

激光等离子体动量转换效率的实验研究^{*}

郑志远¹⁾ 鲁欣¹⁾ 张杰¹⁾ 郝作强¹⁾ 远晓辉^{1 2)} 王兆华¹⁾

¹⁾中国科学院物理研究所光物理重点实验室,北京 100080)

²⁾中国科学院西安光学机械研究所瞬态光学国家重点实验室,西安 710068)

(2003 年 11 月 13 日收到,2004 年 4 月 12 日收到修改稿)

强激光与固体靶相互作用时,产生的高速喷射的等离子体对靶具有强烈的反冲作用,因此,激光等离子体可以作为一种新型的推进动力源.与传统的化学燃料推动相比,激光等离子体具有较高的比冲和有效载荷比等特点.对纳秒激光脉冲与铝、石墨、铅和碳氢靶相互作用时,等离子体对靶的冲量进行了实验测量,研究了大气与真空环境下的靶动量与激光聚焦面积的关系,并对部分实验结果与理论计算的数值进行了比较.实验结果显示,大气与真空环境下的靶动量有很大的差异,并且真空下的靶动量受材料性质的影响较大,与以往长脉冲激光的实验结果有很大的不同.

关键词:激光等离子体,动量,动量耦合系数

PACC:5250J,5225

1. 引言

传统意义上的火箭依靠化学燃料的燃烧来获得前进的动力,其发动机的性能主要取决于喷气速度,而化学燃料火箭发动机的喷气速度最高只有 5×10^3 m/s 的水平.同时由于化学燃料推动中复杂的发射操作运转模式、高昂的发射成本、低的重复使用率等缺点限制了人类对太空的进一步探索.为了克服上述困难,人们不断寻找新的推进方法.随着激光功率和强度的不断提高,激光作为一种新的能量载体,已经逐渐具备了替代传统化学燃料的可能性.强激光辐照固体靶产生的等离子体的喷射速度可达到 10^4 — 10^5 m/s,远高于一般化学燃料火箭发动机的喷气速度.作为化学燃料的一种可能的替代方式,激光等离子体由于其较高的推进比冲和有效载荷比而日益受到人们的重视^[1-6].高强度激光与物质相互作用时,产生向外膨胀的高温等离子体具有强大的反冲作用,利用这个原理驱动的飞行器因为不需没有配备传统意义上的发动机,只有观察和通讯装置,质量非常轻,所以在观察和通讯方面有广泛的应用前景^[1].此外,利用小功率激光制作的微推力装置还可

以应用于维持卫星轨道参数等领域^[2].

利用激光等离子体的反冲作用作为推进动力的思想最早由 Kantrowitz^[7]提出,在随后的几年里,人们对 CO₂ 激光与固体靶相互作用的动量转换过程进行了大量的基础研究^[8-10].但在上世纪 70 年代后期直至 90 年代中期,该项研究的报道甚少.直到 90 年代后期 Myrabo 等人提出了“大气呼吸模式”的激光等离子体推进方式并实验成功后^[4],该项研究又重新引起人们的重视.2001 年 Yabe 等人进行的激光推动纸飞机模型的实验^[11],进一步说明了激光等离子体的反冲作用应用于推进领域的可能性.随激光技术的发展,各种新型的激光器不断出现,激光的波长涵盖了从紫外到近红外的多个频率,脉冲宽度到了飞秒量级,连续激光的输出功率已达兆瓦量级,脉冲激光的峰值功率甚至到了 PW 量级.为了对激光等离子体在推动领域的应用前景做出可靠的判断,有必要对各种参数的激光与不同材料相互作用时产生的等离子体的动量特性进行系统的理论和实验研究,以便寻找能进一步提高动量转化效率和推进比冲的方法.本文对纳秒 YAG 脉冲激光与不同材料的固体靶相互作用的动量转换进行了实验测量,系统地研究了激光等离子体的反冲动量与材料种类、聚

^{*} 国家自然科学基金(批准号:10004015, J0176034),国家重点基础研究项目(批准号:G1999075206)和国家高技术项目联合资助的课题.

焦强度和气压的关系,得到了与微秒长脉冲激光有很大差异的实验结果.

2. 实 验

实验是在中国科学院物理研究所光物理重点实验室完成的,图 1 为实验装置示意图.长方体的靶用两根长为 18cm 的摆线悬挂起来形成一个单摆.将单摆放置在步进电机驱动的三维平移台上,靶面到聚焦透镜的距离可通过此平移台进行调节.整个测量装置放于可抽真空的靶室内,最高真空度为 1.33Pa.实验中采用的驱动激光器为二倍频后的 YAG 激光器,波长为 532nm,脉宽为 7ns.激光脉冲经透镜($f = 75\text{mm}$, $\Phi = 38\text{mm}$)聚焦到靶的正中央产生高温高压等离子体,并且激光的入射方向与靶面垂直.到达靶面的单发激光能量约为 800mJ.靶的摆幅

通过靶室外面的摄像机记录下来,然后根据靶的摆幅和摆长可以容易地计算出靶的初速度,从而获得靶的动量.靶相对于光束几何焦点的位置是用图中的标尺来确定的,其中,透镜的几何焦点对应于标尺的 7.5cm 处.激光在靶面上的聚焦强度、聚焦面积与靶位置的对应关系见表 1.

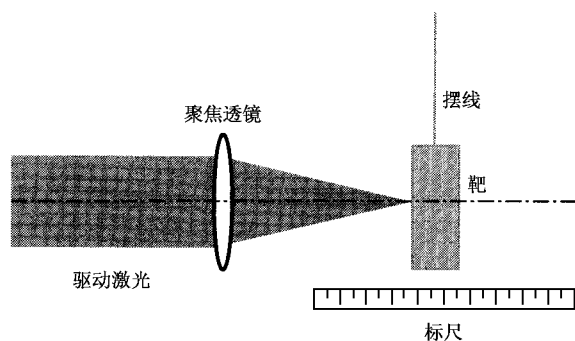


图 1 实验装置示意图

表 1 激光聚焦强度、聚焦面积与靶位置的关系

位置/cm	7.5	7.3	7.1	6.9	6.7	6.5
面积/ mm^2	0.114	0.2057	0.823	1.851	3.291	5.143
光强/ (W/cm^2)	1.143×10^{11}	0.556×10^{11}	0.139×10^{11}	0.617×10^{10}	3.47×10^9	2.22×10^9

3. 结果与讨论

图 2 至图 5 分别为实验中测量的铝、石墨、铅和碳氢靶的动量与靶位置的关系.起始的靶位置是在透镜和焦点之间,并距焦点 1cm 的位置,然后依次向焦点靠近.可以看出,在大气环境下,对于测量过的所有靶材料,随着靶逐渐靠近几何焦点,靶动量由下降转为上升,在几何焦点附近靶的动量达到极大,越过焦点之后,靶动量急剧下降.而在真空环境下,靶动量呈现出与大气中基本相反的趋势,即距几何焦点越近,靶的动量越小,在越过几何焦点之后,呈现出几乎和焦点前对称的动量变化.通过对比还可以看出,在几何焦点前,空气中靶获得的动量总是大于真空中靶的动量,在几何焦点附近差别尤为明显.这一点在以往的实验中已经被证实^[11].此外,各种靶在大气中的动量耦合系数差别不大,但在真空中却有很大的差别,这表明,动量耦合系数明显受环境气压的影响.

大气与真空环境下,激光等离子体的动量转换机理有很大的不同,在真空中靶的动量直接来源于

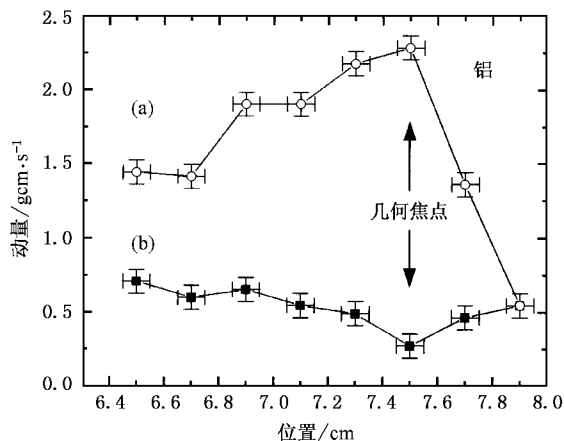


图 2 大气与真空环境下,铝靶的动量与靶位置的关系 (a) 一个大气压 (b) 真空度为 5Pa (其中横坐标的 7.5cm 对应透镜的几何焦点位置)

等离子体喷射的反冲作用.而在大气环境下,当高强度的激光辐照固体靶面时,靶面以及靶面前的空气被击穿,形成等离子体,急速膨胀的等离子体对靶面施加推力,而在相反的方向上压缩靶面附近的空气,并形成向外传播的激光支持的爆炸波^[12].在相互作

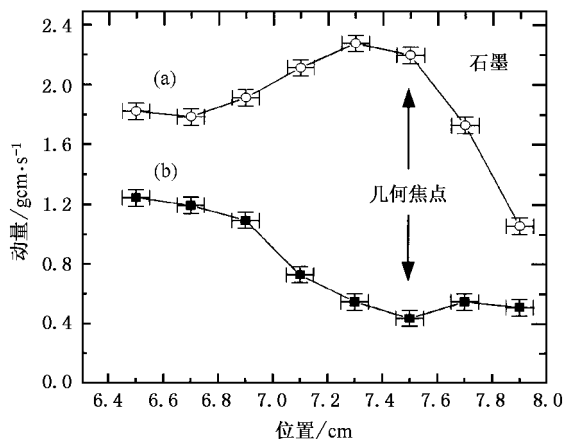


图3 大气与真空环境下,石墨靶的动量与靶位置的关系 (a)一个大气压 (b)真空度为5Pa(其中横坐标的7.5cm对应透镜的几何焦点位置)

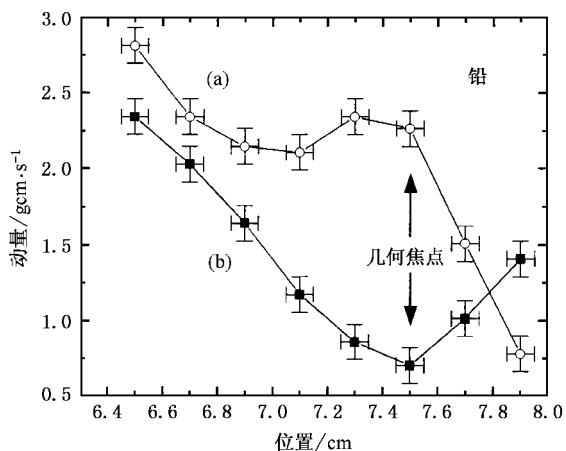


图4 大气与真空环境下,铅靶的动量与靶位置的关系 (a)一个大气压 (b)真空度为5Pa(其中横坐标的7.5cm对应透镜的几何焦点位置)

用结束后,靶获得的动量与爆炸波携带的动量成正比,方向相反,因此从爆炸波的强弱就可以判断靶动量的变化趋势,实验过程中可以明显听到爆炸波带来的响声,事实也显示,爆炸波声音越响亮,靶动量也就越大.根据Pirri理论^[13],靶表面的压强与爆炸波产生的压强的关系可以简单地写为

$$P = [(\gamma + 1)(2\gamma)]^{2\gamma(\lambda-1)} P_{DW}, \quad (1)$$

$$P_{DW} = \rho_0 V_{DW}^2 (\gamma + 1), \quad (2)$$

其中 P_{DW} 为爆炸波的压强, $V_{DW} = [2(\lambda^2 - 1)I/\rho_0]^{1/3}$ 是爆炸波离开靶表面的速度, γ 为爆炸波后面空气的比热, I 为激光功率密度, ρ_0 为爆炸波前面气体的密度.从上式分析可以看出, $P \propto \rho_0^{1/3} I^{2/3}$,即靶表面的

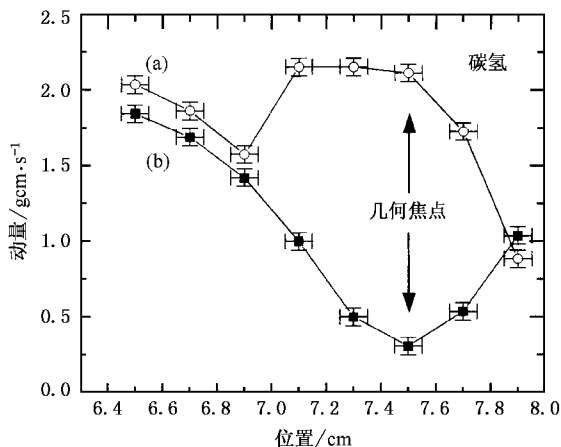


图5 大气与真空环境下,碳氢靶的动量与靶位置的关系 (a)一个大气压 (b)真空度为5Pa(其中横坐标的7.5cm对应透镜的几何焦点位置)

压强正比于气体密度的 $1/3$ 次方和激光功率密度的 $2/3$ 次方.对于固定的空气密度和激光能量而言,靶获得的动量正比于聚焦面积的立方根.靶距离焦点越近,聚焦面积越小,靶的动量就越小.但我们获得的实验结果与这并不完全一致,特别是在焦点附近.

当靶面距几何焦点较远时,聚焦面积较大,这时激光等离子体的流体动力学状态近似为一维的,这与Pirri理论的前提条件相近,因此靶动量随聚焦面积的减小而减小.但随着靶面越来越靠近几何焦点,激光支持的爆炸波越来越接近点源爆炸波,因此Pirri的理论不再适用.同时激光强度的增加使激光脉冲与等离子体的相互作用进一步加强,导致等离子体对激光脉冲的吸收率提高(吸收机理主要为逆韧致吸收),从而形成更强的爆炸波,对靶产生更大的冲击,靶的动量随之增加.

一般认为激光支持的等离子体爆炸波的形成阈值为几百Pa,当低于该阈值时,靶的动量主要是由激光烧蚀直接产生的.根据Phipps的理论^[5],真空下靶表面产生的压强可近似表示为

$$p = 5.83A^{-1/8} \psi^{9/16} I^{3/4} (\lambda \sqrt{\tau})^{-1/4}, \quad (3)$$

从而靶获得的动量可表示为

$$P = pS = p \left(\frac{E}{I\tau} \right) = 5.83EA^{-1/8} \psi^{9/16} I^{-1/4} \lambda^{-1/4} \tau^{-8/9}, \quad (4)$$

式中 A 是原子量, $\psi = A/[Z^2(Z+1)]^{1/3}$, Z 为等离子体的平均电荷数, λ (cm)是激光波长, I (W/cm²)是激光平均功率密度, E 为激光能量, S 为聚焦面积, τ (s)是脉冲宽度.根据(4)式,可知靶获得的动量

与激光功率密度成反比,所以在真空环境下靶面距焦点位置越近,靶获得的动量越小.从图 2 至图 5 可以清楚地看出,真空下所有的靶动量呈现出与 Phipps 理论描述相同的变化趋势.同时,真空下不同材料的靶动量之间的差别比在空气中要大,并且靶动量随材料原子量的变化并非像(3)式那样有规律.这说明真空中靶的动量转换受材料本身的性质、材料在激光作用下的相变过程等影响很大.

基于以上分析,又运用方程(4),对真空下的靶

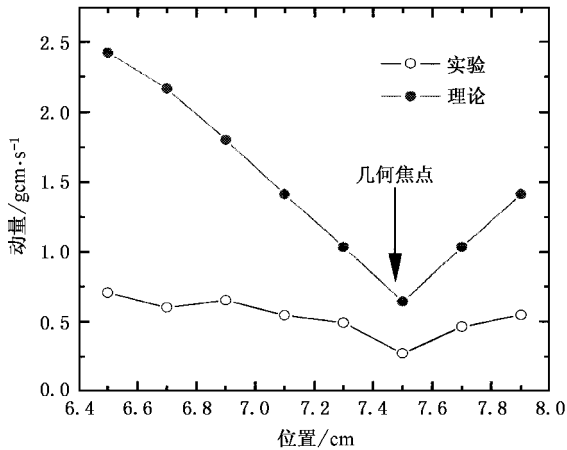


图 6 真空下铝靶动量的实验与理论值比较(其中横坐标的 7.5cm 对应透镜的几何焦点位置,其他位置为焦点的两侧)

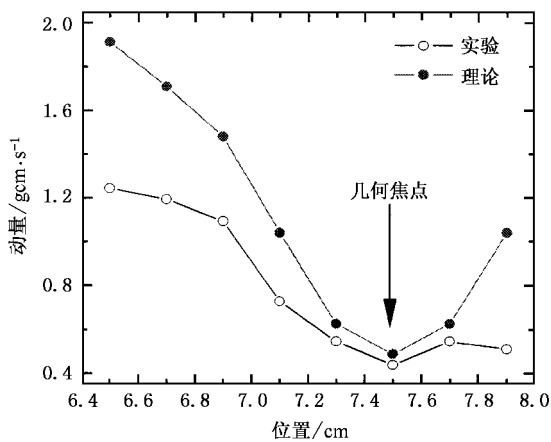


图 7 真空下石墨靶动量的实验与理论值比较(其中横坐标的 7.5cm 对应透镜的几何焦点位置,其他位置为焦点的两侧)

动量进行了估算,近似取 $Z = 1$,并将计算值与实验结果进行了比较.图 6,图 7 和图 8 分别为铝、石墨和铅靶的动量与位置关系的理论与实验值的比较.可以看出它们呈现相同的变化趋势.越靠近焦点,靶动量越小.同时所有的实验数值均低于理论数值,距焦点越远,差别越大.方程(3)中的假设是认为激光的强度在时间和空间上分布是均匀的,同时忽略了其他因素对靶动量的影响^[14,15].对于我们的实验结果,由于存在光束质量、靶表面光洁度和反射率等对动量影响,所以计算值与实验值之间存在一定的差别.

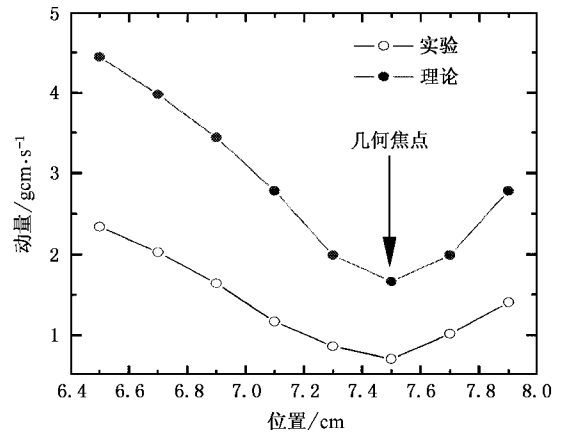


图 8 真空下铅靶动量的实验与理论值比较(其中横坐标的 7.5cm 对应透镜的几何焦点位置,其他位置为焦点的两侧)

4. 结 论

本文测量了纳秒 YAG 激光与铝、铅、石墨和碳氢四种不同材料的靶在大气和真空下相互作用的动量转换,并研究了激光的聚焦面积对靶动量的影响.实验结果表明,各种材料在大气环境中的动量转换能力相差不大.环境大气的存在改善了激光的能量吸收,使得激光等离子体的动量耦合效率较真空中高.在真空中靶的动量转换效率受材料本身物理性质的影响,而呈现出较大的差别.同时我们对实验测得的结果进行了一定的理论分析,结果显示,靶的动量随聚焦面积的变化趋势与理论基本符合.

- [1] Yabe T *et al* 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 4318
- [2] Phipps C R *et al* 1996 *Laser and Particle Beams* **14** 1
- [3] Lu X, Zhang J and Li Y J 2002 *Wuli (Physics)* **31** 796 (in Chinese] 鲁 欣、张 杰、李英俊 2002 物理 **31** 796]
- [4] Myrabo L N and Messitt D G 1998 *AIAA98-1001, Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, 36th, Jan. 12
- [5] Phipps C R *et al* 1988 *J. Appl. Phys.* **64** 1083
- [6] Zheng Z Y, Lu X and Zhang J 2003 *Wuli (Physics)* **32** 533 (in Chinese] 郑志远、鲁 欣、张 杰 2003 物理 **32** 533]
- [7] Kantrowitz A 1972 *Astronautica and Aeronautica* **10** 74
- [8] Jones E D 1971 *Appl. Phys. Lett.* **18** 33
- [9] Beverly R E and Walters C T 1976 *Appl. Phys. Lett.* **47** 3485
- [10] Marcus S and Lowder J E 1975 *J. Appl. Phys.* **46** 2293
- [11] Metz S A 1973 *Appl. Phys. Lett.* **22** 211
- [12] Pirri A N *et al* 1974 *AIAA* **12** 1254
- [13] Pirri A N 1973 *Phys. Fluids* **16** 1435
- [14] Grun J and Ripin B H 1982 *Rev. Sci. Instrum.* **53** 1878
- [15] Pirri A N, Schlier R and Northam D 1972 *Appl. Phys. Lett.* **21** 79

Experimental study on the momentum coupling efficiency of laser plasma ^{*}

Zheng Zhi-Yuan¹⁾ Lu Xin¹⁾ Zhang Jie¹⁾

Hao Zuo-Qiang¹⁾ Yuan Xiao-Hui²⁾ Wang Zhao-Hua¹⁾

¹⁾(Key Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

²⁾(State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi 'an 710068, China)

(Received 13 November 2003 ; revised manuscript received 12 April 2004)

Abstract

During the interaction of laser with solid targets, the counteracting force is generated by the plasma, which can be used as a new type source of propulsion. Compared with the chemical propulsion, laser plasma has unique advantages such as high specific impulse and large load ratio. In this paper, the momentum generated by the laser plasma is measured during the interaction of nanosecond laser pulses with aluminum, graphite, lead and CH targets. The relation of target momentum with laser focal area in atmosphere and vacuum ambient pressure is obtained and the comparison is performed between the experimental and analytical results. It is shown that the target momentum in vacuum is different from that in atmosphere. In vacuum, the target momentum shows a dependence on the target property. These results are different from those generated by long width pulses.

Keywords : laser plasma, momentum, momentum coupling efficiency

PACC : 5250J, 5225

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10004015, 10176034), the State Key Basic Research of China (Grant No. G1999075206) and by National High Technology.