

基于热力循环的激光微推力发动机特性研究

叶继飞¹ 洪延姬¹ 王广宇² 王殿恺²

(¹装备指挥技术学院基础部, 北京 101416)
(²装备指挥技术学院研究生院, 北京 101416)

摘要 以微小卫星姿轨控为任务的激光微推力器是近些年激光推进技术应用研究的热点。在激光微推力发动机热力循环分析的基础上, 研究影响激光微推进热力循环效率的因素, 提出了通过改变激光功率密度和靶材掺杂特性来同时提高比冲和冲量耦合系数的方法, 实验验证了激光功率密度和靶材掺杂对发动机性能影响的规律。结果表明, 激光与靶材的特性共同决定了热力循环效率的高低, 激光功率密度的提高能够增加产生激波波后的压力, 一定程度上提高比冲, 却会使冲量耦合系数下降; 掺杂能够增强靶材对激光能量的吸收, 使比冲和冲量耦合系数都提高, 而两者都能够一定程度上提高激光微推力发动机的热力循环效率。

关键词 激光技术; 激光推力器; 热力循环效率; 冲量耦合系数; 比冲

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s102015

Research of Micro Laser Thruster Engine Performance Based on Thermodynamic Cycle Analysis

Ye Jifei¹ Hong Yanji¹ Wang Guangyu² Wang Diankai²

(¹Department of Basic Theories, Academy of Equipment Command and Technology, Beijing 101416, China)
(²Academy of Postgraduate, Academy of Equipment Command and Technology, Beijing 101416, China)

Abstract In the recent years, the micro laser thruster is the focus of the applied research of laser propulsion technology, which is aimed to apply in the task of pose and orbit control of the micro satellite. Based on the thermodynamic cycle analysis of the micro laser thruster engine, the effect factor on thermodynamic cycle efficiency is researched. The method of improving the propulsion performance is proposed, which is realized by changing the laser power density and target doping content. The regularity of the engine performance is verified by the experiment. The results indicate that the thermodynamic cycle efficiency is influenced by both laser and target, the pressure behind the shock wave could be increased by the increasing of laser power density, the specific impulse could be increased and the impulse coupling coefficient could be decreased; laser energy absorption could be intensified by the doped target, both specific impulse and impulse coupling coefficient are increased, and the thermodynamic cycle efficiency could be increased to some extent by the increasing of laser power density and target doping content.

Key words laser technique; laser thruster; thermodynamic cycle efficiency; impulse coupling coefficient; specific impulse

OCIS codes 140.3530; 140.3330; 350.5340

1 引 言

工质的选择是航天推进系统设计中的重要研究内容之一, 激光推进作为一种先进推进技术也不例外^[1]。将推进性能参数高的工质选择出来, 同时根据具体航天任务需要, 设计出满足性能要求的工况是工质选择的目标。比冲和冲量耦合系数是描述激

光动力发动机性能的关键参数^[2]。比冲低意味着产生同样大小的冲量, 需要消耗较多质量的工质, 使得飞行器工作时需要携带质量较多的工质, 这样将降低推重比, 使得飞行器发动机效率低下。冲量耦合系数低意味着产生同样大小的冲量, 需要较高的辐照激光能量, 这样就对激光光源提出了较高的要求。

收稿日期: 2011-10-30; 收到修改稿日期: 2011-11-26

基金项目: 国家自然科学基金(11102234)资助课题。

作者简介: 叶继飞(1981—), 男, 博士, 讲师, 主要从事激光推进技术方面的研究。E-mail: yj1981@163.com

为了使激光动力发动机更好地满足航天任务的需求,对激光动力发动机热力循环过程进行分析,寻找比冲和冲量耦合系数都比较高的工质是激光推进研究工作的一个重要目标^[3]。

2 激光推进能量转化过程

热力循环指封闭的热力过程,是实现连续热功转换的基本条件。发动机只有通过热力循环才能连续工作。在研究热力循环时,通常忽略一些实际存在的次要因素,假定循环是可逆的,且工质是理想的,其成分不变。激光动力发动机技术是利用高能激光与工质相互作用产生推力,推动飞行器前进的新概念推进技术,其能量转化过程如图 1 所示。

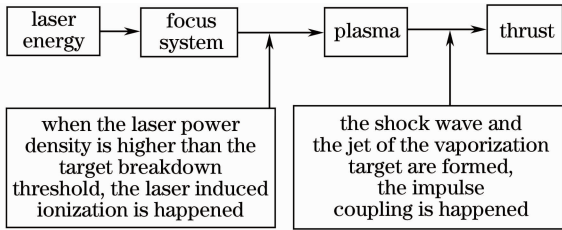


图 1 激光动力发动机的能量转化过程

Fig. 1 Sketch of energy transformation of laser thruster engine

虽然激光推进与化学火箭发动机的工作过程有很大不同,但是二者高温高压工质气流的膨胀做功过程相似,参考化学火箭发动机的相关假设,讨论激光推进的理想热力循环过程^[4]。不考虑激光的传输与聚焦过程,只考虑工质的加热、膨胀和放热过程,进行合理简化假设:

- 1) 激光发动机选择单一工质,且加热后工质气体为定比热容理想气体;
- 2) 以外部热源向工质的加热过程代替激光能量沉积过程,以向外界的放热过程代替实际的排气过程;
- 3) 忽略实际进排气过程中的阻力,在循环中不考虑进排气的影 响,把实际的开式循环简化为一个封闭的循环,循环工质气体的质量和成分自始至终都保持不变;
- 4) 忽略膨胀和工质补充过程中的散热量,即为绝热压缩过程和绝热膨胀过程;
- 5) 组成循环的所有过程均为可逆过程。

3 激光推进理想热力循环过程

图 2 是在以上假设的基础上,建立的激光动力发动机理想热力循环过程,由以下 3 个过程组成:

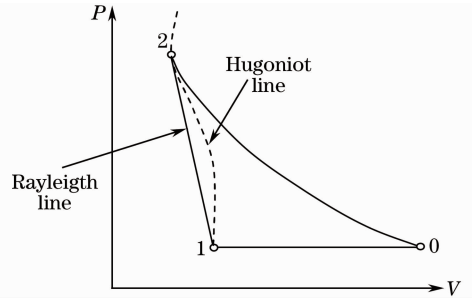


图 2 激光推进发动机理想热力循环 P-V 图
Fig. 2 P-V of the ideal thermodynamic cycle of the laser thruster engine

1) 激光加载和流场演化过程:由状态 1 到状态 2,工质吸收激光能量使其内能迅速增加,激光能量转化为工质的内能。该过程满足冲击波两边物理量的力学守恒,其方程为

质量守恒

$$\rho_1 D = \rho_2 u_2, \quad (1)$$

动量守恒

$$P_1 + \rho_1 D^2 = P_2 + \rho_2 u_2^2, \quad (2)$$

能量守恒

$$e_2 + P_2/\rho_2 + u_2^2/2 = e_1 + P_1/\rho_1 + D^2/2 + I/\rho_1 D, \quad (3)$$

式中 D 为激光支持的爆轰波(LSD)的速度; u_2 为波后介质的速度; e_1 和 e_2 分别为波前和波后的比内能, $e_2 = P_2/(\gamma - 1)\rho_2$; $I/\rho_1 D$ 为单位质量工质吸收的激光能量。假定靶材对激光为线性吸收,吸收系数为 α ,则从靶材表面到深度 z 处

$$I = I_0[1 - \exp(-\alpha z)]. \quad (4)$$

定义比体积为单位质量除以密度,

$$V = 1/\rho. \quad (5)$$

联立(1)式和(2)式得

$$P_1 + C^2 V_1 = P_2 + C^2 V_2, \quad (6)$$

式中 C 为质量通量,(6)式称为 Rayleigh 方程,对应图 2 中的 1-2 线,称为 Rayleigh 线。

联立(1)~(4)式,不计波前未受扰动介质中的压力 P_1 和比内能 e_1 ,消去 e_2 、 u_2 、 D 后可以得出 LSD 波的 Hugoniot 线,对应于图 2 中的虚线^[5],

$$P_2 = \left\{ 2 \left(1 - \frac{V_2}{V_1} \right)^{1/2} \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \frac{V_2}{V_1} - 1 \right)^{-1} \times I_0 [1 - \exp(-\alpha z)] \rho_1^{1/2} \right\}^{2/3}. \quad (7)$$

也就是说,由入射激光功率密度 I_0 和靶材对激光的吸收系数 α 可以给出 2 点的压力 P_2 。取 $\rho_1 = 1 \text{ g/cm}^3$,烧蚀深度 z 为 $100 \text{ }\mu\text{m}$,激光功率密度 $I_0 = 10^9 \text{ W/cm}^2$;靶材的分解产物以 H_2O 等三原子分子

为主,因此取 $\gamma=1.17$;当 Rayleigh 线与 Hugoniot 线相切时,对应于给定 I_0 之下的最低 LSD 波速度,此时体积比

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\gamma}{\gamma+1} = 0.539. \quad (8)$$

将以上数据代入(7)式,计算出压力 P_2 随吸收系数 α 的变化关系,如图3所示。从图中可以看出,随着吸收系数 α 的增加,压力 P_2 单调增加。AB 段压力 P_2 上升不明显,意味着当吸收系数在很低范围时,压力 P_2 差别不大;BC 段为单调上升阶段,此时靶材对激光能量的吸收对压力 P_2 产生了显著影响;CD 段吸收系数超过 $1.0 \times 10^5 \text{ m}^{-1}$, P_2 趋于常值,约 425565 kPa,意味着能量的吸收对 P_2 不再具有显著影响,靶材对激光的吸收能力达到饱和。

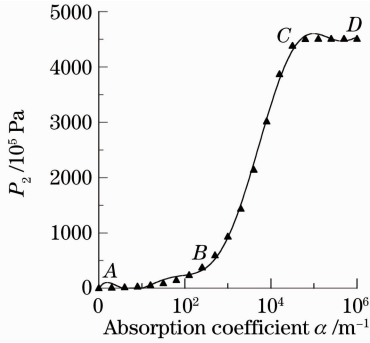


图3 LSD波后压力 P_2 与吸收系数 α 的关系曲线

Fig. 3 Pressure behind LSD P_2 versus absorption coefficient α

2) 推力形成过程:状态2到状态0,高温高压工质气流入喷管,实现等熵膨胀过程,描述该过程的等熵方程为

$$P_2 V_2^\gamma = P_0 V_0^\gamma, \quad (9)$$

式中 γ 为等熵指数,与比热比相同。

3) 补充工质过程:状态0到状态1,此过程为等压放热过程, $P_0 = P_1$ 。

激光动力发动机热力循环效率 η 为

$$\eta = \frac{W}{Q_i} = \frac{W}{W + Q_o} = \frac{1}{1 + Q_o/W}. \quad (10)$$

做功 W 为图2中0、1、2三点所围成的面积

$$W = \frac{P_2 V_2 - P_0 V_0}{\gamma - 1} - \frac{1}{2} (P_2 - P_1) (V_1 - V_2). \quad (11)$$

放热

$$Q_o = c_p (T_0 - T_1), \quad (12)$$

式中 c_p 为单位质量理想气体的定压热容

$$c_p = \frac{C_{p,m}}{M} = \frac{i+2}{2} \frac{R}{M}, \quad (13)$$

式中 $C_{p,m}$ 是理想气体的定压摩尔热容, R 为摩尔气体常量, M 为气体摩尔质量, i 为气体分子的自由度数,它与 γ 的关系为

$$\gamma = \frac{C_{p,m}}{C_{v,m}} = \frac{i+2}{i}. \quad (14)$$

式中 $C_{v,m}$ 是理想气体的定容摩尔热容。将(13)式和(14)式代入(12)式,再结合理想气体状态方程,易得

$$Q_o = \frac{\gamma}{\gamma-1} P_0 (V_0 - V_1). \quad (15)$$

因此

$$\frac{Q_o}{W} = \frac{\frac{\gamma}{\gamma-1} P_0 (V_0 - V_1)}{\frac{P_2 V_2 - P_0 V_0}{\gamma-1} - \frac{1}{2} (P_2 - P_1) (V_1 - V_2)}. \quad (16)$$

令

$$P_2/P_0 = \Delta, \quad (17)$$

则由等熵方程可得

$$V_2/V_0 = \Delta^{-1/\gamma}. \quad (18)$$

将(17)式和(18)式代入(16)式,并利用 $P_0 = P_1$,可将(16)式化为

$$\frac{Q_o}{W} = \frac{2\gamma(\Delta^{1/\gamma} - V_1/V_2)}{2(\Delta - \Delta^{1/\gamma}) + (\gamma-1)(\Delta-1)(1 - V_1/V_2)}. \quad (19)$$

将(19)式代入(10)式即得热力循环效率

$$\eta = \frac{2(\Delta - \Delta^{1/\gamma}) + (\gamma-1)(\Delta-1)(1 - V_1/V_2)}{2\gamma(\Delta^{1/\gamma} - V_1/V_2) + 2(\Delta - \Delta^{1/\gamma}) + (\gamma-1)(\Delta-1)(1 - V_1/V_2)}. \quad (20)$$

由此可知,热力循环效率仅与比热比 γ 和压强比 Δ 有关。

4 靶特性对热力循环的影响

用碳或激光染料作为掺杂剂对高分子材料进行掺杂,可以增强高分子材料对激光的吸收,提高单位

体积材料内沉积的激光能量,使材料对激光的吸收方式由体吸收向面吸收转变。这将使能量注入过程的质量通量,即 Rayleigh 方程中的 C 变小,反映在 P - V 图上即为 Rayleigh 线的斜率变大,即:对于同样的 V_2/V_1 , Δ 提高了。

并由(7)式可知, P_2 随吸收系数单调上升。因

此,吸收系数的提高,就意味着激光加载过程结束之后,产生的激波流场的波后压力 P_2 增加,也就使得从状态 1 到状态 2 的热力学过程中,降压比 Δ 获得增加,热力循环过程由 0-1-2-0 变成了 0'-1-2'-0',如图 4 所示。

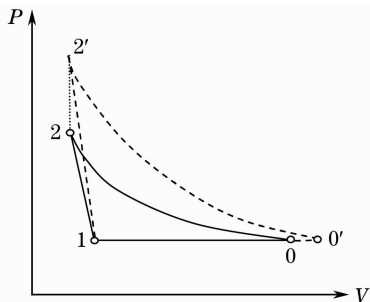


图 4 掺杂对热力循环的影响示意图

Fig. 4 Sketch of influence on the thermodynamic cycle of the doped target

因此,掺杂碳或激光染料对热力循环效率的影响归结为吸收系数 α 对 η 的影响。仍然取 $\rho_1 = 1 \text{ g/cm}^3$, 烧蚀深度 $z = 100 \text{ }\mu\text{m}$, 激光辐射强度 $I_0 = 10^9 \text{ W/cm}^2$, $\gamma = 1.17$, 代入(7)式和(20)式,得到 $\alpha - \eta$ 曲线,如图 5 所示。

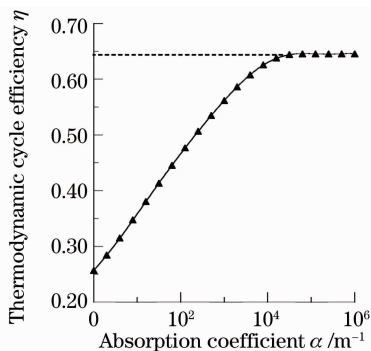


图 5 吸收系数 α 对热力循环效率 η 的影响

Fig. 5 Thermodynamic cycle efficiency η versus absorption coefficient α

由图 5 可知,掺杂材料的加入,使得热力循环效率获得了较大提高。当吸收系数 $\alpha < 10^4 \text{ m}^{-1}$ 时,热力循环效率 η 近似于线性升高,由 26% 提高到了 60%;当吸收系数 $\alpha > 10^5 \text{ m}^{-1}$ 时,热力循环效率 η 趋于常数,近似为 65%,其原因是靶材对激光的吸收能力达到了饱和。当掺杂剂的浓度达到一定值时,吸收系数的提高对热力循环效率影响甚微,因此掺杂浓度应控制在一定范围。掺杂浓度过高对热力循环效率的提高没有帮助,反而会导致靶材的烧蚀主要是掺杂剂的烧蚀,聚合物的作用被削弱。

5 对热力循环分析结果的实验研究

热力循环分析的前提条件之一是激光在较高的功率密度下反射式入射,实验选用 YAG 激光器,功率密度选取 $6 \times 10^{12} \sim 1.2 \times 10^{13} \text{ W/m}^2$ 之间的 5 个不同值,其调节由不同透过率的衰减片实现^[6];靶材选用掺碳质量分数分别为 1% 和 2% 的 PVC,打靶方式为反射式^[7];实验在大气环境下进行,冲量测量装置采用扭摆测量^[8],烧蚀质量的称量采用微量天平,在相同条件下 20 次单脉冲打靶,称量总质量差之后求平均值^[9]。

5.1 掺杂和激光功率密度对冲量耦合系数的影响

冲量耦合系数的测量结果如图 6 所示。由图 6 可知,随着入射激光功率密度的提高,冲量耦合系数由将近 $600 \text{ }\mu\text{N/W}$ 降低到了不足 $400 \text{ }\mu\text{N/W}$,并且掺碳质量分数较高的 PVC 具有较高的冲量耦合系数。冲量耦合系数随激光功率密度提高而降低,其原因是在同等的脉宽条件下,高的激光功率密度意味着更高的注入能量,这虽然能提高冲量,但会导致更多的能量以热扩散或者等离子体屏蔽的形式浪费,引起冲量耦合系数的降低。

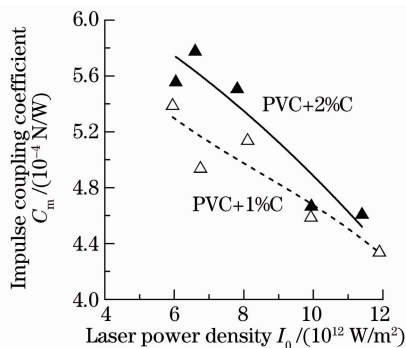


图 6 掺杂和激光功率密度对冲量耦合系数的影响

Fig. 6 Impulse coupling coefficient C_m versus laser power density I_0 with different doping content

5.2 掺杂和激光功率密度对比冲的影响

比冲的测量结果如图 7 所示。由图 7 可知,比冲随激光功率密度的提高而提高,掺碳质量分数较高的 PVC 具有较高的比冲,这说明如要获得较高的比冲,则须将掺杂组分提高,同时提高入射激光功率密度。金属靶材对激光的吸收深度很浅,比冲往往很高^[10],这与掺碳质量分数高的 PVC 比冲较高的原理是一致的,说明了提高单位体积的激光能量沉积率可以提高比冲。

5.3 掺杂和激光功率密度对热力循环效率的影响

热力循环效率的测量结果如图 8 所示。由图 8

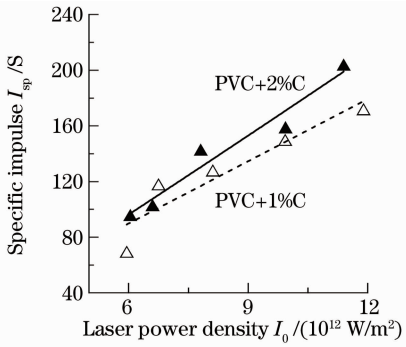


图7 掺杂和激光功率密度对比冲的影响

Fig.7 Specific impulse I_{sp} versus laser power density I_0 with different doping content

可知,随着入射激光功率密度的提高,热力循环效率由20%左右提高到了将近50%,并且掺碳质量分数较高的PVC具有较高的热力循环效率,这些结果与热力循环的分析结果是一致的,如图5所示。

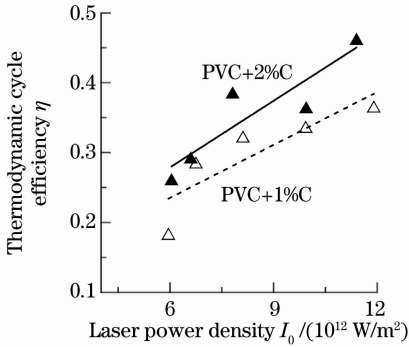
图8 掺杂和激光功率密度对热力循环效率 η 的影响Fig.8 Thermodynamic cycle efficiency η versus laser power density I_0 with different doping content

图8的热力循环效率比图5低了约10%,这是因为在热力循环分析过程中采用了很多理想化的假设,如不考虑能量的热扩散损失等,这必然会得出比实验结果高得多的结果。

6 结 论

分析激光动力发动机热力循环过程,研究靶特性对热力循环效率的影响,基于热力循环分析的方法,提出了通过对靶材掺杂来同时提高比冲和冲量耦合系数的方法,并进行了实验验证。结果表明,靶材掺杂能够在一定程度上同时提高比冲和冲量耦合系数,能够改善热力循环效率。激光功率密度与靶

材的掺杂特性共同决定了热力循环效率的高低,两者都能在一定程度上提高激光微推力发动机的热力循环效率,但激光功率密度的提高能够增加产生激波波后的压力,一定程度上提高比冲,却会使冲量耦合系数下降。

参 考 文 献

- Ye Jifei, Hong Yanji, Wang Guangyu. Progress of research in laser micro ablation of target [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2009, **30**(6): 751~756
- 叶继飞, 洪延姬, 王广宇. 激光微推进的靶特性研究进展[J]. *推进技术*, 2009, **30**(6): 751~756
- Nan Baojiang, Zhang Gangchui, Wu Ping *et al.*. Analysis of energy conversion efficiency of solid propellant for laser ablative propulsion[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2007, **28**(5): 478~480
- 南宝江, 张钢锤, 吴平等. 含能工质激光烧蚀推进效率分析[J]. *推进技术*, 2007, **28**(5): 478~480
- Hong Yanji, Li Xiuqian, Wang Diankai *et al.*. Some recommendations on condensed propellants for laser propulsion [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2009, **30**(5): 618~624
- 洪延姬, 李修乾, 王殿恺等. 对凝聚态工质激光推进的思考[J]. *推进技术*, 2009, **30**(5): 618~624
- Hong Xin, Zhang Baojiong. Basic of Rocket Engine [M]. Beijing: Science Press, 2003. 33~34
- 洪鑫, 张宝炯. 火箭发动机基础[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 33~34
- Sun Chengwei. Laser Irradiation Effect [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 86~113
- 孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 86~113
- Ye Jifei, Hong Yanji, Wang Guangyu *et al.*. Effects of target character on propulsion performance in laser micro propulsion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(s): s100521
- 叶继飞, 洪延姬, 王广宇等. 基于激光微推进技术的靶特性研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(s): s100521
- Ye Jifei, Hong Yanji, Wang Guangyu *et al.*. Review of research progress in micro-laser plasma propulsion[J]. *Chinese Optics*, 2011, **4**(4): 319~326
- 叶继飞, 洪延姬, 王广宇等. 激光等离子体微推进技术的研究进展[J]. *中国光学*, 2011, **4**(4): 319~326
- Ye Jifei, Wang Guangyu, Wang Diankai. Measurement of laser ablation micro impulse using the torsion pendulum interferometry [C]. The 2nd International Conference on Advanced Measurement and Test, 2011, Advanced Materials Research Vols. **301-303**: 1078~1082
- Ye Jifei, Hong Yanji, Wang Guangyu *et al.*. Measurement method of microgram amounts laser ablation mass[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2010, **31**(3): 372~376
- 叶继飞, 洪延姬, 王广宇等. 微量级激光微烧蚀质量测量方法[J]. *推进技术*, 2010, **31**(3): 372~376
- Claude R. Phipps, James R. Luke, Wesley Helgeson *et al.*. 3 ks specific impulse with a ns-pulse laser microthruster [C]. International Electric Propulsion Conference, 2005. 319~323