

文章编号: 0258-7025(2005)05-0627-05

连续波 DF/HF 化学激光器高超音速低温喷管混合性能的研究

施建华, 姜宗福, 袁圣付, 华卫红

(国防科技大学定向能技术研究所, 湖南 长沙 410073)

摘要 高超音速低温(HYLTE)喷管是目前在燃烧驱动连续波 DF/HF 化学激光器中广泛使用的一种喷管,为了掌握该喷管的混合性能,用激光诱导碘荧光(LIIF)法对实验室的单喉道小型燃烧驱动连续波 DF/HF 化学激光器的高超音速低温喷管的流场进行了测量。实验结果与理论研究一致,表明激光诱导碘荧光方法可以用于该种喷管混合性能的测量。

关键词 激光技术; 混合性能; 激光诱导荧光; 化学激光器; 高超音速低温喷管

中图分类号 TN248.5 **文献标识码** A

Mixing Performance of HYLTE Nozzle in CW DF/HF Chemical Lasers

SHI Jian-hua, JIANG Zong-fu, YUAN Sheng-fu, HUA Wei-hong

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

Abstract The hypersonic low temperature (HYLTE) nozzle is widely used in continuous wave (CW) DF/HF chemical laser. To realize the mixing performance of this kind of nozzle, the laser induced iodine fluorescence (LIIF) was used to visualize the mixing flowfield of the single HYLTE nozzle. The measured result is concordant with the theory and the mixing performance of the HYLTE nozzle is better than the trip and rampnozzles.

Key words laser technique; mixing performance; laser induced fluorescence; chemical lasers; hypersonic low temperature nozzle

1 引言

在连续波 DF/HF 化学激光器中,原来分开的氧化剂和燃料两股气流在光腔中进行超音速混合,并发生反应生成增益介质。反应所产生的热将引起压力、温度增加和马赫数减小,如果马赫数减小到 1,就会出现阻塞,激光器的效率将显著下降;热过程引起的压力增加亦有降低激光效率的倾向。另外,激发态物质的分布和光学增益与混合过程密切相关。因此,混合速率是决定激光器效率的主要因素之一,是喷管性能的一个重要指标。

为了设计、优化和改进喷管,提高喷管的混合性能,就必须对其流场有一个清楚的认识。目前,物质荧光在许多领域得到了应用^[1~2]。在 DF/HF 化学激光器喷管混合性能的测量中,激光诱导碘荧光法(LIIF)是一种非常好的方法,具有信号强、对流场干

扰小、时间空间分辨率高等优点。碘分子在可见光波段有很强的吸收能力,发出的荧光亦为可见光,这使得实验更加简单易行。N. L. Rapagnani 等^[3]首先用该方法对化学激光器二维狭缝喷管的流场进行测量, August A. Cenkner Jr. 和 Richard J. Driscoll^[4]用该方法研究 Trip 喷管的混合情况, Richard J. Driscoll^[5]又用其对 RAMP 喷管的混合性能展开了研究。

高超音速低温喷管(HYLTE)是连续波 DF/HF 化学激光器喷管的发展方向,国内外对其做了大量的研究^[6~13]。本文用激光诱导碘荧光方法对高超音速低温喷管的流场展开仔细的测量,通过比较该喷管和其他类型喷管的流场,明确其在混合性能上的优势。

2 喷管的结构

高超音速低温喷管通过横向射流使反应面扭

收稿日期: 2004-02-27; 收到修改稿日期: 2004-04-26

作者简介: 施建华(1976—),女,江苏盐城人,国防科技大学定向能技术研究所博士研究生,主要从事高能激光技术研究。
E-mail: gexin7651@sina.com

曲,其喉道高度很小。它的氧化剂喷管为一型面喷管,在氧化剂喷管的扩张段,沿气流流动的方向,依次为稀释剂和燃料喷管,如图 1 所示(下文中的坐标以此图为准)。三者均为 Laval 喷管,其中氧化剂喷管为平面对称,其余两种为轴对称。喷管的各主、副喷管的收缩角 α ,扩张角 β ,等截面长度 l 以及喉道高度 h 的大小见表 1。在氧化剂喷管的同一型面上,燃料喷管和稀释剂喷管(统称为副喷管)的对称轴相互平行,间距为 3.172 mm,它们与氧化剂喷管的轴线之间的夹角为 25° 。副喷管在氧化剂喷管的两侧交错排列,周期为 5 mm。

表 1 喷管的结构参量

Table 1 Structure characters of nozzle

Nozzle	$\alpha / (^\circ)$	$\beta / (^\circ)$	l / mm	h / mm
Oxidant	45.00	16.62	0.400	0.200
Fuel	18.05	15.00	1.020	0.508
Diluent	24.82	15.00	0.996	0.254

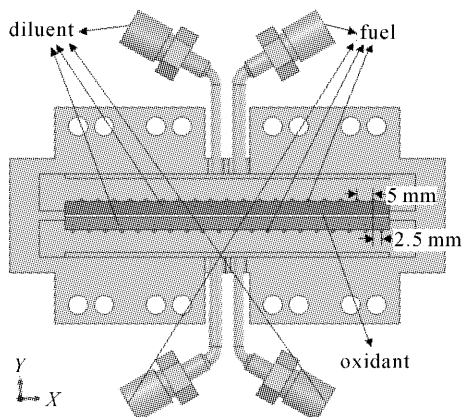


图 1 高超音速低温喷管结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of HYLTE nozzle

3 实验装置

激光诱导碘荧光是指作为荧光物质的碘分子在激发激光(一般用氩离子激光的 514.5 nm 谱线)的照射下,由基态跃迁到激发态,然后自发跃迁到基态发出荧光。考虑碘的消耗量、碘的腐蚀性可能对喷管造成的影响以及气流走向在流场中所起作用大小,实验在燃料流中加入碘气体。

图 2 为实验装置示意图。氩离子激光经一圆孔光阑(除去高阶模,保留基模)后照射到一焦距为 120 mm 的柱透镜上(用长焦距的目的是为了减小光束的扩散角,从而使得流场中的光斑近似为一矩形),光束沿一个方向展开。考虑到激光功率和碘分子密度是影响荧光强度的两大重要因素,在拍摄流

场图之前,测量激光功率,为实验结果的讨论提供必要的参量。加在流场前面的狭缝光阑是用于控制流场中片光的厚度(即实验的空间精度)。

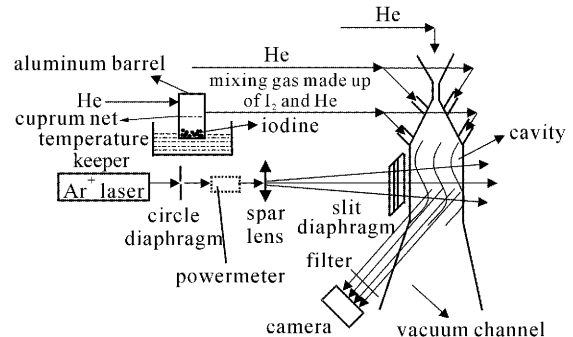


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

作为燃料的氦气进入一个装有碘晶体、被放在恒温槽中的铝盒,通过控制恒温槽的温度就可以控制铝盒内碘气体的浓度,恒温槽的高稳定性(变化不超过 0.01°C)确保实验过程中燃料喷管内的两种气体的组份比不变。为了保证同一次实验的系列测量中碘浓度相同,在两次测量之间要留有足够的时间,使得铝盒内的气态碘和固态碘达到平衡。在铝盒的底部放一聚四氟乙烯薄膜,以防碘腐蚀铝盒。实验表明,气态碘对铝的腐蚀非常小,而固态碘对铝的腐蚀比较严重(尤其在高温时)。铝盒内放一铜网,以防止碘颗粒被氦气卷起,堵塞后续的管道。同时要位于碘盒和燃料喷管入口之间的管路加热,防止碘气体因温度降低而重新凝结成固体,腐蚀或堵塞管道(实验完毕后,对喷管及光腔进行了检查,没有发现碘晶体)。其余两路气体即作为氧化剂和稀释剂的氦气直接进入喷管。

入口压力是实验的一个重要参量,因此,在每个喷管的入口处都装有一个高精度的压力传感器,以精确测量入口压力。为了保证每次实验各入口压力一致,在各个高压气瓶的减压阀下游装一开关,在实验时,将高压气瓶的减压阀调到所需要的值,在后续过程中便不再调整此表,靠下游的开关来控制气体的开启与关闭。

碘分子的荧光用数码相机收集。为了消除激发激光对荧光信号的影响,在数码相机前加一对激发激光高度反射、对碘分子荧光高度透射的滤光片。

背景光是实验的主噪声源,因此,整个实验在暗室中进行。光腔材料石英玻璃在 514.5 nm 的氩离子激光照射下同样发出红色荧光,实验中采取先拍

摄没有流场的背景图,再拍摄流场的荧光图,用后者减去前者所得的结果作为真正的流场荧光图,以此来排除玻璃窗口的荧光影响。每次实验后残余的碘气体对下一次实验有很大的影响,因此每次测量后都要用氦气对所有气路进行冲洗。

4 实验结果与讨论

作为燃料流的氦碘混合物中碘的摩尔分数按下式计算

$$n_{I_2} = P_{I_2} / (P_{I_2} + P_{He}), \quad (1)$$

P_{I_2} 为碘蒸气压, P_{He} 为从高压气瓶出来的氦气的压强。在许多流体计算中关心的是碘的质量分数

$$m_{I_2} = \frac{W_{I_2} \times n_{I_2}}{W_{I_2} \times n_{I_2} + W_{He} \times n_{He}} = \frac{W_{I_2} \times P_{I_2}}{W_{I_2} \times P_{I_2} + W_{He} \times P_{He}}, \quad (2)$$

W_{I_2} , W_{He} 分别为碘和氦的分子量。 P_{He} 可以从压力传感器中读出, P_{I_2} 是通过碘颗粒的温度(即恒温槽的温度)计算出来的。根据文献[14]中给出的数据,拟合出碘蒸气压随温度的变化关系为(由于文献[14]中最后一组数据远高于实验时的温度,而由此引入线型变化比较大,故拟合公式时没有用最后一组数据):

$$P_{I_2} = 54.23 \times \exp\left(\frac{T}{21.08}\right) - 279.28, \quad (3)$$

T 为碘晶体的温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$,压强的单位为 Pa。

实验时,恒温槽的温度为 70° ,根据(3)式计算出碘气压为 1216.2 Pa。氦气的气压为 2.4×10^5 Pa,根据(2)式计算出作为燃料的混合气体中碘气体的质量分数为 0.236。研究表明,在这样的组份比条件下所形成的流场与 DF/HF 化学激光器的流场非常接近。

表 2 各喷管的入口总压

Table 2 Total pressures at each nozzle's inlet

Nozzle	Oxidant	Fuel	Diluent
Total pressure / ($\times 10^5$ Pa)	0.4	2.5	2.0

各喷管的入口压力见表 2。为了详细、全面地掌握流场信息,实验从三个方向拍摄流场的荧光图。为了便于结果分析,编制了一套程序,将所得到的黄红色荧光图转换为灰度图,并对信号进行放大。另外,将光腔中充满静态的碘气体,用激光照射光腔,拍摄此时的荧光图,通过分析得到在光束传输方向

此荧光信号没有明显减弱。因此,在讨论中,忽略因碘分子的吸收而导致的光功率衰减。

图 3 给出了垂直于 x 方向即光轴方向的流场分布情况。(a),(b),(c)分别为上燃料喷管出口处、中间和下燃料喷管出口处的荧光图。显然,在实验参量条件下,燃料自身扩散不明显,但与氧化剂有较大的混合角,它能穿过氧化剂流。图 3(b)还说明,燃料和氧化剂两股气流充分混合的地方并不是在喷管的出口平面,而是与出口平面有一定的距离。

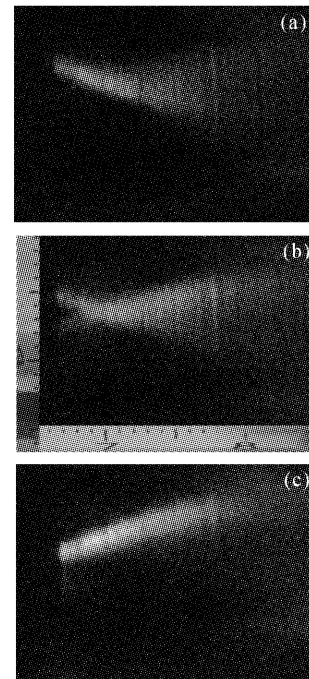


图 3 垂直于 x 方向的流场变化情况

Fig. 3 Fluorescence photograph of the flowfield perpendicular to x direction

从上下两股燃料流的交叉混合可以推断,激光光斑在 y 方向的边缘不是一条直线,而是呈“丫”字型,这一点与激光器的光斑(图 4)一致。不过按实验的结果所得出的光斑尺寸略小于实际的激光光斑(沿 z 方向小 1 mm 左右)。Clarence F. Chenault

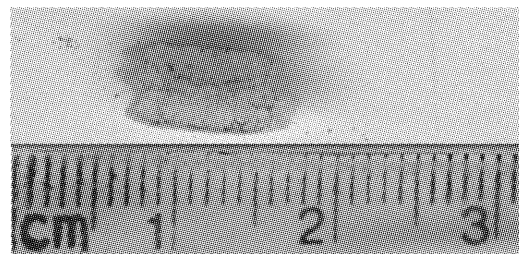


图 4 激光器烧蚀有机玻璃的光斑图

Fig. 4 Spot ablated from organic glass by the laser

等^[15]认为,两股气流混合情况主要取决于两股气流的夹角和压强比。对于本文讨论的流场和实际的DF/HF化学激光器流场,两股气流的夹角相同,因此上述差异主要是由于实验中氧化剂和燃料入口之间的压力比 γ 低于激光器工作时的值引起的。适当地提高实验中的 γ 值,结果将更接近实际情况。当 γ 加大到一定程度时,燃料流不会穿过主气流。

图5~图7给出了二维狭缝喷管, Trip喷管和RAMP喷管的流场荧光图^[3~5],显然,二维狭缝喷管的混合性能最差,相邻两股同种气流没有相交区域。与其相比, Trip和RAMP喷管的混合效果有较大的提高,但它们在混合角、完全混合区域的大小等方面不如高超音速低温喷管好。

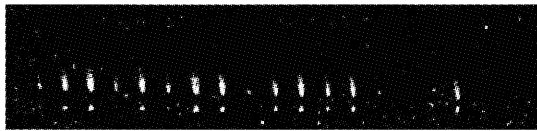


图5 二维狭缝喷管流场荧光图

Fig. 5 Fluorescence of the flowfield of 2-slit jet plane nozzle

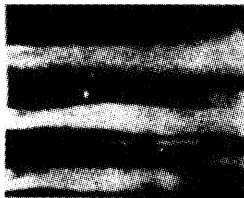


图6 Trip喷管流场荧光图

Fig. 6 Fluorescence of the flowfield of Trip nozzle

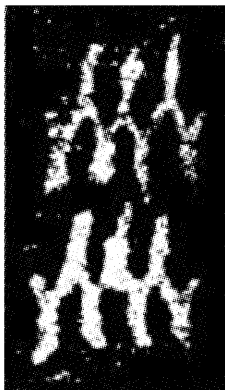


图7 RAMP喷管流场荧光图

Fig. 7 Fluorescence of the flowfield of RAMP nozzle

图8给出了垂直于 y 方向、从下到上流场系列荧光图(受篇幅限制,没有将喷管的20个周期全部显示出来,图9与此同),间隔1 mm。沿 x 方向的尺寸可以从荧光的周期性获得,因此在图中只给出沿

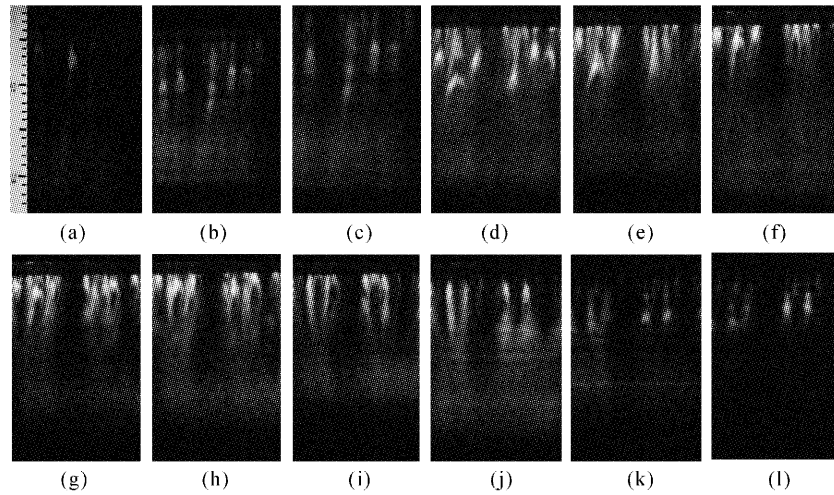
z 方向的尺寸。理想情况下,这12幅图应该呈对称分布,即(a)~(f)的变化过程与(g)~(l)相反,每幅图中荧光应呈周期性分布。但实际所测得的结果并非如此,这主要由以下几个方面的原因引起。首先,受加工工艺的限制,喷管的实际尺寸与设计参量有误差;其次,在喷管的长期使用过程中,气体的腐蚀和沉淀都会导致喷管形状的改变。这两点是荧光非周期性分布的主要原因。另外,在实验时,虽然采取了非常严格的光路调节,但也不能保证光路同 x 轴完全平行。在实验过程中,利用石英玻璃在氩离子激光照射下发出的荧光来确定实验的起始位置,即不开启各路气流,在光腔处于真空条件下,用氩离子激光从下向上扫描,当不再观察到荧光时,开始第一次实验,所得结果如图8(a)所示。根据图8中的荧光图变化规律,对比图8(a),(l)中荧光的强弱可以得出,图8(a)比(l)更靠近壁面,这使得12幅图没有呈对称分布。在(d)~(h)中,荧光呈马蹄型分布,这与文献的理论结果一致。

图9给出平行于喷管出口平面、并距此平面距离分别为9.5 mm, 12 mm和14 mm截面上流场的分布情况。根据流场的发展规律,结合图3给出的结果,可以得出,在 $z=9.5$ mm附近的几个毫米范围内,燃料和氧化剂混合得比较充分。

在图8和图9中,沿 x 方向,相邻燃料流的荧光之间有空隙,说明在本实验所研究的喷管尺寸条件下,适当地减小副喷管之间的距离,混合效果会更好。在这两个方向上的实验结果还有另外一个特征,那就是在喷管的中心和两侧(图中没有显示)的部分区域没有荧光出现,说明该喷管的一些燃料喷管被堵塞(在Rapagnani等^[3]的实验中也发现类似现象),这使得激光器的功率大大降低,与本台激光器最近一段时间内出光实验的结果一致。

5 结 论

激光诱导碘荧光技术是一种简单易行的流场显示方法,完全可以用于流场混合性能的测量。用该方法对实验室中连续波DF/HF化学激光器高超音速低温喷管流场进行测量,所得结果与理论一致。通过与狭缝, Trip, RAMP等类型喷管流场的比较,证明高超音速低温喷管的混合性能优于其他喷管。实验结果还表明,由于部分燃料喷管被堵塞,导致目前该台激光器出光功率有较大幅度的下降。在工艺允许的条件下,可以适当减小副喷管的周期。

图 8 垂直于 y 方向的荧光图Fig. 8 Fluorescence photograph of the flowfield perpendicular to y direction图 9 垂直于 z 方向的流场变化情况Fig. 9 Fluorescence photograph of the flowfield perpendicular to z direction

参 考 文 献

- Wencai Huang, Hai Ming, Jianping Xie *et al.*. High efficiency broad bandwidth erbium-doped superfluorescent fiber source [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(6): 311~313
- Xie Honglan, Gao Hongyi, Chen Jianwen *et al.*. A method of eliminating scattered light in X-ray fluorescent tomography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4): 385~389
谢红兰,高鸿奕,陈建文等. X射线荧光层析成像中消除散射光的方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(4): 385~389
- N. L. Rapagnani, S. J. Davis. Laser-induced I_2 fluorescence measurements in a chemical laser flowfield[J]. *AIAA J.*, 1979, **17**(12): 1402~1404
- August A. Cenkner Jr., Richard J. Driscoll. Laser-induced fluorescence visualization on supersonic mixing nozzles that employ gas-trips[J]. *AIAA J.*, 1982, **20**(6): 812~819
- Richard J. Driscoll. Mixing enhancement in chemical lasers, Part I: Experiments[J]. *AIAA J.*, 1986, **24**(7): 1120~1126
- Shi Jianhua, Yuan Shengfu, Hua Weihong *et al.*. Investigation of mass flow-rate coefficient in relation to secondary flow of HYLTE nozzle in DF/HF chemical lasers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(7): 639~642
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): 639~642
- Yuan Shengfu, Zhao Yijun, Hua Weihong *et al.*. Dependence of CW DF/HF chemical laser performance on the flowfield parameters[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(5): 402~406
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, **A28**(5): 402~406
- Yuan Shengfu, Hua Weihong, Jiang Zongfu *et al.*. Numerical simulating results of nozzle flow in DF/HF chemical lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(1): 22~24
袁圣付,华卫红,姜宗福等. DF/HF 化学激光器喷管流动数值模拟结果[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(1): 22~24
- J. S. Hartlove, R. E. Waldo, J. A. Betts. Small signal gain measurements on the HYLTE water-cooled module [C]. *AIAA, Plasmadynamics and Lasers Conference*, 32nd, Anaheim, CA, 2001
- Yuan Shengfu. Theoretical design of gain generator in continuous-wave DF/HF chemical lasers [D]. Changsha: Graduate Student Institute of National University of Defence Technology, 2002
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 Shengfu, Hua Weihong, Jiang Zongfu. Performance analysis of small continuous wave DF chemical laser with HYLTE nozzle[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(4): 295~299
袁圣付,华卫红,姜宗福. 采用超音速低温喷管的小型连续波 DF 化学激光器性能分析[J]. *中国激光*, 2003, **30**(4): 295~299
- Yuan Shengfu, Hua Weihong, Jiang Zongfu. Numerical simulation of three dimensional reactants mixing of latest nozzles in CW-DF/HF chemical lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(Suppl.): 188~192
袁圣付,华卫红,姜宗福. CW-DF/HF 化学激光器新型喷管气流掺混的三维模拟[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(增刊): 188~192
- Cai Guangming, Song Yingsong, Yang Weidong *et al.*. Investigation on nozzle of HF overtone chemical laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(2): 228~232
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研究[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(2): 228~232
- Zhuang Qi, Sang Fengting, Zhou Dazheng. Short-Wavelength Chemical Laser [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1997. 75
庄琦,桑凤亭,周大正. 短波长化学激光[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997. 75
- Clarence F. Chenault, Philip S. Beran, Rodney D. W. Bowersox. Numerical investigation of supersonic injection using a reynolds-stress turbulence model [J]. *AIAA J.*, 1999, **37**(10): 1257~1269