

# 10kW 连续波固体推进剂燃烧驱动 CO<sub>2</sub> 气动激光实验研究

刘 宇 李稻睦 张景升 祝寿恩 余西龙

(北京航空航天大学403教研室, 北京100083)

**摘 要** 简要介绍了固体推进剂燃烧驱动连续波 CO<sub>2</sub> 气动激光系统的工作原理及其突出特点, 对组成10kW 实验系统的各主要部件——固体推进剂燃气发生器、超音速掺混室、喷管排、谐振腔等作了简要说明, 利用该实验系统进行了上百次成功的测量或打靶实验, 并对主要实验结果进行了总结分析。

**关键词** 固体推进剂 连续波 CO<sub>2</sub> 激光 实验

固体推进剂燃烧驱动 CO<sub>2</sub> 气动激光的工作原理<sup>[1]</sup>: 以双基固体火箭推进剂为激光的能源和部分介质源, 将高温高压固体推进剂燃气同高压空气进行超音速掺混后形成激光工作介质, 激光介质经喷管排产生超音速激光激活介质, 最后由谐振腔产生连续波长为10.6 $\mu$ m 的激光输出并将废气由排气段排出。

一般气动激光装置主要由四个部分组成, 即热源和掺混室, 喷管排, 光学谐振腔, 扩压器。我们的激光实验装置与一般气动激光装置不同之处仅在于热源和掺混室部分, 其余三个部分均可照搬成熟的 CO<sub>2</sub> 气动激光技术, 其唯一热源就是固体火箭推进剂的燃烧热。所使用的双基固体推进剂的主要燃烧产物包括 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、CO、H<sub>2</sub>O、H<sub>2</sub> 等, 基本上不含凝相颗粒。燃气组分中的 CO 和 H<sub>2</sub> 过多, 而 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 和 N<sub>2</sub> 均偏少。尽管在燃气中直接掺混空气并不能直接达到最佳的激光介质配比, 但却是一种较廉价且能达到出光要求的方法。空气中的成份主要是 N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> 能使燃气进一步燃烧完全, 将 CO 转为 CO<sub>2</sub>, 将 H<sub>2</sub> 转为 H<sub>2</sub>O, 同时又增加了 N<sub>2</sub> 的含量。燃气和空气必须以适当比例均匀混合才能得到较为满意的工作介质温度和组分配比。

这种激光的主要特点有: 仅以固体推进剂为能源, 不需要其它任何能源(如电能)即可工作, 10kW 平均输出功率工作0.7s 仅需燃烧固体推进剂300g 左右, 能量转换速率快, 连续工作时间可由推进剂燃烧时间确定。与 CO<sub>2</sub> 气动激光相关的技术发展成熟, 结构简单, 研制成本低, 工作稳定可靠, 且功率较易提高。喷管排前的工作压力可高于4MPa, 合理的设计可以不依赖真空直接将废气排入大气中, 且排出废气无明显污染。其工作波长10.6 $\mu$ m 处于大气窗口之中, 有较好的大气传输能力<sup>[2]</sup>。

所建立的10kW 级实验台已进行过一百多次的成功实验, 测出的最大平均功率为11.50kW, 分别进行过0.7s 和1.5s 二种连续工作的实验。已建立了与实验系统相配套的激光系统工作特性软件模拟系统, 预计仅将现有系统的气源部分作适当改造即可获得30~50kW 平均激光功率输出。

\* 国防科技基础研究基金资助课题

1997年6月24日收到原稿, 1997年9月9日收到修改稿。

刘宇, 男, 1963年3月出生, 博士, 副教授。

## 1 实验系统

图1是整个激光实验的构成框图,主要包括燃气发生器及其中的固体推进剂装药,高压空气贮罐,超音速燃气与空气掺混室,喷管排,谐振腔及其中的镜片组,排气段等。为了便于燃气流量的控制,燃气发生器的主喷管喉径和排气调节喉径相互匹配。推进剂应选用燃气中含 $N_2$ 量较高,凝相颗粒少且燃烧性能稳定的推进剂。

关于 $CO_2$ 气动激光的最佳组分配比不难从过去多年的研究成果中找到,但如何利用现有的固体推进剂燃烧生成所期望的激光介质却不那么容易。通过数种固体推进剂(其中包括双基和复合推进剂)燃气组分和空气的掺混计算,以及进一步利用非平衡气体流动控制方程和不同分子振动能级的弛豫方程进行的激光输出功率和比功率计算,优选了其中一种双基推进剂用于实验研究。复合推进剂在能量上并不逊色于双基推进剂,但大都含有较多凝相颗粒(如 $AlO_3$ ),会增加激光散射损失并降低喷管排冻结效率,此外对结构材料有更强的腐蚀和烧蚀作用。改进或研制适用于气动激光的高氮推进剂,或研制高压大流量固体氮气发生器,都将有利于降低空气的补充量,甚至实现小体积全固体化的气动激光方案。

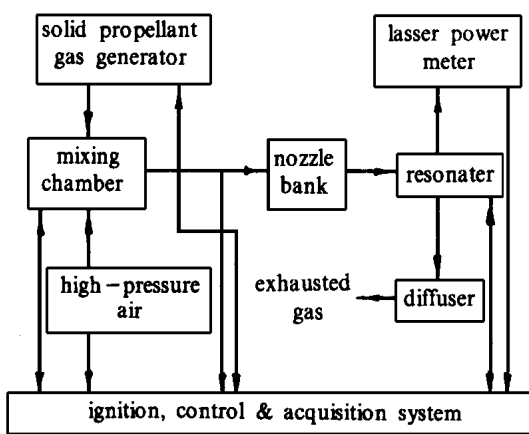


Fig 1 Block diagram of laser system

图1 激光系统方框图

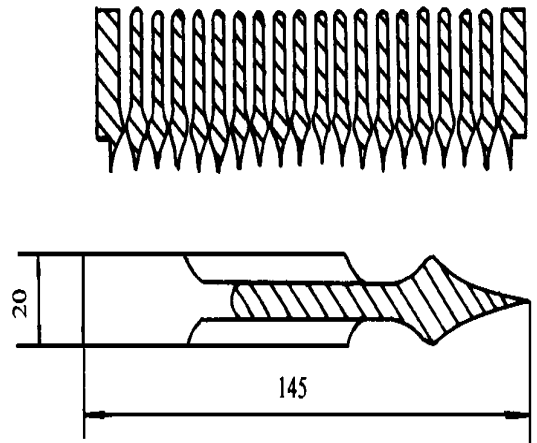


Fig 2 Nozzle bank blade

图2 喷管排叶片

掺混室的结构力求使掺混后的气体成分、温度、压强分布均匀,参数可调整且能量损失小。采用超音速多孔喷注掺混方案是可行的,目前燃气发生器内的稳定压力约为 $8\text{ MPa}$ ,空气注入压力约为 $9\text{ MPa}$ 。小流量时使用圆筒型掺混结构比较好,大流量时使用梯级扩张型结构并设计不同方向气流旋转的小孔分布注入为佳。

对于该种气动激光的喷管排没有特别要求,可以参考利用已有的研究成果进行设计。有关尺寸主要决定于流量和膨胀比等参数,实验表明喉部截面宽在 $0.3\sim 0.4\text{ mm}$ 之间为宜。喷管排由20个叶片组成,其中两侧特征线型面叶片18片(如图2所示),单侧特征线型面叶片2片(用于喷管排两端),材料为钼基合金。

谐振腔采用Z形半球折叠式稳定腔(如图3所示),三个反射镜用无氧铜,输出激光的半透镜采用直径为 $73\text{ mm}$ 的 $ZnSe$ 。光腔的主要参数为:反射镜的反射系数为 $0.98$ ,凹面镜的曲率半径为 $25\text{ m}$ ,稳定性参数 $g_1=0.937, g_2=1$ 。最佳耦合度位于 $0.2\sim 0.3$ 的透射率之间。目前使用稳定腔是为了获得较高功率输出,如改用非稳腔则可以提高光束质量,合理的非稳腔设计可获得

近单模光束质量。

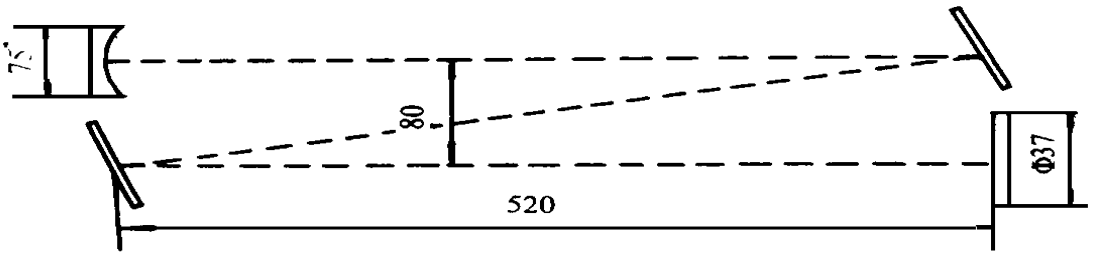


Fig 3 M irror group of resonator

图3 谐振腔镜片组

实验系统所测量的主要参数包括: 燃气发生器内的压力、高压空气压力、喷管排前的压力和温度、小信号增益、激光工作时间、激光平均和瞬时输出功率。平均功率用铝锥热电耦式功率计测量, 瞬时功率由金属网式功率传感器配合平均功率计进行测量。

## 2 实验结果与分析

在整个实验系统安装调试正常以后, 需要进行一系列参数调整测量实验, 其目的是确定燃气发生器平衡工作压力、高压空气注入压力、燃气主喷管和排气调节喷管的喉部面积、推进剂点火滞后时间和小信号增益等。小信号增益可以定性反映喷管排出口后粒子数反转的情况, 并由此判断热试时是否可以出光, 其测量结果如图4所示。目前的小信号增益值还很低<sup>[3]</sup>, 通过介质组分的改进提高小信号增益, 进而大幅度提高输出功率的潜力是很大的。目前没有进行各参数分别对激光工作特性影响的实验研究, 一般来说, 只要测出的小信号增益大于0.3, 就可获得正常的激光功率输出。

在额定气体流量下进行了大量激光输出功率的测量实验, 以了解最佳的空气与燃气流量比值  $\beta$ 、喷管排前压力和温度等参数对功率的影响。空气中的氧气可以使贫氧的固体推进剂燃烧更完全, 降低燃气成份中的 CO 含量, 还可以提高喷管排前的温度, 同时空气还补充了激光介质对 N<sub>2</sub> 的需求。目前实验的组分配比近似为 CO<sub>2</sub> 14.0%, N<sub>2</sub> 68.0%, H<sub>2</sub>O 9.0%, O<sub>2</sub> 9.0%, 距最佳配比尚有较大偏离。图5给出了实验测出的激光平均输出比功率与比质量流率  $\beta$  值的关系, 可以看出在  $\beta = 3.4$  附近可以获得最大的激光比功率输出。当  $\beta$  值比较合理时, 可以使喷管排前的温度达到 2000 K 左右, 使更多介质被激励到高能级, 有利于功率的提高。图6给出了实验测出的激光输出功率与喷管排前压力的关系, 可以看出随着喷管排前压力的提高, 激光输出功率明显提高。压力的提高是通过介质流量和密度的增加而影响功率的, 进一步提高喷管排前的工作压力是提高激光输出功率的一种途径。由此实验结果也可推断, 在喷管排前压力  $p < 4 \text{ MPa}$  范围内, 功率随流量呈线性增加趋势, 说明介质中颗粒密度的增加对功率的影响不大。

此外利用该激光系统进行了激光与材料相互作用的打靶实验。在 2kW 的功率输出时, 2m 距离的有机玻璃可在 0.7s 内烧穿 30mm 以上厚度, 可以使铝板烧融。在 10kW 的功率输出时, 可使 2m 距离的 0.7mm 厚钢板在 0.7s 内烧穿 3 层, 靶面上的激光功率密度约为  $10^4 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$ 。

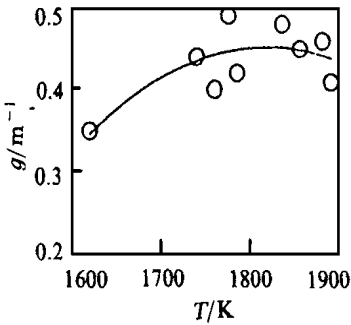


Fig 4 Dependence between small signal gain and temperature before nozzle bank

图4 小信号增益与喷管排前温度的关系

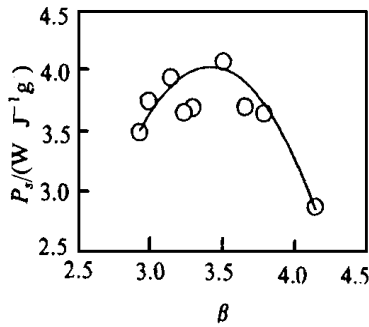


Fig 5 Dependence between specific power and ratio of mass flow rate

图5 激光比功率与比质量流率的关系

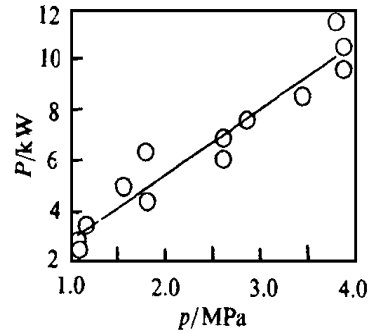


Fig 6 Dependence between laser power and pressure before nozzle bank

图6 激光功率与喷管排前压力的关系

### 3 主要结论

(1) 固体推进剂燃烧驱动  $\text{CO}_2$  气动激光是一种特点突出的大功率激光生成方式, 实验结果表明该种激光有很大的发展改进潜力, 可以利用其特点开展相关应用研究;

(2) 改进介质的生成方式, 大幅度提高该激光系统的小信号增益是值得重视的发展方向;

(3) 进一步提高喷管排前的工作压力, 是提高功率的可行途径;

(4) 该种激光系统可作为一种较为经济且无污染的大功率连续波短时工作激光源使用, 目前的技术水平完全可以在  $100\text{W} \sim 1\text{MW}$  平均功率输出范围进行光源系统设计。

### 参考文献

- 1 Boreisho A S, Leonov A F. AIAA 93-3166, 1993
- 2 刘景生. 红外物理. 北京: 兵器工业出版社, 1972
- 3 谈洪, 朱宗厚. 气动激光技术. 北京: 国防工业出版社, 1977

## EXPERIMENTAL STUDY ON 10KW SOLID PROPELLANT COMBUSTION DRIVEN CW - $\text{CO}_2$ GAS DYNAMIC LASER

Liu Yu, Liu Li, Zhang Jingsheng, Zhu Shouen, Yu Xilong

Faculty 403, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083

**ABSTRACT** A brief introduction is given to the working principle and the outstanding characteristics of solid propellant combustion driven continuous-wave  $\text{CO}_2$  laser system. Some concise descriptions about the major parts such as solid propellant gas generator, supersonic mixing chamber, nozzle band and resonator of the 10kW experimental system are presented also. Over one hundred parameter-measuring or target-shooting tests have been done successfully by the use of the test system and some necessary discussions and analysis are conducted to the experimental results

**KEY WORDS** solid propellant, continuous-wave  $\text{CO}_2$  laser, experiment