

# 固体推进剂燃烧驱动连续波 CO<sub>2</sub> 气动激光工作特性的数值计算

刘 宇 李 张景升 祝寿恩 余西龙

(北京航空航天大学 403 教研室 北京 100083)

**提要** 配合所建立的固体推进剂燃烧驱动 CO<sub>2</sub> 气动激光实验系统,对固体推进剂燃气与高压空气的掺混特性和该种气动激光的工作特性进行了数值模拟计算,有助于获得较为理想的激光工作介质和较高的激光功率输出。

**关键词** 固体推进剂, CO<sub>2</sub> 气动激光, 数值计算

## 1 引 言

固体推进剂燃烧驱动气动激光是一种特点突出的激光系统<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 μm 的激光输出功率并将废气由排气段排出。该种激光能源自备,同等功率下体积最小,成本低,功率易于提高,可不依赖真空系统工作,且排出废气无明显污染,值得重视和发展。目前我校所建立的实验系统已获得 11.50 kW 的平均功率输出,进行过上百次的成功实验。

对于激光介质的形成,主要关心的燃气空气混合气体的参数有燃烧热、燃烧产物、组份、温度、焓、压力以及比热等。对于激光系统而言,则需要了解工作介质的气动热力学参数、谐振腔和喷管排的有关参数对激光输出功率和比功率的影响。本文的控制方程组和相应的计算软件正是为解决这些问题而发展的,有关计算不仅对实验系统的建立起到指导作用,而且也得到实验测量结果的验证。

## 2 实验装置

整个实验系统的核心部分如图 1 所示,包括固体推进剂燃气发生器、喷管排、谐振腔和排气段。在燃气发生器内,前端为固体推进剂装药,后端为燃气与空气的掺混室。谐振腔内装有 4 片镜子,每边各 2 个,其中有 3 块无氧铜反射镜和一块 ZnSe 半透镜,为半球式共振稳定腔。输出激光束直径为 73 mm。

实验系统的辅助设备主要有高压空气贮罐、计算机控制与数据采集系统。通过压力传感器、温度传感器、真空传感器和功率计采集实验参数。

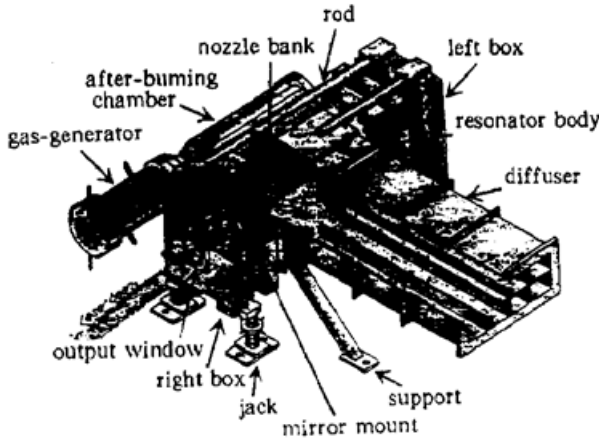


图 1 固体推进剂燃烧驱动气动激光系统  
Fig. 1 Solid propellant combustion driven GDL system

该实验系统不同于一般 CO<sub>2</sub> 气动激光的地方是以固体推进剂为激光的能量源, 将固体推进剂燃烧产物的热能转换为激光能。10 kW 的激光功率输出仅需消耗固体推进剂 300 g 左右。其谐振腔、喷管排和扩压段等同其它 CO<sub>2</sub> 气动激光器没有太大差别, 可以转用成熟的技术。目前实验时的喷管排前压力为 3.5 MPa 左右, 温度为 1800 K 左右, 小信号增益为 0.4 左右。由于该系统的介质形成方式还可以进一步改进, 可使小信号增益大幅度提高, 同时其喷管排前的压力也可进一步提高, 所以其功率的提高潜力还很大。目前该系统的热光转换效率约为 1%。由于采用的是稳定腔, 所以激光为多模输出。如采用非稳腔可以获得近单模激光输出, 但功率会有较大降

低。

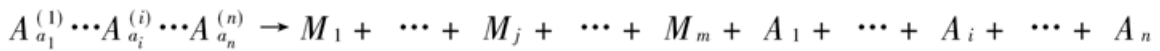
### 3 固体推进剂燃气和空气的掺混计算<sup>[2]</sup>

为了使计算简单、合理、实用, 采用以下基本假设: 均相或非均相燃气由多组份的理想状态构成, 该状态是焓或熵的热力学函数。比热和平衡常数不依赖压力, 而同温度有很强的相关性。初始确定的燃烧产物组份, 由一系列可能产生的分子物质构成, 以避免考虑随机数量非常复杂的输入输出和计算麻烦。

将输入的燃气或空气组份写成如下通用形式

$$A_{a_1}^{(1)} A_{a_2}^{(2)} A_{a_3}^{(3)} \cdots \cdots A_{a_n}^{(n)}$$

该通式表明在 1 kg 气体中各物质的莫尔数。A<sup>(i)</sup> 表示气体中第 i 种原子, a<sub>i</sub> 表示 1 kg 气体中第 i 种原子的莫尔数, n 表示气体中所有原子数。任何燃烧气体的分解可写成如下通式



式中 M<sub>j</sub> 表示不同的分子物质, 即产物中有 m 种分子和 n 种原子。

在固定温度下可求解以下方程

$$\ln\left(\sum_{j=1}^m m_{ji} P \zeta_j + P \zeta_i\right) + \ln n \Sigma / P + \ln a_i = 0$$

$$\ln P \zeta_j - \sum_{i=1}^n m_{ji} \ln P \zeta_i + \ln K_j = 0$$

$$\ln\left(\sum_{j=1}^m P \zeta_j + \sum_{i=1}^n P A_i\right) - \ln P = 0$$

式中 P 为混合气体压力, ζ<sub>j</sub> 为 j 种分子组份的摩尔分数, ζ<sub>i</sub> 为 i 种原子组份的摩尔分数, m<sub>ji</sub> 为所有分子组份假定式的矩阵, a<sub>i</sub> 表示第 i 种燃料假定化学式的摩尔分数, nΣ 表示 1 kg 燃料中的总摩尔数, K<sub>j</sub> 为第 j 种分子组份的化学平衡常数。

化学分解产物的温度由如下能量守恒关系确定

$$H_f = H_\Sigma$$

H<sub>f</sub> 和 H<sub>Σ</sub> 分别为燃气和燃烧产物的焓, 是温度的函数。

混合气体的参数焓、定压比热、分子量、气体常数、总热容量、比热比分别按以下各式计算

$$H_{\Sigma} = \frac{n_{\Sigma}}{P} \left( \sum_{j=1}^m P \zeta_j H_j + \sum_{i=1}^n P \zeta_i H_i \right)$$

$$C_{p\Sigma} = \frac{n_{\Sigma}}{P} \left( \sum_{j=1}^m P \zeta_j C_{pj} + \sum_{i=1}^n P \zeta_i C_{pi} \right)$$

$$\mu_{\Sigma} = \sum_{j=1}^m \zeta_j \mu_j + \sum_{i=1}^n \zeta_i \mu_i$$

$$R_{\Sigma} = \frac{8314}{\mu_{\Sigma}}$$

$$f_0 = n_{\Sigma} R_{\Sigma} T$$

$$\gamma = \frac{C_{p\Sigma}}{C_{p\Sigma} - R_{\Sigma}}$$

式中  $\mu_j$  和  $\mu_i$  分别为原子和分子组份的原子量和分子量。

在方程的求解中主要采用了常微分方程组、线性或非线性代数方程组、矩阵求逆、多项式插值和样条插值等基本数值算法。

#### 4 计算结果与实验测量结果的比较

利用以上成份的计算结果, 考虑不同分子振动能级的振动能交换方式, 根据非平衡气体流动的能量守恒、动量守恒、质量守恒和热力学状态方程, 可以推出完整的数值求解方程组, 用于激光输出功率和比功率的计算<sup>[3]</sup>。

工作介质的气动热力学参数和激光器件参数, 如喷管排几何尺寸、谐振腔及镜片参数等对计算结果的影响集中反映在功率上, 这些参数是计算程序必须的输入参数。

利用计算程序进行了大量与实验相关的计算, 在此仅给出部分计算结果。图 2(a) 是不同空气与燃气流量比  $\beta$  值下主要激光介质组份的变化, 图 2(b), (c) 是不同  $\beta$  值下喷管排前温度和激光输出比功率的变化, 并给出计算结果同实验测量结果的比较。从图 2(a) 可以看出, 在  $\beta = 2$  附近燃气与空气的混合气体由贫氧状态转为富氧状态。当  $\beta = 3.5$  左右时, 掺混后的气体组份比例比较合适。通过不同工作条件和不同气源条件的计算分析可以优选最佳的激光工作

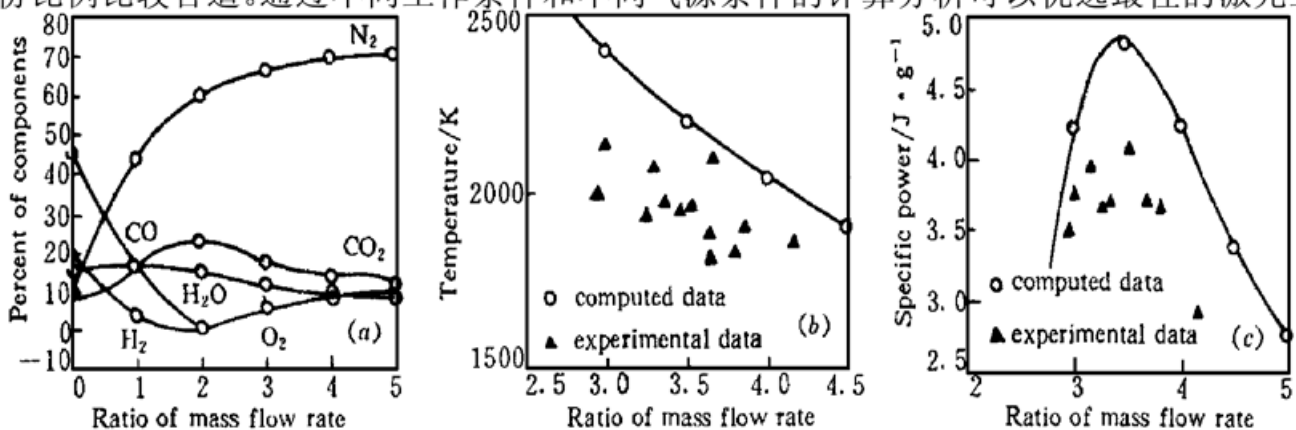


图 2 组份百分数 (a)、喷管排前温度 (b) 和比功率 (c) 与比质量流率的关系

Fig. 2 Dependence of percentage of components (a), temperature before the nozzle bank (b) and specific power (c) on ratio of mass flow rate

条件。从图 2(b) 和图 2(c) 可以看出最大温度位置和最大比功率输出的位置是错开的, 这就需要协调选择合适的激光工作点。从图 2(c) 中也可以看出计算出的比功率分布同实验测出的比功率分布规律是一致的, 计算结果稍高, 主要是计算忽略传热等损失造成的。激光的最大输出比功率出现在  $\beta = 3.5$  左右的位置, 计算和实验结果相一致。

### 参 考 文 献

- 1 A. S. Boreisho, A. F. Leonov. Active media inhomogeneities of gas flow laser. AIAA 93-3166, 1993
- 2 Li Yimin, Zhang Zhongqin, Zhang Yuanjun. Principle of Solid Rocket Motor. Beijing: Beijing University of Aero. and Astro. (BUAA) Press, 1991. 50~ 108 (in Chinese)
- 3 Tan Hong, Zhu Zonghou. Techniques of Gasdynamic Laser. Beijing: National Defence Industry Press, 1977. 9~ 30 (in Chinese)

## Numerical Simulation on Working Properties of a Solid Propellant Combustion Driven CW-CO<sub>2</sub> Gasdynamic Laser

Liu Yu Li Lu Zhang Jingsheng Zhu Shouen Yu Xilong  
(Faculty 403, Beijing University of Aero. and Astro., Beijing 100083)

**Abstract** In the study of a solid propellant combustion driven CW-CO<sub>2</sub> gasdynamic laser system built, the mixing properties of the solid propellant gas and high pressure air, and the working properties of the experimental system have been simulated by the numerical method. It may be helpful to obtain comparatively ideal laser working media and high power laser output.

**Key words** solid propellant, CO<sub>2</sub> gasdynamic laser, numerical simulation