

脉冲数目和重复频率对纳秒激光推进的影响

陈豪¹, 石磊¹, 马丽华¹, 彭志明², 徐志燕¹, 乔忆炜³

- (1. 空军工程大学 信息与导航学院, 陕西 西安 710077;
2. 中国人民解放军 95107 部队, 广东 广州 510500;
3. 空军工程大学 航空航天工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 以抛物形点聚焦激光推进器模型为研究对象, 数值模拟了脉冲重复频率在 2~50Hz 范围内吸气式多脉冲纳秒激光推进的流场演变过程, 分析了脉冲数目和重复频率对推进性能的影响。结果表明: 随着脉冲数目的增加, 喷管内气体密度减小、温度升高, 导致平均冲量耦合系数下降, 但纳秒脉冲激光作用获得的平均冲量耦合系数明显高于微秒脉冲激光; 相同脉冲数目条件下, 随着脉冲重复频率的增大, 流场恢复时间缩短, 使得流场状态不能及时恢复, 导致平均冲量耦合系数下降, 其中脉冲重复频率 $f \geq 10$ Hz 时的下降趋势明显大于 $f \leq 10$ Hz。

关键词: 激光推进; 纳秒激光; 脉冲数目; 脉冲重复频率; 平均冲量耦合系数

中图分类号: TN249; V439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)09-2403-06

Effect of laser pulse number and repetition frequency on nanosecond laser propulsion

Chen Hao¹, Shi Lei¹, Ma Lihua¹, Peng Zhiming², Xu Zhiyan¹, Qiao Yiwei³

- (1. School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;
2. Army 95107 of PLA, Guangzhou 510500, China;
3. School of Aeronautics and Astronautics Engineering, Xi'an 710038, China)

Abstract: The parabolic point focusing thruster model was adopted as research object. The development process of flow field of air-breathing nanosecond laser propulsion with pulse repetition frequency of 2-50 Hz was numerically simulated, and the Effect of nanosecond laser pulse number and pulse repetition frequency on performance of laser propulsion was analyzed. The results indicate that with the increase of pulse number, the average impulse coupling coefficient decreased due to the reducing air density and increasing temperature. The average impulse coupling coefficient with nanosecond laser is significantly higher than that with microsecond laser, though. With the same pulse number, when the pulse repetition frequency increased, the flow field had less time to recover, leading to the decreasing average impulse coupling coefficient, and the decreasing trend is much more clear in pulse repetition frequency of $f \geq 10$ Hz than in $f \leq 10$ Hz.

收稿日期: 2013-01-06; 修订日期: 2013-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(61108068)

作者简介: 陈豪(1989-), 男, 硕士生, 主要从事激光推进方面的研究。Email: chen_hao_8889@163.com

导师简介: 马丽华(1974-), 女, 教授, 硕士生导师, 主要从事光通信与光电对抗仿真方面的研究。Email: hua_marry@sohu.com

Key words: laser propulsion; nanosecond laser; pulse number; pulse repetition frequency; average impulse coupling coefficient

0 引言

激光推进是一种依靠远距离输送激光能量产生推进力的新概念推进技术,由于具有高比冲、高有效载荷比、安全环保、能够实现多次快速发射等优点,使其在未来微小卫星发射、卫星姿态调整、太空垃圾清除等航天领域拥有广泛的应用前景^[1-2]。吸气式激光推进以空气为工质,比冲理论上无穷大,能够极大地提高发射的有效载荷比,作为大气层推进段的重要推进模式,一直是激光推进领域的研究热点。

在现有的吸气式激光推进实验中,大都采用 10.6 μm 波段的 CO_2 气体激光器。 CO_2 气体激光器能提供高重复频率和平均功率,但其缺点在于体积过于庞大,不适合快速机动发射的需求,其波长也不适合高空长距离传输,且受到功率水平的限制,已成为制约激光推进技术发展的瓶颈。采用体积更小、脉冲更窄、峰值功率更高的纳秒级固体激光器是一个重要的发展趋势^[3]。研究小组前期开展吸气式纳秒脉冲激光推进的数值模拟及实验研究表明,就单脉冲而言,纳秒脉冲激光要优于微秒脉冲激光^[4-6]。

近年来,单脉冲激光推进理论得到深入发展,开展对多脉冲激光推进的研究,建立多脉冲激光推进理论模型,揭示多脉冲推进机理,是目前吸气式激光推进技术研究中迫切需要解决的关键问题。参考文献[7-11]针对微秒脉冲激光开展了多脉冲激光推进性能研究,结果表明:冲量耦合系数随频率及脉冲个数的增加而减小。文中在前期单脉冲纳秒激光推进研究的基础上,开展静态环境下多脉冲纳秒激光推进模拟仿真,研究脉冲数目和重复频率对吸气式多脉冲纳秒激光推进性能的影响。

1 计算模型

1.1 推进器模型

以实验室已有的抛物形点聚焦推进器模型为研究对象,如图 1 所示,满足方程 $y^2+z^2=2px$, $p=10$ 为抛物参数,底部半径为 $R=15\text{ mm}$,高为 $H=11.25\text{ mm}$,焦点在 $(5,0)$ 处。抛物面既是激光接收和聚焦系统,又是产生推力的喷管。

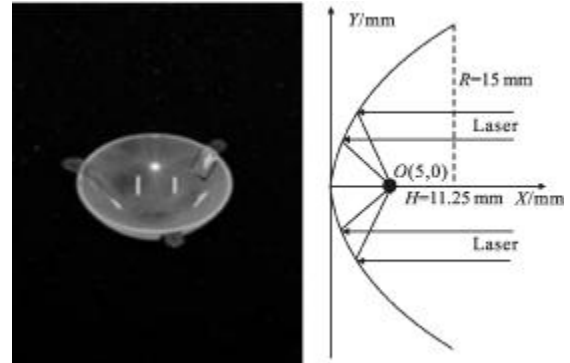


图 1 抛物形点聚焦推进器模型与剖面示意图

Fig.1 Model of cross section of paraboloid point focusing laser thruster

1.2 计算区域划分及网格

采用二维轴对称模型,整个计算流场划分为 3 个区域,以简化边界条件的处理和降低网格划分的难度,1 区为内流场,2 区和 3 区为外流场,见图 2。

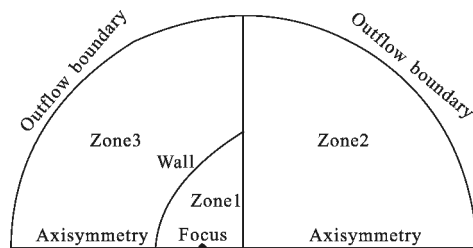


图 2 计算区域划分

Fig.2 Divided computational zones

其中,外流场的出口边界取足够远距离,目的是减弱由边界引起的非物理波反射,出口条件设为适合亚声速计算的特征边界条件。利用 Gambit 网格软件生成计算网格。

1.3 数值计算方法

吸气式脉冲激光推进的基本原理:由地基或天基发射的激光束,经推进器光学系统聚焦,击穿空气产生高温高压等离子体,等离子体冲击波反向喷射产生推动力。其中涉及大气激光传输、激光致空气击穿、等离子体对激光能量的吸收等多个复杂物理过程。为简化数值模拟仿真过程,计算中忽略激光的吸收过程,假设激光能量以 40% 的能量转换效率沉积在等离子体区域。环境气体设为完全气体,忽略粘性和质量力。

数值计算基于 Navier-Stokes 控制方程, 采用 Roe-FDS(Flux Differencing Scheme)通量格式, 通过基于 Van Albada 通量限制器的单调逆风格式(MUSCL)方法获得三阶空间精度, 时间积分采用二阶精度的耦合隐式算法; 用离散转移方法(Discrete Transfer Method, DTRM)分析等离子体辐射; 使用标准 $\kappa-\varepsilon$ 双方程模型进行湍流计算。

1.4 平均冲量耦合系数

冲量耦合系数是评估激光推进性能的重要参数。多脉冲条件下, 定义平均冲量耦合系数为计算时间 t 内, n 个脉冲作用后推进器获得的总冲量与入射激光总能量的比值, 即:

$$C_m = \frac{1}{nE} = \frac{\int_0^t F(t)dt}{nE} \quad (1)$$

式中: $I = \int_0^t F(t)dt$ 为时间 t 内激光作用产生的总冲量。

2 计算结果及分析

2.1 单脉冲纳秒激光推进

数值模拟采用单脉冲能量为 $E=18J$, 脉冲宽度 $t_p=20ns$ 的纳秒激光, 通过计算流体力学仿真软件 Fluent 开展数值模拟研究, 结果显示: 单脉冲条件下推进器获得的单脉冲冲量耦合系数为 $348.20 N/MW$, 大于在同工况下实验获得的冲量耦合系数 $183.4 N/MW$ 。实验中, 三线导轨和推进器不匹配, 导致激光以一定的夹角入射到推进器反射面上, 降低了激光能量的利用率, 导致推进效果不佳。因此数值模拟结果与实验结果中存在的误差是可以允许的, 同时也证明了文中的数值模拟方法的正确性。

2.2 多脉冲纳秒激光推进

以脉冲重复频率 $f=50 Hz$ 为例, 分析多脉冲条件下纳秒激光推进流场演变, 图 3 给出了计算时间 $t=0.1 s$ 内的推力情况。由图 3 可以看出, 与微秒脉冲激光推进相似^[7], 由于喷管内外压力差的作用, 喷管内气体完成“排出→再入”过程, 但流场不能立即恢复到初始状态, 气体在喷管内振荡, 所以激光脉冲结束后的一段时间内推力 F 呈现振荡衰减; 但纳秒脉冲激光由于脉冲宽度更窄、功率更高, 导致推力 F 衰减收敛更快。下面进一步比较多脉冲条件下纳秒脉冲激光与微秒脉冲激光的推进性能。

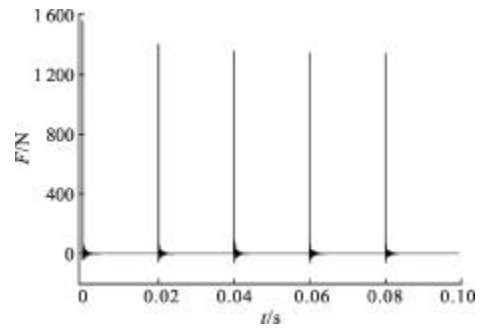


图 3 $f=50 Hz$ 时的推力曲线

Fig.3 Thrust curves in case of $f=50 Hz$

图 4 显示了多脉冲纳秒激光推进的平均冲量耦合系数与微秒脉冲激光数值模拟结果的比较^[7]。数值计算中采用相同的激光脉冲重复频率 $f=50 Hz$, 不同的是微秒脉冲激光推进基于平顶抛物形喷管模型, 模拟仿真得到的结论是^[7]: 在多脉冲条件下, 随着脉冲数目的增多, 喷管内气体密度降低, 后续脉冲受到之前激波流场影响增大, 推进性能降低。图中虚线和实线分别表示在纳秒和微秒脉冲激光推进下的平均冲量耦合系数 C_m 随脉冲数目的变化, 从拟合曲线的变化趋势来看, 纳秒脉冲激光推进的计算结果与微秒脉冲激光推进的数值模拟吻合的较好; 进一步从计算结果来看, 纳秒脉冲激光推进的计算结果要优于微秒脉冲激光推进, 其中第 5 个脉冲激光作用后的平均冲量耦合系数几乎是微秒脉冲激光推进的 3 倍。因此, 可以得出这样的结论: 多脉冲条件下, 纳秒脉冲固体钕玻璃激光推进要优于微秒脉冲 CO_2 气体激光。

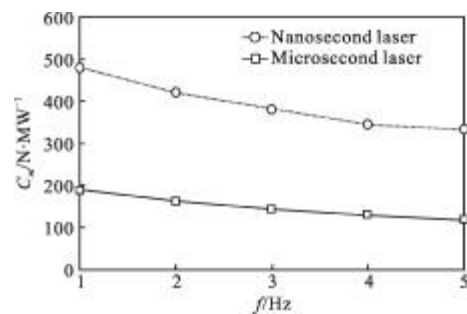


图 4 平均冲量耦合系数与微秒脉冲激光的比较

Fig.4 C_m with nanosecond laser vs C_m with microsecond laser

下面根据每个脉冲作用前喷管内流场的恢复情况来分析多脉冲纳秒激光推进性能。图 5(a)-(b)给出了 $t=0.02 s$ 、 $0.04 s$ 、 $0.06 s$ 和 $0.08 s$ 的流场状态, 即第 2、3、4 和 5 个脉冲作用前的流场密度和温度云图。图 6 显示了 4 个时刻对称轴上的密度和温度分布。

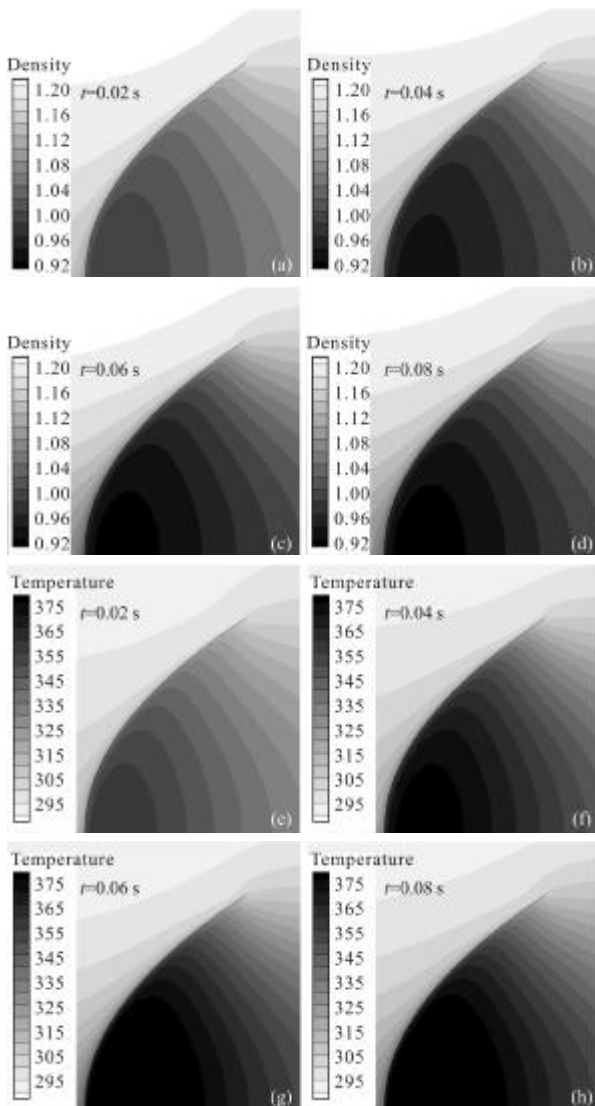


图 5 部分时刻的流场状态

Fig.5 Fluid field in the case of some time

从图 5(a)-(d)中可知,随着脉冲数目的增加,喷管内气体密度降低,且低密度范围不断扩大,进一步观察焦点处的密度,可以发现焦点处的密度随脉冲数目的增加而降低。图 5(e)-(h)中可以发现随着脉冲数目的增加,喷管内的温度逐渐升高,高温气团不断积聚。从激光致大气击穿理论出发,喷管内气体密度降低温度升高,使得大气击穿产生的能量减小,导致流固耦合作用产生的推力 F 减小,影响后续脉冲的推进性能。

图 6(a)-(b)给出了 $t=0.02\text{ s}$ 、 0.04 s 、 0.06 s 和 0.08 s 时刻计算区域内对称轴上的密度和温度分布,图中虚线、实线分别表示喷管的焦点位置和头部位置,可以清楚地发现,随着脉冲数目的增多,喷管内密度降

低、温度升高。其中,焦点位置到喷管头部段的密度温度变化最显著。但与微秒脉冲激光作用后喷管内密度在 $0.6\sim 0.9\text{ kg/m}^3$ 的范围相比,数值模拟 5 个纳秒脉冲激光,喷管内密度能够较高地维持在 $0.9\sim 1.0\text{ kg/m}^3$ 的范围。说明纳秒脉冲激光推进的流场恢复要好于微秒脉冲激光,也是相同脉冲数目条件下,纳秒脉冲激光推进性能要优于微秒脉冲激光的原因。

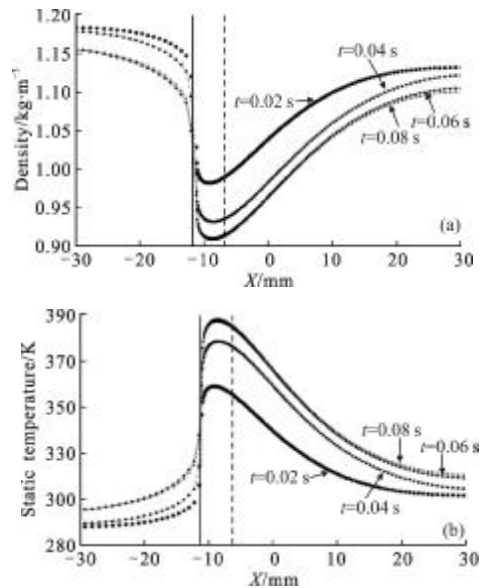


图 6 对称轴上的密度和温度分布

Fig.6 Distribution of density and temperature in the axis of symmetry

2.3 不同重复频率下推进性能分析

多脉冲条件下,激光推进性能除了受脉冲数目的影响外,还受脉冲重复频率的影响,因此研究多脉冲条件下脉冲重复频率对推进性能的影响是十分必要的。

众所周知,纳秒脉冲固体激光器的重复频率不高,根据目前纳秒脉冲固体激光器的水平,文中数值模拟了脉冲重复频率在 $2\sim 50\text{ Hz}$ 范围内的多脉冲纳秒激光推进,计算时间为 0.5 s 。

图 7 给出了平均冲量耦合系数随脉冲重复频率变化的关系。由图可知,随着脉冲重复频率的增加,推进器获得的平均冲量耦合系数降低。当脉冲重复频率 $f \leq 10\text{ Hz}$ 时,平均冲量耦合系数下降趋势较缓,当脉冲重复频率 $f \geq 10\text{ Hz}$ 时,平均冲量耦合系数随脉冲重复频率的增加显著下降。参考文献[7]已经指出在多脉冲条件下,若脉冲间隔时间不足以使喷管内气体密度恢复,必然导致喷管获得冲量的减少,

进而使得冲量耦合系数下降。下面结合脉冲作用前的流场状态说明流场状态恢复对平均冲量耦合系数的影响。

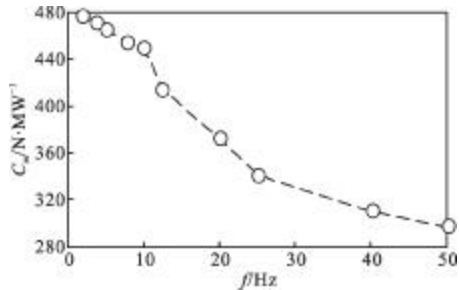


图7 平均冲量耦合系数与脉冲重复频率的关系

Fig.7 Relations between the average impulse coupling coefficients and pulse repetition frequency

图8显示了部分脉冲重复频率条件下第2个脉冲作用前的流场状态。

图(a)~(c)分别给出了脉冲重复频率为 $f=4\text{ Hz}$ 、 10 Hz 和 20 Hz 时第2个脉冲作用前的流场密度云图,即 $t=0.25\text{ s}$ 、 0.1 s 和 0.05 s 时刻的流场状态,比较后可以发现,随着脉冲重复频率的增大,脉冲间隔时间减小,流场密度恢复越差,其中图(a)和(b)时刻的流场状态基本能够恢复到初始状态,而图(c)时刻的流场未能恢复。对应到图7中平均冲量耦合系数比较,可以发现 $f=4\text{ Hz}$ 、 10 Hz 时的平均冲量耦合系数要明显高于 $f=20\text{ Hz}$ 。

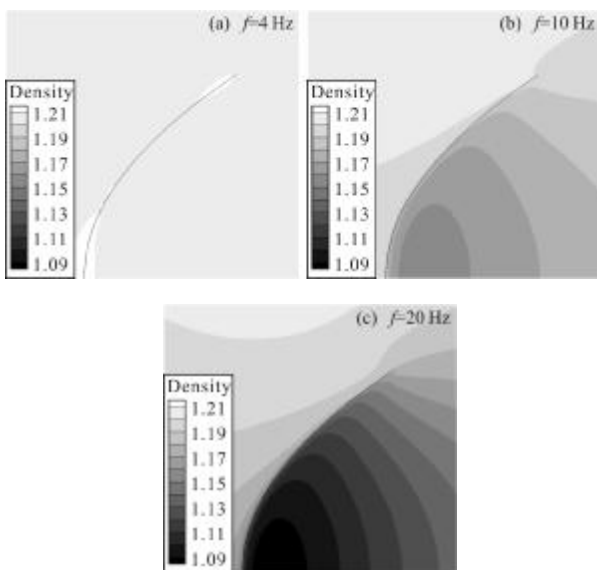


图8 部分脉冲重复频率条件下第2个脉冲作用前的流场状态
Fig.8 Fluid field before the second pulse comes with different pulse repetition rate

结合图7和图8可知,随着脉冲重复频率的增大,脉冲间隔时间减小,使得喷管内气体不能及时恢复,导致平均冲量耦合系数的降低。当脉冲重复频率为 $f \leq 10\text{ Hz}$ 时,喷管内气体能够基本恢复,平均冲量耦合系数较高,为后续多脉冲纳秒激光推进实验的激光器选型提供了一定的参考依据。

3 结论

以实验室已有的抛物形点聚焦推进器模型为研究对象,数值模拟了脉冲重复频率为 $f=50\text{ Hz}$ 条件下多脉冲吸气式纳秒激光推进,结果表明:随着脉冲数目的增加,喷管内气体密度降低,温度升高,平均冲量耦合系数降低。通过比较相同脉冲重复频率条件下微秒脉冲激光发现,纳秒脉冲激光由于纳秒激光脉冲窄、功率高,推力 F 衰减收敛迅速,使得喷管内流场恢复优于同频率下微秒脉冲激光,导致纳秒激光推进性能要优于微秒脉冲激光。

考虑脉冲重复频率对吸气式激光推进性能的影响,根据现有水平的纳秒脉冲固体激光参数,模拟仿真了不同脉冲重复频率条件下的多脉冲激光推进。结果表明:随着脉冲重复频率的增大,脉冲间隔时间减小,使得喷管内气体不能及时恢复,导致平均冲量耦合系数的降低。当脉冲重复频率为 $f \leq 10\text{ Hz}$ 时,喷管内气体能够基本恢复,平均冲量耦合系数较高,为后续多脉冲吸气式纳秒激光推进实验的激光器选型提供了一定的参考依据。

文中基于静态流场环境,但激光推进作为未来航天动力的新兴技术,必然工作于高速来流环境。下一步工作将围绕在高速来流环境下,开展吸气式多脉冲纳秒激光推进的研究。

参考文献:

- [1] Zhang Nan, Xu Zhijun, Zhu Xiaonong, et al. Laser propulsion technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1025-1037. (in Chinese)
- [2] Shen Zicai, Cui Yun, Niu Jinchao. Applications and countermeasures of laser technology in space engineering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2703-2711. (in Chinese)
- [3] Abbott R P, Boley C D, Fochs S N, et al. High-power solid-state laser: lethality testing and modeling [C]//25th

- Annual Army Science Conference, 2006.
- [4] 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 Journal of Lasers, 2010, 37(1): 100-104. (in Chinese)
- [5] Shi Lei. Performance research on air-breathing mode laser propulsion with narrow laser pulses [D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2008. (in Chinese)
- [6] Shi L, Zhao S H, Chu X C, et al. Numerical simulation of air-breathing mode laser propulsion by nanosecond laser pulse[C]//SPIE, 2009, 7382-738217.
- [7] Song Junling, Hong Yanji, Wen Ming, et al. Influence of laser pulse repetition rate on impulse coupling coefficient of air-breathing propulsive performance for multi-pulses [J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2010, 21(5): 115-119. (in Chinese)
- [8] Li Qian, Hong Yanji, Yang Pengtao, et al. Numerical study on performance of air-breathing high frequency pulsed laser propulsion[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(9): 2282-2286. (in Chinese)
- [9] Xu Renping, Tang Zhiguo. Numerical simulation for laser propulsion of air breathing mode considering multi-pulses[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(3): 370-372. (in Chinese)
- [10] Wen Ming, Hong Yanji, Song Junling. Investigation on multiple pulse propulsion performance for a parabolic nozzle with inlet slit[C]//AIP, 2011, 14(2): 74-81.
- [11] Song Junling, Hong Yanji, Wen Ming, et al. Numerical analysis of laser repetition rate and pulse numbers in multipulsed laser propulsion[C]//AIP, 2011, 14(2):296-305.