

DOI: 10.11943/CJEM2022063

文章编号: 1006-9941(2022)04-0291-03



关于火工药剂发展的几点思考

1. 火工药剂的基本内涵

火工药剂是一类具有高敏感性、高可靠性、高反应速率的亚稳态物质,属于特种能源物质,是一类极为特殊的含能材料。它的作用是接受外界微弱的初始冲能或某种非炸药刺激,促使其自身发生快速化学反应,实现能量转换,输出燃烧、爆燃或爆轰。根据其发生化学反应进行能量转换形式或功效的不同(图1),火工药剂一般可分为起爆药、传爆药、点火药、传火药、击发药、针刺药、延期药、作功药剂及烟火药剂等。其能量输出形式主要表现为:(1)引爆下级装药,实现起爆、传爆功能;(2)引燃传火对象,实现点火、传火功能;(3)自身燃烧,实现作功、作动、延期及特种物理化学效应等功效。火工药剂是火工品的核心能源物质基础,直接影响到火工系统,乃至整个武器系统的安全性、可靠性和作用效能。



图1 火工药剂品种、能量转换及输出功能

火工药剂应具有合适的特定感度性能,但绝非某种含能化合物感度高,就可用作起爆药。火工药剂具有独特的爆炸、燃烧性能,如:起爆药爆炸变化加速度很大或爆轰成长期很短,可以快速实现燃烧、爆燃转爆轰。不同品种的火工药剂均应具有可靠的稳定输出性能,如:起爆能力、点火能力、作功能力、延期时长和精度等。

黑火药可看作是古代最早的混合火工药剂。起爆药是现代火工药剂的核心和基础,是火工药剂不断发展和创新的物质基础。现代火工药剂的发展已经历了三个阶段,第一阶段是以雷汞为代表的起爆药及含雷汞的混合药剂,第二阶段是以叠氮化铅、三硝基间苯二酚铅、二硝基重氮酚、四氮烯等常规单质起爆药及以其为主要成分的混合火工药剂,第三阶段是以高氯酸·五氨·[2-(5-氰基四唑)]合钴(Ⅲ)起爆药(CP)、高氯酸·四氨·双(5-硝基四唑)合钴(Ⅲ)起爆药(BNCP)等为代表的配合物类高能钝感起爆药。由于上述三阶段的火工药剂仍存在机械感度偏高、重金属污染、制备工艺复杂等缺点,近些年来,国内外陆续报道了一系列以胍、碳酰胍、唑类杂环化合物等为配体的新型配合物类起爆药,但多数仍处于基础研究阶段。随着新型武器装备的发展、急需研发能够在复杂作战环境和极端条件下使用的高能钝感型、环境友好型、具有特征感度及良好环境适应性的新型火工药剂。

2. 火工药剂发展的几点思考

2.1 高能钝感火工药剂

火工药剂是火工品的初始能源,是弹药系统点火序列或爆炸序列的始发装药。火工药剂必须通过高能量密度、高作用可靠性等特性来保证火工品在武器系统中的作用可靠性。武器系统小型化的发展对火工品及火工药剂提出了高能化的要求。

火工药剂与其它含能材料相比,最主要的特点就是“感度高”。火工药剂领域研究追求的目标就是药剂必须具有“适宜”的外界刺激输入感度。新型武器平台、钝感弹药的研发,对火工品同样提出了安全钝感的新要求。而火工药剂在火工序列中既要保证在弹药系统给予的刺激能量下可靠作用,又要保证外界环境偶发刺激能量下安全使用。简言之:“既要保证火工药剂作用可靠性,又要保证其使用安全性”。因此,需要研发具有合适感度裕度的单质或混合物类含能材料作为新型火工药剂。

2.2 环境友好火工药剂

叠氮化铅具有爆轰成长期极短、起爆能力强、受热直接并快速分解起爆等特点,但其机械感度偏高且存在重金属铅的污染。三硝基间苯二酚铅的火焰感度高、点火能力强,但其静电感度极高且同样存在重金属铅的污染。近年来,国内外研究人员一直在探寻可替代叠氮化铅和斯蒂芬酸铅这两种物质的环境友好型起爆药。美国先后发布了“消除小口径弹药中的毒性重金属”、“中口径弹药中新型起爆药研究”、“环保型起爆药取代叠氮化铅研究”等多项相关研究计划(John Fronabarger, Mike Williams, Kelly Armstrong, et al. Lead Azide Replacement Program[C]//NDIA Fuze Conference, 2005)。美国 Los Alamos 国家实验室的科学家对环境友好起爆药提出如下要求:无毒性金属和高氯酸根,有一定的耐湿性、耐光性,具有一定感度且使用安全,至少耐温 200 °C,长储性能好(My Hang V. Huynh, Michael D. Coburn, Thomas J. Meyer, et al. Green primary explosives: 5-nitrotetrazolato- N^2 -ferrate hierarchies[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2006, 103(27): 10322-10327)。

真正的绿色起爆药除了能满足不含重金属和低毒性的要求,符合上述标准外,制备过程所用的试剂和溶剂,及所形成的废料也应该是环境友好的。相关药剂的制备方法应简便、经济、安全,且易实现批量生产。故,新型火工药剂的研发要全面考虑其全生命周期环境友好性、化合制备过程的原子经济性。同样,环保型单质药剂是环保型混合火工药剂的基础,一旦突破了单质药剂的研发,混合型火工药剂的环保问题也将迎刃而解。

2.3 特征感度火工药剂

火工药剂感度是指药剂在受到外界能量刺激下发生化学反应的难易程度。外界能量刺激有多种形式:如:机械刺激(撞击、摩擦、针刺)、热刺激(火焰、加热)、电刺激(电火花、静电)、光刺激(激光、可见光)等。与外界能量刺激形式相对应,火工药剂表现出相应的感度。外界能量形式不同,引起火工药剂化学反应所需能量的大小也不相同,火工药剂的感度不仅决定于药剂的化学结构、组成、理化性能,还与药剂的物理状态、装药条件等因素有关。这涉及到药剂受激的化学反应机理,机理不同对应所需刺激能量的大小也不同(盛添伦. 火工药剂特征感度基本概念[J]. 火工品, 2008(2): 50)。

各种药剂对不同形式的外界能量表现出很大的选择性,如:叠氮化铅机械感度较高,而其火焰感度较低;四氮烯的机械感度大于斯蒂芬酸铅,而其火焰感度小于斯蒂芬酸铅。利用火工药剂感度的这种选择性,可研

究优选出某种药剂的特征感度。譬如:确保火工药剂具有较低机械感度的同时,使其具有较好的特征激光感度、特征等离子体感度、特征微波感度等,分别用于激光火工品、半导体桥、微波点火组件等。这样,将会在本质上极大提高火工药剂的使用安全性和火工品的作用可靠性。

2.4 微纳结构火工药剂

微纳结构火工药剂是指采用与微电子机械系统(MEMS)工艺相兼容的技术,如:气相沉积技术、光刻掩膜技术、模板制备技术、磁控溅射技术、静电喷射技术、原位合成技术等,在一定基底上生成纳米尺度的、具有一定微结构的含能材料,用作MEMS火工品装药。微纳结构药剂在微观尺度具有一定的空间排布和有序性,可以实现微量精确制备,并在芯片上与微结构换能元或微安保机构实现集成(褚恩义,张方,张蕊,等. 第四代火工品部分概念初步探讨[J]. 火工品, 2018(1): 1-5)。与之相应的装药方法也突破了传统的压装工艺,多采用“原位”装药技术,通常包括原位化合法、墨水直写法、喷墨打印法、3D打印技术等,提高了装药安全性。

目前,研究较多的微纳结构药剂主要有:亚稳态分子间复合物(MIC)薄膜、多孔硅-氧化剂复合含能材料、低维碳材料复合含能材料、叠氮化铜纳米线阵列等。如:利用模板法结合电化学沉积制备得到叠氮化铜纳米线阵列,该方法制备的微纳结构药剂可以通过模板控制纳米线直径,并使纳米线按一定方向均匀整齐排列(Zhang F, Wang Y L, Bai Y W, et al. Preparation and characterization of copper azide nanowire array[J]. Material Letters, 2012, 89: 176-179)。再如:利用含铜的金属有机框架材料或其他聚合物为前驱体,通过煅烧和气固相叠氮化反应得到被碳骨架包覆的叠氮化铜复合含能材料。

2.5 极端环境应用药剂

随着高新武器装备、复杂作战环境、深空探测、深井勘探等领域的发展,超高低温、低气压高真空、复杂电磁环境、极端力学环境等外界条件也对火工药剂提出了新需求。为适应深空探测严酷力热环境需求,除设计合理的分离系统火工作功装置并进行适当的隔热防护之外,研制耐高温的火工药剂也非常关键。为应对复杂电磁环境,除对火工品器件进行加固外,研制新型低静电感度的本质安全火工药剂也至关重要。为应对高原低气压、外太空宇航高真空环境,需探索低气压高真空条件下火工药剂的发火作用机理,解决稳定燃烧的难题。

3. 结语

随着现代战场环境的复杂化,火工药剂需要不断创新以满足各种武器装备迭代的需求,这就对新一代火工药剂的性能提出了更高的要求。未来火工药剂的研发仍应朝高能化、钝感化、环境友好方向发展,结合新型装药方法和应用方向,研发新型特征感度火工药剂及装药方法。结合不同的产品需求,合理设计火工药剂(配方),实现药剂感度与输出能量的协调统一。综合考虑火工药剂的“特征刺激发火能量”“环境偶发刺激能量”与“可靠输出爆燃能量”之间的匹配关系,最终确保火工产品的作用可靠性和使用安全性。

张建国, 李志敏, 张 陆, 陆祖嘉

北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室
国家自然科学基金资助(22175025)

e-mail: zjgbit@bit.edu.cn