空气重介流化床干法分选与复合式干选分选的对比

吴万昌，赵跃民，左伟，陈尚龙，刘小军
中国矿业大学化工学院，江苏徐州（221008）
E-mail：wuwanchang@126.com

摘　要：文章对目前两种最具应用前景的干选选煤方法：空气重介流化床干法分选和复合式干法分选，进行了全面系统的比较研究。空气重介流化床干法分选和复合式干法分选除具有相同的不用水、流程简单、投资少等优点外，空气重介流化床干法分选在结构、工艺流程、工艺参数等方面都有着比较严格的规定。空气重介流化床干法分选适合分选的煤炭范围较广。而复合式干法分选由于其具有的较宽入料粒度、水分的适应性较广等优点，在用于易选或中等可选性煤炭的分选、动力煤排矸、降硫等方面还是显示出了极大的优越性。

关键词：干法选煤；空气重介流化床；复合式干选机
中图分类号：TD94

1. 引言

我国煤炭资源丰富，占一次能源的 70%左右，2007 年全国煤炭产量达到了 25.23 亿吨。但是由于我国煤炭洁净加工与综合利用程度低，煤炭的入选比例为 30%左右，动力煤仅为 14%，约 80%的动力煤不经分选洁净而直接燃烧，造成十分严重的环境污染。我国有 2/3 以上的煤炭分布在西北等干旱缺水地区，且我国相当数量年轻煤种遇水易泥化以及洗选产品严寒冬季易冻结，因而无法利用湿法选煤方法加工提高煤质。因此，大力发展煤炭分选尤其是动力煤分选加工，工艺简单、投资少、成本低的干法分选技术是最经济、见效最快的方法之一。

干法选煤主要是利用煤与矸石的物理性质差别实现分选的[1]，干法选煤主要包括风选、拣选、摩擦选、磁选、电选、X－射线选、微波选、空气重介流化床选煤、复合式干法分选等。其中已实现工业应用的有风力选煤（风力摇床风力跳汰）、空气重介流化床干法选煤和复合式干法选煤。风力选煤由于其适宜的入料煤粒级窄、分选密度下限高、效率低、工作风量大和粉尘污染严重等缺点，应用范围较小[2~3]。以下主要讨论最具应用前景的空气重介流化床分选技术和复合式干法分选技术。

2. 空气重介流化床干法分选技术

如图 1，空气重介流化床干法分选机由空气室、气体分布器、分选室和产品输送刮板装置组成。空气重介流化床分选系统主要由原煤准备、重介分选、介质净化回收、供风除尘等部分组成。

作为新型高效干法选煤技术的空气重介质流化床干法分选在选煤领域的独特地位及重要性在世界各国已取得共识。前苏联、美国、加拿大等曾先后开展流化床干法分选研究[4~10]。

中国矿业大学从1984年开始研究开发空气重介质流化床干法选煤技术，20多年来，中国矿业大学逐步研究了空气重介流化床干法分选方法和空气重介流化床分选理论，并在入选

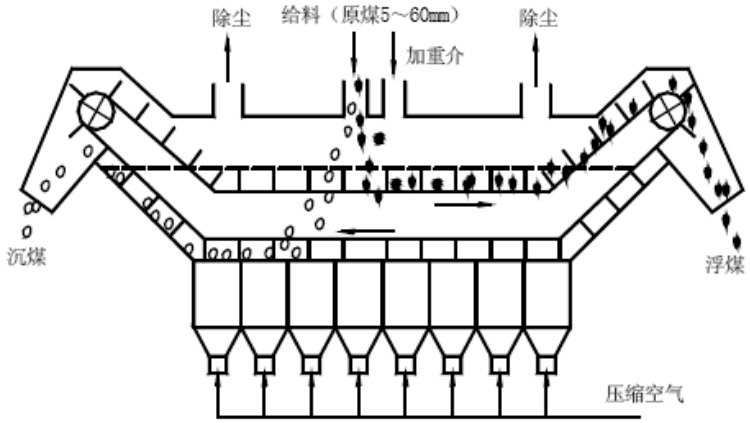


图 1 空气重介流化床干法分选机结构
Fig1 Structure of Dry Separator with Air-Dense Medium Fluidized Bed

物料在流化床中净浮力占主导、错配效应抑制，以及物料在流化床中的三级分布等理论等取得了显著的成就。并设计成功了 50t/h 空气重介质流化床干法分选机。并进行了大量的工业性分选试验，并取得了较好的分选结果。在磁稳定流化床、振动流化床、摩擦电选微细煤粉的研究上也取得了一些可喜的进展[11~20]，为我国干旱缺水地区煤炭提供了新的洁净分选技术。

3. 复合式干法分选技术

如图 2 所示，复合式干法分选机由分选床、振动器、风室、机架和吊挂装置等组成。分选床由床面、背板、格条、排料挡板组成。床面下有可控制风量的风室，由离心通风机供风，气流通过床面上的风孔作用于分选物料。由吊挂装置将分选床、振动器悬挂在机架上，可任意调节分选床的纵向和横向角度。

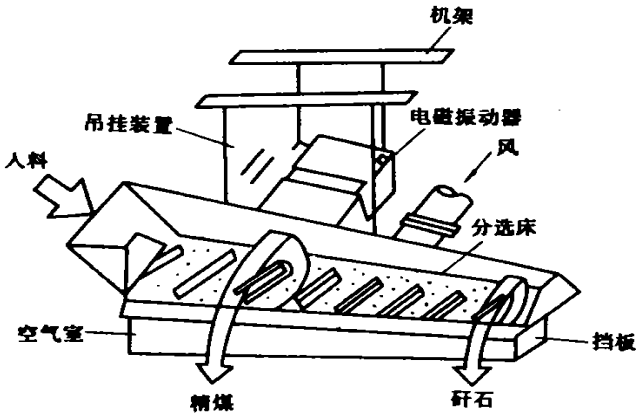


图 2 复合式干法分选机的结构
Fig2 Structure of Compound Dry Separator

复合式干法分选机是在美国干式摇床的下部加上较弱的上升气流，利用入料中的煤粉作为介质的一种新型干法选煤装置。复合式干法选煤系统包括给料部分、分选部分、供风除尘部分、电气控制部分以及产品输送部分。虽然复合式干法分选机的可能偏差 E_P 值较大，在

0.15－0.26 之间。但是在较宽的入料粒级、水分的适应性较广及较高的分选效率上还是显示了其优越性[21~24]。

4. 空气重介流化床干法分选和复合式干选分选的比较研究

作为干法分选方法，空气重介流化床干法分选和复合式干选分选都有适应干旱缺水等地区煤炭分选、省去复杂的煤泥水流程、投资少等优点。下面主要从二者的不同方面做比较。

4.1 分选原理不同

4.1.1 空气重介流化床干法分选原理

空气重介流化床干法分选技术以空气和加重质形成的具有似流体性质和一定密度的流化床层为分选介质，床层密度与分选密度相当，类似于湿法重介质选煤且分选精度与湿法重介质选煤相当。依据阿基米德原理使入选物料在流化床层内按密度分层，精煤上浮，矸石下沉。而后，轻、重物料经分离、脱介获得精煤和尾煤两种产品。

4.1.2 复合式干法分选原理

复合式干选分选技术采用自生介质（入选原煤中所含细粒煤）与空气组成气固两相混合介质分选；借助机械振动使分选物料做螺旋翻转运动，形成多次分选；充分利用逐渐提高的床层密度所产生的颗粒相互作用的浮力效应而进行选。该技术综合了传统的风选和空气重介流化床分选的一些原理。

4.2 工艺参数不同

4.2.1 入选物料

现在开始工业应用的普通空气重介流化床的适宜入料粒级为 50～6mm 级粗粒煤，此时能够得到有效的分选，可能偏差 Ep 值为 0.05-0.08，分选效率大于 95%，介质损耗小于 0.5kg/t 煤。有能量引入的振动空气重介质流化床和磁场流化床是为了解决<6mm 级细粒煤炭的高效干法分选。中国矿业大学为了实现 300～0mm 全粒级煤炭的分选，也进行了一系列的研究并取得了不错的进展。

沈丽娟的试验研究[25]表明：复合式干法分选适用于易选、中等可选和矸石含量较高的煤炭分选；对水分的适应性比较好，适应于外在水分＜10%的入料且当外在水分＜7%时，分选效果基本不受影响；复合式干选的入料较宽，分选物料粒度范围可达到 80～0 mm。

4.2.2 介质

目前，空气重介流化床干法分选采用的加重质有磁铁矿粉、钒钛磁铁矿粉、磁珠等。他们或单独作为加重质，或与具有一定粒级要求的煤粉进行一定比例的配比作为混合加重质。但它们都需满足易回收、经济、耐磨等要求。作为加重质还应具备一定的粒级要求，才能使流化床得到均匀稳定的流态化效果。同样作为与磁铁矿粉进行配比的煤粉也对粒级有一个较窄的粒级要求。这样，可以选用不同或者是不同配比的混合加重质，使流化床的分选密度可以进行调节，满足不同的分选需要。

而复合式干法分选中充当自生介质的是入料中的 6～0mm 的细粒物料。它们决定了粗粒物料的运动状态，我们称之为自生介质。当入料中含有一定的粉煤（6～0mm 级）时，分选效果较好。这些细粒物料和空气组成了气－固悬浮体，有效地利用了这种床层密度和颗粒相互作用的浮力效应，因而改善了粗粒级的分选效果。但是随着分选过程中低密度细粒物料的排出，其自生介质无论是粒度还是密度都不断提高，在矸石端实际充当介质的已经成为细粒

矸石。因而，在复合式分选中形成的这种气－固悬浮体的密度是逐渐变的，而且是逐渐提高的。这种变化有利于排出高灰纯矸。

4.2.3 操作参数

在干法分选中，主要调节的参数有风量、风压、激振器的频率等。但是具体到空气重介流化床分选和复合式干法分选，对参数有着不同的要求。

（1）风量和风压

应该根据不同密度和不同粒度加重质调整风量和风压。分布器的阻力也要考虑在内。

气体分布器是使气体在进人床层之前均匀分布，调整或控制其流速的装置，它是空气重介流化床干法分选机的核心部件。对于分选用流化床，其复合式气体分布器压降同样应满足分布器应具备气体通过它时所产生的压降必须大于气体通过床层所产生的压降这一临界值[26~27]。因此，必须协同优化气体分布器压降和床层压降，以形成微泡浓相高密度流化床，为流态化分选奠定基础。只有当压降中心在气体分布器时，才可以形成适合矿物分选的密度均匀稳定的微泡浓相高密度流化床。 由于动力消耗因素的考虑，通常情况下，可以基于临界点来计算确定。

复合式干法分选机中，风力的作用一方面加强床层粒群的松散，有利于分层；另一方面与细粒煤组成气固两相混合介质，加强分选。所需风量不需要使物料悬浮，为传统风选的1/3，在 5000 m^3/（h • m2）。除尘规模大大减小，80％风量循环，仅有的 20％风量从分选机抽出形成负压，确保无尘外溢。风压较小，以 FGX－3 型为例，风压为 6.14KPa。

（2）激振器的频率

与工业应用的普通空气重介流化床分选机不同的是，在复合式干法分选中引入了振动。振动改善了床层物料的流动性，有利于改善分选效果，提高分选效率。沈丽娟等的试验研究[25]表明：在复合式干法分选中，振动频率对分选效果有显著影响。在其试验中对某矿 50～6mm 入料进行试验得出电源频率采用 55Hz 时，分选指标最好。

4.3 分选过程中物料运动规律不同

4.3.1 空气重介流化床分选中物料运动规律

理想的空气重介分选中，物料在流化床中的分选复合阿基米德原理，即物料颗粒在流化床中所受合力为：

$$F = V\left(\rho_s - \rho\right)g$$

式中：F —物料颗粒在流化床中受的合力，N;

V —物料颗粒的体积，m^3；

ρ_s —物料密度，Kg/m^3；

ρ —流化密度，Kg/m^3。

由上式知，当物料密度 $\rho_s > \rho$ 时，合力向上，物料颗粒浮于表面；当 $\rho_s < \rho$ 时，合力向下，物料颗粒沉于底部。上述分析是在略去次要因素如床层阻力等后得出的结论。

4.3.2 复合式干法分选物料运动规律

复合式干法分选中，物料在分选床横断面上产生螺旋运动，即靠近床面底层的物料向背板方向运动，而床层表面的物料向排料板方向下滑。床层上下部物料颗粒在横断面上向各自方向运动的微分方程[28]为：

底部物料向 X 正方向的运动微分方程：

$$\frac{dV_x}{dt}=\omega^2\lambda\sin\phi\left(\cos\delta+f\sin\delta\right)-g\left(\sin\alpha+f\cos\alpha\right)$$

上部物料向 X 反方向的运动微分方程：

$$\frac{dV_x}{dt}=\omega^2\lambda\sin\phi\left(k\cos\delta+f\sin\delta\right)+g\left(\sin\alpha-f\cos\alpha\right)$$

式中：ω—分选机床体振动的角频率；

α—分选床面的横向倾角，一般小于 0＜α＜150，可以任意调节；

f— 颗粒物料的动摩擦系数；

ϕ—阻力系数，它是雷诺数的函数；

k—为修正系数，0＜k＜1；

δ—振动方向角，即床体振动方向与床体底平面的夹角。

由以上式子可知，复合式分选加振动后，顶、底层物料在各自向 X 正方向和负方向的运动速度基本相当，形成了正反方向速度梯度。这是物料在横断面上产生螺旋运动的原因。

4.4 工艺流程不同

4.4.1 介质的回收利用

空气重介流化床干法分选与复合式干法分选中采用自生介质不同，空气重介流化床干法分选由于涉及到加重质的回收问题，由此要求作为加重质就必须具备可回收的性质，如现在应用的介质都有磁性。这样才能在分选以后对介质进行回收利用，以降低选煤过程中的介耗。

4.4.2 产品的排出方式

在空气重介流化床分选机分选过程中，入选物料在流化床层内按密度分层，精煤上浮，矸石下沉。而后，上部刮板将分选出的精煤刮向排煤端，从排煤口排出。下部刮板将分选出的矸石刮向排矸端，从排矸口排出。然后通过脱介筛分别得到精煤和矸石产品。

在复合式干法分选中，由于振动力和连续进入分选床的物料压力，使不断翻转的物料形成近似螺旋运动，并向矸石端移动。因床面宽度逐渐减缩，上层密度相对较低的煤不断排出，直到最后排出密度大的矸石。因此，由入料端到矸石端依次排出的是精煤、中煤、 矸石三种产品。这样可以根据具体用途，截取产品。

4.5 分选精度不同

在建立的空气重介流化床干法分选工业性系统试验中，可能偏差 Ep 值为 0.05-0.08，分选精度与湿法重介质选煤相当，且分选效率大于 95%，介质损耗小于 0.5kg/t 煤，达到国际领先水平。

复合式干法分选机的可能偏差 EP 值较大，在 0.15－0.26 之间，但数量效率较高，η=95%，只限用于易选或中等可选性煤炭的分选、动力煤排研、劣质煤提质等方面。

5. 结论

由以上分析可知，空气重介流化床干法分选和复合式干法分选作为目前最具应用前景的干法选煤方法，都有各自的优点。推广空气重介流化床干法分选和复合式干法分选对顺应中国煤炭工业的战略西移，解决西部煤炭资源的经济、高效和合理利用以及实现社会和经济效益的最大化有着非常重要的意义。

参考文献

[1] 胡良文．浅析干法选煤技术与设备[J]．科技情报开发与经济，2005，15(7)：290 一 291．
[2] 陈清如，骆振福．干法选煤评述[J]．选煤技术，2003，12（6）：34 一 39．
[3] 石燕峰等．干法选煤技术的发展应用[J]．选煤技术，2006，10（5）：53 一 56．
[4] F. Thomas and H. F. Yancey．A process of separating Loosely Mixed Materials． U．S．Patent，No．153846, April 21, 1925．
[5] J．M．Beeckmans．Separation of mixed granular solids using the fluidized counter-current cascade principle．The Canada Journal of Chemical Engineering，Oct. 55,1977．
[6] D. Muzyka, J. M. Beeckmans and A. Jeffs. Solid separation in a counter-current fluidized cascade：Jetsam-Rich Mixture at total reflux．The Canada Journal of Chemical Engineering，Vol. 56, June 1978．
[7] D．Muzyka, J．M．, Beeckmans．Effects of convective velocity on longitudinal diffusivities in a fluidized cascade separator．The Canada Journal of Chemical Engineering，Vol．57, Oct．1979．Technology center．
[8] A. P. Baskakov et al．Heat and thermo-chemical treatment in fluidized and vibration-fluidized bed. Heat transfer Engineering，1980, 10(1), P9-17．
[9] M．Weinteaub et al，Separation of particulate solid of varying densities in a fluidized bed．U.S.Patent. NO.3774759 Nov 27, 1993．
[10] X．Dong and J．M．Beeckmans．Separation of particulate solid in a pneumatically driven counter-current fluidized cascade．Powder Technology，62(1990) P261-267．
[11] 骆振福.我国西部煤炭分选洁净的途径[J]．中国矿业，2001，10(5)：12 一 13．
[12] 韦鲁滨,陈清如,邢洪波.气固流化床中粗粒的沉降行为[J]．中国矿业大学学报，2000，29 (2)：136 一 139．
[13] 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 一 483．
[14] 骆振福，陈清如，陶秀祥．气固两相流化床中煤炭分层行为的研究[J]．湘潭矿业学院学报，2000，15(1)：9 一 12．
[15] 樊茂明，陈清如，赵跃民，骆振福.细粒煤炭磁稳定流化床干法分选技术的研究[J]．中国矿业大学学报，2001，30 (6)：547 一 549．
[16] 骆振福，陈清如，陶秀祥．振动流化床的形成机理[J]．中国矿业大学学报，2002，29 (3)：233 一 234．
[17] Zhang Xinxi, Duan Chaohong，Yang Yufeu．The Effect Of Microwave And Ultrasonic Pre 一 Treatmnent And Other Factors On Tnhuele chostaticS eparationP rocess[R]．Separation Science and Technology, First International Symposium On Dry Coal Cleaning:China University of Mining and T hecnology Press, 2002：263 一 267．
[18] 骆振福，樊茂明，陈清如．磁场流化床的稳定性研究[J]．中国矿业大学学报，2001.7．
[19] 樊茂明，陈清如，赵跃民，骆振福．磁稳定流化床干法选煤试验研究[J]．选煤技术，2002.6．
[20] 骆振福，赵跃民，邢洪波，樊茂明，陶秀祥．磁场流化床分选粒度下限的研究[J]．中国矿业大学学报，2002.7．
[21] 沈丽娟．复合式干选机选煤的工艺参数研究[J]．煤炭科学技术．1996，24(3)：17 一 20．
[22] 任尚锦，肖永庄．我国几种干选机的开发与利用[J]．煤炭加工与综合利用．2004(5)：7 一 8．
[23] 杨云松，李功民．复合式干法选煤技术的开发和应用[A]．中煤协会《国际选煤技术交流大会论文集》[M]．徐州：中国矿业大学出版社，2005．
[24] 沈丽娟．自生介质在复合式干选机中的作用[J]．选煤技术，1998(2)：45 一 48．
[25] 沈丽娟．复合式干法分选机分选规律的研究[D]．徐州：中国矿业大学，1996.5．
[26] 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，2002.9．
[27] 陈清如，俞少功，李建民等．干式流化床选煤技术[A]．第四届全国流态化会议论文集[C]，兰州，1987．
[28] 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 一 451．
[29] 陈清如，杨毅，钱积才，栾吉祥．煤炭加工与综合利用，1994(5)：27 一 28．

Comparison of Dry Coal Cleaning with Air Dense Medium Fluidized Bed with Compound Dry Separation

WU Wanchang，ZHAO Yuemin，ZUO Wei，CHEO Shanglong，LIU Xiaojun
School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu (221008)

Abstract

This article conducted a comprehensive review of two dry coal cleaning methods: dry coal cleaning with air dense medium fluidized bed and compound dry separation, which are the most promising dry coal separating on the current. Besides the both separations ,which are without water, have the benefits of easy process and lower investment, the dry coal cleaning with air dense medium fluidized bed is stricter on the structure, process and parameters and so on. The dry coal cleaning with air dense medium fluidized bed is high in adaptation. While the compound dry separation , which has the benefits of larger fraction of partical size and externel water of the feed, shows its advantages for coal of easy and middle separation possibility, discharging of gangue and sulfur.

Keywords：dry coal cleaning method；air dense medium fluidized bed；compound dry separator

作者简介：吴万昌，男，1984年出生，2007年获得矿物加工工程和国际经济和贸易双学士学位，现为中国矿业大学矿物加工工程在读硕士，主要研究方向是干法选煤。