

文章编号: 1001-2486 (2000) 03-0060-05

羽流光谱实验仿真*

赵永学, 张育林

(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 根据液体火箭发动机故障羽流诊断的需要, 建立了高温气体下原子的光谱仿真模型, 针对具体实验仪器及实验条件, 对发动机几种主要元素的理论光谱进行了仿真计算, 对不同光栅下的理论光谱进行了比较、讨论, 该工作为后续实验研究打下了基础。

关键词: 羽流; 光谱实验; 光谱仿真

中图分类号: V43 **文献标识码:** A

Research for the Simulation of Plume Spectrum Experiment

ZHAO Yong-xue, ZHANG Yu-lin

(College of Aerospace and Materials Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: According to the demand of plume spectral diagnostic for liquid propellant rocket engines, a radiative transport theory for high temperature gas is developed. The result of simulation for several main atoms of the engine materials in the plume is presented. Different spectrums under different gratings are also compared and discussed.

Key words: plume; spectrum experiment; spectrum simulation

液体火箭发动机一旦发生磨损、烧蚀等故障, 一些金属杂质将进入羽流, 在激波内, 由于温度较高, 这些金属辐射的光谱即使在浓度较低的情况下也能被检测到。通过检测羽流光谱, 可以对发动机进行健康监控。美国于 80 年代末先后开始了航天飞机主发动机 SSME 故障羽流光谱诊断技术的研究^[1~4], 目前地面试验已趋成熟, 并开始往高空飞行的发动机试验方向发展。对实验所得光谱数据进行分析, 是发动机故障羽流光谱诊断的核心问题。

1 辐射传递理论

对发动机的排气羽流进行光谱检测, 主要采集来自马赫盘的光, 因为马赫盘温度较高, 金属在高温下容易发射光谱。根据辐射输运理论, 马赫盘中辐射输运的一维微分方程为^[5]:

$$\frac{dI_{\lambda}}{dx} = \varepsilon_{\lambda} + k_{\lambda} I_{\lambda} \exp(-hc/kT) - k_{\lambda} I_{\lambda} \quad (1)$$

令 $k_{\lambda} = k_{\lambda} [1 - \exp(-hc/kT)]$, 有

$$\frac{dI_{\lambda}}{dx} + k_{\lambda} I_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \quad (2)$$

设马赫盘边界为坐标原点 0, 则该方程的解:

$$I_{\lambda}(x) = \int_0^x \varepsilon_{\lambda} \exp[-\int_x^x k_{\lambda} dx] dx + I_{\lambda 0} \exp[-\int_0^x k_{\lambda} dx] \quad (3)$$

作进一步简化, 设气体温度、压强、浓度、扰动粒子分压均匀一致, 并忽略马赫盘边界影响, 则:

$$I_{\lambda}(x) = \frac{\varepsilon_{\lambda}}{k_{\lambda}} [1 - \exp(-k_{\lambda} x)] \quad (4)$$

由辐射理论, 在实际所有情况下, 辐射场在每一时刻都可以被看成是与发射源和吸收源的瞬时分布、

* 收稿日期: 1999-09-20
 基金项目: 国防科技大学预研基金资助项目
 作者简介: 赵永学 (1970), 女, 博士生。

亦即是与物质的温度和密度的瞬时分布相适应的准定常态^[5]。因此, 可认为马赫盘中的气体辐射为平衡辐射, 且设谱线展宽主要由多普勒展宽与洛仑兹碰撞线宽决定, 忽略谱线自然线宽, 从而由基尔霍夫定律:

$$\frac{\varepsilon_{\lambda}}{k_{\lambda}} = B_{\lambda} \quad (5)$$

$$B_{\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1} \quad (6)$$

(4) 式可化为

$$I_{\lambda}(x) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1} [1 - \exp(-k'_{\lambda}x)] \quad (7)$$

当 $k'_{\lambda}x \ll 1$, 即当有效吸收系数 k'_{λ} 与马赫盘厚度 x 的乘积 (光学路径) 远远小于 1 时, (7) 式可化为:

$$I_{\lambda}(x) |_{k'_{\lambda}x \ll 1} = k'_{\lambda}x B_{\lambda} \quad (8)$$

即

$$I_{\lambda}(x) |_{k'_{\lambda}x \ll 1} = \varepsilon_{\lambda}x \quad (9)$$

(9) 式为光学薄模型, 光谱最后结果可直接由自发辐射谱 ε_{λ} 给出。

由 (7) 式及 (5) 式可知, 只要求得 ε_{λ} , (7) 式即可求解。对原子而言, 电子从能级 i 跃迁到能级 j , 辐射波长为 λ_0 (中心波长) 的光子, 产生的单色光强度 ε_j 为:

$$\varepsilon_j = \frac{n_u h A}{4\pi \lambda_0} \quad (10)$$

A 为爱因斯坦系数, 其中,

$$n_u = (n d_u / Q) \exp(-hcT_c / kT) \quad (11)$$

$$Q(T) = \sum_i d_i \exp(-E_i / kT) \quad (12)$$

设原子辐射谱线是 Voigt 线型, Voigt 线型为 Doppler 线型与 Lorentz 线型的卷积。若归一化 Voigt 线型为 $L_V(\lambda_0)$, 则单位体积、单位弧度上自发辐射谱强度 ε_{λ} 为 $\varepsilon_{\lambda} = \varepsilon_j L_V(\lambda_0)$, 代入 (5) 式, (7) 或 (9) 式可求解。

2 实验研究

2.1 “杂质”的加入

由于正常情况下没有发动机磨损物质进入羽流, 为了对发动机某种部件发生磨损 (或烧蚀) 时的羽流特性进行模拟实验, 需人为地往燃烧室内加入“杂质”, 该“杂质”的加入是通过向燃烧室中注入一定量的浓度的盐溶液来实现的。根据某发动机的设计, 其主要部件的主要材料有: 不锈钢 1Cr18Ni9Ti、9Cr18、2Cr13, 高温镍基合金 GH169、GH30、GH600, 铝合金 LD10、LD2, 铸铝 ZL104, 锆铜合金 TuZr0.15 等, 所含的主要金属元素有: Fe、Cu、Al、Mn、Ni、Mg、Cr、Ti 等。在不失一般性的前提下, 为实验研究方便起见, 从盐溶液的制作难易出发, 考虑进入羽流中的“杂质”元素有: Fe、Cu、Al、Cr、Mn、Ni 等。

2.2 测量仪器

实验概貌如图 1 所示。其中, 透镜会聚来自马赫盘的光, 经光纤传至光谱仪。在光谱仪内, 多色光分解为单色光, 频率不同的单色光分别由多单元的光电二极管探测器检测。探测器得到的模拟量传到光学多通道分析仪 OMA, OMA 控制探测器的工作, 将输入的数据数字化, 并通过标准总线送到计算机; 最后以一线状光谱的形式显示在计算机上。

实验所用光谱仪型号: SpectraPro-500, 焦距 500mm; 探测器型号: OMA4000, CCD 阵列为 512×512 , 每个象素 (pixel) 面积: $19\mu\text{m} \times 19\mu\text{m}$ 。光谱仪中装上 300g/mm 的光栅时, 色散度: 6nm/mm, 仪器测量范围: 58.2nm, 分辨率: 0.113nm/pixel; 600g/mm 光栅, 色散度、测量范围与分辨率分别

为: 3nm/mm, 29.1nm 和 0.056nm/pixel; 150g/mm 光栅, 色散度、测量范围与分辨率分别为: 12nm/mm, 116nm, 0.23nm/pixel. 现考虑测量仪器对光信号的传递. 仪器对光信号的影响有两个: (1) 光强的衰减; (2) 谱线的展宽. 本文主要考虑谱线展宽, 设仪器函数为高斯函数, 即

$$h_{\lambda}(\lambda) = \frac{1}{b_h} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2 \ln 2}{b_h^2}\right] \quad (13)$$

(7) 式或 (9) 式所表达的光谱没有考虑仪器函数的影响, 因此, 实验所得的“真实”光谱为 (7) 或 (9) 式与仪器函数的卷积:

$$I_{\lambda}(\text{measured}) = I_{\lambda}(x) * h_{\lambda}(\lambda) \quad (14)$$

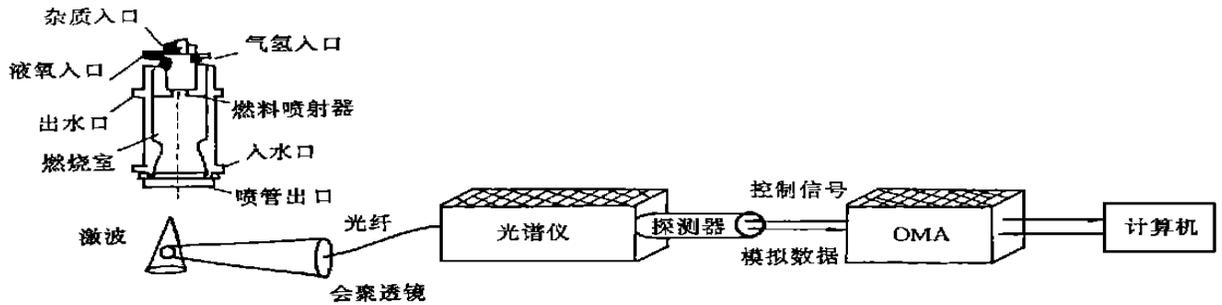


图1 实验系统概貌
Fig. 1 Experimental system

3 数值仿真

上述 I_{λ} (或 $I_{\lambda}(\text{measured})$) 是对单个频率跃迁的描述, 实际上当发动机某个部件磨损时, 往往有多种金属元素进入羽流, 而每种元素有多个不同频率的谱线, 如 Fe 可发生 379 个不同频率的光子跃迁. 仪器接收的光谱是所有元素的所有频率的谱线叠加, 设有 N 个中心波长为 $\lambda_{0k} (k = 1, 2, 3, \dots, N)$ 的辐射 $I_{\lambda k}(\text{measured}) (\lambda_{0k})$ 被仪器接收, 总的接收谱为:

$$I'_{\lambda}(\text{measured}) = \sum_{k=1}^N I_{\lambda k}(\text{measured}) (\lambda_{0k}) \quad (15)$$

如第 2 部分所述, 假定羽流中所含金属元素为: Fe、Cu、Al、Cr、Mn、Ni, 根据前述辐射传递理论, 由原子自发辐射原理, 作者对羽流中金属元素原子的测量光谱进行了仿真研究, 其中用到了表 1 中的光谱数据 (以每种元素的一个中心波长为例), 配分函数 Q 由式(12) 给出. 设 $a^* = 1.0$, 高斯函数线型的仪器函数半高宽 b_h 设为 0.2nm.

表 1 光谱数据
Tab 1 Data of spectrum

金属种类	中心波长 (nm)	爱因斯坦系数 ($\times 10^8$)	简并度	配分函数	温度 (K)	高能级光谱项 (l/cm)
Fe	371.99	0.163	11	21.955	3000	26875
Mn	403.18	0.037	12	6.011	3000	50081
Cr	425.44	0.315	9	7.654	3000	23499
Ni	352.45	1	5	26.354	3000	28569
Al	394.40	0.493	2	5.7908	3000	25348
Cu	402.26	.190	4	2.0348	3000	55388

图 2 以 Fe 的其中两个中心波长 ($\lambda_{01} = 373.49\text{nm}$, $\lambda_{02} = 373.71\text{nm}$) 为例, 采用光学薄模型, 给出计算过程. 图 2 (a) 表示 373.49nm 的谱线, 图 2 (b) 为 373.71nm 的谱线; 图 2 (c) 表示该两条谱线的叠加, 范围: 330nm~440nm (可参见图 4), 图 2 (d) 为 2 (c) 的部分放大.

* $a = \ln 2(b_d/b_c)$, b_d, b_c 分别为 Doppler 和 Lorentz 半高宽度, 由该式可由 Doppler 半宽求解 Lorentz 半宽.

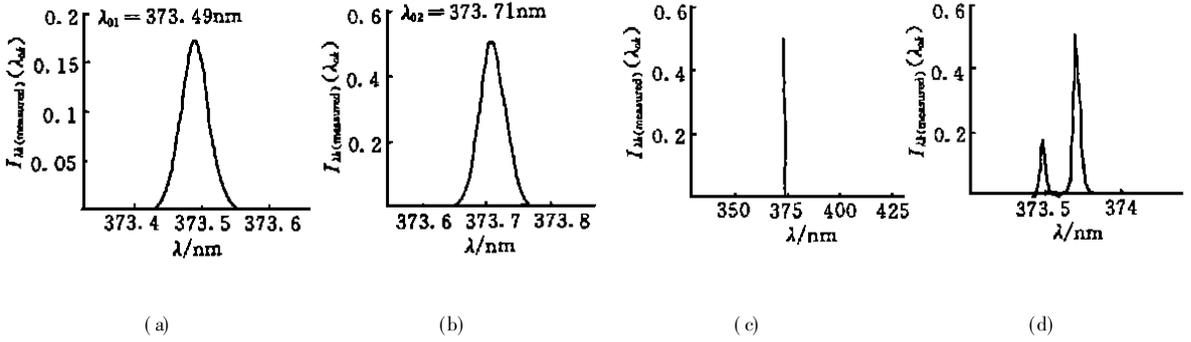


图2 仿真计算过程实例

Fig. 2 Example of simulation calculation

设光谱仪所用光栅为 300g/mm, 则 OMA 仪每帧光谱范围为 58.2nm, 分辨率: 0.113nm/pixel。图 3 为各元素在 370nm 到 428.2nm 波长范围间的光谱。图 3 (a) 中各元素的摩尔浓度比: 1 (Fe) : 0.0273 (Cr) : 0.121 (Ni) : 0.5 (Cu) : 0.0215 (Mn) : 0.1 (Al); 图 3 (b) 中各元素的摩尔浓度比: 1 (Fe) : 0.273 (Cr) : 0.121 (Ni) : 0.5 (Cu) : 0.0215 (Mn) : 0.5 (Al)。图 4 模拟了 150g/mm 光栅下的光谱, 波长范围 330~ 440nm, 图 5 为 600g/mm 光栅、光谱范围 380nm~ 409.1nm 条件下的光谱仿真。

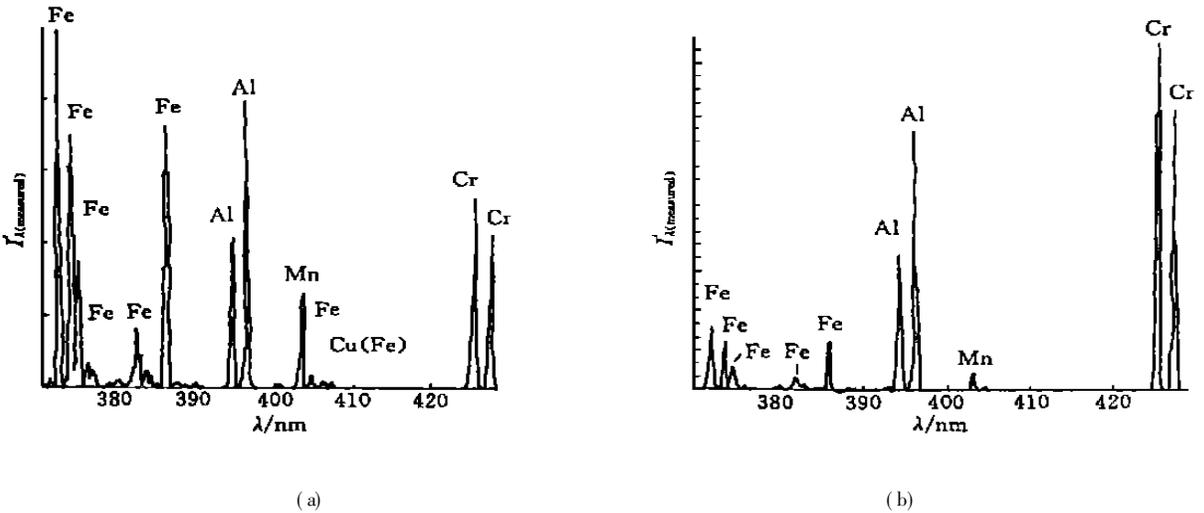


图3 300g/mm 光栅下的原子理论光谱

Fig. 3 Calculated atomic spectrum for 300g/mm grating

比较图 3~ 图 5, 150g/mm 光栅下的光谱范围最宽, 提供的信息最多, 分辨率最低; 600g/mm 光栅下的光谱范围最窄, 分辨率最高; 300g/mm 介于两者之间。由上述结果看来, 在阻尼因子 $a = 1.0$, 仪器函数半高宽度 $b_h = 0.2\text{nm}$ 的情况下, 分辨率影响似乎不大, 150g/mm 光栅似乎最理想。但如果 a 及 b_h 减小, 则结果将受到分辨率影响, 仪器函数的半高宽度将在实验中确定。

比较图 3 (a) 及图 3 (b), 各元素的不同摩尔浓度混合比影响到光谱显示, 这是因为相对强度若太大, 强度较小的谱线在图中的显示则趋近于横坐标。

Lorentz 线宽与羽流的温度、压力、组份等因素有关, 较难确定, 仿真计算设定所有元素 $a = 1.0$ 。由于本研究的最终目的是由实验光谱确定羽流中元素的组份及浓度, 实质上是一个模式识别问题, 因此, 可由实验光谱结果反算 a 值。

本文的仿真计算, 目的是为实验提供一个光谱理论轮廓, 主要考虑谱线展宽问题, 没有考虑具体的强度值, 没有考虑光学厚度问题。

4 结束语

本文应液体火箭发动机故障的羽流光谱诊断需要, 从辐射传递模型出发, 根据原子自发辐射理

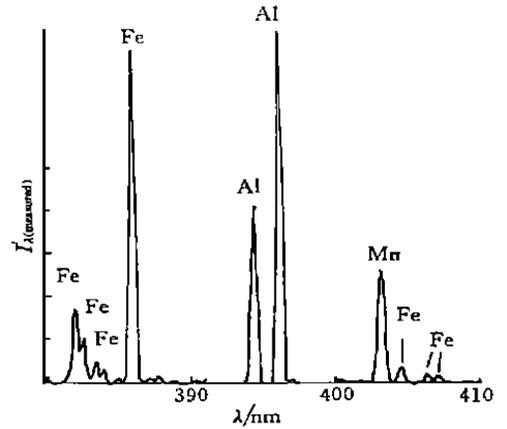
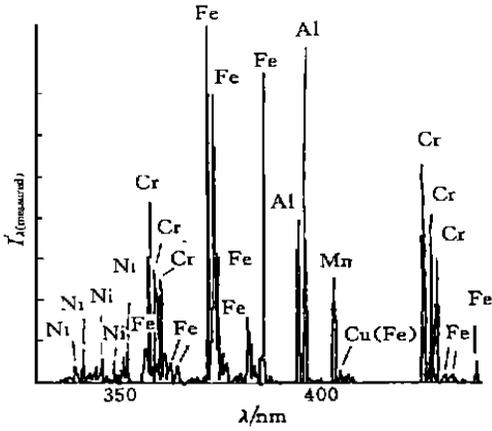


图4 150g/mm光栅下的原子理论光谱

图5 600g/mm光栅下的原子理论光谱

Fig. 4 Calculated atomic spectrum for 150g/mm grating

Fig. 5 Calculated atomic spectrum for 600g/mm grating

论,对发动机几种主要元素在羽流条件下的原子光谱特性进行了仿真研究。该工作为今后的羽流光谱实验提供了一个理论样板,为光谱实验数据分析提供了一个理论依据,为发动机故障的羽流光谱诊断奠定了坚实的基础。

符号说明

I_{λ}	辐射谱强度, $W/cm^2 \cdot nm \cdot sr$	x	离马赫盘边界的位移, cm
ϵ_{λ}	自发辐射谱强度, $W/cm^3 \cdot nm \cdot sr$	T	马赫盘温度, K
k_{λ}	吸收系数, cm^{-1}	h	普朗克常数
k'_{λ}	有效吸收系数, cm^{-1}	c	光速
λ	波长, nm	k	玻尔兹曼常数
$I_{\lambda 0}$	积分常数, $W/cm^2 \cdot nm \cdot sr$	B_{λ}	普朗克黑体辐射函数, $W/cm^2 \cdot nm \cdot sr$
ϵ_{ij}	自发辐射能量, $W/cm^3 \cdot sr$	n_u	自发跃迁原子在高能级的布居数, $particles/cm^3$
A	爱因斯坦系数, s^{-1}	λ_0	中心波长, nm
n	原子浓度, $particles/cm^3$	d_u	自发跃迁原子在高能级的简并度, 无量纲
Q	配分函数, 无量纲	T_e	光谱项, l/cm
d_i	原子第 i 能级的简并度, 无量纲	E_i	原子第 i 能级的能量本征值, J
$L_V(\lambda_0)$	Voigt 归一化线型函数, nm^{-1}	λ_{0k}	光子 k 的中心波长, nm
b_h	仪器函数半高宽度, nm	h_{λ}	仪器函数, nm^{-1}
$I_{\lambda k(\text{measured})}$	“真实”光谱, $W/cm^2 \cdot nm \cdot sr$	$I_{\lambda k(\text{measured})}$	光子 k 的“真实”光谱, $W/cm^2 \cdot nm \cdot sr$
$I'_{\lambda(\text{measured})}$	仪器接收的总的光谱, $W/cm^2 \cdot nm \cdot sr$		

参考文献:

- [1] Ciokanek H A. Characteristics of Space Shuttle Main Engine Failures [R]. AIAA-87-1939, 1987.
- [2] Powers W T et al. OPAD 1991—A Status Report [R]. N93-31559, 1993.
- [3] Tejwani G D et al. Approach to SSME Health Monitoring III. Exhaust Plume Emission Spectroscopy: Recent Results and Detailed Analysis [R]. AIAA-93-2513, 1993.
- [4] Madzsar G C et al. Instrumentation For In-Flight SSME Rocket Engine Plume Spectroscopy [R]. AIAA-94-2985, 1994.
- [5] [苏] П. . 泽尔道维奇, И. . 莱依捷尔著, 激波和高温流体动力学现象物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 1965.