

郭 德 魏树海 张秀梅. 脉动粗煤泥分选机分选理论及其应用研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(9): 2181–2186. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.0021

Guo De, Wei Shuhai, Zhang Xiumei. Separation theory and applied research of coarse coal slime pulsation separator[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(9): 2181–2186. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.0021

脉动粗煤泥分选机分选理论及其应用研究

郭 德¹ 魏树海² 张秀梅¹

(1. 华北科技学院 环境工程学院, 北京 101601; 2. 山西恩必返重工有限责任公司, 山西 太原 030001)

摘 要: 为改善粗煤泥的分选效果, 结合国内外较细颗粒矿物分选技术和粗煤泥难选的特点, 确定采用脉动方式即跳汰方式分选粗煤泥。介绍了主要的跳汰分选学说, 研究了脉动水流作用下的跳汰分层理论, 从颗粒受力出发, 形成了跳汰分层机理的新学说。重力、浮力和压力梯度力是跳汰分层的本质力, 其中压力梯度力是可变的, 是跳汰分层的根本动力。对跳汰分层过程进行了重新认识, 确定跳汰分层主要发生在水流上升末期。在新学说的指导下, 明确了粗煤泥分选应具备的条件, 研发出新型无风源脉动粗煤泥分选机, 并以此指导生产操作。简要介绍了脉动粗煤泥分选机的结构和工作原理。生产实践表明, 脉动粗煤泥分选机的分选效果好, 分选下限达到 0.25 mm, 对 -0.25 mm 的细煤泥也有较好的分选效果。

关键词: 粗煤泥; 分选; 压力梯度力; 脉动

中图分类号: TD94 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2015)09-2181-06

Separation theory and applied research of coarse coal slime pulsation separator

GUO De¹, WEI Shu-hai², ZHANG Xiu-mei¹

(1. College of Environmental Engineering, North China Institute of Science and Technology Beijing 101601, China; 2. Shanxi Enbiou Heavy Ind. Co. Ltd., Taiyuan 030001, China)

Abstract: In order to improve the separation effect of Coarse coal slime, according to domestic and international technology of mineral separation of finer particles and coarse coal slime, this paper applied the method of pulsation, otherwise known as jigging, to separate the coarse coal slime. Based on the introduction of the main theories of jigging separation, the stratification theory of jigging concerning pulsation current of water and analysis of force on the particles, the new theory of jigging stratification mechanism was illustrated. There is a theory that gravity, buoyancy and pressure gradient force contribute to the jigging separation. Moreover, the pressure gradient force is variable which is the fundamental driving force of jigging stratification mechanism. Recognition of the jigging separation process indicate that jigging stratification takes place mainly at the end of the upward water flow. On the basis of the new theory of jigging stratification, the proper conditions of coarse coal slime separation have been explicated, a new type of coal slime pulsation separator without wind source has been designed to guide production operation. After the brief introduction of the new coarse coal slime separator structure and working principle. Experiments show that the new coarse coal slime separator meet our requirements. Moreover, results of the separator prove that not only lower limit of separation can achieve at 0.25 mm, but also the separation effect is ideal in terms of particles with size of -0.25 mm.

Key words: coarse coal slime; separation; pressure gradient force; pulsation

粗煤泥是指粒度近于煤泥、通常在 0.30 ~ 0.50 mm 以上、不宜用浮选处理的颗粒。对于炼焦煤而言,准备好的原煤中 3.00 ~ 0.30 mm 的粗煤泥含量多数在 20% ~ 45%。粗煤泥中的煤与矿物质解离充分,为粗煤泥降灰脱硫提供了有利条件^[1]。粗煤泥分选是选煤生产中的重要环节,选煤厂应重视粗煤泥的分选效果以提高总体精煤产率。

跳汰机、重介质旋流器等重选设备和浮选机、浮选柱等浮选设备成功实现了粗粒煤和细粒煤的分选,但它们的本质性能和操作条件决定了其对粒度介于重选和浮选有效粒度附近的粗煤泥分选效果十分不理想^[2]。因此研发性能可靠、分选效果好、适用于宽粒度范围的粗煤泥分选设备十分必要。目前,国内外粗煤泥分选设备主要有螺旋分选机、煤泥重介质旋流器、干扰床分选机(TBS)和复锥水介质旋流器等^[3-4],它们都有各自的优缺点。为进一步改善粗煤泥的分选效果特别是宽粒度级粗煤泥的分选效果,在理论研究的基础上,开发出了脉动粗煤泥分选机。

1 脉动粗煤泥分选机的研制基础

纵观现有的粗煤泥分选设备,虽然各有其适用范围和特点,但其局限性和缺点也较为突出。例如目前使用较多的干扰床分选机仅适合于窄粒级的中等或易选的粗煤泥的分选,无法适应宽粒度或难选煤的分选^[5-6]。干扰床分选机理论上有效分选粒度为 2.00 ~ 0.25 mm,但工业实践证明,其有效分选粒度为 1.00 ~ 0.50 mm^[7]。

跳汰分选在选矿(煤)领域应用十分广泛,适用的粒度范围宽。在选矿领域,跳汰分选的下限可以达到 0.074 mm^[8]。早在 20 世纪 80 年代,国外即对末煤跳汰机有深入研究^[9],其研制的跳汰机使用微处理机控制,可调节脉动周期长短,分选粒度下限可达 0.10 mm,并具有给料调节范围大、易于改变分选密度、给料粒度变化适应性强、给料质量波动调节范围广、宽粒度物料分选效果好等优点。跳汰可以实现宽粒度按密度分选,物料的粒度、形状虽然影响分选效果,但生产中是可以做到使其影响最小的。跳汰分选设备在选矿和选煤方面的成功应用经验,为粗煤泥分选研究提供了一个方向,为借鉴选矿用跳汰机的结构和分选理念设计一种全新的煤用粗煤泥分选机提供了理论和思想基础。

对于 -6.00 mm 粒级物料的跳汰分选,应采用特殊脉动水流波形才能获得理想分选效果。对比粗煤泥的粒度、密度,若应用跳汰原理对粗煤泥进行有效分选,也应采用特殊脉动形式的跳汰周期曲线。经进

一步分析研究其他行业与粗煤泥粒度相近物料的分选方法后,初步认定采用特殊形式的跳汰可以对粗煤泥进行有效分选。

2 脉动粗煤泥分选理论研究

脉动粗煤泥分选机理和跳汰分选原理基本相同。较粗颗粒分选而言,粗煤泥分选所采取的周期曲线有其特殊之处。正确认识跳汰分选机理对指导确定脉动条件下的粗煤泥分选生产操作具有重要意义。

2.1 跳汰分选学说研究现状

在 100 多年的跳汰分层理论研究过程中主要形成了以下几种学说:速度与加速度学说(包括自由沉降末速度分层学说)、干扰沉降末速度分层学说、吸啜分层学说和初加速度学说、动力学分层学说、位能学说、概率统计分层学说^[10]、重液分层学说^[11]、等压强同层位学说^[12]。这些学说从不同侧面解释了跳汰分层机理,对认识跳汰分层过程和指导跳汰生产起到了一定的指导作用。但跳汰分层过程十分复杂,到目前为止还没有形成大家认可的、完善的跳汰分层理论。

就跳汰分层原理而言,目前在选煤界形成了以下 3 点共识:①跳汰分层基本上是按密度进行分层的,同时也受到粒度的影响。分层后,相同粒度的颗粒,密度大者分布层位靠下;相同密度的颗粒,粒度大者分布层位也相对靠下;②跳汰过程离不开床层,床层是颗粒按密度分层的载体;③跳汰过程是周期性水流脉动过程,以保证一定的松散度。松散度过大或过小,对矿物按密度分层都不利。

2.2 跳汰分层的本质力

2.2.1 颗粒在流体中的受力分析

固体颗粒在液体中的受力^[13]可表示为

$$F = F_g + F_b + F_p + F_a + F_{sa} + F_m + F_s + F_1 \quad (1)$$

式中, F_g 为重力; F_b 为浮力; F_p 为压力梯度力; F_a 为附加质量力; F_{sa} 为 Basset 力; F_m 为 Magans 力; F_s 为 Saffman 力; F_1 为颗粒受到的曳力。

此外还有范德华力、静电力、液体桥力、热泳力、碰撞力、摩擦力等颗粒间直接或间接的作用力,但这些都较为微弱。上述受力分析全面反映了固体颗粒在液体中的受力情况。

对于大家熟知的重力和浮力不再介绍,下面主要介绍其他受力。

(1) 压力梯度力。颗粒在有压力梯度的流场中运动时,除了受流体绕流阻力外,还受到压力梯度引起的作用力,称之为压力梯度力。压力梯度力与该颗粒在介质中分布的压力梯度成正比。压力梯度力表

示为

$$F_p = V \frac{\Delta P}{\Delta L} \quad (2)$$

式中, V 为颗粒体积; ΔP 为作用在颗粒上的压力差; ΔL 为颗粒长度 (ΔL 长度上存在 ΔP 的压差)。

(2) 附加质量力。颗粒在流体中作加速运动时, 引起周围流体做加速运动。由于流体有惯性, 表现为对颗粒有一个反作用力。这时, 使颗粒运动的力将大于颗粒本身的惯性力, 就好像颗粒质量增加了一样。这部分大于颗粒本身惯性力的力叫附加质量力。其大小等于颗粒同体积流体以加速度运动时的惯性力的一半。

(3) Basset 力是颗粒在黏性流体中做变速运动产生的增加阻力。

(4) Magnus 力是颗粒在流场中旋转产生的一种力。

(5) Saffman 力又称为 Saffman 升力, 是固体颗粒在有速度梯度的流场中运动时, 由于颗粒两侧的流速不同, 产生的一个由低速指向高速方向的升力。

(6) 曳力是流体与固体颗粒之间有相对运动时, 颗粒表面对流体有阻力, 流体则对颗粒表面有曳力。曳力与相对速度方向相反, 曳力与阻力是一对作用力与反作用力。

2.2.2 跳汰分层的本质力

跳汰分层过程也是一个颗粒受力运动的过程。受力运动的结果是颗粒按密度分层, 而与粒度和形状基本无关。这就决定了主导跳汰分层的作用力与重力相比, 一定是只与密度有关而与粒度、形状无关的力。因此通过对颗粒在液体中的受力进行分析鉴别即可找出跳汰分层的主要作用力。

分析式(1)可知, 除重力和浮力外, 只有压力梯度力具备作为跳汰分层动力的特点和性质, 其他力均不具备这个特征。压力梯度是指沿流体流动方向单位路程长度上的压力变化, 压力梯度力则是压力梯度对固体颗粒产生的作用力。在加速上升的水流中, 固体颗粒上下所受压力不同而产生压差, 从而形成压力梯度力。设水流上升加速度为 a , 则在加速上升的水流中, 颗粒所受浮力为 $\rho(g+a)V$ 。因此压力梯度力实质是浮力的另一种表现形式, 只是这个浮力不是由液体静压形成的, 而是由液体的动压差(压力梯度)形成的, 是随 a 的变化而变化的, 所以又称为动浮力。压力梯度力具有和浮力相同的性质。压力梯度的单位是 g/cm^3 , 它与密度的单位完全一样。压力梯度力的方向由高压区指向低压区。

综上所述, 压力梯度力是跳汰分层的根本动力之

一, 决定跳汰分层的本质力为重力、浮力和压力梯度力。对某一颗粒在性质不变的介质中运动而言, 重力、浮力是固定的, 而压力梯度力是变化的。压力梯度力是跳汰分层最重要的本质力之一。在上升介质流中, 压力梯度力为颗粒提供了一个附加浮力, 致使颗粒在流体中可以浮起并实现按密度分层^[14]。

在跳汰过程中, 动力源(压缩空气)提供给水的能量转变成水流向上的动力。由于密实床层的存在, 水流向上的能量不能立即释放成动能, 使得床层下的压力升高, 这样就在床层的上、下面之间形成较大的压力梯度。如果没有床层的存在, 运动水流就不可能产生压力梯度。床层上下的压力梯度所形成的压力梯度力足以将整个床层浮起。由此可见, 只有在一定的条件下才能形成足够大的压力梯度力。

2.3 跳汰分层过程的重新认识

对于一个跳汰周期, 水流运动特性分为4个阶段: 速度增加的上升初期、速度减小的上升末期、速度增加的下降初期和速度减小的下降末期^[15]。从床层变化角度研究跳汰分层过程, 可将跳汰过程分为2个阶段: 分选准备阶段(水流上升初期)、分选阶段(水流上升末期、水流下降初期和水流下降末期)。

(1) 分选准备阶段。

一个跳汰周期开始的瞬间, 加速水流穿过筛板作用于床层底部, 在压力梯度力作用下, 床层被托起, 整个床层和床层内的颗粒都受到压力梯度力的作用。这时床层还是较为紧密的堆积状态, 颗粒还不能产生位移置换而分层。这是分层准备阶段, 为分层准备了压力梯度力。

在这个阶段, 因床层内存在空隙, 空隙内存在渗流、窜流等, 存在压力梯度传递效应。床层被托起上升的过程中, 床层上部没有约束力, 在压力梯度力和浮力的共同作用下(称之为综合浮力), 上部物料会出现先松散分层的现象。在床层空隙内, 细小颗粒通过钻隙也可以实现分层。

(2) 分选阶段。

在床层上升的末期, 由于压力梯度力减小和重力的存在, 下层物料开始松散, 并逐步向上层扩散。在床层松散的瞬间, 随着压力梯度力的不断减小, 不断会有密度大于综合浮力的颗粒开始下沉, 直至压力梯度力消失, 所有颗粒全部变为下沉。压力梯度力作用的结果是不同密度的颗粒被推送到不同的高度, 从而出现位移置换, 完成一次分层过程。由于压力梯度力只在瞬间发挥作用, 每个周期只能对颗粒置换移动较小的距离, 因此需要多个周期才能完成整个床层的分层。

床层自上升开始便具有压力梯度,由于床层没有松散,所以分层主要发生在上升后期床层开始松散之后。

在床层下降期,基本遵守干扰沉降规律。但由于床层松散度不高,属于高密集状态,因此不能用颗粒干扰沉降而应用高密集态群体沉降描述下降过程。在床层下降期,只是不同密度颗粒群的干扰沉降而基本不存在分层作用,仅对能钻隙的细颗粒有一定的分层作用。至此完成一个完整的分层过程。

3 粗煤泥跳汰分选难点及应采取的措施

粗煤泥脉动分选的难点主要体现在:①随着粒度的减小,比表面急剧增大,物料易出现抱团、黏附、聚集等现象而导致细颗粒物料群不容易松散。床层不能及时松散,就无法体现压力梯度力的作用;②粒度较小,压力梯度力表现不足,同时不同密度的细颗粒混杂均匀,造成粗煤泥难分选;③采用的上升水流过大,容易将各种密度的颗粒混杂在一起而无法分选;④整个分选过程受到的脉动分选次数少,也是粗煤泥分选精度低的一个重要原因。

在应用脉动方式分选粗煤泥时,结合粗煤泥分选理论,经分析确定应从以下方面改善粗煤泥的分选效果:①保持一定的床层厚度、一定的振幅和频率,适度的水流加速度,充分发挥压力梯度力的作用;②在水流脉动特性方面,要特别重视上升流的速度和加速度,同时采用复合振荡水流,即在一个主振周期内加入一个高频附加周期,通过高低频率复合叠加,改善脉动水流对细粒的分选效果。特别是在水流上升末期和下降初期,加入高频附加周期使该阶段水流运动的负加速度减少,推动细粒物料继续在松散条件下按密度分选。采用复合振动脉动分选,可减少筛下水量,减轻细粒高密度物料未经分选就被上升流携带进轻产品的问题;③在重产物的排料方式上,除排料道外,还应按照入料筛分浮沉组成特征,采用人工床层排放重产物。轻产物在水平动作用下越过溢流堰而排出,溢流堰的高度和造型都必须适合轻产物的特性,以消除细粒物料不应有的错配和混杂。

4 脉动粗煤泥分选机的研制

在借鉴跳汰分选原理的基础上,开展有针对性的脉动粗煤泥分选理论研究。根据对跳汰分层理论的重新认识和粗煤泥分选的特点,设计研发了脉动粗煤泥分选机。

在实验室,用试验机对不同煤样进行试验,探索设备结构、周期曲线、操作参数对分选效果的影响,为

脉动粗煤泥分选机的设计奠定基础。在完成试验机试验基础上设计制造出了成型机。脉动粗煤泥分选机不用风源,没有鼓风机、风包等附属设备。它由机体、脉动机构、筛板和排料装置、控制柜等组成。机体分为 2 个隔室和 1 个隔室 2 种型号。图 1 为 1 个隔室的脉动粗煤泥分选机的结构示意图。物料从机体头部给入,在脉动机构作用下,在分选室内形成脉动水流,使物料在分选室中进行松散、分层。精煤从溢流口排出机外,重产品(矸石或中煤)产品分别从透筛和排料闸门经排料道排到机体下部,用输送机排出机外。精煤和重产品经脱泥、脱水后成为最终产品。

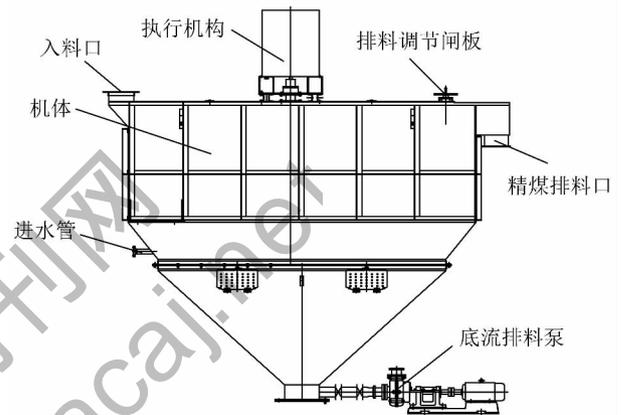


图 1 脉动粗煤泥分选机结构

Fig. 1 Structure chart of coal slime pulsation separator

5 脉动粗煤泥分选机的工业应用

首台脉动粗煤泥分选机成功应用于神华乌海能源有限责任公司老石旦选煤厂。工艺流程如图 2 所示。该厂的精煤磁选尾矿经旋流器浓缩后的粗煤泥灰分在 14.50% ~ 17.50%,经过脱除 -0.25 mm 的细泥脱水后的灰分在 12% ~ 15%,不符合总精煤灰分 $\leq 11.00\%$ 的要求。这部分粗煤泥直接掺入精煤,因其灰分较高,造成总体精煤产率降低。采用脉动粗煤泥分选机后,溢流灰分稳定在 $\leq 14\%$,经脱除 -0.25 mm 的细泥和脱水后,粗煤泥精煤的灰分 $\leq 10.50\%$,满足生产实际要求。尾煤灰分一般 $\geq 31.00\%$,可经回收脱水后掺入中煤。

在生产正常后,进行单机检查。脉动粗煤泥分选机的入料、精煤和尾煤筛分试验结果见表 1;不同粒级的可能偏差、不完善度和数量效率见表 2。

从表 1 可以看出:①脉动粗煤泥分选机不但对 +0.25 mm 的各粒级物料有很好的分选效果,而且对 -0.25 mm 甚至 -0.125 mm 的细颗粒物料也有较好的分选效果;②脉动粗煤泥分选机不受等沉比的限制,适合粒度组成很宽的物料的分选。

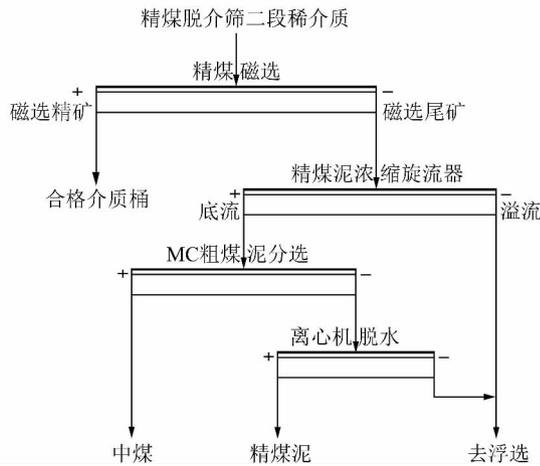


图2 脉动粗煤泥分选机分选粗煤泥流程

Fig. 2 Separation flow of the coal slime pulsation separator

表1 入料、精煤和尾煤筛分试验结果

Table 1 Results of the screening test on feeding, clean coal and tailing

粒级/ mm	入料		精煤		尾煤	
	产率/ %	灰分/ %	产率/ %	灰分/ %	产率/ %	灰分/ %
+3.00	22.45	11.76	11.80	10.26	0	0
3.00~0.50	38.34	11.62	34.98	9.27	35.46	23.77
0.50~0.25	24.87	14.23	29.72	9.34	26.17	23.30
0.250~0.125	10.19	22.24	6.42	13.06	11.01	41.66
-0.125	4.15	41.60	17.08	31.76	27.36	52.91
合计	100	14.63	100	13.49	100	33.59

表2 不同粒级的可能偏差、不完善度和数量效率

Table 2 Summary sheet of E, I and organic efficiency with different size fraction

粒级/ mm	可能偏差 E/ (g·cm ⁻³)	不完善度 I	数量效率/%
+0.50	0.085	0.184	91.23
+0.25	0.100	0.210	90.34
+0.125	0.110	0.230	89.08
0.50~0.25	0.110	0.240	88.65
0.250~0.125	0.140	0.270	78.05

由表2可知: ① 脉动粗煤泥分选机对 +0.125 mm 的物料各粒级具有较好的分选效果; ② 按《煤用重选设备分选下限评定方法(1)》(MT/T 811—1999) 的规定, 脉动粗煤泥分选机的分选下限为 0.25 mm; ③ 对 0.250~0.125 mm 粒级也有显著的分选效果。虽然没有具体对 -0.125 mm 的物料进行浮沉试验、评定分选效果, 但从表1中可知, 该部分物料入料的灰分为 41.60%, 精煤中的灰分为 31.76%, 尾煤中的灰分为 52.91%, 表明 -0.125 mm 的物料

也得到了较好的分选。

6 个多月的生产实践表明: 脉动粗煤泥分选机的分选精度和分选效率高; 分选粒级宽; 设备处理量大, 单位面积处理 5~7 t/h, 用水量 ≤ 1 m³/t; 生产操作简单, 调整方便, 能耗低。

6 结 论

(1) 粗煤泥分选是选煤生产中十分重要的环节, 研发性能可靠、分选效果好、适应于宽粒级粗煤泥分选的设备十分重要。

(2) 重力、浮力和压力梯度力是脉动分选的本质力, 其中压力梯度力是可变的, 是脉动分层的根本动力。脉动分层主要发生在水流上升末期。

(3) 脉动粗煤泥分选机的分选效果好, 分选下限为 0.25 mm, 对 -0.25 mm 的物料也有较好的分选效果。

参考文献:

[1] 于近喜, 刘文礼, 姚嘉胤, 等. 粗煤泥分选设备及其特点对比分析[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(7): 114-117.
Yu Jinxi, Liu Wenli, Yao Jiayin, et al. Comparison analysis on coarse slime preparation equipment and features [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(7): 114-117.

[2] 刘文礼, 陈子彤, 位革老, 等. 干扰床分选机分选粗煤泥的规律研究[J]. 选煤技术, 2007, 35(4): 11-13.
Liu Wenli, Chen Zhitong, Wei Gelao, et al. Study on law of coarse coal slime separation by hindered bed separator [J]. Coal Preparation Technology, 2007, 35(4): 11-13.

[3] 曹育洵, 郭 德, 衡玉华, 等. 我国粗煤泥分选设备现状[J]. 选煤技术, 2010, 38(1): 64-66.
Cao Yuxun, Guo De, Heng Yuhua, et al. The status quo of coarse slime separation equipment in China [J]. Coal Preparation Technology, 2010, 38(1): 64-66.

[4] 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, 2008.

[5] 刘文礼, 张瑞文, 赵银荣, 等. 干扰床分选机对粗煤泥的分选试验研究[J]. 矿业工程研究, 2010, 25(1): 9-10.
Liu Wenli, Zhang Ruiwen, Zhao Yinrong, et al. Study on the separation experiment of the coarse slime by the teetered bed separator [J]. Mineral Engineering Research, 2010, 25(1): 9-10.

[6] 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, 39(9): 75-79.
Chen Wenkan, Li Yanfeng, Xu Shihui, et al. Development and application of technology for separating coarse coal slime with liquid-solid fluidized beds [J]. Mining Machine, 2011, 39(9): 75-79.

[7] 张旭波, 郭永华, 张文军, 等. 介质密度对液固流化床粗煤泥分选效果的影响[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(8): 117-120.
Zhang Xubo, Guo Yonghua, Zhang Wenjun, et al. Study on medium density affected to coarse slime separation effect of liquid-solid fluidized bed [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(8): 117-

- 120.
- [8] 王淀佐,卢寿慈,陈清如,等.矿物加工学[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003:161-162.
- [9] Bowman L.改进型末煤跳汰机可有效地分选粉煤[J].矿山机械,1988,16(11):53-55.
Bowman L. Improved fine coal jig separate coal powder effective[J]. Mining Machinery,1988,16(11):53-55.
- [10] 张荣曾,韦鲁滨,付晓恒.跳汰机中脉动水流流体动力学研究[J].煤炭学报,2002,27(6):644-648.
Zhang Rongzeng,Wei Lubin,Fu Xiaoheng. Research on fluid kinetics of pulsating current in jig washer[J]. Journal of China Coal Society,2002,27(6):644-648.
- [11] 姚昆亮.跳汰分层准重液机理探讨[J].选煤技术,1999,27(3):17-20.
Yao Kunliang. Investigate the mechanism of jigging stratification pseudo heavy liquid [J]. Coal Preparation Technology,1999,27(3):17-20.
- [12] 陈迹.“等压强同层位”重选物料分选机理[A].第15届国际选煤大会论文集[C].徐州:中国矿业大学出版社,2006:71-83.
- [13] 张文斌,祁海鹰,由长福,等.固体颗粒在流化床中的全受力分析[A].中国工程热物理学会燃烧学学术会议论文集[C].南京,2000:214-222.
Zhang Wenbin,Qi Haiying,You Changfu,et al. Analysis of the solid particles in the fluidized bed in full force [A]. Combustion Science Conference of China Engineering Thermal Physics Institute [C]. Nanjing,2000:214-222.
- [14] 魏树海,郭德.跳汰分层机理的研究与探讨[J].煤炭加工与综合利用,2014,32(3):7-13.
Wei Shuhai,Guo De. Exploration of the mechanism of stratification in jigging process [J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization,2014,32(3):7-13.
- [15] 张荣曾,付晓恒,韦鲁滨,等.跳汰机床层松散与分层的流体动力学研究[J].煤炭学报,2003,28(2):193-198.
Zhang Rongzeng,Fu Xiaoheng,Wei Lubin,et al. Fluid kinetics study on jig washer bed dilation and stratification [J]. Journal of China Coal Society,2003,28(2):193-198.