doi: 10.20239/j.issn.1671-9492.2026.08.027

包钢尾矿氢基矿相转化铁精矿工艺矿物学及反浮选脱氟提质研究

刘文丽[1,2],王子航[3],李海斌[2],薛志刚[2],张 鹏[4],唐志东[3],
刘玉明[4],刘 杰[3],高 鹏[3],曹 钊[1]

(1. 内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院,内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司,内蒙古 包头 014010;
3. 东北大学 资源与土木工程学院,沈阳 110819;
4. 内蒙古包钢钢联股份有限公司 白云选矿分公司,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 白云鄂博矿床是我国典型的铁-稀土-氟多金属共生特大型矿床,矿石中伴生大量萤石等含氟矿物,与铁矿物嵌布关系密切,导致选铁尾矿氟含量高、铁资源损失严重,资源化利用难度大。为高效回收尾矿中铁资源并实现降氟提质,本文以包钢尾矿经预富集—氢基矿相转化—磁选工艺制备的铁精矿为研究对象,系统开展工艺矿物学表征与反浮选脱氟提质试验研究。采用化学分析、X射线衍射、物相分析、粒度分析及物理性能检测等手段,查明了磁选精矿的化学成分、矿物组成、元素赋存状态及粒度分布特征。结果表明,磁选精矿TFe品位为64.84%,F含量为1.11%,主要矿物为磁铁矿和萤石,铁主要以磁性铁的形式赋存,分布率达到96.37%,且铁矿物与含氟矿物主要集中在-0.015 mm细粒级,占比达到87.08%。在此基础上,以现场药剂为基础,系统开展了捕收剂用量、抑制剂用量、矿浆温度及矿浆pH条件试验,优化后得到最佳反浮选制度:矿浆pH值为8,温度50 ℃,水玻璃用量400 g/t,捕收剂用量3 500 g/t。采用一粗二扫闭路反浮选试验流程,最终获得铁精矿TFe品位66.28%、F含量0.48%、铁回收率95.55%的浮选指标,实现了铁矿物与含氟脉石的高效分离。氢基还原使铁矿物向高纯度磁铁矿定向转化,细粒级充分单体解离为反浮选提供基础,水玻璃选择性抑制与捕收剂优先吸附萤石是脱氟提质的核心机理。本文研究为白云鄂博高氟尾矿资源化利用、固废减量化与绿色高效选矿提供了技术支撑,符合绿色选矿发展方向。

关键词: 白云鄂博尾矿;铁精矿;反浮选;脱氟;绿色选矿

中图分类号: TD912;TD923 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-9492(2026)08-0308-09

Process Mineralogy and Reverse Flotation Defluorination Upgrading of Iron Concentrate Prepared from Baotou Steel Tailings via Hydrogen-based Mineral Phase Transformation

Liu Wenli[1,2], Wang Zihang[3], Li Haibin[2], Xue Zhigang[2], Zhang Peng[4], Tang Zhidong[3],
Liu Yuming[4], Liu Jie[3], Gao Peng[3], Cao Zhao[1]

(1. School of Mining and Coal Industry, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China;
2. Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia, China;
3. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
4. Baiyun Mineral Processing Branch, Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: Bayan Obo deposit is a typical super-large Fe-RE-F polymetallic deposit in China. The ore is associated with a large amount of fluorine-bearing minerals such as fluorite, which are closely intergrown with

收稿日期: 2025-10-13
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52130406, 52474289);辽宁省杰出青年基金资助项目(50100011);辽宁省兴辽英才计划领军人才项目(XLYC2402050)
作者简介: 刘文丽(1983—),女,内蒙古包头市人,硕士,工程师,主要从事白云鄂博稀土铁矿选矿方向的研究。
通信作者: 曹 钊(1985—),男,内蒙古包头市人,博士,教授,主要从事稀土战略矿产资源高效综合利用、复杂黄金矿高效选冶技术与装备以及工业固体废弃物再生循环利用等方向的研究。

iron minerals. This leads to high fluorine content in iron-separation tailings, serious loss of iron resources, and great difficulties in resource utilization. To efficiently recover iron resources from the tailings and achieve fluorine reduction and quality improvement, this paper takes the iron concentrate prepared from Baotou Steel tailings via pre-enrichment-hydrogen-based mineral phase transformation-magnetic separation process as the research object, and systematically carries out process mineralogy characterization and reverse flotation defluorination upgrading tests. By means of chemical analysis, X-ray diffraction, phase analysis, particle size analysis and physical property testing, the chemical composition, mineral composition, element occurrence state and particle size distribution characteristics of the magnetic separation concentrate were clarified. The results show that the magnetic separation concentrate has a total iron (TFe) grade of 64.84% and a fluorine content of 1.11%. The main minerals are magnetite and fluorite, and iron mainly occurs in the form of magnetic iron with a distribution rate of 96.37%. Moreover, iron minerals and fluorine-bearing minerals are mainly concentrated in the fine fraction of −0.015 mm, accounting for 87.08%. On this basis, taking the on-site reagents as the basis, conditional tests on collector dosage, depressant dosage, pulp temperature and pulp pH were systematically carried out, and the optimal reverse flotation regime was obtained after optimization: pulp pH=8, temperature 50 ℃, water glass dosage 400 g/t, collector dosage 3 500 g/t. Using a locked-cycle reverse flotation process of one roughing and two scavengings, the final flotation indexes of iron concentrate with TFe grade of 66.28%, fluorine content of 0.48% and iron recovery of 95.55% were obtained, realizing the efficient separation of iron minerals and fluorine-bearing gangue. Hydrogen-based reduction enables the directional transformation of iron minerals into high-purity magnetite. The full monomer dissociation of fine-grained minerals lays a foundation for reverse flotation. Selective inhibition by water glass and preferential adsorption of collectors on fluorite constitute the core mechanism for fluorine removal and quality improvement. The research in this paper provides technical support for the resource utilization, solid waste reduction and green and efficient beneficiation of high-fluorine tailings from Bayan Obo, which is in line with the development direction of green beneficiation.

Key words: Bayan Obo tailings; iron concentrate; reverse flotation; defluorination; green mineral processing

0　引言

铁矿作为全球利用最广、消耗最大的战略性金属矿产资源，是国民经济的基础，更是钢铁工业的基础原材料，也是我国重要的战略性矿产资源之一，在工业制造、基础建设、国防军工以及能源领域都有广泛的应用。我国铁矿资源储量丰富，2022年我国可用铁矿石储量约163亿t，探明储量达到850亿t，但97%以上的铁矿资源属于贫矿，平均铁品位约33%，可用含铁量仅69亿t[1-3]。同时，我国铁矿石资源存在禀赋差、难利用、采选成本高的问题，国内铁矿自给率长期低于20%[4-5]，2016—2021年进口量连续6年超10亿t，对外依存度持续在80%左右徘徊，铁矿石供应不足已经成为制约我国经济发展的“瓶颈”[6-11]。

白云鄂博铁矿石为含氟复杂难选铁矿石，主要含氟矿物为萤石和氟碳铈矿[12]。当前现场铁精矿采用磁选工艺生产，比磁化系数很低的含氟矿物及脉石矿物大都进入磁选尾矿，影响铁矿物的回收利用率[13]。若能对此部分资源进行回收利用，对解决短缺矿产供应链“卡脖子”及优势矿产利用效率低的难题具有重要战略意义[14]。本文选取白云鄂博尾矿经预富集—氢基矿相转化—磁选工艺得到的磁选精矿作为试验原料，开展反浮选脱氟提质试验，实现铁资源的有效回收。白云鄂博尾矿含氟高、嵌布细，传统磁选难以实现铁氟高效分离，成为制约固废利用与绿色炼铁的关键瓶颈。氢基矿相转化可实现铁矿物高效还原与提质，但该体系下细粒铁矿物与萤石的界面行为、可浮性差异及脱氟调控机制尚不明确。工艺矿物学作为矿物学的一个分支学科，通过对矿石的化学成分、矿物组成等性质进行研究，揭示矿物间相互关系的内在规律，在确定选矿工艺、优化选矿流程结构、提高企业生产指标等方面发挥着重要作用[15]。因此，对其进行详细的工艺矿物学研究，对开展白云鄂博铁尾矿选矿工艺研究、提高铁资源利用率具有重要意义。

本文采用X射线衍射、化学分析[16]等技术，对白云鄂博尾矿经预富集—氢基矿相转化—磁选工艺得到的磁选精矿进行化学成分、嵌布粒度、物相组成等工艺矿物学特性分析，并对磁选精矿产品进行反浮选脱氟提质试验与产品检测分析，从矿物学本质揭示粒

度、界面性质与浮选行为的内在关联，为白云鄂博铁尾矿资源合理利用提供依据。

1 磁选精矿性质

1.1 主要化学成分分析

试验原料为白云鄂博尾矿经氢基矿相转化—磁选工艺制备的磁选精矿。对磁选精矿进行主要化学成分分析，分析结果见表1。由表1可知，磁选精矿全铁(TFe)品位为64.84%，氧化亚铁(FeO)含量为24.59%，氟(F)含量为1.11%，F为主要有害杂质；二氧化硅(SiO_2)含量为1.41%，氧化钙(CaO)、氧化镁(MgO)、三氧化二铝(Al_2O_3)含量分别为2.80%、0.43%、0.244%；有害元素硫(S)、磷(P)含量分别为0.31%、0.17%；二氧化钛(TiO_2)、锰(Mn)含量分别为0.366%、0.746%。整体属于高磁性、低硅钙、细粒含氟原料，适合深度反浮选脱氟。

表1 磁选精矿主要化学成分分析结果

Table 1 Results of main chemical composition analysis of the magnetic concentrate /%

组分	TFe	FeO	mFe	F	CaO	Mn	MgO
含量	64.84	24.59	64.18	1.11	2.80	0.746	0.43
组分	SiO_2	Al_2O_3	S	P	TiO_2	Nb_2O_5	
含量	1.41	0.244	0.31	0.17	0.366	0.063	

1.2 矿物组成分析

采用X射线衍射(XRD)对磁选精矿矿物组成进行半定量分析，分析结果见图1。由图1可知，磁选精矿主要矿物为磁铁矿和萤石，无明显赤铁矿、褐铁矿衍射峰。氢基矿相转化过程使原矿中赤铁矿、褐铁矿基本还原为磁铁矿，分选过程中大部分脉石矿物被有效脱除。

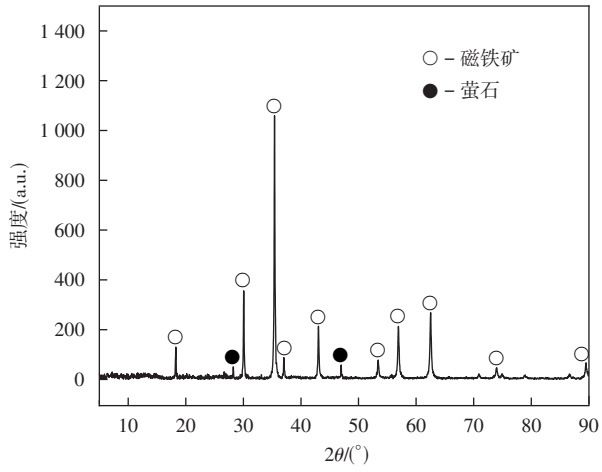


图1 磁选精矿的XRD图谱

Fig. 1 XRD pattern of the magnetic concentrate

1.3 铁、硫化学物相分析

为明确磁选精矿中铁与硫的赋存状态，分别进行铁与硫物相分析，分析结果见表2、3。由表2可知，铁物相分析结果与XRD分析一致，铁主要以磁性铁形式赋存，分布率为96.37%；少量铁以碳酸铁、赤褐铁矿、硅酸铁及硫化铁形式存在，分布率依次为2.32%、0.68%、0.37%、0.26%。由表3可知，硫主要以硫酸盐形式存在，分布率为83.87%，物料氧化程度高，浮选不易受硫干扰；其余硫以硫化物、自然硫形式赋存，分布率均为8.06%。

表2 铁化学物相分析结果

Table 2 Results of iron chemical phase analysis of the magnetic concentrate /%

铁相别	磁性铁	碳酸铁	赤褐铁矿	硫化铁	硅酸铁	合计(全铁)
含量	62.49	1.50	0.44	0.17	0.24	64.84
占有率	96.37	2.32	0.68	0.26	0.37	100.0

表3 硫化学物相分析结果

Table 3 Results of sulphur chemical phase analysis of the magnetic concentrate /%

硫相别	硫化物	硫酸盐	自然硫	合计
含量	0.02	0.26	0.02	0.31
占有率	8.06	83.88	8.06	100.0

1.4 粒度组成分析

为查明磁选精矿中各粒级矿物含量及元素分布规律，对磁选精矿进行粒度筛析，试验结果见表4。

由表4可知，磁选精矿整体粒度较细，－0.038 mm粒级产率为97.06%，对应铁分布率为97.75%，F、S分布率分别为7.78%、5.93%；－0.015 mm粒级产率为87.08%，铁品位65.53%，铁分布率87.94%，F品位1.01%、分布率75.66%，S品位0.27%、分布率86.43%。由此可见，铁、氟均高度富集于细粒级，细粒化使矿物充分单体解离，为反浮选创造条件；同时易泥化，对浮选选择性提出更高要求。

1.5 物理性质分析

对磁选精矿摩擦角、堆积角、密度等基本物理参数进行测定，每组试验平行测定3次，取平均值，测定结果见表5。由表5可知，磁选精矿摩擦角为30.33°，堆积角为31.63°，流动性适中，利于矿浆分散与药剂吸附；松散密度1 370 kg/m^3，堆密度1 830 kg/m^3，真密度4 340 kg/m^3。

2 反浮选脱氟提质试验

2.1 反浮选脱氟提质条件试验

以氢基矿相转化—磁选精矿为对象，采用包钢现

表 4　磁选精矿粒度组成分析结果

Table 4　Results of particle size composition analysis of the magnetic concentrate　/%

粒级/mm	产率	正累积产率	品位			分布率		
			TFe	F	S	TFe	F	S
+0.074	0.19	100.0	38.95	3.42	0.30	0.12	0.57	0.22
−0.074+0.045	1.27	99.81	45.04	5.45	0.33	0.88	5.97	1.55
−0.045+0.038	1.48	98.53	54.95	3.72	0.28	1.25	4.73	1.53
−0.038+0.023	5.45	97.06	63.40	1.66	0.29	5.32	7.78	5.93
−0.023+0.015	4.53	91.61	64.34	1.36	0.26	4.49	5.30	4.34
−0.015	87.08	87.08	65.53	1.01	0.27	87.94	75.65	86.43
合计	100.0		64.84	1.16	0.27	100.0	100.0	100.0

表 5　磁选精矿基本物理性质

Table 5　Fundamental physical properties of the magnetic concentrate

参数	数值
摩擦角/(°)	30.33
安息角/(°)	31.63
松散密度/(kg·m^{-3})	1 370
堆积密度/(kg·m^{-3})	1 830
真密度/(kg·m^{-3})	4 340

场药剂体系开展反浮选脱氟提质条件试验，以“抑铁浮氟”为核心思路，优化工艺流程与药剂制度，实现铁精矿提铁降氟。

2.1.1　捕收剂用量试验

固定矿浆温度 45～50 ℃，矿浆 pH=9，现场抑制剂水玻璃用量为 500 g/t，进行捕收剂用量试验，试验流程见图 2，试验结果见图 3。

由图 3 可知，捕收剂优先吸附萤石表面 Ca^{2+} 活性位点，随着捕收剂用量由 2 000 g/t 增至 4 000 g/t，氟杂质逐步脱除，铁精矿 TFe 品位由 67.11% 升至 67.91%，TFe 回收率由 84.08% 降至 81.99%，F 含量由 0.714% 降至 0.540%；当捕收剂用量超过 3 500 g/t 后铁精矿指标趋于稳定。因此，确定合适的捕收剂用量为 3 500 g/t。

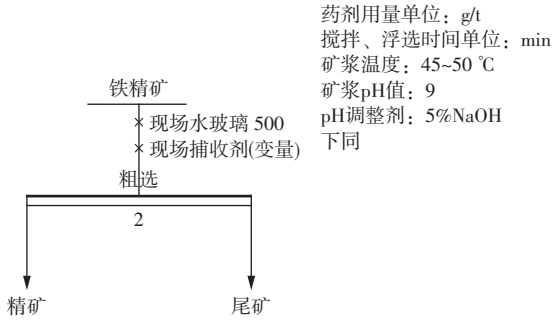


图 2　捕收剂用量试验流程

Fig. 2　Flowseheet of collector dosage tests

2.1.2　抑制剂用量试验

固定矿浆温度为 45～50 ℃，矿浆 pH=9，捕收剂用量为 3 500 g/t，采用现场水玻璃作为抑制剂，进行抑制剂用量试验，试验流程同图 2，试验结果见图 4。

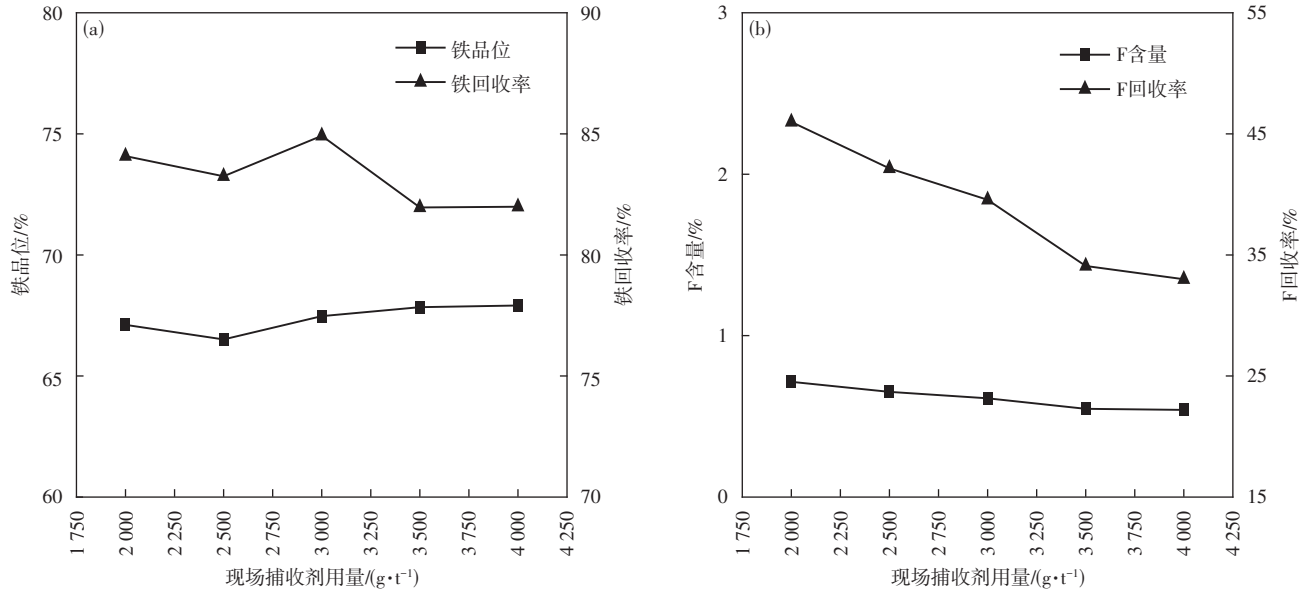


图 3　捕收剂用量试验结果

Fig. 3　Results of collector dosage tests

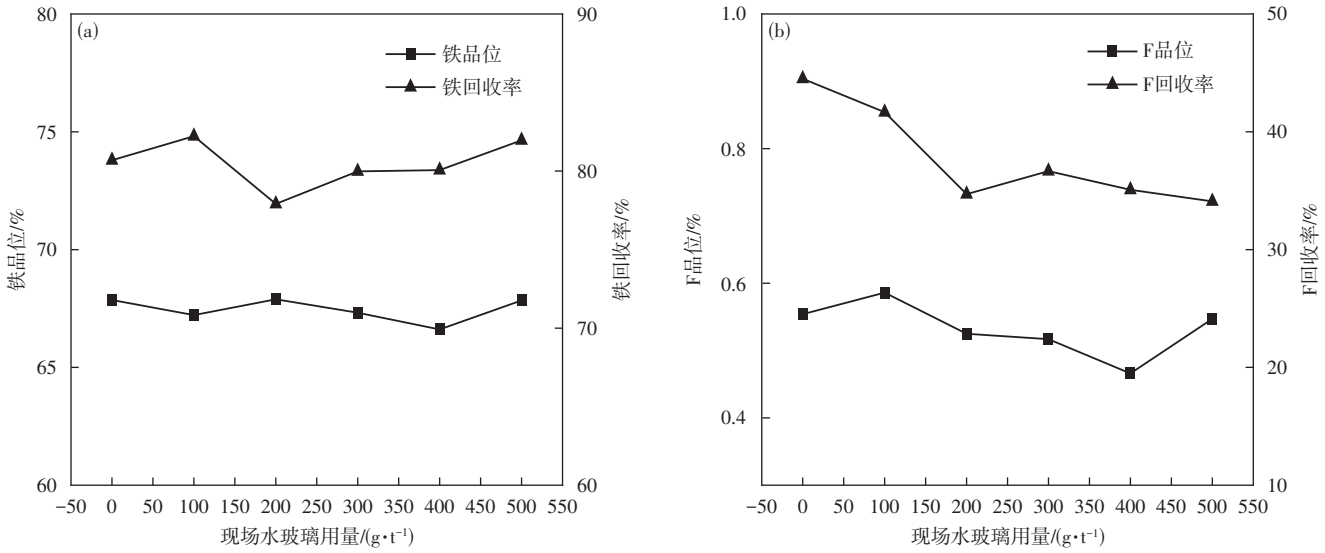


图4 抑制剂水玻璃用量试验结果

Fig. 4 Results of depressant water glass dosage tests

由图4可知，当水玻璃用量在0～500 g/t时，铁精矿TFe品位稳定在67%左右，TFe回收率保持在80%左右，F含量稳定在0.5%左右，水玻璃在磁铁矿表面形成亲水性吸附膜，实现选择性抑制。综合提质效果与药剂成本，确定水玻璃最佳用量为400 g/t。

2.1.3 矿浆温度试验

固定矿浆pH=9，捕收剂用量为3 500 g/t，抑制剂水玻璃用量为400 g/t，进行矿浆温度试验，试验流程同图2，试验结果见图5。

由图5可知，随着矿浆温度升高，铁精矿TFe品位先升后降，F含量持续降低；当矿浆温度为50 ℃时，TFe品位最高(67.50%)、F含量最低(0.54%)，TFe回收率由89.22%降至78.18%。说明适当升温提高药剂扩散速率、降低矿浆黏度、强化萤石可浮性，温度过高易造成药剂分解与铁损失。综合考虑，确定最佳矿浆温度为50 ℃。

2.1.4 矿浆pH值试验

固定矿浆温度为50 ℃，捕收剂用量为3 500 g/t，抑制剂水玻璃用量为400 g/t，设置矿浆pH值分别为8、9、10、11，进行矿浆pH试验，试验流程同图2，试验结果见图6。

由图6可知，当矿浆pH值从8升高至11，铁精矿TFe品位略有上升，从67.05%增至67.61%，但TFe由83.25%大幅降至70.62%，F含量稳定在

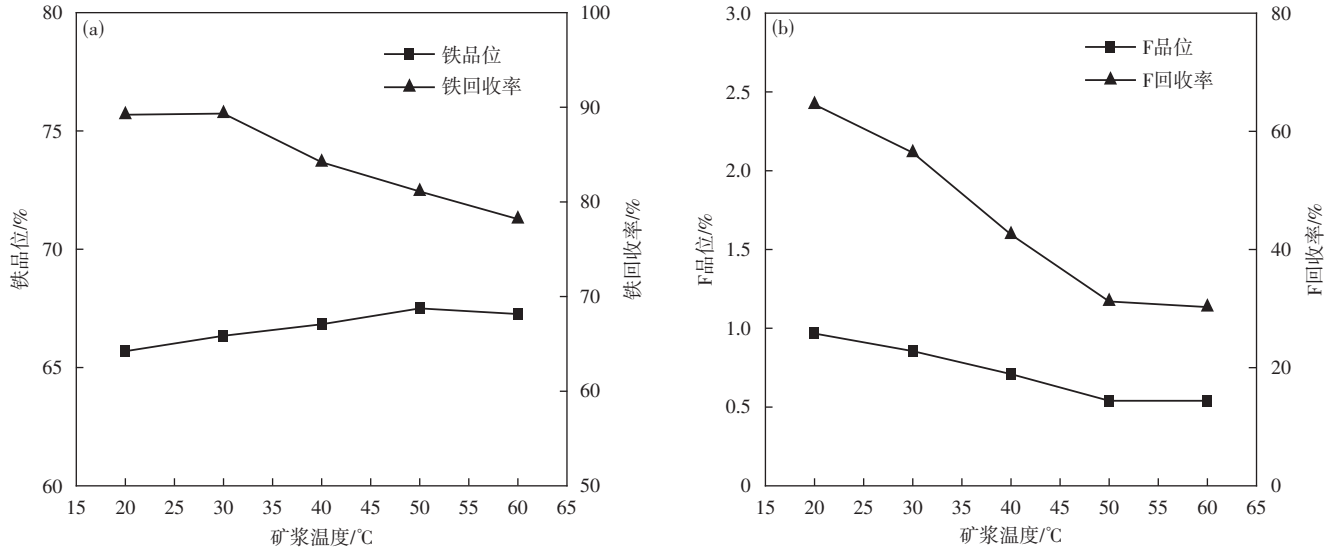


图5 矿浆温度试验结果

Fig. 5 Results of slurry temperature tests

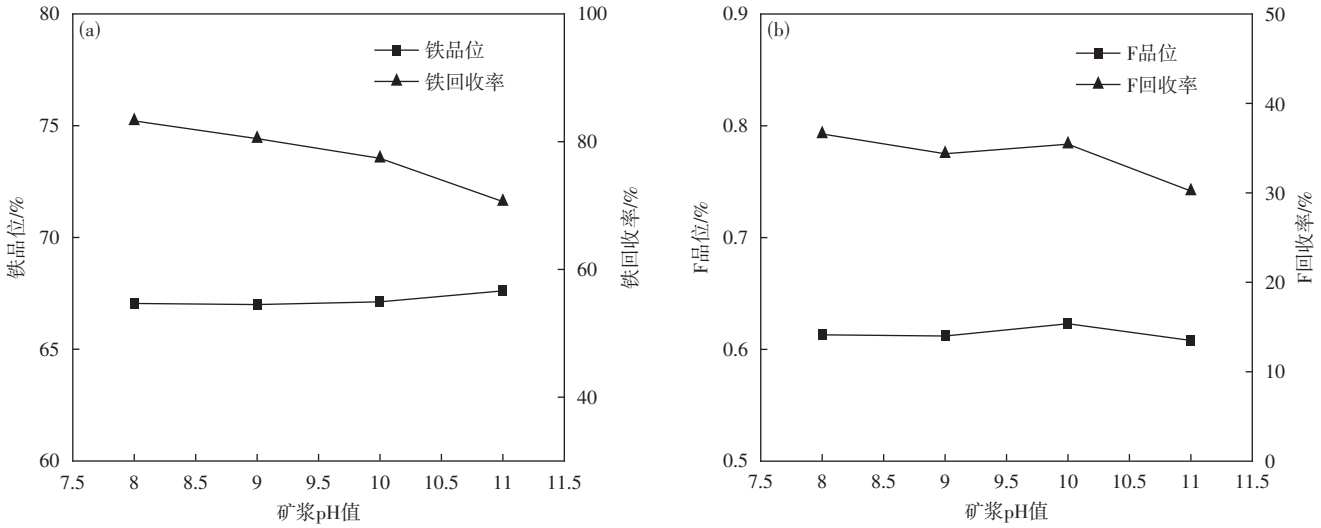


图6　矿浆pH值试验结果

Fig. 6　Results of slurry pH value tests

0.6%左右。兼顾品位与回收率，确定最佳pH值为8。

2.2　反浮选脱氟提质开路试验

在条件优化基础上，确定最优药剂制度：矿浆pH=8，矿浆温度为50 ℃，水玻璃用量400 g/t，捕收剂用量3 500 g/t。采用一粗两扫流程进行开路试验，试验流程见图7，试验结果见表6。

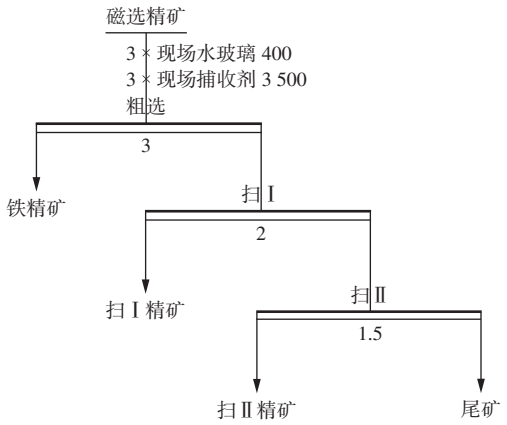


图7　反浮选脱氟提质开路试验流程

Fig. 7　Flowsheet of the open-circuit test on reverse flotation for defluorination and upgrading

由表6可知，经一粗两扫开路试验流程可获得TFe品位67.40%、TFe回收率81.97%、F含量为0.553%的铁精矿。

2.3　反浮选脱氟提质闭路试验

在条件试验和开路试验的基础上，进行了一粗二扫的浮选闭路试验，试验流程见图8，试验结果见表7。

由表7可知，在氢基转化提质、细粒高效解离、界面选择性调控协同作用下，经一粗二扫的闭路试验流程，可以获得TFe品位66.28%、TFe回收率95.55%、F含量为0.38%的优质铁精矿，实现深度脱氟与高效回收协同。

表6　反浮选脱氟提质开路试验结果

Table 6　Results of the open-circuit test on reverse flotation for defluorination and upgrading　/%

产品名称	产率	品位		回收率	
		TFe	F	TFe	F
精矿	79.02	67.40	0.553	81.97	33.26
扫Ⅰ精矿	12.77	63.37	1.42	12.46	13.80
扫Ⅱ精矿	3.66	53.80	4.10	3.03	11.42
尾矿	4.55	36.38	12.00	2.55	41.52
磁选精矿	100.0	64.98	1.31	100.0	100.0

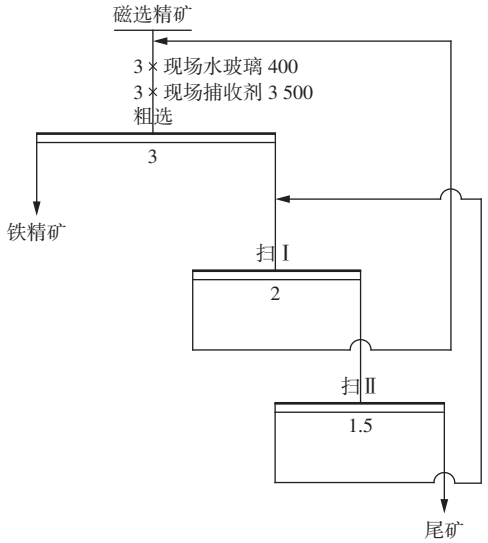


图8　反浮选脱氟提质闭路试验流程

Fig. 8　Flowsheet of the locked-cycle test on reverse flotation for defluorination and upgrading

表7 反浮选脱氟提质闭路试验结果

Table 7 Results of the locked-cycle test on reverse flotation for defluorination and upgrading /%

产品名称	产率	品位		回收率	
		TFe	F	TFe	F
铁精矿	92.52	66.28	0.38	95.55	37.35
尾矿	7.48	38.18	9.92	4.45	62.65
磁选精矿	100.0	64.18	1.18	100.0	100.0

2.4 产品检查和分析

2.4.1 铁精矿主要化学成分分析

对闭路试验产品铁精矿进行了主要化学成分分析,分析结果见表8。由表8可知,铁精矿TFe品位为66.28%,FeO含量24.59%;主要杂质组分CaO、SiO_2、MgO、Al_2O_3含量分别为1.51%、1.48%、0.38%和0.241%;有害元素P、S含量分别为0.118%、0.27%,杂质含量显著降低。

表8 铁精矿主要化学成分分析结果

Table 8 Results of main chemical composition analysis of the iron concentrate /%

组分	TFe	FeO	CaO	MgO	SiO_2	S
含量	66.28	24.59	1.51	0.38	1.48	0.27
组分	Al_2O_3	F	P	MetFe	mFe	
含量	0.241	0.38	0.118	0.05	66.10	

2.4.2 铁精矿矿物组成分析

采用XRD分析铁精矿矿物组成,分析结果见图9。由图9可知,铁精矿仅出现磁铁矿特征衍射峰,萤石峰基本消失,表明产品纯度高,含氟等杂质矿物已被有效脱除。

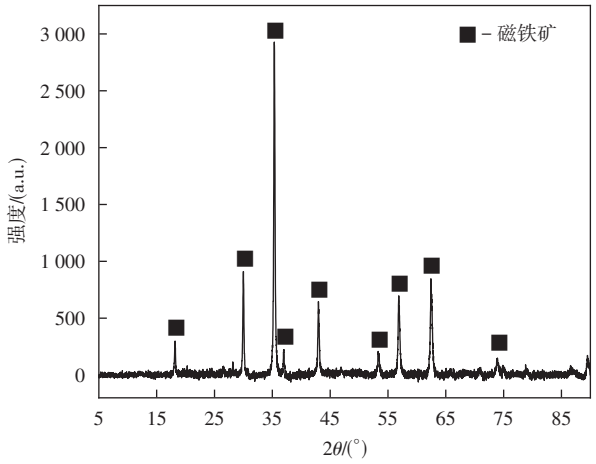


图9 铁精矿的XRD图谱

Fig. 9 XRD pattern of the iron concentrate

2.4.3 浮选尾矿主要化学成分分析

对闭路试验产品浮选尾矿进行了主要化学成分分析,分析结果见表9。由表9可知,浮选尾矿TFe品位为38.18%,FeO品位为17.25%,F含量高达9.92%;主要杂质CaO、SiO_2、MgO、Al_2O_3含量分别为21.73%、12.51%、1.31%、0.345%;有害元素P、S含量分别为1.03%、0.342%。由此可见,氟与钙质脉石高效进入尾矿,铁矿物损失少,分离效果优异。

表9 浮选尾矿主要化学成分分析结果

Table 9 Results of main chemical composition analysis of the flotation tailings /%

组分	TFe	FeO	CaO	SiO_2	S
含量	38.18	17.25	21.73	2.51	0.342
组分	Al_2O_3	F	P	mFe	
含量	0.345	9.92	1.03	36.70	

2.4.4 浮选尾矿矿物组成分析

对浮选尾矿进行XRD分析,分析结果见图10。由图10可知,浮选尾矿中主要矿物为磁铁矿和萤石,同时含有霓石、铁白云石等脉石矿物。

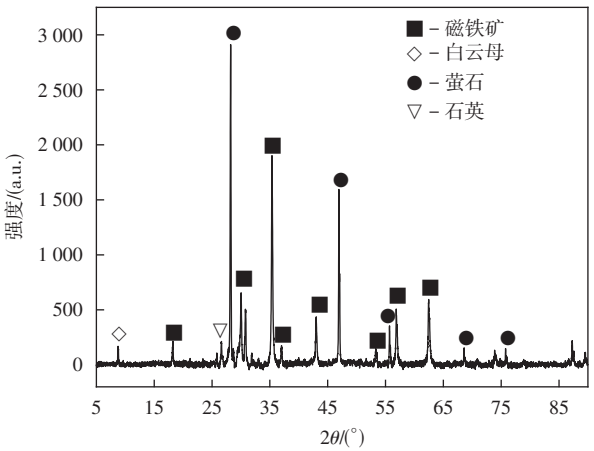


图10 浮选尾矿的XRD图谱

Fig. 10 XRD pattern of the flotation tailings

3 结论

1)磁选精矿TFe品位为64.84%,FeO品位为24.59%,F含量为1.11%,主要矿物为磁铁矿和萤石;铁主要以磁性铁形式赋存,分布率96.37%,矿物高度富集于-0.015 mm细粒级,单体解离充分,为反浮选脱氟提供优异矿物学基础。

2)反浮选脱氟最优工艺条件为:矿浆pH=8、矿浆温度50 ℃、水玻璃用量400 g/t、捕收剂用量为

3 500 g/t；经一粗两扫闭路试验流程，可获得TFe品位66.28%、TFe回收率95.55%、F含量为0.48%的高品质铁精矿，实现提铁、脱氟、高回收三者协同。

3)脱氟机理为：氢基定向还原＋细粒高效解离＋抑铁浮氟界面调控，实现铁矿物与含氟脉石高效分离。

4)形成氢基转化—磁选—反浮选集成工艺，为白云鄂博高氟尾矿资源化、减量化、绿色化利用提供理论与技术支撑。

参考文献

[1] 马宏伟，孙永升，祝昕冉，等. 白云鄂博多金属矿含铁矿物嵌布特性研究[J]. 有色金属(选矿部分)，2024(5)：46-54.
Ma Hongwei，Sun Yongsheng，Zhu Xinran，et al. Study on dissemination characteristics of Fe-bearing minerals in Bayan Obo polymetallic ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)，2024(5)：46-54.

[2] 贾文浩，周瑜林，卢宇熙，等. 微细粒铁矿选矿技术进展[J]. 有色金属(选矿部分)，2025(9)：55-66.
Jia Wenhao，Zhou Yulin，Lu Yuxi，et al. Progress in processing technologies for ultrafine iron ores[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)，2025(9)：55-66.

[3] 韩跃新，张强，孙永升，等. 难选铁矿石矿相转化清洁高效利用技术新进展[J]. 钢铁研究学报，2022，34(12)：1303-1313.
Han Yuexin，Zhang Qiang，Sun Yongsheng，et al. Progress in phase transformation technology for clean and efficient utilization of refractory iron ore[J]. Journal of Iron and Steel Research，2022，34(12)：1303-1313.

[4] 刘梦飞，刘育明. “基石计划”对我国铁矿石资源开发格局的影响分析[J]. 中国矿山工程，2022，51(5)：6-10.
Liu Mengfei，Liu Yuming. Effect analysis of “foundation plan” on China′s iron ore resources development pattern[J]. China Mine Engineering，2022，51(5)：6-10.

[5] 郭春雷，周志广. 白云鄂博西矿白云石型低品位铁矿石利用研究[J]. 有色金属(选矿部分)，2022(2)：39-44.
Guo Chunlei，Zhou Zhiguang. Study on the utilization of dolomite-type low-grade iron ore in Bayan Obo west mine[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)，2022(2)：39-44.

[6] 韩跃新，孙永升，李艳军，等. 我国铁矿选矿技术最新进展[J]. 金属矿山，2015，44(2)：1-11.
Han Yuexin，Sun Yongsheng，Li Yanjun，et al. New development on mineral processing technology of iron ore resources in China[J]. Metal Mine，2015，44(2)：1-11.

[7] Huang Jianbai，Liu Jia，Zhang Hongwei，et al. Sustainable risk analysis of China′s overseas investment in iron ore[J]. Resources Policy，2020，68：101771. DOI：10.1016/j.resourpol.2020.101771.

[8] 宋仁峰，李维兵，刘华艳. 我国铁矿石选矿技术发展特点及展望[J]. 金属矿山，2009，38(1)：1-8，29.
Song Renfeng，Li Weibing，Liu Huayan. Development features and prospects of China′s iron mineral processing[J]. Metal Mine，2009，38(1)：1-8，29.

[9] Wu Jinxiong，Yang Jia，Ma Linwei，et al. A system analysis of the development strategy of iron ore in China[J]. Resources Policy，2016，48：32-40.

[10] 余永富. 从炼铁工业发展现状讨论我国铁矿石选矿值得注意的若干问题[J]. 国外金属矿山，2001(5)：40-44.
Yu Yongfu. Discussion on some noteworthy problems of China′s iron ore separation in view of the status of iron making industriy[J]. Foreign Metal Mining Magazine，2001(5)：40-44.

[11] 余永富，张汉泉. 我国钢铁发展对铁矿石选矿科技发展的影响[J]. 武汉理工大学学报，2007，29(1)：1-7.
Yu Yongfu，Zhang Hanquan. Influence of domestic iron and steel development on iron ore processing technology[J]. Journal of Wuhan University of Technology，2007，29(1)：1-7.

[12] 沈茂森. 关于白云鄂博矿床资源综合利用的探讨[J]. 包钢科技，2024，50(4)：1-6.
Shen Maosen. Discussions on comprehensive utilizations of resources in Bayan Obo ore deposit[J]. Science & Technology of Baotou Steel(Group)Corporation，2024，50(4)：1-6.

[13] 康德伟，李解，李保卫，等. 白云鄂博磁选铁精矿提铁降氟试验[J]. 金属矿山，2017，46(9)：78-81.
Kang Dewei，Li Jie，Li Baowei，et al. Tests on iron improvement and fluoride removal in flotation of magnetic iron concentrate in Bayan Obo[J]. Metal Mine，2017，46(9)：78-81.

[14] 卜俊芬，湛留意，张凌燕. 难选细粒赤(褐)铁矿选矿试验研究[J]. 矿产综合利用，2012，33(3)：14-17.
Bu Junfen，Zhan Liuyi，Zhang Lingyan. Experiment research on beneficiation of a refractory fine-grained hematite-limonite[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources，2012，33(3)：14-17.

[15] 韩明. 工艺矿物学在矿物加工中的应用分析[J]. 世界有色金属，2018(13)：242-243.
Han Ming. Analysis of application of technological mineralogy in mineral processing[J]. World Nonferrous

Metals, 2018(13): 242-243.
[16] 房启家, 张强, 孙永峰. 山东某铁矿石工艺矿物学研究[J]. 金属矿山, 2022, 51(4): 131-137.
Fang Qijia, Zhang Qiang, Sun Yongfeng. Process mineralogy study of an iron ore in Shandong[J]. Metal Mine, 2022, 51(4): 131-137.

(本文编辑 刘水红)

【缅怀寄语】

白云鄂博, 这座举世闻名的宝山, 承载着孙传尧院士毕生的牵挂与深情。孙院士研究生阶段便以包头铁矿为研究对象, 自此与这座矿山结下不解之缘, 终其一生持续关注白云鄂博矿产资源的综合开发利用。在包钢白云鄂博资源综合利用技术研讨会上, 他明确指出该矿床具备广阔的资源综合利用前景, 应当坚持“综合资源有效利用”, 充分挖掘铌、钪、稀土为核心的新材料领域发展潜力, 这番远见卓识, 是其治学精神与战略眼光的生动体现。

孙院士开创性提出“基因选矿”“和谐选矿”学术理念, 在矿物浮选晶体化学、选矿过程智能优化等领域取得丰硕研究成果, 始终认为矿产资源开发利用事关国家资源安全与产业发展命脉。他曾提出, 包钢尾矿中赋存铁、稀土等多种有价组分, 是尚未得到充分利用、放错位置的宝贵资源。本文围绕包钢尾矿氢基矿相转化铁精矿开展工艺矿物学研究与反浮选脱氟提质探索, 正是沿着孙院士指引的研究方向继续前行: 将“沉睡”的尾矿资源化利用、变废为宝。氢基矿相转化、反浮选脱氟等系列技术攻关, 处处体现“基因选矿”的核心思想, 即立足矿物自身本质属性, 实现精准识别、定向调控与高效分离。

斯人已逝, 风范长存。孙院士以毕生科研实践践行了“吹尽狂沙, 点石成金”的科研追求。谨以此文缅怀孙传尧院士, 既是对其学术思想的传承, 亦是对其未竟事业的接续作答——白云鄂博这座宝山, 我们必将守护好、开发好、利用好。

——高 鹏