文章编号:1000-5773(2009)06-0441-06

以 HMX 为基的两种压装高密度炸药的燃烧转爆轰实验研究*

王 建,文尚刚

(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:为研究以 HMX 为基的固体高能炸药的燃烧转爆轰性能,采用同轴电探针和压力传感器测试技术对常用的 A、B 两种压装高密度高能炸药开展燃烧转爆轰实验,研究装药组分和约束条件对压装高密度炸药燃烧转爆轰性能的影响。实验结果表明:这两种压装高密度炸药难以发生燃烧转爆轰;在强约束条件下(45 号钢,内径 25.4 mm、外径 65 mm、长度 600 mm),A 压装炸药(HMX 质量分数为 95%,密度为 1.86 g/cm^3)基本实现了燃烧转爆轰,爆轰诱导距离约为 545 mm;在相同的实验条件下,A 压装炸药比 B 压装炸药(HMX 质量分数为 87%,密度为 1.84 g/cm^3)更易于发生燃烧转爆轰,即 A 压装炸药的安定性相对较差。

关键词:爆炸力学;高密度炸药;燃烧转爆轰;奥克托金
中图分类号:TJ410.34 **文献标识码**:A

1 引 言

炸药的燃烧转爆轰(Deflagration to Detonation Transition,简称 DDT)是一个经历多阶段的复杂过程,它是炸药的重要特征之一。DDT 过程广泛存在于炸药的起爆以及武器弹药的作用过程中,同时,它也是炸药的生产和贮存过程中必须考虑的安全因素之一。因此,DDT 成为炸药爆炸特性和弹药安全性能研究的重要内容,备受学者的重视。

奥克托今(HMX)是当前综合性能最好的高能炸药,具有高密度、高能量以及热安定性好的特点。以 HMX 为基的高能炸药,广泛用于各种射孔弹装药、常规导弹战斗部装药以及战略武器装药,如 A 压装高密度炸药和 B 压装高密度炸药。粉状或是颗粒状 HMX 炸药的 DDT 过程已有很多的研究,而对实际装药状态的压装或铸装 HMX 炸药的相关研究则较少。已有的相关研究主要有:A. Macek[2] 采用应变计和电离式探针研究了铸装 HMX 炸药的 DDT 过程,实验表明炸药点燃后,燃烧波阵面后的压力快速增长产生压缩波,压缩波在未燃炸药中叠加,形成冲击波,最终冲击起爆炸药。近年来,F. Leuret[3] 采用 3 种约束条件研究了压装高密度炸药(含 HMX96%的塑性炸药)的 DDT 过程,实验发现 DDT 管长度为 400 mm 的 53 发实验中有 4 发转为爆轰,而长度为 1 000 mm 的 7 发实验中也只有 4 发转为爆轰,这表明压装高密度炸药的 DDT 过程是呈几率性的。D. E. Hare[4] 和 W. Sandusky[5] 都研究了初温对高能 LX-04 炸药(质量分数为 15%的钝感剂、85%的 HMX)的 DDT 过程的影响,实验表明该炸药难以点燃,难以发生 DDT,并且温度的影响几乎没有规律。黄毅民[6] 对 B 压装炸药进行 DDT 实验的研究表明,以钛粉与不定型硼为点火药,未能使该炸药在 300 mm 长度的 DDT 管内发生爆轰。文尚刚[7] 对 A 压装炸药和 B 炸药的 DDT 过程进行了实验研究,表明密度为 1.84 g/cm^3 的 A 压装炸药药柱在

* **收稿日期**:2008-12-08;**修回日期**:2009-03-12
作者简介:王 建(1981—),男,硕士,主要从事爆炸力学研究. E-mail:wj345jay@sina.com

400 mm的距离内并未转为爆轰,发现当火焰波速度小于 500 m/s 时,电离式电探针作用不可靠。上述研究既表明了压装高能炸药难以形成 DDT,也表明 DDT 过程十分复杂,并伴有一定的随机性,因此,对压装高能炸药的 DDT 研究比较困难。

本研究采用电探针和压力传感器测试以 HMX 为基的两种压装高密度 A、B 炸药的燃烧转爆轰过程,拟研究装药组分和约束条件对此类炸药 DDT 过程的影响。

2 实验装置和测试系统

实验使用了两种强约束条件的 DDT 管,实验装置如图 1 所示。DDT 管管材为 45 号钢,内径 25.4 mm,外径 65 mm,长度有 400 mm 和 600 mm 两种。采用电点火头加小粒黑火药的点火方式点燃炸药(小粒黑的用量都是 1.75 g),利用压力传感器和电探针测试炸药的燃烧波、压缩波、冲击波以及爆轰波的发展历程。压力传感器选用量程为 10 GPa 的 Y-YD-1254 型石英压力传感器,第一只传感器(CH1)距点火端都为 70 mm,第二只传感器(CH2)距点火端 370 mm 或 550 mm (对应不同长度的 DDT 管)。实验中使用了直径为 0.7 mm 和 2.0 mm 的两种电探针,在长度为 600 mm 的 DDT 管上分布 19 根电探针,在长度为 400 mm 的 DDT 管上分布 12 根电探针,第一根探针距点火端的距离都为 40 mm,此后两探针间距为 30 mm。

DDT 实验测试系统如图 2 所示:压力传感器、程控电荷放大器(SK2000T)和数字示波器(TDS5054)用于测试 DDT 管不同位置处的压力变化;电探针、网络讯号源和时间间隔记录仪(DL-32Ⅱ)用于记录燃烧波、压缩波或爆轰波的到达时间;延时同步机(VST-KI)用于同步触发起爆器(DYQB-Ⅱ)、时间间隔记录仪和数字示波器。

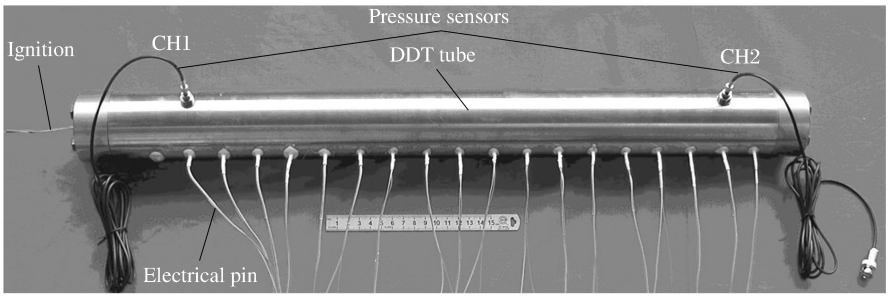


图 1 DDT 实验装置

Fig. 1 Experimental set-up

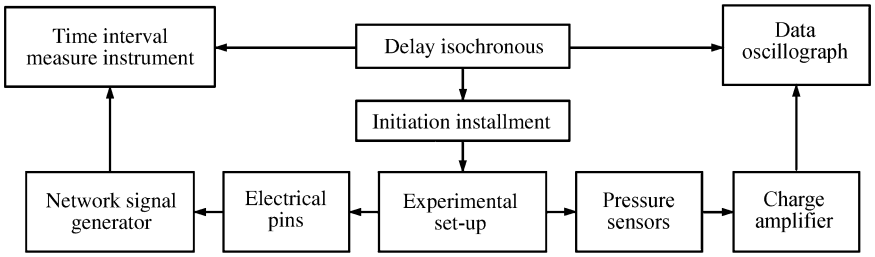


图 2 测试系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the testing system

3 实验结果分析与讨论

在不同装药组分或不同约束条件下进行了 4 发实验,实验结果如表 1 所示。实验装药为直径 25.4 mm、长度不等的压装炸药药柱。

表 1　DDT 实验结果

Table 1　Experimental results

No.	Length of DDT tube/(mm)	Explosive	ρ/(g/cm^3)	Length of charge/(mm)	Conclusion	DDT run-up distance/(mm)
1	400	A	1.86	344	Deflagration	—
2	400	B	1.84	346	Deflagration	—
3	600	A	1.86	545	Detonation	545
4	600	B	1.84	531	Deflagration	—

3.1　电探针测试结果

针对电探针在高密度炸药反应初期作用不稳定的问题,采用直径不同的两种电探针进行测试。直径 2 mm 的探针耐压高,但灵敏度低;直径 0.7 mm 的探针灵敏度高,但耐压低。实验结果表明,两种电探针都未能解决作用不可靠的问题。用直径 0.7 mm的探针测得的信号如图 3 所示,由后 3 根探针得到的平均波速约为 2 727.3 m/s,较真实值偏低。在 3.15～3.20 ms 之间出现了 3 个异常信号点,分析其原因,可能是探针漏电所导致,也可能是由于炸药反应初期并不能可靠导通电探针,直到后期产生强的回传爆轰波导通探针。

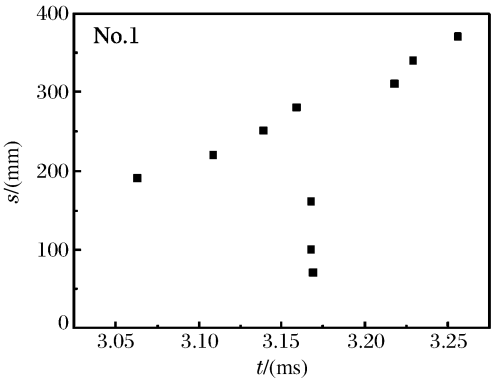


图 3　第 1 发实验的电探针导通时间

Fig. 3　The recorded times at different positions in No. 1

实验结果表明,电探针信号受产物电离程度影响明显,这既与炸药状态有关(散装药的电探针信号明显好于压装炸药,因为压装炸药初期反应速度慢),也与 DDT 过程的复杂性、并伴随一定的随机性有关。因此,在压装炸药爆轰实验中,电离探针测试技术有待进一步改进或完全替代为光纤探针。

3.2　压力传感器测试结果

实验测得的典型压力信号如图 4(第 4 发实验结果)所示,图 4(a)为 CH1 的压力信号,峰值压力为 0.42 GPa,图 4(b)为 CH2 的压力信号,峰值压力为 24.39 GPa,两者时间间隔为 91.3 μs,计算得到平均波速约为 5 257 m/s。图 4(a)中出现两个压力值都较小的压力峰(其中第 2 个压力峰是炸药反应后期的强冲击波向点火端传播所致),表明 B 压装炸药药柱在初期 70 mm 以内的反应较慢。在 550 mm 处 CH2 的压力峰值已经超出传感器的量程,表明此刻的炸药反应剧烈,可能已经处于爆燃或是爆轰状态。

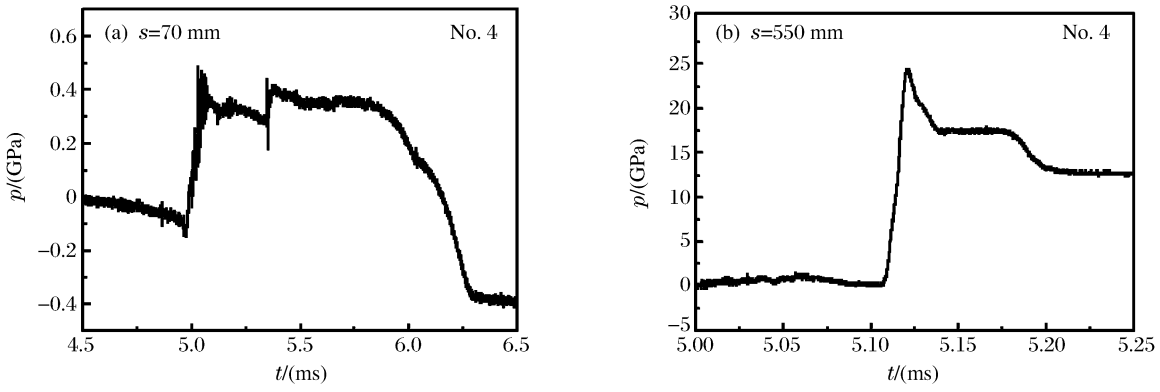


图 4　第 4 发实验不同位置处的压力曲线

Fig. 4　The pressure curves at different positions in No. 4

3.3 约束条件对压装高能炸药 DDT 的影响

对两种压装炸药在不同约束条件下的实验结果表明，约束条件对压装炸药的 DDT 过程影响很大。各发实验之间，压力信号和电探针信号的差异不大，但是回收的 DDT 管碎片差异很明显。图 5、图 6 分别为第 1 发和第 3 发的实验结果，图 5 中的 DDT 管碎片有大半的大碎片，而图 6 中的碎片几乎全是小碎片。这说明第 3 发实验中的 A 压装炸药在 DDT 管尾部基本形成了燃烧转爆轰，爆轰诱导距离为 545 mm，而第 1 发实验中 B 压装炸药在 400 mm 内并未达到爆轰状态，仍处于爆燃或是低速爆轰阶段。实验结果表明 A 压装炸药在 600 mm 长度的 DDT 管内的反应程度比在 400 mm 长度的 DDT 管内更加剧烈，也表明 A 压装炸药由爆燃发展到爆轰要经历很长一段距离，对比第 1 发、第 3 发实验，这段距离大约在 300 mm 的尺度。对比第 2 发、第 4 发实验结果，虽然两发实验都没有发展到爆轰阶段，但是从 DDT 管碎片和压力信号的分析说明，B 压装炸药在 600 mm 长度的 DDT 管内的反应程度明显比在 400 mm 长度的 DDT 管内更加剧烈。



图 5 第 1 发实验回收的 DDT 管碎片

Fig. 5 The DDT tube fragments recovered in No. 1

上述研究表明，A 压装炸药和 B 压装炸药的反应程度和燃烧转爆轰的趋势随着约束条件的增加而增加，当约束强度足够高时，压装炸药的燃烧转爆轰是必然要发生的。

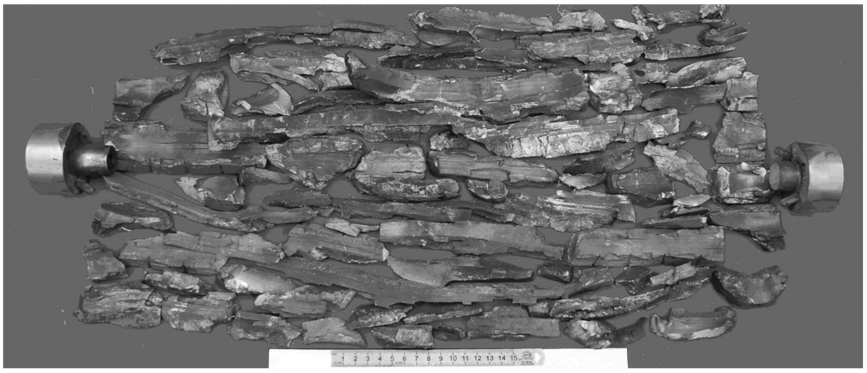


图 6 第 3 发实验回收的 DDT 管碎片

Fig. 6 The DDT tube fragments recovered in No. 3

3.4 装药种类对压装高能炸药 DDT 的影响

在两种约束条件下研究了 A 压装炸药和 B 压装炸药在 DDT 性能方面的差异，实验发现在相同实验条件下，A 压装炸药比 B 压装炸药反应程度更高，燃烧转爆轰的趋势更加明显。图 7 为第 4 发实验结果，看出 B 压装炸药产生的 DDT 管碎片较大，说明炸药在 600 mm 长度内只是发展到了爆燃状态，与图 6对比，A 压装炸药产生的 DDT 管碎片相当小，反映其在 600 mm 长度内已经形成了爆轰。对比都未形成爆轰的 400 mm 长度的两发实验也得出相同的结论，A 压装炸药比 B 压装炸药反应更为剧烈。

实验结果表明，以 HMX 为基的两种压装高能炸药在燃烧转爆轰性能上存在很大的差异，对比分析表明，B 压装炸药的安全性相对更好。分析原因可能是由于 B 压装炸药中的钝感剂含量比 A 压装炸药要多。因此，说明以 HMX 为基的高能炸药在组分上少量差异，在爆轰性能方面也相应的出现了一定的区别。



图 7　第 4 发实验回收的 DDT 管碎片

Fig. 7　The DDT tube fragments recovered in No. 4

4　结　论

对比相关的粉状或颗粒状 HMX 炸药的 DDT 实验结果，表明在相同的实验条件下，以 HMX 为基的固体压装高密度炸药更难形成燃烧转爆轰现象。分析两者的区别主要体现在燃烧阶段，尤其是对流燃烧阶段，对粉状或疏松状炸药而言，对流燃烧更容易而且更充分，从而使得其反应加速较快，因此更容易形成 DDT 现象。而压装高密度炸药的内部孔隙率小、结构一致性和力学性能更好，炸药被点燃时，其初始燃烧表面积较小，产生的初始压缩作用较小，加上炸药的抗压性较强，炸药结构完整性没有受到大的影响，故难于实现燃烧加速，也难于形成足够强度的冲击使炸药发生爆轰。

在本研究实验条件下，得到的主要结论是：

(1) A 压装炸药在强约束条件下(DDT 管为 45 号钢，内径 25.4 mm、外径 65 mm、长度 600 mm，点火药药量 1.75 g)，基本实现燃烧转爆轰，爆轰诱导距离约为 545 mm，而其余 3 发实验炸药都只是发展到爆燃状态；

(2) 在相同的实验条件下，A 压装炸药比 B 压装炸药更易于发生燃烧转爆轰，即 A 压装炸药的安定性相对较差；

(3) 压装高能炸药的反应程度、燃烧转爆轰的趋势随着约束条件的增加而增加，当约束强度足够高时，压装炸药的燃烧转爆轰也是必然要发生的。

References：

[1] Dong H S, Zhou F F. The Performance of High Explosive and Relative Materials [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1989. (in Chinese)
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.

[2] Macek A. Transition from Deflagration to Detonation in Cast Explosive [J]. J Chem Phys, 1959, 31(1): 162-167.

[3] Leuret F, Chaissé F, Presles H N, et al. Experimental Study of the Low Velocity Detonation Regime during the Deflagration to Detonation Transition in a High Density Explosive [A]//Proceedings of 11th International Symposium on Detonation [C]. Snowmass, Colorado, 1998: 693-701.

[4] Hare D E, Forbes J W, Garcia F, et al. A Report on the Deflagration-to-Detonation Transition (DDT) in the High Explosive LX-04 [A]//Proceedings of International Symposium on Detonation [C]. NAVSEA, Indian Head, MD: Lawrence Livermore National Laboratory, 2004: 1-29.

[5] Sandusky H W, Granholm R H, Bohl D G, et al. Deflagration to Detonation Transition in LX-04 as a Function of Loading Density, Temperature, and Confinement [A]//Proceedings of 13th International Symposium on Detonation [C]. Norfolk, VA, 2006: 1-9.

[6] Huang Y M, Feng C G, Long X P. Deflagration to Detonation Transition Behavior of Explosive JOB-9003 [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2002, 1: 54-58. (in Chinese)
黄毅民, 冯长根, 龙新平. JOB-9003 炸药燃烧转爆轰现象研究 [J]. 火炸药学报, 2002, 1: 54-58.

[7] Wen S G, Wang S Q, Huang W B, et al. An Experimental Study on Deflagration-to-Detonation Transition in High-Density Composition B [J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(6): 567-571. (in Chinese)
文尚刚, 王胜强, 黄文斌, 等. 高密度 B 炸药的燃烧转爆轰实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(6): 567-571.

[8] McAfee J M, Asay B W, Campbell W, et al. Deflagration to Detonation in Granular HMX [A]//Proceedings of 9th International Symposium on Detonation [C]. Portland, Oregon, 1989: 265-279.

Experimental Study on Deflagration-to-Detonation Transition in Two Pressed High-Density Explosives

WANG Jian, WEN Shang-Gang

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

Abstract: This paper deals with the experimental findings of the characteristic of deflagration-to-detonation transition in two kinds of pressed explosives—A and B. A series of tests are performed on the high-density explosives. Electrical pins and pressure sensors are used to measure the pressures and velocities of shock, flame, or detonation wave. The experimental results show that it's very difficult to obtain the transition in the pressed explosives. The phenomenon of low velocity detonation (LVD) is achieved under the confinement condition that the length of DDT tube is 400 mm. A deflagration-to-detonation transition in the pressed explosives of A is obtained under the stronger confinement condition that the length of DDT tube is 600 mm and the detonation-induced distance is slightly longer than 545 mm. It's also concluded that the pressed explosive of A is more sensitive to transit into detonation than the pressed explosive of B under the same experimental conditions.

Key words: mechanics of detonation; high-density explosive; deflagration to detonation transition; HMX