

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.02.001

FOX-7 在炸药中的应用述评^{*}

董 军^{①②} 王伟力^① 谭 波^① 王晓峰^② 杜茂华^① 黄亚峰^② 周 诚^②
田 轩^② 赵 凯^② 杨 雄^②

①海军工程大学(湖北武汉,430033)

②西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] FOX-7 是一种性能优异的不敏感单质炸药,也是今后在低易损弹药上推广应用的主要候选炸药之一。重点综述了国内外近年来报道的 FOX-7 在炸药中的应用及性能研究进展,包括 FOX-7 的合成制备、分子结构及晶型、表界面性能、热安定性能以及以 FOX-7 为基的炸药的机械感度、爆速、爆压、冲击波感度、小尺寸装药快速烤燃、慢速烤燃、子弹撞击试验等。其中,对 FOX-7 炸药不敏感性的评价方式主要是与相同状态的 RDX 基炸药和 TNT 炸药进行试验对比。指出 FOX-7 是一种具有应用价值的高能不敏感炸药,要实现 FOX-7 炸药在弹药中的应用,今后还要加强高品质、规模化、低成本 FOX-7 制备工艺技术研究以及 FOX-7 炸药在大尺寸战斗部中的装药技术研究。

[关键词] 兵器科学;不敏感炸药;FOX-7;应用;性能

[分类号] TJ55

Application of FOX-7 in Explosives

DONG Jun^{①②}, WANG Weili^①, TAN Bo^①, WANG Xiaofeng^②, DU Maohua^①, HUANG Yafeng^②, ZHOU Cheng^②,
TIAN Xuan^②, ZHAO Kai^②, YANG Xiong^②

① Naval University of Engineering (Hubei Wuhan, 430033)

② Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] As an explosive with excellent insensitivity FOX-7 is one of the main candidates for popularization and application on low vulnerable ammunition in the future. This review concentrates on recent advances in application and properties of FOX-7 in explosives that reported at home and abroad, including synthesis, molecular structure and crystal form, surface and interface characters, thermal stability of FOX-7. And impact sensitivity, detonation velocity, detonation pressure, shock sensitivity, small-size charge test (fast cook-off, slow cook-off, popping condition) were also discussed. Insensitivity of FOX-7 was mainly compared with that of RDX-based explosive and TNT explosive in the same state. It can be pointed out that FOX-7 is a kind of high-energy insensitive explosive with valuable applications. Furthermore, proposals were given in view of the application of FOX-7 explosive in ammunition and the necessary to strengthen the study of high-quality, large-scale and low-cost FOX-7 preparation technology and charge technology in large warhead.

[KEYWORDS] ordnance science; insensitive explosive; FOX-7; application; property

引言

1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯(FOX-7)作为一种高能低敏感化合物,首先由 Latypo 等合成出来并公开发表^[1]。通过对 FOX-7 前线轨道组成的计算分析发现,该分子结构中含有的 C—NO₂ 具有强共轭作用;相对于黑索今(RDX)、奥克托今(HMX)等常

用炸药而言,FOX-7 的 C—NO₂ 键更稳定^[2-3]。因此,该化合物具有良好的耐热性和安全性,测试的能量密度与 RDX 相当,并且与多数炸药配方用黏结剂、钝感剂、增塑剂等材料相容^[4],放大制备技术也得到了相应的突破^[5]。因此,FOX-7 成为今后高价值武器平台弹药发展新型不敏感炸药的重要候选材料之一,具有广阔的应用前景。

本文中,主要围绕FOX-7的制备技术、结构、表

^{*} 收稿日期:2019-10-08
第一作者:董军(1982-),男,博士,高工,主要从事高能炸药及装药技术研究。E-mail:94180853@qq.com
通信作者:王晓峰(1967-),男,博士,研究员,主要从事混合炸药技术研究。E-mail:wangxf_204@163.com

界面及热安定性以及炸药中的应用及评价技术等研究情况进行述评。

1 FOX-7 的制备技术

FOX-7 主要采用对氮杂环化合物的硝化、开环合成制备。文献报道的合成路线有 3 种,见图 1。

第 1 种合成路线是在 FOX-7 首次被公开发表的文献中给出的^[1]。采用 2-甲基咪唑硝化、胺化获得 FOX-7。但是,反应的总收率较低,只有 13%。对此,人们对该合成路线进行了大量优化研究^[6-10],通过控制工艺条件等措施进一步提高了反应收率。

第 2 种合成路线,采用盐酸乙脒和乙二酸二乙酯进行缩合反应^[5],用甲醇对反应得到的中间体进行重结晶,得到 2-(二硝基亚甲基)-4,5-咪唑烷二酮;对该化合物进一步胺化,最终获得 FOX-7 产物。该合成路线长,增加了制备成本;但是总收率可达到 37%。因此,也有人采用该合成路线来制备 FOX-7 并用于研究^[11]。

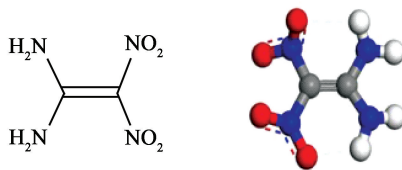
第 3 种合成路线,采用 2-甲基嘧啶-4,6-二酮为原料,通过硝化和水解两步反应获得 FOX-7 产物^[12]。该反应的收率可高达 70%;但是,合成过程的反应剧烈,反应温度难以控制。很多学者对第 3 种合成路线进行了优化及工艺放大研究^[13-16]。有报道称,优化后的总收率可达到 80%^[17]。

2 FOX-7 的结构、表界面及热安定性

FOX-7 作为炸药组分被使用时,其分子结构及晶型、表界面性能、热安定性等与应用效果密切相关。因此,主要围绕这些性能进行分析。

2.1 FOX-7 的分子结构及晶型

FOX-7 作为一种不敏感炸药,有着自己独特的分子结构,见图 2。

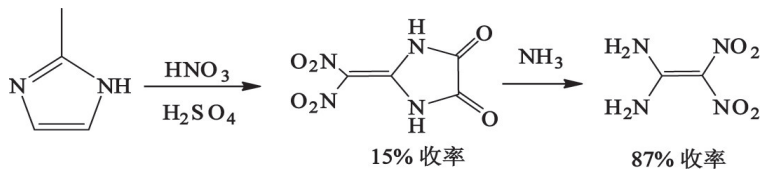


(a) 结构 (b) 模型

图 2 FOX-7 分子结构及模型

Fig. 2 Molecular structure and model of FOX-7

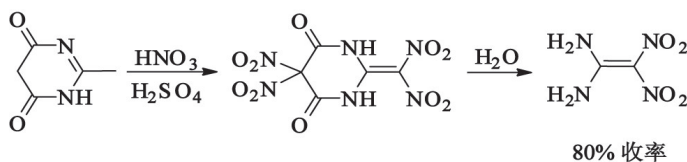
通过分子结构分析可以发现,FOX-7 具有推-拉型的乙烯结构,在乙烯结构的两端分别连有两个供电子的氨基基团(作为推-拉型乙烯结构的头部)和两个吸电子的硝基基团(作为推-拉型乙烯结构的尾部)^[18-19];在这 4 个基团的相互作用下,整个分子结构保持稳定。通过单晶 X 射线衍射发现,FOX-7 分子呈层状结构聚集,存在分子间的范德华力和氢键^[20],这些作用更增加了 FOX-7 的结构稳定性。



(a) 第 1 种合成路线



(b) 第 2 种合成路线



(c) 第 3 种合成路线

图 1 FOX-7 的 3 种合成制备路线

Fig. 1 Three synthetic routes of FOX-7

采用扫描电镜对 FOX-7 材料进行观察发现,其主要以片状不规则多面体形式存在(图 3)。但是对 FOX-7 晶体相变研究发现,FOX-7 在加热至分解过程中存在 3 个相变,分别出现在 80、115 ℃ 和 156 ℃;因此,在不同温度下,FOX-7 存在 α 、 β 、 γ 和 δ 4 种相态^[13]。国外对以 FOX-7 为基的炸药性能测试的研究报道中,常使用 γ 晶型样品进行试验。

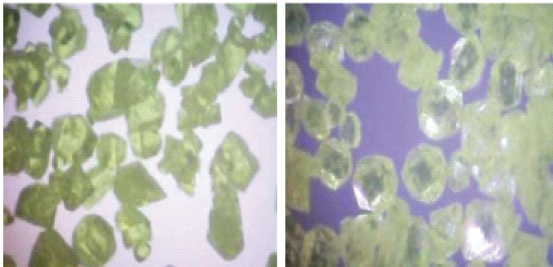


图 3 FOX-7 晶体的显微镜照片

Fig. 3 Microscopic photos of FOX-7 crystals

2.2 FOX-7 的表界面性能

为了研究 FOX-7 与其他火炸药组分的包覆混合效果,南海等^[21]对 FOX-7 的表界面性能进行了研究,采用接触角测试和 Young-Good-Girifalco-Fowke 方程计算的方式,对比研究了 FOX-7 和 TATB 的表面能和氟聚物对两者的包覆效果。结果表明,FOX-7(47.22 mJ/m²)和 TATB(47.87 mJ/m²)具有相近的表面能;因此,适用于 TATB 的包覆材料也适用于 FOX-7。

2.3 FOX-7 的热安定性

对 FOX-7 的热安定性研究报道较多。文献[22]中,采用真空安定性试验(100 ℃,40 h)和失重试验(105 ℃,72 h)对 FOX-7 进行测试。结果表明,FOX-7 具有良好的稳定性;对 FOX-7 样品进行缓慢升温(5 K/min),测试出其分解温度范围为 218 ~ 232 ℃。见图 4。

Wild等^[23]通过差热分析与热失重分析联用,测

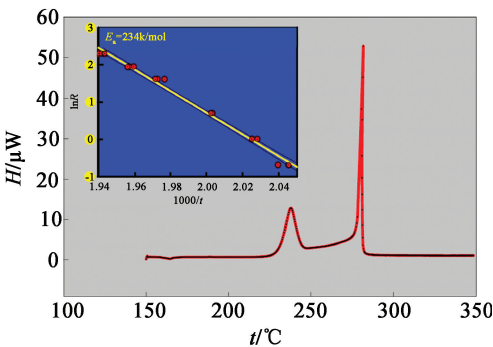


图 4 FOX-7 热分解曲线

Fig. 4 Thermal decomposition curve of FOX-7

试出 FOX-7 发生热分解反应的起始点在 210 ℃ 左右。并且研究表明,FOX-7 在 122 ℃ 条件下储存 10 a,质量损失率仅为 3%。但实际的储存温度根本达不到这样高的温度;因此,FOX-7 的储存寿命将会更长,以 FOX-7 为基的炸药能够满足常规弹药的储存寿命周期要求。

Ticmanis 等^[24]通过差热分析与热失重分析联用对 FOX-7 的热安定性进行研究发现,当升温速率为 5 K/min 时,能够观察到 FOX-7 在 210 ℃ 发生分解,继续升温直到 FOX-7 发生爆炸,这段升温过程未发现新的 FOX-7 分解点;但当升温速率控制为 1 K/min 时,发现 FOX-7 出现了两个热失重阶段,第一阶段的失重量约为 38%,少于第二阶段的失重量(约为 45%)。并且,采用红外、核磁、元素分析等测试手段对失重后的产物进行分析发现,剩余物仍为 FOX-7;由此推断,第一阶段发生分解的是附着在 FOX-7 晶体外层结构松散的碎片,碎片质量的多少取决于 FOX-7 的结晶条件。因此,为了降低 FOX-7 的热失重量,应优化 FOX-7 的结晶工艺,提高其结晶质量。

3 FOX-7 基炸药的制备及性能

3.1 FOX-7 炸药的设计及不敏感性

FOX-7 本身具有较低的机械感度,满足压制成型工艺对安全的要求;因此,在 FOX-7 中添加少量黏结剂,FOX-7 基炸药样品就可以采用压制工艺成型(图 5)。Kretschmer 等^[22]设计了黏结剂分别为石蜡、乙丙橡胶(EPM)和聚丙烯酸酯弹性体(Hy Temp)的 3 种 FOX-7 炸药样品,其组分和质量分数为:95.0% FOX-7、4.5% 黏结剂和 0.5% 石墨。同时,用 RDX 取代 FOX-7 并保持其他组分和含量不变,制备出 3 种 RDX 基炸药样品,用来与 FOX-7 基炸药样品性能进行对比,开展了可压性、弹性模量、摩擦与

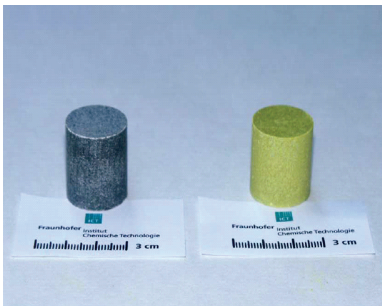


图 5 压制成型的炸药样品

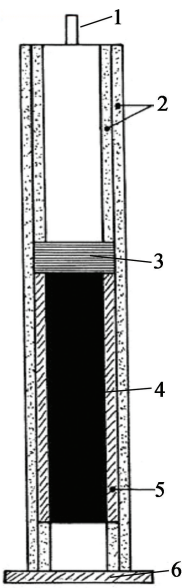
Fig. 5 Pressed samples of explosives

撞击感度、起爆压力、不同炸药含量下的爆速和爆压等的研究。结果表明,3 种黏结剂体系的 FOX-7 基和 RDX 基炸药力学性能和能量相当。

但是,FOX-7 基炸药对抗冲击波的不敏感性显著高于相同黏结剂体系的 RDX 基炸药,试验采用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)为隔板,对比了 3 种黏结剂体系的 FOX-7 基和 RDX 基炸药的冲击波感度。结果表明,FOX-7 基炸药的冲击波点火压力范围为 3.5~3.8 GPa,RDX 基炸药的冲击波点火压力范围为 2.0~2.2 GPa。

含能材料战略情报欧洲领导小组与法国研究中心 SNPE 团队合作,研制出了一种新型浇注不敏感炸药^[25]。该炸药被命名为 F-PBXN-109,主要组分为 FOX-7、铝粉和黏结剂。同时,采用相同制备工艺和配比,用不敏感 RDX 取代 FOX-7,制备了 I-PBXN-109 炸药。采用 Cheetah 软件对两种炸药的爆轰性能进行了计算,并测试对比了两种炸药的摩擦、撞击感度。采用大隔板试验装置,对制备出的两种炸药药柱(∅40 mm×200 mm)进行了冲击波感度试验研究,采用单片厚度 0.19 mm 的醋酸纤维素为隔板,见图 6。测试结果表明,F-PBXN-109 和 I-PBXN-109 的爆速分别为(7 300±50) m/s 和(7 527±38) m/s,但是含 FOX-7 炸药的起爆压力比含不敏感 RDX 炸药的高了 27%。两种炸药的相关性能数据详见表 1。表 1 中,* 项为 Cheetah 软件计算值。

瑞典国防研究机构的 Bergman 等^[26]在 2009 年



1—起爆头;2—约束管;3—醋酸纤维素板;
4—炸药;5—钢管;6—钢制见证板。

图 6 隔板试验结构原理图

Fig. 6 Structure diagram of gap test

表 1 两种炸药性能

Tab. 1 Performance comparison of two kinds of explosives

性能参数	F-PBXN-109	I-PBXN-109
密度/(g·cm ⁻³)	1.703	1.665
爆速*/(m·s ⁻¹)	7 018	7 074
爆压*/GPa	18.85	19.38
能量* @ V/V ₀ = 2, GPa·cm ³ /cm ³	4.30	4.63
能量* @ V/V ₀ = 7, GPa·cm ³ /cm ³	6.63	7.11
摩擦感度/J	>353	>353
撞击感度/J	>50	26

不敏感弹药及含能材料技术论坛上对 FOX-7 的应用研究情况进行了交流报道,详细介绍了 FOX-7 单质的理化性能(表 2),并通过试验对比,得到 FOX-7 的冲击波感度值低于特屈儿、六硝基芪、TNT、HMX 和 RDX 的结论。FOX-7 的点火温度大于 215 ℃,相容性试验结果表明,FOX-7 与 CAB(BF900)、Estane、GAP、HTPB、Viton、NENA 等黏结剂体系均有良好的相容性。

表 2 FOX-7 的部分性能

Tab. 2 Partial performances of FOX-7

性能	FOX-7	RDX
晶体密度/(g·cm ⁻³)	1.885	
生成热/(kJ·mol ⁻¹)	134	
撞击感度/cm	70	38
摩擦感度/N	>350	120
爆炸温度/℃	215	220
爆压(计算值)/GPa	33.96	34.63
爆速(实测值)/(m·s ⁻¹)	8 870	8 930

此外,Bergman 等^[26]还设计了以 FOX-7 为基,分别适用于压装、浇注和熔铸 3 种炸药制备工艺的多个炸药配方,分别开展了小尺寸装药慢速烤燃、快速烤燃、子弹撞击等试验,与 B 炸药装药相比,不敏感性能得到了显著改善(将反应等级由爆轰改善为燃烧或燃爆)。

瑞典国防研究机构的研究人员设计研制了一系列以 FOX-7 为基的炸药^[27],分别命名为 FOF-2、FOF-3、FOF-4 和 FOF-5(表 3),并详细报道了这 4 种炸药配方的组成和比例。由于这 4 种炸药配方的黏结剂的质量分数范围达到了 20%~30%,因此主要采用浇注成型工艺来制备试验所需的炸药样品。

通过对比发现,FOF-5 炸药的能量和工艺性能优于其他 FOF 炸药。因此,研究团队重点开展

表 3 FOF 系列炸药配方

名称	组成	特点
FOF-2	FOX-7(255 ~ 350 μm)50.0% , FOX-7(< 70 μm)20.0% ,聚缩水甘油硝酸酯 21.0% ,丁基-硝酸酯基乙基硝胺 5.0% ,二月桂酸二丁基锡 4.0%	配方体系黏度非常高,工艺性差
	FOX-7(350 ~ 800 μm)35.0% , FOX-7(< 70 μm)35.0% ,聚缩水甘油硝酸酯 11.0% ,聚叠氮缩水甘油醚 11.0% ,丁基-硝酸酯基乙基硝胺 5.0% ,氢化苯基甲烷二异氢酸酯 3.0%	配方体系黏度满足工艺要求,但是能量性能不佳
FOF-3	FOX-7(350 ~ 800 μm)65.4% , HMX(22 μm)14.0% ,聚缩水甘油硝酸酯 7.4% ,聚叠氮缩水甘油醚 7.4% ,丁基-硝酸酯基乙基硝胺 3.7% ,氢化苯基甲烷二异氢酸酯 2.1%	能量性能良好,但是由于粒度分布范围大,造成配方体系黏度较大
FOF-4	FOX-7(238 μm)38.1% , FOX-7(32 μm)25.4% , HMX(22 μm)16.5% ,聚缩水甘油硝酸酯 7.2% ,聚叠氮缩水甘油醚 7.2% ,丁基-硝酸酯基乙基硝胺 3.6% ,氢化苯基甲烷二异氢酸酯 2.0%	配方体系黏度和能量均满足要求

FOF-5炸药与 B 炸药的不敏感性对比研究。采用 40 mm 火炮弹丸壳体进行装药,分别使用装填惰性材料和 HNS 基炸药的两种引信,使用大米来模拟发射药筒里的发射药颗粒,试验样弹(全备弹及弹头)如图 7、图 8 所示。

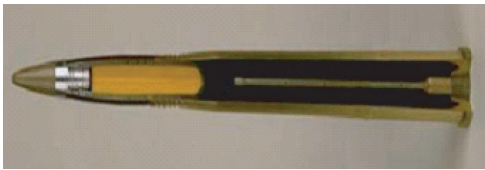


图 7 40 mm 炮弹开壳样弹
Fig. 7 40 mm artillery shells



图 8 40 mm 炮弹弹丸及引信
Fig. 8 40 mm projectile and fuze

按照 MIL-STD-2105B 标准,对装填 FOF-5 炸药和 B 炸药的 40 mm 火炮弹丸进行快速烤燃、慢速烤燃和子弹撞击试验,试验结果及试验后样品照片见

表 4、图 9 ~ 图 11。

表 4 烤燃及子弹撞击试验结果

Tab.4 The test results of cook-off and popping condition			
名称	慢速烤燃	快速烤燃	子弹撞击
FOF-5(假引信)	燃烧	燃爆	燃烧
FOF-5(真引信)	燃爆	燃爆	—
B 炸药	爆轰	爆轰	爆轰



图 9 慢速烤燃试验结果
Fig.9 Results of slow cook-off test



图 10 快速烤燃试验结果
Fig. 10 Results of fast cook-off test



图 11 子弹撞击试验结果
Fig. 11 Results of popping condition test

初步的试验结果表明,FOF-5 炸药具有良好的不敏感性能,有望替代 B 炸药在弹药中使用。

3.2 FOX-7 炸药爆轰性能研究

Fried 等^[28]采用热化学计算软件 Cheetah 中的 BKW 方程及参数,对分别添加高活性铝和惰性铝的 FOX-7 基炸药的爆压和爆速进行了计算,结果表明,添加高活性铝后,FOX-7 基炸药的爆压提高了 10% 左右。

Wild 等^[23]对比了 FOX-7、TNT、钝感 RDX 和钝感 HMX 的爆速、自由表面速度和冲击波压力,结果见表 5。

可以看出,上述表征的 FOX-7 爆轰性能均优于 TNT,与钝化 RDX 和钝化 HMX 相当。

文献[29-30]中,通过控制重结晶溶剂、温度和搅拌速率制备出了粒度均匀的 FOX-7 颗粒,压制成密度为 1.78 g/cm³ 的药柱,采用圆筒试验分别测试了爆速、格尼能和格尼速度,并与 TNT 和 RDX 基炸药对比,结果见表 6。RDX 基炸药的 $m(\text{RDX}) : m$

表 5 FOX-7 与其他炸药爆轰性能对比
Tab.5 Comparison of detonation performance
between FOX-7 and other explosives

性能	FOX-7	TNT	钝化 RDX	钝化 HMX
爆速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	8 000	6 800	8 300	8 300
自由表面 速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1 300	940	1 300	1 400
冲击波压力/GPa	≈26	≈17	≈26	≈28

表 6 FOX-7 与其他炸药金属加速能力对比
Tab.6 Comparison of metal acceleration ability
of FOX-7 and other explosives

炸药	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	爆速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	格尼能/ ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$)	格尼速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
FOX-7	1.78	8 325 ± 50	3 540 ± 100	2 660 ± 40
TNT	1.59	6 910	2 795	2 364
RDX 基炸药	1.65	8 390	3 734	2 733

(黏结剂) = 94 : 5。

通过 FOX-7 炸药的圆筒试验结果对其有效等熵指数进行了预估(有效等熵指数通常用来计算炸药的爆轰参数或部分爆轰产物特性),结果见表 7。

表 7 FOX-7 炸药等熵 JWL 方程参数
Tab.7 Equal entropy JWL Equation parameters
of FOX-7

$\rho_0/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$D/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	γ_{CJ}	p_{CJ}/GPa	E_0/GPa	
1 780	8 325	3.35	28.4	8.9	
A/GPa	B/GPa	C/GPa	R_1	R_2	ω
1 414.339	21.663 7	1.234 12	5.54	1.51	0.32

4 结论与展望

随着高价值武器平台的发展以及携带弹药数量的增加,如何提高弹药在战场上不敏感和低易损的特性已成为军方关注的焦点之一。开展新型不敏感炸药在弹药中的应用研究,是实现弹药不敏感和低易损的重要途径之一。尤其是以 FOX-7 为基的不敏感炸药,通过大量的研究,已经掌握了其自身的理化性能和爆轰性能;并且研究了 FOX-7 炸药小尺寸装药的快速烤燃、慢速烤燃、子弹撞击等不敏感性能,与 RDX 基炸药相比,不敏感性能得到了显著提高。然而,FOX-7 炸药制备工艺放大研究、FOX-7 在大型战斗部中的装药技术研究等鲜有报道。围绕 FOX-7 炸药实用化,其今后的研究方向为:

1) 高品质、规模化、低成本 FOX-7 制备工艺技术研究,实现不同规格 FOX-7 炸药批量化可控制备,满足不同类型不敏感弹药对其应用的需求。
2) FOX-7 炸药在大尺寸战斗部中的装药技术研究,实现弹药的高能、低易损特性,满足高价值武器平台对不敏感弹药的迫切需求。

参 考 文 献

[1] LATYPO N V, BERGMAN J, LANGLET A, et al. Synthesis and reactions of 1, 1-diamino-2, 2-dinitroethylene [J]. Tetrahedron, 1998, 54(38):11525-11536.

[2] 姬广富, 肖鹤鸣, 董海山, 等. 二氨基二硝基乙烯结构和性质的理论研究[J]. 化学学报, 2001, 59(1):39-47. JI G F, XIAO H M, DONG H S, et al. The theoretical study on structure and property of diamino-dinitroethylene [J]. Acta Chimica Sinica, 2001, 59(1):39-47.

[3] 居学海, 肖鹤鸣. 1,1-二氨基二硝基乙烯晶体的密度泛函理论研究[J]. 化学物理学报, 2004, 17(4):407-410. JU X H, XIAO H M. Periodic DFT study on 1,1-diamino dinitroethylene crystal [J]. Chinese Journal of Chemical Physics, 2004, 17(4):407-410.

[4] OSTMARK H, LANGLET A, BERGMAN H, et al. FOX-7: a new explosive with low sensitivity and high performance [C]//Proceedings of 11th International Symposium on Detonation. Snowmass Village, CO, USA, 1998: 807-812.

[5] HOLMGREN E, CARLSSON H, GEODE P, et al. Characterization of FOX-7, its precursors and possible byproducts [C]//34th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, Germany, 2003, 107:1-10.

[6] JALOVY Z, MAREČEK P, DUDEK K, et al. Improved synthesis of 2-(dinitromethylene)-4, 5-imidazoladinedione [C]//New Trends in Research of Energetic Materials. Proceeding of the VIII Seminar. Czech Republic, 2005:132-136.

[7] 蔡华强, 舒远杰, 郁为飞, 等. 1,1,-二氨基-2,2-二硝基乙烯的合成和表征[J]. 化学研究与应用, 2004, 16(2):264-265. CAI H Q, SHU Y J, YU W F, et al. Synthesis and characteristics of 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene [J]. Chemical Research and Application, 2004, 16(2):264-265.

[8] CAI H Q, SHU Y J, HUANG H, et al. Study on reactions of 2-(dinitromethylene)-4, 5-imidazolidinedione [J]. The Journal of Organic Chemistry, 2004, 69(13): 4369-4374.

[9] 蔡华强, 舒远杰, 黄辉, 等. 2-(二硝基亚甲基)-4,5-咪

- 唑烷二酮与甲醇的反应研究[J]. 有机化学,2005,25(1):90-95.
- CAI H Q, SHU Y J, HUANG H, et al. Study on reaction of 2-(dinitromethylene)-4, 5-imidazolidinedione with methanol[J]. Chinese Journal of Organic Chemistry, 2005,25(1):90-95.
- [10] 蔡华强,舒远杰,程碧波. 合成 FOX-7 方法的改进[J]. 应用化学,2005,22(1):95-98.
- CAI H Q, SHU Y J, CHENG B B. An improved method for synthesis of FOX-7[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2005,22(1):95-98.
- [11] INSTYTUT P O, WARSZAWA, WOJSKOWA A T, et al. Low sensitive high explosive 1,1-diamino-2,2-dinitroethene[J]. Przemyst Chemiczny, 2007,86(6):510-514.
- [12] ASTRAT'EV A A, DASHKO D V, MERSHIN A YU, et al. Some specific features of acid nitration of 2-substituted 4,6-dihydroxypyrimidines. Nucleophilic cleavage of the nitration products[J]. Russian Journal of Organic Chemistry, 2001,37(5):729-733.
- [13] ASTRAT'EV A, DASHKO D V, STEPANOV A I. Reactivity of 2-(dinitro-methelene)-4,6-dihydroxy-5,5-dinitropyrimidine in the processes of nucleophilic substitution[C]//New Trends in Research of Energetic Materials. Proceeding of the V III Seminar. Czech Republic, 2005:167-169.
- [14] CHUNG K H, GOH E M, CHO J R. Synthetic modification and scall-up process for 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene(FOX-7) [C]//36th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, Germany,2005.
- [15] CHYLEK Z, CUDZILO S, BLADEK J, et al. Optimization of 1,1-diamino-2,2-dinitroethene synthesis [C]//New Trends in Research of Energetic Materials. Proceeding of the VIII Seminar. Czech Republic, 2005:207-209.
- [16] PAGORIA P, MITCHELL A, SCHMIDT R, et al. Synthesis scale-up and experimental testing of LLM-105 (2,6-diamino-3,5-dinitropyrazine-1-oxide) [C]//Insensitive Munition & Energetic Materials Technology Symposium. San Diego, CA, USA, 1998.
- [17] ÖSTMARK H, BERGMAN H, BEMN U, et al. 2,2-Dinitroethene-1,1-diamine (FOX-7) properties, analysis and scale-up [C]//32th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, Germany, 2001.
- [18] BELLAMY A J, KLAPOTKE T M, MINGOS D M P. High energy density materials [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. KG, 2007: 1-13.
- [19] CRAWFORD M J, EVERS J, GOBEL M, et al. γ -FOX-7: structure of a high energy density material immediately prior to decomposition[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2007, 32(6):478-495.
- [20] BEMM U, ERIKSSON L. Phase transitions in FOX-7 [C]// Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium. 2001:775-789.
- [21] 南海,王晓峰. FOX-7 的表面能研究[J]. 含能材料, 2006,14(5):388-390.
- NAN H, WANG X F. Surface energy of FOX-7[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2006,14(5):388-390.
- [22] KRETSCHMER A, GERBER P, HAPP A. Characterization of plastic bonded explosive charges containing FOX-7 [C]//35th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, Germany, 2004:172.
- [23] WILD R, TEIPEL U. Characterisation and explosive properties of FOX-7 [C]// 35th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, Germany, 2004:69.
- [24] TICMANIS U, et al. Product quality and decomposition kinetics of FOX-7:UCRL-CONF-2308 [R]. Annual ICT Meeting. 2004.
- [25] COLLET B C, ROUX B L, MAHE B, et al. FOX-7 based insensitive cast PBX [C]//The Insensitive Munitions European Manufacturers Group (IMEMG). 2009: 11-14.
- [26] BERGMAN H, PETTERSSON A, STENMARK H, et al. FOX-7, an IM ingredient candidate where are we today [C]//Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium. 2009.
- [27] ELDSÄTER C, PETTERSSON A, WANHATALO M. Formulation and testing of a comp b replacement based on FOX-7 [C]//Proceeding of Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium. San Francisco, CA, USA, 2009.
- [28] FRIED E. Cheetah 1.39-User's Manual [M]. Livermore, CA, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1996.
- [29] TRZCINSKI W A, CUDZILO S, CHYLEK Z, et al. Detonation properties of 1,1-diamino-2,2-dinitroethene (DADNE) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 157(2/3):605-612.
- [30] BELAADA A, TRZCINSKI W A, CHYLEK Z, et al. FOX-7-based melt-cast compositions preparation and some properties [C]// New Trends in Research of Energetic Materials. Czech Republic, 2015:465-476.