

文章编号: 1001-3571 (2023) 05-0026-05

## 我国煤炭干法分选装备技术现状

陈文茂, 陈新波, 朱建飞, 谢永鑫

(陕西新能选煤技术有限公司, 陕西 西安 710000)

**摘要:** 煤炭是我国的重要战略资源, 随着不断的开发利用, 优质资源逐渐减少, 煤炭分选提质势在必行。湿法选煤用水量、成本高, 尤其是在干旱缺水地区难以实施, 而干法选煤则可弥补湿法选煤的不足。为进一步加深业界人士对干法选煤技术的认识、推动煤炭资源清洁高效利用的进一步发展, 文章从风力分选、复合式干法分选、干法重介质流化床分选、智能干法分选等当前主流干选装备的原理、研究现状、应用情况等多个方面进行了详细介绍, 并对各技术的特点进行了简要归纳。分析认为: 风力分选和复合式干法分选适用于易选煤、极易选煤, 但分选效率偏低; 干法重介质流化床分选精度较高, 但入料上限低, 且分选时易出现布风用多孔板堵塞问题; 智能干选机入料上限高, 可代替人工手选, 但其入料下限较高, 否则会影响分选精度; 各干选技术对细粒进行分选时, 对入料外在水分均有较高要求, 否则进料黏度增大、细粒煤和矸石相互粘连, 容易结块并堵塞设备, 进而影响生产。文章提出: 未来干法选煤技术应进一步提升对物料水分的适应性; 同时可组合应用多种干法分选设备, 实现全粒级干法分选。

**关键词:** 干法分选; 复合式干法分选机; 干法重介质流化床; 智能干法分选; 全粒级干法分选  
**中图分类号:** TD942      **文献标志码:** A

## The current situation of coal dry cleaning equipment in China

CHEN Wenmao, CHEN Xinbo, ZHU Jianfei, XIE Yongxin

(Shaanxi Xinneng Coal Preparation Technology Co. Ltd., Xi'an 710000, China)

**Abstract:** Coal is China's important strategic resource, yet along with incessant exploration and utilization of coal resources, the premium-grade coal resources are gradually decreasing. So, upgrading of coal through separation has become inexorably a necessary approach. The wet cleaning method is high in water consumption and cost, and is difficult to be applied especially in arid and water-deficient areas while the dry method can make up the deficiencies of wet method. In order to allow the persons working in coal sectors to gain a deeper insight into the dry cleaning technologies, and push for further development of highly efficient and clean utilization of coal, the paper presents a detailed introduction to the main dry cleaning equipment currently available from multiple aspects, such as the air separator, compound dry separator, heavy medium fluidized-bed dry separator and intelligent dry separator, as well as their respective working principle, related research work so far made, and performance in practical application. The special features of each separator are briefly summarized as follows: the air and compound separators are suitable for treating extremely-easy and easy-to-clean coal with yet a relatively low efficiency; the heavy medium fluidized-bed version, through high in separation accuracy, can only treat a feed with a smaller top size, and its multi-hole air-distribution plate is liable to get blocked in operation; the

收稿日期: 2023-05-16      责任编辑: 邓明瑞      DOI: 10.16447/j.cnki.cpt.2023.05.005

作者简介: 陈文茂 (1985—), 男, 甘肃兰州人, 工程师, 从事选煤技术管理工作。E-mail: 302807062@qq.com, Tel: 15364608063。

引用格式: 陈文茂, 陈新波, 朱建飞, 等. 我国煤炭干法分选装备技术现状 [J]. 选煤技术, 2023, 51 (5): 26-30.

CHEN Wenmao, CHEN Xinbo, ZHU Jianfei, et al. The current situation of coal dry cleaning equipment in China [J]. Coal Preparation Technology, 2023, 51 (5): 26-30.

intelligent version can treat a feed with a large upper and lower size and can be used instead of handpicking operation, but in the case of treating a feed with a smaller lower size, its separation sharpness would be affected; and in the case of treating a feed with a smaller size, the abovementioned separators all require the feed to be low in moisture, otherwise, the equipment would get plugged up by agglomerates formed by bonding of fine coal with dirt due to increase of viscosity of feed. Following the introduction to the state-of-the-art of the coal dry cleaning equipment, it is pointed out that in the future, the dry separators should be developed to have a higher adaptability to the variation of feed moisture and be able to operate in a combined mode for making it possible to realize whole-size dry separation.

**Keywords:** dry cleaning; compound dry separator; heavy medium fluidized-bed dry separator; intelligent dry cleaning; whole-size dry separation

煤炭是我国的主要能源，在保障能源安全稳定供应中起到“压舱石”作用。煤炭的大量生产利用在保障我国发展的同时，也带来了一系列的环境污染、生态破坏等问题<sup>[1]</sup>。因此，党的二十大作出“深入推进能源革命，加强煤炭清洁高效利用”等重要部署，为推动煤炭行业高质量发展指明了前进方向和发展路径<sup>[2]</sup>。

选煤采用物理或化学方法将煤中的杂质矿物分离出来，从而降低煤炭灰分、提高发热量、减少燃烧过程中产生的二氧化碳、氮氧化物、粉尘等污染物的排放量，是实现煤炭清洁高效利用的重要手段。

选煤按分选过程是否用水，可大致分为干法分选和湿法分选两大类。其中常用的湿法选煤技术主要有跳汰分选、重介质分选、泡沫浮选等。跳汰选煤是我国选煤厂早期采用的主要选煤方法，其利用煤和矸石之间存在的密度差异，在垂直升降的变速介质流中实现煤与矸石的分离。跳汰选煤运行成本较低，对中等可选、易选、极易选等可选性较好的煤的适应性强，但分选过程中吨煤用水量较大。重介质选煤工艺自上世纪 50 年代末在我国广泛使用，其原理是原煤投入悬浮液当中，在重力的作用下，密度低于悬浮液的煤上浮，密度高于悬浮液的矸石（或中煤）下沉；重介质选煤由于其悬浮液密度较高且可调，适用于高效分选难选煤和极难选煤<sup>[3]</sup>。但重介质选煤系统需要消耗磁铁矿粉，应用成本较高，维修检修工作量较大。泡沫浮选在选煤厂当中用于细粒煤分选，依据煤与矸石表面特性差异得以实现<sup>[4]</sup>。分选过程中需要消耗大量的浮选药剂，成本高。

综上所述，湿法选煤技术虽然精度较高，但耗水量大、成本高，在干旱缺水地区尤其难以实施。

而干法选煤则可有效弥补湿法选煤的不足，是实现煤炭资源清洁高效利用的重要补充手段。

## 1 风力分选

风力选煤技术是在空气流作用下，通过煤与矸石在风力场中的沉降末速不同实现分选。该技术最早出现于 19 世纪 70 年代，20 世纪初美国最早将其投入实际使用<sup>[5]</sup>。而后，1931 年左右，苏联引进风力选煤技术，并在顿巴斯高尔洛夫卡投产第一座风选车间<sup>[6]</sup>。我国引入风力干选技术在 20 世纪 60 年代，并于 70、80 年代将风力干选设备投入实际使用<sup>[7]</sup>。

风力跳汰机是最早出现的干法分选机，风力跳汰机上装有振动筛板，脉动气流由下向上，在脉动气流与筛板振动作用下，物料实现按密度分层，其中矸石等密度大的杂质位于下层，沿着筛板移动，经过排矸孔时排出。风力跳汰分选原理简单，工作成本低。SAMPAIO 等<sup>[8]</sup>采用风力跳汰从念珠菌煤中去除黄铁矿结核和游离黏土；结果表明，跳汰后煤层上部硫分从 1.8% 降至 0.7%，灰分从 51% 降至 47%。BOYLU 等<sup>[9]</sup>研究了流态化特性对空气跳汰机中褐煤升级的影响；结果表明，在射流速度为 1~1.2 m/s 时，分离效果较好，精煤产品灰分由进料的 44% 降至 16%~18%。GOURI 等<sup>[10]</sup>选用干法跳汰法分选印度高灰分非炼焦煤，当分选粒度为 40~5 mm 时产率为 76%，灰分从 40% 降至 33%，分选效果较优。

## 2 复合式干法分选

复合式干法分选以自生介质和空气组成气体混合介质，通过机械振动、增加床层密度的方式，使煤炭在床层中浮动，实现对煤炭的有效分选，复合

式干法分选机可用于煤炭与矸石、黄铁矿的分离, 利用率高, 操作简单, 维修方便。

复合式干法分选设备原理如图 1 所示。分选由给料机送到具有一定纵向及横向坡度的分选床, 在床面上形成具有一定厚度的物料床层。底层物料受振动惯性力作用向背板运动, 由背板引导物料向上翻动。密度较低的煤翻动到上层, 在重力作用下沿床层表面下滑。由于振动力和连续进入分选床的物料的压力, 不断翻转的物料形成螺旋运动并向矸石端移动<sup>[11]</sup>。目前应用较多的 FGX 复合式干法分选机, 在摇动的分选床底部加适当风力后, 加强物料松散的同时加强分层, 更好地让物料按密度分选<sup>[12]</sup>。李功民等<sup>[13]</sup>论述了 FGX 系列复合干煤选煤设备的结构、分选机理、技术特征、分选效果和推广应用情况。郭冬冬<sup>[14]</sup>在轿子山煤矿应用 FGX 复合式干法选煤设备, 结果表明, 在使用 FGX 复合式干选机选煤后, 粉煤热量提高了 1.84 MJ/kg, 10~30 mm 块煤热值提高 6.70 MJ/kg, 含矸率降低 25.0%。谌托<sup>[15]</sup>在淮北矿区采用复合式干法选煤预排矸工艺, 毛煤排出的矸石产率为 10%。另一种采用阶梯式结构的复合干法分选, 如 ZM 型复合干法分选机, 可根据不同物料特性, 对参数进行调整, 实现煤与矸石的有效分离<sup>[16-17]</sup>。于晓东<sup>[18]</sup>将复合式干法分选技术应用到细粒煤的分选之中, 通过调节床孔大小、振动频率、气流速度来强化细粒煤在复合式干法分选床体中按密度分层过程, 精煤产率为 69.98%, 灰分为 10.28%, 硫分为 0.41%, 分选效果较好。

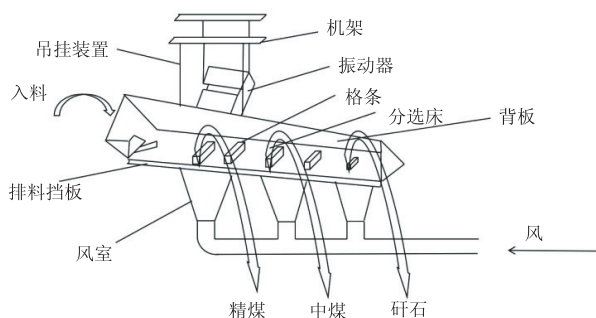


图 1 复合式干法分选设备原理图

Fig. 1 Sketch showing the working principle of the compound dry separator

总体而言, 风力分选和复合式干法分选适用于分选易选煤、极易选煤, 如动力煤排矸、高硫煤脱硫、预排矸选等, 但分选效率较低, 且在煤炭表面水分较大时, 进料黏度增大, 细粒煤和矸石相互粘连, 难以分离, 容易结块并堵塞设备, 影响生产。

### 3 干法重介质流化床分选

干法重介质流化床通过上升气流与加重质颗粒混合形成气固流化床层, 因煤与床层密度差异实现对煤的有效分选。1994 年, 世界上第一座空气重介质流化床选煤设备在中国研制成功。重介质流化床以气—固流化床以及磁铁矿粉作为介质, 形成一种密度稳定均匀的气—固悬浮体, 来自风包具有一定速度的有压气体经底部空气室通过气体分布器均匀作用于加重质发生流化作用, 在一定的工艺条件下形成具有一定密度的均匀稳定的气—固两相流化床。物料在流化床中按密度分层小于床层密度的物料上浮, 称为浮物; 大于床层密度的物料下沉, 称为沉物。干法重介质流化床设备分选原理如图 2 所示。陈清如等<sup>[19-22]</sup>早期研究认为空气重介质流化床分选技术的关键在于重介质在流化床中流化后, 所形成的流化床三维空间内的床层密度要求均匀一致, 而且流化床表面不产生气泡, 即形成均匀一致而稳定的床层密度。赵跃民等<sup>[23-25]</sup>与企业合作, 以磁铁矿粉和煤粉为二元宽粒级加重质, 以空气为流化气体, 研制新一代干法重介质流化床, 开发模块式高效干法选煤工艺系统。2013 年, 世界上第一座模块式干法重介质流化床选煤厂在国家能源集团新疆能源有限责任公司拔地而起, 选出了灰分小于 3.5% 的超低灰煤<sup>[26]</sup>。王亚健<sup>[27]</sup>采用磁铁矿粉和煤粉为加重介质, 利用流动空气作为流化气体, 形成稳定密度的流化床层, 分选实际产出率达 67.71%, 数量效率达 93.3%。戴林等<sup>[28]</sup>研究加重质颗粒在流化过程中的迁移过程和床层密度空间分布规律, 结果表明, 密度高于床层的煤炭快速下降, 密度低于床层的煤炭松散后横向运动。吕鹏等<sup>[26]</sup>研究了空气重介质流化床高对流化特性影响, 结果表明, 床高增大, 流化床起始流化风速和初始鼓泡风速逐渐增大且其值接近, 但流化床床层膨胀率逐步降低。

干法重介质流化床要求物料水分较低, 且入料上限低。分选时存在多孔板堵塞的问题, 影响流化效果, 且水分大时会加重堵塞问题, 不利于分选的正常运行。

### 4 智能干法分选

智能干法分选技术是近几年国内外研究热点, 主要利用煤与矸石在 X 射线下影像的显著差异性, 实现对煤和矸石的辨别与分选。ROBBEN 等<sup>[29]</sup>1974

年首次描述使用 X 射线传输 (XRT) 传感器进行煤炭分选, 2004 年, 第一个工业安装的带式 XRT 分选煤炭已投入使用。新的智能干法分选系统采用 X 射线识别煤与矸石, 采用压缩空气喷嘴作为执行机构, 供料系统使物料独立、有序、以队列形式进入识别系统; 识别系统通过分析反馈执行系统; 当物料进入执行系统后, 由高压空气喷嘴对煤或矸石施加作用力, 使其偏离原先的运动轨迹, 实现煤与矸石的分离<sup>[30]</sup>。TDS 智能干选机分选原理如图 3 所示。李文儒等<sup>[31]</sup>选用 TDS 智能干选机代替手选排矸, 解决了东曲选煤厂原手选排矸系统矸石拣出率低、设备负荷大、后续加工费用高等问题, 选后矸石含煤率为 0.44%, 数量效率达 99.24%。蒋林龙<sup>[32]</sup>在姚桥选煤厂采用 X 射线风选排矸系统替代人工选矸, 用工量减少, 职工劳动强度降低, 合计吨入选原煤可节约加工费 1.80 元。赵宏霞等<sup>[33]</sup>采用 KRS—智能干法分选系统分选 80~25 mm 粒级原煤, 产品灰分从 41.07% 降低至 27.77%, 发热量从 19.24 MJ/kg 提升至 24.85 MJ/kg。

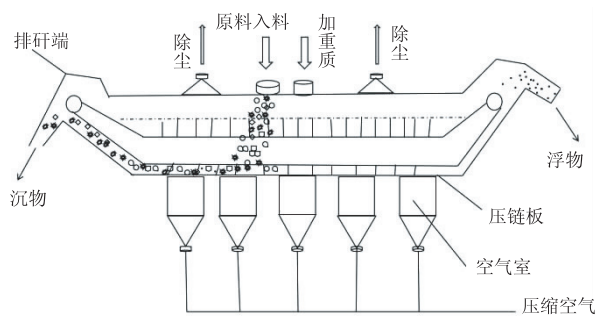


图 2 干法重介质流化床分选原理图

Fig. 2 Sketch showing the working principle of the heavy medium fluidized-bed dry separator

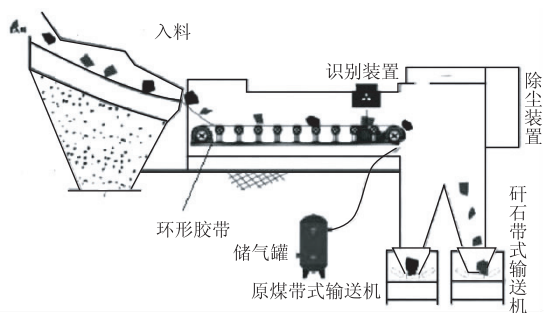


图 3 TDS 智能干选机分选原理图<sup>[35]</sup>

Fig. 3 Sketch showing the working principle of the TDS intelligent dry separator

智能干选机的入料上限大, 不存在水耗与介质消耗, 生产成本低, 可代替人工手选; 但智能干法分选对入料下限要求较高, 否则会影响分选精度, 增加精煤损失, 且智能干选的处理能力较低<sup>[34]</sup>。

## 5 结语与展望

干法选煤主要通过物料中目标矿物与非目标矿物间密度差异实现分选。目前, 干法分选过程受物料水分影响过大。入料水分较大时物料黏度增大, 细粒煤和矸石相互粘连, 难以分离, 容易结块并堵塞设备。同时, 干法分选颗粒的运动特性会下降, 影响干法分选的处理能力以及分选效率。

未来的干法分选应组合应用多种干法分选设备, 实现全粒级干法分选; 进一步发展智能干法分选机, 提高智能干法分选机的入料粒度以及分选精度。高效的干法选煤技术研发能够弥补现有分选技术的不足, 对实现煤炭资源的清洁高效利用意义重大。

### 参考文献:

- [1] 张效铭, 程 敢, 张传祥. 燃煤烟气氧化脱硫脱硝技术进展 [J]. 应用化工, 2018, 47 (2): 375—379, 385.
- [2] 武 强, 涂 坤, 曾一凡. “双碳”目标愿景下我国能源战略形势若干问题思考 [J]. 科学通报, 2023, 68 (15): 1884—1898.
- [3] 程 敢, 徐宏祥, 贾 凯, 等. 细粒煤分选技术与设备的发展 [J]. 矿山机械, 2012, 40 (8): 1—6.
- [4] 张梦妮, 程 敢, 李玉龙. 生物柴油的制备及其在浮选中的应用进展 [J]. 洁净煤技术, 2021, 27 (1): 34—40.
- [5] 陈昭宁. 美国风力选煤的兴衰 [J]. 煤矿设计, 1995 (1): 44—46.
- [6] 李泽普, 秦建华. 俄罗斯风力选煤现状及发展趋势 [J]. 中国煤炭, 1998 (5): 53—55.
- [7] 杨云松, 芦连永. 干法选煤的观状及发展前景 [J]. 煤炭加工与综合利用, 1993 (6): 49—51.
- [8] SAMPAIO CH, ALIAGA W, PACHECO ET, et al. Coal beneficiation of Candiota mine by dry jigging. Fuel Processing Technology, 2008, 89 (2): 198—202.
- [9] BOYLU F, TALI E, ÇETINEL 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.
- [10] GOURI CHARAN T, CHATTOPADHYAY US, SINGH KMP, et al. Beneficiation of high-ash, Indian non-coking coal by dry jigging [J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2011, 28 (1): 21—23.
- [11] 谢广元. 选矿学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社

- 社, 2016.
- [12] 杨云松, 卢连永, 沈丽娟, 等. FGX-1 型复合式干法分选机 [J]. 选煤技术, 1994 (2): 3-6, 30.
- [13] 李功民, 杨云松. 复合式干法选煤技术在中国的应用 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2006 (5): 33-36.
- [14] 郭冬冬. FGX 复合式干法选煤设备在轿子山煤矿的研究应用 [J]. 冶金管理, 2020 (15): 125-126.
- [15] 谌 托. 复合式干法选煤预排矸工艺在淮北矿区的实践 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2013 (3): 47-49.
- [16] 夏灵勇, 田立新, 王海生, 等. ZM 矿物高效分离机在开滦东欢坨矿的应用 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2019 (11): 19-22, 26.
- [17] 王柏华, 李大军, 石开进, 等. ZM 矿物高效分离设备在俄霍布拉克煤矿的应用 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2016 (9): 17-19, 26.
- [18] 于晓东. 小于 6 mm 细粒煤复合式干法分选特性研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- [19] 陈清如. 矿物加工工程学科的现状与发展 [C]// 中国煤炭学会. 世纪之交的煤炭科学技术学术年会论文集, 北京: 《煤炭学报》编辑部, 1997: 290-294.
- [20] 刘有智, 张济宇, 张碧江, 等. 空气重介质流化床分选技术 (I) 基础研究 [J]. 煤炭转化, 1995 (1): 39-47.
- [21] 刘有智, 张济宇, 张碧江, 等. 空气重介质流化床分选技术 (II) 分选设备特性 [J]. 煤炭转化, 1995 (2): 40-55.
- [22] 刘有智, 张济宇, 张碧江, 等. 空气重介质流化床分选技术 (III) 有能量引入的空气重介流化床分选技术 [J]. 煤炭转化, 1996 (2): 30-38.
- [23] 赵跃民, 李功民, 骆振福, 等. 模块式干法重介质流化床选煤理论与工业应用 [J]. 煤炭学报, 2014, 39 (8): 1566-1571.
- [24] 朱 冉, 赵跃民, 赵鹏飞, 等. 空气重介质流化床中细粒煤的流化与分选特性 [J]. 煤炭学报, 2016, 41 (3): 727-734.
- [25] 籍永华, 秦丙克, 赵跃民, 等. 空气重介质流化床的床层黏度研究 [J]. 中国粉体技术, 2014, 20 (5): 10-14.
- [26] 吕 鹏, 赵跃民. 空气重介质流化床高对流化特性影响 [J]. 煤炭技术, 2016, 35 (7): 296-299.
- [27] 王亚健. 干法重介质流化床选煤工艺的应用研究 [J]. 山西冶金, 2018, 41 (5): 115-117.
- [28] 戴 林, 房淑海, 李思维, 等. 干法重介质流化床煤炭颗粒受力特性与分选研究 [J]. 洁净煤技术, 2021, 27 (5): 17-24.
- [29] ROBBEN C, KORTE JD, WOTRUBA H, et al. 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.
- [30] 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.
- [31] 李文儒, 刘国超. TDS 智能干选机在东曲选煤厂的应用 [J]. 山西焦煤科技, 2022 (12): 52-54.
- [32] 蒋林龙. X 射线智能选矸技术在姚桥选煤厂的应用 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2021 (7): 37-39.
- [33] 赵宏霞, 丁芳亮. KRS-智能干法分选系统在矿物分选中的应用 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2016 (9): 24-26.
- [34] 冀宝中. 动筛跳汰机与 TDS 智能干选机在柳湾煤矿选煤厂的应用对比 [J]. 自动化应用, 2022 (1): 119-122.