

岩质路堑液态 CO₂相变爆破的爆孔深度试验*

程选生¹, 刘华东², 张尚龙², 陈俭超¹, 张万林¹

(1. 兰州理工大学西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心 兰州, 730050)

(2. 兰州理工大学甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室 兰州, 730050)

摘要 为研究爆孔深度对液态 CO₂相变爆破技术(liquid carbon dioxide phase transition blasting technology, 简称 LCPTBT)在岩质路堑开挖工程应用中的影响,基于酒-额铁路路堑开挖工程,进行了多组现场工程试验,对爆破实效和振动监测信号进行分析。研究表明:当爆孔深度为 4 m 时能有效利用爆破能量,从爆孔底部沿整个台阶横断面产生贯通裂缝,且临空面部位裂缝发展最充分;在台阶高度大于 5 m 且有自由面时,型号为 Φ89 单管满充致裂器在该地层岩性条件下最大爆孔深度可达约 5 m;各工况中质点在 z 方向的振动速度分量均大于 y 方向和 x 方向;由于自由面的存在,应力波在传播过程中不断反射叠加,使得爆破振动效果加强;随着测点距离的增加,测点处振动持时、质点峰值速度和峰值加速度均逐渐降低,在近距离内先急剧减小,然后随着距离增大而减小的趋势逐渐降低,振动能量分布频段逐渐变窄。

关键词 岩质路堑;液态二氧化碳;相变爆破;爆孔深度

中图分类号 TU751.9;TH706

引言

随着高速公路、铁路建设项目急剧增多,LCPTBT 逐渐被投入到大型土石方开挖工程应用中。文献[1-3]在高瓦斯、低渗透率的煤层中进行了液态 CO₂相变爆破现场试验,发现该技术可有效增加瓦斯抽采量和涌出量。董庆祥等^[4]得出 F57L 型储液管和 SD390 型定压泄能片单次致裂产生的能量与 277 g TNT 所具有的能量相当。孙可明等^[5]进行了原煤和混凝土大试件超临界 CO₂气爆对比试验。学者们对 LCPTBT 的爆破参数和原理进行了研究。周大超^[6]确定了平煤十三矿的最佳装液量为双管串联相变致裂。詹德帅^[7]分析了在不同充装量条件下的 LCPTBT 影响半径。Ke 等^[8]为研究高压液体在 LCPTBT 相变过程中的影响和压力衰减特性,试验测量了该技术在不同距离处高压流体的压力曲线。由于 LCPTBT 具有可控调、绿色无污染且无需繁琐审批流程等优点^[9],为路堑土石方开挖和破岩提供了一种新途径和技术。Zhang 等^[10]在自由场条件下进行了 LCPTBT 岩石破碎试验。Li 等^[11]研究了该技术的有效性、安全性和高效性。爆破振动和振动分析是衡量爆破开挖破坏及振动特性的重

要依据^[12]。

目前,对于 LCPTBT 的研究主要集中于低透气性煤层增透、爆破裂纹扩展机理和超临界 CO₂流体压力分布特性等方面,对其在土石方开挖破岩应用中的现场试验研究较少。课题组基于酒-额铁路路堑开挖工程,针对爆孔深度对 LCPTBT 的影响,进行多组现场工程试验。根据现场爆破实效和振动监测信号分析,为提高 LCPTBT 在土石方开挖工程及破岩技术应用中的爆破实效提供理论依据。

1 试验方案

酒-额铁路路堑开挖工程全长为 1 902 m,工点线路位于酒泉市金塔县鸳鸯池水库西北侧,与肃航一级公路近距离并行,该路段以挖方形式通过,最大挖方深度约为 18 m。选取开挖 DK55+200~DK55+400 试验段,试验段现场情况及地层岩性如图 1 和表 1 所示。

试验采用爆破系统和监测系统分析 LCPTBT 在土石方开挖工程实际应用中对于一定地层岩性、尺寸的路堑台阶的最优爆孔深度,以达到最佳的爆破效果。

* 中铁二十一局集团有限公司科技攻关资助项目(20C-2)

收稿日期:2021-03-26;修回日期:2021-05-09



图 1 试验段现场情况

Fig.1 Field conditions of test section

表 1 试验段地层岩性

Tab.1 Formation lithology of test section

| 序号 | 名称 | 主要成分 | 分类 |
|----|------|--------------------|------------------------|
| 1 | 细圆砾土 | 砂岩、石英岩 | Ⅱ级普通土 |
| 2 | 黏土 | 黏粒 | Ⅲ级硬土 |
| 3 | 石英片岩 | 石英、斜长石 | 强风化:Ⅳ级软石; 弱风化:Ⅴ级次坚石 |
| 4 | 花岗岩 | 石英、钾长石、 斜长石、黑云母 | 强风化:Ⅳ级软石; 弱风化:Ⅴ级次坚石 |

1.1 爆破系统

笔者采用新型一次使用型致裂器^[13]进行试验。表 2 为致裂器规格参数。爆破系统由 LCPTBT 设备和 ZGYX420-1 潜孔钻机组成,爆破系统部分设备如图 2 所示。

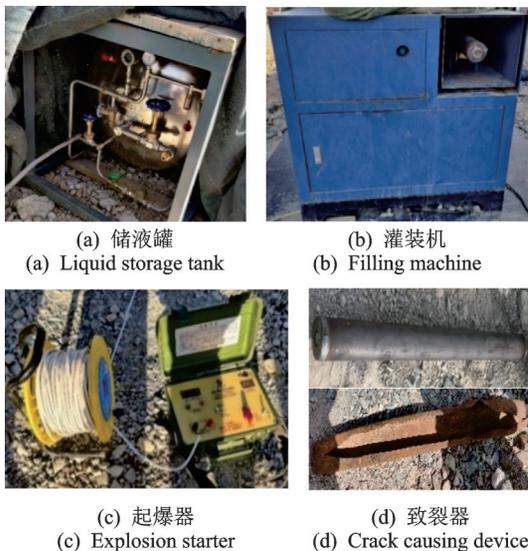


图 2 爆破系统部分设备

Fig.2 Part of the blasting system device

表 2 致裂器规格参数

Tab.2 Specifications of fracturing device

| 型号 | 外径/ mm | 长度/ mm | 最大充装 量/kg | 最大充装 压力/MPa | 单管质量/ kg |
|-----|-----------|-----------|--------------|----------------|-------------|
| Φ89 | 89 | 1 200 | 5 | 10 | 15 |

1.2 监测系统

如图 3 所示,监测系统由东华测试公司的 DH8302 高性能动态信号测试分析采集仪、磁电式振动传感器和计算机组成。DH8302 高性能动态信号测试分析采集仪的最高连续采样频率为 1 MHz。磁电式振动传感器监测质点振动速度量程分 3 个灵敏度:小速度为 30 V·s/m;中速度为 5 V·s/m;大速度为 0.3 V·s/m。



(a) 动态信号测试采集仪

(a) Dynamic signal test & acquisition instrument



(b) 磁电式振动传感器

(b) Magneto-electric vibration sensor

图 3 监测系统

Fig.3 Monitoring system

1.3 试验工况

铁路路堑台阶如图 4 所示。试验中路堑台阶高度 $h=4\text{ m}$,该路基为一般路基,段台阶面宽度 $w_u=5\text{ m}$,台阶底面宽度 $w_d=9.5\text{ m}$,预留操作面宽度 $w_2=2\text{ m}$,爆破工作面宽度为 $w_1=3\text{ m}$ 。表 3 为各工况试验参数。

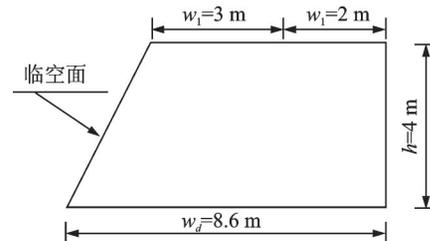


图 4 铁路路堑台阶

Fig.4 Railway cutting step

表 3 各工况试验参数

Tab.3 Test parameters of each working condition

| 工况 | 监测孔深度/m | 爆孔数量 | 爆孔深度/m | 充装量/kg |
|----|---------|------|--------|--------|
| 1 | 1 | 单孔 | 2.5 | 5 |
| 2 | 1 | 单孔 | 4 | 5 |
| 3 | 1 | 单孔 | 5 | 5 |

根据表3,每一种工况分别进行3次爆破试验,LCPTBT钻孔平面布置示意图如图5所示。每一工况3次爆破试验中监测孔距离变化分别为:① $n_1=0.7\text{ m}$, $n_2=1.8\text{ m}$;② $n_1=1.0\text{ m}$, $n_2=3.5\text{ m}$;③ $n_1=1.5\text{ m}$, $n_2=7.0\text{ m}$ 。其中: n_1 和 n_2 分别为爆孔和监测孔之间的距离; l 为爆孔和监测孔距临空面的距离。爆破试验现场沿路堑台阶面长度方向分别测量和标记爆孔及监测孔位置,由专业技术人员操作潜孔钻机按照工况要求打设空孔。爆孔和监测孔打设完毕后进行传感器和致裂器的布置。其中,爆孔内布设1节充满5.0 kg液态CO₂的致裂器,监测孔布置磁电式振动传感器,用来监测爆破振动在此处产生的相互垂直速度分量值及其变化规律。这里 x,y 方向分别为垂直和沿着路堑台阶长度方向, z 向为垂直于台阶面方向。

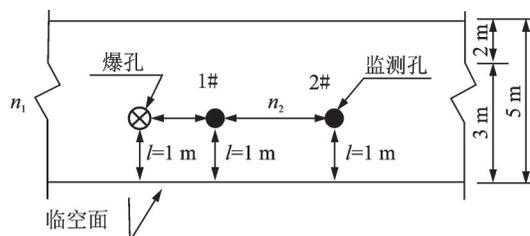


图5 LCPTBT钻孔平面布置示意图

Fig.5 Schematic diagram of LCPTBT drilling layout

2 试验结果及分析

2.1 现场试验爆破效果

爆破后由于岩体的动态抗压强度小于爆破冲击波的压力,爆孔周边首先在冲击波的作用下形成粉碎区,随后冲击波很快衰减为应力波,其强度大于岩体的动态抗拉强度,继续对岩体做功,使粉碎区外的岩体产生径向裂隙,形成裂隙区。裂隙区之外,应力波能量继续衰减,不能使岩体继续产生破坏,称为震动区^[7]。LCPTBT在土石方开挖工程中就是利用其裂隙区的发展,从而达到裂而不爆的效果,增加岩石大块率,降低爆破粉尘的产生。图6为不同工况现场试验爆破效果。

如图6所示,通过对比工况1~3现场爆破结果可知,工况1试验爆孔深度较浅,3次试验均出现了“朝天飞”现象,现场飞石和扬尘高度达到4 m左右。爆破后爆孔周围岩土体上翻隆起形成岩土堆,表面局部大岩块被抬升分离,出现断裂现象,距爆孔最近监测孔均被挤压破坏,爆破大块率不高,且爆破多集中于台阶表面附近,未深入到台阶岩体内部,爆破能量未能充分有效利用。工况2试验爆破后,台阶面以爆孔为中心沿台阶横断面直线方向先发生岩土体

起鼓膨起,岩土体出现明显松动迹象,随后沿该直线方向均有部分灰尘喷出,且临空面方向喷出最多,表明从爆孔底部沿整个台阶横断面有贯通裂缝产生,且临空面部位裂缝发展最充分,爆破效果较好,裂隙区能够发展至台阶面附近。工况3试验爆孔较深,爆破后裂缝从爆孔底部沿台阶横断面向上发展不足,未能形成贯通裂缝,台阶面位于爆破裂隙区之外,仅在临空面等薄弱部位有部分裂缝产生,使得气化后的CO₂气体喷出,爆破实效不佳。



图6 不同工况现场试验爆破效果

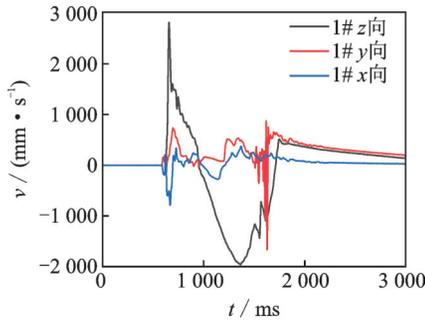
Fig.6 Field test results under different test conditions

2.2 爆破振动特性

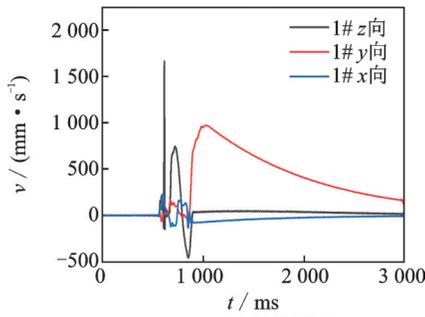
2.2.1 爆破速度传递规律

工况1速度时程曲线如图7所示。可知,振动传递过程中质点 z 向的振动速度分量大于 y 和 x 向振动速度分量。振动产生的波形总体分为3个阶段,即正向/负向攀升阶段、负向/正向攀升阶段和恢复阶段。图7(a)中, z 向速度时程曲线在正向攀升阶段,质点振动速度在28.5 ms内迅速上升达到峰值速度2 820 mm/s,达到正向峰值速度后进入第2阶段即负向攀升阶段。在负向攀升阶段,质点振动速度在708 ms内快速从正向峰值衰减为0,并负向增加

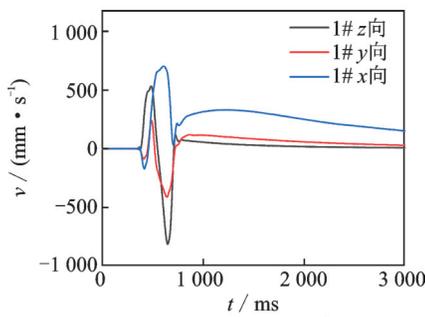
达到负向峰值速度-1962 mm/s。达到负向峰值速度后进入第3阶段即恢复阶段,此时爆炸做功已结束,质点振动速度在413.5 ms内逐渐衰减为0。负向攀升阶段和恢复阶段中振动曲线存在部分波动峰值,这是由于临空面提供了自由面以及台阶岩体中存在节理裂隙等非连续结构,使得应力波在传播过程中不断反射、叠加,形成拉伸波增强的爆破振动效果。



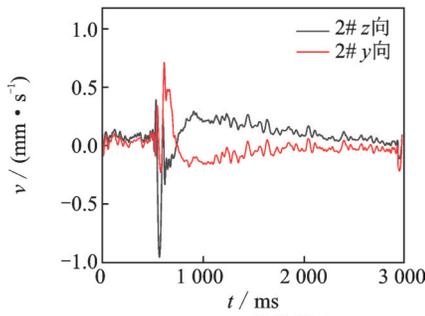
(a) Monitoring site at 0.7 m



(b) Monitoring site at 1.0 m



(c) Monitoring site at 1.5 m



(d) Monitoring site at 4.5 m

图7 工况1速度时程曲线

Fig.7 Speed time history curve of test condition 1

提取各组工况中不同监测点的振动持续时长和峰值速度,得到峰值速度衰减曲线和振动持时变化曲线如图8,9所示。

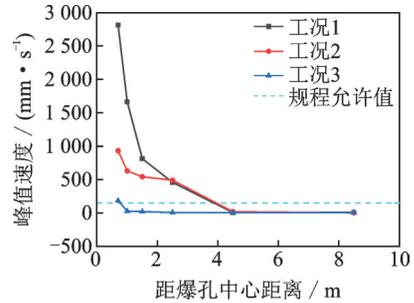


图8 峰值速度衰减曲线

Fig.8 Peak velocity decay curve

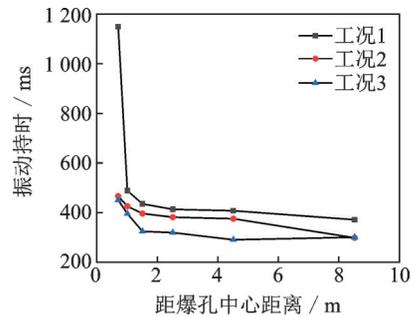


图9 振动持时变化曲线

Fig.9 Vibration duration change curve

由此可见,振动峰值速度和振动持时均随着测点距爆孔中心水平距离的增加而降低,在0.7~1.5 m的距离内急剧减小,1.5~4.5 m的距离内减小的趋势逐渐降低,4.5~8.5 m的距离内减小趋势趋于平缓,这是由于应力波的能量随着传播距离的增加而逐渐衰减。工况3试验中,0~4.5 m距离内各测点处峰值速度均远小于工况1和工况2,这是由于爆孔深度大于路堑台阶的高度,致裂器埋置在台阶底面的地面以下,造成爆破时无足够临空面,即自由面较少,导致应力波流失、反射较少,故爆破实效不佳。

2.2.2 爆破加速度传递规律

工况1的z向加速度时程曲线如图10所示,因z向大于y向和x向,故仅列出z向结果。

由图10可知,LCPTBT爆破时加速度值正向、负向攀升急剧变化,且在短时间内衰减迅速。图10(a)中,加速度时程曲线二次正向峰值即为应力波传播过程中不断反射、叠加所致,增强了爆破振动效果,使得速度时程曲线出现局部波动峰值。

提取各组工况中不同监测点处z向峰值加速度值,得到峰值加速度衰减曲线如图11所示。

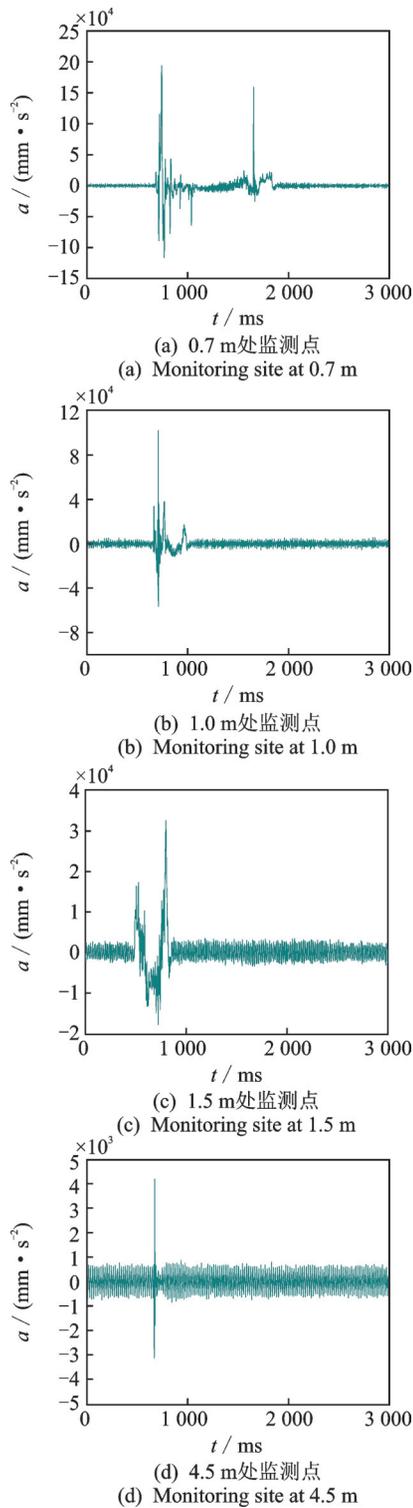


图 10 工况 1 的 z 向加速度时程曲线

Fig.10 z-direction acceleration time history curve of test condition 1

由图 11 可知,各工况中峰值加速度均随着测点距爆孔中心水平距离的增加而降低,0.7~1.5 m 距离内加速度值急剧减小,1.5~4.5 m 距离内减小的趋势逐渐降低,4.5~8.5 m 距离内减小趋势趋于平缓,与振动持时和峰值速度衰减规律较为一致。工

况 1 峰值加速度在 0.7~1.5 m 距离内远大于工况 2 和工况 3,原因是其爆孔深度较浅,爆破振动能量集中在路堑台阶上部。

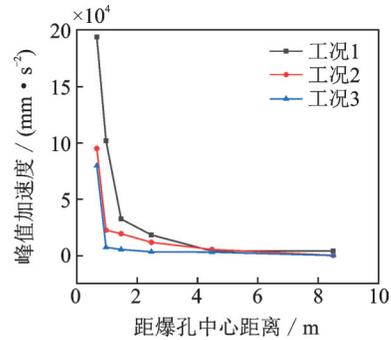


图 11 峰值加速度衰减曲线

Fig.11 Peak acceleration decay curve

图 12 为爆破能量辐射示意图。爆破能量以致裂器为中心向外辐射,根据图 12 中的几何关系,将工况 1~3 中各监测点至爆孔中心的水平距离换算为其至爆破中心的径向距离。采用离散傅里叶变换 (discrete Fourier transform, 简称 DFT) 对爆破振动信号的频域特性进行分析。

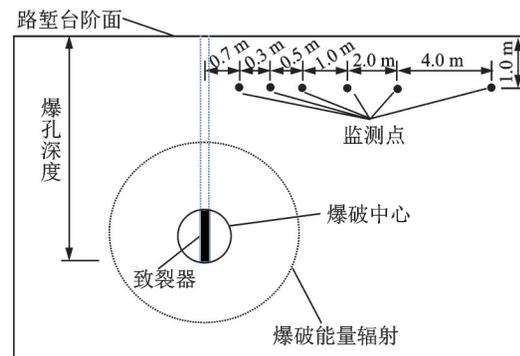


图 12 爆破能量辐射示意图

Fig.12 Schematic diagram of blasting energy radiation

为了分析 LCPTBT 的频域特性,振动信号的傅里叶功率谱为

$$P_k = f_k \bar{f}_k \quad (k = 0, 1, \dots, N - 1) \quad (1)$$

其中: f_k 为 DFT 系数; \bar{f}_k 为 f_k 的复共轭。

傅里叶频率范围取决于振动监测设备的采样频率 f_s , 试验中 DH8302 采集仪最高连续采样频率为 1 MHz, 监测系统的奈奎斯特频率 $N_f = 0.5 \times 10^6$ Hz, 即频率范围为 $0 \sim 0.5 \times 10^6$ Hz, 可满足试验要求。根据式(1)计算得出试验振动监测信号的傅里叶功率谱, 因 z 向振动信号能量高于 y 向和 x 向振动信号能量, 且随着距离的增加, 3 个方向上的能量分布变化

趋势逐渐相同,故仅列出部分监测点 z 向振动信号功率谱,如图13所示。

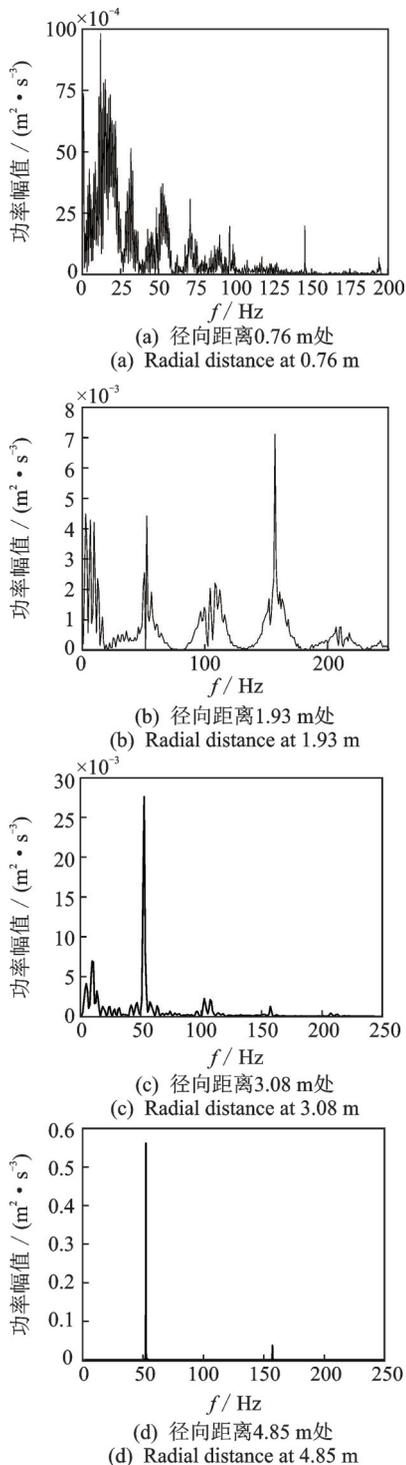


图13 z 向振动信号功率谱

Fig.13 z -direction vibration signal power spectrum

由图13可知,爆破振动能量频率范围为0~250 Hz,在径向距离0~2 m内,振动能量分布频段较宽。其中:0.76 m处 z 向振动信号能量主要分布在0~15 Hz,主频率约为12 Hz;1.93 m处 z 向振动信号能量主要分布在0~15 Hz,50~60 Hz和150~

170 Hz,主频率约为157 Hz。随着距离增加,在径向距离2~5 m内,振动能量逐渐衰减,低频和高频段应力波被台阶中岩体吸收,分布频段逐渐变窄,主要集中在50~55 Hz,主频率约为52 Hz。

参考文献[14]推荐的安全允许质点振动速度,可知该推荐值与本研究结论较为一致,可用作爆破振动安全的评判标准。对于本研究中地层岩性和尺寸的路堑台阶,即一般路基台阶,型号为 $\Phi 89$ 单管满充致裂器最优爆孔深度为4 m。参考规程允许值并结合图10可知,当台阶高度大于5 m有自由面时,型号为 $\Phi 89$ 单管满充致裂器的最大爆孔深度可达5 m左右。

3 结 论

1) 通过3组试验可知,铁路工程中一般路基台阶LCPTBT的最优爆孔深度为4 m。当孔深为4 m时,能够有效利用爆破能量,从爆孔底部沿整个台阶横断面有贯通裂缝产生,且在抵抗线最小方向上,临空面部位裂缝发展最充分。这可提高爆破开挖施工的施工效率和进度,验证了最优爆孔深度的有效性,为同类工程提供参考依据。

2) 3组试验工况中振动持时最长约为1 150 ms,振动产生的波形可分为3个阶段,且质点 z 向振动速度分量大于 y 向和 x 向振动速度分量。由于自由面的存在,应力波在传播过程中不断反射叠加,使爆破振动效果加强,而工况3爆破时无足够临空面,即自由面较少,导致应力波流失、反射较少,爆破实效不佳。振动监测数据表明,在台阶高度大于5 m且有自由面时,型号为 $\Phi 89$ 单管满充致裂器在该地层岩性条件下最大爆孔深度可达5 m左右。

3) 随着距爆破中心距离的增加,测点振动持时、峰值速度和峰值加速度均逐渐降低,在近距离内先急剧减小,随着距离增大而减小的趋势逐渐降低,振动能量分布频段逐渐变窄,振动主频率逐渐从12 Hz和157 Hz转变为52 Hz左右。

参 考 文 献

- [1] 霍中刚. 二氧化碳致裂器深孔预裂爆破煤层增透新技术[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(2):80-83.
HUO Zhonggang. New technology of carbon dioxide fracturer applied to deep borehole pre-cracking blasting for seam permeability improvement [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2):80-83. (in Chinese)
- [2] HU G Z, HE W R, SUN M. Enhancing coal seam gas using liquid CO_2 phase-transition blasting with cross-

- measure borehole [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 60: 164-173.
- [3] KANG J H, ZHOU F B, QIANG Z Y, et al. Evaluation of gas drainage and coal permeability improvement with liquid CO₂ gasification blasting [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10 (4): 1-15.
- [4] 董庆祥, 王兆丰, 韩亚北, 等. 液态CO₂相变致裂的TNT当量研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(11): 84-88.
DONG Qingxiang, WANG Zhaofeng, HAN Yabei, et al. Research on TNT equivalent of liquid CO₂ phase-transition fracturing [J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(11): 84-88. (in Chinese)
- [5] 孙可明, 辛利伟, 吴迪. 超临界CO₂气爆煤体致裂机理试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(2):302-308.
SUN Keming, XIN Liwei, WU Di. Experimental study on fracture mechanism of coal caused by supercritical CO₂ explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(2): 302-308. (in Chinese)
- [6] 周大超. 装液量对液态CO₂相变致裂消突效果影响考察[D]. 焦作: 河南理工大学, 2016.
- [7] 詹德帅. 二氧化碳充装量与致裂效果的模拟分析[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2017.
- [8] KE B, ZHOU K P, REN G F, et al. Positive phase pressure function and pressure attenuation characteristic of a liquid carbon dioxide blasting system [J]. Energies, 2019, 12(21): 4134.
- [9] 陶明, 赵华涛, 李夕兵, 等. 液态CO₂相变致裂破岩与炸药破岩综合对比分析[J]. 爆破, 2018, 35(2):41-49.
TAO Ming, ZHAO Huatao, LI Xibing, et al. Comprehensive comparative analysis of liquid CO₂ phase change fracturing and explosive rock fracturing [J]. Blasting, 2018, 35(2):41-49. (in Chinese)
- [10] ZHANG Y A, DENG J R, KE B, et al. Experimental study on explosion pressure and rock breaking characteristics under liquid carbon dioxide blasting [J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018: 1-9.
- [11] LI Q Y, CHEN G, LUO D Y, et al. An experimental study of a novel liquid carbon dioxide rock-breaking technology [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 128:1-9.
- [12] 何浩祥, 范少勇, 闫维明. 时频非平稳地震动模型及结构随机振动应用[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(6): 1189-1197.
HE Haoxiang, FAN Shaoyong, YAN Weiming, et al. Time-frequency non-stationarity stochastic ground motion model and application in structural random vibration [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(6): 1189-1197. (in Chinese)
- [13] 彭传金, 张磊. 一种带有智能控制系统的一次性二氧化碳致裂器: 中国, CN208269737U [P]. [2018-12-21].
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.



第一作者简介:程选生,男,1972年5月生,教授、博士生导师。主要研究方向为防灾减灾及防护工程。曾发表《Numerical analysis and shaking table test of seismic response of tunnel in a loess soil considering rainfall and traffic load》(《Rock Mechanics and Rock Engineering》2021, Vo1.54, No.3)等论文。
E-mail: chengxslut@sina.com

欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管,南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办,是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献,包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等,不拘泥于行业和测试项目。

本刊为EI Compendex数据库收录期刊和中文核心期刊,双月刊,每逢双月末出版,每本定价30元,全年180元。欢迎订阅和投稿,欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址:南京市御道街29号 邮政编码:210016 电话:(025)84893332
邮发代号:28-239 E-mail:qchen@nuaa.edu.cn 网址:http://zdc.nuaa.edu.cn