

# 基于粒子图像测速的 XeF(C-A) 气体激光器 增益区流场测量

栾昆鹏\*, 叶景峰, 王晟, 沈炎龙, 赵柳, 朱峰, 李高鹏, 黄超, 黄珂

西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024

**摘要** 基于粒子图像测速(PIV)技术,测量了闭合循环脉冲 XeF(C-A)蓝绿准分子激光器增益区的流场。研究了放电区域内流场中心区、近激光窗口区和过渡区在未放电条件下定常流场的流速特征及放电后不同时刻的流场形态,分析了放电后流场的恢复时间与风机转动频率、放电电压的关系。结果表明:在近窗口区域,存在流速缓慢的涡流;在流场中心区,流速较大且分布均匀;放电后瞬态出现了流速极慢的流场停滞现象。

**关键词** 测量; 气体激光器; 流场; 流速

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0204007

## Flow Field Measurements in Gain Zone of XeF(C-A) Gas Laser Based on Particle Image Velocimetry

Luan Kunpeng\*, Ye Jingfeng, Wang Sheng, Shen Yanlong, Zhao Liu, Zhu Feng, Li Gaopeng, Huang Chao, Huang Ke

State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China

**Abstract** Particle image velocimetry (PIV) technique is used to measure the flow field in the gain zone of a closed loop pulsed XeF(C-A) blue-green excimer laser. The flow velocity characteristics of the steady flow field in the center of the flow field, near the laser window and between the two parts in the discharge zone are studied. The flow field states in different time during the process of the discharge are analyzed. Furthermore, the relationships between the recovery time after discharge and the fan rotation frequency or the discharge voltage are discussed. The results show that there exit vortexes with slow flow velocity near the laser window. While in the center of the gain zone, the field is even with fast flow velocity. And in the moment after discharge, the flow field stagnation phenomenon with extremely slow velocity occurs.

**Key words** measurement; gas lasers; flow field; flow velocity

**OCIS codes** 120.7250; 140.7300; 140.1550; 140.2180

## 1 引言

电激励或放电光抽运的脉冲气体激光器在中红外、远红外、蓝绿、极紫外等特殊波段可以实现大能量、高峰值功率的重复频率输出<sup>[1-4]</sup>,其具有的优势使其难以被固体、光纤和半导体激光器取代。脉冲气体激光器放电区域会产生气态和固态污染物以及大量的热<sup>[5-6]</sup>,如果这些放电产物滞留在放电区,就会极大地影响下一次放电,因此,脉

冲气体激光器以重复频率运行时,需要通过气流循环来置换放电增益区的气体<sup>[1,7]</sup>,因而需要对气体激光器的流场,特别是增益区的流速分布进行研究。

虽然基于计算流体动力学(CFD)的数值模拟方法具有快捷、方便等优势,但流场本身的复杂性使得绝大部分流动问题难以从理论上得到精确结果,特别是在脉冲激光器放电条件下流速、温度、密度等流场参数剧烈变化的非定常态流场,CFD

收稿日期: 2018-09-03; 修回日期: 2018-10-22; 录用日期: 2018-11-11

\* E-mail: luankunpeng@126.com

建模计算尚有困难<sup>[8]</sup>,因而有必要通过实验对流场进行测量。目前,粒子图像测速(PIV)方法是测量流场流速最引人注目的一种方法<sup>[9-12]</sup>,它是一种瞬态、多点、非接触式的流场测试技术,可以快速准确地测量出某一瞬间待测区域某个截面流场的空间结构和速度矢量场,具有较高的测量精度。其基本原理是<sup>[8]</sup>:向流场中投放粒径均匀且能跟随流场运动的示踪粒子,将脉冲激光整形成薄片,照亮流场中的某一流动平面,由垂直于这一平面的照相机在间隔为  $\Delta t$  的时间内连续拍摄两次,分别记录下粒子图像;再用数学方法比对两张图片,从而得到该平面的流场情况。通过 PIV 技术既能得到未放电条件下定常流场的高精度速度矢量场,又能研究放电瞬间流速的剧烈波动,还能够分析放电后流场的恢复时间以及放电区域气体置换的效果。但是,目前尚未见将 PIV 技术应用于脉冲气体激光器流场测量的报道。

本文针对闭合循环 XeF(C-A) 蓝绿准分子激光器进行二维 PIV 流场测量,搭建了测量平台,解决了应用 PIV 技术测量放电气体激光器流场的适应性问题,主要针对放电区域内流场中心区、近激光窗口区和过渡区三个典型流场区域,研究了未放电条件下定常流场的流速特征,以及放电后不同时刻的流场形态,研究了放电后流场恢复至放电前状态的时间与风机转动频率、放电电压的关系。

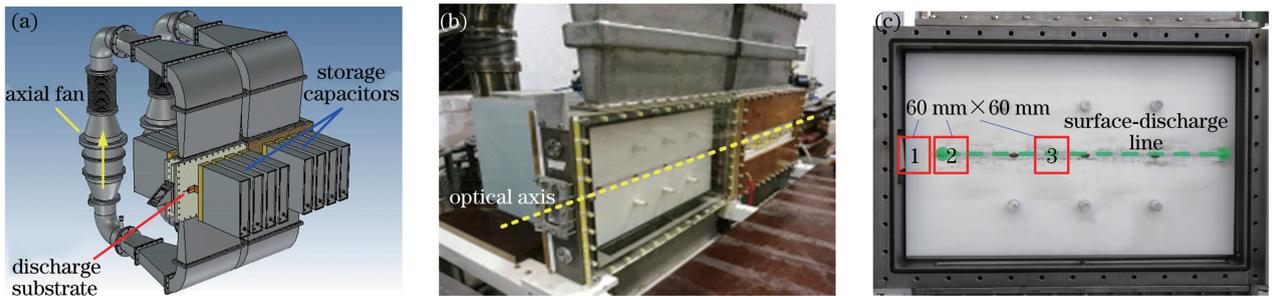


图 1 闭合循环管道 XeF(C-A) 激光器。(a) 结构图; (b) 增益区实物图; (c) 流场测量区域

Fig. 1 Closed loop XeF(C-A) laser. (a) Structure diagram; (b) physical picture of the gain zone; (c) flow field measurement zone

图 2 为 PIV 流场测量实验装置结构图和实物图。两个 532 nm 的脉冲激光器指标如下:脉冲宽度约为 10 ns,最大脉冲能量为 200 mJ,重复频率为 10 Hz。第一路 532 nm 激光被全反镜 M1 反射,在半透半反镜 M2 处与第二路 532 nm 激光合束。全反镜 M3 和 M4 将光路高度提升至与 XeF 激光器电极平齐。柱面透镜 M5 ( $f = 50$  mm) 将激光束在水平方向上聚焦,柱面透镜(焦距  $f = 50$  mm)在垂直

## 2 实验装置

放电抽运 XeF(C-A) 蓝绿激光的基本原理如下<sup>[3]</sup>:在放电基板上沿面放电产生 140~170 nm 的紫外光,将增益介质 XeF<sub>2</sub> 解离成 XeF 分子, XeF 分子从 C 态至 A 态产生激光,其波长范围为 425~525 nm。激光器以重复频率运行时,上一次放电产物会影响下一次放电,激光器通过气体循环将增益区放电产物排出。图 1(a) 为闭合循环 XeF(C-A) 准分子激光器结构图(详细信息见文献[13]),图 1(b)、(c) 为激光器放电气室实物图(拆除一侧的电容和放电基板)。激光器放电气室沿光轴方向长 120 cm,分为左右两段,放电基板为聚四氟乙烯材料,两基板的间距为 3.2 cm。PIV 测量流场时需要拍摄流场中的示踪粒子,所以用透明有机玻璃板替代一侧的放电基板。因为玻璃板与放电基板的尺寸比较接近,故而替换后放电气室内的流场变化较小。图 1(b) 中的黄色虚线为沿面放电通道,长度为 46 cm,在放电通道周围约 2 cm 内的放电光抽运较强,为放电增益区。图 1(c) 中的方框 1、2、3 分别对应 3 个有代表性的流场测量区域:放电增益区的近激光窗口区、过渡区和中心区,3 个测量区域的尺寸均为 60 mm×60 mm。实验中,在测量区域的放电基板(聚四氟乙烯材料)表面覆盖一层黑色塑料板,目的是降低背景噪声。

方向上将激光束发散成光片。沿光路前后调整柱面透镜 M5 的位置,使相机测量区域的光片厚度为 0.5~1 mm。相机为 PI-MAX4-1024i 型,电荷耦合器件(CCD)尺寸为 1024 pixel×1024 pixel,像元尺寸为 12.8  $\mu\text{m}$ ×12.8  $\mu\text{m}$ ,连续拍摄两幅图像的最小时间间隔为 1  $\mu\text{s}$ 。散布的示踪粒子为 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O、H<sub>2</sub>O 等的混合物液滴,颗粒直径为 10  $\mu\text{m}$  量级,在风机转动后通过气体循环均匀散

布在气室内。采用 PIV view2C 软件进行基于互相关算法的数据处理。数据处理过程为:1)为了降低背景的干扰,在 PIV 计算前对图像进行基于帧积分算法的降噪处理<sup>[14]</sup>;2)去除无意义区域,在 PIV view2C 软件中通过设定 Mask 图片覆盖激光未照射到的区域以及噪声过强的区域,以提高计算的准

确度;3)在 PIV view2C 软件中设定相关窗口大小,并进行互相关计算,相关窗口的大小应大于示踪粒子最大位移的 4 倍<sup>[15]</sup>,实验中设为  $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ ,重叠区域设定为  $50\% \times 50\%$ ;4)数据后处理,通过滤波和均匀化去除速度梯度与周围差异过大的矢量。

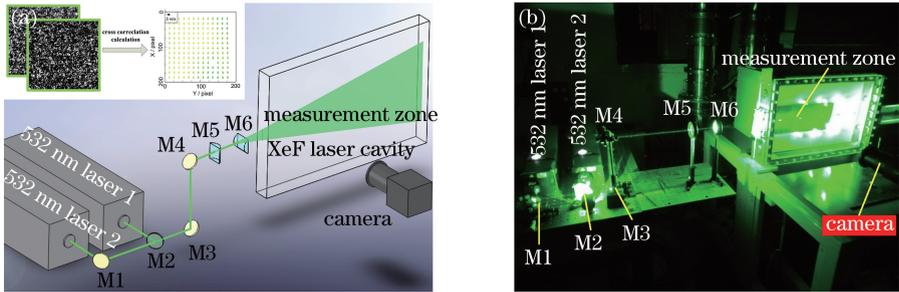


图 2 PIV 流场测量实验装置。(a)结构图;(b)实物图

Fig. 2 Experimental setup for PIV flow field measurement. (a) Structure diagram; (b) physical picture

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 未放电条件下的定常流场

在未放电条件下,激光气室内的流速、气压、密度等参数均随时间缓慢变化,此时流场处于定常流状态。

图 3 为 3 个典型位置的 PIV 流场测量结果,绿色虚线标示了电极连线,即激光增益最强的区域。测量条件如下:风机转动频率为 40 Hz,激光脉冲间隔为  $50 \mu\text{s}$ ,拍摄区域尺寸为  $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 。图 3(a)中的空白部分为激光未照射到的区域,

图 3(b)中的空白方框为电极区域,去除此部分是因为此处电极对激光漫反射噪声较强,会导致 PIV 计算结果失真。在如 3(c)所示的中心区,流场均匀,流场方向一致向下;在图 3(a)所示的近窗口区域,流场不均匀,有涡流现象;在图 3(b)所示的过渡区域,可见均匀向下流场和涡流不均匀流场的结合。同时在实验中发现,流场会随时间而缓慢变化,特别是近窗口区域的涡流形状和中心位置在不断改变。图中的不同颜色表明示踪粒子的位移距离,位移越大,则表明流速越大。可见,增益区中央的流速较大,而在窗口位置的流速则较慢。

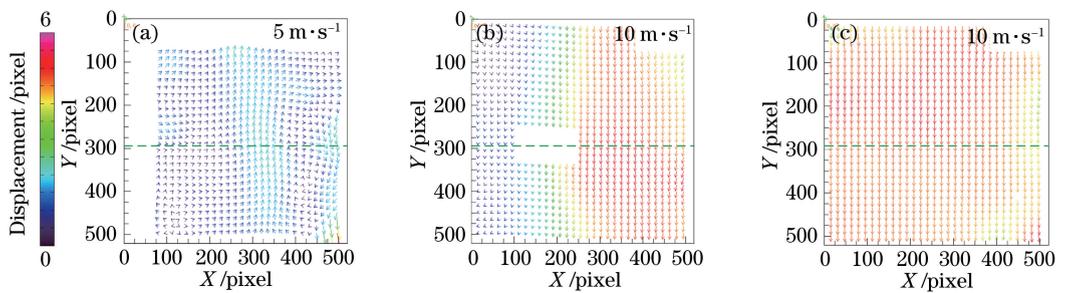


图 3 放电区不同位置的流场 PIV 处理结果。(a)近窗口区;(b)过渡区;(c)中心区

Fig. 3 PIV process results of different discharge zones. (a) Near the laser window; (b) in the connected zone; (c) in the center

图 4 所示的是不同位置、不同风机转动频率时的纵向和横向 PIV 流速测量结果。流速测量点位于电极连线上方  $0.5 \text{ cm}$  处。垂直于地面的方向为纵向,图 4(a)中流速向下时数值为正。平行于地面方向且平行于放电基板方向为横向,图 4(b)中流速向右时数值为正。横坐标的 0 点对应放电基板最左侧位置,向右逐渐增大。图中数值点为 5 次测量的

平均值和平均绝对偏差。从图中可以看出,近窗口位置的流场不仅存在涡流,而且涡流位置随时间不断变化。由图 4(a)可见:在放电中心区,不同位置的纵向流速值接近,风机转动频率越大则流速越大,尽管中心区的流场较为均匀,波动较小,但流速也呈现出一定的起伏;向窗口位置过渡,纵向流速逐渐降低并出现负值的波谷,风机转动频率越大则波谷越

深;继续向窗口移动,流速绝对值逐渐降低,至窗口位置流速接近 0;风机转动频率越大则流场波动越剧烈。由图 4(b)可见:放电中心区的横向流速小且波动小;在过渡区域,横向流速大且波动大;流速最大和波动最大的区域为 50~70 mm 位置处(对应最左侧的放电电极附近),此区域即为涡流发生区域,

且涡流位置会随时间变化,导致横向流场在大范围内波动。由图 4 可见:风机转动频率越快,放电中心区的纵向流速越快,当风机转动频率为 60 Hz 时,放电中心区的纵向流速约为 17 m/s;在过渡区域和窗口位置,涡流的气流速度随风机转动频率的增大而增加,而且涡流的流速和位置剧烈波动。

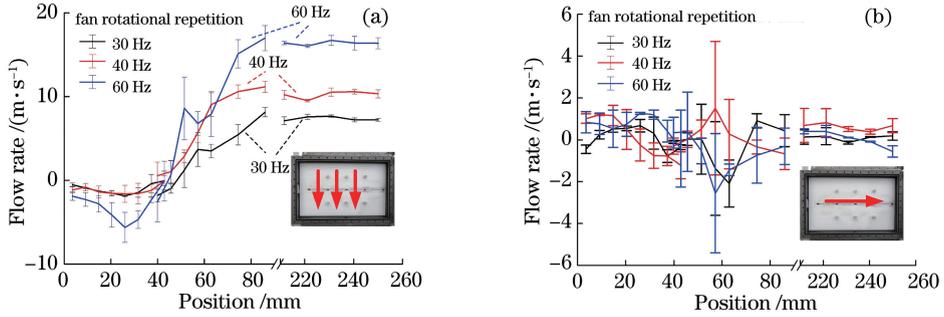


图 4 流速的测量结果。(a)纵向流速;(b)横向流速

Fig. 4 Measured flow velocities. (a) Flow velocities in the longitudinal direction; (b) flow velocities in the transverse direction

闭合循环放电抽运的 XeF 激光器通过流场循环将放电产物置换出增益区,以免放电产物影响下一次放电。流场越均匀,置换效果越好。以上研究结果表明:在未放电条件下,放电中心区域的流场均匀,流速较大,气体置换效果好;但在近窗口区域流速较小,过渡区域出现涡流,说明此处放电产物会较长时间留存而不能被及时置换,对激光器的重复频率运行产生了影响。

机出口处的流速分别为 2, 3, 5 m/s 时,放电中心区纵向的最大流速分别为 7, 10, 17 m/s,如图 5(b)所示,分别与图 4 中的风机转动频率为 30, 40, 60 Hz 时放电中心区纵向的最高流速接近。对比 ANSYS 计算结果和 PIV 测量结果可见:1)计算结果与 PIV 测量结果接近,中心区流场较均匀,且流速最快;在 80 mm 附近纵向流速开始降低,并在 20~30 mm 出现负值的波谷;继续向窗口移动,流速绝对值逐渐降低,至窗口位置流速接近 0。2)横向流速较慢,在

图 5 为流场 ANSYS 软件仿真的结果。设定风

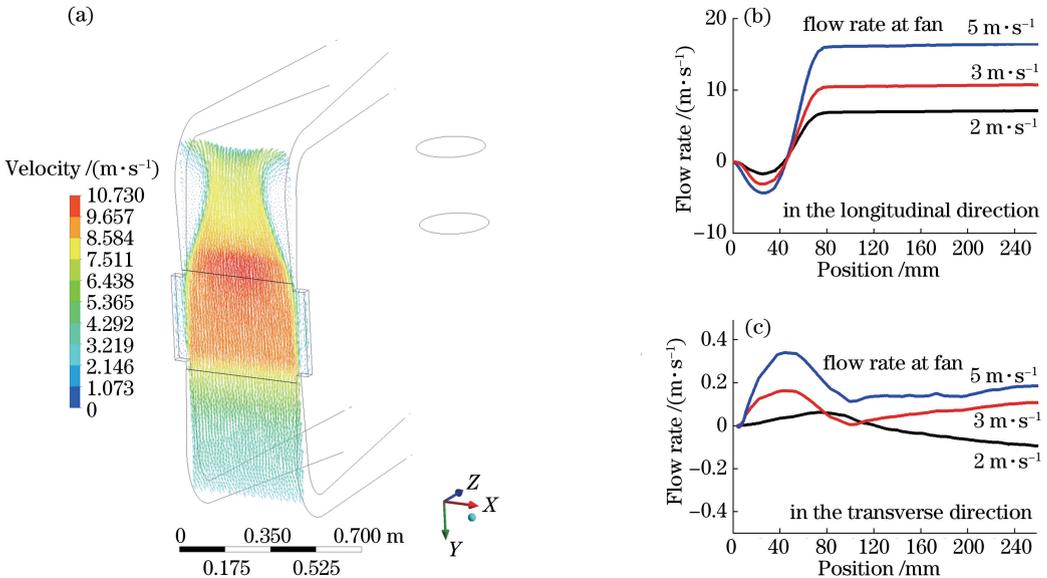


图 5 基于 ANSYS 软件的流速计算结果。(a)计算流场的结构示意图;(b)纵向流速;(c)横向流速

Fig. 5 Flow velocities calculated by ANSYS. (a) Structure schematic of calculated flow field; (b) flow velocities in the longitudinal direction; (c) flow velocities in the transverse direction

过渡区出现峰值。3)与 PIV 测量结果不同,计算结果体现不出流场的波动情况,主要是因为 ANSYS 计算中假定风机出口流场均匀,没有考虑到风机引入的流场波动。

### 3.2 放电条件下的非定常态流场

XeF(C-A)蓝绿准分子激光器沿面放电时间为微秒时间尺度<sup>[3]</sup>。放电瞬间的加热、高压强扰动等会导致流场参数剧烈变化,是典型的流动非平衡现象<sup>[9]</sup>。用 PIV 方法对放电条件下非定常流场进行研究,测量区域选取流速最大的流场中心和流速最小的近窗口位置,如图 6 所示。测量区域较图 1(c)中的方框 3 有所调整,是为了避开沿面放电最强的电极连线,以及避开激光未照射到的区域。

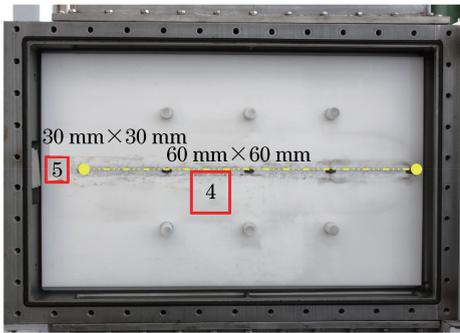


图 6 放电非定常流场的 PIV 测量区域

Fig. 6 PIV measurement zone of the unsteady flow field at discharge

图 7 为整个放电过程不同时刻的拍摄图像和 PIV 处理结果。实验条件如下:风机转动频率为 40 Hz,放电电压为 12 kV,腔内气体为  $N_2$ ,压力为 101.325 kPa。对于流场中心区域,由图 7(a)可见:1)放电后 1.5 ms,拍摄区域大部分示踪粒子烟雾消失。这是因为放电产生的高温等离子体将电极附近的示踪粒子汽化,同时,不均匀的示踪粒子分布可能也反映了流场密度的波动。而此时示踪粒子覆盖区域较小,PIV 流场测量区域也较小。需要指出的是,因为 PIV 方法是基于示踪粒子的位移变化来计算流场流速的,所以在放电条件下,有示踪粒子的区域通过 PIV 法可以得到较准确的流场结构,而示踪粒子稀疏的区域则不能进行 PIV 流场计算。2)放电后 8 ms,示踪粒子覆盖区域增大,PIV 流场测量区域增大。相比放电前,此时的流场流速大大降低,出现流场停滞现象。3)随着时间继续增加,拍摄区域逐渐重新被示踪粒子填充,同时由流速较小且方向不规则的流场,逐步恢复到放电前的流速较大且均

匀、方向向下的稳定状态。放电后 23 ms,流场的流速基本与放电前一致。需要指出的是,有机溶剂烟雾作为示踪粒子在放电瞬态的高温下汽化,会导致部分区域无法测量,应寻找耐高温、高压的示踪粒子作为替代物。

对于近窗口区域,由图 7(b)可见:1)放电后 10 ms,拍摄区域右侧示踪粒子的烟雾密度明显降低,因为右侧距放电电极较近,高温等离子体对示踪粒子的汽化更明显,同时流场流速大大降低,出现了流场停滞现象;2)随后,拍摄区域逐渐重新被示踪粒子填充,并由流速较慢、方向不规则的流场逐步恢复到放电前的流速较大的涡流状态;3)放电后几百毫秒,流场的流速和形态与放电前接近,但流场内部仍然有较明显的示踪粒子密度较低的区域;4)放电后约 1000 ms,拍摄区域完全被示踪粒子填充。与中心区对比,近窗口区域的流场恢复到被示踪粒子完全填充的时间较长,说明近窗口区域的气体置换效果较差,大量的放电产物会在此处滞留较长时间。

图 8 所示为腔内气体为  $N_2$  (压力为 101.325 kPa)时,流场流速恢复到放电前状态的时间与放电电压、风机转动频率的关系曲线。可见:当放电电压越小,风机转动频率越高时,流场流速恢复到放电前状态所用的时间越短。需要指出的是,激光器工作时,腔内混合充入  $XeF_2$ 、 $N_2$ 、Ar(压力为 101.325 kPa),而本实验放电时充入  $N_2$  (压力为 101.325)  $N_2$ ,两种条件下的放电特性略有差别,因而流场略有不同,但放电后流场的变化规律一致。

## 4 结 论

将二维 PIV 技术应用于对闭合循环脉冲 XeF(C-A)蓝绿准分子激光器流场的测量,主要针对放电区域内流场中心区、近激光窗口区和过渡区 3 个典型流场区域,研究了未放电条件下定常流场的流速特征以及放电后不同时刻的流场形态,还研究了放电后流场恢复至放电前状态的时间与风机转动频率、放电电压的关系。结果发现:在近窗口区域存在流速缓慢的涡流,气体置换效果较差;在流场中心区,流速较快且均匀,气体置换效果好;放电后瞬态出现了流速极慢的流场停滞现象。研究结果表明,PIV 技术可以用于放电气体激光器放电区的流速测量,并能得到较精确的结果。在接下来的研究中,需要在示踪粒子选择、背景噪声滤波等方面进行进一步优化。

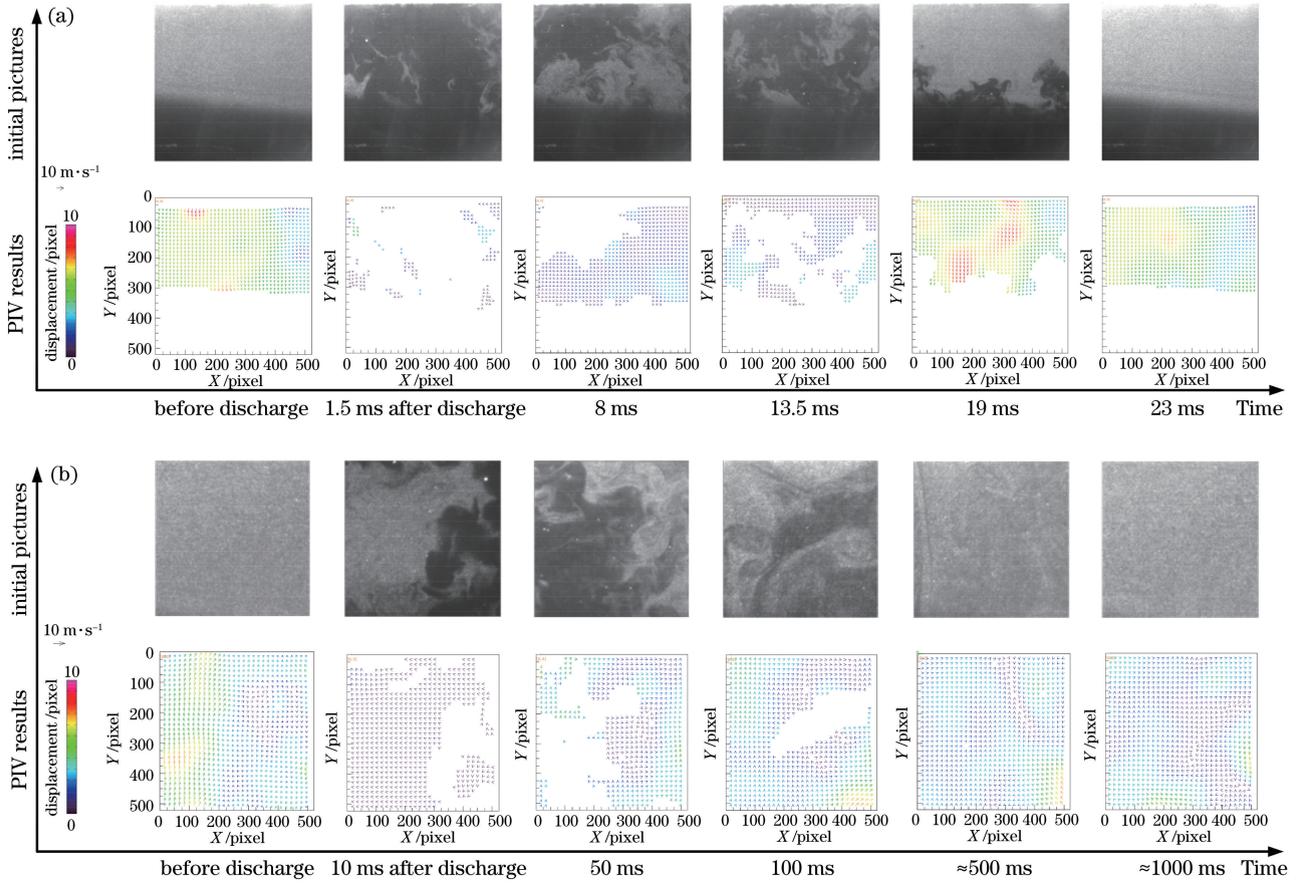


图 7 放电过程中不同时刻下流场结构的散射图像和 PIV 处理结果。(a)中心区;(b)近窗口区

Fig. 7 Scattering pictures and PIV process results of flow field structure at different time during the discharge.

(a) In the center; (b) near the window

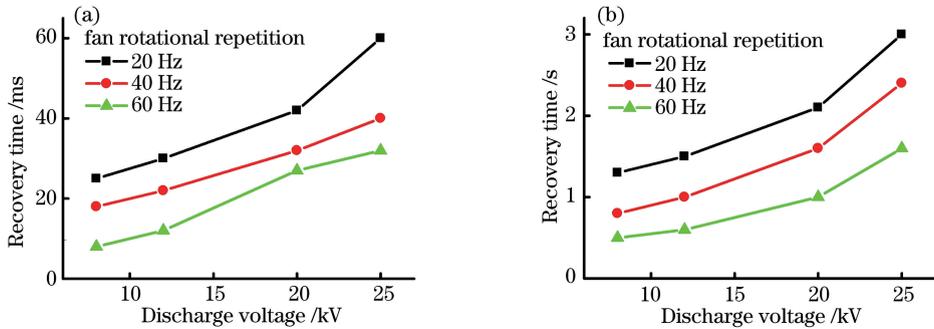


图 8 流场恢复时间。(a)中心区;(b)近窗口区

Fig. 8 Recovery time of the flow filed. (a) In the center; (b) near the laser window

参 考 文 献

[1] Pan Q K, Xie J J, Wang C R, *et al.* Non-chain pulsed DF laser with an average power of the order of 100 W[J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(7): 200.  
 [2] Bulaev V D, Gusev V S, Kazantsev S Y, *et al.* High-power repetitively pulsed electric-discharge HF laser[J]. *Quantum Electronics*, 2010, 40(7): 615-618.

[3] Yu L, Liu J R, Ma L Y, *et al.* 10 J energy-level optically pumped XeF (C-A) laser with repetition mode[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(9): 1087-1089.  
 [4] Meng F J, Li D J, Sun S H, *et al.* Arc-discharge monitoring system of a high-power repetitively-pulsed TEA CO<sub>2</sub> laser [J]. *Journal of Russian Laser Research*, 2012, 33(4): 362-368.  
 [5] Huang K, Huang C, Zhao L, *et al.* Effects of flow field uniformity on energy stability of discharge

- initiated repetitively pulsed HF laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 65-70.
- 黄珂, 黄超, 赵柳, 等. 流场均匀性对重频 HF 激光能量稳定输出的影响[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(1): 65-70.
- [6] Zhu N W. FLUENT-based numerical simulation of gas flow field of excimer laser[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017: 7.
- 朱能伟. 基于 FLUENT 的准分子激光器气体流场数值仿真[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017: 7.
- [7] Harris M R, Morris A V, Gorton E K. Closed-cycle 1-kHz-pulse-repetition-frequency HF (DF) laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3268: 247-252.
- [8] Liu L. Study on internal flow of the small room of ventilation by numerical simulation and PIV [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 1.
- 刘磊. 气流小室流场数值模拟及 PIV 实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 1.
- [9] Liu J, Dong H B, Liu Y. Review and recent advances in uncoupled algorithms for chemical non-equilibrium flows[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 39(1): 021090.
- 刘君, 董海波, 刘瑜. 化学非平衡流动解耦算法的回顾与新进展[J]. *航空学报*, 2018, 39(1): 021090.
- [10] Qu X J, Song Y, Jin Y, *et al.* 3D SAPIV particle field reconstruction method based on adaptive threshold[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(7): 1622-1633.
- [11] Cozzi F, Coghe A, Sharma R. Analysis of local entrainment rate in the initial region of isothermal free swirling jets by stereo PIV [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, 94: 281-294.
- [12] Im S, Kim H T, Rhee B W, *et al.* PIV measurements of the flow patterns in a CANDU-6 model[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2016, 98: 1-11.
- [13] Li Y, Feng Z, Shen Y L, *et al.* A narrow linewidth and tunable XeF (C-A) laser [J]. *Laser Physics*, 2013, 23(8): 085006.
- [14] Chen L, Li Y, Qin X L, *et al.* A multi-frame integration technique based on mode theory for low light level image[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(10): 2217-2220.
- 陈立, 李野, 秦旭磊, 等. 基于众值理论的微光图像帧积分算法[J]. *电子学报*, 2011, 39(10): 2217-2220.
- [15] Keane D, Adrian J. Optimization of particle image velocimeters: I. double pulsed systems [J]. *Measurement Science and Technology*, 1990, 1(11): 1202-1215.