

文章编号: 1001-1455(2005)01-0026-05

有氧化剂(AP)含铝炸药的爆轰性能*

蒋小华¹, 龙新平¹, 何 碧¹, 陈 朗², 黄毅民¹, 张海斌¹

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 北京理工大学爆炸与安全科学国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 对有氧化剂含铝炸药(RDX/AP/Al/粘合剂=20/43/25/12, 下称含铝炸药)爆轰反应的点火增长模型进行研究。用 VLW 状态方程方法计算了含铝炸药爆轰产物 JWL 状态方程; 用激光速度干涉仪(VISAR)测量炸药/窗口界面粒子速度和炸药驱动金属平板自由表面速度, 对试验进行了数值模拟计算, 拟合了含铝炸药的反应速率方程。研究表明, 用 VLW 状态方程方法和炸药/窗口界面粒子速度确定 JWL 状态方程和反应速率方程可行, 金属平板驱动试验的计算结果与试验结果吻合。

关键词: 爆炸力学; 反应速率方程; VISAR; 含铝炸药; JWL 状态方程; VLW 状态方程

中图分类号: O381

国标学科代码: 130·3510

文献标志码: A

1 引 言

加入铝粉和氧化剂提高了炸药的做功能力后, 含铝炸药被大量应用于各类常规兵器, 已构成混合炸药的重要系列^[1]。由于铝粉和氧化剂的加入, 含铝炸药的爆轰过程变得更加复杂, 对其爆轰机理的认识尚不统一^[2]。炸药驱动金属试验是研究含铝炸药做功能力和爆轰反应的有效方法^[3]。利用高分辨率测量手段, 如激光速度干涉仪, 能观测到不同配方含铝炸药的爆轰驱动细节^[4]。这为研究不同配方含铝炸药爆轰提供了较简单、经济的方法。本文中用激光速度干涉仪(VISAR)测量含铝炸药/窗口界面粒子速度和含铝炸药驱动金属平板自由表面速度, 结合爆轰数值模拟, 确定含铝炸药反应速率方程, 对含铝炸药驱动金属平板试验进行分析。

以维里(VIRIAL)理论为基础建立的 VLW 高温高压爆轰产物状态方程(VLW EOS)^[5~7], 在高能炸药、民用工业炸药以及初始密度 2.0 g/cm³ 以上的高能量密度炸药的爆轰参数计算以及做功能力评价中取得了与试验吻合的结果^[8~11]。本文中采用 VLW 状态方程方法计算含铝炸药的爆轰产物 JWL 状态方程, 并用其计算含铝炸药的做功能力。

2 试验装置及炸药

炸药中加入铝粉可以提高其爆轰能力, 但铝粉的加入使混合炸药的负氧平衡加重, 而加入氧化剂(通常为高氯酸铵 AP)可以改善其氧平衡, 使铝粉充分反应增加炸药的能量释放。本文中以黑索今(RDX)为主体炸药、高氯酸铵(AP)为氧化剂的含铝炸药作为研究对象, 含铝炸药配方为 RDX/AP/Al/粘合剂=20/43/25/12, 铝粉颗粒平均直径为 50 μm。

含铝炸药/窗口界面粒子速度试验装置如图 1 所示, 加载炸药(JO-9159)尺寸为 ∅50 mm×30 mm; 约束钢管外径为 70 mm, 内径为 50 mm, 上端厚 5 mm; 含铝炸药尺寸为 ∅50 mm×50 mm; 铜箔尺寸为 ∅20 mm×0.01 mm; 氯化钠光学窗口尺寸为 ∅20 mm×10 mm。铜箔与炸药、铜箔与窗口之间分别加入一滴硅油, O 形弹簧垫圈及卡环对窗口施加约 2 kg 轴向挤压力, 排除铜箔与炸药、铜箔与窗口之间的空气, 减小界面失稳。硅油形成的膜厚小于 5 μm。

* 收稿日期: 2004-04-23; 修回日期: 2004-12-08

基金项目: 国防科技预研基金项目(00J12.6.6.BQ0126)

作者简介: 蒋小华(1966—), 男, 硕士。

含铝炸药驱动金属平板试验装置如图 2 所示,图中雷管、传爆药柱、加载炸药、约束钢筒、含铝炸药与图 1 中相同,钢板尺寸为 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。

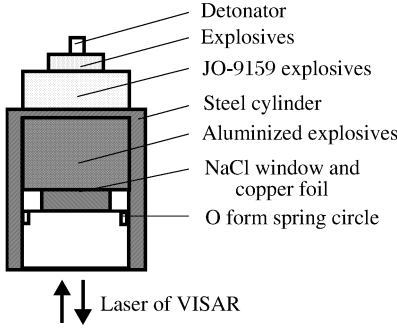


图 1 界面粒子速度试验装置

Fig. 1 Experimental apparatus for interface particle velocity measurement

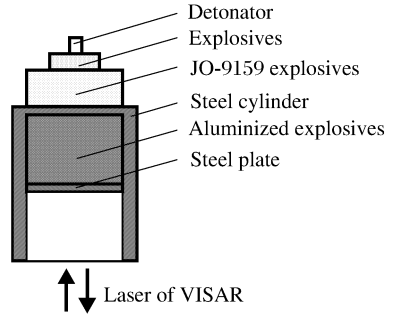


图 2 金属平板驱动试验装置

Fig. 2 Apparatus for metal plate acceleration

3 试验结果

对两发装药条件相同的试验装置进行了炸药/窗口界面粒子速度测试,图 3 为激光速度干涉仪记录到铜箔运动后 $1.7 \mu\text{s}$ 内的速度曲线。由于受铜箔厚度和测试仪器响应频率的影响,未能测试到前导冲击波作用下窗口界面粒子速度的突变尖峰(Von Neumann 峰),测量的窗口界面粒子速度峰值分别为 1.319 km/s 和 1.368 km/s ;随着化学反应的进行,窗口界面粒子速度急剧下降,CJ 状态的炸药/窗口界面粒子速度为 1.061 km/s 。试验结果表明,窗口界面粒子速度测量具有较好的重复性。含铝炸药驱动 2 mm 厚的钢板的自由面速度见图 4,钢板最大速度为 1.775 km/s 。

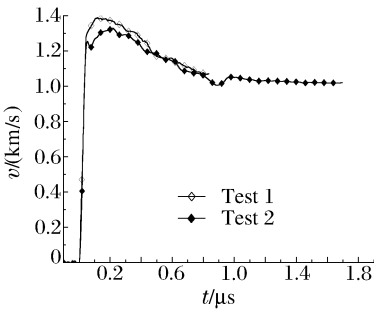


图 3 界面粒子速度试验值

Fig. 3 Experimental interface particle velocity

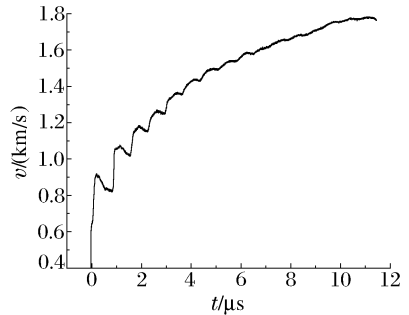


图 4 2 mm 钢板自由面速度试验值

Fig. 4 Free surface velocity from 2 mm steel plate

4 数值模拟

4.1 热力学计算

由圆筒试验标定的 JWL 状态方程^[12],其结果可靠,得到了广泛的应用。对没有试验数据的炸药来说,用热力学计算获得 JWL 状态方程,仍是一种好方法。许多学者在研究中使用该方法^[13~15],例如 C. L. Mader^[13]把用 BKW 程序计算的爆轰产物的压力、温度和能量用最小二乘法拟合成温度的函数,被称为 HOM 状态方程。陈朗等^[15]用 VLWR 状态方程计算了 TNT、RHT-901、JOB-9003、JO-9159、JB-9014 等炸药的 JWL 状态方程,用得到的 JWL 状态方程和 DYNA2D 方法,模拟了圆筒试验膨胀规律,计算结果与试验结果吻合。本文中用 VLW 状态方程计算得到了含铝炸药爆轰产物 JWL 状态方程。

VLW 状态方程的表达式为

$$\frac{pV}{RT} = 1 + B^* (T^*) \omega + \frac{B^* (T^*)}{(T^*)^{1/4}} \sum_{n=3}^m \frac{\omega^{n-1}}{(n-2)^n} \quad (1)$$

式中: $B^*(T^*) = \sum_{j=0}^{\infty} b^{(j)} T^{*-(2j+1)/4}$; $b^{(j)} = -\frac{2^{j+1/2}}{4j!} \Gamma\left(\frac{2j-1}{4}\right)$; $b_0 = \frac{2}{3} \pi N \sigma^3$; $T^* = \frac{kT}{\epsilon}$; $\omega = \frac{b_0}{V}$ 。其中, N 为阿佛加德罗常数; k 为玻尔兹曼常数; T^* 为无量纲温度; σ, ϵ 为 Lennard-Jones 势参数^[16]。

4.2 动力学计算

用非线性有限元流体动力学方法(ANSYS LS-DYNA/3D)^[17], 对炸药驱动试验进行三维爆轰数值模拟。根据含铝炸药非理想爆轰特性, 含铝炸药爆轰模型中采用 JWL 状态方程和点火增长反应模型(ignition and growth EOS)。爆轰产物状态方程^[18]为

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (2)$$

式中: p 为爆轰产物的压力, V 为爆轰产物的相对比容。 $A, B, R_1, R_2, E, \omega$ 为待定参数。反应速率方程为

$$\frac{dF}{dt} = I(1-F)^b \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a\right)^x + G_1(1-F)^c F^d p^y + G_2(1-F)^e F^g p^z \quad (3)$$

式中: F 是炸药反应度, t 是时间, ρ 是密度, ρ_0 是初始密度, p 是压力, $I, G_1, G_2, a, b, x, c, d, y, e, g, z$ 是常数。式(3)的第一项代表部分炸药在冲击压缩下被点火; 第二项代表热点的增长; 第三项代表在主要反应后相对缓慢的扩散控制反应, 对于含铝炸药, 它代表铝与气体产物间的氧化反应。

钢板采用弹塑性流体力学模型和 Grüneisen 方程^[19]。

5 计算结果及讨论

5.1 JWL 状态方程

用 VLW 程序计算含铝炸药爆轰产物等熵膨胀过程(p - V), 再用 C. L. Mader^[20] 提供的 JWL 专用程序, 拟合得到含铝炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数: $A=212.2$ GPa, $B=7$ GPa, $E=1.253$ GPa, $R_1=4.4$, $R_2=1.2$, $\omega=0.38$ 。

5.2 反应速率方程

波阵面粒子速度变化表征含铝炸药的反应速率变化。在炸药/窗口界面粒子速度试验中, 当金属箔无限薄、窗口材料与炸药阻抗完全匹配时, 炸药/窗口界面粒子速度即为波阵面粒子速度。本文中用非线性有限元流体力学数值模拟方法, 考虑金属箔厚度和窗口材料阻抗等, 计算 CJ 反应区的炸药/窗口界面粒子速度变化, 并与试验结果比较, 确定了含铝炸药反应速率方程, 参数 $I=7.4 \times 10^{11}$, $b=0.667$, $a=0$, $x=20$, $G_1=3.2$, $c=0.667$, $d=0.111$, $y=1$, $G_2=14.4$, $e=0.333$, $g=1.0$, $z=2.0$ 。计算的含铝炸药/窗口界面粒子速度与试验结果对比见图 5, 计算结果与试验结果吻合。

5.3 金属平板驱动试验

炸药驱动金属平板速度试验, 用于评价炸药做功能力^[21], 本文中用含铝炸药驱动金属平板速度试验结果与计算结果比较(见图 6), 以验证上述方法确定的 JWL 状态方程和反应速率方程的有效性, 计算

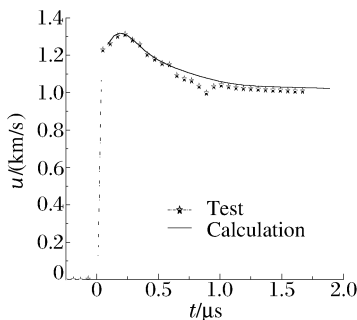


图 5 界面粒子速度试验值与计算值对比

Fig. 5 Comparison between the experimental and calculated interface particle velocities

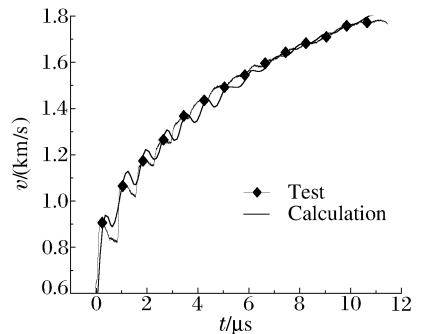


图 6 2 mm 钢板自由面速度试验值与计算值比较

Fig. 6 Comparison between the experimental and calculated free surface velocities of 2 mm steel plate

结果表明,用 VLW 状态方程方法和炸药/窗口界面粒子速度确定 JWL 状态方程和反应速率方程能较好地计算含铝炸药的做功能力。

6 结 论

利用光学窗口方法测试炸药爆轰波后窗口界面粒子速度,结合爆轰数值模拟技术,确定了含铝炸药反应速率方程参数,为含铝炸药爆轰过程的数值模拟分析提供了基础参数。

用 VLW 状态方程方法和炸药/窗口界面粒子速度分别确定 JWL 状态方程和反应速率方程可行,金属平板驱动试验的计算结果与试验结果吻合。

感谢中国工程物理研究院化工材料研究所的关立峰、中国工程物理研究院流体物理研究所的彭其先协助完成研制含铝炸药的试验和速度测试。

参考文献:

- [1] 孙业斌,惠君明,曹欣茂. 军用混合炸药[M]. 北京:兵器工业出版社,1995.
- [2] Tao W C, Tarver C M, Ornellas J W K. Understanding composite explosive energetics: IV. Reactive flow modeling of aluminum reaction kinetics in pent and TNT using normalized product equation of state[A]. 10th International Symposium on Detonation[C], 1993:628-636
- [3] Cutting J L, Hodgins R L, Hoffman D M. A small-scale screening test for HE performance: Application to the new explosive LLM-105[R]. CA 94550.
- [4] 陈朗. 不同铝粉尺寸含铝炸药加速金属能力研究[J]. 爆炸与冲击,1999,19(3):250-255.
CHEN Lang. Study of the metal acceleration capacities of aluminized explosives with spherical aluminum particles of different diameter[J]. Explosion and Shock Waves, 1999,19(3):250-255.
- [5] 吴雄. 新型爆轰产物状态方程[J]. 高压物理学报,1991,5(2):98-103.
WU Xiong. A new equation of state for detonation products[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1991,5(2):98-103.
- [6] 吴雄,龙新平,何碧. VLW 状态方程的回顾与展望[J]. 高压物理学报,1999,13(1):55-58.
WU Xiong, LONG Xin-ping, HE Bi. Review and look forward to the progress of VLW equation of state[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1999,13(1):55-58.
- [7] Wu X, Long X P. Detonation parameters of new powerful explosives compounds predicted with a revised VLW EOS[A]. Proceedings of 9th International Symposium on Detonation[C], Portland, 1989:190-197
- [8] Long X P, Wu X, Jiang X H. Detonation parameters of high energy density explosives predicted with a new revised VLW EOS[R]. EUROPYRC, 1995:221-229.
- [9] 吴雄. 含能材料能量评价准则的讨论[J]. 含能材料,1993,1(1):21-26.
WU Xiong. The principle to assess the power of energetic materials [J]. Energetic Materials, 1993,1(1):21-26.
- [10] 吴雄. VLW 状态方程在民用炸药计算中的应用[A]. 中国民爆学术会议论文集[C],1991:3-7.
- [11] 张双计. 工业炸药爆轰性能的计算[J]. 爆破器材杂志,1997,26(2):6-8.
ZHANG Shuang-Ji. Calculation the detonation performance of industrial explosives[J]. Magazine of Blasting Equipment, 1997,26(2):6-8.
- [12] Lee E, Finger M, Collins W. JWL equation of state coefficient for high explosives[R]. Lawrence Livermore Laboratory report UCID-16189, 1973.
- [13] Mader C L. Numerical Modeling of Detonation[M]. New York: Berkeley, 1979.
- [14] 薛再清,徐更光,王廷增,等. 用 KHT 状态方程计算炸药爆轰参数[J]. 爆炸与冲击,1998,18(2):172-176.
XUE Zai-qing, XU Geng-guang, WANG Ting-zeng, et al. By use of KHT equation of state to calculate detonation parameters of explosive[J]. Explosion and Shock Waves, 1998,18(2):172-176.
- [15] 陈朗,龙新平,冯长根,等. 含铝炸药爆轰[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- [16] Hirschfelder J O, Curtiss C F, Bird R B. Molecular Theory of Gases and Liquids[M]. New York: Wiley, 1964;

157.

- [17] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyword User's Manual[Z]. 1990.
- [18] Tarver C M, Hallquist J O, Erickson L M. Modeling of short pulse duration shock initiation of solid explosives [A]. 8th International Symposium on Detonation[C]. Maryland: Naval Surface Weapons Center, 1986:884.
- [19] Lee E, Breithaupt D, Mcmillan C. The motion of thin metal walls and the equation of state of detonation products [R]. UCRL-91490, 1985.
- [20] Mader C L. Numerical Modeling of Explosives and Propellants[M]. New York: CRC Press, 1998.
- [21] 吕学国. 炸药实验方法—平面飞片速度的测定[S]. GJB 772. 307:93.

Numerical simulation of detonation in aluminized explosives containing oxidiser (AP)

JIANG Xiao-hua^{1*}, LONG Xin-ping¹, HE Bi¹, CHEN Lang²,
HUANG Yi-min¹, ZHANG Hai-bin¹

- (1. *Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;*
2. *Mechanics and Engineering Department, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

Abstract: This article reports Ignition and Growth equations of aluminized explosives containing oxidizer (RDX/AP/Al/HTPB=20/43/25/12). VLW EOS (equations of state) is applied to calculate the parameters of JWL EOS for this explosives. The free-surface velocities of the metal plate and the interface particle velocities between the explosive and sodium chloride window were recorded by the VISAR velocity interferometer. We have performed 3D numerical simulation for the particle velocities test to evaluate the parameters of the reactive rate EOS. The results show that the VLW EOS method and the explosion/widow interface velocity can be used to determine the JWL EOS and the reactive rate EOS. The results of metal plate acceleration test agree well with calculations.

Key words: mechanics of explosion; reactive rate equation; VISAR; aluminized explosives; JWL EOS; VLW EOS

* Corresponding author: JIANG Xiao-hua
E-mail address: ceapjxh@163.com
Telephone: 0816-2485375