

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311885

综放工作面煤矸识别技术及其应用*

李嘉豪, 司 垒, 王忠宾, 魏 东, 顾进恒
(中国矿业大学机电工程学院 徐州 221116)

摘要:综放工作面煤矸识别技术作为智能放煤开采的关键技术,已经成为煤炭智能开采领域的技术难题。首先介绍了综放工作面煤矸识别技术的重要性及其对生产安全和经济效益的影响。随后,指出了该技术目前存在的问题和挑战,如难以识别不同形状、颜色和深度的煤块和岩层;识别过程中噪声和复杂背景的影响等。详细阐述了综放工作面煤矸识别技术的主要方法如射线法、视觉法和振动与声音信号法。通过对煤矸识别方法的原理、技术特点和优缺点等方面进行分析,全面评估了当前综放工作面煤矸识别技术的应用现状以及各种方法的适用条件和存在的问题。最后,探讨了该技术的未来发展趋势,强调了多传感器融合、深度学习和智能决策与实时监测作为当前技术发展的主要方向。

关键词:综放工作面;煤炭开采;煤矸识别;煤矸混合物

中图分类号: TH6 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 440. 60

Coal gangue identification technology and its application in fully-mechanized coal mining face

Li Jiahao, Si Lei, Wang Zhongbin, Wei Dong, Gu Jinheng

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

Abstract: As the key technology of intelligent coal mining, gangue recognition technology has become a technical challenge in the field of intelligent coal mining. This paper firstly introduces the importance of coal gangue recognition technology and its impact on production safety and economic benefits. Subsequently, it points out such existing problems and challenges as the difficulty of identifying coal lumps and rock seams with different shapes, colors and depths, and the influence of noise as well as complex background in the process of identification, etc. In the next section, it describes in detail the key problems of coal gangue identification technology for integrated face mining. Next, the main methods of coal gangue recognition technology in comprehensive discharge working face are elaborated in detail: ray method, visual method, and vibration and sound signal method. By analyzing the principle, technical characteristics, advantages and disadvantages of gangue recognition methods, the current application status of gangue recognition technology in the comprehensive discharge working face, as well as the applicable conditions and problems of various methods are comprehensively evaluated. Finally, this paper discusses the future trend of this technology by emphasizing multi-sensor fusion, deep learning, intelligent decision-making and real-time monitoring as the core of current technological development.

Keywords: consolidated working face; coal mining; coal gangue identification; coal gangue mixture

0 引 言

煤炭在全球能源结构中占据着重要的地位。在过去

的近一个世纪里,全球经历了3次能源革命,但是煤炭在全球能源结构中仍然扮演着至关重要的角色,成为最重要的基础能源之一^[1]。煤炭是现代世界的一个重要推动因素,它提供了世界上41%的电力,是生产世界上70%的

收稿日期:2023-09-05 Received Date: 2023-09-05

* 基金项目:国家自然科学基金面上项目(52074271,52174152)、江苏省自然科学基金面上项目(BK20211245)、中国矿业大学研究生创新计划项目(KYCX22_2517)、徐州市基础 research 计划项目(KC23051)资助

钢铁和90%的水泥的重要原材料^[2]。尽管各国能源政策发生变化,但煤炭在能源结构中的比重长期维持在30%左右,因此实现完全的“去煤化”仍然面临巨大的挑战^[3]。

在煤炭生产过程中,矸石主要来源于如下3个方面^[4]。

1) 巷道掘进,在巷道掘进过程中会产生矸石,通常占原煤产量的10%左右。这些矸石主要由页岩、粉砂岩、砂岩和石灰岩等构成。

2) 采煤和放煤,在采煤和放煤过程中,从顶板、底板和夹层中开采出来的矸石也是一个重要的来源。

3) 选煤或洗煤,在进行洗煤或选煤过程中,会产生洗矸石,其数量通常约占原煤产量的10%~12%。

据统计,目前中国每年的矸石排放量约为 $100 \times 10^6 \text{ t}$ ^[5]。这些排放的矸石不仅占用大量土地资源,还存在自燃的风险,对人们的生命安全构成严重威胁^[6]。因此,煤矸分离是煤矿生产过程中不可或缺的工序。

综放工作面煤矸识别作为煤炭领域亟需解决的技术难题,是煤矿智能化的关键技术之一,是实现综放工作面无人化的前提^[7-8]。该技术的应用可以降低入洗成本,提高煤矿的安全性,提升煤品质,增加企业的经济效益,同时也有利于环境保护和资源节约。

根据不同工作面的特点,煤矸识别技术可分为综放工作面的煤矸混合度识别、采煤工作面的煤岩界面识别以及井上的煤矸分选。根据使用的工作方式,可将其划分为接触式识别和非接触式识别。煤和矸石的物理特性是通过它们的化学成分和分子结构在外观上表现出来,主要包括裂隙、反射率、密度、导电性、脆性、断口形态、硬度、光泽和颜色等特征^[9]。因此根据煤岩之间的特征差异不同煤矸识别技术可分为基于纹理的识别方法、基于灰度的识别方法和基于监测信号的识别方法等。根据技术类别的不同可分为自然射线法、图像处理法、信号处理法和电磁探测法等。

综放工作面煤矸识别是利用传感器技术、集成电路技术和通信技术等手段来自动识别煤和矸石的过程。随着计算机技术的快速发展,煤矿生产的自动化水平显著提高,为实现综放工作面的无人化操作创造了可能。这些先进技术的应用将极大地提升煤炭生产的安全性水平。

本文从综放工作面煤矸的特点入手,介绍煤矸识别技术的基本原理和分类,并针对综放工作面的特殊环境和需求,深入探讨各种识别技术的原理、应用现状、存在问题 and 未来发展趋势。本文旨在探讨综放工作面煤矸识别技术的现状和未来发展趋势,为该领域的进一步研究提供深入的分析 and 理论支持。

1 综放工作面煤矸的特点及识别难点

1.1 煤矸的成分及形态特征

煤矸混合物中煤、矸石和煤屑的比例不同,其成分特征也有所差异。因此,对煤矸的成分特征进行分析和判断,有助于进一步识别和分类煤矸。

煤是综放工作面煤矸混合物中的主要组成部分,其含量取决于采煤工艺和煤层的性质,一般在30%~80%。矸石是指在采煤过程中割除煤层上的非煤物质,如岩石、泥土等,其含量在20%~70%,且矸石的颗粒大小和形状不均匀。

煤矸的形态特征主要包括颜色、形状、大小和密度等。不同类型的煤矸具有不同的形态特征,因此,通过对煤矸的形态特征进行分析和研究,可以有效地区分和识别煤矸。在综放工作面上,煤矸一般呈现出如下5种形态特征。

1) 大块煤炭,指直径 $>50 \text{ mm}$ 的煤块,通常是由于采煤机在采煤过程中未将煤块破碎而形成的。

2) 小块煤炭,指直径 $<50 \text{ mm}$ 的煤块,通常是由于采煤机在采煤过程中将煤块破碎而形成的。

3) 煤泥,指在采煤过程中煤炭和岩石混合后形成的含水的煤泥状物质。

4) 岩石,指在采煤过程中采出的非煤炭物质,包括煤层顶底板、煤体夹层和岩层等。

5) 其他煤矸,指在采煤过程中产生的其他废弃物,如木材、钢材、塑料等。

综放工作面煤矸的成分和形态特征具有如下特点。

1) 多样性,综放工作面煤矸的类型和性质多样,包括岩石、煤屑、钢筋等多种物质。

2) 复杂性,综放工作面煤矸的形态复杂,存在不规则形状和混杂的情况,同时存在很多干扰因素,如水泥尘、油烟等。

3) 分布不均匀,综放工作面煤矸的分布不均匀,可能出现断层、夹矸等情况。

1.2 识别的难点

由于综放工作面环境较为恶劣,其对于实现煤矸精准识别有如下难点。

1) 特征提取难度大,综放工作面煤矸的多样性和复杂性,导致传统的图像处理方法难以提取出有效的特征。

2) 实时性要求高,综放工作面煤矸识别需要在实时性的条件下完成,但是传统的机器学习和图像处理方法通常需要较长的处理时间。

3) 精度要求高,综放工作面煤矸识别的误判率和漏判率都需要控制在较低的水平,因为误判和漏判都会影响采掘的效率和安全性。

4) 传感器数据质量不稳定,综放工作面煤矸识别往往需要依赖传感器数据,但是极其恶劣的环境导致传感器数据质量不稳定,存在干扰和噪声。

5) 环境复杂,综放工作面煤矸识别环境复杂,存在大量的干扰因素,如光线、尘埃等。

综上所述,综放工作面煤矸的特点和识别难点都具有一定的复杂性和多样性,因此需要采用多种方法和手段进行处理。对于这些难点,需要不断地进行研究和探索,以提高综放工作面煤矸识别的精度和实时性。

综放工作面煤矸识别是实现煤炭生产无人化的关键技术之一,国内外许多学者对此做出了大量的研究,已经提出了一些解决方案。

2 煤矸识别技术的分类及原理

2.1 射线识别法

射线识别法是一种常用的煤矸识别技术,分为人工射线法和自然射线法。

其中人工射线法的原理是利用射线在物质中的不同吸收特性来区分煤炭和煤矸。一般使用 X 射线或伽马射线进行照射(图 1),并测量煤炭和矸石对射线的吸收情况。由于煤炭的密度较低,散射和吸收射线的能力较弱,因此其在射线照射下的削减率比矸石高,可以通过测量吸收射线的数量来鉴别煤炭和煤矸。

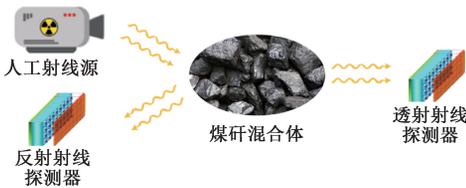


图 1 人工射线法原理

Fig. 1 Principle of artificial ray method

自然放射性是指存在于自然界中的放射性同位素的现象。煤炭和岩石都是通过沉积过程形成的物质,它们都含有天然放射性元素(主要是铀系和钍系元素),这些元素能够释放出天然 γ 射线(图 2)。

根据研究,不同的煤矸石放射性存在明显的区别^[10]。一般情况下,煤的放射性强度相对较低,而砾岩、粗砂岩、中砂岩、细砂岩、粉砂岩、砂质泥岩、页岩和泥岩的放射性逐渐增强。这意味着颗粒度越小、含泥量越高的成岩物质,其辐射性越强。

此外,在不同的沉积岩中,铀、钍和钾的含量相差很大,因此不同类型的沉积物具有不同的放射特征。总之,通过自然射线法可以测量出不同类型的煤矸石中所含放射性元素的含量和辐射强度,并据此进行自动识别和分类。

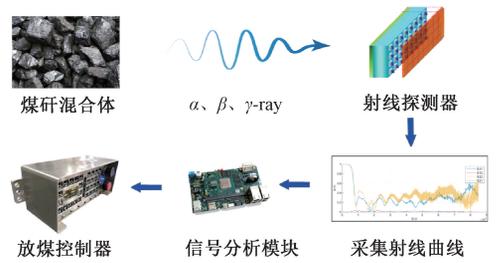


图 2 自然射线法原理

Fig. 2 Principle of natural ray method

2.2 视觉识别法

关于视觉识别法,有两种主要思路。其中之一是利用经典的图像处理算法计算煤矸混合度。其次是利用机器学习对煤矸图像进行图像分割。近年来,深度学习技术逐渐成熟,一些专家学者开始将其应用于煤矸识别领域^[11]。

在传统的图像识别领域,纹理和灰度是广泛应用的特征指标^[12]。煤和岩石在特性上存在明显差异,主要体现在颜色、硬度和光泽方面。如图 3 所示,煤的颜色较深,而大部分岩石(或矸石)呈现白色^[13]。煤普遍具有光泽,而岩石则缺乏此特征,形成鲜明对比^[14]。

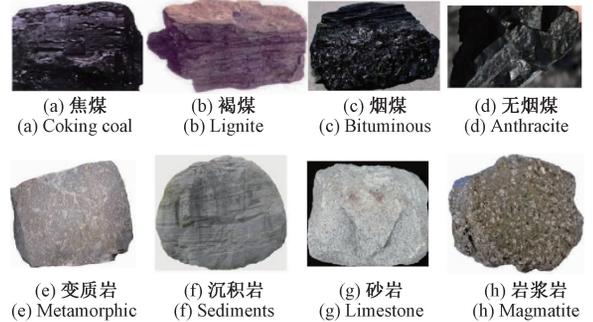


图 3 不同的煤矸种类

Fig. 3 Different types of coal gangue

常规的煤矸图像辨识方法包括灰度阈值法和纹理分析法。依据图 3 中煤矸种类^[15]可知,煤的外观颜色为亮黑色,而矸石则为白灰色。在相同光照条件下照射煤和矸石时,煤块会在某些区域产生反光亮点,而矸石则整体呈灰色^[16]。因此,煤和矸石的灰度概率分布存在显著的不同,一般而言,煤的灰度水平较低,而矸石的灰度则较高^[17],基于这一特性,可以采用灰度阈值法进行检测。

纹理是物质的一种本质属性,可以用于描述图像中的灰度局部模式和排列规律,从而定量表征图像的信息^[18]。在煤矸识别领域中,不同的煤矸样本展现出各自独特的纹理形态。通过提取纹理特征的参数,如纹理强度、方向性、熵值、相关性、对比度和能量等,可以实现对煤矸的准确识别。这些参数的测量可以反映煤矸纹理的

特征,进而用于区分不同类型的煤岩。

在工程领域的研究中,人工智能技术的应用为机器视觉领域带来了显著的发展,并使得图像的特征参数能

够被充分利用于目标的分类和识别过程中。近年来很多学者利用机器视觉以及深度学习的方法对煤矸图像进行图像分割(图4)。

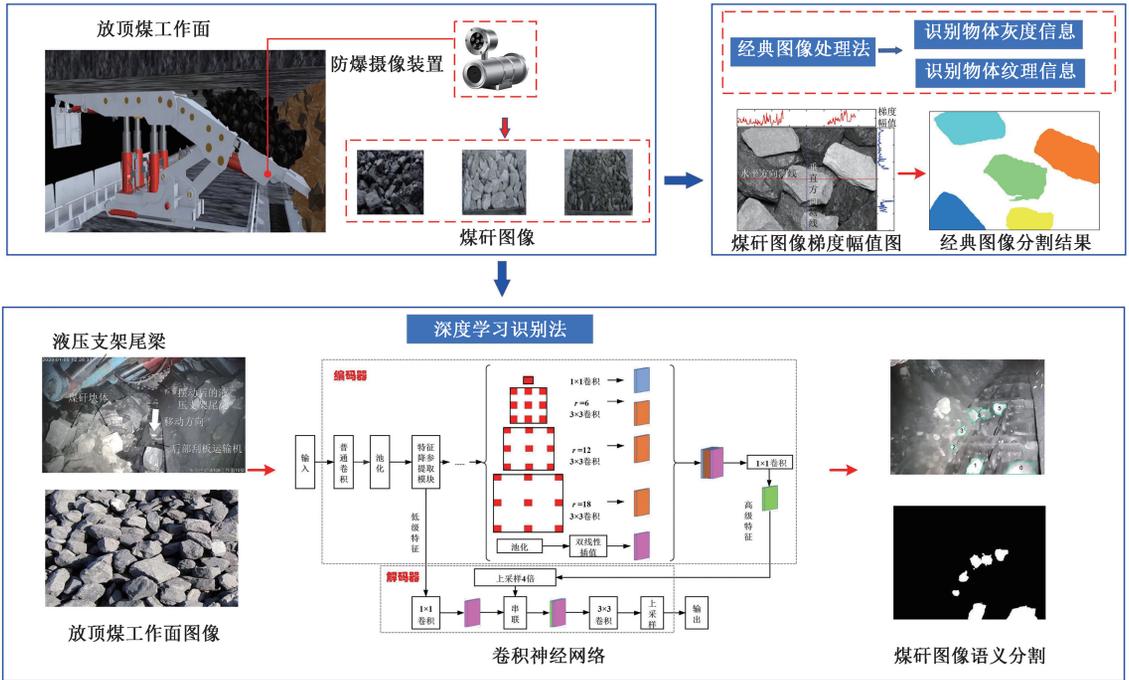


图4 图像识别法原理

Fig. 4 Principle of image recognition

通过构建深度卷积神经网络(CNN)等模型,可以将图像分为不同的区域,每个区域代表一个特定的物体或区域。通过对大量标注好的图像进行训练,网络可以学习到不同特征的特征,并能够准确地将煤矸图像中的不同部分进行分割和分类。这种方法不仅充分利用了图像的特征信息,还能够实现对复杂图像的自动化分析和识别。

2.3 振动与声音信号识别法

振动与声音信号识别法是一种常用的方法,通过采集放煤过程中综放工作面产生的相关信号进行分析处理并识别,主要是对采集到的振动信号和声音信号进行特征提取和分类。

放顶煤开采过程中,对振动信号进行辨识是有效的煤矸识别方法之一。近年来,学者们对该方法进行了广泛的研究。如图5所示,基于振动信号的方法通过采集放顶煤工作面的目标信号,并利用现代信号处理技术对不同测点在不同工况下的振动信号进行分析,从中提取相应工况的特征参数。这种方法依赖于振动传感器的应用,能够准确地捕捉到工作面的振动信号,并通过信号处理技术对信号进行分析和处理,从而得到与工况相关的特征参数^[19]。如表1所示^[20],不同种类的煤矸石普氏系数不同,导致其撞击液压支架尾梁的振动信号特征不同,

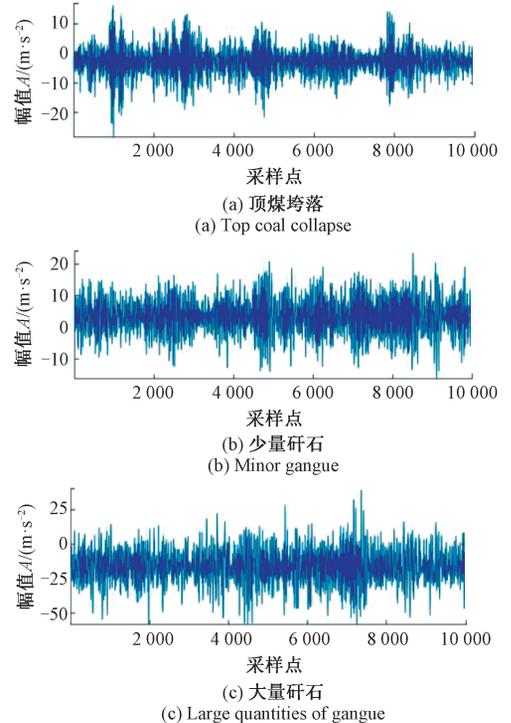


图5 综放工作面尾梁振动信号

Fig. 5 Vibration signal of fully-mechanized top coal caving working face

表1 煤和矸石的普氏硬度系数

Table 1 Hardness of coal and gangue

煤矿	煤	矸石
金鑫矿	0.714	3.369
协庄矿	1.582	4.448
夹河矿	2.421	6.571

根据信号的特征参数的差异,对放顶煤工作面的煤矸状况进行识别^[21],并最终通过分类器判定煤矸的类别。

采用振动信号识别法通常包括振动信号的采集、预处理、特征提取和分类4个步骤^[22]。

首先是振动信号的采集,如图6所示,一般采用加速度传感器或振动传感器对工作面进行监测,得到振动信号数据。然后,对采集到的振动信号进行预处理,主要包括滤波、降噪等处理,以消除噪声和干扰信号的影响。预处理后的振动信号更加准确和可靠,便于后续的特征提取和分类。

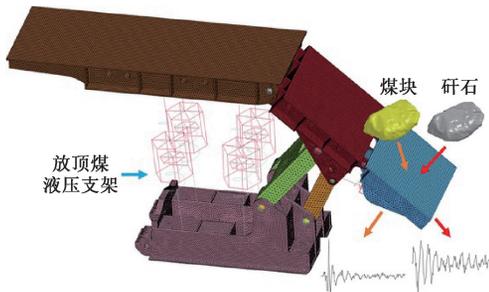


图6 综放工作面采集振动信号

Fig. 6 Vibration signal acquisition diagram of fully-mechanized top coal caving working face

接着,通过小波变换对振动信号进行分析,得到具有代表性的时间-频率特征。小波变换是一种基于信号多分辨率分析的方法,能够提取出振动信号的时间和频率信息,并能够处理非平稳信号。该方法将振动信号分解为不同频率的小波系数,得到时间-频率图像,同时也能够提取出一系列代表振动信号特征的数学指标,如能量、均值、方差等,作为特征向量的组成部分。

最后,将得到的特征向量作为分类器的输入,采用支持向量机(SVM)等分类器对煤矸和岩层进行分类。支持向量机是一种常用的分类器,主要基于构建最优的超平面来实现分类,能够处理高维数据和非线性问题,并具有较好的分类性能和鲁棒性。

基于声波信号的煤矸识别方法和振动信号法类似^[23],利用了煤和矸石物理特性的差异性,通过研究其产生的声音信号来实现煤矸识别。当煤矸坍塌并与支架尾梁碰撞时,产生的声音信号呈现出独特的特征。这种

基于声波信号的方法为实现自动化放顶煤提供了一种可行的选择。通过对煤矸产生的声音信号进行分析和处理,我们能够准确地区分煤和矸石,从而实现放顶煤的自动化过程。

2.4 其他识别方法

近年来研究人员将红外光谱技术引入煤矸识别领域。近红外光谱是一种分子振动光谱,通过分析物质对电磁波的反射和吸收特性,可以获得有关其煤矸混合物的成分和结构等特性的信息^[24]。在煤矸识别中,可以利用红外光谱波段测量煤和矸石的吸收特性,从而区分它们的结构和成分。

通过采集多种类型的煤和矸石样本,可以对不同探测距离和不同粉尘浓度环境下的煤矸近红外反射光谱进行测定^[25],之后对近红外光谱数据进行分析,不同种类的煤矸石其近红外反射光谱呈现不同的特征,可以根据这一特点判断当前的煤矸类别^[26]。

综放工作面放煤量激光扫描是一种基于激光三维扫描技术的无损检测方法,主要用于对工作面的放煤量进行精确测量。该技术通过激光束的发射和接收,获取工作面上物体的三维坐标信息,从而实现煤层放煤量的测量。如图7所示,激光扫描仪通过发射激光束扫描工作面,得到反射回来的光束,并将这些光束的坐标信息与扫描仪的位置和方向信息进行整合,最终得到工作面上各点的三维坐标。这些坐标可以被用来生成一个高精度的三维点云模型,反映出工作面的形状和表面特征^[27]。通过对三维点云数据的处理,可以计算出煤层的厚度和放煤量等参数,并以可视化的方式呈现出来。

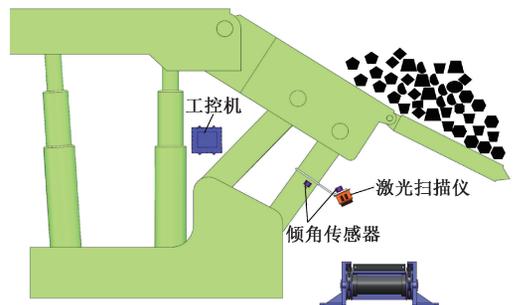


图7 放煤量激光扫描自适应监测系统模型

Fig. 7 Model of laser scanning and adaptive monitoring system for coal output

微波信号相较于其他传感信号(如振动、红外、可见光图像等),具有独特的优点。微波信号几乎可以在所有介质中传播,并且其较宽的频率范围可以实现高精度的监测^[28]。因此有学者开始研究基于微波探测的煤矸识别技术(图8),由于煤和矸石的相对介电常数以及电导率不同,导致不同含矸率的煤矸混合物对于微波的回波

信号必然有很大区别,通过对微波信号的分析可以判断放煤工作面的混矸率。

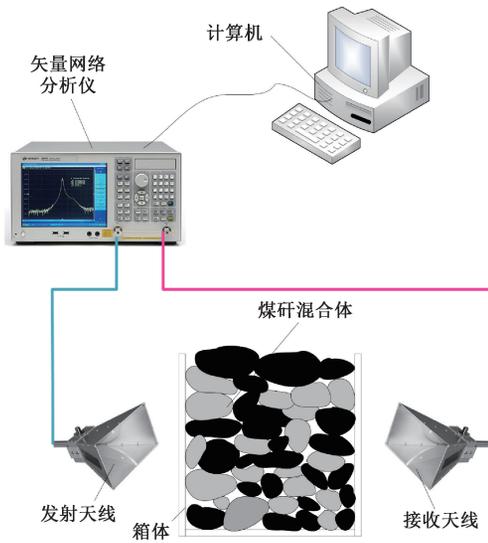


图8 电磁探测法原理

Fig. 8 Principle diagram of electromagnetic detection method

3 煤矸识别技术应用现状

3.1 射线识别法

在煤矸识别的应用领域,射线识别法作为一种重要的技术手段,已经受到了广泛研究和应用。英国是在该领域最早展开研究的国家^[29]。早在1966年,他们开始通过 γ 背散射法研究射线在煤炭与煤矸中的吸收特性。此后,研究者们逐步转向了自然射线法的研究。1980年,美国、英国进行了天然 γ 射线法的研究,并成功地研制出多种型号的煤厚探测器,实现了对煤厚的准确测量。

随着时间的推移,研究者们将注意力聚焦于如何利用自然射线法实现更精准的识别。王增才等^[30]在2002~2006年期间,基于顶板岩层中自然 γ 射线的辐射衰减特性,建立了煤层厚度和煤矸混合度的数学模型,并通过实测数据验证了模型的准确性^[31]。此外,他们创新性地提出了利用自然 γ 射线差异来检测煤矸混合度的方法,并进行了相应的实验验证^[32],为煤矸识别技术的发展提供了新的思路。

在进一步的研究中,学者们着手探索利用自然射线法进行煤矸识别时的误差因素分析。2014年,张宁波等^[33]对煤矸混合物中双能 γ 射线的衰减规律进行了分析,通过实验证实了实时测定含有放顶煤的煤矸混合流中矸石含量的可行性。随后,张宁波^[34]进一步研究了矸石中低水平自然射线的涨落规律,以及测量时间对探测计数误差的影响。

随着时间的推移,研究者开始研究煤层厚度对射线法识别的影响。韦东波^[35]在2015年分析了煤层厚度与 γ 射线强度之间的关系,并为煤层厚度的测量提供了新的思路。赵明鑫^[36]在2020年基于煤矸识别原理进行了深入分析,考虑到煤矸放落环境特征,探讨了影响煤矸自动识别的各种因素规律。郭凤岐^[37]在2021年提出了一种基于自然 γ 射线辐射强度作为识别参数的综放煤-矸-岩识别相应程序,进一步推动了射线法在现场中的应用。近期,刘长友等^[38]利用不同时间序列条件下自然射线的辐射变化特征,验证了自然射线辐射强度的阶梯变化与夹矸赋存参数之间的相互关系,为研究领域的深入探索提供了重要依据。

3.2 视觉识别法

基于视觉的煤矸识别技术应用现状呈现出多个阶段性工作,不同研究者在不同时间节点取得了一系列有益的成果,推动了该领域的发展。这些研究在图像处理、特征提取和模式识别等方面进行了探索,旨在实现煤矸的精准识别。

2004年,蒋勇^[39]采用特征提取、边缘加强和灰度比较的方法,成功对煤和矸石图像进行分割,并引入模式识别技术提高了自动识别率。类似的方法,马宪民等^[40]则专注于提取图像中煤矸石的轮廓以及增强其边缘,通过分析Roberts边缘检测算子的特性,并提出了一种改进的Roberts算法,以实现煤矸石二值图像的快速边缘检测,取得了出色的速度和检测效果。

在图像处理的同时,研究者们开始关注纹理特征在煤矸识别中的应用。周鹏^[41]于2009年通过基于灰度共生矩阵的纹理特征数据,取得了良好的煤与非煤物识别效果。米强等^[42]提出了一种融合局部二值模式和灰度共生矩阵的图像纹理特征提取方法,以解决现有方法在特征提取方面的不足和识别精度低的问题。

然而在图像识别法中,获取清晰的图像是一个关键的难点。恶劣的工作环境引发尘土、湿气和光线不足,可能导致摄像头镜头污染,影响图像质量。机械设备的振动和震动会使图像模糊不清。煤矸分布的不规则性导致摄像头位置和角度难以确定。动态场景下,煤矸运动造成目标不稳定,影响图像捕捉。光照条件的不均匀或不足导致图像中的目标细节难以辨认。这些因素交织,使得获取清晰图像变得非常困难。

为了解决光线不足的问题,很多学者在综放工作面安装照明系统进行补光。然而煤和矸石不同的物理性质决定了它们对于光照强度的响应特性也不同,即在不同光照强度下,即便是同一块煤或矸石,也会在视觉上有所差异。矿区不同照度下煤与矸石的图像如图9所示,表明不同照度下的煤矸图像有较大的视觉差异^[43]。

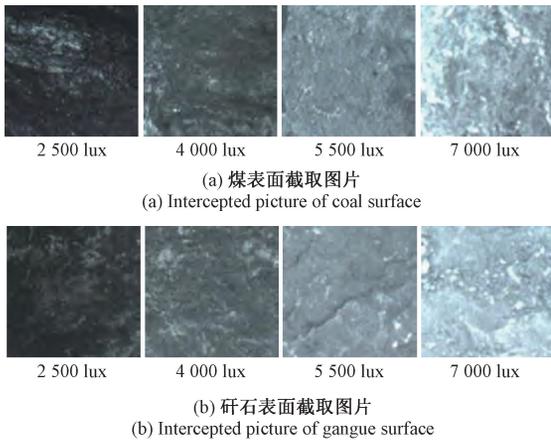


图 9 不同照度下煤和矸石表面图像

Fig. 9 Surface images of coal and gangue with different illuminances

因此,一些学者对煤和矸石在不同照度下的响应特性进行了研究,建立了煤矸灰度子图像数据库,并对数据库中的子图像的灰度、纹理特征进行提取。2018年,王家臣等^[14]对在不同照度下煤和矸石的响应特性进行了研究,首先分析了在相同照度条件下,煤和矸石在灰度和纹理特征方面的差异。接着通过不断改变照明的强度,煤和矸石的特征开始发生变化,而且两者的变化规律存在显著差异。随后,王家臣等^[12]通过对煤矸的二维图像进行反演(图 10),成功获取了煤流表面的体积混矸率,并提出了立体视觉照度智能监测与自适应调节方法,为图像采集实时提供了最优照度环境。

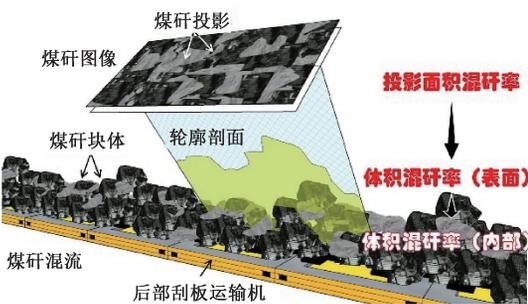


图 10 图像识别智能放煤技术的几种混矸率

Fig. 10 Several types of ash-mixing rates for image recognition intelligent coal placement technology

近年来,机器学习技术逐渐被引入煤矸识别领域。薛广辉等^[44]在 2020 年基于随机森林(RF)算法开展了煤矸图像识别研究;刘博文^[45]以带式输送机拍摄的煤矸图像为基础,提出了改进多尺度 Retinex 图像增强算法,成功实现了综放工作面煤矸的精准识别和分类。

此外,研究者们还在该领域引入了深度学习的手段。贺海涛等^[46]通过混合高斯模型实现了视频中煤流区域

的前景和语义分割,获取了矸石占比的数据。司垒等^[47]则提出了基于激光点云的煤矸识别方法,使用改进的 Otsu 分割算法提高了识别的精度和效率。单鹏飞等^[48]将注意力机制融入 ResNet50 特征提取网络,实现了对煤矸混合放出状态的分析识别。

3.3 振动与声音信号识别法

振动与声音信号识别法在放顶煤工作面煤矸识别中发挥着重要作用,其研究进展逐渐突显了对放顶煤过程中振动和声音信号的深入理解以及如何有效利用这些信号进行煤矸自动识别。

2011年,汪玉凤等^[49]以放顶煤时产生的声波特征为基础,采用含噪超完备独立分量分析方法对放顶煤过程中的煤岩混合声波信号进行了分离处理。这为煤矸识别提供了一种新的思路。但需要注意的是,信号处理中的噪声干扰问题以及实际工况中的复杂性可能影响分离效果。

进一步,刘俊利等^[50]在 2013 年设计了模拟截割试验平台,验证了利用振动信号进行煤岩识别的可行性,为该方法的实际应用奠定了基础,但在现场环境中,信号来源的多样性和环境变化仍然需要考虑。

随后的研究不仅关注信号的分析,还注重挖掘信号中的特征信息。Liu 等^[51]于 2014 年引入了希尔伯特谱分析方法,显示放顶煤振动信号的希尔伯特谱分布与煤矸石崩落时的分布存在差异,这为振动信号识别提供了新的视角。朱世刚^[52]则通过小波包分析不同工况下的振动信号,强调测点位于液压支架后尾梁处时的优势。

在研究方法上,研究者开始运用统计学分析对时域和频域信号进行评估。薛光辉等^[53]在 2015 年通过测振记录仪获取振动信号时域指标,并进行了方差、偏度和峭度等统计学分析,揭示了这些指标对工况变化的敏感性。这表明,在信号特征提取中,不同的统计学指标对煤矸识别的贡献有所不同。

由于振动信号中的噪音含量较大,一些学者注重于对信号降噪。Zhang 等^[54]于 2016 年提出了基于堆叠稀疏自动编码器的煤岩识别方法,薛光辉等^[55]则采用了两种不同的小波(sym18 和 db19)以及不同的阈值参数来降低这些含噪信号,最终发现在使用 db19 小波、将参数选用为 sqtwolog 函数,并且取默认阈值 one 的情况下,降噪效果最为理想。

机器学习技术也逐渐应用于振动信号识别分析。2017年,李一鸣等^[56-57]结合分形盒维数和小波包能量矩两种特征对振动信号进行分形特征分析,计算其盒维数。通过结合分形盒维数和小波包能量矩构造特征向量作为 BP 神经网络的输入,以实现顶煤垮落和顶板岩石垮落两种工况的识别。2020年,窦希杰等^[58]采用了集合经验模态分解(EEMD)和支持向量机方法对放顶煤过程中记

录的顶煤和矸石冲击液压支架振动信号进行分析,实现了较高的识别率。

近年来深度学习技术也逐渐应用到该方法中,陈旭^[59]于2022年利用听觉计算模型处理煤和矸石垮落声音信号,通过频谱分析获得了具有出色抗噪性能的听觉系统各阶段的多特征频率听觉响应,并提出了一种结合下丘发放率和CNN的煤矸识别方法。该方法将多特征频率下丘发放率转化为多通道听觉谱(MCAS),用于构建煤矸识别的输入特征图,并利用CNN自动提取特征以进行煤矸的识别。

3.4 其他煤矸识别技术

关于其他煤矸识别技术,2012年,赵凯等^[60]采用了主成分分析和自组织映射神经网络-模糊C均值聚类(SOM-FCM)的双层聚类方法,以提高模型的学习准确度。这种方法能够有效地处理煤炭样本的复杂性,从而提升了煤炭灰分预测的精确性。2019年,杨恩等^[61-62]测定了不同岩石在可见-近红外波段(400~2450 nm)的反射光谱,以揭示碳质物质含量对煤系页岩反射光谱曲线特征参数的影响规律。

2020年,王赛亚等^[63]发现相比于顶板岩,煤层夹矸的光谱表现出较小的吸收特征和曲线斜率绝对值。2021年,丁震等^[25]使用透明PVC板材形成密闭环境,并建立煤矸近红外反射光谱采集装置(图11),将采集得到的煤矸的近红外反射光谱数据被输入到粒子群优化的反向传播神经网络模型中进行识别。这项研究旨在提高煤矸识别的准确性,并为煤矸的近红外反射光谱分析方法提供了一种有效的预处理策略。

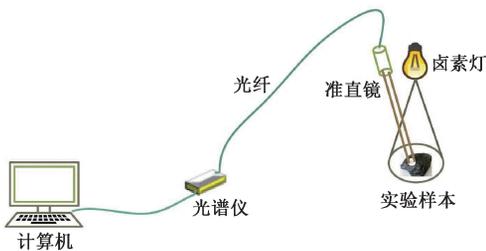


图11 煤矸近红外反射光谱采集装置

Fig. 11 Near-infrared reflectance spectroscopy device for coal gangue application

综放工作面的实时监测在煤矸识别中发挥着关键作用,它能够及时提供数据,帮助监测工作面上的煤矸流动情况。根据综放工作面煤流监测的需求,吕东翰^[64]设计了一种适用于该场景的激光扫描系统方案。为了满足防爆要求和标准设计要求,他们开发了一套具备高防爆性能的测量设备,并搭配上位机软件,该软件具备图形渲染、实时通讯和错误反馈功能。此外,他们还在实验室

内搭建了放煤监测系统,并运用多因素方差分析方法评估了激光扫描效果。这项研究旨在为综放工作面煤流监测提供一种可靠的激光扫描解决方案,并通过实验验证来评估其性能。王利栋^[65]则设计了一种用于实时监测放煤量的智能监测系统,提出了适用于综放工作面的放煤量三维重建方法。通过该方法,可以准确监测和重建放煤量的三维结构。该研究旨在应用工程技术,开发一种智能监测系统,通过激光扫描和三维重建方法,实现对放煤量的精确监测和可视化呈现。

4 煤矸识别方法的优缺点

4.1 射线识别法

作为最早用于实践的人工伽马射线法,该方法具有对井下环境中的粉尘和水雾等影响较小的优点。然而,由于人工放射源本身具有放射性,对人体健康有一定危害,并且受到煤中夹杂物的影响,因此基于人工放射源的煤矸识别方法已经很少有学者继续研究。特别是在井下管理放射源方面存在一定困难,因此后来被自然伽马射线探测器所取代。

自然伽马射线法具有广泛的探测范围、无放射性、非接触式传感器且不易损坏等优点,这使得它在安全管理方面非常便利。然而,该方法在某些情况下并不适用,特别是在煤层中不含放射性元素或放射性元素含量较低的工作面上。此外,当煤层中存在较多的夹矸时,该方法对识别精度会产生较大影响。因此,仍需进一步研究和改进该方法,以提高其在不同工作面条件下的适用性和准确性。

4.2 视觉识别法

基于图像处理技术对煤矸石的差异进行识别,虽然可以通过不断改进算法实现对煤矸混合物的准确识别,但如何在综放工作面获取清晰图像信息的问题始终没有解决,放煤工作面的采光条件以及巷道内浓密的粉尘等因素都会导致该方法无法准确识别。而且现场原煤中常常含有水或煤泥,而煤泥的存在会降低原煤的亮度,使其难以与矸石进行区分。

4.3 振动与声音信号识别法

在综放工作面煤矸识别中,振动信号和声音信号法能够实时监测工作面的振动情况,对于突发事件具有较高的敏感性,有助于迅速响应和处理。然而该技术在工程领域存在如下关键问题。

1) 综放工作面是一个高度动态和复杂的环境,存在大量的机械振动、岩石崩塌和输送带运行等因素,这些因素会产生额外的振动和声音信号,使得煤矸信号与环境干扰混杂,增加了识别的难度。

2) 工作面上的振动和声音信号往往伴随着噪声,例如机械噪声、风力噪声等。这些噪声信号可能掩盖煤矸信号,导致识别的不准确性。

3) 综放工作面中涉及多种机械设备和工作过程,每个振动源和声音源的频率和振幅可能不同,需要针对不同的振动源和声音源设计不同的识别算法,增加了复杂性。

4) 在综放工作面布置振动传感器往往安装到液压支架上,这会受到空间限制、设备安装困难等因素的制约,可能影响传感器的位置和数量,从而影响了识别的效果。

5) 综放工作面的工作环境通常恶劣,振动和声音传感器容易受到灰尘、湿气、振动等因素的影响,需要定期维护和校准,以确保系统的稳定性。

综合考虑,振动信号法在实时性和适用性上具有一定优势,但容易受到环境噪声和多振动源的影响。声音信号法则提供了多维信息,但在信号传播和适用范围方面存在一些限制。选择合适的方法应根据具体情况,可能需要结合多种传感器技术和数据深层挖掘以提高识别的准确性和可靠性。

4.4 其他煤矸识别方法

红外光谱技术是一种非接触式检测技术,能够同时检测多个成分,有利于对不同类型的煤矸进行区分和分类,并且红外光谱技术是一种无辐射的分析方法,不会对操作人员和环境造成任何危害,同时具有非常好的灵敏度和特异性。然而,红外光谱技术需要高精度的光学元件、光源、探测器等设备,设备的维护和调试成本较高,需要进一步研究和优化。

利用激光点云对综放工作面的煤矸进行识别可以提供高精度的煤矸形状和尺寸信息,能够全面描述煤矸的空间位置和分布。然而激光点云数据通常具有大量的点,需要进行复杂的数据处理和算法分析,以提取煤矸的特征和进行分类,这需要大量的计算资源和时间。

5 发展趋势

5.1 多传感器融合技术

目前,针对综放工作面放煤状态识别的研究主要集中在利用单一传感器信息进行采集和分析,以判断煤矸石混合度的状态^[66]。然而,由于传感器信号的采集和传输过程中不可避免地存在损失和干扰,当传感器发生故障或信号失真时,容易导致放顶煤工作面煤矸混合度状态误判,降低了识别的可靠性。

因此整合振动传感器、工业摄像头和声波传感器等多种传感器有助于更全面地捕捉煤矸信息。宋庆军^[67]利用信息融合技术,结合煤矸识别的特点,提出了(DEI+FEI+FEO)-DEO的煤矸识别的信息融合模型,实现了煤

矸混放参数的模式辨识。实现了现场工作面生产放煤过程声音和振动信号的数据采集和信号处理,利用最优特征集获取了现场生产中全煤、30%矸石、50%矸石、全矸和故障阶段的等特征属性值。

同时,综放工作面的煤矸分布存在着区域性差异,不同地质特点的区域需要针对性的识别方法^[68]。多技术交叉应用可以根据区域特点进行灵活调整。在具有明显地质断层的区域,可以结合声波信号识别方法,利用断层的声波特征进行煤矸分类。而在相对平坦的区域,可以通过视觉识别方法捕捉煤矸的纹理特征。因此将多技术应用与地质背景相结合可以进一步提高识别的准确性。

5.2 煤矸特征信息的深层挖掘

综放工作面的地质条件决定了煤矸具有复杂的特征信息。传统的浅层特征提取方法可能无法满足复杂情况下的识别需求。未来的发展趋势应该侧重于深层挖掘煤矸的隐藏特征。这可能涉及到引入更高级的机器学习算法,如深度学习,以捕获更复杂的煤矸特征。

针对煤矸的不同特征,如颜色、形状和纹理,探索更加复杂的深度学习模型^[69]。从放顶煤开采视频中获取煤流图像,然后通过深度学习模型进行前景分割,将煤流和背景区分开。后续进行语义分割,以识别图像中的矸石区域。通过比较前景分割和语义分割的结果,计算出矸石在图像中的占比数据。与此同时可以通过结合多源传感器数据,如振动传感器和声音传感器,输入到深度学习模型中能够实现更全面的煤矸识别,增加识别的准确性和可靠性^[70]。

5.3 智能决策与实时监测

综放工作面是一个动态变化的环境,实时监测和智能决策技术能准确监测和预测放煤量^[71]。通过引入智能化的决策系统,能够根据实时数据进行快速判定和调整。

首先利用不同雷达和摄像技术进行煤层厚度测量、顶煤体量变化检测^[72]。超宽带无线脉冲信号雷达测量煤层厚度,用于进行放煤前的煤量实时监测;激光雷达或毫米波雷达用于监测放煤中的顶煤体量变化,满足精度和实时性需求^[73];高清宽动态摄像机结合透尘光源用于放煤后的煤矸识别,通过图像处理计算混放比例参数。最终根据放煤前、中、后3个阶段的技术综合,将实时测量的数据传输给集控中心,经过智能分析可以判断出当前的煤矸比例,之后将放煤控制决策数据发送给液压支架电液控制系统,实现对放煤口大小的及时调整和关闭^[74]。

6 结论

综放工作面煤矸识别技术作为无人化开采中的关键技术,对提高生产效率、保障工人安全和实现矿山智能化

有着重要意义。本文介绍了该技术的重要性、目前存在的问题和挑战以及各种识别方法的优缺点。未来的研究将集中在如何从恶劣的工作环境下获取更清晰的图像、如何提高识别准确性、如何降低信号噪声干扰等核心问题上。多传感器融合技术、深度学习更深层次的应用以及智能决策与实时监测技术将是未来该技术的主要发展方向。

参考文献

- [1] 谢和平, 王金华, 王国法, 等. 煤炭革命新理念与煤炭科技发展构想[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1187-1197.
- XIE H P, WANG J H, WANG G F, et al. New ideas of coal revolution and layout of coal science and technology development[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1187-1197.
- [2] MCHUGH L. World energy needs: A role for coal in the energy mix [J]. Issues in Environmental Science and Technology, 2018, 45: 1-29.
- [3] 谢和平, 王金华, 姜鹏飞, 等. 煤炭科学开采新理念与技术变革研究[J]. 中国工程科学, 2015, 17(9): 36-41.
- XIE H P, WANG J H, JIANG P F, et al. New concepts and technology evolutions in scientific coal mining[J]. Engineering Sciences, 2015, 17(9): 36-41.
- [4] 康红普. 煤炭开采与岩层控制的时间尺度分析[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(1): 5-27.
- KANG H P. Temporal scale analysis on coal mining and strata control technologies [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(1): 5-27.
- [5] LI J P, DU C L, BAO J W. Direct-impact of sieving coal and gangue [J]. Mining Science and Technology, 2010(4):611-614.
- [6] ZHOU C, LIU G, WU S, et al. The environmental characteristics of usage of coal gangue in bricking-making: A case study at Huainan, China [J]. Chemosphere, 2014, 95(Jan.): 274-280.
- [7] 王国法, 范京道, 徐亚军, 等. 煤炭智能化开采关键技术创新进展与展望[J]. 工矿自动化, 2018, 44(2): 5-12.
- WANG G F, FAN J D, XU Y J, et al. Innovation progress and prospect on key technologies of intelligent coal mining [J]. Industry and Automation, 2018, 44(2): 5-12.
- [8] 王国法. 煤矿智能化最新技术进展与问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 1-27.
- WANG G F. New technological progress of coal mine intelligence and its problems [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 1-27.
- [9] 张晓梅. 煤的物理性质[J]. 内蒙古煤炭经济, 2006(4): 70-71.
- ZHANG X M. Physical properties of coal [J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2006(4): 70-71.
- [10] 张宁波, 刘长友, 陈现辉, 等. 综放煤矸低水平自然射线的涨落规律及测量识别分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(5): 988-993.
- ZHANG N B, LIU CH Y, CHEN X H, et al. Measurement analysis on the fluctuation characteristics of low level natural radiation from gangue [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(5): 988-993.
- [11] 段雍. 基于图像的煤矸石识别和定位方法研究与实现[D]. 西安:西安科技大学, 2020.
- DUAN Y. Research and realization identification and positioning method of coal and gangue based on image[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [12] 王家臣, 潘卫东, 张国英, 等. 图像识别智能放煤技术原理与应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 87-101.
- WANG J CH, PAN W D, ZHANG G Y, et al. Principles and applications of image-based recognition of withdrawn coal and intelligent control of draw opening in longwall top coal caving face[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 87-101.
- [13] 黄韶杰. 基于灰度阈值法的煤岩界面识别研究[J]. 工矿自动化, 2013, 39(5): 52-54.
- HUANG SH J. Research of coal-rock interface identification based on gray threshold method [J]. Industry and Automation, 2013, 39(5): 52-54.
- [14] 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 J CH, LI L H, YANG SH L. 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.
- [15] 王超, 张强. 基于LBP和GLCM的煤岩图像特征提取与识别方法[J]. 煤矿安全, 2020, 51(4): 129-132.
- WANG CH, ZHANG Q. Coal rock image feature extraction and recognition method based on LBP and

- GLCM[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(4): 129-132.
- [16] 封子杰. 基于深度学习的煤矸石识别算法研究[D]. 西安:西安科技大学, 2021.
- FENG Z J. The research based on deep learning of Coal gangue recognition algorithm [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021.
- [17] 刘富强, 钱建生, 王新红, 等. 基于图像处理与识别技术的煤矿矸石自动分选[J]. *煤炭学报*, 2000, 25(5): 534-537.
- LIU F Q, QIAN J SH, WANG X H, et al. Automatic separation of waste rock in coal mine based on image procession and recognition[J]. *Journal of China Coal Society*, 2000, 25(5): 534-537.
- [18] 刘丽, 赵凌君, 郭承玉, 等. 图像纹理分类方法研究进展和展望[J]. *自动化学报*, 2018, 44(4): 584-607.
- LIU L, ZHAO L J, GUO CH Y, et al. Texture classification: State-of-the-art methods and prospects[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(4): 584-607.
- [19] WAN L, WANG J, ZENG Q, et al. Vibration response analysis of the tail beam of hydraulic support impacted by coal gangue particles with different shapes [J]. *ACS Omega*, 2022, 7(4): 3656-3670.
- [20] 李建平, 郑克洪, 杜长龙. 煤和矸石的冲击破碎粒度分布特性[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(S1): 54-58.
- LI J P, ZHENG K H, DU CH L. The distribution discipline of impact crushed on coal and gangue [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(S1): 54-58.
- [21] 李一鸣, 白龙, 蒋周翔, 等. 基于EEMD-KPCA和KL散度的垮落煤岩识别[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(2): 827-835.
- LI Y M, BAI L, JIANG Z X, et al. Caving coal-rock identification based on EEMD-KPCA and KL divergence[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(2): 827-835.
- [22] 曹贯强, 尉瑞, 孟祥涛, 等. 用于煤矸识别的振动传感器设计[J]. *工矿自动化*, 2021, 47(1): 118-122.
- CAO G Q, WEI R, MENG X T, et al. Design of vibration sensor for coal gangue identification [J]. *Industry and Automation*, 2021, 47(1): 118-122.
- [23] 袁源, 汪嘉文, 朱德昇, 等. 顶煤放落过程煤矸声信号特征提取与分类方法[J]. *矿业科学学报*, 2021, 6(6): 711-720.
- YUAN Y, WANG J W, ZHU D SH, et al. Feature extraction and classification method of coal gangue acoustic signal during top coal caving [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 6(6): 711-720.
- [24] 宋亮, 刘善军, 虞茉莉, 等. 基于可见-近红外和热红外光谱联合分析的煤和矸石分类方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(2): 416-422.
- SONG L, LIU SH J, YU M L, et al. A classification method based on the combination of visible, near-infrared and thermal infrared spectrum for coal and gangue distinguishment[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(2): 416-422.
- [25] 丁震, 常博深. 面向煤矸识别的近红外反射光谱数据预处理方法[J]. *工矿自动化*, 2021, 47(12): 93-97.
- DING ZH, CHANG B SH. Near-infrared reflectance spectrum data preprocessing method for coal gangue identification [J]. *Industry and Automation*, 2021, 47(12): 93-97.
- [26] 吕渊博, 王世博, 葛世荣, 等. 近红外光谱煤岩识别装置研制[J]. *工矿自动化*, 2022, 48(7): 32-42.
- LU Y B, WANG SH B, GE SH R, et al. Development of coal and rock identification device based on near-infrared spectroscopy [J]. *Industry and Automation*, 2022, 48(7): 32-42.
- [27] 孙益壮. 基于激光扫描的综放工作面放煤量自适应监测技术[D]. 北京:中国矿业大学, 2022.
- SUN Y ZH. Adaptive monitoring technology of coal caving volume in fully mechanized caving face based on laser scanning [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2022.
- [28] 司垒, 李嘉豪, 邢峰, 等. 不同煤矸混合物的微波传播特性试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(5): 219-231.
- SI L, LI J H, XING F, et al. Experimental study on microwave propagation characteristics of different coal-gangue mixtures Experimental study on microwave propagation characteristics of different coal-gangue mixtures [J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(5): 219-231.
- [29] 任芳. 基于多传感器数据融合技术的煤岩界面识别的理论与方法研究[D]. 太原:太原理工大学, 2003.
- REN F. Study on the theory and method of coal-rock interface recognition based on multi-sensor data fusion

- technique [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2003.
- [30] 王增才, 王汝琳, 徐建华, 等. 自然 γ 射线法在采煤机摇臂自动调高中检测煤层厚度的研究[J]. 煤炭学报, 2002, 27(4): 425-429.
WANG Z C, WANG R L, XU J H, et al. Research on coal seam thickness detection by natural Gamma ray in shearer horizon control [J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(4): 425-429.
- [31] 王增才, 张秀娟, 张怀新, 等. 自然 γ 射线方法检测放顶煤开采中的煤矸混合度研究[J]. 传感技术学报, 2003, 16(4): 442-446.
WANG Z C, ZHANG X J, ZHANG H X, et al. The research on detection of rock content in coal rock mixture in top coal caving by natural gamma ray[J]. Journal of Translucation Technology, 2003, 16(4): 442-446.
- [32] 王增才, 富强. 自然 γ 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, 2006, 25(6): 804-807.
WANG Z C, FU Q. Attenuation of natural γ ray passing through coal seam and hydraulic support[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2006, 25(6): 804-807.
- [33] 张宁波, 鲁岩, 刘长友, 等. 综放开采煤矸自动识别基础研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(4): 532-536.
ZHANG N B, LU Y, LIU CH Y, et al. Basic study on automatic detection of coal and gangue in the fully mechanized top coal caving mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(4): 532-536.
- [34] 张宁波. 综放开采煤矸自然射线辐射规律及识别研究[D]. 北京:中国矿业大学, 2015.
ZHANG N B. Detection and radiation law of natural gamma ray from coal and roof-rock in the fully mechanized top coal caving mining[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2015.
- [35] 韦东波. 自然 γ 射线法在采煤机摇臂自动调高中探测煤层厚度的研究[J]. 煤矿机械, 2015, 36(1): 68-70.
WEI D B. Research of seam thickness detection to automatically raise shearer arm based on natural γ -ray[J]. Coal Mine Machinery, 2015, 36(1): 68-70.
- [36] 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]. 北京:中国矿业大学, 2020.
ZHAO M X. Study on drawing environmental characteristics and influence factors of coal-gangue automatic identification in fully mechanized top coal caving mining[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2020.
- [37] 郭凤岐. 复杂结构特厚煤层综放煤-矸-岩放落流动时序规律及识别研究[D]. 北京:中国矿业大学, 2021.
GUO F Q. Study on time sequence law and identification of coal gangue rock caving flow in fully mechanized top coal caving face of extra thick coal seam with complex structure[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2021.
- [38] 刘长友, 张宁波, 郭凤岐, 等. 特厚煤层综放煤-矸-岩放落流动的时序规律及识别方法[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 137-151.
LIU CH Y, ZHANG N B, GUO F Q, et al. Sequential rules and identification method of coal-gangue-rock caving flow in fully mechanized top-coal-caving workface of extra thick coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 137-151.
- [39] 蒋勇. 数字图像处理技术在煤矸石自动分选系统中的应用[D]. 西安:西安科技大学, 2004.
JIANG Y. Application of digital image processing technology in automatic separation system of coal and gangue[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2004.
- [40] 马宪民, 蒋勇. 煤矸石二值图像的 Roberts 快速边缘检测法[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(S1): 595-597.
MA X M, JIANG Y. A fast edge detection roberts algorithm of coal gangue binary image [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26 (S1): 595-597.
- [41] 周鹏. 基于纹理分析的煤与非煤物的图像识别算法研究[D]. 沈阳:东北大学, 2009.
ZHOU P. The research on image recognition of coal and non-coal based on texture analysis [D]. Shenyang: Northeastern University, 2009.
- [42] 米强, 徐岩, 刘斌, 等. 煤与矸石图像纹理特征提取方法[J]. 工矿自动化, 2017, 43(5): 26-30.
MI Q, XU Y, LIU B, et al. Extraction method of texture feature of images of coal and gangue [J]. Industry and Automation, 2017, 43(5): 26-30.
- [43] 李曼, 杨茂林, 刘长岳, 等. 基于图像的煤矸分选中图像照度调节方法[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S2):

- 1149-1158.
- LI M, YANG M L, LIU CH Y, et al. Illuminance adjustment method for image-based coal and gangue separation[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S2): 1149-1158.
- [44] 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 G H, LI X Y, QIAN X L, et al. Coal-gangue image recognition in fully-mechanized caving face based on random forest[J]. Industry and Automation, 2020, 46(5): 57-62.
- [45] 刘博文. 综放工作面煤矸智能识别关键技术研究[D]. 北京:中国矿业大学, 2021.
- LIU B W. Research on key technology of coal and gangue intelligent recognition in fully mechanized caving face[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2021.
- [46] 贺海涛, 王佳豪, 张海峰, 等. 基于 U-Net 的放煤状态控制关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(S2): 237-243.
- HE H T, WANG J H, ZHANG H F, et al. Calculation method of gangue content of coal gangue mixed image in fully-mechanized caving based on U-Net [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(S2): 237-243.
- [47] 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 L, TAN CH, ZHU J H, 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.
- [48] 单鹏飞, 孙浩强, 来兴平, 等. 基于改进 Faster R-CNN 的综放煤矸混合放出状态识别方法[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1382-1394.
- DAN P F, SUN H Q, LAI X P, et al. Identification method on mixed and release state of coal-gangue masses of fully mechanized caving based on improved Faster R-CNN[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1382-1394.
- [49] 汪玉凤, 夏元涛, 王晓晨. 含噪超完备独立分量分析在综放煤岩识别中的应用[J]. 煤炭学报, 2011, 36(S1): 203-206.
- WANG Y F, XIA Y T, WANG X CH. Application on overcomplete ICA with noise in coal and rock identification of fully mechanized mining[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S1): 203-206.
- [50] 刘俊利, 赵豪杰, 李长有. 基于采煤机滚筒截割振动特性的煤岩识别方法[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(10): 93-95.
- LIU J L, ZHAO H J, LI CH Y. Coal-rock recognition method based on cutting vibration features of coal shearer drums [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(10): 93-95.
- [51] LIU W, HE K, LIU C Y, et al. Coal-gangue interface detection based on Hilbert spectral analysis of vibrations due to rock impacts on a longwall mining machine[C]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2014.
- [52] 朱世刚. 综放工作面煤岩性状识别方法研究[D]. 北京:中国矿业大学, 2014.
- ZHU SH G. Study on coal and rock character recognition method in fully mechanized caving faces [D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2014.
- [53] 薛光辉, 赵新赢, 柳二猛, 等. 基于振动信号时域特征的综放工作面煤岩识别[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(12): 92-97.
- XUE G H, ZHAO X Y, LIU ER M, et al. Time-domain characteristic extraction of coal and rock vibration signal in fully-mechanized top coal caving face [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(12): 92-97.
- [54] ZHANG G, WANG Z, LEI Z. Recognition of rock-coal interface in top coal caving through tail beam vibrations by using stacked sparse autoencoders [J]. Journal of Vibroengineering, 2016, 18(7): 4261-4275.
- [55] 薛光辉, 柳二猛, 焦亚博, 等. 综放煤岩垮落声压信号小波降噪及识别研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(12): 257-260.
- XUE G H, LIU ER M, JIAO Y B, et al. Acoustic pressure signal wavelet de-noising and recognition research of coal-rock caving in mechanized caving[J]. Coal Technology, 2016, 35(12): 257-260.
- [56] 李一鸣, 符世琛, 李瑞, 等. 垮落煤岩性状识别研究[J]. 工矿自动化, 2017, 43(2): 24-28.
- LI Y M, FU SH CH, LI R, et al. Research on identification of caving coal and rock traits[J]. Industry and Automation, 2017, 43(2): 24-28.

- [57] 李一鸣, 符世琛, 焦亚博, 等. 基于分形盒维数和小波包能量矩的垮落煤岩性状识别[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3): 803-808.
LI Y M, FU SH CH, JIAO Y B, et al. Collapsing coal-rock identification based on fractal box dimension and wavelet packet energy moment[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(3): 803-808.
- [58] 窦希杰, 王世博, 谢洋, 等. 基于IMF能量矩和SVM的煤矸识别[J]. 振动与冲击, 2020, 39(24): 39-45.
DOU X J, WANG SH B, XIE Y, et al. Coal and gangue identification based on IMF energy moment and SVM[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(24): 39-45.
- [59] 陈旭. 基于听觉感知原理的综放工作面垮落煤矸识别方法研究[D]. 北京:中国矿业大学, 2022.
CHEN X. Collapsing coal and rock recognition method based on non-stationary vibration signal in fully mechanized caving face[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2022.
- [60] 赵凯, 雷萌. 近红外光谱灰分预测模型中煤炭样本的优化方法[J]. 工矿自动化, 2012, 38(9): 35-38.
ZHAO K, LEI M. Optimization method of coal sample in ash prediction model based on near infrared spectroscopy[J]. Industry and Automation, 2012, 38(9): 35-38.
- [61] 杨恩, 王世博, 葛世荣. 典型煤系岩石的可见—近红外光谱特征研究[J]. 工矿自动化, 2019, 45(3): 45-51, 89.
YANG E, WANG S B, GE S R. Research on visible-near infrared spectrum features of typical coal measures rocks[J]. Journal of Mine Automation, 2019, 45(3): 45-51, 89.
- [62] 杨恩, 王世博, 葛世荣. 典型块状煤的可见—近红外光谱特征研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(6): 1717-1723.
YANG E, WANG SH B, GE SH R. Study on the visible and near-infrared spectra of typical types of lump coal[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(6): 1717-1723.
- [63] 王赛亚, 王世博, 葛世荣, 等. 综放工作面煤岩近红外光谱特征与机理[J]. 煤炭学报, 2020, 45(8): 3024-3032.
WANG S Y, WANG SH B, GE SH R, et al. Near-infrared spectrum characteristics and mechanism of coal and rock in mechanized caving face[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 3024-3032.
- [64] 吕东翰. 综放工作面放煤量激光扫描在线智能监测技术研究[D]. 北京:中国矿业大学, 2021.
LU D H. Research on laser scanning online intelligent monitoring technology of coal caving amount in fully mechanized top coal caving face[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2021.
- [65] 王利栋. 综放工作面放煤量激光扫描监测三维重建方法研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(5): 125-130.
WANG L D. Three-dimensional reconstruction method of coal flow laser scanning monitoring[J]. Coal Engineering, 2022, 54(5): 125-130.
- [66] 蒋干. 基于多传感信息融合的采煤机煤岩截割状态识别技术研究[D]. 北京:中国矿业大学, 2019.
JIANG G. Research on recognition technology of shearer coal-rock cutting status based on multi-sensor information fusion[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2019.
- [67] 宋庆军. 综放工作面放煤自动化技术的研究与应用[D]. 北京:中国矿业大学, 2015.
SONG Q J. Study and application on the caving automation in fully mechanized top coal caving face[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2015.
- [68] 吴婕萍, 李国辉. 煤岩界面自动识别技术发展现状及其趋势[J]. 工矿自动化, 2015, 41(12): 44-49.
WU J P, LI G H. Development status and tendency of automatic identification technologies of coal-rock interface[J]. Industry and Automation, 2015, 41(12): 44-49.
- [69] 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 Q, ZHANG R X, LIU J M, 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.
- [70] 田妍, 田丰. 放顶煤开采过程煤矸识别技术发展现状及前景[J]. 煤炭工程, 2018, 50(10): 142-145.
TIAN Y, TIAN F. Development status and prospect of coal gangue recognition technology in top-coal caving[J]. Coal Engineering, 2018, 50(10): 142-145.
- [71] 张其胜. 破解煤岩识别技术难题的途径探讨[J]. 煤炭技术, 2020, 39(8): 183-185.

ZHANG Q SH. Approach to solving difficult technical problems of coal and rock identification [J]. Coal Technology, 2020, 39(8): 183-185.

[72] 张守祥, 张学亮, 刘帅, 等. 智能化放顶煤开采的精确放煤控制技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2008-2020.

ZHANG SH X, ZHANG X L, LIU SH, et al. Intelligent precise control technology of fully mechanized top coal caving face [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2008-2020.

[73] 刘忠超, 刘勇军. 煤岩识别现状分析与发展方向[J]. 南阳理工学院学报, 2018, 10(4): 26-30.

LIU ZH CH, LIU Y J. Status analysis and development trend of coal-rock identification [J]. Journal of Nanyang Institute of Technology, 2018, 10(4): 26-30.

[74] 王虹. 综采工作面智能化关键技术研究现状与发展方向[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(1): 60-64.

WANG H. Development orientation and research state on intelligent key technology in fully-mechanized coal mining face [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(1): 60-64.

作者简介



李嘉豪, 2020年于河南理工大学获得学士学位, 现为中国矿业大学博士研究生, 主要研究方向为煤矸识别。

E-mail: 2014927163@qq.com

Li Jiahao received his B. Sc. degree from Henan Polytechnic University in 2020. He is currently a Ph. D. candidate at China University of Mining and Technology. His main research interest is the coal-rock recognition.



司垒(通信作者), 2010年于中国矿业大学获得学士学位, 2015年于中国矿业大学获得博士学位, 现为中国矿业大学副教授, 主要研究方向为智能化煤矿机电装备、特种环境机器人。

E-mail: sileicool@163.com

Si Lei (Corresponding author) received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from China University of Mining and Technology in 2010 and 2015, respectively. He is currently an associate professor at China University of Mining and Technology. His main research interests

include the intellectualization of coal mine electromechanical equipment and special environment robot.



王忠宾, 1995年于中国矿业大学获得学士学位, 1998年于中国矿业大学获得硕士学位, 2002年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为中国矿业大学机电工程学院院长、教授, 主要研究方向为智能化矿山机电装备、特种环境机器人。

E-mail: wangzbpaper@126.com

Wang Zhongbin received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from China University of Mining and Technology in 1995 and 1998, and Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2002. He is currently the dean and professor of the School of Mechatronic Engineering at China University of Mining and Technology. His main research interests include the intellectualization of coal mine electromechanical equipment special environment robot.



魏东, 2015年于东北大学获学士学位, 2021年于中国矿业大学获得博士学位, 现为中国矿业大学讲师, 主要研究方向为智能化矿山装备、机器视觉与演化算法。

E-mail: weidongcmee@cumt.edu.cn

Wei Dong received his B. Sc. degree from Northeast University in 2015, Ph. D. degree from China University of Mining and Technology in 2021. Now he is lecturer at China University of Mining and Technology. His main research interests include intelligent mine equipment, machine vision and evolutionary algorithm.



顾进恒, 2012年于华北水利水电大学获得学士学位, 2015年于中国矿业大学获得硕士学位, 2021年于中国农业大学获得博士学位, 现为中国矿业大学讲师, 主要研究方向为煤矿装备智能化。

E-mail: gujinheng@126.com

Gu Jinheng received his B. Sc. degree from North China University of Water Resources and Electric Power in 2012, M. Sc. degree from China University of Mining and Technology in 2015, and Ph. D. degree from China Agricultural University in 2021. Now he is a lecturer at China University of Mining and Technology. His main research interests include intelligent coal mine equipment.