

不同炸药爆破振动信号能量分布特征的 提升小波包分析

宋文章

烟台市工程爆破协会, 山东 青岛

收稿日期: 2024年7月4日; 录用日期: 2024年8月15日; 发布日期: 2024年8月26日

摘 要

为研究不同炸药对爆破地震波信号能量分布特征的影响,通过提升小波包变换,对现场测试的乳化炸药、TNT、RDX等三种不同炸药的地震波信号各频带能量进行了定量分析。研究表明:通过提升小波包变换分析,得到了不同炸药爆源的地震波信号能量的三维时频分布特征,以及各频带能量大小及所处时刻和所占信号总能量的比例值;不同距离地震波信号能量值,TNT和RDX装药都比乳化炸药更大,但随着距离的增大,总能量值越来越接近;其中爆破振动信号大部分能量集中在10~80 Hz的频段,且该频段范围内的能量百分比,乳化炸药比TNT和RDX装药更高。

关键词

爆炸力学, 地震波, 炸药种类, 提升小波包, 能量分布

Research on the Distribution Characteristics of Blasting Seismic Wave Energy for Different Explosives Based on the Lifting Wavelet Packet Analysis

Wenzhang Song

Yantai Engineering Blasting Association, Qingdao Shandong

Received: Jul. 4th, 2024; accepted: Aug. 15th, 2024; published: Aug. 26th, 2024

Abstract

In order to study different explosives effect on the energy distribution characteristics of blasting

vibration signals, the lifting wavelet packet algorithm was used to analyze the seismic wave signals of emulsified explosive, TNT and RDX at different distances tested in the field. The results show that the three-dimensional time-frequency distribution characteristics of seismic wave signal energy of different explosive sources are obtained through the lifting wavelet packet transform analysis, and the energy size of each frequency band, the time and the proportion of the total energy of the signal are obtained. The energy values of TNT and RDX are larger than those of emulsion explosive at different distances, but with the increase of distance, the total energy values are closer and closer. Among them, the energy percentage in the 10~80 Hz band is higher for emulsified explosive than TNT and RDX charge.

Keywords

Explosion Mechanics, Seismic Wave Energy, Types of Explosives, Lifting Wavelet Packet, Energy Distribution

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

爆破振动信号分析是爆破振动监测的重要环节，也是控制爆破振动对周围建筑物危害效应的关键。由于爆破振动信号携带有地层的岩性、爆破参数和起爆网路等影响爆破振动控制识别的重要信息，且这些信息通常体现在其频谱能量分布特征变化上。因此，采取精细的信号处理技术，有利于提高地震波危害效应控制的依据，为地震波强度的精确预测提供数据支持。

近年来，科研人员在不同爆破参量、不同延时间隔、自由面数量和缓冲孔等方面做了大量的研究工作。周建敏[1]、中国生[2]、范志强[3]等采用小波包分析技术对不同爆破参量下爆破振动信号进行了小波包能量分析。崔雪姣[4]等采用小波包分析方法对不同延时间隔的爆破振动信号进行了分析研究。王伟[5]、陈吉辉[6]、陈作彬[7]、费鸿禄[8]等应用小波包变换对爆破振动信号进行多层分解，得到信号能量分布等信息。王子明[9]、吴从师[10]、张声辉[11]等采用小波变换法对爆破振动信号进行处理，获得各层频带包含能量方面信息，从频率和能量方面分析爆破振动信号时频特征。周建敏[12]等采用小波包分析和数值模拟方法对采用主爆破和缓冲爆破的振动信号进行分析。小波包分析方法克服了传统 Fourier 变换无法解决同时提高时间和频率分辨率以及小波变换的分辨率随频率升高而降低的不足[13]-[17]。该分析方法能够同时对低频和高频实施分解，但是该算法依然依赖于傅立叶变换，无法避免基于卷积算法中的冗余计算，运算复杂度高。通过上述文献可知，当前缺少对不同种类炸药爆破产生的爆破振动信号能量分布特征的研究。

本文在传统小波包理论和提升小波变换的基础上，引入一种综合了小波包和提升算法两者的优点，更加简单直接、易于硬件实现、用简单的数乘运算代替卷积运算的提升小波包变换来实现对地震波信号的分解和重构。深入研究不同炸药种类产生的地震波信号能量的三维时频分布特征，为爆破地震波信号能量分布定量特征提取、信号识别和爆破振动危害预测提供了一种新的更加精细的分析方法。

2. 不同药性的爆破振动信号实测试验

为分析不同药性对爆破振动信号能量及频谱的影响，设计了如下试验，用钻孔机械打孔，深为 8 m、孔径为 9 cm。爆源内装填 2 kg 的不同炸药，填塞介质使用碎岩粉和高强度水泥进行装填炮孔。振动信号

传感器每间隔 3 m 布设一个,从距离炮孔中心 3 m 处布设第一个检波器,共布设 70 个,最后一个振动信号传感器与炸药炮孔中心的距离为 210 m,按照一条直线进行布置。主要检测的仪器设置参数包括:采样间隔为 0.125 ms,振动信号记录长度为 2 s。

试验采用 2 kg 小药量装药模拟爆源。为了比较方便,爆源炮孔装药分别使用相同质量的乳化炸药、TNT、RDX 三种不同炸药爆源激发的试验方案。三种炸药的相关性能参数如表 1 所示,其中猛度为铅柱压缩值,由表可知 RDX 是性能最强的炸药,TNT 次之,乳化炸药最弱。具体试验方法是:在灰岩场地钻三个孔径为 90 mm、深为 8 m 的炮孔,炮孔分别装填质量为 2 kg、孔径为 6 cm 的乳化炸药、TNT、RDX。而后,分别引爆炸药并检测爆破振动信号。

Table 1. Explosive performance parameter [18]

表 1. 装药的性能参数[18]

类别	密度 (g/cm ³)	爆速 (m/s)	作功能力 (cm ³)	猛度 (mm)
乳化	1.30	3200	260	12
TNT	1.60	6856	285	16
RDX	1.77	8640	475	24.9

3. 爆破振动信号的提升小波包分析

3.1. 地震波信号的提升小波包变换

对一个能量有限爆破地震波信号,提升小波包基可以利用各个子频带上的信息提供一种特定信号编码和重构方法。一个给定信号 $x(t)$ 若进行 i 层提升小波包分解,在该层分解中可以得到 $j = 2^i$ 个子频带。若原始信号最低频率成分为 0,最高频率成分为 ω_m ,每个子带频率宽度为 $\omega_m/2^i$ 。将提升小波包分解系数重构,可以提取各频带信号,且总信号可以表示为[19]:

$$x(t) = \sum x_{i,k} = x_{i,0} + x_{i,1} + \cdots + x_{i,j-1} \quad (1)$$

式中, $x_{i,k}$ 表示第 i 层分解节点 (i,k) 上的重构信号,其中, $k = 0,1,2,\dots,j-1$ 。

当原始爆破振动信号经过提升小波包分解后,可以对单个节点进行重构,并根据(1)式得到完整原始爆破振动信号的重构信号。

为分析爆破地震波信号的能量特征,论文针对高精度浅层数字地震仪在试验过程中记录的爆破地震波信号数据,在 MATLAB 软件平台上编制了提升小波包变换的信号处理和分析程序。图 1 为分析程序对实测振动信号进行提升小波包分解与重构得到的结果,由图可知原始信号与重新信号非常接近,误差信号非常小。因为,完全重构信号与实测信号具有高度一致性,所以基于提升小波包变换的信号分析结果可以确保对爆破振动信号特征分析的真实性。

3.2. 提升小波包变换的地震波信号三维时频分析

在对前述试验采集的地震波信号(如图 2(a)所示)进行提升小波包能量分析时,构造(6,6)插补细分小波,该小波函数已经在包括爆破振动信号在内的非平稳信号问题中得到成功应用。分解的层数取决于具体信号及测试仪器的工作频带,该试验测试仪器的采样频率为 8000 Hz,根据香农采样定理[20],奈奎斯特频率为 4000 Hz。因此根据提升小波包分解原理[21],可将该爆破振动信号分解到 9 层,共有 $2^9 = 512$ 个小波包,这样原振动信号在整个频域被划分为 512 个子频带,每个子频带宽为 7.8125 Hz,对应的最低频带为 0~7.8125 Hz,使用 Matlab 语言编制爆破振动信号能量三维时频分布程序,经过计算得到单道爆破地

震波信号各子频带重构后在 0~250 Hz 范围内的三维时频分布如图 2(b)所示。从图中能够得到地震波信号能量随时间和频率分布变化的动态特征，其能量谱图可以振动信号能量随时间和频率的细微变化过程，且能量突变的定位与检测能力较强，具有较强非稳态、动态变换的振动信号时频描述功能。

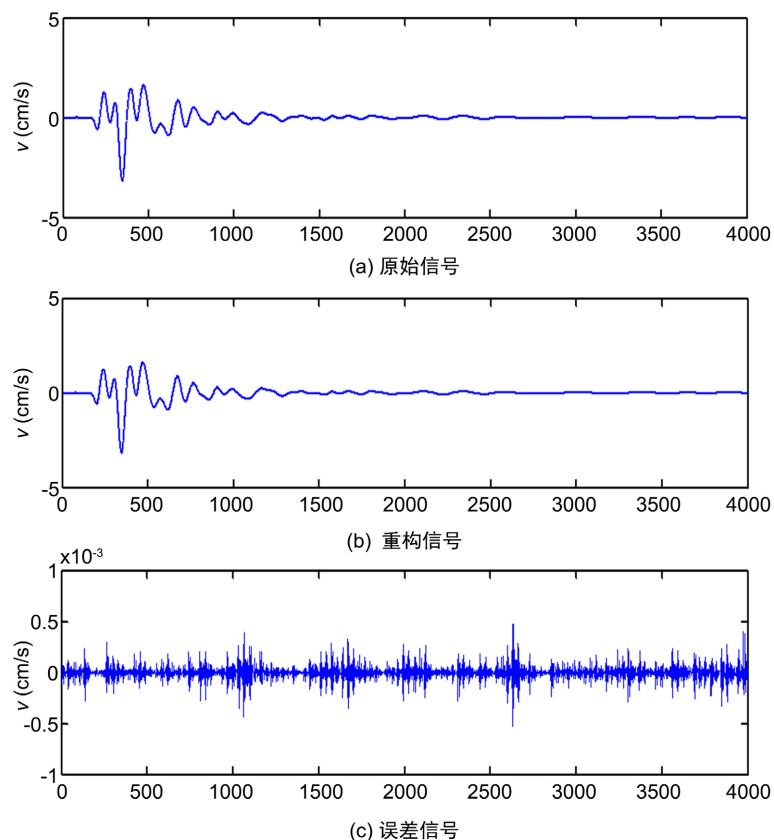
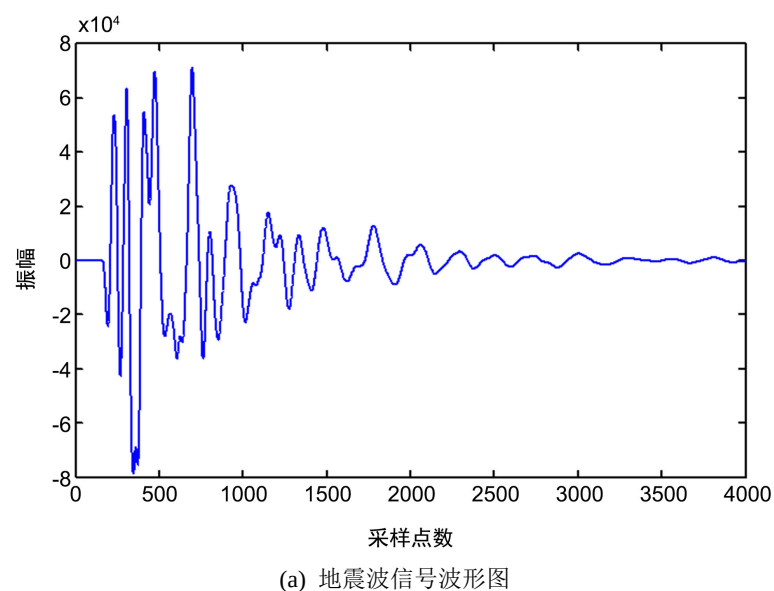


Figure 1. Original, reconstructed and error signal diagrams

图 1. 原始、重构与误差信号图



(a) 地震波信号波形图

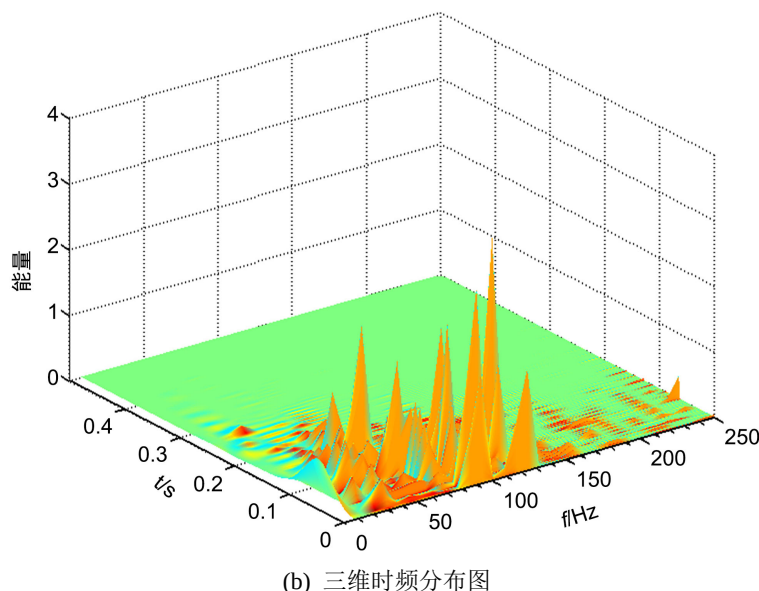


Figure 2. Seismic waveform and three-dimensional energy spectrum
图 2. 地震波波形及三维能量谱图

4. 爆破振动信号能量分布特征的定量分析

4.1. 爆破振动信号能量分布分析原理

爆破地震波信号频带能量分布可按照以下步骤进行, 首先将爆破地震波信号分解到第 9 层, 设 $S_{9,j}$ 对应的能量为 $E_{9,j}$, 且有[22]

$$E_{9,j} = \int |S_{9,j}|^2 dt = \sum_{k=1}^m |x_{j,k}|^2 \quad (2)$$

式中, $x_{j,k}$ ($j = 0, 1, 2, \dots, 2^9 - 1; k = 1, 2, \dots, m; m = 4000$, 为地震波信号离散采样点数) 为重构信号 $S_{9,j}$ 的离散点的幅值。设被分析信号的总能量为 E_0 , 则有

$$E_0 = \sum_{j=0}^{2^9-1} E_{9,j} \quad (3)$$

各频带能量占信号总能量的比例为:

$$E_j = \frac{E_{9,j}}{E_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中, $j = 0, 1, 2, \dots, 2^9 - 1$ 。因此, 由式(2)~(4)计算能够得到爆破振动信号经过提升小波包分解后, 爆破振动信号不同频带的能量值和能量百分比, 从而可以定量的比较不同装药爆源激发地震波信号各频带能量值及其所占信号总能量的百分比。

按照上述原理, 对图 2 中的地震波信号进行 9 层分解与重构, 得到的地震波频带能量分布如图 3 所示。因为 250 Hz 以后的信号能量很小, 所以图中只显示了 250 Hz 以内信号的频谱分布, 其中每个频带的宽度为 7.8125 Hz。图 3(a)为地震波信号的能量值分布特征, 图 4(b)为地震波信号的能量比例值分布特征。由图 3 可知, 经过提升小波包变换后, 能够对爆破地震波信号的能量值分布以及能量比例值进行定量分析, 经过提升小波包分析得到了不同炸药种类的爆破振动信号能量分布特征, 以及各频带能量所在位置和所占信号总能量的比例值。

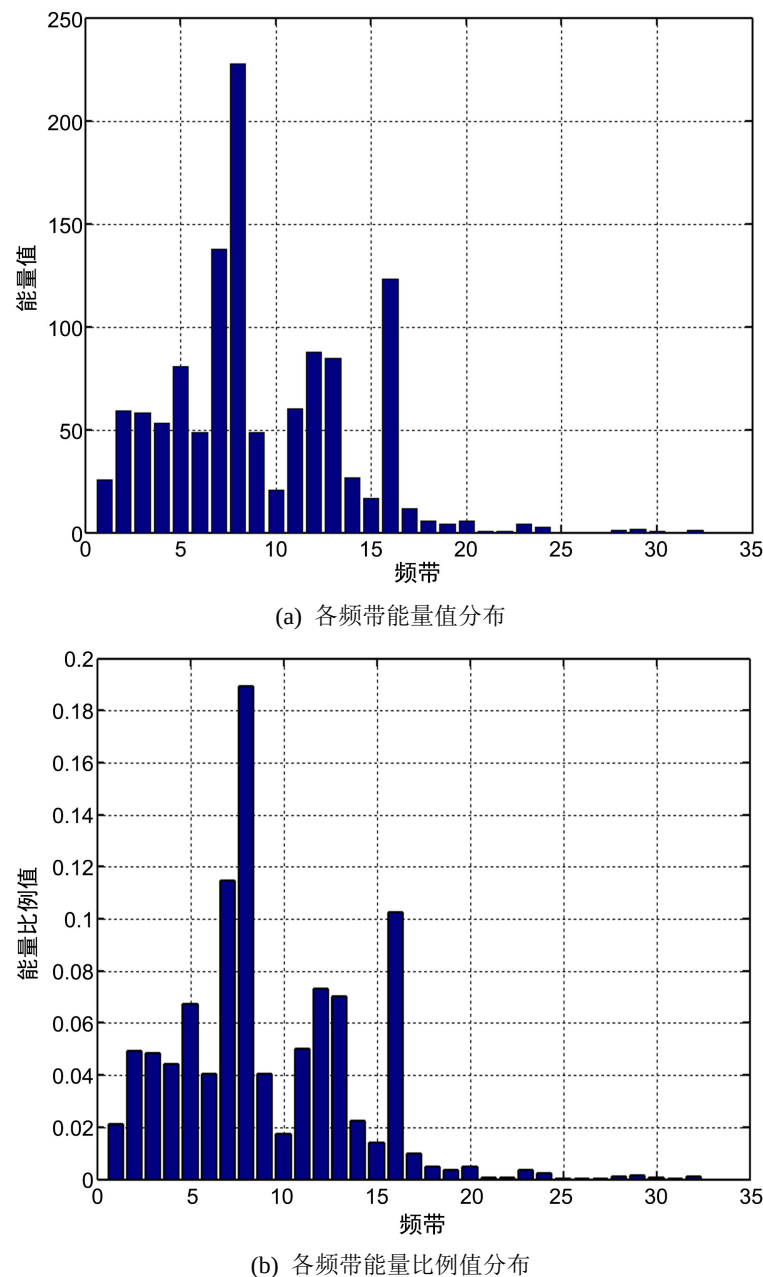


Figure 3. Energy distribution of seismic waves in each frequency band
图 3. 地震波各频带能量分布图

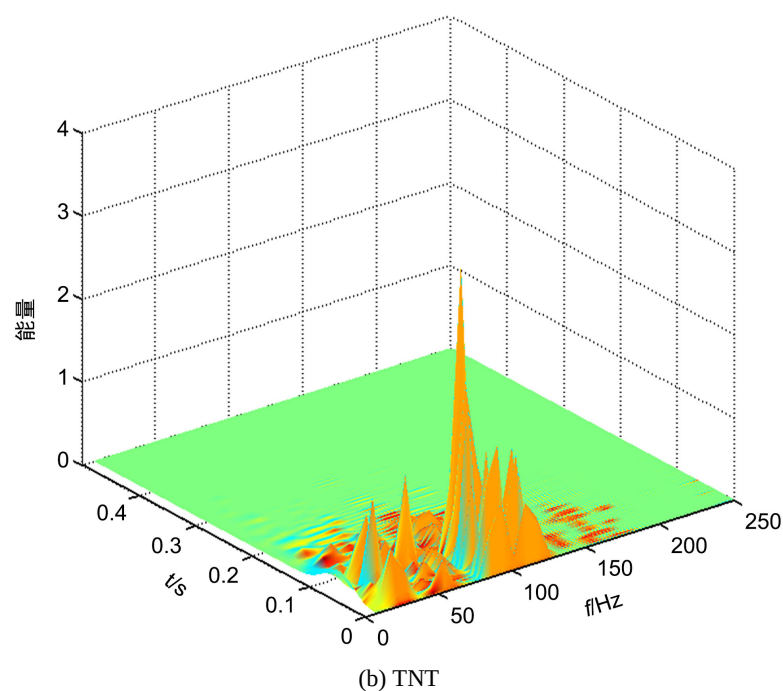
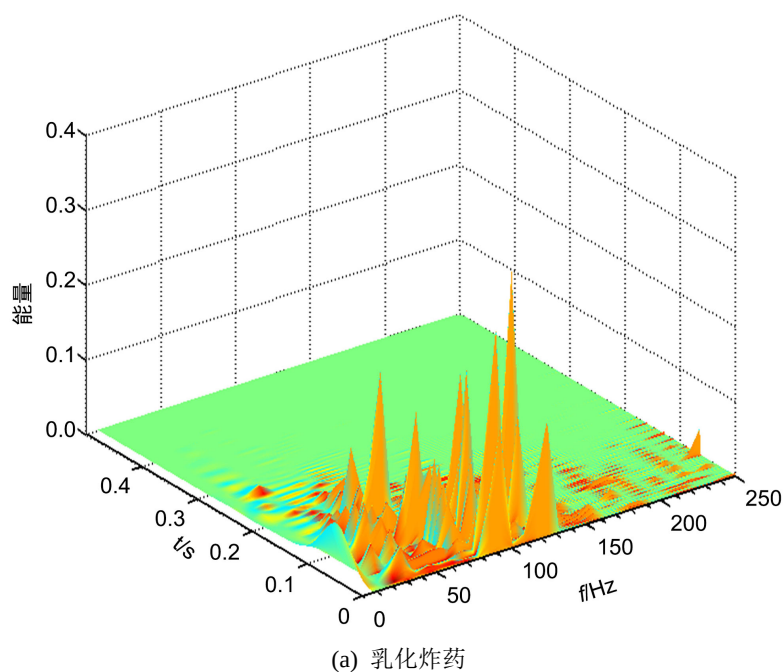
4.2. 炸药种类对地震波能量分布特征的影响

4.2.1. 单道地震波信号的能量分布对比

在典型岩石介质中进行了乳化、TNT、RDX 三种常用爆源装药激发的地震波信号实测试验。借助提升小波包变换深入分析爆破振动信号的能量频谱分布特征，研究不同炸药种类对爆破振动信号能量频谱分布的影响。依据提升小波包能量谱分析原理，编程计算得到三种装药第 15 道地震波信号的三维能量谱如图 4 所示，由图可知乳化炸药激发的地震波信号总能量及各频带能量都比 TNT 和 RDX 装药时小，但是乳化炸药激发时地震波信号的低频能量相对更丰富。通过分析这是由于乳化炸药爆速比 TNT 和 RDX

装药小, 因此相同质量的条件下, 爆炸产生的能量乳化炸药更小。但是由于乳化炸药爆速低, 因此产生的地震波频率低, 衰减慢; 爆速更高的 TNT 和 RDX 装药产生的地震波频率高, 衰减更快。

表 2 是对三种不同装药爆源激发时第 15 道实测地震波信号进行提升小波包分解与重构后各频带能量分布的数据统计, 为了便于比较, 表 2 根据能量的分布范围把地震波信号分为 6 个频段。其中 0~10 Hz 的低频信号以及 80~250 Hz 的高频信号能量都很弱, 所占总能量的百分比都较小。大部分振动信号能量集中在 10~80 Hz 的频段范围内, 其中乳化炸药激发时为 69.2%、TNT 为 51.4%、RDX 为 67.8%。但是 TNT 和 RDX 装药激发时地震波信号总能量值相差较小。



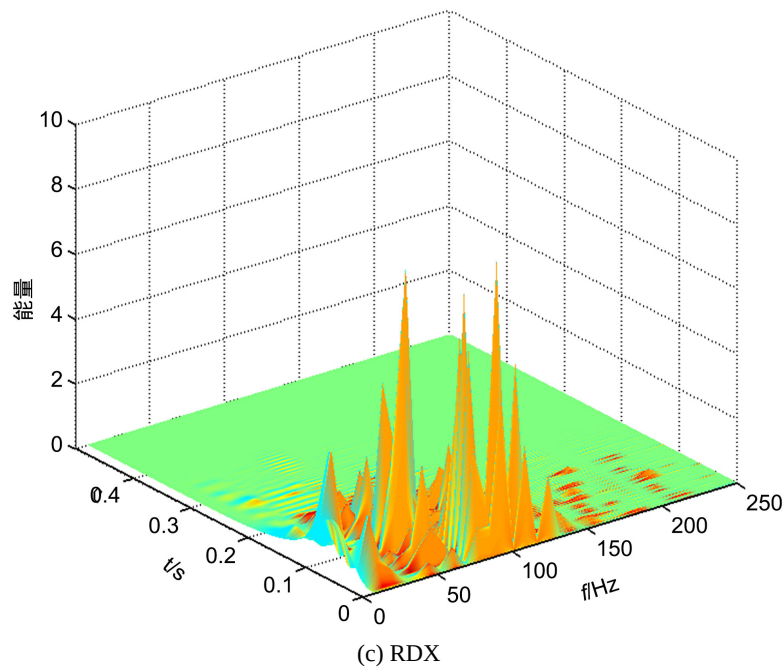


Figure 4. Three-dimensional energy spectra of seismic waves with different drug properties

图 4. 不同药性时地震波三维能量谱图

Table 2. Energy of seismic wave in each frequency with different explosives

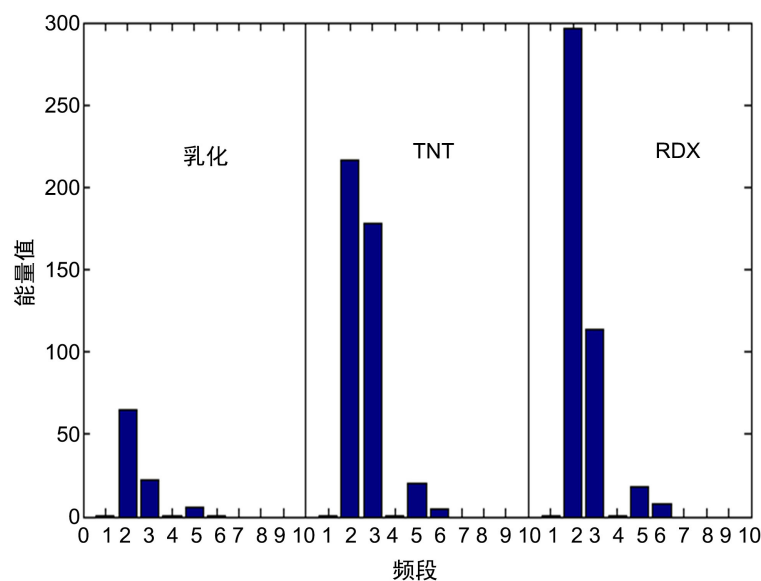
表 2. 不同炸药时地震波各频带能量

频段	频带/Hz	乳化炸药		TNT 炸药		RDX 炸药	
		能量值 /(cm/s) ²	能量百分比/%	能量值 /(cm/s) ²	能量百分比/%	能量值 /(cm/s) ²	能量百分比/%
1	0~10	0.0147	0.02	0.3224	0.08	0.3695	0.09
2	10~80	64.786	69.2	216.41	51.44	296.11	67.87
3	80~130	22.613	24.2	178.31	42.38	114.05	26.14
4	130~190	0.3441	0.37	0.2947	0.07	0.4965	0.11
5	190~220	5.3356	5.70	20.194	4.80	17.732	4.07
6	220~250	0.4760	0.51	5.1842	1.23	7.5131	1.72
全频段	0~250	93.569	100	420.71	100	436.26	100

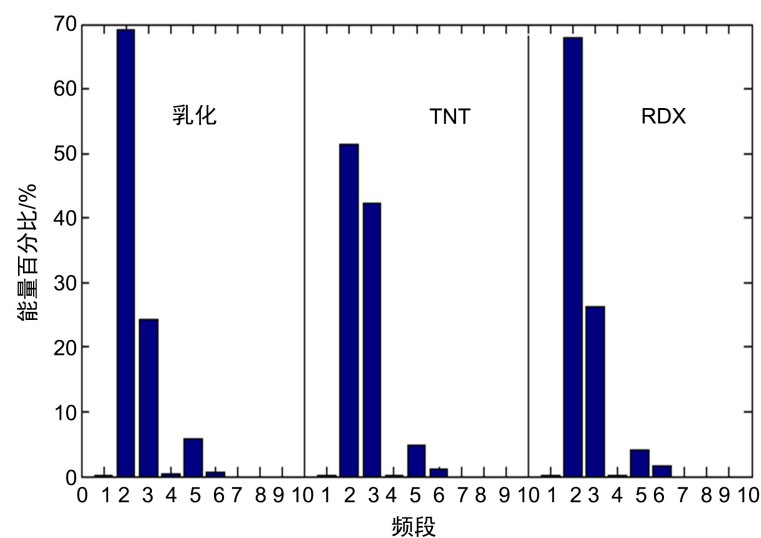
图 5 是单道地震波信号的各频段能量及能量百分比对比图。由图 5 可知，虽然乳化炸药激发时地震波信号的总能量及低频段频带能量都比 TNT 和 RDX 时要低的多，但是该炸药爆源激发时低频带能量百分比更高。

4.2.2. 不同距离地震波信号的能量分布对比

为了研究不同距离所测地震波信号的能量分布特征，对三种不同装药爆源激发的第 1、5、10、20、25、30、35、40、45、50、55、60、65、70 道地震波信号同样进行了提升小波包变换分析，频带能量值及分布比例分析结果如表 3 所示，从各道信号的总能量值来分析，TNT 和 RDX 装药爆源激发时各道地震波信号能量都比乳化炸药时更大。且 TNT 和 RDX 装药爆源激发的地震波信号总能量随着距离的增大越来越接近，10~80 Hz 频段范围内的能量值也较接近。



(a) 能量值柱状分布图



(b) 能量比例值柱状分布图

Figure 5. Energy distribution of seismic waves in each frequency under different explosives**图 5.** 不同炸药时地震波各频带能量分布**Table 3.** Seismic wave frequency band energy and distribution for different explosives**表 3.** 不同炸药时地震波频带能量及分布

道号	乳化炸药			TNT			RDX		
	总能量	10~80 Hz 能量值	能量 百分比/%	总能量	10~80 Hz 能量值	能量 百分比/%	总能量	10~80 Hz 能量值	能量 百分比/%
1	299.8	247.9	82.7	2770.6	1434.1	51.8	1460.4	899.8	61.6
5	739.5	535.2	72.4	2848.9	2089.2	71.3	2240.1	1556.8	69.4
10	387.2	258.3	66.7	1437.2	904.2	62.9	1149.3	733.5	63.8

续表

15	93.6	64.8	69.2	420.7	216.6	51.5	436.3	296.3	67.9
20	46.9	30.2	64.6	106.9	58.9	55.1	334.7	199.3	59.5
25	108.8	48.7	44.8	200.9	53.4	26.6	597.5	184.2	30.8
30	29.7	24.2	81.6	67.4	37.4	55.5	115.2	71.4	61.9
35	47.8	18.2	38.0	141.3	38.7	27.4	245.4	72.4	29.5
40	85.3	59.5	69.7	155.4	103.2	66.4	178.7	125.0	69.6
45	5.3	2.8	50.6	20.2	9.4	46.5	23.8	9.9	41.6
50	31.1	24.9	80.3	87.9	60.9	69.3	90.6	65.3	72.1
55	2.5	1.8	72.7	11.1	7.2	64.9	10.9	7.5	69.3
60	7.0	5.3	75.2	33.3	16.1	48.4	31.8	19.1	59.8
65	19.1	12.8	67.4	102.0	57.0	55.9	86.8	52.4	60.3
70	23.4	13.5	57.6	75.5	35.0	46.4	81.2	37.3	46.0

图 6 为三种不同装药爆源激发地震波信号能量随道号衰减情况，由图 6 可知 3 组信号的总体趋势都是随着距离的增大而减小的，第 30 道以前它们的能量差别比较大。但是由于地层对高频的吸收作用，第 30 道以后信号能量越来越接近。另外，第 5、25、35 道地震波信号都比它前 5 道的信号能量强，分析认为这是由于碳酸盐岩石的孔、缝、洞的岩石物理特征，使得岩层中传播的反射地震波产生绕射、散射和折射等现象，造成某些测点的地震波信号加强或减弱。

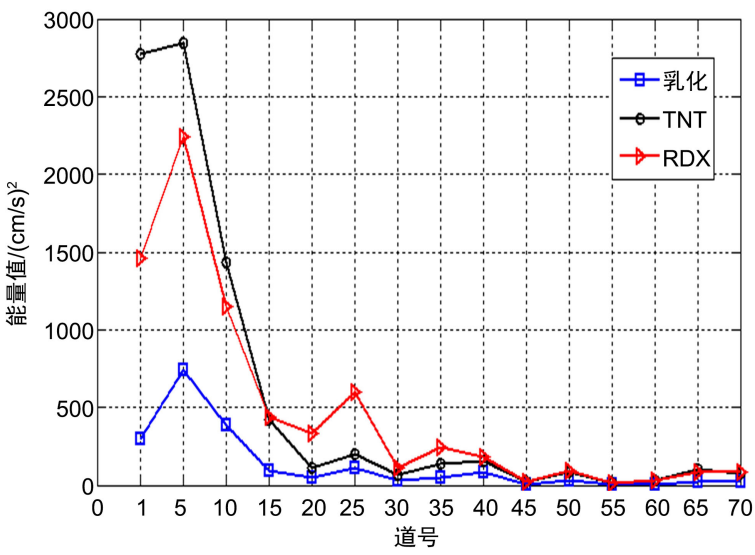


Figure 6. Energy changes with distance
图 6. 地震波能量随距离变化

为研究药性对低频段能量的影响，对乳化炸药、TNT 和 RDX 炸药爆源激发地震波信号的 10~80 Hz 频带能量比例大小进行了计算。图 7 是该三种炸药爆源激发 10~80 Hz 地震波信号能量百分比随距离的变化，由图 7 可知乳化装药爆源 10~80 Hz 能量比例比其它两种装药爆源大，表明乳化装药时其低频能量比例更大，对于爆破振动危害控制更需引起重视。

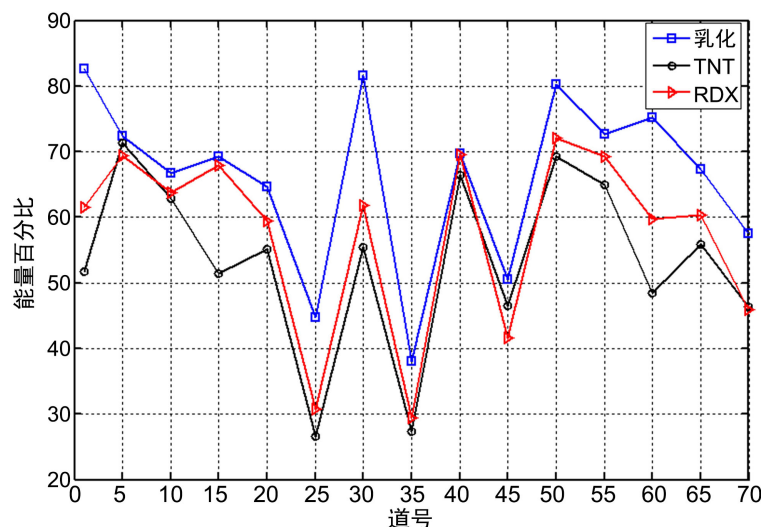


Figure 7. The energy of the 10~80 Hz with distance

图 7. 10~80 Hz 频带能量随距离变化

5. 结论

1) 提升小波包变换综合了小波包和提升算法两者的优点, 实现了地震波信号的多尺度分解与重构、直观展示地震波能量的三维时频分布特征, 展示信号能量随时间和频率变化的动态特征和细微变化, 具有较强非稳态动态变换的时频刻画能力。

2) 通过提升小波包变换分析得到不同炸药爆源条件下地震波信号各频带能量的定量分析和相关频带信号的重构, 以及各频带能量大小所处时刻和所占信号总能量的比例值。

3) 不同距离地震波信号能量值, TNT 和 RDX 装药都比乳化炸药更大。但随着距离的增大, 总能量值越来越接近; 爆破振动信号大部分能量集中在 10~80 Hz 的频段, 且 10~80 Hz 频段范围内的能量百分比, 乳化炸药比 TNT 和 RDX 装药更高。

参考文献

- [1] 周建敏, 余红兵. 不同爆破参量对爆破振动信号能量分布的影响[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(11): 41-44.
- [2] 中国生, 敖丽萍, 赵奎. 基于小波包能量谱爆炸参量对爆破振动信号能量分布的影响[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(3): 300-305.
- [3] 范志强, 马宏昊, 沈兆武, 等. 爆破参量对爆破振动信号能量分布特征影响的研究[J]. 爆破, 2012, 29(4): 1-5+79.
- [4] 崔雪姣, 周建敏, 赵明生, 等. 延时间隔对爆破振动信号时频特征的影响[J]. 工程爆破, 2020, 26(3): 85-88.
- [5] 王伟, 李兴华, 陈作彬, 等. 基于小波包变换的爆破振动信号能量熵特征分析[J]. 爆破器材, 2019, 48(6): 19-23.
- [6] 陈吉辉, 仇文革, 赵旭伟, 等. 基于小波包技术地铁隧道分区爆破振动特性研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(6): 222-228+255.
- [7] 陈作彬, 李兴华, 范磊, 等. 基于小波包变换的爆破地震反应谱分析[J]. 爆破器材, 2018, 47(5): 59-64.
- [8] 费鸿禄, 曾翔宇, 杨智广. 隧道掘进爆破振动对地表影响的小波包分析[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(1): 77-83.
- [9] 单仁亮, 宋永威, 白瑶, 等. 基于小波包变换的爆破信号能量衰减特征研究[J]. 矿业科学学报, 2018, 3(2): 119-128.
- [10] 吴从师, 徐荣文, 张庆彬. 自由面对爆破振动信号能量分布特征的影响[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(6): 907-914.
- [11] 张声辉, 刘连生, 钟清亮, 等. 露天边坡爆破地震波能量分布特征研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(7): 224-232.
- [12] 周建敏, 汪旭光, 龚敏, 等. 缓冲孔对爆破振动信号幅频特性影响研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(1): 240-244+280.
- [13] 王子明, 闫建文, 杨振军. 洞室爆破振动信号时频分析及能量分布研究[J]. 西安理工大学学报, 2021, 37(2): 261-268.

- [14] 凌同华, 李夕兵. 单段爆破振动信号频带能量分布特征的小波包分析[J]. 振动与冲击, 2007, 26(5): 41-43+151-152.
- [15] 晏俊伟, 龙源, 方向, 等. 基于小波包变换的爆破地震波时频特征提取及分析[J]. 振动与冲击, 2007(4): 25-29+167.
- [16] Yang, B., Yan, G., Yan, R. and Wu, T. (2007) Adaptive Subject-Based Feature Extraction in Brain-Computer Interfaces Using Wavelet Packet Best Basis Decomposition. *Medical Engineering & Physics*, **29**, 48-53.
<https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2006.01.009>
- [17] 凌同华, 李夕兵. 地下工程爆破振动信号能量分布特征的小波包分析[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(1): 63-68.
- [18] 吴腾芳, 乌国庆, 周瑶, 等. 爆炸物品识别图[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [19] 林大超, 白春华. 爆炸地震效应[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 53-54.
- [20] 杨志强. 深井爆破振动衰减规律与控制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [21] 闫长斌. 爆破作用下岩体累积损伤效应及其稳定性研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2006.
- [22] 凌同华, 李夕兵. 单段爆破振动信号频带能量分布特征的小波包分析[J]. 振动与冲击, 2007, 26(5): 41-43.