

文章编号: 1000-7598(2010)05-1574-05

变埋深条件下饱和土爆炸能量耦合系数的试验研究

穆朝民^{1,2,3,4}, 任辉启⁴, 李永池³, 辛凯⁴

(1. 安徽理工大学 能源与安全学院, 安徽 淮南 232001; 2. 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001;
3. 中国科学技术大学 近代力学系, 合肥 230026; 4. 总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023)

摘要: 通过在 $\phi 2.5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 模拟爆炸装置中进行了饱和土爆炸试验。利用自由场试验研究了饱和土在不同埋设深度条件下的爆炸问题, 得到了相应的爆炸破坏效应的宏观特征和压力实测波形, 并对测试结果进行了分析, 得到了饱和土中爆炸波传播规律, 并通过试验得到耦合系数的试验数据, 绘制了耦合系数曲线。实验结果表明, 对于封闭爆炸最小比例埋深为 $2.62\text{ m/kg}^{1/3}$, 当比例埋深大于 $2.62\text{ m/kg}^{1/3}$ 时, 峰值压力与动量受比例埋深的影响不大, 此时爆炸能量基本被封闭在饱和土中。

关键词: 爆炸力学; 饱和土中爆炸; 试验研究; 耦合系数

中图分类号: O 382⁺.2

文献标识码: A

Experiment study of explosion energy coupling coefficient with different burial depths in saturated soils

MU Chao-min^{1,2,3,4}, REN Hui-qi⁴, LI Yong-chi³, XIN Kai⁴

(1. School of Energy Resources and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui, 232001, China; 2. Key Laboratory of Mining Coal Safety and Efficiently Constructed by Anhui Province and Ministry of Education, Huainan Anhui, 232001, China; 3. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 4. Luoyang Institute of Hydraulic Engineering and Technology, Luoyang Henan, 470123, China)

Abstract: The experiment of explosion wave propagation in saturated soils is accomplished in the $\phi 2.5\text{ m} \times 5\text{ m}$ pothole. Free-field experiments of explosion with different burial depths in saturated soils are carried out. The macro characteristics of explosion and recorded waveforms of pressure are presented. The recorded results are interpreted. The propagation laws of shock wave in saturated soil, the data of coupling coefficient and the coupling coefficient curve are obtained. The experiments show that the minimal scaled buried depth is $2.62\text{ m/kg}^{1/3}$ for close explosion in free-field. When the minimal scaled buried depth exceeds $2.62\text{ m/kg}^{1/3}$, the peak pressure and momentum influenced by the scaled buried depth is very little. At this point the mostly energy of explosion is closed in saturated soils.

Key words: mechanics of explosion; explosion in saturated soils; experimental study; coupling coefficient

1 引言

炮弹、航弹以较大的速度飞行准确击中岩土目标时将产生冲击、侵彻和爆炸效应。弹体以高速侵彻至介质内, 并在一定深度内爆炸时, 将带来介质的扰动, 产生结构的变形和破坏都比空中爆炸大得多。因此, 自由场试验与耦合系数的研究是岩土介质研究的基本问题之一。获得自由场试验和耦合系数的规律后, 只要给出装药量和介质材料参数, 即可以求出自由场中介质任意一点的峰值应力、作用时间和动量, 从而得到应力波在该介质中传播的规律。

国外对饱和土耦合系数的研究并不多见, 荷兰在饱和砂中进行了 58 次化爆试验, 并将结果与美国 TM5-885-1 公式进行了比较。国内工程兵三所施鹏对非爆和土耦合系数进行了研究, 解放军理工大学钱七虎、王明洋、赵跃堂等^[1-7]研究了爆炸波在饱和砂土中压力的传播和饱和砂土的液化机制, 提出了许多有价值的结论。本文利用自由场试验研究了饱和土在不同埋设深度条件下装药的爆炸问题, 给出了相应的爆炸宏观特征和压力的实测波形, 并对测试结果进行了分析, 得到了饱和土中爆炸压力传播规律。通过试验得到耦合系数试验数据并绘制耦合系数曲线^[1-12]。

收稿日期: 2009-09-01

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 10632080); 国家自然科学基金 (No. 50874005)。

第一作者简介: 穆朝民, 男, 1977 年生, 博士, 主要从事爆炸力学在岩土中的应用方面的研究。E-mail: chmmu@mail.ustc.edu.cn

2 耦合系数的概念

当装药爆炸在土或遮弹层中侵彻较深时, 所产生的土应力和地运动将大大增强。使用耦合系数的概念来描述地冲击和爆炸时, 耦合系数 f 的定义为: 部分埋设或浅埋爆炸(近地爆)与完全埋设爆炸(封闭爆炸)在同一介质中所产生的地冲击大小的比值:

$$f = \frac{(P, V, d, I, a)_{\text{近底爆}}}{(P, V, d, I, a)_{\text{封闭爆}}} \quad (1)$$

式中: P 为压力; V 为速度; d 为埋深; I 为动量; a 为加速度。

耦合系数的概念是衡量同一介质中爆炸存在一个能量耦合的问题, 因为爆炸物在介质中爆炸时, 作用于介质的能量与炸药释放出来的能量和弹体爆炸时距地表的深度有很大关系, 它主要是由于介质参数和爆炸时约束方式不同而引起的, 反映出弹体爆炸时的能量传输给介质的程度^[13-15]。

对耦合系数的定义存在较大的分歧, 不同的定义具有不同的应用范围, 如应力型、冲量型、加速度型等。耦合封闭的程度也存在较大分歧, 可当爆炸有较大的能量向下传播形成球面弹坑时定义为封闭, 也可定义为爆炸能量有较小的泄漏时定义为完全封闭^[13-15]。

笔者认为, 既然耦合是能量的耦合, 反映的应该是能量的分配的关系更为准确, 所以本文以冲量的形式定义耦合系数, 用试验的方法获得耦合关系, 这是惟一的途径。

当弹药在土中爆炸时, 影响地冲击荷载规律的物理因素包括弹体装药量 W 、弹体侵彻深度(弹药埋设深度) h 、介质材料参数(介质密度 ρ 、压缩波速 c) 等。不同侵彻深度对爆炸的影响因素用耦合系数 f 来表示。自由场的荷载参数包括峰值压力 P 、冲量 I_0 、上升时间 T_s , 以装药量 (W)、长度 (L) 和时间 t 的单位为基本量纲, 各参数组成的量纲分别组合为 $P/\rho c^2$ 、 $I_0/\rho c W^{1/3}$ 、 $T_s c/W^{1/3}$ 。在总结爆炸荷载衰减规律时, 把上述量纲组合与比例埋深 ($h/m^{1/3}$), 在假定大气压力 P_0 为定值条件下在对数坐标内进行线性拟合, 拟合后的形式为

$$P/\rho c^2 = f a_1 (h/W^{1/3})^{b_1} \quad (2)$$

$$I_0/\rho c W^{1/3} = f a_2 (h/W^{1/3})^{b_2} \quad (3)$$

$$T_s c/W^{1/3} = f a_3 (h/W^{1/3})^{b_3} \quad (4)$$

式中: 拟合系数 a_i 、 b_i ($i=1, 2, 3$) 由实测数据回归得到。

耦合系数的确定通常由试验测得, 测试的参数根据测试条件也可以选为不同的参数, 如运动参数 (a , v , d) 和荷载参数 (P , I_0) 等, 本文按照式 (3)

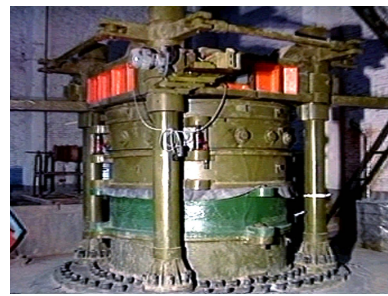
$f = \frac{I_{\text{近底爆}}}{I_{\text{封闭爆}}}$ 的定义确定耦合系数 f 。试验方法是分

别埋设相同重量 TNT 炸药在土中的不同深度, 同时保持爆心与传感器的埋设方式与距离不改变。耦合系数与埋深和药量有关, 将 $h/W^{1/3}$ 组成比例埋深的无量纲量, 由试验确定冲量 I_0 与 $h/W^{1/3}$ 关系, 并绘制成图, 使用时查图插值即可得到比例埋深的耦合系数。

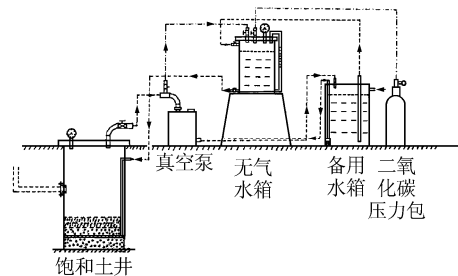
3 试验方法

3.1 试验设备及饱和土样的制取

由于很难获得较高饱和度的饱和土, 而且土体受爆炸动荷载扰动影响较大, 因此国际上对饱和土爆炸荷载开展系统试验研究的较为少见。本次试验设备采用 $\phi 2.5$ m 的模拟爆炸装置(图 1(a))以确保饱和土的高饱和度和试验的可重复性, 设备的直径为 2.5 m, 地上部分高 4.0 m, 地下部分深 5 m, 使用厚 1 m 的钢筋混凝土将设备浇筑成圆筒状并在顶部设有反力架。该设备经核算, 具有井内抗 0.2 kg TNT 炸药直接爆炸的能力, 并对设备进行了必要的改进(图 1(b))以满足制作饱和土土样的要求。



(a) 拟爆炸装置图



(b) 和土制作系统图

图 1 试验装置

Fig.1 Facility of test

采用真空反压法制作饱和土样，即利用真空泵真空抽气使土体中气体含量减小而达到饱和目的，具体为：①全系统密封饱和土样的试验设备；②采用高真空度真空泵（ $6\times 10^{-2}\text{Pa}$ ）；③制作并分层夯实含水率 15%土样，在设计深度上埋置结构或传感器，每层填土使用格栅来控制土样密度（格栅器将 $\phi 2.5\text{ m}$ 直径的圆分成 12 个等面积的格子，每个格子中填土重量相等）。④保持对土样长时间抽气以控制土样真空度，抽气时间不小于 7 d；⑤往真空土样内充制作好的无气水，充水速度控制小于 $2\text{ m}^3/24\text{ h}$ ；⑥真空状态静止置放 15 d 以上；⑦回填爆炸试验后的弹坑，接着真空抽气、充无气水、并静放固结。

由于是炸药直接作用于饱和土体，对饱和土体造成很大扰动，所以每次爆炸后必须重新回填土样并抽气。

3.2 和土耦合系数的试验方法

饱和土体内共埋设了上下 5 层土压力传感器作为试验测点，每层使用 3 个传感器，取得的数据进行平均处理。相邻上、下 2 层传感器不在同一方位角上，以减少相邻 2 层传感器相互影响（图 2(b)）。采用逐层开挖法进行试验并保持爆心距为 1.10 m，药量为 50~200 g（图 2(a)），装药比例埋深分别为 0.34、0.92、1.93 $\text{m/kg}^{1/3}$ 和 2.62 $\text{m/kg}^{1/3}$ 。完全封密爆炸的比例埋深为 2.62 $\text{m/kg}^{1/3}$ （图 3）。

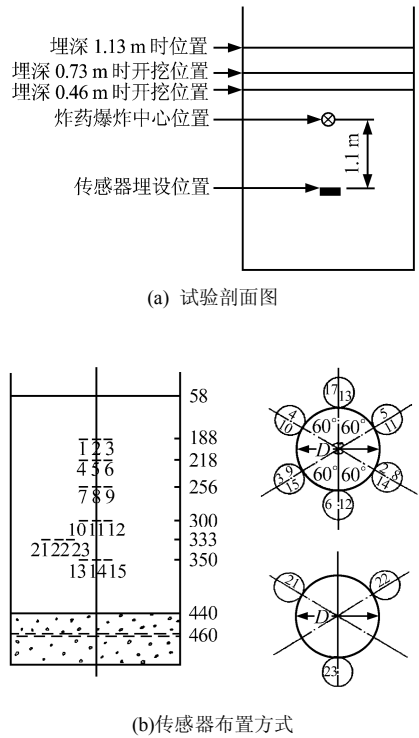


图 2 饱和土试验测点布置图

Fig.2 Schematic of tests in saturated soils

4 试验爆炸结果

图 3 为不同比例埋深时试验现象，其中对弹坑的宏观现象图 3 的解释见表 1。图 4 为实测压力波形。由图 4 可以看出，当炸药与测点距离保持不变时，随着埋深的增加（从第 1 层到第 5 层传感器，埋深不断增加见图 2(b)），饱和土对炸药的封闭增加，炸药向空气中泄漏的能量减少，峰值压力与动量随着埋深的增加而增加，正压作用时间也随着比例埋深的增加而增加，正压上升时间随着比例埋深的增加而减少。当比例埋深达到 2.62 $\text{m/kg}^{1/3}$ 时已经基本封闭，此时再增加埋深对深峰值压力与动量的影响不大，由此可以得出对于此种类型的饱和土比例埋深为 2.62 $\text{m/kg}^{1/3}$ 时封闭度为 1。

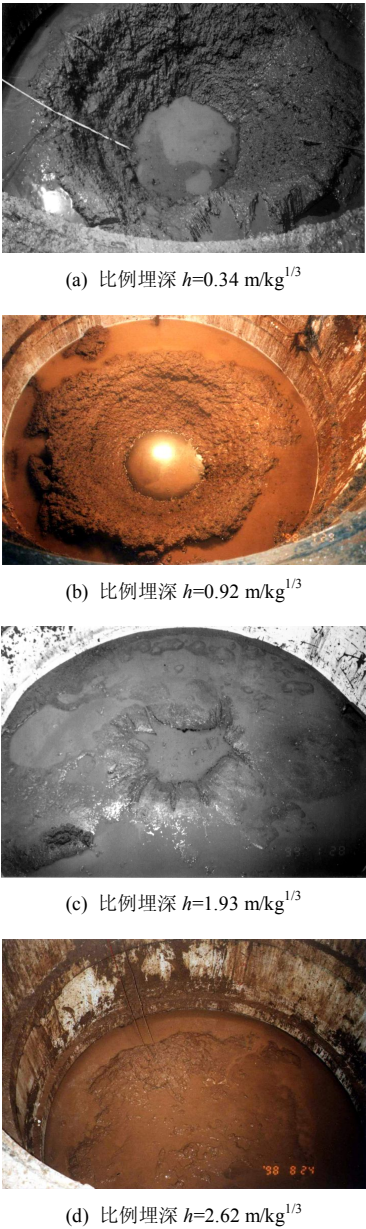
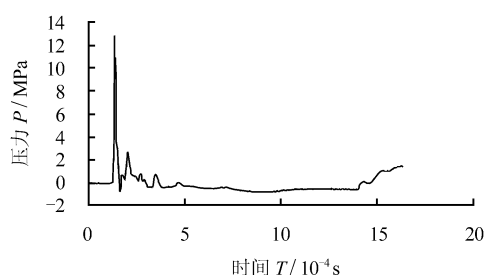


图 3 饱和土爆炸试验现象

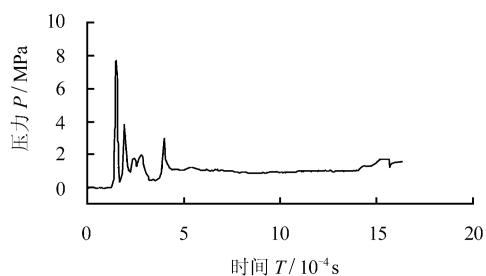
Fig.3 The explosion phenomena in tests of saturated soil

表1 饱和土弹坑特征与埋深关系
Table1 The crater characters in different burial depths of saturated soils

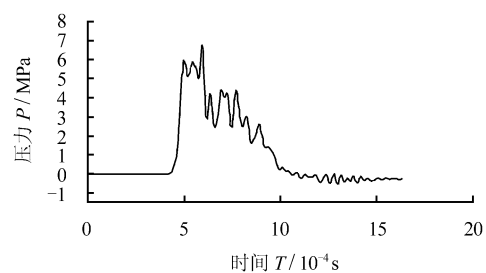
TNT 比例埋深 ($\text{m/kg}^{1/3}$)	特征	能量耦合形式	图例
0~0.60	弹坑有明显抛撒现象, 无球状弹坑	消耗较多	图 3(a)
0.60~1.4	有明显的半球形弹坑, 有抛撒	消耗减少	图 3(b)
1.4~2.62	有较小的弹坑, 抛撒不明显	部分泄漏	图 3(c)
2.62~以下	无抛撒, 无弹坑	泄漏较少	图 3(d)



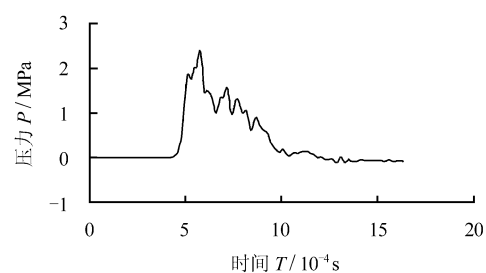
(a) 第1层 16#测点



(b) 第2层 221#测点



(c) 第3层 11#测点



(d) 第5层 111#测点

图4 实测压力波形

Fig4 Measured waveforms of pressure

5 耦合系数数据分析

按公式(3)定义的耦合系数 f 与药量 W 和装药埋设深度 h 有关, 为供设计和分析时参考, 在数据处理时将药量 W 和埋深 h 组合成比例埋深 $h/W^{1/3}$ 并绘制 $f-h/W^{1/3}$ 关系图。饱和土进行了27炮试验, 对于定量研究而言本试验样本偏少, 因此, 试验的定量准确性将受到一定的影响, 导致试验结果在一定程度上存在误差。但对于定性研究而言, 测量样本数量是足够的, 在此基础上得出的定性规律是正确的。首先对压力进行时域积分得到压力冲量, 取封闭爆炸时的压力冲量为最大值, 接着将其他的压力冲量均与此值相比得到耦合系数, 最后在直角坐标系绘制耦合系数曲线, 如图5所示。测量结果的离散度与部分国外文献中的试验数据离散度相当。本次试验测试结果的离散主要由多方面因素造成, 如传感器的精度、灵敏度、定位、回填等。

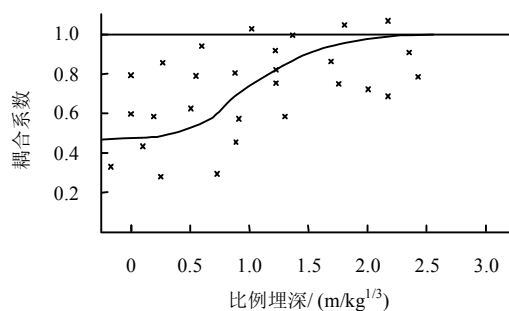


图5 饱和土耦合系数曲线

Fig.5 The coupling coefficient curve

6 结论

通过试验数据和宏观现象分析, 可以得出以下结论:

(1) 通过自由场试验, 得到了饱和土中爆炸耦合系数的试验数据, 根据所得数据绘制成耦合系数与比例埋深的关系图。

(2) 当饱和土中装药比例爆炸埋深超过 $2.62 \text{ m/kg}^{1/3}$ 后, 爆炸基本达到封闭, 耦合系数达到1.0。此时再增加埋深对深峰值压力与动量的影响不大, 由此可以得出对于此种类型的饱和土比例埋深为 $2.62 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时封闭度为1。

(3) 峰值压力与动量随着比例埋深的增加而增加, 正压作用时间也随着比例埋深的增加而增加, 正压上升时间随着比例埋深的增加而减少。当比例埋深达到 $2.62 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时已经基本封闭, 此时再增加埋深对深峰值压力与动量的影响不大。

参考文献

- [1] 赵跃堂, 郑守军, 郑大亮, 等. 爆炸波在饱和土介质中传播时压力变化规律的试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(1): 61—64.
- ZHAO Yue-tang, ZHENG Shou-jun, ZHENG Da-liang, et al. Experimental in investigation on pressure variation during explosion wave propagation in saturated soils[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2004, 24(1): 61—64.
- [2] 王明洋, 赵跃堂, 钱七虎. 饱和砂土动力特性及数值方法研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 723—729.
- WANG Ming-yang, ZHAO Yue-tang, QIAN Qi-hu. Study of dynamic behaviour and numerical method for saturated sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(6): 732—729.
- [3] PUEBLA H, BYRME P M, PHILIPS R. Analysis of CANLEX liquefaction embankments: prototype and centrifuge models[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1997, 34(5): 641—657.
- [4] BYRME P M, CHEUNG H, YAN L. Soil parameters for deformation analysis of sand masses[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1987, 24(3): 366—376.
- [5] 国胜兵, 高培正, 潘越峰, 等. 爆炸波在准饱和砂土中的传播规律[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1897—1902.
- GUO Sheng-bing, GAO Pei-zheng, PAN Yue-feng, et al. Explosive wave propagation in quasi-saturated sandy soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(12): 1897—1902.
- [6] 孙美凤. 爆炸荷载作用下饱和土中地下建筑结构的动力响应[J]. 华北水利水电学院学报, 2004, 25(2): 18—21.
- SUN Mei-feng. The structure dynamical response in saturated soil to blasting loads[J]. **Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power**, 2004, 25(2): 18—21.
- [7] 杨海杰, 钱七虎, 赵跃堂, 等. 三相饱和土爆炸液化机制模型研究[J]. 解放军理工大学学报, 2001, 2(1): 70—73.
- YANG Hai-jie, QIAN Qi-hu, ZHAO Yue-tang, et al. Study on blast-induced liquefaction model for 3-phase saturated soil[J]. **Journal of PLA University of Science and Technology**, 2001, 2(1): 70—73.
- [8] 刘建新, 宋华, 赵跃堂, 等. 准饱和砂土中平面压缩波传播[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(1): 86—92.
- LIU Jian-xin, SONG Hun, ZHAO Yue-tan, et al. Propagation of plane compress-wave in quasic-saturated sandy soil[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2004, 24(1): 86—92.
- [9] 赵跃堂, 郑大亮, 王明洋, 等. 饱和土介质中爆炸波传播的时间特征试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(2): 162—167.
- ZHAO Yue-tang, ZHENG Da-liang, WANG Ming-yang, et al. Experimental investigation on time characteristics of explosive wave propagation[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2004, 24(2): 162—167.
- [10] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid[J]. **Journal of Acoust**, 1956, 28(2): 168—191.
- [11] DONTSOV V E, NAKORYAKOV V E. Enhancement of shock waves in a porous medium saturated with a liquid containing soluble-Gas bubbles[J]. **International Journal of Multiphase Flow**, 2001, 27(11): 2023—2041.
- [12] WANG Zhong-qi, HAO Hong, LU Yong. A three-phase soil model for simulating stress wave propagation due to blast loading[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2004, 28(1): 33—56.
- [13] PRAPAHARAN S, CHAMEAU J L, HOLTZ R D. Effect of strain rate on undrained strength derived from pressure meter tests[J]. **Geotechnique**, 1989, 39(4): 615—624.
- [14] 赵跃堂, 梁晖, 范斌. 饱和土中爆炸波传播问题的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(4): 352—357.
- ZHAO Yue-tang, LIANG Hui, FAN Bin. Numerical simulation of explosion wave propagation in the saturated soil[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2007, 27(4): 352—357.
- [15] 施鹏, 邓国强, 杨秀敏, 等. 土中爆炸地冲击能量分布研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(3): 240—244.
- SHI Peng, DENG Guo-qiang, YANG Xiu-min, et al. Study on ground shock energy distribution of explosion in soil[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2006, 26(3): 240—244.
- [16] 施鹏, 辛凯, 杨秀敏, 等. 土中装药不同埋深爆炸试验研究[J]. 工程力学, 2006, 23(12): 171—174.
- SHI Peng, XIN Kai, YANG Xiu-min, et al. Experimental study of explosion with different burial depths in soil[J]. **Engineering Mechanics**, 2006, 23(12): 171—174.