

激光等离子体点火在航空航天动力系统的应用

李晓晖^{1,2}, 于欣^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 可调谐(气体)激光技术重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 哈尔滨工业大学 光电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 激光等离子体点火以其点火位置和时序方便可控、工况适应性好、电磁干扰小、启动快、可实现重复点火等优点, 成为航空航天动力系统极具潜力的一种点火技术。介绍了激光等离子体点火的技术特点及其基本物理过程; 其次, 回顾了激光等离子体点火在航空航天动力系统应用的研究现状, 尤其是哈尔滨工业大学近年来取得的研究成果; 最后, 分析了激光等离子体点火面临的问题, 并对其发展前景进行了展望。分析表明, 激光等离子体点火在无毒非自燃推进剂的火箭发动机和碳氢燃料的超燃冲压发动机的可靠重复点火上具有广泛的应用前景, 但要实现工程应用, 仍需要解决激光点火器与航空航天动力系统的一体化设计、激光点火器的小型化和工程化等问题。

关键词: 激光等离子体; 点火; 航空航天动力系统

中图分类号: O539 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1136001

Application of laser plasma ignition in aerospace propulsion systems

Li Xiaohui^{1,2}, Yu Xin^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;

2. Institute of Opto-electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Laser plasma ignition(LPI) is viewed as a promising ignition technique for aerospace propulsion systems with its many merits over conventional ignition techniques, including easier control of the ignition position and timing, wider working condition, less electromagnetic interference, rapid response and feasibility of reliable re-ignitions, etc.. Firstly, an introduction to the technical benefits and physical processes of the LPI technique was given. Then the developments in the applications of the LPI in aerospace propulsion systems were summarized, especially the achievements that had been made in National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology. Finally, the challenges and prospects in the application of the LPI in aerospace propulsion systems were analyzed. The LPI has demonstrated great prospects in reliable re-ignition of the rocket engines fueled with non-toxic non-hypergolic propellants and scramjet engines fueled with hydrocarbon fuels. However, to facilitate the in orbit and on board applications, further progress should be made in the integrated system design of the LPI system with the propulsion systems, and in the miniaturization and engineering design of the LPI system.

Key words: laser plasma; ignition; aerospace propulsion systems

收稿日期: 2016-03-08; 修订日期: 2016-04-09

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项 (2012YQ040164); 国家自然科学基金 (61505040, 61275127, 91441130); 中国博士后基金 (2015M570291, 2016T90288); 黑龙江省博士后基金(LBH-Z15054); 中央高校基本科研业务费专项资金(HIT.NSRIF. 201628)

作者简介: 李晓晖(1983-), 男, 讲师, 博士, 主要从事激光诱导等离子体点火、激光诱导击穿光谱技术方面的研究。Email: lixiaohui@hit.edu.cn

0 引言

重复可靠的点火是航空航天动力系统普遍面临的关键技术难题。对于航空动力系统,要求点火系统能够实现地面的可靠点火和高空熄火后的再点火。而对于其中的超燃冲压发动机,燃烧室入口来流速度快,燃料在燃烧室内的驻留时间短,而碳氢燃料的点火延迟时间远大于驻留时间,必须采用外源解决点火问题;同时强烈的激波-边界层干扰、湍流-燃烧耦合等极端条件更增加了点火的难度。对于航天动力系统,深空探测、航天器定位、交会对接等应用所需的姿轨控动力系统要求能够在轨周期性地重复工作^[1]。而推进剂的清洁化和无毒化使得传统的有毒自燃推进剂逐步被氧/甲烷、氧/氢、氧/煤油等无毒非自燃的推进剂替代,因此需要解决航天动力系统的在轨重复可靠点火问题。

航空动力系统的点火方式包括电火花塞、射流点火、引导点火等^[2]。电火花塞工作时通常需要高达几十千伏的脉冲高压,会引起严重的电磁干扰,影响动力系统和载荷的安全;射流点火和引导点火需要额外设计燃料供应系统,增加了系统的复杂性。航天动力系统的点火方式包括固体火药、火炬、电火花塞等。固体火药点火只能完成有限次数的点火,同时需要解决火药的安全封装和隔离问题;火炬点火器结构复杂^[3],其自身也需要解决点火的问题;电火花塞同样存在电磁兼容性的问题。因此,航空航天动力系统领域都亟需开发新型的点火技术,实现可靠重复点火。

激光等离子体点火(Laser Plasma Ignition, LPI)是在传统点火技术面临技术瓶颈的背景下发展起来一种新型点火技术。它是将激光聚焦到混合燃气中,经过多光子电离、雪崩电离、逆韧致辐射等过程诱导产生等离子体,通过等离子体引起的热效应和燃烧化学反应效应,诱导产生燃烧活性基团,形成初始火核,然后经过初始火核的传播实现混合燃气的点火。LPI 与激光热点火(激光直接加热可燃气体点火)、激光化学点火(激光通过光化学效应解离可燃气体分子产生活性基团点火)不同,不要求激光波长与燃气分子的吸收带匹配,因此可以采用当前成熟的激光器系统^[4-5]。

相比于传统的点火技术,LPI 具有一系列的优点。首先,LPI 可在更大的当量比范围内实现成功点火^[6-7],具有更低的贫燃极限,有利于降低燃烧系统的 NO_x 排放量;其次,LPI 不使用金属电极,避免了经由电极向燃烧室壁面传导引起的热量损失^[8],有效降低了熄火率;第三,借助光学系统,LPI 可以方便地控制点火点的位置和点火时序,从而实现点火系统的优化设计;第四,通过光纤传导可以实现多点同步点火^[9];最后,LPI 的电磁兼容性优于电火花塞点火系统^[10]。由于上述优点,LPI 近年来得到了各国研究人员的普遍关注^[11],在天然气发动机^[6]、内燃机^[12]、火箭发动机^[10, 13]、超燃冲压发动机^[14-15]等动力系统上得到了广泛的应用。

文中介绍了 LPI 的技术特点及其物理过程,回顾了近年来 LPI 在航空航天动力系统应用的研究成果,分析了 LPI 在航空航天动力系统应用面临的问题,并对其发展前景进行了展望。

1 激光等离子体点火的物理过程

LPI 是涉及激光等离子体物理、燃烧化学动力学、流体力学等多学科领域的复杂的物理过程,主要包括激光等离子体的形成、冲击波的传播、燃烧活性基团的产生、初始火核的发展等过程,跨越的时间尺度从激光等离子体形成对应的纳秒量级到冲击波传播对应的微秒量级,再到燃烧活性基团形成和初始火核发展对应的毫秒量级^[16],如图 1 所示。

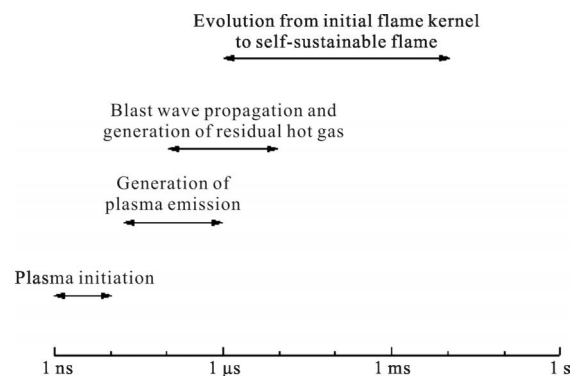


图 1 LPI 的物理过程及对应的时间尺度^[16]

Fig.1 Physical processes of LPI and corresponding time scales^[16]

(1) 激光等离子体的形成

当激光经透镜聚焦到混合燃气中,如果焦点处的峰值功率密度超过一定阈值,即可诱导产生等离

子体^[17]。对于纳秒脉冲激光,激光等离子体形成的物理机制主要包括多光子电离和雪崩电离,其形成过程为纳秒量级。

多光子电离是指原子或分子同时吸收多个光子后实现电离^[18],其物理过程可以表述为:

$$M+n h \nu \rightarrow M^{+}+e \quad (1)$$

式中: M 为原子或分子; n 为原子或分子同时吸收的光子数; $h \nu$ 为入射激光的光子能量; e 为电子。

雪崩电离是指焦点处的初始电子在激光场的作用下,通过逆韧致辐射过程吸收激光能量,增加动能,然后通过如下的级联过程实现电子数量的指数增加^[18]:

$$M+e \rightarrow M^{+}+2e \quad (2)$$

(2) 冲击波的传播

激光等离子体形成后,由于其内部的高温 and 高压,会迅速膨胀并产生向外快速传播的冲击波。冲击波锋面的位置、传播速度和温度可以通过 Taylor 爆炸波模型进行描述^[19]。

(3) 燃烧活性基团的产生和初始火核的发展

在激光等离子体作用下,通过碰撞解离、三体复合、辐射激发等过程,会在混合燃气中形成大量的燃烧活性基团。这些活性基团诱发并促进了燃烧化学反应,并形成激光等离子体初始火核。初始火核只有通过传播形成自持的火焰,混合燃气才能够实现成功点火。这个过程不仅与激光等离子体引起的热效应有关,而且与初始火核内部的燃烧化学反应、燃烧活性基团浓度、流场结构等相关。如图 2 所示为甲烷扩散燃气 LPI 过程初始火核的发展。

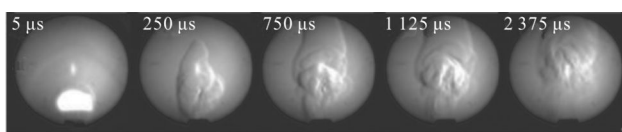


图 2 甲烷扩散燃气 LPI 过程初始火核的发展

Fig.2 Temporal evolution of the initial flame kernels during LPI of methane diffusion flame

2 国外航空航天动力系统 LPI 的研究进展

在航天动力系统领域,为了解决火炬点火器和电火花塞等传统点火方式结构复杂、电磁干扰严重等问题,各国研究人员开展了一系列 LPI 的验证性研究工作。

美国国家航空航天局 (NASA) 路易斯研究中心的 Liou^[10]采用波长 1 064 nm 的 Nd:YAG 激光对气氧/气氢(GOx/GH₂)、气氧/气甲烷(GOx/GCH₄)、气氧/煤油(GOx/RP-1)、气氧/一氧化碳(GOx/GCO)四种推进剂进行了 LPI 实验,获得了推进剂混合比、燃烧室压力、激光脉冲能量和重复频率等实验条件对点火特性的影响。同时,研究了 LPI 的电磁兼容性,发现 LPI 的电磁干扰比电火花塞点火系统低一个数量级。

美国 NASA 马歇尔空间飞行中心与洛斯阿拉莫斯国家实验室合作,提出了基于光纤传输的火箭发动机 LPI 多点点火技术方案^[3],如图 3 所示。采用两台波长 1 064 nm 的 Nd:YAG 激光器对 GOx/GH₂、GOx/CH₄ 和 GOx/RP-1 等多种推进剂进行了双脉冲组合 LPI 实验,研究发现,利用双脉冲组合可以有效降低对激光点火总能量的需求。

德国宇航局的 Oschwald 课题组^[20-24]采用高速摄影和纹影技术,在火箭发动机模拟燃烧器(见图 4)上对 LOx/GH₂ 和 GOx/GCH₄ 推进剂的 LPI 的特性进行了研究,获得了推进剂喷注点火和火焰驻定的瞬态过程^[22-23],并开展了高空低气压条件下的 LPI 实验,模拟火箭发动机高空点火的工况^[21]。

德国宇航局的 Manfretti^[13]研究了 LOx/GCH₄ 和 LOx/GH₂ 推进剂的激光等离子体点火特性,采用直接击穿点火和烧蚀点火两种方式实现了成功点火,研究表明烧蚀点火有利于降低点火所需的能量。

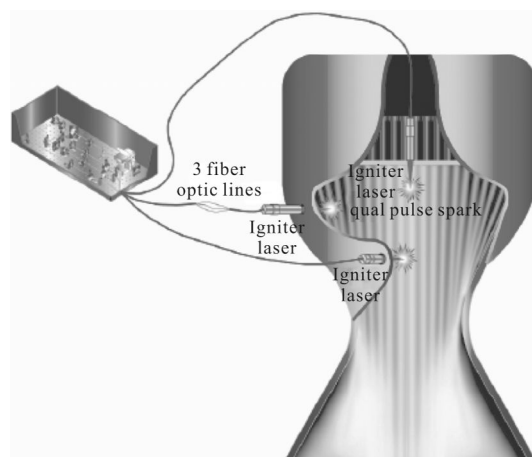


图 3 NASA 马歇尔空间飞行中心提出的火箭发动机 LPI 多点点火方案^[3]

Fig.3 Multi-point laser ignition scheme for rocket engines proposed by NASA Marshall Space Flight Center^[3]

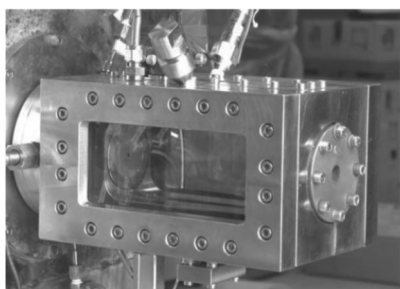


图 4 德国宇航局用于开展 LPI 试验的燃烧模拟器

Fig.4 Model combustion chamber designed for LPI experiment, DLR

美国普林斯顿大学的 Gajdeczko 等^[25]开展了液

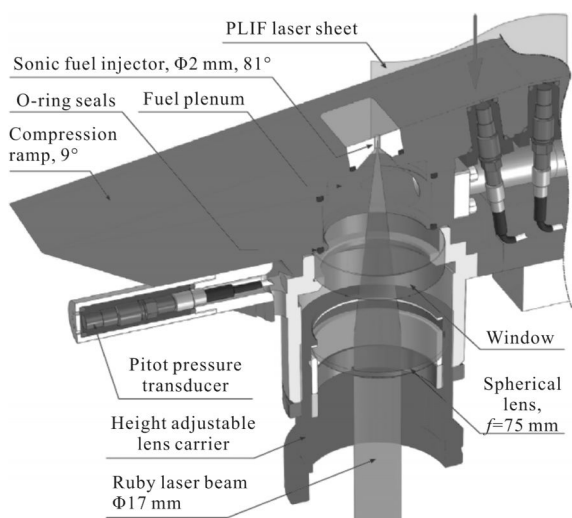
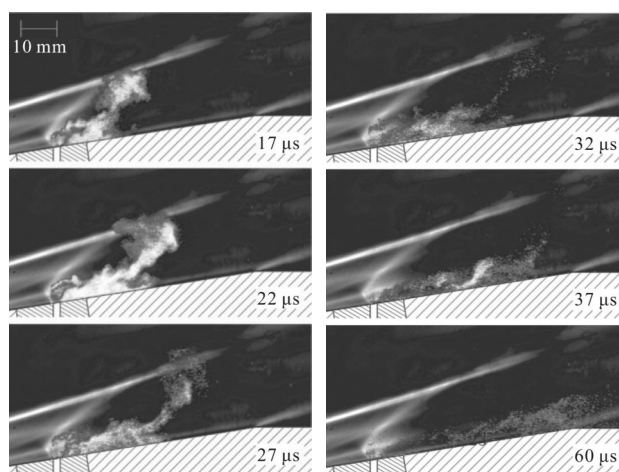


图 5 模型超燃冲压发动机 LPI 的实验装置及获得的 OH 基团的时间演化图像^[14]

Fig.5 Illustration of the LPI apparatus for model scramjet and the temporal evolution of the OH radicals generated by the laser plasma^[14]

氧/酒精推进剂的激光等离子体点火工作,采用 Nd:YAG 激光作用,研究了燃烧室压力对于激光等离子体点火的作用,研究表明,随着燃烧室压力的降低,产生激光等离子体所需的脉冲能量增大。

在航空动力系统领域,澳大利亚昆士兰大学的 Brieschenk 和新南威尔士大学的 O'Byrne^[14]在超燃冲压发动机上利用红宝石激光开展了 LPI 实验,利用平面激光诱导荧光技术研究了激光等离子体形成的 OH 基团的时间演化过程。研究表明,激光等离子体的作用有助于超声速气流中 OH 基团的形成,如图 5 所示。



3 国内航空航天动力系统 LPI 的研究进展

国内早期的激光点火工作主要集中于固体含能材料的激光加热点火。南京理工大学的沈瑞琪等^[26]研究了硼/硝酸钾含能材料的激光点火过程,分析了材料表面形成的等离子体和烧蚀对点火特性的影响。研究表明,激光等离子体几乎不吸收入射的激光能量,但是烧蚀会阻碍激光能量向含能材料的注入。

国内最早开展 LPI 航空航天动力系统应用研究的是哈尔滨工业大学作者所在的课题组。近年来,课题组先后完成了 LPI 的机理研究、基础模拟实验、动力系统外场试验、激光点火器样机研制等系列研究工作。

在 LPI 机理研究方面,通过对 LPI 的局部当量比、等离子体火花能量、OH 基团浓度及最终的点火结果进行二维参数关联分析,获得了影响 LPI 最终

结果的关键因素是激光等离子体形成早期初始火核中的 OH 基团浓度,提出了激光等离子体点火热效应-燃烧化学反应效应协同作用的点火机理^[27]。

在 LPI 特性研究方面,系统研究了甲烷/空气预混燃气和甲烷非预混燃气系统的最小点火能量、点火延迟时间、吹熄时间等参数及其随混合燃气当量比、激光脉冲能量等实验条件的变化规律^[27-28]。如图 6 所示为不同点火位置获得的甲烷/空气预混燃气最小点火能量随当量比的变化规律,如图 7 所示为甲烷扩散火焰 LPI 最小点火能量的二维分布^[27]。

在航天动力系统 LPI 试验研究方面,研制了火箭发动机 LPI 模拟燃烧器,如图 8 所示。在航天科技集团六院北京航天试验技术研究所、上海空间推进研究所、国防科技大学等单位系统开展 LOX/LCH₄、LOX/GCH₄、GOX/GCH₄、GOX/GH₂ 等推进剂的 LPI 试验,成功实现了氧/甲烷、氧/氢推进剂的激光等离

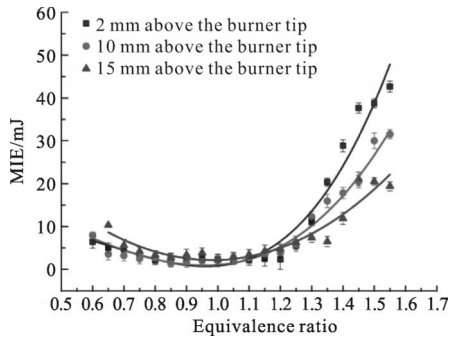


图 6 甲烷/空气预混火焰不同点火位置 LPI 的最小点火能量^[28]

Fig.6 Minimum ignition energy of LPI of premixed methane/air flames vs equivalence ratio obtained at different ignition positions^[28]

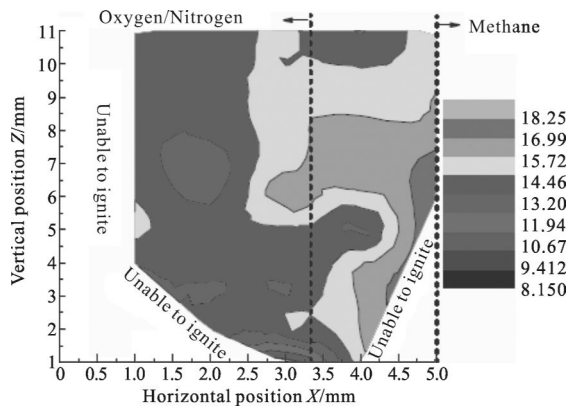


图 7 甲烷扩散火焰 LPI 最小点火能量的二维分布^[27]

Fig.7 Distribution of the minimum ignition energy of LPI of methane diffusion flame^[27]

子体点火,获得了推进剂喷注形式、流量、混合比、点火位置等参数对点火能量、点火延迟时间的影响,为 LPI 的工程应用奠定了基础,如图 9 所示为 LOX/LCH₄ 推进剂 LPI 火核发展的时间演化图像^[29]。

在航空动力系统 LPI 试验研究方面,课题组与国防科学技术大学高超声速冲压发动机技术重点实验室合作,开展了超声速来流条件下碳氢燃料的 LPI 试验,成功实现了乙烯和煤油的激光等离子体点火,如图 10 所示为煤油激光等离子体点火的时间演化过程^[15]。

在激光点火器样机研制方面,课题组成功研制了小型化的初步满足工程应用的激光点火器样机,该点火器无需水冷,脉冲能量 20 mJ,重频 5 Hz。同时

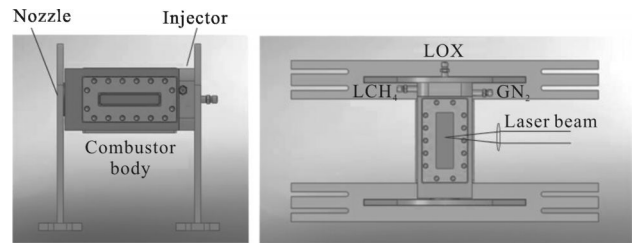


图 8 激光等离子体点火燃烧模拟器三维模型^[29]

Fig.8 Three dimensional model of the optically-accessible combustor for LPI^[29]

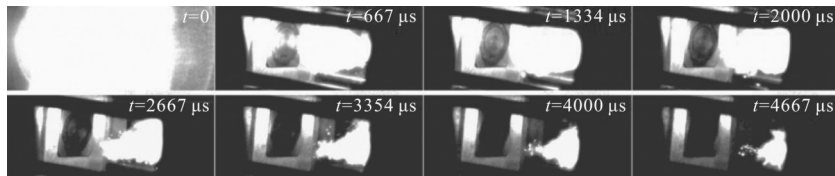


图 9 LOX/LCH₄ 激光等离子体点火过程的时间演化特性^[29]

Fig.9 Temporal transient of the LPI of LOX/LCH₄ propellant^[29]

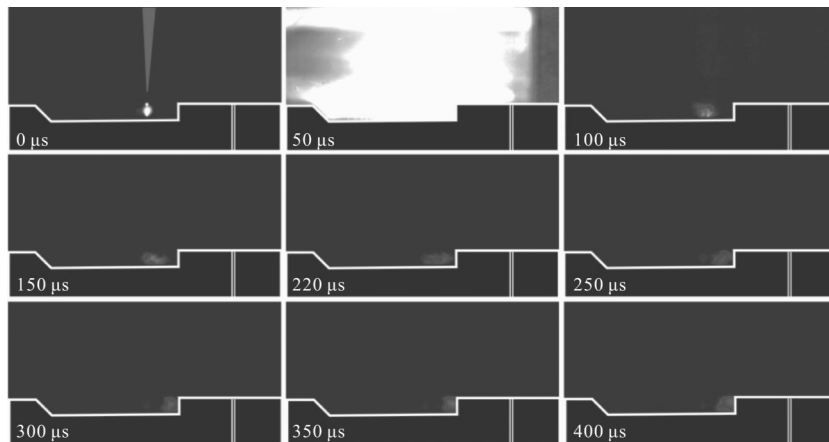


图 10 超燃冲压发动机液态煤油激光等离子体点火过程^[15]

Fig.10 Temporal evolution of LPI of kerosene in scramjet engines^[15]

设计了激光点火器与航空航天动力系统的接口,初步满足应用需求。

4 激光等离子体点火面临的问题

LPI 的研究进展充分证明其在航空航天动力系统上应用的可行性,但要实现 LPI 的实际应用,仍有诸多问题需要解决。

(1) 需要加强 LPI 系统和航空航天动力系统的总体设计。LPI 系统与传统的点火系统在结构、控制等方面均存在较大差异,同时还存在激光器的散热、光学窗口隔热防尘等特殊要求,因此需要从总体的角度统筹考虑 LPI 系统与航空航天动力系统的接口和布局,解决结构、热管理和控制等问题。

(2) 激光点火器的工程化研制有待强化。激光点火器是 LPI 系统的核心器件,需要解决激光器的小型化、轻质化、工程化等设计要求,满足航空航天动力系统的可靠性、环境适应性、电磁兼容性等相关设计要求。

5 结论

激光等离子体点火技术以其特有的技术特点,在航空航天动力系统上得到了初步应用。笔者课题组系统开展了激光等离子体点火的机理和应用研究,并在典型航空航天动力系统上成功实现了点火。未来应着力开展激光等离子体点火技术的工程应用研究,解决激光点火器与动力系统的一体化设计、激光点火器的小型化和工程化设计等问题。随着研究的深入开展,有望在不久的将来实现 LPI 在航空航天动力系统的工程应用。

参考文献:

- [1] Wang Ailing, Wu Jianjun. Research on electrical pulse ignition technology for GO₂/kerosene engine [J]. *Aerospace Shanghai*, 2006(6): 14-17. (in Chinese)
王爱玲, 吴建军. 气氧/煤油发动机电点火技术研究[J]. 上海航天, 2006(6): 14-17.
- [2] Xi Wenxiong, Wang Zhenguo, Liu Weidong, et al. Experimental comparison on the scheme of ignition in dual-mode scramjet[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(3): 383-389. (in Chinese)
- [3] 席文雄, 王振国, 刘卫东, 等. 双模态超燃冲压发动机点火方案对比试验[J]. 推进技术, 2013, 34(3): 383-389.
- [4] Osborne R J, Wehrmeyer J A, Trinh H P, et al. Evaluation and characterization study of dual pulse Laser-Induced spark (DPLIS) for rocket engine ignition system application [C]// 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2003: AIAA paper 2003-4905.
- [5] Phuoc T X, White F X. Laser-Induced spark ignition of CH₄/air mixtures [J]. *Combustion and Flame*, 1999, 119: 203-216.
- [6] Ronney P D. Laser versus conventional ignition of flames[J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(2): 501-521.
- [7] Herdin G, Klausner J, Wintner E, et al. Laser ignition-a new concept to use and increase the potentials of gas engines[C]// AERS-ARICE Symposium on Gas Fired Reciprocating Engines, 2005.
- [8] Gupta S. Technologies for gaseous fueled advanced reciprocating engine systems [C]//US DOE Industrial Distributed Energy Portfolio Review Meeting, 2011.
- [9] Weinrotter M, Kopecek H, Wintner E, et al. Application of laser ignition to hydrogen-air mixtures at high pressures[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2005, 30: 319-326.
- [10] Morsy M H, Chung S H. Laser-Induced multi-point ignition with a single-shot laser using two conical cavities for hydrogen/air mixture [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2003, 27(4): 491-497.
- [11] Liou L C. Laser ignition in liquid rocket engines [C]//30th AIAA/SAE/ASME/ASEE Joint Propulsion Conference, 1994: AIAA paper 94-2980.
- [12] Phuoc T X. Laser-induced spark ignition fundamental and applications[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, 44(5): 351-397.
- [13] Morsy M H. Review and recent developments of laser ignition for internal combustion engines applications [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16: 4849-4875.
- [14] Manfletti C. Laser ignition of an experimental cryogenic reaction and control thruster: Ignition energies[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2014, 30(4): 952-961.
- [15] Brieschenk S, O'Byrne S, Kleine H. Laser-induced plasma ignition studies in a model scramjet engine [J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(1): 145-148.
- [16] Yang L, Li X, Liang J, et al. Laser-induced plasma ignition

- of hydrocarbon fuel in supersonic flows [C]//20th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference Glasgow, 2015.
- [16] Li Xiaohui. Research on laser induced plasma ignition of methane/air mixtures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
李晓晖. 甲烷/空气混合燃气激光诱导等离子体点火研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [17] Cremers D A, Radziemski L J. Handbook of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy [M]. John Wiley & Sons, Ltd, 2006.
- [18] Ostrovskaya G V, Zaidel' A N. Laser spark in gases[J]. *Sov Phys Usp.* 1974, 16: 834.
- [19] Taylor G. The Formation of a blast wave by a very intense explosion. I. theoretical discussion [J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1950, 201(1065): 159–174.
- [20] Gurliat O, Schmidt V, Haidn O J, et al. Ignition of cryogenic H₂/lox sparys[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2003, 7: 517–531.
- [21] De Rosa M, Sender J, Zimmermann H, et al. Cryogenic spary ignition at high altitude conditions [C]//42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2006: AIAA paper 2006–4539.
- [22] Sender J, Manfletti C, Oswald M, et al. Ignition transients of a gaseous CH₄/O₂ coaxial jet[C]//ILASS, 2008.
- [23] Schmidt V, Wepler U, Haidn O, et al. Characterization of the primary ignition process of a coaxial GH₂/Lox spray[C]//42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2004: AIAA paper 2004–1167.
- [24] Pauly C, Sender J, Oswald M. Ignition of a gaseous methane/oxygen coaxial jet[J]. *Progress in Propulsion Physics*, 2009, 1: 155–170.
- [25] Gajdeczko B F, Angioletti M, Dryer F L. Laser ignition of liquid oxygen/ethanol propellants [C]//30th International Symposium on Combustion, 2004.
- [26] Shen Ruiqi, Ye Yinghua, Tu Jian. Effect of plasma and ablation on ignition processes of energetic materials under pulsed laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(11): 1323–1326. (in Chinese)
沈瑞琪, 叶迎华, 涂建. 激光等离子体和烧蚀对含能材料的激光点火过程的影响 [J]. 中国激光, 2004, 31(11): 1323–1326.
- [27] Li X, Yu Y, Yu X, et al. Laser induced spark ignition of coaxial methane/oxygen/nitrogen diffusion flames [J]. *Optics Express*, 2014, 22(3): 3447–3457.
- [28] Li X, Omenetto N, Smith B W. Laser spark ignition of premixed methane-air mixtures: Parameter measurements and determination of key factors for ultimate ignition results[J]. *Applied Spectroscopy*, 2014, 68(9): 975–991.
- [29] Li X, Fan R, Yu Y, et al. Laser spark ignition of LOx/LCH₄ propellant on an optically-accessible combustor [C]//The 3rd Laser Ignition Conference, Argonne National Laboratory, 2015.