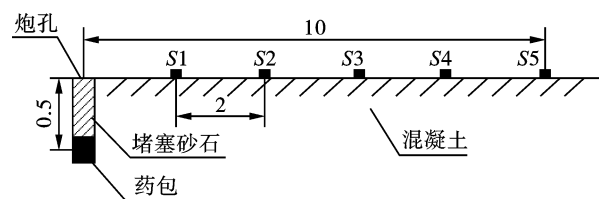


图2 测点布置示意图(单位:m)

Fig. 2 Arrangement of measuring points(unit:m)

2 爆破振动衰减规律及等效系数

2.1 爆破振动衰减规律

实验获得了不同药量时各测点水平径向、水平切向、垂直方向上的质点峰值振动速度以及峰值振动速度合速度,整理如表1所示。

收稿日期:2022-03-21

作者简介:薛冰(1989-),男,讲师、博士,主要从事爆炸力学与含能材料研究领域研究,(E-mail)xuebswust@hotmail.com。

通讯作者:林谋金(1985-),男,高级工程师、博士,主要从事爆炸力学与含能材料研究领域研究,(E-mail)lmj2012pt@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(11802255、12172313);工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室开放基金项目(20kfgk06)

表 1 不同测点爆破振动测试结果

Table 1 Blasting-vibration results at different measuring points

编号	爆心距/m	水平径向速度/ (cm · s ⁻¹)	水平切向速度/ (cm · s ⁻¹)	垂直方向速度/ (cm · s ⁻¹)	合速度/ (cm · s ⁻¹)	编号	爆心距/m	水平径向速度/ (cm · s ⁻¹)	水平切向速度/ (cm · s ⁻¹)	垂直方向速度/ (cm · s ⁻¹)	合速度/ (cm · s ⁻¹)
G20	2	0.25	0.29	1.31	1.37	E20	2	1.18	1.28	3.38	3.80
	4	0.22	0.24	0.67	0.75		4	0.42	0.51	1.75	1.87
	6	0.15	0.18	0.40	0.46		6	0.33	0.41	0.78	0.94
	8	0.10	0.12	0.27	0.32		8	0.25	0.30	0.61	0.72
	10	0.08	0.08	0.24	0.26		10	0.22	0.23	0.51	0.61
G30	2	0.38	0.50	2.04	2.14	E30	2	1.60	1.86	3.15	3.99
	4	0.24	0.29	1.13	1.19		4	0.66	0.85	2.30	2.54
	6	0.18	0.17	0.56	0.61		6	0.40	0.43	0.90	1.08
	8	0.12	0.13	0.36	0.40		8	0.32	0.37	0.69	0.85
	10	0.09	0.10	0.33	0.36		10	0.21	0.23	0.56	0.65
G50	2	0.52	0.59	2.95	3.05	E50	2	1.95	2.46	5.06	5.96
	4	0.33	0.46	1.39	1.50		4	0.95	1.03	1.46	2.01
	6	0.30	0.31	0.87	0.97		6	0.69	0.68	1.15	1.50
	8	0.20	0.20	0.56	0.62		8	0.51	0.54	0.78	1.08
	10	0.12	0.13	0.51	0.54		10	0.32	0.33	0.60	0.76

由表 1 可知,两种爆破器材的垂直方向峰值速度均大于水平方向的峰值振动速度,且三个方向的峰值振动速度随爆心距的增加而减小。通过对比两种爆破器材振动数据,发现在三个速度方向上单基发射药峰值振动速度均小于同药量的乳化炸药,单基发射药各方向峰值振动速度为乳化炸药的 36.05% ~ 71.62%。

相关文献研究表明^[17],利用爆破振动合速度进行爆破振动衰减规律研究具有一定代表性。萨道夫斯基公式是研究爆破振动衰减规律的常用方法,基于萨道夫斯基公式(式 1),利用最小二乘法对表 1 中单基发射药(v_G)和乳化炸药(v_E)峰值振动合速度进行回归分析,得到相应的拟合结果(式 2、3),如图 3 所示。

$$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (1)$$

$$v_G = 19.28 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.15} \quad (2)$$

$$v_E = 42.85 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.20} \quad (3)$$

式中: v 为测点振动速度, $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$; Q 为药量, kg ; R 为测点到爆源的距离, m ; K 、 α 为与质地条件有关的相关系数和衰减系数。

对比两种爆破器材拟合结果,发现单基发射药和乳化炸药爆破振动衰减曲线形状相似,在衰减公式中表现为两者的 α 值接近。两者爆破振动衰减

规律的差异主要体现于 K 值大小不同。该差异是由于两种爆破器材反应类型和对外做功特性不同而导致。乳化炸药主要反应形式为爆轰,其在起爆后迅速对周围介质产生高压破坏,形成强烈的冲击波,引起剧烈的振动效应。而单基发射药的主要反应形式为燃烧或爆燃,其被引燃后发生快速燃烧导致压力上升,从而进一步加速燃烧,直至达到峰值压力。其压力形成速度和峰值均小于乳化炸药,但压力持续时间长于乳化炸药,使得相同药量情况下其振动速度小于乳化炸药。

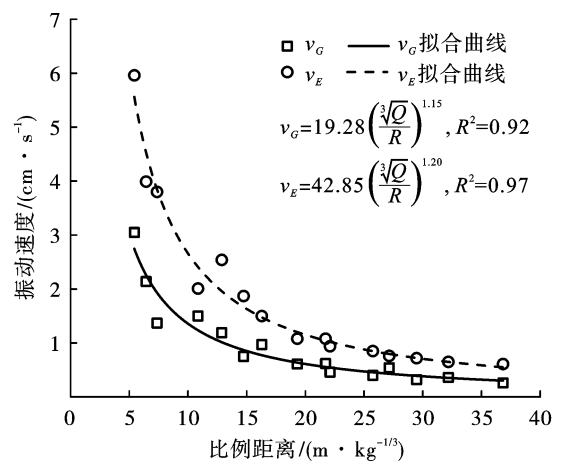


图 3 单基发射药与乳化炸药振动衰减公式拟合曲线图
Fig. 3 Fitting curve of vibration attenuation formula of single-base gun propellant and emulsion explosive

2.2 爆破振动等效系数

为了更好地对比两种爆破材料的爆破振动特性,将实验所测单基发射药峰值振动合速度代入式(3)中计算得到等效的乳化炸药药量 $\sqrt[3]{Q_{EE}}$ 与实际单基发射药药量 $\sqrt[3]{Q_G}$ 对比,并引入爆破振动等效系数 η (式4)进行计算分析,其表达式为

$$\eta = \sqrt[3]{\frac{Q_{EE}}{Q_G}} \quad (4)$$

等效系数能直观反映出相同振动速度时单基发射药与乳化炸药的药量关系。对所有比例距离时的等效系数进行统计分析,如图4所示。

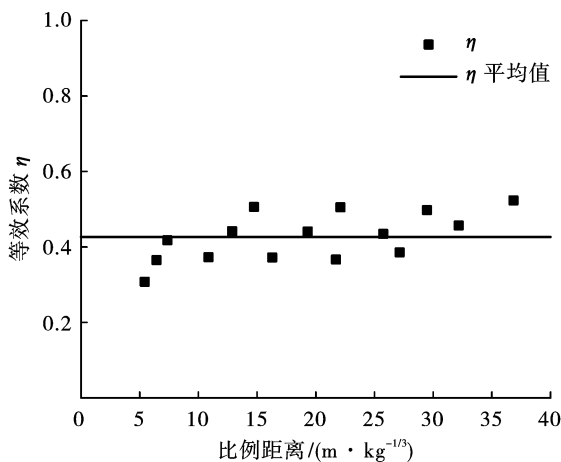


图4 单基发射药振动的乳化炸药等效系数计算结果
Fig. 4 Calculation of emulsion-explosive equivalent ratio of single-base gun propellant

从图4可以看出,在本次实验条件下等效系数分布较为集中,其分布范围为0.31~0.52,平均值为0.43。而在相同振动速度时,等效乳化炸药药量与实际单基发射药药量比值为等效系数的立方 η^3 ,说明单位质量单基发射药与乳化炸药爆破振动效应差异巨大。单基发射药爆破振动的乳化炸药等效系数可为其实际应用提供参考。

3 爆破振动主频及能量分布

已有研究表明,除峰值振动速度外振动频率也是影响爆破振动破坏效应的主要因素,这是因为当爆破振动频率与建构物自振频率接近时易出现共振导致破坏加剧,而建构物的自振频率多为几赫兹到二三十赫兹的低频,所以开展爆破振动研究需要关注其频率分布^[18]。为了更好地研究单基发射药和乳化炸药爆破振动特性,利用希尔伯特-黄变换对比分析了两种爆破器材的能频谱。通过数据预处理

发现实验中乳化炸药和单基发射药的振动信号频率均主要集中于0~50 Hz以内。因此,本研究主要讨论单基发射药和乳化炸药爆破振动在0~10 Hz、10~50 Hz两个频率区间的能量分布。

3.1 爆破振动能谱分布

希尔伯特-黄变换(式5)是一种非线性非平稳信号的数据处理方法^[19]。该方法主要由经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)和Hilbert谱分析(Hilbert Spectrum Analyze, HSA)两部分组成。其中,Hilbert谱具有较好的局部化能力,而Hilbert能量谱显示了能量随时频变化的具体分布。为分析单基发射药与乳化炸药爆破振动能量随时频变化的规律,采用EMD算法进行计算,得到原始信号的多个本征模态函数(IMF),对这些IMF进行Hilbert变换,得到每个IMF分量的瞬时频率,即Hilbert谱。

$$H(\omega, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n \alpha_i(t) e^{j\omega_i(t)t} \quad (5)$$

对IMF分量的瞬时频率进行进一步处理(式6),即可得到对应边际能量谱

$$E(\omega, t) = \int_0^t H^2(\omega, t) dt \quad (6)$$

上式表达了每个频率在全局上的能量,为统计意义上的全部累加能量,即描述能量随频率的分布情况。根据爆破振动实验垂直方向振动信号HHT变换结果,绘制出边际能量谱(图5)如下。

由图5可知,单基发射药振动信号能量主要集中在0~5 Hz和15~25 Hz频率范围,且随着爆心距增加0~5 Hz频段内的能量逐渐减小,而主要集中在15~25 Hz频率范围。当爆心距为6 m、8 m、10 m处的高频振动能量趋近于0,这符合地震波在粘弹性介质中的传播规律,即高频波被不均匀且具有粘弹性特性的混凝土介质吸收^[20]。而乳化炸药的能量分布则较分散,在0~50 Hz范围内呈现多峰分布。对比相同药量时单基发射药和乳化炸药的能谱可知,在20 g药量时两者能谱分布及幅值接近。而随着药量的增加,两种爆破器材的能谱分布差别增大,且各频段乳化炸药能量幅值均要高于单基发射药。

3.2 爆破振动能量占比分析

为了更直观分析两种爆破器材能量累积和分布特性并方便工程应用,参考爆破安全规程分别讨论两种爆破器材在0~10 Hz与10~50 Hz两个频段内的能量占比,整理得到两频段能量相对总能量占比图(图6)。

由图 6 可知,爆心距和实验药量对爆破振动总能量和不同频段能量占比有显著影响。单基发射药与乳化炸药振动信号总能量与 10 ~ 50 Hz 频段能量均随着爆心距的增加而迅速减小,且单基发射药爆破振动信号总能量水平远小于乳化炸药,这与振动速度分析结果一致。但随着实验药量的增加,单基发射药爆破振动总能量与乳化炸药的差距在减小。

此外,随着乳化炸药药量的增加,其 0 ~ 10 Hz 频段的能量占比在逐渐减小。而单基发射药 0 ~ 10 Hz 频段能量随爆心距的变化则存在一定的波动,有时甚至超过乳化炸药,且与药量的变化存在耦合作用。因此,在实际应用中应关注单基发射药火药爆破振动在 0 ~ 10 Hz 频段的能量和速度。

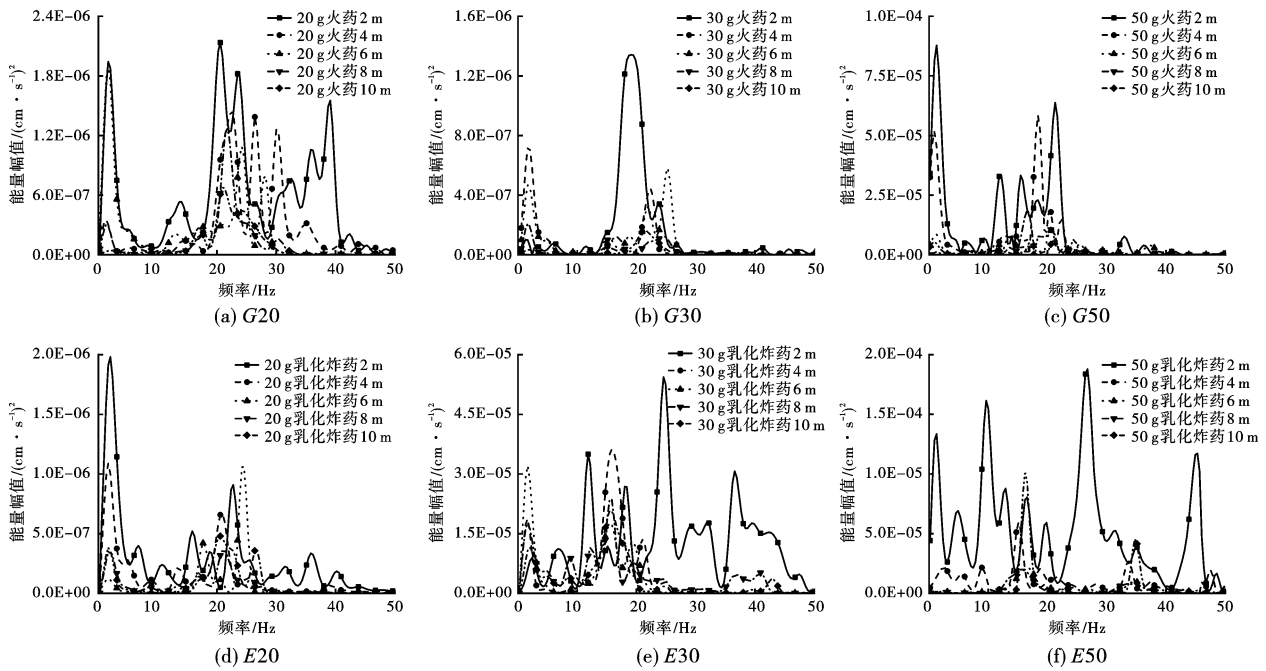


图 5 实验振动信号的 HHT 边际能量谱

Fig. 5 HHT marginal energy spectrum of experimental vibration signals

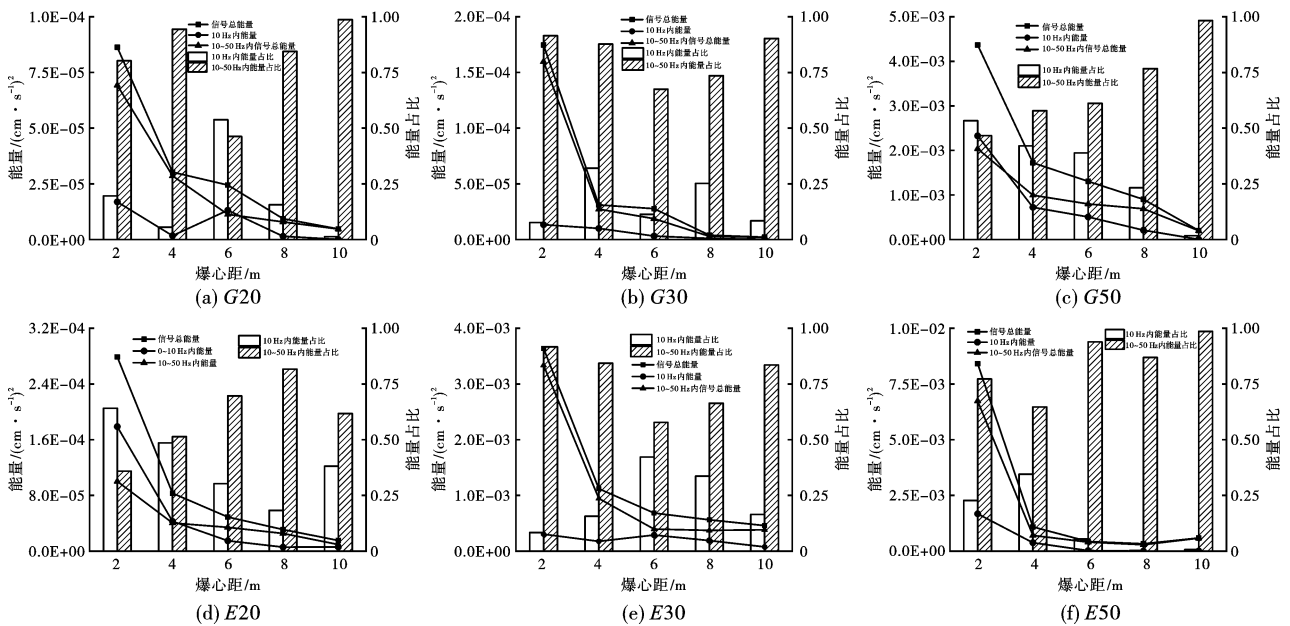


图 6 实验振动信号的能量占比图

Fig. 6 Energy ratio diagram of experimental vibration signals

4 结论

1)通过爆破振动实验获得了单基发射药和乳化炸药在不同爆心距和药量时的振动信号,基于萨道夫斯基公式的拟合结果为 $v_c = 19.28(\sqrt[3]{Q/R})^{1.15}$, $v_E = 42.85(\sqrt[3]{Q/R})^{1.20}$;相同比例距离条件下单基发射药爆破质点峰值振动速度要小于乳化炸药,且单基发射药与乳化炸药对比得到的爆破振动等效系数平均值为 0.43。

2)通过 HHT 获得了爆破振动信号的边际能量谱,发现单基发射药振动信号能量水平要低于乳化炸药,且单基发射药振动信号主要集中于 0 ~ 5 Hz 和 15 ~ 25 Hz 频率范围,而乳化炸药在 0 ~ 50 Hz 范围内能量分布较分散;且随着爆心距增加,单基发射药 0 ~ 5 Hz 频段内的能量逐渐减小,而主要集中于 15 ~ 25 Hz 频率范围。

3)参考爆破安全规程发现,两种爆破器材振动总能量及 10 ~ 50 Hz 频段能量均随爆心距的增加而减小;但随着药量的增加,单基发射药与乳化炸药振动信号总能量的比值在减小,且在实际应用中需关注单基发射药在 0 ~ 10 Hz 频段能量波动的影响。

参考文献 (References)

- [1] 代 勇,周建春.天坪岭隧道爆破振动对既有隧道衬砌受力影响监测分析[J].铁道标准设计,2011(11):97-100.
- [1] DAI Yong,ZHOU Jian-chun. Monitoring of the influence of blasting vibration from Tianpingling tunnel on the behavior of an existing tunnel[J]. Railway Standard Design, 2011(11):97-100. (in Chinese)
- [2] 邹 锐,王玉杰,任少峰,等.含水土质边坡的爆破振动响应及破坏模式研究[J].爆破,2018,35(1):27-34.
- [2] ZOU Rui,WANG Yu-jie,REN Shao-feng,et al. Study on vibration response and failure mode of soil slope with groundwater[J]. Blasting, 2018, 35(1):27-34. (in Chinese)
- [3] 胡八一,陈石勇,谷 岩,等.隔振沟对爆炸塔周边地表振动的影响[J].爆炸与冲击,2012,32(6):647-652.
- [3] HU Ba-yi,CHEN Shi-yong,GU Yan,et al. Effects of vibration-isolating trench on ground vibration surrounding blast containment chamber[J]. Explosion and Shock Waves,2012,32(6):647-652. (in Chinese)
- [4] 贺高威,蒲传金,肖定军,等.减震沟对爆炸塔内空爆振动减震效果试验研究[J].爆破,2018,35(3):125-134.
- [4] HE Gao-wei,PU Chuan-jin,XIAO Ding-jun,et al. Experimental study on damping effect of damping ditch about air bust in explosion tower[J]. Blasting, 2018, 35(3):125-134. (in Chinese)
- [5] 丁安松,唐 海,易 帅,等.预裂爆破的减振试验研究[J].采矿技术,2018,18(5):160-163.
- [5] DING An-song,TANG Hai,YI Shuai,et al. Experimental study on vibration reduction of pre-splitting blasting[J]. Mining Technology,2018,18(5):160-163. (in Chinese)
- [6] 杨仁树,车玉龙,冯栋凯,等.切缝药包预裂爆破减振技术试验研究[J].振动与冲击,2014,33(12):7-14.
- [6] YANG Ren-shu,CHE Yu-long,FENG dong-kai,et al. Tests for blasting vibration reduction technique with pre-splitting blasting of a slotted cartridge[J]. Journal of Vibration and Shock,2014,33(12):7-14. (in Chinese)
- [7] 徐文文,叶海旺,张迎吉,等.金堆城露天矿空气间隔装药减震控制爆破试验研究[J].爆破,2013,30(3):70-74.
- [7] XU Wen-wen,YE Hai-wang,ZHANG Ying-ji,et al. Experimental study on air-decking charging controlled blasting to reduce vibration in Jinduicheng open-pit mine[J]. Blasting,2013,30(3):70-74. (in Chinese)
- [8] 曹 祺,王林桂,马宏昊,等.底部空气柱装药爆破减振理论和实验研究[J].工程爆破,2020,26(2):42-48,64.
- [8] CAO Qi,WANG Lin-gui,MA Hong-hao,et al. Research on blasting vibration reduction theory and experiment of bottom air column charging[J]. Engineering Blasting, 2020,26(2):42-48,64. (in Chinese)
- [9] 周文海,梁 瑞,陈金林,等.时程稳定性系数确定的边坡逐孔起爆孔间微差降振时间[J].爆炸与冲击,2019,39(8):183-191.
- [9] ZHOU Wen-hai,LIANG Rui,CHEN Jin-lin,et al. Millisecond time for reducing vibration between two holes for slope blasting determined by stability coefficient of time history[J]. Explosion and Shock Waves,2019,39(8):183-191. (in Chinese)
- [10] 齐 鹏,尚修瑞,刘 川,等.复杂环境下跨路桥梁拆除爆破方案优化研究[J].爆破,2021,38(3):104-112.
- [10] QI Peng,SHANG xiu-rui,LIU Chuan,et al. Optimization of blasting schemes for demolition of crossroad bridges in complicated conditions[J]. Blasting,2021,38(3):104-112. (in Chinese)