

钒钛磁铁矿电炉渣工艺矿物学研究

聂文林^{1,2}, 张 谦², 阳小勇³, 丰奇成², 文书明², 周耀文², 刘俊伯², 杨秀竹⁴

(1. 滇西科技师范学院 数理学院, 云南 临沧 677000; 2. 昆明理工大学 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南 昆明 650093; 3. 滇西科技师范学院 生物技术与工程学院, 云南 临沧 677000; 4. 中海环境科技(上海)股份有限公司, 上海 200135)

摘要: 以攀枝花钒钛磁铁矿电炉渣为研究对象, 通过化学分析、X射线衍射及电子探针-能谱等手段对电炉渣的化学组成、矿物组成、矿物嵌布特征、元素分布情况进行了较为系统的研究, 结果表明: 电炉渣中有 94.74% 的钛赋存于黑钛石中, 镁和铝主要以镁铝尖晶石形式存在, 钙和硅主要存在透辉石中, 而铁元素在各矿物中分布较为分散。有用矿物黑钛石主要与透辉石呈浸染关系, 部分与镁铝尖晶石呈嵌布关系, 同时有部分镁和铝以类质同像形式进入到黑钛石中, 导致黑钛石中 TiO_2 含量仅 82.04%。研究结果可为钒钛磁铁矿电炉渣的综合利用提供科学依据。

关键词: 钒钛磁铁矿; 电炉渣; 工艺矿物学; 黑钛石

中图分类号: P578.4⁺6; P579; TD95

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)03-0542-09

A study of the process mineralogy of vanadium-titanium magnetite electric furnace slag

NIE Wen-lin^{1,2}, ZHANG Qian², YANG Xiao-yong³, FENG Qi-cheng², WEN Shu-ming², ZHOU Yao-wen², LIU Jun-bo² and YANG Xiu-zhu⁴

(1. Department of Mathematics and Physics, West Yunnan University, Lincang 677000, China; 2. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 3. School of Biotechnology and Engineering, West Yunnan University, Lincang 677000, China; 4. China Shipping Environment Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200135, China)

Abstract: Taking vanadium-titanium magnetite electric furnace slag as the research object, the authors systematically studied chemical composition, mineral composition, mineral and element distribution characteristics of the slag by means of chemical analysis, X-ray diffraction analysis and electron microprobe analysis. The results show that 94.74% Ti exists in anosovite, Mg and Al mainly occur in the form of magnesia alumina spinel, calcium and silicon are mainly in the form of diopside, while iron is dispersed in various minerals. The valuable mineral is anosovite, which is mainly disseminated with diopside, and partly distributed in spinel. Besides, some of Mg and Al occur in anosovite in the form of isomorphous admixture; as a result, the content of TiO_2 in anosovite is only 82.04%. The result can provide scientific basis for the comprehensive utilization of vanadium-titanium magnetite electric furnace slag.

Key words: vanadium-titanium magnetite; electric furnace slag; process mineralogy; anosovite

收稿日期: 2020-09-20; 接受日期: 2021-03-15; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 云南省基础研究计划项目(202001BA070001-107); 云南省教育厅科学研究基金项目(2017ZDX069); 国家自然科学基金联合基金(U1902217)

作者简介: 聂文林(1988-), 男, 博士, 主要从事资源综合利用与环保方面研究, E-mail: nnnvll@126.com; 通讯作者: 阳小勇(1976-), 男, 讲师, 主要从事化学教学研究, E-mail: yangxiaoyong1976@126.com.

Fund support: Research Program of Yunnan (202001BA070001-107); Science Research Fund of Yunnan Education Department (2017ZDX069); Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (U1902217)

我国钒钛磁铁矿分布广泛,资源储量超过100亿吨,其中已探明储量达98.3亿吨,绝大部分钒钛磁铁矿是从基性岩浆中结晶而成的(周美夫,2005),主要分布于四川攀西(攀枝花-西昌)、河北承德、陕西洋县、湖北郧阳和襄阳地区、山东临沂、广东兴宁等地区(王瑞权等,2017;邢相栋等,2018;徐本平,2018)。其中,攀西地区是我国钒钛磁铁矿的主要成矿带,也是世界上同类矿床的重要产区之一,其钛资源含量约占世界储量的1/3,据最新勘探成果,攀枝花境内钒钛磁铁矿累计探明资源储量达73.37亿吨(徐本平,2018)。

攀枝花-西昌地区钛资源储量巨大,但超过一半的钛资源是以钒钛磁铁矿形式存在,且Ca、Mg、Si等杂质含量高,开发利用难度大,目前仅将选铁后得到的钛铁矿精矿作为钛精矿加以利用,而得到的钒钛磁铁矿精矿为铁精矿,只能作为炼铁原料,每年我国钒钛磁铁矿精矿冶炼过程中产生的高炉渣多达几百万吨,大量钛损失于高炉渣中。为了提高攀枝花钛资源利用率,研究人员进行了大量从高炉渣中回收钛的研究,但高炉渣中钛含量低,从中提取钛的技术难度大,且经济成本极高。为了充分利用钒钛磁铁矿精矿中的钛资源,目前对直接还原-磁选、直接还原-电炉熔炼、钠盐焙烧-直接还原-电炉熔炼等方法 and 工艺研究较多,但只有直接还原-电炉熔炼在南非和新西兰得到商业化应用(Jena *et al.*, 1995; 周兰花等,2009; 张永杰等,2009; 杨合等,2014)。目前已有较多文献报道了利用盐酸法、氯化法、传统硫酸法、混合法、加碱活化焙烧法、磷酸活化焙烧法、硫酸氢铵活化焙烧法、微波法等从电炉渣中提取钛的研究(Xue *et al.*, 2009; 仲斌年等,2013; 杨坤等,2014; 隋丽丽,2015; Qu *et al.*, 2016),但尚未对钒钛磁铁矿电炉渣的工艺矿物学进行系统研究。作为一种钛含量较高的新型钛渣,钒钛磁铁矿电炉渣的工艺矿物学研究可为综合利用其中的铁和钛提供科学依据。本文通过化学分析、X射线衍射及电子探针-能谱等手段,对钒钛磁铁矿电炉渣的化学组成、矿物组成、矿物嵌布特征、元素分布情况进行了较为系统的研究。

1 实验材料与方法

实验所用中钛渣样品(TiO_2 品位为55%~60%的中等品位钛渣)系以攀枝花钢铁集团钒钛磁铁矿精矿为原料,通过“钒钛磁铁矿精矿深度精选除杂-选冶联合制备”工艺制备而来(Lü *et al.*, 2017),再通过破碎、磨矿、混匀、缩分、烘干制备出实验矿样。样品的化学多元素分析由云南昆明冶金研究院分析测试部完成。X射线衍射分析由云南大学现代分析测试中心进行,仪器型号为Rigaku d/Max2200型,激发源为Cu靶 $\text{K}\alpha$ 射线,滤波片为石墨单色器,加速电流和加速电压分别为40 mA和40 kV,扫描速度为 $3^\circ/\text{min}$,扫描角度为 $10^\circ \sim 90^\circ$,图谱分析软件为Jade6。将中钛渣切割、磨片、抛光后使用日本电子生产的JXA-8230型电子探针显微镜分析仪对样品表面进行点、线、面的扫描分析。

2 化学多元素分析

化学多元素分析结果显示,中钛渣样品主要化学成分为 TiO_2 、TFe、 Al_2O_3 、 SiO_2 、MgO、CaO,其含量分别为58.18%、1.34%、13.94%、10.24%、5.43%、3.66%,其中Ti是最具有回收价值的元素。该中钛渣中 TiO_2 品位明显低于高钛渣, Al_2O_3 、 SiO_2 、CaO等杂质含量明显比高钛渣高,而 Al_2O_3 、MgO和 SiO_2 含量高会影响钛渣酸溶性(王斌等,2009)。

3 主要矿物组成

中钛渣样品X射线衍射分析结果如图1所示。化学分析、X射线光电子能谱分析和X射线衍射分析等综合研究表明,中钛渣中含钛的主要矿物为黑钛石(68.15%),脉石矿物主要为镁铝尖晶石(14.52%)、透辉石(16.02%)、少量的金属铁(1.02%)以及其他矿物(0.29%)。

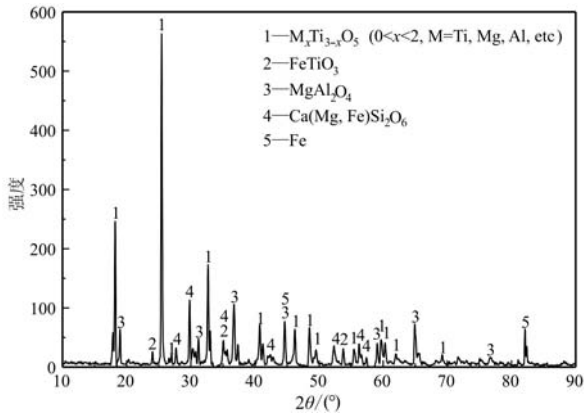


图1 中钛渣样品的X射线衍射分析图谱
Fig. 1 XRD pattern of medium-grade titanium slag

4 主要矿物的赋存形式

将块状中钛渣样品磨片后进行了电子探针-能谱(EPMA-EDS)分析,中钛渣面扫描分析结果如图2

所示。图2中颜色越偏红色,表明含量越高;颜色越偏蓝紫色,表明含量越低;越接近黑色,表明含量基本为0。Fe元素图像中有一乳滴状呈橙黄色,表明此处铁含量极高,且在其他元素图像中对应的颜色为黑色,说明此处基本不含其他元素,结合XRD分析结果,认为中钛渣中Fe主要以金属铁形式存在。Ti元素图像中大片鹅黄色表明其Ti含量较高,其在O和Mg元素图像中对应的颜色为蓝色,在Al和Fe元素图像中对应的颜色为深蓝色,而Si和Ca元素图像中对应的颜色接近黑色,表明同时含有一定量的O、Mg和少量的Al、Fe,但基本不含Si和Ca,因此鹅黄色所对应的矿物为黑钛石。Ti元素图像中少量不规则形状青绿色表明此处含有一定量的Ti,其在Ca元素图像中对应的颜色为黄绿色,说明含有大量Ca,而在Mg、Al、Si、Fe元素图像中颜色接近黑色,分析可知为钙钛矿物相;Ti元素图像中还有较多区域颜色呈深蓝色,表明其中也含有少量的Ti,其在Ca、

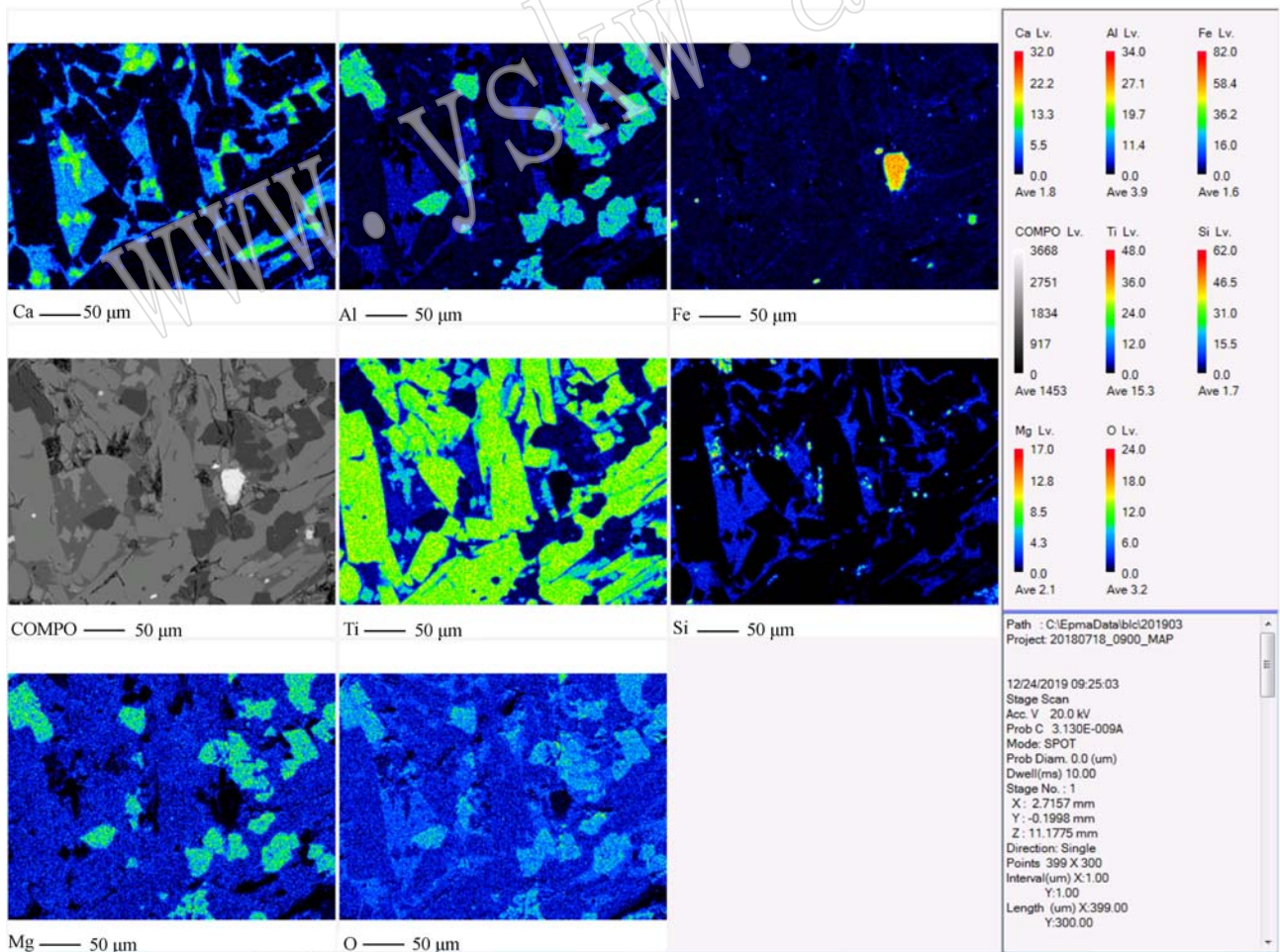


图2 中钛渣样品 EPMA-EDS 面扫描分析结果
Fig. 2 EPMA-EDS map analyses of medium-grade titanium slag

Mg、O、Si 元素图像中对应颜色分别为青绿色或蓝色,表明其同时含有较多和 Ca、Mg、O、Si,结合 XRD 分析可知为透辉石物相。Mg、Al 和 O 元素图像中青绿色区域相互重叠,表明其主要含有 Mg、Al 和 O,结合 XRD 分析可知为镁铝尖晶石物相。Ca 元素扫描图中,有少量黄绿色分布于青绿色区域中间或边缘,表明两者具有不同的 Ca 元素含量,青绿色区域主要为透辉石,黄绿色区域在 Ti 元素图像中对应的颜色为青绿色,在 O 元素图像中对应的颜色为深蓝色,说明主要含有 Ca、Ti 和 O,综合分析应为钙钛矿物相。Si 元素图像中有少量散点状呈黄色,其在 O 元素图像中对应的颜色为蓝色,而在其他元素图像中对应的颜色为深蓝色或黑色,因此推测其为 SiO_2 。

中钛渣样品 EPMA-EDS 线扫描分析结果如图 3

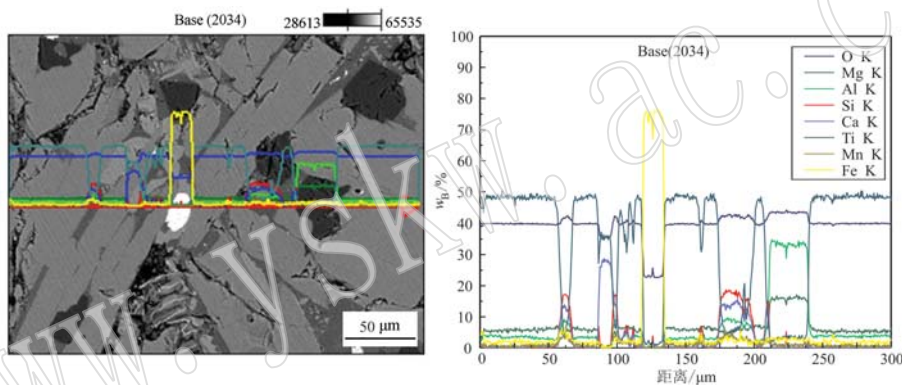


图 3 中钛渣样品 EPMA-EDS 线扫描分析结果

Fig. 3 EPMA-EDS line analyses of medium-grade titanium slag

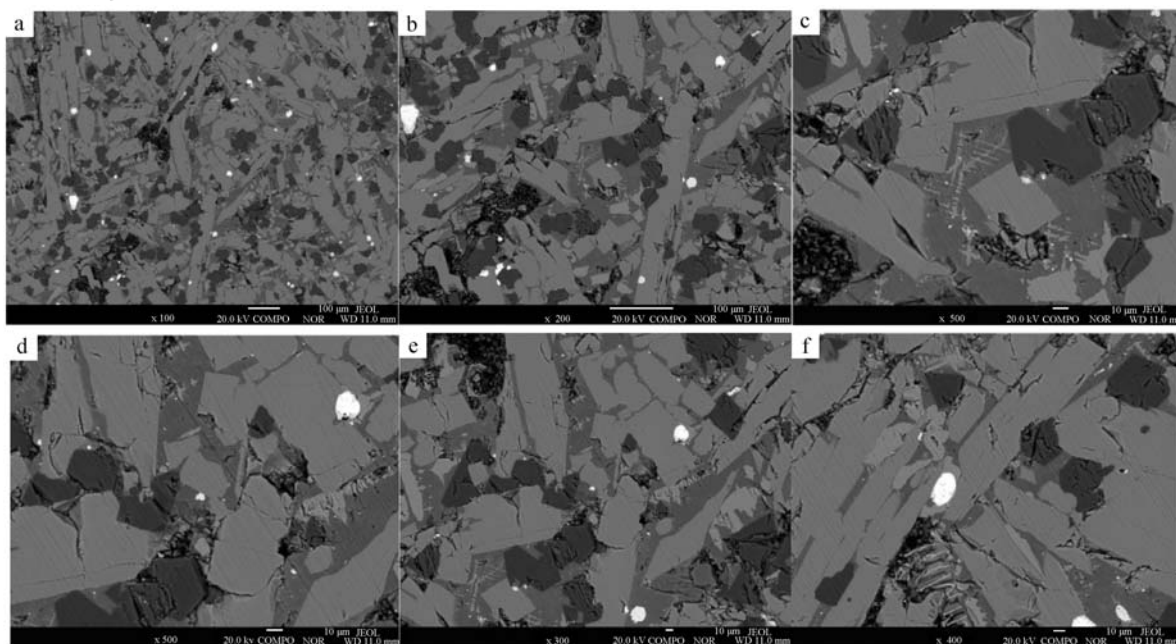


图 4 中钛渣样品的 EPMA 图像

Fig. 4 EPMA images of medium-grade titanium slag

所示。不同颜色、形貌区域的元素各类和含量具有很大变化,说明其对应的矿物种类不同。图中白色区域为金属铁,其中 Fe 含量极高,同时含有一定量的 O,其他元素含量极少,O 元素为磨片过程中金属铁氧化所致。灰白色区域为黑钛石,主要含有 Ti 和 O 元素,同时含有少量 Mg、Al、Fe 等元素。深灰色区域的线扫描结果显示 Ti 含量骤降,Mg 含量保持稳定,而 Si、Ca、Al、Fe 等元素含量则大幅上升,说明透辉石中主要含有 Si、Ca、Mg、Al、Fe 等元素。深灰色区域 O、Al、Mg 元素含量较高,同时含有少量的 Ti 和 Fe,说明镁铝尖晶石中含有少量 Ti 和 Fe。

4.1 黑钛石

黑钛石是中钛渣中的主要有用矿物。图 4 显示,黑钛石在 EPMA 图像中呈灰白色,主要呈自形条

柱状,横切面为条形或菱形,边界平整光滑,粒度较大并多有连结,一般介于 $100\sim 200\ \mu\text{m}$ 之间,但少数细小者小于 $10\ \mu\text{m}$,少数粗者可达 $300\ \mu\text{m}$ 左右。黑钛石主要与深灰色的透辉石呈浸染关系,部分与镁铝尖晶石呈嵌布关系。黑钛石的EPMA-EDS微区扫描分析结果见表1,微区电子能谱成分图如图5所示。

表1 黑钛石 EPMA-EDS 微区扫描分析结果 $w_B/\%$
Table 1 EPMA-EDS micro-area composition analysis results of anosovite

微区序号	TiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	FeO
1	81.59	8.94	6.65	2.82
2	82.45	8.43	7.25	1.87
3	82.16	8.75	7.07	2.03
4	82.14	8.35	7.05	2.46
5	82.21	8.71	6.82	2.25
6	81.78	9.15	6.82	2.24
7	81.59	8.96	6.86	2.59
8	82.26	8.78	6.72	2.24
9	82.08	9.00	6.66	2.26
10	82.12	9.54	6.06	2.28
平均	82.04	8.86	6.80	2.30

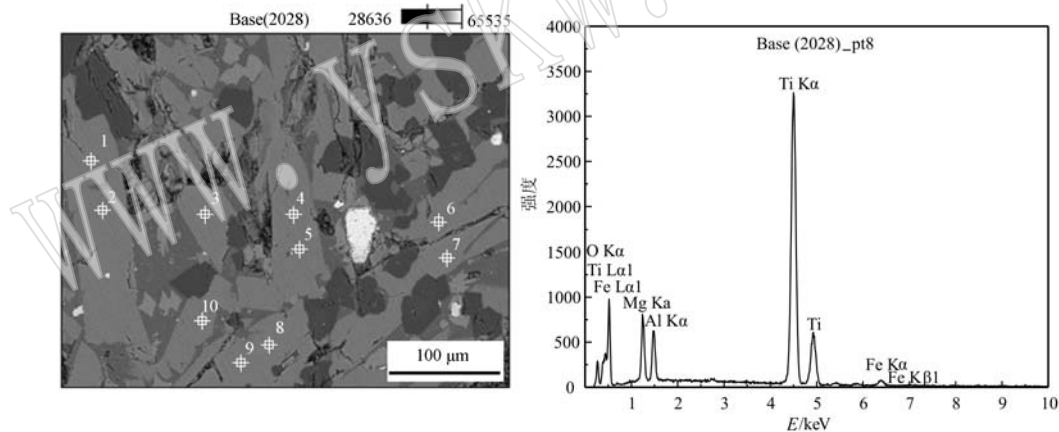


图5 中钛渣样品中黑钛石 EPMA-EDS 微区扫描分析结果

Fig. 5 EPMA-EDS micro-area analyses of anosovite in medium-grade titanium slag

表2 镁铝尖晶石 EPMA-EDS 微区扫描分析结果 $w_B/\%$
Table 2 EPMA-EDS micro-area composition analysis results of spinel

微区序号	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₅	FeO
1	27.08	63.14	4.85	1.96	2.98
2	27.04	61.66	4.98	3.37	2.95
3	26.3	61.60	4.77	3.23	4.09
4	27.05	64.53	3.72	1.45	3.24
5	27.15	63.43	4.51	1.80	3.11
6	25.89	61.04	5.23	4.17	3.68
7	25.93	59.80	5.82	4.76	3.69
8	27.12	63.18	4.57	2.32	2.81
平均	26.70	62.30	4.81	2.88	3.32

由表1可以看出,黑钛石中TiO₂平均含量为82.04%,MgO、Al₂O₃、FeO的平均含量分别为8.86%、6.80%和2.30%,10个微区中黑钛石各成分含量变化均较小,表明中钛渣中黑钛石组成较为均一和稳定。但由于黑钛石中含有较多的杂质元素,即使通过物理选矿方法将黑钛石分离出来,TiO₂品位也仅能达到82.04%。

4.2 镁铝尖晶石

镁铝尖晶石为中钛渣中主要脉石矿物之一,其在EPMA图像中呈灰黑色,主要呈自形块状,横切面为条形或菱形,边界平整光滑,晶体粒度较为均匀,一般介于 $20\sim 30\ \mu\text{m}$ 之间,有少数连生镁铝尖晶石晶体存在,少数粗者可达 $100\ \mu\text{m}$ 左右。镁铝尖晶石主要与深灰色的透辉石呈浸染关系,部分与黑钛石呈嵌布关系。镁铝尖晶石的EPMA-EDS微区扫描分析结果见表2,其微区电子能谱成分图如图6所示。

由表2可以看出,镁铝尖晶石中主要含有Al₂O₃和MgO,对应的平均含量分别为62.30%和26.70%,同时含有少量的TiO₂、V₂O₅和FeO,对应的平均含量分别为4.81%、2.88%和3.32%。8个所选微区中镁铝尖晶石中除了V₂O₅含量有较大波动外,其余各成分含量均较为稳定,表明中钛渣中镁铝尖晶石组成较为均一和稳定。

4.3 透辉石

透辉石是中钛渣中含量最高的脉石矿物,其在EPMA图像中呈深灰色,横切面为条形或不规则形状,主要与黑钛石、镁铝尖晶石呈浸染关系,填充于

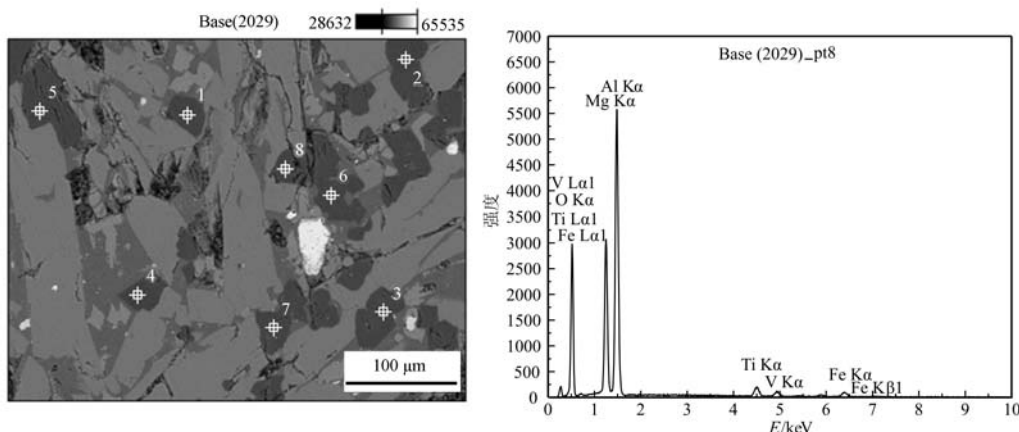


图 6 中钛渣中镁铝尖晶石 EPMA-EDS 微区扫描分析结果

Fig. 6 EPMA-EDS micro-area analysis results of spinel in medium-grade titanium slag

黑钛石、镁铝尖晶石等矿物间隙中,因此粒度变化较大,细至 10 μm 左右,粗则超过 200 μm。

透辉石的 EPMA-EDS 微区扫描分析结果见表 3,其微区电子能谱成分图如图 7 所示。

由表 3 可以看出,透辉石中含有 37.19% 的 SiO₂,其次为 CaO、Al₂O₃、TiO₂、MgO 以及少量的 MnO 和 FeO,对应的平均含量分别为 20.15%、15.88%、11.42%、8.05%、4.29%和 3.01%。8 个所选微区中透辉石中除了 FeO 含量有较大波动外,其余各成分含量均较为稳定,表明中钛渣中透辉石组成较为均一。

4.4 钙钛矿

钙钛矿在 EPMA 图像中呈灰白色,与黑钛石显示的颜色相同,但在图 2 的 Ti、Ca、Mg、Al、Fe 元素扫描图中的颜色均与黑钛石不同,表明具有不同的元

素组分,横切面为不规则形状,在图 8 中也出现了羽状、边界不平整的钙钛矿,主要与透辉石呈浸染关系,分布于透辉石内部或边缘,可能为钛渣冷却过程中透辉石析出的产物,粒度变化较大,细至 20 μm 左右,粗则超过 80 μm。

表 3 透辉石 EPMA-EDS 微区扫描分析结果 *w_B*/%
Table 3 EPMA-EDS micro-area composition analysis results of diopside

微区序号	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	TiO ₂	MnO	FeO
1	7.51	16.88	36.80	19.66	10.98	3.70	4.47
2	9.12	15.53	36.34	20.67	12.85	3.91	1.59
3	5.27	16.56	39.23	18.71	9.27	6.45	4.51
4	9.50	15.99	37.06	20.33	10.90	3.68	2.54
5	8.87	14.42	36.54	21.37	13.12	3.73	1.95
平均	8.05	15.88	37.19	20.15	11.42	4.29	3.01

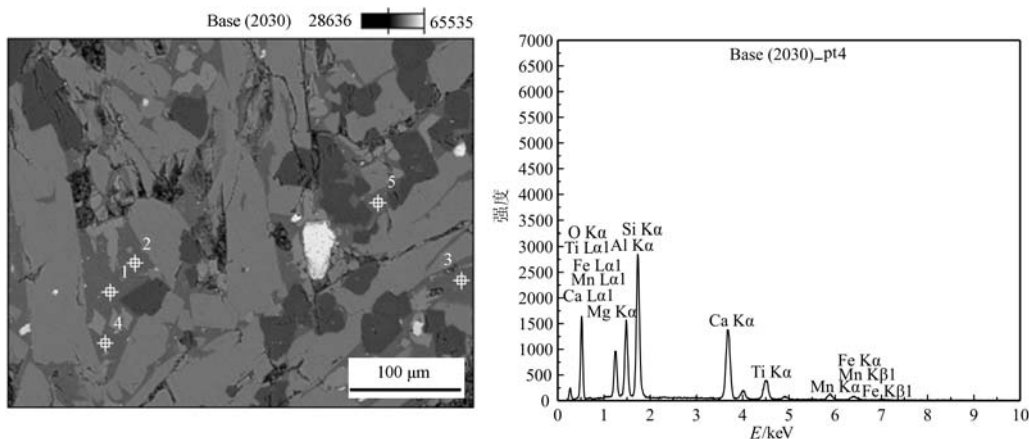


图 7 中钛渣中透辉石 EPMA-EDS 微区扫描分析结果

Fig. 7 EPMA-EDS micro-area analysis results of diopside in medium-grade titanium slag

图8中,块状钙钛矿 Base (2032) 微区扫描分析只检测出了 Ca、Ti 和 O 元素,微区 1 和微区 2 中 CaO、TiO₂ 的含量分别为 39.94% 和 60.06% 以及 40.53% 和 59.47%,各元素含量均较稳定,且与钙钛矿元素比例非常相符。图8中羽状钙钛石 Base (2033) 微区电子能谱成分图表明,羽状钙钛矿粒径

小,主要分布于透辉石内部,其 EPMA-EDS 微区扫描分析结果见表4。由表4可以看出,羽状钙钛矿中除了含有 Ca、Ti、O 这3种元素,还含有 Mg、Al、Si、Mn 和 Fe 元素,其 CaO 和 TiO₂ 含量均略低于块状钙钛矿,可能是羽状钙钛石结晶粒度更细且结晶较不完整所致,在析出、结晶过程中还掺杂有少量杂质。

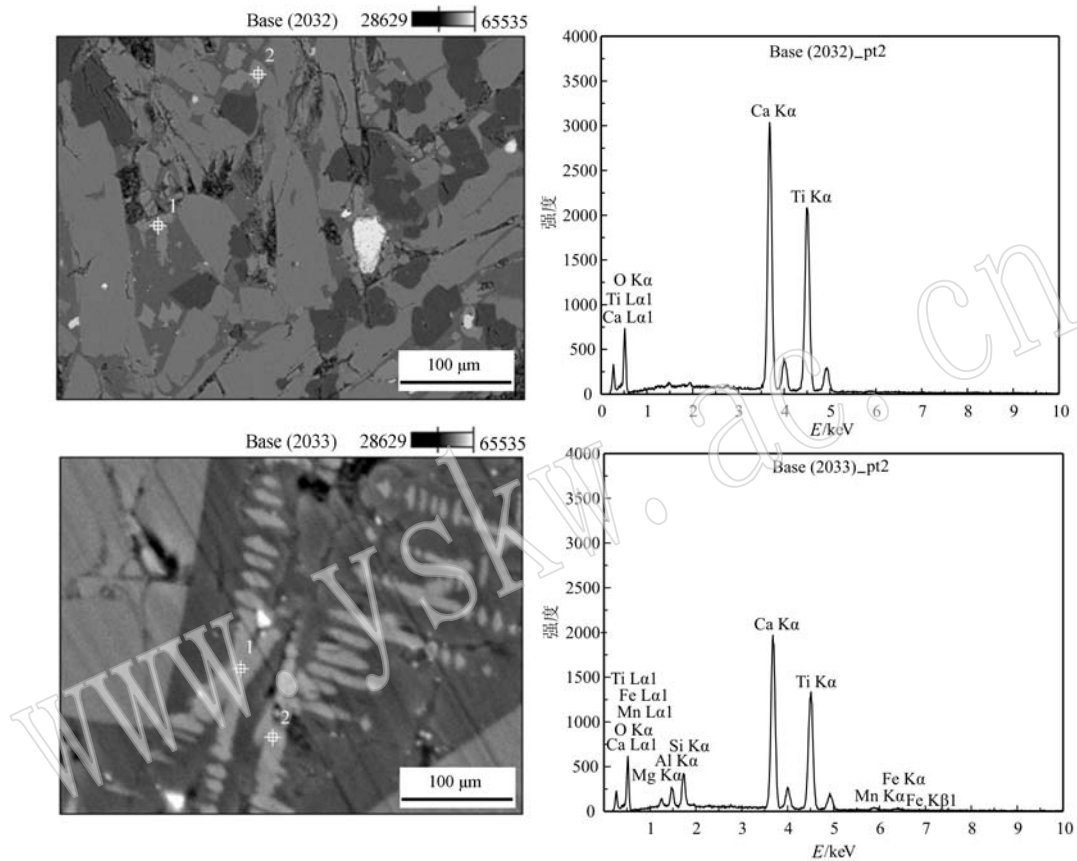


图8 中钛渣中钙钛矿 EPMA-EDS 微区扫描分析结果

Fig. 8 EPMA-EDS micro-area analysis results of perovskite in medium-grade titanium slag

表4 羽状钙钛矿 EPMA-EDS 微区扫描分析结果 $w_B/\%$

Table 4 EPMA-EDS micro-area composition analysis results of plume perovskite

微区序号	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	TiO ₂	MnO	FeO
1	0.66	1.47	2.16	38.36	56.46	0.89	0.00
2	1.41	3.51	6.65	35.75	50.03	1.52	1.13
平均	1.04	2.49	4.41	37.06	53.25	1.21	0.57

4.5 金属铁

金属铁在 EPMA 图像中呈亮白色,虽然其含量较低,但分布广泛,常呈圆粒状,多以星散浸染状的形式嵌布于黑钛石、透辉石中。粒度较细,个别细小者小于 3 μm,粗大者可至 50 μm,粒度约 10 μm 者居多。

5 中钛渣中主要元素的分布

通过 EPMA-EDS 分析和 X 射线衍射分析,对中钛渣各个物相中各元素的分布特点及赋存状态进行了研究,元素分布如表5所示。

由表5可知,绝大多数 Ti 分布于黑钛石中,另有 3.10% 分布于透辉石中,因此黑钛石是中钛渣中主要有用矿物,如能全部回收黑钛石中的 Ti,则回收率高达 94.74%。

Mg 和 Al 主要分布于黑钛石和镁铝尖晶石中,两种矿物中 Mg 的总分布率达到 87.63%,其中黑钛石中 Mg 主要以类质同像或固溶体形式存在。另有

表5 主要元素在中钛渣各物相中的分布 $w_B/\%$

Table 5 The distribution of main elements in the medium-grade titanium slag

物相	Ti	Mg	Al	Ca	Si	Fe
黑钛石	94.74	53.39	28.34	4.14	3.75	37.13
镁铝尖晶石	1.18	34.27	55.34	2.75	1.16	13.43
透辉石	3.10	11.41	15.56	91.91	94.74	13.47
金属铁	0.07	0.06	0.04	0.12	0.08	35.22
其他	0.91	0.87	0.72	1.09	0.28	0.74
合计	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

11.41%的Mg分布于透辉石中,也是以类质同像或固溶体的方式存在;Al的赋存状态与Mg类似,但镁铝尖晶石中Al的含量约为Mg的两倍,从而导致其含量最多的载体矿物为镁铝尖晶石,其次为黑钛石以及透辉石,Al在黑钛石及透辉石中也是以类质同像或固溶体形式存在。

绝大部分Ca的载体矿物为透辉石,其分布率高达91.91%,少量Ca分布于黑钛石、镁铝尖晶石以及钙钛矿中;Si的分情况与Ca类似,因为中钛渣中的Ca和Si主要存在于透辉石矿物中,透辉石中Si的分布率达到94.74%,而黑钛石、镁铝尖晶石、金属铁中Ca分布很少。

Fe分布较为分散,35.22%以金属形式存在,黑钛石中分布率达37.13%,还有部分分布于镁铝尖晶石和透辉石中。Fe以类质同像或固溶体形式存在于黑钛石、镁铝尖晶石和透辉石中,从而导致Fe分布较为分散。

6 结论

(1) 中钛渣中 TiO_2 品位较低,仅为58.18%, MgO 、 Al_2O_3 、 CaO 、 SiO_2 、 TFe 含量分别为5.43%、13.94%、3.66%、10.24%和1.34%。

(2) 工艺矿物学研究表明,中钛渣中绝大部分Ti存在于黑钛石中,其分布率高达94.74%;黑钛石粒度变化较大,细小者小于 $10\ \mu m$,少数粗者可达 $300\ \mu m$ 左右,一般介于 $20\sim 200\ \mu m$ 之间;黑钛石主要与透辉石呈浸染关系,部分与镁铝尖晶石呈嵌布关系。脉石矿物主要为镁铝尖晶石、透辉石、金属铁等,Mg和Al主要分布于黑钛石和镁铝尖晶石中,其次分布于透辉石中;Ca和Si主要以透辉石形式存在;Fe分布较为分散,在黑钛石、镁铝尖晶石、透辉石、金属铁中均有分布。

(3) 黑钛石矿物中有较多Mg、Al等杂质元素以固溶体形式存在,其 TiO_2 平均品位仅82.04%。

References

- Jena B C, Dresler W and Reilly I G. 1995. Extraction of titanium, vanadium and iron from titanomagnetite deposits at pipestone lake, Manitoba, Canada[J]. Minerals Engineering, 8 (1~2): 159~168.
- Lü Chao, Yang Kun, Wen Shuming, *et al.* 2017. A new technique for preparation of high-grade titanium slag from titanomagnetite concentrate by reduction-melting-magnetic separation processing[J]. JOM, 69 (10): 1 801~1 805.
- Qu Xiaoming, Guo Yufeng, Zheng Fuqiang, *et al.* 2016. Performance of sulfuric acid leaching of titanium from titanium-bearing electric furnace slag[J]. Journal of Materials Research, 5 (4): 1~9.
- Sui Lili. 2015. Theory and Technology of Green Utilization of Titanium Slag[D]. Shenyang: Northeastern University (in Chinese with English abstract).
- Wang Bin, Cheng Xiaozhe, Han Kexi, *et al.* 2009. Research of acidolysis performance of acid-soluble titanium slag[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 30 (2): 6~11 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ruiquan, Zhang Lijian, Zhao Xiangkui, *et al.* 2017. Chengde temple type vanadium titanium magnetite state of titanium in research [J]. World Nonferrous Metals, (5): 131 (in Chinese with English abstract).
- Xing Xiangdong, Chen Yunfei, Zhou Jun, *et al.* 2018. Experiments on magnetic separation of vanadium titanium magnetic metallic pellets [J]. Nonferrous Metals Engineering, 8 (2): 96~100 (in Chinese with English abstract).
- Xu Benping. 2018. Main elements distribution in Panzhihua vanadium and titanium magnetite smelting process in China [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 17 (2): 94~100 (in Chinese with English abstract).
- Xue Tianyan, Wang Lina, Qi Tao, *et al.* 2009. Decomposition kinetics of titanium slag in sodium hydroxide system [J]. Hydrometallurgy, 95 (1~2): 22~27.
- Yang He, Sun Xu, Liu Dong, *et al.* 2014. Experimental study on iron recovery from iron tailings and titanium concentrate by direct reduction and magnetic separation[J]. Trans Mater Heat Treat, 35: 90~95 (in Chinese with English abstract).
- Yang Kun, Zhu Hongbo, Peng Jinhui, *et al.* 2014. Pilot plant study on microwave roasting of high titanium slag[J]. Mining & Metallurgy,

- 23 (5): 339~343(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongjie, Qi Tao and Zhang Yi. 2009. A novel preparation of titanium dioxide from titanium slag[J]. Hydrometallurgy, 96 (1~2): 52~56(in Chinese).
- Zhong Binnian, Wue Tianyan, Hu Guoping, *et al.* 2013. Enrichment of low grade reduced titanium slag by H₃PO₄ activation roasting and acid leaching[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 13 (3): 378~384(in Chinese with English abstract).
- Zhou Lanhua, Tao Dongping, Fang Minxian, *et al.* 2009. Carbothermic reduction of V-Ti magnetite ore[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 33 (3): 406~410(in Chinese with English abstract).
- Zhou Meifu. 2005. Origin of layered gabbroic intrusions and their giant Fe-Ti-V oxide deposits in the Pan-Xi district, Sichuan Province, SW China[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 24 (5): 381~384(in Chinese with English abstract).
- 王斌,程晓哲,韩可喜,等. 2009. 酸溶性钛渣酸解性能研究[J]. 钢铁钒钛, 30 (2): 6~11.
- 王瑞权,张立剑,赵向奎,等. 2017. 承德大庙式钒钛磁铁矿中钛的赋存状态研究[J]. 世界有色金属, (5): 131.
- 邢相栋,陈云飞,周军,等. 2018. 钒钛磁铁矿金属化球团磁选分离实验[J]. 有色金属工程, 8 (2): 96~100.
- 徐本平. 2018. 攀枝花钒钛磁铁矿冶炼过程中主要稀散元素分布走向研究[J]. 材料与冶金学报, 17 (2): 94~100.
- 杨合,孙旭,刘东,等. 2014. 选铁尾矿和钛精矿直接还原-磁选工艺回收铁实验研究[J]. 材料热处理学报, 35: 90~95.
- 杨坤,朱红波,彭金辉,等. 2014. 微波焙烧高钛渣中试研究[J]. 矿冶, 23 (5): 339~43.
- 张永杰,齐涛,张懿. 2009. 一种钛渣制备二氧化钛的新工艺[J]. 湿法冶金, 96 (1~2): 52~56.
- 仲斌年,薛天艳,胡国平,等. 2013. 磷酸活化焙烧-酸浸法富集低品位还原钛渣[J]. 过程工程学报, 13 (3): 378~384.
- 周兰花,陶东平,方民宪,等. 2009. 钒钛磁铁矿碳热还原研究[J]. 稀有金属, 33 (3): 406~410.
- 周美夫. 2005. 攀西地区层状辉长岩体及钒钛磁铁矿床的成因[J]. 岩石矿物学杂志, 24 (5): 381~384.

附中文参考文献

隋丽丽. 2015. 绿色综合利用钛渣的理论与工艺研究[D]. 沈阳: 东北大学.

2019年度部分地质学类期刊主要计量指标一览表

序号	刊名	影响因子	总被引频次	他引率	序号	刊名	影响因子	总被引频次	他引率
1	中国地质	2.374	3 224	0.90	15	地球化学	0.905	1 763	0.97
2	中国科学 地球科学	2.242	4 952	0.92	16	矿物学报	0.894	1 189	0.92
3	地质学报	1.903	6 001	0.87	17	岩石矿物学杂志	0.844	1 463	0.92
4	岩石学报	1.877	10 544	0.83	18	高校地质学报	0.753	1 462	0.96
5	地质论评	1.626	3 171	0.89	19	地质通报	0.749	3 946	0.91
6	地学前缘	1.515	5 288	0.94	20	矿物岩石	0.705	913	0.92
7	地球学报	1.462	2 284	0.92	21	吉林大学学报地球科学版	0.670	1 982	0.89
8	地球科学进展	1.280	3 513	0.93	22	西北地质	0.651	900	0.83
9	沉积学报	1.135	3 155	0.91	23	地质科学	0.593	1 613	0.92
10	矿床地质	1.058	2 613	0.90	24	地层学杂志	0.544	897	0.91
11	地球与环境	0.951	1 030	0.93	25	地质找矿论丛	0.386	486	0.91
12	现代地质	0.939	2 069	0.86	26	新疆地质	0.379	743	0.85
13	矿物岩石地球化学通报	0.934	1 394	0.87	27	地质与资源	0.277	377	0.90
14	大地构造与成矿学	0.917	1 591	0.93	28	矿产与地质	0.191	615	0.83

本表数据引自《2020年版中国科技期刊引证报告(核心版)(自然科学卷)(中国科学技术信息研究所编)》。