

干法重介质流化床选煤技术及工业应用

赵跃民¹, 李功民², 骆振福¹, 段晨龙¹, 于晓东^{1,2}, 董良¹, 张博¹, 周恩会¹

(1. 中国矿业大学 化工学院, 徐州 221116; 2. 唐山市神州机械有限公司, 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。中国矿业大学与唐山市神州机械有限公司合作研制了新一代干法重介质分选机, 该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。2013 年建立了世界上首座模块式干法重介质流化床选煤厂, 首次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低灰精煤, 精煤灰分为 3.46%, 可能偏差为 0.055 g/cm³, 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。该技术为我国西部干旱缺水地区及易泥化煤炭的分选开辟了一条有效途径, 对发展选煤技术, 提高煤质、节约能源、减轻环境污染具有重要意义。

关键词: 模块式, 干法选煤, 重介质, 流化床, 低灰精煤

中图分类号: TD942

文献标志码: A

0 前言

2013 年, 煤炭占世界一次能源消费超过 30%, 达到 1970 年以来的最高值。据统计, 煤炭在各国一次能源消费中所占的比例为: 中国 68.1%, 印度 52.9%, 日本 26.0%, 澳大利亚 39.2%, 德国 25.4%, 南非 72.5%, 美国 19.8%。2013 年我国煤炭产量达 36.8 亿吨, 是我国最主要的一次能源。我国煤炭质量差, 灰分和硫分高, 灰分小于 10% 的低灰煤仅占保有储量的 15% ~ 20%, 硫分大于 1% 的中高硫煤占总量的 33%。世界发达国家原煤入选比例为 80% ~ 100%, 而目前我国原煤入选比例约为 59%, 动力煤入选比例仅为 35% 左右, 煤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问题。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 59%, 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, 每分选一吨煤需要用水 3 ~ 5 m³, 消耗水资源 0.1 ~ 0.2 m³。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和水资源短缺相矛盾。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。近年来, 随着水资源短缺问题的日益严峻, 发展高效的干法选煤技术尤为重要, 煤炭的干法分选技术的研究已成为选煤界的研究热点之一, 如风力摇床、空气跳汰、复合式干法分选机、逆流分选机、振动流化床分选机、摩擦电选等。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, 诸多学者对流态化干法选煤技术开展了研究。加拿大 Albert 大学^[1-3]在实验室建立了空气重介质流化床模型机, 分选装置直径 40 mm, 高度 300 mm, 对 6 ~ 2 mm 的细粒煤进行了分选试验, 原煤灰分可由 25% 降至 10%, 精煤产率为 80%; 印度国家科学与工业研究^[4,5]院在实验室建立了一套处理能力 600 kg/h 的连续

收稿日期: 2013-09-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”计划(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”重点项目(51134022); 高等学校博士学科点专项科研基金-优先发展领域课题(20120095130001)

作者简介: 赵跃民(1961—), 男, 河南漯河人, 教授。

E-mail: ymzhao_paper@126.com Tel: 0516-83591102

式空气重介质流化床分选系统，有效分选粒度为 25 ~ 6 mm，分选可能偏差为 0.12 g/cm³。日本岗山大学^[6,7]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 年，先后完成了基础理论研究、实验室研究、中试试验研究和工业性试验等^[8-21]。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，在第一代空气重介质流化床分选机的基础上，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技术的研究，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。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，实现了干法重介质流化床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，鉴定意见为：“创立了浓相高密度气固流态化干法分选理论，成功研制了新一代干法重介质流化床分选机，建成了世界上首座模块式干法重介质流化床选煤厂，在国内外首次实现了干法分选生产超低灰精煤。该项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，并对其工业分选效果进行了研究。

1 干法重介质流化床分选理论

干法重介质流化床分选原理如图 1 所示，由磁铁矿粉和煤粉组成的二元加重质在压缩空气的作用下，形成密度均匀稳定的流化床层。原煤由入料口进入到分选机，按密度进行分层，精煤浮于床层表面，矽石沉于床层底部，精煤和矽石分别由刮板输送机派送至分选机外。通过引风机，在床层上部形成负压，除去分选过程产生的粉尘，确保排出的空气无污染。

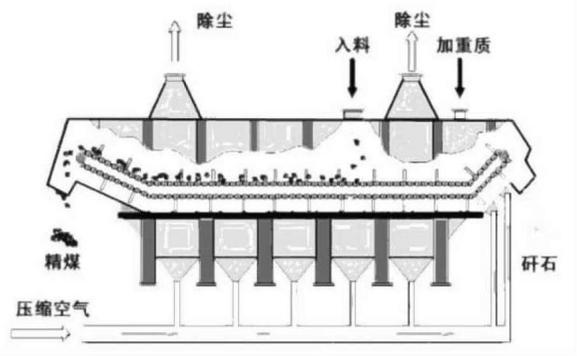


图 1 干法重介质流化床分选原理

通过分析和研究入选物料在复杂的浓相高密度气固流态化系统中的受力，将浓相高密度气固流态化复杂系统中分选特性同负面效应协同优化，形成了入选物料在流化床中净浮力主导、错配效应抑制的分选理论，将错配效应分成粘性和运动两个错配效应，建立了分选过程中的错配模型，如公式 (1) 所示：

$$\alpha = \begin{cases} \frac{\rho_b - \rho}{\rho} g, & \text{当 } U_r = 0 \text{ 时;} \\ \frac{C_D \rho_b}{d \rho} |U_r| U_r, & \text{当 } \rho = \rho_b \text{ 时;} \\ \frac{\rho_b - \rho}{\rho} \left(1 + \frac{U_r^2}{U_i^2} \right) g, & \text{当 } U_r(\rho_b - \rho) > 0 \text{ 时;} \\ \frac{\rho_b - \rho}{\rho} \left(1 - \frac{U_r^2}{U_i^2} \right) g, & \text{当 } U_r(\rho_b - \rho) < 0 \text{ 时。} \end{cases} \quad (1)$$

式中： α 是煤炭颗粒加速度； ρ_b 是床层密度； ρ 是煤炭颗粒密度； U_i 是煤炭颗粒在流化床中的终端速度； U_r 是煤炭颗粒与加重质颗粒的相对速度； C_D 是曳力系数； d 是煤炭颗粒直径； g 为重力加速度。

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 Δp_d 和床层的压降 Δp_b ，为此，我们提出了压降准数 C_p ，以此来表征分选流化床的流化质量及分选性能：

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

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：

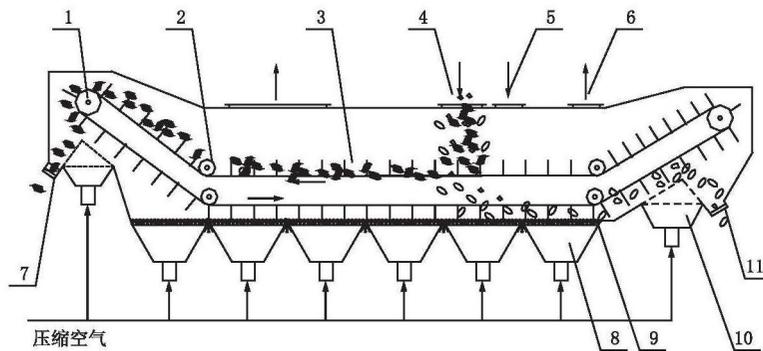
$$\rho_c = \frac{\rho_1 \rho_2}{a(1+m)[\rho_1 + (\rho_2 - \rho_1)\gamma]}, \quad 0 < a \leq 1, \quad (3)$$

式中： ρ_1 和 ρ_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； γ 为二元加重质中煤粉的重量百分数； m 为流化床膨胀率。

2 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，设计参数如表 1。该机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研制了新型装配式耐磨抗堵布风结构，解决了长期以来布风装置堵塞的难题；②研制了加重质内循环装置，大幅度减少了加重质循环量，提高了床层稳定性，减轻了系统负荷；③研制了新型精煤尾煤产品输送装置，大幅度提高了分选机的处理能力；④设计了新型的设备结构，提高了整机的可靠性。

新一代干法重介质分选机采用了磁铁矿粉与煤粉组成的二元加重质，其分选密度可调节范围为 1.3 ~ 2.2 g/cm³，适用性强。二元加重质中磁铁矿粉的粒度为 0.3 ~ 0.06 mm，与第一代分选机采用的 0.3 ~ 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。



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

图 2 干法重介质流化床分选机结构

在 40 ~ 60 t/h 干法重介质分选机的基础上，进一步研发了 GZX 系列干法重介质分选机，其分选机型号、处理能力、入料粒度和分选效果如表 2 所示。

表 1 40 ~ 60 t/h 空气重介质流化床分选机设计参数

内容	设计参数
处理能力 /t · h ⁻¹	40 ~ 60
分选机宽度 /mm	2 000
分选机长度 /mm	5 000
入选煤粒度 /mm	100 ~ 6
工作风量 /m ³ · h ⁻¹ · m ⁻²	40 ~ 400
分选时间 /s	>25
吨煤介质循环量 /t	2
功率 /kW	22
机重 /t	16

表 2 GZX 系列干法重介质流化床分选机

型号	入料粒度 /mm	处理能力 / (t · h ⁻¹)	可能偏差	数量效率
GZX - 60	100 ~ 6	50	0.05 ~ 0.08	>90%
GZX - 90	100 ~ 6	100	0.05 ~ 0.08	>90%
GZX - 120	100 ~ 6	150	0.05 ~ 0.08	>90%
GZX - 180	100 ~ 6	200	0.05 ~ 0.08	>90%
GZX - 240	100 ~ 6	240	0.05 ~ 0.08	>90%
GZX - 500	100 ~ 6	500	0.05 ~ 0.08	>90%

3 模块式干法重介质流化床选煤工业示范系统

2007 年，中国矿业大学与唐山市神州机械有限公司合作研发，建成了 40 ~ 60 t/h 模块式干法重介质流化床选煤工业示范系统，如图 3 所示。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。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，同时对南非干法选煤公司提供的煤样进行了分选试验，分选效果良好。



图3 干法重介质流化床工业示范系统

在低密度和高密度分选两种试验条件下，考查了模块式干法重介质流化床工业示范系统的分选性能。低密度分选时，分选密度为 1.33 g/cm^3 ，可能偏差 E 值为 0.05 g/cm^3 ，如图4所示；高密度分选时，分选密度为 1.61 g/cm^3 ，所得的精煤灰分为 14.67% ，尾煤灰分为 71.26% ， E 值为 0.06 g/cm^3 ，如图5所示。

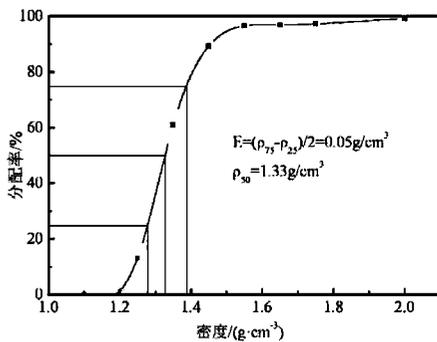


图4 低密度分选分配曲线

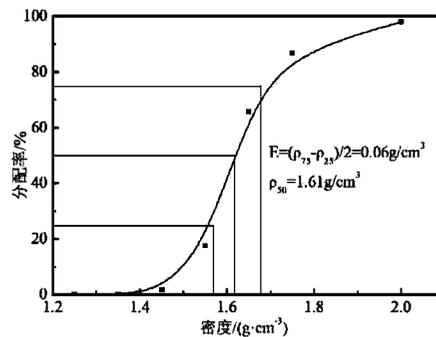


图5 高密度分选分配曲线

4 世界上首座模块式干法重介质流化床选煤厂

4.1 原煤可选性

采用模块式空气重介质流化床干法选煤系统对神华新疆能源公司的煤炭进行了分选。原煤性质如表3所示。通过对原煤进行浮沉试验，得到原煤可选性如图6所示。若要求精煤灰分为 3.5% ，通过可选性曲线，可以查的理论上分选密度为 1.47 g/cm^3 ，分选密度 ± 0.1 含量为 22.5% ，属于较难选煤。

表3 原煤性质

$M_i/\%$	$M_{ad}/\%$	$A_d/\%$	$V_{dat}/\%$	$S_{t,ad}/\%$	$Q_{gr,ad}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
9.4	2.24	23.98	37.61	0.34	26.56

4.2 分选工艺

2013年，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7），要求精煤灰分小于 4% ，精煤产品作为生产活性炭的原材料。

该选煤厂的工艺流程如图8所示，原煤经过筛分破碎， $100 \sim 10 \text{ mm}$ 煤炭进入到干法重介质流化床分选机中，分选得到的精煤和尾煤分别经过脱介筛脱介，成为最终产品。脱介筛筛下物经过分流器，一部分进入到磁选机，经过磁选，回收磁性物，排出煤粉；另一部分进入循环介质仓，作为循环介质重新进入到分选机中。通过引风机和除尘器，除去粉尘，确保排到环境中的气体无污染。

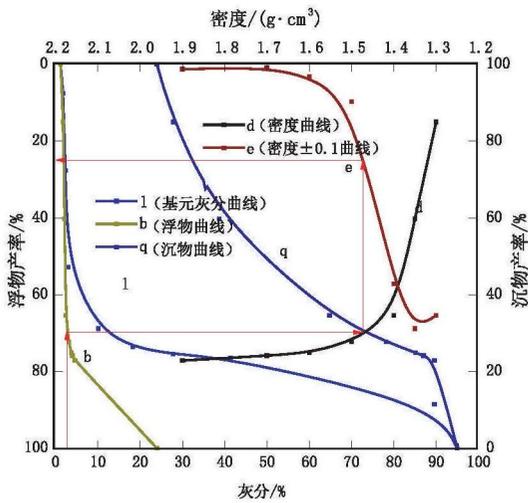


图 6 原煤可选性曲线



图 7 模块式干法重介质流化床选煤厂

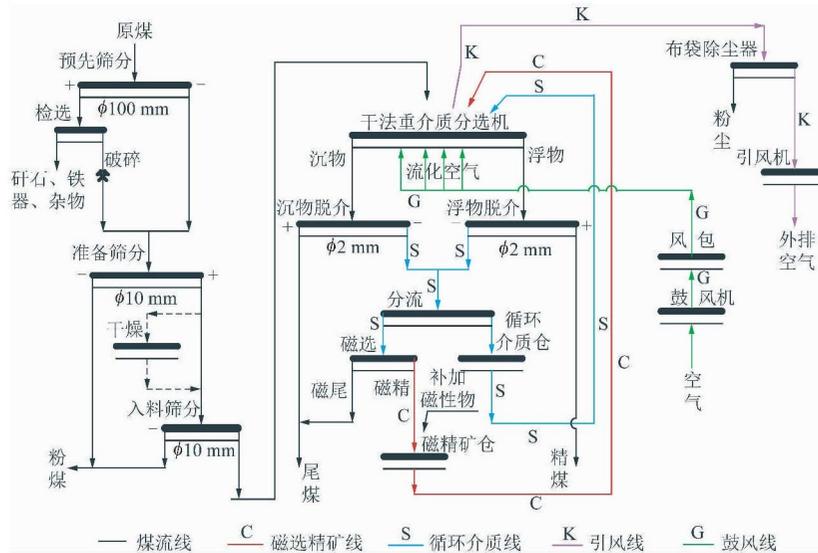


图 8 工艺流程图

4.3 床层密度的均匀稳定性

干法重介质流化床分选机是按密度对原煤进行分选，流化床床层密度的均匀稳定性直接决定了分选效果，因此对干法重介质流化床床层密度波动特性的研究至关重要。在连续运转的干法重介质流化床选煤系统中对床层密度进行采样分析，得到床层中心点密度随时间的波动及密度在三维空间的密度分布特性如图 9 所示，同时给出了多次试验的测量误差图。图 9a 中，总检测时间为 1 800 s，时间间隔 30 s，计算得到床层中部的平均密度为 1.466 g/cm³，密度波动标准差为 0.010 6 g/cm³；图 9b 中，在分选机有效长度方向（宽度和高度方向均取中心点）均匀布置 51 个测点，测点间隔 80 mm，得到床层长度方向上的平均密度为 1.454 g/cm³，密度波动标准差为 0.010 7 g/cm³；图 9c 中，在分选机宽度方向（长度和高度方向均取中心点）每隔 40 mm 布置一个测点，得到床层平均密度为 1.459 g/cm³，密度波动标准差为 0.008 5 g/cm³；图 9d 中，在床层高度方向（长度和宽度方向均取中心点）每隔 8 mm 布置一个测点，测得床层平均密度为 1.446 g/cm³，密度波动标准差为 0.014 7 g/cm³。可以看出，床层密度在 1.46 g/cm³ 附近波动，且床层密度随时间变化的稳定性和在三维空间的均匀性都比较高，能有满足煤炭高效干法连续分选的需求。

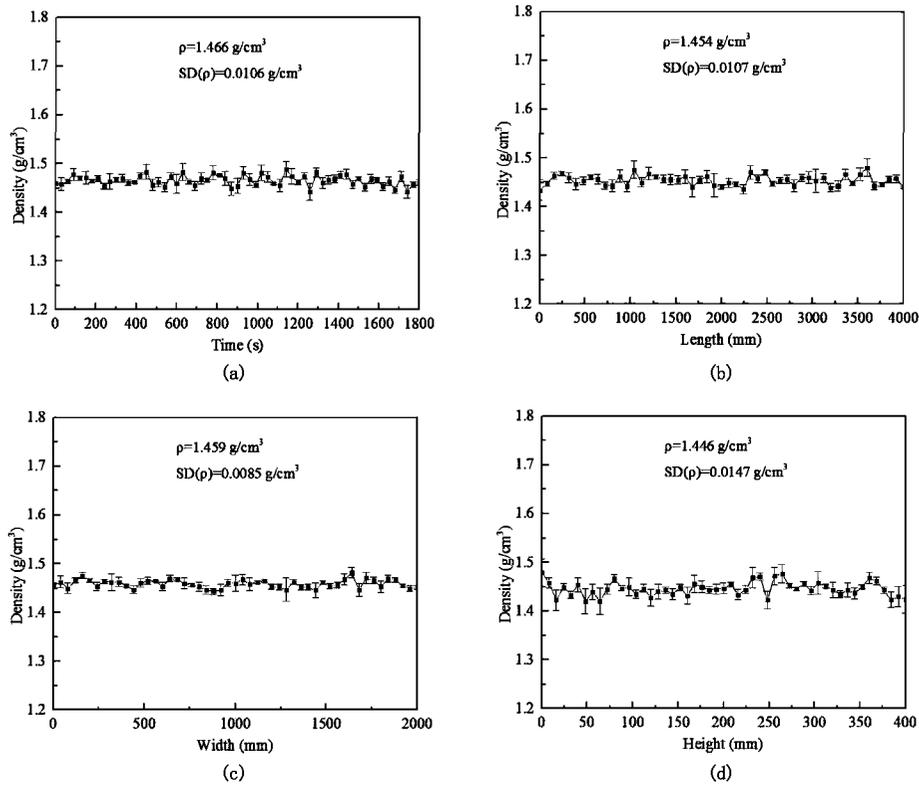


图9 流化床层密度的均匀稳定性

4.4 二元宽粒级加重质

干法重介质流化床选煤系统采用 0.3 ~ 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，其粒度累计特性曲线分别如图 10 和图 11 所示。循环介质粒度主要分布在 0.5 ~ 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 0.5 ~ 0.125 mm。

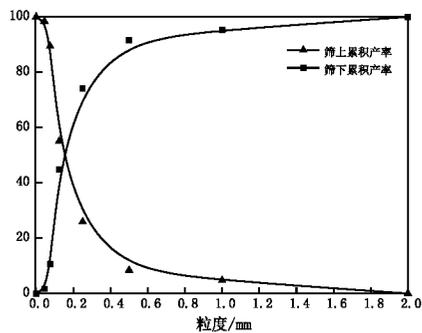


图 10 循环介质粒度累积曲线

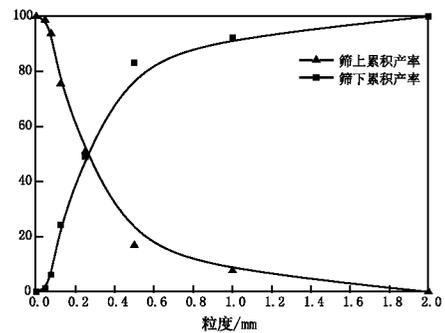


图 11 磁选尾矿粒度累积曲线

4.5 分选效果

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 η 。在正常生产的条件下，按照 GB475 - 2008 和 MT/T808 - 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了取样分析。精煤实际产率为 67.88%，灰分为 3.46%。通过对原煤进行可选性分析，得到在该精煤灰分条件下，精煤的理论产率为 73%，数量效率 $\eta = 93%$ 。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 12 所示。通过分配曲线，可以查得实际分选密度为 1.49 g/cm³，可能偏差 E 值为 0.055 g/cm³。

2013 年，世界上首座模块式干法重介质流化床选煤厂建成运行以来，设备运行平稳，无故障，可靠性高，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，产品满足了用户需求。该选煤厂年生产超低灰精煤 12 万 t，销售利润 1 680 万元，节约加工成本、运输成本和投资成本等共计 1 454 万元，实现创收 3 134 万元，经济效益显著。

4.6 干法重介质流化床选煤技术的特点

与传统的湿法选煤技术相比，如表 4，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。

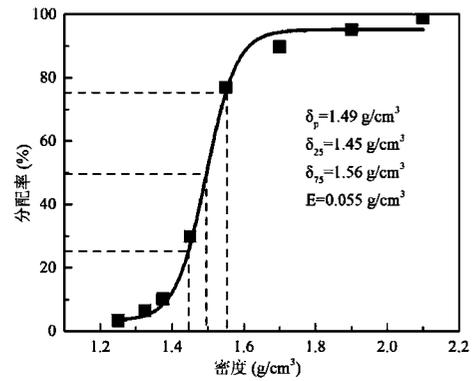


图 12 干法重介质流化床选煤系统分配曲线

表 4 与湿法选煤技术的对比

指标	单位	湿法选煤技术	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	吨/人	25 ~ 30	280
电耗	度/吨	6 ~ 10	1.5 ~ 3.5
清水消耗	m ³ /t	0.1 ~ 0.2	0
加工费	元/吨	15 ~ 25	< 10
建设工期	月	8 ~ 12	2 ~ 4
吨煤投资	元	45 ~ 65	35

4.7 应用范围

该技术分选密度可调范围宽，应用范围广，主要有：

- (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，减少二氧化硫等有害气体的排放，减轻大气污染具有重要意义。

5 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，分选密度为 1.49 g/cm³，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/cm³，数量效率为 >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 ~ 2.2 g/cm³，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, SZYMANSKI J, GUPTA R. 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, SZYMANSKI J, GUPTA R. 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] MAK C, CHOUNG J, BEAUCHAMP R, KELLY D J A, XU Z. Potential of Air Dense Medium Fluidized Bed Separation of Mineral Matter for Mercury Rejection from Alberta Sub – Bituminous Coal [J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2008, 28 (2): 115 – 132.
- [4] SAHU A K, TRIPATHY A, BISWAL S K, PARIDA A. 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] OSHITANI J, ONO K, IJIRI M, ZENNOSUKETANAKA. Effect of particle fluidization intensity on floating and sinking of objects in a gas – solid fluidized bed [J]. Advanced Powder Technology, 2004, 15 (2): 201 – 213.
- [8] ZHANG B, ZHAO Y, WANG J, SONG S, DONG L, PENG L, YANG X, LUO Z. High ash fine coal dry cleaning and stability of shallow bed dense – phase gas – solid separation fluidized bed [J]. Energy & Fuels, 2014: 140601162108000.
- [9] ZHANG B, ZHAO Y, LUO Z, SONG S, LI G, SHENG C. 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.
- [10] HE J, ZHAO Y, HE Y, LUO Z, DUAN C. Force characteristic of the large coal particle moving in a dense medium gas – solid fluidized bed [J]. Powder Technology, 2014, 254: 548 – 555.
- [11] DONG L, ZHAO Y, DUAN C, LUO Z, ZHANG B, YANG X. Characteristics of bubble and fine coal separation using active pulsing air dense medium fluidized bed [J]. Powder Technology, 2014, 257: 40 – 46.
- [12] 贺靖峰, 赵跃民, 何亚群, 骆振福, 段晨龙, 葛林翰, 孙启潇. 基于 Euler_ Euler 模型的空气重介质流化床密度分布特性 [J]. 煤炭学报, 2013, 38 (7): 1277 – 1282.
- [13] 宋树磊, 赵跃民, 骆振福, 唐利刚, 杨旭亮. 气固磁场流态化分选细粒煤 [J]. 煤炭学报, 2012, 37 (9): 1586 – 1590.
- [14] 贺靖峰, 赵跃民, 何亚群, 段晨龙. 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.
- [15] YANG X, ZHAO Y, LUO Z, CHEN Z, LIANG C. Establishment and Evaluation of a United Dry Coal Beneficiation System [J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2012, 32: 95 – 102.
- [16] 宋树磊, 赵跃民, 骆振福, 唐利刚. 气固磁稳定流化床屈服应力的实验研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40 (6): 908 – 911.
- [17] 骆振福, 陈尚龙, 赵跃民, 陈增强, 唐利刚. 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.
- [18] ZHAO Y, LI G, LUO Z, LIANG C, TANG L, CHEN Z, XING H. Modularized dry coal beneficiation technique based on gas – solid fluidized bed [J]. Journal of Central South University Technology, 2011, 18: 374 – 380.
- [19] 唐利刚, 赵跃民, 骆振福, 陈增强, 梁春成, 邢洪波. 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.
- [20] 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.
- [21] 韦鲁滨, 边炳鑫, 陈清如. 运动物体在浓相流化床中的受力 [J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29 (5): 480 – 483.