

高功率 TEA CO₂ 激光器主机流场优化研究

邵春雷

(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: 为提高 TEA CO₂ 激光器放电区气流分布均匀性, 解决手工计算方法无法对复杂流场进行全面准确分析的问题, 采用计算流体动力学 (CFD) 方法, 应用 Fluent 软件对激光器主机流场进行计算模拟, 分析确定了影响因素。通过对流场进行优化改进, 使放电区气流分布不均匀度纵向由 8.3%降低到 5.2%, 横向由 2.3%降低到 0.78%, 从而使激光器稳定放电重复频率由 330 Hz 提高到 405 Hz。

关键词: TEA CO₂ 激光器; 高重复频率; 主机流场; 计算流体动力学; 气流均匀性

中图分类号: TN248.2

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI 20102712.0119

Optimizing Study on Main Frame Flow Field of High Power TEA CO₂ Lasers

SHAO Chun-lei

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

Abstract: In order to improve the airflow uniformity in discharge zone of TEA CO₂ Lasers, and solve the problem that manual calculation can not analysis on complicated flow field comprehensively and accurately, it ascertains the influencing factor by Fluent software, using the method of computational fluid dynamics (CFD) to simulate the main frame flow field of the laser. Through optimizing and improving the flow field, the nonuniformity of airflow in discharge zone longitudinally decreases from 8.3% to 5.2%, and transversely decreases from 2.3% to 0.78%. Thereby the stable discharge repetition rate increases from 330 Hz to 405 Hz.

Keywords: TEA CO₂ laser; high repetition rate; main frame flow field; computational fluid dynamics; airflow uniformity

1 引言

TEA CO₂ 激光器不仅兼有高平均功率、高重复频率和高峰值功率,还能进行调谐选支与倍频输出^[1-2],在激光加工、激光雷达、激光推进、激光大气传输和激光化学等领域具有重要的应用价值^[3-6]。高功率 TEA CO₂ 激光器采用脉冲重复频率横向放电激励,放电区为一狭长的方形通道,工作物质为 CO₂、N₂、He 3 种气体按比例混合,在密闭条件下循环流动,工作压力接近于大气压。为得到高重复频率下的高能激光输出,需要实现高能量大体积均匀稳定的高重复频率脉冲辉光放电^[7]。对于窄脉冲气体放电来说,大电流是弧光放电的特征,气压越高,注入能量越大,会使辉光放电向弧光放电转变的概率增加,而放电区的气体扰动引起气压与温度分布的不均匀性及等离子体的热不稳定性也会大大导致这个转变的发生^[8]。研究已表明,在其他条件不变的情况下,放电频率与气流速度及分布均匀性成正比^[9]。因此,混合工作气体的流速不仅要保证在两个放电脉冲的间隔时间内完全移出放电区,还要在放电区分布非常均匀。然而,由于激光器总体结构体积的限制,主机流场没有拓展的空间且不顺畅,采用手工方法经过准确的设计计算虽然可以达到放电区气流速度的要求,但放电区气流分布均匀性却难以保证。另外,在放电区气流速度及均匀性的测量方面通常是采用皮托管^[10]方法,即使在放电区设置很多个测量探头,也只能是从宏观上粗略检测,不能从微观上全面地分析判断。近年来兴起的计算流体动力学^[11] (以下简称 CFD),因其建立在经典流体动力学与数值计算方法基础上,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计算。本文采用 CFD 方法对激光器主机流场进行模拟仿真,按照分析结果对流场进行优化改进,较大地改善了放电区气流分布均匀性,从而提高了激光器的稳定放电重复频率。

2 TEA CO₂ 激光器主机流场结构

高功率 TEA CO₂ 激光器主机流场由放电腔、风机、热交换器和导流装置构成。为适合工程应用要求,本文激光器主机采用环形通道式结构(如图 1 所示),与通常圆筒式、方箱式腔体结构相比,体积重量减少 30%以上,具有良好的维修性。系统采用两台轴流压气机并联设置,两组换热器对称串联设置,与四段真空流道腔和放电腔构成环形密闭工作腔。风机出入口采用金属波纹管联接,以减少振动传递。放电腔内结构如图 2 所示,由紧凑式 Chang 电极对、两侧预电离火花针阵列及绝缘导流板构成。

主机流场结构设计要点是提高放电区气流速度均匀性和减小压力损失。放电腔内流场在保证高压电绝缘要求前提下尽量减少流道尺寸的突变和电极与绝缘板结合处的高度差,使结构对称。导流装置设计使两台风机在纵向(垂直纸面方向)并联设置独立通道且处于流场中心对称位置,并将每台风机出口流道截面按等面积分割成多个通道,流道中导流板位置的设置原则是使形成的各个并联气流通道的压力损失基本相同。

该激光器主要技术指标与设计参数如下:重复工作频率 400 Hz,工作气体比例 CO₂:N₂:He=6:9:25,工作气压 0.8×10^5 Pa,混合气体密度为 0.59 kg/m^3 ,动力粘度为 $1.945 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,放电区电极间距 40 mm,电极宽度 45 mm,放电区流道纵向长度 1 600 mm,按重复频率要求放电区气流速度 $\geq 80 \text{ m/s}$ 。由于放电

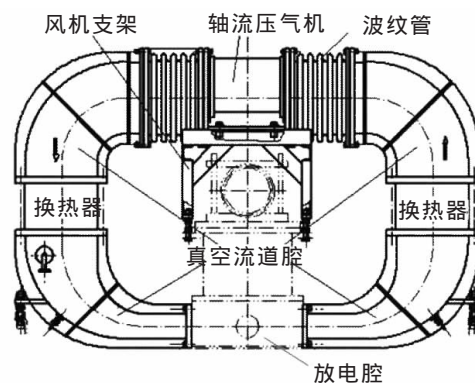


图 1 激光器主机横截面示意图

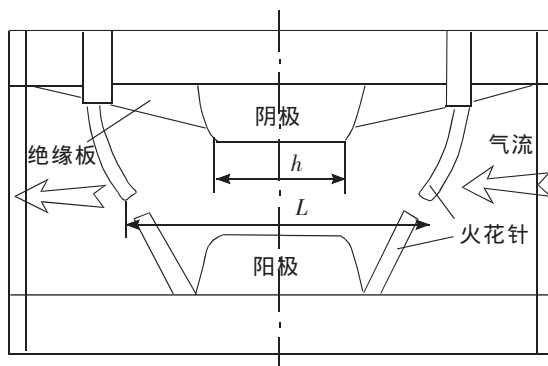


图2 放电腔内横截面示意图

区是一个狭长的流道截面，通常要求气流在纵向的均匀性，然而，气流在横向（放电方向）的均匀性同样会对放电稳定性产生影响，因此，设计上对放电区气流均匀性的参数要求是：纵向 $\leq 6\%$ ，横向 $\leq 1\%$ 。

在主机流场完成装配后，为检测气流在放电区两个方向的均匀性，采用皮托管进行流速测量，在电极间对称中线上沿纵向均匀设置7个点测量纵向气流分布参数；在这7点中取3处，每处在电极间沿横向设置2点测量横向气流分布参数。该方法采用以下公式来计算平均流速：

$$V = \kappa \varphi \sqrt{2\Delta p / \rho} \quad (1)$$

其中， V 为截面平均流速， κ 为分布系数， φ 为流速修正系数， Δp 为测量点压力差， ρ 为流体密度。

经测算，在系统设计参数下，纵向各点平均流速的平均值为 87.8 m/s，达到设计要求；纵向流速不均匀度为 9.7%，横向流速的不均匀度为 2.8%，两项都没有达到设计要求。在此状态下进行调试，激光器最高稳定放电重复频率只达到 330 Hz。由于这种检测方法粗略，难以对影响因素进行准确分析，拟采用 CFD 方法对流场进行模拟仿真，并对流场结构进行优化改进，以满足激光器的重复工作频率要求。

3 CFD 基本原理

CFD 是英文 Computational fluid dynamics（计算流体动力学）的简称，它是指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

理现象的系统所做的分析。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起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 可以看做是在流体动力学基本方程控制下对流动的模拟，可以认为 CFD 是现代模拟仿真技术的一种。下面使用 CFD 商用软件 Fluent^[12] 来对主机流场进行计算分析。

4 主机流场模拟分析与优化改进

4.1 建立三维网格

在使用 Fluent 求解问题之前，需要将激光器主机流场建立三维网格。按照实际结构尺寸，采用 UG 绘图软件绘制出三维几何图形（如图 3 所示），然后应用 Fluent 的前处理软件 Gambit 读入图形并对其进行网格划分。由于图形比较复杂，所以采用的网格类型为混合网格，主要由四面体组成，个别位置还

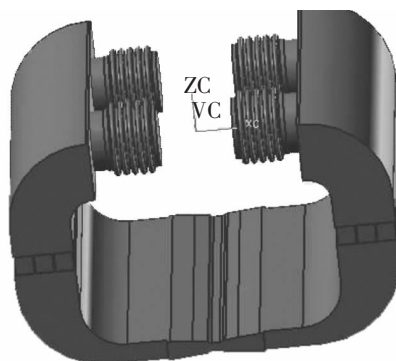


图3 主机流场三维几何图

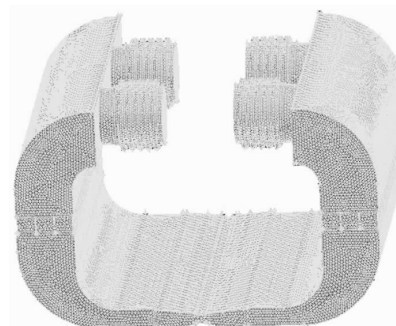


图4 主机流场三维网格图

有六面体、锥体或楔形体。在对计算域内的所有流体区域和各壁面、进口、出口等的属性和名称定义完成后,输出网格文件,生成的三维网格如图4所示。

4.2 设定计算参数

接下来需要按照流场各技术参数来设定各种计算参数,其中包括选择求解器、确定计算模型、指定材料属性、设置工作压力和边界条件、设定求解控制参数等。在 Fluent 中,需要激活相应方程和模块。选择求解器为三维稳态分离式求解器隐式方法,在能量面板中激活求解能量方程,并且选择 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模块解决流体的湍流流动问题。在其他参数设置中,结合研究经验,考虑到流场气体进出口压差相对于工作压力较小、且温度变化也较小,把介质近似看作不可压流体,因此,将气体密度定义为常数。在对不可压流体的 N-S 方程求解时,采用 SIMPLEC 算法解决速度与压力的耦合问题。在边界条件定义中,进口设成 Velocity-inlet 速度进口类型,出口设成 Outflow 出流类型。

4.3 计算结果

在 Fluent 中初始化流场后,进行迭代计算,迭代到 550 次,求解器停止迭代,计算收敛。在放电区电极对称中心位置沿纵向创建一个中间截面(如图5所示),以分析气流在中间截面的流速以及沿不同方向速度变化情况。由 Fluent 得到中间截面速度分布如图6所示,通过 Fluent 计算得到该截面的平均速度为 89.69 m/s,与前面的测试结果接近。在中间截面上分析气流速度分布情况,纵向分布如图7

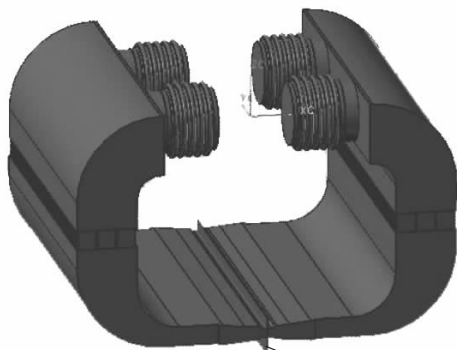


图5 放电区中间截面位置图

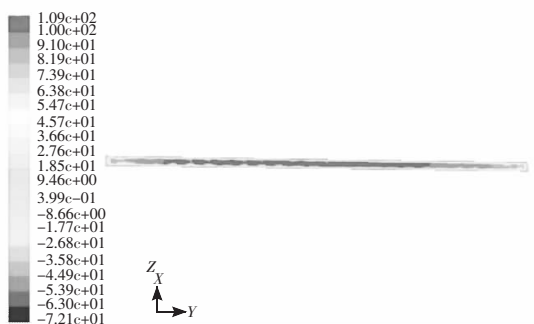


图6 放电区中间截面纵向速度图

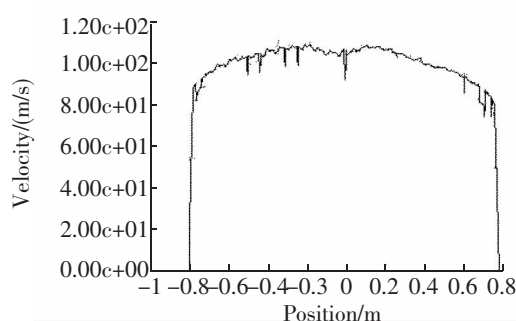


图7 原结构纵向速度分布

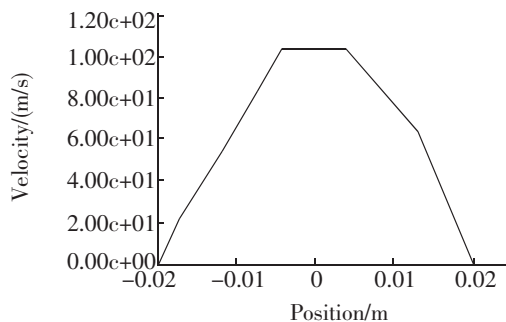


图8 原结构横向速度分布

所示, Fluent 计算纵向分布不均匀度为 8.3%; 横向分布如图8所示, Fluent 计算横向分布不均匀度为 2.3%。

4.4 分析与优化改进

针对图7分析纵向气流分布情况。通过 Fluent 计算不仅流速分布均匀性较差,而且在较多位置有气流速度突变现象(图中毛刺),这会导致辉光放电向弧光放电转变的概率增加。气流分布均匀性差的原因可能有以下两个方面:一是两台风机的气流特性不会完全相同,这无法改变;二是导流板沿纵向

设置的较少且有尺寸误差,这可以通过增加导流板纵向设置数量及控制加工精度来改进。气流突变的原因可能是放电腔内绝缘板(如图2所示)位置斜度和面型凸凹差(为增加绝缘距离)较大而产生的,使气体从放电腔进口流动到电极容易产生湍流漩涡,并且因结构与气流参数确定气流在电极间的状态是介于层流和湍流之间的过渡流,过渡流的特征就是随机性和不确定性。改进的思路是加长放电腔进口到电极以及电极到放电腔出口的距离,以减小放电腔绝缘板的位置斜度,并在满足绝缘要求的条件下尽量减小绝缘板的凸凹面型差。

针对图8分析横向气流分布情况。从图8可看出,气流分布均匀性差的状况是气流在横向分布很不对称,这也可能有两方面原因:一是放电腔阴极绝缘板与阳极导流板面型不同造成的,因阳极导流板(如图2所示)不需要绝缘功能,为平整表面,而阴极绝缘板为凸凹表面,从而对气流影响不同。改进的思路是使阳极导流板面型与阴极绝缘板面型一致。二是导流装置在横向的导流隔板主要是按几何均分结构尺寸来设计的,而气流在循环流动时里侧与外侧通道因流阻的不同,其流量也不同,从而也会造成流速分布不同。改进的思路是采用Fluent软件模拟横向流场阻力分布,以内外侧达到相同流速的原则来设置导流隔板。

按分析结果对主机流场进行优化改进,采用

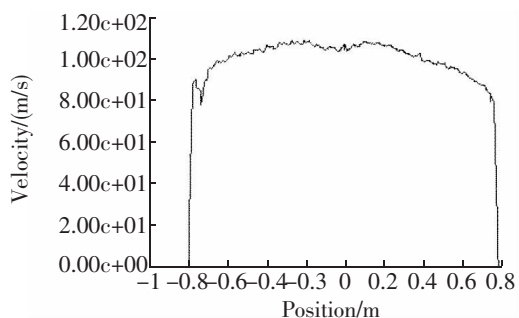


图9 改进结构纵向速度分布

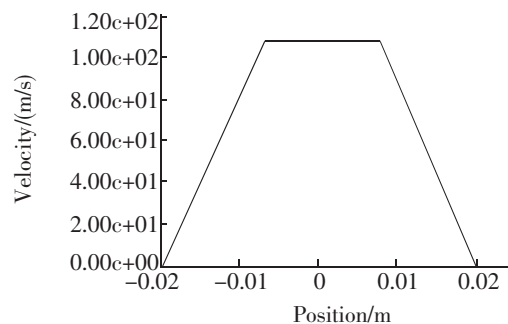


图10 改进结构横向速度分布

Fluent软件重新进行计算模拟,得到气流纵向分布如图9所示,速度突变大幅度减少;横向分布如图10所示,气流分布很对称,与之前比较都有了很大的改善。经Fluent计算得到放电区纵向气流分布的不均匀度为5.2%,横向气流分布的不均匀度为0.78%,满足设计均匀性要求。在此状态下进行调试,激光器最高稳定放电重复频率达到了405 Hz。

5 结 论

对于TEA CO₂激光器较为复杂的主机流场结构来说,采用手工计算方法和传统的检测方法难以进行全面准确的分析。近年来兴起的CFD方法建立在经典流体动力学与数值计算基础上,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,可对复杂流场进行精确的计算。本文采用CFD方法中的Fluent软件,通过对流场进行模拟仿真,分析确定了影响放电区气流均匀性的因素,据此对流场进行优化改进,使放电区气流分布不均匀度纵向由8.3%降低到5.2%,横向由2.3%降低到0.78%,从而使激光器稳定放电重复频率由330 Hz提高到405 Hz。研究表明,CFD方法可对激光器主机流场进行精确的模拟计算,能够指导对流场的准确设计和优化改进。同时也表明,放电区气流均匀性对激光器放电重复频率有很大影响。

参考文献

- [1] 廖均梅, 李育德, 李忠华, 等. 可调谐 TEA CO₂ 激光器多频输出[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(10): 1459–1461.
- [2] 李殿军, 杨贵龙, 谢冀江, 等. 9.3 μm 脉冲 CO₂ 激光倍频试验[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(11): 2684–2691.
- [3] Karapuzikov A I, Malov A N, Sherstov I V. Tunable TEA CO₂ laser for long-range DIAL lidar[J]. *Infrared Phys. & Technol.*, 2000, 41(2): 77–85.
- [4] 谢冀江, 李殿军, 张传胜, 等. 声光调 Q CO₂ 激光器[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(5): 1008–1013.
- [5] 卢远添, 吴谨, 王东蕾, 等. 大能量长脉冲 TE CO₂ 激光器[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(9): 1437–1440.
- [6] Hasson V. Review of recent advancements in the development of compact high power CO₂ laser radar system[J]. *SPIE*, 1999, 3707: 499–512.
- [7] 耿玉民. 高功率高重频 TEA CO₂ 激光器均匀场放电电极设计[J]. 光机电信息, 2010, 27(10): 39–44.
- [8] 庄国良, 褚成. 激光等离子体原理[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1981: 149–174.
- [9] Brown R T. High repetition-rate effects in TEA laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1973, QE-9(11): 1120–1122.
- [10] 李诗久. 工程流体力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1980: 204–207.
- [11] 王福军. 计算流体动力学分析—CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 1–4.
- [12] 王瑞金. Fluent 技术基础与应用实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 1–2.

作者简介: 邵春雷 (1963–), 男, 汉族, 黑龙江牡丹江人, 学士, 研究员, 硕士生导师, 1984年于东北工学院获得学士学位, 主要从事高功率脉冲气体激光器研究。E-mail: sclem@sina.com