

高功率轴快流CO₂激光器气体循环系统的研究进展

崔静, 王又青*, 李晴, 黄鸿雁, 朱新志

(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, 湖北 武汉 430074)

摘要 为将高功率轴快流CO₂激光器放电过程中产生的大量热量带走, 保持放电区气体温度接近常温, 更利于激光器稳定运行, 对于气体循环系统的优化设计至关重要。先就其气体循环系统组成及重要性进行阐述, 后对其各个组成方面的研究发展进行综述, 并对已有的模型建立以及数值模拟的发展进行综述, 并运用计算流体动力学方法对气体流场进行数值模拟, 通过对模拟结果分析得到对气体循环系统进行优化设计的方向, 最后对课题组已经进行的一些工作进行阐述。

关键词 高功率轴快流CO₂激光器; 气体循环系统; 放电稳定性; 流体动力学方法

doi: 10.3788/AL20113101.0015

Progress of Research of Gas Circulation System in the High Power Fast Axial Flow CO₂ Laser

Cui Jing, Wang Youqing, Li Qing, Huang Hongyan, Zhu Xinzhi

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

Abstract In order to take away the heat generated in the process of discharge of the high-power fast axial flow CO₂ laser, keep the gas discharge area close to room temperature and remain the laser more stable operation, the optimal design for the gas circulation system is essential. The first part is the component of its gas circulation system and the importance of the elaboration, Then the composition of the various research and developments were presented, and the developments of the existing model and numerical simulation are discussed and according to use the computational fluid dynamics method to simulate the gas flow field, the direction of optimize the laser were obtain, through analysis of the simulation results of gas recycling system. The last was some research has carried out by our group.

Key words high power fast axial flow CO₂ laser; gas circulation system; discharge stability; computational fluid dynamics method

0 引言

激光加工是传统机械加工技术改造的必由之路, 是国家工业化形象的重要标志, 国际上激光加工以CO₂激光加工为主, 其中又以切割市场最大^[1]。轴快流CO₂激光器诞生于上世纪70年代初, 由于它具有优良的光束质量, 能长时间稳定可靠地工作, 迅速成为工业切割激光器的主流^[2]。

影响激光器工作性能的关键因素是气流方式、放电结构、谐振腔的稳定性^[3]。对于放电结构和谐振腔稳定性的研究已有很多, 而对于气流方式方面的研究目前还很少, 因此通过对内部流场分布的模拟, 得到关于激光器内部的更多真实信息, 借此得到放电更加均匀稳定的方法, 使得输出光束质量达到最优, 仍具有研究价值。

鉴于高功率轴快流CO₂激光器气体循环系统的研

究工作, 将对今后CO₂激光器的改进和优化有重要现实意义, 本文对高功率轴快流CO₂激光器气体循环系统的组成及设计方法等关键问题进行系统的分析和综述。

1 国内外在气体循环系统方面的研究

1.1 气体循环系统组成及重要性

按照激励方式的不同轴快流CO₂激光器分为直流激励和射频激励, 不论是哪种激光器, 占据其大部分体积的就是其气体循环系统。气体循环系统包括放电管、热交换器、风机和连接管路。高速工作气体在流过放电区时, 气体放电, 激光产生过程中约80%~90%的抽运能量转化为气体内能, 导致气体温度急剧上升, 须经热交换器使工作气体冷却到接近常温^[4]。再导入风机进行压缩对气体做功温度升高, 故再须经热交换器进行冷却, 导回到放电管, 如此回路

循环，即实现气体快速对流循环冷却。

目前，高功率轴快流CO₂激光器的转换效率虽然已经达到24%，但仍有76%左右能量将转化为气体的热能，气体温度升高会导致激光器长时间工作中输出功率下降，风机电机烧毁，放电起弧，所以，需用冷却系统把这部分热量及时清除掉，以保证激光器气体放电区保持常温工作状态^[5]。随着激光器功率的增加，需要排出的热量也随之增加，所以要实现高功率的激光输出，气体循环系统的设计至关重要，它直接影响到激光器的运转能否持续及稳定。

1.2 放电管及气体流通管道

流场的设计首先要满足放电区气体流速（量）和均匀性要求，其他还有压力损失小、振动小和结构紧凑等^[6]。因此放电管与导流管道的设计要提高放电区气流速度均匀性，以减小压力损失。国外主要的研究工作围绕在放电管放电过程的模拟上。

Beverly就给出了分别在小信号增益条件下和稳定振荡条件下的六温度模型中气体分子振动能及的特征温度沿气流方向的一维分布图，还给出了小信号增益在不同压强下随注入电功率增大而增大的范围，尤其指出了小信号增益对H₂O和CO的浓度大小很敏感^[7]。

Baeva和Atanasov则给出了有考虑湍流扩散作用情况下的激光输出计算结果，并和实验值比较。结果证明气体流速和温度在管内是呈线性上升趋势的，且考虑湍流扩散作用时的数值模拟结果更接近实际情况^[8]。

Galeev求解控制方程得到的结果与实验值一致，并得到了激光输出功率与电流和气流速度的关系以及不同气流方向时电子、离子密度和电场沿轴向的分布^[9]。

国内对气体激光器的放电管研究的文献较少，主要集中在针对特定放电形式的数值模拟上。如华中科技大学的彭晓元、李适民等，曾发表过一篇针对轴快流CO₂激光器脉冲放电形式的数值模拟^[10]。

上海光机所的陆培华和王润文发表了有关轴向流动激光放电管温度场的解析分析，从能量守恒定律出发，分析了快速轴向流动激光器放电管中的传热情况。采用微元分析法建立了快速轴向流动激光器放电管热能平衡方程，为更加准确的模拟放电管的流场提供了依据^[11]。

激光器放电过程最常见的激励方式为直流激励和

射频激励。由于射频激励电极位于放电管外，对工作气体湍流没有严格要求，因此放电管气流阻力小，有利于流过大流量，获得高功率输出，故7kW轴快流CO₂激光器采用射频激励的方式。根据流体运动理论和对于激光器流场设计要求，华中科技大学研制7kW轴快流CO₂激光器采用图1对称结构。

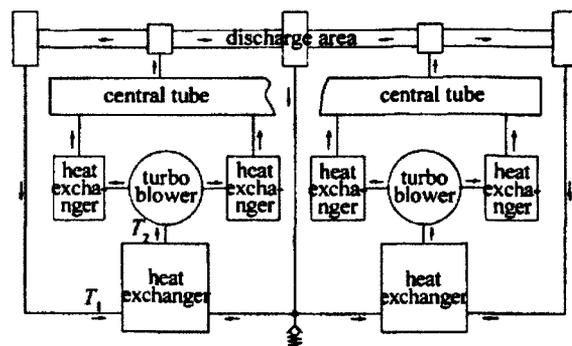


图1 轴快流CO₂激光器气体循环结构图

1.3 风机

在早期的设计中，许多市场上生产的商用轴快流激光器普遍采用笨重的罗兹风机，需要复杂的流通管道来连接整个循环系统，发现其对激光腔有轻度污染、低噪声、低振动、维护周期长和流量较小。后来都采用涡轮风机，其优点在于风速高、压比大、冷却效率好、高可靠性，对激光腔没有污染、低噪声、低振动、免维护、能耗低、体积小、与激光器的集成高等。

Beck发表了一篇关于采用涡轮风机的新型轴快流CO₂激光器的文章，提到了涡轮风机较之罗茨风机具有结构紧凑和效率高的优越性，将风机、热交换器和放电管放在一个圆柱形空腔里，实现了紧凑的设计结构，最终达到了800 W输出功率和16%的效率^[12]。

Jarosch对高功率轴快流CO₂激光器的闭合回路气体循环系统进行了模拟和优化，利用紧凑型的涡轮风机以保证大的质量流量^[13]。

华中科技大学研制的7kW高功率轴快流CO₂激光器选用两个紧凑的涡轮风机，根据输出功率和电光转换效率，由下式计算出体积流量

$$Q_v = \frac{P\left(\frac{1}{\eta} - 1\right)}{C_p \Delta T} \quad (1)$$

由式（1）得出的计算结果来确定选型和设置合适的风机参数来达到要求^[14]。

1.4 热交换器

高功率轴快流CO₂激光器的工作特点和热负荷要求决定了所设计的换热器具有以下要求：(1)单位体积换热面积尽可能大，结构紧凑；(2)气阻要尽量小，以减小气体的速度损失；(3)使用周期长，工作稳定，以达到激光器长时间稳定的激光输出^[15]。

目前，用于轴快流CO₂激光器的换热器有板翅式、管壳式和矩形翅片管式等几种。由于矩形翅片圆管式换热器的传热能力强，结构紧凑，气阻小，现在都采用矩形翅片管式换热器。

上海光机所的陆培华、王润文针对研制的千瓦级快速轴流高功率CO₂激光器的内部循环热交换工作过程建立了热量的平衡方程，选择罗兹风机并选用矩形翅片圆管束热交换器作为激光器的散热部件，并进行了换热计算。经选定参数计算，其换热能力为15kW，能够满足激光器的换热要求^[4]。

合理选择和设计能满足激光器工作特点和热负荷量的换热器，在激光器整体设计中至关重要，它是保证激光器在高功率下稳定运行的关键。华中科技大学通过对7kW轴快流CO₂激光器换热器的设计，给出了设计结构参量和计算换热能力的方法，计算结果表明，选用的矩形翅片圆管式换热器换热能力为18.7kW，能够满足所研制激光器的使用要求。图2就是7kW轴快流CO₂激光器换热器设计的管排结构图^[15]。

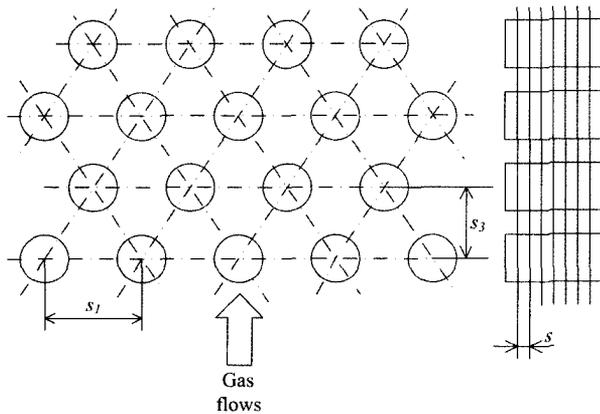


图2 矩形翅片圆管束管排结构图

2 数值模拟方法

在过去的几十年内，对高功率CO₂激光器的数值模拟一直在不断地研究和改进，希望借此能对这个复杂系统得到一个最真实具体的描述^[16]。数值模拟也成为一种对气体循环系统进行优化设计的重要方法。

早在1978年，美国的Smith.K和Thomson.R.M

就发表了关于气体激光器模拟的专著《Computer modeling of CO₂ lasers》，此专著为气体激光器模拟奠定了基础，提供了一系列描述CO₂激光器内部过程的基础理论模型^[17]。之后有许多从事于气体激光模拟研究的科研人员都是在此理论的基础上进行的。如Jacoby在给定电子密度的情况下，解出了描述气体激光器系统的一维方程^[18]；Muller和Uhlenbusch则通过线性代数近似的方法，将湍流和热传导对激光功率输出的影响写入了差分方程组中^[19]；Atanasov和Baeva则对带有螺旋运动的轴快流直流激励的CO₂激光器进行了研究^[20]。近几年又有一些国外的科研工作者在这方面进行新的探索，如Sazhin, Wild等人将5温度模型简化成3温度模型并利用软件进行三维模型的数值计算^[21]；Sharif和Kheir也建立了新的速率方程模型并利用四阶的龙格-库塔方法进行数值计算^[22]。

模型建立和数值计算之后，可得到关于工作气体特性以及激光器性能的数据，然后和实验值进行比较，可证明模拟的正确性，还可得到气体循环系统内部的各个物理量的分布。如Jelvani和Saedi运用Newton-Raphson方法编程计算简化的3温度模型的控制方程的数值解，得到了放电管内工作气体的温度、激光上能极分子振动温度和小信号增益在不同放电电流、放电管直径、气体流速和气压时的分布，得出了气体温升会随着气流速度地降低，气压的增高或放电管直径地增大而增大，CO₂分子反对称振动能及温度会随放电电流的增大而线性上升，且在气体流速、气压和放电管直径减小时上升，小信号增益在压强和放电管直径增大时会更迅速饱和，但不随一定范围内变化的速度值而变化^[23]。

现代计算流体力学CFD的发展使得我们能够用计算机对激光器内部气体的工作过程进行数值仿真研究，即先通过CFD技术对流场进行数值模拟，然后对计算结果进行分析并图形化现实和数据显示，以揭示放电管内工作气体流场的流动特性和其他物理量的分布状况。

FLUENT是目前处于世界领先地位的CFD软件之一，广泛用于模拟各种流体流动、传热、燃烧和污染物运移等问题。FLUENT提供了灵活的网格特性，允许用户根据求解规模、精度及效率等因素，对网格进行整体或者局部的细化和粗化。对于有较大梯度的流动区域，FLUENT提供的网格自适应特性可让用户在很高精度下得到流场的解。FLUENT使用GAMBIT作

为前处理软件，它可读入多种CAD软件的三维几何模型和多种CAE软件的网格模型。FLUENT可让用户定义多种边界条件，用C语言开发完成，支持UNIX和WINDOWS等多种平台。从本质上讲，FLUENT只是一个求解器。本身提供的主要功能包括导入网格模型、提供计算的物理模型、施加边界条件和材料特性、求解和后处理。在使用FLUENT之前，必须借助GAMBIT或其他CAD软件生成网格模型^[24]。

图3是已有的对直流放电过程的模拟结果^[24]。由图可见，直流放电的流速随管长增长而变得均匀稳定。但是由于直流激励的激光器，要求在阳极附近产生较强的湍流，相反，射频激励方式对于湍流的要求不高，因此射频激励更利于高功率轴快流CO₂激光器的运行。目前高功率轴快流CO₂激光器射频激励方式的分析还有待研究。

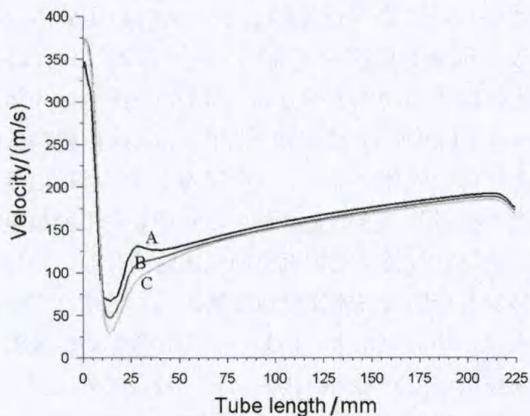


图3 放电管内流速随管长的变化图

图4是7kW高功率轴快流CO₂激光器矩形翅片圆管式换热器的三维立体图（图2的三维结构立体图）^[15]。图5和图6分别对该换热器进行数值模拟的结果，分别从压力分布和温度分布来分析该换热器的性能。



图4 铜翅片换热器三维立体图

气流方向是由铜翅片下端到上端，圆孔中插入冷却管，图中显示，压强从入口到出口逐渐变小，主要是由于在换热器中插入冷却管产生气阻，使得压强

损失。从入口到出口，压强从大约从9960Pa下降到9690Pa，损失大约270Pa，可见此换热器气阻小。

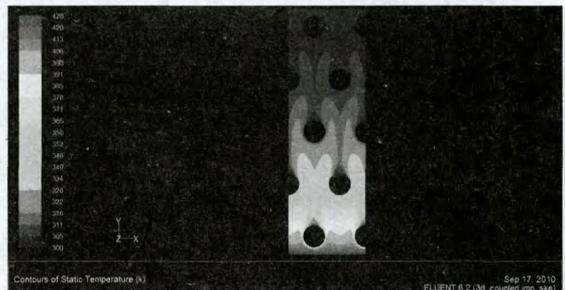
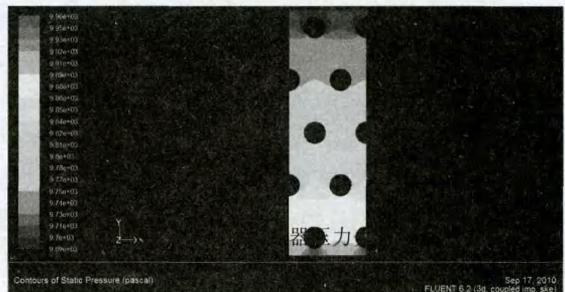


图6 铜翅片换热器温度分布云图

由于对于进入放电管的气体温度要求是接近常温（298K），因此要求换热器能将高温气体冷却到接近常温。由图6可知，铜翅片换热器的温度从入口的428K下降到了300K左右，接近常温，满足对换热器的性能要求。

3 结论

高功率轴快流CO₂激光器的气体循环系统研究发展至今，对于系统组成部分的研究已经形成了一套比较完整的理论和计算方法，但是随着CO₂激光器本身和计算科学的不断更新和发展，对气体循环系统的研究也将有发展与改进。选择合适的仿真计算软件可从结果中得到更多关于激光器内部的信息，不仅节省实验成本，更对激光器的优化和设计有重要的指导意义。

参考文献

- [1] 邓鸿林. 轴向快流工业CO₂激光器[J]. 激光与红外, 1996, 26(3): 191-192.
- [2] 康旭. 高功率轴快流CO₂激光器功率监控系统的设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [3] 左都罗, 李适民. 快轴流CO₂激光器评述[J]. 激光技术, 2000, 24(1): 4-8.
- [4] 陆培华, 王润文. 高功率CO₂激光器热平衡分析及热交换器换热计算[J]. 中国激光, 2001, 28(9): 775-778.

- [5] 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).
- [6] 邵春雷. 高功率TEACO₂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.
- [7] BEVERLY .R .E. Kinetic modeling of a fast-axial-flow CO₂ laser[J]. Optical and Quantum Electronics, 1982, 14(1): 25-40.
- [8] BAEVA.M.G, ATANASOV.P.A. Numerical model of a fast-axial-flow CO₂ laser with controlled turbulence[C]. In: 9th International Symposium on GAS Flow and Chemical Lasers, Heraklion: SPIE, 1992: 109-122.
- [9] GALEEV.R.S. Numerical simulation of fast axial flow CO₂-laser[C]. In: Modeling and Simulation of Laser Systems III, Los Angeles: SPIE, 1994: 205-213.
- [10] PENG.X.Y, LI .S.M, XU.L. Numerical modeling on pulse discharge of a high power fast-axial-flow CO₂ laser[J]. SPIE, 1997: 245-249
- [11] 陆培华, 王润文. 轴向流动激光放电管温度场的解析分析 [J]. 中国激光, 2001, 28 (4) : 4-7.
- [12] BECK .R. Fast-axial-flow CO₂ laser with integrated turbo-blower[J]. Applied Physics B, 1987.
- [13] Jarosch. U, Niehoff. J, Loosen. P, Herziger. G. Simulation and Optimization of Closed Loop Gas Circuits in High Power CO₂ Lasers[J]. SPIE, 1994, 2206: 194-204.
- [14] HUANG Hongyan, WANG Youqing, LI Qing, et al. Design of gas circulation system in the high power fast axial flow CO₂ laser[J]. SPIE, 2009, 7515: 751507.
- [15] 黄鸿雁, 王又青, 李晴. 7KW轴快流CO₂激光器的热平衡分析及换热器设计[J]. 激光技术, 2010, 34(2): 240-246.
- [16] 李晴, 王又青, 黄鸿雁. 高功率轴快流CO₂激光器的数值模拟进展[J]. 激光技术, 2010, 34(3): 339-342.
- [17] SMITH.K, THOMSON.J.K. Computer modeling of gas lasers[J]. Plenum: NEW YORK, 1978: 1-87
- [18] JACOBY.H. Calculation of the performance data of RF-excited transverse flow CO₂ laser[J]. Euro.Space Agency Tech. Translation, 1984, 15 (1) : 832-837
- [19] MULLER.S, UHLENBUSCH.J. Influence of turbulence and convection on the output of a high-power CO₂ laser with a fast axial flow[J]. Journal of Physics D: Applied. Physics, 1987, 20 (6): 697-708.
- [20] ATANASOV.P.A, BAEVA.M.G. Numerical investigation of CW CO₂ laser with a fast turbulent flow[J]. Journal of Physics D: Applied. Physics, 1993, 26(4): 546-551.
- [21] SAZHIN.S, WILD.P, LEYS.C, et al. The three temperature model for the fast-axial-flow CO₂ laser[J]. Journal of Physics D: Applied. Physics, 1993, 26 (11) : 1872-1883.
- [22] SHARIF.A.H, KHEIR.A.M. Numerical modeling of a fast-axial-flow CW-CO₂ laser[J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39 (3): 610-615.
- [23] JELVANI.S, SAEEDI.H. Numerical investigation of a fast-axial-flow CW CO₂ laser[J]. Optics & Laser Technology, 2008, 40 (3): 459-465.
- [24] 李晴. 轴快流CO₂激光器放电管流场的计算流体力学模拟 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.