# 高梯度磁选理论与技术进展

赵嘉艺1.2,王星星3,祁磊1.4,赵志强2,王飞旺1.2,文金磊1.5,戴惠新1

1. 昆明理工大学国土资源工程学院,云南昆明650093;

2. 矿物加工科学与技术国家重点实验室,北京 102628;

3. 普洱市检验检测院, 云南 普洱 665099;

4. 鹤庆北衙矿业有限公司,云南大理 671000;

5. 豫光(成都)科技有限公司,四川成都 610100

中图分类号:TD924 文献标识码:A 文章编号:1001-0076(2024)03-0117-10 DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.03.013

**摘要** 在高梯度磁选分离过程中存在机械夹带、磁性夹带、竞争捕获等现象,最终导致选择性差、分选腔堵塞、分选效率低等 一系列问题。目前科研工作者针对高梯度磁选的理论研究主要集中于对颗粒受力分析并力的大小计算、颗粒轨迹模型和颗粒 堆积模型的构建、聚磁介质的研发与优化。以颗粒受力为基础,通过颗粒的堆积模型和轨迹模型分析造成选择性差以及效率 低的原因,综述聚磁介质的研发与优化,旨在为高梯度磁选技术在工业应用中的优化与理论研究提供参考,并对高梯度磁选技 术理论研究的未来趋势进行展望。

关键词 磁选;高梯度;磁场分布;夹带

# 引言

高梯度磁选 (High gradient magnetic separation) 是 通过向均匀磁场中引入聚磁介质,利用磁化后聚磁介 质周围感应出的高梯度磁场,作用在弱磁性矿物颗粒 上,使其向聚磁介质靠近并捕获在聚磁介质上,从而 实现弱磁性矿物颗粒与非磁性矿物颗粒的分离。高 梯度磁选技术因其效率高、成本低、对环境污染小等 特点,广泛运用于矿物加工、废水处理、生物科学、食 品工业等领域14%。特别是在矿物加工领域,已经成为 微细粒弱磁性矿物回收和非金属矿物提纯的主要方 法题。在高梯度磁选过程中,会有一部分低品位连生 体颗粒和脉石颗粒连同高品位矿物颗粒一并被捕获, 这不仅会导致精矿品位下降,还会因存在竞争捕获作 用,使回收率也下降。并且,当聚磁介质作用在颗粒 上的磁力过大时,会把连生体一同捕获,也会导致品 位降低。因此,为了改善磁选效果,科研工作者们以 聚磁介质周围磁场及磁场梯度分布方程和聚磁介质 周围流场对颗粒曳力的影响为基础,对聚磁介质的类 型、几何尺寸以及排列方式进行优化,以提升高梯度 磁选的效率和选择性。同时为减少磁选夹杂的问题, 还开展了通过提高颗粒分散性进而提升高梯度磁选 的选择性的研究。基于此,本文以颗粒在分选过程中 受到的各种力为基础,从聚磁介质矩阵的优化、降低 夹带提高选择性等角度,对提升高梯度磁选的选择性 分离、增大回收效率等方面的研究进行了全面综述, 以期为高梯度磁选技术的应用与理论研究提供参考。

## 1 高梯度磁选存在的主要问题

在高梯度磁选过程中,因为给矿粒度不均匀、聚 磁介质周围磁场梯度过大、矿浆浓度过高、给矿速度 过快等一系列原因,造成分选腔堵塞、连生体颗粒和 脉石矿物的夹带等,这些问题严重降低了精矿产品的 品位,并且影响精矿的回收率<sup>[6]</sup>。

#### 1.1 机械夹带

影响磁选选择性的主要原因是脉石颗粒随矿浆 通过聚磁介质矩阵时在精矿上的堆积和滞留,随着磁 性颗粒不断被聚磁介质矩阵捕获,矩阵的流道逐渐收 缩,导致非磁性颗粒夹留在精矿中<sup>18</sup>,或因动量较大的 非磁性颗粒穿过磁性颗粒留在精矿中,具体可分为穿 透、滞留、拦截三种形式<sup>19</sup>。穿透现象是由于聚磁介

收稿日期:2024-05-20

基金项目:国家自然科学基金项目(52364033);矿物加工科学与技术国家重点实验室开放基金项目(BGRIMM-KISKL-2023-12) 作者简介:赵嘉艺(2001--),男,硕士,主要从事磁电选矿理论与数值模拟、磁选设备研发,E-mail:zhaojiayi\_mail@163.com。 通信作者:王飞旺(1990--),男,讲师,主要从事磁电选矿理论与数值模拟、磁选设备研发,E-mail:wangfw0310@qq.com。

质上磁性堆积物表面存在空隙,一些细小的或动能较大的脉石和连生体颗粒可通过空隙进入堆积体中造成夹带(图 la);滞留现象是因为颗粒间存在范德华力和静电力等表面作用力,导致脉石和连生体颗粒被吸在堆积体表面,随着磁分离过程的进行,被捕获的脉石和连生体颗粒会被后续的磁性颗粒覆盖造成夹带

(图 1b); 拦截作用是当捕获过程进入最后阶段, 随聚磁介质对颗粒的捕获导致分选腔流道收缩甚至堵塞, 造成脉石和连生体颗粒被截停在堆积体表面造成夹带(图 1c)。目前主流的解决方式是通过脉动冲洗水, 利用流体曳力重新打散表层精矿, 使夹带的非磁性颗粒被释放出来, 提高精矿品位。



图1 机械夹带示意图 (a-穿透; b-滞留; c-拦截)<sup>18</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of mechanical entrainment (a: penetration; b: retention; c: interception) [8]

#### 1.2 磁性夹带

磁性夹带一般指由磁力吸引引起的夹带,主要原 因是非磁性颗粒在一定的作用下由非磁性颗粒转变 为弱磁性颗粒<sup>[7]</sup>。具体的磁转化过程可通过以下两种 方式引起:(1)连生体。有一部分未达到单体解离的 颗粒,它们中有一部分显弱磁性会被聚磁介质捕获, 造成精矿品位下降(图 2a)。(2)黏附。进料中的非磁 性颗粒和磁性颗粒没有完全分离,或非磁性颗粒和磁 性颗粒和磁性颗粒没有完全分离,或非磁性颗粒和磁 性颗粒相互碰撞并在表面力的作用下黏附。黏附成 团的磁团聚体会被捕获到聚磁介质表面并堆积,使精 矿品位下降(图 2b)。目前最常用的处理方式是在给 矿段加入退磁场或通过机械搅拌打散,使团聚体分散 并释放包裹的脉石颗粒,或加入分散剂通过空间位阻 使颗粒间不容易发生黏附作用<sup>[8]</sup>。



图 2 吸引夹带示意图 (a—连生体吸引; b—黏附吸引)<sup>□</sup> Fig. 2 Schematic diagram of attraction entrapment (a: hypha attraction; b: attachment attraction)<sup>□</sup>

#### 1.3 颗粒的竞争捕获

高梯度磁选过程中颗粒在聚磁介质上存在竞争

性捕获,且主要发生在较高磁场下。图3展示了高梯 度磁选中颗粒的堆积,连生体、高解离度的单体颗粒 以及脉石颗粒都会在聚磁介质上堆积<sup>(s)</sup>,其中连生体 对聚磁介质捕获颗粒的过程影响非常大。当背景磁 场在较低磁场强度下,粗粒连生体和细粒高品位单体 颗粒都很难在聚磁介质上堆积,且回收率随着颗粒尺 寸的减小而减小,但当背景磁场强度较高时,由于粗 粒连生体受到流体曳力的影响比细粒的高品位单体 颗粒小,可以更快到达聚磁介质表面占据大量捕获空 间,导致聚磁介质对细粒高品位单体颗粒的可捕获空 间缩小。因此,当背景磁场的磁场强度较高时,继续 提高磁场强度会导致颗粒间的竞争性捕获,降低回收 率<sup>[10]</sup>。



**图3** 颗粒在聚磁介质上堆积示意图(a→低磁场中;b→高磁场中)<sup>10</sup>

Fig. 3 Schematic representation of particle stacking on matrix (a: in a low magnetic field; b: in a high magnetic field)<sup>(10)</sup>

### 2 高梯度磁选理论基础

高梯度磁选的实质是利用聚磁介质对磁性物含 量不同的颗粒上的不同磁力与其他机械力共同作用 使颗粒运动路径的不同而实现。在高梯度磁选过程 中作用在颗粒上的力有磁力、重力、流体曳力、范德 华力和静电力等表面力,通过对颗粒受力分析以及建 立颗粒捕获模型可以更直观地了解高梯度磁选过程<sup>[11]</sup>。 在建立颗粒捕获模型时,如果考虑到颗粒受到的所有 的力,会导致模型及计算公式变得非常复杂<sup>[12]</sup>。矿物 加工领域处理的颗粒大小一般在几微米到几十微米 之间,这种粒径大小的颗粒在捕获过程中主要受到的 力是磁力、流体曳力、重力<sup>[13]</sup>。因此,这部分内容以颗 粒在高梯度磁选过程中受到的主要的力为基础,通过 颗粒捕获模型描述颗粒的捕获过程。

#### 2.1 磁场和磁力

聚磁介质是高梯度磁选中捕获弱磁性颗粒的重 要构件,其周围的磁场分布特性直接影响高梯度磁选 效率。背景磁场的方向有两种,分别为水平配置和竖 直配置。

Chen 等人研究了磁场方向对高梯度磁选性能的 影响,发现垂直磁场比水平磁场漏磁更少、能耗更低, 并且对细粒弱磁颗粒的回收效果更好<sup>[4]</sup>。Hu 等人进 一步比较了两种不同磁场配置方式的差异,发现水平 配置下的精矿品位更高,但处理能力和回收率远低于 竖直配置,磁场竖直配置的处理量大、能耗低更适合 矿物加工领域<sup>[15]</sup>。Xiong 以聚磁介质为中心建立起极 坐标系,推导出了聚磁介质周围磁场表达式,如图 4 所示<sup>[8]</sup>。



**图 4** 直径为 *a* 的聚磁介质周围的磁场分布<sup>[8]</sup> **Fig. 4** Magnetic field distribution around a matrix of diameter *a*<sup>[8]</sup>

其假设在分选腔内放置一个直径为 a 的圆柱形 聚磁介质,并在该区域施加一个均匀背景磁场 H<sub>0</sub>,磁 场计算式:

$$H_{\rm r} = \left(\frac{1}{2}Ma^2r^{-2} + H_0\right)\cos\theta \qquad (1)$$

$$H_{\theta} = \left(\frac{1}{2}Ma^2r^{-2} - H_0\right)\sin\theta \qquad (2)$$

$$H^{2} = H_{\rm r}^{2} + H_{\theta}^{2} \tag{3}$$

$$H^{2} = H_{0}^{2} \left( 1 + \frac{1}{2H_{0}} M a^{2} r^{-2} \cos 2\theta + \frac{1}{4H_{0}^{2}} M^{2} a^{4} r^{-4} \right)$$
(4)

式中: *M* 是聚磁介质的感应磁化强度, r 是空间任意位 置到聚磁介质中心的距离, *H*<sub>r</sub> 为径向磁场强度, *H*<sub>θ</sub> 为 切向磁场强度。随后, T-Y Ying 等人在 Xiong 研究基 础上推导出了磁性颗粒在磁场中任意位置所受的磁 力的计算式<sup>116</sup>。如图 4 所示建立极坐标系, 放置一根 半径为 a 的聚磁介质, 再放置一个与 x 方向夹角大小 为θ的顺磁颗粒, 在 x 方向上施加一个大小为 *H*<sub>0</sub> 的均 匀背景磁场, 可以计算出磁性颗粒在磁场中任意位置 所受到的磁力<sup>117</sup>:

$$F_{\rm r} = -\frac{\mu_0 K_{\rm p} V_{\rm p} M H a^2}{2r^3} \left(\frac{M a^2}{H_{\rm r}^2} + \cos 2\theta\right) \tag{5}$$

$$F_{\theta} = -\frac{\mu_0 K_{\rm p} V_{\rm p} M H a^2}{2r^3} \sin 2\theta \tag{6}$$

$$F_{\rm m} = \sqrt{F_{\rm r}^2 + F_{\theta}^2} \tag{7}$$

式中:  $F_r 和 F_{\theta}$ 分别是磁力  $F_m$ 的非零径向分量和切向 分量;  $\mu_0$  是真空磁导率; M 是聚磁介质的磁化强度; 颗 粒体积为  $V_p$ 、颗粒的磁化率  $K_p$ , r 是磁性颗粒的中心 到聚磁介质轴线的距离。根据公式可得出磁力大小 取决于颗粒的特性, 如颗粒大小和磁化率、施加的背 景磁场强度以及聚磁介质的尺寸等。

#### 2.2 流体曳力

在高梯度磁选过程中流体曳力是主要竞争力,通 过流体的剪切作用使非磁性颗粒和连生体矿物与磁 性矿物颗粒分离。Joshi 推导出球型颗粒受流体曳力 的通用表达式 (8)<sup>118</sup>:

$$F_{\rm d} = \frac{\pi \eta \rho_{\rm f} R^2}{2} \left( v_{\rm p} - v_{\rm f} \right) |v_{\rm p} - v_{\rm f}|$$
 (8)

式中: *R* 为球型颗粒半径, *η* 是流体黏度, *ρ*<sub>f</sub> 是流体密度, *ν*<sub>p</sub>和*ν*<sub>f</sub>分别是颗粒和流体的速度。其中阻力系数取决于雷诺数 *Re*, 雷诺数由公式 (9) 得出:

$$Re = \frac{2\rho_{\rm f} \mid v_{\rm p} - v_{\rm f} \mid R}{\mu_{\rm f}} \tag{9}$$

式中:µ<sub>f</sub>为运动黏度,对于 v<sub>0</sub>的流体平行于磁场方向 的配置方式。运动状态下的颗粒的流体曳力分量可 分别由式 (10) 和式 (11) 得到<sup>[12]</sup>:

$$F_{\rm dr} = -6\pi\mu_{\rm f}Rv_0\cos\theta\left(1 - \frac{d^2}{r^2}\right) \tag{10}$$

$$F_{\rm d\theta} = -6\pi\mu_{\rm f}Rv_0\sin\theta\left(1+\frac{d^2}{r^2}\right) \tag{11}$$

式中: F<sub>dt</sub> 为极坐标系下极径方向的流体曳力分量, F<sub>dt</sub> 为极坐标系下极角方向的流体曳力分量。当颗粒被捕获在聚磁介质表面,并与其他颗粒保持相对静止时,颗粒只受流体曳力的切向力的作用,且仅作用于颗粒群的表面。因此,流体曳力计算式变为式(12):

$$F_{\rm d\theta} = \frac{\pi^2 R^2}{d_{\rm t}} \rho_{\rm f} v_0^{\frac{3}{2}} \left(\frac{\mu_{\rm f}}{r}\right)^{\frac{1}{2}} k \qquad (12)$$

式中: *k*=(6.973*θ*-2.732*θ*+0.292*θ*-0.018 3*θ*+0.000 43*θ*-0.000 115*θ*<sup>11</sup>)。通过计算式(11)和(12)来比较两者的大小,结果表明,作用在运动中的颗粒上的流体曳力远大于作用在已被聚磁介质捕获的静止颗粒<sup>119</sup>。

### 2.3 重力

与磁力和流体曳力相比,重力要小得多。但是, 重力对非磁性颗粒在聚磁介质矩阵上的夹带作用有 很大的影响<sup>[20]</sup>。在高梯度磁选对微细颗粒的捕获中重 力是非常重要的力。作用在颗粒上的重力可用公式 (13)表示:

$$F_{\rm g} = \frac{4}{3}\pi R^3 (\rho_{\rm p} - \rho_{\rm f})g$$
 (13)

式中: ρ<sub>p</sub> 是颗粒密度, g 是重力加速度。由于重力作用, 非磁性颗粒总是优先夹带在聚磁介质上方的沉积物 中, 而不是下方, 即使矿浆的给料方向相反也是如此。 随着脉石矿物密度的增加, 上部沉积物的非磁性夹带变 得更加严重。与低密度脉石相比, 高密度脉石颗粒在 上方沉积物中的夹带, 即使矿浆流速很高也很难去除<sup>[21]</sup>。

#### 2.4 惯性力

在高梯度磁选系统中,通过多物理场的可变配置 为分选的设计或优化创造了巨大空间。一些研究人 员对现有力场进行优化或引入外加作用力(如脉动惯 性力)旨在为减轻脉石和连生体的夹带和提高磁选效 率。脉动惯性力大小和方向随时间周期性变化,且其 方向在每个运动的前后半周期内相反。脉动达到振 幅最大时,惯性力最大。在平衡位置时,惯性力为零。 惯性力表达式为<sup>[21</sup>]</sup>:

$$F_{\rm a} = ma_t = -4mA \frac{\pi^2}{T^2} \sin\omega t \qquad (14)$$

式中: t为时间,  $a_t$ 为颗粒的瞬时加速度, A为振幅, T为脉动周期, m为颗粒质量,  $\omega$ 为脉动周期三角函数 曲线的角速度。

## 2.5 颗粒捕获模型

颗粒捕获模型是利用颗粒的运动方程来描述颗 粒在聚磁介质上的捕获,分为轨迹模型和堆积模型。 其中,轨迹模型是描述聚磁介质对颗粒的捕获行为最 常用的方法之一,该模型适用于颗粒被捕获的初始阶 段<sup>[23-24]</sup>。而颗粒堆积模型考虑了捕获过程中颗粒在聚 磁介质上堆积对后续颗粒捕获的影响<sup>[25-27]</sup>。

#### 2.5.1 轨迹模型

Watson 构建了背景磁场纵向配置的颗粒运动轨 迹模型。在该模型中流体被假定为理想的湍流, 对聚 磁介质无黏性, 但对颗粒有黏性。推导出的颗粒运动 方程式 (15) 和 (16)<sup>[23]</sup>:

$$\frac{dr}{dt} = v_0 \cos\theta \left(1 - \frac{d^2}{r^2}\right) - \frac{4\mu_0 k_p R^2}{9\eta} \left(\frac{M_s d^2 H_0 \cos 2\theta}{2\mu_0 r^3} + \frac{M_s^2 d^4}{4\mu_0^2 r^5}\right)$$
(15)

$$r\frac{d\theta}{dt} = -v_0 \sin\theta \left(1 + \frac{d^2}{r^2}\right) - \frac{4\mu_0 k_p R^2 M_s d^2 H_0 \sin 2\theta}{18\eta r^3 \mu_0} \qquad (16)$$

式中: *M*s 磁介质的磁化强度, µ₀ 真空磁导率, k<sub>p</sub> 粒的磁 化率, *R* 为颗粒半径。如图 5: *d* 为聚磁介质半径, θ为 颗粒中心到聚磁介质中心连线与 x 轴的夹角, H₀ 为背 景磁场强度。





Fig. 5 Cross-section of the polymagnetic medium<sup>[23]</sup>

同时 Waston 还推导出背景磁场横向配置下颗粒 的运动方程式 (17) 和式 (18)<sup>[24]</sup>:

$$\frac{dr}{dt} = -v_0 \sin\theta \left(1 - \frac{d^2}{r^2}\right) - \frac{4\mu_0 k_{\rm p} R^2}{9\eta} \left(\frac{A_1 H_0 \cos 2\theta}{r^3} + \frac{A_1^2}{r^5}\right) \quad (17)$$

$$r\frac{d\theta}{dt} = -v_0 \cos\theta \left(1 + \frac{d^2}{r^2}\right) - \frac{4\mu_0 k_{\rm p} R^2 A_1 H_0 \sin 2\theta}{9\eta r^3}$$
(18)

在纵向配置中,颗粒主要被捕获在矩阵的上下两侧,而在横向配置中,颗粒主要被捕获在矩阵的左右 两侧。颗粒运动轨迹可以通过求解颗粒运动方程来 描述。图6表示了两种构型下的颗粒运动轨迹。



**图6** 围绕聚磁介质的颗粒运动轨迹(a—纵向配置;b—横向配置)<sup>[24]</sup>

**Fig. 6** Particle motion trajectories around matrix: (a) longitudinal configuration; (b) transverse configuration<sup>[24]</sup>

#### 2.5.2 堆积模型

Luborsky 在 Waston 研究的基础上,提出了颗粒 堆积模型,将聚磁介质上流场随颗粒的堆积而变化也 考虑在内,流体的势能随着颗粒的堆积而变化的方程 为式 (19)<sup>[25]</sup>: 式中: $d_n=d+2nR$ , $\psi_f$ 为流场的势能,n为颗粒堆积的层数,d为聚磁介质半径,R为球型颗粒半径。

Badescu 等人建立了高梯度磁选颗粒堆积模型, 并且考虑到矿浆的湍流和层流,其中湍流的颗粒运动 方程见式 (20) 和式 (21)<sup>[26]</sup>:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{2\mu_0 k_{\rm p} R^2 M_{\rm s} H_0}{9\eta d} \left[ S_1 + \frac{M_{\rm s}}{2\mu_0} \left( S_1 S_2 + S_3 S_4 \right) \right]$$
(20)

$$\frac{dy}{dt} = -v_0 + \frac{2\mu_0 k_p R^2 M_s H_0}{9\eta d} \left[ S_4 + \frac{M_s}{2\mu_0} \left( S_1 S_2 + S_3 S_4 \right) \right] \quad (21)$$

式中: *M*<sub>s</sub>为聚磁介质的磁化强度。*S*<sub>1</sub>、*S*<sub>2</sub>、*S*<sub>3</sub>、*S*<sub>4</sub>是颗粒的位置坐标 (*x*、*y*)的函数。对于层流,公式 (21)则 变为式 (22)<sup>[27]</sup>:

$$\frac{dy}{dt} = -6v_0 \left[ \frac{1}{4} - \left( \frac{x}{m} - \frac{h_1}{m} - \frac{1}{2} \right)^2 \right] + \frac{2\mu_0 k_p R^2 M_s H_0}{9\eta d} \left[ S_4 + \frac{M_s}{2\mu_0} \left( S_2 S_4 + S_1 S_3 \right) \right]$$
(22)

式中: *m* 为两块板之间的距离, *h*<sub>1</sub> 为基质与相邻板之间的距离。

## 3 聚磁介质对分选行为的影响

聚磁介质是高梯度磁选过程中产生高梯度磁场、 捕获磁性颗粒的核心构件。聚磁介质的材料、形状、 尺寸、排列方式等因素,会影响聚磁介质周围磁场分 布、磁场梯度大小和矿浆的流态等[18],对磁性颗粒的 捕获过程有至关重要的作用。自第一台高梯度磁选 机问世以来,人们已经发明多种不同类型的高梯度磁 分离系统和聚磁介质<sup>130</sup>。Frantz 在 1937 年发明高梯度 磁洗机,并使用由细金属丝组成的磁性筛网作为聚磁 介质,用于吸引和捕获磁性颗粒<sup>[3]</sup>。1948年 Leslie 使 用具有高磁导率的钢球作为聚磁介质,球型聚磁介质 表面磁场梯度大、填充率高且有效捕获面积大所以回 收率高,但由于球型聚磁介质间距狭窄,随着对磁性 颗粒的不断捕获容易发生堵塞,导致作业效率下降[29]。 1967年琼斯把带有三角形齿的槽板与琼斯式高梯度 磁选机相结合,利用齿板聚磁介质的齿尖感应出小范 围高梯度的磁场捕获磁性颗粒,齿板的齿角、磁极间 距和齿距的选择,应考虑颗粒被捕获所需磁力和聚磁 介质的捕获面积。通常齿板间距应比入料中最大颗 粒尺寸大1.5~2倍,间距过小会导致堵塞以及效率不 高等问题,但实际生产时间距往往较大,因此无法保 证对细弱磁性颗粒的回收,故槽板更适用于捕获磁性 粗颗粒。为更好地回收细粒弱磁性颗粒, Kolm 在 1971年提出使用钢棒作为聚磁介质,通过高梯度磁选 机来分离磁性胶体和亚胶体陶瓷颗粒。棒介质具有 磁场梯度高、矿浆流通性好、不易堵塞等优点,成为 选矿领域应用最广泛的聚磁介质。此后,聚磁介质的

发展主要通过优化棒聚磁介质截面形状和排列方式 等提高磁场梯度和捕获效率,还有部分通过研发聚磁 介质新材料提高饱和磁化率和耐磨性等聚磁介质性 能<sup>131</sup>。

#### 3.1 聚磁介质材料

不同材料的聚磁介质的饱和磁化率、耐腐蚀性、 耐磨性等性质都有差异题。在背景磁场强度大小相同 时,饱和磁化率较高的聚磁介质,感应出的磁场强度 大于饱和磁化率较低的聚磁介质。在聚磁介质材料 研究方面,铁基合金成本低且磁导率高,通过改变铁 基合金的成分及含量得到性能优异的聚磁介质材料 提高铁基合金聚磁介质的磁选性能。1979年,美国学 者用含铬 17.31%、铁 81.64%的铬铁素体合金 (Cr17 不锈钢)制成的聚磁介质,具有良好的耐磨性,饱和磁 感应强度高达 1.2 T<sup>[34]</sup>。奥氏体 (Austenitic) 不锈钢耐 腐蚀性好,所制成的聚磁介质常用于处理含盐高的矿 物,但是在反复磁化和退磁后其磁化性能会退化进而 影响分选性能,因此由奥氏体不锈钢材料制成的聚磁 介质常用于需要耐腐蚀且磁反转较少的作业流程<sup>[3]</sup>。 2010年,有学者使用坡莫合金(铁19%、镍81%)制成 的聚磁介质捕获黄铜矿,回收率大于90%1%。由广东 钢铁学院研制的一种由铁钴合金制成的聚磁介质,该 聚磁介质硬度高、更耐磨、耐腐蚀性好,且饱和磁感 应强度高达 2.38 T<sup>[37]</sup>。

#### 3.2 聚磁介质结构

聚磁介质的捕获效率、单位捕获面积、磁场梯度 等受聚磁介质的尺寸、充填率、截面形状等因素影响<sup>[59]</sup>。 郑霞裕针对聚磁介质直径对聚磁介质周围磁场梯度 的影响,利用 ANSYS 模拟了不同直径聚磁介质周围 磁场特性(如图 7),研究表明聚磁介质的截面半径越 小,聚磁介质表面的曲率就越大,尖角磁效应越明显, 磁场梯度更大,但强磁场范围减小;相反聚磁介质直 径越大,磁场梯度越小,但强磁场范围也更大<sup>[38]</sup>。

Badescu V 发现使用更细的聚磁介质虽然可以获



图 7 不同直径聚磁介质周围的磁场分布<sup>[38]</sup> Fig. 7 Magnetic field distribution around different diameters of matrix<sup>[38]</sup>

得更大的磁场梯度,捕获更多的弱磁性颗粒,但随着 磁场梯度增大对颗粒捕获能力的增强会导致夹杂严 重、聚磁介质矩阵堵塞等一系列问题<sup>[39]</sup>。Zheng X 为 了解聚磁介质尺寸、颗粒粒度以及矿浆流速对聚磁介 质捕获半径的影响,采用数值计算的方法探究了高梯 度磁选中弱磁性颗粒的捕获特性,得出随着颗粒尺寸 的减小、矿浆流速加快、聚磁介质直径增大都会导致 聚磁介质的捕获半径减小<sup>[40]</sup>。

LiW为了探究聚磁介质直径对高梯度磁选效果 的影响,使用赤铁矿和褐铁矿为对象利用水平周期式 高梯度磁选机进行了不同直径聚磁介质的条件实验, 结果表明在聚磁介质间隙(两介质表面间距离)保持 不变的情况下,适当增大介质直径有利于提高充填率, 进而提高分选空间的磁场梯度,加强对磁性物的捕捉 能力,但介质直径过大时,反而会因介质表面有效捕 获面积的减少和磁场梯度的下降而影响对磁性物的 捕捉;介质直径较小虽可提高磁场梯度,增大介质表 面积,但充填率降低,磁损耗增加。因此要提高分离 效率需要选择与颗粒尺寸相匹配的介质直径与充填 率<sup>[4]</sup>。Watson J针对聚磁介质充填率对高梯度磁选效 果的影响进行研究,发现在聚磁介质直径不变的情况 下,提高聚磁介质的填充率可有效提高磁场梯度,随 着填充率的增大,分选区内强磁场面积也明显增大, 并且磁场梯度也随之增大,更有利于细粒矿物的捕收, 但较高的充填率会使聚磁介质间隙减小,导致矿浆的 流通性下降,容易造成堵塞<sup>[28]</sup>。YuH针对高梯度磁选 聚磁介质充填率的不同,对高梯度磁选回收率的影响 进行研究,发现随着聚磁介质充填率的提高,精矿品 位逐渐降低,精矿回收率逐渐升高,在背景磁场强度 和聚磁介质直径一定的情况下,回收的颗粒越细所需 的填充率越高<sup>[42]</sup>。因此实际生产时需要根据矿石性质 选择合适的填充率。

聚磁介质截面形状对高梯度磁选中聚磁介质的 磁场特性有很大影响。合适的横截面形状不仅可以 提高细小弱磁性矿物的回收率,还可降低磁选能耗。 Chen L 针对矩形截面聚磁介质和圆截面聚磁介质对 高梯度磁选的影响进行了研究,发现两种截面聚磁介 质对磁性颗粒的捕获能力都随磁场强度的增加而增 加,随矿浆流速增大而减小,但圆截面聚磁介质有效 捕获面积更大,对参数变化的适应性更强<sup>[43]</sup>。Ren L 利用 ANSYS 分析了三角形、正方形、六边形、八边形、 十二边形和圆形截面的聚磁介质的磁场分布特性及 捕获效果,得到在同一背景磁场强度下,不同截面形 状聚磁介质的磁场梯度,和对颗粒的磁力大小按照三 角形、正方形、六边形、八边形、十二边形和圆形截面 依次减小,虽然三角形聚磁介质的磁场梯度和磁力最 大,但是有效捕获面积更小,实际生产中可以根据具 体的颗粒性质选择适用的聚磁介质[44]。Zheng X 为了

解菱形、椭圆形、正方形和圆形四种截面聚磁介质的 磁性能,利用 ANSYS 软件模拟了四种截面聚磁介质 产生的磁场,并对磁场强度、梯度和磁力进行了分析 和比较。模拟结果表明,菱形、椭圆形、正方形和圆 形截面聚磁介质达到饱和磁化所需的磁场强度分别 为 0.7 T、0.8 T、1.0 T 和 1.1 T。在相同背景磁场强度 下,椭圆形、正方形和菱形截面的聚磁介质的磁梯度 远远大于圆形截面,其中椭圆形和正方形截面作用深 度较广,菱形截面作用深度较小<sup>45</sup>。Xue Z 为探究圆 形、椭圆形、正方形和菱形截面聚磁介质对高梯度磁 选的影响以及对颗粒的捕获过程,构建了由颗粒和聚 磁介质矩阵(圆形、椭圆形、方形和菱形截面)组成的 轴向构型模拟模型,该模型展示了四种不同截面聚磁 介质在高梯度磁选系统中捕获颗粒的过程、颗粒的运 动轨迹,并计算了颗粒被捕获的截面面积,进行定量 比较。结果表明,椭圆形与菱形截面比圆形和正方形 截面具有更好的颗粒捕获性能,对超细颗粒的回收效 果更好[46]。

因尖端效应齿板介质的齿尖可以感应出小范围 的更高梯度的磁场,但齿板聚磁介质的有效捕获面积 小、易堵塞效率低,而棒介质矿浆流通性更好,吸附量 更大。LiW根据齿板介质和棒介质的优点,提出了带 有螺纹的棒状聚磁介质,并探究了螺纹棒介质与普通 棒介质的磁选效果差异。试验结果表明,螺纹棒介质 可提高精矿回收率 3.17~6.17百分点<sup>[47]</sup>。LiW后续开 展了螺纹钢聚磁介质齿间距对氟碳铈矿回收效果的 影响,发现齿间距在1mm时回收效果最好,相比于普 通光滑棒介质对氟碳铈矿的回收率提高了 3~15百 分点<sup>[48]</sup>。

## 3.3 聚磁介质的组合排列

聚磁介质矩阵在分选腔中的放置方式和聚磁介 质的排列方式,会影响矿浆流动以及磁场梯度分布。 对于棒介质矩阵,通常有矩形结构和菱形结构两种排 列方式如图 8<sup>45</sup>]。菱形排列和矩形排列的磁选效果存 在明显的差异,菱形排列方式获得的精矿品位更高。 为了进一步查明菱形排列显著提高铁精矿品位更高。 为了进一步查明菱形排列显著提高铁精矿品位更高。 为了进一步查明菱形排列显著提高铁精矿品位的原 因,Chen L 比较了聚磁介质矩形排列和菱形排列两种 排列方式对颗粒捕获过程的影响,研究结果表明,在 聚磁介质直径相同时,矩形排列方式比菱形排列方式 具有更大的磁场梯度,但这种差异所带来的影响在背 景磁场超过 1.2 T 时会显著减弱甚至消失;在菱形排 列下,由于交错结构使得颗粒与聚磁介质有更好的接 触,颗粒在聚磁介质上的碰撞概率增加,因此在背景 磁场较高时,菱形排列的聚磁介质矩阵对颗粒的捕获 效果要优于矩形排列<sup>[4748]</sup>。

Xue Z 发现通过调整聚磁介质的间距,可以改变 磁场梯度和有效捕获面积,从而改善聚磁介质对弱磁



图 8 聚磁介质矩形排列方式 (左) 和聚磁介质菱形排列方式 (右)<sup>165</sup>

Fig. 8 Rectangular arrangement of matrix (left) and rhombic arrangement of matrix (right)<sup>[45]</sup>

性微细粒矿物的捕捉能力[27]。Huang J X 开展了聚磁 介质水平间距和垂直层间距对颗粒捕获能力影响的 研究,研究发现在背景磁场垂直配置、强度为0.6T条 件下,聚磁介质水平方向上的间距增大至4mm之前 对分选指标几乎没影响,但当间距增大至5mm时磁 场梯度显著下降,导致聚磁介质对细弱磁性颗粒的捕 获能力大幅下降;对于聚磁介质垂直层间距,随间距 增加,精矿品位几乎不变,精矿产率和回收率都增大, 尾矿品位下降19。但随着层间距的增大,会减小分选 腔内聚磁介质的层数,为了探明聚磁介质层数对高梯 度磁选的影响, Chen 采用 SAM 法研究了不同层数下 聚磁介质矩阵对细小赤铁矿分选性能的影响,研究结 果表明,使用 PHGMS 磁选机在聚磁介质层数增大至 8层前,精矿重量和品位几乎没影响,当层数从8增加 到16层时,由于颗粒与聚磁介质的碰撞概率变大回 收率增加[50]。

通过对单一尺寸聚磁介质进行排列组合等优化, 的确可以提高窄粒级物料的回收率,但在物料粒级组 成复杂的情况下,靠单一尺寸的棒聚磁介质组合的处 理效果就大打折扣。处理细颗粒通常采用较细的聚 磁介质,较细聚磁介质的磁场梯度大对细颗粒的捕获 效果好,但处理粗颗粒时,较细聚磁介质由于梯度过 高容易使分选腔堵塞,因此应采用较粗的聚磁介质。 针对粒级较宽的物料,可采用粗细组合式聚磁介质矩 阵,以实现对较宽粒级物料的选择性捕获,从而提高 分选效率<sup>[51]</sup>。Ding L 为探究粗细聚磁介质最佳配置方 式,展开了粗细聚磁介质不同组合下对宽粒级物料的 高梯度磁选实验,结果表明在颗粒粒级较宽时,采用 粗介质在上细介质在下的配置方式可以实现选择性 捕获、提高分选效率<sup>[51]</sup>。

## 4 提高颗粒分散性减少夹杂

当矿粒过细或表面吸附有浮选捕收剂时,由于颗 粒表面活性好(颗粒间静电作用能、范德华相互作用 能)颗粒间易发生团聚。形成的团聚体会将一些非磁 性颗粒和连生体带入精矿,降低精矿品位。因此保持 良好的分散性是提高选择性的核心思路,其中使用超 声波和分散剂是最常用的方法。

#### 4.1 超声波

根据 DLVO 理论, 颗粒的聚集或分散取决于颗粒 间相互作用的净能量。当被破坏聚集体的能量大于 将颗粒聚集在一起的能量时, 聚集的颗粒就会被分散。 因此有足够的超声波振动能量或机械搅拌的流动剪 切能量, 聚集颗粒就能被分解并重新分散<sup>[53]</sup>。

预处理的效果取决于给料特性和给料材料。对 于高黏度材料,超声波能显著提高磁性精矿的纯度。 而对于硅石等低黏度材料,超声波预处理几乎没有影 响<sup>[54]</sup>。Huang使用超声波加强磁团聚体的分散,发现 当超声波处理时间为 20 s、功率为 200 W 时磁选回收 效果最好,但继续延长超声波处理的时间和增大功率, 导致颗粒因大动能彼此碰撞,反而促进磁性颗粒形成 团聚体造成分选效果不理想<sup>[55]</sup>。

## 4.2 分散剂

为了避免颗粒间发生二次团聚,使用小分子无机 分散剂是最佳选择,它可以通过增加颗粒之间的空间 距离或静电斥力来保持分散性,主要包括硅酸钠和无 机磷酸盐等。这些分散剂吸附在矿物颗粒表面,可促 进矿物表面产生高表面电荷(一般为负电荷),和形成 亲水性的颗粒使其在矿浆中分散悬浮。但无机分散 剂对 pH 值很敏感, pH 值选择不合适会导致颗粒重新 聚集;而有机分散剂适应性更好(膦酸盐、醋酸乙烯酯、 环氧乙烷、柠檬酸盐、酒石酸盐和天然物质酪蛋白), 只是有机分散剂价格昂贵。Liu X 通过向瓷土中加入 腐殖酸钠降低矿浆黏性,经高梯度磁选后瓷土精矿中 铁含量仅为0.44%,除铁效果良好,产品白度大幅提高、 斑点率显著减少<sup>[13]</sup>。WeiT向高岭土中加入六偏磷酸 钠作为分散剂后磁选,在保证精矿产率不变的前提下 使精矿白度从 55.03% 提高到 58.08% [56]。因此加入分 散剂可以增强超细颗粒的分散性、提高磁选效果。

## 5 结语与展望

(1)高梯度磁选技术因其效率高以及污染小等特 点,在矿物加工领域的应用取得了巨大的成功。但高 梯度磁选过程中的夹带现象严重影响了精矿产品的 质量,并且降低精矿的回收率,目前科研工作者们对 颗粒在磁选过程中受到的力展开分析以及建立颗粒 捕获模型,展示了高梯度磁选过程中颗粒的捕获过程, 并以此为理论基础对高梯度磁选过程进行优化还针 对聚磁介质进行优化和研发,主要方向为聚磁介质新 材料、聚磁介质结构和排列组合等,以降低夹杂,提高 选择性、实现高效分选。

(2)随着高梯度磁选技术在多个领域的应用,出现了更多有待优化解决的问题,主要表现为自动化程

度不高、磁系结构和配置不佳、颗粒受力分析研究不够、磁性材料的研制欠缺等方面,这些问题的突破可能会进一步将高梯度磁选扩展到更广泛的工业领域。

(3)总结国内外高梯度磁选理论研究现状,其未 来发展趋势可以概括为:突破传统磁场分布研究的理 论和创新磁路结构设计、研制磁性能更好且具有更广 泛适应性的聚磁介质材料、引入更多更有效的竞争力 和多物理场力加强颗粒分散、优化聚磁介质形状改变 磁场梯度分布以及梯度大小、通过对不同形状和尺寸 的聚磁介质的组合使用,以实现更优的矿浆流动,更 好的颗粒分散,实现超细颗粒的高效选择性分离。在 磁场特性及颗粒捕获机理的理论研究方面使用计算 机仿真技术 (COMSOL、CFD、DEM、Fluent、ANSYS 等)提高多介质条件下对磁场分布、矿浆在介质表面 的流态分布及颗粒捕获规律的认识,为改善强磁分选 过程提供理论依据。

#### 参考文献:

- [1] DAI P, TAO M, LI X. Effect of lime (CaOH') on chalcopyrite-arsenopyrite separation in high gradient magnetic separation: Experiment and molecular simulation[J]. Separation and Purification Technology, 2024, 333: 2–7.
- [2] HU Z, HAN L, LU D, et al. Pulsation curves strengthen the high gradient magnetic separation process II: Consideration of separation performance[J]. Minerals Engineering, 2024, 205: 108480–108490.
- [3] LI W, SUN J, ZHANG X, et al. Influence of the screw-thread rod matrix on the magnetic capture behavior of bastnaesite[J]. Powder Technology, 2024, 440: 119738–119752.
- [4] LIN H , LI X , LEI Z, et al. Developing high gradient magnetic separators for greener production: Principles, design, and optimization[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2023: 587.
- [5] 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.
- [6] WATSON JHP, LI Z. A study on mechanical entrapment in HGMS and vibration HGMS[J]. Minerals Engineering, 1991, 4(7/8/9/10/11): 815–823.
- HU Z, LIU J, GAN T, et al. High-intensity magnetic separation for recovery of LiFePO<sub>4</sub> and graphite from spent lithium-ion batteries[J].
   Separation and Purification Technology, 2022, 297: 121486–121499.
- [8] XUE Z, WANG Y, ZHENG X, et al. Mechanical entrainment study by separately collecting particle deposit on matrix in high gradient magnetic separation[J]. Minerals Engineering, 2022, 178: 107435–10746.
- [9] XIONG D, LIU S, CHEN J. New technology of pulsating high gradient magnetic separation[J]. International Journal of Mineral Processing, 1998, 54(2): 111–127.
- [10] SVOBODA J. The effect of magnetic field strength on the efficiency of magnetic separation [J]. Minerals Engineering, 1994, 7(5): 747–757.
- [11] ZHENG X, WANG Y, LU D. Investigation of the particle capture of elliptic cross-sectional matrix for high gradient magnetic separation[J]. Powder Technology, 2016, 297: 303–310.
- [12] ZHENG X, XUE Z, WANG Y, et al. Modeling of particle capture in high gradient magnetic separation: A review[J]. Powder Technology,

2019, 352: 159-169.

- [13] HU Z, LU D, ZHENG X, et al. Development of a high-gradient magnetic separator for enhancing selective separation: A review[J].
   Powder Technology, 2023, 421: 118435–118445.
- [14] CHEN L. Effect of magnetic field orientation on high gradient magnetic separation performance[J]. Minerals Engineering, 2011, 24(1): 88-90.
- [15] HU Z. Model of particle accumulation on matrices in transverse field pulsating high gradient magnetic separator[J]. Minerals Engineering, 2020, 146: 106105–106116.
- [16] DAHE X. Dynamic analysis of weakly magnetic mineral particles in high gradient magnetic field of rod medium[J]. Metal Mine, 1998, 8: 9-12.
- [17] YING T Y, YIACOUMI S, TSOURIS C. High-gradient magnetically seeded filtration[J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55(6): 1101-1113.
- [18] JOSHI J B, NANDAKUMAR K, PATWARDHAN A W, et al. Computational fluid dynamics [M]//Advances of Computational Fluid Dynamics in Nuclear Reactor Design and Safety Assessment. Elsevier, 2019, 21–138.
- [19] NESSET J, FINCH J. The static (buildup) model of particle accumulation on single wires in high gradient magnetic separation: Experimental confirmation[J]. IEEE Trans Magn, 1981, 17(4): 1506–1509.
- [20] WATSON J H P, LI Z. Theoretical and single-wire studies of vortex magnetic separation[J]. Minerals Engineering, 1992, 5(10/11/12): 1147-1165.
- [21] XUE Z, WANG Y, ZHENG X, et al. Role of gravitational force on mechanical entrainment of nonmagnetic particles in high gradient magnetic separation[J]. Minerals Engineering, 2022, 186: 107726– 107735.
- [22] 许金越, 王伊琳, 宋少先. 干式振动高梯度磁选机的分选机理与 试验研究[J]. 金属矿山, 2023(2): 189-195.
  XU J Y, WANG Y L, SONG S X. Sorting mechanism and experimental study of dry vibrating high gradient magnetic separator[J]. Metal Mine, 2023(2): 189-195.
- [23] WATSON J H P. Magnetic filtration[J]. Journal of Applied Physics, 1973, 44(9): 4209–4213.
- [24] WATSON J H P. Theory of capture of particles in magnetic high-intensity filters[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1975, 11(5): 1597-1599.
- [25] LUBORSKY F, DRUMMOND B. High gradient magnetic separation: Theory versus experiment[J]. IEEE Trans. Magn, 1975, 6: 1696–1700.
- [26] BADESCU, V, ROTARIU, et al. Magnetic capture modelling for a transversal high filter[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 1996, 7: 57–67.
- [27] EBNER NA, GOMES CSG, HOBLEY TJ, et al. Filter capacity predictions for the capture of magnetic microparticles by high-gradient magnetic separation [J]. IEEE Trans Magn, 2007, 43(5): 1941–1949.
- [28] GE W, ENCINAS A, ARAUJO E, et al. Magnetic matrices used in high gradient magnetic separation (HGMS): A review[J]. Results in Physics, 2017, 7: 4278–4286.
- [29] LESLIE B W. Magnetic separator: CAD715885[P]. CA715885A [2024-06-16].
- [30] SVOBODA J, FUJITA T. Recent developments in magnetic methods of material separation [J]. Minerals Engineering, 2003, 16(9): 785–792.
- [31] SVOBODA J. Magnetic techniques for the treatment of materials[M]. Springer Netherlands, 2004.

- [32] KOLM H H. Process for magnetic separation: US3676337D[P]. 2024-03-24.
- [33] 李文博, 韩跃新, 汤玉和, 等. 高梯度磁选机聚磁介质的研究概况 及发展趋势[J]. 金属矿山, 2012, 41(9): 129-133.
  LI W B, HAN Y X, TANG Y H, et al. Research overview and development trend of matrix for high gradient magnetic separator[J]. Metal Mine, 2012, 41(9): 129-133.
- [34] 白江虎,李具仓,张志刚,等.聚磁介质用不锈导磁材料开发[J]. 中国冶金, 2017, 27(12): 4.
  BAI J H, LI J C, ZHANG Z G, et al. Development of Stainless Conductive Materials for matrix[J]. China Metallurgy, 2017, 27(12): 4.
- [ 35 ] GRAHAM MD. A precaution on using 316L stainless wire in HGMS matrices[J]. Magnetic Separation News, 1986, 2(2): 91–94.
- [36] WU W, WU C, HONG PKA, LIN C. Capture of metallic copper by high gradient magnetic separation system[J]. Environmental Technology, 2011, 32(13): 1427–1433.
- [37] 黄燕,李思媛. 一种铁钴合金/氮共掺杂碳气凝胶电极材料的制备 方法: CN02010498865.0[P].[2024-06-16]
   HUANG Y, LI S Y. Preparation of an iron-cobalt alloy/nitrogen co-doped carbon aerogel electrode material: CN02010498865.0[P].
   [2024-06-16].
- [38] ZHENG X, WANG Y, LU D, et al. Theoretical and experimental study on elliptic matrices in the transversal high gradient magnetic separation[J]. Minerals Engineering, 2017, 111: 68–78.
- [ 39 ] BADESCU V, MURARIU V, ROTARIU O, et al. A new modeling of the initial buildup evolution on a wire in an axial HGMF filter[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1996, 163(1/2): 225-231.
- 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.
- [41] 李文博, 汤玉和, 韩跃新, 等. 聚磁介质对高梯度磁选效果的影响
  [J]. 金属矿山, 2013, 42(12): 105-107.
  LI W B, TANG Y H, HAN Y X, et al. Influence of matrix on the effectiveness of high gradient magnetic separation[J]. Metal Mine, 2013, 42(12): 105-107.
- [42] 于洪军,王忠生,李东,等.聚磁介质充填率对齐大山选矿厂赤铁 矿高梯度强磁选的影响[J].金属矿山,2017(12):4.
  YU H J, WANG Z S, LI D, et al. Influence of matrix filling rate on high gradient strong magnetic separation of hematite in Qidashan processing plant[J]. Metal Mine, 2017(12):4.
- [43] CHEN L, LIU W, ZENG J, et al. Quantitative investigation on magnetic capture of single wires in pulsating HGMS[J]. Powder Technology, 2017, 313: 54–59.
- [44] REN L, ZENG S, ZHANG Y. Magnetic field characteristics analysis of a single assembled magnetic medium using ANSYS software[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2015, 25(3): 479-487.
- [45] ZHENG X, GUO N, CUI R, et al. Magnetic Field simulation and

experimental tests of special cross-section shape matrices for high gradient magnetic separation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, Published online 2017, 53(3): 1–10.

- [46] XUE Z, WANG Y, ZHENG X, et al. Particle capture of special cross-section matrices in axial high gradient magnetic separation: A 3D simulation[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 237: 116375-116386.
- [47] LI W, ZHOU L, HAN Y, 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.
- [48] LI W, SUN J, ZHANG X, et al. Influence of the screw-thread rod matrix on the magnetic capture behavior of bastnaesite[J]. Powder Technology, 2024, 440: 1197738-1197749.
- [49] 黄建雄. 高梯度磁选过程的棒介质排列组合研究[D]. 昆明: 昆明 理工大学, 2013.
   HUANG J X. Study of matrix arrangement combinations for high gradient magnetic separation processes [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.
- [50] CHEN L, DING L, ZHANG H, et al. Slice matrix analysis for combinatorial optimization of rod matrix in PHGMS[J]. Minerals Engineering, 2014, 58: 104–107.
- [51] CHEN L Z, XU G D, WEN S M, et al. Effect of rod arrangement in matrix on high gradient magnetic separation performance[J]. Advanced Materials Research, 2013, 634/635/636/637/638: 3351–3354.
- [52] 丁利.高梯度磁选过程的组合式棒介质研究[D].昆明:昆明理工 大学, 2014
   DING L. Study of combined matrix for high gradient magnetic separation processes[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014
- [53] 舒有顺,曾海鹏,黄红军.六偏磷酸钠对钾长石和赤铁矿的分散 作用机理[J].矿冶工程,2023,43(2):61-65.
  SHU Y, ZENG H, HUANG H. Dispersion mechanism of sodium hexametaphosphate on potassium feldspar and hematite[J]. Miming And Metallurgical Engeering, 2023, 43(2):61-65.
- [54] 许耀群,李曙光,王娟,等. 超声波及分散剂对纳米 SiO<sub>2</sub>/CaCO<sub>3</sub>/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒分散特性的影响[J]. 材料导报, 2018, 32(S1): 300-304.
   XU Y Q, LI S G, WANG J, et al, Effect of dispersion characteristics of Nano-SiO<sub>2</sub>/CaCO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by ultrasonicand dispersants[J]. Materials Reports, 2018, 32(S1): 300-304.
- [55] HUANG Z, LIN M, QIU R, et al. A novel technology of recovering magnetic micro particles from spent lithium-ion batteries by ultrasonic dispersion and waterflow-magnetic separation[J]. Resources Conservation and Recycling, 2021, 164(3): 105172–105181.
- [56] 魏婷婷. 砂质高岭土选矿提纯试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
  - WEI T T. Experimental study on the preparation and purification of sandy kaolinite [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.

## **Progress in the Theory and Technology of Highgradient Magnetic Separation**

ZHAO Jiayi<sup>1,2</sup>, WANG Xingxing<sup>3</sup>, QI Lei<sup>1,4</sup>, ZHAO Zhiqiang<sup>2</sup>, WANG Feiwang<sup>1,2</sup>, WEN Jinlei<sup>1,5</sup>, DAI Huixin<sup>1</sup>

1. School of Land and Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;

2. State Key Laboratory of Mineral Processing, Beijing 102628, China;

3. Inspection and Testing Institute of Pu'er, Pu'er 665099, Yunnan, China;

- 4. Heqing Beiya Mining Co., Ltd, Dali 671000, Yunnan, China;
- 5. Yuguang (Chengdu) Technology Co., Ltd, Chengdu 610100, Sichuan, China

**Abstract:** Mechanical entrainment, magnetic entrainment and competitive capture occur in the separation process of high gradient magnetic separation, ultimately leading to a number of problems such as poor selectivity, clogging of the sorting chamber and low sorting efficiency. At present, the theoretical study of high gradient magnetic separation mainly focuses on particle force analysis and calculation, the construction of particle trajectory model and particle stacking model, and the research and development and optimisation of polymagnetic media. Based on the particle force, this paper analyses the causes of poor selectivity as well as low efficiency through the particle stacking model and trajectory model, and reviews the development and optimization of matrix, aiming to provide a reference for the optimization and theoretical research of high-gradient magnetic separation technology in industrial applications, as well as looking forward to the future trend of theoretical research of high-gradient magnetic separation technology.

Keywords: magnetic separation; high gradients; field distribution; particle entrainment

引用格式:赵嘉艺, 王星星, 祁磊, 赵志强, 王飞旺, 文金磊, 戴惠新. 高梯度磁选理论与技术进展[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(3): 117-126. ZHAO Jiayi, WANG Xingxing, QI Lei, ZHAO Zhiqiang, WANG Feiwang, WEN Jinlei, DAI Huixin. Progress in the theory and technology of highgradient magnetic separation[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(3): 117-126.

投稿网址: http://kcbhyly.xml-journal.net

E-mail: kcbh@chinajoumal.net.cn



## 通信作者简介:

王飞旺, 男, 1990年9月生, 工学博士(博士后), 内聘副教授, 硕士生导师, 云南省"兴滇 英才支持计划"青年人才, 担任《矿产保护与利用》《化工矿物与加工》等期刊青年编委。主 要研究方向: (1)磁电选矿理论、工艺与数值模拟; (2)新型磁选设备研究与开发; (3)复杂难 处理矿产资源综合利用。作为研究骨干参与国家自然科学基项目及企业委托项目 20 余项, 主持中国博士后科学基金、云南省博士后定向培养资助、云南省基础研究计划青年项目、国 家重点实验室开放基金等项目; 申请专利 20 余件, 获授权专利 10 件; 发表论文 30 余篇, 其中 以第一作者发表 SCI 论文 7 篇(JCR 1 区 5 篇); 获 2021 年第一届全国博士后创新创业大赛创 业赛全国优胜奖(排名第一, 中国人力资源社会保障部颁发), 获 2022 年云南省优秀博士学 位论文奖(云南省教育厅颁发), 获 2024 年中国发明协会发明创新奖二等奖(排名第一, 中国 发明协会颁发)。