

6 km/s 运动激波波后高温空气辐射特性实验研究

张森豪^{1,2}, 许以欣^{1,2}, 张仕忠¹, 张晓源¹, 林鑫¹, 李进平¹,
卢会群³, 李飞^{1*}, 余西龙^{1,2}

(1. 中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049; 3. 广东空天科技研究院, 广州 511458)

摘要: 临近空间高超声速飞行器的绕流是经过强激波压缩的高温空气, 可以产生强烈的高温辐射, 对于飞行器的热防护设计具有重要影响, 因此开展波后高温空气辐射特性研究具有重要意义。在中科院力学所的JF-14激波风洞中, 开展了6 km/s运动激波波后辐射光谱实验研究。利用超高速相机捕捉了激波的运动和辐射空间分布特征, 探索了瞬态和动态结合的辐射光谱测量方法, 测量了可见光波段(510~790 nm)的运动激波波后瞬态光谱, 并初步获得了N₂分子第一正带系光谱、O原子光谱特征谱线, 以及Na原子光谱特征谱线的辐射强度时空演化规律。将实验光谱与SPARK 3.0辐射逐线计算程序的理论光谱进行计算拟合, 推断了N₂分子的转动温度和振动温度。本研究为后续开展激波波后振动弛豫等物理现象的研究工作奠定了基础。

关键词: 发射光谱; 辐射特性; 地面实验; 非接触测量; 激波

中图分类号: V416 文献标识码: A 文章编号: 2097-0714(2023)03-0015-06

DOI: 10.16338/j.issn.2097-0714.20220224

Experimental study of the radiation characteristics of high-temperature air after a 6 km/s shock wave

Zhang Senhao^{1,2}, Xu Yixin^{1,2}, Zhang Shizhong¹, Zhang Xiaoyuan¹, Lin Xin¹, Li Jinping¹,
Lu Huiqun³, Li Fei^{1*}, Yu Xilong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Guangdong Aerospace Research Academy, Guangzhou 511458, China)

Abstract: The flow around hypersonic vehicles is high temperature air compressed by strong shock waves, which can generate strong radiation. This radiation significantly affects the vehicles' thermal protection

收稿日期: 2022-12-31; 修回日期: 2023-04-06

基金项目: 广东省重点领域研发计划资助(2021B0909060004)

作者简介: 张森豪, 博士研究生, 主要研究方向为高温气体辐射。

通讯作者: 李飞, 研究员, 主要研究方向为高焓流动、光谱测试技术和高超推进技术。

引用格式: 张森豪, 许以欣, 张仕忠, 等. 6 km/s 运动激波波后高温空气辐射特性实验研究[J]. 空天技术, 2023 (3): 15-20.
(Zhang Senhao, Xu Yixin, Zhang Shizhong, et al. Experimental study of the radiation characteristics of high-temperature air after a 6 km/s shock wave[J]. Aerospace Technology, 2023 (3): 15-20.)

design. Therefore, it is of great significance to research the radiation characteristics of the shock layer. The radiation spectrum after 6 km/s shock wave is studied experimentally. Experiments are performed in the JF-14 shock tunnel of the Institute of Mechanics, CAS. The motion of shock wave and the spatial distribution of radiation are captured by a high speed camera. A method of radiation spectroscopic measurements combining transient and dynamics is explored. The transient spectra of visible light band (510~790 nm) are measured. Preliminary spatiotemporal evolution patterns of the emission intensities of the characteristic spectral lines in the first band system of N_2 molecules, the atomic oxygen (O) spectrum, and the atomic sodium (Na) spectrum have been obtained. The experimental results are compared to theoretical spectra predicted by the line-by-line code SPARK 3.0, and rotational and vibrational temperature of N_2 are evaluated by spectral matching optimization. This study lays a foundation for further research on post-shock vibration relaxation and other physical phenomena.

Key words: emission spectroscopy; radiation characteristic; ground experiment; non-intrusive measurement; shock wave

1 引言

在高超声速飞行器的头部驻点区, 来流气体通过激波压缩和粘性摩擦的方式, 动能转化为内能, 温度和压力急剧上升, 成为高温气体。高温气体会发生复杂的物理化学过程, 包括能级激发、离解、电离和复合等, 还可能伴随电子/振动/转动能级跃迁等不同的辐射跃迁过程, 产生强烈的辐射现象。辐射作为能量传递方式的一种, 极高速度下可能会成为高温气体绕流与飞行器表面之间的主要传热方式, 进而对飞行器热防护构成严重挑战。以进入木星大气层的伽利略号空间探测器为例, 其进入速度 15 km/s, 以辐射形式传输的热量占总传热量的 95% 以上。辐射现象通常在飞行器头部激波层处最为强烈, 激波层波后辐射加热也是飞行器热防护设计不确定性的主要来源^[1]。因此, 有必要对激波波后辐射开展深入研究以提高热防护设计精度, 降低发射成本。

针对激波波后辐射问题, 近年来学界开展了大量实验和数值研究工作。EAST (Electric Arc Shock Tube) 电弧激波管是 NASA 为模拟行星进入过程中的高焓真实气体现象而开发建造的, 是目前开展火星进入气体辐射强度定量测试最多的设备^[2]。NASA 基于 EAST 激波管开展了系列实验, 实验结果^[3]与 NEQAIR^[4]、HARA^[5] 等辐射计算程序的数值结果存在显著差异。此外, 对日本隼

鸟号再入飞行器的实测辐射数据分析^[6-7] 也表明, 激波波后辐射现象强烈, 且主要波段为紫外及可见波段, 但对该波段光谱相关机理的认知还不够清晰。综上, 有必要对激波波后辐射光谱开展进一步研究, 验证并改进相关参数和模型, 进而构建更为精确的气体辐射计算方法, 提高对气动物理复杂效应机理的认知。

实验手段是高超声速研究领域最基本、最常用的手段^[8]。地面实验较飞行实验具有实验成本低、测量易开展等优势, 常用于量化计算不确定性并验证或改进计算模型, 增进对不同光谱特征机制的理解。目前, 世界各研究机构已建造了大量尺寸、特性、研究目的各异的高超声速地面设备^[9-12]。其中, 激波风洞、激波管等高超声速地面设备是实验研究高温气体物理化学过程的重要工具, 适用于开展气动辐射研究。测量方面, 光学诊断技术作为一种非侵入式测量技术在气动物理实验研究上具有独特优势, 也已开始从实验室基础研究走向各类风洞^[13], 是目前气动物理地面实验研究中的重要测量方法。近年, 国内外研究机构基于激波管和光学诊断技术开展了一些地面实验工作, 但数据质量与丰富度并不十分理想, 地面实验模拟能力仍需得到进一步提升^[14]。如何提升配套的光谱诊断方法、提高辐射光谱数据获取能力是现代高超声速实验空气动力学的紧迫任务。有必要利用不同地面设备开展更多的精细光

谱测量实验, 加强实验和数值研究的相互协作, 完善和验证计算模型^[15]。

本研究基于中科院力学所的JF-14激波风洞开展了系列实验, 验证了实验平台的稳定性及重复性, 探索了宽波段瞬态光谱测量和特征波长动态采集相结合的测量方法, 测量得到了正激波波后可见光波段瞬态光谱和光谱典型波长的时间变化曲线, 结合辐射计算获取了波后瞬态非平衡温度, 并对结果进行了初步分析。

2 实验系统

2.1 JF-14激波风洞

JF-14激波风洞采用氢氧爆轰驱动方式, 可产生一道高速正激波, 适于开展激波层辐射特性实验研究。它由爆轰驱动段、被驱动段、泄爆段、点火管、直喷管、试验段、真空容器段、真空泵组成^[16]。设备总长42 m, 激波管长31 m, 内径224 mm。管壁材料为不锈钢, 能有效降低杂质污染辐射。管内壁装有一组压电传感器, 用来测量激波速度。最末端压电传感器距喷口0.35 m, 作为测量系统的触发源。试验段两侧各有一个K9光学玻璃材质观察窗, 正对段内激波管喷口。

本研究中JF-14采用激波管运行模式, 产生的激波速度约6 km/s, 试验段压力25 Pa。如图1所示, 实验时一道正激波从激波管直喷口射出, 利用光测系统测量研究喷口处激波波后高温非平衡气体的辐射光谱。

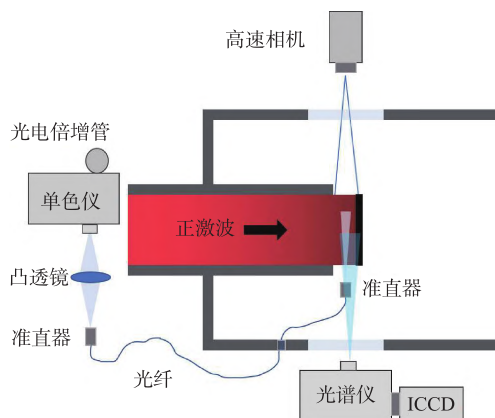


图1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic view of experimental arrangement

2.2 测量系统

实验测量系统设备主要包括光谱仪、单色仪、高速相机等, 如图1所示。

使用光谱仪 (Andor, DH734-18U-03) 结合 ICCD 相机 (Andor, ICCD-3976) 测量激波层可见光波段瞬态辐射光谱。激波层辐射经试验段窗口进入光谱仪狭缝后由光栅分光, 在 ICCD 相机的光敏表面生成光谱图像。光谱仪系统的空间分辨、光谱分辨、光强信噪比取决于 ICCD 相机曝光时间和狭缝宽度等参数。实验中曝光时间 $1 \mu\text{s}$, 狭缝宽度 $200 \mu\text{m}$, 光栅 150 刻线, 光谱覆盖宽度 180 nm 。相应的空间分辨率为 6 mm , 光谱分辨率 1.95 nm 。

使用单色仪 (卓立汉光, Omni- λ 3005i) 结合光电倍增管 (卓立汉光, PMTH-S1-CR131) 测量激波波后特征波长辐射强度随时间的变化曲线。在试验段内喷管出口处固定有真空穿舱法兰, 法兰内有一根石英光纤, 光纤一端连接舱内准直器, 准视线沿垂直到流动方向对准喷管出口, 光纤另一端从试验段穿出, 连接段外单色仪光路, 段外单色仪光路包括准直器、凸透镜。实验时正激波波后辐射经光纤、段外光路后, 照入单色仪狭缝。单色仪使用 1200 刻线光栅, 测量波长在 $200 \sim 1000 \text{ nm}$ 内可调节, 光谱分辨率为 0.2 nm 。辐射经单色仪分光成所设置的特定波长, 再经光电倍增管将光信号转为电信号并由示波器显示和保存。用 DFB 型激光器 (Photodigm, PH778DBR0 20BF) 测量了单色仪系统的时间响应, 确证其小于 $1 \mu\text{s}$ 。

实验所使用的高速相机 (Invisiblevision, UHSi 12/24) 最大帧率可达 $2 \times 10^6 \text{ fps}$, 装于观察窗外, 拍摄视线垂直于流动方向, 视场覆盖喷管出口。设置高速相机曝光时间 200 ns , 实验中的实际帧率为 $1 \times 10^6 \text{ fps}$, 对应两帧间隔 $1 \mu\text{s}$ 。

激波经过距喷口最近的压电传感器时触发延迟脉冲发生器 (Stanford Research Systems, DG645), 脉冲发生器按不同时序分别触发单色仪、高速相机、光谱仪等设备。本研究中定义激波经过该压电传感器起跳时刻为零时刻。

3 实验结果分析

按 6 km/s 预期激波速度开展多次实验，每次实验监测速度，速度偏差超过预期速度 $\pm 3\%$ 视为无效实验，有效实验率约 70%。若干次典型有效实验的激波速度和试验段压力、温度如表 1 所示。

由于单次实验仅能进行单一波长采集，故进行多次重复性预实验，记录各次实验中同一波长单色仪测量曲线的起跳时刻和峰值强度，表征单色仪测量系统重复性。光谱仪测量系统不稳定性主要来源于触发时刻，各实验中光谱仪距单色仪触发时刻间隔相同，由脉冲发生器控制，波动为 ps 量级，故光谱仪系统重复性可由单色仪曲线起

表 1 实验工况

Table 1 Experimental conditions

实验编号	激波速度 V / ($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	波前压力 P_0 / Pa	波前温度 T / K
1	6.1	25	295
2	6.0	25	295
3	6.1	25	295
4	6.2	25	295
5	6.1	25	295

跳时刻表征。多次预实验中单色仪曲线起跳时刻波动小于 $2\ \mu\text{s}$ ，峰值强度波动小于 2%。

编号 1 实验中高速相机拍摄结果经伪彩处理后如图 2 所示。从图片上可以看到正激波从喷管喷

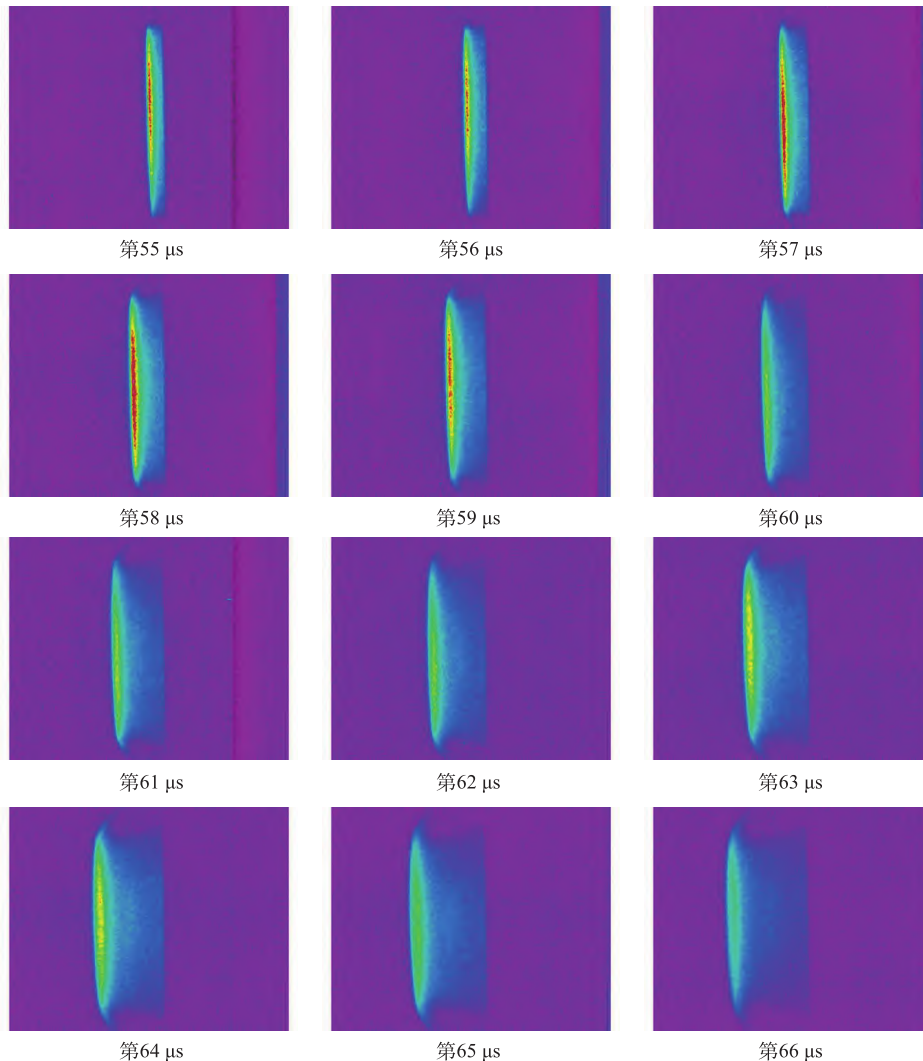


图 2 实验编号 1 中高速相机伪彩结果

Fig.2 High speed false color imaging of case 1

出后的动态行进过程,第66 μs 时高度中心处仍能维持较好的正激波形态。光谱仪和单色仪测点对准喷口高度中心处,高速相机结果表明光谱仪和单色仪的测量位置和触发时刻设置合理,能准确获取激波波后光谱信息。

在实验时序的第58 μs 触发光谱仪,实验编号1和实验编号3中的瞬态光谱结果如图3和图4所示。结果表明,波后瞬态光谱存在中心波长分别在580 nm、650 nm、740 nm的三个宽带谱,以及777 nm处线状光谱。

初步认为580 nm、650 nm、740 nm包络为 N_2 分子光谱,它是中等激波波速下可见光波段的主要分子谱。使用辐射逐线计算程序SPARK 3.0^[17]模拟计算 N_2 分子第一正带系光谱,并基于双温度光谱模型($T_i=T_r$, $T_v=T_e$)对实验测量光谱进行拟合分析。典型拟合结果如图3,结果显示波后瞬态实验光谱与 N_2 第一正带系光谱拟合较好,该拟合结果下 N_2 转动温度和振动温度分别为9000 K和5500 K,处于热非平衡态。结果也显示510~610 nm处实验光谱强于数值光谱,该波段可能还存在一个宽带光谱,非平衡态N原子复合是可能来源机制之一^[18]。

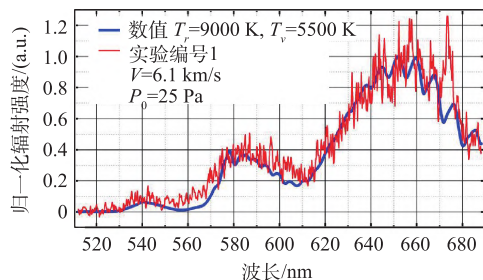


图3 6.1 km/s实验和数值光谱拟合结果

Fig. 3 Spectra fitting between experiments and numerical analysis at velocity of 6.1 km/s

激波波后空气组分中的 N_2 分子和 O_2 分子发生部分分解,产生了位于777 nm的O原子光谱。此外,部分无效实验中出现了较强的656 nm线状光谱,判断为H原子污染光谱,可能来源于潮湿空气中的水蒸气。

实验编号2、实验编号4、实验编号5中分别用单色仪测量了777 nm、589 nm、740 nm三个特

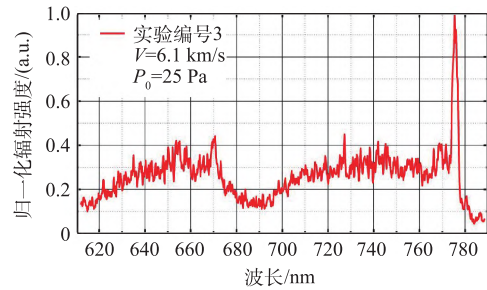


图4 6.1 km/s实验光谱测量结果

Fig. 4 Experimental spectra at velocity of 6.1 km/s

征波长的辐射强度动态变化特征。777 nm为O原子光谱特征谱线;740 nm对应 N_2 分子第一正带系690~770 nm包络中的特征谱线。589 nm特征波长为Na原子光谱特征谱线,驱动气体中该光谱特征较强,故通常用其作为驱动气体示踪信号,判断实验有效时间。

图5(a)、图5(b)、图5(c)为三次实验的单色仪结果,图5(d)是该三次实验结果的对比图。可以看到,3个特征波长谱线在激波到来时具有基本一致的强度起跳变化,但波后777 nm处O原子光谱的强度下降速度慢于740 nm所代表的 N_2 分子光谱,反映了氧、氮等不同组分的波后弛豫过程差异。589 nm强度变化曲线在约第110 μs 时再次发生起跳,表征驱动气体污染物在该时刻到达喷管出口,推算设备的有效运行时间约为60 μs ,该数值远大于美国EAST激波管^[19]。

4 结论与展望

过去数十年,美国利用EAST激波管开展的波后辐射研究已经表明,开展高温非平衡气体辐射地面试验的科学研究和工程应用价值明显,但难度较大。本研究利用JF-14高焓激波风洞,在激波管运行模式下开展了激波波后可见光波段辐射光谱测量实验,探索了将宽波段瞬态光谱测量与特征波长辐射动态测量相结合的辐射光谱测量方法,得到了激波速度约6 km/s、气压25 Pa下光谱分辨和时间分辨辐射数据,具体包括整个可见光波段的激波辐射形状和动态变化特征,510~790 nm波段的波后可见光波段瞬态光谱,以及777 nm等特征波长下的分子/原子辐射强度动态变化曲线。使

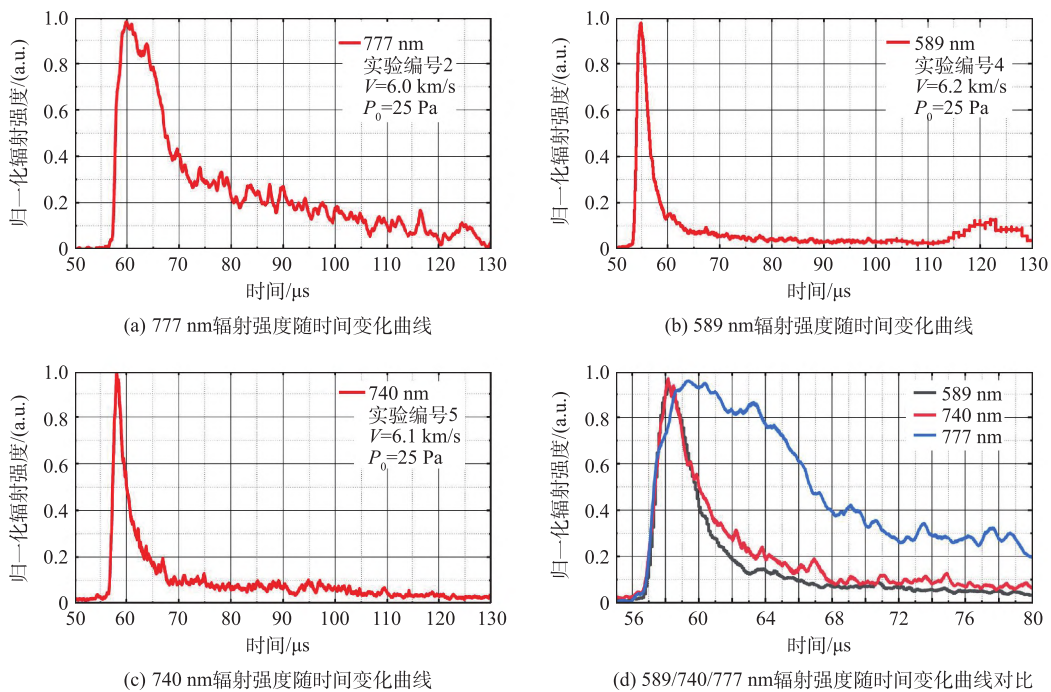


图5 辐射强度的时间变化曲线

Fig. 5 Temporal profile of radiation intensity

用辐射计算程序拟合瞬态实验光谱得到了 N_2 分子的转动温度和振动温度,分析表明,在该工况下波后可见光波段辐射主要来源于 N_2 分子的第一正带系辐射,且 N_2 处于高非平衡态。此外还存在明显的O原子光谱(777 nm)。本研究验证了基于内窥镜光纤传输的特征波长动态测量方法在高焓风洞中的可行性,实验结果反映了氧、氮等不同组分的激波后弛豫过程差异特点,并基于Na原子辐射判断了实验平台的有效运行时间。这些研究结果能够为后续的高温气体辐射光谱模型研究以及精细热化学非平衡研究提供思路 and 支撑。

团队拟在未来结合流场/辐射计算方法,以及H原子线的斯塔克展宽法^[20]等测量手段,获取电子温度、转动温度、振动温度、粒子数密度等参数,分析相关参数对非平衡辐射的时/空/光谱分布影响,用以评估辐射模型。此外也拟开展多工况对比实验,研究辐射光谱与激波速度、试验段压力的变化关系,验证辐射计算模型的精度。

[参 考 文 献]

- [1] Johnston C O, Brandis A M, Bose D. Radiative heating uncertainty for hyperbolic Earth entry, Part 3: Comparisons with electric arc shock-tube measurements[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2013, 50 (1): 48-55.
- [2] 吕俊明, 黄飞, 苗文博, 等. 火星进入气体辐射加热研究进展[J]. 宇航学报, 2019, 40 (5): 489-500.
- [3] Cruden B, Martinez R, Grinstead J, et al. Simultaneous vacuum-ultraviolet through near-IR absolute radiation measurement with spatiotemporal resolution in an electric arc shock tube[C]. 41st AIAA Thermophysics Conference, Texas, USA, 2009.
- [4] Brandis A, Cruden B, Prabhu D, et al. Analysis of air radiation measurements obtained in the EAST and X2 shock-tube facilities[C]. 10th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, Chicago, USA, 2010.
- [5] Johnston C O. A comparison of EAST shock-tube radiation measurements with a new air radiation model[C]. 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Nevada, USA, 2008.
- [6] Fujita K, Abe T, Suzuki K, et al. Air radiation analysis of a superorbital reentry vehicle[C]. 32nd Thermophysics Conference, Atlanta, USA, 1997.

(下转第39页)

- [12] 莫凡, 高振勋, 蒋崇文, 等. 高温化学非平衡效应对高超声速飞行器气动热影响的数值研究进展[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51 (10): 26-41.
- [13] 董维中, 丁明松, 高铁锁, 等. 热化学非平衡模型和表面温度对气动热计算影响分析[J]. 空气动力学学报, 2013, 31 (6): 692-698.
- [14] 苗文博, 程晓丽, 艾邦成, 等. 高超声速流动壁面催化复合气动加热特性[J]. 宇航学报, 2013, 34 (3): 442-446.
- [15] 朱广生, 聂春生, 曹占伟, 等. 气动热环境试验及测量技术研究进展[J]. 实验流体力学, 2019, 33 (2): 1-10.
- [16] 姜宗林, 俞鸿儒. 高超声速激波风洞研究进展[J]. 力学进展, 2009, 39 (6): 766-776.
- [17] Goulard R. On catalytic recombination rates in hypersonic stagnation heat transfer[J]. Jet Propulsion, 1958, 28 (11): 737-745.
- [18] Gupta R N, Yos J M, Thompson R A. A review of reaction rates and thermodynamics and transport properties for an 11-species air model for chemical and thermal non-equilibrium calculations to 30000 K[R]. NASA RP 1232, 1990.

(编辑: 肖晶)

(上接第20页)

- [7] Otsu H, Suzuki K, Fujita K, et al. Radiative heating analysis around the MUSES-C reentry capsule at a super-orbital speed [C]. 7th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, Albuquerque, USA, 1998.
- [8] 乐嘉陵. 再入物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 104-105.
- [9] Cruden B A, Brandis A M. Analysis of shockwave radiation data in nitrogen [C]. AIAA Aviation 2019 Forum, Texas, USA, 2019.
- [10] Kelly R M, Gildfind D E, McIntyre T J. Emission spectroscopy of ionizing superorbital expanding flow [J]. AIAA Journal, 2021, 59 (8): 3217-3227.
- [11] Lemal A, Nishimura S, Nomura S, et al. Analysis of VUV radiation measurements from high temperature air mixtures [C]. 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, California, USA, 2016.
- [12] Kozlov P V, Zabelinskii I E, Bykova N G, et al. Development of a technique for recording the intensity of the emission of gases behind the front of strong shock waves [J]. Russian Journal of Physical Chemistry B, 2021, 15 (4): 652-658.
- [13] 林鑫. 光学诊断专题序言[J]. 气体物理, 2020, 5 (2): 2.
- [14] 吕俊明, 李飞, 林鑫, 等. 氮气辐射强度的激波管测量与验证[J]. 实验流体力学, 2019, 33 (3): 25-30.
- [15] 吕俊明, 李飞, 李齐, 等. 火星大气高温光谱建模与非平衡辐射热流预测[J]. 航空学报, 2022, 43 (3): 35-46.
- [16] 刘立拓, 余西龙, 陈宏, 等. 高超声速飞行目标尾焰红外辐射测量[J]. 气体物理, 2017, 2 (2): 47-53.
- [17] Lopez B, Lino D S M. SPARK: A software package for aerodynamics, radiation and kinetics [C]. 46th AIAA Thermophysics Conference, Washington, USA, 2016.
- [18] Cruden B A, Brandis A M. Analysis of shockwave radiation data in nitrogen [C]. AIAA Aviation 2019 Forum, Texas, USA, 2019.
- [19] Grinstead J, Wilder M, Olejniczak J, et al. Shock-heated air radiation measurements at lunar return conditions [C]. 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Nevada, USA, 2008.
- [20] Liu Y, James C M, Morgan R G, et al. Electron number density measurements in a Saturn entry condition [J]. AIAA Journal, 2022, 60 (3): 1303-1315.

(编辑: 肖晶)