

文章编号 : 0258-7025(2001)05-0402-05

CW DF/HF 化学激光器性能与流场参数的相互关系

袁圣付 赵伊君 华卫红 姜宗福
(国防科技大学理学院 长沙 410073)

提要 从增益系数、输出功率、激光效率的基本公式出发,得到了 CW DF/HF 化学激光器性能对光腔中 F 和 D₂/H₂ 反应区流场参数的依赖关系。利用数值模拟结果对该关系进行了验证。给出了提高 CW DF/HF 化学激光器性能的 F 和 D₂/H₂ 反应区流场参数要求,为 CW DF/HF 化学激光器喷管设计提供了依据。

关键词 CW DF/HF 化学激光,增益系数,输出功率,激光效率,数值模拟

中图分类号 TN 248.5 文献标识码 A

Dependence of CW DF/HF Chemical Laser Performance on the Flowfield Parameters

YUAN Sheng-fu ZHAO Yi-jun HUA Wei-hong JIANG Zong-fu
(Science College, National University of Defence Technology, Changsha 410073)

Abstract The relation between CW DF/HF chemical laser performance and the flowfield parameters in F&D₂/H₂ reacting zone has been studied based on the original formula of gain coefficient, output power and laser efficiency. The relation is proved by simulation results and others' experiments and provides a criterion to optimize the nozzle design and CW DF/HF chemical laser performance.

Key words CW DF/HF chemical laser, gain coefficient, output power, laser efficiency, numerical simulation

1 引言

喷管组件是化学激光器产生高增益激光工作介质的核心部件。喷管组件设计的最终目标是使激光器具有尽可能好的性能参数:即光腔内的激光工作介质具有尽可能高的增益和激光器具有尽可能高的输出功率和效率。喷管组件能够控制和改变喷管出口流场参数,进而影响光腔中 F 和 D₂/H₂ 的反应区流场参数(轴向速度 u ,混合速度 v ,气体密度 ρ ,温度 T ,F 原子浓度 c_F 等)对于确定的总温和总压,不同的喷管组件只是改变了光腔中 F 和 D₂/H₂ 的反应区的流场参数,而这将导致化学激光器具有不同的性能参数。所以,激光器的性能参数由光腔中 F 和 D₂/H₂ 的反应区的流场参数决定。因此,喷管组件设计首先必须讨论和解决的问题是激光器性能与光腔反应区流场参数的相互关系。本文对这一问题进行了探讨并对所得结论进行了验证。

2 理论分析

2.1 增益对流场参数的依赖关系

单个 $V-R$ 跃迁的小信号系数^[1]

$$\alpha(\nu, J, m) = \left(\frac{hN_A}{4\pi}\right)\alpha(\nu, J, m)\Phi\rho B(\nu, J, m)(2J+1) \times \left[\frac{n(\nu+1)}{Q_{rot}^{\nu+1}}\exp\left(-\frac{hc}{k}\frac{E_{\nu+1, J+m}}{T}\right) - \frac{n(\nu)}{Q_{rot}^{\nu}}\exp\left(-\frac{hc}{k}\frac{E_{\nu, J}}{T}\right)\right] = \alpha(\nu, J, m) \cdot \alpha_{\nu}(\nu, J, m) \quad (1)$$

其中, $Q_{rot}^{\nu} = 1 + \sum_{j=1}^{\nu} (2j+1)\exp\left(-\frac{hc}{k}\frac{E_{\nu, j}}{T}\right)$, $\nu = 0, 1, \dots$ 为振动能级 ν 的转动配分函数,其余变量按通常约定,具体含义可参考原文献。

$$\alpha_{\nu}(\nu, J, m) = \frac{n(\nu+1)/n(\nu)}{Q_{rot}^{\nu+1}}\exp\left(-\frac{hc}{k}\frac{E_{\nu+1, J+m}}{T}\right) - \frac{1}{Q_{rot}^{\nu}}\exp\left(-\frac{hc}{k}\frac{E_{\nu, J}}{T}\right)$$

$$\alpha_{\nu}(\nu, J, m) = \left(\frac{hN_A}{4\pi}\right)\alpha(\nu, J, m)\Phi\rho \cdot B(\nu, J, m)(2J+1)n(\nu)$$

$\alpha(\nu, J, m)$ 与流场有关的参数是温度 T 和上、下振动能级占据粒子数比 $n(\nu + 1)/n(\nu)$ 。以 DF 的 $P_2(9)$ 谱线为例, 则 $\nu = 1, J = 9, m = -1$ 。取 $n(2)/n(1)$ 从 0 到 2, 温度 T 从 10 ~ 2500 K, $Q_{rot}^{(\nu)}$ 取经典极限公式^[1]

$$[Q_{rot}^{(\nu)}]^{-1} = hc\alpha [Y_{01} + Y_{11}(\nu + 0.5)]/\kappa T$$

对 $\alpha(\nu, J, m)$ 进行计算, 结果如图 1。由图可知, 在相同的温度下, $n(2)/n(1)$ 越大, 对应的 $\alpha_1(1, 9, -1)$ 越大; 对于确定的 $n(2)/n(1)$, 随温度的上升, $\alpha_1(1, 9, -1)$ 先增大至最大值然后逐渐减小, 当温度高于某值时, $\alpha_1(1, 9, -1) < 0$, 激光工作介质具有吸收特性。随 $n(2)/n(1)$ 减小, $\alpha_1(1, 9, -1)$ 的最大值对应的温度是逐渐减小的。对于其他谱线, $\alpha_1(\nu, J, m)$ 表现出相同规律。

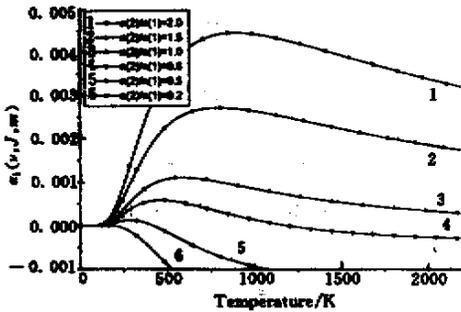


图 1 SSG 系数与温度 T 及能级粒子数比 $n(2)/n(1)$ 的关系

Fig. 1 SSG coefficient as a function of temperature and population inversion ratio $n(2)/n(1)$

在实际的化学激光器中, 喷管出口附近的反应区内, $n(\nu + 1)/n(\nu)$ 很大, 沿流场向下游发展, 由于碰撞去激活和激射作用, $n(\nu + 1)/n(\nu)$ 逐渐减小, 激发态粒子最终回到基态。设计喷管组件时总希望获得尽可能高的增益, 最理想的状况是光腔内沿流场向下游的每一个横截面增益都最大。相应地, 上述规律决定了光腔内反应区温度沿流场方向必须按一定规律逐渐递减。由于光腔中反应放热和碰撞去激活产生废能, 光腔内沿流场方向温度逐渐上升。在此情况下, 反应区在一定范围内选择较低的温度, 可能使较多的 $n(\nu + 1)/n(\nu)$ 取值对应的 $\alpha_1(\nu, J, -1)$ 在最大值附近, 从而实现增益系数的提高。对于 $\alpha_1(\nu, J, m)$, 在没有激射发生时, $\alpha_1(\nu, J, -1)$ 与 $\rho, n(\nu)$ 成正比。

要实现尽可能高的增益 $\alpha_1(\nu, J, m)$, 式(1)中的 $\alpha_1(\nu, J, m)$ 和 $\alpha_2(\nu, J, m)$ 越大越好。一定范围内,

较低的反应区温度有利于 $\alpha_1(\nu, J, m)$ 的增大。提高光腔内反应区激光工作介质密度 ρ 和 F 原子浓度可以使 $\alpha_2(\nu, J, m)$ 增大; 同时, 提高 F 原子浓度也可以实现 $n(\nu + 1)/n(\nu)$ 的增大, 从而也会使 $\alpha_1(\nu, J, m)$ 增大。

2.2 功率对流场参数的依赖关系

有激射存在且采用平面平行腔的 DF/HF 化学激光器输出功率^[2]可表示为

$$\frac{P}{HN} = \begin{cases} cuvm\{m_1 - 1\}E_r\alpha(m_2k_{XF}) & l_f^* \leq 1 \\ 0.5cu\alpha(n_F)_0L(m_1 - 1) - (m_2/8m_3)\alpha(n_F)Lk_{XF}/v & l_f^* = 1 \end{cases} \quad (2)$$

c 为常数, k_{XF} 为激发态工作介质与其基态的碰撞去激活速率, v 为氧化剂流与燃料流的混合速度, $(n_F)_0$ 为氧化剂流中 F 原子浓度, E_r 为反应热, L 可以近似认为是氧化剂被完全反应消耗时的横向平均宽度, u 为激光工作介质气流的轴向速度, ρ 为气体密度。 m_1, m_2, m_3 是温度的函数

$$\begin{aligned} m_1 &= [3 + 2\exp(-2J'\delta) + \exp(-4J'\delta)] \\ &\quad \{1 + \exp(-2J'\delta)\} [1 + \exp(-4J'\delta)] \\ m_2 &= [1 + 2\exp(-2J'\delta) + 3\exp(-4J'\delta)]/6 \\ m_3 &= [1 + \exp(2J'\delta)] [1 + \exp(-4J'\delta)] \end{aligned}$$

其中 $J' = 2J + 1, \delta = T_R/T, T_R$ 为转动特征温度。

$$l_f^* = \begin{cases} 4m\{m_1 - 1\}(\Phi_2) & 4m\{m_1 - 1\}(\Phi_2) \leq 1 \\ 1 & \text{其他情况} \end{cases}$$

$\Phi = \alpha(n_F)_0k_{XF}L/v, \Phi$ 的物理意义是激发态的激光介质去激活速率与激发态工作介质的生成速率之比, $l_f^* = 1$ 表示 F 原子被反应完全消耗 (H_2/D_2 通常过量), N, H 分别为反应区的个数 (对应喷管的个数) 和喷管高度。

由(2)式可知, P 随 u, v 的增加而增加, 而且在其他参数不变, F 原子没有被反应完全消耗时, P 与 u, v 都是线性关系。在其他参数不变的情况下, 当 ρ 较小时, Φ 较小, $l_f^* = 1$, 所以 P 随 ρ 的增加按抛物线规律增加; 当

$$\rho \geq \rho_c, \rho_c = 4vm\{m_1 - 1\} [m\alpha(n_F)_0k_{XF}L]$$

时, P 随 ρ 的增加而不再改变。分析(2)可知 ρ 与 $(n_F)_0, L$ 对 P 的增大具有相同规律。在 $v, (n_F)_0, L$ 不变时, ρ_c 只是温度 T 的函数。以 DF 化学激光为例, 取 k_{XF} 为^[1]

$$k_{DF}(\nu) = \nu(1.2 \times 10^{14}T^{-1} + 1.4 \times 10^2T^{2.96})$$

$T_R = 30.16 \text{ K}^{[1]}$, 通过数值计算可知, ρ_c 随温度的降低而增大, 在其他参数相同时, P 随温度的降低而增

大。所以， P 与密度 ρ 以及温度 T 的关系如图 2。

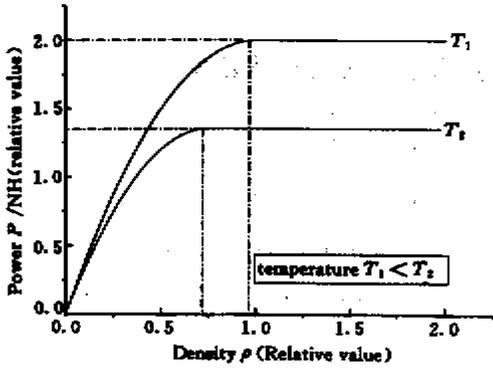


图 2 输出功率 P 和温度 T 及密度 ρ 的关系 (u, v 不变)

Fig.2 Output power P vs density ρ at different temperature

由上述分析可知,要获得尽可能高的输出功率 P ,可采用以下途径:提高反应区气流的轴向速度 u ,反应流混合速度 v 和 F 原子浓度,维持光腔反应区流场具有较低的温度,反应区流场密度 ρ 足够大 ($\rho \geq \rho_c$)。

2.3 效率对流场参数的依赖关系

与 (2) 式对应的效率 η 公式^[2] 为

$$\eta = \begin{cases} 2cm_3(m_1 - 1)^2(m_2\Phi) & l_f^* \leq 1 \\ d[(m_1 - 1) - m_2\Phi/8m_3] & l_f^* = 1 \end{cases}$$

各变量含义同上。对于确定温度,激光器的效率 η 随着 Φ 的增大,先线性降低,当 $\Phi > \Phi_c$ ($\Phi_c = 4m_3(m_1 - 1)/m_2$) 时, η 随着 Φ 的增大按双曲线规律下降。数值计算可知: Φ_c 和 Φ 对应的激光器效率 η 都随温度 T 的降低而增大,所以激光器的效率 η 与 Φ 及温度 T 的关系如图 3。

由图可知,激光效率强烈地依赖光腔内反应区温度和综合变量 Φ 。F 和 D_2/H_2 反应区具有较低的温度并保持其在沿流场方向的低温状态;增加反应

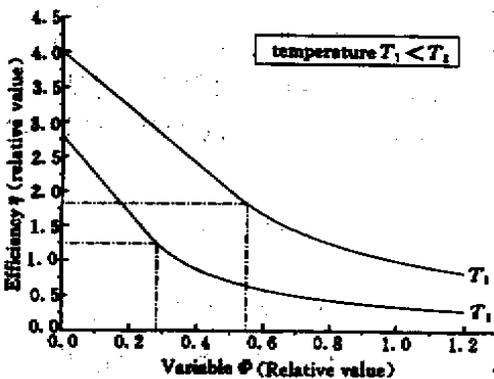


图 3 效率 η 和温度 T 及综合变量 Φ 的关系

Fig.3 Efficiency η at different temperature T vs variable Φ

流的混合速度 v 并适当减小喷管尺寸以减小 L 从而使 Φ 较小,可以实现激光器的高效率。

2.4 增益、功率和效率的关系

上述讨论中,增益、功率、效率是分开进行的。三方面往往表现出一定的矛盾性。如在给定的温度 T 确定的反应流轴向速度 u 和混合速度 v 的条件下,提高腔压将导致反应区密度 ρ 的增大。由上述分析结果可知,功率将在一定范围内得到提高,但使 Φ 增加,导致激光器化学效率下降;且由于废能增加,沿流场方向上单位距离内升温更快,从而导致在更短距离内激射终止,激活区长度变短。这些结果在我们以前的模拟中已经得到证明^[3]。降低 F 原子浓度, Φ 减小,效率可以提高,但增益和功率下降。实际设计中,可以综合考虑,均衡各个方面的性能。如强调输出功率的要求,则密度应该足够大,而通过设计反应区流场温度和混合速度 v 来保证效率。

综合三方面的因素,可得到如下结论:提高 F 和 D_2/H_2 反应区的 F 原子浓度和反应流的轴向速度 u ,降低反应区的温度 T ;提高与 u 对应的反应流混合速度 v ,并选择较高反应流密度 ($\rho \geq \rho_c$);即要求气动上设计出 F 原子冻结效率很高、喷管有效面积比很大、反应流混合速度很快且混合区处于核心流的喷管。

3 结果验证

特别强调的是,本文所指的流场参数 (u, v, P, T, c_F) 是指激发态激光工作介质 $DK(\nu)/HR(\nu)$ 对应的流场参数,或者是指 F 与 D_2/H_2 发生混合反应区域的流场参数,而不一定是指喷管出口的气流参数。对于传统 2-slot 喷管,光腔前端两股反应气流都是来自喷管边界层内且靠扩散混合。边界层内气流参数的典型特征是:速度低,温度高,压力高,F 原子浓度低,所以在使用传统 2-slot 喷管的激光器光腔内,反应区流场参数具有边界层气流参数的特征。提高 2-slot 喷管面积比,喷管出口气流速度的提高却可能会使激光器性能下降^[4,5]。对于 HYLTE 喷管,由于 D_2/H_2 喷管横向射流的穿透效应^[6],F 与 D_2/H_2 发生反应的区域在氧化剂喷管轴线附近的核流。流场参数的典型特征是:速度高,温度低,压力低,F 原子浓度高。而且射流将扭曲和拉伸反应界面^[7],反应流有效混合速度较大。根据前面的结论知:使用 HYLTE 喷管的激光器性能较 2-slot 喷管好得多,这与已有实验结果是一致的。HYLTE 喷管命名本身

说明其追求反应流参数的高速和低温特性⁸¹。

为了进一步对 CW DF/HF 激光性能与流场参数的相互关系进行验证,设定传统 2-slot 氧化剂喷管的壁面温度分别为 300 K, 400 K, 500 K, 800 K, 利用文献[9]中的控制方程,模拟得到了激光性能参数。壁面温度降低将导致喷管边界层内温度和喷管出口

平均温度降低,对于通过边界层内气流混合反应的 2-slot 喷管来说,反应区温度将降低。根据前面的结论,激光性能应得到提高。这与小信号增益系数(如图 4), F-P 腔输出功率(如图 5)以及化学效率(如图 6)的模拟结果是一致的。

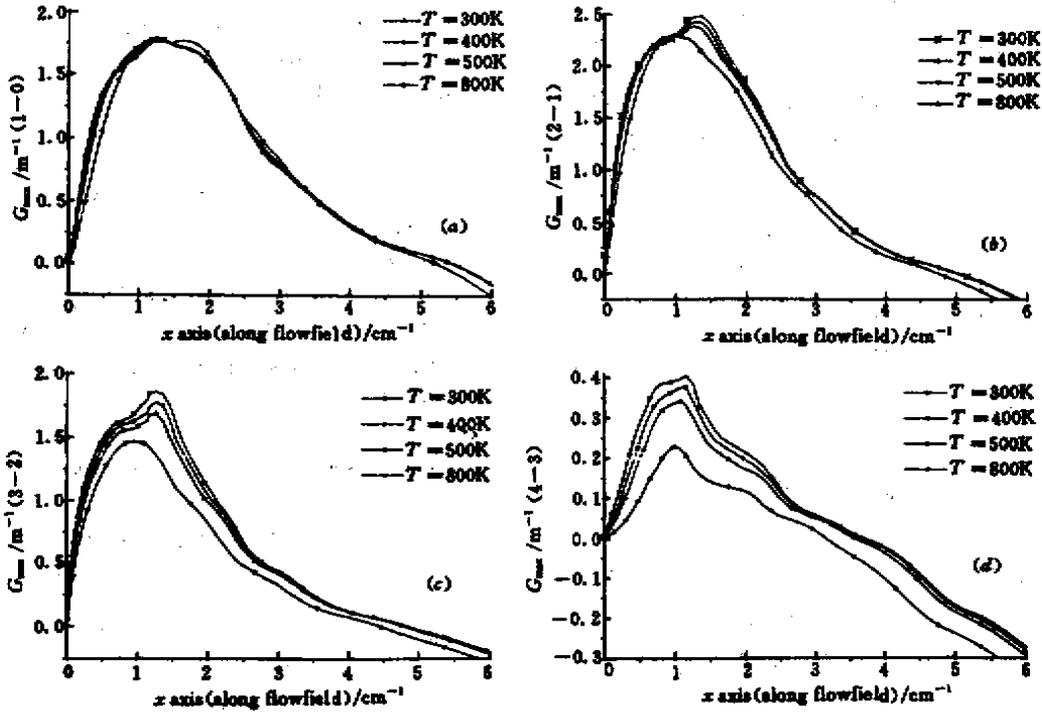


图 4 最大小信号增益

(a) $V=1 \sim V=0$ 跃迁 (b) $V=2 \sim V=1$ 跃迁 (c) $V=3 \sim V=2$ 跃迁 (d) $V=4 \sim V=3$ 跃迁

Fig.4 Maximum SSG of $V=1 \sim V=0$ (a), $V=2 \sim V=1$ (b), $V=3 \sim V=2$ (c) and $V=4 \sim V=3$ (d) lasing distribution along flowfield

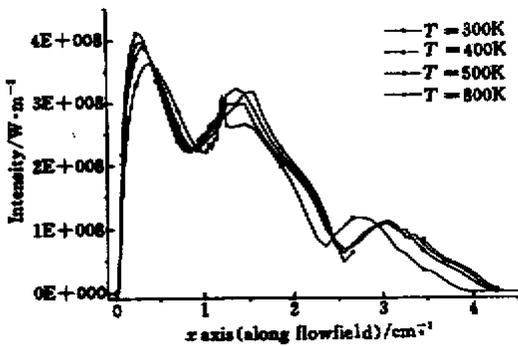


图 5 不同氧化剂喷管壁温下的光腔平均辐射强度沿流场分布

Fig.5 Radiation intensity distribution along flowfield in the optical cavity with different oxidant nozzle wall temperature

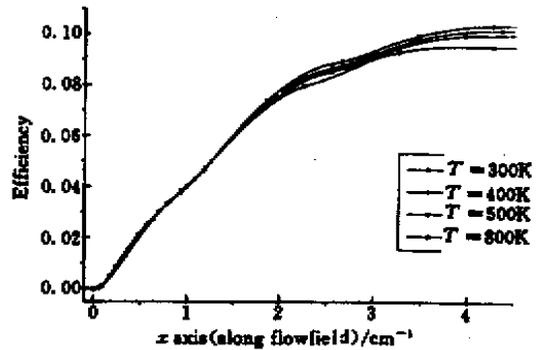


图 6 不同氧化剂喷管壁温下的光腔内平均化学效率沿流场的分布

Fig.6 Chemical efficiency distribution along flowfield in the optical cavity with different oxidant nozzle wall temperature

4 结论和讨论

本文根据 DF/HF 化学激光的基本理论公式和模型结论,从激光器性能参数出发,得到了高性能所

需要的反应区流场气动参数,为喷管性能评判和气动设计提供依据。

喷管组件设计的最终目标是得到尽可能高的激光增益、输出功率和化学效率。对 DF/HF 化学激光的增益系数、输出功率和化学效率的基本公式研究结果表明,DF/HF 化学激光器喷管组件设计标准是提高光腔内 F 和 D_2/H_2 反应区的 F 原子浓度和反应流的轴向速度 u ,降低反应区的温度 T ,提高与 u 对应的反应流混合速度 v 。即在气动设计上要增大喷管有效面积比,以增大喷管出口轴向速度和降低喷管出口温度,提高 F 原子的冻结效率;采用适当的混合方式使反应区流场参数符合上述分析结果,避免反应流在边界层区域混合。

DF/HF 化学激光增益对流场参数的依赖关系表明,最理想的增益对应的反应区温度沿流场方向是递减的。但温度递减应满足的规律,以及如何通过光腔罩板设计或加入稀释剂使得该规律得到满足都有待进一步讨论。

化学激光是根据化学的原理,利用气动的手段,来实现光学的性能。本文的讨论方法,即从光学性能参数(增益、功率和效率)出发,依据其化学原理和激光机制,得出高性能激光对应的流场参数,为气动设计和改进提供依据,也可供研究其他激光体系时参考。

参 考 文 献

- 1 R. W. F. Gross, J. F. Bott. Handbook of Chemical Lasers. Beijing: Science Press, 1987. 260 267 ~ 269 (in Chinese)
- 2 J. E. Broadwell. Effect of mixing rate on HF chemical laser performance. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(4): 962 ~ 967
- 3 Hua Weihong, Jiang Zongfu, Zhao Yijun. The performance of CW DF chemical laser under high cavity pressure. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 1997, **9**(2): 221 ~ 226 (in Chinese)
- 4 Hua Weihong, Jiang Zongfu, Zhao Yijun. Nozzle design in cw hydrogen fluoride chemical laser. *SPIE*, 1996, **2889**: 135 ~ 140
- 5 V. K. Rebone, M. A. Rotinyan *et al.*. Influence of the Mach number of the oxidant flow on the energy and gasdynamic characteristics of a supersonic cw chemical HF laser with a radial-expansion nozzle array. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1998, **25**(2): 119 ~ 122 (in Russia)
- 6 F. S. Billing, R. C. Orth, M. Lasky. A unified analysis of Gaseous jet penetration. *AIAA Journal*, 1971, **9**(6): 1048 ~ 1058
- 7 Richard J. Driscoll. Effect of reactant-surface stretching on chemical laser performance. *AIAA Journal*, 1984, **22**(1): 65 ~ 74
- 8 William A. Duncan, Stanley P. Patterson *et al.*. Overtone research, advanced chemical laser module design. *SPIE*, 1994, **2119**: 46 ~ 57
- 9 Hua Weihong, Jiang Zongfu, Zhao Yijun. Numerical simulation of CW DF chemical lasers—performance of different fuels and diluents. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, **25**(3): 179 ~ 204 (in Chinese)