

文章编号: 1006-9941(2008)05-0633-06

低敏感高能发射药等离子体点火研究动态

肖正刚, 应三九, 周伟良, 徐复铭
(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要:介绍了发射药等离子体点火的试验、机理和模型研究的最新进展。分析了等离子体点火技术应用于低敏感高能发射药的可行性,提出了开展低敏感高能发射药等离子体点火研究的概念框架、关键内容以及相关技术措施等。低敏感高能发射药等离子体点火研究应该充分利用电热化学炮中等离子体点火技术的研究成果。在深刻认识低敏感高能发射药特殊配方与等离子体相互作用规律的基础上,合理进行等离子体能量输出功率调控和点火结构设计。

关键词:等离子体物理学; 发射药; 等离子体点火; 低敏感高能; 研究进展

中图分类号:TJ41; TQ562; O539

文献标识码:A

1 引言

近年来,随着高装填密度装药发射系统和新一代低敏感高能发射药的发展,装药表面单位面积需要具有较高的点火能量和能量传递至装药表面的效率,常规的点火源和点火技术难以有效和瞬时点燃装药。由于等离子体点火技术能缩短发射药点火延迟时间,点火重现性好^[1];容易消除装药温度敏感性^[2];能增加燃气生成速率^[3-4]等诸多优点,使其成为了难点燃固体发射药点火的替代技术和研究热点。

等离子体点火技术是在电热(化学)推进概念的 implementation 过程中发展起来的。随着电热(化学)推进研究的不断深入,电热化学炮(ETC gun)研究逐渐由电能增强技术转向电-等离子体点火-固体发射药燃烧的模式。这主要是为了减少电能对高压脉冲电源的体积要求,使得电源更易实现小型化,从而增强电热化学炮系统平台的兼容性和机动性,同时利用等离子体点火过程中发射药温度补偿技术,能较好地实现近期装备应用。这也是现阶段比较理想的提高火炮威力、且效费比不高的实际途径。目前国外对此项技术的研究已经成熟。

对于等离子体点火研究所用的发射药主要有单基药、双基药、三基药、混合硝酸酯火药如JA2火药等。由于低敏感高能发射药正处于配方研制阶段,几乎没

有关于其等离子体点火技术的报道。但是我们可以借鉴其他发射药等离子体点火研究的试验手段、研究方法和研究思想等。目前,等离子体与发射药相互作用规律研究虽然取得了一定的理论成果,但在实际工作中如何运用其进行含能材料配方设计还需要进一步的深入工作。研究低敏感高能发射药配方中不同含能材料配方键能与等离子体能量输出之间匹配关系,并设置相关调控参数,这将对筛选易于实现等离子体点火的低敏感高能发射药配方设计和进一步的研究工作具有重要指导意义。

本文介绍了发射药等离子体点火试验、机理和模型研究的最新进展。在此基础上论述了等离子体点火技术应用于低敏感高能发射药的可行性,提出了开展低敏感高能发射药等离子体点火研究的概念框架、关键研究内容以及相关技术措施等。

2 发射药等离子体点火试验、机理和模型研究的最新进展

2.1 试验手段

1998年,美国陆军研究实验室(ARL)成立了等离子体发射药相互作用(PPI)研究小组,专门负责发射药等离子体点火的试验及理论研究^[5]。为了更好地理解等离子体发射药相互作用,需要区分三种不同的影响因素:(a)等离子体组分(原子、电子、离子等)与发射药的化学效应;(b)高温等离子体的热效应;(c)辐射效应(UV以及其它电磁辐射)等。为了研究PPI,分别分析各种效应的影响,人们设计制造了不同实验装置,进行了试验。已经建立了包括密闭爆发器、燃烧中止试验装置、火炮模拟器和等离子体辐射试验装置、实际ETC

收稿日期: 2008-07-22; 修回日期: 2008-09-12

基金项目: 火炸药青年创新基金资助(42001060401, 40406010202), 南京理工大学科研发展基金资助(XKF05013)

作者简介: 肖正刚(1974-),男,副教授,博士后,主要从事含能材料及其装药技术研究。e-mail: xiaozhg@mail.njust.edu.cn

炮试验系统等试验装置在内的综合试验系统平台,利用化学和仪器分析手段,如热分解-色谱、质谱法、傅立叶红外光谱法、扫描电子显微镜、X射线荧光光谱法等,研究了各种发射药(M9,JA2,M30等)在不同等离子体能量输出作用下的表面现象和燃烧速度的改变,以期揭示等离子体作用与发射药的能量传递机理和发射药燃气对等离子体辐射的吸收能力。

密闭爆发器是研究发射药等离子体点火最常规的试验装置。该装置能获得发射药在等离子体点火后燃烧全过程的燃烧曲线,压力和时间的关系。德国Eisenreich等人^[6]在容积100 mL,发射药装填密度 $0.117\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,初始温度293 K,等离子体发生器输入能量分别为1 kJ、2 kJ和6 kJ的条件下,研究了透明和半透明JA2发射药的燃烧情况。结果表明,等离子体辐射能强烈影响固体发射药的点火和燃烧。高强度的等离子体辐射能显著缩小发射药的点火延迟。

为了更深入地研究等离子体点火发射药燃速增强机理,美国ARL的Kaste等人^[3]利用中止燃烧试验装置研究M30和JA2火药在等离子体点火燃烧中止后回收样品的表面现象,结果表明:在等离子体点火过程中而不是等离子体点火后,可以观察到发射药的燃速增强现象,由于发射药受到等离子体辐射后发射药表面受到等离子体热固粒子的侵蚀,导致发射药不规则的表面燃烧。增强机理主要是发射药表面积在等离子体点火过程的突增以及受到等离子体热固粒子的热传导等原因所致。

Beyer等^[7-8]设计了等离子体辐射分离试验装置,试验装置图如图1所示。该装置主要利用一个透明的聚碳酸酯管来分离电极放电过程中的非辐射因素。透明的聚碳酸酯管限制了等离子体辐射在可见光和近红外区域。基本消除了等离子体的化学效应。

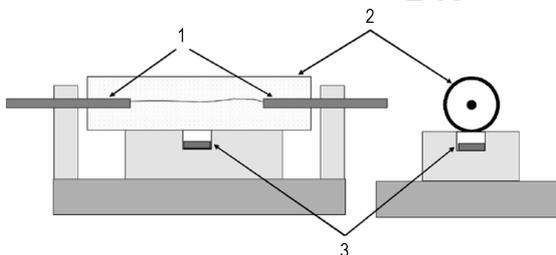


图1 分离等离子体辐射效应试验装置图

1—电极, 2—聚碳酸酯管, 3—样品

Fig.1 Experimental set-up of exposing propellant samples to plasma radiation

1—electrodes, 2—polycarbonate tube, 3—sample

Beyer等利用该装置研究了高温等离子体的辐射对M9、JA2、M30、M44等发射药的作用,通过质量损失测量、傅立叶红外分析(FTIR)和光学显微镜分析等方法,检测分析了气体产物,获得辐射后发射药表面形态的大量照片。研究发现,即使在单纯的等离子体辐射作用下,发射药的表面和内部结构都发生了很大变化,分解气体组分也不同,这与发射药配方密切相关。光学吸收系数对辐射能量的吸收起着决定性作用。结果证明,辐射对发射药的影响是主要的和决定性的,很好地验证了以前的研究成果^[9-10]。

美国、中国、英国、法德研究所、以色列以及韩国等研究机构还利用30 mm^[11]、60 mm^[12]、105 mm^[13]以及120 mm^[14-16]火炮模拟器或实际电热化学火炮分别进行了等离子体点火试验。与常规点火比较,等离子体点火均具有更短的点火延迟,点火重现性好,提高了点火效率,明显改善了弹道性能,最终提高了射击精度。

在等离子体发生器研究方面,设计了一系列适应不同模拟器和试验装置的等离子体毛细管和等离子体点火中心管,考察了不同高分子材料材质烧蚀对等离子体高能射流能量密度和效率放电等的影响^[15]。图2是美国ARL最新设计的用于30 mm火炮的等离子体点火中心管示意图^[11]。图3是点火中心管-药筒装药示意图。与以前研究相区别的是在点火管中增加了JA2火药。通过等离子体发生器中产生的等离子体点燃JA2火药,进而点燃装药床。等离子体仅仅作为点火激励源,这样做的好处是在保证等离子体点火优势的前提下,显著减小电能需求。

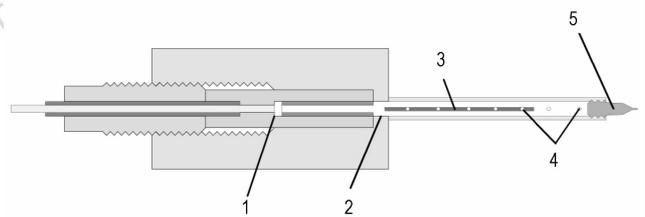


图2 用于30 mm火炮等离子体点火的等离子体发生器及点火中心管结构示意图

1—阳极, 2—阴极, 3—发射药, 4—喷孔, 5—测压孔

Fig.2 Schematic of plasma generator and igniter tube used in 30 mm cannon

1—anode, 2—cathode, 3—propellant,

4—vent holes, 5—pressure gauge

2.2 机理及模型研究

等离子体点火机理研究曾经是等离子体发射药相互作用的重要论题。由于等离子体点火不同于常规点

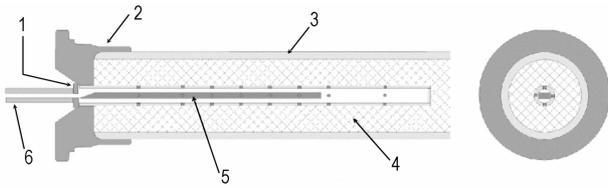


图3 带等离子体射流注入的用于30 mm火炮的点火中心管结构示意图

1—阴极, 2—烟蒂状底座, 3—药筒, 4—药床,
5—点火管中的发射药, 6—毛细管

Fig.3 Schematic of igniter tube used in 30 mm cannon with plasma injection

1—cathode, 2—stub case, 3—cartridge case,
4—propellant bed, 5—propellant in primer tube, 6—capillary

火,点火过程是一个包含热传导、对流和辐射的复杂过程。其中等离子体的一个显著特点是辐射作用,它主要以紫外线(UV)和可见光的形式存在。有关辐射在等离子体与发射药能量转移的作用机理研究也大量展开。

早在20世纪90年代,以色列研究人员与美国ARL等合作致力于研究等离子体高温辐射以及对点火过程的影响^[17-18]。他们利用105 mm ETC火炮模拟器以及发射光谱检测技术等记录得到了光强与波长、时间和位置的光谱曲线图,结果是等离子体传递至药室中的空气相比,通过直接热传导传递至发射药表面的热量是较少的,高温辐射能导致更多的热量被传递至发射药表面。

但是,也有学者认为,等离子体对发射药点火时的辐射作用不重要,甚至可以忽略。英国学者Taylor^[19]通过155 mm火炮射击试验研究认为,对于高功率的等离子体的点火,有证据表明辐射作用在能量转移方面处于主导地位,但是,在低功率、低密度等离子体的点火过程中,辐射作用大大减弱,可以忽略。他给出了实验证据,同时提出了一种新的理论假设,认为在低功率固体电热化学炮的等离子体点火过程中,能量的转移主要以金属蒸汽(metallic vapor)沉积的方式为主。

他还利用电感耦合等离子体原子发射药光谱法表征金属蒸汽在发射药表面的沉积及其含量^[20],该项研究的主要缺点在于仅能测量由等离子体喷孔喷射出来的等离子体中金属蒸汽沉积到惰性发射药表面的含量,没有考虑到等离子体点火瞬间,等离子体与发射药相互作用的动态特性,这使得离子体与发射药相互作用的能量转移机理研究中缺乏发射药配方和组成的贡献。因此金属蒸汽罩模型观点仍然需要进一步试验验证。

等离子体点火中止后回收发射药的X射线荧光光谱分析研究表明^[21]:金属蒸汽罩模型建立在Cu蒸气对惰性发射药表面的相互作用试验结果上,与等离子体的电能密度相关,没有充分考虑到等离子体射流与发射药之间的化学及辐射效应,对于辐射与热金属蒸气的能量转移机制的判别没有得出有力的结论。Cu在发射药表面沉积的相对含量不仅与等离子体的电能密度相关,还与等离子体发射药能量转移方式、发射药的配方及燃烧状况相关。不同配方发射药与等离子体的相互作用能导致等离子体与发射药相互之间能量转移方式的不同,从而影响Cu离子或原子沉积在发射药表面的相对含量。

美国ARL的研究集中于等离子体发射药点火机理的各个方面,甚至还考虑了等离子体化学效应^[22-24]。他们的研究表明辐射热流可引起火药温度升高、高温辐射改变化学反应速率(发射药热化学的改变、光化学反应的发生)等,能显著增强发射药的燃烧。

伴随着电热化学炮由电增强研究转向等离子体点火研究,为了减少电能,提高等离子体点火效率,更多的研究转向了等离子体点火发生器的设计方面。德国研究人员利用所谓的“受控点火机理”,设计了等离子体通道点火系统,并进行了120 mm ETC火炮射击试验^[25]。图4是该点火系统的示意图。

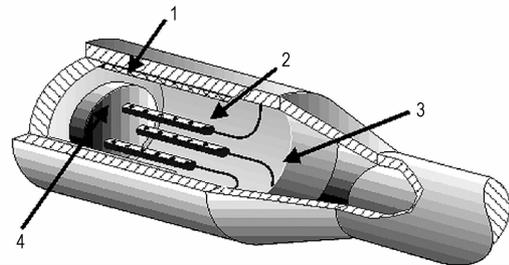


图4 等离子体通道点火系统

1—药筒, 2—管状发射药, 3—金属丝, 4—电流盘

Fig.4 Plasma channel ignition system

1—combustible cartridge case, 2—propellant tube,
3—fuze wire, 4—current distributor

该系统利用药筒底部的电流盘和金属引线以及穿过引线的管状发射药,分成三股通道均匀分布在药室中。当电容放电时,金属丝爆炸引发等离子体,通过高温辐射将等离子体能量传递至发射药表面。与传统的等离子体发生器相比,该点火系统能使装药中的等离子体点火能量分布更为均匀,点火过程更加平顺,也能实现高装填密度装药的点火。但其本质上还是利

用了综合点火机理,只是优化了等离子体点火系统的结构设计。

事实上,等离子体点火过程要考虑的因素是多种多样的,等离子体高能射流的能量密度、发射药的热分解、烧蚀、燃面的变化甚至等离子体发射药化学效应等均会影响到发射药的燃烧规律。辐射效应仅仅是其中一个显著的因素,在不同的点火条件和环境下可能会有所变化。因此需要建立一种耦合模型,将我们对等离子体发射药相互作用的全面理解囊括其中,从而能指导实际应用。

最近,密歇根大学的 Porwitzky 博士发表了多篇论文^[26-28],详细阐述了电热化学炮等离子体点火过程中考虑了毛细管等离子体发生器模型、等离子体-空气相互作用的计算化学流体动力学模型、发射药烧蚀-热效应模型以及等离子体鞘效应模型的耦合机制,其主要目的是建立等离子体发射药相互作用的 End-to-End 模型,能将我们对发射药等离子体点火过程中等离子体-发射药相互作用的全面理解囊括其中,并有所扩展和创新。

3 低敏感高能发射药等离子体点火可行性分析

新型低敏感高能发射药的研究计划是美国 ARL 在 2001 年 5 月于瑞士召开的 19 届弹道国际会议上最先披露的^[29],它兼具低易损性和高能的特点,将成为 21 世纪发射药及其装药的发展方向。

从目前的技术看,低敏感高能发射药最基本的配方设计为高能填充剂、含能低聚物增塑剂和新型含能粘结剂,美国当前研究的几种低敏感高能发射药中,最典型的就是基于当前研究的在含能氧丁环类热塑性弹性体粘合剂中使用象 RDX 或 CL-20 这样的含能添加剂^[30-31]。

由于新材料的筛选和评价研究、新试验技术存在一定的困难,研究进度迟缓,低敏感高能发射药研究处于配方设计和能量、力学及燃烧性能检测评价等阶段,易损性评价试验也正在进行。这种低易损性特征要求研究适于低敏感高能发射药的新型点火技术,以解决与低易损(LOVA)发射药类似的难点燃问题。

国内外对 LOVA 发射药的点火研究主要进行了如下工作^[32]:增加点火药量,即提供点火能量;改变点火药配方,增加点火药配方中的金属含量以提高点火冲量和高能粒子热固体颗粒。这种点火方式的优点是保留了原点火系统的兼容性,易于操作。但可能会带来装药弹道性能的改变,影响射击精度。

针对低敏感高能发射药中高能材料、含能增塑剂

以及含能热塑性弹性体等主要配方材料,进行等离子体点火研究首先要明确的是点火可行性的问题。

电热化学火炮推进技术中所涉及的等离子体一般由高压脉冲电源电弧放电产生,属于弱电离、有机-金属等多组分、和其它物质有强烈相互作用的高密度带电粒子组成的体系。由于受到放电管壁面的约束具有高温高压的性质,其温度在 10000 ~ 50000 K 范围之内,压力可达几十到几百兆帕,可以看成是一种高能粒子流。等离子体点火一般应用中,等离子体能量输出可达 200 kJ。

含能材料(如硝化纤维素、硝化甘油等)或高分子热塑性弹性体大多是由 C、H、O、N 四种元素组成。根据高能分子基团分析,这些含能材料的分子式中主要存在硝基(C—NO₂)、硝胺类(N—NO₂)和硝酸酯基(—ONO₂)等热解引发基团。C—NO₂(硝基类)、N—NO₂(硝胺类)和 O—NO₂(硝酸酯类)分子之间的键能分别为:C—N 单键 305 kJ·mol⁻¹,N—N 单键 165 kJ·mol⁻¹,N—O 单键 200 kJ·mol⁻¹,均在等离子体的能量作用范围之内。等离子体点火射流中的高能超细粒子的辐射及气流的热传导、对流的共同作用,含能材料的化学键将会断裂、离解,最后导致所谓的含能材料的点火、燃烧。

利用常规的点火技术和等离子体点火技术的研究对比表明^[33]:黑火药和 2/1 樟等传统的点火药主要利用其产生的化学能点燃发射药,热传导方式在点火能量转移过程中占主要地位。而等离子体点火方式则综合了热传导、对流和辐射等多种热转移机理,并均有所增强,从而导致了在较低的点火能量下,能缩短点火延迟时间,点火重现性好,从而能显著提高射击精度。低敏感高能发射药的点火机理研究应该基于一般发射药等离子体点火机理,未来研究的着重点应该在于研究低敏感高能发射药配方中不同含能材料配方键能与等离子体能量输出之间匹配关系,并设置相关调控参数,从而筛选易于实现等离子体点火的低敏感高能发射药配方及其装药结构。

等离子体点火是随着电热化学炮中由电增强技术转向电点火技术而发展起来的。对此进行的试验和理论研究已经持续了近 10 年,具备了较为完善的试验基础,得出了符合诸多试验结果的理论解释,数值模拟研究工作也在深入。将电热化学炮中的等离子体点火技术引入低敏感高能发射药的点火研究是自然的、也是可行的。相关的研究工作也正在进行之中。

4 概念设计和实施

应该明确的是:低敏感高能发射药等离子体点火研究应该是建立在电热化学炮中等离子体点火技术研究成果基础之上的。应该借鉴和利用其研究的最新成果,尽量少走弯路。因为实施等离子体点火的相关技术,诸如高功率脉冲电源技术等均是共性技术,已有相当成熟的基础,只需针对低敏感高能发射药的特殊配方进行重新优化设计即可。在深刻认识低敏感高能发射药特殊配方与等离子体相互作用规律的基础上,合理进行等离子体能量输出和结构设计,应该是低敏感高能发射药等离子体点火研究的一个主要着力点。现阶段应该开展的主要工作有:

(1) 低敏感高能发射药配方键能水平的量子化学计算。在已有含能材料键能量子化学计算的基础上,计算高能材料、含能增塑剂以及含能热塑性弹性体等主要配方材料中的相关基因受到高能辐射时的离解、断裂能量;确定主要配方材料中受到等离子体辐射时优先均裂基因。这是进行等离子体能量输出设计的基础。

(2) 含能材料配方键能和等离子体高能射流能量场相互作用的匹配和调控参数的设置。等离子体能量流场与含能物质优先均裂基因之间的相互作用对调节等离子体能量输出具有重要指导意义。可根据配方、含能基因热解引发的稳定性和装药结构等主要参数的变化,合理调控等离子体能量输出功率,从而实现发射药稳定而高效的等离子体点火。传统的发射药等离子体点火试验均是研究发射药对于等离子体高能射流辐射等效应的响应等方面的内容,关于筛选等离子体点火效应显著的发射药配方研究的内容不多,在低敏感高能发射药配方设计中提早开展这一工作,对于筛选易于实现等离子体点火的低敏感高能发射药配方设计和研究工作具有重要指导意义。

(3) 在低敏感高能发射药配方设计和易损性评价研究的基础上,设计合适的等离子体点火方案和装药结构是进行低敏感高能发射药及其装药点火设计的重要一环。目前火炮推进技术已发展到革命性的电磁高速推进阶段,作为电热化学推进概念中的等离子体点火技术已经较为成熟了,但要实现武器化应用,在等离子体点火系统和新型发射药装药结构方面还需要进一步工作,等离子体能量输出更加均匀分布,降低点火能量的需求,提高等离子体点火效率,设计出结构更加精巧的等离子体点火系统和发射药装药结构将是今后一个时期的主要研究内容。而常规方式难点燃的低敏感

高能发射药的成功研制,将会为等离子体点火技术提供一个很好的应用平台。

(4) 建立和完善低敏感高能发射药等离子体点火研究在线试验平台。建立小型实验室规模的低敏感高能发射药等离子体点火的微小型高压脉冲电源系统、等离子体发生器、试验模拟器以及较为完善的相关检测手段,如空气或模拟器试验高速摄像系统、X射线检测系统、多路隔离电源电压、电流和压力检测系统、点火瞬间发射药分解-色谱-质谱联动在线气体成分系统等等。获得等离子体点火瞬间真实和准确的原始试验数据是从事进一步研究的基础。

(5) 发展低敏感高能发射药特殊配方等离子体点火过程中热解、烧蚀和反应动力学耦合模型,提高试验数据的解释能力。阐述毛细管等离子体发生器模型、等离子体-空气相互作用的计算化学流体动力学模型、发射药烧蚀-热效应模型以及等离子体鞘效应模型的耦合机制的适用范围。

5 结论

低敏感高能发射药等离子体点火研究应该充分利用电热化学炮中等离子体点火技术研究成果。在深刻认识低敏感高能发射药特殊配方与等离子体相互作用规律的基础上,合理进行等离子体能量输出功率调控和结构设计,应该是低敏感高能发射药等离子体点火研究的一个主要着力点。

参考文献:

- [1] Fair H D. The science and technology of electric launch [J]. *IEEE Trans Magn*, 2001, 37(1): 25 - 32.
- [2] Guccio M, Stobie I, Oberle W. Electrothermal-chemical (ETC) temperature sensitivity of JA27-perf propellant, AD-A310377 [R]. Maryland: U S Army Research Laboratory, 1996.
- [3] Kaste P, Birk A, Kinkennon A, et al. Analysis of burning rate phenomena and extinguished solid propellants from an interrupted closed bomb with plasma igniter [J]. *IEEE Trans Magn*, 2001, 37(1): 173 - 177.
- [4] White K J, Stobie I, Oberle W, et al. Combustion control requirements in high loading density solid propellant ETC gun firings [J]. *IEEE Trans Magn*, 1997, 33(1): 350 - 355.
- [5] Shaw R W, Mann D M, Anderdon W R, et al. Army plasma/propellant interaction workshop, AD-A370770 [R]. Maryland: U S Army Research Laboratory, 1999.
- [6] Koleczko A, Ehrhardt W, Kelzenberg S, et al. Plasma ignition and combustion [J]. *Propell Explos Pyrot*, 2001, 26(2): 75 - 83.
- [7] Schroeder M A, Beyer R A, Pesce-Rodriguez R A. Scanning electron microscope examination of JA2 propellant samples exposed to plasma radiation [J]. *IEEE Trans Magn*, 2005, 41(1): 350 - 354.
- [8] Beyer R A, Pesce-Rodriguez R A. The response of propellant to plasma

- radiation[J]. *IEEE Trans Magn*, 2005, 41(1): 344 – 349.
- [9] Kappen K, Beyer R. Progress in understanding plasma-propellant interaction[J]. *Propell Explos Pyrot*, 2003, 28(1): 32 – 36.
- [10] Hankins O E, Bourham M. Observations of visible light emission from interactions between an electrothermal plasma and a propellant[J]. *IEEE Trans Magn*, 1997, 33(1): 295 – 298.
- [11] Beyer R A, Brant A L. Plasma ignition in a 30-mm cannon[J]. *IEEE Trans Magn*, 2007, 43(1): 294 – 298.
- [12] Kay A, Raupp J, Mura D, et al. Plasma ignition of consolidated propellants in a 60-milimeter ETC gun[C] // 19th International Symposium on Ballistics, Switzerland, 2001: 187 – 194.
- [13] Goldenberg C, Zoler D, Shafir N, et al. Plasma-propellant interaction at low plasma energies in ETC guns[J]. *IEEE Trans Magn*, 2003, 39(1): 227 – 230.
- [14] Shin J D, O'Reilly J J, Keyser D T, et al. Large caliber firing with electro thermal-chemical ignition (ETI) [C] // 22nd International Symposium on Ballistics, Vancouver BC, Canada, 2005: 405 – 412.
- [15] Kim S H, Yang K S, Lee Y H, et al. ETC ignition research on 120 mm gun in Korea [C] // The 14th Electromagnetic Launch Symposium, Victoria, British Columbia, Canada, 10 – 13 June, 2008.
- [16] Ma Z, Li J, Dong J, et al. Development of 120 mm electrothermal chemical launcher [C] // The 14th Electromagnetic Launch Symposium, Victoria, British Columbia, Canada, 10 – 13 June, 2008.
- [17] Wald S, Alimi R, Bakshi L, et al. Electrothermal-chemical research at Soreq nuclear research center, Israel[J]. *IEEE Trans Magn*, 2005, 41(1): 165 – 170.
- [18] Alimi R, Borenstein A, Goldenberg C, et al. ETC Research at Soreq NRC, Israel[J]. *IEEE Trans. Magn*, 2001, 37(1): 11 – 15.
- [19] Taylor M J. Consideration of the energy transfer mechanisms involved in SPETC ignition systems[J]. *IEEE Trans Magn*, 2003, 39(1): 262 – 268.
- [20] Taylor M J. Ignition of propellant by metallic vapour deposition for an ETC gun system[J]. *Propell Explos Pyrot*, 2001, 26(3): 137 – 143.
- [21] 肖正刚, 应三九, 徐复铭, 等. 等离子体点火中止后回收发射药的 X 射线荧光光谱分析[J]. *含能材料*, 2007, 15(5): 530 – 533.
XIAO Zheng-gang, YING San-jiu, XU Fu-ming, et al. X-Ray fluorescence spectroscopic analysis of recovered propellants after interrupted-burning ignited by plasma[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials* (Hanneng Cailiao), 2007, 15(5): 530 – 533.
- [22] Fair H D. Progress in electromagnetic launch science and technology [J]. *IEEE Trans Magn*, 2007, 43(1): 93 – 98.
- [23] Fair H D. Electromagnetic launch science and technology in the United States enters a new era[J]. *IEEE Trans Magn*, 2005, 41(1): 158 – 164.
- [24] Fifer R A, Sagan E S, Beyer R A. Chemical effects in plasma ignition [J]. *IEEE Trans Magn*, 2003, 39(1): 218 – 222.
- [25] Weise Th H G G, Maag J, Zimmermann G, et al. National overview of the German ETC program[J]. *IEEE Trans Magn*, 2003, 39(1): 35 – 38.
- [26] Porwitzky A J, Keidar M, Boyd I D. Modeling of the plasma-propellant interaction[J]. *IEEE Trans Magn*, 2007, 43(1): 313 – 317.
- [27] Porwitzky A J, Keidar M, Boyd I D. On the mechanism of energy transfer in the plasma-propellant interaction[J]. *Propell Explos Pyrot*, 2007, 32(5): 385 – 391.
- [28] Porwitzky A J, Keidar M, Boyd I D. Progress towards an end-to-end model of an electrothermal chemical gun [C] // The 14th Electromagnetic Launch Symposium, Victoria, British Columbia, Canada, 10 – 13 June, 2008.
- [29] Horst A, Baker P, Rice B, et al. Insensitive high energy propellants for advanced gun concepts [C] // 19th International Symposium on Ballistics, Switzerland, 2001: 17 – 24.
- [30] 徐复铭. 21 世纪先进发射药: 低敏感高能发射药(1): 新材料和新实验技术[J]. *南京理工大学学报*, 2003, 27(5): 551 – 560.
XU Fu-ming. Advanced gun propellants of the 21st century: Insensitive high energy propellants (1): New materials and experimental technology[J]. *Chinese Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2003, 27(5): 551 – 560.
- [31] 徐复铭. 21 世纪先进发射药: 低敏感高能发射药(2): 新配方、装药、点火和理论模拟技术[J]. *火炸药学报*, 2003, 26(4): 1 – 4.
XU Fu-ming. Advanced gun propellants of the 21st century: Insensitive high energy propellants(2): New formulation, charge, ignition and simulation[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2003, 26(4): 1 – 4.
- [32] 廖昕. 低易损性发射药性能研究[D]. 博士学位论文. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [33] 薛昇炜, 肖正刚, 应三九, 等. 发射药等离子体点火与常规点火性能的比较研究[C] // 2007 年弹道学术交流会, 中国长沙, 2007. 12.

Progress in Plasma Ignition of Insensitive High Energy Propellants

XIAO Zheng-gang, YING San-jiu, ZHOU Wei-liang, XU Fu-ming

(School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Recent developments of experiments, mechanism and modeling research on the plasma ignition of propellants were introduced. The feasibility of plasma ignition technology in the application of insensitive high energy propellants was discussed. The concepts, frames, keynotes and related research tactics in plasma ignition of insensitive high energy propellants were proposed. The plasma ignition research of insensitive high energy propellants should benefit from the research fruits of plasma ignition in electrothermal chemical gun. Based on the interaction between the plasma and special formulations in insensitive high energy propellants, the plasma energy output power adjustment and structural design of igniter can be carried out.

Key words: plasma physics; propellant; plasma ignition; insensitive high energy propellant; development trend