

文章编号: 1000-6893(2005)01-0013-05

# 大气吸气模式激光推进的实验研究

唐志平<sup>1</sup>, 龚平<sup>1</sup>, 胡晓军<sup>1</sup>, 蔡健<sup>1</sup>, 谭荣清<sup>2</sup>, 吕岩<sup>2</sup>

- (1. 中国科学技术大学 力学与机械工程系, 中科院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽 合肥 230026)  
(2. 中国科学院电子学研究所 高功率激光技术部, 北京 100080)

## Experimental Investigation on Air-Breathing Mode of Laser Propulsion

TANG Zhi-ping<sup>1</sup>, GONG Ping<sup>1</sup>, HU Xiao-jun<sup>1</sup>, CAI Jian<sup>1</sup>, TAN Rong-qing<sup>2</sup>, LU Yan<sup>2</sup>

- (1. Key Lab for Mechanical Behavior and Design of Materials, CAS, Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei, China 230026)  
(2. Department of High Power Lasers, Electronics Research Institute, CAS, Beijing, China 100080)

**摘要:** 激光推进是一种新概念推进技术, 在未来航天事业中将有重要的应用前景。利用高重复频率高功率 TEA-CO<sub>2</sub> 脉冲激光器进行了抛物形飞行器的水平和垂直激光推进实验, 实现了大气模式的激光垂直推进, 飞行高度超过了 1m。实验测定了多种工作状况下光脉冲能量转变为飞行器动量的推进效能, 测得的光能-冲量耦合系数  $C_m$  达到 27.7 dyne·s/J, 与国外文献报道相当。

**关键词:** 航空、航天推进系统; 激光推进; TEA-CO<sub>2</sub> 激光器; 大气吸气模式; 冲量耦合系数

**中图分类号:** V439+.3 **文献标识码:** A

**Abstract:** The recent progress in the authors experimental investigation on air-breathing mode of laser propulsion are reported. With a high power TEA-CO<sub>2</sub> pulsed laser, both horizontal and vertical propulsion experiments are conducted. The energy of each pulse is about 18.58J. The frequency can be adjusted from 20 to 180Hz. Several parabolic reflectors of aluminum alloy with different focuses  $f$  are used in the experiments. A high speed CCD camera is applied to record the movement variables of the reflectors. For single pulse experiments, the measured momentum coupling coefficients  $C_m$  are 27.7 dyne·s/J for  $f = 10\text{mm}$  and 22.82 dyne·s/J for  $f = 15\text{mm}$ . For multi-pulse experiments (frequency 50Hz, work time 0.5s), the horizontal propulsion distance is greater than 1.5m, and the vertical propulsion height exceeds 1m.

**Key words:** aeroastro-propulsion system; laser propulsion; TEA-CO<sub>2</sub> pulsed laser; air-breathing mode; momentum coupling coefficient

传统的卫星发射, 需要大型的化学运载火箭, 其中推进剂占了很大的比例。人们一直在探索各种新的推进原理以取代传统发射方式。1972 年, Kantrowitz<sup>[1]</sup> 首先提出利用地基激光器将空间飞行器送入近地轨道的设想, 从而开创了激光推进研究的新领域。1985 年, Myrabo 等<sup>[2]</sup> 提出利用“大气吸气模式”(air-breathing mode) 穿越大气层的特殊飞行器构型, 并称之为“光船”(lightcraft)。该模式采用抛物面反射罩会聚入射激光, 在焦点处击穿空气, 形成的高温高压等离子气流由罩口喷出产生反推力。由于利用空气作为工作介质, 飞船本身在穿越大气时不消耗自身质量, 从而大大提高飞船的有效载荷比。2000 年 10 月, Myrabo 等人利用这种模式, 在美国新墨西哥州白

沙导弹靶场的场地试验中已将 51g 重的碟形飞行器垂直推进至 71m 高度<sup>[3]</sup>。国内研究起步较晚。华中科技大学许得胜等<sup>[4]</sup>, 中科院物理所张杰等<sup>[5]</sup>, 哈尔滨工业大学王骥等<sup>[6]</sup>, 中科院电子所柯常军等<sup>[7]</sup>, 傅恩生<sup>[8]</sup> 等, 曾分别对激光推进的原理和进展进行过评述。中国工程物理研究孙承纬<sup>[9]</sup> 较详细地分析了大气吸气模式的空气等离子体点爆炸驱动原理。2000 年以来, 装备指挥技术学院<sup>[10]</sup>, 华中科技大学<sup>[11]</sup> 和中国科技大学等单位在国内率先开展了激光推进的理论和实验研究, 其中中国科技大学<sup>[12]</sup> 应用“火箭烧蚀模式”(ablation mode) 实现了 5.87g 铝弹丸的单脉冲激光垂直发射, 高度达 1.48m。最近, 龚平等<sup>[13, 14]</sup> 对大气模式推进机理进行了初步的数值模拟和实验研究, 给出了反射罩的形状和张角对于推进效能的影响关系。本文主要从实验上研究各种参数对大气吸气模式推进性能的影响, 发现新现象, 以

收稿日期: 2003-10-24; 修订日期: 2004-07-11  
基金项目: 国家 973 计划资助项目

期为进一步建模和数值模拟提供依据。

## 1 实验装置及飞行器

(1) 试验装置 图1、图2分别是垂直和水平推进实验装置示意图。激光器是中科院电子所高重复频率高功率 TEA-CO<sub>2</sub> 脉冲激光器(图3)。最高平均功率约3kW;单脉冲运行时脉冲能量约为20J;脉宽约1 $\mu$ s;波长10.6 $\mu$ m;最高重复频率180Hz。图4为典型激光脉冲波形。输出光斑为50mm $\times$ 35mm矩形。利用 SPEEDCAM PRO-LT 型高速 CCD 相机记录实验过程并判读运动速度,实验中拍摄频率1000f/s。水平推进采用气垫导轨,长1.5m。垂直试验采用双玻璃立杆和飞行器挂线方法。单脉冲实验脉冲能量为15.3J;多脉冲实验脉冲能量为18.6J,重复频率50Hz,工作时间0.5s,约25~30个脉冲。

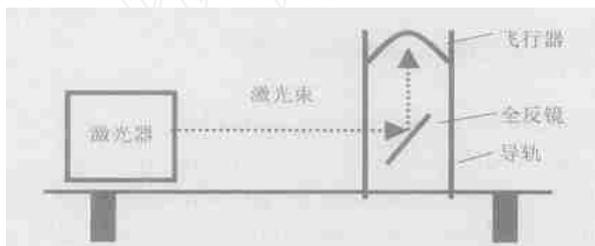


图1 垂直推进试验装置示意图

Fig. 1 Schematic for the vertical propulsion test devices

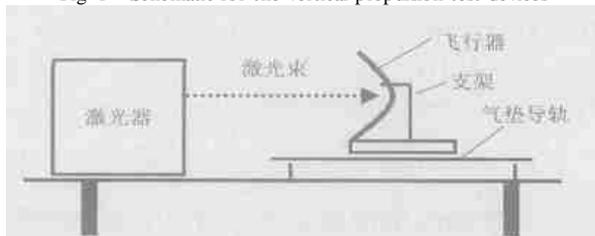


图2 水平推进试验装置示意图

Fig. 2 Schematic for the horizontal propulsion test devices



图3 3kW TEA-CO<sub>2</sub> 脉冲激光器

Fig. 3 3kW TEA-CO<sub>2</sub> pulsed laser

(2) 飞行器 抛物面形飞行器由铝合金经数控机床精密车削成型并研磨,经测定内表面反射系数大于0.9。垂直推进实验中的抛物形飞行器

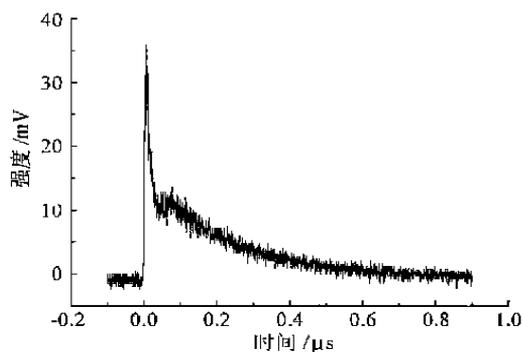


图4 典型激光脉冲波形

Fig. 4 Typical record of laser pulse

有2种型号,A:焦距10mm,罩口直径50mm,质量2.75g;B:焦距15mm,罩口直径65mm,质量7.4g。水平推进飞行器也有2种型号,C:焦距10mm,罩口直径65mm,质量16.3g;D:焦距15mm,罩口直径65mm,质量8.5g。抛物面罩固定在气垫滑块上,连同滑块质量C质量为192g,D质量为174g。

## 2 实验结果及分析

### (1) 水平推进实验

对两种构型的飞行器C和D分别进行了单脉冲和连续脉冲的水平推进实验。为检验实验的重复性,每种实验分别重复2~3次。图5是飞行器D的水平多脉冲推进实验中初始时刻和脉冲结束时记录的几幅图,在29个激光脉冲结束时飞行器移动约11cm,获得了0.39m/s的速度,移动总距离大于150cm(在导轨另一端弹回)。实验数据见表1,其中冲量耦合系数 $C_m$ 定义为飞行器获得的冲量与输入激光能量之比,它是衡量推进性能的主要参数之一。由于罩内表面反射系数约为0.9,到达焦点的光能应小于入射光能,但我们在计算 $C_m$ 时仍按入射总能量计算。从表中数据看,重复性还是比较好的,误差主要来自激光脉冲的能量误差和飞行器位置判读误差,引起的 $C_m$ 误差约为7%。表1数据表明飞行器C的冲量耦合系数高于飞行器D,这反映了抛物面的形状(这里主要是焦距深浅,因为两者罩口直径相同)对 $C_m$ 的影响,即等离子体爆炸点距抛物面罩顶点近,产生的冲量耦合高,这一点与文献[15]是一致的。数据还显示,对同一飞行器而言,单脉冲获得的 $C_m$ 高于多脉冲。对C型飞行器,多脉冲时 $C_m$ 降低29.4%,对D型飞行器, $C_m$ 降低达41.6%。这说明在多脉冲情况下,随飞行器速度的增加,前一个激光脉冲产生的非定常等离子体

表 1 水平推进实验数据表

Table 1 Experimental data of the horizontal propulsion

水平推进		移动距离 /cm	获得速度 /(m·s <sup>-1</sup> )	获得动量 /(10 <sup>-3</sup> N·s)	冲量耦合系数/(dyne·s·J <sup>-1</sup> )	
					单次	平均
飞行器 C	单脉冲	> 10	0.021	4.032	26.44	27.7
		> 10	0.023	4.416	28.96	
	多脉冲 (28 个)	> 150	0.56	107.52	20.67	19.56
		> 150	0.50	96	18.45	
飞行器 D	单脉冲	> 10	0.02	3.48	22.82	22.82
		> 10	0.02	3.48	22.82	
	多脉冲 (29 个)	> 150	0.395	68.73	12.76	12.36
		> 150	0.37	64.38	11.95	

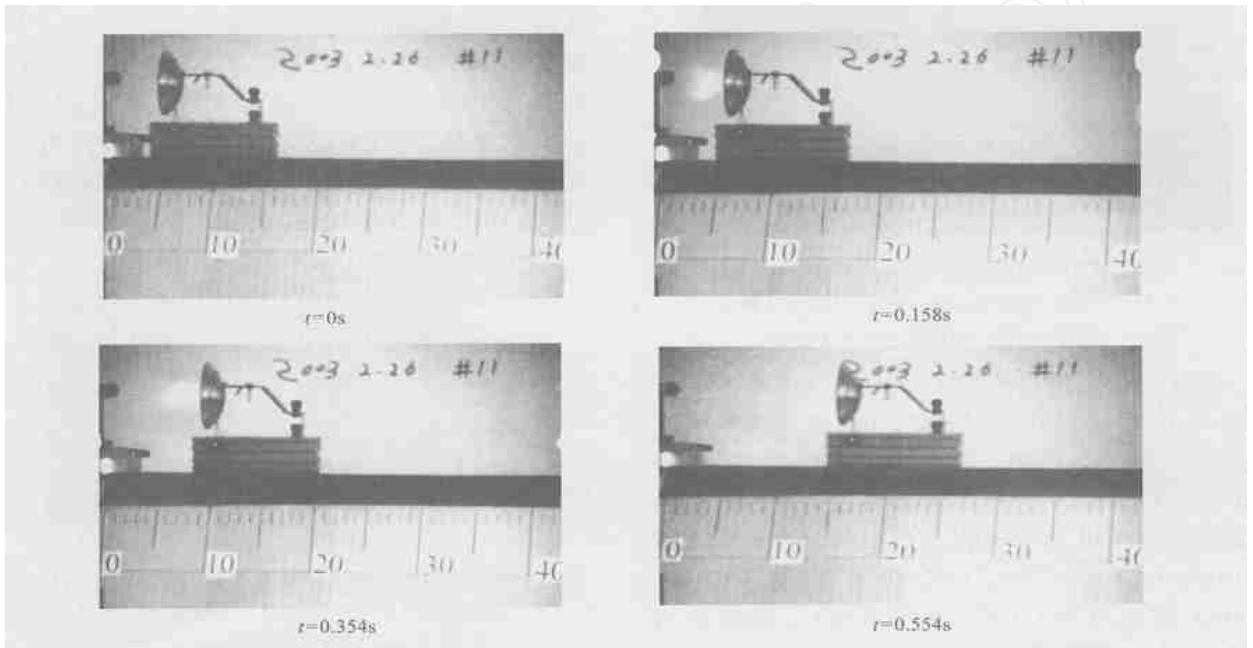


图 5 飞行器 D 的水平多脉冲推进试验

Fig. 5 High speed CCD records for multi-pulsed horizontal test of type D

流场对后续激光脉冲的物理、力学效应存在作用和影响,这将影响激光推进的整体推进性能,对其机理的研究将是激光推进研究中新的不可回避的重要课题。

(2) 垂直推进实验

同样,对两种构型的飞行器 A 和 B 分别进行了单脉冲和连续脉冲的垂直推进实验。图 6 是构型 A 的单脉冲垂直自由飞行试验记录,升高达 12cm,图中飞行器所在的位置对应不同的记录时刻,是从 1000f/s 记录中取出合成的。图中可见接近最高点时姿态已发生偏斜。在多脉冲自由垂直推进时,姿态偏转问题更为严重,如 B 型飞行器仅经历 4 个脉冲就开始偏转,在 6 个脉冲时完全翻转。为保持姿态基本稳定,在飞行器 A 的多脉冲实验中竖立两根玻璃导杆,飞行器通过铁丝横跨在导杆中间,使飞行器不致翻转。加上铁

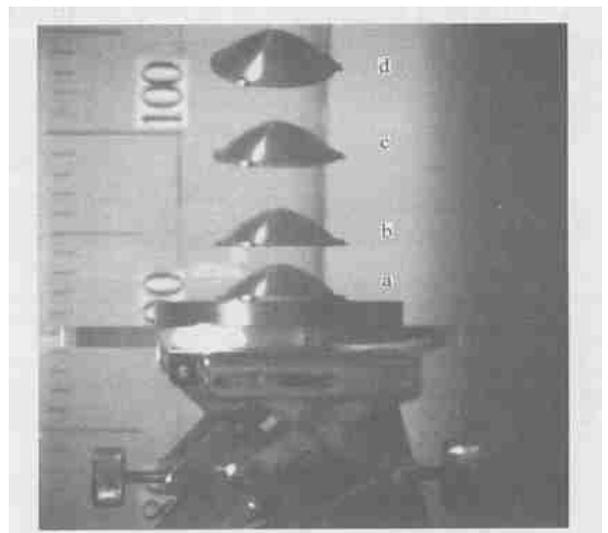


图 6 飞行器 A 单脉冲垂直推进实验  
a:0 时刻, b:0.016s, c:0.048s, d:0.097s

Fig. 6 CCD record of type A for single pulse vertical test  
丝后飞行器 A 的质量达到 4.6g。图 7 是飞行器

A 的多脉冲垂直推进试验记录,也是从 1000f/s 高速 CCD 记录中合成的。高速 CCD 记录表明在 16 个脉冲作用下飞行器已飞出相机视野(高约 60cm)。摄像机记录表明最大升高已超过 1m。

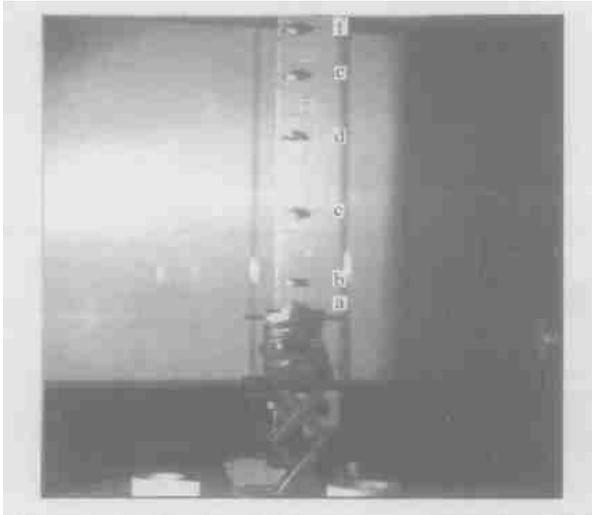


图7 飞行器 A 的多脉冲垂直实验 a:0 秒, b:0.054 秒, c:0.139 秒, d:0.218 秒, e:0.264 秒, f:0.301 秒

Fig. 7 Multi-pulse vertical test of type A

表 2 是垂直推进实验的数据。从单脉冲实验来看,飞行器 A 得到的  $C_m$  大于 B,这与水平推进试验结果是相吻合的。从  $C_m$  的平均值看,两种焦距的飞行器的水平和垂直推进的单脉冲结果在实验误差范围内非常吻合,对 A、C 型罩(焦距同为 10mm),误差仅为 0.6%,对 B、D 型罩(焦距 15mm),误差约为 1.6%。 $C$  型罩的  $C_m$  略高于 A 型罩,两者虽然焦距一样,但 C 型飞行器的罩口半径大于 A 型罩,这与文献[13,15]的计算是相符的。但多脉冲垂直推进实验测得的  $C_m$  明显偏低,而且不稳定。由于垂直推进时飞行姿态不稳定,部分激光能量可能泄漏口外,同时单层铁丝刚

表 2 垂直推进实验数据表

Table 2 Experimental data for vertical propulsion

垂直推进	上升距离 /cm	获得速度 <sup>a</sup> /( $m \cdot s^{-1}$ )	获得动量 /( $10^{-3} N \cdot s$ )	冲量耦合系数/( $dyne \cdot s \cdot J^{-1}$ )		
				单次	平均	
飞行器 A	单脉冲	12.	1.534	4.217	27.66	27.52
		4.2 <sup>b</sup>	0.907	4.174	27.37	
	多脉冲 <sup>c</sup>	17 个	>50	1.602	7.37	2.33
	16 个	>70	2.8	12.88	4.33	
飞行器 B	单脉冲	1.10	0.464	3.44	22.56	22.56
		1.08	0.460	3.41	22.36	
		1.12	0.469	3.47	22.75	
	多脉冲(6 个)	7				e
	8.5					

注:a.在 CCD 记录画面内获得的最高速度;b.加上铁丝后,飞行器质量增为 4.6g;c.脉冲数目为飞行器仍在 CCD 记录画面内所统计的;d.由于飞行器姿态不稳造成  $C_m$  大大下降,e.飞行器 B 自由飞行 6 个脉冲后完全偏转,难以精确计算最终速度。

度不够导致和导杆之间强烈摩擦等,可能是  $C_m$  比单脉冲实验中的低很多的原因,因此姿态保持将是垂直推进试验中主要待解决的问题。

图 8 是本文测定的  $C_m$  与德国 Schall 等<sup>[16]</sup>实验值的比较,可见是基本相当的。通过表 1、表 2 中测定的动量,计及激光脉宽( $1\mu s$ )和频率(50Hz),可求出激光脉冲产生的瞬态和平均推力,进而求得瞬态和平均推重比。以 A 型罩单脉冲自由垂直推进为例,可得其瞬时平均推力(脉宽内)约为  $4.2 \times 10^3 N$ ,获得的瞬时加速度与重力加速度之比(即瞬时推重比)高达  $1.5 \times 10^5$ 。不过,如按 50Hz 来平均,则平均推力约为 0.21N,平均推重比约为 7.5,与传统火箭相当。上述分析仅给出量级估计,实际上,在一个光脉冲结束后,高温等离子流场与飞行器的相互作用仍能维持一定时间,因此瞬态平均值应低一些。不过激光作用

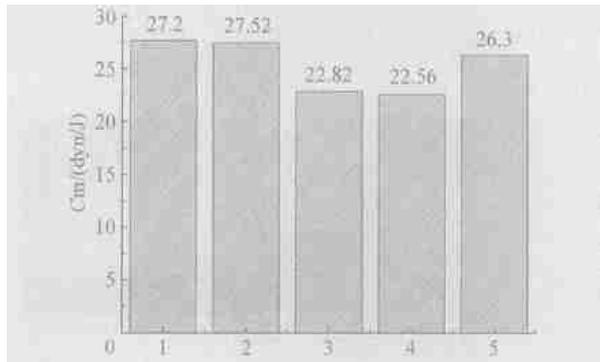


图 8 本文实验测定的冲量耦合系数与文献[16]的比较 1 - 飞行器 C, 2 - 飞行器 A, 3 - 飞行器 D, 4 - 飞行器 C, 5 - 文献[9,16] (飞行器质量 22g, 脉冲能量 200J)

Fig. 8 Comparison of  $C_m$  of this study with  $C_m$  of Schall *et al*<sup>[16]</sup>. 1 - Reflector type C (single pulse), 2 - type A (single pulse), 3 - type D (multi-pulse), 4 - type C (multi-pulse), 5 - Ref. [9,16] (weight 22g and pulse energy 200J)

下的等离子体流场可能产生激光支持的爆轰波(LSD)或爆燃波(LSC),流场以及与飞行器的相互作用是极端非定常的,飞行器壁面可能受到更强烈的瞬态冲击作用;此外还有温升影响(吸热和高温气流传热),未来的“光船”应具有足够的热、力冲击强度。

### 3 结 论

实验结果表明,罩口直径相同的情况下,焦距小的  $C_m$  较大;对于相同焦距的抛物面罩,则罩口大的  $C_m$  较大。结果还表明,单脉冲条件下的  $C_m$  高于多脉冲,这一点很重要,因为激光推进应用必然是多脉冲的。目前的理论和数值研究大都限于单脉冲和飞行器固定状态,对多脉冲作用的机理尚须作深入的研究。

在实验中飞行姿态不稳定以及挂线和导杆的牵连作用使得多脉冲垂直推进试验中的  $C_m$  有很大损失,在进一步实验研究中必须加以克服。推进中反射罩将经历反复的强热力冲击载荷,其破坏机理和防护也是需要研究的课题。

### 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, Ing D. The future of flight [M]. New York: Baen Books, 1985.
- [3] Myrabo L N. Brief history of the lightcraft technology demonstrator (LTD) project [A]. In: Pakhomov A V ed. Proceedings of the First International Symposium on Beamed Energy Propulsion [C]. New York: AIP, 2003. 49 - 60.
- [4] 许德胜,郭振华, Messaoud S, 等. 论光动力飞行器 [J]. *激光技术*, 1999, 23(2): 86 - 90.  
Xu D S, Guo Z H, Messaoud S, *et al.* On lightcraft [J]. *Laser Technology*, 1999, 23(2): 86 - 90. (in Chinese)
- [5] 郑志远,鲁欣,张杰. 激光等离子体推进技术的研究进展 [J]. *物理*, 2003, 32(8): 533 - 538.  
Zheng Z Y, Lu X, Zhang J. Overview and future prospect of laser plasma propulsion technology [J]. *Chinese Physics*, 2003, 32(8): 533 - 538. (in Chinese)
- [6] 王骥,李琦,尚铁梁. 激光推进原理与发展状况 [J]. *激光与红外*, 2003, 33(1): 3 - 7.  
Wang Q, Li Q, Shang T L. Laser propulsion principle and development [J]. *Laser & Infrared*, 2003, 33(1): 3 - 7. (in Chinese)
- [7] 柯常军,万重怡. 激光推进飞行器技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2003, 40(8): 18 - 21.  
Ke C J, Wan C Y. Laser propelled vehicle [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, 40(8): 18 - 21. (in Chinese)
- [8] 傅恩生. 小型卫星用的微型激光等离子体推进器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2003, 40(4): 25 - 31.

Fu E S. Micro laser plasma thruster for small satellite [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, 40(4): 25 - 31. (in Chinese)

- [9] 孙承纬. 激光驱动空间飞行器的原理分析 [A]. *激光的热和力学效应学术会议论文集* [C]. 广西:北海, 2000. 1 - 8.  
Sun C W. Mechanism analysis for laser propelled spacecraft [A]. Proceedings of Thermal and Mechanical Effects of Laser [C]. Guangxi: Beihai, 2000. 1 - 8. (in Chinese)
- [10] 王军,武文远. 利用激光实现飞行器推进的概念和关键技术分析 [J]. *解放军理工大学学报*, 2003, 4(3): 72 - 75.  
Wang J, Wu W Y. Concept and technique analysis of implementation of the aircraft propulsion with laser [J]. *J PLA Univ of Sci and Tech*, 2003, 4(3): 72 - 75. (in Chinese)
- [11] 程祖海,王新兵,王又青. 激光推进的理论和实验研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2001, 40(9): 18 - 21.  
Cheng Z H, Wang X B, Wang Y Q. Theoretical and experimental study of laser propulsion [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2001, 40(9): 18 - 21.
- [12] 唐志平,董慧峰,胡晓军,等. 用激光推进轻型飞行器的初步实验研究 [A]. *激光的热和力学效应学术会议论文集* [C]. 四川绵阳, 2001. 120 - 124.  
Tang Z P, Tong H F, Hu X J, *et al.* Preliminary experiment research for lightcraft propelled by laser [A]. Proceedings of Thermal and Mechanical Effects of Laser [C], Sichuan Mianyang, 2001. 120 - 124. (in Chinese)
- [13] 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.  
Gong P, Tang Z P. Mechanism analysis and numerical simulation of air-breathing model for laser propulsion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(6): 501 - 508. (in Chinese)
- [14] 龚平. 大气呼吸模式激光推进的研究 [D]. 合肥:中国科学技术大学, 2004.  
Gong P. Investigation of air-breathing mode for laser propulsion [D]. Hefei: Univ of Sci and Tech of China, 2004. (in Chinese)
- [15] Ageev V P, Barchukov A I, Bunkin F V, *et al.* Experimental and theoretical modeling of laser propulsion [J]. *Acta Astronautica*, 1980, 7: 79 - 90.
- [16] Schall W O, Bohn W L, Eckel H A, *et al.* Lightcraft experiments in Germany [A]. In: Phipps C R ed. High-Power Laser Ablation III, Proc of SPIE [C]. 2000. 4065: 472 - 481.

#### 作者简介:



唐志平(1945 - ) 男,江苏常州人,中国科学技术大学力学和机械工程系教授,博士生导师,1981年中国科学技术大学近代力学系获硕士学位,1985~88美国华盛顿州立大学,1994~96美国北卡罗州立大学访问学者。主要研究领域:材料动态性能、冲击相变、离散元和多尺度数值方法、激光推进技术。电话:0551-3606754 (o), E-mail: zptang@ustc.edu.cn

龚平(1977 - ) 男,江西景德镇人,中国科学技术大学力学和机械工程系博士研究生。电话:0551-3607731, E-mail: gongp@ustc.edu

(责任编辑:刘振国)