

文章编号: 1006-9941(2013)06-0777-04

# RDX 基含铝炸药不同尺寸的圆筒试验及数值模拟

沈飞, 王辉, 袁建飞, 田清政, 杨凯

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 为了研究 RDX 基含铝炸药在不同装药直径下的做功能力, 进行了  $\Phi 25.4$  mm 和  $\Phi 50.0$  mm 两种尺寸的圆筒试验。试验结果表明, 爆轰产物相对比容均为 10 时,  $\Phi 50.0$  mm 比  $\Phi 25.4$  mm 圆筒的膨胀速度提高约 4.73%。此外, 基于 Lee-Tarver 点火增长模型, 采用有限元动力学程序 LS-DYNA 对两种尺寸的圆筒试验进行了数值模拟, 并与试验结果相比较, 确定了该含铝炸药爆轰产物的 Jones-Wilkins-Lee 状态方程和反应速率方程参数。

**关键词:** 爆炸力学; 含铝炸药; 爆轰; 圆筒试验; 数值模拟

**中图分类号:** TJ55; O389

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.06.017

## 1 引言

含铝炸药因具有高密度、高爆热、高爆温等特点, 已被广泛应用于水中兵器、对空武器等领域, 其做功能力及爆轰产物的状态方程也成为武器设计者所关心的热点问题。

目前, 炸药的做功能力一般采用圆筒试验进行评估, 并已建立了相应的标准。一些学者采用圆筒试验对含铝炸药的做功能力进行研究时发现, 由于含铝炸药的爆轰反应区较宽, 使得不同尺寸圆筒试验的结果不符合相似律<sup>[1-3]</sup>。这也说明, 根据一种尺寸的圆筒试验结果, 采用 C-J 理论模型所确定的含铝炸药爆轰产物 JWL (Jones-Wilkins-Lee) 状态方程并不能描述其他尺寸的圆筒试验, 对含铝炸药爆轰过程的数值模拟, 必须考虑爆轰反应的速率及宽度等因素<sup>[4]</sup>。对此, 一些学者尝试采用 Lee-Tarver 点火增长模型对含铝炸药爆轰过程进行数值模拟, 如陈朗等<sup>[1]</sup>、韩勇等<sup>[5]</sup>采用该模型分别对含铝炸药 RDX/Al/wax(76/20/4)、RDX/AP/Al/wax(35/23/32/10) 的不同尺寸圆筒试验进行了数值模拟, 并结合试验结果确定出了相应的 JWL 状态方程参数及反应速率方程参数。由于该模型不仅使用反应度和压力来控制反应的速率, 而且考虑了铝粉与爆轰产物的二次反应, 所以能够更准确地描述含铝炸药的反应过程<sup>[1]</sup>, 但目前这方面的研究成果仍然较少, 不

能满足含铝炸药战斗部设计及毁伤效果模拟的需要。

本研究针对一种 RDX 基含铝炸药 (RDX/Al/黏结剂 = 68/28/4) 开展了  $\Phi 25.4$  mm 和  $\Phi 50.0$  mm 两种尺寸的圆筒试验, 对比了不同装药直径下该含铝炸药做功能力的差异, 并采用 Lee-Tarver 点火增长模型对其进行数值模拟, 根据试验结果确定出了爆轰产物的 JWL 状态方程参数及反应速率方程参数, 为该含铝炸药在战斗部中的应用提供参考。

## 2 圆筒试验

试验包括  $\Phi 25.4$  mm 和  $\Phi 50.0$  mm 两种尺寸的圆筒试验, 待测炸药的试验样品采用压装成型工艺, 平均密度为  $1.868 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ; 圆筒材料为 TU1 无氧铜, 密度为  $8.93 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。炸药样品尺寸分别为  $\Phi 25.4 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  和  $\Phi 50 \text{ mm} \times 495 \text{ mm}$ ; 圆筒外径分别为 30.4, 60.2 mm; 狭缝扫描位置距起爆端分别为 200, 295 mm。圆筒在爆轰作用下发生膨胀, 采用 GSJ 高速转镜相机记录圆筒外表面在狭缝位置处的径向膨胀过程, 相机的扫描速度为  $1.5 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 。试验装置如图 1 所示。

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 数据处理方法

研究采用文献[6-7]中的数据处理方法, 将圆筒质量中心面的膨胀距离随时间的变化曲线按照式(1)的形式进行拟合。

收稿日期: 2013-01-31; 修回日期: 2013-04-27

基金项目: 国家“973”计划资助项目(61314303)

作者简介: 沈飞(1983-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事炸药爆轰性能试验与理论研究。e-mail: shen02@163.com

$$\Delta r_m = r_m - r_{m0} = \alpha \left\{ (t + t_0) - \frac{1}{\beta} [1 - e^{-\beta(t+t_0)}] \right\} \quad (1)$$

式中,  $r_m$  为圆筒质量中心面的半径, mm;  $r_{m0}$  为其初始值, mm;  $t$  为圆筒膨胀的时间,  $\mu\text{s}$ ;  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $t_0$  均为拟合参数; 由于实验数据中时间  $t$  的零点为圆筒外表面开始运动的时刻, 而圆筒质量中心面开始运动的时刻相对提前, 所以引入  $t_0$  作为时间项的修正参数, 使得  $t + t_0 = 0$  时, 圆筒质量中心面开始膨胀。

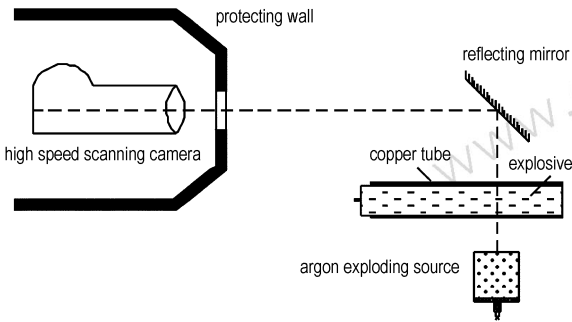


图1 圆筒试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the cylinder test

该处理方法中假设圆筒膨胀过程中圆筒的横截面积保持不变, 则  $r_m$  与圆筒外表面的半径  $r_e$  ( $r_{e0}$  为其初始值)、内表面的半径  $r_i$  ( $r_{i0}$  为其初始值) 之间满足如下关系

$$r_e^2 - r_m^2 = r_m^2 - r_i^2 = (r_{e0}^2 - r_{i0}^2) / 2 \quad (2)$$

由公式(2)可得出圆筒外表面的  $(r_e - r_{e0}) - t$  数据与圆筒质量中心面的  $(r_m - r_{m0}) - t$  数据之间的转换关系式

$$r_m - r_{m0} = \sqrt{[(r_e - r_{e0}) + r_{e0}]^2 - (r_{e0}^2 - r_{i0}^2) / 2} - \sqrt{(r_{e0}^2 + r_{i0}^2) / 2} \quad (3)$$

将公式(1)对时间求导, 可得到圆筒质量中心面的膨胀速度  $u_m$  的表达式

$$u_m = \frac{dr_m}{dt} = \alpha [1 - e^{-\beta(t+t_0)}] \quad (4)$$

由公式(1)和(4)也可以得出圆筒质量中心面的膨胀速度与膨胀距离之间的关系式

$$\left(1 - \frac{u_m}{\alpha}\right) \exp\left(\frac{u_m + \beta \Delta r_m}{\alpha}\right) - 1 = 0 \quad (5)$$

公式(5)中仅包含两个拟合参数, 计算过程中需要一个简单的迭代步骤。

### 3.2 试验结果

对圆筒膨胀过程的扫描底片(如图2所示)进行判读, 得出圆筒外表面的膨胀距离-时间数据, 根据公式(3)将其转换成圆筒质量中心面的膨胀距离-时间数据, 并采用公式(1)进行拟合, 其结果列于表1。

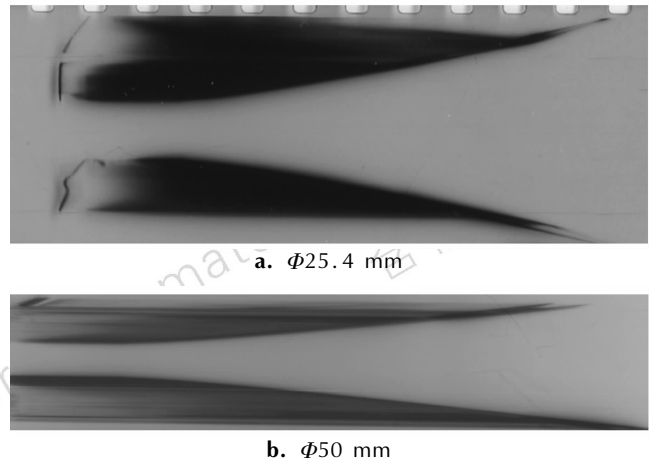


图2 圆筒膨胀过程的扫描照片

Fig.2 Photograph of the cylinder expansion process with different charge diameters

表1 圆筒膨胀曲线拟合参数值

Table 1 Curve-fitting parameters of the cylinder expansion process

$\Phi$ / mm	$\alpha$ / mm · $\mu\text{s}^{-1}$	$\beta$ / $\mu\text{s}^{-1}$	$t_0$ / $\mu\text{s}$
25.4	1.6366	0.2656	1.5906
50.0	1.7217	0.1226	1.9170

为了对比两种圆筒试验结果的差异, 可通过公式(6)<sup>[8]</sup>计算出炸药爆轰产物相对比容  $V$ , 然后对比两种尺寸圆筒试验的  $u_m - V$  曲线。

$$V = V_g [1.01(1 - e^{-1.8V_g}) + 0.003V_g] \quad (6)$$

式中,  $V_g = (r_i / r_{i0})^2$ 。

图3为炸药爆轰产物相对比容与圆筒膨胀时间的关系曲线, 由于一般情况下爆轰产物膨胀至相对比容为12左右时, 圆筒便开始破裂, 所以从图3中可以看出, 在  $\Phi 25.4$  mm 圆筒试验中, 圆筒的膨胀过程仅能持续  $20 \mu\text{s}$  左右, 而在  $\Phi 50.0$  mm 圆筒试验中, 圆筒的膨胀时间几乎增加了一倍, 能达到  $40 \mu\text{s}$  左右。对于圆筒膨胀速度的变化过程, 从图4可看出, 在圆筒膨胀的早期, 两种尺寸圆筒试验的  $u_m - V$  曲线几乎重合, 但在膨胀的中后期, 随着爆轰产物相对比容的增大, 两者之间的速度差值逐渐增大。表2列出了爆轰产物的相对比容为2.1, 4.4, 7.0, 10.0时(在  $\Phi 25.4$  mm 标准圆筒试验中, 它们分别对应的圆筒外表面的膨胀距离约为5, 12.5, 19, 25 mm), 圆筒质量中心面的膨胀速度。从表2可看出, 随着相对比容的增大, 两种圆筒膨胀速度的差值逐步增加, 当  $V = 10$  时, 其相对偏差量约为4.73%。

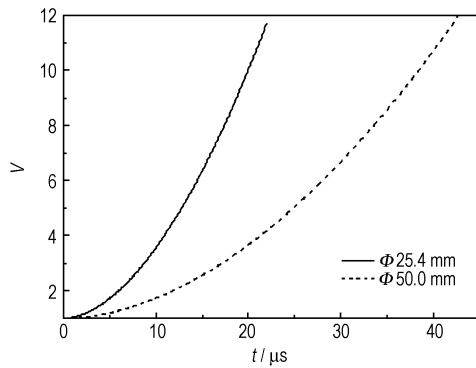


图3 爆轰产物相对比容随时间的变化曲线

Fig. 3 Curves of relative specific volume of detonation products vs time

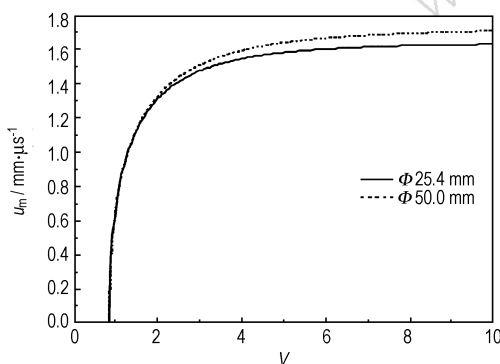
图4 两种圆筒试验的  $u_m$ - $V$  曲线Fig. 4 The curves of  $u_m$ - $V$  for the two cylinder test

表2 特定相对比容处圆筒的膨胀速度

Table 2 Cylinder expansion velocity at given relative volumes

$\Phi$ /mm	$u_m$ /mm· $\mu$ s $^{-1}$			
	$V=2.1$	$V=4.4$	$V=7.0$	$V=10.0$
25.4	1.334	1.560	1.611	1.627
50.0	1.351	1.612	1.680	1.704

#### 4 爆轰产物 JWL 状态方程和反应速率参数

采用 Lee-Tarver 点火增长模型<sup>[9-10]</sup> 模拟含铝炸药

表3 含铝炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数

Table 3 Parameters of JWL equation of state of aluminized explosive

$A$ /GPa	$B$ /GPa	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$C_V$ /GPa·K $^{-1}$	$E_0$ /GPa
503.0	12.0	4.40	1.15	0.33	$1.0 \times 10^{-3}$	11.6

表4 含铝炸药点火增长模型反应速率方程参数

Table 4 Ignition and growth reactive flow parameters of aluminized explosive

$I$ / $\mu$ s $^{-1}$	$b$	$a$	$x$	$G_1$ /GPa $^{-1}$ · $\mu$ s $^{-1}$	$c$	$d$	$y$	$G_2$ /GPa $^{-2}$ · $\mu$ s $^{-1}$	$e$	$g$	$z$
44	0.667	0	4	$48 \times 10^{-2}$	0.667	0.333	1	$8 \times 10^{-4}$	1	0.111	2

爆轰过程,爆轰产物的压力采用 JWL 状态方程描述为

$$p_p = A \exp(-R_1 V_p) + B \exp(-R_2 V_p) + \frac{\omega C_V T}{V_p} \quad (7)$$

式中,  $p_p$  为爆轰产物的压力, GPa;  $V_p$  为爆轰产物的相对比容;  $T$  为温度, K; 其余为待定的状态方程参数, 此外还需要确定单位体积爆轰产物的初始内能  $E_0$ 。未反应炸药的压力也采用 JWL 状态方程描述。

反应过程中的相对比容为:

$$V = (1 - F) V_e + F V_p \quad (8)$$

式中,  $F$  为炸药反应度,  $F=0$  表示炸药未反应,  $F=1$  表示炸药已完全反应;  $V_e$  为未反应炸药的相对比容。

反应速率方程为:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = I(1 - F)^b (V_e^{-1} - 1 - a)^x + G_1 (1 - F)^c F^d p^y + G_2 (1 - F)^e F^g p^z \quad (9)$$

式中,  $t$  为时间,  $\mu$ s;  $p$  为压力, GPa;  $I$ ,  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $x$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $y$ ,  $e$ ,  $g$ ,  $z$  均为待确定的常数。公式的第一项代表部分炸药在冲击压缩下被点火; 第二项代表炸药快速反应产生 CO, H<sub>2</sub>O 和 N<sub>2</sub> 等气体产物; 第三项代表在主要反应后相对缓慢的扩散控制反应, 对于含铝炸药代表铝粉与气体产物间的氧化反应。

圆筒采用各向同性弹塑性流体动力学模型, 具体参数见文献[11]。应用 ANSYS/LS-DYNA 程序分别对两种尺寸圆筒的膨胀过程进行数值模拟, 并将计算结果与试验结果进行对比。由于两种尺寸圆筒试验的结果不满足相似律, 需要同时调整爆轰产物的 JWL 状态方程参数和反应速率方程参数, 才能最终使得  $\Phi 25.4$  mm 和  $\Phi 50.0$  mm 圆筒膨胀过程的仿真结果与试验结果均较好地吻合, 此时所使用的 JWL 状态方程及反应速率方程参数值即为所要标定的参数值(见表3和表4)。图5和图6分别为  $\Phi 25.4$  mm 和  $\Phi 50.0$  mm 圆筒试验的计算结果与试验结果的对比图, 可以看出, Lee-Tarver 点火增长模型能够同时较精确地描述两种尺寸圆筒的膨胀历程。

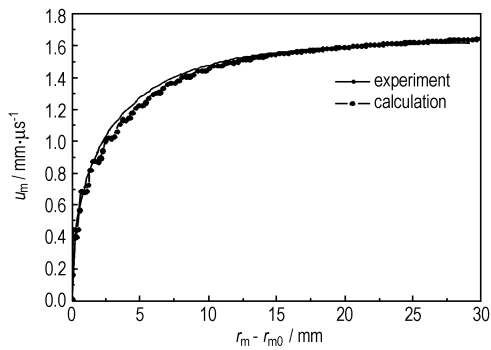


图5  $\Phi 25.4$  mm 圆筒试验的  $u_m-(r_m-r_{m0})$  曲线

Fig.5 Curves of  $u_m-(r_m-r_{m0})$  for the  $\Phi 25.4$  mm cylinder test

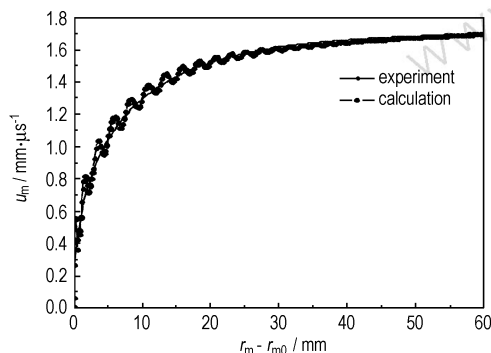


图6  $\Phi 50.0$  mm 圆筒试验的  $u_m-(r_m-r_{m0})$  曲线

Fig.6 Curves of  $u_m-(r_m-r_{m0})$  for the  $\Phi 50.0$  mm cylinder test

## 5 结论

(1) 在该含铝炸药两种尺寸的圆筒试验中,  $\Phi 25.4$  mm 圆筒的膨胀持续时间约为  $20 \mu\text{s}$ , 而  $\Phi 50.0$  mm 圆筒的膨胀持续时间约为  $40 \mu\text{s}$ ; 且爆轰产物相对比容为 10 时,  $\Phi 50.0$  mm 圆筒的膨胀速度较  $\Phi 25.4$  mm 圆筒约提高了 4.73%。这表明,  $\Phi 50.0$  mm 圆筒试验的结果能更准确地反映大尺寸装药条件下该含铝炸药真实的作功能力。

(2) 采用标定出的爆轰产物 JWL 状态方程参数及

反应速率方程参数对两种尺寸的圆筒试验分别进行数值模拟, 其计算结果与试验结果均能较好地吻合。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 韩勇, 黄辉, 黄毅民, 等. 不同直径含铝炸药的作功能力[J]. 火炸药学报, 2008, 31(6): 5-7.  
HAN Yong, HUANG Hui, HUANG Yi-min, et al. Power of aluminized explosives with different diameters[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008, 31(6): 5-7.
- [3] 于川, 李良忠, 黄毅民. 含铝炸药爆轰产物 JWL 状态方程研究[J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(3): 274-279.  
YU Chuan, LI Liang-zhong, HUANG Yi-min. Studies on JWL equation of state of detonation product for aluminized explosive[J]. *Explosives and Shockwaves*, 1999, 19(3): 274-279.
- [4] 孙锦山. 凝聚炸药非理想爆轰的数值模拟[J]. 力学进展, 1995, 25(1): 127-133.  
SUN Jin-shan. Numerical modeling of non-ideal detonation in condensed explosives[J]. *Advances in Mechanics*, 1995, 25(1): 127-133.
- [5] 韩勇, 黄辉, 黄毅民, 等. 含铝炸药圆筒试验与数值模拟[J]. 火炸药学报, 2009, 32(4): 14-17.  
HAN Yong, HUANG Hui, HUANG Yi-min, et al. Cylinder test of aluminized explosives and its numerical simulation[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(4): 14-17.
- [6] Hornberg H, Volk F. The cylinder test in the context of physical detonation measurement methods[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 1989, 14(5): 199-211.
- [7] Waldemar A T, Stanislaw C. Characteristics of high explosives obtained from cylinder test data[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2006, 14(2): 1-7.
- [8] Souers P C, Haselman L C. Detonation equation of state at LLNL 1993. UCRL-ID116113[R], 1994.
- [9] Lee E L, Tarver C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives[J]. *Physics of Fluids*, 1980, 23(12): 2362-2372.
- [10] 孙承伟, 卫玉章, 周之奎. 应用爆轰物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [11] 陈清畴, 蒋小华, 李敏, 等. RDX 基高聚物黏结炸药 JWL 状态方程[J]. 含能材料, 2011, 19(2): 213-216.  
CHEN Qing-chou, JIANG Xiao-hua, LI Min, et al. JWL equation of state for RDX-based PBX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(2): 213-216.

## Different Diameter Cylinder Tests and Numerical Simulation of RDX based Aluminized Explosive

SHEN Fei, WANG Hui, YUAN Jian-fei, TIAN Qing-zheng, YANG Kai

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to study the power of one RDX-based aluminized explosive with different charge diameter, the cylinder tests with diameters of 25.4 mm and 50.0 mm were conducted. The experimental results show that the expansion velocity of  $\Phi 50.0$  mm cylinder is 4.73% higher than that of  $\Phi 25.4$  mm when the relative volume of detonation product is 10. By using the dynamic finite element program LS-DYNA, two cylinder tests were simulated and the Lee-Tarver ignition and growth trinomial model was adopted. The parameters Jones-Wilkins-Lee equation of state and the reaction rate of the aluminized explosive were obtained through simulation and test results.

**Key words:** mechanics of explosion; aluminized explosive; detonation; cylinder test; numerical simulation

**CLC number:** TJ55; O389

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.06.017