



# RDX 基含铝炸药三波点高度的数值模拟<sup>\*</sup>

段晓瑜, 郭学永, 聂建新, 王秋实, 焦清介

(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:**为研究含铝炸药近地空中爆炸的三波点特性, 利用 ANSYS/AUTODYN 显式有限元程序, 对 3 种 RDX 基含铝炸药 HL-01(RDXph)、HL-02(85%RDXph+15%Al) 和 HL-03(70%RDXph+30%Al) 空中爆炸过程进行了模拟。结果表明: 计算得到的压力时程曲线与实测压力时程曲线较吻合, 且在不同位置处的超压值也接近实验值, 说明所建立的模型及状态方程参数选取合理; 与经验图表法的对比说明, 基于爆热当量的经验图表法不适用于含铝炸药三波点高度的计算, 而用数值模拟方法可以较好地获得含铝炸药的三波点高度; 同一爆炸高度下, 3 种炸药的三波点高度由大到小依次为 HL-03、HL-02、HL-01; 对于同种炸药, 三波点高度随着爆炸高度的减小而增加。

**关键词:**含铝炸药; 空中爆炸; 数值模拟; 三波点

中图分类号: O384

文献标识码: A

炸药在地表附近爆炸, 当冲击波入射角超出某个临界值时, 入射波和反射波会结合形成一个加强的爆炸冲击波, 即马赫波<sup>[1-2]</sup>。入射波、反射波和马赫波的连接点称为“三波点”, 三波点是入射波作用与马赫波作用的分界点<sup>[3]</sup>。马赫反射对于工程防护有重要作用, 同时由于马赫反射的存在, 在进行炸药自由场爆炸冲击波参数测试时, 难以准确区分所测得的冲击波是入射波还是反射波<sup>[4]</sup>。为了避开地面反射的影响, 只能通过升高测点位置测得入射波<sup>[5]</sup>。因此, 准确预报三波点的位置不仅对实现弹药的高效毁伤和工程防护具有重要意义, 对指导自由场冲击波参数的测量也具有重要意义。

关于三波点高度的研究: Swisdak<sup>[6]</sup> 将 TNT 空中爆炸的三波点高度与对比爆炸高度及对比水平距离之间的关系用图表表示出来; 乔登江<sup>[7]</sup> 对大量的空爆实验结果进行分析, 归纳了计算 TNT 空中爆炸三波点高度的经验公式; 郭炜等<sup>[8]</sup> 利用空中爆炸试验研究了 TNT 空中爆炸的三波点高度, 确定了三波点高度的变化轨迹; 任会兰等<sup>[9]</sup> 对含铝炸药近地空中爆炸的三波点特性研究则尚不充分。

本研究利用 ANSYS/AUTODYN 显式有限元程序<sup>[10]</sup>, 通过模拟炸药空中爆炸过程研究了含铝炸药 HL-02(85%RDXph+15%Al, 质量分数) 和 HL-03(70%RDXph+30%Al, 质量分数) 近地空中爆炸的三波点特性, 并与理想炸药 HL-01(RDXph) 进行对比。

## 1 模型的建立

### 1.1 计算模型

以含铝炸药空中爆炸试验方案为基本物理模型, 建立数值计算模型。试验时, 在以爆心水平投影点为圆心、夹角为 60° 的两条半径上布置 Kistler 空气壁面传感器, 传感器到爆心的水平距离分别为 3、4、5、7、9 和 12 m, 依次对应计算模型中 1#、2#、3#、4#、5#、6# 观测点。传感器敏感面与地面平齐, 各传感器布置如图 1 所示。试验所用炸药分别为 HL-01、HL-02 和 HL-03, 采用圆柱形装药, 长径比约为

\* 收稿日期: 2017-02-21; 修回日期: 2017-03-23

作者简介: 段晓瑜(1990—), 女, 博士, 主要从事含铝炸药爆炸作用研究. E-mail: dxy900401@163.com

通信作者: 郭学永(1975—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事含能材料爆炸特性研究. E-mail: nust@bit.edu.cn

2:1, 装药质量为10 kg, 药柱中心离地面高度为1 m, 起爆点为药柱上端面中心处, 计算模型与试验工况保持一致。为了计算方便, 采用二维轴对称模型, 建模时采用BOX, 计算空气域为5 m×17 m, 空气域下方为0.5 m×17 m的混凝土。网格划分总数为 $550 \times 1700 = 935\,000$ , 网格尺寸为1 cm×1 cm<sup>[11]</sup>。空气采用多物质Euler算法, 混凝土地面采用拉格朗日算法, 炸药以物质填充的方式填入空气域。两种网格通过流固耦合算法相互作用<sup>[12]</sup>。炸药初始压力取0.1 MPa(1个大气压), 采用缺省人工黏性系数, 模型外围施加压力流出(Flow-out)及透射边界条件, 计算模型如图2所示。

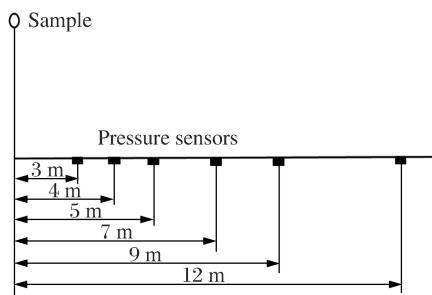


图1 传感器布置示意

Fig. 1 Distribution of sensors

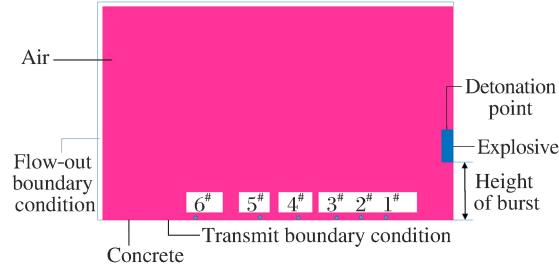


图2 计算模型

Fig. 2 Simulation model

## 1.2 材料模型与状态方程

炸药的爆炸产物压力( $p$ )采用JWL<sup>[13]</sup>状态方程描述

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v}\right) e^{-R_1 v} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 v}\right) e^{-R_2 v} + \frac{\omega E_0}{v} \quad (1)$$

式中:等号右边第1项在高压段起作用,第2项在中压段起主要作用,第3项代表低压段;  $E_0$  为单位质量内能,  $v$  为比容,  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为常数, 各参数值由圆筒试验<sup>[14]</sup>拟合得到。对于RDX基含铝炸药, 一般采用JWL-Miller能量释放模型。含铝炸药爆炸产物Miller能量释放模型<sup>[15]</sup>如下

$$\frac{d\lambda}{dt} = G(1-\lambda)^a p^b \quad (2)$$

式中: $\lambda$  表示铝粉反应度,  $G$  是能量释放常数,  $a$  是能量释放指数,  $b$  是压力指数。这些参数与铝粉粒度、比表面积有关, 可以通过对比含铝炸药水下爆炸测试数据和AUTODYN计算结果进行迭代反推确定, 具体方法参考文献[16]。根据文献[9], 本研究的反应速率常数取 $a=1/2$ ,  $b=1/6$ ,  $G=0.11$ 。

依据商航<sup>[17]</sup>的Φ50 mm圆筒试验数据对3种炸药的JWL状态方程进行标定, 得到各参数取值如表1所示, 其中:  $D_{CJ}$ 、 $p_{CJ}$  分别是爆速和爆压。

表1 炸药JWL状态方程参数

Table 1 Parameters of JWL equation for explosives

Explosive	Density/ (g·cm <sup>-3</sup> )	$A/$ GPa	$B/$ GPa	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E_0/$ (10 <sup>10</sup> J·m <sup>-3</sup> )	$D_{CJ}/$ (km·s <sup>-1</sup> )	$p_{CJ}/$ GPa
HL-01	1.673	694.52	13.75	4.55	1.30	0.49	0.96	8.325	29.39
HL-02	1.763	1897.54	24.77	5.83	1.72	0.35	1.19	8.121	23.91
HL-03	1.865	2225.42	27.59	5.85	1.73	0.49	1.42	7.879	20.70

空气采用理想气体状态方程; 混凝土采用 $p-\alpha$ 状态方程, 强度和失效模型采用RHT模型定义, 各参数均取自AUTODYN的材料库。

## 2 模型验证

实验测得地表上距离炸药中心投影点3、4、5、7、9、12 m(依次对应模型中1#、2#、3#、4#、5#、6#观

测点)处冲击波的峰值超压。为了验证数值模拟的准确性,将不同传感器测得的超压取平均值后与数值模拟结果进行对比,如图3~图5所示,其中:X是距爆心水平投影点的距离(简称爆心距)。图6显示了实测与模拟的冲击波压力时程曲线的对比。

从图3~图5中可以看出,3种炸药在不同测点处的超压模拟值与测量值基本一致,且距离爆炸中心越远,二者的相对偏差越小,误差不大于5%。从图6可以看出,计算得到的冲击波信号与实验结果吻合较好。综上可知,本研究采用的模型设置以及参数选择是正确的,该数值模拟方法可用于含铝炸药空中爆炸三波点高度的仿真计算。

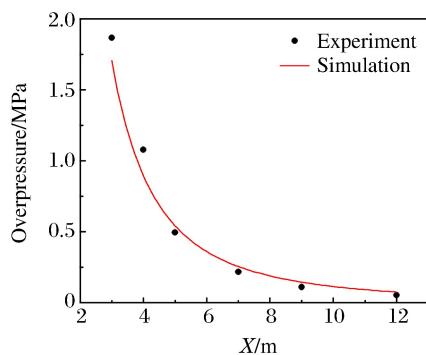


图4 HL-02 的冲击波超压-爆心距曲线

Fig. 4 Overpressures of HL-02 vs.  
distance from blast center

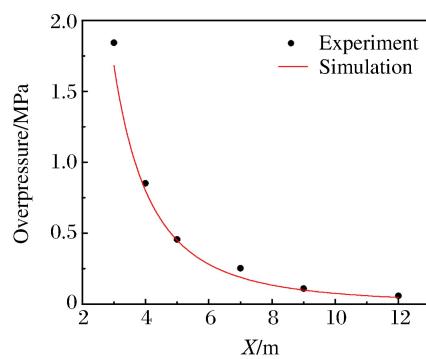


图3 HL-01 的峰值超压-爆心距曲线

Fig. 3 Overpressures of HL-01 vs.  
distance from blast center

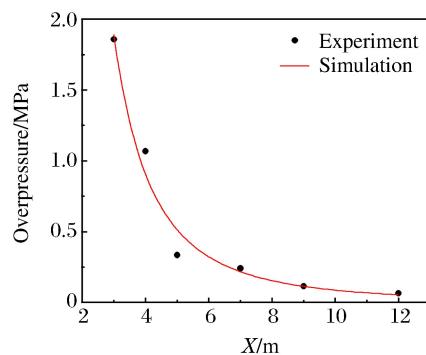


图5 HL-03 的冲击波超压-爆心距曲线

Fig. 5 Overpressures of HL-03 vs.  
distance from blast center

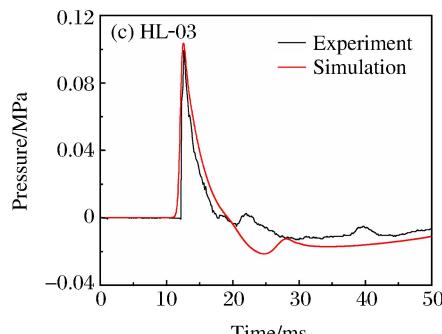
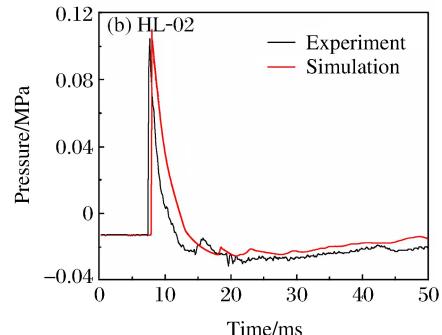
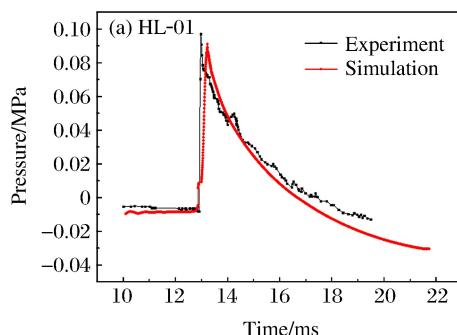


图6 X=9 m 处 3 种炸药的冲击波压力时程

Fig. 6 Pressure histories of 3 explosives at X=9 m

### 3 三波点的计算分析

按照第 2 节建立的模型计算空中爆炸冲击波的传播及其与地面的相互作用,从而观察三波点高度的变化轨迹。图 7 是 HL-02 装药起爆后不同时刻的压力云图。

从图 7 可以看出:(1) 爆炸冲击波在向外扩展的过程中,入射波与地面反射波相互作用,产生马赫反射,即压力云图的红色部分,根据压力云图很容易读取三波点的高度;(2) 随着时间的增加,三波点的高度逐渐升高。

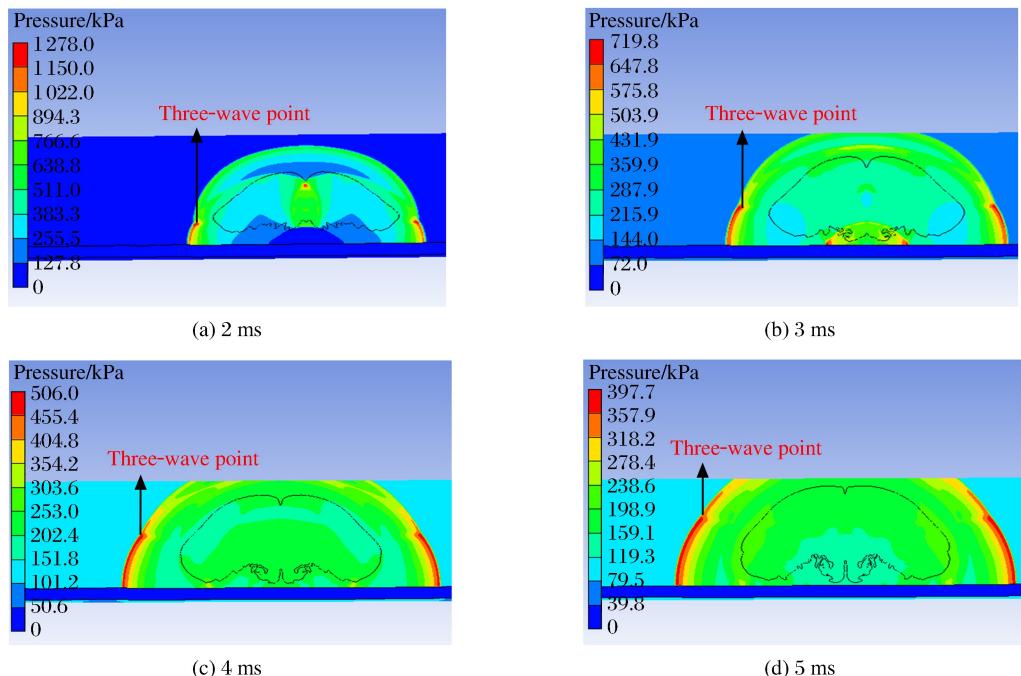


图 7 冲击波传播过程中压力变化云图

Fig. 7 Pressure nephogram of shockwave propagation process

### 3.1 数值计算结果与经验图表算法的对比

采用文献[7]中给出的 TNT 爆炸三波点高度的试验图表,如图 8 所示,其中: $\lambda_x$  为对比水平距离, $\lambda_H$  为对比爆炸高度, $\lambda_T$  为对比三波点高度。

用图 8 计算 TNT 三波点高度时, 只需计算其对比爆炸高度和对比水平距离, 查看对应的图表即可; 对于其他炸药, 则需换成该炸药的 TNT 当量计算。

### (1) HL-01 模拟值与经验值的对比

通常人们使用某炸药爆热与 TNT 爆热之比近似作为该炸药的 TNT 当量。HL-01 爆热可用 EXPLO5<sup>[18]</sup>计算得到, 为 5 408 J/g, TNT 爆热为 4 552 J/g<sup>[19]</sup>, 计算得到 HL-01 在 1.1 节所示模型中的对比爆炸高度, 即  $\lambda_H = 0.44 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ , 依据图 8 曲线插值得到相应的图表法三波点高度。表 2 列出了 HL-01 的三波点高度模拟计算值和图表法经验值(线性

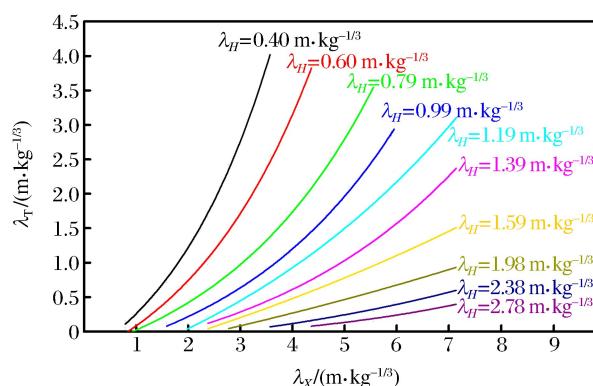


图 8 TNT 距离地面不同高度处爆炸的三波点位置

Fig. 8 Height of three-wave point for TNT at different blasting heights

由表2可知,HL-01的对比爆炸高度为 $0.44 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ ,其三波点的模拟值完全落在经验图中对比爆炸高度为 $0.40$ 和 $0.60 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 的曲线之间。这说明:一方面,该经验公式可以大致估计理想炸药的三波点高度;另一方面,本研究所建立的数值模型对于预测装药爆炸的三波点高度是可行的,并且可以用于完善文献[7]中的图表参数。

表2 HL-01的三波点高度的模拟值与经验值

Table 2 Height of three-wave point for HL-01 gained by simulation and empirical chart

X/m	Height of three-wave point/m		
	$\lambda_H = 0.40 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$	$\lambda_H = 0.44 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$	$\lambda_H = 0.60 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$
2.5	0.68	0.38	0.34
3.0	1.12	0.61	0.57
3.5	1.71	0.84	0.81
4.0	2.05	1.15	1.05
4.5	2.74	1.72	1.37
5.0	3.37	2.51	2.05
5.5	4.15	3.11	2.51

### (2) HL-02 模拟值与经验值的对比

HL-02的爆热同样用EXPLO5计算得到,为 $7271 \text{ J/g}$ ,换算成TNT当量后对应的对比爆炸高度为 $0.4 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 。利用经验图表法得到三波点高度,其与模拟值的对比如表3所示。由表3可见,含铝炸药HL-02的三波点高度的图表法经验值与模拟值的相对误差随爆心距的减小而增大,2.5 m处经验值相对于模拟值的误差达到43.89%,5.0 m以后误差急剧降到3%以内。

表3 HL-02的三波点高度的模拟值与经验值

Table 3 Height of three-wave point for HL-02 gained by simulation and empirical chart

X/m	Height of three-wave point/m		Error between simulation and empirical values/%
	Simulation	Empirical value	
2.5	0.66	0.95	43.89
3.0	1.02	1.35	32.31
3.5	1.46	1.80	23.25
4.0	1.90	2.30	21.01
4.5	2.54	2.80	10.20
5.0	3.50	3.60	2.82
5.5	4.21	4.30	2.11

对于理想炸药HL-01的三波点高度,两种方法计算结果是一致的,证明了数值模拟方法的正确性。表3说明,含铝炸药不适用图表法,主要原因是采用图表法时,非TNT炸药需通过爆热换算成该炸药的TNT当量,三点波高度主要和冲击波能有关,含铝炸药的爆热虽高,却不能都转化为冲击波能。

综上所述,计算含铝炸药的三波点高度时,使用经验图表法会产生较大误差,使用数值模拟得到的结果更为可信。

### 3.2 数值计算3种炸药的三波点高度

通过模拟HL-01、HL-02和HL-033种炸药的冲击波传播过程,依据压力云图(见图7)对三波点高度进行判读,得到3种炸药在不同测点处的三波点高度( $h_T$ ),如图9所示。

由图9可见:3种炸药的三波点高度均随着距爆心水平距离的增加而不断升高;3种炸药具有相似的三波点轨迹,且在同一水平距离处, $h_T(\text{HL-03}) > h_T(\text{HL-02}) > h_T(\text{HL-01})$ ,表明对于RDX基含铝

炸药,铝粉质量分数在30%以内时,铝粉含量与三波点高度成正相关关系。

通过数值模拟得到了3种炸药在不同位置处的冲击波传播速度( $D$ ),如表4所示,可见,冲击波传播速度也是 $D(\text{HL-03})>D(\text{HL-02})>D(\text{HL-01})$ 。冲击波传播速度越高,三波点离开地面向上方运动的速度越快,三波点的高度也越高。这表明对于RDX基含铝炸药,铝粉质量分数在30%以内时,铝粉含量与冲击波能成正相关关系,与文献[20]中关于含铝炸药水中爆炸能量输出特性的研究结论是一致的。铝含量超过30%的情况需结合空爆试验进一步研究。

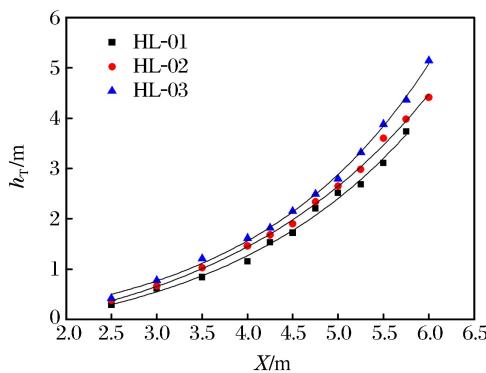


图9 不同炸药三波点高度-爆心距曲线

Fig. 9 Height of three-wave point vs. distance from blast center

### 3.3 爆炸高度对三波点高度的影响

以HL-02炸药为例,选取爆炸高度分别为1.0、1.5、2.0 m 3种情况进行模拟,相应的对比爆炸高度分别为 $0.45\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 、 $0.70\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 和 $0.93\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 。计算得出的HL-02三波点高度-爆心距曲线如图10所示。

由图10可知,同一测点的三波点高度均随着爆炸高度的减小而增加。这是由于爆炸高度越低,冲击波传播到地面时间越短,入射冲击波强度越高,更容易发生马赫反射,马赫波的增长越快,最终导致三波点的高度越高。

## 4 结 论

利用ANSYS/AUTODYN程序,结合含铝炸药的JWL状态方程,通过对炸药空中爆炸过程的数值模拟,研究了HL-01、HL-02和HL-03 3种不同组分炸药空中爆炸的三波点特性。

(1) 对于理想炸药,数值模拟与经验图表法的计算结果具有一致性,可以利用数值模拟结果对经验图表进行进一步的补充。

(2) 基于爆热当量的经验图表法不适用于含铝炸药三波点高度的计算,而采用数值模拟方法可以获得准确的含铝炸药三波点高度。

(3) 3种炸药具有相似的三波点轨迹,在同一炸高和同一爆心距下,三波点高度的顺序为 $h_T(\text{HL-03})>h_T(\text{HL-02})>h_T(\text{HL-01})$ ,表明对于RDX基含铝炸药系列,铝粉含量在30%以内时,铝粉含量与三波点高度成正相关关系,与冲击波能也成正相关关系。铝粉含量超出30%的情况需结合空爆试验进一步研究。

表4 冲击波在不同位置处的波速

Table 4 Shock velocity at different distances from blast center

X/m	Shock velocity/(m·s <sup>-1</sup> )		
	HL-01	HL-02	HL-03
3.5	1 008	1 139	1 345
4.5	833	856	897
5.5	606	643	706

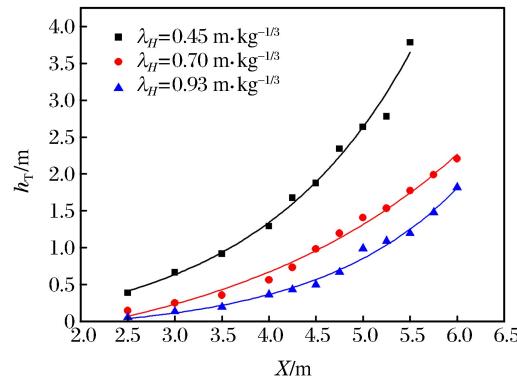


图10 不同对比炸高下三波点高度-爆心距曲线

Fig. 10 Height of three-wave point vs. distance from blast center at different scaled blasting heights

**参考文献:**

- [1] BAKER W E. Explosions in air [M]. Austin:University of Texas Press,1973.
- [2] 郭炜,俞统昌,金朋刚.三波点的测量与实验技术研究 [J]. 火炸药学报,2007,30(4):55-57,61.
- GUO W,YU T C,JIN P G. Test of triple point and study on its test technology [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants,2007,30(4):55-57,61.
- [3] 郝莉,马天宝,王成,等.爆炸冲击波绕流的三维数值模拟研究 [J]. 力学学报,2010,42(6):1042-1049.
- HAO L,MA T B,WANG C,et al. Three dimensional numerical simulation study on the flow of the explosion shock wave around the wall [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2010,42(6):1042-1049.
- [4] 王建灵,郭炜,冯晓军.TNT-PBX和Hexel空中爆炸冲击波参数的实验研究 [J]. 火炸药学报,2008,31(6):42-44,68.
- WANG J L,GUO W,FENG X J. Experimental research on the air explosion shock wave parameters of TNT,PBX and Hexel [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants,2008,31(6):42-44,68.
- [5] 北京工业学院八系. 爆炸及其作用:下 [M]. 北京:国防工业出版社,1979:15-25.
- The Eighth Department of Beijing Institute of Technology. Explosions and effects; volume II [M]. Beijing: National Defense Industry Press,1979:15-25.
- [6] SWISDAK M M. Explosion effects and properties. part I . explosion effects in air:A018544 [R]. New York: Naval Surface Weapons Center,1975:10-16.
- [7] 乔登江.空中爆炸冲击波(I)基本理论 [J]. 爆炸与冲击,1985,5(4):78-85.
- QIAO D J. Explosion waves in air ( I ) basic theory [J]. Explosion and Shock Waves,1985,5(4):78-85.
- [8] 郭炜,俞统昌,金朋刚.三波点的测量与实验技术研究 [J]. 火炸药学报,2007,30(4):55-57.
- GUO W,YU T C,JIN P G. Test of triple point and study on its test technology [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants,2007,30(4):55-57.
- [9] 任会兰,宁建国,许香照.不同炸药量在工事中爆炸的三维数值模拟 [J]. 高压物理学报,2013,27(2):216-222.
- REN H L,NING J G,XU X Z. The 3D numerical simulation different explosives charges in the fortifications [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2013,27(2):216-222.
- [10] ANSYS AUTODYN manuals;version 12.1 [Z]. ANSYS Inc ., 2007.
- [11] 辛春亮.高能炸药爆炸能量输出结构的数值仿真 [D]. 北京:北京理工大学,2008:114-120.
- XIN C L. Numerical simulation of explosive energy output structure of high explosives [D]. Beijing:Beijing Institute of Technology,2008:114-120.
- [12] 郭攀,刘君,武文华.爆炸冲击载荷作用下流固耦合数值模拟 [J]. 力学学报,2013,45(2):283-287.
- GUO P,LIU J,WU W H. Numerical modeling for fluid-structure interaction under blast and impact loading response [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2013,45(2):283-287.
- [13] LEE E,FINGER M,COLLINS W. JWL equations of state coefficients for high explosives:UCID-16189 [R]. Livermore,California:Lawrence Livermore Laboratory,1973.
- [14] 陈朗,冯长根,黄毅民.含铝炸药圆筒试验及爆轰产物JWL状态方程研究 [J]. 火炸药学报,2001,24(3):13-15.
- CHEN L,FENG C G,HUANG Y M. The cylinder test and JWL equation of state detonation product of aluminized explosives [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants,2001,24(3):13-15.
- [15] MILLER P J. A reactive flow model with coupled reaction kinetics for detonation and combustion of non-ideal explosives [C]//MRS Proceedings,1994:413-420.
- [16] ZHOU Z Q,NIE J X,GUO X Y,et al. A new method for determining the equation of state of aluminized explosive [J]. Chinese Physics Letters,2015,32(1):016401.
- [17] 商航.RDX含铝炸药空中爆炸特性研究 [D]. 北京:北京理工大学,2016.
- [18] EXPLO5.05 program user's guide [Z]. Zagreb,Croatia,2010.
- [19] 孙业斌.军用混合炸药 [M]. 北京:兵器工业出版社,1969:364-369.
- SUN Y B. Military mixing explosives [M]. Beijing:National Defense Industry Press,1969:364-369.

- [20] LIN M J, MA H H, SHEN Z W, et al. Effect of aluminum fiber content on the underwater explosion performance of RDX-based explosives [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2014, 39(2): 230-235.

## Numerical Simulation of the Three-Wave Point of RDX-Based Aluminized Explosives

DUAN Xiaoyu, GUO Xueyong, NIE Jianxin,  
WANG Qiushi, JIAO Qingjie

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

**Abstract:** To identify the properties of the three-wave point for aluminized explosives in the near-earth air blast, we simulated the explosion process of 3 kinds of RDX-based aluminized explosives, i.e., HL-01 (RDXph), HL-02 (85% RDXph + 15% Al) and HL-03 (70% RDXph + 30% Al), using the ANSYS/AUTODYN software. The results show that the pressure histories and the near-earth overpressures obtained from the simulation almost overlapped those measured from the experiment, indicating that the chosen model and parameters were appropriate. The comparison of the simulation results with those from the empirical chart shows that it was not suitable to calculate the height of three-wave point for aluminized explosives from the empirical chart, while it was so by simulation. At the same explosion height, the height sequence of three-wave point was HL-03 > HL-02 > HL-01. For the same explosive, the height of three-wave point increased with the decrease of the explosion height.

**Keywords:** aluminized explosives; air explosion; numerical simulation; three-wave point