# 智能干选机在矸石资源化利用领域的应用探讨

马杨硕 邵延海
昆明理工大学国土资源工程学院，云南 昆明 650093

[摘要]煤矸石也是一种可循环利用的资源，发展煤矸石资源综合利用技术，不仅为企业增加经济效益，改善煤矿生产结构，还可以改善生态环境，减少土地占用。智能干选机在干法选煤领域已经有了较广泛的应用，典型应用场景包括人工排矸，跳汰、动筛等技术升级改造项目，但在煤矸石资源化综合利用方面应用较少。文中在分析智能干选机的基本原理和核心技术基础上，针对山西某煤矿产出的煤矸石，使用 PIDS 智能干选机进行煤矸石分选实验。实验结果表明，智能干选机对该矿煤矸石中的硫铁、中煤分选效果较好，可作为产品进行销售；砂岩有一定富集，但未达到进一步工业应用的要求。智能干选机在煤矸石资源化利用方面显示出良好的应用前景。

[关键词]智能干选；煤矸石；综合利用
DOI：10.33142/ec.v6i2.7754 中图分类号：TD942 文献标识码：A

# Discussion on the Application of Intelligent Dry Separator in the Field Of Coalgangue Resource Utilization

MA Yangshuo, SHAO Yanhai
Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yun'nan, 650093, China

**Abstract:** Coalgangue is also a recyclable resource. Developing comprehensive utilization technology of coalgangue resources can not only increase economic benefits for enterprises, improve coal mine production structure, but also improve ecological environment and reduce land occupation. Intelligent dry separators have been widely used in the field of dry coal preparation. Typical application scenarios include technical upgrading and transformation projects such as manual waste removal, jigging and moving screen, but they are rarely used in the comprehensive utilization of coalgangue resources. Based on the analysis of the basic principle and core technology of the intelligent dry separator, this paper uses the PIDS intelligent dry separator to carry out the coalgangue separation experiment for the coalgangue produced in a coal mine in Shanxi. The experimental results show that the intelligent dry separator has a good separation effect on iron sulfide and middling coal in the coalgangue of the mine, which can be sold as products; Sandstone is enriched to some extent, but it does not meet the requirements for further industrial application. The intelligent dry separator shows a good application prospect in the utilization of coalgangue resources.

**Keywords:** intelligent dry selection; coalgangue; comprehensive utilization

## 引言

煤矸石是我国最大的固体废弃物之一。对煤矸石进行综合利用，具有重大的经济价值和环保生态价值，是近年来的一个研究热点。煤矸石综合利用的研究主要集中于整体利用，如制备用于废水处理的光催化剂、吸附剂和沸石分子筛[1]；代替黏土矿物生产混凝土、水泥、砖等建筑材料；改良土壤、制备育苗基质、肥料等；作为充填材料进行采空区回填、路基充填、煤矿塌陷区复垦等；发电以及制备纸张等。对煤矸石中煤炭、硫、硅、铝、钛等有价组分的提取研究较少，或多采用化学的方法，难以实现工业应用。基于光电技术及人工智能算法的智能干选技术在煤、矸分选场景有较多研究[2-5]，并且有较多的工业应用，但是在煤矸石综合利用方面研究较少。本文基于光电技术、人工智能算法，研究智能干选机在煤矸石综合利用领域的应用，探讨智能干选机在煤矸石有用矿物提取和分离的适应性。

## 1 概述

煤矸石是一种在成煤过程中与煤层伴生的含碳量较低、比煤坚硬的黑灰色岩石，干基灰>50%，在煤矿建井、开拓掘进，采煤和煤炭洗选过程中产生，包括巷道掘进过程中的掘进矸石、采掘过程从顶板、底板及夹层里采出的矸石以及洗煤过程中挑出的洗矸石[6]。煤矸石的排放量相当于煤炭产量的 10%～15%[7]，根据《2021—2022 年中国大宗工业固体废物综合利用产业发展报告》测算的数据，我国煤矸石存量约 70 亿吨，并且逐年增长，2021 年煤矸石产生量约为 7.43 亿吨。煤矸石的大量堆放，不仅浪费资源，侵占土地，还会造成水体和土壤污染。煤矸石中含有的可燃物，在特定条件下会发生自燃，排放有害气体，造成空气污染。

同时，煤矸石也是一种可循环利用的资源。煤矸石中的有用矿物质经加工处理后，可作为建筑材料，也可制陶瓷，还可应用于化工产品，煤矸石中含有的一定热值的夹


Copyright © 2023 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

矸等可用于煤矸石发电。发展煤矸石资源综合利用技术，不仅能为企业增加经济效益，改善煤矿生产结构，还可以改善生态环境，减少土地占用。

选煤是煤矿加工生产中的一个重要环节，即将原煤中的煤矸石等杂质剔除，降低煤产品的灰分、硫分，提高产品煤的热值。目前我国选煤工艺主要可分为人工、湿法、干法几类。人工排矸分选效率低，受人为因素影响大。跳汰、重介等机械化选煤方法存在投资与运行成本高、工艺复杂、污染处理难度大等缺点[8]。智能干选机是基于 X 射线与人工智能技术的新型干法选矿技术，具有自动化程度高、分选精度高，无需用水、工艺简单等特点，目前主要用于替代 6-450mm 块状物料的人工手选、动筛、跳汰、重介浅槽进行预排矸或主选[9]。在煤矸石资源综合领域，智能干选机可将煤矸石等矿物中的各类成分进一步分级，提升有用矿物的品位，为矿物的进一步加工利用创造条件。

## 2 智能干选机原理

PIDS 智能干选机是合肥泰禾卓海智能科技有限公司研发的一种基于先进成像和人工智能技术的新型干式自动化选矿设备，其组成如图 1 所示。该型设备利用双能 X 射线/可见光全光谱多谱段扫描技术采集物料图像，通过深度学习图像识别技术对图像进行分析、判断物料种类，准确控制高压风对矸石、尾矿、废石或其他杂质进行喷吹剔除，实现精确、高效、节能的全自动矿石分选。

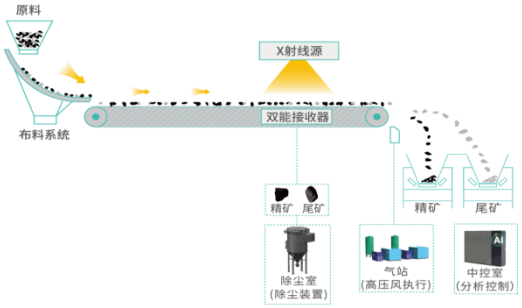


图 1 光电智能干选机及配套设备组成

## 3 智能干选机核心组成

### 3.1 双能 X 射线透射成像系统

由于大部分矿物表面纹理、颜色等特征接近，传统的分选成像技术无法有效获取物料特征，为了能够达到更好的分选效果，智能干选机使用双能 X 射线成像系统采集物料内部纹理和透射信息。X 射线透射法是利用物料受到 X 射线照射后产生的不同物理效应来分选物料的方法，根据不同物质 X 射线的吸收差别可以将之区分[10-11]。

X 射线探测器是信号接收传感模块，图像质量与 X 射线探测器的性能密切相关。探测器的关键参数包括空间分辨率、响应均匀性、对比灵敏度、动态范围、采集速度和帧率等[12-13]。X 射线能谱是在一定区间连续分布的，可采用滤片吸收的方式实现双能探测，其基本原理过程是：(1) 首先，采用响应全能谱的闪烁体（GOS\CsI）将 X 射线能量转换为可见光能区的光子，然后采用光电二极管将光信号转换为电信号，输出为第一路信号。(2) 在第一组传感器下方加一层一定厚度的金属滤片，X 射线的低能部分被滤片吸收，高能部分进入下方的闪烁体转换为可见光光子，再由光电二极管将光信号转换为电信号，由此得到双能 X 射线信号。

信号经过采样、积分放大、AD 转换后，变为数字图像，再由射线数据传输卡的信号处理单元进行进一步处理（如温度补偿、图像预处理等）后，将合成图像发给上位机。

### 3.2 深度学习图像识别系统

深度学习的概念源于人工神经网络的研究。深度学习通过组合低层特征形成更加抽象的高层表示属性类别 或特征，以发现数据的分布式特征表示[14]。智能干选机基于深度学习算法，采集一定数量的分选样品图像，通过 X 射线荧光分析仪分析、表面结构分析等方法，对选取的典型样本图像设定标签，构建出训练用的图像数据集。使用 AI 深度学习算法训练学习，生成目标检测和分类模型。该算法是智能干选机保证最终分选效果的核心关键技术。当遇到不同成分、不同批次的原矿时，系统可在一定范围内自学习调整识别参数，保证分选效果的稳定性。系统的构成如图 2。

图 2 基于深度学习的在线识别系统

### 3.3 分选执行系统

智能干选机的分选执行系统主要由执行分气缸和连通设于执行分气缸上的喷嘴弯管等部分组成[15]。分选执行系统接收在线识别系统输出的分选信号，通过电磁阀的开启关闭控制高压风，在目标物料飞行过程中对物料进行喷吹，实现物料的自动分选。

执行系统的高压风喷嘴呈阵列式布置，根据被执行对象的位置和形状信息，智能控制相应位置的单个或多个空气喷嘴开合状态及开合时间，针对矿石分选领域，矿石形状不规则难以喷吹的场景，能有效保证分选的执行效果。

电磁阀是分选执行系统的核心部件。其核心指标为气量与频率。不同粒级的物料，对电磁阀的频率及气量要求不一样。泰禾智能研发了针对大物料的高频大气量电磁阀以及针对中小粒级物料的高频电磁阀，以应用于不同场景。

分选执行系统可根据原矿来料品位和产品精度需求，灵活切换喷吹分选方案。

## 4 矸石分选工业实验

山西太原某矿煤矸石含有一定量的硫铁矿、砂岩、中煤及砂质泥岩，硫铁矿可作为无氟化渣剂用于钢厂转炉时使用，也可作为产品销售到周边硫酸厂、配重厂使用；砂

Copyright © 2023 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

岩满足建筑砂石标准，可作为水泥和砂石骨料项目的原材料使用；中煤可作为电厂的动力煤销售；砂质泥岩可作为煤矸石制作绿色板材、充填材料的原材料使用。对煤矸石资源进行中综合利用，不仅可以给该企业带来可观的经济效益，还可以大幅减少固体废弃物的排放量。

但是该矿煤矸石各成分混合在一起，需要对该煤矸石中各组分进行分选从而提高各产品的品位，方可进一步利用。论文采用智能干选机，对该矿煤矸石中硫铁矿、砂岩、中煤及砂质泥岩进行了成分分析、数据建模、分选效果测试等，探讨智能干选机在煤矸石有用矿物提取和分离的适应性。

### 4.1 实验系统构成

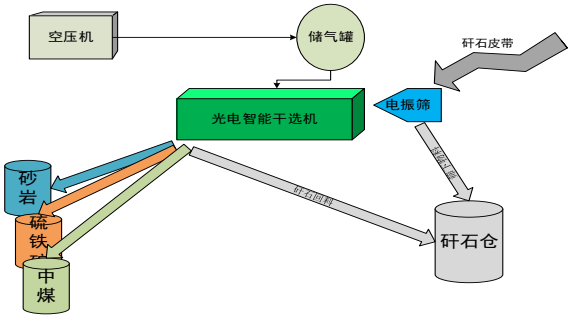


图 3 实验系统连接图

用于煤矸石分选的实验系统如图 3 所示。实验系统以光电智能干选机为主体，配套空压机、储气罐组成的供风气站。光电智能干选机型号为 PIDS-1800-A01，振动筛筛孔为 50mm。

### 4.2 数据集与模型训练

选取一部分该矿煤矸石样本进行采样、标注，对各组成成分、热值等性质进行抽样分析，构造算法数据集，进行模型训练，建立智能干选机分选的算法模型。数据集选取方法如下：

中煤数据集：密度小于 1.8 g/cm$^3$ 矿石 950 块，采样，标注为中煤产品；密度大于 1.8 g/cm 矿石 900 块，采样、标注为矸石样本。

硫铁数据集：由于硫铁含量较高的矿石辨识度较高，该数据集采用人工挑选的方法，最终选取硫铁样本 900 块，采样、标注为硫铁样本。

砂岩数据集：人工挑选砂岩样本 900 块，非砂岩样本 900 块，采样、标注为砂岩和非砂岩数据集。

三类数据集分别进行训练学习，最终获得三种分类模型。

### 4.3 分选实验

#### 4.3.1 实验方案描述

为研究智能干选机对该矿生产工艺中产生的煤矸石（下称原料）的分选效果，分别进行了中煤分选、硫铁分选、砂岩分选三项实验。每项实验截取三段原料，统计来料中各成分的平均占比；对中煤分选实验的产出物，统计热值；对于硫铁分选与砂岩分选实验，统计分选后产出物的成分占比。

#### 4.3.2 测试过程与结果

##### 4.3.2.1 中煤分选实验

截取三段原料，统计-1.8g/cm3 的矿物占原料的重量百分比为 0.97%，平均热值 976 kcal/kg。使用智能干选机进行分选，分选后产出物热值低位 2906 kcal/kg，高位 3250 kcal/kg。

##### 4.3.2.2 硫铁矿分选实验

截取三段原料，统计硫铁矿重量占比，如表 1 所示。来料中硫铁占比较少，三次截取的样本中硫铁重量之和与三次样本总重量之比，计算结果为 1.64%。

表 1 原料硫铁占比统计

| 样本 | 硫铁重量（kg） | 其他矸石重量（kg） | 硫铁占比（%） |
|---|---|---|---|
| 1 | 10 | 257 | 3.7 |
| 2 | 7 | 494 | 1.4 |
| 3 | 5 | 587 | 0.8 |
| 平均 | 7.3 | 446 | 2.0 |

使用智能干选机进行分选实验，选出料中硫铁矿占比分别为 85.4%、88%、88.5%，平均提升至 87.54%，效果明显。

表 2 硫铁分选产出物统计

| 样本 | 硫铁重量（kg） | 其他矸石重量（kg） | 硫铁占比（%） |
|---|---|---|---|
| 1 | 76 | 13 | 85.4 |
| 2 | 110 | 15 | 88.0 |
| 3 | 123 | 16 | 88.5 |
| 平均 | 103 | 14.7 | 87.3 |

##### 4.3.2.3 砂岩分选实验

截取三段原料，统计砂岩含量占比，如表 3 所示。原料中砂岩占比较少，三次截取的样本中砂岩重量之和与三次样本总重量之比，计算结果为 1.82%。

表 3 来料砂岩占比统计

| 样本 | 砂岩重量（kg） | 矸石重量（kg） | 砂岩占比（%） |
|---|---|---|---|
| 1 | 8 | 392 | 2.0 |
| 2 | 11 | 605 | 1.7 |
| 3 | 7 | 427 | 1.6 |
| 平均 | 8.7 | 474.7 | 1.8 |

使用智能干选机进行分选实验，选出料中砂岩占比分别为 7.5%、6.3%、14.2%，平均提升至 9.3%

表 4 砂岩分选产出物统计

| 样本 | 砂岩重量（kg） | 矸石重量（kg） | 砂岩占比（%） |
|---|---|---|---|
| 1 | 66 | 816 | 7.5 |
| 2 | 15 | 223 | 6.3 |
| 3 | 36 | 217 | 14.2 |
| 平均 | 39 | 418.7 | 9.3 |

#### 4.3.3 实验结论与分析

实验过程中分别对原料中各成分的占比、对分选后产


Copyright © 2023 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

出物的热值，成分占比进行了统计。中煤产出物的热值低位为 2906 kcal/kg，可以作为动力煤销售；硫铁产出物中硫铁含量较高，满足该矿周边硫酸厂、配重厂使用要求。实验结果表明，智能干选机适应于该场景下的煤矸石分选应用。砂岩产出物占比与原料相比，虽然有一定的提升，但是尚不能达到工业应用的要求。

## 5 结论

煤矸石是目前工业最大的固体废弃物之一，同时也是可循环利用的资源，而煤矸石分选，是煤矸石资源综合利用的前提，具有较大的社会效益与经济效益。使用智能干选机，针对山西某矿生产的煤矸石，分别进行了中煤、硫铁、砂岩的分选实验，实验结果表明，针对该矿煤矸石的中煤、硫铁等矿物，智能干选机有较好的分选效果，最终的产品可用于相关产业的工业应用。砂岩由于在该矿煤矿石原料中的占比较低，虽然最终的分选效果明显，尚不满足工业应用需求。

本文只对煤矸石中的中煤、硫铁、砂岩的分选进行了研究，下一步将对煤矸石中的其他有用成分（如高岭岩）的分选进行研究，进一步探讨智能干选机在煤矸石资源综合应用领域的应用。

## [参考文献]

[1]杨权成.煤矸石提取氧化铝及其制备功能材料研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2020.
[2]施长玉.高效干法筛分和智能干选技术在准格尔矿区的应用浅析[J].神华科技,2019,17(10):5.
[3]臧洁.小波分析在煤矸石图像识别 ARM 分选控制系统中的应用[D].西安:西安科技大学,2010.
[4]郑爽.基于 AlexNet-SN 网络的煤与煤矸石分类方法[J].中国矿业,2022,31(6):7.
[5]王冠军,苏婷婷,刘文博,等.基于 EAIDK 的智能煤矸分拣系统设计[J].工矿自动化,2020,46(1):4.
[6]王姣雯.煤矸石综合利用现状分析[J].中国新技术新产品,2011(3):191.
[7]张长森.煤矸石资源化利用新技术[D].北京:化学工业出版社,2007.
[8]崔俊强,常宝龙,黄帮松,等.梧桐庄矿大块煤排矸系统改造[J].煤炭加工与综合利用,2018(7):45-50.
[9]靳超,樊海龙.TDS 智能干选机在马脊梁选煤厂应用的可行性分析[J].煤炭加工与综合利用,2021(7):10-17.
[10]MESINA M B, JONG T P R D, DALMIJN W L.Automatic sorting of scrap metals with a combined electromagnetic and dualenergy X-ray transmission sensor[J].International Joural of Mineral Processing,2007,82(4):222-232.
[11]ROBBEN C,DE KORTE J,WOTRUBA H.Experiences indry coarse coal separation using X-ray-transmission-based soring[J].InternationalJournal of Coal Preparation and Utilization,2014,34(4):210-219.
[12]Korner ,Weber C H,Wirth S et al.Experiences indry coarse coal separation using X-ray-transmission-based soring[J].Radiographics,2007,27(3):675.
[13]Milbrath B D,Peurrung A J B.Experiences indry coarse coal separation using X-ray-transmission-based soring[J].Journal of Materials Research,2011,23(10):2561.
[14]何希平,刘波.深度学习理论与实践[M].北京:科学出版社,2017.
[15]周少雷,曾志远.西部煤炭洁净加工利用新技术新工艺探讨[J].煤炭加工与综合利用,2016(7):5-92.

作者简介：马杨硕 1（1997-），山西运城人，硕士；邵延海（1987-），男，博士，副教授，主要从事矿产资源综合利用研究。

Copyright © 2023 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.