

文章编号: 1005-5630(2022)03-0001-07

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2022.03.001

# 基于多光谱显微成像的颗粒表面温度分布测量

杨 娟<sup>1,2</sup>, 周 鹭<sup>1,2</sup>, 蔡小舒<sup>1,2</sup>, 沈中杰<sup>3</sup>, 刘海峰<sup>3</sup>

- (1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093;  
2. 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093;  
3. 华东理工大学 上海市煤气化工程技术研究中心, 上海 200237)

**摘要:** 分别采用彩色相机和多光谱相机构建辐射测温系统, 利用黑体炉进行温度模型标定实验, 并基于BP神经网络对标定数据进行训练得到测温模型。通过蜡烛火焰的温度测量实验, 验证了测温模型的可靠性, 且结果显示多光谱成像测温系统的测温精度高于彩色相机测温系统。针对常规辐射成像测温系统空间分辨率不足的问题, 采用多光谱相机结合显微镜搭建了显微测温平台, 对高温热台内的单石油焦颗粒燃烧过程进行记录, 得到了石油焦颗粒表面的温度分布以及随时间的温度变化过程。

**关键词:** 多光谱成像; 彩色成像; 温度分布测量; 显微热台; 单颗粒; 神经网络  
**中图分类号:** TK 16 **文献标志码:** A

## Measurement of particle surface temperature distribution based on multispectral microscopic imaging

YANG Juan<sup>1,2</sup>, ZHOU Wu<sup>1,2</sup>, CAI Xiaoshu<sup>1,2</sup>, SHEN Zhongjie<sup>3</sup>, LIU Haifeng<sup>3</sup>

- (1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;  
2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer for Power Engineering, Shanghai 200093, China;  
3. Shanghai Engineering Research Center of Coal Gasification, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract:** The radiation temperature measurement system was constructed by color camera and multispectral camera. The blackbody furnace was used to conduct the temperature calibration experiment, and the calibration data were used to obtain a temperature measurement model based on BP neural networks. The reliability of the temperature measurement model was verified by the temperature measurement experiment of a candle flame, and the results showed that the accuracy of the multispectral imaging temperature measurement system was higher than the color camera temperature measurement system. For the problem of insufficient spatial resolution of conventional radiometric temperature measurement system, a microscopic temperature measurement system was established using a hot stage microscope (HSM) and a multispectral imaging camera. The

收稿日期: 2022-02-13

基金项目: 国家科技重大专项 (2017-V-0016-0069); 国家自然科学基金(51327803、51576130)

作者简介: 杨娟 (1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为颗粒燃烧温度测量。E-mail: 17752721401@163.com

通信作者: 周鹭 (1986—), 女, 教授, 研究方向为图像法颗粒与两相流在线测量。E-mail: zhouwu@usst.edu.cn

combustion process of single petroleum coke particles inside the high-temperature hot stage was recorded. The temperature distribution on the surface of petroleum coke particles and the temperature change process with time were obtained.

**Keywords:** multispectral imaging; color imaging; temperature distribution measurement; hot stage microscope; single particle; neural network

## 引 言

温度测量是研究燃烧、气化等反应的基础实验手段。测温方法主要分为接触式测温和非接触式测温两大类<sup>[1]</sup>。非接触测温和被测量介质不直接发生接触,空间局限性较小、响应迅速、不破坏被测对象温度场,适合应用于高温温度场的测量。非接触式测温以辐射测温为代表,又可分为单色法、双色法、三色法以及多光谱测温方法等<sup>[2]</sup>。单色法测温受物体发射率影响较大<sup>[3-4]</sup>,双色法则一般基于灰体假设以减小发射率的影响<sup>[5-6]</sup>。Sawada 等<sup>[7]</sup>利用双色测温和高速蓝光成像技术观测到逆流燃烧器中挥发分和煤焦燃烧的过程,成功地实现了单颗粒煤粉表面燃烧温度测量。孙元等<sup>[8]</sup>通过实验对比分析了双色法和三色法测温的优劣,得出双色法测温动态范围更广,三色法测温精度更高。

随着光学技术不断发展,研究者们尝试使用多光谱手段进行温度测量研究。刘家汛等<sup>[9]</sup>基于多波长测温原理,使用光纤光谱仪减少波长有限的局限性,实现了煤粉颗粒温度以及辐射率的同步测量,但无法获得整个区域的温度。闫伟杰等<sup>[10-11]</sup>使用光谱仪和彩色相机相结合的方式,同时测量生物质颗粒火焰温度和发射率。Prader 等<sup>[12]</sup>利用显微镜结合高速红外相机获取固体表面多光谱辐射图像,测得了直径为 10 mm 的半透明固体表面温度分布。

基于普朗克定律,结合双色法测温以及多光谱测温原理,通过黑体炉分别对彩色相机和多光谱相机进行标定。为解决由于辐射测温精度受气体环境、被测固体颗粒灰度等因素带来的影响,本文通过 BP 神经网络对标定结果进行训练得出测温模型,且对比分析了两种测温模型的优劣。固体颗粒在常规燃烧器中,由于气流影响,很难使用成像设备完整的记录颗粒燃烧过程,且空间分辨率较低,为此采用多光谱成像系统结合显微

热台,得到了单颗粒石油焦着火过程中温度场的变化,实现了高分辨率微尺度测量,为进一步研究单颗粒物质燃烧特性提供了新方法。

## 1 测温基本原理

普朗克(Planck)定律给出了黑体辐射能量按波长分布的规律为:

$$E_b(\lambda, T) = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (1)$$

式中:  $E_b(\lambda, T)$  为黑体单色辐射强度,单位为  $W/m^3$ ;  $\lambda$  为波长,单位为  $m$ ;  $T$  为绝对温度,单位为  $K$ ;  $C_1$  为第一辐射常量( $3.7419 \times 10^{-16} W \cdot m^2$ );  $C_2$  为第二辐射常量( $1.4388 \times 10^{-2} m \cdot K$ )。

实际物体的辐射强度  $E(\lambda, T)$  总是小于同温度下黑体的辐射强度  $E_b(\lambda, T)$ , 两者的比值称为实际物体的辐射率(黑度), 记为  $\varepsilon(\lambda, T)$ , 即实际物体的辐射强度可以被表示为:

$$E(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) E_b(\lambda, T) \quad (2)$$

设相机图像传感器共有  $n$  种不同的传感像元, 即  $n$  个不同的波段响应通道, 第  $i$  个通道内相机的光强响应值  $V_i(\lambda, T)$  (即成像灰度) 可以表示为:

$$V_i(\lambda, T) = \int_{\lambda_{i1}}^{\lambda_{i2}} A_i(\lambda) E(\lambda, T) d\lambda \quad (3)$$

式中:  $A_i(\lambda)$  为相机  $i$  通道的光谱响应函数; 彩色相机和多光谱相机光谱特性曲线如图 1(a)、(b) 所示;  $\lambda_{i1}$ 、 $\lambda_{i2}$  分别为  $i$  通道起始波长。

由于辐射率是波长和温度的函数, 由式(2)和(3)可看出, 物体的温度与相机不同通道的成像灰度有着较复杂的对应关系。尤其是对彩色相机( $n=3$ )而言, 因为每个通道(R、G 和 B 三个通道)的光谱响应波长范围较宽(一般约 150 nm 宽), 而基于比色法测温时, 原则上需采用窄带滤光片

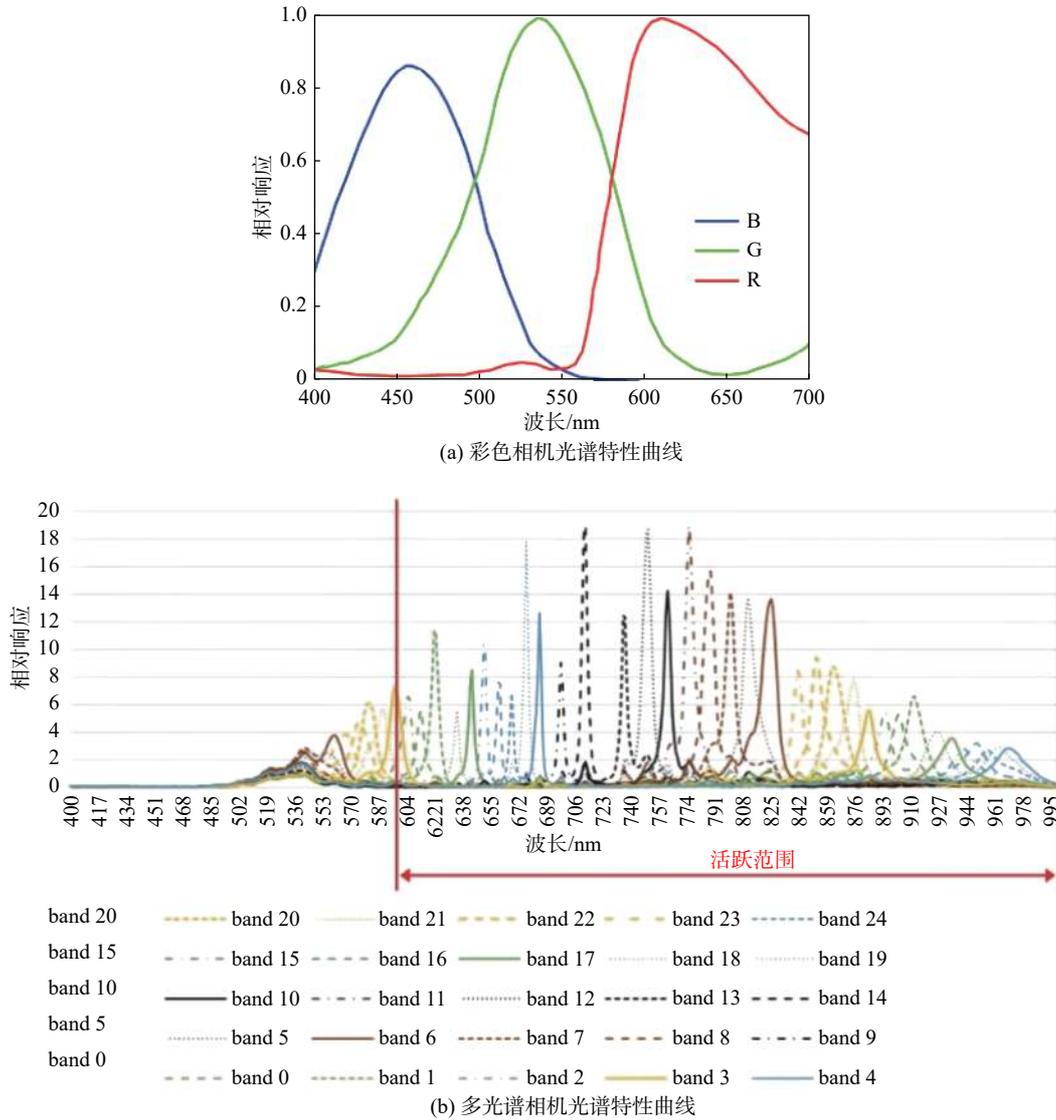


图 1 相机光谱响应曲线

Fig. 1 Spectral characteristic curve of camera

限制相应的波段范围, 且有研究表明最小二乘法测温精度低于 BP 神经网络<sup>[13]</sup>。本文基于双隐含层 BP 神经网络, 将  $n$  个不同响应通道的图像灰度值作为输入, 温度值作为输出, 并利用黑体炉数据进行训练和标定, 试图建立基于上述复杂对应关系的测温模型。BP 神经网络又称反向传播神经网络, 是一种按误差逆向传播训练的多层前馈网络<sup>[14]</sup>。BP 神经网络的计算过程包括正向计算和反向计算。正向传播过程是经隐含层逐层处理从输入层到输出层的过程, 每一层神经元的状态只影响下一层神经元。如果在输出层不能得到期望的输出, 则转入反向传播过程, 将误差信号沿

原来的连接通路返回, 通过修改各神经元的权值和阈值来最小化误差。它无论是在网络理论还是在性能方面都已比较成熟, 其突出优点是预测精度高、且具有较强的非线性映射能力和泛化能力。

## 2 模型标定及验证实验

### 2.1 模型标定实验

如图 2 所示, 采用黑体炉辐射系统对测温系统进行标定实验, 黑体炉型号为 HFY-203B, 温度可调范围为 773~1723 K, 温度分辨率为 1 K, 有

效发射率为 0.99。测温系统所采用的彩色相机型号为 GEV-B1411M-SC, 分辨率为  $1394 \times 1040$ , 像元大小为  $4.65 \mu\text{m}$ , 位深为 8 位。多光谱相机型号为 MQ022HG-IM-SM5, 分辨率为  $2048 \times 1088$ , 像元大小为  $5.5 \mu\text{m}$ , 位深为 10 位, 像元种类 25 个, 对应  $650 \sim 950 \text{ nm}$  总范围内 25 个不同光谱响应的波段区间, 每个区间宽度约  $10 \text{ nm}$ 。镜头使用透过光谱范围为  $425 \sim 1000 \text{ nm}$  的可见-近红外波段的定焦镜头。

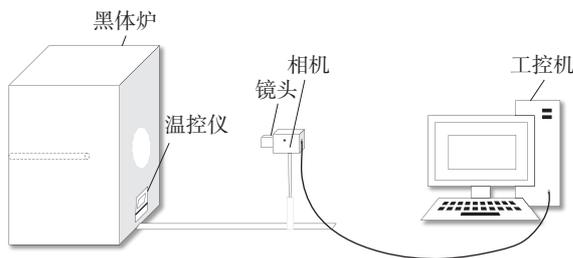


图 2 温度标定实验装置图

Fig. 2 Experimental setup for temperature calibration

标定实验的温度范围为  $1073 \sim 1473 \text{ K}$ , 每隔  $20 \sim 25 \text{ K}$  为一个测量数据点。为了获取更多的数据集, 待黑体炉温度稳定后, 我们对同一温度的黑体炉设置不同的曝光时间进行拍摄, 每组曝光时间拍摄 30 张图片, 共拍摄图片 6000 张。镜头聚焦于黑体炉内热电偶表面, 并对该区域相同通道的灰度值取平均, 得到 200 组原始数据。随机抽取 150 组数据作为训练集, 剩余 50 组作为预测集。输入值为不同通道下相机的灰度值, 经过 2 个隐含层, 每个隐含层含有 5 个节点, 输出值为对应黑体炉设定的温度值, 经过反向误差传播训练得到相应测温模型。

为确认彩色相机和多光谱相机响应的线性范围, 本文通过对白色发光板进行拍摄, 得到图像灰度随曝光时间的变化曲线如图 3 所示。彩色相机 R、G 和 B 波段的响应线性区分布为  $0 \sim 225$ 、 $0 \sim 240$  和  $0 \sim 230$ 。蔡小舒等<sup>[15]</sup>对煤粉燃烧火焰的辐射特性进行测量研究表明, 在波长小于  $550 \text{ nm}$  时火焰的辐射强度比较低, 且在本文实验中发现 B 通道的响应值太小, 即信噪比太低, 增大曝光时间以提高 B 值又会使 R 值饱和, 因此训练数据选用 R、G 两通道内的响应值作为输入, 并考虑到线性度问题, 取线性区间  $[10, 230]$  (图片位深为 8 位) 进行神经网络训练, 以保证温度

测量的准确性。多光谱相机也有类似的响应曲线, 本文选取的标定区间为  $[20, 950]$  (图片位深为 10 位)。

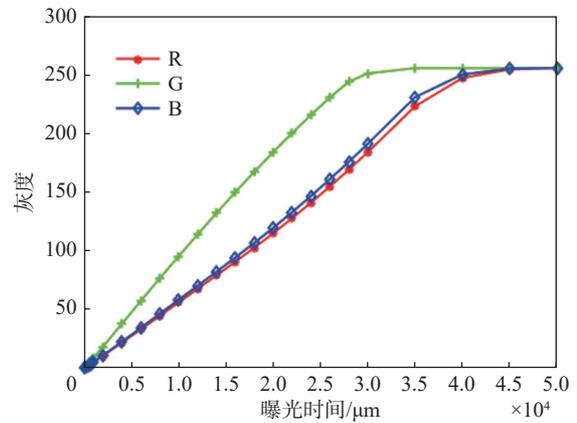


图 3 彩色相机灰度值随曝光时间变化曲线

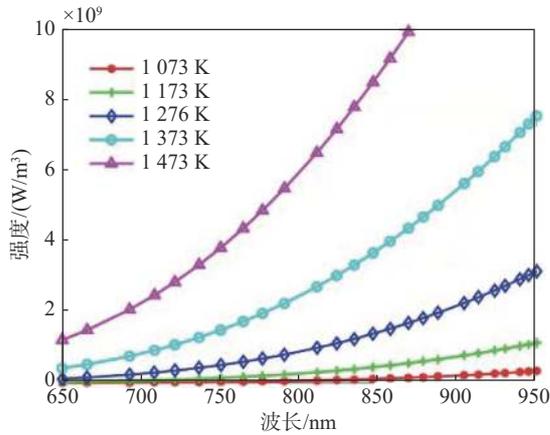
Fig. 3 Response curve of color camera

模型标定实验本质上就是对相机响应函数的标定, 本文以多光谱相机为例, 图 4(a)为黑体在不同温度下的理论辐射强度, 图 4(b)为标定实验得到的不同黑体炉温度下相机的响应灰度。由于多光谱相机的图像传感像元有 25 种, 分别对应  $600 \sim 950 \text{ nm}$  范围内的不同子区间, 由图 3 可知, 相机各像元的区间表观响应系数是不一样的, 强度趋势与理想黑体的辐射强度趋势一致, 且存在着比较复杂的非线性映射关系, 而 BP 神经网络模型可以高精度逼近任意非线性映射, 因此本文选用 BP 神经网络对温度和相机灰度的关系进行建模。

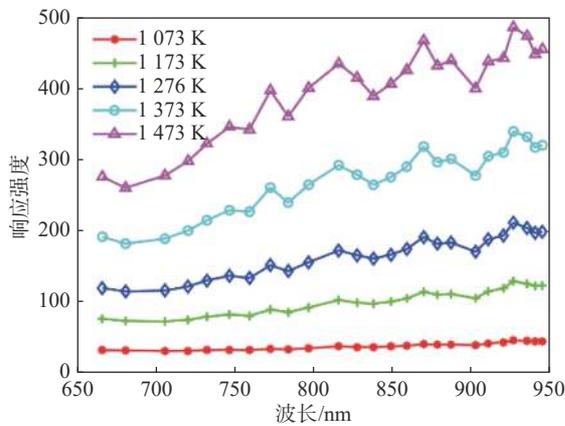
彩色相机测温系统和多光谱相机测温系统通过 BP 神经网络训练得到的预测结果及误差如表 1 所示。彩色相机测温系统最大误差为 1.64%, 平均相对误差为 0.82%; 多光谱相机测温系统最大误差为 0.43%, 平均相对误差为 0.18%。从 BP 神经网络预测结果来看, 其测温精度高于彩色相机测温系统, 但就成本而言, 彩色相机测温系统优于多光谱测温系统。

## 2.2 蜡烛温度测量

使用已标定好的多光谱相机测温系统对蜡烛火焰进行拍摄, 多光谱相机拍摄原图如图 5(a)所示。经过处理得到视线方向累计温度分布如图 5(b)所示, 与 Shan 等<sup>[16]</sup>使用彩色 CCD 对蜡



(a) 黑体在不同温度下的理论光谱辐射强度



(b) 多光谱相机标定实验得到的不同温度下各波段的相机响应强度

图 4 多光谱相机温度标定结果

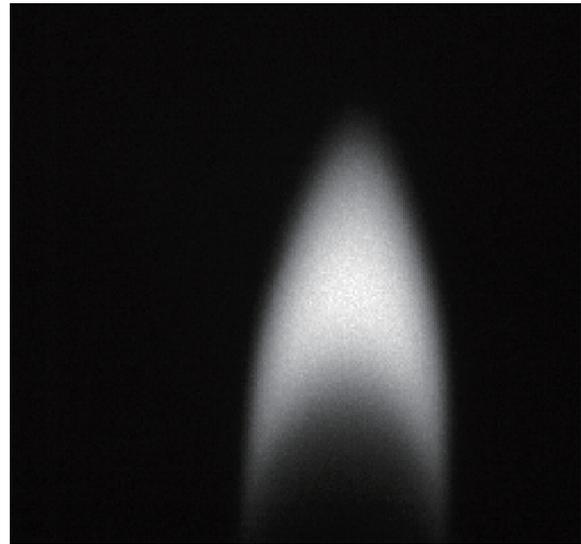
Fig. 4 Temperature calibration results of multispectral camera

表 1 BP 神经网络预测结果

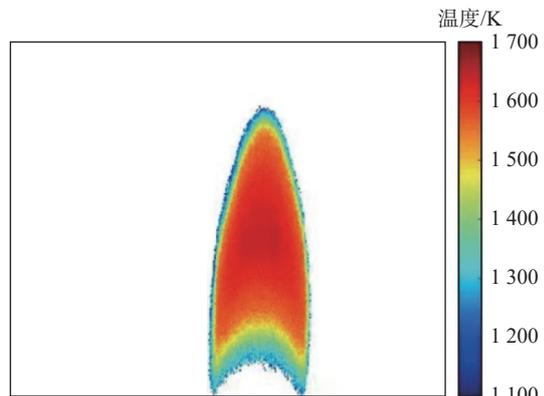
Tab. 1 Predicted results by BP neural network

黑体炉设定值 温度/K	彩色相机测温结果		多光谱相机测温结果	
	温度/K	相对误差/%	温度/K	相对误差/%
1073.15	1065.25	0.74	1073.15	0.27
1123.15	1113.72	0.84	1123.15	0.24
1173.15	1182.86	0.83	1173.15	0.32
1273.15	1294.01	1.64	1273.15	0.43
1313.15	1301.68	0.87	1313.15	0.03
1373.15	1383.92	0.78	1373.15	0.08
1413.15	1419.41	0.44	1413.15	0.04
1473.15	1466.81	0.43	1473.15	0.03

烛温度的测量结果相类似, 证明了测温模型的可靠性。



(a) 多光谱相机拍摄原图



(b) 测温结果

图 5 蜡烛温度测量结果

Fig. 5 Temperature measurement results of candle

### 3 基于显微热台的单石油焦颗粒燃烧温度测量

将多光谱相机与显微镜(型号 DM4500P, 物镜 Hcx-pl-fluotar, 放大倍率 10 倍)结合形成多光谱显微测温系统, 拍摄高温热台(型号 Linkam TS 1500, 温度范围: 室温~1773 K)内的石油焦颗粒的燃烧过程, 进行石油焦颗粒表面温度分布的测量。

#### 3.1 普通工业镜头与显微镜头测温对比实验

由于显微镜头工作距离过短, 无法对焦于黑体炉内部的定温区域, 即难以通过黑体炉进行温度标定实验, 本文采用普通工业镜头的多光谱测温系统的标定模型, 对实验工况 1223 K 和 1413 K

下不同测温系统的实验数据进行处理,普通工业镜头测温系统的结果为 1225.4 K 和 1414.3 K, 显微镜镜头测温系统的结果为 1198.9 K 和 1403.8 K, 即后者的测温结果偏差为 2%~3%, 可以接受。对测温系统的标定即是对相机响应系数的标定, 且实验中采用的显微镜镜头和普通工业镜头材质都是光学玻璃, 其光谱响应曲线基本相近, 因此可以采用前文标定获得的模型, 用于多光谱显微测温系统的测量。

### 3.2 单石油焦颗粒燃烧温度测量

在使用显微热台对石油焦颗粒燃烧温度测量实验前, 将石油焦颗粒置于干燥箱内恒温 50℃ 干燥 12 h 以上, 达到去除颗粒表面水分的目的, 冷却至室温后对颗粒进行筛分, 得到粒径为 170~250 μm 的石油焦颗粒。石油焦颗粒工业分析及元素分析结果如表 2、表 3 所示。

表 2 石油焦颗粒工业分析

Tab. 2 Proximate analysis of coke particle

M/ %	A/ %	V/ %	F/ %
0.71	2.03	7.99	89.27

表 3 石油焦颗粒元素分析

Tab. 3 Ultimate analysis of coke particle

C/ %	H/ %	N/ %	S/ %
91.63	3.46	1.68	2.78

实验中放入单颗粒石油焦后封闭热台, 对热台的气密性进行检查后通入 200 mL/min 的氮气排尽热台中的空气, 设置升温速率为 100 °C/min, 将热台温度升高至 1573 K 后在  $t=0$  s 时通入 100 mL/min 的空气, 石油焦颗粒开始燃烧, 过程中使用多光谱相机进行记录。

将采集到的图片信息代入到多光谱 BP 神经网络测温模型中, 得到单颗粒石油焦燃烧表面温度的分布如图 6 所示。由图 6 可知, 背景最高温度为 1737 K, 最低温度为 1402 K, 平均温度为 1567 K, 与设定的热台温度 1573 K 相近, 证明了上述测温模型的可靠性。由图可进一步看出, 背景为热台表面, 背景温度分布不均, 周围温度较高, 中间温度较低, 这是由于热台内加热电阻

丝缠绕在热台外圈所引起的。通入空气后, 石油焦颗粒迅速燃烧, 燃烧过程中温度随时间的推移逐渐上升, 直至  $t=5$  s 时燃尽, 且开始燃烧时最低温度为 1500 K, 燃尽时温度为 1800 K。前人研究表明, 石油焦颗粒的燃烧与环境温度、环境氧浓度和颗粒粒径有关, 环境温度越高、颗粒粒径越大着火越容易<sup>[17]</sup>。如图 6 所示, 位于热台中心的颗粒与热台边缘环境温度较高处的颗粒相比, 边缘处的颗粒着火更快, 燃尽时间更短, 但粒径越小的石油焦颗粒着火更容易, 这是因为本文在热台温度升高至 1573 K 之前未通入氧气, 挥发分在无氧高温的环境中充分析出, 水分子气化, 通入氧气使燃烧更加剧烈。

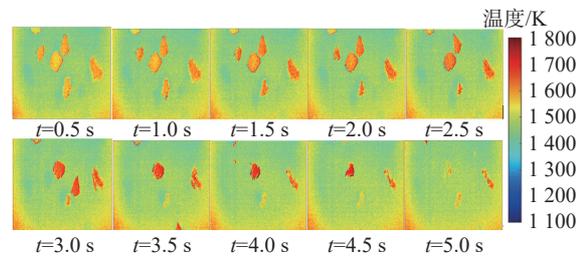


图 6 石油焦颗粒燃烧时表面温度分布

Fig. 6 Surface temperature distribution of petroleum coke particles during combustion

## 4 结 论

本文基于双隐含层 BP 神经网络构建了彩色成像和多光谱成像的测温模型, 使用黑体炉进行了标定, 实验表明更多通道的多光谱成像系统预测温度精度更高。通过蜡烛测温实验, 得到了视线方向上蜡烛火焰温度的分布, 与前人测温结果一致, 进一步验证了多光谱测温模型的可靠性。将普通工业镜头的标定数据迁移至显微镜镜头, 用于显微热台下石油焦颗粒表面温度测量, 得到了石油焦颗粒表面的温度分布及随时间的变化过程, 为细微单颗粒物燃烧特性的实验研究提供了参考。

### 参考文献:

- [1] 王魁汉. 温度测量技术的现状及展望 (上)[J]. 基础自动化, 1997(1): 1-6.

- [2] 王文革. 辐射测温技术综述 [J]. 宇航计测技术, 2005, 25(4): 20 – 24,32.
- [3] 周怀春, 娄新生, 尹鹤龄, 等. 单色火焰图像处理技术在锅炉燃烧监控中的应用研究 [J]. 电力系统自动化, 1996, 20(10): 18 – 22.
- [4] MANCA D, ROVAGLIO M. Infrared thermographic image processing for the operation and control of heterogeneous combustion chambers[J]. *Combustion and Flame*, 2002, 130(4): 277 – 297.
- [5] INAGAKI T, ISHII T. On the proposal of quantitative temperature measurement by using three-color technique combined with several infrared sensors having different detection wavelength bands[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2000, 41(6): 325 – 337.
- [6] 张锐锋, 李恩普, 候建平, 等. 用于声悬浮物体的光纤比色温度计设计 [J]. 红外技术, 2008, 30(3): 173 – 175.
- [7] SAWADA S, OKADA D, NAKATSUKA N, et al. Time-series temperature measurement during combustion of volatile matter and coal char of a single pulverized coal particle via magnified two-color pyrometry with blue backlit imaging[J]. *Energy & Fuels*, 2020, 34(10): 12918 – 12925.
- [8] 孙元, 彭小奇. 基于彩色 CCD 的双色与三色比色测温法比较研究 [J]. 传感技术学报, 2015, 28(8): 1184 – 1187.
- [9] 刘家汛, 蔡小舒, 朱赠好. 火焰光谱测温法的改进 [J]. 工程热物理学报, 2013, 34(12): 2384 – 2387.
- [10] YAN W J, LI K Y, HUANG X L, et al. Online measurement of the flame temperature and emissivity during biomass volatile combustion using spectral thermometry and image thermometry[J]. *Energy & Fuels*, 2020, 34(1): 907 – 919.
- [11] 闫伟杰, 李框宇, 于凌波, 等. 基于自辐射光谱的火焰温度和碱金属释放特性同时检测 [J]. 燃烧科学与技术, 2020, 26(3): 242 – 247.
- [12] PRADERE C, RYU M, SOMMIER A, et al. Non-contact temperature field measurement of solids by infrared multispectral thermotransmittance[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 121(8): 085102.
- [13] 孙志远, 李孟华, 乔彦峰, 等. BP 神经网络在比色法测温系统标定中的应用 [J]. 激光与红外, 2007, 37(12): 1274 – 1277.
- [14] 孙晓刚, 戴景民, 褚载祥, 等. 基于神经网络的多光谱测温方法研究 [J]. 红外技术, 2001, 23(2): 35 – 37,40.
- [15] 蔡小舒, 罗武德. 光谱法测量煤粉火焰温度和黑度的研究 [J]. 工程热物理学报, 2000, 21(6): 779 – 782.
- [16] SHAN L, HUANG H Y, HONG B, et al. Temperature measurement method of flame image fusion with different exposures[J]. *Energies*, 2020, 13(6): 1487.
- [17] 石九菊, 周勇敏, 周全. 石油焦悬浮燃烧燃烬率的理论分析 [J]. 化学工程, 2011, 39(10): 51 – 55,72.

(编辑: 钱紫衡)