干式磁选过程中物料的动态特性及分选效果预测①

宋永喆，曾尚林，张胜广，李然
（长沙矿冶研究院有限责任公司，湖南 长沙 410012）

摘　要：系统研究了物料在干式磁选机中的受力情况，发现物料磁导率、磁选机滚筒转速以及磁场强度的共同作用决定了物料的分选轨迹。以某干式磁选机为例，计算了物料在磁选过程中的动态分离过程，并进行了钛铁矿干式磁选验证试验，结果表明，仿真得到的物料预测轨迹与实际轨迹平均误差在 8%以内。采用动力学模拟方法可以较好地预测独立磁性矿物的运动轨迹。

关键词：干式磁选；磁选机；钛铁矿；分选轨迹；数值模拟
中图分类号：TD924　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.04.014
文章编号：0253-6099(2026)04-0105-05

Dynamic Characteristics of Materials and Separation Performance Prediction During Dry Magnetic Separation

SONG Yongzhe, ZENG Shanglin, ZHANG Shengguang, LI Ran
(*Changsha Research Institute of Mining & Metallurgy Co., Ltd., Changsha* 410012, *Hunan*, *China*)

Abstract: The force acting on material particles in a dry magnetic separator was systematically investigated. It is found that the motion trajectory of particles during the separation is determined by the combined effects of material magnetic permeability, drum rotation speed of magnetic separator and magnetic field intensity. With a certain dry magnetic separator as an example, the dynamic separation process of materials during magnetic separation was calculated, and then verified by performing a test on dry magnetic separation of ilmenite. The results show that the average deviation between the predicted trajectory and the actual trajectory of simulated particles is within 8%. It is concluded that the dynamic simulation method can satisfactorily predict the motion trajectory of liberated magnetic minerals.

Key words: dry magnetic separation; magnetic separator; ilmenite; particle trajectory; numerical simulation

磁选是利用矿物之间的磁性差异进行分选以提高矿石品位、净化固液废料的工艺。常见磁选工艺包括干式和湿式两种，其中干式磁选具有结构简单、适应性强、成本低等优势，在矿产资源丰富但水资源匮乏的地区具有更好的实用性[1]。

已有磁选研究[2-6]主要集中在磁选机机械结构和磁场分布方面，特别是在磁体设计上，但对磁选过程中物料分选的动态过程研究较少，对干式磁选过程中物料的运动行为缺乏足够了解。

通过建立精确的数值模型，可以深入理解磁选过程中物料的运动机制，预测分选效果，并据此优化分选参数，加强对颗粒运动的控制，从而提高分选效率。此外，模型还可以帮助工程师在设备设计阶段就考虑到实际运行中的物理条件和性能要求，从而完成更高效、更经济的设计方案。本文通过分析干式磁选过程中物料的动态特性，建立数值模型对干式磁选的分选效果进行预测，并进行了钛铁矿干式磁选验证试验。

1　模型建立

1.1　磁选基本原理

干式强磁选机的滚筒表面有较高的磁场强度，适用于弱磁性矿物的分选。矿物颗粒进入磁选机后，在分选腔内受到磁力和重力的综合力场作用，不同矿石受力不同，从而实现分选。矿物颗粒进入磁选机的分选腔内，磁性矿物颗粒受到磁力的作用，被吸附至滚筒表面，随着滚筒旋转至精矿槽后落下，成为精矿；非磁

① **收稿日期**：2026-03-05
基金项目：国家重点研发计划(2021YFC2902703)
作者简介：宋永喆(1999—)，男，山东济宁人，硕士，主要研究方向为选矿过程智能控制。E-mail：307366254@qq.com

性矿物颗粒不受磁力作用,在机械合力作用下被抛出,进入尾矿槽,成为尾矿。不同磁性的矿物颗粒在磁选机中会呈现明显不同的运动轨迹。

干式磁选机结构如图 1 所示。干式磁选机由振动给料机、永磁体磁系、驱动机构、滚筒、分矿板以及精矿和尾矿漏斗组成。其工作原理如下:矿物颗粒经振动给料机送至滚筒表面,在磁场力、重力及摩擦力的综合作用下,不同颗粒因磁化特性与粒径差异形成不同运动路径。滚筒旋转时,磁性物料周期性通过高、低磁场强度区域,引发颗粒翻转与滚动,混杂其中的非磁性颗粒受离心力与重力作用向外部迁移;而磁性颗粒因持续磁场吸附于滚筒表面,最终实现高效分选[1]。

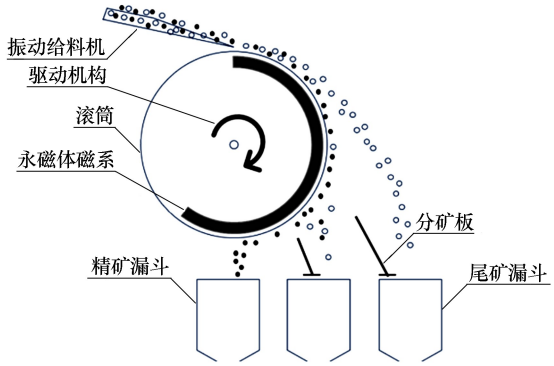


图 1 干式磁选机结构

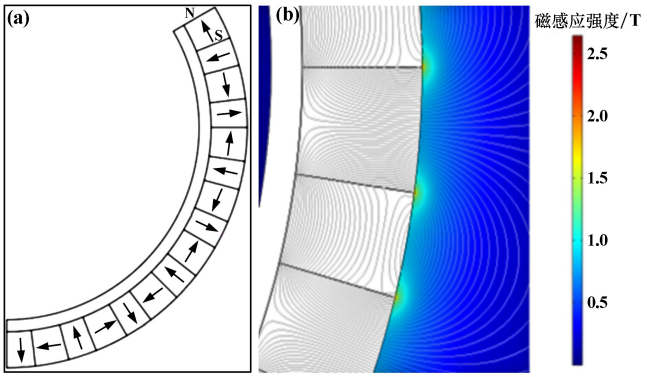
Fig. 1 Structure of dry magnetic separator

1.2 磁选机的磁场特性

试验用干式磁选机的磁体为钕铁硼(Nd-Fe-B)永磁材料,设计成挤压式磁性结构。所用永磁材料剩余磁感应强度为 1.22~1.28 T,磁感矫顽力大于 899 kA/m,内禀矫顽力大于 955 kA/m,磁能积为 287~310 kJ/m^3。

使用有限元法(finite element method,FEM),通过多物理场耦合分析软件 Comsol Multiphysics 对磁场分布进行仿真模拟。干式磁选机磁系的磁力线仿真结果如图 2 所示。由图 2 可见,干式磁选机磁系的磁力线发生强烈排斥、挤压和聚集,有的区域磁场强度特别高,有的区域磁场强度较低。磁系中的径向磁场强度和梯度均随着磁系表面距离增大而减小,磁系不同位置处的磁场强度从高到低排序为:磁极间隙磁场强度>磁极中心磁场强度>磁极其他区域磁场强度。

滚筒径向磁场力(Bgrad$B$)曲线如图 3 所示。磁系的极性沿滚筒表面交替排列,磁通量形成一个开路磁路,从而产生交变磁场,有利于物料的充分翻滚,提高分选效率。



(a) 磁系结构示意图;(b) 磁力线及磁感应强度

图 2 磁系结构示意图、磁力线及磁感应强度

Fig. 2 Schematic diagram of magnetic system structure, magnetic field lines and magnetic induction intensity

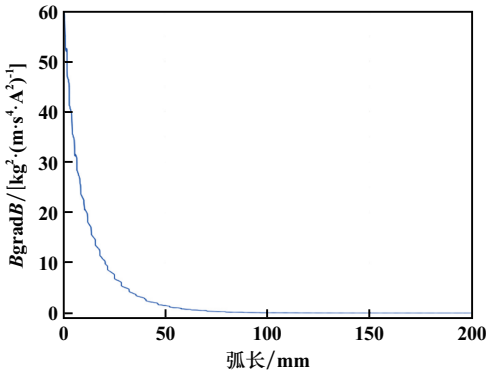


图 3 滚筒径向磁场力曲线

Fig. 3 Radial magnetic field force curve of drum

1.3 运动模型建立

假设物料颗粒为质地均匀的理想球体,干式磁选机中物料颗粒尺寸较小,物料的形状、自转和空气阻力对运动轨迹和分选效率的影响可以忽略不计。对于磁性物料,将颗粒视为磁场中一个有磁性的质点。因颗粒直径较小,这里忽略粒子间的相互作用力。

建立 XOY 坐标系,以滚筒圆心为坐标原点,以水平方向为 X 轴,向右为 X 轴正方向,以竖直方向为 Y 轴,向上为 Y 轴正方向。分选过程受力分析见图 4。

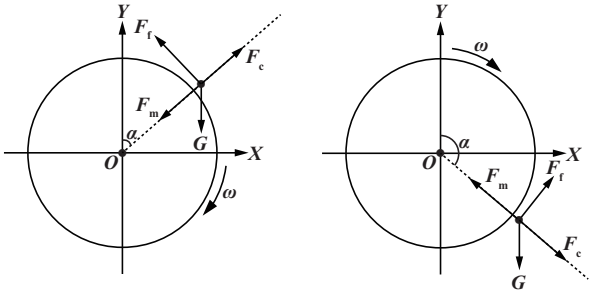


图 4 分选过程受力分析

Fig. 4 Force analysis of particles during separation process

颗粒所受重力 G 为:

$$G = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g \tag{1}$$

式中:r 为颗粒半径;ρ 为颗粒密度;g 为重力加速度,取 9.792 m/s^2。

磁力 F_m 沿径向作用于磁性颗粒,使磁性颗粒产生定向移动。磁力 F_m 为:

$$F_m = \mu_0 \kappa_0 V B \mathrm{grad} B \tag{2}$$

式中:μ_0 为真空磁导率,$\mu_0 = 4\pi \times 10^7$ H/m;κ_0 为粒子的体积磁化系数;B 为磁选机选矿腔内的磁场强度;grad$B$ 为磁场梯度,A/m^2。

代入球形体积,得:

$$F_m = \frac{4}{3}\pi r^3 \kappa_0 \mu_0 B \mathrm{grad} B \tag{3}$$

仿真分析结果表明,沿滚筒径向存在较大磁场梯度。假定有一个相对磁力($\mu_0 B\mathrm{grad}B$),相对磁力随着与滚筒表面距离增大而迅速减小,分选过程主要在距离磁系 0~8 cm 范围内完成,分选圆筒表面(工作面)距离磁系表面约 2.5 mm。为补偿磁系与滚筒表面之间的缝隙,需在磁系外沿加上 2.5 mm 后再进行磁力计算。

离心力 F_c 为:

$$F_c = mR\omega^2 = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho \omega^2 R \tag{4}$$

式中:m 为颗粒质量,g;R 为滚筒外径,m;ω 为滚筒转速,rad/s。

摩擦力 F_f 为颗粒提供加速度,使其最终加速到滚筒外径的线速度上。摩擦力 F_f 为:

$$F_f = \mu(F_m + G\cos\alpha - F_c) \tag{5}$$

式中:α 为颗粒法线方向与 Y 轴正方向的夹角,(°);μ 为物料与滚筒间的摩擦因数,取 0.4[7]。

颗粒吸附在滚筒表面所需径向力 $F_{径}$ 为:

$$F_{径} = F_m + G\cos\alpha - F_c \tag{6}$$

2　轨迹预测

非磁性颗粒几乎不受磁力作用,在加速过程中,它们在滚筒表面以位移角 α 移动,短时间内加速到滚筒线速度后被抛出。因此,非磁性颗粒的运动轨迹可近似为:

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = \omega R \\ \dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} = gt \end{cases} \tag{7}$$

对于磁性颗粒,因干式磁选过程转速较低,可不考虑颗粒的滑动。此外,磁性颗粒所受磁力远大于离心力,磁力足以将颗粒吸附于滚筒表面并随滚筒旋转,直至低位脱离。磁性颗粒的运动轨迹为:

$$\begin{cases} x = R\sin(2\pi t) \\ y = R\cos(2\pi t) \end{cases} \tag{8}$$

式中:$x_{t=0} = 0$;$y_{t=0} = R$。

通过建立的运动方程,可以得到各类颗粒轨迹,这些轨迹是磁化系数、物料粒度、滚筒转速和滚筒半径、滚筒表面磁场强度以及磁场空间分布的函数。

基于这一数值模型,使用 MATLAB 软件模拟干式磁选机在不同参数下磁性和非磁性颗粒的运动轨迹。

3　数值仿真与试验

采用钛铁矿和石英进行纯矿物磁选试验,对上述提出的模型进行验证,并对试验结果与模拟结果进行定量分析。

试验所用纯矿物钛铁矿为高纯度精矿,$FeTiO_3$ 品位达 94.68%以上,粒度在 0.25 mm 以下。对钛铁矿进行粒度筛分分析,结果表明,钛铁矿主要集中在 0.05~0.15 mm 粒级,粒级产率为 80.49%,其中 0.075~0.15 mm 粒级产率最高,+0.075 mm 粒级产率为 62.25%。通过筛分,得到 0.10~0.15 mm、0.15~0.2 mm 和−0.1 mm 粒级钛铁矿产品,备用。

无磁物料选用普通天然石英砂(主要成分为 SiO_2),经洗涤、去除表面杂质后烘干,再经研磨处理,获得粒度集中在 0.5~1 mm 之间的颗粒。石英砂因具有极低的磁化率,在磁场中几乎不受磁力作用,是干式磁选试验中理想的无磁性对照物料。

搭建矿物分选试验平台:以长沙矿冶研究院有限责任公司强干式磁选机为基础,将不同粒级钛铁矿(主要成分为 $FeTiO_3$)与石英砂(SiO_2)混合搅拌均匀,备用。

将磁选机分别设定不同的转速,由高速摄像机对干式磁选的分选图像进行采集,选取不同工况下进入干式磁选机的矿物分选轨迹以对比数值模拟轨迹与实际轨迹。

利用 MATLAB 软件在运动学数值模型的基础上,模拟钛铁矿粒度和滚筒转速对物料分选轨迹的影响。

分选过程模拟参数如表 1 所示。

0.15~0.20 mm 粒级钛铁矿在不同滚筒转速条件下的预测轨迹如图 5 所示。滚筒转速 50 r/min 时,钛铁矿不同粒级条件下的预测轨迹如图 6 所示。图 5 显示,在相同粒级条件下,高滚筒转速时颗粒运动轨迹与滚筒表面的距离远大于低滚筒转速时颗粒运动轨迹与

滚筒表面的距离,并且该距离随着滚筒转速增加而增大。具体来看,y 坐标轴-5 cm 位置处,滚筒转速由20 r/min 增加到 50 r/min,0.15~0.20 mm 粒级钛铁矿颗粒落点距离增加了约 1.37 cm,石英砂颗粒落点距离增加了约 4.7 cm。图 6 显示,在相同滚筒转速下,粗颗粒钛铁矿运动轨迹与滚筒表面的距离大于细颗粒钛铁矿运动轨迹与滚筒表面的距离,石英砂颗粒运动轨迹到滚筒表面的距离明显大于钛铁矿颗粒运动轨迹到滚筒表面的距离。这是由于钛铁矿颗粒受到磁力作用,其运动轨迹更接近滚筒表面。本模型的预测轨迹基本符合干式磁选过程中矿带的运动轨迹。

表 1 分选过程模拟参数

Table 1 Simulation parameters for separation

仿真参数	单位	设定值
滚筒半径(R)	m	0.2
转速(ω)	r/s	0.333,0.583,0.833
颗粒粒度	mm	<0.20
钛铁矿密度(ρ)	kg/m^3	4.7×10^3
体积磁化系数(κ_0)	—	0.007 35
真空磁导率(μ_0)	H/m	$4\pi\times10^{-7}$
摩擦因数(μ)	—	0.4
重力加速度(g)	m/s^2	9.792

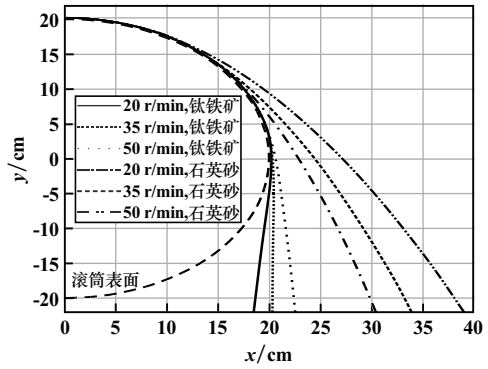


图 5 不同滚筒转速条件下的预测轨迹

Fig.5 Predicted particle trajectories at different rotation speed

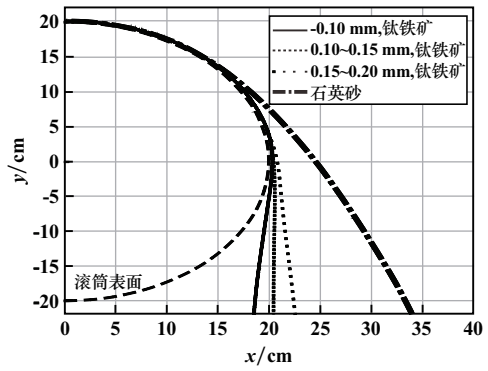
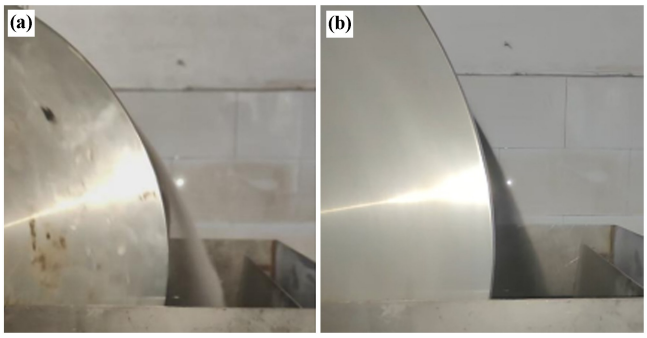


图 6 不同粒级条件下的预测轨迹

Fig.6 Predicted particle trajectories for different sizes

为了让测量更科学、更准确,对矿带距离测量的设计核心思路为:将经验性、目测性的判断转化为可量化、可重复、数据化的测量。以滚筒轴心的垂直投影线作为零点起点,以矿带的内侧和外侧作为测量终点,选择网格法进行矿带轨迹的测量。在矿带预计落料区域的挡板附近,安装固定的标尺作为参照。磁选机工作时,操作员使用高速摄像机,瞄准矿带的内侧、外侧,分别测量其到滚筒中心线的距离。记录转速、粒度等工况条件,每组物料测量 10 次,取平均值。

因实验机存在铁板遮挡因素,以铁板上沿处,即坐标轴所示 $y=-5$ cm 时的矿带作为轨迹参考。分别选取颗粒粒度 0.15~0.20 mm 时不同转速下的轨迹以及转速 50 r/min 时不同粒度下的分选轨迹进行定量分析,分选过程的实际轨迹如图 7 所示。



(a) 非磁性颗粒; (b) 磁性颗粒

图 7 分选过程实际轨迹

Fig.7 Actual particle trajectory during separation

对比图 5~6 及图 7 可见,模拟轨迹与实际轨迹相符,表明矿物运动轨迹的运动模型和模拟结果具有可靠性。

分别测量出轨迹内侧和外侧坐标并记录。同时为了比较误差,以偏差度作为判断指标:

$$\text{偏差度} = \text{误差} \div \text{预测落点} \times 100\% \quad (9)$$

偏差度越小,说明预测轨迹与实际轨迹越接近。分选试验所得结果具体数据如表 2 和表 3 所示。从表 2~3可知,相同粒度(0.15~0.20 mm)下,随着滚筒转速从 20 r/min 增加至 50 r/min,颗粒的实际落点相应增加了约 7.2%;在相同滚筒转速(50 r/min)下,随着给料粒度从-0.10 mm 增加至 0.15~0.20 mm,颗粒的实际落点值增加了约 5.8%。以上试验数据均清晰证实了分选轨迹半径随着滚筒转速与颗粒粒度增大单调递增的规律,亦符合本文所建立模型对运动轨迹的预测。

将预测值与实测值对比,预测落点完全落在实际轨迹的内侧与外侧之间,说明本文建立的数值模型准确预测了干式磁选过程中磁性颗粒的轨迹。

表 2　0.15~0.20 mm 粒级钛铁矿磁选的滚筒转速误差

Table 2　Deviations at different drum rotation speeds for particle size of 0.15 mm to 0.20 mm

滚筒转速/($r\cdot min^{-1}$)	预测落点/cm	实际落点/cm		落点误差/cm		偏差度/%	
		内侧	外侧	内侧	外侧	内侧	外侧
20	19.76	18.40	21.06	1.36	1.30	6.88	6.58
35	20.42	18.80	21.80	1.62	1.38	7.93	6.76
50	21.13	19.30	23.00	1.83	1.87	8.66	8.85

表 3　转速 50 r/min 时钛铁矿磁选的粒级误差

Table 3　Deviations for different particle sizes at drum rotation speed of 50 r/min

粒级/mm	预测落点/cm	实际落点/cm		落点误差/cm		偏差度/%	
		内侧	外侧	内侧	外侧	内侧	外侧
-0.10	20.08	18.50	21.50	1.58	1.42	7.87	7.07
0.10~0.15	20.57	19.10	22.00	1.47	1.43	7.14	6.95
0.15~0.20	21.13	19.30	23.00	1.83	1.87	8.66	8.85

对比误差数据,平均偏差度为 7.68%,在 8%以内,吻合度较好,说明基于力平衡建立的数值模型成功预测了上述变化趋势,预测值与实测值变化趋势吻合。但模型存在 6.5%~8.9%的偏差度,且在高转速、大粒度工况下偏差度略大。从这些数据可以看出,模拟结果与试验结果一致,表明所建立的数值模型能够准确揭示干式强磁选过程中颗粒的动态行为。

4　结论

1) 数值模型和试验结果均表明:相同粒级下,滚筒转速越高,矿带距离滚筒表面越远;相同滚筒转速下,磁性颗粒粒度越大,矿带距离滚筒表面越远。

2) 试验所得轨迹与数值模拟结果基本吻合,说明通过动态模拟可以较好地预测磁选过程中磁性和非磁性颗粒的轨迹,可以为干式强磁选工艺优化提供参考,并有助于指导设计干式磁选机。

3) 研究揭示了干式磁选中影响颗粒空间分布的关键规律:颗粒的分选轨迹随着滚筒转速与自身粒度增加而距离滚筒表面更远。该规律由离心力与磁力相互竞争的物理机制所主导。

参考文献(References):

[1] 陈斌. 磁电选矿技术[M]. 北京:冶金工业出版社, 2007.
Chen Bin. Magnetoelectric beneficiation technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.

[2] 孟祥志,胡旭,王佳强,等. 细粉物料干式磁选机的国内发展现状[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(5):34-45.
Meng Xiangzhi, Hu Xu, Wang Jiaqiang, et al. Domestic development status of dry magnetic separator for fine powder materials[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(5):34-45.

[3] 尚红亮,李国平,沈政昌,等. 旋转磁场特性及其磁选行为影响规律[J]. 中国矿业大学学报, 2022,51(3):599-606.
Shang Hongliang, Li Guoping, Shen Zhengchang, et al. Characteristics of the rotating magnetic field and its influence on magnetic separation behavior[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022,51(3):599-606.

[4] 毛志,谭诗德,柯春海,等. 磁场对磁性湿颗粒运动机理的影响[J]. 重庆大学学报, 2018,41(8):17-25.
Mao Zhi, Tan Shide, Ke Chunhai, et al. Influence of magnetic field on movement mechanism of wet magnetic particles[J]. Journal of Chongqing University, 2018,41(8):17-25.

[5] 荆茂晨,安登极,刘任,等. 基于 Ansys 的 ZH 型组合式强磁选机磁场特性三维仿真研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):91-96.
Jing Maochen, An Dengji, Liu Ren, et al. 3D Simulation study on magnetic field characteristics of ZH high-intensity magnetic separator based on Ansys[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026, 46(1):91-96.

[6] 吴雪红,王洪彬,安登极,等. 低浓度微细粒级钛铁矿高效回收工艺对比探析[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):97-101.
Wu Xuehong, Wang Hongbin, An Dengji, et al. Comparative analysis of efficient recovery processes of low-concentration fine-grained ilmenite[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):97-101.

[7] Molnar W, Nugent S, Lindroos M, et al. Ballistic and numerical simulation of impacting goods on conveyor belt rubber[J]. 2015,42:1-7.

引用本文:宋永喆,曾尚林,张胜广,等. 干式磁选过程中物料的动态特性及分选效果预测[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):105-109.

Song Yongzhe, Zeng Shanglin, Zhang Shengguang, et al. Dynamic characteristics of materials and separation performance prediction during dry magnetic separation [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026, 46(4):105-109.