

文章编号: 1006-9941(2016)08-0752-05

# AP 和 Al 含量对 DNTF 基炸药燃烧转爆轰的影响

冯晓军, 杨建刚, 徐洪涛, 田 轩

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 为了研究配方组分对二硝基呋喃基氧化呋喃(DNTF)基复合炸药燃烧转爆轰性能的影响,设计了 AP 和 Al 粉摩尔比分别为 0.306、0.414、0.574 的三种配方。采用同轴电离探针测试技术,对这三种 DNTF 基复合炸药配方进行了燃烧转爆轰性能试验。从燃烧转爆轰过程中波阵面传播速度及诱导爆轰距离的变化分析了 AP 和 Al 粉摩尔比对炸药燃烧转爆轰的影响。结果表明,随着炸药配方中 AP 和 Al 摩尔比从 0.306 增大到 0.574,炸药初始燃烧持续时间从 1065  $\mu\text{s}$  增大 1395  $\mu\text{s}$ ,燃烧速度从 141  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  减小到 108  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,但对流燃烧段和爆燃段持续时间快速减小,对流燃烧速度从 500  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  增加到 1668  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,爆燃速度从 3000  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  增加到 4800  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,发生燃烧转爆轰的诱导爆轰距离从 675 mm 左右减小到 425 mm 左右。

**关键词:** 复合炸药; 二硝基呋喃基氧化呋喃(DNTF); 燃烧转爆轰; 波阵面速度; 诱导距离; 电离探针

**中图分类号:** TJ55; O389

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.08.005

## 1 引言

炸药的燃烧转爆轰(DDT)是一个非常复杂的物理和化学变化过程,也是炸药全寿命周期安全性设计与评价的重要性能参数之一<sup>[1]</sup>。Bernecker R 等<sup>[2]</sup>对钝化黑索今(RDX)药粒进行了 DDT 过程研究,认为对流燃烧的加速导致压缩波的产生,当压缩波在燃烧波阵面汇聚时便产生冲击波,冲击波在很短距离内迅速加强,从而引起 DDT 的发生。Price D 等<sup>[3]</sup>对高能推进剂的 DDT 进行了研究,发现在强约束下,推进剂发生爆轰的压力突变时间和距离很短,认为 DDT 的发生是由推进剂局部热爆炸引起的。Leuret 等<sup>[4]</sup>对压装高密度的 HMX 基炸药 DDT 过程进行了研究,并与铸装炸药及颗粒态装药进行了对比分析。国内在炸药的 DDT 机理及影响因素方面也开展了大量的工作,如赵同虎等<sup>[5]</sup>用盖帽探针和离子探针研究了颗粒状奥克托今(HMX)、RDX 的 DDT 过程。陈朗等<sup>[6]</sup>采用试验和仿真计算研究了不同约束对以 HMX 为基的 PBXC03 高密度炸药 DDT 过程的影响。代晓淦等<sup>[7]</sup>研究了由 HMX、TATB 和粘结剂等组成的 PBX-2 炸药在加热条件下的 DDT 变化特性。目前为止,对炸药

DDT 影响因素研究主要是针对炸药的外在因素,如装药密度、约束、点火强度等,而炸药配方中各组分对 DDT 的影响研究则较少。

二硝基呋喃基氧化呋喃(DNTF,  $\text{C}_6\text{N}_8\text{O}_8$ )是一种具有广泛应用前景的新型高能量密度炸药,具有爆速高、威力大、感度适中、热安定性良好等优点,可代替 TNT 作为熔铸混合炸药的载体,大幅提高熔铸炸药的能量<sup>[8]</sup>。以 DNTF 为载体,添加高氯酸铵(AP)和 Al 形成复合炸药,可以调节其爆轰反应速率和能量输出结构,从而增强爆炸毁伤作用,但是对于 DNTF 基复合炸药的安全性,尤其是燃烧转爆轰特性研究较少,这对 DNTF 基复合炸药配方的安全性设计和应用指导性不强。

本研究采用同轴电离探针测试技术,分析了 AP 和 Al 摩尔比变化对 DNTF 基炸药装药 DDT 过程中波阵面速度及爆轰诱导距离的影响规律。

## 2 试验原理与测试

### 2.1 试验装置和方法

DDT 试验装置系统如图 1 所示,由 DDT 管、点火器、同轴电离探针、阻抗匹配器及数据采集仪等组成。DDT 管用 45# 钢加工,内径 40 mm,壁厚 10 mm,长度 1200 mm,点火端用堵头和螺钉紧固密封,末端用带螺纹的端盖密封,在 DDT 管上距点火端和末端各 150 mm 的中间部位均布探针,间距 75 mm,共计布放

收稿日期: 2015-11-19; 修回日期: 2016-03-06

基金项目: 国防重点实验室基金(9140C350406130C35126)

作者简介: 冯晓军(1976-),男,博士,研究员,主要从事炸药爆轰及爆炸性能评估技术研究。e-mail: fengxj\_78@163.com

13 支探针。点火器由电点火头和 3 g 黑火药组成,在点火器与第一节药柱端面处布放触发探针,作为计时零点,第一个同轴探针距离触发探针 125 mm。同轴电离探针由外径 1.5 mm,内径 1 mm 的黄铜管内固定直径为 0.86 mm 的漆包线组成。阻抗匹配器型号为 BZK-100,电阻值变化范围为 100  $\Omega$  ~ 100 M $\Omega$ ,共 20 通道。数据采集仪为 HBM Gensis 5i。

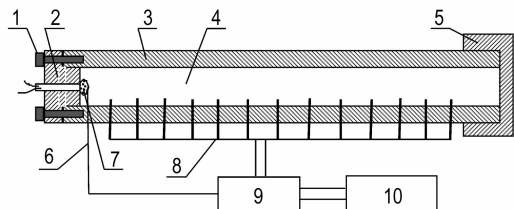


图 1 DDT 试验系统示意图

1—螺钉, 2—堵头, 3—DDT 管, 4—试样, 5—螺纹端盖, 6—触发探针, 7—点火器, 8—电离探针, 9—多通道阻抗匹配器, 10—数据采集仪

Fig.1 Schematic diagram of DDT test system

1—bolt, 2—plug, 3—DDT tube, 4—sample, 5—screw cover, 6—trigger probe, 7—ignition device, 8—ionization probe, 9—multi channel impedance match device, 10—data collecting instrument

试验时,用电起爆器使点火器瞬间燃烧并引燃与其紧密接触的炸药端面,燃烧波在炸药柱内加速燃烧,在一定的压力和温度条件下转变为爆轰传播。炸药燃烧或爆轰时,在波阵面会产生一定的电离产物,当波阵面传播到同轴电离探针位置处会使探针导通,从而产生电压脉冲信号,通过多通道阻抗匹配器和数据采集仪可以记录到该电压脉冲到达的时间,依据相邻探针间的距离和电压脉冲到达的时间差,便可以计算出燃烧波或爆轰波的传播速度,从而得到燃烧到爆轰的转变距离。

## 2.2 试样

试验用炸药配方见表 1。采用熔铸工艺将试样制

表 1 DDT 试验用炸药配方

Table 1 Formulation of explosive used for DDT test

serial number	formulation	$\rho_{TMD}$ /g · cm <sup>-3</sup>	$\rho$ /g · cm <sup>-3</sup>	oxygen balance	$n_{AP} : n_{Al}$
1#	30DNTF/40AP/30Al	2.17	2.00	-0.192	0.306
2#	30DNTF/45AP/25Al	2.13	1.95	-0.131	0.414
3#	30DNTF/50AP/20Al	2.09	1.92	-0.069	0.574

Note:  $\rho_{TMD}$  is theoretical density,  $\rho$  is charge density,  $n_{AP} : n_{Al}$  is mole ratio of AP and Al.

成直径为  $\Phi 40$  mm 的圆柱形药柱,成型时将这三种配方的试样装药密度均控制在理论密度的 92% 左右,尽可能减小密度对 DDT 的影响。将每种炸药配方的试样制成 11 节长度为 100 mm 的药柱和 1 节长度为 85 mm 的药柱,将每节药柱的两个端面磨齐平,依次装入 DDT 试验管中,如图 2 所示。



图 2 试样装置图

Fig.2 The device photo of sample

## 3 结果与讨论

对这三种配方的炸药进行 DDT 试验,可以得到 DDT 过程的波阵面位置随时间的变化曲线和波阵面速度随距离的变化曲线,如图 3 和图 4 所示,同时也得到反应后 DDT 管的碎裂情况,如图 5 所示。

从图 5 显示的 DDT 管的破碎状态可以看出这三种配方的炸药都发生了燃烧转爆轰反应,且三种配方的 DDT 管碎裂的破片尺寸大小及破片分布无明显差别,说明这三种炸药发生 DDT 转变后的剧烈性程度没有明显的差异,表明 DNTF 基复合炸药发生燃烧转爆轰的破坏作用主要取决于配方中主体炸药 DNTF 的猛度和含量,而配方中 AP 与 Al 的摩尔比变化对 DDT 爆炸剧烈性无明显影响。分析认为 DDT 管的碎裂对于炸药爆炸破坏而言属于局部破坏,体现了炸药的猛度,而复合炸药的猛度主要由其所含主炸药的含量及爆压决定,AP 和 Al 在 DNTF 基复合炸药中的作用主要是调节并增强其在爆轰反应区后的能量释放速率及转化,提高爆炸做功的效能,因此对与其紧密接触的 DDT 管碎裂作用不明显。

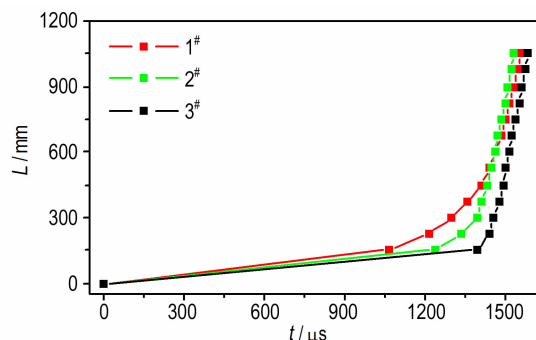


图 3 波阵面位置随时间变化曲线

Fig.3 The curves of wave front location vs. time

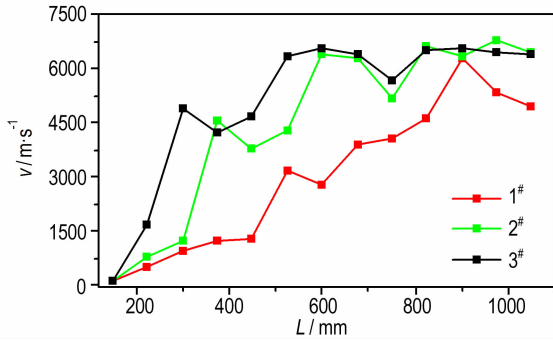


图4 波阵面速度随距离变化曲线

Fig. 4 The curves of wave front velocity vs. distance

从图3可以看出,1<sup>#</sup>炸药的燃烧转爆轰过程经历了较为明显的点火后初始燃烧、对流燃烧、压缩波引发

30DNTF/40AP/30Al(1<sup>#</sup>)30DNTF/45AP/25Al(2<sup>#</sup>)30DNTF/50AP/20Al(3<sup>#</sup>)

图5 试验后 DDT 管破裂照片

Fig. 5 Rupture photos of DDT tube after test

对于2<sup>#</sup>炸药的燃烧转爆轰过程,从图3和图4可以看出,其点火初始燃烧持续时间比1<sup>#</sup>炸药增长,在1235 μs左右,燃烧波阵面平均速度降低为121.4 m·s<sup>-1</sup>,而对流燃烧的持续时间明显缩短,约为100 μs左右,波阵面平均速度增加到755~1225 m·s<sup>-1</sup>,然后在极短的时间内从对流燃烧转变为速度较高的爆燃或爆炸阶段,此时的波阵面传播速度为3787~4573 m·s<sup>-1</sup>,明显高于1<sup>#</sup>炸药的爆燃速度,当波阵面传播到距离点火端525 mm左右时,2<sup>#</sup>炸药发生了燃烧到爆轰的转变,波阵面的传播速度达到6410 m·s<sup>-1</sup>以上。

对于3<sup>#</sup>炸药的燃烧转爆轰过程,从图3和图4可以

的爆燃、爆轰等四个阶段。从点火到1065 μs左右,1<sup>#</sup>炸药波阵面位置随时间缓慢变化,说明其处于点火后的初始燃烧阶段,从1065 μs至1413 μs左右,波阵面位置随时间快速非线性增大,说明装药在内部温度和压力的作用下发生了不稳定的对流燃烧,从1413 μs至1482 μs左右,波阵面位置随时间以指数形式急速上升,说明装药内的压力波逐渐汇聚产生了爆燃现象,从1482 μs后,波阵面位置随时间以陡峭的线性变化,说明炸药发生了爆轰转变。从图4可以得出上述四个阶段对应的波阵面传播平均速度变化:点火初始燃烧阶段,波阵面传播平均速度为140.8 m·s<sup>-1</sup>;对流燃烧阶段,波阵面的速度变化为500~1300 m·s<sup>-1</sup>;爆燃阶段,波阵面的速度变化为3000~4000 m·s<sup>-1</sup>;爆轰阶段,波阵面的速度变化为4000~6300 m·s<sup>-1</sup>。

看出,其初始点火燃烧持续时间更长,大约持续了1395 μs左右,燃烧波阵面平均速度降低为107.5 m·s<sup>-1</sup>,随后快速发展为对流燃烧,波阵面传播平均速度达到了1648 m·s<sup>-1</sup>左右,而且对流燃烧持续时间很短,大约46 μs左右,接着转变为高速的爆燃或爆炸反应阶段,这一阶段的持续时间更短,大约只有30 μs左右,波阵面的传播速度为4200~4800 m·s<sup>-1</sup>,当波阵面传播到距离点火端425~500 mm时,3<sup>#</sup>炸药发生了燃烧到爆轰的转变,其爆轰波阵面传播速度大于6300 m·s<sup>-1</sup>。

对这三种炸药 DDT 过程中各阶段转变的持续时间和波阵面传播平均速度进行分析,结果见表2。

表2 三种炸药 DDT 转变持续时间和速度

Table 2 DDT duration time and velocity for three explosives

serial number	Initial combustion		convection combustion		deflagrate or explosion		detonation	detonation distance /mm
	$t_{DT}$ /μs	$D_{FWV}$ /m·s <sup>-1</sup>	$t_{DT}$ /μs	$D_{FWV}$ /m·s <sup>-1</sup>	$t_{DT}$ /μs	$D_{FWV}$ /m·s <sup>-1</sup>	$D_{FWV}$ /m·s <sup>-1</sup>	
1 <sup>#</sup>	1065	141	348	500	69	3000~4000	4000~6300	600~675
2 <sup>#</sup>	1235	121	100	755	61	3787~4573	6300~6700	525~600
3 <sup>#</sup>	1395	108	46	1648	30	4200~4800	6300~6500	425~500

Note:  $t_{DT}$  is duration time,  $D_{FWV}$  is front wave velocity.

可以看出,随着配方中 AP 与 Al 摩尔比的增大,DDT 过程中初始燃烧段的持续时间延长,燃烧波传播速度降低,但从初始燃烧向对流燃烧的转变速度加快,而且对流燃烧的持续时间明显缩短,对流燃烧波传播速度加快,从对流燃烧到爆燃或爆炸的转变速度更快,尤其是 3<sup>#</sup>炸药,其对流燃烧到爆燃转变只持续了几十微秒,而且从爆燃或爆炸到爆轰的转变几乎没有明显的时间持续。从图 3 和表 2 也可以明显得出,随着炸药配方中 AP 与 Al 摩尔比的增大,DDT 诱导爆轰距离减小,说明其更容易发生燃烧向爆轰的转变。上述现象可能与配方中 AP 和 Al 的含量及反应过程有关。当炸药装药被点火器引燃后,首先是端面炸药中的主体炸药 DNTF 发生燃烧放热,由于 AP 在 300 °C 左右就开始发生吸热分解反应<sup>[9]</sup>,Al 在冲击作用下的点火燃烧温度在 2100 K(1827 °C)<sup>[10]</sup>左右,AP 发生反应的温度比 Al 的燃烧温度低得多,因此主炸药的燃烧加热作用下,AP 首先吸热分解,释放出氧化性气体,在这一过程中,炸药试样处于 DDT 的初始燃烧阶段,如果 AP 含量越高,即 AP 与 Al 的摩尔比越大,则吸热越多,导致初始燃烧段持续时间越长,随着燃烧反应的进行,DDT 管内的压力和温度会逐渐增大,引起 Al 的燃烧放热反应,由于铝粉燃烧放热量非常高,使得 DDT 管内的压力和温度急剧上升,从而引起对流燃烧和爆燃的快速发生,AP 与 Al 的摩尔比越大,炸药配方的负氧平衡越小,氧化剂含量和浓度较高,参加燃烧反应的 Al 粉量及 Al 粉的反应完全性越高,DDT 管内的温度和压力增长变化率会越高,从而使得燃烧到爆轰转变的诱导距离减小。

从图 4 可以看出,炸药的 DDT 过程是一个非稳态的变化,即使发生了爆轰反应,其爆轰速度也是波动变化的,这属于非稳态爆轰反应,而非传统冲击引爆下的稳定爆轰传播,尤其是在 DDT 管的末端,由于 DDT 管的破裂引起的压力和温度降低及侧向稀疏波对爆轰反应区能量的耗散影响,其爆轰传播速度也会有一定的降低,但是配方中 AP 和 Al 的摩尔比对爆轰波速度的波动有一定的影响,当 AP 和 Al 的摩尔比增大时,爆轰阶段速度波动会减小,这主要是因为随配方中 AP 和 Al 摩尔比的增大,使其在爆轰反应区内 Al 粉的反应度有所增加,释放的能量增大,这有利于爆轰传播速度的维持。

## 4 结 论

(1) DNTF 基复合炸药发生燃烧转爆轰后的局部

破坏主要取决于配方中主体炸药的猛度和含量,配方中 AP 与 Al 的摩尔比变化对其局部爆炸剧烈性无明显影响。

(2) 随着 DNTF 基复合炸药配方中 AP 与 Al 摩尔比从 0.306 增加到 0.574,DDT 过程中初始燃烧段的速度从 141 m·s<sup>-1</sup>降低到 108 m·s<sup>-1</sup>,但是对流燃烧传播速度从 500 m·s<sup>-1</sup>增加到 1648 m·s<sup>-1</sup>,爆燃传播速度从 3000 m·s<sup>-1</sup>增加到 4800 m·s<sup>-1</sup>,爆轰诱导距离从 675 mm 左右减小到 425 mm 左右。

(3) 随着 DNTF 基复合炸药配方中 AP 与 Al 摩尔比的增大,炸药发生 DDT 转变后,爆轰段传播速度的波动性会减小,有利于爆轰传播速度的维持。

## 参考文献:

- [1] 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.  
WEN Shang-gang, WANG Sheng-qiang, HUANG Wen-bin, et al. An experimental study on deflagration-to-detonation transition in high-density composition B[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(6): 567.
- [2] Bernecker R, Price D. Studies in the transition from deflagration to detonation in granular explosives ( II ) [J]. *Combustion and Flame*, 1974, 22: 119-129.
- [3] Price D, Bernecker R. Burning to detonation transition in porous beds of a high-energy propellant [J]. *Combustion and Flame*, 1982, 48: 219-231.
- [4] Leruret 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.
- [5] 赵同虎,张新彦,李斌,等. 颗粒状 RDX/RDX 的燃烧转爆轰实验研究[J]. 含能材料, 2003, 11(4): 187.  
ZHAO Tong-hu, ZHANG Xing-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.
- [6] 陈朗,王飞,伍俊英,等. 高密度压装炸药燃烧转爆轰研究[J]. 含能材料, 2011, 19(6): 697.  
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.
- [7] 代晓淦,王娟,文玉史,等. PBX-2 炸药加热条件下燃烧转爆轰特性[J]. 含能材料, 2013, 21(6): 649.  
DAI Xiao-gan, WANG Juan, WEN Yu-shi, et al. Deflagration to detonation transition characteristics for heated PBX-2 [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(6): 649.
- [8] 王亲会. DNTF 基熔铸炸药性能研究[J]. 火炸药学报, 2003, 26(3): 57-59.  
WANG Qin-hui. Properties of DNTF-based melt-cast explosives [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2003, 26(3): 57-59.
- [9] 刘子如,阴翠梅,孔扬辉,等. 高氯酸铵的热分解[J]. 含能材

料, 2000, 8(2): 75.

LIU Zi-ru, YIN Cui-mei, KONG Yang-hui, et al. The Thermal decomposition of ammonium perchlorate[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2000, 8(2): 75.

[10] 胡栋, 叶松, 吴旌贺, 等. 铝粉点火微观机理的光谱研究[J]. 高

压物理学报, 2006, 20(3): 237.

HU Dong, YE Song, WU Jing-he, et al. The spectro-studies on micro-mechanism of shock ignition for aluminium [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2006, 20(3): 237.

## Effect of Content of AP and Al on the Deflagration to Detonation Transition of DNTF-based Explosives

FENG Xiao-jun, YANG Jian-gang, XU Hong-tao, TIAN Xuan

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** To study the effects of ingredients in formulation on the performance of deflagration to detonation transition (DDT) for dinitrofurazanfuroxan (DNTF) based explosives, three kinds of formulations that the molar ratio of AP and Al powders is 0.306, 0.414 and 0.574, were designed. The performance test of DDT for three kinds of DNTF-based composite explosive formulations was carried out by the coaxial ionization probe test technology. The influence of molar ratio of AP and Al powders on the deflagration to detonation transition of explosive was analyzed by change of wave front velocity and inducement detonation distance. Results show that with increasing the molar ratio of AP and Al from 0.306 to 0.574, the initial burn duration time increases from 1065  $\mu\text{s}$  to 1395  $\mu\text{s}$ , and the burning rate decreases from 141  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  to 108  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , but the duration time of convection combustion section and deflagration section decreases rapidly, and the convection burning rate increases from 500  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  to 1668  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , and deflagration velocity increases from 3000  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  to 4800  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , the inducing detonation distance occurring DDT decreases from about 675 mm to 425 mm.

**Key words:** composite explosives; dinitrofurazanfuroxan (DNTF); deflagration to detonation transition; wave front velocity; inducing detonation distance; ionization probe

**CLC number:** TJ55; O389

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.08.005