

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.03.007

近地面爆源爆炸成坑效应的数值模拟研究\*

陈风云 白春华

北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室(北京,100081)

[摘 要] 为研究爆炸案件中近地面爆源的爆炸成坑过程及爆坑形成影响因素,得到近地面爆源爆炸痕迹反演规律,利用非线性动力学软件 AUTODYN 对土壤地面在爆炸载荷作用下的动态响应进行了数值模拟研究,得到了土壤表面爆坑的形成过程及药量、炸高等影响因素对爆坑参数的影响规律。计算结果表明,爆坑形成的最初阶段,爆坑深度扩张速率最大,并随时间推移逐渐减缓,最终趋于稳定;当炸高确定时,爆坑深度随药量增大而增大,且爆坑深度与药量的立方根之间呈线性关系;当药量确定时,爆坑深度随炸高增大而减小,且爆坑深度与炸高呈线性关系;相对爆坑深度与相对炸高之间具有线性关系。

[关键词] 数值模拟;爆坑深度;炸高;药量

[分类号] TD235.1

引言

近年来,恐怖爆炸案件频发,对爆炸案件现场进行爆炸起因分析,通过爆炸痕迹反演,深入研究爆炸痕迹与爆源的关系,对爆炸案件的原因分析具有重要作用,能提高此类案件的破案效率。

土壤作为生活中常见的材料,在爆炸案件中较易形成痕迹,其在爆炸作用下的动态响应已成为热门的研究课题。Kinney 等<sup>[1]</sup>对 200 发大药量的地面悬空爆炸进行了统计分析,提出了关于炸坑直径大小  $D$  与药量  $W$  的计算经验公式;Ambrosini 等<sup>[2-3]</sup>进行了地面(炸高  $h=0$ )和近地面(炸高  $h=0.5\text{ m}$  和  $h=1.0\text{ m}$ )爆炸成坑试验与数值模拟,并得出炸坑尺寸与药量和炸高之间的关系式;Bjelovuk 等<sup>[4]</sup>研究了接触爆炸条件下,柏油路面爆坑尺寸与药量的经验公式;张彦春等<sup>[5]</sup>研究了土介质炸点反演爆源参数的方法;张智超、刘伟、Riera、Moorthy 等<sup>[6-9]</sup>也对近地面爆源爆炸成坑问题进行了研究。

但文献中对药量线性增加条件下的坑深规律研究得不够系统,没有得到可靠的爆坑尺寸经验公式。得到可靠的爆坑尺寸与爆源参数之间的关系式,对恐怖爆炸案件具有重要意义。

本文基于欧拉-拉格朗日耦合的数值模拟技术,使用非线性动力学软件 AUTODYN,对土壤在爆炸载荷作用下的动态响应进行数值仿真研究,重点研究了不同药量和不同炸高条件下,炸药在近地面空

气中爆炸产生的爆坑深度问题,期望得到爆坑深度与爆源参数之间的关系,为爆炸痕迹反演爆源参数提供参考。

1 近地面爆源爆炸成坑的数值模拟方法

1.1 仿真模型及网格划分

在本文的数值仿真中,空气和炸药采用欧拉求解器来求解,土壤采用拉格朗日求解器来求解,欧拉和拉格朗日求解器之间进行流固耦合运算,并对土壤定义了侵蚀算法。

数值分析采用二维轴对称网格。二维模型较之完整的三维模型,不仅可得到精确的解答,还可明显减少单元数量,提高运算速率。根据实际中恐怖爆炸案件的情况,数值分析研究药量  $m$  为 100、200、300、400、500 kg 的球形 TNT 炸药在炸高  $h$  (炸药中心距地面距离)分别为 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 m 时的近地面爆源爆炸问题。

图 1 为爆炸数值计算模型和相应的模型网格划分。本文的整体模型尺寸为  $6\text{ m}\times3\text{ m}$ ,此模型为一个 6 m 直径的圆柱,由于空气和土壤远场对计算结果影响不大,故采用了渐变增大的网格划分,最小网格为  $10\text{ mm}\times10\text{ mm}$ 。

1.2 材料参数

图 1(a)所示的数值模型中,包含了 3 种材料,分别为空气、炸药(TNT)和土壤。

\* 收稿日期:2015-07-19  
作者简介:陈风云(1990-),男,硕士研究生,主要从事爆炸痕迹研究。E-mail: dugulanhun@gmail.com  
通信作者:白春华(1959-),男,教授,博导,主要从事安全技术及工程、爆炸理论方面研究。E-mail: chbai@bit.edu.cn

表 2 TNT 材料参数<sup>[11]</sup>

Tab. 2 Material parameters for the explosive<sup>[11]</sup>

密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	C <sub>1</sub> /GPa	C <sub>2</sub> /GPa	r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>
1.63	373.77	373.47	4.15	0.9
ω	爆速/(m·s <sup>-1</sup> )	比能/(GJ·m <sup>-3</sup> )	C-J 压力/GPa	
0.35	6 930	6	21	

注: C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、r<sub>1</sub>、r<sub>2</sub> 和 ω 为 JWL 状态方程中的常数。

表 3 土壤材料参数<sup>[12]</sup>

Tab. 3 Material parameters for soil<sup>[12]</sup>

密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	剪切模量/MPa	拉伸极限应力/kPa
0.11	1 614	1.5
Γ	起始声速 C <sub>0</sub> /(m·s <sup>-1</sup> )	s
1.92	220	-100

注: Γ 为 Gruneisen Gamma 参数, s 为无量纲参数。

性, 现选取文献[3]中的试验条件进行数值模拟, 并将模拟结果与试验结果进行对比, 如表 4 所示。

表 4 数值模拟与试验结果的对比

Tab. 4 Comparison of simulation results and experimental results

TNT 药量/kg	爆炸高度/m	试验爆坑深度 H <sub>e</sub> /m	模拟爆坑深度 H <sub>s</sub> /m	H <sub>s</sub> /H <sub>e</sub>
7	0.5	0.087 5	0.083 0	0.95
10	0.5	0.095 0	0.099 0	1.04

从表 4 中可以观察到, 在相同条件下, 数值模拟结果与试验结果之间平均相对误差为 4.68%。误差来源可能为土壤材料参数的设定, 由于土壤的特性较为复杂, 数值模拟所设定的参数无法与试验完全相符, 但误差在可接受范围内。

数值模拟的结果与试验结果基本相符, 本文所选用的数值模拟模型与所选材料参数的有效性得到了验证。

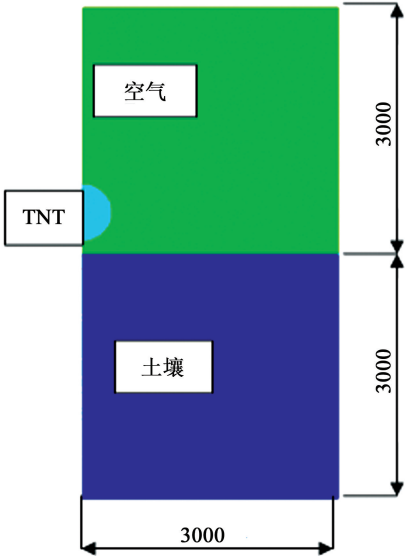
2 结果与分析

2.1 爆坑形成过程

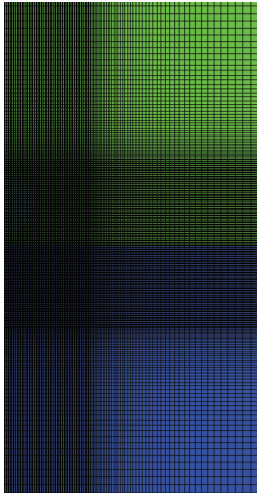
现以 500 kg 球形 TNT 炸药在炸高(炸药中心距地面距离)0.6 m 的爆炸成坑过程为例, 分析近地面爆源爆炸后土壤爆坑的形成过程, 如图 2 所示。

爆炸开始后, 冲击波由空气中传到土壤表面, 土壤开始下陷, 爆坑形成; 随着爆炸作用的持续, 爆坑深度持续扩张, 且爆坑四周开始隆起(药量较小或炸高较大时, 爆坑隆起不明显), 如图 2(b) 所示; 8 ms 后, 爆坑雏形显现, 爆坑深度和宽度的扩张速率减缓; 在 12 ms 之后, 爆坑形态基本不变, 可以认定爆坑状态已经稳定。

图 3 为 500 kg 球形 TNT 炸药在炸高为 0.6



(a) 模型和材料



(b) 网格划分

图 1 数值模拟模型和网格(单位:mm)

Fig. 1 Numerical model and meshes

空气采用理想气体状态方程来描述, 其为气体状态方程的最简形式之一。理想气体的内能仅是温度的函数; 多方气体的内能则正比于温度<sup>[10]</sup>。空气参数如表 1 所示。

表 1 空气材料参数<sup>[11]</sup>

Tab. 1 Material parameters for air<sup>[11]</sup>

密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	温度/K	绝热指数	比热容/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
1.225 × 10 <sup>-3</sup>	288.2	1.4	717.3

TNT 炸药采用 JWL( Jones-Wilkins-Lee ) 状态方程来描述。参数如表 2 所示。

土壤采用冲击状态方程和基于 D-P 准则的弹塑性强度模型, 并定义拉伸极限。参数如表 3 所示。

1.3 模型及参数的有效性验证

为验证本文前述数值模型与所选参数的有效

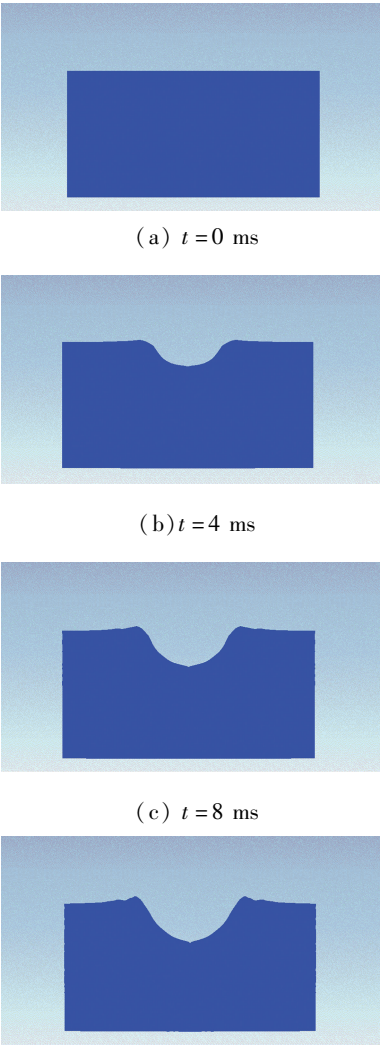


图2 爆坑形成过程  
Fig.2 Crater formation

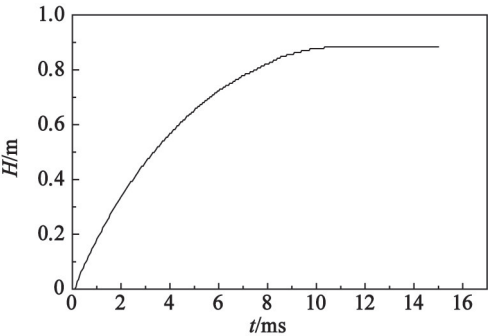


图3 爆坑深度随时间变化  
Fig.3 Changes of crater depth with time

m时爆坑深度随时间变化的曲线。从图3可以看出,0~0.15 ms时,由于炸药与地面有一定距离,起爆后冲击波在空气中传播,还未作用到地面,故爆坑深度为0;0.15 ms后,爆坑开始形成,爆坑开始扩张,且最初阶段爆坑深度增加最快,于2.80 ms时达到最终爆坑深度的一半,为0.442 m;随着时间的推

移,增加速度逐渐减慢,最终趋于稳定,在12.00 ms时形成稳定的爆坑,最终爆坑深度为0.884 m。

2.2 不同炸高下药量变化对爆坑深度的影响

根据不同炸高条件下的数值模拟结果,得到爆坑中心深度随药量的变化,如图4所示。

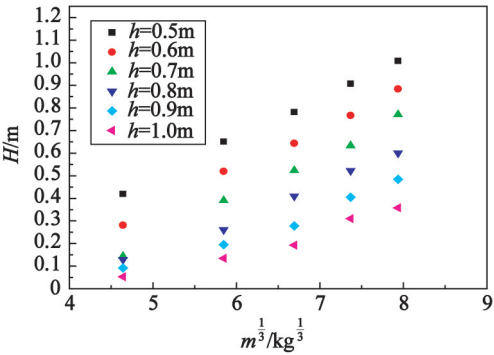


图4 不同炸高下的爆坑深度  
Fig.4 Crater depth at different height of detonation

从图4可以看出,在某一固定炸高下,爆坑中心深度随着药量的减少而减小,最终无法形成明显的爆坑,爆坑深度与药量的立方根之间具有线性关系。且图4中的各条曲线近似平行(药量较小、炸高较大时,由于爆坑不明显,形成的爆坑凹凸不平,无法精确测量,故各曲线存在小部分的交叉),意味着在不同的炸高下,爆坑深度与药量的立方根之间具有相似的线性关系。

对图4中各条曲线分别进行拟合,取各拟合直线斜率的平均值,并对各拟合直线的截距关于炸高进行拟合,可得到爆坑深度与药量、炸高之间的拟合线性关系式:

$$H = 0.18\ m^{1/3} - 1.14h - 0.41, (4.46 < m^{1/3} < 7.94).$$
(1)

式中: $H$ 为爆坑深度,m; $m$ 为炸药质量,kg; $h$ 为炸高,m。

2.3 不同药量下炸高变化对爆坑深度的影响

根据不同药量条件下的数值模拟结果,得到爆坑深度随炸高的变化,如图5所示。

从图5中可以看出,在某一固定药量下,爆坑深度随着炸高的增加而减小,且爆坑深度与炸高之间具有线性关系。且图5中的各条曲线近似平行,意味着在不同的药量条件下,爆坑深度与炸高之间具有相同的

关系。对图5中各条曲线进行拟合,取各拟合直线斜率的平均值,并对各拟合直线的截距关于炸高进行拟合,可得到爆坑深度与炸高、药量之间的拟合线性关系式:



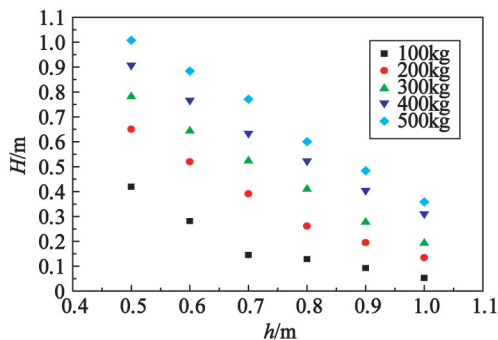


图 5 不同药量下的爆坑深度

Fig. 5 Crater depth at different charge quantities

$$H = -1.17h + 0.17m^{1/3} + 0.45, (0.5 < h < 1.0). \quad (2)$$

式中:  $H$  为爆坑深度,  $m$ ;  $h$  为炸高,  $m$ ;  $m$  为炸药质量,  $kg$ 。

## 2.4 炸高与药量对爆坑深度的综合影响

为综合考虑炸高与药量对爆坑深度的影响,需对这两个变量进行整合,即进行比例化处理。取相对炸高  $h_z = h/m^{1/3}$ ;相应地取相对爆坑深度  $H_z = H/m^{1/3}$ ;相对爆坑深度  $H_z$  与相对炸高  $h_z$  的关系见图 6,图 6 的试验数据来源于文献[13]。

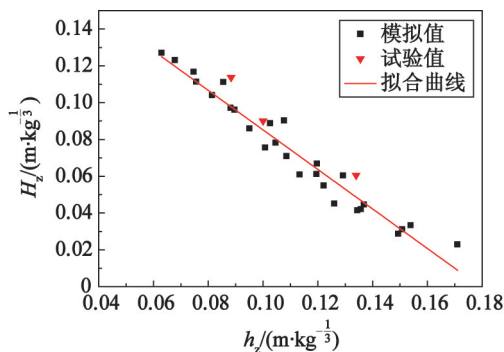


图 6 相对爆坑深度与相对炸高关系

Fig. 6 Relationship between relative crater depth and relative height of detonation

从图 6 可以看出,试验数据与数值模拟结果吻合得较好。随着相对炸高的增大,相对爆坑深度逐渐减小,且可观察到相对爆坑深度与相对炸高之间具有线性关系,具有式(3)所示形式:

$$H_z = ah_z + b. \quad (3)$$

对数据进行线性拟合,得到图 6 中所示的拟合曲线,并计算出式(3)中的系数  $a$  和  $b$ ,最终得到相对爆坑深度与相对炸高之间的函数关系式:

$$H_z = 0.192\ 62 - 1.074\ 22\ h_z, (0.054 < h_z < 0.149). \quad (4)$$

所得系数与式(1)和式(2)基本吻合。

## 3 结论

对近地面爆源爆炸成坑过程进行了数值模拟研究,得到以下结论:

1)采用基于欧拉-拉格朗日耦合的数值模拟技术,较完整地揭示了炸药在空气中爆炸形成爆坑的全过程。爆炸发生后,冲击波首先在空气中传播,还未形成爆坑,随着冲击波的到达及持续作用,爆坑深度开始增加,且增加速度随时间推移逐渐减小,最终趋于稳定,爆坑成形。

2)本文所研究的炸高与药量范围内,在一定的炸高下,不同的药量所形成的爆坑尺寸也不同,药包药量越大,爆坑深度越大,且爆坑深度与药量的立方根之间存在线性关系;在一定的药量下,不同的炸高所形成的爆坑尺寸也不同,炸高越大,爆坑深度越小,且爆坑深度与炸高之间存在线性关系。

3)本文所研究的炸高与药量范围内,综合药量和炸高对爆坑深度的影响,对爆坑深度与炸高对药量进行比例化,得出相对爆坑深度与相对炸高,且相对爆坑深度随着相对炸高的增大而线性减小,并通过拟合得到了相对爆坑深度与相对炸高之间的函数关系式。

## 参 考 文 献

- [1] KINNEY G F, GRAHAM K J. Explosive shocks in air [M]. 2nd ed. Berlin:Springer Verlag,1985.
- [2] AMBROSINI R D, LUCCIONI B M. Craters produced by large-scale explosions [J]. Computational Mechanics, 2008,27: 1801-1822.
- [3] AMBROSINI R D, LUCCIONI B M, DANESI R F, et al. Size of craters produced by explosive charges on or above the ground surface [J]. Shock Waves, 2002, 12 (1): 69-78.
- [4] BJELOVUK I, JARAMAZ S, ELEK P, et al. Preliminary estimation of the explosive mass based on the crater resulting from the surface explosion on asphalt [J]. Strojarstvo: časopis za teoriju i praksu u strojarstvu, 2013, 55(3): 203-210.
- [5] 张彦春, 罗亚平, 王仲琦, 等. 土介质炸点痕迹反演爆源特征的研究 [J]. 安全与环境学报, 2012, 12 (2): 261-264.
- [6] ZHANG Y C, LUO Y P, WANG Z Q, et al. Reversed analysis of the characteristic features of the explosive sources based on the crater in the soil [J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12 (2): 261-264.
- [6] 张智超, 刘汉龙, 陈育民, 等. 触地爆炸土体弹坑的多物质 ALE 法分析 [J]. 解放军理工大学学报 (自然科学版), 2013, 14 (1): 69-74.
- [6] ZHANG Z C, LIU H L, CHEN Y M, et al. Analysis of

contact explosion-induced crater of soil using multi-material ALE method[J]. Journal of PLA University of Science and Technology ( Natural Science Edition ), 2013, 14(1):69-74.

[7] 刘伟,郑毅,秦飞. 近地面 TNT 爆炸的试验研究和数值模拟[J]. 爆破,2012,29(1):5-9,26.

LIU W, ZHENG Y, QIN F. Experimental and numerical simulation of TNT explosion on the ground[J]. Blasting, 2012,29(1):5-9,26.

[8] RIERA J D, ITURRIOZ I. Numerical study of the effect of explosive sources near the ground surface: crater formation[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 10 (236): 1029-1035.

[9] MOORTHY T N, YAACOB M H, VICENTE R, et al. A study into the relationship between crater parameters and quantities of explosives in the scenes of IED explosions [J]. Malaysian Journal of Forensic Sciences: Mission Statement, 2014,5(1):17-25.

[10] 崔激,宋慧芳,张社荣,等. 爆炸荷载作用下土中爆坑形成的数值模拟[J]. 岩土力学,2011,32(8):2523-2528.

CUI W, SONG H F, ZHANG S R, et al. Numerical simulation of craters produced by explosion in soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(8):2523-2528.

[11] ANON. AUTODYN theory manual[M]. Revision 4. 1. San Ramon, California: Century Dynamics, 2001.

[12] AMBROSINI R D, LUCCIONI B M. Craters produced by explosions on the soil surface[J]. Journal of Applied Mechanics, 2005,73(6):890-900.

[13] 周宣赤. 基于爆炸现场痕迹反演爆源参数方法及应用[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.

ZHOU X C. Inverse method for analyzing parameters of explosion source based on trace features at blast field and its application [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.

Numerical Simulation of Craters Produced by Explosion near Ground

CHEN Fengyun, BAI Chunhua

State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology (Beijing, 100081)

[ABSTRACT] In order to study the formation process and critical factors of craters produced by explosion near the ground burst sources and to obtain the law of explosive source inversion, the dynamic response of the soil ground under explosive load was simulated by nonlinear dynamics software AUTODYN. The formation process of craters and influence of factors such as explosive weight and height of detonation on crater sizes were obtained. Simulation results show that crater depth reaches the maximum expansion rate in the initial stage of crater formation, gradually slows down over time, and finally maintains a steady value. When height of detonation is fixed, the crater depth increase with the increase of charge following a linear correlation. When charge is fixed, the crater depth decrease with the increase of detonation height with a linear correlation. Relative crater depth and relative height of detonation also have linear relationship.

[KEY WORDS] numerical simulation; crater depth; height of detonation; charge quantity

声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部