

# 推进剂火焰烟尘对 CARS 测温精确度的影响

郝海霞, 李春喜, 王江宁, 赵凤起

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘 要:** 采用透过率(激光透过率、可见光透过率)表征推进剂火焰烟尘的量, 以理论计算温度作为 CARS (Coherent Anti-Stokes Raman Spectrometry) 测温的相对标准温度, 并将测得的 CARS 温度与热电偶温度进行了对比。通过研究 CARS 温度和理论计算温度的差值与透过率的相关性得到烟尘对 CARS 测温的影响规律: CARS 测温的偏差随着推进剂火焰中烟尘量的增加而增大; 推进剂火焰烟尘对 CARS 测温精度的影响规律基本呈线性关系。

**关键词:** 应用物理学; 固体推进剂; 火焰烟尘; CARS 测温; 精确度

**中图分类号:** TJ 55; V 512

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1007-7812(2005)02-0023-03

## The Influence of Propellant Flame Soot on the Precision of CARS Thermometry Measurement

HAO Hai-xia, LI Chun-xi, WANG Jiang-ning, ZHAO Feng-qi

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The quantity of propellant flame soot was characterized with the light transmission including the laser transmission and the visible light transmission, the computed temperature in theory was chosen as the relative standard temperature of CARS temperature, and the value of CARS temperature was compared with that measured by a thermocouple technique. Studying the correlation between the light transmission and the difference of CARS temperature and the theoretical temperature, the conclusions were obtained that the variation of CARS temperature is augmented with the soot increase in propellant flame and that the relationship between propellant flame soot and the precision of CARS temperature measurement is basically linear.

**Key words:** applied physics; solid propellant; flame soot; CARS temperature measurement; precision

## 引 言

CARS 技术自 20 世纪 70 年代问世以来, 已成功应用于多种火焰温度的测量<sup>[1-5]</sup>, 应用范围从洁净火焰的稳态燃烧发展到烟尘火焰的复杂燃烧。关于烟尘火焰的研究也主要集中在普通有机物燃烧温度的测试, 在推进剂中的应用报道还比较少。对于普通有机物的烟尘火焰, 燃烧产物主要是 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O, 火焰相对稳定, 烟尘对 CARS 测温的影响研究采用 C/O 的值来表征烟尘量是可行的<sup>[6]</sup>, 但是对于推进剂来说, 不仅含有碳和氢元素等有机成分, 还含有铅、铜、铝等金属组分, 其火焰烟尘中除 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 之外, 还有一些金属氧化物颗粒, 因而在研究推进剂烟尘对 CARS 测温的影响时, 不能简单地用 C/O 的值来表示, 而是采用透过率(激光透过率、可见光透过率)来表征推进剂的烟尘量, 通过得到推进

剂烟尘火焰的 CARS 温度研究透过率与 CARS 温度的关系, 从而得到烟尘对 CARS 测温的影响。CARS 温度的测量是在氢/空气预混平面火焰温度测量的基础上进行校准的, 以推进剂理论计算得到的温度作为标准温度, 参照热电偶所测的温度, 可以得到 CARS 温度与这个标准温度的差值, 研究这个差值与透过率是否有规律或者有什么样的规律。在研究过程中, 选取 10 种推进剂作为研究对象。

## 1 CARS 测量系统

CARS 测量系统包括提供泵浦光的 YAG 激光器和 Stokes 光的染料激光器, 相应地使两束光达到一定相位匹配, 产生 CARS 信号的外部光路系统以及采集 CARS 信号并放大信号的多通道光学分析系统(OMA 系统)<sup>[7]</sup>。其基本光路如图 1 所示。YAG 激光器的基频波(1.064 μm)经过倍频晶体后产生倍

收稿日期: 2004-01-20

作者简介: 郝海霞(1980-), 女, 硕士研究生, 主要从事推进剂燃烧的研究。



频光( $\lambda = 532 \mu\text{m}$ ), 然后通过分光镜  $BS_1$  一部分进入染料激光器激发染料激光(Stokes 光)  $\omega_s$ , 另一部分作为泵浦光  $\omega_p$ , 经过分光镜  $BS_2$ 、全反射镜  $M_1$  和  $M_2$  与染料激光经过  $M_3$  全反射镜的燃料激光  $\omega_f$  同时到达中心孔径为 4 mm 的反射镜 AM。染料激光  $\omega_s$  直接通过 AM 的中心孔, 泵浦光  $\omega_p$  被 AM 反射形成由高斯光束变成了环形光束, 这样可以满足 CARS 的相位匹配要求。 $\omega_s$  在  $\omega_p$  的环形和  $\omega_f$  平行地到达同焦距的聚焦透镜组  $L_1$ 、 $L_2$ , 这两束光被  $L_1$  聚焦于测试点, 产生 CARS 信号  $\omega_c$ , 然后所有频率的信号又被  $L_2$  发散形成平行光到达双色镜 DM, 90% 以上的  $\omega_s$  和  $\omega_p$  被反射, CARS 光束  $\omega_c$  透过 DM, 通过空间滤波器 SF 滤去共线的 CARS 信号和干涉滤波片 F 滤掉残存的  $\omega_s$  和  $\omega_p$ , 然后被聚焦透镜  $L_3$  ( $f = 4 \text{ mm}$ ) 聚焦于光纤头, 经过光纤进入光谱仪, 由 IC-CD 接收, OMA 控制器采集信号得到 CARS 谱并存入计算机作进一步的处理。

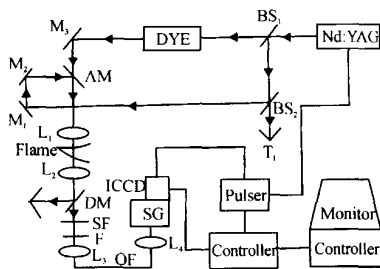


图 1 CARS 实验装置示意图

Fig 1 Schema of CARS experiment setup

光路设计主要是为了提高光束反射和透射的效率, 达到理想的匹配条件<sup>[8]</sup>, 提高空间分辨率, 从而提高温度测量的准确性。

## 2 测量结果

### 2.1 透过率的测量结果

由于不知道推进剂的透过率, 依据不同的燃速选取 10 种药条进行透过率的测试。选取的药条分别为 LL、SDP、QW、03TW、GHQ、N 03、N 04、DN 09、DN 10、DN 11, 测定了激光透过率  $T_1$  和可见光透过率  $T_2$ , 测量结果如表 1 所示。

### 2.2 理论计算温度和热电偶测温结果

样品的理论温度是通过能量计算程序计算得到的, 需要的参数主要是样品中每一种组分的化学式、该组分的质量百分含量、相应的生成焓以及要计算温度的压力。为使理论温度更能切合实际温度, 并与实际热电偶测得的温度进行对照, 选取合适的计算出口为 0.1 MPa 压力下的温度作为理论计算温度,

理论计算温度( $t_0$ )和热电偶测出温度( $t_1$ )的结果以及两者的差值如表 2 所示。

表 1 样品透过率的测定结果

Table 1 The light transmission ratio of the sample

样品名称	$T_1/\%$	$T_2/\%$
LL	0.3	3.9
SDP	12.6	46.2
QW	19.0	49.8
03TW	70.9	84.8
GHW	71.8	82.2
N 03	90.2	93.1
N 04	91.0	93.7
DN 09	96.2	97.5
DN 10	82.2	87.8
DN 11	84.6	90.4

表 2 样品理论温度和热电偶温度结果

Table 2 The theoretical and thermocouple temperature of the sample

样品名称	$t_1/\text{K}$	$t_0/\text{K}$	$(t_0 - t_1)/\text{K}$
LL	1391	1022	-371
SDP	1584	1406	-178
QW	1361	1575	214
03TW	1689	2106	417
GHW	2073	2131	58
N 03	1925	2283	358
N 04	1658	2244	586
DN 09	2533	2303	-230
DN 10	2517	2547	30
DN 11	2579	2536	-45

### 2.3 CARS 测温结果

CARS 测温系统所取的均是长为 20 mm, 截面为 5 mm × 5 mm 的药条, 药条的位置在测试点的正下方约 10 mm 处; 脉冲为 10 Hz, 也就是每秒取 10 个 CARS 谱, 预先设置的是取 50 个谱图, 在 5 s 内所有药条基本燃烧完毕, 燃速快的可以在 3 s 内燃烧完。对所有谱图进行计算处理得到温度, 依据温度的分布情况, 选取燃烧相对稳定的高温区谱图的温度, 得到高温区的平均温度  $t_{21}$  和最高温度  $t_{22}$ 。CARS 的平均温度和最高温度以及它们与理论计算温度的差值结果如表 3 所示。

表 3 样品 CARS 的平均温度和最高温度

Table 3 The CARS equal and highest temperature of the sample

样品名称	$t_{21}/\text{K}$	$t_{22}/\text{K}$	$(t_{21} - t_0)/\text{K}$	$(t_{22} - t_0)/\text{K}$
LL	2134	2288	1112	1266
SDP	1944	2176	538	770
QW	1947	2177	372	602
03TW	2210	2254	104	148
GHW	2267	2377	136	246
N 03	2289	2424	6	141
N 04	2108	2200	-136	-44
DN 09	2163	2270	-140	-33
DN 10	2310	2364	-237	-183
DN 11	2349	2518	-187	-18

需要说明的是, 图 1 的 CARS 测温系统预先通过测试预混平面火焰的温度对测温结果进行了校准, 校准温差为 3.4%<sup>[9]</sup>, 这也说明测温的可靠性。

### 3 实验结果分析

依据实验测定的透过率和 CARS 测温的结果(见表 1 和表 3), 绘制了 CARS 温差和透过率的关系点图(图 2 和图 3), 对图 2 和图 3 点图的 CARS 平均温差进行了线性拟合。从 CARS 测得的温差和透过率的坐标关系图中可以看出, 推进剂的火焰烟尘量越大, 也就是透过率(激光透过率和可见光透过率)越小, 则 CARS 温度和理论计算温度的偏差越大; 反之, 推进剂的火焰烟尘量越少, 也就是透过率越大, 则两者的温差也越小, 且基本上呈线性关系, 图 3 中的规律更明显一些。

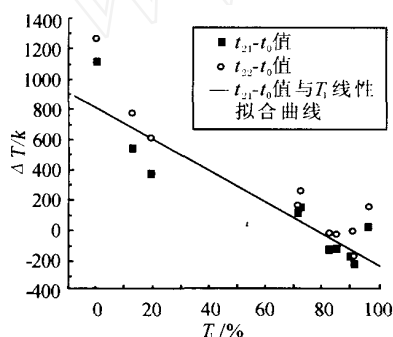


图 2 CARS 温差与激光透过率之间的关系图

Fig 2 The relation between the CARS temperature difference and the laser transmission ratio

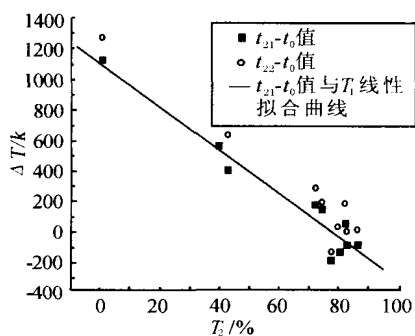


图 3 CARS 温差与可见光透过率之间的关系图

Fig 3 The relation between the CARS temperature difference and the visible light transmission ratio

这主要是由于在测试过程中, 推进剂组分的不同导致燃烧的产物不同, 产生烟尘的量和烟尘的颗粒同时影响了光束, 大量烟尘对光束影响加大, 因而造成信号减弱, 使得背景的噪音相对加强, 造成拟合计算的误差; 另一方面, 烟尘量大的推进剂燃烧过程

中产生的碳自由基的量也增加, 而这些自由基的峰位置刚好在热带峰处, 从而提高了热带峰的强度, 导致热带峰与冷带峰的比例加大, 从而使得拟合和计算的温度比实测温度偏高。这两方面的因素造成了烟尘大的火焰温度测量偏差加大。

### 4 结论

无论是理论计算温度还是实测温度, 基本上透过率越高, 其温度也越高, 这说明温度与其透过率有一定的关系; 推进剂火焰烟尘对 CARS 测温的影响基本上呈线性关系, 烟尘量越大, CARS 温度与理论温度的偏差也越大。

致谢: 本工作得到中科院力学研究所高温气体动力学开放实验室赵建荣、杨仕润等人的帮助, 在此表示感谢。

### 参考文献:

- [1] 郝海霞, 李春喜 推进剂燃料火焰温度 CARS 测试技术问题的探讨[J] 火炸药学报, 2004, 27(1): 45-48
- [2] Stufflebeam J H. CARS diagnostics of solid propellant combustion at elevated pressure[J] Combustion Science and Technology, 1989, (66): 163-179
- [3] Bohm H, Feldemann C, Heidemann T, et al Soot formation in premixed  $C_2H_4$  - Air flames for pressures up to 100 bar[R]. Twenty-fourth Symposium (International) on Combustion, 1992: 991-998
- [4] Harris L E, Melwain M E. CARS temperature measurements in a propellant flame[J] Combustion and Flame, 1982, (48): 97-100
- [5] Bengtsson P E, Alden M. Application of a pulsed laser for soot measurements in premixed flames[J] Appl Phys(13), 1989, (48): 155-164
- [6] Kroll S, Alden M, Bengtsson P E, et al An evaluation of precision and systematic errors in vibrational CARS thermometry[J] Appl Phys(13), 1989, (49): 445-453
- [7] 赵建荣, 杨仕润, 俞刚 CARS 在超音速燃烧研究中的应用[J] 激光技术, 2002, 24(4): 207-212
- [8] 赵建荣, 杨仕润, 俞刚 环形泵浦相位匹配 CARS 技术的匹配方式和空间分辨率的实验研究[J] 激光与光电子学进展, 1998, 7(391): 12-17
- [9] 杨仕润, 赵建荣, 俞刚, 等 氢/空气预混平面火焰 CARS 温度测量[J] 激光技术, 2000, 24(5): 277-280