

文章编号: 1001-3806(2015)03-0308-04

大流量轴快流 CO₂ 激光器放电管的对比分析

李俊杰, 李 波, 王又青*

(华中科技大学 光学与电子信息学院 激光加工国家工程中心, 武汉 430074)

摘要: 为了提高大功率轴快流 CO₂ 激光器的单根放电管的质量流量, 得到更大的单根放电管的输出功率, 对原有放电管的喷嘴、绕流环等结构进行了改进和优化, 设计出一种新型的大质量流量放电管。采用数值模拟和实验验证的方法对新设计的放电管内的气体流动状态和输出功率进行分析, 得到了工作气体的质量流量, 放电管的输出功率以及工作气体在放电管内的流场分布, 数值模拟结果和实验结果一致, 并对不同结构的放电管的输出功率和流场分布进行了比较。结果表明, 新设计的放电管的质量流量明显增加, 单根放电管的输出功率提高, 且能够得到均匀的辉光放电。

关键词: 激光器; 大质量流量放电管; 数值模拟; 辉光放电

中图分类号: TN248.2⁺2

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.03.005

Comparative analysis of discharge tube of CO₂ lasers with large mass flow rate and fast-axial flow

LI Junjie, LI Bo, WANG Youqing

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

Abstract: In order to improve the mass flow rate of a single discharge tube to get higher output power, a new discharge tube was designed after optimization of nozzle and loop structure of the original tube. The flow field, the output power and the mass flow rate of the discharge tube were analyzed through numerical simulation and measured in experiments. The computational results were consistent with the experimental results well. The flow field and the output power of different structure of discharge tubes were compared. The results show that the mass flow rate of the newly designed discharge tube is larger, the output power of single discharge tube is higher and the glow discharge is uniform.

Key words: lasers; large mass flow rate discharge tube; numerical simulation; glow discharge

引 言

轴快流 CO₂ 激光器得名于其与光束同轴的快速流动气体冷却技术。由于光束质量好、功率高、运行稳定可靠, 是一种主要的工业激光器^[1]。轴快流激光器由于工作气体的流速很快, 正是靠着放电管内的流场的湍流和扩散来使工作气体的轴向分布更加均匀, 实现稳定均匀的辉光放电。

轴快流 CO₂ 激光器常用的是普通的十字型放电管和入口处有外部绕流环的放电管。普通的十字型放电管的质量流量较大, 能出较大功率, 但管内的速度和湍流强度不均匀, 在较大的电功率激励下能产生辉光

放电, 但在阳极区容易出现拉丝。另一种常用的放电管是入口处带有外部绕流环结构。该放电管的质量流量相对于十字型管要小, 且速度和湍流强度的均匀性较好, 注入较小的电功率能实现稳定的辉光放电, 但在较大的电功率激励下容易出现弧光放电^[2]。作者通过对现有的放电管进行改进和优化, 设计出一种质量流量大、湍流强度和速度均匀性好的放电管。

1 两种放电管的结构比较

目前轴快流 CO₂ 激光器中常采用的是入口处有外部绕流环结构的放电管。气体从入口直管段进入绕流环后分成两股, 在绕流环两侧环流并在喷嘴处汇聚, 经压缩喷射进入直管段。结构如图 1 所示。

在放电管 a (见图 1) 的基础上对绕流环、喷嘴、直管段等结构进行改进和优化, 设计出一种新型的大质量流量的放电管 b。放电管 b 的结构如图 2 所示。

工作气体的质量流量与放电管的入口处的直径、

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61308045)

作者简介: 李俊杰(1990-), 男, 硕士研究生, 现从事高功率轴快流 CO₂ 激光器数值模拟。

* 通讯联系人。E-mail: YQWang13@163.com

收稿日期: 2014-05-16; 收到修改稿日期: 2014-06-20

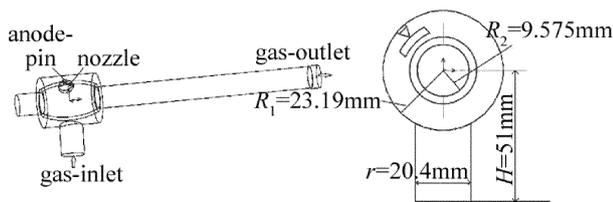


Fig. 1 Structure geometry and left view of tube a

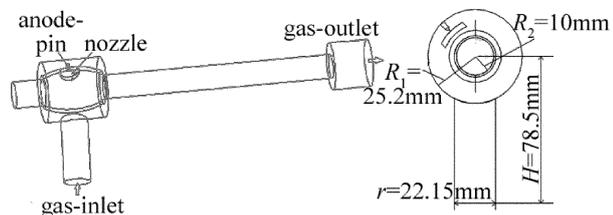


Fig. 2 Structure geometry and left view of tube b

喷嘴的直径以及直管段的直径有关。图 1、图 2 中 r 为放电管的入口处的直径, H 为放电管的入口处与中心轴线的距离, R_1 和 R_2 分别为绕流环的半径以及直管段的半径。由左视图可知, 放电管 a 的入口处的直径为 20.4mm, 直管段的直径 19.15mm; 放电管 b 的入口处直径为 22.15mm, 直管段直径为 20mm。在压降相同的情况下, 入口以及直管段的直径越大, 质量流量会越大。放电管 a 的喷嘴的直径大小为 12.7mm, 放电管 b 的喷嘴直径为 16mm, 喷嘴的直径越大, 直管内的气体质量流量也越大, 但同时也会引起放电管中间的椭圆体内的湍流强度下降, 工作气体速度的轴向分布均匀性变差等问题。在设计放电管的过程中为了弥补由于喷嘴的直径的变大导致速度分布均匀性变差, 增加了放电管 b 的入口与中心轴线的距离 H , 改善了工作气体速度的轴向分布均匀性^[3], 同时增加放电管 b 的绕流环半径 R_1 , 提高湍流强度。数值模拟结果显示, 以上两种措施使得工作气体速度的轴向分布更均匀。

2 放电管的数值模拟

数值模拟的模型由能量守恒方程、动量守恒方程以及质量守恒方程等一系列流体力学基本方程建立而成^[4-6]。FLUENT 是计算流体动力学的软件, 采用有限体积法将计算区域划分为一系列的控制体积, 用待解的微分方程对每一个控制体积积分得出离散方程。FLUENT 软件适用于高速可压流体的动力学计算, 能达到最佳的收敛速度和求解精度, 可以精确获得放电管内的工作气体的流场分布^[7]。

FLUENT 软件在计算的过程中需要设置边界条件, 若要计算的结果精确, 则需要将边界条件设置的与真实的环境是一样的。边界条件的设置如表 1 所示^[8]。

放电管 a 和放电管 b 采用的是相同的风机, 工作气体的配比也相同, 两者的边界条件也基本相同, 由于

Table 1 Specifications of boundary conditions used in computation

types of the boundary conditions	value
total pressure at inlet	18400Pa
static pressure at inlet	17200Pa
temperature at inlet	298K
turbulence kinetic energy at inlet	173m ² /s ²
turbulence dissipation rate at inlet	260822m ² /s ³
static pressure at outlet	10800Pa
temperature at outlet	401K

放电管 a 和放电管 b 的入口处的直径大小不同, 放电管 a 的入口直径为 20.4mm, 放电管 b 的入口直径为 22.15mm, 入口的湍流动能和湍流耗散率是与入口处的直径大小相关的, 放电管 a 和放电管 b 在入口处的湍流动能和湍流耗散率不相同, 根据湍流动能和湍流耗散率的计算公式可知, 放电管 b 的湍流动能为 169m²/s², 湍流耗散率为 233816m²/s³。

通过在 FLUENT 软件中导入网格模型, 将边界设置成如表 1 所示的边界条件。下面将分析 FLUENT 软件的计算模拟结果。

2.1 放电管内的质量流量

在相同边界条件下由 FLUENT 软件计算得出放电管 a 的质量流量为 0.00235kg/s, 放电管 b 的质量流量为 0.00302kg/s。放电管 b 的质量流量相对于放电管 a 有一定程度的提高。对于光电转换效率一定的激光器, 若提高注入功率则管内产生的热量也会相应的增加, 而提高放电管的质量流量, 将有助于更加迅速地带走放电产生的废热, 保证放电管内的工作气体的温度低于临界值, 从而提高放电管的输出功率^[9]。研究表明, 质量流量为 1g/s 时, 单根放电管可获得 120W ~ 150W 的激光功率输出, 因此放电管 a 能够获得 280W ~ 350W 的激光功率输出, 放电管 b 能够获得 360W ~ 450W 的激光功率输出。

在设计放电管的过程中不仅需要考虑如何提高管内的质量流量从而提高激光器输出功率, 还需要考虑速度、温度、气体密度等其它的影响放电稳定性的因素。

2.2 放电管内的速度分布

图 3 和图 4 分别是 a 管和 b 管沿轴向的速率分布图, 曲线 A、曲线 B、曲线 C 分别代表的是直管中心线、距离直管中心线 5mm 以及距离直管中心线 -5mm 处的速率分布。比较放电管 a 和放电管 b 的轴向速率分布曲线图可知, 在同样的压降条件下, 在直管段放电管 b 的平均速率约为 240m/s, 而放电管 a 内的平均速率约为 200m/s, 放电管内的工作气体的速率越快, 则管内的抽运所产生的能量越能及时被带走, 从而保证管内的温度在临界范围之内。同时在直管段放电管 b 的

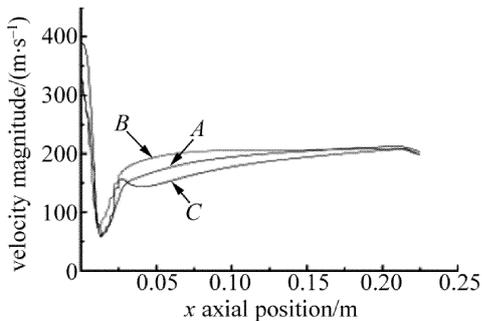


Fig. 3 Velocity magnitude vs. axial length in tube a

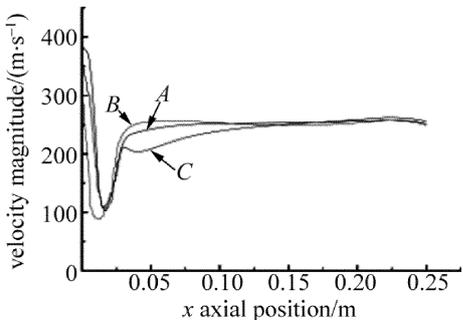


Fig. 4 Velocity magnitude vs. axial length in tube b

速率的均匀性要比放电管 a 更好,放电管 b 较放电管 a 更容易实现稳定的辉光放电。

2.3 放电管内的温度分布

图 5 和图 6 分别是放电管 a 和放电管 b 内的轴向温度分布曲线图。比较可知,放电管 b 内的平均温度要比放电管 a 内的平均温度低。由于放电管 b 内的工作气体的流动速率要比放电管 a 的工作气体的流动速率快,且放电管 b 的质量流量更大,因此放电管 b 放电时产生的大量能量能够迅速地被带走,使得放电管

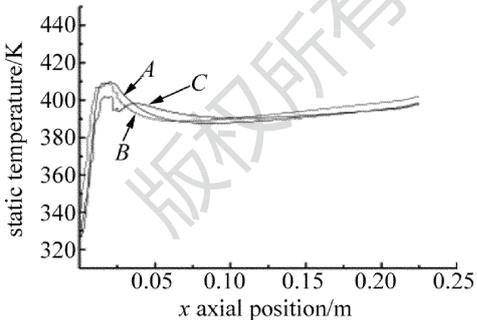


Fig. 5 Static temperature vs. axial length in tube a

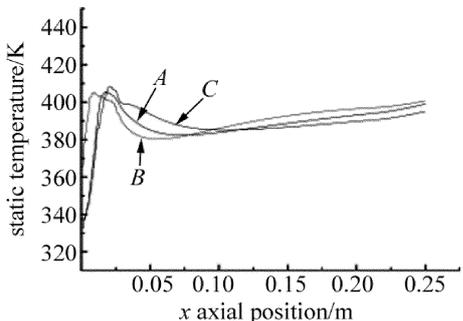


Fig. 6 Static temperature vs. axial length in tube b

b 内的平均温度相对放电管 a 要低,激光器的工作也会更加的稳定。

2.4 放电管内的密度分布

图 7 和图 8 分别是放电管 a 和放电管 b 沿轴线方向的密度分布曲线图,由于工作气体的密度主要受温度和压强的影响,在工作气体的入口处由于温度低、压强高,气体的密度显然较高。在直管段内的工作气体的密度对放电有很大的影响,气体分子不均匀可能会导致放电过程出现拉丝。放电管 a 和放电管 b 在轴向的密度分布都较为均匀,能够实现稳定的辉光放电。

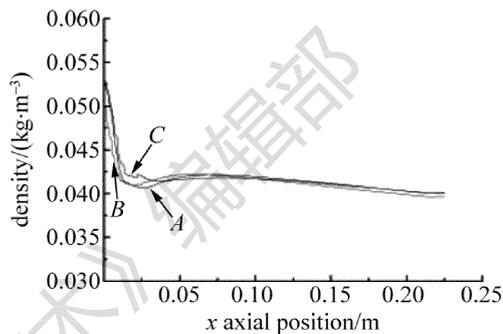


Fig. 7 Density vs. axial length in tube a

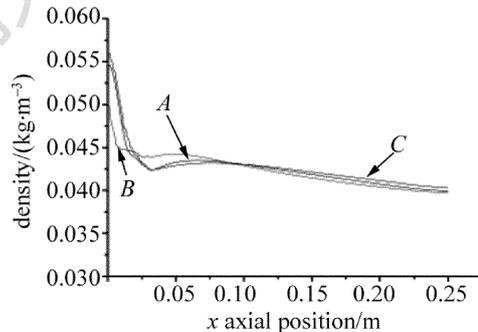


Fig. 8 Density vs. axial length in tube b

由 FLUENT 软件的模拟结果可知,在同样的压降条件下,放电管 b 内的工作气体速度快、质量流量大、平均温度低,放电管 b 能得到十分均匀和稳定的辉光放电。由于注入功率和放电管的质量流量成正比,故放电管 b 易输出较大的激光功率。放电管 a 的工作气体流速较低、流量较小,气体的温升较放电管 b 要大,在较大功率的情况下容易出现放电拉丝。

3 实验结果对比分析

在相同的工作气压、相同的气体配比条件下对放电管 a 和放电管 b 分别进行实验研究,对比两种放电管在不同电功率的激励下的放电表现。放电管 a 在激励电功率不超过 1490W 时能够产生稳定均匀的辉光放电。当激励电功率在 1490W 以上时,在直管段靠近阳极区会出现不均匀的辉光放电和丝状放电^[10]。对于放电管 b,当激励电功率达到了 1650W 时仍能维持

均匀稳定的辉光放电。实验中单根放电管的输出结果如表 2 所示。

Table 2 Output power of single discharge tube

	excitation current/mA	operating voltage/kV	maximum injection power/W	output power/W
tube a	83.1	17.91	1487.49	333
tube b	80.8	20.5	1656.40	375

4 结 论

由数值模拟和实验论证可知,新设计的放电管的质量流量增大,在较大的电功率激励下能够实现稳定均匀的辉光放电,单根放电管的输出功率提高。对比放电管 a 和放电管 b,在新型放电管的设计过程中,可适当增加放电管的入口、喷嘴以及直管段的直径,提高气体的质量流量,增加入口与中心轴线的距离以及外部绕流环的半径来分别提高气体的均匀性和湍流强度。放电管优化设计的原则是在保持工作气体的速度、温度、密度均匀的前提下,提高放电管的质量流量。

参 考 文 献

[1] ZUO D L, LI S M. Review of fast-axial-flow CO₂ laser[J]. Laser Technology, 2000, 24(1): 4-8 (in Chinese).

[2] LI Q, WANG Y Q, HUANG H Y. Research and design of discharge tube structure of fast-axial-flow CO₂ lasers [J]. Laser Technology, 2010, 34(4): 525-528 (in Chinese).

[3] HUANG H Y. The simulation and optimization of the gas flow field and heat exchange of the high power fast-axial-flow CO₂ laser [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011: 51-57 (in Chinese).

[4] JELVANI S, SAEEDI H. Numerical investigation of a fast-axial-flow CO₂ laser [J]. Optics & Laser Technology, 2008, 40(3): 459-464.

[5] HUANG H Y, WANG Y Q. Kinetic modeling and optimum design of the discharge tube for the CO₂ laser with computational fluid dynamics method [J]. Optical Engineering, 2010, 49(11): 201-207.

[6] HUANG H Y, WANG Y Q. Computational fluid dynamics modeling of gas flow characteristics of the high power CW CO₂ laser [J]. Chinese Optic Letters, 2010, 8(11): 401-405.

[7] WANG F J. Analysis of computational fluid dynamics-principle and application of CFD software [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 57 (in Chinese).

[8] LI Q, WANG Y Q, HUANG H Y. Progress of numerical simulation of high power fast-axial-flow CO₂ laser [J]. Laser Technology, 2010, 34(3): 339-342 (in Chinese).

[9] HAN Y Sh, LI X Y. Studies on heat exchange of high power CO₂ laser [J]. Laser Technology, 1995, 19(5): 276-279 (in Chinese).

[10] LI Q. Computational fluid dynamics modeling of discharge tube in fast-axial-flow CO₂ laser [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009: 78-80 (in Chinese).