

叶贵川,马力强,黄根,等.螺旋分选机动力学分析及参数优化探讨[J].煤炭学报,2017,42(S2):479-485. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0271

YE Guichuan, MA Liqiang, HUANG Gen, et al. Dynamic and optimization analysis of spiral separator[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S2):479-485. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0271

## 螺旋分选机动力学分析及参数优化探讨

叶贵川,马力强,黄根,于跃先,孙先凤,吴伦

(中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院,北京 100083)

**摘要:**为了探索螺旋分选机主要结构参数对颗粒运动规律的影响,基于螺旋线的形成特性,利用微元的思想将颗粒在螺旋槽上复杂的受力进行简化,推导出集物料性质、螺旋分选机结构参数为一体的数学模型;以1.0~0.5 mm粒度级的不同密度级粗煤泥为入料,探究了不同密度级颗粒在螺旋分选机出料端沿径向的分布情况,与数学模型分析出的结果进行对比验证,并分析了螺距、流量、螺旋槽内径和槽深等参数对颗粒达运动平衡后径向距离的影响;结果表明:提出的数学模型可以定性分析颗粒在螺旋分选机中的运动行为,颗粒密度越大,其平衡半径越靠近螺旋槽内缘;颗粒达平衡状态后的径向距离随螺距、流量以及内径的减小而减小,随槽深的减小而增加;较小的螺距、较小的内径和较大的槽深有利于粗煤泥的分选。

**关键词:**螺旋分选机;粗煤泥;动力学分析;螺距

中图分类号:TD45

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2017)S2-0479-07

### Dynamic and optimization analysis of spiral separator

YE Guichuan, MA Liqiang, HUANG Gen, YU Yuexian, SUN Xianfeng, WU Lun

(School of Chemical and Environment Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** For the purpose of exploring the effect of parameters on particle moving, the force of particles in a spiral separator was simplified based on infinitesimal method and the characteristic of spiral concentrator. The mathematical model including the particle features and the parameters of spirals was proposed to analyze the effect of parameters on particle moving. Separation experiments were conducted by using different densities materials with the size between 1.0 mm to 0.5 mm in the experimental spiral concentrator and the results were used to verify the accuracy of the model. Effect of parameters on particle moving was analyzed based on the model. The results showed that the radial distance of balanced particles decreases with the increase of the density of particles. Equilibrium radius decreases with the decrease of pitch, flow rate and internal diameter. However, equilibrium radius decreases with the increase of the depth of trough. It is beneficial to coarse coal slim separation using spiral concentrator with lower internal diameter, higher depth of the trough and smaller pitch.

**Key words:** spiral concentrator; coarse coal slime; dynamics analysis; pitch

我国炼焦煤选煤厂多采用重选与浮选相结合的工艺,随重选设备的大型化,-1 mm的煤泥得不到有效的分选,同时浮选工艺对+0.25 mm煤泥的分选效

果较差<sup>[1]</sup>,因此,提高1~0.25 mm粗煤泥的分选精度和分选效果对完善我国炼焦煤分选工艺具有重要意义。选煤厂常用的粗煤泥分选设备主要有煤泥重

收稿日期:2017-03-03 修回日期:2017-08-28 责任编辑:许书阁

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51504262)

作者简介:叶贵川(1993—),男,重庆人,博士研究生。E-mail:guichuanye@126.com。通讯作者:马力强(1963—),男,辽宁东港人,教授,博士。Tel:010-62331528, E-mail:mlqiang@sina.com

介旋流器、TBS 干扰床、水介质旋流器、螺旋分选机等。相对于其他粗煤泥分选设备,螺旋分选机具有结构简单、无动力部件、操作维护简单但分选密度较高等特点<sup>[2-3]</sup>,在澳大利亚、南非等国用于精选 0.076 ~ 3 mm 粉煤<sup>[4-6]</sup>。我国在 20 世纪 80 年代将螺旋分选机应用于煤炭分选,先后研制出 XL 系列、SML 系列、ZK-LX 系列螺旋分选机以及振动螺旋干法分选机,多用于动力煤选煤厂和可选性较好的炼焦煤选煤厂<sup>[7-10]</sup>。

为完善螺旋分选设备及工艺、提高处理量、降低分选密度,国内外学者对螺旋分选机水流特性、颗粒运动特性以及振摆等外加力场对分选效果的影响开展了系统的研究<sup>[11-20]</sup>。这些研究在取得一定技术成果的同时,参数对颗粒在螺旋槽面上的分带规律仍不够明确,缺乏一个可以指导设备优化设计的数学模型。

## 1 螺旋分选机动力学分析

颗粒进入螺旋槽后,在起始阶段主要根据颗粒间密度、粒度等物理差异进行分层,重颗粒沉于液流下层,轻颗粒悬浮在液流上层;下层水流速度小,颗粒所受的离心力也相对较小,处于下层的颗粒主要在重力、摩擦力影响下移向内缘;上层水流速度大,颗粒所受的离心力相对较大,处于上层的颗粒主要在离心力作用下移向外缘,轻重颗粒沿径向实现分带;颗粒在径向不发生位移、沿着固定的螺旋线运动时即达运动平衡阶段,在出料端由产品截取器得到所需产品<sup>[21]</sup>。

对于颗粒在螺旋分选机中的动力学分析,主要难点在于:螺旋槽面在纵向和径向均有一定倾斜度,颗粒在这样一个空间三维曲面上的受力较为复杂。卢继美<sup>[22]</sup>、沈丽娟<sup>[23]</sup>、赵广富<sup>[24]</sup>、孙铁田<sup>[25]</sup>等对颗粒在螺旋分选机中的受力采用自然坐标系、两套直角坐标系等分析方法做过相应阐述,得出了颗粒达运动平衡后的纵向速度公式,但公式较为复杂,且部分参数难以确定,难以直观分析不同颗粒性质、不同结构参数对分选效果的影响。P. C. KAPUR<sup>[26-27]</sup>、S. K. DAS<sup>[14]</sup>等学者通过优化水流作用力的表达方式,简化了数学模型,为颗粒在螺旋分选机中的动力学分析提供了新的思路,但他们所得出的数学模型较为复杂,且没有考虑横截面形状对分选效果的影响。本文基于螺旋线的形成特性,利用微元的思想将颗粒在螺旋槽上复杂的受力进行简化,借鉴国外学者对水流作用力的优化方法,改进了水流厚度的计算公式,引入了横截面形状对分选效果的影响,进一步完善了颗粒在螺旋分选机中的动力学分析。

颗粒在螺旋分选机中主要受以下几个力作用:

(1) 重力  $G$

$$G = \pi d^3 g (\sigma - \rho) / 6 \quad (1)$$

式中,  $d$  为颗粒直径,  $m$ ;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $\sigma$  为矿物密度,  $kg/m^3$ ;  $\rho$  为介质密度,  $kg/m^3$ 。

(2) 离心力  $F_c$

$$F_c = \frac{\pi d^3 (\sigma - \rho) v^2 (\cos \alpha)^2}{6 r} \quad (2)$$

式中,  $r$  为颗粒距离中心轴的径向距离,  $m$ ;  $v$  为颗粒的纵向速度,  $m/s$ ;  $\alpha$  为纵向倾角,  $(^\circ)$ ,  $\tan \alpha = U / (2\pi r)$ ,  $U$  为螺距,  $m$ 。

(3) 水流作用力

水流对颗粒的作用力比较复杂,可将螺旋分选机中颗粒的水流作用力分解为两个力,一个是颗粒在槽面所受的牵引力,一个是促进颗粒分层的法向举力<sup>[14,26-27]</sup>。牵引力  $F_d$  表示水流在纵向和横向两个方向上的合力;牵引力与纵向分力的夹角用  $\delta$  表示;法向举力用  $F_1$  表示,与牵引力有关。牵引力、夹角、法向举力可由式(3) ~ (5) 求出:

$$F_d = \frac{\rho g \pi}{4} d^2 h \sin \alpha \quad (3)$$

$$\tan \delta = 11h/r \quad (4)$$

$$F_1 = kF_d \quad (5)$$

其中,  $h$  为水流厚度,表示水流在螺旋槽上某一径向距离处的厚度,  $m$ ,在计算时可由水流平均厚度  $h_m$  代替,以简化数学模型<sup>[14,26-27]</sup>;  $k$  为系数。分析螺旋分选机中法向举力时取 0.33<sup>[14,26-27]</sup>。

基于螺旋分选机水流厚度内缘较薄外缘较厚的事实,假定螺旋分选机槽宽的中点处的水流厚度代表螺旋槽横截面上的平均水流厚度<sup>[14,26-27]</sup>,水流液面曲线为槽底曲线沿水流厚度方向上的等距曲线,即槽底曲线上的任意一点与水流液面曲线的法向距离均为  $h_m$ 。将水流液面曲线和槽底曲线围成的横截面分成若干微元,所围成的横截面及微元截面如图 1 所示,图中  $C_y$  表示槽深,  $r_i$  表示内径,  $r_o$  表示外径。

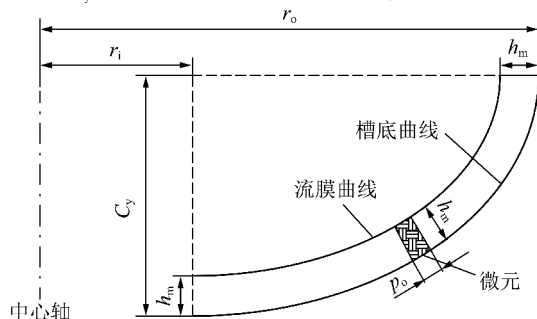


图 1 螺旋槽及微元横截面示意

Fig. 1 Cross-section of a spiral separator

每个微元的水力半径可表示为

$$R_0 = \frac{A_0}{P_0} = \frac{h_m P_0}{P_0} = h_m \quad (6)$$

式中,  $R_0$  为微元水力半径, m;  $A_0$  为微元面积,  $m^2$ ;  $P_0$  为微元湿周, m;  $h_m$  为微元水流厚度, m。

水流在螺旋槽中的流动可视为明渠流动, 明渠流平均速度可以用  $V_m = KR\sqrt{S}$  表示<sup>[14,26-27]</sup>。利用微元思想, 螺旋槽横截面上的平均速度可表示为

$$V_m = \int_{r_i}^{r_o} KR_0\sqrt{S} dr \quad (7)$$

式中,  $S$  为坡度, 且  $S = \tan \alpha$ ;  $K$  为常数, 螺旋分选机中,  $K = 26.4/d^{1/6}$ <sup>[14,26-27]</sup>;  $d$  为颗粒直径, m。

螺旋槽横截面上平均速度也可以表示为

$$V_m = \frac{Q}{A} \quad (8)$$

式中,  $Q$  为流量,  $m^3/h$ ;  $A$  为横截面面积,  $m^2$ 。

已知槽底曲线公式  $f(r)$  时, 结合高等数学几何知识, 利用以下两个条件容易求得水流液面曲线  $g(r)$ 。

条件 1: 槽底任意一点与水流液面曲线的法向距离均为  $h_m$ ; 条件 2: 槽底任意一点的切线方向与  $h_m$  所代表的直线方向相互垂直。

横截面面积可由下式求出(曲线形状位于直角坐标系第 4 象限)

$$A = \int_{r_i}^{r_o} (0 - f(r)) dr - \int_{r_i}^{r_o-h_m} (0 - g(r)) dr \quad (9)$$

联立式(6)~(9), 即可得到流量  $Q$  和平均水流厚度  $h_m$  的函数关系式。

需要注意的是, 利用槽底曲线求出的水流液面曲线公式往往比较复杂, 用定积分求面积时较为困难。当槽底曲线为常见的曲线时, 通过 Solid Works 等绘图软件绘制一条等距曲线, 利用槽底曲线公式的平移、缩放等变换手段, 得到一条曲线公式较简单且与等距曲线近似的新曲线  $G(r)$  代替  $g(r)$ , 进而求得横截面面积。

以实验室现有螺旋分选机槽面为例, 螺距  $U = 0.24$  m, 槽深  $C_y = 0.046$  m, 内径  $r_i = 0.025$  m, 外径  $r_o = 0.2$  m, 槽底曲线公式

$$f(r) = 0.0833(r - 0.2)^{1/3} \quad (10)$$

通过 SolidWorks 软件容易发现, 立方抛物线的等距曲线可近似视为该曲线垂直平移而得, 因此水流液面曲线近似视为  $G(r)$  表示:

$$G(r) = 0.0833(r - 0.2)^{1/3} + h_m \quad (11)$$

颗粒直径取  $d = 0.00075$  m, 联立式(6)~(11)可得流量与平均水流厚度的函数方程, 利用 Matlab

可绘制出流量与平均水流厚度的关系曲线, 如图 2 所示。

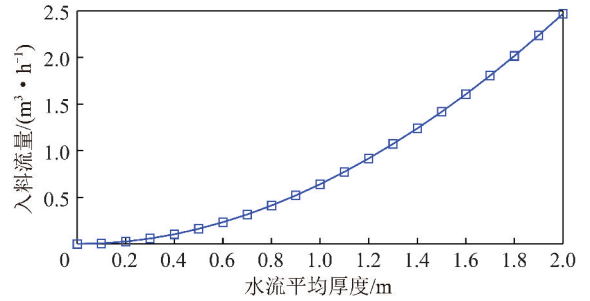


图 2 流量与平均水流厚度的关系曲线

Fig. 2 Relationship between flow rate and film thickness

本文提出的方法, 针对槽面固定的螺旋分选机, 可以直接从曲线中得出不同流量下螺旋分选机中的平均水流厚度, 优化了原有的求平均水流厚度的方法<sup>[14,26-27]</sup>, 为后续数值计算提供了便利。

#### (4) 摩擦力

摩擦力用  $F_f$  表示, 为了便于分析槽底和悬浮颗粒的摩擦力, 可用下式统一表征槽底和悬浮颗粒所受的摩擦力<sup>[14,26-27]</sup>:

$$F_f = \tan \varphi F_N \quad (12)$$

式中,  $\tan \varphi$  为常数, 取  $0.5$ <sup>[14,26-27]</sup>;  $F_N$  为法向合力, N。

颗粒达平衡状态后沿固定的螺旋线运动, 螺旋线可以看作是颗粒沿圆心做圆周运动的同时, 匀速下移所形成的位移曲线。在螺旋槽面上取一个足够小的微元槽面, 颗粒在微元槽面上沿螺旋线做微小的位移时, 在竖直方向上的位移可以忽略不计, 颗粒可近似看作沿着微元槽面做圆周运动, 这就对颗粒在螺旋分选机中的动力学分析进行了简化。颗粒在螺旋分选机中的受力分析如图 3 所示。

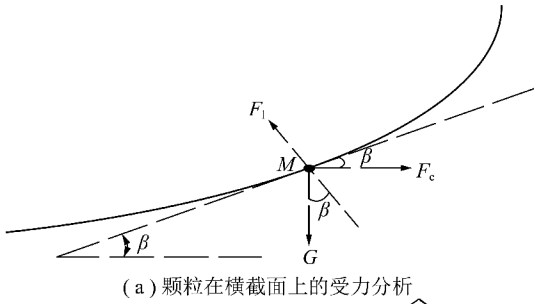
图 3(a) 表示颗粒 M 在横截面上的受力分析, 重力和离心力方向是固定不变的, 可分解为沿法向的力和沿槽面的力  $F_c$ ,  $\beta$  表示槽底曲线在 M 点的横向倾角, 其正切值表示槽底曲线在 M 点的斜率值; 图 3(b) 表示颗粒 M 在微元断面上由 A 点沿螺旋线运动到 B 点后的受力分析, A, B 距离足够小时, 可忽略颗粒在竖直方向上的位移, 则颗粒视为绕点 C 做圆周运动, CA, CB 所形成的角  $\alpha$  即为颗粒在 B 处的纵向倾角。

分别在纵向、法向、径向建立颗粒受力平衡方程可得

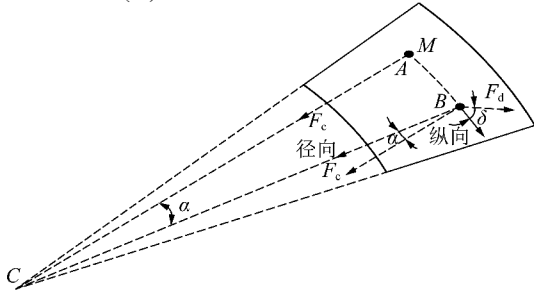
$$G \sin \beta \sin \alpha + F_d \cos \delta - F_f - F_c \cos \beta \sin \alpha = 0 \quad (13)$$

$$F_N = G \cos \beta + F_c \sin \beta - F_f \quad (14)$$

$$G \sin \beta \cos \alpha - F_d \sin \delta - F_c \cos \beta \cos \alpha = 0 \quad (15)$$



(a) 颗粒在横截面上的受力分析



(b) 颗粒在槽面上的受力分析

图 3 螺旋分选机中颗粒的受力分析

Fig. 3 Force analysis of particles in a spiral separator

联立(1)~(5), (12)~(15), 代入  $h_m$  可得

$$W = \frac{1.5 h_m \sin \alpha}{d \tan \varphi} \times$$

$$\frac{k \tan \varphi + \cos \delta + \sin \delta \tan \alpha + \sin \delta \tan \varphi \tan \beta \sec \alpha}{\cos \beta + \sin \beta \tan \beta} \quad (16)$$

式中,  $W$  为颗粒与水的相对密度, 即  $W = (\sigma - \rho) / \rho$ ;  $h_m$  与入料流量以及螺旋分选机结构参数有关, 可由式(6)~(9)得出入料流量与平均厚度的关系曲线图;  $\alpha, \beta$  可由螺旋分选机螺距、直径以及横截面曲线求出;  $k, \varphi, \delta$  可由根据文献取值<sup>[14, 26-27]</sup>。式(16)可改写为

$$F_{eq}(r, \sigma, \rho, d, f(r), U, Q) = 0 \quad (17)$$

式(17)集颗粒物料特性与螺旋槽结构参数为一体, 有如下两方面意义:

(1) 对于任意给定的螺旋分选机(螺旋槽结构参数已知, 即螺距  $U$ 、外/内径、槽面形状  $f(r)$  已知), 已知入料流量  $Q$  时, 平衡半径  $r$  (颗粒达运动平衡后的径向距离) 只与颗粒直径  $d$  和相对密度  $W$  有关, 固定颗粒直径  $d$  时, 利用 Matlab 进行绘图, 可以得出相对密度  $W$  与平衡距离  $r$  之间的关系曲线, 这为分析不同粒度不同密度颗粒达平衡状态时的径向距离提供了参考;

(2) 颗粒性质(粒度、密度)已知时, 式(17)也可用来进行单因素分析。以分析平衡半径与螺距的变化关系为例, 可先由式(6)~(9)得出不同螺距下的水流平均厚度, 然后固定除螺距以外的所有结构参

数, 再利用 Matlab 进行绘图, 即可绘出平衡半径与螺距的关系曲线, 从而定性分析螺距对颗粒平衡半径的影响。利用式(17)可为螺旋分选机设计人员优化设备参数提供一定指导。

## 2 数值计算与讨论

### 2.1 螺旋分选机物理模型及分选实验

实验室现有螺旋分选机横截面形状为立方抛物线型, 横截面曲线公式如式(10)所示, 螺距  $U = 0.24 \text{ m}$ , 5 圈, 槽深  $C_y = 0.046 \text{ m}$ , 内径  $r_i = 0.025 \text{ m}$ , 外径  $r_o = 0.2 \text{ m}$ 。

实验煤样是 1~0.5 mm 的无烟煤经浮沉实验所得到的各密度级颗粒, 主要密度级有 -1.5, 1.5~1.7, +1.7  $\text{g/cm}^3$ 。为了减少颗粒间相互作用对颗粒运动的影响, 实验在较低浓度下进行, 入料质量浓度 3%, 入料流量 1  $\text{m}^3/\text{h}$ , 截料端沿径向由内至外依次分为 1~6 号槽, 如图 4 所示。实验时, 采用断流全接的方法进行取样, 样品经过滤烘干后计算取料槽各小槽的干煤泥量占取料槽总干煤泥量的百分比来表征不同密度级颗粒在螺旋分选机出料端沿径向的分布情况。实验结果如图 5 所示。

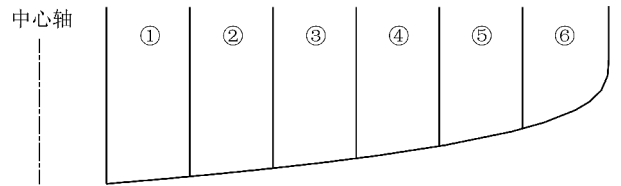


图 4 六产品截料槽

Fig. 4 Spiral discharge with six products

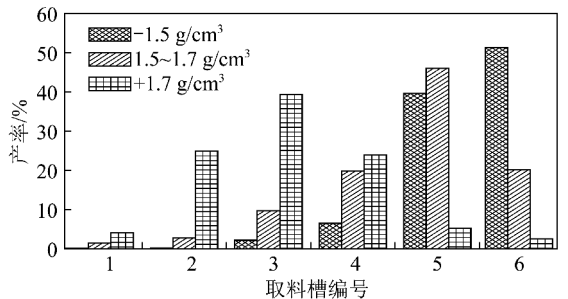


图 5 不同密度级颗粒在出料端沿径向的分布

Fig. 5 Distribution of particles with different densities along the radial on the discharging of the spiral separator

由图 5 可知, -1.5  $\text{kg/L}$  密度级颗粒基本分布在在外缘, 1.5~1.7  $\text{kg/L}$  的中等密度颗粒在中部和外缘均有较多分布, +1.7  $\text{kg/L}$  的高密度颗粒主要分布在中部。这也从侧面反映出, 实验用螺旋分选机排矸效果较好, 但中煤和精煤在外缘均有较多分布, 难以分选出低灰精煤。

### 2.2 数值计算结果

数值计算采用的物理模型为实验室现有螺旋分选机模型,颗粒直径  $d$  分别取 0.000 50,0.000 75,0.001 00,0.001 50 m,利用 Matlab 对式(16)进行绘图,得出相对密度与平衡半径(颗粒达运动平衡阶段时的径向距离)的关系曲线,如图 6 所示。

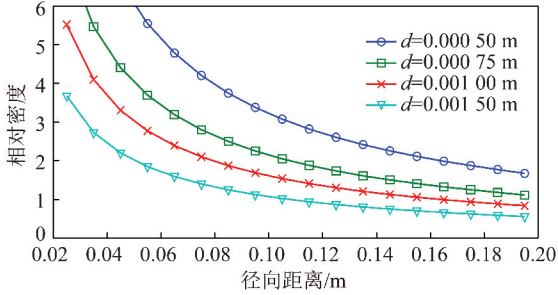


图 6 不同颗粒直径下相对密度与平衡半径的关系曲线  
Fig. 6 Relationship between relative density and equilibrium radius under different particle diameter

由图 6 可知:所得数学模型可以定性反映颗粒在螺旋分选过程中的分布规律,即颗粒直径一定时,密度越大,平衡半径越小;轻重颗粒的密度差越大,平衡半径差越大,越容易分选。

结合图 5,6 可知,本文提出的数学模型还不能准确反映某一具体颗粒在实际分选过程中的平衡位置,这主要是因为本文数学模型得出的平衡距离为单颗粒的平衡距离,忽略了颗粒间的相互作用,简化了水流对颗粒的作用力,与实际分选情况有较大差距。但可以定性反映出颗粒分布的基本规律,通过数学模型可以定性分析结构参数对颗粒运动规律的影响,这对于螺旋分选机设备参数的优化有一定的指导作用。

### 2.3 螺距对颗粒平衡半径的影响

颗粒直径  $d = 0.000 75 \text{ m}$ ,螺距分别取 0.28,0.24,0.20,0.16 m,其他参数保持不变,结合式(16),利用 Matlab 绘图软件得出不同螺距下颗粒相对密度与平衡半径的关系曲线,如图 7 所示。

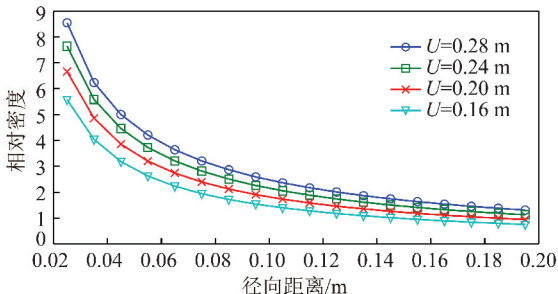


图 7 不同螺距下相对密度与平衡半径的关系曲线  
Fig. 7 Relationship between relative density and equilibrium radius under different pitches

由图 7 可知,颗粒密度一定时,颗粒平衡半径均

随螺距的增加而增加,螺距越大,相同密度颗粒的平衡半径也越大。

对粗煤泥螺旋分选机而言,轻重矿物密度差较小,中高密度级煤颗粒在精煤区域有较多分布,导致精煤灰分较高,分选精度较差<sup>[11]</sup>。由图 7 可知,在保证低密度颗粒平衡半径在外缘的基础上,适当降低螺距,可以降低中高密度颗粒的平衡半径,促进中高密度级颗粒移向内缘,减少中高密度级颗粒对精煤的污染,进而提高螺旋分选机分选精度。

### 2.4 不同流量下颗粒在螺旋槽横截面上的分布规律

颗粒直径  $d = 0.000 75 \text{ m}$ ,流量  $Q$  分别取 0.6,0.8,1.0,1.2  $\text{m}^3/\text{h}$ ,利用图 2 得出不同流量下的平均水流厚度,结合式(16)利用 Matlab 绘图得出不同平衡半径下颗粒相对密度与流量的关系曲线,如图 8 所示。

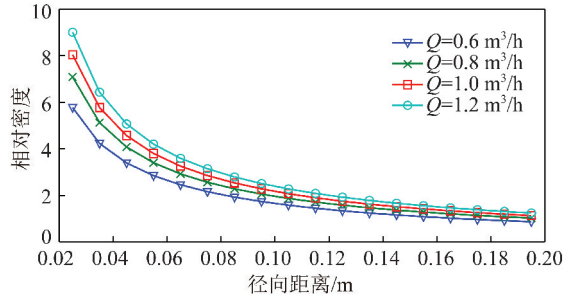


图 8 不同流量下相对密度与平衡半径的关系曲线  
Fig. 8 Relationship between relative density and equilibrium radius under different flow rates

由图 8 可知:颗粒密度不变时,平衡半径随流量的减小而减小,流量越小,颗粒平衡半径越小。

图 8 中,流量的减小能够促进颗粒的平衡位置向内缘移动,这对于改善粗煤泥的分选效果是很有益处的,在保证颗粒在螺旋槽内可以正常流动的基础上,入料流量适当取小值,可以促进中高密度级颗粒移向内缘,减少对精煤的污染。

### 2.5 内径、槽深对颗粒平衡半径的影响

目前,螺旋槽内径和槽深在设备的优化过程中还没有得到重视。通过制备不同内径和槽深的螺旋分选机来研究二者对分选效果的影响,将是一件非常耗费人力、物力和财力的工作,这也导致目前的研究工作很少有提到内径和槽深对分选效果的影响。但内径和槽深不同,螺旋分选机的横截面也不同,对分选效果也必然有着不可忽视的影响。本文提出的数学模型,可以很便捷地预测出内径和槽深对于颗粒平衡半径的影响,这对于研究参数对螺旋分选机分选效果的影响无疑具有重要的意义。

颗粒直径  $d = 0.000 75 \text{ m}$ ,流量  $Q = 1.0 \text{ m}^3/\text{h}$ ,除

内径、槽深外,其他参数不变,利用式(16),可得到不同内径、不同槽深下相对密度与平衡半径的关系曲线,如图9所示。

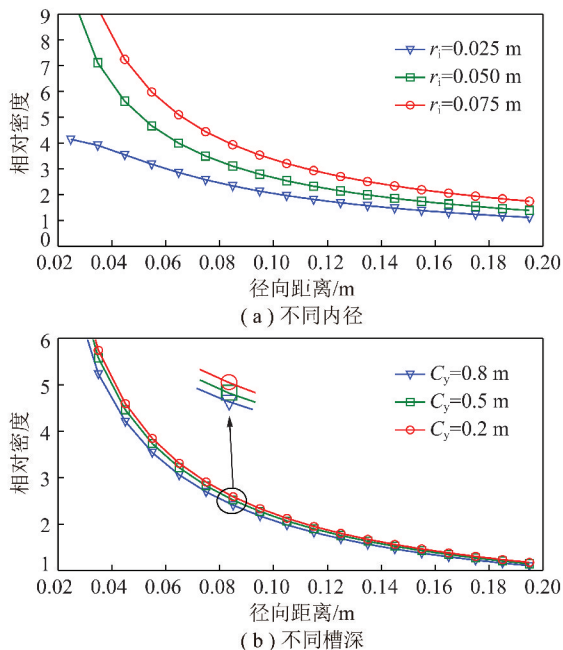


图9 不同内径/槽深时相对密度与平衡半径的关系曲线

Fig. 9 Relation between relative density and equilibrium radius under inner diameter or different groove depth

由图9可知,颗粒密度一定时,内径越小,槽越深,平衡半径越小。对粗煤泥螺旋分选机而言,选用较小的内径、较深的槽,有利于减少颗粒在螺旋分选机中的平衡半径,在一定程度上有利于促进中高密度级颗粒移向内缘,从而提升分选效果。

### 3 结 论

(1)动力学分析得出的数学模型可以定性反映不同密度颗粒达运动平衡后沿径向的分布规律,完善了颗粒在螺旋分选机中的动力学分析。

(2)利用数学模型,可以得出:颗粒达平衡状态后的径向距离随螺距增大而增大;螺旋分选机结构参数一定时,流量越小颗粒的平衡位置越小;内径和槽深对于颗粒平衡半径有较大影响,一定密度和粒度的颗粒,平衡位置随内径的减小而减小,随槽深的减小而增加,内径和槽深在螺旋分选机的优化设计时不应忽略。

(3)在保证颗粒能够顺利沿螺旋槽向下运动的基础上,粗煤泥螺旋分选机结构参数应采用较小的螺距、较小的内径和较大的槽深,结构参数确定后,入料流量不宜过大,这有助于减小中高密度级颗粒平衡半径,减少对精煤的污染。

### 参考文献 (References):

- [1] 于进喜,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] 崔广文,赵辉,徐东升,等.粗煤泥分选新工艺的探讨[J].煤炭加工与综合利用,2014(1):10-13.  
CUI Guangwen, ZHAO Hui, XU Dongsheng, et al. Discussion on the new technology for separation of coarse slime[J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 2014(1): 10-13.
- [3] 陆帅帅,吕宪俊,刘培坤,等.粗煤泥回收和分选工艺应用现状[J].选煤技术,2014(2):83-87.  
LU Shuaishuai, LÜ Xianjun, LIU Peikun, et al. Current situation of application of coarse coal slime recovery and separation process[J]. Coal Preparation Technology, 2014(2): 83-87.
- [4] 何岩岩,王龙龙,慕海伦,等.南非玛泰螺旋分选机在西易选煤厂的应用[J].煤炭加工与综合利用,2012(5):41-43.  
HE Yanyan, WANG Longlong, MU Hailun, et al. South Africa match spiral separator application in Xiyi Coal Preparation Plant[J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 2012(5): 41-43.
- [5] 刘佳喜.煤用LD7型螺旋分选机在西铭矿选煤厂的应用[J].山西焦煤科技,2008(5):17-18.  
LIU Jiayi. Application on LD7 Type Spiral separator for coal in Ximing Coal Preparation Plant[J]. Shanxi Coking Coal Science & Technology, 2008(5): 17-18.
- [6] 赵广富,周玉森.煤用螺旋分选机机理的探讨[J].选煤技术,1994(2):13-15.  
ZHAO Guangfu, ZHOU Yusen. Discussion on the mechanism of the spiral separator for coal[J]. Coal Preparation Technology, 1994(2): 13-15.
- [7] 吕文舵,刘珊.螺旋分选机在选煤厂中的应用[J].选煤技术,2006(4):24-26.  
LÜ Wentuo, LIU Shan. Application of spiral separator in coal preparation plant[J]. Coal Preparation Technology, 2006(4): 24-26.
- [8] 吴绍安,周玉森,赵广富,等.SML900螺旋分选机的研究[J].选煤技术,1991(1):10-15.  
WU Shaoan, ZHOU Yusen, ZHAO Guangfu, et al. The study on the SML900 spiral separator for coal preparation[J]. Coal Preparation Technology, 1991(1): 10-15.
- [9] 沈丽娟,陈建中,祝学斌,等.ZK-LX1100螺旋分选机精选粗煤泥的研究[J].选煤技术,2009(6):16-20.  
SHEN Lijuan, CHEN Jianzhong, ZHU Xuebin, et al. The study of ZK-LX1100 spiral separator separating coarse slime[J]. Coal Preparation Technology, 2009(6): 16-20.
- [10] 沈丽娟.XL-750螺旋分选机选煤的研究[J].选煤技术,1992(6):2-5.  
SHEN Lijuan. The study on the coal preparation of the XL-750 spiral separator[J]. Coal Preparation Technology, 1992(6): 2-5.
- [11] WOOD C J. A study of coal washing spirals[J]. Coal Preparation, 1994, 12: 117-131.
- [12] ATASOY D Y, Spottiswood J. A study of particle separation in a

- spiral concentrator[J]. Minerals Engineering,1995,8(10):1197-1208.
- [13] MATTHEWS B W, FLETCHER C A J, PARTRIDGE A C. Computational simulation of fluid and dilute particulate flows on spiral concentrators [J]. Applied Mathematical Modelling, 1998, 22(12):965-979.
- [14] DAS S K, GODIWALLA K M, PANDA L, et al. Mathematical modeling of separation characteristics of a coal-washing spiral[J]. International Journal of Mineral Processing, 2007, 84:118-132.
- [15] GLASS H J, MINEKUS N J, DALMIJN W L. Mechanics of coal spirals[J]. Minerals Engineering, 1999, 12(3):271-280.
- [16] DOHEIM M A, GAWAD A F A, MAHRAN G M A. Numerical simulation of particulate-flow in spiral separators[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37:198-215.
- [17] HOLLAND-BATT A B. Spiral separation: theory and simulation [J]. Trans. Inst. Min. Met, 1989, 98:46-60.
- [18] 陈庭中, 徐镜潜. 流膜运动速度测定技术[J]. 有色金属, 1981(2):44-47.  
CHEN Tingzhong, XU Jingqian. Measuring Technique of flow rate of flow film[J]. Nonferrous Metals Engineering, 1981(2):44-47.
- [19] 卢继美. 螺旋选矿机中水流的运动规律[J]. 有色金属(选矿部分), 1980(4):34-43.  
LU Jimei. The motion law of water flow in spiral concentrator[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 1980(4):34-43.
- [20] 袁树云, 沈怀立, 李正昌, 等. 振摆螺旋选矿机的研制及工业试验[J]. 有色金属(选矿部分), 1997(5):18-23.  
YUAN Shuyun, SHEN Huaili, LI Zhengchang, et al. Development and industrial test of the spiral concentrator [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 1997(5):18-23.
- [21] 范象波. 螺旋选矿机[J]. 国外金属矿选矿, 1973(11):7-17.  
FAN Xiangbo. Spiral concentrator [J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 1973(11):7-17.
- [22] 卢继美. 矿粒在螺旋选矿机中运动规律的研究[J]. 南方冶金学院学报, 1981(1):18-34.  
LU Jimei. Study on the movement law of ore particles in the spiral concentrator [J]. Journal of Southern Institute of Metallurgy, 1981(1):18-34.
- [23] 沈丽娟. 螺旋分选机结构参数对选煤的影响[J]. 煤炭学报, 1996, 21(1):73-78.  
SHEN Lijuan. The effect of spiral structure parameters on coal preparation [J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(1):73-78.
- [24] 赵广富, 周玉森. 煤用螺旋分选机机理的探讨[J]. 选煤技术, 1994(2):13-15.  
ZHAO Guangfu, ZHOU Yusen. Discussion on the mechanism of the spiral separator for coal [J]. Coal Preparation Technology, 1994(2):13-15.
- [25] 孙铁田. 螺旋选矿设备上矿粒运动速度的计算[J]. 有色金属(冶炼部分), 1976(8):42-46.  
SUN Tietian. Calculation of the movement speed of the mineral particles in the spiral mineral processing equipment [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 1976(8):42-46.
- [26] KAPUR P C, MELOY T P. Industrial modeling of spirals for optimal configuration and design, spiral geometry, fluid flow and forces on particles [J]. Powder Technology, 1999, 102:244-252.
- [27] KAPUR P C, MELOY T P. Spirals observed [J]. International Journal of Mineral Processing, 1998, 53:15-28.