

矿粒在摩擦辊式电选机中运动轨迹的研究与分析

任旭东, 何家宁, 马武兴, 张洪申

(昆明理工大学 机电工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 摩擦电选机的高压静电分选腔是分选矿物及物料的重要组成部分, 对矿物及物料的分选起着决定性的作用. 介绍摩擦辊式电选机及其高压静电分选腔的工作原理, 并对进入摩擦辊式电选机高压静电分选腔中荷电矿粒的受力情况、运动轨迹以及影响荷电矿粒在其分选腔中运动轨迹的因素进行了分析和研究.

关键词: 电选机; 静电分选; 矿粒

中图分类号: TD457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2008)03-0035-06

Research and Analysis on Trajectories of Mineral Particles in Rotary Charger Tribo- Electrostatic Separator

REN Xu-dong HE Jia-ning MA Wu-xing ZHANG Hong-shen

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract The high-voltage electrostatic field of the tribo-electrostatic separator is of great importance to separate mineral and material. The principle of the rotary charger tribo-electrostatic separator and the high-voltage electrostatic field is firstly introduced in this paper. Research and analysis are also carried out on the force conditions, trajectories as well as some influencing factors.

Key words electrostatic separator; electrostatic separation; mineral particles

0 引言

摩擦电选机的发明和应用, 为微细粒矿物的分选提供了一种新的手段和途径. 随着摩擦电选机技术的发展, 摩擦电选将会得到越来越广泛的应用.

摩擦电选机作为电选机的一个分支, 在国内外已得到了较好的发展^[1-6]. 被分选的矿物在进入摩擦电选机高压静电分选腔以前, 通过矿物之间以及矿物与其他材料之间的摩擦而带电, 即摩擦荷电是通过接触、碰撞、摩擦的方法使矿粒带电的. 矿粒的摩擦荷电: 一种是矿粒与矿粒互相摩擦, 使各自获得不同符号的电荷; 另一种是矿粒与某种材料摩擦、碰撞 (包括滚动) 使之带电. 互相摩擦碰撞荷电的根本原因是由于电子的转移. 介电常数小者能位低, 难于极化, 易于接受电子而带负电. 必须指出, 并非所有矿物都能采用摩擦荷电的方法进行分选, 只有在 2 种矿物的介电常数具有明显的差别时, 才能在摩擦时使矿粒之间产生电子转移并保持电荷. 荷电矿粒进入高压静电分选腔后, 由于其带电的极性和荷电量的不同, 产生的分选运动轨迹也明显不同, 使物性不同的矿物被分开, 从而达到分选矿物的目的^[7-10].

论文主要对矿粒在摩擦辊式电选机中的分选运动轨迹进行研究和分析.

1 摩擦静电分选机的工作原理

摩擦电选机的高压静电分选腔是对摩擦荷电后的矿粒进行分选并得到产品的区域, 它能使进入里面的矿物及物料产生分选所需要的运动轨迹. 各种摩擦静电分选机的高压静电分选腔大致相同, 以摩擦辊式

收稿日期: 2008-02-25 基金项目: 昆明理工大学校基金 (项目编号: KKZ2200801001).

第一作者简介: 任旭东 (1982-), 男, 在读硕士研究生. 主要研究方向: 机械设计及理论. E-mail: rxudong@gmail.com

静电分选机为例,其工作过程为:矿物从振动给料机进入摩擦辊式荷电装置中,通过矿粒与摩擦辊表面材料之间的摩擦以及矿粒之间的碰撞摩擦而使矿粒荷电.荷电后的矿粒进入到高压静电分选腔中,在高压静电场的作用下,由于矿粒荷电性质的不同,并且在多种力的共同作用下,不同性质的矿粒产生不同的运动轨迹.并在分选区的下部放置 2 块分矿板,矿粒通过静电分选腔就被分成精矿、中矿和尾矿.

2 矿粒在摩擦辊式电选机高压静电分选腔中的分选原理

2.1 高压静电分选腔

高压静电分选腔主要由高压静电场构成,是摩擦辊式电选机分选矿物的主要工作部分,高压静电分选腔对矿物分选的效果有着直接的影响.它由 2 块平行电极板组成,如图 1 所示,1 块电极板与高压直流正极相连,另 1 块与高压直流负极相连.两电极板之间形成均匀的高压静电场,电力线的方向如图 1 所示,从正极板指向负极板,且均匀分布于两电极板之间.荷电矿粒进入高压静电分选腔后受到电场力的作用,由于矿粒荷电性质的不同,根据同种电荷互相排斥,异种电荷互相吸引的原理,带有不同电荷的矿粒的运动轨迹各异,从而使矿粒被分选开来.

2.2 荷电矿粒在高压静电分选腔中的受力分析

经过旋转的摩擦辊荷电后的矿粒进入高压静电分选腔,荷电矿粒的运动同时受到多个力的影响,如矿粒自身的重力、把矿粒送入高压静电分选腔的气流的推力、与电场力方向相反的空气的阻力、荷电矿粒之间产生的库仑力以及带不同电荷的矿粒间的相互作用力等.

假设在所有的力都起作用的情况下,荷电矿粒在摩擦辊式电选机高压静电分选腔中的运动方程可由下式表示:

$$m \frac{dv}{dt} = F_d + F_e + F_g + F_i + F_c + F_o \quad (1)$$

式中 m —— 矿粒的质量, kg v —— 矿粒的运动速度, m/s t —— 矿粒运动时间, s F_d —— 气流的推力, N ; F_e —— 电场力, N ; F_g —— 重力, N ; F_i —— 矿粒之间的碰撞所产生的力, N ; F_c —— 库仑力, N ; F_o —— 作用在矿粒上的其他的力,如范德瓦尔斯力、磁力等, N .

在电场力、重力、气体的推力起主要作用的情况下,建立荷电矿粒在高压静电场中受力的简单模型,如图 2 所示.其中电场力使荷电性质不同的矿粒产生不同的运动轨迹.而重力和气体的推力,只影响荷电矿粒在分选腔中的停留时间.

荷电矿粒在进入高压静电分选腔后,受到的电场力 F_e 可由下式示:

$$F_e = E q \quad (2)$$

式中 E —— 电场强度, N/C ; q —— 矿粒的荷电量, C .

荷电矿粒所受到重力 F_g 可由下式示:

$$F_g = mg \quad (3)$$

式中 g —— 重力加速度, 9.8 m/s^2 .

3 荷电矿粒在摩擦辊式电选机中的分选运动轨迹及其影响因素

3.1 荷电矿粒在高压静电分选腔中运动轨迹的数学模型

经过摩擦荷电后进入分选腔的导体矿粒,自身的荷电量会发生衰减,其荷电量与时间的关系可由下式

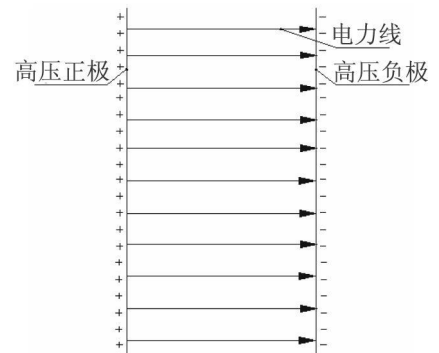


图1 高压静场

Fig.1 High-voltage electrostatic field

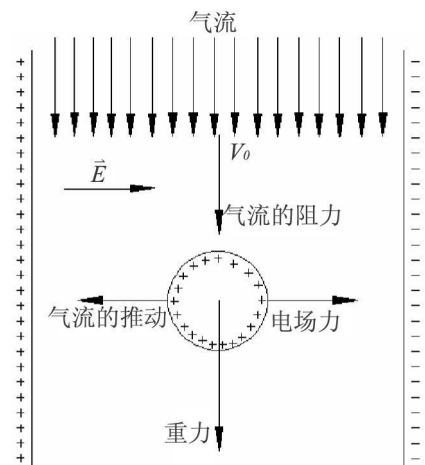


图2 荷电矿粒在高压静电场中的受力
Fig.2 Force of charged particles in the high-voltage electrostatic field

表示^[11]:

$$q = q_0 e^{-t/\tau} \quad (4)$$

式中 q ——矿粒的剩余荷电量, C; q_0 ——矿粒的初始荷电量, C; τ ——常量 ($\tau = RC$, R 表示电阻, C 表示电容), $\Omega \cdot F$.

矿粒在高压静电分选腔中的运动轨迹的不同是矿粒分选的前提。但是矿粒的运动轨迹受到很多因素的影响, 比如分选腔中气体的运动状态、矿粒半径、矿粒重量、初始速度、电场强度等。为便于分析矿粒在高压静电分选腔中的运动轨迹, 建立如图 3 所示的直角坐标系。

当荷电矿粒进入分选腔后, 它的运动轨迹主要受到气流的推力、重力以及电场力的影响, 根据电极性的不同, 分别向分选腔的阳极板或者阴极板方向运动。

为便于研究矿粒的运动轨迹, 对静电分选腔作如下假设:

- 1) 进入分选腔的气体是层流;
- 2) 作用在矿粒上的牵引力只有斯托克斯牵引力;
- 3) 忽略布朗运动的影响;
- 4) 矿粒在 y 方向的位移只与 F_g 和 F_d 有关, 忽略其它力的影响;
- 5) 初始条件: 当 $t = 0$ 时, $\dot{x}(t) = 0$, $\dot{y}(t) = \text{初始速度} = V_0$;
- 6) 高压静电分选腔中的电力线是均匀分布的。

如果分选腔如图 3 铅垂布置, 电场力就会使矿粒在 x 方向上产生一个加速度。矿粒在分选腔中停留的时间, 即矿粒穿过分选腔所用的时间, 由矿粒在 y 方向上的动量决定, 而矿粒在 x 方向上的动量由电场力的大小决定。设矿粒在 x 方向上的位移 x , 则矿粒所受的电场力可表示为:

$$F_e = E_q = m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (5)$$

式中 m ——矿粒的质量, kg; x ——矿粒在 x 方向的位移, m; t ——时间, s

变换上式可得:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = E \left[\frac{q}{m} \right] \quad (6)$$

式中 q/m 是矿粒的荷电量 (q) 与其质量 (m) 之比, 简称为荷质比。在荷电矿粒的分选过程中荷质比作为一个重要的参数对矿粒的运动状态起决定性作用。

式 (5)、(6) 是在没有考虑空气的阻力的情况下建立的。如果考虑空气的阻力, η 为空气的沾滞系数, r 为矿粒的半径, 则矿粒在 x 方向的运动微分方程如下:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 6\pi r \frac{\eta}{m} \frac{dx}{dt} = E \frac{q}{m} \quad (7)$$

解式 (7) 得矿粒的速度是一个关于时间 t 的函数:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{E_q}{6\pi\eta r} \left(1 - e^{-\frac{t}{m/6\pi\eta r}} \right) \quad (8)$$

当时间 $t > \frac{m}{6\pi\eta r}$ 或 $t \rightarrow \infty$ 时, 矿粒在 x 方向的最终速度为:

$$\left[\frac{dx}{dt} \right]_x = \frac{E_q}{6\pi\eta r} \quad (9)$$

基于以上条件可以得出, 矿粒在 x 方向上的最终速度与质量无关。

假设流体场和矿粒的运动不影响高压静电分选腔的假设条件。且根据矿粒撞击 (矿粒与矿粒之间、矿

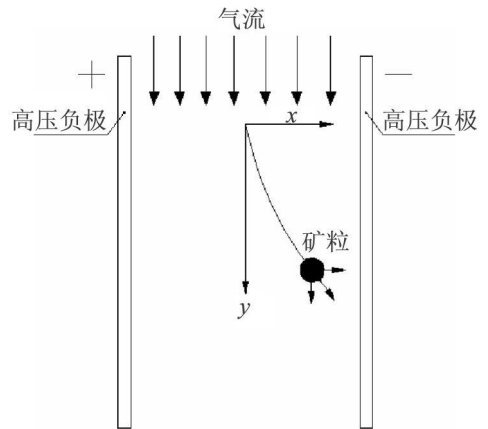


图3 直角坐标系下矿粒运动轨迹示意图
Fig.3 Trajectory of a particle diagram in the Cartesian coordinate system

粒与器壁之间)后的相对速度计算出荷质比 q/m 的表达式如下:

摩擦荷电的荷质比 $\left(\frac{q}{m}\right)$ 的表达式:

$$\frac{q}{m} = \frac{K_1}{r^3} \left[1 - e^{-K_2 \left(\frac{r}{v_{12}}\right)^{\frac{1}{5}}} \right] \left(e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

式中 v_{12} —矿粒撞击后的相对速度, m/s $K_1 = \frac{3\varepsilon}{\rho}(\mu_2 - \mu_1)$ $K_2 = 1.654 \left[\frac{15}{16} \frac{4\pi\phi}{3E} \right]^{\frac{2}{5}} \frac{h_e}{4\varepsilon}$

在图 3 所示的直角坐标系下, 由式 (7) 可得到球形矿粒在 x 方向上的运动微分方程^[6]:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 6\pi r \frac{\eta}{m} \frac{dx}{dt} = \frac{EK_1}{r^3} \left[1 - e^{-K_2 \left(\frac{r}{v_{12}}\right)^{\frac{1}{5}}} \right] \left(e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (10)$$

其中 ε —矿粒的相对介电常数; ρ —矿粒的密度, g/cm³; μ —电压修正系数; h_e —电荷转移系数.

当初始条件满足 $t=0$ $x(0)=0$ $dx(0)/dt=0$ 时, 上式可写成:

$$x(t) = \frac{EM \left[e^{\frac{t}{\tau}} N^2 - \frac{t}{\tau} N + \frac{t^2}{\tau^2} N^2 + \left(\frac{t}{\tau} \right)^2 - \frac{N}{\tau} \right]}{N^2 \left[\frac{1}{\tau} - N \right]} - \frac{EM\tau}{N} + \frac{EM e^{-nt}}{N^2 \tau (M - N)} \quad (11)$$

式中 $M = \frac{K_1}{r^3} \left[1 - e^{-K_2 \left(\frac{r}{v_{12}}\right)^{\frac{1}{5}}} \right]$, $N = 6\pi r \frac{\eta}{m}$.

高压静电分选腔内壁覆盖有绝缘体材料, 且在忽略矿粒荷电量衰减的情况下, 解方程 (10) 可得矿粒在 x 方向上的运动轨迹方程:

$$x(t) = EMN (t - N + N e^{-\frac{t}{N}}) \quad (12)$$

矿粒在 y 方向上的运动, 受自身重力和气体推力的影响, 有如下运动微分方程:

$$\frac{d^2y}{dt^2} = 6\pi r \frac{\eta}{m} \frac{dy}{dt} + g \quad (13)$$

式中 η —空气的粘滞系数.

当初始条件满足: $t=0$ $y(0)=0$ $dy(0)/dt=V_0$ (其中 V_0 是矿粒进入分选腔的初始速度) 时, 解方程 (13) 可得矿粒在 y 方向的运动轨迹方程:

$$y(t) = - \left[Ngt + N^2 \left(g + \frac{V_0}{N} \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{N}} \right) \right] \quad (14)$$

(注: 式中的“ $-$ ”表示方向.)

分选腔中的流体场一经确定, 矿粒在分选腔中的运动轨迹就可以由式 (12) 和 (14) 来确定.

3.2 荷电矿粒在高压静电分选腔中运动轨迹的实验研究

矿粒运动轨迹的数学模型 (式 (12) 和式 (14)) 的建立, 从理论上解决了矿粒的运动轨迹问题. 下面通过测定粉煤灰在各种因素影响下的运动轨迹来验证以上数学模型.

试验用粉煤灰是从火力发电厂静电除尘系统排除的干燥的原状粉煤灰, 并分选出较纯净的煤粒与灰粒的混合物. 其中粉煤灰中未燃尽的煤粒电阻率为 $10^4 \sim 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$, 属于良导体; 而粉煤灰中的纯净灰的主要成分是硅铝酸盐矿物, 其电阻率为 $10^{11} \sim 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$, 属于非导体^[12].

摩擦荷电后的粉煤灰颗粒进入高压静电分选腔进行分选, 就可测定其运行轨迹. 本实验选用图 3 所示的铅垂放置的高压静电分选腔, 其高度为 150mm, 宽度为 100mm; 试验用最高直流电源电压为 25 000 kV.

测定粉煤灰运动轨迹的方法: 在高压分选腔中, 布置一块可沿分选腔上下移动并带有刻度的绝缘薄板, 在间隔 10mm 的位置上, 分别在摩擦辊表面的切向速度、进给速度、粉煤灰的粒度、电场强度的影响下测出粉煤灰运动坐标, 并根据水平位移 x 坐标和竖直位移 y 坐标, 描绘出粉煤灰在高压静电场中的运动轨迹. 在同一粒度级别的粉煤灰中灰粒的密度比煤粒的密度大, 且摩擦后粉煤灰中的煤粒和灰粒所带电荷的极性存在差异, 从而在高压静电分选腔中煤粒向高压负极板方向运动, 灰粒向高压正极板方向运动.

在分别改变摩擦辊表面的切向速度 (23.6 m/s)、气流速度 (2 m/s)、粉煤灰的粒度 ($302 \mu\text{m}^{-1}$) 和电场强度 (25 kV/m) 下测得的粉煤灰中煤粒和灰在高压静电场中的运动轨迹如下:

通过实验得出, 粉煤灰在摩擦辊表面的切向速度、气流速度、粉煤灰的粒度、以及电场强度的影响下的运动轨迹如图 4 所示。

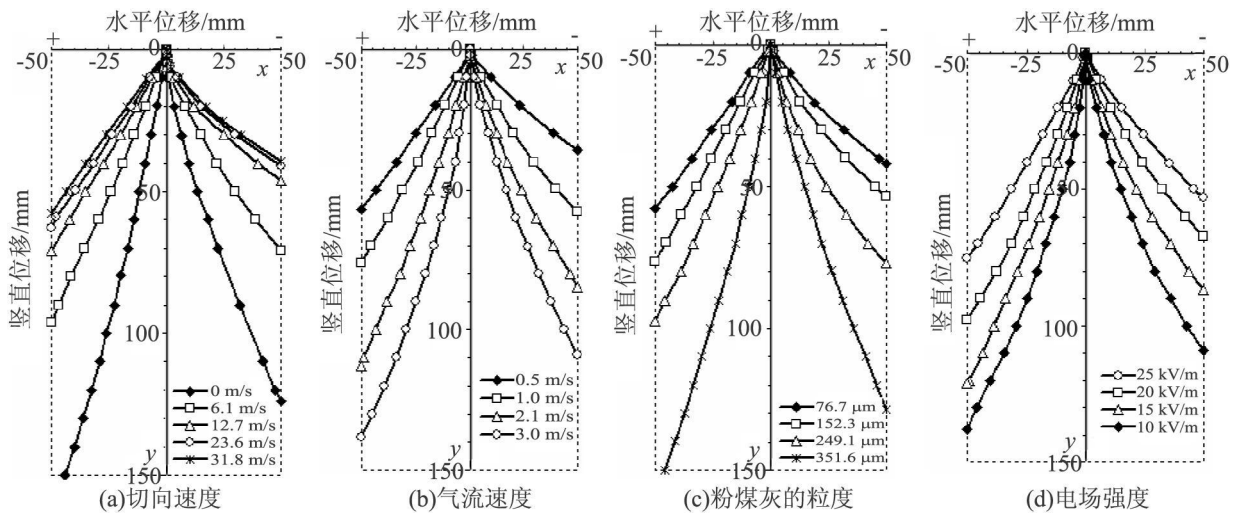


图4 在切向速度、气流速度、粉煤灰的粒度、电场强度影响下的粉煤灰的运动轨迹

Fig.4 Ash's trajectories under the impact of the tangential velocity, the current velocity, the ash's granularities and the electric field intensity

图 4(a) 为改变摩擦辊表面的切向速度对粉煤灰微粒在高压静电分选腔中运动轨迹的影响. 在摩擦辊式荷电装置中, 粉煤灰脱离旋转的摩擦辊时的切向速度, 影响粉煤灰微粒的初动量, 从而影响粉煤灰微粒之间以及粉煤灰微粒与器壁之间撞击后的相对速度 (式 (10) 中的 v_{12}), 由式 (12) 可知, 在其它条件不变的情况下, v_{12} 越大矿粒在 x 方向的位移就越小, 反之亦然. 因此, 在不同的摩擦辊表面的切向速度下, 在其它条件不变的情况下, 粉煤灰微粒在高压静电分选腔中 x 方向的位移, 随着摩擦辊表面的切向速度的增大而减小, 与数学模型相符.

图 4(b) 为改变气流速度即粉煤灰微粒进入分选腔的初始速度 (V_0) 对粉煤灰微粒在高压静电分选腔中运动轨迹的影响. V_0 对粉煤灰微粒在高压静电分选腔中 y 方向的位移产生影响, 由式 (14) 可知, 在其它条件不变的情况下, 当 V_0 较大时矿粒在 y 方向的位移较大, 反之亦然. 因此, 在不同的气流速度即粉煤灰微粒进入分选腔的初始速度 (V_0) 下, 在其它条件不变的情况下, 在相同的时间内, 粉煤灰微粒在高压静电分选腔中 y 方向的位移, 随着 V_0 的增大而增大, 与数学模型相符.

图 4(c) 为改变粉煤灰微粒粒度对粉煤灰微粒在高压静电分选腔中运动轨迹的影响. 粉煤灰微粒的质量与粉煤灰的粒度有关, 由式 (12) 知, 在其它条件不变的情况下, 矿粒的质量 (m) 越大, 其在 x 方向的位移越小, 反之亦然. 因此, 在改变粉煤灰微粒的粒度的情况下, 在其它条件不变的情况下, 粉煤灰微粒在高压静电分选腔中 x 方向的位移, 随着粉煤灰微粒粒度的增大而减小, 与数学模型相符.

图 4(d) 为改变电场强度对粉煤灰微粒在高压静电分选腔中运动轨迹的影响. 由式 (12) 知, 在其它条件不变的情况下, 电场强度 (E) 越小, 矿粒在 x 方向的位移就越小, 反之亦然. 因此, 在改变电场强度的情况下, 在其它条件不变的情况下, 粉煤灰微粒在高压静电分选腔中 x 方向的位移, 随着电场强度的减小而减小, 与数学模型相符.

4 结论

从以上分析可知, 本文所建立的矿粒在摩擦辊式电选机高压静电分选腔中运动轨迹的数学模型与实验结果一致.

在对影响矿粒在摩擦辊式电选机高压静电分选腔中运动轨迹的因素进行研究与分析后,发现矿粒在分选腔中的运动轨迹受摩擦辊表面的切向速度、气流速度、粉煤灰的粒度、以及电场强度的影响.通过建立荷电矿粒在高压静电分选腔中运动轨迹的数学模型,为定量的分析矿粒在其中的运动轨迹提供了保证.并且通过实验验证了此数学模型的正确性和分选结果的一致性.在此基础上为合理的设计出分选腔的形状(如矩形)和尺寸(如宽与高的比例)提供了参考.并且根据此数学模型预测出的矿粒的运动轨迹,可以为合理的选择分矿板的数目以及合理的布置分矿板在分选腔中的位置提供依据,最终达到提高矿物的分选效率的目的.

参考文献:

- [1] 何家宁. 复合式摩擦电选机分选机理的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007
- [2] 章新喜, 段超红, 于凤芹, 等. 微粉煤的电性质及摩擦带电研究[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(6): 694-697.
- [3] Li T X, Ban H., Hower J C., et al Dry Triboelectrostatic Separation of Mineral Particles A potential Application in Space Exploration[J]. Journal of Electrostatics 1998; 47(3): 133-142
- [4] Ban H, Li T X, Schaefer J L, et al Characterizing Dry Triboelectrostatic Beneficiation of Coal and Fly Ash Using Recovery Analysis[C] // Proceedings of 13th Annual International Pittsburgh Coal Conference, 1996; 2: 873-878
- [5] Ban H, Li T X, Etchells M, et al Triboelectrostatic Beneficiation Technology Size and Size Distribution Influence in Coal Combustion Fly Ash[C] // Proceedings of 1997 International Ash Utilization Symposium, Lexington, KY, 1997; 451-458
- [6] Xinkai Jiang DEVELOPMENT AND FUNDAMENTAL EVALUATION OF A NEW TRIBOELECTRO-STATIC SEPARATOR [D]. Kentucky: University of Kentucky, 2003
- [7] 王常任. 磁电选矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986
- [8] Gates P J. A Particle Separator for Electrostatic Separation of Minerals[P]. PCT, Int Appl, 2000
- [9] Cross J A. Electrostatic Principles, Problems and Application[M]. IOP Publishing Limited Bristol England 1987.
- [10] Incullet I I. Electrostatic Mineral Separation[M]. John Wiley & Sons, New York, 1984.
- [11] Haenen, H. T. M., ". Characteristic Decay with Time of Surface Charges on Dielectrics[J]. Journal of Electrostatics 1975, 1(2): 173-185.
- [12] 曹志群. 粉煤灰物性与电选机理研究[D]. 长沙: 长沙矿冶研究院, 1999