国外某风化型钒钛铁矿选矿试验研究

刘 超[1,2,3], 陈志强[1,2,3], 吕昊子[1,2,3], 胡红喜[1,2,3], 饶金山[1,2,3], 刘 勇[1,2,3]

(1. 广东省科学院资源综合利用研究所, 广东 广州 510650; 2. 稀有金属分离与综合利用国家重点实验室, 广东 广州 510650; 3. 广东省矿产资源开发和综合利用重点实验室, 广东 广州 510650)

摘 要: 针对国外某深度蚀变氧化型钒钛铁矿, 铁矿物与钛矿物难以物理选矿实现分离, 脉石矿物的比磁化系数、比重与金属矿物差异较大、易磨矿解离的特征, 开展了选矿富集钒钛铁试验研究, 对比了磁选回收工艺、分级-磁选回收工艺及重选回收工艺, 确定磁选回收工艺为最适宜的回收工艺。磁选回收工艺获得了可市售的含钒铁精矿含 Fe 60.52%、V_2O_5 1.03%, 回收率分别为 Fe 8.12%、V_2O_5 8.62%, 钒钛铁混合精矿 Fe 50.03%、V_2O_5 0.80%、TiO_2 16.01%, 回收率分别为 Fe 78.61%、V_2O_5 78.45%、TiO_2 82.88% 的选别指标, 混合精矿钒、钛、铁品位较高, 可作为冶金进一步获取钒、钛、铁的原料。

关键词: 钒钛铁矿; 风化蚀变; 磁选; 含钒铁精矿; 回收率

中图分类号: TF841.3, TD924 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004−7638(2021)02−0117−08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.02.020 **开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID) :**

听语音 聊科研 与作者互动

Experimental study on beneficiation of a weathered V-Ti iron ore from abroad

Liu Chao[1,2,3], Chen Zhiqiang[1,2,3], Lv Haozi[1,2,3], Hu Hongxi[1,2,3], Rao Jinshan[1,2,3], Liu Yong[1,2,3]

(1. Institute of Resources Comprehensive Utilization, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, Guangdong, China; 2. State Key Laboratory of Rare Metals Separation and Comprehensive Utilization, Guangzhou 510650, Guangdong, China; 3. Guangdong Province Key Laboratory of Mineral Resource and Comprehensive Utilization, Guangzhou 510650, Guangdong, China)

Abstract: For a severely weathered and oxidized V-Ti iron ore from abroad, Fe minerals and Ti minerals are disseminated closely to each other thus it is difficult to separate by physical beneficiation. Based on the specific magnetization coefficient and specific gravity, gangue minerals are quite different from those of metal minerals and are easy to dissociate by grinding, the study on primary enrichment of V-Ti-Fe was carried out. Recovery of V-Ti-Fe by magnetic separation, classification–magnetic separation and gravity separation were compared. The result shows that the magnetic separation is the most suitable method for the ore. The saleable V-bearing iron concentrate consisting of Fe 60.52%, V_2O_5 1.03% with the recovery of Fe 8.12%, V_2O_5 8.62%, and the V-Ti-Fe bulk concentrate consisting of Fe 50.03%, V_2O_5 0.80%, TiO_2 16.01% with the recovery of Fe 78.61%, V_2O_5 78.45%, TiO_2 82.88% were obtained by magnetic separation. The bulk concentrate with high grade of V_2O_5 and TiO_2 could be used as raw materials for extracting vanadium, titanium and iron.

Key words: V-Ti iron ore, weathering and alteration, magnetic separation, V-bearing iron concentrate, recovery rate

收稿日期: 2020−11−12

基金项目: 广东省科学院发展专项资金项目(2016GDASRC-0201); 广东省科技厅重点实验室运行专项(2017B030314046)。

作者简介: 刘超(1988—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事选矿工艺研究。 E-mail: courage0128@163.com。

0 引言

钒、钛、钢铁作为重要的战略金属，在国民经济与国防建设中起着至关重要的作用[1]。我国钒、钛资源储量虽位居全球的第三位和第一位，但资源的禀赋性较差，绝大部分的钒、钛金属来源于原生的钒钛磁铁矿。近年来易选的富矿越来越少，品位低、嵌布关系复杂的共生伴生钒钛矿成为了研究和回收的重点[2−5]。我国的钒钛矿物大多为钒钛磁铁矿，主要分布于四川攀枝花地区、河北承德地区及陕西汉中地区[4, 6−7]。含钒钛赤铁矿在澳大利亚、新西兰、俄罗斯等国的储量较为丰富[8−10]，矿石中钒、钛、钪等有价元素含量高，是重要的钒钛铁矿资源，但由于此类资源的开发难度较大，国内外相关的研究报道较少[11−12]。近年来我国钒、钛、铁等矿产进口量居高不下[8, 13]，伴随着我国“一带一路”国际合作的深入开展，研究开发该类矿产资源的回收利用技术具有重要的意义。因此，笔者以国外某含钒钛铁矿为研究对象，通过矿石工艺矿物学性质分析，采用磁选、分级-磁选、重选技术对该矿进行了详细的钒、钛、铁富集研究，以期为同类资源的回收利用提供可行性的技术路径。

1 原矿工艺矿物学性质

本次试验矿石 (ROM) 取自国外某矿山，将矿石破碎至−2 mm，充分混匀作为本次试验样品。

1.1 化学多元素分析及矿物组成

原矿多元素分析结果见表 1，并通过 MLA 测定了矿样的矿物组成，结果如表 2 所示。

由表 1、2 可见，原矿中主要有价元素为 Fe、V、Ti，是本次选矿试验的回收对象。矿石中的有价金属矿物为磁铁矿-磁赤铁矿-赤铁矿、部分褐铁矿、钛铁矿-蚀变钛铁矿，主要的脉石矿物是以含高岭土为主的粘土矿物，并含蒙脱石、白钛石等。

表 1 矿石的多元素分析

Table 1 The major element composition of ROM %

Fe	V_2O_5	TiO_2	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	S	K_2O	Na_2O	CaO
43.51	0.71	13.26	7.85	10.54	<0.01	0.004	0.002	0.31	0.03

表 2 矿石矿物组成

Table 2 The mineralogical composition of ROM %

磁铁矿-磁赤铁矿-赤铁矿	钛铁矿-蚀变钛铁矿	褐铁矿	蒙脱石	粘土矿物	白钛石	石英	叶腊石	其它
41.85	15.78	22.97	0.25	16.54	0.22	0.22	0.23	1.94

1.2 −2 mm 原矿样品特征和筛分分析

−2 mm 原矿筛分分析结果见表 3，在粗粒级中钒、钛、铁品位较高，在+0.25 mm 粒级富集表现尤为明显，细粒级钒、钛、铁的品位及金属分布率较低。显微镜下观察表明，矿石中的铁、钛矿物之间紧密连生呈颗粒状，少量高岭土充填于铁钛矿物的溶蚀孔洞中，如图 1 所示。

表 3 −2 mm 原矿筛分分析结果

Table 3 The screening analysis result of −2 mm ROM

粒级/mm	产率/%	品位/%			回收率/%		
		Fe	V_2O_5	TiO_2	Fe	V_2O_5	TiO_2
−2.0 ~ +1.5	6.63	49.36	0.76	13.81	7.43	7.20	6.87
−1.5 ~ +1.0	11.68	50.14	0.78	14.40	13.30	13.01	12.62
−1.0 ~ +0.5	19.90	49.94	0.78	14.37	22.55	22.17	21.45
−0.5 ~ +0.25	13.69	48.92	0.83	14.75	15.21	16.23	15.15
−0.25 ~ +0.10	13.44	48.34	0.75	12.74	14.75	14.40	12.84
−0.1 ~ +0.075	4.11	45.64	0.69	15.99	4.25	4.05	4.92
−0.075 ~ +0.038	8.35	42.91	0.64	17.03	8.14	7.63	10.67
−0.038 ~ +0.02	8.93	40.45	0.68	15.07	8.20	8.68	10.10
−0.02 ~ +0.01	3.26	30.59	0.44	9.48	2.26	2.05	2.32
−0.01 ~ +0.005	1.86	24.75	0.41	6.64	1.05	1.09	0.93
−0.005	8.15	15.45	0.30	3.52	2.86	3.49	2.15
合计	100.00	44.05	0.70	13.33	100.00	100.00	100.00

1.3 主要矿物的嵌布特性

MLA 检测和扫描电镜观察表明，该矿石物理化学性质十分复杂，包含了从原生到氧化带的系列矿物，属深度蚀变的氧化矿物。原矿中的铁矿物主要

为少量的磁铁矿赤铁矿、钛赤铁矿、褐铁矿, 钒主要赋存于铁矿物中。钛矿物主要为钛铁矿、蚀变钛铁矿。矿石中的铁矿物与钛矿物连生十分密切, 嵌布关系复杂。常见磁赤铁矿与赤铁矿、赤铁矿与褐铁矿、部分钛铁矿或蚀变钛铁矿与褐铁矿形成复杂的连生关系, 如图 2 ~ 4 所示。

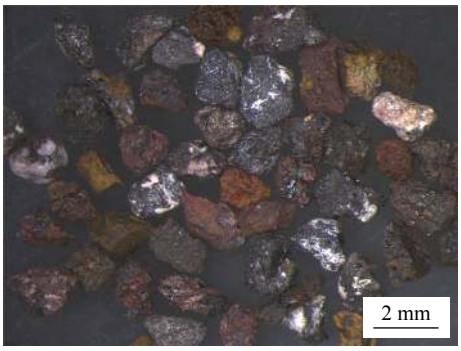

图 1　−1.5 ~ +1.0 mm 粒级高岭土充填于铁、钛矿物的溶蚀孔洞中(显微镜, 反光)

Fig. 1　The −1.5 to +1.0 mm size fraction of kaolinite filling in the corroded holes of Fe-Ti minerals (optical microscope using reflected light)

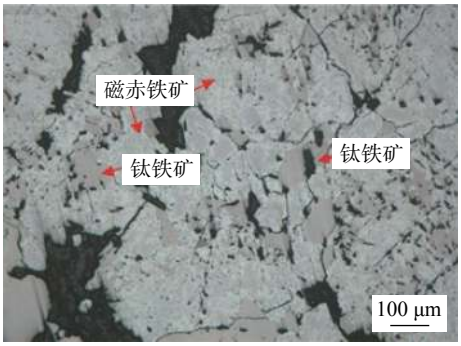

图 2　磁赤铁矿中包含粒状钛铁矿及大量微细钛铁矿包裹体(显微镜, 反光)

Fig. 2　The maghemite including a lot of ilmenite grains and fine inclusions

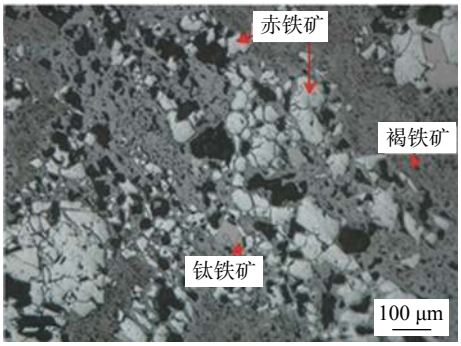

图 3　褐铁矿沿着赤铁矿、钛铁矿颗粒间充填交代, 残余的赤铁矿、钛铁矿包含于褐铁矿中(显微镜, 反光)

Fig. 3　The limonite metasomatizing hematite and ilmenite, and the residual hematite and ilmenite grains included in the limonite

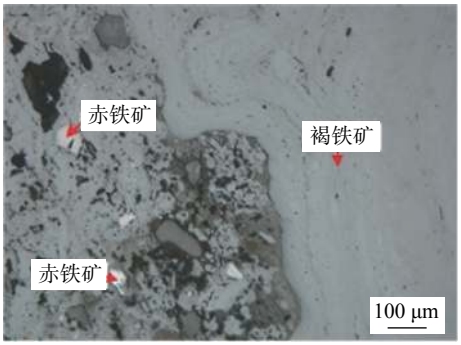

图 4　胶状褐铁矿包含交代残余的微细粒钛铁矿和赤铁矿(显微镜, 反光)

Fig. 4　The colloidal limonite including residual microsized ilmenite and hematite grains

2　选矿回收试验结果与讨论

2.1　选矿方案

原矿工艺矿物学研究表明, 原矿中赤铁矿、钛铁矿、褐铁矿的矿物总量接近 80%, 铁矿物与钛矿物嵌布关系十分密切, 难以磨矿解离, 三种矿物的磁性范围发生重叠、比重及可浮性十分相近, 利用物理选矿难以实现钛矿物与铁矿物的分离。因此, 本次试验的目的在于根据矿石性质确定技术可行、经济合理的铁、钛矿物富集工艺, 实现钒钛铁的初步富集。由于脉石矿物主要以含高岭土为主的粘土矿物, 其比磁化系数、比重与金属矿物差距较大, 且脉石矿物与金属矿物易于磨矿解离, 该矿石的选矿原则工艺确定为磁选、重选。

2.2　磁选回收试验

2.2.1　磨矿细度试验

铁、钛矿物与脉石矿物充分解离是获得合格含钒铁精矿和抛除脉石矿物的关键, 为了确定适宜的磁选磨矿细度, 开展了磨矿条件试验。试验流程如图 5 所示, 试验结果见图 6。

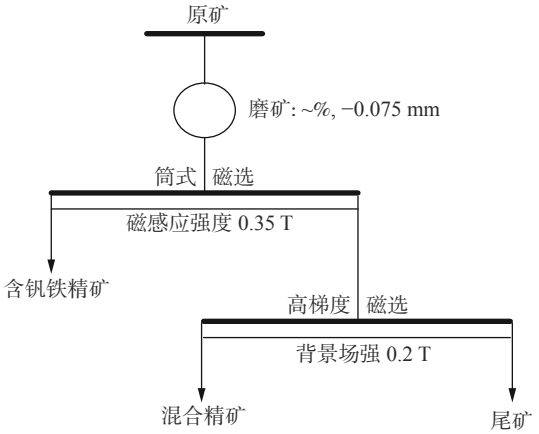

图 5　磨矿细度试验流程

Fig. 5　The flowsheet of the grinding fineness test of ROM

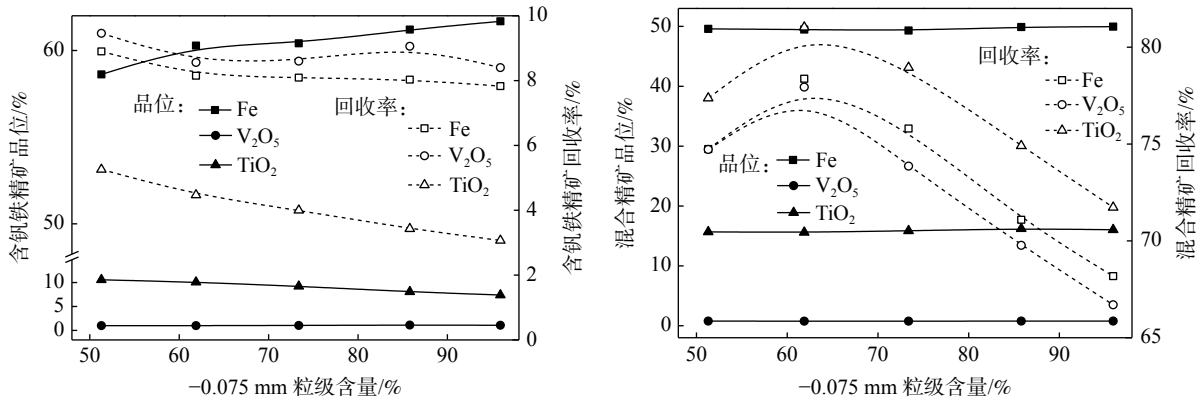

图 6　磨矿细度试验结果

Fig. 6　The result of grinding fineness test of ROM

由图 6 可见，随着原矿磨矿细度的增加，含钒铁精矿铁、钒品位增加，钛品位减小，铁、钒、钛回收率减小；混合精矿铁、钒、钛品位变化不大，回收率则先增加后减小，当磨矿细度大于 61.88% 时，含钒铁精矿铁品位大于 60%，混合精矿铁、钒、钛的回收率大幅减小。因此，原矿适宜的磨矿细度为 −0.075 mm，占比 61.88%。

2.2.2　强磁选背景场强试验

高梯度磁选机的背景场强是影响分选的重要因素，本次试验采用 SSS-1 型间断式高梯度磁选机（HGMS）对筒式弱磁选尾矿进行了背景场强条件试验。试验结果如图 7 所示。

由图 7 可见，随着背景场强的增加，混合精矿铁、钒、钛品位减小，铁、钒、钛回收率缓慢增加，脉石的抛除率降低。当背景场强大于 0.2 T 时，混合精矿的品位减小，回收率的增加幅度较小，脉石的抛出率则大幅减小。因此，适宜的背景场强为 0.2 T。

2.2.3　磁选粗精矿精选试验

为了探索提高磁选混合精矿铁、钒、钛品位的可能性，将混合精矿细磨至−0.075 mm 占 85.16%，利用高梯度磁选机和细泥摇床进行了强磁选精选（背景场强 0.2 T）和摇床精选，精选试验结果见表 4。由表 4 可见，高梯度磁选精选可小幅度提高混合精矿品位，但回收率损失较大，摇床精选精矿铁、钒、钛品位较高，但回收率较低。因此，混合精矿精选效果有限，不考虑对混合精矿进行精选。

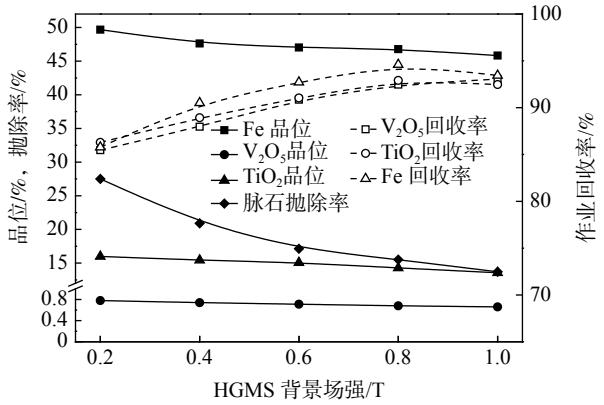

图 7　强磁选背景场强条件试验结果

Fig. 7　Test result of background field strength of HGMS

表 4　磁选粗精矿精选试验结果

Table 4　The test result of magnetic separation concentrate cleaning

精选作业	产品名称	作业产率/%	品位/%			作业回收率/%		
			Fe	V_2O_5	TiO_2	Fe	V_2O_5	TiO_2
高梯度磁选	精矿	82.49	51.14	0.79	16.65	85.40	82.68	86.58
	中矿	17.51	41.20	0.78	12.16	14.60	17.32	13.42
	混合精矿	100.00	49.40	0.79	15.86	100.00	100.00	100.00
细泥摇床	精矿	35.09	52.35	0.91	19.06	37.19	41.42	42.35
	中矿	40.71	50.95	0.80	14.89	41.99	42.25	38.39
	尾矿	24.20	42.48	0.52	12.56	20.82	16.33	19.25
	混合精矿	100.00	49.39	0.77	15.79	100.00	100.00	100.00

2.2.4　磁选回收试验结果

由原矿磁选结果可知, 经过弱磁选获得了合格的含钒铁精矿, 利用高梯度磁选实现了铁、钒、钛的富集。磁选回收试验结果见表 5, 可见通过磁选回收, 得到了可市售的含钒铁精矿, 抛除了大部分脉石矿物, 实现了钒、钛、铁的富集。

表 5　磁选回收试验结果

Table 5　The test result of magnetic seperation

产品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
		Fe	V_2O_5	TiO_2	Fe	V_2O_5	TiO_2
含钒铁精矿	5.84	60.52	1.03	9.28	8.12	8.62	4.10
混合精矿	68.40	50.03	0.80	16.01	78.61	78.45	82.88
尾矿	25.76	22.42	0.35	6.68	13.27	12.93	13.02
原矿	100.00	43.53	0.70	13.21	100.00	100.00	100.00
含钒铁精矿+混合精矿	74.24	50.85	0.82	15.48	86.73	87.07	86.98

2.3　分级-磁选回收试验

2.3.1　−2 mm 原矿筛分分级试验

由−2 mm 原矿筛分分析结果可知, 铁、钒、钛在粗粒级中呈现富集, 随着粒级变细, 铁、钒、钛品位呈下降趋势。因此, 可通过分级作业来实现钒、钛、铁在粗粒级中的富集, 原矿的擦洗-振动筛分试验结果见表 6。由表 6 可见, 钒、钛、铁在粗粒级粗精矿中有明显的富集。

表 6　原矿擦洗—振动筛筛分试验结果

Table 6　The test result of recovery of V, Ti, Fe by scrubbing screening

产品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
		Fe	V_2O_5	TiO_2	Fe	V_2O_5	TiO_2
粗粒级粗精矿	50.59	49.29	0.81	14.14	56.05	57.04	53.26
−0.25 mm粒级	49.41	38.30	0.60	12.12	43.95	42.96	46.74
原矿	100.00	43.86	0.71	13.14	100.00	100.00	100.00

2.3.2　−0.25 mm 粒级磁选试验

−0.25 mm 粒级中的−0.075 mm 粒级占 63.51%, 铁、钛矿物与脉石矿物已基本解离, 利用磁选对该粒级中的铁、钒、钛矿物进行回收。选对−0.25 mm 粒级进行筒式磁选-高梯度磁回收, 试验结果见表 7。由表 7 可见, 高梯度磁选实现了−0.25 mm 粒级中含钒铁精矿和混合精矿的回收。

表 7　−0.25 mm 粒级磁选回收试验结果

Table 7　The test result of −0.25 mm size range recovery by magnetic seperation

产品名称	作业产率/%	品位/%			作业回收率/%		
		Fe	V_2O_5	TiO_2	Fe	V_2O_5	TiO_2
含钒铁精矿	3.65	60.01	0.96	8.64	5.67	5.80	2.61
混合精矿	56.61	48.16	0.76	17.22	70.63	71.19	80.63
尾矿	39.74	23.02	0.35	5.10	23.70	23.01	16.76
−0.25 mm粒级	100.00	38.60	0.60	12.09	100.00	100.00	100.00

2.3.3　分级-磁选试验结果

由分级-磁选结果可知, 分级得到的+0.25 mm 粒级可直接作为混合精矿, 高梯度磁选实现了−0.25 mm 粒级铁、钒、钛的富集。分级-磁选工艺流程如图 8 所示, 回收试验结果见表 8。

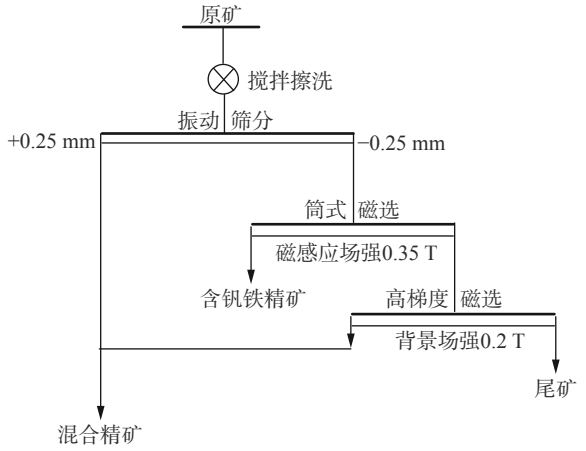

图 8　原矿分级-磁选试验流程

Fig. 8　The flowsheet of classification–magnetic separation

由表 8 可见，分级-磁选工艺获得了可市售的含钒铁精矿，实现了部分脉石矿物的抛除，使原矿中的铁、钒、钛得到富集。该工艺流程结构简单，相比磁选工艺，混合精矿铁、钒、钛品位偏低，脉石抛除率偏低，回收率相比较高，减少了高梯度磁选处理量，节省磁选设备。

2.4　重选回收试验

2.4.1　摇床试验结果

为了考查重选摇床对原矿铁、钒、钛的富集效果，本试验将原矿磨细至−0.25 mm 粒级占 100%（−0.075 mm，62.25%），分成 +0.10 mm、−0.10～+0.075 mm、−0.075 mm 三个粒级开展分级摇床试验，试验流程如图 9 所示，试验结果见表 9。

表 8　原矿分级–磁选试验结果

Table 8　The test result of classification–magnetic separation

产品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
		Fe	V_2O_5	TiO_2	Fe	V_2O_5	TiO_2
含钒铁精矿	1.54	60.12	0.98	8.17	2.12	2.15	0.96
混合精矿	77.42	48.68	0.77	15.22	86.34	84.96	89.96
尾矿	21.04	23.93	0.43	5.65	11.53	12.89	9.08
原矿	100.00	43.65	0.70	13.10	100.00	100.00	100.00
含钒铁精矿+混合精矿	78.96	48.90	0.77	15.08	88.46	87.11	90.92

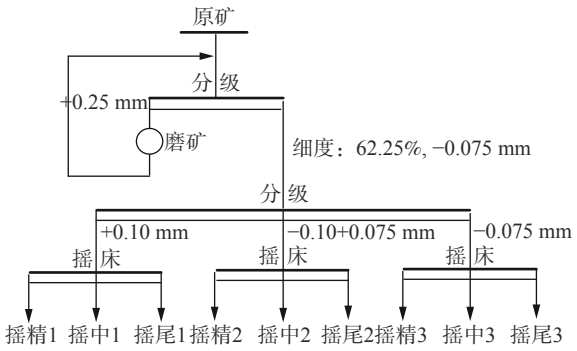

图 9　原矿分级摇床试验流程

Fig. 9　The flowsheet of classification-shaking process

由表 9 可见，摇床得到的混合精矿铁、钒、钛品位较高，但回收率偏低。考虑到摇床的处理能力较低，厂房占地面积大，因此，摇床不适合处理该矿石。

2.4.2　螺旋溜槽试验结果

螺旋溜槽因处理能力大、生产成本低廉，工业上常用来预先抛除脉石矿物。为了考查螺旋溜槽铁、钒、钛矿物的回收效果，本试验在原矿磨矿细度为-0.075 mm 占 62.55%，矿浆浓度为 25% 的条件下进行了螺旋溜槽试验。试验结果见表 10。由表 10 可见，螺旋溜槽脉石抛除率较高，混合精矿铁、钒、钛品位与磁选、分级-磁选工艺相近，但回收率偏低。

表 9　原矿分级摇床试验结果

Table 9　The test result of classification-shaking process

产品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
		Fe	V_2O_5	TiO_2	Fe	V_2O_5	TiO_2
摇精1～3	39.40	52.36	0.90	17.08	47.62	51.48	51.01
摇中1～3	25.88	47.12	0.72	13.49	28.15	27.05	26.46
摇床尾矿	34.72	30.23	0.43	2.97	24.23	21.47	22.53
原矿	100.00	43.32	0.69	13.19	100.00	100.00	100.00
摇精+摇中	65.29	50.28	0.80	15.66	75.77	78.53	77.47

表 10　原矿螺旋溜槽试验结果
Table 10　The test result of spiral chute process

产品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
		Fe	V_2O_5	TiO_2	Fe	V_2O_5	TiO_2
精矿	43.48	52.11	0.87	17.12	51.82	54.08	55.93
中矿	23.81	43.54	0.60	12.82	23.71	20.57	22.93
尾矿	32.71	32.70	0.54	8.60	24.47	25.35	21.14
原矿	100.00	43.72	0.70	13.31	100.00	100.00	100.00
精矿+中矿	67.29	49.07	0.78	15.60	75.53	74.65	78.86

2.5　回收工艺对比

磁选回收、分级-磁选回收、螺旋溜槽回收取得了较好的回收效果，三种回收工艺选别指标见表 11。与磁选工艺相比，分级-磁选工艺通过分级实现了 50% 以上铁、钛矿物的富集，极大地减少了高梯度磁选的处理量，钒、钛、铁回收率较高，但脉石抛废率较低，混合精矿钒、钛、铁品位偏低。螺旋溜槽脉石抛废率较高，但混合精矿钒、钛、铁回收率较低。综合考虑精矿品位、回收率、抛废率、生产成本等因素，磁选工艺流程简单、精矿品位、回收率较高，生产成本适中，磁选工艺最适宜处理该矿石。

表 11　三种工艺回收指标对比结果
Table 11　The comparison result of recovery indexes of three processes

回收工艺	抛废率/%	品位/%			回收率/%		
		Fe	V_2O_5	TiO_2	Fe	V_2O_5	TiO_2
分级-磁选	21.04	48.90	0.77	15.08	88.46	87.11	90.92
磁选	25.76	50.85	0.82	15.48	86.73	87.07	86.98
螺旋溜槽	32.71	49.07	0.78	15.60	75.53	74.65	78.86

2.6　精矿分析

对磁选工艺得到的含钒铁精矿和混合精矿进行多元素分析，结果见表 12、13。其中含钒铁精矿达到铁精矿 C60 品级标准。混合精矿钒、钛、铁含量较高，可作为冶金提取铁、钒、钛的原料。

表 12　含钒铁精矿多元素分析
Table 12　The major element composition of V-bearing iron concentrate　%

Fe	V_2O_5	TiO_2	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	S	Zn	Sn	Cu	As
60.52	1.03	9.28	2.98	3.412	0.01	0.05	0.08	0.02	0.01	<0.01

表 13　强磁选精矿多元素分析
Table 13　The major element composition of strong magnetic concentrate　%

Fe	V_2O_5	TiO_2	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	S	Zn	Sn	Cu	As
50.03	0.80	16.01	8.43	9.87	0.02	0.12	0.05	0.05	0.045	<0.01

3　结论

1)本钒钛铁矿属深度蚀变氧化矿，矿石中的铁矿物主要为钛赤铁矿、褐铁矿，钒主要赋存于铁矿物中，钛矿物主要为钛铁矿、蚀变钛铁矿。铁、钛矿物嵌布关系紧密，磨矿难以解离。脉石矿物是主要以含高岭土为主的粘土矿物。

2)钛矿物与铁矿物难以通过物理选矿实现分离，脉石矿物的比磁化系数、比重与金属矿物差异较大，且易于磨矿解离。本次试验的目的在于实现钒钛铁的初步富集，试验对比了磁选回收工艺、分级磁选回收工艺和重选回收工艺，在分析对比选别指标、流程结构及生产成本的基础上，确定磁选回收工艺为最适宜的回收工艺。

3)磁选回收试验获得了可市售的含钒铁精矿和品位较高的铁钒钛混合精矿，含钒铁精矿含 Fe 60.52%、V_2O_5 1.03%，回收率分别为 Fe 8.12%、V_2O_5 8.62%；混合精矿 Fe 50.03%、V_2O_5 0.80%、TiO_2 16.01%，回收率分别为 Fe 78.61%、V_2O_5 78.45%、TiO_2 82.88%。

参考文献

[1] Guo Yufeng. Study on solid reduction strengthening and comprehensive utilization of vanadium titanium magnetite[D]. Changsha: Central South University, 2007.
(郭宇峰.钒钛磁铁矿固态还原强化及综合利用研究[D].长沙: 中南大学, 2007.)

[2] Chen Yilin, Tang Xiaoling, Li Yanjun, *et al*. Study on continoua test of suspension magnetization roasting of Jiuquan iron and steel company tailings[J]. Metal Mine, 2020, (5): 178−184.
(陈毅琳, 唐晓玲, 李艳军, 等. 酒钢尾矿悬浮磁化焙烧扩大连续试验研究[J]. 金属矿山, 2020, (5): 178−184.)

[3] Yang Zhaojun, Wang Fengyu, Luo Rongfei, *et al*. Magnetic separation and enrichment method of ultrafine vanadium-bearing titanomagnetite in Panxi region[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2019, 40(3): 26−29.
(杨招君, 王丰雨, 罗荣飞, 等. 攀西超细粒级钒钛磁铁矿磁选富集方法[J]. 钢铁钒钛, 2019, 40(3): 26−29.)

[4] Zheng Xike. Enrichment of associated cobalt in vanadium titanomagnetite from Panxi area[D].Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
(郑析科. 攀西地区钒钛磁铁矿中伴生钴的富集规律[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.)

[5] Li Lixia, Shen Shuaiping, Yuan Zhitao, *et al*. Loss mechanism of fine-grainedimenite in magnetic separation[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(11): 138−144.
(李丽匣, 申帅平, 袁致涛, 等. 微细粒钛铁矿磁选回收率低原因分析[J]. 中国矿业, 2018, 27(11): 138−144.)

[6] Wang Hongbin, Li Jin, Zhang Guohua. Study on efficient recovery process of ilmenite from vanadic titanium magnetite in Panxi area[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2020, 41(3): 23−29.
(王洪彬, 李金, 张国华. 攀西钒钛磁铁矿中钛铁矿高效回收工艺研究[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(3): 23−29.)

[7] Li Junhan, Sun Ning, Ma Lan, *et al*. Study on the mineralogical characteristics of titano-magnetite of V-Ti magnetite ore in Panxi region[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2018, 39(5): 98−105.
(李俊翰, 孙宁, 马兰, 等. 攀西某钒钛磁铁矿中钛磁铁矿的矿物特征研究[J]. 钢铁钒钛, 2018, 39(5): 98−105.)

[8] Gao Yongzhang. Vanadium resources and it's supply and demand situation in China[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(S2): 5−10.
(高永璋. 中国钒矿资源及供需形势分析[J]. 中国矿业, 2019, 28(S2): 5−10.)

[9] Liu Mudan, Liu Yong, Zhou Jikui, *et al*. Experimengal research on metallurgical enrichment crude concentrate from benefication of V-Ti-Fe polymetallic ore[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2019, 47(6): 15−19.
(刘牡丹, 刘勇, 周吉奎, 等. 钒钛铁多金属矿选矿粗精矿冶金富集试验研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2019, 47(6): 15−19.)

[10] Liao Qian, Gong Wenyong, Zhang Hua, *et al*. Experimental study on gravity and magnetic separation proces sfor coastal placer in Mozambique[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019, 39(6): 54−56.
(廖乾, 龚文勇, 张华, 等. 莫桑比克某海滨砂矿重选—磁选工艺试验研究[J]. 矿冶工程, 2019, 39(6): 54−56.)

[11] Wang Xun, Han Yuexin, Li Yanjun, *et al*. Processing mineralogical genetic characterization ofaforeign refractory iron ore[J]. Metal Mine, 2019, (2): 178−182.
(王勋, 韩跃新, 李艳军, 等. 国外某难选铁矿石工艺矿物学基因特性研究[J]. 金属矿山, 2019, (2): 178−182.)

[12] Yu Lianxiang, Zhou Jikui, Liu Jun, *et al*. Study on pricess mineralogy and separation technology of titanium-zirconium rough concentrate with refractory hematite in Malawi[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, (6): 171−178.
(喻连香, 周吉奎, 刘军, 等. 马拉维含难分离赤铁矿的钛锆粗精矿工艺矿物学及分离新技术的研究[J]. 矿山保护与利用, 2019, (6): 171−178.)

[13] Hu Yibo, Ye Guohua, Wang Heng, *et al*. Market analysis of vanadium and progress on technologies of vanadium extraction from stone coal[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2019, 40(2): 31−40.
(胡艺博, 叶国华, 王恒, 等. 钒市场分析与石煤提钒工艺进展[J]. 钢铁钒钛, 2019, 40(2): 31−40.)

编辑 杨冬梅