

用 LIIF 法测量 DF/HF 化学激光器喷管混合性能的数值分析*

施建华 ,姜宗福 ,袁圣付 ,华卫红
(国防科技大学理学院 ,湖南 长沙 410073)

摘 要 激光诱导碘荧光(LIIF)是一种很好的流场测量技术 ,为了验证该方法测量化学激光器流场混合性能的精度 ,模拟得到连续波 DF/HF 化学激光器的 HYLTE 喷管冷流场 ,并计算了用氦碘混合气体作为氧化剂流、用氢气作为燃料流的 HYLTE 喷管的流场。通过比较前一流场中的氟原子和后一流场中的碘分子的摩尔百分比分布情况得知 ,当作为氧化剂流的氦碘混合物中碘的质量百分比在 54% 左右时 ,用 LIIF 法测量 DF/HF 化学激光器喷管的混合情况具有较高的精度。

关键词 DF/HF 化学激光器 ,高超音速低温喷管(HYLTE) ,摩尔浓度 ,激光诱导碘荧光(LIIF)

中图分类号 :TN248.1 **文献标识码** :A

Numerical Analysis of Using LIIF to Measure the Mixed Performance in DF/HF Chemical Laser

SHI Jian-hua , JIANG Zong-fu , YUAN Sheng-fu , HUA Wei-hong
(College of Science , National Univ. of Defense Technology , Changsha 410073 , China)

Abstract :The laser induced iodine fluorescence(LIIF) is an advanced technology to visualize the flowfield. To get the precision of using this method to investigate the mixed performance of the nozzle in chemical lasers , the cold flowfield of HYLTE nozzle in CW DF/HF chemical laser is simulated. The flowfield which uses the mixed gas made up of helium and iodine as the oxidant , the helium gas used as fuel is measured. The distribution of the mole fraction of the F atom in the first flowfield and the I₂ molecular in the second flowfield are compared. When the mass fraction of iodine molecular in the He-I₂ mixed gas is about 54% , using LIIF to measure the mixed mechanism of HTLTE nozzle in DF/HF chemical laser is more precise.

Key words DF/HF chemical laser ; Hypersonic Low Temperature nozzle(HYLTE) ; mole fraction ; laser induced iodine fluorescence(LIIF)

氟化氙/氟化氢(DF/HF)化学激光器是目前实现连续出光功率最高的激光器装置 ,DF 激光的波长具有良好的大气传输性能 ,泛频 HF 激光具有 1.35 μ m 的短波长特征 ,都具备良好的应用潜能和背景 ,因此其在化学激光研究领域占有极为重要的地位。目前 ,以美、俄为首的世界诸多国家都开展这项研究 ,并且已达到了很高的水平。

在连续波 DF/HF 化学激光器中 ,氧化剂和燃料两股气流通过喷管超音速膨胀后 ,在光腔中混合并反应 ,造成粒子数反转。由于泵浦反应速率快 ,所以混合过程成为控制步骤 ,它决定激光器的效率。快速混合不仅可以得到最佳的效率 ,亦会得到极短的激射长度。因此在研究这类激光器时 ,对喷管流场混合情况的研究显得十分重要。

在 DF/HF 化学激光器喷管流场诊断方面 ,由 Rapagnani 等人提出的激光诱导碘荧光法^[1]是一种很好的实验方法 ,得到了广泛的应用^[2~4]。它是用 He 气代替 DF/HF 化学激光器的氧化剂流、燃料流中的气体 ,并在其中的一股气流中加入少量的碘蒸气。用激光激发气流中的碘分子 ,通过拍摄碘分子的荧光图来确定含碘气体的这股气流的走向 ,从而进一步得到两股气流的混合情况。用这种方法分析流场具有高时间空间分辨率、高灵敏度、可以同时测量一片流场等优点。然而 ,用碘和氦的混合气体代替真实气体 ,碘分子的分布在多大程度上可以近似为氟原子的分布 ,却未见报道。

本文对目前国内外广泛研究的高超音速低温(HYLTE)喷管^[5~8]的流场进行数值模拟 ,并计算了用

* 收稿日期 2003 - 12 - 11
基金项目 :高等学校先进教师基金
作者简介 :施建华(1976 -) ,女 ,博士生。

氢碘混合气体作为氧化剂流、用氢气作为燃料流的 HYLTE 喷管的流场。通过比较前一流场中的氟原子和后一流场中的碘分子的摩尔百分比分布情况 ,对此问题展开深入研究。

1 HYLTE 喷管的结构参数

HYLTE 喷管通过横向射流使反应面扭曲 ,结构较为复杂 ,直接对其进行数值模拟很难得到收敛的解。本文对其进行了必要的修改 ,即将燃料喷管略向前移 ,使其出口避开叶片的边缘。图 1(a)给出了对称面上喷管的结构 ,O、D、F 分别表示氧化剂、稀释剂和燃料喷管。氧化剂喷管为平面对称 ,其余两种喷管均为轴对称。各喷管的结构参数见表 1。燃料喷管和稀释剂喷管的轴线平行 ,它们之间的垂直距离为 3.172mm ,两者与氧化剂喷管对称轴的夹角为 25°。副喷管间隔为 5mm ,在叶片两侧交替排列。

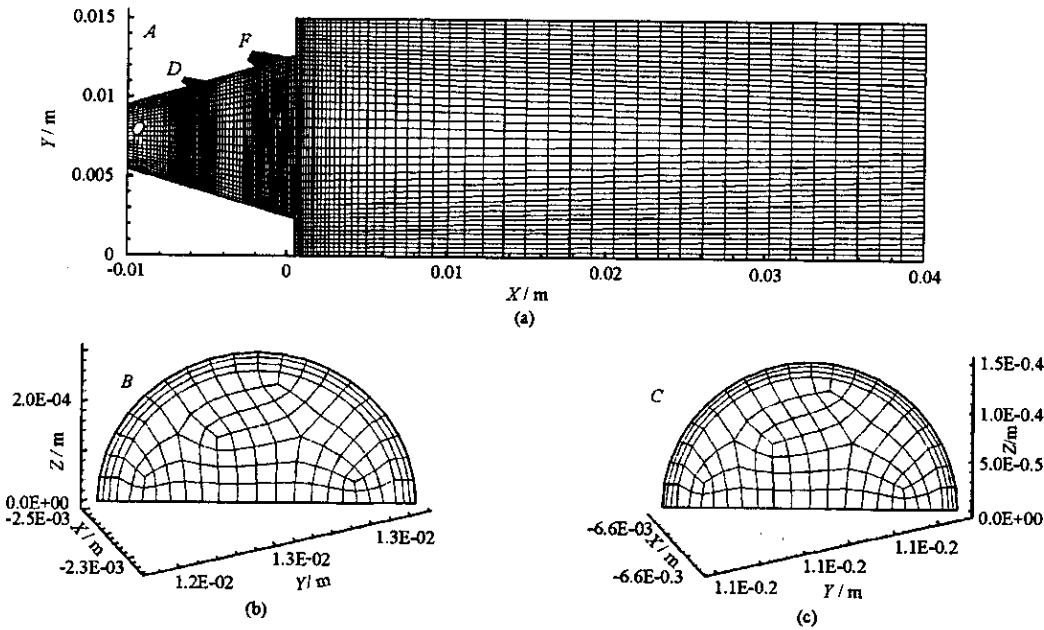


图 1 修改后的 HYLTE 喷管结构和网格划分示意图
Fig.1 Structure and the grid of the modified HYLTE nozzle

表 1 喷管的结构参数

Tab.1 Structure parameters of nozzle

喷管	收缩角(°)	喉道高度(mm)	等截面长度(mm)	扩张角(°)
氧化剂	45.00	0.200	0.400	16.62
燃料	18.05	0.508	1.020	15.00
稀释剂	24.82	0.127	0.996	15.00

2 数值方法、初始条件以及边界条件

对上述结构的流场 ,根据实验室现有的计算条件 ,一次性模拟整个流场是困难的。本文采用了分段模拟的方法 ,即先模拟出氧化剂喷管、燃料喷管和稀释剂喷管流场的前端 ,然后将前端的结果通过一个截面(位于各喷管的扩张段)耦合到后端(对称面、燃料喷管耦合面和稀释剂喷管耦合面上的网格见图 1 的(a)(b)(c) ,从而计算出整个流场。

喷管内气体用 Navier-Stokes 方程组来描述。在 DF/HF 化学激光器中 ,混合气体以超音速的速度流过

光腔,根据气体可压缩性的判断标准,混合气体的密度按可压缩模型计算,即: $\rho = \frac{P_{op} + P}{RT}$ 。 P_{op} 为工作压力,在本计算中取值为 0; P 、 T 分别为当地静压、静温; R 为气体常数。

混合气体的粘性系数和热传导系数根据理想气体混合理论计算,即:

粘性系数 $\mu = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{X_i \mu_i}{\sum_{k=1}^N X_k G_{ik}}}$ 热传导系数 $\lambda = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{X_i \lambda_i}{\sum_{k=1}^N X_k G_{ik}}}$ 其中 $G_{ik} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_k}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{m_k}{m_i}\right)^{\frac{1}{4}}\right]^2}{\left[8 \left(1 + \left(\frac{m_i}{m_k}\right)\right)\right]^{\frac{1}{2}}}$

N 为混合气体的组分数, X_i 、 μ_i 、 λ_i 、 m_i 分别为第 i 种气体的摩尔百分数、粘性系数、热传导系数和分子量。光腔后端接真空罐,因此压力出口边界设定为超音速出口边界条件,即自由边界条件。各喷管入口的滞止压力、总温、喷管中物质组分及其质量百分比见表 2,壁面温度取 300K,壁面的热通量为 0。

表 2 各喷管入口滞止参数和物质组分列表

Tab.2 Stagnation parameters and mass fraction of the nozzle

喷管	入口总压(atm)	总温(K)	质量百分比(%)											
			模拟一(a)					模拟二(b)		模拟三(c)		模拟四(d)		
氧化剂	6	1900	F	F ₂	He	HF	N ₂	He	I ₂	He	I ₂	He	I ₂	
			20.841	0.150	24.305	40.174	14.53	2	98	46	54	90	10	
燃料	3	300	D ₂					He						
			1.0					1.0						
稀释剂	2	300	He					He						
			1.0					1.0						

3 数值计算结果与分析

连续波 DF/HF 化学激光器的激活介质是主喷管中的 F 原子与燃料喷管中的 D₂/H₂ 分子反应生成的 DF/HF 分子。氧化剂流中的 F 原子的密度和分布对激活介质的生成起着决定性作用,极大地影响化学激光器的输出功率、光束质量等性能。研究 HYLTE 喷管,关键在于要清楚 F 原子的扩散情况。

在用激光诱导碘荧光法测量流场混幌情况的实验中,忽略荧光的饱和效应和碘分子的解离(实验满足这两种假设),碘分子的荧光信号强度与碘的粒子数密度成正比。在实际测量中,很难精确地测量出碘分子的密度,另外,研究喷管的混合机制也无需对 F/I₂ 的密度的绝对值进行研究。因此,本文不分析 F/I₂ 的密度值,而是重点讨论反映流体混合情况的参量摩尔百分比分布及其变化情况。

图 2 给出沿气流方向喷管对称面上的 K 在 DF/HF 化学激光器流场中,即表 2 中的(a)或 I_x 在实验流场中,即表 2 中的(b)(c)(d)的摩尔百分比等值线分布。在四种情况下,氟原子或碘分子的摩尔百分比总体分布相似,都是中间高,往两侧由于受副喷管气流的影响而降低,在壁面附近,摩尔百分比回升。沿气流方向上,两种气体都是先被压缩,后膨胀。在氧化剂流和其它两股气流的接触面附近,摩尔百分比变化迅速。燃料流和稀释剂流对主气流都有一定的穿透力,燃料流的影响更明显。

图 2 中的(a)(b)表明,用质量百分比为 2% 的 He 和 98% 的 I₂ 作为氧化剂流, I₂ 流膨胀收缩比 F 原子流要快,膨胀收缩现象更明显、周期更短,气流的混合速度快于 DF/HF 化学激光器中的气流。在副喷管及壁面附近,两种粒子的摩尔百分比的等值线形状差别较大, I₂ 分子的变化速度大于 F 原子。图(c)(d)显示的 I₂ 的摩尔百分比等值线的形状及分布与 DF/HF 化学激光器中 F 原子非常接近,扩张收缩的速度基本相同,副气流对 F/I₂ 的分布影响一致。因此,在这两种情况下, I₂ 分子的分布基本上可以认为是 DF/HF 化学激光器中 F 原子的分布,但从 I₂ 的摩尔百分比的变化速度来考虑,模拟三的结果与 DF/HF 化学激光器中流场的混合情况更为接近。

为了了解气流沿副喷管周期方向的变化情况,需对垂直于气流方向的面进行研究。DF/HF 化学激光器的气流混合开始于喷管的出口平面,激发态的 DF/HF 分子极短的驰豫时间导致 DF/HF 化学激光器具有较小的有效增益区长度。因此所研究的面不能离喷管的出口平面距离太长,图 3 给出了离喷管

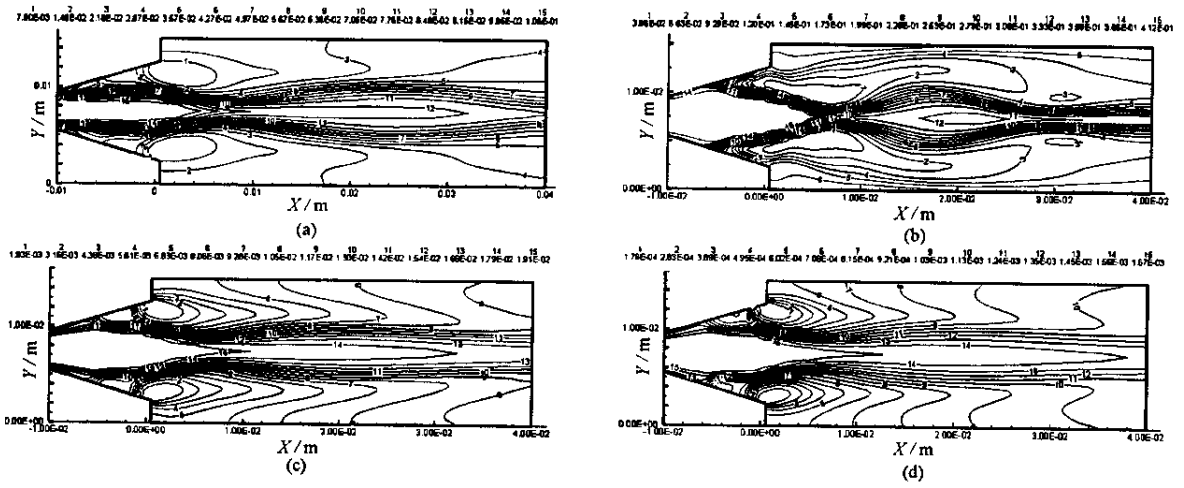


图2 沿气流方向上 F/I_2 的摩尔百分比分布图

Fig.2 Distribution of F/I_2 mole fraction in the plane along the direction of the flow

出口平面距离为 10mm 的平面上 F/I_2 的摩尔百分比等值线分布,横坐标 Z 为副喷管周期方向,纵坐标 Y 为喷管高度。 F/I_2 的摩尔百分比分布呈旋转对称。在 (b) 条件下,沿副喷管周期方向上,在中心位置,等值线断裂,在其它三种情况下不存在此现象;同时,在中心附近, I_2 分子的扩散速度比其它三种情况下慢,副流对其影响不明显。(c)(d) 两种情况下, I_2 的分布与 (a) 中的 F 原子非常相似,只是中心处摩尔百分比峰值区域前者大于后者,副喷管的影响略小于后者。从数值变化情况看 (c) 条件下的结果更接近于 (a) 情况下的 F 原子的分布,结论与沿气流方向的面所给结果一致。

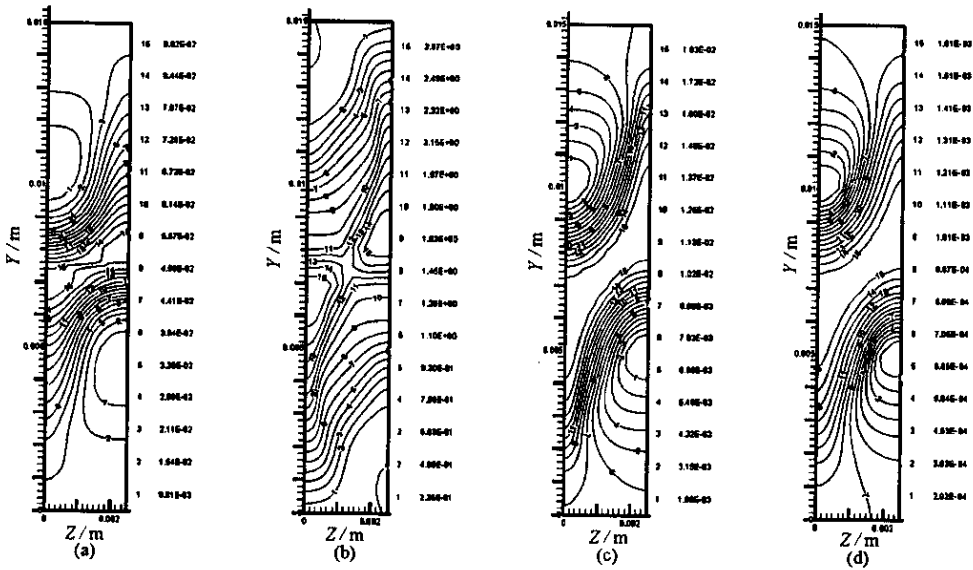


图3 垂直气流方向 F/I_2 的摩尔百分比分布

Fig.3 Distribution of F/I_2 mole fraction in the plane perpendicular to the direction of the flow

4 结论

总体上,用 He 和 I_2 的混合气体代替 DF/HF 化学激光器中的氧化剂,用 He 代替燃料, I_2 的扩散情况与激光器中 F 原子相似。当 $He-I_2$ 混合物中 I_2 的质量百分比小时,两者吻合得较好,此时气流的混合情况基本上可以说明激光器中氧化剂和燃料流之间的混合情况。但考虑实验中应有足够的荧光强度,实验时气体的组分比应控制在模拟三,即氧化剂流中 I_2 的质量百分比为 54% 附近。

在激光诱导碘荧光法测量 CW/HF 化学激光器喷管混合情况的实验中,高压的 He 气流经过装有 I_2 晶体的容器,使得出来气体为 He 气体和 I_2 气体的混合物,因此,在这混合物中, I_2 的含量不会很高,该方法测出的混合效果比较精确。在实验中,应控制碘晶体的温度,使得混合气体中 I_2 质量百分比适当。同时要注意控制含碘的气路的保温情况,以免碘气体在气路上凝华。

参 考 文 献:

- [1] Rapagnani N L, Davis S J. Laser-Induced I_2 Fluorescence Measurements in a Chemical Laser Flowfield[J]. AIAA J., 1979, 17(12).
- [2] Donohue J M, McDaniel Jr J C. Complete Three-dimensional Multiparameter Mapping of a Supersonic Ramp Fuel Injector Flowfield[J]. AIAA J., 1996, 34(3).
- [3] Driscoll R J. Mixing Enhancement in Chemical Lasers, Part I: Experiment[J]. AIAA J., 1986, 24(7).
- [4] 庄琦,谢行滨,桑凤亭,等. 激光诱导荧光法和化学发光法诊断连续波 HF 化学激光器超音速流场[J]. 宇航学报, 1984 (3).
- [5] 施建华,袁圣付,华卫红,等. DF/HF 化学激光器 HYLTE 喷管的副喷管质量流量系数[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(7).
- [6] 蔡光明,宋影松,杨维东,等. 氟化氢泛频化学激光器高超音速低温喷管的研究[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(2).
- [7] Hartlove J S, Waldo R E, Betts J A. Small Signal Gain Measurements on the HYLTE Water-cooled Modul[C]. AIAA Paper, 2001.
- [8] Patterson S, Graves B, Betts J, et al. HF Fundamental and Overtone Testing Using the HYLTE Water Cooled Modul[C]. AIAA 99-3472, 1999.

(上接第 80 页)

3 结 论

本文首先分析了不锈钢/空气二维声子晶体的声波禁带,数值计算结果与测试结果基本吻合,表明文中的模型简化是有效的。接着以散射体阻抗远大于基体为条件,讨论了一类大声阻抗散射体在空气中正方形排列所形成的二维声子晶体的声波禁带,结果表明这类二维声子晶体的声波禁带与柱体材料无关,也与柱体是实心还是空心无关,而与柱体半径和晶格常数有关。

参 考 文 献:

- [1] Martinez-Sala R, Sancho J, et al. Sound Attenuation by Sculpture[J]. Nature, 1995, 378(16): 241.
- [2] Sanche-Perez J V, Caballero D, et al. Sound Attenuation by Two-Dimensional Array of Rigid Cylinder[J]. Phys. Rev. Lett., 1998, 80: 5325-5328.
- [3] Vasseur J O, Deymier P A, et al. Phononic Crystal with Low Filling Fraction and Absolute Acoustic Band Gaps in the Audible Frequency Ranges: A Theoretical and Experimental Study[J]. Phys. Rev. E., 2002, 65(5): 056608-X.
- [4] 杜功焕,等. 声学基础上册, [M]. 上海: 上海科学出版社, 1981: 204-210.
- [5] Vasseur J O, Djafari-Rouhani B, et al. Complete Acoustic Band Gaps in Periodic Fibre Reinforced Composite Materials: the Carbon/Epoxy Composite and some Metallic Systems[J]. J. Phys.: Condens. Mat., 1994, 6: 8759-8770.
- [6] Vasseur J O, Deymier P A, et al. Experimental Evidence for the Existence of Absolute Acoustic Band Gaps in Two-dimensional Periodic Composite Media[J]. J. Phys.: CONDENS. MAT., 1998, 10: 6051-6064.
- [7] Sigalas M M. Elastic Wave Band Gaps and Defect States in Two-dimensional Composites[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1997, 101(3): 1256-1261.
- [8] Sigalas M M. Defect States of Acoustic Waves in a Two-dimensional Lattice of Solid Cylinders[J]. J. Appl. Phys., 1998, 83(6): 3026-3030.
- [9] Kushwaha M S. Stop-bands for Periodic Metallic Rods: Sculptures That Can Filter the Noise[J]. Appl. Phys. Lett., 1997, 70(24): 3218-3220.

