



有应用前景的低感高能炸药研究进展

高晓敏, 魏智勇, 张 明

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 绵阳 621900)

摘要:概述了有应用前景的高能低感炸药的研究成果,从改善现有高能炸药晶体品质和合成新的高能低感炸药方面,总结了大幅度降低炸药冲击波感度的研究现状。

关键词: 高能;低感;炸药

引言

在现代钝感弹药的正常军事使用过程中,它们是相对安全的,虽然是非常危险的材料,一般也不会同时爆炸或燃烧。然而在很苛刻的条件下,它们的危险性就会暴露出来^[1,2]。长期以来,尽管弹药已经得到了各个领域的广泛应用,但是安全性与感度之间的矛盾还是很突出的,因为弹药总是存在容易早爆引起伤害、造成破坏的隐患。

未来弹药的发展核心是高安全性和高可靠性^[3]。在许多武器、弹药系统中,要达到预期的安全性,应该使用比较钝感的炸药。

不敏感弹药的核心是药,只有装药不敏感,弹头才能不敏感,因此研究不敏感炸药就成了国外多年来一直追求的目标和发展方向^[4]。

研制高能低感单质炸药是达到低感高能炸药目标的关键。其中,通过对现有高能单质炸药进行晶体改性,从而实现大幅度降低炸药冲击波感度的方法被认为是最有效的技术途径之一^[5~7],另一种有效方法是寻求合成新的低感高能炸药^[8]。

1 改善晶体品质降低炸药感度

用于弹药的炸药都对热和力学刺激较敏感,为了满足快速从实验室到制造到弹药使用的需求,需要对炸药的结晶过程进行更全面的理解,制造出更多的可设计形貌的产物,提高炸药的晶体品质,使其缺陷更少或结晶更完美,以改进弹药的安全性能^[9]。因此,人们开展了提高晶体品质以降低材料感度的研究。

1.1 对降感 RDX 的研究

在 20 世纪 90 年代后期,法国火炸药公司发现,通过对普通 RDX 晶体改性,可大幅度降低 RDX 的冲击波感度,他们将这种 RDX 命名为 Insensitive RDX(I-RDX)。随后,美、英、德、荷、澳、日、挪威等西方国家经过研究,也相继得到了晶体改性的 RDX,分别命名为 Reduced sensitivity RDX(RS-RDX)或 Grade A RDX 或 Type I RDX^[10,11],这些 RDX 都具有较低的冲击波感度特性,从而为钝感弹药发展提供了很好的解决方案^[12~14]。

为了深入理解 RS-RDX 的感度影响因素,人们进一步探索了其重结晶工艺过程。

据日本 KOKI 有限公司报道,用某种重结晶工艺可以生产低感度超高纯度的高质量 RS-RDX 晶

收稿:2011-06-23; 修回:2011-07-14;

作者简介:高晓敏(1968—),女,1991 年 7 月毕业于浙江大学高分子化学专业,高级工程师,公开发表期刊论文 17 篇。
Tel:13909010320; E-mail:info_icm@caep. ac. cn.

体^[15]。RS-RDX 晶体中没有杂质和晶体缺陷。对 RS-RDX 基 PBX 配方 PBXN-109 进行大型隔板试验 (LSGT), 结果较标准 RDX 基 PBX 配方钝感。为了研究晶形对 RS-RDX 基 PBXN-109 配方的影响, 该公司生产了两种 RS-RDX, 一种 RS-RDX 是球形, 另一种是多面体形状。但是这两种 PBX 配方较标准 RDX 基 PBX 配方钝感, 说明 RS-RDX 基 PBX 配方的感度受晶体质量和晶形的影响。

封雪松等开展了重结晶降低 RDX 感度的研究^[16], 采用 N-甲基吡咯烷酮(NMP)、二甲基甲酰胺(DMF)、二甲基亚砜(DMSO)作溶剂, 对普通 RDX 进行重结晶, 研究了不同溶剂对 RDX 晶体形貌、晶体内部空穴、位错、残存溶剂的影响, 通过扫描电镜和光学显微镜, 分析了重结晶 RDX 晶体的结晶形貌和内部质量, 用密度瓶法测试了晶体密度, 用 10kg 落锤测定了撞击感度。结果表明, 用二甲基亚砜重结晶制备的 RDX 有较好的晶体质量, 撞击感度最低(54%), 晶体密度达到 $1.823\text{g}/\text{cm}^3$ 。

法国的 Borne 等用光学显微镜方法研究了 RDX 颗粒中的杂质^[17], 测试表明 RDX 颗粒中有两种主要杂质: HMX 杂质和溶剂杂质。用高性能液相色谱和 ISL(炸药晶体表面观密度)沉浮法高精度测量不同 RDX 颗粒批中的 HMX 含量及颗粒表面观密度, RDX 颗粒中的 HMX 含量与 RDX 基浇铸配方的冲击感度之间没有直接的实验关联, RDX 颗粒中约 2wt% 的 HMX 使得配方非常敏感(4.3GPa), 对于 HMX 含量非常少(0.035%)的 RDX 颗粒批来说, 测得配方的感度相同, 含 0.1% HMX 的 RDX 颗粒批配方较钝感(5.5GPa)。

1.2 对降感 HMX 的研究

目前已使用的高威力炸药中仍以 RDX 为最多, 但很多国家都在大力开发以 HMX(奥克托今)为主体的高威力炸药^[18]。HMX 炸药的能量高、威力大、密度大、安定性好、耐热性好。发展和研究以 HMX 为主体的高爆热、高爆速、高密度的高威力炸药可以满足武器弹药高毁伤效能和杀爆威力的要求。

晶体品质(内部空隙、表面性质)对浇铸炸药配方的冲击波感度有重大影响。法国的 Borne 等利用具有相同的晶体粒度分布、相同的晶体表面性质、内部缺陷不同的三批 HMX 作为样品, 制备了三批相似的高品质 HMX 浇铸炸药配方, 测试了这三种配方在 20mm 射弹撞击下的起爆阈值^[19]。实验结果表明, 第 3 批和第 1 批 HMX 颗粒相比, 其溶剂包夹物的体积分别为 0.45% 和 0.1%, 其产生爆轰的起爆阈值则从 760m/s 提高到了 1100m/s(相差 30%)。

为了提高产品质量, 制备出更低感度的产品, Kroeber 等研究了 HMX 在不同溶剂中的冷却结晶过程^[20,21], 研究发现高质量的颗粒是通过在碳酸丙烯酯溶液中, 加入少量水将物质淹没, 随后开始成核, 然后慢慢得到结晶产物。结晶过程使粒子有非常高的密度(接近理论值)。对结晶产物进行隔板试验, 表明冲击感度明显降低, 同时发现粒子密度与冲击起爆压力之间存在明显的线性关系。粒子密度相对容易测定, 这样就对测定材料的感度非常有用。

荷兰的 Heijian 和 Bouma 等研究了 HMX 的内部缺陷对 HTPB 基 PBX 冲击波感度的影响^[22], 发现晶体混合的 PBX, 其冲击波感度与这些晶体的感度、晶体内所含有的杂质相关。

随后, Heijian 等又研究了 HMX/HTPB 基 PBX 的冲击波感度与 HMX 晶体密度的关系^[22]。他们选择了两种不同内在品质的 HMX 晶体, 主要是杂质含量不同。经过颗粒分级, HTPB 基 PBX 药品注装后, 研究晶体内在品质对 PBX 冲击波感度的影响。测试结果表明, PBX 的冲击波感度与 HMX 的颗粒密度, 即晶体内在品质有直接关系。PBX 中 HMX 的晶体密度越大, 晶体内在品质越高, 冲击波感度越低。含商用 HMX 颗粒的参照 PBX 与重结晶 HMX 颗粒的 PBX 相比, 后者比前者敏感 1.5 倍。更重要的是, PBX 的撞击压力与使用的 HMX 颗粒密度成线性关系。

2 合成新的高能低感炸药

对高能单质炸药 RDX、HMX 进行晶体改性, 大幅度降低了炸药的冲击波感度。为了达到 IM 要求, 研究者寻求合成了不少新的有前景的低感高能炸药。

2.1 TATB

三氨基三硝基苯(TATB)是对高温、冲击和撞击非常不敏感的高威力常规炸药, 并用于现代核弹头

中^[23],其耐热性、物理性能、抗冲击性能高于能量水平相当的其它含能材料。美国能源部已将劳伦斯·利弗莫尔(LLNL)国家实验室研制的 LX-17 和洛斯·阿拉莫斯国家实验室研制的 PBX-9502 两个配方定型为用于核武器的不敏感炸药^[24],这两个配方都是以 TATB 为基的塑料黏结炸药。目前已知以 TATB 为基的混合炸药有 PBX-9502(TATB/Kel-F 800,95/5)、PBX-9 503(TATB/HMX/Kel-F 800,80/15/5)、LX-17(TATB/Kel-F,92.5/7.5)等。美国 B61 系列核炸弹现有的各种型号全部使用 PBX-9502 不敏感炸药。

传统的 TATB 生产一般使用三氯苯做原料,硝化和氨基化反应过程条件苛刻,费用高,还会产生氯废物。

尽管 TATB 具有广泛的潜能,但由于其制造成本很高和产生氯废物而限制了它的应用。美国 LLNL 的化学家们研发了一种合成 TATB 和 DATB(二氨基三硝基苯)(由美国海军研发但目前尚未确定的一种不敏感炸药)^[23,24]的简便方法。劳伦斯·利弗莫尔法又称为替代性亲核取代法(VNS),利用 VNS 在工厂规模生产 TATB 的价格将低于 90 美元/公斤,并且制造时间缩短 40%左右。与现有合成方法相比,该方法具有环境友好、价格低廉、不含氯等优点。

英国的 Bellamy 等开发了三步法合成 TATB 的路线,使用不含氯的原料 1,3,5-三羟基苯,通过硝化、烷基化和氨基化反应合成 TATB^[25]。用三甲氧基三硝基苯合成 TATB 总产率为 87%,用三乙氧基三硝基苯和三丙氧基三硝基苯合成 TATB 的产率也较高,由三丙氧基三硝基苯合成 TATB 的纯度几乎可以达到 100%。

英国学者也用 VNS 法合成了 TATB,将 VNS 法和三步法、三氯苯合成 TATB 的热性能进行了对比,认为如果不进一步精制,由三甲氧基三硝基苯和三乙氧基三硝基苯合成的 TATB 不如三氯苯合成的 TATB,由三丙氧基三硝基苯合成 TATB 的纯度和热稳定性几乎非常接近由三氯苯合成的 TATB。

2.2 CL-20

六硝基六氮杂异伍滋烷(HNIW,即 CL-20)首先由美国海军于 1987 年合成,因其性能优越,被国际火炸药届誉为自发现 HMX 以来在炸药合成史上的重大突破^[26,27]。

CL-20 的笼状结构引入了应力,六个 N—NO₂ 基团是其能量来源。CL-20 的高密度(2.04g/cm³)和高性能(爆速 9400m/s,生成热 +454kJ/mol)使其确立了强大炸药的地位,与 HMX 相比,CL-20 的配方在安全性能方面很相似,但是能量显然提高了,目前已公认这一材料对外界刺激略微敏感^[28]。

美国海军 CL-20 制造工艺项目以提高 CL-20 的可重复生产性和质量,改进 CL-20 的感度,降低 CL-20 的生产费用为目标^[27]。本项目的另一项任务是考察影响 CL-20 感度的关键因素。他们完成了一系列“循环赛式”检验,摩擦感度和撞击感度试验运用 14 个样品。这些样品运用各种合成及重结晶技术以及不同的结晶试剂制备,具有不同的纯度水平。

美国已经完成对 CL-20 的中试生产研究,在进入 21 世纪的前 15~20 年内,美国可能要对 CL-20 进行大规模生产,并加紧应用研究^[29]。

加拿大国防研究所(DRDC)已开始研究将 CL-20 应用在不同用途中^[28]。其中一项就是将 CL-20 与 TNT 及一种含能热塑性弹性体(ETPE)共用,如 RDX/TNT/ETPE 混合体系(已申请专利)一样,研制出一种新型钝感高性能炸药。分析认为,这一体系可能具有比 B 炸药更优良的性能。已获悉 RDX/TNT/ETPE 混合体系感度低。另外,由于这一混合体系的可融性和可循环性及 CL-20 水溶解度低,它也可以作为制备环保性火炸药体系的候选含能材料。

日本 Asahi 化学公司研制的含 CL-20 的高威力低易损炸药,用硝酸纤维素羧甲基醚做黏结剂,该炸药具有高能、高热稳定性、耐冲击、低易损性^[30]。

法国、英国、印度等国家也开展了 CL-20 研究。在欧洲,含有 CL-20 的部分商业和军用产品已经得到发展,但是 CL-20 的生产成本很高,必须进一步选择优化路线,降低成本。

2.3 LLM-105

RDX 和 HMX 炸药能量高,但感度也相对较高,TATB 感度很低,但能量不够理想。为了满足 IM 的

要求,国际上一直希望合成出能量与 HMX 相当,而感度与 TATB 相当的单质炸药。

美国 LLNL 首次合成了 2,6-二氨基-,3,5-二硝基吡嗪-1-氧化物(LLM-105)。德国和英国也成功合成了 LLM-105^[31]。

LLM-105 是一种耐热高能钝感炸药,LLM-105 的能量达到了 HMX 能量的 80~90%,比 TATB 的能量高 20%。LLM-105 的 DSC 放热峰值温度(354℃)与 TATB 接近,对撞击、火花、摩擦和冲击钝感,是一种综合性能优良的新型钝感高能炸药^[32]。可用在某些特殊用途的武器中,如要求具有抗过载能力的钻地武器中代替 TATB 做传爆药或主装药^[33],也可用在石油深井射孔等方面。

美国 LLNL 国家试验室的研究结果表明^[32],重结晶方法直接影响所得 LLM-105 产品的粒度、晶体形貌、撞击钝感和压缩成型性能。

LLNL 还研究了几种 LLM-105 塑料粘结炸药配方^[36]。小量安全性试验和 Floret 试验表明 RX-55-AE(97.5%LLM-105/2.5%维通 A 粘结剂)能量超过超细 TATB 配方,证明 LLM-105 是一种有应用前景的高性能不敏感炸药。

李海波等采用冷却法和溶剂-非溶剂法结晶制备 LLM-105^[34],对重结晶前后 LLM-105 的纯度、粒度、晶体形貌、撞击钝感进行了对比研究,结果表明,所得 LLM-105 晶体密度高(1.908g/cm³,TATB 为 1.938g/cm³)对撞击和摩擦钝感,压缩成型性能好,爆速(7991m/s)明显高于 TATB (TATB 为 7619m/s),是一种综合性能优良的低感高能炸药。

李玉斌等研究了不同晶粒形状的 LLM-105 对 HMX 的降感作用及降感机制^[35],并优选了 HMX/LLM-105 基炸药配方使用的黏结体系和钝感体系,结果认为,LLM-105 是一种降感效果与 TATB 相当的钝感炸药,尤其是细颗粒 LLM-105 能有效降低 HMX 的感度,可以在 HMX 基 PBX 中用作钝感剂。以细颗粒级配的高品质 HMX 为主体炸药,采用喷流细化的 LLM-105 作为含能钝感剂,选择具有优异钝感性能与降感效果的复合黏结体系,添加少量高效惰性钝感剂的新配方 HM-G2 具有较低的机械感度和冲击感度、很高的爆轰输出能量,是一种安全性能很好的低感高能 PBX 炸药。

2.4 NTO

3-硝基-1,2,4-三唑-5-酮(NTO)的密度为 1.91g/cm³,能量与 RDX 相当,偏酸性(pKa=3.67),钝感性能与 TATB 相当,NTO 基浇注固化 PBX 的加工性能良好、费用适中,具有低易损性。

上世纪 80 年代中期,法国 SNPE(法国火炸药公司)首先研制了含 NTO 的 B2214(NTO/HMX/HTPB)配方^[24],B2214 感度低,是一种极不敏感炸药,适用于一般的大型炮弹。但是 NTO 的临界直径大(约 75mm),性能较低(爆压 22.5GPa)。为此,SNPE 用含能黏结剂替代惰性黏结剂研制 B3017(NTO/粘结剂)配方,其冲击波感度和 B2214 相当,爆压提高了 17%。

Smith 等研究认为 NTO 用作炸药组分时尽管性能略低于 RDX,但是 NTO 对热更稳定,对危险性刺激不太敏感^[37]。NTO 基炸药配方储存运输时危险性分类为 1.6。Smith 等分析了目前已有的 NTO 方面的文献及 NTO 在炸药配方中的使用,建议未来开展 NTO 在钝感弹药中的应用研究,可作为炸药配方中 RDX 的钝感替代物。

Szymanczyk 等研究了含 NTO、HMX 化合物的新型炸药配方的爆轰特性^[38],测定了混合物的爆轰速度、压力和能量,以及爆轰产物的加速度和状态方程。采用隔板实验和落锤实验评估了冲击感度和撞击感度,同时还测定了配方的射流感度。分析结果认为,这些配方可用在钝感弹药中。

马特拉航空航天动力公司(MBDA)利法国火炸药公司按照法国国防部的合同开发生产具有较强的侵彻和破片杀伤能力的 125kg 和 250kg 级别的战斗部^[39]。这种新一代多用途炸弹中的炸药装药为 NTO 和 HMX 基 PBX 装药,炸弹设计满足特定的钝感弹药要求,即法国海军查理·戴高乐号核动力航母特殊不敏感性要求。

美国研制的 NTO 注装炸药 AFX-645(NTO/TNT/蜡/铝)已用于 MK-82 航弹及 FMV-139 炮弹^[23]。美国海军近年还研制了 PBXW-126(NTO/RDX/AP/Al/聚氨酯,22/20/20/26/12)、PBXIW-134。英国研制的(NTO/HMX/polyNIMMO/K10)符合 EIDs 标准,英国准备进一步优化后引入部队代替 B

炸药装填到不敏感弹药中。

2.5 FOX-7

瑞典国防研究院 FOA 高能材料研究所和美国 LLNL 都合成了 FOX-7(1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯(DADE))^[40]。

FOX-7 晶体密度 1.885g/cm^3 , 生成热 32kcal/mol , 爆速 8500m/s 。FOX-7 的活化能高于 RDX 和 HMX, 感度低于 RDX, 而性能与 RDX 相当, 预测其能量为 HMX 的 $85\%\sim 90\%$, 与聚合物相容性好, 具有较高的分子稳定性^[41,42]。

瑞典的 Eldsaeter 等制备了 FOX-7 和 PolyGLYN 浇铸样品^[42]。该配方感度低、但力学性能不好。另外, 还制备了另一种具有改进浇铸性和力学性能的 FOX-7 基 PBX。为了进一步表征 FOX-7 的低易损性, 对 FOX-7 进行了隔板试验, 结果显示 FOX-7 在空气间隔起爆, 压装 FOX-7 的感度在压装 TNT 的感度范围之内, 可用作钝感炸药。

瑞典已研制了 FOX-7 和黏结剂的浇注成型炸药配方, 含能黏结剂体系由聚缩水甘油硝酸酯(polyGLYN)、N-正丁基-N-(2-硝氧基乙基)硝酸胺(BuNENA)、4,4'-二环己基甲烷二异氰酸酯(H_{21} MDI)组成, 配方对摩擦不敏感, 热稳定性好^[24]。

英国 QinetiQ 公司开展多种以 FOX-7 为基的压装 PBX 炸药配方的研究并完成了 QRXO80 炸药配方的制备与试验, 该炸药的配方组成为 95% FOX-7 和 5% Hytemp 黏结剂, 爆速为 8630m/s , 计算爆压为 27.46GPa 。FOX-7 在不敏感弹药中应用前景良好, 可作为 B 炸药(RDX/TNT60/40)的替代物^[40]。

2.6 DNAN

考虑到成本和爆轰能力, 绝大多数炮射的单一战斗部都使用熔铸炸药。传统熔铸炸药的功能主要集中在破片杀伤能力上^[23]。由于 TNT 自身的缺陷使得熔铸炸药的渗油、脆性、体积收缩、感度较高等问题没有得到根本解决^[42]。为了响应不敏感弹药的需求, 研究人员最近已研制出一系列以 2,4-二硝基茴香醚 DNAN 等为基的、低成本、低感度的新型熔铸炸药。

DNAN 作为载体其安全性优于 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, 这种有机中间体可替代 TNT 用在低感度熔铸炸药配方中。

DNAN 的熔点为 89°C (纯度 $\geq 99\%$), 密度为 1.349g/cm^3 , DNAN 价格低, 运输时作为危险性分类 4.1 类易燃性固体处理, 不会受到象 I 类爆炸品那样严格的控制, 而且仍然可以使用 TNT 的生产和装填设备。

自上世纪 80 年代以来, 美国匹克汀尼兵工厂会同美国 ATK 聚硫橡胶公司等多家单位按照不敏感弹药标准要求研制了一组含有 DNAN 的 PAX 系列熔铸炸药^[43]: PAX-21(RDX、DNAN、AP 和 MNA); PAX-24(DNAN、AP、MNA)可取代 TNT; PAX-25(RDX、DNAN、AP、MNA)可取代 B 炸药, 能量性能高于 PAX-21; PAX-26(DNAN、Al、AP、MNA)可取代特里托纳儿(Tritonal)炸药; PAX-28(RDX、DNAN、AP、Al)用于单一战斗部装药, 能量相当于 B 炸药的 1.62 倍; PAX-34(DNAN、NTO、TATB、HMX)可取代 B 炸药; PAX-40(HMX、DNAN、MNA)可取代 Octol 炸药; PAX-41(RDX、DNAN、MNA)可替代 Cyclotol。PAX-21 由 RDX、DNAN、AP 和少量 MNA(工艺助剂)组成, 目前已投入批量生产, 1500 磅/批, 装填 60mm M720E1 迫击炮弹。

DNAN 基炸药成本低, 而且配方中不含 TNT, 其毒性比 B 炸药小。PAX-21 炸药不仅在生产中使用安全, 还显示出良好的不敏感弹药特性、热应力特性以及低冲击感度。PAX-21 已在美国陆军 60mm 和 120mm 迫击炮服役。PAX-34 已在美国霍尔斯特顿陆军弹药厂(HSAAP)开始生产, 每批达到 1200 磅。PAX-40 和 PAX-41 炸药的爆速高于 B 炸药, 而它们的冲击感度低于 B 炸药。PAX-41 也已开始在霍尔斯特顿陆军弹药厂生产。

这些熔铸炸药的投入使用表明美国在钝感弹药领域取得了一定的进展。

3 总结和展望

发展和应用不敏感火炸药是提高武器弹药本质安全性的重要手段, 不敏感高能炸药研究获得了很多

有价值的新的研究成果。

通过对普通 RDX、HMX 晶体改性研究认为, PBX 配方中的冲击波感度与结晶形貌、结晶粒子的密度、晶体内所含杂质等内部质量相关。晶体品质的改善可以降低 RDX、HMX 的晶体缺陷, 提高晶体品质, 从而大幅度降低炸药组分的感度, 这为钝感弹药发展提供了很好的解决方案。

为了达到 IM 要求, 研究者合成了不少新的有前景的低感高能炸药。

传统的 TATB 生产过程条件苛刻, 费用高, 还会产生氯废物。美国 LLNL 研究了合成 TATB^[1] 的简便方法 VNS 法, 利用 VNS 法生产 TATB 具有价廉、省时、环保、不含氯等优点。英国开发了三步法合成 TATB 的路线, 其原料不含氯, 合成 TATB 的产率较高且纯度几乎可达 100%。

CL-20 被誉为自发现 HMX 以来在炸药合成史上的重大突破。美国已完成对 CL-20 的中试生产研究。美国海军以提高 CL-20 的可重复生产性和质量、改进其感度、降低生产费用为目标, 运用各种合成及重结晶技术制备出具有不同纯度水平的 CL-20。加拿大研制出一种比 B 炸药性能更优良的 CL-20 基新型钝感高性能炸药, 这种炸药还可作为制备环保性火炸药体系的候选含能材料。日本也研制出含 CL-20 的高能、高热稳定性、耐冲击、低易损性炸药。含有 CL-20 的部分商业和军用产品已在欧洲得到发展, 但 CL-20 的生产成本很高, 必须进一步选择优化路线。

LLM-105 是一种综合性能优良的新型钝感高能炸药, 可用在钻地武器、石油深井射孔等方面。美国 LLNL 研究了 LLM-105 基 PBX 配方, 证明 LLM-105 是一种有应用前景的高性能不敏感炸药。李海波等采用冷却法和溶剂-非溶剂法结晶制备 LLM-105, 李玉斌等研究了 LLM-105 对 HMX 的降感作用及降感机制, 他们认为 LLM-105 是一种综合性能优良、安全性能很好的低感高能炸药。

NTO 的能量与 RDX 相当, 钝感性能与 TATB 相当, NTO 基浇注固化 PBX 的加工性能良好、费用适中, 具有低易损性。法国研制的含 NTO 的低感度配方适用于一般的大型炮弹, 后来他们在配方中引入含能黏结剂, 使爆压提高了 17%。法国合作开发的以 NTO 和 HMX 为基的 PBX 装药的的设计满足其海军核动力航母特殊不敏感性要求。美国研制的 NTO 注装炸药已用于 MK-82 航弹及 FMV-139 炮弹。英国研制的含 NTO 的 PBX 符合 EIDs 标准, 拟进一步优化后代替 B 炸药装填到不敏感弹药中。

FOX-7 的活化能高于 RDX 和 HMX, 感度低于 RDX, 而性能与 RDX 相当, 预测其能量为 HMX 的 85%~90%, 与聚合物相容性好, 具有较高的分子稳定性。瑞典制备了改进浇铸性和力学性能的 FOX-7 基 PBX, 研究结果显示 FOX-7 可用作钝感炸药。瑞典还研制了 FOX-7 和黏结剂的浇注成型炸药配方, 认为配方对摩擦不敏感, 热稳定性好。英国研究认为 FOX-7 在不敏感弹药中应用前景良好, 可作为 B 炸药的替代物。

考虑到成本和爆轰能力, 以及 TNT 熔铸炸药的渗油、脆性、体积收缩、感度较高等问题, 响应不敏感弹药的需求, 研究人员已研制了以 DNAN 为基的、低成本、低感度的新型熔铸炸药。DNAN 价格低, 安全性优于 TNT, 与 AP 相容, 它可替代 TNT 用在低感度熔铸炸药配方中。

美国按照不敏感弹药标准要求研制了一组含有 DNAN 的 PAX 系列熔铸炸药, 可分别取代 TNT、B 炸药、Tritonal、Octol、Cyclotol 等。其中某些炸药已在美国弹药厂批量生产。

4 未来前景展望

在美国和其他北约国家新研制的弹药都将是不敏感弹药, 新生产的制式弹药产品将尽量换装低易损性的不敏感炸药。高能低感弹药是未来弹药的一个主要发展方向。

英国 2006 年出台的英国国防工业战略设定的目标是到 2010 年英国所有新生产通用弹药都是钝感弹药。英国三军库存弹药品种中, 到 2015 年钝感弹药的比例将接近 50%。

进入 20 世纪 90 年代后, 包括不敏感高能炸药的高能量密度材料的研究已经被美国列入国防部关键技术计划, 新型的高能量密度材料将在提供武器弹药射程和威力、战斗部小型化等关键技术方面发挥作用。目前最引人注目的是 CL-20。

CL-20 因其热分解温度、生成热、密度、及其对燃速的影响, 加之它与绝大多数火炸药组分以及羟基

丁二烯(HTPB)等含能粘结剂的相容性好,作为低感高能炸药具有相当高的吸引力^[44]。

美国 LLNL 含能材料中心对 CL-20 的配方和性能研究认为,在热稳定性和小型感度试验方面,CL-20 基配方比 HMX 基配方稍微差一点,在一维冲击负荷条件下,其感度几乎与 HMX 基配方的性能相同,但在圆筒扩张试验及钽板加速配方中,CL-20 加速金属的能力比 HMX 大 14%。

美国海军面战中心也曾计划研究新型 CL-20 压装 PBX,要求这些炸药在能量和易损性能方面有更好的平衡。美国海军 CL-20 项目今后的研究任务是:完成改进工艺,提高 CL-20 的生产重复性和生产质量,改善 CL-20 的感度,降低成本。

美国 LLNL 的研究和海军计划相互印证,使 CL-20 巨大的应用潜力开始显现。

国外弹药发展很快,炸药的品种也随之更新。近年来俄罗斯和美国的不敏感高能炸药都已经向系列化发展,炸药配方的性能也随着弹药性能的不同而改进^[18]。

美国是实施 IM 计划、研究不敏感高能炸药的最早的国家,其海军大部分弹药已经换装成不敏感高能炸药。美国海、陆、空三军正在用不敏感炸药来取代现用战斗部装药,并用于新型弹药的设计中^[1]。

国外曾采用多种手段来达到研制不敏感高能炸药的目的,经过 20 多年努力,认为发展复合炸药是最有效的途径之一。

对不敏感高能炸药的研究,还存在生产成本高、生产步骤和用于熔铸的设备增加,对 IM 弹药的生命周期研究有限,杀伤率降低、对人体危害和三废处理、冲击感度和热感度的平衡等问题,还需要作深入、细致的研究。

参考文献:

- [1] 高桂萍. 火炸药学报, 1999, 2: 63~67.
- [2] 谭迎新, 王桂吉, 张景林. 华北工学院测试技术学报, 2001, 15(3): 154~157.
- [3] Duncan W, Eric D. 含能材料, 2006, 14(5): 323~329.
- [4] 高晓敏, 黄明. 含能材料, 2010, 17(2): 475~480.
- [5] Freche A, Aviles J. 2000 Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium, 2000: 18~22.
- [6] Ian J, Lochert. DSTO-TR-1447.
- [7] Ian J, Lochert. Insensitive Munition & Energetic Materials, 2003.
- [8] Pagoria P F. UCRL-JC-117228[R].
- [9] Eric D, Touzé P, Duncan W. Military Technology, 2008, 9: 58~62.
- [10] Duncan W. The 35th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, 2004, 9~1.
- [11] Doherty R. The 35th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, 2004.
- [12] Borne L, Patedoye J C. Propellants, Explosive, Pyrotechnics, 1999, 24: 255~259.
- [13] Neidert J B. The 37th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, 2006: 3~1.
- [14] Swanson R L. The 37th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, 2006: 1~1.
- [15] Shinichi M, Eiji Y. The 38th International Annual Conference of ICT Karlsruhe, 2007: 130/1~130/10.
- [16] 封雪松, 赵省向, 李小平. 火炸药学报, 2007, 30(3): 45~48.
- [17] Lionel B, Helmut R. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2006, 31(6): 482~489.
- [18] 项传林, 吕荣华. 火炸药, 1997, 1: 30~32.
- [19] Borne L. 11th International detonation symposium, 1998: 658~663.
- [20] Hartmut K. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2008, 33(1): 33~36.
- [21] Kröber. The 38th International Annual Conference of ICT. 2007: 144/1~144/12.
- [22] Heijian A E D M, Bouma R H B. The 29th International Annual Conference of ICT. 1998, 98-1~98-11.
- [23] 王振宇. 火炸药动态, 2009, 3: 18~22.
- [24] Heijian A E D M, Bouma R H B, Esveld R J. The 31st International Annual Conference of ICT. 2000: 69-1~69-11.
- [25] 王昕. 火炸药学报, 2007, 30(2): 58~60.
- [26] 周新利. 火炸药学报, 2006, (1): 26~28.
- [27] Johnson N C. Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium. 2001: 743~767.
- [28] Patrick B. The 38th International Annual Conference of ICT. 2007, 27/1~27/12.
- [29] 王昕, 彭翠枝. 火炸药学报, 2007, 30(5): 45~48.

- [30] 欧育湘. 化工进展, 2007, (12): 762~766.
- [31] Pagoria P F, Cutting J L, Hoffman M D. DEA-A-76-G-1218, 1998.
- [32] Cutting J L, Hodgins R L, Hoffman M D. UCRL-JC-131623, 1998.
- [33] 邓明哲, 叶志虎, 苏海彭. 火炸药学报, 2009, 32(4): 50~54.
- [34] 李海波, 程碧波, 刘世俊. 含能材料, 2009, 16(6): 687~689.
- [35] 李玉斌, 黄辉, 李金山. 火炸药学报, 2008, 31(5): 1~4.
- [36] Tran T, Pagoria D. The 33rd International Annual Conference of ICT. 2002, V45.
- [37] Marthew W S, Mhew D C. DSTO-TR-0796.
- [38] Leszek S, Trzcinski W A, Technifcznej B W A. 2005, 54(2-3), 31~46.
- [39] Blanc P, Mahé B, Nouguez B. Insensitive Munition S & Energetic Materials Technology Symposium, 2003.
- [40] Ian J. Lochert. DSTO-TR-1238.
- [41] Carina E, Nils R. Proceedings of the International Pyrotechnics Seminars, 2003: 212~223.
- [42] 王昕. 兵器快报, 2007, 1: 1~6.
- [43] 王红星, 王晓峰. 含能材料, 2009, 17(2): 183~186.
- [44] 徐复铭. 南京理工大学学报, 2003, 27(5): 552~554.

Review of Prospective Explosives with High Energy and Low Sensitivity

GAO Xiao-min, WEI Zhi-yong, ZHANG Ming

(*Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China*)

Abstract: The research results of prospective explosives with high energy and low sensitivity are introduced. The property and application situation of the existing and newly synthesized explosives, with decreased sensitivity are summarized.

Key words: High energy; Low sensitivity; Explosive