

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0019-04

燃烧驱动气动 CO₂ 激光器小信号增益的理论计算

王云萍¹ 姜宗福² 范东启¹ 李明¹ 乔广林¹

(¹ 63921 部队, 北京 100094 ² 国防科技大学理学院, 长沙 410073)

提要 将喷管一维守恒气动力学方程与分子的振荡弛豫方程联立, 计算了燃烧驱动气动 CO₂ 激光器激光介质的的小信号增益沿流场方向的变化, 小信号增益分别随燃烧室温度、压强及不同组分配比变化。计算结果表明, 气动 CO₂ 激光器介质增益区较长且变化缓慢; 较高的燃烧室温度、压强和 CO₂ 分子含量以及较低 H₂O 含量是产生较高增益的必要条件。

关键词 燃烧驱动, CO₂ 激光器, 小信号增益, 理论计算

中图分类号 TN248.2⁺2 **文献标识码** A

Numerical Simulation of Combustion-Driven Gas-Dynamic CO₂ Lasers Small Signal Gain

WANG Yun-ping¹ JIANG Zong-fu² FAN Dong-qi¹ LI Ming¹ QIAO Guanglin¹

(¹ Beijing Institute of Telecommunication and Tracking, Beijing Postbox 5131, 100094
² Institute of Directed Energy Technology, National University of Defence Technology, Changsha 410073)

Abstract The distribution of the small signal gain of the combustion-driven gas-dynamic CO₂ laser along the gas active medium flow direction is calculated numerically when the temperature, pressure and compositions fraction ratio of the combustion cabin are different. The calculation results show that the small signal gain distribution of the combustion-driven gas-dynamic CO₂ laser changes slowly, and the higher temperature and pressure and lower fraction ratio of the H₂O can produce the high gain.

Key words combustion-driven, CO₂ laser, small signal gain, numerical simulation

1 引言

伴随着气动激光器的发展, 人们从理论和实验上对激光器的各个部件进行了研究, 不断地对其进行优化和改进设计, 以提高激光器的输出功率和运转效率。小信号增益系数描述激光介质微观统计状态, 是反映激光器宏观性能的最基本的一个参量。可以通过对小信号增益系数的分析, 研究能级的粒子数分布、介质的弛豫过程, 寻求激光介质最佳的组合配比、激光器运转的最佳条件, 从而改进激光器件各部分的设计、提高激光器的功率和效率。本文将对燃烧驱动气动 CO₂ 激光器激光介质的的小信号增益进行理论计算。

2 燃烧驱动气动 CO₂ 激光器系统组成

气动 CO₂ 激光器系统主要由四部分组成: 燃烧

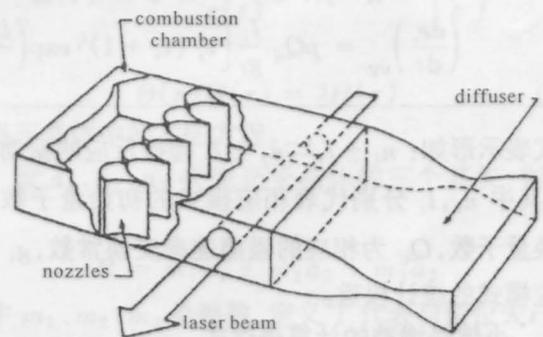


图1 燃烧驱动气动 CO₂ 激光器结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of a combustion-driven gas dynamic CO₂ laser

室、拉瓦尔喷管、光腔和扩压器, 如图1所示。在燃烧室中燃料与高压空气混合燃烧后产生的高温、高压 CO₂, N₂, H₂O 等混合气体, 通过一组拉瓦尔喷管组件, 利用气体膨胀动力过程中 CO₂ 分子的差分弛

豫过程^[1]形成粒子数反转,输出激光。

3 燃烧驱动气动 CO₂ 激光器小信号增益的理论计算

燃料与高压空气充分混合形成的燃烧室化学平衡条件,包括燃烧室温度、气体组分及其所占的摩尔百分比、混合气体的分子量、总焓、气体常数等参数的有关计算可参考文献[2]。若已知燃烧室的化学平衡条件,则将气体动力学方程和振动弛豫动力学方程联立求解,可得到介质的小信号增益。

3.1 喷管非平衡流的数学模型

描述气体流经拉瓦尔喷管的膨胀过程,通常采用一维近似。在假定不考虑扩散、粘性、热传导的情况下,一维守恒形式的气体动力学方程组为:

参量守恒方程:

$$h + u^2/2 = \text{const} \quad (1)$$

动能守恒方程:

$$\rho u \frac{du}{dx} = - \frac{dP}{dx} \quad (2)$$

质量守恒方程:

$$\rho u F = \text{const} \quad (3)$$

热力学状态方程:

$$\frac{P}{\rho} = \frac{RT}{\mu} \quad (4)$$

式中 P, ρ, u, T 分别为气体的压强、密度、流动速度和温度。 h 为气体的焓, x 为气流方向坐标, F 为流动截面积, μ 为气体的分子量, R 为通用气体常数。

能量方程由下述不同分子振动能级的振动弛豫方程补充: CO₂ (10°0), CO₂ (02°0), CO₂ (00°1), N₂ ($\nu=1$), CO ($\nu=1$), O₂ ($\nu=1$)。假定 H₂ 和 H₂O 分子都处于热力学平衡态。

3.2 振动弛豫方程

对于参与反应的每一个分子的每一种振动模式,描述相应振动能变化的弛豫方程用下式表示:

$$\frac{de_i}{dt} = \left(\frac{de_i}{dt} \right)_{VT} + \left(\frac{de_i}{dt} \right)_{V-V} \quad (5)$$

对于一维定常流,上式改写为:

$$u \frac{de_i}{dx} = \left(\frac{de_i}{dt} \right)_{VT} + \left(\frac{de_i}{dt} \right)_{V-V} \quad (6)$$

其中

$$e_i = \frac{1}{\exp(\theta_i/T_i - 1)}, \quad \theta_i = \frac{h\nu_i}{k}$$

θ_i, ν_i, T_i 分别为每一振动模式的特征振动温度、振动频率及振动温度。上式左边用每一振动自由度的平均振动量子数表示分子 i 模式振动能的变化;右边第一项表示由于平动-振动碰撞过程而导致的振动能的变化;右边第二项表示由于振动-振动碰撞而导致的振动能的变化。

右边第一项为:

$$\left(\frac{de_i}{dt} \right)_{VT} = \frac{P}{\tau_{VT}} (\sigma_i - e_i), \quad \tau_{VT} = 1 / \left[\sum \xi_s / \tau(s) \right]$$

$\tau(s)$ 为分子 i 模式同参与碰撞的 s 模式分子之间的弛豫时间, ξ_s 为 s 模式对应的摩尔组分。

右边第二项为:

$$\left(\frac{de_i}{dt} \right)_{V-V} = p Q_{ij} \frac{l_i}{g_i} \left[e_j' (e_i + 1)^{l_i} \exp\left(\frac{l_j \theta_j - l_i \theta_i}{T}\right) - e_j' (e_j + 1)^{l_j} \right], \quad Q_{ij} = \sum \xi_s Q_{ij}(s)$$

上式表示形如: $n_i \pm l_i \leftrightarrow n_j \pm l_j$ 碰撞反应的振动变化。其中 n_i, l_i 分别代表相应模式的初始量子数和交换量子数, Q_{ij} 为相应的碰撞速率交换常数, g_i 为相应模式的统计权重。

3.3 小信号增益的计算表达式

小信号增益定义为光强度趋于无限小时,光在单位传播距离内光强增加的百分比,由激活介质上下能级的粒子数密度决定。考虑 CO₂ 分子 001~100 能级振-转跃迁中波长为 10.6 μm 的 P(20) 支的小信号增益。增益系数的计算表达式为^[3]:

$$G_0 = A_{mn} \frac{\lambda^2}{8\pi^{3/2} c} \left(N_m - \frac{g_m}{g_n} N_n \right) \frac{a}{\Delta_c} H(a, 0) \quad (6)$$

上式中激光上、下能级粒子数密度的表达式为:

$$N_n = \frac{P \xi_{\text{CO}_2}}{T} \frac{2\theta_{100}}{T} \frac{g_n}{\theta_\nu} \exp\left[-\frac{\theta_{100}}{T} J_n (J_n + 1) - \frac{\theta_1}{T_1}\right]$$

$$N_m = \frac{P \xi_{\text{CO}_2}}{T} \frac{2\theta_{100}}{T} \frac{g_m}{\theta_\nu} \exp\left[-\frac{\theta_{100}}{T} J_m (J_m + 1) - \frac{\theta_3}{T_3}\right]$$

$$g_i = 2J_i + 1, \quad J_m = 19, \quad J_n = 20$$

$$Q_\nu = \prod_{i=1}^3 \left[1 - \exp\left(-\frac{\theta_i}{T_i}\right) \right]^{-g_i}$$

$$a = \frac{\Delta_c}{\Delta_d} \sqrt{\ln 2}, \quad \Delta_c = P \frac{300}{T} \sum_i (\Delta_c^0)_i \xi_i$$

$$A_{mn} = 0.187 \text{ s}^{-1}, \quad \Delta_d = \frac{1}{\lambda_c} \sqrt{\frac{2RT \ln 2}{\mu_{\text{CO}_2}}}$$

$$\theta_{100} = 0.5612 \text{ (K)}, \quad \theta_{001} = 0.5568 \text{ (K)}$$

$$\theta_1 = 1920 \text{ (K)}, \quad \theta_2 = 3380 \text{ (K)}$$

T_1, T_3 分别为 CO₂ 分子 10⁰, 00¹ 能级的振动温度 Foint 函数按下式近似估算:

$$H(a, 0) = \begin{cases} \exp(a) \\ 2(1 - \operatorname{erfa}), & a \leq 2.444 \\ \frac{1}{a\sqrt{\pi}} \left(1 - \frac{0.5}{a^2} + \frac{0.75}{a^4} \right), & a > 2.4444 \end{cases}$$

式中
$$\operatorname{erfa} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^a \exp(-Z^2) dZ$$

由气动方程组与振动弛豫方程联立, 利用数值积分方法可求得各个变量; 再将其代入(6)式, 即可得介质的增益。

4 计算结果及分析

4.1 介质小信号增益沿流场方向的变化

由图 2 小信号增益沿流场方向的变化曲线可见, 从喉部到喷管出口小信号增益沿流场方向迅速增大。原因是 CO₂ 低能级分子在 H₂ 分子的作用下快速去激活, 低能级粒子数密度急剧下降, 粒子数加大, 小信号增益因此而增大。虽然此时 CO₂ 分子高能级的分子也被激活, 但这个速度非常慢, 如图 3 所示。当 CO₂ 低能级分子在 H₂O 分子的作用下与气体平动温度振动趋于平衡时, 介质的小信号增益即达峰值。对于气动 CO₂ 激光器介质, 其增益区较长且变化缓慢, 在图 2 条件下在喉部下游 200 mm 处, 仍有 0.6 m⁻¹ 较高的增益存在, 这点对于如何选择激光器轴的位置及光腔的尺寸极为重要。实际条件下由于边界层的作用, 增益变化梯度很大, 即气流密度变化很大, 这将

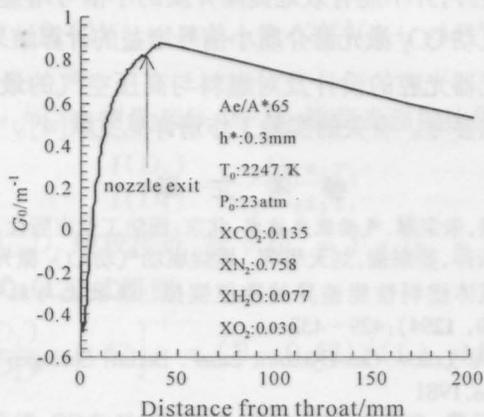


图 2 介质小信号增益沿流场的变化曲线

Fig. 2 Distribution of the small signal gain along gas flow direction

影响输出激光的光束质量; 又由于气流方向一定范围内增益变化缓慢, 所以腔轴应适当后移, 这样既改善了光束质量对功率提取也无较大影响。

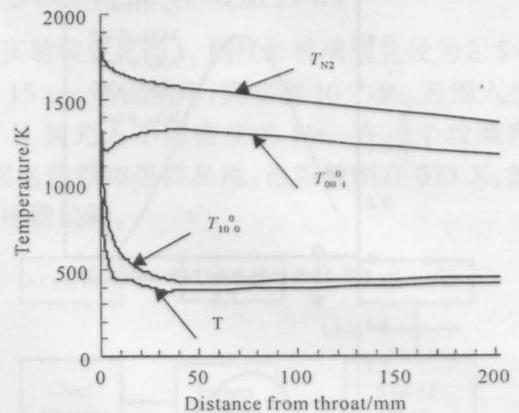


图 3 气体的平动温度 T , CO₂ 分子振动温度 T_{001} , T_{100} 及 N₂ 分子 T_{N_2} 沿流场的变化曲线

Fig. 3 Profile of the medium temperature T , vibrating-temperature T_{001} and T_{100} of CO₂, T_{N_2} of N₂ along gas flow direction

图 3 给出在图 2 条件下, CO₂ 分子上下能级的振动温度和平均温度沿流场方向的变化曲线。CO₂ 分子高能级与 N₂ ($\nu=1$) 能级的振动能量接近, 并且弛豫很慢; CO₂ 分子低能级分子在 H₂O 分子的作用下, 弛豫速度非常迅速, 与气体的平动温度很快趋于平衡。正是 CO₂ 分子高低能级振动弛豫速率的差别, 形成了粒子数的反转, 输出激光。

图 2 中 A_e 为喷管出口面积, A^* 为喷管喉部面积, h^* 为喉道高度, T_0 为燃烧室温度 (K), X_{CO_2} : CO₂ 分子的摩尔面分比。以下各图同理。

4.2 激活介质小信号增益随燃烧室条件的变化

图 4 给出喷管出口小信号增益随燃烧室条件的变化曲线。图 4(a) 分析, 在较低的燃烧室温度时, 由于燃烧室中总的振动能在增加, 所以小信号增益随燃烧室温度的增益而快速增加。但另一方面, 振动弛豫速率也在随温度的升高而增加; 燃烧室温度的升高也使其喷管出口的温度升高, 而 CO₂ 分子低能级的振动温度与气体的平动温度趋于平衡, 因此低能级粒子数随之增加。由于这两方面的原因, 小信号增益会出现峰值。峰值的大小及其出现的位置由喷管的形状、大小以及燃烧室的压强、气体的组分配比来决定。

在图 4(b) 中, 燃烧室压强较低时, CO₂ 分子的粒子数密度随压强的升高而增加, 小信号增益迅速增大。当压缩继续增加时 (大于 20 atm), 介质的小信号增益随压强几乎呈线性下降。这是由于压强的

进一步增加,加快了分子振动的弛豫过程,使得 CO_2 激光上能级与 N_2 分子的第一振动能级($\nu=1$)分子

快速激活,气体的非平衡膨胀快速趋于平衡,反转粒子数不断减少,从而小信号增益不断下降。

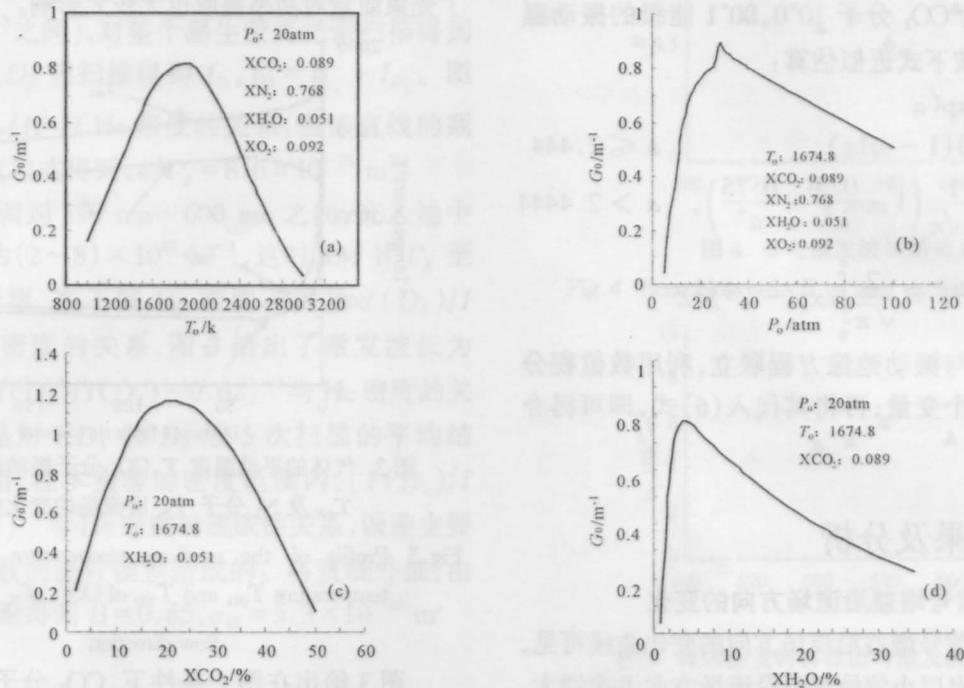


图4 喷管出口小信号增益系数随燃烧室条件的变化曲线。(a) 随燃烧室温度变化曲线; (b) 随燃烧室压强变化曲线; (c) 随 CO_2 分子摩尔浓度变化曲线; (d) 随 H_2O 分子摩尔浓度变化曲线

Fig. 4 Curves of the small signal gain G_0 at the nozzle exit under different conditions. (a) G_0 vs the combustion chamber temperature T_0 ; (b) G_0 vs the pressure of the chamber P_0 ; (c) G_0 vs XCO_2 the mole percent of CO_2 ; (d) G_0 vs XH_2O the mole percent of H_2O

在图4(c)中, CO_2 分子摩尔浓度小于20%时,小信号增益随 CO_2 分子浓度的增加而增加;之后,小信号增益系数开始下降。原因在于随着 CO_2 分子数的增加,分子间碰撞加剧,导致上能级去激活,上能级的粒子数减少,小信号增益下降。

H_2O 分子浓度对小信号增益系数的影响如图4(d)所示。 H_2O 分子对 CO_2 分子高能级和低能级均有作用。与 CO_2 低能级的分子碰撞使其去激活,同时也会使高能级的分子碰撞去激活。从图中可以看出,对于只含 CO_2 和 N_2 的混合气体,根本不会有增益产生。如果混合气体中含有少量的 H_2O 分子,将出现增益,而且增益急剧增加。在含 H_2O 量较小的范围内, H_2O 分子对激光下能级的去激活作用占了主导地位。而当 H_2O 占的比例很大时,其对激光高能级分子的去激活作用将占据主导地位,故小信号增益系数会有峰值出现。

5 结 论

理论计算的结果表明,气动 CO_2 激光器介质增益区较长且变化缓慢;较高的燃烧室温度、适当的 CO_2 分子摩尔浓度及低的含 H_2O 量是形成高增益的必要条件;而增加燃烧室的压强,除有利于将废气排向真空外,并不能有效地提高介质的增益。本文对气动 CO_2 激光器介质小信号增益的计算结果,可为激光器光腔的设计及对燃料与高压空气的最佳配比提供参考。有关的实验工作请详见文献[4]。

参 考 文 献

- 1 谈洪,朱宗厚. 气动激光技术. 北京:国防工业出版社,1977
- 2 王云萍,姜宗福,刘天华等. 燃烧驱动气动 CO_2 激光器几种液体燃料性能差异的数值模拟. 强激光与粒子束, 2000, 12(9): 429~432
- 3 S. A. Losov. *Gas-Dynamic Laser*. Berlin: Springer-Verlag Press, 1981
- 4 王云萍,姜宗福,陈金宝等. 燃烧驱动气动 CO_2 激光器小信号增益的实验研究. 激光技术, 2001, 25(3): 225~228