

[文章编号] 1001-246X(2008)04-0414-07

# 亚声速段横向射流对 Coil 性能影响的数值研究

吕俊明, 胡宗民, 姜宗林

(高温气体动力学重点实验室 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

[摘 要] 在化学氧碘激光的混合喷管内发生的是一个气体动力学、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. 利用三维 CFD 技术, 通过求解层流 Navier-Stokes 方程与组分输运方程, 对简化后的化学氧碘激光 RADICL 模型进行数值模拟与分析, 对 COIL 的气动和增益特性进行探讨. 在不同的射流穿透条件下, 计算 COIL 混合喷管中的混合与化学反应过程, 发现穿透深度决定了增益的分布特性以及过度穿透条件下的非定常结构.

[关键词] COIL; 横向射流; 穿透; 增益; 非定常结构; 总压恢复

[中图分类号]

[文献标识码] A

## 0 引言

化学氧碘激光 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 ( $I^* + h\nu \rightarrow I + 2h\nu$ ). 化学氧碘激光器首先由美国空军武器实验室在 1977 年研制成功, 是第一个应用电子跃迁而不是转动或振动跃迁运转的化学激光器. COIL 产生的激光波长  $\lambda = 1.315 \mu\text{m}$ , 适用于光纤传输与远距离传输, 在军事与工业上的应用前景十分广阔.

目前应用最为广泛的是超声速化学氧碘激光器, 它通过超声速膨胀过程, 降低腔内介质温度及单重态氧阈值, 实现粒子数反转, 同时使腔压不至于过高, 有利于增益介质的形成, 提高激光器的小信号增益系数和输出功率, 改善光束质量. 但是, 超声速气流令混合层趋于稳定, 可压缩效应增强, 使得可能产生的大涡结构受到抑制, 混合有效时间缩短, 混合效率降低. 近期的研究表明, COIL 主要性能指标仍有改进的空间<sup>[1]</sup>, 横向射流的穿透特性以及射流结构的非定常特性<sup>[2]</sup>对 COIL 过程将会产生复杂而重要的影响. 因此, 对于 COIL 中的超声速混合现象的研究是非常重要的.

COIL 的数值模拟工作始于 20 世纪 80 年代, Crowell 分别采用二维薄剪切层<sup>[3]</sup>和三维涡量流函数法<sup>[4]</sup>进行了初步的计算, 结果表明, COIL 的数值模拟对副流碘的喷射及混合过程很敏感, 因此需要用完整的三维 N-S 方程和更高精度的耗散模型求解. Buggeln 率先使用三维 N-S 方程进行模拟<sup>[5]</sup>, 其计算结果所预测的激光功率较为准确, 证明了运用三维 N-S 方程进行模拟的可行性. Madden 及 Miller 对 COIL 在无出光条件下的三维化学反应流场进行了计算模拟<sup>[6]</sup>, 并于近期开展了 COIL 内流动不稳定性的研究. 上述研究尽管在小信号增益系数、出光功率等数据上与实验数据有较好的可比性, 但由于受到计算资源的限制以及用于验证计算中采用的模型、假设的实验数据的缺乏, 致使这些结果仍无法对 COIL 内的流体动力学机制给出深入透彻的解释.

其它国家, 如俄罗斯、日本、以色列等, 也都对 COIL 进行了一定的数值模拟与实验研究. 国内对于 COIL 的研究起步较晚, 主要有大连化物所、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进行了相关的研究<sup>[7-10]</sup>. 但 COIL 的数值模拟工作开展的并不多, 而且大多也没有涉及化学反应的计算.

对于 COIL 横向射流工作方式, 如果穿透不足, 单重态氧的利用率会降低, 造成整个系统化学效率降低. 如果射流穿透过度, 将在喷管对称面附近堆积大量的碘, 势必消耗大量的载能介质, 引起资源浪费. 而且射流在对称面附近的相互作用会引起较为严重的总压损失, 并且增益介质分布的不均匀可能使光镜局部热超载

[收稿日期] 2007-04-02; [修回日期] 2007-09-13

[基金项目] 国家 863 计划项目与大连化学物理研究所基金联合资助项目

[作者简介] 吕俊明(1981-), 男, 陕西, 博士生, 从事化学反应流数值研究.

导致镜面变形或烧损. 因此对于亚声速段横向射流的混合配气方式, 必须考虑合理的射流穿透程度. 本文采用三维 N-S 方程以及基元化学反应模型, 模拟了 COIL 混合喷管与光腔内的化学反应流动, 分析在不同的射流穿透条件下, COIL 亚声速段横向射流对 COIL 性能的影响, 对提高 COIL 工作效率以及确定合理的设备运行条件都有很重要的意义.

## 1 物理模型与计算方法

### 1.1 物理模型

物理模型参考 RADICL (Research Assessment Device Improvement Chemical Laser) 狭缝喷管 (图 1), 其中图 1 (a) 为实物模型简化示意图, 图 1 (b) 为计算模型. 考虑到喷管上下两处管壁和射流喷孔完全对称, 计算区域在竖直方向上只选择了一半, 在对称面处取对称条件. 又由于横向上模型喷孔的重复性阵列安排, 考虑合理节约计算资源, 将模型在横向上也划分到最小单元, 即半个大孔和一个小孔, 边界取对称条件. 这样做虽然简化了靠近小孔的边界的原有的周期性边界条件, 但结果基本无影响, 同时节省了将近一倍的计算量. 模型尺寸来自于文 [2], 计算区域的网格总数为  $600 \times 70 \times 30$ .

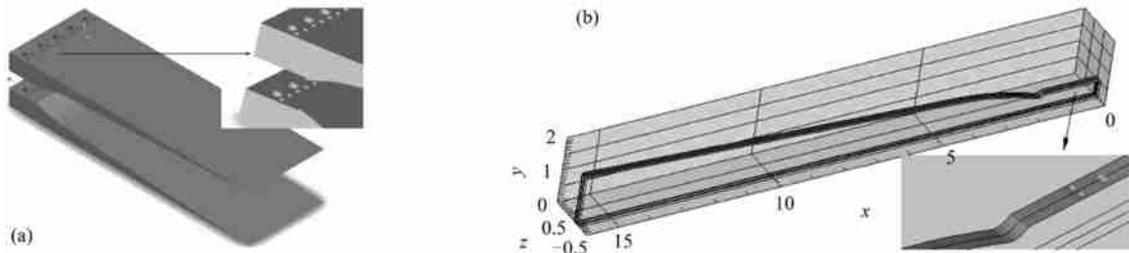


图 1 RADICL 狭缝喷管物理模型和简化计算域

Fig. 1 Schematic of physical model and computational domains of an RADICL nozzle

### 1.2 计算方法

COIL 系统在低压低密度环境下运行, Reynolds 数为  $10^2 \sim 10^3$  量级, 流动具有复杂的三维特性, 因此本文应用三维层流 N-S 方程描述这一流动过程. 同时考虑对流、粘性耗散和分子扩散. 在直角坐标系下, 三维可压缩层流 N-S 方程可以写为

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

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

$$\begin{aligned} U &= [ \quad_1 \quad_2 \quad \dots \quad_{ns} \quad u \quad v \quad w \quad e ], \\ F_i &= [ \quad_1 u_i \quad_2 u_i \quad \dots \quad_{ns} u_i \quad u_i u_1 + \quad_{i,1} p \quad u_i u_2 + \quad_{i,2} p \quad u_i u_3 + \quad_{i,3} p \quad (e + p) u ], \\ D_i &= [ \quad_1 v_{D1,i} \quad_2 v_{D2,i} \quad \dots \quad_{ns} v_{Dns,i} \quad \quad_{i,1} \quad_{i,2} \quad_{i,3} \quad u_i \quad_{i,j} + q_i ], \\ S_c &= [ \quad_1 \quad_2 \quad \dots \quad_{ns} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 ]. \end{aligned}$$

对应的空间半离散差分方程可写为

$$\left( \frac{-U}{\quad_{i,j,k}} \right) = - \text{CONV}_{i,j,k}^n + \text{VISC}_{i,j,k}^n + S_{i,j,k}^n, \quad (2)$$

其中耗散项  $\text{VISC}$  包括分子扩散、粘性效应和热传导项, 采用中心差分格式离散, 对流项  $\text{CONV}$  采用具有二阶精度的结构简单而且鲁棒的频散可控耗散格式 (DCD) 进行离散<sup>[11-13]</sup>.

组分物性参数包括粘性系数、热传导系数以及比热、比焓等热力学参数, 应用温度多项式拟合得到. 分子扩散模型应用考虑浓度驱动机制和压力驱动机制的等效二元扩散模型, 化学反应应用基元反应模型, 考虑  $\text{I}_2, \text{I}_2^*, \text{I}, \text{I}^*, \text{O}_2(^1), \text{O}_2(^3), \text{O}_2(^3), \text{H}_2\text{O}, \text{Cl}_2, \text{He}$  共 10 种组分和 21 个基元反应, 详细见表 1<sup>[14]</sup>.

## 2 计算结果与讨论

### 2.1 横向射流与流场

图 2 给出了亚声速流横向射流示意图,长度参量如图中所标识.横向射流的特性控制无量纲参数为射流和主流的比动量通量的比值,通常定义为等效速比,

$$R = \left( \frac{\rho_s u_s^2}{\rho_p u_p^2} \right)^{0.5} = \frac{M_s}{M_p} \left( \frac{\rho_s P_s}{\rho_p P_p} \right)^{0.5} = \frac{A_p}{A_s} \frac{\dot{n}_s}{\dot{n}_p} \left( \frac{W_s T_s P_p}{W_p T_p P_s} \right)^{0.5} \quad (3)$$

其中,  $\rho, u, M, A, \dot{n}, W, T, P$  分别表示主副流的密度、流速、马赫数、比热比、流道截面、摩尔流量、摩尔质量、温度和压力.横向射流轨迹可用一个无量纲的参数来表示<sup>[15]</sup>,

$$\frac{z}{D} = aR^b \left( \frac{x}{D} \right)^c \quad (4)$$

文[16]通过实验拟合,给出穿透深度的经验公式

$$\frac{z}{D} = 2.5R, \quad (5)$$

代入气体状态参数以及主、射流截面积可以得到横向射流穿透参数的表达式,

$$z = \frac{A_s}{D} \frac{\dot{n}_s}{2.5A_p} = \frac{\dot{n}_s}{\dot{n}_p} \left( \frac{W_s T_s P_p}{W_p T_p P_s} \right)^{0.5} \quad (6)$$

本文模拟中,主流采用  $O_2(^3), O_2(^1), H_2O, Cl_2$  和 He 的混合物,分别为基态氧、单重态氧、水蒸汽、氯气和载气氦气,摩尔配比为 1 1.44 0.16 0.24 5.77. 副流为  $I_2 - He$  的混合物射流,摩尔配比为 1 118.4. 具体的计算参数见表 2,其中下标  $p$  代表主流,  $s$  代表副流.

表 1 COIL 化学反应计算采用的 21 个基元反应  
Table 1 21 reactions in COIL chemical computation

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

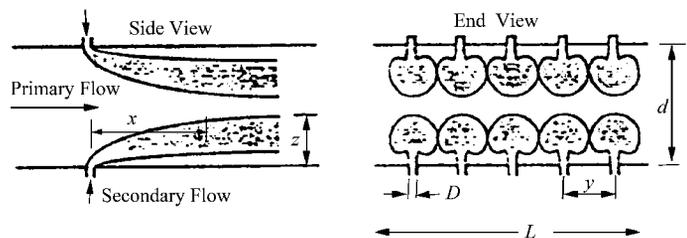


图 2 亚声速横向射流示意图

Fig. 2 Schematic of subsonic jet in cross flow

表 2 模拟采用的计算参数

Table 2 Computation coefficients

|      | $P_p/kPa$ | $T_p/K$ | $P_s/kPa$ | $T_s/K$ | $\dot{n}_s/\dot{n}_p$ | $Z/D$ |
|------|-----------|---------|-----------|---------|-----------------------|-------|
| 穿透不足 | 9.9       | 315     | 16.1      | 415     | 0.16                  | 0.098 |
| 完全穿透 | 9.9       | 315     | 20        | 415     | 0.2                   | 0.109 |

图 3 给出了不考虑化学反应时,穿透不足条件下的射流附近的流场结构,马蹄型断面结构、逆旋涡对以及射流喷口附近的 Shock-cell 结构非常清晰,并可以看出,在  $y$  向轴线附近,副流分布略显不足.

### 2.2 化学反应效率与增益场

对于喷管内发生的化学反应流动,增益介质  $I^*$  的生成是我们最为关心的,因此在本文中考察了碘分子的分解率以及 I 原子的泵浦率,其计算公式为

$$\text{diss} = \frac{I + I^*}{I_2 + I + I^* + I_2^*}, \quad \text{pump} = \frac{I^*}{I + I^*} \quad (7)$$

计算结果见图 4,5.

图 4 为穿透不足情况,图 4(a),(b)分别是在大孔和小孔对称面上光腔轴线位置处( $x = 10\text{cm}$ )各参量沿  $y$  轴的分布情况,其中图 4(a)中, $I_2$  分解率在 32%左右,泵浦率在 13%左右,在  $y = 0$  对称面附近,分解率明显偏低,导致此处泵浦率也不高,单重态氧在喷管离开对称面的中间区域有较多的消耗.图 4(b)中,在靠近壁面的区域内,分解率和泵浦率与图 4(a)相近,但是在靠近  $y = 0$  对称面附近,两者严重偏低,分解率只有 16%左右,泵浦率只有 8%左右,这显示了混合流动以及反应进程的三维效应.

图 5 是在完全穿透条件下得到的结果,与图 4 比较可以发现,分解率与泵浦率分布更为均匀,使得单重态氧的产率更为均匀,不同于穿透不足条件下的情况.由于这种分布更合理, $I$  的泵浦率得到了明显提高,达到了 17%左右.从图 5(b)的分布也可以看到,三维效应也得到了很好的限制.流场的均匀性也带来增益信号等参量的均匀性,有效防止在光腔局部位置可能产生的热过载现象.分解率只有 20%左右,低于穿透不足情况,可能是由于  $I_2$  的集中分布,导致混合不完全充分, $O_2(^1)$  并没有被完全利用.而两者分解率都偏低的情况可能与反应中间过程产生大量过渡性产物  $I^*$  有关.

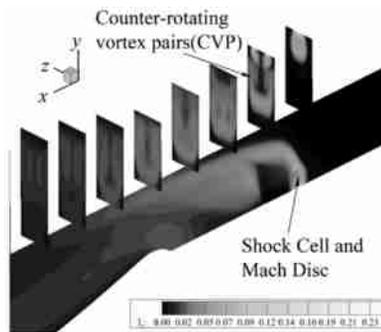


图 3 射流附近  $I_2$  密度分布图

Fig. 3 Distribution of  $I_2$  density around injection

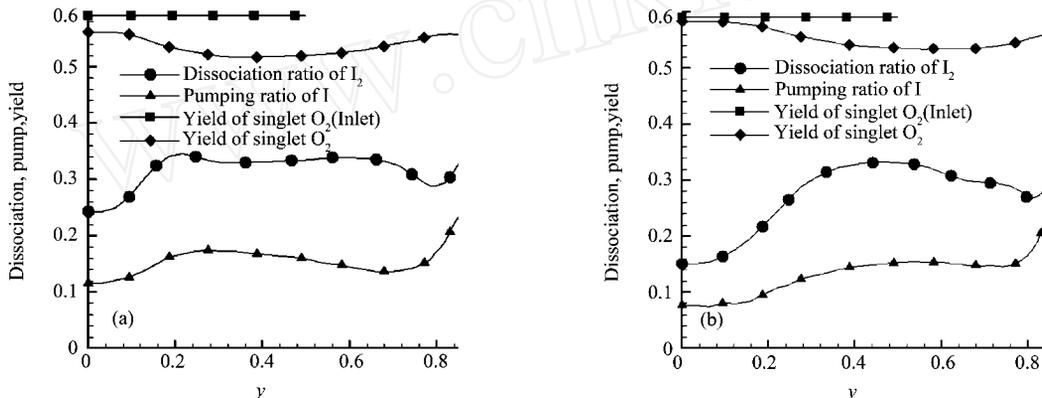


图 4 穿透不足条件下单重态产率以及碘分解率和泵浦率分别在大小孔  $z$  向对称面上  $x = 10\text{ cm}$  处沿  $y$  向分布

Fig. 4 Yield of singlet oxygen, dissociation ratio of  $I_2$  and pumping ratio of  $I$  along  $y$  axis under penetration

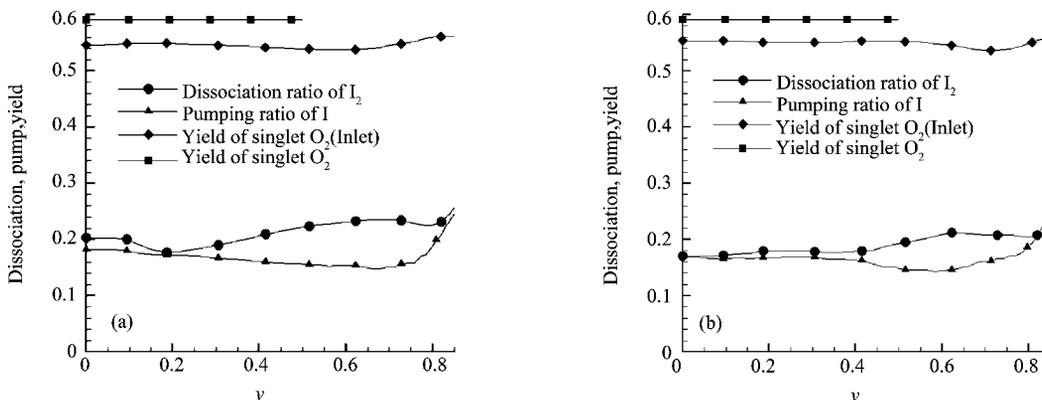


图 5 完全穿透条件下单重态产率以及碘分解率和泵浦率分别在大小孔  $z$  向对称面上  $x = 10\text{ cm}$  处沿  $y$  向分布

Fig. 5 Yield of singlet oxygen, dissociation ratio of  $I_2$  and pumping ratio of  $I$  along  $y$  axis under complete penetration

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

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

其中  $A$  为爱因斯坦自发辐射系数,  $\lambda$  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,  $k_b$  为玻尔兹曼系数,  $T$  为绝对温度.

图 6 给出了在穿透不足和完全穿透条件下,小信号增益系数  $g$ ,  $I$ ,  $I^*$  和  $I_2$  的无量纲密度在大孔  $z=0$  对称面上光腔轴线位置处沿  $y$  轴的分布,证明在混合喷管内得到了正增益.而且在喷管中间大部分区域,增益分布都较为均匀.但在穿透不足情况下,由于射流强度不足,增益系数以及各组分的密度在  $y=0$  竖直方向对称面上的分布偏低,和图 6(b) 完全穿透条件下的分布情况对比来看更为明显,完全穿透条件下各项参数的分布都很均匀.而在靠近管壁的区域,由于边界层与温度升高的影响,增益系数与密度都不高.但总的来看,两种情况下的小信号增益系数都达到了  $1\%/cm$  的量级.

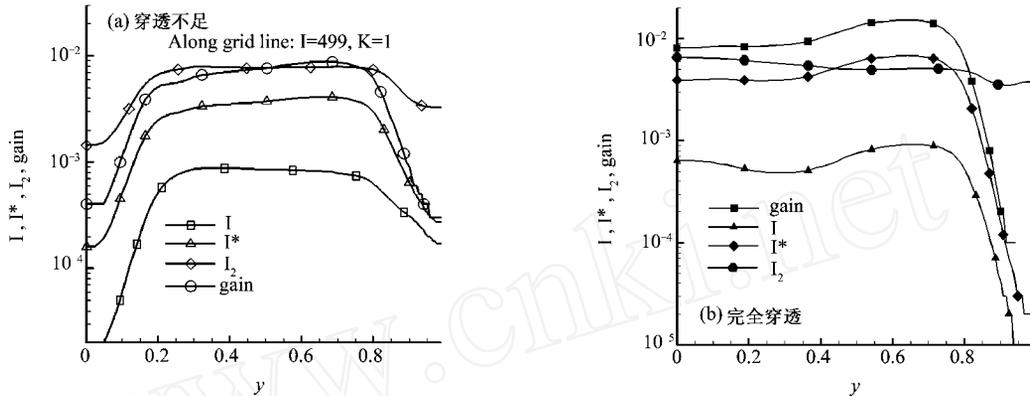


图 6 穿透不足以及完全穿透条件下  $z$  向对称面上  $I$ ,  $I^*$ ,  $I_2$ ,  $g$  ( $cm^{-1}$ ) 在  $x=10$  cm 处沿  $y$  向分布

Fig. 6  $I$ ,  $I^*$ ,  $I_2$  and gain along  $y$  axis under penetration and complete penetration

### 2.2 总压恢复系数

除了混合效率和化学效率之外,总压恢复系数是化学氧碘激光装置的另一个重要参数.我们希望在混合与光提取过程完成以后,气流总压损失越小越好,也就是总压恢复系数越高越好.COIL 是一个多流混合过程,至少存在两个入口端总压,因此压力系数  $C_p$  的求解稍有不同,

$$C_p = \frac{P_{0o}}{P_{0i}}, \quad P_{0i} = \frac{\dot{n}_p P_{0p} + \dot{n}_s P_{0s}}{\dot{n}_p + \dot{n}_s}, \quad (9)$$

其中  $P_{0o}$  为出口端总压,  $P_{0i}$  为入口端总压,  $P_{0i}$  由入口端的主、副流总压根据道尔顿分压定律加权求得,  $\dot{n}_p$  和  $\dot{n}_s$  分别为主、副流的摩尔流量,  $P_{0p}$  和  $P_{0s}$  分别为主、副流的入口总压.

图 7 给出了喷管亚声速段横向射流混合在穿透不足和完全穿透两种情形下的总压恢复系数.出口端的总压,穿透不足时能恢复到加权输入总压的 60% 左右,而完全穿透时只到 40% 左右.可见射流穿透不足时总

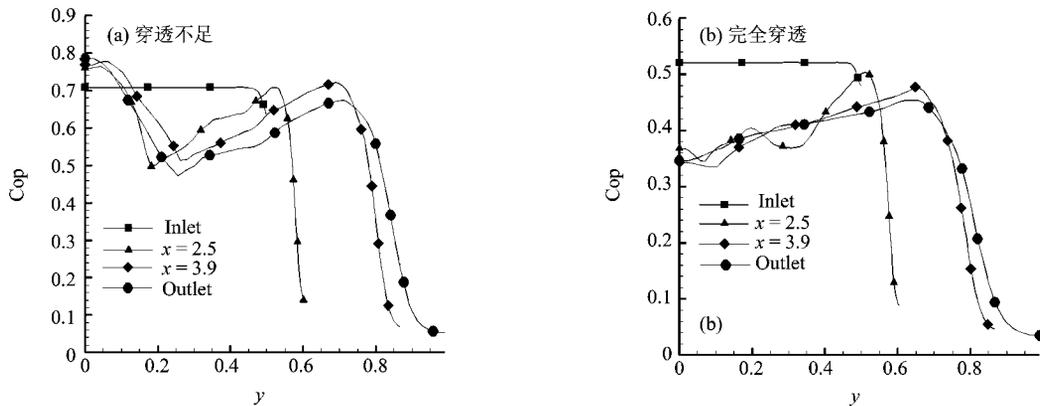


图 7 亚声速段射流混合总压恢复系数

Fig. 7 Pressure recovery coefficients under penetration and complete penetration

压损失相对小一些,这与混合是熵增过程相符合.虽然副流压力的提高增加了入口端的总压,而由于总压恢复系数的限制,出口总压并不能成比例地有效提升.

### 2.3 射流碰撞与非定常结构

如果把射流压力提高到  $p_s = 24\text{kPa}$ ,横向射流将在喷管  $y = 0$  对称面上发生碰撞,形成过度穿透.  $I_2$  密度在流向各个剖面上的分布见图 8,可以看出,在吼道上游,射流发生撞击,计算结果也表明这种撞击促使混合喷管内的流场表现出一定的非定常特性.图 9 给出了  $z = 0$  对称面上不同时刻单重态氧的无量纲密度分布,由于射流相撞挤压的影响,主流形成了一系列富含单重态氧分子的气泡型区域.这种非定常流动对促进混合层失稳进而增强混合是有利的,但对光腔激射过程以及出光性能却有不利的影响<sup>[2]</sup>.图 10 给出了射流相互作用及其发展的流场结构在不同角度的三维等值面视图,结果表明,在展向射流之间也发生了碰撞.这些流场结构具有很强的三维特征,它们的形成、破碎、合并等非定常过程对流场和增益场将有很大影响,文[2]定义这些结构为非定常拟序结构.由于受到可用计算资源的限制,目前尚未有人针对这一问题进行深入的数值研究.



图 8 射流附近区域内  $I_2$  密度分布  
Fig. 8 Distribution of  $I_2$  density

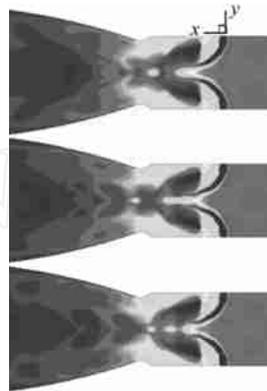


图 9  $z = 0$  对称面上  $O_2(I)$  无量纲密度在不同时刻的分布变化 (间隔依次为  $4.5 \mu\text{s}$ )  
Fig. 9  $O_2(I)$  density distributions in  $z$  symmetric plane (with time interval  $4.5 \mu\text{s}$ )

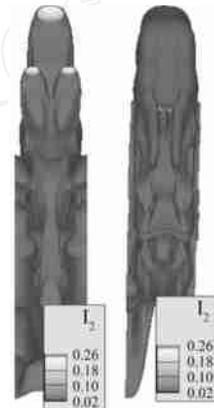


图 10  $I_2$  等值面的俯视图和仰视图  
Fig. 10 Vertical views of  $I_2$  density isosurface

## 3 结论

通过求解三维层流 Navier-Stokes 方程与组分输运方程,对 COIL 亚声速段横向射流在不同穿透强度下形成的流场进行了混合效果与化学效率的数值分析,得到以下结论:

在混合喷管亚声速段进行横向喷流的混合,介质沿喷管展向的分布,宏观上受横向射流的穿透深度控制.对于射流穿透不足的情况,喷管中心流区的载能介质没有得到合理利用,从而造成大量的能源浪费,并在这一区域形成了增益空白区;在射流完全穿透的条件下,主流、副流在喷管展向的大部分流场区域内都能够较好混合,小信号增益系数在垂直方向和展向的分布都较为均匀;而在射流过度穿透条件下,对称射流在喷管对称面发生碰撞,由此导致流场产生一系列非定常结构,对光腔的平稳运行不利.射流穿透深度的提高伴随总压损失的增大,说明通过提高副流总压的方法提高系统总压是有限的.

### [参 考 文 献]

- [ 1 ] Bohn W L. International COIL technology survey[C]. Proceeding of SPIE, 2003, **5120**:301 - 307.
- [ 2 ] Madden T J. Aspects of 3-D chemical oxygen-iodine laser simulation[C]//Proceeding of SPIE, 2003, **5120**:363 - 375.
- [ 3 ] Crowell P G. Laminar mixing between chemically reacting parallel streams of excited oxygen and iodine for an exact multicomponent diffusion model[R]. R & D Associates Report 83 - A/K- 14 - 0, 1983: 1984.
- [ 4 ] Crowell P G. A vorticity-stream function approach to calculate three dimensional mixing for viscous parabolic flows[R]. RDA/Logicon Report 87 - A/K- 03 - 02 - 1125, 1989.

- [ 5 ] Buggeln R C, Shamroth S, Lampson A I, Crowell P G. Three-dimensional (3 - D) Navier-Stokes analysis of the mixing and power extraction in a supersonic chemical oxygen iodine laser (COIL) with transverse  $I_2$  injection [ R ]. AIAA 94 - 2435, 25<sup>th</sup> AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, Colorado Springs CO, June 20 - 23, 1994.
- [ 6 ] Madden Timothy J, Miller James H. Theoretical exploration of gas lasers using time dependent 3-D Navier-Stokes simulation [ C ] // Proceeding of SPIE, 2005, 5777 :111 - 116.
- [ 7 ] 庄绮, 桑凤亭, 周大正. 短波长化学激光 [ M ]. 北京 : 国防工业出版社, 1997.
- [ 8 ] Yang Bailing. Latest advances in COIL at dalian [ C ] // Proceeding of SPIE, 1998, 3574 :281 - 289.
- [ 9 ] 李守先, 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.
- [ 10 ] 李艳, 等. VICON 程序对 COIL 混合喷灌的化学反应流数值模拟 [ C ] 第八届全国激光科技青年交流会文集, 2005.
- [ 11 ] Jiang ZL, Takayama K, Chen YS. Dispersion conditions for non-oscillatory shock capturing schemes and its applications [ J ]. Comput Fluid Dynamics Journal, 1995, 4 :137 - 150.
- [ 12 ] Jiang ZL. On dispersion-controlled principles for non-oscillatory shock-capturing schemes [ J ]. Acta Mechanica Sinica, 2004, 20 (1) : 1 - 15.
- [ 13 ] Hu Zongmin, Mu Qianhui, Zhang Deliang, Jiang Zonglin. Numerical simulation of gaseous detonation wave propagation through bends with a detailed chemical reaction model [ J ]. Chinese J Comput Phys, 2004, 21 (5) :408 - 414.
- [ 14 ] Paschkewitz J, Shang J, Miller J, Madden T. An assessment of COIL physical property and chemical kinetic modeling methodologies [ R ]. AIAA Paper 2000 - 2574, 2000.
- [ 15 ] Fearn R, Weston R P. Vorticity associated with a jet in a cross flow [ J ]. AIAA Journal, 1974, 12 (12) :1666 - 1771.
- [ 16 ] Scott J E, et al. Design considerations for the chemical oxygen-iodine supersonic mixing nozzle [ R ]. AIAA 94 - 2436, 1994.

## Effect of Penetration in HPCOIL

LV Junming, HU Zongmin, JIANG Zonglin

(Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Three-dimensional CFD technology is applied in an RADICL model by solving laminar Navier-Stokes equations and transportation equations. Mixing and reaction of flows, gas-dynamics fields and gains are studied at different jet intensity. It is found that the penetration depth plays an important role for special distribution of small signal gain macroscopically. Strong impinges between jets and unsteady structures are induced by over-penetration in mixing flow field.

**Key words:** chemical oxygen-iodine laser; jet in cross flow; penetration; gain; unsteady structures, pressure recovery