

文章编号: 1006-9941(2010)06-0670-04

# 一种小型炸药驱动飞片装置的试验与数值模拟研究

蒋小华<sup>1</sup>, 陈清畴<sup>1</sup>, 李敏<sup>1</sup>, 彭其先<sup>2</sup>

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院流体力学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 设计了一种速度可调的小型炸药驱动飞片装置, 进行了不同密度的 PETN 炸药驱动飞片实验, 利用 VISAR 激光速度干涉仪测量了飞片速度历程; 采用 VLW 状态方程计算了 PETN 炸药不同密度的 JWL 状态方程, 得到了 JWL 状态方程参数, 进而通过显式动力学有限元程序 Ansys/Ls-dyna 模拟计算出飞片速度, 其结果与试验结果基本吻合, 验证了通过数值模拟计算飞片起爆速度的可行性; 得到了飞片起爆速度与炸药密度的关系, 飞片起爆速度可在  $2660 \sim 3150 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  之间调节, 对应压力范围为  $54 \sim 86 \text{ GPa}$ 。

**关键词:** 军事化学与烟火技术; 飞片起爆; VISAR; 数值模拟

**中图分类号:** TJ55; TJ45; O59

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.06.013

## 1 引言

钝感弹药、钝感起爆传爆序列采用冲击片雷管和钝感传爆药, 钝感传爆药的起爆感度低、极限起爆药量大, 如何实现可靠传爆是钝感弹药起爆、传爆序列设计的核心问题。国外采用冲击片雷管驱动飞片实现钝感传爆药的可靠起爆<sup>[1]</sup>, 其研究表明, 采用冲击片雷管驱动飞片能够大幅度提高其起爆能力, 其安全性符合直列式要求, 从而提高钝感起爆传爆序列的作用可靠性。

采用冲击片雷管驱动飞片的起爆传爆序列的设计关键在于飞片撞击炸药速度即飞片起爆速度。飞片速度研究多通过测试技术获得飞片的速度历程, 并结合数值模拟研究爆轰波驱动飞片过程。Bahl K L 等<sup>[2]</sup>用半径 25 mm 的 TATB 传爆药分别引爆厚度 2 mm 和 30 mm 的塑料粘结 TATB 炸药半球, 在不同方向上贴上 0.025 mm 厚的 Cu 箔飞片, 用激光干涉仪测定飞片飞行历史, 并结合数值计算研究了散心爆轰波的相对强度; 虞德水等人<sup>[3]</sup>采用双灵敏度激光速度干涉仪测量了 JOB-9003 和 JB-9014 两种炸药平面一维爆轰驱动飞片的速度历史, 并用 DYNA2D 程序进行了数

值模拟, 实验和计算结果表明, JB-9014 炸药的做功能力可以达到 JOB-9003 炸药的 75.0%; 姜洋等人<sup>[4]</sup>对点起爆炸药驱动平板飞片进行了试验和数值模拟计算, 计算所得的飞片运动历史和击靶波形均与实验符合较好。

本研究旨在设计一种炸药驱动飞片装置, 通过测试飞片速度并结合数值模拟建立 PETN 炸药密度与飞片起爆速度之间的关系, 预估飞片起爆速度, 获得一种研究飞片起爆速度的新途径。

## 2 炸药驱动飞片装置设计

炸药驱动飞片装置如图 1 所示。采用不同尺寸的炸药柱 ( $\Phi 6.3 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$  和  $\Phi 5 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ ), 分别驱动两种飞片 ( $\Phi 5 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$  和  $\Phi 3.5 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ ), 飞片材料为不锈钢; 炮筒尺寸为  $\Phi 5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  和  $\Phi 3.5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ , 其材料为不锈钢; 采用柔爆索可以尽量消除雷管爆轰对飞片速度的影响, 且近似于点起爆, 易于建模进行数值模拟; 采用 PETN 作为驱动炸药, 其近似于理想爆轰, 通过热力学计算可以获得较为准确的爆轰参数和 JWL 状态方程。PETN 炸药柱由药粉压制而成, 其外形尺寸由模具控制, 通过精确控制 PETN 药量, 可达到精确控制 PETN 炸药柱密度的目的。在保证药柱成型和安全的情况下, 密度调节范围为  $1.30 \sim 1.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。通过炸药驱动飞片装置进行不同密度的炸药驱动飞片起爆钝感传爆药试验可确定钝感传爆药的飞片起爆速度。

收稿日期: 2010-03-29; 修回日期: 2010-06-10

作者简介: 蒋小华(1966-), 男, 副研究员, 研究方向为钝感火工品和爆轰数值模拟计算。e-mail: caepjxh@163.com

通讯联系人: 陈清畴(1983-), 男, 研究实习员, 研究方向为钝感起爆传爆序列设计。e-mail: chenqingchou@163.com

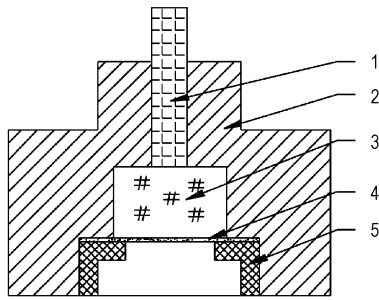


图1 炸药驱动飞片试验装置

1—柔爆索, 2—座体, 3—PETN 炸药, 4—飞片, 5—炮筒

Fig.1 Schematic diagram of the driving test

1—mild detonating fuse (MDF), 2—pedestal, 3—PETN explosive, 4—flyer, 5—barrel

### 3 驱动炸药的 JWL 状态方程

炸药爆轰产物状态方程是描述炸药爆轰 CJ 状态之后的爆轰产物系统各物理量之间的关系式。1965 年, Lee 等人在 Jones 和 Wilkins 的工作基础上, 提出了 JWL (Jones-Wilkins-Lee) 状态方程<sup>[5]</sup>, 它不显含化学反应, 能精确描述爆轰产物的等熵膨胀过程, 其形式为:

$$p_s = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (1)$$

式中,  $p_s$  为爆轰产物的压力,  $V$  为爆轰产物的相对比容。A, B,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $\omega$  和  $E_0$  为六个待定参数。

以维里(VIRIAL)理论为基础建立的 VLW 高温高压

爆轰产物状态方程(VLW EOS), 在 高能炸药、民用工业炸药以及初始密度  $2.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  以上的高能量密度炸药的爆轰参数计算以及做功能力评价中取得了与试验吻合的结果<sup>[6]</sup>。本研究采用 VLW 状态方程计算了不同密度驱动炸药(PETN)的爆轰参数和爆轰产物 JWL 状态方程, 为数值模拟提供 JWL 参数, 结果如表 1 所示。

### 4 不同密度炸药驱动飞片的试验与数值模拟

通过 VISAR 激光速度干涉仪测量了不同密度 PETN 炸药爆轰驱动飞片的速度历程。Sandia 试验室的 Barker 和 LANL 的 Hemsing<sup>[7]</sup> 是实现任何反射物的速度干涉仪(VISAR)的多普勒偏移技术的先驱, 这种方法可以记录从非镜面反射的光并对速度进行连续检测, 且精度较高。VISAR 测试系统由光源、激光发射与接受系统、两个独立干涉腔及对应的光电转换和记录系统组成。其测试原理<sup>[8]</sup> 是利用入射激光在运动物体表面反射产生多普勒效应, 再由激光干涉与光电外差检测的方法测出激光的多普勒频移, 进而得到被测点或物体的速度。

采用显式动力学有限元程序 Ansys/Ls-dyna 进行数值模拟, 采用轴对称结构, 依炸药驱动飞片试验装置建立轴对称结构计算模型。对 PETN 炸药采用高能炸药燃烧模型和 JWL 状态方程, 参数使用由 VLW 状态方程计算所得数据; 不锈钢采用 Johnson-Cook 力学模型<sup>[9]</sup> 和 Gruneisen 状态方程<sup>[10]</sup>, 具体参数见表 2。

表 1 不同密度 PETN 炸药的 JWL 状态方程参数

Table 1 Parameters of JWL EOS of PETN with different density

$\rho_{\text{PETN}}$ / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$D$ / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$p$ / $\text{GPa}$	$A$ / $100 \text{ GPa}$	$B$ / $100 \text{ GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E_0$
1.30	6812	14.7	7.44	0.172	6.00	1.96	0.3	0.0862
1.35	7019	16.0	7.37	0.171	5.81	1.91	0.3	0.0897
1.40	7228	17.4	7.35	0.171	5.63	1.87	0.3	0.0933
1.45	7438	18.8	7.40	0.175	5.49	1.85	0.3	0.0973
1.50	7651	20.4	7.59	0.181	5.38	1.84	0.3	0.101
1.55	7841	24.4	6.82	0.158	5.09	1.74	0.3	0.104
1.60	7986	26.0	6.69	0.157	4.94	1.71	0.3	0.108
1.65	8134	28.0	7.53	0.191	5.00	1.78	0.3	0.112

表 2 不锈钢的 Johnson-Cook 模型参数和 Gruneisen 状态方程参数

Table 2 Parameters of Johnson and Cook plasticity model and Gruneisen EOS of stainless steel

Johnson-cook plasticity model	A/GPa	B/GPa	$n$	$c$	$m$	$T_M/\text{K}$	CP	$D_1$
	0.792	0.51	0.26	0.014	1.03	1793	477	0.8
Gruneisen EOS	C/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	0	$a$	$E_0$	$V_0$
	4569	1.49	0	0	2.17	0.46	0	1

Note: A, B, n, c, m are input constants.  $T_M$  is melt temperature. CP is specific heat.  $D_1$  is failure parameters. C is the intercept of Hugoniot curve.  $S_1, S_2, S_3$  of coefficients of slope of Hugoniot curve.  $\gamma_0$  is Gruneisen gamma. a is first order volume correction to  $\gamma_0$ .  $E_0$  is initial internal energy.  $V_0$  is initial volume.

采用  $\Phi 3.5$  mm 炸药驱动飞片试验装置, PETN 炸药密度分别为  $1.30, 1.35, 1.40, 1.50, 1.55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  进行炸药驱动飞片试验, 其结果与数值模拟结果吻合; 采用  $\Phi 5$  mm 炸药驱动飞片试验装置, PETN 炸药密度分别为  $1.40, 1.45, 1.50, 1.55, 1.60 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  进行炸药驱动飞片试验, 其结果与数值模拟结果吻合, 这表明采用 VLW 状态方程和有限元计算得到的飞片速度与试验结果基本一致, 通过数值模拟计算飞片起爆速度的方法可行。图 2 为飞片速度试验与数值模拟对比图列举。

## 5 结果与讨论

计算了不同密度 PETN 炸药驱动飞片起爆速度,

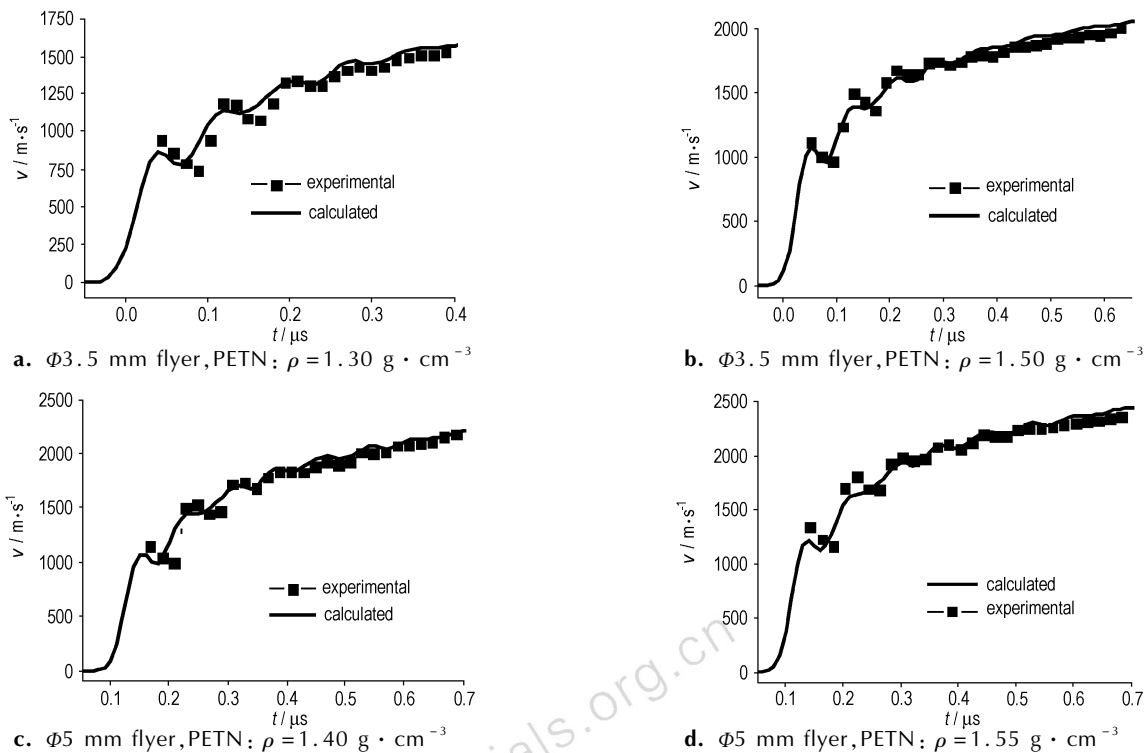


图 2 飞片速度试验与数值模拟对比图

Fig. 2 Comparison of flyer velocities between experimental and calculation

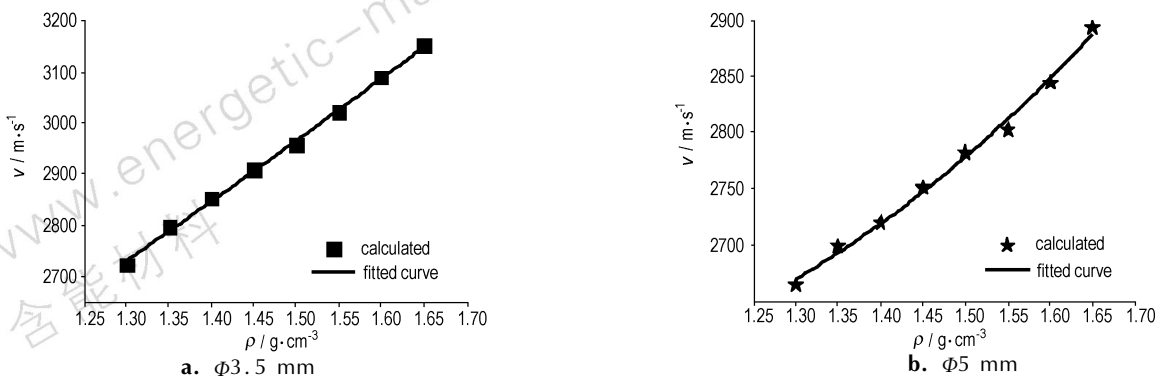


图 3 飞片起爆速度与 PETN 炸药密度之关系

Fig. 3 Relationships between flyer velocity and density of PETN

通过多项式拟合, 得到了 PETN 炸药密度与飞片起爆速度的对应关系, 即

$$v_{3.5} = 123.81\rho^2 + 823.81\rho + 1450.89 \quad (2)$$

$$v_5 = 519.05\rho^2 - 912.62\rho + 2979.55 \quad (3)$$

对于本研究中 PETN 炸药的密度范围  $1.30 \sim 1.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 对应的飞片起爆速度如图 3 所示。

炸药驱动飞片装置通过调节 PETN 炸药的密度, 可使  $\Phi 3.5$  mm 飞片起爆速度在范围  $2720 \sim 3150 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  内调节, 对应的起爆压力范围为  $61 \sim 86 \text{ GPa}$ ; 可使  $\Phi 5$  mm 飞片起爆速度在范围  $2660 \sim 2890 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  内调节, 对应的起爆压力范围为  $54 \sim 71 \text{ GPa}$ 。

## 6 结 论

本研究设计了一种炸药驱动飞片起爆装置,分别进行了不同密度的 PETN 炸药驱动飞片试验,利用 VISAR 技术测量了飞片的速度,采用 VLW 状态方程计算了不同密度 PETN 炸药的爆轰参数和爆轰产物 JWL 状态方程,并采用显式动力学有限元程序 Ansys/Ls-dyna 模拟计算出飞片速度。结果表明计算结果与试验结果吻合,验证了通过数值模拟计算飞片起爆速度的方法可行。计算了不同密度 PETN 炸药驱动飞片起爆速度,获得了飞片起爆速度与 PETN 炸药密度之间的关系,即  $v_{3.5} = 123.81\rho^2 + 823.81\rho + 1450.89$ ;  $v_5 = 519.05\rho^2 - 912.62\rho + 2979.55$ 。提出了一种基于飞片传爆的钝感起爆传爆序列的设计方法。

### 参考文献:

- [1] Wim Prinse, Gert Scholtes. A development platform for a microchip EFI [C] // 52nd Annual Fuze Conference. Sparks, NV. 2008.
- [2] Bahl K L, Breithaupt R D, Tarver C M, et al. Fabry Perot velocimetry on detonating LX-17 in planar and spherically divergent geometries [C] // Proceedings of Ninth Symposium (International) on Detonation. Portland, Oregon. 1989: 133 - 141.
- [3] 虞德水, 赵锋, 谭多望, 等. JOB-9003 和 JB-9014 炸药平面爆轰驱动飞片的对比研究 [J]. 爆炸与冲击, 2006, 12(2): 140 - 144.  
YU De-shui, ZHAO Feng, TAN Duo-wang, et al. Experimental studies on detonation driving behavior of JOB-9003 and JB-9014 slab explosives [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 12(2): 140 - 144.
- [4] 姜洋, 孙承伟, 李平, 等. 点起爆炸药驱动平板飞片运动的数值模拟研究 [J]. 高压物理学报, 2009, 23(4): 261 - 265.  
JIANG Yang, SUN Cheng-wei, LI Ping, et al. Numerical simulation of the motion of flyer driven by slab explosive initiated at centered point [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2009, 23(4): 261 - 265.
- [5] Lee E L, Hornig H C, Kury J W. Adiabatic expansion of high explosive detonation products [R]. UCRL-50422, 1968.
- [6] WU Xiong. Detonation performance of condensed explosives computed with the VLW EOS [C] // Proceedings of the Eighth Symposium (International) on Detonation. Albuquerque Office of Naval Research, 1986: 796 - 804.
- [7] Hatt D J. VISAR velocity interferometer system at MRL for slapper detonator and shockwave studies [R]. AD-A250372.
- [8] 胡绍楼. 激光速度干涉测量技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 27 - 29.
- [9] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strain rates and high temperatures [C] // The 7th International Symposium on Ballistics. Hague, Netherlands. 1983.
- [10] 经福谦. 试验物态方程导引 [M]. 北京: 科学出版社, 1986: 175 - 177.

## Experimental and Numerical Studies on Flyer Initiation Device

JIANG Xiao-hua<sup>1</sup>, CHEN Qing-chou<sup>1</sup>, LI Min<sup>1</sup>, PENG Qi-xian<sup>2</sup>

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China; 2. Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** A novel explosive driven flyer initiation device with changeable velocity was designed. Flyer initiation tests with different densities PETN were finished and the history of velocity of flyer was observed by VISAR. Parameters of JWL EOS of PETN with different densities were calculated by VLW EOS. Velocities of flyer was simulated by the finite element hydrocode Ansys/Ls-dyna, which were coincided with results of tests. It testified feasibility of numerical method to calculate velocity of flyer. The relationships between flyer velocity and density of PETN were gained, so that the velocity of flyer could be adjusted from 2660 m · s<sup>-1</sup> to 3150 m · s<sup>-1</sup> with corresponding pressure range of 54 - 86 GPa.

**Key words:** military chemistry and pyrotechnics; flyer initiation; VISAR; numerical simulation

**CLC number:** TJ55; TJ45; O59

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.06.013