

气动 CO₂ 激光器小信号增益的实验研究

王云萍 姜宗福 陈金宝 刘天华 李文煜
(国防科技大学应用物理系, 长沙, 410073)

摘要: 用放大法测量了分别在甲苯和乙醇两种液体燃烧驱动下气动 CO₂ 激光器的小信号增益系数。实验发现, 用甲苯作为燃料时激光器的平均小信号增益系数可达 0.62m^{-1} , 远远高于乙醇作燃料时的小信号增益系数。结合甲苯和乙醇分别与空气燃烧后产物组分的配比, 对实验结果进行了分析, 得出甲苯是燃烧驱动气动 CO₂ 激光器的一种比较理想的燃料。

关键词: 气动 CO₂ 激光器 小信号增益系数 燃料

Experimental study on the small signal gain of gas dynamic CO₂ lasers

Wang Yunping, Jiang Zongfu, Chen Jinbao, Liu Tianhua, Li Wenyu

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

Abstract: With the help of amplification method, the small signal gain of a gas dynamic CO₂ laser is measured respectively under toluene and alcohol driving conditions. The experiments show that with toluene used as fuel, the small signal gain may reach 0.62m^{-1} , which is by far higher than that with alcohol used as fuel. In conclusion, toluene is an optimum liquid fuel for combustion-driven gas dynamic CO₂ laser.

Key words: gas dynamic CO₂ laser small signal gain fuel

引 言

气动 CO₂ 激光器自 1966 年提出以来, 一直受到极大的重视^[1]。其中, 利用化学燃料燃烧的方法来获得热激励的燃烧驱动 CO₂ 气动激光器具有经济实用、性能稳定、结构简单等突出优点^[2]。燃料的选择直接影响到这类激光器的工作性能。燃烧驱动 CO₂ 激光器的燃料分为固体和液体两类燃料体系。与固体燃料相比, 激光工作者对液体燃料的研究较少。但液体燃料可以产生更为理想的组分配比及更高的燃烧室温度, 激光器的输出功率和比功率会更高, 所以, 液体燃料是一种更为理想的燃料, 有必要开展进一步的研究工作。可以作为 CO₂ 气动激光器液体燃料的主要为碳氢化合物, 例如苯、甲苯、煤油等。上述液体燃料与压缩空气完全混合燃烧后, 燃烧室温度可达 $1600\text{℃} \sim 2100\text{℃}$, 而且能产生较好的组分配比, 尤其是燃烧后产物中 H₂O 的含量低于固体燃料(如固体推进剂)与空气混合燃烧后产物中 H₂O 的含量, 这一点对于 CO₂ 气动激光器尤为重要。我们选用放大法, 测量了在甲苯和乙醇两种不同液体燃烧驱动下 CO₂ 气动激光器的小信号增益系数。通过对小信号增益系数的分析与比较, 讨论了这两种液体燃料体系的性能。我们使用的 CO₂ 气动激光器主要由 4 部分组成: 燃烧室、喷管、光腔和扩压器, 如图 1。燃烧室中燃料与空气混合燃烧后所产生的高温高压 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的差分弛豫过程^[2]造成粒子反转, 输出连续波高功率激光。

1 实验设计

1.1 实验原理

小信号增益系数既是表达激活介质微观统计状态的一个参数,同时又是描述激光器宏观性能的一个最基本的参数。激活介质对光的增益系数 $g = dI(l)/I(l)dl$, 表示光强 $I(l)$ 通过单位长度介质后的增长率。运用边界条件 $l = 0$ 时的光强 $I(0) = I_0$, 得 $I(l) = I_0 e^{gl}$, l 为光传播方向的坐标值。从而 $g = l^{-1} \ln(I/I_0)$ 。小信号增益系数特指无光或光很弱时介质的增益,即探测的光信号 I_0 要远远小于介质的饱和光强 I_s 。实验中用放大法测量了介质的的小信号增益,即:当 I_0 经过增益区 l 后,光强变为 I ;通过对 I_0 及 $I(l)$ 的测量,由公式 $g = l^{-1} \ln[I(l)/I_0]$, 即可得到激活介质的的小信号增益系数 g 。

1.2 实验的光路设计

研究增益的方法很多,实验常用的有无探测光源下的衰减法和变耦合率法及有探测光源的放大法^[3]。实验中放大法的具体光路如图2所示。

由于 $10.6\mu\text{m}$ 的 CO_2 光为非可见光,难以调节光路,所以,有必要加入 632.8nm 的 He-Ne 激光束作为导引光来调节光路。采用双光路可同时消除探测光源的不稳定和光路系统所带来的吸收、散射等。探测器 10 接收探针激光器输出的光信号,探测器 11 接收通过介质返回后的光信号。

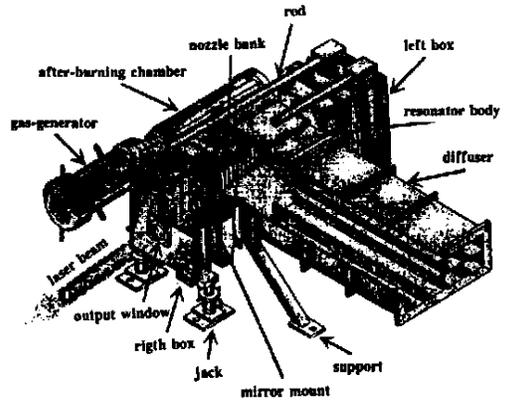


Fig. 1 Gas dynamic CO_2 laser system on the order of 10^6W

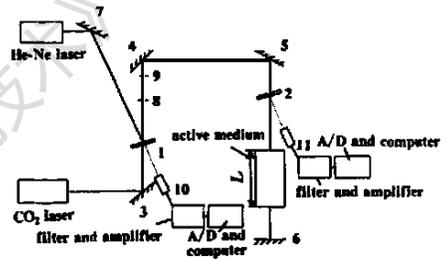


Fig. 2 Optical scheme of a small signal gain measuring system
 1, 2—beam splitter 3—7—mirror
 8, 9—diaphragm 10, 11—detector

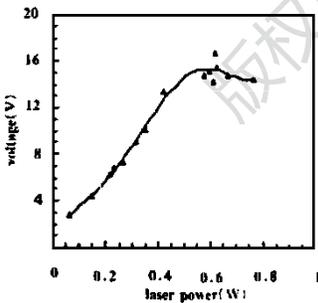


Fig. 3 Working characteristic curve of the heat-sensitivity resistance

探测器选用的是浸没型热敏电阻红外探测器,型号为 RM-2221。敏感元由锰、镍、钴氧化物按一定比例制成,粘合在锗透镜上。时间常数在 $1.8 \sim 3.5\text{ms}$ 之间,探测立体角为 $70^\circ \times 70^\circ$ 。工作偏压 $\pm 17\text{V}$,工作特性曲线如图3所示。它在 $0.1\text{W} \sim 0.45\text{W}$ 的工作范围内具有相当好的线性响应,当功率达 0.5W 时,热敏电阻有饱和现象,故实验时光信号应当控制在 $0.1\text{W} \sim 0.45\text{W}$ 之间为好。

在实地测量时,热敏电阻输出的电信号几乎被噪声淹没,即信噪比很小。实验中选用二阶低通滤波放大电路^[4]对信号进行滤波及放大,再经 A/D 板采集输入计算机。噪声主要来自于市电等高频干扰,所以,滤波电路的截止频率要求低于 50Hz 。A/D 板型号为 AC1059,是多功能 50kHz 的 12 位 A/D 板。实验中进行双通道采集,速率设为 5ms/次 。

作为探测光源的小型电激励连续波 CO_2 激光器,腔中安置了光栅,可以对输出波长进行选择,其输出波长范围为 $10.171 \sim 10.765\mu\text{m}$ 。实验中选定 CO_2 分子 00^0_1 能级到 10^0_0 能级跃迁的

P(20)支(波长为 10.598μm)。探测光经衰减后,在功率 0.01~ 0.02W 下测量了光腔中心处甲苯和乙醇分别燃烧驱动时的小信号增益系数。

探针 CO₂ 激光器的近场、远场光斑直径分别为 4mm 和 12mm。经衰减后,功率为 0.01~ 0.02W 时,其光强约为 0.01~ 0.14W/cm²,远远小于一般气动 CO₂ 激光器的饱和光强 20~ 100W/cm²[2]。所以,探测光强满足小信号增益的要求。

实验过程:开启小型电激励连续波 CO₂ 激光器,首先采集无增益介质时的探测信号 I₁₀及参考信号 I₀₀;待被测主激光器启动后,方为增益的开始,记录为 I₁₁及 I₀₁。则小信号增益系数 $g = L^{-1} \ln(I_{11}/I_{10} \cdot I_{00}/I_{01})$,其中增益区长度 $L = 0.4m$ 。

2 实验结果及分析

图 4 和图 5 分别为用甲苯与乙醇燃烧驱动下,小信号增益系数随时间的变化曲线。

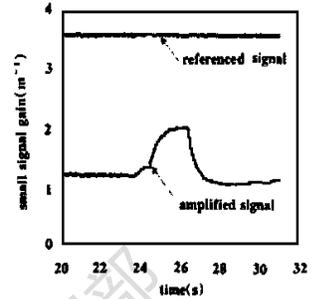


Fig. 4 Small gain coefficient with toluene used as fuel

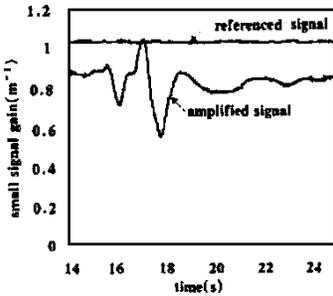


Fig. 5 Small gain coefficient with alcohol used as fuel

图 6 和图 7 分别

为甲苯和乙醇燃烧后对应的气动参数图。小信号增益的测量与气动参数的由两套测量系统完成,二者曲线图中的时间非同步。

由图 4 和图 5 可知,燃料为甲苯时的小信号增益系数为 0.62m⁻¹,用乙醇时的约为 0.17~ 0.35m⁻¹。显然,前者远远大于后者。为了给出更为精确的增益时间,可对照图 6 和图 7 的气动参数图进行分析,对于甲苯,从第 5s 到第 8s 的时间里,有增益介质的存在;而乙醇有增益

的时间是从第 5s 到第 7.4s,要比采用甲苯时的增益时间稍短。二者增益时间的不同,意味着 CO₂ 气动激光器的出光时间的长短,仅从这一点出发,甲苯作为燃料的性能就优于乙醇。而且,甲苯燃烧后燃烧室的压强略高于乙醇,经拉瓦尔喷管膨胀降温后,光腔的压力要大于乙醇燃烧驱动时的光腔压力,这样,废能会以更快的速度排向真空室,激光器的运转效率也就较高。

由文献[2]可知,N₂分子的第一振动能级与CO₂分子的高振动能级00⁰1能级之间,能量仅相差18cm⁻¹,二者会发生强烈的振动耦合。较高的N₂组分可使更多的CO₂分子被泵浦到00⁰1高能级,同时CO₂处于10⁰0低能级的分子与催化剂H₂O分子共振耦合,低能级粒子数不断被抽空,以克服瓶颈效应形成连续激光。采用化学平衡法可计算定压绝热状态下的燃烧产物和有关参数,在m(fule):m(air)=4:96质量比相同的条件下,甲苯与乙醇分别与空气混合燃烧后产物的组分配比见表1。由表1的对比可知,甲苯燃烧产物中CO₂分子的含量高于乙醇燃烧后的含量,同时,甲苯燃烧后H₂O的含量较低;二者燃烧产物中N₂的含量相当。乙醇燃烧后产物中CO₂分子的含量偏低,激光

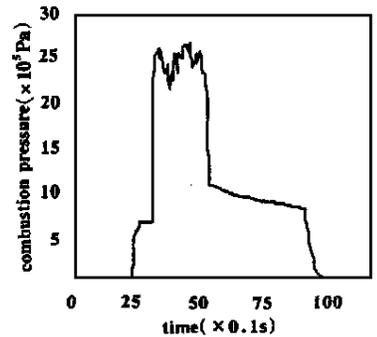


Fig. 6 Combustion pressure with toluene used as fuel

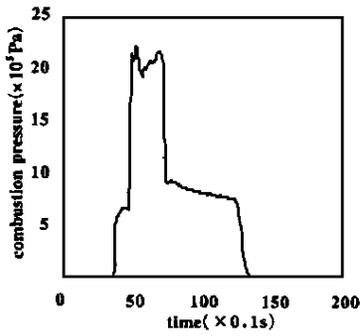


Fig. 7 Combustion pressure with alcohol used as fuel

上、下能级的粒子数较低,因此,小信号增益较小。对于催化剂,一定的水含量是形成高增益的必要条件,但过高的水分也会使高能级的 CO_2 分子碰撞去激活,使得小信号增益大大降低^[5]。乙醇燃烧后产物中过高的含 H_2O 量是降低增益的重要因素。另外,较高的燃烧室温度可以使更多的 CO_2 分子被激发到高能态,是形成较高增益的必要条件。甲苯的标准燃烧热 3910.28kJ/mol 远大于乙醇的标准燃烧热 1366.91kJ/mol ^[6],这就决定了在相同的条件下,甲苯与空气燃烧后燃烧室的温度远大于乙醇,因此,甲苯的小信号增益系数也就远远大于乙醇燃烧驱动时的小信号增益系数。

由乙醇作为燃料时的小信号增益曲线可以看出,返回信号抖动较大,而监测信号基本上无抖动,主要是由于乙醇燃烧后产物中含有较高的 O_2 和 H_2O ,对 CO_2 光产生了较大的吸收,已高达 $20\% \sim 30\%$ 。乙醇燃烧后产物对 CO_2 光这种较高的吸收会严重影响激光介质的小信号增益系数,使激光器的输出功率下降,而且不稳定。

采用三振型四温度模型,对耦合振动弛豫方程的喷管一维定常非平衡流的理论计算得出:甲苯燃烧驱动下的小信号增益数为 0.754m^{-1} ,用乙醇时为 0.472m^{-1} 。理论计算较实验的结果稍偏高,主要归因于振动模型和流场模型的简化,如对于流动中的激波、粘性等均未加考虑。但实验和理论计算的结果基本上符合得较好,实验数据较为可靠。

3 结 论

通过对 CO_2 气动激光器小信号增益系数的测量,发现用甲苯作为燃料时的小信号增益可高达 0.62m^{-1} ,远大于用乙醇作燃料时的小信号增益系数,所以,甲苯是燃烧驱动 CO_2 气动激光器的一种较为理想的燃料。用同样的方法,还可以对煤油、苯等液体燃料及固体推进剂等固体燃料进行实验,从而对燃烧驱动 CO_2 气动激光器的燃料体系做进一步的研究。

参 考 文 献

- 1 Pally B G, Zovko C T. AIAA Paper, 1973; (73-1233): 283-285
- 2 谈 洪, 朱宗厚. 气动激光技术. 北京: 国防工业出版社, 1977: 14, 30, 356
- 3 多丽萍, 桑凤亭, 杨柏龄 *et al.* 中国激光, 1997; A24(4): 289-292
- 4 童诗白. 模拟电子技术基础. 北京: 高等教育出版社, 1987: 451-455
- 5 Anderson J D. Gasdynamic Laser: An Introduction. New York: Academic Press, 1976: 89-95
- 6 兰正学. 化学热力学计算. 西安: 陕西科技出版社, 1986: 563-564

*

*

*

作者简介: 王云萍, 女, 1975年10月出生。硕士研究生。现从事激光器件及其相关技术的研究。

Table 1 The combustion conditions after toluent and alcohol each buming with air, at the same mass ratio $m(\text{fuel}): m(\text{air}) = 4:96$

mole composition	toluene	alcohol
CO_2	0.089	0.0495
N_2	0.7683	0.7603
H_2O	0.0508	0.0743
O_2	0.0917	0.1157
combustion temperature(K)	1674.8	1223.5