

# 液体靶材激光推进研究进展

盛德仁 史香锬 陈坚红 姚华 李蔚

浙江大学热工与动力系统研究所, 浙江 杭州 310027

**摘要** 综述了近10年来国内外液体靶材激光推进的主要研究成果。分析了液体靶材激光推进的一般机理, 得出了溅射是液体靶材推进性能主要制约因素的结论。提出了改变靶材结构形态和增大靶材黏度从而改善推进性能的有效途径, 依据不同途径依次评述了体状、膜状、滴状和高黏度液体靶材的性能特点, 并总结出了己烷炮靶、雾化水滴和高黏度溶液这三种综合推进性能较好的液体靶材。最后指出了复合靶材将成为未来液体靶材激光推进的一个重要发展方向。

**关键词** 激光光学; 激光推进; 液体靶材; 比冲; 冲量耦合系数

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.050002

## Research Progress of Laser Propulsion with Liquid Propellants

Sheng Deren Shi Xiangkun Chen Jianhong Yao Hua Li Wei

*Institute of Thermal Science and Power System, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China*

**Abstract** The main research results in recent ten years of laser propulsion with liquid propellants are summarized internally and internationally. The general mechanism of laser propulsion with liquid propellants is analyzed. And the splashing is concluded as the most important constraint of the performance of liquid propellants. Changing the geometries of propellants and increasing the viscosity of liquid are presented as two effective ways to improve propulsive performance. And the performance characteristics of liquid volume, thin film, droplet and highly viscous propellants are commented successively based on the different ways. The hexane film, water droplet and highly viscous solutions are concluded as three kinds of liquid propellants with better integrated propulsive performance. Finally the compound propellant is pointed out to be one of the most important future directions of laser propulsion with liquid propellants.

**Key words** laser optics; laser propulsion; liquid propellant; special impulse; coupling coefficient

**OCIS codes** 140.3440; 140.3470; 140.3580

## 1 引言

自从1972年Kzntrowitz<sup>[1]</sup>提出激光推进的概念以来, 选取合适的推进靶材一直都是国内外学者研究的焦点<sup>[2-10]</sup>。一方面根据靶材物态的不同, 推进靶材主要分为气体靶材、固体靶材和液体靶材三种。气体靶材一般具有较高的推进比冲, 但是冲量耦合系数较小<sup>[11-16]</sup>, 对推进性能参数的调节范围窄, 且不适用于太空环境, 不能作为合适的推进靶材。固体靶材和液体靶材由于靶材物性的多样性, 对推进性能参数的调节范围较宽, 可以获得较大变化范围内的比冲和冲量耦合系数。另一方面, 在Pakhomov等<sup>[17-20]</sup>发现相对原子质量越小而比冲越高的规律之后, 高分子聚合物靶材由于只含C、H等元素而成为研究热点<sup>[21-25]</sup>, 含能靶材和掺杂靶材由于具有较好的综合推进性能也引起了研究人员的极大兴趣<sup>[26-30]</sup>。固体靶材和液体靶材均可以采用高聚合物靶材、含能靶材和掺杂靶材, 但是液体靶材相对于固体靶材能够产生更大的冲量耦合系数<sup>[21-30]</sup>, 且便于存储和供给, 是一种理想的推进靶材。本文为了研究液体靶材激光推进的性能特点, 综合调研了近10年来国内外相关研究成果, 分析了液体靶材激光推进的研究历程, 讨论了液体靶材激光推进的发展方向。

收稿日期: 2013-10-29; 收到修改稿日期: 2013-12-16; 网络出版日期: 2014-04-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51276169)

作者简介: 盛德仁(1960—), 男, 教授, 主要从事汽轮机与燃气轮机循环特性研究及两相流光学测量技术等方面的研究。

E-mail: shengdr@zju.edu.cn

## 2 液体靶材推进机理

美国阿拉巴马大学的 Pakhomov 等<sup>[31-33]</sup>采用 TEA CO<sub>2</sub> 激光对水、乙醇、异丙烷和己烷等液体靶材进行了实验研究。实验中采用 ICCD 高速相机拍摄了激光烧蚀靶材时气蚀空穴的演化过程,并采用压力传感器测得了推力随时间的变化曲线。实验结果表明,体吸收液体靶材(己烷)受激光辐照后在靶材内部形成气化核心,并进一步产生爆炸沸腾现象。表面吸收液体靶材(水、异丙烷和乙醇)受激光辐照后在靶材表面形成半椭球体气蚀空穴,并伴随着强烈的蒸汽羽流现象;气蚀空穴的形成过程经历了前后两个截然不同的阶段,在 0~100 μs 内平均体积生成率为 0.25 μl/μs,气蚀空穴发展迅速,在 100~1000 μs 内平均体积生成率为 0.04 μl/μs,气蚀空穴发展缓慢,如图 1 所示。推力随时间的变化曲线表明,在 0~100 μs 内产生 5~10 N 的推力,在 100~1000 μs 内推力几乎为零。

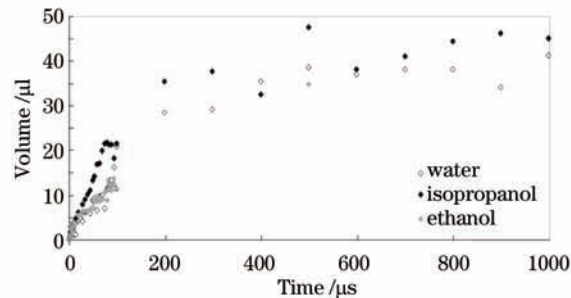


图 1 水、异丙醇和乙醇的气蚀空穴体积随时间变化曲线

Fig.1 Cavity volume versus time for water, isopropanol and ethanol

中国装备指挥技术学院的崔村燕等<sup>[34-37]</sup>采用 TEA CO<sub>2</sub> 激光对水靶材进行了相关实验研究。在 Pakhomov 等实验研究的基础上,建立了一套高速相机与压力传感器的同步测试系统,对液体靶材激光推进的推力形成机理进行了实验研究。实验结果表明,气蚀空穴是由蒸汽压力回推液面造成的,空穴体积在前 100 μs 增长较快,100 μs 之后保持稳定,空穴迅速发展的时间段与推力持续时间基本重合。

关于液体靶材的激光推进机理,分析以上实验进展,可以得出 3 个结论:

1) 根据靶材对激光吸收深度的不同,液体靶材激光推进可以分为表面吸收模式和体吸收模式。表面吸收过程中形成强烈的蒸汽羽流现象,液体靶材以蒸汽的形式高速离开靶材表面,通过反冲作用形成冲量,具有较大的冲量耦合系数;体吸收过程主要发生在靶材内部,反冲作用不明显,所以冲量耦合系数较小。实验数据表明,当功率密度在  $10^6 \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$  范围内时,表面吸收液体靶材的冲量耦合系数(最大值为 1500 N/MW)远大于体吸收液体靶材的冲量耦合系数(最大值为 500 N/MW)。

2) 表面吸收模式主要具有前期汽化和后期溅射两个主要的物理过程,分别对应气蚀空穴形成的前后两个阶段。汽化过程中靶材以蒸汽的形式离开靶材表面,质量较小而速度极大,比冲  $I_{sp}$  约为 6 s;溅射过程中靶材以液滴的形式离开靶材表面,质量较大而速度极小,全过程比冲  $I_{sp}$  约为 0.4 s。

3) 制约液体靶材激光推进的关键因素即在于后期溅射过程。溅射过程中液体靶材的质量消耗占总质量消耗的 95% 左右,是制约比冲发展的关键因素。而且溅射作用会污染激光推进中的光学器材,对推进系统的稳定性和可靠性带来不利影响。溅射是近期内液体靶材激光推进发展的瓶颈所在。

为了提高液体靶材的推进性能,必须减小溅射过程的影响,目前主要有两种方法可以实现此目的。一种方法通过施加约束改变靶材的结构形态,增大靶材的比表面积(单位质量靶材的表面积),使靶材与激光的作用面积增大,尽量使所有靶材都用于汽化过程,从而减小溅射过程的影响;约束模式可以依据 Pakhomov 等<sup>[38]</sup>建立的激光推进概念树进行分析,例如上述两个实验中液体靶材虽然装载于固体容器中,但约束效果不明显,可以视为 L 模式(液体无约束模式);结构形态可以依次分为体状(三维)、膜状(二维)、束状(一维)和滴状(零维)四种形态,上述实验中均采用体状液体靶材。另一种方法是增大靶材的黏度,采用较高黏度的靶材可以减小溅射过程的影响。

### 3 减小溅射影响的研究进展

#### 3.1 体状液靶研究

日本东京工业大学的Yabe等<sup>[39-42]</sup>采用YAG激光对水靶材进行了无金属水炮靶(MFWC)的实验研究。如图2(a)所示<sup>[39]</sup>,实验装置采用丙烯管对水靶材施加约束,从某种程度上减少了靶材的消耗量,约束模式为 $L^S$ 模式(液体受固体约束模式)。激光经透镜聚焦后在靶材内部某一点发生击穿,水靶材沿管道开口方向发生溅射,通过反冲作用产生冲量,开口方向可以根据需求任意设置,由此可以实现任意方向的激光推进。在实验测试中冲量耦合系数高达2400 N/MW。

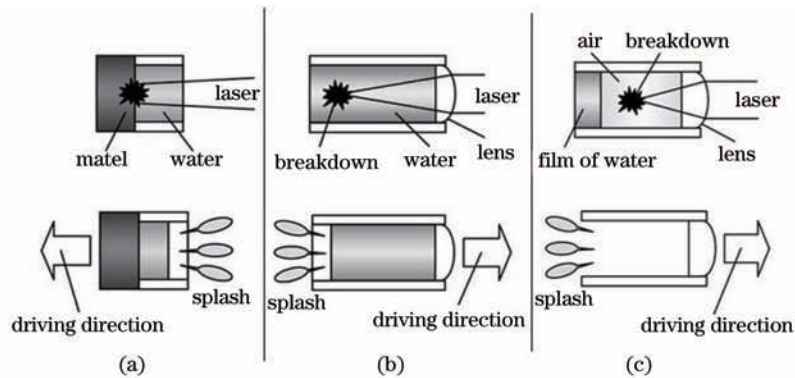


图2 MFWC、WC和WFC模型

Fig.2 Structure of MFWC, WC and WFC

中国科学院物理研究所的郑志远等<sup>[43-45]</sup>采用YAG激光对水和墨水靶材进行了实验研究。实验中采用透射装置,通过玻璃层抑制水向透镜方向的溅射,使溅射过程只能朝尾部开口方向进行,约束模式为 $L^S$ 模式。激光聚焦后在靶材内部某一点发生击穿,通过反冲作用产生冲量,采用墨水靶材时击穿点靠近玻璃层与靶材的交界面,引起了更多靶材的溅射,获得了最大的冲量耦合系数 $C_m=1790$  N/MW,比冲为19 s。

体状液靶激光推进属于体吸收模式,击穿点出现在靶材内部,通过施加一定的约束,使溅射过程只能朝着某个特定的方向进行,一方面减少了靶材的消耗量,另一方面实现了对推进方向的控制。由于只存在单方向有限面积上的溅射,体状液靶的推进性能相比于无约束液靶的推进性能获得了较大提高,冲量耦合系数和比冲都得到了一定的提升。

#### 3.2 膜状液靶研究

Yabe等<sup>[39-42]</sup>采用YAG激光对水靶材进行了水炮靶(WC)实验以及水膜炮靶(WFC)实验。在WC实验中,金属靶表面覆盖一层水膜,激光击穿现象发生在金属靶与水膜的分界面上,水膜在高温高压条件下产生溅射,通过反冲作用产生冲量,方向垂直于金属靶表面,在实验测试中冲量耦合系数高达3536 N/MW。在WFC实验中,丙烯管开口处覆盖一层水膜,管内填充空气,激光经透镜聚焦后在空气中某一点发生击穿,水膜沿管道开口方向发生溅射,通过反冲作用产生冲量,在实验测试中冲量耦合系数高达3680 N/MW。

中国科技大学的唐志平等<sup>[46-49]</sup>采用YAG激光对水靶材进行了水车实验研究,得到了不同材料基板和不同厚度水膜的双层靶的冲量耦合系数。基板置于气垫导轨上的激光驱动水车上,在重力和表面张力的作用下能够形成比较均匀的水膜,通过更换基板材料和改变蓄水槽的深度来研究不同基板材料和水膜厚度对水靶材激光推进性能的影响,其中当基板材料为铝、水膜厚度为3 mm时具有最高的冲量耦合系数,达到了3500 N/MW,比直接烧蚀铝基板提高了两个数量级。

Pakhomov等<sup>[24,50]</sup>采用TEA  $CO_2$ 激光对聚甲醛树脂(POM)基底材料上的水、乙醇和己烷等膜状靶材进行了实验研究。实验结果表明,水和乙醇液膜对提高推进性能的效果不显著,己烷液膜对提高推进性能具有明显效果。相比于不覆盖液膜的纯POM材料的烧蚀反应,覆盖己烷液膜的己烷炮靶(HC)的冲量耦合系数增大了一倍,达到了540 N/MW,最大比冲接近于纯POM材料烧蚀时的比冲,达到了250 s。

虽然靶材物性和激光参数有所不同,但水炮靶、己烷炮靶和水车实验的约束模式均为 $S^L$ 模式(固体受液体约束模式)。激光实际上与固体基底材料发生烧蚀反应,液膜一方面对烧蚀产生的高温高压气体起到约束作用,另一方面通过自身的溅射产生反冲作用,使冲量耦合系数得到了很大的提高。水膜炮靶的约束模式

均为G<sup>1</sup>模式(气体受液体约束模式),水膜也通过约束作用和反冲作用提高了冲量耦合系数。

相比于体状液靶,膜状液靶的靶材消耗量大大减小,但由于水靶材极易发生溅射,冲量耦合系数几乎不变,比冲的提升效果也不明显。而已烷靶材相对于水靶材而言不易发生溅射,冲量耦合系数减小,比冲获得了很大提高,综合推进性能也获得了极大的改善。己烷炮靶是近期内实现激光推进的一种可行靶材。

### 3.3 滴状液靶研究

日本宇宙航空研究开发机构的Fujita等<sup>[30,51-52]</sup>采用YAG激光对甘油滴状靶材进行了实验研究。实验中采用的甘油液滴平均直径为2 mm,通过供给针注入到喷管中,随即被入射激光击穿产生冲量。实验测得最大比冲约为18 s,最大冲量耦合系数约为800 N/MW,通过相关实验结论可以预知,当甘油液滴的直径小于0.24 mm时,比冲可以提高到1000 s以上。

中国装备指挥技术学院的李修乾等<sup>[53-59]</sup>采用TEA CO<sub>2</sub>激光对雾化水滴靶材进行了相关的实验研究。实验中采用的雾化水滴索特平均直径为50 μm,通过工质注入系统注入到抛物线形推力器中,随即被入射激光击穿形成蒸汽羽流,蒸汽羽流沿入射激光反方向喷出推力器形成冲量。实验测得冲量耦合系数约为500 N/MW,比冲约为100 s,能量转换效率达到了26%。

甘油液滴和雾化水滴都直接参与烧蚀过程实现激光推进,约束模式为(L,G)模式(气液两相混合模式)。由于滴状液靶质量较小,比表面积较大,没有出现明显的溅射过程,所以比冲获得了较大的提高。当液滴直径接近于液体靶材对激光的吸收深度时,相互作用过程进行得越彻底,溅射过程越不明显,比冲也就越大。所以减小液滴直径,使其接近于靶材对激光的吸收深度,是提高比冲的一种有效途径。总而言之,滴状液靶在继承液体靶材大冲量耦合系数的同时,提高了推进比冲,使综合推进性能得以改进,是实现激光推进实际应用的一种可行方案。

### 3.4 高黏度靶材研究

瑞士保罗·谢尔研究所的Lippert等<sup>[25,60]</sup>采用YAG激光对四种不同黏度的聚叠氮缩水甘油醚(GAP)溶液进行了实验研究。研究表明,溶液的溅射过程主要受溶液质量分数及相应激光功率密度的影响,随着激光功率密度的增大,低质量分数的溶液率先开始出现溅射现象,随后高质量分数的溶液逐渐开始出现溅射现象,当溶液的质量分数高达一定值时,即使在较大的功率密度辐照下也不会出现明显的溅射现象。如图3所示<sup>[2]</sup>,激光功率密度为4.5 J/cm<sup>2</sup>,激光与溶液相互作用10 μs后,质量分数为28%的溶液溅射现象最明显,质量分数为50%的溶液次之,而质量分数为70%的溶液几乎不发生溅射现象。实验测得质量分数为70%的溶液比冲达到了680 s。

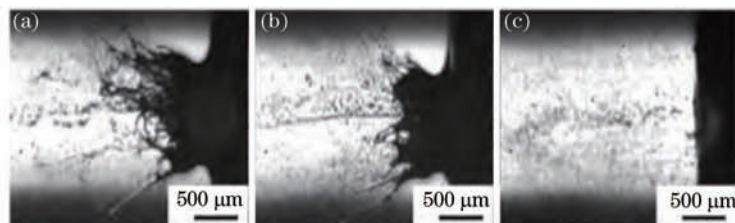


图3 不同浓度GAP溶液的溅射现象

Fig.3 Pictures for varying GAP concentrations

郑志远等<sup>[61-62]</sup>采用波长为532 nm的脉冲激光对水和甘油靶材进行了相关的实验研究。研究结果表明,靶材的黏度对推进性能具有很大的影响,尤其是对水靶材,在较低粘度范围内冲量耦合系数和比冲与其黏度均呈近似线性变化关系,可以仅通过改变靶材黏度控制推进性能参数,在合适的黏度下可以获得较高的冲量耦合系数和比冲。由于黏度较小,冲量耦合系数与比冲并不满足逆相关规律( $C_m I_{sp} = 2\eta/g_0$ ,  $\eta$ 为能量转换效率,  $g_0$ 为重力加速度),而是随着黏度的增大而增大。

对于GAP溶液,当质量分数大于50%后,动力黏度急剧上升,质量分数为70%的GAP溶液对应的动力黏度高达14 Pa·s,在这样高的黏度下,溶液的烧蚀过程近似于固体靶材的烧蚀过程,消耗的靶材质量很小,溅射过程得到了有效的抑制,所以比冲得到了很大的提高。GAP溶液同时还具有液体靶材的优点,易于存储,可以灵活补充。同时GAP溶液还属于一种高含能材料,而且掺杂了一定量的红外激光吸收剂,这都有利于

提高靶材的综合推进性能。总而言之,高黏度的 GAP 溶液兼具液体靶材和固体靶材的优点,是一种极具潜力的推进靶材。对水和甘油的实验研究了较低黏度范围内靶材黏度对推进性能参数的影响关系,在低黏度范围内,水靶材的推进性能参数与黏度系数呈线性变化关系,可以通过增大靶材的黏度提高推进性能参数。

液体靶材的选取过程是一个冲量耦合系数与比冲相互权衡的过程,可以通过控制靶材的黏度,得到冲量耦合系数与比冲以不同权重进行组合的推进靶材,进而对其推进性能进行研究,最终得到推进性能最佳时的最优权重及相应的最佳黏度。高黏度靶材兼具液体靶材和固体靶材的性能优点,可以获得较好的综合推进性能。同时可以设想,膏状或糊状靶材或许也同时具备液体靶材和固体靶材的性能优点,从而具有较好的综合推进性能,这需要研究人员进一步的探索。

### 3.5 研究进展小结

液体靶材冲量耦合系数较大,但比冲较低,不能满足实际应用的需求。通过对无约束靶材激光推进的分析可知,液体靶材推进过程分为汽化和溅射两个连续的过程,溅射过程消耗了大量靶材,但是对冲量几乎毫无贡献。为了提高液体靶材激光推进的比冲,必须尽量避免溅射过程的影响,目前主要有两种方法用于减小溅射过程的影响,即改变靶材结构形态和采用高黏度靶材,前者可以有效增大靶材的比表面积,减小推进过程中靶材的消耗量,后者近似于固体靶材的烧蚀过程,可以有效抑制溅射靶材的射过程,这两种方法都能有效提高液体靶材的推进性能。

表 1 总结了液体靶材激光推进的国内外研究结果。从表中可知,多数研究结果具有较高的冲量耦合系数  $C_m$ , 但比冲  $I_{sp}$  较小,部分实验甚至没有给出比冲的研究结果。美国学者的己烷炮靶实验和中国学者的雾化水滴实验同时具有较高的冲量耦合系数和比冲,具有较好的综合推进性能。瑞士学者的高黏度液体实验侧重于研究液体靶材高比冲实现的可能性,成功获得了较高的推进比冲,但没有冲量耦合系数的研究结果。

表 1 液体靶材激光推进研究小结

Table 1 Summary of study results of liquids for laser propulsion

Nation	Leader	Target	Confined state	$C_{m,max}/(N/MW)$	$I_{sp,max}/s$
USA	Pakhomov <sup>[31-33]</sup>	Bulk liquid	L	1500	0.4
		WC	S <sup>L</sup>	3536	
Japan	Yabe <sup>[39-42]</sup>	MFWC	L <sup>S</sup>	2400	<1
		WFC	G <sup>L</sup>	3680	
China	Zheng Zhiyuan <sup>[43-46]</sup>	Water model car	S <sup>L</sup>	3990	-
China	Tang Zhiping <sup>[47-49]</sup>	Transmitted liquid-confined	L <sup>S</sup>	1790	19
USA	Pakhomov <sup>[24,50]</sup>	HC	S <sup>L</sup>	540	250
China	Hong Yanji <sup>[53-59]</sup>	Water droplet	(L,G)	500	100
Switzerland	Lippert <sup>[2,25,60]</sup>	GAP solution	(L,G)	-	680

## 4 结 论

液体靶材具有冲量耦合系数大而比冲小的性能特点,提高比冲的有效方法是减小溅射过程的影响,目前主要有两种途径用于减少溅射过程的影响,即改变靶材结构形态和增大靶材黏度。依据这两种途径综述了近 10 年来国内外液体靶材激光推进的研究进展,得到了三种最具潜力的推进靶材,即己烷炮靶、雾化水滴和高黏度溶液,这三种液体靶材冲量耦合系数较大,而且比冲获得了很大的提高(提高了 1~2 个数量级),使激光推进的综合性能得到了很大改善。

进一步分析这三种靶材的共同点,可以发现这三种靶材均为多相靶材组成的复合靶材,其中己烷炮靶和高黏度溶液兼具固体靶材和液体靶材的推进特点,雾化水滴属于液体靶材和气体靶材组成的复合靶材。这三种靶材也可以进一步相互组合形成新的复合靶材,如文献[63]中所述的高黏度液膜覆盖下的金属靶材,即己烷靶材和高黏度溶液组成的复合靶材,在己烷靶材的基础上,冲量耦合系数提高了近 2.5 倍,推进性能获得了进一步提高。复合靶材可以兼具各相靶材的性能优点,具有较好的综合推进性能,是未来液体靶材

激光推进的一个重要的发展方向。

对比这三种液体靶材的推进性能参数,可以发现雾化水滴具有较高的能量转换效率,是近期内实现激光推进空间发射的有效途径。但是雾化水滴的研究工作中还存在着以下不足:1)激光功率密度较小,重点研究了水滴蒸发和蒸汽爆炸等现象,对高功率密度下的烧蚀甚至击穿过程研究较少;2)研究工作重在进行性能参数的实验研究,对激光与雾化水滴之间能量传递的内在机理研究较少;3)实验研究中水滴的尺寸还比较大,水滴直径与水滴对激光的吸收深度还有较大差距。实验室拟采用高功率密度激光,进一步缩小水滴直径,对击穿条件下的雾化水滴靶材进行相关的机理分析和实验研究,为推动雾化水滴激光推进的发展提供理论支持和实验参考。

### 参考文献

- 1 Kantrowitz A. Propulsion to orbit by ground-based lasers [J]. *Astronautics Aeronautics*, 1972, 10(5): 74-76.
- 2 Phipps C, Birkan M, Bohn W, *et al.*. Review: laser-ablation propulsion [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, 26(4): 609-637.
- 3 Hong Yanji, Li Xiuqian, Dou Zhiguo. Advances in study on laser propulsion [J]. *Acta Aeronauticae Astronautica Sinica*, 2009, 30(11): 2003-2014.  
洪延姬, 李修乾, 窦志国. 激光推进研究进展[J]. *航空学报*, 2009, 30(11): 2003-2014.
- 4 Hong Yanji, Li Xiuqian, Wang Diankai, *et al.*. Some thoughts on condensed propellants for laser propulsion [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2009, 30(5): 618-624.  
洪延姬, 李修乾, 王殿恺, 等. 对凝聚态工质激光推进的思考[J]. *推进技术*, 2009, 30(5): 618-624.
- 5 Dou Zhiguo, Yao Honglin, Wang Jun, *et al.*. Research on the propulsive performance of laser propulsive working medium [J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2006, 17(6): 99-103.  
窦志国, 姚宏林, 王军, 等. 激光推进工质推进性能研究[J]. *装备指挥技术学院学报*, 2006, 17(6): 99-103.
- 6 Liu Jianxun. Summary of propellants in different states of laser propulsion [J]. *Shanxi Science and Technology*, 2011, 26(5): 95-96.  
刘建勋. 激光推进中不同状态工质性能综述[J]. *山西科技*, 2011, 26(5): 95-96.
- 7 Ye Jifei, Hong Yanji, Wang Guangyu. Progress in laser micro ablation of target research [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2009, 30(6): 751-756.  
叶继飞, 洪延姬, 王广宇. 激光微推进的靶特性研究进展[J]. *推进技术*, 2009, 30(6): 751-756.
- 8 Ye Jifei, Hong Yanji, Wang Guangyu, *et al.*. Research progress in micro-laser plasma propulsion [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(4): 319-326.  
叶继飞, 洪延姬, 王广宇, 等. 激光等离子体微推进技术的研究进展[J]. *中国光学*, 2011, 4(4): 319-326.
- 9 Zheng Zhiyuan, Gao Hua, Fan Zhenjun, *et al.*. Developments of laser plasma propulsion technology [J]. *Science & Technology Review*, 2012, 30(28): 103-107.  
郑志远, 高华, 樊振军, 等. 激光等离子体推进技术研究进展[J]. *科技导报*, 2012, 30(28): 103-107.
- 10 Zhang Nan, Xu Zhijun, Zhu Xiaonong, *et al.*. Laser propulsion technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1025-1037.  
张楠, 徐智君, 朱晓农, 等. 激光推进技术[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(6): 1025-1037.
- 11 Myrabo L N, Messitt D G, Mead Jr F B. Ground and Flight Tests of a Laser Propelled Vehicle [R]. AIAA 98-1001, 1998.
- 12 Myrabo L N. Brief history of the lightcraft technology demonstrator (LTD) projet [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2003, 664: 49-60.
- 13 Shall W O, Eckel H A, Mayerhofer W, *et al.*. Comparative lightcraft impulse measurements [C]. *SPIE*, 2002, 4760: 908-917.
- 14 Bohn W L, Schall W O. Laser propulsion activities of germany [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2003, 664: 79-91.
- 15 Rezunkov Y A, Safronov A L, Ageichik A A, *et al.*. Performance characteristics of laser propulsion engine operation both in CW and in repetitively-pulsed modes [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2006, 830: 3-13.
- 16 Shi Lei, Zhao Shanghong, Chu Xingchun, *et al.*. Experimental and numerical study of air-breathing mode propulsion by solid Nd:glass nanosecond pulse laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(1): 100-104.  
石磊, 赵尚弘, 楚兴春, 等. 大气呼吸模式纳秒脉冲固体钕玻璃激光推进实验与数值分析[J]. *中国激光*, 2010, 37(1): 100-

- 104.
- 17 Pakhomov A V, Gregony D A, Thompson M S. Specific impulse and other characteristics of elementary propellants for ablative laser propulsion [J]. *AIAA Journal*, 2002, 40(5): 947-952.
- 18 Pakhomov A V, Thompson M S, Jr W S, *et al.*. Ablation laser propulsion: specific impulse and thrust derived from force measurements [J]. *AIAA Journal*, 2002, 40(11): 2305-2311.
- 19 Pakhomov A V, Thompson M S, Gregory D A. Ablative laser propulsion: a study of specific impulse, thrust and efficiency [C]. *AIP Conference Proceedings*. 2003, 664: 194-205.
- 20 Lin J, Thompson S, Pakhomov A V. Ablative laser propulsion: determination of specific impulse from plasma imaging [C]. *SPIE*, 2004, 5448: 465-476.
- 21 Zhang Y, Lu X, Zhou M L. Laser propulsion with a high specific impulse using a thin film propellant [J]. *Chin Phys B*, 2011, 20(8): 087901.
- 22 Sinko J E, Sasoh A. Review of CO<sub>2</sub> laser ablation propulsion with polyoxymethylene[J]. *International Journal of Aerospace Innovations*, 2011, 3(2): 93-130.
- 23 Cai Jian, Hu Xiaojun, Tang Zhiping. Experimental investigation on ablation mode of laser propulsion [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2008, 29(3): 371-376.  
蔡建, 胡晓军, 唐志平. 烧蚀模式激光推进的实验研究[J]. *推进技术*, 2008, 29(3): 371-376.
- 24 Sinko J E, Pakhomov A V. Laser propulsion with liquid propellants Part II: thin films [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2008, 997: 209-221.
- 25 Lippert T, Hauer M, Phipps C R, *et al.*. Fundamentals and applications of polymers designed for laser ablation [J]. *Appl Phys A*, 2003, 77: 259-264.
- 26 Fardel R, Urech L, Lippert T. Laser ablation of energetic polymer solution: effect of viscosity and fluence on the splashing behavior [J]. *Appl Phys A*, 2009, 94: 657-665.
- 27 Cheng Jianzhong, Cai Jian, Hu Yun, *et al.*. Experimental study of laser propulsion by using polymer propellant doped with metal powders [J]. *High Power and Particle Beams*, 2008, 20(7): 1190-1194.  
程建中, 蔡建, 胡云, 等. 掺杂金属颗粒的高分子工质激光推进实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(7): 1190-1194.
- 28 Wang Diankai, Hong Yanji, Wang Guangyu. Development of micro-laser ablation propulsion performance of doped polymers [J]. *Laser Journal*, 2009, 30(5): 1-2.  
王殿恺, 洪延姬, 王广宇. 掺杂聚合物的激光微烧蚀推进性能研究现状[J]. *激光杂志*, 2009, 30(5): 1-2.
- 29 Ye Jifei, Wang Guangyu, Wang Diankai. Study on the propulsion performance of doped PVC with laser micro ablation [J]. *Laser Journal*, 2011, 32(6): 36-37.  
叶继飞, 王广宇, 王殿恺. 激光微烧蚀掺碳PVC推进性能研究[J]. *激光杂志*, 2011, 32(6): 36-37.
- 30 Nakano M, Fujita K, Uchida S, *et al.*. Fundamental experiments on glycerin propellant laser thruster [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2004, 702: 139-145.
- 31 Sterling E, Pakhomov A V, Larson C W, *et al.*. Absorption-enhanced liquid ablatants for propulsion with TEA CO<sub>2</sub> laser [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2005, 766: 474-481.
- 32 Sinko J, Kodgis L, Porter S, *et al.*. Ablation of Liquids for Laser Propulsion with TEA CO<sub>2</sub> Laser[R]. *Alabama Univ in Huntsville Dept of Physics*, 2005.
- 33 Sinko J, Kodgis L, Porter S, *et al.*. An analysis of force generation in TEA CO<sub>2</sub> laser ablation of liquids [C]. *SPIE*, 2006, 6261: 62611W.
- 34 Jin Xing, Cui Cunyan, Zhou Jiasheng, *et al.*. Experiment method on mechanism of thrust of laser-induced ablation propulsion with liquid propellant [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2009, 30(5): 625-628.  
金星, 崔村燕, 周家胜, 等. 液体烧蚀激光推进推力形成机理实验方法[J]. *推进技术*, 2009, 30(5): 625-628.
- 35 Cui Cunyan, Hong Yanji, Wen Ming, *et al.*. Analysis for mechanism of cavitation produced by CO<sub>2</sub> laser-generated ablation of the surface of water [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2010, 31(1): 115-118, 128.  
崔村燕, 洪延姬, 文 明, 等. CO<sub>2</sub>激光烧蚀水所形成气蚀空穴机理研究[J]. *推进技术*, 2010, 31(1): 115-118, 128.
- 36 Cui Cunyan, Hong Yanji, Wen Ming, *et al.*. Primary analysis for performance of laser propulsion with water propellant [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2010, 31(2): 240-242, 256.  
崔村燕, 洪延姬, 文 明, 等. 水烧蚀激光推进性能初步分析[J]. *推进技术*, 2010, 31(2): 240-242, 256.
- 37 Cui C Y, Hong Y J, Ye J F, *et al.*. Effects of laser energy density on impulse coupling coefficient of laser ablation of

- water for propulsion [J]. Appl Phys A, 2011, 103(1): 239–243.
- 38 Pakhomov A V, Sinko J E. A conceptual tree of laser propulsion [C]. AIP Conference Proceedings, 2008, 997: 592–603.
- 39 Ohkubo T, Yabe T, Miyazaki, *et al.*. Laser propulsion using metal-free water cannon target [C]. AIP Conference Proceedings, 2005, 766: 394–405.
- 40 Yabe T, Ohzono H, Ohkubo T, *et al.*. Proposal of liquid cannon target driven by fiber laser for microthruster in satellite [C]. AIP Conference Proceedings, 2004, 702: 503–512.
- 41 Yabe T, Nakagawa R, Yamaguchi M, *et al.*. Simulation and experiments on laser propulsion by water cannon target [C]. AIP Conference Proceedings, 2003, 664: 185–193.
- 42 Ogata Y, Yabe T, Ookubo T, *et al.*. Numerical and experimental investigation of laser propulsion [J]. Appl Phys A, 2004, 79(4–6): 829–831.
- 43 Zhang Yi, Lu Xin, Zheng Zhiyuan, *et al.*. High coupling coefficient laser propulsion mode [J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(5): 534–537.  
张翼, 鲁欣, 郑志远, 等. 透射式液体工质的高耦合效率激光推进模式[J]. 推进技术, 2007, 28(5): 534–537.
- 44 Zheng Z Y, Zhang J, Hao Z Q, *et al.*. The characteristics of confined ablation in laser propulsion [J]. Chin Phys, 2006, 15(3): 580–584.
- 45 Zheng Z Y, Zhang J, Hao Z Q, *et al.*. Paper airplane propelled by laser plasma channels generated by femtosecond laser pulses in air [J]. Opt Express, 2005, 13(26): 10616–10621.
- 46 Cai Jian, Wang Bin, Tang Zhiping, *et al.*. The experimental investigation of laser-driven water vehicle [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(1): 43–48.  
蔡建, 王彬, 唐志平, 等. 激光水推进技术的实验研究[J]. 实验力学, 2007, 22(1): 43–48.
- 47 Tang Zhiping. Exploration of mechanism and applications for ablation laser propulsion [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2007, 37(10): 1300–1305.  
唐志平. 烧蚀模式的激光推进机理和应用探索[J]. 中国科学技术大学学报, 2007, 37(10): 1300–1305.
- 48 Wang Bin, Tang Zhiping, Cai Jian, *et al.*. Mechanism for water-powered laser propulsion [J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(5): 586–589.  
王彬, 唐志平, 蔡建, 等. 激光水推进的机理研究及参数优化[J]. 推进技术, 2007, 28(5): 586–589.
- 49 Wang B, Li L, Tang Z P, *et al.*. Experimental investigation of liquid-propellant laser propulsion with a horizontal momentum measuring lever [C]. AIP Conference Proceedings, 2010, 1230: 243–253.
- 50 Sinko J E, Pakhomov A V. Laser propulsion with liquid propellants part I: an overview [C]. AIP Conference Proceedings, 2008, 997: 195–208.
- 51 Fujita K, Nakano M, Uchida S, *et al.*. Impulse generation mechanism in glycerin propellant laser thruster [C]. AIP Conference Proceedings, 2004, 702: 146–151.
- 52 Fujita K, Nakano M, Uchida S, *et al.*. Impulse generation mechanism in pulsed laser propulsion using droplet propellant [J]. Uchu Kagaku Gijutsu Rengo KoenkaiKoenshu (CD-ROM), 2003, 47: 1070–1073.
- 53 Li Xiuqian, Hong Yanji, Chen Jingpeng, *et al.*. Design of a liquid propellant feeding system for laser propulsion thruster [J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2006, 18(1): 1–4.  
李修乾, 洪延姬, 陈景鹏, 等. 激光推力器液体工质注入系统设计[J]. 军械工程学院学报, 2006, 18(1): 1–4.
- 54 Li Xiuqian, Hong Yanji, Wang Jun, *et al.*. Performance measurement of laser propulsion with water spray droplets [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(3): 401–404.  
李修乾, 洪延姬, 王军, 等. 水滴烧蚀激光推进性能测试[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(3): 401–404.
- 55 Li Xiuqian, Hong Yanji, Cui Cunyan, *et al.*. Measurements of impulse coupling coefficient for laser propulsion with liquid propellants [J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(5): 526–529.  
李修乾, 洪延姬, 崔村燕, 等. 液体工质激光推进冲量耦合系数实验测试[J]. 推进技术, 2007, 28(5): 526–529.
- 56 Li X Q, Hong Y J, Wen M, *et al.*. Influencing factors on propulsion performances of water droplets for laser propulsion [J]. Journal of Propulsion and Power, 2010, 26(5): 1025–1028.
- 57 Li Xiuqian, Hong Yanji, Wen Ming, *et al.*. Effects of nozzle configuration and laser focusing site on propulsive performances of atomized water droplets [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(1): 6–10.  
李修乾, 洪延姬, 文 明, 等. 喷管构型和聚焦位置对雾化水滴推进性能的影响[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(1): 6–10.
- 58 Li Xiuqian, Hong Yanji, Wen Ming, *et al.*. Propulsive characteristics of water droplets for multi-pulse laser propulsion



- [J]. High Power and Particle Beams, 2011, 23(7): 1731-1734.  
李修乾, 洪延姬, 文 明, 等. 水滴烧蚀多脉冲激光推进性能[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(7): 1731-1734.
- 59 Li Xiuqian, Hong Yanji, Hen Guoqiang. Reviews of the propulsive characteristics study on liquid propellants for laser propulsion [J]. Journal of Propulsion Technology, 2010, 31(1): 105-110.  
李修乾, 洪延姬, 何国强. 液体工质激光推进性能研究评述[J]. 推进技术, 2010, 31(1): 105-110.
- 60 Lippert T, Urech L, Fardel R, *et al.*. Materials for laser propulsion: liquid polymers [C]. High-Power Laser Ablation, 2008, 7005(12): 1-10.
- 61 Zheng Zhiyuan, He Ran, Dong Aiguo, *et al.*. Effect of viscosity of liquid glycerol on laser plasma propulsion [J]. Physics Experimentation, 2012, 32(2): 7-9.  
郑志远, 贺 然, 董爱国, 等. 甘油的黏度对激光等离子体推进的影响[J]. 物理实验, 2012, 32(2): 7-9.
- 62 Zheng Z Y, Fan Z J, Wang S W, *et al.*. The effect of viscosity of liquid propellant on laser plasma propulsion [J]. Chin Phys Lett, 2012, 29(9): 095202.
- 63 Choi S, Han T, Gojani A B. Thrust enhancement via gel-type liquid confinement of laser ablation of solid metal propellant [J]. Appl Phys A, 2010, 98(1): 147-151.