



火工品的基础问题及技术发展

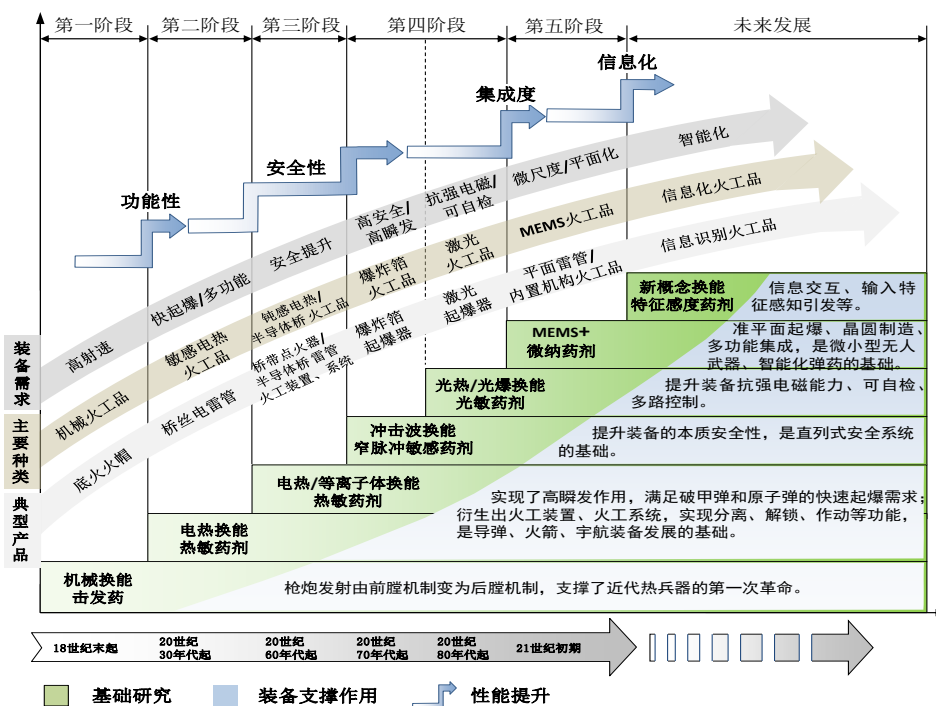
火工品是武器装备的核心单元及最敏感的含能首发单元,是武器装备能量转换的“开关”和能量传递的“放大器”(毫焦级输入引发兆焦级输出),其应用包括陆、海、空、天等全领域作战装备,其作用贯穿于武器装备从发射到完成功能的全过程。

在武器装备多次技术变革中火工品都是重要推手之一。例如1817年英国发明的火帽,支撑了后膛枪的发展;20世纪30年代德国发明的军用电雷管,实现了破甲弹的瞬时起爆;在我国的“两弹一星”重大工程以及世界航天史三大里程碑事件中,火工品均起到了无可替代的重要作用。因此,火工品是国防关键基础技术,是国家重大工程和国家间战略威慑的重要支撑。

1. 技术发展特点

1.1 发展历程

火工品发展受武器装备需求牵引,并且与同时代的工业技术密切相关,对武器装备发展也起着关键的推动作用。根据作用方式、换能体制和使用环境等不同,火工品共经历五个发展阶段(图1),随着技术的进步和总体需求的改变,其技术发展焦点由早期的关注功能性,逐步提升到关注安全性、关注集成度、关注信息化。受功能多样性的影响,火工品应用目前仍是多阶段并存,没有严格的替代关系。



1.2 应用领域和特点

火工品广泛应用于引战毁伤、发射动力、空天飞行器、弹箭结构、无源干扰装备、非战/工化装备等六个领域(图2),结合输出特征和用途细分为二十四大类:火帽、点火头、点火管、底火、点火具、传火具、索类、延期件、雷管、传爆管、曳光管、作动器、压力药筒、爆炸螺栓等(GJB347A-2019《火工品分类和命名原则》)。火工品是武器装备效能发挥的首发含能器件,具备“基础性强、高可靠、高安全、高效能”的典型特征。



图2 火工品应用领域

(1) 基础性强,无处不在

物理学电爆效应的发现,衍生了基于电爆等离子体窄脉冲起爆原理的本质安全爆炸箔火工品;激光技术催生出新型激光火工品,彻底解决了电火工品电磁兼容安全性问题;利用微电子工艺加工硅基换能元,创造出半导体桥火工品;MEMS技术彻底颠覆了火工品制造工艺,使火工品智能化成为可能。火工品应用广泛,小到子弹、手榴弹,大到空间站、航空母舰,应用覆盖陆、海、空、火、天全领域作战装备。据统计,常规弹药平均使用十余件火工品,制导弹药平均使用数十件火工品,弹道导弹平均使用百余件火工品。美国航天飞机从发射到返回需使用五百余个火工品,阿波罗登月工程使用了218个火工品。

因此,火工品技术涵盖化学、物理、机械、电子和材料等多学科,应用涵盖海、陆、空、天等全领域,跨学科、跨领域特征十分显著。

(2) 安全性要求高,不可忽视

火工药剂对摩擦、撞击、静电、冲击、热等环境因素极其敏感,其感度高出常规炸药2~3个数量级。火工品是武器装备最敏感的燃爆始发单元,既要在预设的微小激发能量下可靠作用,又要耐受环境意外刺激而保证安全。火工品一旦发生意外作用,会给装备和人员造成致命甚至灾难性后果,火工品的安全性极其重要。

(3) 可靠性指标高, 万无一失

火工品处于装备可靠性分配的最终端, 承担着武器装备最高的可靠性要求。例如, 常规弹药可靠度通常为 0.90、引信为 0.92、火工品要求则为 0.997。高价值平台要求更高, 导弹火工品为 0.999~0.9995, 航天火工品为 0.9995~0.9999。因此, 从可靠性角度而言, 一件火工品就是一枚导弹、一颗卫星、一艘飞船。

(4) 作用效能高, 不可替代

在武器装备控制系统和火力系统之间, 火工品是不可替代的能量接力单元。它能在较短时间内释放出比其它任何机械装置更多的能量, 功率重量比高, 是机械、液压、机电等物理形式的十倍至几十倍。它尺寸小、重量轻, 如爆炸螺栓是常规机械式分离机构的 7 倍。它能够以较低的成本费用完成起爆、点火、分离、解锁等功能, 实现武器装备效能发挥和航天器功能完成, 具有很高的效费比。

2. 研究内涵与趋势

2.1 研究内涵及基础问题

火工品可靠性提升始终是以火工品技术的研究为主线, 其本质是物理能与化学能的相互转化, 研究焦点是各界面间的能量转换、引发、传递、放大及其控制技术。

火工品由亚稳态火工药剂和功能结构单元等组成, 在很小的体积内存在换能元-始发药-过渡药-输出药等多个能量传递界面(物理界面、化学界面、能量界面), 且火工品中各类火工药剂的装药量少, 感度性能相对较高。因此, 火工品集合了多界面、多组份、多影响因素、高活性药剂、小药剂体量等多项影响其可靠性的要素, 是武器装备中可靠性随物理域变化最敏感的单元, 存在着化学动力学衰减、机械应力疲劳及含能材料与各种材料之间的相容性等问题, 在贮存及使用的各种复杂工况下, 随时间非线性衰减的因素和机理复杂, 是武器装备中不容忽视的可靠性风险源。面向火工品的装备保障可靠性能力提升需求, 基础研究主要集中在高效换能(撞击、电热、电爆、光热、光爆等)、能量富集与引发、能量传递与控制、环境效应与故障抑制、安全性可靠性试验与评估等方面, 重点突破小尺度的多界面匹配、高敏感药剂的安全性平衡、低装药量的高可靠输出等基础问题。

2.2 发展趋势

面向新概念武器装备和未来战场的应用需求, 火工品安全性、可靠性、高效能、多功能等方面的跨越式升级发展需求迫切:

(1) 安全性向本质安全、自主安全及不敏感序列方向发展火工品安全性从机械火工品和敏感电火工品的基本安全, 发展到 A 类钝感电火工品的钝感安全, 目前正处于以爆炸箔和激光火工品为代表的本质安全火工品阶段, 未来将结合 MEMS 技术向自主安全方向发展。

本质安全火工品使用许用传爆药或点火药, 换能元与装药物理隔离, 满足 500 V 不发火的 B 类安全要求。自主安全火工品采用 MEMS、微电子技术, 通过信息芯片和安执机构内置, 实现信息交互、状态判断与自我安全控制功能; 通过在飞片和装药之间增加机械隔离机构, 实现电热火工品自主安全; 通过光能隔离控制, 实现激光火工品自主安全。

(2) 可靠性向全寿命周期及全域环境可靠发展高价值装备的出现促使火工品可靠性逐步向全寿命周期可靠发展, 寿命评估也逐步从传统的贮存寿命评估向全寿命周期评估发展。美国多次创新寿命评估方法, 形成了寿命

监控和趋势线分析方法,通过寿命评估,将已服役30年的民兵II导弹推力终止装置服役寿命延长至2007年,使民兵II型导弹成为美国寿命最长的导弹。

新型装备应用使火工品面临新的复杂环境,火工品全域环境可靠成为重要发展方向。国外采用非线性换能原理,利用一体化集成制造工艺及全密封结构等方法,提高火工品耐受极端高低温、高空低气压、深海高水压、侵略高过载、复杂强电磁等各种恶劣环境的能力,保障了火工品全域环境使用可靠。

(3) 功能性向信息交互和可选择发展武器装备效能的发挥与火工品的功能密切相关。机械火工品实现了单一点火起爆功能,敏感电火工品实现了功能简单可控,火工系统组合实现了级间分离、弹射救生等复杂功能。随着火工品与微电子、MEMS技术的融合,火工品与通过信息芯片、发火组件的集成,逐步向信息交互和功能可选择的方向发展,可以实现信息交互、多路组网、阵列输出等一体化功能。

(4) 药剂向感度可选择和绿色安全发展火工药剂总体发展趋势是在逐步提升安全性的同时,向感度可选择、绿色环保方向发展。美国持续推进感度可选择火工药剂研究,“LIGHT”计划首期目标是利用激光敏感起爆药引爆炸药,远期目标是用激光直接起爆激光敏感炸药。2000年,美国采用CL-20基RSI-007新型传爆药替代HNS-IV,既降低了爆炸箔火工品发火能量,又提高了起爆威力。2009年,美国成功研制了新型绿色起爆药DBX-1替代重金属起爆药用于M55针刺雷管。2008年,美国报道了一种新型硝基四唑类起爆药CuNT,此后通过性能改善研究,美国陆军已于2016年将CuNT应用于M100和M50雷管。

(5) 产品向“通用化、系列化、模块化”发展火工品多品种、小批量的现状已经成为了武器装备的瓶颈之一,“三化”发展成为趋势。20世纪80年代起,美国建立了通用型火工品系列,从火工元件开始规范了尺寸、接口、组合方式等参数指标,实现了跨弹种、跨平台、跨军种通用。20世纪90年代,研制了火工品传爆接头标准件系列,逐步规范了火工装置及系统通用设计方法。NASA标准起爆器在导弹武器及航天器中大量应用,已累计生产超过500万发产品。美国火工品“三化”结合火工品新技术转化应用不断完善,通过火工品标准件组合大幅缩短了火工品的研制周期,目前已形成标准换能元、标准装药、标准发火件、标准装置、标准组件等多种火工品标准件,并在此基础上建立了爆炸箔火工品、激光火工品产品系列,实现了货架化。

3. 建议

火工品在武器系统中使用数量仅次于电子器件,是燃爆序列中最敏感的始发单元,火工品技术跨越和能力提升迫在眉睫,建议重点关注如下四点:

- (1) 理清“老”机理,解决基础数据、设计方法、工艺技术等工程研究不足带来的“新”问题;
- (2) 揭示“新”机理,解决裕度与边界、静态与动态、数据与包络、评估与使用等基础研究不足带来的“老”问题;
- (3) 加强火工品基础数据、数值计算方法等研究,解决火工品正向设计的数字基础问题;
- (4) 聚焦装备需求,基础研究与工程应用紧密结合,解决探索与发展、基础与应用问题。

褚恩义, 陈建华, 张蕾, 刘卫
陕西应用物理化学研究所
e-mail: Enyichu@126.com