

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. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2014.9036

Zhao Yue-min, Li Gongmin, Luo Zhenfu, et al. Theory of modularized dry coal beneficiation and its application based on an air dense medium fluidized bed[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1566—1571. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2014.9036

# 模块式干法重介质流化床选煤理论与工业应用

赵跃民<sup>1</sup>, 李功民<sup>2</sup>, 骆振福<sup>1</sup>, 张 博<sup>1</sup>, 董 良<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 化工学院, 江苏 徐州 221116; 2. 唐山市神州机械有限公司, 河北 唐山 063000)

**摘 要:**我国 2/3 以上的煤炭资源分布在西部干旱缺水地区, 迫切需要高效的干法选煤技术。新一代干法重介质流化床分选机是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, 形成具有一定密度的流化床层, 进入到分选机中的煤炭按密度进行分层, 实现高效干法选煤, 新一代分选机解决了布风板易堵塞的难题, 具有流化床密度均匀稳定、加重质循环量小、整机可靠性高的特点。中国矿业大学与唐山市神州机械有限公司合作开发, 建立了模块式干法重介质流化床选煤厂, 实现了干法选煤技术生产超低灰精煤的工业应用。工业应用结果表明, 采用模块式干法重介质流化床选煤系统生产超低灰精煤, 精煤灰分为 3.46%, 可能偏差  $E$  值为 0.055 g/cm<sup>3</sup>, 数量效率 > 90%, 具有不用水、分选精度高、工艺简单、投资和运行成本低、能耗小等特点。

**关键词:** 模块式; 干法选煤; 重介质; 流化床; 超低灰煤

中图分类号: TD922.7 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2014)08-1566-06

## Theory of modularized dry coal beneficiation and its application based on an air dense medium fluidized bed

ZHAO Yue-min<sup>1</sup>, LI Gong-min<sup>2</sup>, LUO Zhen-fu<sup>1</sup>, ZHANG Bo<sup>1</sup>, DONG Liang<sup>1</sup>

(1. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Tangshan Shen-zhou Manufacturing Co., Ltd., Tangshan 063000, China)

**Abstract:** In China, about 2/3 coal reserves in the west region, where water shortage is a serious problem. High-efficiency dry coal beneficiation technology is desiderated. Using magnetic powder and fine coal as heavy medium, and using air as the fluidizing agent, a novel air dense medium fluidize bed separator was proposed for coal preparation. Coal could be separated efficiently according to its density in the fluidized bed, which bed density is steady. The reliability of the separator is high, circulation quantity of heavy medium is less, and the gas distributor can not be blocked easily. The industrial modularized dry coal preparation plant was built by China University of Mining and Technology and Tangshan Shenzhou Manufacturing Co., Ltd.. And dry coal beneficiation technology was used to produce low-ash coal. Results of industrial production show that the ash content of clean coal is 3.46%, the probable error  $E$  value is 0.055 g/cm<sup>3</sup>, and the organic efficiency is over 90%. The advantages of the modularized dry coal beneficiation system are the high separation accuracy, the simple process flow, the low operation cost, low energy consumption, and so on.

**Key words:** module; dry coal beneficiation; heavy medium; fluidized bed; low-ash coal

2013 年我国煤炭产量达 36.8 亿 t, 约占我国一次能源消费的 68%, 是我国最主要的一次能源。煤

收稿日期: 2014-05-30 责任编辑: 张晓宁

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2012CB214904); 国家自然科学基金委创新研究群体项目(51221462); 国家自然科学基金委—神华集团“煤炭联合基金”重点资助项目(51134022)

作者简介: 赵跃民(1961—), 男, 河南漯河人, 教授, 博士生导师。Tel: 0516-83591102, E-mail: ymzhao\_paper@126.com

炭为我国国民经济的发展做出了重大贡献,但同时也带来了严重的环境污染。选煤技术是煤炭资源洁净利用最经济有效的方法,目前我国煤炭入选率约为55%,2013年国务院《大气污染防治行动计划》要求:推进煤炭清洁利用,新建煤矿应同步建设煤炭洗选设施,现有煤矿要加快建设与改造;到2017年,原煤入选率达到70%以上。现有的选煤技术主要是湿法选煤技术,湿法选煤过程用水量大,分选1 t煤需要用水3~5 m<sup>3</sup>,消耗水资源0.1~0.2 m<sup>3</sup>。但我国2/3以上的煤炭分布在西部干旱缺水地区,湿法选煤技术用水量大与水资源短缺相矛盾。对于储量丰富的褐煤资源,由于其遇水易泥化,也不宜采用湿法分选方法。因此,亟需开发高效的干法选煤技术,满足干旱缺水地区的煤炭分选需求。另外,水资源短缺是全球性问题,开发高效的干法选煤技术对南非、巴西、印度和土耳其等缺水国家的煤炭分选也具有重要意义。

Frazer and Yancey 在1926年将气固流态化技术引入到选煤领域,此后,美国、加拿大和前苏联等国家的学者开展了相关研究,如CBC-100分选机和逆流串级流化床分选机等。1984年,中国矿业大学提出以磁铁矿粉作为加重质,以压缩空气作为流化气体,形成空气重介质流化床,对煤炭进行干法分选。近十年来,流态化干法选煤技术的研究成为矿物加工领域的研究热点之一。加拿大Albert大学的Z. Xu和R. Gupta等<sup>[1-4]</sup>在实验室建立了空气重介质流化床模型机,对6~2 mm的细粒煤进行了分选试验;印度国家科学与工业研究院的A. K. Sahu等<sup>[5-7]</sup>在实验室建立了一套处理能力600 kg/h的连续式空气重介质流化床分选系统,有效分选粒度为25~6 mm,分选可能偏差E值为0.12 g/cm<sup>3</sup>。日本岗山大学的J. Oshitani等<sup>[8-9]</sup>利用空气重介质流化床实验室模型机分选>17.6 mm的铁矿石和25~10 mm的铜矿石。

中国矿业大学从事空气重介质流化床干法选煤技术的研究30 a,先后完成了基础理论研究<sup>[10-13]</sup>、实验室研究<sup>[14-17]</sup>、中试试验研究<sup>[18-20]</sup>和工业性试验等。2000年起,产学研联合,开展了新一代干法重介质流化床分选机和模块式干法选煤系统的研究。2007年中国矿业大学与唐山市神州机械有限公司合作开发,自主创新,建立了模块式空气重介质流化床干法选煤技术的工业示范系统,实现50~6 mm煤炭的高效干法分选<sup>[22-29]</sup>。2013年在神华新疆能源有限责任公司建立了世界上首座模块式干法重介质流化床选煤厂,生产灰分小于3.5%的超低灰精煤,实现了空气重介质流化床干法选煤技术的工业应用。

2014年6月,“模块式干法重介质流化床选煤系统及设备”通过了中国煤炭工业协会组织的科技成果鉴定,专家组认为:“模块式干法重介质流化床选煤系统”技术水平居国际领先,是世界选煤技术的重大突破。本文阐述了该技术的分选原理、关键设备和工艺,并对其工业分选效果进行了研究。

## 1 干法重介质分选原理

以微细颗粒作为加重质,在均匀的上升气流作用下,形成具有一定密度的气固悬浮体,具有似流体的性质,煤炭颗粒在气固流化床中的受力大体可分为纵向力(如重力、惯性力、浮力、阻力、附加质量力, Basset力)和侧向力(如升力、Magnus力和Saffman力)。对于煤炭颗粒,在流化床中的受力主要有惯性力 $F$ 、重力 $G$ 、浮力 $F_f$ 、阻力 $F_r$ <sup>[21]</sup>。当颗粒粒度足够大,可以受到床层平均密度的浮力作用时,它在流化床中的浮沉方向取决于受到的净浮力,即

$$G + F_f = \frac{1}{6} \pi d^3 (\rho_c - \rho_p) g \quad (1)$$

其中, $\rho_c$ 为床层平均密度; $\rho_p$ 为煤炭颗粒密度。当 $\rho_c < \rho_p$ 时,颗粒下沉;反之 $\rho_c > \rho_p$ 时,颗粒上浮,从而达到按密度分层的目的。进入到干法重介质分选机中的煤炭颗粒,在流化床层中按密度分层以后,精煤浮在床层表面,矸石沉在床层底部,分层后的精煤和矸石通过刮板输送机排出分选机,完成分选过程,如图1所示。

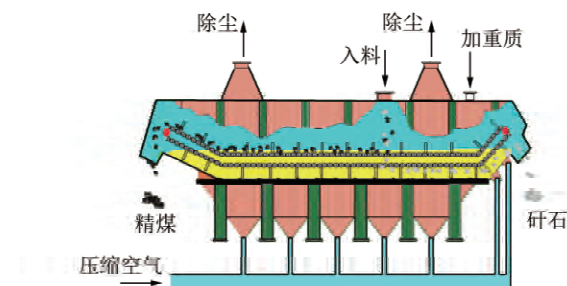


图1 干法重介质流化床分选原理

Fig 1 Separation principle of air dense medium fluidized bed

对于干法重介质流化床分选机,为了满足煤炭分选要求,形成微泡浓相高密度流态化,创造密度均匀稳定的流化床层,必须协同优化气体分布器的压降 $\Delta p_d$ 和床层的压降 $\Delta p_b$ ,为此,提出了压降准数 $C_p$ ,以此来表征分选流化床的流化质量及分选性能<sup>[21-22]</sup>。

$$C_p = \frac{\Delta p_d^2 + \Delta p_b^2}{(\Delta p_d + \Delta p_b) \Delta p_d} \quad (2)$$

在模块式干法重介质流化床选煤系统中使用的是煤粉与磁铁矿粉二元复合加重质。为了对分选流化床密度进行控制,提出了适用于二元加重质的密度

调控模型<sup>[21,23]</sup>,即

$$\rho_c = \frac{\rho_1 \rho_2}{a(1+m)[\rho_1 + (\rho_2 - \rho_1)\gamma]}, 0 < a \leq 1 \quad (3)$$

式中,  $\rho_1$  和  $\rho_2$  分别为煤粉和磁铁矿粉的堆密度;  $a$  为与煤粉和磁铁矿粉的粒度、重量及形状系数有关的参数;  $\gamma$  为二元加重质中煤粉的质量分数;  $m$  为流化床膨胀率。

## 2 设备与工艺

### 2.1 新一代干法重介质流化床分选机

新一代干法重介质流化床分选机结构如图 2 所示,在第一代空气重介质流化床分选机的基础上进行了创新设计:① 分选机在精煤和尾煤的排料端分别设置了加重质的内循环装置,通过该装置,可以大幅度减少加重质的分选机外循环量,将吨煤加重质循环量控制在 2 t 以内,有利于维持床层密度的稳定性和降低加重质的损耗,减轻了系统负荷;② 分选机的分选室与布风室之间安装了新型耐磨抗堵布风板,且便于拆卸更换,解决了长期以来布风板堵塞及难以更换的难题,可保证分选机高效、连续、稳定、长时间的运行;③ 设计了新结构运动部件,如刮板输送机、导向轮和压链轮等,滚动摩擦代替滑动摩擦,提高了运动机构和整机的可靠性。

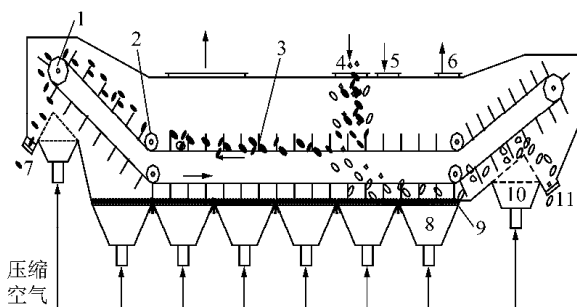


图 2 干法重介质流化床分选机结构

Fig 2 Structure of air dense medium fluidized bed separator

- 1—导向轮;2—压链轮;3—刮板;4—原煤入料口;5—介质入料口;  
6—引风除尘口;7—精煤排料端;8—预布风室;9—易拆卸布风板;  
10—短距回流装置;11—尾煤排料端

新一代干法重介质分选机采用磁铁矿粉与煤粉组成的二元加重质,分选密度可调节范围为 1.3~2.2 g/cm<sup>3</sup>,适用性强。二元加重质中磁铁矿粉的粒度为 0.30~0.06 mm,与第 1 代分选机采用的 0.30~0.15 mm 磁铁矿粉相比,粒级拓宽了 2.5 倍,同时保证了床层密度的均匀稳定性。

### 2.2 模块式选煤系统

2007 年在乌海建成了 40~60 t/h 模块式干法重介质流化床选煤的工业示范系统,如图 3 所示。采用

该系统对我国内蒙古、陕西、山西、新疆等煤炭进行干法分选试验,分选效果良好。同时对南非干法选煤公司提供的煤样进行了分选试验,分选粒度下限可达到 6 mm,分选密度为 1.75 g/cm<sup>3</sup>,精煤产率为 87.45%,精煤灰分为 12.40%,矸石产率为 12.55%,矸石灰分为 88.84%,可能偏差  $E$  值为 0.05 g/cm<sup>3</sup>。



图 3 干法重介质流化床工业示范系统

Fig 3 Industrial demonstration system of air dense medium fluidized bed

2013 年,中国矿业大学与唐山市神州机械有限公司在神华新疆能源有限责任公司建成了世界上首座模块式空气重介质流化床干法选煤厂(图 4)。该系统将原煤准备系统、煤炭分选系统、介质净化回收系统和供风除尘系统集成装配在同一平台,设备布局紧凑,工艺流程简单。系统占地面积 25 m×8 m,高 11 m,与原有厂房式分选系统(30 m×15 m,高 29 m)相比,该系统大幅度降低了基建投资。

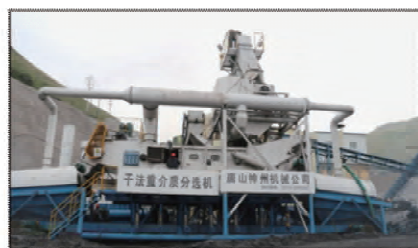


图 4 模块式干法重介质流化床选煤厂

Fig 4 Modularized dry coal preparation plant based on air dense medium fluidized bed

模块式干法重介质流化床选煤厂的工艺流程如图 5 所示。原煤经过预先筛分和破碎,将 <100 mm 的煤炭经过 10 mm 筛分,<10 mm 细粒煤不进入分选系统,10~10 mm 煤炭进入到干法重介质流化床分选机中。若原煤表面水分较高,则将 <100 mm 的煤炭给入到振动混流干燥器中,经过低温干燥,降低煤炭表面水分,满足了空气重介质流化床分选机的分选要求,同时提高了后续筛分作业的筛分效率。分选后的精煤和尾煤分别经过两台振动脱介筛脱除加重质,得到精煤和尾煤产品。脱介筛筛下物经过分选器,一部分进入干式磁选机,经过磁选脱除煤粉,磁选精矿进入磁性物仓;另一部进入循环介质仓。干法重

介质流化床分选机所需要的压缩空气由鼓风机产生,经过风包、流量计和阀门等进入分选机;从分选机上排出的空气中含有次生的微细煤粉,通过引风机和布袋除尘器,回收煤粉,保证排到环境中的空气无污染。

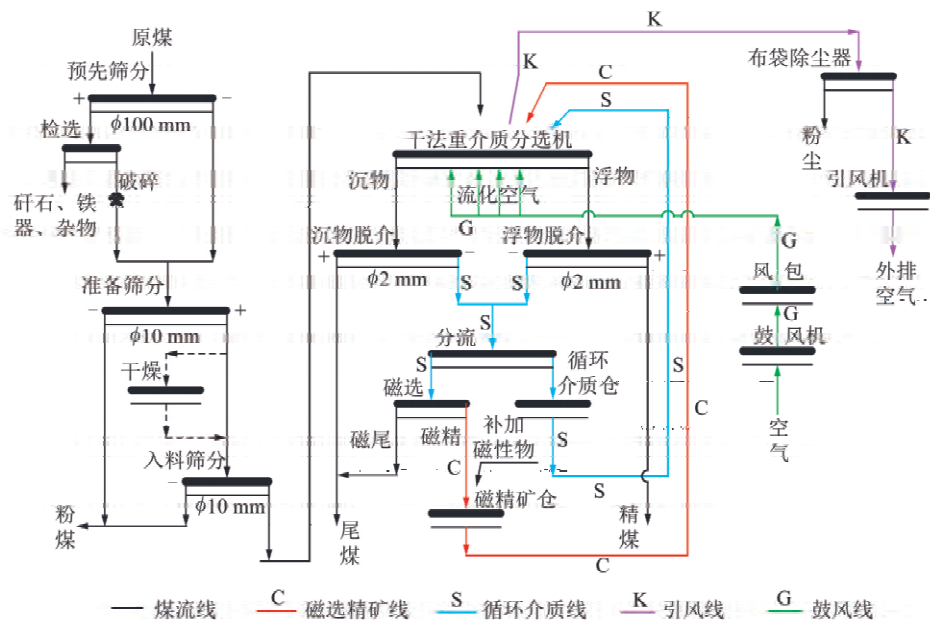


Fig 5 Process flow of modularized dry coal preparation plant based on air dense medium fluidized bed

3 结果与讨论

3.1 原煤性质

采用模块式干法重介质流化床选煤系统对神华新疆能源有限责任公司的长焰煤进行了分选,精煤产品用于生产活性炭。原煤性质见表 1,入选原煤粒度为 100~10 mm,灰分为 18.69%。为满足活性炭厂的生产需求,要求精煤灰分<3.5%,根据原煤可选性,理论分选密度为 1.485 g/cm<sup>3</sup>,理论精煤产率为 73%,可选性等级为较难选煤。

表 1 原煤性质

Table 1 Properties of raw coal

$M_t$ / %	$M_{ad}$ / %	$A_d$ / %	$V_{daf}$ / %	$w(S_{t,ad})$ /%	$Q_{gr,ad}$ / (MJ·kg <sup>-1</sup> )
9.20	2.15	18.69	36.57	0.31	26.78

3.2 床层稳定性、二元宽粒级加重质及介耗

在工业系统中检测了干法重介质流化床分选机床层中心点的密度随时间变化的稳定性,床层平均密度为 1.466 g/cm<sup>3</sup>,密度波动的标准差为 0.010 6 g/cm<sup>3</sup>。检测了床层密度在沿分选机长度、宽度和高度方向的均匀性,检测结果表明,床层密度在三维空间上的波动在 0.01 g/cm<sup>3</sup> 左右。

干法重介质流化床选煤系统采用 0.30~0.06

mm 为主导粒级的磁铁矿粉和<1 mm 煤粉组成的二元宽粒级加重质。采用二元宽粒级加重质的优势在于:① 采用二元加重质方便调节干法重介质流化床分选机的床层密度,适应不同煤种的分选;② 采用宽粒级加重质,降低了加重质制备过程中的磨矿和筛分成本。

在工业运行过程中,对循环介质和磁选尾矿采样,并进行激光粒度分析,其粒度分布分别如图 6,7 所示。循环介质粒度主要分布在 0.500~0.074 mm 粒级,占全粒级的 80% 左右。磁选尾矿的粒度主要分布在 0.500~0.125 mm。

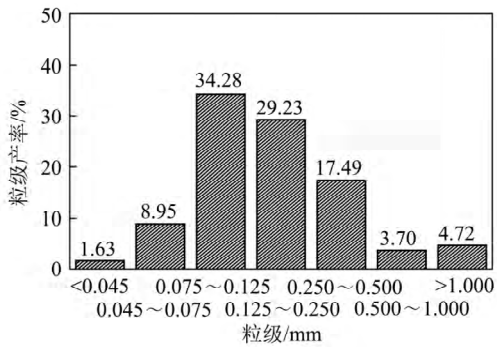


图 6 循环介质粒度分布

Fig 6 Particle size distribution of circulating heavy medium

该干法选煤厂生产运行中的介质损失包括分选产品带走量、磁选尾矿损失量。通过对精煤、尾煤以及磁选尾矿进行磁选试验,得到该系统吨煤的介质损



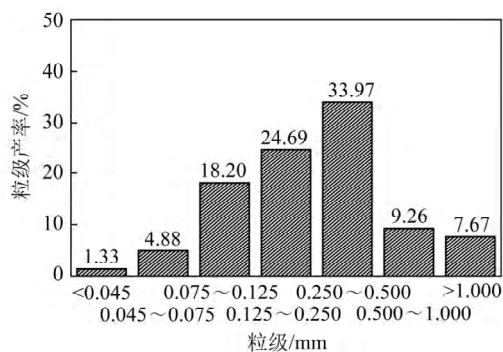


图 7 磁选尾矿粒度分布

Fig. 7 Particle size distribution of magnetic separation tailings

失量为:精煤带走 0.071 6 kg;尾煤带走 0.142 5 kg;磁尾损失 0.198 7 kg;合计 0.412 8 kg。由此可知吨煤的介质损失小于 0.5 kg,低于湿法重介质选煤厂的介耗。

### 3.3 分选结果与效果

重介质分选技术的评价指标主要有可能偏差  $E$  值、分选的数量效率  $\eta$  等。在正常生产的条件下,按照 GB 475—2008 和 MT/T 808—1999 的相关规定和要求,确定合理的采样时间间隔、子样质量和采样方法,对原煤、精煤和尾煤产品进行取样分析。精煤实际产率为 67.88%,灰分为 3.46%,数量效率  $\eta = \frac{67.88}{73.00} \times 100\% = 93\%$ 。通过浮沉试验,得到空气重介质流化床的分配率并绘制分配曲线,如图 8 所示,图中  $\delta_p$  为分选密度,  $\delta_{25}$ ,  $\delta_{75}$  分别为分配率为 25%, 75% 时的密度。通过分配曲线,可以查得实际分选密度为 1.49 g/cm<sup>3</sup>,可能偏差  $E$  值为 0.055 g/cm<sup>3</sup>,分选精度要远大于跳汰<sup>[24]</sup>、风力摇床和复合式干法分选机<sup>[25]</sup>等选煤技术。模块式干法重介质流化床选煤厂满足了用户需求,并在世界上首次实现干法分选技术生产超低灰精煤的工业应用。自建成以来,设备运行平稳,无故障,可靠性高,经济效益显著。与传统的湿法选煤技术相比(表 2),该系统建设周期短,吨煤投资低,分选工艺不用水,没有复杂的煤泥水处理系统,吨煤加工费用低,技术经济指标具有明显优势。

通过对模块式干法重介质流化床选煤工业示范系统的工业性试验和模块式干法重介质流化床选煤厂的工业运行情况总结,该技术可以用于:① 用于动力煤分选,生产灰分低、发热量高的优质动力煤;② 用于原煤排矸,排除煤炭中密度高的脉石和黄铁矿等,减少煤炭加工利用过程中有害物质的排放;③ 对遇水易泥化的低阶煤进行分选提质,提高低阶煤的利用效率;④ 生产超低灰精煤,为制备活性炭、碳素材料等煤基高附加值产品提供优质原料。发展高效的

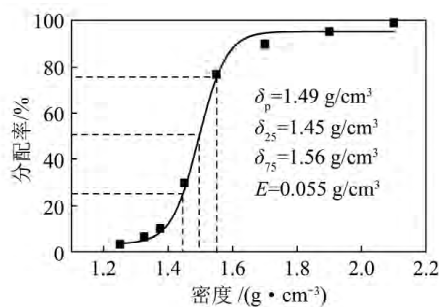


图 8 干法重介质流化床选煤系统分配曲线

Fig. 8 Partition curve of air dense medium fluidized bed separator

表 2 与湿法选煤技术的对比

Table 2 Indexes compared with wet coal separation technology

指标	湿法选煤技术	模块式干法重介质选煤技术
数量效率/%	90	>90
工艺流程	复杂	简单
煤泥水处理	有	无
全员工效/(t·人 <sup>-1</sup> )	25~30	280
电耗/(kW·h)·t <sup>-1</sup>	6~10	1.5~3.5
清水消耗/(m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	0.1~0.2	0
加工费/(元·t <sup>-1</sup> )	15~25	<10
建设工期/月	8~12	2~4
吨煤投资/元	45~65	35

干法选煤技术对提高我国煤炭入选率、提高煤炭质量、节约能源和铁路运力、减少 SO<sub>2</sub> 等有害气体的排放、减轻大气污染具有重要意义。

## 4 结 论

(1) 研制了新一代干法重介质流化床分选机,解决了布风板易堵塞及整机可靠性差的难题,拓宽了加重质的粒度范围,大幅度减少了加重质的机外循环量,保证了分选机长期稳定的运行。

(2) 建成了世界上首座模块式干法重介质流化床选煤厂,首次在工业上实现了干法选煤技术生产超低灰精煤,工业应用表明:该选煤系统的精煤灰分为 3.46%,精煤产率为 67.88%。

(3) 模块式干法重介质流化床选煤厂将原煤准备系统、煤炭分选系统、介质净化回收系统和供风除尘系统装配于同一平台,可能偏差  $E$  值为 0.055 g/cm<sup>3</sup>,数量效率 >90%,吨煤介耗 <0.5 kg。具有不用水、工艺简单、占地面积小、基建成本低、建设周期短,设备可靠性高、运行平稳等优点。

(4) 模块式干法重介质流化床选煤系统密度范围

为  $1.3 \sim 2.2 \text{ g/cm}^3$ , 适用性强, 应用范围广, 为干旱缺水地区及易泥化煤炭的分选提质开辟了一条有效的途径。

#### 参考文献:

- [1] Azimi E, Karimipour S, Rahman M, et al. Evaluation of the performance of air dense medium fluidized bed (ADMFB) for low-ash coal beneficiation. Part 2: Characteristics of the beneficiated coal[J]. *Energy & Fuels*, 2013, 27(10): 5607—5616.
- [2] Azimi E, Karimipour S, Rahman M, et al. Evaluation of the performance of air dense medium fluidized bed (ADMFB) for low-ash coal beneficiation. Part 1: Effect of operating conditions[J]. *Energy & Fuels*, 2013, 27(10): 5595—5606.
- [3] Prashant D, Xu Z, Szymanski J, et al. Dry cleaning of coal by a laboratory continuous air dense medium fluidized bed separator [A]. *Proceedings of the International Coal Preparation Congress* [C]. Australia, 2010.
- [4] Choung J, Mak C, Xu Z. Fine coal beneficiation using an air dense medium fluidized bed[J]. *Coal Preparation*, 2006, 26(1): 1—15.
- [5] Sahu A K, Tripathy A, Biswal S K, et al. Stability study of an air dense medium fluidized bed separator for beneficiation of high-ash indian coal[J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2011, 31(3—4): 127—148.
- [6] Sahu A K, Tripathy A, Biswal S K. Study on particle dynamics in different cross sectional shapes of air dense medium fluidized bed separator[J]. *Fuel*, 2013, 111: 472—477.
- [7] Sahu A K, Biswal S K, Parida A. Development of air dense medium fluidized bed technology for dry beneficiation of coal: A review[J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2009, 29(4): 216—241.
- [8] Oshitani J, Kawahito T, Yoshida M, et al. The influence of the density of a gas-solid fluidized bed on the dry dense medium separation of lump iron ore[J]. *Minerals Engineering*, 2011, 24(1): 70—76.
- [9] Oshitani J, Franks G V, Griffin M. Dry dense medium separation of iron ore using a gas-solid fluidized bed[J]. *Advanced Powder Technology*, 2010, 21(5): 573—577.
- [10] Yang X, Zhou K, Qiu K, et al. Segregation of large granules from close-packed cluster of small granules due to buoyancy [J]. *Physical Review E*, 2006, 73: 1—7.
- [11] 贺靖峰, 赵跃民, 何亚群, 等. 浓相气固高密度流化床内的气泡动力学行为特性[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(2): 295—300.  
He Jingfeng, Zhao Yuemin, He Yaqun, et al. Dynamic fluid bubble behaviors in the dense gas-solid fluidized bed with high densities[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(2): 295—300.
- [12] Wang S, He Y, He J, et al. Experiment and simulation on the pyrite removal from the recirculating load of pulverizer with a dilute phase gas-solid fluidized bed[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2013, 23(2): 301—305.
- [13] Zhao Y, Wei L. Rheology of gas-solid fluidized bed[J]. *Fuel Processing Technology*, 2000, 68: 153—160.
- [14] 唐利刚, 赵跃民, 骆振福, 等. 宽粒级加重质的流化特性[J]. *中国矿业大学学报*, 2009, 38(4): 509—514.  
Tang Ligang, Zhao Yuemin, Luo Zhenfu, et al. Fluidization characteristics of medium solids with a wide size range[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2009, 38(4): 509—514.
- [15] 骆振福, 陈尚龙, 赵跃民, 等. 基于马尔可夫理论的气固分选流化床密度的预测[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(1): 105—109.  
Luo Zhenfu, Chen Shanglong, Zhao Yuemin, et al. Density prediction of gas-solid fluidized bed for separation base on Markov theory[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(1): 105—109.
- [16] Zhao Y M, Luo Z F, Chen Z Q, et al. The effect of feed-coal particle size on the separating characteristics of a gas-solid fluidized bed[J]. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2010, 110: 219—224.
- [17] Luo Z F, Zhu J F, Tang L G, et al. Fluidization characteristics of magnetite powder after hydrophobic surface modification[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2010, 94: 166—171.
- [18] Zhao Y, Li G, Luo Z, et al. Modularized dry coal beneficiation technique based on gas-solid fluidized bed[J]. *Journal of Central South University Technology*, 2011, 18: 374—380.
- [19] Yang X, Zhao Y, Luo Z, et al. Establishment and evaluation of a united dry coal beneficiation system[J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2012, 32: 95—102.
- [20] Zhang B, Zhao Y, Luo Z, et al. Utilizing an air-dense medium fluidized bed dry separating system for preparing a low-ash coal [J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2014, 34(6): 285—295.
- [21] 骆振福, 赵跃民. 流态化分选理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- [22] Luo Z, Zhao Y, Chen Q, et al. Effect of gas distributor on performance of dense phase high density fluidized bed for separation[J]. *Int. J. Miner Process*, 2004, 74: 337—341.
- [23] Luo Z, Zhao Y, Fan M, et al. Density calculation of a compound medium solids fluidized bed for coal separation[J]. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2006, 106: 749—752.
- [24] Sampaio C H, Souza K F D, Jose D S, et al. Beneficiation of Candiota coal in air jigs [A]. *Proceedings of the XV Balkan Mineral Processing Congress* [C]. Sozopol, Bulgaria, 2013.
- [25] Zhang B, Akbari H, Yang F, et al. Performance optimization of the FGX dry separator for cleaning high-sulfur coal[J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2011, 31: 161—186.