文章编号：1003-1480（2026）01-0075-07

不同介质间隔装药结构爆破的振动信号分析研究

关福晨[1,2]，费鸿禄[2]，辛鹏飞[3]，管久霄[1]，张 峰[1]，山 杰[2]

（1. 辽宁农业职业技术学院，辽宁 营口，115009；2. 辽宁工程技术大学 爆破技术研究院，辽宁 阜新，123000；3. 神东天隆集团股份有限公司武家塔露天煤矿，内蒙古 鄂尔多斯，017200）

摘 要：本研究以武家塔露天煤矿为依托，通过现场爆破试验并结合 CEEMDAN-Hilbert 变换方法，对比分析了空气介质与水介质间隔装药结构爆破诱发的振动信号特征。结果表明：水介质间隔装药在低频区间（0~70 Hz）的能量分布更显著，其信号能量显著高于空气介质间隔装药，表明水介质与炸药及岩体的耦合作用更优，能释放更高能量以优化爆破效果。两种间隔装药结构爆破的振动信号主要能量均集中在 70 Hz 以内，水介质爆破的最大能量占比集中在 30~40 Hz，而空气介质爆破的最大能量占比集中在 40~50 Hz。因此，水介质间隔装药在工程应用中需采取控制措施，避免与周边建（构）筑物固有频率共振，确保结构安全。

关键词：CEEMDAN-Hilbert；空气介质；水介质；间隔装药；爆破振动；能量；频率

中图分类号：TJ45+9；TD235 **文献标识码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.1003-1480.2026.01.012

Analysis of Blasting Vibration Signals From Interval Charge Structures with Different Media

GUAN Fu-chen[1,2]，FEI Hong-lu[2]，XIN Peng-fei[3]，GUAN Jiu-xiao[1]，ZHANG Feng[1]，SHAN Jie[2]

（1. Liaoning Agricultural Vocational and Technical College, Yingkou, 115009；2. Blasting Technology Research Institute, Liaoning Technical University, Fuxin, 123000；3. Wujiata Open-pit Coal Mine,Shendong Tianlong Group Co., Ltd. Ordos, 017200）

Abstract：Based on field blasting tests at the Wujiata Open-Pit Coal Mine, this study comparatively analyzed the characteristics of blast vibration signals induced by air-medium and water-medium interval charge structures using the CEEMDAN-Hilbert transform method. Key results indicate:water-medium blasting exhibits significantly more prominent energy distribution in low-frequency ranges (0~70 Hz), with signal energy substantially higher than that of air-medium blasting. This demonstrated superior coupling effects between water medium, explosives, and rock mass, enabling higher energy release for optimized blasting effectiveness. Both blasting modes concentrate primary energy below 70 Hz, but peak energy proportion occurs at 30~40 Hz for water-medium blasting versus 40~50 Hz for air-medium blasting. Engineering applications of water-medium interval charging require resonance prevention measures to avoid alignment with natural frequencies of surrounding structures, ensuring safety.

Key words：CEEMDAN-Hilbert；Air-medium；Water-medium；Interval charge；Blasting vibration；Energy；Frequency

钻爆法在隧道掘进、矿山开采等工程项目中应用广泛，其应用成效对于项目控制与管理起关键作用。在诸多影响因素中，间隔装药结构爆破对于爆破效果及振动强度的影响尤为显著，已成为国内外众多学者研究的焦点[1-4]。

刘江超等[5-9]采用 Starfield 迭加法进行分析，结果表明空气介质与水介质间隔装药结构在爆破过程中对炮孔壁应力及爆破效果有显著影响。叶建军等[10-11]

收稿日期：2025-09-20

作者简介：关福晨（1995-），男，讲师，主要从事爆破工程、地下工程、岩土与隧道工程方向研究。

通讯作者：辛鹏飞（1991-），男，工程师，主要从事矿山开采与爆破工程研究设计工作。

基金项目：辽宁省“兴辽英才计划”教学名师项目（NO.XLYC2211015）。

引用本文：关福晨，费鸿禄，辛鹏飞，等. 不同介质间隔装药结构爆破的振动信号分析研究[J]. 火工品, 2026(1): 75-81.

通过理论推导，确定了合理的炮孔底部空气介质间隔长度。现场应用表明，该方法不仅优化了爆破效果，同时有效降低了孔底峰值压力和爆破振动强度。费鸿禄等[12]研究了炮孔底部与中部采用两段水介质间隔装药结构的爆破方法，发现该技术能显著提高炮孔压力，优化爆破效果。曹勇等[13]运用高速摄像机和 MATLAB 图像处理技术对露天煤矿水封爆破所采集的图像进行分析，得出水封爆破具有显著的降尘效果。张肯等[14-15]基于 CEEMDAN 光滑降噪模型，以各频带与原始信号的相关系数及均方误差作为评价指标，揭示了空气介质间隔装药结构爆破产生的振动强度特征。邱贤阳等[16-17]采用小波包分析法对空气介质间隔装药结构爆破诱发的振动强度进行分析，揭示了该爆破振动信号的时频特性。

综合分析可知，采用间隔装药技术的爆破作业可提升爆破效率、降低振动强度，还能控制爆破过程及降尘。但目前针对水介质环境下间隔装药爆破振动信号特征研究不足。为此，本研究依托武家塔露天煤矿工程，开展了空气与水介质间隔装药结构的现场爆破试验，用 CEEMDAN - Hilbertb 变换法对比分析爆破振动信号，以揭示不同介质间隔装药结构爆破振动信号特征差异。本研究的成果预期将为空气介质和水介质间隔装药结构爆破技术的应用提供科学依据。

1 现场试验

现场爆破试验在内蒙古自治区鄂尔多斯市武家塔露天煤矿进行。该露天矿区的岩层主要由砂岩和泥岩构成，岩石的密度介于 2 500~2 700 kg・m^{-3} 之间，岩石的抗压强度范围为 15~40 MPa。矿区的岩体属于软岩和中硬岩，纵波在岩体中的传播速度在 2 900~3 900 m・s^{-1} 之间。

现场爆破试验采用空气介质和水介质两种不同的间隔装药结构开展爆破作业，具体装药结构如图 1 所示。与此同时，在台阶上布置多台 TC-4850 型爆破测振仪，用以监测现场爆破试验所引发的振动信号。测振仪的监测范围设定为距离爆破中心 50~200 m，测振仪之间的间距为 20 m。测振仪的 X 轴方向指向爆破区域的中心，定义为径向；Y 轴方向为切向；Z 轴方向为垂直方向。两组试验均使用数码电子雷管进行起爆，起爆药包选用 2 kg 的二号岩石乳化炸药，主起爆药为混装粒装铵油炸药。炮孔孔径为 170 mm，深度为 13 m（包含 1 m 超深），爆破参数如表 1 所示。

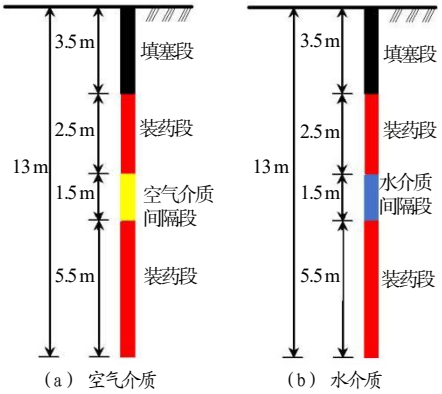


图 1 不同介质间隔装药结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of different medium interval charges

表 1 爆破试验参数表

Tab.1 Blasting test parameters table

参数名称	间隔介质	
	空气	水
单孔药量/kg	145	145
炮孔直径/mm	170	170
台阶高度/m	12	12
排距/m	5	5
孔距/m	7	7
超深/m	1	1
孔间延时/ms	45	45
排间延时/ms	124	124

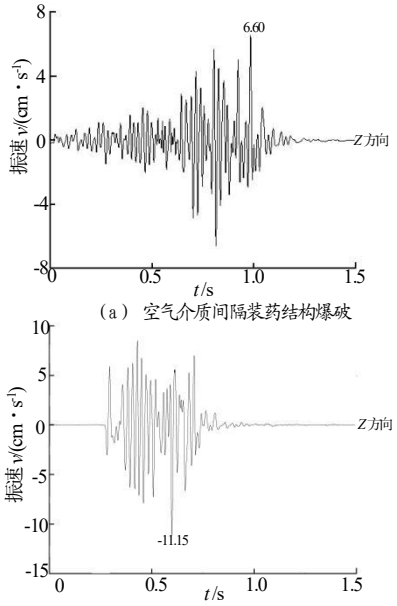
2 爆破振动信号处理与分析

CEEMDAN-Hilbert 变换是将 CEEMDAN 分解法（即完全自适应噪声集合经验模态分解）与 Hilbert 变换（即希尔伯特-黄变换）相结合的信号分析方法[18-19]。CEEMDAN 分解法是以 EMD（即经验模态分解法）为基础算法，可自适应地将振动信号分解成一系列从高频到低频的 IMF 分量（即本征模态函数），并通过集成求均值的方式对信号进行重构，进而消除信号非对称波动及白噪声等因素的影响。随后，对每个 IMF 分量实施 Hilbert 变换以获取精确的时频与能量关系。因此，应用 CEEMDAN-Hilbert 变换法处理爆破振动信号，既能缓解端点效应与模态混叠现象，

又可避免噪声产生的干扰[20-21]。

2.1 信号模态处理

通过对监测所得的爆破振动信号进行系统整理与分析，发现爆破振动强度及振动衰减特性等关键指标主要受垂直方向（即 Z 轴方向）信号的影响。基于此，本研究选取 Z 轴方向的振动监测信号作为主要分析对象，具体分析过程如图 2 所示。



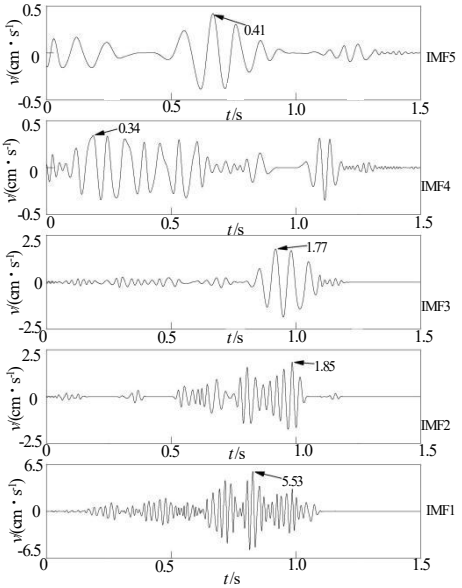
（a） 空气介质间隔装药结构爆破

（b） 水介质间隔装药结构爆破

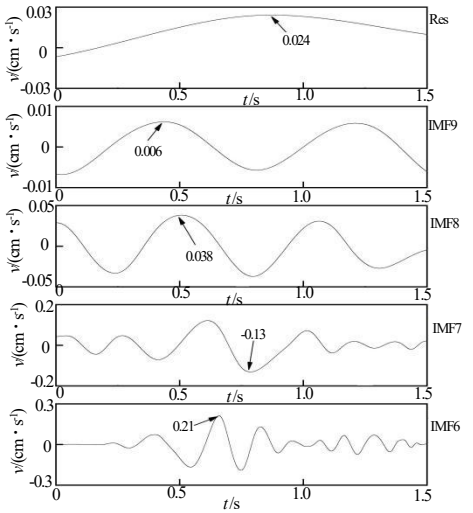
图 2　不同介质间隔装药结构爆破的振动信号 Z 方向图

Fig.2　Vibration signal Z-direction diagram of explosive structures with different medium interval charges

对 Z 轴方向进行 CEEMDAN 模态分解，得到的空气介质装药爆破的振动信号分解结果如图 3 所示；水介质装药爆破的振动信号分解结果如图 4 所示。



（a） IMF1~IMF5 分量



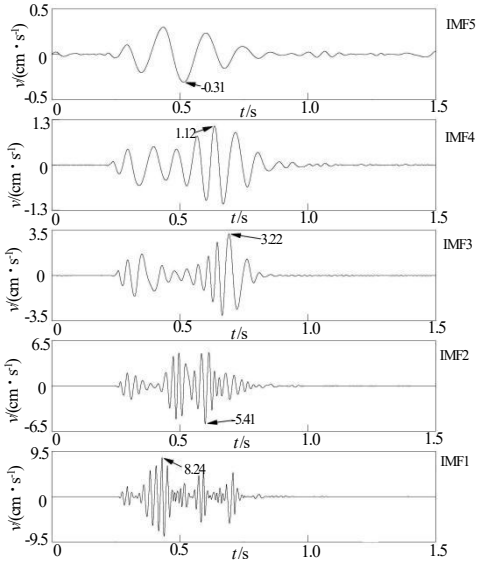
（b） IMF6~IMF10 分量

图 3　空气介质间隔装药结构爆破的振动信号 IMF 分解图

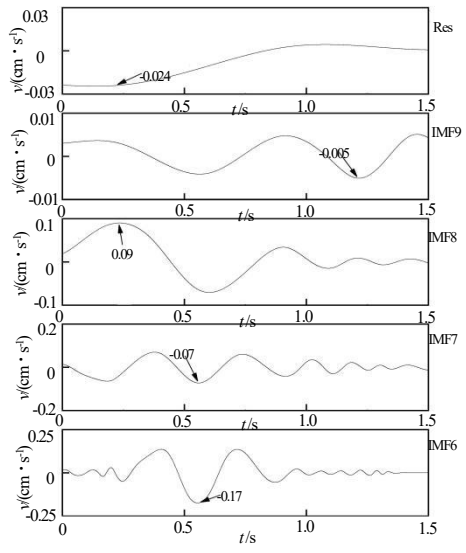
Fig.3　IMF decomposition diagram of vibration signal of air medium interval charge structure blasting

经分解后的本征模态函数（IMFs）有助于深入剖析爆破振动信号中的各类频率成分及其随时间演变的特征，为评估空气介质与水介质间隔装药结构的爆破效果提供了关键依据。每个本征模态函数（IMF）分量对应信号中的一个特定频段，这使得能够更为精细地分析爆破振动信号的能量分布与频率特性。

由图 3~4 可知，空气介质与水介质间隔装药结构在爆破过程中产生的振动信号的内在模态分量（IMF）的幅值与频率均呈现出递减趋势。这表明爆破振动信号的 IMF 各分量的能量随之降低。此外，残余项（Res）的频率降至最低点，这反映了爆破振动信号的变化趋势或仪器的零漂现象。



（a） IMF1~IMF5 分量



（b） IMF6~IMF10 分量

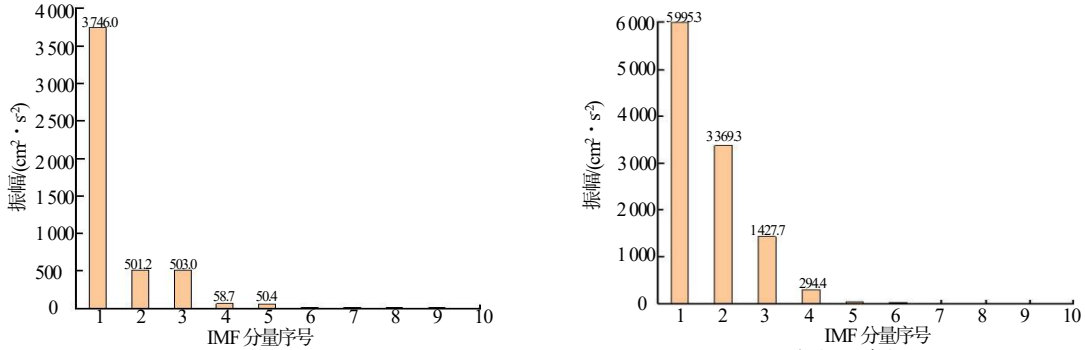
图 4 水介质间隔装药结构爆破的振动信号 IMF 分解图

Fig.4 IMF decomposition diagram of vibration signal for water medium interval charge structure blasting

2.2 信号模态分析

振动信号的振幅大小是衡量各本征模态函数（IMF）分量能量水平的关键指标。本研究采用集合经验模态分解与自适应噪声方法对爆破振动信号进行模态分解，并对分解得到的 IMF 分量进行了振幅的可视化处理，结果如图 5 所示。

由图 5 可知：（1）在空气介质与水介质两种不同间隔装药结构的爆破过程中，IMF-1 分量的能量占据绝对优势，两种爆破方式产生的振动信号 IMF 分量振幅的最大值分别为 3 746.0 $cm^2 \cdot s^{-2}$和 5 995.3 $cm^2 \cdot s^{-2}$；（2）不同 IMF 分量的振幅差异显著，空气介质间隔装药结构爆破的振动信号能量主要集中在 IMF-1~IMF-3 分量，而水介质间隔装药结构爆破的振动信号能量不仅分布在 IMF-1~IMF-3 分量，IMF-4 分量也表现出不可忽视的能量贡献。为了深入研究各 IMF 分量与主频之间的关系，本研究运用快速傅里叶变换（Fast Fourier Transform, FFT）技术分别分析了空气介质与水介质两种间隔装药结构爆破的振动信号 IMF 分量对应的能量及主频，其变换结果如表 2 所示。



(a) 空气介质间隔装药结构爆破　　(b) 水介质间隔装药结构爆破

图5 不同介质间隔装药结构爆破的振动信号 IMF 能量分布图

Fig.5 Vibration signal IMF energy distribution diagram of explosive structures with different medium interval charges

表 2 不同介质间隔装药结构爆破的振动信号 IMF 分量能量及主频表

Tab.2 Vibration signal IMF component energy and main frequency table for blasting structures with different medium interval charges

项目名称	指标	IMF 分量									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
空气介质间隔装药结构爆破	能量/（$cm^2 \cdot s^{-2}$）	3 746.0	501.2	503.0	58.7	50.4	10.2	6.5	3.0	0.6	0.5
	主频/Hz	45.41	32.71	15.63	14.65	9.77	4.88	2.93	1.95	0.98	0.49
水介质间隔装药结构爆破	能量/（$cm^2 \cdot s^{-2}$）	5 995.3	3369.3	1427.7	294.4	29.3	21.3	2.3	2.1	0	0
	主频/Hz	43.46	31.18	15.14	12.21	6.34	2.93	2.4	1.5	0.96	0.48

从表 2 的变换数据结果对比分析可知：（1）空气介质与水介质两种间隔装药结构爆破的振动信号 IMF 分量主频随阶次升高而逐级递减；（2）空气介质间隔装药结构爆破时，振动信号的最大主频为 45.41 Hz，水介质间隔装药结构爆破的最大主频为 43.46 Hz。空气介质中的振动信号各级 IMF 分量主频略高水介质；（3）水介质间隔装药结构爆破时产生的振动信号总能量高于空气介质，特别是在 IMF-2~IMF-4 分量的能量差异更为显著（如 IMF-2 能量差达 2 868.1 $cm^2 \cdot s^2$）。表明水介质中进行间隔装药结构爆破时，振动信号的能量分布更倾向于低频分布。

产生该现象的主要原因为：（1）在标准大气压和温度条件下，水介质密度约为 1 000 $kg \cdot m^{-3}$，空气介质密度约为 1.225 $kg \cdot m^{-3}$，水介质密度远远大于空

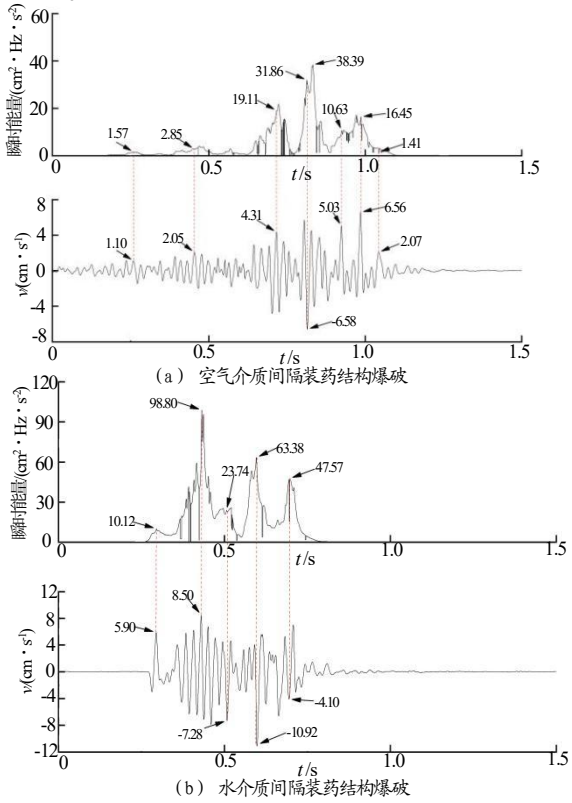
气介质密度[22]。并且，爆破诱发的振动在水介质中的传播速度亦远大于在空气介质中的传播速度，从而导致爆破诱发的振动在水介质中传播时波长更长，频率更低；（2）在标准大气压和温度条件下，水介质热导率约为 0.6 W ·(m ·K)$^{-1}$，空气介质热导率约为 0.025 W · (m · K)$^{-1}$，相较于空气介质，水介质具备更高的黏性与热导率[22]。当爆破诱发的振动在水介质中传播时，水的高粘性阻力将振动能量转化为热能，水介质的高热导率使得爆破诱发的振动能量更容易通过热传导耗散。同时，由于高频振动的波长和周期较短，粒子运动剧烈、能量交换频繁，导致高频振动能量衰减速率远高于低频振动能量，故而低频能量更易保留；（3）相较于空气介质，水介质具有极性和氢键结构，在爆破振动作用下，水分子间会产生弛豫效应，该效应对高频振动的影响更显著，会导致一定的高频能量耗散；（4）水介质中的微小气泡、悬浮颗粒等不均匀性会对爆破所诱发的振动波产生散射作用，该作用对高频振动的影响更强，会导致高频能量衰减速率更快。

综上所述，水介质作为间隔介质时，与炸药耦合效果优于空气介质，爆炸能量能更均匀传至周围岩体，有效降低高频振动，也使爆破振动信号能量更倾向分布在低频段。因此，应用水介质间隔装药结构爆破时，需考量其诱发的爆破振动强度对周边建（构）筑物的共振效应影响，并采取减振措施，防止建（构）筑物受损。

2.3 信号能量主频分析

为直观揭示空气介质与水介质两种间隔装药结构爆破振动信号在全时段内的能量累积及其变化特性，本研究绘制了爆破振动信号及其对应的瞬时能量谱和边际谱图，见图 6~7。同时为进一步分析能量的分布状况，在能量谱的基础上变换得到对应信号的边际能量谱，如图 8 所示。

由图 6 可知，瞬时能量谱与爆破振动信号的几何形态相对应。振动信号突变时，瞬时能量表现出急剧的增减趋势。在空气介质中采用间隔装药结构进行爆破时，振动信号的最大瞬时总能量为 38.39 cm^2 · s^{-2}，其能量分布主要集中在 0.2~1.1 s 的时间范围内；而在水介质间隔装药结构进行爆破时，振动信号的最大瞬时总能量为 98.80 cm^2 · s^{-2}，其能量分布主要集中在 0.3~0.8 s。

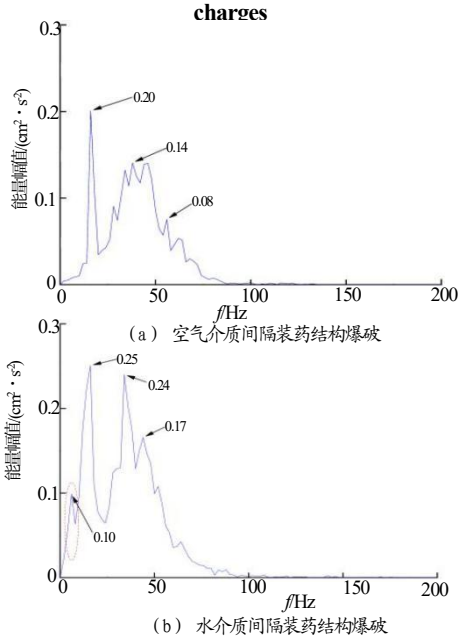


（a） 空气介质间隔装药结构爆破

（b） 水介质间隔装药结构爆破

图 6　不同介质间隔装药结构爆破的振动信号与对应瞬时能量图

Fig.6　Vibration signals and corresponding instantaneous energy diagrams of explosive structures with different medium interval charges



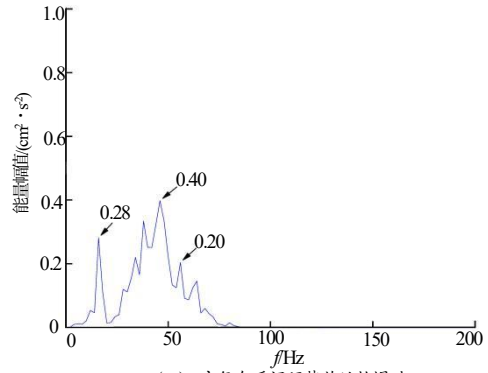
（a） 空气介质间隔装药结构爆破

（b） 水介质间隔装药结构爆破

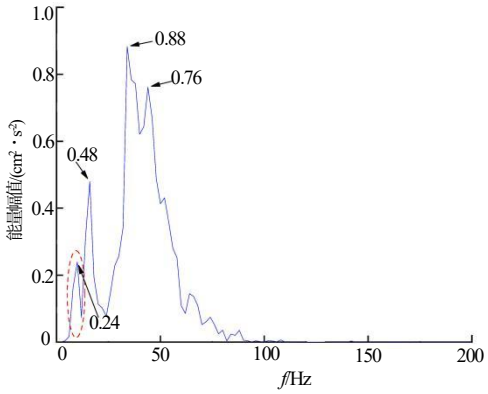
图 7　不同介质间隔装药结构爆破的振动信号边际谱图

Fig.7　Marginal spectrum of vibration signals for blasting structures with different medium interval charges

从图 7 能够看出，空气介质与水介质这两种间隔装药结构爆破所产生的振动信号主频带，均主要分布于 100 Hz 以内，主振频率约为 15 Hz；两者的振动信号边际谱均存在次子频带，且主要分布在 35 Hz 附近。水介质间隔装药结构爆破的振动信号主频带与次子频带的能量幅值明显高于空气介质，这表明其能量主要集中于低频段。



（a） 空气介质间隔装药结构爆破



（b） 水介质间隔装药结构爆破

图 8 不同介质间隔装药结构爆破的振动信号边际能量谱图

Fig.8 Marginal energy spectrum of vibration signals for blasting structures with different medium interval charges

通过对图 7~8 对比分析可知，两种间隔装药结构爆破的振动信号边际谱与边际能量谱的能量幅值范围高度相关。空气介质与水介质这两种间隔装药结构爆破的振动信号能量最大值分别对应在 46 Hz 和 34 Hz。在 0~70 Hz 区间内，水介质间隔装药结构爆破的振动信号各能量峰值均高于空气介质间隔装药结构爆破。这表明相较于空气介质间隔装药结构爆破，水介质间隔装药结构爆破的振动信号能量更高，且在低频区域能量分布更为均匀集中，这也是水介质间隔装药结构能够明显改善爆破效果主要原因之一。

为深入剖析不同介质间隔装药结构爆破振动信号各频带与能量之间的关联，将图 8 中 0~70 Hz 区间以每 10 Hz 为单位划分为一个频率区间，70 Hz 以上单独划分为一个区间。对曲线在不同频率带内进行定积分运算，分析其能量占比状况，结果如表 3 所示。

表 3 不同介质间隔装药结构爆破的振动信号频带能量占比表

Tab.3 Proportion of vibration signal frequency band energy for blasting structures with different medium interval charges

项目名称	频率/Hz	空气介质间隔装药结构爆破	水介质间隔装药结构爆破
频带能量百分比/%	0~10	0.9	2.7
	10~20	10.9	11.2
	20~30	5.8	6.7
	30~40	22.6	29.0
	40~50	33.0	27.7
	50~60	15.1	14.3
	60~70	9.4	5
	>70	2.3	3.4

由表 3 可知，空气介质与水介质这两种间隔装药结构爆破所产生的振动信号能量主要集中于 0~70 Hz 频段，此频段内的总能量占比均超过 90%。其中，在 0~50 Hz 频段内，水介质间隔装药结构爆破的能量占比明显高于空气介质，这表明水介质间隔装药结构爆破的能量集中于低频阶段。

3 结 论

本研究通过现场爆破试验以及 CEEMDAN - Hilbert 变换法，对比分析了空气、水介质间隔装药结构爆破所诱发的振动信号特征。以内蒙古武家塔露天煤矿工程为依托，运用 TC-4850 测振仪对信号实施监测，并通过边际谱分析与频带能量积分对能量分布规律进行了量化。

（1）能量分布特征：水介质间隔装药结构爆破所产生的振动信号能量，相较于空气介质有显著提升，且更为集中于低频段（0~70 Hz），其中 30~40 Hz 频段的能量占比达到最大值；而空气介质的能量则主要集中在 40~50 Hz 频段。这一现象表明，水介质与炸药及岩体之间的耦合作用更为良好，能够更为有效地传递爆炸能量，进而优化爆破效果。

（2）振动信号特性：水介质间隔装药结构爆破振动信号的主频相对较低（最大值为 43.46 Hz），全时段的能量累积效应显著，最大瞬时总能量达到 98.80 $cm^2 \cdot s^{-2}$，且主要分布在 0.3~0.8 s 时段；空气介质的主频略高（最大值为 45.41 Hz），最大瞬时总能量为 38.39 $cm^2 \cdot s^{-2}$，主要分布在 0.2~1.1 s 时段。这表明水介质能够降低高频振动，从而减少对周边结

构的潜在危害。

（3）工程应用建议：水介质间隔装药结构的爆破能量集中在低频且数值较大，在实际工程应用中，需着重关注其可能与周边建（构）筑物固有频率产生共振效应，进而对结构安全构成威胁。建议依据周边环境实施减振措施，例如调整爆破参数、优化装药结构或采用隔振材料等，以确保工程安全。

综上所述，本研究为空气介质与水介质间隔装药结构爆破的应用提供了科学依据与指导，对于优化爆破设计、提升爆破效果以及保障工程安全具有重要的理论与实践价值。

参考文献：

[1] 宗琦, 田立, 汪海波. 水介质不耦合装药爆破岩石破坏范围的研究和应用[J]. 爆破, 2012, 29(2): 42-46.

[2] 顾文彬, 王振雄, 陈江海,等.装药结构对爆破震动能量传递及爆破效果影响研究[J].振动与冲击, 2016, 35(2): 207-211.

[3] Moradi M, Mansouri H, Farsangi m A E, et al. Modelling of bottom air-deck blasting in a single hole, using the SPH-FEM method[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2024, 42(6): 4 891-4 911.

[4] Jang H, Handel D, KO Y, et al. Effects of water deck on rock blasting performance[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018(112): 77-83.

[5] 刘江超, 高文学, 张声辉, 等. 水间隔装药孔壁爆炸应力分布规律[J]. 兵工学报, 2021, 42(12): 2 646-2 654.

[6] 刘江超, 高文学, 张声辉. 隧道掘进周边孔间隔装药结构选取及优化[J]. 爆破, 2021, 38(3): 38-44.

[7] 林继凯, 孙梦迪, 刘增辉, 等. 中部空气间隔不同比例装药对炮孔孔壁受力及碎石块度的影响[J]. 爆破器材, 2023, 52(6): 55-64.

[8] 王浩. 露天深孔台阶爆破水耦合装药结构效应[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2022.

[9] 楼晓明, 官旭晖, 曾令峰, 等. 孔底间隔装药孔壁冲击压力特性[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(6): 174-188.

[10] 叶建军, 彭庆波, 王雁冰, 等. 深孔孔内分段爆破技术[J]. 爆破, 2023, 40(2): 61-68.

[11] 严鸿海, 张义平, 任少峰, 等. 孔底准真空间隔装药的爆破效果试验研究[J]. 爆破, 2018, 35(1): 66-74.

[12] 费鸿禄, 纪海楠, 山杰. 露天台阶水介质间隔装药结构优选及对比试验研究[J]. 黄金科学技术, 2023, 31(6): 930-943.

[13] 曹勇, 周永利, 刘智超, 等. 哈尔乌素露天煤矿水封爆破降尘试验及效果分析[J]. 煤炭工程, 2020, 52(S2) : 33-37.

[14] 张肯, 于燕, 刘犇, 等. 基于 GDEM-BlockDyna 的不同装药结构对爆堆形态影响研究[J]. 爆破, 2024, 41(2): 127-135.

[15] 苟倩倩, 赵明生, 张光雄, 等. 装药结构对爆破振动能量传递的影响研究[J]. 爆破, 2020, 37(1): 61-67.

[16] 邱贤阳, 史秀志, 周健, 等. 基于 HHT 能量谱的高精度雷管短微差爆破降振效果分析[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(1): 107-113.

[17] 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.

[18] 关福晨. 隧道爆破掘进下穿明长城遗址的安全限界及优化设计方案研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2020.

[19] 费鸿禄, 山杰. CEEMDAN-小波阈值法在爆破振动信号处理中的应用[J]. 爆破, 2022, 39(3): 41-47.

[20] 张雪英, 谢飞, 乔铁柱,等. 基于 EEMD 与改进小波阈值的磁记忆信号降噪研究[J]. 太原理工大学学报, 2015, 46(5): 592-597.

[21] 山杰. 露天台阶水介质间隔装药结构爆破效果及振动信号分析[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2023.

[22] 天津大学物理化学教研室. 物理化学[M]. 第六版. 北京: 高等教育出版社, 2017.