

高钛铁精矿反浮选降钛中试试验研究

张鹏羽¹, 柴壮志², 乐文毅¹, 李坛云², 赵 强¹, 刘玉龙², 杨 卓¹

(1. 中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南 长沙 410205; 2. 北票合兴实业有限公司, 辽宁 朝阳 122103)

摘要: 铁精矿中钛杂质含量高会严重影响其经济价值, 因此对铁精矿提品降钛具有重要意义。本文以某选厂的高钛铁精矿为研究对象, 开展矿石性质分析与浮选降钛中试试验研究。结果表明: 高钛铁精矿中金属矿物的质量分数为 97.77%, 主要包含质量分数为 87.88% 的(钛)磁铁矿、质量分数为 9.62% 的钛铁矿; 脉石矿物质量分数约为 2%, 主要为透闪石、石英、长石、黑云母、斜帘石、石榴石等; 钛元素在钛铁矿中的分布率为 95.91%, 在含钛磁铁矿中的分布率为 2.63%, 该矿石具有实际分选的可能性。通过中试试验模拟连续生产条件下铁精粉的降钛分选指标, 试验期间铁精粉的 TFe 质量分数 $\geq 65.0\%$ 、 TiO_2 质量分数为 4.80%~5.30%, 采用浮选机组“一粗三扫”反浮选工艺, 以 CT09 为抑制剂、CT06 为捕收剂, 可分离出产率约为 75%、 $w(\text{TFe}) \geq 67.5\%$ 、 $w(\text{TiO}_2)$ 为 1.5%~1.9% 的低钛铁精粉; 现有 TiO_2 质量分数为 5% 的铁精粉反浮选降钛下限为 1.3% 左右, 获得的低钛铁精粉产率约为 65%、 $w(\text{TFe})$ 约为 68%, 低钛铁精粉销售品级可提高一个等级。本文试验结论可为该类型铁精粉降钛分选提供技术依据。

关键词: 高钛铁精矿; 反浮选降钛; 中试试验

中图分类号: TD923

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)04-0131-10

doi:10.13403/j.sjqt.2025.04.067

Pilot test on titanium reduction by reverse flotation of high titanium iron concentrate

ZHANG Pengyu¹, CHAI Zhuangzhi², YUE Wenyi¹, LI Tanyun², ZHAO Qiang¹,
LIU Yulong², YANG Zhuo¹

(1. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410025, Hunan, China;

2. Beipiao Hexing Industrial Co., Ltd., Chaoyang 122103, Liaoning, China)

Abstract: The high content of titanium impurities in iron concentrate will seriously affect its economic value, so it is of great significance for iron concentrate to improve and reduce titanium. In this paper, the high titanium iron concentrate of a concentrator plant is used as the research object to carry out ore property analysis and pilot test of titanium reduction by flotation. The results show that the mass fraction of metal minerals in high titanium iron concentrate is 97.77%, mainly including (titanium) magnetite with a mass fraction of 87.88% and ilmenite with a mass fraction of 9.62%. The mineral content of gangue is about 2%, mainly tremolite, quartz, feldspar, biotite, epidote, garnet, etc.; The distribution rate of titanium elements in ilmenite is 95.91% and 2.63% in titanium-bearing magnetite, and the ore has the possibility of actual sorting. The titanium reduction sorting index of iron concentrate under continuous production conditions is simulated by pilot tests, the TFe mass fraction of iron concentrate is $\geq 65.0\%$ and the TiO_2 mass fraction is 4.80%~5.30% during the test; Using the “one coarse and three sweeps” reverse flotation process of the flotation unit, with CT09 as the inhibitor and CT06 as the collector, the yield of $w(\text{TFe}) \geq 67.5\%$, and $w(\text{TiO}_2)$ of 1.5%~1.9% can be separated. The lower limit

收稿日期: 2024-12-13; 修回日期: 2025-02-01

基金项目: 湖南省科技创新计划资助项目(2022RC1049)

作者简介: 张鹏羽(1990—), 男, 高级工程师, 从事选矿工艺等方面的研究。

of titanium reduction of iron concentrate with a mass fraction of 5% is about 1.3%, the yield of low-titanium ferroconcentrate obtained is about 65%, and the $w(\text{TFe})$ is about 68%, and the sales grade of low-titanium ferroconcentrate can be increased by one level. The experimental conclusions can provide a technical basis for the separation of this type of iron concentrate and titanium reduction.

Key words: high titanium iron concentrate; titanium reduction by reverse flotation; pilot test

钢铁工业是国民经济发展的基础性产业, 所需的主要原材料为铁矿^[1-2]。我国铁矿资源储量居世界第三位, 但大部分资源的含铁品位较低、杂质含量高、嵌布粒度细^[3]。另外, 经工业选矿富集后获得的高品位铁精矿往往含有较多杂质, 严重影响其销售及经济效益^[4-5]。特别地, 铁精矿中的钛杂质会影响烧结矿的品质和钢铁产品质量^[6-7]。高端钢材产品的生产对铁精粉品质的要求越来越高, 其中, 铁精矿中钛杂质含量的控制极为关键^[8]。

围绕铁精矿降钛问题, 国内开展了部分试验研究^[9]。铁精粉降钛的方法主要包括强磁选法、重选法、电选法及浮选法等多种技术路线, 粗粒级的钛铁矿回收主要采用重选、磁选和电选等, 微细粒钛铁矿的富集回收一般采用浮选法^[10-11]。在多种降钛方法中, 反浮选法因其分选选择性强、药剂体系日趋成熟、可与磁选联用形成稳定流程, 成为当前铁精粉降钛最为主流和成熟的技术^[12]。张云等^[13]针对北方某选厂铁精矿, 采用细磨后弱磁+“一粗一扫”反浮联合流程, 在最佳条件下可以获得最终铁精矿 TFe 质量分数为 69.57%、回收率为 89.49%、TiO₂ 质量分数从 4.18% 降低至 1.48% 的分选指标。郭文达等^[14]采用超细磨—弱磁选工艺流程, 将铁精矿中 TiO₂ 质量分数降低了 1.04 个百分点。李硕等^[15]选用电磁湿法鼓式磁选机设备, 采用预先分级—粗粒再磨磁选—细粒直接磁选工艺流程, 将攀西某钒钛铁精矿的 TFe、TiO₂ 质量分数分别提升了 3.36、3.44 个百分点。虞力等^[16]利用高剪切调浆方法强化矿浆中矿物分散行为, 通过调控 pH 和添加剂浓度, 在浮选 pH 值为 6~7 时获得最佳 TiO₂ 剔除率, 使得精矿中 TiO₂ 质量分数从常规的 39.97% 提升至 43.79%。黄浩等^[17]对山东某赤泥磁选铁精矿进行了反浮选脱钛研究, 在最优浮选药剂制度下, 得到的铁精矿中 TiO₂ 质量分数由 6.90% 降低至 2.73%。杨卓

等^[18]针对东北某选厂的钛铁精矿, 采用“一粗两扫两精”的闭路浮选工艺, 最终可以获得产率为 72.79%、TFe 质量分数为 68.98%、TiO₂ 质量分数为 1.54% 的铁精矿, TiO₂ 质量分数降低约 3.42 个百分点。武春涛等^[19]针对承德某含铁 69%、含钛 8% 的铁精矿, 通过对比重选、磨矿—磁选、磨矿—淘洗等试验, 最终发现淘洗机作为铁精矿再选设备的提质效果较好, 可以获得铁质量分数为 63.16%、钛质量分数为 6.50% 的精矿指标。综上, 在常规选矿工艺的基础上, 研究铁精矿提品降钛问题, 能够有效实现资源综合利用的目的。

本文基于某高钛铁精矿的矿石性质特点和前期铁精矿降钛实验室研究结果, 进行高钛铁精矿反浮选降钛中试试验。中试试验平台采用自主设计制造的可移动式连续选矿集装箱系列(处理量为 1~2 t/d), 试验采用“一粗三扫”反浮选、中矿合并处理的工艺流程, 模拟并验证连续生产条件下的铁精粉降钛分选指标, 以期获取 TiO₂ 质量分数小于 2.0% 的铁精矿, 为该资源的高效利用提供技术依据。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验样品为辽宁某选矿厂生产的高钛磁铁矿精矿, 试验期间铁精粉的 TFe 质量分数 $\geq 65.0\%$ 、TiO₂ 质量分数在 4.80%~5.30% 范围。试样的化学成分全分析结果如表 1 所示。金属粒度分布分析结果如表 2 所示。由表 1 可知: 该试样的主要元素为 Fe、Ti 和 O, 其他元素含量较低; 钛作为铁精矿中的主要有害杂质元素, 应重点关注。由表 2 可知, 铁精矿样品的粒度较小, $\leq 38 \mu\text{m}$ 粒级占比为 85.99%, 该粒级 TiO₂ 质量分数为 4.60%、TiO₂ 金属分布率为 79.77%; $> 38 \mu\text{m}$ 粒级占比为 14.01%, 该粒级 TiO₂ 质量分数略高为 7.16%、TiO₂ 金属分布率为 20.23%。

表1 试样的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of the sample

TFe	Ti	O	Si	Al	Mg	Ca	V	Mn	K	S	Ni	P	Cr
65.75	4.96	39	3.19	1.896	0.876	0.208	0.151	0.057	0.046	0.034	0.022	0.019	0.005 9

表2 试样金属粒度分布

Table 2 Metal particle size distribution of the sample

粒级/ μm	产率(质量 分数)/%	TFe (质量分数)/%		TiO ₂ (质量分数)/%	
		品位	分布率	品位	分布率
>45	4.90	55.48	4.14	7.33	7.25
(38,45]	9.11	63.50	8.79	7.07	12.98
≤38	85.99	66.57	87.07	4.60	79.77
合计	100.00	65.75	100.00	4.96	100.00

注:合计品位为各粒级产品的品位和产率的加权值。

高钛铁精矿中主要矿物成分分析结果如表3所示。Ti元素在矿物中的分配规律如表4所示。由表2、3可知:样品中金属矿物的质量分数为97.77%,其中(钛)磁铁矿质量分数为87.88%,钛铁矿质量分数为9.62%;脉石矿物约为2%,透闪石、石英、长石、黑云母相对稍多,斜帘石、石榴石、白云母、高岭土较少。样品中钛及含钛金属矿物的质量分数为12.32%,包括钛铁矿、含钛磁铁矿;钛硅酸盐及氧化物(楣石)、黑云母、金红石质量分数为0.57%。钛元素在钛铁矿中分布率为95.91%,在含钛磁铁矿中分布率为2.63%。

1.2 试验方法

中试试验平台采用自主设计制造的可移动式连续选矿集装箱系列(处理量为1~2 t/d)。整套系统可运输至生产现场快捷、高效地开展试验,有效串联小型试验与工业生产,避免因矿石性质、气候、水质变化等带来的不利影响。设备布局合理、落差科学,装备有独立的通风系统、水路系统和电路系统,综合考虑了选矿试验的特殊性和工艺的兼容性。试验使用3#浮选集装箱,该集装

表3 样品主要成分的定量统计结果(质量分数)

Table 3 Quantitative statistical results of the main components of the sample

金属矿物				脉石矿物					副矿物					
黄铁矿	钛铁矿	磁铁矿	含钛磁铁矿	透闪石	长石	石英	黑云母	斜帘石	石榴石	白云母	高岭土	楣石	磷灰石	金红石
0.27	9.62	85.18	2.70	0.68	0.37	0.41	0.48	0.15	0.01	0.01	0.01	0.05	0.02	0.04

箱包含14台机械搅拌式浮选机,配备有搅拌桶、砂浆泵等辅助设备。主要试验设备信息:FX2-12L机械搅拌式浮选机(吉林某机械厂)、FX2-7L机械搅拌式浮选机(吉林某机械厂)、FX2-3L机械搅拌式浮选机(吉林某机械厂)、XBSL型∅25立式砂泵(武汉某公司)和XDT-30L搅拌桶(武汉某公司)。3#集装箱三维结构如图1所示。

根据高钛铁精粉性质分析结果,试样中钛元素主要以钛铁矿的矿物形式存在。从生产结果来看,铁精矿中钛含量高,磁选方法无法实现降钛目的。前期试验研究表明,钛铁矿与铁矿物的磁性差异较小,但两者的表面润湿性和化学活性差异显著,同时,浮选对细粒级矿物的分选效果优于磁选,尤其适合钛铁矿常以微细粒嵌布于铁矿物中的情况,可避免因粒度差异导致的磁选钛损失。因此,采用浮选方法降钛具有可行性。

考虑在生产现场开展中试规模试验研究,考察浮选药剂用量、流程结构和工作参数对铁精矿降钛的影响,模拟并验证连续生产条件下铁精粉的降钛分选效果。

2 试验结果与讨论

2.1 反浮选工艺流程结构试验

中试试验采用“粗选+扫选”反浮选工艺流程,收集各级浮选溢流泡沫产品作为高钛铁粉,收集扫选作业的底流产品作为低钛铁精粉。试验以自主研发的CT06为捕收剂、CT09为抑制剂,考查扫选次数对铁精粉反浮选降钛分选效果的影响。试验流程如图2所示,分选试验结果如表5所示。

表 4 钛元素在矿物中的分布估算结果(质量分数)

Table 4 Estimation results of titanium distribution in minerals

矿物名称	相对含量	Ti 元素含量	金属量	分布率
钛铁矿	9.62	31.14	2.995 7	95.91
含钛磁铁矿	2.70	3.04	0.082 1	2.63
榍石	0.05	24.01	0.012 0	0.38
金红石	0.04	68.00	0.027 2	0.87
黑云母	0.48	1.37	0.006 6	0.21
合计	12.89	—	3.123 6	100.00

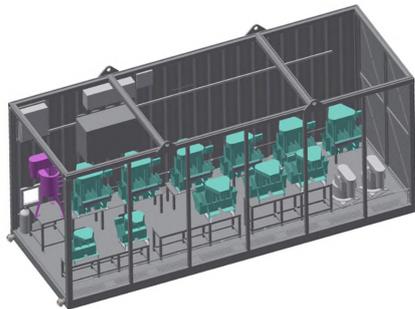


图 1 3#浮选集装箱三维结构

Fig. 1 Three dimensional structure of 3# flotation container

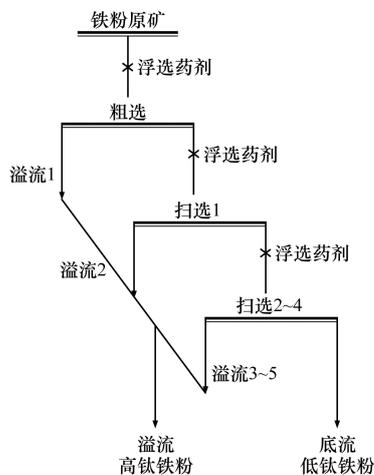


图 2 铁精粉降钛反浮选扫选次数试验流程

Fig. 2 Test process of titanium reduction reverse flotation scavenging times of iron concentrate powder

由表 5 可以看出, 中试试验最初采用“一粗四扫”反浮选工艺流程, 铁精粉中 TiO₂ 质量分数由 4.70% 降低至 2.55%, 低钛铁粉(浮选底流)产率为 84.92%, 反浮选降钛效果较差。分析试验现象发现, 试验过程中浮选药剂添加顺序和加药点不合适, 第一台浮选机组泡沫层很薄, 浮选溢流量

整体偏少, 影响了反浮选降钛试验效果。因此, 对中试试验线设备配置作出调整, 使第一台浮选机组不产生溢流, 仅发挥搅拌调浆作用。当中试试验线调整为“一粗二扫”反浮选工艺流程时, 铁精粉中 TiO₂ 质量分数降低至 2% 以内, 获得的低钛铁粉 TiO₂ 质量分数为 1.83%, 但产率较低, 仅为 63.27%, TFe 回收率也仅为 62.17%, TFe 损失较大, 主要原因是中试试验线调试时浮选液位控制得比较高, 浮选带浆刮泡, 泡沫溢流产率增大。当中试试验线调整为“一粗三扫”反浮选工艺流程并稳定控制液位时, 两组取样结果中铁精粉 TiO₂ 质量分数由 4.86% 分别降低至 1.74% 和 1.46%, 两组试验的铁精粉(浮选底流)产率分别为 72.36% 和 69.62%, TFe 回收率分别为 74.88% 和 71.11%, 反浮选降钛效果较理想, 后续试验采用“一粗三扫”反浮选工艺流程进行铁精粉降钛研究。

2.2 活化剂 + 捕收剂组合药剂条件试验

在确定了“一粗三扫”反浮选工艺流程基础上, 开展活化剂和捕收剂 CT06 组合用药条件试验。活化剂和捕收剂药剂用量配比控制为 1:2, 粗选时活化剂用量为 100 ~ 300 g/t、捕收剂 CT06 用量为 200 ~ 600 g/t, 扫选 1、2 的捕收剂加药量分别为粗选用量的 1/2 和 1/4, 扫选 3 不添加任何药剂。试验流程如图 3 所示, 分选试验结果如表 6 所示。

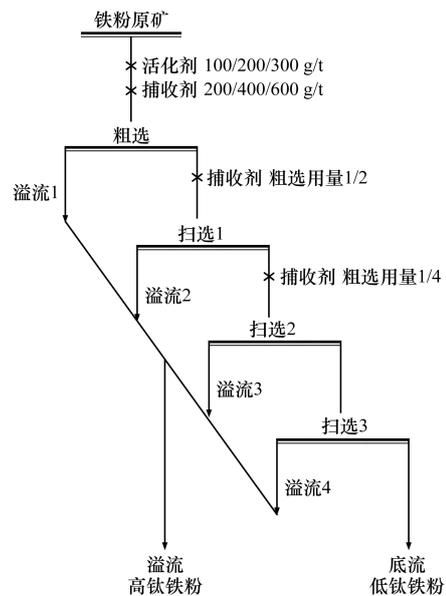


图 3 活化剂和捕收剂药剂用量条件试验工艺流程

Fig. 3 Test process flow of activator and collector dosage conditions

表5 铁精粉降钛反浮选扫选次数试验结果(质量分数)

Table 5 Test results of titanium reduction reverse flotation scavenging times of iron concentrate powder %

工艺方案	样品名称	产率 (以 TiO ₂ 计算)	TFe		TiO ₂	
			品位	回收率	品位	回收率
“一粗四扫”	铁粉原矿	100.00	65.44	100.50	4.70	100.00
	高钛铁粉	15.08	55.79	12.85	16.81	53.92
	低钛铁粉	84.92	67.54	87.65	2.55	46.08
	1#溢流	—	53.16	—	19.55	—
	2#溢流	—	50.52	—	20.65	—
	3#溢流	—	54.38	—	20.56	—
	4#溢流	—	58.77	—	12.79	—
	5#溢流	—	59.65	—	11.51	—
“一粗二扫”	铁粉原矿	100.00	65.17	95.49	4.86	100.00
	高钛铁粉	36.73	59.12	33.32	10.08	76.18
	低钛铁粉	63.27	64.03	62.17	1.83	23.82
	1#溢流	—	64.30	—	10.36	—
	2#溢流	—	57.37	—	17.24	—
	3#溢流	—	60.53	—	6.97	—
“一粗三扫” (I)	铁粉原矿	100.00	65.43	99.71	4.86	100.00
	高钛铁粉	27.64	58.78	24.83	13.03	74.09
	低钛铁粉	72.36	67.70	74.88	1.74	25.91
	1#溢流	—	54.58	—	16.60	—
	2#溢流	—	58.78	—	13.94	—
	3#溢流	—	61.93	—	8.89	—
	4#溢流	—	62.63	—	7.24	—
“一粗三扫” (II)	铁粉原矿	100.00	65.25	98.72	4.86	100.00
	高钛铁粉	30.38	59.30	27.61	12.65	79.09
	低钛铁粉	69.62	66.65	71.11	1.46	20.91
	1#溢流	—	53.18	—	19.16	—
	2#溢流	—	57.03	—	14.58	—
	3#溢流	—	60.70	—	9.26	—
	4#溢流	—	64.38	—	5.41	—

由表6可以看出,中试试验线采用“一粗三扫”反浮选工艺流程,随着活化剂和捕收剂CT06用量的增加,铁精粉中TiO₂含量逐渐降低。当活化剂用量为100 g/t和捕收剂用量为200 g/t时,泡沫产品(浮选溢流)产率为19.90%,铁精粉中TiO₂质量分数仅由4.85%降低至2.10%,说明此药剂用量条件下对钛铁矿的捕收能力不足,铁精粉反浮选降钛没有达到目标效果。当捕收剂用量为400 g/t时,可获得铁精粉中TiO₂质量分数小于2%的分选指标,且低钛铁精粉(浮选底流)产

率大于70%。当捕收剂用量为600 g/t时,铁精粉中TiO₂质量分数甚至降低至1.46%,低钛铁精粉(浮选底流)产率为69.62%、TFe质量分数和回收率分别为66.65%和71.11%。因此可以看出,反浮选降钛工艺在捕收剂用量为400 g/t以上时能够获得钛含量合格的铁精粉。

2.3 抑制剂CT09用量条件试验

活化剂和捕收剂用量试验虽然能获得铁精粉TiO₂质量分数小于2%的分选结果,但存在低钛铁精粉(浮选底流)产率和TFe回收率偏低的情况。

表 6 铁精粉降钛活化剂和捕收剂药剂用量条件试验结果

Table 6 Test results of dosage conditions of titanium-reducing activator and collector for iron concentrate powder

试验条件/(g·t ⁻¹)		样品名称	产率(以 TiO ₂ 计算)/%	TFe(质量分数)/%		TiO ₂ (质量分数)/%	
活化剂用量	捕收剂用量			品位	回收率	品位	回收率
100	200	铁粉原矿	100.00	65.08	100.13	4.85	100.00
		高钛铁粉	19.90	54.93	16.80	15.92	65.32
		低钛铁粉	80.10	67.7	83.33	2.10	34.68
		1#溢流	—	52.31	—	15.83	—
		2#溢流	—	55.02	—	17.21	—
		3#溢流	—	56.59	—	15.19	—
		4#溢流	—	53.27	—	17.80	—
		200	400	铁粉原矿	100.00	65.08	99.25
高钛铁粉	28.69			57.73	25.45	12.93	74.93
低钛铁粉	71.31			67.35	73.80	1.74	25.07
1#溢流	—			52.13	—	16.69	—
2#溢流	—			58.25	—	14.76	—
3#溢流	—			62.45	—	8.25	—
4#溢流	—			63.50	—	5.22	—
150	400			铁粉原矿	100.00	65.25	98.05
		高钛铁粉	29.99	55.28	25.41	11.9	73.58
		低钛铁粉	70.01	67.7	72.64	1.83	26.42
		1#溢流	—	45.66	—	22.24	—
		2#溢流	—	44.96	—	17.76	—
		3#溢流	—	61.49	—	10.16	—
		4#溢流	—	64.2	—	5.21	—
		300	600	铁粉原矿	100.00	65.25	98.72
高钛铁粉	30.38			59.30	27.61	12.65	79.09
低钛铁粉	69.62			66.65	71.11	1.46	20.91
1#溢流	—			53.18	—	19.16	—
2#溢流	—			57.03	—	14.58	—
3#溢流	—			60.70	—	9.26	—
4#溢流	—			64.38	—	5.41	—

因此,为提高合格低钛铁精粉的产率和 TFe 回收率,采用“一粗三扫”反浮选降钛工艺流程,进一步开展抑制剂 CT09 药剂用量条件试验研究。粗选固定活化剂用量为 200 g/t、捕收剂 CT06 用量为 400 g/t,扫选 1、2 的捕收剂加药量分别为粗选用量的 1/2 和 1/4,扫选 3 不添加任何药剂。试验流程如图 4 所示,分选试验结果如表 7 所示。

由表 7 可以看出,中试试验线采用“一粗三扫”反浮选降钛工艺流程,随着抑制剂 CT09 药剂用量的增加,铁精粉中 TiO₂ 含量逐渐增加、TiO₂

脱除率逐渐降低。当抑制剂用量为 200 g/t 时,铁精粉中 TiO₂ 质量分数由 5.02% 降低至 1.91%,铁精粉(浮选底流)产率为 77.77%、TFE 质量分数和回收率为 67.35% 和 80.27%;与不加抑制剂试验结果相比,低钛铁精粉产率和 TFe 回收率约增加 8 个百分点。当抑制剂用量为 400 g/t 时,铁精粉(浮选底流)产率高达 85.66%,但铁精粉中 TiO₂ 质量分数仅由 4.93% 降低至 2.65%,铁精粉中 TiO₂ 含量未达到合格指标,说明当抑制剂用量过大时对钛铁矿的抑制能力增强,铁精粉中钛铁矿未

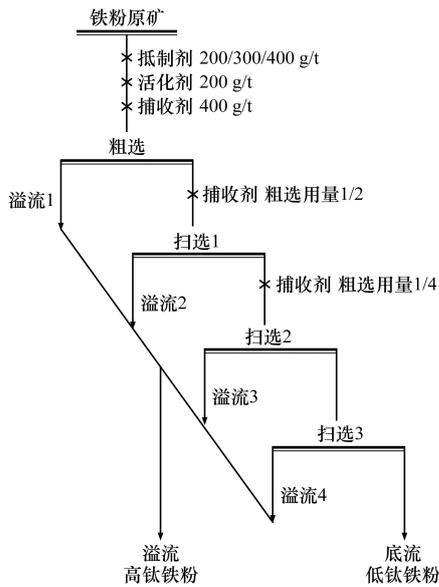


图 4 抑制剂 CT09 用量条件试验工艺流程
Fig. 4 Test process flow of inhibitor CT09 dosage conditions

能得到有效上浮, 致使 TiO_2 脱除效果变差。因此, 反浮选降钛工艺可以适当添加抑制剂提高低钛铁精粉的产率和 TFe 回收率, 但抑制剂用量过大会降低铁精粉的降钛效果。

2.4 铁精粉降钛生产极限指标探究

优化工艺参数后, 在药剂用量及钛铁矿捕收能力充足的情况下, 通过浮选机液位控制尽可能提高浮选溢流产率, 探索生产实践中铁精粉降钛的极限分选指标。分选试验结果如表 8 所示。

由表 8 可以看出, 中试试验线采用“一粗三扫”反浮选降钛工艺流程, 在药剂用量充足的情况下, 随着浮选溢流产率的增大, 铁精粉中 TiO_2 含量逐渐降低、 TiO_2 脱除率逐渐增大。当浮选溢流产率为 33%~35% 时, 铁精粉中 TiO_2 质量分数可由 4.93%~5.22% 降低至 1.37%~1.65%, TiO_2 脱除率达到 79%~82%。当浮选溢流产率调整到近 50% 时, 铁精粉中 TiO_2 质量分数可由 5.31% 降低

表 7 铁精粉降钛抑制剂 CT09 用量条件试验结果

Table 7 Test results of dosage conditions of titanium reduction inhibitor CT09 for iron concentrate powder

抑制剂用量/ ($g \cdot t^{-1}$)	样品名称	产率(以 TiO_2 计算)/%	TFe(质量分数)/%		TFe(质量分数)/%	
			品位	回收率	品位	回收率
200	铁粉原矿	100.00	65.25	99.31	5.02	100.00
	高钛铁粉	22.23	55.89	19.04	15.90	70.41
	低钛铁粉	77.77	67.35	80.27	1.91	29.59
	1#溢流	—	52.31	—	12.34	—
	2#溢流	—	50.56	—	25.04	—
	3#溢流	—	56.59	—	14.89	—
300	铁粉原矿	100.00	65.08	99.67	5.03	100.00
	高钛铁粉	22.98	57.73	20.38	14.55	66.47
	低钛铁粉	77.02	67.00	79.29	2.19	33.53
	1#溢流	—	52.31	—	20.87	—
	2#溢流	—	58.25	—	14.10	—
	3#溢流	—	62.10	—	8.78	—
400	铁粉原矿	100.00	64.9	96.73	4.93	100.00
	高钛铁粉	14.34	51.08	11.29	18.55	53.96
	低钛铁粉	85.66	64.73	85.44	2.65	46.04
	1#溢流	—	46.36	—	20.01	—
	2#溢流	—	54.25	—	18.28	—
	3#溢流	—	53.00	—	19.19	—

表 8 铁精粉降钛极限指标探究结果(质量分数)

Table 8 Exploration results of titanium reduction limit index of iron concentrate

%

取样时间	样品名称	产率 (以 TiO ₂ 计算)	TFe		TiO ₂	
			品位	回收率	品位	回收率
2024-07-19 13:30	铁粉原矿	100.00	64.73	100.36	5.13	100.00
	高钛铁粉	34.83	59.83	32.20	11.64	79.04
	低钛铁粉	65.17	67.70	68.16	1.65	20.96
	1#溢流	—	55.98	—	17.24	—
	2#溢流	—	62.28	—	9.26	—
	3#溢流	—	63.68	—	7.15	—
	4#溢流	—	62.45	—	6.32	—
2024-07-19 15:00	铁粉原矿	100.00	65.08	100.06	4.93	100.00
	高钛铁粉	34.17	59.65	31.31	11.79	81.71
	低钛铁粉	65.83	67.96	68.75	1.37	18.29
	1#溢流	—	56.15	—	15.72	—
	2#溢流	—	59.30	—	14.16	—
	3#溢流	—	64.20	—	5.57	—
	4#溢流	—	66.65	—	2.37	—
2024-07-22 15:00	铁粉原矿	100.00	64.21	100.68	5.31	100.00
	高钛铁粉	49.94	61.40	47.75	9.35	87.93
	低钛铁粉	50.06	67.89	52.93	1.28	12.07
	1#溢流	—	52.81	—	19.44	—
	2#溢流	—	58.07	—	13.75	—
	3#溢流	—	61.23	—	9.26	—
	4#溢流	—	66.84	—	2.29	—
2024-07-24 13:30	铁粉原矿	100.00	65.17	99.45	5.22	100.00
	高钛铁粉	33.04	59.30	30.06	12.84	81.27
	低钛铁粉	66.96	67.54	69.39	1.46	18.73
	1#溢流	—	53.51	—	20.91	—
	2#溢流	—	63.16	—	12.65	—
	3#溢流	—	63.86	—	6.14	—
	4#溢流	—	67.54	—	1.92	—

至 1.28%，降低幅度高达 4.03 个百分点，TiO₂ 脱离率达到 87.93%；与此同时，低钛铁精粉(浮选底流)的 TFe 质量分数由 64.21% 提高到 67.89%，提高幅度高达 3.68 个百分点，但铁精粉(浮选底流)的 TFe 回收率仅为 52.93%，铁损失较大。可以看出，在确定的反浮选降钛工艺和浮选药剂体系下，铁精粉降钛效果比较理想，获得的低钛铁精粉中 TiO₂ 含量与反浮选溢流产率存在直接关系，反浮选溢流产率越大，铁精粉中 TiO₂ 含量越低，相应的低钛铁精粉的产率和 TFe 回收率降低。

因此，应从铁精矿质量和产品经济价值角度出发评估低钛铁精粉中 TiO₂ 含量与 TFe 回收率的最佳指标平衡点，获得最大经济效益。

2.5 推荐铁精粉降钛反浮选工艺流程

根据中试连选试验结果，在保证铁精粉中 TiO₂ 质量分数小于 2.0% 条件下，尽可能提高低钛铁精粉的产率和 TFe 回收率，推荐铁精粉降钛反浮选工艺流程及药剂制度如图 5 所示，推荐铁精粉降钛反浮选工艺数质量流程如图 6 所示。最终产品的化学成分如表 9 所示。

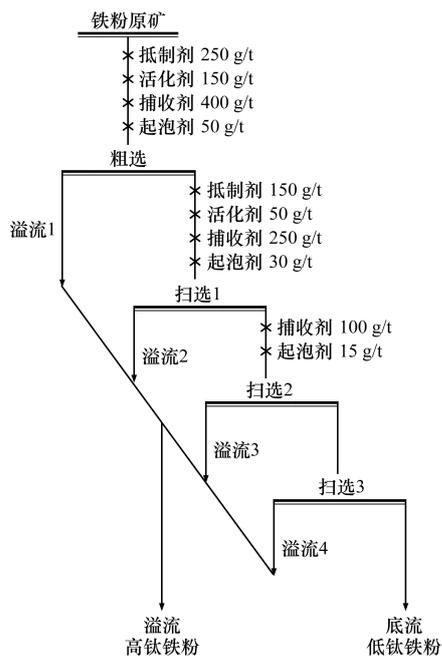


图5 推荐的铁精粉降钛反浮选工艺流程

Fig. 5 The recommended reverse flotation process flow for titanium reduction of iron concentrate powder

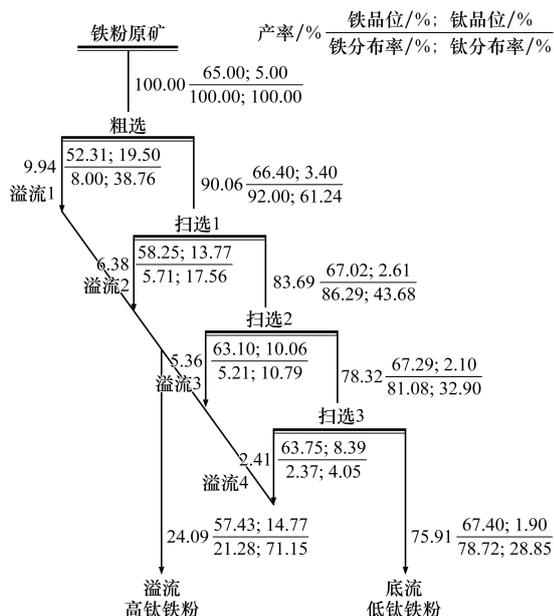


图6 推荐的铁精粉降钛反浮选工艺数质量流程

Fig. 6 The recommended mass and quantity flow of the reverse flotation process for reducing titanium in iron concentrate powder

针对 TFe 质量分数为 65.00%、TiO₂ 质量分数为 5.00% 的铁精粉, 能够获得产率为 75.91%、TFe 质量分数和回收率为 67.40% 和 78.72%、TiO₂ 质量分数为 1.90% 的低钛铁精粉, 以及产率为 24.09%、

TFe 质量分数和回收率为 57.43% 和 21.28%、TiO₂ 质量分数和回收率为 14.77% 和 71.15% 的高钛铁粉。高钛铁粉中铁和钛的含量都很高, 有进一步研究铁和钛分离与富集的必要性, 以提高高钛铁粉的综合利用价值。

表9 低钛铁精粉和高钛铁粉的主要化学成分(质量分数)

Table 9 Main chemical composition of low titanium iron powder and high titanium iron powder %

项目	TFe	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	S	P
低钛铁精粉	67.40	1.90	2.51	1.22	0.02	0.015
高钛铁粉	57.43	14.77	5.78	3.51	0.05	0.025

3 结论

(1) 中试连选试验确定了浮选机组“一粗三扫”反浮选工艺流程以及浮选药剂制度, 试验过程运行稳定, 技术指标达到前期试验结果和预期目标。

(2) 浮选机组采用“一粗三扫”反浮选工艺, 以 CT09 为抑制剂、CT06 为捕收剂, 可将现有铁精粉 (TFe 质量分数为 65%、TiO₂ 质量分数为 5%) 分离出产率约 75% 的低钛铁精粉 (TFe 质量分数 ≥ 67.5%、TiO₂ 质量分数为 1.5%~1.9%) 和产率约 25% 的高钛铁粉中矿 (TiO₂ 质量分数为 14%~16%)。

(3) 现有 TiO₂ 质量分数为 5% 的铁精粉反浮选降钛下限为 1.3% 左右, 获得的低钛铁精粉产率约为 65%、TFe 质量分数约为 68%, 低钛铁精粉销售品级可提高一个等级。上述结果可用于选矿厂进行方案经济性比较与选优。

(4) 高钛铁粉产品主要由磁铁矿和钛铁矿及少量杂质矿物组成, 通过进一步研究铁和钛的分离与富集, 可实现资源高效利用。分离后的铁精矿(低钛)主要用于钢铁冶炼, 提取的钛精矿可进一步加工为钛白粉、海绵钛或钛合金。

参考文献:

- [1] YANG Y, XU W Q, WANG Y, et al. Progress of CCUS technology in the iron and steel industry and the suggestion of the integrated application schemes for China [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 450:138438.
- [2] 刘德忠. 关于我国铁矿石产业的研究[D]. 北京:对外经济贸易大学, 2006.

- LIU Dezhong. Research on China's iron ore industry. Beijing: University of International Business and Economics, 2006.
- [3] XU C H. The development of preconcentration technology in low-grade magnetite's beneficiation[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 361/362/363: 324 - 327.
- [4] 赖绍师. 某铁精矿提纯工艺试验研究[J]. *工程建设*, 2019, 51(6): 34 - 37.
- LAI Shaoshi. Experimental study on purification process of a kind of iron ore concentrate[J]. *Engineering Construction*, 2019, 51(6): 34 - 37.
- [5] 高斯. 低品位铁矿选矿工艺及超纯铁精矿制备的研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2018.
- GAO Si. Study on processing of low-grade iron ore and preparation of super pure iron concentrate[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2018.
- [6] 李磊, 金建文, 肖仪武, 等. 影响攀西某磁铁精矿品质的矿物学因素分析[J]. *矿产综合利用*, 2021(4): 193 - 196.
- LI Lei, JIN Jianwen, XIAO Yiwu, et al. Researches of mineralogical factors affecting the quality of a magnetite concentrate in panxi area[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4): 193 - 196.
- [7] FENG C, CHU M S, TANG J, et al. Effects of MgO and TiO₂ on the viscous behaviors and phase compositions of titanium-bearing slag[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2016, 23(8): 868 - 880.
- [8] 陈超, 张裕书, 张少翔, 等. 攀枝花铁精矿磁选提铁降杂工艺研究[J]. *矿产保护与利用*, 2018, 38(2): 69 - 73; 79.
- CHEN Chao, ZHANG Yushu, ZHANG Shaoxiang, et al. Improving quality of Panzhihua iron concentrate by magnetic separation[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2018, 38(2): 69 - 73; 79.
- [9] 张礼, 王长福. 钒钛磁铁矿资源选矿技术及综合利用研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2023, 43(5): 127 - 137.
- ZHANG Li, WANG Changfu. Research progress on separation technology and comprehensive utilization of vanadium-titanium magnetite resources[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2023, 43(5): 127 - 137.
- [10] 郭客, 张志强, 王绍艳, 等. 钒钛磁铁精矿中钛铁分离技术研究[J]. *金属矿山*, 2019(8): 113 - 119.
- GUO Ke, ZHANG Zhiqiang, WANG Shaoyan, et al. Study on separation technology of titanium and iron from vanadium-titanium magnetite concentrate[J]. *Metal Mine*, 2019(8): 113 - 119.
- [11] 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. Beneficiation process research of ultra-fine titanium magnetite resources in Panxi region[J]. *Comprehensive Utilization of Mineral Resources*, 2023(4): 55 - 61.
- [12] 胡厚勤, 谢海云, 罗荣飞. 攀西钒钛磁铁矿粗、细粒钛铁矿混合浮选的可行性研究[J]. *矿冶*, 2023, 32(4): 33 - 39.
- HU Houqin, XIE Haiyun, LUO Rongfei. Feasibility study on mixed flotation of coarse and fine titanium magnetite in Panxi vanadium-titanium magnetite[J]. *Mining and Metallurgy*, 2023, 32(4): 33 - 39.
- [13] 张云, 叶国华, 项新月, 等. 铁精矿提品降钛试验研究[J]. *矿物学报*, 2024, 44(4): 570 - 578.
- ZHANG Yun, YE Guohua, XIANG Xinyue, et al. An experimental study on the quality improvement of iron concentrate by reducing titanium content[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2024, 44(4): 570 - 578.
- [14] 郭文达, 韩跃新, 朱一民, 等. 岩浆岩型含钛铁精矿降钛研究[J]. *金属矿山*, 2019(2): 71 - 75.
- GUO Wenda, HAN Yuexin, ZHU Yimin, et al. Research on the titanium removal of titanium-containing magmatic iron concentrate[J]. *Metal Mine*, 2019(2): 71 - 75.
- [15] 李硕, 陈福林, 蔡先炎, 等. 攀西某钒钛铁精矿提质降杂试验研究[J]. *钢铁钒钛*, 2023, 44(5): 105 - 110.
- LI Shuo, CHEN Fulin, CAI Xianyan, et al. Experimental study on quality improvement and impurity reduction of a vanadium-titanium iron concentrate in Panxi [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2023, 44(5): 105 - 110.
- [16] 虞力, 孟庆有, 袁致涛, 等. 基于高强度调浆的钛铁矿浮选研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2023, 44(4): 573 - 580.
- YU Li, MENG Qingyou, YUAN Zhitao, et al. Flotation of titanium magnetite based on high-intensity pulp conditioning[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2023, 44(4): 573 - 580.

(下转第 177 页)

recirculation on the premixed oxy-methane flames in atmospheric condition[J]. *Energy*,2015,89:845-857.

- [15] GÓMEZ M A, PATIÑO D, COMESAÑA R, et al. CFD simulation of a solar radiation absorber[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,2013,57(1):231-240.

- [16] OROOJI Y, JAVADI M, KARIMI-MALEH H, et al. Numerical and experimental investigation of natural gas injection effects on NO_x reburning at the rotary cement kiln exhaust[J]. *Process Safety and Environmental Protection*,2021,151:290-298.

(上接第140页)

- [17] 黄浩,吴中贤,乔波,等.拜耳法赤泥磁选铁精矿浮选脱钛研究[J]. *矿冶工程*,2024,44(5):41-45;50.
HUANG Hao, WU Zhongxian, QIAO Bo, et al. Study on titanium removal by flotation from magnetic iron concentrate of Bayer red mud[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*,2024,44(5):41-45;50.
- [18] 杨卓,冯博,李文涛,等.铁精矿选矿除杂试验研究[J]. *工程建设*,2024,56(12):16-23.
YANG Zhuo, FENG Bo, LI Wentao, et al. Experimental

study on impurity removal from iron concentrate[J]. *Engineering Construction*,2024,56(12):16-23.

- [19] 武春涛,韩明,赵礼兵,等.承德某钒钛磁铁矿提铁降钛试验研究[J]. *现代矿业*,2025,41(6):164-167.
WU Chuntao, HAN Ming, ZHAO Libing, et al. Experimental study on iron enrichment and titanium reduction of vanadium-titanium magnetite concentrate in Chengde[J]. *Modern Mining*,2025,41(6):164-167.

(上接第150页)

- [22] 丁成义,常仁德,郭胜兰,等.烧结过程智能控制及烧结冶金性能预测研究现状[J]. *钢铁*,2024,59(4):42-56.
DING Chengyi, CHANG Rende, GUO Shenglan, et al. Research status of intelligent control of sintering process and prediction of metallurgical properties of sinter[J].

Iron and Steel,2024,59(4):42-56.

- [23] 朱德庆,李晓波,潘建,等.镜铁矿粉在铁矿烧结混合料中的制粒行为[J]. *钢铁*,2015,50(7):8-14.
ZHU Deqing, LI Xiaobo, PAN Jian, et al. Investigation of granulation behaviors of specularite fines in ferrous sinter mixture[J]. *Iron and Steel*,2015,50(7):8-14.

江苏省(沙钢)钢铁研究院介绍

江苏省(沙钢)钢铁研究院成立于2007年6月,是江苏省重点研发机构、高新技术企业,主要从事先进钢铁材料和工艺技术的研发与服务。研究院坚持以“国内领先、世界一流”为建设目标,拥有2.3万m²的研发大楼及中试工场,致力开发出高端、先进的钢铁材料和绿色的钢铁生产工艺,并力图减少废弃物排放以及降低能源消耗,以实现沙钢及江苏省钢铁工业的持续发展。沙钢研究院下设七个研究室、一个分析测试中心、一个中试场所以及一个管理部门,涵盖钢铁生产全流程,以及热轧板带材、棒线材、冷轧和超薄带产品。研发方向包括低碳化、先进钢铁材料开发、先进钢铁工艺开发和工艺优化、智能化、环保资源等。研究院每年开展项目约300项,先后承担各级政府项目30余项。通过开展各类研发项目,研究院形成了一系列自主创新知识产权成果,获授权专利765件(其中发明专利634件、国际专利9件),发表论文785篇,先后承担各级政府项目29项,其中国家项目5项,省级项目11项,荣获国家级科技奖二等奖1项、省部级科技奖一等奖10项、二等奖9项。通过科技创新,研究院有力支撑了企业的技术进步和转型升级,每年研发创效超8亿元。