

文章编号: 1001-1455(2012)03-0328-05

HNS-IV 炸药的点火增长模型*

陈清畴¹, 蒋小华¹, 李 敏¹, 卢校军¹, 彭其先²

(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物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 进行直径 $\varnothing 10$ mm 的圆筒实验, 根据冲击 Hugoniot 关系, 拟合了 HNS-IV 炸药的未反应时的 JWL 状态方程, 并通过数值模拟确定了 HNS-IV 炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数; 测量炸药/窗口界面粒子速度历程, 结合数值模拟获得 HNS-IV 炸药的点火增长模型反应速率方程参数。研究表明, HNS-IV 炸药点火增长模型能够描述反应过程并与实验结果吻合较好。

关键词: 爆炸力学; 反应速率方程; 界面粒子速度; HNS-IV 炸药

中图分类号: O381

国标学科代码: 1303510

文献标志码: A

对非均匀高能炸药反应速率的研究基本上靠拟合实验数据得出。目前宏观唯象和经验型的反应速率数学模型较多, 包括 Forest-fire 模型^[1]、JTF 模型^[2] 和 HVRB 模型^[3] 等, 但应用最为广泛的是由 E. L. Lee 等^[4] 提出的点火增长模型。C. M. Tarver 等^[5-6] 随后对此模型进行改进并应用于 PBX9404 炸药和 LX-17 炸药的爆轰性能研究; 有研究人员对以 HMX 炸药^[7-10]、TATB 炸药^[11-12]、LLM-105^[13-14]、RDX 炸药^[15] 为基的各种炸药以及含铝炸药^[16-17] 的点火增长模型反应速率方程进行了大量研究; 伍俊英等^[18]、黄风雷等^[19] 采用拉氏实验研究了固体推进剂的反应速率方程; 浣石等^[20] 研究了 TNT 炸药的反应速率方程; 蒋小华等^[21] 对氧化剂含铝炸药爆轰反应的点火增长模型进行了相关研究。HNS-IV 是一种安全性满足直列式要求的新型始发药, 本文中旨在通过冲击 Hugoniot 关系和圆筒实验确定 HNS-IV 炸药未反应时的和爆轰产物的 JWL 状态方程, 对 HNS-IV 炸药冲击加载过程进行数值模拟分析, 结合炸药/窗口界面粒子速度实验数据确定其点火增长模型反应速率方程参数。

1 实 验

1.1 圆筒实验

以超细 HNS 为主体炸药, 加入适当的粘结剂造粒并压制成为药柱。实验装置和测试系统由 $\varnothing 10$ mm 圆筒、高压电雷管、传爆药柱、被测炸药、无氧铜管、爆炸光源和高速扫描相机等部件组成, 如图 1 所示。采用 GSJ 高速转镜相机拍摄圆筒在爆轰产物膨胀作用下狭缝位置处的膨胀过程。

圆筒实验数据一般被拟合成为以下的形式

$$t = a_1 + a_2(R - R_0) + a_3 e^{a_4(R - R_0)} \quad (1)$$

式中: t 为圆筒壁膨胀的时间, $(R - R_0)$ 为圆筒壁膨胀的距离, 根据实验数据而得到的拟合系数 $a_1 = 1.54271$, $a_2 = 0.669479$, $a_3 = -1.12446$, $a_4 = -0.22786$ 。

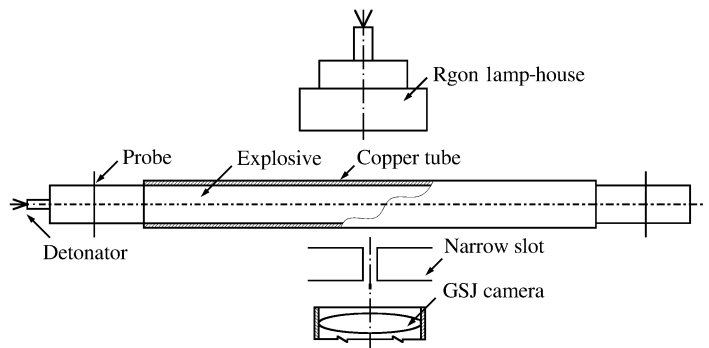


图 1 圆筒实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cylinder test

* 收稿日期: 2011-03-30; 修回日期: 2011-08-16

作者简介: 陈清畴(1983—), 男, 硕士研究生, 助理研究员。

1.2 炸药/界面粒子速度实验与实验结果

波阵面粒子速度变化表征炸药的反应速率变化,通过炸药/窗口界面粒子速度可确定炸药的反应速率方程。实验装置如图2所示,包括柔爆索、HNS-IV 炸药柱(∅5 mm × 4 mm)、不锈钢座体和 LiF 窗口。LiF 窗口与炸药接触端镀有一层 0.5 μm 厚的铝箔,当铝箔无限薄且窗口材料与炸药阻抗匹配时,炸药/窗口界面粒子速度即为波阵面粒子速度。

任意反射表面速度干涉仪(VISAR)^[22]测量精度高,相干性好并且为非接触测量,不会对被测对象的状态产生干扰,同时不受电磁作用和其他杂散光的影响,故采用 VISAR 测量系统测量了炸药/窗口界面粒子速度历程。VISAR 测试系统由光源、激光发射与接受系统、2 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。图3为激光速度干涉仪记录到铝箔运动后 0.8 μs 内的速度曲线。测量的界面粒子速度峰值为 1.16 km/s,随着化学反应的进行,界面粒子速度急剧下降。

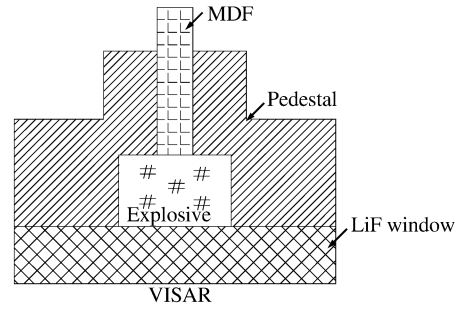


图2 界面粒子速度实验装置

Fig. 2 Experimental setup for interface particle velocity measurement

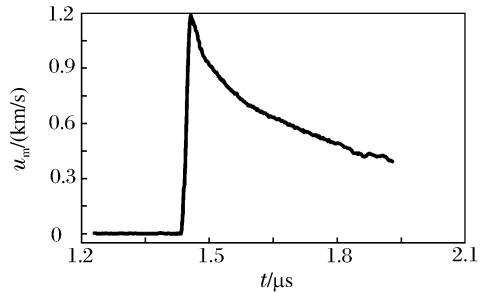


图3 炸药/窗口界面粒子速度测试结果

Fig. 3 Interface particle velocity

根据动量守恒和声学近似得 Goranson 公式

$$p = \frac{1}{2}u_m(\rho_0 D + \rho_{0,m}u_s) \quad (2)$$

式中: p 为 C-J 压力, u_m 为界面粒子速度, u_s 为介质冲击波速度, $\rho_{0,m}$ 为介质初始密度, ρ_0 为炸药初始密度, D 为炸药爆速。LiF 晶体的冲击 Hugoniot 关系^[23]为

$$u_s = 5.15 + 1.35u_p \quad (3)$$

式中: u_s 为冲击波速度, u_p 为爆轰产物粒子速度。由式(2)~(3)计算得到冲击波压力为 17.2 GPa。

2 数值模拟

2.1 动力学计算模型

采用非线性有限元动力学程序 ANSYS/LS-DYNA 对圆筒实验和炸药/窗口界面粒子速度实验进行数值模拟,HNS-IV 炸药爆轰模型采用点火增长模型(Ignition & Growth EOS)。点火增长模型包括 2 个 JWL 状态方程,即未反应炸药 JWL 状态方程和爆轰产物 JWL 状态方程,其共有形式为

$$p = Ae^{-R_1 V} + Be^{-R_2 V} + \omega c_V T/V \quad (4)$$

式中: p 为压力, V 为相对比容, ω 为 Grüneisen 系数, A 、 B 、 R_1 和 R_2 为待定参数。反应速率方程为

$$\frac{d\lambda}{dt} = I(1-\lambda)^b(\rho/\rho_0 - 1 - a)^x + G_1(1-\lambda)^{\lambda^d}p^y + G_2(1-\lambda)^{\lambda^g}p^z \quad (5)$$

式中: λ 为炸药反应度, t 为时间, ρ 为密度, ρ_0 为初始密度, p 为压力, I 、 G_1 、 G_2 、 a 、 b 、 x 、 c 、 d 、 y 、 e 、 g 和 z 是常数。式(5)中,第 1 项代表部分炸药在冲击压缩下被点火,第 2 项代表热点的增长,第 3 项代表在主要反应后相对缓慢的扩散控制反应。

2.2 计算结果与分析

未反应 HNS 炸药的冲击 Hugoniot 关系^[24]为: $u_s = (1.000 \pm 0.05) + (3.21 \pm 0.10)u_p$,再利用冲击波阵面的守恒关系得到(p , V)面上的相应关系,对冲击绝热线按 JWL 等熵线拟合可得到未反应炸药 JWL 状态方程参数: A ,115.18 TPa; B ,−5.00 TPa; R_1 =12.86, R_2 ,1.286; ω ,0.89; c_V ,2.487 MPa/K。

由圆筒实验确定炸药爆轰产物 JWL 状态方程^[25]结果可靠,得到了广泛应用。采用 ANSYS/LS-

DYNA 程序对圆筒实验进行数值模拟,通过对圆筒膨胀过程中筒壁速度 u 与位移 $(R-R_0)$ 的实验值与计算值比较,经过多次计算,不断修正状态方程参数,直到计算膨胀距离-时间曲线与实验曲线间的误差小于 1%,符合 JWL 状态方程参数确定的要求,可标定出 JWL 状态方程参数。依圆筒实验建立轴对称结构计算模型,HNS-IV 炸药采用高能炸药燃烧模型和 JWL 状态方程;紫铜采用 Elastic kinematic 材料模型和 Grüneisen 状态方程。通过数值模拟确定了 HNS-IV 炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数: $A, 469 \text{ TPa}; B, 13 \text{ TPa}; R_1=4.58, R_2, 1.79; \omega, 0.30; c_V, 1.00 \text{ MPa/K}$ 。

图 4 为 HNS-IV 炸药 $\varnothing 10 \text{ mm}$ 圆筒壁位移 $(R-R_0)$ 和速度 u 的实验值与计算值比较,在主要膨胀阶段实验值与计算值保持在规定的误差范围内,计算结果与实验结果吻合较好。

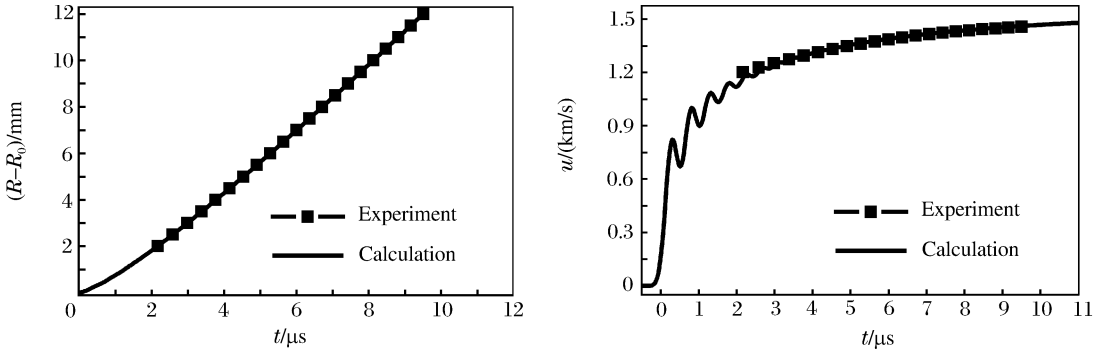


图 4 圆筒壁膨胀实验值与计算值比较

Fig. 4 Calculated radial wall expansion and experimental data for HNS-IV

采用 ANSYS/LS-DYNA 程序进行数值模拟,通过计算反应区的炸药/窗口界面粒子速度变化,与实验结果比较,可确定炸药的反应速率方程。HNS-IV 炸药采用 Elastic plastic hydro 材料模型和点火增长模型反应速率方程;不锈钢壳体采用 Johnson-Cook 材料模型和 Grüneisen 状态方程。通过反复计算,确定了 HNS-IV 炸药反应速率方程参数,如表 1 所示。

表 1 HNS-IV 炸药点火增长模型参数

Table 1 Ignition and growth reactive flow parameters of HNS-IV

$I/\mu\text{s}^{-1}$	a	b	x	$G_1/[(\text{MPa})^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$	c	d	y	$G_2/[(\text{MPa})^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$	e	z	g
7.43×10^{11}	0	0.667	20	8.2	0.667	0.111	2	2.8	0.333	3	1

采用表 1 中 HNS-IV 炸药点火增长模型反应速率方程参数,计算了 HNS-IV 炸药/窗口界面粒子速度,并与实验结果对比,如图 5 所示,计算结果与实验结果吻合。

计算得到的前导冲击波作用下粒子的突变尖峰 (Von Neumann 峰) 为 1.5 km/s ,高于实验测试的粒子速度峰值的 1.16 km/s ,主要原因是铝箔具有一定的厚度和测试仪器频率响应的影响,未能完全测试到前导冲击波作用下粒子的突变尖峰,而 C-J 点后的计算结果与实验结果吻合较好。

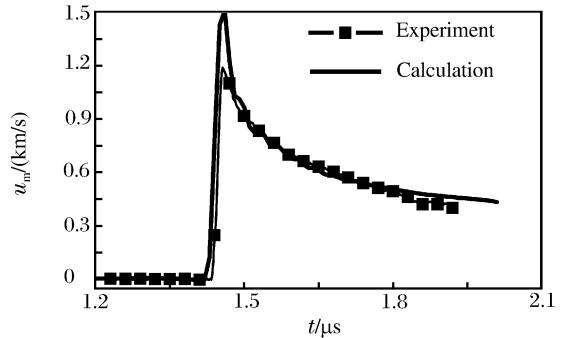


图 5 HNS-IV 炸药界面粒子速度

Fig. 5 Particle velocities at the interface between HNS-IV and window

3 结论

通过圆筒实验和炸药/窗口界面粒子速度实验,结合数值模拟,确定了 HNS-IV 炸药的点火增长模型的全部参数,包括未反应炸药 JWL 状态方程、爆轰产物 JWL 状态方程和反应速率方程,为 HNS-IV 炸药爆轰过程的数值模拟分析提供了基础参数。数值模拟结果表明,获得的 HNS-IV 炸药点火增长模型能够描述其化学反应过程,数值模拟计算结果与实验结果吻合较好。

参考文献:

- [1] Mader C L. Two-dimensional homogeneous and heterogeneous wave propagation[C]//Proceedings of the 6th Detonation Symposium. LA-UR-76-988; CONF-760805-7. San Diego, California, USA, 1976.
- [2] Johnson J N, Tang P K, Forest C A. Shock wave initiation of heterogeneous reactive solids[J]. Journal of Applied Physics, 1985,57(9):4323-4334.
- [3] Starckenberg J. Modeling detonation propagation and failure using explosive initiation models in a conventional hydrocode[C]//Proceedings of the 12th Detonation Symposium. San Diego, California, USA, 2002;1001-1007.
- [4] Lee E L, Tarver C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives[J]. Physics of Fluids, 1980,23(12):2362-2372.
- [5] Tarver C M, Hallquist J O. Modeling two-dimensional shock initiation and detonation wave phenomena in PBX 9404 and LX-17[C]//Proceedings of the 7th Detonation Symposium. UCRL-84990; CONF-810602-29. Annapolis, Maryland, USA, 1981:488-497.
- [6] Tarver C M, Hallquist J O, Erickson L M. Modeling short-pulse duration shock initiation of solid explosives[C]//Proceedings of the 8th Detonation Symposium. UCRL-91484; CONF-850706-25. Albuquerque, New Mexico, USA, 1985:951-960.
- [7] Vandersall K S, Chidester S K, Forbes J W, et al. Experimental and modeling studies of crush, puncture, and perforation scenarios in the Steven impact test[R]. UCRL-JC-144972, 2002.
- [8] Vandersall K S, Tarver C M, Garcia F, et al. Low amplitude single and multiple shock initiation experiments and modeling of LX-04[C]//Proceedings of the 13th Detonation Symposium. UCRL-CONF-222467. Norfolk, Virginia, USA, 2006.
- [9] Urtiew P A, Vandersall K S, Tarver C M, et al. Initiation of heated PBX-9501 explosive when exposed to dynamic loading[R]. Zababakhin Scientific Talks. UCRL-CONF-214667. Snezhinsk, Russia, 2005.
- [10] Tarver C M, Forbes J W, Garcia F, et al. Manganin gauge and reactive flow modeling study of the shock initiation of PBX 9501[C]//12th American Physical Society Topical Conference. UCRL-JC-141967. Atlanta, Georgia, USA, 2001.
- [11] Tarver C M, Cook T M, Urtiew P A, et al. Multiple Shock Initiation of LX-17[C]//Proceedings of the 10th Detonation Symposium. UCRL-JC-111342; CONF-930713-30. Boston, Massachusetts, USA, 1993.
- [12] Tarver C M, McGuire E M. Reactive flow modeling of the interaction of TATB detonation waves with inert materials[R]. UCRL-JC-145013. 2002.
- [13] Tarver C M, Urtiew P A, Tran T D. Sensitivity of 2,6-diamino-3,5-dinitropyrazine-1-oxide[J]. Journal of Energetic Materials, 2005,23(3):183-203.
- [14] Garcia F, Vandersall K S, Tarver C M. Shock initiation experiments on the 11m-105 explosive RX-55-aa at 25°C and 150°C with ignition and growth modeling[C]//Proceedings of the Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter. Waikoloa, Hawaii, USA, 2007,955:907-910.
- [15] Urtiew P A, Vandersall K S, Tarver C M, et al. Shock initiation experiments and modeling of Composition B and C-4[C]//Proceedings of the 13th Detonation Symposium. UCRL-CONF-222137. Norfolk, Virginia, USA, 2006.
- [16] Murphy M J, Simpson R L, Urtiew P A, et al. Reactive flow model development for PBXW-126 using modern nonlinear optimization methods[C]//Proceedings of the Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter. Seattle, Washington, USA, 1995,370:417-420.
- [17] Tao W C, Tarver C M, Kury J W, et al. Understanding composite explosive energetics: IV. reactive flow modeling of aluminum reaction kinetics in PETN and TNT using normalized product equation of state[C]//Proceedings of the 10th Detonation Symposium. UCRL-JC-111348; CONF-930713-31. Boston, Massachusetts, USA, 1993.
- [18] 伍俊英,陈朗,鲁建英,等. 高能固体推进剂冲击起爆特征研究[J]. 兵工学报,2008,29(11):1315-1319.
WU Jun-ying, CHEN Lang, LU Jian-ying, et al. Research on shock initiation of the high energy solid propellants [J]. Acta Armamentarii, 2008,29(11):1315-1319.
- [19] 黄风雷,丁徽,浣石. 固体推进剂冲击起爆及其反应区本构方程的整体标定研究[J]. 北京理工大学学报,1994,14

(4):443-448.

HUANG Feng-lei, DING Jing, HUAN Shi. Shock initiation and global calibration of constitutive equation in reaction zone for a solid propellants[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1994,14(4):443-448.

- [20] 浣石,蒋国平.用 Lagrange 分析方法确定固体炸药基于 JWL 状态方程的反应速率方程[J]. 湖南大学学报,2006,33(3):33-36.
- HUAN Shi, JIANG Guo-ping. Lagrange analysis method to determine reaction rate equation of solid explosives based on JWL state equation[J]. Journal of Hunan University, 2006,33(3):33-36.
- [21] 蒋小华,龙新平,何碧,等.有氧化剂(AP)含铝炸药的爆轰性能[J].爆炸与冲击,2005,25(1):26-30.
- JIANG Xiao-hua, LONG Xin-ping, HE Bi, et al. Numerical simulation of detonation in aluminized explosives containing oxidizer(AP)[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(1):26-30.
- [22] Hatt D J. A VISAR velocity interferometer system at MRL for slapper detonator and shockwave studies[R]. AD-A250372, 1991.
- [23] Steinberg D J. Equation of state and strength properties of selected materials[R]. CA94551, 1996:29.
- [24] Headquarters, Department of the army. Military explosives[R]. Army Technical Manual TM-9-1300-214. US Department of the Army, 1987:43.
- [25] Lee E L, Hornig H C, Kury J W. Adiabatic expansion of high explosive detonation products[R]. UCRL-50422, 1968:14-18.

Ignition and growth reactive flow model for HNS-IV explosive*

CHEN Qing-chou¹, JIANG Xiao-hua¹, LI Min¹, LU Xiao-jun¹, PENG Qi-xian²

(1. Institute of Chemical Material, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, Sichuan, China;

2. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: To develop an ignition and growth reaction flow model for HNS-IV explosive, cylinder tests were conducted on HNS-IV explosive and the expansion processes of the copper cylinder walls were recorded by a GSJ high speed rotating mirror camera, and particle velocities at the interface between HNS-IV explosive and LiF window were measured with laser velocity interferometry (VISAR). The corresponding numerical simulations were carried out by ANSYS/LS-DYNA, respectively. The JWL equation-of-state parameters for unreacted explosive were fitted to the available shock Hugoniot data. And by combining the experimental results and numerical simulations, the JWL equation-of-state parameters for detonation product were determined, as well as reactive rate parameters for reaction ignition and growth in HNS-IV explosive. Investigated results show that the developed ignition and growth reaction flow model can be used to picture the reaction process of HNS-IV explosive, and the numerically simulated results can agree with the experimental ones.

Key words: mechanics of explosion; reaction rate EOS; interface particle velocity; HNS-IV explosive

* Received 30 March 2011; Revised 16 August 2011

Corresponding author: CHEN Qing-chou, chenqingchou@163.com