

文章编号: 1006-9941(2011)05-0527-05

钝感炸药散心爆轰驱动平板飞片研究

赵 锋, 虞德水, 彭其先, 文尚刚, 李 平

(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: 散心爆轰和滑移爆轰驱动规律研究可以获得钝感炸药的反应区和反应产物状态方程的信息。根据特定结构的大板试验研究 TATB 基钝感炸药和 HMX 基高聚物粘结炸药散心爆轰驱动平板飞片的运动规律, 结合试验数据通过理论分析和数值计算, 研究了爆轰产物的 JWL 状态方程参数。结果表明, 随着测点半径的增加, 飞层的有效药量则有所加大, 表现为测点半径大的位置飞层终速更高; 利用大板试验标定的爆轰产物的 JWL 状态方程参数可以较好地再现大板实验结果, 也能较好地重现圆筒实验结果。因此标定炸药爆轰产物的状态方程时, 对飞片初期运动最好采用激光速度干涉仪 (VISAR) 测试结果, 对飞片中后期的运动可以同时采用 VISAR 和高速扫描结果。

关键词: 爆炸力学; 钝感炸药; 散心爆轰; 状态方程**中图分类号:** TJ55; TJ9; O38**文献标识码:** A**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.05.010

1 引 言

钝感炸药 (IHE) 具有突出的安全性能, 对钝感炸药爆轰性能的研究, 至今仍是国际爆轰学术领域的“热点”之一。特别是钝感炸药爆轰产物状态方程的研究更具有重要的科学意义和应用价值。在核武器初级和特种常规武器战斗部研制与设计以及可靠性评定等方面具有广阔的应用前景。

炸药爆轰产物驱动体的研究是一个早就为人们所重视的课题。20 世纪 60 年代 Wilkins^[1] 用半球形炸药装置进行了爆轰驱动实验。炸药半球半径 150 mm, 其下方的炸药柱高度 150 mm, 从球心起爆, 球面一维散心爆轰波驱动铝或镁球壳向外运动, 测量了铝球壳表面沿径向运动的历程。由于半球爆轰驱动试验不适用于产物压力下降到 0.1 GPa 量级的范围, 研究者提出了另一种爆轰驱动试验——圆筒试验 (cylinder test), 它是研究炸药爆轰性能的有效方法之一。圆筒试验是由 Kury^[2] 等于 1965 年最先提出和使用, 主要用来评定炸药做功能力和确定爆轰产物 JWL 状态方程参数。多年来, 圆筒试验已成为标准的系列试验。

收稿日期: 2010-11-03; 修回日期: 2011-01-27

基金项目: 国家自然科学基金 (批准号: 10772167); 中国工程物理研究院预研基金 (批准号: 2009A0201008) 资助项目

作者简介: 赵锋 (1961 -), 男, 研究员, 从事爆轰物理研究。

e-mail: lfpzf@163.com

最近, 美国利弗莫尔国家实验室的 Clark Souers^[3-4] 等人通过大板试验研究了 LX-14、TATB 及 LX-17 二维爆轰性能, 得到了其爆轰产物不同形式的状态方程。

在国内, 研究者也进行了大量的爆轰驱动方面的研究。例如, 于川^[5-7]、陈朗^[8-9] 等通过 $\Phi 25$ mm 和 $\Phi 50$ mm 两种装药直径的标准圆筒试验研究了多种炸药的爆轰性能, 评定了其做功能力, 标定了炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数。陈朗^[8] 用激光速度干涉仪 (VISAR) 直接测量不同时刻圆筒表面速度, 并与传统的高速摄影测量方法进行比较, 认为两种测试方法的结果一致。刘文翰^[10] 在一维点爆轰的基础上引入了爆轰径向与驱动体飞行方向之间夹角 θ 为参量的半经验的爆轰产物运动方程。在此模型基础上计算驱动体各部分的运动, 最后给出了逼近解析解。其计算与实验偏差小于 5%。庄仕明^[11] 等在圆板实验中用电探针测量了飞板碰靶时间, 用高速相机记录其碰靶波形, 并用二维流体弹塑性编码 THEPL 进行了数值模拟。他们得到了飞板的碰靶波形, 通过计算得到飞板中点位置的速度-时间变化曲线。本工作则采用大板试验, 结合激光干涉测量和数值模拟, 研究了钝感炸药从散心爆轰到滑移爆轰驱动平板飞片的速度历程, 有助于校核爆轰驱动的数值模拟计算程序及其参数。

2 实验设计

实验装置如图 1 所示, 用雷管、柔爆索和半球传爆

药组成的传爆序列在中心轴对称位置引爆 $\Phi 200 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 的 TATB 基主装药, 驱动 $\Phi 196 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的黄铜飞片。显然, 在轴对称中心部位, 飞层接近于受散心爆轰波驱动, 而在径向较远处, 飞层更接近于受滑移爆轰波驱动。为了更精确地测量飞片在不同的爆轰驱动作用角度下的运动规律, 实验中采用 5 路多点激光速度干涉仪 (VISAR) 分别测量飞片不同点的自由面速度, 其初始位置 R 分别为 0, 10, 20, 40, 80 mm。对 HMX 基高聚物粘结炸药进行相同的实验, 两种炸药进行比较。

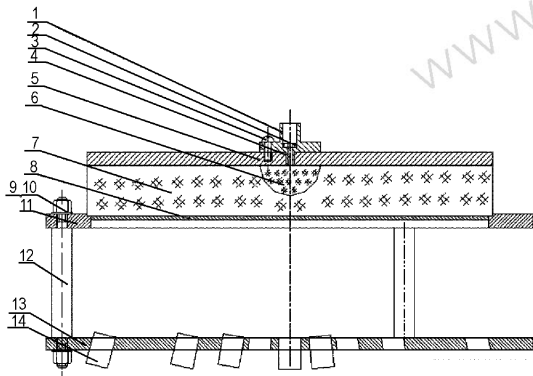


图 1 实验装置示意图

1—雷管套, 2—定位片, 3—螺钉, 4—柔爆索, 5—钢盖板, 6—半球传爆药, 7—主炸药, 8—飞片, 9、10—垫圈、螺母, 11—托盘, 12—支柱, 13—探头支架, 14—VISAR 探头

Fig. 1 Experimental set-up for flyers velocities measurement
1—detonator, 2—sheet for fix, 3—bolt, 4—MDC, 5—steel cover, 6—booster, 7—main charge, 8—flyer, 9, 10—washer, nut, 11—shelf, 12—support, 13—shelf for probe, 14—VISAR probe

3 试验测试

在本实验模型中, 对初始位置 R 为 0 mm 的测试点, 它处于中心轴对称位置, 只有 Y 向速度, 实验中, VISAR 的测试角度 β (探头激光束与飞片静止表面法向的夹角) 为 0° , 即沿 Y 向。而对飞片其他的拉格朗日坐标点上的质点, 在点爆发散爆轰驱动下, 既有 Y 向速度, 又有横向速度, 且其飞行方向角也是随时间变化的。由于 VISAR 的可测试角度有限, 因此我们将 VISAR 探头以一定的角度 β 入射在飞片表面, 以保证 VISAR 测得有效信号和增加测试时间。

应用解析分析方法^[10] 对本实验模型进行分析计算, 就可给出点爆发散爆轰驱动情形下, 飞片质点的飞行方向和速度 $u(t)$ 随时间的变化规律。同时采用 DYNA2D 进行初步的数值计算。为了使不同测试点在

运动过程中尽量沿 VISAR 测试线运动, 计算表明对飞片初始位置 R 分别为 0, 10, 20, 40, 80 mm 的不同测试点, VISAR 入射角 β 分别取 $0^\circ, 4.5^\circ, 7.5^\circ, 10^\circ, 11.5^\circ$ 时可以近似获得该测量点的粒子速度信号。

4 试验结果

以飞片中心 ($R=0 \text{ mm}$) 处微元开始运动为时间零点, 测量结果如图 2 所示。由图 2 可看出, 对 $R=0 \text{ mm}$ 、 $R=10 \text{ mm}$ 一直到 $R=80 \text{ mm}$ 五处的测试点曲线 (图中从左至右), 第一跳速度依次降低, 其主要因素是爆轰波从散心爆轰过渡到滑移爆轰的过程中, 随着入射角度的增加, 爆轰波的反射逐渐减弱, 入射到飞片的压力依次降低。但 R 更大位置, 如 R 为 80 mm 处的测试点, 飞片加速过程更长, 终速更高, 这是由于从起爆点到该测试点炸药的有效药量增加的缘故。采用该实验装置对 HMX 基高聚物粘结炸药作了相应的实验测量。

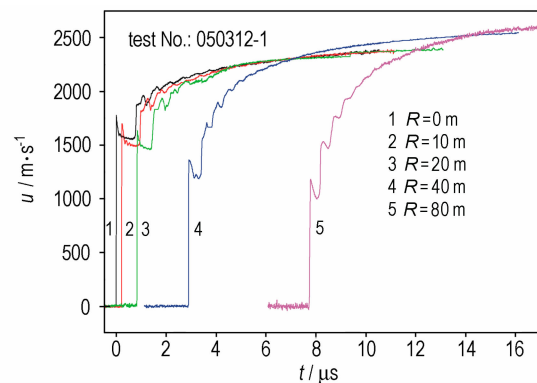


图 2 TATB 基炸药的速度-时间曲线

Fig. 2 Flyer velocity of TATB based explosive at different radius

5 爆轰产物状态方程研究

为了进一步研究产物状态方程, 开展了数值模拟计算。基本计算模型及网格如图 3 所示。我们以计算模型加实验号标识对该实验号的模型进行计算。

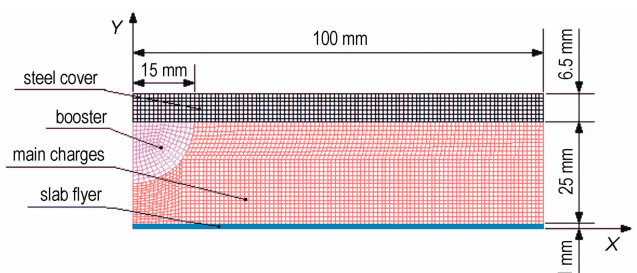


图 3 计算模型

Fig. 3 Numerical simulation model

图 3 中,钢盖板、主装药和飞片半径为 100 mm,钢盖板厚 6.5 mm,主装药厚 25 mm,飞片厚 1 mm,半球传爆药的半径为 15 mm。由于对称性,取实验模型的二分之一即可。在无钢盖板的计算模型中,炸药上表面、飞片下表面和炸药、飞片的侧面均取自由边界条件;在有钢盖板的计算模型中,钢盖板上表面、飞片下表面和钢盖板、炸药以及飞片的侧面均取自由边界条件。

计算中半球传爆药采用高能炸药燃烧 (high explosive burn) 模型和 JWL 状态方程,主炸药采用流体模型和点火增长三项式反应速率模型,依次表示点火、燃烧和快反应。

$$\frac{d\lambda}{dt} = I(1-\lambda)^b \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 - \alpha \right)^x + G_1(1-\lambda)^c \lambda^d p^y + G_2(1-\lambda)^e \lambda^g p^z \quad (1)$$

式中, $I, G_1, G_2, \alpha, b, c, d, e, g, x, y$ 和 z 是 12 个可调系数。对于 TATB 基钝感炸药和 HMX 基高聚物粘结炸药,近似采用国外 LX-17 和 PBX-9404 炸药数据^[12]。未反应炸药和爆轰产物都采用 JWL 状态方程,黄铜飞片和钢盖板采用各向同性弹塑性流体动力学模型和 Grüneisen 状态方程。主要的材料参数见表 1。

对主炸药 TATB 基钝感炸药和 HMX 基高聚物粘结炸药爆轰产物的 JWL 状态方程参数进行了研究。我们首先依据试验测量结果对 JWL 参数进行标定,获得的 JWL 状态方程参数见表 2, TATB 基钝感炸药的计算结果如图 4。可以看出应用这套参数计算大板实验飞片的运动过程,计算结果与实验结果符合得较好。

表 1 材料参数

Table 1 Mechanical parameters of materials

materials	ρ /g · cm ⁻³	Yong's modulus E/GPa	shear modulus G/GPa	yield limit σ_0 /MPa	Grüneisen coefficient
H62	8.45	96	37.4	112	2.04
45# steel	7.85	165.5	79	340	1.69

表 2 爆轰产物 JWL 状态方程参数

Table 2 JWL EOS parameters of detonation product

explosive	C-J parameters			EOS parameters			
	ρ /g · cm ⁻³	D /km · s ⁻¹	A (100 GPa)	B (100 GPa)	R_1	R_2	ω
HMX based	1.850	8.74	9.533	0.2614	5.30	1.24	0.48
TATB based	1.895	7.71	4.914	0.0832	4.30	1.22	0.47

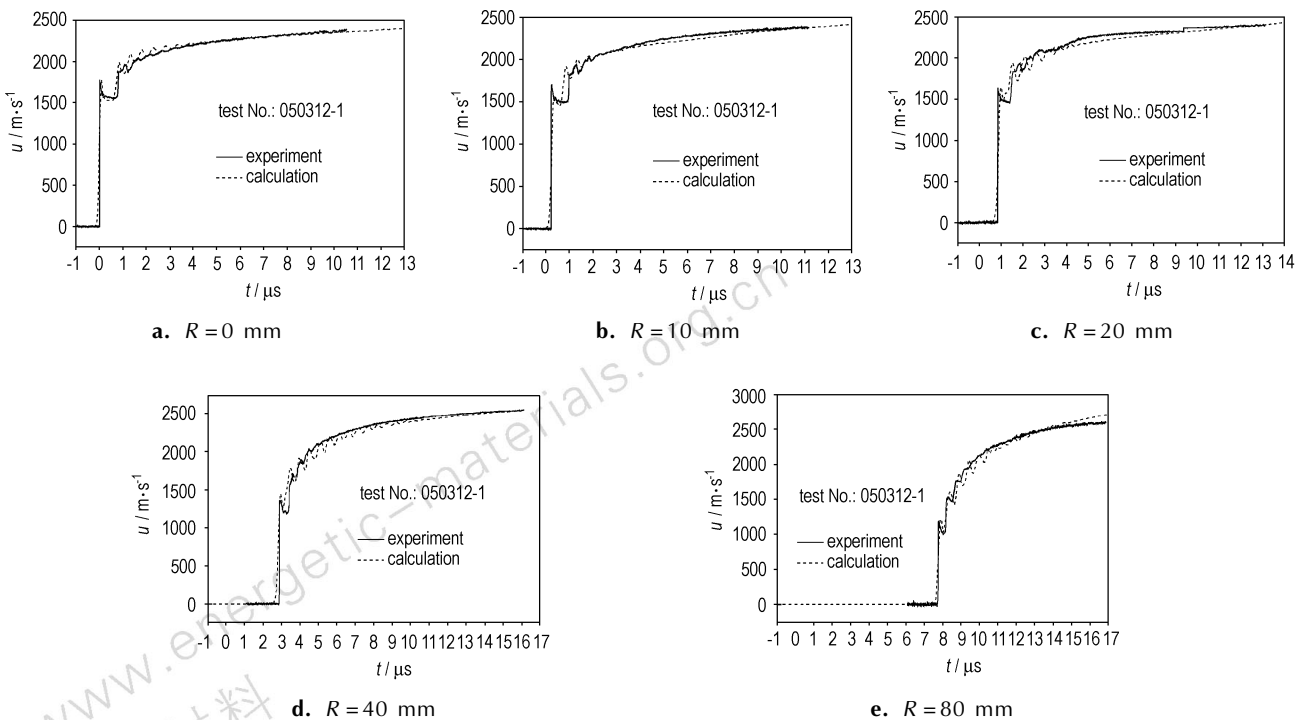


图 4 TATB 基钝感炸药飞片速度实验值与计算值比较

Fig. 4 Comparison of measured and calculated flyer velocities for TATB based explosive

随后,又采用文献[13,6]给出的由圆筒实验标定的 HMX 基高聚物粘结炸药参数对实验测量结果进行计算,结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,对各测试点,在飞片运动初期,应用由圆筒实验标定的爆轰产物 JWL 状态方程参数计算得到的飞片速度比实验值偏高;在飞片运动后期,其计算结果比实验值偏低。对 TATB 基钝感炸药实验,其计算结果存在相同的问题,这里不再列出。其可能的因素除了 JWL 状态方程 5 个参数,不能唯一确定其解外,更重要的是标准圆筒实验采用高速扫描测试系统记录圆筒膨胀过程,由于记录系统本身的时间和空间分辨率有限,圆筒膨胀运动初期,管壁运动速度较低,在照相底片上运动起始点难以判定,其结果的精度不高。在标定炸药爆轰产物状态方程时,主要采用的是圆筒膨胀运动中后期的结果。

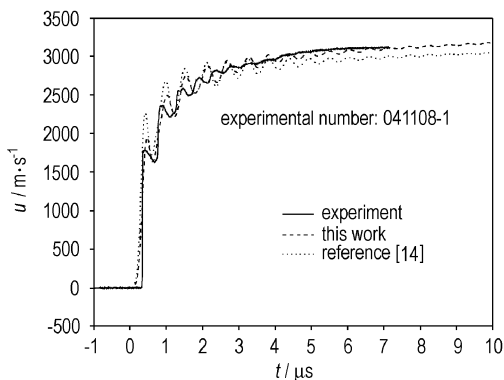


图 5 HMX 基高聚物粘结炸药飞片速度实验值与计算值比较
Fig. 5 Comparison of measured and calculated flyer velocities for HMX based explosive

为了考核本文标定的两种炸药爆轰产物的 JWL 状态方程参数是否能较好地再现圆筒实验结果,我们分别采用本文的参数和由圆筒实验标定的参数对 $\Phi 25$ mm 圆筒实验进行计算。HMX 基高聚物粘结炸药和 TATB 基钝感炸药两种炸药圆筒实验圆筒膨胀过程数值模拟计算结果与实验结果比较,见图 6。其中 HMX 基高聚物粘结炸药的实验结果取自文献[14],TATB 基钝感炸药的实验结果取自文献[6]。

从图 6 可看出,应用本实验标定的 TATB 基钝感炸药和 HMX 基高聚物粘结炸药爆轰产物的 JWL 状态方程参数对 $\Phi 25$ mm 标准圆筒实验进行计算,其计算结果与实验结果符合得较好。说明本实验标定的参数不仅能较好地再现大板实验结果,也能较好地重现圆筒实验结果。

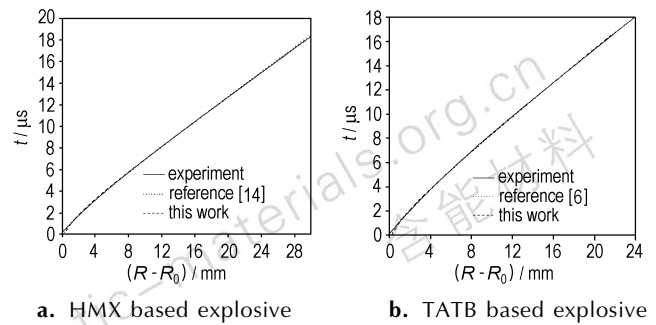


图 6 $\Phi 25$ mm 圆筒实验圆筒膨胀过程计算与实验结果比较
Fig. 6 Comparison of measured and calculated shell displacement for HMX based explosive and TATB based explosive

6 讨论和结论

研究了 TATB 基钝感炸药和 HMX 基高聚物粘结炸药在点爆发散爆轰驱动下的爆轰波驱动飞片运动规律。随着测点半径的增加,爆轰波与飞层表面的夹角变大,进入飞层的冲击波变弱,因此,出飞层表面的冲击波幅度逐步下降;但驱动飞层的有效药量则有所加大,表现为测点半径大的位置飞层终速更高。

利用大板试验标定的爆轰产物的 JWL 状态方程参数可以较好地再现大板实验结果,也能较好地重现圆筒实验结果。

标准的圆筒试验方法采用光学扫描方法测量圆筒外壁的运动历程,在圆筒运动初期存在观测精度不高的问题。与圆筒高速扫描测试技术相比,VISAR 测试更能准确地记录飞片初期的运动情况,因此标定炸药爆轰产物的状态方程时,对飞片初期运动最好采用 VISAR 测试结果,对飞片中后期的运动可以同时采用 VISAR 和高速扫描结果。

致谢:本文的工作还得到了方青、何智、孙永强和刘俊等的帮助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Wilkins M L. The equation of state of PBX-9404 and LXO4-01. Lawrence Radiation Laboratory, University of California, Livermore, UCRL-7797[R]. 1964.
- [2] Kury J W, Hornig H C, Lee E L, et al. Metal acceleration by chemical explosives[C]//4th Symp on Detonation. White Oak, Maryland, USA. 1965: 3-14.
- [3] Laurence E Fried, Michael J Murphy, P Clark Souers, et al. Detonation modeling with an in-line thermochemical equation of state [C]//Proc. of 11th Symp(Int) on Detonation. Snowmass, Colorado. 1998: 889-896.
- [4] Vitello P, P Clark Souers. Stability affects of artificial viscosity in detonation modeling[C]//Proc. of 12th Symp(Int) on Detonation. San Diego, California. 2002: 649-656.

- [5] 于川,刘文翰,李良忠,等. RHT-902 和 Octol 炸药爆轰产物 JWL 状态方程研究[J]. 爆炸与冲击,1993,13(2): 172-177.
YU Chuan, LIU Wen-han, LI Liang-zhong, et al. Detonation product of JWL EOS for RHT-902 and octol explosives[J]. *Chinese Journal of Explosion and Shock Shaves*,1993,13(2): 172-177.
- [6] 于川,刘文翰,李良忠,等. 钝感炸药圆筒试验与爆轰产物 JWL 状态方程研究[J]. 高压物理学报,1997,11(3): 227-233.
YU Chuan, LIU Wen-han, LI Liang-zhong, et al. Cylinder test and detonation product of JWL EOS for insensitive high explosives [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*,1997,11(3): 227-233.
- [7] 于川,李良忠,黄毅民,等. 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, et al. Detonation product of JWL EOS for aluminized explosives[J]. *Chinese Journal of Explosion and Shock Shaves*,1999,19(3): 274-279.
- [8] 陈朗,李泽仁. 激光速度干涉仪测量法在炸药圆筒试验中的应用[J]. 爆炸与冲击,2001,21(3): 229-232.
CHEN Lang, LI Ze-ren. Application of laser interference technique for cylinder test [J]. *Chinese Journal of Explosion and Shock Shaves*,2001,21(3): 229-232.
- [9] 陈朗,冯长根,黄毅民. 含铝炸药圆筒试验及爆轰产物 JWL 状态方程研究[J]. 火炸药学报,2001(3): 13-15.
CHEN Lang, FENG Chang-gen, HUANG Yi-min, et al. Cylinder test and detonation product of JWL EOS for aluminized explosives [J]. *Chinese Journal of Powder and Explosive*,2001(3): 13-15.
- [10] 刘文翰. 轴对称爆轰驱动物体的逼近解析解[J]. 科技学报(中物院院刊),1985: 24-44.
LIU Wen-han. Analysis solution of detonation driven at axis symmetry system [J]. *CAEP Journal of Science and Technology*, 1985: 24-44.
- [11] 庄仕明,刘文翰,孙承纬. 点起爆圆板装药驱动飞板实验的二维数值模拟[J]. 爆炸与冲击,1992(4): 289-296.
ZHUANG Shi-ming, LIU Wen-han, SUN Cheng-wei. Two dimensional simulation of flyer driven by cycle plate charge with point initiation [J]. *Chinese Journal of Explosion and Shock Shaves*,1992(4): 289-296.
- [12] Tarver C M, Hallquist J O, Erickson L M, et al. Modeling short pulse duration shock initiation of solid explosives[C]// Proc. of 8th Symp (Int) on Detonation. Albuquerque, New Mexico. 1985: 951-961.
- [13] 孙承纬,卫玉章,周之奎. 应用爆轰物理[M]. 北京: 国防工业出版社,2000: 286-296.
SUN Cheng-wei, WEI Yu-zhang, ZHOU Zhi-kui. Application of Detonation Physics [M]. Beijing: National Defense Industrial Press,2000: 286-296.
- [14] 董海山,周芬芬. 高能炸药及相关物性能[M]. 北京: 科学出版社,1989: 301-305.
DONG Hai-shan, ZHOU Fen-fen. Properties of High Explosives and Related Materials [M]. Beijing: Science Press,1989: 301-305.

Research on Flyer Acceleration of Divergent Detonation of Insensitive Explosive

ZHAO Feng, YU De-shui, PENG Qi-xian, WEN Shang-gang, LI Ping

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

Abstract: It is helpful for understanding reaction zone and equation of state (EOS) of reactant to study divergent detonation and grazing detonation driving abilities. TATB based explosive and HMX based explosive were investigated with bigplate experiment and numerical simulation. Results show that for the larger radius of velocity interferometer system for any reflector (VISAR) probe, the higher final flyer velocity, implying more effective charge. Obtained JWL (Jones-Wilkins-Lee) parameters can reproduce the cylinder test results quite well. It can be concluded that VISAR method is effective for initial acceleration moment, and for the later movement period, both VISAR and smear photograph technique data can be used for the determination of detonation product EOS at cylinder test.

Key words: explosion mechanics; insensitive explosive; divergent detonation; equation of state (EOS)

CLC number: TJ55; TJ9; O38

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.05.010