

文章编号: 1006-9941(2003)04-0187-04

颗粒状 HMX、RDX 的燃烧转爆轰实验研究

赵同虎, 张新彦, 李斌, 赵峰

(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 621900)

摘要: 用盖帽探针和离子探针实验研究了颗粒状 HMX、RDX 的燃烧转爆轰 (DDT)。研究表明炸药的 DDT 过程复杂, 点火方式、DDT 管材料、杂质都对这些炸药的 DDT 有一定的影响。

关键词: 爆轰力学; DDT; 点火方式; DDT 管材料; 杂质

中图分类号: TQ560.71; O643.2

文献标识码: A

1 引言

DDT 是炸药的重要特征, 早在 20 世纪 40 年代就有人开始进行研究。近年来出于对炸药应用中安全问题的关注和实际装药序列事故分析的需要, 炸药的 DDT 研究倍受爆轰界的重视。Macek 等人^[1] 在 20 世纪 50~60 年代研究了铸装炸药中的 DDT 机理, Bernecker 和 Sandusky 等人^[2,3] 长期从事颗粒状炸药的 DDT 研究, McAfee 等人^[4,5] 用多种测试技术比较详细地研究了颗粒状 HMX 装药的 DDT 过程, Verbeek 等人^[6] 研究了颗粒状装药的密度和管材对 DDT 的影响。这些研究使人们对炸药的燃烧转爆轰的过程和机理有了一定的认识。但是由于炸药的 DDT 是多阶段非定常过程, 物理量要跨过几个量级范围, 测试难度大, 已有研究只是提供了一些宏观的认识, 还有待进一步深入研究。最近几年我们对颗粒状 HMX、RDX 的 DDT 进行了研究, 取得了一些有益的结果。

2 实验装置和测试方法

2.1 实验装置

采用的实验装置如图 1、2 所示。图 1 为点火药直接点火的实验装置。点火部分包括点火头、点火药。主体部分包括 DDT 管、炸药试样和电探针。DDT 管的材料、尺寸和炸药试样的状态 (成分、颗粒度、密度等) 根据试验目的确定。DDT 管上安装两排电探针、一排盖帽探针、一排同轴离子探针。探针间的距离为 10~

20 mm。密封部分包括钢质螺盖、底座和铝质压紧块。

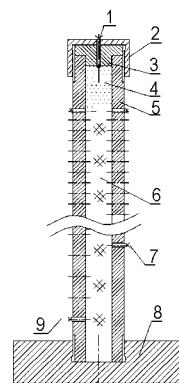


图 1 实验装置示意图(1)

Fig. 1 Sketch of experimental set-up No. 1

1—igniter, 2—screw cover, 3—plug, 4—ignition powder, 5—DDT tuber, 6—explosive bed, 7—capped pin, 8—base, 9—ionization pin

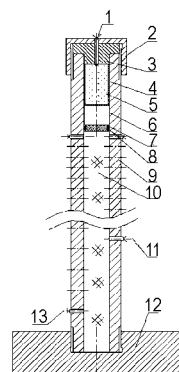


图 2 实验装置示意图(2)

Fig. 2 Sketch of experimental set-up No. 2

1—igniter, 2—screw cover, 3—plug, 4—ignition powder chamber, 5—ignition powder, 6—supporting bead, 7—piston, 8—O ring, 9—DDT tuber, 10—explosive bed, 11—capped pin, 12—base, 13—ionization pin

收稿日期: 2003-04-03; 修回日期: 2003-05-08

基金项目: 中国工程物理研究院科学基金资助(960101Z)

作者简介: 赵同虎(1939-), 男, 研究员, 目前主要从事炸药的燃烧转爆轰、爆轰波的反应区结构研究。

图2为活塞驱动点火的实验装置。点火部分包括点火头、点火药、点火药室、垫筒、活塞和O型圈。主体部分和密封部分同点火药直接点火实验装置相同。活塞驱动点火装置避免了点火药气体、传导燃烧和对流燃烧对被研究炸药的影响,是一种较理想的研究炸药燃烧转爆轰实验装置。

实验中使用HMX平均颗粒度为 $100\ \mu\text{m}$,RDX平均颗粒度为 $216\ \mu\text{m}$ 。

2.2 测试线路

实验采用的测试线路如图3所示。

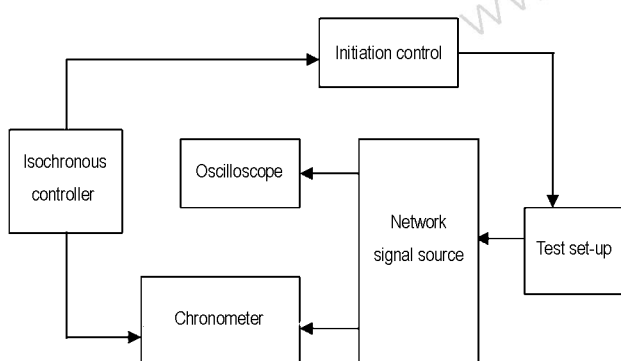


图3 测试系统框图

Fig. 3 Schematic diagram of the testing circuit

a. 由电探针、脉冲形成网络柜、时间间隔测量仪记录DDT过程的走时曲线,其中盖帽探针测压力大于 $2\ \text{MPa}$ 过程的走时曲线,离子探针测有离子产生的反应过程走时曲线。

b. 由同步机主控,经点火装置使实验装置点火,同时使时间间隔测量仪开门。

c. 脉冲形成网络柜加 $-400\ \text{V}$ 电压,提高信号幅度。

3 实验结果

3.1 颗粒状RDX、HMX装药的DDT基本过程

用电探针技术测量的颗粒状RDX、HMX的DDT过程典型走时曲线如图4~7所示,图中 S 为到装药上端面的距离, t 为探针测量的时间。

从图4~7看出,图4、5中所有探针都连续地测到合理的时间,图6、7中虽有个别探针没有接通或因测到的时间明显不合理画图时舍掉,但总的来说都比较清楚地显示了炸药DDT过程的各种波的走时曲线。

以图4为例讨论我们测量的炸药DDT过程。从图4看出,先在颗粒状RDX装药中产生仅盖帽探针接通的低压压缩波,该波先以 $1.04\ \text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度在装药中传播,在离炸药上端面距离 $S=30\ \text{mm}$ 处开始加

速,在 $S=50\ \text{mm}$ 处波速达 $2.20\ \text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。低压压缩波在装药中传播时,在 $S=20\ \text{mm}$ 处产生使离子探针接通的燃烧波,以 $1.24\ \text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的初速在低压压缩波压缩过的炸药中加速传播,在 $S=50\ \text{mm}$ 处速度达 $4.90\ \text{km}\cdot\text{s}^{-1}$,赶上前面的压缩波,使炸药起爆。爆轰波以 $6.86\ \text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度在DDT管中传播。

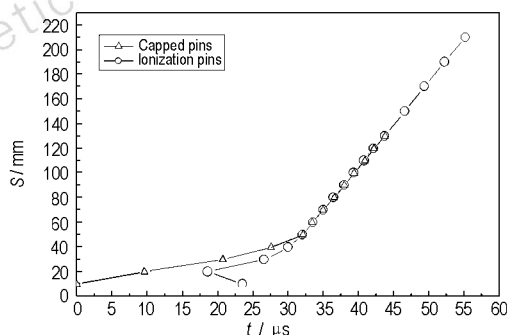


图4 实验装置1(DDT管材为铝)测量的RDX炸药 $S\sim t$ 曲线

Fig. 4 Distances vs time curves measured with the DDT experimental set-up No. 1 for RDX explosives in an aluminum tube ($\rho_0 = 1.318\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

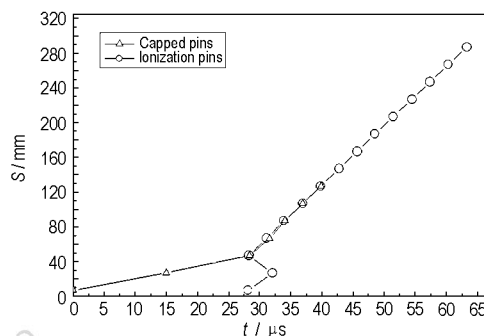


图5 实验装置1(DDT管材为钢)测量的RDX炸药 $S\sim t$ 曲线

Fig. 5 Distances vs time curves measured with the DDT experimental set-up No. 1 for RDX explosives in a steel tube ($\rho_0 = 1.311\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

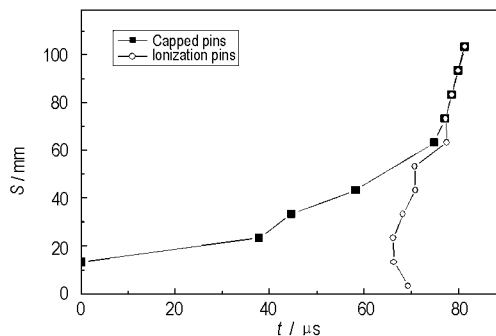


图6 实验装置1(DDT管材为钢)测量的HMX炸药 $S\sim t$ 曲线

Fig. 6 Distances vs time curves measured with the DDT experimental set-up No. 1 for HMX explosives in a steel tube ($\rho_0 = 1.450\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

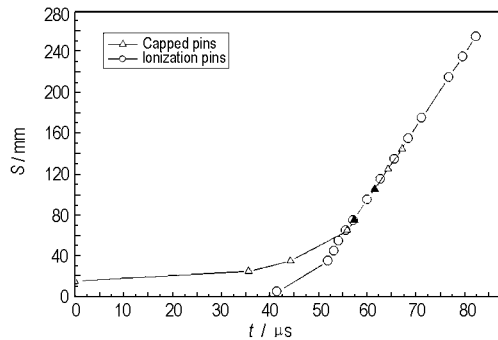


图7 实验装置2(DDT管材为钢)测量的HMX炸药 $S \sim t$ 曲线

Fig. 7 Distances vs time curves measured with the DDT experimental set-up No. 2 for HMX explosives in a steel tube ($\rho_0 = 1.390 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)

从图4~7看出,颗粒状HMX、RDX的DDT实验中,都是由盖帽探针先测到低压压缩波,然后才有燃烧波、冲击波、带化学反应的冲击波、爆轰波等,说明在装药中都是先传播低压压缩波,然后才有其他过程出现。

在同样条件下实验测量的颗粒状RDX到爆轰距离为47~85 mm,颗粒状HMX的到爆轰距离为35~73 mm,说明在同样条件下颗粒状RDX、HMX的DDT的到爆轰距离相近。

3.2 DDT管材料对颗粒状装药DDT的影响

图4、5分别为DDT管材料为铝、钢时颗粒状RDX的DDT走时曲线。从图4看到DDT管材料为铝时,燃烧波连续加速,赶上前面的低压压缩波时RDX起爆。从图5看到DDT管材料为钢时,在RDX床中传播的低压压缩波先后以 1.34 、 $1.49 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度传播,压缩波传到 $S = 47.3 \text{ mm}$ 处时直接使RDX起爆,爆轰波以 $6.80 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度传播。爆轰波向前传播的同时出现回爆,回爆爆速为 $5.26 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。我们还看到 $t = 28.093 \mu\text{s}$ 时在 $S = 7.3 \text{ mm}$ 处出现燃烧波,燃烧波和回爆波在 $S = 27.3 \text{ mm}$ 处相遇。实验结果说明DDT管材料对颗粒状装药的DDT有一定的影响。

本实验中在炸药床上端面装有长度约22 mm的小粒黑,点火头点燃小粒黑后,小粒黑中产生的燃烧波向前传播,由于波后的燃烧产物受上端封闭材料和DDT管的限制,燃烧波后的压力和温度迅速提高,使得燃烧波的传播逐渐加速,在燃烧波前形成压缩波,传入炸药中,压缩波压缩炸药床。由于燃烧波的温度和压力的不断提高,燃烧波逐步加速,不断向前发射压缩波。当DDT管材料为钢时限制较强,小粒黑中产生的初始压缩波和传入炸药中的压缩波也强,波速达 $1.338 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在此压缩波作用下炸药床压缩得紧,

密度大,空隙少,后续的压缩波不能使压缩过的炸药反应。当这些压缩波会聚成冲击波时,使未压缩过的颗粒炸药床起爆。相对而言,由于铝DDT管对小粒黑中燃烧波的限制小些,因此在小粒黑中产生的初始压缩波弱,传入炸药床的压缩波也弱,速度为 $1.04 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,还衰减为 $0.90 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,炸药床压缩的不是很紧,空隙多。在后续压缩波通过时空隙处形成热点,加之在压缩波作用下颗粒间的剪切、颗粒本身的塑性变形形成的热点,使炸药中产生较高的温度,产生燃烧波。炸药反应提供能量,又使燃烧波加速,连续过渡到爆轰。从分析得出,DDT管为钢或为铝时颗粒状RDX的DDT为两种不同的模式,前者为突然转变模式,后者为连续转变模式,DDT管材料为钢或为铝时颗粒状RDX的DDT机理不同。

3.3 点火方式对颗粒状装药DDT的影响

从图6和图7可以看出,颗粒状HMX在点火药直接点火和活塞驱动点火时都是在HMX床中先传播低压压缩波,再在压缩波压缩过的装药中产生燃烧波,炸药起爆,说明两种点火方式下炸药DDT有基本相同的过程,但仔细分析不完全相同。从图6看出,点火药直接点火时,当压缩波会聚成速度达 $4.29 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的冲击波时,在 $S = 73.4 \text{ mm}$ 处直接使炸药起爆,爆速为 $7.31 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,是密度为 $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的HMX的正常爆速。同时还看到燃烧波或带化学反应的冲击波向前、向后运动。从图7看到活塞驱动点火时,压缩波在炸药床中传播过程中也会聚成冲击波,以 $2.57 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度在炸药床中传播,在低压压缩波压缩过的炸药床中产生燃烧波,发展成带化学反应的冲击波,以 $2.88 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的平均速度向前运动。在 $S = 35 \text{ mm}$ 处使炸药床起爆,爆速高达 $8.13 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。按装药密度和爆速的关系计算,此爆速相当于HMX装药密度为 $1.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (相当于理论最大密度的86.4%)时的正常爆速。在 $S = 65 \text{ mm}$ 处爆轰波赶上前面的冲击波,以炸药床初始密度 $1.39 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的正常爆速向前传播。说明两种点火方式点火时炸药的DDT过程不完全相同。活塞改变了DDT管的封闭条件,对炸药的DDT带来一定的影响。

3.4 加入TATB和钝感剂后对颗粒状HMX装药DDT的影响

我们用图2所示的实验装置和图3所示的测试线路研究了JOB-9003(HMX/TATB/粘结剂/钝感剂 = 87/7/4.2/1.8)的DDT。所测量的两发实验走时曲线见图8。

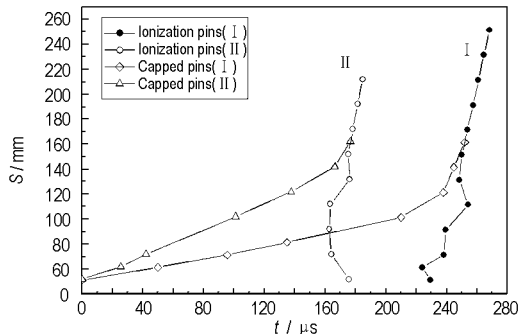


图8 实验装置2(DDT管材为钢)测量的JOB9003炸药 $S \sim t$ 曲线

Fig. 8 Distances vs time curves measured with the DDT

experimental set-up No. 2 for JOB9003 explosives in steel tubes

(I: $\rho_0 = 1.083 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; II: $\rho_0 = 1.126 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)

从图8可看出,两发实验测量的走时曲线基本类似,低压压缩波传播距离长、速度小,其中第1发在100 mm以压缩波速度小于 $0.30 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,第2发在120 mm内压缩波速度小于 $0.60 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。之后压缩波汇聚成冲击波,冲击波逐渐加速,同时伴有离子反应过程的产生和传播,最终使炸药起爆。第1发实验在 $S = 161.4 \text{ mm}$ 处起爆, $S = 171.4 \text{ mm}$ 以后为正常爆轰,爆速 $5.53 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在 $S = 161.4 \sim 171.4 \text{ mm}$ 之间平均爆速为 $5.78 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,大于正常爆速 $5.53 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。第二发在 $S = 152 \text{ mm}$ 处起爆, $S = 162 \text{ mm}$ 以后为正常爆轰,爆速为 $6.04 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 $S = 152 \sim 162 \text{ mm}$ 处平均爆速度为 $7.69 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,大于正常爆速。从两发实验我们也看到活塞驱动点火时,也存在大于正常爆速的区域。JOB-9003主要成份是HMX,但由于有TATB、钝感剂,燃烧到爆轰的距离为 $150 \sim 160 \text{ mm}$,比纯颗粒状HMX的到爆轰距离大的多,说明加入TATB和钝感剂对HMX的到爆轰距离有很大影响。

4 结论

- 同时使用盖帽探针、同轴离子探针较好地测出炸药DDT过程不同的走时曲线;
- 炸药的DDT是多阶段非定常过程,首先在炸药中传播的是低压压缩波,之后有燃烧波、冲击波、爆轰波等过程产生;
- 点火方式、DDT管材料、炸药中掺杂都对炸药的DDT过程有一定的影响。

参考文献:

- [1] Macek A. Transition from deflagration to detonation in cast explosives[J]. J. Chem. Phys., 1953, 31(1): 162 - 167.
- [2] Bernecker R R, Sandusky H W, Clairmont A R. Deflagration to detonation transition studies of Porous explosive Charges in plastic tubes[A]. 7th Symp. (Int) on Detonation[C]. Annapolis Md: NSWC, 1981, 119.
- [3] Sandusky H W, Bernecker R R. Compressive reaction in porous beds of energetic materials[A]. 8th Symp. (Int) on Detonation [C]. Albuquerque NM: NSWC, 1985, 881.
- [4] McAfee J M, Asay B W, et al. Deflagration to detonation in granular HMX[A]. 9th Symp. (Int) on Detonation [C]. Arlington Va: OCNR, 1989, 265.
- [5] McAfee J M, Asay B W, et al. Deflagration to detonation in granular HMX, ignition, kinetics and shock formation [A]. 10th Symp. (Int) on Detonation [C]. Boston MS: NSWC, 1993, 685.
- [6] Verbeek R, Steen A van der, Jong E de. The influence of parameter variations on the deflagration to detonation transition[A]. 10th Symp. (Int) on Detonation [C]. Boston MS: NSWC, 1993, 685.

Experimental Study on the Deflagration to Detonation Transition for Granular HMX, RDX

ZHAO Tong-hu, ZHANG Xin-yan, LI Bin, ZHAO Feng

(Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900)

Abstract: The deflagration to detonation transition for granular HMX, RDX has been experimentally studied with capped pins and coaxial ionization pins. The experimental results show that the process of deflagration to detonation transition for the granular HMX, RDX is very complicated. It is affected by the ignition method, the impurity in the explosive and the DDT tube material.

Key words: explosion mechanics; deflagration to detonation transition; ignition method; DDT tube material; impurity