

文章编号: 1001-4322(2008)10-1593-04

COIL 基于小信号增益系数的最佳流量配比选择*

吕俊明, 王 春, 姜宗林

(中国科学院 力学研究所 高温气体动力学重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 氧碘化学激光器(COIL)的混合喷管内发生的是气体动力学、化学反应动力学以及光学等相互耦合的复杂过程,每个过程都对 COIL 性能有着至关重要的影响。利用 3 维 CFD 技术,通过求解层流 Navier-Stokes 方程与组分输运方程,结合 10 种组分和 21 个基元反应的化学反应模型,对简化后的化学氧碘激光 RADICL 模型在亚声速段横向射流情况下,不同的主副流流量比对小信号增益系数的影响情况进行了比较与分析。结果证明:过高或过低的碘分子浓度均不利于产生合理的小信号增益系数;存在最佳流量配比使小信号增益系数得到显著提高且分布均匀。

关键词: 氧碘化学激光器; 横向射流; 流量配比; 增益系数; 方差

中图分类号: O354.3 **文献标志码:** A

氧碘化学激光(COIL, Chemical Oxygen-Iodine Laser)利用亚稳态的单重态氧 $O_2(^1)$ 与基态碘原子之间的近共振传能过程产生激发态碘原子 I^* 作为增益介质($O_2(^1) + I \rightarrow I^* + O_2(^3)$), I^* 受激辐射产生近红外激光束($I^* + h\nu \rightarrow I + 2h\nu$)。对 COIL 的数值模拟与实验研究很早已经展开,国内主要有中科院大连化学物理研究所、北京应用物理与计算数学研究所和中国科学院力学研究所等单位开展这方面的工作^[1-4],但由于计算复杂性以及计算机性能等限制,对 COIL 复杂模型的 3 维且考虑化学反应数值计算近期才开始。文献[5]在理论分析以及实验的基础上得出结论,单位碘分子在混合喷管中大约需要消耗 4.2 ± 0.4 单位的单重态氧分子,且在碘分子浓度较低的情况下有所升高。以往的数值模拟与实验研究,大多选取了很低的碘分子浓度,但一味的降低碘分子浓度是否有利于 COIL 的性能发挥呢?文献[6]针对此问题进行了初步的实验研究与简单的理论分析。而本文则针对完整物理模型,采用 3 维 N-S 方程、基元化学反应模型以及二元等效扩散模型进行了数值模拟与分析。在 COIL 亚声速段横向射流且穿透深度合理^[7]的条件下,分析与比较了不同的主副流流量配比条件对小信号增益系数分布的影响,对提高 COIL 工作效率以及确定合理的流量配比都有很重要的意义。

1 物理模型与计算方法

1.1 物理模型

物理模型参考 RADICL 狭缝喷管,模型尺寸来自于文献[8],图 1 为所采用的计算模型。主流以 He 为载气进入喷管亚声速段,副流的碘蒸气以 He 为载气,声速横向喷入喷管亚声速区,进行初步混合后迅速进入喷管超声速区。

1.2 数值模型

COIL 系统运行在低压低密度环境,Reynolds 数为 $10^2 \sim 10^3$ 量级,流动具有复杂的 3 维特性,因此本文应用 3 维层流 N-S 方程来描述这一流动过程,同时考虑对流、粘性耗散和分子扩散。在直角坐标系下 3 维可压缩层流 N-S 方程可以写为

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F_i}{\partial x_i} = \frac{\partial D_i}{\partial x_i} + S_c \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

式中: U 为守恒型独立变量; F_i 分别为 x, y, z 方向的对流量,采用频散可控耗散格式(DCD)进行离散^[9]; D_i 分别为 x, y, z 方向的耗散通量,包括分子扩散、粘性效应和热传导项,采用中心差格式离散; S_c 为化学反应

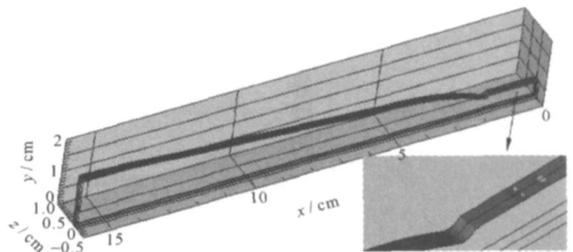


Fig. 1 Schematic of computational domains of RADICL nozzle

图 1 RADICL 狭缝喷管简化计算域

* 收稿日期:2008-08-05; 修订日期:2008-09-27

基金项目:国家高技术发展计划与中科院大连化学物理研究所基金联合资助课题

作者简介:吕俊明(1981—),男,博士研究生,从事化学反应流的数值研究;junminglv@gmail.com。

源项,采用基元反应模型,考虑 $I_2, I_2^*, I, I^*, O_2(^1\Sigma), O_2(^3\Sigma), H_2O, Cl_2, He$ 这 10 种组分, 21 个基元反应,参考文献[10]。

二元扩散模型包括浓度梯度贡献项 $G_{,sp}$ 及压力梯度贡献项 $G_{p,sp}$, 表示为

$$G_{,sp} = - \sum_{i=1}^{ns} \tau_i [G_{,sp} - \frac{w_{sp}}{w_i} G_{,i}] - \sum_{i=1}^{ns} \tau_i [G_{p,sp} - \frac{w_{sp}}{w_i} G_{p,i}] \quad (2)$$

$$G_{p,sp} = w_{sp} D_{sp} \nabla_{sp} G_{p,sp} = w_{sp} D_{sp} (\frac{w_{sp}}{p} - \frac{w_{sp}}{p}) \nabla p / p \quad (3)$$

式中: w_{sp}, τ_{sp} 和 D_{sp} 分别代表组分 sp 的分子量、摩尔浓度和平均扩散系数; τ 代表总摩尔浓度; ρ 代表密度; p 代表压力。

2 计算结果与讨论

2.1 计算条件

气动参数均取相同条件,即主流 $p_p = 9.9617 \text{ kPa}, T_p = 315 \text{ K}$,副流 $p_s = 20 \text{ kPa}, T_s = 415 \text{ K}$ 。主流为基态氧、单重态氧、水蒸气、氯气和载气氦气的混合气体,摩尔配比为 1 : 1.5 : 0.16 : 0.24 : 19.72,在各算例中保持不变。副流为 I_2, He 的混合物,摩尔配比的选择依据不同的流量配比确定,参见表 1,其中, \dot{n}_p / \dot{n}_s 表示主流与副流的流量配比。

2.2 小信号增益系数分布规律

在化学氧碘激光器的光学谐振腔中, I^* 达到粒子数反转后的激射发生在最大增益跃迁线上,故激光功率与小信号增益系数有重要的关系。其具体的表达式为

$$g = \left[[I^*] - \frac{1}{2} [I] \right] = \frac{A^3}{8} \sqrt{\frac{m}{k_B T}} \frac{7}{12} \left[[I^*] - \frac{1}{2} [I] \right] \quad (4)$$

式中: A 为爱因斯坦自发辐射系数; λ 为激光波长; $[I^*], [I]$ 分别为平衡时激发态和基态碘原子浓度; m 为碘原子质量; k_B 为玻耳兹曼系数; T 为热力学温度。

由公式可知,小信号增益系数不仅取决于泵浦率的高低,还与绝对的浓度大小有关。图2是增益系数在 $j=25$ 网格线沿 x 方向的分布。在配比 7 的情况下出现了负增益,而在 10 的情况下,增益在 $1\% \text{ cm}^{-1}$ 左右,但不断减小,配比 15 时,在光腔附近增益保持恒定,并维持在 $1\% \text{ cm}^{-1}$ 左右。配比 20 时,增益系数还在发展阶段时,气流已经完全通过喷管。

表 1 模拟采用的计算条件

Table 1 Computational condition applied in the simulation

\dot{n}_p / \dot{n}_s	n_{I_2}	n_{He}
7	1	30.15
10	1	51.22
12	1	65.85
15	1	88.29
20	1	126.06
25	1	164.29
30	1	202.67

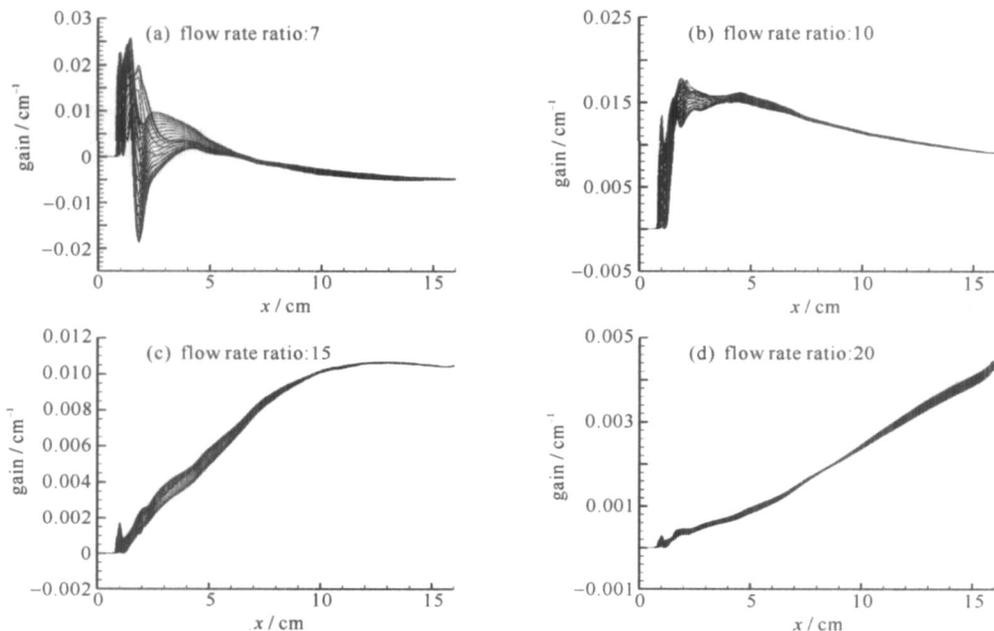


Fig. 2 Distribution of the small signal gain along the x axis at $j=25$ gridline

图 2 $j=25$ 网格线上小信号增益系数沿 x 方向的分布

图 3 是增益系数在 $i = 300$ 网格线上的在纵向分布,做了对称处理。几种情况下横向分布基本均匀,3 维效应在光腔附近已经不明显,其中也有副流的穿透深度合理的因素。流量配比低时,不仅出现负增益,且纵向分布不均匀。配比为 7,10 时,在竖直方向对称面附近出现了增益峰,可能缘于穿透深度并非完全合适。适当的流量配比不仅在流向上分布均匀,还能得到较为均匀的纵向分布。

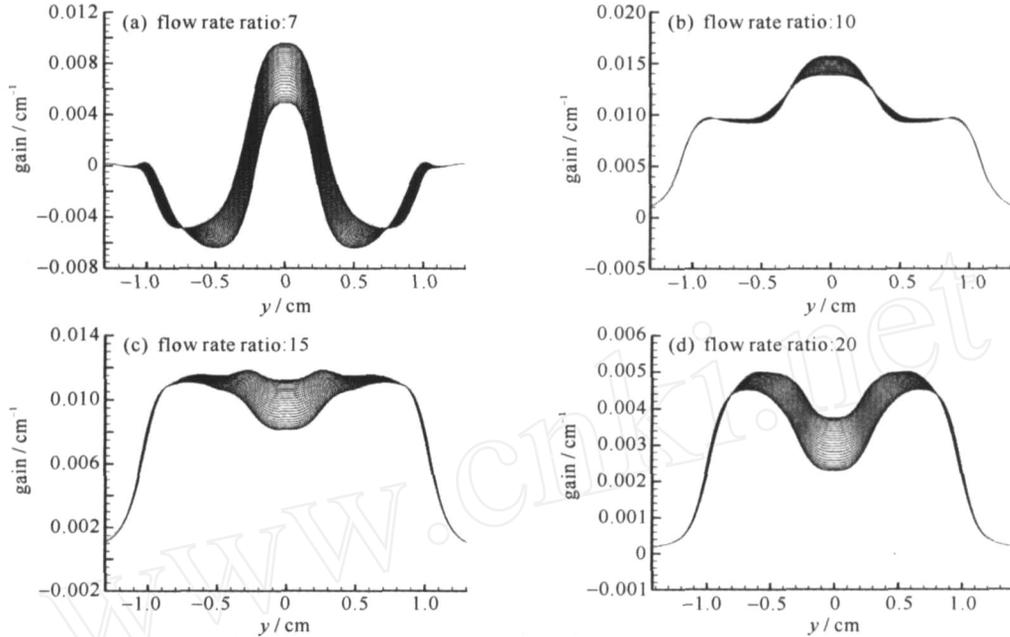


Fig. 3 Distribution of the small signal gain along the y axis at $i = 300$ gridline
图 3 $i = 300$ 网格线上小信号增益系数沿 y 方向的分布

2.3 均值与方差

为了更为直观与系统地比较各流量配比条件下增益系数的分布特性,使用统计理论中的平均值与方差对所有算例结果进行了总结分析

$$g_{avg} = \frac{1}{k_{max}} \left(\prod_{k=1}^{k_{max}} \frac{1}{j_0} \prod_{j=1}^{j_0} g_{j,k} \right) \quad (5)$$

式中: g_{avg} 表示平均值; k_{max} 表示 z 方向上的总网格点数; j_0 取为 35,以忽略壁面影响。

$$V_{g,y} = \frac{1}{k_{max}} \prod_{k=1}^{k_{max}} \sqrt{\frac{1}{j_0} \prod_{j=1}^{j_0} (g_{j,k} - \overline{g_{y,k}})^2}, \quad \overline{g_{y,k}} = \frac{1}{j_0} \prod_{j=1}^{j_0} g_{j,k} \quad (k \text{ 固定}) \quad (6)$$

$$V_{g,z} = \frac{1}{j_0} \prod_{j=1}^{j_0} \sqrt{\frac{1}{k_{max}} \prod_{k=1}^{k_{max}} (g_{j,k} - \overline{g_{z,j}})^2}, \quad \overline{g_{z,j}} = \frac{1}{k_{max}} \prod_{k=1}^{k_{max}} g_{j,k} \quad (j \text{ 固定}) \quad (7)$$

式中: V 表示计算所得的方差,沿 y 方向的 $V_{g,y}$ 为在固定 k 网格线上的方差在 z 方向的求和平均。同理,沿 z 方向的 $V_{g,z}$ 为在固定 j 网格线上的方差在 y 方向的求和平均

$$\overline{V}_{g,y} = \frac{V_{g,y}}{g_{avg}}, \quad \overline{V}_{g,z} = \frac{V_{g,z}}{g_{avg}} \quad (8)$$

图 4 为在 $i = 300$ 处的平均增益系数以及竖直与横向两个方向上的相对方差与平均增益的和,即两条和曲线与平均增益曲线之间的偏差表征着增益沿此方向分布的均匀性。

可以发现,在合适的流量配比条件下,不仅平均增益系数最为可观,同样分布特性不论在纵向上还是横向上也更为均匀,证明了合理流量配比的重要性。

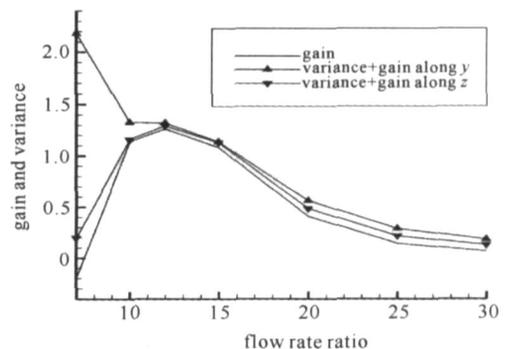


Fig. 4 Distribution of the average small-signal gain and its variances along the y and z axes at $i = 300$

图 4 $i = 300$ 处的平均小信号增益系数及沿 y, z 方向的增益分布方差

3 结 论

本文对 COIL 在不同主副流流量配比下的增益系数分布进行了数值分析,得到以下结论:在混合喷管亚声速段进行横向喷流的 COIL 系统小信号增益系数的分布受到主副流流量配比的影响。在高碘分子浓度条件下,增益系数横向分布极不均匀并出现大量负增益区。而在低碘分子浓度条件下,增益系数分布虽然均匀但很难达到理想水平。数值结果证明,COIL 中的混合与化学反应在喷管中的流动具有一定的时间与空间变化规律,不同的配比条件下增益最大值出现的位置也在喷管中改变移动,并且在高配比时,增益来不及达到最大值气流便已经流出喷管。合理的主副流流量配比将得到理想的、分布均匀的小信号增益系数。

参考文献:

- [1] Yang B L. Latest advances in COIL at Dalian[C]// Proc of SPIE. 1998, **3574**:281-289.
- [2] 李守先,魏德福,刘广华,等. 氧碘化学激光器中混合现象的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 1999, **11**(5):535-537. (Li S X, Wei D F, Liu G H, et al. A numerical simulation on mixing phenomena in chemical oxygen-iodine laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(5):535-537)
- [3] 袁先旭,陈坚强,邓小刚. 化学氧碘激光(COIL)三维混合反应流场数值模拟研究[J]. 空气动力学学报, 2006, **24**(4):444-449. (Yuan X X, Chen J Q, Deng X G. Numerical research on chemical reaction flowfield for 3D COIL. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2006, **24**(4):444-449)
- [4] 胡宗民,吴宝根,姜宗林,等. COIL 亚声速段横向喷流混合流场数值分析[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(4):481-484. (Hu Z M, Wu B G, Jiang Z L, et al. Numerical simulation on the flow field of COIL mixing nozzle with injection from subsonic region. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(4):481-484)
- [5] Rybalkin V, Katz A, Waichman K, et al. How many O₂ molecules are consumed per dissociated I₂ in chemical oxygen-iodine lasers[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, **89**:021115.
- [6] 刘万发,赵彤,徐文刚,等. 碘气流穿透深度和碘流量对 COIL 激光输出功率的影响[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(12):1506-1508. (Liu W F, Zhao T, Xu W G, et al. Influence of iodine flow penetration depth and flow rate on COIL output power. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(12):1506-1508)
- [7] 吕俊明,胡宗民,姜宗林. 亚声速段横向射流对 COIL 性能影响的数值研究[J]. 计算物理, 2008, **25**(4):414-420. (Lü J M, Hu Z M, Jiang Z L. Effect of penetration in HPCOIL. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2008, **25**(4):414-420)
- [8] Madden T J. Aspects of 3-D chemical oxygen-iodine laser simulation[C]// Proc of SPIE. 2003, **5120**:363-375.
- [9] Jiang Z L, Takayama K, Chen Y S. Dispersion conditions for non-oscillatory shock capturing schemes and its applications[J]. *Comp Fluid Dynamics Journal*, 1995, (4):137-150.
- [10] Paschkewitz J, Shang J, Miller J, et al. An assessment of COIL physical property and chemical kinetic modeling methodologies[R]. AIAA 2000-2574, 2000.

Optimization of flow rate ratio of primary to secondary flow in COIL based on gain distribution

L ÜJun-ming, WANG Chun, JIANG Zong-lin

(Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: There are strong interactions or couples among multi-fields in the mixing nozzle of the COIL, such as gas-dynamics, chemical reaction kinetics and optics. Three-dimensional CFD technology was applied on the RADICL model by solving the laminar Navier-Stokes equations and transportation equations to study the small signal gain distributions. A simulation was done in the condition of different flow rate ratio of primary to secondary flow. Results show that the appropriate flow rate ratio plays an important role on the spatial distribution of the small signal gain. Both too high and too low concentration of iodine goes against the proper gain.

Key words: Chemical oxygen-iodine laser; Transverse jet; Flow rate ratio; Gain; Variance

勘误: 2008 年第 9 期目录“张嘉波”更正为“张喜波”。