

doi: 10.7690/bgzdh.2013.01.021

高能钝感混合炸药的研究进展及发展趋势

赵超

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 针对武器弹药因为意外点火造成的弹药自爆等问题, 对高能钝感混合炸药及其发展趋势进行了研究。以装药方式分类, 详细介绍国外压装型、熔注型和浇注性高能炸药在高能钝感主题下所取得的最新研究成果, 并提出了混合炸药今后的发展趋势以及提高炸药能量、降低感度的有效途径。该研究为武器弹药生产满足感度低、能量高、成型工艺性好等要求提供了参考, 使之更能适应高强度战场环境的变化。

关键词: 混合炸药; 高能; 钝感; 发展趋势

中图分类号: TJ510.3 **文献标志码:** A

Research Progress and Trend of Insensitive High Mixture Explosives

Zhao Chao

(State Key Laboratory of Explosion Science & Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In view of the explosion and problems caused by accidental ignition in weapon and ammunition, the insensitive high mixture explosives and its trend were studied. To be classified by the loading method, the current research achievements of pressed, cured and casted insensitive explosives in domestic and abroad were introduced, the trend of explosives and the methods to improve energy and decrease sensitivities were put forward. The research provided a reference for weapon and ammunition to meet the requirements such as low sensitivity, high energy and improved shaping performance, so it can better adapt to the changes in cruel battlefield environment.

Key words: mixture explosives; high energy; insensitive; development trend

0 引言

混合炸药是由单质炸药和添加剂或由氧化剂和可燃剂按适当比例混合加工而成的。混合炸药的发展弥补了单质炸药性能上的不足, 扩大了炸药的应用范围。混合炸药不仅有优良的爆炸性能, 还有理想的机械感度和安全性^[1]。未来战争高效毁伤的特点, 要求提高弹药的能量密度, 但随着战场环境的恶化, 武器弹药的损失很大一部分来自于意外点火或火灾造成的弹药自爆, 研究高能、低敏感弹药, 是提高弹药战场生存能力的关键技术; 因此, 笔者对高能钝感混合炸药及其发展趋势进行研究。

1 国外混合炸药研究现状

近几十年来, 随着高性能对空、对舰、机载、舰载和车载武器以及导弹技术的发展, 对高威力炸药提出了新的高性能要求, 各国都在进行高威力炸药的研究和发展工作。提高炸药威力的一条有效途径是炸药的金属化^[2], 利用高能金属或金属合金燃烧剂与炸药爆炸产物二次反应的热效应提高炸药的爆热, 可以使其具有更大的爆炸做功能力。随着科学技术的发展, 战争样式、战场目标的多样性日益

突出, 对弹药的能量输出结构提出了不同的要求: 杀伤爆破弹药不仅要求炸药有较高的爆热, 而且具有较高的爆压、爆速, 金属粉含量需控制在较低的水平 ($Al/O=0.10\sim 0.20$); 水中兵器弹药作用过程中无法利用外界的氧, 需要零氧平衡的炸药配方 ($Al/O=0.35\sim 0.40$); 为了提高能量输出效率, 空爆炸药要求负氧平衡的配方 ($Al/O>0.40$)^[3]。

在低易损性能方面, 20世纪70年代初, 美国率先提出了钝感弹药的概念, 并着手研究含能材料的危险性与弹药生存能力的关系, 在随后的20年先后研发了以PBXN-109、PBXN-110、PBXN-129、AFX-757等为代表的多种不敏感炸药, 并建立安全性评估标准及检验方法。80年代中期, 美国海军首次提出了不敏感弹药方针, 随后美国国防部在火炸药安全性评估标准及检验方法的基础上, 修正建立了钝感弹药军用标准MIL-STD-2105C, 规定了所有非核弹药、弹药子系统、火炸药装置的安全试验、不敏感弹药特征的评估试验等方法及其相应的合格判据。与此同时, 北约也制定了钝感弹药的评估标准(STANAG 4107), 该标准要求弹药在生产、储存和运输中, 受到热刺激、机械刺激及综合威胁时,

收稿日期: 2012-09-28; 修回日期: 2012-11-12

基金项目: 国防预研基金(00762389)

作者简介: 赵超(1988—), 男, 河北人, 硕士研究生, 从事炸药装药工艺、炸药性能及能量输出结构研究。

不发生比燃烧更剧烈的反应,以避免造成重大损失。从 1989 年起,北约开始采用统一的标准评定钝感弹药的安全性和危险性。目前,世界许多军事大国规定新产品的定型,必须满足钝感性要求,即从引信、火炸药到弹药全系统实现钝感化^[4]。可见,随着战争的演变和发展,高能钝感弹药已上升到新的高度,并成为 21 世纪的重点发展目标。

混合炸药按用途、物理状态、成分、性能和装药方式分为许多类型。为了从工艺角度了解不同类型混合炸药的发展,笔者以装药方式分类,详细介绍国外压装型、熔注型和浇注性高能炸药的最新研究成果。

1.1 压装型炸药

压装炸药制品的外观同硬橡胶或塑料制品相似,是由造型粉制成的。造型粉只是一种半成品,因为其成型方法主要是压制,所以称为压装炸药。其优点是高能组分含量高、力学性能优良、成型工艺简单,因而被广泛应用于中小口径弹药的装药。

1980 年以来,匹克汀尼兵工厂研发了多达 24 种 PAX (picatinny arsenal explosive) 炸药配方,通过在组分中加入并调整添加剂和增塑剂含量来不断寻找更高能量的配方。PAX-2 炸药是美国陆军的第一个高性能不敏感弹药用炸药。其配方为 HMX/BDNPA (BDNPF)/CAB, 密度为 1.77 g/cm^3 , 对外部刺激感度非常低 (ABL 撞击感度 124 cm、摩擦感度 6~11.9 cm), 但却保留了常规炸药的性能 (爆压 34.0 GPa, 爆速 8460 m/s)。美军将这种 IM 炸药完成了大批量生产,用于高爆战斗部中并已在多种弹药中使用。PAX-3 以黑索金为主炸药 (见图 1), 是铝化的 PAX-2 炸药, 密度 1.862 g/cm^3 , 爆压 26.6 GPa, 爆速 7630 m/s, 撞击感度 123~137 cm, 摩擦感度 6.9~11 cm, 目前正在研究双螺杆混合成型工艺技术。



图 1 PAX-3 炸药造型粉及压装药柱

美国陆军坦克机动车辆-武器研究发展中心 (TACOM-ARDEC) 与聚硫橡胶推进公司的研究人员合作研制出新型含铝 CL-20 基 PAX 系列压装

炸药。其中 PAX-11 炸药 (CL20/铝粉/添加剂), 固体的质量分数为 94%, 密度为 1.96 g/cm^3 , 爆压 39.3 GPa, 爆速 9370 m/s; PAX-29 炸药成分与 PAX-11 相同, 固体的质量分数为 92%, 密度为 1.96 g/cm^3 , 爆压 38.4 GPa, 爆速 9230 m/s。这 2 种炸药用于多用途反装甲战斗部和高爆战斗部, 用于打击重装甲和城市目标^[5]。

劳伦斯·利物莫尔实验室研发了多种 LX 系列压装炸药。其中 LX-14 (HMX/Binder) 密度为 1.84 g/cm^3 , 爆压为 37.0 GPa, 爆速为 8800 m/s; LX-19 (CL-20/Binder) 密度为 1.98 g/cm^3 , 爆压为 41.8 GPa, 爆速为 9440 m/s。在 M303 多用途子弹 EFP 弹药中得到应用, 使 EFP 的速度比 HMX 分别增加 11% 和 13% (见图 2)^[6]。

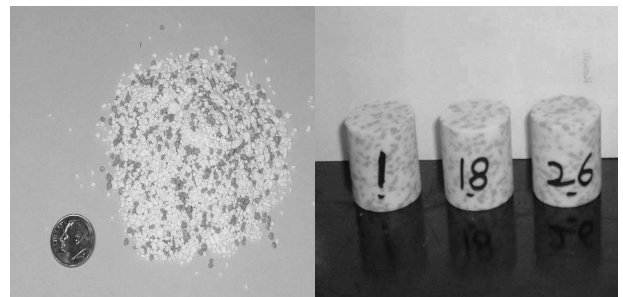


图 2 LX-14 炸药造型粉及压装药柱

1.2 熔注型炸药

熔注炸药的优点是易于装填到各种形状的弹药中。另外,在提高 IM 特性的同时,炸药所具有的爆轰性能不会降低。对于某一给定系统,其能量性能和冲击感度可以通过组分的颗粒大小和质量含量的调整得到改善^[7]。

传统熔注炸药的功能主要集中在破片杀伤能力上,为了达到不敏感弹药的需求,美国的研究人员研制出一系列以 2,4 二硝基茴香醚 (DNAN)、RDX 或 HMX 以及 AP 为基的低成本、低感度的新型熔注炸药 (见表 1)。DNAN 代替 TNT 作为熔融载体,其安全性优于 TNT,而且与 AP 相容,在配方设计中可以通过 AP 改善氧平衡来提高能量,其做功能力为 B 炸药的 1.62 倍,而冲击波感度低于 B 炸药^[8]。

同时美国研发出一系列熔注炸药新基体,如 NTO 和 TNAZ 等。如 TNTO 系列的 TNTO2 (NTO/TNT/Al/WAX), 在密度 1.74 g/cm^3 下爆速 6840 m/s, 50% 撞击感度大于 200.5 cm, BAM 摩擦感度大于 53.0 N^[9]。

美陆军 M107/M795 155 mm 炮弹装药用 MNX-194 炸药 (见图 3) 是一种用石蜡作粘结剂的

熔注炸药 (m.p. 80℃), 替代了原装药中的 TNT, RDX 是其唯一的含能组分, 装药密度达到 98%TMD, 威力大于 TNT, 耐冲击过载达到 50 000 g,

不敏感性满足 STANAG 4107 标准要求, 可以用作空军武器的装药, 是 MK 系列炸弹中替代 TNT 的候选炸药^[10]。

表 1 PAX 系列配方及性能

序号	组分	性能用途
PAX-21	RDX, DNAN, AP, MNA	代替 B 炸药
PAX-24	DNAN, AP, MNA	—
PAX-25	RDX, DNAN, AP, MNA	代替 B 炸药, 相比 PAX-21, 组分的比例不同, 性能提高
PAX-26	DNAN, Al, AP, MNA	—
PAX-28	RDX, DNAN, Al, AP, MNA	能量相当于 B 炸药 1.62 倍
PAX-40	HMX, DNAN, MNA	相比 B 炸药爆轰速度增加, 冲击波感度降低
PAX-41	RDX, DNAN, MNA	—



图 3 MNX-194 熔注药柱

美国陆军武器发展中心多种(咪)唑类炸药熔注组分(MTNI、MDNT、MDNTO), 其感度(撞击感度 ≥ 100 cm)介于 TNT 和 B 炸药之间, 爆炸威力 ($p_{CJ}=30.5$ GPa, $E_{out}=2\ 198$ cal/cm³)介于 B 炸药 ($p_{CJ}=27.7$ GPa, $E_{out}=1\ 837$ cal/cm³)和 RDX 之间, 而且具有热稳定性高、蒸汽压低等特点, 是一种理想的熔注混合炸药组分^[11-12]。

1.3 浇注型炸药

浇注炸药的特点是适于装填大型的和形状较复杂的产品, 易于实现自动化, 且装药力学性能好、能量水平和感度性能可调节范围大, 因而成为先进弹药的首选装填方法。

PBXN 系列炸药是美国较早定型的浇注固化炸药, 其中 PBXN-109 和 PBXN-111 的配方分别为 RDX/Al/HTPB 和 RDX/AP/Al/HTPB, 做功能力为 TNT 的 1.3 倍和 1.5 倍。现已成为美国海军最具代表性的爆破/破片战斗部装药, 用于 MK-80 系列通用炸弹、BLU-109/B 侵彻战斗部、“企鹅”反舰导弹中^[13]。

美国现许多浇注炸药临界直径都大于 2.5 cm, 可保证炸药的低易损性, 包括上面提到的 PBXN-113 以及 PBXN-109 都成为代替美军海陆空的不敏感炸药。同时具有代表性的此类高临界直径不敏感炸药还有 PBXW-124 (NTO/RDX/Al/AP/binder)临界直径 7.6~10 cm,

PBXW-122 (NTO/RDX/Al/AP/binder) 临界直径 18 cm。部分配方通过级配改善性能, 冲击波和燃烧感度低, 有良好的抗殉爆作用^[14]。

美国海军不敏感弹药炸药先期发展计划 (IMAD/HE) 研制出一种新型不敏感浇注固化 PBX 炸药 PBXIH-18, PBXIH-18 主要由 HMX、Al 和粘结剂组成, 其爆轰性能有所提高, 易损性和抗侵彻能力也得到改善, 已通过所有极不敏感炸药 (EIDS) 试验。其关键技术在于加入了可在热气体中燃烧的铝粉。

德国莱茵公司研制的 RH 系列 PBX 浇注炸药 (见图 4), 其基础配方为 RDX/Binder, 在 PzH2000 用 155 mm 榴弹及 Wiesel 用 120 mm 迫击炮弹上完成了全项不敏感性检测, 弹药耐过载能力超过 18 000 g^[15]。



图 4 装填 RH-40 炸药的 155 mm 榴弹

法国、澳大利亚、美国等国家对 RDX、HMX 等单体炸药进行了降感处理, 通过添加少量高分子粘结剂制成高爆速、低敏感性浇注炸药配方 HBU-88B (I-RDX/Addi.) (见图 5), 其爆速 (8 180 m/s (1.62 g/cm³), B 炸药为 7 970 m/s (1.72 g/cm³))、爆压与 B 炸药相当^[16-17]。

法国的 SNPE 公司研制出一种含 CL-20 的高固含量浇注炸药, 其配方为 CL-20/HTPB, 密度达 1.84 g/cm³, 爆速为 9 052 m/s, LSGT 试验的临界压力为 316 MPa, 满足美军标 MIL-STD-2105C 钝感炸药的要求 (≥ 250 MPa), 而且由于药浆粘度低, 工艺性好^[18]。

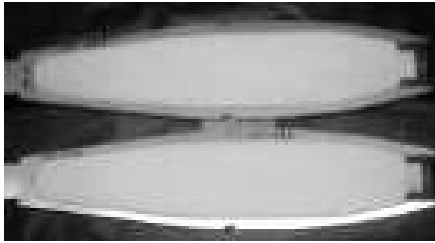


图 5 装填浇注 HBU-88B 榴弹

2 发展趋势

高能钝感混合炸药总的发展趋势是使炸药配方具有更高的潜能、燃烧热、理论密度和氧平衡。同时,为适应高强度战场环境的变化,炸药必须满足:感度低、热安定性好、作用可靠度高及成型工艺性好等要求。

1) 高能化:通过提高主体单质炸药的能量和含量是提高混合炸药能量的主要技术途径,当前研究的热点是 CL-20、DNTF、TNAZ 等高能密度化合物在混合炸药配方中的应用。另外,氧化剂和可燃剂的合理选择及有效应用也是提高炸药能量的关键,如 ADN 可释放更高的气泡能,二氟氨基化合物和金属可以更有效反应,高燃烧热值的硼粉代替铝粉可以增加反应爆热,组分复合化和纳米化等也成为高能炸药的发展方向。

2) 钝感化:合成不敏感高能材料是炸药钝感化的基础,如引入 TATB、CL-20、LLM-105、NTO 和 FOX-7 等新型高能炸药是提高爆轰能量的同时得到理想感度的有效途径。另外,通过采用物理化学手段使高能炸药组分降感、改善晶体品质及采用分子间炸药等途径也可以有效降低炸药感度。

3) 装药工艺精密化:采用精密压装、高效熔注、浇注工艺,使装药密度达到 98%T.M.D 以上,空间密度差 $\leq 0.2\%$,保证弹药高过载发射条件下的安全性的同时,使能量输出一致性提高,保证了战斗部的毁伤能力。

3 结束语

目前,世界各国投入大量的人力、物力、财力研发高能钝感炸药,并通过改善装药工艺提高弹药的抗高过载能力。其中美国在该领域研究成果最为突出,先后定型了 PBXIH-135、PBXN-109、PAX-3、AFX-757 和 LX-17 等产品。随着战场环境的恶化、战争强度的增加,高能化、钝感化及装药工艺的精密化将成为弹药发展的主题,高能钝感炸药将更多的应用于先进武器弹药中,以适应未来战场的需求。

参考文献:

[1] Watt D, Peugeot F. Reduced sensitivity RDX[C]//35th

International Annual Conference of ICT. Karlsruhe: ICT, 2004.

- [2] Benjamin N A, Daniel B N, Daniel W D. Reactive compositions including Metal: US, 20100276042[P]. 2010-11-04.
- [3] Jorg M, Hans S. Military High Explosives[J]. *Chimia* 2004, 58(6): 383-389.
- [4] Globalsecurity Org Insensitive high explosives[EB/OL]. [2006-11-08]. <http://www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/explosives-im.htm>.
- [5] 陈鲁英, 杨培进. CL-20 炸药性能研究[J]. *火炸药学报*, 2006, 26(3): 65-67.
- [6] 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.
- [7] Doll D W, Hanks J M, Allred A G, et al. Reduced sensitivity melt-pourable tritonal replacements: US, 20080099112[P]. 2008-05-01.
- [8] Pierre P, Daniel L, Isabelle L, et al. Additional properties studies of DNAN based melt-pour explosive formulation [C]//2010 IM/EM technology symposium. Munich: DNIA, 2010.
- [9] Smith M W, Cliff M D. NTO-based explosive formulations: a technology review[J]. DSTO TR-0796, 1999: 21-31.
- [10] Steven N, John N, Pamela F. Recent developments in reduced sensitivity melt pour explosives [C]//34th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe: ICT, 2003.
- [11] Drake G, Kaplan G, Hall L, et al. A new family of energetic ionic liquids 1-amino-3-alkyl 1-1,2,3-triazoliumnitrates[J]. *J Chem Crys*, 2007, 37: 15-23.
- [12] Alfred G S, Jesse S M, Jouet R J, et al. Din-itropyrazolopyrazole-amine salts useful in gun propellants: U S. 6706889B1[P]. 2004.
- [13] Wang Xin. Development and application of green propellants and explosives and related technologies[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2006, 29(5): 67-71.
- [14] Williams G K, Palopoli S F, Brill T B. Thermal decomposition of energetic materials 65. conversion of insensitive explosives (NTO, ANTA) and related compounds to polymeric melon-like cyclic azine burn-rate suppressants [J]. *Combust ion and Flame*, 1994, 98: 197-204.
- [15] Akhavan J. Polymer Binder for High Performance[J]. *Explosives, Propellants, Pyrotechnics*. 1992(17): 271-274.
- [16] Bui-Dang R, Brady V. Evaluation of reduced sensitivity RDX in PBXN-109 in GP bomb [C]// 35th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe: ICT, 2004.
- [17] Suzuki Y, Matsuzaki S, Yano E. Reduced Sensitivity RDX (RS-RDX): Effect of crystal quality on the shock sensitivity of a cast cured PBX formulation based on RS-RDX [C]//NDIA IMEM Technology Symposium. Miami: 2007.
- [18] Steven M N, Wendy B, Christos C. CL-20 aluminized PAX explosives formulation development [C]// Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium. Arlington: NDIA, 2003.