

基于氧/氮原子吸收的高焓环境中 C/SiC 近壁面流动特性研究

潘俊杰^{1, 2}, 付依帆¹, 郑雨婷¹, 王泽众¹, 梁金虎², 胡远¹, 林鑫^{1, *}

1. 中国科学院力学研究所 空天飞行高温气动全国重点实验室, 北京 100190

2. 中北大学 环境与安全工程学院, 太原 030051

摘要: 高焓来流与防热材料在气-固界面处的催化复合、氧化和氮化等双向耦合作用是影响气动热环境的重要因素, 在线测量高焓环境下材料近壁面气流温度与离解原子数密度, 对理解该耦合过程具有重要意义。本研究基于激光吸收光谱技术, 同时采用氧原子(777.19 nm)与氮原子(868.03 nm)吸收谱线, 量化分析了碳纤维增强碳化硅(C/SiC)复合材料近壁面流动不同位置处的平动温度及 O、N 原子数密度。测量光路选取 2 处, 位置 1 激光光束中心紧贴材料表面, 位置 2 光束中心距材料表面约 2 mm, 并同步对位置 1 处烧蚀产物($\cdot\text{CN}$ 和 Si)的辐射光谱进行采集。该高焓气动热环境利用 1 MW 高频感应等离子体风洞构建, 综合考虑 C/SiC 表面温度与烧蚀后表面特性, 设计了 2 组对比实验状态。状态 1 总焓 43.2 MJ/kg, 热流密度 3.7 MW/m², 状态 2 总焓 37.5 MJ/kg, 热流密度 3.1 MW/m², 模型加热时间均为 120 s。吸收光谱结果显示: 受激波压缩影响, 相比远离壁面的位置 2, 近壁面位置 1 的平动温度更低, O、N 原子数密度更高。2 组状态下, 位置 1 处的平动温度和 O、N 原子数密度均呈明显下降趋势; 与此同时, 位置 1 处显著的 $\cdot\text{CN}$ 辐射表明此处有明显氮化反应, 电镜及能谱分析证明材料表面已覆盖 SiO₂ 层。2 组状态对比结果显示: 状态 1 下近壁面 O、N 原子数密度下降幅度更大; $\cdot\text{CN}$ 与 Si 辐射明显更强; 表面氧元素含量更低, 氧化与氮化反应竞争过程更为激烈。本研究证明, 对近壁面原子数密度、辐射光谱等参数进行时空分辨测量, 有助于深入理解气-固界面处的耦合过程。

关键词: 近壁面流动; 激光吸收光谱; C/SiC; 数密度; 平动温度

中图分类号: V25

文献标识码: A

Investigation of near-wall flow characteristics over C/SiC in high-enthalpy environments using O/N atomic absorption spectroscopy

PAN Junjie^{1, 2}, FU Yifan¹, ZHENG Yuting¹, WANG Zezhong¹,
LIANG Jinhui², HU Yuan¹, LIN Xin^{1, *}

1. State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. School of environment and safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China

Abstract: The catalytic recombination, oxidation, and nitridation coupling processes occurring at the gas-solid interface between the high-enthalpy flow and thermal protection materials are key factors influencing the aerodynamic thermal environment. Real-time measurement of the near-wall gas temperature and atomic number density under high-enthalpy conditions is essential for understanding these coupling mechanisms. In this study, laser absorption spectroscopy was employed using the oxygen atomic line at 777.19 nm and the nitrogen atomic line at 868.03 nm to quantitatively determine the translational temperature and species number density at different

收稿日期: 2025-11-19; 修回日期: 2025-12-27; 录用日期: 2026-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(12572327, U25B2089, 92271117); 中国科学院基础与交叉前沿科研先导专项(XDB0620202); 中国科学院青年创新促进会项目(2022018)

* 通信作者 E-mail: linxin_bit@imech.ac.cn

引用格式: 潘俊杰, 付依帆, 郑雨婷, 等. 基于氧/氮原子吸收的高焓环境中 C/SiC 近壁面流动特性研究[J]. 实验流体力学, 2026, 40(3): 8-17.

PAN J J, FU Y F, ZHEN Y T, et al. Investigation of near-wall flow characteristics over C/SiC in high-enthalpy environments using O/N atomic absorption spectroscopy[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2026, 40(3): 8-17.

spatial positions near the surface of a C/SiC composite material. Two optical paths were selected: at position 1, the laser beam center was close to the material surface; at position 2, it was approximately 2 mm away. Simultaneously, the emission spectra of ablation products ($\cdot\text{CN}$ and Si) were collected at position 1. The high-enthalpy aerodynamic thermal environment was generated using a 1 MW high-frequency inductively coupled plasma wind tunnel. Considering the surface temperature and post-ablation morphology of the C/SiC material, two experimental conditions with distinct surface oxidation characteristics were designed. State 1 featured a total enthalpy of 43.2 MJ/kg and a heat flux of 3.7 MW/m², while state 2 had 37.5 MJ/kg and 3.1 MW/m², respectively. The heating duration for both conditions was 120 s. The laser absorption spectroscopy results indicate that, due to shock wave compression effects, position 1 near the wall exhibits lower translational temperature but higher number density compared to position 2 farther from the wall. Both conditions show significant decreases in translational temperature and O/N atom number density at position 1. Concurrently, the prominent $\cdot\text{CN}$ radiation observed at position 1 indicates substantial nitridation reactions. Scanning electron microscopy and energy dispersive spectroscopy analyses confirm that the material surface is covered with an SiO_2 layer. Relative to state 2, state 1, characterized by higher enthalpy and heat flux, exhibited a more pronounced reduction in the near-wall number densities of both O and N atoms. This observation, in conjunction with stronger radiative intensity of $\cdot\text{CN}$ and Si , as well as a reduced surface oxygen concentration, collectively implies that the surface oxide layer is more prone to volatilization or consumption, and the competitive process between oxidation and nitridation reactions is more intense under state 1. This research demonstrates that spatiotemporally resolved measurements of key parameters, such as the number densities of near-wall species and their radiative spectra, provide critical insights into the complex coupling processes at the gas-solid interface.

Keywords: near-wall flow; laser absorption spectroscopy; C/SiC; number density; translational temperature

0 引言

高超声速飞行器在大气层中飞行时,周围空气由于强烈压缩和黏性阻滞减速而急剧升温,导致空气分子发生振动能激发、解离、复合、电离等复杂热化学过程,即高温真实气体效应^[1-3]。具有该非平衡特征的高焓来流与隔热材料在气-固界面处发生强烈的非线性耦合,如催化、氧化、氮化等物理化学反应,并通过材料表面物性变化和传热传质等使该耦合效应更为复杂,给气动热环境的精确预示带来极大挑战^[4-6]。在此耦合过程中,催化是指隔热材料表面促使高焓离解的 O、N 原子发生复合反应的过程,这不仅会通过化学放热加剧热载荷,同时也会影响氧化速率^[7]。与此同时,表面氧化和氮化反应不仅可能于材料表面形成新的固相成分并改变其表面特性,进而引起催化特性的变化,还会生成新的气相粒子进入流场,改变流动特征。对于空气介质, O、N 原子是表征离解和催化复合的关键组分,量化材

料近壁面流动中的气体温度和 O、N 原子数密度等流动特征,有利于加深对该过程的理解^[8]。

碳纤维增强碳化硅(C/SiC)凭借高比模量、高强度、高硬度以及优异的耐烧蚀性等优势,成为备受关注的高超声速飞行器热防护材料,广泛应用于鼻锥、机翼前缘和机身热防护瓦等承受气动热载荷的部位^[9-11]。C/SiC 表面氧化生成的二氧化硅(SiO_2)能够填充材料表面间隙,作为保护层阻止氧原子向内扩散,从而赋予表面低催化特性和良好的抗氧化能力^[12]。然而,在实际飞行过程中,该保护层可能会出现软化、挥发、机械剥蚀等过程,不仅会改变材料的表面形貌和化学组成,还会影响其热防护能力^[13-14]。

可调谐二极管激光吸收光谱(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)技术能够针对流场中的特定组分,获取气体温度与组分数密度等参数^[15-16],且兼具低成本、光路简单等优势,已成为当前高焓非平衡流动诊断领域的研究热点^[17]。2016年,Weisberger等^[18]在 LENS-X 膨胀管中开展

铝制圆柱体近壁面流动特性实验, 基于 TDLAS 技术测量了 CO_2 浓度, 为材料表面催化特性分析提供了实验依据。2024 年, Hargis 等^[19] 在 Sandia 高超声速激波风洞中, 基于 TDLAS 技术测量了不同表面温度下石墨近壁面烧蚀产物 CO 的温度与浓度, 发现材料表面温度对 CO 浓度具有明显影响, CO 浓度随着表面温度升高显著增大, 而 CO 温度对表面温度变化不敏感。2025 年, Finch 等^[20] 基于 O/N 原子吸收光谱测量了 NASA Ames 60 MW 电弧风洞混合室平衡温度, 并结合计算流体力学 (CFD) 分析了测量结果的可靠性。这些工作印证了 TDLAS 技术在高焓非平衡流动研究中的可行性与潜力, 但该技术在于长时烧蚀下防热材料近壁面流动演化规律研究中的应用仍较为欠缺。

本研究基于 TDLAS 技术量化分析了高焓等离子体环境中 C/SiC 近壁面 O、N 原子平动温度和数密度的时空演化规律。实验在中国航天空气动力技术研究院的 1 MW 高频感应风洞开展。综合考虑材料表面温度、电镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 和能谱 (Energy Dispersive Spectrometer, EDS) 结果, 构建 2 组对比实验状态 (状态 1 和状态 2)。通过开展材料近壁面 TDLAS 空间测量与烧蚀产物 ($\cdot\text{CN}$ 、 Si) 辐射光谱诊断, 结合 SEM 与 EDS 结果, 综合讨论不同氧化/氮化条件下材料近壁面流动的变化规律, 进而分析气-固界面催化、氧化等非平衡反应的动态耦合机制。

1 原子激光吸收光谱

TDLAS 测量基于 Beer-Lambert 定律。当频率为 ν 的激光穿过待测流场时, 其入射光强 I_0 和透射光强 I_t 满足^[20-22]:

$$k_\nu L = \ln(I_0/I_t)_{\nu\nu} \quad (1)$$

式中: L 为吸收长度, k_ν 为频率 ν 处的吸收系数。吸收系数 k_ν 可表示为:

$$k_\nu = S_{lu} n_l \phi_\nu \quad (2)$$

式中: 下角标 l 和 u 分别表示低能级和高能级; n_l 为低能级粒子数密度; ϕ_ν 满足归一化条件; S_{lu} 为线强度, 其表达式为:

$$S_{lu} = \frac{\lambda_0^2}{8\pi c} A_{ul} \frac{g_u}{g_l} \left[1 - \exp\left(-\frac{hc}{\lambda_0 k_B T_{\text{ex}}}\right) \right] \quad (3)$$

式中: λ_0 为中心波长; 光速 c 为 3.0×10^8 m/s; A_{ul} 为爱因斯坦自发辐射系数; g_l 和 g_u 分别为低能级和高能

级简并度; 普朗克常数 h 为 6.63×10^{-34} J·s, 玻尔兹曼常数 k_B 为 1.38×10^{-23} J/K; T_{ex} 为电子激发温度。在本实验中, 将 O、N 原子参数带入式 (3) 的指数项时, $\frac{hc}{\lambda_0 k_B}$ 的值远大于电子激发温度, 指数项的值较小, 通常可忽略。因此线强度 S_{lu} 可以简化为:

$$S_{lu} = \frac{\lambda_0^2}{8\pi c} A_{ul} \frac{g_u}{g_l} \quad (4)$$

在本实验中, 来流总压小于 5000 Pa, 多普勒展宽占主导 (状态 1 的 Gauss 半宽为 $0.16 \sim 0.21$ cm^{-1} , Lorentz 半宽 < 0.001 cm^{-1} ; 状态 2 的 Gauss 半宽为 $0.15 \sim 0.20$ cm^{-1} , Lorentz 半宽 < 0.001 cm^{-1})。O、N 原子的平动温度 T_{tr} 可通过高斯线型函数获得^[23]:

$$\Delta\nu_D = \nu_0 \sqrt{\frac{8k_B T_{\text{tr}} \ln 2}{mc^2}} = 7.1623 \times 10^{-7} \nu_0 \sqrt{\frac{T_{\text{tr}}}{M}} \quad (5)$$

式中: $\Delta\nu_D$ 为多普勒展宽; ν_0 为待测组分谱线吸收跃迁的中心频率; m 为粒子质量; M 为相对原子质量。Lorentz 半宽 $\Delta\nu_L$ 对温度 T 与压力 p 的关系可以描述为^[24]:

$$\Delta\nu_L = \Delta\nu_{L,0} \left(\frac{p}{p_0}\right) \left(\frac{T_0}{T}\right)^j \quad (6)$$

式中: $\Delta\nu_{L,0}$ 为参考条件下的半高宽, 对于地球大气中大多数活性气体, 取 $0.01 \sim 0.10$ cm^{-1} ; p_0 、 T_0 分别为参考压力和温度, 一般取 100000 Pa 和 296 K; j 为温度对半宽的影响系数, 一般取 0.5^[24]。

低能级粒子数密度 n_l 可以通过对式 (4) 两侧积分得到:

$$n_l = \frac{A_{\text{int}}}{S_{lu} n_l L} = \frac{\int k_\nu d\nu}{\lambda_0^2 (g_u/g_l) (A_{ul}/8\pi)} \quad (7)$$

式中, A_{int} 为积分吸收率。基于热力学平衡假设, 各能级粒子数遵循 Maxwell-Boltzmann 分布^[25], 则基态原子数密度可由以下公式计算:

$$\frac{n_l}{n_0} = \frac{g_l}{Q(T)} \exp\left(\frac{-E_l}{k_B T}\right) \quad (8)$$

式中: $Q(T)$ 为与温度相关的原子配分函数, 描述了目标原子的不同能级在热平衡状态下的能级布居数; n_0 为总粒子数密度; E_l 为低能级能量。通过查阅美国国家标准与技术研究院 (National Institute of Standards and Technology, NIST) 原子光谱数据库可知, O 原子忽略极小值展开项的配分函数表达式为:

$$Q(T) = 5 + 3 \exp\left(-\frac{228}{T}\right) + \exp\left(-\frac{326}{T}\right) \quad (9)$$

同理, N 原子忽略极小值展开项的配分函数表式为:

$$Q(T) = 4 \quad (10)$$

表 1 给出了 O 原子在 777.19 nm 和 N 原子在 868.03 nm 的光谱参数。

表 1 O、N 原子的基本光谱参数

Table 1 Basic spectral parameters of oxygen atom and nitrogen atom

参数	O 原子	N 原子
λ_0/nm	777.19	868.03
E_l/eV	9.15	9.15
E_u/eV	10.74	11.76
g_l	5	6
g_u	7	8

2 实验设置

2.1 C/SiC 模型及实验条件

实验在中国航天空气动力技术研究院的 1 MW 高频感应风洞进行^[26], 实验气体为空气。在该风洞中, 载有高频电流的感应线圈于石英管内部产生交变电磁场, 将空气加热并电离, 形成高焓等离子体,

经超声速喷管加速后进入风洞测试段, 最终由真空系统排出, 细节见参考文献 [1] 和 [4]。

实验所用的 C/SiC 复合材料模型由碳纤维增强体和沉积的 SiC 基体组成, 采用前驱体浸渍裂解 (PIP) 与反应熔体浸渗 (RMI) 复合工艺制备而成, 其中 C 和 SiC 的摩尔比约 1:1。模型样片及水冷工装示意如图 1 所示。模型几何形状为圆柱体, 厚 8 mm, 前表面直径 40 mm, 后表面直径 42 mm。水冷工装基于模型尺寸定制, 模型嵌入工装后, 工装前缘与模型前表面齐平。每次实验前, 模型均置于风洞流场区域以外; 风洞启动且其等离子体流场达到稳定状态后, 再将模型送入流场, 此时定义为实验起始时刻 ($t = 0$ s), 加热 120 s 后将模型从流场中撤出。

实验条件设计时不仅考虑了风洞焓值、热流等来流参数, 还综合考虑了材料表面/背面温度以及烧蚀后形貌等因素, 具体见表 2。表面温度和背面温度分别由常规比色高温计 (Impac IGAR, 12-LO mb22, 测温范围 500~2200 °C) 和 K 型热电偶 (开普森, K 型铠装热电偶) 采集; 材料烧蚀后的微观形貌与成分则通过扫描电子显微镜及其配套的能谱分析系统 (日本日立公司, SU8020) 表征。

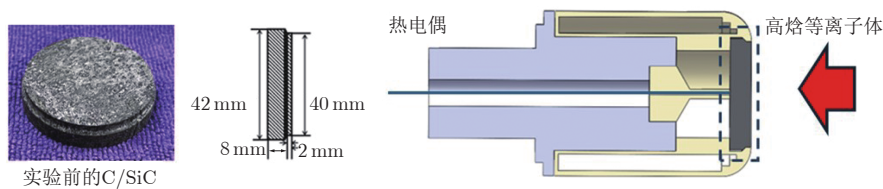


图 1 模型样片及水冷工装示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the probe and its model

表 2 实验条件

Table 2 Experimental condition

实验条件	状态1	状态2
总焓/(MJ·kg ⁻¹)	43.2	37.5
热流密度/(MW·m ⁻²)	3.7	3.1
加热时间/s	120	120
表面温度峰值/K	1900	1730
背面温度峰值/K	1620	1390
形貌	“连续湖状”SiO ₂	“颗粒状”SiO ₂
O 原子数量百分比/%	33	45

2.2 TDLAS 测量系统

图 2 为 TDLAS 测量系统示意图, 该系统包含激光发射端和激光接收端 2 个部分。激光发射端由 1 台分布式布拉格反射 (DBR) 激光器 (Photodigm,

PH778DBR020BF)、1 台分布式反馈 (DFB) 激光器 (Nanoplus GmbH)、2 台激光控制器 (Thorlabs, model ITC-502)、1 台函数发生器 (Siglent, SDG 2122X)、1 根耦合光纤及 2 个准直透镜 (Thorlabs, F220APC-780) 组成。2 台激光器的中心波长分别对应 O 原子在 777.19 nm 和 N 原子在 868.03 nm 的跃迁。激光控制器通过调节温度和电流改变激光器的输出波长。函数发生器输出 200 Hz 锯齿波信号对激光控制器的电流进行调谐, 时分复用后的波长扫描范围覆盖 O 和 N 2 个周期, 整体扫描频率为 100 Hz。激光接收端由双带通窄带滤波片、光电探测器 (Thorlabs, PDA36A2) 和录波仪 (Yokogawa, DL850) 组成。由发射端输出的激光经耦合光纤和分束器后被分成 3 路: 1 路通过标准具 (Thorlabs, FSR 为

1.5 GHz)实时标定激光波长;另2路激光光束的空间测量位置基于窄带光谱成像结果设计。这2路中,一路激光光束中心紧贴模型表面,记为位置1;另一路激光光束中心距模型表面2 mm,记为位置2。2路激光穿过风洞测试段的石英窗口后被光电探测器采集。为抑制背景噪声,光电探测器前方均装有双带通窄带滤波片(777.19和868.03 nm,带宽3 nm),光电信号最终由录波仪记录,采样率为500 kS/s。

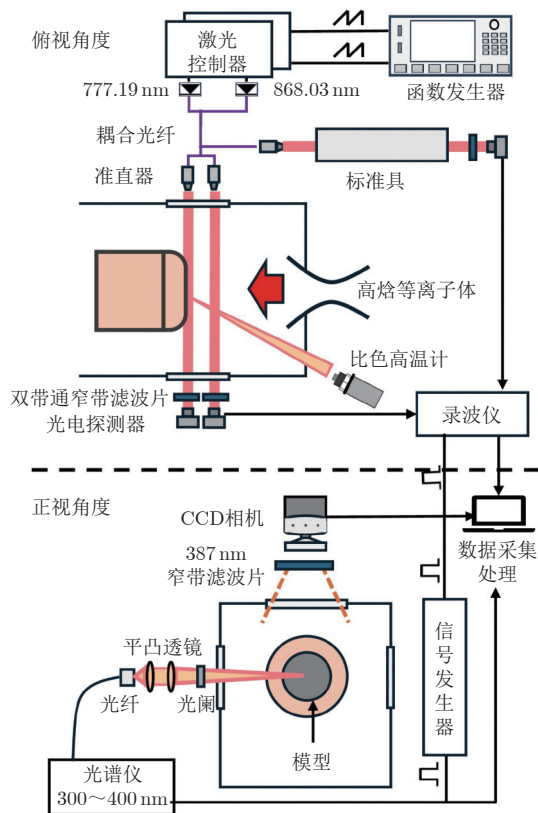


图2 TDLAS测量系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the TDLAS measurement system

2.3 OES及窄带光谱成像测量系统

辐射光谱系统(Optical Emission Spectroscopy, OES)用于采集材料近壁面光谱信息。该系统的光路由1个光阑和2块平凸透镜(焦距分别为25和130 mm)组成,其中前置光阑用于控制入射光通量,抑制目标区域外的杂散光干扰。入射光通过光阑并被第一块透镜转为平行光,再由第二块透镜聚焦到光纤端面,然后经光纤传输至光谱仪(Avantes, AvaSpec-UL2048CL-RS-EVO)。光谱仪的测量范围为300~400 nm,分辨率为0.125 nm,曝光时间为150 ms。实验前,利用标准石英卤素钨灯(Oriel Instruments, Model 63945)对光谱测量系统的强度响应系数进行了标定。窄带光谱成像系统由1台CCD相机(iX Cameras, i-Speed 220)和1枚中心波

长387 nm、带宽3 nm的窄带滤波片组成。相机曝光时间800 μ s,采样率5 Hz。基于OES中检测到的 $\cdot$ CN带系($B^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Sigma^+$, $\Delta v = 0$)确认了滤波片的中心波长。成像系统不仅获取辐射场在测量区域内的空间分布特征,同时为上述吸收光谱的空间测量位置选择提供依据。各测量系统由信号发生器(Stanford Research Systems, DG645)实现同步。

3 实验结果与分析

3.1 2组C/SiC氧化状态的热环境特征

图3展示了2组状态下材料表面温度和背面温度的时序演化结果。由图可见,2组状态下的温度变化存在明显差异。在状态1下,模型送入流场后,材料表面温度迅速升高并在约40 s时达到峰值(约1900 K),随后开始下降,并逐渐稳定在1840 K。同一工况下,背面温度与表面温度的变化趋势一致,但背面温度达到峰值的时间滞后,且其下降趋势更为明显。在状态2下,表面温度在约35 s时达到峰值(约1730 K)并保持稳定;背面温度与表面温度趋势相似,上升到1390 K附近后同样保持稳定。

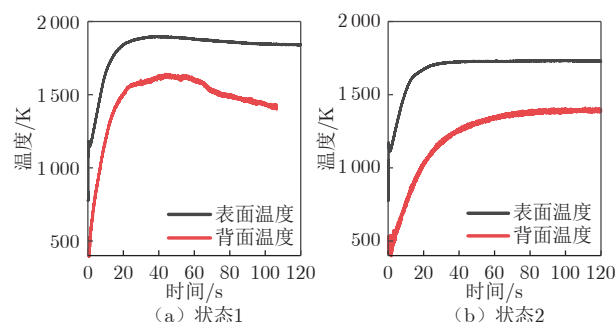


图3 C/SiC的表面温度和背面温度时序演化

Fig. 3 Temporal evolution of material surface temperature and back temperature of C/SiC

材料烧蚀后中心区域的SEM和EDS结果(图4)显示:2种状态下的表面形貌与成分组成区别明显。在状态1下,材料表面出现明显的凹坑,经EDS分析确认,材料表面覆盖有 SiO_2 保护层,且实验后氧元素含量较实验前显著提升。在状态2下,材料表面呈现离散分布的颗粒状 SiO_2 ,同时表面氧元素含量比状态1更高。

3.2 OES及窄带光谱成像

2组状态下材料驻点处的辐射光谱测量结果如图5所示。在372~392 nm波段均可观察到 $\cdot$ CN的辐射光谱($B^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Sigma^+$, $\Delta v = 0$, 370~390 nm)与Si原子谱线(中心波长约390.5 nm)。

图6上半部分为2组实验状态下 $\cdot$ CN和Si原子

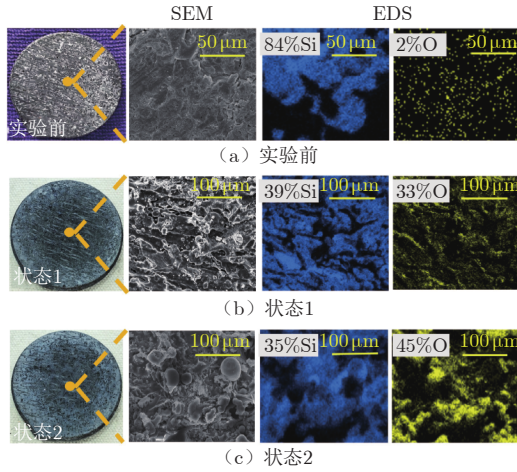


图 4 C/SiC 实验前后的 SEM 和 EDS 结果

Fig. 4 SEM and EDS results of C/SiC before and after the experiment

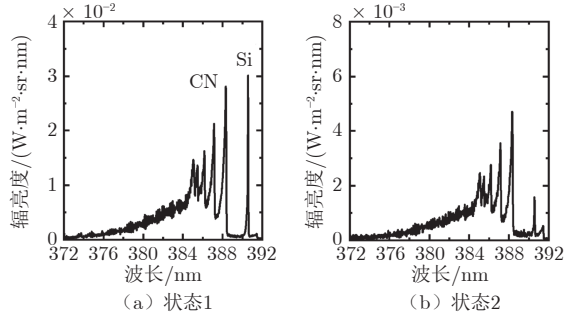
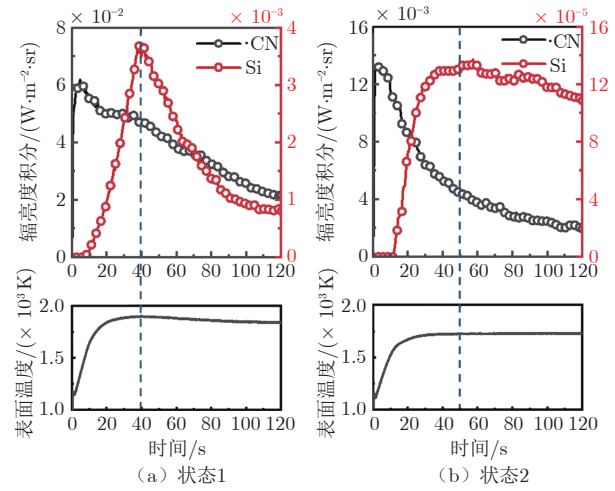


图 5 C/SiC 近壁面光谱测量结果

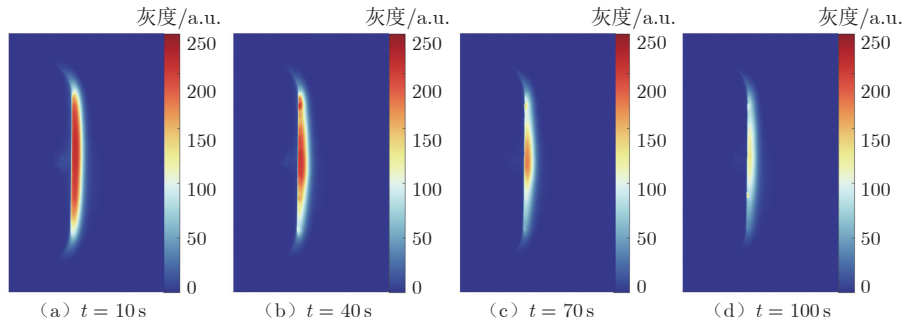
Fig. 5 Near-wall surface spectral measurement results of C/SiC

辐射强度的时序演化结果, 下半部分为 2 组状态下材料表面温度的时序演化结果。在状态 1 下, $\cdot\text{CN}$ 辐射强度在模型送入流场瞬间达到峰值, 随后迅速衰减。这一衰减现象可归因于 SiC 氧化形成的 SiO_2 保护层覆盖材料表面, 抑制了 N 原子与材料的反应。相较于 $\cdot\text{CN}$, Si 原子谱线的出现时间明显滞后, 滞后时间约 8 s, 此时材料表面温度约 1540 K, 低于 SiC 在等离子体环境下发生分解反应的表面温度(约 2000 K^[27])。因此, 早期的 Si 原子辐射应来自

图 6 C/SiC 的 $\cdot\text{CN}$ 带系 (370 ~ 390 nm) 和 Si (390.5 nm) 辐亮度积分结果和 2 种状态下材料表面温度的演化Fig. 6 Evolution of integrated radiance of $\cdot\text{CN}$ radical band system (370~390 nm) and Si (390.5 nm) as well as the surface temperatures of the materials

于 SiC 氧化生成的 SiO_2 的分解。相应地, $\cdot\text{CN}$ 主要来源于材料中的 C 纤维与 N 原子的反应。随着加热时间增加, 状态 1 下 Si 原子辐射强度在约 40 s 时达到峰值, 随后迅速下降。状态 2 下 $\cdot\text{CN}$ 辐亮度同样在模型进入流场时刻达到峰值, 随后持续降低, 但其整体强度较状态 1 约低一个量级。Si 辐射强度表现出与状态 1 相似的滞后性; 然而, 与状态 1 下 Si 辐射强度达到峰值后迅速下降不同, 状态 2 下 Si 辐射强度在达到峰值后下降较为平缓。综合前文材料表面的 SEM 与 EDS 结果可知, 状态 1 下实验后材料表面 SiO_2 保护层呈“连续湖状”形貌, 质量引射可能更强, 因此状态 1 中材料表面温度在达到峰值后迅速下降。相比之下, 状态 2 下实验后材料表面的氧原子含量更高, SiO_2 保护层分解速率可能更缓慢, 表面温度在达到最高值后保持相对平稳。

$\cdot\text{CN}$ 作为高焓来流与 C/SiC 相互作用的代表性产物, 其绕流辐射场强度分布可直观反映气-固界面反应区域及剧烈程度。图 7 为状态 1 下模型

图 7 状态 1 下 C/SiC 在 $t_1 \sim t_4$ 时刻的窄带光谱辐射成像Fig. 7 Pseudo-color narrowband spectral radiation imaging from t_1 to t_4 in state 1

加热不同时刻 t (模型送入后第 10、40、70、100 s) 的窄带光谱成像结果。各时刻分别选取前后 25 幅图像进行对应像素的灰度值平均处理, 图中为经伪彩色处理后呈现的最终结果。由图 7 可见: $\cdot\text{CN}$ 发光区域集中于材料近壁面, 平均厚度约 2 mm。因此, 在 TDLAS 近壁面空间位置选择上, 一路紧贴模型壁面, 针对最能体现气-固界面反应的区域; 另一路距模型表面 2 mm, 以监测来流状态的稳定性, 并验证该位置受壁面反应的影响较小。

3.3 TDLAS 测量结果

图 8 为位置 1 处典型的吸收光谱信号。在数据处理过程中, 首先对原始吸收信号沿时间序列进行 10 次移动平均处理, 随后采用高斯函数对吸收峰进

行拟合。拟合过程及对应的残差如图 9 所示, O、N 原子吸收峰的高斯拟合残差均低于 0.005。

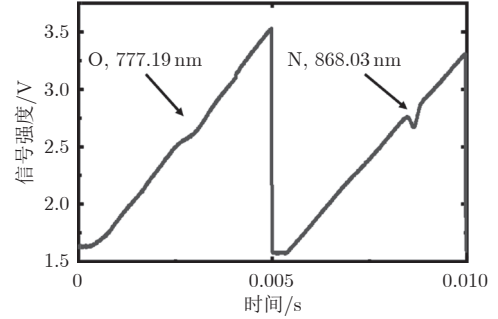


图 8 状态 1 下 C/SiC 吸收光谱中 O、N 原子的原始吸收信号
Fig. 8 The original absorption signals corresponding to the atomic absorption spectra of oxygen and nitrogen in state 1

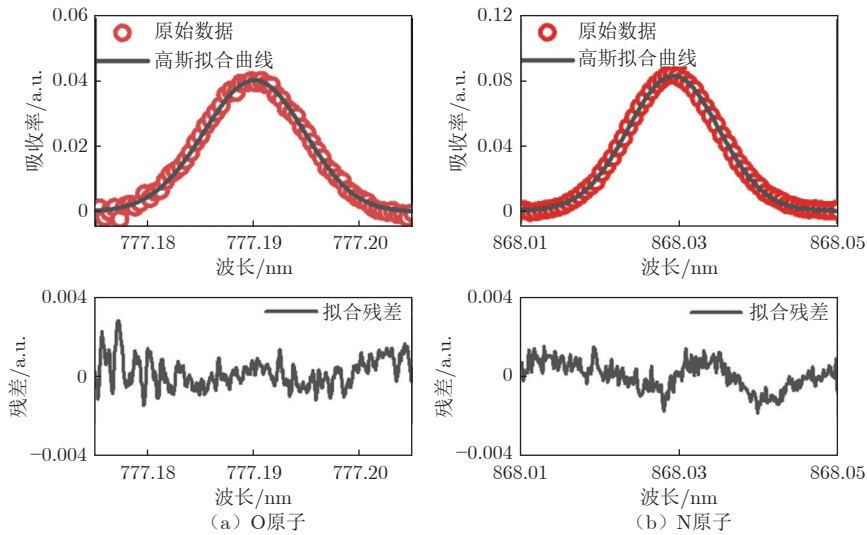


图 9 状态 1 下 C/SiC 吸收峰的高斯拟合过程及残差

Fig. 9 Gaussian fitting process and residuals of C/SiC absorption peaks in state 1

图 10 和 11 分别为 2 种实验条件下 C/SiC 材料近壁面不同位置处平动温度和数密度随时间的演化曲线, 其中黑色和红色曲线分别对应于位置 1、2 的测量结果。图中阴影区域表示测量结果的扩展不确定度(95% 置信区间), 反映了由信号噪声、拟合精度等因素导致的相对误差。研究采用基于泰勒级数展开的误差传递方法评估相对误差: 首先基于信号噪声、拟合残差等评估积分吸收率、展宽等的相对误差; 其次, 通过误差传递公式计算平动温度和数密度的相对误差; 最后, 乘以包含因子 ($k = 2$) 得到扩展不确定度, 即图中置信区间阴影区域。根据误差传递公式, 设 Y 为目标物理量, $x, y, z, \dots$ 为直接测量量, 由 $Y = f(x, y, z, \dots)$ 可得:

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 (\sigma_x)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 (\sigma_y)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 (\sigma_z)^2 + \dots} \quad (11)$$

式中, σ 为目标物理量的相对误差, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 为各直接测量量的分相对误差。

根据式(5), O、N 原子平动温度的相对不确定度来源于多普勒展宽:

$$\frac{\sigma}{T_{tr}} = \sqrt{\left(2 \frac{\sigma_{\Delta \nu_D}}{\Delta \nu_D}\right)^2} = 2 \frac{\sigma_{\Delta \nu_D}}{\Delta \nu_D} \quad (12)$$

本研究中展宽的相对误差小于 1.8%, 平动温度的相对误差小于 3.6%。总粒子数密度的相对误差主要来源于积分吸收率 A_{int} 与配分函数 $Q(T)$:

$$\frac{\sigma_{n_0}}{n_0} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{A_{\text{int}}}}{A_{\text{int}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{Q(T)}}{Q(T)}\right)^2} \quad (13)$$

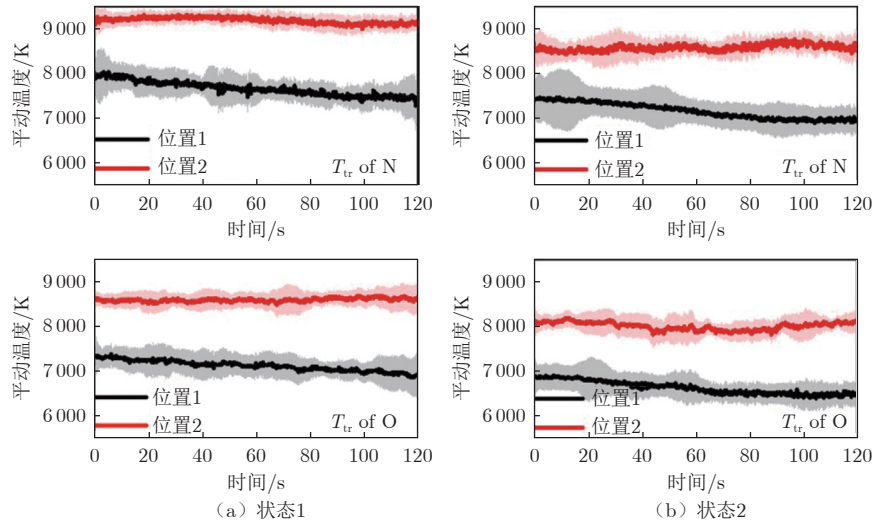


图 10 C/SiC 的平动温度时序演化

Fig. 10 Time evolution of translational temperatures in C/SiC

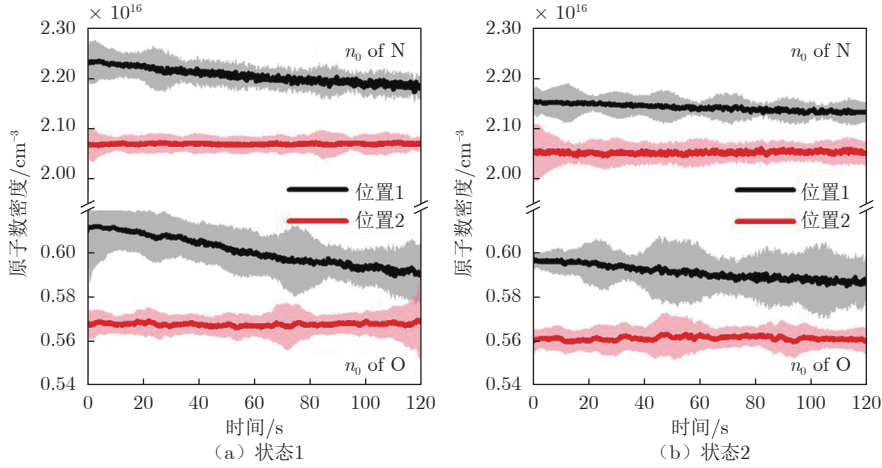


图 11 C/SiC 的原子数密度时序演化

Fig. 11 Time evolution of the number density in C/SiC

式中, O 原子配分函数 $Q(T)$ 的相对误差可由式(9)两端微分得到:

$$\frac{\sigma_{Q(T)}}{Q(T)} = \sqrt{\left[\frac{\frac{1368}{T^2} \exp\left(-\frac{228}{T}\right) + \frac{652}{T^2} \exp\left(-\frac{326}{T}\right)}{5 + 3 \exp\left(-\frac{228}{T}\right) + \exp\left(-\frac{326}{T}\right)} \right]^2} \quad (14)$$

代入 T 可求得 O 原子配分函数的相对误差小于 0.3%。同理可算得 N 原子配分函数相对误差小于 0.1%。根据式(7)和(8), 积分吸收率 A_{int} 的相对误差来源于高斯拟合残差及基线拟合等过程, 其相对误差小于 2.0%, 总粒子数密度的相对误差小于 2.1%。

2 种状态下, 位置 2 处的 O、N 原子平均温度整体保持平稳。位置 1 处 O、N 原子平均温度均低于位置 2, 且呈现下降趋势。原因可能有两方面: 一方面,

C/SiC 表面氧化生成的 SiO_2 作为一种低催化特性材料, 减少了催化复合反应的放热; 另一方面, SiO_2 层的质量引射、分解等吸热过程也降低了材料表面的热载荷。

2 种状态下, 位置 2 处的 O、N 原子数密度均保持平稳, 这与位置 2 处平均温度的规律一致, 体现出流场状态的稳定, 同时也说明位置 2 受壁面反应影响较小。但在位置 1 处, O、N 原子数密度呈下降趋势, 考虑到 SiO_2 保护层导致的低催化特性对原子复合反应的抑制, 即参与催化反应的 O 原子数量减少, 意味着增强的氧化消耗可能是导致 O 原子数密度降低的主要原因。对于 N 原子, 虽然 $\cdot\text{CN}$ 辐射强度随时间减弱, 碳氮反应消耗的 N 原子减少, 但 N 原子数密度的整体下降提示存在其他反应消耗路径, 如与 SiC 反应生成 Si_3N_4 、与 O 原子反应生成 NO 等。

相比于状态 2, 在更高焓值、更高热流的状态 1 下, 位置 1 处 O、N 原子数密度的下降速率更快, 这或许意味着状态 1 下 C/SiC 材料气-固界面的非平衡反应过程更加剧烈。

4 结 论

本研究基于 TDLAS 技术实现了高焓来流下 C/SiC 材料近壁平动温度与 O、N 原子数密度的面时空分布测量, 并结合 $\cdot\text{CN}$ 与 Si 原子辐射测量分析了气-固界面的非平衡反应过程。主要结论如下:

1) TDLAS 结果表明, 位置 2 处 O、N 原子的平动温度与数密度在整个烧蚀过程中均保持稳定; 相比之下, 位置 1 处 O、N 原子的平动温度更低, 数密度整体更高, 且两者均呈明显下降趋势。

2) 在本文实验条件下, 尽管表面生成 SiO_2 层可能带来催化抑制效应, 但气-固界面处的氧化、氮化反应在烧蚀过程中仍表现出增强趋势, 这种现象在更高焓值、更高热流的状态 1 下尤为明显。

参考文献:

- [1] FANG S H, LIN X, YANG J N, et al. Spectral insight into the interface evolution of a carbon/carbon composite under high-enthalpy, nonequilibrium flow[J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35(10): 102116.
doi: 10.1063/5.0166977
- [2] 罗凯, 汪球, 李逸翔, 等. 基于高温气体效应的磁流体流动控制研究进展[J]. *力学学报*, 2021, 53(6): 1515-1531.
LUO K, WANG Q, LI Y X, et al. Research progress on magnetohydrodynamic flow control under test conditions with high temperature real gas effect[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(6): 1515-1531.
doi: 10.6052/0459-1879-21-067
- [3] 杨肖峰, 国义军, 唐伟, 等. 进入火星大气的高温真实气体效应与气动加热研究[J]. *宇航学报*, 2018, 39(9): 959-967.
YANG X F, GUO Y J, TANG W, et al. High-temperature real-gas effects and aerodynamic heating for capsules entering Martian atmosphere[J]. *Journal of Astronautics*, 2018, 39(9): 959-967.
doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2018.09.003
- [4] FANG S H, LIN X, ZENG H, et al. Gas-surface interactions in a large-scale inductively coupled plasma wind tunnel investigated by emission/absorption spectroscopy[J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34(8): 082113.
doi: 10.1063/5.0102274
- [5] 曾庆轩. 硅基材料表面与氧原子相互作用的光谱诊断与模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
ZENG Q X. Spectroscopic diagnosis and simulation of the interaction between silicon-based materials and oxygen atoms[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [6] YANG L W, XIAO X R, JING L, et al. Dynamic oxidation mechanism of SiC fiber reinforced SiC matrix composite in high-enthalpy plasmas[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41(10): 5388-5393.
doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2021.03.064
- [7] HU Z C, YANG F, LIU B, et al. Ablation behavior of gradient ceramic-polymer composites in wind tunnel environment[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2024, 44(10): 6160-6168.
doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2024.03.008
- [8] 曾徽, 文鹏, 杨国铭, 等. 火星进入流场特性中红外吸收光谱诊断研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2024, 44(5): 1277-1282.
ZENG H, WEN P, YANG G M, et al. Mid-IR laser absorption diagnosis on flow characteristics for Mars entry[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2024, 44(5): 1277-1282.
doi: 10.3964/j.issn.1000-0593(2024)05-1277-06
- [9] 成溯. C/SiC 及其涂层的激光烧蚀行为与防护机理研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2021.
CHENG S. Study on laser ablation behavior and protection mechanism of C/SiC and its coatings[D]. Xi'an: North-western Polytechnical University, 2021.
- [10] 丁俊杰. SiC/SiC 材料高温环境下界面退化机理与力学性能演化研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
DING J J. Research on interface degradation mechanism and mechanical properties evolution of SiC/SiC materials under high temperature environment[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.
- [11] 关洪达, 张涛, 何新波. C/SiC 陶瓷基复合材料研究与应用现状[J]. *材料导报*, 2023, 37(16): 66-75.
GUAN H D, ZHANG T, HE X B. Current status of the research and applications of C/SiC ceramic matrix composites[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(16): 66-75.
doi: 10.11896/cldb.21090178
- [12] 罗磊. C/SiC 及其改性复合材料在等离子风洞中的烧蚀行为研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
LUO L. Investigation on the ablation behaviors of C/SiC-based composites in plasma wind tunnel[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018.
- [13] CHEN B, ZHANG L T, CHENG L F, et al. Ablation behavior of a three-dimensional carbon/silicon carbide composite nozzle in an ethanol/oxygen combustion gas generator[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2009, 6(2): 182-189.
doi: 10.1111/j.1744-7402.2008.02330.x
- [14] LUO L, WANG Y G, LIU L P, et al. Ablation behavior of C/SiC composites in plasma wind tunnel[J]. *Carbon*, 2016, 103: 73-83.
doi: 10.1016/j.carbon.2016.02.085
- [15] 方洪鑫, 支冬, 吴学成, 等. 可调谐半导体激光吸收光谱技术在高超声速风洞中的应用研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(13): 1300010.
FANG H X, ZHI D, WU X C, et al. Advancements in tunable diode laser absorption spectroscopy for hypersonic wind tunnel testing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(13): 1300010.
doi: 10.3788/LOP232396
- [16] 郇邸. 基于吸收光谱波长调制技术的高速流场温度测量系统研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
DI Y. University of science and technology of China[D].

- Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [17] FINCH P M, GIRARD J J, SCHWARTZ T, et al. Shock-layer measurements in T5 shock tunnel hypersonic flows around a cylinder model[J]. *AIAA Journal*, 2024, 62(11): 4292-4315.
doi: [10.2514/1.J063877](https://doi.org/10.2514/1.J063877)
- [18] WEISBERGER J M, DESJARDIN P, MACLEAN M G, et al. Near-Surface CO₂ tunable diode laser absorption spectroscopy concentration measurements in the LENS-XX expansion tunnel facility[C]//Proc of the 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2016.
- [19] HARGIS J W, MUSSONI E E, SWAIN W E, et al. Carbon-monoxide laser absorption spectroscopy measurements over ablating graphite in a shock tunnel[J]. *AIAA Journal*, 2024, 63(1): 233-243.
doi: [10.2514/1.J064154](https://doi.org/10.2514/1.J064154)
- [20] FINCH P M, GRANOWITZ Z N, STRAND C L, et al. Temperature and enthalpy characterization of NASA arcjet using oxygen and nitrogen absorption[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2025, 39(4): 936-955.
doi: [10.2514/1.T7088](https://doi.org/10.2514/1.T7088)
- [21] SALVI C, STEFFENS L, HOHN O, et al. Martian flow characterization using tunable diode laser absorption spectroscopy, in high enthalpy facilities[J]. *Acta Astronautica*, 2023, 213: 204-214.
doi: [10.1016/j.actaastro.2023.08.043](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.08.043)
- [22] SCHWARTZ T, DRESCHER D, BARNES S C, et al. Freestream multi-species and near-body atomic oxygen measurements in the T5 shock tunnel by tunable diode laser absorption spectroscopy[C]//Proc of the AIAA SCITECH 2025 Forum, 2025: 2613.
doi: [10.2514/6.2025-2613](https://doi.org/10.2514/6.2025-2613)
- [23] 方思晗, 林鑫, 杨俊娜, 等. 典型碳基材料高温界面光谱演化特性实验研究[J]. *空天技术*, 2023(1): 159-169.
- FANG S H, LIN X, YANG J N, et al. Experimental investigations of spectroscopic characteristics in high temperature interface on carbon-based composite materials[J]. *Aerospace Technology*, 2023(1): 159-169.
doi: [10.16338/j.issn.2097-0714.20220188](https://doi.org/10.16338/j.issn.2097-0714.20220188)
- [24] LIOU K N. International geophysics: Volume 84[M]. New York: Academic Press, 2002: 1-36.
- [25] KIM S, JEFFRIES J, HANSON R, et al. Measurements of gas temperature in the arc-heater of a large scale arcjet facility using tunable diode laser absorption[C]//Proc of the 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2005.
- [26] 欧东斌, 曾徽, 张智, 等. 火星进入器气动热环境模拟及热防护试验综述[J]. *航天器环境工程*, 2022, 39(5): 522-532.
- OU D B, ZENG H, ZHANG Z, et al. Review of aerothermal environmental simulations and thermal protection tests for Mars entry vehicles[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2022, 39(5): 522-532.
- [27] KANG H K, KANG S B. Thermal decomposition of silicon carbide in a plasma-sprayed Cu/SiC composite deposit[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 428(1-2): 336-345.
doi: [10.1016/j.msea.2006.05.054](https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.05.054)



作者简介:

潘俊杰(1999—), 男, 江苏泰州人, 博士研究生。研究方向: 高焓气-固耦合作用。

E-mail: b202514010@st.nuc.edu.cn

(编辑: 宋嘉慧)