

文章编号:1671-251X(2020)01-0038-06

DOI:13272/j. issn. 1671-251x. 2019060005

煤矸石识别方法研究现状与展望

曹现刚, 李莹, 王鹏, 吴旭东

(西安科技大学 机械工程学院, 陕西 西安 710054)



扫码移动阅读

摘要:从煤矸石识别特征出发,对煤矸石识别方法的研究现状进行了总结,列举了密度识别法、硬度识别法等以密度、硬度等为识别特征的煤矸石识别方法,以及射线识别法、图像识别法等以灰度、纹理为识别特征的煤矸石识别方法的代表性研究成果,并对比了各种识别方法的特点。对煤矸石识别方法的研究方向和途径进行了展望,提出应全面分析、理解煤矸石的特征差异,研究符合煤矿绿色发展要求的煤矸石识别方法、快速高效的煤矸石图像识别方法、融合和创新现有方法的新型煤矸石高效识别方法。

关键词:煤矸石分选;煤矸石识别;识别特征;密度识别;硬度识别;射线识别;图像识别
中图分类号:TD94 **文献标志码:**A

Research status of coal-gangue identification method and its prospect

CAO Xiangang, LI Ying, WANG Peng, WU Xudong

(College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract:According to coal-gangue identification features, research status of coal-gangue identification method was summarized, and representative research achievements of some coal-gangue identification methods were enumerated, such as density identification method and hardness identification method, which were characterized by density and hardness, as well as ray identification method and image identification method, which were characterized by gray scale and texture. Characteristics of various identification methods were compared. Research directions and ways of coal-gangue identification method were prospected, namely researching coal-gangue identification methods which met green development requirements of coal mine, fast and efficient coal-gangue image identification method and new efficient coal-gangue identification method fusing and innovating existing methods on basis of full analysis and understanding feature differences between coal and gangue.

Key words: coal-gangue separation; coal-gangue identification; identification feature; density identification; hardness identification; ray identification; image identification

0 引言

煤炭作为我国最主要的能源,资源量占我国化石能源资源基础储量的94%左右,远大于石油和天然气^[1]。煤炭开采过程中会产生大量的固体污染物,矸石是其中最主要的一种,其混杂在煤中不仅会降低煤炭燃烧质量,还会加重污染物排放,因此,需

要将矸石从煤中分选出来。煤矸石分选主要有人工拣矸法、湿选法和干选法3种方式。人工拣矸法效率低,湿选法存在水资源浪费等问题,干选法是目前煤矸石分选领域的研究热点^[2-3]。

煤矸石识别技术是实现煤矸石分选的重要环节。准确识别煤矸石有助于提高分选设备的自动化、智能化水平。煤矸石识别是根据煤矸石的特征

收稿日期:2019-06-02;修回日期:2019-12-25;责任编辑:李明。

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2018GY-160);陕西省教育厅科学研究计划项目(18JC022)。

作者简介:曹现刚(1970—),男,山东莒南人,教授,博士,主要从事设备维护、计算机监测与控制等方面的科研和教学工作,E-mail:807336070@qq.com。

引用格式:曹现刚,李莹,王鹏,等.煤矸石识别方法研究现状与展望[J].工矿自动化,2020,46(1):38-43.

CAO Xiangang, LI Ying, WANG Peng, et al. Research status of coal-gangue identification method and its prospect[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(1): 38-43.

差异,指定一个预先定义的识别类别,并以此为标准,利用某种识别技术判断当前被测物是煤还是矸石。当获取煤矸石识别信息后,分选设备自动将煤和矸石分离。煤矸石识别特征选取是煤矸石识别方法的主要研究内容,主要包括密度、硬度、灰度、纹理等。本文从煤矸石识别特征出发,对现有煤矸石识别方法进行了梳理和总结,并对煤矸石识别方法的研究方向进行了展望,以期为促进煤矸石识别技术发展、提高煤矸石分选设备的智能化水平提供理论参考。

1 煤矸石识别方法研究现状

1.1 以密度、硬度等为识别特征的煤矸石识别方法

1.1.1 密度识别法

煤和矸石在密度特征上的差异可作为识别依据。密度识别法最早应用于重介质旋流器、跳汰机等分选设备。选用某种液体介质并改变液体介质的密度,使其小于矸石密度并大于煤块密度。煤矸石浸没在液体介质中,矸石下沉,煤块上浮,从而达到识别煤矸石的目的。液体介质对降低煤中含矸率起关键性作用。随着计算机信息和控制技术的发展,研究人员采用自动化控制系统对介质密度进行在线监测并调控,不仅方便工作人员操作,而且能够保证介质密度的稳定性,提升产品质量^[4-6]。

采用液体介质识别煤矸石存在水资源浪费及干燥处理与介质回收导致的生产成本增加等问题,采用光电技术识别煤矸石可避免上述问题。通过光电技术获取被测物质量和厚度,计算出被测物密度,以此识别当前被测物为煤或矸石。针对煤矸石井下分选回填及综合利用的需求,王卫东等^[7]提出采用激光三维扫描与动态称重技术相结合的方法获取被测物密度,通过与煤和矸石标准密度进行对比,实现煤矸石在线识别,识别正确率达 90%,并基于上述研究,从理论上讨论了煤矸石体积测量问题^[8],给出了煤矸石识别数学模型和识别算法。

1.1.2 硬度识别法

煤和矸石自身组成成分的不同造成二者在硬度特征方面存在差异。硬度识别法多用于井下,采用选择性破碎方式实现煤矸石识别(没有被破碎的被测物为矸石),能够减少矸石地面堆积造成的污染,降低选煤成本,为井下矸石填充提供原料。弹性负载破碎机最早应用于井下选择性破碎。董长双等^[9]采用压差式液压破碎方式实现煤矸石选择性破碎。李建平等^[10]提出煤矸石冲击式破碎方式,使物料高速冲击破碎板,不被破碎或破碎程度较小的物料为矸石。选择性破碎方式对破碎力大小和煤矸石粒度

要求高,若小块矸石被破碎会影响煤质。郎庆田等^[11]提出以煤矸石同时撞击作用板产生的反弹差异为识别依据,实现煤矸石识别与分离,但缺少完善的应用理论,难以推广。周甲伟等^[12]从理论上分析了煤矸石反弹距离差异,建立了反弹距离公式并进行相关试验,为弹道式煤矸石识别分选研究提供了理论依据。

1.1.3 其他方法

王丽等^[13]通过分析煤矸石的化学组成,提出根据煤矸石的导磁性与色度差异进行识别。He Aixiang 等^[14]研究发现煤矸石下降过程中特征声信号不同,提取 32 dB 特征作为煤矸石识别特征。Liu Kai 等^[15]采用多重分形去趋势波动分析方法提取煤矸石的几何特征,结合灰度和纹理特征进行煤矸石识别。

1.2 以灰度、纹理为识别特征的煤矸石识别方法

人工拣矸法是最早利用灰度、纹理特征从煤块中分拣矸石的方法。选矸工人根据对煤矸石表面特性的认识,将大块矸石从原煤中选出。受人工拣矸法启发,研究者利用自动化设备获取煤矸石灰度、纹理信息,并以此为识别特征实现煤矸石分选,减轻了劳动强度,提高了生产效率。该种识别方法主要有射线识别法与图像识别法。

1.2.1 射线识别法

射线识别法中研究较多的为基于 γ 射线或 X 射线的方法。J. S. Watt 等^[16]采用双能 γ 射线透射技术,实现了煤与矿物在线分析。孔力等^[17-18]采用双能 γ 射线透射法实现了不同粒度煤和矸石组分的识别,并在此基础上提出了改进模型,以扩大待识别物体的粒度范围,提高识别精度。此后,研究者重点解决煤矸石识别精度与实时分选之间的矛盾。徐琦等^[19]采用模糊模式识别建立模糊系统,降低了煤矸石识别误判率。李强等^[20]将神经网络应用于模糊系统进行煤矸石识别,适用于煤种变化较频繁的场合。刘文中等^[21]采用 Fuzzy C-Means 统计方法识别煤矸石,综合考虑了不同数据对总体分布的差异性。徐琦等^[22]采用实用生态算子优化模糊神经网络,提出了一种基于生态遗传算法的煤矸石模糊模式识别方法。

杨慧刚等^[23]采用 X 射线进行煤矸石识别研究。与 γ 射线识别相比,X 射线需结合机器视觉技术采集煤矸石图像,通过图像处理算法得到煤矸石灰度和纹理信息,识别流程如图 1 所示。

射线识别法具有操作简单、识别速度快、效率高等优点,但射线辐射强度大,需要采取特殊的防护措施防止辐射泄漏,导致设备成本增加。

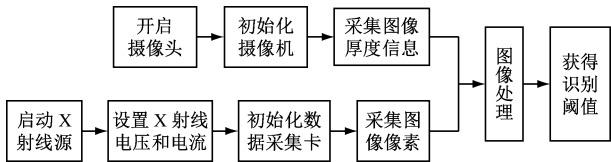


图 1 煤矸石 X 射线识别流程

Fig. 1 X-ray identification process of coal-gangue

1. 2. 2 图像识别法

图像识别法是结合自动化设备与图像识别技术的煤矸石识别方法。该方法将工业相机作为自动化设备的“眼睛”来获取煤矸石图像,将计算机作为自动化设备的“大脑”来处理煤矸石图像,以获取灰度、纹理等特征信息,进而实现煤矸石识别。

刘富强等^[24]提出将图像处理和模式识别技术应用于煤矸石识别,从理论上探索了煤矸石图像处理与识别流程,如图 2 所示。其中边缘检测和特征提取是煤矸石识别的关键步骤。

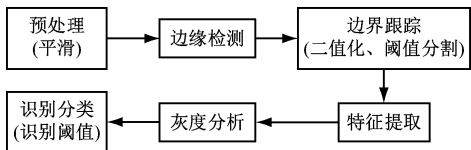


图 2 煤矸石图像处理与识别流程

Fig. 2 Coal-gangue image processing and identification process

为突出图像目标边缘,马宪民等^[25-26]将小波变换的多尺度方法和粗糙集理论分别用于煤矸石图像轮廓提取,从而抑制噪声、准确提取边缘特征。张世杰等^[27]指出通过灰度直方图确定阈值进行二值化并不能从真正意义上解决煤矸石图像的分割问题,并提出一种图像分割算法:图像二值化处理后进行图像距离变换,然后通过梯度下降算法分割煤矸石图像,以达到有效检测图像边缘、分割煤和矸石的目的。程健等^[28]针对煤尘、潮湿等因素造成的矸石颜色加深、边缘梯度不明显等问题,采用粒子群算法和高斯混合模型提取图像背景,实现目标与背景分离。

在煤矸石图像特征提取方面,于国防等^[29]针对样本缺乏代表性和实用性的问题,选择 6 块材质、纹理特征、清洁度不同的块煤或矸石,分别在 3 种光照强度下,按照一定的分组方式分析图像灰度分布规律,以此实现煤矸石自动识别。但若选取的煤矸石识别特征为单一参数,提取图像特征时会存在参数重合、识别精度低等问题。因此,Li Wenhui 等^[30]选用灰度直方图、分形维数和小波变换能量作为识别特征,并建立了 4 层 BP 神经网络模型实现多特征融合。吴开兴等^[31]利用灰度共生矩阵提取煤矸石纹理特征,采用支持向量机实现煤矸石识别。陈雪梅等^[32]依据提取的灰度、纹理特征,应用差分盒维

法获取煤矸石的分形维数,通过试验证明煤的分形维数大于矸石,为煤矸石识别研究提供了新思路。王家臣等^[33]通过提取煤矸石灰度和纹理特征,研究了不同照度下煤矸石图像特征变化规律。

可看出目前对煤矸石图像识别方法的研究主要集中在两方面:如何有效分割图像中的目标与背景;如何准确识别煤和矸石的图像特征。有研究者提出在图像分割和特征提取之前进行图像亮度调整、中值滤波等预处理,以增加图像目标与背景在色彩、亮度、纹理上的差异,以便于图像分割与特征提取。但该类研究大多处于理论和试验阶段,使用的图像背景与目标差异较大,且图像样本数量少,不具有实用性和普遍性。另外,该类研究需要人为进行图像预处理及特征选取,存在对图像目标特征理解不全面、图像识别准确率不高等问题。深度学习可很好地解决上述问题。该技术通过多层非线性变换,从大数据中以有监督或无监督方式学习层次化的特征表达,对图像进行从底层到高层的描述^[34],避免了传统识别方法中复杂的特征提取过程。基于深度学习的图像识别流程如图 3 所示。

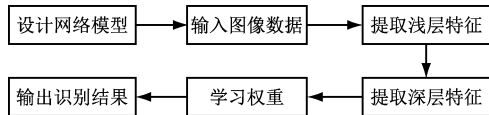


图 3 基于深度学习的图像识别流程

Fig. 3 Image identification process based on depth learning

近年来,深度学习技术已在车牌识别、人脸识别、物体检测等方面得到广泛应用,是目前计算机视觉领域的研究热点。其在煤矸石识别领域的研究也逐步展开。Su Lingling 等^[35]基于深度学习技术,从输入尺寸、激活函数、网络深度等方面对经典卷积神经网络 LeNet-5 进行改进,对其训练之后获得能够识别煤矸石图像的网络模型,实现了煤矸石图像识别和分类。Hong Huichao 等^[36]提出了一种图像目标检测和区域剪切算法,并采用深度学习技术构建了基于 AlexNet 的卷积神经网络模型,解决了数据集较少可能导致的训练困难、过拟合等问题,提高了煤矸石识别的准确性。

2 现有煤矸石识别方法比较

现有煤矸石识别方法对比见表 1。可看出各识别方法选取的识别特征不同,关键在于如何获取易于区分煤和矸石的特征,从而准确、快速地识别煤矸石,为后续分选排矸提供依据。

3 煤矸石识别方法研究展望

目前,研究人员大多通过试验方式选取并确定

表 1 煤矸石识别方法对比

Table 1 Comparison among coal-gangue identification methods

识别方法	识别特征	特点
密度识别法	密度	使用液体介质进行识别分层效果好,处理能力强,但介质回收困难,生产成本增加;采用光电技术进行识别无需干燥处理,获取煤矸石质量与厚度后,需准确计算煤矸石密度,以提高识别精度
硬度识别法	破碎力、反弹距离	多用于井下识别,能量损耗和使用成本低,对破碎力大小要求高,应用理论研究少
射线识别法	灰分(灰度)	识别速度快、效率高,识别结果受被测物粒度影响,射线辐射强度大,需采取特殊的防护措施
图像识别法	灰度、纹理	自动化、智能化程度高,识别效率高,所需设备简单,但易受工作环境影响,识别算法复杂
其他方法	导磁性、声信号、几何特征等	为提高识别准确率,寻找除常用识别特征以外的其他特征,但研究较少

煤矸石的识别特征和识别标准,但没有对其进行深入讨论,如煤矸石图像识别方法中对识别阈值的确定缺乏统一标准。对于实际工作环境中煤矸石识别特征的分析 and 理解,仍需要在理论、算法、工艺等方面开展研究。

(1) 对煤矸石识别特征定义的研究。煤与矸石在识别特征上不存在公认且明显的区分和定义,即没有统一的标准。目前对于煤矸石识别特征的定义大多基于试验统计的思想,得到煤矸石 1 种或多种特征的数值分布范围,从中找出二者差异作为识别标准,存在对煤矸石特征分析、理解不全面的问题。为提高煤矸石识别准确性,需要进一步研究二者特征差异等问题。

(2) 符合煤矿绿色发展要求的煤矸石识别方法研究。我国大部分煤炭资源集中在水资源匮乏的中西部地区,使用液体介质进行煤矸石识别进而实现分选会带来水资源供应压力增大与水资源浪费问题,并需进行介质回收、干燥处理等,流程复杂。随着我国对煤炭绿色清洁、高效利用计划的实施,研究符合煤矿绿色发展要求的煤矸石识别方法十分必要。在井下应用煤矸石识别方法,促进煤矸石干法分选技术的发展,可避免地面矸石堆积问题,有利于构建煤炭清洁低碳发展体系。

(3) 快速高效的煤矸石图像识别方法研究。煤矸石图像识别方法是目前的研究热点。在实际应用中,环境变化、煤矸石种类、设备性能等因素都会对煤矸石图像识别结果造成影响,因此必须考虑图像识别算法的泛化性和易用性。针对煤矸石图像数据少,无法全面、准确分析、理解煤矸石特征的问题,构建大规模煤矸石图像数据库是重要途径。在此基础上,通过煤矸石特征分析、可视化分析等,深入理解煤矸石图像特征在深度卷积神经网络中的表达,研究适合煤矸石识别的深度卷积神经网络,有助于实现快速高效的图像识别。

(4) 新型煤矸石高效识别方法研究。研究者通

过研究光电、射线识别、图像识别、深度学习等技术,将其应用于煤矸石识别领域,但在实际应用中还存在不同的问题。需要研究新型煤矸石高效识别方法,在现有方法基础上进行融合和创新,并将其应用于实践进行检验,从而提高煤矸石识别效率及煤矸石分选智能化水平。

4 结语

煤矸石分选是实现煤炭清洁利用的重要手段,而煤矸石识别是实现煤矸石有效分选的前提和重要环节。识别特征的选取是煤矸石识别方法的重要研究内容。目前,人为设计、选取识别特征的煤矸石识别方法仍在使 用,但将深度学习技术应用于煤矸石识别是煤矸石识别技术的主流趋势。此外,在现有技术基础上进行融合创新,研究新型煤矸石高效识别方法,也是煤矸石识别方法的发展方向,有助于推动煤矸石自动化分选技术进步。

参考文献(References):

[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 Heping, WANG Jinhua, WANG Guofa, 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] 张振红. 我国干法选煤技术发展现状与应用前景[J]. 选煤技术, 2019(1): 43-47.

ZHANG Zhenhong. China ' s coal dry cleaning technology-state-of-the-art and application prospect [J]. Coal Preparation Technology, 2019(1): 43-47.

[3] 梁兴国,李云峰,李燕,等. 智能干选技术研究应用及发展趋势[J]. 选煤技术, 2019(1): 92-96.

LIANG Xingguo, LI Yunfeng, LI Yan, et al. The intelligent dry cleaning technology-study, application and developing trend [J]. Coal Preparation Technology, 2019(1): 92-96.

- [4] 石焕,程宏志,刘万超.我国选煤技术现状及发展趋势[J].煤炭科学技术,2016,44(6):169-174.
SHI Huan, CHENG Hongzhi, LIU Wanchao. Present status and development trend of China's coal preparation technology [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6): 169-174.
- [5] 郭楠,陈震,罗旭辉.重介质选煤自动控制技术研究[J].工矿自动化,2014,40(6):34-36.
GUO Nan, CHEN Zhen, LUO Xuhui. Research of automatic control technology of dense medium coal preparation[J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(6): 34-36.
- [6] 胡熙.选煤工艺现状及发展趋势浅析[J].山东煤炭科技,2016(9):201-202.
HU Xi. Analysis on present situation and development trend of coal preparation technology[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2016(9): 201-202.
- [7] 王卫东,张晨,马中良,等.煤矸光电分选系统设计[J].工矿自动化,2013,39(12):5-8.
WANG Weidong, ZHANG Chen, MA Zhongliang, et al. Design of photometric separation system for coal and gangue[J]. Industry and Mine Automation, 2013, 39(12): 5-8.
- [8] WANG Weidong, ZHANG Chen. Separating coal and gangue using three-dimensional laser scanning [J]. International Journal of Mineral Processing, 2017, 169: 79-84.
- [9] 董长双,姚平喜,刘志河.井下煤和矸石液压式自动分选技术[J].煤炭科学技术,2007,35(3):54-56.
DONG Changshuang, YAO Pingxi, LIU Zhihe. Hydraulic automatic separation technology of coal and refuse in underground mine [J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(3): 54-56.
- [10] 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(增刊1):54-58.
LI Jianping, ZHENG Kehong, DU Changlong. The distribution discipline of impact crushed on coal and gangue[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38 (S1): 54-58.
- [11] 郎庆田,周甲伟,王元仁,等.基于运动分析和仿真的井下弹道式煤矸分选研究[J].煤炭科学技术,2008,36(2):85-87.
LANG Qingtian, ZHOU Jiawei, WANG Yuanren, et al. Study on ballistic of coal and refuse base on kinematic analysis and simulation [J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(2): 85-87.
- [12] 周甲伟,王福荣,刘瑜,等.井下弹道式煤矸分选的理论 and 实验[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(2):498-504.
ZHOU Jiawei, WANG Furong, LIU Yu, et al. Theoretical and experimental research on ballistic separation for coal and gangue underground [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(2): 498-504.
- [13] 王丽,李志宏.煤矸石与煤的自动分选[J].山西煤炭,2003(2):41-42.
WANG Li, LI Zhihong. Automatic separation of debris and coal [J]. Shanxi Coal, 2003(2): 41-42.
- [14] HE Aixiang, ZHANG Mengke, WANG Chenchen. Coal gangue interface recognition based on MFCC research [J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 411/412/413/414: 1058-1061.
- [15] LIU Kai, ZHANG Xi, CHEN Yangquan. Extraction of coal and gangue geometric features with multifractal detrending fluctuation analysis [J]. Applied Sciences, 2018(8): 463-477.
- [16] WATT J S, STERFFNER E J. Dual energy gamma-ray transmission techniques applied to on-line analysis in the coal and mineral industries [J]. International Journal of Applied Radiation & Isotopes, 1985, 36 (11): 867-877.
- [17] 孔力,李红,徐恕宏,等.双能 γ 射线透射法煤矸石在线识别与分选系统[J].华中理工大学学报,1997(10):108-109.
KONG Li, LI Hong, XU Shuhong, et al. The on-line identification and separation system for coal gangues based on double energy γ ray transmission [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1997(10): 108-109.
- [18] 张朴,孔力,黄心汉.基于双能 γ 射线的煤矸在线识别模型研究[J].工业仪表与自动化装置,2000(2):53-55.
ZHANG Pu, KONG Li, HUANG Xinhan. Research on an on-line coal & gangue identification model based on dual energy gamma-ray transmission [J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2000(2): 53-55.
- [19] 徐琦,张勇传.运用模糊模式识别和模糊控制的煤矸石自动分选机[J].自动化仪表,2000(12):20-22.
XU Qi, ZHANG Yongchuan. The automatic sorting machine of gangue operated by fuzzy mode recognition and fuzzy control [J]. Process Automation Instrumentation, 2000(12): 20-22.
- [20] 李强,孔力,程葳,等.模糊神经网络建模方法在煤矸石识别系统中的应用[J].工矿自动化,2002,28(2):10-13.
LI Qiang, KONG Li, CHENG Wei, et al. Application of modeling approach based on fuzzy neural network in the recognition system for coal gangues [J]. Industry and Mine Automation, 2002, 28(2): 10-13.
- [21] 刘文中,孔力,瞿坦.煤矸石自适应神经网络识别方

- 法研究[J]. 选煤技术, 2002(3):22-24.
- LIU Wenzhong, KONG Li, QU Tan. Study on identification method of self-adaptlive neuroid for coal gangue[J]. Coal Preparation Technology, 2002(3): 22-24.
- [22] 徐琦,孔力,刘文中. 生态遗传算法在煤矸石模糊模式识别中的应用[J]. 工矿自动化, 2003, 29(2):9-11.
- XU Qi, KONG Li, LIU Wenzhong. Application of niche genetic algorithm in fuzzy pattern recognition of gangues[J]. Industry and Mine Automation, 2003, 29(2):9-11.
- [23] 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.
- [24] 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 Fuqiang, QIAN Jiansheng, WANG Xinhong, 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.
- [25] 马宪民. 一种基于小波变换的煤矸石图像边缘检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(增刊3):2130-2131.
- MA Xianmin. Edge detection based on wavelet transform for coal gangue image[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(S3):2130-2131.
- [26] MA Xianmin, LIANG Che. Application of rough set theory in coal gangue image process [C]//IEEE International Conference on Information Assurance & Security, Xi'an, 2009:87-90.
- [27] 张世杰,陈泽华. 基于梯度下降算法的煤矸石分割识别方法[J]. 煤矿机械, 2014, 35(8):128-130.
- ZHANG Shijie, CHEN Zehua. Coal stone segmentation approach based on gradient descent[J]. Coal Mine Machinery, 2014, 35(8):128-130.
- [28] 程健,王东伟,杨凌凯,等. 一种改进的高斯混合模型煤矸石视频检测方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(1):118-123.
- CHENG Jian, WANG Dongwei, YANG Lingkai, et al. An improved Gaussian mixture model for coal gangue video detection[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2018, 49(1): 118-123.
- [29] 于国防,邹士威,秦聪. 图像灰度信息在煤矸石自动分选中的应用研究[J]. 工矿自动化, 2012, 38(2): 36-39.
- YU Guofang, ZOU Shiwei, QIN Cong. Application research of image gray information in automatic separation of coal and gangue[J]. Industry and Mine Automation, 2012, 38(2):36-39.
- [30] LI Wenhui, WANG Ying, FU Bo, et al. Coal and coal gangue separation based on computer vision[C]//The 5th IEEE International Conference on Frontier of Computer Science and Technology, Changchun, 2010: 467-472.
- [31] 吴开兴,宋剑. 基于灰度共生矩阵的煤与矸石自动识别研究[J]. 煤炭工程, 2016, 48(2):98-101.
- WU Kaixing, SONG Jian. Automatic coal-gangue identification based on gray level co-occurrence matrix [J]. Coal Engineering, 2016, 48(2):98-101.
- [32] 陈雪梅,张晞,徐莉莉,等. 煤与矸石分形维数的差异研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(7):196-199.
- CHEN Xuemei, ZHANG Xi, XU Lili, et al. Study on fractal dimension differences of coal and rock[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(7):196-199.
- [33] 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.
- [34] 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 Li, ZHAO Lingjun, GUO Chengyu, et al. Texture classification: state-of-the-art methods and prospects [J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(4):584-607.
- [35] SU Lingling, CAO Xiangang, MA Hongwei, et al. Research on coal gangue identification by using convolutional neural network [C]//The 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference, Xi'an, 2018:810-814.
- [36] HONG Huichao, ZHENG Lixin, ZHU Jianqing, et al. Automatic recognition of coal and gangue based on convolution neural network[EB/OL]. [2019-05-03]. [https://www. researchgate. net/publication/321511244_Automatic_Recognition_of_Coal_and_Gangue_based_on_Convolution_Neural_Network](https://www.researchgate.net/publication/321511244_Automatic_Recognition_of_Coal_and_Gangue_based_on_Convolution_Neural_Network).