新疆哈密某铁矿综合利用试验研究*

张莉，蒋升国，王玉山

（新疆维吾尔自治区地质局矿产实验研究中心
新疆岩石矿物分析及工艺矿物学研究重点实验室， 新疆 乌鲁木齐 830091）

摘要：新疆哈密地区贫铁矿资源丰富。某铁矿TFe品位为14%～20%，伴生Ti、V、P，属于超贫钒钛磁铁矿。为探究其有用组分综合利用的可能性，开展了物相分析、镜下鉴定等矿石工艺矿物学研究工作，查明了磁铁矿、钛铁矿、磷灰石等有用矿物的赋存状态、嵌布方式和嵌布粒径。在此基础上，开展了干式预选工艺和铁（钒）、钛、磷的综合回收试验研究工作。最终确定全流程原则试验流程：干式预选—浮选脱硫—浮选回收磷—弱磁选铁—重选回收钛，获得的铁精矿TFe品位为57.15%，作业回收率为34.31%；钛精矿TiO_2品位为46.40%，作业回收率为20.08%；磷精矿P_2O_5品位为28.25%，作业回收率为53.81%。对试验获得的多种精矿产品进行稀土元素的配分测定，发现稀土与磷灰石的相关性最高，在磷精矿中稀土回收率达60%。研究成果可为新疆地区此类钒钛磁铁矿的综合利用提供参考。

关键词：超贫钒钛磁铁矿；工艺矿物学；稀土；磷灰石；综合回收

中图分类号：TD951 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)04-0249-08

Experimental Study on Comprehensive Utilization of an Iron Ore in Hami of Xinjiang

ZHANG Li, JIANG Shengguo, WANG Yushan

(Xinjiang Key Laboratory of Rock Mineral Analysis and Process Mineralogy, Xinjiang Uygur Autonomous Region Bureau of Geology Mineral Experimental Research Center, Urumqi, Xinjiang 830091, China)

Abstract: The Hami region of Xinjiang is rich in low-grade iron ore. A certain iron ore has a TFe grade ranging from 14% to 20%, with associated Ti, V, and P, and it is classified as an ultra-low-grade vanadium-titanium magnetite. To explore the potential for comprehensive recovery of its valuable components, process mineralogy studies including phase analysis and microscopic identification were carried out. The occurrence state, dissemination characteristics, and particle size of valuable minerals such as magnetite, ilmenite, and apatite were determined. On this basis, experimental studies on dry pre-concentration and the comprehensive recovery of iron (vanadium), titanium, and phosphorus were carried out. A full-process principle flowsheet was ultimately determined as dry pre-concentration-flotation for desulfurization-flotation for phosphorus recovery-low-intensity magnetic separation for iron-gravity separation for titanium recovery. An iron concentrate with a TFe grade of 57.15% and an operating recovery of 34.31%, a titanium concentrate with a TiO_2 grade of 46.40% and an operating recovery of 20.08%, as well as a phosphorus concentrate with a P_2O_5 grade of 28.25% and an operating recovery of 53.81% have been obtained. Rare earth element partitioning analysis was conducted on the various concentrate products obtained from the experiments, and the results show that rare earth elements exhibit the highest correlation with apatite, with a rare earth recovery of 60% in the phosphorus concentrate. The research findings can serve as a reference for the comprehensive utilization of such vanadium-titanium magnetite resources in the Xinjiang region.

Key words: Ultra-low-grade vanadium-titanium magnetite, Process mineralogy, Rare earth, Apatite, Comprehensive recovery

0 引言

我国铁矿石资源的特点是贫矿多、富矿少，伴生矿产多，铁矿床大都共生或伴生有益组分。铁矿床中的共生、伴生资源成为我国有色金属和稀土金属的重要来源[1]。目前，白云鄂博铁矿伴生稀土已成为我国稀土的重要来源，攀枝花、西昌、承德大庙等铁矿伴生的钒钛成为钒、钛、磷等资源的重要来源。

* **收稿日期**：2025-04-22

作者简介：张莉（1973—），女，河南商丘人，高级工程师，主要从事黑色金属、有色金属、稀贵金属的选矿试验工作。E-mail：1194805465@qq.com

钒钛磁铁矿由于含有多种有价金属,因而综合利用价值更高。我国钒钛磁铁矿矿产资源主要分布在四川、河北、辽宁、陕西、新疆等地[2]。由于矿石成分复杂、嵌布粒度不均匀等特点,回收利用率普遍较低[3]。近年来,随着选矿设备、选矿分选技术和选矿药剂的创新与突破,我国四川攀西地区、河北承德地区的钒钛磁铁矿综合利用水平不断提高,成为钒钛磁铁矿资源开发利用的示范区。陕西安康地区的低品位钒钛磁铁资源已完成选矿试验研究,最终获得的铁精矿产率为12.35%,TFe 品位为 50.18%,TFe 回收率为 29.37%;钛精矿产率为 6.38%,TiO_2 品位为 45.34%,对原矿 TiO_2 回收率为 38.31%,较好地实现了铁、钛的回收[4]。

新疆哈密地区钒钛资源量大,某铁矿是新疆东部地区较为典型的矿床,TFe 含量为 14.55%,MFe 含量为 4.75%,TiO_2 含量为 4.34%,V_2O_5 含量为 0.06%,属于超贫钒钛磁铁矿[5-7],并伴生磷灰石,P_2O_5 含量为 1.93%。本次对该矿开展矿石工艺矿物学及选矿试验研究,旨在推动该铁矿及本地区大量铁钛资源的开发利用。

1 矿石性质研究

1.1 试验原料

试验原料采自新疆哈密某钒钛磁铁矿,采集多个点样并混匀,破碎加工至-2 mm 后取样开展化验分析(以下简称原矿),成分分析结果见表 1 和表 2。

表 1 X 荧光半定量分析结果

Table 1 X-ray fluorescence semi-quantitative analysis results

%

Fe	Si	Al	K	Mn	Ca	Ba
19.54	24.8	8.8	1.0	0.42	8.94	0.3
Ti	S	P	Cu	V	Cr	Cl
3.3	0.44	1.7	0.00	0.05	0.007	0.10
Sr	Zn	Ni	Zr	Y	Mg	Na
0.09	0.03	0.007	0.007	0.009	3.90	2.3

表 2 化学多项分析结果

Table 2 Chemical multielement analysis results

%

TFe	MFe	TiO_2	MgO	Al_2O_3	P_2O_5
14.55	4.75	4.34	6.50	12.55	1.93
SiO_2	CaO	V_2O_5	Zn	Pb	Co
40.90	9.29	0.06	0.014	0.001	0.003
Ni	Cu	S	Cr	Nb*	In*
0.002	0.004	0.41	0.002	5.15	0.08
Au*	Ag*	Sn*	Ta*		
0.01	0.5	1.85	0.54		

注:* 表示单位为$\times 10^{-6}$。

由半定量分析结果可知,Fe、V、Ti 和 P 这 4 种有价元素含量需做进一步的定量化学分析测定。

原矿伴生有益组分多种:TiO_2 含量为 4.34%,P_2O_5 含量为 1.93%,V_2O_5 含量为 0.06%,Ag 含量为 0.5×10^{-6}。对照地质勘查规范,铁矿石中伴生组分的参考含量如下:除主要元素铁之外,伴生的 P_2O_5 已达到回收标准,TiO_2、V_2O_5 接近综合回收参考含量。伴生元素 Co、Ni、Cu 含量较低,无需进行伴生回收。

1.2 物相分析结果

对原矿分析样品进行铁物相分析和钛物相分析,所得数据见表 3 和表 4。

表 3 铁物相分析

Table 3 Phase analysis of iron

%

物相名称	TFe 含量	TFe 分布率
磁性铁中铁	5.04	34.64
菱铁矿中铁	1.50	10.31
黄铁矿中铁	0.11	0.76
赤褐铁中铁	2.76	18.97
硅酸铁中铁	5.14	35.32
全铁	14.55	100.00

由表 3 可知,矿石中的铁主要赋存于硅酸铁和磁性铁中,其分布率分别为 35.32%和 34.64%。虽然磁性铁是弱磁选回收的主要对象(理论回收率 34.64%),但硅酸铁及赤褐铁(合计分布率 54.29%)占比高,这部分铁难以通过常规磁选有效回收,是影响总回收率的关键因素。

表 4 钛物相分析

Table 4 Phase analysis of titanium

%

物相名称	Ti 含量	Ti 分布率
钛磁铁矿中钛	0.32	9.97
金红石中钛	0.40	12.46
钛铁矿中钛	1.54	47.97
硅酸盐中钛	0.95	29.60
总钛	3.21	100.00

由表 4 可知,钛主要分布于钛铁矿中,其分布率为 47.97%,其次分布于硅酸盐(29.60%)和金红石(12.46%)中;钛磁铁矿中钛的分布率最低,为 9.97%。因此,采用选矿方法回收钛的目的矿物主要为钛铁矿,其理论回收率为 47.97%。

1.3 矿物组成研究

经显微镜下观察,结合电子探针、X 射线衍射及红外分析,共鉴定出 24 种矿物,分为 3 类。其中,金

属氧化物 4 种:钛铁矿、磁铁矿、赤褐铁矿、赤铁矿;金属硫化物 5 种:磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿、白铁矿、铜蓝;透明矿物 15 种:主要为普通辉石和基性斜长石(拉长石),次为橄榄石、普通角闪石、黑云母、磷灰石及其蚀变矿物阳起石、透闪石、滑石、高岭石、绢云母、碳酸盐及绿泥石等。

磁铁矿和钛铁矿的嵌布粒径多数较粗,嵌布方式简单,多充填于透明矿物之间,粒径以 0.06～1.2 mm 为主。仅有少部分磁铁矿粒径较细,在 0.002～0.06 mm 之间,这部分磁铁矿嵌布方式较复杂,多包裹在透明矿物中或与透明矿物复杂交生。

钛铁矿结晶形态分两类:

(1) 呈半自形-它形粒状,部分呈不规则粒状或拉长状,粒径变化大,介于 0.04～1.2 mm 之间,多数在 0.1～0.8 mm 之间;

(2) 呈片状或网格状分布在磁铁矿中,长宽约(0.2～0.6) mm×(0.002～0.06) mm,长宽比较大,属于固溶体分离产物。

钛铁矿主要有两种嵌布方式:

(1) 呈独立单体或与磁铁矿简单连生在一起,但与磁铁矿之间常常存在一个熔蚀反应边结构,边界具有弯曲模糊不清的特点,这种嵌布形式约占 75%;

(2) 呈片状、网格状嵌布在磁铁矿中,数量较少,这种嵌布方式约占 15%～20%。

磁铁矿主要呈它形-半自形粒状,部分外形不规则,呈多角状、拉长状,自形晶少见。嵌布粒度变化较大,在 0.01～1.6 mm 之间,多数在 0.1～1.2 mm 之间。磁铁矿嵌布方式有 3 种:

(1) 呈独立单体、连生体或与钛铁矿简单连生在一起(见图 1(a)),占 85%以上,但与钛铁矿之间通常存在一个熔蚀反应边结构;

(2) 与透明矿物呈文象状连生,粒径细,在 0.005～0.05 mm 之间,形态较复杂,约占 2%;

(3) 包裹在蚀变透明矿物中的磁铁矿,数量少,仅在部分矿石中可见,粒径很细,在 0.01～0.06 mm 之间,形态呈它形粒状、枝状和脉状分布,占磁铁矿总量的 2%～4%。

磷灰石粒径较粗,横切面粒径在 0.04～0.2 mm 之间,纵切面粒径在(0.2～1.2) mm×(0.06～0.2) mm 之间,分布在透明矿物粒间,或包裹于透明矿物及金属矿物中。磷灰石电子探针结果见表 5,其主元素平均含量分别为 CaO 53.62%、P_2O_5 32.43%、FeO 7.69%。从多个分析结果来看,铁含量变化较大,介于 1%～13%之间,颜色上也有色调深浅之分,含铁较高的磷灰石颜色较深。此外,磷灰石 Yb、Co 等元素含量较高,矿石中出现 Yb 异常,与矿石含有磷钇矿有关。

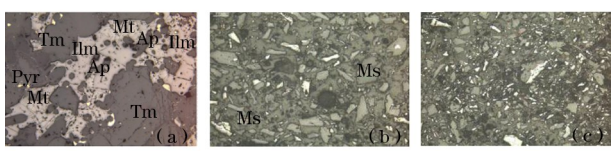


图 1 显微照片

Fig.1 Micrographs

表 5 磷灰石电子探针分析结果

Table 5 Analysis results of apatite electron probe %

序号	样品分类	FeO	P_2O_5	CaO	SiO_2	Yb_2O_3	CoO	V_2O_5	MgO
1	深色磷灰石	8.05	26.92	54.40	2.75	4.48	—	—	—
2	浅褐色磷灰石	1.97	37.27	58.90	—	—	1.86	—	—
3	黄色磷灰石	13.06	33.09	47.57	3.89	—	—	—	2.39
	平均值	7.69	32.43	53.62	3.32	—	—	—	—

2 有价组分综合回收试验研究

2.1 干式预选富集试验

试验样品主元素 TFe、Ti 含量低,故首先通过干式预选提高入选样品的品位。为了降低选矿成本,王建平等开展了攀西钒钛磁铁矿废石的抛尾试验[8]。刘琴对攀西超贫钒钛磁铁矿开展粗粒抛尾研究[9],并选择合适的磁场强度以提高入选样品中铁、钛的品位。

哈密地区干旱,预选原则试验流程见图 2,磁场强度试验条件为:样品粒度为 0～2 mm,试验结果见图 3。入选粒度试验和磁场强度试验:设备选用干式工业磁滑轮,皮带运行速度(以下简称带速)1.5 m/s,试验结果见图 4 和图 5。

由图 3 至图 5 可知,磁性铁回收率很高;0～2 mm 粉矿预选中 TiO_2 回收率较低;较低的带速有利于 TiO_2 的回收。最终确定的试验条件为:破碎粒度为 0～16 mm、磁场强度为 4.77×10^5～$6.37\times$

10^5 A/m、带速为 1.5 m/s。经预先富集后,干选精矿中 TFe 的作业回收率为 77.60%,TiO_2 的回收率为79.22%,MFe 的回收率约 99%。干选精矿中 TFe、TiO_2 的回收率呈正相关关系。

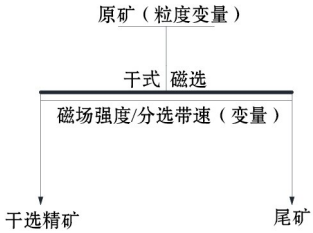


图 2 预选原则试验流程

Fig.2 Pre-selection principle test process

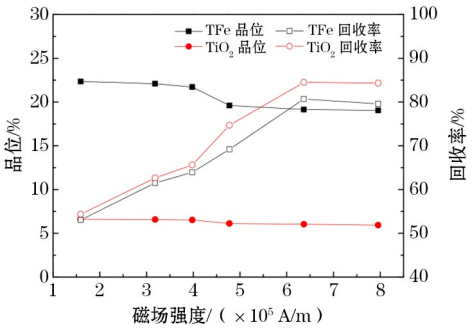


图 3 磁场强度试验结果

Fig.3 Magnetic field strength test result

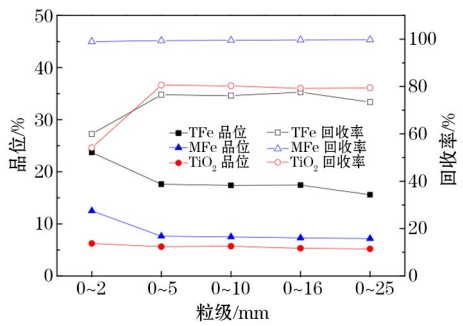


图 4 入选粒度试验结果

Fig.4 Selected granularity test results

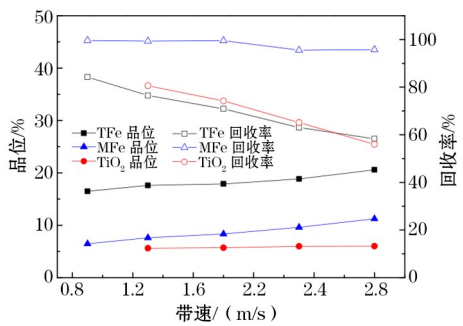


图 5 干选带速试验结果

Fig.5 Dry separation belt speed test results

2.2 弱磁选铁试验

在条件试验的基础上进行弱磁选铁磨矿细度验证试验,试验流程见图 6,试验结果见图 7。

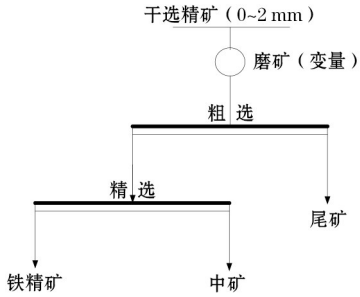


图 6 磁选磨矿细度试验流程

Fig.6 Magnetic separation grinding fineness test process

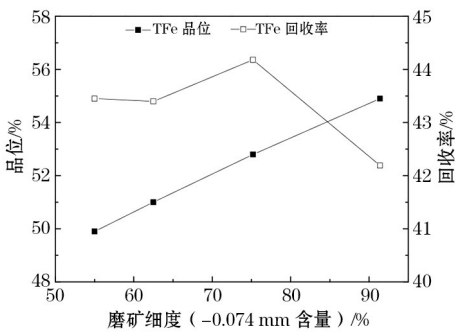


图 7 磁选铁磨矿细度试验结果

Fig.7 Magnetic iron grinding fineness test results

干选精矿阶段破碎至 0～2 mm 后,细磨至−0.074 mm 粒径含量为 75%,经两段湿法磁选,可获得的铁精矿 TFe 品位 52.80%,作业回收率 44.18%,其中 TiO_2 品位 6.80%,V_2O_5 品位0.43%,P_2O_5 品位 0.16%,与攀西式铁精矿含铁品位接近。铁精矿再磨再选,精矿品位可提高到 56.63%。

2.3 重选法回收钛试验

干选精矿 TiO_2 品位 5%,−0.074 mm 含量为 75%,一段重选试验结果见图 8。

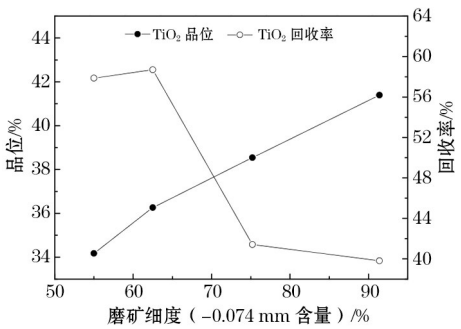


图 8 重选钛磨矿细度试验结果

Fig.8 Grinding fineness test results of gravity separation titanium

钛精矿 TiO_2 品位可达到 38.54%，作业回收率 41.42%。一段粗选一段精选两段选别钛精矿品位可提高到 45.30%，作业回收率 36.74%。浮选脱硫铁精矿 TiO_2 品位可提至 46.60%。由尾矿粒度分析可知，重选法对细粒级钛矿物回收差。吴登平等[10]、王祥波等[11]对攀枝花矿区低品位钒钛磁铁矿进行了工艺优化：通过“先浮硫”工艺，并对选矿系统的磨矿分级环节进行调整，提升了磨矿产品中－0.074 mm 的含量，同时降低 0.038 mm 细泥的含量，这一改进显著优化了钛铁矿的选别粒度，钛铁矿回收率提高了 6.85%。

2.4　强磁选－浮选回收钛试验

钛磁铁矿中极微细粒的钛铁矿片晶难以通过选矿得到有效回收，钛磁铁矿、榍石、辉石等矿物中的钛属于难利用的分散钛，从而制约了钛的回收率[12]。攀钢集团矿业有限公司通过技术改造，用强磁选机替代“重选＋浮选”工艺，使钛精矿产量较 2006 年增长了 365.67%[13]。薛忠言等[14]以攀西地区某钒钛磁铁矿为研究对象，在系统研究矿石性质的基础上，确定了“原矿高压辊磨—磁选预选—阶段磨矿阶段弱磁选铁—选铁尾矿再磨—强磁富集—浮选选钛”的工艺流程，最终获得的选别指标为：铁精矿 TFe 品位和回收率分别为 62.49%和 31.05%，钛精矿 TiO_2 品位和回收率分别为 46.38%和 21.53%。

选用 SLon 立环脉动强磁选机完成强磁选钛试验，磁感应强度试验结果见图 9。

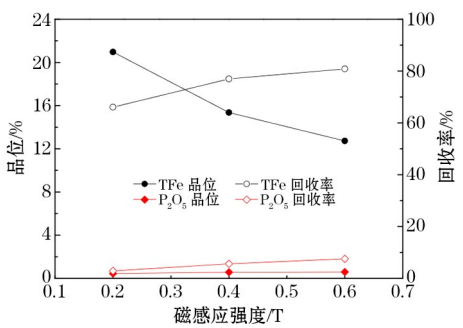


图 9　强磁选钛试验结果

Fig.9　Experimental results of high intensity magnetic separation of titanium

从磁感应强度条件试验及强磁精、尾矿粒度分析结果可以看出，强磁法对细粒级的钛回收效果较好，－0.045 mm 以下粒级含量占比为 75%。0.6 T 磁感应强度下获得的强磁精矿品位为 12.73%，作业回收率为 80.82%。矿物组成（见图 1(b)和图 1(c)）。强磁选精矿成分复杂，主要为脉石矿物(Ms)辉石和少量角闪石及黑云母，含量可达 90%，金属矿物为钛铁矿(Ⅱ)，约占 10%～25%。其次，有少量的硫化物黄铁矿。目的矿物绝大多数已被单体解离，占比约 95%，仅有少量包裹在脉石矿物中。选用浮选工艺，用黄药捕收硫化物，再用油酸钠作捕收剂，经一段粗选二段精选的闭路流程，最终获得品位为 41.39%、作业回收率为 38.48%的精矿。

2.5　磷浮选试验

徐永新等[15]对河北省承德地区超贫钒钛磁铁矿开展了试验，论证了选铁同时综合回收钛、磷的可行性。室温(15 ℃)条件下浮选，矿浆 pH 调整至 10，添加适量抑制剂，试验流程见图 10，试验结果见表 6。

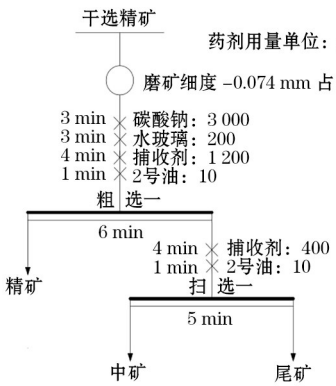


图 10　捕收剂种类及用量试验流程

Fig.10　Flotation collector types and contents test process

表 6　捕收剂种类及用量试验结果

Table 6　Results of flotation collector types and contents test process

种类	用量/(g/t)	产品名称	作业产率/%	P_2O_5 品位/%	作业回收率/%
油酸钠	粗选：1 200 扫选：400	精矿	8.06	21.64	83.66
		中矿	2.89	3.47	4.81
		尾矿	89.05	0.27	11.53
		干选精矿	100.00	2.08	100.00
氧化石蜡皂	粗选：1 200 扫选：400	精矿	6.63	24.71	80.58
		中矿	2.18	5.56	5.96
		尾矿	91.19	0.30	13.46
		干选精矿	100.00	2.03	100.00
纸浆废液	粗选：1 200 扫选：400	精矿	17.08	10.99	92.46
		中矿	1.21	1.18	0.70
		尾矿	81.71	0.17	6.84
		干选精矿	100.00	2.03	100.00
油酸钠＋纸浆废液	粗选：1 000＋200 扫选：330＋70	精矿	9.09	20.19	89.75
		中矿	2.38	3.23	3.76
		尾矿	88.53	0.15	6.49
		干选精矿	100.00	2.04	100.00

对比氧化石蜡皂、纸浆废液、油酸钠等阴离子捕收剂的选别效果，组合捕收剂的回收率高，但精矿产率大，精矿品位低，后续试验选用单一捕收剂油酸钠。

提高浮选温度有利于磷回收,30 ℃(加温)浮选磷比 15 ℃(室温)指标好,回收率可从 83.66%提高到 95.16%,尾矿 P_2O_5 品位从 0.27%降至 0.10%。

2.6 开路和全流程闭路试验

哈密某铁矿中有价元素种类多,回收方法各异,导致选别工艺流程较为复杂,且存在铁、钛、磷的回收顺序问题。另外,矿石中含有磁黄铁矿等硫化矿物,此类矿物占比高、具有电磁性,若前期流程中未予以脱除,将影响后续铁精矿和钛铁矿精矿的质量。因此,在工艺中设置浮选脱硫作业对提高铁精矿与钛精矿的产品质量至关重要。冀成庆等[16]以攀西钒钛磁铁矿为研究对象,针对伴生硫资源的回收问题,提出了重点推广源头选硫产线介入的路径,以达到降碳减污的目的。全流程闭路试验数质量流程见图 11,铁钛磷回收开路试验采用工艺流程:浮选法脱硫→浮选法选磷→弱磁选铁→磁重选钛。开路试验主要产品分析见表 7,全流程闭路试验主要结果见表 8。

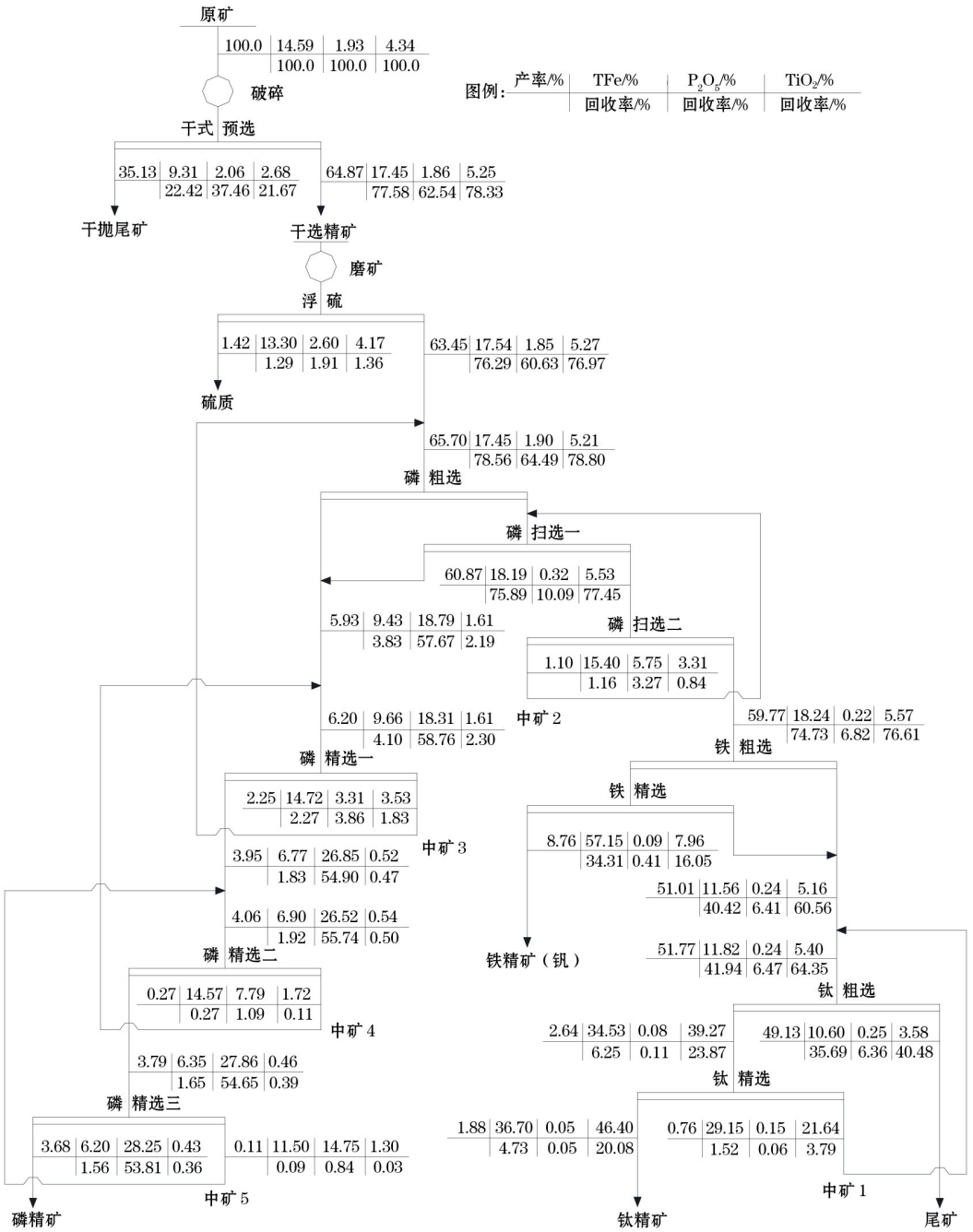


图 11 全流程闭路试验数质量流程

Fig.11 Number quality process of the whole closed-circuit test

表 7 开路试验结果

Table 7 Results of open-circuit test

产品名称	作业产率/%	品位/%					对干选精矿的作业回收率/%				
		TFe	P_2O_5	TiO_2	S	V_2O_5	TFe	P_2O_5	TiO_2	S	V_2O_5
磷精矿	5.67	6.25	28.16	0.50	0.20	0.02	2.03	78.65	0.53	2.31	1.62
铁精矿	11.06	57.25	0.08	5.97	0.25	0.50	36.28	0.43	12.46	5.64	79.00
钛精矿	2.90	36.65	0.06	46.60	0.08	0.09	6.09	0.09	25.50	0.47	3.73
干选精矿	100.00	17.45	2.03	5.30	0.49	0.07	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

表 8 全流程闭路试验结果

Table 8 Results of the whole process closed-circuit test

产品名称	产率/%	品位/%			对原矿的回收率/%		
		TFe	P_2O_5	TiO_2	TFe	P_2O_5	TiO_2
磷精矿	3.68	6.20	28.25	0.43	1.56	53.81	0.36
铁精矿	8.76	57.15	0.09	7.96	34.31	0.41	16.05
钛精矿	1.88	36.70	0.05	46.40	4.73	0.05	20.08
尾矿	49.13	10.60	0.25	3.58	35.69	6.36	40.48
硫质	1.42	13.30	2.60	4.17	1.29	1.91	1.36
尾矿	35.13	9.31	2.06	2.68	22.42	37.46	21.67
原矿	100.00	14.59	1.93	4.34	100.00	100.00	100.00

开路试验结果表明:干选精矿中,磷精矿 P_2O_5 的作业回收率为 78.65%。钒随铁精矿综合回收,其作业回收率为 79.00%。

全流程闭路试验中,磷精矿 P_2O_5 对原矿回收率为 53.81%。回收率偏低的主要原因是预选尾矿未进入磷浮选回收试验。张韶敏[17]从河北承德钒钛磁铁矿尾矿中较好地回收了磷资源,表明预选尾矿中的磷资源具备回收潜力。

2.7 稀土元素分析测试

稀土氧化物(Rare Earth Oxide,REO)总量为 190.7×10^{-6},产品稀土元素分析结果见表 9,其中磷精矿的 REO 总量为 $2\,009.5\times10^{-6}$,明显高于其他产品。

表 9 稀土元素分析结果

Table 9 Analysis results of rare earth elements

$\times10^{-6}$

产品名称	Y_2O_3	La_2O_3	CeO_2	Pr_6O_{11}	Nd_2O_3	Sm_2O_3	Eu_2O_3	Gd_2O_3	Tb_4O_7	Dy_2O_3	Ho_2O_3	Er_2O_3	Tm_2O_3	Yb_2O_3	Lu_2O_3	REO
原矿	40.4	18.40	45.3	7.30	37.7	9.50	5.30	8.60	1.40	7.60	1.60	3.70	0.50	3.00	0.42	190.7
干选精矿	39.9	17.30	43.7	7.10	37.2	9.30	5.00	8.30	1.30	7.60	1.50	3.60	0.50	2.80	0.39	185.5
磷精矿	316.0	237.00	565.0	87.00	430.0	97.70	45.90	89.20	12.60	65.00	12.30	28.30	3.40	17.80	2.30	2 009.5
钛铁精矿	2.1	0.72	1.7	0.28	1.4	0.39	0.21	0.35	0.06	0.37	0.08	0.23	0.04	0.36	0.08	8.9
铁精矿	2.2	0.86	1.9	0.28	1.5	0.36	0.22	0.34	0.05	0.34	0.08	0.16	0.03	0.16	0.02	8.0

3 结论

(1) 通过化学分析、显微镜下鉴定等方法,查明了矿石的物质组成和化学组成。有用矿物磁铁矿、钛铁矿的嵌布粒度多数较粗,嵌布方式较为简单。磷灰石粒径较粗,电子探针分析表明,磷灰石与磷钇矿关系密切。

(2) 采用“浮选脱硫→浮选法选磷→弱磁选法选铁→强磁→重选选钛”的工艺流程,获得了铁精矿、钛精矿、磷精矿等产品。闭路试验结果表明:铁精矿 TFe 回收率为 34.31%,钛精矿 TiO_2 回收率为 20.08%。原矿铁物相分析和钛物相分析表明,磁性铁的理论回收率为 34.64%、钛铁矿的理论回收率为 47.97%。对比可知,该超贫钒钛磁铁矿磁性铁易回收。但钛回收率偏低的主要原因是细粒级钛矿物的回收工艺尚未深入开展研究。

(3) 预选可提高入选品位,有利于降低生产成本,有利于推进试验。干式预选尾矿 P_2O_5 含量为 2.06%,应再磨再选进行磷的回收试验。

(4) 原矿含 S 0.41%,主要来自磁黄铁矿、黄铁矿等金属硫化物。试验结果表明,硫对 Fe、Ti、P 产品有负面影响,因此,选别工艺流程中增加浮选脱硫工艺。但先浮硫后磁选,还是磁选后再脱硫;先浮选磷,还是先选铁、选钛再选磷的工艺流程更合理更优,有待于深入研究。

(5) 由选磷试验指标分析,伴生磷回收率更高。对试验所得各精矿产品进行稀土元素化学分析,验证了磷灰石是稀土元素的重要载体矿物,磷精矿伴生稀土的回收率约为 60%。研究结果对新疆哈密地区此类资源,特别是新疆哈密尾亚钒钛磁铁矿伴生磷资源大型矿床的开发利用具有参考价值。

参考文献(References):

[1] 杜劲光.我国铁矿床中的主要伴生组份及其回收利用现状[J].地质与勘探,1987(2):22-25.
DU Jinguang. Main associated components in iron ore deposits in China and their recycling status[J]. Geology and Exploration, 1987(2):22-25.

[2] 严伟平,张博远,杨耀辉.中国钒钛磁铁矿资源概况及综合利用技术进展[J].金属矿山,2024(11):70-80.
YAN Weiping, ZHANG Boyuan, YANG Yaohui. Overview and progress in comprehensive utilization technology of vanadium titanium magnetite resources in China[J]. Metal Mine,2024(11):70-80.

[3] 罗嘉欣,唐敏,付嘉豪.我国钒钛磁铁矿尾矿综合利用现状[J/OL].矿产综合利用:1-14[2025-04-19]. https://link.cnki.net/urlid/51.1251.TD.20241209.1502.002.
LUO Jiaxin, TANG Min, FU Jiahao. Comprehensive utilization status of vanadium-titanium magnetite tailings in China [J/OL]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources:1-14[2025-04-19]. https://link.cnki.net/urlid/51.1251.TD.20241209.1502.002.

[4] 杨耀辉,严伟平,徐东,等.陕西安康地区低品位钒钛磁铁矿选矿实验研究[J].矿产综合利用,2021(5):193-197.
YANG Yaohui, YAN Weiping, XU Dong, et al. Experimental study on beneficiation of low-grade vanadium-titanium magnetite in Ankang area, Shaanxi [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(5): 193-197.

[5] GB/T 42346—2023 钒钛磁铁矿综合利用[S].

[6] DB13/T 1349—2010 超贫磁铁矿勘查技术规范[S].

[7] 谢承祥,张晓华,王少波,等.承德市超贫(钒钛)磁铁矿特征[J].矿床地质,2006,25(增刊1):487-490.
XIE Chengxiang, ZHANG Xiaohua, WANG Shaobo, et al. Characteristics of the extremely poor vanado-titanomagnetite deposit in Chengde City, Hebei Province [J]. Mineral Deposits,2006,25(Suppl.1):487-490.

[8] 王建平,李韦韦,罗德强.攀西某钒钛磁铁矿废石抛尾实验[J].矿产综合利用,2025,46(1):181-187.
WANG Jianping, LI Weiwei, LUO Deqiang. Test ondiscarding tailings of waste rocks of a vanadium-titanium magnetite in Panxi Area[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2025,46(1):181-187.

[9] 刘琴,郝磊磊,倪一凡.攀西某极贫钒钛磁铁矿粗粒抛尾试验研究[J].四川有色金属,2024(3):24-26+49.
LIU Qin, HAO Leilei, NI Yifan. Experimental study on coarse tailing of a very poor vanadium titanium magnetite in Panxi[J]. Sichuan Nonferrous Metals,2024(3):24-26+49.

[10] 吴登平,王祥波,赵刘阳.低品位钒钛磁铁矿磨矿分级工艺优化研究与实践[J].钢铁钒钛,2022,43(5):117-122.
WU Dengping, WANG Xiangbo, ZHAO Liuyang. Research and practice on optimization of grinding and classification process of low-grade vanadium titanomagnetite[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2022,43(5):117-122.

[11] 王祥波,吴登平,赵刘阳.攀西某低品位钒钛磁铁矿选厂铁尾矿选钛试验[J].现代矿业,2023,39(8):119-122.
WANG Xiangbo, WU Dengping, ZHAO Liuyang. Experiment on titanium separation from iron tailings of a low-grade vanadium-titanium magnetite concentrator in western Panzhihua [J]. Modern Mining,2023,39(8):119-122.

[12] 马东林,杨耀辉,邓建.新疆某低品位钒钛磁铁矿铁、钛综合回收试验研究[J].钢铁钒钛,2023(5):15-20.
MA Donglin, YANG Yaohui, DENG Jian. Study on the comprehensive recovery of Fe and Ti from a low grade vanadium-titanium magnetite in Xinjiang[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2023(5):15-20.

[13] 谢琪春.攀西选钛尾矿中再回收钛铁矿工艺研究与应用[J].矿冶工程,2018,38(3):40-42.
XIE Qichun. Reclaiming ilmenite from titanium tailings of Panxi Area:technical study and commercial application[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2018,38(3):40-42.

[14] 薛忠言,龚明斌,张凛,等.攀西地区某钒钛磁铁矿铁、钛综合回收试验研究[J].现代矿业,2025,41(2):90-93+99.
XUE Zhongyan, GONG Mingbin, ZHANG Lin, et al. Experimental study on comprehensive recovery of iron and titanium from a vanadium-titanium magnetite ore in Panxi Area[J]. Modern Mining,2025,41(2):90-93+99.

[15] 徐永新,杨鹏,杨欢.超贫钒钛磁铁矿综合回收铁钛磷试验研究[J].现代矿业,2009(5):46-47+65.
XU Yongxin, YANG Peng, YANG Huan. Experimental study on comprehensive recovery of iron, titanium and phosphorus from the super-poor vanadium-titanium magnetite [J]. Modern Mining,2009(5):46-47+65.

[16] 冀成庆,杨耀辉,徐璐,等.攀西钒钛磁铁矿伴生硫资源综合利用及其低碳发展意义[J].矿产综合利用,2023(4):19-26.
JI Chengqing, YANG Yaohui, XU Lu, et al. Comprehensive utilization of associated sulfur resources in Panxi vanadium-titanium magnetite and its significance for low-carbon development [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2023(4):19-26.

[17] 张韶敏.承德地区某超贫钒钛磁铁矿干抛尾矿磷回收[J].矿冶,2014,23(3):38-42.
ZHANG Shaomin. Recovery of phosphorus mineral in the dry-discarding tailings from vanadium-bearing titanomagnetite ore in Chengde[J]. Mining and Metallurgy,2014,23(3):38-42.