

煤油-氧火焰中铁的辐射光谱实验研究*

赵永学, 李麦亮, 张育林, 周进

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 为了对羽流激波中金属光谱特性进行研究, 用煤油-氧火焰气体模拟煤油-氧发动机的羽流, 以二茂铁溶于煤油模拟发动机材料铁的磨损, 给出不同混合比下铁在火焰中辐射光谱的实验与仿真结果。实验光谱数据随铁的浓度不同而变化, 理论光谱与实验结果吻合较好, 验证了羽流中金属原子辐射光谱的仿真程序。为基于羽流光谱分析的发动机故障诊断研究奠定了实验与理论基础。

关键词: 液体推进剂火箭发动机; 煤油; 氧; 二茂铁; 羽流; 辐射谱; 仿真试验

中图分类号: V434.13 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055(2000)06-0065-05

Measurement and analysis for spectrum of iron in kerosene-oxygen flame

ZHAO Yong-xue, LI Mai-liang, ZHANG Yu-lin, ZHOU Jin

(Inst. of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to study atomic spectroscopy in the diamond of the plume, a kerosene-oxygen flame on a lamp was used to simulate the plume of the liquid oxygen/ kerosene rocket engine, the ferrocene dissolved in the kerosene was used to simulate the Fe erosion of the engine. The different experimental spectra of iron in different concentration were obtained respectively, the simulation results of the experimental ones were also presented. The experimental results vary with the concentration; the simulation result fits satisfactorily for the measured one, which validates the simulation code of atomic radiation spectrum in the plume. The qualitative study lays experimental and theoretical foundation for the research of engine diagnosis based on plume spectral analysis.

Key words: Liquid propellant rocket engine; Kerosene; Oxygen; Ferrocene; Plume; Radiation spectrum; Simulated test

1 引言

火箭发动机羽流的测量研究, 近年来发展很快, 它对现代发动机和推进剂的发展具有多方面的意义^[1]。液体火箭发动机经磨损、老化或烧蚀, 一些金属杂质将进入羽流, 通过检测羽流中金属的辐射光谱就可对发动机进行故障诊断^[2]。为了对发动机磨损后羽流中的原子光谱特性进行研究, 本文在羽流光谱原子辐射仿真研究^[3]的基础上, 以煤油-氧火焰高温气体模拟液氧-煤油发动机羽流, 以金属有机化合物二茂铁 ($(C_5H_5)_2Fe$) 溶于煤油模拟发动机金属元素 Fe 的磨损, 通过光学采集系统, 得到不同浓度下 Fe 在煤油-氧火焰中的光谱。采用辐射传输模型, 对 Fe 的辐射光谱进行了仿真计算, 与实验结果吻合较好。

2 实验装置及仪器函数

2.1 实验系统

整个实验系统由火焰燃烧系统和光学采集系统两部分组成。将能溶于煤油的二茂铁与煤油混合后作为燃烧剂, 气氧通过旁边管道加压输入, 煤油与氧绝对隔离。在灯芯出口处煤油与氧混合, 产生明亮火焰。用钨铼裸端热电偶测得温度高达 2 300 K 以上, 能模拟羽流中马赫盘的温度, 金属在此高温下能自发辐射。通过改变煤油与二茂铁的混合比来模拟马赫盘中磨损金属的浓度变化。火焰发出的光经透镜会聚后由光纤传入单色仪, 在单色仪内, 复合光分解为单色光, 经探测器 CCD 到 OMA 仪。OMA 仪一方面将该模拟信号转换为数字信号, 另一方面控制探测器的工作, 如曝光时间。最后, OMA 将数

* 收稿日期: 1999-12-25; 修订日期: 2000-04-03。

作者简介: 赵永学 (1973—), 女, 博士研究生, 研究领域为光谱在发动机诊断方面的应用。

字信号通过数据总线送达计算机, 计算机以带状光谱的形式实时显示采集到的数据。

实验所采用的单色仪焦距为 500 mm, 光栅 600 g/mm, 300 g/mm; CCD 为 512×512 阵列, 每个 Pixel 为 $19 \mu\text{m} \times 19 \mu\text{m}$ 。曝光时间设为 20 ms, 用到 CCD 面阵从 250 列到 269 列的二极管, 在此设定下, 每帧光谱所用时间为 856.86 ms。狭缝宽度 $20 \mu\text{m}$, 设定 600/mm 光栅下单色仪单色光出口处中心波长为 380 nm, 300 g/mm 光栅对应的中心波长 367 nm。

2.2 狭缝仪器函数的测定

实验中光学采集系统对光谱的响应函数用狭缝仪器函数来表示, 狭缝仪器函数表征了光谱接收仪器对光谱的展宽, 在光谱仿真及实验数据分析中, 仪器函数的测定起着重要作用。用实验方法测量仪器函数时, 可采用线宽极小的激光通过信号采集光路, 以所得光谱作为仪器函数的近似。实验中以 He-Ne 激光 (波长 632.8 nm, 线宽 $< 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$) 通过整个光路, 测得结果如图 1, 其中 600 g/mm 光栅下仪器函数半高宽度为 0.075 nm, 300 g/mm 光栅对应的半高宽度为 0.169 nm。

2.3 标定

在光路采集系统中, CCD 是由 512×512 个电荷耦合像素 (Charge-coupled pixels) 组成, 在光谱采集

中直接对应的是每个像素, 数据采集前需采用标准光源进行波长标定, 使物理像素单元与波长单位对应。采用标准汞灯, 通过光路采集系统, 得到结果如图 2。当横坐标为 Pixel 时, 采集的光谱如图 2 (a), 标定后如图 2 (b)。可见谱线反转, 横坐标由原 Pixel 变为波长单位 nm。

3 辐射光谱的测定

3.1 纯煤油燃烧火焰的辐射光谱测定

实验中我们希望得到的是铁原子的辐射谱, 为了尽可能减少背景噪声的影响, 不但要去除环境辐射及测量系统暗电流噪声, 还要考虑煤油燃烧过程中各种分子光谱及热辐射的影响。为此, 我们测量了纯煤油 (指未加二茂铁的煤油) 燃烧过程中的辐射, 如图 3 (a)。为便于比较, 图 3 (b) 给出了加二茂铁 (500 mg $(\text{C}_5\text{H}_5)_2\text{Fe} + 100 \text{ ml}$ 煤油) 后的辐射, 其中上两条曲线为纯煤油和加二茂铁后的谱线, 底下为减去纯煤油谱线后的铁的辐射光谱。

3.2 火焰中铁的辐射光谱测定

为研究羽流光谱随金属材料磨损或烧蚀程度的变化, 以稳压表及流量计控制氧气流量不变, 灯芯粗细相当, 即可认为火焰温度恒定, 将二茂铁与煤油以不同浓度相混合, 得到了不同 Fe 浓度的各种光

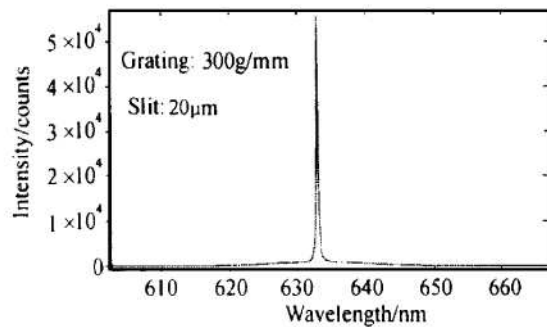
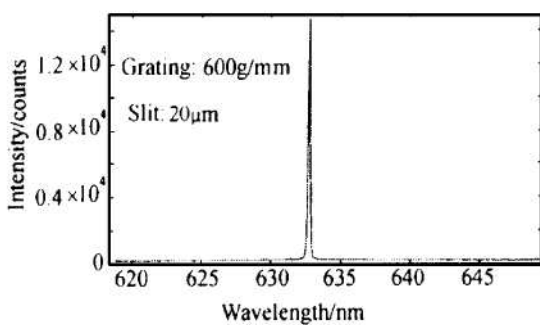


Fig. 1 Measured slit instrument function

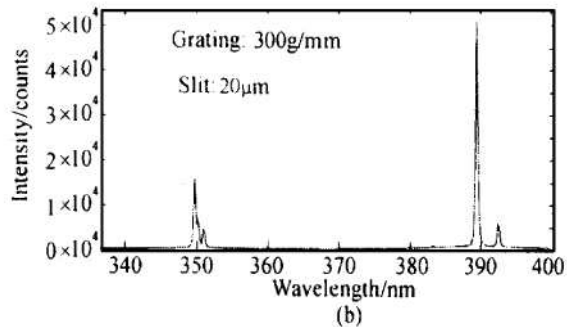
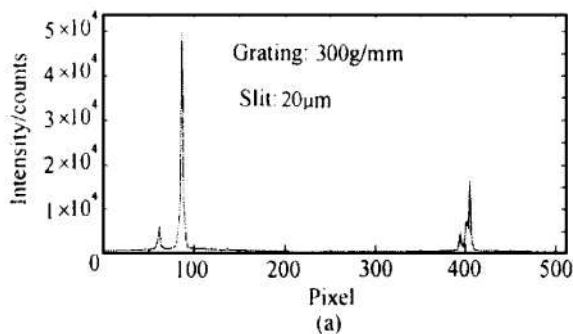


Fig. 2 Calibration

谱, 如图 4 (未减去煤油辐射)。图 4 中各图光栅: 300g/mm, 狭缝宽度: 20 μm 。二茂铁中铁的百分含量为 30.0195%, 每 100mg 二茂铁溶于 100ml 煤油时铁的浓度为 3.234×10^{15} particles/cm³。由图 4 可见, 随着二茂铁浓度的减小, 铁的谱线相对峰值降低, 到图 4 (e) 及图 4 (f) 中铁的原子谱线几乎已无法分辨。由于火焰燃烧温度很高, 灯芯燃烧太快, 在测量过程中火焰形状不断减小, 位置不断降低, 测量中会聚透镜很难将所有火焰辐射恰当地会聚到光纤入口处, 因此即使各次测量温度一定, 也不能单纯从实验测量的谱线峰值的绝对值大小来比较火焰

中铁的浓度大小, 可由谱线峰值间的相对值来反映浓度的变化。在对发动机羽流激波的辐射测量时道理同于此。

图 5 为不同光栅下铁的辐射谱, 图 5 (a)、5 (b) 分别给出 300 g/mm 光栅、600 g/mm 光栅、狭缝宽度为 20 μm 对应的测量结果 (已减去煤油辐射)。可见 300 g/mm 光栅波长覆盖范围较宽 (约 64 nm), 分辨率较低 (0.133 nm/pixel); 600 g/mm 光栅波长覆盖范围窄 (约 32 nm), 分辨率较高 (0.066 5 nm/pixel)。

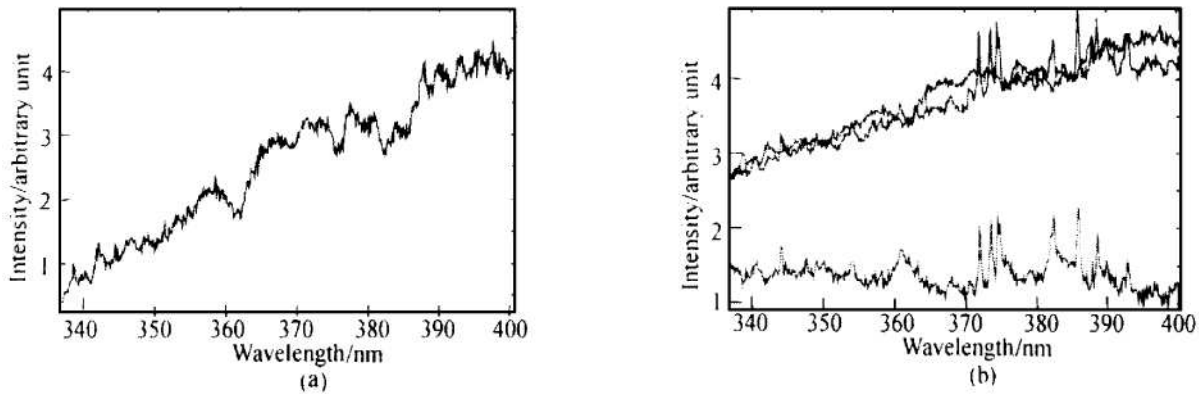


Fig. 3 Measurement of kerosene

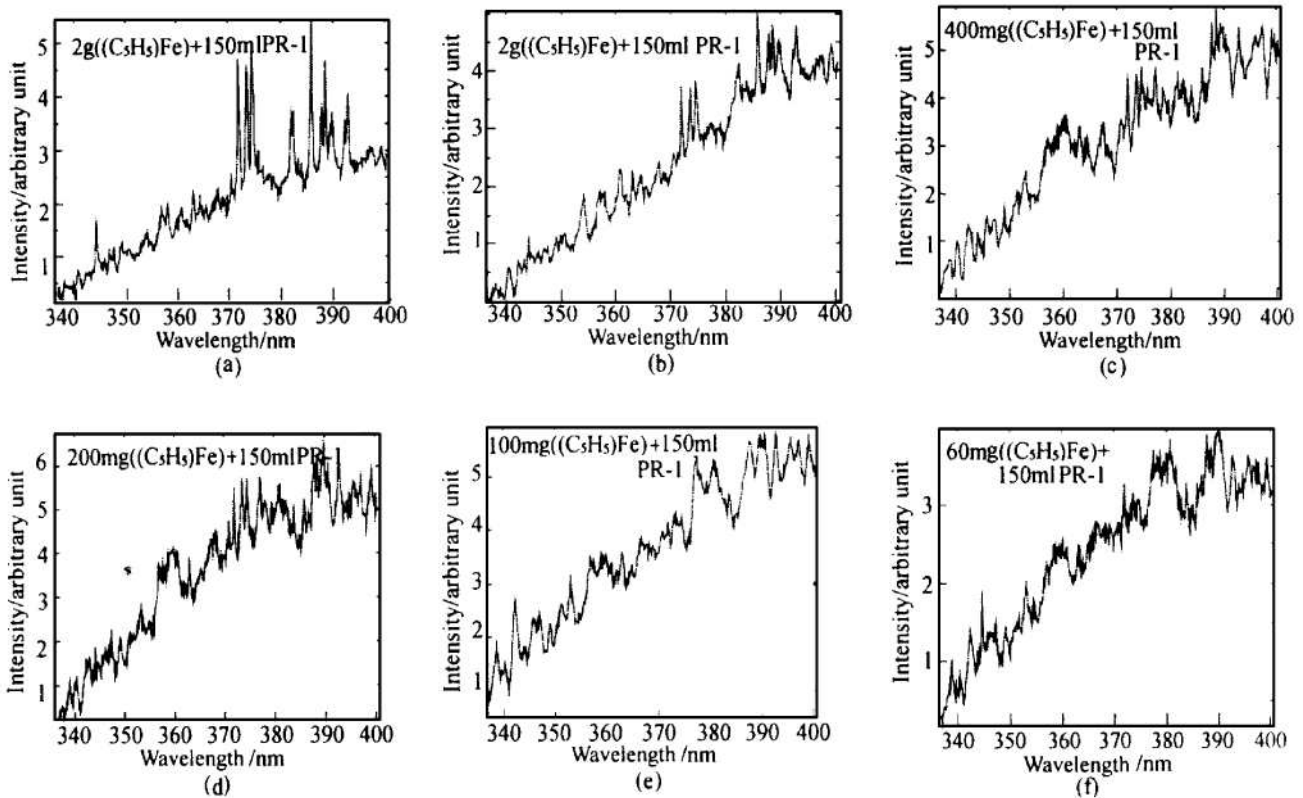


Fig. 4 Spectra of Fe with different concentration

4 结果与分析讨论

4.1 实验与仿真结果的比较

作者对铁的光谱进行了理论仿真计算, 采用一维辐射输运模型^[2], 结果如图6。计算中设定: (1) 燃烧火焰中气体温度、压强、浓度、扰动粒子分压均匀一致; (2) 忽略火焰边界影响。根据火焰燃烧情况, 计算中设温度为2 500 K, 宽度因子1.0, 浓度如各图中所示, 火焰体积目测2 cm³。其中图6 (a) 为图5 (a) 的仿真结果; 图6 (b)、6 (c)、6 (d) 分别为图4 (a) (减去煤油辐射后结果如图5 (b))、4 (b)、4 (e) 中铁原子的仿真结果。

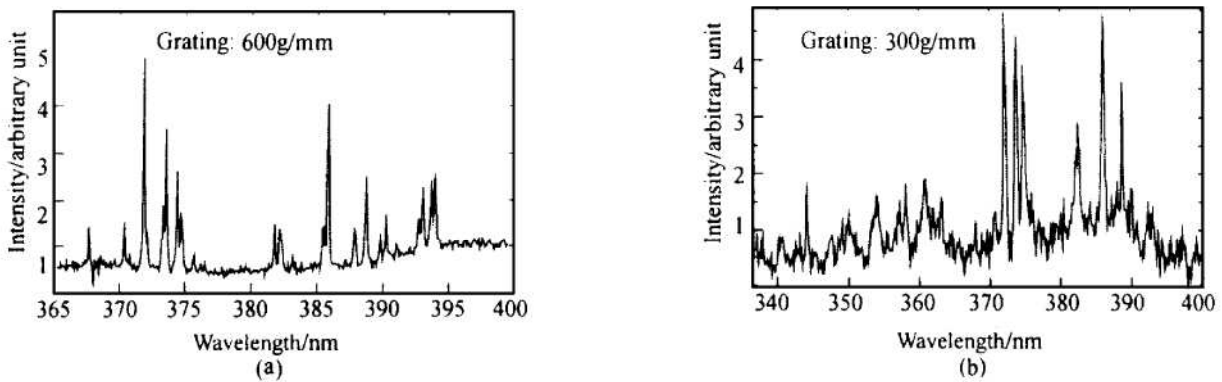


Fig. 5 Spectra of Fe with different gratings

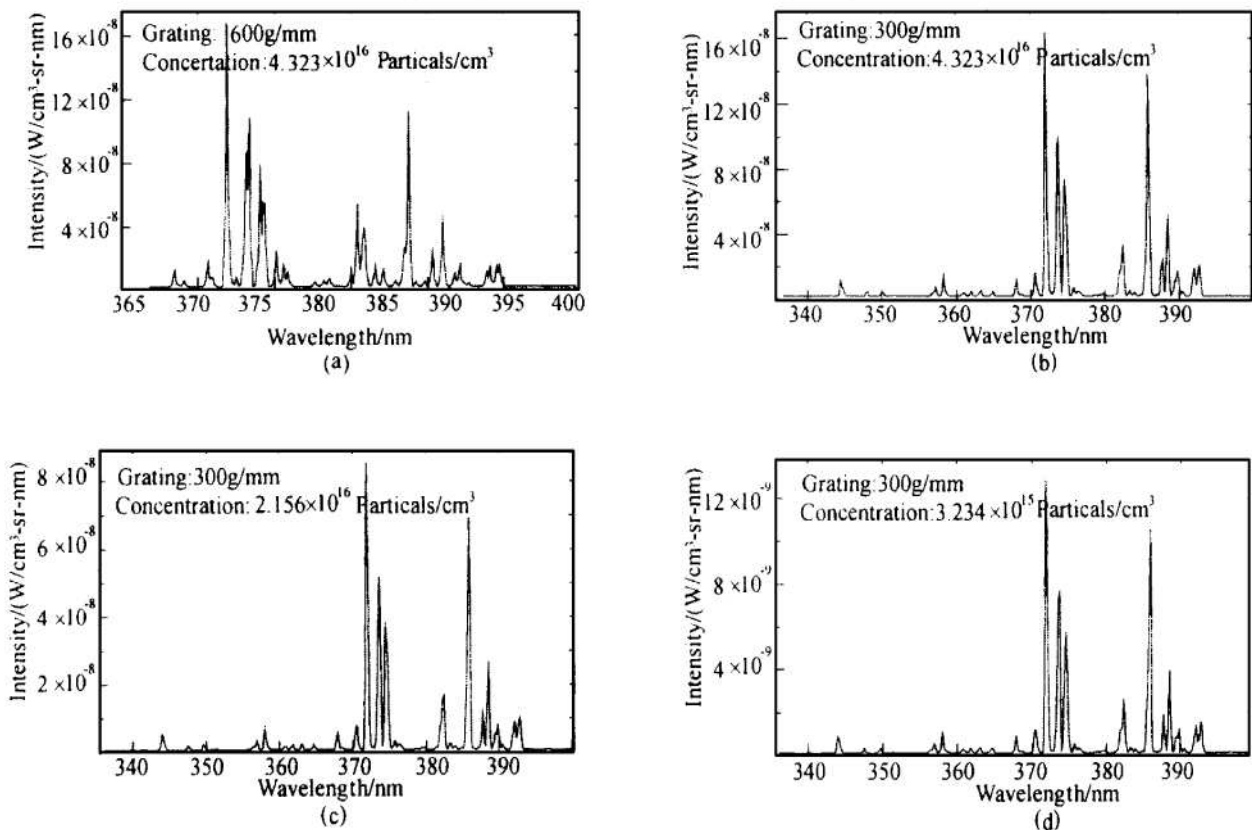


Fig. 6 Comparison of calculated and measured results

由图6 (a) 及6 (b) 可以看出, 就铁的辐射而言, 计算结果很好地模拟了实验结果, 因此, 可以认为图6 (c)、图6 (d) 分别为图4 (b)、图4 (e) 中铁的辐射光谱信号。如果不减去背景噪声, 铁的辐射被噪声干扰, 浓度较高时, 还能辨别出铁的光谱 (图4 (b)); 当浓度较低时, 则很难从实验原始数据直接看出铁原子的辐射信号 (图4 (e))。为了得到铁的辐射, 可由前述的方法, 从实验数据中直接减去煤油辐射, 但该方法要求被减煤油辐射与原光谱数据中煤油辐射部分相同, 实测纯煤油光谱时该项要求很难实现, 因此需要对采集数据进行处理, 以期得到铁原子的辐射。

4.2 影响测量结果的因素分析

整个辐射谱是热辐射、煤油燃烧的分子辐射及原子辐射的叠加,在进行数据处理时只简单地进行了减法运算(见 3.1 节),只有当纯煤油的燃烧与加二茂铁后的燃烧工况完全一致时,这种减法才是精确的。测量结果中仅靠基线扣除法进行数据处理,显然会带来较大偏差。如何对实验数据进行正确有效的处理,目前正在研究中。

光谱是温度、浓度、成分及压力的非线性函数,3.2 节的讨论认为火焰温度、成分、压力不变,测量光谱数据只是浓度的函数,由于每次光谱采集曝光时间为 20ms,在此极短时间内可认为火焰温度、成分及压力等状态不变。但在实际测量中,氧气的流量很难控制,燃烧煤油的含量靠灯芯的吸附作用,随着灯芯的逐渐消耗,火焰逐渐减小,因此各次测量光谱的温度等参数未必一致。

系统的最低检出率。当 60 mg 二茂铁溶于 100 ml 煤油时,已无法用肉眼直接由实验数据分辨出铁的谱线,对数据进行处理后,可望能提高信噪比,从而提高测量系统的浓度分辨率。

狭缝宽度对测量及仿真结果的影响。以上所有测量结果,狭缝宽度都为 20 μm ,由于 CCD 每个像素为 19 $\mu\text{m} \times 19 \mu\text{m}$,狭缝宽度在 20 μm 时效率最高。狭缝宽度对整个仪器响应函数影响较大。在仿真计算中,仪器函数的线型、线宽由实验测量给定。

5 结 论

(1) 仿真结果与实验吻合较好,可认为理论模

型正确。

(2) 由于光谱主要与温度、浓度及压力有关,在对发动机进行羽流光谱诊断时,主要检测排气羽流激波中的高温辐射。自制煤油灯火焰虽不能模拟发动机的高速燃烧,但能模拟激波高温气体的温度、成分及压力等与光谱相关的参数。因此,实验证明整个实验系统可以较好的模拟并检测羽流中金属原子发射光谱,从而实验地证明了发动机羽流光谱故障诊断的可行性。

(3) 通过往煤油中加入可溶性金属有机化合物来模拟发动机的金属磨损,是一种方便可行的实验方法。

目前,整套实验系统已用于液氧-煤油发动机的羽流光谱测量,煤油-氧火焰辐射光谱的实验研究,为基于光谱分析的发动机故障诊断研究奠定了实验基础。

参 考 文 献

- [1] 张 平. 火箭排气特征研究进展 [J]. 推进技术, 1992, 13 (3) .
- [2] Tejwani G D, Bircher F E, et al. SSME health monitoring at SSC with exhaust plume emission spectroscopy [R]. AIAA 97-2666.
- [3] 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) .

(责任编辑: 王居信)

(上接第 64 页)

速度和喷管潜入深度对翼槽内的燃气流动方式影响较大。

参 考 文 献

- [1] Ciucci A, Foster W A Jr., Jenkins R M. Results of an experimental investigation of the flow field in the head-end star slot section of a solid rocket motor [R]. AIAA 92-3048.
- [2] Ciucci A, et al. Experimental investigation of the flowfield in the head-end star slot section of a solid rocket motor [R]. A-

IAA 91-2427.

- [3] 王 慧, 蹇泽群, 王 华, 等. 大后翼与主流相互作用的模拟点火试验 [J]. 推进技术, 1997, 18 (3) .
- [4] Foster W A, et al. Direct measurements of internal flow velocities in a star-slot model [R]. AIAA 97-2716.
- [5] Kuo K K, et al. Flame spreading phenomena in the fir slot region of a solid rocket motor [R]. AIAA 93-2310.
- [6] 任国周. 固体火箭发动机燃速相关性研究 [J]. 推进技术, 1989 (3) .

(责任编辑: 王居信)