

文章编号: 0258-7025(2006)08-1038-05

激光脉冲波形对推力器性能的影响

文 明¹, 洪延姬², 王 军², 曹正蕊¹

(装备指挥技术学院¹ 研究生院, ² 基础部, 北京 101416)

摘要 激光推力器性能优化是激光推力器研究的重要组成部分。受硬件条件的限制,激光推进领域激光脉冲时间波形对推力器性能影响的研究并未广泛展开。以两台 CO₂ 激光器的实际脉冲波形为基准,建立了两组激光能量输入模型,其波形时间分布相似,单脉冲能量相同,但脉冲持续时间及峰值功率不同。数值计算比较了不同脉冲波形下抛物型激光推力器的性能,结果表明:峰值功率和脉冲持续时间是影响推力器性能的重要参数,高功率短持续时间的脉冲波形更有利于提高冲量耦合系数和推力;两种实际脉冲波形的冲量耦合系数数值计算结果分别为 $40.9 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/J}$, $30.0 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/J}$,与文献报道实验测量结果基本吻合。为激光推进 CO₂ 激光器的脉冲波形设计提供支持及研究思路,具有一定参考价值。

关键词 激光技术;脉冲波形;激光推力器;数值研究;冲量耦合系数;推力

中图分类号 O 439; TN 249 文献标识码 A

Effects of Laser Pulse Waveform on Lightcraft Performance

WEN Ming¹, HONG Yan-ji², WANG Jun², CAO Zheng-rui¹

(¹Academy of Postgraduate, ²Department of Basic Theories,
Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China)

Abstract Performance optimization is one of important facets for the investigation of laser thruster. Due to the limitation of hardware, effects of laser pulse waveform on lightcraft performance have not been carried out widely in the field of laser propulsion. Based on actual pulse waveform of two CO₂ lasers, two groups of energy injecting models are formed, whose temporal waveforms are similar, single pulse energies are the same, but peak powers and pulse durations are different. Performances of parabolic laser thruster obtained by numerical calculations are compared under the conditions of different pulse waveforms. The results indicate that peak power and pulse duration are important parameters in determining the lightcraft performance and waveform with shorter duration and higher peak power is more efficient in improving impulse coupling coefficient and force. The numerical results of impulse coupling coefficient with two actual pulse waveforms are $40.9 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/J}$ and $30.0 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/J}$ respectively, which are consistent with experimental ones reported by other literatures. The presented method and investigative idea can be used in pulse waveform design of CO₂ laser and provide some reference for laser propulsion research.

Key words laser technique; pulse waveform; laser thruster; numerical investigation; impulse coupling coefficient; force

1 引 言

作为一种具有突出特点和广阔应用前景的新概念航天推进技术,激光推进已在世界范围内越来越受到重视。无论对于吸气模式还是火箭模式脉冲激

光推进^[1],“光—力”转换过程是实现激光推进最关键的一个过程。远距离输送的激光能量与工作物质(以下简称工质)在推力器内部耦合产生推力,因此激光推力器的研究在整个激光推进技术研究领域中

收稿日期:2005-11-18;收到修改稿日期:2006-04-13

基金项目:国家 973 计划和新世纪优秀人才支持计划资助项目。

作者简介:文 明(1978—),男,湖北武汉人,装备指挥技术学院博士研究生,主要从事激光推进技术方面的研究。

E-mail:wujiewm@163.com

导师简介:洪延姬(1963—),女,吉林龙井人,装备指挥技术学院教授,博士生导师,主要从事爆轰物理、先进推进技术的研究。E-mail:hongyanji@vip.sina.com

起到举足轻重的作用。

激光推力器的研究重点主要集中在不同推力器的构型设计和特定推力器的性能优化两个方面^[2]。推力器性能优化的一个重要部分是研究入射激光参数对性能参数的影响^[3,4]。

本文以确定的抛物型激光推力器为对象，初步研究吸气模式下激光脉冲时间波形对推力器性能的影响，比较同等激光能量在确定聚焦区的沉积效率和沉积时间对冲量耦合系数及推力的作用规律。

2 等离子体点火特征

在推力器有限边界条件和入射激光脉冲持续时间范围内，通过激光与物质相互作用，击穿工质，形成激光等离子体，实现激光能量向等离子体内能转化的过程，是激光等离子体点火过程。这一过程是激光推力器工作成败的关键，直接影响推力器的工作性能。

一般意义上的点火主要依赖于确定构形的聚焦光学系统和入射的单脉冲激光参数。图 1 给出了两种激光单脉冲波形的等离子体点火情况。波形 1,2 具有相同的时间积分，即单脉冲能量相同，分别在 t_1, t_2 时刻达到工质的击穿阈值 I_{th} 。峰值功率 $P_{M2} > P_{M1}$ ，脉冲持续时间 $t_{d2} < t_{d1}$ 。工质击穿前，主要通过固体热交换模式吸收激光能量，吸收系数小；光学击穿后，工质对后续激光能量的吸收主要通过自由电子的逆韧致方式，吸收系数明显提高。

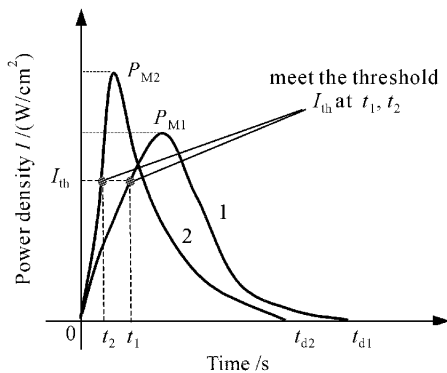


图 1 激光等离子体点火特征示意图

Fig. 1 Sketch of characteristics of laser plasma ignition

3 实际的激光脉冲波形

实验室用于激光推进研究的两台 CO₂ 激光器 I 和 II 的激光脉冲时间波形分布不尽相同。激光器 I 单脉冲能量略高，可以达到 100 J 量级，其单脉冲

波形如图 2 所示，信号前部分含有因脉冲放电产生的噪声干扰，激光功率约在 1.25 μs 达到第一峰值，约在 1.67 μs 达到第二峰值，整个脉冲持续时间约为 20 μs；激光器 II 重复频率高，单脉冲能量低，约在 10 J 量级，其单脉冲波形如图 3 所示，忽略信号前端噪声干扰，约在 0.2 μs 达到峰值功率，整个脉冲持续时间约 6.6 μs。脉冲波形的纵轴为平均单位，转化为实际激光强度需要引入比例系数 k ，满足曲线积分等于各自的单脉冲能量。

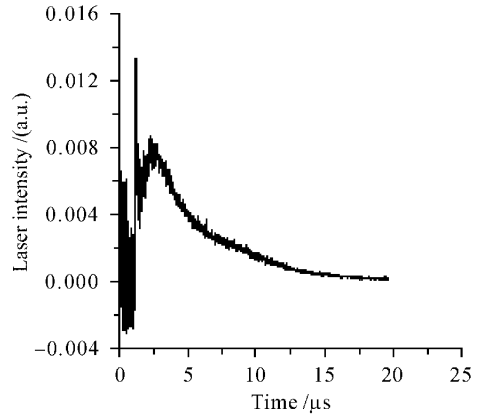


图 2 激光器 I 的脉冲波形

Fig. 2 Pulse waveform of laser I

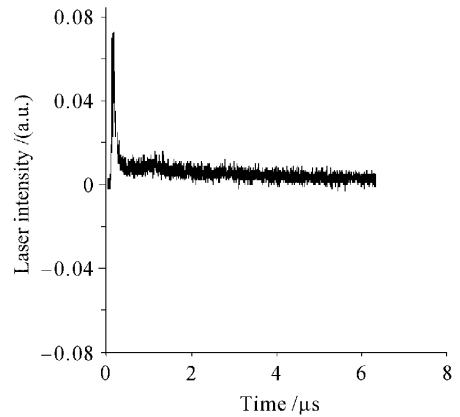


图 3 激光器 II 的脉冲波形

Fig. 3 Pulse waveform of laser II

4 推力器模型

所采用的抛物型推力器的内表面方程为 $y^2 = 16x$ ，端面直径为 50 mm，厚度约为 0.5 mm，材料为 LY12，质量为 7.2 g，如图 4 所示。平行于推力器主轴的脉冲激光入射后，经抛物面反射聚焦于焦点位置，之后击穿空气并实现与壁面的冲量耦合，因此推力器同时作为光学聚焦系统和喷管。理论上，平行光束将聚焦为理想点，但受加工精度的限制，实际认

为聚焦区域是以焦点为中心的球体,并存在最小半径 r_{\min} ,如图 5 所示。在最小半径球面上,当激光脉冲的瞬时功率密度达到空气的击穿阈值 10^7 W/cm^2 时,发生光学击穿,实现激光等离子体点火。

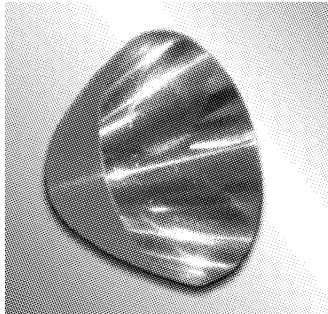


图 4 抛物型推力器的实物照片

Fig. 4 Real photograph of parabolic lightcraft

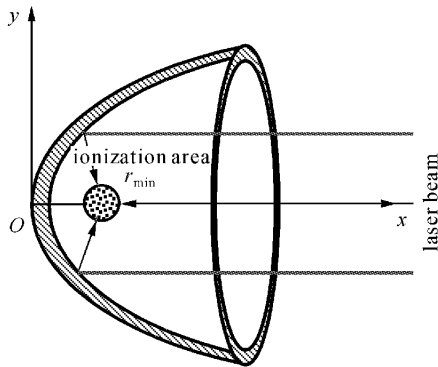


图 5 入射光束聚焦示意图

Fig. 5 Sketch of laser beam being focalized

5 能量输入模型

将空气对激光能量的吸收过程简化为以焦点为中心球面上的能量输入,设抛物型推力器的最小聚焦半径 $r_{\min} = 3.455 \text{ mm}$ (实验表明聚焦半径在毫米量级),计算过程中保持输入能量、转化效率及击穿半径不变,仅改变激光脉冲波形的峰值功率及持续时间。光学击穿的判断条件是某时刻聚焦球面上激光强度 P 达到空气的击穿阈值。即空气击穿前激光能量完全损失,输入激光能量为零;脉冲激光瞬态功率密度达到空气击穿阈值后,后续激光能量完全沉积,能量输入满足设计的二次曲线。

为比较同能量不同脉冲波形的推力器性能,采用两组(每组含 3 种波形)能量输入模型进行计算。模型 1 以激光器 I 的实际脉冲波形为依据作曲线拟合,如图 6 所示,均含 3 个转折点,4 段二次曲线。其激光强度对时间积分 E 不变,均为 75 J ,但峰值功

率 P_M ,到达峰值功率的时间 t_M ,平均功率 \bar{P} 及脉冲持续时间 t_d 不同。波形 I-1 为近似的实际脉冲波形,设计的波形 I-2, I-3 分别在峰值功率和脉冲持续时间上具有明显优势,波形 I-2 在约 $0.2 \mu\text{s}$ 达到峰值功率 50.8 MW ,波形 I-3 的持续时间为 $30 \mu\text{s}$;模型 2 以激光器 II 的实际脉冲波形为依据作曲线拟合,如图 7 所示,均含 2 个转折点,3 段二次曲线,且 3 种波形对时间的积分均为 10 J 。为满足击穿条件,波形 II-1, II-2, II-3 的峰值功率均高于 15 MW ,峰值功率越高对应脉冲持续时间越短,其中波形 II-1 为近似的激光器 II 的实际脉冲波形。为便于综合比较,表 1 汇总了两组能量输入模型的基本特征 (t_b 为击穿时刻)。

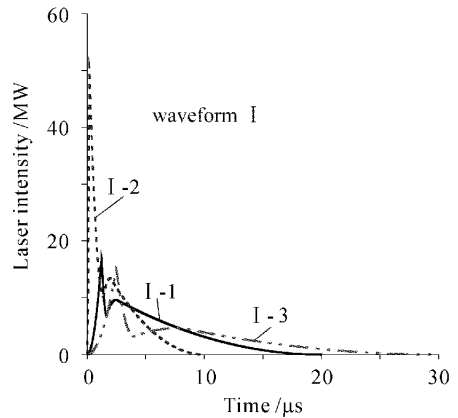


图 6 模型 1 的 3 种脉冲波形

Fig. 6 Three temporal waveforms of model 1

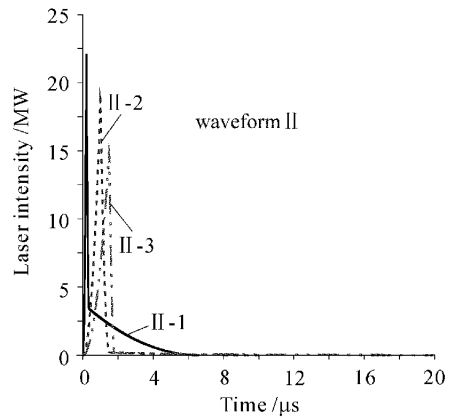


图 7 模型 2 的 3 种脉冲波形

Fig. 7 Three temporal waveforms of model 2

计算过程中,其他计算条件与文献[4]完全相同,即所采用的物理模型、计算网格、计算方法和初边值条件相同,仅调入不同激光脉冲波形的拟合曲线作为激光能量源。

表 1 两种能量输入模型的基本特征

Waveform	$E /$ J	$P_M /$ MW	$t_M /$ μs	$\bar{P} /$ MW	$t_d /$ μs	$t_b /$ μs
I-1		17.1	1.25	3.75	20	1.17
I-2	75	50.8	0.2	7.5	10	0.11
I-3		15.2	2.5	2.5	30	2.48
II-1		22.1	0.2	1.515	6.6	0.16
II-2	10	18.7	1	1	10	0.9
II-3		15.0	1.5	0.5	20	1.5

6 结果与分析

利用能量输入模型 1 的 3 种脉冲波形说明 100 J 量级同等能量激光功率和脉冲持续时间对推力器性能的影响,图 8 是数值计算得到的 3 种波形作用下推力随时间的变化曲线,表 2 上部分是模型 1 推力器性能特征的具体描述。75 J 激光能量以波形 I-2 较短持续时间 10 μs , 峰值功率 50.8 MW 输入聚焦区域时,在 $t_M = 7 \mu\text{s}$ 时峰值推力 F_M 达到 964.1 N, 推力作用时间 F_d 约为 81.7 μs ; 近似激光器 I 实际脉冲波形的波形 I-1 在 9 μs 达到峰值推力 843.0 N, 推力作用时间约为 84.3 μs ; 波形 I-3 在 17 μs 达到峰值推力 490.6 N, 推力作用时间 83 μs 。输入激光能量与推力器耦合产生推力是复杂的过程,其大小与激光支持的爆轰波或激波强度及耦合面积有关。爆轰波传播过程中,强度逐渐减弱,当同期输入的激光能量无法弥补这一损失时,导致推力逐步降低,因此 3 种波形峰值推力均在能量输入结束之前产生;图 8 推力曲线 I-2 产生两个推力尖峰与脉冲波形 I-2 的激光强度尖峰是吻合的,推力曲线 I-1, I-3 没有产生这一现象,原因是入射激光强度比曲线 I-2 低得多。表 1 数据显示高功率短持续时间脉冲波形 I-2 的明显优势,入射激光能量损失仅为 0.75%,由推力曲线 II-2 积分换算得到的冲量耦合系数 C_m , 峰值推力 F_M 和平均推力 \bar{F} 均略高于波形 I-1, 远高于波形 I-3。脉冲波形 I-3 作用下推力器的性能明显劣于另外两种,另一个原因是能量损失率 η 高造成的。

利用能量输入模型 2 的三种脉冲波形探索 10 J 量级单脉冲能量以何种方式输入能够改善推力器性能,图 9 是数值计算得到的 3 种波形作用下推力随时间的变化曲线,表 2 下部分是模型 2 推力器性能特征的具体描述。结果表明:与模型 1 相比,在模型 2 的 3 种脉冲波形作用下,抛物型推力器的性能均

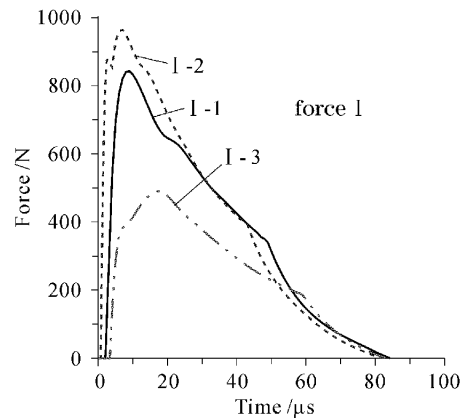


图 8 模型 1 三种波形作用下推力随时间的变化曲线
Fig. 8 Force versus time of three waveforms of model 1

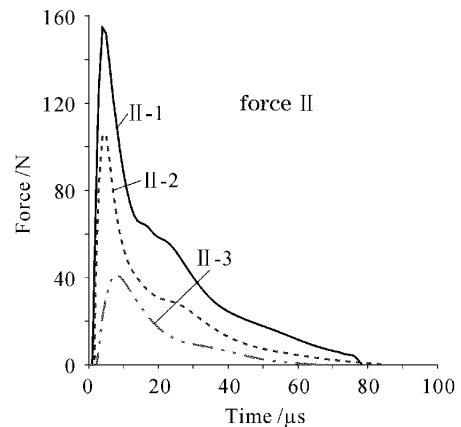


图 9 模型 2 三种波形作用下推力随时间的变化曲线
Fig. 9 Force versus time of three waveforms of model 2

存在大幅度下降。3 种波形的推力曲线 II-1, II-2, II-3 与模型 1 的 3 种波形呈现相同的规律,峰值功率高、持续时间短的近似实际脉冲波形 II-1 在冲量耦合系数、峰值推力和平均推力均具有明显的优势。波形 II-1 在 200 ns 达到峰值功率,因此能量损失较小;波形 II-2, II-3 的峰值功率略高于击穿阈值,从而导致入射能量损失严重,分别为 45.6%, 75.2%, 这也是造成推力器性能下降的重要原因。表 2 中推力产生时刻 t_0 由能量输入模型中的击穿时刻 t_b 和峰值功率共同决定,因此脉冲波形 I-2, II-1 相对较早产生推力 P_M 。

文献[5]和[6]报道了采用不同抛物型推力器时两种脉冲波形下的冲量耦合系数实验测量结果,分别为 $39 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{J}$, $25.5 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{J}$ 。可见两种激光能量输入模型中近似实际脉冲波形的 I-1, II-1 的冲量耦合系数数值计算结果与实验测量结果基本吻合。

表 2 能量模型 1 和 2 三种波形作用下的推力器性能特征

Table 2 Lightcraft performance characteristics of three waveforms of energy models 1 and 2

	$t_0 / \mu\text{s}$	F_M / N	$t_M / \mu\text{s}$	$F_d / \mu\text{s}$	$C_m / (\times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{J})$	\bar{F} / N	$\eta / \%$
I-1	2.0	843.0	9	84.3	40.9	364.0	7.78
I-2	0.7	964.1	7	81.7	44.6	409.1	0.75
I-3	3.3	490.6	17	83.0	27.4	248.0	16.6
II-1	1.0	154.6	4	78.3	30.0	38.3	7.48
II-2	1.7	105.9	5	85.0	17.0	20.0	45.6
II-3	2.3	41.4	8	70	7.7	11.0	75.2

7 结 论

基于实际的激光脉冲波形,建立了两组激光能量输入模型,数值研究了脉冲波形对抛物型推力器性能的影响。结果表明,单脉冲激光能量在 10~100 J 量级,高功率短持续时间的脉冲波形,更有利于改善抛物型推力器的性能参数——冲量耦合系数和推力,其中冲量耦合系数的数值计算结果与实验测量结果基本吻合。因此本文可以为目前激光推进的首选 CO₂ 激光器的脉冲波形设计提供参考及研究思路,从而探索适用于特定激光推力器的最优激光脉冲波形。

参 考 文 献

- Zheng Yijun, Gong Ping, Tan Rongqing *et al.*. Experimental study of coupling coefficients for air-breathing mode laser propulsion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7):889~893
郑义军,龚平,谭荣清等. 大气模式激光推进耦合系数的实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7):889~893
- Li Xiuqian, Hong Yanji, He Guoqiang *et al.*. Status and development trend of concept studies on laser propulsion thruster [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(3):363~368
李修乾,洪延姬,何国强等. 激光推进器概念设计研究现状及发展趋势[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(3):363~368
- Ten-See Wang, Franklin B. Mead, Carl W. Larson. Analysis of the effect of pulse width on laser lightcraft performance [J]. *AIAA*, 2001, **3664**:1~8
- Cao Zhengrui, Hong Yanji, Li Qian *et al.*. Influence of laser pulse energy on propulsion performance of lightcraft [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2005, **4**(2):183~188
曹正蕊,洪延姬,李倩等. 单脉冲能量对光船推进性能的影响[J]. *热科学与技术*, 2005, **4**(2):183~188
- Duluo Zuo, Hong Lu, Zuhai Cheng. Studies on a 100-Joule-class UV-preionized TEA CO₂ laser [C]. *SPIE*, 2005, **5777**:442~445
- Jin Xing, Hong Yanji, Cui Cunyan *et al.*. Measure method of impulse coupling-coefficient of laser propulsion [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(7):861~864
金星,洪延姬,崔村燕等. 激光推进冲量耦合系数的测量方法[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(7):861~864