

基于机器视觉-光电分选耦合的煤系高岭石分选技术

陈仲叔¹, 周运洪², 辛学铭¹, 邓振平¹

(1. 内蒙古中钰泰德煤炭有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000; 2. 中国矿业大学 化工学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:为解决煤系高岭石资源回收利用的问题, 在传统光电分选技术的基础上, 提出一种基于机器视觉与光电分选相结合的自动光电分选系统。介绍了光电分选机的结构及其工作原理、机器视觉的定义及基于YOLOv7网络的目标检测算法。在MS2000智能分选机中植入了相机识别技术和基于YOLOv7的AL识别算法, 以解决光电分选机识别能力差和适应性差的问题。并以准格尔地区酸刺沟选煤厂产出的煤矸石为研究对象, 采用X射线荧光光谱(XRF)和X射线衍射(XRD)技术对煤矸石进行特性分析, 分析了煤系高岭石选出的必要性。采用该系统进行了选别试验。结果表明: 分选精度和数量效率的加权平均值高达94.4%, 错配物含量加权平均值低至6.69%, 分选系统对煤系高岭石有良好的分选效果。

关键词: 煤系高岭石; 机器视觉; 光电分选; X射线衍射; 数量效率

中图分类号: TD95 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2024)S1-0667-05

Coal bearing kaolinite separation technology based on machine vision-photoelectric separation coupling

CHEN Zhongshu¹, ZHOU Yunhong², XIN Xueming¹, DENG Zhenping¹

(1. Inner Mongolia Zhongyu Ted Coal Co., Ltd., Ordos 017000, China; 2. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to solve the problem of recycling and utilization of coal bearing kaolinite resources, an automatic photoelectric separation system based on the combination of machine vision and photoelectric separation was proposed on the basis of traditional photoelectric separation technology. The structure and working principle of the photoelectric sorter, the definition of machine vision and the target detection algorithm based on YOLOv7 network were introduced. In order to solve the problems of poor recognition ability and poor adaptability of the photoelectric sorter, the camera recognition technology and the AL recognition algorithm based on YOLOv7 were implanted in the MS2000 sorter. Taking the coal gangue produced by the Suancigou Coal Preparation Plant in the Zhungeer area as the research object, the characteristics of the coal gangue were analyzed by X-ray fluorescence spectrometry (XRF) and X-ray diffraction (XRD) technology, and the necessity of coal measure kaolinite selection was analyzed. Selection tests were carried out using this system. Results show that the weighted average values of sorting precision and quantity efficiency are as high as 94.4%, and the weighted average value of mismatch content is as low as 6.69%, and the sorting system has a good sorting effect on coal bearing kaolinite.

Key words: coal bearing kaolinite; machine vision; photoelectric separation; X ray diffraction; quantity efficiency

0 引言

煤矸石是在煤矿开采和煤分选过程中产生的固体废弃物, 煤炭开采中, 原煤中混杂的煤矸石占15%左右^[1]。中国煤炭产量居于世界前列, 煤矸石产量相对较高, 主要源于3个途径: 掘进煤矸石, 开采过程中排出的煤矸石, 分选产生的矸石^[2]。大量

的煤矸石弃之不用, 将占用大量土地, 造成危害^[3]。所以对煤矸石进行综合利用, 减少其环境危害是煤矿企业和环境保护部门的重要研究课题。

煤矸石中矿物种类丰富, 包含硅酸盐矿物、碳酸盐矿物、铁矿物、硫酸盐矿物及石膏、闪锌矿等其他矿物。高岭石是一种硅酸盐多功能材料, 主要在造纸、陶瓷等行业中作为填料使用^[4]。高岭石含量超过

收稿日期: 2024-03-27; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CPC24032701

作者简介: 陈仲叔(1988—), 男, 山东泰安人, 中级工程师。E-mail: 807619912@qq.com

通讯作者: 辛学铭(1972—), 男, 内蒙古自治区鄂尔多斯人, 高级工程师。E-mail: 1038555872@qq.com

引用格式: 陈仲叔, 周运洪, 辛学铭, 等. 基于机器视觉-光电分选耦合的煤系高岭石分选技术[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(S1): 667-671.

CHEN Zhongshu, ZHOU Yunhong, XIN Xueming, et al. Coal bearing kaolinite separation technology based on machine vision-photoelectric separation coupling[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(S1): 667-671.

80%的煤矸石成为煤矸石称为煤系高岭土,是一种与煤共伴生的硬质高岭石,是我国特有的,极具开发价值的,也是传统高岭土的重要替代资源^[5]。在国家对于经济环保和综合利用资源的政策支持下,行业内逐步开始推广开发运用煤系高岭石。传统的矿物分选方法存在人工成本高、低效率、环境污染、精度低、资源浪费等问题^[6],所以研究煤系高岭石的有效分选技术,使其中高岭石资源得到充分利用尤为重要。

光电分选^[7]是一项新兴技术,既不像重选磁选等技术需要消耗大量的水资源,也不像浮选技术需要消耗大量药剂,具有速度快、精度高、模块化及集成扩展性强、运行成本低、不受煤或矸石表面附着物和湿度的影响等优势,具有很好的发展前景。目前,光电分选技术已经成功应用于煤炭、磷矿、铁矿分选等领域,成为矿石预选抛尾的主要方法之一。然而,国内外关于光电分选技术用于煤系高岭石分选的相关报道极少见。物料的复杂性和环境的不确定性使光电分选系统需具备强大的识别能力和适应性。近年来,随着硬件设备的发展,基于神经网络的深度学习算法在目标检测中得到广泛应用,设备的识别速度和精准度得到进一步提升^[8]。郑道能^[9]提出了基于改进的 tiny YOLOv3 的煤矸石检测方法,在满足检测精度的前提下,单张照片检测速度仅 12.5 ms。石亦琨等^[10]将 YOLOv5 网络模型与机器

视觉相结合,网络模型的识别精度提高了 2.1%。王军等^[11]基于改进的 YOLOv5s 交通信号灯检测算法,通过构建一种特征金字塔模块 RSN-BiFPN,充分融合不同尺度的交通信号灯特征,以减少目标漏检和误检。

因此,笔者提出一种将机器视觉与光电分选相结合的自动分选系统,提高光电分选机的分选速率和准确性,增强生产线的自动化和智能化,实现煤系高岭石的有效分选。

1 光电分选机工作原理及存在问题

1.1 光电分选机工作原理

光电分选运用光电传感器,经数字信号检测及计算机处理系统,根据分选物料光学差异特性(光投射到物料表面,物料对其产生反射,吸收,透射后激发出其他波长光的性质),对检测物料进行非接触式扫描识别,利用高速剔除机构分离杂物。

光电系统由 4 部分组成,包括给料、运输、扫描检测和分选执行系统光电,其工作原理如图 1 所示。矿块经过给料/布料装置均匀摊铺,由皮带输送机输送至识别区,X 射线单元和探测单元对矿块进行图像采集和自动识别,高速运算单元和阵列式高压气喷装置根据图像识别结果实现矿块自动分选,得到高岭石(精矿)和尾矿。

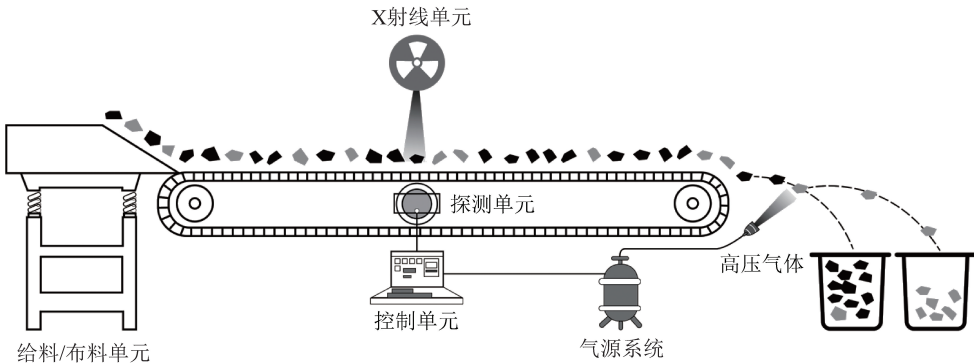


图 1 光电分选系统工作原理

1.2 存在问题

从光电分选技术发展历程看,已实现了从传统自然光扫描到高能 X 射线、激光等扫描,且在图像处理技术上得到突破。目前高能扫描技术和单双面高清图像处理技术已取代其他光电分选技术^[12]。显然,传统光电分选机在一些简单应用场景下具有优势,能很好替代人工分选。但也存在问题,包括光机依赖于光学传感器来捕获物体的特征,而光学传感器的检测能力存在局限性,通常只能检测物体基本特征,如颜色、形状等,有限的特征检测能力导致分选机无法准确区分具有相似特征的物体,无法应

对复杂的分选任务;光学传感器的性能极易受环境因素,如光照强度、光线角度的影响,使分选机性能表现不稳定,难以实现准确分选;传统识别算法所识别的特征由人工设计,这些特征并不能完全反映数据本质,会影响识别效果;算法性能受参数调整和人工调优影响,投入时间和精力较大。

2 基于机器视觉-光电分选耦合的自动分选系统

为解决传统光电分选机光机识别能力和适应性差的问题,在 MS2000 智能分选机中植入机器视觉

技术,即在光学传感器的基础上增加了相机识别并将传统识别算法更换为基于 YOLOv7 的 AL 识别算法,将光电分选机中检测系统的优点最大化,使分选机能根据“看到”的内容做出决策并采取行动。机器视觉与光电分选的融合可实现更智能、高效、精准分选过程,使生产线自动化、智能化和精准化水平提高^[13]。

2.1 分选机选用

MS2000 矿物智能分选机是由同方威视技术股份有限公司针对煤炭分选行业研发的一款产品,集机械化、自动化、智能化于一体,通过 X 射线采集矿石信息、系统精确识别和机器学习,实现原矿中有用矿石与废石分离。基于 X 射线识别和气体喷射 2 项核心技术,同时,融合机械、电气、自动化、系统软件等技术,实现了分选对象的识别和执行。X 射线透射原理如图 2 所示。X 射线照射到待检测矿物上,穿透矿物过程中,与矿物内部原子发生相互作用,矿物中原子对 X 射线有不同吸收和散射能力。X 射线透过物料后,X 射线透射量由探测器测量,被吸收的强度决定了透射强度,从而形成透射图像。

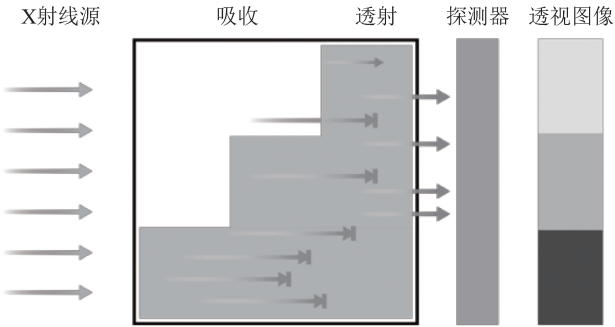


图 2 X 射线透射原理

MS2000 矿物智能分选系统由六大分系统共同组成,分别是射线源分系统、探测器分系统、扫描装置分系统、扫描控制分系统、运行检查分系统、辐射防护分系统。该分选系统具有如下优势特点:采用 XRT 技术(X 射线透射成像技术),能够获取每个矿物的内部组成特征,根据元素组成特性智能识别出煤矸石;阵列式高压气喷装置根据识别结果,对高速运动的煤矸石逐一分选,分选精度高;绿色环保,不用水,不用介质,无排放污染;设备皮带速度、皮带宽度、入选块煤粒级可定制化开发,匹配不同选煤厂的产量需求,处理量大;自动化程度高,设备运行稳定可靠。分选工作流程如图 3 所示。

2.2 机器视觉的定义及组成

机器视觉又称计算机视觉,是基于数字图像处理、模式识别、机器学习、深度学习等多领域技术发展起来的集成硬件和软件的技术系统,旨在通过摄

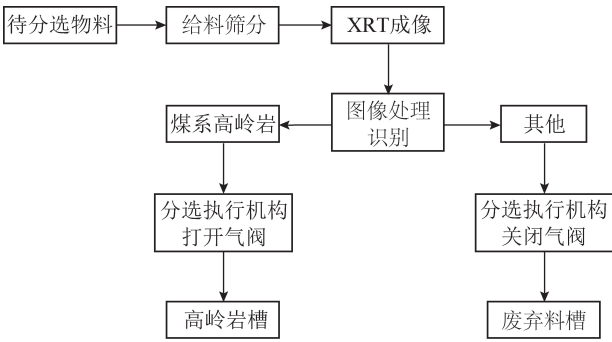


图 3 系统结构逻辑

像机图像处理、模式识别等手段,使计算机系统能像人眼一样看到和理解图像信息,模拟人类视觉系统,用于捕捉、分析和理解图像信息^[14]。

机器视觉系统主要由图像采集部分、图像处理部分、运动控制部分 3 部分组成^[15]。系统通过摄像头或其他图像采集设备获取矿石的图像信息,使用图像处理技术对煤矸石样本的图像进行分类和分割,将不同矿物和颗粒进行区分,利用机器学习算法提取图像中高岭石的各种特征,如颜色、形状、纹理等,使分选系统能精准辨别和处理不同类型的矿物。通过综合利用机器视觉和光电分选技术,系统可考虑多个特征进行分选,包括颜色、形状、明度等方面,更全面判断物体特征,从而实现更高精度分选。现阶段机器视觉系统的应用效果良好,其灵活性和适应性使其在复杂环境中也能有效工作^[16]。

2.3 YOLOv7 目标检测算法

近年来,随着深度学习技术发展,现代识别系统转向使用神经网络,能更好捕捉物体高级特征,在许多识别任务中取得显著成效,弥补了传统光电分选机识别效果差的短板^[17]。YOLOv7^[18] 算法是由 Alexey Bochkovskiy 团队于 2022 年 8 月发布的一种无锚框的单阶段目标检测算法。与 YOLOv5 及之前的算法相比,YOLOv7 使用更高效的卷积操作,更快的网络结构和数据并行技术,具有检测准确度高和检测速度快等优势。YOLO 系列算法主要是对输入的图片进行处理,首先将输入的图片划分为固定大小的网格(如 5×5 或 7×7),然后找出待检测目标中心所处的网格位置,并由待检测目标中心网格对待检测目标进行精准预测^[19]。对每个网格,YOLO 会预测一组边界框,每组边界框由位置信息和置信度分数定义,其中置信度代表了所预测网络中所含有的事物及预测准确性两重信息。

Backbone、FPN、YOLOHead 三部分共同组成了 YOLOv7 网络结构。Backbone 是 YOLOv7 的基础结构,负责对输入的图像进行特征提取,包含 CBS 模

块、ELAN 模块以及 MP 模块。Conv 层+BN 层+ SILU 激活函数组成了 CBS 模块,其中,卷积核不仅用于提取特征,还用于修改特征通道。ELAN 模块由 7 个 CBS 模块组成,特征图像经过 ELAN 模块,选择控制最短,梯度最长的路径,使得计算机网络学习到更多画面特点。MP 包含 3 个 CBS 模块,用于下采样减少计算机复杂程度。YOLOHead 用于预测图像特征和图像目标类别及可信度,通过引入 RepVGG-Style 算法,升级了 head 网络结构。为帮助网络更好地学习数据特征,在训练中允许 3 条路径相加,而在推理阶段,则是将 2 条分支的参数重参数化到主干分支上,实现快速且准确预测。YOLOv7 设计使其成为处理复杂场景和多变目标的有效工具,为煤矸石精准识别提供了强有力的支持。

相机识别技术相较光学传感器具有更好的灵活性、精度和适应性。可捕获矿物更多维的信息,包括颜色、形状、大小等,提供高分辨率的图像,更准确识别物体的特征,还可根据不同分选需求和物体特征进行灵活调整和配置,从而实现更广泛应用。将相机识别技术运用于光电分选中并使用深度学习模型卷积神经网络(CNN)对提取的特征进行分类,将高岭石与其他矿物区分,为后续分类和分选提供基础。利用基于 YOLOv7 的目标检测算法,对煤矸石图像中的高岭石颗粒进行目标检测,确定位置和边界框,结合机器学习分类结果,以实现自动分选和提取高岭石颗粒。

3 基于机器视觉-光电分选耦合的自动分选系统应用实例

酸刺沟选煤隶属于内蒙古伊泰京粤酸刺沟矿业

表 1 酸刺沟煤矸石化学成分

化学成分	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
质量分数/%	43.11	43.8	0.67	1.85	9.00	0.11	0.33	0.11	0.05	1.02

3.1.2 物相分析(XRD)

选取从酸刺沟选煤厂洗选尾矿中筛选的高岭土进行了 X 射线衍射(XRD)测试,测试结果如图 5 所示,可知酸刺沟煤矸石中高岭石含量占比大,除高岭石外只含有少部分珍珠陶土,纯度较高,表明该地煤系高岭石具有较好的分选回收价值。

3.2 分选性能指标

评价光电分选机分选性能的主要指标有错配率、数量效率及精度。错配率为废料中高岭岩占比与原料中高岭岩占比比值,通常用来评估矿石中矿物与废石的分离效果;数量效率为设备单位时间处

理的石量与设备额定处理能力的比值,用来评估

3.1 酸刺沟手选高岭土特性

为实现煤系高岭石高效分选,以酸刺沟选煤厂重选尾矿生产的手选粒径<100 mm 综合煤矸为研究对象,分析煤矸石特性。酸刺沟选煤厂收集的综合煤矸石(煤矸石清水洗净后在烘干箱内(25℃±1℃)干燥 1 h 取出)如图 4 所示。



图 4 酸刺沟综合煤矸原始样

3.1.1 化学成分分析(XRF)

酸刺沟选煤厂收集的综合煤矸化学成分结果见表 1,由表 1 可以明显看出,酸刺沟选煤厂收集的综合煤矸石的原料以 SiO₂、Al₂O₃两种氧化物为主要化学成分,并含有少量铁及微量镍、锰、铜、钛等杂质。

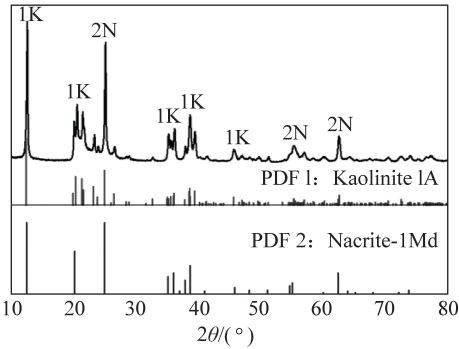


图 5 酸刺沟手选高岭土 XRD 图

理的矿石量与设备额定处理能力的比值,用来评估

分选设备的处理能力,衡量设备在单位时间内处理的矿石数量;精度为正确分选的高岭石质量与原料中高岭石质量的比值,分选精度是评估分选效果的重要指标之一。

3.3 现场应用效果

选取粒度 50~300 mm 物料进行选别试验,为防止杂质、尘埃、泥土等黏附于煤矸石表面对光电分选

系统的识别效果造成影响,因此在物料进入光电分选机前进行一次冲洗。选别试验结果见表 2。可知产品中高岭石占比均大于 90%,错配物含量加权平均值为 6.69%,数量效率和分选精度均大于 90%,加权平均值高达 94.40%。表明该系统的应用,有效提升了酸刺沟选煤厂煤矸石分选精度,减少了错配物含量,提高了煤系高岭石资源的回收和利用率。

表 2 分选试验结果

序号	项目	非高岭岩/kg	高岭岩/kg	小计/kg	处理量/ (t·h ⁻¹)	高岭岩比例/%	错配率/%	数量效率/%	精度/%
1	原料	472.50	25.00	497.50	150	5.03	9.62	90.80	91.90
	产品	2.00	22.70	24.70		91.90			
	废料	470.50	2.30	472.80		0.49			
2	原料	499.00	53.90	552.90	190	9.75	6.42	94.25	97.13
	产品	1.50	50.80	52.30		97.13			
	废料	497.50	3.30	500.80		0.66			
3	原料	425.00	74.80	499.80	170	14.97	6.18	95.59	90.51
	产品	7.50	71.50	79.00		90.51			
	废料	417.50	3.30	420.80		0.78			
4	原料	400.00	99.80	499.80	155	19.97	7.31	94.49	92.91
	产品	7.20	94.30	101.50		92.91			
	废料	392.80	5.50	398.30		1.38			
加权平均							6.69	94.40	94.40

4 结 语

机器视觉技术与光电分选技术的结合,弥补了传统光电分选机的不足,不仅可解决矿区煤矸石堆放、环境污染问题,还可实现煤系高岭石的有效分选,为化工、医药等领域提供高岭石原材料。该系统在酸刺沟选煤厂的应用,成功替代人工分选,既提高了生产效率,又提高了分选精度,为企业节约了生产成本,创造了良好的经济效益、社会效益。

参考文献:

[1] 郭秀军.煤矸石分选技术研究与应[J].煤炭工程,2017,49(1):74-76.

[2] 范晓平,刘京,康哲,等.煤矸石综合利用与矿山生态修复的战略思考[J].环境卫生工程,2023,31(1):8-15.

[3] 李振,雪佳,朱张磊,等.煤矸石综合利用研究进展[J].矿产保护与利用,2021,41(6):165-178.

[4] 陈漫,陈肖汀,黄腾,等.我国煤系高岭土应用现状研究与展望[J].矿产综合利用,2022(6):11-16.

[5] 许红亮,刘钦甫.我国煤系高岭岩资源特征及加工利用现状[J].中国非金属矿工业导刊,2003(5):8-12.

[6] 黄亮国,朱燕娟,赵韦人,等.高岭土最佳分散条件的确定与探讨[J].中国造纸,2009,28(6):18-21.

[7] 卢熠昌,于中山.煤矸光电分选系统及抗干扰技术研究[J].矿业研究与开发,2020,40(1):144-147.

[8] 李余光.基于轻量化神经网络的目标检测算法研究[D].长春:长春工业大学,2024.

[9] 郑道能.一种改进的 tiny YOLO v3 煤矸石快速识别模型[J].工矿自动化,2023(4):113-119.

[10] 石亦琨,李峥,李润田,等.基于机器视觉的煤矸石分选方法研究[J].中国矿业,2024,33(01):114-121.

[11] 王军,葛宝康,程勇.基于改进 YOLOv5s 算法的交通信号灯检测[J].计算机系统应用,2023,32(12):243-252.

[12] 杨丘,唐远,郭劲,等.光电分选技术进展及其在磷矿选别中的应用与展望[J].化工矿物与加工,2022,51(9):24-29.

[13] 殷悦.机器视觉技术在农业机械中的应用研究[J].南方农机,2021,52(8):94-95.

[14] 付贵忠,牛福洲,陈浩,等.面向新时代人才培养需求的“机器视觉”课程教学改革研究[J].南方农机,2023,54(19):195-198.

[15] 刘允浩.机器视觉在智能制造中的应用[J].电子技术与软件工程,2022(24):186-190.

[16] 李菁.基于机器视觉的物流自动分拣系统设计[J].自动化技术与应用,2023(8):34-37,41.

[17] 帅真浩.计算机视觉领域深度神经网络的自适应神经进化方法[D].大连:大连海事大学,2023.

[18] 张相胜,杨骁.基于改进 YOLOv7-tiny 的橡胶密封圈缺陷检测方法[J].图学报,2024,45(3):446-453.

[19] 马纪,陈勇旗,艾延景,等.基于 YOLOv7 网络的人像目标检测[J].科技与创新,2024(2):91-93.

[20] 荆沐阳.准格尔地区综合煤矸中高岭土反浮选提纯试验研究[D].呼和浩特:内蒙古工业大学,2023.