

文章编号: 1006-9941(2001)03-0133-03

# CARS 技术及其在火炸药燃烧诊断中的应用

李春喜, 赵 鸣, 赵凤起, 陆殿林, 李上文

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 介绍了推进剂燃烧火焰的特点和 CARS(Coherent Anti-Stokes Raman Scattering) 检测技术在推进剂燃烧诊断(温度、浓度和燃烧机理研究)中的应用。根据研究结果, 论述了 CARS 技术在推进剂燃烧诊断应用中的几个关键问题: 准确度、时间分辨力和空间分辨力。

**关键词:** 推进剂; 燃烧火焰; CARS

**中图分类号:** V512; O433.5<sup>+</sup>4

**文献标识码:** A

## 1 引言

固体推进剂燃烧关键区域是从燃烧熔融表面(及表面下邻近区域), 直至燃烧火焰达到平衡态的气相区域, 大约为 1 cm 左右。在这一区域内, 推进剂的燃烧涉及到分子的动态反应及反应温度的瞬态变化, 在反应过程中还要产生高温、高压、烟尘。就时空而言, 推进剂燃烧温度变化梯度都是很大的, 因此要对其过程进行实时诊断分析, 要求时间、空间分辨力很高, 诊断技术较为复杂。

目前能应用于推进剂燃烧火焰实时诊断的技术不多, CARS 技术是能够用推进剂燃烧诊断的技术之一<sup>[1,2]</sup>。该技术始于 60 年代, 70 年代应用于燃烧诊断, 80 年代应用于推进剂燃烧火焰诊断, 其时间分辨力可以达到纳秒至皮秒级<sup>[1,2,3]</sup>。

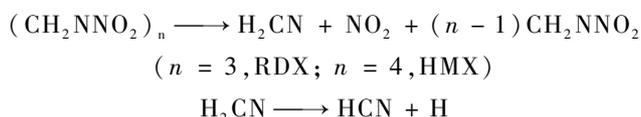
美国的海军研究实验室(NRL)、空军火箭推进实验室(AFAL)、陆军研究发展中心(ARDC)、联合技术研究中心(UTRS)等研究机构已对 CARS 技术进行了深入的研究<sup>[3,4]</sup>。英国的 Williams 等人<sup>[5]</sup>于 1993 年发表了关于液体燃料火箭发动机羽焰 CARS 诊断技术方面的研究结果。我国的燃烧技术国家级重点实验室也采用单脉冲 CARS 技术测定了推进剂燃烧火焰的温度, 并给出了燃烧火焰的拟合温度值<sup>[6]</sup>。

## 2 CARS 技术在推进剂燃烧机理研究中的应用

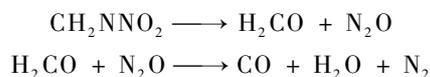
HMX 和 RDX 是硝胺类固体推进剂的主要成分,

在无烟或少烟推进剂和低易损推进剂方面的应用日益受到人们的关注, 从理论上和实践中对其进行深入研究, 研究领域涉及到热分解、点火、气相反应和固相反应等各个方面。Stufflebeam 等人<sup>[7]</sup>于 1991 年报导了 CARS 技术应用于硝胺推进剂燃烧反应机理研究的结果。

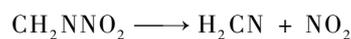
HMX、RDX 都是由最基本的  $\text{CH}_2\text{NNO}_2$  构成<sup>[8]</sup>, 硝胺初始反应步骤是  $\text{N}-\text{NO}_2$  键的断裂与剩余环结构碎片:



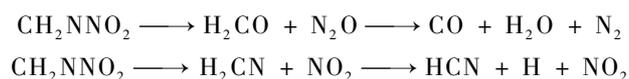
早期分解研究<sup>[9]</sup>指出,  $\text{CH}_2\text{NNO}_2$  会进一步生成  $\text{H}_2\text{CO}$ , 这是因为随后进行的  $\text{H}_2\text{CO}$  与  $\text{N}_2\text{O}$  的反应速率很快, 且是放热反应, 即



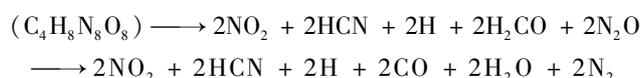
后来又有热解实验<sup>[10]</sup>表明, 在更高温度和加热速率条件下,  $\text{H}_2\text{CN}$  和  $\text{NO}_2$  是重要的分解产物, 即:



因此, 硝胺热分解有两种反应路线:



但也有人认为<sup>[11]</sup>存在下述分解机理:



为证实此说法, Stufflebeam 等人应用 CARS 技术进行实际燃烧诊断, 得到高压下推进剂近表面燃烧区的 CARS 谱。当采样区距燃烧表面 0.1 mm 高, 实验压

收稿日期: 2001-04-16; 修回日期: 2001-06-12

基金项目: 97KJ53.9.1.PZ359

作者简介: 李春喜(1943-), 男, 工程师, 从事结构化学研究。

力为 1.0 MPa 时,谱图显示有 HCN 和 CO 存在;实验压力为 1.3 MPa 时,谱图显示有 H<sub>2</sub>CO 和 CH<sub>4</sub> 存在。由此可看出,上述两种反应路线都有可能存在,其间存在着路线竞争,表面上看与压力有关。

### 3 CARS 在推进剂燃烧诊断中的几个问题

#### 3.1 测温准确度:烟尘粒子干扰和激光源功率的影响

燃烧过程中生成的 C<sub>2</sub> 粒子对 N<sub>2</sub> CARS 谱的影响较大。实验发现, C<sub>2</sub> 自由基强烈吸收 N<sub>2</sub> CARS 谱中的基带峰部分(即所谓的 CARS 冷带),致使 CARS 谱温度拟合值明显偏高,这种干扰在 CARS 测温中具有普遍性。我们知道, N<sub>2</sub> CARS 谱的基带( $\nu = 0 \rightarrow \nu = 1$  Raman 跃迁)和第一个热带( $\nu = 1 \rightarrow \nu = 2$  Raman 跃迁)就在 473.2 nm 和 474.4 nm 之间,而自由基 C<sub>2</sub> 的吸收现象就出现在 473.7 nm,刚好落在 N<sub>2</sub> CARS 谱基带区域,从而吸收 CARS 基带部分信号。因此,在进行实验 CARS 谱拟合时剔除 C<sub>2</sub> 的吸收干扰就显得尤为重要。

激光源功率变化也会影响 CARS 谱,与上述的 C<sub>2</sub> 粒子吸收影响对比, C<sub>2</sub> 粒子吸收影响 CARS 基带信号,而激光功率变化则影响 CARS 热带。前者压低基带,后者抬高热带,二者效果一致,都能升高 CARS 的冷热带比率,结果导致拟合温度值偏高。

#### 3.2 时间分辨力:系统同步问题

由于推进剂燃烧具有瞬变性,为此要求 CARS 诊断技术要有较高的时间分辨力。一是时间响应要快,二是响应频率要高。为获得瞬态燃烧温度的时间分布, CARS 系统中的激光器采用脉冲激光器(例如每秒 20 脉冲,脉宽 8 ns),在探测端选用开门时间为 5 ns 透镜耦合增强器(LCI)和每秒可读出大约 50 帧的 CCD (Charge Coupled Device) 探测器。这些措施为实时测试提供了必要的条件。但要准确、高效地获取信号的时间分布,还要求采集数据要与激光源系统协同工作,精确的同步控制十分重要。

(1) 泵浦光束与斯托克斯光束同时到达并会聚于采样区是 CARS 信号产生的必要条件。

(2) CARS 信号到达 LCI, LCI 必须同步产生高压脉冲,对信号实时放大(相当于快门开)。

(3) 放大的信号到达 CCD 后,在下一信号到达前, CCD 需完成一次读取或累积。

燃烧技术国家级重点实验室研制了一台用于推进剂燃烧 CARS 诊断系统的同步脉冲时序控制装置<sup>[12]</sup>。利用该装置,完成了 CARS 系统激光发射与信号采集

的同步,保证了信号的准确采集,提高了信噪比,实现了单脉冲 CARS 诊断技术,为推进剂燃烧实时测试及微观分析提供了技术保障。

#### 3.3 空间分辨力:伺服马达控制药条燃烧器

应用 CARS 技术研究推进剂燃烧火焰结构要有适当的燃烧器。燃烧压力不同,燃烧反应机理也不同,并且燃烧温度及燃烧产物组分浓度也会有变化。因此,只有测试压力接近真实燃烧压力时才能代表真实的燃烧结果。应用燃烧器就可以建立所需要的实验压力。

不同火焰高度处的燃烧结构化学是不同的,为研究某一高度处的火焰温度和组分浓度,在设计燃烧器结构时采用一个与电子控制步进马达相连的活塞,以实现推进剂药条燃烧表面回落时自动跟踪补偿,保证其燃烧表面固定在某一空间位置。

除此之外,还要求燃烧器具有另外一些功能:显示参考温度、压力、三维调节、燃烧表面和激光聚焦点定位标尺、推进剂药条自动点火、充排气路、点火与激光数采同步装置。从燃烧诊断角度看,这是研究推进剂燃烧化学,特别是研究推进剂燃烧表面上嘶嘶区或初始反应区的关键问题。

#### 参考文献:

- [1] Eckbreth A C, Bonczyk P A, Verdieck J F. Combustion diagnostics by laser raman and fluorescence techniques [J]. Prog. Energy Combust. Sci., 1979, 5: 253 - 322.
- [2] Druet S A J, Taran J-P E. CARS spectroscopy [J]. Prog. Quant. Electr., 1981, 7: 1 - 72.
- [3] Harris L E, McIlwain M E. CARS temperature measurements in a propellant flame [J]. Combustion and Flame, 1982, 48: 97.
- [4] Stufflebeam J H. CARS diagnostics for solid propellant combustion investigations [R]. AD - A248 660, 1992.
- [5] Williams D R, Mckeown D, Porter F M, et al. CARS and LIF measurements in a rocket engine plume [J]. Combustion and Flame, 1993, 94: 77 - 90.
- [6] 李春喜, 赵鸣, 张蕊娥, 等. 双基推进剂燃烧温度 CARS 测定技术 [J]. 火炸药学报, (待发表).
- [7] Stufflebeam J H. CARS diagnostics of reaction pathways for nitramine combustion [A]. AIAA/SAE/ASME 27th Joint Propulsion Conference [C], 1991.
- [8] Melius C F. The gas-phase flame chemistry of nitramine combustion [J]. CPIA Publication, 1982, 2(498): 155 - 162.
- [9] Robertson A J B. The thermal decomposition of explosives, II. Cyclotrimethylenetrinitramine and cyclotetram-

- ethylenetetranitramine [J]. Transactions of the Faraday Society, 1949, 45: 85 - 93.
- [10] Axworthy, A E, et al. High temperature pyrolysis studies of HMX, RDX and TAGN [J]. CPIA Publ. 1988, 1 (297): 253 - 265.
- [11] Hatch R L. Chemical kinetics modeling of NMX combustion [J]. CPIA Publ. 1987, 1(476): 383 - 391.
- [12] 赵鸣, 陆殿林, 袁潮, 等. CARS 系统同步脉冲控制研究 [J]. 火炸药学报, 2001, 24(2): 44.

## CARS for Diagnostics on Combustion of Propellants

LI Chun-xi, ZHAO Ming, ZHAO Feng-qi, LU Dian-lin, LI Shang-wen

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

**Abstract:** The features of the propellant combustion flame, such as high temperature, high pressure, transient, soot, and graded distribution of temperature and concentration, are described in brief, and the application of the CARS technique in propellant combustion diagnostics is introduced. Some key problems on the application of the CARS in propellant combustion diagnostics, such as accuracy, temporal resolution and space resolution, are discussed.

**Key words:** propellant; combustion flame; coherent anti-stokes Raman scattering (CARS)