

DOI:10.13347/j.cnki.mkaq.2018.09.057

竖井爆破振动及 CO₂ 致裂振动信号的小波包分析

刘光辉,王海亮,吴钦鑫

(山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建教育部重点实验室,山东 青岛 266590)

摘要: 为了达到认识 CO₂ 致裂振动的危害并提出危害控制方法的目的,将 CO₂ 致裂振动与爆破振动信号从能量分布特征的角度来进行研究。结合某地铁竖井工程,获取竖井指定点的振动信号,采用 db6 小波基对振动信号进行小波包分析,结果表明:在多数工况下,CO₂ 致裂的质点峰值振速仅为炸药爆破的 10%;爆破振动信号能量随时间的变化表现出高频部分衰减快、低频部分衰减慢的特征;爆破振动能量分布范围广泛,而 CO₂ 致裂振动能量频带较为集中,中心频率约为 120 Hz,三矢量方向振动能量大小关系具体表位为:z 方向>y 方向>x 方向。

关键词: 地铁竖井;CO₂ 致裂;爆破振动;小波包分析;能量分布

中图分类号: TD235.39

文献标志码: A

文章编号: 1003-496X(2018)09-0233-05

Shaft Blasting Vibration and CO₂ Fracturing Vibration Signals by Wavelet Packet Analysis

LIU Guanghui, WANG Hailiang, WU Qinxin

(State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: In order to understand the hazards of CO₂ fracturing vibration and propose the purpose of the hazard control method, the CO₂ fracturing vibration and blasting vibration signals are studied from the perspective of energy distribution characteristics. In combination with a subway shaft project, vibration signals at specified points in the shaft were obtained, and wavelet packets were used to analyze the vibration signals using db6 wavelet basis. The results showed that the peak particle velocity of CO₂ fracturing was only 10% of the explosive blasting under most conditions. The change of blasting vibration signal energy shows the characteristics of fast decay at high frequency and slow decay at low frequency over time; blasting vibration energy has a wide range of distribution, and the frequency band of CO₂ fracturing vibration energy is more concentrated, the center frequency is about 120 Hz, and the relationship between the vibration energy of the three vector directions is shown as follows: z direction>y direction>x direction.

Key words: metro shaft; CO₂ fracturing; blasting vibration; wavelet packet analysis; energy distribution

多年来,传统炸药爆破技术因煤矿本身的特殊性和炸药所固有的危险性,限制了爆破技术在矿井中的应用。因此,人们开始探索代替炸药爆破进行掘进的安全技术^[1]。20世纪50年代,英国的CARDOX公司为煤矿采煤工作研制出液态二氧化碳相变致裂装置,当时称为Cardox管;20世纪80年代,国内一些学者开始对这项技术有了初步认识:Cardox管释放出二氧化碳气体作用于岩石上,产生剪切力使之有效破碎成小块从而便于移动^[2];2007年聂政^[3]等将此技术应用在煤矿中,并总结出其特点及原理;2014年董庆祥^[4]等利用LS-DYNA模拟出液态二氧

化碳致裂的TNT当量;2016年杜泽生^[5]等针对试验矿井炮掘速度慢、粉尘及有害气体较多的问题,研制二氧化碳爆破开采器,并获得国家专利。

总体而言,目前国内外在液态CO₂致裂技术的理论研究已逐渐趋于成熟,但对于其致裂时产生的振动却鲜有研究。鉴于此,依托青岛市地铁一号线西镇站开挖工程来探讨爆破振动与CO₂致裂振动信号振动速度、时频-能量对比及三矢量方向振动能量的区别,以期为后续爆破与CO₂致裂振动分析、建筑物的保护以及解决由其引起的民事纠纷提供理论依据。

1 工程背景

1.1 矿井概况

工程地点位于西藏路、费县路与郛城北路的交叉路口,1号竖井位于车站主体的西侧,风井结构形式为矩形,整体围岩等级Ⅲ级,长×宽为8.6 m×6.6 m,井深38 m,采用倒挂井壁法施工,竖井初期支护厚300 mm,由喷射混凝土、钢筋网片及钢筋格栅组成,井内采用临时中隔壁结合型钢支撑体系。其中,隧道南侧的多层砖混结构居民楼是控制振速的主要单位,控制振速要求为1.5 cm/s。

1.2 二氧化碳致裂器构造

二氧化碳致裂器(图1)主要由提拉杆、起爆头、发热管、主管、密封圈、破裂片、泄能头等6部分组成,是以液态二氧化碳为主要工作介质的物理爆破设备。发热管内含有多种化学粉末,主要包括高氯酸钾、水杨酸、草酸铵等。经委托检验,发热管内药剂摩擦感度、静电感度、火焰感度和撞击感度的发火率^[6]均为0%。当置于液态二氧化碳环境下通入0.8 A以上的电流时,发热管内药粉即可瞬时发生反应产生热量,使液态二氧化碳发生相变。

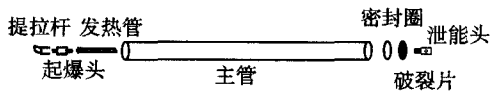


图1 二氧化碳致裂器基本结构

1.3 二氧化碳致裂原理

充装液态二氧化碳完成后将CO₂致裂管装入钻孔连线,采用专用起爆器进行激发,当微电流通过发热管时,产生高温将储液管中液态二氧化碳激发相变,在40 ms内体积迅速膨胀,使致裂管内压力骤升,突破破裂片极限承载能力。气液共存状态下的二氧化碳从致裂管冲出后迅速汽化,高压气体从泄能头的排气孔喷射而出,压缩空气介质,扰动叠加后形成冲击波冲击岩体。岩体受到冲击波的压力产生径向的位移从而被破坏产生裂隙^[7]。

2 小波包分析法

小波分析是一种优于Fourier变换的多尺度细化分析方法。小波包分解正是在小波分解的基础上被提出的,是对小波分析中没有被分解信号的高频部分进行多层次划分,并把原始信号分成高频和低频部分,同时能根据信号特征和分析自行选择相应

频带与信号频谱进行相匹配的方法^[8]。振动信号 $y(t)$ 的小波包分解与重构表示如式(1):

$$y(t) = \sum_{k=0}^{2^j-1} y_{j,k} \quad (1)$$

式中: $y(t)$ 为振动信号; $y_{j,k}$ 为 j 层第 k 个频带的重构信号,且 $k=0,1,2,\dots,2^j-1$ 。

基于小波包理论,进行 n 层分解后第 j 个频带重构信号 $S_{n,j}$ 对应的频率范围^[9]为:

$$[j \sim (j+1)] \times f_a / 2^n \quad (2)$$

式中: $j=0,1,2,\dots,2^n-1$; f_a 为分析频率。

本次将被分析信号分解至8层,设 $S_{8,j}$ 对应的能量为 $E_{8,j}$,则有

$$E_{8,j} = \int |S_{n,j}|^2 dt = \sum_{i=1}^k |y_{j,i}|^2 \quad (3)$$

式中: $y_{j,i}$ 为重构信号 $S_{n,j}$ 离散点对应的幅值; i 为离散点个数。

设本次振动信号的总能量为 λ ,则有

$$\lambda = \sum_{j=1}^{2^8-1} E_{8,j} \quad (4)$$

根据上式可得各频带能量占总能量的百分比:

$$E_j = \frac{E_{8,j}}{\lambda} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $j=0,1,2,\dots,2^8-1$ 。

3 振动试验测试

3.1 爆破试验设计

该竖井采用矿山法施工,断面长×宽为8.6 m×6.6 m。爆破采用不耦合空气间隔装药方式,使用MFB-200型发爆器起爆,炸药使用2号岩石乳化炸药。预计循环进尺1.0 m,采用复式楔形掏槽,竖井轴线方向共钻探4个直径为400 mm的大直径中空孔,掏槽眼孔深为1.2 m,单孔装药量为0.75 kg,周边眼距为600 mm,单段最大起爆药量为11.7 kg,炮眼布置图如图2。

为了降低爆破振动,就必须最大限度减小单段最大起爆药量^[10]。就本工程而言,为了使爆破振速度大小低于1.5 cm/s,单段最大起爆药量按萨道夫斯基公式计算。

$$v = \frac{K}{R^\alpha} \cdot Q^{\omega/3} \quad (6)$$

式中: R 为爆源与被保护的建筑物之间的距离; m ; Q 为齐发爆破总药量,延期爆破为单段最大起爆药量,kg; v 为保护对象所在地质的振动安全允许速度,本工程取1.5 cm/s; K 、 α 为与爆源至保护对象间

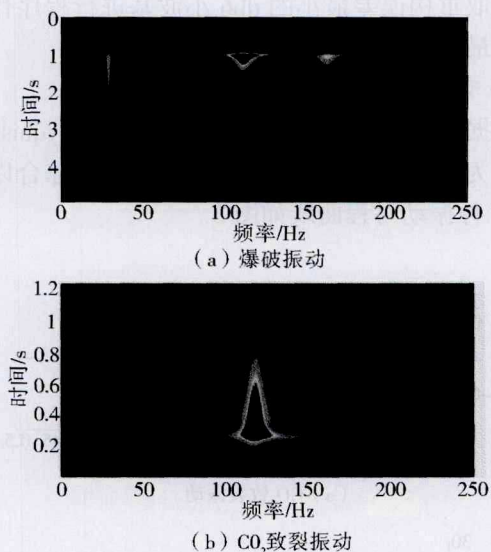


图4 振动时频谱

1) 爆破振动信号的频率响应范围相对较宽, 频率成分也更为丰富。其中, 爆破振动信号表现出瞬时、间断的冲击响应规律, 而 CO_2 致裂振动信号的频率成分相对单一, 频段峰值较为集中, 中心频率约为 120 Hz, 过程变化相对缓慢。

2) 从能量的聚集上看, 爆破振动信号的最大能量频率区间依次为 25~40 Hz、100~125 Hz、160~175 Hz, 而 CO_2 致裂振动信号的频率区间较为单一, 仅在 100~135 Hz 区间内。

3) 从能量的衰减上看, 爆破振动信号在 25~40 Hz 频率区间衰减较慢, 而在 150~200 Hz 区间内衰减较快, 这表现出爆破振动信号在高频部分衰减快、在低频部分衰减慢的特征。

4.3 三矢量方向振动信号能量比较

对 2 种典型振动信号的 3 个矢量方向进行分解, x 、 y 、 z 方向的三维能量时频谱图(图 5)。

对比上述振动信号的小波包分解可以看出:

1) CO_2 致裂振动的能量峰值约为同矢量方向的爆破振动信号的 1/4。以 z 方向为例, 前者峰值能量幅值为 2.86×10^{-5} kJ, 后者振动信号能量幅值为 9.87×10^{-5} kJ, 这充分证明了 CO_2 致裂振动质点峰值振速较爆破振动小的可靠性。

2) CO_2 致裂振动 x 方向的能量峰值为 4.82×10^{-6} kJ, y 方向为 1.01×10^{-5} kJ, z 方向为 2.86×10^{-5} kJ; 而爆破振动信号 x 方向的能量峰值为 8.71×10^{-5} kJ, y 方向为 2.86×10^{-4} kJ, z 方向为 9.87×10^{-5} kJ, 前者振动信号的矢量方向的能量峰值均小于爆破振动信

号, 且 z 方向的能量幅值最大。

3) 2 种振动信号能量主要集中在 0~200 Hz 的频率范围内, 其中在 100~150 Hz 的频率范围内, CO_2 致裂振动信号表现明显, 达到总能量的爆破振动信号 81%, 同样地爆破振动信号也达到了 54%。在 150~200 Hz 的频率集中范围内, 爆破振动能量百分比大于 CO_2 致裂振动, 这说明爆破振动信号相对于 CO_2 致裂振动而言属于更加高宽频的非平稳随机振动。

5 结论

1) 针对实例工程的多数工况, 爆破介质相同时 CO_2 致裂的质点峰值振速仅为炸药爆破的 10%, 可以认为其不会对建(构)筑物造成破坏。

2) CO_2 致裂振动信号的频率成分相对单一, 而爆破振动信号的频率响应范围相对较宽, 频率成分也更为丰富。2 种振动信号能量分布范围较为广泛, 主振频带均集中在 0~200 Hz 之间, 且由多个分振频带组成, 但两者能量峰值的主要聚集区不同。

3) CO_2 致裂的不同振动方向所携带的能量不同, 具体大小关系表示为: z 方向 > y 方向 > x 方向, 同时振动能量分析结果验证了规程采用振动速度峰值作为爆破安全评判指标的合理性。

参考文献:

- [1] 徐颖. 高压气体爆破采煤技术的发展及其在我国的应用[J]. 爆破, 1998, 15(1): 67-69.
- [2] Franke H, Thiel H G. Theoretical and diagnostic investigation of gas blast, turbulence controlled arcs in circuit breakers[J]. Elektrotechnische Zeitschrift ETZA, 1971, 92(5): 298-302.
- [3] 聂政. 二氧化碳炮爆破在煤矿的应用[J]. 煤炭技术, 2007(8): 62-63.
- [4] 董庆祥, 王兆丰, 韩亚北, 等. 液态 CO_2 相变致裂的 TNT 当量研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(11): 84-88.
- [5] 杜泽生, 范迎春, 薛宇飞, 等. 二氧化碳爆破采掘装备及技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(9): 36-42.
- [6] 张家行, 张兴华, 李豪君. CO_2 致裂技术机理及其在底鼓治理中的应用[J]. 煤矿安全, 2017, 48(1): 70-73.
- [7] 许梦飞. 煤层中液态二氧化碳相变致裂半径的研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2016.
- [8] 单仁亮, 白瑶, 宋永威, 等. 冻结立井模型爆破振动信号的小波包分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 1923.
- [9] 王晓鹏, 王海亮. 浅埋隧道下穿高压给水管道微振动

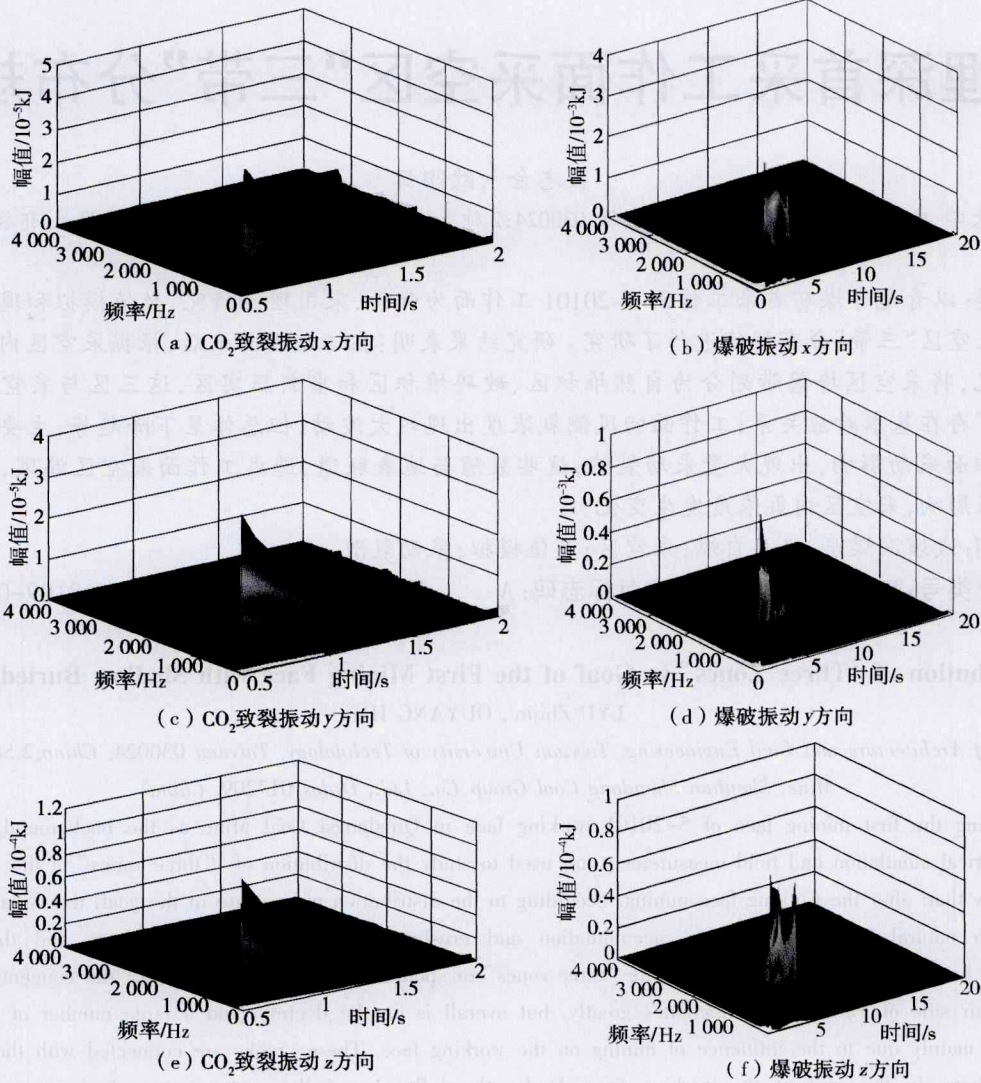


图5 振动信号三维能量时频谱

控制研究[J].山东科技大学学报(自然科学版), 2016, 35(3):61-66.

- [10] 何理.临近边坡精确延时控制爆破地震效应研究[D].武汉:武汉科技大学, 2015.
- [11] 曲村,高亮,辛涛,等.高速列车振动荷载作用下电缆隧道结构动力响应分析[J].振动与冲击, 2011, 30(3):264-268.
- [12] 王海亮,张亮,张祖远.城市隧道爆破震动影响因素

的重要度研究[J].山东科技大学学报(自然科学版), 2016, 35(2):73-78.

作者简介:刘光辉(1995—),男,山东潍坊人,在读硕士研究生,研究方向为工程爆破。

(收稿日期:2018-04-26;责任编辑:陈 洋)

