



# 风力作用下的干式磁选机对 磁铁矿预选的影响

刘剑军<sup>1,2</sup>, 卢东方<sup>1</sup>, 王毓华<sup>1</sup>, 郑霞裕<sup>1</sup>, 李旭东<sup>1</sup>, 程志勇<sup>1</sup>

(1.中南大学资源加工与生物工程学院, 长沙 410083;

2.鞍钢集团北京研究院有限公司, 北京 102209)

**摘要:** 为了解决传统干式磁选机的脉石夹杂问题, 引入空气作为分选介质, 利用气流曳力破坏磁团聚。采用 3mm 以下大范围粒度的磁铁矿进行预选实验, 通过改变磁场强度、风速大小和滚筒转速, 得到不同条件下的精矿品位、回收率、分选效率等指标。结果表明: 风力与磁场的适当耦合能够强化物料分选过程中的分散作用, 减少因物料沉积和磁团聚作用所带来的脉石夹杂, 特别在磁场强度足够大的情况下, 能够在提高精矿品位的同时保证较高的回收率。对矿物颗粒的受力情况进行了分析计算, 并利用 Comsol 仿真软件对不同风速下的颗粒运动轨迹进行了模拟, 同时对实验前后矿样的化学成分进行了对比, 得出了分选过程中风力的作用机理。风力作用下的干式磁选机选矿成本低, 具有较大的推广应用价值。

**关键词:** 风力; 干式预选; 作用机理; 磁铁矿; 磁团聚; 脉石夹杂; Comsol 仿真

文章编号: 中图分类号: TD924

文献标识码: A

## Effect of Dry Magnetic Separator on Pre-selection of Magnetite under Wind Power

LIU Jian-jun, LU Dong-fang, WANG Yu-hua, ZHENG Xia-yu, LI Xu-dong, CHENG Zhi-yong

(School of Minerals Processing & Bioengineering, Central South University, Changsha, 410083, China;

Ansteel Group Beijing Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of gangue inclusion in the traditional dry magnetic separator, air is introduced as a sorting medium, and the magnetic reunion is destroyed by the drag force of the air flow. Magnetite with a large range of particle sizes below 3mm is used for pre-selection experiments. By changing the magnetic field strength, wind speed and drum speed, indicators such as concentrate grade, recovery rate, and separation efficiency under different conditions are obtained. The results show that the proper coupling of wind force and magnetic field can strengthen the dispersion in the material sorting process and reduce the inclusion of gangues caused by material deposition and magnetic agglomeration. Especially when the magnetic field strength is large enough, it can improve the precision. The mineral grade guarantees a higher recovery rate. The force of mineral particles was analyzed and calculated. Comsol simulation software was used to simulate the particle trajectory under different wind speeds. At the same time, the chemical composition of the ore samples before and after the experiment was compared, and the wind force during the separation process was obtained. Mechanism of action. The dry-type magnetic separator under the action of wind force has a low beneficiation cost and is of great value for popularization and application.

**Keywords:** wind; dry preselection; mechanism of action; magnetite; magnetic agglomeration; inclusion of gangue; Comsol simulation.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51974366, 51804341); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2019zzts701)

**收稿日期:** 修订日期:

**通信作者:** 卢东方, 副教授, 博士; 电话: 15399906602; E-mail: 82559428@qq.com

随着易选、高品位铁矿石的大量消耗，炼铁原料的主要来源变成了“贫、细、杂”的低品位磁性矿石，这些矿石必须经过细碎和解离，且选别比大，为了抛除细碎之后产生的大量脉石，减少磨矿量和提高入磨品位，越来越多的矿区选择在细碎之后加入一道预选工序，以降低生产成本和能耗，促进矿山经济效益的提高<sup>[1-3]</sup>。目前国内外的干磁预选设备以磁力滚筒为主，适用于大块物料的抛尾，但对于细粒级矿物的分选却达不到理想效果。其主要原因在于：磁铁矿等强磁性矿物被磁化后存在较强的相互作用力，即磁偶极子力<sup>[4]</sup>，颗粒间易形成磁团聚体而产生脉石夹杂；同时部分微细颗粒对静电力、范德华力和液桥力等颗粒间作用力十分敏感，磁性颗粒与非磁性颗粒之间的受力差距难以被拉开<sup>[5]</sup>。而湿式磁选由于存在精矿需要脱水干燥、寒冷缺水地区运行困难等弊端，其适用性远不及干式磁选。因此在选择干式磁选的基础上，如何克服磁团聚效应，最大限度地抛除脉石矿物，是当今细粒磁铁矿预选需要解决的主要难题。

针对磁团聚问题，国内外相关研究主要基于以下两个方面进行考虑：一是改变设备的磁场特性，对磁源材料、磁极排列和数量、磁系包角以及旋转方式等进行针对性设计<sup>[6]</sup>。如采用高性能钕铁硼材料制作磁系，其结构设计成大包角、多磁极交替排列，使磁性矿物在滚筒表面发生翻滚和滑动；赵海亮等<sup>[7]</sup>研制的旋转磁场磁选机和王俊良等<sup>[8]</sup>设计的CTFG型粉矿干式磁选机在分选时筒体相对于磁系分别作异步、反向旋转，矿物颗粒在交变磁场作用下发生高频剧烈翻滚和抖动，脉石颗粒被大量抛除。二是将各种附加力场作用于磁分选过程，得到复合力场磁选机<sup>[9-10]</sup>。但此类设备多为湿式，如磁团聚重选机、磁选柱、磁浮选柱、超声波复合精选机、磁场筛选机等。干式复合力场磁选机种类较少，如昆明理工大学程坤<sup>[11]</sup>等研制的气流悬浮干式磁选机和山东华特公司<sup>[12]</sup>研制的粉矿风力干式磁选机，通过在分选区间引入气流，使物料处于松散状态，促进脉石的脱离，但由于气流仅仅在分选筒表面产生作用，对磁链和聚团的破坏并不彻底。F.Mishima<sup>[13-14]</sup>等基于气固流化床研制的干式开放梯度磁选机，使空气流透过滤网从下至上运动，对物料产生较强的分散作用，但该设备主要用于非金属除铁或含少量磁性颗粒的粉末的分离，尚未在铁矿磁选领域得到成熟应用。

本文作者通过对上述两个方面的综合考虑，对传统干式磁选机磁系进行了改进，同时引入更加先进的气流方案，有效破坏干选过程中的磁团聚效应，得到适用于细粒级矿物预选的风力干式磁选机。

# 1 实验

## 1.1 试样所含元素分析

采用云南省大红山-3mm 磁铁矿作为实验原料。试样经过混匀、干燥、缩分后装袋，用作每次实验。表 1 所示为试样铁元素分布与粒度的关系，可知该试样的全铁含量为 34.45%，试样中 -1+0.15mm 粒级占比最大，其铁元素分布律也最高，占总量的 36.66%；其中铁品位最高的粒级是 -3+2mm 的粗颗粒，品位达到 40.60%；而 -0.038mm 的细颗粒铁品位则低得多，只有 9.28%。

表 2 和图 1 分别为试样铁物相分析结果和 XRD 衍射图谱，可以看出该矿样的主要磁性矿物为磁铁矿，所占铁含量为 21.37%，除磁铁矿外，矿样中还含有较多的赤褐铁矿，脉石矿物主要有石英、绿泥石、云母长石和闪石等。其中弱磁性的赤褐铁矿以及可能含铁的绿泥石、云母等脉石矿物会对选别产生不利影响，容易造成铁元素流失，回收率下降。

表 1 试样铁元素分布与粒度的关系

Table 1 Relationship between distribution of iron element and particle size of sample

| Particle size<br>(mm) | Yield(%) | Iron grade(%) | Distribution of<br>iron element(%) |
|-----------------------|----------|---------------|------------------------------------|
| -3+2                  | 7.50     | 40.60         | 8.84                               |
| -2+1                  | 15.95    | 34.40         | 15.93                              |

|              |       |       |       |
|--------------|-------|-------|-------|
| -1+0.15      | 33.75 | 37.42 | 36.66 |
| -0.15+0.075  | 12.15 | 38.72 | 13.66 |
| -0.075+0.038 | 15.78 | 34.13 | 15.63 |
| -0.038       | 14.87 | 21.50 | 9.28  |
| Total        | 100   | 34.45 | 100   |

表 2 试样铁物相分析

| Table 2 Sample iron phase analysis |           |
|------------------------------------|-----------|
| Phase                              | content/% |
| Iron carbonate                     | 0.62      |
| Pyrite                             | 0.016     |
| magnetite                          | 21.37     |
| Hematite-limonite                  | 10.68     |
| False hematite                     | trace     |
| Ferric silicate                    | 1.76      |
| Total iron                         | 34.45     |
| C                                  | 0.36      |
| S                                  | 0.024     |

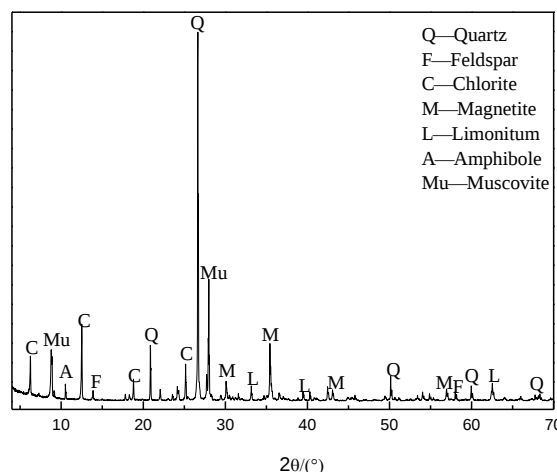


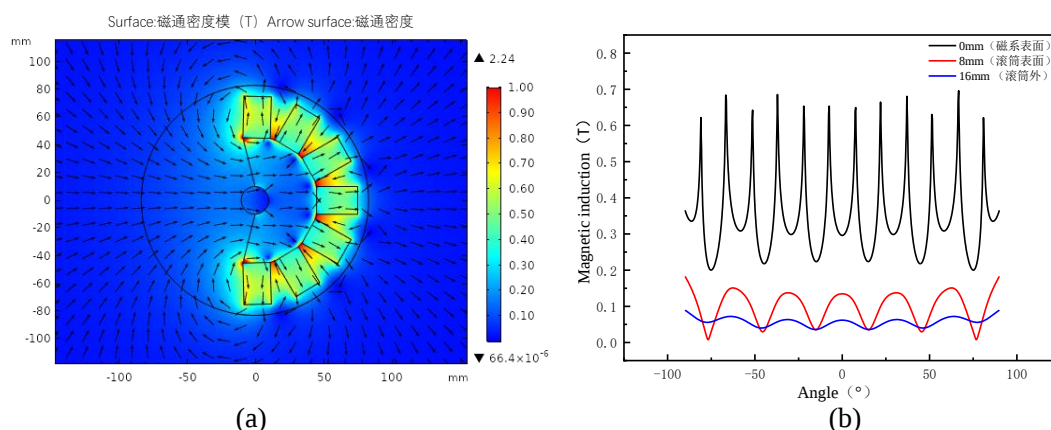
图 1 试样 X 射线衍射图谱

Fig.1X-ray diffraction pattern of the sample

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 干式磁选机结构改进

传统干式磁选机主要由磁系、分选筒、精矿槽及尾矿槽等组成。本次实验在其基础上重新设计了磁系，并增加了风力系统和除尘系统。图 2 所示为改进后的磁系结构和磁场分布特征，整个磁系采用高性能钕铁硼作为磁源材料，设计成多磁极、大包角结构，保证磁场作用强度和深度；同时磁块数量和排列方式可调，能够满足不同磁场强度要求。图 3 所示为磁选机风力系统工作原理图，在分选筒内部引入气流曳力作为竞争力，磁选过程中气流可以透过多孔筒面由内向外扩散，从而分散磁团，增大磁铁矿与脉石矿物颗粒之间的受力差异。



(a) 磁系结构及磁场分布云图；(b) 磁场强度

图2 风力磁选机磁系结构和磁场分布特征图

(a) Magnetic system structure and magnetic field distribution cloud diagram; (b) Magnetic field strength

Fig.2 Magnetic system structure and magnetic field distribution characteristics of wind magnetic separator

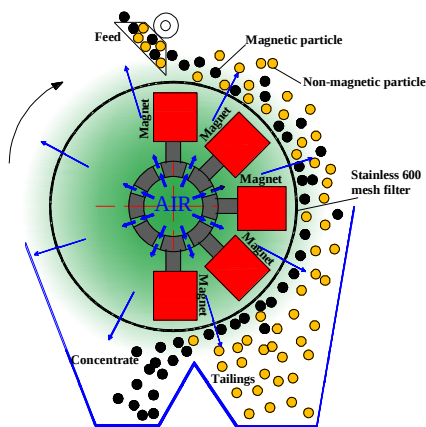


图3 风力磁选机主体结构及工作原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of main structure and working principle of wind magnetic separator

### 1.2.2 实验条件与评价方式

通过调整磁系结构，得到筒面最高磁场强度分别为 450、675、1250Gs；调节滚筒转速分别为 30、45、60、75 r/min；筒面风速范围为 0~0.78 m/s。在此条件下，利用上述准备好的试样，在磁选机上方给料将矿物送至筒体表面进行分选。试样经过分选后得到精矿和尾矿，分别对其进行化验分析，得到精矿品位、回收率等指标，并绘制出磁铁矿精矿品位与回收率随筒面风速变化的曲线，从而得出风力在磁选过程中的作用规律。为了方便对分选结果进行综合评价，引入了分选效率  $E$ ，其计算方法参考汉考克公式<sup>[15]</sup>：

$$E = \frac{(\alpha - \theta)(\beta - \alpha)}{\alpha(\beta - \theta)(1 - \alpha/\beta_m)} \times 100\%$$

式中： $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\theta$ 分别为原矿品位、精矿品位和尾矿品位 $\beta_m$ 为理论最高品位，对磁铁矿而言， $\beta_m = 72.4\%$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 磁场强度对分选性能的影响

对于传统的干式磁选机，磁场强度的大小决定了磁性颗粒的回收数量，是影响精矿品位和回收率的重要因素。本次实验在不加风力作用时，对不同磁场强度条件下磁选机的分选指标进行了比较，结果如表 2 所示。从表 2 可以看出，当磁场强度处于较低水平时，铁的品位较高而回收率较低，这是由于磁场强度较低时颗粒受到的磁力作用小，同时在重力和滚筒离心力的作用下，只有完全解离的磁铁矿颗粒和部分连生体能够被捕收，其余的大部分连生体颗粒因竞争力过大而被抛至尾矿区，导致铁回收率较低。随着磁场强度的增加，磁性颗粒受到的磁力作用增强，更多的磁性颗粒被捕收而进入精矿槽，铁的回收率提高；同时，磁力增强也使得磁团聚作用加剧，脉石颗粒和低品位连生体被夹带到磁精矿中的概率大大增加，导致精矿品位降低。

表 3 无风条件下磁场强度对分选指标的影响

Table3 Effect of magnetic field strength on sorting indicators in the absence of wind

| MagneticFieldintensity<br>(Gs) | 450   | 675   | 1250  |
|--------------------------------|-------|-------|-------|
| Grade (%)                      | 47.66 | 46.06 | 45.00 |
| Recovery (%)                   | 67.65 | 69.66 | 73.84 |

### 2.2 风速对分选性能的影响

为了探究气流曳力对于磁选过程的影响，在不同风速条件下进行了磁选实验。图 4 和图 5 所示为不同磁场强度下磁铁矿精矿品位与回收率随筒面风速变化的曲线。结果表明，当磁场强度为 450Gs 时，风速在 0.18m/s 处精矿品位显著提高，而后随着风速的增大，精矿品位变化不明显，但回收率却急剧下降。这说明气流曳力能够有效增强颗粒的分散效果，使更多的非磁性颗粒偏离磁场进入尾矿区，从而使精矿品位显著提高；但是气流曳力的分散作用存在一个最佳作用点，即最佳风速条件，当气流速度超过最佳风速条件达到一个过高的水平后，颗粒所受的竞争力过强，不少细小的磁性颗粒和连生体也被抛至尾矿区，导致回收率急剧下降。

当磁场强度为 675Gs 时也出现了类似的情况，只不过最佳风速条件提高到了 0.36m/s,显然，风速最佳条件与磁场强度有关。

当磁场强度高达 1250Gs 时,回收率相比 450Gs 和 675Gs 条件下大幅提高，即使在超过最佳风速条件 0.64m/s 时，回收率仍然保持较高水平，说明在高风速条件下物料能够保持良好松散状态的同时，使用强磁场又能够保证细粒级的游离磁性颗粒和连生体颗粒被捕收，使回收率不至于下降得过快。

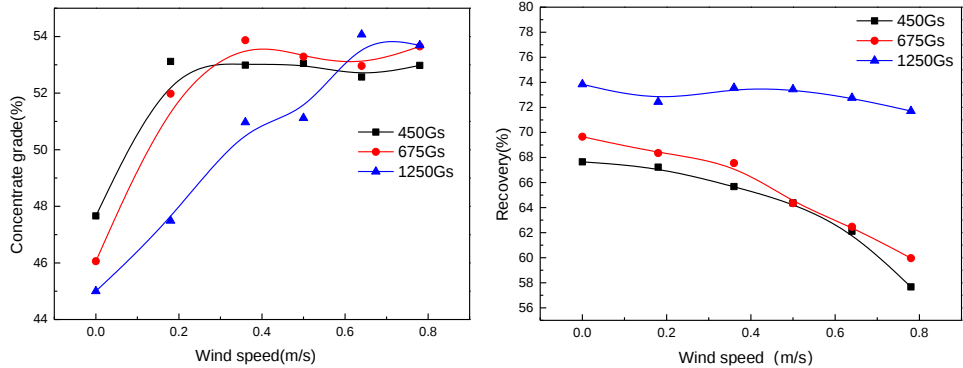


图 4 不同磁

场强度下精矿品位随风速的变化曲线

Fig.4Concentrate grades as a function of wind speed under different magnetic field intensities

Fig.5Recovery as a function of wind speed under different magnetic field intensities

图 6 所示为不同磁场强度下分选效率随筒面风速变化的曲线。可以看出，总体上分选效率值随风速增大呈现先升高后下降的趋势。磁场强度越高，分选效率的最大值越大，且最大值点对应的风速（即最佳风速条件）越大。而在超过最佳风速点时，随着风速的增大，强磁场条件下的分选效率明显下降得更加缓慢。由图 6 可知，当磁场强度为 1250Gs，风速为 0.64m/s 时分选效率最高，此时为最佳分选条件。

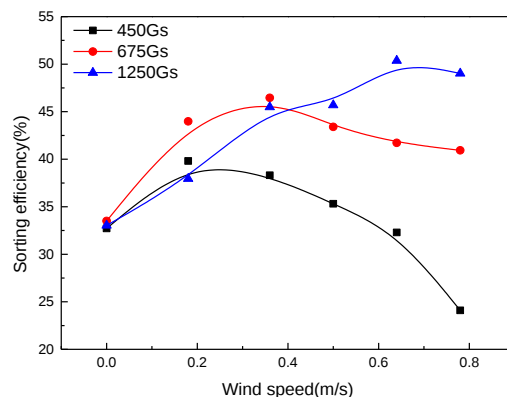


图 6 分选效率随筒面风速变化曲线

Fig.6 Sorting efficiency as a function of drum surface wind speed

## 2.3 滚筒转速对分选性能的影响

在筒面最高磁场强度为 1250Gs，风速 0.64m/s 的条件下，调节滚筒转速为 30rpm、45rpm、60rpm、75rpm 分别进行实验，得到结果如图 7 所示。

对于传统的滚筒磁选机，滚筒转速对分选指标有着非常重要的影响。一般来说，滚筒转速提高，精矿品位会相应提高，而铁的回收率则会降低。这是因为随着滚筒转速的提高，矿物颗粒所受的离心力增大，这会导致更多的非磁性颗粒和细小的磁性颗粒从磁场中排出，使精矿品位提高，回收率下降。然而，从图 7 结果看来，尽管出现了类似的趋势，但是滚筒转速对风力磁选机的分离效率影响似乎并不大。当滚筒转速大幅度增加时，精矿品位只是略微提高，回收率和分选效率也只是略微下降。这是因为强气流提供的电力使磁性颗粒与脉石颗粒的受力差异已经足够大，滚筒离心力并不是物料分散所需的竞争力的显著影响因素，即使当滚筒转速很低时，仍然能够获得高品位精矿。同时，滚筒转速提高，铁的回收率没有明显下降，说明可以通过适当提高滚筒转速来增大风力磁选机的处理能力。

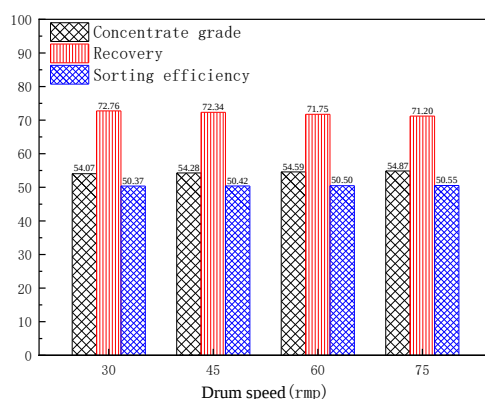


图 7 不同滚筒转速下风力磁选机分选指标的变化

Fig.7 Variation of sorting index of wind magnetic separator at different drum speeds

## 3 机理分析

### 3.1 颗粒受力分析

在磁选分离过程中，颗粒受到的捕收力主要为磁力 $F_m$ ，竞争力主要有气流曳力 $F_d$ 、离心力 $F_c$ 和重力 $G$ ，由于非磁性颗粒不受磁力作用，因此一般来说磁性颗粒与非磁性颗粒所受合力的差距越大，越有利于分离过程的进行。然而，颗粒之间存在的相互作用力阻碍了受力差距的增大，颗粒间相互作用力主要包括磁偶极子力、静电力、范德华力、液桥力等，由于静电力和范德华力通常只在微纳米级别起明显作用，而液桥力在保证矿样干燥条件下也可忽略不计<sup>[16-18]</sup>，因此本次受力分析主要考虑磁偶极子力 $F_a$ 作为颗粒间相互作用力的主要表现形式。如图 8 所示为矿物颗粒所受各力方向示意图（重力未画出）。

假如把矿物颗粒近似看作球形，则根据磁选理论，磁性颗粒在磁场中所受磁力大小可由等式（1）表示<sup>[19]</sup>：

$$F_m = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \frac{1}{\mu_0} \cdot x_0 \cdot B \cdot \nabla B \quad (1)$$

式中： $d$ 为颗粒直径，m； $\mu_0$ 为真空磁导率； $x_0$ 为铁矿石体积磁化系数； $B$ 为磁感应强度，T； $\nabla B$ 为磁感应梯度，T/m。

根据斯托克斯定律与气固两相流动理论<sup>[20]</sup>，颗粒在气流中运动受到的曳力为：

$$F_d = \frac{1}{8} C_D \pi d^2 \bar{\rho} u^2 \quad (2)$$

式中： $C_D$ 为阻力系数； $\bar{\rho}$ 为气流密度，kg/m<sup>3</sup>； $u$ 为球形颗粒与气流的相对运动速度，m/s。其中阻力系数 $C_D$ 与雷诺数 $R_e$ 有关，雷诺数计算公式为：

$$R_e = \frac{du\bar{\rho}}{\sigma} \quad (3)$$

式中： $\sigma$ 为空气的动力粘度，在 101kpa、20℃下约为 $1.79 \times 10^{-5}$ Pa·s。经计算，本论文风力磁选机工作时颗粒在空气流场中的雷诺数为 1~500 之间，其阻力系数满足阿伦公式：

$$C_D = \frac{18.5}{R_e^{0.6}} \quad (4)$$

因此综合式（2）~（4）可得颗粒所受曳力为：

$$F_d = \frac{18.5}{8} \pi \bar{\rho}^{0.4} \sigma^{0.6} d^{1.4} u^{1.4} \quad (5)$$

吸附在筒面的磁性颗粒以及被夹杂的脉石颗粒跟随筒面一起转动，其所受离心力与筒体转速有关，可由等式（6）表示：

$$F_c = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \rho_s \cdot r \cdot \omega^2 \quad (6)$$

式中： $\rho_s$ 为颗粒密度，kg/m<sup>3</sup>； $r$ 为筒体半径，m； $\omega$ 为筒体转动角速度，rad/s；

矿物颗粒在滚筒表面处受到的重力  $G$  可分为沿滚筒切向和径向两个分力：

$$G_x = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \rho_s \cdot g \cdot \sin \theta \quad (7)$$

$$G_y = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \rho_s \cdot g \cdot \cos \theta \quad (8)$$

式中： $G_x$ 为重力沿滚筒切向上的分力，N； $G_y$ 为重力沿滚筒径向上的分力，N； $g$ 为重力加速度，约 10m/s<sup>2</sup>； $\theta$ 为矿粒和滚筒中心连线与竖直向上方向的夹角，其他符号意义同上。可以看出重力沿滚筒径向上的分力 $G_y$ 在夹角 $\theta$ 为 0°~90°之间时表现为捕收力，有利于颗粒回收；夹角 $\theta$ 为 90°~180°时表现为竞争力，不利于颗粒回收。

磁性颗粒之间的磁偶极子力可由毕奥-萨伐尔定律导出<sup>[21]</sup>，根据库建刚等<sup>[22-23]</sup>基于磁偶极子相互作用的研究，空气中磁偶极矩为  $m$  的两个磁性矿粒间的磁相互作用力可表示为：

$$F_a = \frac{3m^2\sqrt{1-2\cos^2\alpha+5\cos^4\alpha}}{4\pi\mu_0 l^4} \quad (9)$$

$$m = \frac{1}{2}\pi\mu_0 d^3 H_0 \cdot \frac{x_0}{x_0 + 3} \quad (10)$$

式中： $\alpha$ 为两磁偶极子中心连线与外磁场方向的夹角， $^\circ$ ； $l$ 为两磁偶极子中心距离，m； $H_0$ 为外磁场强度，A/m；其他符号意义同上。当夹角 $\alpha = 0^\circ$ 时 $F_a$ 表现为相互吸引且吸引力最大，而外磁场强度与磁感应强度 $B$ 的关系为 $B=\mu_0 H_0$ ，假如两个球形磁偶极子之间夹带了一个相同大小的球形脉石颗粒，则两磁偶极子的中心距离 $l=2d$ ，由式（9）、（10）可得：

$$F_a = \frac{3\pi d^2}{64\mu_0} \cdot B^2 \cdot \left(\frac{x_0}{x_0 + 3}\right)^2 \quad (11)$$

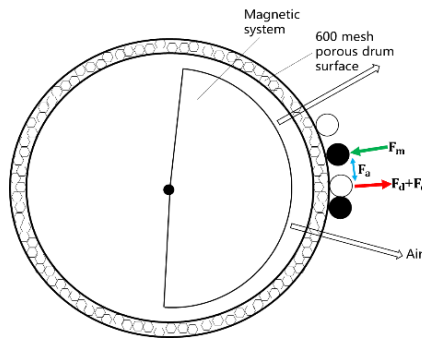


图8 颗粒受力分析图

Fig.8 Particle force analysis diagram

### 3.2 颗粒受力计算

为了方便进行计算，将上述各式中所涉及的物理量取值及单位<sup>[24]</sup>列于表4。

表4 计算所涉及物理量取值及单位

Table4 Values and units of physical quantities involved in calculation

| Parameter    | Value                 | Unit              | Remarks       |
|--------------|-----------------------|-------------------|---------------|
| $B$          | 0.125                 | T                 | Measurements  |
| $\nabla B$   | 13.70                 | T/m               | Measurements  |
| $\mu_0$      | $4\pi \times 10^{-7}$ | N/A <sup>2</sup>  | Constant      |
| $x_0$        | 2.44                  | /                 | Average value |
| $\rho_s$     | 5170/2650             | kg/m <sup>3</sup> | Measurements  |
| $g$          | 10                    | m/s <sup>2</sup>  | Constant      |
| $r$          | 0.083                 | m                 | Measurements  |
| $\omega$     | 3.14                  | rad/s             | Measurements  |
| $\bar{\rho}$ | 1.29                  | kg/m <sup>3</sup> | Constant      |
| $u$          | 0~0.70                | m/s               | Measurements  |
| $\sigma$     | $1.79 \times 10^{-5}$ | Pa·s              | Constant      |

将表4中各参数取值分别代入式（1）、（5）、（6）、（11）中计算即可得到矿物颗粒所受各力值随直径变化的函数图像，结果如图9所示，其中纵坐标采用了对数形式。可以看出，在分选过程中，占主导作用的力为磁力 $F_m$ 、曳力 $F_d$ 以及磁偶极子力 $F_a$ ，而离心力 $F_c$ 和重力 $G$ 相比之下则小几个数量级，这也解释了滚筒转速对分选指标影响较小的原因。此外，磁铁矿颗粒之间存在较强的磁偶极子力是导致脉石颗粒被夹杂的最直接因素，磁偶极子力越大，脉石颗粒受到的夹杂作用必然也越大。由于磁偶极子力与粒径的二次方成正比，而磁力、离心力和重力均与粒径的三次方成正比，因此当颗粒直径较小时，磁偶极子力显得尤为突出，这意味着直径越小的颗粒产生的

夹杂作用力相对于其他力而言也越大，此时单纯依靠重力和离心力不足以将夹杂的脉石抛除，这也是传统干式磁选机分选细粒矿物时效率低的原因。而由图 9 可以看出，气流曳力相比于重力和离心力则大得多，是强有效的竞争力，并且对于不同粒径的矿石，可以通过调节风速大小来使曳力处于最佳值。

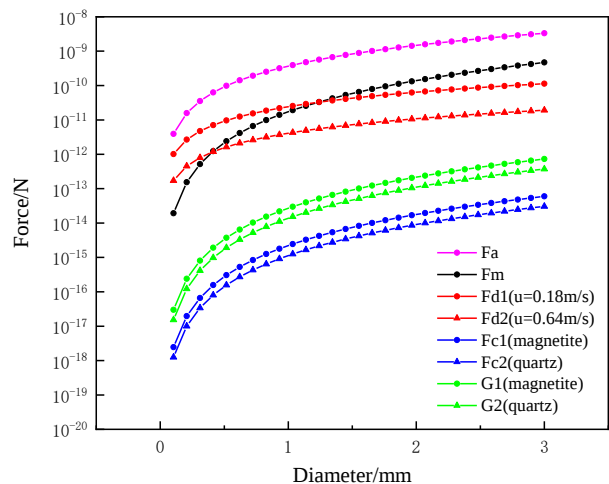
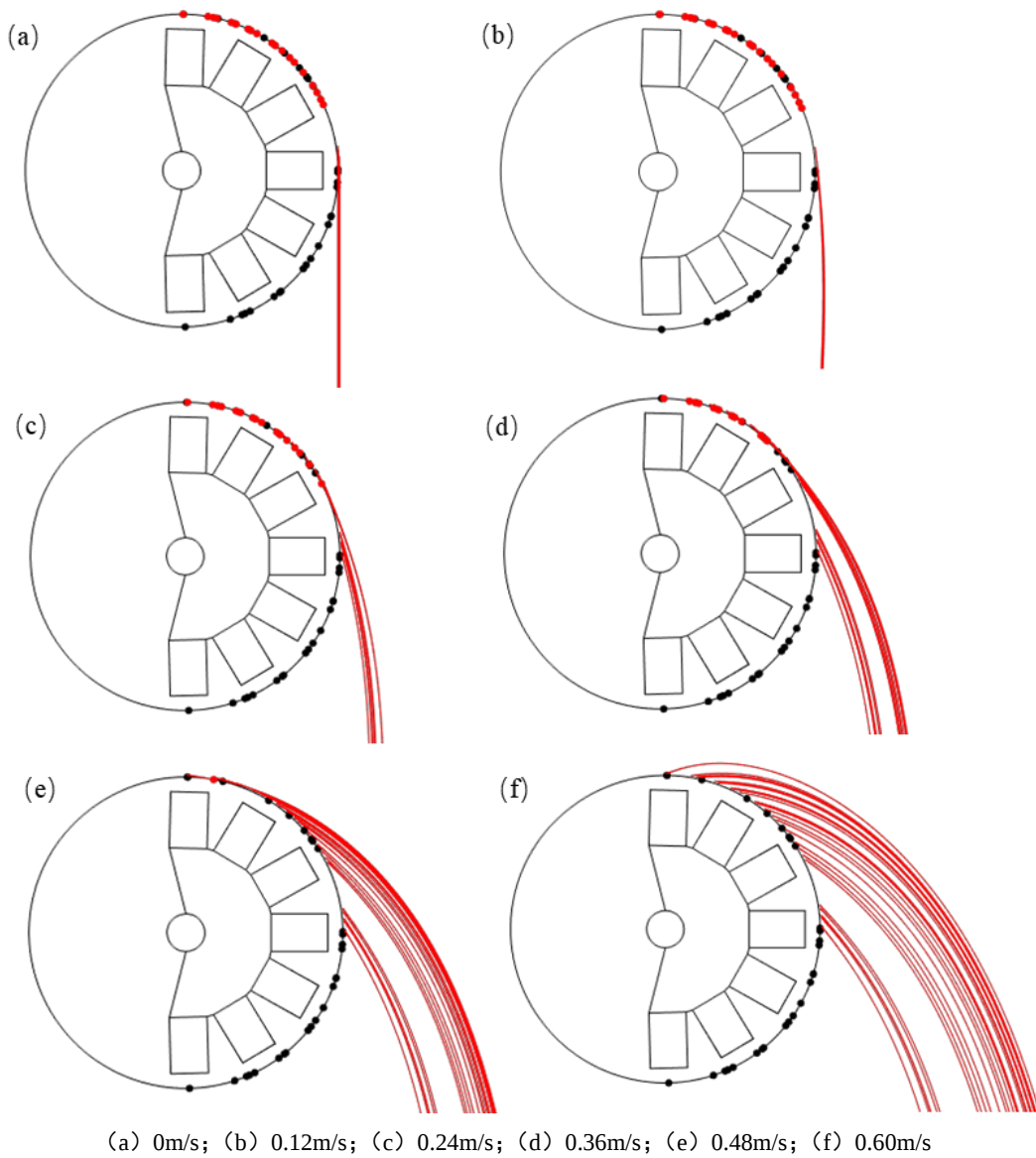


图 9 矿物颗粒所受各力值随直径变化的函数

Fig.9 The function of each force value of mineral particles with the diameter change

为了更直观地表现出风力对于脉石矿物的有效抛除作用，利用 Comsol Multiphysics 对不同风速下的矿粒运动轨迹进行了模拟。Comsol 是一款优秀的多物理场仿真与建模计算工具，以有限元法为基础，通过求解偏微分方程组来模拟真实的物理现象，在各个领域的科学研究和工程计算中均有广泛应用。Comsol 中预定义了大量的物理应用模式，涵盖了流体运动、热传导、电磁场分析、结构力学等多种模型，用户可以灵活地定义材料属性和边界条件等参数，并且对任意多物理场进行耦合分析。本次研究运用了“磁场，无电流”、“层流”以及“流体流动颗粒追踪”模块进行耦合，在对几何模型进行网格划分后，设定颗粒的属性，包括直径、密度和相对磁导率等，然后在几何模型中确定颗粒初始入口和数量、壁面条件以及各力场作用域，最后在研究设置中确定时间和步数进行计算。

以直径 75 $\mu\text{m}$ 的磁铁矿和石英颗粒为例，按 1:1 数量比在滚筒表面随机释放，其中磁铁矿颗粒用黑色表示，石英颗粒用红色表示，其运动轨迹变化如图 10 所示。可以看出，磁性颗粒受磁力作用被吸附在滚筒表面，对应磁极边缘处吸附的磁铁矿颗粒较多，而磁极间隙处较少，这与磁场强度和梯度的分布相符合。而石英颗粒受到风力作用后其运动轨迹呈抛物线状，且风速越大时抛物线开口越大，落点位置也越远，通过无风条件时的轨迹图（a）与 0.60m/s 时的轨迹图（f）对比可知，增大风速对石英颗粒的分离有明显的促进作用。



**图 10** 不同风速下磁铁矿（黑色）和石英（红色）颗粒运动轨迹

**Figure 10** Magnetite (black) and quartz (red) particle movement trajectories at different wind speeds

### 3.3 不同精矿成分对比分析

图 10 所示分别为试样、无风条件下精矿和最佳风速条件下精矿的 XRD 对比，可以看出，未经分选的试样中石英和白云母的衍射峰较强，含有较多的脉石矿物；试样经过常规干式磁选后，石英和白云母含量均有降低，说明部分脉石被抛除；而经过风力磁选机分选所得精矿中石英和白云母的衍射峰强度明显低于试样和常规干式磁选所得精矿，这说明风力磁选机能够在常规干式磁选的基础上进一步降低脉石含量，得到品位更高的精矿。

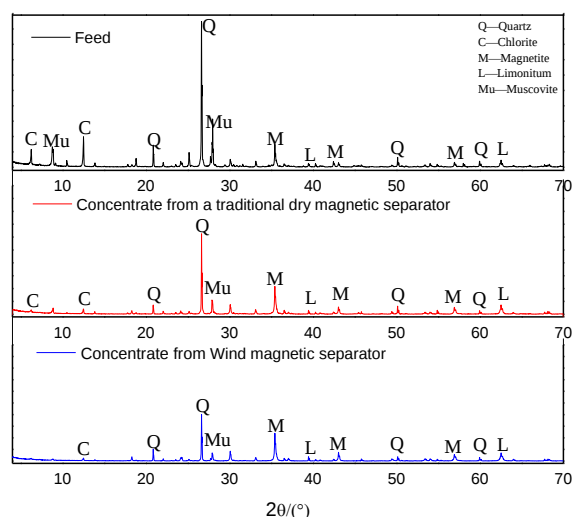


图 11 无风条件下与最佳风速条件下精矿 XRD 对比

Fig.11 Comparison of XRD of concentrates under windless conditions and under optimal wind speed conditions

## 4 结论

1) 试验结果表明：风力在磁选过程中对于提高物料分散性，减少脉石夹杂有着明显的作用，并且磁场强度和风速之间存在最佳耦合点。在保证磁场强度尽可能高的情况下，优化风速条件能够最大化磁场与风力的协同作用，在提高精矿品位的同时保证较高的回收率。

2) 机理分析结果表明：磁偶极子力是导致脉石夹杂的最主要因素，气流曳力是主要的竞争力，增加气流曳力能够在常规干式磁选的基础上进一步降低脉石含量，得到品位更高的精矿；而离心力的贡献极小，滚筒转速对分选指标的影响可以忽略。

3) 风力磁选机采用空气作为分选介质，操作简单、能耗低，选别指标明显优于传统干式磁选机，能够有效减少入磨量和用水量、提高入磨品位，尤其适用于寒冷干旱地区，其成功应用将对选厂降低加工成本、改善选矿技术指标有重要意义。

---

## REFERENCES

- [1] 陈雯,张立刚.复杂难选铁矿石选矿技术现状及发展趋势.有色金属:选矿部分,2013(B12):19-23.  
CHEN Wen, Zhang Li-gang. Status and development trend of beneficiation technology of complex refractory iron ore. Non-ferrous metals: beneficiation part, 2013(B12): 19-23.
- [2] 李丽君.浅析复杂难选铁矿石选矿技术现状及发展.名城绘,2019(3):178-179.  
LI Li-jun. Analysis of the status and development of beneficiation technology of complex refractory iron ore. Famous City Paint, 2019(3): 178-179.
- [3] 李伟.低品位铁矿资源利用技术的发展探讨[J].冶金与材料,2018,38(02):61-62.  
LI Wei. Discussion on the development of low-grade iron ore resource utilization technology[J].Metallurgical & Materials, 2018, 38 (02): 61-62.
- [4] 龙佳,库建刚.磁性颗粒团聚机理与磁团聚设备研究进展[J].化工矿物与加工,2019,48(09):44-49.  
LONG Jia, KU Jian-gang. Research progress on magnetic particle agglomeration mechanism and magnetic agglomeration equipment[J]. Chemical Minerals and Processing, 2019, 48 (09): 44-49.
- [5] Nakai Y, Mishima F, Akiyama Y. Development of high gradient magnetic separation system under dry condition[J]. Physical C Superconductivity, 2010, 470(20): 1812-1817.
- [6] 赵瑞敏.3种新型高效磁选机的研制与应用[J].金属矿山,2011(1):104-108.  
ZHAO Rui-min. Development and Application of Three New High-efficiency Magnetic Separators[J]. Metal Mine, 2011(1): 104-108.
- [7] 赵海亮,冉红想,魏红港,赵瑞敏.新型旋转磁场干选机在细粒干选领域的研究及应用.有色金属:选矿部分,2017(B11):81-84.  
ZHAO Hai-liang, RAN Hong-xiang, WEI Hong-gang, ZHAO Rui-min. Research and application of a new type of rotating magnetic field dry separator in the field of fine particle dry separation. Nonferrous metals: mineral processing, 2017(B11): 81-84.
- [8] 王俊良,袁喆,圣洪,赵光宇,吴世清.CTFG型粉矿干式磁选机及其应用[J].现代矿业,2017,33(04):159-161.  
WANG Jun-liang, YUAN Zhe, SHENG Hong, ZHAO Guang-yu, WU Shi-qing. CTFG powder ore dry magnetic separator and its application [J]. Modern Mining, 2017, 33(04): 159-161.
- [9] 胡永会.国内弱磁场精选磁选设备的研究与发展[J].有色金属(选矿部分),2017(Z1):74-80.  
HU Yong-hui. Research and Development of Magnetic Field Selection Equipment for Weak Magnetic Fields in China[J].Nonferrous Metals(Selection Section), 2017 (Z1): 74-80.
- [10] 樊盼盼,乔笑笑,刘安,董连平,杨宏丽,刘翼洲,樊民强.磁铁矿分选设备研究现状与发展趋势[J].有色金属:选矿部分,2019,000(002):80-83.  
FAN Pan-pan, QIAO Xiao-xiao, LIU An, DONG Lian-ping, YANG Hong-li, LIU Yi-zhou, FAN Min-qiang. Research status and development trend of magnetite separation equipment[J]. Nonferrous Metals: Mineral Processing Section, 2019, 000(002): 80-83.
- [11] 程坤.干式弱磁场气流悬浮磁选机的研制[D].昆明理工大学,2007.  
CHENG Kun. Development of dry weak magnetic field air suspension magnetic separator [D]. Kunming University of Science and Technology, 2007.
- [12] 王顺,辛青.新型粉矿风力干式磁选机的研制与应用研究[J].现代矿业,2019,35(04):133-135.  
WANG Shun, XIN Qing. Development and application research of a new powder ore dry magnetic separator[J]. Modern Mining, 2019, 35(04): 133-135.
- [13] Shulei Song, Guilin Zhang, Zhenfu Luo, Bo Lv. Development of a Fluidized Dry Magnetic Separator and Its Separation Performance Tests[J]. Taylor & Francis, 2019, 40(5).
- [14] Mishima F, Yamazaki S, Yoshida K, Nakane H. A Study on the Development of an Open-Gradient Magnetic Separator Under Dry Condition[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity: A Publication of the IEEE

- 
- Superconductivity Committee, 2004, 14(2): 1561-1564.
- [15] 许时. 矿石可选性研究[M]. 第2版. 北京:冶金工业出版社, 2006: 288-292.  
XU Shi. Study on the selectivity of ore [M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006: 288-292.
- [16] 邱冠周, 胡岳华, 王淀佐. 颗粒间的相互作用与细粒浮选[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1993: 26-49.  
QIU Guan-zhou, HU Yue-hua, WANG Dian-zuo. Interaction between particles and fine particle flotation [M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1993: 26-49.
- [17] 李战军, 田运生, 汪旭光. 矿尘凝聚机理及实验研究[J]. 矿业安全与环保, 2006(01): 10-11.  
LI Zhan-jun, TIAN Yun-sheng, WANG Xu-guang. Mine dust agglomeration mechanism and experimental research [J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2006(01): 10-11.
- [18] 任俊, 沈健, 卢寿慈. 颗粒分散科学与技术[M]. 化学工业出版社, 2005.  
REN Jun, SHEN Jian, LU Shou-ci. Particle Dispersion Science and Technology[M]. Chemical Industry Press, 2005.
- [19] 王淀佐, 邱冠周, 胡岳华. 资源加工学[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 156-159.  
WANG Dian-zuo, QIU Guan-zhou, HU Yue-hua. Resource Processing Science [M]. Beijing: Science Press, 2005: 156-159.
- [20] 袁竹林, 朱立平, 耿凡, 彭正标. 气固两相流动与数值模拟[M]. 南京: 东南大学出版社, 2013: 33-38.  
YUAN Zhu-lin, ZHU Li-ping, GENG Fan, PENG Zheng-biao. Gas-solid two-phase flow and numerical simulation [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2013: 33-38.
- [21] 李建青. 用毕奥-萨伐尔定律计算磁偶极子的磁场分布[J]. 物理与工程, 2004(04): 14-15.  
LI Jian-qing. Calculation of the magnetic field distribution of magnetic dipoles using Biot-Savart law [J]. Physics and Engineering, 2004(04): 14-15.
- [22] Ku J G, Liu X Y, Chen H H, Deng R D, Yan Q X. Interaction between two magnetic dipoles in a uniform magnetic field[J]. 2016, 2(6): 025004.
- [23] 库建刚, 陈辉煌, 何逵, 晏全香. 磁性矿粒在磁选过程中的受力分析及动力学模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(05): 1577-1582.  
KU Jian-gang, CHEN Hui-huang, HE Kui, YAN Quan-xiang. Analysis and Dynamics Simulation of Ferromagnetic Ore Particles in Magnetic Separation Process[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46 (05): 1577-1582.
- [24] 袁志涛, 王常任. 磁电选矿[M]. 第2版. 北京:冶金工业出版社, 2015: 12-23.  
YUAN Zhi-tao, WANG Chang-ren. Magnetoelectric Mineral Processing[M]. 2nd Edition. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015: 12-23.

**Fundation item:** Project (51674290) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(2019zzts701) supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Central South University.

**Received date:** **Accepted date:**

**Corresponding author:** LU Dong-fang; Tel: 15399906602; E-mail: 82559428@qq.com