

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.04.026

高压气体爆破与炸药爆破振动试验研究*

褚怀保,余梦飞,严少洋,王 昌,孙 博
(河南理工大学 土木工程学院,焦作 454000)

摘要: 为探究高压气体爆破与炸药爆破振动特征差异,根据压缩气体与水蒸气容器爆破能量法建立了不同气体压力与炸药的当量关系,设计开展了模拟岩体高压气体爆破与炸药爆破振动试验。基于试验结果对2种爆破振动持续时间和振动速度进行了分析,并利用小波包变换技术对2种振动信号能量在频域上的分布规律进行了对比分析。试验结果表明:高压气体爆破振动持续时间远大于炸药爆破振动持续时间,2种爆破振动持续时间均随着距离的增大而减小;且高压气体爆破振动持续时间随着爆压的增大而减小,但炸药爆破振动持续时间随当量大增大而增大。高压气体爆破振动速度远小于炸药爆破,但随着距离的增大,2种爆破振动的峰值趋于接近,且高压气体爆破振动速度较炸药爆破振动速度衰减缓慢。随着距离的增大,高压气体爆破与炸药爆破振动信号主频带向低频转移并且主频带所占能量比例逐渐降低;与炸药爆破相比,高压气体爆破振动信号属于更加低窄频的信号、能量在频域上更集中、主频带能量占比较高。

关键词: 高压气体爆破; 振动; 持续时间; 小波包; 能量分布

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)04-0177-09

Comparison Analysis on High-Pressure Gas Cracking and Explosive Blasting Vibration

CHU Huai-bao, YU Meng-fei, YAN Shao-yang, WANG Chang, SUN Bo
(School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In order to explore the difference of vibration characteristics between high-pressure gas cracking and explosive blasting. The equivalent relationship between different gas pressure and explosive was established according to the blasting energy method of compressed gas and water vapor vessel, and the vibration test of high pressure gas blasting and explosive blasting in rock mass was designed and carried out. Based on the test results, the duration and vibration velocity of the 2 types of blast vibration were analyzed, and the wavelet packet transform technique was used to compare the distribution pattern of the energy of the 2 vibration signals in the frequency domain. The results show that the vibration duration of high-pressure gas cracking is much longer than that of explosive blasting, and the duration of both blasting vibrations decreases with the increase of distance. High-pressure gas blasting vibration duration decreases with the increase in burst pressure, but the duration of explosive blasting vibration increases with the large increase in mass. The peak vibration velocity of high-pressure gas cracking is smaller than the explosives blasting, but with the increase of distance, the peak value of 2 kinds of blasting vibration tends to be close, and high-pressure gas cracking vibration velocity than explosive blasting decay slowly. The main frequency bands of the two blast vibration signals shift to lower frequencies as the distance increases, and the proportion of energy in the main frequency band gradually decreases. Compared to explosive blasting, high-pressure gas cracking vibration signals are much lower and narrower in frequency, more concentrated in the frequency domain, and have a higher percentage of energy in the

收稿日期:2022-04-27

作者简介:褚怀保(1977-),男,博士、教授,主要从事爆炸理论及应用和隧道工程方面的教学和研究工作,(E-mail)chuhuaibao@hpu.edu.cn。
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874123)

main frequency band.

Key words: high-pressure gas cracking; vibration; time of duration; wavelet packet; energy distribution

炸药爆破作为一种传统破岩手段,因其成熟度高、经济和便捷等优点在工程建设和矿山开采占主要地位。但是,爆破作业过程中可能会造成建(构)筑结构破坏、边坡滑移、地基基础下沉等工程灾害问题,控制爆破振动是解决这些工程爆破灾害问题的关键^[1,2]。QIN Q H 等在大断面隧道开挖时严格控制单段装药量^[3],有效减小了爆破振动速度;钟冬望等为减小爆破振动持续时间造成的振动累计和疲劳效应^[4],基于地震波线性叠加原路,通过软件编程,计算得到了毫秒微差爆破不同爆心距处合理延时区间;还有学者研究了设置减振沟、减振孔和预裂爆破等方法对于振动波传播的影响^[5,6]。这些研究成果对于减小爆破振动危害具有积极作用,但爆破振动控制效果依然不能完全满足工程安全需要。因此,相关学者开始探索能够有效减小爆破振动并能够快速破岩的安全技术,以作为炸药爆破的补充。

高压气体爆破技术是指通过机械压缩的方式将气体充进指定容器中,待容器内压力达到预定压力时瞬间释放,高压气体以射流的形式作用到介质上,达到破岩效果^[7]。该技术起初主要应用于地下煤矿开挖和瓦斯抽采,主要作用是对煤储层进行增透、提高瓦斯抽采了效率^[8-10]。陶明等通过分析 CO₂ 相变和炸药爆破破岩机理^[11],得出利用 CO₂ 相变产生高压气体对煤岩体致裂不产生任何有害气体。褚怀保等通过高压气体冲击试验^[12],得出高压气体冲击作用下孔壁附近基本不出现粉碎区,且能量利用率高。彭怀德等通过现场试验^[13],对比分析了高压气体膨胀破岩和传统钻爆法的振动测试结果,得出了高压气体膨胀破岩能够有效减小隧道开挖过程中的振动。以上研究得出了高压气体爆破过程中具有安全可靠、振动和噪音小、不产生有毒有害气体、能量利用率高等优点;因此高压气体爆破技术被认为是一种安全高

效、绿色环保的破岩方式。炸药爆破破岩主要是爆轰波和应力波共同作用的结果,而高压气体爆破破岩是以气体的准静态作用为主,冲击动作用较小^[14]。破岩机制的不同使这 2 种方式产生的振动持续时间、振动速度和振动信号能量在频域上的分布特征也呈现明显的区别。而有关高压气体爆破技术的研究主要是针对它的爆破破坏机理方面展开^[15-17],较少文献是从振动方面对比分析高压气体爆破与炸药爆破的区别,导致该技术在减振方面的优势无法完全展现。

为此,开展了高压气体爆破与炸药爆破振动试验,对 2 种方式的振动持续时间和振动速度进行了对比分析,并基于小波包变换技术分析了 2 种方式的振动信号能量在频域上的分布特征。以为现场实际应用提供指导,同时为后期的更深入的理论研究奠定基础。

1 试验研究

1.1 高压气体爆破试验装置

参考气体炮的工作原理,采用机械压缩空气产生高压气体,由于装置内外压力差的存在,释放后高压气体迅速膨胀扩散,经泄压口以射流的形式作用到岩体上。试验设备包括:(1)空压机,作用是对空气进行初次压缩;(2)增压泵,作用是对气体进行二次压缩为试验提供符合试验的高压气体;(3)容积 1 L 的钢制无缝气瓶制成的压力釜,作用是保证喷射过程中气量充足、可控和试验安全;(3)数字压力表,作用是设置试验时所需要的气体压力;(4)耐高压电磁阀,作用是待增压系统将压力釜内气体压力增至数字压力表设定的压力时,耐高压电磁阀的阀门打开,实现高压气体的释放。以上所有模块经高压防爆管连接并进行系统性调试,主要设备连接示意图如图 1 所示。

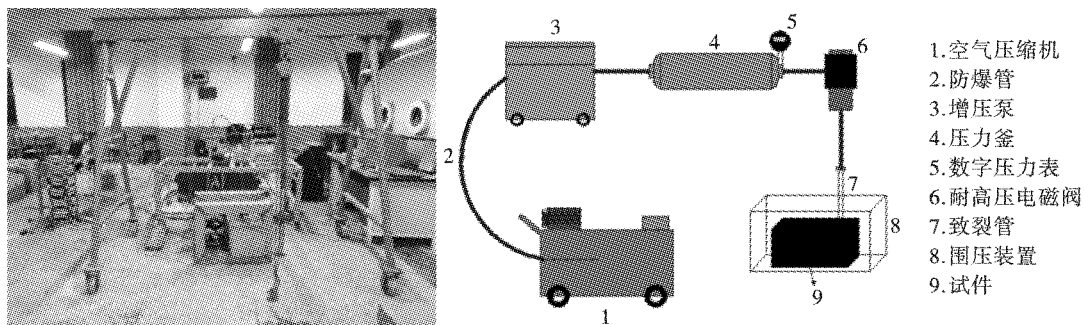


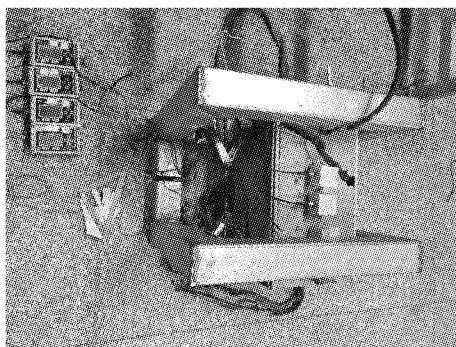
图 1 高压气体爆破装置及示意图

Fig. 1 High-pressure gas blasting device and schematic diagram

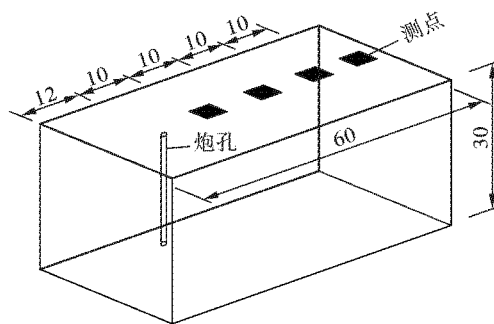
1.2 试验方案

因天然岩体开采、运输困难,节理裂隙发育具有随机性,采用相似模拟试验可以严格控制变量且试验方便。因此,本试验采用相似模拟材料模拟天然岩体,根据相似模拟理论,对比各参数,本模型材料可看作是类砂岩材料。试件材料配比为:细沙:水泥:石膏:水 = 3:1.3:0.15:0.45。试件物理力学参数如表 1 所示。

炸药爆破与高压气体爆破试验模型一致,实验室内制作 30 cm:60 cm:30 cm 的试块,试块在距一端 12 cm 处预留一个直径 1.6 cm,深 20 cm 的炮孔。



(a) 试验过程
(a) Test process



(b) 测点示意图
(b) Schematic layout of the measurement points

图 2 测点示意图及试验过程(单位:cm)

Fig. 2 Schematic diagram of measuring points and test process(unit:cm)

由于 2 种方式的破岩机制和材料性质的巨大差异,简单地以材料质量或破岩效率、效果作为比较标准是不合理的。一种实践中常用的、简单的方法是以含同等能量的高压气体和炸药为基准,对试验结果进行对比分析,即“压缩气体与水蒸气容器爆破能量”法^[15]。炸药爆破试验使用黑索金炸药,根据此方法确定本试验高压气体爆压与对应炸药当量,如表 2 所示。

表 2 高压气体爆压与对应炸药当量

Table 2 Explosion pressure of high pressure gas and corresponding explosive equivalent

高压气体压力/MPa	5	10	15	20
炸药当量/g	2.3	4.6	6.7	9.3

振动测试使用成都中科研发的 TC4850 爆破振动采集仪,采样率设置为 4 kHz,该仪器的振动测试量程从 0.001 ~ 35.4 cm/s,频响范围从 0 ~ 1000 Hz,其量程能充分满足爆破振动测试的需求并且能包含工程爆破所涉及的所有频段,可以充分保障爆破试验测得数据的准确性与可靠性。

振动测试每个试块布置 4 个测点,测点位置距离炮孔为 10 cm、20 cm、30 cm、40 cm,试验过程中,试块置于反力框架内并利用千斤顶、钢板和复合木板对试块施加围压(复合木板在试块与钢板之间,用于吸收爆破过程中产生的反射拉伸波),炸药爆破与高压气体爆破测点一致,如图 2 所示。

表 1 试验模型材料参数

Table 1 Material parameters of the test model

σ_{uc}/MPa	σ_t/MPa	E/GPa	$\rho/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比 ν
24.31	2.45	8.31	2.03	0.201

2 试验结果及分析

将波形起跳点至波幅衰减为最大幅值 $1/e$ 间的波形对应的持续时间定义为爆破振动持续时间,根据测试结果可知垂向(Z向)和径向(Y向)振动速度较大,且大小接近,切向(X向)振速很小。根据工程实际,采用各测点的垂向速度(Z向)进行分析。对 2 种爆破方式的振动进行监测,部分实测振动波形如图 3、图 4 所示,测试数据统计结果如表 3 所示。

2.1 振动持续时间分析

爆破振动持续时间是评价爆破危害的重要指标,探究高压气体爆破与炸药爆破振动持续时间规律具有重要的理论价值和工程意义。图 5 给出了高压气体爆破与炸药爆破振动持续时间变化规律。从图中可以看出,高压气体爆破振动持续时间大约是炸药爆破的 10 倍;随着距离的增大,2 种振动持续时间都减小;随着爆压或当量的增大,炸药爆破振动持续时间逐渐增大、高压气体爆破振动持续时间逐渐减小。

表3 测试结果
Table 3 Test results

编号	炸药爆破				高压气体爆破				
	炸药当量/g	测点距离/m	峰值振速/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	持续时间/ms	爆压/MPa	换算当量/kg	测点距离/cm	峰值振速/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	持续时间/ms
1	2.3	0.1	35.27	44	5	2.3	10	4.81	521
		0.2	17.45	42			20	2.87	503
		0.3	9.74	40			30	1.92	451
		0.4	5.92	38			40	1.13	423
2	4.6	0.1	41.67	46	10	4.6	10	6.11	467
		0.2	19.42	45			20	3.48	432
		0.3	12.38	42			30	2.33	398
		0.4	9.04	40			40	2.37	352
3	6.7	0.1	47.55	50	15	6.7	10	7.72	387
		0.2	20.84	47			20	5.12	369
		0.3	17.19	43			30	4.26	340
		0.4	8.94	42			40	2.47	286
4	9.3	0.1	48.75	55	20	9.3	10	9.75	411
		0.2	23.42	49			20	5.42	342
		0.3	15.40	47			30	4.89	291
		0.4	10.48	45			40	3.84	274

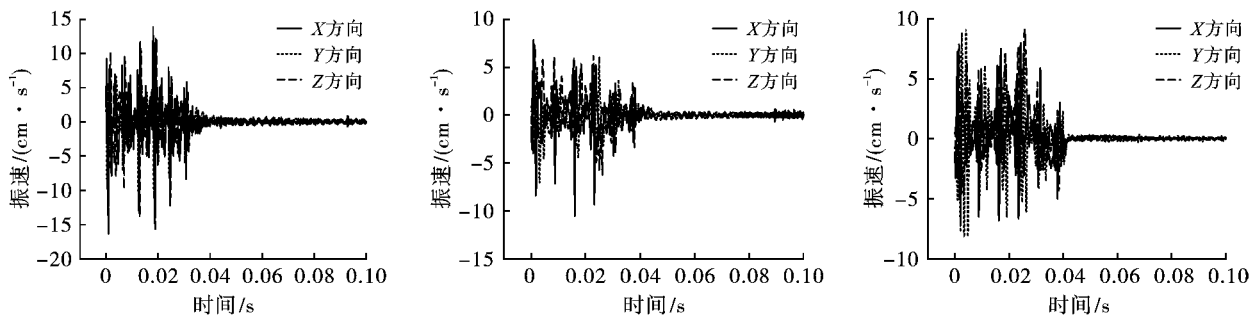


图3 炸药爆破振动波

Fig. 3 Explosive blast vibration wave

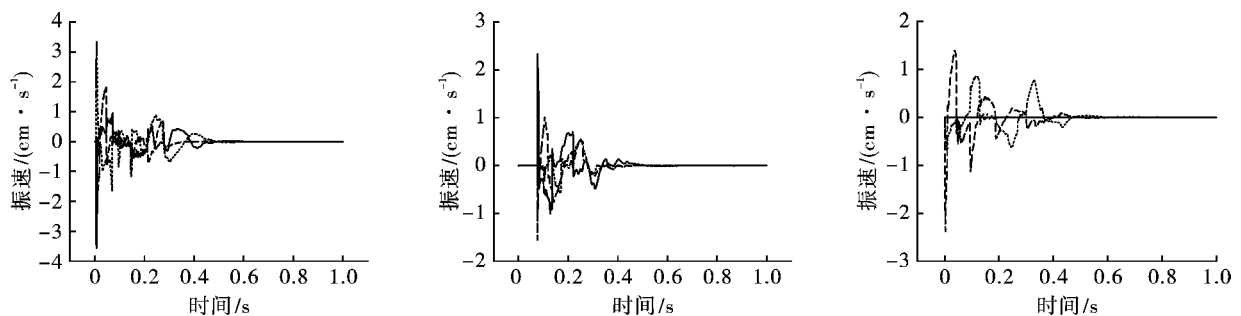


图4 高压气体爆破振动波

Fig. 4 Vibration wave of high-pressure gas cracking

炸药爆破破岩以爆轰波和应力波的共同作用为主。首先是爆轰波作用于孔壁,在岩体内形成冲击波并很快衰减为应力波,冲击波在孔壁周围岩体中形成粉碎区,应力波则使岩体产生径向裂隙,随着距离的增大应力波衰减为振动波,然后是爆生气体对

岩体中裂隙的楔入作用。在此过程中,几 μs 内孔壁压力便达到几千甚至几万 MPa,因此,炸药爆破引起的振动持续时间很短。炸药当量越大,炸药爆轰时间越久,对孔壁的冲击作用时间越长,引起的振动波持续时间也越长。

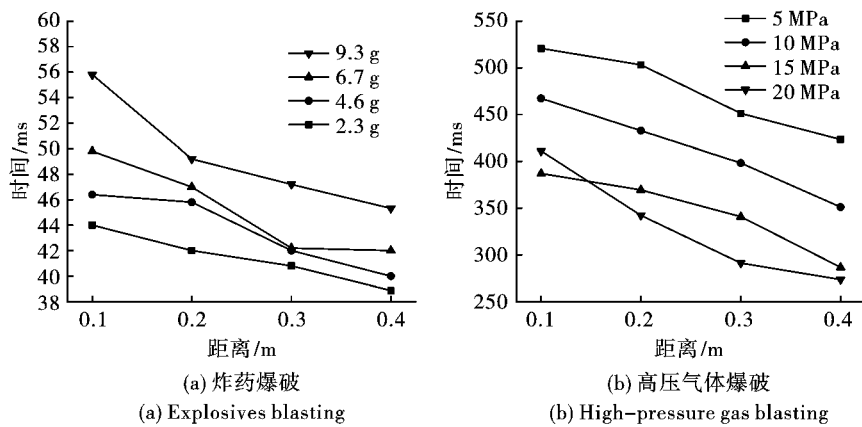


图5 2种振动持续时间变化规律

Fig. 5 Variation rule of two kinds of vibration duration

高压气体爆破破岩可以分为2个阶段,第一阶段是高压气体以射流的形式作用到孔壁上,岩体内产生应力波、孔壁产生初始裂纹,第二阶段是高压气体楔入岩体裂纹中驱动裂纹向前扩展,这2个阶段都会对岩体造成扰动形成振动波,但高压气体爆破破岩的第二阶段是气体准静态作用,作用时间较长。因此,高压气体爆破振动波持续时间较长。高压气体爆压越大,气体射流出的速度越大,能在更短的时间内将试块裂纹贯通,试块裂纹贯通后炮孔内与裂

纹内高压气体迅速逸散,压力迅速降低,无法对岩体造成扰动。因此,高压气体爆破振动持续时间随爆压的增大而减小。

2.2 振动速度对比分析

为揭示2种方式的振动衰减规律差异,对测试统计结果进行非线性拟合,拟合公式为 $y = kx^\alpha$,拟合曲线和衰减系数见图6。由图6可以看出,高压气体爆破振动速度远小于炸药爆破,且衰减较慢。

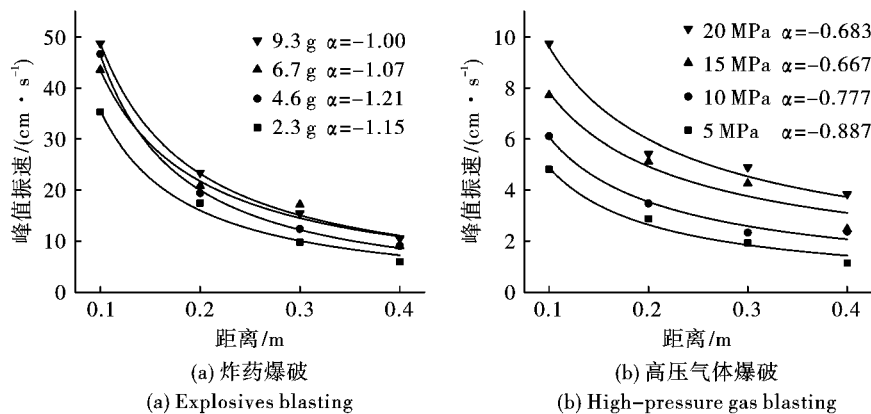


图6 峰值振速衰减规律

Fig. 6 Attenuation law of peak vibration velocity

图7给出了2种爆破方式的试件破碎形态。从图中可以看出,高压气体爆破产生的碎块块度明显比炸药爆破大,且爆破过程中没有出现碎块崩飞现象,高压气体爆破作用下炮孔附近没有出现粉碎区,宏观裂纹只有2条,而炸药爆破作用下炮孔出现了明显的粉碎区,且出现了多条宏观裂纹,由2种方式的试件破碎形态可知,炸药爆破冲击作用更强,而振动速度是反应冲击响应的重要参数。因此,炸药爆破振动速度远大于高压气体爆破。同一种岩体内振动频率是影响振动衰减速度的主要因素,对高频

振动,介质阻尼作用较大,即高频部分能量更容易被吸收,由2.3节分析可知,高压气体爆破振动信号相对于炸药爆破而言属于更加低窄频的振动,高压气体爆破振动信号能量主要分布在低频带,炸药爆破振动信号能量主要分布在高频带。因此,高压气体爆破振动衰减较慢。

进一步地,为量化高压气体爆破减振效果,图8给出了不同爆压下的炸药爆破与高压气体爆破振动速度比值 PPV_e/PPV_g 变化规律。从图中可以看出,炸药爆破振动速度为高压气体爆破的2.72倍以上,

随距离的增大而减小。测点距离为 0.4 m 时,二者比例达到 2.7 以上,测点距离为 0.1 m 时,二者比例在 5 以上,说明高压气体爆破在近区减振效果更显著。另一方面,观察几种爆压之间的对比结果,可以发现二者比值随爆压的增大而减小,说明高压气体爆破更适合用于小规模破岩工程。

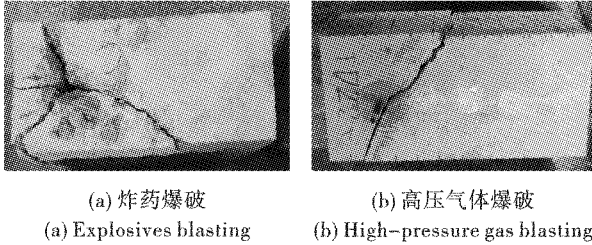


图 7 试块破碎形态

Fig. 7 Breakage morphology of test block

2.3 振动信号能量分布规律对比分析

由图 3、图 4 可知,2 种方式的爆破振动信号都是一种非周期性的瞬态随机波形,其振动时程曲线是时域信号,可以直观地得到振速大小、持续时间等信息,但频率也是评价爆破振动危害的重要因素,因此其频域信号同样重要,为此采用小波包技术对 2 种振动信号能量在频域上的分布规律进行分析。

振动监测时采样频率设为 4 kHz,由 Shannon 采样定理,其 Nyquist 频率为 2 kHz,进行 8 层小波包分解,原信号 Nyquist 频率区间被划分为频带宽为 7.812 Hz

的 256 个子频带。为确定合适的小波基种类,分别采用与爆破振动波相似且在爆破振动信号分析领域中应用较多的 sym 系列的 *sym5*、*sym6*、*sym7*、*sym8* 和 *db* 系列的 *db5*、*db6*、*db7*、*db8* 对振动信号进行 8 层分解与重构,以 10 MPa 第 1 个测点为例,重构后发现 *sym8* 的重构信号与原信号的峰值误差最小,波形也没有发生畸变,因此选取小波基 *sym8* 小波包对此信号分解至第 8 层。同理选择合适的小波基对其他振动信号进行分解重构,利用 matlab 编程得到 4.6 g 炸药爆破和 10 MPa 高压气体爆破各测点最大振速方向振动信号的能量分布百分比,如图 9 和图 10 所示。

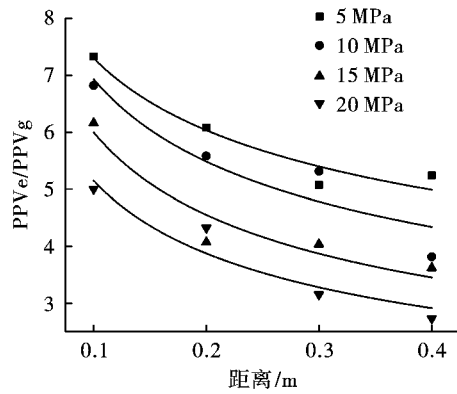


图 8 炸药爆破与高压气体爆破振动速度比值
Fig. 8 Ratio of vibration velocity between explosive blasting and high-pressure gas cracking

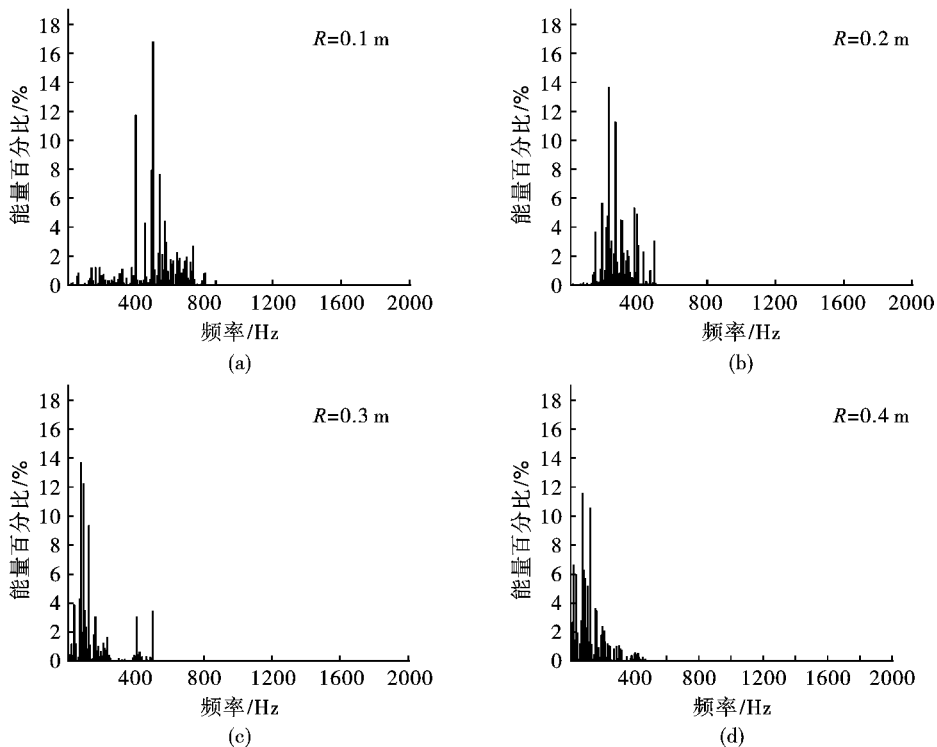


图 9 炸药爆破振动信号能量分布百分比柱状图

Fig. 9 Explosive energy distribution of blasting vibration signal percentage histogram

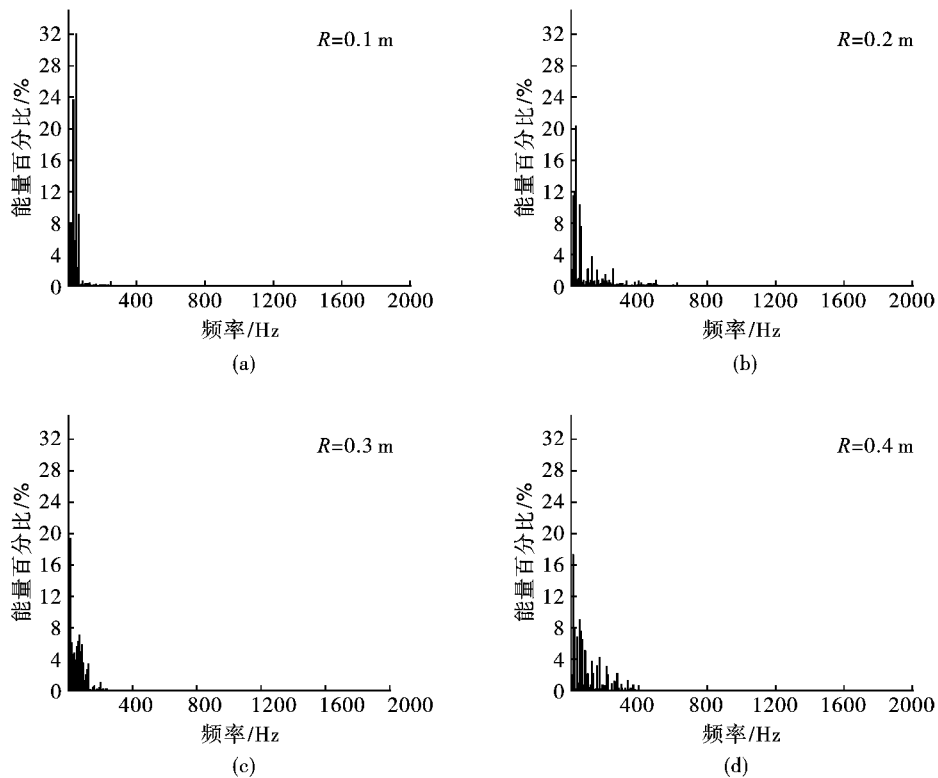


图 10 高压气体爆破振动信号能量分布百分比柱状图

Fig. 10 High pressure gas energy distribution of cracking vibration signal percentage histogram

定义能量分布百分比峰值对应的子频带为主频带,主频带能量比例统计结果如表 4 所示。由表 4 可知,高压气体爆破与炸药爆破振动信号一样,随着距离的增大,主频带向低频转移并且能量比例逐渐降低。

高压气体爆破振动信号相对于炸药爆破而言属于更加低窄频的振动信号。由图 9 和图 10 可知,炸药爆破振动能量主要分布在 0 ~ 500 Hz,而高压气体爆破主要分布在 0 ~ 200 Hz;由小波包能量分析结果可知在 0 ~ 10 的低频带范围内,即 0 ~ 78.125 Hz,高压气体爆破振动信号能量达到总能量的 59.04% ~

94.60%,而炸药爆破只有 1.92% ~ 35.31%。

由图 9 和图 10 可知,炸药爆破振动信号有多个频带的能量比例接近主频带,主频带并不突出,例如图 9(c)中,主频带能量比例为 13.7%,但第 11 频带为 12.99%、第 16 频带为 11.36%,而高压气体爆破振动信号主频带能量比例与其他子频带相比具有明显的优势;由表 4 可知炸药爆破振动信号主频带所占能量比例为 11.58% ~ 16.81%,小于高压气体爆破振动信号主频带所占能量比例 16.83% ~ 30.98%。因此,高压气体爆破振动信号能量在频域上更为集中。

表 4 振动信号主频带及其对应能量百分比

Table 4 Main frequency band of vibration signal and its corresponding energy percentage

测点距离/m	高压气体爆破(10 MPa)		炸药爆破(4.6 g)	
	主频带/Hz	能量占比/%	主频带/Hz	能量占比/%
0.1	39.06 ~ 46.87	30.98	492.19 ~ 500.00	16.81
0.2	23.44 ~ 31.25	20.32	218.75 ~ 226.56	13.65
0.3	7.81 ~ 15.63	19.38	78.13 ~ 85.94	12.99
0.4	7.81 ~ 15.63	16.83	62.50 ~ 70.31	11.58

统计图 10 中不同距离测点 1 ~ 10 子频带能量占总能量的比例:94.6% ($R=0.1\text{ m}$)、73.01% ($R=0.2\text{ m}$)、66.54% ($R=0.3\text{ m}$)、63.34% ($R=0.4\text{ m}$),可以得出,随距离的增大,高压气体爆破振动信号的低频能量比例逐渐降低。参考相关文献可

知,振动能量作用于建(构)筑物时其能量成分与结构固有频率接近的部分会产生放大效应,而一般建(构)筑物的自振频率集中在低频,因此高压气体爆破振动随距的增大低频能量比例降低,有利于建筑安全。

3 结论

采用模拟岩体试块,进行了同等能量条件下的高压气体爆破与炸药爆破振动试验,基于试验结果分析了2种爆破振动持续时间和振动速度,并利用小波包变换技术对2种振动信号能量在频域上的分布规律进行了比较。主要结论如下:

(1) 高压气体爆破振动持续时间远大于炸药爆破;2种爆破振动持续时间均随距离的增大而减小;且高压气体爆破振动持续时间随着爆压的增大而减小,但炸药爆破振动持续时间随当量大增大而增大。振动持续时间长,说明岩体或建构筑物出现较大反应的概率更大,因此分析高压气体爆破振动安全时有必要充分考虑振动持续时间的影响。

(2) 高压气体爆破振动速度峰值较炸药爆破振动速度峰值小,随着距离的增大,2种爆破振动的峰值趋于接近,且高压气体爆破振动速度较炸药爆破振动速度衰减缓慢,说明高压气体爆破在近区的减振效果更显著,对于需要严格控制振动速度的场合具有明显优势。

(3) 2种爆破振动信号的主频带随着距离的增大向低频带转移,且主频带能量所占比例逐渐降低。高压气体爆破振动信号属于更加低窄频的信号、能量在频域上更集中、主频带能量占比高。高压气体爆破振动信号低频段能量比例较高,因此在作业时要注意避免与建构筑物之间产生共振。

参考文献 (References)

[1] 邹 烽,席 田,胡业红,等. 爆破振动综合减震措施的减震效应研究[J]. 中国安全生产科学技术,2022,18(6):119-126.

[1] ZOU Feng, XI Tian, HU Ye-hong, et al. Research on damping effect of comprehensive damping measure for blasting vibration[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(6):119-126. (in Chinese)

[2] 吴德伦,叶晓明. 工程爆破安全振动速度综合研究[J]. 岩石力学与工程学报,1997(3):67-74.

[2] WU De-lun, YE Xiao-ming. Comprehensive study on safety vibration velocity of engineering blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997(3):67-74. (in Chinese)

[3] QIN Q H, ZHANG J. Vibration control of blasting excavation of large cross-section highway tunnel over metro line[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(17):69-73.

[4] 钟冬望,何 理,操 鹏,等. 爆破振动持时分析及微

差爆破延期时间优选[J]. 爆炸与冲击,2016,36(5):703-709.

[4] ZHOANG Dong-wang, HE Li, CAO Peng, et al. Blasting vibration time-holding analysis and delay time optimization of millisecond blasting[J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(5):703-709. (in Chinese)

[5] 李 磊. 双预裂孔爆破在高瓦斯低渗透煤层中的应用研究[J]. 矿业安全与环保,2019,46(2):84-87.

[5] LI Lei. Study on application of double pre-split drilling hole blasting in coal seam with high content of gas and low permeability[J]. Mining Safety Environmental Protection, 2019, 46(2):84-87. (in Chinese)

[6] 孙 冰,罗志业,曾 晟,等. 爆破振动影响因素及控制技术研究现状[J]. 矿业安全与环保,2021,48(6):129-134.

[6] SUN Bing, LUO Zhi-ye, ZENG Sheng, et al. Research status of influencing factors and control technology of blasting vibration[J]. Mining Safety Environmental Protection, 2021, 48(6):129-134. (in Chinese)

[7] 李守国. 高压空气爆破煤层增透关键技术与装备研发[J]. 煤炭科学技术,2015,42(2):92-95.

[7] LI Shou-guo. Research and development of key technology and equipment for anti-reflection in coal seams of high-pressure air blasting[J]. Coal Science and Technology, 2015, 42(2):92-95. (in Chinese)

[8] 王兆丰,孙小明,陆庭佩,等. 液态 CO₂ 相变致裂强化瓦斯预抽试验研究[J]. 河南理工大学学报:自然科学版,2015,34(1):1-5.

[8] WANG Zhao-feng, SUN Xiao-ming, LU Ting-kan, et al. Experiment research on strengthening gas drainage effect with fracturing technique by liquid CO₂ phase transition[J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science, 2015, 34(1):1-5. (in Chinese)

[9] CAO Y, ZHANG J, ZHAI H, et al. CO₂ gas fracturing: A novel reservoir stimulation technology in low permeability gassy coal seams[J]. Fuel, 2017, 203:197-207.

[10] 赵 龙,王兆丰,孙矩正,等. 液态 CO₂ 相变致裂增透技术在高瓦斯低透煤层的应用[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(3):75-79.

[10] ZHAO Long, WANG Zhao-feng, SUN Ju-zheng, et al. Application of permeability improvement technology with liquid CO₂ phase transition fracturing to high gassy and low permeability seam[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3):75-79. (in Chinese)

[11] 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.

[11] TAO Ming, ZHAO Tao-hua, LI Xi-bing, et al. Comprehensive comparative analysis of liquid CO₂ phase change

- fracturing and explosive rock fracturing [J]. *Blasting*, 2018, 35(2):41-49. (in Chinese)
- [12] 褚怀保,任志强,闫松,等. 高压气体冲击作用下煤体内部应力波传播和衰减规律试验研究[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(4):1-6.
- [12] CHU Huai-bao, REN Zhi-qiang, YAN Song, et al. Experimental study on the propagation and attenuation laws of stress waves in coal under high-pressure gas impact [J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2022, 41(4):1-6. (in Chinese)
- [13] 彭怀德,刘敦文,褚夫蛟,等. 硬岩隧道高压气体膨胀破岩开挖试验[J]. *岩土力学*, 2018, 39(1):242-248.
- [13] PENG Huai-de, LIU Guo-wen, CHU Fu-jiao, et al. Test on high pressure gas expansion rock fragmentation in hard rock tunnel [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(1):242-248. (in Chinese)
- [14] 叶红宇. 高压气体冲击作用下煤体应力场及裂纹扩展规律研究[D]. 焦作:河南理工大学, 2021.
- [14] YE Hong-yu. Research on stress evolutions and crack propagation laws of coal under the impact of high pressure gas [D]. JIAOZUO: Henan University of Polytechnic, 2021. (in Chinese)
- [15] 董庆祥,王兆丰,韩亚北. 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.
- [15] DONG Qing-xiang, WANG Zhao-feng, HAN Ya-bei. Research on TNT equivalent of liquid CO₂ phase-transition fracturing [J]. *China Safety Science Journal*, 2014, 24(11):84-88. (in Chinese)
- [16] 孙可明,辛利伟,吴迪,等. 初应力条件下超临界 CO₂ 气体爆破致裂规律研究[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(12):232-238.
- [16] SUN Ke-ming, XIN Li-wei, WU Di et al. Simulation of fracture law of supercritical CO₂ explosion under initial stress condition [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(12):232-238. (in Chinese)
- [17] 周西华,门金龙,宋东平,等. 液态 CO₂ 爆破煤层增透最优钻孔参数研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(3):524-529.
- [17] ZHOU Xi-hua, MEN Jin-long, SONG Dong-ping, et al. Research on optimal borehole parameters of antireflection in coal seam by liquid CO₂ blasting [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(3):524-529. (in Chinese)

英文编辑:黄刚

(上接第176页)

- [7] 张玉成,杨光华,刘鹏,等. 爆破荷载在数值计算中的等效施加方法研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2012, 8(1):56-64.
- [7] ZHANG Yu-cheng, YANG Guang-hua, LIU Peng, et al. An equivalent approach for acting blasting load in dynamic numerical simulation of blasting vibration [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2012, 8(1):56-64. (in Chinese)
- [8] 蒲磊. 不同加载方式下隧洞爆破振动特征分析[J]. *爆破*, 2018, 35(1):42-48.
- [8] PU Lei. Study on vibration characteristics of tunnel blasting under different loading modes [J]. *Blasting*, 2018, 35(1):42-48. (in Chinese)
- [9] 叶志伟,陈明,李桐,等. 小不耦合系数装药爆破孔壁压力峰值计算方法[J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(6):119-129.
- [9] YE Zhi-wei, CHEN Ming, LI Tong, et al. A calculation method of the peak pressure on borehole wall for low decoupling coefficient charge blasting [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(6):119-129. (in Chinese)
- [10] 张玉成,杨光华,姜燕,等. 沉管隧洞基槽爆破施工对既有堤岸稳定性影响的数值仿真分析[J]. *岩土力学*, 2010, 31(S1):349-356.
- [10] ZHANG Yu-cheng, YANG Guang-hua, JIANG Yan, et al. Numerical simulation analysis of influence of blasting construction of foundation trench of immersed tunnel on stability of embankment [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(S1):349-356. (in Chinese)
- [11] SONG Zhan-ping, LI Shi-Hao, WANG Jun-Bao, et al. Determination of equivalent blasting load considering millisecond delay effect [J]. *Geomechanics and Engineering*, 2018, 15(2):745-754.
- [12] 陈士海,王明洋,赵跃堂,等. 岩石爆破破坏界面上的应力历程研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003(11):1784-1788.
- [12] CHEN Shi-hai, WANG Ming-yang, ZHAO Yue-tang, et al. Time-stress history on interface between cracked and uncracked zones under rock blasting [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003(11):1784-1788. (in Chinese)
- [13] 管晓明,傅洪贤,王梦恕. 隧洞近距下穿山坡楼房爆破振动测试研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(7):1995-2003.
- [13] GUAN Xiao-ming, FU Hong-xian, WANG Meng-shu. Blasting vibration characteristics monitoring of tunnel underpassing hillside buildings in short-distance [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(7):1995-2003. (in Chinese)

英文编辑:柯波