

文章编号: 1001-1455(2009)05-0497-06

# PBX-9501 强爆轰产物状态方程的数值模拟<sup>\*</sup>

姚 阳, 谭多望, 文尚刚

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 利用 P. K. Tang 的 JWL 强爆轰产物状态方程改造了 DEFEL 二维弹塑性流有限元源程序, 并用改造后的 DEFEL 程序模拟了一系列飞片撞击 PBX-9501 炸药的一维强爆轰过程, 给出了炸药驱动二级飞片(铝)的速度。计算得到的产物状态参数与实验测量结果符合较好, 验证了增加修正项的新状态方程可较好地描述高能炸药的超压爆轰的高压流体动力学过程。

**关键词:** 爆炸力学; 产物状态方程; 强爆轰; 炸药

**中图分类号:** O381

**国标学科代码:** 130 · 3510

**文献标志码:** A

## 1 引 言

近年来发展了多种高动压加载技术, 因此也越来越多利用超压爆轰驱动高速飞片, 研究在超压加载下材料动态力学性质和超高速碰撞等问题。在常规兵器设计研究中, 也利用超压爆轰驱动来获得较高速度(6~10 km/s)的射流。

随着强爆轰实验和理论研究的深入, 以及数值模拟技术在爆轰领域的广泛应用, 要求对产物在各种压力下的状态行为有越来越精确的描述。目前常用的炸药爆轰产物状态方程, 如 BKW、标准 JWL 等在描述炸药强爆轰状态方面均显得不尽人意。J. H. Kineke 等<sup>[1]</sup>、L. Green 等<sup>[2]</sup>发现常用于计算 CJ 爆轰产物粒子行为的状态方程不能同时适用于描述超压爆轰的定量特征, 而这种差别对于 PBX-9404 等高能炸药比较明显。P. K. Tang<sup>[3]</sup>通过实验得知, 由标准 JWL 状态方程计算塑料粘结 HMX 炸药和塑料粘结 TATB 炸药的超压爆轰状态与实验结果有较大差别, 简单的圆筒实验以及由它标定的基本等熵线不能再用来描述明显偏离基本等熵线的流体动力学状态。因此, 寻找能正确描述超压下爆轰产物特征的状态方程形式逐渐受到人们的关注。Л. В. Альтшулер<sup>[4]</sup>提出了爆轰产物高压状态方程, 并计算了 PBX-9404 等 4 种固体炸药的超压爆轰  $D-u$  曲线和  $p-V$  曲线, 与实验结果符合较好。邓全农<sup>[5]</sup>建立了 DG01A 炸药的爆轰产物状态方程组, 利用超压爆轰状态方程计算的 DG01A、PBX-9404 炸药超压爆轰状态与实验符合很好。M. van Thiel 等<sup>[6]</sup>、E. L. Lee 等<sup>[7]</sup>根据超压爆轰实验确定的爆轰产物 Hugoniot 曲线, 推导出所谓的实验等熵线, 将 JWL 状态方程的 Grüneisen 系数用关于相对比容的函数  $\Gamma = \Gamma(\bar{v})$  代替。

标准 JWL 状态方程能较精确地描述爆轰产物的膨胀驱动做功过程, P. K. Tang<sup>[8]</sup>在标准 JWL 方程的基础上, 给出了适用于高压状态的爆轰产物等熵线方程, 使它能够用来模拟高能炸药的超压爆轰的高压流体动力学过程。而用该方程计算的 PBX-9501 和 PBX-9502 炸药的超压爆轰 Hugoniot 参数和超压爆轰声速与实验吻合很好。潘昊等<sup>[9]</sup>采用 Hybrid 反应率结合这种新型 JWL 方程, 研究了 LX-17、超细 TATB 等钝感炸药的冲击起爆过程, 并计算了爆轰波的对碰现象, 获得了较好的结果。本文中采用 P. K. Tang<sup>[8]</sup>的 JWL 状态方程, 对 DEFEL 二维弹塑性流有限元源程序<sup>[10]</sup>进行改造, 对飞片高速撞击 PBX-9501 后的一维强爆轰过程进行计算, 把计算得到的产物状态物理量与实验测量数据<sup>[11]</sup>进行比较。

\* 收稿日期: 2008-01-17; 修回日期: 2009-07-02

基金项目: 国防基础科研项目(A1520070075)

作者简介: 姚 阳(1975—), 女, 硕士。

## 2 状态方程

### 2.1 标准 JWL 状态方程

在流体弹塑性模型里,静水压力  $p$  被认为只与体积变形有关,他们之间的关系服从流体型状态方程。在数值模拟中流体压强用 Grüneisen 状态方程计算,具体参数则由激波绝热关系确定。Grüneisen 状态方程可以写成如下形式

$$p = p_s + \frac{\Gamma}{v}(E - E_s) \quad (1)$$

式中: $\Gamma$  为 Grüneisen 系数,带下标 S 的量表示等熵线上的量, $p$ 、 $\bar{v}$  分别为压力、相对比容, $E$  为内能。

标准 JWL 状态方程是 E. L. Lee 等<sup>[11]</sup> 在 M. L. Wilkins 等<sup>[13]</sup> 提出的 CJ 等熵线方程基础上给出的

$$p_s = Ae^{-R_1\bar{v}} + Be^{-R_2\bar{v}} + C\bar{v}^{-(\Gamma+1)} \quad (2)$$

$$e_s = \frac{A}{R_1}e^{-R_1\bar{v}} + \frac{B}{R_2}e^{-R_2\bar{v}} + \frac{C}{\Gamma}\bar{v}^{-\Gamma} \quad (3)$$

式中: $e$  为比内能, $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  为常系数。

### 2.2 P. K. Tang 的 JWL 状态方程

P. K. Tang<sup>[8]</sup> 提出适用于高压状态爆轰产物的等熵线方程,与标准 JWL 状态方程不同的是,它保存了由类似圆筒实验这种可靠实验手段得到的系列参数系统。用标准 JWL 状态方程模拟超压爆轰实验的不足,可能主要是因为模拟结果使声速过低而引起的,而不是压力较低引起的<sup>[8]</sup>。鉴于 JWL 方程的 CJ 等熵线方程含有的 3 项中, $Ae^{-R_1\bar{v}}$  项在高压范围内起主要作用,通过在标准 JWL 方程高压系数项前增加一项修正,从而对其加以扩展,即通过使高压区 Hugoniot 斜率变陡来弥补,改变以往压力越高而声速低于实验值越大的情况。P. K. Tang 的 JWL 状态方程如下

$$p_s = [1 + F_p(\bar{v})]Ae^{-R_1\bar{v}} + Be^{-R_2\bar{v}} + C\bar{v}^{-(\Gamma+1)} \quad (4)$$

$$e_s = [1 + F_e(\bar{v})] \frac{A}{R_1}e^{-R_1\bar{v}} + \frac{B}{R_2}e^{-R_2\bar{v}} + \frac{C}{\Gamma}\bar{v}^{-\Gamma} \quad (5)$$

修正项  $F_p(\bar{v})$  和  $F_e(\bar{v})$  仅是关于相对比容  $\bar{v}$  与 CJ 爆轰下相对比容  $\bar{v}_{CJ}$  之差的多项式

$$F_p(\bar{v}) = A_0(\bar{v}_{CJ} - \bar{v})^2 + B_0(\bar{v}_{CJ} - \bar{v})^3 \quad (6)$$

$$F_e(\bar{v}) = \left( A_0 - \frac{3B_0}{R_1} \right) \left\{ \frac{2}{R_1^2} [1 - e^{-R_1(\bar{v}_{CJ} - \bar{v})}] - \frac{2}{R_1} (\bar{v}_{CJ} - \bar{v}) + (\bar{v}_{CJ} - \bar{v})^2 \right\} + B_0(\bar{v}_{CJ} - \bar{v})^3 \quad (7)$$

修正项只应用在高于 CJ 压力的压力范围内,实际上,P. K. Tang 的 JWL 状态方程仅比标准状态方程多引进 2 个新的可调参数。

## 3 DEFEL 程序与判断强爆轰的条件

DEFEL 程序<sup>[10]</sup> 是一个二维动力有限元程序,采用三角形单元,可用来模拟二维流体弹塑性问题。该程序是在 EPIC-2<sup>[4]</sup> 的基础上发展来的,用来计算炸药-金属相互作用及高速撞击方面的程序终点弹道问题,取得了很大成功。

对 DEFEL 程序中用标准 JWL 状态方程进行炸药计算的部分,用 P. K. Tang 的 JWL 状态方程进行改造。但计算程序中,还需对每个单元是否满足强爆轰条件进行判断。

单元计算中,式(6)~(7)中 2 个修正项的值,仅在  $\bar{v}_{CJ} - \bar{v} \geq 0$  时有效,也就是说强爆轰的条件为  $\bar{v}_{CJ} - \bar{v}$  是否大于 0。然而这个判断条件是不完全的,因为在完全爆轰前,每个单元中既有产物也存在炸药,当爆轰波扫过的单元部分很少时, $\bar{v}$  仍然可能大于  $\bar{v}_{CJ}$ ,因此还需要借助产物在单元中所占的比例份额  $f$ ,形成判断强爆轰的条件

$$\bar{v}_{CJ} - \bar{v}f > 0 \quad (8)$$

式中: $f$  的值与起爆时间及爆速有关,计算中爆轰波速度为恒定值。

### 4 算例与结果

以 7 个强爆轰实验数据<sup>[11]</sup>为验证程序算例,以不同厚度  $d$  和速度  $v_0$  的飞片撞击厚为 5 mm、密度为  $1.85 \text{ g/cm}^3$  的 PBX-9501 炸药,进行一维强爆轰实验。计算模型如图 1 所示。

采用与 P. K. Tang 的 JWL 方程相同的状态参数。在爆轰波传播到炸药与二级飞片界面后反射前,实验测得的压力、粒子速度与数值模拟结果的比较如表 1 所示。表中  $d$  为一级飞片厚度的实验数据,  $d_c$  为本程序建立的模型数据;  $p$  为实验测得的压力,  $p_c$  为压力的数值计算结果;  $u$  为实验测得的粒子速度,  $u_c$  为粒子速度的数值计算结果;  $u_f$  为在计算时间为  $3 \mu\text{s}$  时的二级飞片速度;  $\epsilon_p$  为压力的相对误差。各算例的压力、粒子速度和二级飞片速度如图 2~8 所示。

表 1 PBX-9501 强爆轰实验数据<sup>[11]</sup>与计算结果的比较

Table 1 Comparison of strong detonation parameters between experiment<sup>[11]</sup> and simulation for PBX-9501

| 编号     | $d/\text{mm}$ | $d_c/\text{mm}$ | $v_0/(\text{km/s})$ | $D/(\text{km/s})$ | $p/\text{GPa}$ | $p_c/\text{GPa}$ | $u/(\text{km/s})$ | $u_c/(\text{km/s})$ | $u_f/(\text{km/s})$ | $\epsilon_p/\%$ |
|--------|---------------|-----------------|---------------------|-------------------|----------------|------------------|-------------------|---------------------|---------------------|-----------------|
| 3R0014 | 1.215         | 1.20            | $3.69 \pm 0.12$     | 8.977             | 45.1           | 45.3             | 2.736             | 2.757               | 5.845               | 0.4             |
| 3R0016 | 0.873         | 0.87            | $4.29 \pm 0.06$     | 9.250             | 54.1           | 54.6             | 3.187             | 3.209               | 5.919               | 0.9             |
| 8C4819 | 0.875         | 0.87            | $4.69 \pm 0.03$     | 9.470             | 60.6           | 61.3             | 3.486             | 3.507               | 6.246               | 1.1             |
| 8C4798 | 1.506         | 1.50            | $4.85 \pm 0.12$     | 9.564             | 63.3           | 63.9             | 3.605             | 3.623               | 7.491               | 0.9             |
| 3R0021 | 1.190         | 1.20            | $5.49 \pm 0.05$     | 9.967             | 74.6           | 75.7             | 4.079             | 4.100               | 7.599               | 1.4             |
| 8C4808 | 0.873         | 0.87            | $5.55 \pm 0.10$     | 10.007            | 75.7           | 76.9             | 4.122             | 4.143               | 6.966               | 1.5             |
| 8C4799 | 0.864         | 0.87            | $6.34 \pm 0.15$     | 10.547            | 91.1           | 92.6             | 4.703             | 4.723               | 7.650               | 1.6             |

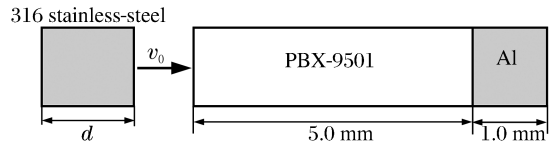


图 1 强爆轰驱动装置的计算模型

Fig. 1 Schematic of a calculation model for strong detonation driving

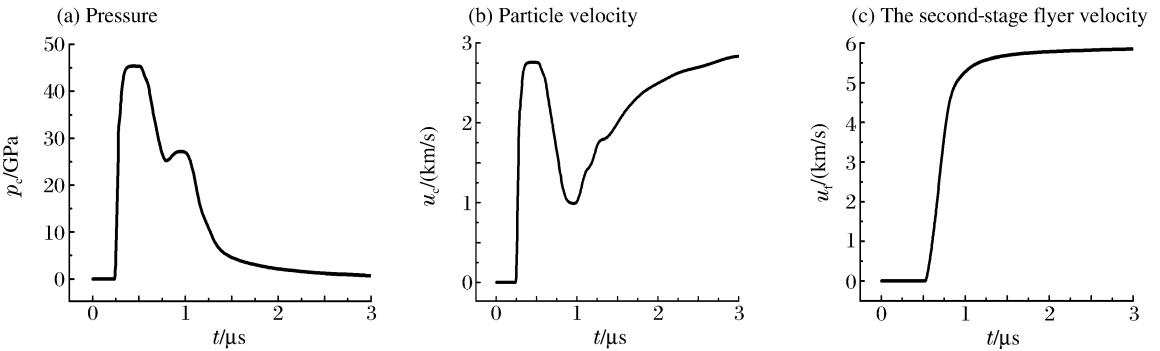


图 2 3R0014 计算结果

Fig. 2 Simulation of 3R0014

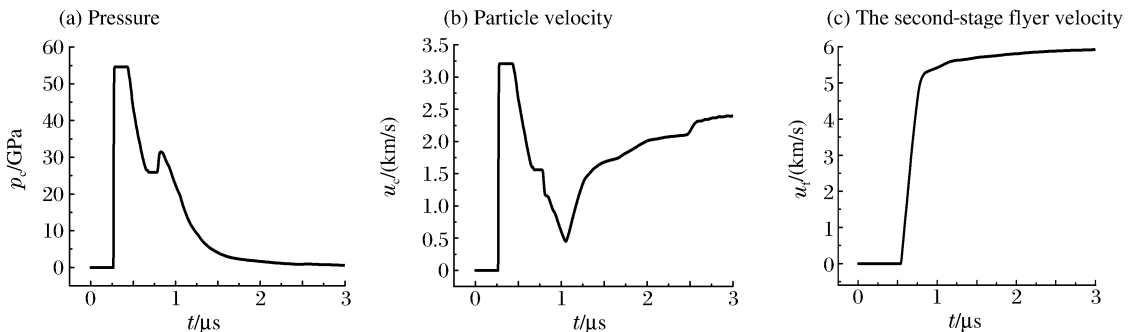


图 3 3R0016 计算结果

Fig. 3 Simulation of 3R0016

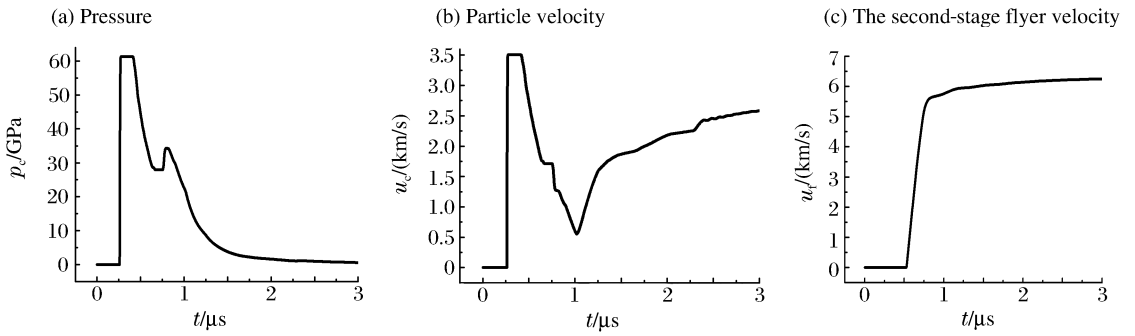


图 4 8C4819 计算结果

Fig. 4 Simulation of 8C4819

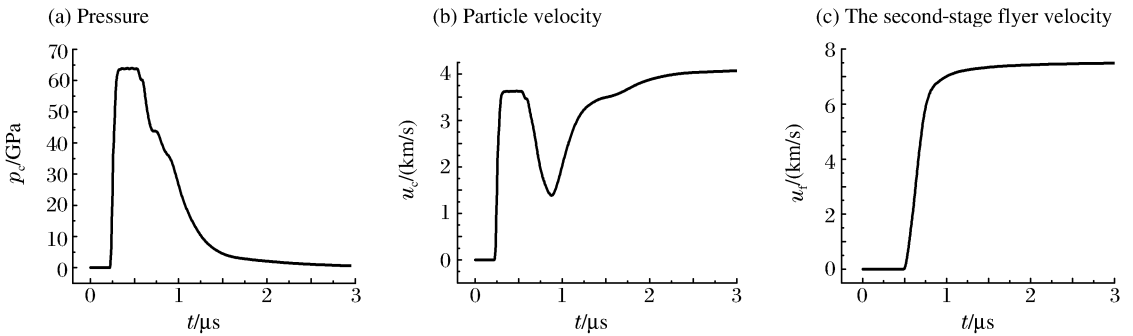


图 5 8C4798 计算结果

Fig. 5 Simulation of 8C4798

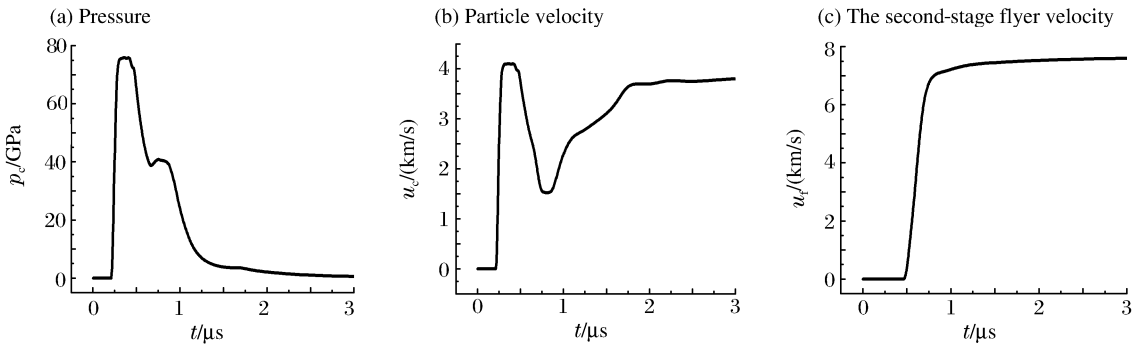


图 6 3R0021 计算结果

Fig. 6 Simulation of 3R0021

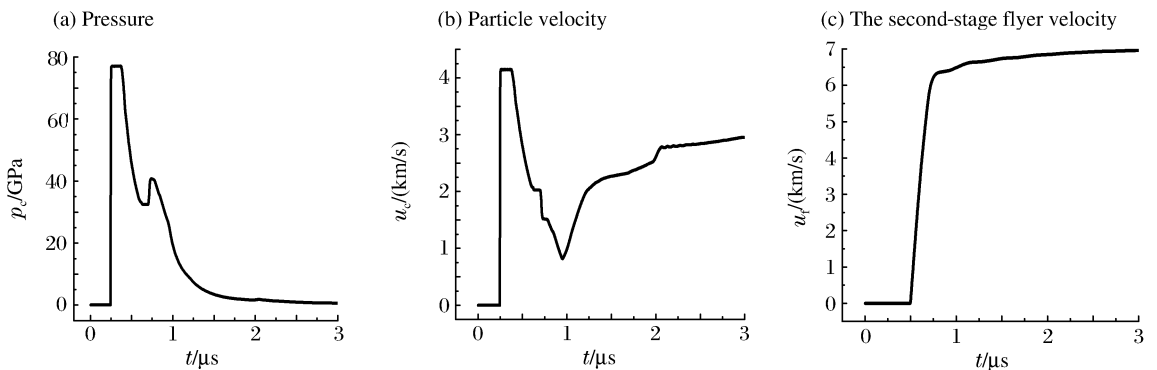


图 7 8C4808 计算结果

Fig. 7 Simulation of 8C4808

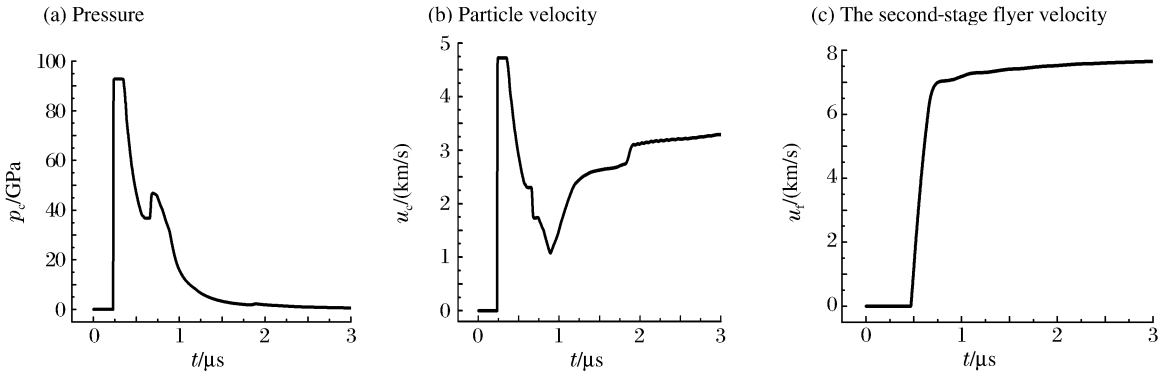


图 8 8C4799 计算结果

Fig. 8 Simulation of 8C4799

### 5 结果分析

将一级飞片厚度的模型尺寸均为 0.87 mm 时,飞片以不同的速度撞击炸药后,产物压力的实验结果和模拟结果作了对比,如图 9 所示。图中同时还给出了用标准 JWL 状态方程计算的产物压力。从图中可以看出,用标准 JWL 状态方程计算的压力与实验结果相差较大;而 P. K. Tang 的 JWL 产物状态方程能够很好地描述超压爆轰状态。这个结论也可以从表 1 数值计算结果与实验数据的比较中得到。另外,从最大压力相对误差为 1.6%,而最小相对误差仅为 0.4%来看,数值模拟是较成功的。当一级飞片厚度相同时,PBX-9501 强爆轰产物的压力随撞击速度呈近似线性变化,与文献[11]中的结论一致。

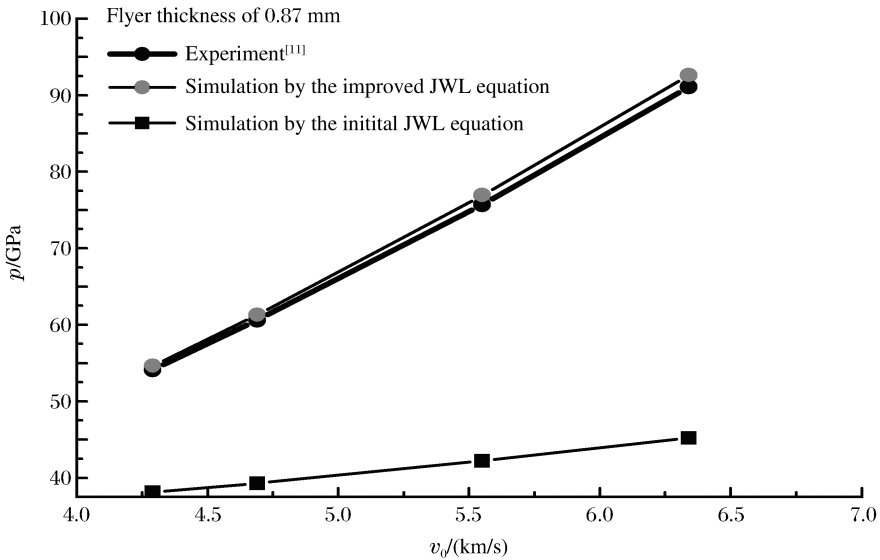


图 9 在厚度相同、速度不同的飞片撞击下 PBX-9501 强爆轰产物压力

Fig. 9 Pressure of strong detonation products for PBX-9501 impacted by the flyers with different velocities

### 参考文献:

[1] Kineke J H, West C E. Shocked states of four overdriven explosives[C]//Proceedings of the 5th International Symposium on Detonation. Pasadena, CA: Office of Naval Research, 1970:533-543.

[2] Green L, Lee E, Mitchell A, et al. Equations of state of PBX-9404, LX-07, RX-26-AF detonation products at pressure above detonation pressure[R]. UCRL-89664, 1983.

[3] Tang P K. A study of the role of homogeneous process in heterogeneous high explosives[R]. LA-UR-93-1557, 1993.

- [4] Альтшуер Л В, Пересжатые детонационные волны в конденсированных В[J]. ФГВ, 1974(16):728.
- [5] 邓全农. 过加载下固体炸药的实验研究和爆轰产物的高压状态方程[D]. 绵阳:中国工程物理研究院, 1989.
- [6] Van Thiel M, Lee E L, Cochran S. Effects of overdriven shock states on the equation of state of 9404 explosive[J]. Journal of Applied Physics, 1983, 54(11):6760-6763.
- [7] Lee E L, Van Thiel M, Green L G, et al. Detonation products EOS: The region above Chapman Jouguet pressure [R]. UCRL-88983, 1983.
- [8] Tang P K. A study of the overdriven behaviors of PBX-9501 and PBX-9502[R]. LA-UR-98-3365, 1998.
- [9] 潘昊, 胡晓棉. 钝感炸药的超压爆轰与冲击起爆过程数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(2):174-178.  
PAN Hao, HU Xiao-mian. Numerical simulation for overdriven and shocking-detonation transition of insensitive high explosives[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(2):174-178.
- [10] Dyna East Corporation. DEFEL Users Manual[Z]. Dyna East Corporation Technical Report 85-02, 1988.
- [11] Fritz J N, Hixson R S, Shaw M S, et al. Overdriven-detonation and sound-speed measurements in PBX-9501 and the thermodynamic CJ pressure[J]. Journal of Applied Physics, 1997, 80:6129-6149.
- [12] Lee E L, Horning H C, Kury J W. Adiabatic expansion of high explosive detonation products[R]. University of California Report, UCRL-50422, 1968.
- [13] Wilkins M L, Squier B, Halperin B. The equation of state of PBX-9404 and LXO4-O1[R]. Lawrence Radiation-Laboratory (Livermore) Reptort. UCRL-7797, 1964.

## Simulation of overdriven shock states based on equation of state of PBX-9501 explosive

YAO Yang<sup>\*</sup>, TAN Duo-wang, WEN Shang-gang

(National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics,  
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

**Abstract:** A 2-D finite element code was adopted to compute several one-dimensional overdriven shock states of flyer plates impacting on PBX-9501 explosive with the JWLTang equation of state. And the velocities of the flyer plates driven by the explosive were presented. The results of numerical simulation agree well with that of the experiment by Fritz J N, et al. The new equation of state with correction and the adapted code are verified.

**Key words:** mechanics of explosion; overdriven detonation; equation of state for product; explosive

\* Corresponding author: YAO Yang

E-mail address: duoer-97@sina.com

(责任编辑 张凌云)