



文章编号: 1671-251X(2024)01-0042-08

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2023070095

## 基于电磁波的煤岩识别技术研究进展

柳圆, 司垒, 王忠宾, 魏东, 顾进恒

(中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 将电磁波应用于煤岩识别中, 可有效提高煤岩界面分辨能力。结合煤岩界面模型, 阐述了运用电磁波技术进行煤岩识别的原理; 介绍了 $\gamma$ 射线法、雷达探测法、太赫兹信号法、电子共振法、X射线法和红外热成像法6种具体的煤岩识别方法, 分析了各方法的原理, 对各方法的优缺点及煤矿井下适用性进行了对比, 并结合实际工业应用分析了各方法的研究现状。 $\gamma$ 射线法在探测距离上具有显著优势, 但存在放射性问题, 基本被淘汰; 雷达探测法具有识别准确的优点, 但由于其信号衰减严重, 探测距离短, 目前一般应用于薄煤层测厚; 太赫兹信号法探测距离短, 只有在井下环境组成稳定时才能应用; 电子共振法信号衰减严重, 探测距离较短且难度较大, 所以目前矿井基本摒弃; X射线法穿透性强, 成像较清晰, 但危害性极大; 红外热成像法中, 主动红外激励法需耗费大量时间对煤岩进行激励, 且在处于高瓦斯的矿井环境中, 存在极大的安全隐患; 截割闪温法虽耗时较短, 但对于截齿多、排布复杂的情况很难实现有效的煤岩识别。指出电磁波回波信息决定着电磁波煤岩识别的准确性, 后续应对其实现深层次挖掘。

**关键词:** 煤岩识别; 电磁波;  $\gamma$ 射线法; 雷达探测法; 太赫兹信号法; 电子共振法; X射线法; 红外热成像法

中图分类号: TD823

文献标志码: A

Research progress on coal rock recognition technology based on electromagnetic waves

LIU Yuan, SI Lei, WANG Zhongbin, WEI Dong, GU Jinheng

(School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Applying electromagnetic waves to coal rock recognition can effectively improve the resolution capability of coal rock interfaces. Based on the coal rock interface model, the principle of using electromagnetic wave technology for coal rock recognition is explained. The paper introduces six methods for coal rock recognition, including  $\gamma$ -ray method, radar detection method, Terahertz signal method, electron resonance method, X-ray method, and infrared thermal imaging method. The principles of each method are analyzed, and the advantages and disadvantages of each method are compared as well as their applicability in coal mines underground. The research status of each method is analyzed in combination with practical industrial applications. The  $\gamma$ -ray method has significant advantages in detection distance, but it has radiation problems. It is basically eliminated. The radar detection method has the advantage of accurate recognition, but due to its severe signal attenuation and short detection distance, it is currently generally used for thickness measurement in thin coal seams. The Terahertz signal method has a short detection distance and can only be applied when the composition of the underground environment is stable. The electronic resonance method has severe signal attenuation, short

收稿日期: 2023-07-26; 修回日期: 2024-01-10; 责任编辑: 胡娟。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52014277); 江苏省自然科学基金面上项目(BK20211245); 江苏高校优势学科建设工程项目建设(苏政办发〔2018〕87号)。

作者简介: 柳圆(1997—), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 研究方向为煤岩识别, E-mail: 897383507@qq.com。通信作者: 司垒(1987—), 男, 江苏徐州人, 副教授, 博士, 研究方向为煤矿智能化开采, E-mail: sileicool@163.com。

引用格式: 柳圆, 司垒, 王忠宾, 等. 基于电磁波的煤岩识别技术研究进展[J]. 工矿自动化, 2024, 50(1): 42-48, 65.

LIU Yuan, SI Lei, WANG Zhongbin, et al. Research progress on coal rock recognition technology based on electromagnetic waves[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(1): 42-48, 65.



扫码移动阅读

detection distance, and high difficulty. It is currently basically abandoned in mines. The X-ray method has strong penetration and clear imaging, but it poses great harm. In the infrared thermal imaging method, the active infrared excitation method requires a lot of time to excite coal and rock, and there are significant safety hazards in high gas mine environments. Although the cutting flash temperature method takes a short time, it is difficult to achieve effective coal rock recognition for situations with multiple cutting teeth and complex layout. It is pointed out that the accuracy of electromagnetic wave coal rock recognition is determined by the echo information of electromagnetic waves, and further in-depth exploration should be carried out.

**Key words:** coal rock recognition; electromagnetic waves;  $\gamma$ -ray method; radar detection method; Terahertz signal method; electron resonance method; X-ray method; infrared thermal imaging method

## 0 引言

破解煤岩识别技术难题是提高采煤工作面智能化水平,推动煤炭清洁、高效、安全生产的关键<sup>[1-4]</sup>。自20世纪60年代起,英、美、澳、德、俄、中等产煤大国便开始了煤岩识别技术的研究。煤岩识别方法包括过程信号识别、图像特征识别、反射光谱识别、超声波探测识别、电磁波探测识别等。过程信号识别和超声波探测识别受机械振动和煤岩硬度影响较大,图像特征识别和反射光谱识别受粉尘、光照、瓦斯和振动等因素的限制,在工程实践中应用较少<sup>[5]</sup>。

微波频段的电磁波携带的信息量大,可避免粉尘及光纤干扰,已被广泛用于煤岩界面识别、金属无损探伤等场景<sup>[6-7]</sup>。将电磁波应用于煤岩识别中,可有效提高煤岩界面的分辨能力。本文阐述了运用电磁波技术进行煤岩识别的原理,介绍了 $\gamma$ 射线法、雷达探测法、太赫兹信号法、电子共振法、X射线法和红外热成像法6种具体的煤岩识别实现方法,并结合实际工业应用分析了各类方法的研究现状。

## 1 电磁波探测原理

电磁波在不同介质中传播时波速不同,同时伴有能量损耗。当电磁波传播到煤层或岩层时,一部分发生折射后继续传播,另一部分则从煤岩接触表面反射后原路返回。因此,可通过电磁波的回波时差计算煤层厚度,达到煤岩识别的目的。此外,还可根据接收到的散射波进行数值反演,实现微波逆散射成像,直接获取煤岩的形状、组成及位置。

理想状态下煤岩界面模型如图1所示。

电磁波在不同介质中的传播速率为

$$v = \frac{V}{\sqrt{\epsilon}} \quad (1)$$

式中:  $V$  为电磁波在真空中的传播速度;  $\epsilon$  为传播介质的相对介电常数。

根据模型可得到雷达天线悬空高度  $H_0$  和煤层厚度  $H_1$ :

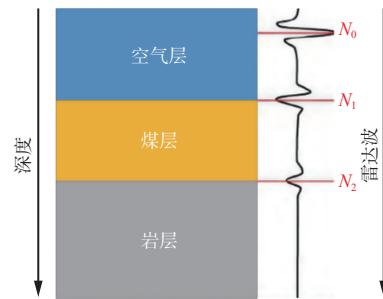


图1 煤岩界面模型

Fig. 1 Coal and rock interface model

$$H_0 = (N_1 + 2 - N_0) V_0 T / [2(M - 1)] \quad (2)$$

$$H_1 = (N_2 - N_1) V_1 T / [2(M - 1)] \quad (3)$$

式中:  $N_1$  为电磁波由空气传输到煤层的时刻;  $N_0$  为初始采样时刻;  $V_0$  为电磁波在空气中的传播速度;  $T$  为采样时窗;  $M$  为采样率;  $N_2$  为电磁波由煤层传输到岩层的时刻;  $V_1$  为电磁波在煤层中的传播速度。

联立式(2)、式(3)得

$$H_1 = \frac{(N_2 - N_1) V_1 H_0}{(N_1 + 2 - N_0) V_0} \quad (4)$$

## 2 基于电磁波的煤岩识别技术

### 2.1 $\gamma$ 射线法

$\gamma$ 射线法可分为主动 $\gamma$ 射线探测法和被动 $\gamma$ 射线探测法2种。主动 $\gamma$ 射线探测法也称自然 $\gamma$ 射线探测法,其原理是利用射线传感器接收煤岩层放射的 $\gamma$ 射线强度,从而推算煤层厚度。被动 $\gamma$ 射线探测法也称人工 $\gamma$ 射线探测法,其原理是在煤层下方放置人工 $\gamma$ 射线的放射源,通过接收穿透煤层的射线来推算煤层厚度。 $\gamma$ 射线法原理如图2所示。

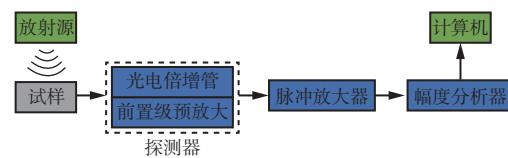


图2  $\gamma$ 射线法原理

Fig. 2 Principle of  $\gamma$ -ray method

1961 年, 英国学者提出用  $\gamma$  射线测量煤炭厚度, 通过  $\gamma$  射线与煤和岩石的相互作用测得煤岩厚度。我国自 20 世纪 80 年代初期开始开展关于  $\gamma$  射线的煤岩识别研究。开滦煤炭科学研究所<sup>[8]</sup>研制出数字式低能射线测灰仪, 利用不同种类煤炭的化学组成不同和对  $\gamma$  射线的吸收不同, 测量不同种类煤炭的灰分。纪纲等<sup>[9]</sup>提出了测量矿井采煤工作面煤皮厚度的方法, 建立了天然  $\gamma$  射线穿过煤层的物理模型, 通过计算机模拟衰减过程获得煤皮厚度。韩成石等<sup>[10]</sup>根据  $\gamma$  射线穿过不同物质时衰减率不同, 提出了区别煤和矸石的方法, 排除矸石效率达 85% 以上。王增才等<sup>[11]</sup>探讨了液压支架顶梁对天然  $\gamma$  射线衰减量的影响, 提出了基于天然  $\gamma$  射线的煤岩界面识别方法, 得出在考虑支架顶梁与不考虑支架顶梁 2 种情况下  $\gamma$  射线强度相差 13.6%。张宁波<sup>[12]</sup>建立了煤矸混合体自然射线辐射模型和煤矸冒落辐射探测有效厚度模型, 确定了煤矸识别指标体系和临界值, 验证了基于自然  $\gamma$  射线的煤矸自动识别技术的适用性。赵明鑫<sup>[13]</sup>提出在综放过程中利用射线进行煤岩识别, 当矸石含量达到 20% 时, 能够精确分辨煤和矸石, 达到了放煤工作面对煤矸识别的精度要求。杨增福等<sup>[14]</sup>对自然  $\gamma$  射线测量统计分布规律及其测量误差的分布规律进行了研究, 推导出新的测量误差公式。

## 2.2 雷达探测法

电磁波遇到煤岩界面时会发生反射, 雷达探测法通过地质雷达的发射天线发射电磁脉冲波, 并接收反射波, 根据反射波的幅度和相位等信息推算煤层厚度。雷达探测法原理如图 3 所示, 发射器发射脉冲信号, 信号经反射到达接收器, 通过接收信号的时间差进行探测。

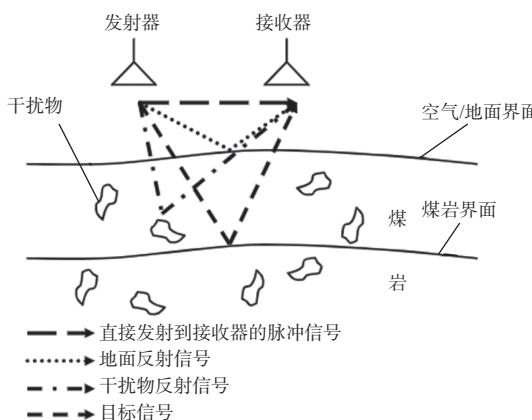


图 3 雷达探测法原理

Fig. 3 Principles of radar detection method

1974 年 D. A. Ellerbruch 等<sup>[15-16]</sup>为解决远程测量煤厚的问题, 首次研究了电磁波在煤层中的穿透性

及其在煤岩界面处的反射, 验证了利用电磁波进行煤层测厚的可行性。文献[17-21]在此基础上进一步研究, 研发了相关雷达探测系统, 取得了一定的成果。

王昕等<sup>[22]</sup>建立了煤岩界面分层介质模型, 分析了电导率和探测深度对煤岩识别的影响。刘帅等<sup>[23]</sup>从煤岩介电常数出发研究了雷达对煤岩的穿透性, 将煤层厚度测量误差控制在 10 mm 内。许献磊等<sup>[24]</sup>通过正演模拟分析了高频雷达波在空气、煤和岩层中的回波特征, 提出了煤岩层位追踪算法, 实现了煤岩层位快速定位。

## 2.3 太赫兹信号法

激光器产生的脉冲进入光谱系统中时被分成 2 个部分: 一部分穿过发射器形成太赫兹脉冲, 最终聚集在探测器上; 另一部分经过平移段后形成延时系统。太赫兹信号法通过获取脉冲信号的幅值和相位, 对皮秒级时域谱进行傅里叶变换, 提取介质在太赫兹波段下的吸收和色散特性, 进而完成煤岩识别。太赫兹信号法原理如图 4 所示。

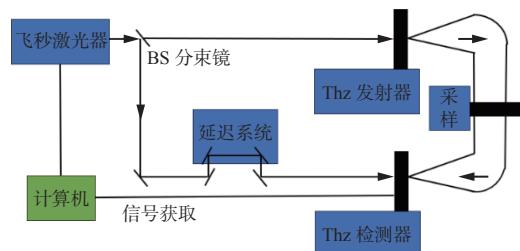


图 4 太赫兹信号法原理

Fig. 4 Principle of Terahertz signal method

杨成全等<sup>[25]</sup>利用太赫兹时域光谱系统, 分析比较了石柱、降尘和新鲜岩石 3 种不同样品所产生的光谱特征, 得出石柱的折射率在整个波段中都趋于稳定, 其余二者则不确定。宝日玛等<sup>[26]</sup>利用太赫兹时域光谱技术对蚀变较强的辉长岩、黑云母花岗岩、花岗岩、碎屑岩和火山碎屑岩 5 种样品进行了光谱测试, 获得了 5 种样品的平均折射率。许长虹等<sup>[27]</sup>利用太赫兹时域光谱技术对煤炭标准物质的氢含量和挥发分进行了研究, 得出二者在太赫兹波段内的吸收系数和介电常数实部均存在负线性关系。王昕等<sup>[28-29]</sup>利用太赫兹光谱技术对煤岩的介电特性进行了研究, 得出了煤岩介质的高衰减性和无明显吸收峰等特征, 采用 Hilbert-Huang 变换对煤岩样的太赫兹光谱进行时频分析, 获得了更高的时频分辨率。虞婧<sup>[30]</sup>利用太赫兹时域光谱技术提取不同样本的太赫兹信号, 结合快速傅里叶变换等方法对煤岩混合物进行了特性分析。苗曙光等<sup>[31]</sup>利用太赫兹透射实验获得 6 种煤岩的太赫兹光谱, 得到各种样品

的折射率、吸收系数及介电常数,实现了煤岩的快速识别。

#### 2.4 电子共振法

电子共振法分为电子顺磁共振(Electron Paramagnetic Resonance, EPR)和电子自旋共振(Electron Spin Resonance, ESR)。电子自转会产生磁矩,在其周围利用线圈发射一定强度的磁场,可以让这些电子磁矩重新取向,从而由低能级电子跃迁成为高能级电子。利用煤层中的不配对电子完成电磁波的吸收,可最终估算出煤层的厚度。电子共振法原理如图5所示。

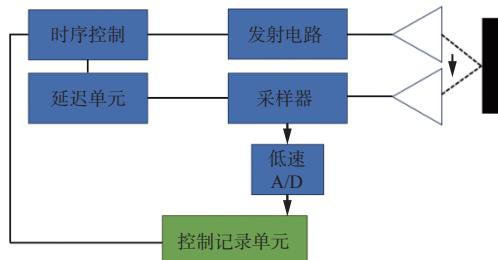


图5 电子共振法原理

Fig. 5 Principle of electron resonance method

苗曙光<sup>[32]</sup>通过时域有限差分法证明了用电子共振法实现煤岩识别的可行性,并用无烟煤、烟煤、褐煤和岩石进行了试验,获得了特征参数变化规律,通过改进最大类间方差法(OTSU)获得了可读性更强的煤岩界面,使得煤岩界面更加准确,易于进行工程解释。

#### 2.5 X射线法

X射线法利用X射线对煤岩穿透性的不同达到识别效果,其原理如图6所示。

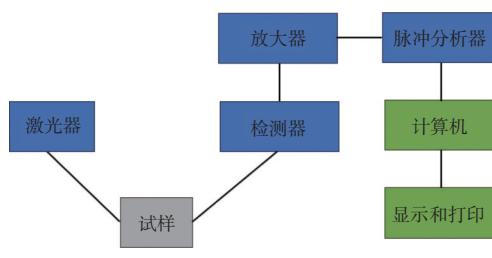


图6 X射线法原理

Fig. 6 Principle of X-ray method

曲星武等<sup>[33]</sup>为了研究高变质程度煤的结构,利用X射线衍射法进行分析,为优质煤和劣质煤的分选提供了方法。李春山<sup>[34]</sup>利用X射线荧光法对岩屑进行分析,测得了岩屑中的12种基本元素,为岩性分析提供了支持。杨慧刚等<sup>[35]</sup>设计了一种基于X射线和机器视觉的煤岩识别分选系统,利用X射线扫描获取煤岩图像,通过图像灰度信息和厚度信息确定分离阈值,提高了煤岩分离精度。耿秀云<sup>[36]</sup>以X光图像为基础,结合物体的高度确定可行的识别

算法,最终实现煤研石的自动识别。司奎等<sup>[37]</sup>提出了基于X射线图像和激光点云融合的煤研识别方法,设计了基于局部熵和全局均差加权的改进OTSU分割算法,提高了X射线图像分割精度和效率,通过提取X射线图像和激光点云的煤研组合特征进行煤研识别,准确率达99.00%。

#### 2.6 红外热成像法

红外热成像法可分为主动红外激励法和截割闪温法。主动红外激励法利用外部辐射源对煤和岩石的表面或内部进行激励,导致煤和岩石快速升温,利用红外热成像仪监测其温度差异,达到识别效果。截割闪温法原理:滚筒在截割煤岩过程中,截齿表面和煤岩接触面因存在颗粒突起而产生摩擦,在截割瞬间接触面上会产生瞬间高温,即截割闪温,同样利用红外热成像仪可完成煤岩识别。红外热成像法原理如图7所示。

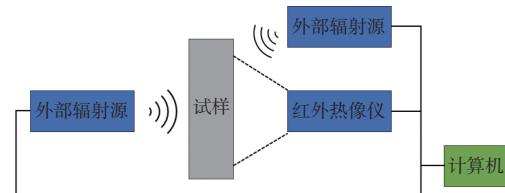


图7 红外热成像法原理

Fig. 7 Principles of infrared thermal imaging

主动红外激励法最初由桂林电子科技大学<sup>[38]</sup>提出,利用红外线对煤壁进行主动激励后,通过采集煤壁降温红外热图像提取煤岩温度场特征信息,完成多种类型煤壁煤岩界面的识别。张强等<sup>[39]</sup>建立了基于红外热成像技术的煤岩界面试验台,利用煤岩试件对5处监测点进行监测分析,得到各个监测点的温度都随着红外射线的激励时长增加而增加,但增长速率各不相同,根据温度变化规律完成煤岩识别。

对于截割闪温法,C. O. Hargrave等<sup>[40]</sup>设计了煤岩截割状态红外检测识别装置,并对煤岩穿透效果与识别性能进行了分析。J. C. Ralston等<sup>[41]</sup>设计了热红外传感装置,基于红外探测原理对煤层的垂直高度进行自动测试,进而确定煤岩界面,实现采煤机自动调高控制。张强等<sup>[42-43]</sup>建立了采煤机截齿截割试验台,分析得到截齿截割不同煤岩时的温度变化规律及闪温特征,为实现煤岩界面动态识别打下基础。

#### 2.7 综合对比

综合对比6种基于电磁波的煤岩识别方法,结果见表1。 $\gamma$ 射线法在探测距离上具有显著优势,但主动 $\gamma$ 射线探测法需要煤层具有一定的放射性,当煤层中的放射性元素含量达不到要求或煤层中的杂质过多时会让该方法失效;被动 $\gamma$ 射线探测法虽然

解决了放射性元素含量的问题,但是放射性元素含量大大增加,易导致机器运转问题,并严重威胁生命安全。雷达探测法具有识别准确的优点,但由于其信号衰减严重,探测距离短,目前一般应用于薄煤层测厚,并要求煤岩电性差异明显。太赫兹信号法具有探测距离短的缺点,只有在井下环境组成稳定时才能应用。电子共振法应用时介质共振吸收现象明

显,但信号衰减严重,探测距离较短且难度较大,所以目前矿井基本摒弃。X 射线法穿透性强,成像较清晰,但危害性极大。红外热成像法中,主动红外激励法需耗费大量时间对煤岩进行激励,且在处于高瓦斯的矿井环境中,存在极大的安全隐患;截割闪温法虽耗时较短,但对于截齿多、排布复杂的情况很难实现有效的煤岩识别。

表 1 6 种基于电磁波的煤岩识别方法综合对比

Table 1 Comprehensive comparison of six coal and rock recognition methods based on electromagnetic wave

识别方法	优点	缺点	煤矿井下适用性
γ射线法	探测距离较远	对放射性元素含量有要求	煤层放射性达标
雷达探测法	识别准确	信号衰减严重,探测距离较短	介质电性差异明显
太赫兹信号法	透射非极性介质多,可同时获取煤岩的多个光学参数	探测距离较短,对环境要求较高	矿井环境组成稳定
电子共振法	介质共振吸收现象明显	信号衰减严重,探测距离较短	目前矿井基本摒弃
X射线法	穿透性强,成像较清晰	探测距离较短,危害性较大	一般用于煤矸分选
红外热成像法	对井下复杂环境适用性强	耗时长	矿井瓦斯含量低,截齿少且排布较简单

### 3 基于电磁波的煤岩识别技术应用现状

目前基于电磁波的煤岩识别方法很多,但类似于  $\gamma$  射线这种危害性较大的方法基本已经被淘汰。山西省阳曲县在全国第 2 次煤预测中,利用电磁波勘探出大致煤地范围,最终确定了煤层厚度。华北科技学院采用探地雷达对开滦(集团)蔚州矿业有限责任公司单侯矿进行测试,在工作面下方 0.8~1.2 m 发现 1 条具有明显反射差且走势稳定的分界线,据此确定了最大回采厚度。山西新景矿煤业有限责任公司采用探地雷达测试了煤层厚度、煤岩界面分布和断层探测<sup>[44]</sup>,得出电磁波在均质中传播时规律性衰减且无明显反射特征,在煤岩界面处有明显反射特征,据此识别煤岩界面准确率极高。山西王家岭煤业有限公司采用探地雷达测试综放工作面顶煤厚度<sup>[45]</sup>,误差仅为 7%。徐坤等<sup>[46]</sup>利用雷达在研究区斜井附近垂直布设 6 条测线,对异常区域范围和埋深进行了精准探测。

### 4 结语

分析了基于电磁波的煤岩识别技术的原理,阐述了  $\gamma$  射线法、雷达探测法、太赫兹信号法、电子共振法、X 射线法和红外热成像法 6 种方法的研究现状,分析了 6 种方法的优缺点,最后介绍了电磁波在煤岩识别中的应用现状。电磁波回波信息决定着电磁波煤岩识别的准确性,因此,后续研究应对其进行深层次挖掘,此外,可充分利用现场条件,对环境进行多方位剖析,对煤岩特性进行多方位比较分析,提

高煤岩识别精度和效率。

### 参考文献(References):

- [1] 杨元. 我国煤矿井下复杂地质条件下钻探技术与装备进展[J]. 内蒙古煤炭经济, 2021(24): 195-197.  
YANG Yuan. Progress of drilling technology and equipment under complex geological conditions in coal mines in China[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2021(24): 195-197.
- [2] 石智军, 刘建林, 李泉新. 我国煤矿区钻进技术装备发展与应用[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(4): 1-6.  
SHI Zhijun, LIU Jianlin, LI Quanxin. Development and application of drilling technique and equipment in coal mining area of China[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(4): 1-6.
- [3] 林柏泉, 李庆钊, 杨威, 等. 基于千米钻机的“三软”煤层瓦斯治理技术及应用[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 1968-1973.  
LIN Baiquan, LI Qingzhao, YANG Wei, et al. Gas control technology and applications for the three-soft coal seam based on VLD-1000 drilling systems[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12) : 1968-1973.
- [4] 张世阔, 曹思华. 复杂地质条件下矿井安全高效开采地质保障技术[J]. 煤矿安全, 2010, 41(4): 70-73.  
ZHANG Shikuo, CAO Sihua. The technology of mine safety and efficient mining geology assurance under complicated geological conditions[J]. Safety in Coal Mines, 2010, 41(4): 70-73.
- [5] 张强, 张润鑫, 刘峻铭, 等. 煤矿智能化开采煤岩识别技术综述[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2): 1-26.

- ZHANG Qiang, ZHANG Runxin, LIU Junming, et al. Review on coal and rock identification technology for intelligent mining in coal mines[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(2): 1-26.
- [6] 许会, 陈艳玲. 微波成像技术及其算法综述[J]. 无损检测, 2012, 34(10): 67-71, 82.
- XU Hui, CHEN Yanling. Overview of the technology and algorithm of microwave imaging[J]. *Nondestructive Testing*, 2012, 34(10): 67-71, 82.
- [7] 李海英, 杨汝良. 超宽带雷达的发展、现状及应用[J]. 遥感技术与应用, 2001(3): 178-183.
- LI Haiying, YANG Ruliang. Development, state-of-the-art and applications of ultra-wideband radar[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2001(3) : 178-183.
- [8] 开滦煤炭科学研究所. 低能 $\gamma$ 射线测灰仪[J]. 煤炭科学技术, 1977, 5(7): 26-28.
- Kailuan Coal Science Research Institute. Low energy gamma ray ash analyzer[J]. *Coal Science and Technology*, 1977, 5(7): 26-28.
- [9] 纪钢, 李冬辉, 吴学胜. 天然 $\gamma$ 射线穿过煤的规律性研究[J]. 煤炭学报, 1994, 19(1): 65-70.
- JI Gang, LI Donghui, WU Xuesheng. Study of rules of natural  $\gamma$ -rays passing through coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 1994, 19(1): 65-70.
- [10] 韩成石, 董长双, 周西军, 等. 煤和矸石 $\gamma$ -射线分选系统的研究[J]. 山西矿业学院学报, 1997, 15(2): 45-49.
- HAN Chengshi, DONG Changshuang, ZHOU Xijun, et al. Research on a system of separating coal from stone by  $\gamma$ -ray[J]. *Shanxi Mining Institute Learned Journal*, 1997, 15(2): 45-49.
- [11] 王增才, 孟惠荣. 支架顶梁对 $\gamma$ 射线方法测量顶煤厚度影响研究[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(3): 323-326.
- WANG Zengcai, MENG Huirong. Influence of canopy of hydraulic support upon measuring thickness of coal seam by natural gamma ray[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2002, 31(3) : 323-326.
- [12] 张宁波. 综放开采煤矸自然射线辐射规律及识别研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- ZHANG Ningbo. Detection and radiation law of natural gamma ray from coal and roof-rock in the fully mechanized top coal caving mining[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [13] 赵明鑫. 综放煤矸放落的环境特征及自动识别的影响因素研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- ZHAO Mingxin. Study on drawing environmental characteristics and influence factors of coal-gangue automatic identification in fully mechanized top coal caving mining[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [14] 杨增福, 张海军, 蒲平武. 基于自然 $\gamma$ 射线探测原理的煤层厚度测量精度优化方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(增刊2): 287-291.
- YANG Zengfu, ZHANG Haijun, PU Pingwu. Optimization method of coal seam thickness measurement accuracy based on natural  $\gamma$ -ray detection principle[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(S2): 287-291.
- [15] ELLERBRUCH D A, ADAMS J W. Microwave measurement of coal layer thickness[R/OL]. [2023-05-12]. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nbsir74-387.pdf>.
- [16] ELLERBRUCH D A, BELSHER D R. Electromagnetic technique of measuring coal layer thickness[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 1978, 16(2) : 126-133.
- [17] DANIELS D J. Short pulse radar for stratified lossy dielectric layer measurement[J]. *IEE Proceedings F(Communications, Radar and Signal Processing)* , 1980, 127(5): 384-388.
- [18] CHUFO R L, JOHNSON W J. A radar coal thickness sensor[C]. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Dearborn, 1991: 1182-1191.
- [19] MOWREY G L, GANOE C, MONAGHAN W D. A radar-based highwall rib-thickness monitoring system[J]. *Fuel and Energy Abstracts*, 1997, 38(3): 194.
- [20] RALSTON J C, HAINSWORTH D W, MCPHEE R J. Application of ground penetrating radar for coal thickness measurement[C]. *IEEE Region 10 Annual Conference*, Brisbane, 1997: 835-838.
- [21] STRANGE A D, CHANDRAN V, RALSTON J C. Coal seam thickness estimation using GPR and higher order statistics - the near-surface case[C]. *The Eighth International Symposium on Signal Processing and Its Applications*, Sydney, 2005: 855-858.
- [22] 王昕, 丁恩杰, 胡克想, 等. 煤岩散射特性对探地雷达探测煤岩界面的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(1): 34-41.
- WANG Xin, DING Enjie, HU Kexiang, et al. Effects of coal-rock scattering characteristics on the GPR detection of coal-rock interface[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2016, 45(1): 34-41.
- [23] 刘帅, 赵文生, 高思伟. 超宽带探地雷达煤层厚度探测试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(8): 207-212.
- LIU Shuai, ZHAO Wensheng, GAO Siwei. Experimental study on coal seam thickness measurement of ultra-wide band ground penetrating radar[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(8): 207-212.
- [24] 许献磊, 王一丹, 朱鹏桥, 等. 基于高频雷达波的煤岩层位识别与追踪方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2022,

- 50(7): 50-58.
- XU Xianlei, WANG Yidan, ZHU Pengqiao, et al. Research on coal and rock horizon identification and tracking method based on high frequency radar waves[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(7): 50-58.
- [25] 杨成全, 孟田华, 卢玉和. 云冈石窟石质、降尘样品的太赫兹光谱分析[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2011, 27(2): 17-19.
- YANG Chengquan, MENG Tianhua, LU Yuhe. Research on Terahertz spectrum of the Yungang Grotto samples[J]. Journal of Shanxi Datong University (Natural Science Edition), 2011, 27(2): 17-19.
- [26] 宝日玛, 赵昆, 赵卉. 岩石的太赫兹光谱特性研究[J]. 现代科学仪器, 2013(1): 115-117, 121.
- BAO Rima, ZHAO Kun, ZHAO Hui. Optical property of rock in Terahertz region[J]. Modern Scientific Instruments, 2013(1): 115-117, 121.
- [27] 许长虹, 滕学明, 赵卉, 等. 煤炭中氢含量与挥发分的太赫兹时域光谱研究[J]. 现代科学仪器, 2013(4): 228-230.
- XU Changhong, TENG Xueming, ZHAO Hui, et al. Analysis of hydrogen and volatile matter content in coal maceral using time-resolved Terahertz spectroscopy[J]. Modern Scientific Instruments, 2013(4): 228-230.
- [28] 王昕, 苗曙光, 丁恩杰. 煤岩介质在太赫兹频段的介电特性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(4): 739-746.
- WANG Xin, MIAO Shuguang, DING Enjie. Study of dielectric property of coal and rock medium in Terahertz domain[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(4): 739-746.
- [29] 王昕, 胡克想, 俞啸, 等. 基于太赫兹时域光谱技术的煤岩界面识别[J]. 工矿自动化, 2017, 43(1): 29-34.
- WANG Xin, HU Kexiang, YU Xiao, et al. Coal-rock interface recognition based on Terahertz time-domain spectroscopy[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(1): 29-34.
- [30] 虞婧. 基于太赫兹光谱技术的煤岩在线识别方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- YU Jing. Study on online identification method of coal and rock based on Terahertz spectroscopy[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [31] 苗曙光, 邵丹, 刘忠育, 等. 基于太赫兹时域光谱技术的煤岩识别方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(6): 1755-1760.
- MIAO Shuguang, SHAO Dan, LIU Zhongyu, et al. Study on coal-rock identification method based on Terahertz time-domain spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(6): 1755-1760.
- [32] 苗曙光. 基于 GPR 与 ESR 的煤岩性状识别方法研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- MIAO Shuguang. Study of coal-rock characteristics identification method based on GPR and ESR[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [33] 曲星武, 王金城. 煤的 X 射线分析[J]. 煤田地质与勘探, 1980, 8(2): 33-40.
- QU Xingwu, WANG Jincheng. X-ray analysis of coal[J]. Coal Geology & Exploration, 1980, 8(2): 33-40.
- [34] 李春山. X 射线荧光岩屑识别技术研究[D]. 西安: 西北大学, 2010.
- LI Chunshan. Research on X-ray fluorescence cuttings identification technology[D]. Xi'an: Northwest University, 2010.
- [35] 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.
- [36] 耿秀云. 基于 X 光图像处理的煤矸石自动分选系统的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- GENG Xiuyun. Research on automatic sorting system of coal and rock based on X-ray image processing[D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.
- [37] 司垒, 谭超, 朱嘉皓, 等. 基于 X 射线图像和激光点云的煤矸识别方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9): 193-205.
- SI Lei, TAN Chao, ZHU Jiaohao, et al. A coal-gangue recognition method based on X-ray image and laser point cloud[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9): 193-205.
- [38] 桂林电子科技大学. 一种基于主动激励红外热成像的煤岩界面识别装置: CN201721418045.6[P]. 2017-10-31.
- Guilin University of Electronic Technology. A coal-rock interface recognition device based on active excitation infrared thermal imaging is presented: CN201721418045.6[P]. 2017-10-31.
- [39] 张强, 孙绍安, 张坤, 等. 基于主动红外激励的煤岩界面识别[J]. 煤炭学报, 2020, 45(9): 3363-3370.
- ZHANG Qiang, SUN Shao'an, ZHANG Kun, et al. Coal and rock interface identification based on active infrared excitation[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(9): 3363-3370.
- [40] HARGRAVE C O, REID D C, HAINSWORTH D W, et al. Mining methods and apparatus: US 2009/0212216A1[P]. 2009-08-27.

(下转第 65 页)

- Multimodal machine learning: a survey and taxonomy[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2019, 41(2):423-443.
- [14] GAO Mingliang, JIANG Jun, ZOU Guofeng, et al. RGB-D-based object recognition using multimodal convolutional neural networks: a survey[J]. *IEEE Access*, 2019, 7:43110-43136.
- [15] LIN T-Y, DOLLAR P, GIRSHICK R B, et al. Feature pyramid networks for object detection[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Honolulu, 2017: 936-944.
- [16] HE Kaiming, ZHANG Xiangyu, REN Shaoqing, et al. Deep residual learning for image recognition[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Las Vegas, 2016: 770-778.
- [17] MA Jiayi, MA Yong, LI Chang. Infrared and visible image fusion methods and applications: a survey[J]. *Information Fusion*, 2019, 45: 153-178.
- [18] RAMACHANDRAM D, TAYLOR G W. Deep multimodal learning: a survey on recent advances and trends[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2017, 34(6):96-108.
- [19] HOU Qibin, ZHOU Daquan, FENG Jiashi. Coordinate attention for efficient mobile network design[C]. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Nashville, 2021: 13713-13722.
- [20] REN Shaoqing, HE Kaiming, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017, 39(6): 1137-1149.
- [21] WANG Xinlong, ZHANG Rufeng, KONG Tao, et al. SOLOv2: dynamic and fast instance segmentation [EB/OL]. [2023-09-12]. <https://arxiv.org/abs/2003.10152>.
- [22] CHEN Hao, SUN Kunyang, TIAN Zhi, et al. BlendMask: top-down meets bottom-up for instance segmentation[C]. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Seattle, 2020: 8570-8578.
- [23] HE Kaiming, GKIOXARI G, DOLLÁR P, et al. Mask R-CNN[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2017, 42(2): 2980-2988.
- [24] HUANG Zhaojin, HUANG Lichao, GONG Yongchao, et al. Mask scoring R-CNN[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Washington, 2019: 6409-6418.
- [25] KE Lei, DANELIJAN M, LI Xia, et al. Mask transfiner for high-quality instance segmentation[C]. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, New Orleans, 2022: 4402-4411.

(上接第 48 页)

- [41] RALSTON J C, STRANGE A D. Thermal infrared-based seam tracking for intelligent longwall shearer horizon control[C]. 12th Coal Operators' Conference, 2012: 78-85.
- [42] 张强, 王海舰, 王兆, 等. 基于红外热像检测的截齿煤岩截割特性与闪温分析[J]. 传感技术学报, 2016, 29(5): 686-692.
- ZHANG Qiang, WANG Haijian, WANG Zhao, et al. Analysis of coal-rock's cutting characteristics and flash temperature for peak based on infrared thermal image testing[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2016, 29(5): 686-692.
- [43] 张强, 王海舰, 郭桐, 等. 基于截齿截割红外热像的采煤机煤岩界面识别研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(5): 22-27.
- ZHANG Qiang, WANG Haijian, GUO Tong, et al. Study on coal-rock interface recognition of coal shearer based on cutting infrared thermal image of picks[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(5): 22-27.
- [44] 刘建伟. KJH-D 型防爆探地雷达在新景矿掘进巷道的应用[J]. 山东煤炭科技, 2021, 39(12): 182-185.
- LIU Jianwei. Application of KJH-D explosion-proof ground penetrating radar in driving roadway of Xinjing Coal Mine[J]. *Shandong Coal Science and Technology*, 2021, 39(12): 182-185.
- [45] 池津维. 王家岭煤矿 12309 工作面顶煤破碎特征及运移规律研究[J]. 能源与环保, 2023, 45(2): 281-284.
- CHI Jinwei. Research on top coal fragmentation characteristics and movement law of 12309 working face in Wangjialing Coal Mine[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2023, 45(2): 281-284.
- [46] 徐坤, 李欣睿, 陈忍忍. 地质雷达在煤矿采空区的探测应用研究[J]. 地质装备, 2022, 23(6): 25-27, 37.
- XU Kun, LI Xinrui, CHEN Renren. Research on the detection application of ground penetration radar in coal mine goaf[J]. *Equipment for Geotechnical Engineering*, 2022, 23(6): 25-27, 37.