

文章编号: 1672-8785(2016)03-0012-04

利用傅里叶变换红外光谱仪测量 固体推进剂的燃烧温度

张新良¹ 陈艳虹² 李 燕^{2*}

(1 陕西北方民爆集团有限公司, 陕西西安 710061 ;

2 南京理工大学化工学院, 江苏南京 210094)

摘 要: 利用布鲁克公司生产的 OPAG 33 型傅里叶变换红外光谱仪 (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR) 对固体推进剂燃烧火焰的温度进行了研究。在仪器的分辨率为 4 cm^{-1} 、测试距离为 20 m 的条件下, 实时测得了高能硝酸酯增塑聚醚 (Nitrate Ester Plasticized Polyether Propellant, NEPE) 固体推进剂燃烧火焰的红外发射光谱图。利用燃烧产物中 HCl 气体分子的发射光谱精细结构谱线计算了 NEPE 固体推进剂羽流的温度。实验结果表明, 利用被动式遥感 FTIR 光谱仪可对固体推进剂的燃烧温度进行快速实时的非接触式测量, 是一种有效的研究手段。

关键词: 固体推进剂; 羽流; 傅里叶变换红外光谱仪; 温度

中图分类号: E932.6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.03.003

Measurement of Combustion Temperature of Solid Propellant by FTIR Spectrometer

ZHANG Xin-liang¹, CHEN Yan-hong², LI Yan^{2,*}

(1. Shanxi North Industrial Explosive Group Co. Ltd., Xi'an 710061, China;

2. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The temperature of solid state propellant combustion flame is studied by a Bruker OPAG33 Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR). The infrared emission spectra of Nitrate Ester Plasticized Polyether Propellant (NEPE) solid propellant are measured with a resolution of 4 cm^{-1} at a testing distance of 20 m in real time. The temperature of NEPE propellant plume is calculated by using the fine structure emission spectral lines of HCl gas molecules released in combustion products. The experimental results show that a passive remote sensing FTIR can measure the temperature of solid propellant plume rapidly and non-contactly in real time. It is an effective means for research.

Key words: solid propellant; plume; FTIR; temperature

收稿日期: 2016-03-01

基金项目: 国家自然科学基金 (21207066)

作者简介: 张新良 (1974-), 男, 籍贯陕西人, 工程师, 主要研究方向为新型火工品及其性能测试技术。

E-mail: 626278440@qq.com

* **通讯作者:** 李燕 (1975-), 女, 籍贯山西人, 副教授, 博士, 主要研究方向为光谱分析、红外探测技术、新型火工药剂技术等。 E-mail: yanli@njjust.edu.cn

0 引言

近年来,随着航空、航天和国防事业的快速发展,对固体火箭发动机性能综合评估的要求越来越高。固体火箭发动机在工作过程中会形成具有明显特征信号的羽流。羽流的红外辐射特性与固体推进剂的配方和发动机的工作状态有关^[1],其中,羽流的温度是固体推进剂综合性评估中的重要指标。在对固体推进剂羽流温度的测定工作中,通常采用热电偶^[2]或者红外热像^[3]的方法,但热电偶对温度的响应有一定的滞后,且成本较高,而红外热像法则受背景辐射和羽流发射率的影响很大,难以得到真实的数据。由于固体推进剂的羽流中含有大量能产生红外辐射的气体分子(HCl、HF、CO₂、H₂O、CO等),这些分子具有明显的红外辐射特征,因此,采用 FTIR 光谱仪测量固体推进剂羽流的辐射特性受到了广泛的关注^[4-6],其中,采用气体分子的振转光谱精细结构对燃烧火焰温度进行计算^[7-9],是目前公认的较准确的方法。该方法与热电偶测温技术相比,最大的优点是采样速率与光谱仪的时间分辨率一致,在快速扫描状态下,可以得到羽流的实时温度数据。

本文利用 FTIR 光谱技术远距离实时采集了 NEPE 固体推进剂燃烧火焰的红外发射光谱图,根据推进剂燃烧产物中气态分子 HCl 发射光谱的精细结构,计算了火焰的温度。实验结果说明,遥感 FTIR 光谱法在测量燃烧温度等方面具有高分辨率、不干扰流场及非接触式遥感测量等优点。

1 理论部分

在高光谱分辨率的测试条件下,可以得到固体推进剂燃烧产物中气体分子的光谱精细结构,本文利用分子振转光谱测温法对固体推进剂的羽流温度进行测定,计算公式为^[10,11]

$$\ln[J\nu_0^4/I] = A[J(J \pm 1)] + B \quad (1)$$

式中, J 为每条谱线对应的下态转动量子数; ν_0 为每条精细结构谱线的中心频率(cm^{-1}); I

为谱线的相对强度; A 为 $\ln[J\nu_0^4/I]$ 与 $J(J \pm 1)$ 拟合直线的斜率, B 为拟合直线在纵坐标上的截距;当所选取的精细结构谱线为分子发射光谱的 R -分支时, $J(J \pm 1)$ 的符号取+,当所选取的精细结构谱线为分子发射光谱的 P -分支时, $J(J \pm 1)$ 的符号取-。

根据测得的气体分子发射光谱的 R -或 P -分支精细结构光谱,拟合出 $\ln[J\nu_0^4/I]$ 与 $J(J \pm 1)$ 的线性方程图,求得直线的斜率 A ,即可得到固体推进剂的羽流温度:

$$T = hcB_\nu/kA \quad (2)$$

式中, h 为 Planck 常数; c 为光速; k 为 Boltzmann 常数; B_ν 为气体分子的转动常数; T 为气体的绝对温度(K)。

2 实验部分

2.1 样品准备

待测试的 NEPE 固体推进剂样品主要由高氯酸铵、铝粉、硝化甘油、聚乙二醇、丁三醇三硝酸酯和奥克托今(HMX)等成分组成,单个样品重 30 g,将样品制成直径 20 mm、高 15 mm 的圆柱形装药。

2.2 实验方法

采用布鲁克公司的 OPAG 33 型红外光谱仪测量推进剂羽流的发射光谱,如图 1 所示。药柱与光谱仪之间的距离为 20 m。光谱仪的分辨率设为 4 cm^{-1} ,检测器为液氮冷却的碲镉汞(Mercury Cadmium Telluride, MCT)检测器,采用连续扫描模式实时采集火焰的发射光谱。



图 1 OPAG33 型傅里叶变换红外光谱仪

3 结果与讨论

3.1 固体推进剂火焰的时间分辨发射光谱图

实验获得了 NEPE 推进剂燃烧火焰的红外发射光谱图, NEPE 推进剂药柱的燃烧持续了大约 0.6 s, 共收集到 5 张谱图, 如图 2 所示。

从图 2 中可以清楚地看出, NEPE 推进剂燃烧后有大量气体产物出现, 主要是 CO_2 、 H_2O 和 CO 等, 从谱图中可以观察到各个产物的发射带。2240 cm^{-1} 、2280 cm^{-1} (红线) 和 2390 cm^{-1} (蓝线) 为 CO_2 的红外发射光谱带。 H_2O 蒸气的发射光谱在 3800 cm^{-1} ~ 3200 cm^{-1} 范围内, 其中 3615 cm^{-1} 为中心峰位, 3610~3230 cm^{-1} 范围为 P 分支, 3800~3620 cm^{-1} 为 R 分支; NO 和 NO_2 分子的谱峰位于 1615 cm^{-1} 和 1900 cm^{-1} 处, 但由于受到 CO 峰的干扰, 其表现很杂乱。此外, NEPE 固体推进剂燃烧产物中还出现了 HCl 分子的发射光谱, HCl 分子的谱峰位于 3150~2450 cm^{-1} 范围内。

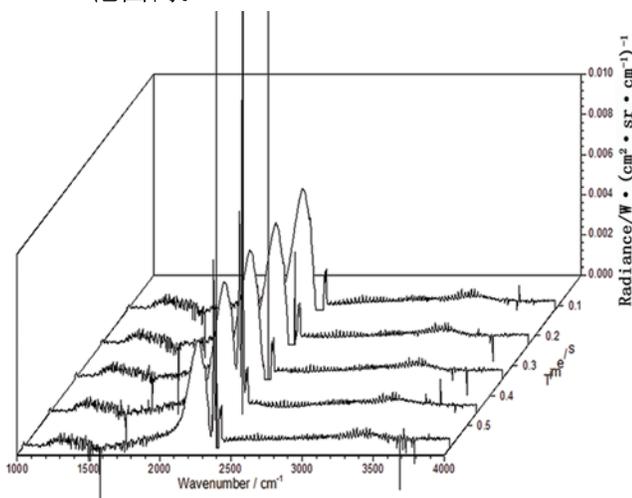


图 2 NEPE 推进剂的光谱辐射亮度随时间的变化三维

3.2 火焰温度的计算

从图 2 的 NEPE 推进剂火焰的红外发射光谱图中可以看出, 由于 NEPE 推进剂的成分中含有高氯酸铵, 因此, 其燃烧产物中有 HCl 气体, 相应地, 在 NEPE 推进剂火焰的发射光谱中出现了 HCl 的发射谱带 (3150~2450 cm^{-1} , 其中 2885 cm^{-1} 为中心峰位, 2450~2885 cm^{-1} 范围为 P 分

支, 2885~3150 cm^{-1} 范围为 R 分支, 如图 3 所示。

读取 HCl 谱线 P 分支精细结构中各条谱线的强度值, 利用分子振转光谱测温法, 即可得出各个时刻推进剂火焰的温度, 如图 4 所示。从图 4 中可见, NEPE 推进剂羽流的最高温度为 2003.5 K, 平均温度约为 1732.8 K, 羽流的温度呈先上升后下降的趋势。

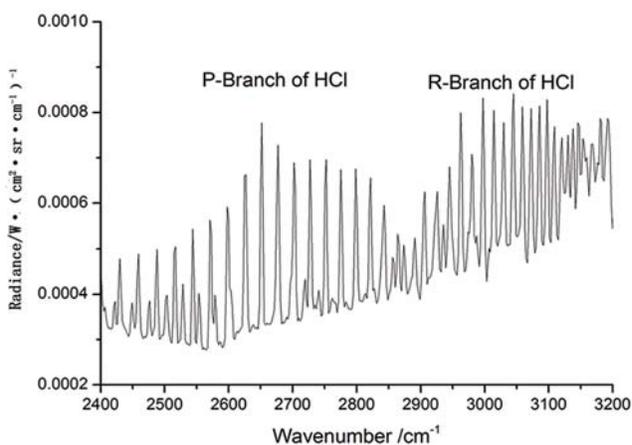


图 3 NEPE 推进剂火焰中 HCl 的发射光谱精细结构谱线

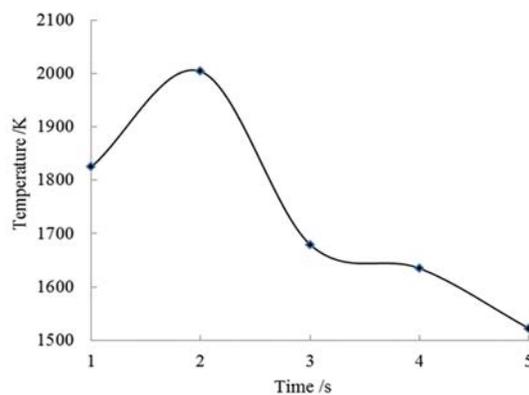


图 4 NEPE 推进剂的羽流温度曲线

4 结论

利用 OPAG 33 型红外光谱仪对 NEPE 固体推进剂的燃烧火焰温度进行了实时、原位和非接触式测试, 得到了火焰的实时温度变化曲线。NEPE 固体推进剂燃烧火焰的最高温度和平均温度分别为 2003.5 K 和 1732.8 K。研究表明, NEPE 固体推进剂的燃烧是一种剧烈变化、非

稳态的过程, 利用 FTIR 光谱仪测试可以在不干扰火焰流畅的前提下, 在宽波段范围内捕捉羽流快速变化的光谱信息, 获得羽流的温度等辐射特性随时间的动态变化过程。因此, FTIR 光谱仪是一种简便有效的固体推进剂辐射特性测试手段。

参考文献

- [1] Wang W C, LI S P, Zhang Q, et al. Infrared Radiation Signature of Exhaust Plume from Solid Propellants with Different Energy Characteristics [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2013, **26**(3): 594–600.
- [2] 李翔, 易新建. 固体火箭发动机羽焰温度流场测试研究 [J]. *航空兵器*, 2007 (6): 45–48.
- [3] Flores-Jardines E, Sch?fer K, Harig R, et al. Investigation of Temperature and Gas Concentration Distributions in Hot Exhausts(Airplanes and Burners) by Scanning Imaging FTIR Spectrometry[J]. *Proc Spie*, 2005, **5979**:59791A–59791A-12.
- [4] Wang H, Chen D, Wall G, et al . Measurement Technology for Material Emissivity Under High Temperature Dynamic Heating Conditions [J] . *Measurement*, 2013, **46**:4023–4031 .
- [5] Edgar F, Klaus S, Black J, et al. Remote Sensing of Aircraft Exhaust Temperature and Composition by Passive Fourier Transform Infrared (FTIR) [J]. *Proc. of SPIE*, 2007, **6745**:67451Q.
- [6] 罗明东, 吉洪湖, 黄伟, 等. 用 FTIR 光谱仪测量排气系统中红外光谱辐射强度的方法 [J]. *航空动力学报*, 2007, **22**(9): 1423–1429.
- [7] Li Y, Wang J D. The Real Time Diagnostics of Combustion Characteristics of Solid Propellant by Remote Sensing FTIR System [J]. *Instrument Science and Technology*, 2003, **31**: 33–47.
- [8] Zhang L M, Zhang L, Li Y, et al. The Application of High Time Resolved Passive FTIR for Combustion Property Study of Solid Propellant [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2006, **42**(5): 410–414.
- [9] 夏卿, 左洪福, 李绍成, 等. 航空发动机尾气的 FTIR 被动遥感 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, **29**(3): 616–619.
- [10] Li Y, Wang J D. The Real Time Diagnostics of Combustion Characteristics of Solid Propellant by Remote Sensing FTIR System [J]. *Instrument Science and Technology*, 2003, **31**: 33–47.
- [11] Zhang L M, Zhang L, Li Y, et al. The Application of High Time Resolved Passive FTIR for Combustion Property Study of Solid Propellant [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2006, **42**(5): 410–414.

(上接第 5 页)

参考文献

- [12] 于清旭, 李红, 林钧岫. 基于泛频 CO₂ 激光器的微量气体光声光谱仪 [J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(7): 669–671.
- [13] 夏林中, 李世国, 张春晓, 等. 3 ~ 5 μm 中红外光源产生概述 [J]. *科技信息*, 2011, **19**(4): 466–467.
- [14] Werle P, Slemr F, Maurer K, et al. Near- and Mid-infrared Laser-optical Sensors for Gas Analysis [J]. *Opt Lasers Engin*, 2002, **37**(2): 101–114.
- [15] 李秀丽, 冯素娟, 毛庆和. 小型化宽调谐光纤型 DFG 中红外激光源的研制 [J]. *量子电子学报*, 2012, **29**(3): 298–302.
- [16] 林宏, 何武光, 李卫中. 用于大气 CO₂ 浓度探测的高功率宽谱红外激光源 [J]. *激光与光电子学进展*, 2015, **52**(8): 081401.
- [17] 彭英才, 傅广生. *纳米光电子器件* [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [18] 沈炎龙, 黄珂, 周松青, 等. 10 W 级高功率单模中红外 2.8 μm 光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2015, **42**(5): 0502008.
- [19] Armin L. Quantum Cascade Lasers, Systems, and Applications in Europe [C]. *SPIE*, 2005, **5732**: 122–133.
- [20] Weidman D, Kosterev A, Roller C, et al. Monitoring of Ethylene by a Pulsed Quantum Cascade Laser [J]. *Appl Opt*, 2004, **43**(16): 3329–3334.
- [21] 宋淑芳, 邢伟荣, 刘铭. 量子级联激光器的原理及研究进展 [J]. *激光与红外*, 2013, **43**(9): 972–976.
- [22] Mohan A, Wittmann A, Hugi A, et al. Room-temperature Continuous-wave Operation of an External-cavity Quantum Cascade Lasers [J]. *Optics Lett*, 2007, **32**(19): 2792–2794.
- [23] Bai Y, Bandyopadhyay N, Tsao S, et al. Room Temperature Quantum Cascade Lasers with 27% Wall Plug Efficiency [J]. *Appl Phys Lett*, 2011, **98**(18): 181102 .
- [24] 程美英. 硅基微机械红外光源的设计和制备 [D]. 厦门: 厦门大学, 2009.
- [25] 郭伟杰. 煤矿井下多种气体一体化传感技术的研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.