

对凝聚态工质激光推进的思考^{*}

洪延姬, 李修乾, 王殿恺, 窦志国

(装备指挥技术学院, 北京 101416)

摘 要: 液体和固体等凝聚态物质以其自身独有的特性引起了广泛的研究兴趣。目前的研究结果表明, 液体工质的冲量耦合系数较高, 固体工质的比冲较高, 但是能量转化效率都比较低。对照化学火箭发动机的理想热力循环过程, 在对激光推进工作过程合理简化假设的基础上, 给出了激光推进的理想热力循环过程, 对激光推进的能量转化效率和化学火箭发动机的热效率进行了定量对比分析, 结果表明, 在能量转化效率方面激光推进并没有优势。分析了掺杂材料、含能工质以及液膜对激光推进理想热力循环过程的影响。定量研究结果表明, 含能工质对能量转化效率的提高作用最明显, 掺杂材料和含能工质对能量转化效率的提高效果比较明显。

关键词: 激光推进; 液体工质; 固体工质; 热力学循环

中图分类号: V439 TN249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2009) 05-0618-07

Some thoughts on condensed propellants for laser propulsion

HONG Yan-ji LIXiu-qian, WANG Dian-kai, DOU Zhiguo

(Inst. of Equipment Command and Technology, Beijing 101416, China)

Abstract More and more scholars have shown great interests in liquid and solid propellants. The current research results show the high momentum coupling coefficient of liquids and the high specific impulse of solids. However, the internal efficiency of condensed propellants was relatively low. The ideal thermodynamic cycle of laser propulsion process was given as a comparison to chemistry rocket. There were no advantages in the field of internal efficiency of laser propulsion compared to chemistry rocket. The effects of dopants, energetic materials, liquid films on the ideal thermodynamic cycle of laser propulsion were analyzed. It is suggested to choose the liquid film, energetic materials and doped matters as propellants for laser propulsion so as to increase the specific impulse and coupling coefficient synchronously. This work may be helpful in the choice of condensed propellants for the future tasks of laser propulsion.

Key words Laser propulsion; Condensed propellants; Internal efficiency; Thermodynamic cycle

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。大量凝聚态工质的研究结果表明, 液体工质可以获得较大的冲量耦合系数, 已经达到了 $3\ 500\ \text{N}/\text{MW}^{[1]}$, 同时比冲非常小^[1~4]; 以铝、铜等为代表的固体工质的比冲很容易达到 $10^3\ \text{s}$ 的数量级^[5~10], 但是其冲量耦合系数很小。

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, 飞行器起飞时需要携带大量的工质, 这样将大大降低推重比, 给相关研究带来很大的难

题。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。为了较好地满足航天任务的需求, 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。

本文首先分析几个主要推进性能参数之间的关系, 然后从分析讨论激光推进的理想热力循环过程入手, 突破比冲和冲量耦合系数之间的制约关系, 提出有利于两者同时获得提高的有效方法。

2 推进性能参数理论分析

衡量激光推进性能的主要参数有平均推力 F 、冲

^{*} 收稿日期: 2009-05-04 修订日期: 2009-06-04

基金项目: 国家“九七三”项目 (61328); 国家自然科学基金 (10672184)。

作者简介: 洪延姬 (1963—), 女, 博士, 教授, 研究领域为先进推进技术。E-mail: hongyanji@vip.sina.com

量耦合系数 C_m 、比冲 I_{sp} 等。平均推力是可以直接测试的,但是冲量耦合系数和比冲无法直接测试。

下面基于一维非定常模型,分析主要参数之间的关系。一束激光击穿工质产生速度为 V_E 的高温气体喷射,消耗了质量为 m 的工质,喷射过程的典型时间是 Δt 产生的冲量为 I ,产生的平均推力为 F ,入射的激光能量为 E ,功率为 P ,这个过程的能量转化效率为 η

$$C_m = \frac{I}{E} = \frac{m V_E}{E} \quad (1)$$

$$I_{sp} = \frac{I}{mg} = \frac{m V_E}{mg} = \frac{V_E}{g} \quad (2)$$

$$F = \frac{I}{\Delta t} = \frac{m V_E}{\Delta t} = C_m \cdot P \quad (3)$$

$$\eta = \frac{\frac{1}{2} m V_E^2}{E} = \frac{g}{2} C_m I_{sp} \quad (4)$$

式中 g 为当地重力加速度。如果除了激光能量之外,没有其它能量转化和外部做功过程,那么能量转化效率不可能大于 1。所以,一般认为比冲和冲量耦合系数之间存在如下相互制约关系

$$C_m I_{sp} \leq \frac{2}{g} \quad (5)$$

也就是说,公式 (5) 成立的前提条件是,能量转化效率不变。如果有办法提高能量转化效率,由公式 (4) 可知,比冲和冲量耦合系数均可能获得提高。本文将通过理论研究工作,探索比冲和冲量耦合系数同时获得提高的可能技术途径。

3 理想热力学循环过程

3.1 化学火箭发动机

3.1.1 基本假设

化学火箭发动机理想热力循环过程满足以下假设^[11]:

(1) 工质 (或者化学反应产物) 是均相的,服从完全气体定律,在发动机燃烧室内气体达到化学平衡,气体成分在喷管内不变;

(2) 没有穿过发动机室壁的传热,流动是绝热的;没有明显的摩擦,忽略所有的边界层效应。

在以上假设的基础上,液体火箭发动机的理想热力循环分为如图 1 所示的四个过程^[12]:

(1) $0^* - 1^*$ 为推进剂在泵内的压缩过程,比体积变化很小,近似为定容过程; (2) $1^* - 2^*$ 为推进剂在燃烧室内的等压燃烧过程,简化为定压加热过程; (3) $2^* - 3^*$ 为燃气在喷管内的绝热膨胀过程; (4) $3^* - 0^*$ 为等压放热过程,燃气降压后被排入大气,经历

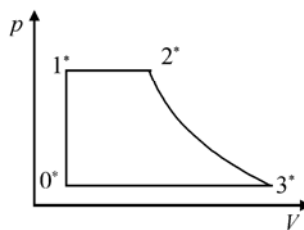


Fig 1 Thermodynamic cycle of liquid rocket^[12]

在大气中向环境的放热过程,构成一个封闭的循环。

3.1.2 热效率

火箭发动机循环 $0^* - 1^* - 2^* - 3^*$ 的热效率为^[12]

$$\eta_r = 1 - \frac{T_3}{T_2} = 1 - \frac{1}{\pi^{(\gamma-1)/\gamma}} \quad (6)$$

其中 $\pi = P_2^*/P_3^*$, 是喷管的降压比, γ 为比热比。

公式 (6) 表明化学火箭发动机的热效率 (η_r) 只与降压比 π 和比热比 γ 有关。液氢液氧化学火箭发动机的燃烧产物主要是水,一般的,其比热比取为 $\gamma = 1.17$ 。图 2 以此发动机为例,给出了热效率 η_r 随降压比 π 的变化关系,图 3 给出了降压比为 $\pi = 100$ 时,热效率 η_r 随比热比 γ 的变化关系。从图中可以看出,随着降压比 π 和比热比 γ 的增加,热效率 η_r 单调增加,但是增加幅度逐渐减小。

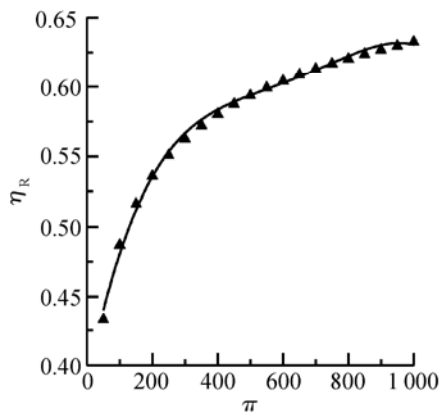


Fig 2 η_r vs π

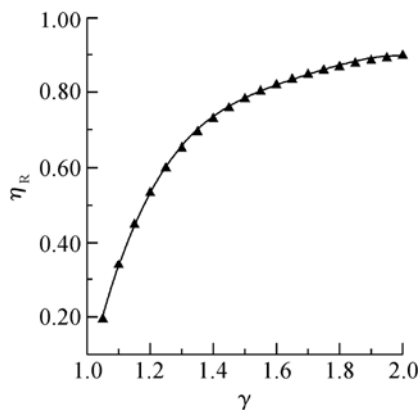


Fig 3 η_r vs γ

3.2 激光推进

3.2.1 能量转化过程

激光推进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4所示。

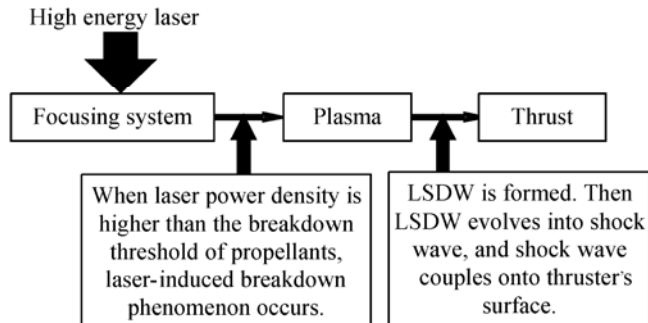


Fig 4 Energy conversion of laser propulsion

一般情况下,激光与工质相互作用过程中,聚焦区域的激光能量密度达到或者超过工质的击穿阈值,激光击穿工质产生高温高压的等离子体(高度电离的气体)流场。等离子体形成以后,继续吸收激光能量,温度升高,于是被吸收的激光能量就转化为等离子体的内能,与流动发生耦合,按照气体动力学的规律运动。等离子体的一部分能量以辐射方式耗散,被周围的空气所吸收。这种吸收激光的等离子体的传播运动,通常称为激光支持的吸收波。

激光支持的吸收波分为两种,一种以超声速传播,叫做激光支持的爆轰波(Laser supported detonation wave, LSDW);一种以亚声速传播,叫做激光支持的燃烧波(Laser supported combustion wave, LSCW)。当聚焦区域的激光能量密度足够大的时候,会直接形成 LSDW。LSDW 的存在必须为激光能量所支持,因此爆轰波是含能的。而当激光入射一结束,含能爆轰波就演化为不含能的激波。爆轰波演化而成的激波以超声速在流场中传播,传播到推力器壁面后,与壁面发生冲量耦合而产生推力。

在后面建立的理想热力循环过程中,将吸收激光能量之后的工质近似为高温高压气体,将等离子体流场向激波流场的演化过程作为激光加载的中间过程处理。

3.2.2 基本假设和理想热力循环过程

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,以下将参考化学火箭发动机的相关研究方法,讨论激光推进的理想热力循环过程。

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)单一工质,吸收激光能量之后变为高温高压的定比热容理想气体;没有穿过推力器壁面的传热,流动是绝热的;

(2)由若干个可逆过程组成,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,循环工质的质量和成分自始至终都保持不变。

图5是在以上假设的基础上,建立的激光推进理想热力循环过程,由以下三个过程组成

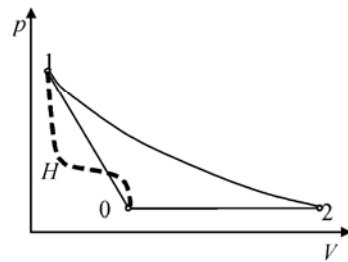


Fig 5 Thermodynamic cycle of laser propulsion

(1)能量沉积过程:由状态0到状态1,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。该过程满足质量守恒和动量守恒

$$\rho_0 u_0 = \rho_1 u_1 \quad (7)$$

$$p_1 + \rho_1 u_1^2 = p_0 + \rho_0 u_0^2 \quad (8)$$

设比体积为

$$V = 1/\rho \quad (9)$$

联立以上三式得

$$p_1 + C^2 V_1 = p_0 + C^2 V_0 \quad (10)$$

其中 C 为质量通量,式(10)称为 Rayleigh 方程,对应图5中的 0-1 线,称为 Rayleigh 线。

激光击穿工质产生的等离子体流场继续吸收激光能量,逐渐演化为激波流场,由激波理论可知,图5中的 0 和 1 两点同时还位于雨贡尼奥(Hugoniot)曲线 H 上。在功率密度为 I_0 的激光辐照作用下,假定靶蒸汽或者环境气体是理想气体,而且激光支持的爆轰波 LSDW 不改变工质的等熵指数 γ (文中所作的假设条件下,比热比和等熵指数相等^[13]),在能量守恒方程中加入单位质量工质吸收的激光能量 $I_0/\rho D$ (D 为 LSDW 的速度),忽略受扰工质的初始压力 p_0 和比内能 e_0 , 0 和 1 两个状态满足的力学守恒关系可以写为^[13]

$$\begin{cases} \rho_1 u_1 = \rho_0 D \\ p_1 + \rho_1 u_1^2 = \rho_0 D^2 \\ e_1 + p_1/\rho_1 + u_1^2/2 = D^2/2 + I_0/\rho_0 D \end{cases} \quad (11)$$

公式(11)中比内能 $e_1 = p_1/(\gamma - 1)\rho_1$, 消去 e, u, D 后

可以得出

$$p_1 = [2(1 - \frac{\rho_0}{\rho_1})]^{1/2} (\frac{\gamma+1}{\gamma-1} \frac{\rho_0}{\rho_1} - 1)^{-1} I_0 \rho_0^{1/2} J^{2/3} \quad (12)$$

也就是说, 由辐照激光功率密度 I_0 可以给出 1 点的压力 p_1 。图 6 给出了压力 p_1 随激光功率密度 I_0 (W/cm^2) 的变化关系 (ρ_0 取为 1 个标准大气压)。从图中可以看出, 随着辐照激光功率密度 I_0 的增加, 压力 p_1 单调增加。

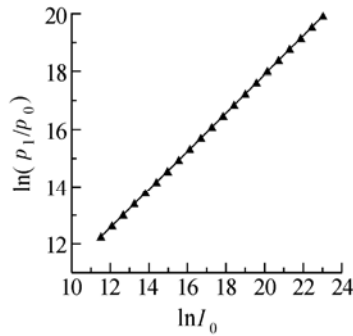


Fig 6 p_1/p_0 vs I_0

满足 C-J 条件的准静态平衡点对应于给定 I_0 之下的最低 LSD 速度, 该点对应的体积变化为^[13]

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{\gamma}{\gamma+1} \quad (13)$$

C-J 点对应于给定辐照激光功率密度之下的最低 LSD 速度, 由公式 (2) 分析可知, 也就是对应于激光推进中的最小比冲; 因为理论研究所作的近似和假设往往使得理论结果高于实验结果, 为了使得理论结果更接近实验结果, 后面的能量转化效率计算中, 体积变化取为公式 (13) 确定的数值大小。

(2) 推力形成过程: 状态 1 到状态 2 高温高压工质气流进入喷管, 实现等熵膨胀过程, 描述该过程的等熵方程为

$$p_2 V_2^\gamma = p_1 V_1^\gamma \quad (14)$$

其中 γ 为等熵指数, 与比热比相等。

(3) 补充工质的过程: 状态 2 到状态 0 气体降压后经历一个向环境等压放热的过程, 构成一个封闭的循环, 同时环境中的工质被补充到下一个循环过程中。

由热力循环过程中热效率的基本理论, 我们知道

$$\eta_L = \frac{2(\Delta - \Delta^{1/\gamma}) + (\gamma - 1)(\Delta - 1)(1 - V_0/V_1)}{2(\Delta - \Delta^{1/\gamma}) + (\gamma - 1)(\Delta - 1)(1 - V_0/V_1) + 2\gamma(\Delta^{1/\gamma} - V_0/V_1)} \quad (26)$$

从式 (26) 可以看出, 对于确定的工质而言, 激光推进能量转化效率 η_L 仅仅与降压比 Δ 和 V_0/V_1 有关, 其中, 降压比 Δ 对能量转化效率 η_L 的影响更为明显。

图 7 对比给出了激光推进 (水工质) 和液氢液氧

道, 激光推进的能量转化效率为

$$\eta_L = \frac{W}{Q_{\text{吸}}} = \frac{W}{W + Q_{\text{放}}} = \frac{1}{1 + Q_{\text{放}}/W} \quad (15)$$

在整个热力循环过程中, 系统做功为图 5 中 0、1、2 三点所围成的面积

$$W = \frac{p_1 V_1 - p_2 V_2}{\gamma - 1} - \frac{1}{2} (p_1 - p_0) (V_0 - V_1) \quad (16)$$

系统放出的热量为

$$Q_{\text{放}} = C_p (T_2 - T_0) \quad (17)$$

其中 C_p 为单位质量理想气体的定压热容

$$C_p = \frac{i+2}{2} \frac{R}{M} \quad (18)$$

其中, R 为摩尔气体常量, M 为工质的摩尔质量, i 为工质分子的自由度数, 它与 γ 的关系为

$$\gamma = \frac{i+2}{i} \quad (19)$$

将式 (19) 和式 (18) 带入式 (17), 再结合理想气体状态方程, 得出单位摩尔的工质与激光相互作用过程中, 系统放出的热量为

$$Q_{\text{放}} = \frac{\gamma}{\gamma-1} p_2 (V_2 - V_0) \quad (20)$$

因此

$$\frac{Q_{\text{放}}}{W} = \frac{\frac{\gamma}{\gamma-1} p_2 (V_2 - V_0)}{\frac{p_1 V_1 - p_2 V_2}{\gamma-1} - \frac{1}{2} (p_1 - p_0) (V_0 - V_1)} \quad (21)$$

令降压比为

$$p_1/p_2 = \Delta \quad (22)$$

由等熵方程 (14) 得

$$V_1/V_2 = \Delta^{-1/\gamma} \quad (23)$$

并有

$$\frac{V_0}{V_2} = \frac{V_0}{V_1} \cdot \frac{V_1}{V_2} = \Delta^{-1/\gamma} \cdot \frac{V_0}{V_1} \quad (24)$$

将式 (21) 的分子分母同除以 $p_2 V_2$, 再利用式 (22) ~ (24), 以及 $p_2 = p_0$, 得出

$$\frac{Q_{\text{放}}}{W} = \frac{2\gamma(\Delta^{1/\gamma} - V_0/V_1)}{2(\Delta - \Delta^{1/\gamma}) + (\gamma-1)(\Delta-1)(1-V_0/V_1)} \quad (25)$$

火箭发动机的能量转化效率随降压比的变化关系。激光推进能量转化效率的计算中, 取 C-J 点对应的体积变化作为参考, 也就是利用公式 (13), 得出 $V_0/V_1 = (1.17+1)/1.17 = 1.85$ 。

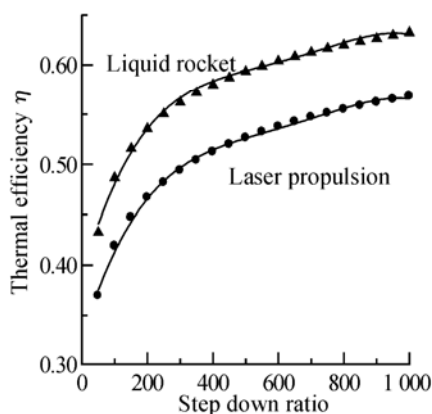


Fig 7 Comparison of internal efficiency of laser propulsion with that of liquid rocket

从图中可以看出,激光推进与化学火箭发动机相比较,在能量转化效率方面并没有优势。为了获得较高的激光推进性能参数,更好地满足航天任务的需求,还需要在工质的选择、设计和有效利用方面付出大量艰辛的努力。

4 提高激光推进性能的几种方法

4.1 掺杂金属粉末等材料

用金属粉末等材料进行掺杂,可以大大增加工质对激光的吸收系数,使得激光能量吸收过程从体吸收过渡为面吸收,使得单位质量工质沉积的激光能量获得较大提高,有效提高了激光能量的利用效率。

由公式(11)可知

$$p_1 \propto \frac{(\gamma - 1) Q}{\gamma} \frac{I_0}{QD} \quad (27)$$

由公式(27)可知,单位质量工质沉积激光能量(I_0/QD)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_1 线性增加,也就使得从状态0到状态1的热力学过程中,降压比 Δ 获得线性增加,热力循环过程由0-1-2-0变成了0-1'-2'-0',如图8所示。

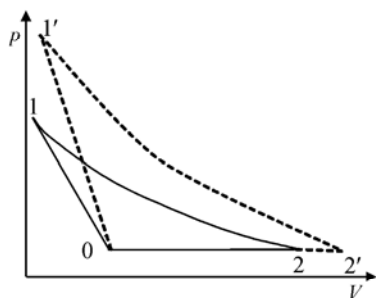


Fig 8 Effects of dopants on thermodynamic cycle of laser propulsion

图9给出了水工质($\gamma = 1.17$)中掺杂金属粉末等材料后,也就是降压比 Δ 获得较大提高之后的能

量转化效率曲线。

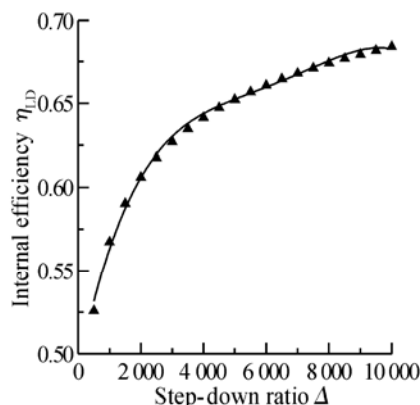


Fig 9 Effects of dopants on internal efficiency

从图中可以看出,掺杂材料的加入,使得能量转化效率获得了较大提高。当降压比由 $\Delta = 1000$ 增加到 $\Delta = 2000$ 时,能量转化效率由 $\eta_{LD} = 57\%$ 提高到了 $\eta_{LD} = 61\%$;当降压比增加到 $\Delta = 10000$ 时,能量转化效率提高到了 $\eta_{LD} = 68\%$ 。

4.2 选择含能材料

将含能材料用作工质,可以使激光推进过程除了利用激光能量之外,还利用了含能工质的分解放热。含能工质的分解放热使热力循环过程增加了一个化学能的注入过程。假设化学能的释放全部用于做功,使得循环过程中做功的增加量为 ΔW 。激光推进能量转化效率变为

$$\eta_{LE} = \frac{W + \Delta W}{Q_{吸}} = \frac{W + \Delta W}{W + Q_{放}} = \frac{1 + \Delta W/W}{1 + Q_{放}/W} \quad (28)$$

将式(28)与式(15)相比较,两式分母相同,式(28)的分子比式(15)多了 $\Delta W/W$ 项,定义

$$\Delta W/W = \Delta_2 \quad (29)$$

为做功比, Δ_2 表征着含能工质释放的化学能与注入激光能量的做功能力之比。含能工质对能量转化效率的影响归结为 Δ_2 对 η_L 的影响,结合式(26),在水工质中加入含能材料之后,计算得到的 $\eta_{LE} - \Delta_2$ 关系曲线如图10所示。

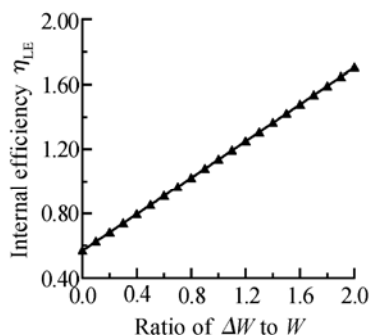


Fig 10 Effects of energetic materials on internal efficiency

从图中可以看出,当含能工质释放的化学能是注入激光能量做功能力的 0.1 倍时,能量转化效率从 $\eta_L = 57\%$ 提高到了 $\eta_{LE} = 62\%$,提高了 5% 左右。当含能工质释放的化学能是注入激光能量做功能力的 2 倍时,能量转化效率从 $\eta_L = 57\%$ 提高到了 $\eta_{LE} = 170\%$,能量转化效率的提高达到了 110% 左右。

以上分析结果表明,含能工质的加入可以极大地提高激光推进能量转化效率 η_L ,甚至可以使 η_{LE} 大于 1。学者们的实验研究结果已经在一定程度上证明了理论分析结果的合理性。文献 [14] 对含能工质的研究表明,比冲、冲量耦合系数、能量转化效率等推进性能参数都获得了极大提高,能量转化效率 η 的实验测量结果已经达到了 1.6。

4.3 液膜

另一种提高能量转化效率的有效方法是在金属等基底材料表面覆盖一层液膜,液膜的作用在于对烧蚀产生的高温高压气体起到了一种约束和二次反射作用,从而使得气体在等熵膨胀之前多了一个膨胀过程。我们将该过程近似为等压膨胀过程,则热力循环

过程变为图 11 所示的 0-1-3-2'-0 过程。

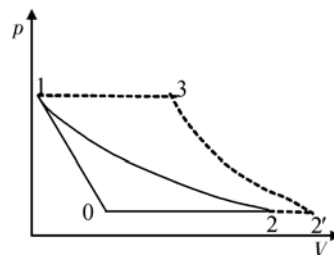


Fig 11 Effects of thin film on thermodynamic cycle of laser propulsion

该过程做功为图 11 中 0-1-3-2' (四点所围成的面积)

$$W = \frac{p_3 V_3 - p_{2'} V_{2'}}{\gamma - 1}$$

$$+ \frac{1}{2} (p_1 - p_0) (V_0 - V_1) + (p_3 - p_{2'}) (V_3 - V_0) \quad (30)$$

与 (20) 式的推导过程一样,我们可以得出

$$Q_{放} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} p_{2'} (V_{2'} - V_0) \quad (31)$$

所以

$$\frac{Q_{放}}{W} = \frac{\frac{\gamma}{\gamma - 1} p_{2'} (V_{2'} - V_0)}{\frac{p_3 V_3 - p_{2'} V_{2'}}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} (p_1 - p_0) (V_0 - V_1) + (p_3 - p_{2'}) (V_3 - V_0)} \quad (32)$$

该式分子分母同除以 $p_{2'} V_3$, 定义

$$\frac{V_3}{V_1} = \Delta_3 \quad (33)$$

为膨胀比,并利用关系式

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{2'} = p_0 \\ \frac{p_3}{p_{2'}} = \Delta \\ \frac{V_3}{V_{2'}} = \Delta^{-1/\gamma} \\ V_0 = 1.85 V_1 \end{array} \right. \quad (34)$$

得出

$$\frac{Q_{放}}{W} = \frac{2\gamma(\Delta^{1/\gamma} - 1.85/\Delta_3)}{2(\Delta - \Delta^{1/\gamma}) + (\gamma - 1)(\Delta - 1)(2 - 2.85/\Delta_3)} \quad (35)$$

$$\eta_{LF} = \frac{2(\Delta - \Delta^{1/\gamma}) + (\gamma - 1)(\Delta - 1)(2 - 2.85/\Delta_3)}{2(\Delta - \Delta^{1/\gamma}) + (\gamma - 1)(\Delta - 1)(2 - 2.85/\Delta_3) + 2\gamma(\Delta^{1/\gamma} - 1.85/\Delta_3)} \quad (36)$$

因此,液膜对能量转化效率的影响归结为膨胀比 Δ_3 对 η 的影响,水膜的 $\eta_{LF} - \Delta_3$ 曲线如图 12 所示。

从图中可以看出,能量转化效率 η_{LF} 随膨胀比 Δ_3 的升高而升高,当膨胀比从 $\Delta_3 = 1$ 增加到 $\Delta_3 = 2$ 时,能量转化效率从 $\eta_L = 57\%$ 提高到了 $\eta_{LF} = 61\%$,能量转化效率提高比较明显,提高了 4% 左右;膨胀比从 $\Delta_3 = 4$ 增加到 $\Delta_3 = 20$ 时,能量转化效率从 $\eta_{LF} = 63.4\%$ 提高到了 $\eta_{LF} = 64.9\%$,能量转化效率仅仅提高了 1.5% 左右。美国学者 Pakhomov 博士在 Derin 基底材料上覆盖水膜之后,能量转化效率达到了 25% 左右^[15],虽然由于理论分析中所作的简化和假设,使得理论研究结果偏高,但是实验数据和理论数据的定性分析结论是一致的,这就再次证明了我们给出的理想热力循环过程是合理的,理论分析结果是正确的。

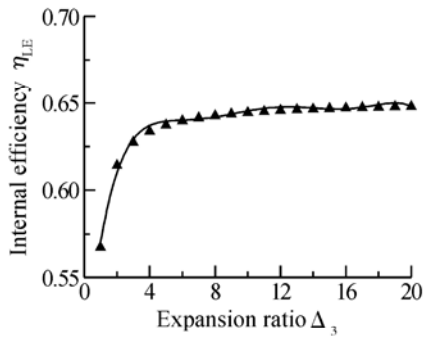


Fig 12 Effects of water films on internal efficiency

5 结 论

通过分析激光推进的理想热力循环过程, 作者认为, 提高凝聚态工质推进性能的根本途径在于努力提高单位质量工质的激光沉积能量, 将激光能量有效利用, 提高做功能力, 从而使得其比冲、冲量耦合系数、能量转化效率等推进性能参数获得较大提高。以此为理论指导, 设计出符合具体航天推进任务需求的工质材料。

定量研究结果表明, 液膜、掺杂材料和含能工质的激光推进性能参数有望获得较大提高。掺杂材料对于激光推进能量转化效率的提高效果比较明显; 含能工质对于能量转化效率的提高效果最为明显, 可以比较容易的将能量转化效率提高到 1 以上; 虽然液膜对于激光推进能量转化效率的提高有一定作用, 但是与其它两种方式相比较, 其能量转化效率的提高较小。

参考文献:

- [1] Yabe T, Phipps C, Aoki K, et al Laser driven vehicles from inner-space to outer-space[J]. *Applied Physics A*, 2004, 79: 243~ 249
- [2] Yabe T, Phipps C, Aoki K, et al Numerical and experimental investigation of laser propulsion[J]. *Applied Physics A*, 2004, 79: 829~ 831
- [3] Yabe T, Ohzono H, Ohkubo T, et al Proposal of liquid cannon target driven by fiber laser for micro-thruster in satellite[A]. *Second International Symposium on Beamed Energy Propulsion*[C], Japan, 2004, 503~ 512
- [4] 王 彬, 唐志平, 蔡 建, 等. 激光水推进的机理研究及参数优化[J]. *推进技术*, 2007, 28(5): 586~ 589 (WANG Bin, TANG Zhiping, CAI Jian, et al Mechanism for water-powered laser propulsion[J]. *Journal of propulsion Technology*, 2007, 28(5): 586~ 589)
- [5] Pakhamov A V, Gregory D A, Thompson M S Specific impulse and other characteristics of elementary propellants of ablative laser propulsion[J]. *AAA Journal*, 2002, 40(4): 947~ 952
- [6] Pakhamov A V, Jun L in Specific Impulse of Ablative Laser Propulsion[R]. *AAA* 2004-651
- [7] Pakhamov A V, Thompson M S, Gregory D A. Specific impulse study of ablative laser propulsion[J]. *AAA* 2001-3663
- [8] Thompson M S Time-of-flight study of elementary propellants for ablative laser propulsion[D]. *Huntsville, Alabama, America: The school of graduate studies of The university of Alabama in Huntsville*, 2004
- [9] Jun L in, Pakhamov A V, Thompson M S The study on plasma plume dynamics and specific impulse using ICCD imaging for laser propulsion[R]. *AAA* 2003-3863
- [10] Jun L in, Thompson M S, Pakhamov V. Ablative laser propulsion: Determination of specific impulse from plasma imaging[J]. *Proc of SPIE*, 2004, 5448: 465~ 476
- [11] G P 萨顿, O 比布拉兹. 火箭发动机基础[M]. 洪鑫, 张宝炯译. 北京: 科学出版社, 2003: 33~ 34
- [12] 冯 青, 李世武, 张 丽. 工程热力学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006: 301~ 302
- [13] 孙承伟, 陆启生, 范正修, 等. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 112~ 113
- [14] 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 (NAN Bao-jiang, ZHANG Gang-chui, WU Ping, et al Analysis of energy conversion eff of solid propellant for laser ablative propulsion[J]. *Journal of propulsion Technology*, 2007, 28(5): 478~ 480)
- [15] Sinko J, Pakhamov A V. Laser propulsion with liquid propellants Part II Thin films[A]. *Fifth International Symposium on Beamed Energy Propulsion*[C]. *America*, 2008, 209~ 221

(编辑: 张荣莉)