



关于低敏感发射药与装药技术的思考与建议

20世纪80至90年代,国内外提出了“低易损(LOVA)火炸药”概念(Schedlbauer F. LOVA gun propellants with GAP binder[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1992, 17(4):164-170),这一概念在21世纪变化为“低敏感火炸药”。直到现在,尚未对该概念进行明确的定义。实际上,该概念源于“不敏感弹药”(Powell I J. *In-sensitive munitions-Design principles and technology developments*[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2016, 41(3):409-413)。“不敏感弹药”是指在满足弹药基本性能(实用性、操作性等)的条件下,受到外界意外刺激时起爆可能性、反应猛烈程度、附带损伤最小的一类弹药。所谓弹药是针对不同目标的属性与空间位置,采用物理方法,将火炸药按照一定的方式设计、组合,然后约束成为整体单元,以实现发射、运载、爆炸的功能,达到武器毁伤的终极目标。一个完整的钝感弹药应是包括战斗部、发射推进系统的完整系统。可见,不敏感弹药的本质就是火炸药的不敏感性。近一二十年,学者研究了诸多低敏感发射药配方(Manning T, Strauss B, Prezelski J P, et al. *High energy TNAZ, nitrocellulose gun propellant: US Patent 5798481*[P]. 1998-8-25)并对照美国不敏感弹药标准(The Department of National Defense of USA. *MIL-STD-2105D: Non-nuclear ammunitions tests of risk assessment*[S]. 2011.)进行了相应的分析,但是没有考虑发射装药低敏感特性,相应的评价方法一直没有建立,发射装药与弹药安全性的相互关联也未予考虑。

1. 发射药与装药的基本特点

首先,需要明确的是,发射药和发射装药是相互关联但却是两个不同的概念。

目前的发射药基本以固体发射药为主,液体发射药尚在探索研究阶段。固体发射药由一种或多种含能化合物组成,具有一定形状尺寸,以燃烧方式释放能量,在身管武器中转化为弹丸动能。发射药自无烟火药发明以来,一直以硝化棉(NC)为力学骨架,加入增塑剂、含能晶体炸药和其他功能助剂,加工成为产品。与同为火炸药的推进剂和炸药相比,具有样本数量大、尺寸小、高压环境燃烧等特点。

发射装药是身管武器弹药中的一个重要组成部分:就组件而言,包括有发射药、点传火系统、辅助装药元器件;就技术体系的构成而言,包括有发射药选择与形状尺寸设计、能量释放控制方法、装药结构、点传火系统及辅助装药元器件设计等方面。

发射药与发射装药两者的不同点在于:(1)前者为单一产品,后者为多个组件的系统;(2)发射药的主要内涵为配方组成,发射装药需要根据武器战术技术要求对发射药的种类进行选择,可能是两种或者两种以上的发射药;(3)发射装药需要对发射药形状、尺寸进行设计,必要时进行表面处理,以达到能量释放过程控制的目的,适应武器内弹道过程;(4)发射装药所必要的点传火系统,在发射能源体系中归结为能量的始发与传递,对发射安全性和弹道稳定一致性至关重要,同时各个组成部分已超出发射药范围,但仍属火炸药范畴。

2. 关于发射装药的安全与低敏感特性的界定

安全性与低敏感性密不可分,这里对其内涵予以界定。

所谓安全,是指一种状态,一种按照人们的意志所希望的相对稳定的状态。客观事物安全性的本质是其

特征状态处于稳定、可控制的范围以内,是表达状态的特征(函数)值在阈值以下。发射装药是弹药的一个重要组成部分,其中发射药、点传火系统、装药元器件均含有含能化合物,可以作为一个相对独立的单元考虑其安全状态。所有的燃烧、爆轰过程归结为一个反应动力学问题,由守恒、本构方程和边值(初始与边界)条件共同构成。火炸药安全问题可以从这三个方面进行表述:(1)由外界能量刺激的意外引发,这是对其初始条件的控制问题;(2)受外界(意外)能量引发后的能量释放过程,涉及能量释放过程函数的连续性和可控制性问题;(3)能量释放作用效果的预知,这是涉及有效防护的问题。

所谓敏感,即客观事物对外界(意外)能量刺激作用的敏感程度。低敏感可以理解为敏感程度达到最低,同时敏感作用在可以接受的最小范围。所以,对于弹药和火炸药而言,低敏感特性与安全特性具有很大的关联程度。火炸药本质为能源,是在外界刺激作用下引发,通过燃烧、爆轰释放能量,具有体系的封闭性、高温、高压和瞬时性特点。对于发射药与装药,通过外界机械能量或者电能(底火),点燃点火药,再进一步点燃发射药。正常的外界刺激受体是底火,底火设计中对激发有最小阈值,该值属于弹药的可靠性和安全性综合设计范围。

无论安全性还是敏感性,均涉及能量的引发和能量释放的过程,均可以建立在对客观事物的状态描述与表达的基础之上,建立物理数学模型并进行相关的数值求解(Ehrhardt J, Courty L, Gillard P. *Thermal degradation and kinetic parameter of two insensitive propellants: an experimental study*[J]. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 2019, 18(1): 51-65),揭示特征函数与变化规律,确定相关阈值。通过实验方法,确定有关守恒方程、本构方程、边值问题中的相关参数与系数。

3. 低敏感发射药与装药发展的基本思路

低敏感发射装药的发展可以从两个层次加以考虑。

第一个层次是使用过程的安全性。就是发射过程中,能量释放为可控制的连续函数。就目前的认知,发射药在点传火阶段因撞击破碎使能量释放成为不可控制因素(Jiang S P, Rui X T, Hong J, et al. *Numerical simulation of impact breakage of gun propellant charge*[J]. *Granular Matter*, 2011, 13(5): 611),能量释放函数成为间断、阶跃函数,致使膛内压力剧增。随着武器对“高初速”的要求不断提高,发射装药的密度也将不断增加,该方面的问题将越来越凸显。一方面需要提高发射药的力学强度以及装药低温抗冲击强度(Shen J, Liu Z, Xu B, et al. *Influence of carbon nanofibers on thermal and mechanical properties of NC-TEGDN-RDX triple-base gun propellants*[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2019, 44(3): 355-361)。另一方面是改善点传火系统(Fang X, Ahmad S R. *Laser ignitability of insensitive propellants*[J]. *Advanced Materials Science*, 2018, 3(1): 1-4),使其全面一致点火燃烧,降低点火阶段膛内的压力分布。发射运输、储存过程的安全性,与一般火炸药产品的要求是一致的,这里不予叙述。

第二个层次是发射装药在外界能量刺激作用下的引发与后期效应。对于发射装药,一般由燃烧释放能量,对于具有弹壳、弹丸约束条件下的发射装药,一般难以殉爆和燃烧转爆轰。所以,对发射装药的安全性,主要考虑在外界能量作用下引发燃烧的可能。发射装药被引发燃烧有两种可能性:(1)发射药被直接引发燃烧;(2)点传火系统被引发。在几种被认为最为可能的外界能量作用下,哪一种最容易被引发,目前没有定论,需要对发射装药或者模拟装药实验测试而得。

在发射装药中,发射药占有质量和数量的绝大多数,也是引发并产生后期效应的主体能量,需要对发射药的安全性与低敏感性予以特别关注。发射药由硝化棉(NC)作为力学骨架,加以增塑剂、高能晶体炸药作为填充物和其他功能助剂共同组成。其中NC和典型的增塑剂硝化甘油(NG)均是以—O—NO₂为特征分

子结构,该结构在所有火炸药组成化合物中最容易断链分解(Yi J, Zhao F, Xu S, et al. Effects of pressure and TEGDN content on decomposition reaction mechanism and kinetics of DB gun propellant containing the mixed ester of TEGDN and NG[J]. Journal of hazardous materials, 2009, 165(1-3): 853-859)。若以引发燃烧为特征,目前的发射药是所有火炸药中除黑火药以外最为薄弱的一环。因此,为降低发射药的敏感性,需要采用比硝酸酯钝感的晶体含能化合物作为填充物(Sabatini J J, Drake G W, Wingard L A, et al. Insensitive plasticizer and melt-castable energetic material: US Patent Application 15/686, 195[P], 2019),以硝基胍(NGu)、黑索今(RDX)和奥克托今(HMX)为首选。第一步,降低NC和NG的含量;第二步,采用相对钝感的增塑剂替代NG;第三步,全面取代硝酸酯含能化合物。就目前的情况而言,最后一步的难度最大,因为发射药的能量、力学、燃烧性能需要优先考虑。

此外需要长期进行理论与规律研究,建立外界能量作用机理、燃烧能量释放与传递规律、燃烧转爆轰机理等方面的模型、模拟装置;对点传火系统进行评价,寻找更为钝感的点火药;对点火药进行结构设计,对可燃药筒进行配方调整、表面处理等,以保证发射装药系统的低敏感性。

国内对低敏感发射药与装药的研究开展时间不长,认知程度较低。建议:

第一,低敏感发射装药是安全弹药的重要组成部分,独立于弹药的战斗部。发射装药和战斗部两个部分在弹药的空间位置和受外界能量刺激作用后的反应机理、作用效果完全不同。在研究内容、方法、评价多个方面均需要与之适应,形成相对独立的体系。

第二,以发射装药的燃烧为基本特征进行系统认知与评价,发射装药以发射药为主体,一般是颗粒自由装填,装填密度在 $1.0\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 以下。现有的弹药中发射药的装药量最多在10 kg左右,在外界能量作用下爆轰的可能性很小,主要是引发燃烧,而燃烧转爆轰的可能性也极小,这是与弹药战斗部中的炸药装药差别所在。应重点考察外界能量刺激对发射药与装药元器件点燃的可能性、能量输入的阈值、引发燃烧后的作用效果等。

第三,尽快建立低敏感发射装药表征与评价方法。首先对发射药、点传火系统和其他辅助装药元器件三者的敏感特性分别评价,然后对系统进行综合评价。评价方法可参照安全弹药的评价标准,根据发射装药的特点建立其评价方法与对应标准。在评价发射装药低敏感特性时应在与弹药相应的或者相似的条件下进行,需要建立相应的测试和模拟装置。

第四,规划低敏感发射装药技术的发展路线图。低敏感发射装药在我国刚刚起步,武器装备需求迫切,需要有规划有阶段地持续发展与进步。短期内,建立低敏感发射装药的评价方法草案并逐步完善,建立相应的测试装置系统和测试方法;研制并定型敏感性低于硝基胍三基发射药的配方,以满足武器、特别是海军武器的装备需求。

肖忠良, 梁 昊

南京理工大学化工学院

南京理工大学特种能源材料教育部重点实验室

e-mail: xzl@njjust.edu.cn