

激光推进器辅助启动实验研究

彭永林¹, 胡春波¹, 何国强¹, 姜立东¹, 张钢锤², 张晓卫²

(1. 西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072; 2. 航天科技集团公司 第四研究院, 陕西 西安 710025)

摘要:为了研究激光推进器辅助启动机理,使用Nd:YAG固体脉冲激光器,并通过凸透镜聚焦光束来击穿工质,采用快速运动分析仪与纹影仪两种测量方式相结合,清楚地拍摄到了激光等离子体发光的照片和波后气流扰动纹影照片,估算出了等离子体持续时间及其他特征参数。实验中通过改变工质参数,等离子体波的空间尺寸及持续时间明显变化;实验发现采用不同的辅助启动方式会对激光推进器性能产生明显的影响。

关键词:激光推进;等离子体;冲击波;纹影测量

中图分类号: V43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2006)06-0013-03

激光推进将是未来最有发展前途的航天推进技术之一。美国、日本、德国、俄罗斯等国在激光推进方面的研究已经取得了很大突破,国内在1980年代初开展此项研究,目前已初步取得了一些研究成果。研究激光等离子体冲击波的性质是研究激光推进器启动机理的重要环节,而等离子体冲击波具有源点小、能量密度高、传播距离短、强度衰减快等特点,对这些参数进行精确测量存在许多困难。卞保民、林兆祥等利用探针及光谱分析的方法研究过激光等离子体激发和复合机制^[1-2];国外学者有利用瑞利散射法测量了激光维持爆轰波的压强、温度和速度^[3],有通过干涉法测量激光等离子体波波形和其他参数^[4]。从文献来看,国内外对激光推进器辅助启动机理研究都较少。

1 实验原理与系统

具有高功率密度的激光束辐照气体工质时,工质急速吸收激光束能量,并通过光电离、热电离、碰撞电离等机制转变为等离子体状态,在等离子体温度和密度较高的某些区域,等离子体逆韧致吸收入射到的激光束能量,通过气动力学机制与激光吸收相耦合;如果由激光维持的吸收波是超声速传播的冲击波,则称为激光维持的等离子体冲击波。理论分析认为:可以采用增加预电离的方式降低点火阈值,如在焦点附近放置一个高熔点金属体,当激光打在金属表面时,由于金属原子的电离势能比较低,电子很容易剥离出来,在金属体表面形成大量的自由电子,由于这些自由电子作为“种子”,使工质的击穿阈值大大降低。还有一些简单方法如高压放电产生的电弧,电弧能够有效地降低等离子体冲击波启动阈值。另外向工质中喷入杂质如气溶胶颗粒、水蒸气等也可能促使冲击波的形成^[5]。研究小组设计了一套实验装置来验证这些理论分析。

1.1 实验系统组成

实验系统由激光器、实验腔、压力及能量测试系统、压力控制系统、工质供给系统、聚焦及测试光路和辅助系统组成。激光器是中国科学院西安近代光学精密机械研究所研制的QYM2000-01型Nd:YAG固体脉冲激光器,波长1.06 μm,脉冲宽度5 ns,频率20 Hz,单脉冲最大能量2 J,光束束腰直径10 mm,发散角2 rad。使用的聚焦透镜焦距50、80、120 mm,直径25.4 mm,边缘厚度为1.8 mm。实验密闭空腔预留激光窗口、观测窗口、传感器接口和气体出入口等,设计承受最大压强1.5 Mpa;光束入、出射窗口采用直径50 mm、

收稿日期:2006-01-18

基金项目:国家“973”计划资助项目

作者简介:彭永林(1976-),男,陕西汉中,人,硕士,主要从事激光推进技术研究;
胡春波(1966-),男,山西河津,人,教授,主要从事航空宇航推进系统研究。

厚度 5 mm,具有三级光洁度的石英玻璃,不镀膜,透过率大于 90%。观测窗口选用直径 50 mm、厚度为 5 mm 的 GBR3 隔热玻璃,可见光透过率大于 60%,对波长为 1.06 μm 激光透过率小于 0.5%。图像测试系统包括美国柯达公司生产的 Hi - Spec EM1012/2 快速运动分析仪以及自行搭建的纹影系统,纹影光源使用功率 30 mW、波长 532 nm 的连续激光器。采用压电式压力传感器测量压力,压力控制系统采用气瓶加压和真空泵减压,通过电磁阀控制开关和气体流量,管路中加入气体过滤器。辅助启动分别采用喷水雾、置入电弧、加铝片、锌片、石墨和 PVC 等方式。图 1 是用快速运动分析仪拍摄到实验中的一幅照片,此时的激光束单脉冲能量为 1.26 J,聚焦透镜焦距为 50.8 mm,实验中观察到在聚焦区内出现瞬间的明亮火花并伴随清脆的爆炸声,实验测得光斑平均直径为 18.2 mm。

1.2 纹影测试系统

纹影测试系统原理见图 2,高能脉冲激光器 1 发出脉冲激光束经透镜 2 聚焦于密闭空腔 3 内产生等离子体冲击波,用作纹影光源的激光器 4 发出点状激光束,依次经扩束透镜 5 和光阑 6,准直透镜 7 将其转换为平行光束,通过腔体 3 内等离子体冲击波区域非均匀流场,携带流场波动信息的光束被纹影透镜 8 会聚于刀口 9 处,快速运动分析仪通过 CCD 采集信号并进行光电转换将图像存贮于计算机内。

2 实验结果及分析

2.1 聚焦点光束功率密度

实验通过激光烧蚀热敏纸的方法测得在不同位置处(见图 3,长度 mm)的激光束平均光斑直径(位置 1 - 位置 6 分别为 10、9.7、4.7、3.4、9.2 mm),已知实验中击工质击穿点在实验腔正中心,即在焦点前 15.7 mm 处,实验测试得到激光束直径约 0.25 mm,则激光器能量输出分别为 0.62 J 和 1.26 J 时,计算得出击穿点的功率密度约为 $1.5 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2 - 3 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$ 。

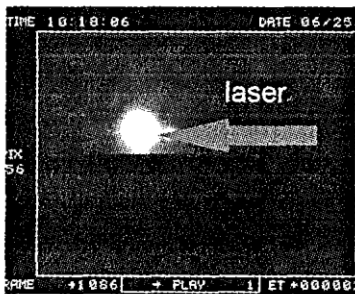


图 1 等离子体发光照片

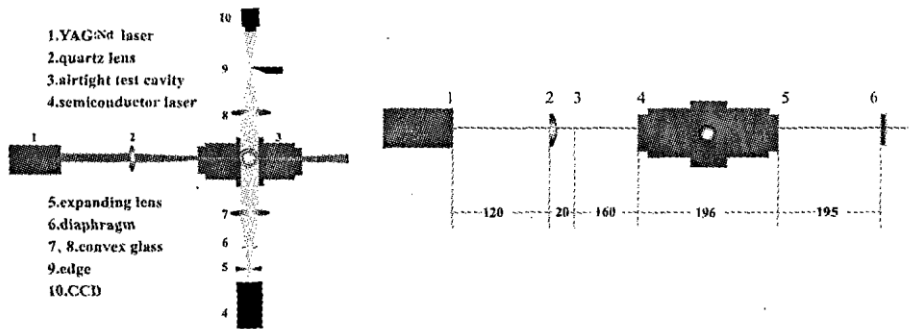


图 2 纹影光路示意图

图 3 激光能量测量点

2.2 能量转换效率

采用中国计量科学研究院研制的 E1000 型激光能量计,8 次测量了沿光束方向不同位置(图 3)的激光能量(表 1),通过数据分析可知激光输出的能量较稳定,即单次实验的数据都具有可比性。图 4 说明激光束经过透镜及实验腔窗口材料后的能量变化情况,其中 E1、E2 代表激光器输出能量,分别为 0.62 J、1.26 J,坐标横轴数字代表不同的测量点。计算得到激光器输出能量 E1、E2 时能量转换效率分别为 56.59% 和 49.11%,这与德国航空航天研究所(DLR)得出的 40% - 50% 的转换效率较为接近。

表 1 不同位置激光脉冲能量/J

Num	Location 1		Location 3		Location 5	
	II	III	II	III	II	III
1	0.611	1.252	0.595	1.119	0.209	0.346
2	0.617	1.252	0.577	1.124	0.216	0.367
3	0.619	1.258	0.602	1.131	0.196	0.387
4	0.605	1.25	0.591	1.123	0.205	0.398
5	0.622	1.256	0.594	1.131	0.230	0.377
6	0.632	1.254	0.593	1.132	0.197	0.371
7	0.626	1.263	0.601	1.142	0.223	0.352
8	0.635	1.26	0.587	1.141	0.223	0.350
Average	0.621	1.256	0.593	1.130	0.212	0.369
Standard deviation	0.010 1	0.004 5	0.008 0	0.008 2	0.012 6	0.018 5
Specimen variance	0.000 1	0.000 02	0.000 1	0.000 1	0.000 2	0.000 3

2.3 辅助启动比较

利用快速运动分析直接测量了常温常压下不同辅助启动方式对等离子体冲击波的影响。实验透镜焦距为250 mm(实验证明短焦距透镜更有利于等离子体冲击波的形成,选择较长焦距透镜的原因是满足密闭实验空腔尺寸的要求),激光器输出单脉冲能量为1.26 J,每种工质实验次数在10次以上。如图5所示,通过直观分析可以看出:电弧加入后击穿光斑略有增大(1.15倍)但不明显,原因是电火花与激光束距离没有达到足够近,激光束电场与电弧电场之间的作用甚微;加入铝片后光斑直径增加到近1.89倍;而在焦点处喷射水雾后,光斑直径增加到原来的1.38倍,分析认为,进一步降低雾化液滴直径,光斑直径将会显著增加。实验还发现,激光束输出能量较弱(0.3 J)时,直接辐照空气未能击穿空气,而通过辅助启动的方式可以使空气击穿,即辅助启动能降低激光击穿空气的阈值。

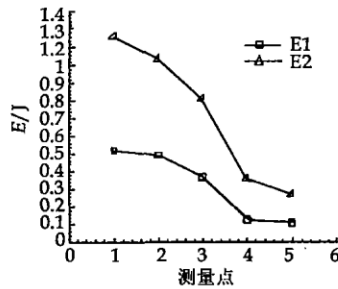


图4 不同位置处激光脉冲能量变化

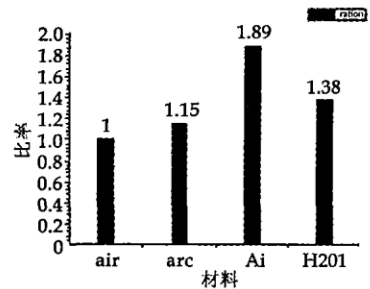


图5 不同辅助启动光斑直径比较

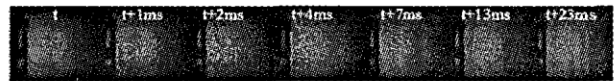
电弧加入后击穿光斑略有增大(1.15倍)但不明显,原因是电火花与激光束距离没有达到足够近,激光束电场与电弧电场之间的作用甚微;加入铝片后光斑直径增加到近1.89倍;而在焦点处喷射水雾后,光斑直径增加到原来的1.38倍,分析认为,进一步降低雾化液滴直径,光斑直径将会显著增加。实验还发现,激光束输出能量较弱(0.3 J)时,直接辐照空气未能击穿空气,而通过辅助启动的方式可以使空气击穿,即辅助启动能降低激光击穿空气的阈值。

2.4 纹影测量

采用实验小组设计的纹影测试系统结合快速运动分析仪,测试了空气中分别以金属铝片、锌片、非金属石墨、高分子材料PVC以及水雾等作为辅助启动方式时,激光等离子体冲击波的消散过程。图6(a)是单纯的空气的纹影图,图6(b)是加入锌片的纹影图,从这些图可以看出等离子体冲击波造成的空气扰动波呈纺锤形近似球状,在0.1 ms后等激光离子体波传播速度迅速降低,波后空气扰动的持续时间大约为20 ms;同时可以看出,加入辅助启动相对单一的工质,周围空气产生的扰动波区域更大,持续时间更长,纹影图亮区面积更广,即空气密度梯度变化大,传播速度更快。



(a) Air 空气



(b) Air + Zinc Foil 空气 + 锌片

图6. 等离子体冲击波演化过程纹影图

3 结论

使用YAG固体脉冲激光器,通过透镜点聚焦的方式,能够使空气击穿产生等离子体冲击波,采用快速运动分析仪能够直观地测量等离子体冲击波的传播过程,对研究激光推进辅助启动机理有很大帮助;采取向工质中加入金属单质、高分子、水雾、电弧等辅助启动方式,能有效降低激光维持等离子体冲击波的起动机理。

参考文献:

- [1] 卞保民,杨玲,陈笑. 激光等离子体及点爆炸空气冲击波波前运动方程研究[J]. 物理学报,2002,(4):809-812.
- [2] 林兆祥,常启海,程学武. 激光击穿大气等离子体的光谱实验研究[J]. 原子核物理评论,2002,(7):88-90.
- [3] Yan H. Laser Energy Deposition in Quiescent Air[R]. AIAA 2003-1051
- [4] Raymond F. Smith Improved Energy Coupling Into The Gain Region Of The Ni-Like Pd Transient Collisional X-Ray Laser [R]. SPIE,5197167
- [5] 朱定强,郑力铭,蔡国飙. 激光推进技术中激光与工质相互作用[J]. 北京航空航天大学学报,2004,(7):635-639.

(编辑:姚树峰)

(下转第75页)

(1. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, Shaanxi, China; 2. School of Management, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Based on the study of decision content for materiel support and command aided support system, a modeling method for complex system is put forward. Firstly, the process of materiel support activity is described by using IDEF3 method and decision problem on materiel support activity is summarized. Secondly, the IDEFO function modeling for aided support system is established. Finally, the method of establishing information model and dynamic model is pointed out. The establishment of model becomes a stable foundation for the follow - up development.

Key words: materiel support and command system; aided decision; IDEF3; IDEFO

(上接第 15 页)

Experimental Research of Aided Ignition in Laser Propulsion

PENG Yong - lin¹, HU Chun - bo¹, HE Guo - qiang¹, JIANG Li - dong¹, ZHANG Gang - chui², ZHANG Xiao - wei²

(1. College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China; 2. The Fourth Academy of CASC, Xi'an 710025, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the form mechanism of Laser Supported Detonation (LSD) in Laser Propulsion, an experiment was made. YAG laser 2J/pulse with pulse - width of 5 nsec, focalized through the convex lens and exploded around the focus. Using the Hi - spec processor and schlieren apparatus in the experiment the emission images of laser sustained plasma and schlieren images of disturbed air field were obtained, and then the duration time of plasma and other characteristic parameters were calculated. By changing the material parameters, the plasma wave's magnitude increased obviously, the duration time lengthened the threshold value of LSD fell distinctly.

Key words: laser propulsion; plasma; detonation wave; schlieren measure