

选矿工艺

澳大利亚某复杂钛铁砂矿工艺矿物学研究

Process Mineralogy Study of a Complex Titanium-Iron Placer in Australia

曾子华¹, 白进忠²

(1. 江苏省新能源地质调查大队, 江苏 南京 210041; 2. 江苏省矿产地质调查大队, 江苏 南京 210012)

摘要:采用矿物自动定量分析系统(MLA 650)、电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)、扫描电子显微镜(SEM)结合能谱分析(EDS)等技术,对澳大利亚某复杂钛铁砂矿进行系统工艺矿物学研究。结果表明:铁钛矿物因固熔体分离及氧化蚀变,形成钛铁矿、蚀变钛铁矿、富铁钛铁矿、磁赤铁矿、富钛赤铁矿等复杂组合,脉石以石英、长石为主,金红石、锆石呈细粒分布。矿石主要有价元素为Ti(TiO_2 平均品位2.72%)和Fe(4.74%),可综合回收Zr(0.109%)。钛铁矿与磁性铁矿物粒度集中于0.02~0.32 mm,锆石(0.02~0.16 mm)和金红石(0.01~0.16 mm)呈细粒分布,细磨至0.075 mm时解离度超96%。钛-铁矿物磁性范围重叠(130~550 mT),需通过还原焙烧改性实现磁选分离。研究成果为该类型复杂砂矿的高效分选工艺开发提供了矿物学理论支撑。

关键词:钛铁矿; 砂矿; 氧化蚀变; 工艺矿物学

中图分类号: TD951 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)05-0061-06

Abstract: Using technologies such as the Automatic Mineralogy Quantitative Analysis System (MLA 650), Scanning Electron Microscope (SEM) combined with Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), and Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS), a systematic process mineralogy study was conducted on a complex titanium-iron placer in Australia. The results show that due to solid solution separation and oxidative alteration of iron-titanium minerals, complex associations such as ilmenite, altered ilmenite, iron-rich ilmenite, maghemite, and titanium-rich hematite are formed. Gangue minerals are mainly quartz and feldspar, while rutile and zircon are distributed in fine grains. The main valuable elements in the ore are Ti (average grade of TiO_2 is 2.72%) and Fe (4.74%), with Zr (0.109%) recoverable as a by-product. The particle size of ilmenite and magnetic iron minerals is concentrated in the range of 0.02–0.32 mm, while zircon (0.02–0.16 mm) and rutile (0.01–0.16 mms) are embedded in fine grains. The liberation degree exceeds 96% when the ore is finely ground to 0.075 mm. The magnetic properties of titanium-iron minerals overlap (130–550 mT), requiring magnetic separation via reduction roasting modification. The research results provide a mineralogical theoretical support for the development of efficient separation processes for such complex placer deposits.

Key words: ilmenite; placer; oxidation and alteration; process mineralogy

1 前言

钛铁矿是钛金属及铁资源的重要载体,随着经济发展我国对钛-铁等矿产的需求量不断攀升(张小伟等,2019)。钛铁砂矿工艺矿物学研究近年覆盖范围与深度均有拓展,不少学者做出过研究,聚焦钛铁矿、钒钛磁铁矿的矿物特征及选矿适配性,研究区域以国内为主,攀西、云南等核心产区研究历史最长,新疆、甘肃等新兴区域聚焦低品位、难选矿,海外仅涉及缅甸等少量矿点。学者的研究内容从基础的

矿物组成、嵌布特征、化学组成分析,逐步深入到难选问题研究,如低品位、微细粒、难选矿石的分选可行性^[1-5]。澳大利亚某钛铁砂矿为近年来发现的大型内陆型砂矿,该矿床因表生氧化蚀变、钛铁固熔体分离、风化搬运等作用,形成钛铁矿-赤铁矿-磁铁矿复杂矿物组合,导致钛铁矿物磁性重叠,分离难度显著增加^[6-9],目前针对该类氧化蚀变钛铁砂矿的系统矿物学研究,尤其是矿物磁性与解离特性的耦合关系研究仍较为缺乏^[10-13]。本文通过多技术手段,系统分析矿石的化学成分、矿物赋存状态、粒度

[作者简介] 曾子华(1984—),男,硕士,高级工程师,主要从事固体地质勘查及矿床研究。

[基金项目] 2012年国外矿产资源风险勘查专项基金(苏财建[2012]88号项目9);2020年江苏省一带一路专项基金(苏财资环[2020]20号项目35)。

[引用格式] 曾子华,白进忠. 澳大利亚某复杂钛铁砂矿工艺矿物学研究[J]. 中国矿山工程,2025,54(5):61-66.

分布及磁性特征,为复杂钛铁砂矿的高效磁选分离工艺开发提供矿物学理论依据。

2 试验样品和方法

2.1 试验矿样

矿样为澳大利亚某钛铁砂矿 RC 钻孔组合样(1 900 kg),属重砂矿,原矿中粗粒(>2 mm)占比极少,无需破碎,直接缩分制样。

2.2 试验仪器和方法

成分分析:采用电感耦合等离子光谱仪(ICP-OES)和电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)分析元素成分及含量。

矿物定量与结构:矿物自动定量分析系统(MLA 650)进行矿物自动定量分析,扫描电子显微

镜 SEM (FEI Quanta 200) 结合扫描电镜能谱仪(EDS)表征矿物微结构及成分。

粒度与解离度:激光粒度仪与偏光显微镜(Leica DMR XP)联合测定粒度分布,矿物自动定量分析系统(MLA650)分析磁性产品中矿物解离度。

磁性分析:电磁分选仪(WCF-3)在100~1 100 mT场强下进行磁选分区,结合物相分析确定磁性范围。

3 结果与讨论

3.1 化学成分与矿物组成

1) 化学成分

原矿多元素化学分析结果见表1,原矿 TiO₂ 含量为 2.72%,是回收的主要元素,Fe 含量 4.74%、ZrO₂ 为 0.109%,可综合回收利用。

表1 原矿多元素化学成分分析结果

元素	TiO ₂	Fe	ZrO ₂	Cu	Pb	Zn	S
含量/%	2.72	4.74	0.109	0.001 87	0.003 57	0.004 48	0.006
元素	P	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SiO ₂	CaO	
含量/%	0.011	0.111	1.291	0.114	78.93	0.255	

2) 矿物组成

结合人工重砂鉴定,原砂的 MLA 矿物定量检测结果见表2,原砂中铁钛矿物组成复杂,主要矿物包括钛铁矿、蚀变钛铁矿、富铁钛铁矿、磁赤铁矿、富钛

赤铁矿及赤铁矿,次要矿物为金红石、白钛石、锆石、褐铁矿,微量矿物为独居石;脉石矿物以石英为主,次为长石、高岭土,少量镁坡缕石、方解石等。

表2 原砂的矿物组成及含量

矿物	磁赤铁矿	赤铁矿	富铁钛铁矿	富钛赤铁矿	钛铁矿和蚀变钛铁矿	金红石	白钛石	锆石
含量/%	1.149	0.516	1.774	0.689	3.153	0.028	0.028	0.123
矿物	独居石	石英	长石	高岭土	镁坡缕石	方解石	褐铁矿	其他
含量/%	0.004	69.764	14.096	6.566	1.199	0.416	0.106	0.389

3.2 粒度与解离度特征

1) 主要矿物的粒度组成

测定原砂中各主要矿物的粒度分布,结果如图1所示。结果表明,钛铁矿粒度一般为0.02~0.32 mm,0.08~0.16 mm 占比约50%,与赤铁矿、磁赤铁矿的基本一致;富钛赤铁矿与富铁钛铁矿的粒度接近,比钛铁矿稍粗,而锆石粒度稍细;金红石的粒度最细。

2) 主要矿物的解离度特征

砂矿中大量钛铁矿含赤铁矿片晶,赤铁矿也含钛铁矿片晶,这部分钛铁矿和赤铁矿即使磨矿也无法获得纯净的单体颗粒,因此将含赤铁矿片晶的富

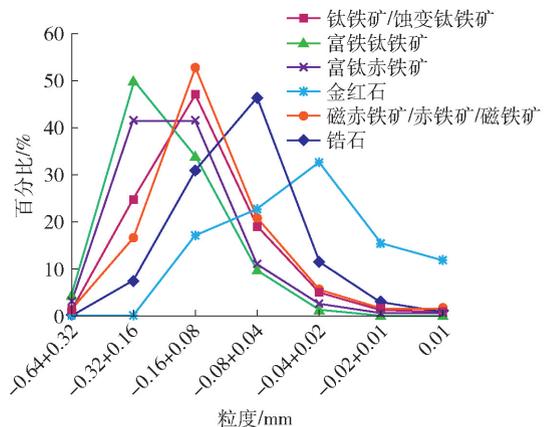


图1 原砂中各主要矿物的粒度分布图

铁钛铁矿和含钛铁矿片晶的富钛赤铁矿均视为单体颗粒,测定原砂磁性产品中钛铁矿(包括蚀变钛铁矿和富铁钛铁矿)和赤铁矿(包括赤铁矿和富钛赤铁矿)的单体解离度,结果如图2所示,细磨至0.075 mm时解离度超96%。

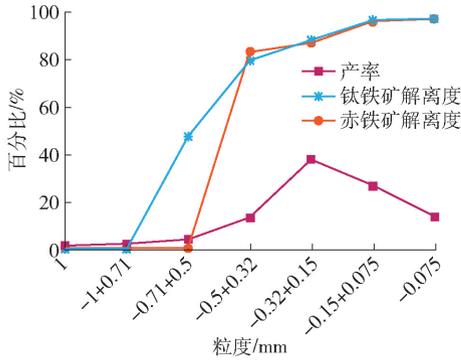


图2 磁性产品中钛铁矿和赤铁矿的解离度分布图

3.3 主要矿物的嵌布状态和矿物学特性

1) 钛铁矿和富铁钛铁矿

砂矿中钛矿物以复杂类型组合为特征,钛铁矿的颜色为铁黑色,光泽为半金属至油脂光泽,磨圆度较差,多呈次棱角状至次棱角状,一般以单体形式产出为主,可见与赤铁矿、磁铁矿或黏土矿物的连生现象(图3(d))。主要矿物相为钛铁矿(图3(a)),其次为富铁钛铁矿(含赤铁矿或磁铁矿片晶,图3(b)),少量可见蚀变钛铁矿(图3(c))。能谱分析(EDS)表明(表3),各类钛铁矿的TiO₂量一般为31.05%~54.68%(均值44.19%),FeO含量一般为43.01%~65.91%(均值52.99%),并普遍含Mn、Si、Mg、Al等元素,个别矿物颗粒含Zn、Cr、Nb等微量元素。

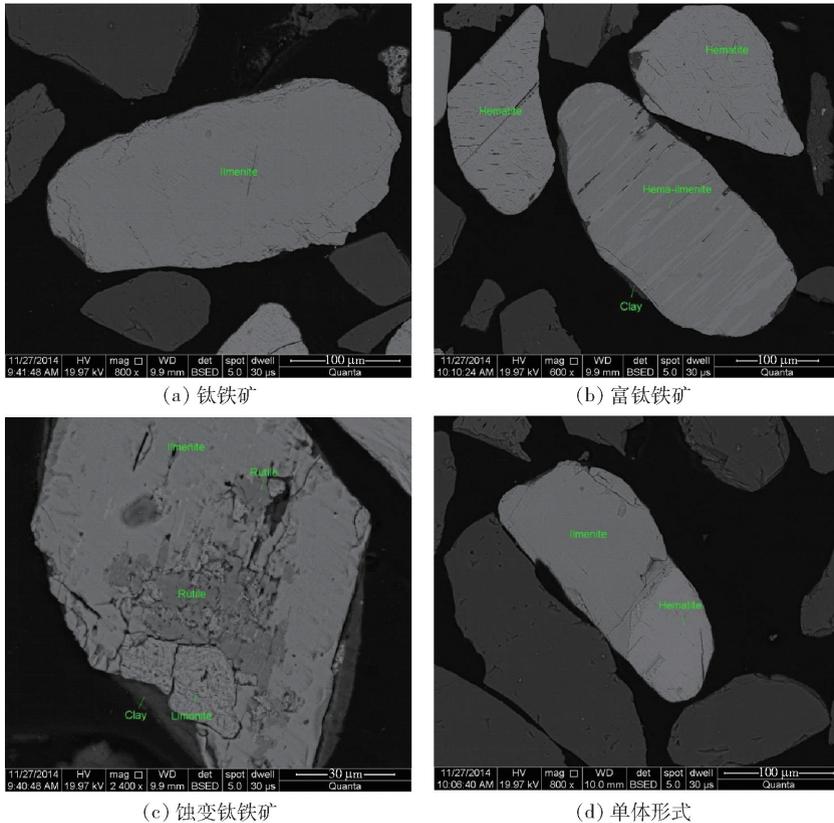


图3 钛铁矿的背散射电子(BSE)显微图像

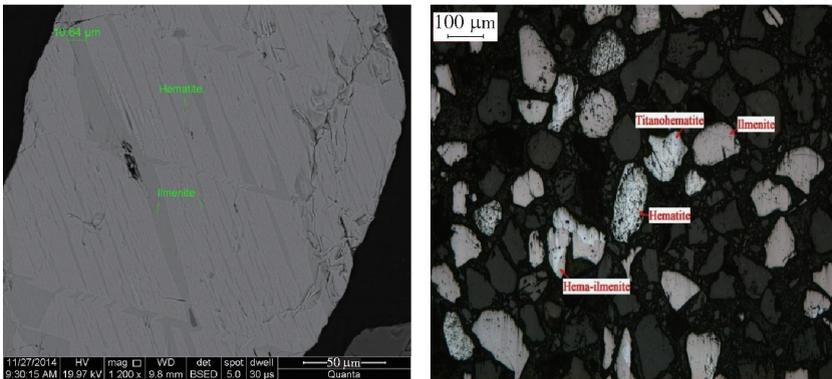
2) 赤铁矿和富钛赤铁矿

砂矿中的赤铁矿常见,由磁铁矿氧化蚀变产物与富钛赤铁矿二类组成,后者为赤铁矿—钛铁矿连晶结构(如图4所示),颜色主要为呈铁黑色至钢灰色,光泽表现为半金属至金属光泽,磨圆度一般较高,多呈次圆状。能谱分析(EDS)表明(表4),赤铁

矿中Fe₂O₃含量为93.72%~98.57%,平均96.43%,纯度较高,TiO₂含量平均0.78%。富钛赤铁矿中Fe₂O₃含量为52.54%~86.58%,平均73.73%,TiO₂含量平均24.31%。两类赤铁矿均含V、Si、Al等杂质元素。

表3 钛铁矿化学成分能谱检测结果

													%
测点	TiO ₂	FeO	MnO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	测点	TiO ₂	FeO	MnO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂
1	31.05	65.91	0.71	0.64	0.51	0.69	13	44.50	53.59	1.10	0.06	0.15	0.27
2	34.61	63.51	0.23	0.63	0.27	0.31	14	45.26	50.43	3.95	0.06	0.05	0.25
3	37.34	61.62	0.58	0.09	0.08	0.29	15	45.67	51.45	0.92	1.10	0.19	0.67
4	38.49	59.66	0.19	0.17	0.20	0.34	16	47.66	48.35	2.11	0.87	0.33	0.68
5	39.83	56.87	0.49	0.88	0.86	1.07	17	48.87	45.89	3.70	0.54	0.17	0.83
6	40.63	57.74	0.07	0.95	0.14	0.47	18	49.50	47.35	1.46	0.38	0.24	1.07
7	40.88	56.50	0.33	1.10	0.56	0.63	19	49.99	47.34	1.48	0.29	0.15	0.59
8	41.40	51.78	0.28	1.15	2.23	2.47	20	50.39	45.27	2.67	0.02	0.54	1.11
9	42.11	56.23	0.59	0.63	0.09	0.35	21	50.65	47.39	1.01	0.32	0.16	0.47
10	43.16	55.53	0.37	0.33	0.23	0.38	22	51.72	45.68	1.69	0.04	0.17	0.70
11	44.60	53.69	0.27	0.80	0.25	0.39	23	54.68	43.01	1.08	0.21	0.17	0.85
12	43.70	54.08	0.39	1.01	0.16	0.31	平均	44.20	52.99	1.12	0.53	0.34	0.66



(a) 背散射电子图像 (b) 光学显微镜图像

图4 赤铁矿的背散射电子(BSE)和光学显微镜图像

表4 赤铁矿和富钛赤铁矿化学成分能谱检测结果

测点	赤铁矿化学组成及含量/%					测点	富钛赤铁矿化学组成及含量/%				
	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	SiO ₂		Fe ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	SiO ₂
1	92.72	0.93	0.14	2.85	2.63	1	86.58	11.91	0.00	0.49	0.49
2	93.64	0.90	1.04	0.93	1.17	2	79.68	17.09	0.07	0.34	0.65
3	94.22	2.11	0.10	1.58	0.59	3	79.42	17.90	0.00	0.59	0.57
4	94.62	0.92	1.45	1.04	1.07	4	79.10	19.54	0.11	0.32	0.46
5	94.96	0.79	0.30	2.33	1.30	5	77.61	20.60	0.50	0.31	0.48
6	95.06	2.55	0.03	1.00	0.90	6	77.65	20.68	0.23	0.23	0.36
7	95.15	1.30	0.24	1.41	1.56	7	76.40	20.78	0.93	0.34	0.16
8	96.07	0.24	0.70	1.39	1.58	8	77.07	21.24	0.22	0.00	0.00
9	96.21	1.34	0.25	1.04	1.01	9	76.00	21.81	0.33	0.45	0.62
10	96.92	0.39	0.47	0.86	0.98	10	76.12	22.52	0.24	0.26	0.34
11	97.40	0.82	0.11	0.75	0.81	11	75.43	22.95	0.66	0.26	0.45
12	97.49	0.57	0.29	0.75	0.81	12	72.57	25.70	0.46	0.24	0.39
13	97.81	0.28	0.09	0.82	0.99	13	72.66	26.01	0.28	0.28	0.24
14	97.95	0.30	0.40	0.44	0.88	14	70.47	26.60	1.15	0.00	0.31
15	98.00	0.23	0.62	0.49	0.59	15	71.62	26.77	0.42	0.29	0.26
16	98.37	0.09	0.60	0.34	0.44	16	68.47	29.61	0.33	0.10	0.38
17	98.53	0.38	0.18	0.46	0.43	17	66.01	32.47	0.12	0.16	0.40
18	98.55	0.23	0.31	0.45	0.40	18	65.55	32.90	0.57	0.15	0.24
19	98.57	0.42	0.34	0.27	0.34	19	52.54	44.87	0.00	0.16	0.38
平均	96.43	0.78	0.40	1.01	0.97	平均	73.73	24.31	0.35	0.26	0.38

3) 磁铁矿和磁赤铁矿

砂矿中磁性铁矿物较多且复杂,一般以单体形式存在,以磁赤铁矿为主,次为磁铁矿与钛铁矿连生成富钛磁铁矿,颜色一般呈黑色-褐黑色,光泽表现为半金属光泽,磨圆度较高,多呈次圆粒状。能谱分析(EDS)表明(表5),磁铁矿/磁赤铁矿中Fe含

量为67.15%~69.07%,平均68.32%,Ti含量平均0.35%。富钛磁铁矿中Fe含量为49.83%~62.47%,平均53.87%,Ti含量平均13.84%,磁铁矿/磁赤铁矿和富钛磁铁矿中普遍含有V、Si、Al等杂质,部分还含Mn、Mg等杂质元素。

表5 磁铁矿/磁赤铁矿和富钛磁铁矿化学成分能谱检测结果

测点	磁铁矿/磁赤铁矿化学组成及含量/%					测点	富钛磁铁矿化学组成及含量/%				
	Fe	Ti	V	Al	Si		Fe	Ti	V	Al	Si
1	67.15	0.67	0.24	0.70	0.49	1	49.83	16.96	0.49	0.20	0.57
2	67.52	1.06	0.04	0.70	0.13	2	49.99	17.40	0.10	0.15	0.28
3	67.75	0.77	0.10	0.54	0.19	3	51.11	16.06	0.51	0.20	0.40
4	68.09	0.13	0.67	0.31	0.12	4	51.91	15.39	0.50	0.20	0.45
5	68.23	0.30	0.22	0.58	0.19	5	52.40	14.71	0.15	0.40	0.19
6	68.30	0.13	0.49	0.34	0.15	6	53.18	14.39	0.30	0.18	0.40
7	68.33	0.15	0.29	0.35	0.31	7	53.80	14.39	0.30	0.09	0.28
8	68.37	0.70	0.14	0.24	0.16	8	54.74	13.47	0.35	0.05	0.30
9	68.48	0.31	0.04	0.42	0.15	9	55.00	12.45	0.30	0.63	0.38
10	68.91	0.13	0.29	0.23	0.12	10	55.08	12.94	0.33	0.13	0.37
11	68.96	0.09	0.17	0.25	0.19	11	55.15	12.79	0.43	0.11	0.33
12	68.99	0.05	0.20	0.26	0.18	12	55.69	12.72	0.27	0.08	0.32
13	69.07	0.10	0.14	0.24	0.14	13	62.47	6.30	0.02	0.54	0.38
平均	68.32	0.35	0.23	0.40	0.19	平均	53.87	13.84	0.31	0.23	0.36

3.4 磁性分析

采用WCF-3电磁分选仪对-0.2+0.074mm粒级的原砂进行磁性分析,结果见表6。磁性分析结果表明:

(1)铁和钛元素主要赋存于100~550mT场强的磁性产品中,回收率分别达93%和95%,表明该场强范围是钛铁矿物的主要富集区间。

(2)100mT低场强下的磁性产品以磁赤铁矿和

表6 矿物磁性分析结果

磁场强度/ mT	产率	品位/%		回收率/%		主要矿物组成
		Fe	TiO ₂	Fe	TiO ₂	
100	2.83	58.48	11.44	27.52	8.09	主要是磁赤铁矿、少量磁铁矿
130	1.38	45.29	26.91	10.42	9.31	主要是赤铁矿、富铁钛铁矿、富钛赤铁矿和少量钛铁矿,并有含铁矿物包裹体的石英
240	4.04	39.44	35.26	26.52	35.64	主要是钛铁矿,其次为赤铁矿,少量富钛赤铁矿和富铁钛铁矿,并有含铁矿物包裹体的石英
340	0.34	32.31	31.98	1.83	2.72	主要是钛铁矿,其次富铁钛铁矿、少量富钛赤铁矿、赤铁矿,少量含铁包裹体石英
550	4.40	36.75	35.59	26.92	39.19	主要是钛铁矿、其次富铁钛铁矿,少量氧化钛铁矿和含铁包裹体的石英
1100	1.83	5.29	2.18	1.61	1.00	主要是褐铁矿和含铁包裹体的黏土、石英及微量锆石、金红石
1100非磁	85.18	0.37	0.19	5.19	4.05	大量石英、长石,极少量锆石、金红石
合计	100.00	6.01	4.00	100.00	100.00	

少量磁铁矿为主,其强磁性与矿物氧化蚀变程度相关。

(3) 钛铁矿(含正常钛铁矿、富铁钛铁矿)的磁性范围为 130 ~ 550 mT, 赤铁矿(含正常赤铁矿、富铁赤铁矿)为 130 ~ 340 mT, 两者磁性区间重叠, 直接磁选难以分离。

(4) 还原焙烧可通过改性钛铁矿磁性实现分离, 但含赤铁矿片晶的钛铁矿焙烧后易被磁化, 可能降低钛精矿回收率, 需优化焙烧工艺。

(5) 锆石、金红石等非磁性矿物主要富集于 100 mT 的非磁性产品中, 可通过后续重选或电选回收。

4 结论

矿石主要有价元素为 Ti(TiO_2 品位 2.72%) 和 Fe(4.74%), 可综合回收 Zr(0.109%), 具有工业开发价值。

(2) 铁钛矿物因固熔体分离及氧化蚀变, 形成钛铁矿、蚀变钛铁矿、富铁钛铁矿、磁赤铁矿、富铁赤铁矿等复杂组合, 脉石以石英、长石为主。

(3) 钛铁矿与磁性铁矿物粒度集中于 0.02 ~ 0.32 mm, 细磨至 0.075 mm 时解离度超 96%, 满足选矿粒度要求。

(4) 钛-铁矿物磁性范围重叠(130 ~ 550 mT), 需通过还原焙烧改性钛铁矿磁性, 实现磁选分离。

(5) 推荐“还原焙烧-磁选”工艺分离钛铁, 并结合重选/电选回收细粒金红石与锆石, 为工业化分选提供工艺依据。

[参考文献]

[1] 陈福林, 杨晓军, 杨道广, 等. 甘肃某低品位钒钛磁铁

矿工艺矿物学研究[J]. 矿产综合利用, 2020(6): 64 - 6842.

[2] 费泽通, 袁致涛, 孟庆有. 新疆某钛铁矿重选粗精矿工艺矿物学及分选可行性研究[J]. 矿冶工程, 2025, 45(1): 61 - 64.

[3] 刘超, 洪秋阳, 陈志强, 等. 国外某钒钛铁矿工艺矿物学与磁选回收技术研究[J]. 矿物学报, 2021, 41(3): 277 - 286.

[4] 刘飞燕, 谢志远, 邓冰, 等. 滇南地区某钛磁铁矿工艺矿物学研究[J]. 矿产综合利用, 2023(4): 200 - 204.

[5] 李亮, 罗建林. 攀枝花地区某钒钛磁铁矿工艺矿物学研究[J]. 金属矿山, 2010, 39(4): 89 - 92.

[6] 陆显志, 路沛瑶, 陈英杰, 等. 云南某钛铁矿的工艺矿物学研究[J]. 矿产综合利用, 2022(2): 206 - 210.

[7] 申帅平, 袁致涛, 马龙秋, 等. 攀西微细粒钛铁矿工艺矿物学特征[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(4): 580 - 584.

[8] 王墨, 张汉平, 谢峰, 等. 缅甸某钛铁矿工艺矿物学研究[J]. 钢铁钒钛, 2014, 35(3): 46 - 49.

[9] 王越, 杨耀辉, 惠博, 等. 新疆某低品位难选钒钛磁铁矿工艺矿物学研究[J]. 钢铁钒钛, 2024, 45(5): 116 - 122.

[10] 王勋, 韩跃新, 李艳军, 等. 钒钛磁铁矿综合利用研究现状[J]. 金属矿山, 2019(6): 33 - 37.

[11] 许承宝, 张一敏, 刘涛, 等. 辽西某钒钛磁铁矿工艺矿物学研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2018(3): 1 - 541.

[12] 喻莲香, 汤优优, 刘军, 等. 含难分离赤铁矿的钛铁粗精矿选冶提质工艺研究[J]. 金属矿山, 2020(5): 185 - 190.

[13] 杨耀辉, 惠博, 严伟平, 等. 攀西微细粒钛铁矿工艺矿物学研究[J]. 矿产综合利用, 2020(3): 131 - 135.