

西北地区某钛铁矿中钽的赋存状态研究

刘飞燕¹, 谢志远², 李成秀¹, 周家云¹

(1. 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 四川 成都 610041; 2. 四川省地质矿产(集团)有限公司, 四川 成都 610036)

摘要: 这是一篇工艺矿物学领域的论文。为查清某伴生钽的低品位钛铁矿石性质, 采用化学分析、电子探针、X射线衍射、AMICS矿物自动分析仪和光学显微镜等手段, 对矿物的物质组成、矿物嵌布特征以及钽、铁、钛元素的赋存状态进行了详细的工艺矿物学研究。结果表明: 矿石中钽主要赋存于钙镁硅酸盐中, 分布率达94.93%, 仅针对钙镁硅酸盐类矿物进行选冶工作即可取得优异的钽回收指标。研究结果对钛矿石伴生钽的选冶及矿床下一步开发利用具有重要指导意义, 也对类似含钽钛矿床中钽的赋存状态研究具有重要启示。

关键词: 工艺矿物学; 西北地区; 钛铁矿; 磁铁矿; 钽; 钙镁质硅酸盐矿物; 赋存状态

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.04.027

中图分类号: TD952;P575 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2023)04-0177-05

钽的上地壳丰度为7 g/t, 与稀土元素性质相似, 自然界中稀土元素有许多独立矿物, 形成规模可观的独立矿床, 而钽的独立矿物非常少, 通常知道的只有钽铋石、磷钽矿等, 其存在量非常少, 不具工业意义^[1]。目前工业上钽主要从黑钨矿、锡石精矿中提取, 对钛矿石中伴生钽的回收报道鲜少。随着科技发展, 对钽资源的需求日益增加, 使得钽的开发利用研究愈加迫切。本文选取西北某钛矿石进行系统的工艺矿物学研究, 以其查明矿石中的钽的赋存状态, 为后续选冶开发

利用提供矿物学资料。

1 矿石的物质组成

1.1 矿石化学组成

矿石样品化学分析结果见表1。由表1可知, 矿石化学成分以TFe、TiO₂、SiO₂、Al₂O₃、CaO、MgO、Na₂O为主, Sc₂O₃含量未达到综合利用最低品位, 但可作为伴生组分综合利用。矿石属于低铁低钽等级钛矿石。

表1 矿石主要化学成分分析结果/%
Table 1 Chemical analysis results of raw ore

K ₂ O	TFe	TiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	MnO	SiO ₂	P
0.14	10.21	4.54	6.10	11.40	12.55	11.41	2.55	0.17	43.73	0.11
V ₂ O ₅	S	Sc ₂ O ₃ *	Sr*	Cr*	W*	Y*	Ge*	Ga*	Ce*	Co*
0.07	0.04	55.50	323	50.9	28.3	19.7	17.1	17	14	60.0

*单位为g/t。

1.2 矿石的矿物组成

矿石角闪石、长石约占矿物总量的85%以上, 其他矿物含量少。经过系统工作, 查明矿石

中的主要矿物成分为角闪石、长石和钛铁矿, 其他矿物为磁铁矿、绿泥石、磷灰石等, 根据上述矿物的性质和含量进行了分类统计, 结果见表2。

收稿日期: 2023-06-12

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目(DD20230039); 四川省科技厅项目(2022ZHCG0124)

作者简介: 刘飞燕(1975-), 女, 高级工程师, 主要从事工艺矿物学研究工作。

通信作者: 谢志远(1977-), 男, 高级工程师, 主要从事地质调查工作。

表 2 矿石矿物含量

Table 2 Mineral composition and content of raw ore

矿物类别	矿物名称	含量/%
电磁性脉石	角闪石、辉石	45.63
	绿泥石	1.35
	橄榄石	0.33
	云母	0.12
	长石	39.82
非磁脉石	方解石	0.86
	磷灰石	0.68
	石英	0.45
	石膏	0.34
铁矿物	磁铁矿	2.34
	赤-褐铁矿	0.47
钛矿物	钛铁矿	6.80
	榍石	0.04
微量矿物	磁黄铁矿、毒砂、黄铁矿、黄铜矿、锑石等	偶见

2 矿石结构、构造

矿石的结构、构造可指示矿石磨矿后单体解离的难易程度。一般在磨矿条件相同的情况下，晶粒粗者、自形程度高者较易解离。反之，细粒者、不规则它形粒状者较难解离^[2]。

2.1 矿石结构

矿石主要发育它形—半自形晶粒状结构、固溶体分离结构、包含结构和嵌晶结构、反应边结构等。矿石中含量最高的非金属矿物角闪石、辉石等硅酸盐矿物与金属矿物磁铁矿、钛铁矿具它形晶粒状结构，磁铁矿，钛铁矿呈它形粒状充填于上述矿物粒间，形态大小受间隙大小控制；固溶体结构表现为矿石中镁铝尖晶石呈串珠状，钛铁矿呈搁架状、平行板状微片晶分布在钛磁铁矿中；包含结构表现为角闪石中包裹有铁钛矿物构成嵌晶或脉石中包含铁钛矿物；反应边结构表现为磁铁矿与斜长石接触部位，嵌布有铁镁质硅酸

盐矿物的反应边。

2.2 矿石的构造

矿石的构造主要为块状构造、稀疏浸染状构造、斑杂状构造。块状构造为矿石中发育的主要构造，一般表现为脉石矿物集合体的致密镶嵌，均匀分布；浸染状构造主要发育于金属矿物含量较高的矿石，磁铁矿和钛铁矿组成的金属矿物集合体在矿石中呈浸染状嵌布；斑杂状构造为部分矿石中磁铁矿和钛铁矿呈不规则状斑块。

3 主要矿物嵌布特征及粒度特征

3.1 钛铁矿

钛铁矿是重要的钛工业矿物，也是矿石中主要的含钛金属矿物。钛铁矿中 Fe 可被 Mn 类质同象替代。钛铁矿嵌布特征包括：（1）钛铁矿常呈它形粒状或粒状集合体与磁铁矿毗连嵌布在钙镁硅酸盐矿物粒间（图 1a-1b），粒径往往较粗，粗者可达 0.45 mm，一般 0.1~0.3 mm，是钛铁矿的主要嵌布类型；（2）钛铁矿边缘常见榍石化（图 1c）；（3）部分钛铁矿嵌布在斜长石和角闪石类矿物粒间、解理缝（图 1d），粒径往往较细，在 0.03~0.04 mm；（4）少量钛铁矿呈星点状在脉石矿物中析出，粒径多在几微米；（5）微量钛铁矿呈半自形状（图 1e）或片晶形式产出，片晶形式的钛铁矿呈盒状、搁架状，宽度仅几微米（图 1f），这类钛铁矿即使细磨也难从磁铁矿中解离出来，磁选选铁时往往随磁铁矿进入铁精矿，影响铁精矿的品质。粒状钛铁矿可以利用，片晶状钛铁矿不能利用。钛铁矿的电子探针微区分析成分分析结果见表 3。电子探针微区分析是不含任何包体或连生体的情况下，钛铁矿中主要组份的含量，是钛精矿的钛极限品位，这个数据的高低对选矿作业有一定的指导意义。



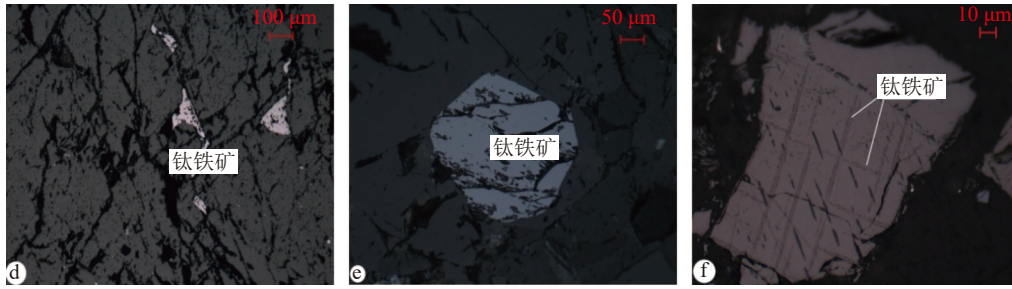


图1 钛铁矿在矿石中的嵌布特征
Fig.1 Dissemination characteristics of ilmenite

表3 钛铁矿的电子探针分析结果/%

点号	FeO	TiO ₂	Sc ₂ O ₃	SiO ₂	MnO
1	47.775	49.781	0.000	0.029	0.900
2	48.784	50.037	0.008	0.077	0.702
3	47.701	50.325	0.017	0.115	0.792
4	47.554	50.262	0.003	0.018	0.739
平均	47.954	50.101	0.007	0.06	0.783

3.2 磁铁矿

磁铁矿等轴晶系^[3]，呈灰带棕色调，晶体结构中除了Fe²⁺代替Fe³⁺以外，还伴随有Ti⁴⁺代替Fe³⁺、Mg²⁺和V³⁺代替Fe²⁺和Fe³⁺等，磁铁矿电子探针分析结果见表4。磁铁矿是典型的铁磁性矿物，弱磁条件时即可对其进行有效的选别。磁铁矿集合体粒径分布不均匀，与钛铁矿毗邻的磁铁矿粒度较粗，可达0.45 mm；独立嵌布在脉石粒间的磁铁矿粒径较细，在30 μm左右。矿石中磁铁矿多呈它形粒状或它形粒状集合体形式嵌布。磁铁矿在矿石中的嵌布形式包括：呈不规则粒状与钛铁矿毗

邻嵌布在脉石粒间，其中常见有细粒串珠状镁铝尖晶石或钛铁矿片晶，是磁铁矿的主要嵌布形式；其次呈不规则粒状嵌布在脉石中。

表4 磁铁矿电子探针分析结果/%

序号	FeO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₅	Sc ₂ O ₃
1	92.764	0.218	0.437	1.942	0.000
2	92.954	0.221	0.065	1.122	0.009
3	92.697	0.184	0.108	2.841	0.000
4	92.199	0.184	0.883	1.541	0.014
5	91.669	0.402	1.066	1.873	0.008
平均	92.456	0.242	0.512	1.864	0.006

3.3 角闪石

角闪石是矿石中主要的脉石矿物，多数呈半自形柱状，发育角闪石式解理，两组解理夹角56°，多色性显著^[4]，具电磁性。角闪石在矿石中粒径大小不等，粗者大于4 mm，细者仅约20 μm，集中分布在0.20~1.2 mm之间。角闪石电子探针元素成分分析结果见表5，角闪石含一定量的FeO、TiO₂。

表5 角闪石电子探针分析结果/%

序号	CaO	FeO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Sc ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃
1	19.231	12.686	0.462	/	2.961	/	12.438	50.691	2.726
2	20.894	12.348	0.362	0.010	2.297	0.053	11.837	51.663	1.277
3	19.325	12.973	0.485	0.019	1.173	0.006	12.674	50.448	3.280
平均值	19.817	12.669	0.436	0.010	2.144	0.020	12.316	50.934	2.428

3.4 辉石

矿石中含少量辉石，手标本中近灰绿色，短柱状，主要呈半自形-它形粒状嵌布在矿石中，粒径在0.35~1.5 mm。辉石中含少量TiO₂（表6）。

3.5 长石

矿石中含大量长石，是主要的脉石矿物，主要为斜长石，碱性长石含量很低。长石呈它形晶

结构，少量为半自形结构，嵌布在钙镁硅酸盐矿物粒间或被其包裹，粒度0.05~1.5 mm，聚片双晶发育，部分斜长石被绿帘石交代呈残余状。斜长石的理论上没有磁性，选铁尾矿磁选选钛时易与钛铁矿、角闪石、辉石等暗色硅酸盐矿物分离。经电子探针微区分析检测出微量铁、钛（表7）。

表 6 辉石电子探针分析结果/%
Table 6 Electron probe analysis results on the pyroxene

序号	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Sc ₂ O ₃	MgO	CaO	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃
1	1.892	0.523	3.64	0.003	11.23	10.725	15.656	41.285	13.369
2	2.04	0.466	2.125	-	11.657	11.129	13.957	42.482	14.687
3	2.368	0.728	3.007	0.011	10.062	10.849	16.874	42.483	12.958
平均	2.100	0.572	2.924	0.005	10.983	10.901	15.496	42.083	13.671

表 7 斜长石电子探针分析结果/%
Table 7 Electron probe analysis results on the Plagioclase

序号	FeO	TiO ₂	Sc ₂ O ₃	MgO	CaO	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Al ₂ O ₃
1	1.230	0.047	-	0.228	8.890	51.906	5.409	0.163	31.471
2	0.174	0.006	-	0.005	10.134	54.200	5.385	0.051	31.833
平均	0.702	0.0265	-	0.1165	9.512	53.053	5.397	0.107	31.652

3.6 硫化物

矿石中硫化物含量极低，偶见黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、毒砂，分布在脉石裂隙或被脉石包裹，粒径在 0.01~0.04 mm。

4 主要矿物单矿物分析

上述研究可以看出，主要矿物中钪含量均低，接近电子探针微量元素检测限，为此，对原矿石砂样在实体镜下进行了人工单矿物分选，主要针对磁铁矿、钛铁矿、钙镁硅酸盐矿物以及长石，并进行钪、铁和钛元素的化学分析，分析结果见表 8。由表 8 可以看出，长石中不含钪，其他矿物中均检测到不等量的钪。

表 8 单矿物化学分析结果/%
Table 8 Chemical analysis of key elements of pure minerals

样品	TiO ₂	TFe	Sc ₂ O ₃ *
磁铁矿类	3.80	65.20	1.39
钛铁矿	47.89	36.73	50.00
角闪石类磁性矿物	2.69	11.38	136.00
长石类非磁性矿物	0.09	1.27	0.00

*单位为 g/t。

5 矿石中钪的赋存状态

5.1 钪矿物

通过上述系统工作，未发现钪的独立矿物，矿石中的含钪矿物主要限定钛铁矿和钙镁硅酸盐矿物中^[5]。我们对角闪石类矿物以及钛铁矿均开展了钪元素能谱分析和元素扫描，未见钪的富集点，说明钪应以类质同象形式存在于矿物中。

5.2 钪的分布

经系统分析（表 9），矿石中主要含钪矿物为

钛铁矿和角闪石类暗色硅酸盐矿物，钛铁矿的矿物量为 6.80%，角闪石类的矿物量为 47.39%，钛铁矿中含钪 50g/t，角闪石类暗色硅酸盐矿物中含钪 136 g/t，通过计算可知钛铁矿中钪的分布率为 5.01%，角闪石类暗色硅酸盐矿物中钪的分布率为 94.93%，故矿石中钪绝大多数赋存于角闪石类暗色硅酸盐矿物中，仅极少量钪 (5.01%) 赋存于钛铁矿中。所以仅对角闪石类暗色硅酸盐矿物进行选冶工作即可取得优异的钪回收指标。

表 9 矿石中钪金属量平衡配分结果
Table 9 Calculation results of scandium equilibrium in raw ore

矿物	矿物含量	Sc ₂ O ₃ 含量/(g/t)	Sc ₂ O ₃ 的配分量/(g/t)	Sc ₂ O ₃ 分布率/%
磁铁矿	2.81	1.39	0.04	0.06
钛铁矿	6.80	50.00	3.40	5.01
电磁性脉石	47.39	136.00	64.45	94.93
非磁脉石	42.19	-	0.00	0.00
其他	0.81	-	0.00	0.00
合计	100.00		67.89	100.00

6 结 论

(1) 西北某钛矿属低铁、低钛伴生钪矿石，铁品位 10.21%，钛品位 4.54%，主要矿物铁、钛矿物为磁铁矿、钛铁矿；主要硅酸盐矿物为角闪石、辉石类钙镁硅酸盐和长石，其他矿物含量较低。矿石中磁铁矿和钛铁矿普遍紧密共生。钛铁矿嵌布特征复杂，与磁铁矿连生的钛铁矿嵌布粒度较粗，接触边界平滑，粗磨较易单体解离；嵌布在脉石粒间的钛铁矿略细，控制磨矿细度亦可较好解离，即矿石为低品位较易利用含钪钛矿石^[6-8]。

(2) 矿石中的 Sc₂O₃ 含量为 55.5 g/t，研究未发现钪的独立矿物，对钪的赋存状态进行了研

究, 结果表明, 钙镁硅酸盐角闪石类矿物中 Sc_2O_3 含量为 136 g/t, 分布 Sc_2O_3 为 94.93%; 钛铁矿中 Sc_2O_3 含量为 50 g/t, 占总 Sc_2O_3 的 5.01%。长石矿物中 Sc_2O_3 未明显指示, 或呈负值, 说明不含钪。即钪主要以类质同象的形式存在深色钙镁酸盐矿物类(主要为角闪石)矿物中, 钪的目标矿物较为集中。

(3) 针对钪的主要载体矿物, 利用矿物间磁性和比重的差异, 采用磁选、重选等环保工艺进行预富集磁性钙镁硅酸盐类矿物, 使得矿石尾矿比例大大降低, 矿石综合利用程度显著提高。

参考文献:

- [1] 赵芝, 王登红, 张国华, 等. 钪—稀散家族中的稀土 稀土家族中的贵族 [J] 国土资源科普与文化, 2019(3)13-15.
ZHAO Z, WANG D H, ZHANG G H, et al. Nobles in rare earth rare earth family of scandium scatter family [J] Science Popularization and Culture of Land and Resources, 2019 (3) 13-15.
- [2] 赵开乐, 闫武, 刘飞燕, 等. 细粒嵌布硫化钼矿铜钼高效分离技术 [J]. 矿产综合利用, 2021(2):1-7.
ZHAO K L, YAN W, LIU F Y, et al. High efficiency separation of chalcopyrite from a fine disseminated molybdenite [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(2):1-7.
- [3] 王濮, 潘兆橹, 翁玲宝, 等. 系统矿物学 [M]. 北京: 地质出版社, 1987.
WANG P, PAN Z L, WENG L B, et al. Systematic

- mineralogy [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987.
- [4] 常丽华, 陈曼云等. 地质调查工作方法指导手册-透明矿物薄片鉴定手册 [M]. 北京: 地质出版社, 2006.
Chang L H, Chen M Y, etc. Guide manual for geological survey methods-transparent mineral slice identification manual [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.
- [5] 刘飞燕, 杨磊, 陈家彪等. 某铁矿床中铁钴矿物的工艺矿物学研究 [J]. 现代矿业, 2011(12): 119-120.
LIU F Y, YANG L, CHEN J B, et al. Study on process mineralogy of iron cobalt minerals in an iron ore deposit [J]. Modern Mining, 2011 (12): 119-120.
- [6] 黄雯孝, 卢可可. 攀西钒钛磁铁矿尾矿中钪的提取工艺研究 [J]. 矿产综合利用, 2020(2):135-139.
HUANG W X, LU K K. Study on scandium extraction technology for Panxi vanadium titanium magnetite tailings [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(2):135-139.
- [7] 陈福林, 杨晓军, 蔡先炎, 等. 攀西地区白马辉长岩型超低品位钒钛磁铁矿选铁试验研究 [J]. 矿产综合利用, 2020(6):26-30.
CHEN F L, YANG X J, CAI X Y, et al. Experimental study on iron separation of baima gabbro-type ultra-low-grade vanadium-titanomagnetite in Panxi Area [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(6):26-30.
- [8] 李得立, 曾小波, 魏友华, 等. 矿山企业矿产资源开发利用水平评价方法研究——以湖南省金矿矿山为例 [J]. 矿产综合利用, 2019(5):22-27.
LI D L, ZENG X B, WEI Y H, et al. Research on evaluation method of mineral exploration level for mine enterprise-taking Hunan province gold mine enterprise as an example [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(5):22-27.

Occurrence of Scandium in a Ilmenite Ore in Northwest China

Liu Feiyan¹, Xie Zhiyuan², Li Chengxiu¹, Zhou Jiayun¹

(1. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Chengdu, Sichuan, China; 2. Sichuan Geological and Mineral Resources Group Co., Ltd, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: This is an essay in the field of process mineralogy. In order to find out the properties of low-grade titanium ore with scandium, chemical analysis, electron microscope, X-ray diffraction, automatic mineral analyzer and optical microscope are used to analyze the material composition and mineral embedding characteristics of the ore. From the perspective of process mineralogy, the occurrence state of titanium, iron, and scandium has been studied in detail. The results show that the scandium in the ore mainly occurs in calcium-magnesium silicate, with a distribution rate of 94.93%. An excellent scandium recovery index can be obtained by beneficiating and smelting this silicate mineral. The research results have important guiding significance for the selection and smelting of scandium associated with titanium ore and the next development and utilization of the deposit. It also has important implications for the study of the occurrence of scandium in similar scandium-bearing titanium deposits.

Keywords: Process mineralogy; Northwest China; Ilmenite; Magnetite; Scandium; Calcium magnesium silicate minerals; Occurrence state