

激光烧蚀微推力器聚合物靶材的烧蚀特性

罗乐乐¹, 窦志国^{1,2}, 李南雷¹

¹航天工程大学激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416;

²航天工程大学基础部, 北京 101416

摘要 以聚叠氮缩水甘油醚(GAP)作为烧蚀靶材,以纳米碳粉和红外染料作为掺杂剂,采用微尺度羽流观测系统对 GAP 靶材的喷射羽流图像进行了观测,分析了掺杂浓度、靶材厚度及激光烧蚀模式对 GAP 烧蚀特性和推进性能的影响。结果表明,在激光烧蚀过程中,未掺杂吸收剂的 GAP 靶材利用率非常低;掺杂纳米碳粉后,靶材的推进性能显著增强,但对靶材厚度的依赖性较强,厚度较薄的掺杂纳米碳粉的 GAP 适合作为透射式激光烧蚀微推力器的靶材;掺杂红外染料后,聚合物的气化程度显著提高,透射式下厚度对羽流喷射的影响较小。红外染料适合作为反射式激光烧蚀微推力器聚合物靶材的掺杂剂。

关键词 激光技术; 激光烧蚀微推力器; 烧蚀特性; 聚叠氮缩水甘油醚(GAP); 羽流; 纳米碳粉; 红外染料

中图分类号 V439; TH823

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0702002

Ablation Characteristics of Polymer Target for Laser Ablation Micro-Thruster

Luo Lele¹, Dou Zhiguo^{1,2}, Li Nanlei¹

¹State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

²Department of Basic Theories, Space Engineering University, Beijing 101416, China

Abstract The energetic polymer glycidyl azide polymer (GAP) is taken as the ablation target and the nano-carbon powder and infrared dye are taken as dopants. The plume of GAP is observed by the microscale plume observation system, and the influences of doping concentration, target thickness and laser ablation mode on GAP ablation characteristics and propulsion performance are analyzed. The results show that the utilization rate of absorber-undoped GAP is very low in the laser ablation process. The propulsion performance of GAP doped with nano-carbon powder is significantly improved, which is sensitive to the target thickness, and the thin GAP doped with nano-carbon powder is more suitable as the target of laser ablation micro-thruster in the transmission mode. The gasification of polymer doped with infrared dye is substantially improved and the plume is weakly affected by the target thickness in the transmission mode. The infrared dye is considered suitable as the polymer target of the laser ablation micro-thruster in the reflection mode.

Key words laser technique; laser ablation micro-thruster; ablation characteristics; glycidyl azide polymer (GAP); plume; nano-carbon powder; infrared dye

OCIS codes 140.3070; 260.3060; 110.5200; 010.3310; 160.5470

1 引 言

激光烧蚀微推力器^[1-3]利用脉冲激光与靶材间的相互作用产生羽流喷射,进而为微推力器提供反

冲推力,具有结构简单、比冲高、最小比特小、寿命长等优点,在航天器的姿轨控和微小卫星推进等领域具有良好的发展前景。

靶材性能的优劣对激光烧蚀微推力器至关重要

收稿日期: 2017-12-12; 收到修改稿日期: 2017-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(11602304)

作者简介: 罗乐乐(1992—),男,硕士研究生,主要从事激光推进、微冲量测量技术方面的研究。

E-mail: luolele010@163.com

导师简介: 窦志国(1963—),男,硕士,教授,硕士生导师,主要从事先进技术及理论物理方面的研究。

E-mail: dou-zhiguo@tom.com(通信联系人)

要,研究者针对微推力器的烧蚀靶材^[4-5]进行了大量的研究。Urech 等^[6]通过对比多种聚合物激光烧蚀推进性能,发现含能聚合物聚叠氮缩水甘油醚^[7](GAP)表现优秀;对掺杂纳米碳粉和红外染料之后的烧蚀产物进行了质谱^[8]和光谱^[9]分析,并解释了吸收剂提升靶材推进性能的原因。

本文采用 GAP 作为烧蚀靶材,掺杂一定浓度的红外染料或纳米碳粉吸收剂,选取不同的掺杂浓度、靶材厚度以及激光烧蚀模式,使激光烧蚀微推力器的能量转化效率超过 100%。采用微尺度羽流观测系统,对靶材的喷射羽流图像进行采集,对 GAP 靶材的烧蚀特性进行分析,给出了适合激光烧蚀微推力器的靶材设计方案。

2 实验设计

采用波长为 1064 nm、脉宽为 9 ns 的 YAG 激光器作为能量注入源。为了近似模拟微推力器所处的近地轨道气压环境,羽流喷射图像的采集均在气压为 40 Pa 的真空舱中进行。

聚合物 GAP 常态下为黏稠状液体,由于溅射效应^[10-11],在烧蚀推进过程中会浪费大量的工质,且因工质混入水汽而在真空环境下产生沸腾现象^[12],

使得靶材的物理结构脱离控制,无法保证实验的可重复性。固体靶材不存在上述弊端,因此这里选择固化后的 GAP 作为激光烧蚀靶材。

为了充分混合吸收剂,以强挥发性的乙酸乙酯作为溶剂,并加入固化剂异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI),采用刮涂法在透明玻璃片上制模,待溶剂挥发,制备成一定厚度的固体双层靶材。

图 1 所示为采集靶材激光烧蚀喷射羽流图像的微尺度羽流观测系统,主要由高速相机、激光器、信号触发器和背景光源组成。为了提高观测系统的效率,在烧蚀靶材基座下安装电动位移台装置。

考虑到真空气压会对高速相机和激光器的元器件造成损伤,激光器和高速相机安装在真空舱外。高速相机聚焦在聚合物靶材的烧蚀区域,可对烧蚀区进行间隔为 10 μs 、曝光时间为 1 μs 的连续拍摄。由于曝光时间极短,即使采用相机的最大光圈,采集的图像仍然过暗。沿水平滑轨方向,在真空舱另一侧放置钨灯光源,利用透镜聚光为烧蚀区域提供足够强的背景光。激光器输出的脉冲激光通过真空舱的窗口进入,经过反射镜转折、光阑过滤,被透镜聚焦在 GAP 靶材上,光路如图 1 中红色虚线所示。

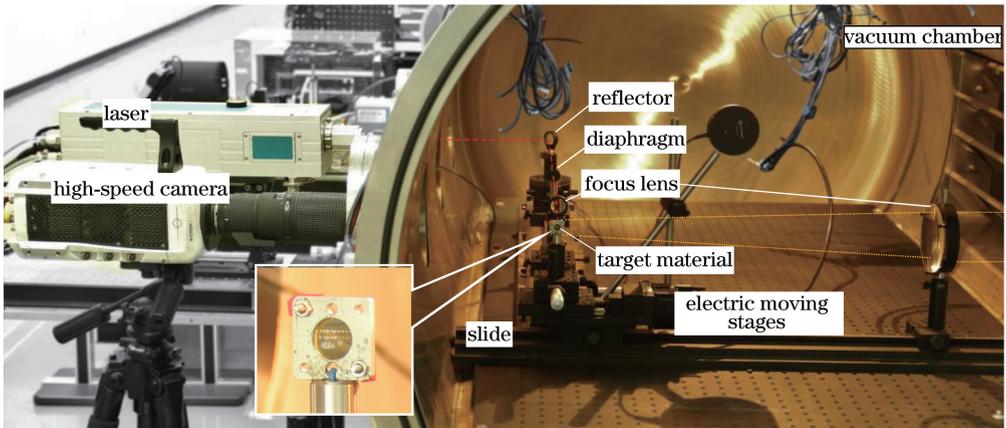


图 1 微尺度羽流观测系统

Fig. 1 Microscale plume observation system

靶材的激光烧蚀过程通常只会持续数 10 μs ,为了捕捉到靶材的喷射过程,需要精确地控制激光和高速相机的触发时间,使其同步开启。采用信号触发器进行时序控制,信号触发器的三路脉冲信号输出端口分别与激光器的抽运源开关、调 Q 开关,及相机的触发端口相连,通过调节信号触发器的三路输出端口的相对延迟时间,可控制相机采集激光器触发之后的任意时刻的羽流喷射图像。

3 喷射羽流分析

激光烧蚀微推力器常用的两种激光烧蚀模式为透射式和反射式^[13],通过激光器元器件与烧蚀喷射羽流处于靶材同侧或异侧进行界定,如图 2 所示。

在透射式下,脉冲激光通过透明的基底与另一侧的靶材相互作用,羽流的喷射方向与激光的入射方向相同,如图 2(a)所示,其中所用的双层靶材以波长 1 064 nm 的激光高透过率透明玻璃片作为基

底。在反射式下,如图 2(b)所示,激光与靶材直接作用,烧蚀区吸收激光能量更为均匀,靶材的气化程度更高。透射式下靶材的烧蚀喷射产物不会对微推

力器上的光学镜头造成污染,是目前激光烧蚀微推力器普遍采用的设计方式,但靶材的气化分解程度低,靶材烧蚀不完全。

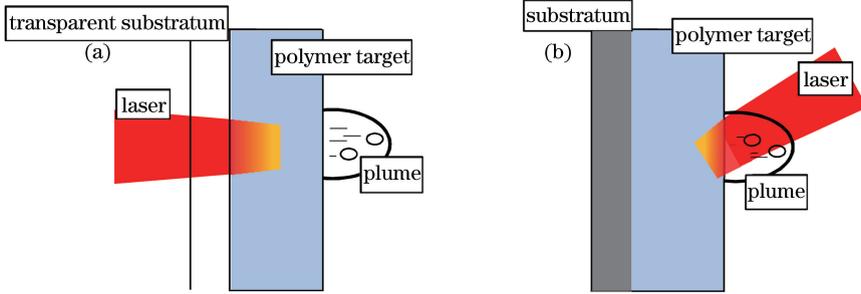


图 2 不同激光烧蚀模式示意图。(a)透射式;(b)反射式

Fig. 2 Different laser ablation modes. (a) Transmission mode; (b) reflection mode

3.1 不同掺杂剂对靶材烧蚀性能的影响

在透射式下,掺杂纳米碳粉,GAP 靶材的推进性能显著增加,但随掺杂浓度的增加,推进性能没有得到显著提升;掺杂红外染料,随着掺杂浓度(质量分数,下同)从 1%增加至 7%,GAP 的最优推进性能表现为先增后减的变化趋势,厚度约为 134 μm 的靶材在 5%掺杂浓度下的推进性能取得最优值。通过对功率密度为 $4.8 \times 10^8 \sim 8.8 \times 10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的脉冲激光作用下的 GAP 靶材的推进性能数据进行分析,发现纳米碳粉掺杂浓度为 1%和 3%的 GAP 在激光功率密度约为 $6.0 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时达到推进性能峰值;红外染料掺杂浓度为 3%、5%、7%的 GAP 在激光功率密度约为 $3.0 \times 10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时达到推进性能峰值,之后缓慢下降。为了便于对比,选择在激光功率密度约为 $3.2 \times 10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时采集掺杂纳米碳粉和红外染料的 GAP 喷射羽流图像,此时 GAP 靶材能量转化效率均高于 120%,满足激光烧蚀微推力器对推进性能的要求。推进性能数据通过真空舱中的高精度推进性能测量系统^[14-15]测量。

在透射式下,纳米碳粉掺杂浓度不同的 GAP 靶材的烧蚀羽流图像如图 3 所示,其中 d 为靶材厚度。图像均在单脉冲激光辐照下采集,尺寸为 $3.34 \text{ mm} \times 7.80 \text{ mm}$,聚焦在靶材烧蚀区的光斑直径约为 1.2 mm。冲量耦合系数为

$$C_m = \frac{I}{W}, \quad (1)$$

式中 I 为单脉冲激光与靶材作用产生的冲量大小,可通过扭摆测量装置测量; W 为脉冲激光能量,可采用能量计测量。比冲为

$$I_{sp} = \frac{I}{\Delta m g_0}, \quad (2)$$

式中 Δm 为烧蚀质量,可通过高倍显微镜测量的烧蚀坑上下表面直径和测厚仪测量的厚度计算; g_0 为重力加速度。能量转化效率为

$$\eta_{AB} = \frac{W_E}{W} = \frac{\Delta m \bar{v}_z^2}{2W} = \frac{g_0}{2} \cdot \frac{\Delta m \bar{v}_z}{W} \cdot \frac{\Delta m \bar{v}_z}{\Delta m g_0} = \frac{g_0}{2} \cdot C_m \cdot I_{sp}, \quad (3)$$

式中 W_E 为喷射粒子的动能, \bar{v}_z 为喷射产物沿靶面垂直方向的平均速度。

冲量耦合系数表示单位能量的脉冲激光作用在靶材上产生的冲量大小,用以衡量激光烧蚀微推力器对激光能量的利用率。比冲表示激光推进过程中,烧蚀单位质量的工质所产生的冲量大小,可衡量微推力器对工质的利用率。能量转化效率^[16]为脉冲激光能量转化为喷射粒子动能的效率,由于喷射粒子的平均速度难以计算,一般情况下通过冲量耦合系数和比冲间接求解。从(3)式可知,能量转化效率与冲量耦合系数及比冲为正相关,可综合衡量微推力器对靶材和激光能量的利用效率。

未掺杂吸收剂的 GAP 能量转化效率小于 5%,比冲仅为 150 s,冲量耦合系数仅为 40 N/MW。如图 3(a)所示,喷射产物中可见大块未烧蚀的工质从靶材表面脱落,说明工质未达到气化分解所需要的温度就被喷射出去,靶材的利用效率很低。另一方面,大部分激光能量以透射的形式被耗散,靶材对激光的利用率低。

掺杂纳米碳粉后,GAP 的各项推进性能得到显著提升,在 1%掺杂浓度下,能量转化效率为 155%,比冲为 850 s,冲量耦合系数为 350 N/MW;在 3%掺杂浓度下,能量转化效率为 160%,比冲为 900 s,冲量耦合系数为 350 N/MW。1%和 3%掺杂浓度下的能

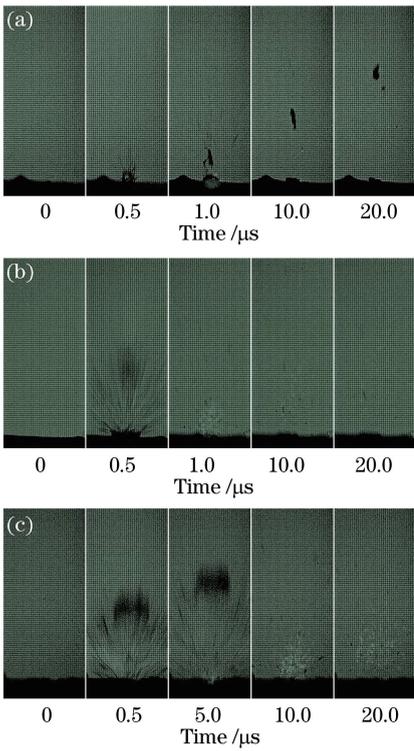


图 3 不同纳米碳粉掺杂浓度和靶材厚度下的 GAP 喷射羽流图像。

(a) 0%, $d=109\ \mu\text{m}$; (b) 1%, $d=107\ \mu\text{m}$; (c) 3%, $d=107\ \mu\text{m}$
 Fig. 3 Plumes of GAP under different nano-carbon powder concentrations and target thicknesses. (a) 0, $d=109\ \mu\text{m}$; (b) 1%, $d=107\ \mu\text{m}$; (c) 3%, $d=107\ \mu\text{m}$

量转化效率均超过了 150%，激光能量和靶材的利用率大幅提高。由喷射羽流图像可知，掺杂纳米碳粉之后 GAP 的羽流喷射速度也显著提高。

由图 3 可知，当纳米碳粉浓度掺杂为 1% 时，喷射羽流中只有少量的未烧蚀的工质喷出，而 GAP 的推进性能方面与掺杂浓度为 3% 时的接近。当纳米碳粉掺杂浓度为 3% 时，GAP 的喷射羽流前方有一定厚度的工质从靶面喷出。已有研究发现，体吸收特征^[17]的 GAP 在掺杂纳米碳粉之后，表现出类似金属靶材的面吸收^[18]特性，随着纳米碳粉掺杂浓度的升高，GAP 靶材对激光的吸收深度降低。对于较厚的靶材，外层的工质在透射式激光烧蚀模式下无法吸收足够的激光能量，分解不充分，在中心烧蚀区的膨胀过程中被喷出。纳米碳粉掺杂浓度为 1% 的 GAP 的吸收深度比掺杂浓度为 3% 时的更深，对于厚度为 $107\ \mu\text{m}$ 的靶材，烧蚀的工质更多。

如图 3 所示，发光的烧蚀产物从靶材表面喷射出来，烧蚀过程中纳米碳粉吸收激光能量形成局部高温区。纳米碳粉的熔点和沸点非常高，烧蚀区的温度无法使碳粉在短时间内发生气化和电离，而从激光入射到烧蚀羽流喷射整个过程只有数十微秒的

时间，这些处于物态变化过程中的碳粉来不及完全分解便从靶材表面喷出，因而在拍摄的烧蚀羽流图像中，表现出发光发亮的特征。纳米碳粉吸收激光能量后在烧蚀区形成了局部高温、高压区，这是透射式激光烧蚀模式下纳米碳粉掺杂大幅提高聚合物靶材性能的主要原因。

掺杂不同浓度红外染料的 GAP 靶材在激光功率密度约为 $3.2 \times 10^9\ \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时的喷射羽流图像如图 4 所示。

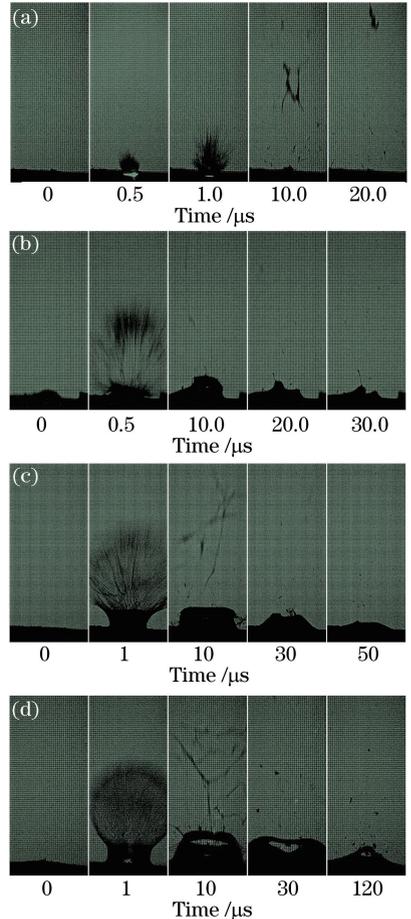


图 4 不同红外染料掺杂浓度和靶材厚度下的 GAP 喷射羽流图像。(a) 1%, $d=138\ \mu\text{m}$; (b) 3%, $d=148\ \mu\text{m}$; (c) 5%, $d=134\ \mu\text{m}$; (d) 7%, $d=155\ \mu\text{m}$

Fig. 4 Plumes of GAP under different infrared dye concentrations and target thicknesses. (a) 1%, $d=138\ \mu\text{m}$; (b) 3%, $d=148\ \mu\text{m}$; (c) 5%, $d=134\ \mu\text{m}$; (d) 7%, $d=155\ \mu\text{m}$

由图 4 可知，随着红外染料掺杂浓度的增加，GAP 推进性能先增后减。当红外染料掺杂浓度为 1% 时，能量转化效率仅为 3%，比冲仅为 140 s，冲量耦合系数为 40 N/MW，如图 4(a) 所示；当红外染料掺杂浓度为 3% 时，能量转化效率为 124%，比冲为 780 s，冲量耦合系数为 310 N/MW，如图 4(b) 所

示;当红外染料掺杂浓度为 5% 时,能量转化效率为 170%,比冲为 900 s,冲量耦合系数为 380 N/MW,如图 4(c)所示;当红外染料掺杂浓度为 7% 时,能量转化效率为 160%,比冲为 850 s,冲量耦合系数为 350 N/MW,如图 4(d)所示。由羽流喷射图像可知,红外染料掺杂浓度对烧蚀产物的气化分解程度影响较小。对比 0.5 μs 左右不同红外染料掺杂浓度下的喷射图像,羽流中均含有较多未完全烧蚀分解的工质喷出,不仅使得微推力器对靶材的利用效率降低,也会对空间环境造成污染。与掺杂纳米碳粉的 GAP 相比,掺杂红外染料的 GAP 的黏性更大。在透射式下,中心烧蚀区以球形爆炸的形式膨胀,由图 4 红外染料掺杂浓度为 3%~7% 的 GAP 的羽流演化图像可知,外层靶材在烧蚀区膨胀过程中凸起,随着时间的推移,烧蚀区的压力释放,在黏性的作用下,凸起的靶材逐渐平复。而掺杂纳米碳粉的 GAP 在烧蚀喷射过程中没有靶面凸起的现象。靶面凸起会影响周围脉冲激光作用点处靶材的几何结构,使得推进性能与预定数据产生偏差,不利用微推力器输出冲量的精确控制。

3.2 靶材厚度和激光烧蚀模式的影响

当激光功率密度约为 $2.0 \times 10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,采集不同靶材厚度下纳米碳粉掺杂浓度为 3% 时的 GAP 的烧蚀喷射羽流图像,如图 5 所示。当靶材厚度为 54 μm 时,能量转化效率为 240%,比冲为 1400 s,冲量耦合系数为 340 N/MW,如图 5(a)所示;当靶材厚度为 107 μm 时,能量转化效率为 160%,比冲为 900 s,冲量耦合系数为 350 N/MW,如图 5(b)所示;当靶材厚度为 176 μm 时,能量转化效率为 75%,比冲为 480 s,冲量耦合系数为 310 N/MW,如图 5(c)所示。

由图 5 可知,厚度为 54 μm 的靶材的喷射羽流烧蚀分解程度非常高,基本没有未烧蚀的工质以固态或液态的形式从靶材表面喷射,并且在 1 μs 的曝光时间内,相较于其他两种厚度的靶材,其喷射产物留下的拖影更长,喷射速度更快。而厚度为 107 μm 和 176 μm 的靶材由于厚度大于靶材对激光的吸收深度,在它们的喷射羽流图像中可以清晰地看到未烧蚀的外层工质喷出。

不同厚度 GAP 靶材的冲量耦合系数最优值差异较小,说明靶材厚度对激光能量利用率的影响较小。随着 GAP 靶材厚度的增加,其比冲显著降低,这与羽流图像中未烧蚀的工质质量增加,靶材利用效率大幅下降,及烧蚀产物的整体喷射速度降低有

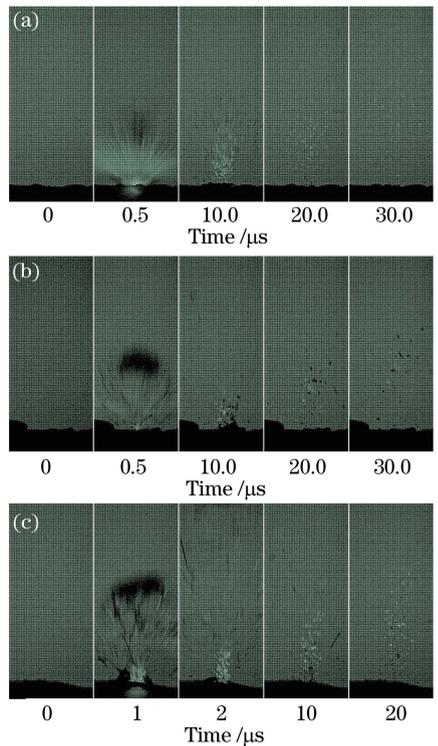


图 5 不同靶材厚度下纳米碳粉掺杂浓度为 3% 的 GAP 喷射羽流图像。(a) $d = 54 \mu\text{m}$; (b) $d = 107 \mu\text{m}$; (c) $d = 176 \mu\text{m}$

Fig. 5 Plumes of GAP under 3% nano-carbon powder concentration but different target thicknesses.

(a) $d = 54 \mu\text{m}$; (b) $d = 107 \mu\text{m}$; (c) $d = 176 \mu\text{m}$

关。其中厚度为 54 μm 的掺碳 GAP 比冲约为 1400 s,能量转化效率高达 240%。综合考虑该工况下靶材在喷射羽流中的优秀烧蚀性能,认为厚度为 54 μm ,纳米碳粉掺杂浓度为 3% 时的 GAP 靶材是透射式激光烧蚀微推力器的理想选择。

对透射式和反射式下的红外染料掺杂浓度为 3% 的 GAP 的喷射羽流图像进行对比,如图 6 所示。靶材的厚度为 142 μm ,烧蚀喷射羽流图像均在激光功率密度约为 $3.2 \times 10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时采集。在透射式下,能量转化效率为 120%,比冲为 780 s,冲量耦合系数为 300 N/MW,如图 6(a)所示;在反射式下,能量转化效率为 230%,比冲为 1200 s,冲量耦合系数为 380 N/MW,如图 6(b)所示。

由图 6 可知,在透射式下,掺杂红外染料的 GAP 的喷射羽流中含有较多的未完全烧蚀工质,靶材的分解程度非常高;而在反射式下的喷射羽流中几乎看不到未烧蚀的工质从靶材表面喷出,并且烧蚀坑周围的靶材不存在可见的结构改变。从推进性能数据看,反射式下靶材的比冲约为 1200 s,能量转化效率超过 200%,接近透射式激光烧蚀模式下测量值的两倍。红外染料作为反射式激光烧蚀微推力

器靶材的掺杂剂,不仅能保护航天器轨道环境,还有利于微推力器良好的推进性能和稳定性。

红外染料作为红外激光吸收剂,能够提高 GAP 靶材对激光的吸收率。由于激光能量在靶材中的传播按照指数衰减,在透射式下,靠近基底一侧的靶材迅速发生气化和电离,形成中心烧蚀区,中心烧蚀区在分解的同时迅速膨胀,直至突破外层靶材的束缚,产生的瞬态冲击力使外层未烧蚀的工质从靶面脱落;而在反射式下,吸收激光能量气化分解的工质先从靶材表面喷射,并随着激光能量的沉积和 GAP 中化学能的释放,靶材在热扩散的作用下逐渐沿内侧方向烧蚀,且烧蚀的靶材吸收激光能量更为均匀。

选取两种烧蚀性能较优的工况:1) 纳米碳粉掺杂浓度为 3% 的 GAP 靶材,厚度为 $54\ \mu\text{m}$;2) 红外染料掺杂浓度为 3% 的 GAP 靶材,厚度为 $142\ \mu\text{m}$ 。不同条件下的推进性能数据如图 7 所示。

由图 7 可知,在两种工况下,在较宽的激光功率密度范围内,比冲都高于 $1000\ \text{s}$,能量转化效率都高于 200%,工质和激光能量都得到充分利用,满足微推力器对推进性能的要求。

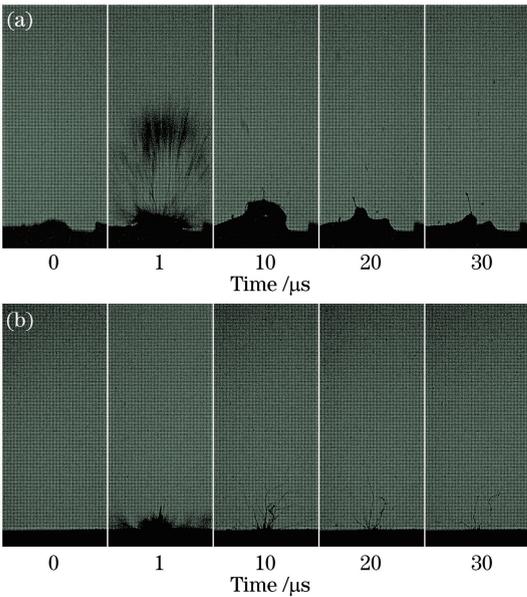


图 6 红外染料掺杂浓度为 3% 的 GAP 在不同激光烧蚀模式下的喷射羽流图像。(a)透射式;(b)反射式

Fig. 6 Plumes of GAP under 3% infrared dye concentration but different laser ablation modes. (a) Transmission mode; (b) reflection mode

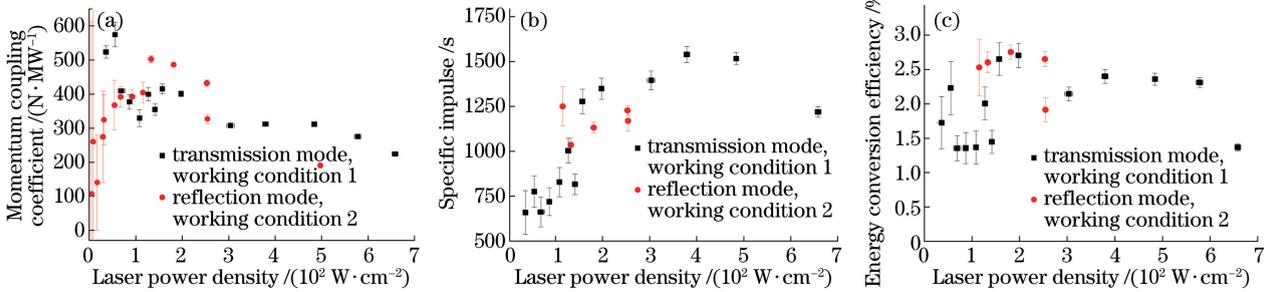


图 7 不同激光烧蚀模式下两种工况的推进性能。(a)冲量耦合系数;(b)比冲;(c)能量转化效率

Fig. 7 Propulsion performances under different laser ablation modes for two working conditions.

(a) Momentum coupling coefficient; (b) specific impulse; (c) energy conversion efficiency

4 结 论

以 GAP 作为烧蚀靶材,红外染料、纳米碳粉作为掺杂吸收剂,采用微尺度羽流观测系统对靶材的喷射羽流图像进行采集。选取不同的掺杂浓度、靶材厚度及激光烧蚀模式,对 GAP 靶材的烧蚀特性进行了实验分析,得到如下结论。

1) 通过对靶材的优化设计,激光烧蚀微推力器满足航天任务飞行的要求。纳米碳粉和红外染料均适合作为提高靶材性能的掺杂剂。

2) 在透射式激光烧蚀模式下,掺杂纳米碳粉的 GAP 靶材表现出面吸收特性,在靶材厚度较薄时具有优秀的烧蚀性能和推进性能,满足透射式激光烧

蚀微推力器的设计要求。

3) 掺杂红外染料之后,GAP 聚合物的推进性能显著增加。反射式激光烧蚀微推力器宜选用红外染料作为聚合物靶材的掺杂剂。

参 考 文 献

[1] Hong Y J. Laser ablation micro-thruster for attitude and orbit control of microsatellite [J]. Journal of Academy of Equipment, 2013, 24(6): 57-61.
洪延姬. 用于微小卫星姿轨控的激光烧蚀微推力器 [J]. 装备学院学报, 2013, 24(6): 57-61.

[2] Ziemer J K. Laser ablation micro thruster technology [C]. 33rd Plasmadynamics and Lasers Conference, 2002: 2002-2153.

- [3] Hong Y J, Wang G Y, Dou Z G. State of art of laser ablation micro thruster [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(9): 1555-1565.
洪延姬, 王广宇, 窦志国. 激光烧蚀微推力器研究进展[J]. *航空学报*, 2009, 30(9): 1555-1565.
- [4] Phipps C R, Birkan M, Bohn W, *et al.* Review: Laser-ablation propulsion [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, 26(4): 609-637.
- [5] Li X Q, Chen G C. Laser-ablation propulsion [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
李修乾, 陈谷仓. 烧蚀模式激光推进[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [6] Urech L, Lippert T. Designed polymers for ablation [M]//[s. n.]. *Laser Ablation and Its Applications*. [S.l.]: Springer, 2007: 281-297.
- [7] Anoop N A. Energetic polymers[D]. Cochin: Cochin University of Science and Technology, 2013.
- [8] Urech L, Lippert T, Phipps C R, *et al.* Polymers as fuel for laser plasma thrusters: A correlation of thrust with material and plasma properties by mass spectrometry[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6261: 626114.
- [9] Urech L, Hauer M, Lippert T, *et al.* Designed polymers for laser-based microthrusters: Correlation of thrust with material, plasma, and shockwave properties[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5448: 52-64.
- [10] Fardel R, Urech L, Lippert T, *et al.* Laser ablation of energetic polymer solutions: Effect of viscosity and fluence on the splashing behavior [J]. *Applied Physics A*, 2009, 94(3): 657-665.
- [11] Ye J F, Hong Y J, Li N L. Experimental study on thrust performance of carbon doped liquid working substance processed by laser ablation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0202001.
叶继飞, 洪延姬, 李南雷. 激光烧蚀碳掺杂液态工质推力性能实验研究 [J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0202001.
- [12] Liu K F. Vacuum laser ablation plume characteristics experimental study [D]. Beijing: Academy of Equipment, 2015.
刘克非. 真空环境下激光烧蚀羽流特性实验研究 [D]. 北京: 装备学院, 2015.
- [13] Phipps C R, Luke J R, Helgeson W D. 3ks specific impulse with a ns-pulse laser micro thruster [C]. *International Electric Propulsion Conference*, 2005: 1-9.
- [14] Hong Y J, Jin X. Micro thrust and micro impulse measurement method[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
洪延姬, 金星. 微推力和微冲量测量方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [15] Luo L L, Dou Z G, Li N L. The micro-impulse measuring method based on torsion pendulum [J]. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*, 2017, 30(2): 70-73.
罗乐乐, 窦志国, 李南雷. 基于扭摆测量系统的微冲量测量方法 [J]. *机电产品开发与创新*, 2017, 30(2): 70-73.
- [16] Phipps C R, Luke J R, McDuff G G, *et al.* Laser-driven micro-rocket [J]. *Applied Physics A*, 2003, 77(2): 193-201.
- [17] Phipps C R, Harrison R F, Shimada T, *et al.* Enhanced vacuum laser-impulse coupling by volume absorption at infrared wavelengths [J]. *Laser and Particle Beams*, 1990, 8(1/2): 281-298.
- [18] Phipps C R, Turner T P, Harrison R F, *et al.* Impulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF, and CO₂, single-pulse lasers [J]. *Journal of Applied Physics*, 1988, 64(3): 1083-1096.