

# 环聚焦推进器聚焦点位置对激光推进性能的影响

党东明<sup>1</sup>, 彭冬梅<sup>2</sup>, 张婷婷<sup>3</sup>, 石磊<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 95215 部队, 广东 汕头 515049; 3. 西安卫星测控中心, 陕西 西安 710021)

**摘要:**针对进气口开放的环聚焦推进器,通过改变聚焦点的位置,数值模拟研究了推进器的推力、冲量耦合系数以及推进器整流罩承受的热冲击等问题。模拟结论表明聚焦点位置变化对激光推进性能有较大的影响,当聚焦点远离整流罩时,推进器获得推力的时间提前,冲量耦合系数增大,并且整流罩承受的热冲击降低。同时,模拟还表明在推进器构型设计中应该加大整流罩倾斜段的长度和倾斜角度,以限制逆流而上的冲击波冲出进气口,给推进器带来额外的阻力。

**关键词:**爆炸力学;激光推进;数值模拟;推进器

**中图分类号:** O381 **文献标识码:** A

## Influence of focus on propulsion performances of the ring focusing thruster

DANG Dong-ming<sup>1</sup>, PENG Dong-mei<sup>2</sup>, ZHANG Ting-ting<sup>3</sup>, SHI Lei<sup>1</sup>

(1. Institute of Telecommunication Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. 95215 Army, Shantou 515049, China; 3. Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** Aiming at open-inlet mode ring focusing thruster, issues including thrust, impulse coupling coefficient and thermal damage on the cowl are numerical simulating investigated by altering the focus location. The results indicate that the performance of thruster deeply depends on the focus location. When the focus is located far from the cowl, the thrust occurs earlier, the impulse coupling coefficient is larger and the thermal damage risk of the cowl is lower than those of laser focusing on the cowl. In addition, in order to prevent the shockwave rushing out of the inlet and inducing additional drag to the thruster, the length and inclination of cowl to the inflow should be steeper in design of the thruster.

**Key words:** mechanics of explosion; laser propulsion; numerical simulation; thruster

### 1 引言

自1972年Kantrowitz提出激光推进概念<sup>[1]</sup>以来,美、德、俄、日等国研究人员已经在激光推进器概念设计以及用缩比实验模型进行推进性能试验测试等方面做了大量卓有成效的工作<sup>[2-3]</sup>。Myrabo最早提出的环聚焦光船被认为是近期最有可能发射入轨的推进器,其设计的光船构型主要有进气口关闭和开放两种。NASA的Wang等人<sup>[4-5]</sup>对进气口关闭结构的光船进行了比较系统理论分析,建立了一套等离子体空气动力学模型来研究光船激光推进的性能,计算中假定临界状态等离子体对激光能量的吸收效率为40%,计算结果与Myrabo等人的实

验结果吻合较好。对于进气口开放结构的光船,东京大学Hiroshi等人<sup>[6]</sup>基于Navier-Stokes方程,在5 MHz超音速流情况下,数值模拟了光船内流场中压力波的传播过程,同时还发现聚焦点位置对光船冲量耦合系数有一定的影响。国内装备指挥技术学院、中国科技大学等单位<sup>[7-9]</sup>利用流体动力学模型数值模拟了推进器内等离子体流场的演化过程。本文针

**基金项目:**国家自然科学基金项目(No. 60678018);陕西省自然科学基金项目(No. 2009JQ8013)资助。

**作者简介:**党东明(1978-),男,硕士研究生,主要从事激光推进技术研究。

**收稿日期:**2009-08-26

对进气口开放式环聚焦推进器,采用有限体积法研究了聚焦点位置变化对推进器的推力和冲量耦合系数的影响,同时分析了整流罩承受的热冲击等问题。

### 2 环聚焦推进器结构

模拟采用的环聚焦推进器剖面结构及尺寸如图 1 所示,构型和 Myrabo 提出的进气口开放式光船相仿。推进器包括鼻形前体 (forebody)、抛物形后体 (afterbody) 和整流罩 (bowl)。在推进过程中大气自进气口进入推进器内,高能脉冲激光束被抛物形后体聚焦后,在整流罩内环形焦线上击穿空气,形成环状等离子体云团,等离子体继续吸收激光脉冲剩余的能量并膨胀,形成激光维持的爆轰波 (LSD) 或爆燃波 (LSC),当激光脉冲结束或其强度不能继续维持 LSD/LSC 时,LSD/LSC 将衰退为普通冲击波继续向外传播,撞击抛物形后体和整流罩后通过喷嘴膨胀扩散。冲击波对抛物面后体和整流罩的撞击产生对推进器的直接推力,而通过喷嘴的膨胀扩散则对推进器产生附加推进力。推进器体长和最大半径分别为 200 mm 和 67.5 mm,整流罩位于推进器肩部以上 12.5 mm 处,从  $z = 100$  mm 到  $z = 160$  mm 覆盖船体。抛物形后体将激光束聚焦在整流罩和后体之间的区域内,改变后体抛物面型可以改变焦点的具体位置。

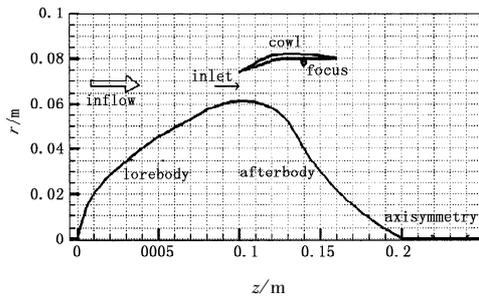


图 1 环聚焦推进器剖面结构及尺寸  
Fig.1 cutaway view and scale of the thruster

### 3 数值计算模型及网格

采用有限体积法在对称柱坐标系中数值求解 Navier-Stokes 方程:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial z} + \frac{\partial G}{\partial r} = \frac{\partial M}{\partial z} + \frac{\partial N}{\partial r} + S \quad (1)$$

其中:

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e_0 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (e_0 + p)u \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + P \\ (e_0 + P)v \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{zz} \\ \tau_{zr} \\ u\tau_{zz} + v\tau_{zr} - q_z \end{bmatrix}, N = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{rz} \\ \tau_{rr} \\ u\tau_{rz} + v\tau_{rr} - q_r \end{bmatrix}$$

$$S = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} -\rho v \\ -\rho uv + \tau_{zr} \\ -\rho v^2 + \tau_{rr} - \tau_{\theta\theta} \\ -(e_0 + p)v - q_r + u\tau_{zr} + v\tau_{rr} \end{bmatrix}$$

式中, $\rho, P, \tau$  和  $q$  分别为流体的密度、压强、黏性力张量和热通量; $u$  和  $v$  分别是速度分量; $z, r$  和  $\theta$  是柱坐标系参数,单元体积内的总能量定义为: $e_0 = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{\rho(u^2 + v^2)}{2}$ ,  $\gamma$  取 1.4。理想气体的状态方程为: $P = \rho RT$ , 气体常数  $R$  为 287 J/(K · kg)。尽管空气被击穿后温度达到 10000 K 以上,在整个计算过程中仍然假定气体为热理想气体。

在单脉冲激光作用时间内 LSD/LSC 的传播距离非常短,通常只有几毫米,相对于推进器的尺寸来说可以忽略不计,所以 LSD/LSC 衰退后的冲击波仍可以视为点爆炸过程。我们关心的是 LSD/LSC 波结束时的状态,并将此时的状态参数作为冲击波流场的初始参数。假设 LSD/LSC 波结束时的等离子体波前为以焦点为球心、半径为  $r$  的球面,将激光能量的吸收过程简化为该球面上的能量输入,并且假定被吸收的激光能量均匀分布在球体表面。当等离子体波前中电子密度达到阈值  $n = \frac{\epsilon_0 m_e \omega_L}{e^2}$  ( $\epsilon_0$  为介电常数,  $m_e$  为电子质量,  $\omega_L$  为激光辐射频率,  $e$  为电子电量)时,认为等离子体处于临界状态,此时激光不再能穿透等离子体区域,而是部分被反射或散射,部分被等离子体波前吸收。假定等离子体对激光能量的吸收效率  $\eta_{laser}$  为 40%。在激光能量的球面输入简化模型中,假定球表面上的激光强度就是空气的击穿阈值  $I_{th}$ ,球外区域不能被击穿,则该球形区域就是大气光学击穿区域(激光“点火”区域)。根据单脉冲激光能量  $E$ 、脉宽  $t_p$ 、等离子体对激光能量的吸收效率  $\eta_{laser}$  以及球表面的激光强度就可以确定击穿区域的大小。被吸收的激光能量在球表面均匀分布,故有:

$$4\pi r^2 \cdot I_{th} \cdot t_p = E\eta_{laser} \quad (2)$$

整理得:

$$r = \sqrt{\frac{E\eta_{laser}}{4\pi t_p I_{th}}} \quad (3)$$

整理得:

$$r = \sqrt{\frac{E\eta_{laser}}{4\pi t_p I_{th}}} \quad (3)$$

结合 LSD/LSC 的气体动力学模型<sup>[10]</sup> 可得到 LSD/LSC 波结束时等离子体波阵面上的密度、压强和温度,这些状态参数为接下来将要进行的冲击波流场模拟提供了初始条件。

计算域及网格如图 2 所示。为了使计算结果更

加接近真实情况,整个计算域是推进器尺寸的十倍以上。为了保证网格的精度同时避免划分网格的复杂性,将整个圆形计算域划分为若干子域,对各子域分别进行网格划分。网格在推进器的前体周围加密以清楚地捕捉到流场在此处的变化情况,在整流罩和推进器后体之间加密以捕捉到空气击穿后冲击波的传播过程。

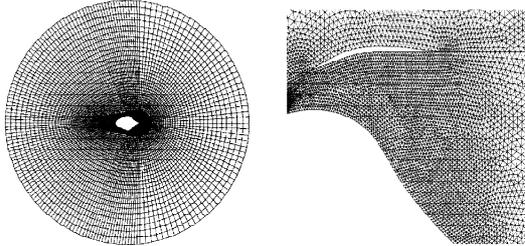


图2 计算域及网格

Fig. 2 computational zone and grid

#### 4 模拟结果与分析

美国和德国联合对 Myrabo 设计的光船进行了详细的性能测试实验<sup>[3]</sup>,本文主要的模拟参数与其实验参数一致。采用  $10.6\ \mu\text{m}$  的  $\text{CO}_2$  脉冲激光,脉冲宽度为  $12\ \mu\text{s}$ ,单脉冲激光能量设为  $200\ \text{J}$ 。自由来流速度为  $0.6$  马赫( $1$  马赫 =  $1126\ \text{km/h}$ ),流场密度为  $1.225\ \text{kg/m}^3$ ,流场温度为  $288\ \text{K}$ 。

为了探讨激光聚焦点在流场中位置变化对推进的影响,模拟中分别设定聚焦点位于整流罩附近(如图3(a)所示, $z = 140\ \text{mm}$ , $r = 79\ \text{mm}$ ),推进器后体与整流罩中间位置(如图3(b)所示, $z = 140\ \text{mm}$ , $r = 65\ \text{mm}$ ),聚焦点位置变化必然是由推进器后体面型变化引起的,但模拟中我们忽略了后体面型的变化。 $t = 1\ \mu\text{s}$ 时,激光击穿空气形成一个半径为  $2.3\ \text{mm}$  大小的击穿区域,击穿区域的压强最大达到  $50$  个大气压,被冲击波包围区域内的物理特性分布类似于一个点源的自相似解。当焦点位于整流罩附近时,等离子体冲击波被整流罩内表面反射,击穿区域如半圆状。当焦点位于推进器后体与整流罩中间位置时,由于失去整流罩的约束作用,击穿区域呈圆形,受进气流的影响,击穿区域略向下漂移。



(a) 聚焦点在整流罩附近 (b) 聚焦点在后体与整流罩中间  
(a) focus is on the cowl (b) focus is at the middle point

图3 聚焦位置( $t = 1\ \mu\text{s}$ )

Fig. 3 focus locations ( $t = 1\ \mu\text{s}$ )

图4为不同焦点位置时推进器获得的推力随时间的变化曲线。推进器获得的推力包括外部环境气流阻力和内部等离子体冲击波产生的推力两部分。在激光束聚焦后刚开始的几微秒时间内,由于等离子体冲击波没有和推进器发生有效耦合作用,推进器获得的推力维持环境气流稳态阻力  $-265\ \text{N}$  不变。图5为不同聚焦点位置时推进器内等离子体冲击波在典型时刻的压强等值线。

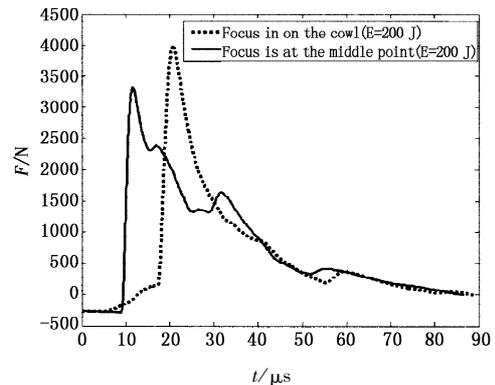


图4 两种不同焦点位置时推进器获得的推力随时间的变化曲线

Fig. 4 curves of thrust for two different focus locations

聚焦点位于流场中间位置时产生推力的时间更早。当聚焦点位于整流罩附近时,在  $t = 12.7\ \mu\text{s}$  时总推力值变为正值;而聚焦点位于推进器后体与整流罩中间时,在  $t = 8\ \mu\text{s}$  时就产生了有效推力,产生推力的时间提前了近  $10\ \mu\text{s}$ 。这是由于当焦点位于整流罩附近时,击穿区域位于整流罩的平行段,不能产生轴向推力,而焦点位于流场中间时冲击波更早撞击光船后体产生有效推力。

聚焦点位于流场中间时推进器获得的总冲量更大。当焦点位于整流罩附近时,推进器在  $t = 20.8\ \mu\text{s}$  时获得  $4001\ \text{N}$  的峰值推力,此时冲击波不仅扫过光船后体主要部分,而且抵达整流罩倾斜段(有效推力作用部分),峰值推力的出现是冲击波和推进器后体、整流罩倾斜段共同作用的结果,所以峰值推力更大。焦点位于流场中间时,峰值推力出现在  $t = 11.7\ \mu\text{s}$ ,此时冲击波撞击光船后体,但冲击波的另一侧还处于整流罩的平行段,没有产生有效推力,所以总推力不如焦点位于整流罩附近时大。但是由于焦点位于流场中间时,推力产生的时间更早,推力曲线衰减缓慢,有效推力持续时间更长,所以推进器获得的总冲量更大。

从图5还可以发现,在两种不同聚焦点位置时,上行冲击波均冲出了进气口,在推进器前体和整流罩倾斜段外侧施压,给推进器带来阻力。因此,在实

际激光推进中,推进器结构还要进一步优化,整流罩倾斜段应该加长,倾斜角度应该加大,以阻止逆流而

上的冲击波冲出进气口,从而限制冲击波给推进器带来的附加阻力。

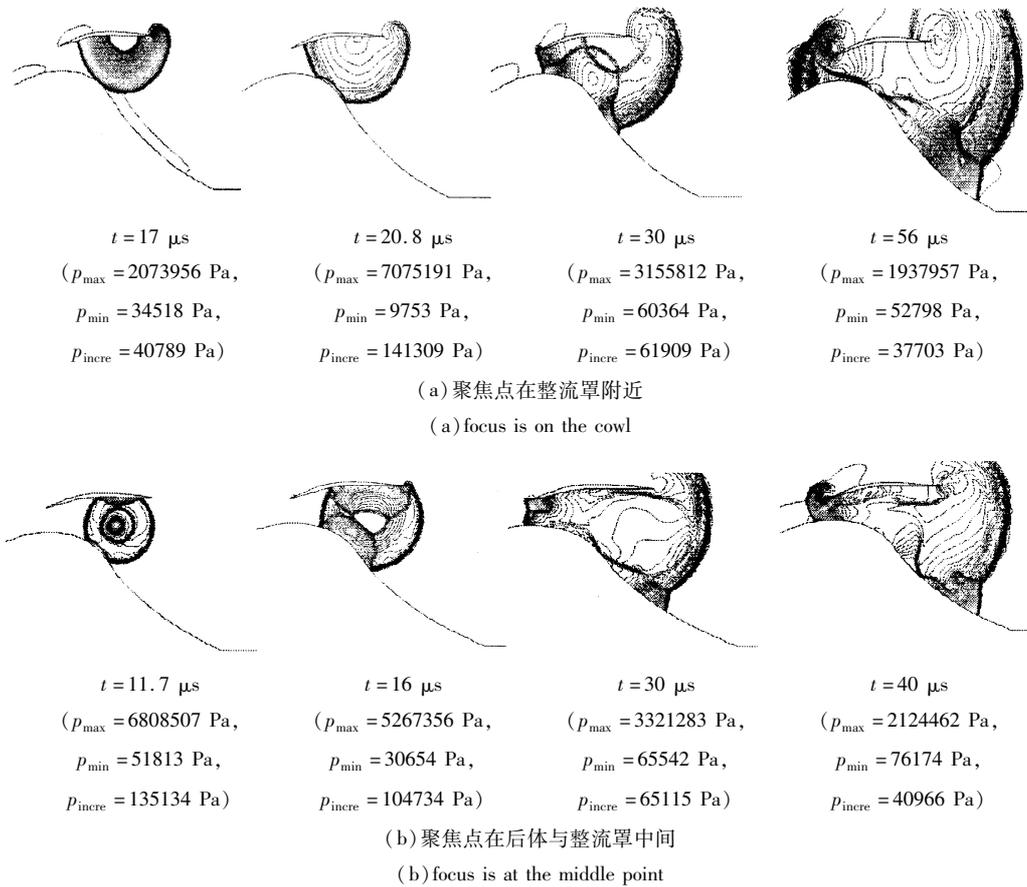


图5 不同聚焦点位置时推进器内等离子体冲击波在典型时刻的压强等值线

Fig. 5 pressurte contours of disserent focus locations

冲量耦合系数  $C_m$  是表征激光推进性能的重要参数,定义为推进器获得的总冲量(推力对时间的积分)与入射脉冲激光能量的比值,它体现了激光能量转化为推进器有效动力的效率。图6将两种不

果与美国光船的实验结果进行了比较。该实验采用德国航空航天局技术物理研究所提供的稳态腔结构的电子束  $CO_2$  脉冲激光器,聚焦点位于整流罩附近,环聚焦线上没有添加聚甲醛树脂作预电离。从图中我们发现,冲量耦合系数对聚焦位置比较敏感。当聚焦点位于整流罩和推进器后体中间时,冲量耦合系数明显比聚焦点位于整流罩附近时高,其原因是“击穿”区域距离主推力壁面(推进器后体)更近,冲击波抵达壁面时强度和速度更大。本文模拟所得的冲量耦合系数随脉冲能量的变化趋势同美国光船实验结果是一致的,当脉冲能量在 200 ~ 300 J 之间时,冲量耦合系数达到最佳,当脉冲能量大于 300 J 时,冲量耦合效率开始缓慢下降。模拟结果和美国光船实验结果处于同一数量级,但是高于实验结果,分析其原因可能是在计算模型中我们忽略了空气击穿产生等离子体以及 LSD/LSC 传播过程中的复杂化学反应;另外,在计算中假设等离子体对激光脉冲能量的吸收效率为 40% 也有可能高于实际效率。

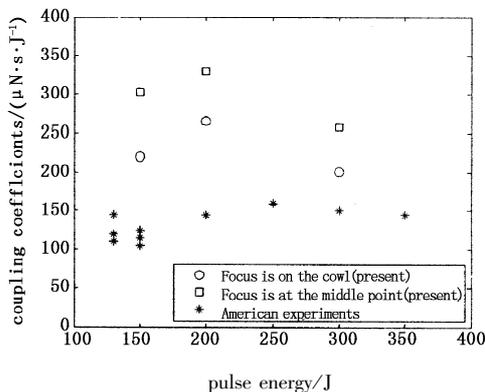
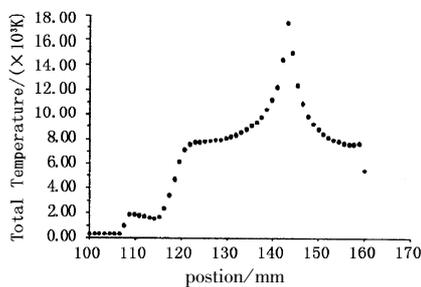


图6 两种不同聚焦位置情况下激光推进冲量耦合系数与脉冲能量的关系

Fig. 6 relation between impulse coupling coefficients and pulse energy

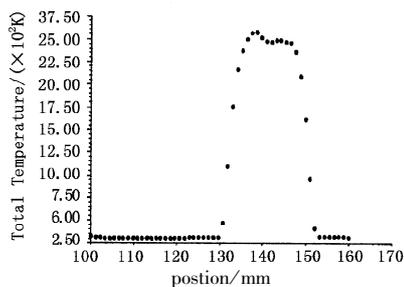
同聚焦位置情况下激光推进冲量耦合系数的模拟结

另外一个需要考虑的重要问题是整流罩所受到的热冲击。在模拟中我们监测了整流罩内侧温度的分布情况(如图7所示)。当聚焦点位于整流罩附近时,整流罩内侧的温度峰值和推进器推力峰值同时在 $t = 20.8 \mu\text{s}$ 时出现,整流罩经受的峰值温度达到17000 K,由于受进气流的影响,高温点不在聚焦点(140,79)上,而是向下漂移到(145,79)处。当聚焦点位于推进器后体与整流罩中间位置时,整流罩经受的最高温度出现在 $t = 10 \mu\text{s}$ 时,由于击穿区域距离整流罩有一定的距离,冲击波传播到整流罩时,强度和温度已经极大地衰弱了,而且由于冲击波波前半径扩大,热量分布在整流罩135~150 mm这一长段范围,温度峰值也只有2600 K。因此,从降低整流罩承受的热冲击上考虑,聚焦点位于流场中间时更加有优势。激光推进器不仅要选取耐超高温的材料,而且在结构设计中要考虑激光束聚焦点的位置,适当远离整流罩是十分必要的。



(a) 聚焦点在整流罩附近( $t = 20.8 \mu\text{s}$ )

(a) focus is on the cowl( $t = 20.8 \mu\text{s}$ )



(b) 聚焦点在后体与整流罩中间( $t = 10 \mu\text{s}$ )

(b) focus is at the middle point( $t = 10 \mu\text{s}$ )

图7 整流罩内侧温度分布情况

Fig.7 temperature distribution of inboard cowl at peak value thrust

## 5 结论

通过比较分析推进器的推力、冲量耦合系数以及整流罩承受的热冲击,研究了环聚焦推进器聚焦点位置变化对激光推进性能的影响。当聚焦点位于整流罩和光船后体中间时,推力产生的时间比聚焦点位于整流罩附近时提前了近 $10 \mu\text{s}$ ,冲量耦合系数

也明显高于后者;当聚焦点位于整流罩附近时,整流罩经受的峰值温度达到17000 K,而当聚焦点位于整流罩和推进器后体中间时,温度峰值只有2600 K,因此,从降低整流罩承受的热冲击上考虑,聚焦点位于流场中间时也更加有优势。同时认为在推进器构型设计中还应该加大整流罩倾斜段的长度和倾斜角度,以限制逆流而上的冲击波冲出进气口,给推进器带来额外的阻力。

由于推进器整流罩和后体之间的内流场区域非常小,我们只选择了两个比较典型的位置进行比较分析,从模拟结果来看,激光束聚焦点远离整流罩更好,但在实际应用中不得不考虑推进器后体的光洁度等因素,聚焦点不能离其太近,所以我们没有模拟聚焦点更加靠近光船后体时的情况。

## 参考文献:

- [1] Kantrowitz A. Propulsion to orbit by ground-based lasers [J]. *Astronautics and Aeronautics*, 1972, 10 (5): 74-76.
- [2] Myrabo L N, Messitt D G, Mead F B Jr. Ground and flight tests of a laser propelled vehicle [J]. *AIAA paper*, 98-1001, 1998, 1001:1-10.
- [3] Schall W O, Eckel H-A, Mayerhofer W, et al. Comparative lightcraft impulse measurements [C]. *Proc. Of SPIE*, 2002, 4760:908-917.
- [4] Wang T S, Chen Y S, Liu J, et al. Advanced performance modeling of experimental laser lightcrafts [J]. *AIAA paper*, 2001-0648, 2001, A01-16501:1-11.
- [5] Wang T S, Robert R. Thermophysics characterization of multiply ionized air plasma absorption of laser radiation for airbreathing laser propulsion [C]//33rd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference 20-23 May 2002, Maui, Hawaii, AIAA, 2002-2203.
- [6] Hiroshi Katsurayama, Kimiya Komurasaki, Yoshihiro Arakawa. Numerical analyses on pressure wave propagation in repetitive pulse laser propulsion [J]. *AIAA paper*, 2001-3665, 2001, A01-34350:1-9.
- [7] 李倩, 洪延姬, 曹正蕊. 吸气式激光推进推力产生机理的数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(6):550-555.
- [8] 龚平, 唐志平. 大气呼吸模式激光推进的机理分析及数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23(6):501-508.
- [9] 石磊, 赵尚弘, 周万银, 等. 大气呼吸模式激光推进数值分析 [J]. *中国激光*, 2008, 35(1):49-54.
- [10] 孙承纬. 激光辐照效应 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002:112-120.