

文章编号: 0258-7025(2009)02-0362-05

连续波 DF/HF 化学激光器收缩段氦气膜 注入式新型喷管的理论研究

李 兰 华卫红 袁圣付 姜宗福

(国防科学技术大学光电科学与工程学院定向能技术研究所, 湖南 长沙 410073)

摘要 连续波(CW)DF/HF 化学激光器喷管中一般有近 20% 的氟原子复合为氟分子, 这是影响激光器抽运效率和激射强度的重要因素。尤其是壁面复合反应对氟原子的损耗占主要地位。通过喷管型面设计等方法减少氟原子的复合效果不甚明显。结合航空领域中气膜冷却方案设想通过在喷管收缩段位置处注入氦气层, 隔离氟原子气流与喷管壁面, 实现降低氟原子损耗的目的, 同时保护喷管壁面及喉道部分避免过度烧蚀。数值模拟结果显示此方法可同时实现对喷管壁面的冷却保护和有效提高氟原子的冻结效率。但注入的氦气将占据部分气流通道的, 影响主气流在喷管中的传输。在主气流属性保持不变的情况下, 喷管出口平面(NEP)上氟原子绝对流率将下降。针对引入的不足, 提出了几种改进方案。

关键词 激光器; DF/HF 化学激光器; 喷管; 数值模拟; 氦气膜

中图分类号 TN 248.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093602.0362

Theoretical Investigation of Nozzle with Helium Film Injection at the Converge Section in CW DF/HF Chemical Laser

Li Lan Hua Weihong Yuan Shengfu Jiang Zongfu

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract About 20% fluorine atoms recombine to fluorine molecules in continuous wave(CW)DF/HF chemical laser's nozzle, and it is one of the most important factors influencing the bumping efficiency and lasing intensity of lasers. The fluorine atoms loss is caused mainly by wall recombination. Nozzle contour design does not have an obvious effect on reducing it. Combining the gaseous film cooling used in aerospace realm, a new kind of nozzle is designed by injecting helium film from nozzle's converge section. The film is estimated to be a separating layer between the main stream and nozzle wall which can reduce fluorine atoms loss, protect the wall, and throat region from ablation. The numerical results show that the protection and frozen efficient are obvious. The helium film occupies part of the stream channel, which influences the main stream's transportation. The absolute mass flow rate of fluorine atom falls at nozzle exit plane(NEP) if the main stream's property keep constant. Several methods are presented to improve the design's inherent shortage.

Key words lasers; DF/HF chemical laser; nozzle; numerical simulation; helium film

1 引言

连续波 DF/HF 化学激光器一直都是高能激光器领域的杰出代表, 而其高能量高效率的输出很大

程度上得益于通过喷管将气动技术引入激光器。激光器中所用喷管的设计, 基本要求是能够提供快速混合、快速反应、低温、高速的气流。而在提升其气

收稿日期: 2008-03-31; 收到修改稿日期: 2008-06-11

作者简介: 李 兰(1983-), 女, 河南人, 博士研究生, 主要从事高能激光器数值计算方面的研究。

E-mail: llnudt@163.com

导师简介: 姜宗福(1963-), 男, 湖南人, 教授, 博士生导师, 主要从事高能激光技术及气动光学方面的研究。

E-mail: jiangzongfu@yahoo.com.cn

动性能的同时,主喷管对氧化剂主要成分——氟原子的冻结效率也是衡量激光器性能的重要参数。它将主要参与抽运反应,以形成粒子数反转分布,产生激射。主喷管中氟原子将主要受到三体复合与壁面复合反应的影响有所损耗,尤其在喷管收缩段壁面附近,由于气流温度较低,速度较慢,大量氟原子复合为氟分子,从而使光腔中热反应发生概率增大,激发态去激活速率增大,小信号增益下降,增益区变窄和输出功率下降。因此,为减少氟原子损失,曾考虑了诸多途径,如设计喷管型面等。但文献[1]表明这种改善是较小的,在避免边界层分离的情况下设计收缩段型面,在仅考虑三体复合的情况下,氟原子质量流量的差别在 5% 左右。因此,需要设计新的方法进一步减少氟原子的损失,提高激光器效率。

2 设计思路

在三体复合和壁面复合的影响下,有 20% 左右的氟原子转化为氟分子^[2]。如上所述,喉道上游壁面附近,气流温度低,速度慢,氟原子复合速率远大于分解速率,因此,在壁面催化作用下,大量氟原子转化为氟分子。而仅三体复合反应损耗的氟原子量是相对较少的,因此,减少氟原子的损耗主要在于减少壁面复合。最有效的方法就是避免氟原子与喷管壁面的直接接触,对主气流和壁面实施物理隔离——在收缩段处主气流和壁面之间注入一层隔离气体,但需确保不对主气流中氟原子产生显著影响。根据激光器工作气体的特性,考虑采用惰性气体氦气作为隔离气。注入的氦气与主气流一起通过收缩段、喉道和扩张段膨胀至超音速,在喷管中复合易发生的区域都将有氦气隔离。这种方式十分类似于航空航天领域中的气膜冷却方式^[3],注入的氦气可同时对喷管壁面起冷却作用,避免主气流直接对喉道部位产生烧蚀。以二维喷管为例,设计二维狭缝的注入方式,喷管示意图如图 1 所示。氦气贴壁注入主气流中,主要处于复杂的边界层区域,且有氟原子的复合、分解反应发生,理论分析是较难进行的。在化学激光器的数值模拟和实验研究上都有过大量研

究工作^[4~7],本文将对该结构进行初步的数值模拟,研究其可行性。

3 数值模拟

3.1 数值模型

为与主气流相匹配,设计氦气从喷管收缩段开始处沿与壁面平行的方向注入,以减缓对主流流的压缩,将这里注入的氦气称为“稀释剂”。为简化计算,先针对二维平面对称喷管,将氦气的注入等效为等面积狭缝,宽度为 0.07 mm,注入总压高出主气流总压 20%。喷管中的多组分、有反应混合气体可用纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程组来描述,其守恒形式表示为

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \mathbf{W} + \mathbf{Q}_{\text{chem}} = 0, \quad (1)$$

式中 $\mathbf{Q} = [\rho, \rho u, \rho v, \rho H - \frac{\gamma_0 - 1}{\gamma_0} p, \rho c_k]^T, k = 1, 2, \dots, N_k$ 为守恒变量矢量,其中 $\rho, u, v, H, \gamma_0, p, c_k$ 分别为流场密度, x 方向速度分量, y 方向速度分量,总焓,特征比热比,静压,组分 k 的质量分数。

$\mathbf{W} = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y}$ 为空间导数项, $\mathbf{Q}_{\text{chem}} = [0, 0, 0, 0, 0, -\dot{W}_k]$ 为化学反应源项。其中 $\mathbf{F}, \mathbf{G}, \mathbf{H}$ 是与流场黏性、扩散、热传导有关的矢量, \dot{W}_k 是组分 k 的生成速率,具体定义可参见文献[8]。

状态方程为

$$p = \rho RT \quad (2)$$

总焓与速度、温度的关系为

$$H = \frac{V^2}{2} + \sum_{k=1}^{N_k} c_k \left(\int_{T_0}^T c_{pk} dT + h_k^0 \right), \quad (3)$$

式中 h_k^0 为 k 组分在参考温度 T_0 时的标准焓^[6], V^2 为各向速度的平方和。

由于在主喷管中为 F, F₂, N₂, He, HF 5 种组分组成的混合气体,仅存在氟原子的三体复合、分解,及壁面复合三个基元反应,采用有限速率模型表达每个反应,速率方程如表 1 所示。

混合气体物性参数根据分子动力学理论计算^[8],分子间相互作用势取‘6-12’的 L-J 势,并对各个单组分的物性参数进行运算得到。控制方程组采用有限体积法进行离散,使用完全隐式耦合算法迭代收敛。

喷管结构参数与滞止参数如表 2 所示。

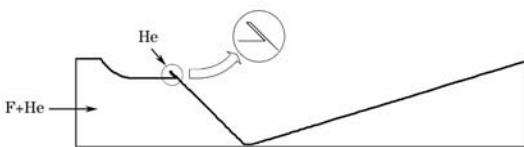


图 1 收缩段带氦气注入的新型喷管

Fig. 1 New nozzle with helium injection at convergent section

表 1 化学反应速率方程
Table 1 Chemical reaction rate equations

| | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|---|
| Reaction of the three elements | $F + F \rightarrow F_2$ | $1 \times 10^{10} \times T^{-1}$ |
| | $F_2 \rightarrow F + F$ | $1.99 \times 10^{15} \times T^{-1.325} \times \exp(-1.907 \times 10^4 / T)$ |
| Wall reaction | $F + F_{\text{site}} \rightarrow F_2$ | $1 \times 10^{10} \times T^{-1}$ |

表 2 喷管结构与滞止参数
Table 2 Nozzle structure and stagnation parameter

| Nozzle | Throat half height/mm | NEP half height/mm | Total pressure/(10^5 Pa) | Total temperature/K | Species mass fraction | | | | |
|----------|-----------------------|--------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------|----------------|---------|---------|----------------|
| | | | | | F | F ₂ | He | HF | N ₂ |
| Oxidizer | 0.15 | 4.4375 | 2.0265 | 1500 | 0.20841 | 0.0015 | 0.24305 | 0.40174 | 0.1453 |
| Inert | 0.05 | 0.05 | 2.4318 | 300 | | | He | | |
| | | | | | | | 1.0 | | |

3.2 计算结果分析

图 2 为喷管中氟原子的质量分数二维分布图。从图中可看出整个喷管中氟原子主要集中在核心流位置,壁面附近氟原子的量很少;只在氦气注入前的位置有相对较多的氟原子复合,在注入位置后部至喷管出口,壁面附近基本被氦气所占据,且氟分子含量明显减少,有效避免了高温气流与喷管壁及喉道区域的直接接触。可以说氟原子和氟分子与氦气在注入位置之后直至喷管扩张段有相互“补位”的分布规律。但主气流与注入的氦气之间存在扩散混合,氟原子不可能与壁面完全脱离接触,壁面复合有大幅度减小,但仍然是存在的。同时,由于氦气注入位置贴近收缩段且与壁面平行,注入缝又很小,氦气与主气流的混合不十分充分。这将使喷管出口平面后副气流要与主气流混合发生反应,就必须穿透两者之间的氦气层,仅采用简单的扩散混合方式效率较低,因此需要采取附加措施增强气流混合,以保证激光器的功率输出。

为进一步明确氦气注入对减少氟原子壁面复合

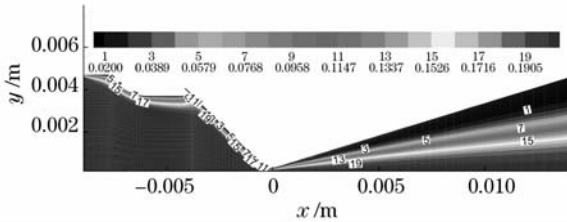


图 2 喷管内氟原子组分的二维分布图

Fig. 2 Fluorine atom two-dimensional distribution in nozzle

的效果,同时对同样型面和边界条件下无氦气注入的喷管流场进行了计算,并对两者喷管出口平面(NEP)上组分分布进行了比较,如图 3 所示。由于氦气注入使喷管中气流总的的质量流量发生变化,因此,对于有氦气层注入的情况,出口平面上的氟原子和氟分子所占比例做换算,仍按占主气流的质量分

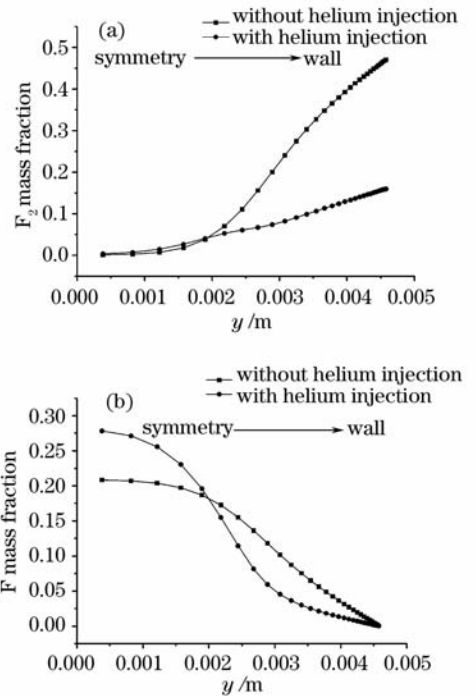


图 3 新型喷管与原喷管喷管出口平面上组分分布曲线

(a)NEP 上 F₂ 的质量分数曲线;

(b)NEP 上 F 的质量分数曲线

Fig. 3 (a) F₂ and (b) F mass fraction distribution at NEP with or without helium injection

数表示。

对于氟分子的分布,有无注入氦气在对称轴附近并无大影响,而在壁面附近,由于氦气的注入,壁面复合生成的氟分子量明显减少,这将有效减少光腔内热反应的发生;氟原子在壁面附近含量也有明显降低,这主要是氦气占据壁面附近区域造成的,更多的氟原子集中至对称轴附近。可以说,氦气的注入对减少氟原子壁面复合的发生,降低其损耗,效果十分明显。

由于注入的氦气需要通过喉道,从而氧化剂主

气流可用的有效喉道面积减小,在入口总压不变的情况下主气流质量流量下降。本文选取的算例流量数据如表 3 所示(同时列出了无氦气注入的喷管流量数据以作对比,质量流量单位均为 g/s)。表中数据显示,对以上主副气流状态,注入氦气后,氟原子本身的冻结效率由 80.15% 提高至 90.69%,但由于主气流流量下降,造成喷管出口平面上氟原子质量分数由 16.7% 下降至 13.854%,即导致喷管出口平面单位面积上氟原子绝对浓度减少,可参与激射的氟原子绝对量减少,功率水平下降。

表 3 气流流量数据对比
Table 3 Flow rate parameter comparison

| Case | Main stream flow rate | F flow rate in main stream | Helium film flow rate | NEP stream flow rate | F flow rate at NEP | F frozen efficiency | F mass fraction in NEP stream |
|----------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------|--------------------|---------------------|-------------------------------|
| Without helium | 17.339168 | 3.6126212 | 0 | 17.339168 | 2.8958046 | 80.158% | 16.7% |
| With helium | 14.133935 | 2.9449048 | 5.1856861 | 19.276299 | 2.6706099 | 90.69% | 13.854% |

针对以上问题,在激光器实际设计中可进行以下改善:

1) 提高主气流总压以增大主气流流量,从而可一定程度上增大出口气流中氟原子绝对含量。如将主气流总压提高 10%,稀释剂总压保持不变,数值模拟结果显示氟原子本身冻结效率为 90.927%,与以上比较没有明显的变化,而 NEP 上氟原子质量分数由 13.854% 上升至 15.697%,但仍低于无氦情况;

2) 保证氦气注入总压的同时,设计调整氦气注入孔的尺寸大小,以相对减小氦气流量。如将氦气注入狭缝宽度缩小为上述例子的一半(0.035 mm),总压仍比主气流高出 20%。数值模拟结果显示氟原子冻结效率为 88.294%,而 NEP 面上氟原子质量分数上升至 16.158%;

3) 主气流流量降低的原因在于有效喉道面积减小,通过分析氦气层对喉道高度的影响设计主喷管喉道高度,附加氦气通道,以增大主气流流量;

4) 将注入的氦气作为主稀释剂的一部分,类似于文献[9]中的氧化剂气流的新型产生方式,但氦气的注入位置从气流中调整到喷管壁面附近。通过减少主稀释剂的量,提高燃烧效率,在同等氧化剂、燃料条件下增大氟原子百分比含量,弥补主气流在有氦气注入时流量减小带来的氟原子绝对流量减少。

通过对以上措施进行综合应用,此类型喷管有望应用在 CW DF/HF 化学激光器中,获得较高的化

学效率。

4 结 论

激光器主喷管中的壁面复合反应是氟原子损耗的重要因素,为有效减少氟原子复合为氟分子,采用将主气流与壁面隔离的方法设计了一种新型喷管——将氦气通过狭缝或小孔的方式从喷管收缩段开始处注入主气流中,从而在氟原子复合最易发生的喷管收缩段壁面附近形成氦气膜层,减少复合。通过数值模拟发现,这种结构使壁面附近基本被氦气占据,氟原子大部分集中在喷管核心区域,氟分子含量较没有氦气注入时有明显下降,有效减少了氟原子壁面复合的发生,同时冷却了喷管壁面。但这种结构将影响主气流质量流量,明显减少了 NEP 面上氟原子的绝对含量。分析认为通过调节主气流总压、氦气注入孔大小及位置、喷管喉道高度以及燃烧室入口气流比例,此结构的喷管将有望应用于 CW DF/HF 化学激光器中,可在提高激光器化学效率的前提下,有效改善氦气注入对主气流及功率输出的不利影响。

参 考 文 献

- 1 Liu Wenguang, Lu Qisheng, Yuan Baolun *et al.*. Effects on F recombination in annular hypersonic low-temperature nozzle with different contraction curves [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2006, **38**(3):392~397
刘文广,陆启生,袁保伦等. 收缩段线型对超音速喷管氟原子气

- 相复合的影响[J]. 力学学报, 2006, **38**(3):392~397
- 2 R. W. F. Gross, J. F. Bott. Handbook of Chemical Lasers[M]. 1st ed., Beijing: Science Press, 1987. 255~290
R. W. F. 格罗斯, J. F. 博特. 化学激光手册[M]. 第一版, 北京: 科学出版社, 1987. 255~290
 - 3 Ge Shaoyan, Liu Dengying, Xu Jingzhong *et al.*. Gaseous Film Cooling[M]. 1st ed., Beijing: Science Press, 1985
葛绍岩, 刘登瀛, 徐靖中 等. 气膜冷却[M]. 第一版, 科学出版社, 1985 年
 - 4 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
 - 5 Yuan Shengfu, Hua Weihong, Jiang Zongfu *et al.*. Nozzle design and numerical simulation method of nozzle flow in DF/HF chemical lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(1):19~21
袁圣付, 华卫红, 姜宗福 等. DF/HF 化学激光器喷管设计和数值模拟[J]. 中国激光, 2001, **A28**(1):19~21
 - 6 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
 - 7 Yan Baozhu, Yuan Shengfu, Wang Hongyan *et al.*. Experiments and analysis of continuous wave DF chemical laser without diluent [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6):823~826
闫宝珠, 袁圣付, 王红岩 等. 连续波 DF 化学激光器无稀释剂实验及其分析[J]. 中国激光, 2008, **35**(6):823~826
 - 8 Yuan Shengfu. Theoretical design of latest gain generator for continuous wave DF/HF chemical lasers. [D], Changsha: Ph. D. dissertation, 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]. 工学博士论文, 国防科技大学研究生院, 2002
 - 9 V. K. Rebone, J. A. Fedorov Yu P. *et al.*. Characteristics of a cw chemical HF laser operating by using a new oxidising-gas production technique [J]. *Quantum Electronics*, 2004, **34**(9) 795~800