

文章编号: 1001-4322(2005)02-0181-05

用 FLUENT 软件计算化学氧碘激光流场^{*}吴宝根¹, 陆 来², 姜宗林¹, 陈耀松²

(1. 中国科学院 力学研究所, 北京 100080; 2. 北京大学 力学系, 北京 100871)

摘 要: 用计算流体力学(CFD)软件 FLUENT, 数值研究化学氧碘激光喷管形线, 碘喷孔位置, 副流入口压力, $O_2(^1\Delta)$ 初始产额, 水蒸汽含量以及稀释气体对平均小信号增益系数沿流动方向分布的影响; 并对大连化学物理研究所超音速化学氧碘激光的两次实验进行数值模拟, 计算结果显示平均小信号增益系数与实验测试的摩尔功率趋势一致。

关键词: 化学氧碘激光(COIL); 计算流体力学(CFD); 小信号增益分布

中图分类号: TN248 **文献标识码:** A

在超音速化学氧碘激光器(COIL)中, I_2 - $He(N_2)$ 副流以接近音速的射流形式横向注入亚音速的 $O_2(^1\Delta)$ - $He(N_2)$ 主流中, 在混合过程的同时, 发生化学反应、超音速膨胀、碘分解、传能、淬灭、激射等一系列复杂的流体力学、化学和物理过程。目前都是用纳维-斯托克斯(N-S)方程描述流体力学过程, 用波动光学描述光在共振腔内振荡和功率的取出过程, 并结合氧碘的传能过程建立完整的物理数学模型。早期用简化模型可以解析地预言激光的功率输出特性, 这只是一种近似地描述; 更精确的描述 COIL 内细致过程还得依靠数值模拟计算。国外大多数采用 MINT 程序^[1-3], 二维 AC³ (Advanced Cavity Code for COIL) 程序^[4,5], AeroSoft 公司的 GASP 软件^[6,7]; 也有采用 FLUENT 软件^[8,9]的。国内张本爱等人用自编软件以及俄罗斯的软件做了大量计算工作。

我们从 2001 年开始应用 FLUENT 软件, 参照日本文献^[10, 11]的倒三角形喷管模型和参数, 计算了二维、三维 COIL 化学反应混合流场, 得到了与日本文献一致的结果。接着将其参数应用于大连化物所实验所用的喷管中, 数值研究碘喷孔位置, 副流入口压力, $O_2(^1\Delta)$ 初始产额, 水蒸汽含量和稀释气体对增益分布的影响。最后, 以 N_2 作为稀释气体的两次实验运行参数代入计算程序, 算出的平均小信号增益系数与实验测量结果进行比较。本文的目的是考察商用软件在 COIL 工程中应用的可能性。

1 计算模型和方法

1.1 计算模型

实际运行的超音速 COIL 系统都是由多个列阵喷管组成, 图 1 选取其中的一对喷管。副流 $I_2 + He(N_2)$ 以音速射流注入亚音速的主流 $O_2(^1\Delta) + He(N_2)$ 中。由于喷孔和喉道尺寸都很小, 雷诺数小于 4 000/cm, 流动可看作层流, 而射流明显有三维特征, 因此用三维、层流、稳态 N-S 方程来模拟 COIL 流动是合适的。

计算按大连化物所实验所用喷管, 如图 2 所示。在喉道上游开有 6 个编号为 1, 2, 3, 4, 5, 6 的 $\phi 0.5$ mm 碘

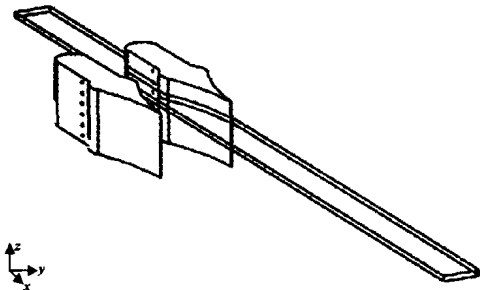
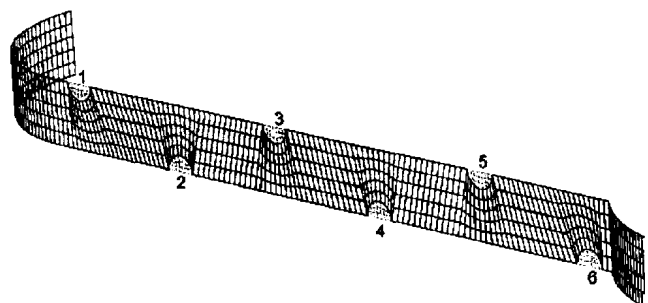


Fig. 1 COIL nozzle and computational zone

图 1 COIL 喷管及计算区域

Fig. 2 Schematic of I_2 nozzle图 2 I_2 喷管示意图

• 收稿日期: 2004-06-28; 修订日期: 2004-11-03

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 吴宝根(1939—), 男, 研究员, 从事强激光, 气动光学研究; E-mail: wubg@imech. ac. cn.

喷孔,分别距离喉道 13.75, 11.65, 9.55, 7.45, 5.35, 3.25 mm,交叉布局垂直主流对喷。按对称性我们只选取 150 mm×6.5 mm×1 mm 的计算区域,用 GAMBIT 软件生成 192 203 个网格。

1.2 化学反应

在 COIL 47 个化学反应方程式中^[4],我们选用 10 种反应物 $O_2(^3\Sigma)$, $O_2(^1\Delta)$, $O_2(^1\Sigma)$, I_2 , I_2^* , $I(^2P_{3/2})$, $I(^2P_{1/2})$, H_2O , Cl_2 , He (或 N_2), 21 个主要化学反应方程式^[12]。以 Arrhenius 形式给出反应速率常数

$$k_{f,r} = A_r T^{\beta_r} e^{-E_r/RT}$$

式中: A_r 为前因子; β_r 为温度指数因子; E_r 为反应激活能; R 为普适气体常数; T 为温度。

1.3 物性

在 COIL 中,工作温度在 100~450K 范围内,在精确的计算中必须考虑工作物质的粘性系数 μ , 热传导系数 k 是温度的函数。在参考文献^[12]中给出了这些系数与温度关系的多项式展开式及展开系数。为简化计算,我们把 μ , k 看作常数。

1.4 计算条件

我们选择文献^[10]($O_2(^1\Delta)$ 初始产额改为 50%)以及两次实验(0917, 0926)的工作参数作为 COIL 的入口条件(见表 1)。喷管出口用 FLUENT 设置的抽气条件,这也符合我们器件的实际工作条件;喷管壁面边界条件为无滑移条件,其他计算边界为几何对称条件。

表 1 入口条件
Table 1 Plenum condition

	primary flow							secondary flow			
	$p_{0p}/133Pa$	T_{0p}/K	mole fraction / %					$p_{0s}/133Pa$	T_{0s}/K	mole fraction / %	
			O_2	$O_2(^1\Delta)$	H_2O	Cl_2	He/N_2			I_2	He/N_2
[10]	39.6	273	12.00	12.00	1.20	2.60	72.20	214	376	3.0	97.0
0917	42.0	273	15.63	15.63	2.90	3.47	62.37	136	383	3.4	96.6
0926	37.0	273	14.44	14.44	2.67	3.21	65.24	162	383	2.7	97.3

1.5 计算方法

我们用隔离法求解三维层流稳态 N-S 方程,先计算没有化学反应的混合流场,在适当的时候加入化学反应,调整松弛因子,使所有参量收敛稳定。

1.6 增益系数

小信号增益系数的计算公式为

$$G = \frac{7}{12\sqrt{\pi}} \frac{A}{4\pi} \frac{\lambda}{\Delta\nu} \left\{ n[I(^2P_{1/2})] - \frac{g[I(^2P_{1/2})]}{g[I(^2P_{3/2})]} \times n[I(^2P_{3/2})] \right\}$$

式中: Einstein 系数 A 取为 $3.7s^{-1}$ (大多数文献为 $5.0s^{-1}$); COIL 波长 λ 为 $1.315 \mu m$; $\Delta\nu$ 是 Doppler 加宽; n 是物质的数密度; g 是碘原子能级的简并度。

2 结果与讨论

下面的讨论是以表 1 中文献^[10]的参数,大连化物所实验所用的喷管,5,6 号碘喷孔,He 稀释气体的模型为基础,比较不同条件下与流动方向 x 轴垂直的横截面上平均小信号增益系数沿 x 轴的分布。

2.1 喷管形线对增益分布的影响

将表 1 中^[10]的参数应用于日本^[10]的倒三角形喷管和大连化物所实验所用 5,6 号碘喷孔的喷管。两种喷管出口的坐标统一为 $x=0$ mm。日本喷管的喉道位于 $x=-24.5$ mm,而大连的位于 $x=-16.7$ mm,日本的扩张段比大连的长 7.8 mm。日本的碘喷孔位于 $x=-30.5$ mm,而大连的 5,6 号碘喷孔分别位于 $x=-22.05$, -19.95 mm,日本的碘喷孔在喉道上游距离比大连的 5,6 号碘喷孔分别长 0.65, 2.75 mm。图 3 是两种喷管的平均增益沿流动方向的分布图。由图可以看出,大连喷管的平均增益在喷管出口下游处明显比日本的高。其峰值都发生在喉道下游,但大连的比日本的更接近喉道。

2.2 碘喷孔位置对增益分布的影响

我们将 1 与 2,3 与 4,5 与 6 号碘喷孔分别组成三种工况。图 4 是亚音速段不同碘喷孔位置的平均增益沿流动方向的分布。由图可以看出,主喷管亚音速段的碘喷孔位置距离喉部越近,喉道 ($x=-16.7$ mm) 下游各

剖面处的平均小信号增益系数就越大。图中碘喷孔位于喉道的工况(T),其增益系数的计算结果并不理想。

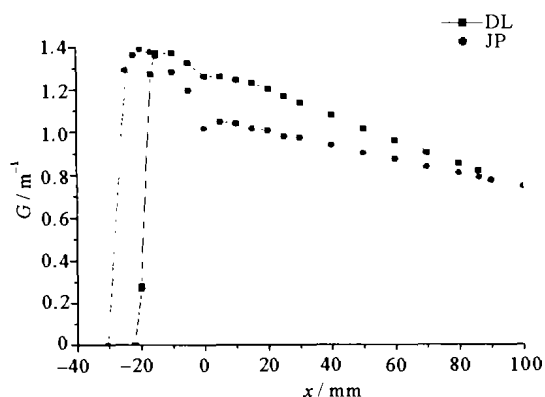


Fig. 3 Distribution of the average gain along x axis for different nozzle

图 3 不同喷管的平均增益沿 x 轴分布

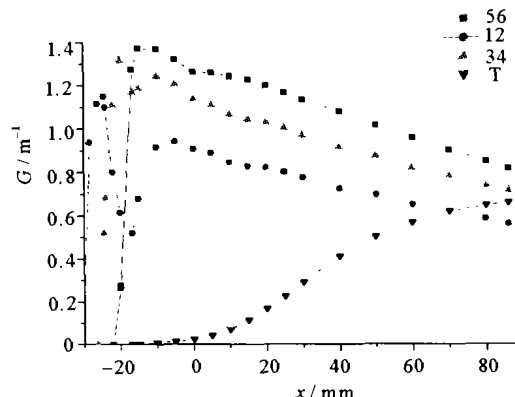


Fig. 4 Distribution of the average gain along x axis for different orifices locations

图 4 不同碘喷孔位置的平均增益沿 x 轴分布

2.3 副流入口压力对增益分布的影响

为了研究副流入口的压力对增益分布的影响,我们在碘流量不变的情况下,改变副流入口的压力。计算结果如图 5。从图中可以看出,副流入口压力为 0.75 倍时,光腔内上游部分的增益较大;在喷管下游,随副流压力增加,增益减小。

2.4 $O_2(^1\Delta)$ 初始产额对增益分布的影响

图 6 是碘喷孔在最接近喉道的 5,6 位置时,不同 $O_2(^1\Delta)$ 初始产额的平均增益系数沿流动方向分布的计算结果。 $O_2(^1\Delta)$ 初始产额越高,增益愈大,这是很显然的;由于化学反应的放热,同时 Mach 数下降,静温增加。75%的 $O_2(^1\Delta)$ 初始产额平均增益系数的峰值在喉道处,随着 $O_2(^1\Delta)$ 初始产额的下降,峰值向下游移动。

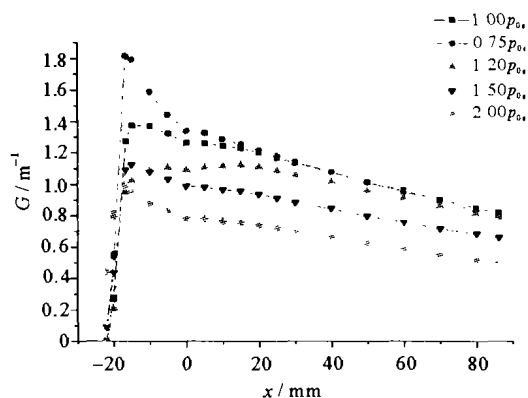


Fig. 5 Distribution of the average gain along x axis for different pressure of secondary flow

图 5 不同副流压力的平均增益沿 x 轴分布

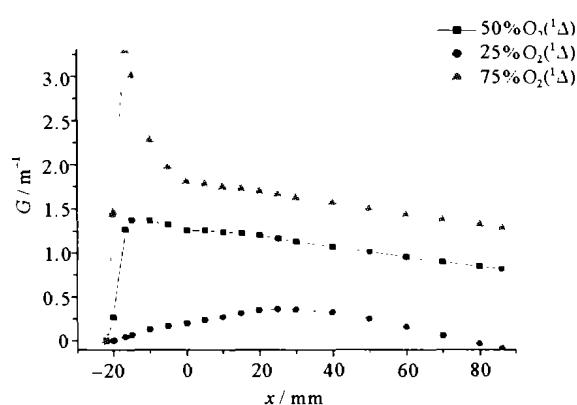


Fig. 6 Distribution of the average gain along x axis for different $O_2(^1\Delta)$ yields

图 6 不同 $O_2(^1\Delta)$ 产额的平均增益沿 x 轴分布

2.5 水蒸汽对增益分布的影响

在主流其他组分摩尔流量不变的情况下,改变水蒸汽的摩尔流量。其增益分布的计算结果如图 7,水蒸汽对增益分布的影响是明显的。水蒸汽的摩尔流量增加,增益就下降。2 倍水蒸汽摩尔流量的平均增益最低。没有水蒸汽的极端情况,增益应该是最大,计算结果是我们所预料的那样。

2.6 载气对增益分布的影响

我们在相同入口压力、温度条件下,对同一喷管分别用 N_2 和 He 作载气计算平均增益系数,结果如图 8。主喷管出口下游处 N_2 载气的小信号增益系数大约是 He 的 80%。

N_2 的分子量是 He 的 7 倍,因而用 N_2 作稀释气体时,主、副流的速度比用 He 时要小得多,特别是从碘喷孔喷出的副流以接近音速喷射, N_2 的速度约是 He 的 1/3 倍。在压力和温度相同条件下,化学反应和转能时间很接近,所以用 N_2 作稀释气体时,亚音速段的 I_2 分子在很短距离内就被分解。这一结果与实验符合。图 9

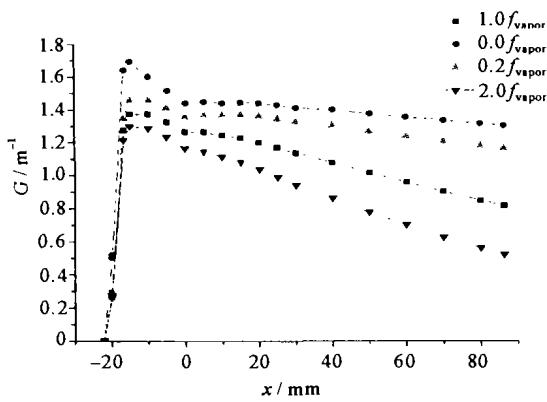


Fig. 7 Distribution of the average gain along x axis for different diluents

图 7 不同稀释气体的平均增益沿 x 轴分布

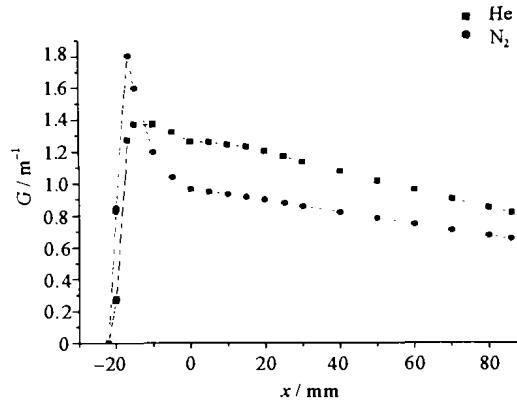


Fig. 8 Distribution of the average gain along x axis for different mole flux of water vapor

图 8 不同水蒸汽摩尔量的平均增益沿 x 轴分布

显示了用 N_2 和 He 作载气时, I_2 的摩尔分数的不同分布。

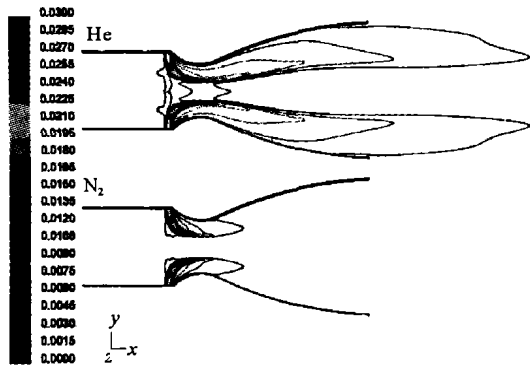


Fig. 9 Contours of mole fraction of I_2 for different diluents

图 9 不同稀释气体时 I_2 的摩尔分数等值线

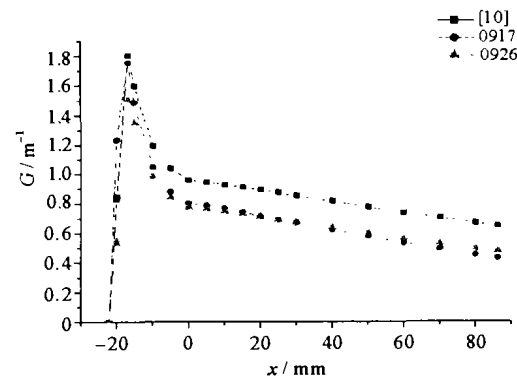


Fig. 10 Distribution of the average gain along x axis for three conditions

图 10 三种工况下平均增益沿 x 轴分布

2.7 与两次实验测试数据的比较

我们按大连化物所两次以 N_2 为载气的实验条件进行平均增益计算, 计算结果如图 10。两次实验的测试数据如表 2。平均而言, 0926 光腔部分的增益系数比 0917 的大 2.65%, 而 0926 实验的单位摩尔功率输出比 0917 的大 4.51%, 趋势是一致的。

图 10 中工况 [10] 即图 8 中的 N_2 , 其平均增益明显比 0917 和 0926 两次实验高。

数值计算的优点是可以显示流动参数如马赫数、温度、压力、各组份的详细分布情况等, 这些参数在实验上是无法测量或无法实现多点测量的。限于篇幅我们不一一给出这些图了。

表 2 实验测试数据

Table 2 Testing data of the experiment

test No.	Cl_2 flowrate / (mmol · s ⁻¹)	output power / kW	mole power / (kW · mol ⁻¹)
0917	137	2.6	18.98
0926	121	2.4	19.83

3 结 论

我们两年多的实践, 说明用 FLUENT 软件计算 COIL 流场是可行的。如何在现有的数值模拟基础上考虑水冷凝以及光辐射是今后需要解决的问题。另外, 将 FLUENT 应用于 $O_2(^1\Delta)$ 发生器, 缩短模拟计算时间也是我们迫切需要解决的问题。使数值模拟成为 COIL 试验方案评估的首选是我们的努力方向。

参考文献:

[1] Buggeln R C, Shamroth S, Lampson A I, et al. Three-dimensional Navier-Stokes analysis of the mixing and power extraction in a superson-

- ic chemical oxygen iodine laser with transverse I₂ injection[R]. AIAA Paper,1994. 94—2435.
- [2] Lampson A I, Plummer D N, Crowell P G, et al. Chemical oxygen iodine laser beam quality predictions using 3-d Navier-Stokes (MINT) and wave optics (OCELOT) codes[R]. AIAA Paper,1998. 98—2991.
- [3] Madden T J, Hager G D, Lampson A I, et al. A comparison of subsonic and supersonic mixing mechanisms for the chemical oxygen - iodine laser using computational fluid dynamic simulations[A]. Proc of SPIE[C]. 1999, **3612**: 135—146.
- [4] Yang T T, Copeland D A, Bauer A H, et al. Chemical oxygen-iodine laser performance modeling[R]. AIAA Paper,1997. 97—2384.
- [5] Yang T T, Dickerson R D, Moon L F, et al. High Mach number, high pressure recovery COIL nozzle aerodynamic experiments[R]. AIAA Paper,2000. 2000—2425.
- [6] Madden T J, Solomon W C. A detailed comparison of a computational fluid dynamic simulation and a laboratory experiment for a COIL laser [R]. AIAA Paper,1997. 97—2387.
- [7] Eppard W M, McGrory W D, Godfrey A G, et al. Recent advances in numerical techniques for the design and analysis of COIL systems[R]. AIAA Paper,2000. 2000—2576.
- [8] Koop G, Hartlove J, Clendening C, et al. Airborne laser flight-weighted laser module (FLM) and COIL modeling support[R]. AIAA Paper,2000. 2000—2421.
- [9] Hautman, D J, Hass R J, Chiapp L. Transverse injection into subsonic air flow[R]. AIAA Paper,1991. 91—0576.
- [10] Wataru M, Manabu H, Shigenori H, et al. Three-dimensional mixing/reacting zone structure in a supersonic flow chemical oxygen-iodine laser[J]. *JSME International Journal, Series B*, 1997, **40**(2):209—215.
- [11] Masuda W, Satoh M, Fujii H, et al. Numerical Simulation of a supersonic flow chemical oxygen-iodine laser solving Navier-Stokes equations[J]. *JSME International Journal, Series B*, 1997, **40**(1):87—92.
- [12] Paschkewitz J, Shang J, Miller J, et al. An assessment of COIL physical property and chemical kinetic modeling methodologies[R]. AIAA Paper,2000. 2000—2574.

Computation of mixing flowfield of chemical oxygen-iodine laser with FLUENT software

WU Bao-gen¹, LU Lai², JIANG Zong-lin¹, CHEN Yao-song²

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Department of Mechanics, Beijing University, Beijing 100871, China)

Abstract: The computational simulations of the mixing flowfield of supersonic chemical oxygen-iodine laser (COIL) using FLUENT (CFD) computation of fluid dynamics commercial software have been performed. The distribution of the averaged small signal gain along the downstream for nozzle profiles, orifices locations, pressure of secondary flow, O₂ (Δ) yields, content of water vapor and dilute gases was calculated. The numerical simulation for two experimental conditions of Dalian Institute of Chemical Physics show that the trend of the computational averaged small signal gain coincides with the measured output mole power.

Key words: Chemical oxygen-iodine laser(COIL); Computation of fluid dynamics (CFD); Small signal gam distribution