

电弧加热器中 10 kHz 相干反斯托克斯拉曼散射光谱测温技术

张续腾^{1, 2}, 戴晓辉^{1, 2}, 宋英杰^{1, 2}, 彭江波^{1, 2}, 田野³, 曹振^{1, 2}, 罗新光^{1, 2}, 杨超博^{1, 2, *}, 于欣^{1, 2}

1. 哈尔滨工业大学, 光电子技术研究所, 哈尔滨 150001

2. 激光空间信息全国重点实验室, 哈尔滨 150001

3. 中国空气动力研究与发展中心, 空天技术研究所, 绵阳 621000

关键词: 相干反斯托克斯拉曼散射; 脉冲串激光器; 非平衡流场; 光谱测温

中图分类号: O433.1; V211.752

文献标识码: A

极高速流动产生的热力学非平衡效应对高速飞行器动力系统及热防护系统具有重大影响, 忽略热力学非平衡效应会导致飞行器性能估计偏差达 10% 以上。相干反斯托克斯拉曼散射 (Coherent Anti-Stokes Raman Scattering, CARS) 技术可直接测量非平衡流场中分子各能级的粒子数布居, 从而实现对流场内能非平衡分配的特征。开展高频 CARS 测量, 对定量解析非平衡高焓流场的瞬时内能分配特性、修正计算流体力学模型具有重大意义。哈尔滨工业大学和中国空气动力研究与发展中心研究团队突破传统 10 Hz CARS 性能局限, 自主设计研制了一套 10 kHz CARS 测量系统, 并将其应用于电弧加热器高焓流场测量, 成功获得了高时间分辨的振动和转动温度信息。

10 kHz CARS 测量系统如图 1 所示, 其核心脉冲串激光源由自主设计的 10 kHz Nd:YAG 脉冲串激光器

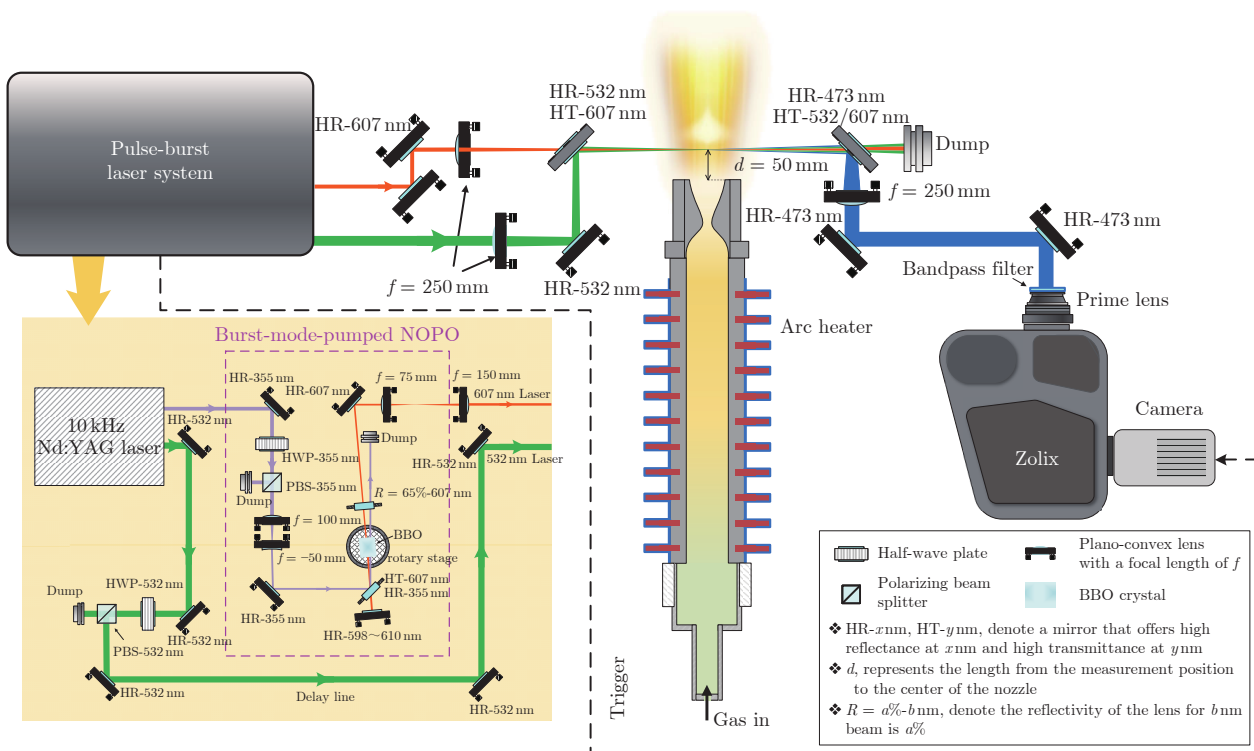


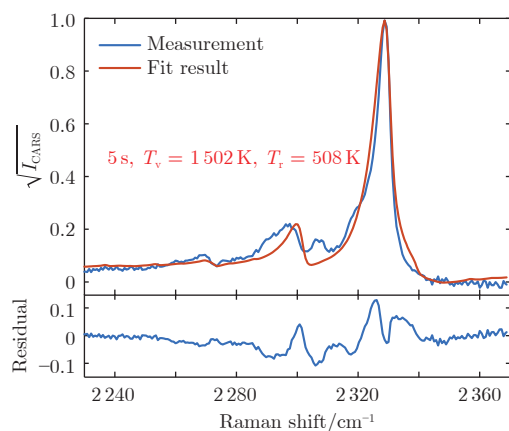
图 1 电弧加热器中 10 kHz CARS 测量系统示意图 (非等比例)

收稿日期: 2026-04-28; 修回日期: 2026-06-01; 录用日期: 2026-06-03

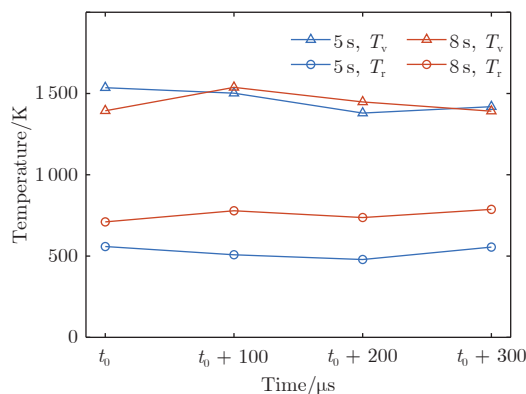
* 通信作者 E-mail: yangchaobo@hit.edu.cn

引用格式: 张续腾, 戴晓辉, 宋英杰, 等. 电弧加热器中 10 kHz 相干反斯托克斯拉曼散射光谱测温技术 [J]. 实验流体力学, 2026, 40(3): 121-122.
ZHANG X T, DAI X H, SONG Y J, et al. 10 kHz coherent anti-Stokes Raman scattering (CARS) thermometry in arc heaters[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2026, 40(3): 121-122.

和非共线光学参量振荡器(Noncollinear Optical Parametric Oscillator, NOPO)组成。在光路配置上,泵浦/探测光使用Nd:YAG激光器输出的532 nm激光;Stokes光则通过355 nm激光泵浦自研NOPO产生宽带607 nm激光作为光源。通过对NOPO核心参数的理论仿真与优化,将非共线角设置为 3.96° 。性能测试结果表明:在该条件下NOPO单脉冲能量达20 mJ,光谱带宽达 382 cm^{-1} ,可有效覆盖 N_2 分子的多个拉曼振转跃迁,实现振动和转动温度的同步测量。实验采用USED-CARS相位匹配机制,显著降低了工程环境中强振动对CARS信号的干扰。探测端利用EMCCD相机的高速子帧突发成像模式(subframe burst imaging mode),克服了传统CCD相机高信噪比和高帧频不可兼得的问题,实现了10 kHz高信噪比CARS测量。在总焓 7.4 MJ/kg 的条件下,获得了电弧加热器启动后5和8 s时的CARS信号,并基于已开发的CARS振动和转动温度拟合模型反演得到了相应的振动和转动温度(图2,其中 I_{CARS} 为归一化的信号强度, T_v 为振动温度, T_r 为转动温度, t_0 为测量起始时刻)。本文验证了高频CARS技术在电弧加热器非平衡高焓流场诊断中的可行性,为进一步构建电弧加热器非平衡高焓流场振动和转动温度数据库奠定了基础。



(a) 归一化CARS光谱与理论拟合结果



(b) 启动5和8 s后获取的温度时间序列 (10 kHz)

图2 10 kHz CARS 实验结果

(编辑:秦虹)