

DF/ HF 化学激光器 HYL TE 喷管的副喷管质量流量系数*

施建华, 袁圣付, 华卫红, 姜宗福, 王红岩

(国防科技大学 理学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 对 DF/ HF 化学激光器 HYL TE 喷管的副喷管质量流量进行了数值和理论计算, 得出入口滞止压力在 0.01 ~ 0.4MPa 之间、喉道半高度在 0.1 ~ 0.9mm 之间的喷管的氘气、氢气和氦气质量流量系数, 总结出质量流量系数随入口滞止压力和喉道高度的变化规律, 并给出拟合公式, 为副喷管的设计提供依据。

关键词: DF/ HF 化学激光器; HYL TE 喷管; 质量流量系数

中图分类号: TH248.5

文献标识码: A

高超音速低温喷管(HYL TE)是目前国内、国外用于连续波 DF/ HF 化学激光器的主流喷管^[1~4], 燃烧室产生的氧化剂流经其主喷管膨胀至超音速, 在光腔中与副喷管提供的燃料流混合后起反应产生增益介质(即振动激发态的 DF/ HF 分子)。D₂/ H₂ 副喷管的流量直接影响光腔中混合物的成分、激发态分子的形成以及激射环境; He 副喷管提供的稀释剂流将氧化剂流和燃料流隔离, 缓冲和抑制反应区升温, 使得增益介质有较长的激射区。为了准确地掌握 HYL TE 喷管的副喷管质量流量, 我们对 HYL TE 喷管 D₂/ H₂、He 副喷管的质量流量系数进行了研究。

DF/ HF 化学激光器的燃料和稀释剂经过管路分流到达喷管的收缩段(见图 1), 受上一级管路的影响, 下级管路的各个入口气流总压之间将变得不均匀, 沿上级管路流场方向逐渐下降, 因此有必要对不同入口气压喷管内的质量流量系数进行模拟。受喷管叶片的限制, HYL TE 喷管的副喷管不可能太大, 较小的喉道高度导致较厚的边界层, 使得副喷管中的实际质量流量无法正确估计^[5]; 激光器长期使用, 由于气体的腐蚀或沉淀作用, 喉道高度有可能被改变, 从而影响激光器的性能。为了合理的设计和维护 DF/ HF 化学激光器, 本文对入口滞止压力在 0.01 × 0.4MPa 之间、喉道半高度在 0.1 ~ 0.9mm 之间的平面对称喷管和轴对称喷管的 D₂, H₂ 和 He 流场做了细致的模拟, 并计算出质量流量系数, 得到各自质量流量系数随入口滞止压力和喉道高度变化的规律。

1 HYL TE 喷管副流质量流量系数的计算

1.1 HYL TE 喷管副流质量流量系数的计算方法

本文按下式计算 HYL TE 喷管的副流质量流量系数:

$$= \dot{m} / \dot{m}_0 \tag{1}$$

式中, \dot{m} 和 \dot{m}_0 分别为喷管内气体质量流量的模拟值和理论值。

$$\dot{m} = \rho v A \tag{2}$$

式中: ρ 是模拟得到的喷管中气体的密度和流场方向上的速度, A 为喷管喉道半高度(平面对称喷管)或截面积(轴对称喷管)。

假设喷管中的稳态流动为一维定常等熵流动^[5], 则其质量流量的理论值

$$\dot{m}_0 = K \frac{p}{\sqrt{T}} A^* \text{ (kg/s)} \tag{3}$$

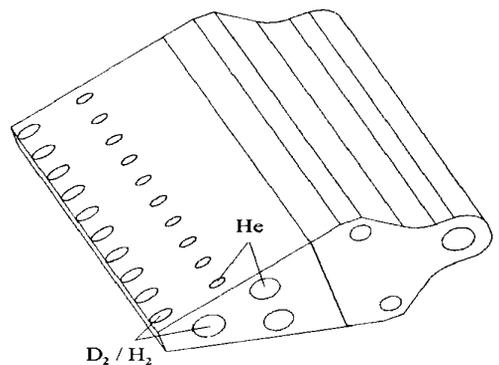


Fig. 1 Schematic diagram of HYL TE nozzle blade
图 1 HYL TE 喷管叶片示意图

* 收稿日期: 2002-12-25; 修订日期: 2003-03-15

基金项目: 高等学校先进教师基金资助课题

作者简介: 施建华(1976), 女, 江苏盐城人, 在读博士, 目前主要从事强激光技术研究; E-mail: gexin7651@sina.com.

其中： $K = (\gamma / R)^{1/2} [2 / (\gamma + 1)]^{(\gamma + 1) / (2\gamma - 2)}$ ， γ 为流体的比热比， $R = 8310 / W$ ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)， W 为流体的分子量； A^* 为喷管喉道处的截面积，轴对称喷管 $A^* = \pi h^2$ ，平面对称喷管 $A^* = 2h^2$ (h 为喷管喉道半高度)； p^* 的值取喷管入口滞止压力； $T^* = 300K$ 。

1.2 HYLTE 副喷管质量流量的数值计算方法

本文计算的喷管的结构和滞止参数如表 1 所示，壁面温度取 300K，热通量为 0。

表 1 喷管的结构和滞止参数

Table 1 Structure and stagnation parameters of nozzle

contraction angle	expansion angle	throat length	half throat height	inlet temperature	inlet pressure
10°	13°	1mm	0.1~0.9mm	300K	0.01~0.4MPa

Laval 喷管内气体可用 Navier-Stokes 方程组来描述^[6]，利用有限差分方法计算出喷管内气体各网格点上的密度 $\rho(i, j)$ 和沿气流方向上的速度 $v(i, j)$ ，有关数值模拟的基本理论和计算方法详细讨论可参见文献[6,7]，根据式(2)得气体的质量流量模拟值的具体计算式为

$$\dot{m} = \frac{1}{2M} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N-1} [\rho(i, j)v(i, j) + \rho(i, j+1)v(i, j+1)] S(i, j) \quad (4)$$

平面对称喷管： $S(i, j) = y(i, j+1) - y(i, j)$ ；轴对称喷管： $S = [y(i, j+1)^2 - y(i, j)^2]$ 。M, N 分别为 x, y 方向的网格数，y(i, j) 为网格点(i, j)的 y 坐标值。

2 计算结果及分析

本文对喉道半高度在 0.1~0.9mm、入口滞止压力在 0.01~0.4MPa 平面对称喷管和轴对称喷管共 720 种情况下 D₂, H₂ 和 He 的流场进行了模拟，并计算出相应的质量流量系数。

图 2 给出 D₂, H₂ 和 He 副喷管的质量流量系数随入口滞止压力的变化。三种气体的质量流量系数随入口滞止压力变化规律相同，在相同喷管结构参数和边界条件下，D₂ 与 H₂ 的质量流量系数基本相同，而 He 的值较低。对同一喷管，质量流量系数随入口滞止压力的增加而增加，入口滞止压力小于 0.1MPa 时，质量流量系数随其的变化较大。对相同的入口气压、喉道高度和气体，轴对称喷管的质量流量系数明显低于平面对称喷管。

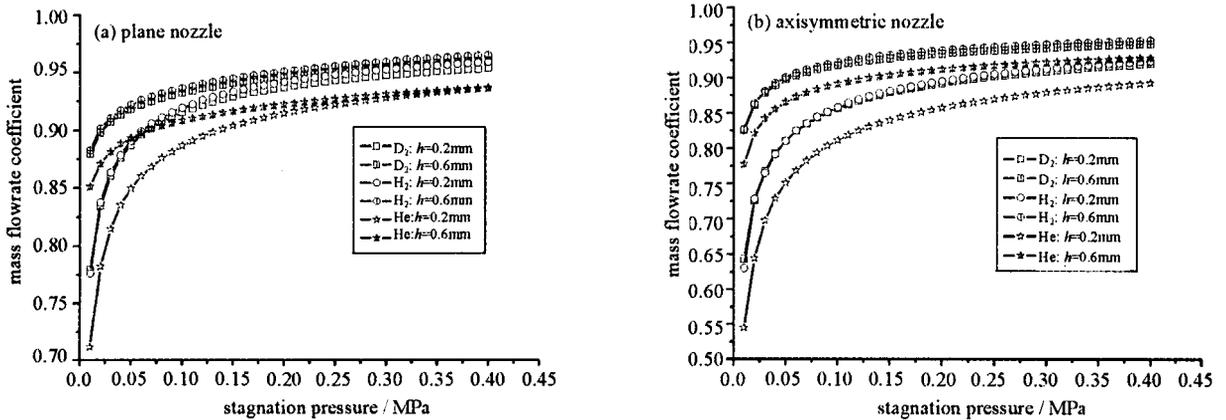


Fig. 2 Relation of mass flowrate coefficient and stagnation pressure

图 2 质量流量系数随入口滞止压力的变化情况

边界层是影响气体质量流量系数的主要因素^[4]，本文根据公式 $\eta = \frac{y_w}{h} (1 - v_x / v_{x-axis}) dy$ (y_w 为喷管的壁面高度， v_x 为 x 方向的速度， v_{x-axis} 为在对称轴上与该点对应的点的 x 方向速度)^[8] 得到气体的边界层位移厚度并计算出

$$\eta = \begin{cases} 1 - \gamma / h, & \text{平面对称喷管} \\ (1 - \gamma / h)^2, & \text{轴对称喷管} \end{cases} \quad (5)$$

可将 η 近似地看作喷管中气流截面积的实际值与理论值之比。在本文计算的 720 种情况下， η 与 γ 的关系基本相同。图 3 给出喉道半高度为 0.2mm 的平面对称喷管 D₂, H₂ 和 He 的 η 与 γ 值，两者随喷管入口滞止压力的变化规律一致， η 略大于 γ ，此结果进一步表明，边界层对气体质量流量系数起主要作用。

边界层厚度与气流的粘性 μ 、特征长度 l 、密度以及边界层外沿速度 v 有关,可表述为

$$\sqrt{\mu l / v} \quad (6)$$

而影响气体密度的主要因素是气体的滞止压力和比热比, D_2 与 H_2 有相近粘性、相同比热比,而 He 的粘性系数大于 D_2 和 H_2 的,比热比小于 D_2 和 H_2 的,因此在相同的喷管结构参数和边界条件下, D_2 、 H_2 、 D_2 (H_2) $>$ He。在比热比一定的条件下,气流密度近似与滞止压力成正比,而由式(6)得,边界层厚度与 $p^{-1/2}$ 成正比,因此气体的质量流量系数应与入口滞止压力平方根的倒数成正比,即随着 p 的增加,随 p 的变化减小。对同一气体,在相同 p 和 h 条件下,轴对称喷管的边界层厚度与平面对称喷管相差不大,由式(5)知,其质量流量系数小于平面对称喷管。

图 4 给出三种气体质量流量系数随喷管喉道半高度的变化情况。三种气体的质量流量系数随喷管喉道高度变化规律相同,在入口滞止压力相同的情况下,质量流量系数随喉道高度的增加先增加后减小。随着入口滞止压力增大,质量流量系数随喉道高度的变化幅度减小,流量系数峰值前移,移动非常缓慢,峰值附近的质量流量系数随喉道高度的变化的幅度比较小,峰值后轴对称喷管的 C_d 值随喉道高度的变化明显地小于平面对称喷管。

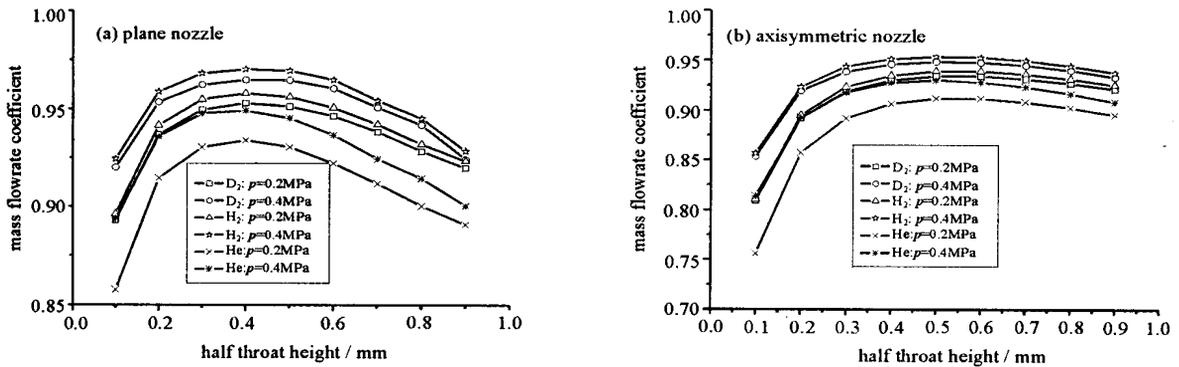


Fig. 4 Relation between mass flow-rate coefficient and height of half throat

取气流的特征长度为喷管喉道半高度^[6],则边界层占喉道高度的比率与气流密度、边界层外沿速度 v 以及喉道半高度 h 有关。喷管流场参数随 h 变化复杂, h 增加,在喷管的收缩段、喉道段, v 略有增加,减小,而在扩张段,由于面积比下降, v 减小,增加。质量流量系数的增减由 $(v h)$ 的值决定。

根据计算结果,拟合出壁面形状如表 1 所述的喷管质量流量系数与入口滞止压力以及喉道半高度的关系式(p 为喷管内气流的入口滞止压力,单位为: $10^5 Pa$; h 为喷管喉道半高度,单位为: mm)。

平面对称喷管

$$C_d = M_1 h^{-1/2} + M_2 + M_3 h + M_4 h^2 \quad (7)$$

其中, $M_i = M_{i1} + M_{i2}(p + M_{i3})^{-1/2}$ ($i = 1, 2, 3, 4$)。

轴对称喷管

$$C_d = A + B(p + C)^{-1/2} \quad (8)$$

其中: $A = A_1 h^2 + A_2 h + A_3 + A_4 h^{-1/2}$; $B = B_1 + B_2(h + B_3)^{-1/2}$; $C = C_1 + C_2 h + C_3 h^2 + C_4 h^3 + C_5 h^4$ 。

拟合相对误差计算公式

$$\text{Error} = | \text{cal} - \text{fit} | / \text{cal} \quad (9)$$

对平面对称喷管, D_2 , H_2 的拟合值和模拟值吻合得非常好,相对误差值均在 1% 以下; He 的相对误差基本上都小于 1%,在高入口滞止压力、大喉道高度时略有上升。对轴对称喷管, D_2 有较小的相对误差, D_2 除个别点外,均在 1% 以下; H_2 除在 $p < 0.03 MPa$ 时有稍大的相对误差外,其余部分 C_d 值均小于 4%; He 相对误差较大值

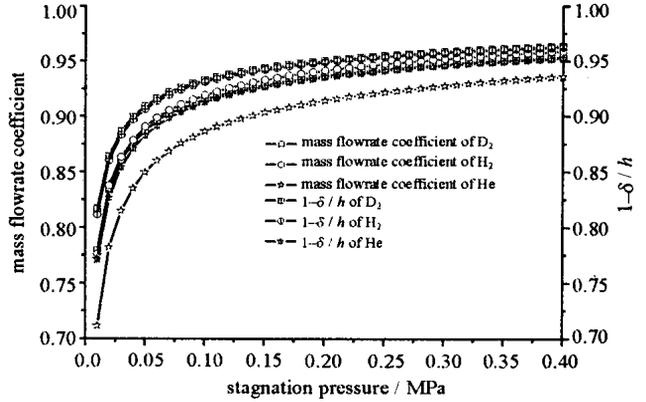


Fig. 3 Comparison of mass flowrate and $(1 - \delta / h)$

图 3 质量流量系数和 $(1 - \delta / h)$ 的比较

出现在 $h = 0.1\text{mm}$ 处,其它部分的 He 基本上都不大于 1%。

3 结 论

为了减小由于喷管入口滞止压力不等而引起的喷管内气体质量流量系数的差异,可控制喷管的上一级管路,使得副喷管的入口滞止压力在 0.1MPa 以上。在设计 HYLTE 副喷管时,应尽可能避开质量流量系数随喷管喉道高度变化较大的区域。本文给出三种气体 (D_2 , H_2 , He) 的质量流量系数随喷管入口滞止压力和喉道半高度的拟合公式精度较高,可用于该壁面形状的喷管在不同的入口滞止压力和喉道高度的质量流量系数的计算。

参考文献:

- [1] 蔡光明, 宋影松, 杨维东, 等. 氟化氢泛频化学激光器超音速低温喷管的研究[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(2): 228—232. (Cai G M, Song Y S, Yang W D, et al. Investigation on nozzle of HF overtone chemical laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(2): 228—232)
- [2] Waldo R E, Betts J A. Approach for reduced heat loss in HYLTE laser module[R]. AIAA Paper, 97-2422.
- [3] Hartlove J S, Waldo R E, Betts J A. Small signal gain measurements on the HYLTE water-cooled module[A]. AIAA Plasmadynamics and lasers Conference, 32nd[C]. Anaheim, CA, 2001.
- [4] 袁圣付. 连续波 DF/ HF 化学激光器新型增益发生器的理论设计[D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 2002. (Yuan S F. Theoretical design of gain generator in continuous-wave DF/ HF chemical lasers. Changsha: Graduate School of National University of Defence Technology, 2002)
- [5] 桑风亭, 周大正, 金玉奇, 等. 化学激光[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000. 39. (Sang F T, Zhou D Z, Jin Y Q, et al. Chemical lasers. Beijing: Chemical Industry Press, 2000. 39)
- [6] 谈洪, 朱宗厚. 气动激光技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1977. 265—268. (Tan H, Zhu Z H. Technology of GL. Beijing: National Defence Industry Press, 1977. 265—268)
- [7] 华卫红. 高功率连续波 DF/ HF 化学激光器数值模拟研究[D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 1997. (Hua W H. Numerical simulation of high power continuous-wave DF/ HF chemical lasers. Changsha: Graduate School of National University of Defence Technology, 1997)
- [8] 里希廷 H. 边界层理论[M]. 北京: 科学出版社, 1988. 27—29. (Schlichting H. Boundary-layer theory. Beijing: Science Press, 1988. 27—29)

Mass flowrate coefficient in relation to secondary flow of HYLTE nozzle in DF/ HF chemical lasers

SHI Jiam-hua, YUAN Sheng-fu, HUA Wei-hong, JIANG Zong-fu, WANG Hong-yan

(College of Science, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The secondary mass flowrate of the HYLTE nozzle in DF/ HF chemical lasers was numerically and theoretically calculated, the mass flow-rate coefficients of D_2 , H_2 and He with 0.01 ~ 0.4MPa stagnation pressure and 0.1 ~ 0.9mm height of the half throat are obtained. The change-rules of mass flowrate coefficient with stagnation pressure and half throat's height were got, the functions deduced from these rules were of satisfactory precision. As a result, some suggestions are presented on the design and maintenance of secondary nozzle.

Key words: DF/ HF chemical laser; Hypersonic low temperature nozzle; Mass flowrate coefficient