

■ 李修乾 陈谷仓 编著

烧蚀模式激光推进

Laser-Ablation
Propulsion



国防工业出版社

National Defense Industry Press

烧蚀模式激光推进

Laser-Ablation Propulsion

李修乾 陈谷仓 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书介绍了激光推进的基本概念和发展历程,讨论了烧蚀模式激光推进的工作机理,详细总结了固体和液体烧蚀模式激光推进的理论和实验研究成果,建立了激光推进理想热力循环过程,探讨了提高烧蚀模式激光推进性能的途径,以及激光推进在微小卫星近地轨道发射、cm 级空间碎片主动清除等领域的广泛应用前景。

本书可作为航空宇航推进理论与工程、工程力学、激光与物质相互作用、工程热物理等领域研究生和专业技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

烧蚀模式激光推进 / 李修乾, 陈谷仓编著. —北京:
国防工业出版社, 2012.9

ISBN 978-7-118-08256-2

I. ①烧… II. ①李… ②陈… III. ①烧蚀-模式-
激光-推进 IV. ①V43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 165689 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 12 字数 210 千字

2012 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 42.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

光压推进概念的提出迄今已有 60 年的历史,而美国学者 Kantrowitz 于 1972 年提出的烧蚀模式激光推进更具实际应用前景。烧蚀模式激光推进在微小卫星的近地轨道发射、微小卫星姿态和轨道控制、1cm ~ 10cm 空间碎片的激光主动清除等领域有着极为诱人的应用前景。

40 年来,国内外学者在烧蚀模式激光推进研究领域付出了大量心血,基本掌握了烧蚀模式激光推进的工作机理,设计了多种构形的激光推力器实验模型,开展了演示验证实验,探讨了烧蚀模式激光推进在众多领域的应用方式。在理论、数值模拟和实验研究方面取得了许多具有重要意义的研究成果,这些里程碑式的研究成果为烧蚀模式激光推进早日进入实际工程应用奠定了良好的基础。及时总结这些研究成果,为后续研究工作的深入开展提供参考,是一名科技工作者义不容辞的责任。

作者结合自己 10 余年来一直从事激光与物质相互作用、激光推进等研究工作的经验编写了此书。书中包含了作者在烧蚀模式激光推进研究中取得的部分成果,凝结着作者对烧蚀模式激光推进的理解。装备学院洪延姬教授对作者的研究工作给予了大量有意义的指导,装备学院的同事们在日常研究工作中给予了大力支持和无私帮助,在此向他们深表感谢。本书的出版得到了总装备部人才战略工程专项经费资助,在此对总装政治部干部部的大力支持表示感谢。同时,也感谢国防工业出版社对本书出版的支持和帮助。

由于时间仓促、作者才疏学浅,错误之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编著者

2012 年 4 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 激光推进的基本概念	1
1.1.1 激光推进的性能参数	1
1.1.2 激光推进的特点	2
1.1.3 激光推进的分类	2
1.2 激光推进的发展历程	3
1.2.1 激光推进研究的早期历史背景	3
1.2.2 烧蚀模式激光推进	5
1.2.3 20 世纪 70 年代以来激光推进的发展	6
参考文献	8
第 2 章 固体烧蚀模式激光推进机理	12
2.1 固体烧蚀模式激光推进基本工作过程	12
2.1.1 物质对激光的反射和吸收	12
2.1.2 激光引起凝聚态靶材的汽化和烧蚀	14
2.1.3 激光等离子体中自由电子的产生和增长	16
2.1.4 激光在等离子体中的传播和能量吸收	19
2.2 固体烧蚀模式激光推进推力形成过程	21
2.2.1 靶蒸气的运动	22
2.2.2 激光维持的燃烧波和爆轰波	23
2.2.3 激光与凝聚态靶的冲量耦合	27
参考文献	34
第 3 章 激光与液体相互作用	35
3.1 液体激光击穿效应的研究现状及其应用	35
3.2 水性介质的击穿阈值	36

3.2.1	理论	36
3.2.2	击穿的定义	38
3.2.3	多光子击穿	39
3.2.4	级联击穿	41
3.2.5	参数对激光击穿阈值的影响	49
3.2.6	小结	55
3.3	等离子体在水性介质中的膨胀和喷射	56
3.3.1	理论研究	56
3.3.2	实验测试	62
3.4	水性介质激光击穿导致的力学效应	65
3.4.1	力学效应综述	65
3.4.2	力学效应的理论研究	69
3.4.3	气蚀空泡理论	72
3.4.4	冲击波理论	75
3.4.5	理论在实验中的应用	77
	参考文献	77
第4章	固体烧蚀模式激光推进	79
4.1	实验研究方法	79
4.1.1	TOF	79
4.1.2	高速相机测试法	81
4.1.3	悬摆法	82
4.1.4	压电传感器推力测试法	83
4.1.5	位移测试法	84
4.2	常见金属和半导体材料的推进性能	85
4.3	激光烧蚀聚合物研究	87
4.3.1	材料的特性	87
4.3.2	实验方法	88
4.3.3	推进性能	88
4.4	飞秒激光烧蚀固体	98
4.5	推力器构形对推进性能的影响	101
	参考文献	107
第5章	液体烧蚀模式激光推进	109
5.1	液体烧蚀模式激光推进性能理论模型	109

5.1.1	推进性能与激光参数之间的关系	109
5.1.2	计算结果	111
5.1.3	最优辐照能量密度	114
5.2	水的激光推进性能	115
5.2.1	约束靶材对推进性能的影响	115
5.2.2	液面形状对推进性能的影响	118
5.3	冰的激光推进性能	122
5.4	水滴的激光推进性能	124
5.4.1	多脉冲激光推进性能	124
5.4.2	喷管构形和聚焦位置对推进性能的影响	128
5.5	液膜的激光推进性能	134
5.6	高性能工质设计	140
	参考文献	145
第 6 章	烧蚀模式激光推进性能理论研究	148
6.1	推进性能参数理论分析	148
6.2	化学火箭的理想热力学循环过程	149
6.2.1	基本假设	149
6.2.2	热效率	149
6.3	激光推进的理想热力学循环过程	150
6.3.1	能量转化过程	150
6.3.2	基本假设和理想热力循环过程	151
6.4	提高推进性能的几种方法	154
6.4.1	掺杂金属粉末等材料	154
6.4.2	选择含能材料	155
6.4.3	液膜	156
6.5	小结	158
	参考文献	158
第 7 章	激光推进的应用前景	160
7.1	微小卫星的近地轨道发射	160
7.1.1	垂直推进实验	160
7.1.2	微小卫星近地轨道发射成本	164
7.2	微小卫星姿态和轨道控制	166

7.3 高超声速飞行器减阻	168
7.4 cm 级空间碎片的激光主动清除	172
7.4.1 开展空间碎片主动清除研究工作的迫切性	172
7.4.2 Orion 系统的组成和基本原理	172
7.4.3 激光参数的选择	173
7.4.4 激光作用下的碎片轨道动力学	177
7.4.5 空间碎片的地基激光监测	177
参考文献	180

第1章 绪论

1.1 激光推进的基本概念

衡量一个国家航天发展水平重要标志之一的航天推进技术,是指将运载器送入预定空间轨道和实现航天器在轨机动的技术。推进方式主要包括化学火箭推进、电推进、核推进和定向能推进等。其中,定向能推进又包括激光推进和微波推进。

当前,实用的航天推进技术主要有化学火箭推进、电推进和核推进技术。化学火箭最突出特点是可以提供大推力,而且理论体系和应用技术基本成熟,发射基地和地面测控系统等配套设施健全,一直以来是最主要的航天运载器,在可预见的将来也是最重要的航天推进工具。但其能量释放受到燃烧产物温度等因素的限制,比冲较低,同时还存在着发射操作运转模式复杂、准备周期长、可靠性较低、发射成本高和重复使用困难等不足。电推进系统能够获得较高的比冲,但推力很小;核推进系统虽能获得大推力和高比冲,但受到核反应装置小型化和环保的限制,还必须携带相对庞大的能源设备,故军事航天发射和在轨机动难度较大,目前主要用于深空探测。

激光推进是利用高能激光与工质相互作用产生推力,推动飞行器前进的新概念推进技术,不论是推进原理、能量转化方式,还是系统组成和应用体系,都不同于现有的化学火箭推进。

激光推进系统主要包括激光系统、光束发射与控制系统和光船三部分,如图1-1所示。在激光推进中,运载器与有效载荷是一体化设计的,称为光船或者推力器。工质是指与激光相互作用的工作物质。激光系统产生高能激光束,光束发射与控制系统将激光发送到光船,光船接收远距离激光能量而实现光—力转换。

1.1.1 激光推进的性能参数

衡量激光推进性能的主要参数有冲量 I 、平均推力 $\bar{F}$ 、冲量耦合系数 C_m 、比冲 I_{sp} 和能量转化效率 η 等。冲量耦合系数 C_m 是单位激光能量所产生的冲量,

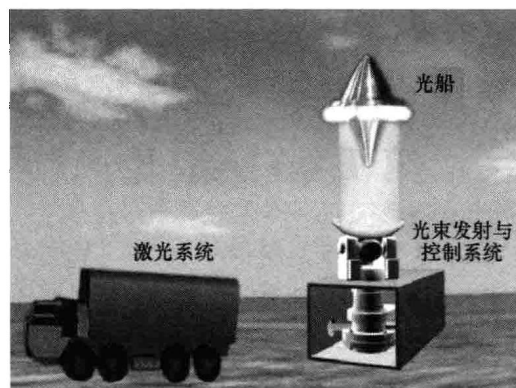


图 1-1 激光推进系统示意图

常用单位有 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{J}$ 、 N/W 、 N/MW 和 dyne/W 。在激光推进中,学者们习惯将比冲 I_{sp} 定义为单位质量的工质产生的冲量,常用单位是 s 。能量转化效率 η 定义为飞行器的动能(实验中喷射气体的动能)与入射激光能量之比。

1.1.2 激光推进的特点

从图 1-1 中可以看出,激光推进系统中的工质与激光能量完全分离,光船与激光系统完全分离。飞行器与能源的分离,使得飞行器不必携带庞大笨重的能源系统,可以极大地简化飞行器结构和控制系统,缩短发射前的检测周期,有利于应急发射。

能源与工质的分离,使得人们可以选用安全的工质,不必像现在的化学火箭推进必须携带易燃易爆、甚至有毒的推进剂(如偏二甲肼硝酸等)。分子量小的“轻型”工质的比冲较高,这类工质既安全又环保。安全环保的工质可以提前加注,缩短发射前的准备周期,提高激光推进的机动灵活性,又可以直接提高系统的安全可靠性。同时,比冲大的推进系统完成同一航天任务需要携带较少的工质,减小飞行器的起飞质量,使得有效载荷占起飞质量的比例大,有效载荷比高,整个系统的发射成本低。

激光推进由于两个分离,带来了推进技术的革命,其主要特点是:比冲大、成本低;机动性好、可靠性高;远距离传输能量,在轨机动能力强;发射周期短、批量发射能力强。美国学者 Kantrowitz 将激光推进的特点概括为 4P 原则(It leaves everything on the ground except 'Payload, Propellant, and Photons ... Period!')。

1.1.3 激光推进的分类

激光推进的分类方式很多,按照所用激光光源的种类,可以分为连续激光推

进、脉冲激光推进和换热式激光推进。其中,换热式激光推进对激光能量/功率等参数要求不高,连续波和脉冲激光都可以作为其光源。目前,国内外的研究工作主要集中在脉冲激光推进领域。

根据是否需要消耗飞行器自身携带的工质,学者们习惯将激光推进分为大气吸气模式和火箭模式。现在的提法还不够统一,也有一些学者将火箭模式称为烧蚀模式。

所谓大气吸气模式,特指在稠密大气层中,飞行器将环境中的空气作为工质,而不需要消耗自身携带工质的情况。

所谓烧蚀模式激光推进,是指一束高能激光(脉冲或者连续)辐照到稠密介质的表面(固体或者液体),产生蒸气或者等离子体射流,从而产生作用于介质表面的反作用力的推进方式(图 1-2)。烧蚀模式激光推进的推重比较高,可以达到 15N/kg ,其推力随着激光功率的增加而线性变大,比冲的典型值位于 $200\text{s} \sim 3100\text{s}$ 之间。

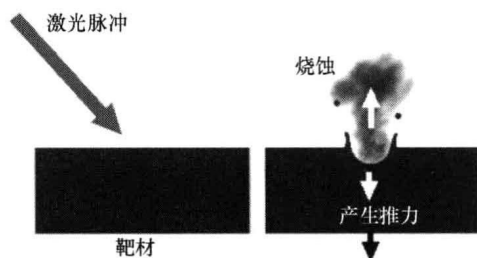


图 1-2 烧蚀模式激光推进示意图

1.2 激光推进的发展历程

1.2.1 激光推进研究的早期历史背景

将一束光发送到远距离处,并将其能量和动量有效利用起来的思想,在激光还没有发明之前的远古时代就出现了。早在公元前 214 年,Archimede 利用平面镜将太阳光反射并聚焦,从而将罗马 Commander Marcellus 舰队驱逐出 Syracuse 海峡的故事,就是一个为人们所熟知的例子。无论是真实的故事还是神话传说,这个例子至少证明了早在 2000 多年以前,人们就已经对于光束能量或者动量的有效利用问题表现出了浓厚兴趣。有关定向能光束利用的文字记载,可以追溯到 20 世纪的航天科幻题材出版物。俄罗斯航天先驱 Fridrikh Tsander、Konstantin Tsiolkovsky(图 1-3)和德国 Hermann Oberth(图 1-4)分别于 1923 年和 1924 年,提到了光压推进的思想,这一思想是帆推进概念的雏形。遗憾的是,直到 20

世纪 30 年代,在德国的 Oberth 和美国的 Goddard 努力下,火箭技术已经获得了一定的发展空间,而俄罗斯的相关研究工作则一直不为西方所知。



图 1-3 Tsander(左)和 TsioKovsky(右)



图 1-4 Oberth(左)和 Sänger(右)

航天飞行的先驱们不仅认识到了液体和固体燃料火箭推进能够克服地球引力场的作用,执行到达月球和火星的星际飞行任务,同时他们也认识到了火箭推进无法携带充足的燃料以满足星际飞行任务往返的需要。唯一能够解决这一难题的办法,是在一个固定的基地用地磁波束向火箭补充能量。德国学者 Eugen Sänger 于 1953 年提出了光子火箭用于星际飞行任务的概念。由于当时还没有发明激光,因此 Sänger 设想的光子推进,是通过置于一个大型反射镜焦点位置处的裂变反应堆产生的连续高温等离子体辐射来实现的。人类发明激光之后, Sänger 在 1960 年改进了他的光子推进概念,即用核泵浦的固体气体激光来产生推进必需的辐射压力(图 1-5)。2000 年,也就是 Sänger 提出光子推进概念的 47 年之后,一种用高功率 CO_2 激光驱动的光帆在美国 Wright-Patterson 空军基地通过了测试;同年,位于 Braunschweig 的德国 DLR 空间中心也研究并建造了一种大型太阳帆(图 1-6)。

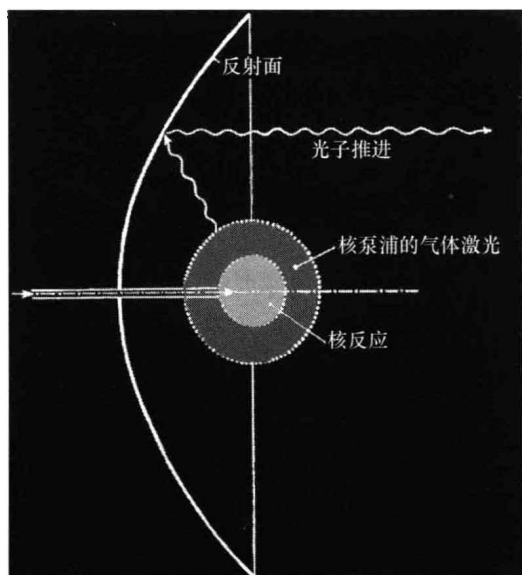


图 1-5 Sänger 提出的光子推进示意图



图 1-6 位于 DLR Braunschweig 的太阳帆

1.2.2 烧蚀模式激光推进

光子推进产生的光压是非常小的,光辐射与抛光壁面耦合产生的冲量耦合系数仅为

$$C_m = 2/c = 6.7 \text{ nN/W} \quad (1-1)$$

也就是说,10kW 的激光产生的推力仅为 $67 \mu\text{N}$ 。

为了能够获得有用的推力,必须使用输出功率极高的激光光源,或者利用其

他的热物理现象将冲量耦合过程放大。这样,激光烧蚀普通材料产生的冲量耦合系数就可以达到 $C_m = 100\text{N/MW} \sim 10\text{kN/MW}$ 的量级。1972 年, A. Kantrowitz (图 1-7) 提出了烧蚀模式激光推进概念: 高能激光束聚焦之后辐照到材料表面, 可以使其部分汽化或者电离, 这一过程产生的比冲远远高于传统化学火箭的比冲。同年, Pirri 和 Weiss 发表了第一份用连续和脉冲激光烧蚀抛物形反射面的实验报告。

大量实验结果表明, 材料的有效烧蚀对辐照激光的功率密度要求很高, 连续激光在这一方面没有优势; 相反, 脉冲激光的峰值功率一般都比较高。因此, 烧蚀模式激光推进研究工作中所用的激光光源主要为脉冲激光。

烧蚀模式激光推进的推重比较高, 可以达到 15N/kg ; 推力随着激光功率的增加而线性变大; 比冲较高, 典型值在 $200\text{s} \sim 3100\text{s}$ 之间。

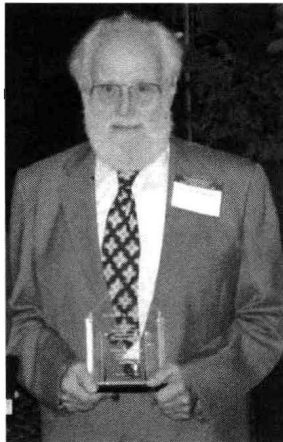


图 1-7 A. Kantrowitz

1.2.3 20 世纪 70 年代以来激光推进的发展

1972 年, 激光推进概念的提出几乎与美国高功率激光器的发展计划同步。随着激光技术不断发展, 20 世纪 70 年代, 各国学者, 特别是美国学者在激光与物质相互作用机理方面开展了大量的研究, 也探索了若干种激光推进模式。到了 20 世纪 70 年代末, 美国军方对高能激光武器不再感兴趣, 激光推进需要的高能激光器进展缓慢; 而 NASA 热衷于航天飞机, 对微小卫星发射系统不感兴趣; 激光推进因高能激光器技术限制和小推力发射技术无人问津而进入发展的低潮。

到了 20 世纪 80 年代中期, 两个事件再次掀起了激光推进研究的热潮。一是在美国“星球大战”计划推动下, 美国高能激光器和光束定向器等技术的迅速发展为激光推进研究奠定了技术基础; 二是太空武器计划, 特别是空基动能武器系统, 需要低成本发射技术和能力。

1986 年春天,美国举办了激光推进研讨会,讨论了用大规模的自由电子激光发射有效载荷直接入轨的可行性。这个研讨会促成了美国 SDIO (Strategic Defense Initiative Organization) 立项支持“激光推进项目”(Laser Propulsion Program),但是该项目于 1989 年草草结束,而且冷战时期成果发表得很少。这个项目夭折的主要原因:一是从其他项目不能获得用于激光推进演示的激光器,1989 年 SDIO GBL 决定重点支持 Los Alamos 和 Boeing 的 RF-Linac FEL,而不是 LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory) 的 ILFEL,而 RF-Linac FEL 的性能参数与激光推进实验研究需要的激光器性能参数完全不匹配;二是在短期内没有途径获得大型 CO₂激光器用于激光推进研究,只有美国 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 和 AF (Air Force) 给予了适度资助,激光推进研究又一次进入低潮。

20 世纪 90 年代之前,美国之外的其他国家基本没有系统深入地研究激光推进,只有少量的对美国研究进展的跟踪性报道和综述性文章。20 世纪 90 年代中期,随着 MEMS (Micro-electromechanical System) 技术的发展,微小卫星技术发展非常迅速。在这个背景下,再次兴起了适合微小卫星低成本发射的激光推进技术的研究热潮。

自 1996 年开始,NASA 和 AF 联合立项支持开展“光船技术演示项目”(Lightcraft Technology Demonstration)。这一计划的目标是在“激光推进项目”取得的成果的基础上,用缩比试验模型验证用高能脉冲激光将飞行器发射进入近地轨道的可能性,研究利用激光推进技术降低空间运输系统的成本。进入 21 世纪,俄罗斯、日本、德国等国家也都制定了激光推进研究工作的发展规划,资助相关领域的学者们开展应用基础研究和攻关。表 1-1 就国外激光推进研究计划及研究目标进行了简要概括。

表 1-1 国外激光推进研究计划

国别	研究计划和起止时间	资助单位	研究目标
美国	激光推进项目 1986—1989	SDIO	验证激光推进近地轨道发射的原理可行性
	光船技术演示 1996—2000	NASA& AF	用缩比模型验证高能脉冲激光将飞行器发射进入轨道的原理可能性,以及探索利用激光推进降低空间运输成本的途径
	X-50LR 2003—2009	政府和签约组织	设计直径为 50cm 激光推力器,并开展用激光推进驱动飞行器的实验研究,计划进行用 100kW CO ₂ 激光器将载荷发射到 30km 高空的试验

(续)

国别	研究计划和起止时间	资助单位	研究目标
俄罗斯	ISTC - 1801 2001—2003	国际科学和技术中心	设计激光推进试验,验证激光推进的原理可行性
	ISTC - 2260 2004—2006		研制激光动力发动机,进行推进性能的实验研究
	ISTC - 3644 获批但是没有经费支持		在研究太阳能泵浦激光器及激光与工质相互作用的基础上,发展效率较高的激光推力器概念设计
日本	激光驱动飞行器 2001 年至今	政府和高校	研究激光推进微型飞行器及其航天应用体系
欧洲	激光推进用于欧洲航天局的任务:近地轨道发射 2000 年至今	欧洲航天局	研究激光推进用于近地轨道发射的可行性

参考文献

- [1] Cramer J G. Laser Propulsion and the Four P's[EB/OL]. [2009-7-20]. <http://www.npl.washington.edu/AV/altvw21.html>. [1996-12-07].
- [2] Birkan M A. Laser propulsion: research status and needs[J]. J. Propulsion and Power, 1992, 8(2): 354-360.
- [3] Phipps C R, Reilly J P, Campbell J W. Optimum parameters for laser launching objects into low earth orbit [J]. Laser and particle Beams, 2000, 18:661-695.
- [4] Glumb R J, Krier H. Concepts and status of laser-supported rocket propulsion[J]. J. Spacecraft, 1984, 21(1):70-79.
- [5] Lin J. Time-resolved imaging for the dynamic study of ablative laser propulsion[D]. Huntsville, Alabama, America: The school of graduate studies of The University of Alabama in Huntsville, 2004.
- [6] 唐志平, 龚平, 胡晓军, 等. 大气模式激光推进的实验研究[J]. 航空学报, 2005, 26(1): 13-17.
- [7] Kantrowitz A. Propulsion to orbit by ground-based lasers [J]. Astronautics and Aeronautics, 1972, 10(5): 74-76.
- [8] Kare J T. Laser launch-the second wave[A]//Proceeding of First International Symposium on Beamed Energy Propulsion[C]. 2003: 22-36.
- [9] Froning D, McKinney L, Mead F, et al. Some results of a study of the effectiveness and cost of a laser-powered 'lightcraft' vehicle system[A]. High-power laser ablation V, Proceedings of SPIE, 2004, 5448:

- [10] Mead F B, Myrabo L N, Messitt D G. Flight and ground tests of a laser-boosted vehicle[R]. AIAA 98 - 3735.
- [11] Rezunkov Y A, Osipov V M, Savelyeva, et al. Atmospheric phenomena affecting laser-propelling capability of vehicles in the atmosphere[A]. High-power laser ablation III, SPIE, 2000, 4065:940 - 948.
- [12] Rezunkov Y A, Safronov A L, Ageichik A A, et al. Performance characteristics of laser propulsion engine operating both in CW and in repetitively-pulsed modes[A]. Fourth International Symposium on Beamed Energy Propulsion[C], Japan, 2006, 3 - 13.
- [13] Ageichik A A, Egorov M S, Ostapenko S V, et al. Model test of aerospace laser propulsion engine[A]. Third International Symposium on Beamed Energy Propulsion[C], America, 2005, 183 - 194.
- [14] Yabe T, Phipps C, Aoki K, et al. Laser driven vehicles-from inner-space to outer-space[J]. Applied Physics A, 2004, 79:243 - 249.
- [15] Yabe T, Phipps C, Aoki K, et al. Numerical and experimental investigation of laser propulsion[J]. Applied Physics A, 2004, 79: 829 - 831.
- [16] Yu X L, Ohtani T, Kim S, et al. Blast wave characteristics under laser-driven in-tube accelerator operation conditions [J]. Science and technology of energetic materials, 2005, 66(2): 274 - 282.
- [17] Sasoh A, Urabe N, Kim S S M, et al. Impulse-scaling in a laser driven in - tube accelerator[J]. App. Phys. A. 2003, 77:349 - 352.
- [18] Schall W O, Bohn W L, Eckel H A, et al. Lightcraft experiments in Germany[A]. Proc. of SPIE[C], 2000, 4065:472 - 481.
- [19] Resendes D P, Mota S, Sorasio G, et al. Laser propulsion for ESA mission: Ground to Orbit launch[R]. 17048/03/NL/PA. 2004.
- [20] Schall W O, Eckel H A, Walther S. Lightcraft impulse measurements under vacuum[R]. AFRL - PR - ED - TR - 2002 - 0044.
- [21] Kare J T. Laser-powered heat exchanger rocket for ground to orbit launch[J]. J Propulsion and power, 1995, 11(3): 595 - 563.
- [22] Pirri A N. Propulsion by absorption of laser radiation[A]. AIAA 73 - 624.
- [23] Larson C W, Mead F B and Kalliomaa W M. Energy Conversion in Laser Propulsion III[C]. High-Power Laser Ablation IV, Proceedings of SPIE, 2002, 4760: 887 - 898.
- [24] Mead F B, Larson C W, Knecht. An overview of the experimental 50 - cm laser ramjet (X - 50LR) program [A]. Fourth International Symposium on Beamed Energy Propulsion[C], Japan, 2005, 534 - 552.
- [25] Thompson M S. Time-of-flight study of elementary propellants for ablative laser propulsion[D]. Huntsville, Alabama, America: The school of graduate studies of The university of Alabama in Huntsville, 2004.
- [26] Pakhomov A V, Gregory D A, Thompson M S. Specific impulse and other characteristics of elementary propellants of ablative laser propulsion[J]. AIAA Journal, 2002, 40(4): 947 - 952.
- [27] Apollonov V V, Tishchenko V N. Mechanism of Shock Wave Merging in a Laser Jet Engine[J]. Quantum Electronics, 2004, 34(12): 1143 - 1146.
- [28] Toyoda K, Komurasaki K, Arakawa Y. Continuous wave laser thruster experiment[J]. Vacuum, 2000, 59: 63 - 72.
- [29] Toyoda K, Komurasaki K, Arakawa Y. Thruster performance of a CW laser thruster in vacuum[J]. Vacu-