

文章编号: 1006-9941(2004)03-0178-03

FTIR 光谱遥测固体火箭推进剂燃气辐射能

王宏¹, 李春迎², 张小玲²

(1. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065;

2. 陕西师范大学, 陕西 西安 710062)

摘要: 用遥感 FTIR 光谱测定了固体火箭推进剂燃气的辐射亮度。记录了分辨率为 1 cm^{-1} 时, $500\sim 4\,500\text{ cm}^{-1}$ 波段内两种推进剂燃气的 IR 辐射亮度谱, 积分 $2\,000\sim 3\,333\text{ cm}^{-1}$ 区间辐射亮度, 获得了两种推进剂燃气积分亮度(辐射能)随时间变化的曲线, 得到了两种推进剂燃气组分和燃烧特性信息。

关键词: 光学; 燃气; 遥感测量; FTIR; 辐射能量; 固体推进剂

中图分类号: V51; O43

文献标识码: A

1 引言

特征信号是指固体火箭发动机在工作过程中形成羽流的可见性能、辐射性能及对各种制导信号的干扰特性。特征信号的大小, 直接影响导弹的制导和隐身。国内外近年来应用多种途径和方法降低信号特征, 因此, 特征信号的测试技术研究尤为重要, 同样对火箭发动机燃气的红外辐射性能测试也是发展低特征信号推进剂的迫切需要。

FTIR 遥测技术由于其固有的多光路、高通量、高分辨率、非干扰流场、非接触式遥感测量等优点得到光谱学家们的青睐, 并被应用于环境监测^[1]、太阳和月亮红外发射测量^[2]、飞机排气^[3]、推进剂药条燃烧性能测试^[4~7]等各个领域。本文利用 FTIR 遥测技术获得了推进剂的红外辐射亮度分布图, 并对 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 大气窗口进行了能量积分, 对比了不同配方推进剂的能量分布和随时间的变化情况。

2 基本原理^[8]

遥感测量中, 需要测量待测样品的发射光谱或者发射率 $\varepsilon(\nu)$ 。 $\varepsilon(\nu)$ 为指定温度下, 待测辐射体的辐射通量密度与同样温度下的黑体辐射通量密度之比。

对于气体:

$$\varepsilon(\nu) = 1 - \tau(\nu) \quad (1)$$

其中 $\tau(\nu)$ 为待测样品的光谱透射率。

直接测量待测样品的发射率 $\varepsilon(\nu)$ 是很困难的, 因为在温度 T 时, 样品的单光束光谱 $S(\nu, T)$ 包含有各方面的贡献:

$$S(\nu, T) = R(\nu) [\varepsilon(\nu)H(\nu, T) + B(\nu) + \rho(\nu)I(\nu, T)] \quad (2)$$

式中: T 为待测样品的绝对温度, K ; $R(\nu)$ 为仪器响应函数; $H(\nu, T)$ 为 Planck 函数; $B(\nu)$ 为直接射到辐射源上的背景; $\rho(\nu)I(\nu, T)$ 为从样品上反射来的辐射; $\rho(\nu)$ 为样品的反射率。

一般情况下, 从样品上反射来的辐射 $\rho(\nu)I(\nu, T)$ 很小, 可略去。则得:

$$S(\nu, T) = R(\nu)N(\nu, T) + R(\nu)B(\nu) \quad (3)$$

$$N(\nu, T) = \varepsilon(\nu)H(\nu, T)$$

$R(\nu)B(\nu)$ 为没有待测样品时, 仪器测得的背景单光束光谱 $S_B(\nu)$ 。在遥感测定中, 背景辐射不可忽略。从上述公式可得到待测样品的红外辐射光谱能量分布:

$$N(\nu, T) = [S(\nu, T) - S_B(\nu)]/R(\nu) \quad (4)$$

实验中, 使用标准黑体对测得的红外辐射的发射光谱强度进行校正。

3 实验部分

3.1 仪器装置

MR254 型傅立叶变换红外光谱仪, 中角度望远镜 SMY0500G, 检测器 InSb, MCT, 波数分辨率 8 cm^{-1} , 待

收稿日期: 2003-05-27; 修回日期: 2003-10-31

基金项目: 总装跨行业预研项目支持(41328030308)

作者简介: 王宏(1971-), 男, 硕士, 工程师, 多年从事固体推进剂特征信号测试研究工作。e-mail: wangh6@tom.com

测物距仪器约 4.3 m, 每次测量扫描两次。使用光纤联接计算机和 FTIR 光谱仪。ZWK 系列高温黑体(中国科学院上海技术物理研究所, 高温至 1 400 °C)。仪器设备按下图 1 的位置放置。

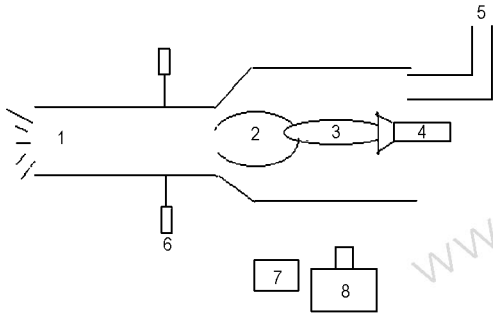


图 1 红外辐射测试仪器放置示意图

1—烟雾通道, 2—烟雾, 3—火焰区, 4—发动机, 5—温湿度可控气流入入口, 6—多波段烟雾测试点, 7—红外热像, 8—红外光谱仪

Fig. 1 The placement of the infrared test instruments

1—smoke tunnel, 2—smoke, 3—plume, 4—rocket, 5—gas entrance of limited temperature and moisture, 6—dual wavelength smoke measurement, 7—infrared image, 8—FTIR

3.2 样品准备

使用 $\Phi 50$ mm 标准发动机, 单孔管装药, 所研究的推进剂代号分别为: 171-25 (改双基含铝粉), L-1 (复合推进剂)。装药长度 120 mm, 外径 $\Phi 45$ mm, 内径 $\Phi 8$ mm, 单端包覆。发动机自由装填。用 6 g 黑火药点火, 工作压力设计为 7 MPa。

3.3 试验过程

调整望远镜位置, 使辐射源发射的光充满视场并能清晰成像。进行绝对辐射能测量时, 需先利用标准高温黑体辐射图建立校准曲线, 获得仪器响应函数。实验获得辐射源的单光束光谱 $S(\nu, T)$ 去除背景, 并除以仪器响应函数 $R(\nu)$, 得到光谱辐射亮度 $N(\nu, T)$ 分布曲线, 横坐标为波数(或波长), 纵坐标为光谱辐射亮度。

发动机点火, 同步启动光谱仪记录系统, 得到干涉图, 傅立叶光谱转换, 进一步处理谱图。

4 结果与讨论

4.1 光谱辐射亮度分布

光谱分辨率为 1 cm^{-1} , 傅立叶变换红外光谱仪距火焰约 4.3 m。测试对象是燃气羽流中的一个光斑

点。该光斑位于发动机喷管 1 m 处的轴线上, 面积为 28.26 cm^2 ($D 60 \text{ mm}$)。发动机燃气的辐射亮度分布见图 2, 从谱图中还可读出最大光谱辐射及峰位波数值, 可见两图中最大光谱辐射亮度均为火焰中二氧化碳的发射峰。

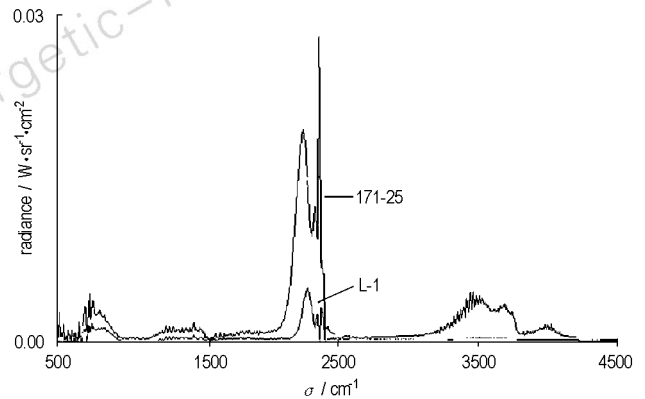


图 2 两种推进剂的燃气红外辐射亮度谱

Fig. 2 The IR radiance spectra of combustion gases for propellants 171-25 and L-1

从图 2 可看出, 在 $500 \sim 4500 \text{ cm}^{-1}$ 波段范围内:

两谱线大气水蒸气的吸收分别在 $2800 \sim 3300 \text{ cm}^{-1}$, $3200 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$, 其中 3756 cm^{-1} , 3652 cm^{-1} 处是火焰中热水蒸汽的发射峰, 分别为水分子的 ν_3 和 ν_1 振动基带。 $2900 \sim 2400 \text{ cm}^{-1}$ 大气吸收为最小值。 2220 cm^{-1} , 2262 cm^{-1} 处是火焰中热的 CO_2 发射峰(两个最高峰)。 $2400 \sim 2200 \text{ cm}^{-1}$ 是大气中 CO_2 的吸收, 在 2349 cm^{-1} 处是大气中 CO_2 发射峰, 对应 CO_2 分子的 ν_3 振动基带。 2143 cm^{-1} 为 CO 的 ν_1 振动基带中心, 其 P 支发射在 $2145 \sim 2025 \text{ cm}^{-1}$, R 支在 $2150 \sim 2245 \text{ cm}^{-1}$, 被 CO_2 的发射峰干扰。

另外, 谱线 2 中, 可以看到在 2820 cm^{-1} 处有弱的 HCl 气体吸收峰, 而谱线 1 中未见。

图中, 在 2970 cm^{-1} 附近是非甲烷饱和烃碳 (CH_2) 产生的吸收峰。从峰高来看, 谱线 2 比 1 的信号值要小得多。

从各个特征峰的对比可以看出, 含铝粉的改性双基推进剂 171-25 的辐射亮度明显高于 L-1 复合推进剂。

4.2 推进剂积分辐射能及其随时间的变化

在 $2000 \sim 3333 \text{ cm}^{-1}$ ($3 \sim 5 \mu\text{m}$) 波段范围内, 对推进剂的光谱辐射亮度进行积分, 可得到相应的积分辐射能量曲线, 其相关数据见表 1。

由表 1 可知,改双基推进剂 171-25 的红外辐射能要高于 L-1 复合推进剂的红外辐射。需要指出的是,红外辐射能测试给出是燃气羽流中一个“点”,要计算整个燃起羽流的红外辐射能,考虑到燃气并非均匀场,目前的计算仅局限于粗略计算。此外还可以增大测试距离,直接测试发动机燃气辐射能,但存在背景的扣除、传输补偿等复杂计算。

表 1 两种推进剂积分辐射能

Table 1 The integrated energy of these propellants

propellant types	171-25	L-1
average integrated energy/W · sr ⁻¹ · cm ⁻²	5.7	0.78
corresponding time/s	0.41	0.10
combustion time/s	1.60	1.50

5 结束语

综上所述,傅立叶变换红外光谱可用于测量燃气红外辐射能量分布,并可计算任意波段内光谱辐射积分发射能,获得其随时间的变化趋势图,从中可以直接获得燃气组成及能量分布、变化等重要信息。此外,傅立叶变换红外光谱在燃气组成的定量测定方面也有着广泛的应用前景。这对于研究推进剂燃烧过程、燃烧产物、燃烧机理、减小特征信号都有着重要的意义。实验表明 FTIR 光谱技术是一项快速、简便的测试技术,可用于剧烈、非稳态过程的非接触式测试。

参考文献:

- [1] 张骏,荀毓龙. 污染云团特征参数的被动 FTIR 遥感监测 [J]. 量子电子学报,1999,16(3): 285-288.
ZHANG Jun,XUN Yu-long. Remote observation of feature parameters from pollution clouds using FTIR spectroscopy [J]. *Chinese J. of Quantum Electronics*,1999,16(3): 285-288.
- [2] Becher E, Notholt J. Intercomparison and validation of FTIR measurements with the Sun, the Moon and emission in the Arctic [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*,2000,65(5): 779-786.
- [3] William F, Herget, Jame D Brasher. Remote fourier transform infrared air pollution studies [J]. *Opt. Eng*,1980,19: 508.
- [4] Klaus Schaefer, Joerg Heland, Erwin Lindermeir, et al. Determination of exhaust composition in turbine test beds by FTIR [A]. *Environment Sensing and Applications Meeting [C]*, 14-48 June/1999, Munich, Germany, 3821: 191-197.
- [5] Huang I T, Thynell S T, Kuo K K. Measurements and theory of signal-to-noise ratio of FTIR emission spectrometry applied to high-pressure solid propellant combustion [J]. *Appl. Spectrosc.*, 1992, 46: 1182.
- [6] 王俊德, 罗蕴华, 陈作如, 等. 用 FTIR 系统作红外辐射源的遥感测量 [J]. *光谱学与光谱分析*, 1988, 8(5): 6.
- [7] 吴谨光. 近代傅立叶变换红外光谱技术及应用 [M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
- [8] WANG Jun-de, LOU Yun-hua, CHEN Zuo-ru. Study on infrared spectral radiance by remote fourier transform infrared spectroscopy [J]. *Spectroscopy Letters*, 1991, 24(6): 855-864.

Determination of the Combustion Gas Radiance of Solid Rocket Propellant by Remote Fourier Transform Infrared Spectroscopy

WANG Hong¹, LI Chun-ying², ZHANG Xiao-ling²

(1. Xi'an Modern Chemistry Institute, Xi'an 710065, China;

2. Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: The combustion gas radiance of solid rocket propellants was measured by remote Fourier Transform Infrared spectroscopy. The IR radiance spectra of combustion gases of two propellants in the wavenumber range of 500 to 4 500 cm⁻¹ at a resolution of 1 cm⁻¹ were recorded. The curves of change in the integrated radiance (emission energies) of combustion gases of two propellants with the burning time were obtained by the method of integrating the radiance between 2 000 to 3 333 cm⁻¹. Information was obtained on the components of combustion gas and characteristics of combustion processes of two propellants.

Keywords: optics; combustion gas; remote sensing; FTIR; radiance; solid propellant