

某含钛矿石中钛的赋存状态研究

王越, 王婧

(中国地质科学院矿产综合利用研究所, 中国地质调查局金属矿产资源综合利用技术研究中心, 四川 成都 610041)

摘要: 为研究某含钛矿石是否具有综合利用价值, 通过光学显微镜、X 射线衍射仪、扫描电镜及矿物自动分析仪、电子探针等分析技术, 对其物质组成、目的矿物嵌布特征、有价元素赋存状态等开展了系统的研究。结果表明, 该矿石为含铁、钛的闪长岩类, 矿石中 TiO_2 品位为 2.27%、TFe 品位为 11.36%, 矿石中的铁品位低, 没有达到铁矿石的最低工业品位。矿石中的 TiO_2 主要赋存于钛铁矿及钛铁闪石中, 分布率分别为 40.02% 和 44.75%, 占总分布率的 84.79%; 少量分布在榍石、金红石和磁铁矿(赤铁矿)中, 分布率分别为 7.93%、5.67% 和 1.59%, 其中钛铁矿及金红石的矿物含量仅为 1.86% 和 0.13%。矿石中金红石含量低, 多与榍石、钛铁矿等连生, 粒度微细, 金红石中含有钙、铁、硅等杂质元素, 这会直接影响金红石精矿的品位及回收率, 采用阶磨阶选流程及重选、磁选及浮选联合工艺, 可有效回收矿石中的有用矿物。

关键词: 钛; 矿物组成; 嵌布粒度; 赋存状态

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.05.034

中图分类号: TD951 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2022)05-0200-06

钛是 20 世纪 50 年代发展起来的一种重要的结构金属, 钛合金具有密度低、比强度高、耐腐蚀性好、导热率低、无毒无磁、可焊接、生物相容性好、表面可装饰性强等特性, 广泛应用于航空、航天、化工、石油、电力、医疗、建筑、体育用品等领域^[1-3]。目前, 随着钛元素应用的日益广泛和矿产资源开发难度的增大,

工艺矿物学在矿产资源开发过程中的作用日益显著。通过工艺矿物学研究, 掌握矿石性质及有价元素的赋存状态, 查明影响选冶指标的矿物

学因素, 可为矿产资源的开发和选冶工艺指标优化提供重要的参考依据^[4-6]。

1 矿石的物质组成

矿石物质组成是矿石性质研究的基础, 通过化学多元素分析作为矿石的定量依据, 确定矿石的基本性质。最后通过光学显微镜、扫描电子显微镜及 MLA 确定矿石中的主要矿物及含量。

1.1 化学组成

矿石的化学多元素分析结果见表 1。

表 1 原矿化学多元素分析/%
Table 1 Chemical analysis results of the ore

CaO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe	CuO	ZnO	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	Nb	Ta
11.154	7.263	0.412	2.270	40.252	18.961	11.360	0.009	0.016	2.231	0.431	0.139	0	0

通过表 1 可知, 矿石中 TFe 品位为 11.36%, 没有达到铁矿石的最低边界品位; TiO_2 品位为 2.27%; 矿石中 SiO_2 、 Al_2O_3 、CaO、MgO 的含量总计高达 77.633%, 说明矿石中铝硅酸盐类矿物含量非常高, 矿石是含铁钛的铝硅酸盐矿石; 化学

分析检测出矿石中铜、锌等含量很低, 没有检测出铌、钽等其他可供综合利用的有价元素; 矿石中硫、磷元素含量很低, 对矿石性质影响较小^[7]。

1.2 矿物组成

经镜下鉴定、X 射线衍射分析、扫描电镜分

收稿日期: 2022-07-26

基金项目: 中国地质调查局项目“稀土锂铍等战略性矿产综合利用技术研究与应用(DD20221697)”

作者简介: 王越(1984-), 男, 硕士, 工程师。主要研究方向为矿产综合利用及工艺矿物学。

析和 AMICS (矿物自动分析仪) 测定结果表明, 矿石中的金属矿物以铁、钛金属矿物为主, 主要的含钛金属矿物为钛铁矿、金红石、榍石及微量的钛磁铁矿, 含量分别为 1.86%、0.13%、0.47% 及 0.09%, 铁矿物为磁铁矿 (或含少量的赤铁矿、

褐铁矿等), 含量约 9.15%, 以及微量的钛磁铁矿、黄铁矿等; 脉石矿物以钛铁闪石、斜长石、绿帘石及绿泥石为主, 总量达 82.62%, 除此之外还有微量的角闪石、云母、石英、磷灰石等, 含量很低 (表 2)。

表 2 矿石中矿物组成及含量/%
Table 2 Mineral composition and content of the ore

钛铁矿	金红石	磁铁矿/赤铁矿	钛磁铁矿	黄铁矿	榍石	磷灰石
1.86	0.13	9.15	0.47	0.02	0.48	0.23
角闪石	辉石	钛铁闪石	绿帘石	钾长石	斜长石	绿泥石
1.26	0.08	38.68	8.93	0.03	30.91	5.10
黑云母	白云母	碳酸盐矿物	石英	黏土矿物	其他	总计
0.35	1.57	0.10	0.24	0.18	0.23	100.00

2 主要矿物的矿物学特征

通过矿物种类和含量分析, 原矿中主要可回收利用的铁矿物为磁铁矿及微量的赤铁矿, 二者含量总计达 36% 左右。脉石矿物石英、白云母、绿泥石为主, 还有微量的钾长石、普通辉石、方解石、橄榄石等。通过对矿石进行光学显微镜鉴定、扫描电镜分析、MLA 分析、电子探针分析及粒度统计, 从而查明主要矿物产出形式。

2.1 钛铁矿

该矿石中钛铁矿是主要的含钛金属矿物, 含量达总矿物的 1.86%, 常呈半自形、他形晶粒状结构, 与金红石、榍石紧密共生, 呈交代残余结构, 粒径常介于 50~500 μm 之间。对钛铁矿进行电子探针微区分析得知, 钛铁矿中平均含 TiO₂ 48.16%, 平均含 FeO 44.14%, 此外还有微量的镁、钙、锰等杂质 (见表 3)。对钛铁矿与磁铁矿的连生体进行能谱微区成分扫描 (图 1、2), 发现钛铁矿与磁铁矿常紧密连生赋存于斜长石、钛铁闪石等脉石矿物中, 且钛铁矿常呈蜂窝状结构, 被榍石和金红石交代, 这三者紧密共生。

表 3 钛铁矿电子探针微区分析元素含量/%
Table 3 Element composition and content of the ilmenite by EPMA

点号	MgO	CaO	FeO	MnO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	总量
1	0.14	0.66	45.11	3.53	0.03	0.03	49.55	99.05
2	0.14	1.13	43.75	4.62	0.01	0.04	48.54	98.22
3	0.14	2.02	42.93	6.23	0.00	0.00	47.57	98.89
4	0.12	1.43	44.33	5.18	0.00	0.01	47.00	98.07
5	0.30	1.15	44.58	4.22	0.01	0.03	48.12	98.41
平均	0.17	1.28	44.14	4.76	0.01	0.02	48.16	98.53

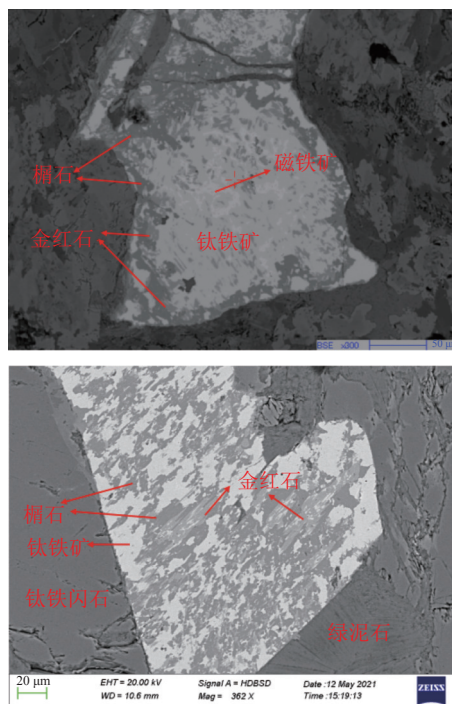


图 1 钛铁矿的嵌布特征
Fig.1 Embedded characteristics of ilmenite

2.2 磁铁矿 (含少量赤铁矿)

该矿石中磁铁矿为最主要的铁矿物, 含量达 9.15%, 常呈自形、半自形晶粒状与钛铁矿连生, 常呈晶粒状、条带状、脉状、碎裂状等构造, 晶体粒径较大, 一般介于 200~500 μm 之间, 最小可达 50 μm。除磁铁矿之外, 矿石中偶见少量的没有与钛铁矿连生的赤铁矿晶体赋存于脉石矿物中 (图 3), 粒径一般小于 100 μm, 由于其含量低、对矿石性质影响较小, 且在背散射图中不便与磁铁矿区分, 在此次矿石性质研究与磁铁矿

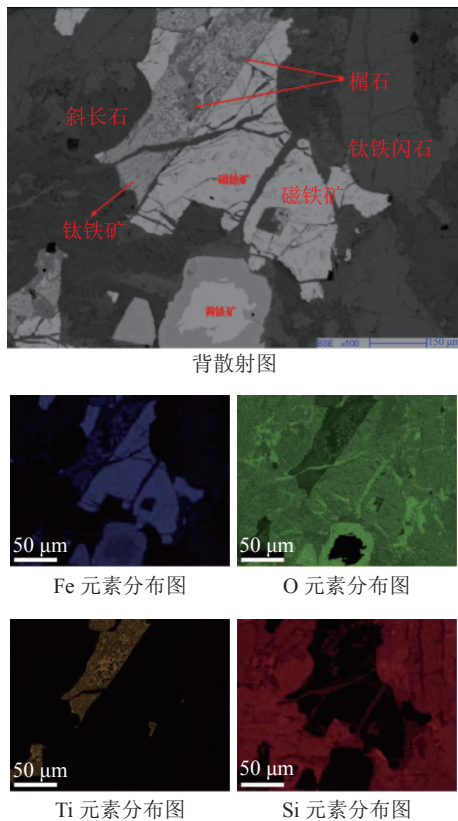
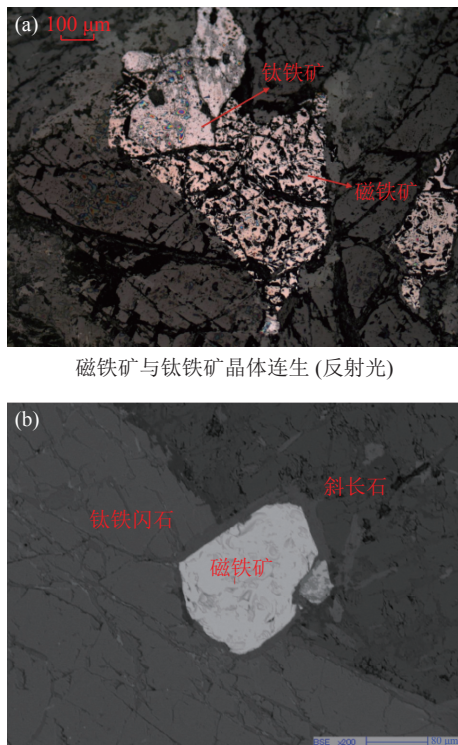


图 2 含钛矿物的 X 射线面扫描
Fig.2 X-Ray surface-scanning pattern of titanium-bearing minerals



自形晶粒状赤铁矿赋存于斜长石和钛铁闪石中 (BSE)

图 3 磁铁矿的嵌布特征
Fig.3 Embedded characteristics of magnetite

一并研究。对磁铁矿和赤铁矿进行电子探针微区分析得知，其中 FeO 平均含量为 91.71%，TiO₂ 平均含量为 0.39%，此外还有微量钙、镁、硅等杂质（表 4）。

表 4 磁铁矿电子探针微区分析元素含量/%
Table 4 Element composition and content of the magnetite by EPMA

点号	MgO	CaO	FeO	MnO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	总量
1	0.00	0.04	92.53	0.00	0.06	0.02	0.13	92.77
2	0.04	0.15	90.12	0.02	0.05	0.05	0.05	90.47
3	0.02	0.16	90.71	0.00	0.07	0.10	0.00	91.05
4	0.00	0.06	92.37	0.00	0.04	0.02	0.38	92.87
5	0.01	0.02	91.95	0.00	0.13	0.00	0.00	92.10
6	0.00	0.04	92.58	0.00	0.04	0.05	1.81	94.52
平均	0.01	0.08	91.71	0.00	0.06	0.04	0.39	92.30

2.3 金红石

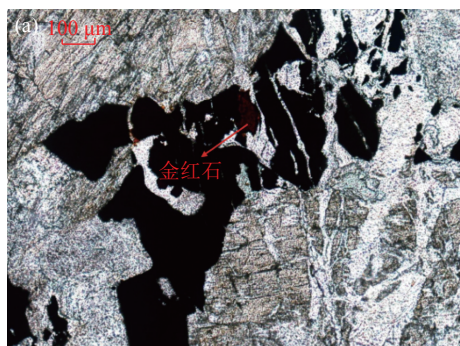
矿石中金红石含量很少，仅占矿物总量的 0.13%，且常与榧石、钛铁矿共生，粒径较小一般介于 30~60 μm 之间，最大者不超过 100 μm，根据其赋存状态推测该矿石中金红石与榧石由钛铁矿蚀变形成，构成了交代残余结构，没有独立的金红石晶体赋存于脉石矿物中（图 4）。对金红石进行电子探针微区分析得知，金红石中 TiO₂ 平均含量为 97.72%，此外还有 1.02% 的 CaO、0.81% 的 FeO 以及 0.38% 的 SiO₂ 等杂质。

2.4 榧石

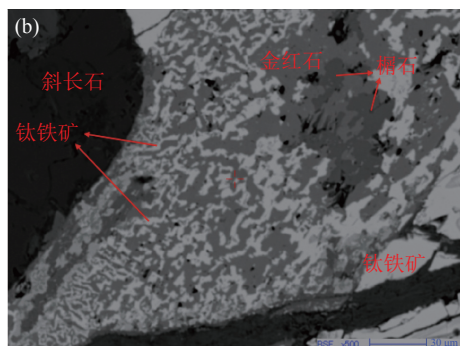
矿石中的榧石是含钛的脉石矿物之一，含量为 0.47%，与金红石、钛铁矿紧密共生，常呈他形结构，是钛铁矿的交代残余产物，没有独立的榧石晶体，粒径较小，一般在 <100 μm。一般都赋存在钛铁矿晶体内。对榧石进行电子探针微区分析得知，榧石中平均含有 37.79% 的 TiO₂。

2.5 钛铁闪石

矿石中钛铁闪石是最主要的含钛脉石矿物，矿物含量高达 38.68%，常呈自形、半自形晶，晶型较大，粒径常介于 >500 μm，大者可达几毫米（图 5），是矿石中最主要的脉石矿物。对钛铁闪石进行电子探针微区分析得知，钛铁闪石中 TiO₂ 平均含量为 2.59%，此外还有 9.98% 的 CaO、13.93% 的 FeO 以及 13.14% 的 MgO 等（表 5）。



呈暗红色的金红石与钛铁矿、榍石等紧密共生(透射光)



金红石与钛铁矿、榍石等紧密共生 (BSE)

图4 金红石的嵌布特征

Fig.4 Embedded characteristics of rutile

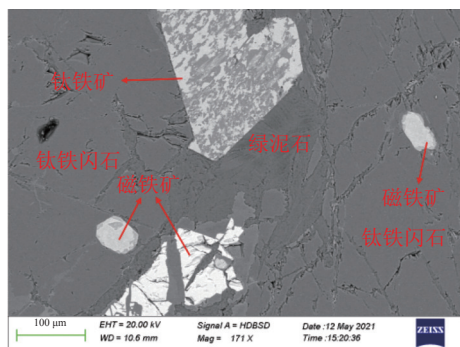
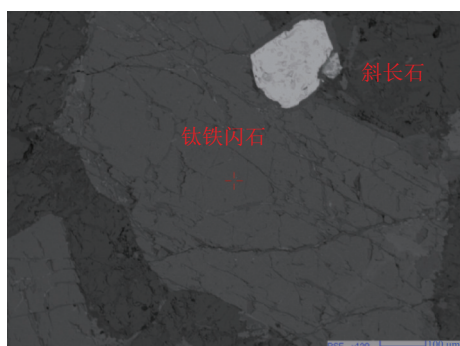


图5 钛铁闪石的嵌布特征

Fig.5 Embedded characteristics of kaersutite

2.6 其他矿物

除了上述几种主要矿物外，矿石中还有斜长

石、绿帘石、绿泥石及微量的石英、磷灰石、云母、黏土矿物等，含钛、含铁量很低，对矿石性质影响较小。

表5 钛铁闪石的电子探针微区分析元素含量/%

Table 5 Element composition and content of the kaersutite by EPMA

点号	MgO	CaO	FeO	MnO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	总量
1	14.62	10.56	12.55	0.20	12.83	42.71	2.15	2.94	0.45	99.01
2	8.95	7.32	25.44	0.43	10.68	41.35	2.78	1.63	0.21	98.78
3	13.67	10.67	10.94	0.20	11.89	44.96	3.17	2.86	0.48	98.84
4	14.87	10.75	11.16	0.20	12.58	43.48	2.90	2.74	0.50	99.17
5	13.58	10.60	9.57	0.18	12.48	46.74	1.98	2.98	0.44	98.53
平均	13.14	9.98	13.93	0.24	12.09	43.85	2.59	2.63	0.41	98.86

3 有用矿物的粒度和单体解离度

运用 AMICS 图像分析仪对不同粒级的原矿样品进行测定，发现原矿中的各矿物工艺粒度具有不同的特性。矿石中最重要的三种含钛矿物金红石、钛铁矿和榍石在破磨至-0.25 mm 后，粒径有较大区别，相对而言，钛铁矿粒径最大，主要集中在-210+75 μm 之间，其次为金红石，粒径主要集中于-63+27 μm 之间，最后为榍石，粒径主要集中于-32+11.4 μm 之间。对不同筛级中的主要矿物进行单体解离度测定，得知随着粒径变小，单体解离度都稳步提高，在同一粒级内，钛铁闪石、斜长石、绿泥石、绿帘石等脉石矿物的单体解离度明显高于钛铁矿、金红石、榍石等含钛金属矿物。其中金红石的单体解离度最低，与其粒度最微细直接相关，钛铁矿与榍石的单体解离度基本一致(表6)。

4 钛的赋存状态及分布规律

本次研究的某含钛原生矿矿石主要为含铁、钛的铝硅酸盐矿石，最主要的含钛金属矿物为钛铁矿、榍石、金红石，含钛脉石矿物有钛铁闪石。通过化学分析、钛、铁物相分析、电子探针、扫描电镜、AMICS 矿物自动分析系统测试研究，确定了矿石钛的赋存状态及分布规律。

矿石中的 TiO₂ 品位为 2.270%，钛主要赋存于钛铁矿及钛铁闪石中，分布率分别为 40.02% 和 44.75%，占总分布率的 84.79%；其次主要分布在

榍石、金红石和磁铁矿（赤铁矿）中，分布率分别为 7.93%、5.67% 和 1.59%（表 7）。该矿石中金红石的矿物含量仅为 0.13%，钛铁矿含量仅为

1.86%，没有达到《矿产资源工业要求手册》中原矿金红石边界品位需达 1% 以上、钛铁矿边界品位需达 10% 以上的要求。

表 6 原矿中主要矿物的单体解离度/%
Table 6 Monomer dissociation of main minerals in the ore

粒级/mm	钛铁矿	金红石	榍石	磁铁矿	钛铁闪石	斜长石	绿泥石	绿帘石
-0.25+0.15	36.29	11.66	34.68	56.91	74.36	64.01	45.52	39.64
-0.15+0.075	51.30	20.65	34.13	73.93	83.68	79.28	62.85	57.57
-0.075+0.045	63.40	34.29	51.55	81.25	78.20	77.77	73.92	66.43
-0.045	86.18	70.25	83.26	93.23	89.79	92.72	92.63	88.91

表 7 矿石中钛的金属量平衡
Table 7 Metal mass balance of titanium content in the ore

矿物分类	矿物名称	矿物含量/%	矿物中的TiO ₂ 品位/%	Ti金属量/%	Ti在各矿物中的分布率/%
金属矿物	钛铁矿	1.860	48.160	0.896	40.02
	金红石	0.130	97.720	0.127	5.67
	榍石	0.470	37.790	0.178	7.93
	磁铁矿（赤铁矿）	9.150	0.390	0.036	1.59
脉石矿物	钛铁闪石	38.680	2.590	1.002	44.75
	绿泥石	5.100	0.012	0.001	0.03
总计	总计			2.239	100.00
原矿	原矿			2.270	
Fe的平衡系数			2.239/2.270=0.986		

5 结 论

(1) 矿石中 SiO₂、Al₂O₃、CaO、MgO 的含量总计高达 77.633%，矿石中铝硅酸盐类矿物含量非常高，主要有价元素为铁和钛，TFe 品位为 11.36%，TiO₂ 品位为 2.27%，其他有价元素含量很低，矿石中硫、磷元素含量很低，对矿石性质影响较小。

(2) 矿石中主要的含钛金属矿物为钛铁矿、金红石，含量分别为 1.86%、0.13%，铁矿物为磁铁矿（含少量的赤铁矿、褐铁矿等），含量约 9.15%，以及微量的钛磁铁矿、黄铁矿等；脉石矿物以钛铁闪石、斜长石、绿帘石、榍石及绿泥石为主，总量达 82.62%，除此之外还有微量的角闪石、云母、石英、磷灰石等，含量很低，对矿石性质影响较小。

(3) 矿石中最重要的三种含钛矿物金红石、钛铁矿和榍石在破磨至-0.25 mm 后，粒径有较大区别，相对而言，钛铁矿粒径最大，主要集中在-210+75 μm 之间，其次为金红石，粒径主要集中

于-63+27 μm 之间，最后为榍石，粒径主要集中在-32+11.4 μm 之间。

(4) 矿石中 TiO₂ 品位为 2.270%，金红石的矿物含量仅为 0.13%，钛主要赋存于钛铁矿及钛铁闪石中，分布率分别为 40.02% 和 44.75%，占总分布率的 84.79%，其次主要分布在榍石和磁铁矿（赤铁矿）中，分布率分别为 7.93% 和 1.59%，金红石中 TiO₂ 分布率仅为 5.67%。由于矿石中金红石含量低，多与榍石、钛铁矿等连生，粒度微细，经电子探针分析得知金红石中含有钙、铁、硅等杂质元素，这些因素会直接影响精矿的品位及回收率，采用阶磨阶选流程及重选、磁选及浮选的综合工艺，可有效回收矿石中的有用矿物。

参考文献：

[1] 陈超, 张裕书, 李潇雨, 等. 钛磁铁矿选矿技术研究进展[J]. 矿产综合利用, 2021(3):99-105.
CHEN C, ZHANG Y S, LI X Y, et al. Research progress in titanium-magnetite beneficiation technology[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(3):99-105.

- [2] 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.
YANG Y H, HUI B, YAN W P, et al. Research on process mineralogy of fine ilmenite in Panxi area[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(3):131-135.
- [3] 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.
LU X Z, LU P Y, CHEN Y J, et al. Study on process mineralogy of ilmenite in Yunnan Province[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(2):206-210.
- [4] 王越, 王婧, 周满赓, 等. 工艺矿物学在矿产资源综合利用水平监测中的重要作用[J]. *中国矿业*, 2013, 22(4):46-50.
WANG Y, WANG J, ZHOU M G, et al. The important role of the process mineralogy in the level monitoring of multipurpose utilization of mineral resources[J]. *China Mining Magazine*, 2013, 22(4):46-50.
- [5] 王越, 王婧, 李潇雨, 等. 川西某金矿工艺矿物学研究及对选矿工艺的影响[J]. *矿产综合利用*, 2021(4):206-210.
WANG Y, WANG J, LI X Y, et al. Process mineralogy study of the gold deposit in Western Sichuan area and its influence on mineral processing technology[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4):206-210.
- [6] 全丽娟, 张广伟. 工艺矿物学在选矿中的应用[J]. *现代矿业*, 2014, 548:68-78.
TONG L J, ZHANG G W. Application of process mineralogy in beneficiation[J]. *Modern Mining*, 2014, 548:68-78.
- [7] 肖颖, 管川, 徐晓霞. 钒钛磁铁矿铁钛物相联测分析方法[J]. *矿产综合利用*, 2019(4):98-102.
XIAO Y, GUAN C, XU X X. Determination method of iron and titanium phases for vanadium titanium magnetite[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(4):98-102.

Study on the Occurrence State of Titanium in a Titanium-containing Ore

Wang Yue, Wang Jing

(Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Research Center of Multipurpose Utilization of Metal Mineral Resources of China Geological Survey, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: In order to study whether a titanium-containing ore has comprehensive utilization value, its material composition, target mineral dissemination characteristics and occurrence state of valuable elements were systematically studied by means of optical microscope, X-ray diffractometer, scanning electron microscope, mineral automatic analyzer and electron probe. The results show that the ore is a diorite containing iron and titanium. The grade of TiO_2 in the ore is 2.27% and the grade of TFe is 11.36%. The iron grade in the ore is low and does not reach the lowest industrial grade of iron ore. TiO_2 in ore mainly exists in ilmenite and ilmenite amphibole, and the distribution rates are 40.02% and 44.75% respectively, accounting for 84.79% of the total distribution rate. A small amount of TiO_2 is distributed in titanite, rutile and magnetite (hematite), with distribution rates of 7.93%, 5.67% and 1.59%, respectively. The mineral content of ilmenite and rutile is only 1.86% and 0.13%. The content of rutile in the ore is very low, which is mostly associated with titanite and ilmenite, and the particle size is fine. Rutile contains calcium, iron, silicon and other impurity elements, which will directly affect the grade and recovery rate of rutile concentrate. The useful minerals in the ore can be effectively recovered by using the stage grinding stage selection process and the combined process of gravity separation, magnetic separation and flotation.

Keywords: Titanium; Mineral composition; Dissemination characteristics; Occurrence state