

石灰岩中球形装药封闭化爆试验的自由场应力和地运动

王占江, 门朝举, 刘冠兰, 李运良, 李孝兰

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 对石灰岩中 50, 100, 800, 1 000 和 2 000 kg TNT 的系列球形装药封闭爆炸试验的 $350 \text{ km/kt}^{1/3}$ 比例爆距内的自由场应力波和 $30 \text{ km/kt}^{1/3}$ 比例爆距内的地运动测量数据, 按爆炸相似律进行归一化分析处理, 拟合得到自由场应力、地表粒子速度、地表比位移及地表比加速度等特征参量峰值随比例爆心距的衰减规律, 并与硬岩(花岗岩、砂岩、石灰岩)中的核爆相应结果进行对比。结果表明, 化爆试验的地表比加速度峰值远小于核爆的, 其他特征参量的峰值衰减规律与核爆的大体一致。讨论与自由场应力波、地表运动参数测量及数据分析相关的若干问题, 指出: 只有通过现场试验积累足够的资料, 从统计学的角度来研究, 才能比较客观地了解岩体中爆炸的自由场和地运动变化规律, 而化爆能在一定程度上模拟核爆的力学效应。在自由场应力波测量中, 化爆模拟试验需要更高频响的测试系统。在地表运动测量中, 由于波传播路径上的岩体对高频波的吸收很强, 在一定比例爆距外, 化爆与核爆的地运动信号频率并无太大的差别, 波传播路径上的岩体性质对加速度参量的影响最大, 这是化爆比例加速度峰值远小于核爆的主要原因。

关键词: 爆炸力学; 石灰岩; 球形装药; 地下爆炸; 自由场应力波; 地表运动; 模拟试验

中图分类号: O 38

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)增 1 - 3403 - 08

FREE-FIELD STRESS AND GROUND MOTION OF UNDERGROUND CONFINED CHEMICAL EXPLOSIONS WITH SPHERICAL CHARGE IN LIMESTONE

WANG Zhanjiang, MEN Chaoju, LIU Guanlan, LI Yunliang, LI Xiaolan

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China)

Abstract: According to the cube root scaling law, the test data of free-field stress(scale distance in $350 \text{ m/kt}^{1/3}$) and ground motion(scale distance in $30 \text{ km/kt}^{1/3}$) of a series of confined chemical explosion with spherical charges of 50, 100, 800, 1 000, 2 000 kgTNT in limestone have been analyzed, the attenuation of the free-field peak stress and the ground surface peak particle velocity, peak scaled particle displacement and peak scaled particle acceleration with scale distance are fitted, all the characteristic parameters are compared with that of nuclear explosion in hard rocks(granite, sandstone, limestone). The results show that, the ground surface peak scaled particle acceleration is far low in chemical explosions, and the others are principally in agreement with that of underground nuclear explosions. Some problems about in-situ measurements and data analysis are discussed, that mechanics effects of underground nuclear explosion could be to a certain extent simulated with underground chemical explosion is emphasized, and that a large number of on site data should be fitted statistically and it would

收稿日期: 2009 - 05 - 05; **修回日期:** 2009 - 06 - 01

作者简介: 王占江(1961 -), 男, 博士, 1983 年毕业于国防科技大学爆炸力学专业, 现任研究员, 主要从事爆炸力学效应和介质动力学特性等方面的研究工作。E-mail: wzjh_nint@163.com

be helpful in understanding the objective laws is also indicated. The instruments with higher frequency response must be provided in measuring free-field stress on underground chemical explosion. The higher frequency wave is attenuated quickly while propagating in rock mass, there are not distinct differences between ground motion frequencies of chemical explosion and nuclear explosion beyond a certain scale distance, acceleration is more sensitive to rock property on the travel path especially, which is the reason why the measured ground surface peak scaled particle acceleration is far low in chemical explosions.

Key words: explosion mechanics; limestone; spherical charge; underground explosion; free-field stress; ground motion; simulated test

1 引言

了解和掌握地下爆炸的自由场应力波和地运动传播规律,对防护工程、岩体本构关系、爆炸震源特性和爆破震害研究等具有重要意义。

有关地下化学爆炸的应力波传播规律和地运动规律,黄理兴等^[1, 2]已对当时的国内外相关研究成果、现状和发展趋势进行了综述。近年来,国内以爆炸应力波在含有节理、断层、夹层的岩土以及层状岩土中传播衰减的实验室研究和理论研究居多,如:唐廷等^[3]以模型数值计算为基础、定量分析地下爆炸的应力波传播和地运动;唐海等^[4]采用神经网络方法来研究现场工程爆破震动效应的文章也有一些,但有关现场集中装药大型封闭爆炸的力学效应研究的文章还没见到。

有关地下核试验的自由场应力波传播规律和地运动规律,国内、外均开展了大量的研究,但公开报道却不多。在试验方面,国外一些结果多散见于一些文章和报告中^[5-12],楼沅涛等^[13, 14]曾进行过这方面的研究,郝保田等^[15-17]给出了较为直接的规律性结果。理论模拟方面,伴随着地下核试验的进行,一维球对称流体-弹性数值计算模型发展起来,其结果的好坏直接依赖于材料状态方程、本构模型对介质客观性质描述的合理程度。经过不断改进,一维球对称数值模拟对于近区高应力(GPa以上)波传播的估算与实际符合得较好,但是对于远区弹性应力波传播和衰减的估算与实际测量相差很远,主要是因涉及到了材料的主要非线性行为(汽化、液化、多晶相变,塑性流动,脆性断裂、孔隙和微裂隙的压碎,并且这些过程中的一些或全部是和速率相关的)。针对以上问题,美国除了在实验室大量开展对地层介质动力学特性的试验研究外,还在现场通过应力波的实测,对描述现场岩体介质的动力学特性的合理模型进行研究,而国内在这方面还有

很大差距。郝保田等^[15, 18, 19]的研究成果基本反映了目前国内关于地下核爆炸力学效应的理论和数值模拟研究的现状和水平。

国外以地下核试验为背景进行的大型现场化爆试验很多,早期试验均是围绕安全封闭的,涉及应力波和地运动规律的报道很少。1994年,以禁核试和核不扩散条约为背景,美国在其内华达核试验场进行了约1 kt TNT当量的化爆模拟试验(NPE),之后简单地报道过试验现场的应力波和地运动测量情况^[9-11]。NPE中,尽管用以往在该试验场(含附近区域)进行的十多次核试验的数据分析总结得到的介质状态方程模型和计算机程序进行了地运动预估,但其不确定度还是非常大的。NPE的地运动测量大多使用原核试验的地下深孔测点和地表台站(其深孔内预埋的传感器被认为是有效的),将实测值与预估值相比较,相当一部分测点和台站的预估值的高估或低估的倍数超过了4,对约30个测点和台站的数据作统计分析,得到的高估或低估的倍数的标准偏差高达2左右。造成以上误差的原因是多方面的,除了爆炸源耦合、波的传播路径和测量站点的效应变化外,预估时并未考虑化爆与核爆的区别也是原因之一(这本身又是一个非常复杂的问题)。以上情况基本反映了地下化爆与核爆力学效应上的差别和测量结果分散较大的客观现实。

总体来讲,地质介质中的爆炸能量耦合和力学效应研究是非常复杂的课题,理论和数值研究中的“模拟容易、预测困难”和“定性容易、定量困难”等问题的主要障碍是没有很好地了解现场地质材料的力学特性和本构关系,这反过来又要求开展大量深入细致的现场试验研究工作,故应力波和地运动参量的测量和规律性研究就显得尤为重要。

为研究地下核试验的埋深、堵塞、泄漏和应力波传播等问题,作者^[20]曾开展过许多地下封闭爆炸的化爆模拟试验,也曾分析了花岗岩竖孔中1~150 kg TNT爆炸的自由场应力波传播规律^[21]。本文对干

石灰岩山体平洞中进行的 50, 100, 800, 1 000 和 2 000 kg TNT 的系列球形装药封闭化爆试验的力学测试结果, 用爆炸相似律进行了归纳分析, 给出了自由场应力、地表加速度、粒子速度及位移测量数据的拟合规律, 并与我国干硬岩中核爆的相应典型结果进行了比较(核试验中的岩体有干、湿和软、硬之分, 含水量低的花岗岩、砂岩、石灰岩统称为干硬岩), 对与试验测试和分析相关的一些问题进行了讨论。本文的集中装药系列封闭化爆模拟试验的自由场应力波和地运动测量的布点范围很大, 其比例爆距分别达到了 350 和 30 km/kt^{1/3}, 基本达到了核试验的规模, 尽管有一些试验数据有数倍甚至量级上的分散性, 但归一拟合后的各力学效应参数随比例爆心距变化符合基本的物理规律, 从而为现场相关试验研究积累了重要的数据基础资料。试验结果表明, 除地表比加速度峰值远小于核爆的外, 其他参数的峰值衰减规律与硬岩中地下核爆的相应结果大体一致, 这在说明小药量化爆可在一定条件下模拟核爆的力学效应的同时, 也加深了对地下爆炸现象学的认识。本文结果可推广应用于相近条件下的地下爆炸, 对防护工程和工程爆破震害等研究有重要参考价值。

2 试验概况

试验在一座干石灰岩山体的一个平洞中进行, 试验共进行 5 次, 药量分别为 50, 100, 800, 1 000 和 2 000 kg TNT, 装药全部用质量为 400 g 的标准 TNT 药块垒成近似球形(见图 1), 起爆体处于球心。所有试验的爆心均集中在一个方圆约 200 m 的区域, 互相之间不会有明显干扰, 通向爆室的支坑道为直角形或鱼钩形, 球装药周围缝隙用薄胶泥浆砌块石填充, 坑道前段先用薄胶泥或混凝土堵塞, 最后大段用浆砌块石和沙袋堵塞。装药的埋深和最小抵抗线均较大, 山体表面不会出现类似于松动爆破



(a) 100 kg TNT



(b) 1 000 kg TNT

图 1 堆砌为近似球体的 100 和 1 000 kg TNT 装药照片

Fig.1 Photos of spherical charges for 100 and 1 000 kg TNT

等明显的宏观破坏效应。试验均是较理想的球形填充装药封闭爆炸。

现场岩石名称为灰色致密块状石灰岩。对爆点周围不同位置的岩石样品进行了室内物理力学性质测试分析, 在坑道内 0~500 m 距离范围内, 用药包放炮法和敲击法现场测量了石灰岩体的纵波声速和横波声速, 有关结果见表 1。

表 1 石灰岩的主要物理力学性能

Table 1 Physico-mechanical properties of limestone

相对密度	密度 (g·cm ⁻³)	孔隙度 (%)	抗压强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	杨氏模量 (GPa)	泊松比	岩样纵波声速 (km·s ⁻¹)	岩体纵波声速 (km·s ⁻¹)	岩体横波声速 (km·s ⁻¹)
2.69~2.79 (2.74)	2.68~2.74 (2.70)	0.4~4.6 (2.1)	115~173 (136)	1.5~5.9 (3.6)	42~66 (54)	0.20~0.30 (0.26)	6.19~6.23 (6.21)	4.13~5.82 (4.94)	2.37~3.90 (3.12)

注: 括号内的数值为平均值。

化爆试验所用的测量传感器与核爆试验的基本一样。因各次试验目的不同, 石灰岩中的 5 次化爆试验的测试项目不完全一样、有部分交叉, 主要包括: 自由场应力波走时、自由场弹性应力、坑道及地运动的波走时和地运动的加速度、速度及位移。对于自由场应力波测量, 测点的选择原则确保了应力探头在测量过程中, 感兴趣的波形主要部分未受地表面反射稀疏波扰动的影响, 也不受来自地下大的空洞(如未堵塞的坑道空段、工号)的稀疏扰动的影响。只关心应力波到时参量和峰值参量衰减规律时, 只要求波形峰值点之前的那一部分不受扰动影响。自由场应力波走时探头是独立的快响应压电晶体击波开关探头, 它们和压电晶体应力测量探头一样, 均对心安放在直径为 130 mm 的钻孔底部, 钻孔中探头的电缆用钢管保护, 先用实验室设计好

的、与岩石阻抗相匹配的薄胶泥喷封一段钻孔，后续的电缆部分用特制砂浆封孔。地运动测点布设在坑道内、山表和地表，所用的传感器为压电晶体加速度计、变磁阻式位移计和微振仪等。

关于具体的测试技术和数据波形，在此从略。

3 试验结果分析

下面对石灰岩中自由场应力波和地表运动数据结果进行归纳分析，并给出拟合规律(见表 2)，在直观的图示结果中，还比较性地加绘了干硬岩(花岗岩、砂岩、石灰岩)中核爆的相应典型结果^[15~17]。

(1) 自由场应力波的传播速度

在 100 和 1 000 kg TNT 试验中，从炸药球表面开始，分别到 4.95 和 7.98 m 的爆心距范围内，测量了自由场应力波走时数据，如图 2(a)所示，时间和

距离均从炸药球表面起算。由图 2(a)可看出 2 次试验的应力波波速有一些差别，但考虑到试验数据较少，把它们归一化后统一进行直线拟合，得到自由场应力波平均波速约为 4.74 km/s，这与表 1 所列的石灰岩体的纵波声速平均值 4.94 km/s 基本一致。

(2) 自由场应力波峰值的衰减

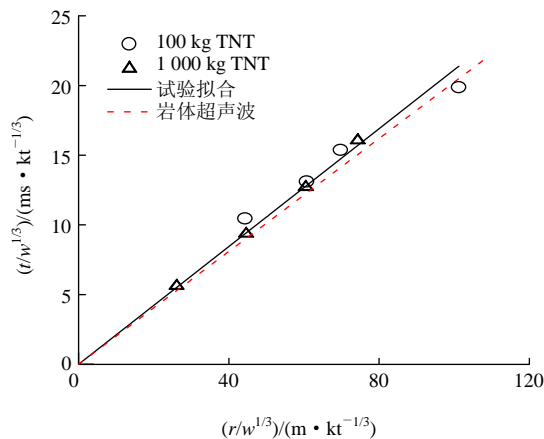
在 50, 100, 800 和 1 000 kg TNT 试验中，测量了自由场弹性区的应力。但由于传感器的频响不足，自由场应力峰值测量数据均明显偏小。考虑到应力测量数据较稀缺，依据传感器的频率特性对实测的应力波形进行解析反演修正，归一化处理后，其弹性应力峰值随比例爆心距的变化关系如图 2(b)所示，图 2(b)中还加绘了干花岗岩中核爆炸自由场粒子速度测值换算的应力峰值数据拟合结果^[17]，从图 2(b)中可以看出，经过波形反演修正后的应力峰值衰减规律与核爆的基本一致，但仅供参考。

表 2 石灰岩中化爆时自由场应力波和地运动规律

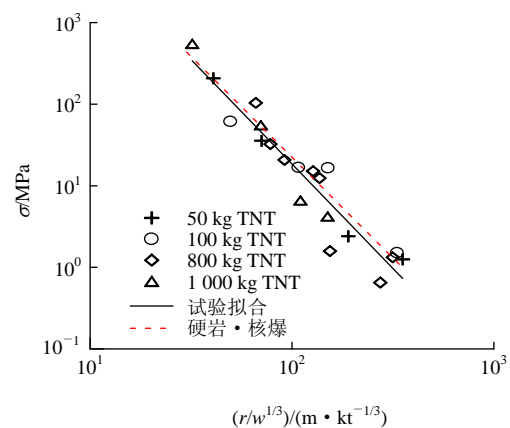
Table 2 Free-field stress wave and ground motion parameters by chemical explosions in limestone

拟合对象	拟合参数	拟合规律	拟合范围
自由场应力波	应力波峰值	$\sigma = 2.44 \times 10^6 (r/w^{1/3})^{-2.56} (\text{MPa})$	$20 < r/w^{1/3} < 350 (\text{m/kt}^{1/3})$
	应力波走时	$(t-t_0)/w^{1/3} = 0.211 \times [(r-r_0)/w^{1/3}] (\text{ms/kt}^{1/3})$	$0 < (r-r_0)/w^{1/3} < 100 (\text{m/kt}^{1/3})$
地运动	地运动(地震)波走时	$T = 0.256 \times r^{0.977} (\text{ms})$	$10 < r < 3\ 000 (\text{m})$
	地表水平径向比加速度	$A_r w^{1/3} = 2.50 \times 10^5 (r/w^{1/3})^{-1.82} (\text{m/s}^2 \text{kt}^{1/3})$	$200 < r/w^{1/3} < 8\ 000 (\text{m/kt}^{1/3})$
	地表垂向比加速度	$A_v w^{1/3} = 1.35 \times 10^5 (r/w^{1/3})^{-1.76} (\text{m/s}^2 \text{kt}^{1/3})$	$90 < r/w^{1/3} < 1\ 600 (\text{m/kt}^{1/3})$
	地表水平径向粒子速度	$u_r = 1.58 \times 10^3 (r/w^{1/3})^{-1.52} (\text{m/s})$	$50 < r/w^{1/3} < 8\ 000 (\text{m/kt}^{1/3})$
	地表水平径向比位移	$D_r w^{1/3} = 5.15 \times 10^4 (r/w^{1/3})^{-1.36} (\text{mm/kt}^{1/3})$	$150 < r/w^{1/3} < 30\ 000 (\text{m/kt}^{1/3})$
	地表垂向比位移	$D_v w^{1/3} = 1.29 \times 10^5 (r/w^{1/3})^{-1.55} (\text{mm/kt}^{1/3})$	$300 < r/w^{1/3} < 30\ 000 (\text{m/kt}^{1/3})$

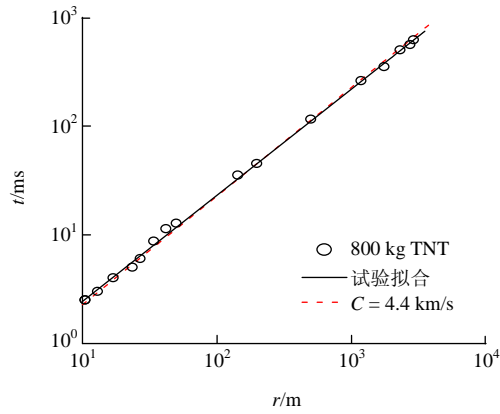
注：表中 r_0 为球形装药半径， t_0 为球形装药爆轰时间。



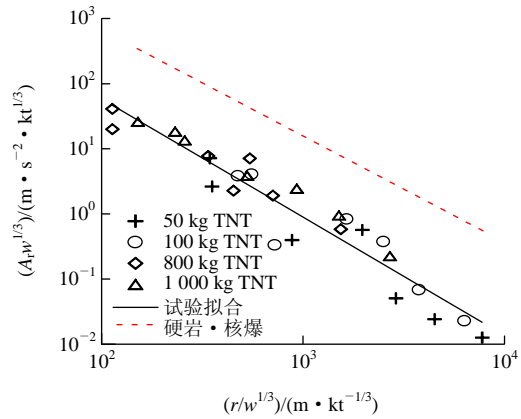
(a) 自由场应力波走时



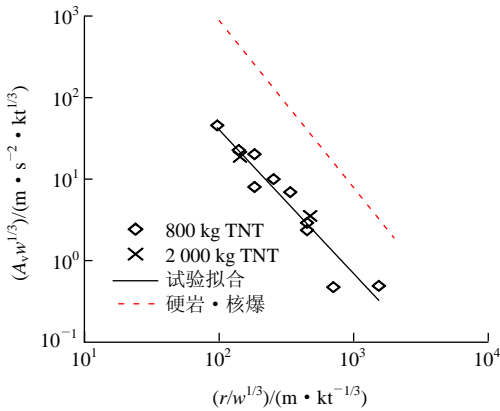
(b) 自由场应力峰值与比例爆心距关系



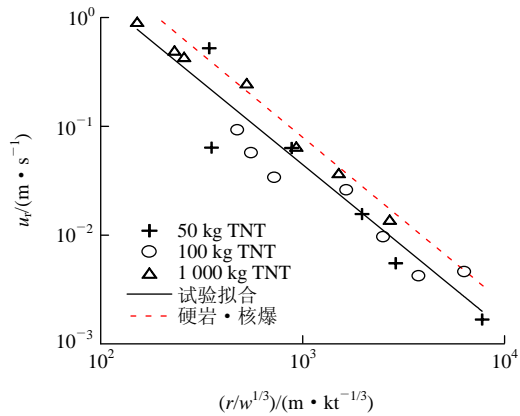
(c) 800 kg TNT 试验的地运动走时



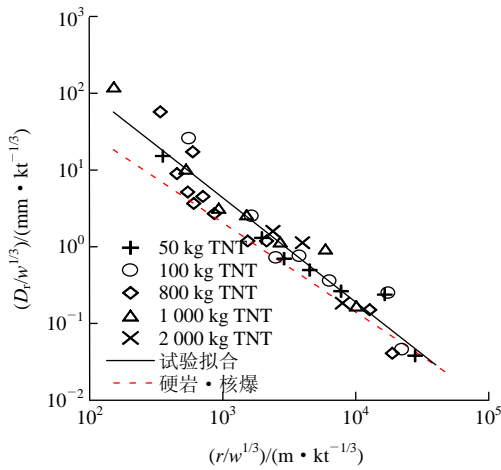
(d) 地表水平径向比加速度与比例爆心距关系



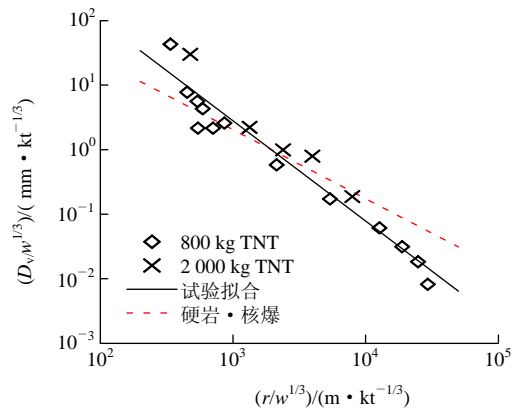
(e) 地表垂向比加速度与比例爆心距关系



(f) 地表水平径向速度与比例爆心距的关系



(g) 地表水平径向比位移与比例爆心距的关系



(h) 地表垂向比位移与比例爆心距关系

图 2 自由场应力和地运动各参量随距离的变化关系

Fig.2 Relationships for parameters of free-field stress and ground motion vs distance

(3) 地运动的波传播速度

在 800 kg TNT 试验中, 在坑道内距爆心 10.5~17.0 m 处布设加速度计, 在山表和地表距爆心 23.6~2 890.0 m 距离范围内布设加速度计和位移计。测量得到了坑道内应力波及地表运动的波走时如图 2(c)所示, 不对坑道内和坑道外的数据加以区分, 可明显看出 2 890 m 爆心距范围内的数据点分

布只是大体呈直线趋势, 其对应的波速随距离增加逐渐加大。从实测数据出发, 将地表运动走时拟合为指数形式, 其波速范围为 4.1~4.7 km/s(平均值 4.4 km/s), 与表 1 中石灰岩体的纵波声速为 4.13~5.82 km/s(平均值 4.94 km/s)是自恰的。在 25.5 和 91.0 km 爆心距处的地震测点, 其地震波的平均波速分别约 5.5 和 6.0 km/s(与核爆炸的相一致), 明显高于 3

km 以内近距离的平均波速,这主要是由于试验的绝对埋深较小,近距离范围内的地运动首波基本在靠近地表的低阻抗岩层中传播,波速较低,而数十公里远的地震首波是通过较深的高阻抗岩层中传播的,波速较高,这在一定程度上反映了波的传播路径差异的影响。

(4) 地表水平径向和垂向运动加速度峰值的衰减

在 50, 100, 800 和 2 000 kg TNT 试验中,测量了地表水平径向加速度,在 800 和 2000 kg TNT 试验中,测量了垂向加速度,其各自的比例加速度峰值随比例爆心距的变化分别如图 2(d), (e)所示,其中分别加绘了干硬岩中核爆的相应比加速度峰值数据拟合结果^[16],可以看出,化爆试验的水平径向比例加速度峰值和垂向比例加速度峰值均远小于核爆的,用实测数据拟合得到的比例加速度衰减关系来计算,化爆的小约接近一个数量级。

(5) 地表水平径向运动速度峰值的衰减

在 50, 100 和 1 000 kg TNT 试验中,用水平径向加速度波形积分,间接得到了地表水平径向运动速度波形,其峰值随比例爆心距的变化如图 2(f)所示,从中看出,50 kg TNT 试验的数据分散性较大。不考虑加速度积分很可能进一步加大速度的不确定度,将 3 次试验的数据统一拟合,与其中加绘的干硬岩中核爆相应结果^[16]比较,可见化爆地表水平径向粒子速度峰值衰减指数与核爆的基本一致,但核爆的幅值高,约是化爆的 2 倍。

(6) 地表水平径向和垂向运动位移峰值的衰减

在 50, 100, 800, 1 000 和 2 000 kg TNT 试验中,直接测量了水平径向位移,在 800 和 2 000 kg TNT 试验中,测量了垂向位移,其各自的比例位移峰值随比例爆心距的变化分别如图 2(g), (h)所示,其中分别加绘了干硬岩中核爆的相应比位移峰值数据拟合结果^[16],可以看出,所有 5 次试验的水平径向比例位移峰值变化规律比较一致,而 800 kg TNT 试验的垂向比例位移值略低于 2 000 kg TNT 的。不考虑各次试验的差异,将所有的试验数据统一拟合的结果是,化爆的地表水平径向比位移峰值和垂向比位移峰值的衰减指数均大于核爆的,化爆的径向比位移拟合线处于核爆的上方,而垂向比位移拟合线与核爆的相交。对于水平径向比位移,在数据拟合的比例爆心距 150~30 000 m/kt^{1/3} 范围内,同一比例爆距处化爆的较高,最近处化爆约是核爆的 3 倍,

最远处化爆与核爆的基本一致;对于垂向比位移,在数据拟合的比例爆距 300~30 000 m/kt^{1/3} 范围内,在比例爆距 2 800 m/kt^{1/3} 附近,二者基本相当,以此为界,较小比例爆距处化爆的较高,300 m/kt^{1/3} 处化爆约是核爆的 2.5 倍,较大比例爆距处化爆的较小,30 000 m/kt^{1/3} 处化爆约是核爆的 0.3 倍。

4 讨 论

从原理上讲,在相同比例埋深的条件下,地下封闭爆炸靠近地表投影零点的近区(从爆心的地表零点至几 km/kt^{1/3} 比例爆距范围内),地表运动可通过不同入射角的球面 P 波在自由表面反射时造成的表面运动来描述,通过量纲定理可推导出与描述自由场应力波传播的爆炸相似律相类似的关系式。而对于更远距离上的地运动(或地震波),由于波系中不再只是以 P 波为主导,加之波的传播与其传播路径上的地质条件关系越来越密切,描述自由场应力波传播的爆炸相似律在此时的适用性会越来越差,故对于较远区域的地运动,有时用距离的 2.7 次方根对不同当量爆炸试验的测试距离和地运动数据进行归一和拟合^[15]。本文对石灰岩中化爆地表运动速度峰值、位移峰值和加速度峰值,统一按距离的立方根进行归一处理和拟合,从前面的分析处理可以看出,仅就现有的试验数据,用这样的简化处理方法来总结经验规律还是可以接收的。

地下工程施工一般用爆破的方法,根据试验测定,硬岩介质中爆室及坑道周围的岩石受扰动的范围为其断面半径的 2~3 倍,受扰动的岩石介质的性质与原岩有较大差别,其动力学阻抗明显降低,它对小当量爆炸的能量耦合影响比大当量爆炸要大得多。在地下爆炸试验的动力学效应测试中,由于装药条件、地质条件(断层、裂缝、裂隙)、波的传播路径、传感器性能及其安装状态等的差异,测量数据有数倍的分散,甚至同一试验、同一爆心距处不同测点的测值有量级上的差别,都是不鲜见的。对不同当量的爆炸,在同一比例爆心距测点的归一化测值可能会出现很大差别,显然这不能完全归结为测量误差,故不能随便舍掉那些分散较大的测试数据,只有通过试验积累足够的试验数据资料,从统计学的角度来研究,才能比较客观地反映客观规律。本文将几次不同药量爆炸的结果归一处理,其拟合

结果也只能大体反映现场的实际。

在一定条件下, 化爆可以模拟核爆的力学效应, 但地下核爆与化爆的力学效应结果不能直接相互比拟。一方面, 核爆只有较少部分能量转化为力学效应, 比如: 万吨级以上地下核爆的力学有效当量约只有化爆当量的 20% 左右, 千吨级以下的只有 40%~50%; 另一方面, 由于核爆当量远远大于化爆当量, 具有同样地质条件的岩体, 对化爆应力波传播演化的影响要比对核爆的影响要大, 有关研究表明, 要用化爆来模拟核爆, 则化爆当量至少要达到十吨量级^[15], 而国外的化爆药量一般为百吨以上。只有当岩体节理、裂隙、断层、夹层等尺度与当量满足一定的相似比时, 化爆才可能模拟核爆。本文的化爆试验的当量较小, 比核爆的低几个数量级, 而且次数较少、测点布设的绝对爆心距范围较窄, 测量结果受环境介质条件的影响较大, 所拟合的结果与核爆的有差别是正常的。

按照爆炸相似律, 模拟试验的当量缩比到 1 000 倍时, 同一比例爆心距处的应力波频率将扩大到 10 倍。在当量远小于核爆当量的化爆试验中, 对于同样大幅度的应力波, 爆心距要比核试验对应测点的爆心距小得多, 化爆试验对测试系统的高频响应要求要比核爆高得多。但大量不同当量的地下爆炸试验的应力波和地运动参数测试证明, 波传播路径上的岩体或地层对高频波的过滤作用很强, 这在一定程度上又降低了小当量爆炸对测试系统的高频响应要求, 如在同样地质条件的地运动测量中, 在一定爆心距以外, 当量相差很悬殊的不同爆炸的地运动信号频率并无太大的差别。所以, 在爆心距较小的自由场应力波测量中, 要特别注意仪器频响不足造成测值的偏低。本文中, 考虑到化爆试验中自由场应力传感器的频响不足, 依据传感器的频率特性对应力波形进行了解析反演修正, 虽然其峰值衰减规律与干花岗岩的基本一致, 但仅供参考。

在地运动参量中, 加速度对岩性最敏感, 尤其对于小当量爆炸, 当速度及位移因岩体的节理裂隙、裂隙或断层等缺陷引起倍数的衰减时, 加速度可能会有量级上的衰减。本文中, 地表比例速度和地表比例位移与核爆的大体一致, 但地表比例加速度却远小于核爆的, 这主要是由地质条件引起的。笔者曾在泥岩和黄土中进行过大量的类球形装药封闭化爆试验, 不但其定性结果与本文的相仿, 而且其地

表比例加速度只相当于本文核爆的几分之一。

地下集中装药封闭爆炸的力学效应与一般的岩土工程爆破的力学效应有很大差别, 主要是因装药条件、引爆方式和埋深的不同, 一方面导致周围岩体和近区地表破坏程度的不同, 另一方面导致以波动形式向外辐射爆炸能的比率和频率的不同, 使得地震动的效应不同, 在超出其适用条件的外推应用时要慎重。

5 结 论

本文按爆炸相似律归一总结了 50, 100, 800, 1 000 和 2 000 kg TNT 球形装药系列封闭化爆的自由场应力波和地运动参数, 其比例爆距分别达到 350 和 30 km/kt^{1/3}, 拟合得到的各力学效应参数随比例爆心距变化的规律基本客观地反映了现场化爆试验的实际情况。除地表比例加速度峰值远小于核爆的外, 其他参数的峰值衰减规律与硬岩中地下核爆的相应结果大体一致, 说明小药量化爆只能在一定条件下模拟核爆的力学效应。本文结果可推广应用于相近条件下的地下爆炸, 对与钻地侵彻爆炸等相关的地下深层爆炸防护工程研究、对一般工程爆破的参数优化和安全设计等有重要参考价值。

参考文献(References):

- [1] 黄理兴, 陈奕柏. 我国岩石动力学研究状况与发展[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1 881 - 1 886.(HUANG Lixing, CHEN Yibai. Rock dynamics in china: past, present and future[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1 881 - 1 886.(in Chinese))
- [2] 毕贵权, 李 宁. 岩体中应力波传播与衰减规律研究现状与发展[C]// 第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2004: 99 - 104.(BI Guiquan, LI Ning. The research status and the development about the rule of stress wave propagation and decay in rock[C]// Proceedings of the 8th Chinese Conference for Rock Mechanics and Engineering. Beijing: Science Press, 2004: 99 - 104.(in Chinese))
- [3] 唐 廷, 王明洋, 葛 涛. 地下爆炸的地表运动研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 1): 3 528 - 3 532.(TANG Ting, WANG Mingyang, GE Tao. Study of ground movement of underground explosions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.1): 3 528 - 3 532.(in Chinese))

- [4] 唐海, 石永强, 李海波, 等. 基于神经网络的爆破振动速度峰值预报[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增1): 3 533 - 3 539. (TANG Hai, SHI Yongqiang, LI Haibo, et al. Study of ground movement of underground explosions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.1): 3 533 - 3 539. (in Chinese))
- [5] CARDER D S, CLOUD T H. Surface motion from large underground explosions[J]. Journal of Geophysical Research, 1959, 64(4): 1 471 - 1 487.
- [6] ADAMS W M, PRESTON R G, FLANDERS P L, et al. Summary report of strong-motion measurements, underground nuclear detonations[J]. Journal of Geophysical Research, 1961, 66(3): 903 - 942.
- [7] MURPHY B F. Particle motions near explosions in halite[J]. Journal of Geophysical Research, 1961, 66(3): 947 - 958.
- [8] WILLIAM R P, ROBERT C B. Free-field ground motion induced by underground explosions[R]. SAND - 74 - 0252, 1974.
- [9] PERATT A L, OLSEN K H. Free-field ground motions for the nonproliferation experiment-Preliminary comparisons with nearby nuclear events[R]. LA - US - 94 - 1813, 1994.
- [10] WALCK M C, DURRANI B A. Near-surface velocity modeling at Yucca Mountain using borehole and surface records from underground nuclear explosions[R]. SAND95 - 1606-UC - 814, 1996.
- [11] WALCK M C. Summary of ground motion prediction results for Nevada test site underground nuclear explosions related to the Yucca Mountain project[R]. SAND95 - 1938-UC - 814, 1996.
- [12] FOXALL W. Extreme ground motion recorded in the near-source region of underground nuclear explosions[R]. UCRL - TR - 208847, 2005.
- [13] 楼涛涛, 田兵, 辛建文. 硬岩中地下爆炸的自由场位移衰减规律[J]. 爆炸与冲击, 1991, 11(2): 146 - 152. (LOU Weitao, TIAN Bing, XIN Jianwen. The free-field displacement of underground explosion in hard rock [J]. Explosion and Shock Waves, 1991, 11(2): 146 - 152. (in Chinese))
- [14] 李孝兰. 硬岩中大当量地下爆炸应力波的测试和分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2001, 20(4): 393 - 395. (LI Xiaolan. Stress wave measurement and analyses for the underground explosions in hard rock with large yield[J]. Journal of Liaoning Technique University(Natural Science), 2001, 20(4): 393 - 395. (in Chinese))
- [15] 郝保田. 地下核爆炸及其作用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. (HAO Baotian. Underground nuclear explosion and its application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese))
- [16] 乔登江, 韩学安, 李如松. 地下核爆炸现象学概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. (QIAO Dengjiang, HAN Xue'an, LI Rusong. Introduction to the phenomena of underground nuclear explosion[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese))
- [17] 林俊德. 地下核爆炸力学与试验工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003. (LIN Junde. Mechanics and engineering of underground nuclear explosion[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. (in Chinese))
- [18] 王铁良, 张建鑫, 韩学安. 岩石中爆炸波传播的数值模拟[J]. 计算物理, 2000, 17(1/2): 126 - 129. (WANG Tieliang, ZHANG Jianxin, HAN Xue'an. Numerical simulation of the stress produced by chemical explosion in rock[J]. Chinese Journal of computation physics, 2000, 17(1/2): 126 - 129. (in Chinese))
- [19] 浦锡锋, 张海波, 田宙, 等. 岩石中强爆炸动力学过程数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增1): 5 007 - 5 012. (PU Xifeng, ZHANG Haibo, TIAN Zhou, et al. Numerical simulation of underground explosion in granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.1): 5 007 - 5 012. (in Chinese))
- [20] 王占江. 地下核试验的化爆模拟试验技术总结[R]. 西安: 西北核技术研究所, 2002. (WANG Zhanjiang. Technique summation for chemical explosive simulation of underground nuclear tests[R]. Xi'an: Northwest Institute of Nuclear Technology, 2002. (in Chinese))
- [21] 王占江, 李孝兰, 戈琳, 等. 花岗岩中化爆的自由场应力波传播规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1 827 - 1 831. (WANG Zhanjiang, LI Xiaolan, GE Lin, et al. The free-field stress wave propagation of underground chemical explosion in granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1 827 - 1 831. (in Chinese))