文章编号：1000-1964(2005)06-0721-04

细粒煤在 Falcon 分选机中的运动特性及其脱硫研究

陶有俊[1]，赵跃民[1]，Daniel Tao[1,2]，刘炯天[1]
(1. 中国矿业大学 化工学院，江苏 徐州 221008；
2. Department of Mining Engineering，University of Kentucky，Lexington，KY40506，USA)

摘要：简述了 Falcon 离心重力分选机的特点及工作原理，通过细颗粒在 Falcon 离心重力场中的受力分析和沉降末速的计算，得出了颗粒沉降时间与离心加速度的关系，结果表明：颗粒的离心加速度越大、固体颗粒与介质的密度差越大、颗粒直径越大，则沉降时间越短. 通过对转筒内流膜运动特性分析，研究了处于转筒内不同流膜微层中的颗粒切向速度的变化规律，结果表明：流膜内各微层的切向流速沿径向递增. 分析对比了 Falcon 离心分选和浮选分步释放试验脱硫效果，结果表明了细粒煤在离心重力场中的全硫脱除率要比基于颗粒表面性质分选的浮选过程平均高 5% 左右.

关键词：细粒煤；Falcon 分选机；颗粒；沉降速度；脱硫
中图分类号：TD 922 **文献标识码**：A

Research on Moving Characteristic and Desulphurization of Fine Coals in the Falcon Centrifugal Separator

TAO You-jun[1], ZHAO Yue-min[1], Daniel Tao[1,2], LIU Jiong-tian[1]
(1. School of Chemical Engineering and Technology,
China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;
2. Department of Mining Engineering, University of Kentucky, Lexington, KY40506, USA)

Abstract: The characteristic and separation principle of the Falcon centrifugal gravity separator were introduced. Through analyzing forces exerted on fine particle in the Falcon centrifugal gravity force field and calculating the terminal velocity, the relation between settling time and centrifugal acceleration was obtained. The result indicates that the bigger the centrifugal acceleration is, the bigger the density difference between the coal particle and medium solid is, and the bigger the diameter of coal particle is, the shorter the settling time is. Based on analyzing the moving characteristics of pulp stream inside, the change law of tangent velocity of fine coal particle in different thin layers of pulp stream was discussed, and the result shows that the tangent velocity increased gradually in radial direction. By comparing the desulfurization result of Falcon test with that of timed release test, the result shows that the average desulphurization efficiency using the centrifugal gravity force field separation is higher by about 5% than that using floatation.

Key words: fine coal; Falcon separator; particle; settling velocity; desulfarization efficiency

收稿日期：2005－05－25
基金项目：国家杰出青年基金项目(50025411)；教育部"211"工程重点建设项目(B00403)
作者简介：陶有俊(1964-)，男，安徽省滁州市人，副教授，工学博士，从事细粒煤分选和脱硫方面的研究.
E-mail：tyj9000@sina.com **Tel**：0516-3884487

由于重力分选成本低、环境污染小，而被广泛应用于金属矿和煤炭的分选中. 随着复合物理力场的采用，重力分选设备对细粒甚至微细粒的分选能力已经得到了极大提高. 近年来，美国和加拿大等国成功地将高强度离心力场引入矿物分选过程中，并成功地开发出了多种离心选矿机，诸如采用离心流膜分选的 Mozley 多产品重选机(美国)、采用离心力场分选的 Falcon 离心分选机(加拿大)、Kelsey 离心跳汰机(澳大利亚)以及 Teeter-bed 分选床. 这些强化重力分选机都是将外加离心力场应用于传统的重力分选过程中(如流膜、流化床和跳汰选)，缘于离心力而产生的较高惯性力增大了不同密度的颗粒的沉降速度差异，从而提高了整个分选效率. 其中，Falcon 离心分选机被称为目前最有效的细粒重选设备之一，该设备通过采用离心力场来强化细粒物料按密度进行有效分离，尤其对细粒高硫煤中的黄铁矿硫的脱除有很好的效果[1-4].

1 Falcon 分选机工作原理

由于微细粒的惯性小，沉降速度慢，因此，常规的重选方法不可能有较好的分选效果. 改善重力分选的一个有效措施是利用离心力场增强不同密度物料的分离. 也就是采用惯性离心加速度去取代重力加速度，以实现细颗粒的离心重力分选.

分选物料调浆后经导流管给入旋转的内转筒底部之后，在离心力作用下被甩向转筒内壁，同时，带有压力的反冲水从内外转筒之间的水套，由外垂直射入来复圈底的进水孔，使位于来复圈内的物料松散或流态化，在离心力和反冲水的共同作用下，密度大的脉石或黄铁矿颗粒能够克服反冲水的径向阻力而离心沉降或钻隙渗透物料层的缝隙抵达锥壁，即使是非常微细的高密度物料也能进入床层底部，而密度较小的物料因所受的离心力较小，加上难以克服反冲水的阻力，而不能进入床层底部，结果被轴向水流的冲力和离心力的轴向分力共同作用而旋转出内转筒，溢出成为精矿产品[1-4]，图 1 为 Falcon 离心分选机转子结构示意图，图 2 为该机来复圈流态化反冲水孔局部放大示意图.

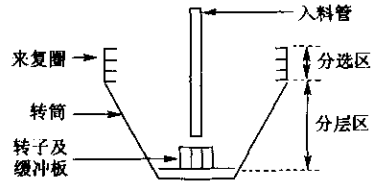


图 1 Falcon 离心分选机转子结构示意图
Fig. 1 The schematic diagram of Falcon separator

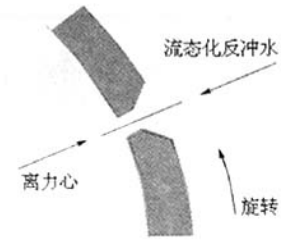


图 2 Falcon 分选机来复圈流态化反冲水孔示意简图
Fig. 2 The fluidization back water of Falcon separator

Falcon 分选机区别于其它类型重力分选机的重要特征之一就是其能够产生较大的离心加速度，最大能够达到重力加速度的 300 倍，高强度的离心加速度可以弥补微细颗粒由于粒度小而导致沉降时间长的缺点，实现快速沉降. 此外，通过调节反冲水的压力，实现来复圈中的物料处于流态化状态，高密度的颗粒将会很容易地穿过流态化床层达到来复圈底部位置，原来处于床层地步的低密度物料将被重颗粒取代进入来复圈外部，被轴向水流冲出旋转滚筒外，最终实现轻、重物料的分离[4].

2 细颗粒在离心力场中的运动特点

在离心力场中，离心力的大小、作用方向以及加速度等在离心力场中的分布规律都与重力场有所不同. 在重力场中，颗粒在整个运动过程中，所受的重力及重力加速度都是常数. 而在离心力场中则不然，离心力和离心加速度是旋转半径和旋转速度的函数，并且随半径的增加而加大. 由于离心力的作用方向是作用在垂直于旋转轴线的径向上，所以在离心选矿过程中，分选作用也是发生在径向上. 此时，沿径向作用于物体上的力有：离心力和阻力.

2.1 细颗粒在离心力场中的沉降末速的计算[5]

在离心力场中，当介质和颗粒作同步旋转运动时，颗粒所受的离心力为

$$F = \frac{\pi \cdot d_v^3}{6}(\delta - \rho)\omega^2 r, \tag{1}$$

式中：d_v 为颗粒的当量直径；δ 为颗粒的密度；ρ 为介质密度；r 为旋转半径. 颗粒在径向所受介质的黏性阻力为

$$R = \psi \cdot d_v^2 v_c^2 \rho. \tag{2}$$

式中：ψ 为介质黏性系数；v_c 为颗粒与介质的相对运动速度.

根据矿粒在沿径向运动时的受力分析，可建立颗粒沿径向运动的微分方程

$$F - R = ma,$$

即

$$\frac{\pi \cdot d_v^3}{6}(\delta - \rho)\omega^2 r - \psi \cdot d_v^2 v_c^2 \rho = m\frac{\mathrm{d}v_c}{\mathrm{d}t}, \tag{3}$$

或
$$\frac{(\delta-\rho)}{\delta}\omega^2 r-\frac{6\psi\cdot v_c^2\rho}{\pi\cdot d_v\delta}=\frac{\mathrm{d}v_c}{\mathrm{d}t}. \tag{4}$$

上式表明：颗粒在离心力场中运动的加速度是离心加速度与阻力加速度之差. 其中离心加速度为颗粒旋转半径 r 的函数，并随旋转半径增加而加大，而所受到的阻力加速度是相对速度 v_c 的函数，并与 v_c 平方成正比. 颗粒在开始受到离心加速度的作用后，颗粒的径向速度 v_c 逐渐增加，而阻力和阻力加速度也在同时加大，当阻力增加到与该处的离心力相等时，颗粒的运动加速度 $\frac{\mathrm{d}v_c}{\mathrm{d}t}=0$，此时 v_c 达到最大值. 由于颗粒在离心力场中分选时所受到的离心加速度往往比重力加速度大几十到几百倍，所以颗粒获得最大径向速度的时间很短，可忽略不计，因此，颗粒在任一回转半径处的径向速度可以按 $\frac{\mathrm{d}v_c}{\mathrm{d}t}=0$ 条件得出

$$v_c=\sqrt{\frac{\pi\cdot d_v(\delta-\rho)\omega^2 r}{6\psi\cdot\rho}}. \tag{5}$$

在这里需要值得注意的是，由于离心力 F 是旋转半径 r 的函数，所以颗粒的径向速度 v_c 与重力场条件下的沉降末速不同，它不是常数，而是旋转半径，即离心加速度的函数. 直接利用上式计算 v_c 时会遇到阻力系数 ψ 是未知数 v_c 的函数的难题. 因此，这里可以采用类似在重力场中求解沉降末速 v_0 的办法来解决，即采用斯托克斯公式进行计算，在这里只要将重力加速度 g 用离心加速度 $\omega^2 r$ 来取代即可

$$v_c=\frac{\chi d_v^2(\delta-\rho)}{18\mu}\omega^2 r, \tag{6}$$

式中：d_v 为颗粒平均粒度；ω 为角速度；χ 为颗粒球形系数；μ 为矿浆黏度；δ 为颗粒密度；ρ 为介质密度；r 为颗粒旋转半径.

颗粒沿径向运动一段距离所需时间 t，可按下列关系计算

$$v_c=\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t},\quad \mathrm{d}t=\frac{\mathrm{d}r}{v_c},$$

积分得
$$t=\int_{r_1}^{r_2}\frac{\mathrm{d}r}{v_c}, \tag{7}$$

式中：t 为颗粒由半径 r_1 处运动到半径 r_2 处所需的时间.

将式(6)代入式(7)得

$$t=\frac{18\mu}{\chi d_v^2(\delta-\rho)}\int_{r_1}^{r_2}\frac{\mathrm{d}r}{\omega^2 r}. \tag{8}$$

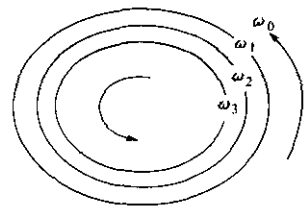
式(8)表明：细颗粒在离心力场中分选时，颗粒向器壁沉降所需的时间 t 随离心加速度 $\omega^2 r$ 的增大而缩短，同时固体颗粒与介质的密度差值 $(\delta-\rho)$ 越大、颗粒直径 d_v^2 越大，沉降时间也越短. 因此，细颗粒矿物在离心力场中分选时，离心加速度的加大将有利于颗粒的沉降.

2.2　细颗粒在转筒切向速度计算

因为 Falcon 分选机的转筒的旋转速度是匀速的，因此，这里可以认为颗粒在沿转筒的切向速度等于其角速度与颗粒所处位置的半径的乘积[6]，即

$$v_T=r\omega. \tag{9}$$

在离心力场中，由于流膜的各微层旋转角速度是不等的，如图 3 所示，自流膜表面至转筒内壁的径向方向上，其角速度 ω 是在递增的，而各点的切向速度 $v_T=r\omega$，也是递增的，即流膜内各微层的切向流速与转筒的转动不同步，愈接近流膜表面滞后愈大. 这种切向流速在流膜各微层不同步，为细颗粒分散和选别创造了良好的条件.



$\omega_3<\omega_2<\omega_1<\omega_0$

图 3　离心力场中径向各微层流膜旋转角速度的变化

Fig. 3　The variety of rotation angular velocity along radial in different thin layer of pulp stream in centrifugal gravity field

3　细粒煤强化重力分选脱硫实践

目前针对细粒煤的分选方法很多，但普遍采用的仍然是泡沫浮选. 虽然浮选技术对于小于 0.5 mm 细粒煤的分选在某些情况下能取得较好的效果，尤其是浮选柱新技术的发展和推广应用，使浮选效率进一步提高. 尽管如此，浮选方法在某些方面还是存在明显的缺陷. 比如有效分选粒度范围较窄；运行成本高；环境污染大；对未完全解离的颗粒，分选效果差，造成细粒中煤损失和产品质量下降；在实践中，浮选分步释放试验结果总是差于浮沉试验结果. 尤其是中间密度物含量或入料硫分较高时，浮选法难以获得令人满意的脱硫和降灰效果.

通过对新汶矿业集团汶南矿小于 0.5 mm 细粒煤所采用的 Falcon 离心分选和浮选分步释放试验的对比结果(见图 4)可以看出：在可燃体回收率相同的情况下，Falcon 试验精煤全硫脱除率好于分步释放试验结果，由图 4a 可见，其全硫脱除率平均相差 5%左右，可见 Falcon 离心重力分选对脱除细粒原煤硫分要好于理想条件下的泡沫浮选效果，即

利用黄铁矿颗粒与煤之间较大密度差异而分选，强化离心重力分选机对全硫的脱除效果明显好于基于颗粒表面性质分选的浮选过程；然而在获得的相同可燃体回收率情况下，Falcon 试验精煤灰分脱除率要差于分步释放试验结果，其原因主要是由于小于 0.5 mm 级入料中高灰分的细泥在 Falcon 分选试验中往往随溢流进入精煤，从而污染精煤，使得最终精煤灰分增高[3].

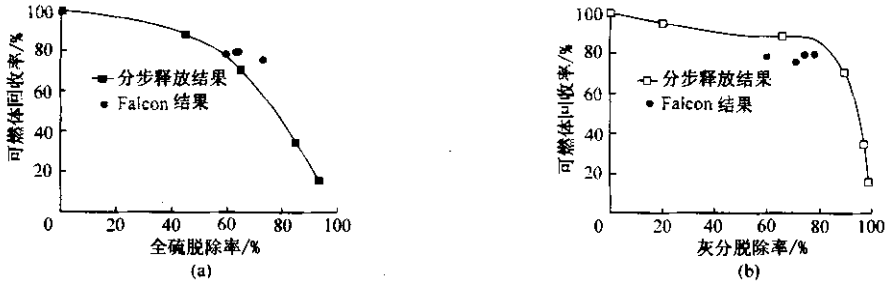


图 4 Falcon 试验与分步释放试验对比结果

Fig. 4 The comparison of Falcon test results with that of release test

4 结 论

1）细颗粒在离心力场中分选时的沉降末速 v_c（径向速度）与重力场条件下的沉降末速不同，它不是常数，而是旋转半径，即离心加速度的函数

$$v_c = \frac{\chi d_v^2(\delta-\rho)}{18\mu}\omega^2 r.$$

2）细颗粒在离心力场中分选时，颗粒向器壁沉降所需的时间可表示为

$$t = \frac{18\mu}{\chi d_v^2(\delta-\rho)}\int_{r_1}^{r_2}\frac{\mathrm{d}r}{\omega^2 r}.$$

它随离心加速度 $\omega^2 r$ 的增大而缩短，细颗粒矿物在离心力场中分选时，高强度的离心加速度将加速细颗粒的沉降.

3）细颗粒在转筒切向速度可表示为 $v_T = r\omega$，且处于转筒内不同流膜微层中颗粒的切向速度随半径的增大而递增.

4）强化离心重力分选机对细粒煤的脱硫效果明显好于基于颗粒表面性质分选的浮选过程，本试验条件下，前者的脱硫率较后者高 5%.

参考文献：

[1] Honaker R Q. High capacity fine coal cleaning using an enhanced gravity concentrator [J]. Minerals Engineering, 1998,11(12):1191-1199.

[2] 陶有俊，Daniel Tao，赵跃民，等. 采用 Design-Expert 设计和优化 Falcon 分选试验[J]. 中国矿业大学学报，2005，34(3)：343-348.
Tao Y J, Daniel Tao, Zhao Y M, et al. Design and optimization of Falcon separation test by using design-expert software [J]. Jounal of China University of Mining &Technology, 2005,34(3):343-348.

[3] 陶有俊，陶东平，刘炯天，等. Falcon 离心分选机对细粒煤脱硫试验研究[J]. 金属矿山，2004(2)：41-43.
Tao Y J, Tao D P, Liu J T, et al. Test research of fine coal desulfarization using Falcon centrifugal separator[J]. Metal Mine, 2004(2):41-43.

[4] Honaker R Q, Singh N, Govindarjan B. Application of dense-medium in an enhanced gravity separator for fine coal cleaning[J]. Mineral Engineering, 2000,13(4):415-427.

[5] 谢广元，张明旭，边炳鑫，等. 选矿学[M]. 徐州：中国矿业大学出版社，2001.

[6] 柳吉祥. 旋转流分选的理论及应用[M]. 北京：煤炭工业出版社，1985.

（责任编辑 骆振福）