文章编号：1001-1455(2014)01-0125-04

起爆高密度 TATB 炸药的飞片速度阈值*

吕军军，曾庆轩，李明愉，周利存
（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：采用实验与数值模拟相合的方法研究了飞片起爆钝感 TATB 炸药的性能。设计了飞片可靠起爆钝感 TATB 炸药的起爆序列，利用全光纤位移干涉测速系统分别测出飞片可靠起爆和未起爆 TATB 炸药的速度，初步确定飞片起爆钝感 TATB 炸药的起爆速度阈值。采用 DYNA2D 程序对飞片起爆 TATB 炸药过程进行数值模拟，模拟结果与实验结果相符合。

关键词：爆炸力学；起爆速度阈值范围；起爆序列；高密度 TATB 炸药；飞片速度；DYNA2D 程序
中图分类号：O381；TJ450　　**国标学科代码**：1303510　　**文献标志码**：A

TATB 类炸药是以 TATB 炸药为基的钝感炸药，近几十年来，TATB 类炸药的性能尤其是其短脉冲冲击的起爆性能，越来越受到关注。

J. Campos 等[1]设计了新型的雷管起爆装置，首先采用微型雷管驱动二次飞片，飞片撞击起爆钝感装药 PBX-RU81(以 RDX 炸药为基)，该装置可用于直接起爆更钝感的主装药。实验中，采用 Fabry-Perot 光学测量装置记录了飞片位移曲线，并讨论了二次飞片厚度对 RU81 起爆性能的影响。W. C. Prinse 等[2]设计了含有冲击片雷管、二次飞片、传爆药和主装药的起爆序列，实验证明采用不锈钢、聚酯薄膜和铝飞片可以起爆低密度 TATB 炸药(ρ=1.688 g/cm^3)，但采用二次飞片未能起爆高密度的 TATB 炸药(ρ=1.842 g/cm^3)。B. He 等[3]通过实验和数值模拟，系统研究了飞片起爆亚微米(炸药颗粒平均粒径为 0.578 μm)低密度(ρ=1.75 g/cm^3)TATB 炸药的性能，得到了飞片直径、厚度与飞片可靠起爆 TATB 装药阈值速度的关系。

本文中，采用钝感起爆序列分别驱动二次飞片和三次飞片撞击 TATB 装药，利用全光纤激光干涉测速系统分别测得飞片可靠起爆和未起爆 TATB 炸药的速度，并结合数值模拟获得飞片驱动、TATB 炸药起爆过程，在飞片尺寸一定的情况下，初步确定飞片起爆高密度 TATB 炸药(ρ=1.895g/cm^3)的速度阈值范围。

1 飞片起爆钝感 TATB 炸药实验

为起爆钝感 TATB 炸药，设计了三次飞片起爆序列，飞片起爆钝感 TATB 炸药的实验装置如图 1 所示。脉冲功率装置产生的脉冲能量使金属爆炸箔发生快速电爆炸，爆炸形成的等离子体剪切并驱动聚酰亚胺飞片层产生飞片，起爆初级装药 HNS-IV，初级装药爆轰驱动二次飞片冲击起爆二级炸药 LLM-105，LLM-105 炸药爆轰驱动三次飞片起爆钝感 TATB 装药。实验采用的初级装药为 HNS-IV，尺寸为∅4 mm×4 mm；次级装药为分别为 HNS-

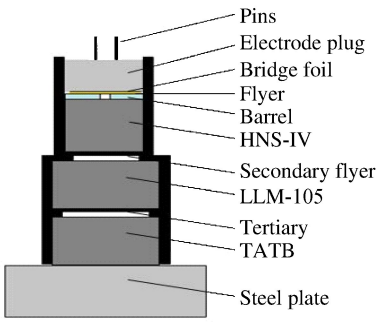


图 1 飞片起爆钝感 TATB 炸药实验示意图
Fig. 1 Experimental sketch of initiation of insensitive TATB explosive by flyer

* **收稿日期**：2012-08-20；**修回日期**：2012-10-12
基金项目：总装预研基金项目(9140A05080110BQ0119)；
爆炸科学与技术国家重点实验室基金项目(YBKT13-03)
作者简介：吕军军(1988—)，男，博士研究生。

IV、RDX 和 LLM-105；二次飞片和三次飞片材料均为金属钛，其中二次飞片尺寸为∅4 mm×0.11 mm，三次飞片尺寸分别为∅4 mm×0.11 mm、∅6 mm×0.11 mm 和∅10 mm×0.11 mm。

表 1 为部分飞片起爆钝感 TATB 炸药实验的序列结构和起爆结果。实验 1、2、3 直接采用 HNS-IV，增加 HNS-IV 装药量和采用 RDX 二级装药不能起爆钝感 TATB 炸药。实验 4、5 不含有二次飞片，初级装药 HNS-IV 直接接触起爆二级装药 LLM-105 并驱动飞片，高密度 TATB 装药未起爆。实验 6、7 中，初级装药 HNS-IV 驱动二次飞片撞击二级装药 LLM-105，LLM-105 装药爆轰驱动三次飞片撞击 TATB 装药，TATB 装药稳定爆轰。

表 1 飞片起爆钝感 TATB 炸药的实验及结果

Table 1 Experiments and results of initiation of insensitive TATB explosive initiated by flyer

实验	初级装药			二次飞片		二级装药			三次飞片		结果
	材料	d/mm	h/mm	d/mm	h/mm	材料	d/mm	h/mm	d/mm	h/mm	
1	HNS-IV	4	4	4	0.11	—	—	—	—	—	未起爆
2	HNS-IV	4	4	4	0.11	HNS-IV	6.3	5	4	0.11	未起爆
3	HNS-IV	4	4	4	0.11	RDX	7.0	5	4	0.11	未起爆
4	HNS-IV	4	4	—	—	LLM-105	6.3	5	4	0.11	未起爆
5	HNS-IV	4	4	—	—	LLM-105	6.3	5	6	0.11	未起爆
6	HNS-IV	4	4	4	0.11	LLM-105	10.0	10	6	0.11	起爆
7	HNS-IV	4	4	4	0.11	LLM-105	10.0	10	10	0.11	起爆

2 飞片速度测试和数值模拟

为初步获取∅6 mm×0.11 mm 钛飞片起爆 TATB 装药的速度上下限，采用全光纤激光位移干涉测速测速系统(AFDISAR)对实验 2、3 三次飞片速度进行测量，分别获得飞片未起爆和可靠起爆 TATB 装药的飞片速度曲线。飞片速度测试如图 2 所示。三次飞片在炸药驱动下运动，将激光探头照射的光返回到耦合器，经光电探测器记录得到飞片的速度。

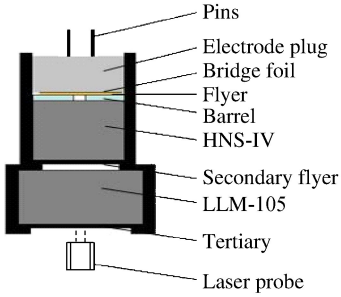


图 2 三次飞片速度测试示意图

Fig. 2 Sketch map of measurement of the third flyer velocity

对 LLM-105 炸药爆轰驱动钛飞片的过程和钛飞片冲击起爆主装药 TATB 炸药的过程进行数值模拟，与实验结果进行比较。

简化实验模型，建立∅6.3 mm×5 mm 和∅10.0 mm×10 mm 的 LLM-105 炸药爆轰驱动飞片的模型，采用轴对称结构。在计算过程中，钛飞片采用弹塑性流体动力学模型，LLM-105 采用高能炸药燃烧模型，采用 JWL 状态方程描述炸药的爆轰产物压力、体积和能量特性。JWL 状态方程的形式为：

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

式中：p 为压力，V 为相对体积，E 为内能，A、B、R_1、R_2 和 ω 为常数。在实验中，LLM-105 密度为 1.82 g/cm^3，参数分别为：A=852 GPa，B= 18 GPa，R_1=4.6，R_2=1.3，ω=0.3，E_0=10.2 GJ/m^3。

飞片起爆 TATB 炸药属于高压短脉冲冲击起爆，采用 JWL 方程描述未反应炸药和爆轰产物状态，采用三项式点火增长模型反应速率方程描述 TATB 炸药的反应过程。点火增长模型反应速率方程为：

$$\begin{gathered}\dot{\lambda}=I(1-\lambda)^b(\rho/\rho_0-1-a)^x+G_1(1-\lambda)^c\lambda^d p^y+G_2(1-\lambda)^e\lambda^g p^z\\ 0<F<F_{\mathrm{ig,max}},\quad 0<F<F_{G_1,\mathrm{max}},\quad 1<F<F_{G_2,\mathrm{min}}\end{gathered} \tag{2}$$

式中：I、G_1、G_2、a、b、c、d、e、g、x、y、z 是 12 个可调参数。ρ_0 为炸药初始密度，ρ_0=1.895 g/cm^3，主要参数引自文献[4-5]。

3　结果分析

图 3(a)为实验 5 的飞片速度曲线：在飞片速度上升阶段，实验结果和数值模拟结果比较一致，平滑段数值模拟结果大于实验结果，主要因为在数值模拟中，未考虑 LLM-105 炸药的爆轰稀疏波的影响，飞片也不受空气阻力的作用。图 3(b)为实验 6 的飞片速度曲线，实验结果整体小于数值模拟结果，这是因为在数值模拟中，没有考虑稀疏波和空气阻力的作用。图 3 中，为了更清晰的得出飞片的速度曲线，对 AFDISAR 测速系统测得曲线的点进行了筛选。

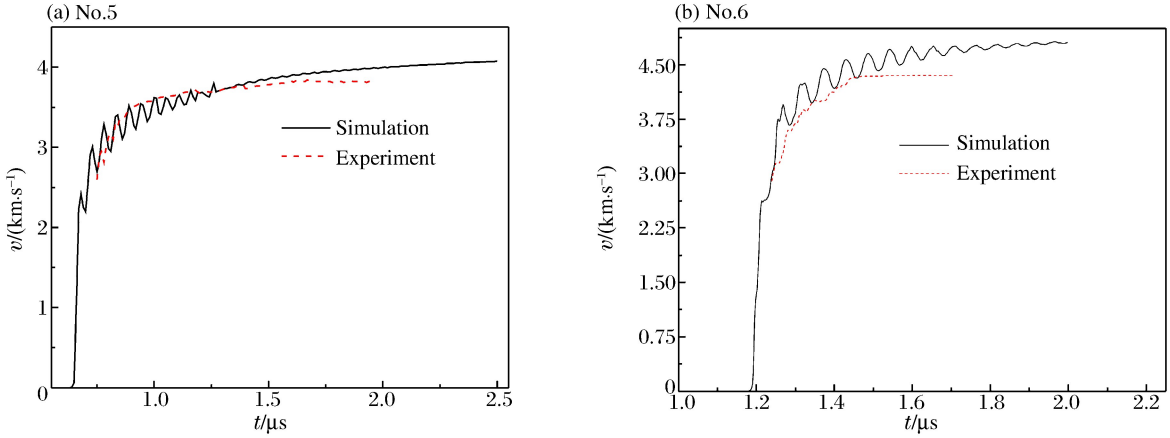


图 3　钛飞片速度

Fig. 3　Experimental and simulational results of titanium flyer speed

由表 1 和图 3 可知，当∅6 mm×0.11 mm 钛飞片以 3.834 km/s 的速度撞击 TATB 装药时，TATB 装药未起爆，当∅6 mm×0.11 mm 钛飞片以 4.350 km/s 的速度撞击 TATB 装药时，TATB 装药起爆。图 4(a)是钛飞片以 3.834 km/s 的速度撞击炸药时，炸药压力曲线的数值模拟结果。可以看出，炸药界面处的压力峰值为 38 GPa，受稀疏波的影响，炸药内压力逐渐减小，在 8 和 9 mm 处压力不足 20 GPa，结果炸药没有稳定爆轰。图 4(b)是钛飞片以 4.350 km/s 的速度撞击炸药时，炸药压力曲线的数值模拟结果。可以看出，在炸药界面处的压力为约 46 GPa，随着爆轰波的传播，在 2 和 4 mm 处的压力分别为 38.38 和 35 GPa，受稀疏波的影响，在 8 和 9 mm 处压力分别降至 29.19 和 29.5 GPa。由炸药不同位置处的压力曲线可以判定，炸药达到稳定爆轰。

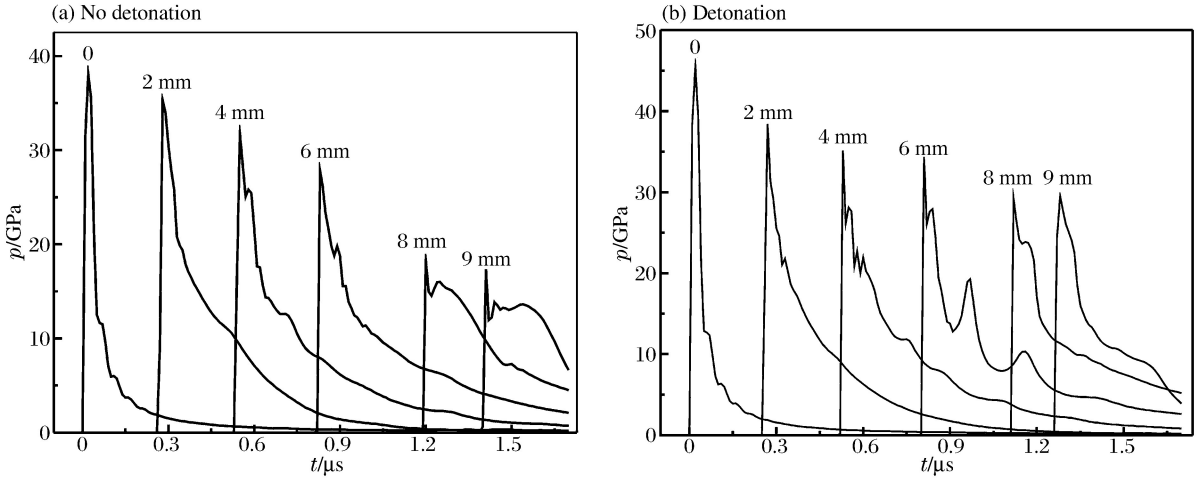


图 4　炸药的压力曲线

Fig. 4　Pressure curves of explosives

4 结 论

采用现有的冲击片雷管直接驱动二次飞片不能起爆高密度 TATB 装药,通过飞片起爆序列实验设计,得出飞片可靠起爆高密度 TATB 装药的起爆序列,且序列中所用的装药满足钝感起爆序列许用装药要求。

采用 AFDISAR 系统,测得钛飞片未起爆和起爆 TATB 炸药的速度分别为 3.834 和 4.350 km/s。通过 DYNA2D 程序对飞片速度和起爆 TATB 炸药过程进行数值模拟,模拟结果与实验结果一致。初步确定了钛飞片起爆高密度 TATB 装药的阈值速度范围。

参考文献:

[1] Campos J, Duncombe R, Erkol S, et al. Explosive initiation by micro-slapper[C]// The 33th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut fur Chemische Technologie, 2002:1-10.

[2] Prinse W C, van't Hof P G, Cheng L K, et al. High-speed velocity measurements on an EFI-system[C]// The 27th International Congress on High-speed Photography and Photonics. Xi'an: International Society for Optics and Photonics, 2007:62795E-62795E-10.

[3] He Bi, Long Xin-ping, Feng Chang-gen. Numerical simulation on shock-pulse initiation of submicron TATB[C]// The 25th International Symposium on Ballistics. Beijing, 2010:749-758.

[4] Tarver C M, McGuire E M. Reactive flow modeling of the interaction of TATB detonation waves with inert materials[C]// The 12th International Detonation Symposium. San Diego, 2002: 641-649.

[5] Garcia M L, Tarver C M. Three-dimensional ignition and growth reactive flow modeling of prism failure tests on PBX 9502[C]// The 13th International Detonation Symposium. Norfolk, United States: Department of Energy, 2006.

Threshold impact velocity for detonation initiation in high-density TATB explosive by flyer*

Lü Jun-jun, Zeng Qing-xuan, Li Ming-yu, Zhou Li-cun

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

Abstract: The experiments and the numerical simulations were carried out to investigate the characteristics in the initiation process of the TATB explosive by flyers. The initiation sequence was designed to initiate the high-density TATB explosive. The all-fiber displacement interferometer system for any reflector was used to measure the flyer velocities for the success and failure of the initiation in the TATB explosive, respectively. So the corresponding threshold flyer velocity was determined primarily. And the DYNA2D program was employed to simulate the detonation process of the TATB explosive initiated by the flyer. The simulated results are consistent with the experiments.

Key words: mechanics of explosion; detonation speed threshold value range; initiation sequence; high density TATB explosive; flyer speed; DYNA2D program

* Received 20 August 2012; Revised 12 October 2012

Corresponding author: Zeng Qing-xuan, zengqingxuan@263.net

(责任编辑 丁 峰)