

激光-电磁复合推力器研究现状与展望*

吴建军, 欧阳, 张宇, 赵元政, 李宇奇

(国防科技大学 空天科学学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 激光-电磁复合推力器不仅具有比冲高和体积小的特点, 还具有推力精准可控、工作稳定、抗干扰强以及效率高的优势, 可为微纳卫星提供可靠的动力来源。本文对激光-电磁复合推力器的相关研究进行了较为全面的介绍, 概述了此类推力器的基本原理与优势特征, 重点总结了样机设计、数值模型与推进剂研制三部分内容的研究进展, 归纳了现有研究内容的关键问题。在此基础上, 对激光-电磁复合推力器的进一步发展方向进行了展望。

关键词: 激光-电磁复合推力器; 空间微推进技术; 微纳卫星; 数值模型; 推进剂; 综述

中图分类号: V439 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2023) 06-2208069-20

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2208069

Review and Prospect of Laser-Electric Hybrid Thruster

WU Jian-jun, OU Yang, ZHANG Yu, ZHAO Yuan-zheng, LI Yu-qi

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Laser-electric hybrid thrusters are expected to achieve the higher specific impulse and the smaller volume, and they also have the advantages of accurate and controllable thrust, stable operation, strong anti-interference and high efficiency, which is now perceived as an advanced propulsion system to support the precise maneuvering of microsattellites. This paper presented a comprehensive review to the related research of laser-electric hybrid thrusters, summarized the basic principle and advantages of this kind of thruster, focused on the research progress of prototype design, numerical model and propellant development, and included the key problems of the existing researches. On the basis, the further key directions of laser-electric hybrid thrusters are prospected to provide reference for the research and application of space propulsion technology, and promote the further development of Chinese electric propulsion industry.

Key words: Laser-electric hybrid thruster; Space micro-propulsion technology; Microsattellites; Numerical model; Propellant; Review

1 引言

微纳卫星作为一种经济实用、灵活高效的航天器,目前已应用于天气预报、通讯导航、广播电视以及资源勘察等领域,是当前航天技术发展的热门方

向之一。得益于新型材料、微机电和人工智能等前沿技术的发展,微纳卫星正在朝着更高程度智能化、精细化、节能化且微型化的方向迈进,其研发成本和发射成本也被进一步降低^[1-2]。从2010年开始,微纳卫星每年发射数量以40%的增长速度呈现井喷式

* 收稿日期: 2022-08-23; 修订日期: 2022-11-19。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11772354)。

作者简介: 吴建军, 博士, 教授, 研究领域为先进空间推进技术、故障诊断与健康监控技术。

通讯作者: 欧阳, 博士, 讲师, 研究领域为先进空间推进技术。E-mail: ouyang16@nudt.edu.cn

引用格式: 吴建军, 欧阳, 张宇, 等. 激光-电磁复合推力器研究现状与展望[J]. 推进技术, 2023, 44(6):2208069.
(WU Jian-jun, OU Yang, ZHANG Yu, et al. Review and Prospect of Laser-Electric Hybrid Thruster[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(6):2208069.)

的增长,预计2022年发射数量将超过2000颗^[2]。并且,曾经受限于高昂成本而搁置的卫星星座组网方案和集群飞行从设想变成了现实,当今微纳卫星集群正在形成集全球通信、世界导航、数据挖掘和地球观测等功能于一体的通用型集成智能网联卫星平台^[3-4]。

通常来说,微纳卫星主要包含专用系统和保障系统两大部分。专用系统是指与执行任务直接相关的系统,也称为有效载荷。保障系统是指保障卫星在空间正常运转的系统,以推进系统为主。毫无疑问,当前微纳卫星的井喷式发展,离不开空间推进技术的进步。对于推进系统而言,其不仅需要满足微纳卫星尺寸小、质量轻的设计要求,还需要为微纳卫星的变轨、机动、姿控和阻力补偿等任务提供稳定可靠的动力来源^[5]。传统的化学推进系统通常寿命短、比冲低且体积大,与微纳卫星小型化的设计理念相悖^[6-10]。在过去的几十年,全球各研究机构对适用于微纳卫星的各种微型空间推力器开展了深入的研究,并取得了系列成果。在这些微型空间推力器中,以激光推进和电推进系统的性能最为突出。激光推进和电推进系统的排气速度远高于化学推进,因此推进剂需求量更少。对于一项特定的任务,配置激光推进和电推进系统的微纳卫星有效载荷将大约为配置化学推进系统的微纳卫星有效载荷的七倍^[2,11-15]。因此,采用激光推进和电推进系统作为卫星的推进系统,可以减轻整体质量和体积,增大有效载荷,节省研发成本和发射成本。近些年,随着航天技术的发展和空间任务的精细化需求,各种航天器对推进系统提出了更高精度、更低成本且更轻质量的要求。为了追求性能更优的推进系统,研究者们提出了以激光烧蚀和电磁加速组合形成的激光-电磁复合推进方案,并且对其原理样机、数值仿真以及推进剂研制等内容展开了深入的研究。

鉴于此,本文综述了各类激光-电磁复合推力器相关研究,重点介绍样机设计、数值模型以及推进剂研制等内容,归纳各部分内容中存在的问题,展望下一步的发展。

2 原理和特征

激光推进系统最早由 Arthur Kantrowitz^[16]于1972年提出,微型激光推进系统已于2009年成功应用于KKS-1号微纳卫星的姿态调整和轨道机动等任务^[17]。如图1所示,当激光推进系统工作时,高能激

光热源加热推进剂,推进剂受热后生成高温高压等离子体羽流而生成推力^[15,18-22]。除了具有比冲高、有效载荷比大和发射成本低等优点之外,激光推进可以通过改变激光强度、脉宽大小和脉冲频率等参数,调节和控制推力/冲量的生成。另一方面,与采用气体推进剂供给的电推力器相比,激光推进无需中和器、加热器、高电压设备、储箱和阀门等部件,整体结构更简单紧凑^[11,13-15]。激光推进以激光器发射的激光作为能量来源,根据激光器的位置,可以分为地面激光器式和在地携带式激光推进。地面激光器式激光推进,虽然可以给卫星保留更多的有效空间,并提高有效载荷比,但是长距离激光会带来光污染、能量损耗和安全等问题,同时也容易干扰其他卫星的轨道运转。随着激光器相关技术的发展,质量轻、体积小的激光器,通过特定的光路设计也能生成高能激光束,但是在地携带式激光推进系统通常能量功率不高,产生的比冲和推力较小。更为重要的是,不管是地面激光器式还是在地携带式激光推进系统,都普遍存在效率低的缺点^[12-13]。

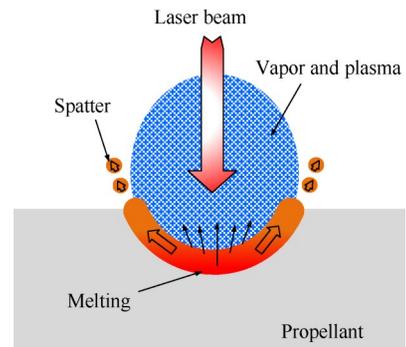


Fig. 1 Conceptual schematic of laser propulsion system

电推进系统的首次空间应用可追溯到1964年前苏联发射的ZONE-2号卫星,此卫星配备了六个电推力器,用于姿态控制与阻力补偿^[3-4,23]。如图2所示,一个典型的电推力器工作时,电能加热、离解和加速推进剂形成高速射流而产生推力^[2,24-26]。电推进系统利用电磁力加速推进剂,其排气速度很大,因此具有比激光推进系统更高的比冲和效率^[2,6,12]。另一方面,电推进可通过改变放电周期、放电脉宽和放电电压等参数调节推力的生成,具有较高的控制精度。但是依靠电能生成推力的电推进系统对电源具有较高的需求,且时而发生点火不稳定、放电失败的问题。此外,以气体推进剂供给的电推力器多数需要配置中和器、加热器、高电压设备、储箱和阀门等装置,限制了卫星的寿命和推进效率^[27]。

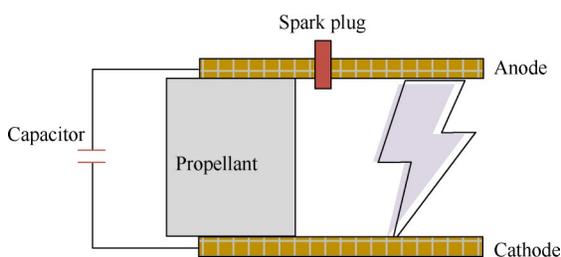


Fig. 2 Conceptual schematic of electric thruster

综上所述,尽管激光推进系统和电推进系统都具有比冲高和成本低的特点,但仍存在一些局限点,尚不能完全满足微纳卫星功能日益多样化且任务逐渐细节化的推进需求。因此,缺乏可长期支持微纳卫星精准机动的高效、可靠推进系统,仍然是阻碍智能网联卫星平台部署的绊脚石^[28-31]。

以激光烧蚀推进剂来生成等离子体羽流,并采用电磁场进一步加速等离子体羽流喷出而生成推力的激光-电磁复合推力器,将是一种更好推进方案。图3给出了一种典型的激光-电磁复合推力器工作过程示意图。在激光点火之前,电容器已通过直流电源充电完成,给阴极和阳极之间的放电腔室提供电场。当激光辐射推进剂时,推进剂被分解、气化和电离成具有一定初始速度的准中性等离子体羽流。随后,等离子体羽流进入放电腔室内,在电磁力和气动力的作用下加速喷出,从而产生推力^[32-36]。

得益于其独特的结构,激光-电磁复合推力器不仅兼备激光推进和电推进系统比冲高和体积小的优点,还具有如下特点:

(1)采用激光烧蚀固体材料产生的等离子体羽流作为电磁加速的工质,可省去储箱、管道和阀门等装置。鉴于此,与配置储箱、管道和阀门等气体推进剂供给的电推力器相比,激光-电磁复合推力器具有更轻的质量、体积和成本,进而简化了卫星的结构,延长了使用寿命^[11,37-39]。另外,复合推力器在同等推力条件下所需的总能量低于单一激光推进或单一电推进系统。能量的大小通常和激光器、电源的重量

具有密不可分的联系。因此,耗能更低的复合推力器可降低卫星整体重量,增大有效载荷。

(2)与脉冲等离子体推力器采用的火花塞点火相比,激光点火更稳定,不易产生积碳,且可通过烧蚀去除推进剂表面的沉积物^[40]。此外,激光烧蚀产生的羽流具有更高电离度和更多带电粒子,因此等离子体诱导放电成功率更高,进而提高抗干扰能力,稳定生成推力^[11,41]。

(3)相比气体供给式电推进系统中直接参与电磁加速过程的气体推进剂,激光烧蚀推进剂产生的等离子体羽流具有一定的初始速度和更高的电离度^[40,42-45],其被电磁加速可获得更高的元冲量、比冲和效率^[11]。

3 研究难点

尽管大量地面试验验证了激光-电磁复合推力器的优越性,但是当前相关研究仍存在工作机理把握较为薄弱、多物理场特性分析较为片面以及推进性能提升方向尚未明确等问题。作为一个复合系统,激光-电磁复合推力器不仅包含烧蚀、分解、相变、传热传质、电离和电磁加速等过程,还涉及光、电、力和热等多物理场变化,各物理过程复杂多样且高度耦合^[42,46]。同时,推力器空间狭小而反应迅速,物质和能量输运极其剧烈,偏离传统热化学与热力学方程^[18,47]。并且,由于激光-电磁复合推力器是激光烧蚀过程和电磁加速过程的高度耦合,其推进剂不仅需要具有良好的烧蚀特性和电磁特性,且需要有效匹配复合推力器中各物理过程的变化^[37-38]。但是,单一激光推进和单一电推进系统常用的推进剂难以同时具备两种特性,而推进剂尺寸小且单次消耗量少,复合设计难度高。因此,一款高性能适配推进剂的缺乏,限制了激光-电磁复合推力器性能的进一步提高。

结合上述研究难点,为推进激光-电磁复合推力器的工程化研制与应用,重点需要解决如下问题:

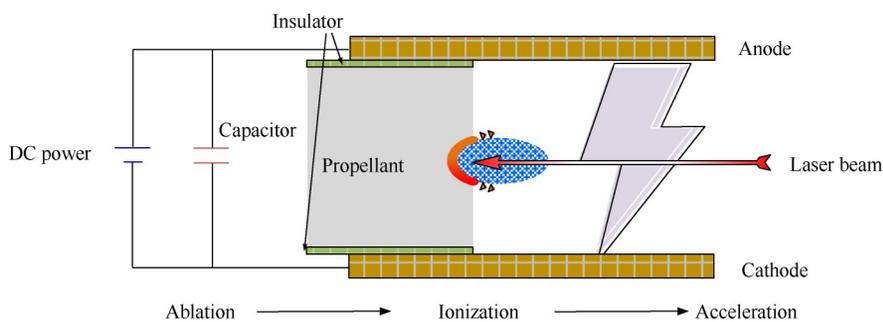


Fig. 3 Conceptual schematic of laser-electric hybrid thruster

(1)模块化的高性能推力器设计。结合复合推力器空间实际应用,优选激光和电磁场之间的耦合方案,定向提高推力器的工作稳定性和抗干扰能力;同时合理选择推进剂供给方式和激光烧蚀模式,搭配模块化设计方法,研制质量轻且体积小的推力器样机;量化不同工作参数对推进性能的影响,确定推力器最佳工作环境。

(2)多物理场工作过程特性分析。综合采用理论分析、数值仿真和实验研究的方法,厘清推力器工作时激光烧蚀推进剂、等离子体羽流膨胀扩散、等离子体诱导放电、等离子体电离增强和电磁加速等强耦合过程变化,表征超快时间和微小空间内的光、电、磁、热和力的相互作用机制,分析工作参数对推进性能的影响机理。

(3)性能突出且工作稳定的复合推进剂制备。分析复合推力器各物理过程对工质特性的需求,明确推进剂性能提升方向;探究不同种类掺杂剂对各物理过程的影响,确定可增强推进性能的掺杂剂种类;采用固体复合材料设计方法,确保掺杂剂之间互相兼容且各自匹配对应的物理过程,获得可有效提高性能并且工作稳定的复合推进剂。

(4)稳定可靠的电源处理单元。根据激光器和电磁加速过程对电能功率和能量的不同要求,解决卫星平台母线电源与激光器电源和电磁加速电源之间的相互转换,确保激光器和放电加速的稳定进行,提高能量利用率。

(5)兼顾性能和环保的光路设计。激光-电磁复合推力器的激光通常具有两种模式:反射模式和透射模式。反射模式为激光器和烧蚀羽流位于推进剂的同一侧,透射模式为激光器和烧蚀羽流位于推进剂的两侧。反射模式中,烧蚀羽流容易沉积在光学元件上,减少使用寿命。透射模式虽然能减少羽流沉积污染,但是烧蚀羽流初始速度较小,性能低于反射模式。因此,有必要进一步优化激光器和推力器的光路设计,兼顾推力器性能和环保两方面需求。

4 实验样机研制进展

虽然激光-电磁复合推力器是一种新型的等离子体推力器,但作为激光烧蚀和电磁加速过程的组合推力器,其伴随着激光烧蚀推进技术和电推进技术并行发展且相互借鉴。激光-电磁复合推力器具有多种结构,其工作原理大同小异。基本工作过程是,激光烧蚀推进剂生成具有一定初速度的等离子体羽流,电磁场对等离子体羽流进一步加速喷出而

生成推力^[37-38]。根据复合推力器中激光能量 E_l 和电磁能量 E_e 之比 $a = E_l/E_e$ 的大小,可以将激光-电磁复合推力器划分为如图4所示的五类工作模式:

- (1) $a = 0$,纯电推进模式;
- (2) $0 < a < 1$,激光辅助的电推进模式;
- (3) $a \approx 1$,激光-电磁并行推进模式;
- (4) $1 < a < \infty$,电磁辅助的激光推进模式;
- (5) $a = \infty$,纯激光推进模式^[48-49]。

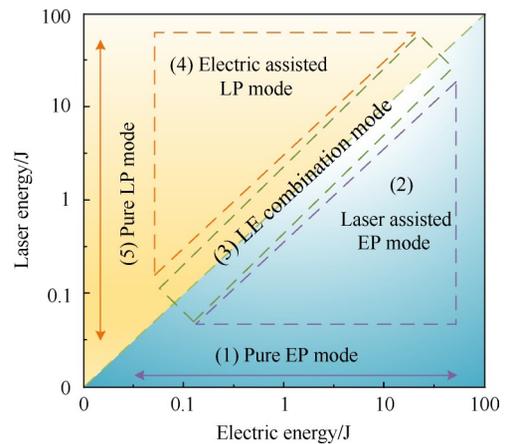


Fig. 4 Working mode classification diagram of laser electromagnetic composite thruster

激光-电磁复合推力器不仅具有体积小和比冲高的特点,还具有精准可控、工作稳定、抗干扰以及效率高的优势,可用作微纳卫星稳定可靠的动力装置。作为一款新型推力器,当前国内外针对激光-电磁复合推力器的相关研究较少,主要集中在日本、美国和中国等国家。

4.1 日本

为了解决脉冲等离子体推力器推进效率低和火花塞点火不稳定的问题,日本东海大学于2003年率先提出了激光支持的脉冲等离子体推力器概念,并设计了如图5所示的矩形极板式和同轴极板式两类结构样机,两者最大比冲均高于3000s,最大效率均高于8%,验证了激光-电磁复合推力器的有效性^[49-52]。

随后,基于这两种结构的推力器样机,东海大学探究了不同推进剂^[53]、不同烧蚀点位置^[54]和不同构型^[53]对推进性能的影响。研究发现,氧化铝可降低烧蚀过程中质量的损失,因而此类材料作为推进剂时可获得更高的比冲和效率^[53];当激光辐射推进剂表面的烧蚀点更靠近阴极时,推进性能将进一步提升^[54];当放电腔室处于更大的体积时,推力器有望取得更高的推进性能^[5,53]。

2010~2015年,东海大学采用高速相机、磁探针

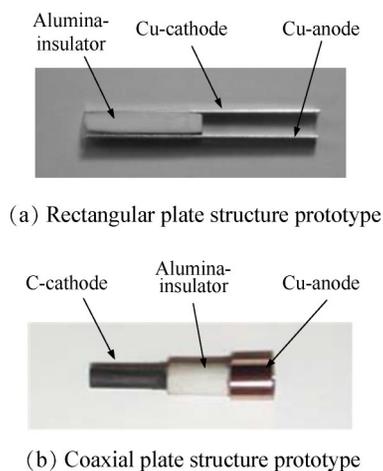


Fig. 5 Schematic of laser-assisted pulsed plasma thruster

和法拉第杯等工具,探究此类推力器的等离子羽流演化机理^[32,53,55-61]。结果表明,放电通道内的等离子体羽流向极板偏转,且阳极附近的羽流速度大于阴极附近的羽流速度;阴极处的磁场强度更高,且推力器工作时最大磁场强度位置将随着羽流运动而向下游移动。

为进一步优化推力器性能,2015~2018年,东海大学分别测试了不同极板长度、不同放电能量和不同放电时间尺度下推力器的推进性能^[62-63]。结果显示,适中的极板长度可取得最佳推进性能;增大放电能量可线性提高元冲量;推力器放电周期时间处于ns量级时各项性能参数优于ms量级。

与激光支持的脉冲等离子体推力器概念提出的同时期,2004年,东海大学为了提高激光推进系统的性能,采用静电场加速激光烧蚀推进剂产生的羽流,进而获得了更大的推力^[49]。该激光-静电场复合推力器原理图如图6所示,激光烧蚀靶材生成等离子体羽流,等离子体羽流在静电场中通过双极扩散和库伦爆炸加速喷出而生成推力。在100V的正偏压下,此推力器比冲可达1800s,离子速度可达25km/s,各性能参数大约是同等条件下激光推进系统的两倍^[64]。随后在2009~2019年,东海大学针对激光-静电场复合推力器的加速机制,展开了详实的探究^[65-69]。研究表明,双层加速电极构型可增大离子速度,减少反向粒子团的生成;电极和推进剂的距离不宜过长,以减少羽流径向扩散;离子速度随着静电场电势的增大而增大,但离子的电势空间分布大致保持不变。

4.2 美国

为了提高激光推进系统的比冲,普林斯顿大学在2005年对靶材施加一个垂直的磁场以限制烧蚀羽

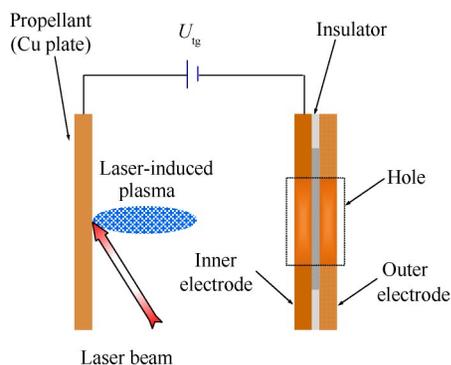


Fig. 6 Schematic of laser-electrostatic hybrid thruster^[49]

流粒子的径向运动,提出了一种如图7所示的激光-静磁场复合推力器,并开展了大量试验以验证其有效性^[70]。研究表明,施加磁场可约束激光烧蚀等离子体羽流的膨胀过程,增强羽流的准直性,其推力是纯激光烧蚀推力器的3倍,羽流膨胀速度是纯激光烧蚀推力器的1.6倍。

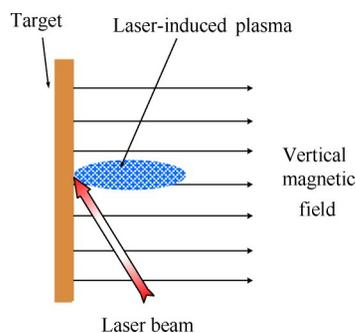
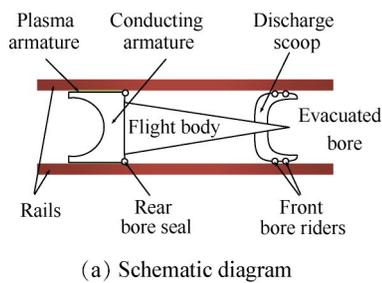


Fig. 7 Schematic of laser-magnetostatic hybrid thruster

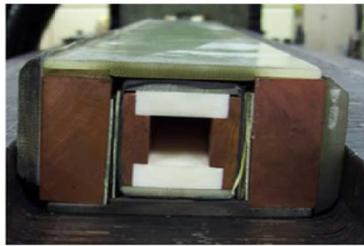
基于此激光-静磁场复合推力器,普林斯顿大学于2012~2013年探究了等离子体羽流的演化机理以及采用不同推进剂时等离子体羽流的差别。研究发现,永磁铁可控制推力矢量而提高推力器的推进性能,并且铝材料被烧蚀生成的等离子体羽流比聚合物材料被烧蚀生成的等离子体羽流对磁场更敏感^[71-72]。

为了低成本地执行微小卫星从低层大气层到近地轨道的上升任务,美国提出了一种将毫瓦量级的激光推力器与电磁炮相结合的复合推力器方案^[73],并且在2005年成立了专项研究项目组。如图8所示,此复合推力器在大气层中利用地面激光器发射高能激光击穿空气而生成等离子体羽流,电磁发射器将大电流施加在平行轨道上并通过滑动触点加载于等离子体羽流,洛伦兹力将加速等离子体羽流喷出而生成稳定推力^[74]。

作为项目组成员之一,德克萨斯大学研制了一种电磁炮样机,并且设计了多级供电系统以降低回



(a) Schematic diagram



(b) Physical map

Fig. 8 Laser electromagnetic gun composite thruster

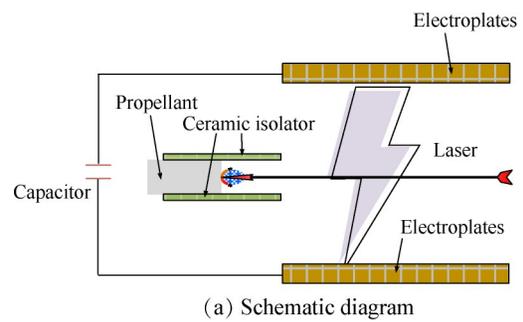
路电感和电阻。此外,明尼苏达大学和新奥尔良大学对推力器前端的热化学非平衡气流进行了建模,并且对前端热防护系统的烧蚀和氧化进行了耦合求解。同时,德克萨斯理工大学采用高纯度氧化铝作为推进剂生成等离子体,可减少拉伸载荷下的开裂倾向,并且重新设计了电磁炮的结构,减少了能量耗散,提高了推进效率,其峰值电流可达800kA,推力器速度可达11km/s^[75]。

4.3 中国

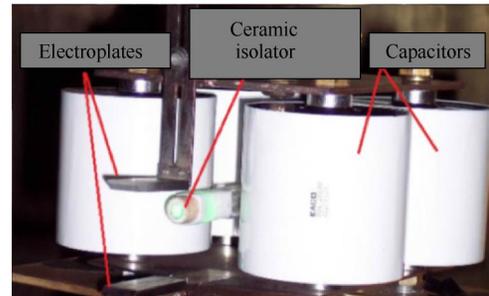
国内针对激光-电磁复合推力器研究较少且起步较晚,主要研究单位为国防科技大学、南京理工大学和航天工程大学。

2012年,为了解决脉冲等离子体推力器滞后烧蚀的弊端,国防科技大学提出了以激光代替火花塞点火,并且在推进剂和放电腔室之间添加陶瓷喷管进行物理隔离的新型推力器方案^[36]。如图9所示,当推力器工作时,激光烧蚀推进剂生成等离子体,等离子体在陶瓷喷管中膨胀扩散后进入放电腔室,放电腔室的电磁场对其加速喷出生成推力。与不加陶瓷隔离管的推力器相比,此推力器可减少放电电弧对推进剂表面的烧蚀,增强放电稳定性,提高控制精度且降低滞后烧蚀的影响^[76]。

基于这种结构的推力器,国防科技大学2016年对比了不同推进剂对推进性能的影响。结果表明,以纯铝作为推进剂的推力器比冲高达8000s,效率高达90%,大约是以聚合物作为推进剂对应性能参数的4倍^[34]。2016~2020年,国防科技大学采用数值模拟和实验测量方法,分析此类推力器中激光烧蚀推进



(a) Schematic diagram

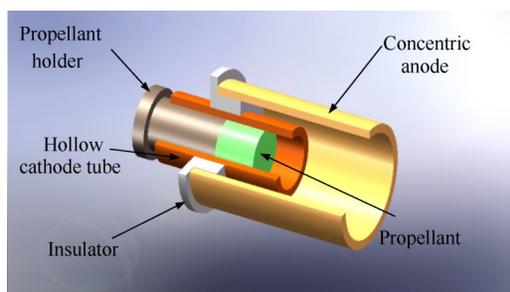


(b) Physical map

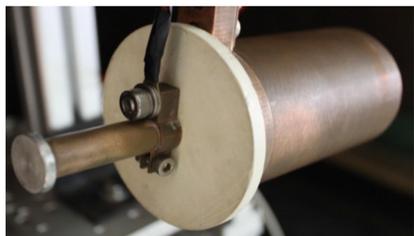
Fig. 9 Laser-electric hybrid thruster with ceramic isolation tube

剂、等离子体羽流膨胀扩散、组分演化以及电离等过程变化机理^[47,77-80]。2020~2022年,国防科技大学进一步探究了极板构型、外加磁场、初始放电电压和推进剂种类对推力器的影响。研究发现,舌形极板可增大电感梯度,提高电流峰值进而增强推进性能;分块阳极可限制羽流径向运动,减少侧边偏转,增大极板间电流密度;适当提高外加磁场的强度可提高推进性能,但是过大的磁场反而会降低推进性能;电容器的初始放电电压越大,放电延迟时间越小;聚氯乙烯材料作为推进剂时可降低单次脉冲烧蚀质量,提高推进剂利用率^[41-42,81-83]。另一方面,国防科技大学通过优选激光和电磁场之间的耦合方案,合理选择推进剂供给方式和激光烧蚀模式,搭配模块化设计方法,研制了一款如图10所示的空心阴极同轴式激光-电磁复合推力器。该类型推力器可明显增大烧蚀羽流中带电粒子的含量,减小羽流发散角度,降低滞后烧蚀效应,提高控制精度,元冲量最高可达 $400\mu\text{N}\cdot\text{s}$,比冲约为700s,放电成功率近乎100%^[39]。

2019~2021年,航天工程大学设计了一种多模式工作的复合推力器,可根据需求调整为纯激光烧蚀推力器、激光-电磁复合推力器和脉冲等离子体推力器三种模式工作,并且探究了激光能量和放电能量对于推力器性能的影响^[45,84]。结果表明,同等能量供给下,激光-电磁复合推力器各项性能参数均优于纯激光烧蚀推力器和脉冲等离子体推力器;激



(a) Schematic diagram



(b) Physical map

Fig. 10 Coaxial hybrid thruster with hollow cathode tube

光-电磁复合推力器比冲、元冲量和效率随着放电能量增大而增大,冲量耦合系数随着放电能量增大而降低;激光-电磁复合推力器比冲、效率和冲量耦合系数都随着激光能量的增大呈现先增大后减小的趋势。

2021年,南京理工大学以图5(a)所示的推力器为基础,设计了一款工程化的小型复合推力器,对比分析了采用硝酸铵、聚四氟乙烯和金属等推进剂供给的推力器放电特性和推进性能。研究发现,硝酸铵可减少羽流污染效应并且受热后将释放大量自身所含的化学能,其推进性能优于其他推进剂^[40,43-44]。

5 数值仿真研究进展

作为激光烧蚀过程和电磁加速过程的结合体,激光-电磁复合推力器的数值模型不但需要表征这两个过程,而且需要构建烧蚀产物与放电入口之间的物理边界条件。2022年,国防科技大学欧阳等将激光烧蚀推进剂生成的等离子体产物视为电流片,激光烧蚀产物的排气速度等于电流片的初始运动速度,烧蚀产物的质量流量等于电流片的质量流量,进而建立了如图11所示的数值模型,可表征激光-电磁复合推力器的多物理场过程,且能够预测宏观推进性能,仿真结果与实验结果偏差小于10%^[37]。整体来说,当前面向激光-电磁复合推力器整个物理场过程的数值模型较少,主要聚焦于推力器中激光烧蚀或电磁加速等单一物理层过程展开研究。

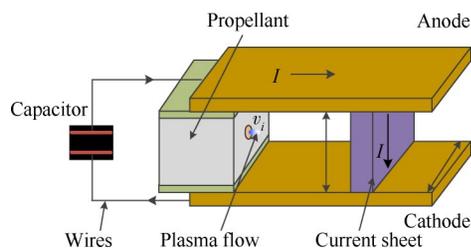


Fig. 11 Simulation model of laser-electric hybrid thruster

5.1 激光与固体靶材的相互作用

图12给出了激光与固体靶材之间的相互作用原理图。如图所示,当激光辐射固体靶材时,激光能量被不透明的靶材吸收,靶材表面下的一个薄层被加热,促使表面温度持续升高。与此同时,能量向靶材的内部传导,使得加热层的厚度不断增加。但是,随着深度的增加,温度梯度会越来越小,导致由热传导引起的热传播速度随时间而减小。因此,热传导通常只会渗透到靶材表面层一个很薄的深度,此深度通常被称为渗透深度^[85-90]。

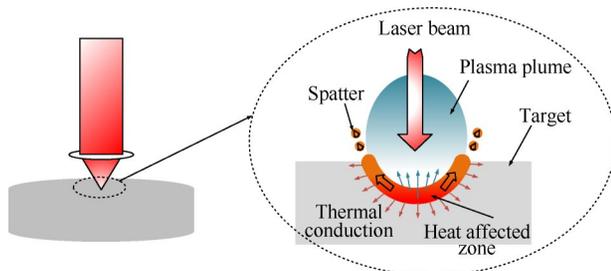


Fig. 12 Schematic diagram of interaction between laser and solid target

由于激光渗透到靶材内部的能量较少,绝大部分激光能量沉积在靶材的表面,这将导致靶材表面与其附近区域的温度持续上升。当激光能量密度足够高时,靶材内部的电子被激光光子激发,通过碰撞使靶材的粒子热运动不断加剧,当其具有足够多的动能时,将摆脱周围粒子对其的束缚,产生熔化、汽化和升华等物理过程以及相应的质量迁移,进而导致靶材烧蚀表面退缩^[85-89]。这种因激光辐射材料表面而导致的质量迁移、消蚀或散失等现象称之为激光烧蚀^[91-93]。当激光能量密度较大时,汽化的粒子温度很高,其被激发和电离,进而在靶材表面附近形成等离子体羽流^[90]。

根据激光与靶材之间相互作用的原理,影响激光烧蚀靶材的因素可分为三类。其一是激光本身的参数,如激光波长、激光器类型、脉宽持续时间和激光功率等;其二是激光光路设计,这将影响激光的热

通量密度和传播速度;其三是靶材本身的物化属性,如吸收系数、反射率、导热系数和烧蚀阈值等参数。改变这三类影响因素的数值,可定向调控靶材的烧蚀深度、激光能量沉积区域以及热影响区的大小,进而实现不同的工程应用^[90]。表1列出了基于激光与材料相互作用原理的一些工程应用。

表1 激光与材料相互作用原理的工程应用

| 功率密度/ (W/cm ²) | 类型 | 反应机理 | 应用 |
|-------------------------------|----|-------------|---------|
| ≤10 ⁷⁻⁸ | 脉冲 | 吸收/折射/光电效应 | 无损监测 |
| ≤10 ⁻² | 连续 | | |
| ~10 ⁰⁻⁴ | 连续 | 融化/烧蚀/蒸发 | 激光武器 |
| ~10 ⁵⁻⁸ | 振荡 | 融化/烧蚀/弱等离子体 | 激光加工 |
| ~10 ⁹⁻¹³ | 毫秒 | 瞬态烧蚀/强电离 | 激光加工与推进 |
| ~10 ¹³⁻¹⁴ | 纳秒 | | |
| ~10 ¹⁴⁻¹⁷ | 皮秒 | 异常吸收/电离 | 推进/点火 |
| ~10 ¹⁸⁻²¹ | 飞秒 | 非热负荷 | 离子加速 |

通常来说,熔化、汽化和喷溅是造成金属材料被烧蚀的主要因素,而非金属材料除了这三种因素之外,升华、化学反应和焦化等因素也将导致烧蚀表面退缩^[92,94-99]。根据靶材被烧蚀主导机制的不同,可将激光与靶材的相互作用机制分为三类,即光热机制、光化学机制和光物理机制^[94,100-101]。对于光热机制而言,激光能量不足以让靶材分子的化学键断裂,激光能量以热能的形式沉积在推进剂表面,并且通过热传导驱动靶材内部温度升高和后续烧蚀过程进行。此时,熔化、汽化、升华和蒸发是造成靶材烧蚀的主要原因。光化学机制主要适用于因分解反应造成靶材表面退缩的聚合物材料。在光化学机制中,材料被视为由长分子链组成的固体物质,链内分子由强共价键连接,不同长链分子间的相互作用较弱。当激光的光子能量大于共价键能时,电子被激发而导致化学键断裂,材料被分解为小分子量产物。在多数实际情况中,光热机制和光化学机制将同时出现,共同影响材料的烧蚀过程,此时的作用机制被称为光物理机制^[100-104]。

基于上述三种烧蚀机制,研究者们建立了大量的数值仿真模型,以探究激光和固体材料之间的动态反应过程^[18,92-94,96-97,99,104-137]。2016年,国防科技大学张宇等建立了一个考虑材料热物性参数变化、相变和非傅里叶导热效应的聚四氟乙烯靶材烧蚀模型,以及一个表征烧蚀羽流的化学反应、电离、吸收和屏蔽过程的动力学模型^[47,78],并且通过耦合聚四氟

乙烯烧蚀,烧蚀羽流膨胀扩散和羽流组分演化等过程,完整地描述了聚四氟乙烯被激光烧蚀的热力学和动力学特性。2017年,佛罗里达大学 Wang 等^[120,123]采用有限元分析的方法构建了一个脉冲激光烧蚀铝的数值模型。该模型不仅可以追踪靶材表面的动态退缩变化,而且可以同时表征蒸发和相爆炸两种因素引起的烧蚀过程。2018年,国防科技大学谭胜等^[79,138]充分考虑了靶材的相变、蒸发和相爆炸,烧蚀羽流的形成和膨胀,以及烧蚀羽流和入射激光之间的屏蔽效应等因素,建立了一个多物理场耦合模型,研究飞秒激光烧蚀铜的热传导过程。基于此模型可以精准预测靶材的温度分布、烧蚀质量和烧蚀深度。2021年,诺丁汉大学 Cha 等^[139]建立了一个高保真数值模型,模拟了脉冲激光烧蚀沟槽过程。与先前的模型不同,该模型对烧蚀过程建立了正反馈调节机制,量化了多次脉冲激光的累积热量对于整体烧蚀过程的影响,可模拟多次脉冲激光烧蚀靶材的热力学变化过程。

总的来说,上文提及的这些模型能精准反映激光和固体靶材之间的相互作用机制,但是这些模型只适用于纯激光烧蚀过程。而对于激光-电磁复合推力器中激光烧蚀过程,仍需要更具体的物理描述。一个是构建固体推进剂表面、烧蚀产物与放电腔室三者之间的物理边界条件,表征烧蚀过程与电磁加速过程之间的相互作用机制。另外一个,激光-电磁复合推力器工作时,固体推进剂处于一种高温梯度、大热通量和超短持续时间的环境,微小时间和微小空间尺度传热效应对推进剂相变、热传导和烧蚀表面退缩等物理过程的影响不能忽视,因而所建立的烧蚀模型需要考虑微小尺度传热效应。

5.2 等离子体羽流与电磁场的相互作用

激光烧蚀推进剂的产物主要为等离子体羽流,而等离子体羽流在电磁场中的加速机理与电推进加速机理基本一致。因此,激光-电磁复合推力器中烧蚀羽流与电磁场相互作用机制的表征可充分借鉴包含脉冲等离子体推力器、磁等离子体推力器和霍尔推力器等电推力器的电磁加速过程。

近些年来,研究者们针对电推力器的电磁加速过程建立了各种数值模型,深入探究了等离子体羽流与电磁场相互作用的机理。根据核心假设的不同,这些数值模型可分为机电模型、磁流体动力学模型和粒子模型三类^[46,140-141]。其中,机电模型较为简单,可快速预测推力器的宏观推进性能;磁流体动力学模型将等离子体羽流视为连续流体,可对推力器

的宏观推进性能和等离子体羽流的流动特性精准模拟;粒子模型从第一性原理出发,重点关注单个粒子的运动状态,可挖掘等离子体非热平衡动力学特征^[6, 142-146]。

机电模型主要应用于脉冲等离子体推力器等电容式放电推力器。其假设放电腔室内的工质完全电离为等离子体,并且在电容放电开始之前,等离子体已经充满整个放电腔室,可形成一个如图13所示的RLC放电回路^[23, 144-145, 147-149]。此时,放电腔室内的羽流可视为一块“电流片”,电流片的质量等同于单次脉冲放电时间内推进剂的供给质量。图中, l 为极板长度, h 为极板间距, w 为极板宽度, I 为回路电流。RLC放电回路是指可将回路视为由电阻、电感和电容组成的回路。放电回路的总电阻包含电容器的电阻 R_c ,导线和接头电阻 R_w ,极板电阻 R_{pe} 以及电流片电阻 R_p ;放电回路总电感包含电容器的电感 L_c ,导线和接头电感 L_w 和极板电感 L_{pe} ;放电回路总电容只考虑电容器的电容 C 。通常来说,电容器的电阻 R_c ,导线和接头电阻 R_w ,电容器的电感 L_c ,导线和接头电感 L_w 以及电容器电容 C 由推力器设计参数决定,电流片的电阻 R_p ,极板的电阻 R_{pe} 和极板的电感 L_{pe} 随着工作状态动态改变^[41, 83]。机电模型将电路视为一个离散且可运动的RLC放电回路,可采用基尔霍夫电压定律描述等效电路中电流和电压的变化过程。另外,机电模型假设工质烧蚀的全部质量在工作之初就已全部产生,将加速过程中电流片质量视为常数,采用牛顿第二定律来描述电流片的动力学过程。通过求解机电模型中放电电压和放电电流的变化,可估算推力器的元冲量、比冲和效率等推进性能^[3]。由于机电模型忽略了推力器中具体的物理过程,而是将电磁加速简化为一个宏观电路中的电流片运动,因此此类模型无法反映等离子体羽流形成和发展的过程,也不能计算等离子体温度、推进剂表面温度和等离子体密度等微观参数。但机电模型简单、计算量小且可快速估算推力器的性能参数,因此被广泛应用于推力器样机设计和性能优化中。

为了进一步提高机电模型的准确性,研究者们逐步对Hart^[150]提出的初始机电模型进行了改进。1970年,麻省理工学院Vondra等^[151]考虑了气动力对电流片加速过程的影响,建立了耦合气动力源项的改进机电模型,并应用于LES-6号卫星的电推力器设计中。1982年,中国科学院魏荣华^[152]考虑电磁加速过程中等离子体密度的动态变化,将等离子体羽流视为厚度随电流大小变化而改变的电流片,以此为

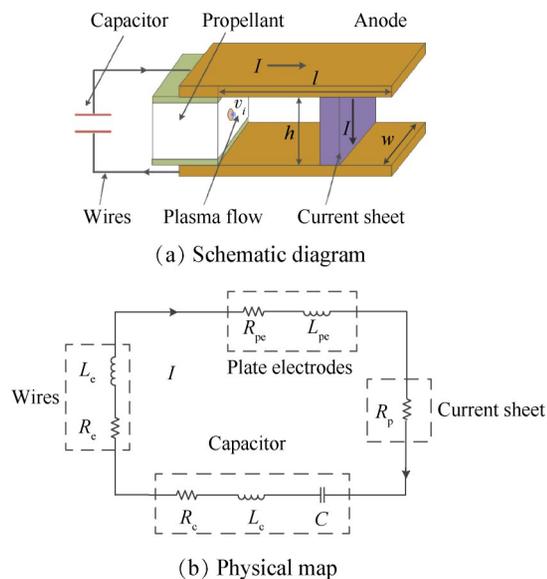


Fig. 13 Electromechanical model

基础建立了扩散机电模型。2005年,佐斯特理工大学Laperriere理论分析了放电过程中等离子体电阻和回路电感的动态变化,建立了能体现等离子体电阻和回路电感变化的新型机电模型^[153]。2013年,国防科技大学张华等^[143]建立了一种耦合推进剂烧蚀的改进机电模型,量化了推进剂烧蚀质量流量对于电磁加速过程的影响。2018年,国防科技大学欧阳考虑了微小尺度传热的非傅里叶导热效应和随烧蚀过程累积增加的羽流质量对电磁加速过程的影响,建立了能同时反映推进剂温度变化和等离子体羽流电磁加速的新型机电模型^[23, 154]。2020年,北京理工大学Li等^[148]重点区分了带电等离子体和中性气体在放电通道内的不同加速原理,建立了一个既能表征等离子体电磁加速,又能描述中性气体热膨胀扩散的机电模型,可预测同轴式脉冲等离子体推力器的宏观性能。

磁流体动力学模型将等离子体视为连续介质,利用流体力学方程和麦克斯韦方程组,表征羽流在放电腔室内的电磁加速过程^[155-156]。与机电模型相比,磁流体动力学模型考虑了更多的物理过程,仿真结果更精准,可获取等离子体密度分布、温度分布和速度等特征参数,因此广泛应用于磁等离子体推力器和霍尔推力器等电推力器的数值模拟研究中^[144, 157-158]。

目前,国内外多个研究单位都建立了成熟的磁流体动力学模型,用于分析电推力器工作过程的物理机制^[159-170]。2005年,安柏瑞德航空大学Liron针对电磁场非平衡放电过程,建立了可精准模拟等离子

体羽流场特性的三维磁流体动力学模型,该模型可应用于磁等离子体推力器、电弧喷射器、磁流体喷嘴和高马赫数飞行器等电磁加速过程^[171]。2009年,国防科技大学尹乐针对局部热力学平衡的等离子体温度特性,建立了基于磁流体动力学原理的三维非稳态双温模型,描述脉冲等离子体推力器的推进剂烧蚀、等离子体放电和电磁加速等过程,同时采用此模型探究了不同工作参数对推力器推进性能和流动特征的影响^[172]。2011年,亚利桑那州立大学 Parma 重点构建等离子体羽流和阴极之间鞘层边界条件,联结阴极温度与鞘层电压之间的关系,进而建立了一个可求解等离子体羽流在电磁场中温度、电压和电流密度等特性的磁流体动力学模型^[173]。2014~2015年,贝拉内政大学 Xisto 等考虑等离子体羽流的不可压缩性和等离子体电阻随流场的变化性,建立了一个可反映磁等离子体推力器中电热加速和电磁加速两种加速机制的二维磁流体动力学模型,并且基于此模型研究了不同放电腔室结构对于推进效率的影响^[161,165]。2018年,为了模拟磁等离子体推力器在非稳态放电过程中的电磁加速机理,布莱梅大学 May-gue 提出了一种基于散度清理策略的磁流体动力学方程求解方法,采用有限体积离散框架,构建了一个可描述等离子体羽流中多重激波相互作用和平流-湍流相互转化的三维磁流体动力学模型^[174]。

机电模型和磁流体动力学模型具有各自独有的优势,在电推力器的各种研究中应用较广。但与此同时,这两种模型受限于其核心假设,存在两个局限点。第一个局限点在于机电模型和磁流体动力学模型忽略了中性气体的电离过程,默认进入放电腔室的羽流完全电离。诸多实验结果表明,仅有10%~60%的中性气体会电离为等离子体,忽略羽流的电离过程将降低仿真模型的准确性。因此,机电模型求解的等离子体速度远低于实验值,磁流体动力学模型求解的推进剂消耗量也远低于实验值。第二个局限点在于忽略了等离子体羽流的非连续性,默认放电腔室的羽流是连续介质。然而,由于电推力器工作时处于真空环境,电子密度极高,粒子平均自由程将达到毫米量级,放电腔室通常较小,此时难以满足连续介质条件。另外,不少实验结果已证明,多数等离子体羽流的产生和流动是非连续性过程^[144-145,157-158,175-180]。

粒子模型基于粒子的物理特性,以第一性原理为核心,通过求解麦克斯韦方程、电流密度方程和粒子运动方程来追踪微观粒子的运动,借以反映等离

子体羽流中微观粒子的相互作用和输运特性,再对大量微观粒子进行统计平均可获得等离子体羽流的宏观特性和运动规律。尽管粒子模型的计算量和计算时间远大于机电模型和磁流体动力学模型,但粒子模型重点关注羽流中离子、电子和中性粒子等微观粒子在电磁场中的运动,可捕捉其他模型中难以描述的壁面反应、电极鞘层以及非平衡放电等物理过程。因此,粒子模型可更全面和深入地表征等离子体羽流和电磁场之间的相互作用机制。另外,粒子模型以微观粒子为研究对象,原则上此类模型可应用于任何电推力器的仿真研究中^[175-177,181-184]。

基于粒子模拟的方法,不少研究单位针对电推力器的不同过程建立了准确的数值模型^[179-180,185-192]。2012~2015年,北京航空航天大学汤海滨等针对磁等离子体推力器中等离子体羽流与电磁场的相互作用关系,采用将粒子云网格方法和蒙特卡洛碰撞方法相结合的建模方法,构建了一个二维轴对称模型,并且详细阐述了模型求解中的算法、边界条件和计算加速方法。基于此模型,汤海滨进一步探究了磁等离子体推力器中的电磁加速机制和能量转换机制,结果表明涡旋加速是磁等离子体推力器推力生成的核心机制,并且磁喷管可有效将粒子的径向/切向能量转换为轴向动能^[163,193-195]。2016年,布莱尼茨等离子体科学与技术研究所 Sun 等将蛙跳算法、速度 Verlet 算法、自适应粒子管理算法和并行计算方法结合,建立了一个适用于低压电容耦合射频放电的粒子模型,该模型可精准描述边界层和鞘层区域中等离子体和电磁场的动态反应关系^[196]。2018年,兰州空间技术物理研究所杨乐等充分考虑了电子与中性原子之间的碰撞、激发碰撞和电离碰撞,离子和中性原子之间的弹性碰撞和电荷碰撞,以及电子和电子的碰撞,量化霍尔推力器不同区域的玻姆扩散强度,进而建立了能够反映等离子体羽流在霍尔推力器中运动的粒子模型,误差低于15%^[197]。2020年,电子科技大学周明鉴采用粒子模型的方法开发了适用于离子推力器的空心阴极求解器,重点探究了空心阴极中等离子体和时变电磁场之间的相互作用关系,利用该模型可表征空心阴极的电离过程、等离子体演化和分布以及带电粒子的电磁加速等物理过程^[198]。2021年,中国运载火箭技术研究院刘祺基于蒙特卡洛碰撞的粒子模型,开展了对脉冲等离子体推力器工作过程的数值模拟研究,揭示了脉冲电磁场下等离子体羽流的运动扩散机理,并且探究了放电腔室构型对电磁加速过程的影响^[199]。

6 推进剂研究进展

根据激光-电磁复合推力器的工作过程可知,等离子体羽流是电磁加速必不可少的介质,也是连接激光烧蚀和电磁加速两个过程的桥梁。因此,激光烧蚀推进剂生成稳定且电离度高的等离子体羽流是保证推力器后续电磁加速过程正常进行的前提条件。采用激光点火的复合推力器对推进剂适应性较好,理论上不管是聚合物、氧化物、金属、非金属单质或者含能材料都能作为推进剂。

如表2所示,激光-电磁复合推力器的常用固体推进剂包含聚四氟乙烯、聚氯乙烯、铝、氧化铝、铜和硝酸铵等材料。其中,聚合物因其极低的导热系数、较大的放热比焓以及低廉的成本,是当前激光-电磁推力器最常用的推进剂。但聚合物对激光能量吸收率较低,烧蚀质量较小,生成的等离子体羽流较少,难以保证电磁加速的稳定性。为了提高推力器的推进性能,研究者们开展了大量实验寻找性能优于聚合物的替代材料。2010年,东海大学 Horisawa 等对比了分别采用聚四氟乙烯、氧化铝和氮化硼作为推进剂的复合推力器性能,结果表明氧化铝具有比聚四氟乙烯和氮化硼更高的比冲和效率,但氧化铝的放电稳定性、元冲量和平均推力低于聚四氟乙烯的相关数据^[53]。2014~2016年,国防科技大学张代贤等分别以铝和聚四氟乙烯作为复合推力器的推进剂,测量和比较两者的放电电流、元冲量、比冲和推进效率等性能参数,结果表明采用铝作为推进剂的各项性能参数均高于采用聚四氟乙烯作为推进剂的各项性能参数^[34-35]。2020年,国防科技大学谭胜聚焦于推进剂长期供给的稳定性,测试了铝、铜、聚四氟乙烯、聚甲醛、掺碳粉的聚甲醛、聚氯乙烯和掺碳粉的聚氯乙烯等材料被激光烧蚀后的烧蚀形貌和羽流特

性,发现掺碳粉的聚氯乙烯烧蚀表面最为平整,无孔隙或裂痕,并且具有最大的羽流膨胀速度,由此认为掺碳粉的聚氯乙烯材料是激光-电磁复合推力器长期工作的更优推进剂。与此同时,谭胜进一步比较了分别采用掺碳聚氯乙烯和氟化金属含能材料作为推进剂的推力器放电特性,研究发现掺碳聚氯乙烯的峰值电流远大于氟化金属含能材料,并且掺碳聚氯乙烯的放电电阻小于氟化金属含能材料^[41]。2021年,南京理工大学段卜仁等比较了硝酸铵基含能材料和聚四氟乙烯材料作为推进剂的推力器推进性能和放电特性,数据显示硝酸铵基含能材料的放电峰值电流、烧蚀质量、元冲量、比冲和效率都远高于聚四氟乙烯的相关结果,并且前者的放电延迟时间也小于后者,由此认为硝酸铵基含能材料是更优异的推进剂^[43-44]。

尽管当前针对聚合物、金属、氧化物和含能材料作为激光-电磁复合推力器的推进剂展开了一些研究,但是限于研究对象和工作环境的不同,还欠缺明确的共性结论,且尚未弄清推力器对推进剂特性的具体需求。作为一个包含多个物理场过程的复合推力器,其推进剂不但需要兼容良好的烧蚀特性和电磁特性,而且需要匹配复合推力器中的各物理场变换,才有望获得更优的推进性能。结合激光-电磁复合推力器的多物理场特性分析,适用于该类推力器的高性能推进剂应具备以下特征:

(1)适中的导热系数。一方面,激光-电磁复合推力器的工作特点要求激光能量集中加热推进剂表面,促使烧蚀生成足量的等离子体羽流,因此推进剂的导热系数不能太高以减少热量扩散;另一方面,推进剂的导热性能不能太差,以避免在脉冲结束后推进剂烧蚀表面温度过高造成严重的滞后烧蚀,从而影响材料表面形貌的平整度。

表2 复合推力器常用推进剂

| 推进剂类别 | 电能/J | 激光能量/mJ | 比冲/s | 效率/% | 研究单位 |
|-------|-------|---------|-------|------|---------------------------|
| 聚四氟乙烯 | 4 | 75 | ~680 | ~13 | 航天工程大学 ^[45,84] |
| | 25 | 600 | ~2400 | ~16 | 南京理工大学 ^[34] |
| | 1.125 | 140 | ~500 | - | 南京理工大学 ^[43] |
| 硝酸铵 | 1.125 | 140 | ~750 | ~23 | 南京理工大学 ^[44] |
| 碳纤维 | 2 | 120 | ~1500 | ~5 | 东海大学 ^[200] |
| 聚氯乙烯 | 38 | 542 | - | - | 南京理工大学 ^[42,85] |
| 铝 | 25 | 600 | ~8000 | ~90 | 南京理工大学 ^[34] |
| 铜 | - | 50 | ~1800 | - | 东海大学 ^[201] |
| 氧化铝 | 0.6 | 400 | ~1250 | ~4.5 | 东海大学 ^[32] |
| | 9 | 266 | ~8000 | - | 东海大学 ^[55] |

(2)适中的激光吸收系数和反射系数。激光吸收系数和反射系数决定了材料对激光能量的吸收能力,进而影响烧蚀羽流的生成量。提高推进剂对激光能量的吸收能力,可确保其被烧蚀后产生足量后续电磁加速所需的等离子体羽流,以提高电磁加速的稳定性。但过高的烧蚀量,会造成推进剂的浪费,反而降低了比冲和推进效率。

(3)低电离能。推进剂电离能越低,其在相同能量下能电离产生更多带电粒子,带电粒子的增加可改良等离子体羽流的导电性和电离度,促进电磁加速过程的稳定性,增强等离子体羽流和电磁场的相互作用,进而获得更大推力和推进效率。

(4)高放热比焓。推进剂被烧蚀后,自身和烧蚀产物能够发生放热化学反应,释放的热量一方面可以促进推进剂的烧蚀和烧蚀产物的电离,另一方面可以增强等离子体羽流在放电腔室内的气动加速。

(5)稳定的性质。应用于微纳卫星中的推力器极易受到电磁干扰和机械振动等外界影响,性质稳定的推进剂方可应对卫星的各项飞行任务,并且满足卫星长期工作的动力需要。

通常来说,单一种类的材料难以同时满足上述所有要求。同时,激光-电磁复合推力器的推进剂尺寸小且消耗量少,针对火箭推进剂的各种分层和复合设计方案不再适用。因此,选定某种能够兼备多数特征,且价格低廉的材料作为推进剂基质,再根据推力器的多物理场特性,优选特定类别的掺杂剂改性推进剂基质,无疑是一种可行的复合推进剂设计方案^[202]。基于这种复合推进剂设计方法,国防科技大学和南京理工大学分别展开了进一步的实验探究。2018年,张宇将金属铝颗粒掺杂到聚四氟乙烯基质中,制备了系列具有不同掺杂比例的复合推进剂,对比分析了采用这些复合推进剂供给的激光-电磁复合推力器各项性能指标。结果表明,当铝颗粒掺杂比例越大时,烧蚀质量、元冲量、羽流膨胀速度和等离子体密度越大^[158]。2019年,杜忻洳采用多种金属、金属氧化物和盐类掺杂聚四氟乙烯基质来制备复合推进剂,实验测量复合推进剂的烧蚀形貌、烧蚀羽流和推进性能,分析得出盐类掺杂物可促进烧蚀羽流产生更多等离子体,进而提高推进性能^[81]。2020年,谭胜比较了掺碳聚氯乙烯和掺铝聚四氟乙烯的放电特性,研究发现掺碳聚氯乙烯放电电流大于掺铝聚四氟乙烯,并且掺碳聚氯乙烯的放电延迟时间和放电电阻小于掺铝聚四氟乙烯^[41]。2021年,段卜仁等把不同比例的硝酸铵掺杂到聚四氟乙烯基

质中作为复合推力器的推进剂,对比分析了这些复合推进剂的放电特性和推进性能,相关数据显示硝酸铵的掺杂可缩短放电延迟时间,增大放电电流,提高比冲和效率^[44]。2022年,欧阳等研究且分析了聚四氟乙烯掺杂金属、金属氧化物和碳类等样品的羽流特性参数与推进性能参数,并且测试了不同掺杂比例对各性能参数的影响,研究发现掺杂石墨烯的样品羽流膨胀速度较大,羽流发散角度较小,综合推进性能最优,最佳掺杂比例为5%^[38,203-207]。

尽管已有一些关于掺杂改性复合推进剂的研究,但这些研究只是单一地对比了某几种掺杂剂的性能,尚未理清掺杂物对复合推力器工作过程的改性机理,也没有明确掺杂剂对于不同物理过程的作用机制。因此,广泛对比不同掺杂剂对于推力器的影响,深入分析掺杂剂的改性机理,确定推进剂性能提升方向,优选匹配各物理场过程的相关掺杂剂仍然是开展高性能推进剂制备亟需解决的问题。

7 总结与展望

激光-电磁复合推力器,通过激光烧蚀固体推进剂生成等离子体,并采用电磁场进一步加速等离子体而生成推力,在业界已被看作是一种极具前景的新型先进推力器。与其他推力器相比,激光-电磁复合推力器不仅具有比冲高和体积小的特点,还具有精准可控、稳定可靠、抗干扰以及效率高的优势,可作为功能日益多样化且任务逐渐细节化的微纳卫星的主要动力装置。

作为一个复合推进系统,激光-电磁复合推力器不仅有激光烧蚀过程,又包含电磁放电加速过程,涉及工质分解、相变、传热传质、电离和电磁加速等多物理场过程,过程复杂且高度耦合。尽管大量地面试验验证了激光-电磁复合推力器的优越性,但是当前相关研究仍存在工作机理把握较为薄弱、多物理场特性分析较为片面以及推进性能提升方向尚未明确等问题。为了进一步推动激光-电磁复合推力器的发展和实际空间应用,提出如下展望:

(1)结合小型激光器和小型电源,进一步优化激光-电磁复合推力器的结构和布局设计,减少质量和体积,增大有效载荷,实现星载激光器供给激光模式的复合推力器在工程实际中的应用。

(2)充分考虑激光、电磁场和等离子体羽流三者之间的相互作用,建立能够体现推力器中固体推进剂被激光烧蚀时相变、分解、电离、传热和传质过程,等离子体流的生成和膨胀以及等离子体流在电磁场

作用下进一步电离增强和电磁加速等过程的一体化模型。

(3)分析激光-电磁复合推力器羽流的成分,厘清掺杂剂对推力器各过程的微观改性机理,确定掺杂剂的属性与推力器多物理场特性的匹配关系,从推进剂本身出发,研制一种可明显减弱羽流污染而不影响推进性能的添加剂。

致谢:感谢国家自然科学基金面上项目的资助。

参考文献

- [1] Levchenko I, Xu S, Mazouffre S, et al. Perspectives, Frontiers, and New Horizons for Plasma-Based Space Electric Propulsion[J]. *Physics of Plasmas*, 2020, 27: 020601.
- [2] Levchenko I, Xu S, Teel G, et al. Recent Progress and Perspectives of Space Electric Propulsion Systems Based on Smart Nanomaterials [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1).
- [3] Zhang Z, Ling W Y L, Tang H, et al. A Review of the Characterization and Optimization of Ablative Pulsed Plasma Thrusters [J]. *Reviews of Modern Plasma Physics*, 2019, 3(1).
- [4] Ling W Y L, Zhang S, Fu H, et al. A Brief Review of Alternative Propellants and Requirements for Pulsed Plasma Thrusters in Micropropulsion Applications [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 33 (12) : 2999-3010.
- [5] 谭 胜, 吴建军, 张 宇, 等. 激光支持的空间微推进技术研究进展[J]. *推进技术*, 2018, 39(11): 2415-2428. (TAN Sheng, WU Jian-jun, ZHANG Yu, et al. Research Progress of Laser-Supported Space Micropropulsion Technology [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(11): 2415-2428.)
- [6] 于达仁. 空间电推进原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2014.
- [7] 张天平, 唐福俊, 田华兵, 等. 电推进航天器的特殊环境及其影响[J]. *航天器环境工程*, 2007, 24(2): 88-94.
- [8] 张 郁. 电推进技术的研究应用现状及其发展趋势 [J]. *火箭推进*, 2005, 31(2): 27-36.
- [9] 黄良甫. 电推进系统发展概况与趋势[J]. *真空与低温*, 2005, 11(1): 1-9.
- [10] 吴汉基, 蒋远大, 张志远. 电推进技术的应用与发展趋势 [J]. *推进技术*, 2003, 24(5): 387-394. (WU Han-ji, JIANG Yuan-da, ZHANG Zhi-yuan. Application and Development Trend of Electric Propulsion Technology [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2003, 24 (5): 387-394.)
- [11] Phipps C, Birkan M, Bohn W, et al. Review: Laser-Ablation Propulsion [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, 26(4): 609-637.
- [12] Levchenko I, Bazaka K, Ding Y, et al. Space Micropropulsion Systems for Cubesats and Small Satellites: From Proximate Targets to Furthestmost Frontiers [J]. *Applied Physics Reviews*, 2018, 5: 011104.
- [13] Levchenko I, Bazaka K, Mazouffre S, et al. Prospects and Physical Mechanisms for Photonic Space Propulsion [J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(11): 649-657.
- [14] Komurasaki K, Wang B. Laser Propulsion [M]. *New York: John Wiley and Sons, Ltd*, 2010.
- [15] Yu H, Li H, Wang Y, et al. Brief Review on Pulse Laser Propulsion [J]. *Optics and Laser Technology*, 2018, 100: 57-74.
- [16] Kantrowitz A R. Propulsion to Orbit by Ground-Based Lasers [J]. *Astronautics and Aeronautics*, 1972, 10(5): 74-76.
- [17] Masakatsu N, Tomohiro I, Ryoji W. Laser Propulsion Technology on KKS-1 Microsatellite [J]. *The Review of Laser Engineering*, 2011, 39(1): 34-40.
- [18] Ou Y, Wu J, Zhang Y, et al. Modelling the Laser-Polymer Interaction of Laser Propulsion Systems Considering Progressive Surface Removal, Thermal Decomposition and Non-Fourier Effect [J]. *Acta Astronautica*, 2021, 186: 319-328.
- [19] Jiao L, Cai J, Ma H, et al. Research on Applications of Rectangular Beam in Micro Laser Propulsion [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 301: 481-487.
- [20] Felicetti L, Santoni F. Nanosatellite Swarm Missions in Low Earth Orbit Using Laser Propulsion [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2013, 27(1): 179-187.
- [21] Zhang Y, Lu X, Zhou M, et al. Laser Propulsion with a High Specific Impulse Using a Thin Film Propellant [J]. *Chinese Physics B*, 2011, 20(8): 470-473.
- [22] Michaelis M, Forbes A. Laser Propulsion: A Review [J]. *South African Journal of Science*, 2006, 102: 289-295.
- [23] Ou Y, Wu J, Zhang Y, et al. Theoretical Modeling and Parameter Analysis of Micro-Pulsed Plasma Thruster [J]. *Energies*, 2018, 11(5).
- [24] Keidar M, Zhuang T, Shashurin A. Electric Propulsion for Small Satellites [J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2015, 57: 014005.
- [25] Herdrich G, Bauder U, Boxberger A, et al. Overview on Electric Propulsion Development at IRS [C]. *Kurhaus: 32nd International Electric Propulsion Conference*, 2011.
- [26] Jahn R G, Lyman F A. Physics of Electric Propulsion [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1969, 36(3).
- [27] Molina P, Herdrich G, Lau M, et al. Pulsed Plasma Thrusters: A Worldwide Review and Long Yearned Clas-

- sification[C]. *Kurhaus: 32nd International Electric Propulsion Conference*, 2011.
- [28] Cervone A, Topputo F. Combined Chemical-Electric Propulsion for a Stand Alone Mars CubeSat[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2019(5): 1-15.
- [29] Dale E, Jorns B, Gallimore A. Future Direction for Electric Propulsion Research[J]. *Aerospace*, 2020, 7(9): 120.
- [30] Gatsonis N A, Lu Y, Blandino J, et al. Micropulsed Plasma Thrusters for Attitude Control of a Low-Earth-Orbiting CubeSat[J]. *Journal of Spacecraft and Rocket*, 2016, 53(1): 1-17.
- [31] Coletti M, Guarducci F, Gabriel S B. A Micro PPT for Cubesat Application: Design and Preliminary Experimental Results[J]. *Acta Astronautica*, 2011, 69(3-4): 200-208.
- [32] Oigawa Y, Akashi N, Hosokawa H, et al. A Short Pulse Laser-Assisted Pulsed Plasma Thruster[C]. *Orlando: 51st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2015.
- [33] Kamezaki H, Yano K, Kato H, et al. Effect of Discharge Pulse Delays on Characteristics of a Short-Pulse Laser-Assisted Pulsed Plasma Thruster[C]. *Cincinnati: 2018 Joint Propulsion Conference*, 2018.
- [34] Zhang Y, Zhang D, Wu J, et al. A Novel Laser Ablation Plasma Thruster with Electromagnetic Acceleration[J]. *Acta Astronautica*, 2016, 127: 438-447.
- [35] 张代贤. 激光支持的脉冲等离子体推力器理论、实验与仿真研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
- [36] Zhang D, Wu J, Zhang R, et al. Design and Performance Study of a New Laser-Electromagnetic Coupling Plasma Thruster[C]. *Naples: 63rd International Astronautical Congress*, 2012.
- [37] Ou Y, Wu J, Zhang Y, et al. A Predictive Model for Macro-Performances Applied to Laser-Assisted Pulsed Plasma Thrusters[J]. *Physics of Plasmas*, 2022, 29(1): 013506.
- [38] Ou Y, Zhang Y, Wu J, et al. Comparative Study of PTFE Filled Different Dopants as Propellants for Laser-Electric Hybrid Thruster[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 183: 199-210.
- [39] Ou Y, Wu J, Zhang Y. Design and Experimental Results of a Laser-Ignited Solid-Propellant-Fed Magneto-plasmdynamic Thruster[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(7): 074501.
- [40] Duan B, Zhang H, Wu L, et al. Acceleration Characteristics of Laser Ablation Cu Plasma in the Electrostatic Field[J]. *The European Physical Journal Applied Physics*, 2021, 93: 20802.
- [41] 谭 胜. 激光支持的脉冲等离子体推力器工作过程建模仿真与实验研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2020.
- [42] 谭 胜, 赵元政, 吴建军, 等. 激光支持的脉冲等离子体推力器工作过程实验研究[J]. *推进技术*, 2022, 43(8): 200762. (TAN Sheng, ZHAO Yuan-zheng, WU Jian-jun, et al. Experimental Study on Operating Process of Laser-Assisted Pulsed Plasma Thruster[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(8): 200762.)
- [43] 段卜仁, 章皓男, 华佐豪, 等. AN基推进剂在脉冲激光辐照下的电场加速特性[J]. *推进技术*, 2022, 43(11): 210439. (DUAN Bu-ren, ZHANG Hao-nan, HUA Zuo-hao, et al. Electric Acceleration Characteristics of AN-Based Propellant under Laser Irradiation[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(11): 210439.)
- [44] Duan B, Zhang H, Hu Z, et al. Impulse and Electric Charge Characteristics of Chemical Propellant under Pulsed Laser Irradiation[J]. *Vacuum*, 2021, 192: 110419.
- [45] 张志伟, 叶继飞, 祝 超, 等. 激光与电磁组合推进中能量对推进性能的影响[J]. *机电产品开发与创新*, 2019, 32(3): 68-71.
- [46] 谭 胜, 吴建军, 张 宇, 等. 脉冲等离子体推力器研制进展[C]. 长沙: 第十四届中国电推进学术研讨会, 2018.
- [47] Zhang Y, Zhang D, Wu J, et al. Non-Fourier Heat Conduction and Phase Transition in Laser Ablation of Polytetrafluoroethylene (PTFE)[J]. *Acta Astronautica*, 2017, 140: 338-350.
- [48] Horisawa H, Kawakami M, Kimura I. Laser-Assisted Pulsed Plasma Thruster for Space Propulsion Applications[J]. *Applied Physics A*, 2005, 81: 303-310.
- [49] Horisawa H, Igari A, Kawakami M, et al. Discharge Characteristics of Laser-Electric Hybrid Thrusters[C]. *Fort Lauderdale: 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2004.
- [50] Kawakami M, Lin W, Igari A, et al. Plasma Behaviors in a Laser-Assisted Plasma Thruster[C]. *Huntsville: 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2003.
- [51] Horisawa H, Sasaki Y, Funaki I, et al. Electromagnetic Acceleration Characteristics for a Laser-Electric Hybrid Thruster[C]. *Hartford: 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2008.
- [52] Sasaki Y, Horisawa H, Funaki I, et al. Thrust Performance of Electromagnetic Acceleration Mode for Laser-Electric Hybrid Thrusters[C]. *Florence: 30th International Electric Propulsion Conference*, 2007.
- [53] Horisawa H, Kishida Y, Funaki I, et al. High- I_{sp} Mode of Pulsed Laser-Electromagnetic Hybrid Accelerator for

- Space Propulsion Applications [C]. *Santa Fe: International Symposium on High Power Laser Ablation*, 2010.
- [54] Ayabe T, Horisawa H, Funaki I, et al. Rectangular Laser-Electromagnetic Hybrid Pulsed Plasma Thruster [C]. *Florence: 30th International Electric Propulsion Conference*, 2007.
- [55] Horisawa H, Mashima Y, Yamada O, et al. High Isp Mechanism of Rectangular Laser-Electromagnetic Hybrid Acceleration Thruster [C]. *Wiesbaden: 32nd International Electric Propulsion Conference*, 2011.
- [56] Horisawa H, Mashima Y, Yamada O. Acceleration Mechanism of Pulsed Laser-Electromagnetic Hybrid Thruster [C]. *Ludwigsburg: 7th International Symposium on Beamed Energy Propulsion*, 2011.
- [57] Kobayashi H, Horisawa H, Funaki I. A Plasma Behavior Analysis of a Laser-Assisted Pulsed Plasma Thruster [C]. *Atlanta: 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 2012.
- [58] Oigawa Y, Horisawa H, Funaki I. Improvement of Laser Electromagnetic Hybrid Thruster [C]. *Washington: 33rd International Electric Propulsion Conference*, 2013.
- [59] Horisawa H, Akashi N, Oigawa Y, et al. Short Pulse Operation of a Laser-Assisted Pulsed Plasma Thruster [C]. *Cleveland: 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2014.
- [60] Akashi N, Oigawa Y, Horisawa H, et al. Plasma Acceleration Characteristic of a Rectangular Laser-Electromagnetic Hybrid Thruster [C]. *Cleveland: 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2014.
- [61] Kato K, Akashi N, Oigawa Y, et al. Magnetic Field Distributions of a Laser Assisted Pulsed Plasma Thruster [C]. *Kobe-Hyogo: Joint Conference of 30th ISTS, 34th IEPC and 6th NSAT*, 2015.
- [62] Matsubara K, Hosokawa H, Akashi N, et al. A Short-Pulse Laser-Assisted Pulsed Plasma Thruster [C]. *Orlando: 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2015.
- [63] Kamezaki H, Yano K, Kato H, et al. Effect of Discharge Pulse Delays on Characteristics of a Short-Pulse Laser-Assisted Pulsed Plasma Thruster [C]. *Cincinnati: 2018 Joint Propulsion Conference*, 2018.
- [64] Ono T, Uchida Y, Horisawa H, et al. Laser-Electrostatic Acceleration Characteristics of a Laser-Electric Hybrid Thruster [C]. *Hartford: 44th AIAA/ASME/SAE/AS-EE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 2008.
- [65] Sakai T, Osamura A, Horisawa H. Development of a Laser-Electrostatic Hybrid Acceleration Propulsion System [J]. *Transaction of JSASS Aerospace Technology Japan*, 2014, 12(29): 43-46.
- [66] Ono T, Uchida Y, Horisawa H, et al. Measurement of Ion Acceleration Characteristics of a Laser-Electrostatic Hybrid Microthruster for Space Propulsion Applications [J]. *Vacuum*, 2009, 83(1): 213-216.
- [67] Osamura A, Edamura R, Horisawa H. Development of an Alternating Electric Field Accelerator for Laser-Ablation Plasma Acceleration [C]. *Kobe-Hyogo: Joint Conference of 30th ISTS, 34th IEPC and 6th NSAT*, 2015.
- [68] Edamura R, Osamura A, Hara K, et al. A Laser-Electrostatic Hybrid Thruster [C]. *Kobe-Hyogo: Joint Conference of 30th ISTS, 34th IEPC and 6th NSAT*, 2015.
- [69] Hamada A, Yano K, Ogasawara T, et al. Laser Ablation Plasma Diagnostics for Electrostatic Acceleration [C]. *Vienna: 36th International Electric Propulsion Conference*, 2019.
- [70] Zaidi S H, Smith T W, Murray R, et al. Magnetically Guided Laser Ablation for High Specific Impulse Thrusters [C]. *Reno: 43rd AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit*, 2005.
- [71] Rubi A S, Zaidi S H, Miles R B. Thrust Vectoring of Laser-Ablated Aluminum Plasma Using Permanent Magnets [C]. *Nashville: 50th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit*, 2012.
- [72] Rubi A S, Zaidi S H, Miles R B. Thrust Vectoring of a Laser-Ablated Plasma Using Permanent Magnets and Various Materials [C]. *Grapevine: 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2013.
- [73] Rashleigh S, Marshall R. Electromagnetic Acceleration of Macroparticles to High Velocities [J]. *Journal of Applied Physics*, 1978, 49: 2540.
- [74] Mcnab I R. Launch to Space with an Electromagnetic Railgun [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2003, 39(1): 295-304.
- [75] Mcnab I R. Progress on Hypervelocity Railgun Research for Launch to Space [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, 45(1): 381-388.
- [76] Zhang D, Zhang R, He Z, et al. Discharge Characteristics of a Laser-Electromagnetic Coupling Plasma Thruster for Spacecraft Propulsion [J]. *Applied Mechanical Materials*, 2012, 232: 337-341.
- [77] Zhang Y, Wu J, Ou Y, et al. Investigation on Plasma Characteristics in a Laser Ablation Pulsed Plasma Thruster by Optical Emission Spectroscopy [J]. *Plasma Science and Technology*, 2020, 22(4): 85-91.
- [78] Zhang Y, Wu J, Zhang D, et al. Investigation on Plume Expansion and Ionization in a Laser Ablation Plasma Thruster [J]. *Acta Astronautica*, 2018, 151: 432-444.
- [79] Tan S, Wu J, Zhang Y, et al. A Model of Ultra-Short Pulsed Laser Ablation of Metal with Considering Plasma Shielding and Non-Fourier Effect [J]. *Energies*, 2018,

- 11(11).
- [80] Zhang Y, Zhang D, Wu J, et al. A Thermal Model for Nanosecond Pulsed Laser Ablation of Aluminum[J]. *AIP Advances*, 2017, 7: 075010.
- [81] 杜忻洵. 激光-电磁推进器纳米改性工质的烧蚀特性及推进性能研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2019.
- [82] 谭胜, 吴建军, 赵元政, 等. 分块阳极式激光支持的脉冲等离子体推力器实验研究[J]. *推进技术*, 2022, 43(3): 200601. (TAN Sheng, WU Jian-jun, ZHAO Yuan-zheng, et al. Experimental Study of Laser Assisted Pulsed Plasma Thruster with Segmented Anode [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(3): 200601.)
- [83] 谭胜, 吴建军, 陈鑫, 等. 外加磁场对脉冲等离子体推力器性能的影响[J]. *推进技术*, 2019, 40(5): 1177-1188. (TAN Sheng, WU Jian-jun, CHEN Xin, et al. Effects of Applied Magnetic Field on Performance of Pulsed Plasma Thruster [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(5): 1177-1188.)
- [84] 詹玉豪, 李南雷. 不同激光点火能量下脉冲等离子体推进性能试验研究[J]. *机电产品开发与创新*, 2021, 34(6): 14-16.
- [85] 何敏华, 张端明. 脉冲激光沉积动力学研究进展[J]. *物理评论*, 2012, 41(3): 141-150.
- [86] 张端明, 李智华, 钟志成, 等. 脉冲激光沉积动力学原理[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [87] 刘高斌, 张端明, 赵汝顺, 等. 纳秒脉冲激光沉积中等离子体膨胀的动力学模型[J]. *沈阳工业大学学报*, 2009, 31(4): 401-408.
- [88] 谭新玉, 张端明, 李智华, 等. 纳秒脉冲激光沉积薄膜过程中的烧蚀特性研究[J]. *物理学报*, 2005, 54(8): 3915-3921.
- [89] 陈中军, 张端明, 李智华, 等. 脉冲激光沉积KTN薄膜动力学过程模拟[J]. *华中理工大学学报*, 2000, 28(5): 92-94.
- [90] Ravi-Kumar S, Lies B, Zhang X, et al. Laser Ablation of Polymers: A Review [J]. *Procedia Manufacturing*, 2019, 34: 316-327.
- [91] Bityurin N, Lukyanchuk B S, Hong M H, et al. Models for Laser Ablation of Polymers [J]. *Chemical Reviews*, 2003, 103: 519-552.
- [92] Sinkovics B, Gordon P, Harsányi G. Computer Modeling of the Laser Ablation of Polymers [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30(16): 2492-2498.
- [93] Punetha V D, Ha Y M, Kim Y O, et al. Interaction of Photothermal Graphene Networks with Polymer Chains and Laser-Driven Photo-Actuation Behavior of Shape Memory Polyurethane/Epoxy/Epoxy-Functionalized Graphene Oxide Nanocomposites [J]. *Polymer*, 2019, 181: 121791.
- [94] 李干, 程谋森, 李小康. 激光烧蚀聚甲醛的热-化学耦合模型及其验证[J]. *物理学报*, 2014, 63(10): 416-424.
- [95] Li Gan, Cheng Mousen, Li Xiaokang, et al. Slicing-Response Model for Ablation Mass Removal of Polyformaldehyde Irradiated by Pulsed CO₂ Laser in Vacuum [J]. *Science China Technological Sciences*, 2015, 5(1): 158-162.
- [96] 彭国良, 闫辉, 刘峰, 等. 纤维增强复合材料激光烧蚀效应的数值模拟[J]. *中国光学*, 2013, 6(2): 216-222.
- [97] Wang B, Wang X, Zheng H, et al. Thermal Effect of Femtosecond Laser Polystyrene Processing [J]. *Optics and Laser Technology*, 2019, 117: 244-250.
- [98] Lippert T. Laser Application of Polymers [J]. *Advance Polymer Science*, 2004, 168: 51-246.
- [99] Bounos G, Selimis A, Georgiou S, et al. Dependence of Ultraviolet Nanosecond Laser Polymer Ablation on Polymer Molecular Weight: Poly (Methyl Methacrylate) at 248nm [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100: 114323.
- [100] Bityurin N, Lukyanchuk B S, Hong M H, et al. Models for Laser Ablation of Polymers [J]. *Chemical Review*, 2003, 103: 519-552.
- [101] 李干. 脉冲激光辐照聚合物工质烧蚀推进机理与性能优化研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
- [102] Bityurin N. Laser Nanostructuring of Polymers [J]. *Springer Series in Materials Science*, 2014, 195: 293-313.
- [103] Bityurin N, Malyshev A. Bulk Photothermal Model for Laser Ablation of Polymers by Nanosecond and Subpicosecond Pulses [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 92: 605.
- [104] Bulgakova N M, Zakharov L A, Onischuk A A, et al. Thermal and Gas Dynamic Analysis of Ablation of Poly (Methyl Methacrylate) by Pulsed IR Laser Irradiation under Conditions of Nanoparticle Formation [J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2009, 42: 065504.
- [105] 杨镇, 刘海, 何远航. 飞秒激光烧蚀含能材料的分子动力学模拟(英文)[J]. *物理化学学报*, 2016, 32(8): 1977-1982.
- [106] Nan P, Shen Z, Ni B H. The Influences of Laminated Structure on the Ablation Characteristics of Carbon Fiber Composites under CW Laser Irradiation [J]. *Optics and Laser Technology*, 2019, 116: 224-231.
- [107] Kim B, Iida R, Doan D H, et al. Nanosecond Pulse Laser Scribing Using Bessel Beam for Single Shot Removal of Transparent Conductive Oxide Thin Film [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 107:

- 829–835.
- [108] Li Y, Zhang P, Li C, et al. Fractional Order and Memory-Dependent Analysis to the Dynamic Response of a Bi-Layered Structure Due to Laser Pulse Heating[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 144: 118664.
- [109] Kumar S, Srivastava A. Numerical Investigation of Thermal Response of Laser Irradiated Tissue Phantoms Embedded with Optical Inhomogeneities [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 77: 262–277.
- [110] Huang J, Zhang Y, Chen J K. Ultrafast Solid-Liquid-Vapor Phase Change in a Thin Gold Film Irradiated by Multiple Femtosecond Laser Pulses [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52: 3091–3100.
- [111] Rahaman A, Kar A, Yu X. Thermal Effects of Ultrafast Laser Interaction with Polypropylene[J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 5764–5783.
- [112] Marla D, Zhang Y, Hattel J H, et al. Modeling of Nanosecond Pulsed Laser Processing of Polymers in Air and Water[J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2018, 26: 055005.
- [113] Antonov E N, Dunaev A G, Konovalov A N, et al. Temperature Field Distribution in Polymer Particles During Surface-Selective Laser Sintering [J]. *Laser Physics*, 2020, 30: 055601.
- [114] Palmieri F L, Wohl C J. Topographical Modification of Polymers and Metals by Laser Ablation to Create Superhydrophobic Surfaces [M]. *New York: John Wiley and Sons*, 2018.
- [115] Marimuthu S, Kamara A M, Rajemi M F, et al. Laser Surface Cleaning: Removal of Hard Thin Ceramic Coatings[M]. *New Jersey: Wiley-Blackwell*, 2018.
- [116] Loktionov E Y, Ovchinnikov A V, Protasov Y S, et al. Study of OptoMechanical Characteristics of Interaction of Ultrashort Laser Pulses with Polymer Materials [J]. *Lasers and Their Applications*, 2012, 112(4): 631–637.
- [117] Kruger J, Kautek W. Ultrashort Pulse Laser Interaction with Dielectrics and Polymers[J]. *Advance Polymer Science*, 2004, 168: 247–289.
- [118] Feng Y, Liu Z Q, Yi X S. Co-Occurrence of Photochemical and Thermal Effects During Laser Polymer Ablation via a 248-nm Excimer Laser [J]. *Applied Surface Science*, 2000, 156: 177–182.
- [119] Brosda M, Nguyen P, Olowinsky A, et al. Analysis of the Interaction Process During Laser Transmission Welding of Multilayer Polymer Films with Adapted Laser Wavelength by Numerical Simulation and Thermography [J]. *Journal of Laser Applications*, 2020, 32: 022060.
- [120] Wang Y, Shen N, Befekadu G K, et al. Modeling Pulsed Laser Ablation of Aluminum with Finite Element Analysis Considering Material Moving Front[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 113: 1246–1253.
- [121] Otto A, Vazquez R G, Hartel U, et al. Numerical Analysis of Process Dynamics in Laser Welding of Al and Cu [J]. *Procedia CIRP*, 2018, 74: 691–695.
- [122] Yi J, Feng G, Yang X, et al. Random Lasing in a Dye-Doped Polymer Thin Film Waveguide Deposited on a Si Surface Microstructured by Femtosecond Laser Ablation [J]. *Journal of Modern Optics*, 2014, 61(3): 215–221.
- [123] Wang Y, Befekadu G K, Ding H, et al. Uncertainty Quantification for Modeling Pulsed Laser Ablation of Aluminum Considering Uncertainty in the Temperature-Dependent Absorption Coefficient[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 120: 515–522.
- [124] Taha R M, Jawad H A. Numerical Modeling of 193-nm Excimer Laser Ablation on CR-39 Polymer[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2018, 3: 6815.
- [125] Ho C Y, Chen B C, Tsai Y H, et al. Nanoscale Removal of Picosecond Laser Ablation for Polymer[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2018, 18: 7281–7285.
- [126] Becerra M, Pettersson J. Optical Radiative Properties of Ablating Polymers Exposed to High-Power Arc Plasmas [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, 51: 125202.
- [127] Tsurutaa H, Dondelowski O, Katagiri Y, et al. Ablation Spot Area and Impulse Characteristics of Polymers Induced by Burst Irradiation of 1 μ s Laser Pulses[J]. *Acta Astronautica*, 2017, 136: 46–54.
- [128] Khalil A I, Morsy M A. Development of Double-Pulse Lasers Ablation System and Electron Paramagnetic Resonance Spectroscopy for Direct Spectral Analysis of Manganese Doped PVA Polymer[J]. *Optics and Laser Technology*, 2017, 96: 227–237.
- [129] Zelenska K S, Zelensky S E, Poperenko L V, et al. Thermal Mechanisms of Laser Marking in Transparent Polymers with Light-Absorbing Microparticles [J]. *Optics and Laser Technology*, 2016, 76: 96–100.
- [130] Marla D, Zhang Y, Jabbari M, et al. A Computational Model for Heterogeneous Heating During Pulsed Laser Irradiation of Polymers Doped with Light-Absorbing Microparticles[J]. *Applied Physics A*, 2016, 122: 1042.
- [131] Long L, Huang Y, Zhang J. Experimental Investigation and Numerical Simulation on Continuous Wave Laser Ablation of Multilayer Carbon Fiber Composite[J]. *Journal of Materials: Design and Application*, 2017, 231(8).
- [132] Kappes R S, Schönfeld F, Li C, et al. Temperature Analysis of Laser Heated Polymers on Microsecond Time Scales[J]. *Applied Physics A*, 2012, 106(4): 791–801.

- [133] Zakharov L A, Bulgakova N, Telminov A E, et al. Laser Plasma of Poly (Methyl Methacrylate) in Air: Modeling and Experiment[C]. *Sofa: SPIE Proceedings*, 2010.
- [134] Sinkovics B, Gordon P, Harsányi G. Computer Modeling of the Laser Ablation of Polymers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30: 2492–2498.
- [135] Lazare S, Elaboudi I, Castillejo M, et al. Model Properties Relevant to Laser Ablation of Moderately Absorbing Polymers[J]. *Applied Physics A*, 2010, 101: 215–224.
- [136] Sinko J E, Phipps C R. Modeling CO₂ Laser Ablation Impulse of Polymers in Vapor and Plasma Regimes[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95: 131105.
- [137] Prasad M, Conforti P F, Garrison B J. Interplay Between Chemical, Thermal, and Mechanical Processes Occurring upon Laser Excitation of Poly (Methyl Methacrylate) and Its Role in Ablation[J]. *Journal of Physics Chemical C*, 2009, 113: 11491–11506.
- [138] 谭 胜, 吴建军, 黄 强, 等. 基于双相延迟模型的飞秒激光烧蚀金属模型[J]. *物理学报*, 2019, 68(5): 233–244.
- [139] Cha D, Axinte D. Transient Thermal Model of Nanosecond Pulsed Laser Ablation: Effect of Heat Accumulation During Processing of Semi-Transparent Ceramics[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 173: 121227.
- [140] 李 健. 基于粒子模拟方法的磁等离子体推力器工作机理研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2020.
- [141] 王司宇. 脉冲等离子体推力器实验及仿真研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [142] 张 锐. 脉冲等离子体推力器工作过程及羽流特性的理论与实验研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- [143] 张 华, 吴建军, 张代贤, 等. 用于脉冲等离子体推力器烧蚀过程仿真的新型机电模型[J]. *物理学报*, 2013, 62(21): 27–33.
- [144] 武志文, 刘向阳, Ling W Y L. 脉冲等离子体推进理论和关键技术[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [145] 黄天坤. 脉冲等离子体推力器能量分配机理的理论与实验研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.
- [146] 袁世越. 脉冲等离子体推力器点火过程实验与理论研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [147] Wu Z, Huang T, Liu X, et al. Application and Development of the Pulsed Plasma Thruster[J]. *Plasma Science and Technology*, 2020, 22(9): 131–144.
- [148] Li H, Wu Z, Sun G, et al. A Model for Macro-Performances Applied to Low Power Coaxial Pulsed Plasma Thrusters[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 170: 154–162.
- [149] Huang T, Wu Z, Sun G, et al. Study and Modeling of Propellant Ablation in Coaxial Ablative Pulsed Plasma Thrusters[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 173: 69–75.
- [150] Hart P J. Modified Snowplow Model for Coaxial Plasma Accelerators[J]. *Journal of Applied Physics*, 1964, 35(12): 3425–3431.
- [151] Solbes A, Thomassen K, Vondra R J. Analysis of Solid Teflon Pulsed Plasma Thruster[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2013, 50(12): 1402–1406.
- [152] 魏荣华. 用于PPT的扩散模型及其简化MHD方程组的解[J]. *空间科学学报*, 1982, 2(4): 319–326.
- [153] Laperriere D D, Gatsonis N A, Demetriou M A. Electro-mechanical Modeling of Applied Field Micro Pulsed Plasma Thrusters[C]. *Tucson: 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2005.
- [154] 欧 阳. 基于应力检测技术的等离子体推力器推力测量方法探究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2018.
- [155] 赵博强, 李 永, 周 成, 等. 磁等离子体动力推力器加速机理研究与仿真[J]. *固体火箭技术*, 2021, 44(2): 233–240.
- [156] 李益文, 张百灵, 李应红, 等. 磁流体动力学在航空工程中的应用与展望[J]. *力学进展*, 2017, 47: 452–502.
- [157] Li J, Zhang Y, Wu J, et al. Particle Simulation Model for Self-Field Magnetoplasmadynamic Thruster[J]. *Energies*, 2019, 12(8): 1579.
- [158] 张 宇. 激光烧蚀磁等离子体推力器工质烧蚀特性及推进性能理论与实验研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2018.
- [159] Kuzenov V V, Ryzhkov S V, Frolko P A. Numerical Simulation of the Coaxial Magneto-Plasma Accelerator and Non-Axisymmetric Radio Frequency Discharge[J]. *Journal of Physics Conference*, 2017, 830(1): 012049.
- [160] Ahangar M, Ebrahimi R, Shams M. Numerical Investigation of Plasma Behavior and Anode Sheath in a Magnetoplasmadynamic Thruster[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2016, 32(2): 420–430.
- [161] Xisto C M, Páscoa J C, Oliveira P J. Numerical Analysis of Real Gas MHD Flow on Two-Dimensional Self-Field MPD Thrusters[J]. *Acta Astronautica*, 2015, 112: 89–101.
- [162] Quraishi A, Kumar A, Mahendhran M. Numerical Study on Diffusion Effects in Magnetoplasmadynamic Arcjet Thrusters[C]. *Hyogo-Kobe: 34th International Electric Propulsion Conference*, 2015.
- [163] Li M, Tang H, Ren J, et al. Modeling of Plasma Processes in the Slowly Diverging magnetic Fields at the Exit of an Applied-Field Magnetoplasmadynamic Thruster [J]. *Physics of Plasmas*, 2013, 20: 1–13.
- [164] Xisto C, Páscoa J, Oliveira P. A Pressure-Based High Resolution Numerical Method for Resistive MHD [J]. *Journal of Computational Physics*, 2014, 275: 323–345.

- [165] Xisto C, Páscoa J, Paulo J Oliveira. Numerical Analysis of Real Gas MHD Flow on Two-Dimensional Self-Field MPD Thrusters[J]. *Acta Astronautica*, 2015, 112: 89-101.
- [166] Keidar M, Boyd I D. Ablation Study in the Capillary Discharge of an Electrothermal Gun[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99: 053301.
- [167] Keidar M, Boyd D, Antonsen E L, et al. Optimization Issues for a Micropulsed Plasma Thruster[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22(1): 48-55.
- [168] Keidar M, Boyd I D, Beilis I I. Ionization and Ablation Phenomena in an Ablative Plasma Accelerator[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 96(10): 5420-5428.
- [169] Keidar M, Boyd I D, Antonsen E, et al. Electromagnetic Effects in the Near-Field Plume Exhaust of a Micropulsed-Plasma Thruster[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2004, 20(6): 961-969.
- [170] Peterkin R E. MHD Modeling of Plasma Compression to High Pressure with Capacitive-Driven Solid Shell Implosions[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, 30(2): 468-475.
- [171] Liron C. Derivation of A Numerical Method for Computing 3D Magnetoplasmdynamic Flows in Thermodynamic Non-Equilibrium [D]. *Daytona Beach: Embry-Riddle Aeronautical University*, 2005.
- [172] 尹乐. 脉冲等离子体推力器工作过程及羽流的数值仿真研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- [173] Parma B. Three-Dimensional Modeling and Analysis of Magnetoplasmdynamic Acceleration [D]. *Phoenix: Arizona State University*, 2011.
- [174] Mayigue C C. Numerical Investigation of MPD Thrusters Using a Density-Based Method with Semi-Discrete Central-Upwind Schemes for MHD Equations[D]. *Bremen: University of Bremen*, 2018.
- [175] 夏旭, 杨涓, 付瑜亮, 等. 2 cm 电子回旋共振离子推力器离子源中磁场对等离子体特性与壁面电流影响的数值模拟[J]. *物理学报*, 2021, 70(7): 075204.
- [176] 孙安邦, 闫涵, 李昊霖. 电子轰击式离子推力器放电腔结构对等离子体特性影响的全粒子仿真研究[J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(7): 12-20.
- [177] 罗杨, 陈茂林, 苏冬冬, 等. 外磁场作用下的磁等离子体动力学过程仿真[J]. *物理学报*, 2022(5): 251-259.
- [178] 冷爽. 基于 PIC-MCC 模型的真空电弧零区等离子体仿真[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [179] Kempf A, Kilian P, Ganse U, et al. Picpanther: A Simple, Concise Implementation of the Relativistic Moment Implicit Particle-In-Cell Method [J]. *Computer Physics Communications*, 2015, 188: 198-207.
- [180] Genco F, Hassanein A. Numerical Simulations of Laser Ablated Plumes Using Particle-In-Cell (PIC) Methods [J]. *Laser and Particle Beams*, 2014, 32: 305-310.
- [181] 胡生屹. 非正交结构化网格下的霍尔推力器 Particle-In-Cell 粒子模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [182] 鹿畅. Kaufman 型离子推力器中等离子的数值模拟研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2019.
- [183] Itina T E, Zhigilei L V. Generation of Nanoparticles by Laser Ablation: Combined MD-DSMC Computational Study [J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2007, 59: 44-49.
- [184] Oh D Y. Computational Modeling of Expanding Plasma Plumes in Space Using a PIC-DSMC Algorithm [D]. *Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology*, 1997.
- [185] Li J, Wu J, Zhang Y, et al. Study of Scaling Law for Particle-In-Cell/Monte Carlo Simulation of Low Temperature Magnetized Plasma for Electric Propulsion[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, 52: 455203.
- [186] Surmin I A, Bastrakov S I, Efimenko E S, et al. Particle-In-Cell Laser-Plasma Simulation on Xeon Phi Coprocessors [J]. *Computer Physics Communications*, 2016, 202: 204-210.
- [187] Garrigues L, Fubiani G, Boeuf J P. Appropriate Use of the Particle-In-Cell Method in Low Temperature Plasmas: Application to the Simulation of Negative Ion Extraction [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 120: 213303.
- [188] Liu Q, Yang L, Huang Y, et al. PIC Simulation of Plasma Properties in the Discharge Channel of a Pulsed Plasma Thruster with Flared Electrodes [J]. *Plasma Science and Technology*, 2019, 21(7).
- [189] Tang H, Cheng J, Liu C, et al. Study of Applied Magnetic Field Magnetoplasmdynamic Thrusters with Particle-In-Cell Code with Monte Carlo Collision. I. Computation Methods and Physical Processes [J]. *Physics of Plasmas*, 2012, 7: 107-117.
- [190] Neudorfer J, Stindl T, Stock A, et al. Three-Dimensional Simulation of Rarefied Plasma Flows Using a High Order Particle in Cell Method [M]. *Berlin: Springer*, 2011.
- [191] Poulain G, Blanc D, Kaminski A, et al. Modeling of Laser Processing for Advanced Silicon Solar Cells [C]. *Paris: COMSOL Conference*, 2010.
- [192] Taccogna F, Longo S, Capitelli M, et al. Particle-In-Cell Simulation of Stationary Plasma Thruster [J]. *Contributions of Plasma Physics*, 2007, 47(8): 635-656.
- [193] Li M, Liu H, Ning Z, et al. 2-D Extended Fluid Model of Applied-Field Magnetoplasmdynamic Thruster with Solid and Hollow Cathodes [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, 43(12): 4034-4042.
- [194] 程蛟, 汤海滨, 刘兵. 磁等离子体推力器工作机

- 理与应用前景研究[J]. 空间控制技术与应用, 2013, 39(5): 34-38.
- [195] Tang H, Cheng J, Liu C, et al. Study of Applied Magnetic Field Magnetoplasmadynamic Thrusters with Particle-in-Cell and Monte Carlo Collision. II. Investigation of Acceleration Mechanisms [J]. *Physics of Plasmas*, 2012, 19: 1-11.
- [196] Sun A, Becker M M, Loffhagen D. PIC/MCC Simulation of Capacitively Coupled Discharges: Effect of Particle Management and Integration[J]. *Computer Physics Communications*, 2016, 206: 35-44.
- [197] 杨乐, 贾连军, 张天平, 等. 5千瓦霍尔推力器磁场优化及 Particle-in-Cell 性能仿真[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(27).
- [198] 周明鉴. 离子推进器空心阴极 PIC/MCC 模拟研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [199] 刘祺. 脉冲等离子体推力器工作过程等离子体机理研究[D]. 北京: 中国运载火箭技术研究院, 2021.
- [200] Shinohara T, Horisawa H, Baba M, et al. A Pulsed Laser-Electromagnetic Hybrid Accelerator for Space Propulsion Application [C]. *Scottsdale: 6th International Symposium on Beamed Energy Propulsion*, 2010.
- [201] Horisawa H, Sasaki K, Igari A, et al. Electrostatic and Electromagnetic Acceleration in a Laser-Electric Hybrid Thruster [C]. *Princeton: 29th International Electric Propulsion Conference*, 2005.
- [202] Ou Y, Wu J, Du X, et al. Experimental Investigation on Characteristics of Pulsed Plasma Thrusters with the Propellant Samples of Modified PTFE Filled Si, Al and Al₂O₃ [J]. *Vacuum*, 2019, 165: 163-171.
- [203] 欧阳. 激光-电磁复合推力器工作过程和新型推进剂特性理论与实验研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2022.
- [204] Ou Y, Wu J, Zhang Y. Effects of Carbon, Graphite, and Graphene as Propellant Dopants in a Laser-Electric Hybrid Acceleration System [J]. *Optics and Laser Technology*, 2022, 151(7): 108007.
- [205] Ou Y, Wu J, Zhang Y, et al. Plume Characteristics of Polymeric Material Doped with Different Metal Particles under Pulsed Laser Irradiation [J]. *Optics and Laser Technology*, 2022, 152: 108132.
- [206] Ou Y, Wu J, Zhang Y, et al. Comparative Study of Plume Characteristics of Polymeric Propellants Filled with Different Oxides for Laser-Electric Hybrid Thruster [J]. *Optics and Laser Technology*, 2022, 147: 107609.
- [207] Ou Y, Wu J, Zhang Y. Dynamic Simulation and Model of Laser Ablation of Al/PTFE Material in the Vacuum [J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2022, 105: 670-689.

(编辑:白 鹭)