

文章编号: 1001-3806(2014)06-0729-04

## 计算流体力学在 CO<sub>2</sub> 激光器换热器设计中的应用

王文进, 王又青\*, 赵 恒, 胡 逸, 赵 江  
(华中科技大学 光学与电子信息学院, 武汉 430074)

**摘要:** 为了提高轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器换热器设计的灵活性、缩短研发周期、降低成本, 采用计算流体力学方法对换热器内部流场和热交换过程进行了分析。根据分析结果设计出流阻为 154.5 Pa、换热量为 8888.5 W 的换热器。由 4 kW 轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器的运行试验证明, 采用计算流体力学方法设计的换热器满足激光器的运行需求。结果表明, 计算流体力学法是一种精确、高效的轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器换热器的设计方法。

**关键词:** 激光技术; 换热器; 计算流体力学; 轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器

中图分类号: TN248.2<sup>+</sup>2 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.06.002

### Application of computational fluid dynamics in design of heat exchanger of CO<sub>2</sub> laser

WANG Wenjin, WANG Youqing, ZHAO Heng, HU Yi, ZHAO Jiang

(College of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to get understand the process of the heat exchanging and flow field and design heat exchangers with more flexibility, computational fluid dynamics was used to design the heat exchanger of 4 kW fast axial flow CO<sub>2</sub> laser. The flow resistance of the heat exchanger is 154.5 Pa and its heat transfer is 8888.5 W. The heat exchanger can ensure the long-term stability of fast axial flow CO<sub>2</sub> laser. The research proves that computational fluid dynamics theory can make the design process of heat exchanger more efficient and accurate.

**Key words:** laser technique; heat exchanger; computational fluid dynamic; fast axial flow CO<sub>2</sub> laser

## 引 言

由于激光加工技术相对于传统加工工艺具有无可比拟的优势, 所以在工业加工中得到了广泛的应用。为了满足工业加工要求的进一步提升, 激光器就要向更高功率、长时间稳定运行的方向发展<sup>[1-2]</sup>。高功率工业激光器结构复杂、价格昂贵, 这在一定程度上限制了它的推广和应用。目前 CO<sub>2</sub> 激光器在技术和价格上都占有优势, 是工业高功率激光光源的最佳选择。本课题旨在为轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器气体循环系统热交换部件的设计提供一种高效的方法。

目前, 轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器的转化效率可以达到

25% 左右, 也就是说有 75% 的电能转化为气体的热能, 工作气体通过放电区后温度会升高 150K 左右。气体温度的升高会导致激光器放电不稳定和输出功率的下降。所以, 需要热交换系统把放电产生的废热带走, 以保证工作气体在进入放电区域时保持常温状态<sup>[3-4]</sup>。

作者针对传统轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器热交换设计采用的经验公式法计算繁琐、灵活性低、需要较多的工程经验等缺点<sup>[5]</sup>, 提出使用流体力学方法设计轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器的换热器的方案, 并设计了管布结构的 4 kW 轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器换热器, 其能满足激光器连续稳定运行的要求。

## 1 激光器换热器的设计要求

4 kW 轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器的流道结构如图 1 所示。工作气体是由摩尔比为  $r(\text{CO}_2):r(\text{N}_2):r(\text{He}) = 5:29:66$  的混合气体, 工作压强为 10.4 kPa。工作气体由风机经副换热器进入放电管, 经过放电的高温

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (61308045)

作者简介: 王文进 (1987-), 男, 博士研究生, 现主要从事轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器气体循环系统的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: YQWang13@163.com

收稿日期: 2013-12-23; 收到修改稿日期: 2014-01-19

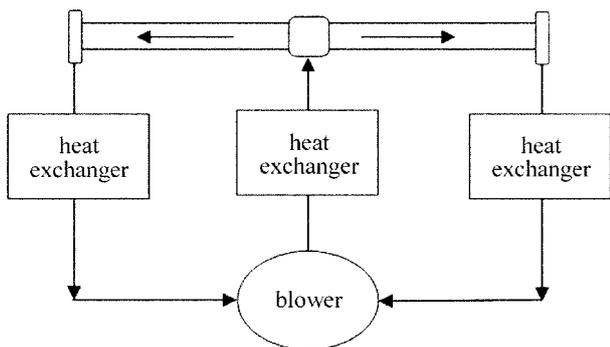


Fig. 1 Gas circulation diagram of the laser system

气体再由主换热器进入风机。工作气体在风机中流动时会和叶轮产生摩擦并且体积被压缩,在这个过程中会产生附加热量。工作气体放电过程中产生的热量和这些附加热量相比要大得多,所以本文中以主换热器为例,介绍计算流体动力学方法在轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器换热器设计中的应用。

轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器热平衡方程为<sup>[6-7]</sup>:

$$P_1 = P_2 - P_3 = Mc_p \Delta T \quad (1)$$

式中,  $P_1$  为工作气体放电后产生的热量,  $P_2$  为注入电功率,  $P_3$  为激光输出功率,  $P_3 = P_2 \eta$ ,  $\eta$  为激光器的电光效率。为了使设计的换热器留有余量,  $\eta$  取值为 20%。文中的激光器选用 Leybold 公司的 S3500 风机, 体积流量可达 4000m<sup>3</sup>/h。298K, 10.4kPa 时混合气体的密度  $\rho = 0.049\text{kg/m}^3$ , 计算得气体的质量流量  $M = 0.0545\text{kg/s}$ , 工作气体的定压比热容  $c_p = 1949\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。4kW 轴快流激光器按照 20% 的电光效率来计算, 工作气体经过放电区域后会产生 16kW 的热量, 气体温度的上升值为  $\Delta T = 150.3\text{K}$ 。4kW 轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器中有两个对称的主换热器, 所以设计的每一台主换热器的换热量需要达到 8kW 左右。

根据轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器换热器结构紧凑、换热效率高、气体流阻小的要求, 4kW 轴快流 CO<sub>2</sub> 激光

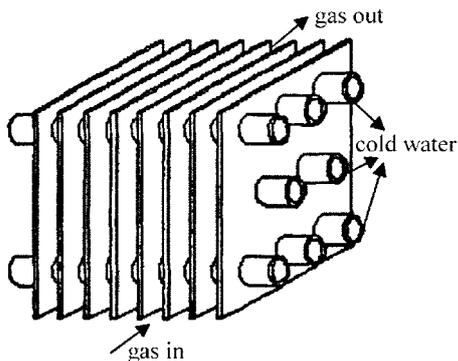


Fig. 2 Finned-tube refrigeration heat exchanger

器选用的是矩形翅片管式换热器, 如图 2 所示。

矩形翅片管式换热器的气体阻力计算的经验公式为<sup>[8]</sup>:

$$\Delta p = fn \frac{G_{\max}^2}{2\rho} \quad (2)$$

式中,  $n$  是指气流方向上的管排数,  $f$  是摩擦系数,  $G_{\max}$  是最小截面的质量流速。当换热器气体流阻大会加重风机的负荷, 不利于激光器长时间稳定运行。所以换热器的气体流阻必须尽量小。

## 2 换热器的设计与数值模拟

### 2.1 换热器模型与边界条件

估算换热面积, 5 × 5 管排布置的 84 片 190mm × 190mm 矩形翅片管能满足 4kW 轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器换热器的换热需求, 几何模型如图 3 所示。

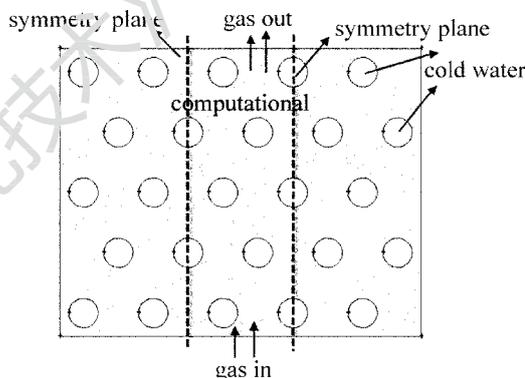


Fig. 3 Geometric model of heat exchanger

为了简化计算, 模型被虚线分割为 3 个部分, 只将虚线内部的区域作为模拟计算区域, 将它的两个切割面设定为对称边界。对于翅片使用周期性边界条件, 只建立两片翅片之间的区域作为流体的计算区域, 将上、下表面设置为周期性边界条件, 进出口均采用压力条件。初始条件和边界条件需要用到的物性参量如表 1 所示。

Table 1 Physical parameters used for numerical calculation<sup>[8-9]</sup>

average molecular weight	specific heat at constant pressure	coefficient of heat conductivity	pressure of gas in
12.28g/mol	1943J/(kg · K)	0.0943W/(m · K)	10.4kPa

### 2.2 热交换过程与流场分析

因为 5 × 5 的管布结构不严格对称, 所以计算出的换热量会略小于实际值, 但是对内部流场分布 (如图 4 所示) 的影响不大。

由压强分布云图 (见图 4a) 可以看出, 从换热器进口到出口, 压强呈平滑分层波纹状且递次减小, 在进口和出口处压降较大, 经过每一排换热管时压强

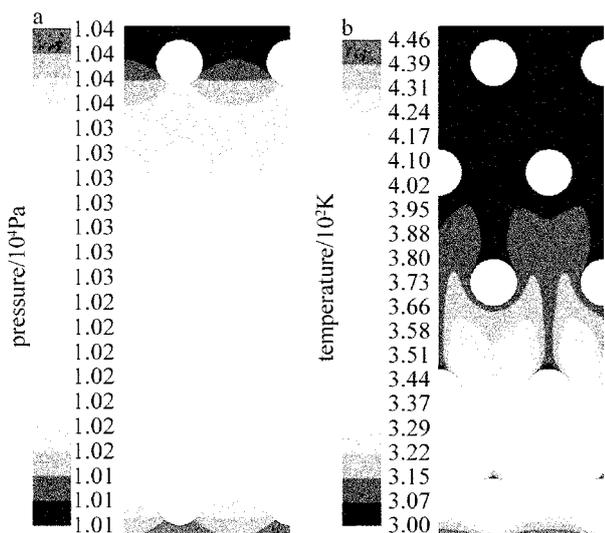


Fig. 4 Flow field distribution inside the heat exchanger with 5 × 5 tube arrangement

a—pressure distribution b—temperature distribution

产生较大的变化,在横向方向上,也就是垂直于气体流动方向上,压强变化不明显。可见,换热管排数越多,压降越大;换热管列数,对换热器的流道阻力影响不大;这与计算换热器流阻的经验公式(2)式是一致的。

由温度云图(见图 4b)只能看出,翅片表面的温度变化呈分层变化、均匀递减的趋势。选取换热器中心线为分析对象如图 5 所示。从图中可以看出工作气体进口温度为 446K,沿着中心线方向上,温度呈递减趋势。当工作气体绕流过圆管时会产生绕流脱体现象,因此此处的温度变化趋势呈现一个小阶梯;然后,温度分布又呈平滑下降趋势。由换热器中心温度曲线可见,第 2 段温度下降比较明显,而第 5 段温度几乎没有变化,说明在第 5 段时工作气体的温度与冷却水达到了平衡,两者之间没有热量的交换<sup>[10]</sup>。

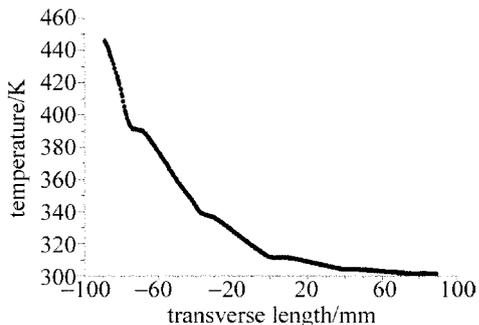


Fig. 5 Temperature curve at centerline of heat exchanger with 5 × 5 tube arrangement

### 2.3 优化设计

由以上分析可知,换热器的最后一排水管没有起到换热的作用,并且增大了换热设备的气体流阻。所以可以移去最后一排铜管以提高换热效率,降低气体流阻;在垂直气流方向上增加一排铜管以保证换热器的换热量,将换热器优化为 4 × 6 的管排布置、228mm × 152mm 矩形翅片结构。优化后的换热器结构的流场分布与中心线上的温度变化曲线如图 6 所示。

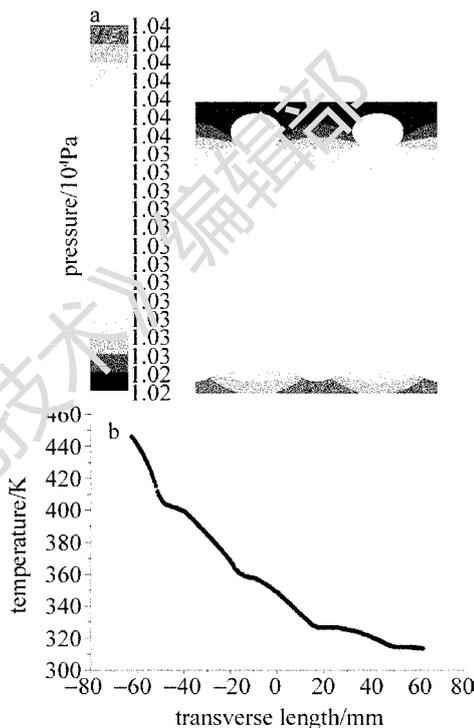


Fig. 6 Flow field and temperature curve at centerline of heat exchanger with 4 × 6 tube arrangement

a—pressure distribution b—temperature curve at centerline of heat exchanger

从图 6 可以看出,优化后的结构的出口压强相较于之前管布结构(见图 4a)要大 100Pa 左右,优化后换热器中心线处的温度分布曲线有 4 个明显的阶梯状分布,并且均有比较明显的温度变化。由于前排管使气体产生了扰动增强了气体分子的无规则运动,提高了换热效率,所以第 2 段和第 3 段的温差要略大于第 1 段。出口处由于气体温度与换热管内水温逐渐达到平衡,因此温差较小。这说明改进后的换热器结构压力损失减小并且冷却水管得到了充分的利用换热效率得到提高。所以在 4kW 轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器设计选择此方案作为换热设备。

### 2.4 经验公式结果对比与实验验证

由经验公式可计算出换热器铜管、矩形翅片的

换热系数,得到换热器的整体换热系数,然后根据换热器面积和具体管布结构计算出换热器的换热量和气体流阻<sup>[11]</sup>。由计算流体力学软件的报告功能可以得到进口和出口的压强值、流阻以及热负荷分别为 10394.523Pa, 10240Pa, 154.523Pa, 8888.53W。由经验公式法算出的换热器流阻和热负荷分别为 154Pa, 8915.2W。由上面的数据可知,计算流体力学软件模拟出的结果与经验公式计算出的结果非常吻合。将通过计算流体力学设计出的换热器安装至 4kW 轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器,连续运行 48h 后激光器各项参量如图 7 所示。

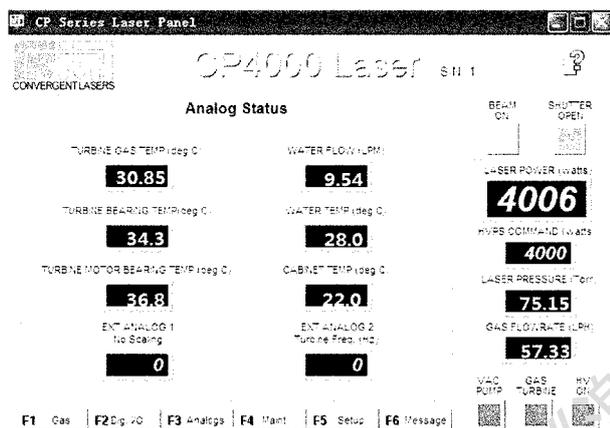


Fig. 7 Operation monitoring interface of CP4000 laser used heat exchanger with 4 × 6 tube arrangement

由以上分析可知,计算流体力学法是一种准确、高效的设计轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器换热设备的新方法。

### 3 小 结

使用计算流体力学法可以得到轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器热交换设备内部流场的详细分布,通过分析温度场、压力场的分布情况可以对换热设备的结构

进行灵活的调整,以满足激光器的工作需求。计算流体力学法同样适用于其它采用冷热对流热交换的气体激光器,在今后的热交换器设计中只要根据气体配比、换热量需求就可以根据此方法对换热器进行设计。

### 参 考 文 献

- [1] HABICH U, DU K, EHRlichMANN D. Development of an industrial CO<sub>2</sub> laser with more than 40kW output power; recent results [J]. Proceedings of the SPIE, 1995, 2502: 20-24.
- [2] HERTZLER C, WOLLERMANN-WINDGASSE R. 30kW fast axial flow CO<sub>2</sub> laser with RF excitation [J]. Proceedings of the SPIE, 1996, 2788: 14-23.
- [3] HINDO M, WALTER R K. Gas Laser [M]. Boca Raton, USA: CRC Press, 2007: 51-56.
- [4] HONG H Y, WANG Y Q. Kinetic modeling and optimum design of the discharge tube for the CO<sub>2</sub> laser with computational fluid dynamics method [J]. Optical Engineering, 2010, 49(11): 1-7.
- [5] HABICH U, ROSCH U K, MALY H, et al. Fast axial flow 25kW CO<sub>2</sub> laser with unstable resonator for industrial applications [J]. Proceedings of the SPIE, 1997, 3092: 174-177.
- [6] SHOOCHANI D E, DEGHAN G H, HASANVAND M, et al. Design and manufacture of a heat exchanger for industrial fast axial flow CO<sub>2</sub> lasers [J]. Lasers in Engineering, 2011, 21(5): 305-318.
- [7] LU P H, WANG R W. Heat balance analysis of high power CO<sub>2</sub> laser and calculation to the heat exchanger [J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28(9): 775-778 (in Chinese).
- [8] YANG S M, TAO W Q. Heat transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001: 130-202 (in Chinese).
- [9] BIRD R B. Transport phenomena [M]. 2nd ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 2006: 310-316.
- [10] HUANG H Y. The simulation and optimization of the heat exchanging and flow field of the high power fast axial flow CO<sub>2</sub> laser [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011: 81-84 (in Chinese).
- [11] HUANG H Y, WANG Y Q, LI Q. Heat balance analysis of 7kW fast axial flow CO<sub>2</sub> laser and design of heat exchanger [J]. Laser Technology, 2010, 34(2): 240-246 (in Chinese).