

DOI: 10.19527/j.cnki.2096-1642.0794



NO 激光诱导荧光对高焓气流温度的测量

严浩^{1,2,3}, 张少华², 王方仪^{2,3}, 余西龙^{2,3}

(1. 北京控制工程研究所, 北京 100094;

2. 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;

3. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

Temperature Measurement in High-Enthalpy Flow by NO Laser-Induced Fluorescence

YAN Hao^{1,2,3}, ZHANG Shao-hua², WANG Fang-yi^{2,3}, YU Xi-long^{2,3}

(1. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100094, China;

2. State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China;

3. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

摘要: 由于真实气体效应, 高超声速流场的研究仍然依赖于大量的实验. 流场温度是实验的重要参数, 目前只能通过具有非入侵性质的光学测量手段获得, 然而, 由于多方面的难题, 鲜有对高焓流场参数测量的报道. 文章介绍了利用激光诱导荧光 (laser-induced fluorescence, LIF) 技术对 JF-10 氢氧爆轰激波风洞产生的高焓实验气流温度的测量工作. 搭建了用于脉冲式风洞的 LIF 测量系统, 使用了 NO 分子作为荧光组分. 因为高焓流场实验条件苛刻, 本实验对传统的激光设置进行了调整, 使用了平行于拍摄方向的竖直平面激光激发 NO, 使荧光信号更为集中, 获得了清晰的 LIF 图像. 利用双线测温法 (two-line thermometry, TLT) 测量高焓自由流中 NO 分子的转动温度, 从而确定气流的平转温度. 测量结果表明, JF-10 实验气流的平转温度为 600 K.

关键词: 高焓气流; 激光诱导荧光; NO; 激波风洞; 双线测温法

中图分类号: O354.7

文献标识码: A

Abstract: Due to real-gas effect, the studies of hypersonic phenomena still rely on experiments. Temperature, one of the key parameters of the flow-field, can only be acquired by optical diagnostics. However, as there are challenges from many aspects, few works regarding measurements in high-enthalpy flow have been reported. This paper presented the laser-induced fluorescence (LIF) investigation of high-enthalpy flow generated by JF-10, a H₂/O₂-detonation-driven shock tunnel. A LIF system was established for the impulsive testing facility, and nitric oxide (NO) was chosen as the fluorescent species. Since the testing environment is harsh for LIF measurement, adjustments have been made on the conventional planar LIF technique. The excitation planar beam was made parallel to the direction of the detector, thus the fluorescence signal was concentrated, and clear LIF images were taken. By two-line thermometry (TLT), the rotational temperature of NO molecules in the free stream at the test section was acquired, and thus the translational and rotational temperature of the flow was determined. The result shows that the translational and rotational temperature of the test flow is 600 K.

Key words: high-enthalpy flow; laser-induced fluorescence; NO; shock tunnel; two-line thermometry

引言

在高超声速流场中, 由于气体被压缩加热至上千, 甚至上万 K, 分子会发生振动激发、解离等现

象, 气体状态严重偏离理想气体模型, 给数值计算的准确性带来极大的挑战, 因此实验是高超声速气流研究的必要手段. 激波风洞是复现高超声速流场的

收稿日期: 2019-07-19; 修回日期: 2019-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(11802315)

第一作者简介: 严浩(1988-) 男, 博士, 主要研究方向为高温气流激光诊断技术. E-mail: physics_hyan@outlook.com

引用格式: 严浩, 张少华, 王方仪, 等. NO 激光诱导荧光对高焓气流温度的测量[J]. 气体物理, 2020, 5(2): 1-7.

Citation: Yan H, Zhang S H, Wang F Y, et al. Temperature measurement in high-enthalpy flow by NO laser-induced fluorescence [J]. Physics of Gases, 2020, 5(2): 1-7.

地面模拟设备. 激波风洞运行时, 在激波管中通过入射激波与反射激波的作用, 形成高温高压气源. 激波管尾端连接喷管, 气源中的气体在喷管中膨胀加速, 形成实验用的高超声速气流. 为了开展有关再入物理过程的实验工作, 中国科学院力学研究所于 1998 年建成 JF-10 氢氧爆轰激波风洞^[1-2]. JF-10 风洞气流的名义 Mach 数为 11.7, 具有超高的总焓, 而且均匀自由流的直径高达 400 mm, 是研究再入飞行的理想实验设备^[3]. 然而, 超高的总焓给实验气流温度等参数的测量工作带来了巨大的挑战. 流场温度的确定必须依赖非入侵性质的光学测量手段.

LIF 技术是一种激光光谱诊断技术, 与吸收光谱技术^[4-5]相比, 在 JF-10 自由流这样较为稀薄的流场中, 具有更高的信背比. LIF 技术在高超声速流场诊断方面有诸多的应用, 学者们已实现了高超声速流场的温度^[6-11]、速度^[12-14]等参数的测量. 其中, 以 NO LIF 的应用最为丰富. 先前有大量学者投入到 NO 的光谱研究中. NO 分子在 225 nm 附近有大量 $\gamma(0,0)$ 谱带的激发谱线, 适合 LIF 测量. 早期 McGregor 等对谱线结构、上下态能量做了研究, 这些数据是 LIF 测温技术的基础^[15]. 这项技术根据不同谱线的荧光效率与温度的关系计算出流场温度^[6]. 20 世纪末开始, 以 Hanson 课题组为主, 对 NO 的荧光寿命^[16]、跃迁几率^[17]、碰撞猝灭^[18]以及碰撞加宽、频移^[19-21]等特性做了大量精细的研究. 这些数据对 NO LIF 的测量可靠性分析有着重要的意义. 在各类荧光组分中, NO 化学性质相对稳定, 可以掺混到惰性实验气体中, 用于流场的 LIF 诊断, 也可以在风洞运行时, 在驻室中由 N_2, O_2 混合实验气体中直接生成. 综上所述, NO LIF 是高超声速流场温度测量的可靠手段.

在以往的 NO LIF 实验中, 脉冲式风洞的最高总焓为 11.2 MJ/kg^[11], 而 JF-10 的总焓高达 16.2 MJ/kg. 即使在实验条件较为宽松的连续风洞中, 在如此高的焓值下也难以测到 NO LIF 的信号^[22]. 另一方面, JF-10 自由流的静压仅有 105 Pa, 而 NO LIF 相关报道中的自由流静压在 kPa 量级或以上. 除此之外, JF-10 风洞试验段的半径巨大, 限制了荧光信号收集效率. 在激波风洞这样的脉冲式模拟设备中, 由于实验气流维持时间短, 测量样本数量有限, 难以通过多次采样的方式提高信噪比. 因此, 高焓流场的 NO LIF 诊断工作面临着巨大的挑战.

1 测量原理

1.1 LIF 的物理过程

荧光是分子受到光照时吸收光子并在短时间释放出荧光光子的现象. 荧光产生过程如图 1 所示. 入射光子的能量与分子跃迁至激发态所需的能量相符时, 分子有一定几率会吸收光子, 然后跃迁至激发态. 处于激发态的分子并不稳定, 会迅速跃迁到较低能级并向任意方向随机释放荧光光子. 值得注意的是, 激发态的分子也可通过碰撞猝灭等途径回到基态, 不释放荧光光子.

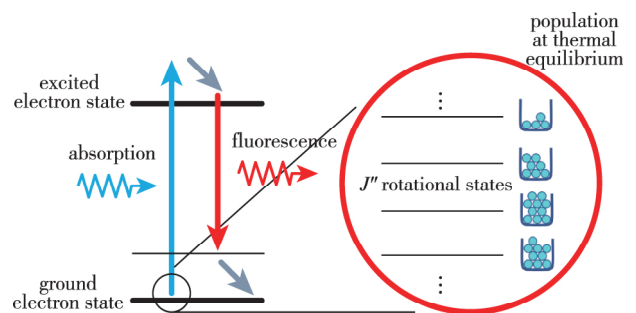


图 1 荧光过程相关能级示意图

Fig. 1 Diagram of the energy levels in fluorescence process

进行 LIF 测量时, 研究人员使用激光光束照射流场, 并用 ICCD (intensified CCD) 相机在垂直于激光传播的方向上拍摄荧光信号的分布, 从而获得流场信息. 因此, LIF 技术具有很好的空间分辨能力, 在激波风洞这样的设备中, 测量结果不易受到实验气流之外的边界层的干扰.

1.2 LIF TLT 的测量原理

在准静态下, 分子在不同能级的布居服从 Boltzmann 分布. 某两个不同转动能级的粒子数密度比与温度的关系为

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{g_1}{g_2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{F_1 - F_2}{kT}\right)$$

其中, g 为能级的简并度, F 为转动项能量, k 为 Boltzmann 常数.

简单分子的激发光谱一般具有分立结构, 其中, 每一条谱线都有对应的振动、转动能级. 以 NO 的 $\gamma(0,0)$ 跃迁为例, 在 225 nm 附近具有 12 个分支, 上百条线宽在 10^{-3} nm 量级的激发谱线. 用于 LIF 测量的激光器具有很好的单色性, 足以对这些谱线进行分辨. 在多数应用条件下, 荧光效率(荧光信号强度与激光能量的比值)正比于荧光组分在

激发谱线对应能级上的布居数. LIF 的双线测温法 (two-line thermometry, TLT) 通过测量不同激发谱线的荧光效率计算温度. 尽管荧光效率本身受到碰撞猝灭等现象影响, 将两条谱线的荧光效率相除可以消去这些不确定因素, 得到如下含有温度 T 的表达式

$$\frac{S_1}{S_2} = C_{12} \left(\frac{S_{J_1 J_1'}}{S_{J_2 J_2'}} \right) \left(\frac{2J_1'' + 1}{2J_2'' + 1} \right) \cdot \exp \left(- \frac{F(J_1'') - F(J_2'')}{kT} \right)$$

其中, S 为荧光效率; J'' 为分子总角动量量子数; $S_{J_1 J_1'}$ 为 Holn-London 因子; C 为光学系统的校正系数. 值得注意的是, 这个方法检测到的是分子在转动能级上的布居. 根据以往研究, 本实验条件下气体分子在平动、转动自由度上达到热平衡, 具有相同的温度^[7]. 本文使用的 NO $\gamma(0, 0)$ 谱带主要激发谱线的光谱参数在表 1 中给出.

表 1 NO $\gamma(0, 0)$ 谱带主要激发谱线的光谱参数
Table 1 Spectral parameters of select NO $\gamma(0, 0)$ transitions excitation

| excitation transition | λ/nm | $F/(\text{cm}^{-1})$ | $S_{J_1 J_1'}$ |
|-----------------------|---------------------|----------------------|----------------|
| $R_1 + Q_{21}(13.5)$ | 225.785 | 226.2 | 0.663 |
| $R_{21}(18.5)$ | 225.072 | 542.0 | 0.140 |
| $Q_1 + P_{21}(27.5)$ | 225.282 | 1248.5 | 0.900 |
| $Q_1 + P_{21}(28.5)$ | 225.202 | 1343.6 | 0.904 |

由于 TLT 根据气体分子的热力学分布计算温度, 这个方法本身是免标定的. 在光谱常数精确, 仪器参数已知, 以及测量数据信背比、信噪比足够高的情况下测量结果是准确的.

2 实验方法

用于 JF-10 高焔气流诊断的 NO LIF 实验装置如图 2 所示, 包括 LIF 系统、波长监测系统以及时序控制系统.

2.1 NO LIF 系统的构成

NO LIF 系统的主要设备是激光光源和 ICCD 相机以及相关光学元件. NO LIF 所用的激发光由可调谐染料激光器 (Precisionscan, Sirah) 产生, 波长在 225 nm 附近, 针对 NO 组分的 $\gamma(0, 0)$ 谱带跃迁.

一台工作在 3 倍频模式的 Nd: YAG 激光器 (Quanta-Ray Pro 250, Spectra-Physics) 产生波长为 355 nm 的泵浦激光, 为染料激光器提供能量. 染料激光器载入 C450 染料溶液, 产生波长为 450 nm 左右的基频激光. 基频激光经过频率转换单元倍频至约 225 nm, 用于 NO 荧光的诱导. 染料激光器的谐振腔中使用了 3 000 l/mm 的光栅, 激光光谱线宽约为 0.24/cm, 即 1.2 pm. 整套激光器以 10 Hz 的固定重复频率工作.

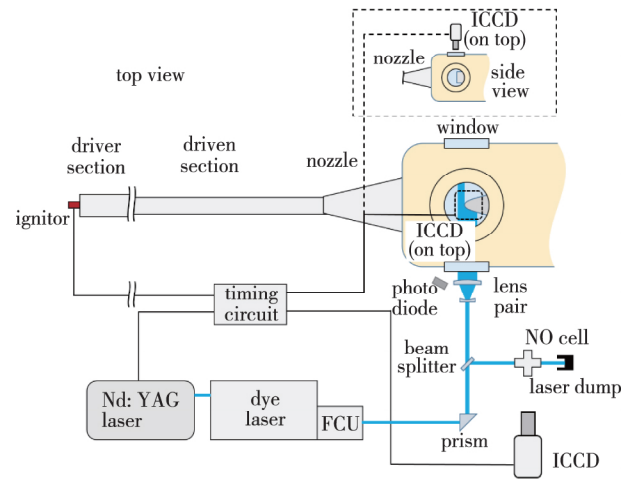


图 2 JF-10 激波风洞流场诊断的 NO LIF 测量设备示意图
Fig. 2 LIF system for flow field diagnostics in JF-10 shock tunnel

激光光束经过焦距为 -75 mm 的石英柱透镜在竖直方向发散, 然后经过焦距为 1 000 mm 的石英球面透镜在竖直方向上准直, 在水平方向上逐渐汇聚形成薄片状的平面光束, 进入风洞的试验段. 石英透镜距离拍摄视场中心约 800 mm, 焦点在视场以外, 避免激发光能量密度过高导致荧光的饱和. 荧光信号由 ICCD (PI-MAX4, Princeton Instruments) 相机拍摄. 该相机放置于风洞试验段的正上方, 距离激光片光约 800 mm. 相机配备了 100 mm 紫外镜头, 在测量区域的最大视场为边长约 50 mm 的正方形. 镜头前安装了 ZWB3 有色玻璃和 315 ~ 420 nm 陷波滤光片组合, 可消除 225 nm 的激发光的散射光, 以及减少可见光波段的背景辐射对荧光信号的干扰. 激光光束的设置如图 3 所示. 与图 3(a) 中传统的平面光束设置不同, 本实验使用的是如图 3(b) 所示的竖直平面激光设置. 在这种设置下, 荧光信号十分集中, 不但提高了荧光图像的信噪比, 也便于对背景辐射信号进行剔除.

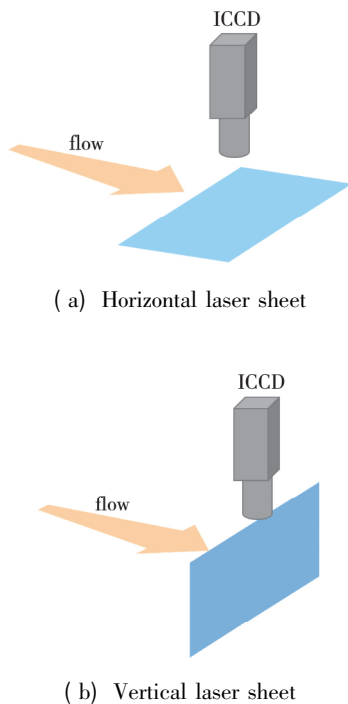


图3 片光设置示意图

Fig. 3 Laser sheet configurations

2.2 风洞运行与 LIF 测量的时序控制

合理的时序控制是实现 JF-10 的气流进行 LIF 测量的关键。一方面,脉冲风洞的最佳测试时间窗口仅持续几个 ms,而 LIF 系统的采样频率仅为 10 Hz,必须将风洞的运行与 LIF 测量进行同步。另一方面,染料激光系统必须经过 100 个周期以上的充分预热,否则无法产生具有足够能量的激光脉冲。

图 4 是风洞点火时刻, P5 压力以及自由流自发光信号的时序图。在点火后 7 ms 时刻,激光运行至激波管末端,驻室的压力剧烈上升,试验段的光电二极管探测到自由流中的自发光,与高超声速流场的建立有关,随后自发光逐渐减弱。P5 压力在 18 ms 时刻再次产生阶跃,标志着测试时间窗口的结束。LIF 测量时间选在了点火后的 12.5 ms。此时,自由流场的自发光减弱,而 P5 压力相对稳定。

在本系列 LIF 测量中,建立了专用的时序控制系统,对激光器、风洞点火、ICCD 拍摄进行触发,实现激光器的预热以及各个设备的同步。时序控制系统启动以后,首先以 10 Hz 的频率给激光器发出触发信号,使激光器进行预热。在第 200 个激光脉冲发出之前,控制系统发出点火信号,触发风洞点火器点火,然后在点火后 12.5 ms,触发激光器和 ICCD,进行 LIF 测量。

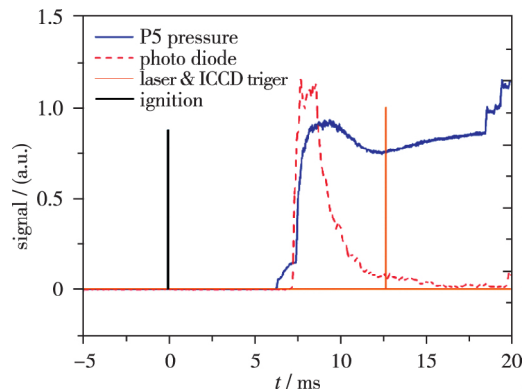


图4 风洞运行状态与 LIF 测量的时序

Fig. 4 Time sequence for shock tunnel operation and LIF measurement

2.3 激发谱线的确认与选取

激光器波长的面板值与真实值有一定的偏差,而激发谱线十分密集,因此有必要对激发谱线进行确认。在实验准备过程中,首先使用波长计(LSA, Highfinesse)对激光的基频波长进行测量(450 nm 波段),绝对误差在 10 pm 以内,实现对激光波长的初步确认。

激光波长的进一步确认是通过对比荧光监测系统的 NO 激发谱的结构与理论激发谱实现的。NO 激发谱的理论值来自 LifSim 数据库的模拟结果^[23]。NO 荧光监测部分的主要组成为 NO 标气池,供气、抽气设备以及探测荧光信号的 ICCD。标气池的主体为 KF50 四通管,其中 3 个端口安装石英窗片,使得 NO LIF 的激光发光与荧光可以透过,另一端与供气抽气系统连接。通常情况下,标气池充入 5% 的 NO 与 N₂ 的混合气(或 1.5% 的 NO 与 Ar 的混合气)并抽至约 500 Pa。图 5 展示了标气池中的 NO 荧光。荧光信号的强弱变化标志着激光波长是否与激发谱线重合。通过事先与激光功率计的标定,风洞运行时标气池中的荧光信号强度反映了 LIF 测量时激光脉冲的能量。

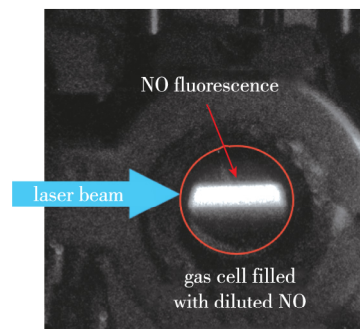


图5 NO 标气池中的荧光

Fig. 5 Fluorescence in NO cell

不同激发谱线对温度变化的灵敏度、信号强度不尽相同. 图 6 展示了不同谱线组合的荧光效率比值在 400~800 K 区间随温度的变化. 可以看出 R_{21} (18.5) 和 Q_1+P_{21} (27.5) 激发谱线组合的荧光比值, 在 400~800 K 区间有较大的斜率, 说明这个谱线组合具有较高的测温灵敏度, 确保了测温精度. 这两条谱线的荧光效率比值在 1 附近, 可以避免采集设备的非线性响应对实验结果的影响.

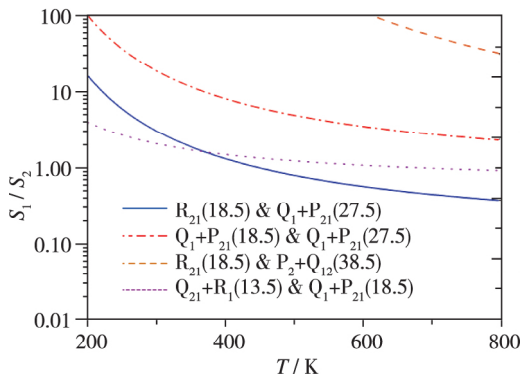


图 6 不同激发谱线组合的荧光效率比值随温度的变化
Fig. 6 Variation of fluorescence efficiency ratio between specified transition pair with temperature

3 结果及分析

3.1 JF-10 自由流温度测量结果

JF-10 自由流中的 NO LIF 图像见图 7. R_{21} (18.5) 和 Q_1+P_{21} (27.5) 两条谱线的激光能量分别为 4.6 和 3.9 mJ/pulse. 这两条谱线的 LIF 图像在拍摄范围内是均匀的, 峰值信号强度在 10 000 以下.

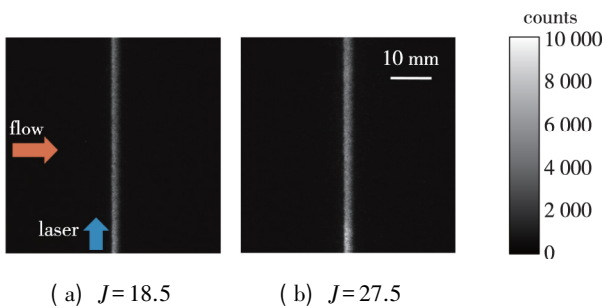


图 7 自由流中 NO LIF 的图像
Fig. 7 NO LIF images in the free stream

LIF 信号在轴向位置的平均分布如图 8 所示. 两条谱线的 LIF 信号强度相近, 而且单个像素的强度大多分布在 7 000 以下, 远小于 65 535 的最大计数, 处于线性响应区间. 可以忽略 ICCD 非线性响应对实验结果带来的影响.

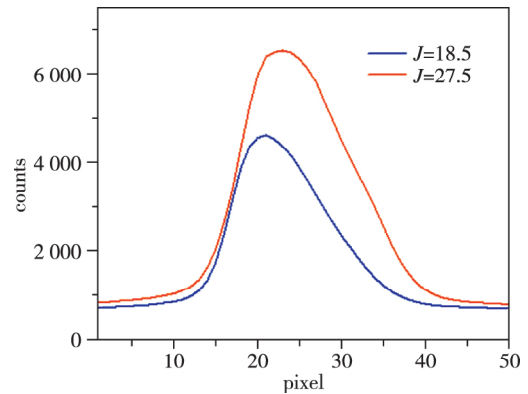


图 8 荧光信号的平均轴向分布
Fig. 8 Axial distributions of averaged LIF signals

荧光图像经过处理得到荧光信号在流场径向上的分布. 处理过程为对每一个径向位置的图像数据拟合出基线. 基线的计数为 750~900, 包含了均匀的背景辐射以及平均计数为 600 的 ICCD 的暗噪声. 数据减去基线后求和得到该径向位置的总荧光信号强度, 用于温度的计算.

本次实验的总荧光信号强度在气流径向分布如图 9 所示, 虚线为每一个径向数据点对应的信号强度, 方块和三角符号为该位置 5 mm 范围内的信号平均值, 误差条为对应数据的标准差. 自由流中的 NO LIF 测温结果如图 10 所示. 实验结果表明自由流中 NO 组分的平转动温度约为 600 K, 温度数据的标准差为 6%. 激光能量抖动带来的温度的不确定度约为 7%. 这两项带来的测量不确定度在 10% 以内.

3.2 激光沿程吸收对测温结果带来的影响

LIF 的激发光会被荧光粒子吸收而衰减, 在 JF-10 这样大型设备中, 可能会影响测量结果. 评估了激光吸收对测温结果的影响. 计算吸收率时利用了 Reisel 等提供的 Einstein 系数^[17]. 对于 NO 的吸收谱线线型, 仅考虑了 Doppler 展宽, 因为根据 NO $\gamma(0,0)$ 谱线的碰撞加宽数据^[18-19], 在约 100 Pa 的自由流环境下, 碰撞展宽的半高全宽比 Doppler 展宽小两个量级. 在 JF-10 的自由流中, 据 CFD 估算出 NO 粒子数密度为 $4.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$; 经吸收光谱 (LAS) 测得 NO 粒子数密度为 $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. 对 JF-10 自由流测量时, 激光经过约 20 cm 的自由流后到达 ICCD 拍摄区域. 假设流场真实温度为 600 K, 沿程吸收导致的温度测量误差如图 11 所示, 与信号本身的噪声带来的约 6% 的不确定度相比可以忽略不计.

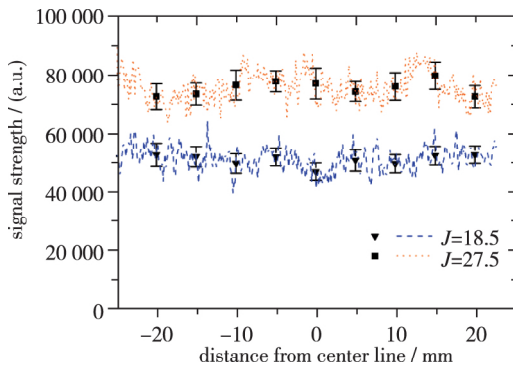


图9 自由流中 NO LIF 信号强度的径向分布
Fig. 9 Radial distributions of NO LIF signals in the free stream

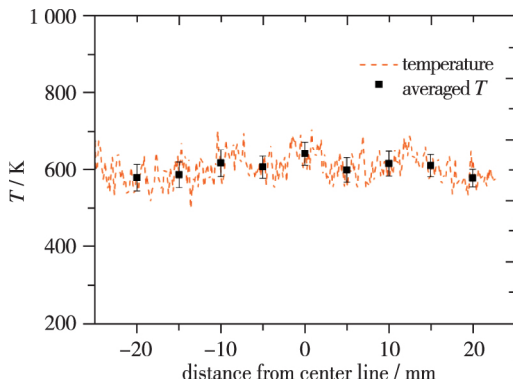


图10 自由流的平转温度分布
Fig. 10 Distributions of translational and rotational temperature in the free stream

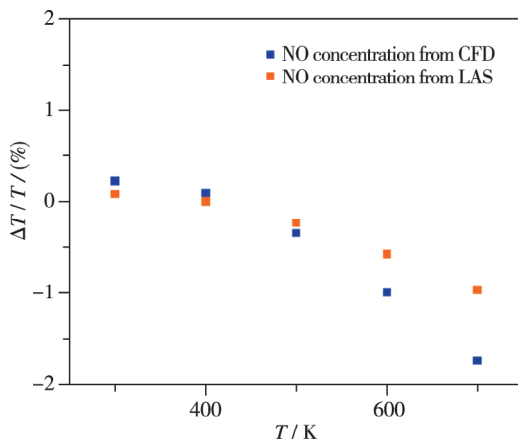


图11 沿程吸收带来的误差与实际温度的关系
Fig. 11 Relation between relative errors caused by laser depletion and temperature

4 结论

为了掌握 JF-40 激波风洞实验气流的重要参数,开展了利用 NO LIF 技术测量风洞自由流温度的工作。

搭建了用于 JF-40 的 LIF 测量系统,攻克了在高焓、低静压的脉冲式风洞进行 LIF 测量这一难题,获得了清晰的荧光图像:时序控制系统实现了在激光器充分预热后,风洞运行与 LIF 测量的同步,保证了激光器具有较高的输出能量;通过改变平面激光束的设置,获得了集中的荧光信号,并根据该设置采取宽带滤光策略,在保证实验结果不受背景辐射影响的前提下,极大提高了信噪比。

实验中,选择了 $R_{21}(18.5)$ 和 $Q_1+P_{21}(27.5)$ 作为 NO LIF 的激发谱线,在目标测温区间具有足够的灵敏度以及相近的信号强度,保证了测量结果的准确性。结果显示, JF-40 自由流的平转温度为 600 K。最后,对 NO 造成的激光吸收率进行了估算,排除了在大型设备中,激光沿程吸收对测温结果的影响。

致谢 感谢国家自然科学基金(11802315)对相关研究的支持。

参考文献 (References)

- [1] Yu H Y. Oxyhydrogen combustion and detonation driven shock tube[J]. Acta Mechanica Sinica, 1999, 15(2): 97-107.
- [2] Jiang Z L, Zhao W, Wang C, et al. Forward-running detonation drivers for high-enthalpy shock tunnels[J]. AIAA Journal, 2002, 40(10): 2009-2016.
- [3] Jiang Z L, Yu H. Development and calibration of detonation-driven high-enthalpy and hypersonic test facilities [A]// Igra O, Seiler F. Experimental methods of shock wave research [M]. Switzerland: Springer, 2016.
- [4] 余西龙, 曾徽, 林鑫, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱诊断技术: 原理和应用[J]. 气体物理, 2016, 1(5): 52-63.
Yu X L, Zeng H, Lin X, et al. Tunable diode laser absorption spectroscopy: principle and application[J]. Physics of Gases, 2016, 1(5): 52-63 (in Chinese).
- [5] 林鑫, 李飞, 王宽亮, 等. 旋流火焰燃烧温度场二维吸收光谱诊断[J]. 气体物理, 2019, 4(2): 55-61.
Lin X, Li F, Wang K L, et al. Diode laser absorption tomography for swirling flame diagnostics[J]. Physics of Gases, 2019, 4(2): 55-61 (in Chinese).
- [6] McMillin B K, Palmer J L, Hanson R K. Temporally resolved, two-line fluorescence imaging of NO temperature in a transverse jet in a supersonic cross flow[J]. Applied Optics, 1993, 32(36): 7532-7545.
- [7] Palmer J L, McMillin B K, Hanson R K. Multi-line fluo-

- rescence imaging of the rotational temperature field in a shock-tunnel free jet[J]. *Applied Physics B*, 1996, 63(2): 167-178.
- [8] Wollenhaupt M, Rosenhauer M, Muller T, et al. NO laser-induced fluorescence studies for the application of single-shot two-line thermometry to HEG[C]. ISSW21, Great Keppel Island, Australia, 1997.
- [9] Palma P C. Laser-induced fluorescence imaging in free-piston shock tunnels[D]. Canberra: The Australian National University, 1999.
- [10] Palma P C, Danehy P M, Houwing A F. Fluorescence imaging of rotational and vibrational temperature in shock-tunnel nozzle flow[J]. *AIAA Journal*, 2003, 41(9): 1722-1732.
- [11] Kaseman T, Le Page L M, O'Byrne S, et al. Visualization and thermometry in hypersonic wedge and leading-edge separated flows[R]. *AIAA 2017-0443*, 2017.
- [12] Zimmermann M. Resonant doppler velocimeter[D]. Princeton: Princeton University, 1980.
- [13] Palmer J L, Hanson R K. Single-shot velocimetry using planar laser-induced fluorescence imaging of nitric oxide[R]. *AIAA 1993-2020*, 1993.
- [14] Zhang S H, Yu X L, Yan H, et al. Molecular tagging velocimetry of NH fluorescence in a high-enthalpy rarefied gas flow[J]. *Applied Physics B*, 2017, 123: 122.
- [15] McGregor W K, Few J D, Litton C D. Resonance line absorption method for determination of nitric oxide concentration[R]. *AEDC-TR-73-182*, 1973.
- [16] Settersten T B, Patterson B D, Humphries IV W H. Radiative lifetimes of NO $A^2\Sigma^+(v' = 0, 1, 2, \dots)$ and the electronic transition moment of the $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ system[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2009, 131(10): 104309.
- [17] Reisel J R, Carter C D, Laurendeau N M. Einstein coefficients for rotational lines of the $(0, 0)$ band of the NO $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ system[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1992, 47(1): 43-54.
- [18] Paul P H, Gray J A, Durant J L, et al. Collisional electronic quenching rates for NO $A^2\Sigma^+(v' = 0)$ [J]. *Chemical Physics Letters*, 1996, 259(5/6): 508-514.
- [19] Chang A Y, Di Rosa M D, Hanson R K. Temperature dependence of collision broadening and shift in the NO $A \leftarrow X(0, 0)$ band in the presence of argon and nitrogen [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1992, 47(5): 375-390.
- [20] Di Rosa M D, Hanson R K. Collision-broadening and shift of NO $\gamma(0, 0)$ absorption lines by H_2O , O_2 , and NO at 295 K[J]. *Journal of Molecular Spectroscopy*, 1994, 164(1): 97-117.
- [21] Di Rosa M D, Hanson R K. Collision broadening and shift of NO $\gamma(0, 0)$ absorption lines by O_2 and H_2O at high temperatures[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1994, 52(5): 515-529.
- [22] Johansen C, Lincoln D, Bathel D, et al. Simultaneous laser-induced fluorescence of nitric oxide and atomic oxygen in the hypersonic materials environment test system arcjet facility[C]. 17th International Symposium on Applied Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 2014.
- [23] Bessler W G, Schulz C, Sick V, et al. A versatile modeling tool for nitric oxide LIF spectra[C]. Proceedings of the Third Joint Meeting of the US Sections of the Combustion Institute, Chicago, 2003.