基于图像识别的烧结矿落料温度拟合模型

包向军[1]，刘钟腾[1]，张晓萍[2]，张 璐[1]，陈 光[1]，王诗歌[1]
（1. 安徽工业大学 能源与环境学院，安徽 马鞍山 243002；2. 马鞍山钢铁股份有限公司，安徽 马鞍山 243000）

摘要：烧结矿落料温度是判断烧结终点、评价烧结矿质量、影响烧结余热回收效率的重要参数。针对烧结矿落料温度检测受现场环境限制，测温难度大、不稳定、精度差等问题，本文通过试验模拟烧结现场的环境条件，使用红外热成像设备提取试验图像数据作为训练样本，并使用热电偶进行温度校准作为测试样本，提出一种基于图像识别的非接触式烧结矿落料温度特征提取方法，分别建立直接拟合模型和分步拟合模型。对比分析结果表明：与测试组数据相比，基于图像特征的烧结矿温度直接拟合模型误差为 3.51%，均方根误差为 28.24；采用明度值拟合辐射能量再拟合烧结矿落料温度的分步拟合模型的误差为 2.10%，均方根误差为 17.21。采用基于图像识别的烧结矿落料温度分步拟合模型结果更稳定且精度更高，该模型对于提高烧结矿落料温度检测的准确性和稳定性具有重要的应用价值，对于优化烧结过程控制、提高余热回收效率具有潜在的推动作用。

关键词：烧结矿；温度；图像识别；最小二乘法；分步拟合
中图分类号：TF046.4；TP183 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)05－0110－07
doi：10.13403/j.sjqt.2024.05.082

Sinter blanking temperature fitting model based on image recognition

BAO Xiangjun[1], LIU Zhongteng[1], ZHANG Xiaoping[2], ZHANG Lu[1],
CHEN Guang[1], WANG Shige[1]
(1. School of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, Anhui, China;
2. Ma'anshan Iron & Steel Company Ltd., Ma'anshan 243000, Anhui, China)

Abstract: Sinter blanking temperature is an important parameter for judging the sintering endpoint, evaluating the quality of sinter, and affecting the recovery efficiency of sintering waste heat. In order to solve such problems as sinter blanking temperature detection limited by the on-site environment, difficult temperature measurement, instability and poor accuracy, the environmental conditions of the sintering site are simulated by experiments, the test image data are extracted by infrared thermal imaging equipment as the training sample, the thermocouples are used for temperature calibration as the test sample, a non-contact sinter blanking temperature feature extraction method is proposed based on image recognition, and the direct fitting model and the step-by-step fitting model respectively are established. The results show that compared with the data in the test group, the error of the direct fitting model of sinter temperature based on image features is 3.51% and the root mean square error is 28.24, and the error of the step-by-step fitting model of fitting radiant energy and then fitting sinter blanking temperature by luminosity value is 2.10%, and the root mean square error is 17.21. The step-by-step fitting model based on image recognition is more stable and accurate, which has important application value for improving the accuracy and stability of sinter blanking temperature detection, and has a potential role in optimizing the sintering process control and improving the waste heat recovery efficiency.

Key words: sinter; temperature; image recognition; least square law; step-by-step fitting

收稿日期：2023－11－06；**修回日期**：2024－01－30
基金项目：安徽高校自然科学研究项目(KJ2021A0411)
作者简介：包向军(1972—)，男，副教授，从事冶金过程节能环保方面的研究工作。
通信作者：张晓萍(1982—)，女，高级工程师，从事低碳、低成本炼铁工艺技术等方面的研究。

烧结与冷却系统界面处烧结矿落料温度是判断烧结终点、评价烧结矿质量、影响烧结余热回收效率的重要参数，是烧结系统热风循环及余热利用的重要前提，其精确测量具有实际意义[1-2]。但受落料现场的高温环境限制，高精度接触式测温装置不能直接应用于温度检测，导致该参数检测始终存在稳定性差、精度不高等问题。针对高温物料，目前大部分采用的是红外测温的方法。许永华等[3]提出了一种基于红外图像处理的高炉温度场检测方法，通过红外图像处理来建立温度场分步模型，结合十字测温进行温度定标提高了高炉温度场分步检测的精度。孔明等[4]提出了一套 ARM 火焰温度红外测量系统，通过双光路图像采集模块提高了图像灰度采集精确度，提高了温度图像的识别精度。但与普通的高温物料不同，烧结矿落料除温度高外，还伴随产生的高温烟气和粉尘，会大大影响红外热成像设备的检测精度，所以采用红外测温的结果稳定性差，且不能准确地反应烧结矿落料温度[5-8]。

近年来兴起的计算机视觉识别与处理技术已经在多个研究领域中广泛应用，并应用于实际工程中。随着电荷耦合器件图像传感器(charge coupled device，CCD)的发展，基于图像识别的高温物料温度预测研究受到许多学者重点关注。YU 等[9]发现短波红外数据同样具有较好的高温目标识别能力；AZAMI 等[10]通过非接触式温度测量技术，使用 CCD 相机记录的像素亮度变化来研究温度波动；HÖHMANN 等[11]使用微观尺度温度测量技术，采用 CCD 相机和显微镜记录对温度敏感的液晶晶体的颜色变化。SUTTER 等[12]基于温度测量技术在可见光谱范围内的辐射测温原理，使用短曝光时间的增强型 CCD 相机和 0.8 μm 干涉滤波器，确定切割速度和切屑厚度对切屑中温度剖面的影响。毛尹航[13]根据温度与图片灰度值之间的关系，通过最小二值化拟合的方法建立了温度与比色温度的数学模型，实现了温度的图像识别。莫苏新[14]通过控制曝光时间来进行目标温度的分段测量，解决了图像温度识别范围较窄的问题。BÜNGER 等[15]对单色 CCD 相机安装窄带滤光片，经过黑体标定后对 1 200 K 以上的温度进行测量。任建新[16]基于 CCD 相机，提出针对烟气遮蔽环境的图像温度测量模型，从而提高了对锅炉过热器温度场的测量精度。上述研究均应用图像识别技术将图像特征与温度进行拟合，为温度图像识别提供了理论支持。

由于烧结矿自身温度较高，其在落下过程中产生的烟尘温度相对低。在红外热像仪拍摄的图像中可明显分辨出烧结矿，有利于烧结矿温度的图像识别。此外，烧结矿落料窗口摄像头采集的大量可见光图像，可为烧结矿温度图像识别提供数据支持。因此，本文基于烧结矿落料特征，结合试验结果与理论分析，提出一种基于图像识别的烧结矿落料温度拟合方法；通过图像特征提取，结合辐射能量，建立不同的拟合模型，对比分析模型的精度和稳定性，确定合理方法，以期为烧结矿落料温度的精准检测提供指导。

1　试验系统与方法

1.1　试验装置与平台

烧结矿图像特征可表征烧结矿温度，因此需要通过试验获取不同温度下烧结矿可见光图像的图像特征与温度数据。使用型号为 FLUKE TIX660 的红外热成像仪采集不同温度下烧结矿的图像以及温度数据，并结合热电偶直接测量获得烧结矿表面的真实温度，对采集的温度数据进行校正。采用计算机图像识别技术对采集到的图像进行处理，提取图像特征，并将相关特征数据存入服务器中组成数据库，用于烧结矿落料温度拟合，并进行误差分析。试验流程如图 1 所示。

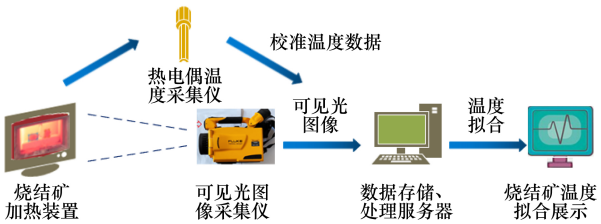


图 1　烧结矿落料温度拟合试验系统流程

Fig. 1　System process of sinter blanking temperature fitting test

按温度梯度将试验采集到的代表性图像分为训练样本和测试样本，其中：训练样本为 30 个，最高温度为 818.6 ℃，最低温度为 548.9 ℃，平

均温度为 664.7 ℃；选取 50 张图像作为测试样本，进行烧结矿温度图像拟合验证，测试样本中最高温度为 889.8 ℃，最低温度为 577.9 ℃，平均温度为 719.4 ℃。

训练样本数据进行烧结矿温度最小二次拟合，将校正后的温度数据导入计算平台进行最小二乘公式拟合，确定拟合系数；测试样本数据用来分析拟合温度与实际温度的误差，验证拟合方案的可行性及精确度。

1.2 可见光图像特征提取

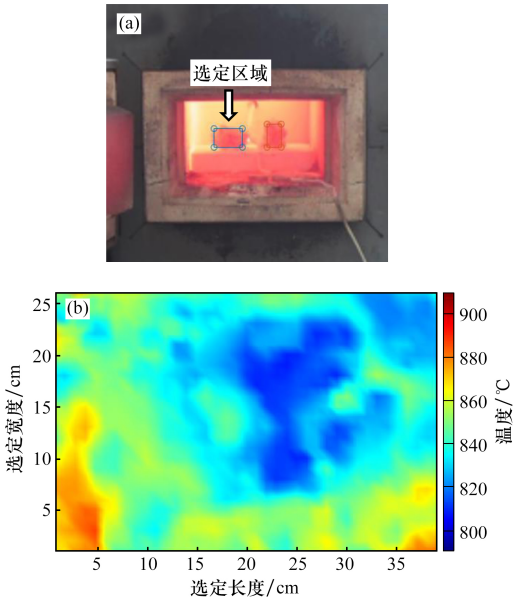
完成图像采集工作之后，需要进行图像预处理。预处理的主要任务是提取可见光以及红外光图像中烧结矿区域的图像灰度数据以及温度数据。可见光图像成像原理：感光芯片接收物体发射出的红、绿、蓝颜色波长范围的辐射能量后，将辐射能量转化为电信号，再经过模数转换成数值图像进行存储。

本文通过计算机平台编程批量提取可见光图像中烧结矿区域的灰度数据（R、G、B 分别代表每个颜色通道的强度，值的范围从 0 到 255，无量纲）。明度值（L，无量纲）与灰度值图像特征密切相关，是表征图像的关键分析要素。可使用明度值映射温度，作为烧结矿温度拟合的重要分析因素。因此，本文将三个通道的值综合考虑，计算出图像的明度值，用来表示相对于某个参考值的亮度级别。明度计算公式[17]如下。

$$L=\sqrt[2.2]{\frac{\left(\frac{R}{255}\right)^{2.2}+\left(1.5\frac{G}{255}\right)^{2.2}+\left(0.6\frac{B}{255}\right)^{2.2}}{1+1.5^{2.2}+0.6^{2.2}}} \tag{1}$$

通过上述公式可以实现可见光图片图像特征与明度之间的转换。这种转换方法考虑到了辐射能量与图像灰度值之间的关系，有利于明度值与温度之间的拟合。

由于不同图片区域的温度不同，实际需要采用人工标定的方式选定可见光图像中的烧结矿区域。可见光图像选定区域为[279,221,38,25]、[350,215,19,31]，向量中前两个数据为矩形框左上角坐标（x、y），后两个数据为矩形框的宽和高。烧结矿选定区域温度示意如图 2 所示。利用烧结矿选定区域的图像或温度数据进行计算时，需要将二维烧结矿图像转化为一维像素点进行提取图像特征。烧结矿选定区域为 26×39 分辨率的矩形区域，共有像素点 1 014 个。图 2(b)中红色部分为高温区，蓝色部分为低温区。烧结矿选定区域的最高温度为 889.8 ℃，最低温度为 807.9 ℃。



（a）可见光选定区域；（b）烧结矿选定区域温度分布

图 2 烧结矿选定区域温度示意

Fig. 2 Temperature schematic of the selected area of sinter

1.3 烧结矿温度拟合模型的建立

使用计算平台的最小二乘法对训练样本中的烧结矿图像特征与温度进行公式拟合，将拟合得到的公式进行误差验证，再使用拟合公式对测试样本中烧结矿的图像进行温度预测，并与实际温度进行误差分析。本文提出如下两种拟合模型。

（1）直接拟合模型。从图像特征与温度之间相关规律出发，使用最小二乘法，采用图像的 R、G、B 灰度数据以及 L 等各分量进行直接温度拟合，降低拟合函数的复杂程度。

（2）分步拟合模型。先采用 R、L 值进行辐射能量拟合，然后采用辐射能量进行温度拟合。采用分步拟合的原因是温度与物体辐射能量存在函数关系，而图像灰度值也与物体辐射的能量有关，因此将物体辐射能量值作为中间值进行拟合。

首先将图像特征与辐射能量值进行拟合，再使用辐射能量值拟合温度值。将像素点温度代入

普朗克定律，并在可见光波段进行积分后即可得到辐射能量。表达式如下。

$$E(\lambda,T)=\int_{0.43}^{0.78}\frac{C_1\lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}}-1}\mathrm{d}\lambda \tag{2}$$

式中：$E(\lambda,T)$是波长为 λ(m)的可见光在温度 T 下的辐射能量，J/m^3；C_1、C_2 为常数。

分步拟合模型从物体辐射规律以及成像原理出发，使用最小二乘法对各分量到辐射能量、辐射能量到温度的过程进行拟合，增加了中间拟合变量，拟合函数较复杂但预测精度提高，拟合关系式如下。

$$E(R)=ae^{dR}+ce^{dR} \tag{3}$$

$$E(L)=aL^b+c \tag{4}$$

$$T(E)=aE^b+c \tag{5}$$

式中：a、b、c、d 均是最小二乘公式拟合系数，为无量纲常数。

2　结果与讨论

2.1　直接拟合模型

将提取出的 R、G、B 图像特征分别与烧结矿落料温度进行最小二乘拟合，得到公式拟合系数和公式拟合误差，对比分析不同图像特征的温度拟合误差。

（1）公式拟合误差。基于 30 个训练样本的 R、G、B 分量以及 L 与温度拟合公式的系数及误差如表 1 所示。由表 1 可以看出，R 分量、L 与温度拟合均方根误差较小，分别为 14.810 9 和 18.331 2，说明这两个参数与温度拟合效果较好。分析原因认为，随着物体温度的升高，最大辐射能量波长向可见光范围移动，此时摄像机接收到不同物体温度辐射的红色波段能量大，温度变化可以被感光器分辨出。因此，R 分量的温度预测效果较好，后续采用 R 分量与 L 进行分步拟合。

（2）温度预测误差。根据上述拟合公式对烧结矿的温度进行求解，得到预测温度与真实温度对比如图 3 所示。由图 3 可以看出，R 分量预测出的温度值更高，并且随温度波动的幅度较小，但明度值 L 的波动趋势与温度一致，其对温度变化比较敏感。将 50 个预测数据分为 5 组进行平均值统计，得到 R 分量、L 拟合公式的预测温度平均值如表 2 所示。由表 2 可以看出，采用 R 分量与 L 计算的温度均高于真实温度值，但 L 拟合公式计算出的温度与真实值更接近。综上，L 预测温度的误差更小，灵敏度更高，温度拟合效果更好。

R、G、B 分量以及 L 与温度拟合公式的温度预测误差如表 3 所示。由表 3 可以看出：R 分量的温度预测效果最佳，误差仅为 3.17%；G 分量的温度预测效果最差，误差为 13.04%。

综上，R 分量在温度预测上表现出较高的精度，但其预测值普遍偏高，且适用的温度范围有限；相比之下，尽管 L 的拟合精度略低，但其对温度变化更敏感，可以测量出温度的微小变化，其预测结果与实际温度的变化趋势更为一致。

2.2　分步拟合模型

将上述直接拟合模型中拟合结果较好的 R 特征和明度值进行分步拟合，将 R 分量与辐射能量进行拟合，采用辐射能量进一步拟合烧结矿温度；明度值也进行相同拟合，对比分析 R 特征和明度值作为不同输入参数的分步拟合误差。

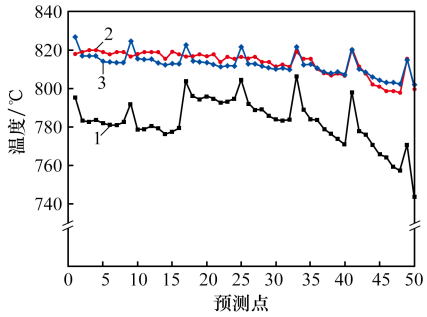
（1）公式拟合误差。采用 R 分量及明度拟合物体辐射能量，并利用辐射能量拟合温度的分步拟合函数系数及误差如表 4 所示。由表 4 可以看出，明度与辐射能量值拟合的误差较小，不难看出L更能反映物体辐射能量规律。将各分量转换

表 1　不同分量与温度拟合公式系数及误差

Table 1　Formula coefficient and error table of different components and temperature

变量名称	拟合系数				误差类型	
	a	b	c	d	R^2	RMSE
R 分量	684.50	0.000 717 5	−204.6	0.093 78	0.958 7	14.810 9
G 分量	919.20	0.000 943 1	−349.4	−0.056 43	0.540 5	49.406 9
B 分量	1 023.00	−0.002 972 0	−621.8	−0.052 42	0.873 2	25.956 8
L 值	−3 368.00	−0.487 600 0	1 100.0	—	0.936 7	18.331 2

注：R^2 为预测值与实际值的残差平方和，RMSE 为预测值与实际值的均方根误差。



1—真实值；2—*R* 分量；3—明度值。

图 3 预测温度与真实温度对比

Fig. 3 The predicted temperature versus the real temperature

表 2 *R* 分量、明度值 *L* 拟合公式的平均预测温度

Table 2 Average value of predicted temperature by fitting formula for *R* and brightness(*L*) value ℃

预测点	平均温度		
	真实值	*R* 预测值	*L* 预测值
1 ~ 10	784. 23	818. 64	817. 19
11 ~ 20	786. 19	817. 71	814. 58
21 ~ 30	791. 96	815. 13	812. 73
31 ~ 40	783. 00	811. 34	811. 00
41 ~ 50	768. 36	805. 28	807. 45

表 3 不同分量温度拟合公式预测温度的误差

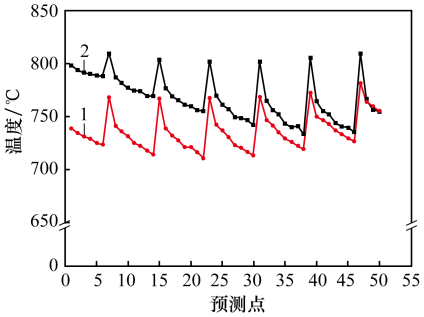
Table 3 Temperature error predicted by temperature fitting formulas

误差类型	*R*	*G*	*B*	*L*
ME/%	3. 170 0	13. 040 0	8. 290 0	3. 510 0
RMSE	25. 204 2	104. 620 7	64. 149 9	28. 238 1
R^2	0. 888 3	0. 207 5	0. 530 6	0. 859 5

注：ME 为预测值与实际值的平均相对误差。

为辐射能量后，辐射能量值与温度的拟合关系固定。因此，分步拟合温度预测方案的误差主要取决于各分量辐射能量的预测误差。

（2）温度预测误差。根据上述拟合公式对烧结矿的温度进行求解，得到明度温度预测值与真实值对比如图 4 所示。由图 4 可以看出，采用明度分步拟合方式计算出的温度预测值大于真实值，但是预测值与真实值的波动趋势相同，并且随着温度的升高，真实值与预测值的误差逐渐减小，说明拟合函数在高温区的预测更加准确。



1—真实值；2—预测值。

图 4 明度温度预测值与真实值对比

Fig. 4 The lightness temperature prediction versus the true value

R、明度分量分步拟合公式预测温度误差如表 5 所示。由表 5 可知，*R* 分量通过拟合函数计算辐射能量时出现了负值，与实际规律不符。因此，去掉 *R* 分量拟合温度的分步拟合方案。在明度分步拟合方案中，预测温度的误差由 3. 51% 下降至 2. 10%，预测精度更高；温度的均方根误差由 28. 238 1 下降至 17. 209 8，说明预测温度与真实温度偏差更小，该方案温度预测更加稳定；R^2 系数由 0. 859 5 提高到 0. 946 5，说明分步拟合结果更符合温度变化规律。分析原因认为：分步拟合方案将辐射能量作为中间变量，由辐射能量公式可知，该方案将可见光图片的像素点温度带入普朗克定律，然后对可见光波段进行积分，充分展现了可见光图片的图像特征。而辐射能量与物料温度符合斯特藩 - 玻尔兹曼定律，即物体的温度

表 4 *R* 分量及明度分步拟合公式系数及误差

Table 4 Error table of *R* and *L* value distribution fitting formula

拟合类型	拟合步骤	拟合系数				误差类型	
		a	*b*	*c*	*d*	R^2	RMSE
R 分量拟合	*R*—辐射能量	0. 228	0. 011 0	- 0. 57	- 0. 089 7	0. 863 4	0. 518 7
	辐射能量—温度	548. 100	0. 097 5	202. 90	—	1. 000 0	0. 094 4
L 拟合	*L*—辐射能量	3.558×10^{-7}	3. 173 0	- 0. 02	—	0. 917 4	0. 403 4
	辐射能量—温度	548. 100	0. 097 5	202. 90	—	1. 000 0	0. 094 4

表 5　*R*、明度分量分步拟合函数预测温度误差

Table 5　Error prediction by *R* and brightness component distribution

误差类型	*R* 分量分步拟合		*L* 分量分步拟合	
	R—辐射能量	辐射能量—温度	*L*—辐射能量	辐射能量—温度
ME/%	252.24	49.93	16.00	2.10
RMSE	0.313 7	415.313 6	0.269 1	17.209 8
R^2	0.589 1	−0.904 5	0.698 8	0.946 5

决定了它的热辐射能力，辐射能量强度主要是由物体的温度决定。高温物料反馈辐射能量的精度更高，因此研究烧结矿落料温度时采用明度拟合辐射能量再拟合温度的模型精度较高。

3　结　论

（1）针对烧结矿温度图像识别问题，通过分析可见光成像原理找出图像与温度之间的关系，对比分析烧结矿落料温度直接拟合模型和分步拟合模型。采用图像提取出的灰度值与烧结矿落料温度直接拟合模型时，平均拟合误差为 3.17%；均方根误差为 25.204 2，拟合误差相对较高，稳定性相对较差。

（2）首先采用明度值拟合辐射能量，再进一步预测烧结矿温度的分步拟合模型，表现出对温度变化更好的适用性和更高的灵敏度。与图像特征直接拟合温度相比，分步拟合模型得到的烧结矿温度误差由 3.51% 下降至 2.10%，温度的均方根误差由 28.238 1 下降至 17.209 8，识别烧结矿温度更稳定且精度更高。

参考文献：

[1] 丁晖，王宏元，徐冰，等．双系统耦合平衡法在线计算烧结冷却机漏风率[J]．烧结球团，2021，46(6)：43－48.
DING Hui，WANG Hongyuan，XU Bing，et al. Online calculation of air leakage rate of sintering cooler with dual-system coupling balance method[J]. Sintering and Pelletizing，2021，46(6)：43－48.

[2] 王双，徐冰，陈光，等．烧结冷却机循环热风接入点优化模拟研究[J]．烧结球团，2022，47(4)：83－91；98.
WANG Shuang，XU Bing，CHEN Guang，et al. Simulation research on optimization of circulating hot air access point of sintering cooler[J]. Sintering and Pelletizing，2022，47(4)：83－91；98.

[3] 许永华，吴敏，曹卫华，等．高炉温度场的红外图像识别检测方法及应用[J]．控制工程，2005，12(4)：354－356.
XU Yonghua，WU Min，CAO Weihua，et al. Measurement of the temperature profile based on infrared image processing and its application in blast furnace[J]. Control Engineering of China，2005，12(4)：354－356.

[4] 孔明，杨明，郭天太，等．基于 ARM 的火焰温度图像测量系统[J]．中国测试，2018，44(7)：88－92；104.
KONG Ming，YANG Ming，GUO Tiantai，et al. Flame temperature image measurement system based on ARM[J]. China Measurement & Test，2018，44(7)：88－92；104.

[5] 匡可涵．红外测温系统设计[J]．自动化应用，2021(5)：22－24.
KUANG Kehan. Design of infrared temperature measurement system[J]. Automation Application，2021(5)：22－24.

[6] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems，Man，and Cybernetics，1979，9(1)：62－66.

[7] 段毅，包向军，徐俊超，等．不同级数烧结电场除尘灰的理化特性分析[J]．烧结球团，2022，47(2)：96－100；109.
DUAN Yi，BAO Xiangjun，XU Junchao，et al. Analysis on physicochemical properties of sintered electric field fly ash with different stages[J]. Sintering and Pelletizing，2022，47(2)：96－100；109.

[8] 魏晓伟．热风炉红外测温监测系统的应用[J]．设备管理与维修，2021(15)：144－146.
WEI Xiaowei. Application of infrared temperature monitoring system for hot blast stove[J]. Plant Maintenance Engineering，2021(15)：144－146.

[9] YU Y F，PAN J，XING L X，et al. Identification of high temperature targets in remote sensing imagery based on factor analysis[J]. Journal of Applied Remote Sensing，2014，8(1)：083622.

[10] AZAMI T，NAKAMURA S，HIBIYA T. Observation of periodic thermocapillary flow in a molten silicon bridge by using non-contact temperature measurements[J]. Journal of Crystal Growth，2001，231(1/2)：82－88.

[11] HÖHMANN C，STEPHAN P. Microscale temperature

measurement at an evaporating liquid meniscus[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(2/3/4):157 – 162.

[12] SUTTER G, FAURE L, MOLINARI A, et al. An experimental technique for the measurement of temperature fields for the orthogonal cutting in high speed machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(7):671 – 678.

[13] 毛尹航. 基于CCD摄像机的高温目标测温系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2016.
MAO Yinhang. Research on measurement system of high-temperature target based on CCD camera[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2016.

[14] 莫苏新. 基于CCD的高温温度场测量方法研究[D]. 长春:长春理工大学,2020.
MO Suxin. Research on high temperature field measurement method based on CCD[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.

[15] BÜNGER L, ANHALT K, TAUBERT R D, et al. Traceability of a CCD-camera system for high-temperature measurements[J]. International Journal of Thermophysics, 2015, 36(8):1784 – 1802.

[16] 任建新. 锅炉过热器壁面温度红外图像测量技术研究[D]. 南京:东南大学,2017.
REN Jianxin. Study of temperature measurement system for boiler superheater wall based on the infrared image technology[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.

[17] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007.

(上接第87页)

information hiding method[J/OL]. Journal of Computer-Aided Design and Graphics, 2024:1 – 8[2024 – 02 – 05]. https://link.cnki.net/urlid/11.2925.TP.20240204.1349.035.

[11] 黎瑾慧,贺里梅. 一种利用LiDAR点云的水域DEM快速精细生成算法[J]. 海洋测绘,2023,43(4):62 – 66.
LI Jinhui, HE Limei. A fast and fine generation algorithm of water DEM using LiDAR point cloud[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2023, 43(4):62 – 66.

[12] 杜中义,肖春霞. 基于保特征无参数投影的快速几何重建[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2010,22(7):1138 – 1144.
DU Zhongyi, XIAO Chunxia. Feature-preserving and parameterization-free projection for fast geometry reconstruction[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2010, 22(7):1138 – 1144.

[13] 林松,田林亚,毕继鑫,等. 基于最优邻域局部熵的点云精简算法[J]. 测绘工程,2021,30(5):12 – 17.
LIN Song, TIAN Linya, BI Jixin, et al. Point cloud simplification algorithm based on local entropy of optimal neighborhood[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2021, 30(5):12 – 17.