

文章编号: 1001-4322(2009)09-1305-05

氧碘化学激光器超声速段射流 工作方式性能的数值研究*

吕俊明^{1,2}, 胡宗民³, 王 春², 姜宗林²

(1. 中国航空气动力技术研究院, 北京 100074; 2. 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;
3. 国立庆尚大学 机械航空工程学系, 660-701 晋州 韩国)

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 维计算流体动力学技术,通过求解层流 Navier-Stokes 方程与组分输运方程对简化的氧碘化学激光 RADICL 模型进行数值模拟与分析,结合 10 种组分和 21 个基元反应的化学反应模型,对 COIL 超声速段射流情况下喷管内的流动及混合情况,尤其是产率、分解率、泵浦率和小信号增益系数的细致 3 维空间分布进行研究。结果证明超声速段进行射流有利于提高 COIL 的性能表现,可以充分利用高增益区,光腔位置增益可以达到 0.012 cm^{-1} ,与亚声速段射流相比总压恢复性能提高,混合有待加强。

关键词: 氧碘化学激光; 超声速段射流; 增益系数; 混合效率; 总压恢复

中图分类号: O354.3 **文献标志码:** A

氧碘化学激光(COIL)利用亚稳态单重态氧 $\text{O}_2(^1)$ 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($\text{O}_2(^1) + \text{I} \rightarrow \text{I}^* + \text{O}_2(^3)$), I^* 受激辐射产生近红外激光束($\text{I}^* + h\nu \rightarrow \text{I} + 2h\nu$)。首先由美国空军武器实验室在 1977 年研制成功,国内对 COIL 研究工作的开展主要有中国科学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^[1-4]。COIL 传统上采用在亚声速段以横向射流方式喷射副流,相关理论与实验研究开展较多,中国科学院力学研究所也针对穿透深度及流量对比对整体性能的影响进行了相关数值研究^[5-6]。但亚声速段射流方式限制了总体流量大小,横向射流方式压力损失严重,因此提出将射流口改在超声速段,将副流动能转化为压力以提高压力恢复系数,也可减小水蒸气冷凝与去活的双重损失机制。相关研究的数值模拟结果非常理想,但实验结果让人失望。推测其原因在于混合效率较低以及单重态氧供给不足。故本文利用 3 维计算程序对主流无载气式 COIL 在超声速段射流的工作方式进行了研究,分析各参数尤其是小信号增益系数在 3 维空间内的细致分布。

1 物理模型与计算方法

1.1 物理与计算模型

物理模型参考 RADICL (research assessment device improvement chemical laser) 狭缝喷管,图 1 为所采用的计算模型示意图,尺寸来自文献[7]。喷孔位于喉道下游,半径为 0.4 mm,所在平面与水平面成 60° ,保证射流角度为 30° 。竖直方向对称面处取对称条件,横向边界也为对称条件。计算区域的网格总数为 $350 \times 50 \times 30$ 。

1.2 控制方程与数学模型

应用 3 维层流 N-S 方程,直角坐标系下可以描述为

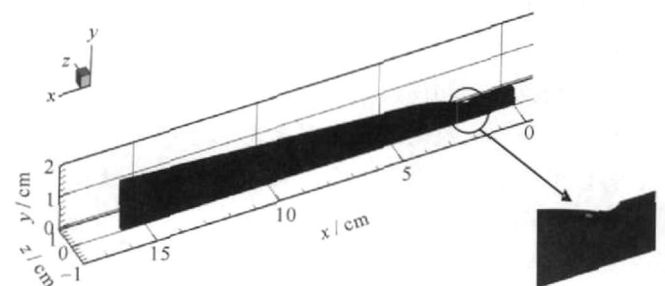


Fig. 1 Schematic of computational model of RADICL nozzle

图 1 RADICL 狭缝喷管简化计算模型

* 收稿日期:2008-12-24; 修订日期:2009-05-15
基金项目:国家高技术发展计划项目与大连化学物理研究所联合基金资助课题
作者简介:吕俊明(1981—),男,博士研究生,从事化学反应流数值研究; junminglv@gmail.com。

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

式中: U 为守恒型独立变量; $F_i (i = 1, 2, 3)$ 分别为 x, y, z 方向的对流量; $D_i (i = 1, 2, 3)$ 分别为 x, y, z 方向的耗散通量; S_c 为化学反应源项。

采用考虑浓度驱动机制和压力驱动机制的多组分扩散输运公式,其中扩散系数通过等效二元扩散模型计算而得。化学反应采用基元反应模型,考虑 $I_2, I_2^*, I, I^*, O_2(^1), O_2(^2), O_2(^3), H_2O, Cl_2, He$ 共 10 种组分, 21 个基元反应, 详见表 1^[8]。

表 1 21 个基元反应模型

Table 1 21 reaction models

reaction equation	rate/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	reaction equation	rate/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
1 $O_2(^1) + O_2(^1) \rightarrow O_2(^1) + O_2(^3)$	2.7×10^{-17}	12 $I_2^* + O_2(^3) \rightarrow I_2 + O_2(^3)$	4.9×10^{-12}
2 $O_2(^1) + H_2O \rightarrow O_2(^1) + H_2O$	6.7×10^{-12}	13 $I_2^* + H_2O \rightarrow I_2 + H_2O$	1.7×10^{-11}
3 $O_2(^1) + O_2(^3) \rightarrow O_2(^3) + O_2(^3)$	1.6×10^{-18}	14 $I_2^* + He \rightarrow I_2 + He$	9.8×10^{-12}
4 $O_2(^1) + H_2O \rightarrow O_2(^3) + H_2O$	4.0×10^{-18}	15 $I + O_2(^1) \rightarrow I^* + O_2(^3)$	7.8×10^{-11}
5 $O_2(^1) + Cl_2 \rightarrow O_2(^3) + Cl_2$	6.0×10^{-18}	16 $I^* + O_2(^3) \rightarrow I + O_2(^1)$	$1.0277 \times 10^{-10} \times e^{(-401.4/T)}$
6 $O_2(^1) + He \rightarrow O_2(^3) + He$	8.0×10^{-21}	17 $I + O_2(^1) \rightarrow I + O_2(^3)$	1.0×10^{-15}
7 $I_2 + O_2(^1) \rightarrow 2I + O_2(^3)$	4.0×10^{-12}	18 $I^* + O_2(^1) \rightarrow I + O_2(^1)$	1.1×10^{-13}
8 $I_2 + O_2(^1) \rightarrow I_2 + O_2(^3)$	1.6×10^{-11}	19 $I^* + O_2(^1) \rightarrow I + O_2(^1)$	1.1×10^{-13}
9 $I_2 + O_2(^1) \rightarrow I_2^* + O_2(^3)$	7.0×10^{-15}	20 $I + I^* \rightarrow I + I$	1.6×10^{-14}
10 $I_2 + I^* \rightarrow I + I_2^*$	3.8×10^{-11}	21 $I^* + H_2O \rightarrow I + H_2O$	2.0×10^{-12}
11 $I_2^* + O_2(^1) \rightarrow 2I + O_2(^3)$	3.0×10^{-10}		

1.3 数值方法

对流项采用具有二阶精度、结构简单且鲁棒的频散可控耗散格式(DCD)进行离散^[9],耗散项采用中心差分格式离散。

2 计算结果与讨论

2.1 计算条件

模拟中主流采用 $O_2(^1), O_2(^2), H_2O, Cl_2, He$ 的混合物,分别为基态氧、单重态氧、水蒸气、氯气和载气氦气,摩尔配比为 1 1.5 0.16 0.24 19.72。副流为 I_2 和 He 的混合物,摩尔配比为 1 64.92,保证碘流量配比为 25 1。主流来流马赫数为 0.4。对于副流,声速射流的方式已不再适宜,采用压力匹配条件,以马赫数 2.5 喷入,射流角度保持与水平方向成 60° ,主流 $p = 5.5417 \text{ kPa}, T = 271.3 \text{ K}$,副流 $p = 2 \text{ kPa}, T = 319 \text{ K}$ 。

2.2 流场结构的分布

图 2 是 I^* 的无量纲密度在 2 个 xy 剖面和 5 个 yz 剖面上的分布图, yz 剖面位置分别为 $x = 2.2278, 2.6296, 3.0, 3.4, 3.8, 4.2 \text{ cm}$,第一个位置为喷孔的中心位置。为方便显示流场结构特征,各剖面中所用的分布云图级数各不相同。由图可见, I^* 充满混合喷管的大部分区域,由于射流的深度有限,在竖直方向对称面附近分布不足。沿流向的分布显示出和亚声速段横向射流相类似的流场结构,马蹄形涡,向内卷起的涡,这些剪切作用区域都有助于混合。横向对称轴处分布较少,可考虑在下游适当位置设立第二喷孔。

2.3 泵浦率与增益分布

I_2 分解率、 I 泵浦率以及 $O_2(^1)$ 生成率的计算公式为

$$\text{diss} = \frac{(I) + (I^*)}{(I_2) + (I_2^*) + (I) + (I^*)}, \quad \text{pump} = \frac{(I^*)}{(I) + (I^*)}, \quad \text{yield} = \frac{(O_2(^1))}{(O_2(^1)) + (O_2(^2)) + (O_2(^3))} \quad (2)$$

图 3 中各分布的每条曲线代表不同的横向位置,即不同的 k 方向网格点。可见碘分解完全,除喷管竖直方向对称轴区域由于射流穿透稍显不足有所下降,流向和纵向分布均表明分解彻底。产率基本维持在 35%~40%,竖直方向对称轴区域由于碘含量较少而有较多的单重态氧剩余,导致此区域泵浦率达到 80%左右,超过平均值 50%。碘射流过多,没有充足的载能介质以维持较高的泵浦率,将直接影响小信号增益系数的提高。

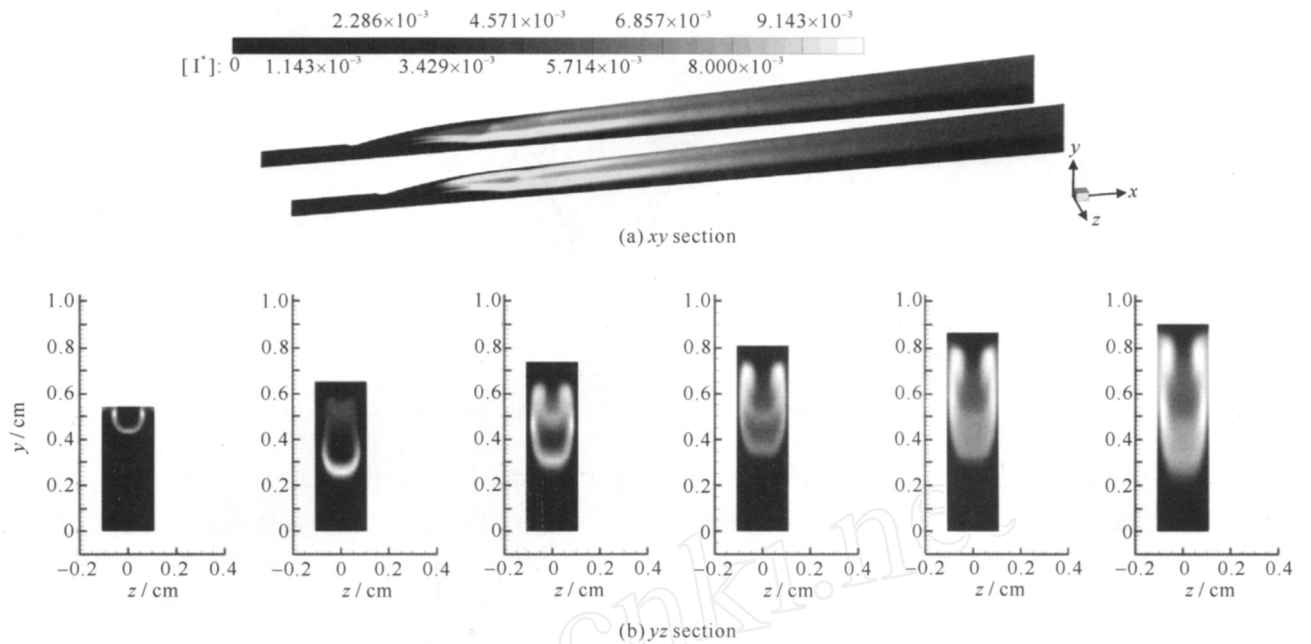


Fig. 2 Distribution of non-dimensional density of excited iodine on xy and yz plane sections

图 2 激发态碘原子无量纲密度的 xy 与 yz 剖面分布图

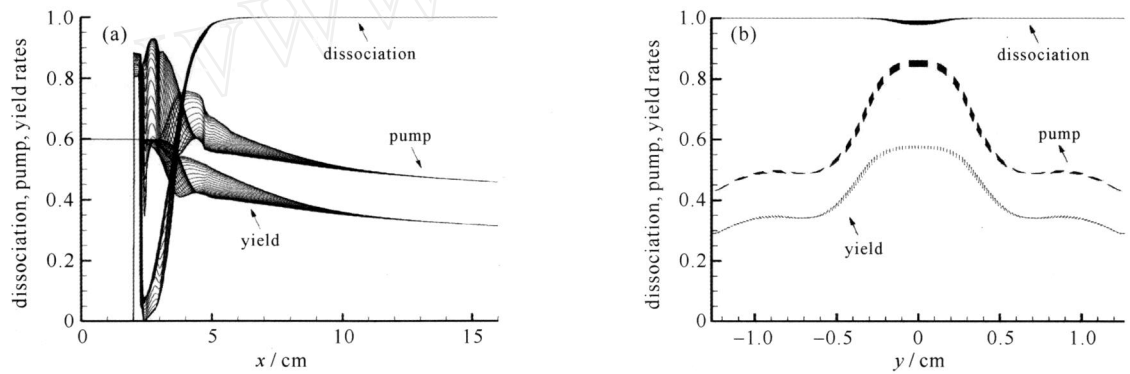


Fig. 3 Distribution of dissociation, pump and yield rates along x axis at $j=25$ and along y axis at $i=300$

图 3 $j=25$ 和 $i=300$ 网格面上分解率、泵浦率和产率沿 x 向和 y 向的分布

在氧碘化学激光器的光学谐振腔中, I^* 达到粒子数反转后的激光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。具体的表达式为

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

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 为绝对温度。

小信号增益系数不仅取决于泵浦率的高低, 还与数密度大小有关。图 4 显示由于载能介质不足, 增益系数沿流向不断下降, 同样在纵向对称轴区域增益系数较低。在喷管中部, $x=7$ cm 附近, 增益系数达到 0.012 cm^{-1} 左右, 与亚声速段射流情况下的增益系数相近。随流动发展, 在下游段分布在横向更为均匀, 3 维效应几乎可以不考虑。

图 5 是混合效率以及总压恢复系数沿流向的分布曲线, 计算公式为

$$\eta_{\text{mix}} = \frac{\int_{-H/2}^{H/2} (I, y) dy}{\max(I) H} \quad (4)$$

式中: (I) 为 I 原子的密度, 其正比于 I_2 的密度; H 为此流向位置下喷管的纵向高度。

$$C_p = \frac{p_{0a}}{p_{0i}}, \quad p_{0i} = \frac{\dot{n}_p p_{0p} + \dot{n}_s p_{0s}}{\dot{n}_p + \dot{n}_s} \quad (5)$$

式中: \dot{n}_p 和 \dot{n}_s 分别为主、副流的摩尔流量; p_{0p} 和 p_{0s} 分别为主、副流的输入总压。

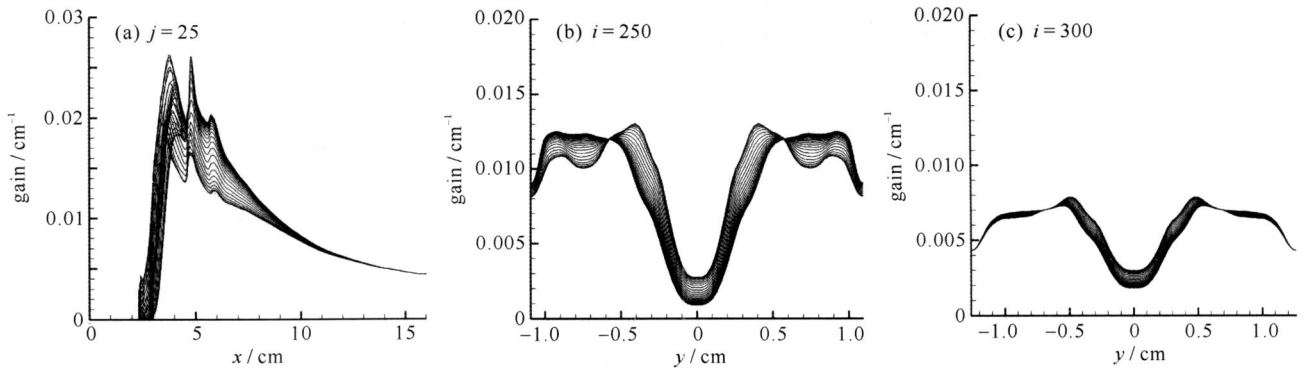


Fig. 4 Distribution of small signal gain along x axis at $j=25$ and along y axis at $i=250$ and $i=300$

图 4 $j=25$ 及 $i=250, 300$ 网格线上小信号增益系数沿 x, y 方向的分布

图 5(a) 表明喷管恒压区内混合效率在 50% ~ 60%, 低于亚声速段射流情况, 有待进一步增强混合, 提高混合效率。总压恢复系数为 0.25 左右, 沿流向基本保持不变, 相对于主流入口总压的恢复系数约为 0.55。

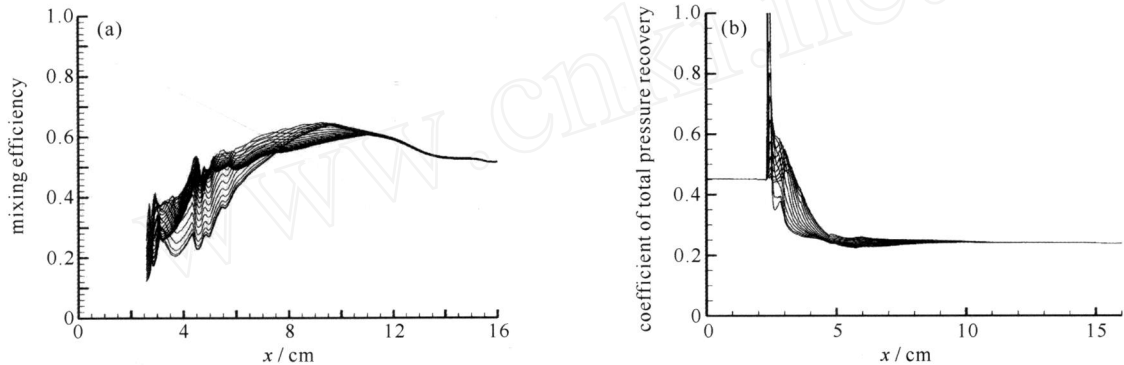


Fig. 5 Distribution of mixing efficiency and pressure recovery along x axis at $j=25$

图 5 混合效率和总压恢复系数沿 x 轴分布

3 结 论

本文通过求解 3 维层流 N-S 方程与组分输运方程, 结合基元化学反应模型对 COIL 超声速段射流时, 化学效率与小信号增益系数的分布进行了数值研究, 得到以下结论: 超声速段射流情况下, 流场结构与激射介质的分布表现出马蹄形涡等横向射流特征。通过对产率、分解率与泵浦率的分析, 氧碘流量配比 25 时碘分解完全, 载能介质不足导致泵浦率不高, 使得小信号增益系数的流向分布呈逐渐降低趋势, 增益系数的纵向分布体现出较好的横向分布, 在光腔位置增益大小达到 0.012 cm^{-1} 。混合效率与总压恢复系数的分布表明此种工作方式下混合效率不足 60%, 需要提高, 而总压分布均匀, 有利于出光。

参考文献:

- [1] Yang Bailing. 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 Shouxian, Wei Defu, Liu Guanghua, 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. 氧碘化学激光(COIL)3 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 Xianxu, Chen Jianqian, Deng Xiaogang. 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 亚声速段横向射流混合流场数值分析[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(4):481-484. (Hu Zongmin, Wu Baogen, Jiang Zonglin, 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] 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 Junming, Hu Zongmin, Jiang Zonglin. Effect of penetration in HPCOIL. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2008, **25**(4):414-420)
- [6] 吕俊明, 王春, 姜宗林. COIL 基于小信号增益系数的最佳流量配比选择[J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(10):1593-1596. (Lü Junming, Wang Chun, Jiang Zonglin. Optimization of flow rate ratio of primary to secondary flow in COIL based on gain distribution. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(10):1593-1596)

- Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(10):1593-1596)
- [7] Madden T J. Aspects of 3-D chemical oxygen-iodine laser simulation[C]// Proc of SPIE. 2003, **5120**:363-375.
- [8] Paschkewitz J, Shang J, Miller J, et al. An assessment of COIL physical property and chemical kinetic modeling methodologies[R]. AIAA Paper 2000-2574, 2000.
- [9] Jiang Zonglin, Takayama K, Chen Yaosong. Dispersion conditions for nonoscillatory shock capturing schemes and its applications[J]. *Computational Fluid Dynamics Journal*, 1995, **4**:137-150.

Numerical study on performance of COIL with supersonic jet in supersonic section

L ÜJunming^{1,2}, Hu Zongmin³, Wang Chun², Jiang Zonglin²

(1. *China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074, China;*

2. *Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

3. *Research Center for Aircraft Parts Technology and School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, South Korea)*

Abstract: There are strong interactions or couplings among multi-fields in the mixing nozzle of the chemical oxygen-iodine laser(COIL), such as gas-dynamics, chemical reaction kinetics and optics. In this paper, three-dimensional computational flow dynamic technology was applied on the research assessment device improvement chemical laser model by solving the laminar Navier-Stokes equations and transportation equations to study iodine molecule dissociation rate, iodine atom pumping rate, singlet oxygen yield rate and small signal gain distributions. The simulation was done in the condition of that the secondary flow jet would take place in the supersonic section of the nozzle. The detailed flow field and distribution of yield, dissociation and pumping rates were investigated. The distribution characteristic of small signal gain, variation of total pressure recovery and mixing efficiency were described. It is found that the COIL with the secondary flow jet in the supersonic section would show some improved performance. The gain at the position of mirror could achieve 0.012 cm^{-1} . The coefficient of total pressure recovery would be increased. The mixing process between supersonic flows plays an important role here and should be investigated deeply.

Key words: chemical oxygen-iodine laser; jet in supersonic section; gain; mixing efficiency; total pressure recovery