

文章编号: 0258-7025(2001)01-0022-03

DF/HF 化学激光器喷管流动数值模拟结果

袁圣付 华卫红 姜宗福 赵伊君

(国防科技大学应用物理系 长沙 410073)

摘要 模拟得到了喉部具有不同等截面段长度的二维喷管流场,指出了音速线随该长度的变化规律和等截面段最佳长度。模拟分析了三种不同方法设计的喷管流场和性能参数,结果表明新方法设计的喷管具有合适的横向速度,提高了喷管对 F 原子“冻结”效率、纵向速度等性能参数,能防止喷管内边界层分离和激波产生。并根据数值模拟得到的速度分布型计算了边界层位移厚度,讨论了 DF/HF 激光器上述三种喷管内边界层发展规律。

关键词 DF/HF 激光器, 喷管性能参数, 边界层分离

中图分类号: TN 248.5 文献标识码: A

Numerical Simulating Results of Nozzle Flow in DF/HF Chemical Lasers

YUAN Sheng-fu HUA Wei-hong JIANG Zong-fu ZHAO Yi-jun

(Department of Applied Physics, National University of Defence Technology, Changsha 410073)

Abstract Two dimensional flow fields in different nozzles, with equal section throat area and different section length have been simulated. The change of sonic line with the section length, and optimum length of the section have been given. The flow fields and the performance of three nozzles designed with different methods, have been simulated and analysed. Results of simulation show that the new method can optimize/promote the performance of nozzle, such as lateral velocity, the efficiency of “freezing” fluorine atom and longitudinal velocity, and also can prevent boundary layer separation and shock wave. Moreover, thickness of boundary layer has been calculated according to the velocity field obtained from simulation. Developing tendency of boundary layer in the nozzle of DF/HF chemical laser has been discussed.

Key words DF/HF chemical laser, nozzle performance, boundary layer separation

1 计算结果及分析

1.1 最佳等截面段长度 l 的确定

我们对 $h^* = 0.2 \text{ mm}$, $0 \leq l \leq 3.0 \text{ mm}$ 的 15 种仅等截面段长度 l 不同的简单型面的楔型喷管进行模拟,考察音速线的变化,讨论 l 的最佳值。在消除边界层厚度后,当 $0 \leq l/h^* \leq 1$ 时,音速线向前弯曲呈抛物型,并随 l 的增大弯曲程度减小;当 $1 < l/h^* \leq 2$ 时,音速线基本上为直线;当 $l/h^* > 2$ 时,音速线向后弯曲呈抛物型,并随 l 的增大弯曲程度增大。其中当 $1 < l/h^* \leq 2$ 时,此时正好满足喷管设计中常作的直音速线假设,从而避免喷管出口处边界层分离和产生激波且可以简化喷管设计。但是下面的计算表明,等截面段不利于 F 原子的“冻结”, l 越小越好,但是过小的 l 不能有效防止烧蚀。对氧化剂喷

管来说, $h^* \in [0.2 \text{ mm}, 1.0 \text{ mm}]^{[1]}$, 所以通常可选取 0.4 mm 作为 l 的最佳值,而且这一长度对 F 原子的“冻结”效率影响又不是很大。

1.2 三种喷管性能参数

图 1 给出了三种喷管 F 原子质量流量 \dot{m}_F 沿流场方向的变化,与文献 [1] 的结论一致。重合主要发生在亚音速段和喉部等面积段,喉部附近 F 重合和 F_2 分解很剧烈,后扩张段重合很慢, F 原子基本上处于完全“冻结”状态。新方法设计的喷管 (NOZ2) 对 F 原子的“冻结”效率要高一些,简单型面的楔型喷管 (NOZ3) 对 F 原子的“冻结”效率最低。由于喷管壁面的活性催化作用, F 原子可以在壁面上重合,这影响了喷管出口尤其是边界层中 F 原子的浓度分布, F 原子沿流场方向上归一化的积分浓度与下面计算出的边界层厚度占喷管壁面高度的百分比沿流场方向的发展是一致的,所以 F 原子的“冻结”与边界层发展密切相关。

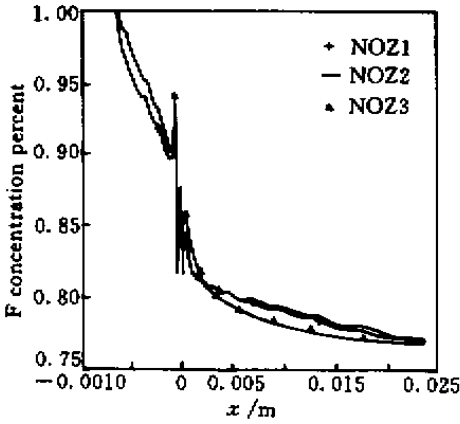


图 1 沿流场方向归一化的 F 原子积分浓度
Fig.1 Normalized integral fluorine concentration along the flowfield

喷管其他出口参数平均值比较如下表：

	\overline{M}_{exit}	\overline{T}_{exit}/K	$\overline{u}_x/m \cdot s^{-1}$	$ \overline{u}_y /m \cdot s^{-1}$
NOZ1	3.485	240.1	1874	43.42
NOZ2	3.556	237.9	1894	49.71
NOZ3	3.571	230.1	1847	147.5

简单型面的楔型喷管(NOZ3)具有很大的横向速度 u_y , 相对较小的纵向速度 u_x , 这正是简单型面的楔型喷管最大的缺点。楔型喷管使得 F 氧化剂流和燃料混合、反应过快, 光腔沿流场方向在较短的距离内迅速升温至激光终止温度, 从而导致激活区相对较短, F 原子可能没有被完全利用; 较大的横向速度也会导致喷管出口强膨胀激波的产生, 这对激光器的性能也会产生不利的影响。由此可预见, 简单型面的楔型喷管组件增益发生器的激活区较短和单模块输出功率相对较小。新方法设计(NOZ2)的喷管具有合适的横向速度 u_y , 较大的纵向速度 u_x , 有利于拉长激活区长度和提高激光的输出功率。值得说明的是, 当选取适当的 $\alpha(M)$ 时, 根据特征线法设计的 NOZ2 喷管性能参数将会进一步改善。

图 2 是两种喷管喉部附近的压力等值线分布。NOZ1 的喉部附近侧壁有较弱的激波产生, 而 NOZ2 的喉部附近侧壁无激波产生且膨胀速度较慢, 流场比较均匀。图 3 是喷管出口附近四个横截面上的压力分布。NOZ2 出口壁面附近正压区范围较大, 逆压梯度区域较小, 出口附近边界层分离的可能性要小些, 喷管出口压力分布更均匀。

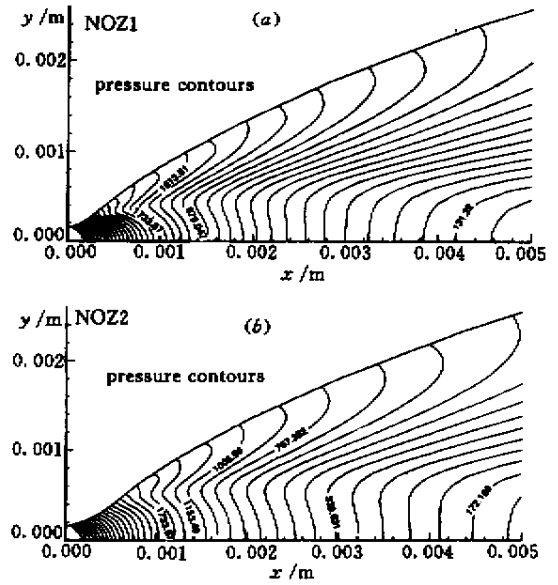


图 2 两种喷管喉部附近的压力分布
Fig.2 Pressure isogram near nozzle throat
(a)NOZ1 ;(b)NOZ2

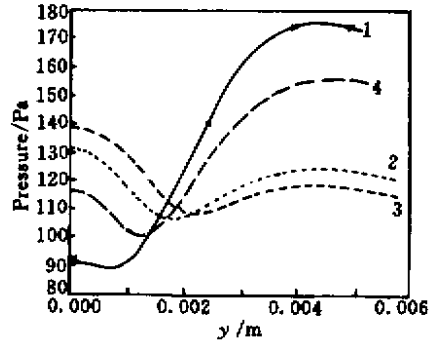


图 3 喷管出口附近压力横向分布
(x_2 为相应喷管的出口位置)
Fig.3 Lateral pressure distribution near nozzle exit
(x_2 : the length of divergence section)

1 : NOZ2 $x_1 = 0.0171$ m ; 2 : NOZ2 $x_2 = 0.024$ m ;
3 : NOZ1 $x_2 = 0.0239$ m ; 4 : NOZ1 $x_1 = 0.01855$ m

1.3 边界层位移厚度

图 4 给出根据公式 $\delta^* = \int_0^{y_w} (1 - u_x/u_{x-axis}) dy$ 得到的扩张段边界层位移厚度随流场的发展情况, y_w 是壁面高度。等截面段边界层位移厚度不能忽略, 约占喉道高度的 15% 左右。喷管有效面积比增加, 喷管内最大马赫数(6.643)大于面积比(39) 确定的马赫数。在扩张段, NOZ1 和 NOZ2 两种喷管边界层发展表现出相同的“折线型”规律, 一元线性回归 $\delta^* = Ax + B$ 的结果如下表。

	A (FS)	A (BS)	B (FS)	B (BS)	x (TP)	CRC (FS)	CRC (BS)
NOZ1	0.242	0.0803	$1.18e-5$	$1.83e-4$	$6.69e-4$	0.994	0.998
NOZ2	0.215	0.077	$7.48e-6$	$2.18e-4$	$1.17e-3$	0.993	0.998
NOZ3	0.08444		$-1.602e-5$			0.9994	

Note: FS: Front section; BS: Back section; TP: Turning point; CRC: Correlation coefficient.

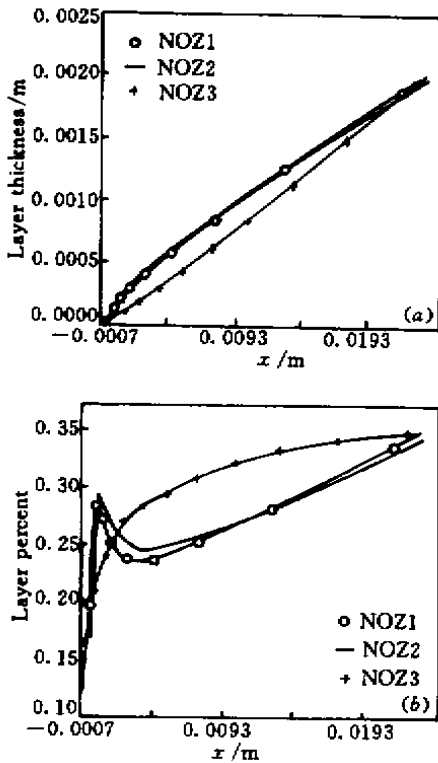


图4 边界层沿流场方向的发展

(a) 边界层厚度沿流场方向的发展;

(b) 边界层厚度占喷管壁面高度的百分比沿流场方向的发展

Fig.4 Development of boundary layer along the flowfield

(a) Development of layer thickness along the flowfield;

(b) Development of layer percent along the flowfield

边界层的发展和壁面曲率半径密切相关, NOZ2 喉部附近曲率半径较大, 膨胀缓慢, 边界层发展缓慢而较薄 (F 原子浓度变化缓慢), 但由于膨胀转折点较远, 所以在喷管扩张段中部, 边界层较 NOZ1 稍厚, 但 NOZ2 内压力梯度小, 边界层发展平缓, 所以最终 NOZ2 的出口边界层薄一些。“折线型”规律与喷管气流膨胀分为核心区 and 变向区是相对应的。

简单型面的楔型喷管 (NOZ3) 内气流没有膨胀变向区, 所以边界层呈“直线型”发展。

2 结论

利用 CS 方法对 DF/HF 激光器喷管的数值模拟结果表明: 对喉道高度 h^* 很小且喉部有等截面段的 DF/HF 化学激光器喷管来说, 等截面段长度 l 的最佳值在 0.4 mm 左右。喷管出口过大的横向速度与喷管出口边界层分离造成气体回流都会导致激活区变短、激光输出功率下降。简单型面的楔型喷管存在出口气流横向速度过大的缺点, 喷管等截面长度及前扩张段设计不当, 将会造成喷管内边界层分离和激波产生。我们提出的方法设计的喷管出口具有合适的横向速度, 且能有效防止喉部附近侧壁边界层分离和产生激波, 减小喷管出口存在分离区的可能性, 能提高喷管对 F 原子的“冻结”效率及喷管出口纵向速度等性能参数, 从而提高激光输出功率、拉长激活区长度和激光器运行稳定性。F 原子“冻结”效率与边界层的发展密切相关, 喉部边界层不可忽略。对存在膨胀变向区的喷管而言, 扩张段边界层位移厚度呈“折线型”规律发展, 简单型面的喷管边界层呈“直线型”发展, 这一结论可以为设计喷管时作边界层修正提供参考。

致谢 本文的完成得到了本校航天技术系空气动力学专业王承尧教授的热情指导, 在此深表谢意。

参考文献

- 1 R. W. F. Gross, J. F. Bott. Handbook of Chemical Lasers. Beijing: Science Press, 1987. 267276 (in Chinese)
- 2 H. Schlichting. Theory of Boundary Layer. Beijing: Science Press, Volume. 1, 1988. 29, 38 (in Chinese)