

文章编号: 1001-4322(2002)02-0228-05

# 氟化氢泛频化学激光器高超音速低温喷管研究\*

蔡光明, 宋影松, 杨维东, 朱连贵, 金 晶, 陈荣立

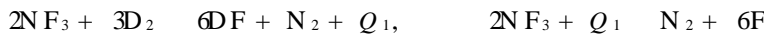
(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 通过建立一套氟化氢泛频化学激光器实验系统, 介绍了一种新型高超音速低温喷管的结构及其实验参数设置方法; 对喷管性能进行了测试, 并将实验结果同数值模拟结果进行对比, 找出了改善喷管性能的方法。由该喷管构成的激光系统已顺利出光。

**关键词:** 化学激光器; 喷管; 气体流场测量

**中图分类号:** TN 248.5 **文献标识码:** A

氟化氢(HF)泛频化学激光器是利用 F 与 H<sub>2</sub> 反应, 其反应热使生成的 HF 激发到高能态, 形成粒子数反转<sup>[1]</sup>。采用泛频波段( $\lambda=1.30\sim 1.37\mu\text{m}$ )的平凹谐振腔, 提取出 HF 泛频化学激光。器件首先要生成 F, F 的生成过程为: 通过 NF<sub>3</sub> 与 D<sub>2</sub> 反应产生热量 Q<sub>1</sub>, Q<sub>1</sub> 使过量的 NF<sub>3</sub> 分解而产生 F, 反应过程为



HF 泛频化学激光器的关键是在尽可能低的温度和与温度适配的压力下, 用最少量的反应物, 产生最多的 F, 这就要求详细计算反应的放热和吸热量、器壁的吸热和气体的温升, 并加入缓冲气体进行压力适配。研究表明, 产生最大量 F 时的主气流出口温度约 1500K, 滞止压力约 0.115MPa。而使 F 与 H<sub>2</sub> 反应生成高能态 HF 的最小淬灭环境温度在约 300K, 压力为 650Pa。为了使含 F 原子的气流能够快速降温, 而使活性极强的 F 原子不损失, 需采用气动喷管<sup>[2]</sup>。气动喷管的参数选择是化学激光器研究的关键, 一直贯穿了整个化学激光器的发展历史<sup>[3]</sup>。本文研究的是一种新型的采用气流交差流动的喷管, 称之为高超音速低温喷管(HYLTE)。该喷管为一单缝槽型拉瓦尔喷管, 其截面结构如图 1 所示。其中卸压台宽为 10mm。He 注入点(A)距离喉道(O)11~11.2mm, 喷射方向与壁成夹角 140°; 出口马赫数为 3.47; H<sub>2</sub> 注入点(B)距离喉道(O)14.5~15.2mm, 喷射方向与壁成夹角 140°; 出口马赫数为 3.47。

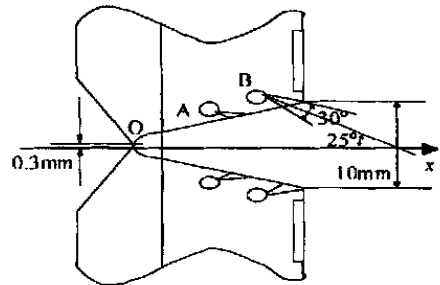


Fig 1 Configuration of HYLTE nozzle

图 1 HYLTE 喷管示意图

## 1 实验参量控制

HYLTE 实验首先是整个装置的联试, 包括: 八路气体的进气压力和文氏嘴的设定; 进气时序安排; 点火延迟时间控制; 测量系统的同步、标定和实测检验等, 以保证整个装置能够正常运行。其次是燃烧室参数的确定。最后进行主气流流场测量, 由此确定次级喷管的注入参数, 实现最佳注入, 获得激光输出并进行参数测量。

装置组装好后应保证真空密封、循环水密封, 保证进气通畅, 装置的气路全程不能存在逆台阶。控制系统的运行程序根据新喷管的要求进行改编, 并按设计要求对进气系统进行最佳设置。实验中我们设计了 8 种气体进气参数, 具体如表 1 所示。

理论进气量  $M_{Th}$  按如下公式计算

\* 收稿日期: 2001-02-15; 修订日期: 2001-08-22

基金项目: 国家 863 激光技术领域资助课题(863-410-1-11)

作者简介: 蔡光明(1975-), 男, 助理工程师, 主要从事空气动力学及相关技术研究, 绵阳 919-1011 信箱。

表 1 进气参数设置

Table 1 Injecting parameters of gases

	NF <sub>3</sub>	D <sub>2</sub>	primary He	H <sub>2</sub>	secondary He	cover gas	ear gas	insulation
$p_0/\text{MPa}$	0.74	0.58	0.84	0.11	0.77	0.7	0.98	0.27
$A^*/\text{mm}^2$	4.251	1.518	1.074	4.920	4.251	0.952	3.256	3.339
$M_{\text{Th}}/(\text{mol} \cdot \text{s}^{-1})$	0.095	0.0917	0.074	1.02	1.676	0.171	0.231	0.117
$M_{\text{Ac}}/(\text{mol} \cdot \text{s}^{-1})$	0.096	0.0915	0.074	1.02	1.676	0.171	0.231	0.117

$$M_{\text{Th}} = \sqrt{\frac{\gamma}{R} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma+1}} \frac{p_0 A^*}{\sqrt{T_0}}}$$

式中:  $M_{\text{Th}}$  的单位为  $\text{mol/s}$ ;  $R$  为气体常数;  $\gamma$  为气体比热;  $p_0$  为气体总压;  $A^*$  为文式嘴面积 (单位:  $\text{mm}^2$ );  $T_0$  为气体总温 (单位:  $\text{K}$ )<sup>[4]</sup>。通过计算出每一路气体的理论进气量, 实现进气精确控制。

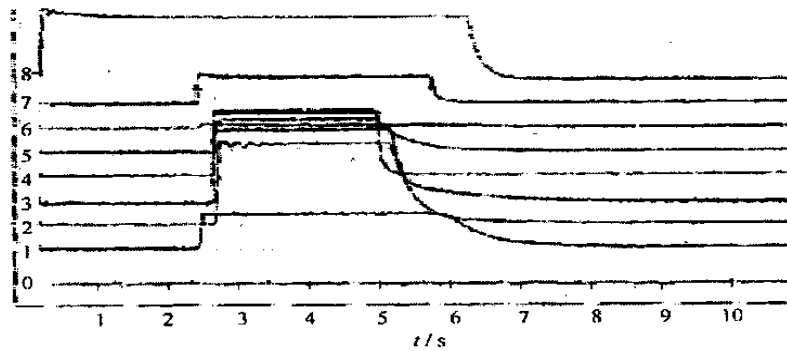


Fig 2 Injecting orders of gases

图 2 装置运行进气时序图

控制系统通过时序信号控制点火时间延迟和其它测量设备的同步, 主要是通过电磁阀控制八路气体的进气时序, 根据气体的气路和工作原理设计的进气时序如图 2 所示。图中横坐标为时间, 纵坐标为气体序号, 分别为: 1-主 He, 2-NF<sub>3</sub>, 3-D<sub>2</sub>, 4-H<sub>2</sub>, 5-副 He, 6-冷却气, 7-隔离层, 8-耳朵气。

实验时先根据理论计算值设置并运行该装置, 再通过检测系统测量的数据判断运行是否正常并进行参数调整。经首轮实验运行, 8 路气体进气量已达到了设计要求, 时序正常, 点火时间延迟适当, 整个装置已能正常运行。

新喷管装置的实验首先进行了燃烧室进气参数实验。由于理论计算中有较多的近似, 计算值不能准确地与实验相吻合。而燃烧室进气参数对整个器件至关重要, 故必须通过实验来准确确定进气参数。由理论设定的燃烧室进气参数计算出燃烧室的总压为 0.115MPa, 温度为 1500K。实验中实测出真实的燃烧室总压和温度如表 2 所示。

表 2 燃烧室总压和温度

Table 2 Stagnation pressure and temperature in combustion

	$M_{\text{NF}_3}/(\text{mol} \cdot \text{s}^{-1})$	$M_{\text{D}_2}/(\text{mol} \cdot \text{s}^{-1})$	$M_{\text{He}}/(\text{mol} \cdot \text{s}^{-1})$	$T_0/\text{K}$	$p_0/\text{MPa}$
theoretics	0.095	0.0917	0.074	1500	0.115
test	0.093	0.093	0.074	1300	0.120
correction	0.109	0.109	0.083	1400	0.130

可见先前设定温度偏高, 这将使光腔反应区的温度增高, 加快高能态粒子数的淬灭。根据理论计算 NF<sub>3</sub> 最低分解温度应为 1400K, 为保证 NF<sub>3</sub> 完全分解, 需修正实验进气参数, 使燃烧室出口温度为 1400K, 同时保证最佳的 F 原子生产率。表 2 所示的修正值就是我们实验确定的燃烧室最佳进气参数。

## 2 实验测量系统

HYL TE 实验测量系统如图 3 所示。

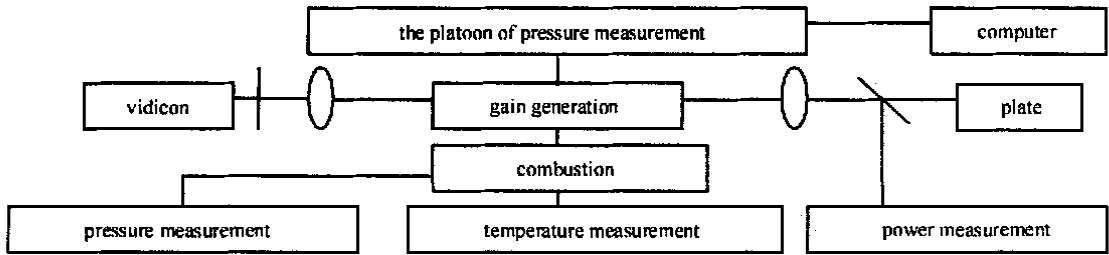


Fig. 3 Apparatus and principle of measurement

图 3 装置及测量原理图

对燃烧室有两个测量参数,一是燃烧室总压力测量,二是滞止温度测量。喷管出口处是一套具有十个测点的低压测量排架,能较准确地测出气体流场分布;光腔的左端是录像机,记录光腔中气流的颜色变化,它能定性地反映流场变化情况和次级喷管的注入情况;光腔的右端为场图板,激光从多孔镜输出打到场图板上,可反映出光腔增益区的位置和强度分布;光腔的两端都有激光输出,可用热释电能量卡计测量。

### 2.1 排架压力测量

在 HF 泛频实验中,为清楚的获得喉道后光腔内流场的分布情况,我们新建了一套排架压力测量系统,如图 4 所示。

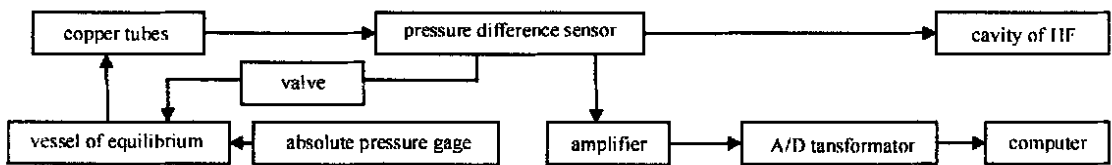


Fig. 4 System of platoon of pressure measurement

图 4 排架压力测量系统

该排架压力测量系统是根据光腔扩压器内静压与绝压计的压强引起压差传感器的变化产生电信号来进行测量的<sup>[3,5]</sup>。其输出由程序控制,该压差传感器量程为 6.65kPa,其误差在 40Pa 以内,系统响应时间约为 0.2s。在实验运行之前,在光腔喉道口正对着主反应流方向放置排架,该排架上均匀分布着十个测管,这些测管分别与压差传感器相连,压差传感器的另一端又与铜管排相连,铜管排的容积较小,为保护绝压计免受过强的冲击,故在铜管排与绝压计之间又接上一个平衡容积,以减缓冲击。在实验进行之前,光腔与平衡容积间的阀门处于关闭状态。实验进行时压差传感器的压强变化经由放大器后变成电信号,输入计算机,由程序算出具体压差值,并作出压差随反应时间的变化曲线图。另外,为对出光环境有一个比较感性的了解,实验系统中对燃烧室温度和光腔壁压进行实时测量;并与理论计算值进行比较,以获得较好的反应匹配参数。

### 2.2 全息纹波测量

测量光束通过光腔中的气流区,气流密度的变化将引起光束的位相变化,全息干涉图将能记录下这种变化,并定量分析气流流场中的各种现象。为此实验中安排了全息纹波测量仪系统(如图 5 所示)。

## 3 实验结果及分析

由于 HYL TE 喷管的加工难度极大,精度要求很高,因此在机械加工上还存在一些问题。但首轮实验还是取得了可喜的成果,首先整个装置已能稳定的运行;其次通过我们建立起来的几种测量手段,获得了很有价值的根据。

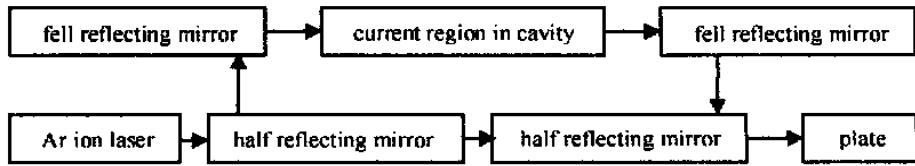


Fig 5 Holographic veined-wave measurement

图 5 全息纹波测量装置图

### 3.1 压力分布测量结果

经多次实验,证实该系统的一致性较好,所测的压强与温度都较好的满足实验要求。实验压力分布如图 6 所示,横坐标为测压探头编号,纵坐标为喉道出口压力。实验的压差总体趋势是一致的。最高压差距中心有 1mm 的偏差,图的中心偏移量和方向是一致的,说明主隙缝的加工精度未能达到我们的要求。以后在加工时要严格精度要求。

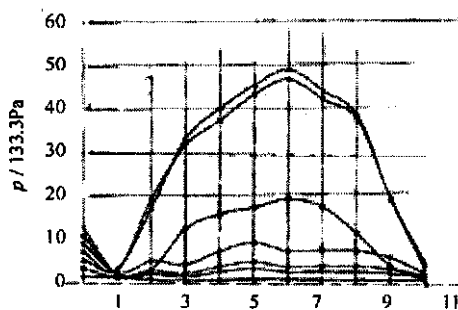


Fig 6 Experimental pressure distribution

图 6 实验的压力分布图

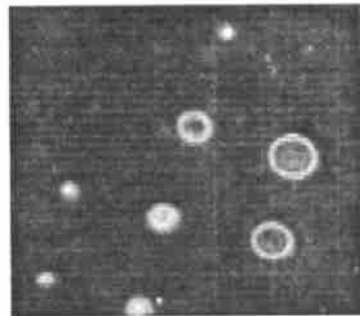


Fig 7 Faculae of HF laser

图 7 激光光斑图

### 3.2 出光实验

经过首轮实验,采用 HYL TE 喷管的 HF 激光器装置已获得出光。采用平凹谐振腔多孔镜输出(这种腔型能充分反映出增益区的强度分布),输出激光打到场图板上烧焦场图板而形成斑点,如图 7 所示。实验共打出的 8 个斑点,斑点的数目和斑点的大小对应于激光强度,斑点在光轴的上方,说明出光区仅在增益区的上半部,而光轴下半部没有增益,这显示了我们的次级喷管的注入参数与最佳值相差较大。

### 3.3 实验结果

通过对光腔反应区录像,观察气流的火焰颜色,非常直观地反映出次级喷管的气流位置与主气流的反应区域、反应状态,同时结合场图板上光斑位置,我们得出了一个结论,即反应区火焰颜色必须是淡黄色才能输出激光,这对我们下一步的调试有重要的指导意义。通过排架动压测量系统,测出了气流的压力分布,这使得我们能够定量的分析整个流场的压力分布,从而确定出最佳的次级喷管注入参数,并考查装置的机械部件的组装是否达到精度要求。

### 3.4 光腔流场数值模拟

由北京应用物理与计算数学研究所模拟计算出的光腔压力、温度、马赫数的分布来看,实验系统光腔中的宏观量已基本均匀, HF 密度分布在光腔出口 3~4cm 处也基本充满整个空间,  $H_2$  在光腔出口基本耗尽。同时从 HF、 $H_2$  的密度分布图还可以看出,它们的最大密度位置由  $H_2$  注入孔出发先靠近氧化剂喷管中线,然后又远离,然后又靠近(即“反弹”现象)。这主要是由于  $H_2$  注入孔喷出的  $H_2$  与主气流相互作用在  $H_2$  注入孔之后形成了一个回流区,以及卸压台使混合气流突然膨胀造成的。我们认为可以通过减小卸压台的宽度、降低 He 注入孔和  $H_2$  注入孔出口的马赫数以及加大从卸压台注入的 He 的流速来克服这些现象。

## 4 结 论

从实验结果可以看出, HYL TE 喷管基本上达到了设计的要求, 实验中建立了多种实用的参数测量手段, 并找出了 8 路气体进气量的优化匹配关系, 采用该喷管的 HF 泛频激光器已经出光, 但还需做进一步的优化。我们下一步的工作就是寻找次级喷管的最佳注入参数, 包括影响混合燃烧性能进而影响激光器性能的喷管几何参数和激光器的主、副气流的运行参数。

### 参考文献:

- [1] 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. (Zhuang Q, Sang F T, Zhou D Z Short-wave chemical laser. Beijing: National Defense Industry Press, 1997)
- [2] 谈红, 朱宗厚 气动激光技术[M]。北京: 国防工业出版社, 1977. (Tan H, Zhu Z H. Aerodynamic laser technology. Beijing: National Defense Industry Press, 1977)
- [3] Goldstein R J. Fluid mechanics measurements[M]。USA: University of Minnesota, 1999.
- [4] Kuethe A M, Chow C Y. Foundations of aerodynamics[M]。Printed in the United States of America, 1986.
- [5] 王铁城, 吴志成, 郗忠祥, 等 空气动力学实验技术[M]。北京: 国防工业出版社, 1986. (Wang T C, Wu Z C, Xi Z X, et al Aerodynamic experiment technology. Beijing: National Defense Industry Press, 1986)
- [6] Yang T T, Hsia Y C, Moon L F, et al Advanced mixing nozzle concepts for CO<sub>2</sub> laser[J]. Proc of SPIE[C]. 2000, **3931**: 116—130.

## Investigation on nozzle of HF overtone chemical laser

CA I Guangming, SONG Ying-song, YANG Wei-dong, ZHU Lian-gui, JIN Jing, CHEN Rong-li

(Institution of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1011, Mianyang 621900, China)

**Abstract** The employment principle of HF (hydrogen fluoride) overtone chemical laser is described in brief in the article, and a new high supersonic low temperature nozzle manufactured is introduced in detail, including its structure and the experimental parameters set method. In the experiments on the laser, gain is observed. Several valuable results can be concluded by analyzing the measured experimental data. Test and measure methods in nozzle experiments established and the numerical simulation method of value are introduced.

**Key words:** chemical laser; nozzle; the measurement of gas flow ability