

DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2025.05.001



引用格式: 杨聪聪, 侯德楠, 朱德庆, 等. 铁矿粉基本特性对其湿式磨矿—沉降—过滤性能的影响机制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2025, 56(5): 1711–1720.

Citation: YANG Congcong, HOU Denan, ZHU Deqing, et al. Influence mechanism of basic characteristics of iron ore fines on its wet grinding–sedimentation–filtration performance[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2025, 56(5): 1711–1720.

# 铁矿粉基本特性对其湿式磨矿—沉降—过滤性能的影响机制

杨聪聪<sup>1,2</sup>, 侯德楠<sup>1</sup>, 朱德庆<sup>1,2</sup>, 郭正启<sup>1,2</sup>, 胡博厚<sup>1</sup>, 付豪<sup>1</sup>

(1. 中南大学 资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙, 410083;

2. 中南大学 低碳与氢冶金研究中心, 湖南 长沙, 410083)

**摘要:** 以AM、AP、BS、BC、SM这5种铁矿粉为研究对象, 分析其显微硬度、堆密度、最大分子水含量等基本理化特性, 研究其湿式磨矿—沉降—过滤行为和影响因素, 建立铁矿粉基本特性与其湿式磨矿—沉降—过滤性能之间的内在联系。研究表明: 铁矿粉的磨矿功指数与显微硬度呈线性正相关, 硬度越高, 可磨性越差; 矿粉的沉降速度与其堆密度成正比, 与自然堆积料层孔隙率成反比, 堆密度越大、料层孔隙率越小的矿粉沉降速度越快。矿粉的过滤性能与其堆积料层孔隙率和最大分子水质量分数显著相关, 矿粉的颗粒孔隙率越小, 其最大分子水质量分数越低, 过滤性能越好。本研究可为球团企业矿石采购、优化配矿, 强化铁矿石湿式磨矿—沉降—过滤工艺提供理论指导。

**关键词:** 铁矿石; 湿磨; 沉降; 过滤

**中图分类号:** TD951

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-7207(2025)05-1711-10

## Influence mechanism of basic characteristics of iron ore fines on its wet grinding–sedimentation–filtration performance

YANG Congcong<sup>1,2</sup>, HOU Denan<sup>1</sup>, ZHU Deqing<sup>1,2</sup>, GUO Zhengqi<sup>1,2</sup>, HU Bohou<sup>1</sup>, FU Hao<sup>1</sup>

(1. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Research Center for Low Carbon and Hydrogen Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Five types of iron ore fines (AM, AP, BC, BS, SM) were taken as research objects and based on the analysis of their fundamental physicochemical characteristics, including microhardness, loose bulk density, and maximum hygroscopic moisture content. The wet milling–sedimentation–filtration behaviors and their influencing factors were also investigated. Intrinsic relationships between the fundamental characteristics of iron ore fines and their wet milling efficiency, settling velocity, and filtration performance were established. The results demonstrate that the bond work index of iron ore fines exhibits a linear positive correlation with their microhardness (HV)–higher hardness. The settling velocity of fines is directly proportional to their loose bulk density and inversely

收稿日期: 2024-08-10; 修回日期: 2024-09-25

**基金项目(Foundation item):** 广西创新驱动发展专项(2024AA08010-2); 湖南省重点研发计划项目(2022SK2075) (Project (2024AA08010-2) supported by the Innovation-Driven Development Special Project of Guangxi Province; Project (2022SK2075) supported by the Major Research and Development Project of Hunan province)

**通信作者:** 朱德庆, 博士, 教授, 从事铁矿造块、低碳与氢冶金理论和新技术、低品位矿及大宗固废综合利用等研究; E-mail: dqzhu@csu.edu.cn

proportional to the natural packing porosity of the particle bed the iron ore; fines with higher bulk density and lower bed porosity demonstrate faster sedimentation. Regarding filtration performance, it shows significant correlations with particle morphology, packing porosity, and maximum molecular moisture content: lower particle porosity leads to maximum molecular moisture content, thereby improving filtration efficiency. This study provides theoretical guidance for pelletizing plants to ore procurement, optimize ore blending strategies and enhance the wet milling–sedimentation–filtration performance in iron ore beneficiation.

**Key words:** iron ore; wet grinding; sedimentation; filtration

在当前国内倡导钢铁企业实施环保节能生产的背景下,越来越多的钢铁企业逐步提高球团矿入炉比例,以实现源头和过程节能减排目标<sup>[1]</sup>。然而,作为球团矿原料的铁精矿价格居高不下严重降低钢厂经济效益。因此,国内部分钢厂通过将进口粗粒烧结料如卡粉、纽曼粉、麦克粉等磨细至粒度小于 0.075 mm 作为球团原料,旨在扩大原料来源,降低球团生产成本<sup>[2-3]</sup>。然而,这些铁矿石在成分和特性上存在较大差异,使得国内钢铁企业在生产过程中面临着优化不同来源铁矿石的加工工艺以实现高效生产和降低碳排放的双重要求<sup>[4]</sup>。在目前主流的湿式磨矿—沉降—过滤工艺中,铁矿粉的物理化学特性如矿物组成、密度和孔隙率等对沉降速度和过滤效果有着显著影响,这不仅影响铁精矿的预处理效率和成本,而且对后续球团生产带来不利影响<sup>[5]</sup>。

近年来,许多学者研究了铁矿粉湿式磨矿对球团制备性能的影响。例如,杨永斌等<sup>[6]</sup>对 Minas 镜铁矿进行湿式球磨,发现随着球磨时间增加,生球落下强度明显提高,球磨 12 min 时生球落下强度由未处理时的 3.9 次/(0.5 m)提高到 6 次/(0.5 m)以上,生球爆裂温度则随着球磨预处理时间延长而有所下降。球磨后铁精矿可有效降低粒度,增加细粒级质量分数和比表面积,对其造球及球团焙烧性能有明显的改善效果。彭道胜等<sup>[7]</sup>通过实验发现,卡粉经湿式球磨后,颗粒表面活性明显升高,微细粒级质量分数增大,比表面积增大,亲水性和表面活性增强,但其沉降和过滤性能明显变差。杨涛等<sup>[8]</sup>研究了矿粉表面形貌、比表面积、表面吸附水质量分数与其过滤性能的定性关系,发现表面较粗糙、黏附细颗粒较多的矿粉越容易吸附最大分子结合水,毛细水越难脱除,矿粉表面结合水吸附能力和颗粒间毛细作用更强,故滤饼水分较高,过滤速率较低。总体而言,目前对

于铁矿石的湿式磨矿、沉降、过滤性能仍依靠大量试验或经验判断为主,缺乏基于铁矿密度、孔隙度等铁矿石基础特性对磨矿—沉降—过滤性能影响的定量评价研究。因此,揭示铁矿粉基本特性对其湿式磨矿—沉降—过滤过程的影响机制,对于促进对铁矿粉自身特性对磨矿—沉降—过滤性能影响机制的认识、构建铁矿石质量评价及预测体系具有重要意义<sup>[9]</sup>。

本研究以不同类型铁矿粉为对象,分析其基本物理化学特性对湿式磨矿—沉降—过滤性能的影响机制,建立铁矿粉自身特性与其可磨性、沉降和过滤性能的内在关系,以便为球团原料高效预处理工艺的研发和优化提供理论依据和技术支持。

## 1 原料及研究方法

### 1.1 原料基本理化性质

试验原料为 5 种不同类型的铁矿粉(SM、AP、AM、BC、BS),其中,除 SM 粉为铁精粉外,其余 4 种(AP、AM、BC、BS)均为粗铁矿粉。铁矿的化学成分(质量分数)如表 1 所示,铁矿粉的物理性质如表 2 所示。从表 1 可见:5 种铁矿粉的全铁质量分数在 60%~70%之间;SM 粉为高品位磁铁精矿,全铁和 FeO 质量分数最高,分别为 68.61%和 30.31%,SiO<sub>2</sub>质量分数较低,仅为 0.42%;BC 粉的铁品位也较高,为 64.62%;AP 粉和 AM 粉铁品位相近,分别为 61.19%和 60.31%,两者的烧损较高,分别为 5.42%和 6.08%,为典型的赤—褐铁矿;BS 粉铁品位最低,为 60.08%,同时其 SiO<sub>2</sub>质量分数较高,达到 8.92%,是一种高硅赤铁矿粉。

### 1.2 矿相学分析

不同铁矿粉粒度小于 0.045 mm 的颗粒微观形貌见图 1,不同矿种光学矿相显微照片见图 2。从

表1 铁矿粉的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of iron ore(mass fraction) %

铁矿粉	化学成分								烧损*
	TFe	FeO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	P	S	
SM	68.61	30.31	0.42	0.19	0.16	0.20	0.043	0.010	-3.31
BC	64.62	0.80	2.88	1.04	0.09	0.05	0.074	0.019	2.88
AP	61.19	0.35	4.28	0.27	1.94	0.10	0.100	0.020	5.42
AM	60.31	0.56	4.45	2.21	0.14	0.08	0.088	0.042	6.08
BS	60.08	2.25	8.92	1.15	0.14	0.33	0.073	0.015	2.19

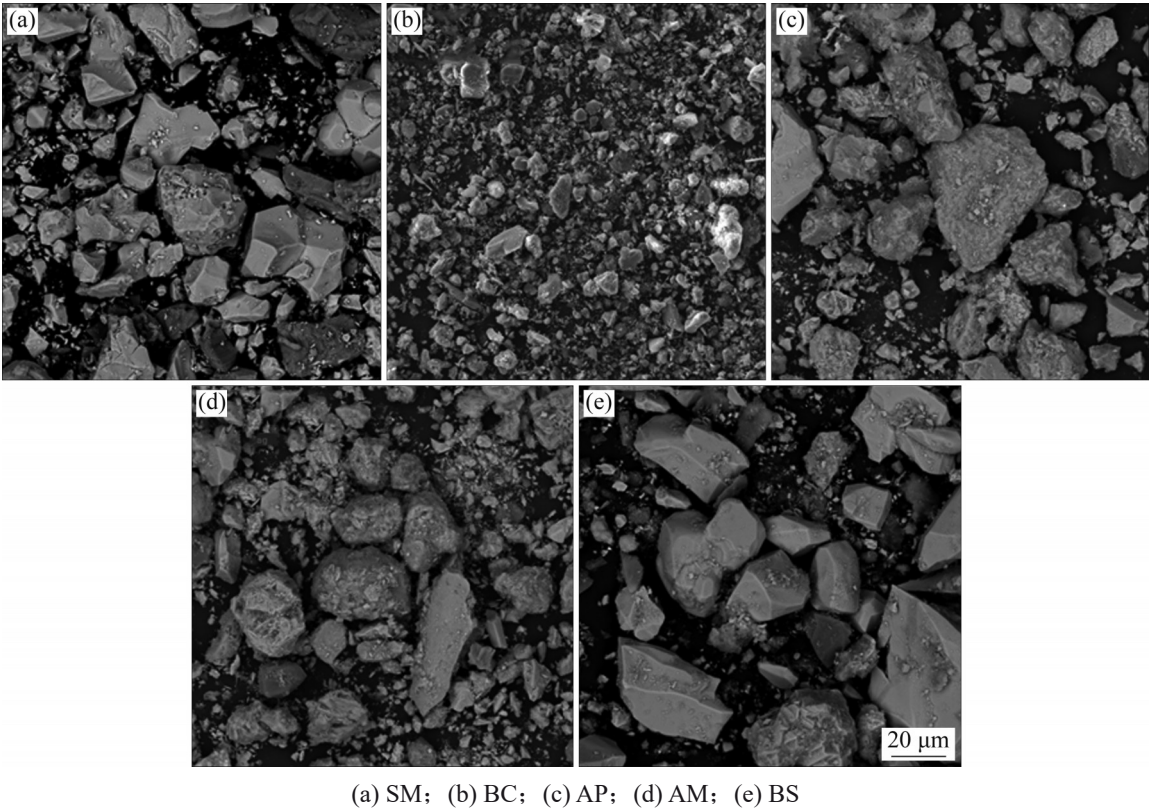
注：SM烧损为负值，表示样品氧化增重。

表2 铁矿粉的物理性质

Table 2 Physical properties of iron ores

矿粉种类	显微硬度/MPa	磨矿功指数/ (k·Wh·t <sup>-1</sup> )	堆密度/(g·cm <sup>-3</sup> )*	颗粒孔隙率/%	堆积料层孔隙率/%*	最大分子水质 量分数/%*
SM	911.0	19.675	1.86	2.73	60	2.33
BC	801.6	13.198	1.18	10.80	67	4.83
AP	688.5	7.602	0.95	12.40	71	8.43
AM	894.0	16.959	1.09	13.19	74	10.47
BS	735.8	11.029	1.32	10.46	63	3.09

注：\*针对粒度小于0.045 mm矿粉测定。



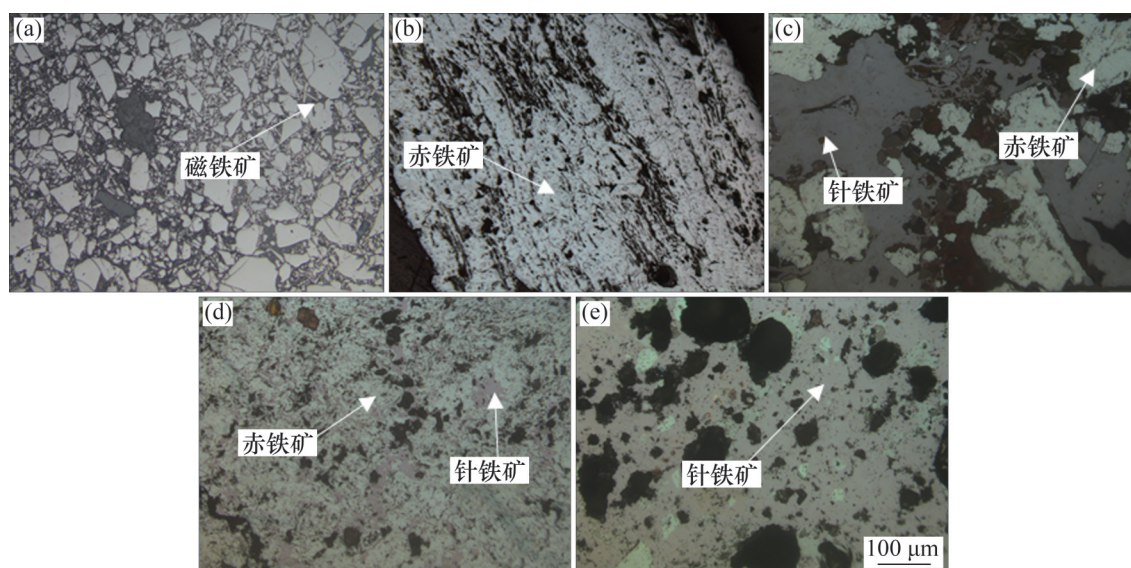
(a) SM; (b) BC; (c) AP; (d) AM; (e) BS

图1 粒度小于0.045 mm的不同铁矿粉颗粒微观形貌

Fig. 1 Micromorphologies of particles with different iron ore fines with less than 0.045 mm particle size

图1和图2可见：5种铁矿粉的矿物性质存在明显差异；SM矿的主要物相为磁铁矿，表面较光滑致密，附着的细小颗粒较少；BC矿中的赤铁矿质量分数最高，同时也存在少量针铁矿，颗粒粒径较





H—赤铁矿；M—磁铁矿；G—针铁矿。

(a) SM; (b) BC; (c) AP; (d) AM; (e) BS

图2 不同矿种的光学矿相显微照片

Fig. 2 Optical mineral micrographs of different minerals

小，表面较粗糙；BS矿赤铁矿质量分数也较高并含有一定量的石英，其颗粒相对于AM、AP和BC棱角更明晰，虽附着有部分细小颗粒，但整体较致密光滑；AM和AP粉颗粒形貌较接近，主要呈不规则粒状，表面粗糙，其中针铁矿质量分数相近且均较高，这可能是导致其烧损率较高的原因；针铁矿与赤铁矿互嵌，颗粒形状和表面粗糙程度等造成不同种矿粉之间性质存在差异，这将直接影响后续的湿式磨矿—沉降—过滤性能<sup>[10]</sup>。

### 1.3 研究方法

通过颚式破碎机将上述5种铁矿粉分别破碎至粒度小于3 mm后，将全部样品分别混匀、干燥、缩分后备用。将其中一部分采用振磨机将样品制备至粒度小于0.075 mm，用于化学成分及X射线衍射仪分析。此外，将其中一部分物料湿式球磨至粒度小于0.045 mm后进行过滤、干燥，作为沉降和过滤实验的原料备用。

#### 1.3.1 基本特性分析

采用X射线荧光光谱仪(XRF, PANalytical AxiosmAX)检测各样品的主要化学成分；依照国家标准采用化学滴定法检测FeO质量分数。样品的Bond绝对磨矿功指数依据Bond提出的“功指数法”测定，具体步骤见文献[11]。铁矿石的堆密度、真密度、孔隙率和最大分子水质量分数按文

献[12]中方法测定。

#### 1.3.2 工艺矿物学

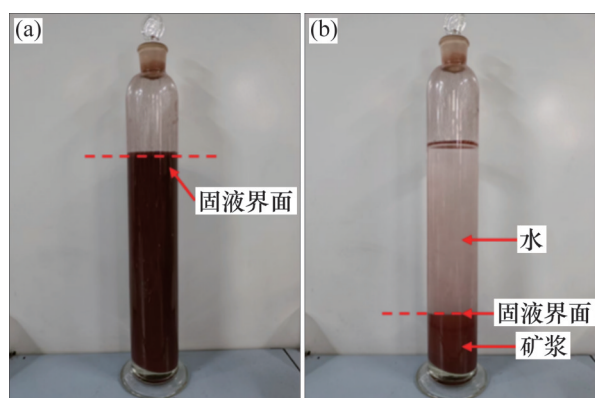
5种粗铁矿粉的微观形貌和微观结构采用扫描电镜(SEM, FEI Quanta-200)和光学显微镜(DMLP 4500)分析；显微硬度采用显微硬度计(HMV-G21S)测定，下压力为245.2 mN，每种样品分别测定30个点。

#### 1.3.3 湿式磨矿—沉降—过滤实验

在湿式磨矿试验中，每次取上述粒度小于3 mm的矿样200 g，在矿浆质量分数为70%的条件下使用球磨机(XMQ-φ160 mm)进行湿式球磨实验。达到设定的球磨时间后，将矿浆过滤、干燥。取100 g矿样筛分以测定粒度小于0.074 mm的铁矿粉质量分数，由此获得铁矿粉在不同磨矿时间时粒度低于0.074 mm的质量分数及其增长速率。

在矿浆沉降试验中，取上述粒度小于0.045 mm的样品配置成质量分数为25%的矿浆。将准备好的矿浆倒入容量为1 000 mL的量筒中，将初始液面高度调整为300 mm，并充分混匀，随后静置于水平桌面，同时开始计时记录矿浆固液界面下降高度随时间变化情况，结果如图3所示。实验进行3次，取固液界面下降高度平均值作为最终结果。

模拟工业生产开展过滤试验，同样取上述粒度低于0.045 mm的粒级制备质量分数为70%的矿浆。



(a) 开始沉降; (b) 沉降结束

图3 粒度小于0.045 mm的矿浆沉降过程

Fig. 3 Sedimentation process of slurry with particle less than 0.045 mm

随后, 用真空过滤机(XTLZ-φ260 mm/φ200 mm)对矿浆样品过滤, 固定最终滤饼厚度为8 mm。保持真空抽滤压力为0.08 MPa, 记录不同抽滤时间(10 s、30 s、1 min、2 min、4 min、6 min、8 min)时的滤饼残余水分质量分数。残余水分质量分数 $w$ 可按照下式计算:

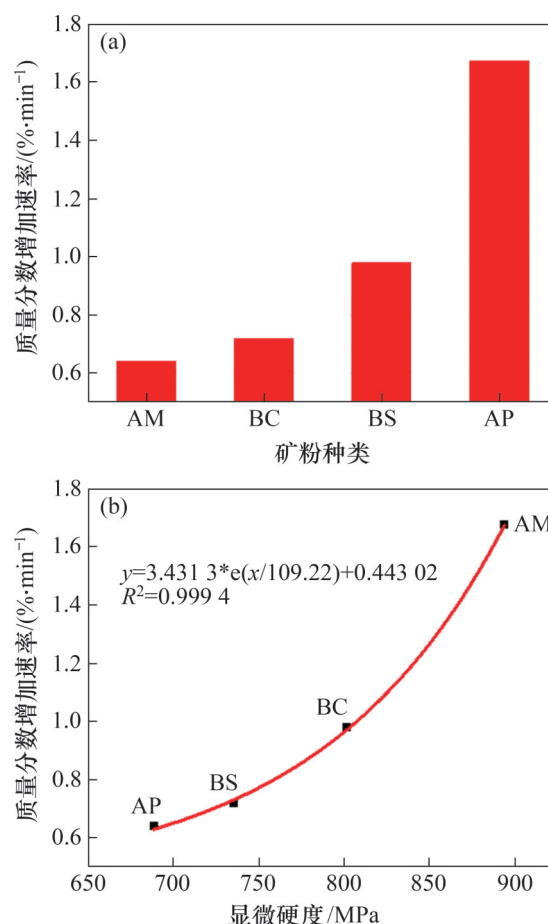
$$w = \frac{m_2 - m_1}{m_2} \times 100\% \quad (1)$$

其中:  $m_2$  和  $m_1$  分别为烘干前和烘干后样品的质量, g。

## 2 结果与讨论

### 2.1 湿式磨矿性能

试验通过分析不同粗铁矿粉湿式磨矿产品中粒度小于0.074 mm的质量分数与磨矿时间的关系, 测定了其质量分数的增加速率, 如图4(a)所示。对不同铁矿粉粒度小于0.074 mm的质量分数增加速率与其显微硬度进行非线性拟合, 结果见图4(b)。由图4(a)可知: 在相同磨矿时间下, AP矿粉可磨性最好, 细粒级增长速率最快, 磨矿20 min后, 小于0.074 mm的颗粒质量分数超过70%, 因此, 湿磨时应控制AP矿的磨矿时间不宜过长, 以免过磨; 相比之下, BC、AM矿粉磨效果较差, 需磨矿45 min以上, 其产品中小于0.074 mm的颗粒质量分数才能达到70%左右。故铁矿的可磨性在很大程度上取决于矿石硬度, 通常硬度越高, 所需



(a) 不同矿粉的小于0.074 mm的质量分数增加速率对比;

(b) 小于0.074 mm的质量分数增加速率与显微硬度的关系

图4 4种粗铁矿粉粒度小于0.074 mm的质量分数增加速率及其与显微硬度的关系

Fig. 4 Accumulation rate of mass fraction for particles finer than 0.074 mm and its relationship with microhardness (HV) of four types of coarse iron ore fines

的磨削能量就越多<sup>[11]</sup>。5种铁矿细粒的显微硬度与磨矿功指数的关系见图5。从图5可见: 铁矿粉显微硬度与其磨矿功指数呈正相关。

### 2.2 沉降性能

#### 2.2.1 矿粉堆密度的影响

在相同磨矿细度情况下, 最终沉降高度与其堆密度的关系见图6。随着矿粉堆密度增大, 最终沉降高度减小。堆密度大的矿粉在沉降过程中, 颗粒间间隙更小, 使滤饼形成更紧密的堆积结构, 从而导致矿浆最终沉降高度降低<sup>[12-13]</sup>。这说明密度高的矿粉在沉降过程中沉降速率更快, 可能导致沉降层颗粒堆积更紧密, 形成大粒级团块。

矿粒在静止介质中沉降时, 矿粒对介质的相对

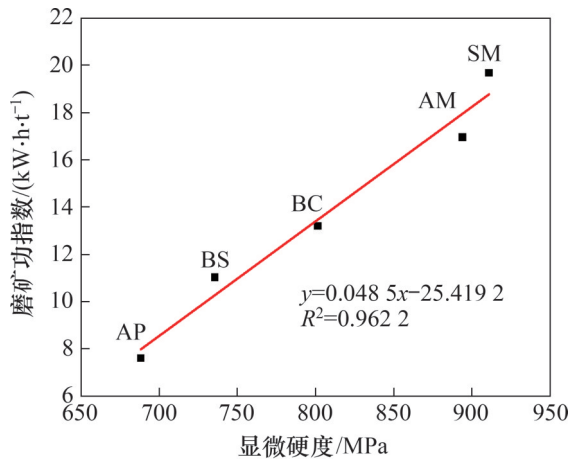


图5 5种铁矿粉的显微硬度与其磨矿功指数的关系

Fig. 5 Relationship between microhardness of five types of iron ore fines and grinding work index

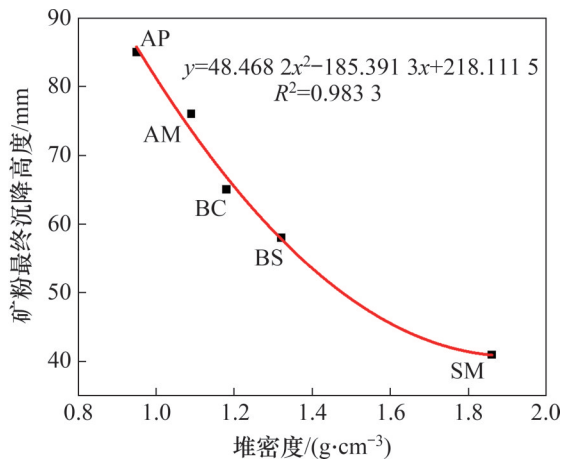


图6 5种矿粉的最终沉降高度与其堆密度的关系

Fig. 6 Relationship between final settlement height and bulk density of five types of mineral fines

速度即为矿粒的运动速度。当矿粒加速度为  $0 \text{ m/s}^2$ 、以等速度沉降时, 该速度为自由沉降末速, 可根据式(1)计算。

$$v = \sqrt{\frac{\pi d (\delta - \rho) g}{6 \phi \rho}} \quad (1)$$

式中:  $v$  为沉降末速,  $\text{cm/s}$ ;  $d$  为颗粒粒径,  $\text{cm}$ ;  $\delta$  为颗粒密度,  $\text{g/cm}^3$ ;  $\rho$  为介质密度,  $\text{g/cm}^3$ ;  $\mu$  为介质黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $\phi$  为阻力系数。

5种矿粉在整个沉降过程的平均沉降速率与其堆密度及理论和实际沉降末速之间的关系分别如图7和图8所示。根据 Stokes 定律, 对于在静止流体中沉降的细小球形颗粒, 其沉降速度与颗粒密度和流体密度之差成正比。具体而言, 沉降速度  $v$

与颗粒密度  $\delta$  和流体密度  $\rho$  之差成正比, 同时, 沉降速度  $v$  还受重力加速度、颗粒半径和流体黏度的影响。当颗粒的密度增加时, 其相对于流体的密度差也增大, 导致沉降速度增大<sup>[14-15]</sup>, 反之, 当颗粒密度降低时, 密度差减小, 沉降速度变小。因此, 在相同条件下, 密度较大的颗粒会比密度较小的颗粒沉降得更快。此外, 密度大的颗粒在沉降过程中受到的流体阻力较小, 进一步增大了沉降速度<sup>[16-17]</sup>。综上所述, 颗粒密度是影响沉降速度的关键因素之一, 直接决定了颗粒在流体中的沉降速度。

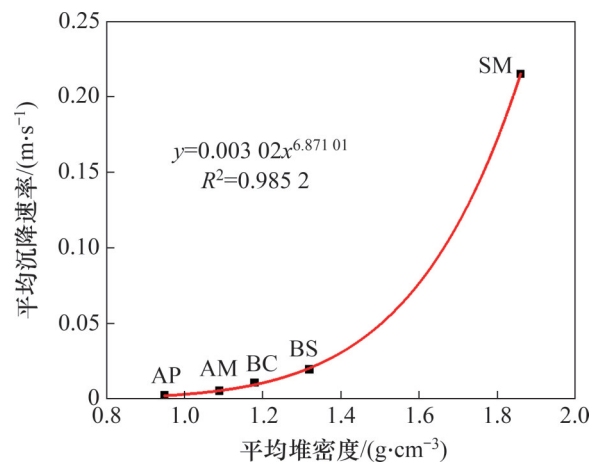


图7 5种矿粉的平均沉降速率与其堆密度的关系

Fig. 7 Relationship between average settling velocity and bulk density of five types of iron ore fines

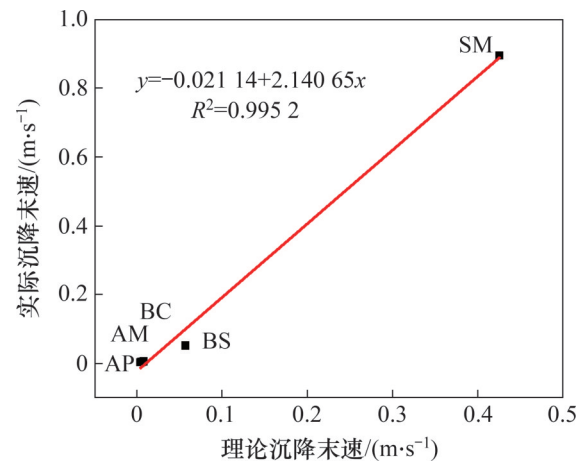


图8 5种矿粉的实际沉降末速和理论沉降末速的关系

Fig. 8 Relationship between actual and theoretical terminal velocity of settling of five types of iron ore fines

### 2.2.2 堆积料层孔隙率的影响

5种矿粉平均沉降速率与其堆积料层孔隙率的关系如图9所示。从图9可见: 堆积料层孔隙率越



大,沉降速率越小;随着孔隙率减小,矿粉颗粒的排列变得更加紧密;颗粒之间的空隙减少,颗粒之间的接触点增多,摩擦力和相互支撑作用增强,形成了更加稳定的结构,颗粒在沉降过程中受到的剪切作用和滑动阻力显著减少,因为颗粒之间的接触和支撑作用有效阻止了颗粒之间的相对位移<sup>[17]</sup>;而当孔隙率较高时,颗粒之间相对松散,容易发生滑动和剪切作用,这种相对移动会增加沉降过程中的阻力,降低整体沉降速度。另外,孔隙率低还会减少絮凝和团聚效应的发生,当孔隙率较大时,颗粒之间距离较大,颗粒容易通过相互吸引或碰撞形成絮凝体或团聚体,这些团聚体的体积较大,形状不规则,在沉降时会受到更大的流体阻力,进而降低沉降速度<sup>[18-20]</sup>。

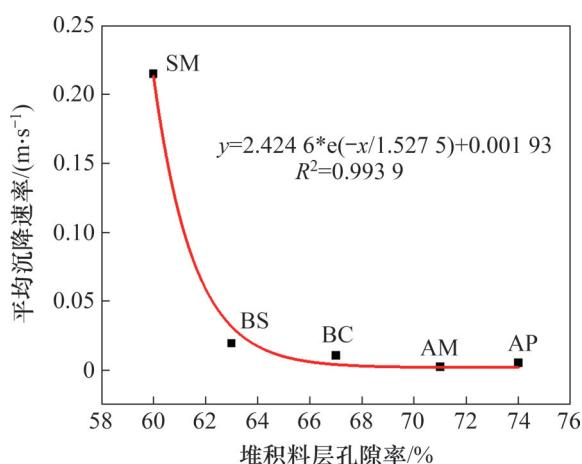


图9 5种矿粉的平均沉降速率与其孔隙率的关系

Fig. 9 Relationship between average sedimentation velocity and porosity of five types of mineral fines

## 2.3 过滤性能

### 2.3.1 颗粒孔隙率的影响

在初始矿浆水分为30%的条件下,5种矿粉真空抽滤后滤饼水分质量分数与其颗粒孔隙率的关系如图10所示。从图10可见:在相同磨矿细度条件下,不同种类矿粉过滤性能相差较大;矿石颗粒孔隙率越小,这是因为相同抽滤时间下得到的滤饼水分质量分数越小。SM、BC、BS矿粉颗粒表面较光滑,孔隙少,矿石内部蓄积的水分少而AP和AM矿粉颗粒表面孔隙率较高,具有较强的吸水能力,同时导致孔隙水的流动阻力和脱除难度增大,故其过滤性能较差;同时,AM、AP矿含针铁矿( $\alpha$ -FeOOH)比例较高,矿石的过滤性能也受到针铁矿的影响。针铁矿是一种疏松多孔的铁

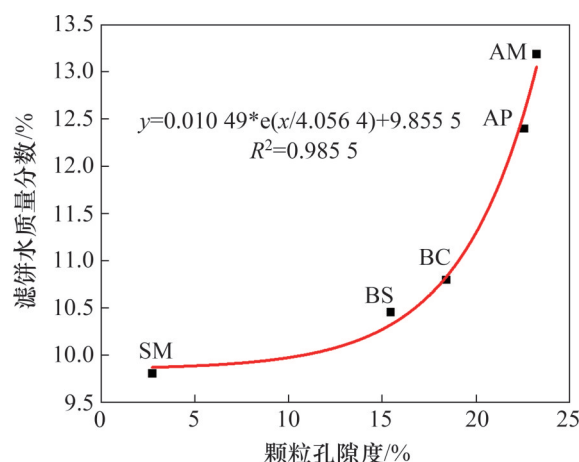


图10 5种矿粉的真空抽滤后滤饼水质量分数与其颗粒孔隙率的关系

Fig. 10 Relationship between moisture of filter cake and porosity of particles after vacuum filtration of five types of mineral fines

矿物,会影响矿石中的固液分离<sup>[21-23]</sup>。

### 2.3.2 矿粉堆积孔隙率对过滤性能的影响

在矿浆过滤过程中,水分通过滤层的流速可以通过式(2)来计算:

$$U = \frac{\varepsilon^3}{k_1(1-\varepsilon)^2 a^2} \cdot \frac{\Delta P}{\mu L} \quad (2)$$

式中: $U$ 为液体通过滤层的平均线速度,cm/s; $\varepsilon$ 、 $L$ 分别为填充床的孔隙率和厚度,cm; $a$ 为颗粒的比表面积,cm<sup>2</sup>/g; $k_1$ 为科泽尼常数,与溶液性质和温度等有关,计算时,一般取值5; $\mu$ 为滤液的黏度,Pa·s; $\Delta P$ 为滤层两侧的压力降,Pa。

5种矿粉抽滤速度与料层孔隙率的关系如图11所示。从图11可见:矿粉颗粒堆积孔隙率越大,矿浆过滤过程中水分通过滤层的流速越快。结合前述不同铁矿石的微观颗粒形貌分析,AP粉和AM粉的颗粒表面粗糙,但粒度较均匀,粗颗粒质量分数较高,互相接触可以形成“骨架作用”<sup>[24]</sup>,矿粉过滤形成滤饼的孔隙度较大,孔隙间水的流动阻力减小,在宏观上表现为水的渗流速度快;相反,BC粉和BS矿粉表面较光滑,粗颗粒间细小孔隙被细颗粒填充,导致堆积料层的孔隙率低,流体需要克服孔隙之间的摩擦力才能通过,故在过滤过程中对水的吸附量和迟滞阻力较大,渗流速度降低<sup>[25]</sup>。

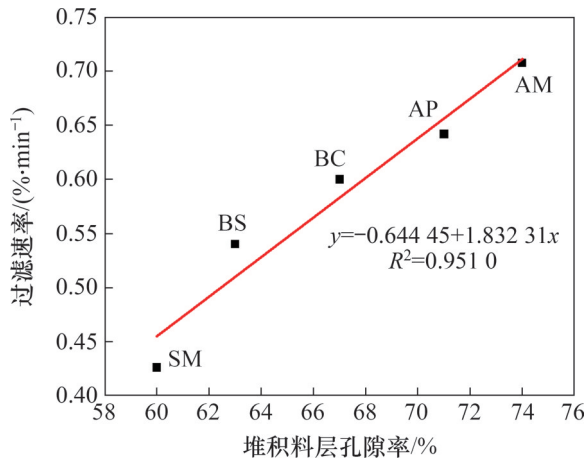


图 11 5 种铁矿粉过滤速率与料层孔隙度的关系

Fig. 11 Relationship between suction filtration rate and filter cake porosity of five types of mineral fines

### 2.3.3 矿粉最大分子水质量分数的影响

当铁矿粉粒度小、比表面积较大时,表面能较大,表面分子处于不平衡力场中,与水接触后,颗粒表面离子与水分子产生静电吸引,水分子在范德华力作用下,吸附在颗粒表面形成最大分子结合水,故铁矿粉的粒度、比表面积和表面化学性质等是决定最大分子水质量分数的主要因素。分子水与物料结合紧密,不能用机械方法脱除,而过滤后滤饼水分为物料表面的水分,其质量分数与最大分子水质量分数有密切联系。5 种矿粉滤饼水质量分数与最大分子水质量分数的关系见图 12。从图 12 可知矿粉最大分子水质量分数越高,滤饼水质量分数越高,其过滤效果越差,两者有很大相关性<sup>[26-27]</sup>。

AP 粉和 AM 粉颗粒表面粗糙,疏松多孔,内孔隙发达,会增大颗粒的比表面积和表面能,使表面亲水性增强,吸附水和薄膜水分增多,导致气流阻力增大,压力降升高。而对于表面相对光滑致密的 BC 和 BS 矿粉,它们的比表面积和表面能较低,吸附水和薄膜水质量分数较低,气流阻力和压力降较低,过滤性能较好<sup>[28]</sup>。因此,颗粒表面粗糙多孔,最大分子水质量分数也越高,过滤性能越差<sup>[29]</sup>。

通过对不同类型铁矿粉基本物理特性的系统分析,发现其对湿式磨矿—沉降—过滤性能具有重要影响。湿式磨矿—沉降—过滤性能作为铁矿粉预处理过程中的关键环节,直接决定了生产中

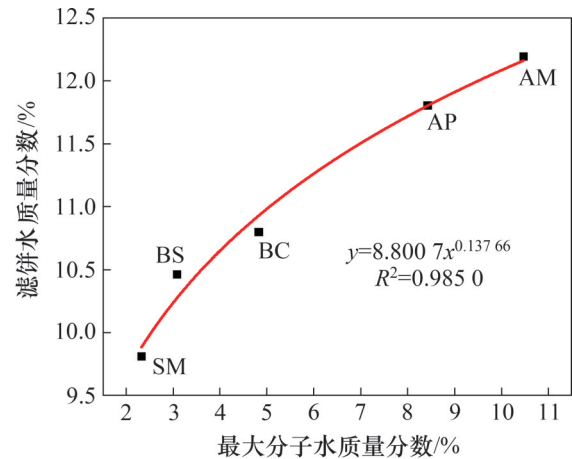


图 12 5 种矿粉的滤饼水质量分数与最大分子水质量分数的关系

Fig. 12 Relationship between filter cake moisture and maximum molecular moisture content in five types of mineral fines

铁矿石预处理工艺的成本与效率<sup>[30-31]</sup>。本文分析了铁矿粉基本物理特性与其湿式磨矿—沉降—过滤行为之间的定量关系,揭示了矿粉基本物理特性对工艺性能的作用机理,为后续新矿种湿式磨矿—沉降—过滤性能的预测、现场配矿方案的优化以及预处理工艺的改进提供了理论支撑,也将为提高原矿湿式磨矿—沉降—过滤工艺效率提供指导。

## 3 结论

1) 铁矿粉的显微硬度与其磨矿功指数呈显著正相关,显微硬度每增加 10%,磨矿功指数平均增加约 12%。矿石硬度越高,磨矿时间越长,能耗越高。

2) 在磨矿细度相同时,颗粒密度和堆积料层孔隙率是影响矿粉颗粒沉降速度的关键因素,决定了颗粒在流体中沉降速度。沉降速度与矿粉堆密度成正比,与堆积料层孔隙率成反比。矿粉堆密度越大,沉降速度越快,最终沉降高度越低;堆积料层孔隙率越低,颗粒的沉降速度越快。

3) 在磨矿细度和过滤条件相同时,矿粉颗粒过滤性能受颗粒孔隙率、堆积料层孔隙率和最大分子水质量分数的显著影响。颗粒孔隙率越小,最大分子水质量分数越低,滤饼残余水质量分数



越低;过滤速度与堆积料层孔隙率成正比,堆积料层孔隙率越大,过滤性能越好。

### 参考文献:

- [1] YANG Congcong, ZHU Deqing, PAN Jian, et al. Oxidation and induration characteristics of pellets made from western Australian ultrafine magnetite concentrates and its utilization strategy[J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2016, 23(9): 924-932.
- [2] 陈江安. 低品位褐铁矿石煤基直接还原过程矿物转化规律及机理[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
- CHEN Jiang'an. Law and mechanism of mineral transformation in coal-based direct reduction of low-grade limonite[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.
- [3] 许满兴, 张玉兰. 新世纪我国球团矿生产技术现状及发展趋势[J]. *烧结球团*, 2017, 42(2): 25-30.
- XU Manxing, ZHANG Yulan. Analysis of pellet technology and production of China in 21st century[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2017, 42(2): 25-30.
- [4] 毛瑞, 王飞, 金海, 等. 烧结富矿粉细磨用于制备球团矿的试验研究[J]. *烧结球团*, 2022, 47(2): 24-29.
- MAO Rui, WANG Fei, JIN Hai, et al. Experimental research on grinding rich ore powder originally used for sintering to prepare pellet[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2022, 47(2): 24-29.
- [5] 朱德庆, 春铁军, 潘建. 低品位赤铁矿球团成核剂强化还原机理研究[J]. *北京科技大学学报*, 2011, 33(11): 1325-1330.
- ZHU Deqing, CHUN Tiejun, PAN Jian. Mechanism of action of improving reduction on low grade hematite pellets by adding nucleating agent[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2011, 33(11): 1325-1330.
- [6] 杨永斌, 张健, 钟强, 等. 预处理强化赤铁矿熔剂性球团制备性能的研究[J]. *矿冶工程*, 2019, 39(4): 83-88.
- YANG Yongbin, ZHANG Jian, ZHONG Qiang, et al. Effect of pretreatment on the ballability of hematite in preparation of a fluxed pellet[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2019, 39(4): 83-88.
- [7] 彭道胜, 潘建, 李军, 等. 细磨卡粉制备熔剂性球团的试验研究[J]. *烧结球团*, 2021, 46(4): 50-57.
- PENG Daosheng, PAN Jian, LI Jun, et al. Experimental research on preparation of fluxed pellets from fine grinding Carajas powder[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2021, 46(4): 50-57.
- [8] 杨涛, 青格勒, 董香娟, 等. 铁矿粉表面性质与过滤性能关系的研究[J]. *金属矿山*, 2020(11): 124-128.
- YANG Tao, QING Gele, DONG Xiangjuan, et al. Study on relationship between surface properties and filtration performance of different iron ore powders[J]. *Metal Mine*, 2020(11): 124-128.
- [9] ZHANG Wuju, ZHOU Qi, PAN Jian, et al. Grinding of Australian and Brazilian iron ore fines for low-carbon production of high-quality oxidised pellets[J]. *Minerals*, 2024, 14(3): 236.
- [10] 栗艳锋, 韩跃新, 孙永升, 等. 鲕状赤铁矿深度还原过程中铁颗粒粒度和形貌特征分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(4): 779-785.
- SU Yanfeng, HAN Yuexin, SUN Yongsheng, et al. Analysis of iron particle size and morphology characteristics during deep reduction of oolitic hematite[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2018, 49(4): 779-785.
- [11] 伍洪标, 韩建军, 冯小平. 物料粉磨功指数的测定与计算[J]. *中国粉体技术*, 2002, 8(6): 10-12.
- WU Hongbiao, HAN Jianjun, FENG Xiaoping. Measuring and calculating on bond index of material[J]. *China Powder Science and Technology*, 2002, 8(6): 10-12.
- [12] 罗艳红. 磁铁精矿氧化球团的基础研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- LUO Yanhong. Basic research on oxidized pellets of magnetite concentrate[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [13] ZHU Deqing, GUO Zhengqi, PAN Jian, et al. Insights on pretreatment of Indian hematite fines in grate-kiln pelletizing process: the choice of grinding processes[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2018, 25(5): 506-514.
- [14] 杨聪聪, 曲士娟, 梁海源, 等. 某进口赤-褐铁矿磨矿特性及其氧化球团制备行为[J/OL]. *钢铁研究学报*, 2024, 36(9): 1152-1162.
- YANG Congcong, QU Shijuan, LIANG Haiyuan, et al. Grinding characteristics of an imported erythro-limonite and its preparation behavior of oxidation pellets[J/OL]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2024, 36(9): 1152-1162.
- [15] 牛向东. 单个粗颗粒矿石自由沉降速度和浮游速度试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- NIU Xiangdong. Experimental study on free settling velocity and floating velocity of a single coarse-grained ore[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [16] 焦华喆, 王洪江, 吴爱祥, 等. 全尾砂絮凝沉降规律及其机理[J]. *北京科技大学学报*, 2010, 32(6): 702-707.
- JIAO Huazhe, WANG Hongjiang, WU Aixiang, et al. Rule and mechanism of flocculation sedimentation of unclassified tailings[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2010, 32(6): 702-707.
- [17] 黄细聪, 周峰. 某赤铁矿精矿配比对球团生产的影响[J]. *现代矿业*, 2023, 39(4): 89-91.
- HUANG Xicong, ZHOU Feng. Influence of A hematite concentrate proportion on pellet production[J]. *Modern Mining*, 2023, 39(4): 89-91.
- [18] 胡宗岗. 细粒赤铁矿精矿沉降性能及絮团特性研究[D]. 武

- 汉: 武汉大学, 2023.
- HU Zonggang. Study on sedimentation and flocculation characteristics of fine hematite concentrate[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2023.
- [19] 焦华喆, 吴爱祥, 王洪江, 等. 全尾砂絮凝沉降特性实验研究[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(12): 1437–1441.
- JIAO Huazhe, WU Aixiang, WANG Hongjiang, et al. Experiment study on the flocculation settlement characteristic of unclassified tailings[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(12): 1437–1441.
- [20] 侯贺子, 李翠平, 王少勇, 等. 尾矿浓密中泥层沉降速度变化及颗粒沉降特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(6): 1428–1436.
- HOU Hezi, LI Cuiping, WANG Shaoyong, et al. Settling velocity variation of mud layer and particle settling characteristics in thickening of tailings[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2019, 50(6): 1428–1436.
- [21] 毛瑞, 王飞, 金海, 等. 烧结富矿粉细磨用于制备球团矿的试验研究[J]. 烧结球团, 2022, 47(2): 24–29.
- MAO Rui, WANG Fei, JIN Hai, et al. Experimental research on grinding rich ore powder originally used for sintering to prepare pellet[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(2): 24–29.
- [22] 易陆杰, 蒋林海, 李建, 等. 优质球团矿产品多元化低成本清洁生产技术开发与应用[J]. 烧结球团, 2022, 47(1): 95–103.
- YI Lujie, JIANG Linhai, LI Jian, et al. Technology development and application of diversified low cost clean production of high quality pellet products[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(1): 95–103.
- [23] 杨涛, 青格勒, 董香娟, 等. 铁矿粉表面性质与过滤性能关系的研究[J]. 金属矿山, 2020(11): 124–128.
- YANG Tao, QING Gele, DONG Xiangjuan, et al. Study on relationship between surface properties and filtration performance of different iron ore powders[J]. Metal Mine, 2020(11): 124–128.
- [24] 杜加法, 宋泽普. 矿山充填尾砂过滤脱水性能试验研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2021, 73(3): 6–14.
- DU Jiafa, SONG Zepu. Experimental research on filtration dewatering performance of backfilling tailings in mine[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2021, 73(3): 6–14.
- [25] 杨涛, 青格勒, 董香娟, 等. 矿粉颗粒表面微观形貌对过滤性能的影响[J]. 矿产综合利用, 2020(3): 185–189.
- YANG Tao, QING Gele, DONG Xiangjuan, et al. Effect of surface micro-morphology of mineral powder particles on the filtration performance[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(3): 185–189.
- [26] 姚亚东, 王树根. 矿物的表面结构和表面性质[J]. 矿产综合利用, 1998(4): 35–39.
- YAO Yadong, WANG Shugen. Surface texture and properties of minerals[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 1998(4): 35–39.
- [27] 陈绍民. 新疆某铁矿降低精矿过滤水份试验研究[J]. 新疆有色金属, 2021, 44(1): 69–70.
- CHEN Shaomin. Study on reducing the filtered water content of concentrate in an iron ore mine in Xinjiang[J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 2021, 44(1): 69–70.
- [28] 苏桂华, 王泽强, 李海燕. 应用改性剂改善红土镍矿超细矿浆的沉降及过滤性能的研究[J]. 世界有色金属, 2017(16): 247–248.
- SU Guihua, WANG Zeqiang, LI Haiyan. Application of modifier to improve sedimentation and filtration performance of superfine slurry of laterite nickel ore[J]. World Nonferrous Metals, 2017(16): 247–248.
- [29] 杨聪聪, 侯德楠, 潘建, 等. 不同类型铁矿粉湿式磨矿-沉降-过滤行为及其影响因素分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(10): 3627–3640.
- YANG Congcong, HOU Denan, PAN Jian, et al. Analysis of wet grinding-sedimentation-filtration behaviors of different types of iron ore fines and influencing factors[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2024, 55(10): 3627–3640.
- [30] 朱德庆, 唐艳云, MENDES V, 等. 高压辊磨预处理强化巴西镜铁矿球团[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(1): 30–35.
- ZHU Deqing, TANG Yanyun, MENDES V, et al. Improvement in pelletization of Brazilian specularite by high-pressure roller grinding[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(1): 30–35.
- [31] 潘建, 田宏宇, 朱德庆, 等. 超微细铁精矿的粒度特性和润湿性对其成球性能交互影响[J]. 工程科学学报, 2017, 39(6): 830–837.
- PAN Jian, TIAN Hongyu, ZHU Deqing, et al. Particle size and wettability effect of ultrafine magnetite concentrate on ballability[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(6): 830–837.

(编辑 陈灿华)