

## 大功率准分子激光器气体流场数值分析

杨礼昭<sup>1,2</sup>, 方晓东<sup>1,2,3</sup>, 游利兵<sup>3,4\*</sup><sup>1</sup>中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;<sup>2</sup>中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所安徽省光子器件与材料重点实验室, 安徽 合肥 230031;<sup>3</sup>深圳技术大学新材料与新能源学院, 广东 深圳 518118;<sup>4</sup>深圳盛方科技有限公司, 广东 深圳 518173

**摘要** 准分子激光器作为放电激励的气体激光器,其激光介质气体在主放电电极间辉光放电产生激光的同时,也在放电区域产生气态和固态的放电产物以及大量的热。通常在激光腔内放置横流风机,以维持放电区域气体的流动和更新,从而保证激光器以重复频率工作时,每一次放电不受前一次放电产物和热量的影响。对于大功率(>300 W)准分子激光器,其放电区域体积大,且具有更高的放电电压和放电重复频率,因此对主放电电极间的气体流场具有更高要求。本课题组采用二维模型,针对一套自行设计的大功率准分子激光器放电腔结构和气体循环系统进行了稳态流场数值分析。数值分析结果显示,当风机转速为 3500 r/min 时,放电区域气体的平均流速高于 32.76 m/s,且气体流速均匀。这一结果从理论上证明了该循环系统可以满足大功率准分子激光器的工作要求。

**关键词** 激光器;准分子激光器;气体循环系统;流场;数值分析

**中图分类号** TN248.2; O355

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL202249.2101003

## 1 引言

准分子激光器是目前紫外波段输出功率最高的激光器件,其以短波长、高功率的特点被广泛应用于工业、科研、医疗等领域<sup>[1-4]</sup>。近年来,随着材料技术、光学加工技术及高压快放电技术的进步,准分子激光器向着更高频率、更高功率方向不断发展。例如,用于低温多晶硅(LTPS)退火<sup>[5]</sup>的大功率准分子激光器已成为平板显示制造中关键设备的核心光源。可以预见,大功率准分子激光器将在 MicroLED 显示面板制造的剥离和巨量转移工艺技术中发挥重要作用<sup>[6]</sup>。

目前,产品化的大功率准分子激光器主要是美国 Coherent 公司的 Lambda SX 系列产品。对于波长为 308 nm 的 XeCl 准分子器件,其输出的单脉冲能量可达 1 J,最大重复频率为 600 Hz,最大输出功率为 600 W<sup>[7]</sup>。在平板显示制造所用低温多晶硅的退火装备中,为进一步提高激光功率,满足大尺寸显示器面板退火的需要,通常需要将多台相同的大功率准分子激光器联用,在输出端光学系统中实现激光合束输出;2台、4台、6台大功率准分子激光器联用并工作于 600 Hz 的最高频率时,输出功率可分别高达 1200、2400、3600 W。

我国在大功率准分子激光器领域的技术水平与国外差距较大,目前尚处于研发阶段,其中激光腔内高速气体循环系统的设计是研发大功率准分子激光设备的关键技术之一<sup>[8]</sup>。

准分子激光器是放电激励的气体激光器,当电极放电时,放电区将产生大量离子、活性粒子以及电极溅射的颗粒碎片等放电产物,这些放电产物会减小气体的放电阻抗<sup>[9-10]</sup>。此外,准分子激光器的电光转换效率通常为 1%~3%,注入的电能为输出激光的占比较低,大部分能量以热量的形式损失在激光腔内<sup>[11]</sup>;放电激励产生的热量会使放电区的气体密度发生改变<sup>[12]</sup>,如果不及时更新放电区的气体,将导致下一次放电质量恶化。对于大功率准分子激光器件而言,比如一台放电电压高达 30 kV、放电重复频率高达 600 Hz 的 600 W 大功率准分子激光器,其放电区域会产生较多放电产物,全功率输出时放电区域会产生接近 50 kW 的产热功率,因此,要求放电电极间具有很高的气体更新速度。可见,在大功率准分子激光器研发时,激光放电腔结构设计和腔内气体循环系统设计都非常关键,需要进行流场分析,以便为设计提供理论依据。

本课题组曾针对小功率准分子激光器(输出功率

**收稿日期:** 2022-02-09; **修回日期:** 2022-02-22; **录用日期:** 2022-03-08

**基金项目:** 国家自然科学基金(41627803)、深圳市科技计划资助项目(JCYJ20210324120207021, KQTD20170331115422184)、深圳技术大学新引进高端人才财政补助科研启动项目(2020101)、中国科学院核心关键技术攻关项目(ZKYG-2018-04)

**通信作者:** \*youlibing@sztu.edu.cn

为 10 W, 工作频率为 30 Hz) 进行了内流场仿真研究<sup>[13]</sup>, 验证了数值仿真方法对准分子激光器内流场状态分析的指导价值。对于大功率 (>300 W) 准分子激光器的内流场分析, 国内外暂未见相关报道。大功率准分子激光器电极间放电区域工作气体的更新速率和均匀性会直接影响脉冲激光放电的均匀性和输出激光的质量<sup>[14-15]</sup>。相比中小功率准分子激光器, 大功率准分子激光器的大放电区域在对电极间气流均匀性提出要求的同时也使得维持电极间气流的高速流动成为难点, 从而对气体循环系统的设计提出了挑战。

本课题组针对一套自行设计的大功率准分子激光器的流场进行仿真研究。该系统包括高速横流风机、多通道导风板、散热系统、主电极、预电离系统以及特殊设计的激光腔体结构, 其中, 激光器放电电极间距为 3 cm, 电极长度高达 120 cm, 电极有效放电宽度约为 1.56 cm, 要求气体循环系统能够保证气体高速更新的区域体积达到 561.6 cm<sup>3</sup> (本课题组以往研发的中小功率准分子激光器该区域的体积一般不超过

200 cm<sup>3</sup>)。准分子激光器的工作气体为氖气、氙气和 HCl 气体的混合气体, 工作气压为 0.3~0.7 MPa, 工作温度为 40 ℃。本文研究了流场的二维数值分析结果, 讨论了激光放电区域气体的更新速率、气流的均匀性、腔内压力分布以及风机所受力矩等关键参数。

## 2 模型描述

### 2.1 湍流模型

本文采用标准  $k-\epsilon$  湍流模型进行流场仿真计算。标准  $k-\epsilon$  模型是一个半经验公式, 是从实验现象中总结出来的。该模型假设流动为完全湍流, 分子黏性的影响可以忽略, 在模型公式中需要求解湍流动能及耗散率方程。其中: 湍流动能  $k$  的输运方程是通过方程推导得出的精确方程; 耗散率  $\epsilon$  的方程是通过物理推理以及数学上模拟相似原型方程得到的经验方程。标准  $k-\epsilon$  模型的求解原理是先求解  $k$  方程和  $\epsilon$  方程, 再根据  $k$  和  $\epsilon$  的值求湍流黏度<sup>[16]</sup>。

湍流动能  $k$  的方程<sup>[17]</sup>为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M, \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为流体密度;  $k$  为湍流动能;  $\mu$  为黏度;  $u_i$  为黏度  $\mu$  的瞬时项;  $\mu_t$  为湍流黏性系数;  $\sigma_k$  为  $k$  的湍流普朗特数;  $G_k$  为平均速度梯度引起的湍流动能  $k$  的生成项;  $G_b$  是由浮力引起的湍流动能  $k$  的生成项, 对于不

可压缩流体,  $G_b = 0$ ;  $\epsilon$  为湍流耗散率;  $Y_M$  为可压缩性修正项, 是可压缩湍流中脉动扩张的贡献, 对于不可压缩流体,  $Y_M = 0$ 。

耗散率  $\epsilon$  的方程<sup>[17]</sup>为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \quad (2)$$

式中:  $\sigma_\epsilon$  为耗散率  $\epsilon$  的湍流普朗特数;  $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 $C_{3\epsilon}$  为经验常数。

湍流黏性系数的计算公式<sup>[17]</sup>为

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad (3)$$

式中:  $C_\mu$  为常数。

为了提高模拟所得结果的可靠性, 本文还选用 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型和 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型分别进行了模拟计算, 并将结果进行了简单对比。Standard  $k-\epsilon$  湍流模型、RNG  $k-\epsilon$  湍流模型和 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型的形式很相似, 都是计算  $k$  和  $\epsilon$  的输运方程, 它们的主要区别在于: 1) 湍流黏度的计算方法不同; 2) 控制  $k$  和  $\epsilon$  湍流扩散的湍流普朗特数不同; 3)  $\epsilon$  方程中的生成项和消耗项不同<sup>[16]</sup>。三种模型都是实际工程中流体模拟计算的常用模型。

### 2.2 几何模型及初始条件

图 1(a) 所示为本课题组自行设计的大功率准分子激光器气体循环系统的几何模型。本课题自采用多参考系模型对激光器的内部流场进行稳态模拟, 模型

中的横流风机通过旋转为流场提供动能, 其叶片角度、叶片密度、轮辐大小, 以及与其配合形成流道的腔体壁面和挡风板的结构设计均需要充分考虑横流风机动能的传递效率, 同时还需要考虑对高速气流产生的噪声的控制。散热系统的放置位置需要考虑参与循环的气流在高速流动时能与其充分接触, 且不能对横流风机的进气造成过多阻碍。预电离系统因功能性要求, 放置位置不可调整, 且不适合根据流场需要对其结构进行过多额外设计; 同时, 预电离系统工作时会产生放电杂质。为尽可能减小放电杂质对放电区域流场的影响, 避免放电杂质随气流传递至放电区域, 设计时应使腔体壁面尽可能贴近预电离系统, 并在其下方加工出具有导流作用的长条形凸起 (该凸起结构在导流的同时可对预电离系统起到遮挡作用, 避免过多气流经过预电离系统)。对于本模型设计中涉及的大量经验值的选择以及流体力学的相关计算在此不展开描述。

准分子激光器两电极间的放电区域为气体工作区域, 电极宽度为 3.5 cm, 电极在其垂直轴上相隔

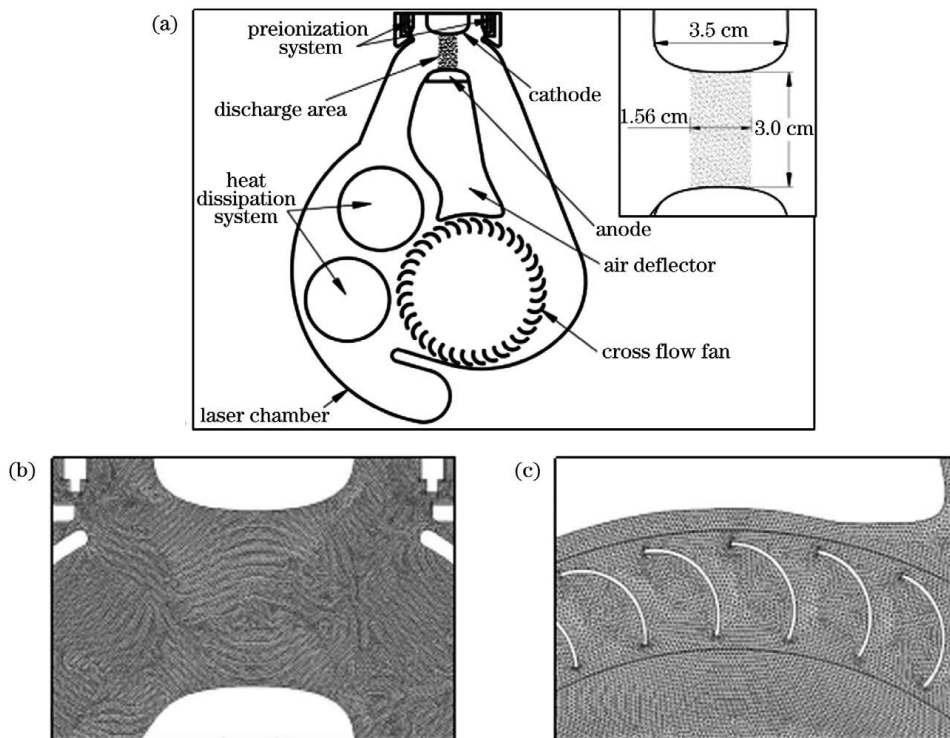


图 1 大功率准分子激光器气体循环系统的模型配置。(a)几何形状;(b)放电区域附近的计算网格;(c)风机叶片附近的计算网格  
Fig. 1 Model configuration of gas circulation system of high-power excimer laser. (a) Geometry; (b) computational mesh near discharge area; (c) computational mesh near fan blade

3.0 cm,有效放电区域的宽度为 1.56 cm。有效放电区域宽度是指电极实际参与放电的面型宽度,电极的其余面型采用耐腐蚀绝缘涂层覆盖,不参与放电。横流风机的轴向长度为 100 cm,横流风机的最高转速为 3500 r/min。腔内气体混合物由氦气、氙气、HCl 气体组成,其中氦气的体积占比高于 95%,故进行数值计算时采用氦气作为介质;腔内压力为 0.3~0.7 MPa,温度为 40 ℃。计算时假设为等温条件,气体介质不可压缩。模型中使用的部分网格如图 1(b)、(c)所示。所有静壁面以及风机叶片表面边界层的网格均为四边形网格,厚度为 0.1 mm,层数为 1 层;在旋转区域与非旋转区域交界处,设置尺寸为 0.1 mm 的两层四边形网格作为数据传递边界层;计算域中的其余网格均为三角形网格,最大单元边长尺寸为 0.5 mm。

准分子激光器放电区域气体更新率的计算公式<sup>[5]</sup>为

$$C = \frac{v}{Wf}, \quad (4)$$

式中: $C$  为气体更新速率; $W$  为放电区的宽度; $v$  为电极间气体的平均流速; $f$  为激光放电的重复频率。当  $C=1$  时,可以认为放电区域的气体刚好可以得到实时更新,即每一次脉冲放电开始时,上一次脉冲放电期间放电区域的工作气体刚好离开放电区域。大功率准分子激光器的放电电压和放电频率均较高,放电产生的杂质多,并且放电产热多,为确保放电产生的杂质不影

响下一次脉冲放电,同时确保放电产生的热量不累积,需要保证每一次脉冲放电开始时,上一次脉冲放电期间放电区域的工作气体到放电区域的距离足够大,因此气体更新速率  $C$  的取值需要偏大一些。

本课题组设计的准分子激光器模型的放电区宽度  $W=1.56$  cm,放电的重复频率  $f=600$  Hz。根据模型的几何结构,上一次脉冲放电期间放电区域的工作气体需要离开放电区域轴线位置约 5.407 cm,因此可得  $C_{avg}=5.407/W=3.466$ ,即要求放电区域整体的气体更新速率均值不低于 3.466。考虑放电区域整体的气体更新速率时,取  $C_1=3.5$ (略高于  $C_{avg}$ ),可计算得到  $v_1=32.76$  m/s,即本模型中放电区域工作气体平均流速的目标值为 32.76 m/s。此外,考虑到大功率准分子激光器放电电极间距较大,放电区域必然存在气体流速梯度,在满足放电区域全域气体平均更新速率达到 3.5 的同时,还需要对放电区域气体流速的最小值提出要求,以确保流速最小处的气体也能得到及时更新,同时还要确保放电区域气体流速的均匀性。此时取  $C_2=C_1/2=1.75$ ,可得到  $v_2=16.38$  m/s,即本模型要求放电区域气体流速的最小值不低于 16.38 m/s。

### 3 仿真结果与讨论

#### 3.1 固定风机转速下的流场仿真结果

固定风机转速下的流场仿真选用氦气作为介质,同时选择大功率准分子激光器最常用的工作气压

0.5 MPa 和工作温度 40 °C, 风机转速固定为最大转速 3500 r/min。采用 Standard  $k-\epsilon$  湍流模型, 在 FLUENT 软件中进行数值计算。激光器腔体内流场的数值计算结果如图 2 所示。

从图 2(a)中可以看出, 在整个循环过程中, 工作气体被横流风机加速后经过放电区域, 之后被散热系统阻挡分成三路流回风机。图 2(b)显示, 由于散热系统的阻挡, 气流在经过散热系统与腔体壁的狭小缝隙

后明显加速, 在腔体表面附近形成了两处低压区域, 在 3500 r/min 的风机转速下, 该区域与气体低速区域的相对压力差达到了 5 kPa。为增加工作气体的寿命, 大功率准分子激光器件一般需要外接气体净化系统, 以实时清除激光放电产生的杂质气体及放电粉尘。该系统由管道接入激光腔体, 气体循环完全依赖于激光器内部的压力差。本次仿真得到的腔体内压力分布图可为气体净化系统在腔体上的接入位置提供参考。

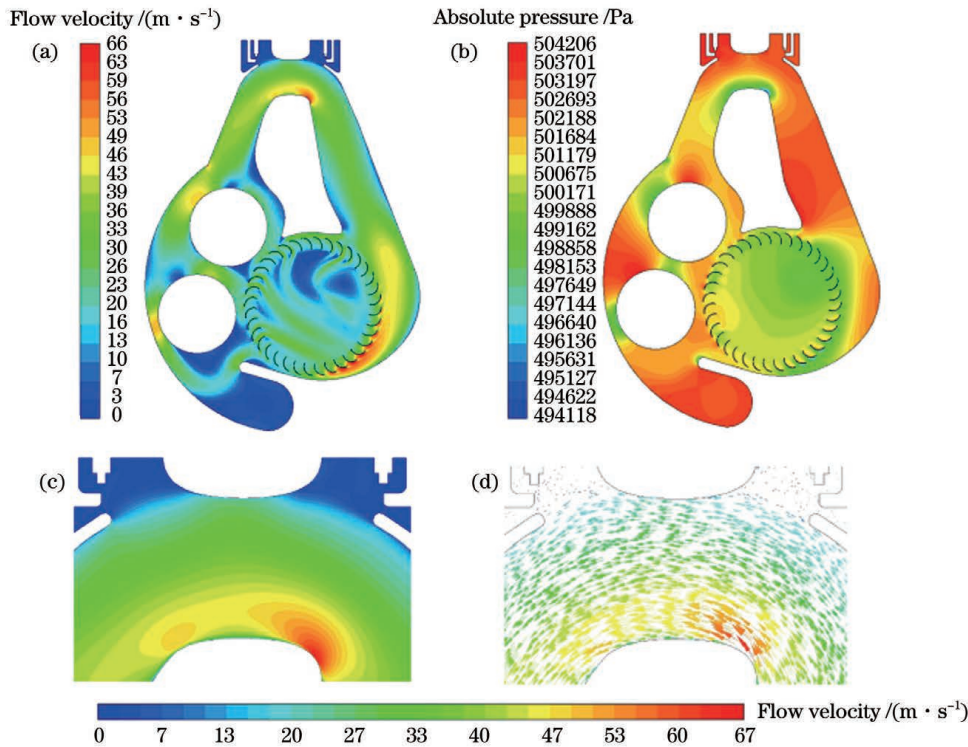


图 2 激光器腔体内流场的数值计算结果。(a)全局气体流速分布;(b)全局绝对压力分布;(c)电极间气体的流速分布;(d)电极间气体的速度矢量图

Fig. 2 Numerical calculation results of flow field in laser chamber. (a) Global gas flow velocity distribution; (b) global absolute pressure distribution; (c) flow velocity distribution of gas between electrodes; (d) flow velocity vector diagram of gas between electrodes

图 2(c)、(d)为仿真得到的激光放电区域的气体流速分布以及气体的速度矢量图, 仿真结果显示, 在风机最高设计转速下, 放电区域气体的平均流速约为 37.15 m/s, 大于目标值 32.76 m/s。由于阳极对气流的阻挡, 阳极右侧表面区域出现了小团高速气流, 其最高速度达到了 65.81 m/s, 该气流贴近阳极传输到放电区域, 使得放电区域的最高气体流速位于阳极附近, 能防止阳极表面出现逆流。放电区域的最高气体流速出现在阳极上方约 4.2 mm 处, 流速约为 47.71 m/s, 并向着阴极和阳极两个方向均匀减小, 阳极表面附近的气体流速约为 37 m/s, 最低气体流速出现在阴极表面附近, 约为 18.5 m/s, 大于最低流速要求 16.38 m/s。因此, 放电区域气体的更新速率满足要求。

在平行于气体流速的方向上, 气体流速均匀传递, 气流方向的一致性较好, 未出现逆流和速度突变; 在气体流速的法线方向上, 气体流速梯度均匀, 流速由速度峰值处沿法线的正反两个方向均匀递减, 未出现速度

突变。综上, 放电区域流场的均匀性较为理想。

为增加仿真结果的可靠性, 在保持初始条件不变的前提下, 本课题组又采用 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型和 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型分别对激光器腔体内的流场进行了数值模拟, 并对三次仿真结果进行了简单对比。图 3 所示为采用 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型和 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型对流场进行仿真的结果。

对比激光器腔体内全局气体流速分布的三次仿真结果可以看出, 三种  $k-\epsilon$  湍流模型计算出的腔内气体流速分布趋势大致相同。在 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型和 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型的模拟结果中, 阳极右侧区域出现的小团高速气流向放电区域方向的传播更加贴近阳极(与 Standard  $k-\epsilon$  湍流模型的模拟结果相比), 使得放电区域中气体流速最大的位置更加接近阳极, 对阳极表面附近气体流速的贡献更大。在 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型的模拟结果中, 放电区域气体流速的梯度最大, 最高气体流速达到了 49.24 m/s, 阴极表面附近的气

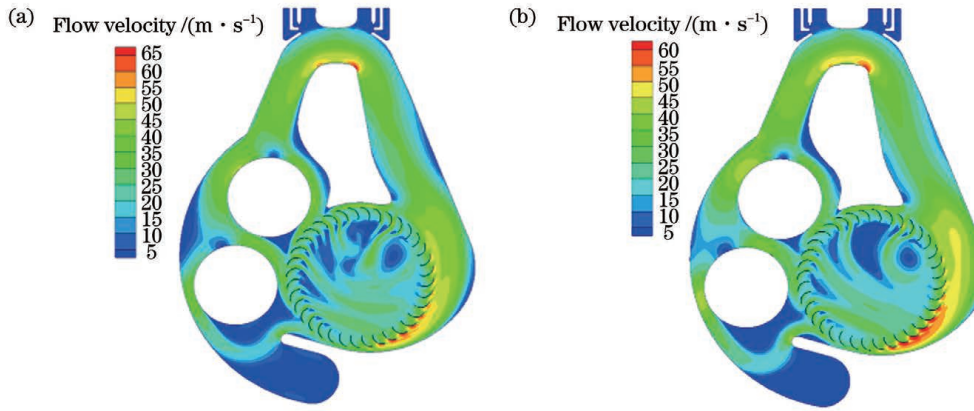


图 3 采用不同的湍流模型对激光器腔体内的流场进行数值模拟的结果。(a)采用 RNG  $k-\epsilon$  模型模拟的全局气体流速分布；(b)采用 Realizable  $k-\epsilon$  模型模拟的全局气体流速分布

Fig. 3 Simulated flow field in laser chamber with different turbulence models. (a) Global flow velocity distribution simulated using RNG  $k-\epsilon$  model; (b) global flow velocity distribution simulated using Realizable  $k-\epsilon$  model

流速度最小,为 18.21 m/s。Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型仿真得到的阴极表面附近的气体流速是三个模型中的最小值,为 17.39 m/s,但该值仍大于 16.38 m/s 的最低流速要求。

图 4 为三种不同模型计算得到的电极间气体流速沿电极中心轴的分布,采样区域为放电区域两电极中心轴的连线。三种模型计算出的气体流速的变化趋势基本一致,且平均流速均大于目标值 32.76 m/s,最低流速均大于要求值 16.38 m/s。这一结果从理论上证明了本课题组所设计的工作气体循环系统可以满足大功率准分子激光器的工作要求。

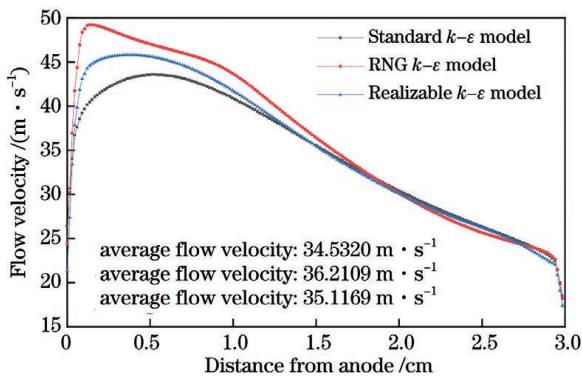


图 4 三种模型计算得到的气体流速沿电极中心轴的分布  
Fig. 4 Gas flow velocity distribution along central axis of electrodes calculated with three different models

由于三种  $k-\epsilon$  湍流模型计算得到的放电区域气体流速的分布趋势大致相同,而且 Standard  $k-\epsilon$  湍流模型计算得到的平均流速最低,因此,在主要保证放电区域气体流速达到目标值的验证计算中,将该模型计算得到的结果作为标准更加可靠。同时,该模型的计算更为简单省时。鉴于此,本文后续研究均采用 Standard  $k-\epsilon$  湍流模型。

### 3.2 风机转速对电极间气体流速及风机所受扭矩的影响

在本课题组设计的大功率准分子激光器中,横流

风机驱动电机的最高转速为 3500 r/min。根据不同的工作需求,激光器可以在不同的放电频率下工作,激光放电频率范围为 1~600 Hz,低频率运行时风机无需维持最高转速。为获得风机转速与电极间气体平均流速、风机所受扭矩的大致关系,本课题组以氙气作为介质,固定腔内气压为 0.5 MPa,采用 Standard  $k-\epsilon$  湍流模型,选择不同的风机转速(500、1000、1500、2000、2500、3000、3500 r/min)进行计算,计算结果如图 5 所示,图中数据的采样区域为整个放电区域。计算结果显示,准分子激光器电极间工作气体的平均流速与风机转速趋于线性正相关,风机扭矩与风机转速的二次方趋于线性正相关。这一结果可为激光器工作于不同频率时横流风机驱动电机的功率及转速控制提供参考。

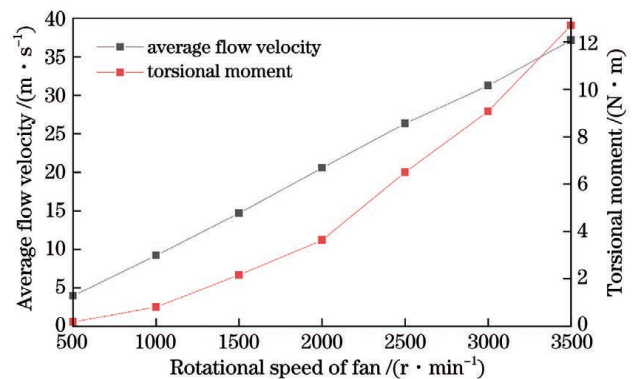


图 5 不同风机转速下放电区域气体的平均流速以及风机所受扭矩

Fig. 5 Average gas flow velocity in discharge area and torsional moment of fan at different fan rotational speeds

### 3.3 腔内气压对电极间气体流速及风机所受扭矩的影响

对于本课题组设计的大功率准分子激光器,根据不同的工作需求,可对其腔内工作气体的压力进行调整,气压范围为 0.3~0.7 MPa。为获得不同气压下电极间气体的平均流速及风机所受扭矩,本课题组以氙

气为介质,固定风机转速为 3500 r/min,采用 Standard  $k-\epsilon$  湍流模型,选择不同的腔内气压(0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 MPa)进行计算,计算结果如图 6 所示,图中数据采样区域为整个放电区域。从图 6 中可以看出,风机所受扭矩与腔内气压基本呈线性关系,腔内气压为 0.7 MPa 时,风机所受扭矩最大,为 17.97 N·m。电极间气体的平均流速与腔内气压正相关,腔内气压为 0.3 MPa 时,电极间气体的平均流速最低,为 36.11 m/s,大于目标值 32.76 m/s。这一结果可为横流风机的材料选择、风机整体装配刚性要求以及驱动风机的磁耦合器性能要求提供参考。

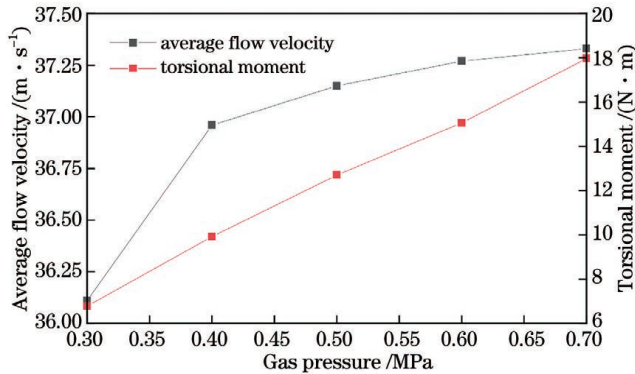


图 6 不同气压下放电区域气体的平均流速以及风机所受扭矩

Fig. 6 Average flow velocity of gas in discharge area and torsional moment of fan under different gas pressures

## 4 结 论

本课题组针对一套自行设计的大功率准分子激光器腔内高速气体循环系统进行了流场的二维数值研究,分析了激光放电区域气体的更新速率、气流均匀性、腔内压力分布以及风机所受扭矩等大功率准分子激光器设计所需的重要参数,所得结果可为气体净化系统在腔体上的接入位置、激光器于不同频率工作时电机的功率及转速控制、横流风机的材料选择、风机整体装配刚性要求以及驱动风机的磁耦合器性能要求提供参考。

模拟结果显示,当风机转速为 3500 r/min 时,放电区域气体流速的平均值大于目标值 32.76 m/s,且气体流速均匀。模拟结果从理论上证明了本套自行设计的气体循环系统可以满足大功率准分子激光器的工作要求。

本次仿真研究将腔内温度设为固定值,未考虑激光器实际工作时脉冲放电及散热系统引起的腔内温度变化对流场的影响,因此仿真结果与实际情况存在一定差异。

## 参 考 文 献

[1] 余吟山,游利兵,梁勤,等. 准分子激光技术发展(邀请论文)[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2253-2270.

Yu Y S, You L B, Liang X, et al. Progress of excimer lasers technology (invited paper) [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(9): 2253-2270.

[2] 王大辉,赵学庆,薛全喜,等. 高功率准分子激光 MOPA 系统光束平滑技术研究[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0214003  
Wang D H, Zhao X Q, Xue Q X, et al. Technical study on beam smoothing of high power excimer laser MOPA system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0214003.

[3] 刘世元,吴小健. 深紫外准分子激光实时曝光剂量控制算法研究[J]. 光学学报, 2006, 26(6): 878-884.  
Liu S Y, Wu X J. Real-time exposure dose control algorithm for DUV excimer lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(6): 878-884.

[4] 孙正阳,季凌飞,林真源,等. 激光分解 4H-SiC 制备石墨烯层的晶面取向影响研究[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0802002.  
Sun Z Y, Ji L F, Lin Z Y, et al. Effect of crystal orientation on synthesis of graphene layers by laser decomposition of 4H-SiC [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0802002.

[5] Basting D, Marowsky G. Excimer laser technology[M]. Heidelberg: Springer, 2005.

[6] MicroLEDs-laser processes for display production [EB/OL]. [2022-02-09]. <https://www.coherent.com/web-resources/white-paper/microleds-lasers-for-display-prod-wp>.

[7] Product catalog of coherent [EB/OL]. [2022-02-09]. <https://www.coherent.com/content/dam/coherent/site/en/resources/datasheet/lasers/lambda-sx-ds.pdf>.

[8] 赵家敏,游利兵,余吟山,等. 大能量高功率准分子激光的应用及关键技术[J]. 量子电子学报, 2013, 30(6): 696-702.  
Zhao J M, You L B, Yu Y S, et al. Application and key technology of high energy and high power excimer laser [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2013, 30(6): 696-702.

[9] Amada Y, Steiger T D, Ujazdowski R C. Cross-flow fan impeller for a transversley excited, pulsed, gas discharge laser: US8814522 [P]. 2014-08-26.

[10] Asayama T, Sasaki Y, Nagashima T, et al. Power up: 120 Watt injection-locked ArF excimer laser required for both multi-patterning and 450 nm wafer lithography [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8683: 86831G.

[11] 宋庆梅. 简单紧凑的电晕预电离 XeCl 准分子激光器 [J]. 中国激光, 1983, 10(3): 156-158.  
Song Q M. A simple compact XeCl excimer laser with corona preionization [J]. Chinese Journal of Lasers, 1983, 10(3): 156-158.

[12] 刘斌,丁金滨,周翔,等. 准分子激光器中放电冲击波的仿真研究 [J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0901001.  
Liu B, Ding J B, Zhou Y, et al. Simulation of discharge shock waves in excimer laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0901001.

[13] 朱能伟,方晓东. 基于 FLUENT 的准分子激光器气体流场数值仿真 [J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0901007.  
Zhu N W, Fang X D. FLUENT-based numerical simulation of gas flow field of excimer laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0901007.

[14] Kakizaki K, Sasaki Y, Inoue T, et al. High-repetition-rate (6 kHz) and long-pulse-duration (50 ns) ArF excimer laser for sub-65 nm lithography [J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(3): 035109.

[15] Tanaka S, Tsushima H, Nakaike T, et al. GT40A: durable 45-W ArF injection-lock laser light source for dry/immersion lithography [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6154: 61542O.

[16] 王福军. 计算流体力学分析: CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.  
Wang F J. Computational fluid dynamics analysis: CFD software principle and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

[17] 罗惕乾. 流体力学 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2003.  
Luo T Q. Mechanics of fluids [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2003.

# Numerical Analysis of Gas Flow Field of High-Power Excimer Laser

Yang Lizhao<sup>1,2</sup>, Fang Xiaodong<sup>1,2,3</sup>, You Libing<sup>3,4\*</sup>

<sup>1</sup> School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

<sup>2</sup> Anhui Province Key Laboratory of Photonic Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;

<sup>3</sup> College of New Materials and New Energies, Shenzhen Technology University, Shenzhen 518118, Guangdong, China;

<sup>4</sup> Shenzhen Shengfang Technology Company Ltd., Shenzhen 518173, Guangdong, China

## Abstract

**Objective** The dielectric gas in excimer lasers generates light via glow discharge between the main discharge electrodes, which produces gaseous and solid discharge products and a large amount of heat in the discharge area. Generally, a crossflow fan is used in the laser chamber to maintain and renew the gas flow in the discharge area, thus ensuring that each discharge is not affected by the products and heat from the previous when the laser operates repeatedly. For high-power ( $> 300$  W) excimer lasers, their discharge area is large; moreover, the high-power excimer lasers have higher discharge voltage and frequency than medium- or low- power excimer lasers, so there are higher requirements for the gas flow field between the main discharge electrodes. This article studies a 600 W high-power excimer laser with a laser discharge voltage of up to 30 kV and a discharge repetition rate of up to 600 Hz. Its discharge area generates more discharge products, and has a heat-generation power of close to 50 kW at full power output, so a higher gas-renewal rate is required between the discharge electrodes. Therefore, when developing this high-power excimer laser, the structural design of the discharge chamber and gas-circulation system within it are critical, and flow-field analysis is required to provide a theoretical basis for the design.

**Methods** A multiple-reference-frame model is used to simulate the steady-state flow field in the laser. In the model, the rotation of the crossflow fan provides all the kinetic energy of the flow field. The flow field simulation adopts the standard  $k-\epsilon$  turbulence model. To improve the reliability of the simulation results, we also selected the renormalization group (RNG) and Realizable  $k-\epsilon$  turbulence models for simulation calculations and compared the results.

**Results and Discussions** Figure 2 shows the numerical calculation results of the flow field in the laser chamber. Figures 2 (a) and (b) show the global flow velocity distribution and absolute pressure distribution, which provide a reference for the access position of the gas-purification system. Figures 2 (c) and (d) show the flow velocity distribution and flow velocity vector diagram in the laser discharge area. The simulation results show that the gas-renewal rate in the discharge area meets the requirements. The uniformity of the flow field in discharge area is ideal. Figure 3 shows the simulation results using the RNG and Realizable  $k-\epsilon$  turbulence models. It can be seen by comparing the simulation results that the flow velocity distribution trends in the laser chamber calculated by the standard, RNG, and Realizable  $k-\epsilon$  turbulence models are roughly the same. Figure 4 is a comparison diagram of the distribution of flow velocity along the central axis of the electrodes calculated using three different models. The calculated variation trend in the flow velocity on the central axis of the electrodes is nearly the same for all three models. The simulation results show that when the fan speed is 3500 r/min, the average gas velocity in the discharge area is higher than the target value of 32.76 m/s, and the gas velocity is uniform. It is proven theoretically that this set of self-designed gas-circulation system can meet the working requirements of the high-power excimer laser. The average flow velocity of the working gas between the electrodes of the excimer laser tends to be correlated linearly and positively with the fan speed, and the torsional moment of the fan tends to be linearly and positively correlated with the square of the fan speed. This result provides a reference for the power and speed control of the crossflow fan drive motor when the laser operates at different frequencies. Furthermore, the torsional moment of the fan is basically linear with respect to the air pressure in the chamber. This result provides insight into the selection of the structural materials of the cross-flow fan, the requirements of the overall assembly rigidity of the fan, and performance requirements of the magnetic coupler driving the fan.

**Conclusions** In this paper, a two-dimensional numerical study of the flow field is carried out for a self-designed high-speed gas-circulation system in the chamber of a high-power excimer laser. The important parameters of high-power excimer laser design, such as the renewal rate of the gas in the laser discharge area, uniformity of the gas flow, pressure distribution in the chamber, and torsional moment of the fan, are discussed. The results provide a reference for the access position of the gas-purification system on the chamber, power and speed control of the motor at different operating

frequencies, selection of structural materials for the crossflow fan, rigidity requirements of the overall fan assembly, and performance requirements of the magnetic coupler that drives the fan. The simulation results show that when the fan speed is 3500 r/min, the average gas velocity in the discharge area is higher than the target value of 32.76 m/s, and the gas velocity is uniform. This set of self-designed gas-circulation systems is theoretically proven to be able to meet the working requirements of the high-power excimer laser. It should be noted that we set the cavity temperature to a fixed value and ignore the effect of cavity temperature variation on flow field. So, our simulation has certain difference with the actual results.

**Key words** lasers; excimer laser; gas-circulation system; flow field; numerical analysis