

激光等离子体推进在火箭推进技术领域的应用前景*

鲁欣^{1,†} 张杰¹ 李英骏²

(1 中国科学院物理研究所 北京 100080)

(2 中国矿业大学(北京校区)物理系 北京 100083)

摘要 激光等离子体推进将给火箭推进技术带来革命性的发展. 高强度短脉冲激光和物质相互作用可产生速度为每秒数百公里的等离子体喷射, 可以几十倍地提高推动的比冲. 文章主要介绍了激光等离子体推进的原理、研究现状, 并对其应用前景进行了分析.

关键词 推进, 激光等离子体, 比冲

PROSPECTIVE APPLICATION OF LASER PLASMA PROPULSION IN ROCKET
TECHNOLOGY

LU Xin^{1,†} ZHANG Jie¹ LI Ying-Jun²

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

(2 Department of Physics, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract Interest in laser plasma propulsion is growing intensively. The interaction of high intensity short laser pulses with materials can produce plasma expansion with a velocity of hundreds of km/s. The specific impulse of ablative laser propulsion can be many tens of times greater than that of chemical rockets. The development and potential application of laser plasma propulsion are discussed.

Key words propulsion, laser plasma, specific impulse

1 引言

1997年,在美国新墨西哥州的沙漠里,一支微型火箭拔地而起,上升到了20多米的高度.当时这个实验在科学界引起了轰动,我国的《科技日报》也作了报道.看到这里你或许不以为然,的确,这个火箭还没有焰火飞得高.但是当你知道这支火箭上没有安装任何发动机时,你一定会觉得吃惊.是什么把火箭推上天的呢?答案是激光.2002年6月出版的在物理学界颇有影响的Applied Physics Letters杂志上,刊登了一篇关于激光等离子体推动纸飞机模型的实验的文章.一系列的实验说明,采用激光作为能源来替代火箭发动机使用的化学燃料是可行的.

火箭推进技术目前仍是人类摆脱地球引力,实现太空旅行的唯一手段.传统的火箭依靠化学燃料燃烧后产生的气体向后高速喷出而获得在反冲方向上的推动力.从第一枚火箭升空直到现在,投入实用

的火箭全部是化学燃料火箭.早在20世纪初,俄国学者齐奥尔科夫斯基就仔细研究了火箭的反冲动力学,并于1903年导出了著名的齐奥尔科夫斯基公式(非相对论的):

$$v = v_{\text{jet}} \ln(m_0/m)$$

该公式描述的是在没有外部作用的情况下,一个最初静止的、质量为 m_0 的火箭以相对速度 v_{jet} 喷出燃料时,火箭在运动过程中的瞬时质量 m 和速度 v 的关系.从齐奥尔科夫斯基公式可以看出,在相同有效载荷的条件下,火箭最终获得的速度正比于发动机的喷气速度.衡量火箭发动机性能的一个重要参数是比冲,即单位重量的燃料燃烧后产生的冲量.比冲是火箭燃料利用效率的直接反映,以秒为单位.

* 国家自然科学基金(批准号:10004015,10176034,19825110)资助项目

2002-07-25收到初稿,2002-08-13修回

† 通讯联系人. E-mail: luxin@aphy.iphy.ac.cn

比冲在数值上等于发动机的喷气速度除以重力加速度. 目前性能最好的液氢液氧推进剂所能达到的喷气速度为 4km/s 左右, 也就是说, 比冲为 400s 左右. 根据这些数据, 我们可以计算出化学燃料火箭的能量 - 动量转换效率(耦合系数). 齐奥尔科夫斯基公式可以写成如下的微分形式:

$$m dv = v_{\text{jet}} dm,$$

等式左边代表火箭动量的微小增量, 这个动量增长是以燃烧了质量为 dm 的燃料为代价的, 给等式两边同时除以 dm (为燃料的燃烧热), 就可以得到火箭的能量 - 动量转换效率, 大小为 $v_{\text{jet}}/$. 我们知道, 氢的燃烧热为 119662J/g, $v_{\text{jet}} = 4\text{km/s}$, 因此液氢液氧火箭发动机的能量 - 动量转换效率为 $3.3 \times 10^{-5} \text{N} \cdot \text{s/J}$, 即 $3.3 \text{ dyne} \cdot \text{s/J}$, 这个数值可以代表现在的绝大多数化学燃料火箭的技术水平.

当今时代是科学技术飞速发展的年代. 随着新能源、新技术、新材料的不断涌现, 科学家们提出了许多包含新概念的推进方法, 其中包括激光等离子体推动、电磁场推动、核反应推动等等. 其中激光等离子体推动方式在许多性能指标上优于普通的化学燃料火箭, 而技术上又比较容易实现. 本文将对激光等离子体推动技术的发展作一较为详细的介绍.

2 等离子体推进是未来火箭的发展方向

由于受到产能机制的限制, 化学燃料发动机的喷气速度已经很难继续提升. 因为无论多么剧烈的化学反应都仅仅是蕴藏在原子最外壳层电子的能量的释放. 如果要使单位质量的推进剂携带更多的能量, 产生更高的压力, 就必须剥离原子更深壳层的电子使推进剂变成高温高密度的等离子体. 依靠化学燃料燃烧是不可能实现这个目标的, 推进剂的能量只能由外部注入, 强激光脉冲瞬时加热就是一种高效的能量注入方式. 当然, 也可以采用其他的能量注入方式, 比如快速放电, 目前这方面的研究也在进行中.

激光推进有两种工作模式: 一种被称作“大气呼吸模式”; 另外一种被称作“火箭模式”. 大气呼吸模式直接利用大气层的空气作推进剂, 激光脉冲被火箭的光学系统聚焦后击穿燃烧室里的空气产生爆轰波, 爆轰波的波峰和燃烧室的腔壁相碰撞时就带动量传递给了火箭. 大气呼吸模式的好处是火箭自身不需要携带推进剂, 但局限性也十分明显, 它只能在地面到二三十公里高的大气层区域工作, 并且随

着高度的增高其工作效率会逐渐下降. 超过了一定高度, 就必须转换到火箭模式.

火箭模式的基本原理是利用高强度的激光辐照推进剂, 产生瞬态的高温高密度等离子体, 等离子体迅速膨胀, 并以很高的速度向后喷出而使火箭受到向前的推动力.

激光推进技术的研究始于冷战时期的美国, 在 1972 年的时候, 激光器出现后没过多久, 就有人提出可以用 1GW 的地面激光将 1 吨重的载荷加速到 10 个重力加速度并送入卫星轨道的设想^[1]. 随后美国宇航局和空军就开始了激光烧蚀推进的实验和理论研究^[2-4]. 在 1974 年的实验中, 曾经用几十焦耳能量, 3—100 μs 脉宽的 CO_2 激光聚焦在固体和气体喷嘴, 测到了 500—900s 的比冲和几十 $\text{dyne} \cdot \text{s/J}$ 的能量 - 动量转换效率^[2], 按照当时的实验结果推算, 使 1 吨重的火箭在真空中达到 10G 的加速度需要单脉冲能量 10^6J , 重复频率 350Hz 的脉冲激光系统. 可以看到, 在当时激光功率还很低的情况下, 激光烧蚀推进的效率就已经明显高于化学燃料火箭. 接着, 苏联、日本等其他国家也开始涉足这个领域^[5,6], 由于应用潜力巨大, 所以在冷战结束之后, 这项研究仍旧继续进行.

2.1 大气呼吸模式的激光推进研究的进展

本文开头提到的实验是大气呼吸模式激光推进的重大突破^[7]. 该实验是美国宇航局和美国空军的联合实验, 是在新墨西哥州的沙漠里进行的. 火箭模型是形似陀螺的轴对称锥形体, 直径约 14cm, 重量只有 50g 左右, 其结构和外形见图 1.

激光脉冲经抛物线锥型反射镜呈环状聚焦在燃烧室内并击穿那里的空气, 依靠产生的爆轰波推动火箭模型. 驱动激光是二氧化碳脉冲激光, 单脉冲能量为 1000J, 脉宽 30 μs , 重复频率为 10Hz. 该实验成功地使火箭模型的上升高度达到了 20m. 图 2(a) 是火箭模型升空时某一瞬间的照片, 图 2(b) 为反映火箭模型升空过程的照片. 图中看到的光晕就是被爆轰波散射出来的空气等离子体的发光, 光晕的边缘对应的就是爆轰波的波峰到达的位置. 图 3 是实验中测到的单脉冲激光产生的冲量和激光脉冲的能量关系, 曲线的斜率就是激光能量 - 动量转换效率, 约为 $12.6 \text{ dyne} \cdot \text{s/J}$. 根据最新的报道, 在 2000 年的类似实验中已经使火箭模型上升了 70m.

2.2 高强度短脉冲激光用于火箭推进模式的可行性研究

从理论上讲, 短脉冲激光比长脉冲和连续激光

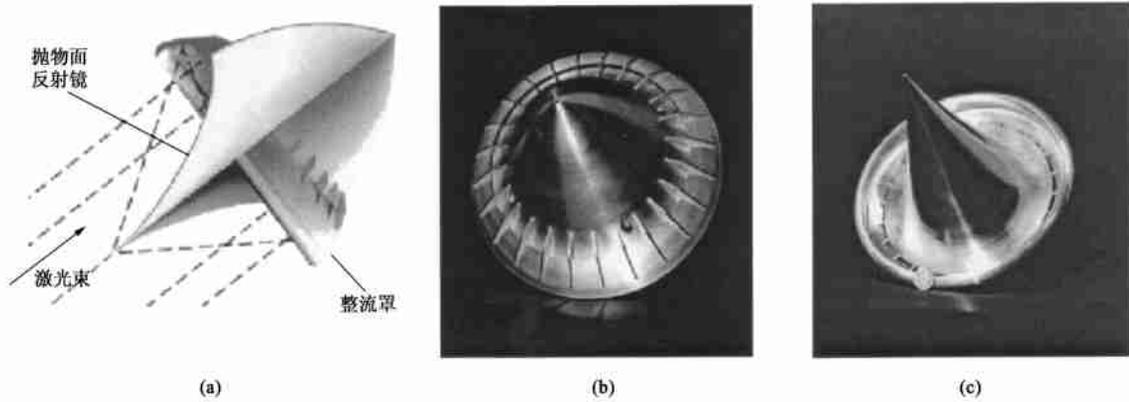


图1 火箭模型的结构图(a)和实物照片(b),(c)

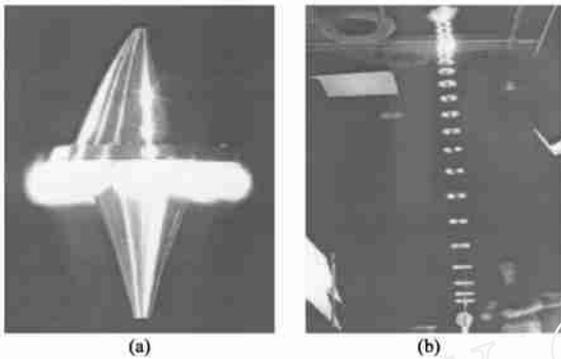


图2 火箭模型升空时的照片
(a)某一瞬间;(b)升空过程

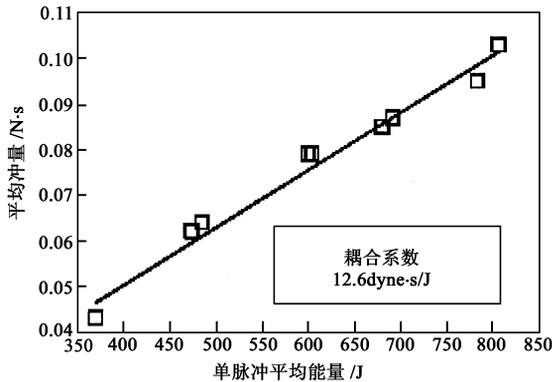


图3 单脉冲的激光产生的冲量随能量的变化

更适合作火箭模式的推进,因为长脉冲激光的功率相对较低,而且有相当一部分的能量会被燃烧室外面的等离子体吸收,而这部分等离子体对推进的贡献很小. 高强度的短脉冲激光和物质相互作用则属于激光等离子体物理的范畴,在这个领域已经积累了非常丰富的理论知识、模拟程序、实验设备和研究结果,可以直接用于激光等离子体推进的研究. 数值模拟和实验结果都表明,功率密度超过 10^{13} W/cm^2

的激光脉冲和物体表面相互作用产生的等离子体温度可超过百万度,膨胀速度可达百公里/秒的量级. 如果将这样的等离子体喷射用于推进,将获得两个量级的效率的提高. 因此,最近几年科学家们做了许多比冲测量的实验^[8,9]. 采用峰值强度为 $5 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ 左右、脉宽在 100 ps 以下、波长为 532 nm 的激光脉冲轰击不同的推进材料,并测定了比冲(图4)和激光脉冲产生的冲量(图5)^[9]. 实验结果表明,比冲随靶材料元素的核电荷数增加逐渐减小,但是动量转换效率则是重元素略高于轻元素.

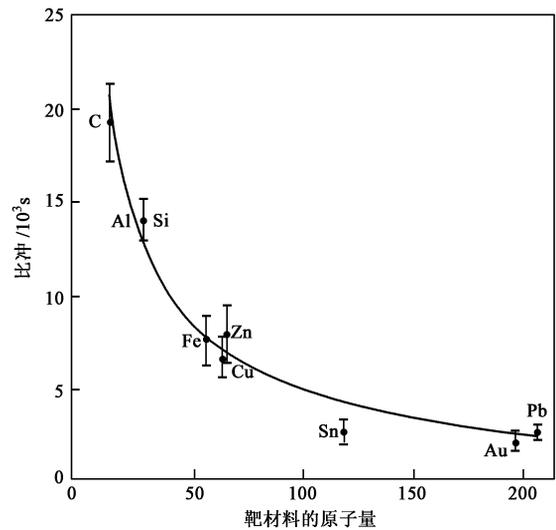


图4 比冲随靶元素原子量的变化

从图4可以看到,用碳材料作推进剂时,测得的比冲为 $2 \times 10^4 \text{ s}$,这意味着喷气速度可达 200 km/s ,远远超过了化学燃料火箭的喷气速度. 假如要把1吨重的卫星加速到 8 km/s 的第一宇宙速度,用化学燃料火箭至少需要携带6.4吨的推进剂,而采用激光等离子体推进方法,理论上只需要 40 kg 的推进剂就够了.

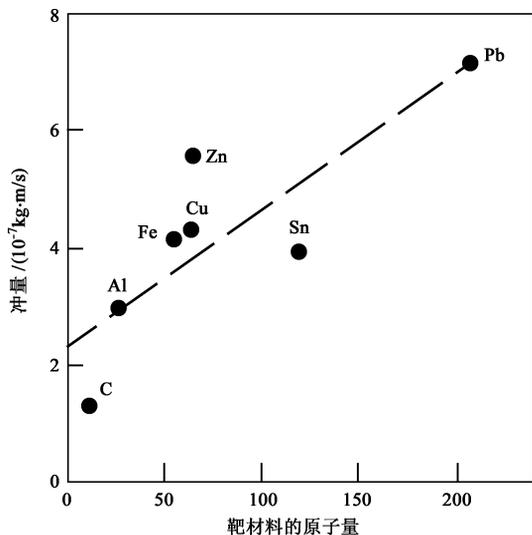


图5 激光脉冲产生的冲量随靶元素原子量的变化

2002年激光烧蚀推进的研究取得了令人激动的结果^[10],东京技术研究所成功地进行了激光驱动纸飞机模型的实验.该纸飞机模型重0.1—0.2g,尾部镶有一块0.1mm厚的铝膜作烧蚀推进材料.通过采用特殊的靶构形设计,实验中测到了最高达500dyne·s/J的能量-动量转换效率.

从目前的实验结果来看,比冲随激光的功率密度的提高而增大.目前激光技术已经获得了巨大发展,已经造出了各种波长、脉宽从微秒到飞秒,功率最高可达 10^{15} W的激光装置,究竟什么样的脉冲和靶的构造最适合用来做激光等离子体推进呢?目前还没有进行过系统的研究.

3 激光等离子体火箭推进技术的优缺点

激光等离子体推进技术的优点是显而易见的.首先它的比冲和能量-动量转换效率远远大于一般的化学燃料火箭.其次是安全性好,火箭本身不依靠燃烧化学燃料获得动力,能量主要来自外部激光束,这样推进剂本身的燃烧值就变得不重要,因此完全可以采用不可燃的材料作推进剂,这便使火箭的制造加工、发射以及使用过程更加安全.第三是污染小而且可以控制.目前很多种类的化学燃料及其燃烧后的产物的排放物是有污染甚至是有毒性的.而激光推进火箭完全可以用清洁无污染的材料作推进剂而不产生任何环境污染.

激光等离子体推进技术走向实用化尚需要克服一些重要的技术难题.首先目前的激光脉冲单发次

传递给载荷的动量很小,推进功率并不高,所以近期内还难以代替传统的火箭,因为克服重力加速载荷需要很大的功率.但是同时我们也应该注意到,实践中并不是在所有情况下都需要大的推力,小推力装置同样具有广泛的用途.目前的台面型大功率脉冲激光装置就非常适合制造高效率的小推力装置.其次要求激光束能够在长距离稳定传播而不发散.解决途径有两个,一是增大激光器的口径,例如直径为1m的 CO_2 激光可在真空中传播几十公里而没有明显的发散.二是利用空气的非线性自聚焦效应抵消衍射和自由电子的散焦效应,而使激光束形成稳定的传播,数值模拟和实验都显示,激光束能够在电离通道中长距离稳定传播^[11].还有一个问题就是火箭的飞行姿态和方向的控制,目前人们已经提出了一些初步的设想,例如采用多路激光从不同的方向推动火箭等等.

4 结论

激光等离子推进有着化学燃料火箭推进无可比拟的优越性,并且实现起来并不十分困难.对此我国的新闻媒体做了报道,但在我国与之相关的系统的科学研究才刚刚起步.激光等离子体火箭推进是激光等离子物理和火箭推进技术相结合的新研究领域,它的出现将使火箭推进技术摆脱对化学燃料的依赖,进入更加广阔的发展空间,给航空航天事业带来革命性的发展.

参 考 文 献

- [1] Kantowitz A. *Astronautica and Aeronautica*, 1972, 10(5): 74
- [2] Pirri A N, Monsler M J, Nebolsine P E. *AIAA J*, 1974, 12(9): 1254
- [3] Simons G A, Pirri A N. *AIAA J*, 1977, 15(6): 385
- [4] Richard J C, Morales C, Myrabo L N. *AIAA Paper 88-2970*, 1988
- [5] Ageev V P *et al.* *Acta Astronautica*, 1980, 7: 79
- [6] Azechi H *et al.* *Jpn. J. Appl. Phys. Part 2*, 1981, 20: L477
- [7] Myrabo L N *et al.* *AIAA98-1001*, *Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, 36th, 1998
- [8] Pakhomov A V, Gregory D A. *AIAA J.*, 2000, 38(4): 725
- [9] Thompson M S *et al.* *Ablative Laser Propulsion: The Study of Specific Impulse and Related Dynamic Characteristics of Elementary Propellants*. Proceedings of NASA JPL/MSFC/UAH 12th Annual Advanced Space Propulsion Workshop. Huntsville, Alabama: University of Alabama in Huntsville, 2001
- [10] Yabe T *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 80: 4320
- [11] Yang H *et al.* *Phys. Rev. E*, 2001, 65: 016406