

文章编号: 1001-3806(2010)04-0525-04

## 轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器放电管结构的研究和设计

李 晴, 王又青\*, 黄鸿雁

(华中科技大学 光电子科学与工程学院 激光加工国家工程研究中心, 武汉 430074)

**摘要:** 为了深入了解高功率轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器放电管结构和内部流场对激光器工作性能的影响, 得到更均匀稳定的辉光放电, 采取对放电管内部工作气体的流动状态分别进行数值模拟和实验的方法, 得到了关于放电等离子体的流场分布数据, 数值模拟结果和实验结果一致, 并对不同结构的管内的流场和放电表现进行了比较和分析, 设计了一种新结构的放电管。结果表明, 放电管内的流场特性影响着辉光放电的均匀性和稳定性, 新设计的放电管内能得到更均匀的辉光放电, 但还需进一步优化。

**关键词:** 激光器; CO<sub>2</sub> 激光器; 轴快流; 放电管; 流场; 数值模拟

**中图分类号:** TN248.2<sup>+</sup>2 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2010.04.025

### Research and design of discharge tube structure of fast-axial-flow CO<sub>2</sub> lasers

LI Qing, WANG You-qing, HUANG Hong-yan

(National Engineering Research Center of Laser Processing, College of Optoelectronic Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to grasp the influence of the discharge tube structure on the flow field and working performance of a high power CO<sub>2</sub> laser and get a more uniform and stable glow discharge, numerical simulation of the flowing status in discharge tube was done and the computational results matched the experiments results well. The flow fields of different tubes were compared. A new discharge tube structure was designed. The results showed that the flowing field characteristics influenced the uniformity and stability of the glow discharge in tubes. A more uniform flow field and discharge could be got in the new tube needing more optimization.

**Key words:** lasers; CO<sub>2</sub> laser; fast-axial-flow; discharge tube; flow field; numerical simulation

## 引 言

高功率轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器以其优良的光束性能在工业加工领域已得到广泛应用, 如切割、焊接、表面处理等等。为了深入了解激光等离子体的特性和分布, 获得更好更稳定的激光输出, 对此类激光器的研究一直在进行<sup>[1-10]</sup>。放电管是激光器系统中的关键部件之一, 其外型结构直接影响到工作气体放电时的流场分布, 而快流激光器正是靠流场的湍流和扩散效应来降低激光等离子体的不均匀性, 所以, 放电管结构设计是激光器结构设计中至关重要的一环, 关系到放电的稳定性和均匀性, 以及激光器的出光效率。

轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器的放电管通常为普通的圆柱

型玻璃管, 一般只有入口的阳极端和出口的阴极端的结构有少许变化。另外也有一些结构较复杂的放电管, 如华工激光科微晶公司生产的轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器中使用的放电管和国外激光器制造商 (ROFIN-SI-NAR) 生产的系列轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器中使用的放电管。研究对象是适用于直流激励的, 输出功率为 3500W 的轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器的两种不同结构的放电管, 其具体结构将在下文中介绍。轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器的增益区共有 12 根相同的放电管, 工作气体由一个涡轮风机带动, 风机两侧分别装有一个气-液热交换器来进行冷却。作者通过对两种不同结构的放电管分别进行数值模拟和实验验证, 分析了两者的放电时的表现和流场变化, 总结了两者的优缺点, 提出了设计放电管的新思路。

## 1 现有放电管结构比较

目前一种最常见的高功率轴快流激光器使用的放电管为普通的十字型管, 结构如图 1 所示。而另一种

作者简介: 李 晴 (1983-), 女, 博士研究生, 主要从事高功率轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器数值模拟的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: YQWang13@163.com

收稿日期: 2009-03-19; 收到修改稿日期: 2009-05-11

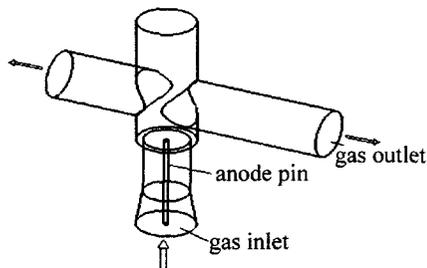


Fig. 1 The geometry of inlet structure of the tube a

同样功率输出的激光器采用的是入口处有外部绕流的放电管,工作气体从外部绕流环经过以后再从阳极与中心管之间的小孔进入放电管,其结构如图2所示。

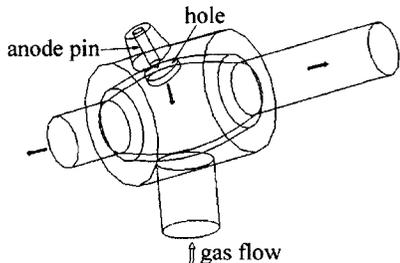


Fig. 2 The geometry of inlet structure of the tube b

需要说明的是,除了图示入口处局部结构的不同之外,两种放电管的内径和长度都是一样的,内径均为19mm,从阳极到阴极的放电长度也都是215mm,这样才能保证计算结果的比较是有意义的。

通过放电实验发现两种放电管在不同大小电功率激励下的放电表现有所不同。前者在最大电功率注入时都能产生正常的辉光放电,但都在激活区前半段(即中心管靠近阳极部分)有拉丝和不均匀的现象。后者在注入电功率较小时整段激活区产生的辉光放电都十分均匀和稳定,但在最大电功率注入时会产生弧光放电现象。具体实验结果见表1。

Table 1 Experiment observations

discharge characteristics	tube a	tube b
2800W output	normal glow discharge	normal and uniform glow
3500W output	normal but non-uniform glow discharge	arc occasional glow discharge
temperature rise at 3500W	108K	135K

除了实验之外,本文中还对这两种放电管内部流场进行数值模拟,该模型由包括了电流热效应,对流传热和湍流效应的一系列流体力学基本方程建立而成,通过FLUENT软件求解,得到了在相同边界条件下两种放电管的流场分布。FLUENT是专业的计算流体动力学分析软件,十分适合高速可压流体的流场分布的计算,采用有限体积法离散控制偏微分方程,并且有很强大的计算结构后处理功能,有助于获得更多放电管内的流体

特性分布<sup>[11]</sup>。FLUENT软件中运用的有限体积法可理解为将每一个有限体积元上的差分方程综合在一起,然后转化为代数方程进行数值求解。FLUENT对代数方程中任意变量 $\theta$ 在 $p$ 点的解的形式为:

$$a_p \theta_p = \sum a_{nb} \theta_{nb} + s_\theta \quad (1)$$

式中, $\theta$ 指求解变量, $a_p$ 和 $a_{nb}$ 分别表示求解变量在节点 $p$ 和相邻节点的系数, $s_\theta$ 指的是变量 $\theta$ 的源项。解的过程是通过“逐行”求解器完成的,此求解器是通过产生一个三对角矩阵,然后再用高斯消去法去求解<sup>[12]</sup>。

模型中设置的边界条件应尽量与真实实验环境一致,a管数值模型中设置的具体边界条件类型如表2所示。因为在同样的室温工作环境下工作,风机的压

Table 2 Specifications of boundary conditions used in computation

types of boundary conditions	values
ratio of working gas composition $V(\text{CO}_2) : V(\text{N}_2) : V(\text{He})$	4.2 : 27.5 : 68.3
specific heat at constant pressure of working gas	1943J/(kg·K)
thermal conductivity of working gas	0.143W/(m·K)
viscosity of working gas	$2.313 \times 10^{-5} \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$
total pressure at inlet	18400Pa
temperature at inlet	293K
turbulence kinetic energy at inlet	$166 \text{m}^2/\text{s}^2$
turbulence dissipation rate at inlet	$246100 \text{m}^2/\text{s}^3$
heat source item	$1.15 \times 10^7 \text{W}/\text{m}^3$

比不变,气体比例成分也一样,所以,两种放电管的数值模型的边界条件和物性参量基本相同,不同的是入口的湍动能和湍流耗散率,因为两者入口半径大小不同,而充分发展的湍流的湍动能和湍流耗散率与流道半径大小有关,其计算方法可参考FLUENT用户使用手册<sup>[13]</sup>。b管中的入口湍动能和湍流耗散率经计算分别为 $173 \text{m}^2/\text{s}^3$ 和 $260822 \text{W}/\text{m}^3$ 。

通过在FLUENT导入模型,设置经计算机进行计算得到的数值结果也和实验结果一致,其中热源项即激光器注入的电功率转换成热量的一部分。

图3和图4分别是a管和b管内沿轴向的速度分布图。其中曲线A代表了放电管中心线的速度分布,曲线B代表了管内上端与中心线平行且距中心线5mm处的速度分布,曲线C代表管下端对称位置的平行线上的速度分布。由两图比较可知,a管内除末端出口的速率比较平均以外,前大半段3个位置的速率值跨度很大。靠上端的地方速率大,下端的地方速率小,最大达到250m/s,最小只有50m/s,相差200m/s。而b管的速度分布则比较平均,只在入口处的前1/4

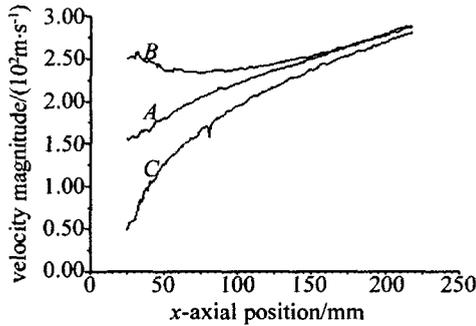


Fig. 3 Plots of the velocity magnitude versus axial length in tube a

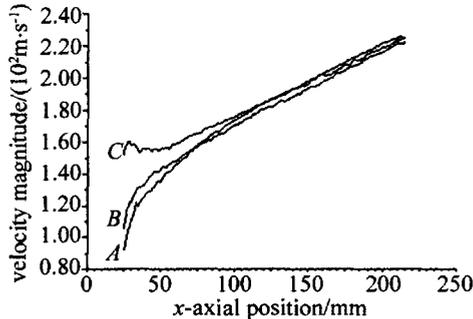


Fig. 4 Plots of the velocity magnitude versus axial length in tube b

处有些差别,速率最大值和最小值只相差 60m/s,而其它大部分区域的速度都很均匀一致。

由此可见,在同样的压降下,a管的流速快,质量流量也较大,能出较大功率,但管内速度分布和湍流强度都很不均匀,管中靠近阳极区域的气体流速很低,正好对应放电实验时出现拉丝和不均匀现象的位置,是造成气体放电时等离子体的不均匀和不稳定的主要原因。b管流速稍低,流量较小,气体温升较大,当较大功率时容易产生弧光放电,降低输出功率时,由于其内部速度场和湍流场都很平均,所以能得到十分均匀和稳定的辉光放电。若采用压比更高的风机,能提高第2种管(b管)的两端的压降,使其中工作气体的流量增高,流速也相应增高,温升下降,则能在提高输出功率的同时避免弧光放电的产生。

## 2 新放电管结构

比较可知,b管在放电均匀性和稳定性上优于a管,但其结构复杂,加工难度大,成本高。为了以最低成本取得最佳效果,采取了一种折中的办法,即对b管进行简化改进,得到如图5所示的新结构的放电管c

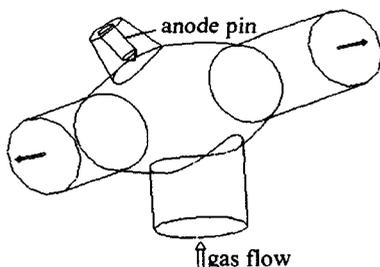


Fig. 5 The geometry of inlet structure of the tube c

管。除了入口处和阳极之间的局部结构与前两种放电管不同之外,c管和前两种放电管的内径及放电长度也相等。但该结构比第2种放电管b管简单得多,但也可以达到和b管流场接近的均匀分布。

同样对c管进行建模计算,假设c管内的工作气体和a管、b管在相同的入口压强和入口温度下工作,即边界条件也和a管、b管相同,因为入口半径和b管相同,所以,湍动能和湍流耗散率也可设置成和b管相同,通过计算得到的c管内流体速度分布,如图6所示。其整体分布也比较平均,前端径向的速度跨度和

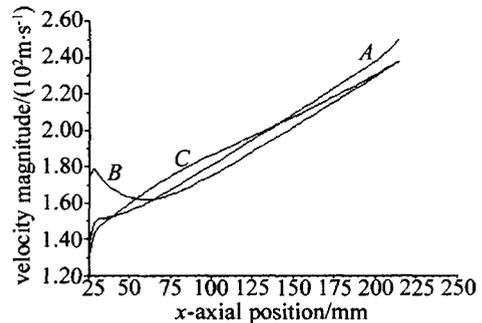


Fig. 6 Plots of the velocity magnitude versus axial length in tube c

b管一样较小,最大值和最小值相差 50m/s。因此其内部流场分布比较平均,产生的辉光放电也比较均匀和稳定。另外模拟结果显示,此放电管的工作气体质量流量的大小介于a管和b管之间,具体数值见表3。由此可见,若要得到均匀的流场和稳定的辉光放电,需要牺牲一部分的质量流量,若要补偿这部分的流量损失,则需提高风机的压比或改善流道设计使压强损失减小。

Table 3 The mass flow rate of the three tubes

computational results	tube a	tube b	tube c
mass flow rate/(kg · s <sup>-1</sup> )	0.00295	0.00228	0.00246
outlet average velocity/(m · s <sup>-1</sup> )	280	220	240

最后对c管也进行了放电实验,实验结果证明,c管内产生的辉光放电整体的确比a管中要均匀得多,但在阴极部分还是不够均匀和稳定,而且单管输出功率比a管小,所以要达到更理想的效果,还需对阴极结构做一些改进,以及设法增大其管内气体平均速度和流量。

## 3 结 论

对现有两种放电管内工作气体的流场状态分别进行了数值模拟,得到了关于其内部流场的分布图,证明了两种放电管的在工作时各自的优缺点,并且和实验结果一致。另外还对现有放电管结构进行了改进,新的放电管不仅结构简单,同时流场分布也比较均匀,为激光器的优化设计提供了一个新方法,还提出新放电管的进一步优化工作的方向。

## 参 考 文 献

- [1] SMITH K, THOMSON J K. Computer modeling of gas lasers[M]. New York: Plenum, 1978: 25-66.
- [2] SHARIF A H, KHEIR A M. Numerical modeling of a fast-axial-flow CW-CO<sub>2</sub> laser[J]. Opt & Laser Technol, 2007, 39(3): 610-615.
- [3] JELVANI S, SAEEDI H. Numerical investigation of a fast-axial-flow CW CO<sub>2</sub> laser[J]. Opt & Laser Technol, 2008, 40(3): 459-465.
- [4] RUDOLPH R, HARENDT A, BISIN P, *et al.* Numerical modeling of fast-flow CO<sub>2</sub> lasers; the model[J]. J Phys, 1993, D26(4): 552-559.
- [5] PHILIPPE A B, BO N. Thermal emission stimulated by excitation of metastable states[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2005, 91(2): 181-187.
- [6] CHEN J K, TZOU D Y, BERAUN J E. A semiclassical two-temperature model for ultrafast laser heating[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(17): 307-316.
- [7] BAEVA M G, ATANASOV P A. Numerical investigation of CW CO<sub>2</sub> laser with a fast turbulent flow[J]. J Phys, 1993, D26(4): 546-551.
- [8] MULLER S, UHLENBUSCH J. Influence of turbulence and convection on the output of a high-power CO<sub>2</sub> laser with a fast axial flow[J]. J Phys, 1987, D20(6): 697-708.
- [9] SAZHIN S, WILD P, LEYS C, *et al.* The three temperature model for the fast-axial-flow CO<sub>2</sub> laser[J]. J Phys, 1993, D26(11): 1872-1883.
- [10] SAZHIN S, WILD P, LEYS C, *et al.* Three-dimensional modeling of processes in the fast-axial-flow CO<sub>2</sub> laser[J]. J Phys, 1994, D 27(3): 464-469.
- [11] WANG F J. Analysis of computational fluid dynamics-principle and application of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 57(in Chinese).
- [12] WANG F J, LI Y J, CONG G H, *et al.* CFD simulation of 3-D flow in large-bore axial flow pump with half-elbow suction sump[J]. Journal of Hydrodynamics, 2006, B18(2): 243-247.
- [13] FLUENT INC. FLUENT user's guide[M]. Lebanon, New Hampshire, USA: Fluent Inc, 2003: 447-456.
- (上接第 458 页)
- [6] WANG X B, SONG C, GENG K W, *et al.* Photoluminescence and Raman scattering of Cu-doped ZnO films prepared by magnetron sputtering[J]. Applied Surface Science, 2007, 253(16): 6905-6909.
- [7] SHAN F K, SHIN B C, JANG S W, *et al.* Substrate effects of ZnO thin films prepared by PLD technique[J]. Journal European Ceramic Society, 2004, 24(6): 1015-1018.
- [8] PENG X P, LAN W, TAN Y Sh, *et al.* Photoluminescence properties of Cu-doped ZnO thin films[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(8): 2705-2709(in Chinese).
- [9] HU J B, WANG X J, LOU H, *et al.* Influence of heat treatment on crystal structures and luminescence properties of ZnO films prepared by sol-gel method[J]. Journal of Xiangfan University, 2007(5): 2-4(in Chinese).
- [10] FU Zh X, LIN B X, GUO Ch X, *et al.* Luminescent spectrum of ZnO films deposited on Si substrates[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 1999(9): 829-832(in Chinese).
- [11] WANG Zh J, WANG Zh J, LI Sh Ch, *et al.* Ultraviolet emission of ZnO film prepared by electrophoretic deposition[J]. Chinese Physics, 2004, 13(5): 750-753.