

液体火箭发动机尾焰金属发射光谱仿真与 实验研究*

苏童, 雷庆春, 范玮

(西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 液体火箭发动机尾焰包含丰富的光谱信息, 可以作为检测发动机运行状态与故障情况的重要依据。本文建立了高精度的液体火箭发动机尾焰金属发射光谱数值模拟方法, 该方法以逐线法(Line-by-Line, LBL)为基础, 考虑介质的光学厚度影响。利用该方法, 对液体火箭发动机发生故障时, 尾焰中可能存在的铁、镍、钾发射光谱进行了数值模拟, 模拟结果与NASA光谱模拟程序所得结果相吻合。最后, 在甲烷-氧气、乙烯-氧气预混火焰开展了铁、钾发射光谱的实验验证, 结果表明, 以光谱面积与特征峰强度为对比参数, 光谱模拟结果和实验结果的相对误差在2.5%以下, 利用实验数据, 进一步讨论了光学薄和光学厚两种模型的适用性。

关键词: 液体火箭发动机; 原子发射光谱; 数值模拟; 光学厚度; 逐线法

中图分类号: V434 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2024) 02-2212030-09

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2212030

1 引言

液体火箭发动机地面试车是保证发动机安全、可靠运行的必要环节。随着火箭探测任务难度的不断增大, 发动机推力和复杂度大幅提升, 使传统的火箭地面监测系统暴露出误报率高、灵敏度低等缺点, 亟需发展新的、先进的液体火箭发动机地面试车故障诊断与健康监控技术^[1]。

液体火箭发动机的尾焰蕴含了丰富的光谱信息, 包括多种金属成分和气体组分光谱, 而这些光谱信息可以作为检测发动机运行状态与故障情况的重要依据^[2]。发动机的很多关键元件都是由各类合金材料制成的, 这些元件一旦发生磨损、老化或者烧蚀, 其金属成分就会随尾焰喷出, 尽管金属粒子的含量很少, 但依旧可以在火箭尾焰的高温场中激发出很强的光谱, 借此可以在非侵入的前提之下, 对尾焰中因为故障而存在的金属进行识别以及量化, 从而实现故障部位与程度的诊断^[3-4]。

1987年, 马歇尔飞行中心(MSFC)对航天飞机主发动机(SSME)的故障报告进行分析, 发现在27次重大试

验事故中, 有8次在发动机尾焰检查出异常光谱^[5]。此后, MSFC和斯坦尼斯航天中心(Stennis Space Center, SSC)致力于液体火箭光学羽流异常监测系统(Optical Plume Anomaly Detection, OPAD)的研发, 用于液体火箭发动机磨损、腐蚀和破损等故障的实时监测, 光谱波段检测范围为200~15 000 nm^[6-7]。1994年, SSC将OPAD系统整合到发动机诊断控制台(Engine Diagnostics Console, EDC), 成功用已有的SSME光谱数据库实现了对液体火箭发动机状态的实时监控^[8-9]。该EDC程序在1996年1月25号液体火箭发动机编号为901-853的测试试验中, 成功监测到火箭尾焰中光谱的异常变化, 测试人员据此提前200 s中断了火箭试车试验, 避免了严重灾难性事故的发生。后续的检查发现, 火箭发动机的高压油泵发生了严重的损坏^[10]。

我国在基于尾焰光谱的液体火箭发动机健康监测方面发展较晚, 在20世纪90年代末期才开始发展。赵永学等^[11]对液体火箭发动机尾焰光谱进行检测, 在发动机部件发生磨损的状态下成功检测到铁原子发射光谱。黄庆梅等^[12]对液体火箭发动机的光谱进行实时采集, 在点火阶段检测到铁等相关元素

* 收稿日期: 2022-12-12; 修订日期: 2023-12-27。

作者简介: 苏童, 硕士生, 研究领域为发动机尾焰光谱测量。

通讯作者: 雷庆春, 博士, 副教授, 研究领域为燃烧诊断。E-mail: lqc@nwpu.edu.cn

引用格式: 苏童, 雷庆春, 范玮. 液体火箭发动机尾焰金属发射光谱仿真与实验研究[J]. 推进技术, 2024, 45(2): 2212030. (SU T, LEI Q C, FAN W. Numerical and experimental investigations of metal emission spectrum in liquid rocket engine plume[J]. Journal of Propulsion Technology, 2024, 45(2): 2212030.)

的特征光谱,同时在工况变换时,OH基的光谱数据也有差异,初步获得了发动机工况与尾焰特定波段光谱辐射强度之间的变化规律。赵晋平^[13]对液体火箭发动机尾焰光谱进行检测,分析了尾焰光谱与发动机工况之间的关系。

由上可见,对液体火箭尾焰的发射光谱(包括金属原子和分子自由基发射光谱)进行高精度仿真模拟,是进行尾焰光谱检测与后续分析极为关键的一步,其具有两个重要意义:其一,给每种金属元素在不同环境下,挑选最适合监测的波长范围,减少数据量;其二,是建立仿真数据库,通过和大量实验数据的结合,给神经网络反演元素粒子浓度提供大量准确的训练集。NASA在EDC系统中使用逐线法(Line-by-Line, LBL)进行尾焰光谱模拟^[14]。LBL方法考虑每一条原子光谱线的贡献来模拟谱线分布,可以通过进一步考虑介质的光学特性(光学薄或光学厚)并结合仪器函数,获得较为准确的光谱曲线。

我国针对液体火箭发动机尾焰光谱模拟的工作相对较少,2000年,赵永学等^[15]根据原子发射光谱原理和辐射传输模型对液体火箭发动机主要不锈钢材料(1Cr18Ni9Ti)的光谱特性进行了仿真计算,然而缺乏后续更深入的跟进工作。

本文利用LBL法,对液体火箭发动机发生故障时,尾焰中可能存在的3种金属元素(包括:镍、铁、钾)的发射光谱进行模拟,研究了温度和金属浓度与发射光谱辐射强度的关系;在甲烷-氧气和乙烯-氧气预混火焰开展验证实验,对不同激发温度下,钾和铁原子的发射光谱进行测量,并与模拟结果进行对比。

2 液体火箭发动机尾焰光谱特性

2.1 光谱展宽以及线型

谱线并不是严格呈线状,而是以某一个频率(波长)为中心,按特定的方式在指定频率范围内连续分布,线型函数就是描述这一分布的数学函数。工程之中较为常见的线型分别是 Lorentz 线型、Gaussian 线型以及二者卷积的 Voigt 线型。

粒子在受到外界因素(例如粒子间发生的相互碰撞)的影响时,其平均寿命会缩短,导致谱线宽度出现展宽。在温度较高或密度较大时,粒子碰撞更加频繁,激发态粒子衰变加速,这种原因产生的展宽被称为碰撞展宽,由于展宽的物理机制与压力有关,因此也称压力展宽。碰撞展宽具有 Lorentz 线型,线型函数为

$$F_L(\eta) = \frac{\pi^{-1} \cdot b_{Li}}{(\eta - \eta_i)^2 + b_{Li}^2} \quad (1)$$

$$b_{Li} = \sum_j b_{Li0j} \left(\frac{p_j}{p_0} \right) \left(\frac{T_0}{T_j} \right)^{n_j} \quad (2)$$

式中 b_{Li} 为谱线 i 的碰撞半宽,与组分类型、温度、压强有关; b_{Li0j} 代表组分 j 在标准状态下 ($p=0.1$ MPa, $T=296$ K) 的碰撞半宽; η_i 为谱线 i 的中心频率; η 为频率; n_j 为温度指数。

另外,根据 Doppler 效应,如果接收器与发射器之间存在相对运动,则辐射波长会受到影响。由于辐射分子在不停歇地做热运动,粒子的运动方向可能向着接收器的方向,也可能是反方向,导致无法在观测中获得谱线 i 的单值频率 η_i ,而是以 η_i 为中心频率的带宽分布,从而产生 Doppler 展宽。Doppler 展宽具有 Gaussian 线型,线型函数为

$$F_G(\eta) = \frac{1}{b_{Di}} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp\left(-\ln 2 \left(\frac{\eta - \eta_i}{b_{Di}}\right)^2\right) \quad (3)$$

$$b_{Di} = \frac{\eta_i}{c} \sqrt{\frac{8 \ln 2 \cdot kT}{m}} \quad (4)$$

式中 b_{Di} 为谱线 i 的 Doppler 展宽,随温度、波长变化; m 为分子质量; k 为玻尔兹曼常数; c 为光速。

Doppler 展宽在气体压强较低时较为明显,而在气体压强较高时,由于单位体积内的粒子数目增加,碰撞的几率增加,此时碰撞展宽将更为明显。当气体状态是高温低压时,温度和压力对谱线半宽的影响最好都要考虑,此时线型函数为 Voigt 线型,是对两类展宽线型函数进行卷积,结果如下所示。

$$F_V(\eta) = \int_{-\infty}^{+\infty} F_G(\eta - \eta_i) F_L(\eta_i) d\eta_i \quad (5)$$

但是在模拟时,如果按照上式计算 Voigt 线型则需要繁杂的无穷积分,这导致模拟计算光谱速度缓慢。所以,可以用以下近似公式进行计算^[16]:

$$\frac{F_V(\eta)}{I_V} = \left(1 - \frac{b_L}{b_V}\right) \cdot \exp\left[-2.772 \left(\frac{\eta - \eta_i}{b_V}\right)^2\right] + \left(\frac{b_L}{b_V}\right) \cdot \left[1 + 4 \left(\frac{\eta - \eta_i}{b_V}\right)^2\right]^{-1} + 0.016 \left(1 - \frac{b_L}{b_V}\right) \left(\frac{b_L}{b_V}\right) \cdot \left\{ \exp\left[-0.4 \left(\frac{\eta - \eta_i}{b_V}\right)^{2.25}\right] - 10 \left[10 + \left(\frac{\eta - \eta_i}{b_V}\right)^{2.25}\right]^{-1} \right\} \quad (6)$$

式中

$$b_V = 0.5346 b_L + (0.2166 b_L^2 + b_D^2)^{0.5} \quad (7)$$

$$I_V = \left\{ b_V \left[1.065 + 0.447 \left(\frac{b_L}{b_V}\right) + 0.058 \left(\frac{b_L}{b_V}\right)^2 \right] \right\}^{-1} \quad (8)$$

图1展示了三种线型函数,其中 Lorentz 线型、

Gaussian线型的半高全宽均为20 nm,而Voigt线型是二者的卷积。

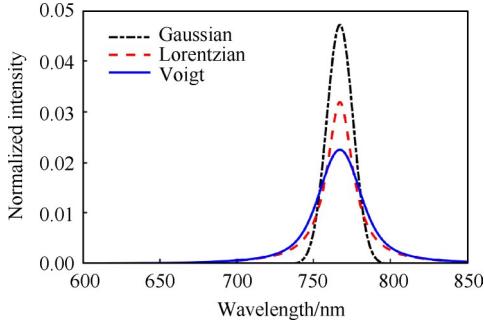


Fig. 1 Three types of spectral line function

2.2 尾焰金属原子光谱特性

2.2.1 原子光谱强度

当尾焰高温场中的金属原子受到热激发,由基态跃迁到激发态,然后返回到基态时,会发射出特征光谱,称为原子的发射光谱。

Scheibe-Lomakin公式描述了谱线强度的基本关系:

$$I = an^b \quad (9)$$

式中 I 为谱线强度, n 是试样中分析元素的浓度, a 是一个复杂的常数项,与温度、压强等环境因素有关, b 是自吸系数,当 n 足够小时, $b \approx 1$ 。

热激发态各种粒子的运动,宏观上是处于动态平衡的,这样的体系可以用统计热力学的方法描述,称为“局部热力学平衡(Local Thermal Equilibrium, LTE)体系”。在LTE体系中,虽然整体的温度分布并不是均匀的,但每一个局部体积内是均匀且处于热平衡的。在温度为 T 的环境中,分布在基态和各种激发态上的粒子数服从 Boltzmann 分布:

$$N_i = N' \frac{g_i}{Q} e^{-\frac{E_i}{kT}} \quad (10)$$

式中 N_i 是处于 i 激发态的粒子数, N' 是处于基态的粒子数, g_i 是 i 态的简并度(统计权重),在 Boltzmann 项中 E_i 是 i 态的激发能, k 是 Boltzmann 常数, T 为绝对温度, Q 为配分函数,可用以下近似公式^[17]求解:

$$Q = j_0 + j_1 \left(\frac{T}{10^3} \right) + j_2 \left(\frac{T}{10^3} \right)^2 + j_3 \left(\frac{T}{10^3} \right)^3 + j_4 \left(\frac{T}{10^3} \right)^4 + j_5 \left(\frac{T}{10^3} \right)^5 \quad (11)$$

式中 $j_0 \sim j_5$ 是仅与温度和元素种类有关的系数。

分布在各激发态上的粒子数,或称粒子在各态上的布居数,随激发能 E_i 的变大而呈指数关系迅速减少。激发能越大,粒子布居数越少,即越难激发,谱

线越弱。当 T 升高时,同一激发态上的粒子布居数迅速增多,表现为谱线增强;但由于 T 的升高引起电离度增大,因此谱线强度不表现为单调增强。

综上,考虑激发态粒子的 Boltzmann 分布、配分函数、跃迁几率和统计权重等因素,单位立体角内谱线辐射的能量强度可表示为

$$E_{\lambda_i} = \frac{hc}{4\pi\lambda_i} A_i N_i = \frac{hc}{4\pi\lambda_i} A_i N' \frac{g_i}{Q} e^{-\frac{E_i}{kT}} \quad (12)$$

式中 h 为普朗克常量, c 为光速, λ 为波长, A_i 为爱因斯坦跃迁概率。

2.2.2 辐射传输理论

基于尾焰光谱的液体火箭发动机故障检测技术,至关重要的一点就是根据光谱的特性(强度、谱线展宽等)来反演相应金属粒子的数量密度。

当原子发生高能级跃迁时,其释放的光量子辐射,在传播途中有可能被同种元素的基态原子所吸收,从而导致相应谱线的辐射强度降低,这就是自吸现象,严重时会出现自蚀^[18]。

当辐射在尾焰介质中沿一个非常窄的视场内的路径同时发射和吸收,或沿一个穿过观察立体角范围的具有恒定性质的路径中传输时,其传输方程如下所示^[19]。

$$I_{\lambda_i}(\lambda) = B_{\lambda_i} \cdot (1 - e^{-k'x}) = \frac{2hc^2}{\lambda_i^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda_i kT}} - 1} (1 - e^{-k'x}) \quad (13)$$

式中 B_{λ_i} 为黑体项,是黑体在波长 λ_i 处的辐射强度,仅与温度有关, k' 为吸收系数, x 为光程, $1 - e^{-k'x}$ 统称为吸收项,其和自身特性以及数量密度有关。 k' 是一个和基态原子数密度正相关的系数,当基态原子数密度足够小时,及 $k'x \ll 1$ 时,可以直接忽略自吸现象,为光学薄模型;当基态原子数密度过大时,及 $k'x \gg 1$ 时,自吸收效应较为严重,无法忽视,为光学厚模型。

当沿视线方向穿过光学薄介质观测发光体时,接收到的光强和实际发射光强相差无几,但穿过光学厚的介质观测光强时,接收到的光强明显比实际发射光强要小。而根据基尔霍夫定律,可以得到:

$$\frac{E_{\lambda_i}}{k'} = B_{\lambda_i} \quad (14)$$

光学薄模型的辐射传输方程可以简化为

$$I_{\lambda_i}(\lambda) = E_{\lambda_i} \cdot x \quad (15)$$

3 光谱模拟

LBL法光谱模拟的原理是将每一条特征谱线的强度进行展宽处理,然后将所有展宽之后的特征谱

线强度在对应波长(频率)上的强度贡献进行叠加,最终得到该波长(频率)上的实际强度。其计算公式为

$$I(\lambda) = \sum_{i=j} I_{\lambda_i}(\lambda) \quad (16)$$

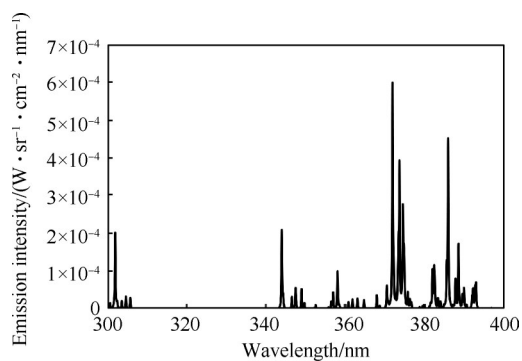
LBL法计算时需要考虑每条谱线的谱线强度、谱线位置以及谱线增宽等参数,是目前最为准确的光谱辐射特性计算方法。

同时,由于探测器即光谱仪自身的光学特性,所测量到的光谱展宽并非单纯由碰撞展宽和 Doppler 展宽决定,还受仪器展宽的影响。而仪器展宽函数可以近似利用 Gaussian 函数表示或者也可以用简单 Voigt 函数表示,所以最终卷积得到的线型依旧是 Voigt 线型。

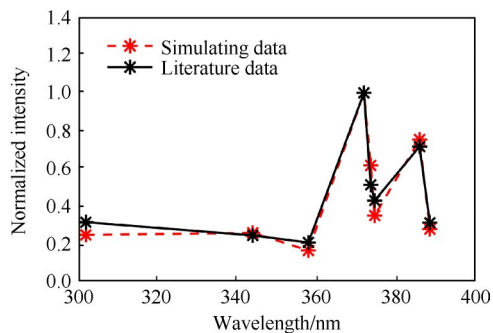
按照上文的光谱模拟方法,对液体火箭发动机尾焰中可能存在的金属:铁、镍和钾等金属原子进行辐射模拟,此时选取的仪器函数半高宽为 0.1 nm,远大于 Doppler 展宽和碰撞展宽,所以为了简化计算,最终选取的 Voigt 线型展宽为 0.1 nm。设定模拟温度为近似尾焰马赫盘处的温度 3 000 K,原子浓度均为 $6 \times 10^{14}/\text{cm}^3$ 。由于元素种类不同,导致共振线数量不一,计算量不一,本文中每种金属原子的模拟时间小于 0.5 s。

图 2~4 展示了铁、镍和钾的模拟光谱,还有铁、镍的发射光谱中一些强度较高的共振线的仿真数据与文献[20]中的仿真数据对比结果。如图 2(a)所示,铁原子在 300~400 nm 内的发射光谱,在 372 nm 有最大峰值,且与附近特征谱线强度差别较明显,可以作为液体火箭发动机健康检测系统中铁元素的检测谱线。如图 3(a)所示,镍原子在 300~400 nm 的发射光谱,其最大峰值位于 352.5 nm 处,同样可以作为检测谱线。如图 2(b)和图 3(b)所示,在对应共振线的归一化强度上,本文仿真数据和文献[20]中模拟的数据有较好的吻合程度。如图 4 所示,钾的发射光谱在 700~800 nm 内,钾的双线辐射强度明显是高于周边强度的,且因为钾双线的激发能较大,所以在低浓度时也有较强的辐射强度,根据原子辐射强度公式(15),此时钾发射光谱中 766.5 nm 以及 769.9 nm 处的特征峰强度仅与温度和浓度有关。图 5 展示了钾的双线特征峰强度随温度的关系。

由图 5 可见,当浓度和光程一定时,钾的双线辐射强度随温度的升高而近似呈指数增长。图 5 的结果意味着可以利用钾的双色光谱进行温度反演,但是在实际工程运用中,钾的原子浓度是很难测定准

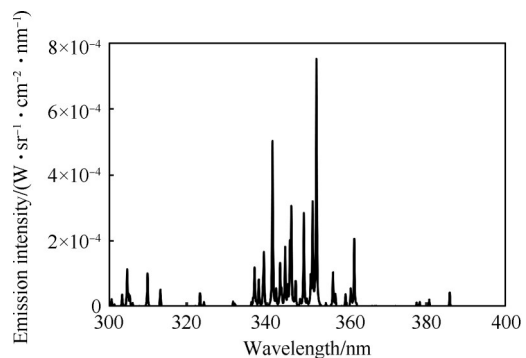


(a) Simulated spectrum of iron

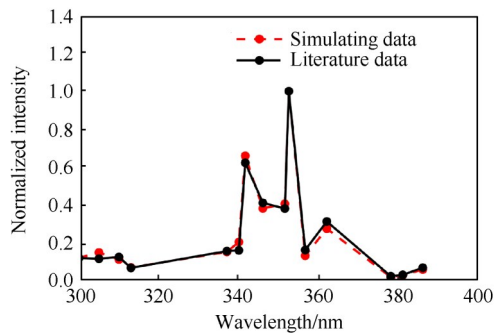


(b) Comparison of results with literature of iron

Fig. 2 Simulated spectrum of iron and comparison of results with literature



(a) Simulated spectrum of nickel



(b) Comparison of results with literature of nickel

Fig. 3 Simulated spectrum of nickel and comparison of results with literature

确的,所以用单线的辐射强度很难预测温度。假如使用双线的强度之比,则根据公式(12),可以抵消浓

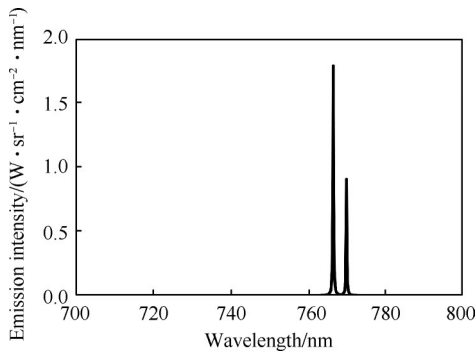


Fig. 4 Simulated spectrum of potassium

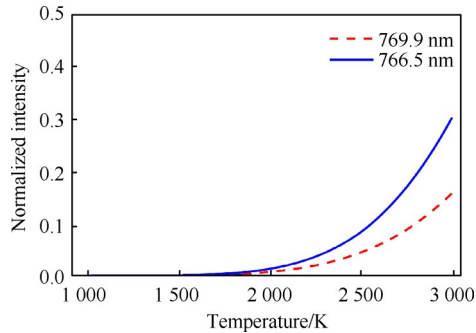


Fig. 5 Intensity of potassium-double-line radiation varies with temperature

度对测温准确性的影响。然而,公式(12)并没有考虑谱线展宽等因素,直接使用公式(12)会造成较大的温度反演误差。图6展示了利用光谱模拟(即考虑谱线展宽)得到的双线相对强度同温度的关系,可见,双线的辐射强度之比随温度单调递减。

此外,也可以利用光谱强度进行浓度的定量反演,如图7所示,当温度保证在3000K的时候,低浓度下,即不考虑自吸收效应时,特征谱线的辐射强度随浓度增大而增大,且几乎是正比例函数,这为发射光谱辐射强度定量测量粒子浓度提供了理论基础。

为了进一步分析光谱模拟模型对不同金属浓度的适用性,本文假定在3000K时,分别利用光学薄模

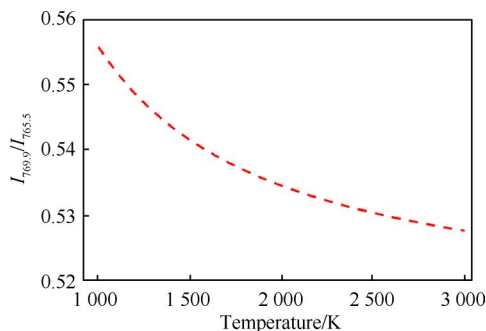


Fig. 6 Ratio of two potassium spectrums varies with temperature at low concentrations

型和光学厚模型对三种不同铁原子数量密度的光谱进行模拟,图8~图10分别展示了低浓度、中浓度、高浓度的模拟结果。

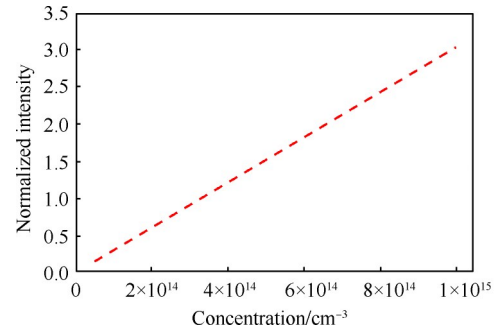
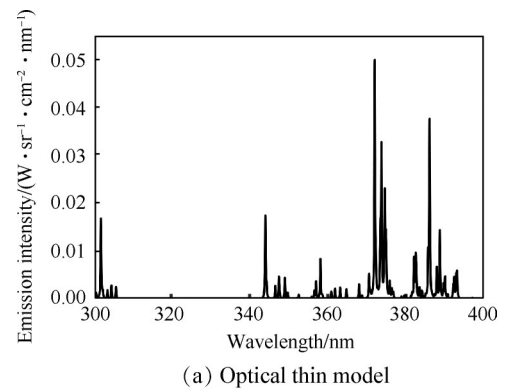
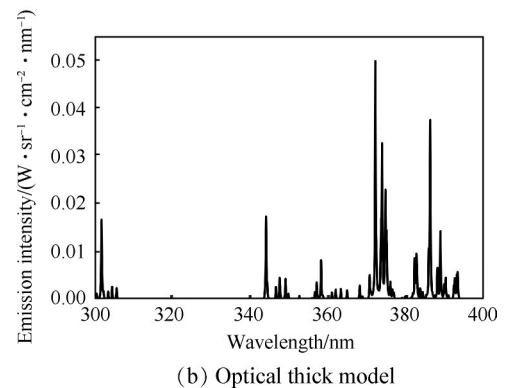


Fig. 7 Intensity of potassium radiation at 766.5 nm varies with its concentration



(a) Optical thin model



(b) Optical thick model

Fig. 8 Simulated spectrum of iron at 3000 K with 10 cm pathlength and $5 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ number density

如图8所示,在低浓度下,光学薄模型(a)与光学厚模型(b)得到的光谱非常相似,差值几乎可以忽略不计,即 $k'x \ll 1$ 时,可以使用光学薄模型。如图9和图10所示,当浓度增大时,无法满足 $k'x \ll 1$ 的条件,所以式(15)不成立,造成两种不同光学模型下的仿真结果有明显差异。在图9中,在中浓度下,已经出现了较为明显的吸收现象,其光谱透过率如图9(c)所示,此时已经不适合用光学薄模型进行仿真模拟。在图10中,光学薄模型(a)得到的光谱强度出现大于相同

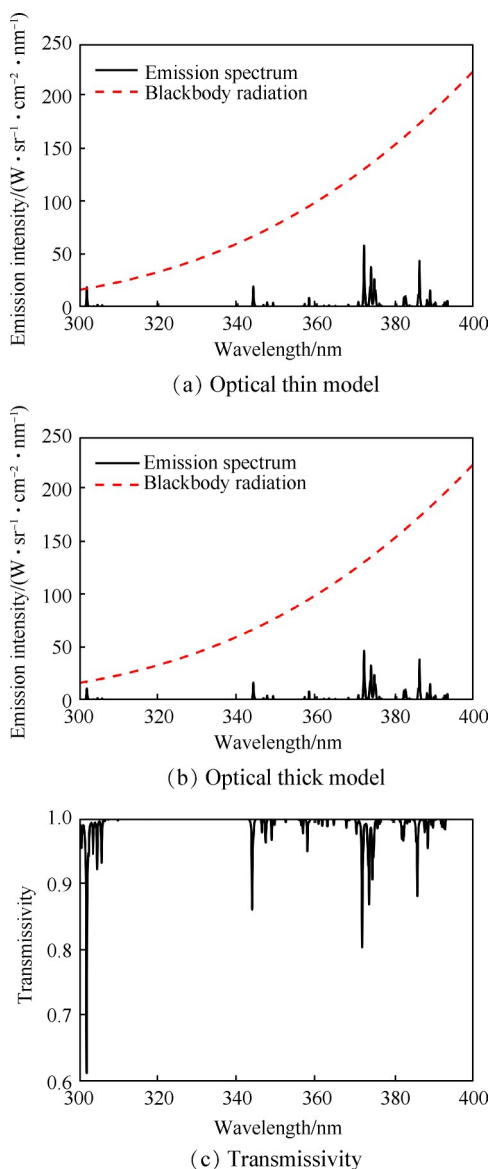


Fig. 9 Simulated spectrum of iron at 3 000 K with 10 cm pathlength and $6 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ number density

温度下的黑体辐射强度(图中红色曲线)的情况,显然与辐射理论不符合,故该浓度下同样无法使用光学薄模型。

4 实验验证

本文通过甲烷-氧气和乙烯-氧气的预混火焰进行光谱实验验证,由于甲烷预混火焰温度在 1 500 K 左右,温度较低,无法激发镍、铬光谱,且对铁的激发程度也有一定的限制,所以在本实验中,对钾原子的 766.5 nm 和 769.9 nm 双线光谱特征进行验证,利用热电偶测量火焰温度。

实验装置图如图 11 所示,主要由雾化室、掺混室、燃烧炉以及光谱采集部分构成。雾化室内,含钾溶液在空气压缩雾化器的作用下形成含钾的喷雾。

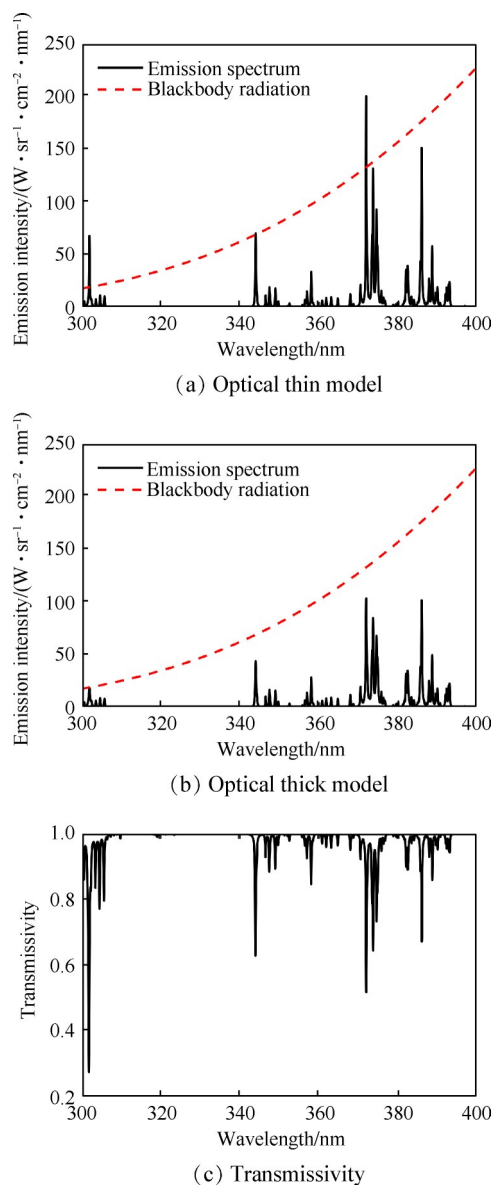


Fig. 10 Simulated spectrum of iron at 3 000 K with 10 cm pathlength and $2 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ number density

掺混室内,预混的甲烷可燃气和含钾的喷雾充分混合,最终在平面火焰炉上,形成稳定的预混火焰。光谱采集部分使用的是 Ocean Optic 的紫外-近红外段光谱仪 (FLAME-T-XR1-ES),其参数如表 1 所示。

本文对比了实验测量的光谱曲线与两种模型(光学薄、光学厚)模拟的光谱曲线,主要通过双峰强度比和线型符合程度确定模型的准确度。如图 12 (a)所示,在 1.7×10^{-4} mol/L 的低浓度时,光学薄模型和光学厚模型得到的结果相似,且均与实验结果吻合。表 2 列出了对比误差,可见,对于 760~780 nm 内的光谱面积,两种模型得到的结果和实际光谱数据误差小于 2.4%;对于双峰强度比,模拟误差甚至是小于 1%的,所以在低浓度下,无论光学薄或者光学厚

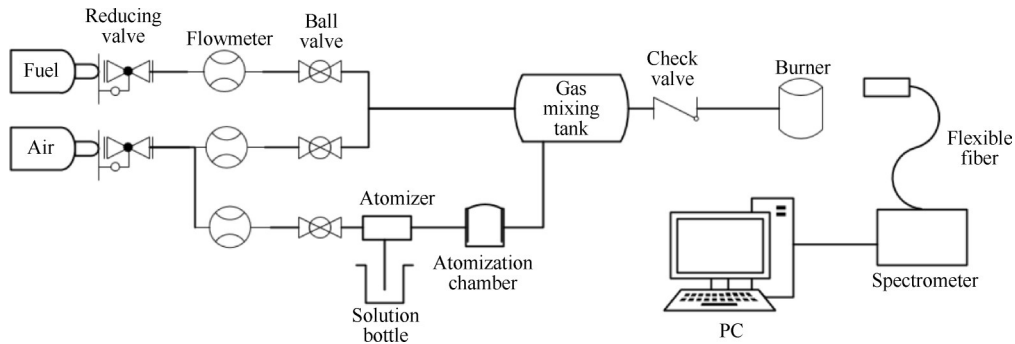


Fig. 11 Schematic experimental setup

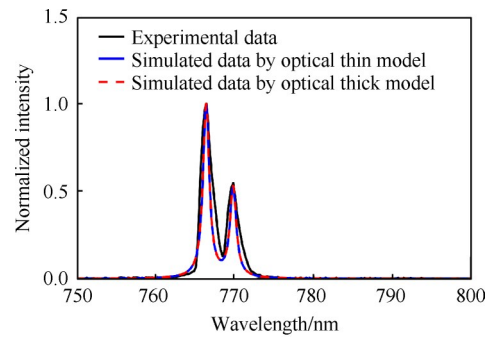
Table 1 Spectrometer parameters

波长范围	光学分辨率	时间分辨率	像素	入射狭缝
200~1 025 nm	1.70 nm	3 ms~10 s	3 648	25 μm

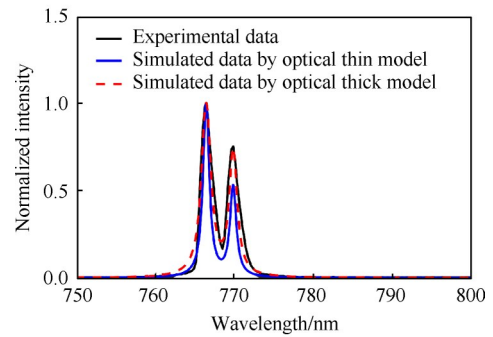
模型,都可以较为准确地模拟出实际光谱,为了减少计算量,此时应该选取光学薄模型。但是在 $5.5 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$ 的高浓度时,如图 12(b)所示,光学薄模型得到的结果无法与实际光谱吻合,光学厚模型仍可以很好地模拟实际光谱,其光谱面积和双峰强度比与实际光谱的误差都在 1% 以内。另外,从图 12 中的实测光谱曲线中,可以很明显地观察到钾原子的双线自吸增宽效应。

同时,利用温度更高的乙烯-氧气预混火焰开展验证实验,此时铁原子浓度为 $1.8 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$,为低浓度,忽略自吸收,火焰温度同样由热电偶测量,其光谱数据如图 13 所示,由于此时光学薄模型和光学厚模型所模拟光谱几乎一样,所以图中仅保留实验数据和光学薄模型模拟数据。

由图 13 可见,在铁原子特征谱线强度较高的区域(360~380 nm)处,光学薄模型模拟的结果与实验数据吻合程度较好,特征峰的位置以及相对强度可以准确复现。而在铁原子发射光谱的低强度特征谱线处(300~310 nm),其强度和背景光强度难以区分,这是由于,此时铁原子的浓度偏低,相应的铁原子发射光谱强度和乙烯预混火焰以及环境背景光之间的强度差异不大。因此,在液体火箭发动机故障检测中,不能使用辐射强度较低的特征峰进行检测,对于



(a) $1.7 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$



(b) $5.5 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$

Fig. 12 Spectrum of potassium obtained by the experiment and simulation, respectively ($T=1\ 583\ \text{K}$)

铁的检测波段应该集中于 372 nm,且需要在较高温度下进行,例如马赫盘处接近 3 000 K 的高温。

Table 2 Comparison of potassium atomic emission spectrum between experimental and simulated results

组别	760~780 nm 内光谱归一化面积			769.9 nm 和 766.5 nm 的双峰强度比		
	实验数据	光学薄模型	光学厚模型	实验数据	光学薄模型	光学厚模型
$1.7 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$	13.246 6	12.927 0	13.042 1	0.546 5	0.541 9	0.546 2
误差/%	-	2.4	1.5	-	0.840	0.055
$5.5 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$	15.684 8	10.133 1	15.547 5	0.751 4	0.529 7	0.745 1
误差/%	-	35.40	0.88	-	29.50	0.84

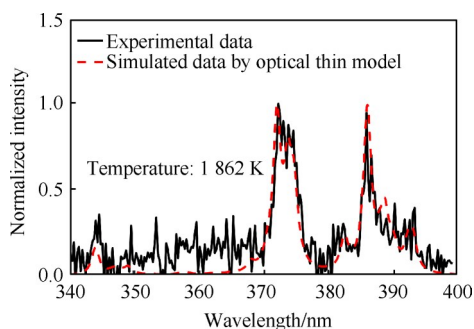


Fig. 13 Spectrum of iron obtained by the experiment and simulation, respectively

5 结论

本文针对液体火箭发动机尾焰光谱健康监测技术,开展了以逐线法为基础,并考虑介质的光学厚度的发射光谱模拟与实验研究,得到以下结论:

(1)铁、镍、钾的原子发射光谱模拟结果与NASA光谱模拟程序所得结果相吻合。

(2)在甲烷-氧气、乙烯-氧气预混火焰开展了铁、钾发射光谱的实验验证,光谱模拟结果和实验结果的相对误差在2.5%以下。

(3)光学薄和光学厚两种模型对同一浓度和同一温度下的同一元素的发射光谱预测结果,会由于光学厚度的增加,出现明显差异;介质吸收效应明显时,只能使用光学厚模型。

本文论述的方法可以推广到液体火箭发动机尾焰其它可能存在的金属发射光谱的模拟,并为尾焰温度与金属成分浓度的反演提供了依据。

参考文献

- [1] 张振臻,陈 晖,高玉闪,等. 液体火箭发动机故障诊断技术综述[J]. 推进技术, 2022, 43(6): 20-38. (ZHANG Z Z, CHEN H, GAO Y S, et al. Summarization of fault diagnosis technology for liquid rocket engine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(6): 20-38.)
- [2] 吴建军,程玉强,杨述明. 液体火箭发动机健康监控[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [3] BENZING D A, WHITAKER K W. Approach to space shuttle main engine health monitoring using plume spectra [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1998, 35(6): 830-836.
- [4] 陈启智. 液体火箭发动机故障检测与诊断研究的若干进展[J]. 宇航学报, 2003, 24(1): 1-11.
- [5] CIKANEK III H. Characteristics of space shuttle main engine failures [C]. San Diego: 23rd Joint Propulsion Conference, 1987.
- [6] CIKANEK, III H, POWERS W, ESKRIDGE R, et al. Space shuttle main engine plume spectral monitoring preliminary results [C]. San Diego: 23rd Joint Propulsion Conference, 1987.
- [7] GARDNER D G, TEJWANI G D, BIRCHER F E, et al. Stennis space center's approach to liquid rocket engine health monitoring using exhaust plume diagnostics [J]. SAE Transactions, 1991: 501-515.
- [8] BIRCHER E, TEJWANI G D, VALENTI E L, et al. Recent results in the development of the engine diagnostic console [C]. Virginia: NASA Conference Publication, 1994, 3282: 17-19.
- [9] BIRCHER F, TEJWANI G, VA, et al. Engine diagnostic console-recent development and test results and SMME data [C]. San Diego: 31st Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1995.
- [10] BENZING D A, WHITAKER K W. Approach to space shuttle main engine health monitoring using plume spectra [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1998, 35(6): 830-836.
- [11] 赵永学,张育林,李麦亮,等. 三组元双工况火箭发动机羽流发射光谱实验研究[J]. 推进技术, 2001, 22(3): 199-203. (ZHAO Y X, ZHANG Y L, LI M L, et al. Experimental study on emission spectra of three-component two-mode rocket engine plume [J]. Journal of Propulsion Technology, 2001, 22(3): 199-203.)
- [12] 黄庆梅,陈 路,孙景宁,等. 液体火箭发动机羽焰UV-VIS光谱的实时采集及分析[J]. 北京理工大学学报, 2008, 53(4): 306-309.
- [13] 赵晋平. 液体火箭发动机羽焰光谱采集系统研究与应用[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [14] TEJWANI G D, BIRCHER F E, VAN DYKE D B, et al. Space shuttle main engine health monitoring with exhaust plume emission spectroscopy [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1998, 35(3): 387-394.
- [15] 赵永学,张育林. 羽流光谱的原子辐射仿真[J]. 推进技术, 2000, 21(2): 15-18. (ZHAO Y X, ZHANG Y L. Atomic radiation simulation of plume spectrum [J]. Journal of Propulsion Technology, 2000, 21(2): 15-18.)
- [16] WHITING E E. An empirical approximation to the Voigt profile [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1968, 8(6): 1379-1384.
- [17] DE GALAN L, SMITH R, WINEFORDNER J D. The electronic partition functions of atoms and ions between 1500 K and 7000 K [J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 1968, 23(8): 521-525.
- [18] 郑国经,罗立强,符 斌,等. 分析化学手册. 3A. 原子光谱分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
- [19] WALLACE T, POWERS W. Simulation of UV atomic ra-

- diation for application in exhaust plume spectrometry[C]. Monterey: 29th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1993.
- [20] TEJWANI G, MCVAY G, LANGFORD L, et al. Hydrocarbon-fueled rocket engine plume diagnostics: analytical developments & experimental results[C]. Sacramento: 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2006.

(编辑:朱立影)

Numerical and experimental investigations of metal emission spectrum in liquid rocket engine plume

SU Tong, LEI Qingchun, FAN Wei

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The plume of liquid rocket engine contains abundant spectrum information, which can be used to infer the operating and fault conditions of the engine. A high-accuracy numerical method has been established in this paper for the simulations of metal emission spectrum in the plume of liquid rocket engine. The method was based on the line-by-line (LBL) spectrum simulating scheme, and considered the effects of the medium optical thickness. Based on the method, the emission spectrums of iron, nickel, and potassium in the plume were simulated when engine failures occurred. The results agreed well with those obtained by the NASA plume simulation code. Besides, experimental verifications of emission spectra of iron and potassium were performed on CH_4/O_2 and $\text{C}_2\text{H}_4/\text{O}_2$ flames. Results show that the differences of spectrum area and characteristic spectrum peak intensity between simulated and experimental data were below to 2.5%. Last, the capability and limit of optical thin and thick models were evaluated.

Key words: Liquid rocket engine; Atomic emission spectra; Numerical simulation; Optical thickness; Line-by-line

Received: 2022-12-12; Revised: 2023-12-27.

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2212030

Corresponding author: LEI Qingchun, E-mail: lqc@nwpu.edu.cn

2212030-9