第 43 卷 第 7 期
2016 年 7 月

中 国 激 光
CHINESE JOURNAL OF LASERS

Vol. 43, No. 7
July, 2016

TEA CO_2 激光器放电区气流均匀性对激光输出的影响

邵明振 邵春雷 陈 飞 潘其坤

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激光与物质相互作用国家重点实验室，吉林 长春 130033

摘要 为了获得气体流速分布均匀性对激光器注入能量和输出能量的影响，运用计算流体动力学(CFD)方法对放电区流场进行模拟分析，得到放电区气体流速的纵向分布和竖向分布。根据影响流速分布不均匀性的因素，对整个流场进行优化改进。根据流体动力学原理及激光器结构及其轻量化要求，在原有结构基础上增加 3 层隔板以改善流场分布特性。优化后，放电区气体平均流速达到 99.3 m/s，流速的纵向不均匀度为 5.2%，竖向不均匀度为 7.1%。激光器的重复频率由 300 Hz 提高到 365 Hz，单脉冲注入能量由 160 J 提高到 171.5 J，输出能量由 20 J 提高到 21.8 J，激光发散角减小了 0.5 mrad。改善放电区流场分布特性可提高激光器的整体性能。

关键词 激光器；横向激励大气压 CO_2 激光器；气体均匀性；计算流体动力学；输出能量；注入能量；发散角

中图分类号 TN24 **文献标识码** A

doi：10.3788/CJL201643.0701005

Effect of Gas Flow Uniformity in Discharge Chamber of TEA CO_2 Laser on Laser Output

Shao Mingzhen Shao Chunlei Chen Fei Pan Qikun

State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, *China*

Abstract In order to understand the effect of gas velocity distribution uniformity on injected energy and output energy of lasers, the flow field in discharge chamber is simulated by computational fluid dynamics (CFD) so that the gas velocity distribution in longitudinal and vertical directions can be acquired. According to the elements that affect the gas velocity uniformity, the whole flow field is optimized. Based on the fluid dynamics, laser structure and light weight requirement, three clapboards are added to improve the flow field distribution characteristics. After optimization, the average gas velocity reaches 99.3 m/s. The velocity non-uniformity in longitudinal direction is 5.2%, and that in vertical direction is 7.1%. The repetition rate of laser increases from 300 Hz to 365 Hz, the injected energy of single pulse increases from 160 J to 171.5 J, the output energy increases from 20 J to 21.8 J, and the divergence angle of laser beams decreases by 0.5 mrad. Improving flow field distribution characteristics in the discharge chamber will enhance the integral performance of lasers.

Key words lasers; transversely excited atmosphere CO_2 laser; gas uniformity; computational fluid dynamics; output energy; injected energy; divergence angle

OCIS codes 140.3470; 140.3460; 140.3538

1 引 言

脉冲横向激励大气压(TEA)CO_2 激光器具有高平均功率、高重复频率和高峰值功率等特点，在激光加工、激光雷达、激光推进、激光大气传输、激光化学以及激光与物质相互作用等领域具有重要的应用价值[1-13]。此类激光器采用脉冲重复频率放电激励工作制式，工作介质通常由 CO_2、N_2、He 3 种气体按一定比例混合而成，充入密闭工作腔，混合工作气体气压接近于大气压。为实现重复频率运转，要求工作气体在工作腔内循环流动[14-15]。为得到高重复频率下的高平均功率激光输出，需要实现大体积、高重复频率、均匀稳

收稿日期：2016-01-18；**收到修改稿日期**：2016-03-31

基金项目：中国科学院知识创新工程领域前沿项目(O72z32c070)、国家重点实验室基金(SKLLIM1510)

作者简介：邵明振(1985—)，男，博士，助理研究员，主要从事高功率气体激光器方面的研究。

E-mail：smz2050@163.com

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

定的辉光放电。影响稳定辉光放电的因素很多，混合工作气体作为放电的主体，其在放电区的流动状态是主要的影响因素。气体流动状态包括气流速度和流速分布均匀性。气流速度对激光输出的影响已有相关报道，即在一定的结构参数下和一定的频率范围内，激光输出重复频率和平均功率正比于气流速度[16]；而流速分布均匀性对放电和激光输出的影响却少有关注。实现大体积均匀稳定辉光放电，要求电极间具有很高的电场分布均匀性，这就要求电极间气体密度（或压力）也具有很高的分布均匀性，而气体在电极间的流速分布均匀性可作为其密度（或压力）分布均匀性的表征。

由于传统人工设计方法无法在设计阶段直观地分析电极间气流速度分布情况，只能在 CO_2 激光器装置研制后采用直接测量的方法来获取。目前 CO_2 激光器放电区气体流速的测量仍然采用传统的皮托管方法[17]。该测量方法一般是在电极间垂直气流方向的截面内设置足够多个皮托管探头，测算出各个探头处的气流速度。即使忽略各种测量误差的存在，认定该方法能够较为准确地反映电极间气流速度分布情况，但如何对其结构进行改进以提高分布均匀性仍然是传统人工设计方法难以解决的问题。近年来广泛应用的计算流体动力学（CFD）技术建立在经典流体动力学和数值计算方法的基础之上，兼有理论性和实践性的双重特点，通过计算机数值计算和图像显示，可对复杂流场结构进行精确的参数计算。

本文利用一台高功率 TEA CO_2 激光器研究了如何提高放电区气流分布均匀性以及气流分布均匀性对激光输出的影响。利用 CFD 方法模拟分析气体循环流场结构，通过改进流场结构提高放电区气流分布均匀性，并采用皮托管方法对改进结构进行测试以验证效果。通过激光器放电出光实验，对比改进前后的数据发现，提高放电区气流分布均匀性可使激光器放电注入能量、激光输出能量和重复频率提高，而且光束发散角也有一定的改善。

2　原激光器结构参数

高功率 TEA CO_2 激光器流场结构组成截面如图 1 所示。该激光器为环形流道式工作腔，由 2 台轴流风机（并联）、2 组换热器、放电腔和 4 段流道组成。主要技术参数为：单脉冲能量 20 J，重复频率 300 Hz，光束发散角 6 mrad，工作气体压力比 $P_{CO_2}:P_{N_2}:P_{He}=6:9:25$；工作总气压 80 kPa；放电区有效气流通道截面尺寸 1542 mm×40 mm（纵向×竖向）。

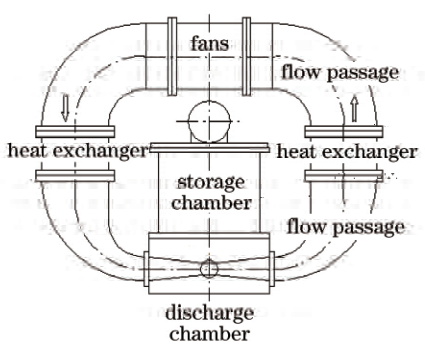

图 1　TEA CO_2 激光器流场组成截面

Fig. 1　Cross-section of flow field of TEA CO_2 laser

放电区电极间气流平均速度与气流分布均匀性采用皮托管方法测量。将气流分布均匀性分为纵向和竖向两种情况来表征。纵向是指沿光轴方向，即电极长度方向；竖向是指沿电极间距方向，即垂直光轴方向，如图 2 所示。气流纵向分布不均匀度以电极间对称中心面上纵向各点速度和各点平均速度的最大差值与平均速度的比值来表示。由于电极间距的特征尺寸小，靠近电极表面位置的气流速度几乎接近于零，不同位置气流速度相差很大，若采用与纵向相同的方法来表示气流竖向分布的均匀性，不符合实际情况，因此，根据气流在电极间的竖向分布特征，以电极间对称中心面两侧对称位置测量点的速度和对称中心面上测量点速度的最大差值与后者的比值来表示竖向分布不均匀度。

具体测试方法如下：如图 2 所示，在电极间沿纵向设置 3 排测试点，其中对称中心面 1 排，沿纵向均匀设置 15 个测试点（相邻测试点间隔约 110 mm），用于测试纵向分布不均匀度；在距离对称中心面两侧 15 mm

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

处各设置 1 排，这 2 排沿纵向均匀设置 8 个测试点（相邻测试点间隔约 220 mm），用于测试竖向分布不均匀度。由于测试时需要在放电区气流通道中安装多个皮托管探头，原激光器放电腔不能满足要求，因此制作了一套与放电腔内流场结构相同且能够安装多个皮托管探头的测试装置，代替原放电腔安装在激光器主机中构成气体循环流场。需要说明的是，后文提及的流速测试均采用此方法和测试装置进行。

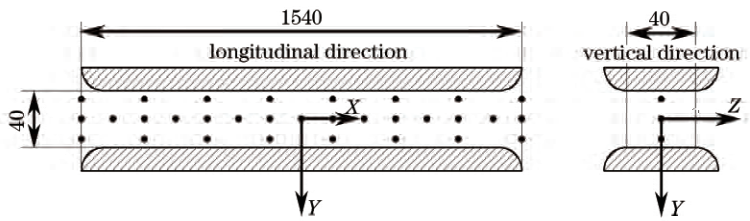

图 2　皮托管探头的布置（单位：mm）

Fig. 2　Layout of pitot probes (unit: mm)

采用上述方法测试原激光器放电区气体流速，按图 2 所示从左到右、从上到下的方向记录每一点的速度值，结果如表 1 所示。

表 1　利用皮托管测量放电区气体流速

Table 1　Gas velocity measured by pitot probes

Point	Velocity/(m·s^{-1})													
1st row	0		82.5		86.5		84.8		86.2		85.9		81.8		0
2nd row	0	90.4	94.1	96.8	98.7	99.5	97.9	98.9	98.6	97.1	97.8	97.9	94.2	91.1	0
3rd row	0		85.8		89.5		89.1		90.7		89.9		85.3		0

由表 1 可知，电极最外侧点的速度为 0，因为这些点处于有效放电区（纵向 1542 mm）外，该区域的工作气体不参与循环放电，基本处于静止状态。根据表 1 中的数据，有效放电区内工作气体的平均流速为 91.6 m/s，气流纵向分布不均匀度为 6.2%，竖向分布不均匀度为 13.4%。

3　流场模拟分析研究

3.1　CFD 原理

CFD 是通过计算机数值计算和图像显示，对包含有流体流动和热传导等相关物理现象的系统所作的分析[18-20]。CFD 的基本思想可以归结为：将原来在时间域或空间域上连续的物理量的场，如速度场和压力场，用一系列有限个离散点上的变量值的集合来代替，通过一定的原则和方式建立关于这些离散点上场变量之间关系的代数方程组，然后求解代数方程组获得场变量的近似值。故 CFD 可以看作流体动力学基本方程控制下对流动的模拟。

3.2　纵向和竖向速度分布模拟分析

由图 1 可知，风机驱动的气流经过左上流道后进入板翅式换热器进行冷却，由于板翅式换热器为多孔结构，气流经过时其速度分布均匀性得到了很大的改善，因此，左上流道结构对流速的分布均匀性影响不大。而气流经过左下流道时，没有经过换热器等装置，直接进入放电腔，故左下流道内气体流速的分布均匀性会对气体放电产生直接影响。因此，确定左下流道为研究对象，分析其对气流分布均匀性的影响，并将其作为优化改进的重点。图 3 为原激光器左下流道截面结构。

气体在流动过程中，由于摩擦力以及流道截面形状的突变等原因，既存在沿程阻力，也存在局部阻力。在弯道处，气流由于流速方向的改变必然会产生涡流[21-25]。涡流会降低气体的主动能，并且会产生由速度脉动引起的脉动切应力，这是影响气体流速及分布均匀性的主要因素。

利用 CFD 原理建立激光器的整个流场模型，划分网格，如图 4 所示。由于流场结构复杂，采用的网格类型为混合网格，主要以四面体为主，部分区域还有六面体、锥体和楔形体网格。整个模型的网格单元数为 1762147 个，节点数为 329197 个。

利用 CFD 原理计算流场特性时，其控制方程主要有质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

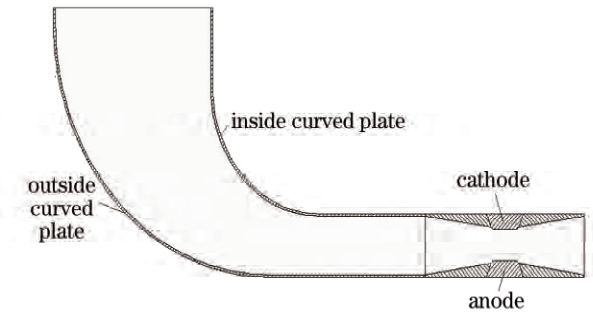

图 3　左下流道剖面示意图

Fig. 3　Cross-section diagram of lower left flow passage

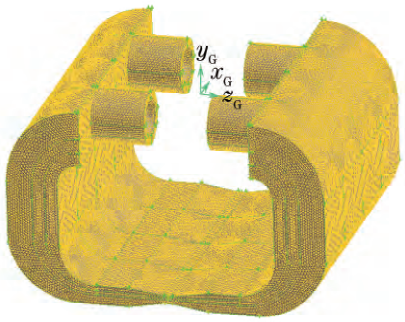

图 4　流场三维网格

Fig. 4　Three-dimensional grid of flow field

1）质量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}=0。\tag{1}$$

令 $\mathrm{div}(\boldsymbol{a})=\frac{\partial a_x}{\partial x}+\frac{\partial a_y}{\partial y}+\frac{\partial a_z}{\partial z}$，则(1)式可改写为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho \boldsymbol{u})=0,\tag{2}$$

式中 ρ 为流体密度，t 为时间，$\boldsymbol{u}$ 为速度矢量，u、v、w 分别为速度矢量 $\boldsymbol{u}$ 在 x、y 和 z 方向的分量。(1)式表示流体微元单位时间内增加的质量等于相同时间内流入的净质量。

2）动量守恒方程：

$$\frac{\partial(pu)}{\partial t}+\mathrm{div}(pu\boldsymbol{u})=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}+F_x,\tag{3}$$

$$\frac{\partial(pv)}{\partial t}+\mathrm{div}(pv\boldsymbol{u})=-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}+F_y,\tag{4}$$

$$\frac{\partial(pw)}{\partial t}+\mathrm{div}(pw\boldsymbol{u})=-\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}+F_z,\tag{5}$$

式中 p 为流体微元上的压力，τ_{xx}、τ_{xy}、τ_{xz} 等为因分子黏性作用产生的黏性应力 τ 的分量，F_x、F_y、F_z 为流体微元上的体积力。(3)～(5)式表示流体动量的变化率等于作用在微元体上的各种外力之和。

3）能量守恒方程：

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u T)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v T)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w T)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{k}{c_p}\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{k}{c_p}\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{k}{c_p}\frac{\partial T}{\partial z}\right)+S_T,\tag{6}$$

式中 c_p 为比热容，T 为温度，k 为流体的传热系数，S_T 为黏性耗散项。(6)式表示流体微元能量的增加率等于流入微元体的净热流量与体积力和面积力对微元体所做功之和。

根据各个控制方程对计算流场施加相应的边界条件，其中风机入口设为速度入口类型，出口设为出流类型，流体的密度设为常数，并选择重正化群 k-ε 湍流模块计算流体的湍流状态。计算参数设定后，利用求解器进行运算，并在计算结果中选择速度波动最大的平面，得出放电区纵向和竖向速度分布分别如图 5 和图 6 所示。图 5 中所选面为 $z=5$ 平面，图 6 中所选面为 $x=0$ 平面。由图 5、6 可知，放电区平均速度为 93.4 m/s。在图 5 和图 6 中各选择速度分布均匀性最差的一条线，其速度分布曲线分别如图 7 和图 8 所示。其中，图 7 所示为 $y=0$ 处平行于纵轴的一条线上的纵向速度分布，图 8 所示为 $z=5$ 处垂直于纵轴的一条线上的横向速度分布。由图中曲线可知，放电区气体流速的纵向不均匀度为 5.9%，竖向不均匀度为 12.8%。造成图 8 中竖向不均匀度偏大的原因在于该位置为两风机气流的交汇处，涡流大，气流的动能损失也较大。因此，该位置平均速度较低，均匀性也较差。与表 1 中的结果相比，模拟分析的误差小于 5%。

造成流速分布不均匀的主要原因是，风机驱动气流垂直向下运动，通过弯道 A、B 处(图 9)时，气流仍然有向下运动的趋势。但由于流道结构的变形，流线发生转折，造成一部分气流速度矢量发生突变，在弯道处会产生大小不等的漩涡。漩涡不仅使气流发生紊乱，造成速度分布的不均匀，而且会产生脉动切应力，增大

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

图 5　放电区纵向速度分布(单位：m·s^{-1})

Fig. 5　Distribution of longitudinal velocity in discharge chamber (unit: m·s^{-1})

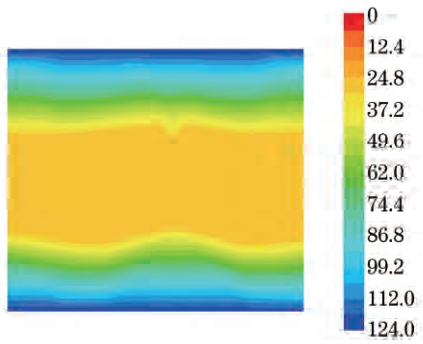

图 6　放电区竖向速度分布(单位：m·s^{-1})

Fig. 6　Distribution of vertical velocity in discharge chamber (unit: m·s^{-1})

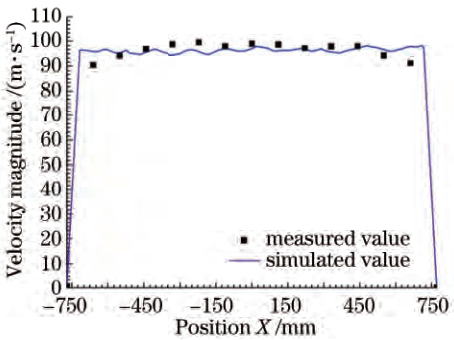

图 7　纵向速度分布曲线

Fig. 7　Distribution curve of longitudinal velocity

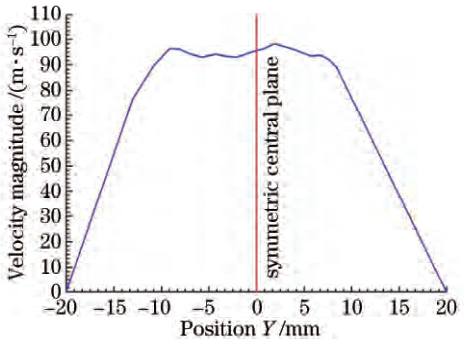

图 8　竖向速度分布曲线

Fig. 8　Distribution curve of vertical velocity

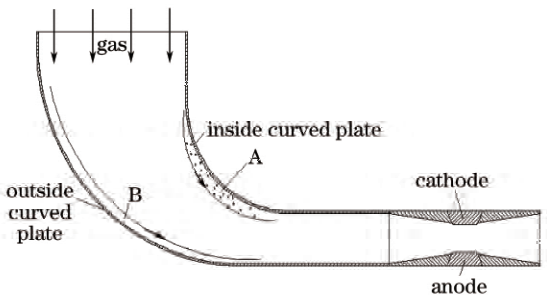

图 9　流道内的气流分布

Fig. 9　Gas flow distribution in flow passage

沿程阻力及局部阻力，从而使气体的动能减小，速度降低。

3.3　模拟改进分析

漩涡产生的主要原因是流速的突变和相邻层之间速度的差异。限制流速的突变空间可减小其突变程度，使其速度矢量变化趋于平缓。依据漩涡形成的原理在流道内增加隔板，将其整体分流，使垂直向下的气流速度变化平缓，减小相邻层之间速度的差异，从而减少漩涡的形成。依据此原理，先计算涡流产生较多以及速度变化较大的位置，然后在适当的位置依次增加 1 层、2 层和 3 层隔板，将整个流域分成多个子流域。表 2 为分别增加 1 层、2 层、3 层和 4 层隔板时，利用 CFD 原理模拟分析得到的气体流速及其分布不均匀度。

由表 2 可知，随着隔板层数的增加，放电区平均速度、速度分布均匀性都随之增加。隔板层数的增加使整个流场得到细化，流道结构的曲率变化趋于平缓，当气体经过流道时，流速的突变程度降低，产生的漩涡也相应减少，由此产生的脉动切应力及其他阻力均有所减小。因此，放电区的流速及分布均匀性得到相应提高。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2　采用不同数量隔板时的速度分布

Table 2　Velocity distribution with different layers of clapboards

Number of clapboards	Average velocity /(m·s^{-1})	Non-uniformity in longitudinal direction /%	Non-uniformity in vertical direction /%
0 (original structure)	93.4	5.9	12.8
1	97.3	5.6	10.9
2	98.8	5.3	8.5
3	99.7	5.1	6.8
4	98.2	4.9	5.9

当增加到 4 层隔板时，气流在纵向和竖向上的均匀性虽有提高，但其平均流速降为 98.2 m/s。造成这一现象的原因是随着流域的增加，流体与固体接触的边界层也增大，流体与隔板产生的摩擦阻力相应增加，从而造成平均流速的降低。流速降低会影响激光器的放电重复频率。从加工工艺角度考虑，随着流域的增加，整个流道的加工也变得更为困难。

综合考虑压力损失、加工工艺和结构质量等因素，改进方案选用 3 层隔板，优化改进后流速的纵向和竖向分布曲线分别如图 10 和图 11 所示。

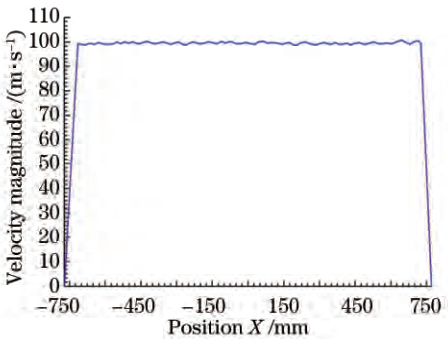

图 10　3 层隔板时纵向速度分布曲线

Fig. 10　Distribution curve of longitudinal velocity with three layers of clapboards

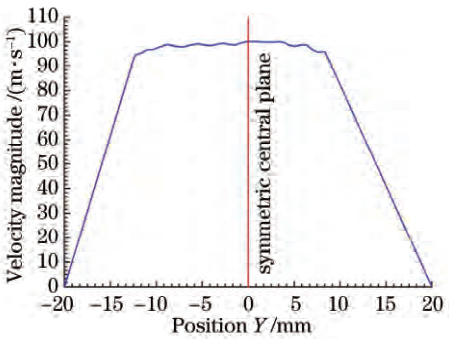

图 11　3 层隔板时竖向速度分布曲线

Fig. 11　Distribution curve of vertical velocity with three layers of clapboards

4　测试与实验

激光器放电重复频率和激光平均功率与气体流动速度成正比，根据该原理，流场优化后的激光器提高了气流平均速度，其重复频率也相应增加。因气流分布均匀性得到了改善，注入能量和激光输出能量也会相应增加，同时激光的传输环境也得到改善，发散角会有所减小。

根据模拟分析优化结果制作具有 3 层隔板的流道，其剖面示意图如图 12 所示，利用此结构进行激光器的放电测试和实验。首先利用皮托管测量速度参数，分别测出平均速度及速度的纵向和竖向分布不均匀度；然后进行重复频率放电实验，测量激光器的注入能量和输出能量，并测量重复频率和激光光束远场发散角。

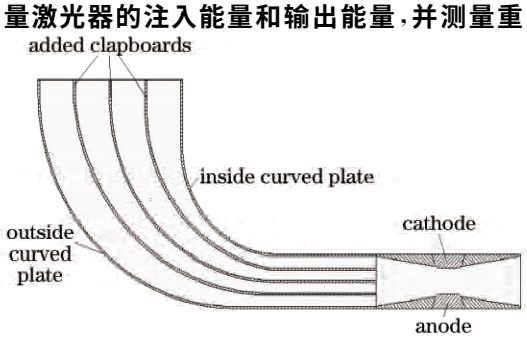

图 12　3 层隔板时流道结构示意图

Fig. 12　Diagram of flow passage structure with three layers of clapboards

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 3　优化前后的实验结果对比

Table 3　Comparison of experiment results before optimization and after optimization

Measured item	Average velocity /(m·s^{-1})	Non-uniformity in longitudinal direction /%	Non-uniformity in vertical direction /%	Repetition rate /Hz	Injected energy /J	Output energy /J	Divergence angle /mrad
Original structure (without clapboards)	91.6	6.2	13.4	300	160	20	6
After optimization (three layers of clapboards)	99.3	5.2	7.1	365	171.5	21.8	5.5

由表 3 可知，与改进前相比，改进后放电腔内气流的平均速度、不均匀度等都得到改善。激光器在重复频率、单脉冲注入能量、输出能量及发散角等方面也得到了一定的改善。这主要是因为当气体均匀性增加时，放电区内各方向气体浓度梯度降低，气体放电时电流密度均匀性增加，在一定程度上抑制了弧光放电的产生，提高了辉光放电的稳定性。因此，激光的重复频率、注入能量以及输出能量都会相应增加。气体均匀性增加，激光的传输环境得到改善，因此激光光束远场发散角有所减小，而激光器出口激光光斑大小和形状均无变化。

5　结　　论

利用有限元方法分析放电区气体平均流速及速度分布均匀性，由分析结果可知，漩涡及流固接触边界层会降低流速并增大其分布不均匀度。通过增加隔板的方法对整个流场结构进行优化，即在原流场结构的适当位置增加 3 层隔板。优化后放电区平均流速为 99.3 m/s，其纵向不均匀度为 5.2%，竖向不均匀度为 7.1%。激光器重复频率由 300 Hz 提高到 365 Hz，注入能量由 160 J 提高到 171.5 J，输出能量由 20 J 提高到 21.8 J，激光光束远场发散角由原来的 6 mrad 减小至 5.5 mrad。激光器整体性能得到提高，且已应用于工程领域。

参　考　文　献

1　Wu Jin, Lu Yuantian, Wang Donglei, *et al.*. Novel long pulse TE CO_2 laser with 1.5 kW average output power[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(7): 1697-1703.
吴　谨，卢远添，王东蕾，等. 1.5 kW 新型长脉冲 TE CO_2 激光器[J]. 中国激光，2010，37(7)：1697-1703.

2　Shao Chunlei, Yang Guilong, Li Dianjun, *et al.*. 9.3 μm branch selection research of high power pulse CO_2 laser[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0302008.
邵春雷，杨贵龙，李殿军，等. 高功率脉冲 CO_2 激光器 9.3 μm 波长选支研究[J]. 中国激光，2011，38(3)：0302008.

3　Shao Chunlei, Song Xiaofeng, Zhang Laiming, *et al.*. High power TEA CO_2 laser with two wavelength free shift output structure[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(2): 429-436.
邵春雷，宋晓峰，张来明，等. 高功率 TEA CO_2 激光器的双波长免调切换结构[J]. 光学 精密工程，2011，19(2)：429-436.

4　Wu Wuming, Leng Jinyong, Zhou Pu, *et al.*. Research progress of high average power electric-energy laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(2): 204-209.
吴武明，冷进勇，周　朴，等. 高平均功率电能激光器研究进展[J]. 红外与激光工程，2011，40(2)：204-209.

5　Ji Hongxu, Tan Rongqing, Liu Shiming, *et al.*. Grating line selectable TEA CO_2 laser with tubulous preionizer[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(9): 2389-2394.
吉洪煦，谭荣清，刘世明，等. 基于管状预电离的光栅选线 TEA CO_2 激光器[J]. 中国激光，2010，37(9)：2389-2394.

6　Razhev A M, Churkin D S. Pulsed inductive discharge gas lasers[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(2): 238-251.
Razhev A M, Churkin D S. 脉冲诱导放电气体激光器[J]. 光学 精密工程，2011，19(2)：238-251.

7　Zhong Rutao, Xiong Zheng. Research on continuous/pulse laser cladding superalloy K403[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(3): 852-857.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

钟如涛，熊　征. 连续/脉冲 CO_2 激光熔覆高温合金 K403[J]. 中国激光，2010，37(3)：852-857.

8 Hasson V. Review of recent advancements in the development of compact high power CO_2 laser radar system[C]. SPIE，1999，3707：499-512.

9 Cao Jianjian，Liang Siyuan，Li Dianjun. Experimental research on UV-preionized TEA CO_2 laser[J]. Laser & Infrared，2008，38(2)：128-131.

曹建建，梁思远，李殿军. 紫外预电离 TEA CO_2 激光器的实验研究[J]. 激光与红外，2008，38(2)：128-131.

10 Ivashchenko M V，Karapuzikov A I，Malov A N，*et al.*. A TEA CO_2 laser with a peak radiation power of 100 MW[J]. Instruments and Experimental Techniques，2000，43(1)：119-125.

11 Benerji N S，Varshnay N，Abhinandan L，*et al.*. A compact spark pre-ionized pilser sustainer TE CO_2 laser[J]. Sadhana，2004，29(3)：297-303.

12 Wang Hongxuan. Design of preionization in fast axial flow CO_2 lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress，2014，51(12)：121405.

王红宣. 轴快流 CO_2 激光器预电离设计[J]. 激光与光电子学进展，2014，51(12)：121405.

13 Wang Tingfeng，Tang Wei，Shao Junfeng，*et al.*. Analysis of temperature and damage characteristics of HgCdTe crystal on repetition frequency of CO_2 laser[J]. Chinese J Lasers，2015，42(2)：0206006.

王挺峰，汤　伟，邵俊峰，等. 高重复频率 CO_2 激光重复频率大小对 Hg Cd Te 晶体温升及损伤特性影响分析[J]. 中国激光，2015，42(2)：0206006.

14 Shao Chunlei. Design of gas circulation system in high power TEA CO_2 laser[J]. High Power Laser and Particle Beams，2009，21(1)：1-5.

邵春雷. 高功率 TEA CO_2 激光器气体循环系统的设计[J]. 强激光与粒子束，2009，21(1)：1-5.

15 Pan Qikun，Xie Jijiang，Shao Chunlei，*et al.*. High power electric-discharge non-chain pulsed DF laser[J]. Chinese J Lasers，2015，42(7)：0702001.

潘其坤，谢冀江，邵春雷，等. 高功率放电引发非链式脉冲 DF 激光器[J]. 中国激光，2015，42(7)：0702001.

16 Brown R. High repetition-rate effects in TEA laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics，1973，9(11)：1120-1122.

17 Zhang Yeying. Fluid mechanics[M]. Beijing：Higher Education Press，1998：170-173.

张也影. 流体力学[M]. 北京：高等教育出版社，1998：170-173.

18 Wang Chao，Shao Chunlei. Application of CFD in the research of the flow field of impulse gas laser′s sparkle switch[J]. Computer Simulation，2008，25(10)：323-327.

王　超，邵春雷. 应用 CFD 研究脉冲气体激光器火花开关流场[J]. 计算机仿真，2008，25(10)：323-327.

19 Soong C Y. CFD application to analysis of transport phenomena and epitaxial uniformity of semiconductor thin-film growth in rotating MOCVD reactors[C]. 4th Cross-Strait CFD Workshop，Kunming，2003：61-69.

20 Wang Fujun. Computational fluid dynamics analysis[M]. Beijing：Tsinghua University Press，2004.

王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京：清华大学出版社，2004.

21 Zhang Yeying. Fluid mechanics[M]. Beijing：Higher Education Press，1998：136-137.

张也影. 流体力学[M]. 北京：高等教育出版社，1998：136-137.

22 Hazins V M. Large eddy simulation approach in problems on floating up of high-temperature thermals in stratified atmosphere[J]. High Temperature，2010，48(3)：402-410.

23 Shen Z，Li Y P，Cui G X，*et al.*. Large eddy simulation of stably stratified turbulence[J]. Physics，Mechanics & Astronomy，2010，53(1)：135-146.

24 Vasin A V，Timofeeva O A. Modeling zones of eddy currents in water-supply galleries of locks[J]. Power Technology and Engineering，2013，47(2)：114-118.

25 Hassanzadeh R，Sahin B，Ozgoren M. Large eddy simulation of flow around two side-by-side spheres[J]. Journal of Mechanical Science and Technology，2013，27(7)：1971-1979.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net