DOI: 10.11883/1001-1455(2016)02-0236-06

铝纤维炸药土中扩腔现场实验与数值模拟*

万晓智,马宏昊,沈兆武,陈 伟
(中国科学技术大学近代力学系,安徽 合肥 230027)

摘要: 为检验铝纤维炸药的做功能力,对铝纤维炸药土中爆炸扩腔现象进行实验,并采用 ANSYS/LS-DYNA 软件进行数值模拟,得出铝纤维炸药爆腔半径随药量变化的关系。结果表明,现场实验与数值模拟均能较好地表征铝纤维炸药土中爆炸扩腔的规律,铝纤维炸药相对于工业乳化炸药做功能力强,且由于其成型效果好等特点,应用于一些复杂的环境能够取得理想效果,可为类似工程提供参考。

关键词: 爆炸力学;爆炸扩腔;ANSYS/LS-DYNA 软件;铝纤维炸药
中图分类号: O383.1 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

含铝炸药作为军用混合炸药,其性能优良,已广泛应用于空中和水下兵器战斗部中。铝纤维炸药是一种新型含铝炸药,具有高能量密度、高安全以及高力学强度的特点,廖学燕[1]通过系列实验进行了相关验证,但没有对其进行土中爆炸扩腔实验。炸药在土体封闭的情况下,爆轰产物保持较长时间的高温高压状态,能量释放更加完全,能全面地反应炸药的爆炸做功能力,且此法相对铅墙法、威力摆、圆筒实验及水下实验等方法操作步骤简便,成本低,无需专门仪器设备,且土体材料接近实际,具有工程参考价值。炸药土中爆炸扩腔是一种非常实用的爆破技术,具有成本低、耗时少、效率高等优点。该技术的主要原理在于药包爆炸时,产生的冲击波和爆轰气体将周围土介质极度压缩,从而形成一个空腔。很多学者对炸药土中爆炸发展规律、爆腔特征等进行了相关研究[2-5]。任晓亮等[6]、赵均海等[7]应用 ANSYS/LS-DYNA 软件模拟了炸药土中扩腔的过程,王海亮等[8-9]进行了大量现场实验,建立了爆腔半径计算公式。但在实际应用中,不同的场地环境和装药条件等对炸药扩腔效果影响显著,准确获取公式中的经验系数存在一定困难。李小雷等[10]应用 AUTODYN 软件模拟了含铝炸药在混凝土中的爆炸效应,结果表明含铝炸药比理想炸药做功能力强,且当铝含量为 20%时爆腔半径最大。

本文中通过炸药土中爆炸扩腔的现场实验与数值模拟方法检验铝纤维炸药的做功能力,并与工业乳化炸药做比较,通过结果分析对铝纤维炸药爆腔半径随药量的关系进行调整,为一些复杂环境下(小范围地下爆破、钻孔难度大、装药条件差)等类似工程提供参考。

1 实 验

为表征铝纤维炸药土中扩腔规律,针对不同药量的铝纤维炸药进行了现场实验,并与工业乳化炸药进行对比。铝纤维炸药各组分质量分数分别为:w(RDX)=76%,w(WAX)=4%,w(铝纤维)=20%。乳化炸药为普通工业乳化炸药。为减少地表面稀疏波对爆腔成形带来的影响,参考王海亮等[8-9]不同炸药在不同土壤中爆炸扩腔的经验系数,炸药埋深分别设为 40、50、60 和 60 cm,垂直地面钻孔,炮孔上方用细砂填塞严实,所有炸药采用飞片式无起爆药雷管引爆。空腔形成以后,将搅拌好的混凝土填入,待固化后将混凝土模型取出,可直观地分析各个爆腔的特征,如图 1 所示。测量其各项参数,为减小实验误差,测量横向与纵向半径时,实验假设爆腔呈椭球形,设爆腔横向尺寸为 a,纵向尺寸为 b,并进行多次测量取平均值,各参数见表 1 所示。

* **收稿日期**: 2014-09-02; **修回日期**: 2015-03-03
基金项目: 国家自然科学基金项目(51134012,51174183)
第一作者: 万晓智(1986—),男,硕士研究生; **通讯作者**: 马宏昊,hhma@ustc.edu.cn。

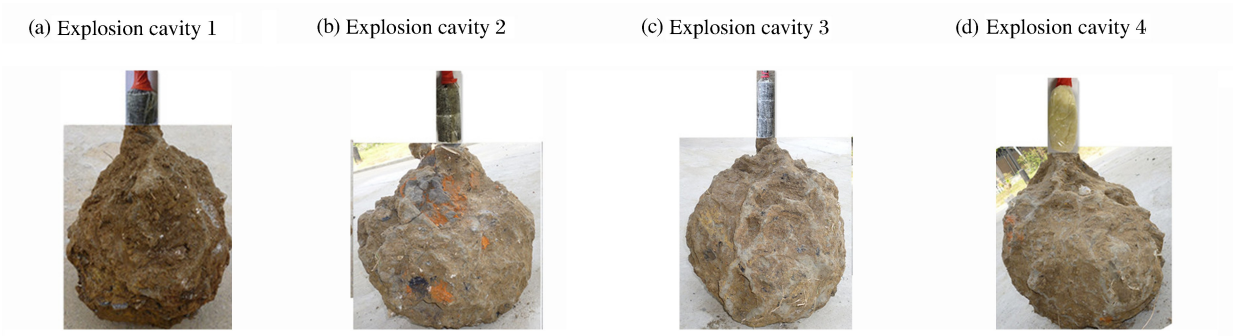


图 1　现场实验爆腔效果图

Fig. 1　Explosion cavities in experiment

表 1　实验中爆腔特征参数

Table 1　Characteristic parameters of explosion cavities in experiment

药柱	炸药类型	m/g	ρ/(g·cm^{-3})	药柱尺寸		H/cm	腔体尺寸		V/L
				r/cm	h/cm		a/cm	b/cm	
1	铝纤维炸药	9.974	1.65	1.010	1.884	40	11.00	13.00	6.500
2	铝纤维炸药	20.162	1.65	1.010	3.808	50	18.25	17.25	24.567
3	铝纤维炸药	30.001	1.66	1.010	5.630	60	19.50	20.25	31.900
4	乳化炸药	30.125	1.19	1.200	5.600	60	16.88	16.65	21.193

2　数值模拟

为了更加形象地观察炸药土中爆炸扩腔的过程，对照现场实验参数建立各个模型并进行数值模拟。

2.1　计算模型

计算模型由土体、炸药和空气等 3 部分组成。炸药分别采用 RDX 基含 20%铝纤维的混合炸药与乳化炸药，采用耦合装药，中心点起爆。药柱的计算模型如图 2 所示。整个系统为三维轴对称问题，因此可只建立 1/4 模型，采用单层实体欧拉网格，多物质 ALE 算法。模型底部和右侧采用无反射边界条件，其他采用固定边界条件，求解终止时间设置为 5 ms。

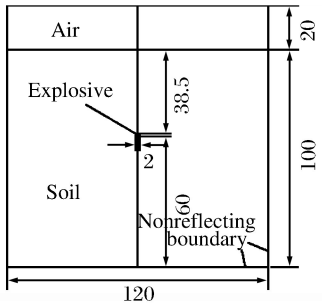


图 2　计算模型

Fig. 2　Calculation model

2.2　计算参数

2.2.1　炸药

采用 HIGH_EXPLOSIVE_BURE 材料模型和 JWL 状态方程进行数值模拟[11]：

$$p=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)\mathrm{e}^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)\mathrm{e}^{-R_2V}+\frac{\omega E}{V} \tag{1}$$

式中：p 为爆轰产物压力，E 为单位体积炸药的内能，V 为相对体积。铝纤维炸药与传统含铝炸药水下爆炸性能相近[12]，因此铝纤维炸药材料参数参考传统含铝炸药：$\rho=1.65$ g/cm^3，$D=0.78$ cm/μs，$p_{CJ}=0.218$ g·cm^{-1}·μs^2，$A=7.52$ g/(cm·μs^2)，$B=0.12$ g/(cm·μs^2)，$R_1=4.4$，$R_2=1.3$，$\omega=0.33$，$E=0.106$ cm^2/μs^2。对于乳化炸药[13]：$\rho=1.19$ g/cm^3，$D=0.45$ cm/μs，$p_{CJ}=0.06$ g·cm^{-1}·μs^2，$A=2.144$ g/(cm·μs^2)，$B=0.0018$ g/(cm·μs^2)，$R_1=4.2$，$R_2=0.9$，$\omega=0.15$，$E=0.042$ cm^2/μs^2。铝纤维炸药分 1、2、3 号药柱，模型尺寸分别为 2 cm×2 cm×1.5 cm，2 cm×2 cm×3 cm，2 cm×2 cm×4.5 cm；乳化炸药为 4 号药柱，模型尺寸为 2.4 cm×2.4 cm×4.2 cm。

2.2.2　土体

采用 LS-DYNA 中的 MAT_SOIL_AND_FOAM 材料模型，土介质的各材料参数可见文献[7]。

2.2.3 空气

可用 MAT_NULL 材料模型和 EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程来描述空气材料的本构关系和状态方程,其表达式为:

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \tag{2}$$

式中:C_0 ~C_6 为系数,E 为内能;$\mu = \frac{1}{V} - 1$,空气材料状态方程各参数可见文献[7]。

2.3 计算结果分析

炸药中心起爆后,爆炸产生的高温、高压气体冲击药包周围土介质,同时产生强爆炸冲击波在土介质中传播。在高温、高压气体和冲击波的联合作用下,药包周围的土介质发生剧烈的塑性变形,形成空腔破碎区。爆炸冲击波波阵面随时间向前移动,超压逐渐衰减;冲击后,大量能量被消耗,爆炸气体的压力和温度大大降低,在距药包一定距离处,超压低于土体的强度极限,土体保持原来的结构形态。各个计算模型爆腔的形状如图 3 所示,数值模拟结果列于表 2,设计算得到的乳化炸药爆腔的体积为 V_0,爆热为 Q_0,则计算出铝纤维炸药的爆腔体积和爆热后即可得出相对体积 V/V_0 和相对爆热 Q/Q_0[14-15]。

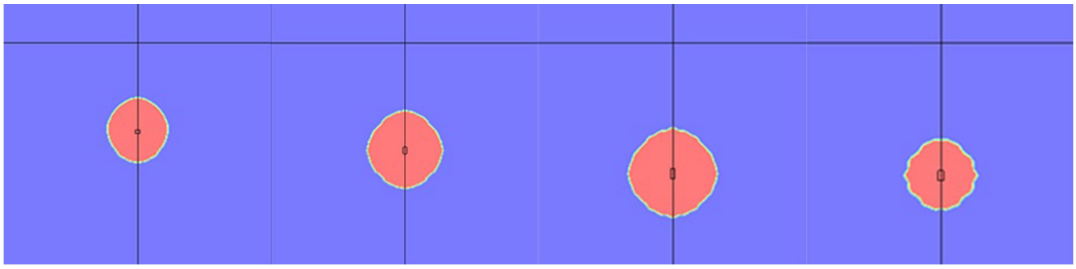


图 3 计算得到的爆腔效果图

Fig. 3 Explosion cavities by calculation

表 2 计算得到的爆腔特征参数

Table 2 Characteristic parameters of explosion cavities by calculation

药柱	炸药类型	m/g	ρ/(g·cm^{-3})	H/cm	腔体尺寸		V/L	V/V_0	Q/Q_0
					a/cm	b/cm			
1	铝纤维炸药	9.9	1.65	40	12.5	13.5	8.836	2.24	2.15
2	铝纤维炸药	19.8	1.65	50	16.0	17.0	18.230	2.31	2.15
3	铝纤维炸药	29.7	1.65	60	18.50	19.0	27.239	2.30	2.15
4	乳化炸药	28.8	1.19	60	13.8	14.4	11.487	1.00	1.00

3 数据分析

3.1 实验

1 号与 3 号药柱爆炸形成的腔体纵向半径略大于横向半径,符合集中装药在土中爆炸扩腔的基本规律;2 号与 4 号药柱爆炸形成的腔体纵向半径略小于横向半径,主要原因有地下建筑垃圾引起土壤环境复杂,对爆腔的形成产生一定影响。在等药量条件下,铝纤维炸药相对于乳化炸药爆腔横向半径增大了 15.6%,纵向半径增大了 21.6%,体积增大了 54.1%。

3.2 数值模拟

从图 3 中可以看出,爆腔呈椭球形,主要原因有爆腔在发展过程中受到地表自由面稀疏波的影响,使得后期爆腔上表面质点的运动速度大于下表面质点。1、2、3 号药柱爆腔半径与体积随药量的增加逐渐增大,4 号药柱爆腔较小,乳化炸药的做功能力明显不如铝纤维炸药,主要原因有铝纤维炸药的冲击波压力高于乳化炸药,且铝纤维与爆炸产物的二次反应延缓了冲击波压力的衰减,有利于炸药土中爆炸做功。铝纤维炸药相对乳化炸药做功能力(相对体积)与相对爆热值接近,说明该方法评价炸药做功能力的合理可靠性。

3.3　曲线拟合

现场实验与数值模拟均能较好地反映炸药土中扩腔的特征规律，由于模型参数、现场条件的选取，以及引爆炸药所用的雷管相当于 1 g RDX 的药量等，这些条件都会对爆腔产生一定影响，所以现场实验爆腔与数值模拟爆腔的实际大小有所差异。将现场实验与数值模拟数据进行线性拟合，对于集中装药，拟合公式可根据爆炸相似理论推导如下[8-9]：

$$R = k' W^{1/3} \tag{3}$$

式中：R 为爆腔半径，m，由于假设爆腔呈椭球形，爆腔横向尺寸为 a，纵向尺寸为 b，在实验和数值计算中，用 a、b 代替 R；W 为药柱质量，kg。对铝纤维炸药爆腔横、纵向半径进行线性拟合，得到经验系数 k'，如图 4 所示。

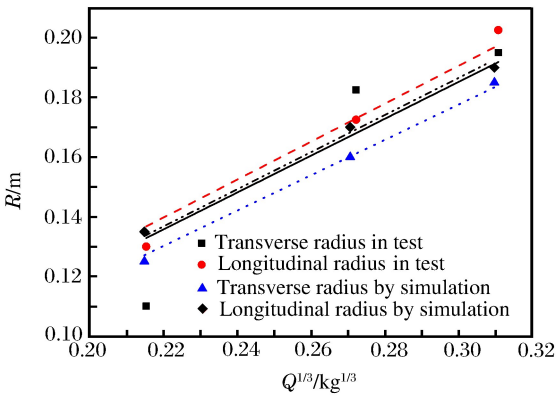


图 4　铝纤维炸药爆腔半径与药量关系

Fig. 4　Relation between the radius of explosion cavity and the weight of aluminum fiber explosive

从图 4 中可以看出，数值模拟爆腔半径曲线拟合效果较好，现场实验中爆腔横向半径拟合效果不如纵向半径拟合效果好，主要原因与地下建筑垃圾造成土壤环境复杂有关。将铝纤维炸药爆腔半径拟合得到的经验系数 k' 值与乳化炸药爆腔半径计算得到的经验系数 k' 值列于表 3。王海亮等[8-9]在研究乳化炸药在不同土壤爆炸扩腔规律时得到的 k' 约为 0.24～0.65 m/kg$^{1/3}$，本文中实验结果在其范围之内，因此可认为实验方法可靠，结果有效。

表 3　不同炸药爆腔半径公式经验系数

Table 3　Empirical coefficients of the explosion cavity radius formulas for different explosives

k'/(m·kg$^{-1/3}$)	铝纤维炸药		乳化炸药	
	数值模拟	实验	数值模拟	实验
横向	0.592	0.617	0.450	0.535
纵向	0.622	0.635	0.470	0.542

4　工程实例

为体现铝纤维炸药爆炸扩腔的实际效果，将其用于实验室水下爆炸塔纠偏工程，如图 5 所示。



图 5　爆炸塔纠偏实验

Fig. 5　Rectification of explosion tower

水下爆炸塔为直径 5 m、高度 5 m 的圆柱形水塔，由 3 cm 厚度钢板焊接而成，塔底为 12 个 64 cm ×24 cm ×2 cm的矩形钢板环绕支撑结构。该塔在长时间用于炸药水下爆炸性能测实后发生了一定的倾斜，东西侧支撑钢板高低相差 30 cm。水塔地基多为压实的建筑垃圾，在布置炮孔时手动钻孔具有较

大难度,应做到药量、孔径及孔深越小越好,本次选用铝纤维炸药,并参考炸药纵向爆腔半径公式计算取药量 15 g,利用现有模具将其压制成圆柱形药柱,炸药在支撑钢板地基土中爆炸形成一系列空腔,经测量,腔体横向直径在 25～33 cm 范围内,纵向直径在 29～31 cm 范围内。在后续的水下爆炸实验过程中,水下爆炸引起塔的振动,导致塔在振动与其自身重力的作用下重新将地基土压实,爆炸塔得以纠偏。

5 结 论

(1)铝纤维炸药作为一种新型含铝炸药,其土中爆炸扩腔能力明显优于工业乳化炸药,铝纤维与爆炸产物的二次反应延缓了冲击波压力的衰减,显著增强了炸药对土介质的做功能力。并且由于其成型效果好、力学强度高,相对于乳化炸药降低了工程实际中装药难度。

(2)采用现场实验与数值模拟的方法均能较好地反映铝纤维炸药土中爆炸扩腔的基本规律,炸药爆腔随药量的增加逐渐增大,受地表自由面稀疏波影响,爆腔纵向半径略大于横向半径,爆腔呈椭球形。地下建筑垃圾引起土壤环境复杂,对爆腔的发展产生了一定影响。

(3)铝纤维炸药相对乳化炸药做功能力与相对爆热值接近,且乳化炸药爆腔半径的经验系数 k' 值与文献[8-9]中 k' 值相吻合,说明通过炸药土中爆炸扩腔来评价其做功能力的方法合理可靠。铝纤维炸药爆腔半径随药量的变化关系,可为一些复杂环境下(小范围地下爆破、钻孔难度大、装药条件差)等类似工程提供参考。

参考文献:

[1] 廖学燕. 铝纤维复合炸药研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2010.

[2] 亨利奇 J. 爆炸动力学及其应用[M]. 熊建国,译. 北京:科学出版社,1987:161-324.

[3] 许连坡,金辉,章培德. 土中爆炸空腔的发展过程[J]. 力学学报,1982,14(5):500-504.
Xu Lianpo, Jin Hui, Zhang Peide. Development of explosion cavity in soil[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1982,14(5):500-504.

[4] 沈兆武,皮爱如,周听清,等. 地下水库爆炸成形的实验研究[J]. 力学与实践,2002,24(增刊):119-122.
Shen Zhaowu, Pi Airu, Zhou Tingqing, et al. Experimental study on underground reservoir formation by explosion [J]. Mechanics in Engineering, 2002,24(Suppl):119-122.

[5] 李毅,郭学彬,蒲传金. 土中球状药包爆腔半径预测及验证[J]. 煤矿爆破,2009(2):1-5.
Li Yi, Guo Xuebin, Pu Chuanjin. The prediction and verification of spherical charge on blasting cavity radius in soil [J]. Coal Mine Blasting, 2009(2):1-5.

[6] 任晓亮,杜志明,丛晓民. 大半径装药土中爆炸的数值模拟[J]. 矿业研究与开发,2010,30(1):100-103.
Ren Xiaoliang, Du Zhiming, Cong Xiaomin. Numerical simulation of explosion with large radius charge in soil[J]. Mining Research and Development, 2010,30(1):100-103.

[7] 赵均海,冯红波,田宏伟,等. 土中爆炸作用的数值分析[J]. 建筑科学与工程学报,2011,28(1):96-99.
Zhao Junhai, Feng Hongbo, Tian Hongwei, et al. Numerical analysis of explosion process in soil[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011,28(1):96-99.

[8] 王海亮,冯长根,王丽琼. 土中爆炸成腔的现场实验研究[J]. 火炸药学报,2001,24(2):12-15.
Wang Hailiang, Feng Changgen, Wang Liqiong. Study on on-site experiment of explosion cavity in soil[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2001,24(2):12-15.

[9] 王海亮,冯长根,侯兆霞,等. 土中爆炸成腔半径的计算[J]. 爆破器材,2001,30(3):19-22.
Wang Hailiang, Feng Changgen, Hou Zhaoxia, et al. The calculation on radius of explosion cavity in soil[J]. Explosion Materials, 2001,30(3):19-22.

[10] 李小雷,聂建新,覃剑锋,等. 含铝炸药在混凝土中爆炸效应的数值模拟研究[J]. 爆破,2012,29(3):109-113.
Li Xiaolei, Nie Jianxin, Qin Jianfeng, et al. Numerical simulation of explosion effects in concrete by aluminized explosives[J]. Blasting, 2012,29(3):109-113.

[11] 陈朗,龙新平,冯长根,等. 含铝炸药爆轰[M]. 北京:国防工业出版社,2004:126-130.

[12] 万晓智，马宏昊，沈兆武，等. RDX 基铝纤维炸药与铝粉炸药水下爆炸性能比较[J]. 振动与冲击，2014，33(24)：129-132.
Wan Xiaozhi, Ma Honghao, Shen Zhaowu, et al. Comparison of underwater detonation performance of RDX-based aluminum fiber explosive and that of aluminum particle explosive[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(24):129-132.

[13] 段云，熊代余，李国仲，等. 典型工业炸药爆炸灾害效应的数值模拟[J]. 河南理工大学学报：自然科学版，2011，30(4)：381-385.
Duan Yun, Xiong Daiyu, Li Guozhong, et al. Numerical simulation of disaster effects induced by typical industrial explosive explosion[J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science, 2011, 30(4):381-385.

[14] 刘蓉，程扬帆，周宗富，等. 玻璃微球敏化的乳化炸药数学模型[J]. 中国科学技术大学学报，2012，42(12)：990-994.
Liu Rong, Cheng Yangfan, Zhou Zongfu, et al. A mathematical model for the detonation reaction of emulsion explosives with micro balloons[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2012, 42(12):990-994.

[15] 孙业斌，惠君明，曹欣茂. 军用混合炸药[M]. 北京：兵器工业出版社，1995：338-339.

Experiment and numerical simulation of explosion cavity in soil by aluminum fiber explosive

Wan Xiaozhi, Ma Honghao, Shen Zhaowu, Chen Wei

(*Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *Anhui, China*)

Abstract: To evaluate the work capability of the aluminum fiber explosive, the field test of explosion cavity expansion in soil by aluminum fiber explosive was performed, and the numerical simulation analysis using the software of ANSYS/LS-DYNA was carried out for further investigation. The relationship between the radius of the explosion cavity and the explosive charge was obtained. Our results reveal that both of the two methods provide a fairly good characterization of the law of expansion during the explosion cavity process in soil of aluminum fiber explosive, and the characteristics the aluminum fiber explosive exhibit are better than those of the emulsion explosive in modelling and work ability, which offers a promising application when used in complicated environments and provides a reference for similar engineering projects.

Key words: mechanics of explosion; explosion cavity; ANSYS/LS-DYNA; aluminum fiber explosive

(责任编辑　王易难)