

流态化床分选设备发展与应用

李 强, 史帅星, 张跃军

(北京矿冶研究总院 北矿机电科技有限责任公司, 北京 100160)

摘要:本文主要介绍了国内外流态化床分选设备的基本分选原理与结构, 分析了该设备的发展方向和趋势。分析表明, 流态化床分选设备的发展趋势是, 借助 CFD 软件, 通过优化流态化床分选设备的结构, 添加复合力场或流场, 提高其分选粗粒级矿物的效果, 扩大其在粗煤泥及金属矿选矿中的应用。

关键词:粗颗粒; 流态化床分选设备; 应用现状; 发展趋势

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2017.03.004

中图分类号:TD456 文献标志码:A 文章编号:1000-6532(2017)03-0029-05

浮选理论及大量的浮选实践表明, 不同粒度级别的矿物, 具有不同的浮选行为及浮选效率。传统浮选机与浮选柱可有效回收粒度范围为 20 ~ 170 μm 的矿物, 但是对于粗颗粒矿物 ($>200 \mu\text{m}$), 由于矿浆扰动与矿物颗粒浮力的制约, 传统浮选机与浮选柱一直难以有效回收该部分矿物^[1]。粗颗粒矿物分选效率低下, 严重影响了选矿厂精矿产量和企业的经济效益, 因此, 粗颗粒矿物回收成为国内外研究的热点和重点问题。

在煤炭分选领域, 随着大直径重介质旋流器有效分选粒度的上升与浮选柱和高选择性浮选机有效分选粒度的下降, 粒度介于重介质分选与浮选之间的煤泥难以得到有效的分选, 该粒度级煤泥被称为粗煤泥。粗煤泥粒度通常在 0.3 mm 以上, 粗煤泥的难以有效分选已经成为制约我国煤炭行业发展的瓶颈。费之奎等^[2]分析了粗煤泥重选过程中分选效率低下的原因, 认为在重选过程中, 随着煤粒度的减小, 密度对煤颗粒沉降末速的影响逐渐减小, 减弱了颗粒按密度分选的效果。流态化床分选设备有效减弱了粒度对分选过程的影响, 强化了粗煤泥按密度分选, 目前流态化床分选设备在国内为已经广泛应用于粗煤泥分选。

在金属矿选矿领域, 国内外选矿厂的统计数据表明^[3], 磨矿作业耗电量最大, 其费用占选矿厂总耗

电量的 45% ~ 50%, 如果能够提高浮选粒度上限, 将有效降低磨机负荷, 提高磨机的处理量, 解决制约选厂生产能力的瓶颈, 提高资源的利用率; 同时还可以防止因矿石过磨而造成的金属流失, 降低浮选药剂的使用量, 而且可以提高精矿脱水效率, 从而降低选矿成本, 达到较佳的技术经济指标。流态化床分选设备在选矿流程中主要用于磨矿分级回路中, 实现粗颗粒选别并提前抛尾, 其在选矿流程中典型应用见图 1^[1]。

1 流态化床分选设备分选原理

不同密度、粒度的矿物颗粒, 在同一流体介质中的干涉沉降速度不同。高密度粗颗粒矿物具有较大的干涉沉降速度, 低密度细颗粒的矿物则具有较小的干涉沉降速度。在分选设备内提供一上升流体, 使其速度介于高密度粗颗粒和低密度细颗粒沉降末速之间, 则高密度粗颗粒矿物将在该上升流体中沉降, 而低密度细颗粒矿物将上浮, 从而实现矿物按粒度与密度分离。

高永明^[4]利用 Fluent 软件对流态化床设备内流场进行了分析, 指出上升水流与上升气泡流提供的向上的速度场会改变颗粒的沉降末速, 提高了低密度粗颗粒的分选效率, 从而减弱了粒度对分选效果的影响。沙杰^[5]对流态化床中相同粒度、不同密

收稿日期:2016-02-23

作者简介:李强(1989-), 男, 助理工程师。

度的粗煤泥分选行为进行了模拟,并指出当分选过程达到相对稳定后,颗粒在分选机内主要按密度分布并且呈现从上到下密度逐渐增加的趋势。并且沙杰研究了给料的粒度分布对流态化床分选的影响,试验结果表明当给料粒度差异较大时会影响流态化床按密度分选。李延峰^[6]从动力学角度研究了颗粒在流态化床分选设备内的分层规律,并提出由等沉粒组成的平衡层是流态化床分选的介质。黄亚飞^[7]利用 PIV 技术对流态化床分选设备内流场进行了模拟,并指出分选机内壁对流场影响较大,是漩涡与湍流的产生源之一。上升水流对分选设备内流场的影响同样不容忽视,上升水流引起的床层压降导致分选机下部区域的紊乱,随着高度上升,分选机上部流场趋于平稳。

2 国外流态化床分选机应用现状

2.1 干扰床分选机(Teetered Bed Separator)

1964 年,干扰床分选机(简称 TBS)首先在英国应用于煤炭分选。TBS 是圆柱形结构,主要由分选机槽体、上升流体分布器、泡沫槽、给矿系统和排矿系统等构成。TBS 以切线形式给矿,原矿直接给入到 TBS 的中部,在上升水流形成的紊流床层的作用下,物料按密度与粒度进行分离,高密度粗颗粒矿物进入槽体底部,由尾矿阀门排出;低密度细颗粒矿物在上升水流作用下聚集在槽体上部,由泡沫槽排出。

近年来,该设备在煤炭分选领域应用广泛,目前我国已有数十家选煤厂使用此设备分选粗粒煤泥。TBS 应用范围主要包括粗煤泥分选、砂的提纯、分选锡、铅、铁等矿物,但其对入料粒度分布要求较高,用于细粒煤泥分选时,泡沫产品灰分较高,需经多次提纯,灰分才能达到要求^[8]。邹勇等^[9]人针对石板选煤厂原煤含泥量升高,原有的 TBS 分选机分选效果恶化的问题,提出优化末精煤脱泥系统与工艺参数,发现在水量为 160 ~ 170 t/h、分选密度为 1.5 kg/L 条件下可有效提高 TBS 分选精度与处理量。国内某选煤厂^[10]采用重介质旋流器处理大于 1.5 mm 粒级煤,小于 1.5 mm 粒级经旋流器分级后,采用 TBS 分选 1.5 ~ 0.25 mm 粒级煤,小于 0.25 mm 粒级煤采用浮选机分选的选煤工艺,通过一段时间运行后发现,TBS 的使用可提高选厂的洗选能力,精煤产率显著增大。

2.2 横流分选机(Crossflow Separator)^[11]

为了减轻入料对流态化床层的影响,美国 Eriez 公司在 TBS 分选机的基础上,研发了 Crossflow 分选机。在设备的一侧安装给料缓冲箱,矿浆进入给料缓冲箱,速度减缓后使其水平溢流出来进入分选机,精矿从另一侧溢流出来。与 TBS 中心给矿形式相比,Crossflow Separator 给矿中的水和低密度细颗粒矿物可以直接进入溢流槽,分选机内上升水流受给矿的影响较小,从而显著提高了分选机的处理量和精度。

目前横流分选机主要应用于洗矿、分级与分选。Ghosh 等^[12]通过实验室试验与工业试验发现,相比于传统的 TBS 分选机,横流分选机具有更高的分选效率与处理量,并且所需水量较少。

2.3 水力分选机(Hydrofloat Separator)

水力分选机(Hydrofloat separator)是 Eriez 公司研制的一种新型的流态化分选设备,这种新设备结合了常规流态化分选机与柱浮选技术,底部的流体分布器在提供上升水流的同时,外加一个充气系统,将气泡引入到流态化床层,同时向矿浆中添加少量的起泡剂。待选矿物进入分选区后,气泡能够选择性的吸附在与捕收剂作用后产生疏水性的矿物颗粒表面,在流态化床的推动作用下,使矿化气泡上升到分选机顶部形成溢流并从泡沫槽排出。气泡的引入扩大了亲水性矿物与疏水性矿物之间的视密度差,不仅提高了分选效果,同时使得分选宽粒度级矿物成为可能^[13]。水力分选机下部设计为圆锥形尾矿排出装置,可以实现尾矿高浓度排出,从而减小尾矿排出对分选机内流场的影响。

与传统的机械搅拌式浮选设备相比,水力分选机具有以下优点^[14]:(1)入选矿浆浓度大,增加了气泡与矿物颗粒的碰撞概率。(2)矿浆以对流形式给入,在上升水流提供的向上的力的作用下,延长了粗颗粒的停留时间,提高了选别指标。(3)无机械搅拌机构,分选区内矿浆流动相对平稳,从而减小了气泡与矿物的脱附概率。水力分选机对粗颗粒磷酸盐矿、钾盐矿石和粗粒煤泥的分选效果见表 1。从表 1 可知,相比于常规的浮选机,水力分选机粗颗粒的回收率明显提高,而且品位控制在合理的范围之内。

表 1 HydroFloat 分选机分选矿石效果^[15]

Table 1 Separating results of HydroFloat Separator

矿 物	给矿量/(t ⁻¹ ·h ⁻¹ ·m ²)		回收率/%		品位/灰分%	
	传统 浮选机	Hydrofloat 分选机	传统 浮选机	Hydrofloat 分选机	传统 浮选机	Hydrofloat 分选机
磷酸 盐矿	10	25	91	98	4-6*	4-6*
钾盐 矿石	7	16	50	90	60**	57**
粗粒 煤泥	3	20	50	60	6-8***	8-10***

注: * 不溶物%, ** K₂O%, *** 灰分%。

2.4 逆流分选机

逆流分选机是由澳大利亚 Newcastle 大学和洛德维奇公司联合研制的粗煤泥分选机兼具分级与分选功能,其与传统 TBS 分选机的不同是在分选机内部增加了三组角度与高度均不同的倾斜版。

工作时,矿浆由分选机中部给入,在上升水流作用下,粗颗粒重矿物经底流板进入底流,成为尾矿;轻颗粒矿物经中矿板、溢流板,经泡沫槽溢流成为精矿。与传统的 TBS 分选机相比,倾斜板的加入,增加了矿物颗粒的沉降面积,减小了沉降距离,显著增加了设备的处理量^[16]。目前该设备在国内的塔山选煤厂及柳湾选煤厂都有应用。Amariei 等^[17]针对细粒铁矿难以有效回收的问题,利用逆流分选机对-150 μm 铁矿进行了实验室回收试验,试验结果表明逆流分选机可以有效回收细粒级铁矿,为进一步工业应用提供了指导。A. Kiani 等^[18]利用逆流分选机回收粉煤灰中的硅酸铝并探讨了给矿速率、给矿浓度与流态化作用对分选效果的影响,试验结果表明利用逆流分选机可以有效回收粉煤灰中的硅酸铝,并具有较高的处理量。

2.5 NovaCell 浮选柱^[19-21]

NovaCell 浮选柱由澳大利亚纽卡斯尔大学 Jameson 教授 2010 年提出,主要由浮选柱柱体、矿气混流气泡发生器、给矿器、中矿循环管路及矿浆泵构成。其分选区域主要由泡沫层、分离区和流态化区组成。部分中矿和新鲜矿浆在中矿管与空气作用后,经底部给入到浮选柱内,矿物与气泡混合体向上流动,粗颗粒矿物形成流态化床层。尾矿从浮选柱的中下部排出,精矿从上部的泡沫槽溢流排出,部分中矿经中矿循环管与新鲜矿浆、气泡混合后重新进入分选机内。Novacell 将浮选柱技术与流态化床技

术相结合,矿浆与气泡在中矿管中充分混合,促进了粗细颗粒与气泡的碰撞。Jameson 教授提出将 Novacell 应用于磨矿分级回路中,实现粗颗粒选别并提前抛尾,降低磨矿功耗,提高选厂技术经济指标。

3 国内流态化床分选机应用现状

国内对流态化床分选机的研究相对较晚,但是近年来随着 TBS 分选机在煤炭领域应用的推广,国内对流态化床分选机的研究逐渐增多,并取得了一定的成果。目前国内对流态化床分选机的研究主要集中在粗煤泥分选领域,针对金属矿选矿的研究较少。研究人员在吸收和改进 TBS 分选机基础上,借助 CFD 流体力学模拟软件,研制了 CSS 分选机、FBCC 分选机、阻尼脉动液固流化床分选机等。

3.1 CSS 分选机

CSS 分选机是中国矿业大学设计研发的粗煤泥分选机,采用重力和界面力复合力场的流态化床分选技术,有效的弥补了传统流态化床分选设备的不足,提高了分选精度。CSS 分选机采用独特的钟形排料阀,可以实现连续稳定排矿,从而减少了排矿对分选机内流态化床层的扰动,提高了分选精度^[22]。刘佳等^[23]人通过对田庄选煤厂粗煤泥分选各工艺产品的分析发现,CSS 粗煤泥分选机适宜低密度分选,为了避免细泥对精煤品质的污染,应控制 CSS 给矿粒度分布为 1~0.25 mm。公乌素选煤厂由于新建厂房缺少粗煤泥分选流程,导致部分精煤流失,影响了选厂的经济效益。为此,安装了一套 CSS 分选机用于粗煤泥分选,经生产实践发现,CSS 分选机投入使用后,在精煤灰分符合品质要求的条件下,精煤回收率提高了 0.3%^[24]。

3.2 FBCC 分选机^[6]

李延峰利用 CFD 模拟了流态化分选机内不同密度、粒度特性的矿物在分选机内的浓度、速度变化及上升水流速度对流场的影响。结合计算机模拟仿真结果,将多管分布器和侧流分布器结合起来设计了新型流态化分选机流体分布器,并在此基础上设计制造了 FBCC-1500 流态化分选机。采用 FBCC-1500 流态化分选机分别在成庄选煤厂和葛店选煤厂进行了工业试验,试验结果表明 FBCC-1500 流态化分选机可提高精煤产率 1% 以上,精煤灰分控制在 10%~11%,显著提高选煤厂经济效益。

3.3 阻尼脉动流态化分选机

阻尼脉动流态化分选机在传统的 TBS 分选机基础上加入了阻尼块和脉动水流^[25]。阻尼块可以减少矿物颗粒间的夹杂,脉动水流可以使不同密度的矿物颗粒获得加速和减速效应,削弱粒度对分选过程的影响,强化矿物颗粒按密度分选。张厦等^[26]人利用 Fluent 软件对脉动流态化分选机内单相流场与多相流场进行了计算机模拟并发现在分选区域内上升水流与下降水流相遇时,会产生涡流现象,这些涡流既可以松散床层也可以加强对粗颗粒的捕收作用。邢耀文等^[27]人对脉动流态化分选机与传统的 TBS 分选机进行了实验室对比分选试验,试验结果表明,在流态化分选机中添加脉动水流后,精煤产率可提高 2.09%,灰分下降 0.09%。

4 结 论

实现粗颗粒($>200\ \mu\text{m}$)矿物浮选可有效减小磨机载荷、避免矿物过磨、提高精矿产量和企业的经济效益,但是传统浮选机与浮选柱难以有效回收粗颗粒矿物。为此,国内外研究人员研发了流态化分选机用于粗颗粒矿物浮选并取得了一定的成果。综合国内外流态化床分选机的技术特点,可得出以下结论:

(1)目前对流态化床分选技术的研究,主要是通过流体力学仿真软件或 PIV 技术对流态化分选设备内流场形态以及颗粒的运动行为进行研究。包括上升水流速度、流量以及给料的浓度、速度对分选设备内流场的影响等;不同密度、粒度颗粒在分选机内分选行为与运动特性的研究。

(2)对流态化床分选机的改造,除了对原有结构进行优化研究以外,主要是在流态化分选设备内添加不同的力场或流场,强化目的矿物与脉石矿物的分离,提高对粗颗粒目的矿物的回收。如 Hydro-Float 与 Novacell 将气泡引入到分选机,提高了目的矿物与脉石矿物的视密度差;在逆流分选机中添加不同倾斜角度的倾斜板,减少了粗颗粒矿物的沉降距离,提高了分选精度与处理量;在阻尼脉动流态化分选机内添加阻尼块和脉动水流,减少了脉石矿物夹杂。

国内外流态化床分选设备发展方向是,借助 CFD 仿真软件,通过优化流态化床分选机的结构,添加复合力场或流场,提高其分选粗粒级矿物的效果,扩大其在粗煤泥及金属矿选矿中的应用。

参考文献:

- [1] Bellson Awatey, William Skinner, Massimiliano Zanin. Incorporating fluidised-bed flotation into a conventional flotation flowsheet: A focus on energy implications of coarse particle recovery[J]. Powder Technology, 2015(275): 85-93.
- [2] 费之奎, 王刚, 丁光耀, 等. 粗煤泥分选设备的研究与发展现状[J]. 煤矿现代化, 2014(2): 99-102.
- [3] James A. Curry, Mansel J. L. Ismay, Graeme J. Jameson. Mine operating costs and the potential impacts of energy and grinding[J]. Mineral Engineering, 2014, (56): 70-80.
- [4] 高永明. 新型粗煤泥分选机数值模拟与试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- [5] 沙杰. 液固流化床中颗粒分选行为和运动特性的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
- [6] 李延锋. 液固流化床粗煤泥分选机理与应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学化工学院, 2008.
- [7] 黄亚飞. 应用 PIV 技术对上升流水力分选机流场的试验研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2009.
- [8] 王洪立. TBS 粗煤泥分选机及应用[J]. 煤炭加工与综合利用, 2012(6): 27-29.
- [9] 邹勇, 罗朝全, 黄伟, 等. 提高 TBS 干扰床分选机分选效果的研究[J]. 煤炭加工与综合利用, 2014(11): 46-49.
- [10] 张伟, 张红鸽, 张钊. 新型重浮耦合分选机在粗煤泥分选中的应用[J]. 煤矿安全, 2014(10): 126-129.
- [11] 卢特雷, 谢贤, 童雄, 等. 高效水力分级机的研究[J]. 国外金属矿选矿, 2008, 45(3): 18-23.
- [12] Ghosh, T., et al., 2012. Performance evaluation and optimization of a full-scale Reflux classifier. Coal Prep. Soc. Amer. J. 11(2), 2433.
- [13] Shadrack Fosu, Bellson Awatey, William Skinner, et al. Flotation of coarse composite particles in mechanical cell vs the fluidised-bed separator (The HydroFloat) [J]. Minerals Engineering, 2015(77): 137-149.
- [14] Bellson Awatey a, Homie Thanasekaran, Jaisen N. Kohmuench, et al, Optimization of operating parameters for coarse sphalerite flotation in the HydroFloat fluidised-bed separator Minerals Engineering, 2013(50-51): 99-105.
- [15] 曼科萨. 水力浮选分选机的半工业试验研究[J]. 国外金属矿选矿, 2001, 39(5): 40-44.
- [16] 谢国龙, 俞和胜, 杨颀, 等. 粗煤泥分选设备及其应用分析[J]. 煤矿机械, 2008, 29(3): 117-119.
- [17] Daniel Amariei, Daniel Michaud, Guy Paquet, et al., The use of a Reflux Classifier for iron ores; Assessment offline particles recovery at pilot scale, 2014, 62: 66-73.

(下转 37 页)

- 研究[J]. 中国稀土学报, 2008(26): 819-821.
- [19] 张江娟. 从赤泥中回收二氧化钛的初步研究[J]. 中国资源综合利用, 2003(1): 28-30.
- [20] 姜平国, 王鸿振. 从赤泥中浸出钛的研究[J]. 中国有色冶金, 2008(2): 52-54.
- [21] 李铁轺, 李军旗, 肖伟. 赤泥酸浸回收钛的实验研究[J]. 云南化工, 2009, 36(6): 18-20.
- [22] 孙道兴. 赤泥脱碱处理和有价金属钛提取研究[J]. 无机盐工业, 2008, 40(10): 49-52.
- [23] 韦斌, 傅晓恒, 王世龙. 赤泥硫酸浸出金属钛实验的动力学研究[J]. 世界科技研究与发展, 2008, 30(6): 697-699.
- [24] 蔡定建, 刘慧. 用硫酸从赤泥浸出金属钛实验的动力学研究[J]. 铝镁通讯, 2011(1): 29-31.
- [25] 廖春发, 姜平国, 焦云芬. 赤泥中钛硫酸浸出的工艺条件及动力学研究[J]. 矿业研究与开发, 2008, 28(2): 45-47.
- [26] Xiao-bo ZHU, et al. Kinetics of titanium leaching with citric acid in sulfuric acid from red mud Trans [J]. Nonferrous Met. Soc. China. 25(2015)3139-3145.
- [27] 徐本军, 丁先胜. 赤泥酸浸试验的热力学研究[J]. 轻金属, 2013(2): 27-30.

Current Research Situation of Recovering Titanium from Red Mud

Han Dongzhan, Yin Zhonglin

(Zhengzhou Non-ferrous Metals Research Institute Co., Ltd., of CHALCO, Zhengzhou, Henan, China)

Abstract: Red mud is the solid waste from alumina production. A lot of red mud does serious harm to natural ecological environment and security, the red mud also contains a range of valuable metals, such as titanium and scandium, and it may be considered secondary raw material. Processes and latest progress in recovery of titanium from red mud are summarized. Pre-roasted of red mud-leaching of roasting slag and acid leaching are introduced and their principles are analyzed. The research direction is pointed on recovering titanium from red mud and complex utilization.

Keywords: Red mud; Titanium; Comprehensive utilization

(上接 26 页)

- [18] A. Kiani, J. Zhou, K. P. Galvin. A Pilot Scale Study of Cenosphere Recovery and Concentration using the Inverted Reflux Classifier [J]. Minerals Engineering, 2015(79): 17-23.
- [19] Graeme J. Jameson, New directions in flotation machine design, Minerals engineering, 2010(23): 835-841.
- [20] Jameson, Graeme John, Method and apparatus for flotation in a fluidized bed, Patent, AU2008221231, 2008.
- [21] J. Cowburn, G. Harbort, E. Manlapig, et al). Improving the recovery of coarse coal particles in a Jameson cell [J]. Minerals Engineering, 2006(19): 609-618.
- [22] 陈文刊, 李延锋, 徐世辉, 等. 液固流化床分选粗煤泥技术发展与应用 [J]. 矿山机械, 2011(9): 75-79.
- [23] 刘佳, 秦朝阳. CSS 粗煤泥分选机分选试验研究 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2015(3): 31-33.
- [24] 闫开, 雷龙. CSS-3.0 型粗煤泥分选机在公乌素选煤厂的应用 [J]. 选煤技术, 2015(01): 32-34+37.
- [25] 赵闻达. 多产品液固流化床逐级分离过程模拟与分选研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- [26] 张厦, 章新喜, 陈峰, 等. 脉动液固流化床分选机流场的计算流体力学模拟 [J]. 选煤技术, 2012(2): 4-8.
- [27] 邢耀文, 万克记, 王见明, 等. 脉动液固流化床粗煤泥分选试验研究 [J]. 矿山机械, 2014(12): 92-96.

Application and Development Fluidised-bed Separator

Li Qiang, Shi Shuaxing, Zhang Yuejun

(Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, BGRIMM Machinery & Automation Technology, Co., Ltd., Beijing, China)

Abstract: The present paper introduces the basic separation principle and separation structures of fluidised-bed separator and analyzes its application and evolution. The results indicate that the developing tendency of fluidised-bed separator is optimizing the separation structures by means of CFD and adding composite force field or flow field to enhance the recovery of coarse particles and enlarge the application in the coarse coal slime separation and metal beneficiation.

Keywords: Coarse particles; Fluidised-bed Separator; Application; Developing Tendency