

煤炭干法分选的发展与挑战

李思维¹, 常博¹, 刘昆轮¹, 周晨阳^{2,3}, 董良^{2,3}, 段晨龙^{2,3}, 赵跃民^{2,3}

(1. 国家能源集团新疆能源有限责任公司, 新疆乌鲁木齐 830002; 2. 煤炭加工与高效洁净利用教育部重点实验室(中国矿业大学), 江苏徐州 221116; 3. 中国矿业大学化工学院, 江苏徐州 221116)

摘要: 煤炭作为一种不可再生的国家型战略资源, 依然是全球最重要的基础能源之一。低品质煤潜在储量可观, 已成为实现我国能源保障不可或缺的能源资源。选煤是实现煤炭高效、洁净利用的源头技术, 传统的湿法选煤技术严重依赖水资源, 干法选煤技术因其不用水、成本低、无污染等特点, 为煤炭资源的清洁高效分选提质和煤炭工业转型发展提供了有效方法。详细分析了风力分选、复合式干法分选、光电分选、重介干法分选技术的工作原理、研究现状和工业应用进展, 并对国内外煤炭干法分选技术的进展进行梳理。在理解分选技术进展的基础上, 指出了现有干法分选技术入料粒级窄、水分要求高、智能化程度不高等局限性, 对煤炭干法分选技术发展的趋势进行展望, 指出了下一步研究重点, 包括突破细粒煤分选的理论瓶颈, 实现全粒级煤炭的干法分选、开发高效的煤炭分选与干燥协同技术, 破解原煤水分限制的难题、加快干法精选技术攻关, 降低炼焦煤等高品质煤的加工成本、开展分选机放大的理论研究, 实现分选设备的持续大型化及煤系共伴生矿物、煤系固废资源化利用等, 为干法选煤技术的研究提供借鉴。

关键词: 煤炭分选; 干法分选; 风力分选; 复合式干法分选; 干法重介质流化床分选

中图分类号: TD94

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2021)05-0032-06

Development and challenge of dry coal separation

LI Siwei¹, CHANG Bo¹, LIU Kunlun¹, ZHOU Chenyang^{2,3}, DONG Liang^{2,3}, DUAN Chenlong^{2,3}, ZHAO Yuemin^{2,3}

(1. Xinjiang Energy Co., Ltd., CHN Energy, Urumqi 830002, China; 2. Key Laboratory of Coal Processing and Efficient Utilization (China University of Mining & Technology), Ministry of Education, Xuzhou 221116, China; 3. School of Chemical Engineering & Technology, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: As a non-renewable national strategic resource, coal is still one of the most important basic energy resources in the world. Low quality coal has considerable potential reserves and has become an indispensable energy resource for energy security in China. Coal preparation is the source technology to realize efficient and clean utilization of coal. The traditional wet coal preparation technology strongly depends on water resources. Due to the characteristics of no water, low cost and no pollution, the dry coal preparation technology has provides an effective method for clean and efficient separation and industrial transformation and development of coal resources. The working principle, research status and industrial application progress of air separation, compound dry coal separator, photoelectric separation technology, dry dense medium coal separation technology were analyzed in detail, then the progress of dry coal separation technology at home and abroad was summarized. Based on understanding the progress of the above separation technologies, the limitations of the existing dry separation technologies were pointed out, such as narrow feed size, high water requirement and low intelligence. Then the development trend of coal dry separation technologies was prospected, and the next research focus was pointed out, including breaking through the theoretical bottleneck of fine coal separation and realizing dry separation of whole-grain coal, developing efficient coal separation and drying collaborative technology and solving the problem of water limitation of raw coal, speeding up the research of dry precision separation technology and saving the processing cost of high-quality coal, such as coking coal, carrying out up-scale theoretical research on the separator and reali-

收稿日期: 2021-04-25; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.21042555

基金项目: 国家能源集团科技创新 2030 重大项目先导资助项目(GJNY2030DXDM-19-07.2); 国家自然科学基金资助项目(52125403, U1903132)

作者简介: 李思维(1989—), 男, 辽宁阜新, 工程师, 主要从事煤矿露天开采工程技术研究。E-mail: 1197402388@qq.com。

通讯作者: 赵跃民, 教授, 主要从事煤炭清洁高效加工利用。E-mail: ymzhao_paper@126.com

引用格式: 李思维, 常博, 刘昆轮, 等. 煤炭干法分选的发展与挑战[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(5): 32-37.

LI Siwei, CHANG Bo, LIU Kunlun, et al. Development and challenge of dry coal separation[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(5): 32-37.



移动阅读

zing the up-grade of the separator, coal-series associated minerals and coal-series solid waste resource utilization, etc., so as to provide the possible suggestions for the research of dry coal separation technology in future.

Key words: coal beneficiation; dry beneficiation; pneumatic separator; compound dry separator; dry dense medium fluidized bed separator

0 引言

煤炭是我国主要能源之一,支撑了经济和工业的快速发展。2020年我国的能源消费达49.8亿t标准煤,煤炭消费总量占比达56.8%,对我国经济增长具有重要作用^[1]。目前,煤炭粗放型发展引起的地下水污染,以及煤低效利用带来的大气污染成为遏制社会发展的关键难题。2020年国务院发布的《新时代的中国能源发展》白皮书指出,要推进煤炭供给侧结构性改革,推动煤炭等化石能源的清洁高效利用^[2]。因此,需要对我国能源资源禀赋进行深入剖析,做好煤炭清洁高效可持续开发利用。

作为洁净煤技术的重要组成部分,选煤可缓解煤炭运输负荷,有助于降低煤使用过程中有害元素和有害气体的排放,减轻大气污染。为了应对全球经济增长缓慢、能源结构变革及环保要求提高,发展煤炭净化高效利用技术既能提高煤炭的质量和利用效率,也符合国家发改委《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》^[3]提出的“加强煤炭洗选加工,提高煤炭洗选比例”的行动目标。

随着我国煤炭开采水平的快速发展,深部开采已成为发展趋势,西部地区逐渐成为我国煤炭发展的中心,我国煤炭产品中低品质煤总量不断增加。同时,我国低品质煤潜在储量可观,已成为实现我国能源保障不可或缺的资源,约占我国煤炭资源的40%^[4]。因此,针对高灰、高硫、高水的低品质煤进行大规模提质利用,是我国煤炭工业可持续发展亟

待解决的重大难题。传统的湿法选煤技术严重依赖水资源,吨煤耗水0.1~0.3 m³,分选产品水分约10%,部分抵消了分选后热值提高的优势,分选质量改善效果不明显;产品煤水分高,储运难度大,煤泥水易冻结难以处置。因此,研究高效的干法选煤技术可以弥补现有湿法分选技术的不足,提高我国煤炭入选比例,推动我国煤炭资源的高效洁净利用。

1 干法分选技术的研究进展

煤与矸石物理性质(密度组成、粒度组成、导电性等)存在较大的差异,干法选煤主要利用密度组成差异实现分选,分选过程不需要煤泥水处理系统,可以减少水资源的使用,有效压缩生产成本,还可以解决寒冷地区装卸车的难题,是煤炭资源清洁高效分选提质的有效方法^[5]。基于现有干法分选技术特点和研究进展,有必要梳理现有干法分选技术的发展现状,为未来煤炭的干法分选技术研究提供借鉴,也为干法选煤厂的设计提供参考。

自1850年以单相气体作为分选介质的风力选煤技术提出以来,学者相继开发了风力分选^[6-14]、复合式干法分选^[15-19]、干法重介质流化床分选^[20-24]、光电分选(X射线/γ射线分选)^[25-28]等,主要技术及参数见表1,分选过程具有不用水、成本低、无污染的特点,为煤炭提质利用,尤其为动力煤的分选作出重要贡献。以下将围绕相关干法分选技术的发展现状做进一步介绍。

表1 干法分选方法及参数

Table 1 Dry separation method and parameters

分选技术	分选依据	分选粒度/mm	备注
复合式干法分选	密度	100~1	排矸,工业应用
光电分选	原子序数、密度	>25	排矸,工业应用
风力分选	密度	80~6	排矸,工业应用
干法重介质流化床分选	密度	100~6	精确分选,工业应用

1.1 风力分选技术

风力分选技术可以概括为基于煤炭和矸石在压缩空气中沉降末速的差异,借助周期性脉动气流实现煤炭的有效分选,主要包括包括风力跳汰与风力摇床分选机。近年来,风力跳汰分选技术受到了中国、德国、土耳其、美国、印度等国关注,在工业放大以及推广上取得了重大突破。德国的Allminerals公

司在德国亚琛大学搭建了半工业规模的分选样机,处理量为300 kg/h。WEINSTEIN和SNOBY^[29]利用风力跳汰开展了煤炭工业性分选试验研究,由于分选机理简单、投入成本低,在美国建立了风力跳汰分选工业性系统,处理量在50~120 t/h。目前,风力摇床分选机的研究工作主要集中在KADEMLI和GULSOY^[30]对大于6 mm褐煤分选研究,主要分析

了床层振动频率、床层倾斜角度、给料速度、栅格的高度对分选效率的影响,结果显示分选效率与风力跳汰接近,风力摇床的可能偏差 E 可以维持在 $0.13 \sim 0.23 \text{ g/cm}^3$,有效分选粒度为 $6 \sim 38 \text{ mm}$ 。

1.2 复合式干法分选机

复合式干法分选机通过振动气流复合力场驱使用物料在翻转剥离过程中按密度与粒度梯级分布,完成分选。针对复合式干法分选技术的分选特性研究较多,为了分析煤炭颗粒分选过程与床面布置的相互影响,相继研究了粒度组成、床体设计、操作条件对分选精度的影响,探究了煤炭运动特征以及煤炭密度分布的规律。目前,复合式干法分选技术已在美国、俄罗斯、澳大利亚、印度尼西亚、南非、波兰等国家得到推广应用,处理能力可达 480 t/h , E 在 $0.20 \sim 0.30 \text{ g/cm}^3$ 。

1.3 光电分选技术

随着科技发展,国内外的研究热点主要在智能化干法分选技术。目前,智能干法分选技术主要分为3类: X 射线识别、 γ 射线识别以及基于色差的智能识别。其原理是煤和矸石对 X 射线、 γ 射线的吸收和散射程度存在明显区别,相关探测器卡获取的信息存在显著差异性,进而有助于获取具有较大区别度的影像,因此,煤炭和矸石会呈现差异性非常显著的影像,进而有效分离煤和矸石。目前,智能干法分选机对块煤的分选精度较高,优势在于简化工艺流程,实现了对人工拣矸的替代,大大压缩了人力成本,已成功实现 $300 \sim 25 \text{ mm}$ 块煤分选的工业应用,处理能力达 380 t/h ,有效降低了矸石的带煤率,在国内多个选煤厂进行了工业性分选试验。

1.4 干法重介质流化床分选技术

干法重介质流化床分选技术,又称空气重介流化床分选技术,是干法领域的研究热点之一,是气固鼓泡流态化技术在矿业领域的拓展应用,利用气固流化床似流体的特点,实现精煤和矸石按照密度进行有效分离。目前,气固流态化分选研究得到了澳大利亚、印度、日本、南非、中国等国学者的关注,各国学者围绕流化特性、密度调控、煤炭分离机制等方面开展了细致研究,建立了多套半工业规模的分选样机。在工业推广方面,中国矿业大学率先开发了模块化干法重介质流化床选煤系统,成功进行了工业推广,实现了煤炭的干法精选,主要针对粒度在 $100 \sim 6 \text{ mm}$ 煤炭的高效干法分选, E 在 $0.05 \sim 0.08 \text{ g/cm}^3$ 。

2 干法分选技术的展望与挑战

我国干法分选技术取得了突破性进展,处于世

界领先地位,为我国煤炭分选提质,尤其是对动力煤和低阶煤的高效利用作出了突出贡献。目前,我国煤炭消费主要集中在动力煤,且低阶煤资源占比逐年上升,干法选煤的优势更加明显,符合“煤泥减量化,减少水资源”的选煤厂发展趋势。然而,干法分选技术也存在发展瓶颈,入料粒级窄、水分要求高、智能化程度不高等难题亟需解决。因此,需要对现有分选技术进行凝练,为未来发展提供方向。

2.1 全粒级煤炭干法分选

目前,干法分选技术主要集中在块煤分选,主要有单一风力分选机、复合式干法分选机、干法重介分选机,研究发现分选技术能降低原煤灰分和硫分,提高发热量。然而,在风力分选过程中,随着粒度逐渐减小,密度不同的颗粒在分选机上运动速度的差异逐渐减小,颗粒分离难度增加。而在空气重介流化床分选机中,由于随着煤炭粒度的减小,表面作用力和流体作用力增强,使煤炭按密度分选效应减弱,细粒煤分选效率较低。因此,需要高效的筛分作业作为支撑,需考虑进一步优化工艺,加快干法分选技术攻关,提高对入选原煤的适应性。

学者开展了复合式干法分选机分选细粒煤的试验研究,其目的是分析煤炭运动与床面设计的相互影响,为分选机的研制提供理论依据。目前,学者研制的新型矿物高效分离机处理能力可达 $1\,000 \text{ t/h}$,分选粒度在 $1 \sim 13 \text{ mm}$, E 可达 $0.13 \sim 0.23 \text{ g/cm}^3$,主要应用于细粒煤的粗选。

同时,由于细粒煤中煤与矸石的粒度、形状等相近,仅借助于重选或光电分选技术分选,分选精度较低,因此,有必要引入外力场提升细粒煤分选效率,进而增强煤与矸石的物理特性差异以提高分选效果。相应技术主要有引入机械振动力场的振动流化床、引入气流振动的脉动流化床、引入磁场形成的磁稳定流化床,但细粒煤分选技术仍停留在实验室小规模分选机的研究,有必要进一步加快分选机放大研究,实现煤炭的全粒级精选。

2.2 煤炭分选与干燥协同技术

煤炭开采过程中,原煤水分较高,表面水分造成煤颗粒较黏湿,易在煤矸颗粒间产生液桥作用,增加颗粒间黏附力而形成煤矸聚团,增加分选错配率,降低了干法分选技术的分选效率。尤其当原煤水分含量较高时,干法重介分选还会造成介质黏附在煤炭表面,造成矸石中带煤率增加,介质损耗提升,影响分选效果和分选机的稳定运行。其次,煤炭燃烧时水分蒸发会显著降低发热量,造成资源损失,若单独降灰和脱水,则需增设工艺。因此,为提高

干法分选技术的适用性,亟需研制脱水脱灰一体化的分选技术,对潮湿煤炭进行干燥提质,提高发热量,同时完善干法分选工艺,提高干法分选技术的适用性。

目前,学者相继提出了振动流化床分选干燥一体化技术方案,将煤炭脱外水-脱灰-脱内水3个阶段耦合,将煤炭颗粒的混合-分离-混合状态有机结合,实现煤炭分选与干燥的协同强化,如图1所示(U_{mf} 为临界流化风速, K 为振动强度, f 为振动频率, A 为振幅)。上述3阶段密不可分,互相联系,脱除煤外水,降低颗粒间黏附力,利于脱灰过程顺利进行;干燥内水前脱灰有利于提高内水干燥效率。气流、振动、温度的协同作用能有效破坏高含水、高含灰低品质煤颗粒间液桥力,强化气固接触,形成稳定的流化环境。通过调节表观风速和风速使颗粒体系呈混流脱外水-稳态分离脱灰-温和对流脱内水,从而完成干燥分选耦合提质,有效提高发热量^[31-34]。然而,此项技术仍处于实验室研究阶段,如何解决气固相间作用与振动能量输配等难点将是未来研究重点。

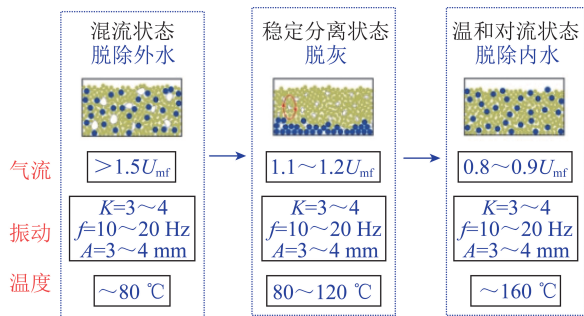


图1 低品质煤分段脱灰脱水耦合过程^[31-34]

Fig.1 Coupling process of staged deashing and dewatering for low quality coal^[31-34]

2.3 干法精准分选技术

作为分选精度最高的干法分选技术,空气重介流化床分选机可用于炼焦煤、活性炭用煤等低密度分选需求,分选精度与湿法相近。然而,现有的工业化分选机的最大处理量为60 t/h,分选技术的处理能力相对偏低,但分选机放大会导致密度不稳定。因此,亟需剖析现有分选技术的不足,实现气固流态化煤炭分选过程的强化。由于气固分选流化床属于鼓泡流化床,气固分选流化床主要含有气泡相和乳化相,如图2所示,两相的组成对床层膨胀以及床层密度产生直接影响^[35]。由于选用的加重质由 Geldart B/D类磁铁矿粉和细粒煤粉组成,床层中乳化相膨胀程度较低,主要依靠气泡相对床层膨胀进行调节,实现对密度的调控。然而,当风速和床层高

度逐渐增加,气泡相兼并频率提高,气泡相组成不断增加,气泡运动提高了床层密度的波动,影响入选煤炭的分选效率。因此,如何解决气泡运动带来的负面影响,是解决密度稳定调控和分选机放大的关键。

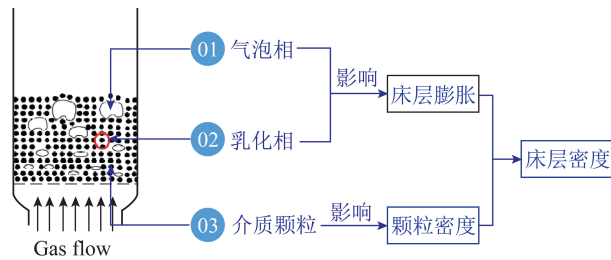


图2 气固流化床密度调控示意^[35]

Fig.2 Density control diagram of gas solid fluidized bed^[35]

此外,随着采矿机械化程度的快速发展,微细粉煤产量逐渐增加,若不能有效分选利用,会造成资源浪费。因此,开发微细粉煤高效干法分选技术迫在眉睫。目前,摩擦静电分选技术是一种有效的粉煤干法分选技术,主要利用煤与其伴生矿物的介电常数差异实现煤和矸石有效分选,可以对微细粉煤进行干法提质。目前,摩擦电选技术仍处于快速发展阶段,学者相继开发了滚筒静电分选机、STI 皮带式摩擦电选机等分选技术。随着煤炭精细化利用程度的提高,煤与矸石的高效解离仍是难题,影响摩擦电选的分选效率。同时,摩擦电选分选技术的工程放大仍存在瓶颈,距离大规模工业化应用还有差距。如何保证高压电场下摩擦电选技术的安全性与可靠性将是未来的重点。因此,未来研究应结合颗粒性质、受力特性、分离机理等,开发高效解离技术,优化高压电场设计,剖析高压静电场内精煤和矸石的分离机理,深入研究不同种类带电颗粒在电场中的运动轨迹,阐明分选过程中各种影响因素的相互关联机制,实现摩擦电选技术的工业化应用,形成微细粉煤摩擦电选的高效分选理论。

2.4 分选机放大理论研究

设备的大型化可以满足日益增长的煤炭分选比例的需求,提高干法分选设备的竞争力。然而,在干法分选系统不断放大过程中存在着流场行为的转变机制,使得原有的理论模型及试验结论产生偏差,影响因子不断增加,建立的分选模型在工业上可能难以应用。因此,亟需对比不同尺寸设备的相应模型参数关系,研究不同尺寸分选设备参数以及入料性质等对分选效率的影响,探究削弱扰动因子作用机制,提出放大过程中关键调控参数的修正机制。

目前,数值模拟是较普遍的应用于研究设备放

大的手段,已应用于化工、冶金等领域。颗粒数目越多,计算能力要求越高,设备放大的模拟也存在局限。因此,在干法分选领域,学者提出了粗粒化模型降低颗粒计算数目,将受力性质相似的颗粒打包处理,减少计算量,适合工业级设备放大的模拟,已在空气重介流化床的放大展开相关研究,实现了半工业级别的流化模拟,如图3所示^[36]。未来可基于此方法,对其他干法分选技术设备进行放大研究,为建立从实验室到工业化设备的关联提供理论支持。需要指出的是,现有的模拟技术还处于研发阶段,计算方法、动力学模型等还需进一步优化以适应不同工况的需求。

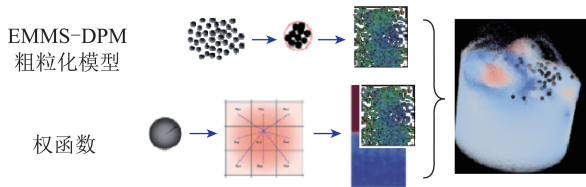


图3 粗粒化模型模拟示意^[36]

Fig.3 Simulation diagram of coarse grained model^[36]

2.5 干法分选智能化

近年来,我国智能化干法分选技术取得巨大进步,但现有分选技术难以对细粒煤进行分选,同时智能化干法分选机还存在 γ 射线管制、分选机投资规模较大等难题,仍需进一步提高图像识别的技术水平与工程应用的可靠性,为进一步推广应用提供基础。另一方面,在推动产业经济发展过程中,大数据、人工智能等新兴产业的蓬勃发展,对推动行业变革有重要影响。目前,加快智能化干法选煤厂的建设是发展趋势,将物联网、大数据、云平台等“互联网+”技术有效运用到干法选煤厂设计,大力提升选煤厂建设和生产管理的全过程,有助于建设我国干法选煤示范工程,进一步提升干法分选的影响力。

2.6 煤系共生伴生矿物、煤系固废资源化

随着全球经济向低碳经济转型,煤炭工业加快结构调整,高附加值煤基新材料制备是煤炭利用转型的重要突破口。美国麻省理工大学、清华大学等围绕煤炭制备电子元件、石墨烯、合成材料等开展相关研究,现阶段煤炭基材料制备处于快速发展阶段,产业发展过程仍面临技术创新等难题。

从煤炭分选加工利用角度看,煤炭资源化应用对煤炭原产料的要求不断提高,未来应着眼于煤炭分选技术与工艺创新,实现煤炭精准分选。干法分选技术也应打破原有技术方案及工艺思路,提出煤及衍生物定向转化的新工艺,如开发干法-湿法分选联合工艺,发挥各自优势,推动煤炭精细化分选,

提升我国煤炭分质分级的资源化利用效率,为煤基材料提供高品质原材料,实现煤中有价组分的高效利用。

3 结 语

煤炭是世界上的主要能源,对世界的经济发展发挥着至关重要的作用。作为煤炭产业的重要组成部分,煤炭分选加工为保证煤炭清洁利用奠定了基础。梳理了国内外煤炭干法分选技术现状,对风力跳汰、风力摇床、复合式干法分选、空气重介流化床分选、智能干法分选进行比较,主要介绍了不同分选技术的工作原理、研究进展以及工业发展情况。探究了干法分选技术的瓶颈,对煤炭干法分选技术发展趋势进行展望,指出了未来干法分选的研究要点可以从“拓宽入料粒级、分选与干燥协同、加快干法精选技术的攻关、提高分选机放大稳定性、加大干法分选智能化程度”入手,为提高我国低品质煤提质加工利用发挥作用。

参考文献 (References):

- [1] 国务院.《新时代的中国能源发展》白皮书[R].北京:中华人民共和国国务院,2020.
- [2] 中华人民共和国国家统计局.中华人民共和国2019年国民经济和社会发展统计公报[R].北京:中华人民共和国国家统计局,2020.
- [3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.能源生产和消费革命战略(2016-2030)[R].北京:中华人民共和国发展和改革委员会,2016.
- [4] 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):43-52.
ZHANG Zhenhong.China's coal dry cleaning technology:State-of-the-art and application prospect[J].Coal Preparation Technology, 2019(1):43-52.
- [5] 韦鲁滨,张振,朱长勇,等.宁东矿区粉煤变径脉动气流干法提质联合工艺研究[J].煤炭工程,2021,53(3):46-51.
WEI Lubin, ZHANG Zhen, ZHU Changyong, et al. Combined process of fine coal dry beneficiation using variable - diameter pulsed airflow in Ningdong mining area[J].Coal Engineering, 2021,53(3):46-51.
- [6] BOYLU F, TALİ E, ÇETİNEL T, et al. Effect of fluidizing characteristics on upgrading of lignitic coals in gravity based air jig[J]. International Journal of Mineral Processing, 2014, 129(3):27-35.
- [7] BOYLU F, ÇİNKU K, ÇETİNEL T, et al. Effect of coal moisture on the treatment of a lignitic coal through a semi - pilot - scale pneumatic stratification jig[J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2015, 35(3):143-154.
- [8] WEINSTEIN R, SNOBY R. Advances in dry jigging improves coal quality[J]. Mining Engineering, 2007, 59(1):29-34.
- [9] WEI L, LIU P, Zhu X. Optimization parameters of discharging heavy particles in vibration fluidized bed separator used for coal

- beneficiation [J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2016,49(9):836-844.
- [10] CHALAVADI G, SINGH R K, SHARMA M, et al. Development of ageneralized strategy for dry beneficiation of fine coal over a vibrating inclined deck [J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2016,36(1):10-27.
- [11] CHALAVADI G, SINGH R K, DAS A. Processing of coal fines using air fluidization in an air table [J]. International Journal of Mineral Processing, 2016,149:9-17.
- [12] PATIL D P, PAREKH B K. Beneficiation of fine coal using the air table [J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2011,31(3/4):203-222.
- [13] CHALAVADI G, SINGH R K, S M, et al. Recovery of combustibles from fine coal through controlled air fluidization over inclined deck [J]. Separation Science and Technology, 2015, 50(13):2032-2040.
- [14] CHALAVADI G, DAS A. Study of the mechanism of fine coal beneficiation in air table [J]. Fuel, 2015, 154:207-216.
- [15] 夏云凯, 李磊, 翟继鹏. 末煤干选工艺在阳煤五矿的工业化应用 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2021(1):1-5.
XIA Yunkai, LI lei, ZHAI Jipeng. The industrial application of dry separation process of fine coal at Yang coal five mine [J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 2021(1):1-5.
- [16] 沈丽娟, 陈建中. 复合式干法分选机中床层物料的运动分析 [J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(4):447-451.
SHEN Lijuan, CHEN Jianzhong. Analysis of material motion in compound dry separator [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(4):447-451.
- [17] LING X Y, HE Y Q, LI G F. Separation performances of different particle sizes using an industrial FGX dry separator [J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2018, 38(1):30-39.
- [18] 夏云凯, 李功民. 我国动力煤干选技术现状及展望 [J]. 洁净煤技术, 2017, 23(6):21-29.
XIA Yunkai, LI Gongmin. Current situation and prospects of power coal dry separation technology in China [J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(6):21-29.
- [19] YU X D, LUO Z F, YANG X L. Oil shale separation using a novel combined dry beneficiation process [J]. Fuel, 2016, 180:148-156.
- [20] ZHAO Y, LI G, LUO Z, et al. Industrial application of a modularized dry-coal-beneficiation technique based on a novel air dense medium fluidized bed [J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2017, 37(1):44-57.
- [21] ZHU X, FENG P, WEI L. Drying of lignite during beneficiation in the air dense medium fluidized bed under mild conditions [J]. Fuel Processing Technology, 2019, 187:28-35.
- [22] FU Z J, ZHU J, BARGHI S, et al. Dry coal beneficiation by the semi-industrial air dense medium fluidized bed with binary mixtures of magnetite and fine coal particles [J]. Fuel, 2019, 243:509-518.
- [23] 尹炜迪, 王庆功, 吕俊复, 等. 选煤流化床内气固流动和颗粒分层的数值模拟 [J]. 中国矿业大学学报, 2019, 38(2):430-436.
- YIN Weidi, WANG Qinggong, LYU Junfu, et al. Modeling of the gas-solid flow and particle segregation behavior in coal beneficiation fluidized beds [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 38(2):430-436.
- [24] ZHOU E H, ZHANG Y D, ZHAO Y M. Collaborative optimization of vibration and gas flow on fluidization quality and fine coal segregation in a vibrated dense medium fluidized bed [J]. Powder Technology, 2017, 322:497-509.
- [25] CHRISTOPHER R, JOHAN D K, HERMANN W. Experiences in dry coarse coal separation using X-ray-transmission-based sorting [J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2014, 34(3/4):210-219.
- [26] 姚广华, 杨宏智, 郝俊, 等. 低阶块煤智能干选的必要性分析 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2016(9):13-16.
YAO Guanghua, YANG Hongzhi, HAO Jun, et al. Necessity analysis of intelligent dry separation of low rank lump coal [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2016(9):13-16.
- [27] 蒋焱. TDS智能分选机在阳煤集团五矿选煤厂的应用 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2020(6):28-30.
JIANG Yan. Application of TDS intelligent separator in minmetals coal preparation plant of Yangmei Coal Group [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2020(6):28-30.
- [28] 黄邦松. TDS智能干选机在双柳煤矿的应用 [J]. 中国煤炭, 2020, 46(3):47-50.
HUANG Bangsong. Application of TDS intelligent dry sorter in Shuangliu Coal Mine [J]. China Coal, 2020, 46(3):47-50.
- [29] WEINSTEIN R, SNOBY R. Advances in dry jigging improves coal quality [J]. Mining Engineering, 2007, 59(1):29-34.
- [30] KADEMLI M, GULSOY O Y. Investigation of using table type air separators for coal cleaning [J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2013, 33(1):1-11.
- [31] ZHAO P, ZHAO Y, CHEN Z, et al. Dry cleaning of fine lignite in a vibrated gas-fluidized bed: Segregation characteristics [J]. Fuel, 2015, 142:274-282.
- [32] ZHAO P, ZHU R, ZHAO Y, et al. De-mixing characteristics of fine coal in an air dense medium fluidized bed [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2016, 110:12-19.
- [33] ZHAO P, ZHONG L, ZHU R, et al. Drying characteristics and kinetics of Shengli lignite using different drying methods [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 120:330-337.
- [34] ZHAO P, ZHAO Y, LUO Z, et al. Feasibility studies of the sequential dewatering/dry separation of Chinese lignite in a vibration fluidized-bed dryer: Effect of physical parameters and operation conditions [J]. Energy & Fuels, 2014, 28(7):4383-4391.
- [35] 周晨阳. Geldart A类加重质气固分选流化床的密度调控研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [36] 张勇. 气固分选流化床中多组分颗粒分层与混合的数值模拟研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.