

攀枝花某钛精矿工艺矿物学研究

赖 杨, 杨耀辉*, 惠 博, 徐 莺, 郑国顺

(中国地质科学院矿产综合利用研究所, 四川 成都 610041)

摘 要:以攀枝花某钛精矿为例, 通过化学多元素分析、AMICS 矿物自动分析、电子探针分析、X 射线衍射分析、扫描电镜分析和光学显微镜鉴定等手段开展详细的工艺矿物学研究, 查明该钛精矿中 TiO_2 含量为 48.03%, TFe 含量为 33.93%, 另含少量 MgO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 等杂质组分; 主要矿物为钛铁矿 (91.00%), 次要矿物为钛磁铁矿 (1.41%), 以及少量黄铁矿 (0.35%), 另外含有少量辉石、绿泥石、榍石、橄榄石等脉石矿物 (7.24%); 钛元素主要以独立矿物相形式赋存于钛铁矿、榍石中, 分布率分别为 99.50%、0.35%; 其次以类质同象形式赋存于钛磁铁矿中, 分布率为 0.12%; 确定该钛精矿 TiO_2 理论品位为 52.09%。研究认为钛精矿中的部分钛铁矿与钛磁铁矿以固溶体分离结构紧密连生产出, 通过传统的选矿手段难以有效分离剔除; 钛精矿中存在少量含镁、钙、硅、铝等杂质元素的脉石矿物, 这些是钛精矿品位难以提高的主要原因, 应探索优化钛精矿精选工艺流程及药剂制度, 有效剔除钛精矿中的脉石矿物, 从而提高钛精矿品位, 降低杂质含量。

关键词: 钛精矿; 工艺矿物学; 赋存状态; 提质降杂

中图分类号: TF823, TD912

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2025)01-0100-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.01.015

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
聊
科
研
与
作
者
互
动

Study on process mineralogy of a titanium concentrate from Panzhihua

LAI Yang, YANG Yaohui*, HUI Bo, XU Ying, ZHENG Guoshun

(Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: This study focused on a specific case - titanium concentrate from Panzhihua. Detailed process mineralogy research was conducted using chemical element analysis, AMICS, EPMA, XRD, SEM and optical microscope identification. The research reveals that the ilmenite concentrate contains 48.03% TiO_2 and 33.93% TFe, along with small amounts of impurity components such as MgO , SiO_2 , Al_2O_3 and CaO . The primary mineral present is ilmenite (91.00%), followed by titanomagnetite (1.41%), with a small percentage (7.59%) consisting of gangue minerals including pyroxene, chlorite, titanite and olivine. The titanium element primarily exists in the form of independent mineral phases in ilmenite and titanite, with distribution rates of 99.50% and 0.35%, respectively. It also occurs as isomorphism in titanomagnetite, with a distribution rate of 0.12%. The theoretical TiO_2 grade of the titanium concentrate has been determined to be 52.09%. It is believed that part of the ilmenite and titanomagnetite in the titanium concentrate are formed by solid solution separation structures, which are difficult to effectively separate and eliminate using traditional beneficiation methods. Additionally, there are

收稿日期: 2024-09-24

基金项目: 四川省经信厅揭榜挂帅项目 (LB-SK-HT23-0334); 攀西试验区第五批重大科技攻关项目 (ZHS-QR-22-102); 中国地质调查项目 (DD20242129)。

作者简介: 赖杨, 1987 年生, 男, 四川彭州人, 硕士, 高级工程师, 长期从事地质矿产调查、工艺矿物学研究工作, E-mail: 772459504@qq.com; * 通讯作者: 杨耀辉, 1985 年生, 男, 湖南永州人, 博士, 研究员, 主要从事战略性矿产资源综合利用技术研发与应用推广相关工作, E-mail: yyaohui@mail.cgs.gov.cn。

small amounts of gangue minerals containing impurity elements such as magnesium, calcium, silicon, and aluminum present in the titanium concentrate. These reasons render it challenging to enhance the grade of titanium concentrate. We ought to explore and optimize the beneficiation process for the purpose of effectively eliminating the gangue minerals within the titanium concentrate, thereby upgrading the grade of titanium concentrate and reducing the impurity content.

Key words: titanium concentrate, process mineralogy, occurrence state, improving quality and reducing impurities

0 引言

钛是国家发展的重要战略资源。我国钛资源以钛铁矿为主,主要集中在四川攀西地区^[1-2]。钛精矿,作为钛产业链的基础原料,广泛应用于航空航天、化工、冶金、医疗等领域。随着全球经济的复苏和科技的进步,钛精矿的需求持续增长,推动了钛精矿行业的快速发展^[3-4]。钛精矿的开采、加工和贸易已经成为全球矿业和金属材料行业的重要组成部分。根据中国铁合金在线网站数据统计,2022 年国内钛精矿总产量 664 万 t,其中攀西地区产量为 471 万 t,约占总产量的 70%。当前,我国优质钛精矿产量不足,国产钛精矿无法满足高端钛材生产需要,已成为制约我国钛产业发展的重大短板^[5-6]。因此,系统查明影响钛精矿品质的因素,从理论上为钛精矿提质降杂提供方向至关重要^[7-8]。笔者以攀枝花某选矿厂生产的钛精矿为研究对象,查明钛精矿中有价元素钛及有害杂质元素钙、镁、铝、硅的赋存状态,明确了影响因素,为钛精矿提质降杂提供矿物学依据,在分析了影响铁精矿品位主因和提质难点的基础上,从理论的角度讨论钛精矿提质降杂可达到的程度。

1 钛精矿化学成分及矿物组成

钛精矿样品为某选矿厂现场稳定生产的 6 个班样组成,为选铁后经预富集处理的预富集物料,再经粗细分级后的粗粒预富集物料采用一粗两扫四精浮选工艺获得的产品级钛精矿具有较好的代表性。

1.1 化学成分

钛精矿样品经烘干并研磨过筛(200 目,即-74 μm),称取样品置于聚四氟乙烯坩埚中,然后滴加几滴水润湿,再加入盐酸、硝酸、氢氟酸、高氯酸,放至约 200 ℃ 电热板上蒸至近干再冷却。SiO₂ 采用动物胶凝聚重量法测定,TFe 和 TiO₂ 分别采用容量法测定,Al₂O₃、CaO、MgO 采用混合酸分解 ICP 光谱仪(电感耦合等离子体光谱仪 PerkinElmer Avio500)测定,分析结果见表 1。

表 1 钛精矿化学成分
Table 1 Chemical element analysis of Ti concentrate %

TiO ₂	TFe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
48.03	33.93	38.26	1.50	0.57	0.50	3.12

由表 1 可知,该钛精矿中 TiO₂ 含量为 48.03%,TFe 含量为 33.93%。另含有少量 MgO、SiO₂、Al₂O₃、CaO 等杂质组分,特别是 MgO、SiO₂ 含量相对偏高,达 3.12% 和 1.5%,影响了钛精矿品质。

1.2 矿物组成

利用偏光显微镜下鉴定(Leica DMRX)、X 射线衍射分析(Rigaku Ultima IV)(图 1)以及 AMICS 矿物全自动分析(Sigma 300+X Flash 6160)(图 2)等手段对钛精矿进行了矿物组成分析,其结果见表 2。

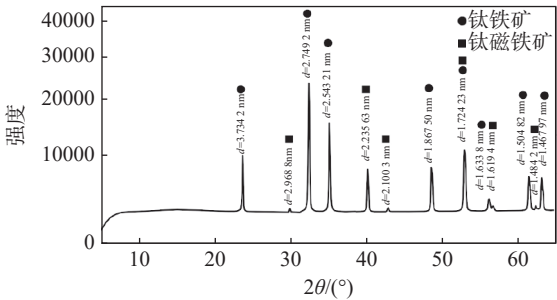


图 1 钛精矿 X 射线衍射分析图谱
Fig. 1 X-ray diffraction analysis of titanium concentrate

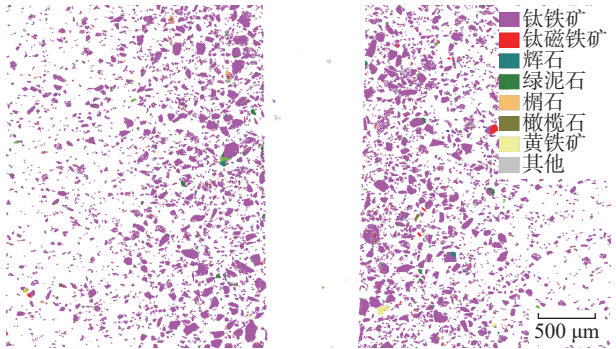


图 2 钛精矿样品 AMICS 矿物分析彩图
Fig. 2 AMICS mineral analysis color map of titanium concentrate

由表 2 可知,根据工艺类型划分,样品中矿物类别大致可分为钛铁矿、钛磁铁矿、硫化物、脉石矿物等四个大类,主要矿物为钛铁矿,是浮选回收钛的目的矿物,含量为 91%;次要矿物为钛磁铁矿,是磁

选回收铁的主要目的矿物,含量为 1.41%;硫化物主要为黄铁矿等,含量约 0.35%;另外还有少量辉石、绿泥石、榍石、橄榄石等脉石矿物,含量合计为

7.24%。钛精矿产品中,除钛铁矿以外合计含有约 9% 的杂质矿物,这是钛精矿品位偏低的主要原因,该钛精矿具有进一步提质降杂的矿物学基础。

表 2 钛精矿矿物组成分析结果
Table 2 Mineral compositions of Ti concentrate

%

钛铁矿	钛磁铁矿	硫化物 (黄铁矿等)	脉石矿物							合计
			辉石	绿泥石	榍石	角闪石	尖晶石	橄榄石	其它	
91.00	1.41	0.35	1.10	1.40	0.40	0.35	0.05	1.00	2.94	100.00

2 钛精矿中主要矿物粒度分析

钛精矿无需研磨,经缩分、二次对切镶嵌注胶、粗磨、精磨、抛光等工序制得砂光片,砂光片经矿物自动分析仪(AMICS)测得钛铁矿、钛磁铁矿、绿泥石等主要矿物的粒度分布情况和单体解离情况(表 3),从表 3 可知,钛铁矿粒度主要集中分布于 7~22 μm ,占比约 75%;钛磁铁矿粒度主要集中分布于 5~13 μm ,占比约 60%;绿泥石粒度主要集中分布于 7~44 μm ,粒度跨度相对较大,占比约 80%。

3 钛精矿中主要矿物解离特征

目标矿物单体解离是选矿分选的前提,利用矿物自动分析仪(AMICS),对矿样中各种矿物解离特征进行研究,对下一步的提质降杂具有重要的指导意义。钛精矿产品中钛铁矿、钛磁铁矿单体解离度测定结果如表 4 所示。

表 3 钛精矿粒度分布范围

Table 3 Particle size composition of titanium concentrate

粒度/ μm	钛铁矿/%		钛磁铁矿/%		绿泥石/%	
	筛上	累积分布	筛上	累积分布	筛上	累积分布
89.19			0	100		
75			3.71	96.29		
63.07			0	96.29	0	100
53.03			1.61	94.68	4.88	95.12
44.6	0	100	0	94.68	5.14	89.98
37.5	3.78	96.22	2.86	91.82	8.53	81.44
31.53	2.79	93.43	4.6	87.22	5.93	75.51
26.52	3.79	89.64	0.92	86.3	8.2	67.31
22.3	7.76	81.88	2.44	83.86	9.79	57.52
18.75	8.01	73.87	4.46	79.4	8.02	49.5
15.77	10.08	63.79	5.25	74.14	9.29	40.21
13.26	15.81	47.97	8.97	65.18	10.26	29.95
11.15	13.65	34.32	9.81	55.37	10.71	19.24
9.38	10.65	23.67	13.73	41.64	6.72	12.53
7.88	10.22	13.45	11.14	30.49	5.78	6.75
6.63	5.89	7.56	11.5	18.99	3.38	3.38
5.57	3.58	3.98	7.68	11.31	1.62	1.76

表 4 钛铁矿、钛磁铁矿单体解离度分析结果
Table 4 Dissociation degree of ilmenite and titanomagnetite monomer

矿物名称	单体解离度/%	连生体/%											
		金红石	钙钛矿	钛铁矿	钛磁铁矿	黄铁矿	含Cr磁铁矿	橄榄石	绿泥石	榍石	角闪石	尖晶石	辉石
钛铁矿	96.58	0.04	0.09	0.00	1.6	0.05	0.01	0.02	0.64	0.55	0.15	0.06	0.12
钛磁铁矿	57.75	0.02	0.06	40.41	0.00	0.16	0.13	0.07	0.78	0.25	0.08	0.03	0.19

钛铁矿主要以单体解离形式存在(图 3(a)),单体解离度达到 96.58%,少量与脉石矿物形成连晶(图 3(b));另可见固溶体分离作用形成的微细板片状钛铁矿(图 3(c))或钛铁矿中析出板柱状钛磁铁矿(图 4)。少量钛铁矿和钛磁铁矿紧密连生,难以充分解离,这部分钛磁铁矿在磁选铁作业环节难以有效回收,且在后端选钛作业环节随钛铁矿进入钛精

矿中,导致钛精矿中铁的含量升高,同时降低了 TiO_2 品位。钛铁矿在岩浆期后受热液蚀变,钛铁矿裂隙及边缘会发生轻微交代蚀变作用(图 3(d),图 5),形成尖晶石、榍石等脉石矿物,尖晶石与钛铁矿紧密镶嵌连生,这部分连生的尖晶石、榍石等脉石矿物随着钛铁矿进入钛精矿,这是钛精矿中 Mg、Si、Al 等杂质含量偏高的一种重要因素。

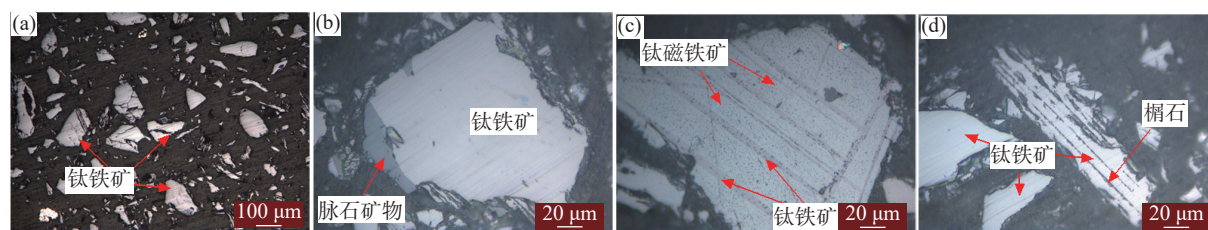


图 3 钛铁矿显微结构

Fig. 3 Microstructure of ilmenite in the sample

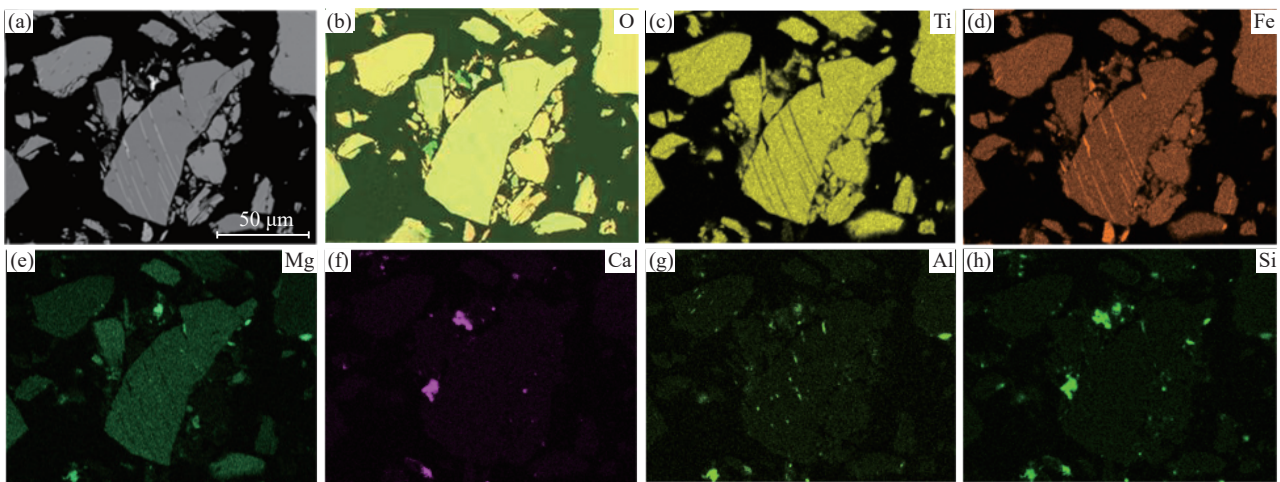


图 4 钛铁矿(固溶体分离结构)能谱面扫图像

Fig. 4 Energy spectrum scanning image of ilmenite (solid solution separation structure)

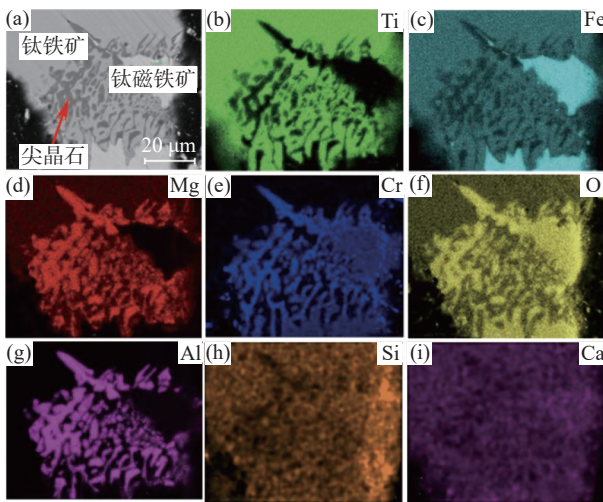


图 5 钛铁矿(交代蚀变)能谱面扫图像

Fig. 5 Energy spectrum scanning image of ilmenite (metasomatic alteration)

钛磁铁矿单体解离度只有 57.75%, 绝大多数未单体解离的钛磁铁矿与钛铁矿连生, 其占比为 40.41%; 少量未单体解离的钛磁铁矿与绿泥石、榍石、辉石等矿物连生, 其他脉石矿物解离程度也较低(图 6)。

4 有价值元素钛、铁及杂质元素钙、镁、铝、硅的赋存状态和分布规律

通过电子探针微区分析(表 5)可知, 钛铁矿中 TiO_2 含量在 49.33% ~ 56.28%, 平均值为 52.09%; FeO 含量在 35.62% ~ 50.17%, 平均值为 45.20% (换算成 Fe: 35.16%); 另外, 杂质组分 MgO 含量平均值为 2.20%, SiO_2 含量平均值为 0.01%, Al_2O_3 含量平均值为 0.01%, CaO 含量平均值为 0.01%, 据以上分析数据可知, 钛铁矿中主要杂质元素为 Mg, 次要杂质元素为 Ca、Al、Si 等。根据钛铁矿微区电子探针分析结果, 该钛精矿 TiO_2 理论品位为 52.09%。

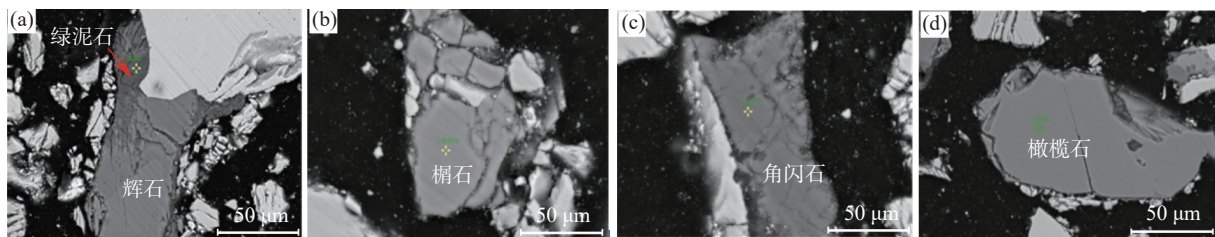


图 6 脉石矿物显微结构

Fig. 6 Microstructure of gangue mineral in the sample

通过 X 射线能谱点分析对主要脉石矿物化学成分进行分析, 由表 6 可知, 除钛磁铁矿外, 辉石、绿泥石、角闪石、橄榄石等脉石矿物多为含镁、铝的硅酸盐矿物, 是钙、镁、铝、硅等杂质元素的主要载体矿物; 另外, 榍石和尖晶石中 TiO_2 含量分别为 11.92% 和 41.18%, 二者是除钛铁矿以外 TiO_2 含量

相对较高的脉石矿物。

综合以上铁、钛、铝、硅、钙、镁元素载体矿物电子探针微区点分析、元素能谱分析以及样品中各矿物含量, 样品中有价元素铁、钛以及杂质铝、硅、钙、镁元素的平衡配分计算结果见表 7、8。

表 5 钛铁矿微区电子探针分析结果
Table 5 EPMA analysis results of ilmenite

%

序号	TiO ₂	FeO	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	V ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Total
1	53.60	42.09	3.51	0.00	0.01	0.00	0.14	0.00	0.01	0.00	99.37
2	52.46	42.71	4.36	0.03	0.02	0.03	0.08	0.00	0.01	0.00	99.70
3	51.61	45.03	2.95	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	99.66
4	51.83	44.93	2.85	0.00	0.00	0.02	0.21	0.01	0.00	0.00	99.86
5	56.28	35.62	8.02	0.00	0.00	0.00	0.07	0.03	0.01	0.00	100.05
6	50.86	48.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	98.99
7	52.37	47.28	0.09	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	99.77
8	52.05	47.23	0.08	0.00	0.00	0.02	0.32	0.02	0.00	0.00	99.73
9	50.53	48.91	0.02	0.02	0.03	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	99.55
10	49.33	50.17	0.07	0.04	0.05	0.00	0.22	0.00	0.01	0.01	99.90
平均值	52.09	45.20	2.20	0.01	0.01	0.01	0.11	0.01	0.00	0.00	99.66

表 6 其他矿物的能谱微区数据
Table 6 Energy spectrum analysis results of other minerals

%

矿物	TiO ₂	FeO	TFe	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	ZnO	Na ₂ O	K ₂ O
钛磁铁矿	4.02	92.60	72.02					3.38			
辉石		7.01	5.45	15.94	24.65	4.99	47.41				
尖晶石	11.92	21.20	16.48	13.41		46.29		6.30	0.88		
绿泥石		4.56	3.55	33.21		33.74	28.50				
榍石	41.18	0.94	0.73		30.10	1.05	26.73				
角闪石	2.76	6.12	4.76	18.58	14.16	16.96	37.86			3.02	0.56
橄榄石		27.15	21.12	38.04			34.81				

表 7 钛精矿中 Fe、Ti、Mg 元素平衡配分计算
Table 7 Equilibrium partition calculation table of chemical elements such as Fe, Ti, Mg in the sample

%

矿物名称	矿物含量	TFe			TiO ₂			MgO		
		含量	金属量	分布率	含量	金属量	分布率	含量	金属量	分布率
钛铁矿	91.00	35.16	31.996	95.45	52.09	47.402	99.50	2.20	2.002	64.70
钛磁铁矿	1.41	72.02	1.015	3.03	4.02	0.057	0.12	0.00	0.000	0.00
辉石	1.10	5.45	0.060	0.18	0.00	0.000	0.00	15.94	0.175	5.67
绿泥石	1.40	3.55	0.050	0.15	0.00	0.000	0.00	33.21	0.465	15.03
榍石	0.40	0.73	0.003	0.01	41.18	0.165	0.35	0.00	0.000	0.00
尖晶石	0.05	16.49	0.008	0.02	11.92	0.006	0.01	13.41	0.007	0.22
角闪石	0.35	4.76	0.017	0.05	2.76	0.010	0.02	18.58	0.065	2.10
黄铁矿	0.35	45.76	0.160	0.48	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00
橄榄石	1.00	21.12	0.211	0.63	0.00	0.000	0.00	38.04	0.380	12.29
其它矿物	2.94									
合计	100.00		33.520	100.00		47.639	100.00		3.094	100.00
钛精矿品位			33.93			48.03			3.12	
平衡系数(k)			98.79			99.19			99.18	

钛元素主要以独立矿物相形式赋存于钛铁矿、榍石中,分布率分别为 99.50%、0.35%;次要以类质同象形式赋存于钛磁铁矿中,分布率为 0.12%。

铁元素主要以独立矿物相形式赋存于钛铁矿、钛磁铁矿、黄铁矿中,分布率分别为 95.45%、3.03%、0.48%;次要以类质同象形式赋存于橄榄石、绿泥石、辉石等脉石矿物中。

镁元素主要以类质同象形式赋存于钛铁矿中,分布率为 64.70%;次要以独立矿物相形式赋

存于绿泥石、橄榄石中,分布率分别为 15.03%、12.29%。

钙元素主要以独立矿物相形式赋存于辉石、榍石、角闪石中,分布率分别为 53.49%、23.75%、9.78%;次要以类质同象形式赋存于钛磁铁矿、钛铁矿中,分布率分别为 11.18%、1.80%。

硅元素主要以独立矿物相形式赋存于辉石、绿泥石、橄榄石、角闪石、榍石等脉石矿物中,分布率分别为 34.37%、26.30%、22.94%、8.73%、7.05%;

仅有少量以类质同象形式赋存于钛铁矿中, 分布率为 0.60%。闪石、辉石等脉石矿物中, 分布率分别为 75.81%、9.53%、8.81%; 次要以类质同象形式赋存于钛铁矿中, 分布率为 1.46%。

铝元素主要以独立矿物相形式赋存于绿泥石、

表 8 钛精矿中 Ca、Si、Al 元素平衡配分计算
Table 8 Equilibrium partition calculation table of chemical elements such as Ca, Si, Al in the sample

矿物名称	矿物含量	CaO			SiO ₂			Al ₂ O ₃		
		含量	金属量	分布率	含量	金属量	分布率	含量	金属量	分布率
钛铁矿	91.00	0.01	0.009	1.80	0.01	0.009	0.60	0.01	0.009	1.46
钛磁铁矿	1.41	4.02	0.057	11.18	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00
辉石	1.10	24.65	0.271	53.49	47.41	0.522	34.37	4.99	0.055	8.81
绿泥石	1.40	0.00	0.000	0.00	28.50	0.399	26.30	33.74	0.472	75.81
榍石	0.40	30.10	0.120	23.75	26.73	0.107	7.05	1.05	0.004	0.67
尖晶石		0.00	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	46.29	0.023	3.71
角闪石	0.35	14.16	0.050	9.78	37.86	0.133	8.73	16.96	0.059	9.53
黄铁矿	0.35	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00
橄榄石	1.00	0.00	0.000	0.00	34.81	0.348	22.94	0.00	0.000	0.00
其它矿物	2.94									
合计	100.00		0.507	100.00		1.517	100.00		0.623	100.00
钛精矿品位			0.50			1.50			0.57	
平衡系数(k)			101.38			101.14			109.31	

5 讨论与建议

从钛精矿化学成分(表 1)、矿物组成(表 2)以及主要杂质元素平衡配分计算结果(表 7、8)可知, 钛精矿中杂质元素主要为 MgO(3.12%)、SiO₂(1.50%)、Al₂O₃(0.57%)、CaO(0.50%), 这些杂质元素的主要的载体矿物(即杂质矿物)为绿泥石(1.4%)、辉石(1.1%)、橄榄石(1.0%)等, 且另含钛磁铁矿约为 1.41%, 由于钛精矿中有少量以上杂质矿物存在, 导致其 TiO₂ 品位仅有 48.03%, 低于该钛精矿理论品位 52.09% 近 4 个百分点。考虑到钛精矿中有少量(3.42%)钛铁矿未单体解离, 并与钛磁铁矿、绿泥石、榍石等矿物形成连生体, 为了对该钛精矿提质降杂, 建议采取如下工艺优化措施: ①适当增加磨矿细度, 提高钛铁矿单体解离度; ②增加一次磁精选环节, 进一步剔除钛磁铁矿; ③增加一次浮选(精选), 优化浮选药剂, 有效剔除含钙、镁、硅等杂质矿物。

6 结论

1) 该钛精矿产品中 TiO₂ 含量为 48.03%, 与钛精矿理论指标 52.09% 相比, 还有近 4 个百分点的差距, 说明该钛精矿有进一步提质降杂的理论

空间。

2) 钛精矿产品中钛元素主要以独立矿物相形式赋存于钛铁矿, 钛元素在钛铁矿中分布率高达 99.50%。

3) 钛精矿产品中主要矿物为钛铁矿, 其含量约为 91.00%; 钛磁铁矿含量约 1.41%; 黄铁矿含量约 0.35%; 另含少量辉石、绿泥石、榍石、橄榄石等脉石矿物, 这些矿物是硅、铝、钙、镁等杂质元素的主要载体, 是提质降杂工艺中的主要剔除对象。

4) 钛精矿中的部分钛铁矿与钛磁铁矿以固溶体分离结构紧密连生产出, 通过传统的选矿手段难以有效分离剔除; 另外, 钛精矿产品中有少量单体解离的脉石矿物未得到有效剔除, 进入钛精矿后对钛精矿品质有影响, 以上是影响钛精矿品质的两个主要原因。

5) 钛精矿中钛铁矿单体解离已高达 96.58%, 单体解离情况较好, 但钛精矿 TiO₂ 品位低于理论品位 52.09% 近 4 个百分点, 为了对该钛精矿提质降杂, 采取如下工艺优化措施: ①适当增加磨矿细度, 提高钛铁矿单体解离度; ②增加一次磁精选环节, 进一步剔除钛磁铁矿; ③增加一次浮选(精选), 优化浮选药剂, 有效剔除含钙、镁、硅等杂质矿物。

参考文献

[1] CHENG D. Institute of comprehensive utilization of minerals, China Geological Survey Bureau. Panxi vanadium titanium

- magnetite resources and comprehensive utilization technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015: 1-12.
(中国地质科学院矿产综合利用研究所. 攀西钒钛磁铁矿资源及综合利用技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015: 1-12.)
- [2] LI X Y, ZHOU M G. Process mineralogy research on the titanium concentrate from a mining field Panxi region[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2009(1): 24-27.
(李潇雨, 周满赓. 西部某矿区钛精矿工艺矿物学研究[J]. 矿产综合利用, 2009(1): 24-27.)
- [3] CHONG X X, LUAN W L, WANG F X, *et al.* Overview of global titanium resources status and titanium consumption trend in China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(2): 162-170.
(崇霄霄, 栾文楼, 王丰翔, 等. 全球钛资源现状概述及我国钛消费趋势[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(2): 162-170.)
- [4] LI Z, CHEN C X. Development status of global titanium resources industry[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2021, 42(2): 245-250.
(李政, 陈从喜. 全球钛资源行业发展现状[J]. 地球学报, 2021, 42(2): 245-250.)
- [5] DING R F, ZHANG D W, QIN Z R, *et al.* Analysis of resource security and supply under the rapid development of titanium industry in China[J]. China Steel Focus, 2023(22): 43-51.
(丁瑞锋, 张大伟, 秦子然, 等. 我国钛产业高速发展下的资源安全保供分析[J]. 冶金管理, 2023(22): 43-51.)
- [6] WANG Y L, WANG S, XU B J, *et al.* Study on process mineralogy of a vanadium and titanium iron concentrate[J]. Modern Mining, 2023, 39(7): 153-156, 161.
(王云龙, 王帅, 徐宝金, 等. 某含钒钛铁精矿工艺矿物学研究[J]. 现代矿业, 2023, 39(7): 153-156, 161.)
- [7] LIU Z X. Research and industrial practice on improving quality and reducing[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2022, 43(3): 104-110.
(刘志雄. 白马钒钛磁铁矿提质降杂研究及工业实践[J]. 钢铁钒钛, 2022, 43(3): 104-110.)
- [8] ZHAO X F. The influence of related mineral composition of vanadium titanomagnetite on the quality of titanium concentrate[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 1983(3): 96-99.
(赵新奋. 钒钛磁铁矿有关矿物成份对钛精矿质量的影响[J]. 矿产综合利用, 1983(3): 96-99.)

编辑 杨冬梅

(上接第 93 页)

- [37] WANG S. Application of high titanium slag-steel slag-silica fume composite mineral admixture in concrete[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2021.
(王帅. 高钛矿渣-钢渣-硅灰复合矿物掺合料在混凝土中的应用研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021.)
- [38] XIAO B, ZHANG R H, HU Z Q. Preparation of lithium slag based supplementary cementitious materials and its impact on concrete performance[J]. China Concrete and Cement Products, 2023(10): 82-86.
(肖波, 张荣华, 胡卓强. 锂渣基辅助胶凝材料的制备及其对混凝土性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2023(10): 82-86.)
- [39] HE Z J. Research on preparation of concrete with pulverized titanium slag[J]. China Harbour Engineering, 2004(6): 4-7.
(何志军. 应用磨细高钛矿渣配制混凝土的相关试验研究[J]. 中国港湾建设, 2004(6): 4-7.)
- [40] CHEN H B. Study on the properties and evaluate the environmental effect of the concrete working in the environment with severe acid rain[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
(陈寒斌. 严重酸雨环境下混凝土性能与环境性评价[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.)
- [41] QING T. Design and performances of ultra-high performance concrete based on high titanium slag[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2023.
(卿婷. 基于高钛矿渣的超高性能混凝土体系设计与性能研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2023.)
- [42] WANG H B, CHENG X L, CANG D Q, *et al.* Mechanism of increasing concrete strength by titanium contained blast furnace slag[J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(4): 402-406, 432.
(王怀斌, 程相利, 苍大强, 等. 高炉钛渣提高混凝土强度的作用机理[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(4): 402-406, 432.)
- [43] LI B, CHEN J Y, CHEN D. High-performance concrete mixed with ground mineral reinforcing materials[J]. Sichuan Architecture, 2003(5): 82-84.
(李兵, 陈加耘, 陈栋. 掺有磨细矿物质增强材料的高性能混凝土[J]. 四川建筑, 2003(5): 82-84.)

编辑 杨冬梅