



四川某钒钛铁矿床中-深部矿石赋存状态

周玉, 杨磊, 刘飞燕, 周家云, 赖杨

(中国地质科学院矿产综合利用研究所, 国土资源部钒钛铁矿综合利用重点实验室,
四川 成都 610041)

摘要: 为查明四川攀西某钒钛铁矿床中-深部矿石中有用矿物的赋存状态, 采用化学分析、电子探针、X射线衍射、MLA和光学显微镜等手段进行了矿石主要化学成分、矿物组成、粒度和嵌布特征以及铁、钛赋存状态的研究。结果表明: 矿石中铁主要赋存于钛磁铁矿中, 钛主要赋存于钛铁矿中。矿石中铁的理论回收率为65%左右; 钛的理论回收率为68%左右。研究结果对某钒钛铁矿床中-深部矿石的选冶研究具有重要指导意义, 也对红格矿田乃至攀西地区基性-超基性钒钛铁矿矿石工艺矿物学研究具有重要启示。

关键词: 工艺矿物学; 赋存状态; 钒钛磁铁矿; 攀西红格矿田

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2018.03.019

中图分类号: TD951; P575 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2018) 03-0089-05

四川攀枝花-西昌地区是我国最重要的钒钛磁铁矿生产基地, 从南至北有攀枝花、白马、红格和太和四个大型矿田。截止2007年底探明钒钛磁铁矿资源储量达101亿t, 预测远景资源量达194.52亿t以上, 是我国特有的大宗支柱性矿产之一^[1], 其中钛储量为8.7亿t, 占世界已探明钛资源储量的35.17%, 占国内已探明储量的90.54%^[2]。攀西地区钒钛磁铁矿矿石富含至少14种可利用元素以及2种潜在的可利用元素^[3], 具有巨大的综合利用价值, 引起了学者的极大关注^[4-13]。

本文所研究的某钒钛磁铁矿位于攀西地区四大矿田之一的红格矿田, 其选矿问题也引起了学者关注^[14-15], 但对矿石中有用矿物的赋存状态未做报道。本次工作选取矿床中-深部有代表性的矿石样品进行有用矿物的赋存状态研究, 为下一步

选冶工作提供技术支撑, 以期攀西地区钒钛磁铁矿选冶研究有所裨益。

1 矿石概况

某钒钛磁铁矿床中-深部矿石属基性-超基性钒钛磁铁矿矿石, 矿石矿物以钛磁铁矿和钛铁矿为主, 脉石矿物以辉石、长石和角闪石等为主。矿石构造主要为斑状构造、浸染状构造、条带状构造和脉状构造等, 结构主要为自形-半自形晶粒状结构、他形粒状结构、海绵陨铁结构、固溶体分离结构、交代残余结构和包含结构等。

2 矿石化学成分

原矿化学分析, 分析结果见表1。由结果可知, 矿石中Fe含量为21.97%, 属贫铁矿石; TiO₂含量为9.23%, 可供综合利用的元素有Co和V。

表1 矿石化学多项分析结果 /%
Table 1 Chemical analysis of multi-elements of the ore

TFe	TiO ₂	V ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	CaO	S	P	Cr
21.97	9.23	0.17	7.64	30.52	8.16	8.98	0.31	0.050	0.14

收稿日期: 2017-11-06

基金项目: 中国地质调查局“攀西地区多金属矿产资源集中开采区地质环境调查”二级项目(DD20160337)资助。

作者简介: 周玉(1984-), 男, 博士, 工程师, 主要从事矿床学研究工作。

3 矿石矿物成分

我们对原矿综合样进行 X 射线衍射分析、选择有代表性的矿石样品磨制光片在显微镜下研究以及 MLA 和电子探针分析以确定矿石中矿物成分和主要矿物含量。

3.1 矿物种类

原矿综合样 X 射线衍射分析结果表明，原矿中主要矿石矿物为钛磁铁矿和钛铁矿，脉石矿物主要为角闪石、辉石和长石等。此外有次要、少量及微量矿石矿物磁赤铁矿、赤褐铁矿、磁黄铁矿、黄铁矿，次要、少量及微量脉石矿物有黝帘石、绿泥石、蛇纹石、黑云母、磷灰石、楣石、橄榄石、尖晶石、角闪石、石榴石和滑石等。与攀西其他钒钛磁铁矿区矿石比较，脉石矿物中角闪石含量明显增高，橄欖石含量明显降低。

综合原矿样中选取的手标本观察、光片显微镜下研究、X 射线衍射分析、电子探针和 MLA 分析结果，基本确定了矿石的矿物组成，按照目标矿物类型，将矿石组成矿物大致划分为四大类——铁矿物、钛矿物、硫化物和脉石矿物。

表 2 矿石矿物组成及含量
Table 2 Mineral composition and content of the ores

矿物种类	主要矿物	含量 /%	次要矿物	含量 /%	少量~微量矿物	含量 %
铁矿物	钛磁铁矿	24.5	磁赤铁矿	微	赤铁矿、褐铁矿	微
钛矿物	钛铁矿	15.2			楣石、金红石	微
硫化物			磁黄铁矿	微	黄铜矿、黄铁矿、镍钴铁硫化物	微
脉石矿物	角闪石	20	黝帘石、绿泥石、黑云母	15.3	蛇纹石、磷灰石、橄欖石、尖晶石、方解石、石榴石、滑石	微
	辉石	18				
	长石	6				

3.2 矿物含量

原矿矿物含量测试以原矿破磨后综合样为准，制备砂光片，在 MLA 矿物自动分析系统下逐粒统计，结合显微镜下研究，得出样品矿石中主要矿

物的含量(表 2)：矿石矿物主要为钛磁铁矿(含量为 24.5%)和钛铁矿(含量为 15.2%)。铁矿物除钛磁铁矿外还有赤褐铁矿，钛矿物除钛铁矿外还有楣石、金红石，铁钛矿物合计约占矿物总量的 40%；硫化物可见磁黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿、镍钴铁硫化物，含量甚微。脉石矿物主要为角闪石(20%)、辉石(18%)、长石(6%)，而其他矿物如黝帘石、绿泥石、黑云母、蛇纹石、楣石和磷灰石等合计约占矿物总量的 15.3%。

4 主要矿物赋存状态

4.1 钛磁铁矿

钛磁铁矿为强磁性矿物，黑色，不透明，粒状，多呈不规则集合体嵌布于角闪石、辉石和长石等脉石矿物粒间(图 1A)，和钛铁矿密切共生(图 1B、C)。常见到钛铁矿以各种片晶嵌布于钛磁铁矿中(图 1D)，亦可见到钛磁铁矿以星点状、片状、线状和不规则状嵌布于钛铁矿中。一般认为此种形态的钛磁铁矿为固溶体分离形成，单体解离困难^[16]。脉石矿物中亦可见到嵌布有星点状、细脉状和蠕虫状的钛磁铁矿，粒度细小，不规则，亦较难解离。

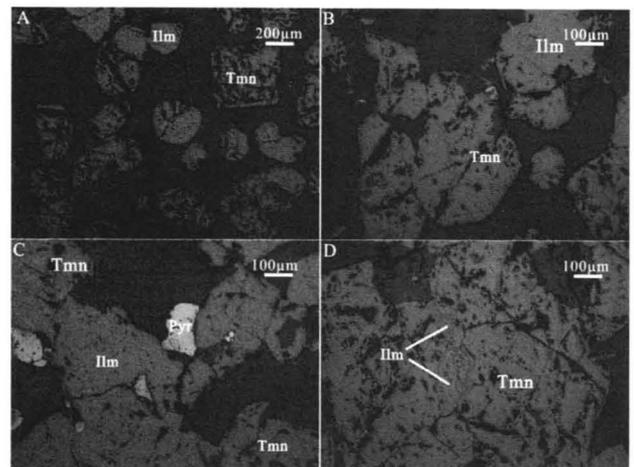


图 1 主要矿石矿物镜下特征
A- 钛磁铁矿、钛铁矿呈不规则粒状集合体嵌布于脉石中；
B- 钛磁铁矿、钛铁矿紧密共生；C- 钛磁铁矿、钛铁矿和磁黄铁矿紧密共生；D- 钛磁铁矿中钛铁矿片晶及包裹体

图 1 主要矿石矿物镜下特征
Fig. 1 Microscope features of the main ore

为了解钛磁铁矿中其他元素的情况,我们对钛磁铁矿进行了单矿物化学分析和电子探针分析。钛磁铁矿单矿物分析结果见表3,钛磁铁矿电子探针分析结果见表4。

4.2 钛铁矿

矿石中钛矿物主要为钛铁矿,偶见榍石和金红石,未见其它钛矿物。在对钛元素进行电镜扫描时,发现部分角闪石中也有钛元素显示。

矿石中钛铁矿与钛磁铁矿密切共生,主要以自形-半自形他形粒状与钛磁铁矿毗邻相嵌(图1B-C),部分以自形-半自形粒状嵌布于铝硅酸

盐矿物粒间(图1A),少量呈片晶状分布于钛磁铁矿中构成固溶体分离结构(图1D)。而钛铁矿集合体中也常见不规则状的钛磁铁矿嵌布。钛铁矿单矿物化学分析结果见表3,钛铁矿电子探针分析结果见表4。

表3 单矿物化学分析结果/%

名称	TFe	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
钛磁铁矿	63.2	6.3	2.6	1.6	0.4	1.3
钛铁矿	34.3	49.0	3.5	0.6	0.6	2.1
总脉石单矿物	5.2	3.2	43.1	10.5	13.4	11.3

表4 矿物电子探针

Table 4 Mono mineral electron microprobe analysis of the ore

矿物	测点编号	FeO	TiO ₂	V ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	MnO	Cr ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SiO ₂	Total
钛磁铁矿	Yl-ctk-01	81.980	5.412	0.826	1.555	0.384	0.062	-	2.587	-	-	-	92.807
	Yl-ctk-02	90.019	0.266	0.906	0.670	0.115	0.017	-	0.056	-	-	-	92.050
	Yl-ctk-03	79.613	4.446	0.785	1.880	0.586	0.048	-	5.703	-	-	-	93.061
	Yl-ctk-04	87.709	0.413	0.896	0.261	0.063	0.065	-	2.611	-	-	-	92.019
	Yl-ctk-05	88.334	0.338	0.940	0.174	0.014	0.064	-	1.085	-	-	-	91.668
	平均值	85.531	2.175	0.871	0.908	0.232	0.051	-	2.552	-	-	-	92.321
钛铁矿	Yl-ttk-1	39.975	52.145	0.357	0.024	5.225	0.000	0.649	0.000	-	-	-	98.375
	Yl-ttk-2	42.519	52.764	0.380	0.015	2.137	0.000	0.744	0.000	-	-	-	98.560
	Yl-ttk-3	40.308	51.937	0.406	0.033	4.647	0.002	0.662	0.079	-	-	-	98.074
	Yl-ttk-4	46.481	50.999	0.444	0.029	0.272	0.007	1.097	0.017	-	-	-	99.344
	Yl-ttk-5	43.355	52.208	0.377	0.016	2.924	0.011	0.921	0.000	-	-	-	99.812
	Yl-ttk-6	46.746	49.971	0.418	0.009	0.264	0.001	1.296	0.035	-	-	-	98.741
	Yl-ttk-7	45.121	51.041	0.409	0.001	0.981	0.007	0.926	0.028	-	-	-	98.513
	Yl-ttk-8	46.011	50.561	0.425	0.014	0.175	0.003	1.337	0.042	-	-	-	98.568
	Yl-ttk-9	41.285	52.348	0.443	0.000	3.454	0.000	0.690	0.000	-	-	-	98.219
	Yl-ttk-10	46.603	50.331	0.433	0.012	0.307	0.011	1.087	0.094	-	-	-	98.878
平均值	43.840	51.430	0.409	0.015	2.039	0.004	0.941	0.029	-	-	-	98.708	
辉石	Yl-maishi-1	8.041	0.836	-	1.333	14.617	21.393	-	-	0.302	0.010	53.183	99.715
	Yl-maishi-2	7.704	0.274	-	0.786	14.676	22.209	-	-	0.330	0.005	54.496	100.482
	Yl-maishi-3	9.451	0.022	-	0.200	12.197	24.306	-	-	0.150	0.010	52.897	99.233
	Yl-maishi-4	7.861	0.321	-	0.585	14.810	21.969	-	-	0.307	0.000	54.437	100.291
	平均值	8.264	0.363	-	0.726	14.075	22.469	-	-	0.272	0.006	53.753	99.930
长石	Yl-maishi-5	0.193	0.019	-	19.706	0.000	1.795	-	-	10.770	0.074	67.481	100.038
	Yl-maishi-6	0.285	0.000	-	20.130	0.018	2.855	-	-	10.287	0.098	65.664	99.337
	Yl-maishi-7	0.082	0.016	-	19.373	0.000	1.558	-	-	10.903	0.022	67.791	99.744
平均值	0.186	0.012	-	19.736	0.006	2.070	-	-	10.653	0.065	66.979	99.706	

角闪石	Yl-maishi-8	19.819	0.670	-	7.464	8.820	11.843	-	-	1.505	0.761	44.128	95.011
	Yl-maishi-9	18.337	2.848	-	9.891	8.729	11.620	-	-	2.086	1.188	40.803	95.504
	Yl-maishi-10	20.606	1.222	-	8.603	8.139	11.665	-	-	1.614	0.978	42.806	95.632
	平均值	19.587	1.580	-	8.653	5.563	11.710	-	-	1.735	0.976	42.579	95.382

注：钛磁铁矿未测定“O”，“Total”标准值为92%。

5 矿石中主要矿物的粒度特征

原矿矿物粒度的测定，是以破磨后的综合样为准，制备砂光片，通过 MLA 矿物自动分析仪逐粒统计。统计结果表明，钒钛磁铁矿矿物粒度主要分布在 0.075 ~ 0.710 mm 范围内，占总矿物粒度分布范围的 81.86%。

利用显微镜测定了原矿手标本磨制的光片中矿物的原生粒度，结果见表 5。由表结果可知，矿石中钛磁铁矿、钛铁矿和脉石矿物主要粒径大于 0.3 mm，其次为 0.3 ~ 0.15 mm 和 0.15 ~ 0.075 mm，合计分别占钛磁铁矿、钛铁矿和脉石矿物 79%、75% 和 92.1%，而其他粒径范围分布很少。

表 5 矿石手标本原生粒度显微镜下统计结果
Table 5 Granularity measurement results of the ore

粒径 / mm	+ 0.3	-0.3+0.15	-0.15+0.075	-0.075+0.04	-0.04+0.02	-0.02+0.01	- 0.015	合计
钛磁铁矿 / %	47.2	18.3	13.5	9.8	9.5	7.9	3.6	100.0
钛铁矿 / %	45.9	15.4	13.8	8.2	7.6	4.6	4.5	100.0
脉石矿物 / %	80.5	6.2	5.4	3.1	3.0	2.7	2.1	100.0

6 影响钒、钛回收的矿物学因素分析

6.1 矿石中铁、钛的分布

矿石中矿物种类众多，基本上都不同量含有铁。主要矿石矿物钛磁铁矿、钛铁矿为主要含铁矿物；主要脉石矿物角闪石、辉石、长石等也都含一定量的铁，特别是主要脉石矿物角闪石 FeO 含量高者可达 20.6%。主要含铁矿物中铁的平衡分配计算结果见表 6。由表可知，虽然矿石中矿物多不同程度含有不等量的铁，但铁主要分布于钛磁铁矿中（分布率 65.1%）和钛铁矿中（分布率 21.9%）。

矿石中含钛矿物主要有钛铁矿、钛磁铁矿和脉石矿物中的角闪石。主要矿石矿物钛铁矿和钛磁铁矿为主要含钛矿物；主要脉石矿物角闪石也含一定量的钛，高者可达 2.848%。其它矿物要么钛含量甚微，要么矿物量甚微，对矿石中钛分布影响不大。主要含钛矿物中钛的平衡分配计算结果见表 6。由表可知，钛主要分布于钛铁矿中（分布率 68.4%），为矿石中钛主要工业回收矿物。

表 6 矿石中铁、钛平衡分配计算结果

Table 6 Results of equilibrium assignment of iron and titanium in the ore

矿物名称	矿物含量 / %	TFeO 含量 / %	TiO ₂ 含量 / %	铁分布律 / %	TiO ₂ 分布律 / %
钛磁铁矿	24.5	63.2	6.3	65.1	14.2
钛铁矿	15.2	34.3	49.0	21.9	68.4
综合脉石	59.3	5.2	3.2	12.9	17.2
合计	99	-	-	99.9	99.8

表中计算矿物含量来自表 2，钛磁铁矿、钛铁矿、综合脉石中 TFeO 和 TiO₂ 含量来自单矿物电子探针分析结果见表 4。

6.2 铁、钛理论精矿品位

由上述分析可知，铁主要分布于钛磁铁矿和钛铁矿中，如果以钛磁铁矿为矿石中唯一回收的铁矿物，探针分析表明钛磁铁矿中 FeO 含量平均为 85.5%，换算成铁含量为 66.5%，单矿物分析表明钛磁铁矿单矿物铁含量为 63.2%，结合目前经济技术条件，本矿石铁理论精矿品位为 63% 左右；

钛主要分布于钛铁矿中, 如果以钛铁矿为矿石中唯一回收的钛矿物, 探针分析表明钛铁矿 TiO_2 含量平均为 51.4%, 单矿物分析表明钛铁矿单矿物 TiO_2 含量为 49.0%, 结合目前经济技术条件, 本矿石钛理论精矿品位为 49% 左右。

6.3 铁、钛理论回收率

从目前经济技术条件结合本矿石特性, 矿石可资利用的铁矿物为钛磁铁矿, 钛磁铁矿中铁的分布率为 65.1%, 所以矿石铁的理论回收率为 65% 左右; 矿石可资利用的钛矿物为钛铁矿, 钛铁矿中钛的分布率为 68.4%, 所以钛的理论回收率为 68% 左右。

7 结 论

(1) 本次研究样品原矿 Fe 品位为 21.97%, 属贫铁矿石, TiO_2 品位为 9.23%, 可供综合利用的元素有 Co 和 V。矿石中钛磁铁矿与钛铁矿紧密共生, 单体解离困难。

(2) 矿石中铁主要分布于钛磁铁矿和钛铁矿中, 分布率分别为 65.1% 和 21.9%; 钛主要分布于钛铁矿中, 分布率 68.4%。

(3) 结合目前经济技术条件, 矿石铁理论精矿品位为 63% 左右, 铁理论回收率为 65% 左右; 钛理论精矿品位为 49% 左右, 钛理论回收率为 68% 左右。

参考文献:

- [1] 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.
[2] 王黎. 中国攀西钒钛磁铁矿选钛技术进步与展望 [J]. 地球, 2016(8):166-167.

- [3] 杨强. 米易县安宁村钒钛磁铁矿成矿地质条件与成矿规律研究 [D]. 西南科技大学, 2014.
[4] 刘明培. 浅析攀枝花钒钛磁铁矿钒的分布规律 [J]. 矿业工程, 2009, 7(5):9-11.
[5] 何桂珍. 红格矿中钒、铬的综合回收利用 [D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
[6] 廖名扬, 陶琰, 宋谢炎, 等. 红格层状侵入体岩浆演化及成矿过程探讨 [C]// 全国矿床会议, 2014.
[7] 刘严松, 何政伟, 李浩然, 等. 攀西钒钛磁铁矿床深部找矿疑难问题研究进展 [J]. 地质论评, 2015, 61(S):517-519.
[8] 罗金华. 红格钒钛磁铁矿主要元素在选矿中的分布 [J]. 矿产综合利用, 2015(3):55-58.
[9] 黄霞光, 罗国清, 李亚平. 攀西钒钛磁铁矿中钒的赋存状态研究 [J]. 有色金属: 选矿部分, 2016(6): 1-4.
[10] 李潇雨, 周满庚, 王婧, 等. 攀西钒钛磁铁矿铬元素工艺矿物学研究 [J]. 中国矿业, 2016, 25(11):144-151.
[11] 李潇雨, 周满庚, 王婧, 等. 攀西钒钛磁铁矿硫族元素工艺矿物学研究 [J]. 中国矿业, 2016, 25(1): 118-124.
[12] 曾小波, 张渊, 熊文良, 等. 某低品位钒钛磁铁矿选矿试验研究 [J]. 矿产综合利用, 2017(3):67-70.
[13] 张腾蛟, 李佑国, 张月姣, 等. 川西盐边县红格钒钛磁铁矿中镍钴硫化物的铂族元素地球化学特征 [J]. 地质论评, 2017, 63(4):1050-1063.
[14] 李尉, 付贵勤, 储满生, 等. 红格钒钛磁铁矿氧化物相转变及非等温氧化动力学 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2017, 38(4):517-521.
[15] 杨耀辉, 惠博, 廖祥文, 等. 红格低品位难选橄辉岩型钒钛磁铁矿选矿试验 [J]. 金属矿山, 2016, 45(10):77-82.
[16] 马驰, 卫敏, 卞孝东, 等. 山东某钛铁矿石工艺矿物学研究 [J]. 金属矿山, 2016, 45(3):103-106.

Study on Occurrence State of the Ore from Middle - deep Ore Body of a V-Ti Magnetite Deposit in Sichuan Province

Zhou Yu, Yang Lei, Liu Feiyan, Zhou Jiayun, Lai Yang

(Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS; Key Laboratory of Multipurpose Utilization of Vanadium-titanium Magnetite of Ministry of Land and Resources, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: The main chemical constituents, mineral composition, mineral composition particle size, embedding characteristics and the occurrence of iron and titanium of the ore were studied by means of chemical analysis, electron probe, X-ray diffraction, MLA and optical microscope in order to ascertain the occurrence status of useful minerals in Middle - deep Ore body of a V-Ti magnetite deposit, Panxi area, Sichuan Province. The results show that iron is mainly present in titanium magnetite, and titanium is mainly present in ilmenite. The theoretical recovery of iron in the ore is about 65%; the theoretical recovery of titanium is about 68%. The results of this study are of great significance to the selection for the V-Ti magnetite deposit, and it is also of great significance for the treatment of this type of ore in the Hongge ore field and Panxi area.

Keywords: Process Mineralogy; Occurrence state; V-Ti magnetite ore; The Hongge ore field of the Panxi