

用瞬时混合模型研究混合气动激光器的性能

严海星 徐纪华

(中国科学院力学研究所)

提 要

本文在逐渐混合模型^[1]的基础上,提出更为简化的瞬时混合模型,对CO₂混合气动激光的非平衡流进行了大量的数值计算。研讨了速度、温度、组分和辐射场对激光性能的影响,给出了激光性能随有关重要参数的变化规律。

一、引 言

混合气动激光器(MGDL)的核心问题是非平衡流的混合过程。在两股超音速流的混合过程中,会出现复杂的激波、粘性和边界层所造成的气动损失等,理论模型中需同时考虑详细的流体动力学过程和微观动力学过程(MGDL中即振动弛豫过程),问题极其复杂。本文作者在文献[1]中用简化的逐渐混合模型得到了与Anderson等的二维Navier-Stokes方程解^[2]比较一致的结果。本文把逐渐混合模型进一步简化为瞬时混合模型,对CO₂ MGDL混合非平衡流进行了数值计算,并详细考察了速度、温度、组分和辐射场等主要因素对激光性能的影响。数值计算在国产TQ-16机上进行。结果表明,本模型虽更简单,但得出的一些规律对于提高激光性能仍具有一定的指导意义;而且计算时间还比逐渐混合模型少一个数量级,所以该模型特别适合于需要进行大量计算的实验研究和理论工作。

二、模型的提出

分析文献[2]的计算结果可知,在层流混合中,只在相当短的距离内,混合已基本均匀;实际采用的筛形喷管中的混合过程更快;在渐混模型计算中,发现改变不同的混合长度,只影响混合区内的增益分布,而对混合区外的增益无明显影响^[1]。根据上述理由,本文把渐混模型进一步简化为瞬时混合模型,其流动图如图1所示:在喷管出口处,两股束流立即发生均匀混合,然后只作为等截面非平衡流向前发展。其中的混合过程用定常流守恒方程组描述^[1],求得混合后的流动参数作为非平衡流的初值;等截面非平衡流过程用定常守恒方程组^[1]和振动弛豫方程组^[3]联立来描述,数值计算采用Runge-Kutta法程序^[4]可方便地求解联立方程

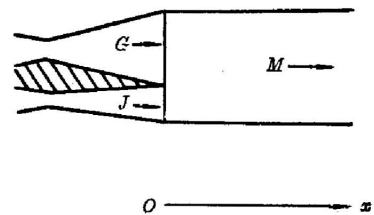


图1 瞬时混合模型流动图
Fig.1 Flow pattern for instantaneous mixing model

组,进而求得激光增益 G_0 和最大可用能 E_{\max} 等。

三、计算结果与 MGDL 性能分析

为了得到实用的结果, G 流 ($N_2 + H_2O$) 的初始条件是用 [3] 的计算程序算得的, 锥型喷管的出口数据见表 1, J 流 (CO_2 或 $CO_2 + H_2O$) 的初始条件可以改变, 以得到最佳激光性能, 这样就能由初始条件反回去确定喷管参数和储存室条件。筛型喷管面积对于 G 、 J 流分别是 11.9022 和 1.7374 cm^2 。下面将分别叙述改变 J 流的速度 u_J 、温度 T_J 、组分 (CO_2 和 H_2O 的克分子数分别是 X_{C_j} 和 X_{H_j}) 以及在有辐射场下的计算结果, 并对激光性能进行分析。

表 1 锥形喷管的出口数据

Table 1 Some data at the exit of G flow

A/A^*	h^* (cm)	T_0 (K)	P_0 (atm)	$X_C:X_N:X_H$						
				出口数据	0:1:0	0:0.99:0.01	0:0.98:0.02	0:0.095:0.05	0:0.9:0.1	0.1:0.89:0.01
60	0.04	2200	10	T	258.6	262.8	265.6	274.7	289.7	291.0
				T_N	2197.3	2188.2	2181.0	2156.2	2121.6	2076.4
				E_{\max}	112.88	111.22	109.76	105.11	98.07	91.43

1. u_J 的影响

由图 2 可见, 当 $u_J = u_G/0.9$ 时 (u_G 是 G 流的速度), 小信号增益 G_0 有最大值。在 u_J 较大或较小时, G_0 均明显下降。但考虑到 u_J 改变会引起混合流中 X_{C_j} 的改变 (见表 2), 而在布居数反转情况类似时, G_0 正比于 X_{C_j} , 因此图中还隐含着 X_{C_j} 的改变所引起的 G_0 的改变。显然, X_{C_j} 增大使 G_0 峰值向 u_J 增大方向移动。除去这个因素的影响, 可以粗略地讲, $u_J \approx u_G$ 时, G_0 最大。

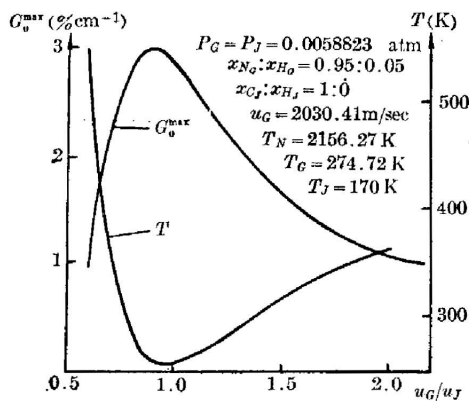


图 2 u_J 对 MGDL 的影响

Fig. 2 The effect of u_J on MGDL

其物理解释是: 两股流的速度差引起部分动能转化成无规热能, 使混合后平动温度 T 升高 (图 2)。速度差越大, T 越高。 T 的增大一方面由 $\nu_2 \leftrightarrow T$ 过程拉高 ν_2 的振动温度 T_2 , 而 ν_1 和 ν_2 的 Fermi 共振总保持 $T_1 \sim T_2$ [3, 5], T_1 的增大导致布居数反转减少从而 G_0 下降; 另一方面由于 $\nu_3 \leftrightarrow \nu_N$ 速率的负温度关系 [6] 造成激光上能级泵浦速率随 T 的上升而变慢, 不利于有效抽运 N_2 的储能, 最终亦使 G_0 降低。

表 2 X_{O_2} 随 u_J 的变化
Table 2 Variation of X_{O_2} with u_J

u_G/u_J	1.2	1	0.9	0.8
X_{O_2}	0.164	0.191	0.208	0.228

2. T_J 的影响

由图 3 可见, 温度较低的 J 流与条件不变的 G 流混合, 使混合流平动温度降低, G_0 随之增大, 而 E_{max} 有所下降。图中所列是 $u_J = u_G$ 的结果, 改变 u_J 时的变化规律也类似。

当然尽可能降低 J 流的平动温度, 对改善激光性能有利, 但其下限应以 J 流组分不冻结而定。当 J 流不预混水时, 可使 T_J 下限从 270 K 降到 170 K, 从而使 G_0 从 1.8% 增加到 2.8% cm^{-1} 。

3. 组分的影响

图 4 给出了 $u_J = u_G$ 时 X_{H_2} 对增益的影响, 改变 u_J 值, G_0 的分布有类似规律。由图可见, 无水时增益 G_0 最高, 随着 X_{H_2} 的增大 G_0 下降, 这是 MGD L 特有的规律。因为在 MGD L 中混入的 CO_2 的平动和振动温度都很低, 但混合后的 T 总大于 T_1 , 水的弛豫通过 $\nu_1 \leftrightarrow T$ 过程拉高 T_1 而使 G_0 下降; 水在 G 流中亦会使 G_0 下降, 这一方面是 G 流的水使 N_2 的冻结效率略降低 (见表 1), 另一方面是由光腔中水的弛豫效应所致。水在辐射场中的作用见下文。

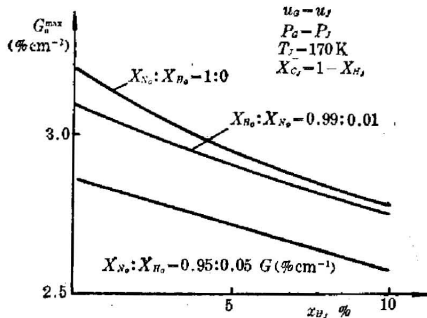


图 4 X_{H_2} 对 MGD L 的影响
Fig. 4 The effect of X_{H_2} on MGD L

由图 5 可见, 无水激活介质在光腔区饱和增益较低, 在辐射场之后又难于恢复, 致使难于取出激光能。其主要原因是无水时, 无法抽空激光下能级, 使 T_1 连续上升, 以致布居数反转显著减少。若存在一定量水时 (图 6), 光腔中 $T_1 - T$ 大幅度下降, 饱和增益又比较高, 辐射场之后增益就能迅速恢复。权衡各方面的因素, 混合流中 X_H 似取 2~4% 为宜 (见表 3)。

考虑到 $\nu_3 \leftrightarrow \nu_N$ 过程与辐射抽运过程相比速度不够快^[6], 以及混合在上游的不均匀性会影响光束质量, 因此对放置较后的光腔和改变光强 I 对饱和增益 G 的影响作了计算。由图 6 可见, 6~16 cm 光腔的饱和增益 G 较高, 这有利于提高输出功率。当 I 增大时 G 下降,

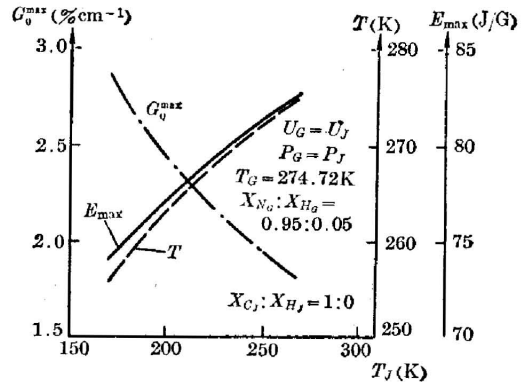


图 3 T_J 对 MGD L 性能的影响
Fig. 3 The effect of T_J on MGD L

4. 有辐射场的情况

MGD L 的最终目的是要输出大功率激光, 因此必须考虑有辐射场的情况。取辐射场为梯形分布, 中间是均匀场, 上升、下降区域各为 1 cm 宽。

输出功率不会有太大增加。要想充分取出激光能量,须在流动方向上延长光腔长度。但考虑到连续取能,会使 G 下降太快而不易回升,故建议间隔放置光腔,每个长 $5\sim 10$ cm,间隔 ~ 5 cm,每个光腔可自行振荡(因为 MGRL 中增益较高)。

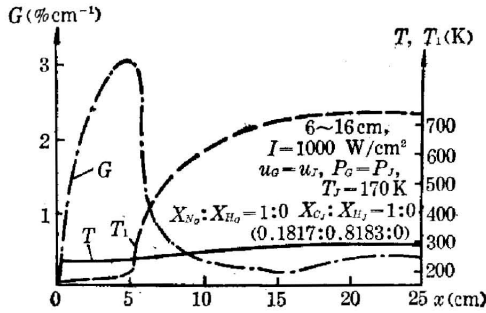


图 5 无水激活介质中的饱和增益

Fig. 5 The saturated gain in the activated medium without water

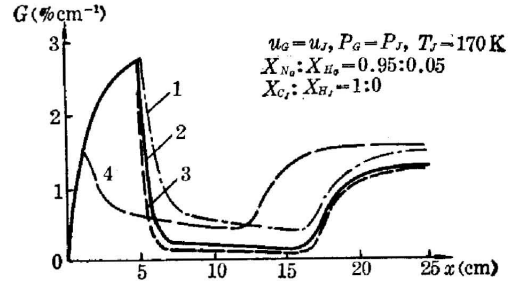


图 6 含水激活介质中的饱和增益

1— $6\sim 16$ cm ($I=1000$ W/cm²);
2— $6\sim 16$ cm ($I=3000$ W/cm²);
3— $6\sim 16$ cm ($I=500$ W/cm²);
4— $2\sim 12$ cm ($I=1000$ W/cm²)

Fig. 6 The saturated gain in water contained activated medium

表 3 光腔中心处一些饱和性能 ($I=1000$ W/cm², 腔长 10 cm)

Table 3 Some saturated parameters in the middle of cavity ($I=10^3$ W/cm², length of cavity is 10 cm)

X_H	0	0.00821	0.0182	0.0266	0.0405	0.0595	0.0801
T_1-T (K)	362.02	276.51	225.75	184.76	132.13	97.62	67.25
G (cm ⁻¹)	0.003390	0.004650	0.004927	0.005208	0.005448	0.004862	0.004715
E_{\max} (J/g)	60.25	59.22	63.40	60.18	52.18	50.79	42.32

四、结 论

本文用极为简化的瞬时混合模型,通过数值计算得到了 MGDL 性能随有关重要参数变化的主要规律。若使 $u_s \sim u_a$, 尽量降低 T_s , 取 X_H 在 $2\sim 4\%$, $X_{O_2} \sim 10\%$, 采用一定间隔的分段光腔,第一个光腔适当移后,将会使激光性能明显提高。

参 考 文 献

- [1] 严海星;《用于非平衡流计算的逐渐混合模型》,第四届国际激光会议上宣读(在美国)。
- [2] K. N. Parthasarathy, J. D. Anderson *et al.*; *AIAA Paper*, 79-02-7, 1979.
- [3] 严海星等;《力学学报》,1978, No. 4, 274.
- [4] 李树山;《激光》,1979, 6, No. 7, 10.
- [5] 严海星;《激光》,1981, 8, No. 6, 1.
- [6] 吴中祥等;《激光》,1980, 7, No. 3, 5.

The performances of CO₂ mixing gas dynamic laser studied by an instantaneous mixing model

YAN HAIXING AND XU JIHUA

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

(Received 13 May 1982, revised 27 September 1982)

Abstract

Basing on the gradual mixing model, the authors present a simpler instantaneous mixing model, with which quite a number of digital computations for nonequilibrium flow of CO₂ mixing gas dynamic laser are carried out. The effects of velocity, temperature, concentration and radiation fields on the laser performances are studied. The variations of laser performances with these important parameters are given.