文章编号:1001-5078(2011)11-1222-04

·光电技术与系统 ·

# 氢氧火箭发动机羽烟紫外辐射建模与测量

国爱燕,唐 义,白廷柱,王 贺,黄 刚

(光电成像技术与系统教育部重点实验室,北京理工大学光电学院,北京100081)

**摘 要:**针对氢氧火箭发动机羽烟紫外辐射机理的分析,紫外辐射的理论研究等需求,采用 HITRAN 数据库计算 OH\*紫外波段吸收系数,利用 FLUENT 和离散坐标法(DOM)建立能够计 算不同方位羽烟紫外辐射的二维模型。并且在实验室内进行了氢氧火箭发动机的点火实验, 采集了氢氧燃烧羽烟的紫外辐射光谱以及不同角度的紫外辐射空间分布,通过与模型计算得 到的 OH\*紫外辐射光谱和不同方位羽烟的紫外辐射分布数据的对比,验证了羽烟紫外辐射模 型计算的有效性。相关研究对于优化紫外逼近预告警系统整体设计,评估系统探测性能等方 面具有重要的理论和实用价值。

关键词:羽烟紫外辐射;辐射传输模型;FLUENT;离散坐标法;OH 化学发光 中图分类号:TN23 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2011.11.011

# Modeling and measurement of UV radiation from hydrogen oxygen rocket motor plume

GUO Ai-yan, TANG Yi, BAI Ting-zhu, WANG He, HUANG Gang

(Key Laboratory of Photoelectronic Technology and System, Ministry of Education of China, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract**: Liquid hydrogen and oxygen are common used fuel and oxidizer in liquid rocket motor, and ultraviolet radiation is thought mostly result from the transition of OH from excited state to ground state with peak value at 281 nm and 306 nm. A 2-D model is built to calculate the spatial distribution of UV radiation intensity, and the spectral absorption coefficient is calculated based on HITRAN database. The ignition of lab-scale hydrogen oxygen rocket motor is performed. Ultraviolet spectral and spatial radiation of the rocket plume are measured. The model is validated by experiment data. This research can be used in optimization of ultraviolet approach warning system and evaluation of system detection performance.

Key words: plume ultraviolet radiation; radiative transfer model; FLUENT; discrete ordinate method; OH chemiluminescence

1 引 言

在现代战争中如何及早发现威胁,防止和减小 精确制导武器的攻击,已经成为导弹来袭预告警技 术面临的新课题。紫外告警系统具有环境适应性 强、虚警率低、体积小巧等优势,目前已发展成为装 备量最大的导弹告警系统之一<sup>[1]</sup>。导弹羽烟的紫 外辐射特性研究对于优化紫外逼近预告警系统整体 设计,评估系统探测性能等方面具有重要的理论和 实用价值。

#### 2 紫外辐射机理

根据推进剂状态的不同,导弹采用的发动机主 要分为固体火箭发动机,液体火箭发动机。液体火

基金项目:国家"863"计划(No. 2009AA01Z225);国防预研课题(No. 110010202)资助。

作者简介:国爱燕(1984 - ),女,博士研究生,研究方向紫外辐 射数值计算。E-mail:guoaiyan@gmail.com 收稿日期:2011-06-01

箭发动机是指使用在常温或低温下呈液态的一种或 多种化学物质作为推进剂的火箭发动机。液体火箭 发动机常用的氧化剂有:液态氧气( $LO_x$ ),硝酸 ( $HNO_3$ ),四氧化二氮( $N_2O_4$ )等。常用的燃料包括: 液态氢气( $LH_2$ ),煤油,汽油,偏二甲肼 (( $CH_3$ )<sub>2</sub> $N_2H_2$ )等。

液体火箭发动机具有比冲高,推力范围大、能反 复起动、能控制推力大小、工作时间较长等优点,一 般用于战略弹道导弹中,主要作用为航天器发射、姿 态修正与控制、轨道转移等。不同推进剂燃烧产生 的尾气的化学成分有很大差别。使用碳氢化合物推 进剂的火箭发动机燃烧的最终产物是水(H,O)和二 氧化碳(CO<sub>2</sub>),一氧化碳(CO)既是中间产物又是最 终产物,另外还有OH,HO,,O,H等中间反应物。含 高氯酸胺推进剂的燃烧以氯化氢(HCl)为最终产 物,Cl为中间反应物,还包括一些由C,H,N,O和Cl 构成的二原子和三原子成分,以及其他添加剂如铝、 氧化锆、碳颗粒的初步分解,氧化或反应产物<sup>[2]</sup>。 这些反应产物大部分与周围环境达到了热平衡 (途径之一是在化学反应后,未达到热平衡的成分 通过化学发光将多余的能量传递出去)。这些复 杂的混合物被排放到大气中,通过湍流与较冷的 空气混合,产生二次燃烧的羽烟,通过多种方式发 出紫外辐射。

根据火箭发动机羽烟紫外辐射的光谱特性,可 以将紫外辐射源分为连续光谱辐射源和特征谱段辐 射源。热凝聚颗粒的热辐射是连续紫外辐射的主要 来源,如铝、氧化锆等。颗粒对于天光和太阳光的散 射也会产生连续的光谱。另外,CO和O反应生成 的激发态的CO<sub>2</sub>能够产生峰值波长为350 nm的宽 波段化学发光辐射,高温情况下在250~300 nm 波 段还有一个次峰。特征谱段辐射主要是由激发态 OH\*产生的以306 nm 为主峰,以281 nm 为次峰的 窄波带。

根据上述分析,建立羽烟紫外辐射的二维模型,利用 HITRAN2008<sup>[3]</sup>数据库计算 OH\*在200~350 nm 紫外波段的吸收系数,得到羽烟不同方位的紫外辐射分布。然后在实验室中采用气态 H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 为推进剂,进行模型氢氧火箭发动机的点火试验。该推进剂的组分简单,在燃烧的化学反应中不会涉及到热凝聚的颗粒相和 CO-O 的反应,但是却保留了特征谱段辐射中最重要的 OH\*反应机制,适合作为液体火箭发动机紫外辐射机理的

研究和理论模型验证实验。通过模型计算数据 与测量数据的比较,验证羽烟紫外辐射模型的有 效性。

#### 3 实验测量

图1为火箭发动机实验装置的示意图,氧化剂 O<sub>2</sub>与燃料 H<sub>2</sub>分别贮藏在不同的气罐中,通过减压 器和流量计进入火箭发动机模型。阈门1,2和3 (如图1所示)每个分别控制3个氧气管道的开关 (共9个氧气管道),阈门4控制氢气管道的开关。 实验中通过改变气体的流量来控制 O<sub>2</sub>和 H<sub>2</sub>的质 量比在3.6 左右。



图 2 是质量比为 3.63 时光谱仪采集的羽烟紫 外辐射光谱数据,可以看出主要是 OH\*的特征辐射 谱线。光谱仪和喷管的水平距离为 30 cm,狭缝与 火焰延伸的方向垂直,对准火焰中部。狭缝的宽度 为 3000 μm,扫描范围 250 ~ 350 nm,扫描间距为 1 nm。图 3 为羽烟与紫外相机分别呈 0°,45°,90°, 135°,180°角度时的紫外辐射图像。紫外相机曝光 时间为 3 ms,增益为 5。滤光片的峰值响应波长为 310 nm,带宽为 10 nm。





图 3 不同角度的羽烟紫外辐射分布 Fig. 3 spatial distribution of plume UV radiation

#### 4 数值计算

根据模型火箭发动机羽烟的参数,及其轴对称 特性,建立二维模型,考虑介质的辐射和吸收过程, 求解辐射传输方程,数值计算羽烟剖面的紫外辐射 光谱和空间分布。辐射 – 吸收介质的辐射传输方 程为:

$$\frac{\mathrm{d}I_{\nu}}{\mathrm{d}s} = -\kappa_{\nu}I_{\nu} + \kappa_{\nu}I_{b\nu} \tag{1}$$

其中,*I<sub>ν</sub>*为光谱辐射强度;*s*为辐射传输方向;*κ<sub>ν</sub>*为 介质的光谱吸收系数;*I<sub>νν</sub>*为黑体光谱辐射强度。

辐射-反射灰体边界方程为:

$$I_{w\nu}(\vec{s}) = \varepsilon_w I_{b\nu} + \frac{I - \varepsilon_w}{\pi} \int_{\vec{n} \cdot \vec{s}'} |\vec{n} \cdot \vec{s}'| I_{\nu}(\vec{s}') d\Omega'$$
(2)

其中, $\varepsilon_w$ 为边界面的发射率; $\vec{n}$ 为单位方向向量; $\vec{s}$ 为 辐射传输出去的方向; $\vec{s}$ 为辐射传输过来的方向; $\Omega$ 为 与 $\vec{s}$ 相关的空间立体角。

采用离散坐标法(DOM)求解辐射传输方程,该方 法是目前比较通用的数值计算辐射传输方程的方法, 它通过求解覆盖4π空间立体角上一系列离散方向上 的辐射传输方程而得到问题的解<sup>[4]</sup>。DOM 计算羽烟 紫外辐射分布需要的参数主要包括三个部分:温度分 布、组分分布和各组分的光谱吸收系数。

其中羽烟的温度和组分分布采用流体仿真软件 FLUENT<sup>[5]</sup>来计算,假设流体中的化学反应处于平衡 状态,FLUENT采用 *k* - *e* 湍流模型的 PDF 化学反应模 型,能够计算湍流和化学反应的相互影响,图 4 和图 5 分别为计算得到的羽烟剖面温度分布和 OH 质量分数 分布。



图 4 羽烟的温度分布 Fig. 4 temperature distribution of plume





虽然 FLUENT 能够得到 OH 的质量分数分布, 但是没有得到非平衡的激发态 OH\* 的空间分布,而 OH\* 的化学发光是紫外辐射主要来源。这里通过 化学动力学软件 CHEMKIN<sup>[6]</sup> 的 PSR 模型计算 H<sub>2</sub>/ O<sub>2</sub> 燃烧的化学反应,包括非平衡的 OH\* 涉及的化 学反应。通过研究发现 OH\* 的摩尔分数与 OH 的 摩尔分数随着当量比的变化近似一致。所以在数值 计算中假设 OH\* 与 OH 的分布位置相同,质量分数 为 OH 质量分数的 1.26 × 10<sup>-8</sup>。虽然这个假设并不 严谨,但却是目前能够得到的与 OH\* 空间分布最相 关的信息,涉及的化学反应见参考文献[7]。

光谱辐射曲线采用 HITRAN2008 提供的 OH A-X 紫外谱线数据,利用逐线计算法计算 OH 在 1 atm,2600 K 的吸收系数分布曲线。图 6 为测量与 计算的归一化光谱数据的对比。理论上 OH 产生的 主峰在306 nm 和次峰在281 nm,而实验和计算数



据的峰值波长都有所偏移,造成上述偏移的原因主 要是由于温度和压强的变化带来的谱线位置移动和 谱线加宽效应。由于实际羽烟中存在温度和 OH 浓 度变化,所以实验数据与计算数据谱线的位置和宽 度也不同。

将以上数据输入到模型中,利用 DOM 求解辐 射传输方程,得到紫外辐射的剖面分布后,为了与相 机采集的紫外辐射图像相比较,采用粒子系统将计 算得到的剖面数据沿着视线的方向积分,图 7 为羽 烟与视线呈 0°,45°,90°,135°,180°角度时的 300 ~ 320 nm 波段的紫外辐射图像分布。





Fig. 7 spatial UV radiation intensity of plume at different angles

比较图 7 与图 3 发现,计算数据能够反映羽烟 辐射强度的变化,但是与测量数据还有较大差别。 测量数据紫外辐射较强的部分为喷管出口处,而且 分布在边缘。计算数据则在羽烟的中部紫外辐射较 强,造成上述差异的主要原因是因为:紫外辐射源 OH\*的分布假设与 OH 一致,所以紫外辐射集中在 OH 浓度较高的区域,需要进一步研究 OH\* 的空间 分布信息,提高计算的准确性。

从测量和实验数据都可以看出,火箭发动机模型的羽烟在水平面180°范围内都存在很强的紫外辐射,而且不同方位羽烟的长度存在很大的变化,利用该特点紫外告警系统可以根据采集的连续图像来判断导弹飞行方向的变化。另外,由于模型火箭发动机本身温度较低不会产生紫外辐射,所以在180°方位角的紫外辐射图像有遮挡现象,也就是说当导弹朝向探测器飞行的时候会在明亮的羽烟图像中出现明显的黑色遮挡,根据这个特点能够快速的判断导弹是朝向探测器方向飞行的,这种情况恰恰是导弹逼近时最需要及时探测的,但是该情况的外场试验需要花费大量的人力和物力,而且具有很高的危

险性,所以利用模型火箭发动机的点火实验数据,验 证了数值计算羽烟紫外辐射方法的有效性,进而利 用该方法计算实际火箭发动机羽烟在不同方位,不 同遮挡效果的紫外辐射图像,减少实验的成本和危 险性。

## 5 总 结

本文建立了羽烟紫外辐射二维模型,利用 HIT-RAN2008 数据库计算了 OH\*在 200~350 nm 的吸 收系数,得到羽烟不同方位的紫外辐射分布,并在实 验室中进行了氢氧火箭发动机的点火试验,采集了 火箭发动机羽烟在 250~350 nm 波段紫外辐射光谱 和水平面内 0°~180°的紫外辐射空间分布图像。 通过计算数据与实验数据的比较验证了数值计算模 型的有效性。该模型可以用于分析火箭发动机羽烟 紫外辐射的光谱和空间分布,为导弹逼近紫外告警 系统的设计和优化提供服务。

### 参考文献:

- [1] Fu Wei. Development of missile UV approach warning system[J]. Modern Military Equipment and Technology, 2002,(8):4. (in Chinese)
  付伟. 导弹逼近紫外告警技术的发展[J]. 现代军用仪器与技术,2002,(8):4.
- [2] DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory. Ultraviolet emission from rocket motor plumes: DSTO Technical Report[R]. Australia: DSTO, 1994.
- [3] L S Rothman, I E Gordon, et al. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2009, 110: 533 – 572.
- [4] Tan Heping, Xia Xinlin, et al. Numerical calculation of IR characteristics and transmission [M]. Harbin; Harbin Institute of Technology Press, 2006. (in Chinese) 谈和平,夏新林,等. 红外辐射特性与传输的数值计算 [M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2006.
- [5] FLUENT 6.3 User Guide [EB/OL]. [2006 09 20]. http://my.fit.edu/itresources/manuals/fluent6.3/help/ html/ug/main\_pre.htm.
- [6] R J Kee, F M Rupley, J A Miller, et al. CHEMKIN Release 4. 1, Reaction Design, San Diego, CA, 2006.
- [7] M Bozkurt, M Hartmann1, T Kathrotia, et al. Experimental and numerical investigation of OH\* chemiluminescence in shock tubes: Reactions of highly diluted H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> mixtures with various diluents [C]//Proceedings of the European Combustion Meeting, 2009.