

文章编号: 1001-4322(2007)08-1247-04

# 无缓冲气 COIL 扩压器流场数值模拟\*

孙英英, 吴宝根, 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 100080)

**摘 要:** 以无缓冲气化学氧碘激光器 (COIL) 实验器件的数据计算得到的混合喷管出口参数平均值作为光腔入口条件, 对 6 种不同构型的扩压器从光腔入口至扩压器出口的流场进行了数值模拟, 得出了各流场参数分布; 对不同构型扩压器的流场特点、总压恢复性能进行了分析; 研究了扩压器出口背压对流场参数的影响。结果表明: 对于主流无缓冲气的 COIL, 等截面扩压器具有较好的压力恢复性能; 增大扩压器出口背压可以使扩压器的压力恢复性能提高, 然而, 较高的背压使激波串向光腔方向移动, 从而使光腔流场受到干扰, 影响光腔的光束质量。

**关键词:** 化学氧碘激光器 (COIL); 扩压器; 压力恢复

**中图分类号:** TN248.5

**文献标识码:** A

在化学氧碘激光器 (简称 COIL) 中, 进入光学谐振腔 (简称光腔) 的气流马赫数  $Ma$  在 2 左右, 气流静压很低, 一般只有几百 Pa。为使光腔出口的尾气能够顺利排出, 光腔后需要连接压力恢复系统。对于无缓冲气 COIL, 压力恢复系统由扩压器和低温吸附装置构成。扩压器的作用是使光腔排出的超声速气流减速增压。扩压器的性能和尺寸大小对于 COIL 的成功运行至关重要, 因为扩压器有可能对光腔压力产生不利影响, 从而进一步影响激光器的输出功率。在一个空间有限的运载工具或测试场所内, 应当将扩压器设计得尽可能小和紧凑, 同时仍然保持其最佳性能。

与超声速风洞的扩压器相比, COIL 的扩压器具有许多根本的特殊性。这主要是因为 COIL 扩压器内部气流的雷诺数  $Re$  低 ( $10^2 \sim 10^4$  量级), 激光介质的物理特性, 以及物理化学非平衡<sup>[1]</sup>。在 COIL 扩压器中, 超声速气流的减速增压过程是通过气流中产生的斜激波与边界层的相互作用来实现的。激波与边界层的相互作用是边界层分离以及具有高湍流强度的亚声速区形成的原因。由于滞流的作用, 亚声速区域沿着扩压器通道增大, 逐渐达到流动核心<sup>[2-3]</sup>。因此, COIL 扩压器内部的流动很复杂, 是一种典型的低压、低密度、低  $Re$  数, 同时存在亚声速、跨声速、超声速流动区域, 多种波系与边界层相互作用, 具有化学反应的内流流场。

近年来, 中国科学院力学研究所开展了与 COIL 相关的数值研究工作。吴宝根等用计算流体力学软件 FLUENT 研究了 COIL 混合喷管型线、碘喷孔位置等因素对平均小信号增益系数沿流动方向分布的影响<sup>[4]</sup>; 胡宗民等对 COIL 混合喷管亚声速段横向喷流混合过程和基本流场特性进行了数值分析<sup>[5]</sup>。本文在以往工作的基础上, 利用 FLUENT 软件对无缓冲气 COIL 光腔入口至扩压器出口的流场进行数值模拟, 分析不同构型扩压器的流场特点和总压恢复性能, 并研究扩压器出口背压对流场参数的影响。

## 1 数值方法

根据所研究的扩压器的几何构型, 控制方程采用 2 维多组分考虑化学反应的 N-S 方程组。湍流模型采用 Spalart-Allmaras 模型<sup>[6]</sup>。化学反应模型采用 10 组分 13 反应模型<sup>[7]</sup>。数值方法为有限体积法, 采用隐式耦合求解的方法, 对流项采用二阶迎风格式, 扩散项采用二阶中心差分格式。

计算区域从光腔入口至扩压器出口, 考虑到流动的对称性, 只计算光腔和扩压器上壁面到对称面之间的区域。以无缓冲气 COIL 实验器件的数据计算得到的混合喷管出口参数平均值作为光腔的入口条件, 具体边界条件如下:

入口的总压、静压、总温分别为:  $p_0 = 14.943\ 4 \times 133\ \text{Pa}$ ;  $p_s = 1.676\ 4 \times 133\ \text{Pa}$ ;  $T_0 = 467.863\ 4\ \text{K}$ 。

各组分质量分数为:  $\text{O}_2$ , 0.335 2;  $\text{O}_2^*$ , 0.226 4;  $\text{O}_2^{**}$ ,  $6.893\ 3 \times 10^{-4}$ ;  $\text{I}$ ,  $1.882\ 1 \times 10^{-4}$ ;  $\text{I}^*$ ,  $6.069\ 5 \times$

\* 收稿日期: 2006-09-29; 修订日期: 2007-04-16

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 孙英英 (1970—), 女, 助理研究员, 研究方向为流体力学; yysun@imech.ac.cn。

$10^{-6}$ ; I, 0.018 2; I<sup>+</sup>, 0.018 2; N<sub>2</sub>, 0.278 1; Cl<sub>2</sub>, 0.062 5; H<sub>2</sub>O, 0.060 6。

出口:静压  $p_s = 2 \times 133$  Pa。

壁面:无滑移绝热条件。

对称面:对称条件。

## 2 计算结果与分析

对 6 种不同构型的扩压器,数值模拟了从光腔入口至扩压器出口的流场,得出了马赫数、静压、总压、密度、速度、湍流粘性等各流场参数分布,以及各组分分布。光腔段入口高度为 78 mm,长度为 300 mm,扩张半角为 4°。光腔段与扩压器之间为过渡段,其扩张半角与光腔段相同,长度为 200 mm。表 1 给出了 6 种不同扩压器的几何构型参数,其中,分别为扩压器段和段的扩张半角,,分别为隔板的楔角和厚度。算例 1~5 的扩压器总长度相同,均为 450 mm;算例 6 的扩压器总长度为 900 mm。

根据文献[8],将气流从超声速转变为亚声速的等截面段的长度与高度的比值,取决于扩压器的进口条件;实验结果表明,所需长高比为 10~15。减小超声速扩压器尺寸的方法之一就是采用隔板来缩短有效的进口通道尺寸,从而缩短扩压器的长度<sup>[9]</sup>。算例 4~6 即为不同形式的带有隔板的扩压器。

图 1 给出了算例 1~6 的马赫数等值线,图中虚线之前的部分为光腔段,虚线之后的部分为过渡段和扩压器。光腔入口处均匀来流的马赫数为 2.09,以光腔入口半高为特征长度的  $Re$  数为  $5.3 \times 10^3$ 。

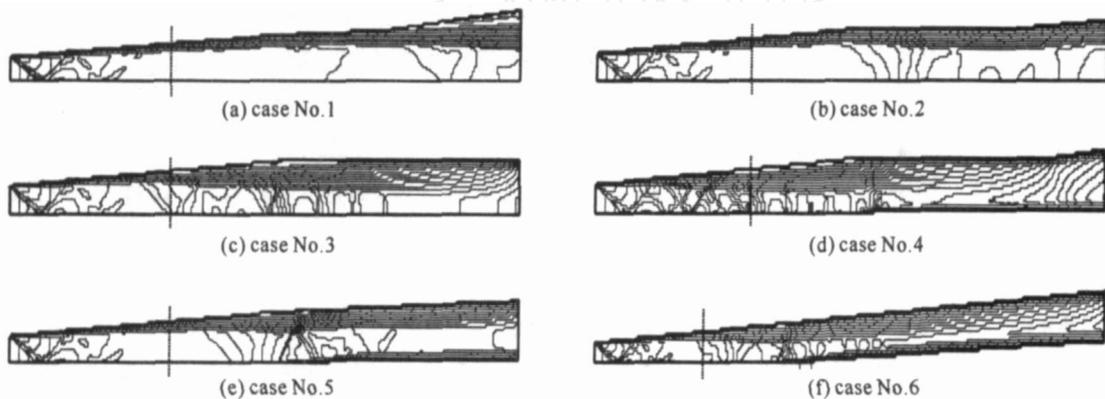


Fig. 1 Contours of Mach number (case No. 1~6)

图 1 算例 1~6 的马赫数等值线

由图 1 可知,由于光腔入口处均匀来流的  $Re$  数很低,在壁面附近发展形成了很厚的粘性边界层。在光腔入口处,边界层的位移厚度增长率很大,壁面处粘性边界层的位移效应致使进入光腔的平行气流受到压缩,流动方向发生偏转,因而流场中形成了微弱的斜激波。需要说明的是,这一弱斜激波是由于在计算中光腔入口所给定的均匀来流条件所造成的。事实上,在 COIL 实际运行过程中,光腔与前面的氧碘混合喷管出口相连,其入口已经具有一定厚度的边界层,并非均匀来流,所以不会存在上述斜激波。

算例 1 的扩压器由两个扩张角不同的扩张段组成。由于扩压器段的扩张角过大,致使出口背压高于扩压器内静压,在逆压梯度的作用下,扩压器出口附近的边界层内形成分离流动,从而导致边界层增厚,边界层位移效应使扩压器壁面的有效外形发生改变,在流动分离点附近的流场中形成了压缩波;扩压器出口主流核心仍为超声速;总压恢复系数(扩压器出口总压与光腔入口总压之比)为 0.3。

算例 2 的扩压器由一个等截面段与一个扩张段组成。气流由过渡段进入扩压器的等截面段时,相当于经过一个压缩拐角,在扩压器等截面段入口附近的边界层内形成分离流动,并且在流场中形成了压缩波;扩压器出口主流核心仍为超声速;总压恢复系数为 0.368。

算例 3 采用等截面扩压器。注意到在等截面扩压器内形成了激波串,边界层内流动分离点前移至光腔段尾部,相应地在光腔段尾部出现了压缩波系;在扩压器出口,主流核心仍为超声速;总压恢复系数为 0.388。

算例 4 的扩压器由一个等截面段与一个扩张段组成,并且在扩压器的对称中心处添加了隔板。由于隔板的楔角比较大,隔板前缘诱导的激波较强,该较强的激波与边界层相互作用,使得边界层内流动分离点前移至光腔段中部,激波串头部进入光腔段,从而使光腔段流场受到较大扰动;扩压器出口主流核心仍为超声速;总压恢复系数为 0.397。

算例 5 的扩压器由一个小扩张角的扩张段组成,其隔板的楔角比较小,隔板前缘诱导的激波较弱,边界层内流动分离点位于过渡段;扩压器出口主流核心仍为超声速;总压恢复系数为 0.347。

算例 6 的扩压器由一个扩张角与光腔相同的扩张段组成,在扩压器的对称中心处添加了小顶角的隔板。边界层内流动分离点位于过渡段,扩压器内形成了激波串;扩压器出口主流核心仍为超声速;总压恢复系数为 0.325。

对以上 6 种算例的计算结果进行比较分析可知,对于主流无缓冲气的 COIL 而言,由于光腔和扩压器中的静压、密度和  $Re$  数低,粘性损耗大,因此不适宜采用较长的或带有隔板的扩压器。虽然算例 4 的扩压器构型总压恢复系数最高,但是边界层流动分离点前移至光腔中部,对光腔流场干扰很大,有可能影响光腔的光束质量。算例 3 的等截面扩压器构型不仅结构简单,而且具有较高的压力恢复性能。

表 1 扩压器的几何构型参数和总压恢复系数

Table 1 Diffuser configurations and total pressure recovery coefficients

case	first section	second section	vane	total length	total pressure recovery coefficient
No. 1	200 mm, = 2°	250 mm, = 7°		450 mm	0.300
No. 2	300 mm, = 0°	150 mm, = 4.2°		450 mm	0.368
No. 3	450 mm, = 0°			450 mm	0.388
No. 4	350 mm, = 0°	100 mm, = 6.3°	= 20°, 450 mm, = 8 mm	450 mm	0.397
No. 5	450 mm, = 2°		= 4°, 450 mm, = 8 mm	450 mm	0.347
No. 6	900 mm, = 4°		= 5.34°, 900 mm, = 42 mm	900 mm	0.325

### 3 扩压器出口背压的影响

采用算例 3 的等截面扩压器构型,研究了扩压器出口背压对流场参数的影响,出口背压范围为 (2.0 ~ 4.5) × 133 Pa。图 2(a) ~ (d) 分别给出了不同背压条件下流场对称中心处的马赫数、静压、总压分布,以及壁面处的静压分布,图中横坐标的零点为光腔入口位置,虚线所示位置为光腔出口位置。由图 2 可知:一方面,随着扩压器出口背压的增大,流场总体的马赫数减小,静压升高,总压也有所升高,扩压器的压力恢复性能提高;另一方面,也应当注意到,随着背压的增大,流场中的激波串逐渐向光腔方向移动,从而使光腔流场受到干扰,影响

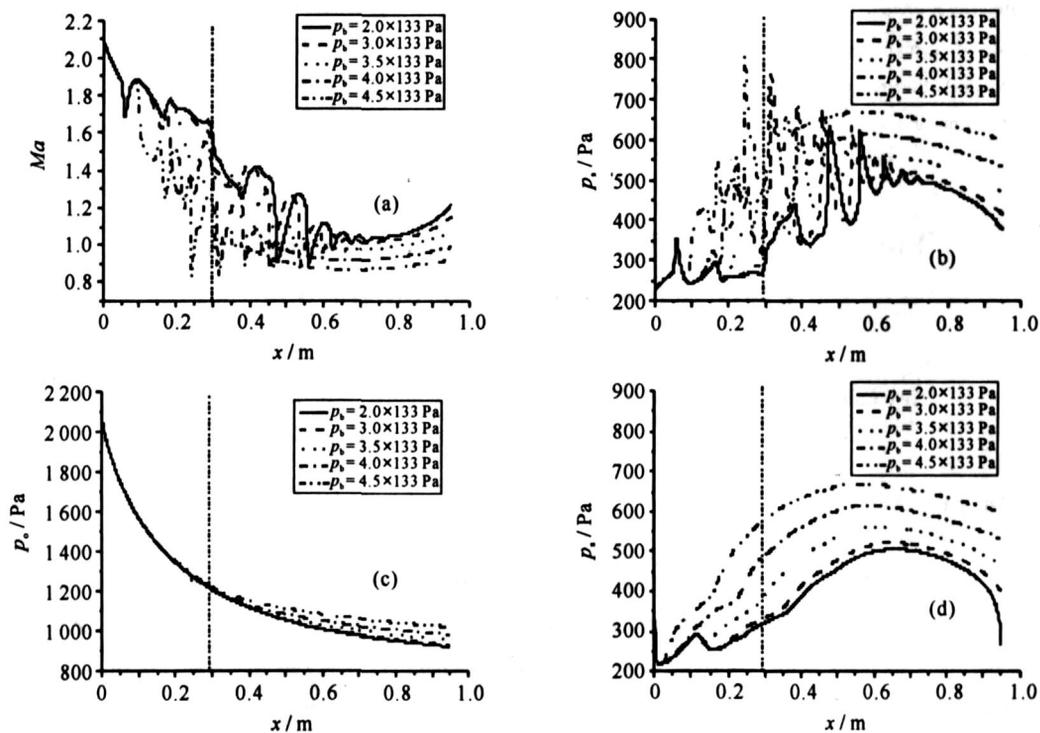


Fig. 2 Distributions of Mach number (a), static pressure (b) and total pressure (c) along symmetric centerline and distribution of static pressure along wall (d) of case No. 3, respectively

图 2 算例 3 对称中心处的马赫数 (a)、静压 (b)、总压 (c) 和壁面处的静压 (d) 分布

光腔的光束质量。对于算例 3 的等截面扩压器构型,在给定的光腔入口条件下,扩压器出口的背压不宜大于  $3 \times 133 \text{ Pa}$ 。

此外,对比流场对称中心处和壁面处的静压分布可知,由于在扩压器内部激波和边界层相互作用造成边界层分离,实验中易于测量的壁面压力不能反映扩压器内部的流场情况,数值计算可以较为全面地给出详细的流场结构。

#### 4 结 论

本文开展了无缓冲气 COIL 扩压器流场的数值研究工作,对 6 种不同构型的扩压器,数值模拟了从光腔入口至扩压器出口的流场;对不同构型扩压器的流场特点、总压恢复性能进行了分析;研究了扩压器出口背压对流场参数的影响,得到了以下主要结论:对于主流无缓冲气的 COIL,扩压器中压力、密度和  $Re$  数低,粘性损耗大,不适宜采用较长的或有隔板的扩压器,等截面扩压器不仅结构简单,而且具有较高的压力恢复性能;虽然增大扩压器出口背压可以提高压力恢复性能,但是,过高的背压会使光腔流场受到干扰,影响光腔的光束质量;由于在扩压器内部激波和边界层相互作用造成边界层分离,实验中易于测量的壁面压力不能反映扩压器内部的流场情况,数值计算可以较为全面地给出详细的流场结构。

#### 参考文献:

- [1] Savin A V, Ignatiev A A, Fedotov A V. Numerical simulation of gas dynamic flows in pressure recovery systems of supersonic chemical lasers[C]// Proc of SPIE. 2001, **4184**:410-413.
- [2] Malkov V M, Boreysho A S, Savin A V, et al. About choice of working parameters of pressure recovery systems for high power gas flow chemical lasers[C]// Proc of SPIE. 2001, **4184**:419-422.
- [3] Boreysho A S, Khailov V M, Malkov V M, et al. Pressure recovery systems for high power gas flow chemical lasers[C]// Proc of SPIE. 2001, **4184**:401-405.
- [4] 吴宝根,陆来,姜宗林,等.用 FLUENT 软件计算化学氧碘激光流场[J].强激光与粒子束,2005, **17**(2):181-185. (Wu B G, Lu L, Jiang Z L, et al. Computation of mixing flowfield of chemical oxygen-iodine laser with FLUENT software. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(2):181-185)
- [5] 胡宗民,孙英英,吴宝根,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, Sun Y Y, Wu B G, 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)
- [6] Spalart P, Allmaras S. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows[R]. AIAA Paper, 92-0439, 1992.
- [7] Carroll D L. Modeling high-pressure chemical oxygen-iodine lasers[J]. *AIAA Journal*, 1995, **33**(8):1454-1462.
- [8] Driscoll R J, Moon L F. Pressure recovery in chemical lasers[J]. *AIAA Journal*, 1977, **15**(5):665-673.
- [9] Acebal R. Evaluation of vaned diffuser performance applicable to chemical laser pressure recovery systems[C]// Proc of SPIE. 1994, **2119**:59-67.

## Flow field numerical simulation for the diffuser of COIL without primary buffer gas

SUN Ying-ying, WU Bao-gen, JIANG Zong-lin

( Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** Using the average parameters at the outlet of a mixing nozzle calculated based on experimental data of a chemical oxygen-iodine laser(COIL) apparatus without primary buffer gas as input conditions, the flow fields from the inlet of optical cavity to the outlet of diffuser for six different diffuser configurations were numerically simulated. Contours of different flow field parameters such as Mach number, static pressure, and total pressure etc. were obtained. The flow field characteristics and the total pressure recovery performance for different diffuser configurations were analyzed. The effect of back pressure at the diffuser outlet on flow field parameters was also studied. The results indicate that the diffuser with constant cross section has better pressure recovery performance for COIL without primary buffer gas; and the pressure recovery performance of a diffuser can be improved by means of increasing the diffuser back pressure. However, the shock train region may move towards the optical cavity under higher back pressure, as a result, the flow field inside the optical cavity may be disturbed and the laser beam quality may be affected.

**Key words:** Chemical oxygen-iodine laser(COIL); Diffuser; Pressure recovery