

# DF/HF 化学激光器狭缝气膜冷却式喷管喉道的设计

高振于 袁圣付

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 针对现有大功率 DF/HF 化学激光器增益发生器存在的喷管喉道烧蚀问题,采用狭缝气膜冷却式喷管实现对喷管壁面和喉道的保护。通过对不同气膜流量下喷管中流场参数的变化进行数值模拟,分析出气膜对主气流流动的影响,并得到气膜、主气流的理论喉道宽度与喷管物理喉道宽度之间的经验关系式,这对于狭缝气膜冷却式喷管喉道的设计具有指导意义。

**关键词** 激光器;DF/HF 化学激光器;喷管烧蚀;气膜冷却;数值模拟

**中图分类号** TN248.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.s102005

## Design of Nozzle's Throat with Gaseous Film Cooling through Slot in DF/HF Chemical Laser

Gao Zhenyu Yuan Shengfu

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

**Abstract** For the nozzle throat ablation problem existing in the gain generator of high power DF/HF chemical lasers, there is a way called film cooling, to protect the wall and the throat of the nozzle. The differences of flow characteristic are numerically simulated under the different mass fluxes of the helium film and the influence of film on main stream is analyzed. The relationship between the throat width of the helium film, the main stream and the nozzle's throat width is important for the design of nozzle's throat with gaseous film cooling through the slot.

**Key words** lasers; DF/HF chemical laser; nozzle ablation; gaseous film cooling; numerical simulation

**OCIS codes** 140.1550; 000.4430; 140.3460; 000.2690

## 1 引言

DF/HF 化学激光器的高能量、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,但喷管喉部由于热流密度大、尺寸小、结构薄弱等特征,很容易受到主气流的烧蚀和腐蚀,从而影响激光器的稳定运转,因此,喷管的保护是十分必要的。鉴于气膜冷却方法在热防护上的优势<sup>[1]</sup>,以及与气膜冷却有关的研究表明,气膜以连续缝槽式结构注入冷却效果优于离散孔形式<sup>[2-6]</sup>,考虑在喷管收缩段开始处引入气膜狭缝<sup>[7-8]</sup>,通过注入氦气来

实现对喷管壁面和喉道的保护。但是气膜的引入占据了部分气流通道,影响了主气流在喷管中的流动;另一方面,在工程设计中,对于不同的主气流和气膜参数,喷管喉道的理论设计尺寸也不相同,而且这个尺寸的设计也是比较困难的,没有一个具体的参考。因此,本文将针对气膜对主气流流动的影响进行模拟,主要模拟不同气膜流量对气膜、主气流的理论喉道流通宽度的影响,并以解决喷管喉道尺寸设计这一难点为目的,得出狭缝气膜冷却式喷管物理喉道尺寸设计的经验关系式。

收稿日期: 2013-07-01; 收到修改稿日期: 2013-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(10974255)

作者简介: 高振于(1988—),男,硕士研究生,主要从事高能激光器数值计算方面的研究。

E-mail: gaozhenyu1028@163.com

导师简介: 袁圣付(1975—),男,博士,副教授,主要从事高能激光技术方面的研究。

E-mail: shengfuyuan\_bb@163.com(通信联系人)

## 2 计算模型

图 1 为计算网格示意图,主体为 Laval 喷管,氦气从收缩段入口两侧的狭缝内贴壁注入。喷管喉道宽度为 0.3 mm,喷管入口宽度为 10 mm,出口宽度为 8.875 mm,气膜狭缝宽度为 0.05 mm,喷管在  $z$  方向的高度为 50 mm(二维模型只是在  $xy$  平面上,

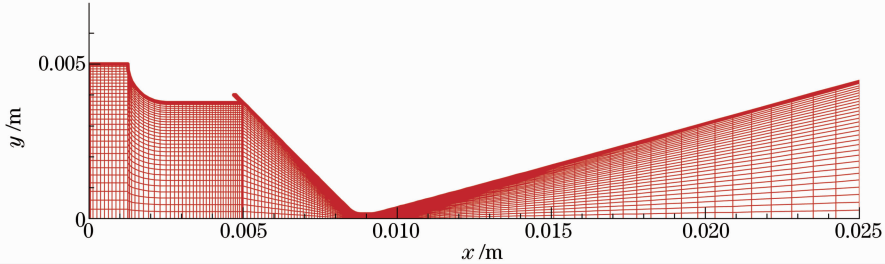


图 1 计算网格

Fig. 1 Computational grid

## 3 数值计算方法

喷管内气体采用 Navier-Stokes 方程组描述,结合气体状态方程和总焓、速度与温度的关系式构成封闭的控制方程组。混合气体的物性参数根据分子动力学理论计算,具体方法可参看文献[9],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。因本文不讨论气膜流量对 F 原子产率的影响,所以文中算例不包含 F 原子复合反应,仅考虑组分传输。在边界条件设置中,主喷管入口和氦气膜入口设置为流量入口,喷管出口设置为压力出口,壁面设置为恒温 300 K。在模拟计算中,

不考虑  $z$  方向,但是在后期的计算中需要这个量)。因为壁面附近流场变量的梯度较大,喉部尺寸较小,为保证数值模拟的精度,靠近喷管壁面和喉部的网格划分较密,而靠近喷管中心和喉部以外部分的网格划分较稀疏。

将主喷管入口和氦气膜入口设置为流量入口,但没有设置为压力入口,是因为本文主要模拟的是不同气膜流量对喷管流场的影响,这样设置可直观地看到流量的变化,实现了对气膜流量的精确设置,也方便与相关的实验进行数据匹配。

喷管入口边界条件设置如表 1 所示,其中给出了主气流和气膜的质量通量和入口面积,即给出了质量流量,分别为各自的质量通量与入口面积的乘积,表中显示的气膜质量通量为  $3\sim 9\text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$ ,包含 3、4、5、6、7、8、9 这 7 个量,表示模拟是在不同的气膜流量下进行的,共 7 个算例。

表 1 喷管入口边界条件参数

Table 1 Parameters of the nozzle entrance in boundary condition

Nozzle	Entrance area/cm <sup>2</sup>	Mass flux / (g/cm <sup>2</sup> · s)	Total temperature/K	Species mass fraction				
				F <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	F	He	HF
Oxidizer	5	0.4	1940	0.00087	0.15056	0.20335	0.21512	0.4301
Inert	0.025	3~9	300			He	1.0	

## 4 计算结果及分析

表 2 给出了模拟结果,也就是不同气膜流量下的主气流的总压和气膜的总压。将总压代入流量(1)式中可以分别求出对应的理论喉道宽度。流量公式可表示为

$$\dot{m} = \frac{P_0 A^* f(\gamma)}{\sqrt{RT_0}}, \quad (1)$$

式中  $f(\gamma) = \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}$ ,  $\gamma$  为比热容;  $R_u = \frac{R_u}{W}$ ,  $R_u$  为普适气体常数,  $W$  为摩尔质量;  $T_0$  为气体总温。对于主气流,  $\gamma = 1.5056$ ,  $W = 10.9476\text{ g/mol}$ 。

从表 2 中所示数据可以看出,随着气膜流量的增加,主气流和气膜的总压提高,气膜的理论喉道宽度增加而主气流的理论喉道宽度减小。这是因为气膜流量的增加引起气膜动量的增大,气膜狭缝出口

处气膜与主气流的动量比也增大,模拟结果显示其变化范围为 0.122~0.916,动量比的提高表明气膜对主气流的挤压增强,从而使主气流的喉道流通面积减小、气膜的喉道流通面积增大。又根据流量(1)式,对于气膜,在系统结构参数不变的情况下,提高

气膜流量需要通过提高气膜总压来实现;对于主气流,流量不变,总压与喉道面积呈反比。因此,气膜流量的提高对应着气膜总压的提升,而主气流喉道流通面积减小的同时其自身总压不断提高。

表 2 模拟结果比对

Table 2 Simulation results comparison

He-film mass flux /[g/cm <sup>2</sup> ·s]	Total pressure of oxidizer /(10 <sup>5</sup> Pa)	Total pressure of He-film /(10 <sup>5</sup> Pa)	Theory value of oxidizer throat width /mm	Theory value of He-film throat width /mm
3	2.421	2.504	0.286	6.513×10 <sup>-3</sup>
4	2.479	2.600	0.279	8.365×10 <sup>-3</sup>
5	2.528	2.693	0.274	1.010×10 <sup>-2</sup>
6	2.571	2.785	0.269	1.171×10 <sup>-2</sup>
7	2.611	2.880	0.265	1.322×10 <sup>-2</sup>
8	2.649	2.977	0.261	1.461×10 <sup>-2</sup>
9	2.692	3.081	0.257	1.588×10 <sup>-2</sup>

主气流和气膜的总压及理论喉道流通宽度随着气膜流量的变化发生着显著的变化,同时主气流和气膜的理论喉道宽度与狭缝气膜冷却式喷管的物理喉道宽度之间也存在着一个重要的关系,该关系式对工程设计中狭缝气膜冷却式喷管喉道的设计发挥重要的指导作用。为得到这个经验关系式,图 2 给出了主气流和气膜的理论喉道宽度的关系曲线,并进行了曲线拟合。

式。在实验和工程中,根据已知的初始数据算得主气流和气膜的喉道宽度,代入该经验关系式便可求得所需设计的喷管物理喉道宽度的参考值。

## 5 结 论

通过对狭缝气膜冷却式喷管流场的模拟,得出主气流和气膜的理论喉道宽度与喷管物理喉道宽度之间的经验关系式。狭缝气膜冷却式喷管设计的关键之一为喉道参数的确定,因此,该经验关系式对该参数具有一定的参考价值。

## 参 考 文 献

- 1 Ge Shaoyan, Liu Dengying, Xu Jingzhong, *et al.*. Gaseous Film Cooling[M]. Beijing: Science Press, 1985. 49-50.  
葛绍岩, 刘登瀛, 徐靖中, 等. 气膜冷却[M]. 北京: 科学出版社, 1985. 49-50.
- 2 Wang Jian, Sun Bing, Wei Yukun. Numerical simulation of supersonic gaseous film cooling[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(5): 865-870.  
王建, 孙冰, 魏玉坤. 超声速气膜冷却数值模拟[J]. 航空动力学报, 2008, 23(5): 865-870.
- 3 Zhang Dahai, Chen Qiuyang, Zeng Min, *et al.*. Numerical investigation on the effect of different transverse trench configurations on film cooling effectiveness [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(4): 611-616.  
章大海, 陈秋扬, 曾敏, 等. 不同横槽结构对气膜冷却效率影响的数值研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(4): 611-616.
- 4 Guo Tingting, Liu Jianhong, Song Donghui, *et al.*. Influence of jet orifice geometry on film-cooling effectiveness[J]. Journal of Power Engineering, 2006, 26(3): 333-336.  
郭婷婷, 刘建红, 宋东辉, 等. 不同形状气膜孔对气膜冷却效果的影响[J]. 动力工程, 2006, 26(3): 333-336.
- 5 Wang Yangping, Jang Peixue. Large eddy simulation on cylindrical and diffused hole film cooling [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(6): 1016-1018.  
王扬平, 姜培学. 圆孔与侧扩孔气膜冷却的大涡模拟[J]. 工程

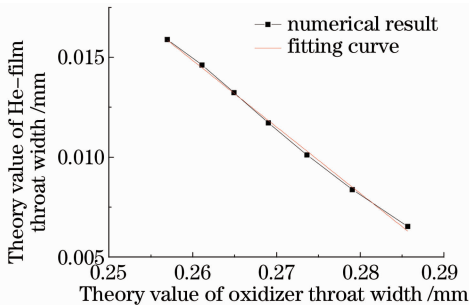


图 2 主气流和气膜的理论喉道宽度关系曲线

Fig. 2 Relationship curve between throat widths of oxidizer and film

令  $h_1$  表示主气流的理论喉道宽度,  $h_2$  表示气膜的理论喉道宽度,  $h$  为狭缝气膜冷却式喷管的物理喉道宽度,通过曲线拟合得到横、纵坐标  $h_1$ 、 $h_2$  之间的关系为  $h_2 = 0.10143 - 0.33302 h_1$ ,其中常数项的误差为 1.78%,  $h_1$  的系数误差为 2%,标准方差为  $2.7 \times 10^{-8}$ 。将其变换为  $h_1$ 、 $h_2$  与  $h$  之间的关系得到  $0.985 h_1 + 1.479 \times 2 h_2 = 0.3 = h$ ,这个关系式即为描述主气流和气膜的理论喉道宽度与狭缝气膜冷却式喷管的物理喉道宽度之间关系的经验关系

- 热物理学报, 2007, 28(6): 1016—1018.
- 6 Liu Cunliang, Zhu Hui ren, Bai Jiangtao. Study on the physics of film-cooling effectiveness enhancement by the converging-expanding hole[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(4): 598—604.
- 刘存良, 朱惠人, 白江涛. 收缩-扩张形气膜孔提高气膜冷却效率的机理研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(4): 598—604.
- 7 Li Lan, Hua Weihong, Yuan Shengfu, *et al.*. Theoretical investigation of nozzle with helium film injection at the converge section in CW DF/HF chemical laser[J]. Chinese J Laser, 2009, 36(2): 362—366.
- 李 兰, 华卫红, 袁圣付, 等. 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[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 362—366.
- 8 Li Lan, Hua Weihong, Yuan Shengfu, *et al.*. Numerical analysis of nozzle flow field with gaseous film cooling in CW DF/HF chemical laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(9): 1995—1998.
- 李 兰, 华卫红, 袁圣付, 等. 连续波 DF/HF 化学激光器气膜冷却式喷管流场数值分析[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(9): 1995—1998.
- 9 Yuan Shengfu. Theoretical Design of Lastest Gain Generator for Continuous Wave DF/HF Chemical Laser [D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2002. 29—33.
- 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. 29—33.

栏目编辑: 宋梅梅