

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.01.001

不敏感熔铸炸药的研究现状及发展趋势^{*}

王红星 王晓峰 罗一鸣
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 针对不敏感弹药的发展需求,对不敏感熔铸炸药的研究现状及发展趋势进行研究。综述了 TNT 基、DNAN 基、蜡基、低共熔物载体基和新型载体基 5 种类型的不敏感熔铸炸药的国内外研究现状,归纳了不同类型炸药的优缺点,提出了 TNT 基和低共熔物基炸药是目前不敏感熔铸炸药发展的重点,指明了新型载体、低共熔物体系、不敏感单质炸药、炸药不敏感化处理和功能助剂等方面未来的主要发展方向。

[关键词] 不敏感;熔铸炸药;TNT;DNAN;蜡;低共熔物

[分类号] TJ55

Research Status and Development Trend of Insensitive Melt-Cast Explosive

WANG Hongxing, WANG Xiaofeng, LUO Yiming
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] According to the development demand of insensitive ammunition, the present situation and development trend of insensitive melt-cast explosive were studied. In this paper, the research status of five types of insensitive melt-cast explosives, including TNT-based, DNAN-based, wax-based, low eutectic-based and new carrier-based melt-cast explosives were reviewed in detail. Advantages and disadvantages of different types of explosives are summarized. TNT-based and low eutectic-based explosives are the key explosives in the development of insensitive melt-cast explosives. Future development directions of new carrier, low eutectic, insensitive single explosive, insensitive treatment of explosives and functional assistant were pointed out.

[KEYWORDS] insensitive; melt-cast explosive; TNT; DNAN; wax; low eutectic

引言

随着现代军事科学技术的快速变化与发展,具有综合作战性能的高价值作战平台(如航空母舰、潜艇、新型战斗机等)不断投入使用;弹药意外或遭受打击时发生燃烧,尤其是爆炸产生的后果对作战平台及部队战斗力极具破坏性,给人员和财产造成无法估量的损失,进而导致自身的战斗力下降^[1]。为了提高弹药的战场生存能力,减少弹药在生产、储存、运输和使用等全寿命周期的压力,以美国为代表的西方各国早在 20 世纪 70 年代就提出了不敏感弹药(insensitive munitions,IM)的概念,其内涵是指战时能够满足作战使用效能,而在受到热、机械或冲击等意外刺激作用时,能降低反应剧烈程度和破坏程

度的弹药^[2-3]。近年来,IM 技术更是发展迅速,在不同类型的弹药中得到广泛的应用。IM 的安全评估技术也随之发展,逐步形成了完备的评估体系和试验方法。例如,美军制定的 MIL—STD—2150B 标准^[4],北约制定的有关 IM 的使用、评估和测试的 STANG4439 标准,法国的 MURAT(危险性较小的弹药)三星级军标及联合国关于极不敏感爆轰物质(EIDs)的标准^[5]。

弹药的核心是炸药装药,其不敏感性直接影响弹药甚至武器系统的安全性和战场生存能力。因此,各国也都致力于发展不敏感炸药,尤其以美国为代表的西方国家更是将发展不敏感炸药提升到战略地位。历经多年的不断发展,美国已成功研制出满足 IM 需求的不敏感炸药(如 PBX 系列炸药),并已在美国海军、空军等多型弹药中得到应用^[6]。但由

^{*} 收稿日期:2020-07-01
基金项目:国家重大专项基金项目(00401020202)
第一作者:王红星(1981-),男,副研究员,研究方向为熔铸炸药技术。E-mail :hxwang204@126.com
通信作者:王晓峰(1967-),男,研究员,博导,研究方向为混合炸药技术。E-mail :wxclub@163.com

于 PBX 炸药装药产品的固化时间长、成本较高,需要人工间断性操作;因此,PBX 炸药很长时间一直未能在大批量生产的廉价弹药中得到应用^[7]。

综合考虑毁伤威力和成本的因素,约占 70% 的战斗部装填熔铸炸药,使得熔铸炸药成为在弹药领域应用最广泛的一种混合炸药。所以,发展不敏感熔铸炸药具有重要的意义。

本文中,根据不敏感熔铸炸药的特点,介绍了国内外不敏感熔铸炸药的发展状况,归纳并总结了不敏感熔铸炸药发展过程中的新载体、新方法和新材料,以期在不敏感熔铸炸药的发展提供技术支撑。

1 不敏感熔铸炸药研究现状

载体炸药自身的理化、爆轰和安全等综合性能对熔铸炸药的性能具有较大的影响。因此,提升熔铸炸药的综合性能,首当其冲要改进载体炸药的性能。载体炸药的不敏感化对于不敏感熔铸炸药的发展具有显著的推动作用。目前,不敏感载体炸药的研究主要从两方面进行:一是改进传统的载体炸药 TNT,提高 TNT 基熔铸炸药的综合性能;二是研发新的熔铸载体炸药,以提高熔铸炸药的不敏感性能。

1.1 TNT 基炸药

作为传统的熔铸载体炸药,TNT 具有熔点(80℃)低、爆炸性能良好、机械感度低和成本低等优点,兼具良好的安定性、稳定性和温度稍高即有的塑性等特点;TNT 基熔铸炸药已广泛应用于工业炸药和军用炸药^[8]。但 TNT 也存在应用方面的不足。例如,其同分异构体(一、二硝基化合物)会导致混合炸药凝固点降低进而引起渗油现象;热循环作用下具有不可能膨胀的特性,导致装药易形成粗结晶结构;体积收缩率(约 11.6%)较高;还有与生俱来的脆性会影响装药的力学性能^[9]。

虽然 TNT 存在许多不足之处,但 TNT 基炸药在生产中要比任何一种压装或浇注固化的 PBX 炸药都廉价,不足之处可以通过改性处理得到一定程度的弥补;因而,在大批量、低附加值武器弹药中得到广泛应用。目前,美国的匹克汀尼兵工厂(Picatinny Arsenal)、法国的 GIAT 公司和南非的戴诺公司等諸多军工厂仍然致力于发展 TNT 基不敏感熔铸炸药。

为改善 TNT 基炸药的发射安全性,发展了改性 B 炸药 $[w(\text{TNT}):w(\text{RDX}):w(\text{外加聚氨酯}):w(\text{外加 MNT})=40.0:60.0:0.5:0.6]$,即在 B 炸

药中加入高分子黏结剂和增塑剂^[10]。在俄罗斯,通过加入一种能溶解在 TNT 中的塑性聚氨酯弹性体,进一步改善了 B 炸药的性能,使膛炸率降低到 10^{-6} 以下;加入添加剂(如 2,4-二硝基苯肼)可降低烤燃反应的剧烈程度^[11]。

为解决装药的脆性问题,西方各国研制不同类型的添加剂以提高装药的塑性,先后发展了 XM-28 抗裂剂和热稳定更优的新型抗裂剂^[12]。为解决装药的裂纹问题,国外大量采用添加纤维的方法以提高力学强度,效果良好;也有通过增强炸药塑性的方法,即在 TNT 基熔铸炸药中加入高聚物,改善了炸药的塑性,提高了熔铸炸药的力学和安全性能^[13]。

20 世纪 90 年代,美国空军莱特实验室在 AFX-644 炸药 $[w(\text{TNT}):w(\text{NTO}):w(\text{Al}):w(\text{D2 蜡})=30:40:20:10]$ 的基础上,又进一步完成了 AFX-645 炸药 $[w(\text{TNT}):w(\text{NTO}):w(\text{Al}):w(\text{I-800 蜡})=32:48:12:8]$ 的设计。NTO 为 3-硝基-1,2,4-三唑-5-酮。由于 AFX-644 炸药具有较高的渗油性,且其配方中的 D2 蜡含有 14% 的硝化纤维素,炸药在快速烤燃和慢速烤燃过程中会释放较多的气体;因此,AFX-645 炸药配方中采用优化的 I-800 蜡替代了 D2 蜡。装填 AFX-644 炸药的 MK-82 战斗部通过了全部的极不敏感爆炸物质试验(EIDS)的考核和除殉爆试验外的所有 1.6 级危险物质试验考核;而装填 AFX-645 炸药的战斗部在其基础上又进一步通过了殉爆试验考核。与 AFX-644 炸药相比,AFX-645 炸药配方的设计在威力、不敏感性、安全储存和环境适应性等方面寻找到了更为合适的平衡点^[14]。

XF 系列熔铸炸药^[15-17]是由法国 Nexter Munitions 公司开发的不敏感熔铸炸药。该类型炸药在传统 TNT 基熔铸炸药的基础上加入 NTO 以提升配方的安全性。较为典型的 XF 系列配方见表 1。

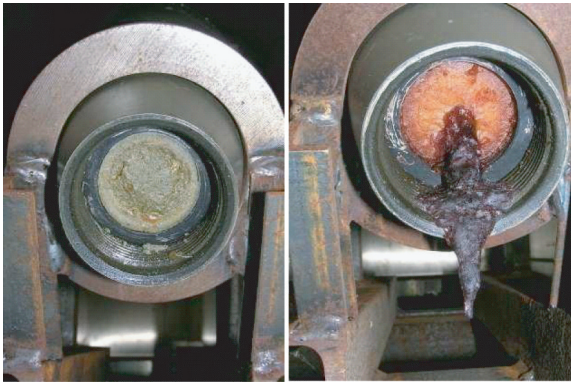
表 1 典型的 XF 系列炸药配方组成(质量分数)
Tab. 1 Composition of typical XF series explosives

炸药	%					
	TNT	NTO	HMX	RDX	Al	蜡
XF 13153	30.0	40.0	0	0	20.0	10.0
XF 13333	31.0	48.0	0	0	13.5	7.5
XF 11585	31.0	21.0	0	27.0	13.5	7.5
XF 12366	31.0	21.0	27.0	0	13.5	7.5

从表 1 可知,XF 13153 和 XF 13333 与美国空军研制的 AFX-644 和 AFX-645 炸药配方非常接近。而 XF 11585 和 XF 12366 则是在 XF 13333 炸药的

基础上综合考虑了爆轰性能和安全性能的产物。

Nexter Munitions 公司于 2012 年完成了 XF 11585 炸药性能的系统表征,其爆轰性能与 B 炸药相当,各项安全性能能够满足 STANAG 4439 标准的 IM 要求,可用于 60 ~ 155 mm 口径弹药的装药。此外,在温度循环试验中,XF 系列炸药不会出现传统 TNT 基炸药的渗油现象。见图 1。



(a)XF 系列炸药 (b)B 炸药

图 1 温度循环试验结果

Fig.1 Temperature cycle test results

熊闲锋等^[18]将不敏感炸药 NTO 加入到 TNT 炸药体系,形成了 2 种熔铸炸药配方 [$w(\text{TNT}):w(\text{NTO})=60:40,w(\text{TNT}):w(\text{NTO}):w(\text{RDX})=50:25:25$],开展了配方能量和安全等主要性能的试验研究。结果表明:2 种熔铸炸药的理化性能及爆速与梯黑炸药 [$w(\text{TNT}):w(\text{RDX})=50:50$] 相当,而机械感度低于梯黑炸药,抗压强度比梯黑炸药高;当遭受火焰快速烧烤、子弹撞击时仅发生燃烧反应,具备一定的不敏感特性。

Guntol(钢托儿)炸药是将 FOX-12(N-脒基脒二硝酰胺盐)熔融于 TNT 中制成的一种不敏感熔铸炸药^[19],其配方组成为 $w(\text{TNT}):w(\text{FOX-12})=55:45$ 。该炸药的金属驱动能力略高于 PBXN-109,格尼系数为 2.07。采用 STANAG 4413 标准测试了装填 Guntol 炸药的 155 mm 榴弹:慢速烤燃试验的反应等级为燃烧;子弹撞击的反应等级为爆燃;射流撞击的反应等级为爆炸;殉爆试验的反应等级介于爆炸和爆燃之间。Guntol 炸药制备工艺非常简单,且钝感组分 FOX-12 的合成成本也较低;因此,该炸药可视为一种廉价的不敏感炸药。

美国阿连特技术系统公司(ATK)的 TNT 柔性生产线能够生产纯度 99.99% 的 TNT,还可以生产 DNAN、TEX、NTO 和 CL-20 等单质炸药,现有工艺设备稍加改造即可满足各种混合炸药(B 炸药、Tritonal 和 Octol 等)的制备需求。因此,积极支持发展新型

TNT 熔铸炸药,并提出了不敏感通用炸药(ICE)的新概念。研制出了 I-TNT(TNT + 添加剂),即 PAX-44 炸药^[20],作为通用目的不敏感炸药应用。PAX-44 炸药成本低,采用现有工艺设备,对环境友好,已经在 155 mm 高爆弹中试验并验证。

尽管 TNT 存在诸多不足之处,但通过改性可以制备性能优良的不敏感熔铸炸药;因此,TNT 基不敏感熔铸炸药仍是研究应用的重点之一。

1.2 2,4-二硝基苯甲醚(DNAN)基炸药

DNAN 是最有望代替 TNT 而成为熔铸炸药的载体炸药,其优异的综合性能引起了世界各国的关注。DNAN 并不是一种新的含能物质。据记载,DNAN 的第一次被使用是在第二次世界大战^[21],被作为 V-1 巡航导弹用弹药 Amatol 的主要组分。然而当时被应用并不是它的爆轰性能和低易损性,而可能是 TNT 的日益匮乏。尽管 DNAN 存在爆轰能量的问题,但它在炸药中的使用却还是引起人们的广泛关注,一系列 DNAN 基 PAX 炸药(Picatinny arsenal explosive)的发展足以证明。

美国匹克汀尼兵工厂同 ATK 等多家单位按照钝感弹药标准研制了以 DNAN 为基的 PAX 系列新型熔铸炸药^[22-26],如表 2 所示。

表 2 DNAN 基熔铸炸药组分及性能
Tab.2 Component and performances of DNAN-based melt-cast explosive

炸药	组分	爆速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	能量 水平
PAX-21	DNAN、MNA、RDX、AP	6 700	B 炸药
PAX-26	DNAN、MNA、AP、Al	6 360	Tritonal 炸药
PAX-28	DNAN、RDX、AP、Al	6 500	1.62 倍 B 炸药
PAX-40	DNAN、MNA、HMX	8 200	Octol 炸药
PAX-41	DNAN、MNA、RDX	7 680	Cyclotol 炸药
PAX-48	DNAN、MNA、HMX、NTO	7 180	Octol 炸药

其中,PAX-21 炸药是第一个具有不敏感特性的熔铸炸药,兼具不敏感熔铸炸药的所有特性(包括成本、可生产性等),已广泛应用到 60 mm 迫击炮弹。PAX-40(含 HMX)和 PAX-41(含 RDX)炸药的爆速均高于 B 炸药;而两者冲击波感度均低于 B 炸药,且 PAX-40 的冲击波感度比 PAX-41 低。

2005 年以来,美国陆军又在“通用低成本不敏

感炸药 (common low-cost insensitive munitions explosive, CLIMEx)”项目的支持下推出以 DNAN 为基的 IMX (insensitive melt-cast explosive) 系列熔铸炸药^[27], 包括 IMX-101 [$w(\text{DNAN}) : w(\text{NTO}) : w(\text{NQ}) = 43 : 20 : 37$] 及 IMX-104 [$w(\text{DNAN}) : w(\text{NTO}) : w(\text{RDX}) = 32 : 53 : 15$]。NQ 为硝基胍。其中, IMX-101 应用于 105、120、155 mm 弹药中; IMX-104 通过了子弹撞击、射流撞击、快速烤燃和殉爆等安全性试验测试, 在不敏感性方面比现役 60 mm 迫击炮弹装填的 PAX-21 炸药的表现更加优良, 作为真正意义上代替 B 炸药的不敏感熔铸炸药, 已在 60、80、120 mm 系列迫击炮弹中得到应用。

2006 年, 澳大利亚国防科学与技术组织 (defence science and technology organization, DSTO) 对 DNAN 基熔铸炸药进行了研究, 形成了 ARX (Australian research explosive) 系列配方^[28-30], 分别为 ARX-4027 [$w(\text{DNAN}) : w(\text{MNA}) : w(\text{RDX}) = 39.75 : 0.25 : 60.00$]、ARX-4028 [$w(\text{DNAN}) : w(\text{MNA}) : w(\text{NTO}) = 29.75 : 0.25 : 70.00$] 和 ARX-4029 [$w(\text{DNAN}) : w(\text{MNA}) : w(\text{RDX}) : w(\text{NTO}) = 29.75 : 0.25 : 5.00 : 65.00$]。根据是否含有 I-RDX 又分为 ARX-4027M1 (含 I-RDX) 和 ARX-4027M2 (不含 I-RDX) 2 种配方, 并对设计的 ARX 系列炸药的做功能力、冲击波感度和力学性能等进行了表征。结果表明: ARX 系列炸药的热分解温度均高于 B 炸药, 其中, 含有 NTO 的配方 ARX-4028 及 ARX-4029 感度明显低于 B 炸药与 ARX-4027。

2015 年, 挪威的 Nevstad 等^[31-34] 也开展了 DNAN 基熔铸炸药研究, 形成了 MCX (melt cast explosive) 系列配方, 包括 MCX-6100 [$w(\text{DNAN}) : w(\text{NTO}) : w(\text{RDX}) = 32 : 53 : 15$]、MCX-8100 [$w(\text{DNAN}) : w(\text{NTO}) : w(\text{HMX}) = 35 : 53 : 12$]、MCX-6002 [$w(\text{TNT}) : w(\text{NTO}) : w(\text{RDX}) = 34 : 51 : 15$] 和 MCX-8001 [$w(\text{TNT}) : w(\text{NTO}) : w(\text{HMX}) = 36 : 52 : 12$]。

国内关于 DNAN 基熔铸炸药的研究起步较晚, 且主要针对基础科学进行研究, 公开的配方鲜有报道。张光全等^[35] 从合成路线、理化性能、热性能和相容性等方面对 DNAN 的研究进展进行综述。王亲会^[20] 分析了 DNAN 作为载体炸药所存在的优缺点, 并提出了改进途径。王红星等^[36] 通过慢速烤燃试验对 DNAN 炸药的热安全性进行了评价, 并与传统载体 TNT 进行对比, 得出其自发火温度和热爆炸

延滞期均优于 TNT。蒙君昉等^[37] 研究了 DNAN/HMX 体系的流变特性, 获得固含量、粒度、颗粒级配、炸药温度以及功能助剂对混合炸药体系的流变性的影响规律, 并通过颗粒级配使其固体质量分数达到 80% 而保持良好的流动性。张庆正^[38] 测试了 DNAN 基熔铸炸药的安全储存临界温度, 结合 71 °C 加速储存试验, 分析 DNAN 基熔铸炸药的安全储存要求。李东伟等^[39] 开展了 DNAN 基高爆速熔铸炸药的研究, 获得了一种爆速高且通过了快速烤燃、慢速烤燃、子弹撞击、破片撞击、热碎片、射流和殉爆等 7 项不敏感试验考核的熔铸炸药配方, 并结合大尺寸 EFP 战斗部和防空反导战斗部开展应用集成验证, 发现其具有良好的应用前景。赵凯等^[40] 对比研究了 DNAN 和 TNT 的力学性能发现, DNAN 的抗压强度为 5.96 MPa, 抗拉强度为 2.57 MPa, 抗剪强度为 0.34 MPa; TNT 的抗压强度为 15.57 MPa, 抗拉强度为 2.37 MPa, 抗剪强度为 1.80 MPa, 表明 DNAN 相比于 TNT 更易发生脆性断裂。牛国涛等^[41] 针对某 DNAN 基熔铸炸药开展了 $\varnothing 300$ mm 的装药工艺试验和温度冲击试验, 发现大直径的 DNAN 基熔铸炸药装药在温度变化导致的热应力作用下极易开裂, 从而破坏装药结构, 影响使用安全。罗一鸣等^[42] 研究了 DNAN 和 TNT 的凝固特性, 发现 DNAN 与 TNT 虽然具有相近的体积收缩率 (DNAN 为 13.2%、TNT 为 12.7%), 但 DNAN 具有更快的凝固速率, 导致其收缩缺陷的集中度低于 TNT, 从而更易在 DNAN 装药中出现缩空、缩松等装药疵病, 需要对 DNAN 基熔铸炸药进行精密的装药控制, 以提高大直径装药的安全性。

1.3 蜡基炸药

蜡类物质 (石蜡、微晶蜡等) 具有熔点低、质地软、吸热性好和润滑作用强等优点, 常常作为钝感材料在混合炸药中应用。当炸药受到冲击或热刺激时, 可吸热熔化, 不易形成热点, 极大地降低了热点产生的几率; 即使发生燃烧也不易转为爆轰, 具有良好的钝感效果。美国开展了以蜡为基的不敏感熔铸炸药研究, MNX-194 是该类炸药的典型代表^[43]。该炸药由美国陆军坦克机动车辆与武器局武器研究发展与工程中心研制, 用于代替原 M107/M795 两型 155 mm 炮弹中装填的 TNT。该炸药中唯一的含能组分是 RDX, 根据不同的 RDX 预处理工艺, 形成 3 种组分相同的 MNX-194 炸药, 并开展了相关性能的研究工作。

美国匹克汀尼兵工厂也研制了以蜡为载体的系列不敏感熔铸炸药, 最具代表性的是 PAX-195 炸

药^[1]。该炸药采用 3 种不同颗粒的 RDX 进行级配,固体质量分数可达 88%,流动性良好,并通过了不敏感性试验考核。

美国空军研究实验室 (AFRL) 为了提高空军用通用目的炸弹的安全性水平,研制了一种含铝的蜡基不敏感熔铸炸药 (MNX-795)^[44],并结合 MK-84 战斗部开展了 IM 试验测试。其快速烤燃和慢速烤燃的反应等级为燃烧;子弹撞击试验,在 7.62 mm 子弹撞击下战斗部无明显反应,在 12.70 mm 子弹撞击下战斗部发生爆炸;破片撞击、射流撞击和殉爆试验结果尚不明确。

虽然装填 MNX-795 炸药的 MK-84 战斗部未完全满足 IM 的相关标准,但其安全性已经远优于原 Tritonal 炸药装药;同时,由于 MNX-795 可采用熔铸工艺进行战斗部装填,其批产化能力优于 PBXN-109 炸药装药;且 MNX-795 炸药的爆轰性能优于 PBXN-109 炸药^[45]。

1.4 低共熔物载体基炸药

低共熔物炸药是指两种或两种以上的化合物混合后,其熔点低于任一组分、性能发生变化的一类共熔混合物。利用这种特点,根据不同需求和用途,可以设计不同的低共熔物,使其具备诸多优点:

- 1) 熔点可调节至更适宜的熔铸温度;
- 2) 能量水平调节至高于 TNT,甚至接近 RDX 或 HMX;
- 3) 不敏感性满足使用要求;
- 4) 力学性能得到显著改善,满足环境适应性的要求;
- 5) 装药成本得到有效控制,在熔铸炸药方面具有广阔的应用前景。

低共熔物按物质结构可以分为以下几类^[46]:

- 1) EA 分子间炸药 (乙二胺二硝酸盐/硝酸铵);
- 2) EAK 分子间炸药 (乙二胺二硝酸盐/硝酸铵/硝酸钾);
- 3) 含有 NQ 或甲基硝基胍 (MeNQ) 的分子间炸药;
- 4) 其他分子间炸药。

EA 系列分子间炸药比 TNT 钝感,但熔点 (约 105 ℃) 较高,不适用于现有熔铸工艺;且组分中的硝酸铵 (AN) 在 32 ℃ 时发生相变,分子间体系发生体积变化,熔铸炸药装物理理不稳定,导致装药容易产生裂纹缺陷,极大地降低了使用安全性,限制了其在熔铸炸药中的应用。EAK 分子间炸药中,AN 存在严重的吸湿性和腐蚀性,为战斗部设计、长期储存和后处理工艺提出更严苛的要求;同时,EAK 硬度

和模量高,韧性差,熔点高;因此,EAK 分子间炸药未得到广泛应用。美国空军使用的以 MeNQ/AN 低共熔物为载体的分子间炸药,密度 1.72 g/cm³,爆速 7 400 m/s,撞击感度 143 cm (特性落高,接近美军方不敏感炸药特性落高 144 cm 的要求),并通过了快速烤燃、慢速烤燃等试验考核,作为不敏感熔铸炸药装填到美国 AFX-453 型航弹。

在含能低共熔物的研究中出现了一种新的趋势。在两种或两种以上的熔铸载体炸药的相互作用研究中发现,除了可以获得低共熔物、降低载体炸药的熔点以外,还可以调节炸药能量、力学和安全性等综合性能,在 TNT、TNAZ、DNTE、DNAN 和 DNP 等单一熔铸载体炸药研究基础上,开展大量的复配技术研究,形成系列共熔物载体炸药。

作为传统熔铸炸药载体,TNT 与其他炸药形成低共熔物可改善其综合性能。溶液共晶法可得到低熔点、低感度的 TNT/TNCB 炸药 [$n(\text{TNT}) : n(\text{TNCB}) = 1 : 1$]^[47]。熔点为 72.7 ℃, H_{50} 为 92.9 cm,预测爆速、爆压分别为 7 508 m/s、19.24 GPa,明显高于 TNT。TNT/TNCB 炸药有望作为一种新型熔铸载体炸药取代 TNT。采用挥发溶剂法制备了 TNT/AN 共晶炸药^[48]。对制得的共晶炸药进行了理化性能表征,结果表明:TNT/AN 共晶炸药的吸热峰与 TNT、AN 单质和 TNT/AN 机械混合物完全不同,TNT/AN 共晶还能够降低 AN 的吸湿性。

TNAZ 能与许多含能材料形成二元或多元低共熔物,并且与常用炸药组分相容。美国空军伊格林基地莱特实验室研发了不同的含能材料与 TNAZ 形成的二元低共熔混合物 (主要性能如表 3 所示)。其中,与 PETN、TNT、TNB 的二元混合物或复合炸药已进行过能量特性、感度特性的表征,但铸装特性限制了其应用。TNAZ 与 TNT 的二元低共熔物同样显示出复杂的多晶现象及晶型相互转变的问题^[49]。MN630 [$w(\text{TNAZ}) : w(\text{MNA}) : w(\text{HMX}) = 20 : 5 : 75$] 代替细粒 Octol 用于传感器引爆的武器系统 (SFW),性能研究表明,两种炸药具有良好的爆轰性能和低易损性能。国内也开展了 TNAZ 基低共熔物研制,研发的 TNAZ/ANTA 最低共熔物具有熔点 (84 ℃) 低、热稳定好、热安定性好、机械感度低等优点,做功能力达到 B 炸药的 1.14 倍,熔铸特性与 TNT 相当,满足熔铸炸药液相载体要求^[50]。TNAZ 与 ANTA 质量比为 60 : 40 的最低共熔物是有潜力的 TNT 替代物,在钝感弹药中具有良好的应用前景。

表 3 TNAZ 基熔铸炸药性能
Tab. 3 Performances of DNAN-based melt-cast explosive

共熔物	TNAZ 质量分数/%	理论密度/ (g · cm ⁻³)	熔点/ ℃	热爆炸临界 温度/℃	真空热安定性/ (g · cm ⁻³)	大隔板 试验/MPa	冲击波感度 H ₅₀ /cm	爆速/ (m · s ⁻¹)
TNT	0	1.65	80.9		0.10	4.40	>80.0	6 970
TNAZ	100	1.84	101.0	251	0.11	1.05	21.1	9 000
TNAZ/TNB	53.7	1.77	69.0	266	0.05	0.74	36.1	8 250
TNAZ/TNT	37.1	1.72	60.0	260	0.10	1.04	52.0	7 600
TNAZ/MNA	90.0	1.75	93.0	239	0.20		38.6	8 320
TNAZ/MNA	80.0	1.66	93.0	230	0.06	1.08	34.9	7 730
TNAZ/DNA	92.0	1.82	95.0	234	0.04		30.8	8 770
TNAZ/CAB	97.0	1.81	100.0	243	0.24	0.07	22.6	8 800

DNAN 作为不敏感熔铸载体炸药得到应用,但由于自身的能量相对较低、力学脆性等原因,限制了其应用范围。研究者设计了 DNAN/DNTF 的双元复合体系。王浩等^[51]利用红外光谱、X 射线衍射和扫描电镜对不同比例的 DNAN/DNTF 共熔物进行了表征,并通过冲击波感度试验研究了共熔物冲击波感度变化情况,发现共熔物包覆在 DNTF 结晶表面,降低了 DNTF 感度。赵凯等^[52]研究了不同工艺温度下 DNAN/DNTF 共熔物的临界直径和拐角传爆能力,结果表明,共熔物体系有良好的拐角传爆能力,为不敏感传爆药设计提供支撑。学者们还系统研究了 DNAN/DNTF 的理化性能、能量输出特性、熔铸特性、点火增长特性和不敏感特性等。研究表明, DNAN/DNTF 双元复合体系中,能量水平随 DNTF 含量增加呈线性增长的趋势;而感度增长是非线性的。通过选择合适的比例, DNAN/DNTF 具备高能不敏感的性能。DNAN/DNTF 形成混晶结构,计算表明, DNAN 与 DNTF 分子间作用力强于 DNAN 分子间的分子作用力, DNAN/DNTF 体系的抗拉强度与抗剪强度均强于纯 DNAN 或纯 DNTF,共熔后塑性增强,能够改善炸药装药的力学性能与环境适应性;采用载体复配技术可以根据应用需求,设计出更合理的熔铸炸药载体, DNAN/DNTF 共熔物具有可以调节的能量和安全性,可作为高能不敏感熔铸炸药的载体炸药。

1.5 新型载体在不敏感熔铸炸药中的应用

1-甲基-2,4,5-三硝基咪唑 (MTNI) 是一种能量水平接近 RDX 的多硝基咪唑化合物,具有熔点 (82 ℃) 低、密度 (1.75 g/cm³) 高、机械感度 (摩擦感度 4%~6%) 低、热稳定性好 (190 ℃ 前是稳定的、190 ℃ 开始挥发、280 ℃ 达到峰温) 等特点^[53]。韩国国防开发局与美国陆军军械研究发展与工程中心

(ARDEC) 联合对 MTNI 开展应用研究,认为其具有良好的不敏感特性,可以作为代替 TNT 用于不敏感熔铸炸药。

DNP (3,4-二硝基吡唑) 是性能优异的氮杂环类含能化合物,具有熔点 (85~89 ℃) 低、氮含量 (质量分数 35.44%) 高、氧平衡 (-30.33%) 好、密度 (1.81 g/cm³) 高、爆速 (8 100 m/s) 高、安全性好等特点,有望代替 TNT 作为新型不敏感熔铸载体炸药,具有良好的应用前景^[54]。

2 不敏感熔铸炸药的发展趋势

IM 能够直接提高武器的安全效能,不敏感熔铸炸药技术研究一直受到各国普遍重视。未来不敏感熔铸炸药的发展总体趋势是炸药设计兼顾能量性能、安全性能和工艺性能等综合性能的提升,对于不敏感高能熔铸炸药研究与应用主要集中在以下几个方面:

- 1) 继续研究新型低熔点、不敏感、工艺特性优良的熔铸炸药载体,从应用出发,全面认识新型载体的综合性能;
- 2) 深入研究低共熔物体系,全面掌握不同低共熔物体系的特性,获得高能不敏感熔铸复合载体;
- 3) 加强不敏感单质炸药 (如 I-RDX、NTO、TATB、FOX-7、FOX-12 等) 在熔铸炸药中的应用研究,开发新型不敏感炸药配方;
- 4) 深挖常规单质炸药 (RDX、HMX) 的潜能,从分子结构和相互作用出发,通过共晶技术,将不敏感材料与单质炸药共晶形成不敏感炸药;通过重结晶、纳米化等技术,实现单质炸药的不敏感处理;
- 5) 开发兼顾能量、安全、力学性能和工艺性能的新型功能助剂。

3 结语

1) TNT 作为传统熔铸载体炸药,具有成本低、安全性好、工艺成熟的优势;尽管存在一些不足,但通过改性处理,性能可以得到显著改善。TNT 基不敏感炸药仍将是重要的发展方向。

2) DNAN 作为目前最成熟的不敏感熔铸载体炸药,其力学特性有待进一步的优化,以期拓宽其在大尺寸装药领域的应用。

3) 蜡作为不敏感熔铸炸药的载体,需要在满足不敏感性要求的同时,尽可能地提高固含量,提高蜡基熔铸炸药的能量,以满足弹药对能量的需求。

4) 共熔物体系作为不敏感熔铸载体炸药,通过组分间的相互作用,可同时满足高能与不敏感的要求,是高能不敏感熔铸炸药发展的有效途径。

5) 不敏感熔铸炸药是未来发展的总趋势,通过新型载体炸药、低共熔载体炸药、不敏感单质炸药、炸药的不敏感化处理和功能助剂的应用等技术的发展,不敏感熔铸炸药将更多地应用于武器弹药中,以适应未来战场的需求。

参 考 文 献

[1] 王昕. 美国不敏感混合炸药的发展现状[J]. 火炸药学报, 2007, 30(2): 78-80.
WANG X. Current situation of study on insensitive composite explosives in USA[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2007, 30(2): 78-80.

[2] Hazard assessment tests for non-nuclear munitions; MIL—STD—2105D [S]. USA: Department of Defense Test Method Standard, 2011.

[3] 范士锋,董平,李鑫,等. 国外海军弹药安全性研究进展[J]. 火炸药学报, 2017, 40(2): 101-106.
FAN S F, DONG P, LI X, et al. Research progress in the safety of foreign naval ammunition [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2017, 40(2): 101-106.

[4] 彭翠枝,范夕萍,任晓雪,等. 国外火炸药技术发展新动向分析[J]. 火炸药学报, 2013, 36(3): 1-5.
PENG C Z, FAN X P, REN X X, et al. Analysis on recent trends of foreign propellants and explosives technology development [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2013, 36(3): 1-5.

[5] 王昕. 绿色火炸药及相关技术的发展与应用[J]. 火炸药学报, 2006, 29(5): 67-71.
WANG X. Development and application of green propellants and explosives and related technologies [J]. Chi-

nese Journal of Explosives & Propellants, 2006, 29(5): 67-71.

[6] 王晓峰,赵省向. 战术战斗部用炸药[G]. 西安:中国兵器工业第二〇四研究所,2003.

[7] RAVI P, BADGUJAR D M, GORE G M. Review on melt cast explosives [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2011, 36(5): 393-403.

[8] 曹端林,李雅津,杜耀,等. 熔铸炸药载体的研究评述[J]. 含能材料, 2013, 21(2): 157-163.
CAO D L, LI Y J, DU Y, et al. Review on carriers for melt-cast explosives [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(2): 157-163.

[9] 刘瑞鹏,罗一鸣,王红星,等. TNT、DNAN 和 DNTF 单质凝固过程中温度和缩松的数值模拟及实验研究[J]. 火炸药学报, 2016, 39(3): 43-47, 52.
LIU R P, LUO Y M, WANG H X, et al. Experimental study and numerical simulation on temperature and shrinkage porosity of TNT, DNAN, and DNTF during solidification process [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2016, 39(3): 43-47, 52.

[10] 郑保辉,王平胜,罗观,等. 短切纤维对 RDX/TNT 熔铸炸药的力学改性[J]. 含能材料, 2013, 21(6): 786-790.
ZHENG B H, WANG P S, LUO G, et al. Mechanical reinforcement on the melt-cast explosive of RDX/TNT by chopped fibers[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(6): 786-790.

[11] 聂少云,高大元,文雯,等. 添加剂对 B 炸药安全和爆轰性能的影响[J]. 火炸药学报, 2014, 37(3): 20-25.
NIE S Y, GAO D Y, WEN W, et al. Effect of supplement on safety and detonation properties of Composition B [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2014, 37(3): 20-25.

[12] 徐瑞娟,罗宏,王新峰,等. 改性 B 炸药中添加剂的作用机理[J]. 火炸药学报, 2003, 26(2): 5-7.
XU R J, LUO H, WANG X F, et al. Effect of additives on the modified Composition B [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2003, 26(2): 5-7.

[13] 何得昌,徐军培,柴皓,等. 添加剂对 TNT 成型性能的影响[J]. 火炸药学报, 2000, 23(3): 41-42.
HE D C, XU J P, CHAI H, et al. The effect of additives on the forming properties of TNT [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2000, 23(3): 41-42.

[14] CORLEY J D, STEWART A C. Fuzed insensitive general purpose bomb containing AFX-645 [R]. Okaloosa FL, US: Wright Laboratory Eglin Air Force Base, 1995.

[15] WECKERLE A, COULOUARN C. A step further for the XF® explosive family dedicated to insensitive munitions

- (IM)[C]//Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium. Munich, Germany, 2010.
- [16] GUILLEMIN J P, BRUNEL L, BONNEFOY O, et al. A flow time model for melt-cast insensitive explosive process [J]. *Propellants, Explosive, Pyrotechnics*, 2007, 32(3):261-266.
- [17] COULOUARN C, AUMASSON R, LAMY-BRACQ P, et al. Melt-cast process applied to develop based IM ammunition[C]//Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium. San Diego, CA, US, 2013.
- [18] 熊贤锋, 王晓峰, 王亲会. 含 NTO 的 TNT 基熔铸炸药研究[J]. *含能材料*, 2001, 9(2):70-73.
XIONG X F, WANG X F, WANG Q H. A research on the TNT-based castable explosives containing NTO[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2001, 9(2):70-73.
- [19] 雷永鹏, 阳世清, 徐松林, 等. 钝感高能材料 N-脒基脲二硝酰胺盐的研究进展[J]. *含能材料*, 2007, 15(3):289-293.
LEI Y P, YANG S Q, XU S L, et al. Progress in insensitive high energetic materials N-guanylurea-dinitramide [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2007, 15(3):289-293.
- [20] 王亲会. 熔铸混合炸药用载体炸药评述[J]. *火炸药学报*, 2011, 34(5):25-28.
WANG Q H. Overview of carrier explosive formelt-cast composite explosive[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2011, 34(5):25-28.
- [21] 吴思宇, 祝巧, 薛敏, 等. 2,4-二硝基苯甲醚的离子色谱检测[J]. *火炸药学报*, 2015, 38(3):73-76.
WU S Y, ZHU Q, XUE M, et al. Ion detection of 2,4-dinitroanisole by ion chromatography [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2015, 38(3):73-76.
- [22] TEAGUE C A, WILSON A, ALEXANDER B, et al. Next generation IM mortar fill-optimized PAX-33 development and characterization[C]//Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium. Miami, FL, US, 2007.
- [23] PELLETIER P, LAROCHE I, LAVIGNE D, et al. Processing studies of DNAN-based melt-pour explosives formulations[C]//Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium. Tucson, AZ, US, 2009.
- [24] NICOLICH S, NILES J, FERLAZZO P, et al. Recent developments in reduced sensitivity melt pour explosives [C]//34th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, Germany: ICT, 2003.
- [25] GUNGER M E. Development and performance characterization of PAX-28: a new melt pour explosive[C]//Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium. Orlando, FL, US, 2003.
- [26] NICOLICH S, NILES J. Development of a novel high fragmentation/high blast melt pour explosive [C]//Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium. Orlando, FL, US, 2003.
- [27] TAYLOR S, PARK E, BULLION K, et al. Dissolution of three insensitive munitions formulations [J]. *Chemosphere*, 2015(119):342-348.
- [28] DAVIES P J, PROVATAS A. Characterization of 2, 4-dinitroanisole: an ingredient for use in low sensitivity melt cast formulations: DSTO-TR-1904[R]. Edinburg, Australia: Defence Science and Technology Organisation, 2006.
- [29] DAVIES P J, PROVATAS A. DNAN: a replacement for TNT in melt-cast formulations [C]//Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium. Bristol, UK, 2006.
- [30] PROVATAS A, WALL C. Thermal testing of 2, 4-dinitroanisole (DNAN) as a TNT replacement for melt-cast explosive [C]//International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, Germany, 2011.
- [31] NEVSTAD G O. Determination of detonation velocity and pressure for MCX-6100; FFI-rapport 2015/02323 [R]. Skedsmokorset, Akershus, Norway: Norwegian Defence Research Establishment, 2015.
- [32] NEVSTAD G O. Characterization of MCX-8100; FFI-rapport 2015/02448 [R]. Skedsmokorset, Akershus, Norway: Norwegian Defence Research Establishment, 2015.
- [33] NEVSTAD G O, PRYTZ A K, ØDEGÅRDSTUEN G, et al. IM assessment for a state of the art 155 mm HE round [C]//Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium. Rome, Italy, 2015.
- [34] JOHANSEN Ø H, NEVSTAD G O, GJERSØE R, et al. Insensitive munitions-development and qualification of new melt-cast formulations [C]//Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium. Nashville, TN, US, 2016.
- [35] 张光全, 董海山. 2,4-二硝基苯甲醚为基熔铸炸药的研究进展[J]. *含能材料*, 2010, 18(5):604-609.
ZHANG G Q, DONG H S. Review on melt-castable explosives based on 2,4-dinitroanisole [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2010, 18(5):604-609.
- [36] 王红星, 王晓峰, 罗一鸣, 等. DNAN 炸药的烤燃试验[J]. *含能材料*, 2009, 17(2):183-186.
WANG H X, WANG X F, LUO Y M, et al. Cook-off test of DNAN explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2009, 17(2):183-186.

- [37] 蒙君熨,周霖,金大勇,等. DNAN/HMX 熔铸炸药的流变特性[J]. 含能材料, 2018, 26(8): 677-685.
MENG J J, ZHOU L, JIN D Y, et al. Rheological properties of DNAN/HMX melt-cast explosives [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2018, 26(8): 677-685.
- [38] 张庆正. DNAN 基熔铸炸药贮存寿命预估研究[J]. 山东化工, 2016, 45(9): 36-47.
ZHANG Q Z. Study on the estimation of storage life for melt-loading explosive based on DNAN [J]. Shandong Chemical Industry, 2016, 45(9): 36-47.
- [39] 李东伟,姜振明,张向荣,等. 2,4-二硝基苯甲醚基高爆速熔铸炸药爆轰性能表征[J]. 兵工学报, 2016, 37(4): 656-660.
LI D W, JIANG Z M, ZHANG X R, et al. Characterization of new 2,4-dinitroanisole-based melt-cast high detonation velocity explosives [J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(4): 656-660.
- [40] 赵凯,王浩,王玮,等. DNAN 力学性能分析[J]. 火炸药学报, 2016, 39(4): 68-72.
ZHAO K, WANG H, WANG W, et al. Analysis of the mechanical properties of DNAN [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2016, 39(4): 68-72.
- [41] 牛国涛,金大勇,王亲会,等. 装药结构对大尺寸熔铸炸药裂纹的影响[J]. 火工品, 2015(1): 30-33.
NIU G T, JIN D Y, WANG Q H, et al. Effect of charge structure on charge quality of large size melt-cast explosive [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2015(1): 30-33.
- [42] 罗一鸣,蒋秋黎,赵凯,等. 2,4-二硝基苯甲醚与 TNT 凝固行为的差异性分析[J]. 火炸药学报, 2015, 38(5): 37-40.
LUO Y M, JIANG Q L, ZHAO K, et al. Analysis on differences of solidification behavior of DNAN and TNT [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2015, 38(5): 37-40.
- [43] 刘敏,胡楷钰. 国外不敏感炸药的发展和我国发展不敏感炸药的紧迫性[J]. 国防技术基础, 2015(6): 42-45.
LIU M, HU K Y. The development of foreign insensitive explosives and the urgency of developing insensitive explosives in China [J]. Foundation of National Defense Technology, 2015(6): 42-45.
- [44] ALEXANDER B. Explosives coating via advanced cluster energetics (ACETM) fluid energy mill (FEM) technology [C]//Insensitive Munitions and Energetic Material Technology Symposium. Rome, Italy, 2015.
- [45] KELLEY S, BECKER F. Joint general purpose bomb insensitive munitions program [C]//Insensitive Munitions and Energetic Material Technology Symposium. Bristol, UK, 2006.
- [46] 陈玲,舒远杰,徐瑞娟,等. 含能低共熔物研究进展[J]. 含能材料, 2013, 21(1): 108-115.
CHEN L, SHU Y J, XU R J, et al. Review on energetic eutectic [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(1): 108-115.
- [47] 马援,黄琪,李洪珍,等. TNT/TNCB 共晶炸药的制备及表征[J]. 含能材料, 2017, 25(1): 86-88.
MA Y, HUANG Q, LI H Z, et al. Preparation and characterization of TNT/TNCB cocrystal explosive [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2017, 25(1): 86-88.
- [48] 郭文建,安崇伟,李鹤群,等. TNT/AN 共晶炸药的制备及表征[J]. 火工品, 2014(5): 28-30.
GUO W J, AN C W, LI H Q, et al. Preparation and characterization of TNT/AN co-crystal [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2014(5): 28-30.
- [49] AUBERT S A, SPRAGUE C T. Characterization of a TNAZ/TNT composite explosive: WL-TR-96-7044 [R]. Okaloosa, FL, US: Wright Laboratory Eglin Air Force Base, 1996.
- [50] 张学梅,董海山,孙杰,等. TNAZ/ANTA 最低共熔物的制备与性能[J]. 含能材料, 2012, 20(5): 555-559.
ZHANG X M, DONG H S, SUN J, et al. Preparation and properties of lowest eutectic mixture TNAZ/ANTA [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2012, 20(5): 555-559.
- [51] 王浩,王亲会,黄文斌,等. DNAN 降低 DNTF 冲击波感度研究[J]. 含能材料, 2010, 18(4): 435-438.
WANG H, WANG Q H, HUANG W B, et al. Shock sensitivity of DNTF reduced by using DNAN [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2010, 18(4): 435-438.
- [52] 赵凯,罗一鸣,谢中元,等. 工艺温度对 DNTF/DNAN 二元共熔物传爆性能影响[J]. 火工品, 2013(6): 45-47.
ZHAO K, LUO Y M, XIE Z Y, et al. The Effect of process temperature on the booster performance of DNTF/DNAN eutectic mixture [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2013(6): 45-47.
- [53] 杨威,姬月萍. 多硝基咪唑及其衍生物的研究进展[J]. 火炸药学报, 2008, 31(5): 46-50.
YANG W, JI Y P. Research progress on polynitroimidazoles and their derivatives [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2008, 31(5): 46-50.
- [54] PRICE D, MORRIS J. Synthesis of new energetic melt-pour candidates [C]//Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium. Holston, TX, US, 2009.