

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0188-05

CW-DF/HF 化学激光器新型喷管气流掺混的 三维模拟

袁圣付 华卫红 姜宗福

(国防科技大学定向能技术研究所, 长沙 410073)

摘要 针对 HYLTE 喷管的三维复杂外形, 设计生成高效的计算网格。利用有限体积方法, 通过求解带湍流模型的多组分混合气体 N-S 方程, 建立了一套能对 HYLTE 喷管和光腔流场进行模拟的三维程序和方案。考虑到副喷管粘性边界层对喷管内流场的影响, 喷管和光腔采用了一体化模拟, 在不考虑化学反应的条件下, 初步对 HYLTE 喷管和光腔“冷流场”进行了模拟。研究了喷管和光腔内的流场结构; 氧化剂、燃料和稀释剂的掺混机理。所得到的冷流场结果可以作为反应流场模拟的初解, 对程序进一步完善和反应动力学参数进行修改, 可以模拟各种燃料体系和 HF 泛频激光的反应流场、小信号增益和 FP 腔的输出功率以及化学效率。

关键词 CW-DF/HF 化学激光器, HYLTE 喷管, 数值模拟, 湍流模型

中图分类号 TN248.5 **文献标识码** A

Numerical Simulation of Three Dimensional Reactants Mixing of Latest Nozzles in CW-DF/HF Chemical Lasers

YUAN Sheng-fu HUA Wei-hong JIANG Zong-fu

(Institute of Direct Energy, National University of Defence Technology, Changsha 410073)

Abstract Program and method for simulating the three-dimensional flowfields of HYLTE nozzle and cavity, which governed by the compressible full Navier-Stokes equations with Realizable $k-\epsilon$ turbulent model, has been upbuilt by using an coupled implicit FVM method based on efficient grid for complicated geometry. The HYLTE nozzle and cavity have been simulated as a integrative for considering non-uniform flowfield parameters of secondary nozzle exit. Cold flowfield parameters and mixing mechanism of reactant streams have been studied detailedly. Results show that mixing process is accelerated by two ways: reacting surface strectching and streamwise vortices. Furthermore, the cold result can be as the initial value of the reacting flowfields. The program can be modified to simulated overtone HF chemical lases and other kind of chemical lasers for studying the SSG coefficient and output power & chemical efficiency of FP reazonator.

Key words CW-DF/HF chemical lasers, HYLTE nozzle, numerical simulation, turbulent model

1 引言

喷管设计和优化是化学激光器设计的最核心技术之一。HYLTE 喷管阵列(图 1), 是目前用于 CW-DF/HF 化学激光器的主流增益发生装置^[1,2]。该喷管副喷管孔阵交错排列, 通过横向射流使反应截面扭曲, 其流场具有典型的三维特征, 二维简化模拟没有实际意义。HYLTE 喷管的模拟是一项具有挑战性的工作^[3], 流场结构非常复杂, 模拟难度很大; HYLTE 喷管喉道高度很小, 喷管内具有很厚的边界层, 喷管出口为高超音速流动, Re 数较大, 根据文献[4]的结

论, 网格要求较为严格。到目前为止, 除文献[3]采用蒙特卡罗直接模拟(DSMC)外, 尚未见到其它报道。

本文尝试采用有限体积方法, 在设计生成高效的计算网格基础上, 通过求解带湍流模型的三维 NS 方程, 得到 HYLTE 喷管及光腔流场。对 HYLTE 喷管中反应流的混合机理、组分等参数分布进行了初步的研究。

2 数值模型

HYLTE 喷管和光腔内的流场可以通过守恒形

式的 N-S 方程来描述:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + W + Q_{\text{chem}} + Q_{\text{rad}} = 0 \quad (1)$$

守恒变量矢量:

$$Q = \left[\rho, \rho u, \rho v, \rho w, \rho H - \frac{\gamma_0 - 1}{\gamma_0} p, \rho c_k \right]^T; \\ k = 1, 2, \dots, N_k$$

空间导数项:

$$W = \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial z}$$

矢量 F 、 G 、 H 可以分为粘性项(下标 v)和无粘项(下标 i)两部分:

$$F = F_i + F_v; \quad G = G_i + G_v; \quad H = H_i + H_v$$

Q_{chem} 为化学源项,描述各个组分在化学反应中的生成和消耗速率; Q_{rad} 为能量源项,描述激光激射过程中的能量转移和激发态分子在激射作用下互相转移的相关项。方程(1)实际上是文献[5]用于有限差分算法求解光腔流场控制方程守恒形式, Q_{chem} 具体表达式见文献[5]。

针对 HYLTE 喷管的流场特征,采用 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型,该模型对平面和圆柱射流,边界层中存在强逆压梯度与分离,回流以及很强的流线扭曲时,具有较好的模拟效果。湍流动能 R 和耗散速率运输 ϵ 方程如下:

k 方程:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M$$

ϵ 方程:

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \\ \rho c_1 S \epsilon - \rho c_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + c_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \xi_{3\epsilon} G_b$$

其中湍流粘性 $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$; $C_\mu = \frac{1}{A_0 A_s U^* k / \epsilon}$ 是变化的, A_0, A_s, U^* 是速度梯度的函数,方程中各个物理量含义和系数取值参见文献[6],为了使求解方程封闭,还要补充两个关系式:

状态方程:

$$P = \rho RT / m$$

总焓、速度与温度的关系:

$$H = \frac{V^2}{2} + \sum_{k=1}^{N_k} c_k h_k = \frac{V^2}{2} + \sum_{k=1}^{N_k} c_k \left(\int_{T_0}^T c_{pk} dT + h_k^0 \right)$$

上述 N-S 方程采用耦合的隐式有限体积方法求解,所得参数代入湍流模型求解 k, ϵ , 即 $k-\epsilon$ 方程采用分

裂算法,利用时间相关法循环迭代收敛至稳态解。

3 HYLTE 喷管模拟

3.1 模拟方案

控制方程(1)分三步进行求解:

1) 混合、无反应、无激射求解:即冷流场模拟,也就是本文描述的内容。即忽略方程(1)中 Q_{chem} 和 Q_{rad} 两项,所得的结果作为第二步求解的初值。从理论上说,所得的冷流场解在喷管内和光腔入口附近具有一定的实际意义,因为在此区域内,化学反应与激光激射基本上没有发生。由冷流场解可以看出基本的流场结构、喷管出口的流场参数,也可以看出各个反应流气体是如何混合的。

2) 有反应、无激射求解:考虑 Q_{chem} ,即在求解中加入化学反应动力学模型,从而得到各个激发态分子分布和热流场,从而可以计算小信号增益的分布状况、光腔中激发态分子的激射环境条件和 F 原子的利用效率,后者反映了激光器的化学效率。

3) 有激射存在的反应流场求解:同时考虑 Q_{chem} 和 FP 腔下的 Q_{rad} 两项,从而得到 FP 腔下的输出功率和化学效率。

3.2 计算区域

HYLTE 喷管阵列是横向(z 轴方向)和纵向(y 轴方向)周期排列的,在计算模拟中,横向取一个反应周期,纵向选取一个反应气流接触界面[如图 1(b)中小矩形所示],沿流场方向(x 轴方向)取 40 mm 长度[如图 2,图 3(b)所示]。在 HYLTE 区域结构模拟步骤问题上,沿用以往的模拟经验,分三步对整个计算区域进行模拟:

1) 模拟各个单喷管内——氧化剂喷管(平面对称喷管)、燃料喷管(轴对称喷管)与稀释剂(轴对称喷管)的流场,其中氧化剂喷管内考虑 F 原子在壁面催化作用下的复合反应。取各个喷管扩张段下游(离喷管出口约 1/3 距离)的一个截面上的流场参数作为下一步计算的压力入口边界条件。

2) 模拟喷管和光腔交接的计算区域。与文献[3]不同的是:我们把喷管后段与光腔前段作了一体化模拟,从而避免各个喷管与光腔交接处气流的不均匀性对光腔流场以及亚音速边界层对上游流场的影响。模拟区域如图 2。

3) 模拟光腔后段,该区域是取一个长方体的通道,入口边界为第二步模拟所得的出口流场参数。

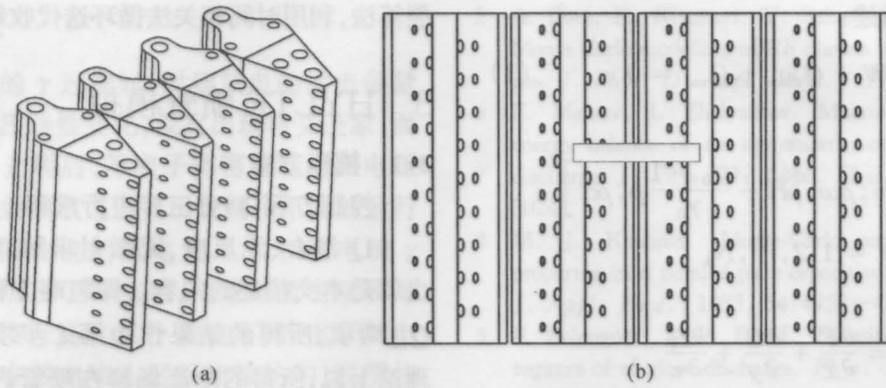


图1 HYLTE 喷管结构图. (a) 增益发生器的4个喷管叶片轴测图; (b) 喷管出口平面视图

Fig. 1 Structure of HYLTE nozzles. (a) 4 blades view of HYLTE gain generator; (b) Vertical view of nozzle exit plane

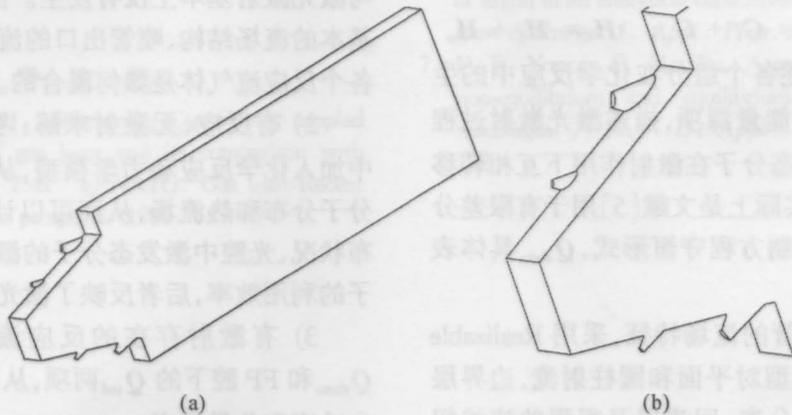


图2 数值模拟选取的计算区域图. (a) 数值模拟区域全局图; (b) 副喷管附近区域的放大图

Fig. 2 Domain of numerical simulation. (a) Whole domain of numerical simulation; (b) Enlarged view of domain near secondary nozzle

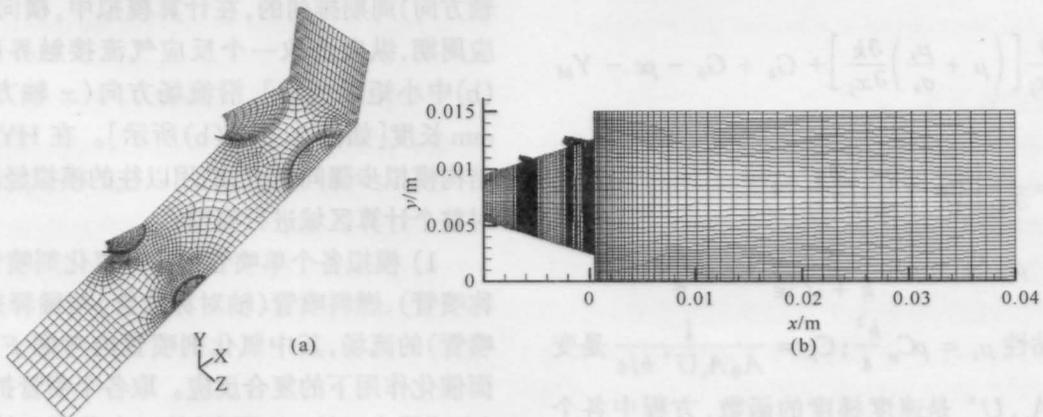


图3 计算网格. (a) 壁面附近的副喷管网格; (b) 整个对称面网格

Fig. 3 Grid used in numerical simulation. (a) Grid of secondary nozzle on the wall; (b) Grid in whole symmetry plane

3.3 边界条件

HYLTE 主、副单喷管的模拟采用文献[7]的程序,边界条件同时沿用。在喷管与光腔耦合区域,主要有以下几种边界:压力入口边界;超音速出口边界;对称边界条件;固壁边界条件;周期边界条件。压力入口边界给定总压、静压与总温、速度矢量方向以及组分质量百分比。然后根据一维等熵流理论计

算各个流场入口参数;固壁边界给定壁面温度或者热通量(绝热壁对应的热通量为0);周期边界条件如何从数值上实现目前尚未解决,通常采用壁面或对称边界条件代替,或者计算区域取两个喷管叶片反应周期,这两种处理方法我们在模拟中都采用过,本文的结果是用固壁代替周期边界得到的;其余边界条件参考文献[7]。

3.4 网格设计

网格质量在模拟中起着重要的作用,它直接影响求解能否收敛、能够达到的收敛程度以及计算所需的时间长短。网格对流场结构——如激波、漩涡的捕捉也起着关键的作用。根据 HYLTE 喷管的流场的基本特征,对副喷管射流附近区域进行加密,如图 3,一般来说,先根据流场大致结构设计出基本的原始网格,得到收敛解后,再对网格进行自适应,检查收敛解对网格的依赖性,最终得到对网格不太依赖的收敛解。

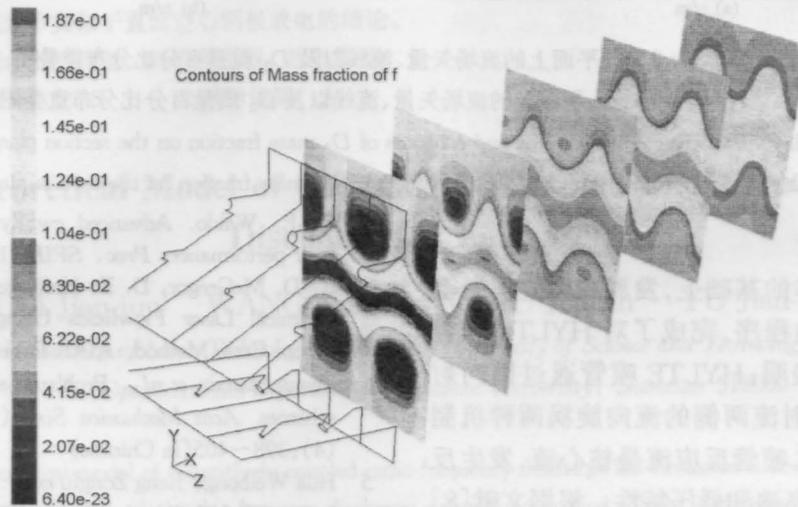


图 4 F 原子在 $x = 3, 10, 20, 30, 40$ mm 平面上的质量百分比分布

Fig. 4 Contours of mass fraction of F atom on the planes of $x = 3$ mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm

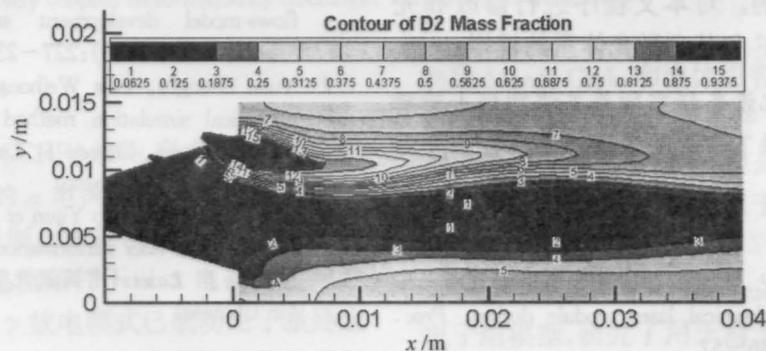


图 5 对称面上的 D_2 质量百分比分布

Fig. 5 Contours of D_2 mass fraction on the symmetry plane

图 5 给出了 D_2 在副喷管对称面上的质量百分比分布;图 6 给出了 $x = 3$ mm, 10 mm 位置垂直流场的截面上的 D_2 质量百分比的分布、流场矢量以及流线的分布。从图 5、6 可以看出氧化剂流与燃料流的相互作用以及 D_2 流的穿透效应,主气流先被 D_2 流压缩,然后再膨胀;在 D_2 气流两侧,有两个流向旋涡,这也将有利于增强反应流的混合。此流向旋涡沿流场方向先增强,然后逐渐衰减,进一步模拟

4 冷流场模拟结果

图 4 给出了 F 原子在 $x = 3$ mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm 截面上的质量百分比分布。由图可知: F 原子与 D_2 的接触面完全是扭曲的,反应界面明显增加,这将加快两股反应气流的混合; F 原子与 D_2 发生反应的位置在喷管的核心流附近,反应气流具有低温、高速以及低压的特性,而不再象二维平面对称喷管(2SLOT)喷管那样,反应流来自边界层,发生反应的气流不具有低温、高速和低压特性(边界层气流具有低速、高温和高压特性)。

表明:旋涡的强度随副喷管射流总压、副喷管间距等参数变化。从总体分析来看,流向旋涡对大基区的 HYLTE 喷管混合增强不占主导地位,大基区结构的 HYLTE 喷管主要还是靠反应界面扭曲来增强混合的。但这一点在小基区高度结构的 HYLTE 喷管中可能会有所改变。从流场矢量图结构来看,副喷管射流与钝实体具有类似的效应,存在底部流结构和对主流的压缩效应。

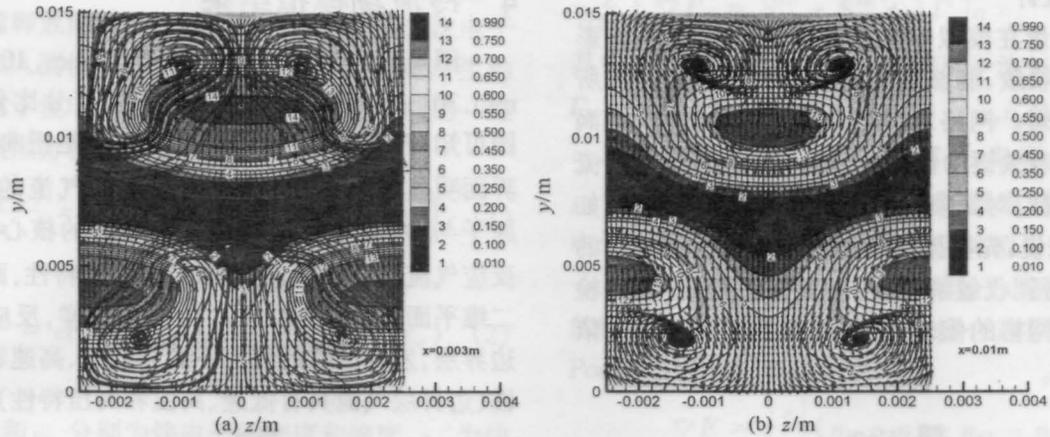


图6 (a) $x = 3$ mm 平面上的流场矢量、流线以及 D_2 质量百分比分布重叠图;

(b) $x = 10$ mm 平面上的流场矢量、流线以及 D_2 质量百分比分布重叠图

Fig. 6 (a) Overlay view of vector, streamline and contours of D_2 mass fraction on the section plane of $x = 3$ mm;

(b) Overlay view of vector, streamline and contours of D_2 mass fraction on the section plane of $x = 10$ mm

5 结 论

在过去模拟工作的基础上,发展和建立了一套三维有限体积方法的程序,完成了对 HYLTE 喷管的初步模拟。结果表明:HYLTE 喷管通过横向射流使反应截面扭曲、射流两侧的流向旋涡两种机制来增强混合;HYLTE 喷管反应流是核心流,发生反应的气流具有低温、高速和低压特性。根据文献[8]中结论可知:HYLTE 喷管构成的增益发生器对应的 DF/HF 化学激光器将具有较高的化学效率。这与实验结果是一致的。对本文程序进行修改和完善,可以完成泛频 HF 和其它激光体系的模拟。

致谢 感谢邯郸净化设备研究所总工程师胡士珩研究员为本文模拟提供了喷管运转滞止参数和部分结构参数。

参 考 文 献

1 W. A. Duncan, S. P. Patterson, B. R. Graves. Overtone research, advanced chemical laser module design. *Proc. SPIE*, 1994, **2119**:46~57

2 R. E. Waldo. Advanced cw hydrogen fluoride chemical laser performance. *Proc. SPIE*, 1993, **1871**:252~264

3 R. D. McGregor, D. E. Haflinger *et al.*. Modeling of HF Chemical Laser Flowfields Using the Direct Simulation Monte Carlo Method. AIAA Paper. 92~2980

4 Zhang Hanxin *et al.*. Problems about grid and high order schemes *Acta Mechanica Sinica*(力学学报), 1999, **31**(4):398~405(in Chinese)

5 Hua Weihong, Jiang Zongfu *et al.*. Numerical Study of the 3-slot CW HF Chemical Laser. *Chinese J. Lasers*(中国激光), 1997, **A24**(3):221~227(in Chinese)

6 T. H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir *et al.*. A new eddy-viscosity model for high reynolds number turbulent flows-model development and validation. *Computers Fluids*, 1995, **24**(3):227~238

7 Yuan Shengfu, Hua Weihong *et al.*. Nozzle design and numerical simulation method of nozzle flow in DF/HF chemical lasers. *Chinese J. Lasers*(中国激光), 2001, **A28**(1):19~21(in Chinese)

8 Yuan Shengfu, Zhao Yijun *et al.*. Dependence of CW DF/HF chemical laser performance on the flowfield parameters. *Chinese J. Lasers*(中国激光), 2001, **A28**(5):402~406(in Chinese)