

文章编号: 1006-9941(2018)03-0255-05

DNTF 基炸药燃烧转爆轰影响因素实验研究

冯晓军, 田 轩, 赵 娟, 冯 博

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 为了研究二硝基呋咱基氧化呋咱(DNTF)基混合炸药燃烧到爆轰转变(DDT)过程的有效调控技术,采用同轴电离探针测量技术研究了点火药量、DDT管壁厚约束、成型方式等对DNTF基混合炸药DDT性能的影响,从DDT管破裂状态、DDT过程不同位置处波阵面速度、诱导爆轰距离等变化对实验结果进行了分析。结果表明,DDT管壁厚约束对DNTF基混合炸药DDT的诱导爆轰距离没有明显影响,都在375 mm左右,但壁厚减小会使爆燃阶段持续时间增加,达到爆轰的初始速度减小到 $5515 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;点火药量增加对DNTF基混合炸药DDT反应剧烈性没有明显影响,但会减小初始燃烧持续时间和诱导爆轰距离;压制成型试样DDT的初始燃烧持续时间、爆燃持续时间及诱导爆轰距离均大于熔铸成型试样,但反应剧烈性没有差别。

关键词: 二硝基呋咱基氧化呋咱(DNTF); 燃烧转爆轰(DDT); 波阵面速度; 诱导爆轰距离; 电离探针

中图分类号: TJ55; O389

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.03.009

1 引 言

燃烧转爆轰(DDT)是各类含能材料,尤其是火炸药燃烧时常常发生的现象,涉及非常复杂的物理和化学变化过程,影响因素多且有一定的随机性。尽管国内外学者已经在该领域已开展了几十年的研究,但直到目前,人们对含能材料燃烧转爆轰的影响因素、反应机理及调控技术途径仍未完全认识和掌握。由于燃烧转爆轰性能是火炸药本质安全性设计和全寿命周期安全使用及防护的关键参数,因此一直是火炸药领域重点研究的方向。McAfee^[1]研究了活塞驱动应力波作用下颗粒状奥克托今(HMX)炸药的DDT过程,认为颗粒状HMX炸药DDT过程可分为低压压缩波、燃烧波、冲击波和爆轰四个阶段。Leuret等^[2]对压装HMX基高密度(密度为 $1.823 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)炸药用长度为1000 mm的DDT管实验,结果表明压装高密度炸药的DDT过程具有几率性,且诱导爆轰距离变化较大。贾祥瑞^[3]研究了装填密度对HMX基高能推进剂燃烧转爆轰的影响,发现在装填密度为50%~94%的范围内,密度与诱导爆轰距离成“U”形关系。李瑞^[4]等利用不同材质,不同厚度的DDT管研究了约束强度对

太安(PETN)炸药燃烧转爆轰的影响,发现约束越强,越有利于装药DDT的形成。代晓淦^[5]、文尚刚^[6]、王建^[7]、陈朗等^[8]也从不同方面研究了燃烧转爆轰的影响因素,但是由于火炸药燃烧转爆轰过程的复杂性及随机性,若要实现对特定火炸药配方燃烧转爆轰性能的有效调控和安全性预估,必须首先对该火炸药进行燃烧转爆轰影响因素的实验研究。

二硝基呋咱基氧化呋咱(DNTF, $\text{C}_6\text{N}_8\text{O}_8$)是一种具有广泛应用前景的高能量密度化合物,熔铸性能优良,可作为一种新型熔铸载体,显著提升熔铸混合炸药的爆炸能量和爆炸威力。目前国内已经开展了大量DNTF基混合炸药配方设计研究,验证了DNTF基混合炸药在能量和威力方面的优势^[9-10],但是由于DNTF自身的热感度较高,爆轰增长速率也高,导致DNTF基混合炸药的安全性能是其配方优化设计和应用的难点。基于此,本研究采用同轴电离探针测试技术,通过燃烧转爆轰实验,研究了点火能量、DDT管壁厚约束和成型方式等对DNTF基混合炸药燃烧转爆轰的影响,以期对DNTF基混合炸药燃烧转爆轰调控技术研究和配方的安全性优化设计与预估提供指导。

2 实验

2.1 实验系统和方法

燃烧转爆轰实验系统由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,如图1所

收稿日期: 2017-08-03; 修回日期: 2017-11-10

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: bingqi204suo@163.com

示^[11]。DDT管用45#钢加工,内径40 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管上距离点火端和末端各150 mm的中间段以间距75 mm均布电离探针,共计布放13支。点火器由电点火头和一定量黑火药构成,在点火器与药柱界面处布放触发探针,作为计时零点,第一个电离探针距离触发探针125 mm。电离探针由外径1.5 mm,内径1 mm的黄铜管内固定直径0.86 mm的漆包线组成。阻抗匹配器的阻值变化范围为100 Ω ~100 M Ω 。数据采集仪为HBM Gensis 5i。

实验时用电起爆器激发点火器燃烧并引燃与其紧密接触的炸药端面,燃烧波在炸药柱内不断加速,在一定的压力和温度条件下转变为爆轰。炸药燃烧或爆轰时,在波阵面产生电离产物使电离探针导通,从而产生电压脉冲信号,记录DDT管上不同位置处的电压脉冲信号到达的时间,便可计算出燃烧波或爆轰波的传播速度,得到燃烧到爆轰转变的诱导爆轰距离。

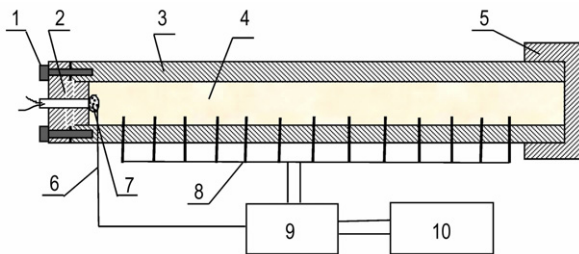


图1 DDT实验系统示意图

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 end cover, 6—trigger probe, 7—ignition device, 8—ionization probe, 9—multi channel impedance match device, 10—data collecting instrument

2.2 实验条件及试样装配

实验用DNTF基混合炸药配方为DNTF/HMX/TATB/Al/binder 40/40/10/5/5。DNTF基混合炸药成型时将密度($1.78 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)控制在理论密度($1.87 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)的95%左右,尽可能减小成型密度对DDT过程的影响。采用熔铸成型工艺,改变点火器中黑火药的药量(3 g, 10 g)和DDT管的壁厚(5 mm, 10 mm, 15 mm)进行点火药量和约束强度对燃烧转爆轰的影响研究;同时在点火药量3 g, DDT管壁厚10 mm的条件下研究熔铸成型和压制成型两种成型

方式对燃烧转爆轰的影响。每发试样由11节长度为100 mm的药柱和1节长度为85 mm的药柱组成,装配时将每节炸药柱的两个端面磨齐平,依次装入DDT实验管中,如图2所示。



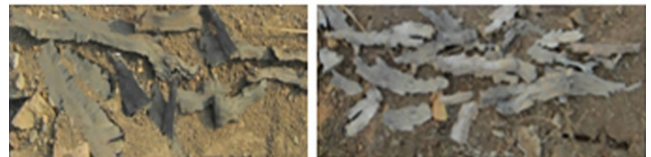
图2 试样装配图

Fig.2 The assembly photo of specimen

3 结果与讨论

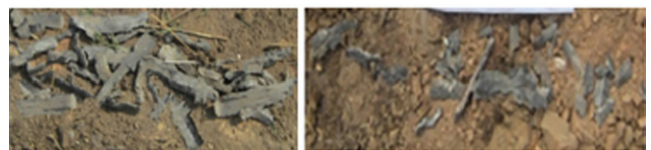
3.1 DDT反应剧烈性分析

实验后DDT管的破裂情况如图3所示。由图3可看出,DNTF基混合炸药在不同实验条件下均发生了燃烧到爆轰的转变。从图3a和图3b可看出,在相同的DDT管壁厚约束(10 mm)条件下,点火药量(3 g增至10 g)增大,尽管收集到的壳体破片数量增加,但碎片大小似乎没有明显的差别,说明点火药量对于DNTF基混合炸药燃烧转爆轰反应的剧烈性没有明显影响;从图3d、图3a和图3c看出,在相同点火药量(3 g)下,DDT管壁厚增大,收集到的壳体碎片越多,壳体碎片也越大,这是因为DDT管的壳体壁厚增大,



a. $m=3 \text{ g}$, $\delta=10 \text{ mm}$,
melting-cast

b. $m=10 \text{ g}$, $\delta=10 \text{ mm}$,
melting-cast



c. $m=3 \text{ g}$, $\delta=15 \text{ mm}$,
melting-cast

d. $m=3 \text{ g}$, $\delta=5 \text{ mm}$,
melting-cast



e. $m=3 \text{ g}$, $\delta=10 \text{ mm}$ press

图3 DDT壳体碎裂照片

Fig.3 Rupture photos of DDT tube

其强度也会增大,使得壳体破片较大;从图 3a 和图 3e 看出,在相同点火药量(3 g)和 DDT 管壁厚(10 mm)约束条件下,熔铸成型(图 3a)与压制成型(图 3e)试样的 DDT 管碎裂程度也没有明显差别。点火药量、DDT 管壁约束、成型方式等因素对 DNTF 基混合炸药燃烧转爆轰反应剧烈性影响不大的可能原因,一方面是由于 DNTF 炸药自身的热分解速率和热敏度比较高^[12],在热作用下从燃烧反应增长为爆轰的速率较大,转变为爆轰的距离较短,因此外加因素对其点火后的自身化学反应增长速率影响不大;另一方面,由于壳体的碎裂程度是炸药猛度的直接体现,其主要受到炸药爆压或爆速的影响,DNTF 基混合炸药快速转变为爆轰后,爆压或爆速的波动较小,因此表现出对 DNTF 基混合炸药燃烧转爆轰反应剧烈性影响不大。

3.2 DDT 反应过程分析

从实验获得的 DNTF 基混合炸药在燃烧转爆轰过程中,DDT 管上不同电离探针位置处的电压脉冲信

号到达时间,可以确定出炸药燃烧转爆轰过程中波阵面随时间的变化曲线,如图 4 所示。通过对相邻两个波阵面间的距离与波阵面传播时间求商,可以得到波阵面传播到不同位置处的平均速度。对 DNTF 基混合炸药 DDT 过程中各阶段转变的持续时间和波阵面传播平均速度及成长为爆轰的诱导距离进行分析,结果见表 1。

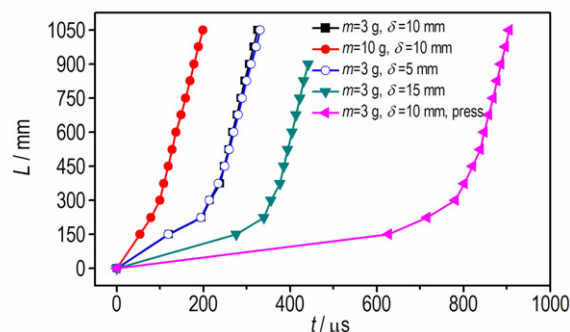


图 4 波阵面位置随时间变化曲线

Fig. 4 The curves of change in wave front location with time

表 1 DDT 过程持续时间、波阵面速度和诱导爆轰距离

Table 1 The duration time, front wave velocity and inducing detonation distance of DDT process

| influence factor | initial combustion | | convection combustion | | deflagrate or explosion | | detonation $D_{FWV}/m \cdot s^{-1}$ | inducing detonation distance/mm |
|---------------------------------------|--------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| | $t_{DT}/\mu s$ | $D_{FWV}/m \cdot s^{-1}$ | $t_{DT}/\mu s$ | $D_{FWV}/m \cdot s^{-1}$ | $t_{DT}/\mu s$ | $D_{FWV}/m \cdot s^{-1}$ | | |
| $m=3 g, \delta=10 mm$, melting-cast | 195 | 996-1249 | - | - | 42 | 3178-3769 | 7426-8333 | 375-450 |
| $m=10 g, \delta=10 mm$, melting-cast | - | - | 54 | 2762 | 45 | 3024-3695 | 6637-8427 | 300-375 |
| $m=3 g, \delta=5 mm$, melting-cast | 194 | 1004-1256 | - | - | 54 | 3538-3827 | 5515-7979 | 375-600 |
| $m=3 g, \delta=15 mm$, melting-cast | 339 | 544-1187 | - | - | 37 | 3695-4491 | 7813-8333 | 375-450 |
| $m=3 g, \delta=10 mm$, press | 781 | 239-1152 | - | - | 57 | 3676-4360 | 6944-8242 | 525-600 |

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

3.2.1 点火药量和约束强度对 DDT 反应过程的影响

从图 4 可以看出,在 DDT 管壁厚约束和装药密度相同的条件下,点火药量增加,炸药试样发生燃烧转爆轰的诱导距离减小,DNTF 基混合炸药装药在 3 g 和 10 g 黑火药的点火药量作用下爆轰诱导距离分别为 375~450 mm 和 300~375 mm,而且点火药量增大,炸药的初始燃烧阶段会很快增长为对流燃烧;在相同点火药量和装药密度下,DDT 管壁厚约束增加,对 DNTF 基混合炸药的爆轰诱导距离没有明显影响,基本都在 375 mm 之后开始由爆燃向爆轰转变,但是 DDT 管壁厚为 5 mm 时,试样转变为爆轰的初始速度比较低,为 5515 $m \cdot s^{-1}$ 左右,这对于 DNTF 基混合炸

药装药而言是属于低速爆轰的水平,随后当波阵面传播到 600 mm 后,速度达到 7075 $m \cdot s^{-1}$ 以上,达到了高速爆轰的水平,当 DDT 管的壁厚增加到 10 mm 和 15 mm,试样的爆轰转变状态及波阵面传播速度几乎没有差别。

从表 1 可以看出,当点火药量为 3 g 黑火药时,DNTF 基混合炸药试样经历了初始燃烧、爆燃和爆轰三个过程,但当点火药量增加到 10 g 黑火药时,试样直接发生了对流燃烧,这主要是由于点火药量增大,很容易使试样的初始燃烧速度增大,导致 DDT 管内在试样燃烧的初始阶段温度和压力急剧增大,从而快速的转变为对流燃烧,同时,从试样的配方组成来说,由

于配方中含有热感度较高的 DNTF^[12] 炸药, 点火药量增加, 会诱导 DNTF 炸药快速发生热解反应, 释放大热量, 促使炸药配方中的 HMX 发生快速热分解反应, 这两种炸药组分的放热量叠加, 会进一步加快混合炸药试样自加速分解和放热速率, 使得装药从燃烧到爆轰转变的时间和距离减小。

从表 1 也可以看出, 在点火药量相同的条件下, 随着 DDT 管壁厚约束的增加, 尽管 DNTF 基混合炸药试样都经历了初始燃烧、爆燃和爆轰反应三个阶段, 而且爆轰诱导距离的开始位置也基本相同, 但是爆燃阶段的持续时间却逐渐减小, 当 DDT 管的壁厚为 5 mm 时, 试样虽然从 375 mm 之后开始向爆轰转变, 但是爆轰波阵面速度比较小, 一直到 600 mm 后, 才达到与壁厚 10 mm 和 15 mm 约束条件下相近的波阵面速度, 这可能是由于 DDT 管壁厚约束较弱时, 在爆燃阶段 DDT 管就已经发生了撕裂, 导致 DDT 管内反应气体的泄露, 使得 DDT 管内压力和温度的增长速率降低, 很难达到转变为稳定高速爆轰的条件, 致使爆燃阶段持续时间增加, 发生了从低速爆轰到稳定高速爆轰的过渡。

3.2.2 成型方式对 DDT 反应过程的影响

从图 4 可以看出, 在点火药量为 3 g 黑火药和 DDT 管壁厚约束为 10 mm 的相同实验条件下, 熔铸成型和压制成型的试样都经历了相同的燃烧转爆轰过程, 但是压制成型试样的初始燃烧阶段和爆燃阶段的持续时间比熔铸成型试样的长, 导致燃烧到爆轰转变的诱导距离增大, 在 525~600 mm, 爆轰后的速度比熔铸成型试样略有减小。这可能是由于这两种成型方式下试样的微观结构和燃烧转爆轰的传热机理不同引起。试样压制成型时, 通过造粒工艺会使惰性添加剂均匀的包覆在炸药颗粒表面, 成型后每个炸药颗粒之间都是用惰性添加剂隔离开, 而熔铸成型试样, 由于惰性添加剂很难均匀有效的包覆在每个炸药颗粒表面, 因此会有大量的 HMX 颗粒和 TATB 颗粒直接被 DNTF 包覆, 由于燃烧转爆轰在初始燃烧阶段的能量传递是以分子热传导和热扩散为主的热传递方式, 爆燃阶段是以压缩波为主的能量传播方式, 对于压制成型试样而言, 炸药颗粒间惰性添加剂的吸热、隔热以及对压缩波的衰减作用, 使得其在初始燃烧和爆燃阶段的能量损失较多, 而熔铸成型试样, 由于存在大量含能组分紧密接触^[13], 无论是热传递还是压缩波传递, 都会使传递的能量逐级增大, 因此导致压制成型试样在 DDT 过程中的初始燃烧持续时间, 爆燃持续时间及爆轰诱导距离增大, 而且由于惰性添加剂的吸热和隔热

作用, 导致波阵面能量减小, 使得爆轰波阵面速度降低, 如表 1 所示, 在点火药量为 3 g 黑火药和壳体壁厚约束为 10 mm 的相同条件下, 压制成型试样的初始燃烧持续时间 781 μs 、爆燃持续时间 57 μs 、诱导爆轰距离 525~600 mm 及爆轰速度 6944~8242 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 而熔铸成型试样的初始燃烧持续时间 195 μs , 爆燃持续时间 42 μs , 诱导爆轰距离 375~450 mm, 爆轰速度 7426~8333 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

4 结 论

(1) DDT 管壁厚度从 5 mm 增大到 15 mm, DNTF 基混合炸药发生燃烧转爆轰后的壳体碎片增大, 但燃烧到爆轰转变的诱导爆轰距离没有明显差别, 都在 375 mm 左右, DDT 管壁厚减小会使爆燃阶段持续时间增加, 出现从低速爆轰到稳定高速爆轰的过渡。

(2) 点火药量从 3 g 黑火药增加到 10 g 黑火药, DNTF 基混合炸药的燃烧转爆轰剧烈性没有明显影响, 但是会减小初始燃烧持续时间, 促使稳态燃烧快速转变为对流燃烧, 使诱导爆轰距离从 375~450 mm 减小到 300~375 mm。

(3) 对于 DNTF 基混合炸药试样, 由于压制成型和熔铸成型的微观结构不同, 导致压制成型试样燃烧转爆轰的初始燃烧持续时间、爆燃持续时间及诱导爆轰距离均大于熔铸成型试样。

参考文献:

- [1] McAfee J M, Asay B W, Bdzil J B. Deflagration to detonation in granular HMX, ignition, kinetics and shock formation[C]//10th Symp. (Int) on Detonation. Boston MS: NSWC, 1993: 685.
- [2] Leuret F, Chaisse 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[C]//Proceedings of 11th International Symposium on Detonation. Snowmass, Colorado, 1998: 693-701.
- [3] 贾祥瑞, 池军智, 黄风雷, 等. 装填密度对高能推进剂燃烧转爆轰的影响研究[J]. 含能材料, 1996, 4(4): 163-168. JIA Xiang-rui, CHI Jun-zhi, HUANG Feng-lei, et al. Influence of density on deflagration-to-detonation transition of high-energy propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 1996, 4(4): 163-168.
- [4] 李瑞, 葛瑞荣, 黄寅生, 等. 内管约束强度对无起爆药导爆管管燃烧转爆轰的影响[J]. 火工品, 2015(1): 1-5. LI Rui, GE Rui-rong, HUANG Yin-sheng, et al. Influence of constraint strength of inner tuber on transition of deflagration to detonation in nonei non-primary explosive detonator[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2015(1): 1-5.
- [5] 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): 649-652. 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): 649-652.
- [6] 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.
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): 567-571.
- [7] 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): 442-446.
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): 442-446.
- [8] 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): 697-704.
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.
- [9] 王浩, 高杰, 罗一鸣, 等. DNTF/HMX 炸药金属加速做功能力及其 JWL 状态方程[J]. 兵工自动化, 2014, 33(7): 60-62.
WANG Hao, GAO Jie, LUO Yi-ming, et al. Metal Accelerating Ability and JWL EOS of DNTF/HMX Explosive[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2014, 33(7): 60-62.
- [10] 杨斐, 王建灵, 罗一鸣, 等. DNTF/AP/Al 体系炸药的能量特性分析[J]. 爆破器材, 2014, 43(5): 11-14.
YANG Fei, WANG Jian-ling, LUO Yi-ming, et al. Explosion energy characteristics of DNTF/AP/Al explosive[J]. *Explosive Materials*, 2014, 43(5): 11-14.
- [11] 冯晓军, 杨建刚, 徐洪涛, 等. AP 和 Al 含量对 DNTF 基炸药燃烧转爆轰的影响[J]. 含能材料, 2016, 24(8): 752-756.
FENG Xiao-jun, YANG Jian-gang, XU Hong-tao, et al. Effect of content of AP and Al on the deflagration to detonation transition of DNTF-based explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(8): 752-756.
- [12] 任晓宁, 王江宁, 阴翠梅, 等. 新型高能量密度材料 DNTF 热分解特性[J]. 火炸药学报, 2006, 29(2): 33-36.
REN Xiao-ning, WANG Jiang-ning, YIN Cui-mei et al. Thermal decomposition characteristics of a novel high energy density material DNTF[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2006, 29(2): 33-36.
- [13] 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.

Experiment Study on the Influence Factors of the Deflagration to Detonation Transition for DNTF-based Explosives

FENG Xiao-jun, TIAN Xuan, ZHAO Juan, FENG Bo

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

Abstract: To study the effective regulation and control technology of the deflagration to detonation transition (DDT) process for DNTF-based composite explosive, the effect of ignition charge mass, DDT tube wall thickness constraint and molding way etc. on the performance of DDT for DNTF-based composite explosive was investigated by the coaxial ionization probe test technology. The test results were analyzed from the view of the change in rupture state of DDT tube, wave front velocity at different location of DDT process and inducement detonation distance etc. Results show that the DDT tube wall thickness constraint has no significant effect on the inducement detonation distance of DDT for DNTF-based composite explosive, which is at about 375 mm, but decreasing wall thickness can make the duration time of deflagration stage increase and the initial velocity to detonation reduce to $5515 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Increasing ignition charge mass has no significant effect on the reaction violence of DDT for DNTF-based composite explosive, but it can reduce the duration time of initial combustion and detonation induced distance. The duration time of initial combustion, duration time of deflagration and detonation induced distance of the pressed molding specimen are greater than those of the cast specimen, but there is no obvious difference in the violence of the reaction.

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

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.03.009