基于 EDEM-Maxwell 耦合的不同磁性颗粒群运动特性模拟*

张忠元,陈明,毕中,马学东

(辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山市 114051)

摘要:为探究不同磁性颗粒在永磁辊式磁选机选矿过程中的运动规律与分选机理,基于磁场梯度和颗粒的比磁化率,建立了磁力计算模型。采用 ANSYS Maxwell 软件模拟永磁辊磁系的磁场分布,获取磁场矢量数据后,通过 EDEM 场管理导入仿真环境,并基于 C++ API 进行了二次开发,扩展了 EDEM 模拟磁力作用下的颗粒行为特征。模拟结果表明:磁性颗粒在高速度区的分布密度显著高于连生体颗粒和非磁性颗粒;当颗粒粒径从 15 mm 增大到 60 mm 时,颗粒的平均脱辊速度和最小脱辊速度呈增大趋势,最大脱辊速度则相反;当磁辊转速从 10 r/min 提高到 50 r/min 时,磁性颗粒、连生体颗粒及非磁性颗粒间的轨迹间距均有所增大,转速为 30 r/min 时,颗粒分选效果较好。对本文提出的耦合仿真方法进行试验验证,结果表明,该耦合仿真方法可以相对真实地模拟磁性颗粒分离过程。研究结果为优化此类选矿技术提供了重要的理论依据和技术支持。

关键词:磁力选矿;EDEM-Maxwell 耦合方法;磁辊转速;颗粒粒级;颗粒运动模拟

中图分类号:TD924 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)03-0301-12

Simulating the Motion Characteristics of Different Magnetic Particle Groups Based on EDEM-Maxwell Coupling

ZHANG Zhongyuan, CHEN Ming, BI Zhong, MA Xuedong

(School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning 114051, China)

Abstract: To investigate the motion patterns and separation mechanisms of different magnetic particles in a permanent magnet roller separator during mineral processing, a magnetic force calculation model was established based on the magnetic field gradient and particle specific magnetic susceptibility. The magnetic field distribution of the permanent magnet roller system was simulated using ANSYS Maxwell. The obtained magnetic field vector data were then imported into the EDEM simulation environment via its field management interface. Subsequently, secondary development was performed using the C++ API to extend EDEM's capabilities for simulating particle behavior under magnetic forces. Simulation results indicate that the distribution density of magnetic particles in high-velocity zones is significantly higher than that of intergrowth particles and non-magnetic particles. As particle size increases from 15 mm to 60 mm, the average and the minimum roll-off speeds of the particles show an increasing trend, while the maximum roll-off speed exhibits the opposite behavior. When the magnetic roller speed increases from 10 r/min to 50 r/min, the trajectory spacing among magnetic particles, intergrowth particles, and non-magnetic particles all increase. At a speed of 30 r/min, particle separation performance is optimal. Experimental validation of the coupled simulation method demonstrates that it can realistically simulate the magnetic particle separation process. The research findings provide crucial theoretical foundations and technical support for optimizing such mineral processing technologies.

Key words: Magnetic separation, EDEM-Maxwell coupling method, Rotational speed of magnetic roller, Particle size fraction, Particle motion simulation

0 引言

在现代选矿技术中,磁力选矿因其高精度、高效率而受到广泛关注。磁选是利用不同矿物的磁性差异,采用不同类型的磁选机,通过磁场将矿物中的磁性颗粒和非磁性颗粒进行分离,该技术已在铁矿、锰矿和稀有金属矿等资源中得到了广泛应用[1]。随着对铁矿的开采强度及开采深度的增加,国内铁矿石的开采品位逐年降低[2],磁选技术的进步使得更多含铁量较低的矿石也能够被用于工业化生产[3]。磁

* **收稿日期**:2025-04-17

作者简介:张忠元(2000—),男,山东滕州人,硕士研究生,主要从事颗粒物质动力学研究。E-mail:zyuanpro@qq.com

通信作者:陈明(1980—),男,辽宁辽阳人,博士,副教授,主要从事节能环保冶金新工艺及装备的开发研究。E-mail:chenming@ustl.edu.cn

力选矿技术的发展得益于磁场强度、梯度和磁选机设计的提升,这些因素能够显著影响矿物分离的效果[4-5]。

在磁性颗粒分离领域,国内外学者对磁场设计、分离机制及颗粒运动行为等方面进行了广泛研究,并取得了一定进展。赵通林等[6]基于小岭子磁选尾矿的性质,进行了五段磁选回收尾矿中磁铁矿的处理工艺研究,并通过试验评价其工艺流程。李国雄等[7]通过对低品位弱磁性铁矿磁选技术的研究,以及对内蒙古东源铁矿的调查,提出了一种干式与湿式结合的磁选工艺。朱德华等[8]提出了利用高速气流与高梯度磁场结合的方法,实现了高岭土的干式除铁,并通过试验优化了分散器设计,为干式磁选设备的开发提供了新思路。张义顺等[9]通过 PFC2D 动力学仿真技术,研究了高梯度磁场中煤粉干式磁选的颗粒运动规律,系统分析了磁场强度、颗粒间相互作用力及极距对分选效果的影响,证实了动力学模拟在磁选效率提升中的应用潜力。库建刚等[10]基于磁偶极子模型,通过 Verlet 速度算法模拟了强磁性矿粒的受力和轨迹,揭示了磁偶极子力在磁链形成过程中的主导作用。近年来,随着磁分离技术的深入发展,学者们更加注重通过磁场理论的完善来深化对颗粒行为的解析。HISAYOSHI 等[11]利用钕铁硼(NdFeB)永磁体,通过低强度静磁场梯度实现了弱磁性和抗磁性颗粒的动态分离,验证了在微重力条件下对异质颗粒群进行高效分离的可行性,拓展了磁分离技术的应用范围。LIU 等[12]通过高梯度超导磁体的水平偏转试验,探索了磁化浮力和横向浮力在矿物分离中的作用机制。CAO 等[13]开发了基于数值模拟的有限元模型,揭示了颗粒在磁场和流体动力学耦合作用下的动态行为,为磁性颗粒链状聚集现象提供了理论支持。然而,以上研究主要集中于单颗粒或少量颗粒的运动规律,对于颗粒群在复杂磁场下的动态行为和分选效率的分析仍显不足,也缺乏针对不同磁性颗粒分离行为的系统性研究。

综上所述,尽管在磁性颗粒分离技术领域取得了一定进展,但对于多颗粒复杂动力学行为、磁场梯度与分离效率的定量关系,以及多物理场耦合作用的理解尚待深化。对此,本研究采用 ANSYS Maxwell 和 EDEM 软件,将磁场模拟与颗粒动力学模拟相结合,实现对干式辊式磁选机中颗粒群的运动轨迹及分选行为的分析。利用 Maxwell 计算磁场强度及梯度的分布;利用 EDEM 软件模拟颗粒群在磁力和机械力作用下的运动轨迹。通过将磁场数据导入 EDEM 中实现耦合模拟,准确揭示了颗粒在复杂磁场中的动态行为,为分离效率优化及磁选设备开发提供了理论依据和技术支撑。

1 基本理论与模型描述

1.1 几何模型

建立磁选机的简化模型如图 1 所示,该模型包含入料板、输送带、磁辊和收集箱等关键组件。矿石颗粒经由入料板导入,在摩擦力驱动下水平移动至磁辊附近。进入磁场区域后,非磁性颗粒主要受重力作用,并因自身惯性保持原有运动状态,呈现抛体运动轨迹;而磁性颗粒因受到磁力影响,其运动轨迹发生改变,被吸附于磁辊表面并随之旋转。考虑到磁辊与颗粒间的输送带对同类磁性颗粒的作用效果相近,为简化分析过程,忽略输送带对磁场分布的影响。

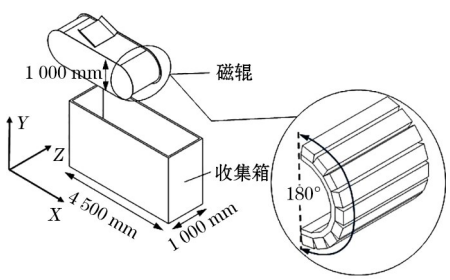


图 1 分选设备仿真模型

Fig.1 Simulation model of sorting equipment

1.2 基本磁场理论

在电磁学理论框架内,对磁现象的描述通常依赖于两个关键的矢量场:磁感应强度和磁场强度。在真空环境中,两者存在简单的线性关系,由真空磁导率联系:

$$B \approx \mu_0 H \tag{1}$$

式中:B 为磁感应强度,T;H 为磁场强度,A/m;μ_0 为真空磁导率,H/m。

然而,当磁场穿透物质介质时,情况则更为复杂。介质本身会被磁化,产生宏观的磁化强度 M,它反映了材料内部磁偶极矩的集体响应。此时,磁感应强度 B 不仅取决于外部施加的磁场强度 H,还包含了材料磁化所贡献的部分,其关系式修正为:

$$B \approx \mu_0 (H + M) \tag{2}$$

式中,M 为磁化强度,A/m。

为了便于对特定系统进行分析,例如,本研究中涉及的磁辊所产生的磁场,可以引入简化假设。若系统变化缓慢,满足准静态近似条件,且所考虑的材料为线性、各向同性的顺磁性或抗磁性材料,那么其

磁化强度 M 可认为与外加磁场强度 H 成正比。其比例系数定义为：

$$M=\chi H \tag{3}$$

式中，χ 为体积磁化率。

在准静态条件下，磁辊产生的静磁场主要遵循麦克斯韦方程组中的静磁场方程。若进一步忽略位移电流以及自由电流密度，则方程简化为：

$$\begin{cases}\nabla \cdot B=0\\ \nabla \times H=0\end{cases} \tag{4}$$

式中，∇ 为散度算子。

其中，$\nabla \times H=0$ 表明静磁场 H 在无自由电流区域是一个无旋场。这一特性允许引入一个标量场：标量磁位 ϕ，通过其梯度来表示磁场强度：

$$H=-\nabla \phi \tag{5}$$

这种处理方式极大地简化了问题的求解。将 H 的表达式代入高斯磁定律 $\nabla \cdot B=0$，并结合材料的本构关系 $B=\mu H$（其中 μ 为材料的磁导率，H/m），可得 $\nabla \cdot (\mu H)=-\nabla \cdot (\mu \nabla \phi)=0$。对于磁导率 μ 在空间中均匀分布的区域（即均匀介质），该方程进一步简化为经典的拉普拉斯方程：

$$\nabla^2 \phi=0 \tag{6}$$

磁化率通常用来表示材料在外加磁场下的磁化程度，磁化率越大的物体越容易被磁化，其磁性也越强；反之磁性越弱[14-15]。实际上，矿物颗粒的质地通常是不均匀的，其内部存在一些孔隙，故对于同一种矿物颗粒可能具有不同的磁化率，为了消除孔隙的影响，用比磁化率来表示物体的磁性[16-17]：

$$\chi_m=\frac{\chi}{\rho} \tag{7}$$

式中：χ_m 表示比磁化率，m^3/kg；ρ 表示颗粒的密度，kg/m^3。

1.3　耦合模拟方法

为准确模拟颗粒在磁场环境下的动态行为，本研究采用了电磁场仿真与离散元方法（DEM）相结合的耦合模拟策略。此耦合方法的关键在于精确获取磁场分布数据并将其有效地施加于颗粒系统。

为获得驱动颗粒运动所需的磁场信息，构建了磁场源的几何模型，如图 2(a)所示，该磁系设计采用了 N-S 极交替排列的结构，共包含 9 个磁极，旨在产生具有特定空间分布特征的磁场。利用 ANSYS Maxwell 电磁仿真软件导入此模型，并进行仿真设置：磁极材料设定为钕铁硼（NdFeB），磁极固定装置则采用钢材，二者的材料属性均直接选用软件材料库中提供的默认参数。为了保证计算结果的可靠性并减少边界条件对核心区域磁场分布的影响，仿真模型的各个计算域边界均向外延伸了相当于模型尺寸 50%的距离。同时，为了精确捕捉磁场梯度的剧烈变化区域，采用了自适应网格划分技术对磁系周围空间进行离散，进而求解获得磁场强度 H 的空间分布。基于得到的磁场强度数据，进一步计算出磁场梯度（∇H）。考虑到磁力计算的便捷性与效率，预先计算了磁场强度与梯度乘积（$H \cdot \nabla H$）的矢量场数据，该物理量直接关联到单位体积磁性材料所受的磁力。最后，将此矢量场数据集整理为 EDEM 软件要求的特定字段格式，以备后续导入。

为了在 DEM 模拟中精确分析磁力对颗粒的作用，特别是考虑颗粒自身磁化率的影响，基于 EDEM 的应用编程接口（API），使用 C++语言开发了一个自定义的颗粒体力模型。该模型的核心在于根据公式(8)计算作用在每个颗粒上的磁力。

$$F_m=\mu_0 \cdot V \cdot \chi \cdot H \cdot \nabla H \tag{8}$$

其分量形式表示为：

$$F_m=\mu_0 V\chi \begin{pmatrix} Hx\dfrac{\partial Hx}{\partial x}+Hy\dfrac{\partial Hx}{\partial y}+Hz\dfrac{\partial Hx}{\partial z}\\ Hx\dfrac{\partial Hy}{\partial x}+Hy\dfrac{\partial Hy}{\partial y}+Hz\dfrac{\partial Hy}{\partial z}\\ Hx\dfrac{\partial Hz}{\partial x}+Hy\dfrac{\partial Hz}{\partial y}+Hz\dfrac{\partial Hz}{\partial z}\end{pmatrix} \tag{9}$$

式中：F_m 表示磁力，N；V 表示颗粒体积，m^3；H_x，H_y，H_z 为磁场强度 H 的分量，A/m；x，y，z 表示笛卡尔坐标系的坐标变量，m；∂ 表示偏微分算符。

将编写的自定义力模型代码编译生成动态链接库（DLL）文件后，部署于 EDEM 的仿真目录中，在 EDEM 仿真环境中实现耦合。通过其内置的场数据管理模块，将先前由 Maxwell 计算得到的 $H \cdot \nabla H$ 矢量场数据导入，形成一个覆盖整个颗粒分离区域的场，如图 2(b)所示。为了在颗粒运动过程中准确获取其所处位置对应的场数据，程序采用了反距离加权插值法（IDW）对导入的离散场数据进行空间插值，确保场数据在空间上的连续性和准确性。在仿真模拟的每一个时间步长内，EDEM 求解器都会调用已部署的自定义力模型 DLL。该模型会参考每个颗粒当前所处位置，通过 IDW 插值获取该点的值，并结合颗粒自身的磁化率等属性，依据公式(8)计算出该颗粒此刻所受的磁力。此计算得到的磁力将与其他作用力一同被纳入牛顿第二定律的求解框架中，共同决定颗粒的运动状态，从而实现磁场

与颗粒动力学行为的耦合模拟。耦合实现过程如图 2(c)所示,图中标号为实现顺序。

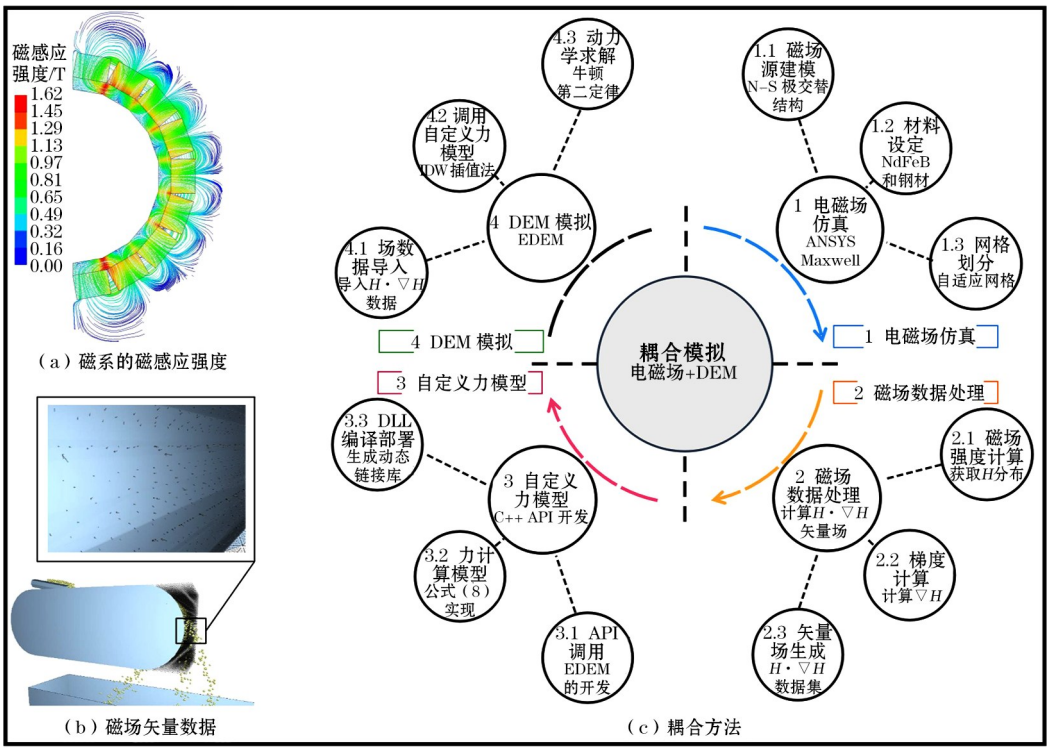


图 2 磁场特性与耦合方法

Fig.2 Magnetic field characteristics and coupling method

1.4 磁性颗粒体的力学分析与动态行为

根据相对磁性强度,待分选矿物颗粒可分为强磁性、中磁性、弱磁或无磁性。不同磁性强度的颗粒在磁场中受到不同大小的磁力,其具体受力情况如图 3 所示。由于合力差异,颗粒的运动轨迹会呈现出明显的区分:无磁性颗粒在输送带末端做抛体运动,而磁性颗粒则随磁辊转动一定角度后发生脱离[18-19],图 3(a)中 θ 即表示为颗粒的脱离角。

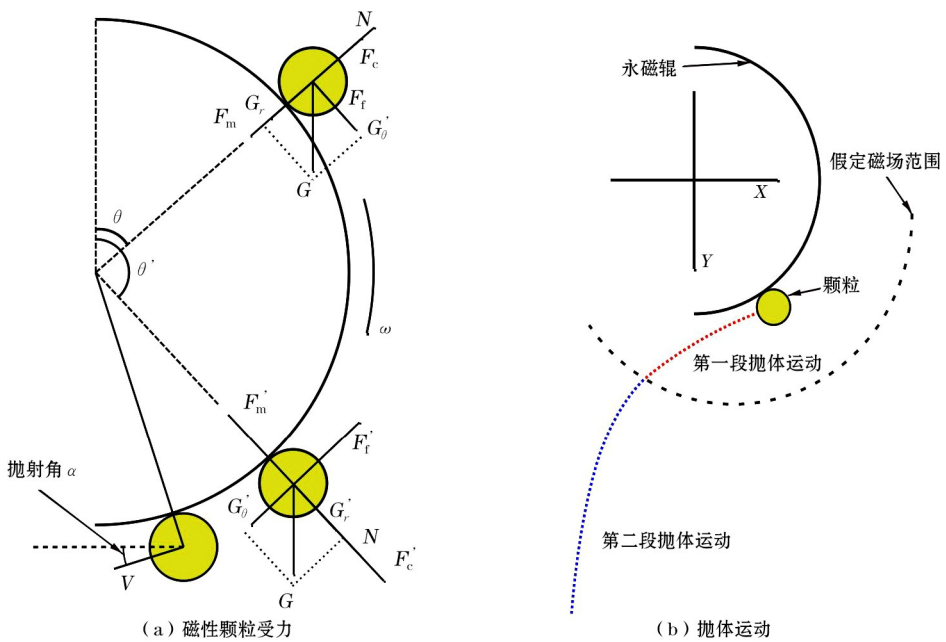


图 3 磁性颗粒受力与抛体运动示意

Fig.3 Schematic of force and throwing motion of magnetic particles

为分析磁性颗粒在磁辊上的运动，对颗粒位置采用极坐标系(r，θ)进行描述，以磁辊中心为极点，垂直线为极轴，将颗粒简化为质点模型，质点的加速度可分解为径向加速度和切向加速度，便于进行平衡受力分析。由于磁辊近似为半径 R 恒定的圆筒，公式(10)中涉及 $\dot{r}$ 和 $\ddot{r}$ 的项可予以忽略。在径向上，质点受到磁力、法向力、重力径向分量及离心力的作用；在切向上，质点受到摩擦力和重力切向分量的作用。基于质点的受力分析，建立公式(11)描述质点在径向和切向的受力组成。通过牛顿第二定律分析质点运动状态的变化属于运动学第二类问题，结合公式(10)和公式(11)求解质点运动方程，最终得到简化形式的公式(12)。

$$\begin{cases} a_r = \ddot{r} - r\dot{\theta}^2 \\ a_\theta = r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta} \end{cases} \tag{10}$$

$$\begin{cases} F_r = F_c + N - F_m + G_r \\ F_\theta = \vec{e}_f F_f + G_\theta \end{cases} \tag{11}$$

$$\ddot{\theta} + 2\vec{e}_f \mu \dot{\theta}^2 - \frac{g}{r}(\vec{e}_f \mu \cos\theta + \sin\theta) - \vec{e}_f \mu \frac{F_m}{mr} = 0 \tag{12}$$

式中：a_r、a_θ 分别为质点的径向加速度和切向加速度，m/s^2；r 为极坐标下的径向坐标，即质点到磁辊中心的距离；$\dot{r}$、$\dot{\theta}$分别为径向速度和角速度；$\ddot{r}$和$\ddot{\theta}$分别为径向加速度和角加速度；F_r、F_θ、F_c、F_m 分别为质点受到的径向合力、切向合力、离心力、磁力，N；μ 为摩擦因数；$\vec{e}_f$ 表示摩擦力的方向，m 为颗粒的质量，kg；N 为磁辊表面对颗粒的法向支持力，N；G_r 为颗粒重力的径向分量，N；G_θ 为颗粒重力的切向分量，N；g 为重力加速度，通常取 9.81 m/s^2。

磁性强度的差异导致不同矿物颗粒在磁场中呈现出运动特征的差异化。强磁性颗粒在磁力作用下附着于磁辊表面运动，在切向上其运动状态受重力分量和摩擦力的共同影响，可能出现相对于磁辊表面的滑动，此时磁力作为向心力维持颗粒的圆周运动。当向心力不足以维持颗粒进行圆周运动时，颗粒脱离磁辊表面并进入抛体运动阶段。弱磁性或无磁性颗粒因受到较小的磁力作用，其脱离磁辊的时刻相对早于强磁性颗粒。当法向力降为零时，标志着颗粒开始脱离磁辊，此脱离角度 $\theta_{脱离}$ 可通过径向受力方程求得，见公式(13)。

$$\cos\theta_{脱离} = \frac{1}{mg}(mr\omega_p^2 - F_m) \tag{13}$$

式中，ω_p 为颗粒的角速度，rad/s。

在脱离磁辊表面后，磁性颗粒仍处于磁场作用范围内。由于磁力的持续影响，颗粒的运动方程呈现出非线性且耦合的特征。由图 3(b)可知，在第一段抛体运动阶段，若不考虑空气阻力，颗粒仅受重力和磁力的作用。基于牛顿第二定律，可在直角坐标系下分别建立 X 方向和 Y 方向的运动方程，从而构建公式(14)所示的磁性颗粒第一段抛体运动微分方程组：

$$\begin{cases} \dfrac{d^2x}{dt^2} = -\dfrac{F_m}{m}\dfrac{x}{d} \\ \dfrac{d^2y}{dt^2} = -\dfrac{F_m}{m}\dfrac{y}{d} + g \end{cases} \tag{14}$$

式中：d 为颗粒质心到磁辊转轴中心的距离；(x，y)为颗粒在直角坐标系下的位置坐标。

$$d = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{15}$$

当磁性颗粒运动至磁场边界外时，颗粒的运动结束，随即进入第二段抛体运动阶段。此阶段的运动轨迹由颗粒离开磁场时的速度矢量 $V_{1(x,y)}$ 和重力场共同决定。以第一段抛体运动终点坐标(x_1，y_1)作为第二段运动的初始位置，通过公式(16)的抛体运动方程可确定颗粒的最终落点坐标：

$$\begin{cases} x(t) = x_1 + v_{1x}(t - t_1) \\ y(t) = y_1 + v_{1y}(t - t_1) + \dfrac{1}{2}g(t - t_1)^2 \end{cases} \tag{16}$$

式中：v_{1x} 和 v_{1y} 为第一段抛体运动终点时，颗粒的水平速度分量和竖直速度分量，m/s；t 为第二段抛体运动过程中的时间分量；t_1 为第一段抛体运动所用时间，s。

2　数值模拟结果

2.1　颗粒参数

本研究以粗颗粒为研究对象，在 EDEM 中设定三类颗粒：磁性颗粒、连生体颗粒和非磁性颗粒，其磁化强度依次递减，各类颗粒的物理特性参数与接触参数见表 1[20-21]，在颗粒工厂中设置每种颗粒均生成 1 000 颗。本文主要采用粒径为 30 mm 的球形颗粒进行模拟，颗粒之间的接触采用 Hertz-Mindlin (no slip)接触模型。将 EDEM 的仿真时间步长设置为 Rayleigh 时间步长的 20%，总仿真时长为 10 s。

表 1　颗粒物理参数

Table 1　Physical parameters of particle

颗粒分类	密度/(kg/m^3)	剪切模量/GPa	泊松比	比磁化率	直径/mm
磁性颗粒	5 260	51.2	0.30	2.5×10^{-7}	30
连生体颗粒	3 500	46.6	0.25	3.5×10^{-8}	30
非磁性颗粒	2 650	44.6	0.15	1×10^{-9}	30

2.2 结果分析

通过提取分选稳定阶段特征颗粒的 X-Y 坐标数据,绘制了位移轨迹。轨迹分布显示磁场对磁性颗粒表现出较高的分离效率,不同磁性强度颗粒的轨迹偏移体现了基于磁性差异的分选效果;轨迹曲率的变化反映了磁力、重力、颗粒速度及磁化率的综合作用效果。磁性颗粒在磁场作用下呈现明显的轨迹偏转,而非磁性颗粒则主要在重力作用下向下抛掷。

为探究不同磁辊转速对颗粒运动的影响,分别导出磁辊转速为 10 r/min、30 r/min、50 r/min 下特征颗粒的 X-Y 位移轨迹散点图,如图 4 所示。由图 4 可知,在磁辊附近,磁系产生的磁场强度足够,磁性颗粒的运动主要受磁力的影响,同时表现出沿磁辊表面的惯性运动特征。根据颗粒径向受力平衡分析可知,颗粒速度增加将导致其脱离角度减小。随着磁辊转速提高,磁性颗粒的脱离角度呈现减小的趋势,这是由于颗粒的角速度增加引起离心力增大,由磁力提供的向心力无法继续维持径向上的平衡,且随着颗粒运动速度的增加,颗粒在磁辊表面接触的时间减少,颗粒受磁场的作用时间相应缩短。在磁辊附近区域存在磁场强度梯度分布,使得颗粒在不同位置受到的合力大小和方向出现差异,从而导致颗粒脱离时的角度和速度呈现离散分布,连生体颗粒的运动轨迹离散度与磁辊转速呈负相关关系,这归因于转速增加时惯性力在颗粒运动中的主导作用增强,使颗粒运动轨迹逐渐趋于一致。非磁性颗粒遵循抛体运动规律,其运动参数与磁辊转速呈现明确的相关性,磁辊转速增加导致抛射角减小,同时抛射初速度和水平位移增大。

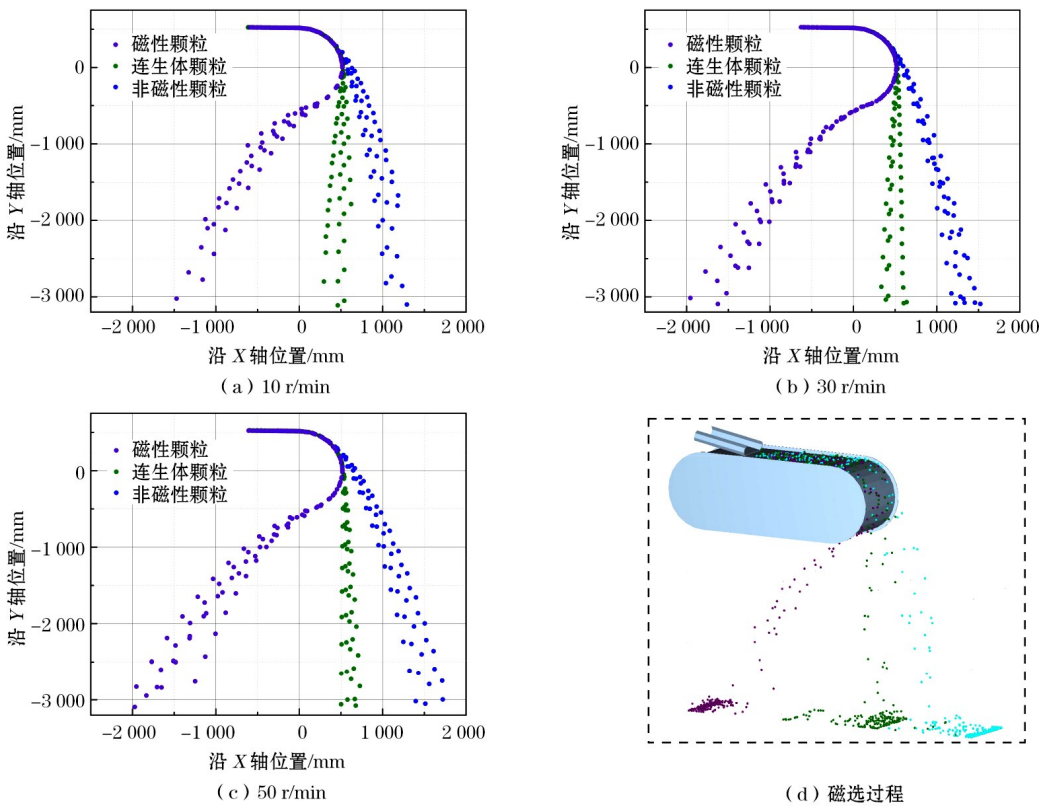


图 4 不同磁性颗粒在不同磁辊转速下的运动轨迹

Fig.4 Trajectories of different magnetic particles at different magnetic roller speeds

磁辊转速设定为 30 r/min 时,磁性颗粒、连生体颗粒及非磁性颗粒在磁辊附近区域的速度分布特征如图 5 所示。由图 5 可知,三者间的速度分布表现出一定的差异性,这主要归因于它们各自对磁场的响应强度不同。对于磁性颗粒而言,其运动轨迹受磁场力主导,并呈现出阶段性的动态变化。具体来看,在进入磁场作用范围的初始阶段,强大的磁力梯度提供了额外的驱动力,使得磁性颗粒相较于连生体颗粒和非磁性颗粒能获得更高的初始加速度。然而,当颗粒被吸附至磁辊表面并随之运动后,持续存在的磁吸附力

可能在一定程度上转化为对其切向运动的阻碍(增加了滚动或滑动摩擦)，从而抑制了其加速度的进一步提升。当颗粒运动至磁辊约 90°位置附近时，重力沿切线方向的分量开始发挥更为积极的作用，为颗粒的切向加速提供了额外的动力。最终，在脱离磁辊的瞬间，颗粒的运动状态由受约束的圆周运动转变为近乎自由的抛体运动，此时磁力、重力等对其轨迹和速度的综合影响机制也随之发生根本性改变。

通过对速度分布特征的深入分析，不仅有助于精确预测不同颗粒在磁辊表面的动态行为，识别潜在的物料滞留或堆积风险区域，而且揭示了颗粒动力学差异对颗粒分选过程中轨迹分离和分选效率的影响，对优化磁选机的设计参数，如磁场强度分布、转速等，具有重要的理论指导意义。

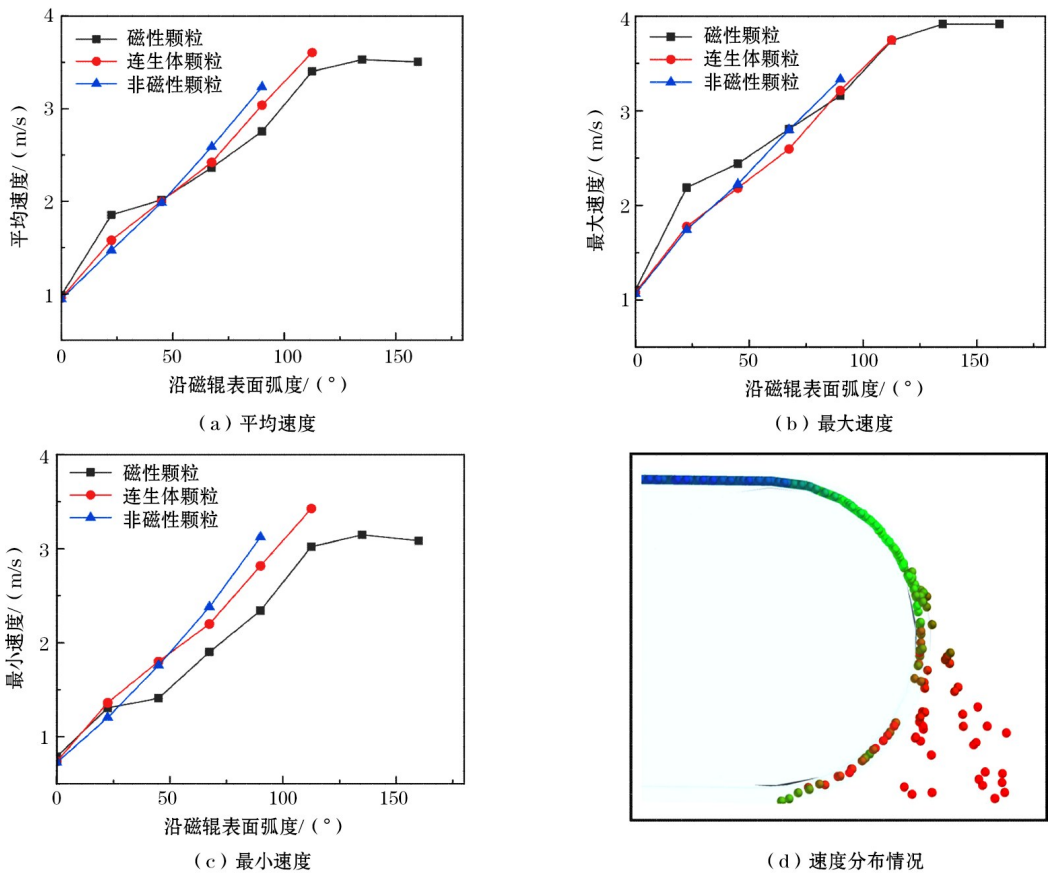


图 5　磁辊转速为 30 r/min 时不同矿物颗粒的速度分布特征

Fig.5　Velocity distribution characteristics of different mineral particles when the magnetic roller speed is 30 r/min

磁分选仿真过程中，在 4～4.2 s 时间段内，磁辊表面三类颗粒(磁性颗粒、连生体颗粒及非磁性颗粒)的速度密度分布情况如图 6 所示。该分布反映了不同颗粒在磁辊上受力情况的差异性，而颗粒获得的速度矢量是其所受合力的直接结果。由于分离效果主要取决于颗粒运动方向与其最终脱离点的相互关系，因此对速度密度的分析有助于从动力学角度理解分选过程的本质。

由图 6 可知，磁性颗粒在高速度区的分布密度显著高于其他两类颗粒，说明磁性颗粒在磁力作用下更紧密地贴附于磁辊表面，从而积累了更多的动能。相比之下，非磁性颗粒主要集中在速度相对较低的单一峰值区域，较为集中的分布形式表明其所受的外力较为稳定且一致，运动轨迹相对单一。连生体颗粒则表现出多峰速度分布特征，这是受磁力、重力、离心力等多种力协同作用的结果。连生体颗粒磁性中等，受力状态不稳定，因此表现出多种速度分布状态。通过分析图 6 所示的速度密度分布情况，将抽象的受力机制差异转化为颗粒动态行为模式差异，为深入理解和优化磁选过程中的颗粒分选轨迹提供了重要的动力学依据。

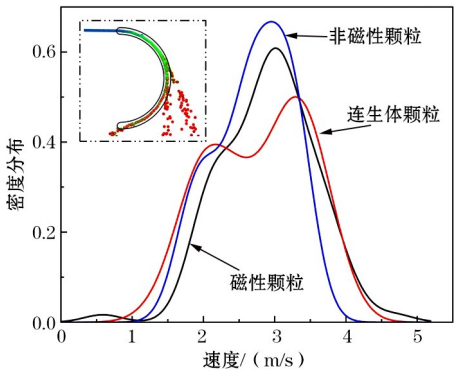


图 6 磁辊上颗粒的速度密度分布

Fig.6 Velocity density distribution of particles on magnetic roller

根据前文及动力学分析结果,颗粒在磁辊表面的切向速度是决定其运动轨迹和分选效果的重要参数。当颗粒进入磁辊区域后,颗粒与输送带之间的速度差值决定了摩擦力的作用方向,进而对颗粒运动产生促进或阻碍作用。重力在切向方向的分量与磁辊表面的切向速度方向相同,对颗粒切向速度产生加速作用。在旋转参考系下,切向速度的增加导致颗粒离心力随之增大,加强了颗粒与磁辊表面的相对滑动,从而对切向速度产生反馈作用。磁性颗粒由于在磁辊表面具有较长的吸附时间,因此获得了更大的切向速度增量。

通过设定不同颗粒体积来研究重力切向分量对颗粒在磁辊附近运动的影响,得到磁辊附近磁性颗粒速度分布特征,如图 7 所示。磁性颗粒的速度随着颗粒体积的增加而增大,验证了重力切向分量对磁辊附近磁性颗粒的加速作用。但颗粒的最大速度并未呈现出相同的变化趋势,造成这种现象的主要原因在于:大体积颗粒受到了更强的离心力作用,磁力无法提供足够向心力维持圆周运动时,颗粒会较早脱离磁辊表面,从而缩短了加速过程。此外,颗粒的体积、离心力和磁力间存在复杂的非线性相互耦合作用,因此颗粒脱离磁辊所需速度实质上取决于其自身物理属性。

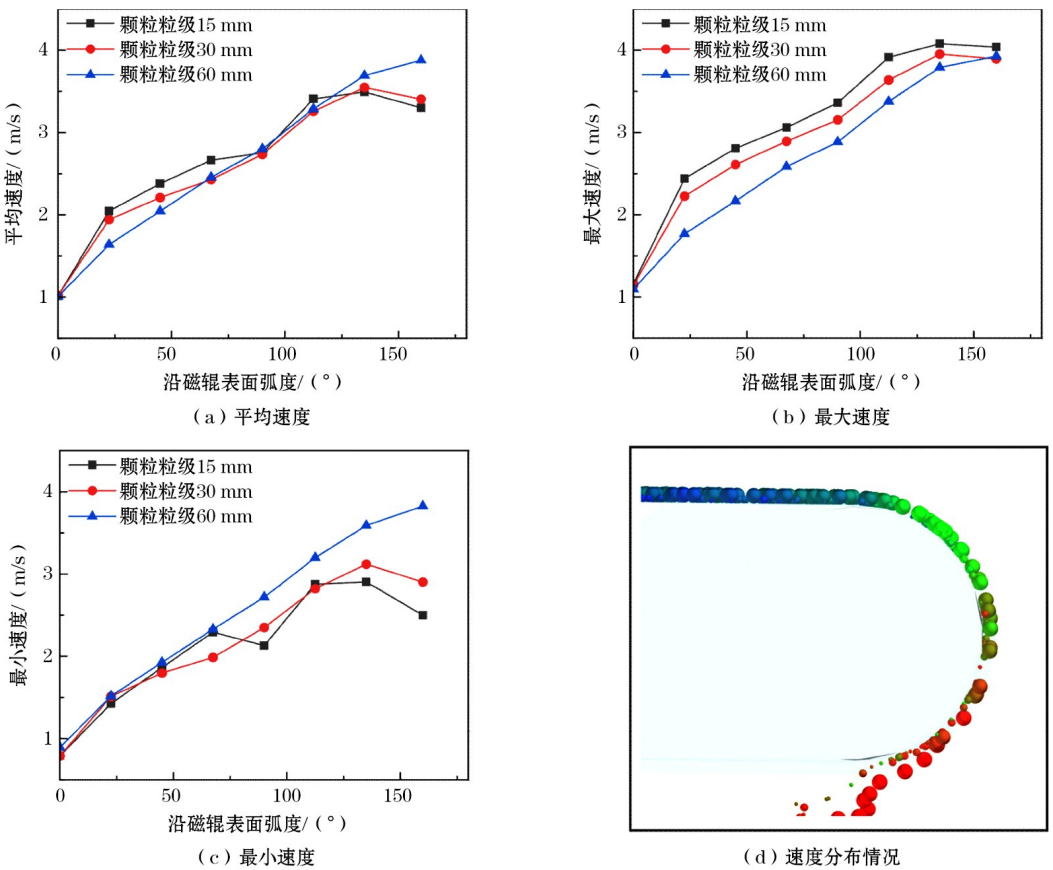


图 7 磁化率较高的磁性颗粒速度分布特征

Fig.7 Velocity distribution characteristics of magnetic particles with higher magnetic susceptibility

为探究分选过程中磁化率对颗粒运动行为的影响,使用控制变量法,将颗粒磁化率减小到原磁性颗

粒的一半，得到磁性颗粒速度分布特征，如图 8 所示。总体来看，磁化率降低后，大颗粒所受重力占据主导作用，磁力对其运动的影响相对有限。磁性颗粒在磁辊表面的贴附时间与其运动特性密切相关，贴附时间越长，相应的抛射角度越小，颗粒获得的速度越大，最终抛掷距离也更远。

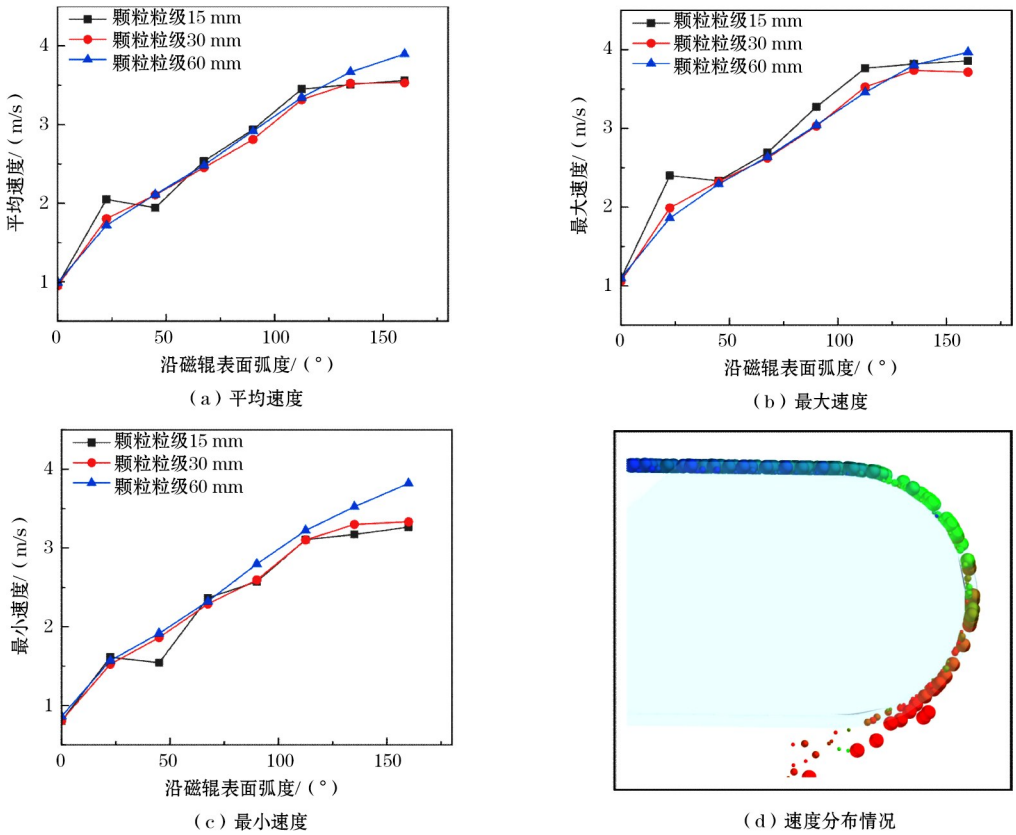


图 8　磁化率较低的的磁性颗粒速度分布特征

Fig.8　Velocity distribution characteristics of magnetic particles with lower magnetic susceptibility

图 9 呈现了磁辊分选过程中不同角度位置颗粒的受力情况。由图 9 可知，颗粒在 Y 轴方向上的受力矢量持续指向重力方向，这一现象揭示了颗粒在整个分选过程中始终受到向下的加速度影响。深入分析数据可知，处于磁辊顶部区域的颗粒几乎不受磁场干扰，其运动轨迹主要由重力主导。当颗粒沿磁辊表面移动至约 45°位置时，颗粒所受合力及对应加速度达到峰值；而当颗粒接近 90°位置时，Y 方向受力状态可简化为重力与表面摩擦力的矢量合成。在 90°～135°区间，离心力逐渐占据主导地位，这促使颗粒加速运动。随后颗粒进入 135°～180°的关键区域，在某一特定角度处，磁力无法继续克服重力与离心力的共同作用，导致颗粒从磁辊表面脱离。这一临界状态的出现标志着磁性颗粒与非磁性颗粒的有效分离，颗粒在重力作用下迅速脱离磁场影响区域，完成分选全过程。

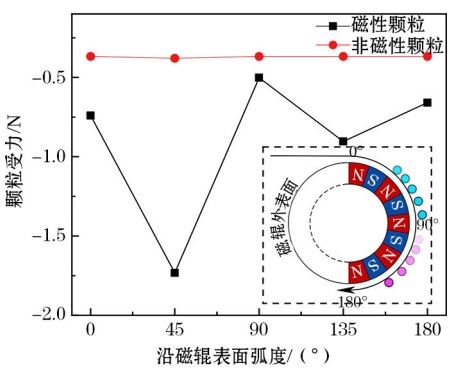


图 9　颗粒在 Y 方向上受到的合力变化曲线

Fig.9　Variation curves of resultant force of particles in Y-direction

将收集箱底部划分为 10×45 个统计区域，对不同转速条件下颗粒的落点分布进行统计分析，结果如图 10 所示。由图 10 可知，随着转速提高，磁性颗粒的落点带呈现左移趋势，这与高转速下

颗粒获得更大水平速度,进而产生更远抛掷距离的运动规律相符。连生体颗粒和非磁性颗粒的落点带则呈现右移趋势,但其作用机理存在差异:连生体颗粒的右移是由于径向磁力与离心力的平衡点被提前破坏,导致颗粒在磁辊表面的脱离位置逆时针偏移;非磁性颗粒则几乎不受磁力作用,其运动轨迹的改变主要取决于速度的变化。随着辊速增加,磁性颗粒落点带逐渐收窄,不同磁性颗粒之间的间隔随之扩大,这种变化有利于颗粒提高分选效果。

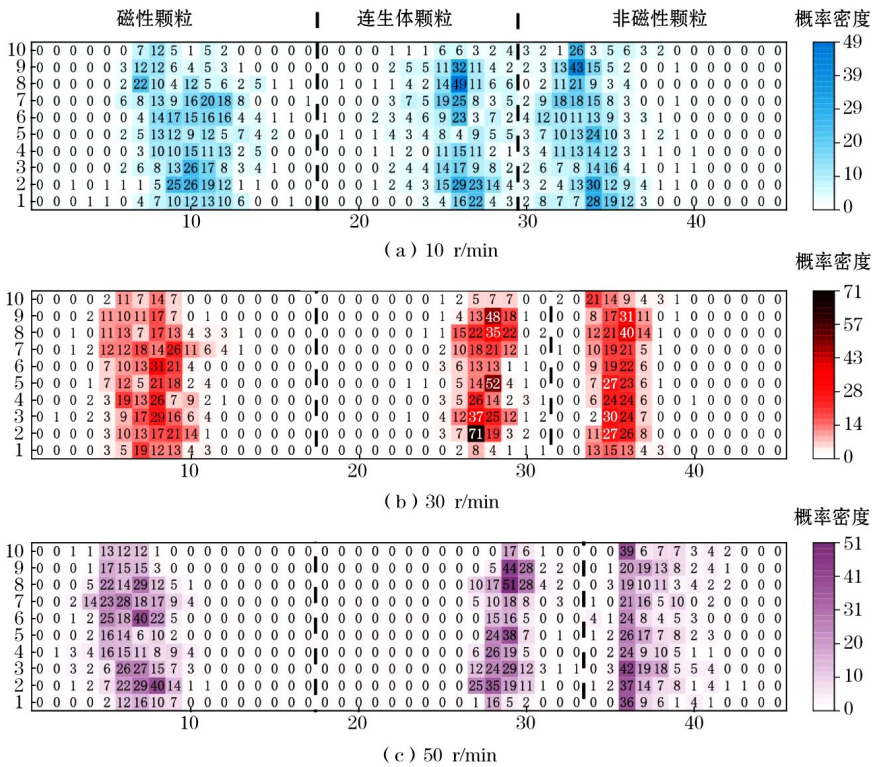


图 10 颗粒在不同磁辊转速下落点对比

Fig.10 Comparison of particle landing zones at different magnetic roller speeds

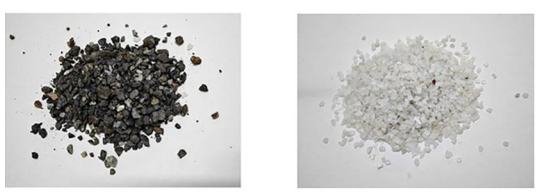
3 试验验证

为了验证本文提出的耦合仿真方法,通过搭建简易试验平台与仿真结果进行对比。该试验装置装配了一个永磁辊,使用电机来带动输送带运转,并配有变频器来控制电机转速。试验过程使用铁矿石颗粒与石英砂颗粒作为试验对象(见图 11)。将两种颗粒混合投入分选机中进行分选,观察颗粒的落料情况,得到的试验结果如图 12 所示。由于电机与磁辊转轴通过同步带连接,即同一时间内,通过主动轮和从动轮的齿带长度是相等的。若将磁辊转速设定为固定值,那么可根据以下公式计算得到电机应设定的转速:

$$N_1 = N_2 \times (Z_2/Z_1) \tag{17}$$

式中:N_1 为主动轮(电机)的转速,r/min;N_2 为从动轮(磁辊)的转速,r/min;Z_1 为主动轮的齿数;Z_2 为从动轮的齿数。

由图 12 可知,随着磁辊转速增加,铁矿石和石英砂颗粒的水平移动距离增加,两种颗粒之间的间距相应增大。根据观察,铁矿石颗粒落料时的宽度逐渐变窄,这是由于速度增加导致颗粒运动模式趋于一致。该结果与耦合模拟结果基本一致,表明本文提出的模拟方法可以相对真实地模拟磁性颗粒分离过程。



(a) 铁矿石颗粒 (b) 石英砂颗粒

图 11 试验用矿石颗粒

Fig.11 Ore particles for testing



(a) 10 r/min (b) 30 r/min (c) 50 r/min

图 12 不同转速下的颗粒分选结果

Fig.12 Particle sorting results at different speeds

4 结论

采用 Maxwell 软件对磁系磁场进行模拟，通过 EDEM-API 接口将磁场数据导入 EDEM 仿真环境中，构建自定义力场模型，完成对三种不同磁性粗颗粒的动态分选仿真。得到如下主要结论。

(1) 创新性的建立了一种 EDEM 与 Maxwell 耦合的磁力分选仿真方法。利用 Maxwell 得到精确的磁场分布数据，通过 EDEM-API 将其加载至颗粒运动仿真环境，实现了磁场与颗粒力学行为的耦合。试验验证表明，该方法能够相对真实地再现磁力分选过程中颗粒的运动状态和分布规律，为磁选设备的性能优化提供了可靠的理论依据。

(2) 根据动力学分析，颗粒脱辊时的速度矢量是影响颗粒最终分选性能的关键初始条件。当颗粒粒级从 15 mm 增大到 60 mm 时，颗粒的平均脱辊速度和最小脱辊速度呈增大趋势，最大脱辊速度则相反。若原料粒度分布范围过宽，不同粒级颗粒的运动轨迹差异将导致颗粒分选精度下降。

(3) 调整磁辊的转速可以控制分选效果，当转速从 10 r/min 提高到 50 r/min 时，磁性、连生体及非磁性颗粒间的轨迹间距均有所增大，但过大的间距可能对收集产生影响，针对研究采用的混合颗粒体系，转速为 30 r/min 时已能实现较好的分离效果。

参考文献(References)：

[1] KELLAND D. High gradient magnetic separation applied to mineral beneficiation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1973,9(3):307-310.

[2] 张亚明，朱欣然，李为，等.铁矿资源开发利用评价指标体系研究[J].矿业研究与开发，2020，40(9)：165-169.
ZHANG Yaming, ZHU Xinran, LI Wei, et al. Study on the evaluation index system for development and utilization of iron ore resources[J]. Mining Research and Development, 2020,40(9):165-169.

[3] 刘剑军，卢东方，王毓华，等.风力作用下的干式磁选机对磁铁矿预选的影响[J].中国有色金属学报，2020，30(10)：2482-2491.
LIU Jianjun, LU Dongfang, WANG Yuhua, et al. Effect of dry magnetic separator on pre-selection of magnetite under wind power[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020,30(10):2482-2491.

[4] NEVSKY B, SKRINICHENKO M, VOROBYEV A, et al. Potentialities for beneficiation of rare metal ores using high magnetic fields[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1981, 17(5):1997-1998.

[5] CHOKIN K, YEDILBAYEV A, YUGAI V, et al. Beneficiation of magnetically separated iron-containing ore waste[J]. Processes, 2022, 10(11):2212.

[6] 赵通林，陈中航，陈广振.小岭子磁选尾矿回收处理工艺研究[J].中国矿业，2014，23(4)：115-117.
ZHAO Tonglin, CHEN Zhonghang, CHEN Guangzhen. Study on the reconcentration technology of the tailings in Xiaolingzi mineral processing plant [J]. China Mining Magazine, 2014, 23(4):115-117.

[7] 李国雄，孙德宁，王洪存，等.低品位弱磁性铁矿磁选技术和工艺研究[J].矿业研究与开发，2012，32(4)：51-53.
LI Guoxiong, SUN Dening, WANG Hongcun, et al. Research on magnetic separation technology of low grade and weakly magnetic iron ore[J]. Mining Research and Development, 2012, 32(4):51-53.

[8] 朱德华，孙仲元，陈荩，等.高岭土干式高梯度磁分离法除铁[J].中国有色金属学报，1993(1)：28-31.
ZHU Dehua, SUN Zhongyuan, CHEN Jin, et al. Iron removal from kaolin by dry high-gradient magnetic separation method[J]. China Nonferrous Metals, 1993(1):28-31.

[9] 张义顺,史长亮,田瑞霞.基于 PFC2D 高梯度磁场下煤粉干式磁选行为模拟[J].煤炭学报,2013,38(9):1668-1674.
ZHANG Yishun, SHI Changliang, TIAN Ruixia. Simulation for dry magnetic separation behavior of pulverized coal in high gradient magnetic field based on PFC2D[J]. Journal of China Coal Society,2013,38(9):1668-1674.

[10] 库建刚,陈辉煌,何逵,等.强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(5):1577-1582.
KU Jiangang, CHEN Huihuang, HE Kui, et al. Force analysis and dynamic simulation of ferromagnetic mineral particles in magnetic separation process [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2015,46(5):1577-1582.

[11] HISAYOSHI K, UYEDA C, TERADA K. Magnetic separation of general solid particles realised by a permanent magnet[J]. Scientific Reports,2016,6(1):38431.

[12] LIU S, LEAPER M, MILES N J. Particle separation by horizontal deflection in paramagnetic fluid [J]. Powder Technology,2014,267:26-38.

[13] CAO Q L, LIU M Y, WANG Z, et al. Dynamic motion analysis of magnetic particles in microfluidic systems under an external gradient magnetic field[J]. Microfluidics and Nanofluidics,2017,21:24.

[14] HWANG S, LEE S K. Efficient experimental design for measuring magnetic susceptibility of arbitrarily shaped materials by MRI [J]. Investigative Magnetic Resonance Imaging,2018,22(3):141-149.

[15] DEISTUNG A, SCHWESER F, REICHENBACH J R. Overview of quantitative susceptibility mapping[J]. NMR in Biomedicine,2017,30(4):e3569.

[16] KUEHN R, HIRT A M, BIEDERMANN A R, et al. Quantitative comparison of microfabric and magnetic fabric in black shales from the Appalachian plateau (western Pennsylvania, USA) [J]. Tectonophysics, 2019, 765: 161-171.

[17] BRADAK B, SETO Y, STEVENS T, et al. Magnetic susceptibility in the European loess belt: new and existing models of magnetic enhancement in loess [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2021, 569:110329.

[18] KIM B U, JEON H S, PARK C H. Trajectory simulation of magnetic particles in dry belt type magnetic separation[J]. Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers,2020,57(1):58-67.

[19] LO W Y, LU C Y, LIN C R, et al. Trajectory of a non-magnetic particle transported by a rotating magnetic particle chain[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2018,55(2):2100404.

[20] ZHANG C, LI L X, YUAN Z T, et al. Mechanical properties of siderite and hematite from DFT calculation[J]. Minerals Engineering,2020,146:106107.

[21] HEYLIGER P, LEDBETTER H, KIM S. Elastic constants of natural quartz[J]. The Journal of the Acoustical Society of America,2003,114(2):644-650.