

文章编号: 0258-7025(2010)01-0100-05

大气呼吸模式纳秒脉冲固体钕玻璃激光推进实验与数值模拟

石磊 赵尚弘 楚兴春 吴继礼 李晓亮 李国杰

(空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要 采用 1.06 μm 纳秒脉冲固体钕玻璃激光器和 K9 玻璃材质铃形推进器开展了大气呼吸模式单脉冲垂直激光推进实验和相应的数值模拟研究。结果表明,纳秒脉冲激光推进中焦距在推进器构型因素中占主导地位,焦距越大,推进性能越好,焦距相同时,开口张角小、喷管长的推进器获得的冲量耦合系数越大,这与微秒脉冲 CO_2 激光推进的结论不同。分析认为超短脉冲对推进器壁面的热损伤是短焦距推进器性能较差的真正原因。在 18 J 单脉冲激光作用下,12.5 g 推进器被垂直推进 24.5 mm,冲量耦合系数达到 $478.75 \mu\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{J}^{-1}$ 。通过与 CO_2 激光推进实验结果比较分析发现,纳秒脉冲激光的单脉冲推进效果要优于微秒脉冲激光。

关键词 激光技术; 激光推进; 纳秒脉冲; 固体钕玻璃激光器

中图分类号 O439; TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103701.0100

Experimental and Numerical Study of Air-Breathing Mode Propulsion by Solid Nd:Glass Nanosecond Pulse Laser

Shi Lei Zhao Shanghong Chu Xingchun Wu Jili Li Xiaoliang Li Guojie

(Institute of Telecommunication Engineering, Air Force Engineering University, Xian, Shaanxi 710077, China)

Abstract With a 1.06 μm solid Nd:glass nanosecond pulse laser and a bell-shaped thruster made of K9 glass, both vertical single-pulse propulsion experiment and the corresponding numerical simulation are studied. The results show that, the focal length dominates among the structural factors of thruster in the propulsion by nanosecond pulse laser. The larger focal length corresponds to a better propulsion performance, and at the same focal length, the thruster with smaller open angle and longer scale can achieve higher impulse coupling coefficient, which are different from the results achieved in the propulsion by a microsecond pulse CO_2 laser. It is believed that the reason for the poor performance of thruster with shorter focal length is the thermal damage of thruster caused by ultrashort pulse laser. The 12.5 g thruster is vertically propelled for a height of 24.5 mm by a 18 J single pulse laser, and its impulse coupling coefficient is $478.75 \mu\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{J}^{-1}$. By comparing with the experimental results based on the CO_2 laser, the nanosecond pulse laser is better than the microsecond pulse laser in the single pulse propulsion.

Key words laser technique; laser propulsion; nanosecond pulse; solid Nd:glass laser

1 引言

激光推进是一种依靠远距离输送激光能量提供推进力的新概念推进技术,其特点是飞行器与能源完全分离,可多次重复使用,在航空航天领域有着十分诱人的前景。按工作模式不同,激光推进可分为火箭烧蚀模式和大气呼吸模式,前者需消耗一定的工质,后者不消耗飞行器的自身质量。2000 年,Myrabo^[1]在白沙导弹基地利用脉宽为 30 μs 的 TEA CO_2 激光器通过大气呼吸模式成功地将直径

12.2 cm,重 50 g 的光船发射到 71 m 的高空,创下了激光推进高度纪录。德国航空航天研究所(DLR)^[2,3]利用电子束激励 CO_2 气体激光器对铃形推进器展开了全面的实验研究,研究发现激光波长、能量密度和脉宽的改变对推进性能具有重要影响。在空气中的实验表明,脉宽减小到 7 μs 时冲量耦合系数会有所增加,同时,铃形推进器喷管张角不同,其冲量耦合系数也不同。在国内,装备指挥技术学院、中国科学技术大学和中国科学院电子学研究所

收稿日期: 2008-11-14; 收到修改稿日期: 2009-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(60678018)和陕西省自然科学基金(2009JQ8013)资助课题。

作者简介: 石磊(1980—),男,博士,讲师,主要从事激光推进技术方面的研究。E-mail: shilei809@163.com

等单位^[4~8]都采用 CO₂ 激光器进行过大气呼吸模式激光推进实验,取得了良好的实验结果。

迄今为止,国内外已经开展的大气呼吸模式激光推进实验大都采用 10.6 μm 微秒脉冲 CO₂ 气体激光器,单脉冲峰值功率高达千兆瓦的固体钕玻璃激光器应用于大气呼吸模式激光推进的研究尚未见报道。相对于 CO₂ 激光器,固体钕玻璃激光器体积更小,更加适合未来建立空间激光基站,随着固体钕玻璃激光器的重复频率不断提高,使固体钕玻璃激光器用于激光推进研究成为可能。另外,现有实验中推进器多采用铝合金材料,其他材料的推进器尚缺乏实验研究。本文采用 1.06 μm 纳秒脉冲固体钕玻璃激光器和 K9 玻璃材质铃形推进器开展了大气呼吸模式激光推进实验和相应的数值模拟研究,探讨了纳秒脉冲激光作用下推进器构型、激光脉冲能量以及玻璃材质等因素对推进性能的影响,并与已开展的 CO₂ 激光推进实验结果进行了比较分析。

2 实验

2.1 实验装置

实验中使用的激光器为千兆瓦固体钕玻璃激光器,波长为 1.06 μm,脉冲半峰全宽(FWHM)为 20 ns,单脉冲能量 1~25 J 可调,单脉冲峰值功率最大可达 1.25 × 10⁹ W,光斑呈圆形,光斑直径为 22 mm,聚焦后光斑尺寸 0.5~5 mm 可调(分 10 个光斑尺寸)。脉冲波形和激光束近场光斑分别如图 1,2 所示。

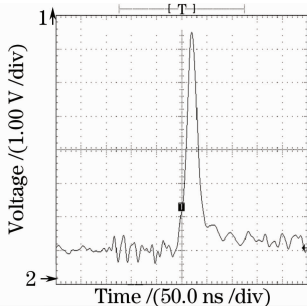


图 1 激光脉冲波形(FWHM: 20 ns)

Fig. 1 Nanosecond laser pulse (FWHM: 20 ns)

采用 K9 玻璃加工了 3 个不同构型的铃形推进器(参考了 DLR 提出的铃形推进器^[9],其材质为铝合金),具体参数如表 1 所示。平行激光束入射推进器抛物面形内表面后被聚焦,在焦点处击穿空气产生高温高压的等离子体爆裂波,爆裂波反向喷射产生推力,推动推进器前进。目前,已开展的实验中采用的推进器大多为铝合金材质,经金刚石车床加工

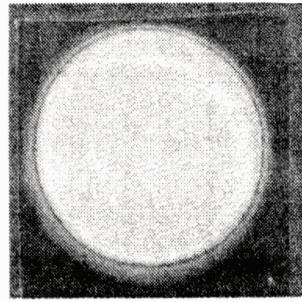


图 2 激光束近场光斑

Fig. 2 Near-field facula of the laser beam

后,在推进器内表面会留下螺纹状痕迹,光洁度不太理想,激光束照射时容易形成干涉,激光反射率只有 90%左右,导致约 10%的激光能量直接烧蚀推进器,增大了其被高能激光直接摧毁的风险。比较而言,玻璃材质更易于抛光成型,光洁度比金属要高得多。因此,本实验的推进器选用了 K9 玻璃材料,先用高精度的数控机床加工成型,然后研磨抛光,最后在推进器内表面镀上 1.06 μm 激光高反射膜,膜层为耐高温的氧化物介质膜,经反射检测,激光反射率均在 99%以上,相对于传统的铝合金推进器,直接烧蚀推进器的激光能量降低了 1 个数量级。

表 1 K9 玻璃铃形推进器参数

Table 1 Parameters of the K9 glass bell-shaped thrusters

Model	Focus / mm	Radius / mm	Height / mm	Mass / g
I	5	15	11.25	6
II	5	20	20	17.5
III	10	20	10	12.5

实验过程中,由于玻璃推进器在没有保护装置时容易损坏,因此设计了一种三线导轨以保护和约束推进器,如图 3 所示。导线采用 φ0.5 mm 的细钢丝,固定在不锈钢导轨支架上,导轨全长 1 m,具有足够的刚性和稳定性。导轨一侧留有 φ30 mm 的圆

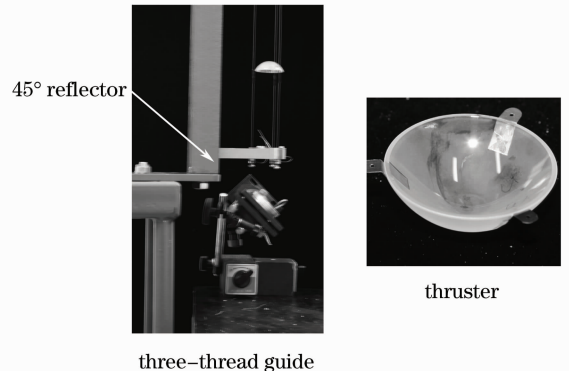


图 3 三线导轨及推进器照片

Fig. 3 Three-thread guide and thruster

形通光孔以导入激光束(平行激光束直径为 22 mm)。通光孔下放置一个 45°全反射镜,可将平行光束导入通光孔中。

2.2 实验结果与讨论

图 4 为三线导轨竖直推进原理图。三线导轨支架竖直放置,推进器穿在三线导轨上,实验前在导轨细钢丝线上涂上一层很薄的润滑油以减小摩擦阻力。在三线导轨中间处,利用高速频闪配合相机拍

摄推进器在导轨上的运行轨迹,结合推进器的位移和频闪频率计算出推进器获得的初速度,然后推算出单脉冲激光作用下推进器获得的冲量和冲量耦合系数(冲量耦合系数定义为推进器获得的冲量和激光脉冲能量的比值),在计算过程中忽略导轨阻力的影响,因此,实际实验结果还应略高于计算值。每种实验重复进行 2 次,取平均值,实验数据如表 2 所示。图 5 为 III 型推进器竖直激光推进实验照片,闪光灯频率为 40 Hz。

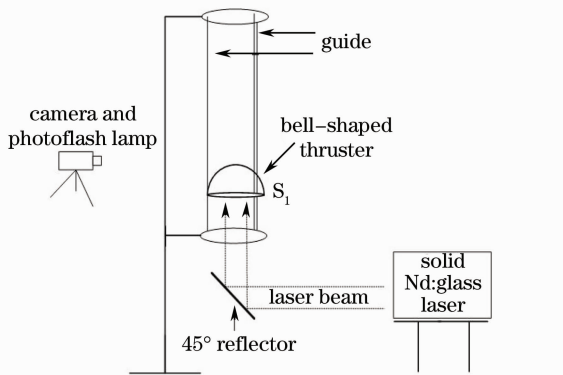


图 4 三线导轨竖直推进实验原理图

Fig. 4 Schematic diagram of vertical propulsion test

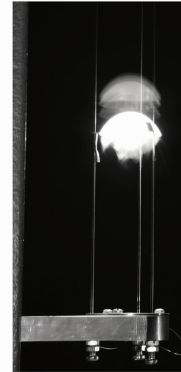


图 5 III 型推进器竖直激光推进实验

Fig. 5 Vertical propulsion test of thruster III

表 2 竖直推进实验数据

Table 2 Experimental datas of vertical laser propulsion

Thruster	Mass /g	Pulse energy /J	Propelled distance of thruster /mm	Muzzle velocity of thruster /(m/s)	Impulse /(10^{-3} N·s)	Momentum coupling coefficient /(μ N·s·J $^{-1}$)
I	6	15	16	0.56	3.36	224
			14.5	0.53	3.2	213
		18	28	0.74	4.44	246.9
			27.5	0.73	4.4	244.7
		20	29.5	0.76	4.56	228
			30	0.767	4.6	230
II	17.5	15	2.5	0.22	3.87	258.3
			2.4	0.217	3.80	253
		18	4.5	0.297	5.20	288.7
			4.5	0.297	5.20	288.7
		20	4.6	0.30	5.25	262.7
			4.65	0.302	5.28	264.2
III	12.5	15	10	0.443	5.54	369.2
			11.5	0.475	5.93	395.6
		18	24.5	0.693	8.66	481.2
			24	0.686	8.57	476.3
		20	26	0.71	8.875	443.75
			25.5	0.707	8.837	441.85

实验结果表明,在相同的单脉冲激光能量作用下,I,II,III型推进器获得的冲量耦合系数依次增大。I,II型推进器焦距相同,但 II 型推进器的开口张角略小,喷管长度几乎是前者的 2 倍,从而可以看出在纳

秒脉冲激光推进中,焦距相同时,开口张角小、喷管长的推进器更加有效,这与采用微秒脉冲 CO₂ 激光推进的结论不同。这是因为长喷管使得等离子体冲击波对推进器的有效作用时间变长,提高了冲击波的能

量利用率(冲击波与推进器壁面能量耦合效率),所以冲量耦合系数变大。II,III型推进器的开口半径同为20 mm,虽然III型推进器的喷管长度只有前者的一半,但焦距是前者的2倍,在相同激光脉冲能量作用下III型推进器获得的冲量耦合系数大很多,说明焦距在推进器构型因素中占主导地位,焦距越大,推进性能越好,该结论与采用微秒脉冲CO₂激光推进的结果也不同。文献[10,11]认为在CO₂激光推进中推进器喷管长度对推进性能起主导作用,焦距相同时,开口张角越大冲量耦合系数越高,开口张角相同时,焦距越小冲量耦合系数越高。

实验还发现随着单脉冲激光能量增加,推进器获得的冲量增大,推进效果更加明显,但冲量耦合系数并不一直单调增加。虽然实验中激光脉冲能量最大为20 J,但3种推进器均在18 J时获得了最大的冲量耦合系数。III型推进器在18 J单脉冲激光作用下,推进高度最大达到24.5 mm,冲量耦合系数达到478.75 $\mu\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{J}^{-1}$ 。对于同等尺寸的推进器,德国DLR采用10.6 μm CO₂气体激光器在单脉冲能量250 J附近获得了最大冲量耦合系数只有320 $\mu\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{J}^{-1}$ [2]。因此,就单脉冲推进而言,纳秒脉冲固体钕玻璃激光器要优于微秒脉冲CO₂气体激光器。另外,DLR进行的CO₂激光推进实验也发现存在一个最优脉冲能量值,当激光脉冲能量小于该值时,冲量耦合系数随激光脉冲能量单调增加,当激光脉冲能量大于该值时,冲量耦合系数随激光脉冲能量单调下降。因此,在窄脉冲激光推进过程中必须考虑激光能量优化问题,并不是激光脉冲能量越高越好。

另外,实验中还观察到当单脉冲激光能量在15 J以下时,激光束击穿空气产生的等离子体“火焰”外围颜色为黄色,当激光能量增加到20 J左右时,“火焰”外围颜色变成蓝色,分析这和激光击穿空气的程度以及等离子体的温度有关。

经过多次重复推进实验后,焦距为5 mm的I,II型推进器内表面反射膜层光洁度有所下降,而焦距为10 mm的III型推进器的膜层未见异常,推测超短脉冲对推进器壁面的热损伤是短焦距推进器性能较差的真正原因。对于纳秒量级窄脉冲应该选择焦距较大的推进器,以减少击穿区域高温对推进器壁面激光反射膜层的烧蚀破坏。

通过下面的数值模拟分析同样可以看到推进器构型及激光脉冲能量对推进性能的影响。

3 数值模拟

采用计算流体力学软件Fluent耦合求解Navier-Stokes方程,数值模拟研究I,II,III型推进器在纳秒脉冲激光推进中的性能,具体数值模拟方法见文献[8,12]。对于1.06 μm 的千兆瓦固体钕玻璃激光,近地大气的击穿阈值比CO₂气体激光高出约2个数量级,约为 10^9 W/cm²,相对于微秒级的CO₂脉冲激光来说,纳秒级脉冲激光大气击穿区域更小。

图6是3种不同构型推进器在单脉冲激光作用下的推力随时间变化曲线,脉冲能量 $E=20$ J,脉冲宽度 $t_p=20$ ns。图7为I型推进器在 $t=9.62$ μs 时的流场等压线。

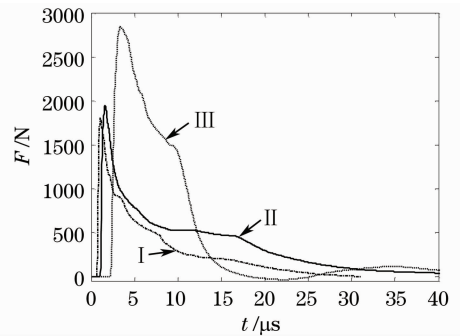


图6 不同激光推进器在单脉冲(20 J,20 ns)激光作用下的轴向推力随时间的变化曲线比较

Fig. 6 Thrust curves of three thrusters versus time by single pulse laser (20 J, 20 ns)

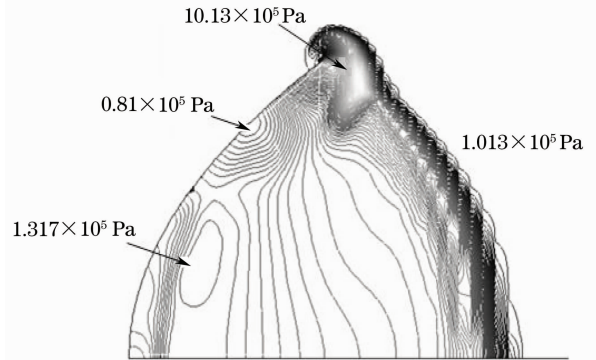


图7 I型推进器在 $t=9.62$ μs 时的流场等压线

Fig. 7 Pressure contours of thruster I at $t=9.62$ μs

从图6可知,由于I,II型推进器的焦距相同,其推力产生的时间几乎相同,在不到1 μs 的时间内,激光冲击波就到达推进器,产生有效推力,这得益于纳秒量级激光脉冲产生的更强冲击波。由于II型推进器的几何尺寸较大,受到的环境大气阻力也要大,所以其正推力出现的时刻略微晚一些。III型推进器的焦距最大,所以其推力产生的时刻明显落后于前两种推进器,直到2 μs 左右才产生有效推

力。从峰值推力来看, I, II 和 III 型推进器依次增大。III 型推进器的推力峰值达到 2847 N, 比 I, II 型推进器大了 1000 N 左右。可以看出, I, II 型推进器虽然长度相差较大, 但焦距相同, 推力曲线相近, III 型推进器的焦距是 I, II 型的 2 倍, 推力明显大于另外两种推进器, 说明焦距对推进性能的影响较喷管长度和开口张角要大。

从图 7 可以发现, 在 $t=9.62 \mu\text{s}$ 时冲击波波前已经逃逸出推进器, 而此时推进器出口处的峰值压强仍然有 $10.13 \times 10^5 \text{ Pa}$ 左右, 由于失去了推进器壁面的约束, 这部分能量无法转化成推进器的有效动能, 推力迅速下降, 造成了能量浪费。I 型推进器产生的有效推力只持续了 $30 \mu\text{s}$ 左右(如图 6 所示), 等离子体冲击波就从喷管内完全逃逸出去了。因此, 在纳秒脉冲激光推进中, 需要加大推进器喷管的长度, 充分利用激光等离子体冲击波的能量。

以 I 型推进器为例数值模拟研究脉冲能量对推进的影响, 图 8 为 I 型推进器在脉冲能量分别为 15, 18 和 20 J 时的推力变化曲线。可以看出, 不同能量情况下, 推力曲线的变化规律一致, 区别在于, 随着激光能量的增加, 冲击波到达推力壁面的时间缩短, 推进器产生推力的时间提前, 推力变大。但当脉冲能量从 18 J 增加到 20 J 时, 推力增大趋势不明显, 冲量耦合系数反而从 $269 \mu\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{J}^{-1}$ 下降到 $261 \mu\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{J}^{-1}$, 这与实验结果吻合较好, 进一步验证了在窄脉冲激光推进中存在脉冲能量优化问题。

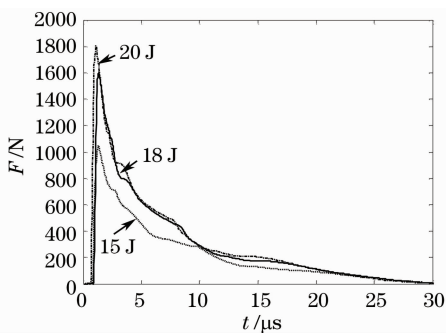


图 8 I 型推进器在不同能量脉冲作用下的推力曲线

Fig. 8 Thrust curves of thruster I with different pulse energies

4 结 论

采用 $1.06 \mu\text{m}$ 固体钕玻璃激光器和 K9 玻璃材质铃形推进器开展了单脉冲大气呼吸模式三线导引激光推进实验及相应的数值模拟研究, 将研究结果与德国 DLR 开展的基于 CO_2 激光和铃形推进器的实验进行了比较分析, 并探讨了纳秒激光脉冲作用

下推进器构型、激光脉冲能量等因素对推进性能的影响。研究得出了与微秒脉冲 CO_2 激光推进不同的结论, 在纳秒脉冲激光推进中, 焦距在推进器构型因素中占主导地位, 焦距越大, 推进性能越好, 焦距相同时, 开口张角小、喷管长的推进器获得的冲量耦合系数越大。研究还表明, 在窄脉冲激光推进过程中, 存在激光脉冲能量优化问题。通过实验知道, 在单脉冲大气呼吸模式激光推进中, 纳秒脉冲固体钕玻璃激光器要优于微秒脉冲 CO_2 气体激光器。该型激光器的优点在于单脉冲峰值功率很高, 但要实现多脉冲持续推进必须进一步提高激光脉冲的重复频率和激光器的平均功率。

参 考 文 献

- 1 L. N. Myrabo. World record flights of beam-riding rocket lightcraft; demonstration of "disruptive" propulsion technology [J]. *AIAA Paper* 01-3798, 2001, **3798**: 1~16
- 2 W. O. Schall, H. A. Eckel, W. Mayerhofer *et al.*. Comparative lightcraft impulse measurements [C]. *SPIE*, 2002, **4760**: 908~917
- 3 W. O. Schall, W. L. Bohn, H. A. Eckel *et al.*. Lightcraft experiments in Germany [C]. *SPIE*, 2000, **4065**: 472~481
- 4 M. Wen, Y. J. Hong, J. Yang *et al.*. Experimental investigation of the pressure characteristics in air-breathing laser propulsion [J]. *Lasers in Eng.*, 2007, **17**: 1~9
- 5 Wen Ming, Hong Yanji, Wang Jun *et al.*. Effects of laser pulse waveform on lightcraft performance [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1038~1042
文 明, 洪延姬, 王 军等. 激光脉冲波形对推力器性能的影响 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1038~1042
- 6 Tang Zhiping, Gong Ping, Hu Xiaojun *et al.*. Experimental investigation on air-breathing mode of laser propulsion [J]. *Acta Aero. ET Astro. Sin.*, 2005, **26**(1): 13~17
唐志平, 龚 平, 胡晓军等. 大气呼吸模式激光推进的实验研究 [J]. *航空学报*, 2005, **26**(1): 13~17
- 7 H. Lu, Z. H. Cheng, D. L. Zuo *et al.*. Experimental research on plasma induced by TEA CO_2 laser propulsion [J]. *Plasma Sci. and Tech.*, 2008, **10**(2): 203~206
- 8 Shi Lei, Zhao Shanghong, Zhou Wanyin *et al.*. Numerical analysis of air-breathing mode laser propulsion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 49~54
石 磊, 赵尚弘, 周万银等. 大气呼吸模式激光推进数值分析 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 49~54
- 9 W. L. Bohn. Laser lightcraft performance [C]. *SPIE*, 1999, **3885**: 48~53
- 10 Gong Ping. Research on Air-Breathing Mode Laser Propulsion [D]. *Hefei: University of Science and Technology of China*, 2004, 88~108
龚 平. 大气呼吸模式激光推进的研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2004, 88~108
- 11 Gong Ping, Tang Zhiping. Mechanism analysis and numerical simulation of air-breathing model for laser propulsion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, **23**(6): 501~508
龚 平, 唐志平. 大气呼吸模式激光推进的机理分析及数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2003, **23**(6): 501~508
- 12 Shi Lei. Research on the Performances of Air-Breathing Mode Propulsion by Narrow Laser Pulses [D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2008, 45~49
石 磊. 大气呼吸模式窄脉冲激光推进性能研究 [D]. 西安: 空军工程大学, 2008, 45~49