

文章编号: 1671-251X(2024)04-0078-07

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2023110029

# 基于红外热像和振动信号的煤岩识别实验研究

刘治翔, 孙战, 尹家阔, 邹康

(辽宁工程技术大学 机械工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** 针对现有煤岩识别技术存在的难以实际应用、易受信号干扰、成本高和实现复杂等问题, 通过理论分析煤岩截割产热与煤岩硬度的关系, 证明通过红外热像获取的截割温度变化来进行煤岩识别的合理性; 搭建了掘进机截齿截割煤岩试验台, 对不同硬度的普通煤层、煤岩交界处及中砂岩层进行长时间截割试验, 通过红外热像仪和振动传感器分别获取截割温度和截割头振动信号并分析其变化规律。研究结果表明: ① 随着截割时间增加, 截割温度逐渐升高; 煤岩硬度越高, 截割温度越高, 且截割温度上升速率越快; 在截割起始阶段无法通过截割温度识别煤岩, 但在稳定截割时可根据截割温度特性识别煤岩。② 截割头振动强度随着煤岩硬度增大而变大, 但不随截割时间增加而产生明显变化, 因此可弥补在截割起始阶段无法通过截割温度识别煤岩的不足。③ 通过单一截割温度或振动强度不能对煤岩进行准确识别, 因此可在截割起始阶段和频繁出现闪温时通过振动强度来识别煤岩, 而在截割稳定阶段通过红外热像获取的温度来识别煤岩。

**关键词:** 煤岩识别; 红外热像; 截割温度; 振动强度

中图分类号: TD67

文献标志码: A

Experimental study on coal rock recognition based on infrared thermal imaging and vibration signals

LIU Zhixiang, SUN Zhan, YIN Jiakuo, ZOU Kang

(School of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** In response to the difficulties in practical application, susceptibility to signal interference, high cost, and complex implementation of existing coal rock recognition technologies, this paper theoretically analyzes the relationship between coal rock cutting heat production and coal rock hardness. The paper proves the rationality of using infrared thermal imaging to obtain cutting temperature changes for coal rock recognition. A coal rock cutting test bench is built for roadheader. Long-term cutting tests are conducted on ordinary coal seams, coal rock interfaces, and sandstone layers with different hardness. The cutting temperature and vibration signals of the cutting head are obtained through infrared thermal imaging and vibration sensors, and their change patterns are analyzed. The research results indicate the following points. ① As the cutting time increases, the cutting temperature gradually increases. The higher the hardness of coal rock, the higher the cutting temperature, and the faster the rate of increase in cutting temperature. At the initial stage of cutting, coal and rock cannot be recognized by cutting temperature, but during stable cutting, coal and rock can be recognized based on cutting temperature features. ② The vibration intensity of the cutting head increases with the increase of coal rock hardness, but does not show a significant change with the increase of cutting time. Therefore, it can compensate for the lack of recognition of coal rock through cutting temperature at the beginning stage of cutting. ③ Accurate recognition of coal and rock cannot be achieved through a single cutting temperature or vibration intensity. Therefore, coal and rock can be recognized through vibration intensity during the initial cutting stage and frequent flash temperatures.

收稿日期: 2023-11-09; 修回日期: 2024-04-27; 责任编辑: 盛男。

基金项目: 辽宁省应用基础研究计划项目(2023JH2/101600061)。

作者简介: 刘治翔(1988—), 男, 辽宁大连人, 副教授, 博士, 研究方向为煤矿智能掘进成套装备及技术, E-mail: lzxndl@yeah.net。

引用格式: 刘治翔, 孙战, 尹家阔, 等. 基于红外热像和振动信号的煤岩识别实验研究[J]. 工矿自动化, 2024, 50(4): 78-83, 152.

LIU Zhixiang, SUN Zhan, YIN Jiakuo, et al. Experimental study on coal rock recognition based on infrared thermal imaging and vibration signals[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(4): 78-83, 152.



扫码移动阅读

In the stable cutting stage, coal and rock can be recognized through temperature obtained from infrared thermal imaging.

**Key words:** coal rock recognition; infrared thermal imaging; cutting temperature; vibration intensity

## 0 引言

在工况复杂的煤矿巷道掘进过程中,掘进机截齿经常会与煤岩交界处发生碰撞<sup>[1-3]</sup>。由于煤岩层硬度等物理特性不同,所以截齿在截割煤岩交界处时会因受力不均等加剧截齿磨损,甚至形成巨大的冲击载荷使掘进机截齿折断,降低掘进机使用寿命和截割稳定性<sup>[4-6]</sup>。

为提高掘进机截割效率的同时降低截齿磨损率,煤岩界面自动识别成为亟待解决的问题<sup>[7]</sup>。目前煤岩识别技术包括图像识别技术<sup>[8]</sup>、过程信号监测识别技术<sup>[9]</sup>、电磁波识别技术<sup>[10]</sup>、超声波探测识别技术<sup>[11]</sup>、多传感器融合识别技术<sup>[12]</sup>等。图像识别技术包括传统的图像处理技术<sup>[13]</sup>(如图像变换、图像分割、图像特征提取等)和基于深度学习的图像处理技术<sup>[14]</sup>(如卷积神经网络等),通过图像变换、特征提取和分类,以判断煤岩界面位置,但该技术比较依赖大量标注数据进行训练,目前仍处于试验研究阶段<sup>[15]</sup>。过程信号监测识别技术通过监测掘进机截割头或采煤机滚筒的运行信号(如振动、电流、声发射等)来判断是否截割到煤岩界面,但由于井下存在多种干扰信号<sup>[16]</sup>,导致识别煤岩界面的准确性下降。电磁波识别技术利用电磁波的传播特性进行煤岩界面识别,对煤岩介电常数、电导率等有一定要求,识别精度高<sup>[17]</sup>,但设备成本较高。超声波探测识别技术基于超声波在不同介质界面上的传输和反射原理<sup>[18]</sup>,通过分析反射回波信号来探测煤岩界面,但由于煤岩结构不同,探测厚度也不同,所以面对复杂的地质情况需与其他技术相结合来进行煤岩界面识别。多传感器融合识别技术通过整合多个传感器(如振动加速度传感器、转轴传感器、电流传感器等)数据,来获取更全面准确的煤岩界面信息,但需解决数据融合和匹配的难题<sup>[19]</sup>,以确保不同传感器之间的精确校准和可靠性。

红外热像技术<sup>[20]</sup>利用物体发射红外辐射原理,通过红外热像仪检测物体表面温度分布。红外热像仪成本低、体积小,便于移动且不受其他信号干扰,无需与截齿接触即可实时测得截齿截割煤岩时的温度,适用于煤岩识别。但煤层中常有夹矸现象,会降低通过截齿温度进行煤岩识别的准确性,因此引入掘进机截割头振动信号来判断煤岩<sup>[21]</sup>。通过试验研

究结合掘进机截割温度及截割头振动信号进行煤岩识别的可行性。

## 1 煤岩截割产热理论

悬臂式掘进机在进行截割作业时,截割头的截齿在高速旋转下对巷道煤壁进行破碎和剥离。在复杂的煤层工况中,煤层和岩层的共存及硬度和密度的不均匀性,导致截齿与煤岩碰撞摩擦时产生的热量非连续并具有波动性。煤岩的非均质性使得截齿在接触煤岩时可能会短时间内经历温度的剧烈升高,表现为截齿表面的闪温特性。因此,为分析截割产热的规律,需要系统地考虑截齿、硬度不均匀的煤岩及其产生的煤岩碎屑等因素。

截割产热量与截割载荷有关,截齿截割过程中截割载荷主要包含截割推进力 $F_x$ 、截割进给力 $F_y$ <sup>[20]</sup>。

$$F_x = 145K_c \left( \frac{\sigma_c}{25} + \sqrt{\frac{\sigma_c}{2.5}} \right) \frac{-0.3 + 0.035h_p}{h_p + b \tan \varphi} abK \frac{1}{\cos \beta} \quad (1)$$

$$F_y = 145K_p \left( \frac{\sigma_c}{25} + \sqrt{\frac{\sigma_c}{2.5}} \right) \frac{-0.3 + 0.035h_p}{h_p + b \tan \varphi} abK \frac{1}{\cos \delta} \quad (2)$$

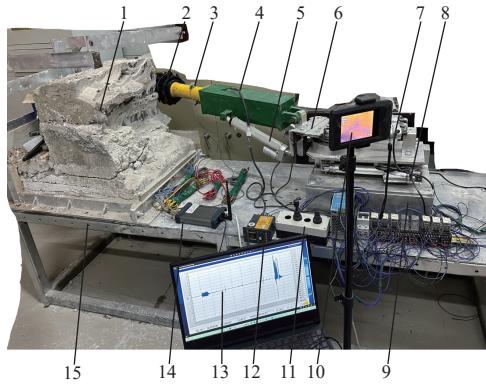
式中:  $K_c$  为截割推进力修正系数;  $\sigma_c$  为煤岩抗压强度, MPa;  $h_p$  为截齿计算宽度, mm;  $b$  为平均截割深度, mm;  $\varphi$  为煤岩的崩裂角, (°);  $a$  为截齿截距, mm;  $K$  为综合截割系数;  $\beta$  为截齿倾斜角, (°);  $K_p$  为截割进给力修正系数;  $\delta$  为截齿进给角, (°)。

在相同的截齿属性(如结构参数、材料)、截割深度和截割速度条件下,截割产生的温升总量通常与煤岩抗压强度呈正相关关系。然而,在实际的截割过程中,由于掘进机结构和功率差异,截割头可能会出现跳刀现象,导致截齿与煤岩短暂分离,打破了截齿与煤壁之间形成的热封闭系统,使得截割过程中产生的热量不能持续累积。因此,通过观察长时间的非连续截割过程中的温度变化,可以对煤岩硬度进行评估。

## 2 试验

为分析长时间截割下截割头表面温度及振动强度变化,搭建了掘进机截齿截割煤岩试验台,如图1所示。试验台主要由截割模拟系统和数据采集系统

2个部分组成。截割模拟系统主要由试验台底座、掘进机模型、动力控制系统、岩样等组成；数据采集系统主要由红外热像仪、振动传感器等组成。



1—岩样; 2—截割头; 3—振动传感器; 4—截割臂; 5—升降电缸;  
6—摆动底座; 7—摆动电缸; 8—伸缩电缸; 9—截割底座; 10—红外热像仪;  
11—动力控制系统; 12—电动机控制器; 13—信号分析计算机;  
14—信号采集仪; 15—试验台底座。

图 1 掘进机截齿截割煤岩试验台

Fig. 1 Roadheader cutting gear cutting coal rock test bench

试验台电动机功率为 180 W, 可调节转速, 适用于不同工况下的截割试验。采用电缸代替掘进机的油缸, 截割臂的升降、旋转和伸缩功能均采用单个推力为 2 000 N 的双电缸同步实现。

为模拟不同煤岩硬度, 采用砂子、水泥、石膏和水作为原材料进行岩样配置。根据相似原理, 通过改变材料比例, 制作 4 个直径为 200 mm、高度为 150 mm 的圆柱标准试件(图 2), 进行抗压强度和坚固性系数测试。4 个圆柱标准试件理论抗压强度分别为 0.66, 1.01, 1.23, 2.70 MPa, 坚固性系数分别为 1.6, 2.7, 3.8, 6.5。

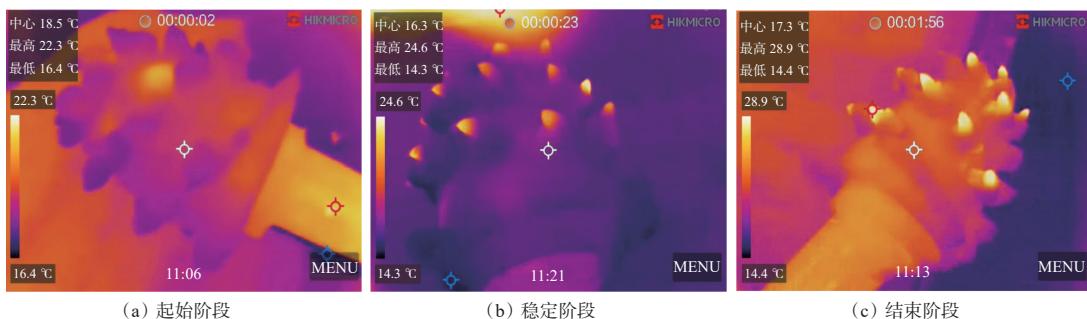


图 3 截割头摆动截割过程红外热像

Fig. 3 Infrared thermal image of cutting head swing cutting process

从图 3 可看出, 截割过程分为起始、稳定及结束 3 个阶段。截割起始阶段截齿与岩样接触面温度逐渐升高, 截割产生的部分岩屑带走了少量热量, 截割头的跳动性使得截割面与空气的热交换运动速度加快, 导致截齿表面温度较低; 当截割头与岩样稳定接



图 2 标准试件

Fig. 2 Standard test specimen

根据圆柱标准试件坚固性测试结果, 分别制作坚固性系数为 1.7 的普通煤层和坚固性系数为 6.8 的中砂岩层, 岩样配置比例见表 1。砂子作为主材料, 砂子含量越高, 岩样硬度越低; 水泥含量越高, 岩样硬度越高; 石膏主要用于填充砂子、水泥中的微孔和细小裂缝, 石膏含量越高, 岩样抗裂性能越强。

表 1 岩样配置比例

Table 1 Allocation proportion of rock sample

岩样	质量占比/%			岩样尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)
	沙子	水泥	石膏	
煤层	82	11	7	600×400×200
中砂岩层	70	23	7	600×400×200

岩样配置后, 进行截割头摆动截割试验。试验过程中截割参数保持不变, 先使截割头慢慢接触岩样, 通过电缸控制截割臂摆动, 使截割头充分与岩样接触且截割臂摆动速度降到最低, 保证截割充分及截割时间充足。

### 3 试验分析

#### 3.1 煤岩截割温度特性分析

采用红外热像仪记录截割过程的温度变化情况, 红外热像如图 3 所示。

触截割时, 截割面温度达到相对平衡阶段, 截割面热量持续累积, 造成截齿温度逐渐上升, 持续到稳定截割阶段结束。由此可见, 当截割时间较短时, 截割产生的热量没有集中在截齿部位, 导致截割温度的参考意义不大, 所以需根据稳定截割时的温度变化进

行煤岩识别。

为获取不同硬度岩样截割下截割温度变化规律, 分别对普通煤层、普通煤层与中砂岩层交界处和

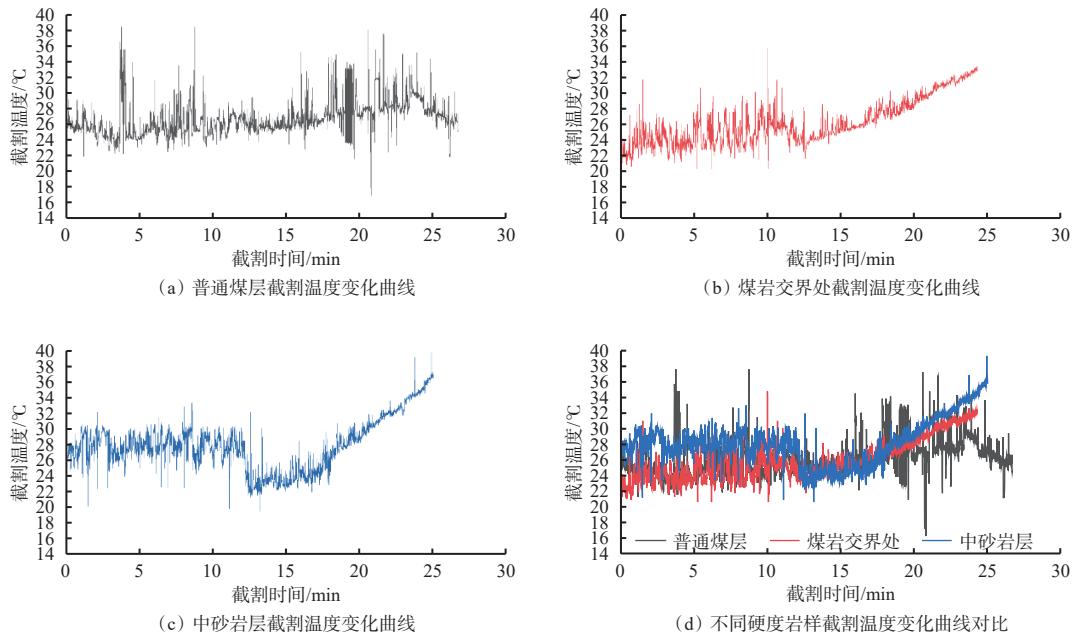


图 4 不同硬度岩样截割温度变化曲线

Fig. 4 Temperature variation curves of rock samples with different hardness

从图 4(a)可看出, 在截割头对普通煤层进行截割时, 出现闪温(瞬间高温)次数较多, 这是因为普通煤层中夹杂着较多高硬度的矸石, 但整体截割温度变化不明显。

从图 4(b)可看出, 由于煤岩交界处硬度差异较大, 截割过程中前 10 min 温度波动幅度大; 在截割 10 min 后, 截割头在上层中砂岩层及下层普通煤层的压力下处于稳定截割阶段, 温度波动幅度小, 截割温度逐渐上升。

从图 4(c)可看出, 由于中砂岩层在岩样上方, 所以在截割时始终处于半个截割头与中砂岩层接触的状态, 在截割过程的前 12 min, 温度波动幅度小; 在截割进行到第 13 min 时, 由于中砂岩层硬度较大, 截割头产生跳刀现象, 造成截割头与中砂岩层短暂分离, 截割温度大幅下降; 发生跳刀现象后, 通过人工干预截割臂的振动幅度, 使得截割头在之后的截割过程中始终保持与中砂岩层的充分接触, 稳定截割后, 截割温度呈稳定增大趋势。

从图 4(d)可看出, 在截割起始阶段, 普通煤层截割温度与煤岩交界处截割温度并无明显区别, 无法通过温度识别煤岩; 当截割头始终与煤岩保持充分接触并进行稳定截割时, 普通煤层截割温度略有上升, 中砂岩层和煤岩交界处截割温度均呈稳定上升状态, 且岩样硬度越高, 截割温度上升速率越快, 表

中砂岩层进行长时间截割试验, 截割温度变化曲线如图 4 所示。

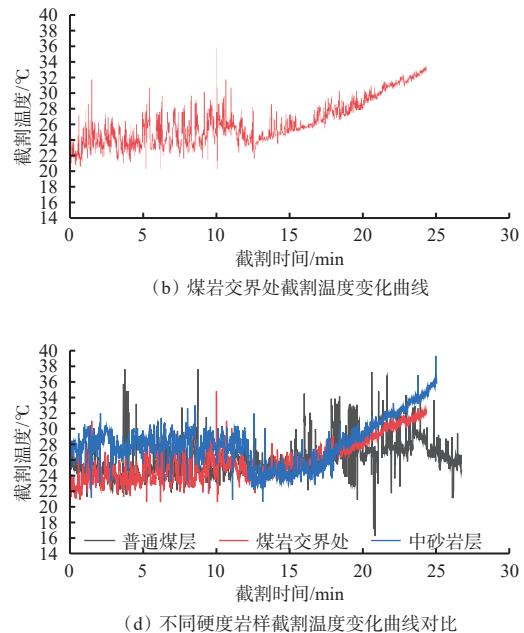


图 4 不同硬度岩样截割温度变化曲线

明截割头稳定截割时的温度变化曲线更符合煤岩截割产热理论, 可根据截割温度特性识别煤岩。

在截割不同硬度岩样时, 每 5 min 统计平均温度, 见表 2, 截割温度变化见表 3。

表 2 不同硬度岩样截割平均温度

Table 2 Average cutting temperature of rock samples with different hardness

截割时间/min	平均温度/°C		
	普通煤层	煤岩交界处	中砂岩层
0~5	24.92	23.35	27.95
5~10	24.85	24.25	28.46
10~15	25.16	25.11	27.61
15~20	25.68	24.85	24.06
20~25	27.61	27.73	28.00
25~30	27.32	31.43	33.42

表 3 不同硬度岩样截割温度变化

Table 3 Temperature variation of rock samples with different hardness

煤层	平均温度	最高温度	温度变化幅值
普通煤层	25.91	38.20	2.40
煤岩交界处	26.08	37.20	8.08
中砂岩层	28.22	41.00	9.36

从表 2、表 3 可看出, 随着截割时间增加, 截割温

度升高; 中砂岩层截割平均温度为 28.22 ℃, 高于煤岩交界处的 26.08 ℃ 和普通煤层的 25.91 ℃, 可见煤岩硬度越高, 截齿平均温度越高; 普通煤层、煤岩交界处、中砂岩层截割温度变化幅值分别为 2.40, 8.08, 9.36 ℃, 可见煤岩硬度越高, 截割温度增幅越大。

### 3.2 煤岩截割振动特性分析

在掘进机截割过程中, 截割头会产生振动, 在不同工况下截割头振动强度不同。在进行截割试验时通过振动传感器提取振动信号, 使用方差作为特征指标来衡量振动强度大小。在不同时间段截割普通煤层、煤岩交界处及中砂岩层时的振动方差见表 4。

表 4 不同硬度岩样截割时振动方差对比

Table 4 Comparison of vibration variance during cutting of rock samples with different hardness

截割时间/min	振动方差/(cm <sup>2</sup> ·s <sup>-4</sup> )		
	普通煤层	煤岩交界处	中砂岩层
0~5	99.60	119.45	147.97
5~10	99.34	119.25	147.68
10~15	99.15	119.37	147.37
15~20	98.78	119.87	147.92
20~25	98.15	119.94	146.89
25~30	99.64	119.26	147.05

从表 4 可看出, 不同硬度岩样截割时振动强度不同, 普通煤层、煤岩交界处和中砂岩层截割时振动方差平均值分别为 99.11, 119.52, 147.48 cm<sup>2</sup>/s<sup>4</sup>, 表明随着煤岩硬度增大, 截割头振动强度增大。

不同硬度岩样截割时振动强度变化曲线如图 5 所示。可看出随着截割时间增加, 截割头振动强度并无明显变化, 振动强度大小仅与煤岩硬度有关, 可弥补在截割起始阶段无法通过截割温度识别煤岩的不足。

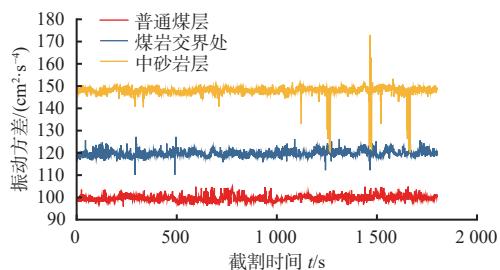


图 5 不同硬度岩样截割时振动强度变化曲线

Fig. 5 Vibration intensity variation curves of rock samples with different hardness

### 3.3 煤岩截割温度及振动特性对比分析

不同硬度岩样截割温度、振动强度变化趋势对比如图 6 所示。

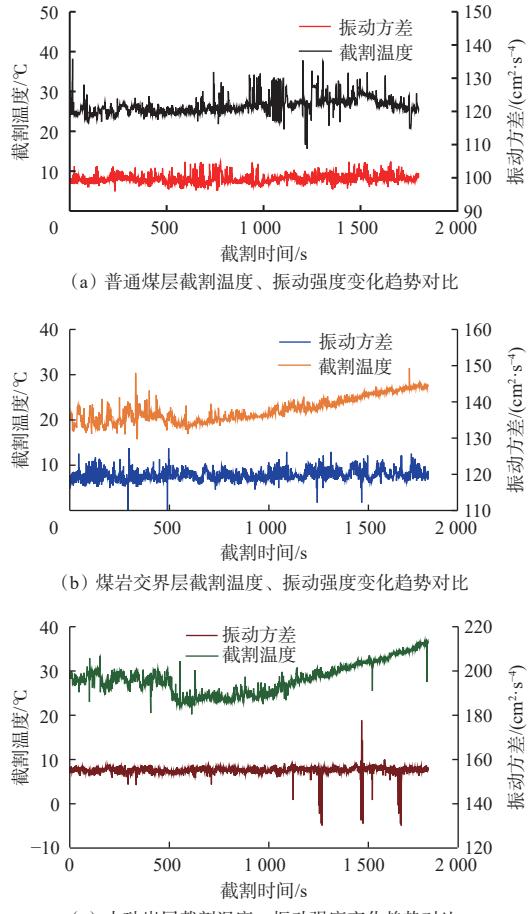


图 6 不同硬度岩样截割温度、振动强度变化趋势对比

Fig. 6 Comparison of variation trend of temperature and vibration intensity of rock samples with different hardness

从图 6 可看出, 截割时出现的闪温情况会降低通过截割温度进行煤岩识别的准确性, 而截割头振动特性不受闪温的影响, 因此可在截割起始阶段和频繁出现闪温时通过振动强度来识别煤岩; 在截割头不稳定截割或截割头发生跳刀产生空转时, 截割温度发生剧烈变化, 但截割头振动强度并没有随之发生变化, 表明单一根据截割头振动强度来识别煤岩的准确性不高。因此, 应同时根据截割温度变化特性及截割头振动强度变化特性进行煤岩识别。

## 4 结论

1) 随着截割时间增加, 截割温度逐渐升高; 煤岩硬度越高, 截割温度越高, 且截割温度上升速率越快; 在截割起始阶段无法通过截割温度识别煤岩硬度, 但在稳定截割时可根据截割温度特性识别煤岩。

2) 截割头振动强度随着煤岩硬度增大而变大, 但不随截割时间增加而产生明显变化, 因此可弥补在截割起始阶段无法通过截割温度识别煤岩的不足。

3) 单一通过煤岩截割温度特性或振动强度特性无法准确识别煤岩, 因此可在截割起始阶段和频繁

出现闪温时通过振动强度来识别煤岩,而在截割稳定阶段通过红外热像获取的温度来识别煤岩。

#### 参考文献(References):

- [1] 王虹,陈明军,张小峰.我国煤矿快速掘进 20 a 发展与展望[J].煤炭学报,2024,49(2): 1199-1213.  
WANG Hong, CHEN Mingjun, ZHANG Xiaofeng. Twenty years development and prospect of rapid coal mine roadway excavation in China[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 1199-1213.
- [2] 才庆祥,陈彦龙.中国露天煤矿 70 年成就回顾及高质量发展架构体系[J].煤炭学报,2024,49(1): 235-260.  
CAI Qingxiang, CHEN Yanlong. Review of 70 years' achievements and high-quality development architecture system of surface coal mining in China[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 235-260.
- [3] 杨健健,张强,王超,等.煤矿掘进机的机器人化研究现状与发展[J].煤炭学报,2020,45(8): 2995-3005.  
YANG Jianjian, ZHANG Qiang, WANG Chao, et al. Status and development of robotization research on roadheader for coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 2995-3005.
- [4] 王国法,杜毅博.智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向[J].煤炭科学技术,2019,47(1): 1-10.  
WANG Guofa, DU Yibo. Development direction of intelligent coal mine and intelligent mining technology[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 1-10.
- [5] 袁亮,张平松.煤矿透明地质模型动态重构的关键技术与路径思考[J].煤炭学报,2023,48(1): 1-14.  
YUAN Liang, ZHANG Pingsong. Key technology and path thinking of dynamic reconstruction of mine transparent geological model[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 1-14.
- [6] 石智军,姚克,姚宁平,等.我国煤矿井下坑道钻探技术装备 40 年发展与展望[J].煤炭科学技术,2020,48(4): 1-34.  
SHI Zhijun, YAO Ke, YAO Ningping, et al. 40 years of development and prospect on underground coal mine tunnel drilling technology and equipment in China[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(4): 1-34.
- [7] 李晓豁,闫建伟,张惠波,等.割岩截齿的应力分布及其载荷的仿真研究[J].计算机仿真,2011,28(11): 405-408.  
LI Xiaohuo, YAN Jianwei, ZHANG Huibo, et al. Simulation and research on stress distribution and loads on pick cutting rock[J]. Computer Simulation, 2011, 28(11): 405-408.
- [8] 张婷.基于变换域与高斯混合模型聚类的煤岩识别方法[J].煤炭技术,2018,37(11): 320-323.  
ZHANG Ting. Coal and rock recognition method based on transform domain and clustering of Gaussian mixture model[J]. Coal Technology, 2018, 37(11): 320-323.
- [9] 田立勇,毛君,王启铭.基于采煤机摇臂惰轮轴受力分析的综合煤岩识别方法[J].煤炭学报,2016,41(3): 782-787.  
TIAN Liyong, MAO Jun, WANG Qiming. Coal and rock identification method based on the force of idler shaft in shearer's ranging arm[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 782-787.
- [10] 刘万里,马修泽,张学亮.基于探地雷达的特厚煤层厚度动态探测技术[J].煤炭学报,2021,46(8): 2706-2714.  
LIU Wanli, MA Xiuze, ZHANG Xueliang. Dynamic detection technology of extra-thick coal seam thickness based on ground penetrating radar[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(8): 2706-2714.
- [11] 李力,欧阳春平.基于超声相控阵的煤岩界面识别研究[J].中国矿业大学学报,2017,46(3): 485-492.  
LI Li, OUYANG Chunping. Research on coal-rock interface recognition based on ultrasonic phased array[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(3): 485-492.
- [12] 王海舰,黄梦蝶,高兴宇,等.考虑截齿损耗的多传感信息融合煤岩界面感知识别[J].煤炭学报,2021,46(6): 1995-2008.  
WANG Haijian, HUANG Mengdie, GAO Xingyu, et al. Coal-rock interface recognition based on multi-sensor information fusion considering pick wear[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(6): 1995-2008.
- [13] 吴德忠,刘泉声,黄兴,等.基于边界跟踪和神经网络的煤岩界面识别方法研究[J].煤炭工程,2021,53(6): 140-146.  
WU Dezhong, LIU Quansheng, HUANG Xing, et al. Coal-rock interface recognition method based on boundary tracking algorithm and artificial neural network[J]. Coal Engineering, 2021, 53(6): 140-146.
- [14] SI Lei, XIONG Xiangxiang, WANG Zhongbin, et al. A deep convolutional neural network model for intelligent discrimination between coal and rocks in coal mining face[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020(2): 1-12.
- [15] 孙传猛,王燕平,王冲,等.融合改进 YOLOv3 与三次样条插值的煤岩界面识别方法[J].采矿与岩层控制工程学报,2022,4(1): 81-90.  
SUN Chuanmeng, WANG Yanping, WANG Chong, et al. Coal-rock interface identification method based on improved YOLOv3 and cubic spline interpolation[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(1): 81-90.

(下转第 152 页)

- control strategy of shearer[J]. Coal Engineering, 2020, 52(2): 136-141.
- [16] 李森, 李重重, 刘清. 基于透明地质的综采工作面规划截割协同控制系统[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(4): 175-184.  
LI Sen, LI Zhongzhong, LIU Qing. Planned cutting and collaborative control system for fully-mechanized mining face based on transparent geology[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(4): 175-184.
- [17] 杨芸. 采煤机现状与发展[J]. 工矿自动化, 2017, 43(1): 26-28.  
YANG Yun. Status and development of shearer[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(1): 26-28.
- [18] JAEGER H, HAAS H. Harnessing nonlinearity: predicting chaotic systems and saving energy in wireless communication[J]. *Science*, 2004, 304(5667): 78-80.
- [19] 张昭昭, 朱应钦, 乔俊飞, 等. 一种基于行为空间的回声状态网络参数优化方法[J]. 信息与控制, 2021, 50(5): 556-565.  
ZHANG Zhaozhao, ZHU Yingqin, QIAO Junfei, et al.
- 

(上接第 83 页)

- [16] 张强, 刘志恒, 王海舰, 等. 基于截齿振动及温度特性的煤岩识别研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(3): 1-9, 18.  
ZHANG Qiang, LIU Zhiheng, WANG Haijian, et al. Study on coal and rock identification based on vibration and temperature features of picks[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(3): 1-9, 18.
- [17] 王增才, 富强. 自然  $\gamma$  射线穿透煤层及支架顶梁衰减规律[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2006, 25(6): 804-807.  
WANG Zengcai, FU Qiang. Attenuation of natural  $\gamma$  ray passing through coal seam and hydraulic support[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2006, 25(6): 804-807.
- [18] LIU Guanhua, LIU Zhentang, FENG Junjun, et al. Experimental research on the ultrasonic attenuation mechanism of coal[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2017, 14(3): 502-512.
- An echo state network parameter optimization method based on behavior space[J]. Information and Control, 2021, 50(5): 556-565.
- [20] 刘清, 韩秀琪, 徐兰欣, 等. 综采工作面采煤机和液压支架协同控制技术[J]. 工矿自动化, 2020, 46(5): 43-48.  
LIU Qing, HAN Xiuqi, XU Lanxin, et al. Cooperative control technology of shear and hydraulic support on fully-mechanized coal mining face[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(5): 43-48.
- [21] ZHANG Zhaozhao, LIU Yue, ZHU Yingqin, et al. An online self-adaptive RBF network algorithm based on the Levenberg-Marquardt algorithm[J]. Applied Artificial Intelligence, 2022, 36(1): 3794-3809.
- [22] 李重重, 刘清. 基于截割顶底板高度预测模型的采煤机自动调高技术[J]. 工矿自动化, 2024, 50(1): 9-16.  
LI Zhongzhong, LIU Qing. Automatic height adjustment technology of shearer based on cutting roof and floor height prediction model[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(1): 9-16.
- 
- [19] LIU Yanbing, DHAKAL S, HAO Binyao. Coal and rock interface identification based on wavelet packet decomposition and fuzzy neural network[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems: Applications in Engineering and Technology, 2020, 38(4): 3949-3959.
- [20] 张德义, 刘送永, 贾新庆, 等. 基于红外热像的夹矸巷道断面记忆截割试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3377-3385.  
ZHANG Deyi, LIU Songyong, JIA Xinqing, et al. Experimental study on memory cutting of roadway cross-section containing gangue based on infrared thermography[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3377-3385.
- [21] 路红蕊, 童敏明, 刘栋. 基于钻头振动特性的采煤机煤岩识别研究[J]. 煤炭技术, 2018, 37(3): 242-245.  
LU Hongrui, TONG Minming, LIU Dong. Research on coal-rock recognition based on vibration characteristics of coal shearer drill[J]. Coal Technology, 2018, 37(3): 242-245.