DOI: 10.11883/1001-1455(2015)02-0197-06

强爆轰驱动飞片的数值模拟研究*

袁 帅,文尚刚,李 平,董玉斌
(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重点实验室,四川 绵阳 621999)

摘要: 在一维流体动力学程序中,使用了 JWLT 状态方程,对强爆轰驱动飞片的实验模型进行了数值模拟研究,得到了炸药爆轰产物的压力和密度分布,验证了强爆轰的存在,同时得到了二级飞片自由面的速度曲线,与实验测量结果符合较好,为解释实验结果和设计新的强爆轰实验提供了计算依据,同时验证了程序的正确性。

关键词: 爆炸力学;自由面速度;状态方程;强爆轰驱动
中图分类号: O381 **国标学科代码**: 1303510 **文献标志码**: A

在天体物理、地球物理、固体物理、核武器以及惯性约束聚变等研究中,常常需要精确了解极端压力(太帕)条件下物质的动态响应特性和状态方程,而常规的动态加载技术,如化爆、轻气炮等只能够将飞片发射至 8 km/s 以下的速度,在重材料中实现的压力也不过数百万大气压,远不能满足上述研究的要求。近年来,为获得更高的压力,人们发展了一些超高压加载技术,如磁压缩、激光驱动、多级爆轰等。其中,利用成熟的二级轻气炮加载飞片撞击炸药产生强爆轰,从而驱动重金属飞片达到更高速度的方法越来越受到重视。由于实验所需设备简单、费用低,而且在测试精度、数据可信度等方面具有较明显的优势,此项技术成为开展极端高压物理研究的重要手段之一。

强爆轰是指爆轰产物中的压力在 p-v 平面上的位置高于炸药正常爆轰时 CJ 点的状态。高速飞片冲击炸药起爆等方法可以产生强爆轰状态。利用强爆轰驱动飞片获得高压力和高速度飞片的实验研究,逐渐成为超高速发射研究的热点问题。P. K. Tang[1-3] 利用强爆轰方法研究了 HMX 和 TATB 炸药,得到了用标准的 JWL 状态方程计算塑形黏结炸药 HMX 和 TATB 的强爆轰状态与实验差别较大的结论。赵峰等[4]、文尚刚等[5-6] 利用轻气炮(或炸药)发射(或驱动)一级飞片冲击目标炸药驱动二级飞片实验,研究了强爆轰驱动飞片情形,实验结果表明二级飞片的速度可达到 6.0~10.0 km/s。

随着强爆轰实验和理论研究的深入发展,以及数值模拟技术在爆轰领域的广泛应用,要求对强爆轰产物状态的描述更精确。目前,常用爆轰产物的状态方程有 JWL、BKW、HOM 等。但 J. H. Kineke 等[7]、L. Green 等[8] 的研究表明,用于计算 CJ 爆轰产物的状态方程(JWL)不适用描述强爆轰的行为特征,而这种差别对高能炸药尤其明显。Л. В. Альтшулер[9] 提出了爆轰产物高压状态方程,并计算了 PBX-9404 等 4 种固体炸药的强 D-u 曲线和 p-V 曲线,与实验结果符合较好。邓全农等[10] 建立了 DG01A 炸药的爆轰产物方程,利用强爆轰状态方程计算的 DG01A、PBX-9404 炸药强爆轰状态与实验符合较好。M. van Thiel 等[11]、L. Green 等[12] 根据强爆轰实验确定的爆轰产物 Hugoniot 曲线,推导出实验等熵线,将 JWL 状态方程的 Grüneisen 系数作为相对比容的函数。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 在标准 JWL 的基础上,给出了适用于高压状态的爆轰产物的等熵膨胀线方程(JWL),使它能够用来模拟炸药的强爆轰的流体力学过程。用该方程计算的 PBX-9501 和 PBX-9502 炸药的强爆轰 Hugoniot 参数和强爆轰声速与实验结果符合很好。潘昊等[13] 采用 Hybrid 反应率结合 JWLT 状态方程,研究了 LX17、超细 TATB 等钝感炸药的冲击起爆过程,并

* **收稿日期**: 2013-07-12; **修回日期**: 2013-09-26
基金项目: 国防科技工业基础科研项目(A1520070075)
第一作者: 袁 帅(1972—),男,硕士,工程师,yscaep_01@sina.com.cn。

计算了爆轰波对碰现象,获得了较好的结果。姚阳等[14]在 DEFFL 二维流体弹塑性流体力学程序中使用 JWLT 状态方程,研究了飞片高速撞击 PBX-9501 后冲击起爆驱动二级飞片的实验模型,并将计算结果和实验结果进行比较。

已有关于强爆轰的研究,主要针对炸药爆轰产物的动力学行为,对强爆轰驱动飞片的超高速发射研究相对较少,用流体力学程序对强爆轰驱动飞片的数值模拟计算结果,没有达到实验结果和计算结果比较一致的程度。

本文中,利用自编一维平面弹塑性流体动力学程序,使用 JWLT 状态方程描述强爆轰产物的流体力学行为,对强爆轰驱动飞片实验进行了数值模拟,得到二级飞片的自由面粒子速度曲线,与实验结果比较吻合,拟为解读实验结果和设计新的强爆轰实验提供计算依据和参考。

1 计算方法

1.1 一维弹塑性流体力学 Lagrange 方程组

拉格朗日一维轴对称的运动方程、连续方程和能量方程分别为:

$$\dot{u} = -r\partial\sigma_r/\partial m - v(\sigma_r - \sigma_\theta)/r \tag{1}$$

$$v = r\partial r/\partial m \tag{2}$$

$$\dot{E} = -(q+p)\dot{v} + v[\dot{\varepsilon}_1 s_1 + \dot{\varepsilon}_2 s_2] \tag{3}$$

式中:$\dot{r}=u$,为速度,r 为半径,m 为质量,σ_r 径向应力,σ_θ 为环向应力,$v=1/\rho$ 为比容,q 为人为黏性力,p 为状态方程计算的压力,$\varepsilon_i(i=1,2)$为应变张量 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 的分量,ρ 为密度,$s_i(i=1,2)$为应力张量 $\boldsymbol{s}$ 的分量。

1.2 本构关系

本构关系的法向应力、切向(环向)应力、应力偏量和应变率分别为(力的方向,拉正压负):

$$\sigma_r = p + q + s_1 \tag{4}$$

$$\sigma_\theta = p + q + s_2 \tag{5}$$

$$\dot{s}_i = 2\mu[\dot{\varepsilon}_i + \dot{v}/(2v)] \qquad i=1,2 \tag{6}$$

$$\dot{\varepsilon}_1 = -\partial u/\partial r, \qquad \dot{\varepsilon}_2 = -u/r, \qquad \dot{\varepsilon}_3 = 0 \tag{7}$$

式中:p 为由状态方程计算得到的压力,q 为人为黏性,s 为应力偏量,ε 为应变偏量,Y_0 为材料的初始屈服强度,μ 为材料的剪切模量。

1.3 状态方程

对于惰性材料,使用 Grüneisen 形式的状态方程。在压缩状态,状态方程为:

$$p = \gamma(E - E_{\mathrm{H}})/v + c_0^2(v - v_0)/[v_0 - \lambda(v_0 - v)]^2 \tag{8}$$

式中:γ 为 Grüneisen 系数,E 和 E_{H} 分别为比内能和 Hugoniot 状态下的比内能,v 和 v_0 分别为比容和初始时刻的比容,c_0 和 λ 都为 Grüneisen 系数。可根据冲击波关系式 $D=c_0+\lambda u_{\mathrm{p}}+\lambda' u_{\mathrm{p}}^2$,由实验结果拟合得到 c_0 和 λ。

在膨胀状态,状态方程为:

$$p = \gamma[E - C_v(v/v_0 - 1)/(3\beta)]/v \tag{9}$$

式中:β 为线膨胀系数。

对于爆轰产物,使用JWLT 状态方程描述行为特征。P. K. Tang 在对 PBX-9501 和 PBX-9502 炸药的爆轰产物状态方程进行研究时,首先假设爆轰产物的标准 JWL 状态方程在低压部分是可以接受的,而对强爆轰区中的状态进行描述时有所欠缺。为此,他建议增加 Hugoniot 曲线在 CJ 点以上的斜率,更好地匹配强爆轰 Hugoniot 实验数据,同时也增加强爆轰产物的声速。思路类似于可压缩理想气体在高压区的概念,只对 JWL 状态方程中的高压指数项做修正。

经 P. K. Tang 修改后的 JWLT 状态方程为:

$$p=[1+F_p(\bar{v})]Ae^{-R_1\bar{v}}+Be^{-R_2\bar{v}}+C\bar{v}^{-(1+\omega)} \tag{10}$$

$$e=[1+F_e(\bar{v})]Ae^{-R_1\bar{v}}/R_1+Be^{-R_2\bar{v}}/R_2+C\bar{v}^{-\omega}/\omega \tag{11}$$

修正项为当前比容与 CJ 比容之差的简单多项式：

$$F_p(\bar{v})=A_0(\bar{v}_{CJ}-\bar{v})^2+B_0(\bar{v}_{CJ}-\bar{v})^3 \tag{12}$$

$$F_e(\bar{v})=(A_0-3B_0/R_1)\{2[1-e^{-R_1(\bar{v}_{CJ}-\bar{v})}]/R_1^2-2(\bar{v}_{CJ}-\bar{v})/R_1+(\bar{v}_{CJ}-\bar{v})^2\}+B_0(\bar{v}_{CJ}-\bar{v})^3 \tag{13}$$

修正后的等熵线压力和内能的表达式中，只有两个新的参数 A_0 和 B_0。

2　计算模型和参数

二级轻气炮驱动一级飞片，一级飞片经过加速后撞击直径约 16 mm、厚度约 4 mm 的 JO-9159 炸药，使其发生强爆轰，并驱动相应的次级钢飞片（直径约 16 mm、厚度约 0.5 mm）达到更高的速度。为了防止强爆轰波过高压力对二级飞片的冲击破坏，在二级飞片前放置一层厚度约 0.5 mm 的有机玻璃缓冲层。

共进行了 3 发实验，参数见表 1。表中，L_1、L_2、L_3 和 L_4 分别为钢飞片、JO-9159 炸药、有机玻璃缓冲层和次级钢飞片的厚度。

表 1　实验模型参数

Table 1　The parameter of experiment model

No.	L_1/mm	v_0/(km·s^{-1})	L_2/mm	L_3/mm	L_4/mm
1	2.52	4.97	3.99	0.51	0.47
2	2.52	6.09	3.98	0.50	0.48
3	2.53	5.89	4.00	0.50	0.36

计算中，使用弹塑性流体本构模型和 Grüneisen 状态方程描述惰性材料的力学行为，使用 JWLT 状态方程描述炸药爆轰产物的行为。

材料的强度参数和状态方程参数见表 2，JO-9159 炸药的参数分别为：$\rho=1.860$ g/cm^3，$D=8.862$ km/s，$p=37.0$ GPa，$Q=5.267$ kJ/g，$A=934.8$ GPa，$B=12.72$ GPa，$R_1=4.6$，$R_2=1.1$，$\omega=0.37$，$A_0=2.52$ GPa，$B_0=36.48$ GPa。

表 2　材料参数

Table 2　The parameter of material

材料	强度参数			状态方程参数		
	ρ/(g·cm^{-3})	G/GPa	Y/GPa	c_0/(km·s^{-1})	λ	Γ
钢	7.85	83.1	0.60	3.449	2.087	1.69
有机玻璃	1.186	2.32	0.15	2.566	1.624	0.85

钢飞片以一定的初速度撞击 JO-9159 炸药，由于飞片的高速运动，使炸药爆轰产物中压力高于其 CJ 压力，形成强爆轰。实验中，获得了二级飞片的自由面速度曲线。

3　计算结果与实验结果的比较

计算得到实验 3 炸药中不同时刻的压力和密度分布，如图 1～2 所示。由图 1 可知，在 0.2 μs 时刻，部分炸药已经爆轰，且压力高达 84 GPa，远远超过 JO-9159 炸药的 CJ 压力 37 GPa，随着时间的推进，压力最大值 154 GPa 出现在 0.6 μs，之后，随着飞片 PMMA 和 Fe 的运动，炸药中压力随之下降，在

1.0 μs 时刻，炸药爆轰产物中压力仅为 17GPa。计算结果表明，在炸药中形成了很强的强爆轰，驱动重金属飞片达到更高的速度是可能的。

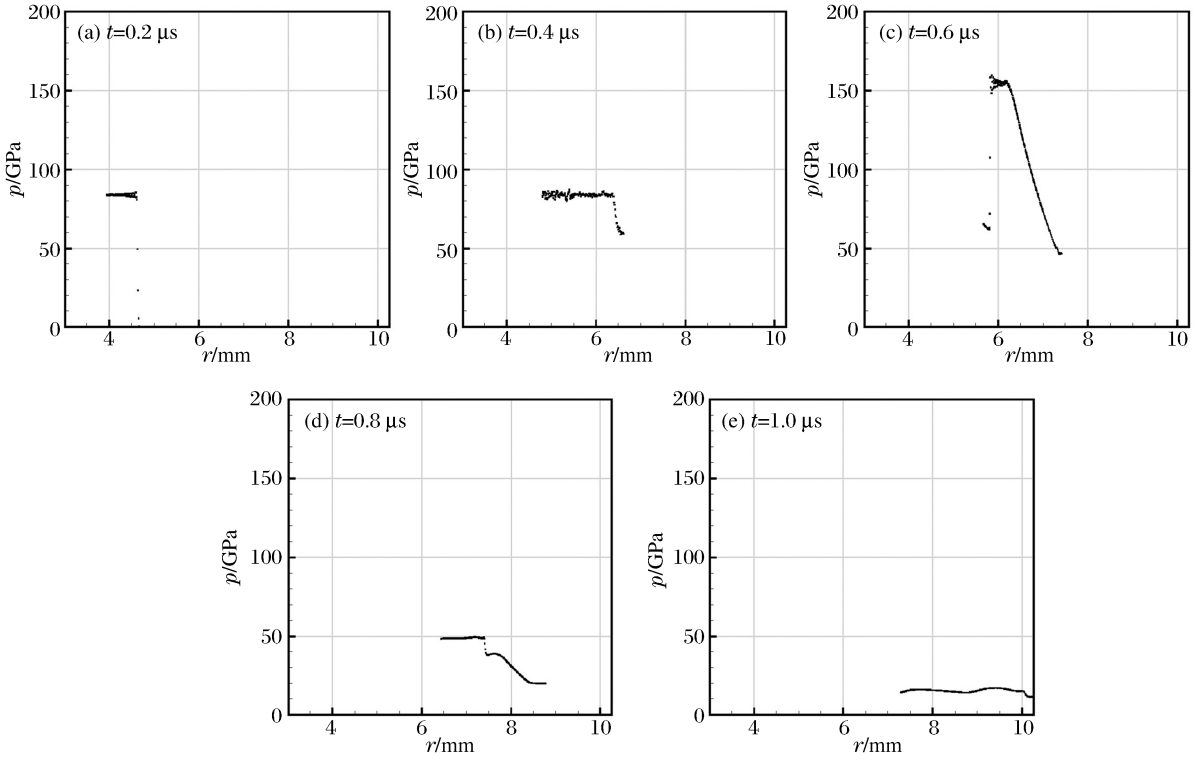


图 1 炸药的压力分布

Fig. 1 Distribution of pressure in explosion JO-9159

计算得出的 3 个实验模型的二级飞片的自由面速度与实验结果的比较，如图 3～5 所示。由图看出，除自由面粒子速度在第一次起跳后，计算结果稍高于实验结果外，计算得到的自由面速度曲线和实验测量结果几乎重合。这表明，用 JWLT 状态方程描述炸药的强爆轰状态是可行的；利用强爆轰驱动重金属飞片达到更高的速度是可行的。

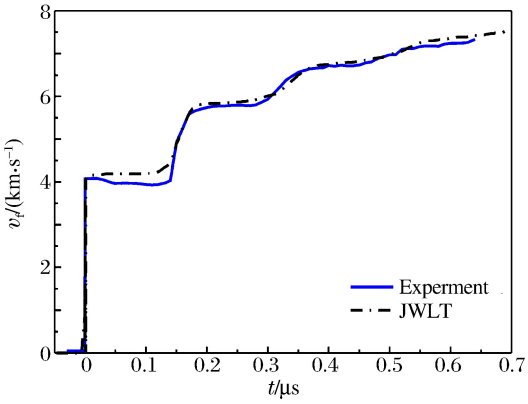


图 3 实验 1 的自由面速度

Fig. 3 Free surface velocity of experiment 1

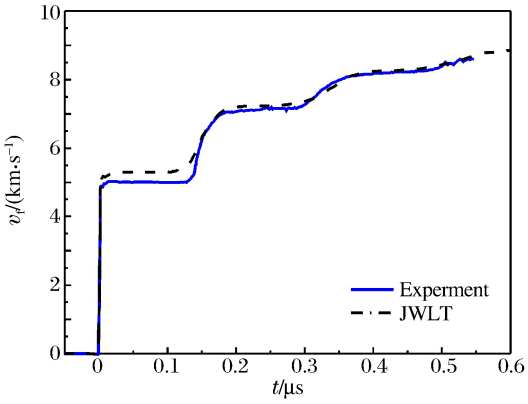
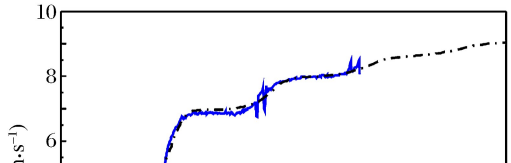


图 4 实验 2 的自由面速度

Fig. 4 Free surface velocity of experiment 2



4 讨 论

利用 JWLT 状态方程描述炸药的超压状态方

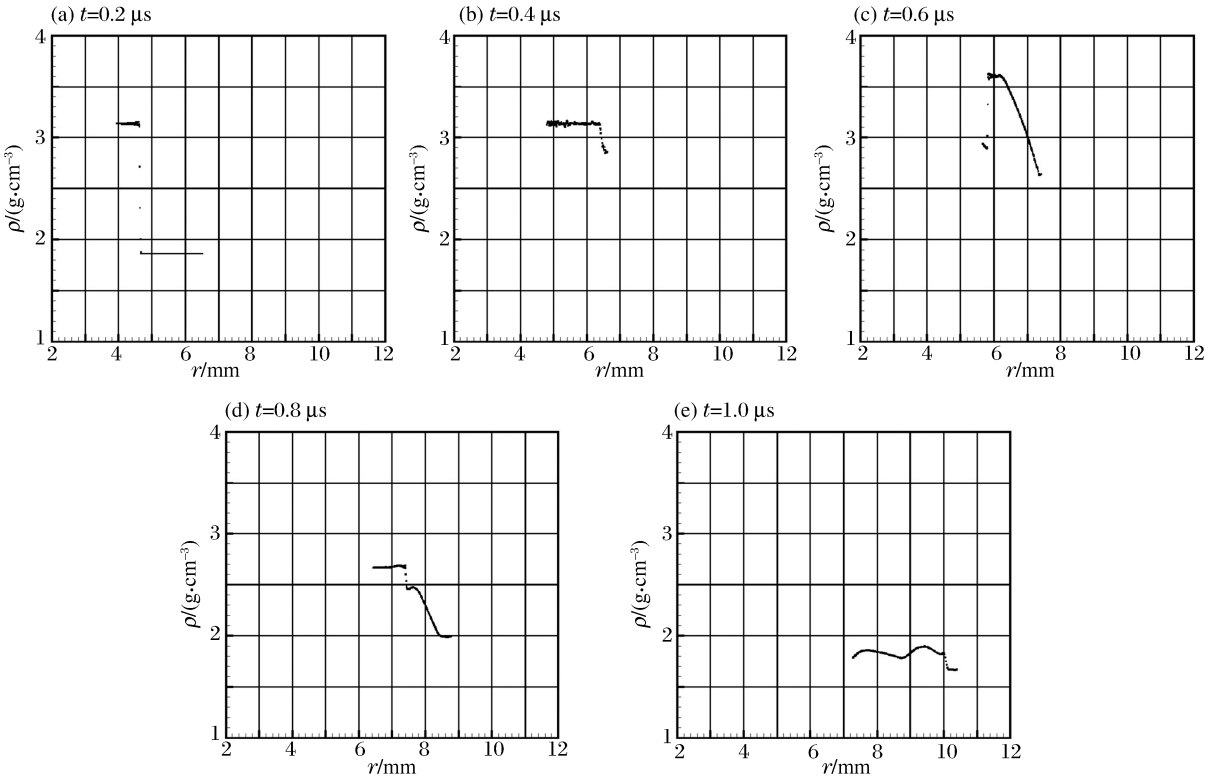


图 2　炸药的密度分布

Fig. 2　Distribution of density in explosion JO-9159

程，使用自编一维流体动力学程序，计算了金属飞片以一定速度撞击炸药产生强爆轰驱动组合飞片实验模型，得到了撞击过程中不同时刻炸药中的压力和密度分布和飞片自由面粒子速度曲线。

计算结果和实验测量结果比较表明，计算结果和实验结果符合较好，表明了自编程序使用 JWLT 状态方程用于计算炸药的强爆轰问题的正确性，可以用该程序用于强爆轰问题的计算和数值模拟，设计新实验。

然而计算中发现，有很多的因素在影响爆轰产物的流体力学行为。如本文中使用的 JWLT 状态方程参数中由实验数据拟合得到的 A_0 和 B_0，是否可以使用其他的拟合方法获得，就是目前正在研究的问题。对于强爆轰，目前还没有公认的、较好的解决方法，还需要进行更多、更细致、更深入的研究。

参考文献：

[1]　Tang P K. A study of the overdriven behaviors of PBX-9501 and PBX-9502[C]// 11th Symposium (International) on Detonation. Colorado, USA: Office of the Naval Research, 1998:1058-1064.

[2]　Tang P K. A study of the role of homogeneous process in heterogeneous high explosive[R]. Los Alamoss National Laboratory, 1993.

[3]　Tang P K. A study of the overdriven behaviors of PBX-9501 and PBX-9502[R]. Los Alamoss National Laboratory, 1998.

[4]　赵峰，孙承纬，文尚刚，等. 炸药强爆轰的研究[J]. 高压物理学报，2000，14(1)：47-53.
Zhao Feng, Sun Cheng-wei, Wen Shang-gang, et al. Researches on strong detonation of high explosives [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2000, 14(1): 47-53.

[5]　文尚刚，邓文荣，赵锋，等. 二级装药强爆轰驱动次级飞片的分析[J]. 高压物理学报，2005，19(4)：343-347.
Wen Shang-gang, Deng Wen-rong, Zhao Feng, et al. Analysis of two explosive/flyer system[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(4): 343-347.

[6]　文尚刚，赵锋，王建，等. 气炮加载下炸药强爆轰驱动技术的初步实验研究[J]. 高压物理学报，2011，25(1)：36-40.

Wen Shang-gang, Zhao Feng, Wang Jian, et al. Primary experimental study on driving technique of strong detonation using gas gun[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011,25(1):36-40.

[7] Kineke J H, West C E. Shocked states of four overdriven explosives[C]// Fifth Symposium (International) on Detonation. Pasadena, CA, 1970:533-543.

[8] Green L, Lee E, Mitchell A, et al. Equation of state of PBX9404, LX07, RX26AF detonation products at pressure above detonation pressure[R]. Los Alamoss National Laboratory, 1983.

[9] АлЬтшулер Л В. Пережатые детонационные волны в кондеироанных В[J]. ФГВ, 1974(16):728.

[10] 邓全农,章冠人,李良忠.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[C]//第五届全国高压学术讨论会缩编文集.1990:64.

[11] van Thiel M, Lee E L, Cochran S. Effects of overdriven shock states on the equation of state of PBX-9404 explosive[J]. Journal of Applied Physics, 1983,54(11):6760-6763.

[12] Green L, Lee E, Mitchell A, et al. The supra-compression of LX07, LX17, PBX9404, and RX26AF and the equation of state of the detonation products[C]// Proc of 8th Symp (Int) on Detonation. 1986:587-595.

[13] 潘昊,胡晓棉.钝感炸药的强爆轰与冲击起爆过程的数值模拟[J].爆炸与冲击,2006,26(2):174-178.
Pan Hao, Hu Xiao-mian. Simulation for overdriven and shocking-detonation transition of insensitive high explosive [J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(2):174-178.

[14] 姚阳,谭多望,文尚刚.PBX-9501 强爆轰产物状态方程的数值模拟[J].爆炸与冲击,2009,29(5):497-502.
Yao Yang, Tan Duo-wang, Wen Shang-gang. Simulation of overdriven shock states based on equation of state of PBX-9501 explosive [J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(5):497-502.

Simulation of free surface particle velocity of flyer under the strong detonation drive

Yuan Shuai, Wen Shang-gang, Li Ping, Dong Yu-bin

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*)

Abstract: The concept, application back ground and generation of strong detonation were briefly introduced. The JWLT equation of state was embeded in one dimensional hydrodynamic program. The experimental model of strong detonation was simulated with the program. The pressure and density distribution of production of explosive were drew, and the existence of strong detonation was shown. The velocity curves of second flyer free surface are in good agreement with the experimental results. This work may afford validation and reference for studying the strong detonation.

Key words: mechanics of explosion; free surface velocity; equation of state; strong detonation

(责任编辑 丁 峰)