

文章编号: 1671-251X(2024)01-0066-07

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2023050056

基于水传热和红外热成像的煤矸识别方法

程刚^{1,2}, 陈杰^{1,2}, 潘泽烨², 魏溢凡², 陈森森²

(1. 安徽理工大学 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽 淮南 232001;

2. 安徽理工大学 机械工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 基于可见光图像的煤矸识别方法准确率不高、识别速度慢; 基于高能射线透射的煤矸识别方法具有很大辐射导致较少应用。红外热成像具有穿透性强、不受光线影响等优点, 但煤和矸石的表面温度在室温下相对接近, 导致煤和矸石在红外热图像中没有明显差异, 难以获得较好的识别效果。针对上述问题, 提出了一种基于水传热和红外热成像的煤矸识别方法。在不同水温(18, 21, 24, 27, 30 ℃)条件下进行煤和矸石红外热成像实验, 通过煤和矸石红外热图像和温度变化之间的差异来区分煤和矸石。实验结果表明: 不同水温下煤和矸石红外热图像不同, 当水温低于环境温度时, 煤和矸石红外热图像之间的差异较大; 在相同水温条件下, 煤和矸石红外热图像之间的差异随着时间增加逐渐增大; 煤和矸石表面温度变化均随水温升高和时间增加呈增大趋势, 但矸石表面温度变化大于煤表面温度变化; 当水温为 18 ℃、时间为 180 s 时, 煤和矸石红外热图像之间差异和温差均达到最大。这说明低温的水可作为一种传热介质, 更有利于使煤和矸石之间产生较大的温差, 从而实现煤和矸石红外热图像准确、快速识别。

关键词: 煤矸识别; 水传热; 红外热成像; 红外热图像; 温差

中图分类号: TD67

文献标志码: A

Coal gangue recognition method based on water heat transfer and infrared thermal imaging

CHENG Gang^{1,2}, CHEN Jie^{1,2}, PAN Zeyue², WEI Yifan², CHEN Sensen²

(1. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui

University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. School of Mechanical Engineering, Anhui

University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: The coal gangue recognition method based on visible light images has low accuracy and slow recognition speed. The coal gangue recognition method based on high-energy ray transmission has significant radiation, resulting in limited application. The infrared thermal imaging has advantages such as strong penetration and no influence from light. But the surface temperature of coal and gangue is relatively close at room temperature, resulting in no significant difference between coal and gangue in infrared thermal images, making it difficult to achieve good recognition results. In order to solve the above problems, a coal gangue recognition method based on water heat transfer and infrared thermal imaging is proposed. The method conducts infrared thermal imaging experiments on coal and gangue under different water temperatures (18, 21, 24, 27, 30 ℃). The method distinguishes between coal and gangue based on the differences in infrared thermal images and temperature changes. The experimental results show that the infrared thermal images of coal and gangue are different at different water temperatures. When the water temperature is lower than the ambient temperature, there is a significant difference between the infrared thermal images of coal and gangue. Under the same water temperature conditions, the difference between the infrared thermal images of coal and gangue gradually increases

收稿日期: 2023-05-17; 修回日期: 2024-01-18; 责任编辑: 盛男。

基金项目: 安徽省高校协同创新项目(GXXT-2021-076); 煤炭安全精准开采国家地方联合工程研究中心研究项目(EC2021010)。

作者简介: 程刚(1986—), 男, 安徽桐城人, 副教授, 博士, 研究方向为煤矿智能开采, E-mail: chgmec@mail.ustc.edu.cn。通信作者:

陈杰(1997—), 男, 安徽铜陵人, 硕士研究生, 研究方向为矿山机电工程, E-mail: ChenJie7197@163.com。

引用格式: 程刚, 陈杰, 潘泽烨, 等. 基于水传热和红外热成像的煤矸识别方法[J]. 工矿自动化, 2024, 50(1): 66-71, 137.

CHENG Gang, CHEN Jie, PAN Zeyue, et al. Coal gangue recognition method based on water heat transfer and infrared thermal imaging[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(1): 66-71, 137.



扫码移动阅读

with time. The surface temperature changes of coal and gangue both show an increasing trend with the increase of water temperature and time. But the surface temperature changes of gangue are greater than those of coal. When the water temperature is 18°C and the time is 180 s, the difference and temperature difference between the infrared thermal images of coal and gangue reach their maximum. This indicates that low-temperature water can serve as a heat transfer medium, which is more conducive to creating a large temperature difference between coal and gangue. The accurate and rapid recognition of coal and gangue infrared thermal images can be achieved.

Key words: coal gangue recognition; water heat transfer; infrared thermal imaging; infrared thermal image; temperature difference

0 引言

我国煤炭行业正处于高质量发展期,为响应国家“双碳”政策,煤炭行业逐渐向绿色低碳转型^[1-3]。矸石是采煤和洗煤过程中排放的固体废物,是在成煤过程中与煤层伴生的一种含碳量较低、比煤坚硬的黑灰色岩石。矸石的主要成分是 Al_2O_3 和 SiO_2 ^[4],发热值低,不仅会影响煤的发热量,而且燃烧时还会污染环境。煤矸识别是实现煤炭高效清洁利用不可或缺的步骤,对提高能源利用率和减少环境污染具有重要意义^[5-6]。

目前,关于煤矸识别的方法主要包括基于可见光图像和基于高能射线透射的方法^[7-9]。李曼等^[10]提出了一种基于传统可见光图像的灰度和纹理特征差异的煤矸识别方法,选取灰度均值、纹理对比度、熵作为特征参数,采用最小二乘支持向量机作为图像识别分类器,但实际煤矿井下环境复杂,光线、粉尘等外部因素干扰会影响煤矸识别准确率。张释如等^[11]利用改进 YOLOv5 模型对煤矸图像进行识别,在黑暗环境中也能准确划定目标边界,但该网络模型复杂,且需要大量的煤矸图像数据集,对计算机硬件设备要求较高,处理时间长,不能快速识别。郭永存等^[12]采用双能 X 射线对煤和矸石进行透射成像识别,通过研究 X 射线图像目标区域中的 R 值均值与密度和灰分的关系,以确定煤和矸石的物质属性,但 X 射线具有很大辐射,对人员身体造成一定伤害,因此应用较少。

红外热成像是一种应用广泛、发展较快的新型数字化无损检测技术^[13-14],具有穿透性强、不受光线影响等优点,在电力设备温度监测、工业生产缺陷监测、煤矿事故报警和煤岩动力灾害预防等领域已广泛应用^[15-18]。然而红外热成像技术在煤矸识别领域中的应用较少,这是因为煤和矸石的表面温度在室温下相对接近,导致煤和矸石在红外热图像中没有明显差异。针对该问题,本文提出了一种基于水传热和红外热成像的煤矸识别方法。通过将煤和矸石与不同温度的水混合,使用红外热像仪获取煤矸表面的

温度分布红外热图像,并记录温度的变化,根据煤和矸石红外热图像及温度之间的差异来识别煤和矸石。

1 红外热成像原理

红外热成像原理如图 1 所示。当被测物体吸收周围环境的辐射后,温度高于绝对零度时会向外辐射红外线。首先,通过红外热像仪的镜头收集并聚焦物体表面发出的红外辐射。其次,红外辐射通过光栅进行分光,将不同波长的红外辐射分离,使红外辐射具有不同的频率分布。然后,通过探测器将分光后的红外辐射转换为电信号。最后,探测器生成的电信号经过信号处理和图像生成算法转换后,得到被测物体表面温度分布红外热图像^[19-20]。

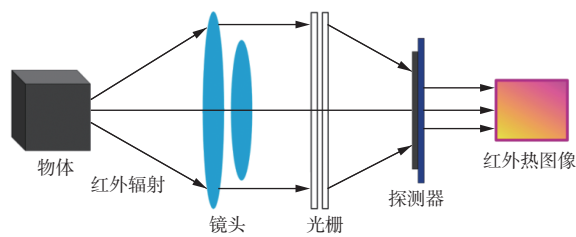


图 1 红外热成像原理

Fig. 1 Principle of infrared thermal imaging

2 煤矸红外热成像实验

2.1 实验系统

为研究不同水温下煤和矸石的红外热图像差异及表面温度变化规律,搭建煤矸红外热成像实验系统,如图 2 所示。

实验系统由 UTi320E 红外热像仪、电加热板、可调三脚架、耐高温结晶皿、烧杯、电子温度计、样品夹、计算机及煤和矸石的实验样品等组成。红外热像仪同时具有红外光和可见光 2 种镜头,可监测物体表面温度和实时热成像;红外光谱带宽为 $8\sim 14\ \mu\text{m}$,测温范围为 $-40\sim 400\ ^{\circ}\text{C}$,测温精度为 $\pm 2\%$,红外分辨率为 320×240 ,热灵敏度为 $65\ \text{mK}$ 。红外热像仪可实现高低温自动捕捉和样品特定区域温度的实时监测,监测的热图像和温度数据可通过计算机进行后处理分析。

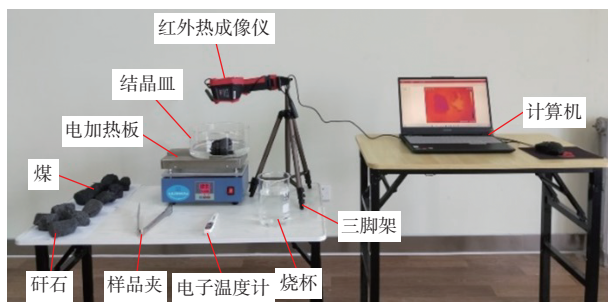


图 2 煤矸红外热成像实验系统

Fig. 2 Experimental system of coal and gangue infrared thermal imaging

2.2 实验方案

根据《煤矿安全规程》^[21]规定,煤矿井下各工作地点的温度不允许超过 30 ℃,最低温度一般在 18 ℃。为更好地模拟煤矿井下实际温度变化,实验

共设置了 6 组方案。方案 1—方案 5 采用水加热,水温分别设定为 18, 21, 24, 27, 30 ℃;考虑到环境温度对实验结果的影响,设置了空白组(方案 6)为对照实验,空白组为环境温度(22.5 ℃)条件下不进行水加热。实验前将煤和矸石样品在相同环境中放置 12 h,防止煤矸初始温差对实验结果带来干扰。在整个实验过程中,水的体积均相等,每组实验共持续 3 min,通过红外热像仪每间隔 10 s 采集煤和矸石的红外热图像,并记录表面温度的变化。

3 煤矸红外热成像实验结果及分析

3.1 红外热图像变化

煤和矸石在不同水温条件下不同时刻的红外热图像如图 3 所示(左边为煤,右边为矸石)。

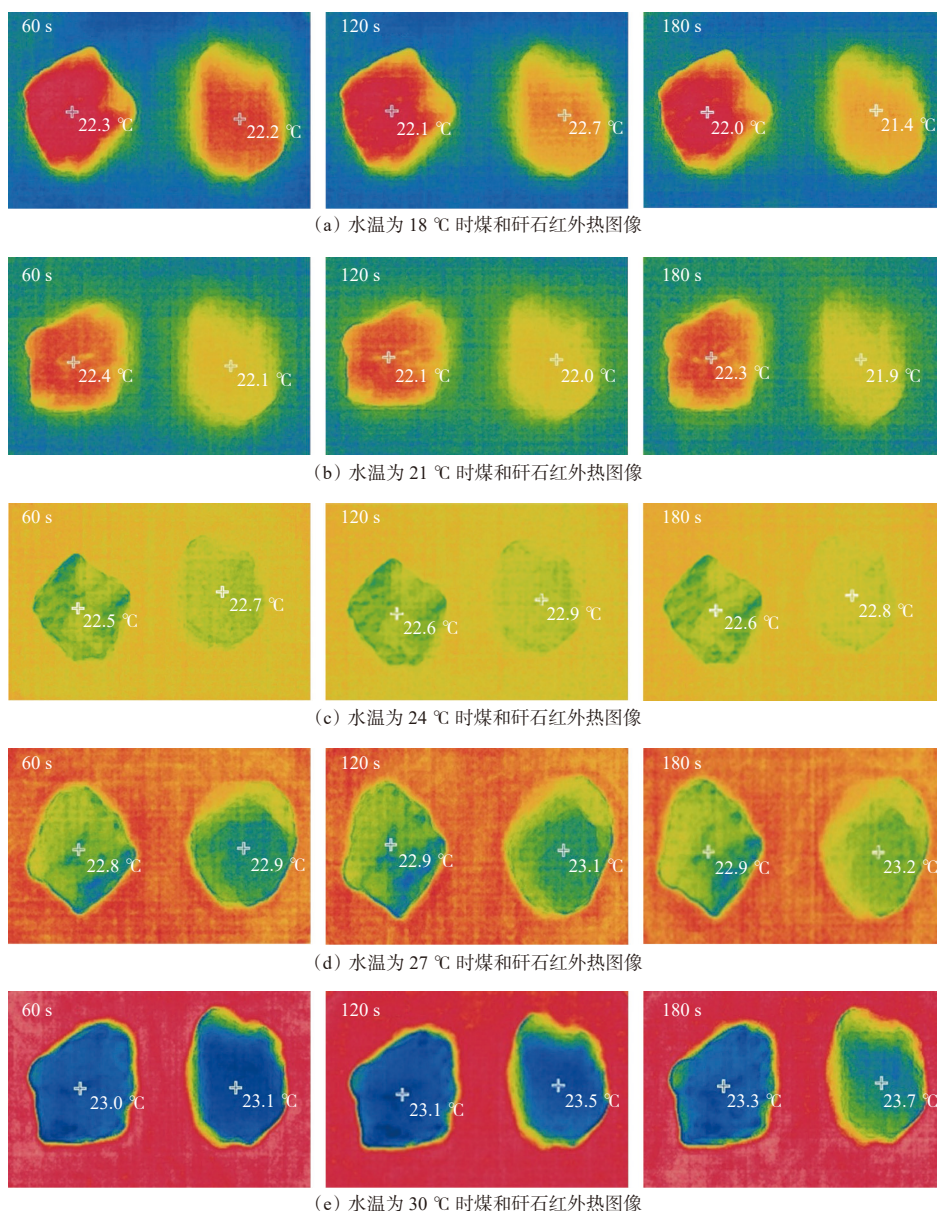


图 3 不同水温下不同时刻的煤和矸石红外热图像

Fig. 3 Infrared thermal images of coal and gangue under different water temperatures and time

由图3可看出,不同水温下的煤和矸石红外热图像不同,随着水温逐渐升高,红外热图像的背景颜色由蓝逐渐变红。当水温为18, 21℃时,即水温低于环境温度时,煤和矸石红外热图像之间的差异较为明显;当水温为24, 27, 30℃时,即水温高于环境温度时,煤和矸石红外热图像没有明显差异。在相同水温条件下,180 s时的煤和矸石红外热图像比60, 120 s时的煤和矸石红外热图像更具有显著的差异性,表明随着时间增加,煤和矸石红外热图像之间的差异逐渐增大。出现这种现象的原因主要是煤和矸石红外辐射能力的差异,煤通常具有较高的红外辐射能力,而矸石的红外辐射能力较低。随着水温升高,煤的红外辐射能力逐渐增强,热量会较快地传导到周围环境中,导致红外热图像中的背景颜色呈红色。通过煤和矸石红外热图像之间的差异可以很好地识别煤和矸石,表明基于水传热和红外热成像进行煤矸识别是一种可行有效的方法。

3.2 温度变化

为研究不同水温下煤和矸石表面温度的变化规律,定义煤和矸石的表面温度变化 Δt :

$$\Delta t = t_s - t_0 \quad (1)$$

式中: t_s 为红外热像仪记录的表面温度; t_0 为初始表面温度,为消除环境温度对煤和矸石传热特性的影响, t_0 与环境温度相同。

根据式(1)可知:当 $\Delta t > 0$,表示煤和矸石表面温度大于初始温度,温度上升;当 $\Delta t < 0$,表示煤和矸石表面温度小于初始温度,温度下降。

不同水温下煤和矸石表面温度的变化随时间变化曲线如图4所示。可看出煤和矸石与不同温度的水混合发生热传导后,其表面温度会发生变化。当水温低于环境温度时,煤和矸石表面温度逐渐下降,温度变化 $\Delta t < 0$;当水温高于环境温度时,导致煤和矸石与水之间发生热传导,煤和矸石表面温度有所升高,温度变化 $\Delta t > 0$ 。实验开始时,煤和矸石表面温度变化均为零;随着时间增加,矸石表面温度变化大于煤表面温度变化。水温越高,矸石表面温度上升越快;在相同水温情况下,矸石表面温度变化大于煤表面温度变化。

根据图4绘制了煤和矸石表面温度变化与水温和时间关系,如图5所示。可看出煤和矸石表面温度变化均随水温升高和时间增加呈增大趋势,但矸石表面温度变化速度大于煤。这是因为当煤和矸石与水接触时,由于热传导,导致煤和矸石表面温度均会逐渐增大,但矸石的热传导能力大于煤的热传

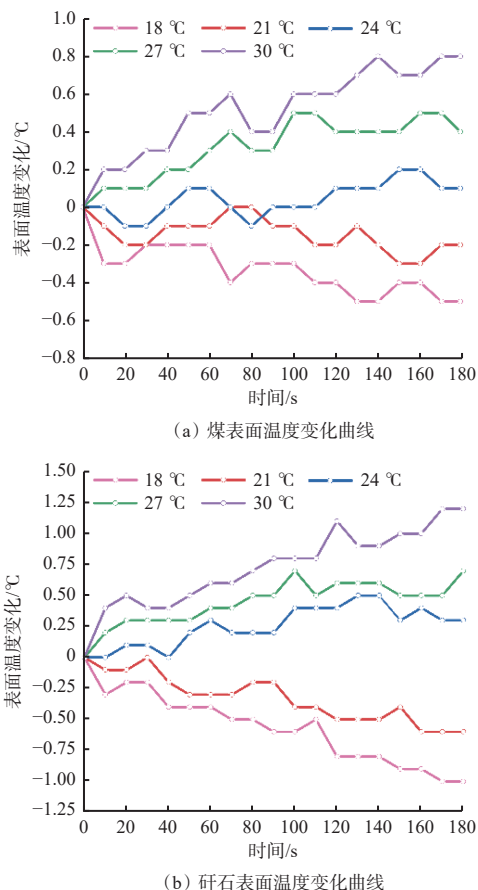


图4 不同水温下煤和矸石表面温度变化曲线

Fig. 4 Surface temperature variation curves of coal and gangue under different water temperatures

导能力,所以矸石表面温度的变化比煤表面温度的变化大。

为了更直观地反映不同水温条件下煤和矸石表面温度变化差异的程度,计算煤和矸石在不同水温下表面温度变化的均值和方差,如图6所示,表面温度变化的均值可反映平均热传导能力,表面温度变化的方差可反映热传导稳定性。可看出矸石表面温度变化的均值和方差均大于煤,表明在不同水温下,矸石具有较好的热传导能力,即矸石通过热传导使其表面温度上升的能力较好;而煤表面温度变化的均值和方差较低,表明其热传导能力较低,热传导过程相对稳定。煤和矸石在水传热过程中表现出不同的热传导能力和稳定性,可作为区分煤和矸石的有效依据,以此实现煤矸精确识别。

为进一步研究在不同水温条件下煤和矸石之间的表面温差变化,定义煤和矸石表面温差 $\Delta t'$:

$$\Delta t' = t_c - t_g \quad (2)$$

式中: t_c 为煤表面温度; t_g 为矸石表面温度。

不同水温下煤和矸石表面温差 $\Delta t'$ 随时间变化曲线如图7所示。可看出在相同水温下,煤和矸石表

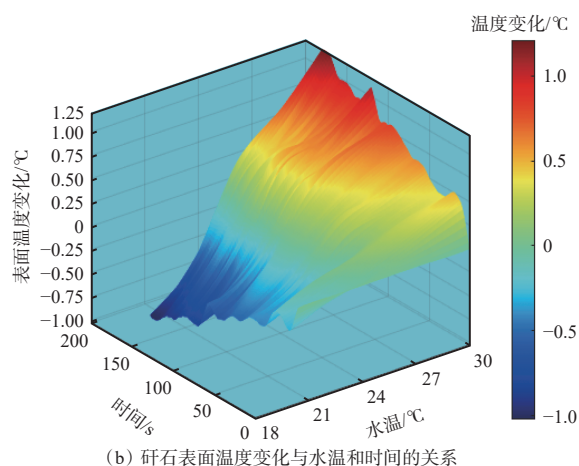
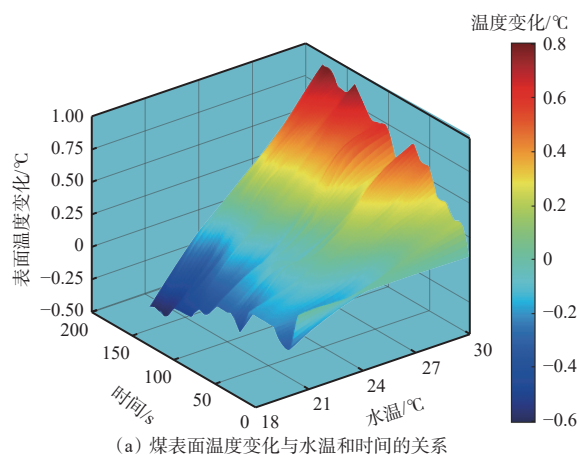


图 5 煤和矽石表面温度变化与水温和时间关系

Fig. 5 Surface temperature variation of coal and gangue in relation to water temperature and time

面温差随着时间的增加而增大;当水温为 18℃、时间为 180 s 时,煤和矽石之间的表面温差达到最大,为 0.6℃。表明当水温低于环境温度时,煤和矽石之间会形成较大的温差,从而有利于实现煤矽准确识别。这是因为低温的水可作为一种辅助传热介质,煤和矽石在与低温的水混合后产生的温差较大,这种温差使煤和矽石在红外热图像中呈现出明显的差异,可据此进行煤矽识别。

4 结论

1) 由于煤和矽石红外辐射能力的差异,不同水温下的煤和矽石红外热图像不同,当水温低于环境温度时,煤和矽石红外热图像之间的差异较为明显;在相同水温条件下,煤和矽石红外热图像之间的差异随着时间增加逐渐增大。

2) 煤和矽石与水之间发生热传导,导致煤和矽石表面温度变化,均随水温升高和时间增加呈增大趋势,但由于矽石的热传导能力大于煤的热传导能力,矽石表面温度变化大于煤表面温度变化。

3) 当水温为 18℃、时间为 180 s 时,煤和矽石红

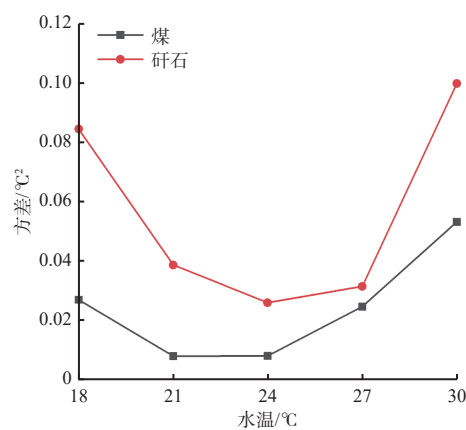
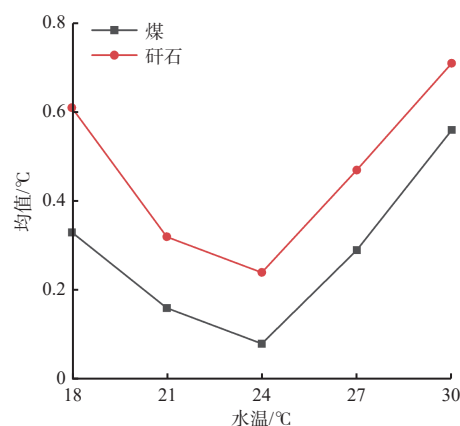


图 6 不同水温下煤和矽石表面温度变化的均值和方差

Fig. 6 Mean and variance of surface temperature variation of coal and gangue under different water temperatures

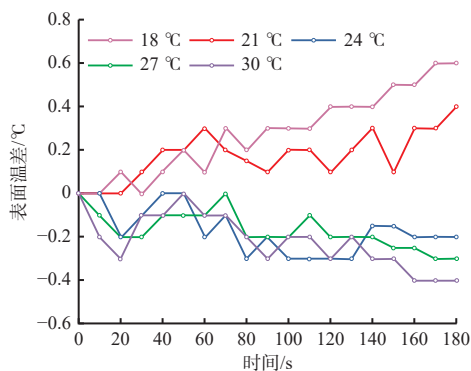


图 7 不同水温下煤和矽石表面温差

Fig. 7 Surface temperature difference between coal and gangue under different water temperatures

外热图像之间差异和温差均达到最大。低温的水更有利于使煤和矽石之间产生较大的温差,进一步使煤和矽石在红外热图像中呈现明显的差异,从而实现煤和矽石红外热图像准确、快速识别。

参考文献(References):

- [1] 袁亮. 我国煤炭主体能源安全高质量发展的理论技术思考[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 11-22.
YUAN Liang. Theory and technology considerations on

- high-quality development of coal main energy security in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 11-22.
- [2] 王国法, 富佳兴, 孟令宇. 煤矿智能化创新团队建设与关键技术研发进展[J]. 工矿自动化, 2022, 48(12): 1-15.
WANG Guofa, FU Jiaxing, MENG Lingyu. Development of innovation team construction and key technology research in coal mine intelligence[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(12): 1-15.
- [3] 袁亮, 张通, 张庆贺, 等. 双碳目标下废弃矿井绿色低碳多能互补体系建设思考[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2131-2139.
YUAN Liang, ZHANG Tong, ZHANG Qinghe, et al. Construction of green, low-carbon and multi-energy complementary system for abandoned mines under global carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2131-2139.
- [4] YANG Mei, GUO Zhixing, DENG Yinsheng, et al. Preparation of $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glass ceramics from coal gangue[J]. International Journal of Mineral Processing, 2012, 102: 112-115.
- [5] XUE Bo, ZHANG Yong, LI Jian, et al. A review of coal gangue identification research-application to China's top coal release process[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(6): 14091-14103.
- [6] LI Deyong, WANG Guofa, ZHANG Yong, et al. Coal gangue detection and recognition algorithm based on deformable convolution YOLOv3[J]. IET Image Processing, 2022, 16(1): 134-144.
- [7] 王家臣, 李良晖, 杨胜利. 不同照度下煤矸图像灰度及纹理特征提取的实验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 3051-3061.
WANG Jiachen, LI Lianghui, YANG Shengli. Experimental study on gray and texture features extraction of coal and gangue image under different illuminance[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 3051-3061.
- [8] 薛光辉, 李秀莹, 钱孝玲, 等. 基于随机森林的综放工作面煤矸图像识别[J]. 工矿自动化, 2020, 46(5): 57-62.
XUE Guanghui, LI Xiuying, QIAN Xiaoling, et al. Coal-gangue image recognition in fully-mechanized caving face based on random forest[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(5): 57-62.
- [9] 杨慧刚, 乔志敏. 基于 X 射线和机器视觉的煤与矸石分选系统设计[J]. 工矿自动化, 2017, 43(3): 85-89.
YANG Huigang, QIAO Zhimin. Design of separation system of coal and gangue based on X-ray and machine vision[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(3): 85-89.
- [10] 李曼, 段雍, 曹现刚, 等. 煤矸分选机器人图像识别方法和系统[J]. 煤炭学报, 2020, 45(10): 3636-3644.
LI Man, DUAN Yong, CAO Xiangang, et al. Image identification method and system for coal and gangue sorting robot[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(10): 3636-3644.
- [11] 张释如, 黄综浏, 张袁浩, 等. 基于改进 YOLOv5 的煤矸识别研究[J]. 工矿自动化, 2022, 48(11): 39-44.
ZHANG Shiru, HUANG Zongliu, ZHANG Yuanhao, et al. Coal and gangue recognition research based on improved YOLOv5[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(11): 39-44.
- [12] 郭永存, 何磊, 刘普壮, 等. 煤矸双能 X 射线图像多维度分析识别方法[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 300-309.
GUO Yongcun, HE Lei, LIU Puzhuang, et al. Multi-dimensional analysis and recognition method of coal and gangue dual-energy X-ray images[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 300-309.
- [13] 王淑, 冷航, 陈彦伶, 等. 红外热成像技术在孔隙尺度下多孔介质相变过程表征中的应用与优化研究[J]. 红外技术, 2022, 44(3): 294-302.
WANG Shu, LENG Hang, CHEN Yanling, et al. Application of infrared thermography for characterizing phase change process of porous media at pore scale[J]. Infrared Technology, 2022, 44(3): 294-302.
- [14] QU Zhi, JIANG Peng, ZHANG Weixu. Development and application of infrared thermography non-destructive testing techniques[J]. Sensors, 2020, 20(14): 3851-3876.
- [15] PAN Dong, JIANG Zhaohui, CHEN Zhipeng, et al. Compensation method for molten iron temperature measurement based on heterogeneous features of infrared thermal images[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(11): 7056-7066.
- [16] 卜迟武, 刘涛, 李锐, 等. 光伏电池缺陷红外热成像检测与图像序列处理[J]. 光学学报, 2022, 42(7): 118-124.
BU Chiwu, LIU Tao, LI Rui, et al. Infrared thermography detection and images sequence processing for defects in photovoltaic cells[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(7): 118-124.
- [17] 程继杰, 刘毅, 李小伟. 基于热红外图像的煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 2236-2248.
CHENG Jijie, LIU Yi, LI Xiaowei. Coal mine rock burst and coal and gas outburst perception alarm method based on thermal infrared image[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 2236-2248.
- [18] 赵小虎, 车亭雨, 叶圣, 等. 煤体红外热像异常区域分割方法[J]. 工矿自动化, 2022, 48(9): 92-99.
ZHAO Xiaohu, CHE Tingyu, YE Sheng, et al. Segmentation method of the abnormal area of coal infrared thermal image[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(9): 92-99.

- [11] 马恒, 刘亮亮. 基于 T-S 模糊神经网络的淋水井筒温度预测分析[J]. 世界科技研究与发展, 2015, 37(3): 226-229.
MA Heng, LIU Liangliang. Prediction analysis of temperature of wellbore with spay water based on T-S fuzzy neural network[J]. World Sci-tech R & D, 2015, 37(3): 226-229.
- [12] 段艳艳. 基于支持向量机的矿井风温预测[D]. 西安: 西安科技大学, 2013.
DUAN Yanyan. Prediction of the mine air temperature based on support vector machine[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013.
- [13] 张群. 潘三矿热害调查及风温预测研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.
ZHANG Qun. The thermal damage investigation and wind temperature prediction research of Panji No. 3 Colliery[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2015.
- [14] 何启林, 任克斌. 深井建井期入风井筒风温的预测[J]. 煤炭工程, 2002, 34(8): 47-48.
HE Qilin, REN Kebin. Prediction of air temperature in the inlet well during deep well construction period[J]. Coal Engineering, 2002, 34(8): 47-48.
- [15] 顾伟红, 赵雪. 基于 GRA-SSA-Elman 的隧道施工瓦斯安全性预测评价[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(6): 230-239.
GU Weihong, ZHAO Xue. Gas safety prediction and evaluation of tunnel construction based on GRA-SSA-Elman[J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(6): 230-239.
- [16] 乔寅威, 贾新春, 关燕鹏, 等. 基于 DE-WOA 的 Elman 神经网络的空气质量预测方法及应用 [J/OL]. 控制工程, 1-8[2023-08-17]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20220929>.
QIAO Yinwei, JIA Xinchun, GUAN Yanpeng, et al. Air quality prediction method and its application of Elman neural network based on DE-WOA[J/OL]. Control Engineering of China, 1-8[2023-08-17]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20220929>.
- [17] 吴定会, 朱勇, 范俊岩, 等. 基于双重注意力 IJAYA-Elman 的高炉煤气柜位预测 [J/OL]. 控制工程, 1-9[2023-08-17]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20220463>.
WU Dinghui, ZHU Yong, FAN Junyan, et al. Prediction of blast furnace gas holder lever based on double attention IJAYA-Elman[J/OL]. Control Engineering of China, 1-9[2023-08-17]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20220463>.
- [18] 李练兵, 朱乐, 李思佳, 等. 基于差分电压和 ICS-Elman 神经网络的锂离子电池剩余使用寿命预测方法 [J]. 太阳能学报, 2023, 44(12): 433-443.
LI Lianbing, ZHU Le, LI Sijia, et al. Remaining useful life prediction of lithium-ion batteries based on differential voltage and ICS-Elman neural networks[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2023, 44(12): 433-443.
- [19] 韩会宾. 基于目标 PSO 算法的工程项目优化研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(12): 167-177.
HAN Huibin. Research on engineering project optimization based on target PSO algorithm[J]. Journal of Southwest University(Natural Science Edition), 2023, 45(12): 167-177.
- [20] 焦龄霄, 周凯, 张子熙, 等. 基于 mRMR-IPSO 的短期负荷预测双阶段特征选择 [J/OL]. 重庆大学学报, 1-13[2023-08-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20231206.1636.002.html>.
JIAO Lingxiao, ZHOU Kai, ZHANG Zixi, et al. Dual-stage feature selection for short-term load forecasting based on mRMR-IPSO[J/OL]. Journal of Chongqing University, 1-13[2023-08-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20231206.1636.002.html>.
- [21] 吴以童, 李斌, 刘春, 等. 融合 GMM 和 PSO 的储罐超声检测机器人避障研究 [J]. 计算机仿真, 2023, 40(11): 408-414.
WU Yitong, LI Bin, LIU Chun, et al. Research on obstacle avoidance of storage tank ultrasonic inspection robot integrating GMM and PSO[J]. Computer Simulation, 2023, 40(11): 408-414.

(上接第 71 页)

- [19] 张志强, 王萍, 于旭东, 等. 高精度红外热成像测温技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(5): 10-18.
ZHANG Zhiqiang, WANG Ping, YU Xudong, et al. Study on high accuracy temperature measurement technology of infrared thermal imager[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(5): 10-18.
- [20] 孙继平, 李迎春. 矿井大气中红外辐射传输特性[J]. 煤炭学报, 2005, 30(6): 788-791.
SUN Jiping, LI Yingchun. Transmission characteristic of infrared radiation through mine atmosphere[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(6): 788-791.
- [21] 国家安全生产监督管理总局. 煤矿安全规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2022.
State Administration of Work Safety. Coal mine safety regulations[M]. Beijing: Coal Industry Press, 2022.