DOI: 10.11883/1001-1455(2015)02-0273-05

石灰岩中核爆冲击震动效应的化爆模拟*

薛宇龙[1],唐德高[1],李大鹏[1],李治中[1],么梅利[2],胡兆颖[1]
(1.解放军理工大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室,江苏 南京 210007;
2.解放军理工大学野战工程学院,江苏 南京 210007)

摘要:根据爆炸能量相似律,提出了采用化爆模拟核爆在石灰岩中爆炸的冲击震动效应的方法。通过对核爆和化爆分别在石灰岩中爆炸的冲击震动效应的分析,建立了化爆与核爆之间自由场峰值应力和峰值速度的模拟关系式,并利用最小二乘法,拟合出了最终的模拟表达式。经过对关系式的计算表明:拟合出的关系式较可靠,在已知化爆的基础上可近似计算核爆的峰值应力及峰值速度。

关键词:爆炸力学;冲击震动效应;爆炸相似律;核爆;最小二乘法;化爆
中图分类号:O382.2;TP91 **国标学科代码**:1303520 **文献标志码**:A

石灰岩是煤系地层的常见岩层之一,有许多地下工程兴建于石灰岩中,目前针对石灰岩的研究已经取得了一定的成果。赵洪宝等[1]给出了石灰岩热膨胀的主要原因;赵红玲等[2]研究了石灰岩中常规装药不同埋深爆炸自由场直接地冲击参数的传播规律,得到了石灰岩介质中不同埋深爆炸地冲击参数随比例距离的预计公式;王占江等[3]给出了石灰岩中球形装药封闭化爆实验的自由场应力和地运动。

核爆的威力巨大,对岩体介质具有极强的破坏作用。核爆之后会在岩体介质内形成一定范围的爆破空腔、粉碎压实区以及更大范围的裂隙区、震动区等。核爆不仅产生强烈的冲击波、地震动等破坏效应,同时又伴随着核辐射、光辐射、贯穿辐射等一系列对人体具有严重危害的损伤效应。因此,寻求一种方法或途径来模拟核爆的冲击震动效应显得尤为重要。化爆是一般性质炸药的爆炸,大当量的化爆也能产生和核爆相似的冲击波、地震动等破坏效应。同时由于炸药的性质特点,爆炸后并不会形成光辐射、贯穿辐射等现象[4-6]。因此,可根据化爆和核爆的相似性和不同点,利用爆炸能量相似律[7],通过化爆产生的冲击震动效应来模拟核爆产生的冲击震动效应。

目前,关于核爆冲击震动效应的模拟研究只是处在初步阶段,化爆模拟核爆的可行性也没有明确的理论说明。化爆与核爆之间的有效当量系数为 20%左右[8],但影响核爆冲击震动效应的因素有很多,不仅包括岩石的密度、硬度、含水量、波阻抗,同时又包括岩石的种类、爆炸当量、距爆心的距离等因素。因此,核爆与化爆之间的有效当量系数只单纯取 20%计算,显得不够理想。

本文中,从化爆与核爆产生的冲击震动效应的相似性出发,对化爆模拟核爆冲击震动效应的可行性进行分析。根据现有的经验公式以及理论基础,提出了化爆与核爆之间峰值应力与峰值速度的模拟关系式,并利用最小二乘法,拟合出表达式,通过验算,验证拟合表达式的可靠性,拟用于计算不同比例距离的核爆自由场峰值应力与峰值速度。

1 爆炸相似律

爆炸现象在一定条件下是服从几何相似律的,因此爆炸后距爆心不同距离上的参数可以由爆炸相似律求得。由实验可知,采用质量相同但能量不同的炸药,在相同距离上,能量大的装药,其冲击波作用强,因为冲击波作用的强弱与冲击波的能量有关。爆炸能 $E=wQ_V$,不仅与装药质量有关,而且与炸药

* **收稿日期**:2013-08-29; **修回日期**:2014-01-02
基金项目:国家自然科学基金创新研究群体项目(51021001);国家自然科学基金项目(51378498)
第一作者:薛宇龙(1988—),男,硕士研究生,ylx19880218@163.com。

特性有关。所以,在更普遍的情况下,爆炸相似律的参数不是 $w^{1/3}/r$,而是$E^{1/3}/r$,这种相似律称为能量相似律,可表达为[7]:

$$\Delta p = f\left(\frac{E^{1/3}}{r}\right) \tag{1}$$

式中:Δp 为爆炸冲击波超压,pa;E 为爆炸能,J;r 为爆距,m。

这是霍普金森相似律的一种表示形式。它不仅可以应用于不同炸药的爆炸,也可以应用于自然界中其他能源的爆炸。

2 核爆与化爆冲击震动效应的比较

Ⅱ级围岩中石灰岩的参数为[3]:$\rho_m = 2\ 700\ \mathrm{kg/m^3}$,纵波波速 $c_p = 4\ 500\ \mathrm{m/s}$,地冲击衰减指数 $n = 2.5$,耦合系数 $k = 1$。TNT 炸药的密度 $\rho_0 = 1\ 400\ \mathrm{kg/m^3}$,爆轰速度 $D_H = 6\ 265\ \mathrm{m/s}$。

常规武器(如 TNT 炸药)爆炸的自由场峰值速度为[9]:

$$v_r = 160k\left(\frac{r}{w^{1/3}}\right)^{-2.5} \tag{2}$$

式中:v_r为化爆自由场峰值速度,0.305 m/s;r 为爆距,0.305 m;w为炸药 TNT 当量,0.454 kg。

核爆产生的自由场峰值速度为[8]:

$$v_h = 3.24 \times 10^4\left(\frac{r}{w^{1/3}}\right)^{-2.05} \tag{3}$$

式中:v_h为核爆自由场峰值速度,m/s;r 为爆距,m;w为炸药 TNT 当量,kt。

计算的化爆与核爆的自由场峰值速度如图 1 所示。图中,将式(2)~(3)中的单位进行了统一换算;化爆的自由场峰值速度与核爆的量级差为 10^4,因此将 $10^4 v_r$ 与 v_h 进行比较。

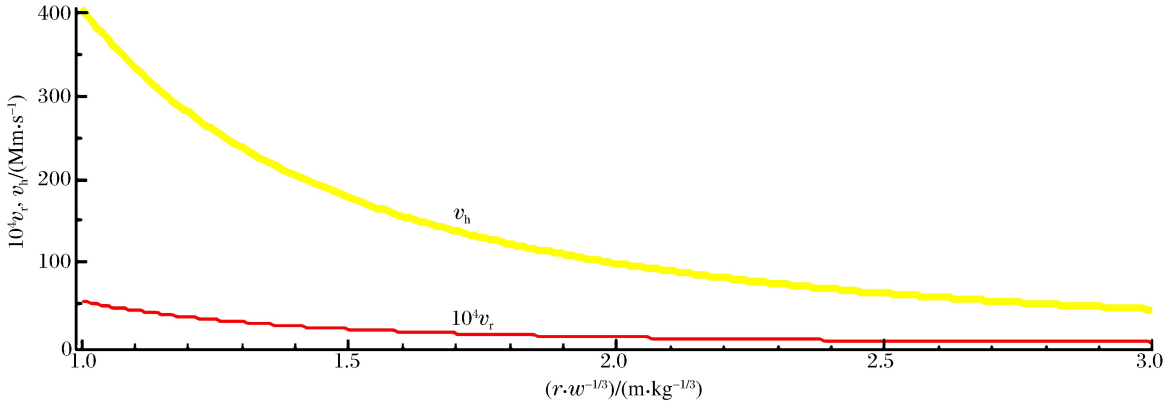

图 1 自由场径向峰值速度

Fig. 1 Peak radial velocitis of free field

计算石灰岩中化爆的应力波参数式为[7]:

$$\sigma_r = \frac{p_2}{\bar{r}^{\alpha}} \qquad p_2 = \frac{1}{2}\frac{\rho_0 D_H^2}{1 + \dfrac{\rho_0 D_H}{\rho_m C_p}} \tag{4}$$

式中:σ_r为化爆的自由场峰值应力,pa;p_2为药室岩壁处的初始冲击压力,pa;$\bar{r}$为爆距 r 与装药半径r_0的比,$\bar{r} = \dfrac{r}{r_0}$,其中r_0与 w 的关系为 $w = \dfrac{4}{3}\pi {r_0}^3 \rho_0$,$\rho_0$为 TNT 炸药的密度,$\mathrm{kg/m^3}$;$D_H$为爆轰速度,m/s;$\rho_m$为石灰岩的密度,$\mathrm{kg/m^3}$;$c_p$为纵波波速,m/s。

将石灰岩的参数代入表达式,可得:

$$\sigma_r = 0.491 \times 10^8\left(\frac{r}{w^{1/3}}\right)^{-2.0} \tag{5}$$

式中：σ_r为化爆的自由场峰值应力，pa；r 为爆距，m；w为炸药 TNT 当量，kg。

计算核爆的应力表达式为[8]：

$$\sigma_h = 3.08 \times 10^8 \left(\frac{r}{w^{1/3}}\right)^{-2.09} \tag{6}$$

式中：σ_h为核爆的自由场峰值应力，pa；r 为爆距，m；w为炸药 TNT 当量，kt。

图 2 给出了化爆与核爆峰值应力衰减曲线。图中，将式(5)～(6)中的单位进行了统一换算；化爆的自由场峰值应力与核爆的量级差为 10^4，因此将 $10^4\sigma_r$ 与 σ_h 进行比较。

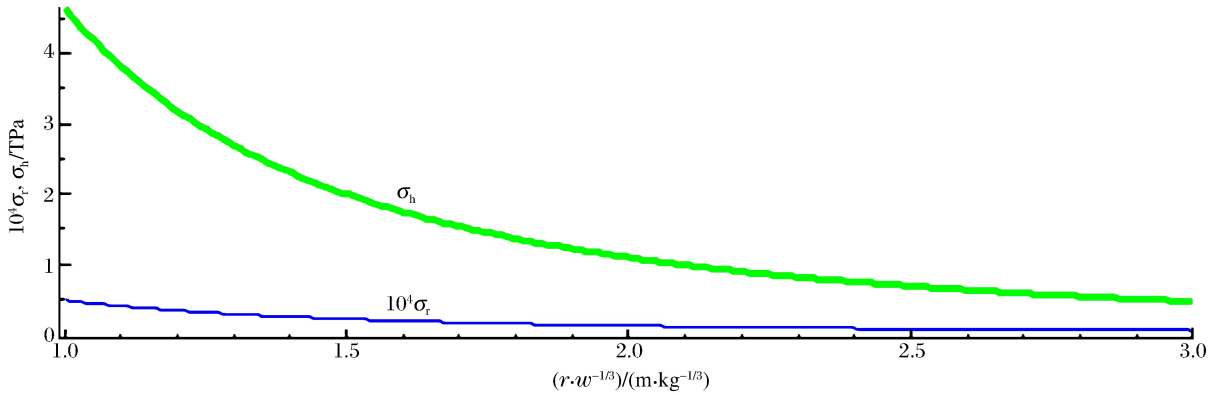

图 2 自由场径向峰值应力

Fig. 2 Peak radial stresses of free field

比较图 1～2 可以发现：化爆与核爆产生的自由场峰值应力、速度衰减规律相似，当比例距离 $r/w^{1/3}$ 在一定的范围内变化时，化爆与核爆的冲击震动效应呈现相近的变化特点。

不同比例距离的化爆与核爆的自由场峰值速度、应力及对应比值，见表 1。

表 1 自由场的峰值速度和峰值应力

Table 1 Peak radial velocitis and stresses of free field

$(r\cdot w^{-1/3})/(m\cdot kg^{-1/3})$	$10^4 v_r/(Mm\cdot s^{-1})$	$v_h/(Mm\cdot s^{-1})$	$10^4 v_r/v_h$	$10^4\sigma_r$/TPa	σ_h/TPa	$10^4\sigma_r/\sigma_h$
0.01	1 613 000	5 135 000	0.314	4 910.0	70 532	0.069 6
0.05	28 854	189 520	0.152	196.40	2 440.8	0.080 5
0.10	5 100.7	45 766	0.111	49.100	573.30	0.085 6
0.25	516.16	6 994.6	0.074	7.856 0	84.468	0.093 0
0.50	91.24	1 689.1	0.054	1.964 0	19.840	0.099 0
0.75	33.11	753.64	0.044	0.873 0	8.501 7	0.102 7
1.00	16.13	407.89	0.040	0.491 0	4.660 0	0.105 4
1.25	9.23	258.15	0.036	0.314 2	2.923 1	0.107 5
1.50	5.85	177.65	0.033	0.218 2	1.997 0	0.109 3
1.75	3.98	129.51	0.031	0.160 3	1.446 9	0.110 8
2.00	2.85	98.50	0.029	0.122 8	1.094 5	0.112 2
2.25	2.12	77.37	0.027	0.097 0	0.855 7	0.113 4
2.50	1.63	62.34	0.026	0.078 6	0.686 8	0.114 4
2.75	1.29	51.27	0.025	0.065 0	0.562 6	0.115 5
3.00	1.03	42.90	0.024	0.054 6	0.469 0	0.116 4

由表 1 可以看出，比例距离 $r/w^{1/3}$ 在 0.01～3.0 $m/kg^{1/3}$ 之间时，化爆的峰值速度与核爆的峰值速度比值在 0.024～0.314 之间，利用最小二乘法[10]，拟合得到基于峰值速度的化爆与核爆之间的模拟关系式：

$$\gamma_1 = 0.038\ 71\left(\frac{r}{\sqrt[3]{w}}\right)^{-0.45} \times 10^{-4} + 0.010\ 58 \times 10^{-4} \qquad \frac{r}{\sqrt[3]{w}} \in (0.01 \sim 3.0)\ \mathrm{m/kg^{1/3}} \tag{7}$$

式(7)便是拟合得到基于峰值应力的化爆与核爆之间的模拟关系式。根据式(7),可以近似计算核爆与化爆之间的峰值速度的比值。在已知化爆峰值速度的情况下,可计算出相应条件下的核爆产生的自由场峰值速度。这将给核爆炸在岩体介质中爆炸的峰值速度的计算带来极大的便利。式(7)的误差在 2%以内。

由表 1 可以看出,比例距离 $r/w^{1/3}$ 在 0.01～3.0 $\mathrm{m/kg^{1/3}}$ 之间时,化爆的峰值应力与核爆的峰值应力比值在 0.069 6～0.116 4 之间,利用最小二乘法,拟合得到出基于峰值应力的化爆与核爆之间的模拟关系式:

$$\gamma_2 = \begin{cases} 0.099\ 54 \times \mathrm{e}^{-0.005\ 48\left(\frac{r}{\sqrt[3]{w}}\right)^{-1}} \times 10^{-4} & \dfrac{r}{\sqrt[3]{w}} \in (0.01 \sim 1.0)\ \mathrm{m/kg^{1/3}} \\ 0.005\ 29\left(\dfrac{r}{\sqrt[3]{w}}\right) \times 10^{-4} + 0.101\ 14 \times 10^{-4} & \dfrac{r}{\sqrt[3]{w}} \in (1.0 \sim 3.0)\ \mathrm{m/kg^{1/3}} \end{cases} \tag{8}$$

式(8)便是拟合得到基于峰值应力的化爆与核爆之间的模拟关系式。根据式(8),可以近似计算核爆与化爆之间的峰值应力的比值。在已知化爆峰值应力的情况下,可计算出相应条件下的核爆产生的自由场峰值应力。这将给核爆炸在岩体介质中爆炸的峰值应力的计算带来极大的便利。式(8)中,上段式的误差在 20%以内,下段式的误差在 2.1%以内。

由于本文主要以理论分析为基础,所引用的公式均是普遍运用于工程实践中的成熟理论公式,因此计算结果可靠。

3 结 论

核试验会产生巨大的破坏效应,同时也给环境、人类带来巨大的创伤。目前联合国已颁布了禁止核试验的条约。但核能一直以来都受到各国的密切关注,核爆炸的巨大威力更是各国军事上所追求的。本文中,通过化爆来模拟研究核爆在石灰岩中爆炸所产生的冲击震动效应的方法无疑会给核爆的研究带来巨大的便利。

根据已有的经验公式,结合对化爆及核爆在石灰岩中的冲击震动效应的对比分析,得到以下结论:

(1)核爆在石灰岩中爆炸的冲击震动效应的衰减规律与化爆在石灰岩中爆炸的冲击震动效应的衰减规律相似,可以通过化爆来近似模拟核爆的冲击震动效应。

(2)利用最小二乘法,拟合了基于峰值速度与峰值应力的核爆与化爆的模拟关系式γ_1、γ_2,较可靠,可以用来近似计算核爆的峰值速度与应力。

关于核爆炸自由场峰值加速度、峰值位移的研究还有待进一步探讨,本文中化爆模拟核爆的方法可为以后核爆的研究提供参考。

参考文献:

[1] 赵洪宝,谌伦建.石灰岩热膨胀特性研究[J].岩土力学,2011,32(6):1725-1730.
Zhao Hong-bao, Chen Lun-jian. Experimental study of thermal expansion property of limestone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(6):1725-1730.

[2] 赵红玲,侯爱军,童怀峰,等.石灰岩中不同埋深爆炸自由场直接地冲击参数的预计方法[J].爆炸与冲击,2011,31(3):290-294.
Zhao Hong-ling, Hou Ai-jun, Tong Huai-feng, et al. Prediction method of the direct ground shock parameters of explosion at different buried depths in free field of limestone[J]. Explosion and Shock Waves, 2011,31(3):290-294.

[3] 王占江,门朝举,刘冠兰,等.石灰岩中球形装药封闭化爆试验的自由场应力和地运动[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增 1):3403-3410.

Wang Zhan-jiang, Men Chao-ju, Liu Guan-lan, et al. Free-field stress and ground motion of underground confined chemical explosion with spherical charge in limestone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010,29(suppl 1):3403-3410.

[4] Argo P, Clark R A, Douglas A, et al. The detection and recognition of underground nuclear explosion[J]. Surveys in Geophysics, 1995,16(4):495-532.

[5] Abbasi T, Pasman H J, Abbasi S A. A scheme for the classification of explosions in the chemical process industry [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010,174(1):270-280.

[6] Zhong Fang-qing, Liu Wen-tao, Xiao Wei-guo, et al. Stress wave numerical calculation excited from underground nuclear explosion in granite[C]// Mechanics and Material Engineering for Science and Experiments. 2003:528-529.

[7] 叶序双.爆炸作用理论基础[M].3 版.南京:解放军理工大学工程兵工程学院,2010.

[8] 郝宝田.地下核爆炸及其应用[M].北京:国防工业出版社,2002.

[9] 杜义欣,刘晶波,伍俊,等.常规爆炸地下结构的冲击震动环境[J].清华大学学报(自然科学版),2006,46(3):322-326.
Du Yi-xin, Liu Jing-bo, Wu Jun, et al. Blast shock and vibration of underground structures with conventional weapon[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2006,46(3):322-326.

[10] 贺建清,刘秀军.基于最小二乘法的边坡稳定性分析[J].岩土力学,2012,33(6):1724-1729.
He Jian-Qing, Liu Xiu-jun. Slope stability analysis based on least square method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012,33(6):1724-1729.

Simulation of shock and vibration of nuclear explosion in limestone based on chemical explosion

Xue Yu-long[1], Tang De-gao[1], Li Da-peng[1],
Li Zhi-zhong[1], Yao Mei-li[2], Hu Zhao-ying[1]

(1. *State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, PLA University of Science and Technology, Nanjing* 210007, *Jiangsu, China*;
2. *College of Field Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing* 210007, *Jiangsu, China*)

Abstract: Analysis on shock and vibration of nuclear explosion in limestone is difficult due to the forbidden law of nuclear test. Based on the blasting similarity law, simulation of shock and vibration of nuclear explosion in limestone based on chemical explosion is considered. Shock and vibration of nuclear and chemical explosion had been analyzed. The expression of equivalent weight coefficient between chemical and nuclear explosion is defined by stress wave and velocity and given by least square method. The expression can be used to calculate stress wave and velocity of nuclear explosion approximately.

Key words: mechanics of explosion; shock and vibration; blasting similarity law; nuclear explosion; least square method; chemical explosion

（责任编辑　丁　峰）