

文章编号: 0258-7025(2003)04-0295-05

# 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

袁圣付, 华卫红, 姜宗福

(国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 针对一台单喉道的小型连续波 DF 化学激光器设计指标与实验结果的差别, 利用数值方法对不同条件的喷管光腔冷流场进行模拟和诊断, 分析了光腔中的 F 原子质量百分比浓度、静压和静温分布以及反应流场小信号增益系数分布, 并与实验光斑定性地进行了比较, 取得与实验观察一致的结果, 从而为该小型 DF 激光器的改进措施确定提供了理论依据。

**关键词** 激光技术; 连续波 DF 化学激光器; 数值模拟; 超音速低温喷管; 性能诊断

**中图分类号** TN 248.5      **文献标识码** A

## Performance Analysis of Small Continuous Wave DF Chemical Laser with HYLTE Nozzle

YUAN Sheng-fu, HUA Wei-hong, JIANG Zong-fu

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

**Abstract** Numerical simulation and performance analysis of flow fields in hypersonic low temperature (HYLTE) nozzle and optical cavity of a small continuous wave (CW) DF chemical laser, which employed a single throat HYLTE nozzle (STL), under different stagnation and structural parameters have been carried into execution to interpret the disparity between device design and experiment. Distribution of F atom mass fraction, static pressure and static temperature in cold flow field has been analyzed. Distribution of small signal gain in reactive flow field also has been simulated and qualitatively compared with spots ablated from organic glass. Some orientations have been conformed to improve the performance of the STL DF laser.

**Key words** laser technique; CW DF chemical laser; numerical simulation; HYLTE nozzle; performance analysis

## 1 引 言

高超音速低温喷管(HYLTE)目前是连续波 DF/HF 化学激光器的主流高效率喷管, 对其进行模拟和实验是极为必要的。我们建立了一套三维有限体积程序<sup>[1]</sup>, 可以对 HYLTE 等复杂形状的三维喷管光腔流场、小信号增益系数以及 F 原子利用效率等参数进行数值模拟。本文利用该程序, 对一台小型连续波 DF 化学激光器的流场参数进行模拟, 并分析验证了该激光器设计预期功率与实验结果存在较大差别的原因。

## 2 STL 简介及问题分析

实验采用的小型连续波 DF 激光器是单喉道 (Single Throat Laser) 的, 下文简称 STL 激光器。STL 使用的 HYLTE 喷管结构及副气流燃料供给管路示意如图 1(a), 激光器的整体示意如图 1(b)。NF<sub>3</sub> 和 H<sub>2</sub> 从不同管路进入燃料喷注板, 然后从燃料喷注板的小孔注入燃烧室, 在流动过程中混合并点火燃烧, 反应放热裂解多余的 NF<sub>3</sub>; 产生的高温含 F 原子混合气体沿楔形通道向前流动, 再与侧壁上小孔喷出的 He 混合后, 作为通常所指的燃烧室滞

收稿日期: 2001-12-20; 收到修改稿日期: 2002-04-03

作者简介: 袁圣付(1974. 12—), 男, 安徽肥东人, 在读博士, 主要从事高能化学激光增益发生器设计和模拟研究。E-mail: shengfuyuan@yahoo.com

止气体。然后通过单喉道的 HYLTE 喷管冷却 F 原子,在 He 副喷管气幕隔离保护下,进入光腔,与 D<sub>2</sub> 副喷管燃料发生化学反应生成激发态 DF 分子,形成粒子数(部分)反转的激活介质。通过平凹腔收集激光,废气排入真空罐。

STL 激光器的设计指标:增益区长度大于 30 mm,喷管出口平面(NEP)功率流密度 100 W/cm<sup>2</sup>, STL 的喷管出口采用 10 cm×1 cm,所以预期出光功率为 1000 W,但实验时实际出光在 100 W 左右。比功率在 30 W/总质量流率左右,也比理论设计值低很多。根据已有结论和对比另一台喷管结构相同 DF 装置的运转参数,STL 激光器的主要不同在于:

1) 燃烧室结构:STL 中的 NF<sub>3</sub> 与 H<sub>2</sub> 是在没有缓冲气体 He 参与下直接燃烧,燃烧裂解产物的 F 原子含量较高,理论计算表明,F 原子的摩尔百分比为:0.4172,总温为:2095.72 K。比有 He 情况下(F:0.27389,总温:1642.22 K)的比例高;另一方面,文献[2]的模拟结果表明,在(氧化剂)拉瓦尔喷

管的收缩段,有 20%左右的 F 原子将复合成为 F<sub>2</sub>。对于 STL 激光器而言,低速流动的高浓度 F 原子混合气体要经过燃烧室后段一长约 10 cm 的楔形通道,在壁面催化和冷却的作用下,F 原子将有一部分会复合成为 F<sub>2</sub>,然后再加上经过 HYLTE 拉瓦尔喷管的收缩段造成的复合。所以,F 原子会有较多部分在反应前就已复合变成 F<sub>2</sub>。

2) 喷管基区尺寸:STL 的喷管基区较小,高度为 0.351 mm,从而底部卸压程度较小;且激光器是单喉道的,壁面边界层影响较大,从而造成光腔内静压和静温相对较高,这对 STL 的有效激射产生不利影响。

3) 燃烧室总压:测量结果表明,STL 燃烧室总压只有 1 atm 左右,而另一性能较好的 DF 激光器的对应值约 6 atm 左右,所以 STL 并非工作在设计总压状况下。

上述三点不同可能是造成 STL 性能下降的主要原因,也是本文讨论的内容。

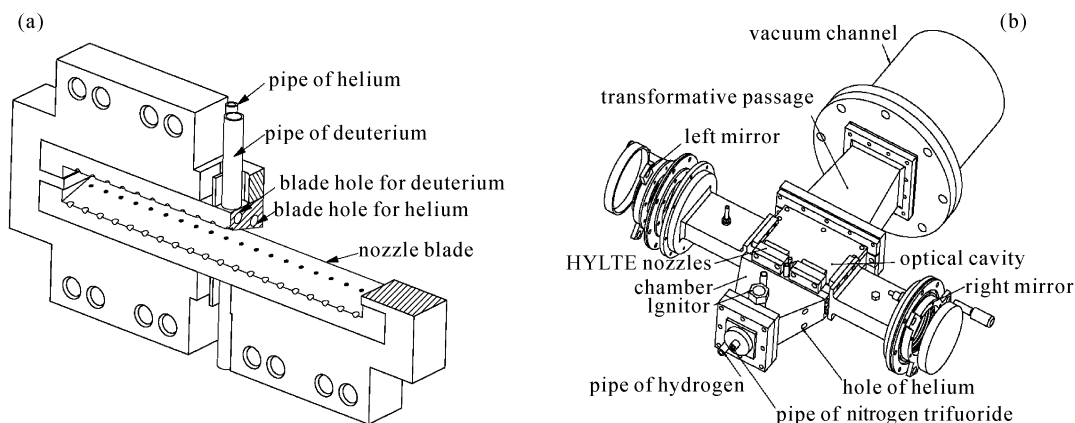


图 1 HYLTE 喷管(a)和 STL 激光器(b)结构示意图

Fig. 1 Structure of HYLTE nozzle and STL laser

(a) structure of HYLTE nozzle used in STL laser; (b) schematic diagram of STL laser

### 3 STL 流场模拟分析

STL 模拟的控制方程、模拟策略和步骤、网格生成等与文献[1]相同。不同的是:模拟的 STL 氧化剂喷管的总压为 1.2 atm,而不是 6.0 atm。为了给改进 STL 激光器提供依据,表 1 模拟了三种不同的氧化剂喷管入口滞止参数和结构参数情况,但入口混合气体的质量百分比相同。而三种情况下,副喷管的结构参数和滞止参数均相同。No. 1 为 STL 的实际运转参数。另外,由于基区高度较小,基区底部的旋涡影响区域较小,所以在流场方向( $x$ 轴)上

只取 20 mm 的长度即可,同时,也可以减小计算量。所有情况下,NEP 位置为  $x = 0.5$  mm。

表 1 三种不同的氧化剂喷管入口滞止参数和结构参数

Table 1 Stagnation and structural parameters of three different oxidant nozzles

Number	Total pressure/atm	Base region height/mm
No. 1	1.2	0.351
No. 2	6	0.351
No. 3	6	2.351

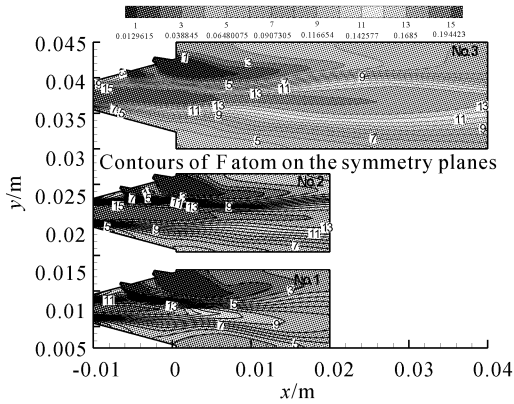


图 2  $z = 0$  mm 面上 F 原子质量百分比的分布  
Fig. 2 Distribution of F atom mass fraction on the  $z = 0$  mm planes under three conditions

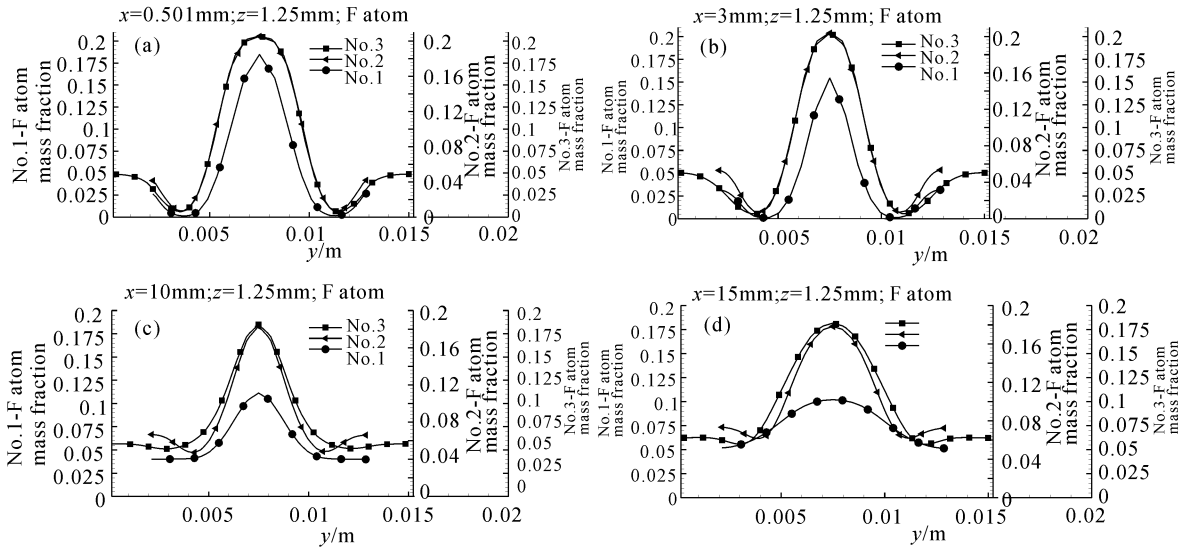


图 3  $z = 1.25$  mm 面上对应的 F 原子沿流场方向的发展规律  
Fig. 3 Evolution of F atom mass fraction on the  $z = 1.25$  mm plane along the flowfield

NEP 面上,副气流  $D_2$  对主气流核心处的压缩效应并不十分明显,但在离喷管 NEP 约 3 mm 处,这种压缩效应在图 4(b)中首先明显地表现出来,低总压的主气流核心处的压力值高出其他两种情况的一倍左右。但在  $x = 10$  mm 处(如图 4(c)),其他两种情况下的压缩效应也表现出来。在  $x = 15$  mm 处,由图 4(d)可知,低总压的主气流(No. 1)首先发生膨胀。

不同的基区高度表现出不同的卸压作用,在 NEP 附近,小基区喷管对应的静压值较高,而较大的基区对应的静压较低(如图 4(a));对于 No. 2 和 No. 3 的高总压情况,由图 2 和图 3 知,副流  $D_2$  对主流的穿透深度基本相同。但图 4 表明,由于基区高

由图 2 知,对于氧化剂低总压的情况(No. 1),副气流 He 和  $D_2$  的穿透深度明显增大,从而使得 F 原子气流被压缩在较小的空间范围内。同时,由图可以看出,在三种情况下,含 F 原子的主流在流场方向上都是先被压缩,然后又膨胀。

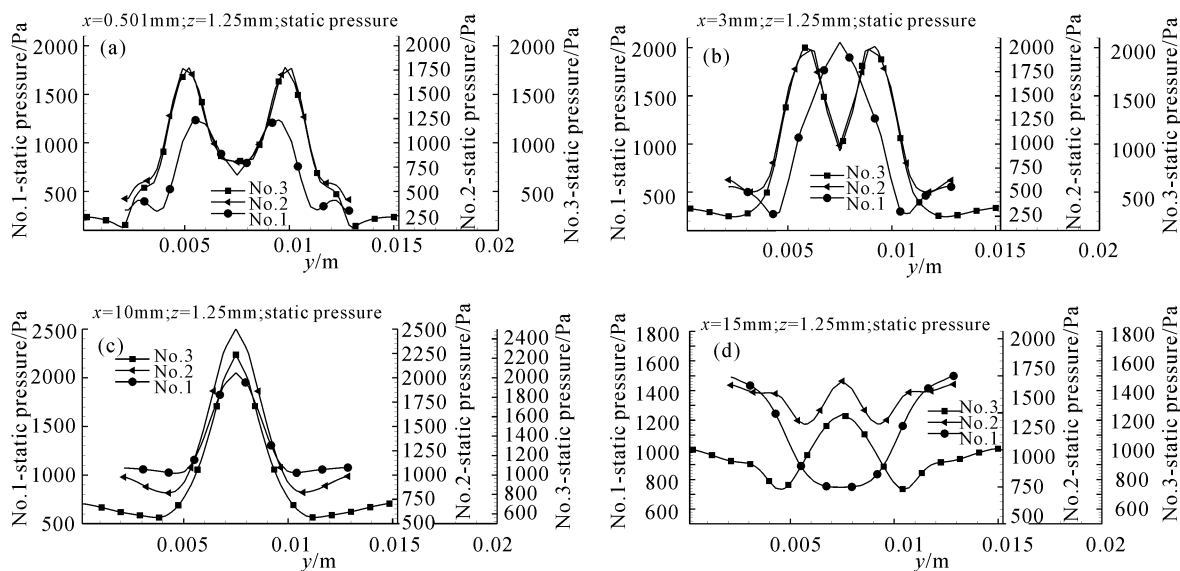
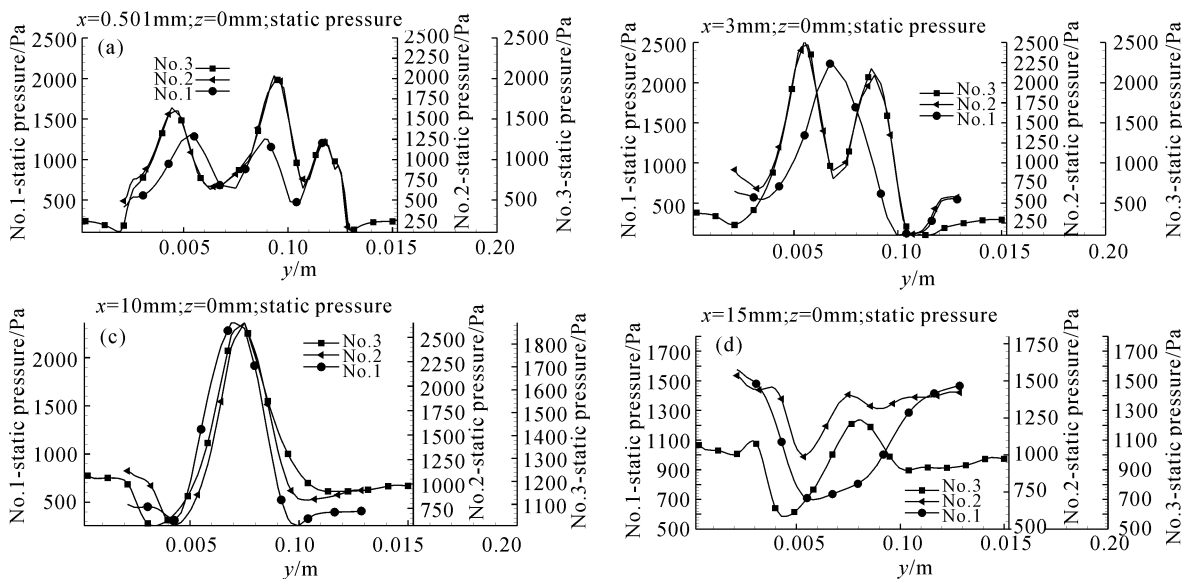
图 3 同样证明了 F 原子被压缩的情况。而且在低总压(No. 1)情况下,F 原子的质量百分比要低很多。主要是由于氧化剂喷管总压较低,而副气流  $D_2$  和 He 的总压不变,注入后  $D_2$  和 He 的质量百分比明显升高。

由图 4(a)可知,在  $D_2$  副气流喷管出口处,低总压的氧化剂流(No. 1)使得副喷管尤其是  $D_2$  喷管的膨胀更加充分,所以副喷管出口附近压力会低一些,这相当于副喷管出口气流有效“背压”较低。在

度的差别,大基区喷管(No. 3)沿流场方向的静压较低,随着流场的发展,这种基区卸压作用表现得非常明显。因此,基区高度的差别所导致的结果是反应区的组份分布基本相同,但反应区的静压、静温等参数差别很大,对应的激光器也将具有不同的性能。

图 5 给出了  $z = 0$  平面上沿流场方向不同位置处的静压分布,分析可知,其对应的静压与  $z = 1.25$  mm 平面的相应位置的分布具有非常类似的规律。但由于 HYLTE 喷管的副气流  $D_2$  的注入是相互交错的,所以对称面  $z = 0$  上的静压分布具有明显的不对称性。

进一步分析表明,在流场方向上,静温与静压力表现出完全类似的发展规律; $D_2$  与 F 原子具有互相

图4  $z = 1.25$  mm 对应的静压沿流场方向的发展规律Fig. 4 Evolution of static pressure on the  $z = 1.25$  mm plane along the flowfield图5  $z = 0$  对应的静压沿流场方向的发展规律Fig. 5 Evolution of static pressure on the  $z = 0$  plane along the flowfield

补位的分布规律。

上述冷流场分析结果表明,在氧化剂喷管具有低总压、小基区的条件下,在垂直流场方向上,F原子气流将被限制在主喷管对称面附近更狭窄的空间范围内;而且基区附近的压力和温度较高,不利于激光的有效辐射,这会导致光斑狭窄。在沿流场方向上,主气流的被压缩和膨胀效应都较靠近于NEP面,从而使得激射段的压力和温度较高,这会导致激射区长度变短。如果通过降低副流( $D_2$ 和He)总压来展宽光斑,则容易导致喷管NEP功率流密度下降。

#### 4 实验验证与反应流场模拟

为了进一步验证上述分析并和实验结果进行比较,图6给出了相应的低总压STL激光器在实验中测得的烧蚀光斑,尽管光强分布会受到光腔的影响,但多次重复实验表明,该光斑能反映激光介质增益的分布情况,尤其是氧化剂喷管对称面的增益最大。烧蚀光斑沿流场方向长10 mm,垂直流场方向的高为5 mm左右。该光斑相对于NEP高度(10 mm)则较窄;相对于设计参数而言,该光斑沿流场方向很

短。这与上述冷流场分析结果是一致的。

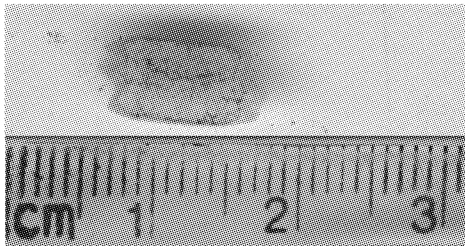


图 6 STL 激光器烧蚀有机玻璃的光斑形状

Fig. 6 Spot ablated from organic glass by the STL laser

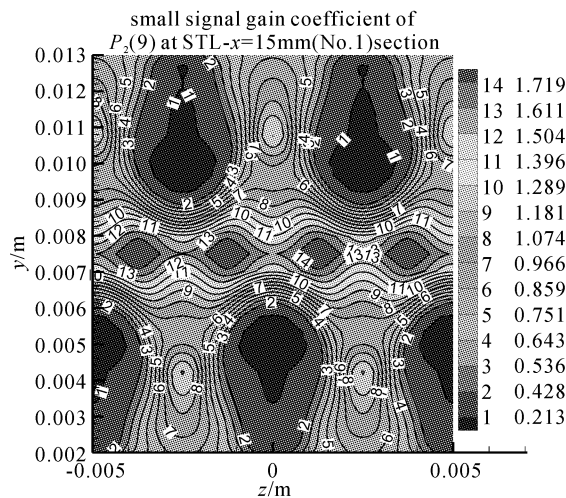


图 7  $x = 15 \text{ mm}$  处截面上的小信号增益分布(单位:  $\text{m}^{-1}$ )

Fig. 7 Distribution of small signal gain on the cross-section plane of  $x = 15 \text{ mm}$  (Unit:  $\text{m}^{-1}$ )

为了给 STL 的改进进一步提供依据,模拟得到了 STL 实际参数下的反应流场,并计算对应的小信号增益分布。图 7 给出了光轴(离 NEP 约 15 mm 左右)附近的  $x = 15 \text{ mm}$  截面上的小信号增益系数分布。由图 7 可知,低总压 STL 激光器氧化剂喷管对称面的增益系数最大,且激发态分子也充满了整个截面,但壁面附近没有发生有效激射。由于在壁面附近气流处在边界层内,模拟结果和气动知识都表明,边界层气流流速较低,静压和静温均较高,反应速度和碰撞弛豫很快,在光轴附近的边界层内基态吸收现象已经占支配地位,使得壁面附近激活介

质的增益系数低于阈值而不能发生有效激射。而大基区、高总压、多周期 HYLTE 喷管阵列的激光器中则不会出现这种情况。

此外,STL 的流向旋涡结构与多周期的 HYLTE 喷管是不同的,也会导致 STL 的混合速度下降,从而使得化学效率降低<sup>[3]</sup>。

## 5 结 论

根据分析、模拟和实验结果,低总压 STL 激光器的主要改进措施如下:

1) 提高反应流的 F 原子质量百分比,包括:改进燃烧室的设计,减小 F 原子复合的比例,可以考虑  $\text{NF}_3$  与  $\text{H}_2$  在缓冲气体 He 参与下先混合好燃料体系再燃烧的设计方案;改造燃料供给管路,以便提高燃烧室的总压。

2) 增大基区高度,降低反应区域的静压和静温;同时考虑采用边界层控制技术。对于单周期的 STL 激光器,可以采用类似 ORACL 模块<sup>[4]</sup>中的 HYLTE 喷管基区吹 He 的方法,以加速边界层和基区气流,减少基态吸收。

致谢 感谢李强、李文煜两位同志为本文实验所提供的帮助。

## 参 考 文 献

- 1 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* (中国激光), 2002, **A29**(Supplement):188~192 (in Chinese)
- 2 Yuan Shengfu, Hua Weihong, Jiang Zongfu *et al.*. Numerical simulating results of nozzle flow in DF/HF chemical lasers [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(1):22~24 (in Chinese)
- 3 Yuan Shengfu, Zhao Yijun, Hua Weihong *et al.*. Dependence of CW DF/HF chemical laser performance on the flowfield parameters [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(5):402~406 (in Chinese)
- 4 W. A. Duncan, S. P. Patterson, B. R. Graves *et al.*. Overtone research, advanced chemical laser module design [C]. *SPIE*, 1994, **2119**:46~57