

文章编号: 1006-9941(2017)02-0132-06

## 微型爆炸网络用 DNTF/HMX 基传爆药研究

安崇伟<sup>1</sup>, 李文玺<sup>2</sup>, 温晓沐<sup>1</sup>, 王晶禹<sup>1</sup>, 卫彦菊<sup>1</sup>, 庾滨铄<sup>1</sup>

(1. 中北大学化工与环境学院, 山西太原 030051; 2. 四川华川工业有限公司, 四川成都 610106)

**摘要:** 为了使爆炸网络装药在实现高爆速、高安全和小临界尺寸传爆的同时满足装药均匀性好、爆速极差小的要求, 以 3,4-二硝基呋喃基氧化呋喃(DNTF)和奥克托今(HMX)为主体炸药, 以含能聚合物聚叠氮基缩水甘油醚(GAP)为粘结剂, 配以其它助剂, 设计出一种适用于微小尺寸爆炸网络的 DNTF/HMX 基传爆药配方, 并采用微注射工艺将其装入到微型爆炸网络沟槽中。采用扫描电镜(SEM)表征了主体炸药颗粒粒径和形貌并观察和测试了装药表面; 采用 X 射线衍射仪(XRD)测试了主体炸药和装药后炸药的晶型; 采用直线传爆临界尺寸实验测试了传爆性能; 采用撞击感度与冲击波感度实验测试了配方的安全性能。结果表明: 配方的炸药组分固含量为 85%, 固化成型后装药表面平整, 颗粒分布均匀, 炸药晶型未发生变化, 沟槽中装药密度可达  $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  (理论密度的 92%) 以上。在此装药密度下, 该配方的直线传爆临界尺寸为  $0.6 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ , 在  $0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$  的沟槽中爆速为  $7558 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 爆速极差为  $29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 撞击感度特性落高为 45.2 cm (5.0 kg 落锤), 冲击波安全性试验小隔板厚度值为 8.74 mm。

**关键词:** 微型爆炸网络; 3,4-二硝基呋喃基氧化呋喃(DNTF); 奥克托今(HMX); 传爆性能; 安全性能

中图分类号: TJ55; O389

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.02.007

## 1 引言

爆炸网络是由爆炸元件构成、通过爆轰信号传递起爆指令的火工系统。这里的爆炸元件指的是能够传递和调制爆轰信号的装药体和装药结构。由于其体积小、作用可靠等优点, 爆炸网络在定向战斗部和聚能战斗部中已经广泛使用。随着武器系统的小型化, 爆炸网络的微小尺寸对传爆药配方带来了更高要求。应用于爆炸网络传爆药的典型代表是美国的 XTX-8003 和 XTX-8004<sup>[1]</sup>, 它们以粒径为  $10 \mu\text{m}$  左右的细化太安(PETN)或黑索今(RDX)为主体, 钝感剂为 20% 硅酮树脂, 临界直径在  $0.38 \sim 0.76 \text{ mm}$  之间, 装药密度约  $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 爆速约  $7000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。近期, 国内也进行了相关研究, 吴凯等<sup>[2]</sup>研究了奥克托今(HMX)基塑性粘结炸药作为起爆逻辑网络用传爆药, 其装药平均密度  $1.44 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  沟槽内平均爆速为  $6959 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。胡菲等<sup>[3]</sup>研究了爆炸网络用 HMX/CL-20 基传爆药, 平均装药密度  $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$  沟槽内平均爆速为  $7131 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 爆速极差为

$124 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。尽管在微型爆炸网络装药配方和工艺方面都取得了一些成果, 但造型粉压装工艺常出现小尺寸条件下的装药密度一致性问题, 造成爆速极差大。其他类型传爆药也存在适用配方种类少, 爆轰波输出同步性有时无法满足使用要求等问题。

3,4-二硝基呋喃基氧化呋喃(DNTF)作为一种高能量密度材料具有良好的材料相容性、高生成热和高爆速的特性, 已应用于一些改性推进剂配方<sup>[4-7]</sup>。由于其传爆临界尺寸小, 研究 DNTF 作为小临界尺寸传爆药的含能组分很有意义。封雪松等<sup>[8]</sup>研究了 DNTF 基熔铸型传爆药配方, 并将其用于爆炸网络, 虽然能够在小尺寸装药下传爆, 但其冲击波感度较高<sup>[9]</sup>, 不能满足传爆药冲击波安全性要求。

基于此, 本研究以 DNTF 与 HMX 混合物为主体炸药, 含能粘结剂聚叠氮基缩水甘油醚(GAP)为粘结剂, 配以其他助剂, 制备出一种新型 DNTF/HMX 基传爆药, 并采用微注射工艺将其装入微型爆炸网络沟槽中, 对装药的成型效果、传爆性能和安全性能进行了测试, 为解决战斗部对爆炸网络爆轰波输出同步性要求提供了参考。

## 2 实验部分

### 2.1 主要试剂与材料

DNTF、HMX 原料, 甘肃银光化学工业集团有限

收稿日期: 2016-06-15; 修回日期: 2016-09-16

基金项目: 武器装备预先研究项目(00402040204); 应用物理化学国家级重点实验室基金(9140C370203130C37137)

作者简介: 安崇伟(1980-), 男, 副教授, 主要从事小临界尺寸传爆药研究。e-mail: anchongwei@nuc.edu.cn

公司；聚叠氮缩水甘油醚 (GAP), 泸州北方化学工业集团有限公司；甲苯-2,4-二异氰酸酯 (TDI), 天津登科化学试剂有限公司；二月桂酸二丁基锡 (T-12), 天津福晨化学厂, 以上试剂均为化学纯。

## 2.2 传爆药配方

在 GAP/DNTF 基 PBX 炸药配方<sup>[10]</sup>的基础上, 用 HMX 部分取代 DNTF, 形成本研究传爆药配方, 各组分及其含量 (质量分数) 为: DNTF 42.5%, HMX 42.5%, GAP 11%, TDI 1.8%, 其他助剂 4%。为了达到更好的颗粒填充效果, 主体炸药组分 DNTF 和 HMX 采用粒度级配的方法进行混合, 其中 DNTF 颗粒采用喷雾细化法<sup>[11]</sup>制备, 粒径约为 2~5  $\mu\text{m}$ ; HMX 颗粒粒径约为 10  $\mu\text{m}$ , 采用溶剂非溶剂滴加法制备; 溶剂均选用二甲亚砜, 非溶剂选择去离子水。配方中粘结剂 GAP 使用前需置于真空烘箱中 80  $^{\circ}\text{C}$  充分干燥 10 h。

## 2.3 装药方法

将炸药、粘结剂与一定量其他添加剂按照 2.2 中传爆药配方称量好后均匀混合配制成预固化药浆, 放入特制模具装药前加入对应量的固化剂 TDI 和催化剂 T-12 通过捏合工艺混制成均匀药浆。将注药模具出药口置于微型爆炸网络沟槽装药口处, 用液压机提供压力, 液压机压力设置为 1.2 t 进行微注射装药, 将药浆挤注到沟槽中。待沟槽装药装满后, 将沟槽出药口密封, 保压压力设置为 0.8 t, 保压 5~10 min。最后, 将装药完成的爆炸网络基板置于水浴烘箱中 60  $^{\circ}\text{C}$  固化 3~5 d。

## 2.4 表征与计算方法

扫描电镜 (SEM) 表征: 用 SU8020 型冷场发射扫描电子显微镜 (日本 Hitachi 公司) 观察配方中的炸药组分的粒度和形貌情况; 利用 EVO18 型扫描电子显微镜 (德国 Carl Zeiss 公司) 对 DNTF/HMX 基传爆药在沟槽网络内装药效果进行观察研究。

X-射线衍射仪 (XRD) 表征: 用 DX-2700 型 X 射线衍射仪 (丹东方圆仪器有限公司) 对 DNTF、HMX 炸药原料和经过细化后的组分进行晶型对比表征。测试条件: Cu 靶  $K_{\alpha}$  辐射, 射线管电压 40 kV, 电流 30 mA, 扫描角度  $2\theta$  角从 5 $^{\circ}$  到 50 $^{\circ}$ , 扫描步长 0.03 $^{\circ}$ 。

装药密度与爆速计算: 将不同尺寸沟槽中固化后的药条从基板沟槽中取出, 置于高精度 MH-124S 型密度测试仪 (邯郸兆辉电子科技有限公司) 中测试成型后所达到的实际装药密度; 理论爆速由 Explo5 爆轰参数评估软件 (美国爱迪赛恩公司) 运用自由能最小化方法进行计算。

## 2.5 直线传爆临界尺寸实验

将传爆药药浆装入到不同尺寸的直线爆炸网络沟槽 (横截面为正方形) 中, 固化成型后, 通过雷管起爆沟槽中装药。沟槽中装药传爆后留有爆轰痕迹, 且沟槽尺寸会有不同程度扩张, 根据这些现象可以判断沟槽中装药是否传爆, 测试装置如图 1 所示。在同一装药尺寸下连续实验 5 次, 如都能传爆, 表明临界尺寸低于该装药尺寸。将沟槽的深 ( $d$ ) 和宽 ( $w$ ) 各降低 0.1 mm, 重复以上实验, 直到找出能够完全传爆的最小沟槽装药尺寸 ( $d \times w$ ), 该装药尺寸即为该配方装药的直线传爆临界尺寸。

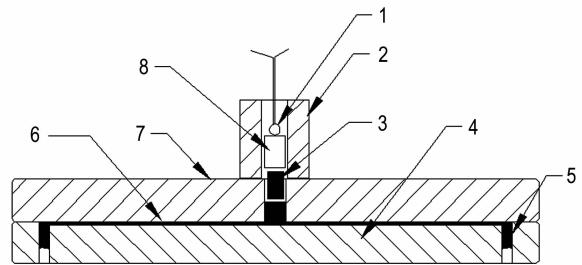


图 1 传爆临界尺寸试验装置示意图

1—引火头, 2—雷管座, 3—传爆药柱, 4—传爆基板, 5—通气孔, 6—传爆药槽, 7—传爆盖板, 8—雷管

Fig. 1 Schematic of detonation device for the critical dimension test

1—fuse head, 2—detonator holder, 3—booster grain, 4—detonation substrate, 5—ventilation hole, 6—booster groove, 7—detonation cover, 8—detonator

## 2.6 爆速测试

将传爆药装入 0.8 mm $\times$ 0.8 mm 的沟槽中, 起爆实验装配图和直线传爆临界尺寸实验基本一致。不同之处在于本项实验需在盖板相应位置上刻出 0.3 mm $\times$ 0.3 mm 的沟槽, 将漆包线 (探针) 装入盖板沟槽中, 测试装置示意图如 2 所示。利用炸药爆轰波阵面电离导电作用, 采用时间间隔测试仪可测试出爆轰波在两个探针距离间的传播时间, 进而得出传爆药的爆速。

## 2.7 感度性能测试

撞击感度测试按照 GJB772A-1997 炸药试验方法 601.312 型工具法<sup>[12]</sup>进行, 测试条件: 落锤质量 (5.0 $\pm$ 0.002) kg, 药量 (35 $\pm$ 1) mg, 温度 10~35  $^{\circ}\text{C}$ , 相对湿度  $\leq$  80%。冲击波感度采用 GJB2178A-2005 中小隔板实验<sup>[13]</sup>测试, 隔板厚度的升降步长为 0.2 mm。通过测定被测试样 50% 被起爆时的隔板厚

度( $L_{50}$ )来表征试样的相对冲击波感度。隔板值越大,冲击起爆所需入射到被测试样的冲击波能量越低,冲击波感度越高;反之,冲击波感度越低。

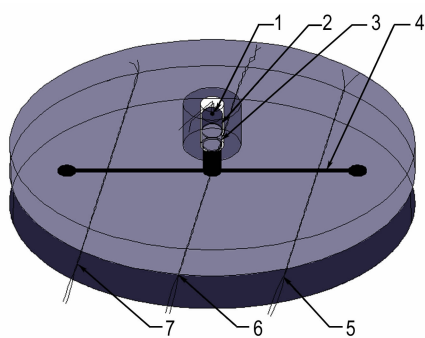


图2 爆速测试试验示意图

1—引火头, 2—雷管, 3—传爆药柱, 4—传爆药槽, 5, 7—爆速测试线, 6—起发信号线

Fig. 2 Schematic of the detonation velocity test

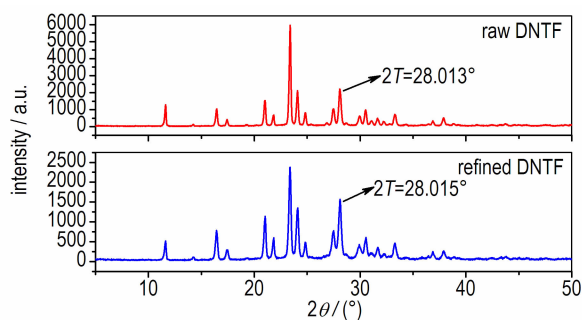
1—fuse head, 2—detonator, 3—booster grain, 4—booster groove, 5, 7—detonation velocity test line, 6—initiation signal line

### 3 结果与讨论

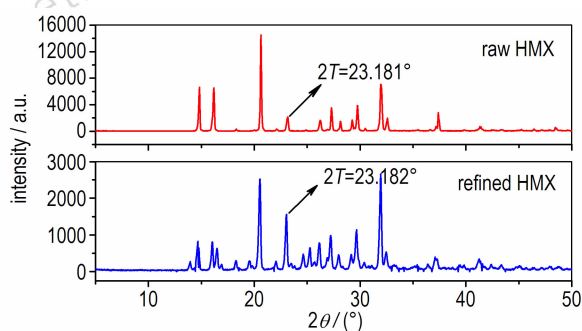
#### 3.1 XRD 测试结果分析

图3为DNTF、HMX原料细化前后以及DNTF/HMX基传爆药样品的X射线衍射图。如图3所示, DNTF/HMX基传爆药样品所有的衍射峰位置(衍射角度)与DNTF、HMX原料细化前后基本相同,例如原料DNTF在 $2\theta=28.013^\circ$ ,原料HMX在 $2\theta=23.181^\circ$ 的衍射峰位置对应细化后的DNTF在 $2\theta=28.015^\circ$ (峰值2000 a.u.左右)及HMX在 $2\theta=23.182^\circ$ 并没有发生变化, DNTF本身的结构稳定,溶于二甲基亚砜溶剂后,经喷雾细化在非溶剂中析出并没有改变其晶体结构; HMX组分细化前后的晶型也未发生变化,仍为稳定的 $\beta$ 型。

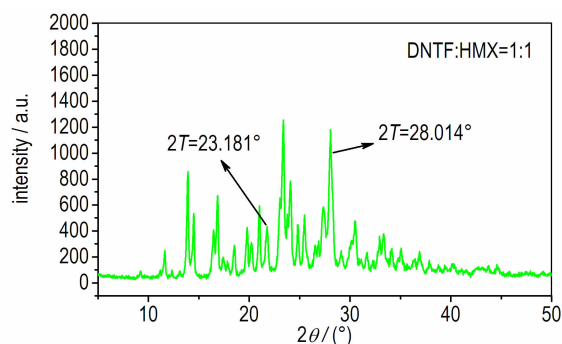
在相同的衍射角度,原料与DNTF/HMX基传爆药样品相同角度对应的衍射峰强度不同,传爆药样品中的炸药组分相对于原料大部分衍射峰会出现一定程度的宽化,且强度下降,两个衍射峰对应DNTF/HMX基传爆药样品的衍射峰角度分别为 $2\theta=28.014^\circ$ 和 $2\theta=23.181^\circ$ ,基本没有变化。但DNTF/HMX基传爆药样品的衍射峰强度明显下降,半高宽(FWHM)从 $0.132^\circ$ 和 $0.124^\circ$ 对应上升到 $0.266^\circ$ 和 $0.352^\circ$ 。这是因为与原料相比颗粒粒度的减小和与非晶聚合物GAP及其他添加剂的复合引起的。



a. DNTF



b. HMX



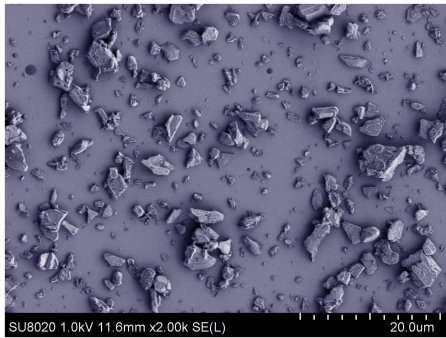
c. DNTF/HMX based booster explosive

图3 DNTF、HMX原料细化前后以及DNTF/HMX基传爆药样品的X射线衍射图

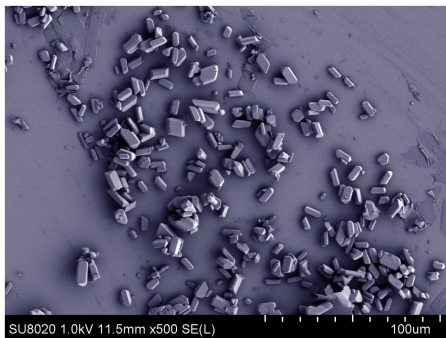
Fig. 3 X-ray diffraction patterns of DNTF, HMX before and after the refinement and DNTF/HMX based booster explosive samples

#### 3.2 SEM 测试分析

SEM测试结果如图4所示。结果表明,经喷雾细化的DNTF颗粒较小,粒径在 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 左右,颗粒形貌主要呈片状,这可能与DNTF的椅型分子构型有关, DNTF的这种结晶性质使分子堆积更加紧密,晶体结构更加稳定且表现出更高的密度<sup>[14]</sup>,从而获得更好的爆轰能量和性能。采用溶剂/非溶剂滴加方法细化的HMX保持了结构的稳定,颗粒形貌为多面体状,颗粒粒径在 $10\ \mu\text{m}$ 左右。



a. refined DNTF 2-5 μm



b. refined HMX 10 μm

图 4 DNTF、HMX 原料细化后的扫描电镜图

Fig.4 SEM images of the refined DNTF and HMX

### 3.3 装药成型效果

采用数码相机、扫描电子显微镜对装药成型效果分别进行了观察,其结果如图 5 所示。由图 5a 实物图照片可以看出沟槽装药表面比较平整,没有出现溢药和断药情况。图 5b 中扫描电镜 SEM 照片可见装药表面平整,没有出现微小裂纹和缩孔等缺陷,进一步表明炸药颗粒分布比较均匀,炸药颗粒和粘结体系结合比较紧密。

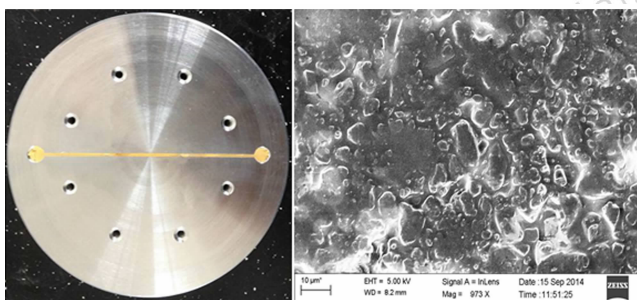


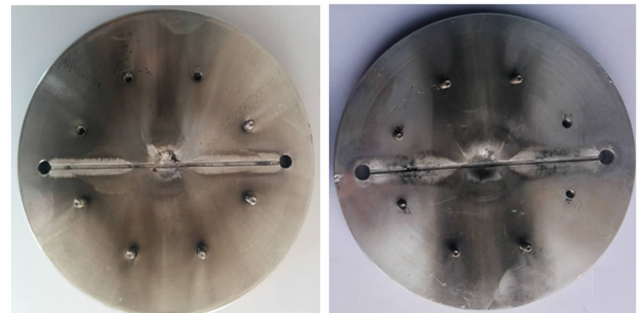
图 5 DNTF/HMX 基传爆药在爆炸网络沟槽中的装药效果

Fig.5 The detonation groove after charging with DNTF/HMX based booster explosive

### 3.4 直线传爆临界尺寸

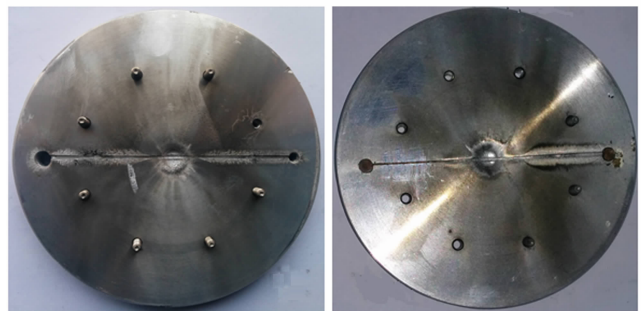
按照 2.5 中设计的实验方法对沟槽装药进行了

传爆实验,考察了传爆药的直线传爆临界尺寸,其结果如表 1 和图 6 所示。



a. 0.8 mm×0.8 mm

b. 0.7 mm×0.7 mm



c. 0.6 mm×0.6 mm

d. 0.5 mm×0.5 mm

图 6 直线传爆临界尺寸实物图

Fig.6 Propagation reliability test photos

表 1 直线传爆临界尺寸实验结果

Table 1 The formula of the DNTF/HMX based booster explosive in this experiment

groove size/mm	experiment number	propagation number
0.8×0.8	5	5
0.7×0.7	5	5
0.6×0.6	5	5
0.5×0.5	5	1

由图 6 可知,当沟槽尺寸为 0.8 mm×0.8 mm ~ 0.6 mm×0.6 mm 时,DNTF/HMX 基传爆药网络沟槽内装药均能实现可靠、稳定传爆,沟槽扩张一致性良好,尺寸为 0.5 mm×0.5 mm 时直线沟槽部分传爆,DNTF/HMX 基传爆药的直线传爆临界尺寸为 0.6 mm×0.6 mm。

### 3.5 装药密度与爆速

理论装药密度可通过体积加法如式 1 所示来计算。

$$\rho_e = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{\rho_i}} \quad (1)$$

式中,  $\rho_e$  为炸药的理论密度,  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $m_i$  为  $i$  组分的质量,  $\text{g}$ ;  $\rho_i$  为  $i$  组分的密度,  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

理论上的爆轰速度可以由以下方程<sup>[15]</sup>计算:

$$D_{\max} = \sum D_i a_{Vi}$$

$$a_{Vi} = \rho_{\max} \frac{g_i}{\rho_{i\max}}$$

$$D = \frac{D_{\max}}{4} + \frac{3 D_{\max}}{4} \rho_0 \quad (2)$$

式中,  $D_{\max}$  为理论爆速,  $D_i$  为  $i$  组分的理论爆速,  $a_{Vi}$  为  $i$  组分的体积分数,  $\rho_{\max}$  为混合炸药的理论密度,  $g_i$  为  $i$  组分的质量,  $\rho_{i\max}$  为  $i$  组分的理论密度,  $\rho_0$  为实际装药密度,  $D$  为装药密度  $\rho_0$  时的理论爆速。

由上述理论密度和爆速的原理, 通过 Explo5 爆轰参数评估软件进行计算, 沟槽装药实测密度通过高精度 MH-124S 型密度测试仪测试, 结果如表 2 所示。0.8 mm×0.8 mm 沟槽装药的实测爆速和实测密度也如表中所示。

由表中理论爆速和实测爆速的结果可以看出, 相同尺寸的沟槽中实测密度小于理论密度, 沟槽中的实际测试爆速小于理论爆速, 在 0.8 mm×0.8 mm 的沟槽中, 平均理论爆速和平均实测爆速分别为  $7824.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $7558 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。3 发测试样品的爆速极差仅为  $29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 这一指标表明了本文研制出的 DNTF/HMX 基传爆药配方的颗粒分布均匀、药剂均匀性好、装药工艺的装药稳定性好等优异性能。

表 2 DNTF/HMX 基传爆药的理论爆速和沟槽内实测爆速

Table 2 Theoretical and measured detonation velocity results of DNTF/HMX based booster explosives

number	groove size/mm	density/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$		velocity/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	
		theoretical	measured	theoretical	measured
1	0.8×0.8	1.737	1.603	7824.9	7547
2	0.8×0.8	1.737	1.604	7824.9	7576
3	0.8×0.8	1.737	1.602	7824.9	7550
average	0.8×0.8	1.737	1.603	7824.9	7558

### 3.6 撞击感度与冲击波感度测试

经过固化后的 DNTF/HMX 基传爆药的撞击感度与冲击波感度见表 3。从表 3 可知, 对原料 DNTF、HMX 的重结晶细化可以降低其撞击感度, 加之粘结剂的粘结复合作用可以显著降低 DNTF/HMX 基传爆药的冲击波感度, 使所研究的配方作为微型爆炸网络装药具备优异的安全性能。

表 3 原料与细化 DNTF、HMX 及 DNTF/HMX 基传爆药的撞击感度与冲击波感度

Table 3 Impact sensitivity and shock sensitivity of the raw and refined DNTF, HMX and DNTF/HMX based booster explosive

samples	impact sensitivity		shock sensitivity	
	$H_{50}/\text{cm}$	S	card gap thickness/mm	S
raw DNTF	16.9	0.08	55.4	0.11
raw HMX	19.4	0.06	35.1	0.10
DNTF(2~5 $\mu\text{m}$ )	25.9	0.07	42.3	0.08
HMX(10 $\mu\text{m}$ )	24.6	0.06	22.5	0.09
DNTF/HMX	45.2	0.09	8.74	0.08

## 4 结论

(1) 综合考虑小尺寸传爆特点、装药密度、爆速等能量性能以及安全性能, 实验确定的 DNTF/HMX 基传爆药的配方为: 主体炸药细化 DNTF 2~5  $\mu\text{m}$  (42.5%), 细化 HMX 10  $\mu\text{m}$  (42.5%) 以质量比 1:1 进行粒度级配, 粘结剂 GAP (11%), 固化剂 TDI (1.8%), 增塑剂、催化剂等其他添加剂 (2.2%)。

(2) 研究的 DNTF/HMX 基传爆药的配方在 0.5 mm×0.5 mm~0.8 mm×0.8 mm 尺寸的微型沟槽成功实现了装药, 数码相机与扫描电镜观察结果表明传爆药表面无缩孔、裂痕等缺陷, 获得了密实性、均匀性良好的装药效果。

(3) 通过注射装药固化成型制备出的 DNTF/HMX 基传爆药装药密度达到  $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 并在此高装药密度下实现了不小于 0.6 mm×0.6 mm 的微小通道内的可靠传爆。爆速实验结果表明: 沟槽中的实际测试爆速小于理论爆速, 在 0.8 mm×0.8 mm 的沟槽中, 平均理论爆速和平均实测爆速分别达到  $7824.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $7558 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 爆速极差为  $29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。安全性能测试中撞击感度实验特性落高为 45.2 cm, 冲击波感度小隔板实验的隔板厚度值为 8.74 mm。各项性能指标均体现出所研究的 DNTF/HMX 基传爆药应用于微型爆炸网络的优越性。

### 参考文献:

- [1] Terry R G, Alphonse P, John F B, et al. LASL explosive property data[M]. California: University of California Press, 1980: 253-260.
- [2] 吴凯, 刘玉存, 刘登程, 等. 微通道挤注药剂配方与装药工艺研究[J]. 兵工学报, 2013, 34(2): 251-256.

WU Kai, LIU Yu-cun, LIU Deng-cheng, et al. Study on the ex-

- trusion-cast booster and charging process for the small grooved channel[J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(2): 251–256.
- [3] 胡菲, 刘玉存, 王建华, 等. HMX/CL-20 基传爆药的挤压装药工艺及传爆性能[J]. 火炸药学报, 2013, 36(4): 87–90.  
HU Fei, LIU Yu-cun, WANG Jian-hua, et al. Squeeze Charge Process and Booster Performances of HMX/CL-20-based Booster[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2013, 36(4): 87–90.
- [4] 郑伟, 王江宁. 3, 4-二硝基呋喃基氧化呋喃(DNTF)的研究进展[J]. 含能材料, 2006, 14(6): 463–466.  
ZHENG Wei, WANG Jiang-ning. Review on 3, 4-bisnitrofurazanfuroxan (DNTF) [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2006, 14(6): 463–466.
- [5] 胡焕性, 张志忠, 赵凤起, 等. 高能量密度材料 3, 4-二硝基呋喃基氧化呋喃性能及应用研究[J]. 兵工学报, 2004, 25(2): 155–158.  
HU Huan-xing, ZHANG Zhi-zhong, ZHAO Feng-qi, et al. A study on the properties and application of high energy density material DNTF [J]. *Acta Armamentarii*, 2004, 25(2): 156–158.
- [6] 罗阳, 高红旭, 赵凤起. 含 3, 4-二硝基呋喃基氧化呋喃(DNTF) 推进剂的能量性能[J]. 含能材料, 2005, 13(4): 225–228.  
LUO Yang, GAO Hong-xu, ZHAO Feng-qi, et al. Energy characteristics of propellant containing 3, 4-dinitrofurazanfuroxan (DNTF) [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(4): 225–228.
- [7] 赵凤起, 陈沛, 罗阳, 等. 3, 4-二硝基呋喃基氧化呋喃(DNTF) 的改性双基推进剂[J]. 推进技术, 2004, 25(6): 570–572.  
ZHAO Feng-qi, CHEN Pei, LUO Yang, et al. Study on the composite modified double base propellant containing 3, 4-dinitrofurazanfuroxan (DNTF) [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25(6): 570–572.
- [8] 王浩, 王亲会, 黄文斌, 等. DNAN 降低 DNTF 冲击波敏感度研究[J]. 含能材料, 2010, 18(4): 435–438.  
WANG Hao, WANG Qin-hui, HUANG Wen-bin, et al. Shock sensitivity of DNTF reduced by using DNAN [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(4): 435–438.
- [9] 封雪松, 王浩, 刁小强, 等. DNTF 基钝感传爆药冲击波感度与小尺寸传爆性能研究[J]. 火工品, 2011, (6): 22–25.  
FENG Xue-song, WANG Hao, DIAO Xiao-qiang, et al. Study on shock-wave sensitivity and small-size detonation propagation of DNTF booster [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2011, (6): 22–25.
- [10] AN Chong-wei, WEN Xiao-mu, WANG Jing-yu et al. GAP/DNTF Based PBX Explosives: A novel formula used in small sized explosive circuits [J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2016, 13(2), 261–270.
- [11] WANG Jing-yu, LI Jun-long, AN Chong-wei, et al. Study on ultrasound- and spray-assisted precipitation of CL-20 [J]. *Propellants, Explosive, Pyrotechnics*, 2012, 37: 670–675.
- [12] 国防科学技术工业委员会. GJB 772A–1997. 中华人民共和国国家军用标准炸药实验方法[S], 北京: 国防科工委军标出版社, 1997.
- [13] 国防科学技术工业委员会. GJB 2178A–2005. 传爆药安全性试验方法[S], 北京: 国防科工委军标出版社, 2005.
- [14] 周彦水, 张志忠, 李建康, 等. 3, 4-二硝基呋喃基氧化呋喃的晶体结构[J]. 火炸药学报, 2005, 28(2): 43–46.  
ZHOU Yan-shui, ZHANG Zhi-zhong, LI Jian-kang, et al. Crystal structure of 3, 4-dinitrofurazanfuroxan (DNTF) [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2005, 28(2): 43–46.
- [15] Dobratz B M, Crawford P C. Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants [P], UCR-S1319, 1974.

## Research on the DNTF/HMX Based Booster Explosive Employed in the Microscale Explosion Network

AN Chong-wei<sup>1</sup>, WEN Xiao-mu<sup>1</sup>, WANG Jing-yu<sup>1</sup>, WEI Yan-ju<sup>1</sup>, YU Bin-shuo<sup>1</sup>

(Chemical Industry and Ecology Institute, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In order to make the explosive charged in explosion network meet the charge uniformity, low detonation velocity dispersion requirement and at the same time achieve the high detonation velocity, high security, explosion detonation in groove of small size, 3,4-dinitrofurazanfuro xan(DNTF) and HMX were chosen as the main explosive, GAP as the binder polymer, together with the other additives. A kind of booster formula was successful designed suitable for network booster and it was charged into the explosion network of microsize. The particle size and morphology of the DNTF and HMX was characterized by scanning electron microscopy (SEM). X-ray diffraction (XRD) was utilized to test the crystal. The booster charging surface were tested and observed by SEM and the detonation performance, impact sensitivity, shock sensitivity and detonation velocity were tested afterwards. The results showed that when the solid content was of 85%, the viscosity of the booster slurry can meet the requirements of charging process. After curing process the surface of booster was smooth with uniform particle distribution. The crystal of the two kinds of explosives was not changed and the density of booster charging in the groove was up to more than  $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  (92% of theoretical density). Under this density of booster charging, the critical dimension of linear detonation is  $0.6 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ , the detonation velocity in  $0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$  groove was  $7558 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  and the velocity range was  $29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . The impact sensitivity of the DNTF/HMX based booster explosive characteristic height ( $H_{50}$ ) was 45.2 cm (5.0 kg hammer), the thickness of small scale gap was 8.74 mm in the shock sensitivity test.

**Key words:** explosion network of microsize; 3,4-dinitrofurazanfuro xan(DNTF); HMX; detonation performance; safety performance

**CLC number:** TJ55; O389

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.02.007