

新疆某低品位难选钒钛磁铁矿 工艺矿物学研究

王越^{1,2,3}, 杨耀辉^{1,2,3*}, 惠博^{1,2,3}, 林海涛^{1,2,3}

(1. 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 四川 成都 610041; 2. 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; 3. 自然资源部战略性矿产综合利用工程技术创新中心, 四川 成都 610041)

摘要:为查清新疆某低品位难选钒钛磁铁矿的矿石性质及影响选矿指标的因素, 开展了详细的工艺矿物学研究。结果表明: 该矿石为辉长岩型低品位钒钛磁铁矿, 矿石 TiO_2 品位 4.53%、TFe 品位 14.06%, 其它有价元素含量低。钛磁铁矿为选矿回收铁元素的目的矿物, 其中铁的分布率占总铁的 47.892%, 钛铁矿为选矿回收钛元素的目的矿物, 其钛的分布率占总钛的 60.881%。钛磁铁矿中常见固溶体分离矿物、蚀变矿物绿泥石及磷灰石等, 粒度微细、嵌布复杂, 磨矿难以与钛磁铁矿有效解离, 易混入铁精矿影响铁精矿品质; 钛铁矿中亦包含有微量蚀变矿物绿泥石及微细粒钛磁铁矿、磷灰石及硫化物等, 混入钛精矿将导致钛精矿中 Ca、Mg、Si、S、P 等含量升高, 影响精矿质量。同时, 钛磁铁矿中的片晶状钛铁矿及钛铁晶石磨矿难以有效解离, 在选铁环节易随钛磁铁矿进入铁精矿, 这部分钛铁矿属于合理损失。

关键词:低品位钒钛磁铁矿; 赋存状态; 工艺矿物学; 理论品位; 选矿工艺

中图分类号: TD951

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)05-0116-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.05.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Study on process mineralogy of a low grade refractory vanadium-titanium magnetite ore in Xinjiang

Wang Yue^{1,2,3}, Yang Yaohui^{1,2,3*}, Hui Bo^{1,2,3}, Lin Haitao^{1,2,3}

(1. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resource, CAGS, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. Research Center of Multipurpose Utilization of Metal Mineral Resources of China Geological Survey, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. Technology Innovation Center for Comprehensive Utilization of Strategic Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: In order to find out the ore properties of a low-grade refractory vanadium-titanium magnetite ore and the factors affecting the beneficiation index, carried out detailed process mineralogy research. The research shows that the ore is a low-grade vanadium-titanium magnetite ore of gabbro type. The grade of TiO_2 is 4.53 %, the grade of TFe is 14.06% and the content of other valuable elements is low. Titanomagnetite is the target mineral for beneficiation recovery of iron, in which the distribution rate of

收稿日期: 2024-07-01

基金项目:国家自然科学基金(2021YFC2900800); 攀西试验区第五批重大科技攻关项目“攀西地区钒钛磁铁矿中共伴生资源高效分离技术研究及产业化应用示范”; 四川省经信厅揭榜挂帅项目“攀西地区关键金属元素赋存规律及高效利用技术开发与应用”; 新疆维吾尔自治区重大科技专项项目(2023A03003-4)。

作者简介:王越, 1984年出生, 男, 高级工程师, 长期从事矿产综合利用及工艺矿物学研究工作, E-mail: imurwy@163.com; *通讯作者: 杨耀辉, 1985年出生, 男, 研究员, 长期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: 258296623@qq.com。

iron accounts for 47.892% of the total iron. Ilmenite is the target mineral for beneficiation recovery of titanium, and its distribution rate of titanium accounts for 60.881% of the total titanium. The solid solution separation minerals, altered minerals chlorite and apatite are common in titanomagnetite. The particle size is fine and the dissemination is complex. It is difficult to effectively dissociate from titanomagnetite by grinding, and it is easy to be mixed with iron concentrate to affect the quality of iron concentrate. The ilmenite also contains trace alteration minerals such as titanite and fine-grained titanomagnetite, apatite and sulfide. The addition of titanomagnetite to the ilmenite concentrate will lead to the increase of Ca, Mg, Si, S and P in the ilmenite concentrate, which will affect the quality of the concentrate. At the same time, the lamellar ilmenite and ilmenite in titanomagnetite are difficult to be effectively dissociated by grinding, and it is easy to enter the iron concentrate with titanomagnetite in the iron separation process. This part of ilmenite is a reasonable loss.

Key words: low-grade vanadium-titanium magnetite, occurrence state, process mineralogy, theoretical grade, mineral processing technology

0 引言

钒钛磁铁矿作为全球重要的战略性矿产资源,因其含有铁、钛、钒、铬、钴、镍、镓、铜、锰、铈和铂族元素等多种有价值元素而在钢铁工业、航空航天、冶金化工、电子技术、材料科学等领域具有极重要的战略价值^[1-3]。全球钒钛磁铁矿的储量较大,分布广泛,主要位于俄罗斯、南非、中国、美国、加拿大等国家和地区。中国的钒钛磁铁矿资源主要分布在四川攀西地区和河北承德地区,其中攀西地区的钒钛磁铁矿资源储量巨大,目前已探明储量达 100 亿 t^[4-9]。经多年的技术攻关,钒钛磁铁矿资源综合利用取得了显著成绩,铁、钛、钒的回收利用技术相对成熟,尤其伴随“超微细粒级钛铁矿高效回收技术”创新性研发取得突破性进展并实现产业化应用,破解了攀西钒钛磁铁矿中超微细粒钛铁矿选矿高效回收的行业世界性难题。

随着钒钛磁铁矿选冶技术的提高,对过去没有综合利用的一类基性-超基性含铁岩石开展了综合利用,取得了显著的经济效益^[10-14]。这部分含铁岩石 TFe 平均品位一般低于 15%,低于圈定工业矿体的边界品位 20%,有用矿物以磁铁矿(钛磁铁矿)为主,属低品位难选钒钛磁铁矿,主要分布于河北承德、张家口,辽宁建平-喀左、海城-弓长岭,新疆天山地区等。河北北部承德地区低品位钒钛磁铁矿开发利用起步较早,规模较大,已探明储量达 85 亿 t,伴生 TiO₂ 达 1.28 亿 t、V₂O₅ 达 703 万 t,是仅次于攀西钒钛磁铁矿的全国第二大钒钛磁铁矿^[15-19]。新疆天山地区低品位钒钛磁铁矿主要分布于东天山和西南天山一带,但达到工业品位的矿石资源量较少,低品位、

特别是超贫钒钛磁铁矿资源量巨大,估算远景资源量可达 20 亿 t 以上。其它地区低品位钒钛磁铁矿开发正处于起步阶段,尚未形成规模化生产^[20-21]。整体来看,此类钒钛磁铁矿资源勘查程度低、资源综合利用水平不高、开发利用不规范,存在较大的发展问题。

钒、钛作为重要的战略金属,随着高品位矿石资源的逐渐枯竭,低品位矿石开发成为必然趋势。低品位矿石的开发可以增加国内资源供应,减少对外依赖,保障国家资源安全。同时,可促进选矿、冶炼、材料加工等相关产业的发展,促进矿业技术的革命与创新。笔者以新疆南天山-东天山地区某低品位钒钛磁铁矿为研究对象,深入分析矿石的矿物组成、结构特性以及有价值元素的赋存状态,为矿石的选矿流程设计和工艺参数优化提供重要的矿物学依据,对推动此类超贫钒钛磁铁矿资源的综合利用具有重要的指导意义。

1 矿石的物质组成

1.1 化学组成

该矿石取自新疆南天山-东天山地区,其原矿化学多元素分析结果见表 1。分析得知:矿石中主要的有价值元素为铁、钛, TFe 品位 14.06%, TiO₂ 品位 4.53%, V₂O₅ 品位 0.071%;矿石中 SiO₂、Al₂O₃、CaO、MgO 的含量总计高达 70.89%,说明矿石中铝硅酸盐类矿物含量非常高,矿石属低品位钒钛磁铁矿石;其它有价值元素有 S、Sc、Cu、Co、Ni 等,含量极低,有害元素 P 含量仅为 0.19%,对矿石性质影响较小。

1.2 矿物组成

经矿物学分析(表 2)得知:矿石中的金属矿物

主要包括金属氧化物及金属硫化物,金属氧化物以钛磁铁矿及钛铁矿为主,含量分别为 11.25% 及 5.35%,金属硫化物主要为磁黄铁矿,含量为 0.59%,另有极微量的黄铜矿等;非金属矿物总量高达 82.8%,主要以长石和辉石为主,含量分别为

38.50% 及 29.10%;少量非金属矿物有橄榄石、绿泥石、闪石、黑云母、磷灰石等,含量分别为 5%、2.5%、2.8%、1.22% 及 1.22%;微量非金属矿物有石英、绿帘石、方解石等,总量不超过 2%,极微量矿物有榴石、黏土矿物等。

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	Na ₂ O	Cu	ZnO	Sc*	P	S	V ₂ O ₅	Ni	Co
10.93	6.28	0.25	4.53	40.09	13.59	14.06	2.85	0.016	0.038	23.90	0.19	0.22	0.071	0.008	0.002

注: *处的单位为g/t。

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

钛磁铁矿	钛铁矿	磁黄铁矿	黄铜矿	长石	辉石	橄榄石	闪石	绿泥石	磷灰石	黑云母	石英	榴石	绿帘石	方解石	其它
11.25	5.35	0.59	0.01	38.50	29.10	5.00	2.80	2.50	1.22	1.22	0.40	0.31	0.22	0.21	1.32

2 主要矿物的嵌布特征

2.1 钛磁铁矿

钛磁铁矿是选铁的可利用矿物,含量较低,常见与钛铁矿连生,呈海绵陨铁结构赋存于脉石矿物晶隙中,钛磁铁矿晶体内部发育有较多的固溶体分离结构,有席状交织的钛铁矿片晶、串珠状分布的尖晶石等,钛磁铁矿发育不同程度的绿泥石化蚀变,绿泥石常呈它形晶赋存于钛磁铁矿晶体周边或呈脉状分布于钛磁铁矿晶内裂隙中,偶见半自形-自形磷灰石赋存于钛磁铁矿中(图 1)。利用电子探针波谱仪对

钛磁铁矿进行 X 射线面分析,可以明显看到呈席状交错发育的固溶体分离矿物,主要为钛铁矿片晶及尖晶石类矿物(图 2)。钛磁铁矿粒度较粗,一般介于 200 ~ 500 μm,最大可达 1.5 mm,0.15 mm 以上占比达 51.3%,0.15 ~ 0.043 mm 部分占比达 43.5%,<0.043 mm 微细粒钛磁铁矿分布较少,仅占 5.2%(表 3)。电子探针微区分析查明钛磁铁矿中 FeO 含量为 77.202% ~ 79.539%,平均值为 78.400%(换算为 TFe: 61.152%),TiO₂ 含量为 9.822% ~ 12.972%,平均值为 11.057%,另含少量 Al₂O₃、SiO₂、MgO、CaO 等元素(表 4)。

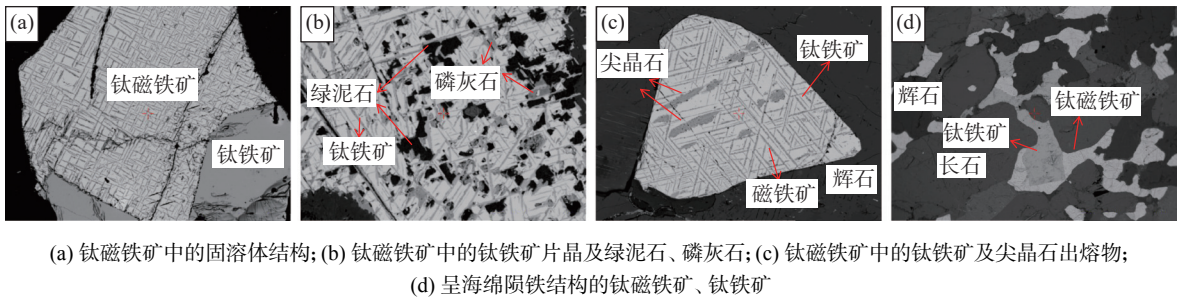


图 1 钛磁铁矿的嵌布特征(背散射)

Fig. 1 Embedded characteristics of titanium magnetite (BSE)

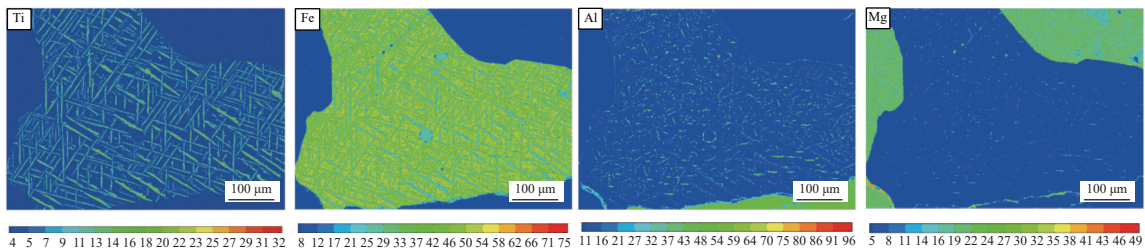


图 2 钛磁铁矿中固溶体分离结构的 X 射线面分析

Fig. 2 X-ray spectrum analysis of solid solution separation structure in titanium magnetite

2.2 钛铁矿

钛铁矿是矿石中主要的含钛金属矿物, 含量占矿物总量的 5.35%, 钛铁矿的赋存状态主要有两类: 一类是由固溶体分离形成的钛铁矿片晶, 以板状、片晶、显微片晶的形式赋存于钛磁铁矿中, 粒径较小, 宽度一般小于 5 μm, 与钛磁铁矿紧密共生, 形成固溶体分离结构(图 1); 另一类是粒状钛铁矿, 呈自形、半自形、它形, 粒度相对较粗, 在 100 ~ 300 μm, 常与钛磁铁矿共生, 形成连晶, 并一起充填嵌布于脉石矿物间隙中, 构成海绵陨铁结构(图 3)。选矿主要回收的为粒状钛铁矿, 固溶体分离形成的钛铁矿粒度微细, 常与钛磁铁矿一同进入铁精矿中, 属合理损失。钛铁矿原生粒度略小于钛磁铁矿, 一般介于 74 ~ 500 μm, 最大可达 1 mm, 0.15 mm 以上占比为 26.3%, 0.043 ~ 0.15 mm 占比达 61.3%, -0.043 mm 微细粒钛铁矿占 12.4%(表 3)。电子探针微区分析查明钛铁矿中 FeO 含量为 41.642% ~ 46.388%, 平均值为 44.592%(换算为 TFe: 34.682%), TiO₂ 含量为 50.186% ~ 52.038%, 平均值为 50.874%, 另含少量 Al₂O₃、SiO₂、MgO、CaO 等杂质元素(表 4)。

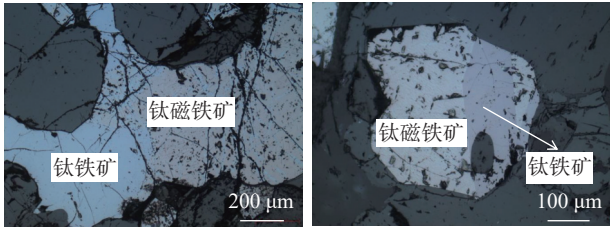


图 3 粒状钛铁矿的矿物学特征(反射光)
Fig. 3 Embedded characteristics of granular ilmenite (reflected light)

表 3 钛磁铁矿、钛铁矿原生粒度统计
Table 3 Statistics table of primary particle size of titanium magnetite and ilmenite

粒级/mm	分布率/%	
	钛磁铁矿	钛铁矿
+0.5	11.5	4.5
-0.5 ~ +0.15	39.8	21.8
-0.15 ~ +0.074	23.2	32.5
-0.074 ~ +0.043	20.3	28.8
-0.043	5.2	12.4

表 4 钛磁铁矿、钛铁矿电子探针微区分析(平均)
Table 4 Element composition and content of titanium magnetite and ilmenite by EPMA(average) %

矿物	Na ₂ O	CaO	FeO	Cr ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	SiO ₂	V ₂ O ₅	MnO	总计
钛磁铁矿	0.016	0.286	78.400	0.013	0.315	0.001	11.057	0.382	2.450	0.073	0.194	0.317	93.504
钛铁矿	0.008	0.018	44.592	0.005	1.906	0.001	50.874	0.007	0.062	0.038	0.203	0.886	98.599

2.3 金属硫化物

矿石中的金属硫化物主要为磁黄铁矿, 含量较低, 仅为 0.59%, 在镜下呈乳黄色(图 4), 具有多色性, 无内反射色, 具有较强的非均质性, 多呈它形粒状产出, 与钛磁铁矿、钛铁矿共生产出, 粒径较小, 一般介于 50 ~ 150 μm。对其进行电子探针微区分析得知磁黄铁矿中 Fe 含量为 59.201% ~ 61.568%, 平均值为 59.961%, S 含量为 36.252% ~ 38.7%, 平均值为 37.784%, Co 含量为 0.141% ~ 0.233%, 平均值为 0.156%, 另含少量 Ni、Mo、Cu 等元素(表 5)。

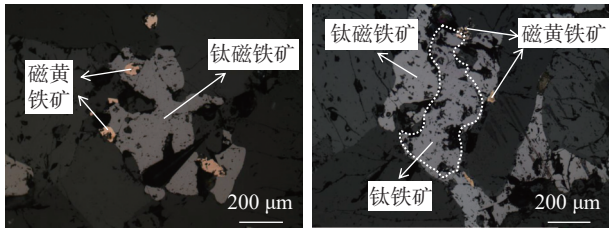


图 4 磁黄铁矿的嵌布特征
Fig. 4 Embedded characteristics of pyrrhotite

2.4 长石

长石为主要的脉石矿物, 矿石中长石主要以斜

长石为主, 双晶发育, 含量为 38.5%。长石粒径粗大, 一般介于 0.5 ~ 2 mm, 常与辉石、钛铁矿及钛磁铁矿一起构成海绵陨铁结构(图 5)。对长石进行电子探针微区分析可知, 其中平均含有 0.323% 的 FeO 及 0.043% 的 TiO₂(表 6)。

表 5 磁黄铁矿电子探针微区分析元素含量(平均)
Table 5 Element composition and content of pyrrhotite by EPMA (average) %

As	S	Fe	Ni	Cu	Ti	Zn	Mo	Co	总量
0.208	37.784	59.961	0	0.040	0.042	0.039	0.345	0.156	98.576

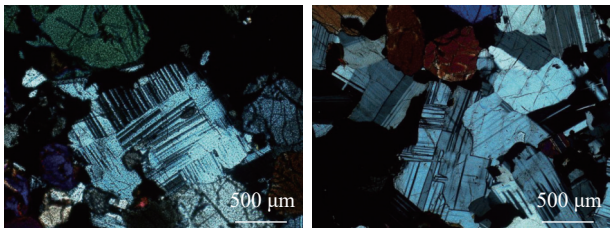


图 5 斜长石的双晶(正交偏光)
Fig. 5 Bicrystal of plagioclase (CPL)

表 6 脉石矿物的电子探针微区分析元素含量(平均)

Table 6 Element composition and content of gangue mineral by EPMA (average)

%

脉石矿物	Na ₂ O	CaO	FeO	Cr ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	SiO ₂	V ₂ O ₅	MnO	F	总计
长石	5.035	10.694	0.323	0.008	0.017	0.267	0.043	0.009	27.376	55.866	0.003	0.009	0	99.652
辉石	0.349	20.039	10.070	0.020	13.860	0.005	1.007	0.020	2.628	50.159	0.020	0.237	0	98.413
闪石	1.439	10.661	16.881	0.017	14.055	0.602	1.570	0.022	9.141	40.388	0.033	0.164	0	94.973
橄榄石	0.009	0.044	46.471	0.009	17.856	0.001	0.021	0.036	0.004	34.441	0.007	0.461	0	99.360
绿泥石	0.005	0.215	28.134	0.006	12.362	0.236	0.232	0.051	16.245	27.825	0.045	0.161	0	85.517
磷灰石	0.064	53.654	0.335	0.004	0.003	0.004	0.047	42.015	0.004	0.126	0.003	0	2.889	99.148
黑云母	0.347	13.464	0.012	15.795	8.839	3.655	0.003	15.093	35.831	0.033	0.347	0	0	93.253

2.5 辉石

矿石中辉石以透辉石为主, 含微量的普通辉石, 辉石常呈自形-半自形粒状, 部分辉石受构造应力作用形成碎裂结构, 并沿辉石颗粒裂隙发生绿泥石化等蚀变作用(图 6)。辉石粒径主要集中分布于 1~0.3 mm, 占比约 70%, 0.3 mm 以下占比约 30%。电子探针微区波谱分析得知辉石中 FeO 含量为 8.782%~12.215%, 平均为 10.070%, TiO₂ 含量为 0.696%~1.309%, 平均为 1.007%(表 6)。

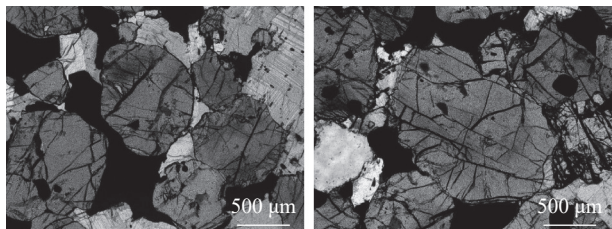


图 6 辉石的嵌布特征(正交偏光)

Fig. 6 Embedded characteristics of pyroxene (CPL)

2.6 闪石

闪石是矿石中的次要脉石矿物。闪石多与辉石、长石紧密连生, 普遍发生绿泥石化蚀变。通过扫描电镜及电子探针微区分析得知闪石中 FeO 含量为 15.372%~18.908%, 平均为 16.881%, TiO₂ 含量为 1.224%~1.923%, 平均为 1.570%(表 6)。

除了上述几种主要矿物外, 矿石中还有微量的橄榄石、绿泥石、磷灰石、黑云母、榍石等, 对矿石性质基本影响较小, 对其它脉石进行电子探针微区分析见表 6。

3 铁的赋存状态

研究得知矿石中的铁主要分布于钛磁铁矿及钛铁矿中, 分布率分别为 47.892% 及 12.954%, 其余的铁主要分布在脉石矿物中, 辉石中分布有 15.866% 的 TFe, 橄榄石中分布有 12.581% 的 TFe, 此外, 绿

泥石、角闪石及磁黄铁矿中含有微量的 TFe(表 7)。钛磁铁矿为选矿回收铁元素的目的矿物, 全部回收, 其理论品位可达 61% 左右, 理论回收率可达 47.5% 左右。由于钛磁铁矿中极微细粒固溶体分离矿物的存在, 选矿难以有效单体解离, 导致实际生产指标较难达到此理论指标。钛铁矿、磁黄铁矿及脉石矿物中的铁属较难利用的分散铁, 为合理损失。

表 7 原矿综合样中铁、钛的平衡配分

Table 7 Equilibrium partitioning of iron and titanium in raw ore comprehensive sample

%

矿物名称	矿物含量	TFe			TiO ₂		
		矿物中 TFe 品位	TFe 金属量	TFe 在各矿物中的分布率	矿物中 TiO ₂ 品位	TiO ₂ 金属量	TiO ₂ 在各矿物中的
钛磁铁矿	11.25	61.150	6.879	47.892	11.057	1.244	27.824
钛铁矿	5.35	34.780	1.861	12.954	50.874	2.722	60.881
磁黄铁矿	0.59	59.961	0.354	2.463	0.000	0.000	0.000
黄铜矿	0.01	30.590	0.003	0.021	0.000	0.000	0.000
辉石	29.1	7.832	2.279	15.866	1.007	0.293	6.555
钠长石	38.5	0.251	0.097	0.673	0.043	0.017	0.370
橄榄石	5	36.144	1.807	12.581	0.021	0.001	0.023
绿泥石	2.5	21.880	0.547	3.808	0.232	0.006	0.130
角闪石	3	13.129	0.394	2.742	1.570	0.047	1.054
黑云母	1.22	10.470	0.128	0.889	3.655	0.045	0.997
磷灰石	0.88	0.261	0.002	0.016	0.047	0.000	0.009
榍石	0.31	4.370	0.014	0.094	31.090	0.096	2.156
其它	2.29	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
合计	100.00		14.364	100.000		4.471	100.000

注: 原矿综合样 TFe 品位 14.060, 平衡系数(k)14.436 4÷14.060=102.16%; 原矿综合样 TiO₂ 品位 4.53%, 平衡系数(k)4.471÷4.530=98.69%。

4 钛的赋存状态

矿石中的钛主要分布于钛铁矿及钛磁铁矿中, 分布率分别为 60.881% 及 27.824%, 其余少量的钛

分布在脉石矿物中。钛铁矿为选矿回收钛元素的目的矿物,全部回收,其理论品位可达 50.5% 左右,理论回收率可达 60.5% 左右。由于钛铁矿赋存状态以粒状钛铁矿及钛磁铁矿中出溶的片状钛铁矿为主,钛磁铁矿中极微细粒的钛铁矿片晶选矿难以有效回收,为合理损失。此外,钛磁铁矿、榍石、辉石等矿物中的钛属较难利用的分散钛,为合理损失(表 7)。

5 结论

1)此次研究的矿石为低品位辉长岩型钒钛磁铁矿石, TFe 品位 14.06%, TiO₂ 品位 4.53%, V₂O₅ 品位 0.071%, 矿石中的主利用元素为铁、钛。金属氧化物以钛磁铁矿及钛铁矿为主,金属硫化物主要为磁黄铁矿,非金属矿物总量高达 82.8%,主要为辉石和长石,另有少量的橄榄石、绿泥石等。

2)钛磁铁矿常与钛铁矿连生,钛磁铁矿晶体内发育有固溶体分离结构,且有不同程度的绿泥石化蚀变现象,偶见半自形-自形磷灰石赋存于钛磁铁矿中。钛铁矿一类为半自形-它形粒状钛铁矿,粒度相对较粗,是选矿回收铁的主要目的矿物;另一类由固溶体分离形成的板状、片状、显微片晶状的钛铁矿粒度微细,常与磁铁矿一同进入铁精矿中,属合理损失。

3)矿石中的铁主要分布于钛磁铁矿及钛铁矿中,其余的铁主要分布在脉石矿物及磁黄铁矿中,钛磁铁矿为选矿回收铁元素的目的矿物。钛磁铁矿晶体广泛发育有固溶体分离结构、绿泥石化蚀变。这些微细粒固溶体分离矿物、蚀变矿物粒度微细、嵌

布复杂,选矿难以有效剔除,会混入铁精矿影响精矿品质,指标较难达到理论指标。

4)矿石中的钛主要分布于钛铁矿及钛磁铁矿中,其余少量的钛分布在脉石矿物中。粒状钛铁矿为回收钛的主要类型,而固溶体分离形成的钛铁矿,粒径较小,与钛磁铁矿紧密共生,磨矿难以单体解离,易在选铁环节随钛磁铁矿混入铁精矿,属合理损失。此外,钛磁铁矿、榍石、辉石等矿物中的钛属较难利用的分散钛,为合理损失。

5)钛磁铁矿为选矿回收铁元素的目的矿物,全部回收,其理论品位可达 61% 左右,理论回收率可达 47.5% 左右;钛铁矿为选矿回收钛元素的目的矿物,全部回收,其理论品位可达 50.5% 左右,理论回收率可达 60.5% 左右。

6 建议

1)选矿回收的主要为粒状钛铁矿,这类型钛铁矿在选铁工艺中进入磁选尾矿,是回收钛精矿的主要物料。固溶体分离形成的钛铁矿粒度微细,常与磁铁矿一同进入铁精矿中,属合理损失。

2)矿石中含有 0.6% 左右的硫化物,应在选铁工艺后、选钛工艺之前增加一道浮选脱硫工艺。

3)矿石中含少量绿泥石、榍石等蚀变矿物,以及微量的黏土类矿物,过磨容易导致矿浆泥化,在磨矿作业时应注意矿石磨矿条件设置。

4)根据矿石性质,建议选矿工艺为抛尾—一阶磨阶选选铁—弱磁除铁—分级—强磁选—重选预富集—脱硫—浮选选钛。

参考文献

- [1] Peng Mingsheng, Liu Xiaowen, Liu Yu, *et al.* The main advances of process mineralogy in China in the last decade[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2012, 31(3): 210-213.
(彭明生, 刘晓文, 刘羽, 等. 工艺矿物学近十年的主要进展 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2012, 31(3): 210-213.)
- [2] Zhu Fuxing, Jiao Yu, Li Liang, *et al.* The status and trends of mineral processing technology for vanadic titanomag[J]. Mining and Metallurgy, 2021(4): 26-32.
(朱福兴, 焦钰, 李亮, 等. 攀西钒钛磁铁矿的选矿技术现状及发展趋势 [J]. 矿冶, 2021(4): 26-32.)
- [3] Chen Haibin, Zhou Zhenhua, Zhang Zuojin, *et al.* Research progress in the comprehensive recovery of vanadium-titanium magnetite[J]. Modern Mining, 2023(1): 7-9.
(陈海彬, 周振华, 张作金, 等. 钒钛磁铁矿综合回收研究进展 [J]. 现代矿业, 2023(1): 7-9.)
- [4] Wang Yue, Wang Jing, Zhou Mangeng, *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.
(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.)
- [5] Wang Yue, Wang Jing, Li Xiaoyu, *et al.* Application of EPMA in the processing mineralogy study of a deep iron ore in Benxi, Liaoning province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2018(5): 109-113.
(王越, 王婧, 李潇雨, 等. 电子探针在本溪某深部铁矿石工艺矿物学研究中的应用 [J]. 矿产综合利用, 2018(5): 109-113.)

- [6] Yang Yaohui, Hui Bo, Yan Shiqiang, *et al.* Overview of global vanadium-titanium magnetite resources and comprehensive utilization[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(4): 1-11.
(杨耀辉, 惠博, 颜世强, 等. 全球钒钛磁铁矿资源概况与综合利用研究进展[J]. 矿产综合利用, 2023(4): 1-11.)
- [7] Xiao Ying, Guan Chuan, Xu Xiaoxia. Determination method of iron and titanium phases for vanadium titanium magnetite[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(4): 103-105.
(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): 103-105.)
- [8] Yang Yaohui, Hui Bo, Yan Weiping, *et al.* Research on process mineralogy of fine ilmenite in Panxi area[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(3): 131-135.
(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.)
- [9] Han Yuexin, Zhang Xiaolong, Gao Peng, *et al.* Development and prospect of iron ore processing technologies in China[J]. Metal Mine, 2024(2): 1-24.
(韩跃新, 张小龙, 高鹏, 等. 中国铁矿石选矿技术发展展望[J]. 金属矿山, 2024(2): 1-24.)
- [10] Hong Qiuyang, Li Meirong, Li Bo, *et al.* Process mineralogical characteristics of a foreign refractory vanadium-titanium iron ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(6): 48-55.
(洪秋阳, 李美荣, 李波, 国外某难选冶钒钛铁矿石工艺矿物学特征[J]. 矿产综合利用, 2020(6): 48-55.)
- [11] Chen Chao, Zhang Yushu, Li Xiaoyu, *et al.* Research progress in titanium-magnetite beneficiation technology[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(3): 99-105.
(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.)
- [12] Jia Muxin. Process mineralogy progress and its trend abroad[J]. Mining & Metallurgy, 2007, 16(2): 95-99.
(贾木欣. 国外工艺矿物学进展及发展趋势[J]. 矿冶, 2007, 16(2): 95-99.)
- [13] Lu Xianzhi, Lu Peiyao, Chen Yingjie, *et al.* Study on process mineralogy of ilmenite in Yunnan province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(2): 206-210.
(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.)
- [14] Ding Quanli. The innovative demonstration project for the enhanced recovery of ultra-fine titanium iron ore has been put into operation, raising the recovery rate of titanium resources in China to more than 40% [N/OL]. China Natural Resources News, 2023-09-19. https://www.mnr.gov.cn/dt/kc/202309/t20230919_2800629.html
(丁全利. 超微细粒级钛铁矿强化回收创新示范工程生产线投运, 我国钛资源回收率提至 40%[N/OL]. 中国自然资源报, 2023-09-19. https://www.mnr.gov.cn/dt/kc/202309/t20230919_2800629.html.)
- [15] Feng Youquan. Discussion on comprehensive development and utilization scheme of an ultra-lean vanadium-titanium magnetite in Xinjiang[J]. Mining Engineering, 2020(2): 36-38.
(冯友全. 新疆某超贫钒钛磁铁矿综合开发利用方案探讨[J]. 矿业工程, 2020(2): 36-38.)
- [16] Li Houmin, Wang Ruijiang, Xiao Keyan, *et al.* Characteristics and current utilization tatus of ultra-low grade magnetite resource and suggestion on its exploration and development[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28 (1): 85-90.
(李厚民, 王瑞江, 肖克炎, 等. 中国超贫磁铁矿资源的特征、利用现状及勘查开发建议—以河北和辽宁的超贫磁铁矿资源为例[J]. 地质通报, 2009, 28(1): 85-90.)
- [17] Wang Jinggong, Li Zhaohui, Guo Xiuping. Comprehensive utilization of ultra-low-grade magnetite ore resources in Hebei province[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2012(2): 14-15.
(王敬功, 李朝晖, 郭秀平. 河北省超贫磁铁矿资源的综合利用[J]. 矿产保护与利用, 2012(2): 14-15.)
- [18] Wang Xun, Han Yuexin, Li Yanjun, *et al.* Research status on comprehensive development and utilization of vanadium-titanium magnetite[J]. Metal Mine, 2019(6): 33-37.
(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.)
- [19] Ma Jianming, Chen Congxi. A new type of iron ore resources development and utilization of ultra-poor vanadium titanomagnetite in Chengde[J]. China Metal Bulletin, 2007(20): 31-32.
(马建明, 陈从喜. 我国铁矿资源开发利用的新类型—承德超贫钒钛磁铁矿[J]. 中国金属通报, 2007(20): 31-32.)
- [20] Zhang Qingshan. Development and utilization of vanadium titano-magnetite ore in Xinjiang[J]. Xinjiang Iron and Stell, 2020(3): 54-57.
(张清山. 浅谈新疆钒钛磁铁矿开发利用思路[J]. 新疆钢铁, 2020(3): 54-57.)
- [21] 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, 44(5): 15-22.
(马东林, 杨耀辉, 邓建, 等. 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, 44(5): 15-22.)