

碳类粒子对固体推进剂束流发散角度影响的实验研究

欧阳, 吴建军*, 程玉强, 张宇, 车碧轩
(国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410073)

摘要:以石墨烯和碳粉两种碳类粒子作为掺杂剂定向改性固体推进剂,借助高速摄影技术和自搭建的束流发散角度测量系统,对比并分析不同掺杂比例和工作条件对改性推进剂束流发散角度的影响,确定了掺杂粒子的最优掺杂比例和工作条件。结果表明,石墨烯和碳粉的最优掺杂比例均为7%,且石墨烯的束流发散角度更小,生成稳定等离子体流的响应时间更短。同时,石墨烯更适配于小激光能量供给下的工作条件,而碳粉更适配于大激光能量供给下的工作条件。

关键词:掺杂粒子;空间推进;固体推进剂;束流发散角度;实验研究

中图分类号:V439 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2024)04-016-13

Experimental study on effects of carbon dopants on the beam divergence angles of solid propellants

OU Yang, WU Jianjun*, CHENG Yuqiang, ZHANG Yu, CHE Bixuan

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

Abstract: Two kinds of carbon doped particles, graphene and toner, were used to directionally modify solid propellant. The influence of different doping ratios and working conditions on the divergence angle of the modified propellant was compared and analyzed by high-speed photography technology and a self-built beam divergence angle measurement system, so as to determine the optimal doping ratios and working conditions of the doped particles. It is found that the optimal doping ratio of graphene and toner is 7%, and the beam divergence angle of graphene is smaller, and the response time of generating stable plasma flow is shorter. At the same time, graphene is more suitable for the working conditions under the small laser energy supply, and toner is more suitable for the working conditions under the large laser energy supply.

Keywords: dopants; space propulsion; solid propellant; beam divergence angle; experimental study

空间领域作为制海权、制空权和制信息权的前提,已经成为国家利益竞争和战略制衡的关键点,是国家战略意图的重要体现^[1-2]。2022年1月,国务院发布的《2021中国的航天》白皮书中明确指出:“未来五年,中国航天将立足新发展阶段,贯彻新发展理念,构建新发展格局,按照高质量发展要求,推动空间科学、空间技术、空间应用全面发展,开启全面建设航天强国新征程”^[3]。以电推进系统为代表的空间推进技术是实现各类航天器高精度控制和长时间驻守的核心技术,是保障各种空间应用必要的动力基础,也是当前建设航天强国的重点试验验证内容之一^[4-5]。

固体电推力器是近些年兴起的一种以固体推进剂供给的新型电推进方案。与常规气体和液体电推力器相比,固体电推力器无须繁杂的气罐和气阀等储存装置,具有寿命更长、结构更简单、响应时间更快、成本更低和易于小型化等特点^[6-7],可为强体约束的微小航天器和快速机动的空天任务提供可靠的动力方案,得到了国内外相关研究单位的广泛关注^[8-16]。以固体推进剂固气转换的激发能量类型为分类标准,固体电推力器主要包含脉冲等离子体推力器、微阴极电弧推力器和激光-电磁复合推力器。

作为喷气推进的一种形式,电推进通常要求

收稿日期:2023-11-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(T2221002,52302485);湖南省小荷科技人才专项资助项目(2023TJ-X27)

第一作者:欧阳(1994—),男,湖南衡阳人,讲师,博士,E-mail:ouyang16@nudt.edu.cn

*通信作者:吴建军(1967—),男,新疆奎屯人,教授,博士,博士生导师,E-mail:jjwu@nudt.edu.cn

引用格式:欧阳,吴建军,程玉强,等.碳类粒子对固体推进剂束流发散角度影响的实验研究[J].国防科技大学学报,2024,46(4):16-28.

Citation:OU Y, WU J J, CHENG Y Q, et al. Experimental study on effects of carbon dopants on the beam divergence angles of solid propellants[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2024, 46(4): 16-28.

推力器喷出束流为轴对称构型,垂直于轴线的工质动量代数和为零,推力尽可能和推力器轴线平行^[17-19]。在推力器实际工作中,由于工质分子运动的无规则性和加速过程的非对称性,工质径向运动量很难抵消,导致推力矢量并非严格通过中轴线。固体电推力器往往需先将固体推进剂转换为等离子体流,然后等离子体流与电磁场相互作用生成推力,因此固体电推力器的束流特性通常逊于气体/液体电推力器。

从电推进设计而言,束流发散程度是衡量电推力器效率的重要参数,其表示工质垂直推力器中轴线动量与平行于推力器中轴线动量的比值的大小。由于加速工质的能量是一定的,而垂直于推力器的动力无法产生有效推力,对推力器意味着能量损失,将导致推力器效率下降^[20]。因此,尽可能减小推力器的束流发散角度可明显提高能量的转换率和推进效率。

从电推进应用而言,束流发散程度关系到电推进在空间飞行器中的布局和使用方式。因电推力器的束流包含大量带电粒子,其冲击航天器表面将造成溅射或沉积,长时间溅射沉积会影响航天器结构或功能,进而造成航天器寿命和性能的衰减^[20-21]。因此,减小束流发散角度可降低束流溅射和沉积区域大小,延长航天器的寿命和保障工作性能。

综上所述,束流发散角度对于任何一种类型的电推力器都是关键的指标参数。针对电推力器的束流发散角度问题,研究者们开展了广泛的研究^[22-31]。2015年,哈尔滨工业大学 Liu 等提出在推力器出口放置一个具有相反极性的小环形磁铁和一个纯铁环,将束流发散角度从 45° 降低至 25°,有效增加了推力和效率的大小^[32]。2018年,FOTEC 公司对自研推力器开展了推力和束流发散角度精确的测量,以全面评估推力器的性能^[33]。2020年,哈尔滨工业大学 Liu 等分析了不同外加磁场对磁屏蔽霍尔推力器束流发散程度的影响,研究发现当外加磁场向内倾斜时,可明显抑制径向粒子运动,减小束流发散角度^[34]。2021年,美国普林斯顿等离子体物理实验室通过对推力器添加偏置分段电极来减小束流发散角度和降低放电不稳定性,同时有效提升了推进性能^[35]。2022年,兰州空间技术物理研究所分别探究了不同阳极质量流率、磁场和电场对推力器束流发散角度和推力矢量偏心特性的变化规律^[36]。尽管目前研究者们针对电推力器束流发散程度的抑制和降低已经发现了一些策略和方法,但是多数聚焦在外加结构以改变推力器的电磁场。这些方法

虽然可以改善电推力器的束流发散程度,但是增加了推力器整体结构的复杂性和降低了可靠性。若是能够从推进剂本身的角度出发,通过对推进剂进行改性,使其能够降低束流发散角度,这无疑可以既不增加结构的复杂性,又有效提升推进性能。

根据固体电推力器工作过程分析,若以激光、电弧和热电阻等装置确保固体推进剂固气转换过程正常进行,则聚合物、金属和氧化物等材料均可作为该类型推力器的推进剂。得益于低廉的成本、良好的稳定性和迅速的气化性,聚合物材料是目前固体电推力器中应用较广的推进剂^[6,37-38]。然而,作为一个包含多个物理场过程的固体电推力器,其推进剂不但需要兼容良好的固气转换特性使其快速生成等离子体流,而且还需要具备良好的电磁特性使其能够被电磁加速生成推力^[8]。单一种类的材料难以同时满足固气转换过程和电磁加速过程的需求。因此,以聚合物材料为基质,优选特定的掺杂粒子改性基质的性能,无疑是一种可行的束流发散角度抑制方法。

2015年至今,东京大学^[39]、NASA^[40]、国防科技大学^[41-45]、南京理工大学^[46]、北京理工大学^[47]分别探究了多种金属、金属氧化物、盐类、碳类和非金属单质等掺杂粒子对固体电推力器推进性能的影响。经对比分析,碳粉和石墨烯可明显提高固体电推力器的元冲量、放电成功率、比冲和推进效率,并且减小束流发散角度。基于此,本文制备了一系列石墨烯和碳粉改性的固体复合推进剂,借助自构建的束流发散测量系统^[42,48],测量并分析不同掺杂比例和工作条件对改性推进剂束流发散角度的影响,进而确定掺杂粒子的最优掺杂比例和工作条件。

1 实验设计

1.1 推进剂制备

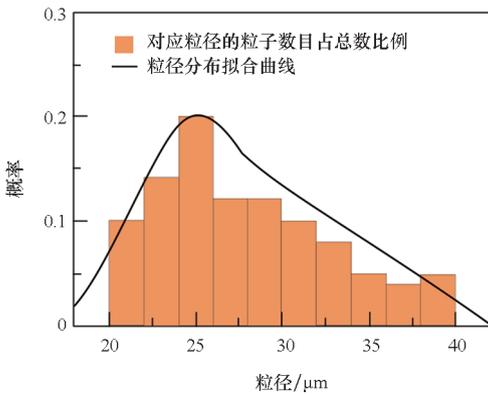
聚四氟乙烯具有低导热系数、低表面黏附性、低摩擦阻力、低成本、高比热焓、热稳定性和化学稳定性等特点,是当前空间推进中应用最广的固体推进剂之一。同时,聚四氟乙烯常温下性质稳定,难以与其他物质发生化学反应,以其作为基质可有效兼容多种特性。因此,本文以聚四氟乙烯为固体推进剂的聚合物基质,再以碳类粒子作为掺杂剂,定向改良聚四氟乙烯基质的电离能、导热系数和比热焓等特性。实验中所使用的聚合物基质和各掺杂剂参数如表1所示。后续涉及的掺杂比例均为质量分数比例。聚四氟乙烯基质、石墨烯和碳粉的粒径

表 1 聚合物基质和掺杂剂参数

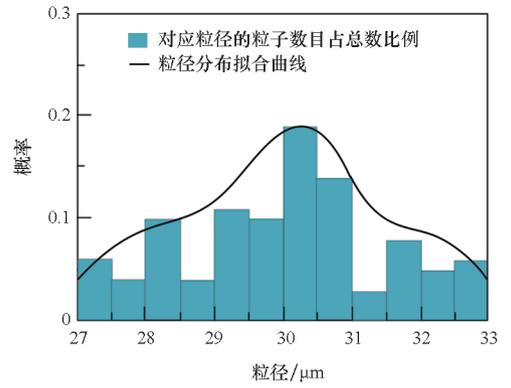
Tab. 1 Main properties of polymeric matrix and fillings

参数	基质	碳类掺杂剂	
材料名称	聚四氟乙烯	碳粉	石墨烯
简写符号	PTFE	C	C
粒子半径	25 μm	30 nm	1.2 nm
颜色	白色	黑色	黑色
厂家	明尼苏达 矿业及机械 制造公司	北京德科岛金科技 有限公司	

分布概率图如图 1 所示。尽管多数粒子大小以厂家标定的粒径为主,但是不同粒径大小的粒子在后续烧蚀过程会带来不同的粒子剥离效应,这可能是造成推进剂样品束流发散角度动态稳定过程中波动的一个因素。但掺杂粒子的粒径均远小于聚四氟乙烯基质的粒径,因此可认为掺杂粒子的粒径对推进剂的影响较小,远低于掺杂粒子本身性质对推进剂的影响。

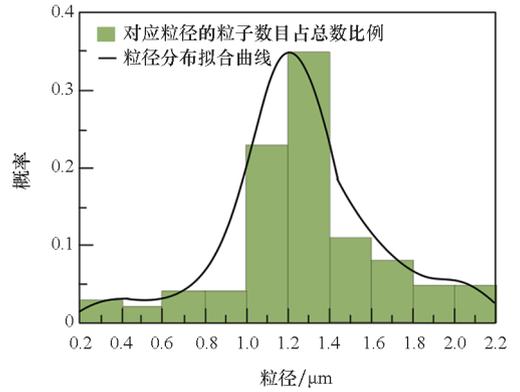


(a) 聚四氟乙烯
(a) PTFE



(b) 碳粉

(b) Toner



(c) 石墨烯

(c) Graphene

图 1 原料粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of materials

固体复合推进剂以聚四氟乙烯为基质,各种纳米粒子为掺杂剂,根据如图 2 所示的模压烧结合成型法制备而得。固体复合推进剂的制备流程包含基质和掺杂剂的混合、混合粉末干燥、锻压预成型和烧结合成型四个步骤,具体过程如下所述。

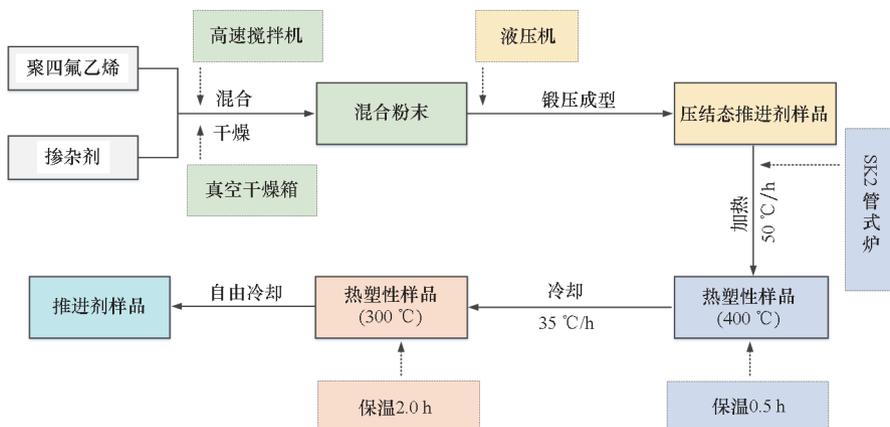


图 2 固体推进剂制备步骤

Fig. 2 Preparation steps of solid propellants

1) 基质和掺杂剂的混合。为了防止纳米掺杂粒子被空气氧化,基质和掺杂剂的混合过程置于氩气环境的手套箱中进行。首先,电子天平分别称取一定量的聚四氟乙烯粉末和掺杂粒子粉末,一起加入搅拌机中。然后,采用干粉混合法,利用机械搅拌机将聚四氟乙烯粉末和掺杂粒子物理混合并使其均匀分散^[9-10]。搅拌机转速设置为 200 r/min,每搅拌 5 min 后静置 10 min,待其冷却后再次搅拌,同时保证有效搅拌时间至少 30 min,最终实现基质和掺杂粒子的均匀混合。

2) 混合粉末干燥。将已混合均匀的粉末一次性倒入模具中,手动压实后采用锻压压片机施加 5 MPa 的压力预压,保持 0.5 min。加压过程需缓慢而连续,一方面避免压力突变引入应力,另一方面确保混合粉末被加压过程正常排气。预压完成后,将混合粉末和模具一起置于温度为 90 ℃ 的真空干燥箱中,静置 1 h 以去除混合粉末中水分和其他挥发性物质^[9-10]。

3) 锻压预成型。从真空干燥箱中取出已干燥完全的混合粉末和模具,再次采用锻压压片机对装有混合粉末的模具进行锻压预成型。锻压压力设置为 20 MPa,并且持续加压 5 min^[49]。加压和卸压过程都应缓慢且连续,以减少预成型样品的残余应力。待模具自然冷却至室温时,脱模获得压结态样品。

4) 烧结成型。在烧结前,将压结态样品静置 24 h 以消除样品内部的残余应力,避免样品在烧结过程因应力而产生裂纹。采用管式炉对压结态样品进行烧结,并且以氩气作为防护气体隔绝样品与空气相互反应。烧结过程包含加热、保温和冷却三个过程。在烧结前期,对管式炉加热使其温度从室温升高至烧结温度 400 ℃,加热速率设置为 50 ℃/h。待样品温度达到 400 ℃ 时,保温 0.5 h,此时聚四氟乙烯基质为完全熔融状态,其将与掺杂粒子进一步融合,成为紧密且连续的整体。随后,以 35 ℃/h 的冷却速率将管式炉温度从 400 ℃ 降低至 300 ℃,保温 2 h,此时样品开始形成晶体。最后,关闭管式炉并且保持氩气以隔绝空气,待样品自然冷却到室温即获得烧结成型的推进剂样品^[9,10,49-50]。

基于上述固体复合推进剂制备工艺流程,实验制备了一系列具有不同掺杂比例的柱状推进剂样品。推进剂样品如图 3 所示,实验中所有固体复合推进剂样品质量均为 2 g,直径为 10 mm,长度约为 12 mm。碳类掺杂粒子的密度都较小,掺杂质量分数比例因而选定为 1%、4%、7%、10%。

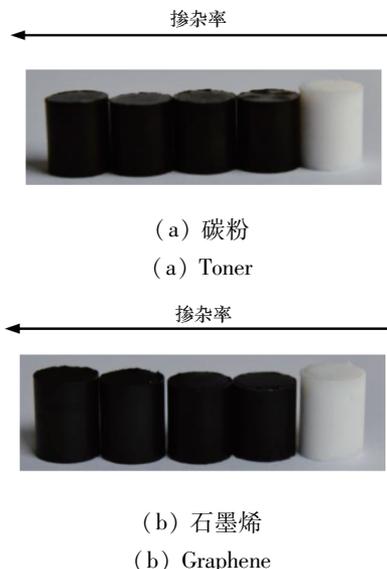


图 3 固体推进剂样品

Fig. 3 Solid propellants appearance

1.2 发散角度测量方法

对于空间推进系统中,束流发散角度的测量通常采用法拉利探针方法、光谱方法或高速摄影图像处理方法。法拉利探针方法属于接触式测量,测量部件将影响束流原有的运动,测量部件会因粒子轰击而腐蚀,并且难以实时测量束流发散角度的动态变化。光谱方法需要烦琐且复杂的操作流程,以及耗时久的转换过程,难以匹配动态快速测量的需求。高速摄影图像处理方法采用高速相机拍摄一系列束流变化图像,经特定的提取方法计算对应时刻的束流发散角度大小。本文采用课题组前期自构建基于高速摄影图像处理法的动态束流发散角度测量系统^[42,48],其测量系统原理图如图 4 所示。

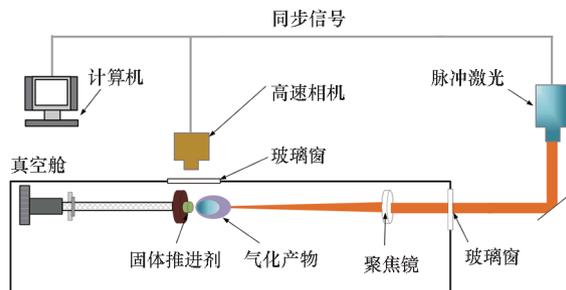


图 4 束流发散角度测量系统

Fig. 4 Measurement stand of beam divergence angle

实验测量过程中,采用激光器作为固体复合推进剂的激发方法,当激光光束经透镜聚焦于推进剂表面后,将加热推进剂促使其发生固气转换过程,生成等离子体流。推进剂侧面的高速相机从激光烧蚀推进剂开始,持续记录等离子体流的

运动图。根据处于不同时刻的运动图,经如图 5 所示的测量流程,可获得束流发散角度随时间的

变化情况。经前期实验验证,其测量时间分辨率可达 $1 \mu\text{s}$,测量误差约为 10%^[42]。

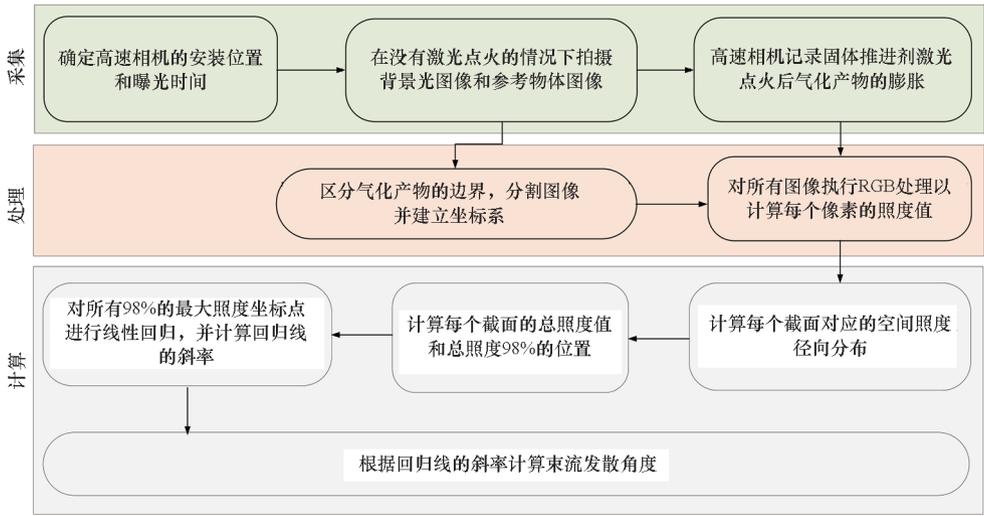


图 5 束流发散角度测量步骤

Fig. 5 Beam divergence angle measurement steps

1.3 实验测量环境

所有实验均处于如图 4 所示的真空舱中开展,待真空舱压力低于 1 Pa 后方开始实验。此时,可认为推进剂处于真空环境中工作,可忽略残余空气对固气转换过程的影响。

固体电推力器的工作原理包含固体推进剂的固气转换过程和等离子体流的电磁加速过程。对于一款如图 6 所示的典型固体电推力器,其工作时,固体推进剂先在外部能量的激发下发生固气转换过程以生成等离子体流,随后等离子体流与电磁场相互作用被加速喷出而生成推力。固气转换阶段是后续电磁加速过程的前提,固气转换阶段生成等离子体流的特性参数也将直接影响后续电磁加速过程以及推力器整体推进性能。本文研究主要聚焦在固体推进剂的固气转换阶段,此时推力器并未加载电磁场。在本文涉及的实验中,固气转换过程的激发能量来源为激光器,采用的是波长为 1 080 nm 的脉冲光纤激光器,其脉宽和功率可调。如图 4 所示,激光通过透镜垂直照射在固体推进剂表面,表面激光光斑直径约为

5 mm。光纤激光器为高斯光束,激光光斑的空间分布满足高斯分布规律。

2 结果与讨论

固体推进剂的固气转换过程是一个连续的瞬态过程,而前期实验发现激光点火的瞬间会产生部分不规则和不规律的等离子体束流,此时并未发生稳定的固气转换反应。多数固体电推力器以电容或电感放电作为电磁加速的来源,此时推力器将脉冲工作,单次脉冲工作时间在微秒到毫秒量级,此时固体推进剂固气转换的初始阶段将与推力器的稳定性息息相关。因此,实验将重点分析固气转化过程动态稳定阶段的特征变化,同时也分析推进剂从点火开始进入动态稳定阶段的时间,以评估其工作稳定性。实验中,如无额外的说明,激光设定脉宽时间为 5 ms,激光能量为 5 mJ。

2.1 石墨烯掺杂改性推进剂

图 7 给出了当石墨烯改性推进剂处于相同工作条件下,不同掺杂比例下的束流发散角度随时间的变化情况。

由图 7 可知,虽然掺杂比例不同,但是这些推进剂的束流发散角度具有相似的变化趋势。在固气转换过程开始之初,由于激光能量的突然施加,并未烧蚀生成稳定的等离子体流,形状波动变化,因此束流发散角度较大。随着激光持续加热,固体推进剂被稳定转化为等离子体流,束流发散角度逐渐减小,并且后期维持动态平衡状态。对比

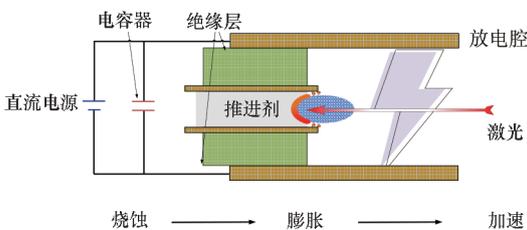
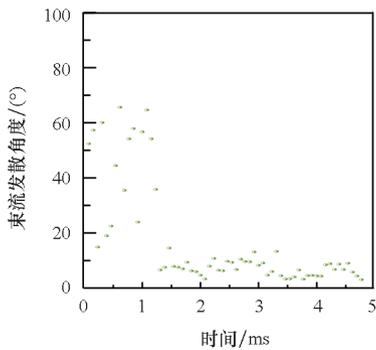


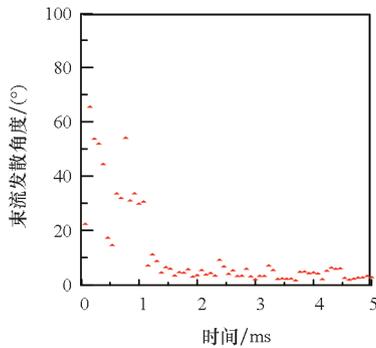
图 6 固体电推力器

Fig. 6 Solid electric thruster

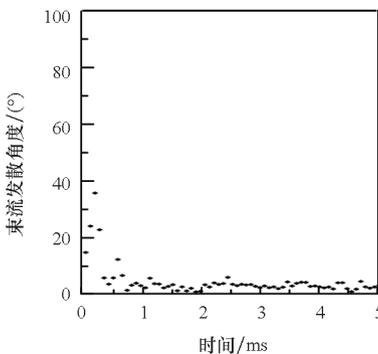
不同掺杂比例下的束流特性可知,随着石墨烯掺杂比例的提高,束流发散角度进入动态稳定平衡值所消耗的时间越短,且对应的动态稳定平衡值越小。根据石墨烯的物理性质可知,一方面其能够促进聚四氟乙烯的气化、电离过程,因此能够使固体推进剂快速生成稳定的等离子体流;另一方面,石墨烯可以吸附和解吸各种原子和分子,因此石墨烯颗粒被烧蚀后进入等离子体流中,将与原有的原子和分子整合在一起,从而降低发散程度。因此,适当提高石墨烯的掺杂比例可有效改善束流发散程度。然而,当掺杂比例为 10% 时,束流特性反而变差,其耗费了更长的时间来进入动态稳定阶段,且动态稳定值更大。这是因为推



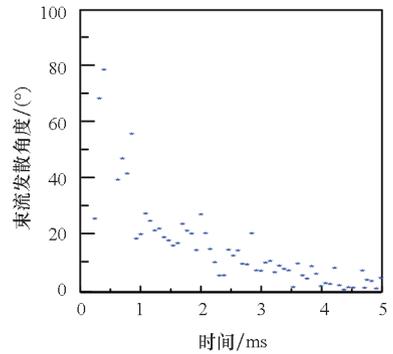
(a) 1% 石墨烯,99% 聚四氟乙烯
(a) 1% graphene, 99% PTFE



(b) 4% 石墨烯,96% 聚四氟乙烯
(b) 4% graphene, 96% PTFE



(c) 7% 石墨烯,93% 聚四氟乙烯
(c) 7% graphene, 93% PTFE



(d) 10% 石墨烯,90% 聚四氟乙烯
(d) 10% graphene, 90% PTFE

图7 不同掺杂比例的石墨烯改性推进剂样品测量结果
Fig. 7 Measurement results of graphene-doped samples with different doping ratios

进剂中存在过多的石墨烯,其被烧蚀的难度和所需的能量远高于聚四氟乙烯。当大掺杂比例的推进剂被激光辐射时,石墨烯自身吸收了更多能量而导致聚四氟乙烯吸收的能量较少,因而恶化了聚四氟乙烯的气化和电离过程,使得其耗费了更久时间生成稳定的等离子体流。并且,由于石墨烯难被烧蚀,大掺杂比例的推进剂被烧蚀后,进入等离子体流中的石墨烯粒子比例反而较少,因此无法发挥粒子吸附作用,并未改善束流特性。

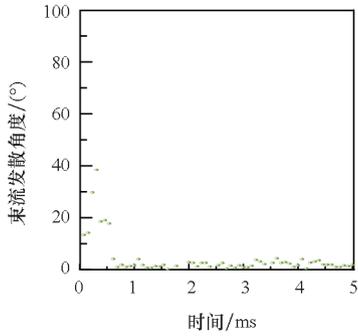
对比平衡状态下的束流发散角度,可知当掺杂比例为 7% 时,对应推进剂的束流发散角度最小,约为 4° ,并且等离子体流进入动态稳定的耗时最短,动态稳定后的幅度最大。因此,石墨烯的掺杂比例为 7% 时,固体推进剂可获得最优的束流特性。

基于石墨烯最优掺杂比例 7%,实验进一步分析推进剂处于不同工作条件下的束流特性。

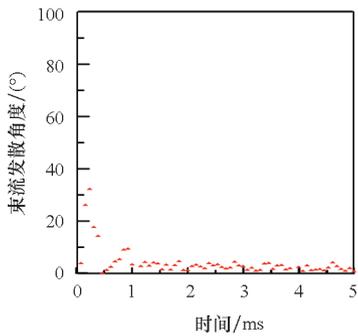
图 8 给出了固体推进剂处于不同功率大小的激光烧蚀下,束流发散角度随时间的变化曲线图。由图可知,随着功率的增大,束流发散角度越早进入动态稳定阶段,这意味着激光能量越大,固气转换过程生成稳定的等离子体流越快。

从图 8 还可看出,当激光烧蚀时间大于 1 ms 时,束流发散角度都进入了动态稳定阶段。进一步计算动态稳定阶段(假设为 1 ms 以后)束流发散角度的均值和标准,具体数据如表 2 所示。由表可知,不同功率下的均值和标准差都处于大致相等的情况。综合对比,束流发散角度最小的工作条件为 100 W,但是此时等离子体流耗费了约 0.6 ms 方进入动态稳定阶段;束流发散角度动态稳定过程的标准差最小为 1 000 W 时,但此时束流发散角度较大,为

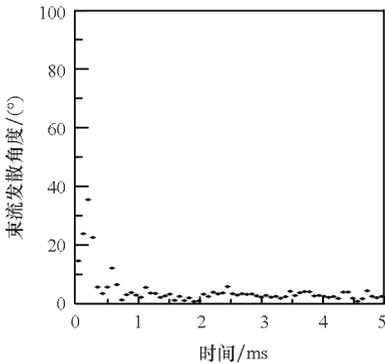
2.751°。因此,综合束流发散角度均值和标准差,当固体推进剂处于激光功率为 500 W 时,其综合束流特性将会更优。



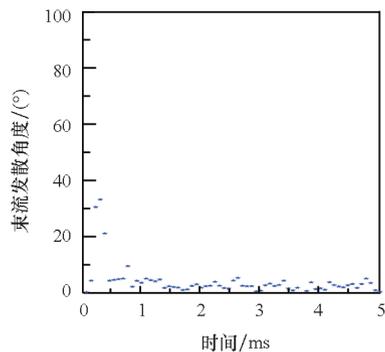
(a) 100 W



(b) 500 W



(c) 1 000 W



(d) 1 500 W

图 8 不同激光功率的石墨烯改性推进剂样品测量结果

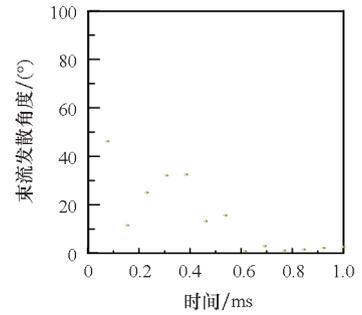
Fig. 8 Measurement results of graphene-doped samples under different laser powers

表 2 石墨烯掺杂样品在不同点火激光功率下束流发散角度均值和标准差

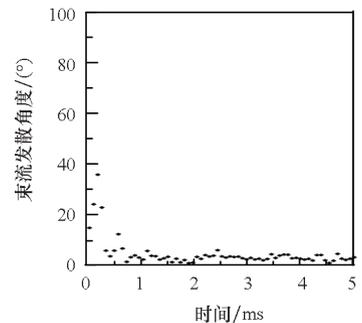
Tab.2 Mean and standard deviation of beam divergence angle for graphene-doped sample under different laser powers

激光功率/ W	稳定时间/ ms	平均值/ (°)	标准差/ (°)
100	0.62	1.967	1.093
500	0.58	2.261	1.111
1 000	0.36	2.751	1.070
1 500	0.48	2.248	1.299

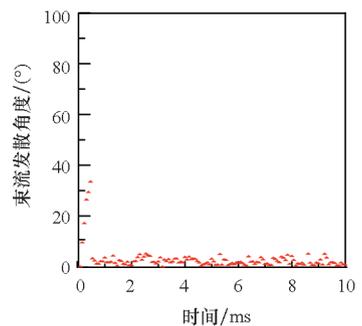
图 9 呈现了推进剂处于不同激光脉宽下束流发散角度的变化情况。由图可知,不同脉宽下束流发散角度的变化趋势大致相似,但是激光脉宽的提高会加速固气转换过程的稳定进行。表 3 进一步计算了不同脉宽下,束流发散角度进入动态稳定阶段的时刻和稳定后的均值及标准差。



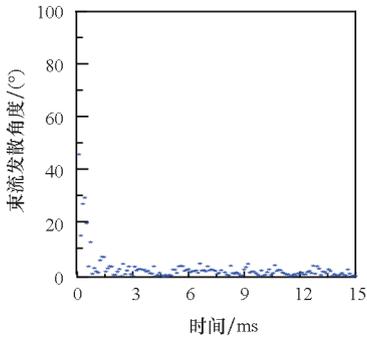
(a) 1 ms



(b) 5 ms



(c) 10 ms



(d) 15 ms

图9 不同激光脉宽的石墨烯改性推进剂样品测量结果

Fig. 9 Measurement results of graphene-doped samples under different laser widths

表3 石墨烯掺杂样品在不同点火激光脉宽下束流发散角度均值和标准差

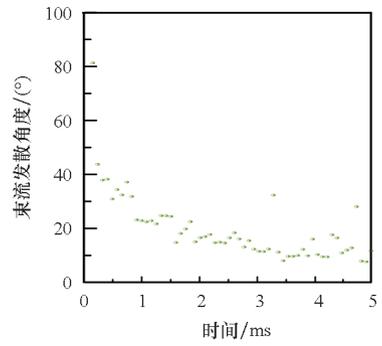
Tab. 3 Mean and standard deviation of beam divergence angle for graphene-doped samples under different laser widths

脉宽/ms	稳定时间/ms	均值/(°)	标准差/(°)
1	0.77	1.884	0.769
5	0.75	2.751	1.070
10	0.69	2.021	1.252
15	0.68	2.038	1.422

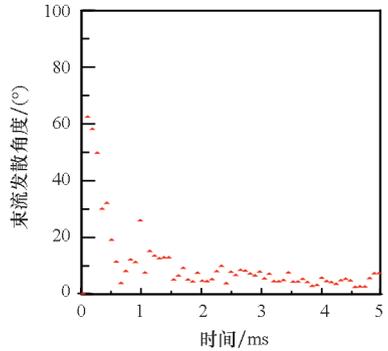
由表3中数据可知,随着激光脉宽的增大,束流进入稳定状态的时间越短,但是束流在动态稳定阶段的波动程度反而变大。这是因为,随着脉宽的增大,激光能量大幅度增大,固气转换获得的等离子体流的量也大幅度增大,进而增大了随机运动的概率,导致束流发散角度的标准差变大。因此,在石墨烯掺杂改性的固体推进剂中,为了确保稳定的等离子体流生成,且束流稳定性和发散角度都较小,激光脉宽可优选为10 ms。

2.2 碳粉掺杂改性推进剂

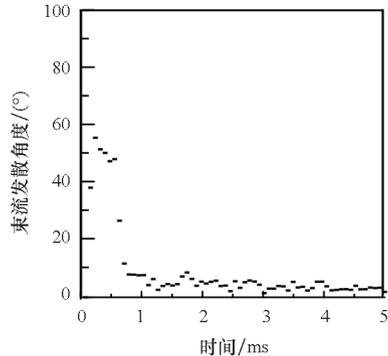
具有不同掺杂比例的碳粉改性推进剂束流发散角度随时间的变化情况如图10所示。由图可知,当碳粉掺杂比例过大或者过小时,改性推进剂的束流发散角度都更大,且需耗费更长时间才能进入动态稳定阶段。掺杂比例为7%时,束流发散角度最小,其动态稳定过程中束流发散角度均值约为4.001°,标准差为1.451°。分析其原因在于,当掺杂比例较小时,碳粉对聚四氟乙烯基质的烧蚀促进作用较小,并未生成稳定的等离子体流;当掺杂比例较大时,等离子体流中包含大量纳米碳粉粒子,容易团聚在一起,反而导致束流发散程度更大。



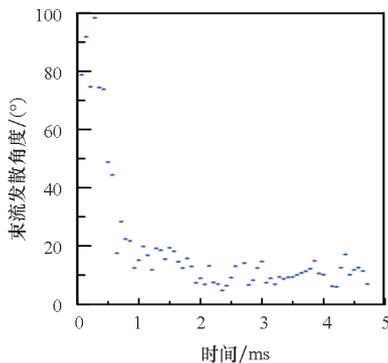
(a) 1% 碳粉, 99% 聚四氟乙烯
(a) 1% toner, 99% PTFE



(b) 4% 碳粉, 96% 聚四氟乙烯
(b) 4% toner, 96% PTFE



(c) 7% 碳粉, 93% 聚四氟乙烯
(c) 7% toner, 93% PTFE

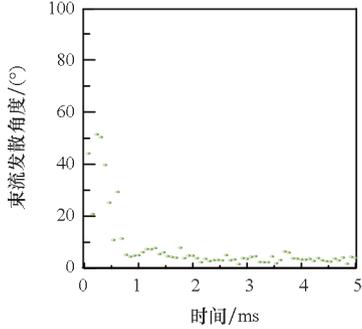


(d) 10% 碳粉, 90% 聚四氟乙烯
(d) 10% toner, 90% PTFE

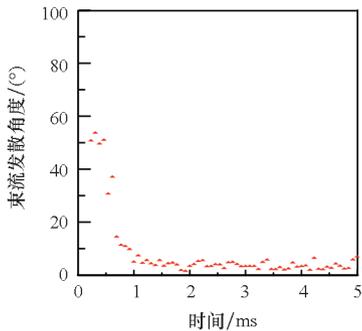
图10 不同掺杂比例的碳粉改性推进剂样品测量结果
Fig. 10 Measurement results of toner-doped samples with different doping ratios

基于碳粉最优掺杂比例 7% ,实验进一步分析推进剂处于不同工作条件下的束流特性。图 11 给出了碳粉改性推进剂处于不同激光功率下的束流参数变化情况,表 4 计算了束流进入稳定的时间和动态稳定阶段中束流发散角度均值和标准差的大小。由数据可知,不同功率下推进剂

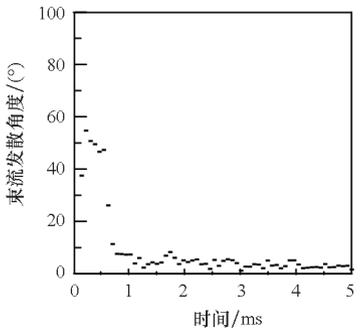
的束流发散角度保持相似的变化趋势,但是随着激光功率的增大,动态稳定阶段时束流发散角度越小。这是因为激光能量越大,越能促进固体推进剂稳定地生成更多等离子体流,进而可减小发散角度。因此,碳粉改性的推进剂更适合大激光功率下的工作条件。



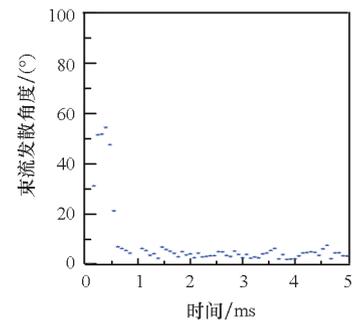
(a) 100 W



(b) 500 W



(c) 1000 W



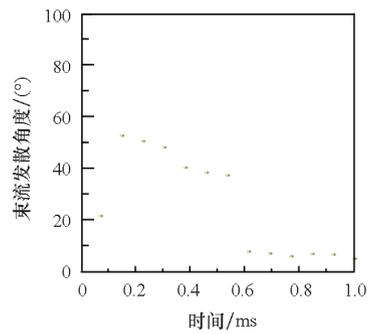
(d) 1500 W

表 4 碳粉掺杂样品在不同点火激光功率下束流发散角度均值和标准差

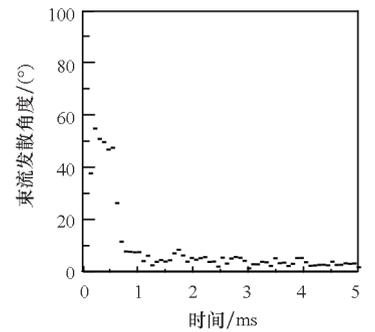
Tab. 4 Mean and standard deviation of beam divergence angle for toner-doped sample under different laser powers

激光功率/W	稳定时间/ms	均值/(°)	标准差/(°)
100	0.76	4.061	1.471
500	0.82	3.917	1.393
1 000	0.79	3.819	1.498
1 500	0.61	3.744	1.297

碳粉改性推进剂处于不同激光脉宽下的束流情况如图 12 所示,对应束流进入稳定阶段的时间和动态稳定时的均值及标准差如表 5 所示。由图中数据可知,随着激光脉宽的增大,束流发散角度进入稳定阶段所耗时间占据总脉宽时间比例越小,但是当脉宽大于 5 ms 后,仍需要 1 ms 左右的时间才能进入动态稳定阶段,这说明碳粉改性的推进剂生成稳定等离子体流的响应时间保持为 1 ms 左右。另外,随着脉宽的增大,束流发散角度



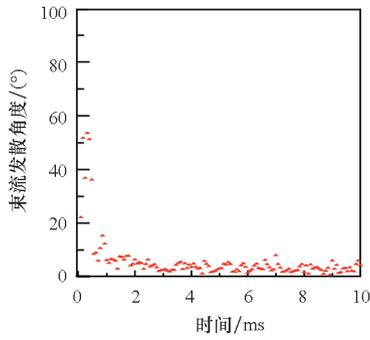
(a) 1 ms



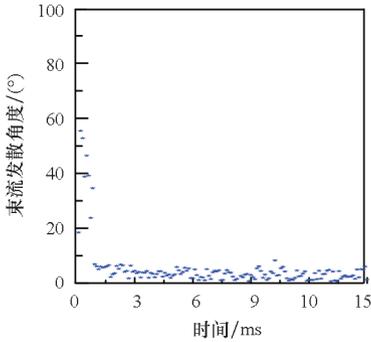
(b) 5 ms

图 11 不同激光功率的碳粉改性推进剂样品测量结果

Fig. 11 Measurement results of toner-doped samples under different laser powers



(c) 10 ms



(d) 15 ms

图 12 不同激光脉宽的碳粉改性推进剂样品测量结果

Fig. 12 Measurement results of toner-doped samples under different laser widths

动态稳定的均值整体呈现下降的趋势,这说明固体推进剂在大激光脉宽下反而束流发散角度更小,但是由于等离子体流数量增大,会增大随机性,标准差也随之提高。

表 5 碳粉掺杂样品在不同点火激光脉宽下束流发散角度均值和标准差

Tab. 5 Mean and standard deviation of beam divergence angle for toner-doped sample under different laser widths

脉宽/ms	稳定时间/ms	均值/(°)	标准差/(°)
1	0.7	7.044	0.957
5	1.1	3.819	1.498
10	1.0	3.481	1.644
15	1.1	3.491	2.833

2.3 对比分析

综合上述结果可知,石墨烯和碳粉均可改善推进剂的束流发散程度,特别是对比其他金属或氧化物掺杂的推进剂样品^[42]。不管是石墨烯还是碳粉,其都具有较高的激光吸收率、热导率和高熔点,因此会吸收更多能量来促进掺杂粒子周围的聚合物基质快速分解成等离子体流。由于前期掺杂粒子吸收了较多能量,烧蚀初期向粒子周围

的聚合物基质传递的能量较少,因此并未形成稳定持续的烧蚀,此时束流形状不规则,束流发散角度较大。随着烧蚀的进行,这些掺杂粒子吸收了足够的能量,但是它们本身熔点极高,很难被烧蚀,因而稳定地促进聚合物基质的烧蚀,使得束流发散角度保持动态稳定。随着石墨烯和碳粉掺杂比例的增大,这种促进效果越好,因此会发现随着掺杂比例增大,不管是石墨烯还是碳粉改性的推进剂都会越早进入动态稳定阶段。虽然碳粉和石墨烯的熔点远高于聚合物基质,但是当掺杂粒子周围的聚合物基质被烧蚀完全后,由于粒子剥离效应,碳粉和石墨烯粒子也会脱落到等离子体流中,造成束流发散角度动态波动。并且当掺杂比例过大时,由于粒子剥离效应,等离子体流会含有大量未被烧蚀的石墨烯和碳粉,其将容易团聚一起,同样会增大束流发散程度。因此,当石墨烯和碳粉掺杂比例过大时,其动态稳定阶段的束流发散角度也随之增大。对于石墨烯和碳粉而言,其对束流发散程度的改良效果略有不同。纳米碳粉和石墨烯都具有良好的吸附特性和较大的比表面积,可吸附各种原子、分子和离子,使得等离子体流整合在一起,进而降低分散程度。石墨烯比纳米碳粉更稳定,并且其吸附带电粒子后会做布朗运动,当合适比例的石墨烯粒子进行布朗运动后可以进一步捕获和吸附等离子体流中的各种粒子,进而使得束流发散程度变小。同样地,如若等离子体流中的石墨烯粒子过多,此时布朗运动反而会增大束流发散角度。

结合石墨烯和碳粉改性的推进剂性能结果可知,两种掺杂粒子的最优掺杂比例都是7%。改性推进剂生成稳定等离子体流的时间大致保持不变,不随外界工作条件改变而改变,可认为石墨烯和碳粉改性的推进剂固气转换过程的响应时间是固定的。石墨烯改性推进剂样品响应时间约为0.7 ms,碳粉改性推进剂样品响应时间约为1.0 ms,对于这两种改性推进剂优选的激光脉宽应该大于响应时间,此时才能确保稳定且发散角度小的等离子体流供给。此外,束流动态稳定后,石墨烯改性推进剂的束流发散角度都小于3°,而碳粉改性推进剂的束流发散角度普遍大于3°。因此,综合各方面数据表明,石墨烯比碳粉对于束流的发散程度具有更优的改性效果,且最优掺杂比例为7%。

束流发散程度是衡量电推力器效率的重要参数,尽可能减小推力器的束流发散角度可明显提高能量的转换率和推进效率。对于推力器而言,

同等能量条件下束流发散角度越小,推力器的整体效率越高。束流动态稳定阶段代表着推力器稳定工作的状态。对于瞬态脉冲工作的固体电推力器而言,束流越快进入稳定,说明推力器越快稳定工作,推力器才有望取得更佳的性能。基于上述实验结果,我们可知道石墨烯可以明显改善束流发散角度和增快进入动态稳定时间,因而有望提高固体推力器性能,这一点与前期实验结果^[44]保持一致。

3 结论

本文针对石墨烯和碳粉对固体推进剂束流特性的影响进行了实验研究,重点分析不同掺杂比例和工作条件对束流发散角度的影响,可以得到以下一些结论:

1) 石墨烯和碳粉最优掺杂比例均为 7%,但是同等条件下石墨烯对束流发散程度的改善作用更好,其对应的发散角度普遍小于 3° ,且生成稳定等离子体流的响应时间更短。

2) 激光能量越大,石墨烯改性的推进剂对应的束流发散角度越大,且动态稳定偏差度越大。

3) 激光能量越大,碳粉改性的推进剂对应的束流发散角度越小,但是大激光能量下动态稳定偏差度越大。

致谢

湖南大学曹意宏博士在束流发散角度测量方面提供了帮助和指导,谨致谢意!

参考文献 (References)

- [1] 朱智春, 林庆国, 杭观荣, 等. 我国空间推进技术研究现状及发展[J]. 上海航天, 2021, 38(3): 178-188.
ZHU Z C, LIN Q G, HANG G R, et al. Research status and development of space propulsion technology in China [J]. Aerospace Shanghai, 2021, 38(3): 178-188. (in Chinese)
- [2] 夏广庆, 鹿畅, 孙斌, 等. 电推进加速技术现状及展望[J]. 宇航学报, 2022, 43(2): 143-157.
XIA G Q, LU C, SUN B, et al. Review and prospect of electric propulsion acceleration technology [J]. Journal of Astronautics, 2022, 43(2): 143-157. (in Chinese)
- [3] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 白皮书: 2021 中国的航天 [R/OL]. (2022-01-28) [2023-10-12]. https://www.gov.cn/zhengce/2022-01/28/content_5670920.htm. State Council Information Office of the People's Republic of China. White paper: China's aerospace in 2021 [R/OL]. (2022-01-28) [2023-10-12]. https://www.gov.cn/zhengce/2022-01/28/content_5670920.htm. (in Chinese)
- [4] LEVCHENKO I, BAZAKA K, DING Y J, et al. Space micropropulsion systems for Cubesats and small satellites; from proximate targets to furthestmost frontiers [J]. Applied Physics Reviews, 2018, 5(1): 011104.
- [5] 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: 879.
- [6] WU Z W, HUANG T K, LIU X Y, et al. Application and development of the pulsed plasma thruster [J]. Plasma Science and Technology, 2020, 22(9): 094014.
- [7] ZHANG Z, LING W Y L, TANG H B, et al. A review of the characterization and optimization of ablative pulsed plasma thrusters [J]. Reviews of Modern Plasma Physics, 2019, 3: 5.
- [8] 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 J J, OU Y, ZHANG Y, et al. Review and prospect of laser-electric hybrid thruster [J]. Journal of Propulsion Technology, 2023, 44(6): 2208069. (in Chinese)
- [9] 罗乐乐, 窦志国, 李南雷, 等. 纳米碳粉掺杂对激光烧蚀 GAP 的推进性能影响 [J]. 宇航学报, 2018, 39(7): 784-792.
LUO L L, DOU Z G, LI N L, et al. Effects of nano carbon dopants on laser ablation propulsion performance of GAP [J]. Journal of Astronautics, 2018, 39(7): 784-792. (in Chinese)
- [10] 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: 国防科技大学, 2020.
TAN S. Operating process modelling simulation and experimental study on a laser-assisted pulsed plasma thruster [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2020. (in Chinese)
- [11] O'REILLY D, HERDRICH G, KAVANAGH D F. Electric propulsion methods for small satellites: a review [J]. Aerospace, 2021, 8(1): 22.
- [12] RAFALSKYI D, MARTÍNEZ J M, HABL L, et al. In-orbit demonstration of an iodine electric propulsion system [J]. Nature, 2021, 599: 411-415.
- [13] 康小录, 张岩. 空间电推进技术应用现状与发展趋势 [J]. 上海航天, 2019, 36(6): 24-34.
KANG X L, ZHANG Y. Application status and development trend of space electric propulsion technology [J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(6): 24-34. (in Chinese)
- [14] 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 S, WU J J, ZHANG Y, et al. Research progress of laser-supported space micropropulsion technology [J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(11): 2415-2428. (in Chinese)
- [15] 王亚楠, 丁卫东, 程乐, 等. 毛细管型脉冲等离子体推力器研究现状综述 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(22): 5358-5370.
WANG Y N, DING W D, CHENG L, et al. A review of the current research situation on capillary based pulsed plasma thruster [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(22): 5358-5370. (in Chinese)

- [16] LEE J, KIM T. MEMS solid propellant thruster array with micro membrane igniter [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 190: 52 – 60.
- [17] 钟超. 磁屏蔽霍尔推力器束流分布特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
ZHONG C. Study on beam distribution characteristics of magnetically shielded Hall thruster [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [18] DING Y J, SU H B, LI H, et al. Measurement method for plume divergence angle of Hall thrusters [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2019, 37(1): 012902.
- [19] 卢昕, 王宣, 汤海滨, 等. 700 W 功率 HET - 80 霍尔推力器束流特性研究[J]. *推进技术*, 2018, 39(6): 1426 – 1433.
LU X, WANG X, TANG H B, et al. Beam characteristics of HET - 80 Hall thruster with 700 Watts [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(6): 1426 – 1433. (in Chinese)
- [20] 康小录, 刘佳, 乔彩霞, 等. 空间电推进试验测量技术[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
KANG X L, LIU J, QIAO C X, et al. Test and measurement technology for space electric propulsion [M]. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese)
- [21] 吕游. 应用图像法诊断霍尔推力器等离子体参数的实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
LYU Y. Study on diagnosis of plasma parameters of Hall thruster by image method [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [22] 孙明明, 耿海, 何非, 等. 10 cm 发散磁场离子推力器地面试验验证研究 [J]. *真空与低温*, 2022, 28(5): 507 – 513.
SUN M M, GENG H, HE F, et al. Ground test verification of a 10 cm diameter divergent magnetic field ion thruster [J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2022, 28(5): 507 – 513. (in Chinese)
- [23] 任林渊, 王亚楠, 靳丽云, 等. 低功率平面型霍尔推力器的工作特性研究[J]. *推进技术*, 2024, 45(2): 2302007.
REN L Y, WANG Y N, JIN L Y, et al. Operating characterization of low power planar Hall thruster [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2024, 45(2): 2302007. (in Chinese)
- [24] 张元哲, 韩先伟, 杨振宇, 等. 碘物质射频离子推力器栅极系统束流特性仿真[J]. *中国空间科学技术*, 2022, 42(6): 115 – 124.
ZHANG Y Z, HAN X W, YANG Z Y, et al. Ion beam characteristics of iodine RF ion thruster optical system [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2022, 42(6): 115 – 124. (in Chinese)
- [25] 罗杨, 陈茂林, 许诺, 等. 场致发射电推力器羽流分布特性仿真[J]. *推进技术*, 2023, 44(6): 2209029.
LUO Y, CHEN M L, XU N, et al. Simulation of plume distribution characteristics of FEED thrusters [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(6): 2209029. (in Chinese)
- [26] YU D R, MENG T H, NING Z X, et al. Confinement effect of cylindrical-separatrix-type magnetic field on the plume of magnetic focusing type Hall thruster [J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2017, 26(4): 04LT02.
- [27] YU D R, LI J, LI H, et al. Experimental study on the effects of magnetic field configuration near the channel exit on the plume divergence of Hall thrusters [J]. *Plasma Science and Technology*, 2009, 11(6): 714 – 720.
- [28] MA D, DING Y J, WANG L, et al. Experimental study on the influence of magnetic inclination in plume region on performance of low-power Hall thruster [J]. *Vacuum*, 2022, 195: 110673.
- [29] 张天平, 李小平, 陈继巍, 等. LIPS - 200 离子推力器束流模型及其应用[J]. *真空与低温*, 2011, 17(3): 136 – 139, 165.
ZHANG T P, LI X P, CHEN J W, et al. Ion beam mathematical model of LIPS - 200 ion thruster and its applications [J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2011, 17(3): 136 – 139, 165. (in Chinese)
- [30] LIU H, NIU X, LI X, et al. Simulation study of influence of exit magnetic separatrix angle on plume divergence control [J]. *The European Physical Journal D*, 2020, 74: 195.
- [31] COHEN-ZUR A, FRUCHTMAN A, GANY A. The effect of pressure on the plume divergence in the Hall thruster [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, 36(5): 2069 – 2081.
- [32] LIU H, SUN G S, ZHAO Y J, et al. Plume control of a cusped field thruster [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, 43(1): 127 – 129.
- [33] JELEM D, REISSNER A, SEIFERT B, et al. Direct thrust and plume divergence measurements of the IFM nano thruster [J]. *Advances in Space Research*, 2018, 62(12): 3398 – 3404.
- [34] LIU J W, ZHONG C, LI H, et al. The influence of the inclination of strong magnetic field lines on the performance and plume divergence of a magnetically shielded Hall thruster [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53: 245201.
- [35] SIMMONDS J, RAITSES Y. Mitigation of breathing oscillations and focusing of the plume in a segmented electrode wall-less Hall thruster [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(21): 213501.
- [36] 陈新伟, 顾左, 高俊, 等. 低功率霍尔推力器束流发散和推力矢量偏心特性研究 [J]. *推进技术*, 2022, 43(8): 200948.
CHEN X W, GU Z, GAO J, et al. Beam divergence and thrust vector deviation characteristics of low-power Hall thruster [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(8): 200948. (in Chinese)
- [37] YU H C, LI H Y, WANG Y, et al. Brief review on pulse laser propulsion [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 100: 57 – 74.
- [38] CIARALLI S, COLETTI M, GABRIEL S B. Results of the qualification test campaign of a pulsed plasma thruster for Cubesat propulsion (PPTCUP) [J]. *Acta Astronautica*,

- 2016, 121: 314 – 322.
- [39] SCHÖNHERR T, ABE Y, ARAKAWA Y. Pulsed plasma thruster performance using compound polytetrafluoroethylene[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2015, 31(3): 965 – 967.
- [40] 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.
- [41] OU Y, ZHANG Y, WU J J, et al. Comparative study of PTFE filled different dopants as propellants for laser-electric hybrid thruster[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 183: 199 – 210.
- [42] OU Y, WU J J, CHENG Y Q, et al. Measurement method and results of divergence angle of laser-controlled solid propellants used in space propulsion[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36(9): 195 – 206.
- [43] OU Y, WU J J, ZHANG Y, et al. Comparative study of plume characteristics of polymeric propellants filled with different oxides for laser-electric hybrid thruster[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 147: 107609.
- [44] OU Y, WU J J, ZHANG Y. Effects of carbon, graphite, and graphene as propellant dopants in a laser-electric hybrid acceleration system[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 151: 108007.
- [45] LI Y Q, OU Y, WU J J, et al. Experimental investigation on plume characteristics of PTFE-filled carbon, graphite, graphene for laser-assisted pulsed plasma thruster [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13: 9283
- [46] DUAN B R, ZHANG H N, HUA Z H, et al. Impulse and electric charge characteristics of chemical propellant under pulsed laser irradiation[J]. *Vacuum*, 2021, 192: 110419.
- [47] 涂演, 刘向阳, 尹诗明, 等. 新型固体工质脉冲等离子体推力器试验研究[J]. *飞控与探测*, 2021, 4(3): 40 – 47.
- TU Y, LIU X Y, YIN S M, et al. Experimental investigation on pulsed plasma thruster with new solid propellant [J]. *Flight Control & Detection*, 2021, 4(3): 40 – 47. (in Chinese)
- [48] CAO Y H, ZHANG H, LU X, et al. Adaptive refining-aggregation-separation framework for unsupervised domain adaptation semantic segmentation[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2023, 33(8): 3822 – 3832.
- [49] 张锐. 脉冲等离子体推力器工作过程及羽流特性理论与实验研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- ZHANG R. Theoretical and experimental investigation on operation process and plume characteristics of pulsed plasma thruster [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
- [50] 张华. 脉冲等离子体推力器工作过程及工质改性的理论与实验研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- ZHANG H. Theoretical and experimental investigation on operation process and propellant modification of pulsed plasma thruster [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016. (in Chinese)