

复合推进剂的冲击波起爆和 爆轰过程研究

白春华 丁 傲
(北京理工大学)

摘要 本文应用拉氏量计和拉氏分析技术研究了, 两种常用的复合推进剂(聚硫和丁羟复合推进剂)的冲击波起爆和爆轰过程。在冲击波起爆过程中, 压力等参量出现双峰现象, 化学反应由三个阶段完成。在爆轰过程中, 反应区宽度 5 mm 以上, 属于非理想爆轰过程。最后基于组分实验结果, 进一步分析了复合推进剂, 在冲击波作用下的化学反应过程, 结果表明, 双峰现象和多反应阶段的出现是由于高氯酸铵和粘合剂之间的相互作用的结果。

关键词 推进剂 冲击波起爆 爆轰

一、引言

复合推进剂是固体推进剂中应用最广泛的一种。固体推进剂的爆炸危险性一直是人们关心的问题。在固体推进剂的生产、加工、贮存、运输和使用过程中, 经常会遇到冲击波的作用; 在固体推进剂的燃烧转爆轰过程中, 冲击波转爆轰是它的后期阶段^[1]。因此, 冲击波作用危险性是固体推进剂爆炸危险性的一个重要方面。长期以来, 用于评价固体推进剂冲击波作用危险性的方法一直是隔板试验方法^[2], 但是, 大量研究工作^[3-4]表明, 隔板试验的各方面因素都对评价结果有明显的影响。近年来, 由于航天技术的迅速发展, 固体推进剂中高能组分(如 HMX、RDX 等)的加入以及航天事故不断发生, 已发展起来了改进隔板试验方法^[5]、探针方法^[6]以及数值模拟方法^[7]等, 但是, 在目前条件下, 这些方法都不能揭示固体推进剂与冲击波相互作用的内在本质。

本文首先应用描述介质质点状态变化历史的拉氏量计测试系统对两种典型复合推进剂(聚硫和丁羟复合推进剂)冲击波起爆和爆轰过程进行了测量; 然后基于拉氏分析技术计算了描述化学反应过程的反应度、反应速率、能量释放速率、瞬态反应热等物理量变化过程, 最后在组分实验结果基础上进一步分析了化学反应过程。这些结果充分表现了两种复合推进剂冲击波起爆和爆轰过程的特点。

二、拉氏量计和拉氏分析技术

冲击波产生装置见图 1。研究起爆过程的冲击波阵面压力为 2.0 GPa, 研究爆轰过程的冲击波阵面压力为 10.0 GPa。四个速度计测量试件见图 2。在 TNT 炸药爆轰产物导电性研究^[8]基础上, 研究了复合推进剂爆轰产物导电性对电磁速度计测量的影响, 结果表明, 复合推进剂爆轰产物导电性对电磁速度计测量的影响比 TNT 炸药小, 最大误差小于 4%。四个

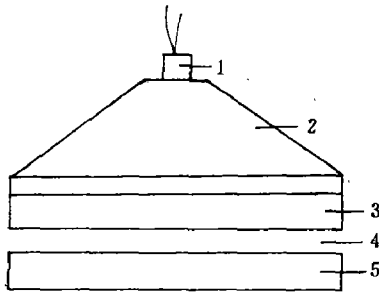


图 1 冲击波产生装置

- 1—雷管； 2—平面波发生器(φ100mm)；
3—巴拉托儿； 4—空气； 5—有机玻璃。

Fig. 1 Schematic drawing of shock wave output

- 1—Detonator.
2—Plane wave generator (φ100mm).
3—Baratol. 4—Air 5—PMMA

锰铜压阻计测量试件见图 3。为了减小封装厚对流场的影响，把压阻计封装变窄，装配时彼此错开，且通过刻槽嵌入推进剂中。

在利用拉氏分析技术计算比容 V 、比内能 E 时，计算公式为(1)和(2)，质点速度 u 和压力 p 都由实验直接测得，这样可以进一步提高计算精度。式(3)~(5)为复合推进剂满足的状态方程，由状态方程可得到反应度 F 的变化过程。进一步由公式(6)~(9)可计算反应速率 R 、体积能量释放速率 $\dot{p}^{[9]}$ 、化学键能释放速率 $\sigma R^{[10]}$ 、瞬态反应热 $Q^{[11]}$ 等反应特征量变化过程。

$$V(h, t) = V(h, \tau)$$

$$+ \frac{1}{\rho} \int_{\tau}^t \left(\frac{\partial u}{\partial h} \right)_t dt \quad (1)$$

$$E(h, t) = E(h, \tau) - \frac{1}{\rho_0} \int_{\tau}^t \left(\frac{\partial u}{\partial h} \right)_t p dt \quad (2)$$

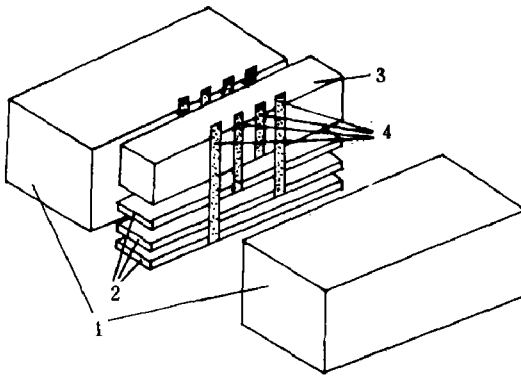


图 2 速度计测量试件装配图

- 1—80×25×30mm试件；
2—80×10×3mm试件；
3—80×10×20mm试件；
4—速度计

Fig. 2 Assembly of a set of EMV gauges

- 1—80×25×30mm pieces,
2—80×10×3mm pieces,
3—80×10×20mm piece,
4—EMV gauges

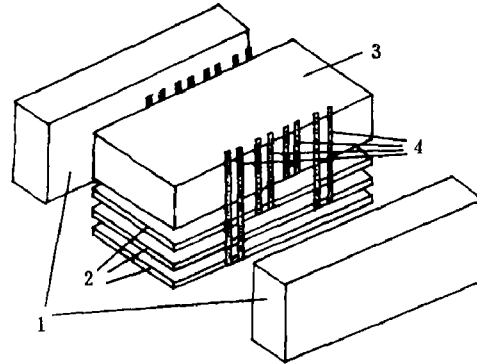


图 3 压阻计测量试件装配图

- 1—80×15×30mm试件；
2—80×30×3mm试件；
3—80×30×20mm试件；
4—压阻计(H型)

Fig. 3 Assembly of a set of manganin pressure gauges

- 1—80×15×30mm pieces,
2—80×30×3mm pieces,
3—80×30×20mm piece,
4—Manganin Pressure gauges

未反应推进剂

$$p_s = c_0^2 (\rho_s - \rho_0) + (\gamma - 1) \rho_s E_s \quad (3)$$

反应产物

$$E_r = \frac{p_r}{\rho_r (k - 1)}, \quad p_r = A \rho_r^k \quad (4)$$

混合法则

$$\left. \begin{aligned} p &= p_s = p_r \\ V &= FV_r + (1 - F)V_s \\ E &= F \cdot E_r + (1 - F)E_s + FQ \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$R = \left(\frac{\partial F}{\partial t} \right)_h \quad (6)$$

$$\dot{p} = \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right)_h + \left(\frac{c}{V} \right)^2 \left(\frac{\partial V}{\partial t} \right)_h \quad (7)$$

$$\sigma R = \frac{\dot{p}}{\rho c^2} \quad (8)$$

$$Q = \frac{\dot{p}}{\Gamma \rho R} \quad (9)$$

式中 Γ 为格临爱森常数; c 为声速; h, t 为拉氏坐标中的空间位置及时间。

三、冲击波起爆过程

本文研究的聚硫和丁羟复合推进剂的主要组分配比(重量百分比)分别为:聚硫橡胶/高氯酸铵/铝粉=21/65/8和丁羟橡胶/高氯酸铵/铝粉=11/68/18。用拉氏量计测量了两种复合推进剂质点速度和压力变化过程,典型信号见图4,丁羟复合推进剂压力测量结果见图5。根据拉氏分析计算了比容、比内能、反应度、反应速率、体积能量释放速率、化学键能释放速率和瞬态反应热各量变化过程,丁羟复合推进剂的部分结果见图6~7。

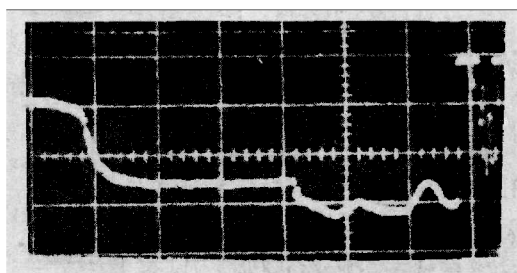


图4 典型压力测量信号

Fig. 4 Typical record of manganin pressure signal

从聚硫和丁羟复合推进剂冲击波起爆过程看出,在质点速度、压力、反应速率等量变化

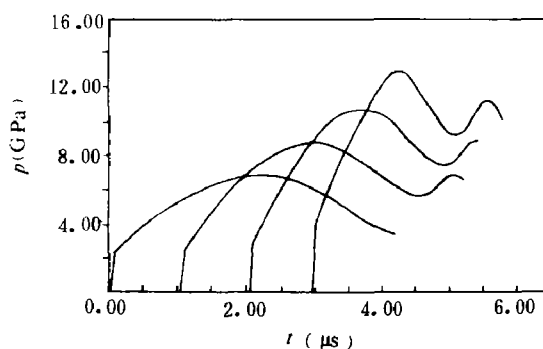


图5 丁羟复合推进剂压力变化过程

Fig. 5 Pressure histories in the composite propellant the binder is HTPB

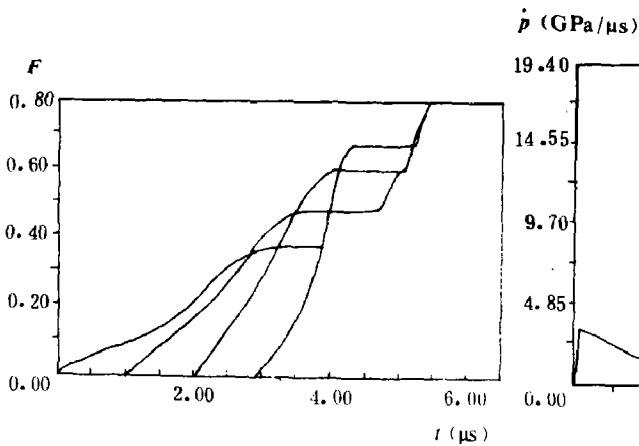


图6 反应度变化过程

Fig. 6 Reaction extent histories

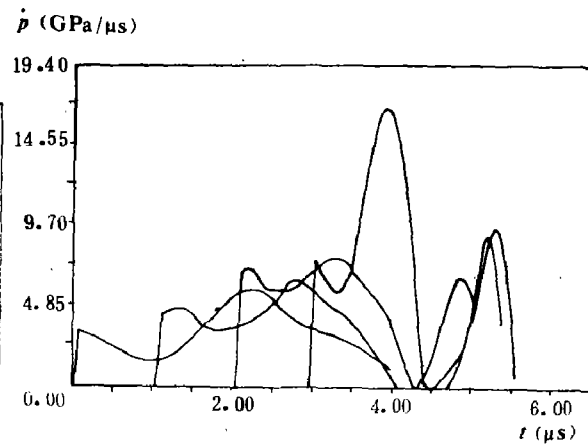


图7 体积能量释放速率变化过程

Fig. 7 Volumetric energy-release rate histories

过程中, 前沿波阵面后出现了双峰现象。反应度曲线开始单调上升, 中间近似于水平, 最后又是单调上升, 即整个反应过程由三个阶段完成, 中间为无反应或缓慢反应阶段。在能量释放速率等变化过程中, 也出现了多峰现象。另外, 比较聚硫和丁羟复合推进剂结果发现, 丁羟复合推进剂中冲击波阵面状态成长比聚硫复合推进剂快, 但聚硫复合推进剂冲击波阵面后状态成长比丁羟复合推进剂快, 尤其在远离波阵面的第二个峰更为明显。

四、爆轰过程

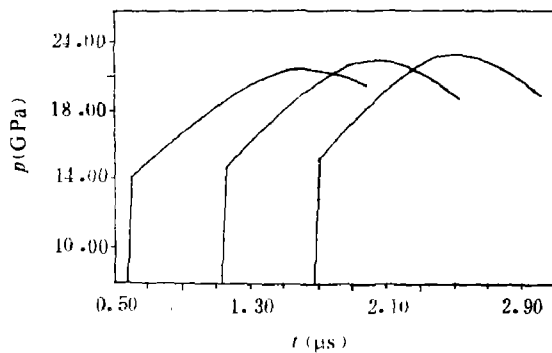


图8 爆轰状态下压力变化过程

Fig. 8 Pressure histories of detonation

首先用拉氏量计测量了两种复合推进剂爆轰状态下质点速度、压力变化过程, 其中聚硫复合推进剂的压力结果见图8。从质点速度和压力实验结果看出, 前沿波阵面后仍存在一个峰, 波阵面状态不是最高状态, 这说明前沿波阵面后仍有化学反应发生。基于拉氏分析技术, 进一步计算了反应度、反应速率、体积能量释放速率、化学键能释放速率及瞬态反应热等反

应特征量变化过程, 部分结果见图9~10。

从实验和计算得到的爆轰过程可看出, 在复合推进剂爆轰过程中, 化学反应持续时间为 $1\mu\text{s}$ 以上, 爆轰反应区宽度为 5mm 以上, 这比一般非均质炸药宽约一个数量级。由BKW程序^[12]计算得到的理想爆轰状态和实验测得的爆轰状态下波阵面状态(见表1)两者的比较表明, 聚硫复合推进剂爆速和爆压相差分别为 0.93km/s 和 9.4GPa , 丁羟复合推进剂爆速和爆压相差分别为 1.25km/s 和 12.7GPa , 这表明, 复合推进剂的爆轰属于非理想爆轰。

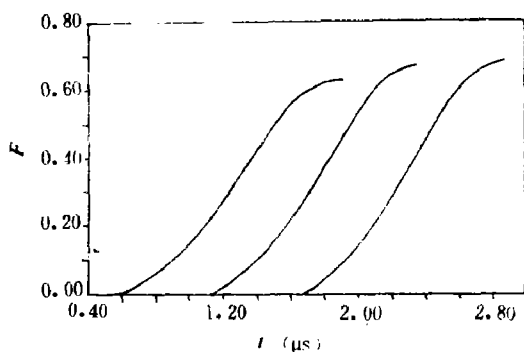


图9 反应度变化过程
Fig. 9 Reaction extent histories

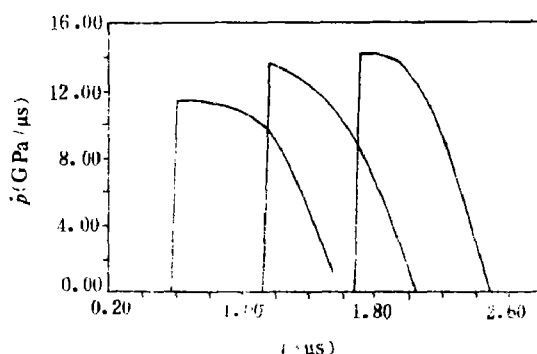


图10 体积能释放速率变化过程
Fig. 10 Volumetric energy-release rate histories

表1 聚硫和丁羟复合推进剂爆轰状态参数
Table 1 Experimental and calculated detonation parameters

	爆速 (km/s)		爆压 (GPa)	
	实验	计算	实验	计算
聚硫推进剂	6.10	7.00	14.5	23.9
丁羟推进剂	6.45	7.70	16.0	28.7

五、化学反应过程分析

为了分析上面两种复合推进剂特殊的冲击波起爆和爆轰过程，我们对这两种推进剂中各组分及其组合混合物进行了相同条件下压力变化过程测量，其中包括以下六类：(1) 单独粘合剂(聚硫橡胶和丁羟橡胶)；(2) 单独高氯酸铵；(3) 粘合剂加铝粉；(4) 高氯酸铵加铝粉；(5) 高氯酸铵加粘合剂；(6) 聚硫和丁羟复合推进剂。部分结果见图11~14。

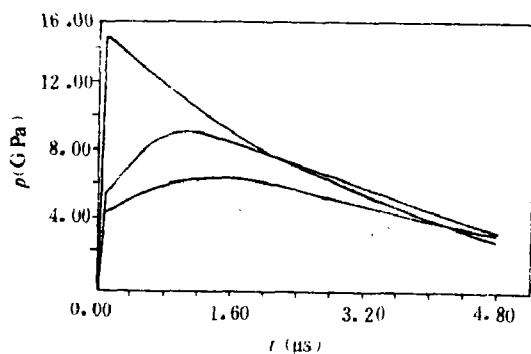


图11 高氯酸铵压力变化过程
中间曲线与其他组分结果条件相同
Fig. 11 Pressure histories of AP

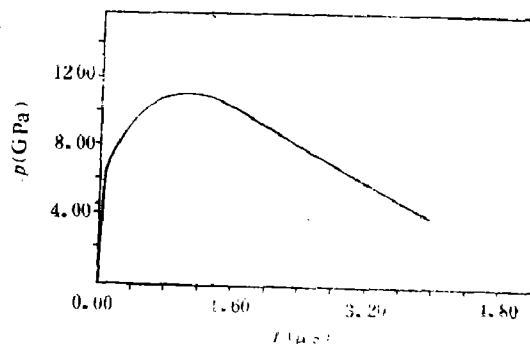


图12 高氯酸铵加铝粉混合物压力变化过程
Fig. 12 Pressure history of the mixture of AP and Al-powder

从单组分结果(图11和图13)可看出，在波阵面压力约为6.0GPa的冲击波作用下，粘合剂能发生化学反应，而且反应很迅速，波阵面压力增长较大，这与数值模拟结果^[13]相符。高氯酸铵反应也是在波阵面上开始的，但波阵面附近反应较少，波阵面压力增长较小，而波

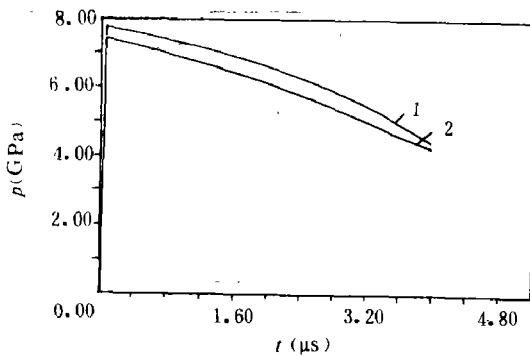


图13 丁羟橡胶 (1) 和丁羟橡胶加铝粉混合物 (2) 压力变化过程

Fig.13 Pressure histories of HTPB (1) and the mixture of HTPB and Al-powder (2)

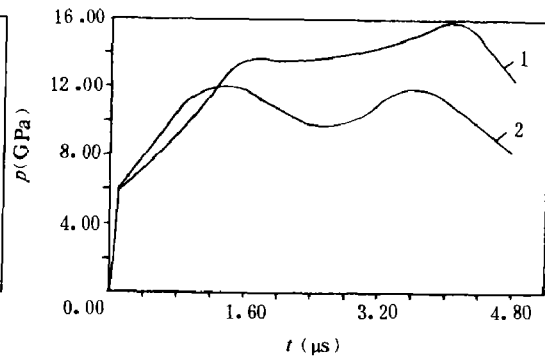


图14 丁羟复合推进剂 (1) 和高氯酸铵加丁羟橡胶混合物 (2) 压力变化过程

Fig.14 Pressure histories of the mixture of AP, HTPB and Al-powder (1) and the mixture of AP and HTPB (2)

阵面后反应成长较快, 出现一个峰值。

从双组分混合物结果 (图12、图13和图14) 可看出, 在高氯酸铵反应过程中, 铝粉参与了反应, 这表明铝粉反应较迅速。在高氯酸铵加粘合剂的结果中, 波阵面后出现了双峰现象, 与复合推进剂中出现的双峰现象很类似, 这说明复合推进剂的双峰现象是高氯酸铵和粘合剂之间相互作用的结果。

单独高氯酸铵与高氯酸铵加粘合剂结果的比较表明, 高氯酸铵加粘合剂的第一个峰比单独高氯酸铵峰值高, 这说明在第一个峰上, 粘合剂的反应产物与高氯酸铵的反应产物发生了反应。再把高氯酸铵加粘合剂的结果与复合推进剂的结果比较表明, 复合推进剂的两个峰值比高氯酸铵加粘合剂的峰值高, 这说明铝粉对复合推进剂的双峰都起到了加强作用。

六、总 结

以高分子材料为粘合剂的复合推进剂对冲击波作用具有特殊的响应过程。在冲击波起爆过程中, 质点速度、压力、反应速率等量出现双峰现象, 化学反应由三个阶段完成, 中间为无反应或缓慢反应阶段; 在爆轰过程中, 化学反应持续 $1 \mu\text{s}$ 以上, 反应区宽度 5 mm 以上; 复合推进剂的各组分之间具有复杂的作用过程, 双峰现象的产生是粘合剂与高氯酸铵相互作用的结果。

参 考 文 献

- [1] Cowperthwaite.M., *Proceedings Seventh Symp. (Intern.) on Detonation* (1981), 225.
- [2] Price.D., NOLTR 70-25 (1970).
- [3] Ayers.J.N., NAVWEPS Report (1961), 7342.
- [4] Price,D.et al., NOLTR 74-40 (1974).
- [5] Tasker, D.G., *Proceedings Seventh Symp.(Intern.) on Detonation* (1981), 285.
- [6] Dick, J.J., *Combustion and Flame*, 37 (1980), 95.

- [7] Westmoreland.C., Lee.E.L., *Proceedings Seventh Symp. (Intern.) on Detonation* (1981), 517.
- [8] 黄正平等, *爆炸与冲击*, 7 (4) (1987), 300.
- [9] Cowperthwaite.M. et al., *Proceedings Sixth Symp. (Intern.) on Detonation* (1976), 786.
- [10] Fickett.W., Davis.W.C., *Detonation*, University of California Press (1979).
- [11] Huan Shi et al., *Proceedings of Intern Symp. on Intense Dynamic Loading and its Effects* (1986),144.
- [12] Mader.C.L., *Numerical Modeling of Detonation*, Los Alamos Press (1979).
- [13] Bai Chunhua, Ding Jing, *Nineth Symp. (Intern.) on Detonation* (1989), (to be published).

SHOCK INITIATION AND DETONATION OF COMPOSITE PROPELLANTS

Bai Chunhua, Ding Jing

(*Beijing Institute of Technology*)

ABSTRACT In the present paper, using the Lagrangeian gauge and Lagrangeian analysis technique, the shock initiation and detonation of two composite propellants, whose binders are thiokol and HTPB respectively, have been studied. The results of shock initiation show there are two peaks behind the shock wave front in the histories of the particle velocity, pressure and others, the reaction is finished in three stages whose middle one is a reactionless or slowly reaction stage, and the detonation of the composite propellants is non-ideal. The width of the reaction zone is more than 5mm. On the basis of the results of supplementary experiments, the reaction behavior is further analyzed. It is demonstrated that the two peaks are produced by the interaction of AP and the binder.

KEY WORDS propellant, shock initiation, detonation.