

战术导弹中小型固体发动机技术的发展

毛成立,王 继,陈晓龙,何 快,乐 浩
(上海航天动力技术研究所,上海 201109)

摘 要:通过对战术导弹中小型固体发动机具体发展需求的分析,明确了高能化、轻质化、可控化和低易损4个主要的中小型固体发动机发展方向。可以从提高推进剂黏合剂密度和燃烧室工作压强来实现高能化;采用轻质高性能金属壳体、纤维缠绕复合材料壳体以及提高绝热层性能以实现轻质化;可控化需要在高功率密度的驱动装置、高精度的控制算法等方面获得突破和支撑;低易损则可以从钝感推进剂、主动扩稳、防护材料等途径开展工作。通过对这4个技术方向上国内外研究现状和发展趋势进行梳理,明确提出未来研究需要突破推进剂和热防护原材料、新型装药工艺、可调燃气阀门、压力闭环控制和有效扩稳等关键技术,加速工程化进程,为我国战术导弹的跨越式发展提供支撑。

关键词: 固体发动机(SRM); 高能; 轻质; 可控; 低易损

中图分类号: V 11; V 435 **文献标志码:** A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.06.008

Technology Development of Small and Medium-Sized Solid Rocket Motor for Tactical Missiles

MAO Chengli, WANG Ji, CHEN Xiaolong, HE Kuai, LE Hao
(Shanghai Space Propulsion Technology Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: The specific development needs of small and medium-sized solid rocket motor (SRM) for tactical missiles are analyzed, and four main development directions for small and medium-sized SRM are identified, i.e., high energy, light weight, controllability, and low vulnerability. High energy can be achieved by increasing the density of the propellant binder and the working pressure of the combustion chamber. Light weight can be achieved by using high-performance metal and filament wound composite shells and improving the performance of the thermal insulating layer. Controllability needs breakthroughs and support in high-power-density driving devices, high-precision control algorithms, etc. Low vulnerability can be carried out by means of insensitive propellant, active stabilization, protective material, etc. Finally, through the analyses of the research status and development trend at home and abroad in these four directions, it is pointed out that in order to provide support for the leap-forward development of tactical missiles in China, in the future research, the key technologies, e.g., propellant and thermal protection material, new propellant loading process, adjustable gas valve, closed-loop pressure control, and effective stability expansion, need breakthroughs, and the engineering process needs to be accelerated.

Key words: solid rocket motor (SRM); high energy; light weight; controllable; low vulnerability

0 引言

固体发动机是战术导弹飞行的动力装置,同时也是导弹弹体的主要组成部分^[1],占到导弹质量和尺寸的50%~80%,是导弹武器实现中、远程防空

反导和精确打击的关键技术基础,其性能直接关系到导弹武器作战效能和威慑力。防空反导、远程精打、未来智能导弹的发展对固体发动机的推进剂能量、质量比和调控能力等方面的要求越来越高,而发动机服役环境却越来越严酷,对固体发动机低易

收稿日期:2019-10-23; 修回日期:2019-11-06

作者简介:毛成立(1973—),男,博士,研究员,主要研究方向为先进固体发动机技术。

通信作者:王 继(1982—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为固体发动机低易损技术。

损性和环境适应性的需求日趋迫切,这都给固体发动机的研制提出了更高要求^[2]。本文从高能化、轻质化、可控化和低易损 4 个方面,综述了固体发动机国内外的研究和发展现状,对涉及的关键技术和难点进行了分析,以期能够为国内战术导弹中小型固体发动机的后续发展提供参考。

1 研究现状

1.1 高能化

固体推进剂作为固体发动机的能量来源,国内外均将提高固体推进剂比冲和实现发动机高压强作为研究重点。我国经过多年的发展,形成了发展路线明晰的三代高能固体推进剂体系^[3]。黏合剂采用硝酸酯增塑^[4]、GAP(聚叠氮缩水甘油醚)^[5],氧化剂引入 CL-20(六硝基六氮杂异伍兹烷)^[5-6],金属燃料引入储氢材料 AlH_3 ^[7],推进剂标准比冲从 255 s 提高到 265 s,这些对提高武器性能发挥了重要作用。

在固体推进剂中,氧化剂和燃料具有较高的密度,是主要的能源材料。而黏合剂能量较低,密度较小,是提高固体推进剂能量密度的关键限制因素^[8-9]。近年来,几乎没有出现能量密度全面超 CL-20 的高能量密度材料,导致我国高能固体推进剂的发展遇到瓶颈。

高活性纳米铝粉、纳米复合含能颗粒等新型纳米材料是提升装药燃烧性能的有效途径^[10]。但纳米材料的比表面积大导致浸润性差,难以均匀混合和浇注成型,无法形成结构完整的装药。固含量的增加能够显著提升推进剂能量密度,但是同时带来了装药成型困难。为了保证装药流平性的工艺要求,

目前必须加入较多的低能量低密度黏合剂体系,固含量无法有效提高,通常为 70%~90%,导致固体装药能量提升遇到“天花板”效应。

我国战术导弹固体发动机工作压强一般低于 22 MPa,稳定工作阶段压力更低。国外目前战术导弹发动机工作压强在 7~30 MPa 之间^[2]。根据相关资料显示,未来 20 年内如能突破推进剂、喷管、密封等技术,固体发动机的压强可以提高到 35~42 MPa。高压强发动机技术发展主要存在以下 3 方面的问题:① 固体推进剂适应高压工作能力不足,压强越高燃温越高,燃烧动态压力稳定性问题越严重;② 喷管喉衬的抗烧蚀和抗冲击能力不足,高压工作会导致喷管喉衬结构破坏和喉衬烧蚀严重;③ 密封问题亟待解决,现有的密封材料和密封结构形式难以满足 30 MPa 以上稳定工作。目前,这几方面研究进展缓慢。

1.2 轻质化

固体发动机轻质化主要是通过采用轻质高性能金属壳体或纤维缠绕复合材料壳体^[11-12],以及提高绝热层结构性能等技术手段^[13],降低消极结构质量。同时,随着发动机工作压强的不断提高,复合壳体的比强度优势较目前主流的钢质壳体也更为明显。

在过去的 25 年中,各国进行了多种战术级火箭发动机复合材料壳体的开发和验证工作,已在战术导弹领域获得了广泛的应用,壳体直径 70~510 mm 不等。各种战术级火箭发动机复合材料壳体计划见表 1^[11-12,14]。

表 1 复合材料壳体计划

Tab.1 The programs of composite case

认证的战术系统	战术级开发及验证计划	高速导弹应用
空中防御反坦克系统(加拿大、美国)	高级空射发动机(美国)	紧凑型动能导弹 CKEM(美国)
紫苑 15/30(法国、意大利)	Crayon(法国)	高速反坦克导弹 HATM(挪威、美国)
响尾蛇 VT-1(法国)	扩展射程拦截器(美国、法国)	
西北风(法国)	改进型海麻雀导弹复合材料原型(挪威)	Hyperschall-Flugkörper(德国)
爱国者先进能力 PAC-3(美国)		
标准 SM-3 导弹第 3 级火箭发动机(美国)	多重任务推进技术(美国)	高速导弹(法国)
超 530-D(法国)	海军攻击导弹(挪威)	
战区高空区域防御 THAAD(美国)	近程攻击导弹 II(美国)	视线反坦克导弹 LOAST(美国)

国内针对复合材料壳体的研制也取得了一些进展,相关单位陆续开展了直径 $\Phi 150\sim 480$ mm的多种碳纤维发动机壳体,且纤维强度转化率及特性系数均达到的较高的技术水平^[11]。

1.3 可控化

为了有效改善导弹武器的控制性能,提高其生存能力及增加其动力航程,固体发动机推力和能量可控发挥了巨大作用,也一直是一个重要的发展方向^[15]。目前主要技术途径包括脉冲发动机、变推力发动机、固体姿轨控发动机^[16]、摆动喷管及燃气二次喷射技术。

双脉冲固体火箭发动机是一种利用隔舱将推进剂隔离成两个燃烧室,实现二次启动,间歇提供推力的动力装置。英、德、美、意等国研制了多种类型的脉冲发动机,主要应用于战术防空导弹。国内相关单位均开展了不同形式的固体多脉冲发动机技术方面的研究^[15],目前已有多型脉冲发动机应用于研制型号。但脉冲发动机属于预设式的能量管理方式,能量释放的规律已经预先设定,而能量随控的固体发动机仍在发展之中,例如基于电控^[17]、磁控^[18]固体推进剂的固体发动机。

固体火箭发动机变推力的形式众多,目前国内外主要采用喉栓推力调节技术,通过改变喉部面积的大小进而改变发动机推力的大小^[19]。在该研究领域,美国的Aerojet公司和ATK公司是主要的参与者,均取得了重要的成绩。2003年,Aerojet公司针对HAWK导弹和“网火”系统精确攻击导弹PAM,开展变推力发动机研究,前者通过了地面20 s的考核试验,后者完成了近2 min的飞行试验,发动机工作50 s,后续又开展了多次分析试验,精确命中了无人驾驶汽车和坦克等高速移动目标^[20]。国内相关单位也启动了研究工作,目前均处于原理样机的研究阶段,仍需结合导弹总体的弹道需求,在推力开环控制、闭环控制方面仍处在攻关阶段。

固体姿轨控发动机以其控制灵活、结构轻巧、维护方便、反应迅速等特点成为导弹武器提高机动性的首选。精确打击的极致就是导弹与目标直接碰撞,这是实现动能杀伤的必要条件。目前多数动能杀伤武器都采用了固体姿轨控发动机技术,其应用分为大气层内和大气层外两类。大气层内的应用包括低空近程高速动能弹和反TBM导弹等;前

者如美国的“LOSAT”高速动能反坦克弹^[21],其低空飞行速度高达1 600 m/s,全程飞行时间只有几秒钟,常规的气动力控制响应太慢,利用固体姿轨控发动机进行姿态保持和弹道校正;后者如美国“爱国者-3”导弹^[20]和俄罗斯的9M96E、9M96E2,在导弹自动导引的末段,需要在极短时间内消除脱靶,此时导弹的主发动机通常已经工作完毕,无法用推力矢量的方式提供控制力(矩),较高的高度也使舵面的气动效率下降,利用固体姿轨控发动机可以在导弹飞行末段提供较大的机动能力。大气层外的应用主要包括大气层外反导和空间攻防,例如美国的“SM-3”导弹上的动能拦截器,从Block I到Block II B,其固体姿轨控发动机从开关式的射流阀技术发展为了喉栓式的调节阀技术,提高了动能拦截器的过载能力^[20]。固体姿轨控发动机从单次动作阀门(如俄罗斯的9M96E导弹)向多次动作的比例调节燃气阀(如法国的Aster-30导弹)的方向发展,推力可连续调节,灵活性更强,代表了固体姿轨控发动机的技术发展方向。

1.4 低易损

低易损性已成为战术导弹固体发动机设计的主要指标之一。美国海军在1984年率先实施了先进钝感弹药发展计划(IMAD)。1988年美海陆空三军达成联合协议,要求1993年10月以后武器系统的首件装备以及1995年10月以后生产的武器弹药均应符合低易损性弹药标准^[22]。北约建立了弹药安全信息分析中心(MSIAC),提供数据和分析服务^[23-25]。国外已经建立健全了弹药安全性评估体系,国内在标准体系方面仍是空白。

在发动机的低易损性验证方面:美国海麻雀导弹发动机已经通过了美军标MIL-STD-2105B^[26]规定的4项考核中的3项;国内相关单位已经完成了发动机级的部分低易损性考核试验^[27],试验表明,发动机的低易损特性与推进剂低易损特性并不完全等同,应加强对发动机整机的低易损性研究^[28]。

在低易损推进剂方面,目前国外主要有美国的HTPE推进剂、钝感NEPE推进剂,以及法国的钝感低特征信号XLDB推进剂^[29],其性能已与在战术导弹中的常规推进剂相当,并且已经装备了部分导弹型号。国内对低易损性推进剂HTPE、GAP、PBT等开展了大量研究,部分推进剂已通过了6项低易

损性试验^[30],燃烧稳定性、力学性能、能量水平与HTPB推进剂相当,已具备工程应用的基本条件,但距离大规模使用和装药生产尚有一定距离。

在低易损结构方面,壳体的复合材料化是对低易损性有重大贡献的技术,可以降低外部子弹或破片袭击后推进剂的着火概率,同时对热刺激也有防护作用^[22,31-32]。采用复合壳体、装填HTPE推进剂的美国海麻雀导弹,通过了美军标2105B的3种主要测试项目,而相应的HTPB推进剂装药仅能通过快速烤燃测试。Vetter^[22]提出了钢质发动机壳体采取隔热涂层加局部易破实现低易损性方案,能在易着火的范围内安全使用。国内相关单位通过在燃烧室壳体表面安置切割索,在快速烤燃、慢速烤燃以及子弹冲击3个方面验证了该项技术的有效性。

此外,安全点火装置、激光点火器也是提高发动机低易损性的有效手段,在美国多型武器中得到了应用。

1.5 小结

传统固体发动机的发展已陷入瓶颈期,战术导弹中小型固体发动机要实现质的跨越,必须进一步提高性能和安全性,这就要求其必须往高能化、轻质化、可控化和低易损方面发展。与西方国家相比,我们无论是技术,还是材料、工艺等方面都落后,有关这方面的技术资料,西方也对我们一直保持高度封锁的状态,能查阅到有用、有效的资料文献都比较少,这就要求我们必须自力更生,加大研发投入。

根据前文综述梳理,从目前国内外发展趋势来看,固体发动机的高能化主要从提高固体推进剂中黏合剂的密度和提高发动机燃烧室工作压强两条技术途径来开展;轻质化可以从采用轻质高性能金属壳体、纤维缠绕复合材料壳体以及提高绝热层结构性能3条技术途径实施;可控化主要往多脉冲固体发动机、推力可调可控固体发动机以及固体姿轨控发动机3个方向发展;而作为提升固体发动机安全性的低易损,则是固体发动机未来必须面对的,这方面主要可以从钝感固体推进剂、主动扩稳(发动机自分解、自毁、主动泄压等方式)、防护材料(壳体材料、外部涂层、绝热层)等途径开展工作^[33-35]。

战术导弹中小型固体发动机技术发展必定是多元而又统一的,高能化、轻质化、可控化和低易损

将在相对独立的研究过程中走向整合,实现中小型固体发动机质的跨越和发展。

2 发展趋势

为进一步提高导弹的性能,美国海军提出“夺取空中优势/未来海军能力”计划。该计划的内容便是研发先进技术,增大导弹射程,减小截击目标的时间,提高末端机动能力,以及改善火箭发动机对钝感弹药刺激的响应。因此,从前文对战术导弹固体推进技术国内外研究现状来看,随着高性能战术导弹的需求牵引、对安全性的重视,高能量、质量轻、灵活的能量管理,以及机动性、低易损性已经成为中小型固体发动机的未来重要发展方向。

以新型含能黏合剂、增塑剂和氧化剂的合成研究为基础,发展高能量、高燃速、高强度和低感度的推进剂,是未来战术导弹武器的要求之一。依托于边缘学科及新兴专业,提出的新概念、新原理、新方法而发展的高新技术,通过挖掘现有材料的潜力以提高推进剂的综合性能^[36]。

采用复合材料构件可以大幅降低发动机的结构质量,同时为使得发动机实现更高的性能,这需要发展先进的复合材料。欧洲P80FW整体式碳纤维复合材料固体发动机,是以整体结构复合材料壳体与裙的应用为代表,采用了一系列先进的复合材料技术,具有更低的成本和更好的性能;采用了极低密度的橡胶绝热层、高性能碳纤维预浸渍带成型、复合材料柔性接头、分段复合材料壳体等多项新材料和新技术的Zefiro 40发动机,也具有很高的质量比。

可控化向着多脉冲发动机、变推力发动机、固体姿轨控系统等具有高效能量管理技术的方向发展,使得固体发动机的性能和使用范围都得到大幅提升,进而确保战术导弹的作战和防御区域得以扩大,机动性增强,在防空反导领域深受重视。美国洛马公司的“PAC-3”通过采用双脉冲发动机后,射程提高1倍;美国“SM-3”采用固体姿轨控系统后,通过控制燃烧室压强调节推力,使得姿态控制更为灵活。

低易损是导弹武器装备发展的重点方向之一,尽管国内研制的低易损推进剂已经通过了美军标2105D中规定的所有6项考核,但我们依旧不能认为装备了低易损推进剂的发动机就是低易损发动

机,还必须从发动机整体出发开展研究。同时,低易损技术的发展也必须由被动式向主动式,或者主被动结合的方式发展,在不对现有体系、结构进行大改动的情况下,提升发动机的低易损性。

3 研究建议

从前文所述的中小型固体发动机技术发展创新规律来看,可以给出的研究建议如下:

1) 固体发动机能量水平仍需进一步提高。① 在未来相当一段时间内,固体推进剂的高能化仍然是一条发展主线,新型高能或超高能物质的不断涌现,将使固体推进剂的标准理论比冲突破300 s。在新型含能材料无法短期突破的情况下,创新成型工艺,提高推进剂固含量,引入纳米含能材料将是提高固体推进剂能量密度和能量利用率的有效途径。② 依托新研制成功的高比强度壳体材料和耐烧蚀喷管材料,继续深入开展高压强发动机技术研究,使得固体发动机获得更高的比冲和更大的推力,推动发动机能量向更高水平迈进。③ 建立固体发动机高压强下的性能计算模型,通过优化和改进装药结构,为高压强固体发动机的方案设计提供理论基础。

2) 基于轻质高效的能量管理能力依旧是固体发动机发展的重点方向。① 开展发动机燃烧室与封头或喷管一体化设计研究,优化结构,降低消极质量,同时提升制造成型技术。② 在缠绕壳体方面,针对固体发动机开展带装药缠绕一体化关键技术攻关,进一步降低发动机消极质量。③ 突破高强碳纤维的工程化应用和新型壳体材料的开发,促使固体发动机的复合材料壳体技术更新换代。④ 对于多脉冲固体发动机,继续深入开展柔性脉冲隔离装置(软隔舱)研制,减小发动机体积,降低发动机质量。

3) 固体发动机可控化的发展正在从开环控制向闭环控制,从开关式向连续可调式方向发展,能量管理方式也从预设式到随控式方向发展,向着高精度、快响应的方向发展。① 针对高功率密度驱动装置和高精度控制算法等方面开展技术攻关,寻求新的突破,支撑可控固体发动机技术的发展。② 开展可多次启停固体发动机研究,在可熄火固体推进剂、发动机燃烧室降压或泄压装置、重复点火技术等方面有所突破。③ 通过装药结构优化设计、喉部

调节装置研制、高压指数固体推进剂研制等,继续深入开展推力可调固体发动机研制,实现传统固体发动机工作模式的颠覆和功能拓展。④ 结合柔性脉冲隔离装置(软隔舱)等更先进的隔离方式、高效的多次点火技术,将脉冲发动机从双脉冲往更多的脉冲工作发展,进一步实现固体发动机能量分配管理的优化。

4) 固体发动机低易损技术从组件级往整机级发展。① 有效集成钝感固体推进剂和复合材料壳体等组件级低易损性实施途径,开展固体发动机整机级低易损性研究,根据具体使用环境有针对性地提出低易损技术方案。② 开展固体装药的尺寸效应和发动机组件间的相互影响研究,弄清固体装药、发动机结构等对发动机安全性的关键影响因素和方式。③ 以数值仿真和试验结合的手段,在发动机整机层面开展失稳机理研究,并开展扩稳技术的攻关工作。④ 通过环境危险实时感知与主动扩稳相结合等技术,研制主动安全的固体发动机,以全面通过低易损性试验考核,实现低易损技术的工程化。

此外,固体发动机的智能化也是未来的重要发展方向。为了支撑战术导弹实现智能化,固体发动机需要在智能可控、弹道最优、高安全性、能量自装配、状态感知、智能制造、免维护等方面深入发展。

4 结束语

高能化和轻质化是固体发动机永恒的追求,而可控化和低易损则是中小型固体发动机具备颠覆性的发展方向。俄罗斯、美国等已经在可控化和低易损方面实现了战术导弹武器装备的服役,走在了中小型固体发动机发展的前列。尽管国内相关技术也日益成熟,但较之俄、美仍存在一定的差距,需要逐个突破推进剂和热防护原材料、新型装药工艺、可调燃气阀门、压力闭环控制、有效扩稳等关键技术,加速工程化进程,为我国战术导弹的跨越式发展提供技术支撑。

参考文献

- [1] 王铮,胡永强.固体火箭发动机[M].北京:中国宇航出版社,1993.
- [2] 寇军强.固体火箭推进技术发展趋势及关键技术分析[J].弹箭与制导学报,1999(1):53-56.
- [3] 庞维强,张教强,国际英,等.21世纪国外固体推进剂的研究与发展趋势[J].化学推进剂与高分子材料,2005,3(3):

- 16-20.
- [4] 王恒生,程艳婷.新型含能黏合剂研究进展及发展趋势[J].化工科技,2015,23(5):70-74.
- [5] WEISER V, EISENREICH N, ECKL W, et al. Burning behavior of CL-20/GAP and HMX/GAP propellants [C]// The Proceeding of 31st ICT V144. 2000:1-6.
- [6] SURAPANENI R, DAMAVARAPU R. Process improvements in CL-20 manufacture [C]// The Proceeding of 31st ICT V108. 2000:1-4.
- [7] VANDER A E D M, KEIZERS H, VAN L D V, et al. Ballistic properties of HNF/Al/HTPB based propellants [C]// The Proceeding of 32nd ICT V133. 2001:1-11.
- [8] 刘轩,孙晓飞,洪昕林,等.GAP基含能热塑性弹性体制备及其在复合固体推进剂中的应用进展[J].化学推进剂与高分子材料,2018(6):16-22.
- [9] GOLFIER M, GRAINDORGE H, LONGEVIALLE Y, et al. New energetic molecules and the applications in energetic materials [C]// 29th ICT V3. 1998:1-18.
- [10] 刘志力,李小龙,黄进.新型含能材料的研究发展[J].信息记录材料,2016,17(5):31.
- [11] 刘梦威,严明.用于战术导弹推进系统的火箭发动机复合材料壳体[J].飞航导弹,2007(3):45-47.
- [12] 刘洋,陈茂林,杨涓.固体火箭发动机复合材料基础及其设计方法[M].西安:西北工业大学出版社,2012.
- [13] 郝会娟,沈兆宏,何吉宇,等.马来酸酐接枝三元乙丙橡胶 (EPDM-g-MAH)对三元乙丙橡胶内绝热成层材料性能的影响[J].上海航天,2019,36(217):78-82.
- [14] 孟宇,张晓虎,张炜,等.固体火箭发动机用复合材料树脂基体发展现状[C]//第十三届全国复合材料学术会议.2004:406-411.
- [15] 侯晓,付鹏,武渊,等.固体火箭发动机能量管理技术及其新进展[J].固体火箭技术,2017(1):1-6.
- [16] 王静.动能拦截弹技术发展现状与趋势[J].现代防御技术,2008(4):23-26.
- [17] 郭洋.电控固体推进剂技术发展现状及趋势[EB/OL].国防科技要闻.(2017-05-26)[2019-08-09].http://www.sohu.com/a/143652427_635792
- [18] 张泽霖,魏志军,张靖佳,等.磁场对固体燃料燃烧的研究进展[C]//中国宇航学会固体火箭推进专业委员会第34届学术年会.2017:1116-1124.
- [19] 王佳兴,魏志军,王宁飞.变推力固体火箭发动机非稳态影响因素研究[J].北京理工大学学报,2011,31(9):1018-1022,1121.
- [20] 王秀萍.美国固体火箭发动机的发展及其在机载战术导弹上的应用[J].航空兵器,2016(3):14-17.
- [21] 曲东才,赵国荣.LOSAT瞄准线动能导弹系统[J].飞航导弹,2010(6):28-32.
- [22] 戴耀松.国外战术导弹固体火箭发动机低易损性技术分析[J].推进技术,1998,19(1):98-101.
- [23] 李广武,赵继伟,杜春兰.常规导弹弹药安全性考核与技术[M].北京:中国宇航出版社,2015:18-21.
- [24] 殷调,闻泉,王雨时,等.北约不敏感弹药标准试验方法[J].兵器装备工程学报,2016,37(10):1-7.
- [25] Policy for introduction and assessment of insensitive munitions; STANAG4439 [S]. NATO, 2018.
- [26] Department of Defense Test Method Standard. Hazard assessment tests for non-nuclear munitions; MIL-STD-2105D [S]. 2011.
- [27] 王虎干.空空导弹固体火箭发动机舰用化关键技术分析[J].弹舰与制导学报,2015,35(2):88-92.
- [28] 李军,焦清介,庞爱民,等.固体发动机低易损性评估研究进展[J].固体火箭技术,2019,42(1):1-6,15.
- [29] 张恒宁,樊学忠,王晗.高能钝感推进剂配方改性的研究进展[J].科学技术与工程,2018(24):195-199.
- [30] 李焕,樊学忠,庞维强.低易损性固体推进剂钝感特性及评估试验方法研究进展[J].化学推进剂与高分子材料,2017,15(2):56-59.
- [31] VIOREL C A, TEODORESCU C. Safety and compatibility in service of munitions and explosives in Romania [J]. Defense Industries: Science and Technology Related to Security: Impact of Conventional Munitions on Environment and Population, 2004, 44:9-19.
- [32] PORTUGAL A, CAMPOS J, SIMOES P, et al. Energetic materials synthesis and development of insensitive and green compounds [J]. Defense Industries: Science and Technology Related to Security: Impact of Conventional Munitions on Environment and Population, 2004, 44:209-220.
- [33] VOLK F. Analysis of the detonation products of insensitive high explosives [C]//Proceedings of the 4th International Symposium on Analysis and Detection of Explosives. Jerusalem: Springer Publisher, 1992: 223-239.
- [34] BAKER E L, PHAM J, MADSEN T, et al. Shaped charge jet characterization and initiation test configuration for IM threat testing original research article [J]. Procedia Engineering, 2013, 58:58-67.
- [35] DOHERTY R M, SIMPSON R L. A comprehensive evaluation of several insensitive high explosives [C]// 28th International Annual Meeting of ICT. Karlsruhe: ICT, 1997:24-27.
- [36] 张志峰,马岑睿,高峰,等.战术导弹固体火箭发动机推进剂发展综述[J].飞航导弹,2007(4):53-56.