DF/HF 化学激光器喷管总压损失的数值模拟

唐力铁,于志闯,赵乐至,尹 飞,郭士波,谈 斌

(西北核技术研究所,陕西 西安 710024)

摘 要：DF/HF 化学激光器需要体积庞大的压力恢复系统才能够工作。为了综合考虑激光器和压力恢复系统一体化设计,对 DF/HF 化学激光器的两种喷管的内流场采用了 CFD 技术进行了模拟,比较了它们的总压损失的差别和内流场的不同，并讨论了这种不同对整个激光器性能的影响。计算结果表明,细喉道的喷管不但有利于减小激光器增益发生器的尺寸,而且它的总压损失近似于标准喷管,从而不会增加激光器后部压力恢复系统的体积。

关键词：DF/HF 激光器； 喷管设计； 压力恢复系统； 数值模拟

中图分类号：TN24 **文献标志码**：A **文章编号**：1007-2276(2013)05-1194-04

Total pressure losing of nozzles flow in DF/HF chemical laser by numerical simulation

Tang Litie, Yu Zhichuang, Zhao Lezhi, Yin Fei, Guo Shibo, Tan bin

(Northwest Institue of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: The DF/HF chemical laser needs the pressure recovery system with huge volume to work successfully. In order to optimize the design of the laser and the pressure recovery system, the flow field and total pressure losing of two types nozzles (standard nozzle and thin neck nozzle) in DF/HF chemical lasers was studied by numerical simulation. The difference of their total pressure losing and interior flow field were compared. Then the influence of the difference on the entire laser system performance was discussed. The computer result shows that the total pressure losing of the thin neck nozzle was as same as the standard nozzle. So, using the thin neck nozzle was benefit to diminishing the volume of gain generator of the DF/HF chemical laser. And it did not take more berden to the pressure recovery system. So, the pressure recovery system at the end of the laser will not have to be enlarged.

Key words: DF/HF chemical Laser; nozzle design; pressure recovery system; numerical simulation

收稿日期:2012-09-01; **修订日期**:2012-10-11

基金项目:国家自然科学基金(40905011);国家 863 计划

作者简介:唐力铁(1974-),男,副研究员,主要从事激光技术与应用方面研究。Email:tlt_laser@sina.com

0 引 言

DF/HF 化学激光器需要游离的 F 原子和来产生激光[1-2]。喷管组件是化学激光器获得有效激射的关键部件之一,关系到增益介质的生成和光束的质量[3]。喷管冻结 F 原子,提供氟氧化剂流和氘/氢燃料流在光腔中快速混合、反应而产生激发态的 DF/HF[1];喷管还为光腔中泵浦反应建立适当的压力、温度。其中低压环境是包括 DF/HF 化学激光器等此类激光器正常出光的重要条件[4-5]。为了让反应产物能排放到大气中去, 这种化学激光器需要庞大而复杂的压力恢复系统才能工作[6-8]。为了减小整个化学激光器系统的体积, 人们设想如高强压运转等许多方法以减少对压力恢复系统的依赖[9]。在激光器的整体设计当中, 喷管的出口总压增大可以减小对压力恢复系统的要求, 从而对减小整个激光器系统的尺寸意义重大。喷管内部的总压损失在没有发生气流分离的情况下,主要是由于粘性附面层引起的。为了比较总压损失的情况, 文中采用 FLUENT 软件计算了标准喷管(喉部大于直径 1 mm)和细喉道喷管(喉部直径小于 0.5 mm)两种情况.

喷管造成总压损失的主要原因是气体附面层的粘性,因此在研究总压损失的试验中,使用氮气和氦气来近似,在模拟时也以这两种气体进行了计算。

以氮气作为主流气体,氦气作为加入气体。在差分格式中, 为了避免数值粘性引起对总压计算的大误差,文中采用了两阶精度的迎风格式。为了配合以后的,给定引射比的引设系统设计,采用了给定质量流量的入口条件。

1 数值模拟

1.1 控制方程

Laval 喷管内多组分混合气体使用二维 Navier-Stokes 方程组描述,即:

连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\vec{u})=0 \tag{1}$$

动量方程

$$\frac{\partial \rho\vec{u}}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\vec{u}\vec{u}+p\vec{E}-\vec{\tau})=0 \tag{2}$$

能量方程

$$\frac{\partial(\rho H-p)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\vec{u}H+\vec{q}-\vec{\tau}\cdot\vec{u}) \tag{3}$$

组分方程

$$\frac{\partial \rho c_k}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\vec{u}c_k+\vec{J})-\sum_{s=1}^{N_R}\dot{\omega}_{ks}=0 \tag{4}$$

其中粘性应力张量

$$\vec{\tau}=\begin{pmatrix}\tau_{xx} & \tau_{xy}\\ \tau_{yx} & \tau_{yy}\end{pmatrix}\quad \tau_{xx}=-\tau_{yy}=\frac{2}{3}\mu\left(2\frac{\partial u_x}{\partial x}-\frac{\partial u_y}{\partial y}\right)$$

$$\tau_{xy}=\tau_{yx}=\mu\left(2\frac{\partial u_x}{\partial y}+\frac{\partial u_y}{\partial x}\right) \tag{5}$$

热通量矢量

$$\vec{q}=-\lambda\nabla T+\sum_{k=1}^{N_k}h_k\vec{J}_k \tag{6}$$

k 组分比焓

$$h_k=\int_{T_0}^{T}C_{pk}dT+h_k^0 \tag{7}$$

式中:T 为温度。

质量通量矢量

$$J_k=-\rho D_k\nabla C_k \tag{8}$$

k 组分扩散系数

$$D_k=\left(\frac{1}{m}-\frac{c_k}{m_k}\right)\sum_{\substack{i=1\\ i\neq k}}^{N_k}c_i/m_iD_{ki},\ k=1,2,3,\cdots,N_k \tag{9}$$

式中:N_k 为气体组分总数。

混合气体的粘性系数 μ, 热传导系数 λ 和二元扩散系数 D_{ij} 都是根据气体分子动力学理论计算得到的。此外定义 $H=h+u^2/2$, 并假设混合气体为理想气体;为了使控制方程封闭,补充关系式:$p=\rho\frac{R}{m}T$。

1.2 初、边值条件:

取一维等熵流解析解作为计算的初始值。二维平面 Laval 喷管具有对称性,所以计算时有四种边界条件,描述分别为:

亚音速入口边界条件

$$u_\tau/u_{\tau,max}=f_1(\vec{e}),\ u_n/u_\tau=f_2(\vec{e})\ c_k=c_{k,in}(\vec{e})$$
$$k=1,2,3,\cdots,N_k,\ \partial^2u_{\tau,max}/\partial\tau^2=0$$
$$T/T_{stagn}=[1+M^2(\gamma-1)/2]^{-1}$$
$$p/p_{stagn}=[1+M^2(\gamma-1)/2]^{-\frac{\gamma}{\gamma-1}} \tag{10}$$

式中:$f_1(\vec{e})$和 $f_2(\vec{e})$为假设的入口速度分布,如抛物型或常数型;τ 和 n 分别表示单位矢量$\vec{e}$的切向和法向。

曲形固壁边界条件

$$u_\tau=u_n=0,\ T=T_w,\ J_{k\tau}=0\quad k=1,2,3,\cdots,N_k \tag{11}$$

对称边界条件

$$u_\tau=0,2\phi/2\tau=0,\phi=u_n,p,T,c_k \quad (12)$$

超音速出口边界条件

$$\partial^2\phi/\partial\tau^2=0,\phi=u_n,u_\tau,p,h,c_k \quad (13)$$

1.3 计算方法

采用 Fluent 软件计算，控制方程是通过以下思路进行求解的。

1.3.1 控制方程的无量纲化

对密度 ρ,引入无量纲动压 $p'=(p-p_0)/p_0u_{x0}^2=(\bar{p}-1)/\gamma_0M_0^2$ 来实现无量纲化，其中 p、p_0 和 $\bar{p}$ 分别对应于静压、滞止压力和无量纲静压,ρ_0、u_{x0}、γ_0 和 M_0 对应于密度、纵向速度、比热比和马赫数的特征参量。其余变量(u_x,u_y,H,c_k)按通用的方法进行无量纲化。

1.3.2 差分方程的建立

采用算子分裂方法,将控制方程组中的定常项按物理过程、空间方向、平流项(对空间的一阶导数项)和粘性项(对空间的二阶导数项)分裂得到差分方程。

1.3.3 差分方程的可压缩流约化算法处理

可压缩流约化(compressibility scaling,CS) 算法是为了克服求解跨声速流动中出现的“声学刚性”而提出的一种有效方法,求解收敛速度快,对定常解没有影响。

1.3.4 差分格式

为了保证求解收敛,差分方程采用全隐式。对动量方程,采用两阶精度的迎风格式.

2 计算结果与讨论

文中计算了传统标准喷管和细喉道喷管,这里只列出了主要结果(见图 1~图 4),并把它们进行比较。

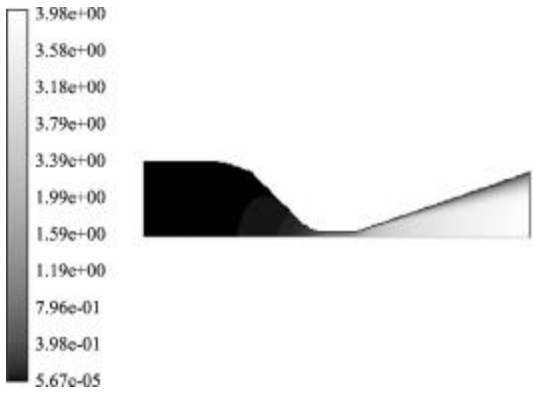

图 1 标准喷管的马赫数

Fig.1 Standard nozzle mach number

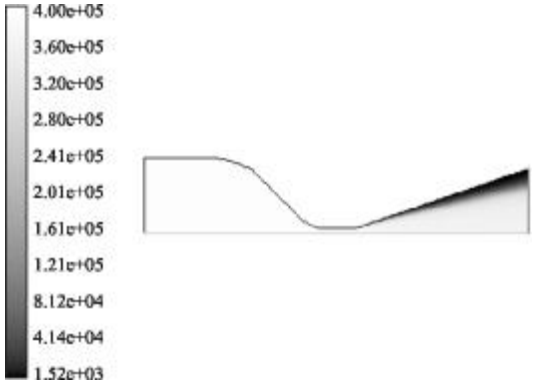

图 2 标准喷管的总压(Pa)

Fig.2 Standard nozzie total pressure(Pa)

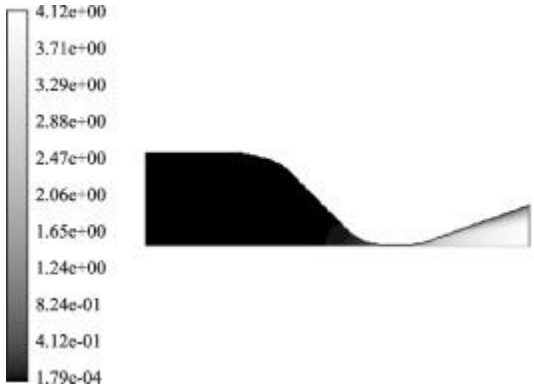

图 3 细喉道喷管马赫数

Fig.3 Thin neck nozzie mach nubmer

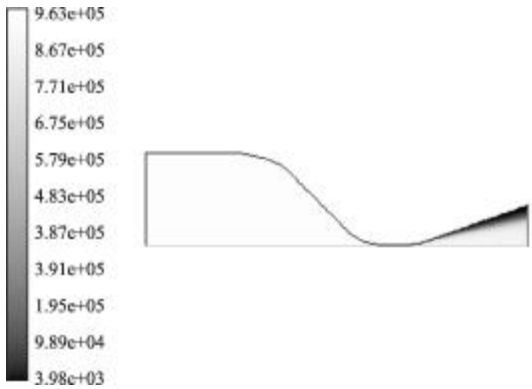

图 4 细喉道喷管总压(Pa)

Fig.4 Thin neck nozzie total pressure(Pa)

从计算结果得出以下几个结论：

(1) 为了保证有同样的出口马赫数,细喉道喷管的膨胀部分要小于标准喷管，这对于缩小激光器增益发生器的体积是有利的。从马赫数分布还会发现,由于喷管壁面的摩擦，使得喷管的扩张段在靠近壁面的位置处,气体仍然是亚音速流动。这和理想的无

粘喷管模型预言的结果不相同。因此，在这个位置上，喷管的下游气动环境会影响喷管上游的气动环境，这就有可能引发激光器出现不稳定燃烧的工作情况。

(2) 研究总压损失是为了设计便于压力恢复的激光器，激光器的压力恢复能力与流场气体最后能够有效获得的动能的多少有关。动能是一个与质量有关的物理量，也就是说，对于一个密度不均匀的可压缩流场,如果它大部分总压很高,但对应区域的气体密度很小;而其他部分总压很低,但对应的气体密度很大,那么这个流场即使平均总压很高,但它的压力恢复能力也是很小的。因此,在这里引入“质量平均总压损失系数 n”(定义如下)，作为研究的参数来分析喷管的总压损失。

$$n=\frac{\int_{\text{对喷管入口积分}}\rho\cdot p_{\text{总}}\,ds-\int_{\text{对喷管出口积分}}\rho\cdot p_{\text{总}}\,ds}{\int_{\text{对喷管入口积分}}\rho\cdot p_{\text{总}}\,ds}\times 100\% \quad (14)$$

经过计算,标准喷管的总压损失系数为 23.3%;细喉道喷管的总压损失系数为 25.2%。由此可以看出,细喉道喷管的总压损失更大些,但增加幅度不明显。

总之，采用减少喷管喉道直径的方法有利于减少增益发生器的体积,但对总压损失的影响并不大。因此,在激光器喷管设计当中,可以选取较小直径的喷管喉道,而不会导致明显总压损失。

参考文献:

[1] Gross R W F, Bott J F. Handbook of Chemical Lasers[M]. Beijing: Science Press, 1987: 267-276. (in Chinese)

[2] Li Qiang, Zeng Xuewen, Zhao Yijun, et al. Power of small-scale CW discharge DF/HF chemical laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(4): 343-345. (in Chinese)
李强, 曾学文, 赵伊君, 等. 小功率连续波放电 DF/HF 化学激光器的功率[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(4): 343-345.

[3] Ning Yongqiang, Zhang Xing, Qin Li, et al. High-power high beam quality vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(12): 3219-3225. (in Chinese)
宁永强, 张星, 秦莉, 等. 高光束质量大功率垂直腔面发射激光[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3219-3225.

[4] Yuan Shengfu, Zhao Yijun, Hua Weihong, et al. Dependence of CW DF/HF chemical laser performance on the flowfield parameters[J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28(5): 403-406. (in Chinese)
袁圣付, 赵伊君, 华卫红, 等. CW DF/HF 化学激光器性能与流场参数的相互关系[J]. 中国激光, 2001, 28(5): 403-406.

[5] Ge Lun, Hua Weihong, Wang Hongyan, et al. Energy pooling process in rubidium vapor laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(2): 334-338. (in Chinese)
葛伦, 华卫红, 王红岩, 等. 铷蒸气激光器中的碰撞能量转移效应[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 334-338.

[6] Yu Zhen, Li Shouxian, Chen Dongquan. Integrative design of nozzle,cavity and pressure recovery system [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(4): 533-537. (in Chinese)
余真, 李守先, 陈栋泉. 喷管、光腔及压力恢复系统一体化设计[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(4): 533-537.

[7] Zhao Bo, Liao Daxiong. Numerical simulation of cooling technique in COIL pressure recovery system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20 (11): 1841-1845. (in Chinese)
赵波, 廖达雄. COIL 压力恢复系统气流主动冷却技术数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(11): 1841-1845.

[8] Xu Wanwu, Zou Jianjun, Wang Zhenguo, et al. Experimental investigation of the start performances of the supersonic annular ejector [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2005, 31(6): 7-11. (in Chinese)
徐万武, 邹建军, 王振国, 等. 超声速环型引射器启动特性试验研究[J]. 火箭推进, 2005, 31(6): 7-11.

[9] Hua Weihong, Jiang Zongfu, Zhao Yijun. Numerical research on high cavity pressure of CW DF chemical laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1997, 9(2): 221-225. (in Chinese)
华卫红, 姜宗福, 赵伊君. 连续波 DF 激光器高腔压运转的数值研究[J]. 强激光与粒子束, 1997, 9(2): 221-225.