激光击穿不同气体的激光推进实验研究

程 翔，胡春波，何国强，李宇飞，周战锋
（西北工业大学 航天学院，陕西 西安 710072）

摘 要：为了研究激光击穿气体工质的机理，通过测量冲量耦合系数，比较了激光在不同压强下击穿不同惰性单原子气体（氩气、氦气）的效果，试验结果表明：原子序数较大的无机气体原子可以电离出更多的电子，从而击穿阈值更低，激光能量转化为爆轰波能量的能量转化效率更高，冲量耦合系数就越大，同样条件下更容易击穿。推进剂气体不同，冲量耦合系数差别较大。测量摆角对结果的影响也较大。

关键词：激光推进；冲量耦合系数；击穿；惰性气体；压强

中图分类号：V434 **文献标识码**：A **文章编号**：(2007) 02-0040-04

Experimental study of laser propulsion in different gases

Cheng Xiang, Hu Chunbo, He Guoqiang, Li Yufei, Zhou Zhanfeng
(College of Astronautics, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

Abstract: To study the laser breakdown mechanism in different gases , laser breakdown effects in different monatomic inert gases (Argon、Helium) under different ambient pressures were compared by the measurement of impulse coupling coefficients. The results show that inorganic gas which has higher atomic number could ionize more electrons. This kind of gas ofter has lower breakdown threshold, and the transform efficiency from laser energy to blast wave is higher, so the impulse coefficient is higher, and in the same condition , it is easier to breakdown. Different gases have a huge contrast of impulse coefficients. Also measuring angles of oscilaltion have great effect on test results.

Key words: laser thrust; impulse coupling coefficient; breakdown; inert gases; pressure

---

收稿日期：2006-11-16；**修回日期**：2006-12-30。**基金项目**：国家 973 项目资助。

作者简介：程翔（1983—），男，硕士研究生，研究领域为航天器推进技术。

万方数据

1 引言

1972 年美国学者 Kantrowitz 首次提出利用高功率激光发射微小卫星的设想，由于其相对于以往的推进技术具有多种优势，目前激光推进已经成为一种重点研究的新型推进方式。激光推进的原理就是利用高功率激光与物质（固体、液体和气体）相互作用产生类似于化学火箭一样的喷射，从而推动物体前进。在激光推进技术中，国外的研究水平高于国内。

当前国外已经对激光推进进行了一些基础研究。美国伦塞勒工学院的 Myrabo 等人用自己设计的推力器，进行了吸气式和火箭模式的激光推进冲量耦合系数实验测试研究；美国物理科学研究所的 Pirri 用重复脉冲激光推进发动机对吸气式激光推进冲量耦合系数进行了实验研究；德国航空航天局技术物理研究所的 Bohn 等人研究了不同压强对激光推进冲量耦合系数实验测试研究；日本国家航天实验室以氩、氪、氙等惰性气体和水为推进剂进行了激光推进冲量耦合系数实验测试研究。国内目前处于起步阶段，装备技术指挥学院采用悬摆法测量冲量耦合系数；中科院唐志平、龚平等对吸气模式激光推进进行了机理分析及数值模拟。

本文模拟低压高空环境下，用复摆法测量冲量耦合系数，研究激光击穿气体工质的机理。

2 试验装置与测量原理

试验系统由激光器、真空舱、光船、测试系统、复摆系统构成。激光器为 TEA CO_2 激光器，脉宽为 200ns，波长为 10.64μm，单脉冲能量在 70J 左右波动，输出光斑近似为椭圆，短轴长 50mm，长轴长 60mm。光船的主体部分是碗状的轴对称抛物形反射镜，用来聚焦脉冲激光，形成环状或者点聚焦。实验使用点聚焦抛物线型光船，壁厚为 0.5mm，焦距 5mm，开口直径为 60mm，重 8.81g。光船放置在冲击摆上。整个实验过程中冲击摆放置在真空舱中，实验中真空舱内环境气体（He、Ar）压强集中在 6×10^4~5×10^3Pa 范围内变化。测量最大摆角所用的仪器为 Hi-Spec EM1012/2 高速运动分析仪，摄像速度为 1000 帧/秒。利用示波器与 E6B2-2000 型旋转编码器得到复摆的周期 T，根据周期计算出转动惯量 J。图 1 为复摆测试系统示意图。

激光束辐照到真空舱内的光船上，焦点附近的气体被击穿形成等离子体，等离子体迅速膨胀成为激光支持的爆轰波，爆轰波与光船壁面耦合产生推力，从而获得冲量并使光船偏离平衡位置，通过测量摆杆偏离平衡位置的最大摆角就可以计算得出光船的冲量大小。

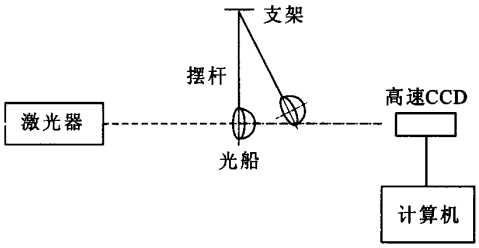

图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic of experiment setup

假设激光产生的冲量耦合系数在瞬间完成，并忽略了转轴和空气阻力的作用和复摆的中间过程。由机械能守恒定律可得：

$$\frac{1}{2}J\omega_{max}^2-mgL\ (1-\cos\theta_{max})=0 \tag{1}$$

式中，L 为转轴到复摆系统质心的距离；m 为复摆的整体质量；J 是复摆的转动惯量；ω_{max} 是最大角速度；g 为 9.8N/s²。

根据刚体定轴转动的角动量定理

$$\int_1^2 M\mathrm{d}t=\Delta(J\omega) \tag{2}$$

式中，M 是力矩；J 是复摆的转动惯量；ω 是角速度；t 是外力作用时间。若冲量耦合系数耦合瞬间完成，则表达式为：

$$M\cdot\Delta t=\Delta(J\omega) \tag{3}$$

若忽略阻力矩和重力矩，只考虑复摆的冲量 I，由于假设激光产生的冲量耦合系数在瞬间完成，因复摆的初速度为零，则复摆的冲量公式为：

万方数据

$$I=\frac{J\omega_{max}}{L}=\sqrt{\frac{2mgJ(1-\cos\theta_{max})}{L}} \quad (4)$$

其中，θ_{max}表示最大摆角。激光能量已知，由冲量耦合系数定义得到：

$$C_m=\frac{I}{E}=\sqrt{\frac{2mgJ(1-\cos\theta_{max})}{L}}/E \quad (5)$$

3 试验结果与分析

3.1 试验结果

图 2、3 分别是氦气与氩气的压力与角度以及压力与冲量耦合系数变化图，图中的实点（圆点为 Ar，倒三角为 He）表示测量数据点的平均值，实线表示变化的趋势，横坐标轴统一表示压强，采用指数表示，纵坐标分别为冲量耦合系数与角度，角度没有采用指数表示。

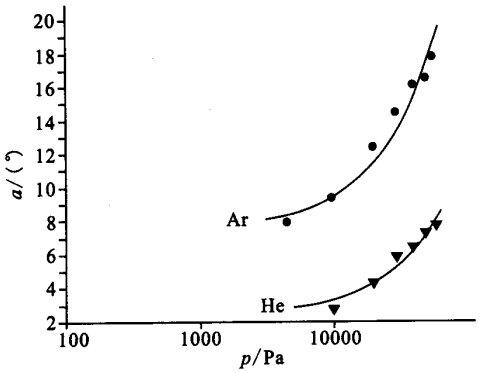

图 2 氩气与氦气中的压力-角度曲线

Fig.2 Angle vs. ambient pressure in Ar & He

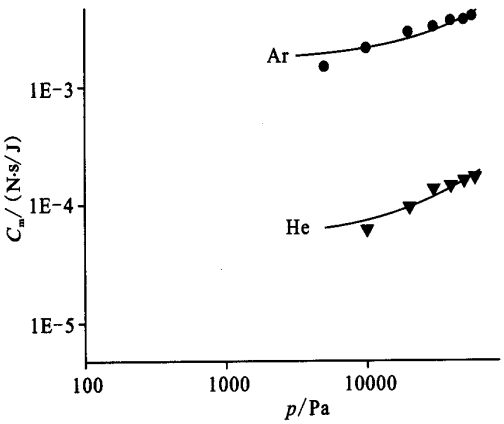

图 3 氩气与氦气中的压力-冲量耦合系数曲线

Fig.3 Momentum coupling coefficient vs. ambient pressure in Ar & He

从图 2、图 3 中可以看出，环境气体为氩气的时候光船获得的冲量耦合系数要高于氦气。在压强为 6×10^4Pa 时，氦气的冲量耦合系数为 1.78×10^{-4}N·s/J；氩气的冲量耦合系数为 4.34×10^{-4}N·s/J。从 6×10^4~3×10^4Pa，氦气压力-冲量耦合系数下降直线的斜率为 1.3×10^{-9}Pa；从 3×10^4Pa~1×10^4Pa，氦气压力-冲量耦合系数下降直线的斜率为 。从 5.7×10^4~3×10^4Pa，氩气压力-冲量耦合系数下降直线的斜率为 2.7×10^{-9}Pa；从 3×10^4Pa~5×10^3Pa，氩气压力-冲量耦合系数下降直线的斜率为 7×10^{-9}Pa。随着压力的减小，光船在氦气和氩气两种工质气体中实验获得的冲量耦合系数都减小。总的比较来看，在图中氩气减小幅度高于氦气，这是个引人关注的现象。

从图上可以看出，氩气与氦气中光船摆动角度随压强变化、冲量耦合系数随压强变化的趋势都大致相同，都是随着压强的降低而平滑地下降，这表明两种惰性单原子气体的光学击穿具有相似的性质，从中分析可以找出其中的规律。

一般来说，影响冲量耦合系数的因素很多：从工质方面，一种推进工质（气体、固体）击穿阈值越小，其电离能也越大，电子密度也越大，逆韧致吸收系数也越大，粒子之间碰撞频率也越大，冲量耦合系数就越大。对于激光器，脉宽加长，也会降低击穿阈值从而增加冲量耦合系数。光船焦距较短同样会导致较大的冲量耦合系数等等。等离子体的膨胀与周围气体的密度有关，也与气体热力学性质以及气体原子的离化能、原子量、电子振动频率以及原子参数有关。实验的条件变量是压强和击穿阈值，对此将在下文进行分析。

3.2 结果分析

激光在大气中电离击穿效应的产生是多种物理过程相互作用的共同结果。这些过程有的会增加自由电子密度，有的会抑制自由电子密度的增加。它们竞争的结果导致存在一个激光强度的阈值，在这个阈值之上，自由电子密度的增长速率大于其复合的速率。大的增长速率导致自有电子密度呈指数速率增加，迅速达到电离状态，这个过程通常叫做气体的击穿。只有当激光强度大于

万方数据

这个阈值时，击穿效应才可能发生。

一般来说，对于同一种气体，压强较高时，工质密度越大，背景气体比热容比低气压下的大，等离子体出射粒子与背景气体粒子之间的碰撞比低气压下剧烈，这加剧了等离子体在形成初期对激光脉冲能量的吸收，也使得等离子体在激光脉冲结束后不至于因为等离子体过度膨胀而迅速的损失热能。另一方面，较高的气体密度增加了背景气体对等离子体电磁辐射的吸收，等离子体周围的背景气体原子被激发到了亚稳态。当等离子体膨胀至该点时，这些处于亚稳态的原子通过无跃迁碰撞将能量再传回给等离子体，使能量损失缓慢，内能得以长时间维持，且变化较慢。但气压过高，因背景气体的热容及热传导系数很大，损失了大量的激光脉冲能量。然而当等离子体温度高到足以观测到原子谱线的发射时，高的激发温度不能导致高的离子发射强度，这时低的离子温度衰减速率的影响将更重要。等离子体周围气体的适当限制可以阻止等离子体的膨胀。一般认为，等离子体形成过程中，对同类气体来说，密度大，比热容小，热传导率低，离化能低，等离子体就越有效的吸收激光能量，激光击穿气体的效果就越好。

由上所述，对于同一气体，随着压强的下降，造成了冲量耦合系数的下降趋势越来越快。由于本文中压强属于低压情况（低于 1 个大气压），因此在实验中的主要因素就是随着压强的降低，背景气体的密度减少，降低了等离子体出射粒子与背景气体粒子之间的碰撞，减少了气体工质对等离子体电磁辐射的吸收，直接表现为冲量以及冲量耦合系数的减小。但是氩气试验的冲量减小幅度高于氮气，这是由于随着压强降低，氩气击穿阈值明显上升，而且上升幅度高于击穿阈值较大的氮气。

经过这些分析认为：原子序数较大的无机气体原子可以电离出更多的电子，击穿阈值更低；同样条件下更容易比其它气体击穿。对于同种气体，压强越低，击穿越难。理想的气体工质是低分子量并且含有容易离化的成份（H、He、Ar），用这些成分提高激光能量的吸收，从而提高击穿效果。氩的原子序数比氦的大，使得氩原子可以电离出比氢原子更多的电子，因此作为相同性质的气体，氩气更宜于发生光学击穿。

氩气试验中的冲量耦合系数减小幅度高于氮气，这个发现有助于开拓思路：随着科技的进步，光船在未来应用时可能携带本文研究的气体工质穿越大气层飞向太空。由于大气压强随着高度的增加而不断减小，在 4km 高空的稀薄大气时压强甚至只有 300Pa 左右，因此设想在激光推进的初期阶段采用氩气，由于其击穿阈值较低，因此产生的冲量较大。随着高度的降低，压强不断降低，这时采用混和氦气或者随着高度上升完全采用氮气作为推进气体（氮气的击穿阈值随压强变化慢），从而保证冲量不会随着高度的上升而急剧下降，保证了光船的速度平稳变化。考虑到生产成本与经济因素，氩气也适宜作为一种良好的推进气体。

4　结论

利用悬摆法比较了激光在不同压强条件下击穿不同气体测量的冲量耦合系数。结果表明：在实验测试压强范围内，两种推进剂气体的激光推进冲量耦合系数基本都随着压强的减小而减小；不同种类推进剂气体的激光推进冲量耦合系数差别较大，实验结果与国外相关领域的研究成果基本一致。影响结果的主要因素是摆角的测量。

参考文献：

[1] Myrabo L N, Messitt D G, Mead F B. Ground and flight tests of a laser propelled vehicle [R]. AIAA Paper 98-1001.

[2] 李修乾, 洪延姬, 何国强, 王军. 悬摆法测量气体推进剂激光推进冲量耦合系数[J]. 强激光与粒子束, 2006, 2.

[3] 金星, 洪延姬, 崔村燕, 等. 激光推进冲量耦合系数的测量方法[J]. 强激光与粒子束, 2004, 7.

（编辑：侯　早）

万方数据