

化学氧碘激光器内流场结构对出光性能影响的数值分析

怀 英 吴克难 贾淑芹 陈 曦 金玉奇

(中国科学院大连化学物理研究所化学激光重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要 利用超音速喷管实现化学氧碘激光器(COIL)内流场的加速降温,进而使增益有量级上的提升是激光器研究中的重大进展。但超音速内流场中存在着复杂的三维结构,流场结构与光束质量的关联机制是设计相关气动部件的重要判据。为此,采用了包含流场-化学场、光场和热结构计算模块的全耦合仿真平台,数值解析了在不同流场条件下的出光性能,重点分析了内流场中不同方向上激波对近场输出光斑的影响及相互关系,从而确定了相关气动部件的优化设计方式。改善后的光束近场均匀性(F 因子)提高了 45%。

关键词 激光器; 化学氧碘激光; 光束质量; 耦合计算; 超音速流场; 激波

中图分类号 O35 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1102005

Influence of Flow Structures on Supersonic Chemical Oxygen-Iodine Laser Output with Numerical Analysis

Huai Ying Wu Kenan Jia Shuqin Chen Xi Jin Yuqi

(Key Laboratory of Chemical Lasers, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian, Liaoning 116023, China)

Abstract The utilization of supersonic nozzles to accelerate and cool the flow in the chemical oxygen-iodine laser is a significant progress in laser research. However, there are complex three-dimensional structures in the supersonic flow field. The relationships between flow structures and laser outputs are important criterions on the design of pneumatic components. The simulation system presented in the paper contains three blocks: the chemical flow calculation block, the optical calculation block and thermal structure calculation block. With the numerical platform, the analysis of the performance of laser under different flow conditions is carried out and the focus is the influence of the shock waves in the flow field on the near field laser output. According to the analysis, optimal methods are proposed. It makes an increase of the beam quality (F factor) of 45%.

Key words lasers; chemical oxygen-iodine laser; beam quality; coupled computation; supersonic flow; shock waves

OCIS codes 140.1150; 140.3325; 000.4430

1 引 言

以化学氧碘激光器(COIL)^[1]为代表的气流化学激光器内流场大多运行在超音速状态,而在超音速流场中激波(运动气体中的强压缩波)^[2]的存在早已被意识到。流场的压强、温度、密度值在经过激波面会大幅提升,而速度下降。这种流场参量的演变过程对激光器出光的影响无疑是研究激光器性能时必须思考的问题,但研究这个问题面临两个主要的难点:1)解析超音速内流场结构一直是计算流

体力学中的难点问题,这不仅需要精准的计算模型,而且超音速流场计算所需的细密网格和求解过程中的高阶收敛性问题对数值算法提出了较高要求。而氧碘化学激光的超音速内流场还包含着数十种介质的化学反应过程,大幅增加了计算规模。2)解析超音速内流场结构对出光性能影响,流场计算必须耦合光场计算,现阶段工程应用较多的还是一种单向耦合过程,即先通过流体力学及化学反应动力学方程得到增益及折射率分布,再以此为基础研究

收稿日期: 2013-04-23; 收到修改稿日期: 2013-05-31

基金项目: 国家自然科学基金(20903087)

作者简介: 怀 英(1973—),女,博士,副研究员,主要从事化学激光数值仿真方面的研究。E-mail: huaiying@dicp.ac.cn

COIL 的光学特性^[3-5]。这些研究在光学计算部分假定增益及折射率保持不变,未考虑光能提取对流场的作用,这样并不能准确考察在出光过程中流场参量的演变对光场的影响。随着计算资源的发展,耦合计算研究中发展了假设一个超音速喷管通道内的双向往返光强与往返于腔镜的光强相等^[6],或者通过假设一个等效流体区域进行计算的全耦合计算模式^[7]。这样的仿真过程真实体现了激光器出光过程中流场与光场相互作用的物理过程,但为了减小计算规模提出的假设丧失了对全三维流场的数值预测。随着计算集群的发展和超级计算理念的植入,本课题组一直致力于发展激光器全三维多场耦合计算平台^[8-11],通过这样的计算不仅能够对激光器出光性能进行预测,而且能够数值演算光场和流场全三维结构,及其相互作用的机制。

本文采用高阶算法,解析激光器内超音速流场结构。利用耦合计算平台,重点分析了超音速流场内的激波结构对出光性能的影响,并对近场光束近场均匀性的改善提出了相应的优化方法。

2 数值计算方法

COIL 的工作介质主要是单重态氧 $O_2(^1\Delta)$ 和碘。其中 $O_2(^1\Delta)$ 是由氯气和碱性过氧化氢溶液在氧发生器内反应产生,含 $O_2(^1\Delta)$ 的混合气体经过超音速喷管并与碘蒸汽 I_2 混合,经过喷管加速膨胀降温到超音速状态,同时 I_2 与 $O_2(^1\Delta)$ 反应产生碘原子,激发态碘原子 I^* 在谐振腔内受激辐射,不断向基态碘原子 I 跃迁,将从单重态氧 $O_2(^1\Delta)$ 抽运得到的能量转化成光能输出。针对上述化学氧碘激光的物理过程,所建立的数值计算平台包括了流场-化学场、光场和热结构计算模块。由于各模块包含的数理模型和计算方法涉及内容较多,本文只做简要介绍。

2.1 流场-化学场计算模块

流场-化学场计算模块主要计算激光器内的气动过程,模拟从氧发生器产生混合气流的亚跨超音速流动和其中的化学反应。利用计算流体力学的方法模拟这种可压缩流动。计算系统包括了三维可压缩 Navier-Stokes 方程、能量方程以及各组份输运方程的守恒形式,可以统一为

$$\underbrace{\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t}}_{\text{accumulation}} + \underbrace{\frac{\partial \rho \Phi v_i}{\partial x_i}}_{\text{convection}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right)}_{\text{diffusion}} + \underbrace{S_{\text{chem}} + S_{\text{rad}}}_{\text{source}}, \quad (1)$$

式中 ρ 为密度, Φ 为通用变量,可以代表速度,内能,组分浓度等求解变量, v_i 为各个方向上的速度, Γ 为扩散系数,源项 S_{chem} 代表化学反应源项,通过有限层流反应模型进行计算。 S_{rad} 代表辐射通量源项,反映了激光能输出对流场相应参量(能量及 I^* 、 I 的浓度)的影响,表示为

$$S_{\text{rad}} = \begin{cases} -g\bar{I}, & (2a) \\ \frac{M_1 g \bar{I}}{h\nu} & (2b) \\ -\frac{M_1 g \bar{I}}{h\nu}, & (2c) \end{cases}$$

式中 M_1 为碘原子的摩尔质量, $h\nu$ 是波长为 $1.315 \mu\text{m}$ 的光子能量 (90956 J/mL), g 为增益,反映了激光器内粒子数的反转情况, \bar{I} 代表双向往返总光强,通过下述光场计算模块求解而得。(2a)式为能量方程,(2b)式为 I 输运方程,(2c)式为 I^* 输运方程。

2.2 光场计算模块

光场计算主要依据波动光学的方法,模拟谐振腔中光场的产生、放大、振荡,直至输出的过程。采用的方程主要为有源腔的亥姆霍兹方程,表示为

$$\frac{j}{2k} \left(\frac{\partial^2 U^\pm}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U^\pm}{\partial y^2} \right) + \left[\frac{g}{2} - jk(n-1) \right] U^\pm \mp \frac{\partial U^\pm}{\partial z} = 0. \quad (3)$$

方程的求解基于 Siegman 提出的快速傅里叶变换方法^[12]。其中 k 为波数, $U^\pm(x, y, z)$ 代表光腔内正、反方向传播的光场复振幅,光腔内的双向总光强 \bar{I} 与傍轴波动方程中的复振幅 U^\pm 满足 $\bar{I} = |u^+|^2 + |u^-|^2$ 。通常,非稳腔的前、后腔镜均镀有反射率为 R 的高反膜则 U^\pm 在腔镜处满足:

$$U^\pm(x, y) = R \cdot \exp(2jk\Delta d^\pm) U^\mp(x, y), \quad (4)$$

式中 Δd^+ 与 Δd^- 分别代表前、后腔镜的形变量,其具体数值由热结构计算模块演算。

2.3 热结构计算模块

热结构计算模块计算腔内激光场作用下由于腔镜材料温升发生的形变。主要包括了热传导方程和准静态热应力方程分别表示为

$$\nabla(q \nabla T) + \beta \bar{I} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \sigma_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{jk}}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{jk}}{\partial x_k} + F_i = 0, \quad (6)$$

式中 q 为热传导系数, β 为吸收系数, c 为热容, τ 为模量(剪切模量与弹性模量的乘积), σ 和 F 分别为应力和外力均由热结构计算模块求解,其中 \bar{I} 由光场模块计算。

上述三个模块通过二阶插值互相交换数据,耦合迭代,实现对出光性能的预测。在计算过程中数据传递的频率和方式、各模块网格尺寸的选取以及数值算法的设置都需要在考虑耦合计算的基础上确定,否则很容易出现计算结果的发散。耦合程序基于消息传递接口(MPI)开发了并行模式,使整体计算效率大幅提高。

3 结果分析

利用上述耦合计算平台,计算了不同流场条件下的出光性能,图1是流场的计算区域,包括了超音速喷管和相应的光腔区域。流体具有三维的自然特性,但为了阐述清楚,本文在流场结构的分析上分为垂直(xz 平面)和平行于光轴方向(xy 平面)分别论述。

在垂直于光轴方向上,流体在超音速区出现了

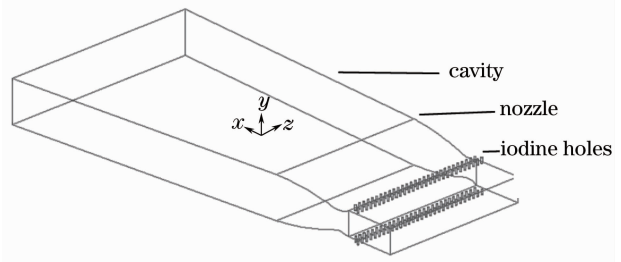


图1 流场的计算区域

Fig.1 Computational domain of flow field

典型的激波、激波与膨胀波交叉以及明显的边界层结构。图2是垂直于光轴方向的切面图,分别为归一化马赫数和小信号增益。在这个方向上出现的激波贯穿整个光腔区域,在气动参数上有明显的表征,由于增益与温度和抽运反应介质的浓度同时相关,增益的分布[图2(b)],与气动参数的对应关系较弱。

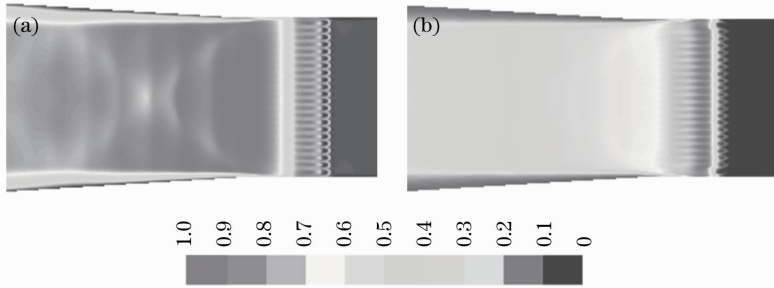


图2 垂直于光轴方向的流场参量。(a) 归一化马赫数; (b) 归一化小信号增益

Fig.2 Flow parameters perpendicular to the optical axis. (a) Normalized Mach number; (b) normalized small signal gain

在这样的流场条件下,计算所得的近场相位和归一化光强的分布如图3所示。

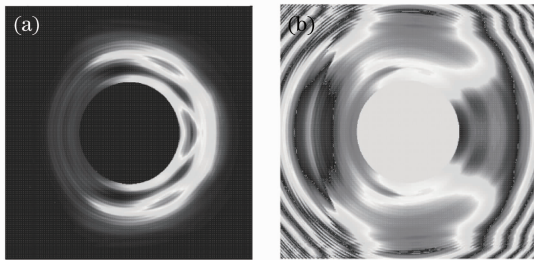


图3 (a) 归一化光强; (b) 相位

Fig.3 (a) Normalized intensity; (b) phase

图3所示的光斑与流场有很明显的对应关系,在激波的波面上出现了强光区域。由于光场计算中与流场相关的参量包括增益和折射率,但如图2所示,增益的分布与流场参数的相关性并不明显,可见造成这种现象的主要是折射率。图4是垂直于光轴方向光腔区域的折射率与介质密度,由于两者的线性关系,因此造成了光斑与流场结构的对应关系。

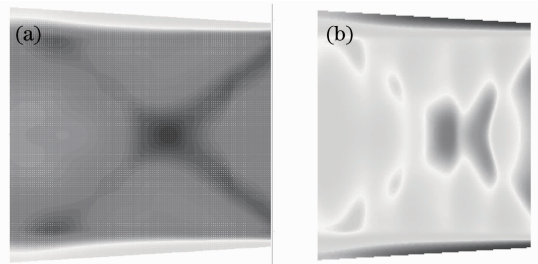


图4 (a) 折射率; (b) 介质密度

Fig.4 (a) Refractivity; (b) flow density

通过上述分析可看出垂直于光轴方向的激波结构对出光性能具有显著的影响,为此改善这个方向上的流场分布均匀性是保证出光质量的合理尝试。在对激波的形成机理进行剖析的基础上,改进了光腔和喷管壁面的夹持方式(封闭喷管的上下盖板留出一定的流动空间)在一定程度上削弱了垂直于光轴方向主激波的强度,如图5所示。在这种流场条件下的近场光斑如图6所示。可见,近场光斑的均匀性得到了大幅改善。虽然在超音速流场中存在明显的膨胀波结

构,但这些结构未见对光束质量的明显影响,这也是

本文重点分析激波结构对出光性能影响的主要原因。

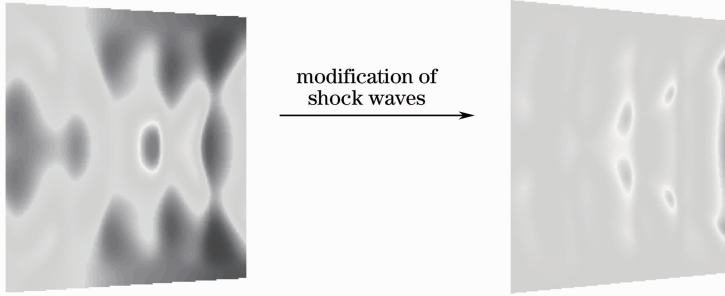


图 5 削弱了的垂直于光轴方向主激波强度前后的归一化压强

Fig. 5 Normalized pressure before and after reduction of the shock waves perpendicular to the optical axis

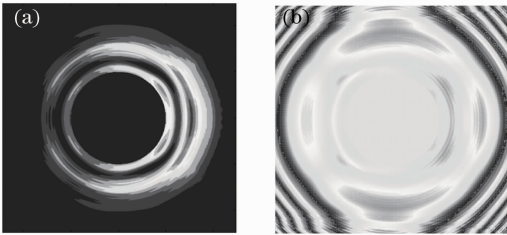


图 6 削弱了的垂直于光轴方向主激波强度的 (a)归一化光强和(b)相位

Fig. 6 (a) Normalized intensity and (b) phase before and after reduction of the shock waves perpendicular to the optical axis

除了在垂直于光轴方向存在激波结构外,在平行于光轴方向上的一系列连贯的小激波早已被预测,如图 7 所示。但由于这不是出光方向,与出光性能的关系并不直接、明显,所以得到的关注较少。但本文作者认为,这个方向上的流场结构对出光性能

的影响也是至关重要的。通过修正 Prandtl 角改善喷管型线后可以明显削弱小激波的强度,避免了流体速度在通过每个激波面上的退减现象,因此超音速区域的维持长度明显增加,如图 7 所示。由于这个特性,激光器抵御背压升高的能力必然提升,这对激光器的运行具有积极意义,同时这样也增长了低温低压的有效增益区,使得构建折叠腔结构或扩大光斑尺寸成为可能。另外由于流体的均匀性明显改善,化学反应介质分布的均匀性提高,折射率和增益分布的均匀性也显著提高,当光穿越增益层时所造成的散射和折射损耗较小,输出功率必然能提高。在保持其他条件不变的情况下,对比计算了在修正喷管型线前后的输出功率,修正后的功率提高了 8%,虽然是个较小的量,但对于大型激光器的意义不可小觑。通过修正 Prandtl 角改善了喷管型线后的归一化光强和相位的计算结果见图 8。

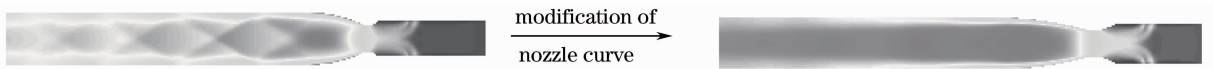


图 7 通过修正 Prandtl 角改善了喷管型线前后的马赫数分布

Fig. 7 Mach number before and after modification of the nozzle curve with prandtl angle method

图 8 是仅修正了喷管型线后的近场光斑,其中

的大结构显然是对应于垂直光轴方向存在的激波结构,除了这个大结构外,光斑明显变的平滑,这无疑是由于改进了平行于光轴方向上流场均匀性的结

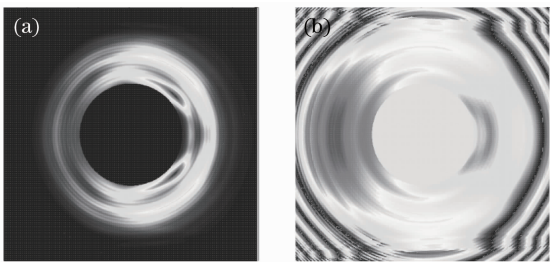


图 8 通过修正 Prandtl 角改善了喷管型线后的 (a)归一化光强和(b)相位

Fig. 8 (a) Nominated intensity and (b) phase before and after modification of the nozzle curve with Prandtl angle method

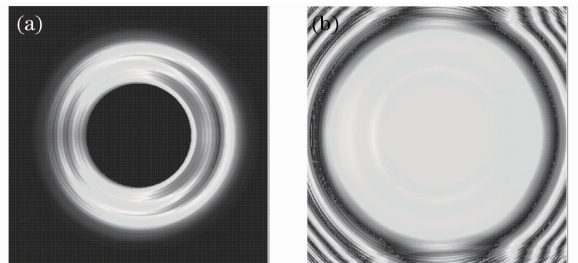


图 9 (a) 优化后的归一化光强和(b)相位

Fig. 9 (a) Nominated intensity and (b) phase after optimization

(功率和光束近场均匀性)均有明显的影响。因此要达到对光束近场均匀性的有效改善,对壁面的夹持方式(图 5)和喷管型线(图 8)的优化设计均具有重要意义。图 9 是在同时改进了这两点后的近场光斑,其 F 因子较未优化前(图 3)提高了 45%。

4 结 论

采用了包含流场—化学场、光场和热结构计算模块的全耦合仿真平台,重点解析了流场中包含的不同性状的激波结构,及相应的出光性能。研究发现,超音速流场中的激波对出光有重要影响,其中垂直于光轴方向存在的大结构激波直接影响光斑分布,与近场光斑有明显的对应关系;平行于光轴方向上的一系列连贯的小激波,虽然和出光性能没有直接的对应关系,但是对出光性能的主要评价指标(功率和光束近场均匀性)均有影响。为此,提出了改善壁面的夹持方式和喷管型线的优化方式以削弱激波强度,优化后的近场光斑 F 因子提高了 45%。

参 考 文 献

- 1 Sang Fengting, Jin Yuqi, Duo Liping. Chemical Laser and Application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. 1-72.
桑凤亭, 金玉奇, 多丽萍. 化学激光及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. 1-72
- 2 R Courant, F O Friedrichs. Supersonic Flow and Shock Waves [M]. New York: Spring-Verlag New York Inc., 1999. 377-433
- 3 Chen Yunshan, Li Shouxian, Liu Guanghua, *et al.*. The operation parameters influence on the COIL performance [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1999, 11(3): 267-271.
陈云山, 李守先, 刘广华, 等. COIL 运行参量对激光器性能的影响[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(3): 267-271.
- 4 Du Yanyi, Shu Xiaojian, Li Shouxian. Simulation of phase disturbance in COIL [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(6): 903-907.
杜燕贻, 束小建, 李守先. 氧碘化学激光器中相位扰动的模拟研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(6): 903-907.
- 5 Ma Xiaoliang, Yang Guowei, Shen Yiqing. Laser beam propagation in compressible vortical field [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2008, 25(5): 602-606.
马小亮, 杨国伟, 申义庆. 可压缩涡中的激光传播 [J]. 计算物理, 2008, 25(5): 602-606.
- 6 R C Buggeln, S Shamroth, A I Lampson, *et al.*. Three-dimensional (3-D) navier-Stokes analysis of the mixing and power extraction in a supersonic chemical oxygen iodine laser (COIL) with transverse 12 injection [J]. AIAA Paper, 1994, 94: 2435-2442.
- 7 G D Hager, C A Helms, K A Truesdell. A simplified analytic model for gain saturation and power extraction in the flowing chemical oxygen-iodine laser [J]. IEEE J Quantum Electron, 1996, 32(9): 1525-1536.
- 8 Jia Shuqin, Huai Ying, Jin Yuqi, *et al.*. Coupling simulation of flow and optical fields in supersonic chemical oxygen-iodine lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(9): 59-63.
贾淑芹, 怀 英, 金玉奇. 超音速化学氧碘激光器流场与光场耦合仿真的研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(9): 59-63.
- 9 Wu Kenan, Jia Shuqin, Huai Ying, *et al.*. Coupled simulation of flow and optical power extraction in supersonic chemical oxygen-iodine laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(8): 2005-2010.
吴克难, 贾淑芹, 怀 英, 等. 超音速化学氧碘激光器内流动与光能提取耦合仿真 [J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(8): 2005-2010.
- 10 Jia Shuqin, Huai Ying, Wu Kenan, *et al.*. Numerical study of effects of power extraction on flow fields in supersonic chemical oxygen iodine lasers [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0402001.
贾淑芹, 怀 英, 吴克难, 等. 超音速化学氧碘激光器能量提取对流动影响的数值研究 [J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0402001.
- 11 Wu Kenan, Huai Ying, Jia Shuqin, *et al.*. Coupled simulation of chemical lasers based on intracavity partially coherent light model and 3D CFD model [J]. Opt Express, 2011, 19(27): 26295-26307.
- 12 E A Sziklas, A E Siegman. Mode calculations in unstable resonators with flowing saturable gain. 2: fast Fourier transform method [J]. Appl Opt, 1975, 14(8): 1874-1889.

栏目编辑:宋梅梅