

激光等离子体推进技术研究新进展*

郑志远^{1,2} 张翼¹ 吴秀文² 鲁欣¹ 李玉同¹ 张杰^{1,†}

(1 中国科学院物理研究所 北京凝聚态物理国家实验室 北京 100080)

(2 中国地质大学材料科学与工程学院 北京 100083)

摘要 随着激光技术的发展,激光等离子体推进技术越来越来呈现出其独特的优势,现在已成为当前科学研究和推进领域的研究热点之一.文章对激光等离子体推进技术的应用以及目前的研究进展进行了总结.

关键词 激光推进,激光等离子体,靶材料,微推进

New developments of laser plasma propulsion technology

ZHENG Zhi-Yuan^{1,2} ZHANG Yi¹ WU Xiu-Wen² LU Xin¹ LI Yu-Tong¹ ZHANG Jie^{1,†}

(1 Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

(2 School of Materials Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract the rapid development of laser technology, laser plasma propulsion is clearly demonstrating its distinct advantages, and has become a hot topic in propulsion research. Prospective applications and recent research progress are reviewed.

Keywords plasma propulsion, laser plasma, target material, microthrust

1 引言

“你希望孩子们乘着激光束去太空旅行吗?”这是著名学者 Phipps 在 2004 年国际激光束能量推进会议上提出的一个问题.这句话以幽默的方式表达了人们对激光等离子体推进技术在航空航天领域应用的一种期待,同时表明了激光等离子体推进技术未来的发展目标.

传统的卫星发射,需要大型的化学燃料运载火箭.化学燃料推进的比冲较低^[1,2],约为 200—500s,有效载荷比约为 1.5%,发射成本约为 10000 美元/千克.为了克服化学燃料推进本身所具有的这些局限,人们一直在探索一种新的发射方式来代替化学燃料推进.1972 年,美国学者首先提出了利用激光烧蚀产生的等离子体来代替化学燃料推进空间飞行器的概念^[3].随后,其他发达国家如德国、苏联、日本等也开始涉足这个领域.由于该技术所具有的低发射费用、高比冲、污染小等独特优势,使得它在航

天航空、卫星发射、通讯等方面都呈现出广阔的应用前景.例如可以用来消除太空垃圾、发射低轨道微型飞行器、控制微型飞行器的姿态等,此外还有近几年发展起来的微推力器的关键技术^[4,5].近几年来各国对激光等离子体推进技术的研究力度进一步加大,除了进行大量飞行器的概念设计和基础理论研究外,还进行了激光推进飞行器模型的可行性实验研究.从 2002 年起,国际上开始举办题目为《束能推进》(Beamed Energy Propulsion)的国际会议,各国共同探讨激光等离子体推进技术的发展.从 20 世纪 90 年代开始,国内一些高等学校和科研院所如中国科学技术大学、装备指挥技术学院、中科院物理研究所等也开始了这方面的研究工作^[6,7],并已取得了一些突破性进展.

* 国家自然科学基金(批准号:10374116,10374115,10334110)和国家高技术惯性约束核聚变主题联合资助项目

2006-06-21 收到初稿 2006-11-08 收到修改稿

† 通讯联系人. Email: jzhang@iphy.aphy.ac.cn

2 激光推进的工作模式及研究进展

激光等离子体推进的原理与化学燃料推进的原理相同,都是利用反冲作用来实现的.所不同的是,化学燃料推进依靠的是化学燃料的燃烧,而激光推进中利用的是激光束辐照靶面产生的超音速喷射的等离子体.由于克服了燃烧温度的限制,等离子体的温度可达到 10^4K ,同时比冲达到 10^5s .与化学燃料相比,激光等离子体推进技术可以将发射费用降低2个数量级,实现近地轨道的发射费用约为几百美元/千克,同时大大降低推进剂的消耗.激光等离子体推进同样需要一定的介质作为推进剂,根据推进介质的不同,可分为“大气呼吸模式”和“火箭模式”两种.大气呼吸模式是以大气作为介质,利用激光将空气离子化时产生的爆轰波作为动力源的一种推进模式.该模式的优点在于飞行器不需要消耗自身质量,这意味着比冲可以达到无限大,缺点在于只能应用于大气层或低轨道的发射,超过一定高度后需要转换推进模式.实验上已经成功地利用该工作模式进行了飞行器模型的推进飞行实验.迄今为止,垂直自由飞行的最高记录为 71m ,限制这一高度的主要原因是缺乏更大功率的激光器.需要提及的是,在目前很多实验中^[8-10],使用的激光器都是脉冲宽度为微秒量级的 CO_2 激光器.对于这类脉冲宽度较宽的激光束,除了需要对飞行器尾部进行特殊设计以实现激光束的连续聚焦外,还存在激光束在传输过程中的能量损耗问题.针对这一点,中国科学院物理研究所提出了“激光等离子体通道推进”的概念.该方法利用超短脉冲激光在大气中传输时产生的长距离等离子体通道作为推进源,实现了长距离内飞行器的连续稳定推进.该方法既避免了飞行器尾部的复杂光学聚焦系统,又解决了光束传输过程中的能量损耗问题.图1是中国科学院物理研究所研究小组利用自行研制的飞秒激光装置产生的等离子体通道推进飞机模型的演示实验,在几米长的通道内,飞机模型被平稳地推进,耦合系数达到了 $8.5\text{ dyne}\cdot\text{s}/\text{J}$ ^[11].这一新颖的推进模式引起了激光推进研究界的广泛兴趣^[12].到目前为止,激光等离子体通道的产生长度已经达到公里量级^[13],这为激光等离子体通道推进技术的进一步应用提供了坚实的基础.此外,该研究小组还测量了“大气呼吸模式”中环境气压与动量耦合系数的关系^[14].结果发现,随环境气压的降低,耦合系数减小的规律如图2所示,环境气压

为 5Pa 时的耦合系数仅为大气压下的十几分之一.这进一步表明,超过一定飞行高度后必须转换推进模式.

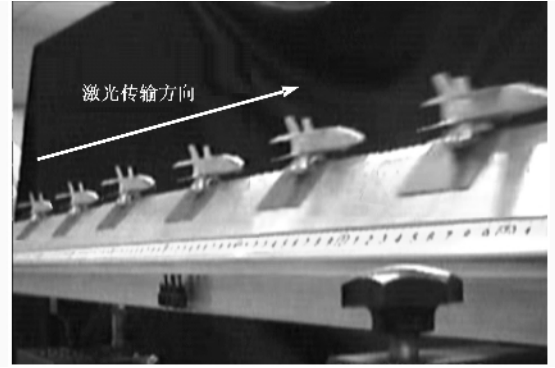


图1 飞秒激光在大气中传输产生的等离子体通道推进飞机模型(图中的箭头方向为激光传输方向)

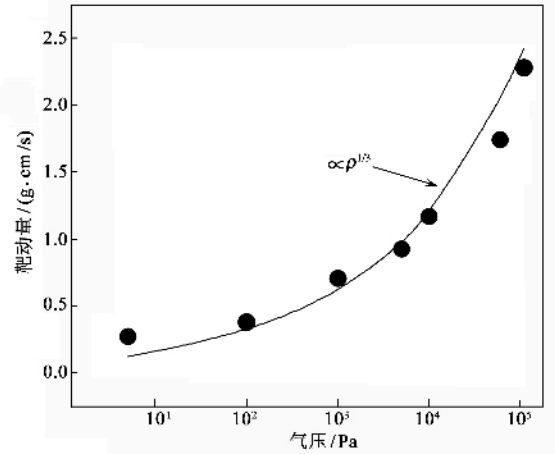


图2 靶动量随环境气压的变化(其中 ρ 为气体密度)

激光推进的另一种工作模式是“火箭模式”或称为“烧蚀模式”,即利用一定的物质作为推进剂.“火箭模式”既可以应用于大气环境下,也可以应用于太空中.对于“火箭模式”,现在已经进行了大量的基础性研究,研究内容主要集中在靶材的选择、耦合系数的提高、比冲的测量以及靶结构的优化等方面.靶材的选择是研究人员首先需要解决的问题.理想的靶材不但具有高的耦合系数和高的比冲值,还应具备重量轻、造价低、对环境污染小等特点.

3 靶材的选择

激光推进的靶材即推进剂可以是固体、液体和气体.推进效率除了与激光器本身的参数(脉宽、波长、强度等)有关外,还与靶材的特征参数如状态、分子量、离子化阈值、热导系数等有关.在这一方面,国

内外对大量靶材进行了尝试,包括各种常见的金属(铝、铜、铅、镁等)以及生活中常见的材料(酚醛树脂、纸上的复印墨、玻璃上的黑墨水、纤维玻璃、石墨片、照相胶卷、录音磁带、水、PVC薄膜等)。Bohn等^[8]认为,聚甲醛树脂这种塑性材料是固体推进剂的首选;Simons等认为,石墨材料的冲量耦合系数较大^[15];日本国家实验室在做实验时发现,用碳和环氧树脂组成的双层靶材的冲量耦合系数至少提高了一个数量级^[16];Pakhomov认为,低离化阈值的金属铅是一种理想的靶材^[17]。至于那一种材料是最合适的,目前虽然已经发现了一些规律,但还没有一个定论^[18]。对于固体靶材而言,实验上已经发现材料的原子量越小比冲就越大的规律(如图3所示)。

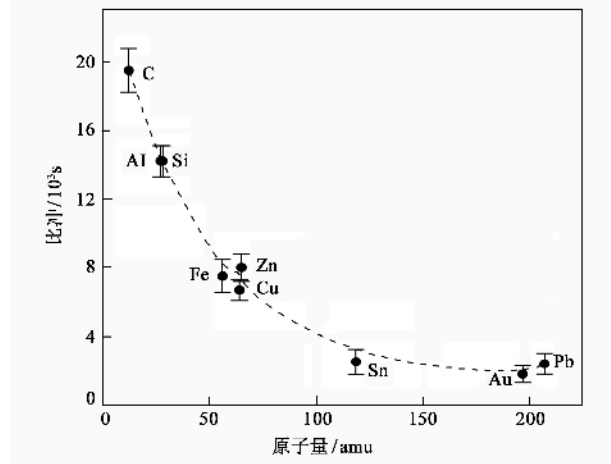


图3 推进比冲与材料原子量的关系

理想的靶材,除了本身具有低的原子量之外,还应具有低的离化阈值。这一点在利用“烧蚀模式”工作的激光发射中是非常重要的。例如在地基发射中,空气的离化是不希望发生的,因为它会造成光束传输过程中的能量衰减。为了避免沿着激光束传输过程中等离子体的形成,固体靶的离化阈值应该低于空气的离化阈值。对于固体靶材,目前研究主要集中在金属和低原子量富氢的CH材料方面。固体的金属材料,除了易于加工外,它们还具有极低的光束穿透深度,理论上能够提供很高的比冲。但金属材料一般具有良好的导热性,这使得入射激光的强度要比绝缘的CH材料高2—10倍,以补偿激光脉冲由于热传导而造成的损耗,同时金属材料的烧蚀阈值也比较高。CH材料的优点是重量轻、价格低廉,同时没有热传导造成的能量损失。但由于其接近于化学燃料,快的烧蚀速度以及较深的光束穿透深度会影响到比冲的大小。Luke等对CH材料中的普通PVC

薄膜进行了实验^[19],认为双层结构的PVC薄膜的推进效果更好。在双层结构中,第一层为透明的约束薄膜,第二层为黑色的烧蚀薄膜,激光束透过第一层薄膜,直接聚焦到烧蚀薄膜上。这种结构不但具有高的耦合系数,而且通过薄膜表面形状,可以控制等离子体的喷射方向(如图4所示)。Schall等在CH材料基础之上,提出了金属掺杂的CH复合材料,即在CH材料中掺入不同比例的金属成分^[20]。CH材料中掺入不同比例的Al和Mg粉末的实验结果表明,金属成分所占的比例越大,动量耦合系数越低,但比冲提高了4—6倍。

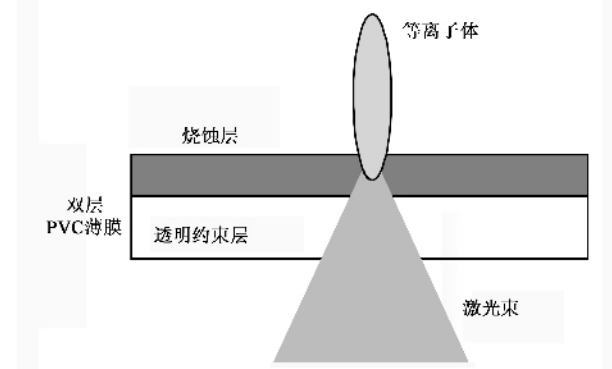


图4 双层薄膜结构的激光等离子体推进示意图

对于气体而言,特别是氢气是最具有吸引力的一种推进剂。因为氢的分子量最低,能在最低的温度水平上获得最大的推力。另外,相对于固体靶,不需要经过气化过程,这样可以产生更高的比冲。同时为进一步改进激光推进剂的性能,在低分子量的气体中,混入少量较易电离的种子气体(如氢或氦中加入锂或铯),制成低离化阈值的气体推进剂,可以解决腔体由于高温而被破坏的问题^[2,17]。

相对于固体,液体材料具有更多的优势。比如液体的质量和浓度可以根据实验的需要进行调节,同时液体更容易储存和传输(特别是对于航天器内有限的空间而言)。到目前为止,水成为很多研究小组研究的对象。水除了具有易于储存和控制、价格低廉的特点之外,最重要的是对环境无污染,这是其他材料所无法代替的。实验结果表明,水具有非常高的耦合系数,可以达到 10^3 甚至 10^4 dyne/W,但缺点是水的比冲太小,仅为几秒。图5是中国科学院物理研究所研究小组对水测量的实验结果,耦合系数达到了170 dyne/W,但比冲约为9s^[21]。如果能够解决水的比冲问题,水将是非常具有发展潜力的一种推进材料。解决水比冲小的方法之一是将水与金属材料相

结合,将水的高耦合系数与金属材料的高比冲结合起来.基于这一点,Yabe等提出了水膜附着于铝膜表面的复合靶结构^[22].现在有人提出将航天器中产生的水循环利用,以解决水比冲小的问题^[23],但这仅是一种设想,有待进一步研究.

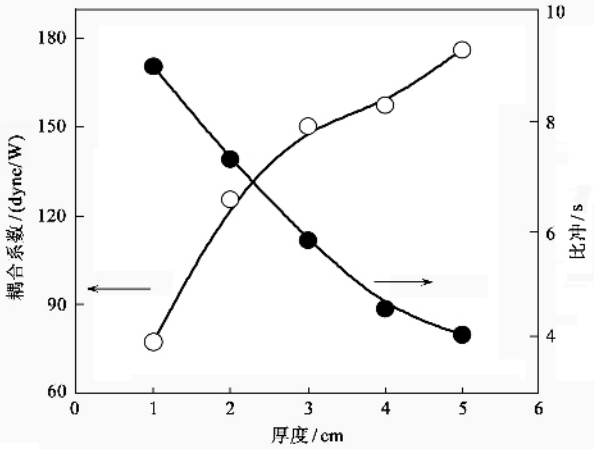


图5 在水辅助的激光烧蚀推进中,水层厚度对耦合系数和比冲的影响

越来越多的实验结果表明,理想的靶材料将是一种复合材料,该材料集合了各种单一材料的优点.这种复合材料既具有高的比冲、高的耦合系数,又便于储存、加工,同时又具有价格便宜、无污染等特点.

4 激光等离子体推进技术在微推进领域的应用

近几年来,随着微机械电子技术的发展,微小卫星和纳卫星得到了迅猛的发展.而对于这类卫星的变轨和精确定位就显得特别重要,这就对微推进技术提出了更高的要求,即不但需要微推进器自身的重量很轻,而且要求产生的最小可控推力很小,为微牛甚至纳牛量级.与目前的几种推进技术(如冷气推进、磁力推进、电力推进和化学反应推进等)相比,激光等离子体推进呈现出独特的优势^[24,25].它的优点主要有以下几点:(1)推力的调节范围大.通过调节激光器的输出功率和输出时间,可以产生从纳牛到牛范围的推力,而对于纳牛这样小的可控推力是其他推进技术所不能产生的.(2)总重量轻.微小卫星或纳卫星的特点就是重量轻,所以要求它本身携带的发动机的重量也必须很轻.在激光等离子体微推力器中,能量来源于高亮度的半导体二极管激光器.这种激光器的体积小、重量轻,输出功率为

几瓦时就足以使靶材料离子化,产生微小的推力.(3)转化效率高,使用寿命长.这主要是由激光等离子体推进技术的特点和二极管激光器的特点所决定的.

对于激光等离子体推进技术在微推进领域的应用,Phipps研究小组进行了大量的研究,从激光器的筛选到靶材的选择以及推进参数的测试,他们都进行了大量的探索工作.目前靶材主要集中在各种薄膜树脂方面,例如聚氯乙稀薄膜、聚甲醛树脂、普通PVC薄膜等.

5 结束语

激光等离子体推进是利用高功率激光与靶相互作用产生的反作用力推动航天器前进的新概念推进技术.其基本特点是飞行器与能源以及能源与靶完全分离,可达到更高的飞行器载荷比,同时可获得比化学火箭高几倍、几十倍的比冲,从而实现航天发射的低成本、短周期、可重复使用的目标.作为一种新的航天推进概念,激光等离子体推进技术在概念、机理和方法等方面还存在着大量的基础性探索研究工作要做.日前国外的研究主要集中在对公斤量级小卫星推进的原理性实验研究上.对推动吨级以上大重量的火箭研究,尚需要相当长的研究时间.微推力技术是激光等离子体推进技术在航空航天方面的一个新的应用,也是近几年刚刚兴起的应用领域,目前正处于探索研究阶段.激光等离子体推进技术在我国虽然刚刚起步,但已经引起国家的重视.相信在今后的几年内,激光等离子体推进技术在我国航天事业中会有突飞猛进的发展.

参 考 文 献

- [1] 鲁欣等.物理,2002,31:796 [Lu X et al. Wuli (Physics), 2002, 31:796 (in Chinese)]
- [2] 郑志远等.物理,2003,32:533 [Zheng Z Y et al. Wuli (Physics), 2003, 32:533 (in Chinese)]
- [3] Kantrowitz A. Astronautica and Aeronautica, 1972, 10:74
- [4] Phipps C, Luke J. AIAA J., 2002, 40:310
- [5] Phipps C R, Luke J R, Meduff G G et al. Appl. Phys. A, 2003, 77:193
- [6] Zheng Z Y, Zhang J, Hao Z Q et al. Chin. Phys., 2006, 15:580
- [7] Zheng Z Y, Zhang J, Lu X et al. Chin. Phys. Lett., 2005, 22:1725
- [8] Bohn W L, Schall W O. Beam Energy Propulsion, AIP Conference Proceedings, 2003, 664:79
- [9] Myrabo L N et al. AIAA, 98-1001, Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 36th, 1998

- [10] Tang Z P , Gong P , Hu X J *et al.* Beam Energy Propulsion , AIP Conference Proceedings , 2003 , 702 : 23
- [11] Zheng Z Y , Zhang J , Hao Z Q *et al.* Opt. Express , 2005 , 13 : 10616
- [12] Photonics Spectra , 2006 , 40 : 20
- [13] Braun A , Korn G , Liu X *et al.* Opt. Lett. , 1995 , 20 : 73
- [14] Zheng Z Y , Zhang J , Hao Z Q *et al.* Appl. Phys. A , 2006 , 83 : 329
- [15] Simons G A , Pirri A N. AIAA J , 1977 , 15 : 835
- [16] Nitno M. Beam Energy Propulsion. AIP Conference Proceedings , 2003 , 664 : 71
- [17] Pakhomov A V , Gregory D A. AIAA J. , 2000 , 38 : 725
- [18] Pakhomov A V , Gregory D A , Thompson M S. AIAA , 2002 , 40 : 947
- [19] Luke J R , Phipps C R , McDuff G G. Appl. Phys. A , 2006 , 77 : 343
- [20] Schall W O , Tegel J , Eckel H A. Beamed Energy Propulsion , AIP Conference Proceedings , 2004 , 766 : 423
- [21] Zheng Z Y , Zhang J , Zhang Y *et al.* Appl. Phys. A , 2006 , 85 : 441
- [22] Yabe T , Phipps C , Yamaguchi M *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2002 , 80 : 4318
- [23] Ohkubo T , Yabe T , Miyazaki S *et al.* Beamed Energy Propulsion , AIP Conference Proceedings , 2004 , 766 : 394
- [24] Phipps C , Luke J , Lippert T. Appl. Phys. A , 2004 , 453 : 573
- [25] Phipps C R , Luke J R , Lippert T *et al.* Appl. Phys. A , 2004 , 79 : 1385

· 物理新闻和动态 ·

土卫六星球上的甲烷湖

尽管土卫六的大气层主要是由氮气所组成,但其中却包含有 1.6 % 的甲烷气体.通常甲烷气体是可以受太阳的影响而被破坏的,所以天文学家们推断,土卫六上的甲烷气体一定存在着某种方式可对它进行不断地补充.现有资料提供的少量证据表明,土卫六星球的表面并不存在着丰富的甲烷储备.所以天文学家推测,补充到大气层的甲烷很可能来自于土卫六星球的地下.

最近英国伦敦高等学院的 E. Stofen 教授和他在美国和欧洲的同行们决定以另一种思路来研究这个问题,借助于美国国家宇航局 Cassini - Huygens 太空行动中所获得的雷达数据,他们完成了细致的分析后发现在土卫六北半球的高纬度处分布着许多暗黑斑点,这些斑点实际上是一些甲烷湖,甲烷湖的直径大约在 3 公里到 70 公里的范围内.研究组认为,其中某些甲烷湖中的甲烷可能是参与到河流的流动或降雨过程中,而另一些甲烷湖内的甲烷是参与到地下贮藏过程.总之土卫六星球上的甲烷存在着“甲烷循环”,即它们连续地参与蒸发、凝结和降落的循环过程,它们的作用类似于地球表面的“水循环”过程.

研究组非常关注他们的研究成果,因为这项工作反映的是在太阳系内,除地球外存在的另一星体,可以在星球内具有正在进行着的流体能量交换过程.这项工作也肯定会对地球上气候动力学较大的帮助,同时随着太空行动中 Cassini 探测器的连续工作,将会给科学界带来更多的未知领域的有用资料.

(云中客 摘自 Nature , 4 January 2007)

等离子体尾场“涡轮增压”粒子加速器

当 2000 年欧洲粒子研究所(CERN)的大型正负电子对撞机(LEP)被拆除时,该对撞机已经创造了将电子能量加速到 100GeV 以上的记录.但是这样高的能量并不容易达到.利用原来 LEP 的隧道新建的大型强子对撞机 LHC 的造价为 10 亿美元.

现在,Mark Hogan 及其在 SLAC 和 California 大学的同事演示了利用“等离子体尾场”可以通过“涡轮增压”来增强现有的常规加速器.科学家们开发的这种小得多的、廉价的装置只有 85 厘米长,能把 SLAC 的 42 GeV 电子束提高到 85 GeV.

最近,有些物理学家用激光照射气体喷注,在所产生的等离子体尾场中将电子加速到 GeV 的能量.

Hogan 的研究组则使用 SLAC 的脉冲电子束注入他们充有锂蒸气的装置中,电子束将锂蒸气中的电子从锂核周围拖走,而这些电子又迅速跳回并越过了它们原来的位置.这种发生在原始电子脉冲尾部的振荡运动,时会捕捉到一些脉冲束中的电子,将它们加速到高得多的能量.

由于 SLAC 的束流由压缩的电子束团组成,Hogen 的装置能够保持几乎长达一米的稳定的加速尾场.以前的装置由于束流不稳,加速尾场只有几厘米长.

但是,为将这种技术实际应用在于粒子加速器上,仍有一些问题必须解决.研究组需要减小电子的能量分散,并证明正电子也能以同样的方式加速.有关论文发表在 Nature 2007 445 741 上.

(树华 编译自 Physics Web News , 14 February 2007)