

文章编号: 1006-9941(2017)01-0002-10

混合炸药设计研究进展

杨志剑, 刘晓波, 何冠松, 李玉斌, 聂福德

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 混合炸药是含能材料在武器中实现毁伤作用的能量源。本文简要综述了近年来混合炸药设计的研究进展和发展趋势, 从新型高能炸药、含能粘结剂与增塑剂、高活性金属的应用三个方面阐述了混合炸药高能化设计的研究进展, 再从低感含能材料、高效降感技术和抗力热环境材料与微结构的应用三个方面介绍了混合炸药钝感化设计的研究进展。依据不同的功能化设计, 归纳了典型炸药配方组成、特点和应用情况, 提出了未来混合炸药将朝着高能量密度化、钝感化、环境适应性提升、绿色化、理论设计加强方向发展。

关键词: 混合炸药; 高能; 钝感化

中图分类号: TJ55; O62

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.01.001

1 引言

先进武器弹药伴随着含能材料技术的发展和應用而不断发展。混合炸药由于能够弥补单质炸药在品种、成型工艺、原料来源和成本等方面的不足, 选择性和适应性更高, 是武器实现毁伤作用的最终使用形式, 在武器装药中起着至关重要的作用。混合炸药设计技术是含能材料技术的一个重要方向, 牵引着新型含能材料合成、结晶等学科的发展。对于混合炸药而言, 不仅要考虑能量与安全性这些基本性能, 还需要考虑材料相容性、成型、机加、力学等综合性能。经过多年的发展, 世界各国相继研发了以不同炸药为基, 能够实现不同毁伤方式的炸药配方, 以满足武器弹药的应用需求。总体上看, 混合炸药应该具有高的密度和能量输出、良好的安全和工艺性能。

从特点上看, 混合炸药属于高填充体系的复合材料, 涉及含能材料介观、宏观尺度的科学问题。配方中通常包含主体炸药、高分子粘结剂、熔铸载体、降感剂、增塑剂、其它功能添加剂等, 每种组分所起作用不同, 但功能上的协同效应对配方设计十分重要。混合炸药的能、安全性、力学性能、成本等往往不可兼得, 需要

综合匹配设计, 因此一种炸药可能在定型后很长一段时间仍然在不断改进和发展, 实现综合性能不断提升。混合炸药配方总体设计原则如图 1 所示^[1], 为满足武器弹药应用需求, 从设计的策略而言, 其一是不断应用新的单质炸药, 挖掘应用潜力; 其二是研究新型功能助剂, 包括粘结剂、降感剂、增塑剂、其它添加剂等, 将其用于改善炸药性能; 其三是通过对混合炸药内部微结构进行适当调控、改进炸药制备工艺等实现性能优化和应用。本文根据混合炸药设计的高能化和钝感化两个主要方向, 对近年来混合炸药的设计研究展开综述, 并对今后的发展趋势进行展望。

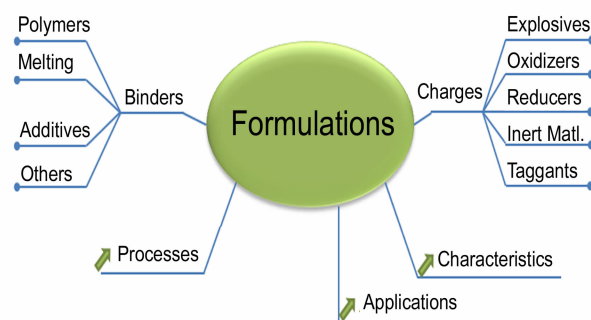


图 1 配方设计总体原则^[1]

Fig. 1 Overall principle for formulation design^[1]

2 混合炸药的高能化设计

2.1 新型高能炸药的应用

现役武器弹药中, 实际应用的炸药含能组分最主

收稿日期: 2016-12-09; 修回日期: 2016-12-29

基金项目: 国家自然科学基金资助(11502243, 11502245)

作者简介: 杨志剑(1986-), 男, 助理研究员, 主要从事高性能混合炸药研究。e-mail: zhijianyang@caep.cn

通信联系人: 聂福德(1969-), 男, 研究员, 主要从事含能材料制备与应用研究。e-mail: niefude@caep.cn

要三硝基甲苯 (TNT)、2,4-二硝基茴香醚 (DNAN)、3-硝基-1,2,4-三唑-5-酮 (NTO)、硝基胍 (NQ)、黑索金 (RDX) 和奥克托今 (HMX) 六种。其中, TNT、DNAN、NTO 主要用于熔铸炸药, NQ 用于熔铸或浇注炸药, 而 RDX 和 HMX 作为典型高能炸药广泛用于各类配方。对于混合炸药设计而言, 提高主体炸药含量或能量, 是炸药高能化设计最直接、最有效的途径。多年来, 研究人员致力于开发新型高密度材料 (HEDM), 但能获实际应用的只占少数。当前, 混合炸药高能化设计中应用的典型高能炸药包括六硝基六氮杂异伍兹烷 (CL-20)、1,3,3-三硝基氮杂环丁烷 (TNAZ)、3,4-二硝基咪唑基氧化咪唑 (DNITF)、5,5'-联四唑-1,1'-二氧二羟铵 (TKX-50) 等。

CL-20 由 Nielsen 于 1987 年合成, 是最有应用前景的新型高能炸药之一, 其能量输出比 HMX 高 10%~15%。部分已报道的 CL-20 基炸药配方如表 1 所示。美国研制了系列 CL-20 基混合炸药^[2-4], 包括 LX-19、RX-39-AA/AB、PBXC-19、PBXCL-1、PBXCLT-1、RX-49-AE、PATHX-1、PATHX-2、PATHX-3、PAX-11、

PAX-12、PAX-22、PAX-29、PBXW-16、DLE-C038 等。其中, LX-19、RX-39-AB 所用 CL-20 粒径不同, 但配方组成一致, 均是将 LX-14 中 95% 的 HMX 换成 CL-20, 5% 的 Estane 粘结剂不变, 能量提升十分显著, 可用于多用途子弹、爆炸成型穿甲战斗部 (EFP) 弹药。PBXC-19 与之类似, 粘结剂使用的是 EVA。PATHX 系列配方组成均为 CL-20/Estane, 区别在于 CL-20 含量不同。PAX-11、PAX-29 则主要是 CL-20 基含铝炸药, 主要用于多用途反装甲战斗部和高爆战斗部。DLE-C038 则是一种 CL-20 含量为 90% 的浇注炸药, 该炸药安全性能、力学性能良好, 在高爆、破片杀伤战斗部中具有重要的应用前景。总体上看, 当前 CL-20 基炸药以压装型为主, 与 HMX 基炸药相比, 均体现了较为突出的高能优势, 应用方向主要为聚能破甲、杀爆战斗部等。目前, 限制 CL-20 在武器炸药中广泛应用的首先是其成本和感度过高, 其次是 CL-20 的转晶、力学性能等问题。围绕这些问题, 许多实验室仍在开展研究^[5-7], 以全面推动 CL-20 作为新一代高能炸药在武器中的应用。

表 1 部分 CL-20 基炸药配方及其性能^[2-4]

Table 1 Some CL-20 based formulations and their performance^[2-4]

code	formulation	density/g · cm ⁻³	detonation velocity/m · s ⁻¹
LX-19	CL-20/Estane=95/5	1.959	9440
RX-39-AB	CL-20/Estane=95/5	1.942	9208
PBXC-19	CL-20/EVA=95/5	1.896	9083
PBXCL-1	CL-20/PVB=97/3	1.921	9201
PBXCLT-1	49%~70% CL-20/48%~27% HNJ/3% PVB	1.906	8384~9102
PATHX-1	88%~95% CL-20/Estane	1.868~1.944	8890~9370
PATHX-2	92%~95% CL-20/Estane	1.869~1.923	8850~9220
PATHX-3	85%~94% CL-20/Estane	1.871~1.958	8910~9500
PAX-11	CL-20/Al/CAB/BDNPF/A=79/15/2.4/3.6	2.023	8870
PAX-29	CL-20/Al/CAB/BDNPF/A=77/15/3.2/4.8	2.002	8770
DLE-C038	CL-20/HTPB+PL-1=90/10	1.821	8730

TNAZ 熔点为 101 °C, 爆速为 8830 m · s⁻¹, 爆热弹测试其能量输出为 1.5 倍 TNT 当量。尽管能量水平较 HMX 低, 但由于具有低熔点特性, 且具有良好的氧平衡、生成热、较低的感度和较好的热稳定性, 同时没有吸湿性问题, 可用于熔铸炸药中替代 TNT, 使炸药能量水平大幅提升^[8-9]。以 TNAZ 替代 B 炸药中的 TNT, 炸药的爆速和爆压可提升 30%~40%。美国陆军研制了六种基于 TNAZ 的炸药配方 RX-22-AT/AU/AV/AW/AX/AY^[10], 配方中所使用粘结剂有 Viton A,

Estane 和 Fluore, 这些炸药成型性能良好, 可以满足武器弹药的空心装药需求。澳大利亚研究了 TNAZ 替代 B 炸药中 TNT 的配方 ARX-4007 (RDX/TNAZ = 60/40), 尽管爆速和爆压分别提升至 8660 m · s⁻¹ 和 33.0 GPa, 但 TNAZ 的蒸气压高, 易挥发仍然是一个问题^[11], 此外, TNAZ 成本偏高, 且在固化时体积收缩率较大, 易形成孔隙^[12], 这些问题限制了 TNAZ 在混合炸药中的应用。尽管如此, TNAZ 的综合性能较好, 在解决成本问题之后, 可考虑用于导弹战斗部之中。

与 TNAZ 类似, DNTF 也可在熔铸炸药中替代 TNT 作为高能液相载体^[13], DNTF 爆速为 $9250 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 熔点为 $110 \text{ }^\circ\text{C}$, 热安定性和相容性良好, DNTF 基熔铸炸药可满足多种武器装药的高威力要求^[14]。目前, DNTF 基炸药研究正在大量开展, 俄罗斯已将 DNTF 应用于武器型号。An 等^[15]研究了 DNTF/GAP 炸药配方 (DNTF/GAP/TDI=85/11/4), 用于爆炸网络, 撞击感度与 PBXN-5 相当, 摩擦感度比 PBXN-5 显著降低。目前, 限制 DNTF 在炸药中应用的主要问题一是感度偏高, 需要开展降感技术研究; 二是其熔点偏高, 不利于传统熔铸工艺使用, 尽管可以通过与 TNT 等其它载体组成低共熔物来降低熔点, 但这可能带来渗出物问题。

TKX-50 是近年来合成出的一种四唑含能离子盐^[16], 属于具有代表性的新型高能量密度材料, 理论计算爆速为 $9698 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 爆压 42.4 GPa 。同时, TKX-50 感度较低, 是 RDX 的理想替代物。尽管目前 TKX-50 的研究多数集中在合成优化阶段, 但其应用于高能炸药的探索已逐步开展。Yu 等采用分子动力学模拟方法, 研究了四种不同高聚物对 TKX-50 基炸药的性能影响^[17], 通过综合对比力学性能、成型性能、晶面结合能, 认为聚乙二醇 (PEG) 是 TKX-50 理想的粘结剂体系。Klapötke 等^[18]采用水下爆炸试验研究了 TKX-50 及其它炸药为基的装药爆轰性能, 发现 TKX-50 基炸药相对密度较低, 其在水下的气泡能与冲击波能偏低, 不及 RDX、HMX 和 PETN, 如图 2 所示。在相容性方面, Huang 等^[19]研究了 TKX-50 与常见组分的相容性, 发现 TKX-50 与六硝基乙烷 (HNE) 相容性

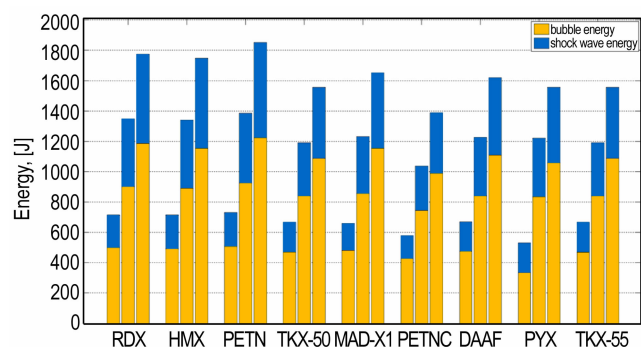


图 1 TKX-50 及其它炸药的水下爆炸气泡能、冲击波能 (装药质量为 0.2 g , 0.5 g , 0.7 g)^[18]

Fig. 1 Bubble energy and shock wave energy of TKX-50 and other explosives by underwater explosion (mass of charge: 0.2 g , 0.5 g , 0.7 g)^[18]

良好, 与 HMX 相容性适中, 但与 TNT、CL-20、RDX、高氯酸铵 (AP)、Al、缩水甘油叠氮聚醚 (GAP)、端羟基聚丁二烯 (HTPB) 等组分相容性均较差。因此, 尽管 TKX-50 在能量和安全性方面具有较为明显的优势, 但其实测爆轰性能与理论计算值存在一定差距, 且 TKX-50 在混合炸药中的应用需要解决相容性、成型性能以及离子盐的吸湿性等问题。除上述几种高能炸药外, 还有许多新型高能单质炸药正在用于高能化研制探索, 由于炸药能量与安全性往往存在一定矛盾, 在设计时, 需重点关注高能组分引入后的安全性能以及其它性能综合匹配。

2.2 含能粘结剂与增塑剂的应用

尽管粘结剂、增塑剂等炸药配方中所占比例不高, 但其能量特性对炸药的能量水平却有着重要的影响。使用含能的粘结剂、增塑剂, 能够提升炸药能量, 从而可在相同能量水平的配方设计中适当减少炸药组分含量, 有利于对安全性能进行调控, 因而相关研究受到广泛关注。新的含能粘结剂与增塑剂品种不断出现, 且部分已获应用。一般而言, 含能粘结剂或增塑剂分子中具有含能基团, 如硝基 ($-\text{NO}_2$)、硝酰氧基 ($-\text{ONO}_2$)、叠氮基 ($-\text{N}_3$)、氟 (F) 等。多年来, 研究人员陆续开发了聚醚类、聚硝酸酯类、环氧树脂类、聚硫化物类、聚氨酯类等多种含能粘结剂^[12], 如 GAP、硝化后的端羟基聚丁二烯 (NHTPB)、聚-3-硝酸酯甲基-3-甲基氧丁环 Poly (NIMMO)、聚缩水甘油醚硝酸酯 Poly (GLYN)、硝化环糊精聚合物 (Poly-CDN) 等。而用于炸药的含能增塑剂主要包括双 (2,2-二硝基丙基) 缩甲/乙醛 (BDNPF/A), N-丁基硝氧乙基硝酸胺 (BuNENA) 等。

世界各国研制了许多含有含能粘结剂的炸药, 如法国的 B3003、B3017、B3021、B3103、B3110; 英国的 CPX 412、CPX 413、CPX 450、CPX 458、CPX 459、CPX 460; 瑞典的 GD-5; 日本的 PBXK-C3101、PBXK-C3102 等^[20]。表 2 列出了部分含能粘结剂、增塑剂的配方组成及性能, 其中部分炸药已经获得实际应用。含能粘结剂或增塑剂的使用能够改善混合炸药能量输出, 以 PBXN-111 (RX/Al/AP/HTPB=20/25/43/12) 为例, 如将 GAP 替代 HTPB, 爆热值能提升约 1400 kJ/kg 。Anderson 等^[21]研究发现对于典型含铝炸药而言, 使用含能粘结剂替代惰性粘结剂, 炸药的氧平衡获得改善, 爆速提升 10% 以上, 同时铝的反应活性大幅增加。

表 2 采用含能粘结剂、增塑剂的炸药配方^[20]Table 2 Energetic binders and plasticizers based explosive formulations^[20]

code	formulation	density/g · cm ⁻³	detonation velocity/m · s ⁻¹
B 3003	HMX/NC-NG=80/20	1.81	/
B 3017	NTO/EB=74/26	1.75	7780
B 3021	RDX/NTO/EB=25/50/25	1.77	8100
B 3103	HMX/Al/EB=51/19/30	/	7810
CPX 412	NTO/HMX/PolyNIMMO/K10=50/30/10/10	1.66	7200
CPX 413	NTO/HMX/PolyNIMMO/K10=45/35/10/10	1.70	8150
CPX 450	NTO/HMX/Al/PolyNIMMO/K10=40//20/20/10/10	1.85	7762
CPX 458	NTO/HMX/Al/PolyNIMMO/K10=30//30/20/10/10	1.85	7676
CPX 459	NTO/HMX/Al/PolyNIMMO/K10=20//40/20/10/10	1.86	7761
CPX 460	NTO/HMX/Al/PolyNIMMO/K10=27.5//27.5/25/10/10	1.88	6420
GD-5	NTO/HMX/PGA/BDNPA/F=40/43/7/10	/	8035
PBXK-C3101	CL-20/EB=81/19	1.83	8650
PBXK-C3102	CL-20/EB=82/18	1.84	8700

Note: EB is energetic binder.

在炸药应用中,部分含能粘结剂、添加剂存在相容性、力学性能问题,需通过研究进行改善,且由于含能基团的存在,能量的提升伴随着安全性能一定程度的下降,在设计时需要进行权衡。近年来,含能粘结剂^[22-23]、含能增塑剂^[24-25]的研究仍在持续开展,这些含能组分与炸药相容性较好,可通过高分子氢键等与炸药形成一定相互作用,可对炸药形成良好包覆,在降低炸药感度、改善力学性能等方面具有良好效果。

2.3 高活性金属的应用

高活性金属具有高的燃烧热值,将其用于混合炸药,能够显著提升武器弹药对目标的毁伤威力。早期发展的燃料空气炸药(FAE)中主要含有可燃液体和高活性金属粉(Al、Mg),在威力范围内转化的毁伤能量要远高于传统炸药。近年来,同样应用高活性金属的温压炸药(TBX)受到广泛关注,温压炸药已成为标志性的新型武器之一^[26-28]。温压炸药富含高活性金属,兼具高能炸药和FAE的特点,具有较高的总冲量和较长的作用时间,能够同时产生高温高压、耗氧窒息等毁伤效果。温压炸药中一般包括高能炸药、可燃金属颗粒、氧化剂、粘结剂等成分,其中,燃料是决定和影响温压炸药性能的关键成分,通常为可燃性金属或合金粉(如Al、Al-Mg、Al-B、Ti-B等)。研究表明,温压炸药的组成、作用过程和爆炸功效都明显区别于一般含铝炸药^[29]。一般含铝炸药的中铝含量不超过20%,这是因为其中的铝主要与炸药爆炸的气体产物反应,需要与炸药之间保持一定的化学平衡。而温压炸药中铝的含量通常更高,铝主要与目标周围空气中的氧气反应,由高温产物进行二次点火,温度效果高。

典型的温压炸药包括美国研制的PBXIH-18(含HMX、Al、己二酸二辛酯(DOA))和PAX-3(含HMX、Al、BDNPA/F、CAB)、法国研制的B2514(含RDX、Al、AP、HTPB)、瑞士研制的DPX-6(含HMX、Al、Hytemp、DOA)等。其中,PBXIH-18已通过美国海军认证,具有6000加仑的放大生产线,并在LAW M72-ASM肩射武器中得到应用,对于打击地下、隧道目标具有很好的毁伤威力^[30]。PAX-3则用于先进多功能武器,B2514对有限空间目标极具毁伤性的高压脉冲效果,DPX-6则已用于缩小口径反结构弹药。温压炸药设计时,不能只从化学反应热力学考虑,而应基于炸药爆炸化学反应的动力学特性进行设计^[31]。温压炸药中宜使用含不同颗粒尺寸分布的金属粉,从而有利于发生多重反应。此外,温压炸药中的金属颗粒应该具有合适的反应动力学特征,这要求金属颗粒容易被高温气体产物点燃,具有合适的燃烧反应速度,并具有一定抗氧化性。因此,温压炸药中一般需要对金属粉进行包覆预处理,以提升抗氧化能力。同时,改善可燃性金属的表面性质,或通过增加颗粒的比表面积,能够提高金属颗粒的反应活性^[32]。如采用反应性的金属间化合物作为燃料颗粒,通过反应性组分之间的化学反应,释放大量的化学能,可进一步有效提升温压炸药输出性能。

增爆炸药(EBX)由于具有金属驱动和高爆两个效果,也被称为组合效果炸药。通常由高能炸药、金属燃料(如Al)和粘结剂组成,其反应包括三个阶段:高能炸药爆炸、爆炸气体产物无氧膨胀、燃料及爆炸气体产物燃烧反应^[33]。在整个过程中,燃料及爆炸气体产物

可以持续与空气中的氧气发生反应,从而大幅度增强爆炸冲击效果^[34](如图3)。欧洲含能材料公司(EURENCO)研制的B2258A(含RDX、AP、Al、HTPB)、B3108A(含HMX、Al、聚酯)就是两个典型的增爆炸药,已经成为增强爆炸导弹战斗部的主装药。美国匹克汀尼兵工厂研制的PAX-29(15% Al、77% CL-20、3.2% CAB、4.8% BDNPA/F)、PAX-30(77% HMX、15% Al、8% 粘结剂)和PAX-42(77% RDX、15% Al、8% 粘结剂)也是典型的压装型增爆炸药,其金属驱动能力相当于或大于LX-14,显示出良好的增强爆炸效果,不足之处在于这三个炸药的安全性能还有待改善。研究人员优化了炸药的制备工艺,获得了感度明显改善,而爆炸性能得以保持的炸药PAX-50。通过工艺处理保持Al粉的高活性,所获得的具有组合效果的炸药可应用于多功能战斗部以及具有高爆性能要求的战斗部^[35]。

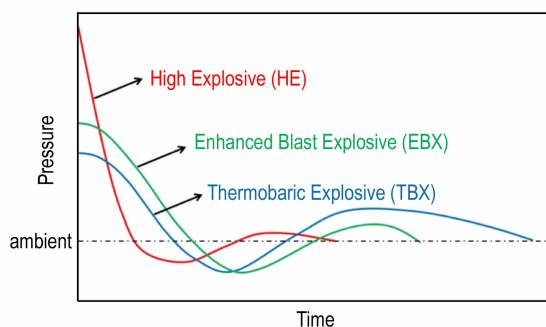


图3 普通高能炸药、温压炸药及增爆炸药爆轰的压力-时间曲线^[34]

Fig. 3 Pressure-time curves of high explosive, TBX and EBX detonations^[34]

3 炸药配方的钝感化设计

3.1 低感含能材料的应用

鉴于现代化战争中武器弹药意外爆炸将导致的灾难性后果,弹药安全性受到广泛关注。而炸药本身的安全优劣是影响弹药系统安全性的最根本、最重要因素。多年来,安全性能提升(钝感化设计)一直是混合炸药设计的核心主题,美国海军在20世纪80年代提出钝感弹药(IM)的概念并取得了长期发展^[36]。由于混合炸药的安全性能取决于炸药组分及结构,因此,在配方设计时,选择本质上不敏感的含能组分,如DNAN、NTO、三氨基三硝基苯(TATB)、1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯(FOX-7)、2,6-二氨基-3,5-二硝基吡

啉-1-氧化物(LLM-105)、3,3'-二氨基-4,4'-氧化偶氮吡啶(DAAF)、二乙二醇二硝酸酯(DEGDN)等^[37],是降低炸药感度的最有效途径之一。

在熔铸炸药钝感化方面,由于DNAN和NTO具有优异的安全性能,是TNT和RDX的理想替代物,有利于实现炸药的IM特性,因此被广泛研究,最为典型的配方如IMX-101(DNAN/NQ/NTO=40/40/20)和IMX-104(DNAN/NTO/RDX=31.7/53/15.3)^[38],满足IM要求,可用于替代B炸药,已实现规模化生产和应用。DNAN基熔铸炸药的优点在于其机械感度和冲击波感度均较低,已研制含DNAN的炸药包括PAX-21、PAX-24、PAX-25、PAX-28、PAX-40、ARX-4027等。除DNAN外,熔铸炸药中TNT的另一潜力替代物N-丙基硝基胍(PRNQ)则是一种高能钝感炸药,具有优良的安全性能和能量输出^[39],应用前景较好。当前,DNAN和PRNQ在应用中的一个缺点在于其不可逆热膨胀较高,分别为15%和11%,而TNT的不可逆热膨胀只有3.3%,因此,如何解决不可逆热膨胀是DNAN和PRNQ应用的一项关键问题。另一方面,NTO作为目前钝感弹药中使用最为广泛的炸药之一,主要应用于熔铸和浇注炸药。代表性的NTO基熔铸炸药包括用于MK-82航弹及FMU-139炮弹装填的AFX-645(TNT/NTO/Al/I-800)、TNTO-I~TNTO-IV系列(TNT/NTO/Al/石蜡),此外,NTO与RDX或HMX复配的熔铸炸药仍在持续研究^[40]。NTO基浇注炸药主要有PBXW-121~PBXW-126系列(NTO/RDX/Al/AP/HTPB),B3017(NTO/含能粘结剂)、B3021(NTO/RDX/含能粘结剂)、DLE-C054(NTO/RDX/HTPB)等,这些炸药安全性能优异,有望应用于大弹药装药^[41]。

除DNAN、NTO外,近年来FOX-7基混合炸药也逐渐成为钝感弹药领域的研究热点^[42],瑞典研制了如FOF-2~FOF-5的系列FOX-7基混合炸药,能量与B炸药相当,表现出明显的IM安全特性。FOX-7具有与RDX相当的能量,以及与TNT相当的感度。含蜡FOX-7炸药(FOX-7/W=97.8/2.2)与B炸药相比,爆轰性能略有提升,装药产生聚能射流和侵蚀能力更佳,而传爆药(FOX-7/EVA=95/5)能够通过快烤、慢烤等IM试验考核^[43]。整体上看,FOX-7大规模应用于IM的前景良好。其它不敏感炸药组分应用方面,TATB最为钝感,但由于成本较高、临界起爆直径大等原因,主要用于核武器炸药如LX-17、PBX-9502以及敏感高能炸药的降感材料。近年来,LLM-105^[44]、

DAAF^[45]等不敏感炸药由于性能优异,其配方设计工作也开展较多。此外,含能离子液体应用于混合炸药的钝感化设计也逐渐受到关注,Adams等近期研发了一种氨基胍-三氟乙酸胍盐的含能离子液体GAGTFA^[46],在熔铸炸药中使用性能好,不仅具有含能特性,还具有良好的降感效果,已用于两种新炸药PAX-53 (HMX/GAGTFA) 和 PAX-54 (HMX/Al/GAGTFA),安全性能良好。随着新型不敏感单质炸药合成的持续发展,混合炸药的钝感化设计在组分上具有越来越多的选择,有望持续推动钝感弹药的发展与应用。

3.2 高效降感技术的应用

除选用不敏感含能组分外,对炸药进行降感也是炸药钝感化的重要技术途径之一。根据热点理论,炸药的爆炸主要取决于热点的产生和传播的概率。为降低热点产生概率,应设法消除炸药晶体缺陷,提高晶体的完整性,减少外力作用下产生的形变或应力集中,如改善炸药晶体品质,或采用具有缓冲能力的物质对炸药表面进行包覆等手段。在热点产生后,为降低其传播概率,需添加能控制、降低炸药燃速和抑制燃烧转爆轰发展的物质,难度相对较大。因此,当前炸药的高效降感技术主要是基于降低热点的生成,主要包括炸药晶体品质改善、共晶、纳米化、表面包覆等几个方面。

炸药晶体品质对感度影响明显,可采用重结晶方式对炸药晶体品质进行改善,提高炸药晶体纯度、密度,减少晶体杂质、缺陷和棱角,使晶体表面光滑化、球形化等。最为典型的是高能硝胺炸药RDX、HMX、CL-20的重结晶降感^[47-49],除撞击、摩擦感度外,晶体品质的改善对冲击波感度的降低作用尤为显著。法国火炸药公司(SNPE)和EURENCO大量将降感后的RDX (I-RDX、RS-RDX) 用于浇注、压装炸药,如B2258A、B2265A、B2268A等,安全性能得到大幅改善^[11]。除重结晶外,共晶也是降低炸药感度的手段之一^[50],通过两种共晶组分的选取,能够在一定程度上对炸药能量和安全性的矛盾进行调和,但由于共晶炸药目前尚未实现大规模制备,因此尚未得到广泛应用。另一方面,纳米结构由于能够减小炸药晶体中的孔隙和孔洞,因此对降感有利,炸药纳米化后机械感度可获得大幅降低^[51]。为结合配方应用,Qiu等^[52-53]开发了喷雾干燥法制备纳米级降感混合炸药的新技术,可一步制备均匀性好、包覆效果佳的系列RDX基、HMX基纳米炸药复合物,机械感度明显降低,冲击波感度也能降低10%。然而,具有纳米结构的混合炸药制备也

存在药柱压制密度不够高、纳米结构的不可逆热膨胀明显、纳米炸药容易转晶等问题,需进一步优化改善。

对敏感炸药颗粒进行惰性物质包覆是降低其感度普遍采取的措施之一。高分子粘结剂本身具有一定包覆降感效果,其它降感剂主要包括蜡类、石墨类、硬脂酸、含能降感剂等。这些惰性物质在配方中的引入,能够起到吸热、冲击缓冲、滑移等作用,从而实现炸药感度的降低。蜡类物质具有熔点低、吸热性好、硬度小等优点,对炸药的降感效果最为显著,在混合炸药中应用十分广泛。近期,美国陆军将牌号为Indramic 800N、180-W和5999A的三种微晶蜡用于B炸药降感,并用于手榴弹装药,安全性能优异,炸药的脆性、易缩孔、渗油等问题也获得了一些改善^[54]。石墨类降感剂由于具有层状结构,主要通过润滑、导热实现降感,除常用的普通石墨外,其它一些功能碳材料诸如膨胀石墨、石墨烯、碳纳米管、氧化石墨烯等也在炸药中获得应用^[55]。

从混合炸药能量角度考虑,石蜡、石墨、高聚物等降感剂属于惰性物质,大量使用会导致炸药能量降低。为此,研究人员开展了系列含能降感剂的包覆降感研究,主要是采用低感度的炸药包覆于敏感炸药的表面,通过形成“核壳型”结构,实现感度降低的同时,尽可能维持炸药的高能量水平。如采用钝感炸药TATB包覆CL-20^[5]、HMX^[56];采用NTO包覆HMX^[57],采用TNT包覆HMX^[58]、RDX^[59]等,均可实现较好的降感效果。值得注意的是,包覆层的均匀性、致密程度和界面孔隙对炸药感度有重要影响。即使形成了较好的核壳型包覆结构,但由于包覆层不够致密、颗粒界面存在大量孔隙,在外界冲击下容易形成热点,也达不到理想的降感效果,如Nandi等采用TATB包覆HMX后,撞击感度反而有所升高^[60]。从现有的包覆降感策略来看^[61](图4),核壳型包覆结构的构建,降感效果明显优于普通机械混合,而通过对炸药进行一定表面修饰再包覆,或使用少量高聚物对包覆层进行固化、孔隙填充^[5],能够有效改善炸药表面包覆致密程度、减少包覆层颗粒间孔隙,提升降感效果。若采用高分子单体原位聚合包覆的方法,可使得包覆层致密程度和机械强度进一步增加,因而使用较少含量的高聚物即可实现高效降感^[62-63]。此外,将惰性材料通过内掺杂、外包覆相结合的形式引入,通过精细调控炸药颗粒内部组分分布和微结构,则可实现多层次降感,将其应用于CL-20基高能配方,可实现爆速约 $9100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,撞击、摩擦感度为0的良好效果^[61]。总之,采用物理手段对

炸药进行预先降感处理,是混合炸药钝感化设计十分关键、有效的技术途径之一,基于表面包覆的降感关键在于所选惰性材料是否具有吸热、缓冲、滑移等作用,炸药表面的包覆度是否足够高,包覆后界面孔隙是否足够少。

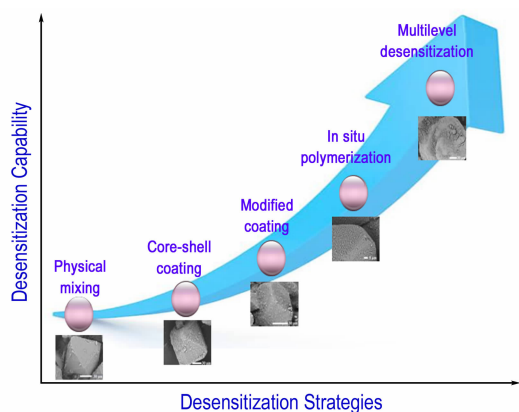


图4 不同炸药包覆降感策略的降感能力^[61]

Fig. 4 Desensitization capability for explosives of different desensitization strategies via coating^[61]

3.3 抗力热环境材料与微结构的应用

超高速侵彻弹药是打击加固防护目标的最有效手段。目前,主要军事强国都积极研发高速、超高速飞行器平台及侵彻武器,由于飞行弹道处于临近空间,高超声速巡航导弹、侵彻战斗部装药需承受严苛的温度环境和力学环境。一方面,炸药随着温度变化而产生温度梯度,由于装药各部位不均匀热膨胀而产生热应力,可能会导致装药损伤和开裂;另一方面,装药的力学性能还要面对战斗部高低频振动、过载等考验。对混合炸药的断裂损伤机制研究结果表明^[64],界面脱粘是混合炸药损伤的早期和主要破坏模式,会诱导炸药发生拉伸断裂,最终会以拉应力的形式产生损伤和裂纹。近年来,混合炸药在作用力加载下的损伤和破坏研究受到越来越多的关注^[65]。从炸药设计角度,通过添加辅助材料或对炸药内部微结构进行调控,提高导热和炸药本身力学性能,是提高装药力热环境作用下承载力的重要途径。

针对超高速武器弹药在飞行过程中所处的复杂力热环境,从材料复合化改性入手,在炸药基体不变的情况下,通过添加高导热填料,是提升炸药导热性能最简单和快捷路线。常用的金属、无机非金属及碳材料等导热填料中,碳系材料,特别是碳纳米材料导热系数高、比表面积大,是复合材料中最有潜力的一类导热填料。例如,对于添加石墨烯的炸药配方而言,炸药导热

系数随着石墨烯含量的增加而增大,但受制于界面声子散射,导热系数并未出现大幅度的提升^[66]。近年来,新型导热填料石墨烯纳米片(GNPs)逐渐成为复合材料导热性能研究的热点,其导热增强效果要高于单壁碳纳米管、石墨烯等碳系材料,将GNPs应用于混合炸药中,易相互搭建形成导热通路,最终可形成三维导热网络,大幅度提升炸药导热性能,数值计算结果表明,混合炸药内部的温度梯度及热应力可随着导热系数的提高有效降低^[67]。另一方面,炸药的力学性能则取决于单质炸药本身性质、粘结剂性质及界面的作用,在炸药和粘结剂确定的情况下,大量研究表明,界面作用对力学性能具有重要影响。可采用一些表面改性手段,改善炸药内部微结构,如加入键合剂,增强炸药与粘结剂界面相互作用,提升力学性能^[68],增强炸药在超高速飞行过程中的环境适应性,提高武器可靠性和使用寿命。

超高速武器侵彻过程中,炸药受长时间挤压、摩擦、剪切等持续载荷作用,同样涉及及高强的力热环境,要求炸药配方具有良好的抗过载性能。抗过载炸药需要具有较低的感受和良好的高速冲击动力学性能,在冲击载荷下不易产生损伤。针对侵彻武器的应用需求,研究人员先后开发了PBXN-109、AFX-757、PBXIH-135、PBXW-125、PAX-3、PAX-28等系列抗过载炸药。其中,AFX-757(RDX/AP/HTPB/DOA/其它=25/30/33/4.44/6.65/0.91)具有较高的爆炸能量,安全性满足IM要求,用于BLU-113战斗部装药。PBXIH-135(HMX/Al/HTPB=45/35/20)属于浇注成型炸药,具有良好的爆炸性能、耐受性能和低易损性,在侵彻中体现了良好的抗过载性能^[69]。炸药抗过载设计时,需要通过材料或微结构设计,尽可能实现钝感特性,尤其是对高速撞击过载钝感,才能在侵彻目标时不发生早炸或爆燃。总体而言,针对超高速侵彻武器飞行过程中的复杂力热环境和侵彻过程中的高速冲击载荷,可通过在配方中引入抗力热环境的材料或微结构,改善混合炸药的导热性能、力学性能和钝感特性,实现武器弹药的强环境适应性和抗过载能力,确保武器系统的可靠性和毁伤效力。

4 结论

混合炸药的设计一直是含能材料应用的核心环节,其研究内涵十分丰富。高能化和钝感化仍然是当前混合炸药研制的主线,基于当前武器弹药的性能需求,新的高性能炸药配方不断涌现,综合性能也不断得

到优化。笔者认为,混合炸药设计未来发展趋势主要可概括为以下几个方面:

(1) 高能量密度化。炸药能量输出的提升强烈依赖于新型单质炸药的发展,因此炸药的高能量密度化将侧重新型高能炸药的应用,同时,通过功能化的设计如高活性金属的利用,研制温压炸药、组合效果炸药等,也是实现高能化的另一重要途径。

(2) 全面钝感化。炸药安全性能的提升在未来依然是首要研究方向,通过开发新型降感剂和先进的材料处理与包覆技术,研制满足钝感弹药要求的炸药,并将其全面替代现有武器弹药中的炸药,提升武器系统的本质安全性。

(3) 更强环境适应性。面向新的复杂作战环境,如超高速侵彻弹药的高速飞行和侵彻过载,未来炸药将更多考虑在不同外界力、热等冲击作用下体现出更好的综合环境适应性,以确保炸药在飞行和侵彻时的安全性和可靠性。

(4) 绿色化。尽管当前炸药的绿色化报道并不多,但其将成为未来混合炸药研究的一个新方向,设计时材料的选择上将更多考虑低毒性、易于降解、环保等,同时制备工艺上逐步实现绿色化,并致力于开发废炸药的回收和再利用。

(5) 混合理论设计将进一步加强。相比于传统研制方式,未来的配方设计更加注重理论设计和性能预估,强调针对性的性能提升技术途径的选择与优化,将传统的试错法研究模式向科学设计、定制式过渡,从而大量减少配方正交试验环节和性能测试,缩短研制周期并大幅降低研制成本。

参考文献:

- [1] Nouguez B, Eck G. From synthesis to formulation and final application[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2016, 41(3): 548-554.
- [2] Simpson R L, Urtiew P A, Ornellas D L, et al. CL-20 performance exceeds that of HMX and its sensitivity is moderate[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1997, 22(5): 249-255.
- [3] Nair U R, Sivabalan R, Gore G M, et al. Hexanitrohexaazaisowurtzitane (CL-20) and CL-20-based formulations (review)[J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2005, 41(2): 121-132.
- [4] Ordzhonikidze O, Pivkina A, Frolov Y, et al. Comparative study of HMX and CL-20: thermal analysis, combustion and interaction with aluminium[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2011, 105(2): 529-534.
- [5] Yang Z, Li J, Huang B, et al. Preparation and properties study of core-shell CL-20/TATB composites[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2014, 39(1): 51-58.
- [6] Yu L, Jiang X, Guo X, et al. Effects of binders and graphite on the sensitivity of ϵ -HNIW[J]. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 2013, 112(3): 1343-1349.
- [7] Zhang P, Guo X Y, Zhang J Y, et al. Application of liquid paraffin in castable CL-20-based PBX[J]. *Journal of Energetic Materials*, 2014, 32(4): 278-292.
- [8] Behrens Jr R, Bulusu S. Thermal decomposition studies of a new, gem-dinitroalkyl nitramine 1, 3, 3-trinitroazetidene (TNAZ)[J]. *Defence Science Journal*, 2013, 46(5): 361-369.
- [9] Veals J D, Thompson D L. Thermal decomposition of 1, 3, 3-trinitroazetidene (TNAZ): A density functional theory and ab initio study[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2014, 140(15): 154306.
- [10] Simpson R L, Garza R G, Foltz M F, et al. Characterization of TNAZ[R]. *Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore, CA*, 1994. UCRL-ID-119672.
- [11] Nair U R, Asthana S N, Rao A S, et al. Advances in high energy materials[J]. *Defence Science Journal*, 2010, 60(2): 137.
- [12] Agrawal J P. Some new high energy materials and their formulations for specialized applications[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2005, 30(5): 316-328.
- [13] Liu N, Zeman S, Shu Y, et al. Comparative study of melting points of 3, 4-bis(3-nitrofurazan-4-yl) furoxan (DNTF)/1, 3, 3-trinitroazetidene (TNAZ) eutectic compositions using molecular dynamic simulations[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(64): 59141-59149.
- [14] Sinditskii V P, Burzhava A V, Sheremetev A B, et al. Thermal and combustion properties of 3, 4-bis(3-nitrofurazan-4-yl) furoxan (DNTF)[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2012, 37(5): 575-580.
- [15] An C, Wen X, Wang J, 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): 397-410.
- [16] Fischer N, Fischer D, Klapötke T M, et al. Pushing the limits of energetic materials-the synthesis and characterization of dihydroxylammonium 5, 5'-bistetrazole-1, 1'-diolate[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, 22(38): 20418-20422.
- [17] Yu Y, Chen S, Li X, et al. Molecular dynamics simulations for 5, 5'-bistetrazole-1, 1'-diolate (TKX-50) and its PBXs[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(24): 20034-20041.
- [18] Klapötke T M, Witkowski T G, Wilk Z, et al. Determination of the initiating capability of detonators containing TKX-50, MAD-X1, PETNC, DAAF, RDX, HMX or PETN as a base charge, by underwater explosion test[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2016, 41(1): 92-97.
- [19] Huang H, Shi Y, Yang J, et al. Compatibility study of dihydroxylammonium 5, 5'-bistetrazole-1, 1'-diolate (TKX-50) with some energetic materials and inert materials[J]. *Journal of Energetic Materials*, 2015, 33(1): 66-72.
- [20] Provatas A. Energetic polymers and plasticisers for explosive formulations-A review of recent advances[R]. *Defence science and technology organization*, Melbourne, Australia, 2000.
- [21] Anderson P E, Cook P, Davis A, et al. The effect of binder systems on early aluminum reaction in detonations[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2013, 38(4): 486-494.
- [22] Bellan A B, Hafner S, Hartdegen V A, et al. Polyurethanes based on 2, 2-dinitropropane-1, 3-diol and 2, 2-bis(azidomethyl) propane-1, 3-diol as potential energetic binders[J]. *Journal*

- of *Applied Polymer Science*, 2016, 133(40): 43991.
- [23] Shee S K, Reddy T S, Banerjee S, et al. Poly (2-methyl-5-vinyl tetrazole)-poly (3-nitratomethyl-3-methyl oxetane) blend: an insensitive energetic binder for propellant and explosive formulations[J]. *Journal of Polymer Materials*, 2015, 32(4): 461.
- [24] Ma M, Shen Y, Kwon Y, et al. Reactive energetic plasticizers for energetic polyurethane binders prepared via simultaneous hydrogen azide-alkyne cycloaddition and polyurethane reaction[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2016, 41(4): 746–756.
- [25] Tang Y, Shreeve J M. Nitroxy/azido-functionalized triazoles as potential energetic plasticizers[J]. *Chemistry-A European Journal*, 2015, 21(19): 7285–7291.
- [26] Simic D, Popovic M, Sirovatka R, et al. Influence of cast composite thermobaric explosive compositions on air shock wave parameters[J]. *Scientific Technical Review*, 2013, 63(2): 63–69.
- [27] Wei X, Wu X. Experimental study of the explosion of aluminized explosives in air[J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2016, 13(1): 117–134.
- [28] Xing X L, Zhao S X, Wang Z Y, et al. Discussions on thermobaric explosives (TBXs)[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2014, 39(1): 14–17.
- [29] Mohamed A K, Mostafa H E, Elbasuney S. Nanoscopic fuel-rich thermobaric formulations: chemical composition optimization and sustained secondary combustion shock wave modulation[J]. *Journal of hazardous materials*, 2016, 301: 492–503.
- [30] Lotspeich E. Manufacturing process technology for explosive PBXIH-18[C]//2016 Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium, Nashville, USA, 2016, 18806.
- [31] 王晓峰, 冯晓军. 温压炸药设计原则探讨[J]. *含能材料*, 2016, 24(5): 418–420.
WANG Xiao-feng, FENG Xiao-jun. Discussion on the design principle for thermobaric explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(5): 418–420.
- [32] Elitzur S, Rosenband V, Gany A. Study of hydrogen production and storage based on aluminum-water reaction[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(12): 6328–6334.
- [33] Cooper M A, Baer M R, Schmitt R G, et al. Understanding enhanced blast explosives: a multi-scale challenge[C]//19th Military Aspects of Blast and Shock, Alberta, Canada, 2006.
- [34] Trzciński W A, Maiz L. Thermobaric and enhanced blast explosives-properties and testing methods[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2015, 40(5): 632–644.
- [35] Türker L. Thermobaric and enhanced blast explosives (TBX and EBX)[J]. *Defence Technology*, 2016, 12: 423–445.
- [36] Koch E C. Insensitive munitions[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2016, 41(3): 407.
- [37] Powell I J. Insensitive munitions-design principles and technology developments[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2016, 41(3): 409–413.
- [38] Cuddy M F, Poda A R, Chappell M A. Estimations of vapor pressures by thermogravimetric analysis of the insensitive munitions IMX-101, IMX-104, and individual components[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2014, 39(2): 236–242.
- [39] Bukowski E. The path forward for aluminized PRNQ formulations [C]//2016 Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium, Nashville, USA, 2016, 18805.
- [40] Johansen O. Insensitive munitions-development and qualification of new melt-cast formulations[C]//2016 Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium, Nashville, USA, 2016, 18761.
- [41] Vijayalakshmi R, Radhakrishnan S, Shitole P, et al. Spherical 3-nitro-1, 2, 4-triazol-5-one (NTO) based melt-cast compositions: heralding a new era of shock insensitive energetic materials[J]. *RSC Advances*, 2015, 5(123): 101647–101655.
- [42] Trzciński W, Belaada A. 1, 1-Diamino-2, 2-dinitroethene (DADNE, FOX-7)-properties and formulations (a review)[J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2016, 13(2): 527–544.
- [43] Daniel M A, Davies P J, Lochert I J, FOX-7 for insensitive boosters[R], DSTO-TR-2449, *Weapons System Division, Defense Science and Technology Organization*, Edinburgh, Australia, 2010.
- [44] Vitello P, Fried L, Lorenz K T, et al. Chemistry based modeling of LLM-105 explosives[R]. Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore, CA, 2015. LLNL-CONF-669912.
- [45] Koch E C. Insensitive High explosives II: 3, 3'-diamino-4, 4'-azoxyfurazan (DAAF)[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2016, 41(3): 526–538.
- [46] Adams M. Formulation and testing of GAGTFA based explosives [C]//2016 Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium, Nashville, USA, 2016, 18813.
- [47] vander Heijden A, Creighton Y, Marino E, et al. Energetic materials: crystallization, characterization and insensitive plastic bonded explosives[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2008, 33(1): 25–32.
- [48] Urbelis J H, Swift J A. Solvent effects on the growth morphology and phase purity of CL-20[J]. *Crystal Growth & Design*, 2014, 14(4): 1642–1649.
- [49] Ghosh M, Banerjee S, Khan M, et al. Understanding metastable phase transformation during crystallization of RDX, HMX and CL-20: experimental and DFT studies[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2016, 18(34): 23554–23571.
- [50] Landenberger K B, Bolton O, Matzger A J. Energetic-energetic cocrystals of diacetone diperoxide (DADP): dramatic and divergent sensitivity modifications via cocrystallization[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2015, 137(15): 5074–5079.
- [51] Guo X, Ouyang G, Liu J, et al. Massive preparation of reduced-sensitivity nano CL-20 and its Characterization[J]. *Journal of Energetic Materials*, 2015, 33(1): 24–33.
- [52] Qiu H, Stepanov V, Di Stasio A R, et al. RDX-based nanocomposite microparticles for significantly reduced shock sensitivity[J]. *Journal of hazardous materials*, 2011, 185(1): 489–493.
- [53] Qiu H, Stepanov V, Chou T, et al. Single-step production and formulation of HMX nanocrystals[J]. *Powder technology*, 2012, 226: 235–238.
- [54] Donegan M. Alternate waxes for composition B[C]//2016 Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium, Nashville, USA, 2016, 18794.
- [55] Yan Q L, Gozin M, Zhao F Q, et al. Highly energetic compositions based on functionalized carbon nanomaterials [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(9): 4799–4851.
- [56] Huang B, Hao X, Zhang H, et al. Ultrasonic approach to the synthesis of HMX@TATB core-shell microparticles with improved mechanical sensitivity[J]. *Ultrasonics sonochemistry*, 2014, 21(4): 1349–1357.
- [57] Jung J W, Kim K J. Effect of supersaturation on the morphology of coated surface in coating by solution crystallization[J]. *Industrial*

- & *Engineering Chemistry Research*, 2011, 50(6): 3475–3482.
- [58] An C, Wang J, Xu W, et al. Preparation and properties of HMX coated with a composite of TNT/energetic material[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2010, 35(4): 365–372.
- [59] An C, Li F, Song X, et al. Surface coating of RDX with a composite of TNT and an energetic-polymer and its safety investigation[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2009, 34(5): 400–405.
- [60] Nandi A, Ghosh M, Sutar V, et al. Surface coating of cyclotetramethylenetetranitramine (HMX) crystals with the insensitive high explosive 1, 3, 5-triamino-2, 4, 6-trinitrobenzene (TATB)[J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2012, 9(2): 119–130.
- [61] Yang Z, Ding L, Nie F, New strategies for reducing the mechanical sensitivity of CL-20 with reserved high energy[C]//42nd International Pyrotechnics Society Seminar, Grand Junction, USA, 2016, 43–49.
- [62] Yang Z, Ding L, Wu P, et al. Fabrication of RDX, HMX and CL-20 based microcapsules via in situ polymerization of melamine-formaldehyde resins with reduced sensitivity[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 268: 60–66.
- [63] Zhu Q, Xiao C, Li S, et al. Bioinspired fabrication of insensitive HMX particles with polydopamine coating[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2016, 41(6): 1092–1097.
- [64] Zhou Z, Chen P, Duan Z, et al. Study on fracture behaviour of a polymer-bonded explosive simulat subjected to uniaxial compression using digital image correlation method [J]. *Strain*, 2012, 48(4): 326–332.
- [65] Drodge D R, Williamson D M. Understanding damage in polymer-bonded explosive composites[J]. *Journal of Materials Science*, 2016, 51(2): 668–679.
- [66] Lin C, He G, Liu J, et al. Construction and thermal properties of nano-structured polymer bonded explosives with graphene[J]. *RSC Advances*, 2015, 5(119): 98514–98521.
- [67] He G, Yang Z, Zhou X, et al. Polymer bonded explosives (PBXs) with reduced thermal stress and sensitivity by thermal conductivity enhancement with graphene nanoplatelets [J]. *Composites Science and Technology*, 2016, 131: 22–31.
- [68] 何冠松, 林聪妹, 刘佳辉, 等. TATB 基 PBX 界面粘结改善研究进展[J]. 含能材料, 2016, 24(3): 306–314.
HE Guan-song, LIN Cong-mei, LIU Jia-hui, et al. Review on interfacial bonding improving of TATB-based PBX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(3): 306–314.
- [69] Vadhe P P, Pawar R B, Sinha R K, et al. Cast aluminized explosives (review)[J]. *Combustion, explosion, and Shock waves*, 2008, 44(4): 461–477.

Advances in Design and Research of Composite Explosives

YANG Zhi-jian, LIU Xiao-bo, HE Guan-song, LI Yu-bin, NIE Fu-de

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China)

Abstract: Composite explosives are the final energy source of energetic materials in realizing damage effect of weapons. In this paper, we briefly reviewed the recent advances and development trends in research of composite explosives, the advances of composite explosives aimed at higher energy are elaborated by the application of novel high explosives, energetic binders and plasticizers, and highly active metals, and then those formulations aimed at low sensitivity are introduced by the application of energetic materials inherent with low sensitivity, efficient desensitization technology, materials and microstructures for the resistance of stress and thermal environment. The composition, characteristics and application of typical explosive formulations are summarized based on different functions design. Finally, we proposed that the development directions of composite explosives in the future are pursuing higher energy, to be more insensitive, enhanced environmental adaptability, green explosives and improved theoretical design.

Key words: composite explosive; high energy; desensitization

CLC number: TJ55; O62

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.01.001