

基于激光诱导荧光的高速飞行粒子 低温段测温方法

周江宁¹, 殷一民¹, 郭秋亭², 陈爽¹, 杨文斌¹, 母金河¹, 林俊²

- (1. 中国空气动力研究与发展中心 设备设计与测试技术研究所, 四川 绵阳 621000;
2. 中国空气动力研究与发展中心 高速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 针对当前高速飞行固体粒子在低温段测温困难的问题, 提出了一种基于激光诱导荧光的固体测温方法来显示高速粒子飞行过程中的温度变化过程。使用掺杂罗丹明 B 染料的醋酸纤维粒子的 600 nm 荧光信号和激光的 532 nm 信号之比, 能进一步排除激光光强波动对测温结果的干扰。对固体荧光粉末在 20~80 °C 温度下的光谱学特征进行分析, 研究发现: 系统的荧光信号强度、温度灵敏度 (80 °C 下温度系数为 $-0.0125\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, 20 °C 下温度系数为 $-0.0379\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)、测量精度均随温度的下降显著上升, 验证了该方法在低温段温度测量的应用潜力。基于该方法对高速气流下粒子撞靶的温度变化规律进行定性分析。

关 键 词: 高速粒子; 温度测量; 罗丹明 B; 荧光光谱; 激光诱导

中图分类号: V211.71; O433.1

文献标志码: A

Thermometry method for high speed flying particle at low temperature based on laser induced fluorescence technique

ZHOU Jiangning¹, YIN Yimin¹, GUO Qiuting², CHEN Shuang¹,
YANG Wenbin¹, MU Jinhe¹, LIN Jun²

- (1. Facility Design and Instrumentation Institute,

China Aerodynamic Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China;

2. High Speed Aerodynamics Institute,

China Aerodynamic Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: A thermometry method was presented for high speed flying particles in low temperature applications with difficulty in measurement. Rhodamine B was doped in cellulose acetate particles to visually show spacial temperature distribution of these particles. The ratio of 600 nm photo luminescence fluorescence signal from these dye doped particles and 532 nm laser signal for excitation was applied to further eliminate interference from laser intensity fluctuation. Spectrum of dye particles at different temperature ranging from 20 °C to 80 °C was analyzed. Photo luminescence intensity, temperature sensitivity ($-0.0125\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ temperature coefficient at 80 °C and $-0.0379\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ temperature coefficient at 20 °C) and measuring accuracy were significantly enhanced with temperature decline, further proving the potential of this technology at low temperature applications. Temperature behavior of high speed dye

收稿日期: 2019-05-13

基金项目: 国家自然科学基金 (91641118)

作者简介: 周江宁 (1991—), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事非接触测量方向研究。

引用格式: 周江宁, 殷一民, 郭秋亭, 等. 基于激光诱导荧光的高速飞行粒子低温段测温方法[J]. 航空动力学报, 2019, 34(12): 2642-2647. ZHOU Jiangning, YIN Yimin, GUO Qiuting, et al. Thermometry method for high speed flying particle at low temperature based on laser induced fluorescence technique[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(12): 2642-2647.

particle hitting target was present by this technique.

Key words: high speed particle; thermometry; Rhodamine B; fluorescence spectrum; laser induced

固-气/液体系中,播撒在流体中的粒子温度分布作为重要参数,能直观地反映出粒子与流体相互作用的过程。特别在固体粒子与气体、液体相互作用的一些化学反应中,粒子温度能够进一步反映化学反应的速率^[1]。对于高速运动的微小粒子,测温系统需要具有较快的时间响应速度以及较高的空间分辨率。通常可使用比色测温法、红外热成像测温法进行温度测量^[2-4]。其中,比色测温方法根据维恩偏移定律对温度进行测量,一般用于测量 1000℃ 量级的温度场分布,红外热成像测温具有相对更宽的测温范围,但该方法的测温灵敏度随温度的降低而降低,且高时间响应和空间分辨率的红外相机成本较高,限制其应用范围。因此,到目前为止,仍然缺乏低温(温度远小于 1000℃)下高速粒子的高灵敏度测温手段。

近年来,随着高分辨率、高性能光源和相机测试系统的出现,以激光诱导激发光谱技术为代表的光学诊断方法,因具有较高的时间分辨率、空间分辨率等优点,成为国内外测温技术的发展热点^[5]。其中,温敏荧光测温方法,因其具有较高的温度灵敏度和较宽的测温范围,被广泛应用于流体温度的测量中^[6-8]。该技术利用温度敏感的荧光材料(如罗丹明 B、奇通红、荧光素 27^[9-10]) 在激光光照射下产生的荧光信号强度分布实现温度场测量。由于温敏荧光粒子的量子效率随温度发生变化,而荧光信号强度与荧光量子效率正相关,因此荧光信号强度能够直观地体现出材料温度的变化。另外,将罗丹明类温敏染料溶解吸附于 SiO₂、醋酸纤维等固体材料中^[11-12],这些固体荧光粒子仍然具有温敏特征,能够显示粒子在流场中的温度变化^[13-14]。

本文在温敏荧光液体测温的技术基础上,开展温敏荧光固体粒子测温技术的探索工作。将常用的温敏染料罗丹明 B 吸附在醋酸纤维粒子上,采用双色测温技术,建立不受到激光光强波动干扰的温度测量系统。基于该方法对高速气流下靶式气流磨中飞行粒子的温度变化规律进行定性分析。该方法可为流体中粒子温度变化的理论分析提供一定的数据参考。

1 荧光测量机理

在连续光源激发下,荧光染料从激发态 k 能

级向下跃迁至基态 i 能级产生的荧光光子数 n_{fl} 与荧光信号强度呈正比,由收集体积 V_R 、上能级荧光分子浓度 c_k 、 k 能级的自发辐射系数 A_k 决定,可表示如下^[15]:

$$n_{\text{fl}} = A_k V_R c_k \quad (1)$$

其中上能级荧光分子浓度 c_k 由基态粒子浓度 c_i 、激光能量密度 ρ 、 A_k 、 i 能级跃迁至 k 能级的受激辐射系数 B_{ik} 、 k 能级跃迁至 i 能级的受激辐射系数 B_{ki} 以及无辐射跃迁速率 R 等因素所决定。在稳态下,结合式(1)有

$$\frac{dc_k}{dt} = c_i B_{ik} \rho - c_k (A_k + B_{ik} \rho + R) = 0 \quad (2)$$

$$n_{\text{fl}} = A_k V_R c_i \frac{B_{ik} \rho}{A_k + B_{ki} \rho + R} \quad (3)$$

对于罗丹明 B,其无辐射跃迁速率 R 对温度非常敏感,并满足 Arrhenius 方程^[16]

$$R = k_0 \exp\{E_a/[k_B(t + 273.15)]\} \quad (4)$$

其中 E_a 为无辐射跃迁的活化能, k_0 为猝灭相关系数, k_B 为玻尔兹曼常数, t 为温度(单位:℃)。将 R 代入式(3)中,可得荧光光子数 n_{fl} 与温度 t 的关系。假设 $B_{ik} = B_{ki}$,当激光功率密度 ρ 较低,受激辐射跃迁较弱时($B_{ik} \rho \rightarrow 0$), n_{fl} 可近似为

$$n_{\text{fl}} = A_k V_R c_i \frac{B_{ik} \rho}{A_k + k_0 \exp\{E_a/[k_B(t + 273.15)]\}} \quad (5)$$

考虑到固体荧光粒子中荧光浓度分布均匀且浓度大小不变,荧光粒子的荧光信号强度主要由温度 t 和激光能量密度 ρ 决定。将荧光信号与 532 nm 激光能量密度 ρ 相除,比值的大小仅与温度 t 的大小相关,能够排除激光能量密度 ρ 在空间上不均匀分布带来的干扰。

2 实验系统及测量结果

2.1 实验装置

图 1 为实验使用的靶式气流磨的装置示意图^[17]。压缩 N₂(压强为 1.1 MPa)从压缩气体入口进入拉瓦尔喷嘴并加速到较高的速度。由于喷嘴压强的降低,粒子从入口进入喷嘴并与气流在引流段混合成为圆柱形的剪切流,并在加速管内加速获得大量动能。最终,粒子束在碰撞室内撞

击至直径 5 mm 的金属圆柱形靶,碰撞后粒子从出口离开装置。

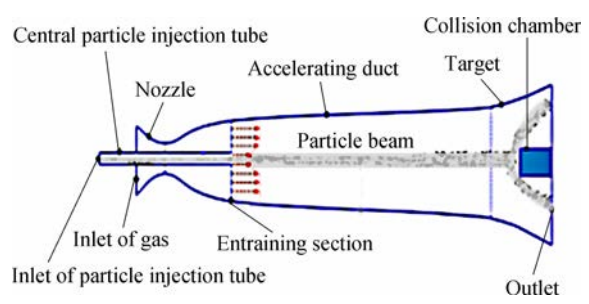


图 1 靶式气流磨的装置示意图
Fig. 1 Sketch of the target jet mill

实验使用的温敏荧光粒子由罗丹明-醋酸纤维溶液风干成膜,研磨过筛批量制备。通过均匀搅拌溶液,能够较稳定地控制粒子中的荧光分子浓度(至少在同一个数量级)。经统计,过筛后粒子直径为 $200\pm50\text{ }\mu\text{m}$ 。粒子在 532 nm 激光照射下的荧光光谱如图 2(a)所示,谱线峰值波长约为 600 nm,半高宽约为 60 nm。在不同温度下荧光强度变化非常明显。

激光诱导荧光粒子测温装置如图 2(b)所示。将温敏荧光粒子播撒在气流中,使用 532 nm 脉冲激光(脉宽为 5 ns,脉冲频率为 30 Hz)整形为片光通过靶式气流磨的轴心激发观察室内飞行的荧光粒子并产生荧光。由于靶式气流磨为圆柱形对称结构,拍摄粒子可近似为在激光平面上运动。使用分幅相机拍摄粒子的飞行图像(相机曝光时间为 $30\text{ }\mu\text{s}$)。在分幅相机中,装配有两台 CCD(charge coupled device)相机(相机像素大小为 1388×1088)以及不同波长的滤波片(滤波片 1 的中心波长为 600 nm,带宽为 35 nm;滤波片 2 的中心波长为 532 nm,带宽为 4 nm),用于捕捉温度敏感荧光信号和于温度无关的激光信号。

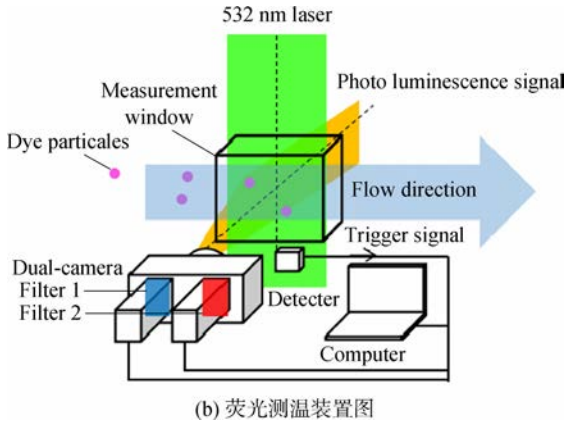


图 2 温敏粒子温度特性及激光诱导荧光测温装置图
Fig. 2 Temperature behavior of temperature sensitive particles and laser induced fluorescence thermometry method

2.2 空间坐标校准和温度标定

为确保测量结果的准确,需要对分幅相机拍摄的两张照片的空间坐标进行校准。图 3(a)~图 3(b)显示了分幅相机中,左右两相机拍摄相同标定板得到的图像(标定板上相邻点间距为 1.5 mm)。由于分幅相机中两条光路并不完全对称,同一个点在两张照片上的坐标并不一致(图 3(c)),导致无法直接对两张照片进行相除处理。根据标定板上的特征点建立两张图像坐标的对应关系,对其中一张照片的空间坐标进行校准,使标定板上特征点在两张照片上的坐标一致(如图 3(d)所示),最终实现空间坐标校准。另外,结合标定板中相邻点间距和相机的像素值,可得视场范围约为 $1.4\text{ cm}\times1.0\text{ cm}$,空间分辨率约为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。

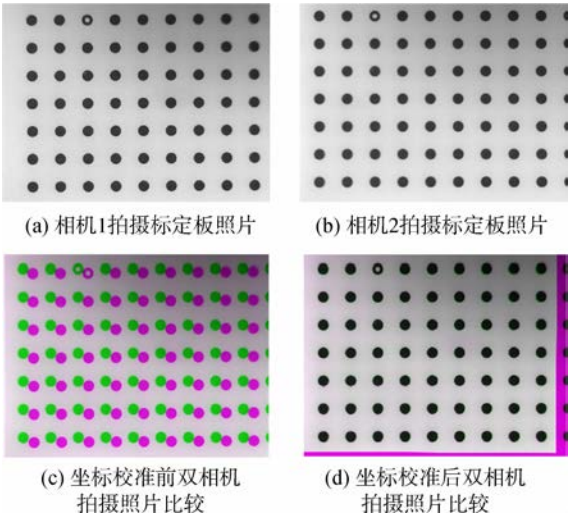
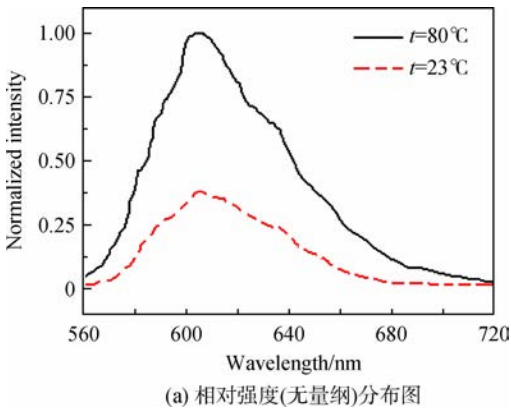


图 3 校准前后双相机拍摄标定板照片比较
Fig. 3 Comparison of calibration board's photos taken from two cameras before and after calibration



使用半导体控温片加热研磨后未过筛的荧光粉末堆(堆高至 2mm,温度控制偏差小于 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$),利用热电偶测量温度稳定后样品表面温度,待样品温度稳定后使用分幅相机测量不同温度下粒子的激发荧光和散射激光图像。图 4(a)~图 4(b)分布为 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下粉末堆的荧光和激光散射信号。根据式(4),由于荧光信号强度与激光信号强度呈正比,将两强度相除能有效减弱粒子形貌、激光光强波动导致的荧光信号强度变化对测量结果的影响。图 4(c)为 600nm 信号和 532nm 信号强度比值的分布图。

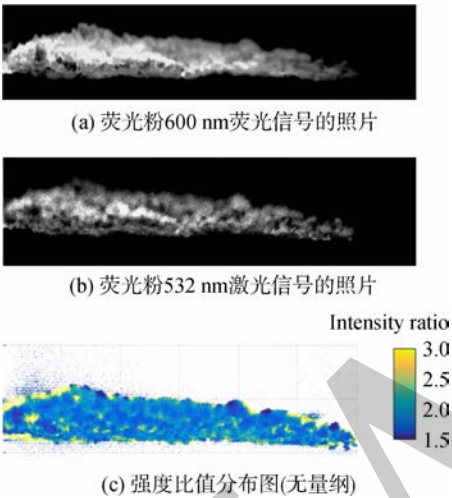


图 4 双相机拍摄研磨荧光粉 600 nm 信号与 532 nm 信号的强度分布图及比值分布图($t=23\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig.4 Intensity distribution of 600nm band to 532nm band from fluorescence powders and corresponding ratio distribution ($t=23\text{ }^{\circ}\text{C}$)

对同一温度 10 次测量下,粒子堆的强度比值均值和测量偏差随温度的分布如图 5 所示。荧光粒子的量子效率(正比于强度比值)随温度的上升而降低,使荧光信号信噪比随温度升高显著降低,导致测量偏差随温度的上升而显著上升,在温度小于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,不同粒子间比值的测量偏差约为 $\pm 10\%$ 。使用式(4)拟合数据点,结果如虚线所示。根据比值随温度非线性变化关系,荧光粒子的温度灵敏度随温度的下降而上升。当温度从 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,温度系数(定义为荧光信号与激光强度之比与温度的斜率,绝对值越高表示温度灵敏度越高)从 $-0.0125\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 提升至 $-0.0379\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$,测温误差从 $\pm 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。考虑到罗丹明 B 染料能够应用于零下的温度测量应用中,可以推测在更低温度下该示踪粒子能够有更强的荧光信号、温

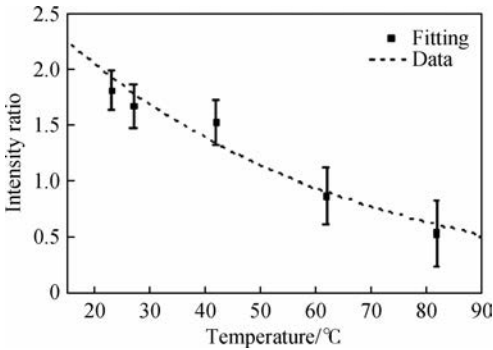


图 5 600 nm 荧光强度与 532 nm 激光强度的比值(无量纲)随温度变化关系

Fig.5 Ratio of 600 nm fluorescence intensity and 532 nm laser intensity (dimensionless) versus temperature

度灵敏度和测温精度。

3 讨论

3.1 靶式气流磨中撞靶前粒子的速度特征

由于当前大量参数未知,无法对飞行粒子的温度进行仿真计算,仅能对飞行粒子的速度进行计算。首先使用 Navier-Stokes 方程组^[18]对靶式气流磨的腔内气流速度和温度进行仿真分析,结果如图 6 所示^[19]。在距离靶面 2 mm 范围外,气流速度可高达 $450\sim 500\text{ m/s}$,另外由于气压的降低,气流在靶头附近的温度显著低于室温。

结合靶式气流磨内 N_2 气流的速度和粒子直

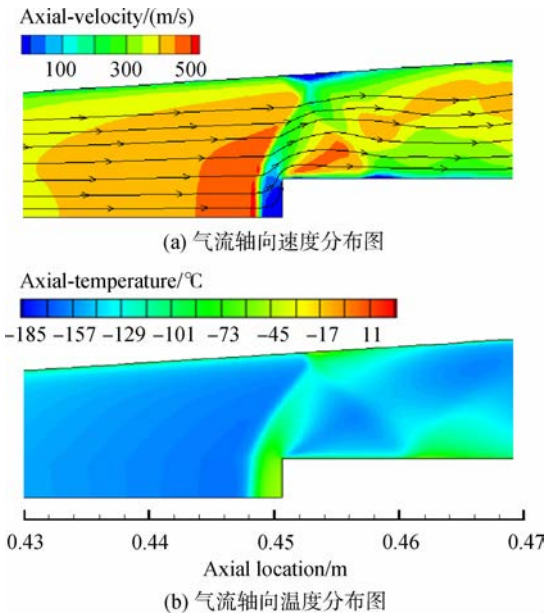


图 6 靶头附近 N_2 气流沿靶轴速度和温度分布图^[19]

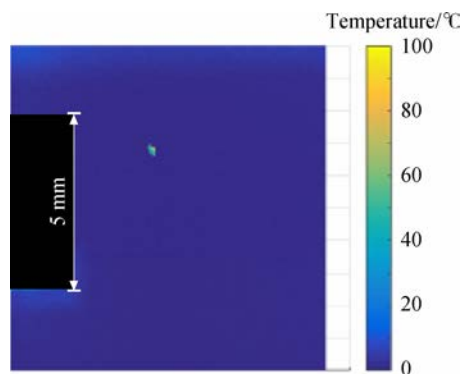
Fig.6 Axial-velocity and axial-temperature distribution of N_2 flow along the axial around target^[19]

径,可进一步估算荧光粒子撞靶前的速度。气流磨中的粒子速度计算方法在文献[20]中给出。根据实验条件,加速距离为 0.45 m、扩散角为 0° 、粒径为 $100\ \mu\text{m}$ 时,计算得到荧光粒子撞靶上的速度约为 127 m/s。但由于实验条件的限制,粒子的速度无法通过测量不同时间下粒子的位移计算得到(位移/时间)。当前飞行粒子撞靶前速度为 100 m/s 量级,横向视场范围为 1.4 cm 量级,需要测量 μs 量级时间间隔下粒子的飞行图像,才能保证两次测量下粒子的位移均在测量视场范围。由于当前脉冲激光器频率较低(最大频率为 30 Hz,对应激光脉冲间隔较长(大于 33.3 ms)),需要对一个激光脉冲内不同时间下粒子的位移进行测量才能获得速度信息。然而,罗丹明 B 荧光寿命太短(约 10 ns),粒子在荧光寿命内的位移小于 $1\ \mu\text{m}$,远低于系统的空间分辨率,因此无法对荧光粒子速度进行直接测量。

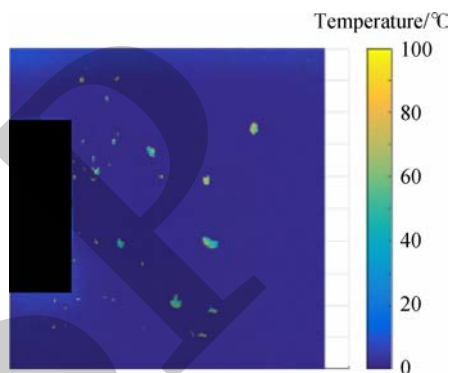
3.2 荧光粒子撞靶前后温度变化特征

利用测量系统对飞行的单荧光粒子温度进行测量,结果如图 7(a)所示。由于激光脉宽较窄且罗丹明 B 荧光寿命在 ns 量级,照片没有明显的拖尾现象。由于示踪粒子的荧光寿命较短(约为 10 ns),当前系统响应较慢(30 Hz),同时,当前系统无法捕捉同一个高速飞行粒子撞靶前后的图像。因此,通过持续往腔内添加荧光粒子,连续拍摄 200 张图像,将多次测量的粒子撞靶前后的平均粒径和温度分布绘制于图 7(b)中(粒子图像未重叠),以比较撞靶前后粒子的状态变化。结果如图 7(b)所示。粒子大小及温度在距离靶头不同位置存在明显差异。距离靶头大于等于 2 cm 范围外,粒子直径较大(平均直径约为 $200\ \mu\text{m}$),而距离靶头约 1 cm 范围内,粒子直径显著减小(直径小于等于 $100\ \mu\text{m}$),说明粒子在高速飞行撞击靶面,粒子发生碎裂。

由于罗丹明 B 染料均匀溶解于醋酸纤维粒子内部,因此碎裂后粒子的表面依然分布着温敏染料,撞靶前后粒子的温度均可以测量。根据测温结果,距离靶头较远区域(大于等于 2 cm)的平均温度约为 35°C 。比较仿真计算的气流速度与温度结果和实测粒子温度,粒子平均温度高于室温约 10°C ,远高于气流温度。考虑到粒子飞行速度很快,该现象可能由气动加热造成。而距离靶头 1 cm 范围内的小粒子的平均温度约为 90°C ,温度上升约 55°C ,远高于测量误差。该现象表明当粒子撞击靶面时,粒子发生碎裂,同时动能转化成



(a) 单荧光粒子温度分布



(b) 多个荧光粒子温度分布

图 7 荧光粒子温度分布图

Fig. 7 Temperature distribution of fluorescence particles

内能导致温度显著升高。

假设飞行粒子以速度 $v_1 = 127\ \text{m/s}$ 撞击靶面,并以速度 v_2 脱离靶面,假设粒子的动能全部转换为内能,粒子的温升 Δt 有

$$\frac{1}{2}(v_1^2 - v_2^2)m = cm\Delta t \quad (6)$$

其中 m 为粒子质量, c 为粒子的比热容(醋酸纤维约为 $1.464\ \text{J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$)。不考虑能量损耗,粒子撞靶后单位质量上动能损耗最大为 $8 \times 10^3\ \text{J/g}$ (此时 $v_2 = 0\ \text{m/s}$),而粒子实测温升约为 55°C ,单位质量上内能增长约为 $80\ \text{J/g}$ 。考虑到撞击后粒子仍然有一定的速度,且撞击过程中产生的热量能够扩散到靶面和周围空气中,因此粒子本身的内能增长远低于动能损耗。在下一步工作中,将在该系统上拓展粒子速度测量模块,以对测量结果进行进一步的定量分析。

4 结 论

本文基于温敏荧光测温的基本原理,提出一种荧光粒子测温方法,弥补了红外热成像测温方法在温度 $20 \sim 80^\circ\text{C}$ 低温段测量的短板。实验制备的罗丹明 B-醋酸纤维荧光材料具有良好的温

度灵敏度,可以制备成浓度均匀的荧光颗粒或荧光膜,具有包裹在其他待测颗粒上进行荧光示踪的潜力。根据 20~80℃ 温度范围下系统的测试结果,测温系统的视场范围为 1.4 cm×1.0 cm,空间分辨率为 10 μm,系统的荧光信号强度、温度灵敏度(80℃ 下温度系数为 $-0.0125^{\circ}\text{C}^{-1}$, 20℃ 下为 $-0.0379^{\circ}\text{C}^{-1}$)、测量精度均随温度的下降而上升,说明该系统在更低温度的测量中具有更高的潜力。靶式气流磨实验中,该系统能够清晰地拍摄到 450~500 m/s 高速气流下荧光粒子撞击靶面时的粒子本身的温度变化,能够为粒子撞击靶面的温度变化研究提供数据参考。然而,由于实验条件的限制,本系统仍然有很大的提升空间:首先,在温度标定中,通过扩大标定温度、更均匀地控制样品的温度,可进一步提升标定精度、扩大该技术在低温段的应用范围;其次,通过同步测量系统的采样频率和投放粒子的频率,可提升系统的采集效率并提升材料的利用效率,另外,通过使用长寿命的温敏磷光示踪剂以及改变两相机的触发时间,提升粒子的示踪能力和系统的响应频率,实现单粒子撞靶前后的状态分析,并进一步实现高速粒子温度和速度的实时测量,使系统具有更宽泛的应用范围。

参考文献:

- [1] ZHUANG Yaqing, CHEN Xiaomin, LUO Zhenghong, et al. CFD-DEM modeling of gas-solid flow and catalytic MTO reaction in a fluidized bed reactor[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2014, 60: 1-16.
- [2] FINCKE J R, SWANK W D, JEFFERY C L. Simultaneous measurement of particle size, velocity, and temperature in thermal plasmas[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1990, 18(6): 948-957.
- [3] LIU F, STAGG B J, SNELLING D R, et al. Effects of primary soot particle size distribution on the temperature of soot particles heated by a nanosecond pulsed laser in an atmospheric laminar diffusion flame[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, 49(3/4): 777-788.
- [4] CHILDS P R N, GREENWOOD J R, LONG C A. Review of temperature measurement[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(8): 2959-2978.
- [5] DREIER T, CHRYSTIE R, ENDRES T, et al. Encyclopedia of analytical chemistry[M]. New York: John Wiley and Sons, 2016.
- [6] CHAMARTHY P, GARIMELLA S V, WERELEY S T. Measurement of the temperature non-uniformity in a microchannel heat sink using microscale laser-induced fluorescence[J]. *International Journal of Heat and Mass*

- Transfer*, 2010, 53(15/16): 3275-3283.
- [7] SOMEYA S, LI Y, ISHII K, et al. Combined two-dimensional velocity and temperature measurements of natural convection using a high-speed camera and temperature-sensitive particles[J]. *Experiments in Fluids*, 2011, 50(1): 65-73.
- [8] SAKAUE H, MORITA K, TANAKA M, et al. Study of icing process using dual-luminescence imaging for aircraft-icing prevention[R]. AIAA-2014-0929, 2014.
- [9] SUTTON J A, FISHER B T, FLEMING J W. A laser-induced fluorescence measurement for aqueous fluid flows with improved temperature sensitivity[J]. *Experiments in Fluids*, 2008, 45(5): 869-881.
- [10] MISHRA Y N, ABOU N F, POLSTER S, et al. Thermometry in aqueous solutions and sprays using two-color LIF and structured illumination[J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 253552. 1-253552. 15.
- [11] GARCÍA-REVILLA S, FERNÁNDEZ J, ILLARRAMENDI M A, et al. Ultrafast random laser emission in a dye-doped silica gel powder[J]. *Optics Express*, 2008, 16(16): 12251-12263.
- [12] GAO Xiaoqing, HE Jiang, DENG Li, et al. Synthesis and characterization of functionalized rhodamine B-doped silica nanoparticles[J]. *Optical Materials*, 2009, 31(11): 1715-1719.
- [13] CELLINI F, PETERSON S D, PORFIRI M. Flow velocity and temperature sensing using thermosensitive fluorescent polymer seed particles in water[J]. *International Journal of Smart and Nano Materials*, 2017, 8(4): 232-252.
- [14] CHAROGIANNIS A, ZADRAZIL I, MARKIDES C N. Thermographic particle velocimetry (TPV) for simultaneous interfacial temperature and velocity measurements[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 97: 589-595.
- [15] DEMTRÖDER W. Laser spectroscopy basic concepts and instrumentation, third edition[M]. Berlin: Springer, 2003.
- [16] NAGL S, STICH M I J, SCHAFFERLING M, et al. Method for simultaneous luminescence sensing of two species using optical probes of different decay time, and its application to an enzymatic reaction at varying temperature[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2009, 393(4): 1199-1207.
- [17] ZHANG Zhao, LIN Jun, TAO Yang, et al. A supersonic target jet mill based on the entrainment of annular supersonic flow[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(8): 085104. 1-085104. 6.
- [18] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [19] TAO Yang, LIN Jun, ZHANG Zhao, et al. Theoretical study of the effect of instrument parameters on the flow field of air-flow impacting based mechanochemical Synthesis[J]. *International Journal of Chemical Engineering*, 2018, 2018: 1-6.
- [20] TAO Yang, LIN Jun, ZHANG Zhao, et al. Supersonic gas flow for preparation of ultrafine silicon powders and mechanochemical synthesis[J]. *Royal Society Open Science*, 2018, 5(11): 181432. 1-181432. 7.