

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2024.04.016

超导磁选白云鄂博尾矿稀土颗粒捕获及聚集行为

刘昕昞¹,白庆伟¹,赵增武¹,许鹏¹,贺宇龙²,贾艳¹

(1. 内蒙古科技大学材料与冶金学院, 内蒙古包头 014010;

2. 内蒙古科技大学矿业与煤炭学院, 内蒙古包头 014010)

摘要: 超导磁分离技术中, 稀土矿物颗粒在磁介质上的聚集半径与磁介质填充率应相互匹配, 以确保高效的矿物分离效果和提高稀土尾矿资源利用率。基于颗粒轨迹模型, 探究了矿浆流速对颗粒捕获的影响并建立了颗粒饱和聚集模型, 以计算稀土矿物颗粒单体及其连生体在磁介质上的饱和聚集半径、聚集半径和磁介质间距关系, 从而优化磁介质填充率。并通过颗粒沉积试验, 验证了聚集模型的正确性。研究表明, 矿浆流动速度最优为 0.1 m/s 时有效去除了杂质萤石矿物。磁介质有一个临界填充率, 高于临界填充率不会发生堵塞。随着磁介质直径的增加, 颗粒饱和聚集半径 r_{B_c} 和磁介质临界填充率逐渐增大, 当连生体度为 1/20 的稀土连生体与磁介质直径为 0.06 mm 时, 临界填充率为 5.6%。当磁介质直径为 0.4 mm 时临界填充率为 20.6%。本研究结果为稀土矿物的高效分离提供了重要的理论基础, 也为工业生产中磁分离技术的优化与设计提供了可靠的参考依据。

关键词: 磁介质; 超导磁分离; 稀土颗粒; 连生体; 颗粒聚集

中图分类号: TD954; TD924

文献标志码: A

文章编号: 1671-9492(2024)04-0144-10

Trapping and Aggregation Behavior of Rare Earth Particles in Bayan Obo Tailings by Superconducting Magnetic Separation

LIU Xinyang¹, BAI Qingwei¹, ZHAO Zengwu¹, XU Peng¹,HE Yulong², JIA Yan¹

(1. School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China;

2. School of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: In the superconducting magnetic separation technology, the aggregation radius of rare earth mineral particles on the magnetic medium and the filling rate of the magnetic medium should match each other, so as to ensure the efficient mineral separation effect and improve the utilization rate of rare earth tailings resources. Based on the particle trajectory model, the influence of slurry velocity on particle capture has been explored, and a particle saturation aggregation model has been established to calculate the saturation aggregation radius of rare earth mineral free and intergrown particles on the magnetic medium, and the relationship between the aggregation radius and the magnetic medium distance, so as to optimize the filling rate of the magnetic medium. The aggregation model is verified by particle deposition experiment. The results show that impurity fluorite mineral can be effectively removed when the slurry flow velocity is optimal at 0.1 m/s. Magnetic media have a critical filling rate, above which plugging will not occur. With the increase of magnetic medium diameter, the particle saturation aggregation radius r_{B_c} and the critical filling rate of magnetic medium increase gradually. For rare earth intergrown particles with a locking degree of 1/20, when the diameter of magnetic medium is 0.06 mm, the critical filling rate is 5.6%. When the magnetic medium diameter is 0.4 mm, the critical filling rate is 20.6%. This study provides an important theoretical basis for the efficient separation of rare earth minerals, and also provides a reliable reference for the optimization and design of magnetic separation technology in industrial production.

Key words: magnetic medium; superconducting magnetic separation; rare earth particle; intergrowth; particle buildup

收稿日期: 2023-04-07

基金项目: 国家重点研发计划专项(2020YFC1909100)

作者简介: 刘昕昞(1996—), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 主要从事矿物分选理论与工艺研究。

中国白云鄂博矿是世界上最大的稀土矿,占中国稀土储量的80%以上^[1],在世界稀土产业中占有重要地位。白云鄂博稀土尾矿是选矿厂经过弱磁、强磁、浮选过程中产生的多金属矿^[2]。尾矿中稀土与萤石矿物具有相似的表面性质和可浮性不利于稀土浮选^[3]。尽量富集稀土矿物,抛弃萤石矿物,便于后续浮选稀土和减少药剂使用,是当前寻求选矿新工艺的重点。

白云鄂博矿尾矿中稀土矿物主要是氟碳铈矿和独居石,矿物元素含量种类较多,矿物组成非常复杂,磁性弱,嵌布粒度细,稀土矿物在38 μm粒度以下累计超过90%^[4]。由于其“贫”、“细”、“杂”、“散”的工艺矿物学特点,采用常规磁选实现稀土矿物的高效分离异常困难。超导磁分离技术的磁场可高达5 T,是常规磁选技术的数倍,是分离或过滤流体悬浮液中细微弱磁性颗粒的一种有效方法。由于高选择性、高效、环保、经济等优点,超导磁分离是未来工程应用和研究的新兴领域,如矿物加工、水净化及冶金提取。

磁介质是超导磁分离关键部件,其使均匀的磁场去均匀化,产生较高的磁场梯度,磁性颗粒可以在磁介质上聚集^[5]。磁介质作为高磁场梯度的发生源及磁性矿物的捕获体,其尺寸、形状和填充率对颗粒受力、捕获和聚集都有显著影响^[6]。

目前,通过超导磁分离对白云鄂博稀土矿物已经实现了预富集。通过场强条件试验,在5 T背景磁场下稀土矿物回收率可达90%以上,但其品位提升并不明显。颗粒堵塞可能是导致品位低的原因。当进行颗粒分离试验时,有时会遇到难以观察到颗粒分离状况的情况,这时,可以使用数值计算方法来预测颗粒的捕获和聚集状态。这些方法基于物理模型和计算机模型,通过数学方程来描述颗粒在流体和磁场中的运动。WATSON^[7]基于圆柱形磁介质附近矿物颗粒动力学行为,推导出了描述颗粒运动的轨迹方程,得出了颗粒捕获的极限轨迹或捕获横截面,并通过捕获半径 R_c 的大小来评价磁介质过滤性能。聚集模型研究了颗粒捕获全过程。NESSET^[8]提出了磁性颗粒在单丝磁介质上聚集的理论数学模型。根据上述理论模型,近年来大量研究人员对磁分离过程进行了理论研究。ZHENG等^[9]对高梯度磁场下流体速度、磁场强度等变量对细弱磁性颗粒捕获效率进行了定量化研究。XUE等^[10]基于静态聚集模型描述了颗粒大小和磁介质形状对颗粒聚集的影响。为了实现高效分离,通过计

算机模拟对分离条件进行优化^[11],但为了简化计算,在考虑流体力学和磁介质周围磁场空间分布时,往往忽略了颗粒堆积在磁介质表面上的影响^[12]。

当磁介质填充率较小会造成矿物回收率低,当磁介质填充率较大,难免会造成沉积在磁介质表面的颗粒堵塞,影响颗粒品位。合理的填充率可以获得较好的磁选效果。因此在本研究中,利用数值模拟方法开展了超导磁场下稀土颗粒堆积研究,并给出了不同磁介质直径下稀土矿物颗粒的临界填充率,研究结果可为生产实践中填充率优化及设计提供理论支撑。

1 数学模型

1.1 颗粒运动轨迹模型

图1是超导磁分离过程示意图。磁介质使背景磁场变成高梯度非均匀场,靠近磁介质具有较高磁场梯度。当磁性颗粒经过磁介质附近时,颗粒会受到强烈的磁力作用,从而在磁介质表面上会发生颗粒吸附和聚集。

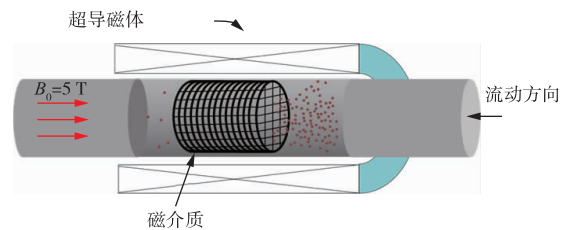


图1 超导磁分离示意图

Fig. 1 Schematic diagram of superconducting magnetic separation

在外加磁场作用下,流体中的细粒受到磁力、重力、流体阻力和扩散力。随着颗粒粒径的减小,一些力与其他主导力相比太小,可以忽略不计。对于1~38 μm的颗粒,惯性力和扩散力可以忽略。因此主要的竞争力是重力和流体曳力。在外加磁场中,直径为 d_p ($d_p = 2R$)的颗粒上的磁力 F_m 由式(1)给出。

$$F_m = 4\pi R^3 \mu_0 k H \nabla H \quad (1)$$

其中 H 和 ∇H 是颗粒所在位置处的磁场强度和梯度。 μ_0 是真空磁导率, H/m; k 是颗粒体积磁化率,无量纲参数。曳力和重力由式(2)和(3)给出。

$$F_d = 6\pi\eta R v \quad (2)$$

$$F_g = 4\pi R^3 (\rho_p - \rho_f) g / 3 \quad (3)$$

其中, η 是流体黏度, $N \cdot m/s^2$; v 是颗粒和流体相对速度, m/s; ρ_p 和 ρ_f 是颗粒和流体密度, kg/m^3 ; g 是重力加速度, m/s^2 。磁力、重力和曳力与稀土矿物直径的关系如图2所示。由图2可以看出,在颗粒

直径为1~38 μm时曳力大约是重力的10⁻⁵~10⁻⁷倍,所以对于这个问题,重力也可以忽略,主要是磁力和流体曳力。

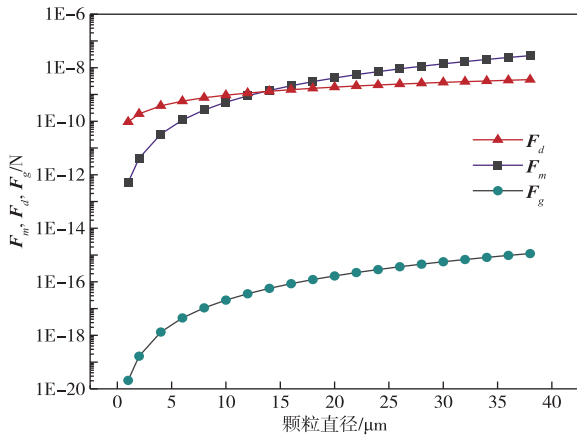


图2 磁力、重力和曳力与颗粒直径之间的受力关系 (曳力是以颗粒和流体相对速度0.01 m/s来计算)

Fig. 2 The relationship between magnetic, gravitational and drag forces and particle diameter (Drag force is calculated by the relative velocity of particle and fluid 0.01 m/s)

根据上述假设,颗粒运动方程可以表示为式(4)、(5)。

$$\frac{dr_a}{dt} = \frac{v_0}{a} \left(1 - \frac{1}{r_a^2}\right) \cos\theta - \left(\frac{v_m}{a}\right) \left(\frac{M_s}{2\mu_0 H_0}\right) \frac{1}{r_a^5} - \left(\frac{v_m}{a}\right) \frac{\cos 2\theta}{r_a^3} \quad (4)$$

$$r_a \frac{d\theta}{dt} = -\left(\frac{v_0}{a}\right) \left(1 + \frac{1}{r_a^2}\right) \sin\theta - \frac{v_m}{a} \frac{\sin 2\theta}{r_a^3} \quad (5)$$

其中, $r_a = r/a$, 对计算区域进行了无量纲化处理,方便计算结果比较。

$$v_m = \frac{2k\mu_0 M H_0 b^2}{9\eta a} \quad (6)$$

其中, v_m 为磁速度, m/s。

计算采用四阶龙格库塔法对磁分离方程求解。将粒子的运动分为径向 r 和切向 θ , 将式(4)和(5)的时间 dt 乘到等式右边, 可得到在固定时间步长 dt 下的 dr_a 和 $d\theta$, 再带入到式(7)和(8)。

$$r = r_0 + dr_a \quad (7)$$

$$\theta = \theta_0 + d\theta \quad (8)$$

其中, r_0 和 θ_0 为颗粒入射初始位置, 无量纲参数。由初始位置 r_0 和 θ_0 , 再对公式(10)、(11)进行时间迭代, 可以计算出颗粒在磁分离通道横截面上的位置 (r, θ) , 从而可以预测磁选腔中矿物运动轨迹。

1.2 颗粒静态饱和堆积模型

静态堆积模型是一种基于各堆积层受力分析的

稳态理论。在纵向型高梯度磁分离中, 静态堆积模型成功地通过单根磁介质实现累积或分解^[13]。图3显示了静止颗粒作用在磁介质表面上的力的分量。在径向和切向方向上的磁力、重力和阻力的合力共同决定了颗粒是聚集还是被冲走。

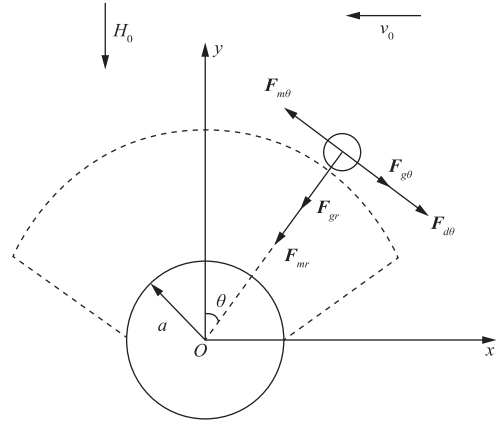


图3 作用在磁介质静止颗粒力分量

Fig. 3 Component of the force acting on a stationary particle in a magnetic medium

对于静止在磁介质上的球形粒子, 磁力的径向分量和切向分量用式(9)和(10)表示^[14]。

$$F_{mr} = -\frac{8}{3} \pi b^3 \mu_0 k \frac{A}{r^3} (H_0 \cos 2\theta + \frac{A}{r^2}) \quad (9)$$

$$F_{m\theta} = -\frac{8}{3} \pi b^3 \mu_0 k \frac{A}{r^3} H_0 \sin 2\theta \quad (10)$$

其中, b 和 k 分别是颗粒半径和磁化率, b 单位为 m, k 无量纲参数; μ_0 是真空磁导率, H/m; r 是颗粒距离磁介质表面距离, 无量纲参数; H_0 是外加磁场强度, A/m; A 是磁介质磁化状态决定的系数, A·m。对于背景场强较高使磁介质磁化状态达到饱和, A 可以表示为:

$$A = \frac{M_s a^2}{2\mu_0} \quad (11)$$

其中, a 为磁介质半径, m; M_s 是磁介质饱和磁化强度, T。当磁介质未达到饱和磁化状态时, A 由式(12)给出。

$$A = H_0 a^2 \quad (12)$$

径向和切向重力由式(13)和(14)给出。

$$F_{gr} = -\frac{4\pi b^3}{3} (\rho_p - \rho_f) g \cos\theta \quad (13)$$

$$F_{g\theta} = \frac{4\pi b^3}{3} (\rho_p - \rho_f) g \sin\theta \quad (14)$$

其中, ρ_p 和 ρ_f 分别为颗粒和流体的密度, kg/m³。

流体阻力是根据边界层底部的剪应力来计算。因此, 假设只在一个方向上的力起作用。考

考虑到对 θ_{11} 层的扩张, 流体阻力可由式(15)给出^[15]。

$$\mathbf{F}_{df} = \frac{\pi^2 b^2}{4} \rho_f v_0^{3/2} \left(\frac{v}{r} \right)^{1/2} (6.973\theta - 2.732\theta^3 + 0.292\theta^5 - 0.0183\theta^7 + 0.000043\theta^9 - 0.000115\theta^{11}) \quad (15)$$

径向和切向的合力用式(16)和(17)表示。

$$\mathbf{F}_{netr} = \mathbf{F}_{mr} + \mathbf{F}_{gr} \quad (16)$$

$$\mathbf{F}_{net\theta} = \mathbf{F}_{m\theta} + \mathbf{F}_{d\theta} + \mathbf{F}_{g\theta} \quad (17)$$

当达到饱和堆积时, 位于边界的颗粒的径向力和切向力的总和等于零, 可以计算出颗粒饱和堆积轮廓。

1.3 连生体颗粒磁化率计算

对于连生体的连生度 $\bar{\xi}_s$ 定义为稀土矿物颗粒质量与颗粒整体质量之比, 如式(18)所示。

$$\bar{\xi}_s = \frac{m_B}{m_B + m_F} \quad (18)$$

其中, m_B 是连生体中氟碳铈矿颗粒质量, kg; m_F 是连生体中其他颗粒质量, kg。

颗粒的体积磁化率 k_p 作为矿石行为的初始指标

和模拟计算的重要参数^[16], 由式(19)给出。

$$k_p = \left(\sum_{s=1}^n \bar{\xi}_s \chi_s \right) \rho_p \quad (19)$$

颗粒体积磁化率与连生体颗粒密度 ρ_p 和颗粒中所有矿物相各自的质量分数 $\bar{\xi}_s$ 乘以他们的质量磁化率 χ_s 的总和有关^[17]。 n 为连生体矿物相的种类。通过式(20)可以算出连生体的密度 ρ_p 。

$$\rho_p = \sum_{s=1}^n \bar{\xi}_s \rho_s \quad (20)$$

式中, ρ_s 为各个矿物相的密度, kg/m³。如式(19)和(20)所示, 对于这种计算方法, 它还需要知道连生体中所有矿物的特定质量磁化率、密度以及质量分数。

1.4 模型参数

研究材料为白云鄂博矿物经过弱磁选、强磁选、浮选产生的稀土尾矿。如表1所示, 通过化学分析来测定材料中不同组分的含量。由表1可知, 稀土尾矿中全铁、稀土、萤石的含量分别为14.6%、8.47%、21.48%。稀土尾矿中含铁、稀土和萤石含量较高具有很大的回收价值。

表1 白云鄂博尾矿化学成分

Table 1 Chemical composition of Bayan Obo tailings

/%

化学成分	TFe	CaO	MgO	SiO ₂	S	ThO ₂	CaF ₂	K ₂ O	Na ₂ O
含量	14.6	18.47	2.65	12.31	1.641	0.016	21.48	0.45	1.18
化学成分	REO	Nb ₂ O ₅	Sc ₂ O ₃	MnO ₂	BaO	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	TiO ₂	mFe
含量	8.47	0.17	212.47	1.23	3.19	1.47	0.84	0.35	3.6

为了确定稀土尾矿中的主要矿物组成, 采用X射线衍射(XRD)对材料进行表征。如图4所示, 铁主要存在于赤铁矿中, 稀土主要存在于氟碳铈矿和独居石中, 氟主要存在于萤石中。由以上分析可知, 稀土尾矿中主要矿物类型为赤铁矿、氟碳铈矿、独居石和萤石。稀土矿物主要是氟碳铈矿和独居石, 稀土矿物主要与铁矿物、萤石连生^[18]。为此, 以直径为

38 μm 的氟碳铈矿为研究对象, 考虑了一组1/2、1/4和1/8连生度的稀土连生体, 一组磁介质直径为0.06、0.12、0.15、0.2和0.4 mm, 一组矿浆流速0.01、0.05、0.1 m/s下的捕获及堆积行为。矿物的物理性质见表2。

表2 矿物的物理性质^[19]

Table 2 The physical properties of minerals^[19]

矿物名称	质量磁化率/(cm ³ ·g ⁻¹)	密度/(g·cm ⁻³)
氟碳铈矿	13.5	4.968
赤铁矿	30	5.288
萤石	4.2	2.659

2 试验验证

超导磁选作业过程无法观察到磁选腔内部磁选状态, 所以设计一个高梯度磁分离装置, 在低背景磁场下, 选用磁化率较高的钛铁矿替代磁化率较低的稀土矿物对模拟结果进行验证。

试验分离过程如图5所示。采用两块钕铁硼磁性材料的永磁体施加磁场。两块磁体之间距离为13 mm, 磁体之间具有较均匀的背景磁场高达

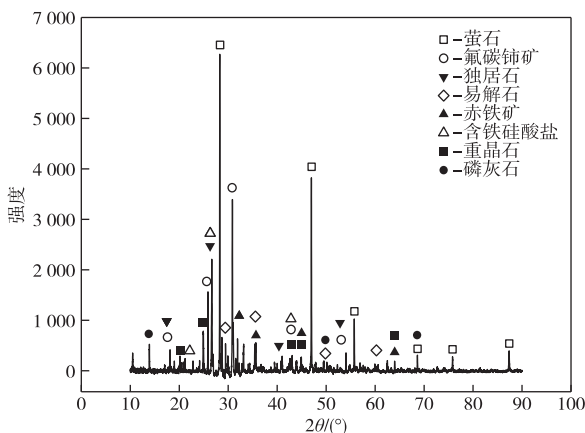


图4 稀土尾矿的XRD谱图

Fig. 4 XRD pattern of rare earth tailings

0.34 T。磁介质为 SUS304 材料,饱和磁化强度为 1.53 T。将一根直径为 0.4 mm 圆柱形磁介质固定在磁选腔外壳,并置于两块永磁体中心处。试验样品是钛铁矿颗粒,颗粒直径主要集中在 100 μm,使用振动样品磁强计(VMS-7410,Lake Shore)测量的钛铁矿体积磁化率为 1.2×10^{-3} [20]。以 3 g 钛铁矿颗粒悬浮液在 0.3 L 蒸馏水中作为样品。在试验中,先将整个流道充满蒸馏水,然后将样品悬浮液从放置在永磁体顶部的样品搅拌器中流入磁选腔壳体。使用放置在下流的阀门及蠕动泵控制样品悬浮液的进料速度。数码电子显微镜位于磁介质切面方向,在磁选装置切面观察颗粒吸附行为。

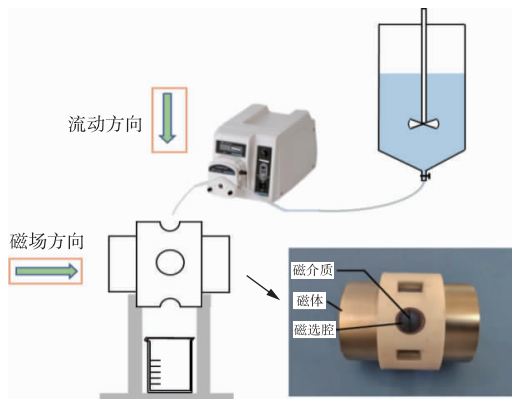


图 5 试验分离过程

Fig. 5 Test separation process

图 6(a)所示为视频屏幕拍摄中提取轮廓的示意。红色虚线为饱和堆积剖面,红色线以外的黑色区域为颗粒沉积到壁面附近的阴影。为了观测真实的堆积剖面,在视频录制方向上,在磁介质与壁面之间预留了少量间隙。将试验值与模拟预测进行了比较。如图 6(b)所示,对该模型中过程参数带入模型中验证,试验观察到的轮廓与模拟结果吻合良好。

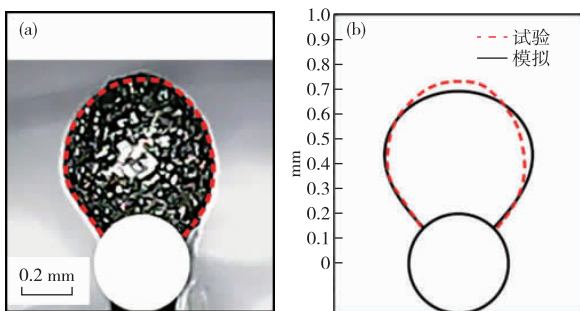


图 6 (a)试验视频轮廓提取;(b)数值计算结果与试验结果对比

Fig. 6 (a)Experimental video contour extraction; (b)The numerical results compared with the experimental results

3 结果与讨论

3.1 矿浆流速优化

通过颗粒运动轨迹模型,用数值计算方法计算了稀土尾矿中主要矿物类型为赤铁矿、氟碳铈矿和萤石矿物颗粒在单根磁介质下捕获状态。图 7 为尾矿颗粒瞬时捕获状态,其中颗粒粒度为 38 μm,超导背景强磁场为 5 T,磁介质直径为 0.12 mm,矿浆初始流速为 0.01 m/s。

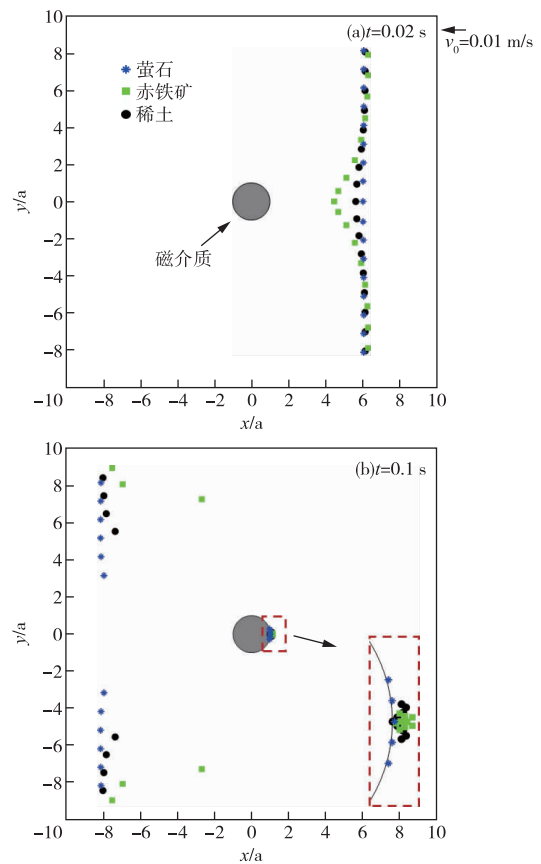


图 7 尾矿颗粒捕获状态(a)t=0.02 s;(b)t=0.1 s

Fig. 7 Tailings particle capture state

(a)t=0.02 s;(b)t=0.1 s

尾矿中颗粒直径为 38 μm 的赤铁矿、稀土和萤石矿物在计算域右侧同时出发,如图 7(a)所示,当 $t=0.02$ s 时离磁介质较近的赤铁矿颗粒运动较快,离磁介质较远的赤铁矿颗粒由于受到磁介质排斥区的影响,运动较慢。如图 7(b)所示,当 $t=0.1$ s 时赤铁矿颗粒由于颗粒磁化率较高被磁介质稀土较多,其次是稀土矿物。值得注意的是,由于稀土矿物与萤石矿物差异小导致了小部分的萤石矿物也被磁介质捕获影响稀土回收品位。同时赤铁矿较多有可能会造成磁介质之间颗粒聚集造成堵塞,导致矿物稀土品位降低。所以

通过这两个方面对稀土颗粒品位的影响,我们先
将流速进行优化,尽量去除萤石矿物,然后对磁介
质填充率进行优化,防止赤铁矿聚集造成过滤器
堵塞。颗粒迹线更能直观地表达颗粒在超导梯度
磁场中的运动状态,如图8所示。红色线是可以

被磁介质捕获的颗粒运动轨迹,黑色线是不能被
磁介质捕获的运动轨迹,蓝色线是粒子被捕获的
临界运动轨迹。以简化计算目的,对计算区域进
行了无量纲化处理。其中捕获半径 R_c 是临界轨
迹到 x 轴的距离,是无量纲数。

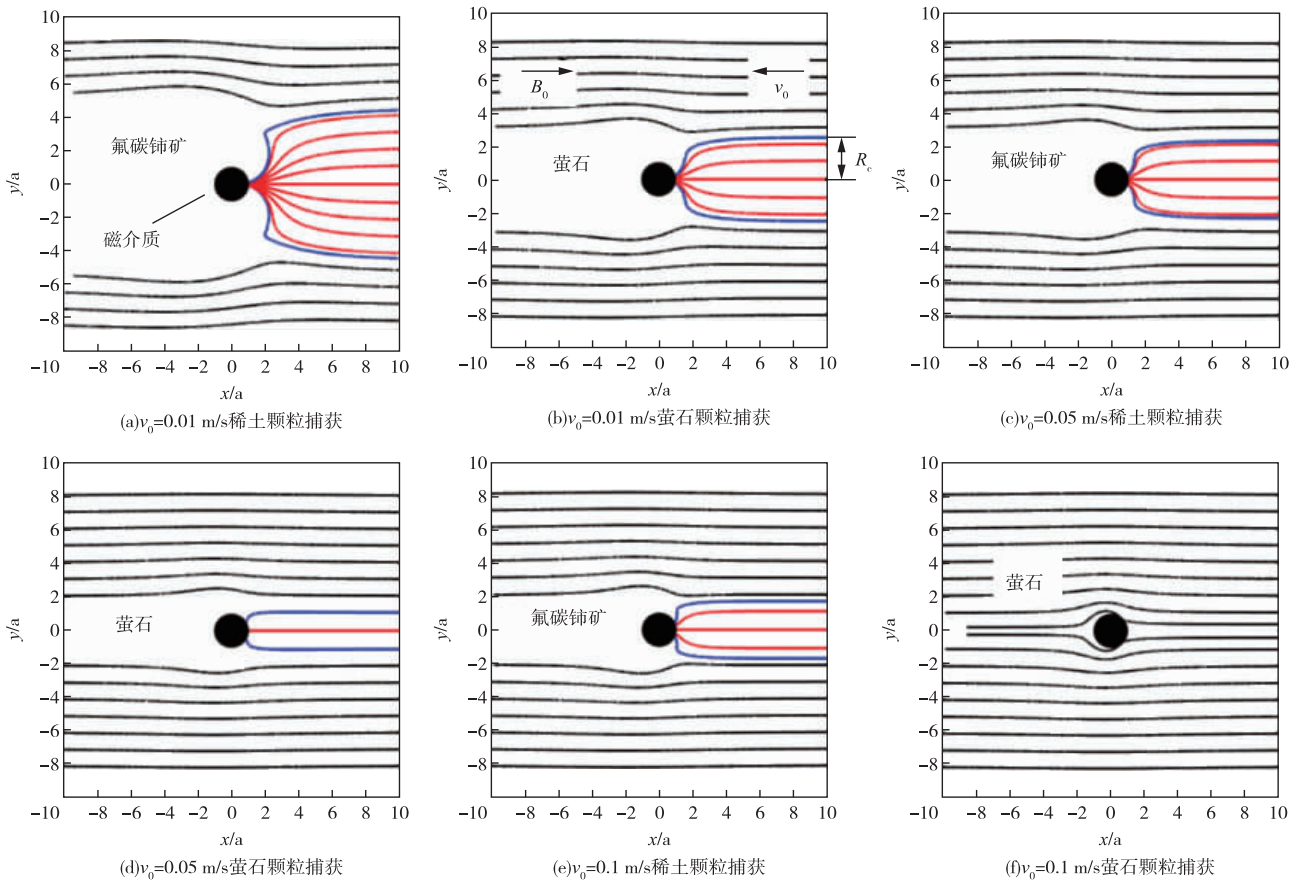


图8 (a) $v_0=0.01$ m/s 稀土颗粒捕获; (b) $v_0=0.01$ m/s 萤石颗粒捕获; (c) $v_0=0.05$ m/s 稀土颗粒捕获;
(d) $v_0=0.05$ m/s 萤石颗粒捕获; (e) $v_0=0.1$ m/s 稀土颗粒捕获; (f) $v_0=0.1$ m/s 萤石颗粒捕获

Fig. 8 (a) $v_0=0.01$ m/s rare earth particle capture; (b) $v_0=0.01$ m/s fluorite particle capture;
(c) $v_0=0.05$ m/s rare earth particle capture; (d) $v_0=0.05$ m/s fluorite particle capture;
(e) $v_0=0.1$ m/s rare earth particle capture; (f) $v_0=0.1$ m/s fluorite particle capture

如图8所示,在5 T背景磁场、矿物颗粒直径
为 $38 \mu\text{m}$ 的条件下,随着矿浆流动速度的增加,稀
土矿物颗粒和萤石矿物颗粒捕获半径 R_c 逐渐减
小。当矿浆流速增加到 0.1 m/s 时,萤石矿物颗
粒捕获半径较小几乎不会被捕获。因此在流速为
 0.1 m/s 时可抛弃大量萤石矿物。未被捕获的稀
土颗粒也可以通过改变磁介质填充率来增加稀土
颗粒被捕获的机率。

图9(a)为矿浆初始流速为 0.01 m/s 时颗粒捕

获半径与颗粒磁化率和磁介质直径的关系。由图可
知,随着颗粒磁化率增加,捕获半径逐渐增大,在颗
粒磁化率为 $10 \times 10^{-5} \sim 15 \times 10^{-5}$ 和磁介质直径为
 $0.06 \sim 0.15$ mm 捕获半径大于3,具有较高捕获半
径。图9(b)为矿浆初始流速为 0.1 m/s 时颗粒捕
获半径与颗粒磁化率和磁介质直径的关系。由图可
知,随着矿浆流速增加到 0.1 m/s 时捕获半径迅速
减小,在颗粒磁化率为 $10 \times 10^{-5} \sim 15 \times 10^{-5}$ 和磁介
质直径为 $0.06 \sim 0.12$ mm 捕获半径相对较好。

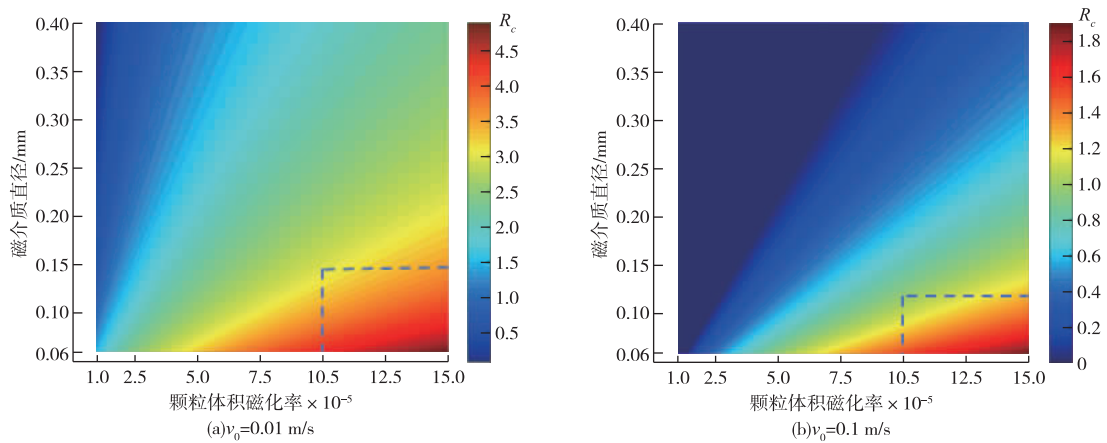


图9 颗粒捕获半径与颗粒体积磁化率和磁介质直径的关系

Fig. 9 The relationship between particle capture radius and particle volume susceptibility and magnetic medium diameter

3.2 稀土矿物颗粒聚集

上文通过颗粒运动轨迹优化了矿浆流速 0.1 m/s, 抛弃了大量的萤石矿物。在磁分离中具有高磁化率矿物更容易在磁介质上大量聚集, 所以对矿浆流速为 0.1 m/s 条件下稀土单体与稀土-铁连生体的饱和聚集轮廓进行了计算。

图 10 为颗粒直径为 38 μm 的稀土矿物单体及连生体在磁介质表面上的饱和聚集轮廓, 随着连生体度的降低, 聚集轮廓逐渐增大。这是因为随着连生体中铁的质量分数增加, 增加了连生体磁化率, 使颗粒在梯度磁场中的磁力更强, 从而颗粒聚集轮廓增大。

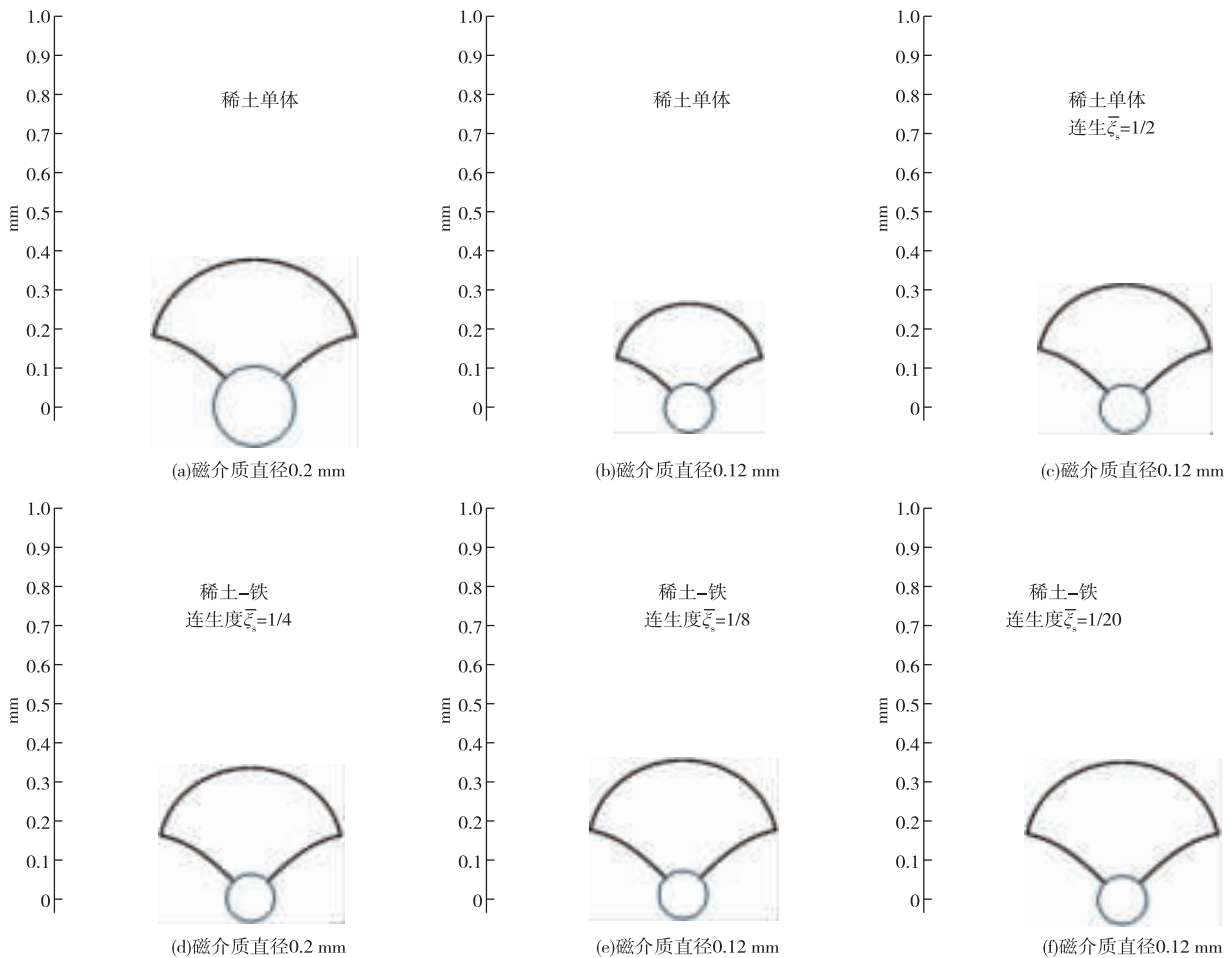


图 10 稀土矿物饱和聚集剖面

Fig. 10 Rare earth mineral saturation accumulation profile

图 11 为稀土单体和稀土与铁连生体在磁介质直径为 0.06、0.12、0.15、0.2 和 0.4 mm 下饱和聚集半径 r_{Ba} 。随着连生度降低颗粒饱和聚集半径 r_{Ba} 逐渐增大,当颗粒连生度小于 1/16 时饱和聚集半径 r_{Ba} 增加速度缓慢。当磁介质直径为 0.06 mm 时稀土单体颗粒饱和聚集半径 $r_{Ba}=0.16$ mm,连生度为 1/2 的稀土与铁连生体饱和聚集半径 $r_{Ba}=0.20$ mm,颗粒连生度为 1/20 饱和聚集半径 $r_{Ba}=0.23$ mm。随着磁介质直径的增加,颗粒饱和聚集半径逐渐增大,当磁介质直径为 0.4 mm 时,稀土单体颗粒饱和聚集半径 $r_{Ba}=0.60$ mm,连生度为 1/2 的稀土与铁连生体饱和聚集半径 $r_{Ba}=0.70$ mm,颗粒连生度为 1/20 饱和聚集半径 $r_{Ba}=0.78$ mm。这是因为根据磁学原理,磁介质直径越细,周围磁场衰减的越快,作用深度越小,导致细磁介质直径饱和聚集半径 r_{Ba} 值越小。

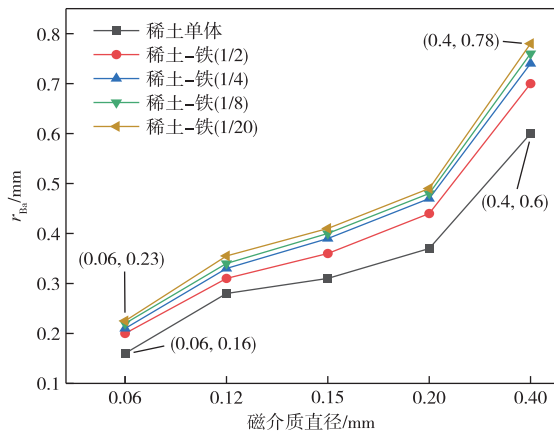


图 11 稀土单体及连生体在磁介质表面上的饱和聚集半径 r_{Ba}

Fig. 11 Saturation aggregation radius r_{Ba} of rare earth free and intergrown Particles on the surface of magnetic media

3.3 磁介质填充率优化

颗粒饱和聚集半径 r_{Ba} 与磁介质间距或填充率密切相关。假设磁介质在分离空间均匀排布,构型参数如图 12 所示。

在二维中磁介质填充率 ϵ 为磁介质横截面积与分离空间横截面积之比,如式(21)所示。

$$\epsilon = \frac{\pi a^2}{(2d)^2} \quad (21)$$

其中, a 为磁介质半径, m ; $2d$ 为相邻磁介质丝中心距, m 。通常为了避免颗粒堆积导致过滤器堵塞,颗粒饱和聚集半径 r_{Ba} 应小于 d 。当 $r_{Ba}=d$ 时,定义为临界填充率 ϵ_c ,当 r_{Ba} 大于 d 时过滤器可能会发生堵塞。临界填充率 ϵ_c 由式(22)给出。

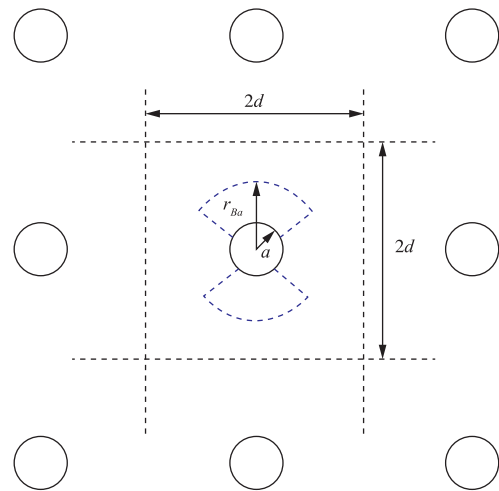


图 12 堆积半径对填充率的影响

Fig. 12 Effect of packing radius on filling rate

$$\epsilon_c = \frac{\pi a^2}{(2r_{Ba})^2} \quad (22)$$

通过式(22)和颗粒饱和聚集半径 r_{Ba} 值,可以计算临界填充率 ϵ_c 。如图 12 所示。

图 13 为在 5 T 背景磁场,颗粒直径 $38 \mu\text{m}$ 、矿浆流速 0.1 m/s 的条件下,不同连生度矿物颗粒与磁介质直径和填充率的关系。由图 13 可以看出,当磁介质直径为 0.06 mm 时,连生度为 1/20 的颗粒临界填充率为 5.6%。随着磁介质直径的增加,临界填充率逐渐增大。当磁介质直径为 0.4 mm 时,连生度为 1/20 的颗粒临界填充率为 20.6%。磁介质填充率也是过滤系统重要参数,填充率较大可以增加磁性颗粒被捕获机率,但也增加了磁过滤器被堵塞的风险。当实际情况中磁介质填充率小于临界填充率时,过滤器不易发生堵塞,所以临界填充率又可称为最大填充率。临界填充率是评价颗粒发生堵塞难易程度重要参数,其定义了颗粒是否发生堵塞的标准,

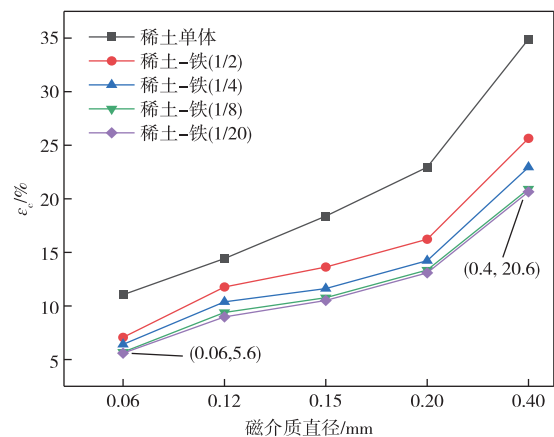


图 13 不同矿物与磁介质直径和填充率关系

Fig. 13 The relationship between different minerals and magnetic medium diameter and filling rate

也可以作为设计磁介质填充率的依据。

在实际生产中可以通过不同磁介质填充率的磁介质丝盘来进行生产作业,如在距离矿浆进料入口近的地方放入填充率较小的磁介质丝盘来吸附磁性较强的颗粒。在距离进料入口较远处放入磁介质填充率较大的磁介质丝盘来吸附磁性较弱的颗粒。这样提高了回收率的同时,也可以有效改善颗粒堵塞问题。

4 结论

1)颗粒饱和聚集试验结果表明,数值模拟颗粒饱和聚集轮廓与试验视频轮廓吻合较好,证明数值计算结果是可靠的。

2)通过颗粒运动轨迹模型优化了矿浆流动速度,当矿浆流动速度为 0.1 m/s 时萤石矿物几乎不能被吸附在磁介质上。

3)随着磁介质直径的增加,颗粒饱和聚集半径 r_{Bk} 和磁介质临界填充率逐渐增大,当磁介质直径为 0.06 mm 时,连生度为 1/20 的稀土连生体颗粒临界填充率为 5.6%。随着磁介质直径的增加,临界填充率逐渐增大,当磁介质直径为 0.4 mm 时连生度为 1/20 的颗粒临界填充率为 20.6%。

参考文献

- [1] FARIS N, RAM R, TARDIO J, et al. Application of ferrous pyrometallurgy to the beneficiation of rare earth bearing iron ores: a review [J]. Minerals Engineering, 2017, 110: 20-30.
- [2] ZHOU Y, YANG H, XUE X X, et al. Separation and recovery of iron and rare earth from Bayan Obo tailings by magnetizing roasting and $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ activation roasting[J]. Metals-Open Access Metallurgy Journal, 2017, 195(7): 2-18.
- [3] FUERSTENAU D W, PRADIP, HERRERA-URBINA R. The surface chemistry of bastnaesite, barite and calcite in aqueous carbonate solutions[J]. Colloids and Surfaces, 1992, 68(1/2): 95-102.
- [4] 王绍华, 杨占峰, 王振江, 等. 白云鄂博矿中深部弱磁尾矿中稀土的赋存状态研究[J]. 中国稀土学报, 2020, 38(1): 122-128.
WANG Shaohua, YANG Zhanfeng, WANG Zhenjiang, et al. Study on rare earth occurrence in middle and deep weak magnetic tailings of Bayan Obo Mine[J]. Chinese Journal of Rare Earth, 2020, 38(1): 122-128.
- [5] ZHOU R, WANG C. Microfluidic separation of magnetic particles with soft magnetic microstructures [J]. Microfluidics & Nanofluidics, 2016: 20-48.
- [6] WLA B, LZ A, YH A, et al. Numerical simulation and experimental verification for magnetic field analysis of thread magnetic matrix in high gradient magnetic separation[J]. Powder Technology, 2019, 355: 300-308.
- [7] WATSON J. Magnetic filtration[J]. Journal of Applied Physics, 1973, 44(9): 4209-4213.
- [8] NESSET J E, FINCH J A. The static (buildup) model of particle accumulation on single wires in high gradient magnetic separation: experimental confirmation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 17 (4): 1506-1509.
- [9] ZHENG X, WANG Y, LU D. Study on capture radius and efficiency of fine weakly magnetic minerals in high gradient magnetic field[J]. Minerals Engineering, 2015, 74: 79-85.
- [10] XUE Z, WANG Y, ZHENG X, et al. Simulation of particle accumulation in high gradient magnetic separation based on static buildup model (SBM) [J]. Minerals Engineering, 2022, 175: 107290. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107290.
- [11] 黄均平. 铁磁介质捕捉顺磁颗粒的动力学模型[J]. 力学与实践, 2004, 26(4): 61-63.
HUANG Junping. Dynamics model of trapping paramagnetic particles in ferromagnetic media [J]. Mechanics and Practice, 2004, 26(4): 61-63.
- [12] HIROTA N, ANDO T, TAKANO T, et al. In-situ observation of particles deposition process on a ferromagnetic filter during high-gradient magnetic separation process [J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.11.028>.
- [13] NESSET J, FINCH J. The static (buildup) model of particle accumulation on single wires in high gradient magnetic separation: experimental confirmation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1981, 17 (4): 1506-1509.
- [14] WATSON J H P. Magnetic filtration[J]. Journal of Applied Physics, 1973, 44(9): 4209-4213.
- [15] ZHENG X, WANG Y, LU D. A realistic description of influence of the magnetic field strength on high gradient magnetic separation [J]. Minerals Engineering, 2015, 79: 94-101.
- [16] YANG H, RONG Y, TANG R, et al. Recovery of iron from Baotou rare earth tailings by magnetizing roast[J]. Rare Metals, 2013, 32(6): 616-621.
- [17] LEISSNER T, BACHMANN K, GUTZMER J, et al. MLA-based partition curves for magnetic separation[J]. Minerals Engineering, 2016, 94: 94-103.
- [18] 王翔, 赵增武, 贾艳, 等. 内蒙古某尾矿回收稀土试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(2): 104-110.

WANG Xiang, ZHAO Zengwu, JIA Yan, et al. Rare earth recovery experiment and adsorption kinetics of a tailings in Inner Mongolia [J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2024(2):104-110.

- [19] YANG H, RONG Y, TANG R, et al. Recovery of iron from Baotou rare earth tailings by magnetizing roast [J].

Rare Metals, 2013, 32(6):616-621.

- [20] FONER S. Versatile and sensitive vibrating-sample magnetometer [J]. *Review of Entific Instruments*, 1959, 30(7):548-557.

(本文编辑 刘水红)

(上接第 143 页)

XIA Zifa, DENG Chaoan, REN Xingmin, et al. Industrial application of magnetic flotation combined process in recovery of fluorite from tailings [J]. *Non-ferrous Metallurgical Equipment*, 2021(2):40-44.

- [3] 朱训. 中国矿情:第三卷非金属矿产[M]. 北京:科学出版社, 1999:43-78.

ZHU Xun. Mineral situation in China: volume 3 non-metallic minerals [M]. Beijing: Science Press, 1999: 43-78.

- [4] 任俊. 羟肟捕收剂对稀土矿物的浮选性能[J]. 有色金属, 1988, 50(2):36-39.

REN Jun. Flotation behavior of rare earth minerals with two new collectors [J]. *Nonferrous Metals*, 1998, 50(2):36-39.

- [5] 朱一民. 2022年浮选药剂的进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(3):17-32.

ZHU Yimin. Progress of flotation reagents in 2022 [J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2023(3):17-32.

- [6] GAO Y, GAO Z, SUN W. A review of anisotropic surface properties of fluorite [J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2016, 26(2):415-422.

- [7] SONG S, LOPEZ-VALDIVIESO A, MARTINEZ-MARTINEZ C, et al. Improving fluorite flotation from ores by dispersion processing [J]. *Minerals Engineering*, 2006, 19(9):912-917.

- [8] TIAN X, ZHANG X, LI L, et al. Room temperature cleaner flotation technique for scheelite rough concentrate [J]. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 1997, 7(2):20-24.

- [9] CHEN C, HU Y H, ZHU H L, et al. Inhibition performance and adsorption of polycarboxylic acids in

calcite flotation [J]. *Minerals Engineering*, 2019, 133: 60-68.

- [10] ANTSIFEROVA S, MARKOSYAN S, SUVOROVA O. The effect of a humate reagent and sodium oleate on the wettability of fluorite, calcite, and quartz [J]. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2019, 53(4): 656-660.

- [11] BULATOVIC SRDJAN M. Handbook of flotation reagents: chemistry, theory and practice [M]. Amsterdam: Elsevier Science, 2010:57-76.

- [12] 任玲玲, 丁伟丽, 王喆, 等. 萤石与方解石在组合捕收剂体系下的浮选行为与机理研究 [J]. *山西化工*, 2022(6): 4-7.

REN Lingling, DING Weili, WANG Nian, et al. Study on flotation behavior and mechanism of fluorite and calcite in combined collector system [J]. *Shanxi Chemical Industry*, 2022(6):4-7.

- [13] 张少杰, 何嘉宁, 李沛, 等. 柠檬酸对萤石和方解石的抑制效果研究 [J]. *有色金属(选矿部分)*, 2023(1): 138-145.

ZHANG Shaojie, HE Jianing, LI Pei, et al. Study on the inhibitory effect of citric acid on fluorite and calcite [J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2023(1):138-145.

- [14] 孙东阳, 张磊, 张太雄, 等. 硫酸铝作为活化剂的浮选试验及其活化机理探讨 [J]. *黄金*, 2018, 38(11):58-60.

SUN Dongyang, ZHANG Lei, ZHANG Taixiong, et al. Flotation experiment with aluminum sulfate as activator and discussion about its activation mechanism [J]. *Gold*, 2017, 38(11):58-60.

(本文编辑 刘水红)