

# 磁流体耦合高梯度磁选高效回收攀西钛铁矿的研究<sup>①</sup>

唐海芬, 曙瓦克·赛力克, 岳鑫慧, 王晓晗, 李博佳, 郑霞裕

(中南大学 资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 采用磁流体耦合高梯度磁选对攀枝花地区钛铁矿进行高效回收试验研究。在  $MnCl_2$  浓度(质量分数)40%、磁感应强度0.6 T、脉动频率400 r/min 条件下, 仅通过磁流体耦合高梯度磁选(不再浮选), 经一次粗选、三次精选, 获得了  $TiO_2$  品位46.89%、回收率38.30%的钛精矿指标, 与工业生产中采用磁选-浮选联合分选获得的指标相当。

**关键词:** 钛铁矿; 钛辉石; 高梯度磁选; 磁流体; 磁化率; 钛精矿

中图分类号: TD924

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.03.020

文章编号: 0253-6099(2025)03-0120-05

## Efficient Recovery of Panxi Ilmenite by Magnetic Fluid Coupling High-Gradient Magnetic Separation

TANG Haifen, Shuwake·Sailike, YUE Xinhui, WANG Xiaohan, LI Bojia, ZHENG Xiayu

(School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

**Abstract:** An experimental research was conducted on efficient recovery of ilmenite from Panzhihua City by magnetic fluid coupling high-gradient magnetic separation. With  $MnCl_2$  concentration of 40%, magnetic induction intensity of 0.6 T, and pulsation frequency of 400 r/min, the ilmenite was processed by magnetic fluid coupling high-gradient magnetic separation, including one roughing and three cleaning, resulting in a titanium concentrate grading 46.89%  $TiO_2$  at 38.30% recovery. It is shown that the obtained indices are comparable to those obtained from industrial production by adopting magnetic separation combined with flotation process.

**Key words:** ilmenite; titanite; high-gradient magnetic separation; magnetic fluid; magnetic susceptibility; titanium concentrate

钛被誉为“太空金属”和“海洋金属”, 在航空航天、超导材料、船舶制造、生物医药、机械制造、化工、建筑等领域应用广泛<sup>[1]</sup>。我国钛矿资源储量居世界第一, 但98%为含钙镁杂质高的钛铁矿, 主要分布于四川攀西地区<sup>[2]</sup>, 采用高梯度磁选-浮选的联合分选流程, 可获得  $TiO_2$  品位47%左右、回收率35%左右(相对于选铁尾矿)的钛精矿。由于细粒矿物会影响浮选, 原选铁尾矿中-20  $\mu m$  粒级矿物分级后直接排入尾矿, 导致钛回收率低, 造成资源浪费<sup>[3]</sup>。近年来, 通过科技攻关, 实现了部分细粒钛铁矿的回收, 钛铁矿整体回收率提升至40%左右(相对于选铁尾矿), 但整体分选流程长, 浮选药剂用量大, 生产成本较高<sup>[4]</sup>。高

梯度磁选因选择性较低, 通常用于钛铁矿粗选。钛铁矿和主要脉石钛辉石都为顺磁性矿物。常规高梯度磁选中, 根据矿物颗粒所受磁力的差异进行分离。虽然钛铁矿磁化率高于钛辉石<sup>[5]</sup>, 但细粒级钛铁矿和粗粒级钛辉石仍然会受到相等的磁力, 发生竞争捕集<sup>[6]</sup>, 导致难以兼顾品位和回收率。因此高梯度磁选一般用于钛铁矿粗选, 以获得高回收率、低品位的粗精矿。

开发基于颗粒磁化率  $\kappa$  (而不是磁力  $F_m$ ) 差异的精细分离方法, 是简化和缩短分选流程的有效途径。本文提出磁流体耦合高梯度磁选法<sup>[7]</sup>, 使用 SLon 立环脉动高梯度磁选机对攀西某钛铁矿进行系统的磁流体耦合高梯度磁选试验, 研究影响磁性产品  $TiO_2$  品位和

① 收稿日期: 2024-11-30

基金项目: 国家自然科学基金(52474311, 52174270, 52174267); 国家重点研发计划(2021YFC2903202)

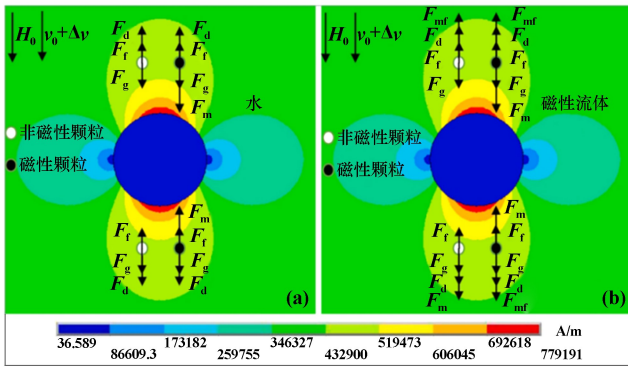
作者简介: 唐海芬(2002—), 女(土家族), 贵州铜仁人, 主要研究方向为资源综合利用。E-mail: 3122466980@qq.com

通信作者: 郑霞裕(1989—), 男, 湖北鄂州人, 博士, 副教授, 主要研究方向为复合力场分选理论、设备与工艺, 工业水处理, 矿物加工过程仿真模拟, 浮选理论与工艺等。E-mail: 19601229xiayu@163.com

回收率的关键参数,探索仅使用磁流体耦合高梯度磁选(不再浮选)获得 TiO<sub>2</sub> 品位大于 46% 合格精矿的可能性,以期攀西钛铁矿及其他难选弱磁性矿物的高效利用提供新思路。

### 1 磁流体耦合高梯度磁选

外加磁感应强度为 0.5 T 时,常规高梯度磁选和磁流体耦合高梯度磁选中矿物颗粒(磁性和非磁性)受力分析如图 1 所示。其中  $H_0$  为外磁场磁感应强度,  $v_0 + \Delta v$  为脉动流速度。常规高梯度磁选中需要考虑重力  $F_g$ 、浮力  $F_f$ 、流体曳力  $F_d$  和磁力  $F_m$  [7-8]。磁流体耦合高梯度磁选中,由于磁流体的存在,在高梯度磁场区域内可以产生与磁力  $F_m$  方向始终相反的磁排斥力  $F_{mf}$  [9-10]。磁排斥力  $F_{mf}$  对磁性和非磁性颗粒都有效,起到竞争力的作用,可用来调节分选过程的选择性。



(a) 常规高梯度磁选; (b) 磁流体耦合高梯度磁选

图 1 磁选过程中矿物颗粒受力分析

Fig.1 Analysis of forces acting on mineral particles during magnetic separation

作用于颗粒(磁性或非磁性)上的磁排斥力  $F_{mf}$  为:

$$F_{mf} = -\mu_0 \kappa_m V H \text{grad} H \quad (1)$$

式中  $\kappa_m$  为磁流体磁化率。由于磁排斥力始终与磁力相反,作用在磁化率为  $\kappa$  颗粒上的净磁力  $F_r$  为:

$$F_r = F_m - F_{mf} = \mu_0 (\kappa - \kappa_m) V H \text{grad} H \quad (2)$$

为比较作用于有用磁性矿物颗粒和磁性脉石颗粒上的净磁力相对大小,定义比净磁力  $\gamma$  为:

$$\gamma = \frac{F_{r1}}{F_{r2}} = \frac{\mu_0 (\kappa_1 - \kappa_m) V_1 H \text{grad} H}{\mu_0 (\kappa_2 - \kappa_m) V_2 H \text{grad} H} = \frac{(\kappa_1 - \kappa_m) V_1}{(\kappa_2 - \kappa_m) V_2} \quad (3)$$

由式(3)可知,比净磁力  $\gamma$  是磁流体磁化率  $\kappa_m$  的函数,与磁场力  $H \text{grad} H$  无关。可以通过调节流体磁化率  $\kappa_m$  来调节选择性,通过增大磁场力  $H \text{grad} H$  来提高回收率。因此,磁流体耦合高梯度磁选可解决常规高梯度磁选中品位和回收率难以兼顾的问题。

常规高梯度磁选中  $\kappa_m = 0$ , 因此  $\gamma = 1$ , 磁力相等, 发生竞争捕集。引入顺磁流体后,  $\gamma \neq 1$ , 其值随着流体磁化率  $\kappa_m$  变化而变化。适宜的流体磁化率  $\kappa_m$  应接近钛辉石磁化率  $\kappa_1$ , 此时可以保证高比净磁力, 实现高选择性。

### 2 试验样品、设备和方法

#### 2.1 试验样品及设备

试验样品取自攀西某选矿厂的选铁尾矿, 其 XRD 图谱如图 2 所示。样品中的有用矿物为钛铁矿, 脉石矿物为钛辉石、长石、绿泥石、闪石等。从该样品中回收钛铁矿的主要难点是钛铁矿和钛辉石的有效分离, 因此加入  $MnCl_2$  溶液来研究其对钛铁矿和钛辉石竞争捕集的影响。将该尾矿磨至  $-0.074 \text{ mm}$  粒级占 85%, 采用弱磁选脱除大部分强磁性矿物, 脱磁产物  $TiO_2$  品位约 6.00%, 作为磁流体耦合高梯度磁选试验的给矿。采用顺磁性  $MnCl_2$  溶液作为磁流体 [11],  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  下  $MnCl_2$  溶液饱和浓度(质量分数, 下同)约 40.63%。制备了浓度分别为 20%、30% 和 40% 的  $MnCl_2$  溶液, 其磁化率与浓度呈线性相关。采用磁力天平测得浓度 20%、30% 和 40% 的  $MnCl_2$  溶液的磁化率  $\kappa_m$  分别为  $3.80 \times 10^{-4}$ 、 $6.05 \times 10^{-4}$  和  $8.25 \times 10^{-4}$ 。

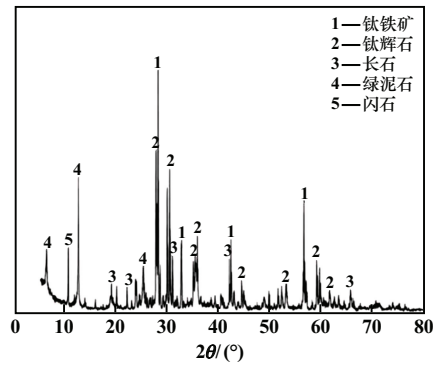


图 2 样品 XRD 图谱

Fig.2 XRD pattern of sample

试验设备为赣州金环磁选公司研制的 SLon 100 周期式脉动高梯度磁选机, 分选腔直径 100 mm, 内部可产生高达 1.75 T 的磁感应强度。脉动机构频率调节范围为 0~400 r/min。

#### 2.2 试验方法

配制 2.0 L 一定浓度的  $MnCl_2$  溶液, 关闭磁选机底部阀门, 将 1.6 L 配制好的  $MnCl_2$  溶液倒入分选腔。在剩余的 0.4 L  $MnCl_2$  溶液中加入 100 g 矿样后混匀, 接通磁选机电流并调整至产生所需的磁感应强度和脉动频率, 在 20 s 之内将添加了矿样的  $MnCl_2$  矿浆均匀

倒入分选腔中,同时打开底部阀门开始分选。磁性颗粒被磁介质捕获,大部分非磁性颗粒则从底部随流体排出成为尾矿。矿浆完全排出后,分选过程结束,切断电流,将磁介质捕集磁性颗粒冲出成为精矿。分析各产物品位并计算回收率。每个试验条件重复2次,取平均值。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 $MnCl_2$ 浓度的影响

磁流体耦合高梯度磁选中,磁流体磁化率是很重要的参数。攀枝花钛铁矿和钛辉石的比磁化率分别为  $(1.50 \sim 9.00) \times 10^{-7}$  和  $(0.90 \sim 1.40) \times 10^{-7} m^3/kg$ , 体积磁化率分别为  $(6.00 \sim 42.30) \times 10^{-4}$  和  $(3.24 \sim 5.04) \times 10^{-4}$ 。脉动频率 300 r/min,磁感应强度分别为 0.4、0.6 和 0.8 T 时, $MnCl_2$  浓度对磁性产物  $TiO_2$  品位及回收率的影响如图 3 所示。

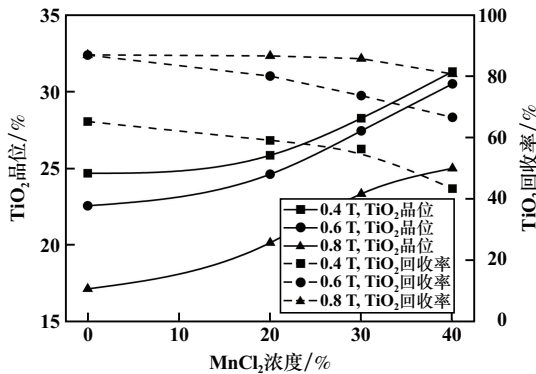


图 3  $MnCl_2$  浓度对磁性产物  $TiO_2$  品位及回收率的影响

Fig. 3 Influence of  $MnCl_2$  concentration on  $TiO_2$  grade and recovery of magnetic product

随着  $MnCl_2$  浓度增加,磁性产物  $TiO_2$  品位增加,回收率降低。与常规高梯度磁选相比, $MnCl_2$  浓度越大,磁性产物  $TiO_2$  品位提高幅度越大,选择性显著提高。根据上述钛铁矿、钛辉石和  $MnCl_2$  溶液的体积磁化率及式(3)可知,钛铁矿和钛辉石颗粒的比净磁力随着  $MnCl_2$  溶液浓度增加而增加,从而导致选择性提高和磁性产物  $TiO_2$  品位提高。另外,作用在钛铁矿颗粒上的净磁力随着  $MnCl_2$  浓度增加而减小,导致  $TiO_2$  回收率降低<sup>[12]</sup>。 $MnCl_2$  浓度 40%、磁感应强度 0.4 和 0.6 T 时,仅用一次磁流体耦合高梯度磁选, $TiO_2$  品位分别提高到 31.30% 和 30.50%,回收率分别为 43.39% 和 66.60%,指标较好。

#### 3.2 磁感应强度的影响

图 4 为脉动频率 300 r/min 时,外加磁感应强度对磁性产物  $TiO_2$  品位及回收率的影响。不同  $MnCl_2$  浓

度下, $TiO_2$  回收率随着外加磁感应强度增加而增加。在 0.2~0.6 T 范围内,磁性产物  $TiO_2$  品位呈下降趋势,但随着  $MnCl_2$  浓度增加,下降趋势有所减缓。 $MnCl_2$  浓度 30% 和 40%,磁感应强度低于 0.6 T 时, $TiO_2$  品位几乎保持不变,这是由于  $MnCl_2$  溶液强化分选能力随着  $MnCl_2$  浓度增加而增强。然而,磁感应强度增加到 0.8 T 时,磁性产物  $TiO_2$  品位都急剧下降,表明高场强下即使采用浓度 30% 和 40% 的  $MnCl_2$  溶液,也有大量钛辉石颗粒被磁介质捕集并进入磁性产物。由上述矿物和  $MnCl_2$  溶液的体积磁化率可知, $MnCl_2$  溶液浓度 40% 时钛铁矿的体积磁化率高于钛辉石,作用在钛辉石颗粒上的净磁力始终为负,钛辉石颗粒不太可能通过磁捕获进入磁性产物。在高梯度磁选中,非磁性颗粒的机械夹带也会导致低选择性。但在外加磁感应强度 0.8 T 时,钛辉石颗粒会因矿浆通道变窄发生严重的机械夹杂。因此磁流体耦合高梯度磁选也需要适宜的磁感应强度来确保高选择性和回收率。

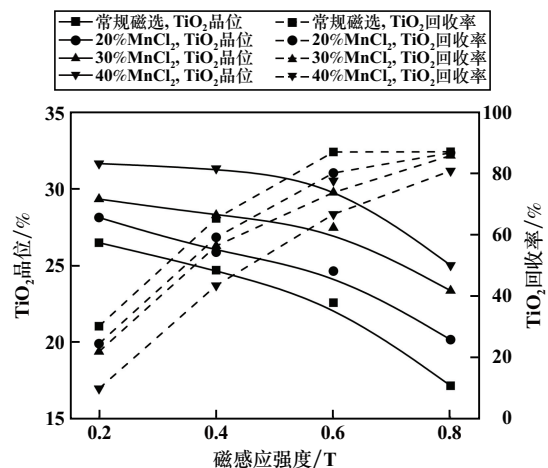


图 4 外加磁感应强度对磁性产物  $TiO_2$  品位及回收率的影响

Fig. 4 Influence of applied magnetic induction intensity on  $TiO_2$  grade and recovery of magnetic product

不同  $MnCl_2$  溶液浓度下,磁性产物  $TiO_2$  品位及回收率曲线形状和变化规律相似,说明顺磁流体对提高分离效率有较好的效果,磁流体耦合高梯度磁选可显著提高磁选精矿  $TiO_2$  品位,显示其在处理难选钛铁矿中的巨大优势和应用潜力。在试验参数范围内,常规高梯度磁选很难获得  $TiO_2$  品位高于 30% 的钛精矿。

#### 3.3 脉动频率的影响

采用外加磁感应强度 0.4 T 条件下常规高梯度磁选(方案 1)和外加磁感应强度 0.6 T 条件下  $MnCl_2$  溶液浓度 40% 磁流体耦合高梯度磁选(方案 2),研究了脉动频率对分离效果的影响,结果如图 5 所示。由图 5 可知,脉动频率 100~400 r/min 范围内,磁流体耦合高

梯度磁选获得的磁性产物 TiO<sub>2</sub> 品位和回收率均高于常规高梯度磁选,且两种情况下 TiO<sub>2</sub> 品位和回收率差值随着脉动频率增加而增大。MnCl<sub>2</sub> 溶液浓度 40% 时,钛辉石的竞争捕获转变为机械夹杂,提高脉动强度可有效消除机械夹杂,可见脉动流在磁流体耦合高梯度磁选中是不可或缺的。

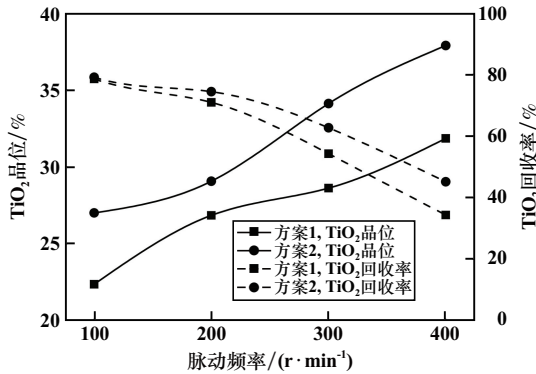


图5 脉动频率对磁性产物 TiO<sub>2</sub> 品位及回收率的影响  
Fig.5 Influence of pulsation frequency on TiO<sub>2</sub> grade and recovery of magnetic product

### 3.4 流程试验

条件试验结果表明,在 MnCl<sub>2</sub> 溶液浓度 40%、外加磁感应强度 0.6 T、脉动频率 400 r/min 条件下进行磁流体耦合高梯度磁选,可获得较高的 TiO<sub>2</sub> 品位和回收率。设计了一粗三精分选流程,并采用上述条件进行磁流体耦合高梯度磁选流程试验;作为对照,在外加磁感应强度 0.4 和 0.6 T、脉动频率 400 r/min 条件下,采用相同流程进行了常规高梯度磁选试验。试验流程见图 6,结果如表 1 所示。

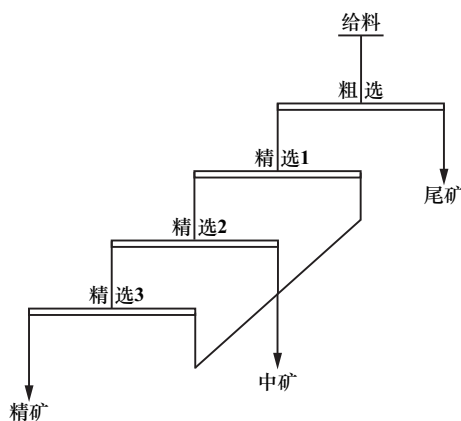


图6 试验流程  
Fig.6 Flowchart in test

通过 0.6 T 磁流体耦合高梯度磁选获得的精矿 TiO<sub>2</sub> 品位和回收率分别为 46.89% 和 38.30%。攀西钛铁矿工业生产中,通常采用两段高梯度磁选和三段浮

选,从 TiO<sub>2</sub> 品位 10% 的选铁尾矿中获得 TiO<sub>2</sub> 品位 47% 左右的精矿,回收率约 40%。磁流体耦合高梯度磁选在给矿品位更低的情况下仍获得了与工业生产相当的分选指标,在钛铁矿等复杂弱磁性矿物的加工利用中表现出巨大应用潜力。0.4 T 常规高梯度磁选获得了精矿 TiO<sub>2</sub> 品位和回收率分别为 36.89% 和 29.82%,低于磁流体耦合高梯度磁选精矿。0.6 T 常规高梯度磁选获得的 TiO<sub>2</sub> 回收率虽然提高到 63.00%,但 TiO<sub>2</sub> 品位降到了 30.14%。常规高梯度磁选很难获得合格精矿。磁流体耦合高梯度磁选在钛铁矿的加工利用方面表现出较好的分选效果,为处理复杂弱磁性矿物提供了新的途径。

表1 试验结果  
Table 1 Test results

试验条件	产品名称	产率 / %	品位 / %	回收率 / %
0.4 T 常规 高梯度磁选	精矿	4.74	36.89	29.82
	中矿	6.11	7.31	7.62
	尾矿	89.15	4.11	62.56
	原矿	100.00	5.86	100.00
0.6 T 常规 高梯度磁选	精矿	13.48	30.14	63.00
	中矿	18.85	6.17	18.03
	尾矿	67.67	1.81	18.96
	原矿	100.00	6.45	100.00
0.6 T 磁流体耦合 高梯度磁选	精矿	5.02	46.89	38.30
	中矿	5.55	10.37	9.35
	尾矿	89.43	3.60	52.35
	原矿	100.00	6.15	100.00

## 4 结论

顺磁性磁流体能有效减少钛铁矿和钛辉石颗粒之间的竞争捕获,显著提高选择性。随着 MnCl<sub>2</sub> 溶液浓度增加,磁性产品 TiO<sub>2</sub> 品位明显提高,但在高磁感应强度下,因发生严重机械夹带,选择性急剧下降。回收率相同时,磁流体耦合高梯度磁选获得的磁性产物 TiO<sub>2</sub> 品位远高于常规高梯度磁选。脉动流可以进一步强化磁流体对矿物的选择性。在 MnCl<sub>2</sub> 溶液浓度 40%、磁感应强度 0.6 T、脉动频率 400 r/min 条件下,仅使用磁流体耦合高梯度磁选(不再浮选)可获得 TiO<sub>2</sub> 品位 46.89%、回收率 38.30% 的钛精矿。磁流体耦合高梯度磁选为钛铁矿等难选弱磁性矿物的加工利用提供了新路径。

### 参考文献 (References):

[1] 陈福亮,李松春,陈利生,等. 浅谈金属钛的应用[J]. 云南冶金, 2010, 39(5): 58-60.  
CHEN Fuliang, LI Songchun, CHEN Lisheng, et al. Discussion on the

- application of titanium metal[J]. *Yunnan Metallurgy*, 2010,39(5):58-60.
- [2] 崇霄霄,栾文楼,王丰翔,等. 全球钛资源现状概述及我国钛消费趋势[J]. *矿产保护与利用*, 2020(2):162-170.  
CHONG Xiaoxiao, LUAN Wenlou, WANG Fengxiang, et al. Overview of global titanium resources status and titanium consumption trend in China[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2020(2):162-170.
- [3] 邹建新,徐国印. 攀西钒钛磁铁矿采选生产技术现状与转型升级策略[J]. *轻金属*, 2020(9):51-55.  
ZOU Jianxin, XU Guoyin. Mining & dressing production technology status and transformation & upgrading strategies of Panxi vanadium titanium magnetite[J]. *Light Metals*, 2020(9):51-55.
- [4] 严伟平,李维斯,杨耀辉,等. 攀西地区超微细粒级钛铁矿资源选矿工艺研究[J]. *矿产综合利用*, 2023(4):55-61.  
YAN Weiping, LI Weisi, YANG Yaohui, et al. Research on mineral processing technology of ultrafine ilmenite resources in Panzhihua-Xichang area [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023(4):55-61.
- [5] YUAN Z T, ZHAO X, LU J W, et al. Innovative pre-concentration technology for recovering ultrafine ilmenite using superconducting high gradient magnetic separator[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021,31:1043-1052.
- [6] ZHENG X Y, WANG Y H, LU D F. A realistic description of influence of the magnetic field strength on high gradient magnetic separation[J]. *Minerals Engineering*, 2015,79:94-101.
- [7] ZHENG X Y, JING Z H, SUN Z X, et al. Significantly improved separation efficiency of refractory weakly magnetic minerals by pulsating high-gradient magnetic separation coupling with magnetic fluid[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022,10:10105-10118.
- [8] WANG Y H, XUE Z X, ZHENG X Y, et al. Matching relation between matrix aspect ratio and applied magnetic induction for maximum particle capture in transversal high gradient magnetic separation[J]. *Minerals Engineering*, 2020,151:106316.
- [9] XIE J, ZHANG C Q, JIA Y H, et al. Automatic and continuous separation of mixed waste plastics via magneto; Archimedes levitation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022,287:120537.
- [10] 郑霞裕,王毓华,卢东方,等. 一种磁流体耦合高梯度磁选方法; CN113426576A[P].  
ZHENG Xiayu, WANG Yuhua, LU Dongfang, et al. A magnetic fluid coupling high-gradient magnetic separation method; CN113426576A[P].
- [11] ZHAO W J, CHENG R, MILLER J R, et al. Label-free microfluidic manipulation of particles and cells in magnetic liquids[J]. *Advanced Functional Materials*, 2016,26:3916-3932.
- [12] 熊涛,陈禄政,谢美芳,等. 周期式振动脉动高梯度磁选机的研制与试验研究[J]. *金属矿山*, 2023(3):227-233.  
XIONG Tao, CHEN Luzheng, XIE Meifang, et al. Development and test research of a periodic vibrating-pulsing high gradient magnetic separator[J]. *Metal Mine*, 2023(3):227-233.
- 引用本文:唐海芬,曙瓦克·赛力克,岳鑫慧,等. 磁流体耦合高梯度磁选高效回收攀西钛铁矿的研究[J]. *矿冶工程*, 2025,45(3):120-124.  
TANG Haifen, Shuwake·Sailike, YUE Xinhui, et al. Efficient recovery of Panxi ilmenite by magnetic fluid coupling high-gradient magnetic separation[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025,45(3):120-124.

(上接第 114 页)

- [8] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 通用硅酸盐水泥;GB 175—2023[S]. 北京:中国标准出版社, 2023.  
State administration for market regulation, National standardization administration. Common portland cement; GB 175—2023[S]. Beijing: Standards Press for China, 2023.
- [9] 王继蕊,王旭旭,秦育红,等. 烧失量对循环流化床粉煤灰高强陶粒烧结的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2023,54(12):4662-4672.  
WANG Jirui, WANG Xuxu, QIN Yuhong, et al. Effect of loss on ignition on sintering of high-strength ceramics made from CFB fly ash [J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2023, 54(12):4662-4672.
- [10] 叶国华,朱思琴,陈子杨,等. 石煤钒矿的选矿预富集研究评述[J]. *稀有金属*, 2022,46(1):120-130.  
YE Guohua, ZHU Siqin, CHEN Ziyang, et al. A research review on beneficiation pre-concentration of vanadium-bearing stone coal [J]. *Rare Metals*, 2022,46(1):120-130.
- 引用本文:李鑫源,刘有才,符剑刚,等. 石煤酸浸提钒尾渣资源化利用试验研究[J]. *矿冶工程*, 2025,45(3):110-114.  
LI Xinyuan, LIU Youcai, FU Jiangang, et al. Experimental study on resource utilization of residue after vanadium extraction from stone-like coal by acid leaching[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025,45(3):110-114.

(上接第 119 页)

- [10] WANG L, SUN N, LIU J, et al. Effect of chain length compatibility of alcohols on muscovite flotation by dodecyl amine[J]. *Minerals*, 2018,8(4):168.
- [11] CHEN X, GU G H, LI L J, et al. The selective effect of food-grade guar gum on chalcopyrite-monoclinic pyrrhotite separation using mixed aerofloat (CSU11) as collector[J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2018,25(10):1123-1131.
- [12] WANG Y L, HE G C, ABUDUKADE D, et al. Selective inhibition of sodium tripolyphosphate on calcite in the process of magnesite flotation[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022,345:117412.
- 引用本文:彭磊红,邓政斌,唐云,等. 季铵盐 Y28 对一水硬铝石与脉石硅酸盐矿物的浮选性能[J]. *矿冶工程*, 2025,45(3):115-119.  
PENG Leihong, DENG Zhengbin, TANG Yun, et al. Effect of quaternary ammonium salt Y28 on flotation performance of diaspore and gangue silicate minerals[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025,45(3):115-119.