

文章编号:1001-5078(2011)12-1314-05

· 激光器技术 ·

混合型气动 CO₂ 激光器主喷管冻结效率研究

翟小飞, 赖林, 周进

(国防科学技术大学航天与材料工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要:采用两振型弛豫模型及严海星的弛豫速率数据,对混合型气动 CO₂ 激光器(简称MGDL)主喷管中的非平衡流动进行了计算。研究了 N₂($\nu=1$) 分子质量分数沿喷管轴线的分布,总温、总压、CO₂ 和 H₂O 的摩尔分数、喷管构型对 N₂($\nu=1$) 分子冻结效率的影响。计算结果表明:N₂($\nu=1$) 分子质量分数沿喷管轴线方向逐渐减少,在喉部附近降低幅度最大;随着总温的升高,N₂($\nu=1$) 分子冻结效率先降低后升高;随着总压、CO₂ 和 H₂O 摩尔分数的增大,N₂($\nu=1$) 分子冻结效率逐渐降低;随着喷管扩张段半锥角的增大或者喷管喉部直径的减小,N₂($\nu=1$) 分子冻结效率逐渐增大。

关键词:混合型气动 CO₂ 激光器;N₂($\nu=1$) 振动能级;冻结效率;非平衡流动

中图分类号:TN248.2 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2011.12.005

Freezing efficiency of donor nozzle of mixing gasdynamic CO₂ laser

ZHAI Xiao-fei, LAI Lin, ZHOU Jin

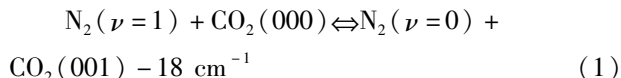
(College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: By using relaxation model of two vibrational modes and Yan Haixing's relaxation times data, the nonequilibrium flow in donor nozzle of mixing gasdynamic CO₂ laser is calculated. Mass fraction distribution of N₂($\nu=1$) molecules along nozzle axis, influences of total temperature, total pressure, mole fractions of CO₂ and H₂O and nozzle profile on freezing efficiency of N₂($\nu=1$) molecules are studied. Calculation results indicate that mass fraction of N₂($\nu=1$) molecules decreases gradually along nozzle axis and decreases at a large range around the throat. When total temperature rises, freezing efficiency of N₂($\nu=1$) molecules decreases at first and then rises. When total pressure and mole fraction of CO₂ and H₂O rise, freezing efficiency of N₂($\nu=1$) molecules decreases gradually. When half-angle of expansion section of nozzle rises or when throat diameter of nozzle decreases, freezing efficiency of N₂($\nu=1$) molecules rises gradually.

Key words: mixing gasdynamic CO₂ laser; N₂($\nu=1$) vibrational level; freezing efficiency; nonequilibrium flow

1 引言

混合型气动 CO₂ 激光器(简称MGDL,如图1所示)的基本原理为:高温氮气和冷的 CO₂ + He(或 CO₂ + H₂O)经过各自的喷管(高温氮气流经的喷管称为主喷管,CO₂ 和 He 流经的喷管称为副喷管)膨胀加速,在喷管出口处混合;通过分子间的碰撞,氮气将其振动能传递给基态 CO₂ 分子(对应的能量转移过程如公式(1)所示,造成 CO₂ 的粒子数反转,最终产生激光。



其中,N₂($\nu=1$)表示处于第一振动能级的氮气分子;N₂($\nu=0$)表示处于基态的氮气分子;CO₂(000)表示处于基态的 CO₂ 分子;CO₂(001)表示处于 001 振动能级的 CO₂ 分子;此过程为可逆过程。

作者简介:翟小飞(1982-),男,在读博士研究生,研究方向为混合型气动 CO₂ 激光器。E-mail:zhaixiaofei0@126.com

收稿日期:2011-05-24

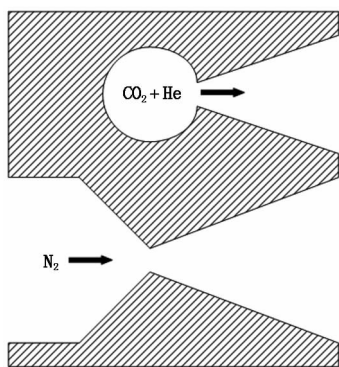


图1 MGD示意图

由上式可以看出,要获得尽可能多的 CO₂ (001)能级分子(这是实现 CO₂ 粒子数反转进而出光所必须的),就需要在主喷管出口处提供尽可能多的 N₂($\nu=1$)分子。主喷管对 N₂($\nu=1$)分子的冻结效率定义为:

$$\frac{\text{主喷管出口截面 } N_2(\nu=1) \text{ 分子质量分数的平均值}}{\text{主喷管入口截面 } N_2(\nu=1) \text{ 分子质量分数的平均值}} \quad (2)$$

对于气动 CO₂ 激光器喷管中非平衡流动的计算,已经有很多报道^[1-4]。计算中常用的弛豫模型有三振型模型和两振型模型。李树山系统地总结了各种弛豫模型和方程,并对其进行了详细的对比计算^[3]。关于弛豫速率,严海星收集和整理了之前的实验和理论研究结果,给出了各种弛豫速率的最佳拟合曲线和解析表达式^[5],为今后的计算提供了方便。本文对 MGD 主喷管中非平衡流动的计算,采用 anderson 的两振型弛豫模型^[2]及严海星的弛豫速率。

2 控制方程、计算方法及算例验证

本文采用二维守恒型方程对 MGD 主喷管中的非平衡流动进行求解。为了简化计算和加快收敛,只考虑无粘情况。

耦合弛豫动力学模型的二维非平衡流控制方程如下:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} = H \quad (3)$$

其中:

$$U = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho e \\ \rho e_{\text{vib I}} \\ \rho e_{\text{vib II}} \end{pmatrix} \quad E = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho uu + p \\ \rho uv \\ u(\rho e + p) \\ \rho ue_{\text{vib I}} \\ \rho ue_{\text{vib II}} \end{pmatrix}$$

$$F = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho vv + p \\ v(\rho e + p) \\ \rho ve_{\text{vib I}} \\ \rho ve_{\text{vib II}} \end{pmatrix} \quad H = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \rho/\tau_I \cdot [(e_{\text{vib I}}^{\text{eq}} - e_{\text{vib I}})] \\ \rho/\tau_{II} \cdot [(e_{\text{vib II}}^{\text{eq}} - e_{\text{vib II}})] \end{pmatrix}$$

式中, e 表示单位质量混合气体总能量, $e = \sum e_i + 1/2(u^2 + v^2) + e_{\text{vib I}} + e_{\text{vib II}}$; e_i 表示单位质量混合气体中第 i 组分不考虑振动能在内的总内能。 $(e_{\text{vib I}})^{\text{eq}}$ 是将平动温度代替振动温度代入振动能 $e_{\text{vib I}}$ 计算式后得到的振动能值。

弛豫时间 τ_I 和 τ_{II} 由下列公式求出:

$$\tau_I = \tau_c \quad (4)$$

$$\frac{1}{\tau_{II}} = \left[\frac{X_{\text{CO}_2}}{\tau_a} + \frac{X_{\text{N}_2}}{\tau_b} \right] \frac{1}{(X_{\text{CO}_2} + X_{\text{N}_2})} \quad (5)$$

其中, τ_a 表示振型 I 和振型 II 之间的弛豫时间; τ_b 表示振型 II 与基态之间的弛豫时间; τ_c 表示振型 I 与基态之间的弛豫时间,这些弛豫时间的计算可见文献[2]。 X_{CO_2} , X_{N_2} , $X_{\text{H}_2\text{O}}$ 分别表示 CO₂, N₂ 和 H₂O 在混合气体中所占的摩尔分数。

为了验证本文计算方法的正确性,选取严海星等人文献[1]中的算例,喷管参数和计算参数如表 1 所示。

表1 喷管参数和计算参数

A_e/A^*	T_0/K	p_0/atm	h^*/cm	X_{CO_2}	$X_{\text{H}_2\text{O}}$	X_{N_2}
50	1800	37.5	0.0356	0.07	0.01	0.92
					0.035	0.895
					0.05	0.88
					0.1	0.83

其中, A_e/A^* 表示喷管面积比; T_0 为总温; p_0 为总压; h^* 为喷管喉部高度; X_{CO_2} , $X_{\text{H}_2\text{O}}$, X_{N_2} 分别表示 CO₂, H₂O 和 N₂ 在混合气体中所占的摩尔分数。

喷管型面设计采用了最小长度喷管设计方法 (MLN),计算按照理想气体无粘流进行,壁面按绝热壁处理。计算结果如图 2 所示。本文的计算结果用圆圈表示,圆心位置即为计算值。图中的小圆圈是文献[6]的实验值,图中的曲线编号代表了各种不同模型的准一维流计算结果,具体含义见文献[1]。可以看出,本文的计算结果和实验数据符合得很好。这说明本文将 Anderson 弛豫模型和严海星弛豫数据相结合处理方法的正确性。

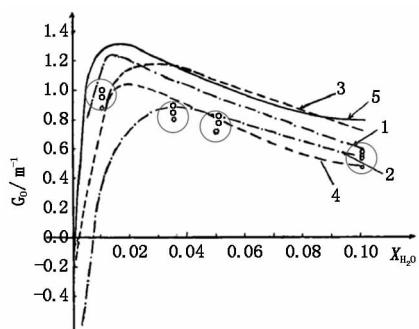


图2 喷管出口小信号增益

3 计算结果及讨论

本文分别研究了 $N_2(\nu=1)$ 分子质量分数沿喷管轴线的分布(用1#表示)、总温(用2#表示)、总压(用3#表示)、 CO_2 摩尔分数(用4#表示)、 H_2O 摩尔分数(用5#表示)、喷管扩张段半锥角(用6#表示)、喷管喉部直径(用7#表示)对 $N_2(\nu=1)$ 分子冻结效率的影响。主喷管采用当前 MGDJ 研究中普遍使用的三维轴对称喷管,喷管收缩段和扩张段均为锥面。在以下所有计算中,喷管收缩段面积比均为 31.36,收缩段长度均为 4mm,扩张段面积比均为 64。计算中的其他参数如表 2 所示。

表2 计算参数

	h^*/mm	$\theta/(^\circ)$	p_0/MPa	T_0/K	X_{CO_2}	X_{H_2O}
1#	1.0	10	5	1500	0.01	0.005
2#	1.0	10	5	1000,1500, 2000,2500, 3000	0.01	0.005
3#	1.0	10	2,3,4,5	1500	0.01	0.005
4#	1.0	10	5	1500	0.01,0.02, 0.03,0.04	0,0.005
5#	1.0	10	5	1500	0.01	0.005,0.01, 0.015,0.02
6#	1.0	10,12.5, 15	5	1500	0.01	0.005
7#	0.6,0.8, 1.0	12.5	5	1500	0.01	0.005

其中, h^* 表示喷管喉部直径; θ 表示喷管扩张段半锥角; p_0 表示总压; T_0 表示总温; X_{CO_2} 和 X_{H_2O} 分别表示 CO_2 和 H_2O 在混合气体中所占的摩尔分数。 N_2 在混合气体中所占的摩尔分数等于 $(1 - X_{CO_2} - X_{H_2O})$ 。

3.1 $N_2(\nu=1)$ 分子质量分数沿喷管轴线分布

计算结果如图 3 所示。可以看出: $N_2(\nu=1)$ 分

子质量分数沿喷管轴线方向逐渐降低;在喷管喉部附近($x=3\sim 5mm$), $N_2(\nu=1)$ 分子质量分数降低很快,这是因为在喉部附近,静温降低很快(如图 4 所示),导致公式(4)和(5)中的弛豫时间 τ_a, τ_b, τ_c (三者均是温度的函数)变化很大。

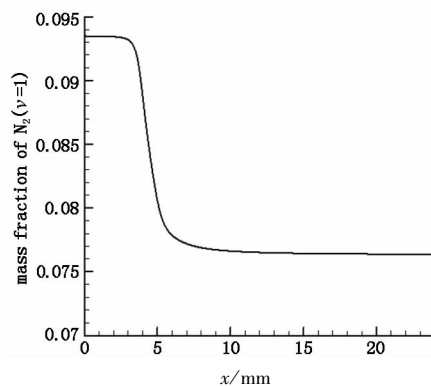
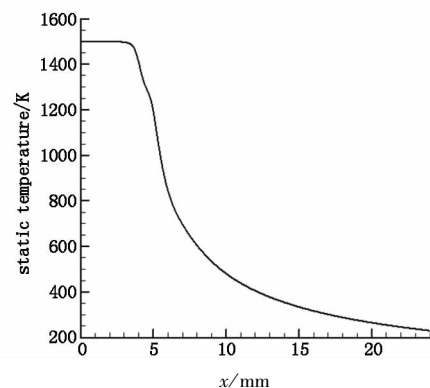
图3 $N_2(\nu=1)$ 分子质量分数沿喷管轴线分布

图4 静温沿喷管轴线分布

3.2 总温和总压的影响

主喷管入口处总温越高,喷管入口处 $N_2(\nu=1)$ 分子的质量分数越高(由公式(6)^[2]决定),这是总温高首先带来的好处。总温对 $N_2(\nu=1)$ 分子冻结效率的影响如图 5 所示,可以看出,随着总温的升高, $N_2(\nu=1)$ 分子冻结效率先降低后升高。总的来看,在 1000~3000K 的计算范围内, $N_2(\nu=1)$ 分子的冻结效率变化不大(最低 81.61%,最高 83.18%)。总压对 $N_2(\nu=1)$ 分子冻结效率的影响如图 6 所示。可以看出,总压对 $N_2(\nu=1)$ 分子冻结效率的影响较大;随着总压的升高, $N_2(\nu=1)$ 分子冻结效率逐渐下降。

$$C_{N_2(\nu=1)} = C_{N_2} \cdot \exp(-3357/T_0) \cdot$$

$$(1 - \exp(-3357/T_0)) \quad (6)$$

式中, $C_{N_2(\nu=1)}$ 表示 $N_2(\nu=1)$ 分子的质量分数; C_{N_2} 表示所有氮气分子的质量分数; T_0 表示喷管入口

总温。

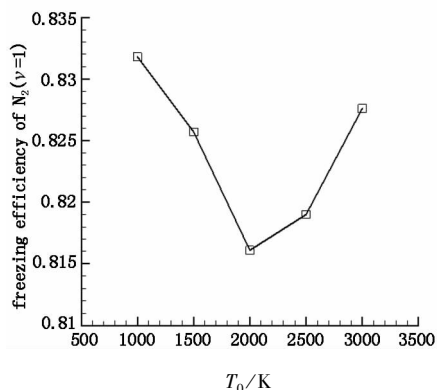


图5 总温对 $N_2(v=1)$ 分子冻结效率的影响

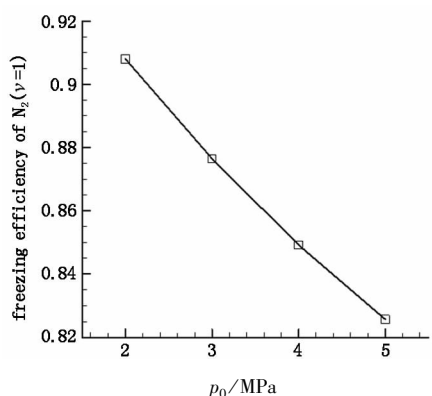


图6 总压对 $N_2(v=1)$ 分子冻结效率的影响

3.3 CO₂ 和 H₂O 含量的影响

文献[7]指出:主喷管中 CO₀ 和 H₂O 的含量对混合型气动 CO₂ 激光器性能有较大影响;当主喷管总压为 5MPa 时,为了保证激光器性能,H₂O 的摩尔分数应不超过 0.01;在不含水的情况下,CO₂ 的摩尔分数在 0.02~0.04 之间时,CO₂ 对激光器小信号增益影响不大。本文在计算 CO₂ 摩尔分数对 $N_2(v=1)$ 分子冻结效率的影响时,考虑了不含水和含水(水的摩尔分数为 0.005)两种情形。在基于 C₄N₂/N₂O 的燃烧驱动混合型气动 CO₂ 激光器^[7]中,燃烧产物中不含水,而在基于 C₆H₆/N₂O^[8](或 CO + H₂ + N₂O^[9])的燃烧驱动混合型气动 CO₂ 激光器中,燃烧产物中含水,因而,本文对不含水和含水两种情况进行计算,具有实际的指导意义。计算结果如图 7 和 8 所示。可以看出:无论是否含水,随着 CO₂ 摩尔分数的增加, $N_2(v=1)$ 分子的冻结效率降低;同样地,随着 H₂O 摩尔分数的增加, $N_2(v=1)$ 分子的冻结效率降低; $N_2(v=1)$ 分子冻结效率受 CO₂ 和 H₂O 含量的影响显著。

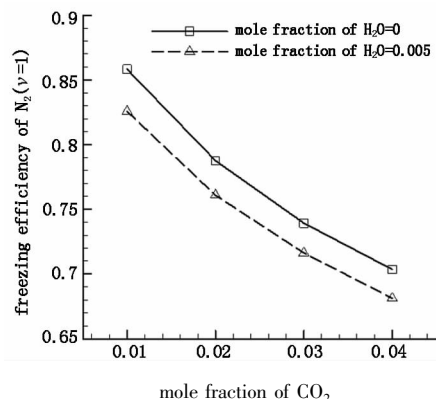


图7 CO₂ 摩尔分数对 $N_2(v=1)$ 分子冻结效率的影响

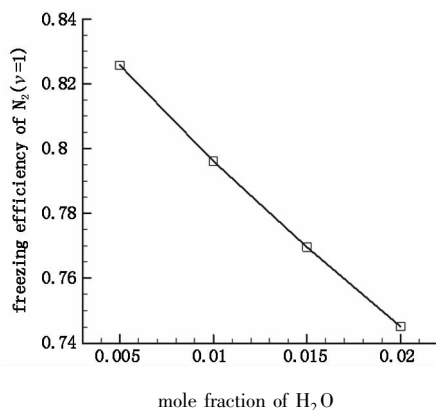


图8 H₂O 摩尔分数对 $N_2(v=1)$ 分子冻结效率的影响

3.4 喷管构型的影响

关于喷管构型对 $N_2(v=1)$ 分子冻结效率的影响,本文考虑主喷管扩张段半锥角和喷管喉部直径两个参数。计算结果如图 9 和 10 所示。可以看出:随着扩张段半锥角的增大, $N_2(v=1)$ 分子的冻结效率提高;随着喷管喉部直径的减小, $N_2(v=1)$ 分子的冻结效率提高。这是因为:在保持喷管其他结构参数不变的情况下,无论是增大扩张段半锥角,还是减小喉部直径,喷管扩张段长度都相应地减小,从而最终导致 $N_2(v=1)$ 分子的冻结效率提高。

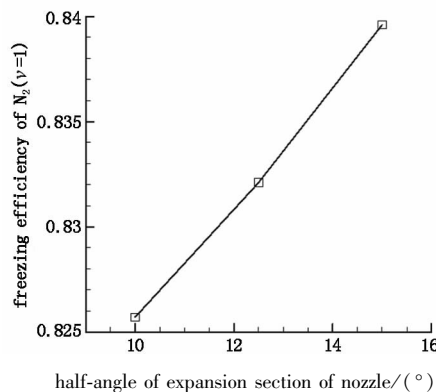


图9 喷管扩张段半锥角对 $N_2(v=1)$ 分子冻结效率的影响

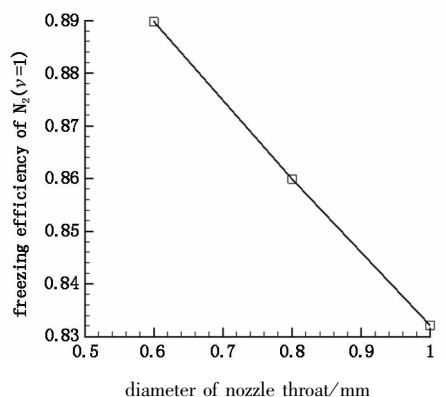


图10 喷管喉部直径对 $N_2(\nu=1)$ 分子冻结效率的影响

4 结 论

本文采用两振型弛豫模型及严海星整理的弛豫速率数据对 MGD 主喷管中的非平衡流动进行了计算,研究了 $N_2(\nu=1)$ 分子质量分数沿喷管轴线的分布,总温、总压、 CO_2 和 H_2O 的摩尔分数、喷管扩张段半锥角及喉部直径对 $N_2(\nu=1)$ 分子冻结效率的影响。计算结果发现: $N_2(\nu=1)$ 分子质量分数沿喷管轴线方向逐渐降低,在喉部附近降低幅度最大;随着总温的升高, $N_2(\nu=1)$ 分子冻结效率先降低后升高;随着总压、 CO_2 和 H_2O 摩尔分数的增大, $N_2(\nu=1)$ 分子冻结效率逐渐降低;随着喷管扩张段半锥角的增大或者喷管喉部直径的减小,喷管扩张段长度减小,进而导致 $N_2(\nu=1)$ 分子冻结效率增大。

参考文献:

- [1] Yan Haixing, Chen Liyin. Calculation of nonequilibrium flow in a gasdynamic laser[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1978, (4): 274-287. (in Chinese)
严海星,陈丽吟. 气动激光器的非平衡流计算[J]. 力学学报, 1978, (4): 274-287.
- [2] Anderson J D, Jr. Gasdynamic Lasers: An Introduction [M]. New York, San Francisco, London: Academic Press, 1976.
- [3] Li Shushan. Classification of relaxation equations in $CO_2 - N_2 - H_2O$ laser system and comparison of gain computations[J]. Chinese Journal of Lasers, 1979, (7): 10-18. (in Chinese)
李树山. $CO_2 - N_2 - H_2O$ 激光体系弛豫方程的分类及其增益计算比较[J]. 中国激光, 1979, (7): 10-18.
- [4] Li Guangzheng, Cheng Zuhai. Numerical simulation for nonequilibrium nozzle flow in a gasdynamic laser [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1996, 24(8): 84-88. (in Chinese)
李光正,程祖海. 气动激光器非平衡喷管流的数值模拟[J]. 华中理工大学学报, 1996, 24(8): 84-88.
- [5] Yan Haixing. Data of vibrational relaxation processes rate in $CO_2 - N_2 - H_2O$ laser system[J]. Chinese Journal of Lasers, 1981, (6): 1-8. (in Chinese)
严海星. $CO_2 - N_2 - H_2O$ 激光体系的振动弛豫过程速率数据[J]. 中国激光, 1981, (6): 1-8.
- [6] Vamos J S. Small signal gain measurements in a high area-ratio nozzle shock tunnel GDL [R]. AIAA Paper, 1974: 174-177.
- [7] Alexander V Lavrov, Valerii K Ikonnikov, Peter A Yegoyants, et al. Experimental and theoretical investigation of the noncomplete combustion-driven downstream-mixing CO_2 -GDL [R]. New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996.
- [8] T Yokozawa, S Yamaguchi, H Kanazawa, et al. Gain characteristics of an after mixing gasdynamic laser utilizing low stoichiometric (fuel lean) combustion of liquid C_6H_6 and liquid N_2O [R]. New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1989.
- [9] Takashi Hashimoto, Susumu Nakano, Michio Hachijin, et al. Characteristics of a downstream-mixing CO_2 gasdynamic laser caused by behavior of two supersonic flows in a laser cavity[J]. Applied Optics, 1993, 32(30): 5936-5943.