

文章编号: 1006-9941(2013)05-0649-04

PBX-2 炸药加热条件下燃烧转爆轰特性

代晓淦, 王 娟, 文玉史, 黄毅民, 戴明鸿

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为了研究炸药在加热前后的燃烧转爆轰特性变化, 设计了加热条件下燃烧转爆轰试验加载系统, 对 $\Phi 30 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的 PBX-2 炸药进行了试验。试验中采用热电偶测试装置壳体和炸药表面温度变化过程, 采用离子探针测量了燃烧转爆轰过程的传播时间和距离, 探讨了加热与未加热 PBX-2 炸药的燃烧转爆轰特性。结果表明, 与未加热相比, 加热至 $85 \text{ }^\circ\text{C}$ 时 PBX-2 炸药更难以发生燃烧转爆轰现象。

关键词: 爆炸力学; 炸药安全性; 燃烧转爆轰 (DDT)**中图分类号:** TJ55; O38**文献标识码:** A**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.05.017

1 引言

炸药燃烧转爆轰 (Deflagration to Detonation Transition, DDT) 特性是评价炸药安全性的重要指标, 能为炸药装药安全性分析评估提供更准确的依据。近十年来, 国内外对炸药 DDT 过程进行了大量的研究。Leuret 等^[1] 研究了 HMX/粘结剂 (96%/4%) 炸药在高密度 ($1.823 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 低孔隙率 (超过理论最大密度 98%) 状态下的 DDT 行为。Verbeek^[2]、Asay^[3] 及 Luebecke^[4] 研究发现 DDT 现象一般发生在具有较强约束条件或较大尺寸的装药中。赵同虎^[5-6]、黄毅民^[7] 等研究了颗粒状 HMX、RDX 炸药 DDT 特性, 给出了炸药发生 DDT 的条件。文尚刚等^[8] 研究了约束条件对 HMX 基压装高密度 PBX 炸药的 DDT 过程影响。陈朗等^[9] 采用试验和数值计算的方式研究了成型 PBXC03 炸药的 DDT 过程。但这些研究主要是针对常温下炸药 DDT 过程, 难以真实反映炸药在火灾环境下的危害程度, 因此, 有必要研究加热状态下炸药 DDT 特性变化, 分析炸药在火烧条件下燃烧转爆轰的条件以及难易程度, 这对评估大型装药在热作用下的安全性具有重要意义。

本课题组针对 PBX-2 炸药开展了加热状态下燃烧转爆轰试验, 研究了加热前后 PBX-2 炸药燃烧转爆轰特性变化。

收稿日期: 2012-06-19; **修回日期:** 2013-03-17**作者简介:** 代晓淦 (1978 -), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事炸药安全性研究。e-mail: 1085396505@QQ.com

2 试验原理及测试

2.1 试验原理与装置

将成型炸药柱密封在 DDT 管中, 加热 DDT 管使炸药柱至预定温度, 通过点火头点燃炸药柱, 燃烧波即在炸药柱中传播, 一定条件下可转变为爆轰波。采用离子探针测试燃烧波或爆轰波的传播时间和距离, 计算传播速度。根据测试结果和装置残骸, 综合判断炸药的反应程度。

与传统的 DDT 试验装置不同, 为了研究加热状态下炸药的 DDT 过程, 本课题组设计了一种可加热的 DDT 试验装置, 如图 1 所示。试验装置主要包括 DDT 管、点火部分、炸药柱、电探针、热电偶、电加热装置等, 空气腔为 20 mm (用于测试 DDT 管内气体压力)。采用的钢壳体内径为 30 mm , 外径为 50 mm , 长 420 mm , 壳体材料采用 $45^\#$ 钢。设计的电探针间距为 25 mm , 共 14 个探针孔, 试验装置照片如图 2 所示。

2.2 试样

PBX-2 炸药主要由 HMX、TATB 和粘结剂等组成, 密度约为 $1.85 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $140 \text{ }^\circ\text{C}$ 时开始出现明显热分解, 由中国工程物理研究院化工材料研究所提供。按炸药机加工艺将 PBX-2 炸药加工成 $\Phi 30 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的药柱, 然后将 4 个 $\Phi 30 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 药柱组合为 $\Phi 30 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 药柱, 总药量约 486.5 g 。每个状态准备了 2 发试验样品, 本文的结果是试验平均结果。

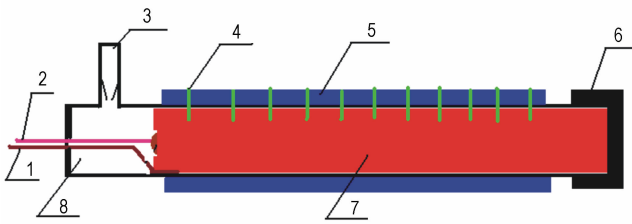


图1 可加热的 DDT 试验装置示意图

1—热电偶, 2—点火部分, 3—冲气口, 4—电探针, 5—电加热装置, 6—钢壳, 7—炸药柱, 8—空气腔

Fig.1 Diagram of heatable DDT test device

1—thermocouple, 2—ignition, 3—scoop, 4—probe, 5—heating device, 6—steel shell, 7—explosive, 8—air-filled cavity



a. non-heating device



b. heating device

图2 DDT 试验装置照片

Fig.2 Photographs of DDT test device

2.3 试验方案

考虑在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上电探针可能失效, 同时为了与 PBX-2 炸药实际应用结合, 解决工程问题, 故选择 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行实验, 对比分析加热与未加热 PBX-2 炸药 DDT 特性的变化趋势。

加热过程中, 采用较低升温速率 ($2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$) 控制温度, 使炸药中心温度与炸药表面温度尽可能接近。对炸药进行开孔、开槽, 在炸药半径处 (即炸药样品表面与试验弹内壁接触处) 布置热电偶 (直径约为 2 mm), 测量炸药表面温度变化过程。沿炸药轴向不

同位置安装电离探针测量炸药反应波阵面速度, 得到燃烧波或爆轰波的传播时间和距离, 判断炸药反应的剧烈程度。

3 结果与讨论

测试了可加热 DDT 装置炸药表面温度变化过程, 结果如图 3 所示。从图 3 可以看出, 该加载方式能有效实现 DDT 装置中炸药的温升控制, 炸药被加热至 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时与壳体温度相差约 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

常温以及 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的 PBX-2 炸药 DDT 试验结果照片如图 4 所示。从图 4 可以看出, 未加热时 DDT 管破裂并形成一些较大的破片, 底板上有凹坑 (图 4a); 当炸药表面被加热到 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 再点火时, 装置壳体前部破裂 (图 4b), 中后部壳体完好, 壳内仍剩余有大量炸药样品, 且壳体仍剩余部分完好的探针, 表明加热至 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后反应仅传播至 DDT 管中部位置, 相比常温状态下壳体破裂时间提前。

图 5 为根据探针信号获得的 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下反应传播距离与相对时间、反应传播距离与波阵面速度变化曲线。表 1 为加热前后 PBX-2 炸药 DDT 试验测试结果。从图 5 可以看出, 随着传播距离的增加, 波阵面速度逐渐增加。同时, 由表 1 可见, 未加热 PBX-2 炸药在 DDT 管壳体破裂前反应传播速度约为 $4317.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 加热至 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 PBX-2 炸药在 DDT 管壳体破裂前反应传播速度约为 $2976.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 均低于 PBX-2 炸药完全爆轰时的爆速 (约为 $8712\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [10]), 因此, 结合图 4 中试验结果, 综合判断加热至 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 PBX-2 炸药未发生 DDT 现象。

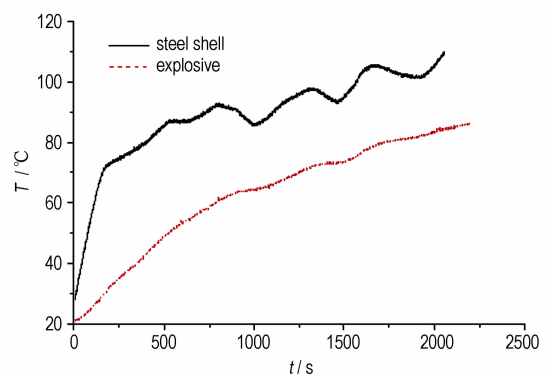


图3 外壳体和炸药温度随时间变化曲线

Fig.3 Curves of explosive and steel shell temperature changing with time



图 4 PBX-2 炸药 DDT 试验结果照片

Fig.4 DDT results of PBX-2

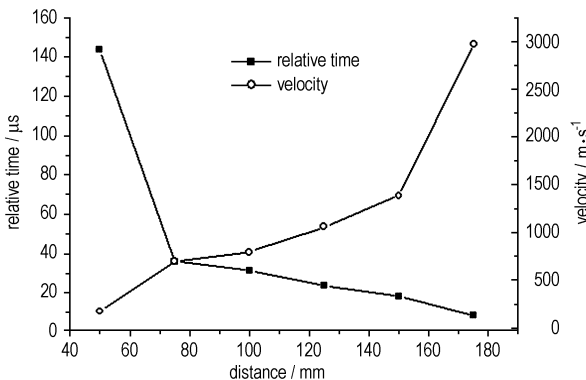


图 5 反应传播距离与相对时间及反应传播距离与波阵面速度变化曲线(85 °C)

Fig.5 Relationship between propagation distance and relative time, wavefront velocity at 85 °C

表 1 加热与未加热 PBX-2 炸药 DDT 试验测试结果

Table 1 DDT results of unheated and heated PBX-2

temperature / °C	velocity before shell rupturing / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	propagation distance / mm	reaction degree
25	4317.8	400	low velocity detonation
85	2976.2	175	deflagration

实际上, 试验获得的“低速爆轰 (Low velocity detonation, LVD)”现象从一定角度看并不是真正意义上的爆轰, 而是炸药件在燃烧形成的不稳定压缩波作用下, 产生的结构破坏, 形成裂隙, 为破碎炸药中的

燃烧波提供能量支持前驱不稳定压缩波传播, 这种相互作用达到一种平衡后, 能定常地向前传播。在这种形状不稳定 (由于约束的管体的形变和破裂等原因造成) 的压缩波作用下, 炸药件发生挤压、产生剪切等作用而破碎, 使后续的燃烧波易于进行下去。形成了一个破坏—燃烧—支持前驱压缩波破坏的稳定过程, 当这种定常传播的“LVD”受到干扰时 (如炸药柱间有间隙或炸药已破碎), 其定常传播状态被打破很快就会产生 DDT 现象。

图 6 为常温以及加热至 85 °C 下的 PBX-2 炸药的 SEM (扫描电镜) 结果对比。从图 6 中可以看出, 未加热时 PBX-2 炸药内孔隙清晰 (图 6a), 粘结剂包覆炸药颗粒, 粘结剂、炸药颗粒界面明确, 而加热至 85 °C 时 (图 6b, 粘结剂明显发生了流动, 填补了炸药原有的孔隙, 几乎无法判定粘结剂、炸药颗粒界面。

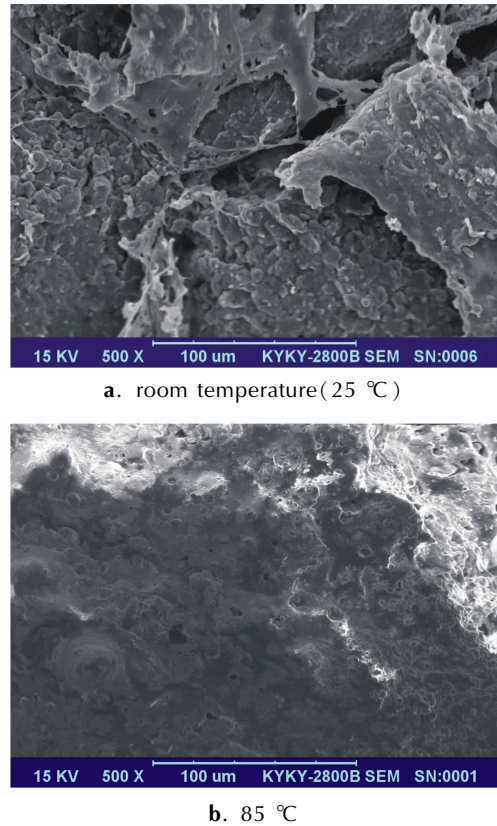


图 6 加热与未加热 PBX-2 炸药 SEM 照片对比

Fig.6 SEM photographs for unheated and heated PBX-2

因此, 相比未加热, 加热至 85 °C 的 PBX-2 炸药柱中缺乏孔隙而不易形成对流燃烧, 炸药燃烧面积相对较小, 气体生成速率和能量释放速率都受到很大的限制, 难以出现 DDT 所需要的较高压力增长速率, 导致在 DDT 试验中炸药点火后前部反应的炸药产生高压

无法维持其向后面炸药传播,使反应产生压力高于壳体约束强度,故加热 85 °C 后 DDT 管壳体破裂时间提前。因此,在燃烧转爆轰试验中加热至 85 °C 后的 PBX-2 炸药反应程度低于未加热炸药。

4 结 论

在可加热的燃烧转爆轰试验装置条件下,常温时 PBX-2 炸药反应传播距离达到了 400 mm,在 DDT 管壳体破裂前反应传播速度约为 $4317.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,在 85 °C 下 PBX-2 炸药在 DDT 管壳体破裂前反应传播距离仅为 175 mm,速度约为 $2976.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,低于 PBX-2 炸药完全爆轰时的爆速。因此,PBX-2 炸药未发生燃烧转爆轰现象。加热对 PBX-2 炸药的燃烧转爆轰特性有显著影响:加热至 85 °C 后 PBX-2 炸药的反应程度明显低于未加热炸药,更难以发生 DDT 现象。

设计的加热条件下炸药 DDT 试验加载装置能有效用于加热后炸药燃烧转爆轰特性变化研究。

参考文献:

- [1] Leuret F, Chaisse F. Experimental study of the low velocity detonation regime during the deflagration to detonation transition in a high density explosive [C] // 11th International Detonation Symposium, Snowmass Colorado, 1998: 693 - 700.
- [2] Verbeek R. The influence of parameter variations on the deflagration to detonation transition [C] // Tenth Symposium (international) on Detonation, 1993: 685 - 689.
- [3] Asay B W, McAfee J M. Temperature effects on failure thickness and the deflagration-to-detonation transition in PBX9502 and TATB [C] // Tenth International Detonation Symposium, 1993: 485 - 489.
- [4] Luebcke P E, Dickson P M, Field J E. Experimental investigation into the deflagration to detonation transition in secondary explosives [C] // Tenth International Detonation Symposium, 1993: 242 - 264.
- [5] 赵同虎, 张新彦, 李斌, 等. 颗粒状 HMX、RDX 的燃烧转爆轰实验研究 [J]. 含能材料, 2003, 11(4): 187 - 190.
ZHAO Tong-hu, ZHANG Xin-yan, LI Bin, et al. Experimental study on the deflagration to detonation transition for granular HMX, RDX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2003, 11(4): 187 - 190.
- [6] 赵同虎, 张寿齐, 张新彦, 等. DDT 管材料对颗粒 RDX 床燃烧转爆轰 (DDT) 影响的实验研究 [J]. 高压物理学报, 2000, 14(2): 99 - 103.
ZHAO Tong-hu, ZHANG Shou-qi, ZHANG Xin-yan, et al. An experimental study of the effects of DDT tube materials on the deflagration to detonation transition in granular RDX bed [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2000, 14(2): 99 - 103.
- [7] 黄毅民, 冯长根, 龙新平, 等. JOB-9003 炸药燃烧转爆轰研究 [J]. 火炸药学报, 2002, 25(1): 54 - 56.
HUANG Yi-min, FENG Chang-gen, LONG Xin-pin, et al. Deflagration to detonation transition behavior of explosive JOB-9003 [J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2002, 25(1): 54 - 56.
- [8] 王建, 文尚刚. 以 HMX 为基的两种压装高密度炸药的燃烧转爆轰实验研究 [J]. 高压物理学报, 2009, 23(6): 441 - 446.
WANG Jian, WEN Shang-gang. Experimental study on deflagration-to-detonation transition in two pressed high-density explosives [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2009, 23(6): 441 - 446.
- [9] 陈朗, 王飞, 伍俊英, 等. 高密度炸药燃烧转爆轰研究 [J]. 含能材料, 2011, 19(6): 697 - 704.
CHEN Lang, WANG Fei, WU Jun-ying, et al. Investigation of the deflagration to detonation transition in pressed high density explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(6): 697 - 704.
- [10] 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.
DONG Hai-shan, ZHOU Fen-fen. The Capability of Explosive and Relative [M]. Beijing: Science Press, 1989.

Deflagration to Detonation Transition Characteristics for Heated PBX-2

DAI Xiao-gan, Wang Juan, WEN Yu-shi, Huang Yi-min, DAI Ming-hong

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to study characteristics of deflagration to detonation transition (DDT) of unheated and heated explosives, the DDT test device for heated explosive was designed. And the PBX-2 explosive samples with $\Phi 30 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ were made. The processes of temperature changing for device shell and explosive were measured by thermocouples. The transmitting time and distance were analyzed by ionic probe. The characteristic of DDT for unheated and heated explosives were gained. The results show that DDT is more difficult to occur for PBX-2 explosive at 85 °C than room temperature.

Key words: explosion mechanics; explosive safety; deflagration to detonation transition (DDT)

CLC number: TJ55; O38

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.05.017