

连续波 DF/HF 化学激光器环形喷管与线形喷管的对比

靳冬欢, 刘文广, 陈 星, 陆启生

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 环形喷管阵列主要用于环柱型化学激光器, 它可以分为两种构型: 直喉道型和圆喉道型。二者都可以由线性喷管阵列变换得到。在变换前后保持相同的增益区体积的前提下, 环形喷管阵列的横向尺寸将减小为线性喷管阵列的 $1/\pi$ 倍, 这将更有利于激光器的紧凑化设计。由于圆喉道型环形喷管阵列相对直喉道型更具实用价值, 通过三维的数值模拟, 比较了圆喉道型环形喷管单元和线形喷管单元的流场特性。结果表明: 在相同截面尺寸及喉道面积条件下, 环形喷管出口气流马赫数、气流速度分别比线形喷管高 4.03%, 0.356%, 静温、静压分别比线形喷管低 6.08%, 19.7%。在喷管的收缩段, 两种喷管的边界层发展规律及厚度值基本相同, 而环形喷管的气流速度要快于线形喷管, 因此环形喷管的氟原子复合比例要略低于线形喷管。

关键词: 化学激光器; 环形喷管; 直喉道型; 圆喉道型; 线形喷管; 数值模拟

中图分类号: TN248.5; O354.2

文献标识码: A

Comparative analysis of annular nozzle and linear nozzle in CW DF/HF chemical laser

JIN Dong-huan, LIU Wen-guang, CHEN Xing, LU Qi-sheng

(College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Annular nozzle array is principally used in cylindrical laser. It contains two geometrical configurations of straight-throat style and circular-throat style. Both of them can be acquired by transforming linear nozzle array. Under conditions of constant gain volume, transverse dimension of annular nozzle array will reduced to $1/\pi$ of linear nozzle array. Thus annular nozzle array is especially suitable for the design of small-volume chemical laser. Annular nozzle array with circular throat is more applicable in actual chemical laser. Consequently flow field characteristics of annular nozzle unit with circular throat and linear nozzle unit were calculated based on three-dimension computational fluid dynamics methods. The numerical simulation results demonstrate that Mach number and velocity magnitude in annular nozzle exit plane are higher by 4.03% and 0.356% as compared with linear nozzle under conditions of constant nozzle section dimension and throat area, whereas static temperature and static pressure of annular nozzle is lower by 6.08%, 19.7%. Boundary-layer thicknesses of convergent section of two kinds of nozzles grow basically according to same trends and dimensions, nevertheless mean velocity magnitude of annular nozzle exit plane is faster than that of linear nozzle. As a result recombination proportion of F-atom is lower appreciably in annular nozzle exit plane than in linear nozzle exit plane.

Key words: chemical lasers; annular nozzle; straight-throat style; circular-throat style; linear nozzle; numerical simulation

1 引言

超音速喷管前接燃烧室、后接光腔, 是连续波 DF/HF 化学激光器中实现气动技术的关键器件。它的主要作用是将接近滞止的燃烧室气流以低温、

低压、高速的状态注入光腔, 为泵浦反应提供氧化

作者简介: 靳冬欢(1981-), 男, 博士研究生, 从事化学激光器技术研究。E-mail: jinboyiyi@163.com

收稿日期: 2010-07-15

剂,同时最大限度的“冻结”燃烧室中热解离的氟原子,防止其在进入光腔前发生复合。因此,它直接影响到激光器的化学效率、光束质量、增益区长度及最终的出光功率。

从化学激光器问世至今,先后诞生了许多超音速喷管设计概念^[1],如采用扩散混合技术的 2 Slot^[2],3 Slot^[3]、三维轴对称及 HYWN 喷管^[4],通过横向射流扭曲反应界面的 Trip 喷管^[5],利用流向漩涡加快混合的 Ramp 喷管^[6],综合运用上述混合技术的 HYLTE 喷管^[7]。这些喷管都有效提高了化学激光器的性能,促进了化学激光器的发展。

从喷管阵列方式的角度来说,超音速喷管可以分为线形喷管阵列和环形喷管阵列两种^[8]。两种喷管阵列都在实际的激光器系统中得到了应用,如美国的 MIRACL^[9]、Alpha^[10]就是分别采用了线形喷管阵列和环形喷管阵列的高能 DF、HF 化学激光器,二者都实现了兆瓦级的功率输出。从 20 世纪 70 年代开始,中科院大连化学物理研究所、中国船舶重工集团公司第七一八研究所等单位采用线性喷管阵列,先后研制成功了多台 DF/HF 化学激光器^[11-13]。而对于环形喷管阵列 DF/HF 化学激光器,国内的研究工作开展得还不充分^[8],尤其是与发展较好的线性喷管阵列化学激光器比较而言,究竟有哪些优势及不足,还不十分明确或缺乏理论支撑。本文的目的就是探讨两种喷管阵列方式之间的联系和区别,为化学激光器增益发生器设计方案的选择和优化提供依据。

2 线形喷管阵列到环形喷管阵列的变换

环形喷管阵列有两种构型:一种是直喉道型,喉道与光轴方向平行,呈长条状,出口气流在水平方向上扩张,如图 1(a)右图所示;一种是圆喉道型,喉道与光轴方向垂直,呈圆环状,出口气流在竖直方向上扩张,如图 1(b)右图所示。环形喷管阵列的两种构型都可以由线形喷管变换得到。直喉道型环形喷管阵列可以由线形喷管单元沿角向旋转排列得到;圆喉道型环形喷管阵列可以由线形喷管阵列单元沿角向弯曲得到。变换过程中,喷管阵列高度不变、喉道高度不变、总喉道面积及增益区面积(喷管出口平面)不变。从这个角度来看,线形喷管阵列的设计概念也可以运用到环形喷管阵列设计中。一个典型的范例是,Alpha 环柱型激光器的初始验证模块采用的就是线性喷管阵列^[14]。

直喉道型环形喷管阵列的燃料及稀释剂的供给管路与线形喷管阵列完全一样,然而这种排列方式

使垂直于光轴方向的横截面上的增益介质沿角向的变化呈现出强烈的周期性,将对激光器的输出光束质量造成不利影响^[8]。圆喉道型环形喷管阵列的布置使垂直于光轴方向的横截面上的增益介质沿角向变化非常微弱,因此这样的喷管阵列设计更有利于激光器输出光束质量的提高,美国的 Alpha 激光器采用的就是圆喉道型环形喷管阵列。

假定变换前后,喷管阵列的增益区长度保持不变,则增益区体积也近似相等,都等于:

$$V = W \times H \times L \quad (1)$$

式中, W, H 分别是线形喷管阵列的宽度和高度; L 是沿流场方向的增益区长度。变换前线形喷管的横向尺寸为 W ,变换后环形喷管的横向尺寸则为环形喷管的直径,近似等于 W/π ,减小为原来的 $1/\pi$ 倍,这将更有利于激光器的小型化、紧凑化设计。这一点对于军用或工业用激光器而言是非常具有吸引力的^[8]。

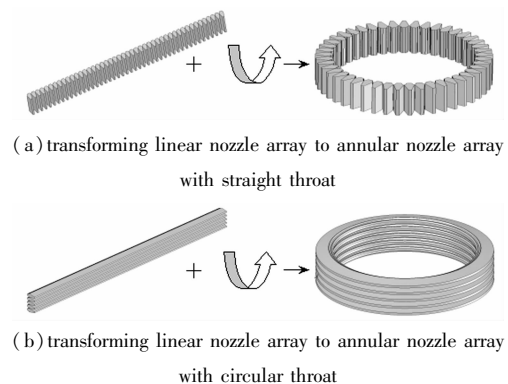


图 1 线形喷管阵列到环形喷管阵列的变换

Fig. 1 transforming linear nozzle array to annular nozzle array

3 环形喷管与线形喷管的对比分析

虽然环形喷管阵列可以由线形喷管阵列变换得到,但变换后喷管收缩段的入口面积减小了,扩张段的出口面积增大了,这样通过喷管的气流的性能参数就会发生变化。由于圆喉道型环形喷管阵列更具实用价值,下面将通过数值模拟的方法,对圆喉道型环形喷管单元和线形喷管单元的流场特性进行比较。

线性喷管模型一般是二维模型^[2]或三维模型^[1],而环形喷管模型是三维模型^[8],二者的比较就是个三维问题,也只能通过三维的数值模拟手段进行分析,才能阐述清楚。激光器中多将单个喷管模块放大为阵列形式使用,对整个喷管阵列同时进行数值模拟对计算能力的要求非常高,一般主要关心远离喷管及光腔罩板的核心区域的流场情况,这样就可以应用对称边界条件,提取出可重复出现的

最小周期单元。计算模型及网格划分如图2所示,其中环形喷管计算模型左右截面的夹角为 0.9° 。两种计算模型的截面尺寸及喉道面积相同,截面尺寸如图3所示。

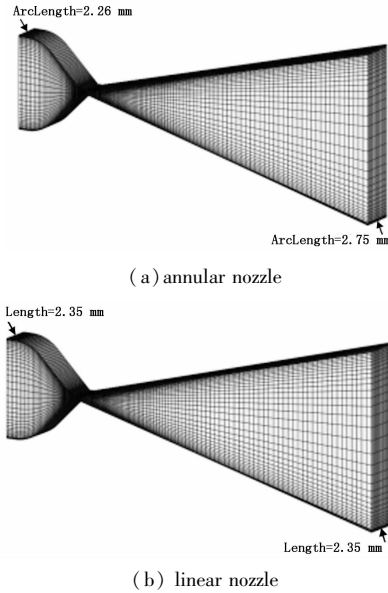


图2 两种喷管的计算模型及网格划分

Fig. 2 computation models and meshes of linear nozzle and annular nozzle

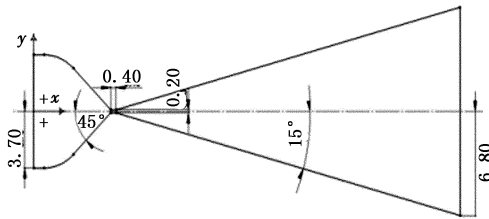


图3 计算模型横截面尺寸图/mm

Fig. 3 section dimension of computation model/mm

对于 $(NF_3 + D_2 + He)/H_2$ 燃料体系而言,喷管内有包括 F, F_2, N_2, He, DF 五种组分的混合气体,存在氟原子的复合、氟气的离解两种化学反应,Arrhenius反应速率参数根据C-R程序中的数据设置^[2],介质的黏性系数及导热系数皆采用分子动力学理论进行计算,其中的分子间作用力模型使用的是Lennard-Jones(6,12)势^[15],黏性模型使用Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型。立足于Navier-Stokes方程组,利用有限体积法对控制方程离散,采用完全隐式的基于密度的算法求解,分别对两种喷管进行了三维的数值模拟。

主要边界条件:入口为压力入口边界,具体设置如表1所示;左、右截面为对称边界;上、下壁面为固壁边界,壁面温度恒为300 K;出口设为压力出口边界。

表1 喷管的压力入口边界条件设置

Tab. 1 Nozzle inlet parameters

	total pressure /atm	total temperature /K	species mass fraction				
			F	F ₂	He	DF	N ₂
nozzle inlet parameters	6	1900	0.20841	0.0015	0.24305	0.40174	0.1453

3.1 出口气流参数比较

喷管出口的气流参数将作为光腔区入口的气流参数,直接关系到激射环境的形成。喷管出口气流参数的平均值如表2所示。环形喷管出口气流马赫数、气流速度分别比线形喷管高4.03%,0.356%,静温、静压分别比线形喷管的低6.08%,19.7%,这主要是因为经过变换后,环形喷管的扩张段出口面积变大,喉道面积相同的情况下,环形喷管的扩张段面积比要大于线形喷管,按照气体动力学的相关理论,超音速气流的马赫数、气流速度与面积比成正比,而静温、静压又与马赫数的变化成反比,因此有上述结果,这也说明在相同截面尺寸及喉道面积条件下,环形喷管比线形喷管更容易在光腔区形成低温、低压、高速的激射环境。

表2 喷管出口气流参数的平均值

Tab. 2 Mean value of gas flow parameters of nozzle exit plane

	A_{exit}/A_{throat}	\bar{M}_e	$\bar{V}_e/(m/s)$	\bar{T}_e/K	\bar{P}_e/atm
linear nozzle	68	6.2975	2413.8	128.85	0.0024973
annular nozzle	79.53	6.5513	2422.4	121.01	0.0020048

3.2 氟原子复合的比较

图4给出了归一化的沿流场方向的氟原子质量分数分布,各数据点取自平行于喷管入口平面的一组等距平面内的氟原子质量分数的加权平均值,横坐标表示各平面与入口平面之间的距离。从图4可

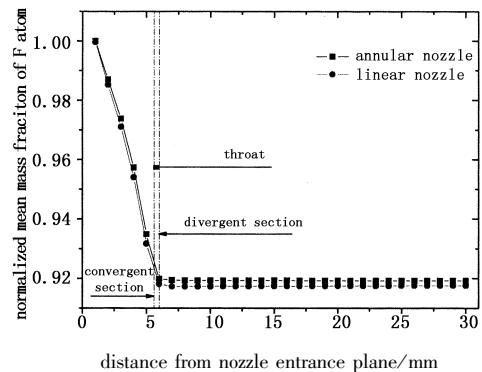


图4 归一化的沿流场方向的平均氟原子质量分数分布图

Fig. 4 normalized mean mass fraction of F atom along the direction of gas flow

以看出,氟原子的复合主要发生在喷管收缩段,收缩段气流速度慢、温度低,尤其是在恒温壁面附近,大量的氟原子通过三体碰撞复合为氟分子,而在扩张段,氟原子的质量分数基本保持不变,这是因为气流在膨胀过程中的速度足够快而使得化学反应处于一种非平衡的状态,从而实现了超音速喷管对氟原子的“冻结”作用。在收缩段,环形喷管的复合比例略低于线形喷管,主要原因是环形喷管收缩段面积比小于线形喷管,而亚音速气流的速度与面积比成反比,因此环形喷管的气流速度要快于线形喷管。图5给出了收缩段气流平均速度的波动幅度,其定义为:

$$\alpha = \frac{\bar{u}_{\text{annular}} - \bar{u}_{\text{linear}}}{\bar{u}_{\text{annular}}} \quad (2)$$

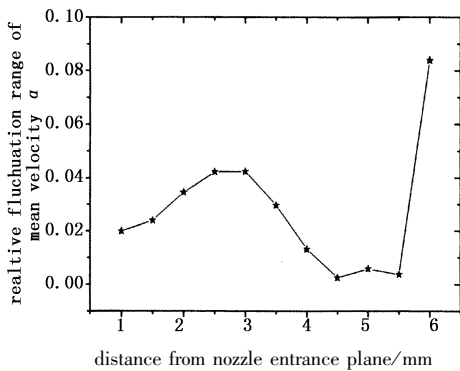


图5 收缩段气流速度波动幅度

Fig. 5 relative fluctuation range of mean velocity in convergent section

从图中可以看出,在收缩段沿流向各个位置处,环形喷管的平均速度都要快于线形喷管,最高增速幅度达到8.39%。

氟原子的冻结也与收缩段边界层的发展密切相关^[1,16],因此,我们对两个模型的右截面($z=0$)的收缩段应用可压缩流的边界层位移厚度的计算公式^[17-18]:

$$\delta^* = \int_0^{y_w} \left(1 - \frac{\rho u_x}{\rho_{x-axis} u_{x-axis}} \right) dy \quad (3)$$

式中, y_w 是壁面高度, ρ, u_x 分别是流体的密度和方向的速度分量, $\rho_{x-axis}, u_{x-axis}$ 分别是流体在右截面对称中心线(x 轴)处的密度和速度,计算结果如图6所示。两种喷管的边界层发展规律及厚度值基本相同:在喷管入口附近,边界层沿着流体的运动方向逐渐增厚,之后由于壁面高度的迅速减小,边界层也逐渐变薄。这是因为边界层厚度决定于气流的 Reynolds,而 Reynolds 仅与气流的滞止参数、组分及喷管的几何尺寸有关^[16],对于两种喷管而言,入口的滞止参数、组分及截面几何尺寸相同,因此边界层厚度的变化并不明显。

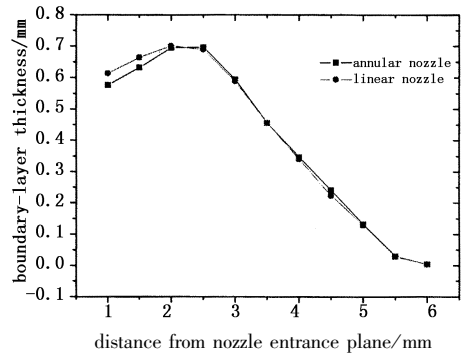


图6 收缩段边界层厚度沿流场方向的发展

Fig. 6 growth of boundary-layer thickness in convergent section along the direction of gas flow

最终喷管出口处,环形喷管对应的氟原子复合比例为8.07%,而线形喷管对应的氟原子复合比例为8.24%,那么,在同样的入口参数的前提下,环形喷管出口处的氟原子流量相对大0.17%,虽然提高的比例很小,但如果应用于高功率输出的激光器,将有助于降低光腔区热反应发生的几率,提高激光器的输出功率。

4 结论

环形喷管阵列的两种构型——直喉道型和圆喉道型,都可以由线性喷管阵列变换得到,从这个角度来看,线性喷管阵列的设计概念也可以运用到环形喷管阵列设计中。在变换前后保持相同的增益区体积的前提下,环形喷管阵列的横向尺寸减小为线性喷管阵列的 $1/\pi$ 倍,这将更有利于激光器的紧凑化设计。相对而言,圆喉道型环形喷管阵列比直喉道型在提高激光器输出光束质量方面更具优势。

通过三维数值模拟的方法,比较了圆喉道型环形喷管单元和线形喷管单元的流场特性。结果表明:在相同截面尺寸及喉道面积的条件下,环形喷管比线形喷管更容易在光腔区形成低温、低压、高速的激射环境。由于在喷管的收缩段,两种喷管的边界层发展规律及厚度值基本相同,而环形喷管的气流速度要快于线形喷管,因此环形喷管的氟原子复合比例略低于线形喷管。那么,在同样的入口参数的前提下,环形喷管将更有助于拉长增益区、降低光腔区热反应发生的几率,提高小信号增益及激光器的输出功率。当然,文中讨论的是主要是燃烧室气流通过主喷管的流场特性,如再结合出口附近的副气流注入及光腔段(线性腔或环形腔)的功率提取,两种喷管的差别还有待进一步的深入研究。

参考文献:

[1] Yuan Shengfu. Theoretical design of latest gain generator

- for continuous wave DF/HF chemical lasers[D]. Changsha; National University of Defense Technology, 2002. (in Chinese)
- 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:国防科学技术大学, 2002.
- [2] Hua Weihong. Numerical simulation of high energy continuous wave DF/HF chemical laser[D]. Changsha; National University of Defense Technology, 1997. (in Chinese)
- 华卫红. 高功率连续波 DF/HF 化学激光器数值模拟研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 1997.
- [3] Galaev I I, Konkin S V, Krivitskiĭ A M, et al. Supersonic cw chemical HF laser with a three-jet nozzle array[J]. *Quantum Electronics*, 1996, 26(3): 211 - 214.
- [4] Zelazny S W, Chambers W A, Van Tassell W F, et al. Medium induced aberrations in CW HF chemical lasers[C]. *Proc of SPIE*, 1981, 293: 126 - 132.
- [5] Li Lan, Yuan Shengfu, Hua Weihong, et al. Numerical investigation of jets' influence on TRIP gain generator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(6): 826 - 830.
- 李兰, 袁圣付, 华卫红, 等. 扰流气对 TRIP 增益发生器影响的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(6): 826 - 830.
- [6] Voignier F, Merat F, Brunet H, et al. Mixing diagnostic in a CW DF chemical laser operation at high cavity pressure[C]. *Proc of SPIE*, 1990, 1397: 297 - 301.
- [7] Duncan W A, Patterson S P, Graves B R, et al. Gain generator optimization for hydrogen fluoride overtone and fundamental chemical lasers[C]. *Proc of SPIE*, 1993, 1871: 123 - 134.
- [8] Liu Wenguang. Study on the cylindrical continuous wave HF chemical high energy lasers[D]. Changsha; National University of Defense Technology, 2004. (in Chinese)
- 刘文广. 环柱型高能连续波 HF 化学激光器研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2004.
- [9] Albertine J R. Recent high energy laser system tests using the MIRAACL/SLBD[C]. *Proc of SPIE*, 1993, 1871: 229 - 239.
- [10] Ryan L, Bendow B, Clark G, et al. Recent results from the ALPHA laser performance test program[C]//32nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, 2001.
- [11] Deng Ximing. Lasers' history summary of China[M]. Beijing: Science Press, 1991. (in Chinese)
- 邓锡铭. 中国激光史概要[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [12] Sang Fengting, Gu Chengzhou, Zhuang Qi, et al. Mixing processes behind the nozzle bank exit of a supersonic CW HF/DF laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1991, 3(3): 323 - 330. (in Chinese)
- 桑凤亭, 顾成洲, 庄琦, 等. 燃烧驱动连续波氟化氢(氘)化学激光器 - 三维列阵小孔喷管研究[J]. *强激光与粒子束*, 1991, 3(3): 323 - 330.
- [13] Yao Cuiyue, Sun Chaojun, Guo Jianzeng, et al. Evaluation of the performance of DF chemical laser with nitrogen diluent[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1992, 4(4): 588 - 592. (in Chinese)
- 姚翠月, 孙超君, 郭建增, 等. 氮作稀释剂 DF 化学激光器性能评价[J]. *强激光与粒子束*, 1992, 4(4): 588 - 592.
- [14] Zhuang Qi, Sang Fengting, Zhou Dazheng. Short wavelength chemical laser[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1997. (in Chinese)
- 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.
- [15] Tsien H S. Physical mechanics teaching materials[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2007. (in Chinese)
- 钱学森. 物理力学讲义[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.
- [16] Gross R W F, Bott J F. Handbook of chemical lasers[M]. Beijing: Science Press, 1987. (in Chinese)
- 格罗斯 R W F, 博特 J F. 化学激光手册[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [17] Schlichting H. Boundary-layer theory[M]. Seventh edition. New York: McGraw-Hill, 1979.
- [18] Wang Xinyue. Gas dynamics basic[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2006. (in Chinese)
- 王新月. 气体动力学基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.