

文章编号: 100124322(2004)1121380205

“烧蚀模式”激光推进的实验研究^X

童慧峰^{1,2}, 唐志平¹, 胡晓军¹, 龚平¹,
李静¹, 蔡建¹, 王声波³, 林丽耘³

(1. 中国科学技术大学 力学和机械工程系, 中科院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽 合肥 230026;
2. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900; 3. 中国科学技术大学 物理系 强激光实验室, 安徽 合肥 230026)

摘 要: 采用单脉冲激光进行了大气环境下激光烧蚀小钢珠实验, 得到其推进效应参数, 发现并分析了钢珠在不同放置位置(焦前与焦后)时不同的物理现象; 为了得到一系列定量实验数据, 采用自行研制的激光冲量靶仪进行了单脉冲激光烧蚀推进效应实验测试, 得到了不同环境条件、不同靶材料的激光推进效应参数, 并与国外的实验数据以及数值计算结果进行了比较。实验表明, 靶材料和激光功率密度是影响冲量耦合系数的主要因素, 冲量耦合系数随环境气压的降低而升高。

关键词: 激光推进; 烧蚀模式; 推进参数; 激光冲量靶仪

中图分类号: O381; O432.12 **文献标识码:** A

传统的卫星发射, 需要大型的化学运载火箭。受化学推进剂热值的限制, 化学运载火箭的比冲量较低(约 200~500), 有效载荷比低(约 1.5%), 发射成本高。人们一直在探索各种新的推进原理以改进传统的发射方式。自 60 年代初第一台激光器诞生以来, 激光技术及其应用已取得了长足发展。1972 年 A. Kantrowitz^[1]提出用地基高功率脉冲激光推进微小卫星的设想, 从而开辟了激光推进研究的新领域。1989 年 Myrabo 等人^[2]提出了贯穿大气的光推进飞行器并称之为“光船”。在 90 年代以后, 多个国家的科研小组开始进行激光推进发射小卫星的理论和实验方面的研究, 在我国也已经有科研小组开始这方面的研究工作。2001 年唐志平等^[3]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。2002 年 Phipps^[4]等人提出采用激光微推进技术可以方便地得到小于 $\mu\text{N}\cdot\text{s}$ 的冲量, 并称之为激光微推进器, 这对于实现空间微小卫星(10kg 以下)的精确姿态调节有很大的应用价值。

“烧蚀模式”激光推进的基本原理就是利用激光和靶物质相互作用产生等离子体反喷获得推动力, 调节激光参数可以得到不同的推进力及推进冲量。本文就“烧蚀”模式进行了大气环境下的激光推进实验测试(小钢珠实验), 并采用我们自行研制的多功能冲量靶仪进行了不同气压条件下的激光推进实验测试。

1 空气击穿实验

在采用长焦距透镜聚焦激光束时, 在焦点前后较大范围均可能达到空气击穿阈值。由于空气中灰尘颗粒的存在, 使击穿阈值降低, 从而在焦点前方灰尘颗粒处产生多点击穿现象, 对靶面入射激光产生一定的屏蔽。

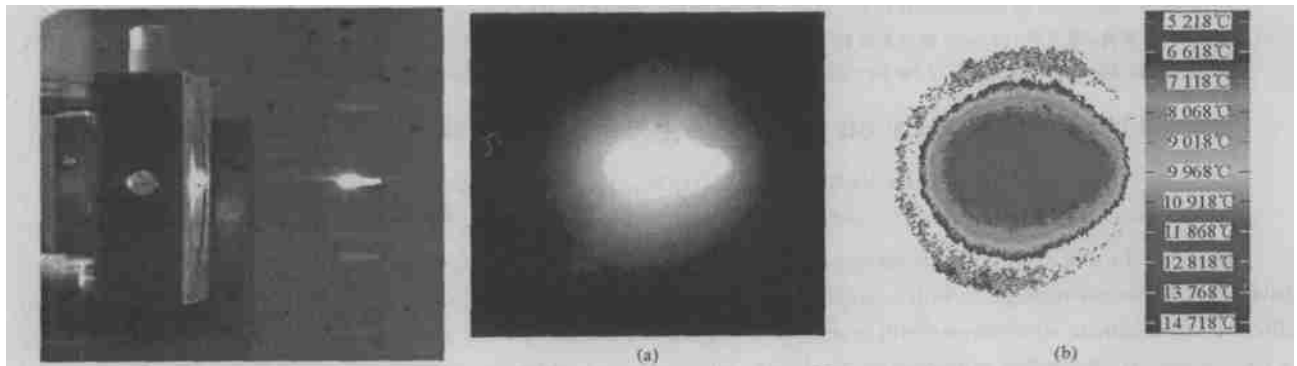


Fig. 1 Photo of air breakdown by CCD
图 1 高速 CCD 拍摄到空气击穿照片

Fig. 2 Photo of air breakdown by bulb of camera (a) and the temperature analysis (b)
图 2 光学相机 B 门拍摄到的空气击穿照片 (a) 及温度分析 (b)

X 收稿日期: 2003211218; 修订日期: 2004206228

基金项目: 中科院资助项目(42201.02.02)

作者简介: 童慧峰(1976—), 男, 博士研究生, 主要从事“烧蚀模式”激光推进的机理及实验研究; E2mail: hftong@mail.ustc.edu.cn.

因此此次实验采用约 100mm 焦距的短焦透镜,光源为 1.06μm 钕玻璃激光器,脉宽 20~30ns。实验表明能产生稳定的空气击穿。然而,实验发现对离焦靶面,仍能产生一定的烧蚀,说明仍有部分激光能量透过了空气击穿区域。这一现象对于激光推进中的能量传输和有效利用是十分重要的。

为此专门进行了测定。实验方案为在焦点前后各设置一台能量计,分别测量输入和透过的光能,焦点处空气等离子体形貌由高速 CCD 相机和光学 B 门相机记录。图 1 及图 2 分别为高速 CCD 相机记录的一帧画面(500 帧/s)和光学相机 B 门照片,击穿区呈橄榄形,温度分析表明最高温度超过 10⁴。透过能量的测定结果离散较大,这与激光脉冲的重复质量,当时当地空气状态等有关。表 1 给出了各次实验的输入能量以及焦点后的透过能量和单次透射率,由表中数据可以得到平均透射率约为 13.6%,且随着光强的增加,透射率降低。

表 1 不同激光束能量条件下的透射率

Table.1 Transmission rate of different input energy of laser beam

input energy/J	behind focus/J	transmission rate/%	input energy/J	behind focus/J	transmission rate/%	input energy/J	behind focus/J	transmission rate/%
6.5	0.712 5	10.96	9.375	0.837 5	8.93	13.625	2.425	17.8
6.625	0.612 5	9.25	10.5	1.912 5	18.21	11.5	0.875	7.61
6.875	0.7	10.18	9.75	1.875	19.23	11.75	0.937 5	7.98
7.75	1.787 5	23.06	8.375	0.737 5	8.81	13	2.275	17.5
7.875	1.575	20.0	10.5	1.837 5	17.5	13.5	0.925	6.85
average transmission rate is			average transmission rate is			average transmission rate is		
		14.69 %			14.52 %			

2 激光烧蚀小钢珠实验

2.1 实验简介

实验的简单示意图如图 3 所示,将直径约 9.5mm 的钢珠用细棉线悬挂成单摆,激光束经透镜聚焦后辐照到钢珠表面,高功率密度激光与靶材料相互作用,在靶面形成高温、高压靶蒸气等离子体气团向外高速喷射,从而使靶获得相反方向的冲量。实验采用的是单脉冲钕玻璃激光器,波长 1.06μm,脉宽 20ns,单次激光束输出能量通过能量计测得。

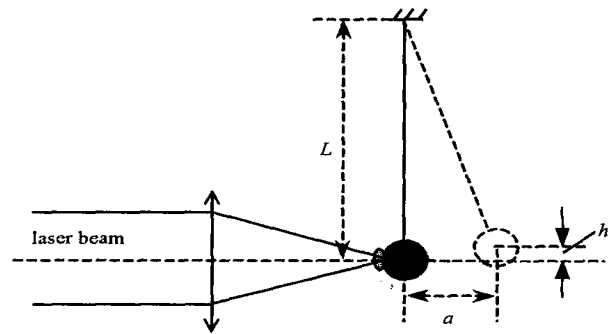


Fig.3 Schematic diagram of the experiment

图 3 实验简单示意图

2.2 实验结果

在图 3 中,激光与钢珠相互作用后钢珠获得一水平运动速度,根据实验测得的水平摆动距离 a 和摆长 L 即可得钢珠所获得的水平速度 v ,进而可计算出冲量耦合系数 c_m 。表 2 给出了两次实验的结果。

表 2 两次钢珠烧蚀实验的结果

Table.2 Results of the two steel ball ablation experiments

number	m/g	L/mm	a/mm	E/J	$v/(m \cdot s^{-1})$	$c_m/(10^{-5} N \cdot W^{-1})$
1 [#]	3.507	750	92	27.5	0.336 6	4.293
2 [#]	3.507	731	56	25	0.207 3	2.913

表中 m 为小钢珠质量, E 为单次脉冲能量。

2.3 实验分析

2.3.1 冲量耦合系数 c_m

两次实验的激光参数基本相同,1[#]的激光功率密度稍大,实验 2[#]的 c_m 值却比 1[#] 低了 32%,这与冲量耦合系数随激光功率密度增大而减小的规律^[5]是不符的。分析发现,这是由两次实验中钢珠不同的摆放位置引起的,如图 4(a)、(b)所示,1[#]实验钢珠表面放置在焦点前约 5mm,2[#]试验位于焦点后约 5mm。后一种情况在钢珠前方已发生了空气击穿现象,使得到达钢珠表面激光能量大大降低。

由前述空气击穿实验结果可知,对于 2[#]实验到达钢珠表面的激光能量只有入射激光束能量的 13.6%左右,因此烧蚀作用产生的推力将大大降低。不过由于钢珠离焦点很近,已部分进入等离子体区,这时到达钢珠

靶面的能量应大于 13.6%,但不可能达到 1# 实验的 68%。2# 实验的冲量耦合系数是 1# 实验的 68%,由此看来,应当还存在其他的作用机制。对比通过高速 CCD 拍摄到的两次实验激光烧蚀时刻等离子体喷溅的照片(见图 5),由于 2# 钢珠离焦点 5mm,焦点处产生的空气等离子体爆炸波将对小球产生较强的推动作用,使得 c_m 提高。图 5(b)中显示 2# 实验时烧蚀产物在爆炸波作用下向钢珠后方呈锥状飞散,是这一机制的证明。这一现象对推进有重要影响,值得作进一步研究。

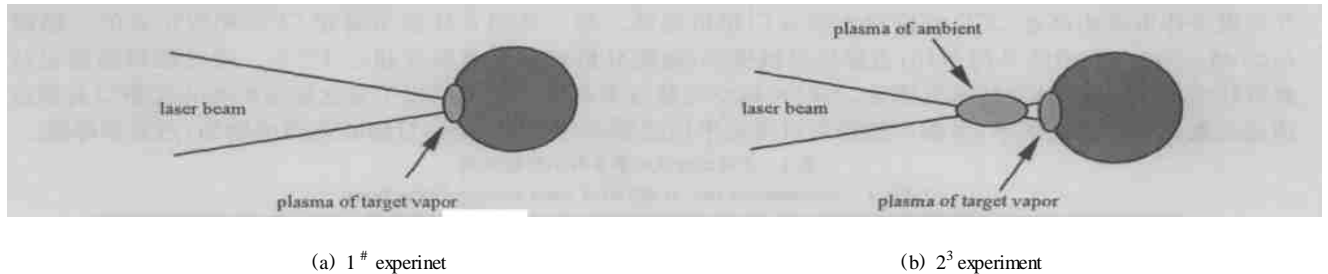


Fig. 4 Schematic diagram of ablation experiments 1# and 2#

图 4 1# 实验和 2# 实验烧蚀作用示意图

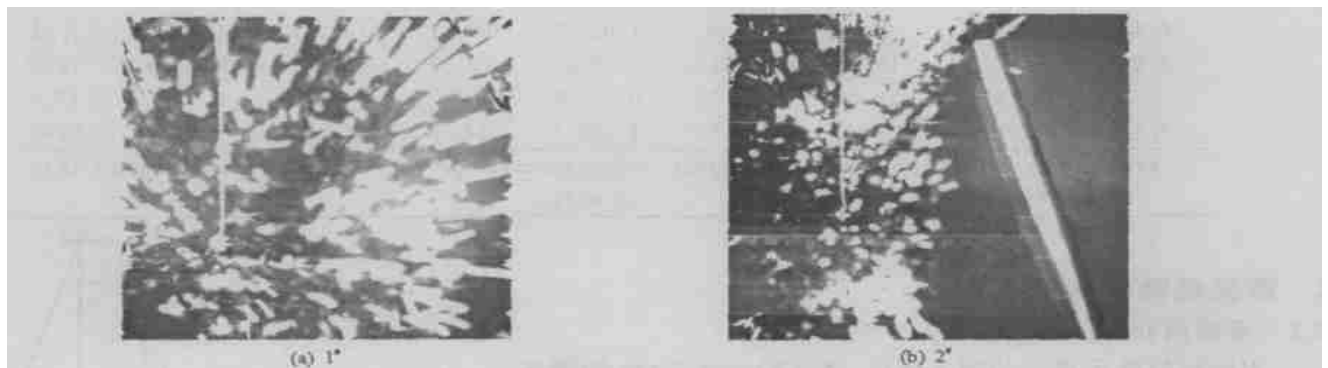


Fig. 5 Diagram of plasma spray by CCD

图 5 CCD 拍摄到的等离子体喷溅图

2.3.2 比冲量 I_{SP}

由金相显微镜测得 1# 钢珠烧蚀孔外径为 1.575mm,深度为 0.045 83mm。计算得烧蚀质量为 4.643×10^{-7} kg,比冲量 $I_{SP} = 254.2$ s。对于 2# 钢珠,烧蚀孔外径 1.62mm,深 0.101 7mm,烧蚀质量为 1.346×10^{-6} kg, $I_{SP} = 54.1$ s。

以上计算结果又出现一个反常问题,1# 试样产生的冲量大,但烧蚀质量反而小于 2# 试样。两者激光总能量相差不大,主要区别在于放置的位置。1# 钢珠位于焦点前 5mm,功率密度可达 10^{11} W/cm² 以上,产生高电离度等离子体喷射和高比冲。由于激光对铁的高密度等离子体支持产生 LSD 波,从而发生完全屏蔽,激光能量不能到达钢珠,使烧蚀量减少。2# 试样位于焦点后 5mm,激光透过空气击穿区仍有部分到达靶面产生烧蚀,不过功率密度较低(约低 1 个量级),产生的铁等离子体的电离度低,透明度高,不易产生 LSD 波,从而在整个脉冲时间内能连续烧蚀,烧蚀量较大,喷射速度较小,因此,比冲较小。由此可见,靶面位置对于空气中烧蚀模式的推进效果影响很大。

3 激光烧蚀推进实验测试

采用自行研制的激光冲量靶仪对不同工况条件、不同靶材料进行了激光烧蚀推进效应初步实验。

3.1 激光冲量靶仪

为研究环境气体的影响我们研制了一台多用途激光冲量靶仪(见图 6)。图 7 给出了冲量靶仪的标定结果,图中纵坐标为输入冲量,横坐标为靶摆的最大摆角。从图 7 中可以看出,实验结果与理论计算结果符合得相当好。冲量测量范围 $2 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-3}$ N·s。适当增加配重可以测量更大范围的冲量。

3.2 激光烧蚀推进实验

在对激光冲量靶仪进行精确的标定之后,进行了初步的烧蚀推进实验,得到了一些实验数据,并与国外公开报道的数据进行了比较。

实验采用了金属靶材(铝合金)和非金属靶材(PVC),在不同的气压下进行,通过拍摄靶的摆动全过程得到

激光烧蚀作用的力学效应参数,图 8 给出了几个典型图象。

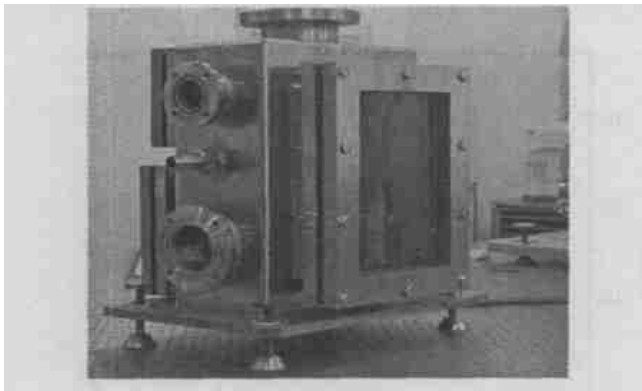


Fig. 6 Outlook of the pendulum apparatus

图 6 激光冲量靶仪实物照片图

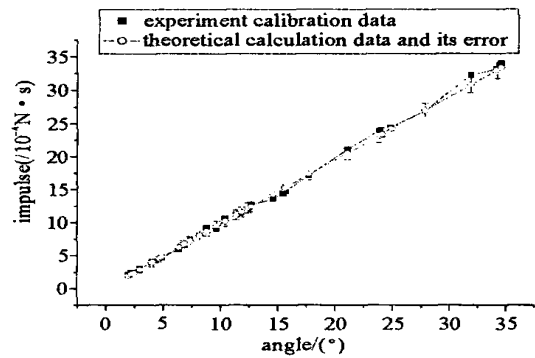


Fig. 7 Experimental calibration data compared with theoretical calculation data

图 7 激光冲量靶仪的标定曲线



Fig. 8 Several typical experiment records

图 8 实验拍摄到的几个典型记录

表 3 实验参数及结果

Table 3 Parameters and results of the experiment

number	ambient pressure/ 10^5 Pa	target	energy of laser pulse/J	laser intensity / (GW cm^{-2})	angle/ (°)	impulse/ $(10^{-3} \text{N} \cdot \text{s})$	$c_m / (10^{-5} \text{N} \cdot \text{W}^{-1})$
1	0.006	Al	21.1	23.4	2.3	0.24	1.14
2	0.006	Al	21.4	28.0	1.9	0.197	0.92
3	1.0	Al	22.0	28.8	1.8	0.187	0.85
4	1.0	PVC	20.6	9.0	7.6	0.649	3.16
5	0.004 5	PVC	16.3	8.46	6.4	0.546	3.35
6	1.0	PVC	6.1	3.15	2.4	0.205	3.38
7	1.0	PVC	4.7	2.43	1.9	0.163	3.46
8	0.5	PVC	4.5	2.34	1.9	0.163	3.62
9	0.006	PVC	0.79	0.405	0.5	0.043	5.46

表 3 给出了各次实验的参数(环境气压、靶材料、激光功率密度)及实验结果。由表 3 可见,靶材料和激光功率密度是影响冲量耦合系数的主要原因;其次,环境气压也有一定的影响。图 9 为由修正后的 MEDUSA 程序得到的冲量耦合系数随环境气压的变化曲线,可以看出, c_m 随环境气压的升高而降低。

3.3 与国外实验结果比较

我们的实验数据与 Phipps 的实验数据^[6]比较,虽然目前我们取得的实验数据还很有限,但从图 10 可以看到,我们的实验结果与 Phipps 的实验结果以及数值计算结果吻合得很好。图中直线为 Phipps 经验模型^[6]。需要说明的是,表 3 中只有 4 次实验是在接近真空环境下,所以只取了这 4

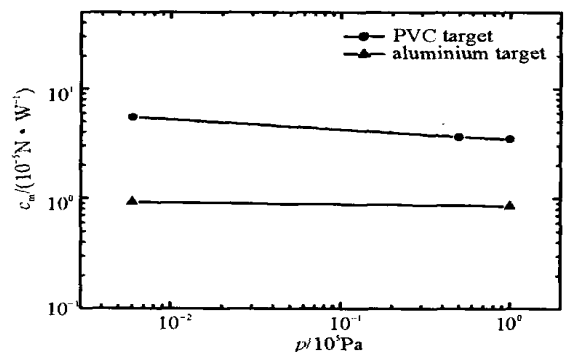


Fig. 9 c_m variety with ambient pressure

图 9 冲量耦合系数随环境气压的变化

次实验结果进行了比较。Phipps 实验结果的气压不到几十 Pa, 但由表 3 中的实验数据可以看到, 当气压较小时, 气压对推进效应的影响不是很大。

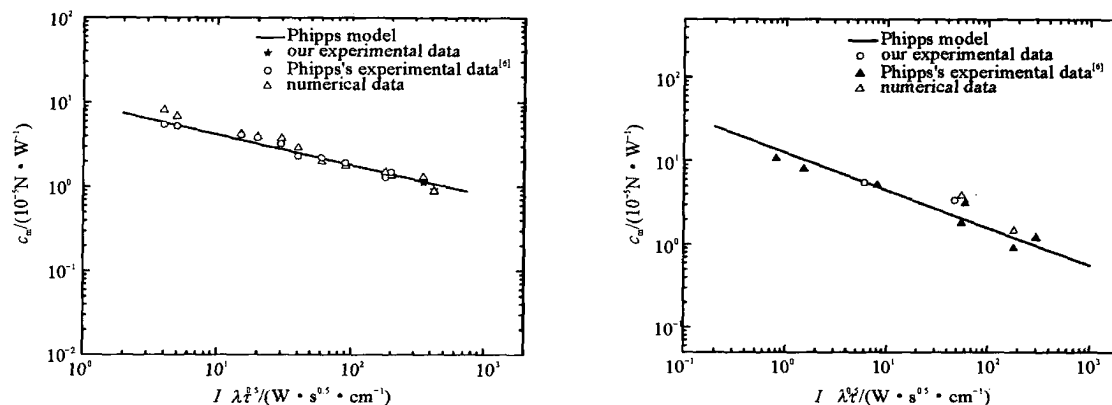


Fig. 10 The experimental data and simulated results compared with those of Phipps

图 10 与 Phipps 实验数据以及数值计算的比较

4 小结

进行了大气环境下激光烧蚀钢珠的推进效应实验以及不同环境气压条件下的冲量耦合系数测试实验, 得到以下结论: 在大气环境下靶面位置对激光推进效应有较大的影响。靶材料和激光功率密度是影响冲量耦合系数的主要原因; 其次, 环境气压也有一定的影响, 冲量耦合系数随环境气压的降低而升高。

致谢: 本文空气等离子体温度测量得到中国科技大学能源和工程热物理系程晓航教授及其课题组成员的帮助, 特此致谢。

参考文献:

- [1] Kantrowitz A. Propulsion to orbit by ground-based laser[J]. *Astronautics and Aeronautics*, 1972, **10**(5): 74.
- [2] Myrabo L N. The Apollo lightcraft project, NASA/USRA advanced design program[R]. Rensselaer Polytech. Institute, 1989.
- [3] 唐志平, 童慧峰, 郭大浩, 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]. 绵阳: 中国工程物理研究院流体力学研究所, 2001. 120—124. (Tang Z P, Tong H F, Guo D H, et al. Preliminary experimental research for lightcraft propelled by laser. Proceedings of thermal and mechanical effect of laser. Mianyang: Institute of Fluid Physics, CAEP, 2001. 120—124)
- [4] Phipps C R, Luke J R. Diode laser-driven microthrusters: A new departure for micropropulsion [J]. *AIAA Journal*, 2002, **40**(2): 310—318.
- [5] Gegg D W, Thomas S J. Momentum transfer produced by focused laser gain pulses [J]. *Journal of Appl Phys*, 1966, **37**(7): 2787.
- [6] 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 Appl Phys*, 1988, **64**(3): 1083.

Experimental study of “ablation mode” laser propulsion

TONG Hui^{1,2}, TANG Zhi¹, HU Xiao¹, GONG Ping¹,
LI Jing¹, CAI Jian¹, WANG Sheng², LIN Li²

(1. CAS Key Laboratory for Mechanical Behavior and Design of Materials, Department of Mechanics and Mechanical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China;

3. The High Power Laser Laboratory, Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Experiments that use single-pulse laser to ablate small steel ball in atmosphere were conducted. In these experiments, the propulsion efficiency parameters were obtained and different phenomena for the steel ball in front and back of the focus were analyzed in detail. To get a series of experiment data, experiments for different ambient conditions and different target materials were conducted and the propulsion parameters were obtained, and the experiment data were compared with those of overseas and numerical results. Experimental results showed that the material of target and the laser intensity were the main factors influenced the mechanical coupling coefficient (c_m), and the c_m value increased a few with the decreased of ambient pressure.

Key words: Laser propulsion; Ablation mode; Propulsion efficiency; Pendulum apparatus