

全球钒钛磁铁矿资源概况与综合利用研究进展

杨耀辉, 惠博, 颜世强, 陈超, 邓建

(中国地质科学院矿产综合利用研究所, 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: 这是一篇矿业工程领域的论文。本文综述了全球钒钛磁铁矿的分布状况以及目前其综合利用进展等方面的内容。钒钛磁铁矿是一种铁、钛、钒多金属共生的复合矿石, 其中还伴生有铬、镓、铈、钴、镍、铜、铂族元素等多金属有用元素, 钒钛磁铁矿在全球储量丰富、分布广泛, 具有极高的综合利用价值。就我国而言, 目前对钒钛磁铁矿中铁、钛、钒的利用技术相对成熟, 但综合利用水平仍不高, 在高效绿色发展已经成为当今社会发展的必然要求的背景下, 亟需尽快改进钒钛磁铁矿的综合利用工艺, 进而实现钒钛资源的高效综合利用。

关键词: 矿业工程; 钒钛磁铁矿; 全球资源分布; 综合利用; 高效绿色发展; 选冶工艺

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.04.001

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2023)04-0001-11

钒钛磁铁矿是一种以铁、钒、钛为主, 伴生多种有价元素(如铬、钴、镍、铜、铈、镓和铂族元素等)的复合的共生矿物, 有价元素含量高, 是具有极高开发和综合利用价值的重要工业矿物原料^[1-2]。随着我国经济的不断快速发展, 钢铁行业在我国国民经济中的地位逐渐稳定, 钒、钛资源在基础建设领域和航空航天领域也发挥着十分重要的作用。近年来, 全球钒、钛制品需求不断增加, 其中钒制品主要运用于钢铁工业及储能电池中, 钛材则广泛应用于在化工、航空航天、电力、轻工等领域^[3-4]。

全球钒钛磁铁矿的储量丰富, 主要位于俄罗斯、南非、中国、加拿大和澳大利亚等地, 有很大的开发利用前景^[5]。我国是全球重要的钒钛磁铁矿资源地, 但如今我国钒钛磁铁矿资源综合利用程度仍很低, 还普遍存在着资源浪费的现象。因此, 结合目前钒钛磁铁矿资源现状, 改进钒钛磁铁矿综合利用工艺, 提高钒钛资源高效综合利用效率, 实现资源的深度开发与充分利用具有极其深远的意义。本文旨在摸清全球钒钛磁铁矿的分

布状况的基础上, 对钒钛资源综合利用工艺进行总结与评述, 为全球钒钛磁铁矿资源开发与综合利用技术进步提供参考。

1 钒钛磁铁矿资源概况

1.1 钒钛磁铁矿资源特征

钒钛磁铁矿铁钛紧密共生, 钛、钒、铬等以类质同像的形式赋存于钛磁铁矿中^[6]。在自然界中, 钒钛磁铁矿主要生成于基性、超基性岩体中, 形成的矿床中常见的有价矿石矿物主要为钛磁铁矿和钛铁矿, 此外还有少量的磁铁矿、赤铁矿和硫化物等。钛磁铁矿是一种含有钛铁矿、钛铁晶石、镁铝尖晶石等固溶体分离物的磁铁矿, 经区域变化可结晶为钛铁矿和磁铁矿。一般钒钛磁铁矿含 TiO_2 1%~15%, V_2O_5 0.1%~2%。钛铁矿化学成分为 $FeTiO_3$, 钛铁矿含 TiO_2 52.66%, Fe^{2+} 与 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 间可为完全类质同像代替, 形成 $FeTiO_3$ - $MgTiO_3$ 或 $FeTiO_3$ - $MnTiO_3$ 系列, 以 FeO 为主时称钛铁矿, MgO 为主时称镁钛矿, MnO 为主时称红钛锰矿。钛铁矿莫氏硬度 5~6, 比重 4.70~4.78, 具

收稿日期: 2023-06-18

基金项目: 国家自然科学基金战略性矿产资源开发利用专项(2021YFC2900800); 自然资源部人才项目基金(12110600000180039-2208); 中国地质调查局地质大调查项目(DD20230039)

作者简介: 杨耀辉(1985-), 男, 研究员, 主要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。

弱磁性，比磁化系数 $1173.33 \sim 224.56 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$ ^[7]。

1.2 全球钒钛磁铁矿资源分布

全球钒钛磁铁矿的储量较大，分布也较为广泛，主要位于俄罗斯、南非、中国、美国、加拿大、挪威、芬兰、瑞典、印度、澳大利亚和新西兰等等少数几个国家和地区，即集中分布在非洲

南部、北美洲和亚太等地区^[8]。

根据公开报道的资料统计，仅上述国家钒钛磁铁矿的储量即达 400 亿 t 以上，见表 1。除此之外，巴西、智利、委内瑞拉、纳米比亚、埃及、阿联酋、斯里兰卡、马来西亚、印度尼西亚等国家均发现有钒钛磁铁矿资源^[9]。

表 1 国外主要钒钛磁铁矿分布状况
Table 1 Distribution of vanadium titanium magnetite abroad

国家地区	矿床名称/所在地	储量/万t	矿石构成		精矿含量/%	
			类型	Fe/TiO ₂	TiO ₂	V ₂ O ₅
美国	圣弗尔德-列克	20000	钛磁铁矿-钛铁矿	1.5~2.5	9~12	0.6~0.9
	纽约州桑福德胡	20000	钛铁矿-钛磁铁矿	-	18~20	0.45
	阿拉斯加西南部	100000	钛磁铁矿	7~10	2~3	0.3~0.5
加拿大	魁北克马格皮矿床	100000	钛铁矿-钛磁铁矿	4	7.6~9.2	0.5~0.54
	魁北克阿德湖	-	-	-	(35)	(0.27~0.35)
	摩林	200000	钛磁铁矿-磁铁矿	1.5~4.0	1.5~6.1	0.3~0.5
	古谢沃	-	磁铁矿-钛铁矿	-	2.5	0.5
	第一乌拉尔	-	钛磁铁矿	6~13	1~4	0.5~1.0
	恰津	-	钛磁铁矿-钛铁矿	4~6	11~12	0.5~0.6
	斯瓦兰茨	-	钛磁铁矿	10~15	3.2~4.5	0.2~0.6
	沃林	-	钛磁铁矿-钛铁矿	1.5~4.0	8~20	0.7~1.0
俄罗斯	库格达	-	钙钛矿-钛磁铁矿	7~8	8~11	0.1~0.22
	科夫多尔	-	钙钛矿-钛磁铁矿	5~20	-	-
	谢布里雅夫尔	-	钙钛矿-钛磁铁矿	1.0~1.5	7.8	0.2
	格列木雅哈	-	钙钛矿-钛磁铁矿	2~3	14	0.4
	维亚姆	-	钛磁铁矿	15~20	1.3~2.0	0.3~0.7
	朱格朱尔	-	钛铁矿-钛磁铁矿	2~4	14~20	0.06~0.3
南非	布什维尔得	200000	钛铁矿-钛磁铁矿	4	12~18	1.5~2.0
芬兰	奥坦马可	3500	钛铁矿-磁铁矿	3	4.7	1.1
	木斯塔瓦拉	3800	钛磁铁矿	8~9	4~8	1.6
瑞典	塔贝格	150000	钛磁铁矿	3~5	15.3	0.5~1.0
挪威	特尔尼斯矿床	300000	钛铁矿	-	18.4	0.1~1.0
	勒德萨德矿床	10000	-	-	4	0.31
印度	辛格布胡姆	-	钛铁矿-钛磁铁矿	2~5	-	1.5~5.0
	梅尔布罕兹	800	钛铁矿-钛磁铁矿	4	14	0.5~1.8
澳大利亚	巴拉姆比	400	钛铁矿-钛磁铁矿	1.7	29	1.2
	文多维	40	钛铁矿-钛磁铁矿	5	7.5	1.6
新西兰	北岛	65400	-	-	-	0.3~0.5

俄罗斯钒钛磁铁矿的储量相当丰富，它拥有全球约 60% 的钒钛磁铁矿，矿物组成多样。总体而言，俄罗斯的钒钛磁铁矿主要以磁铁矿和钙钛矿为主，大部分都属于低钛型矿产，开采产率低，其主要矿床分布在乌拉尔地区、科拉半岛、西北利亚及其远东地区。其中，具有代表性的矿

藏有古谢沃戈尔矿、卡契卡纳尔矿和第一乌拉尔矿露天矿等等，同时还有相当数量含 TiO₂ 较高的钒钛磁铁矿矿藏，如缅甸维杰夫矿、沃尔科夫矿、科潘矿、普多日矿、齐涅斯克矿等。俄罗斯钒钛磁铁矿石中主要金属矿物为钛磁铁矿，其次为钛铁矿以及少量硫化物，脉石矿物有斜晶辉

石、橄榄石、角闪石、斜长石、绿帘石、蛇纹石。矿石以贫钒钛磁铁矿为主，平均含 Fe 15%~17%、TiO₂ 0.43%~1.88%，V₂O₅ 0.13%。

南非钒钛磁铁矿，以“高钒高钛低钙”型钒钛磁铁矿为主。南非的布什维尔德、罗伊瓦特等地的火成岩复合矿中均有钒钛磁铁矿床，浸染式块状产出，主要岩石为辉长岩、斜长岩和碱性岩，而且南非钒钛磁铁矿主要分布在布什维尔德的杂岩中，即布什维尔德是目前南非钒钛磁铁矿最主要基地，占世界钒总储备量的 31%，稳居世界第一位，其主要矿山有马伯茨矿山、RHOVAN 公司矿山、肯尼迪河谷矿山等^[10-11]。其中，南非钒钛磁铁矿资源中最大矿山是马伯茨矿山，它的储量可达两亿 t，其矿石的特点鲜明，V₂O₅ 含量普遍偏高，通常在 1.4%~1.9% 之间，属于高钒型矿产。

加拿大的钒钛磁铁矿主要分布于纽芬兰省、安大略省、马尼托巴省、不列颠哥伦比亚省和魁北克省等地区，主要有马格底、莫林、马塔瓦、乐蒂奥矿山等多个矿床。以魁北克省七星岛东北部的马格底矿床为代表，矿石主要是含钛磁铁矿，主要岩石为辉长岩、镁铁质岩和超镁铁质岩石，原矿品位 TFe 43%，TiO₂ 10%，V₂O₅ 0.2%~0.35%。

美国钒钛磁铁矿的矿藏极为丰富，如阿拉斯加州、纽约州、怀俄明州、明尼苏达州都有钒钛磁铁矿的矿床。例如美国纽约州的桑福德湖地区钒钛磁铁矿，位于纽约州东北部埃塞克斯地区，成因与阿迪龙达克山脉的前寒武纪辉长岩、斜长岩的杂岩有密切关系，矿体长 1600 m，下盘岩石为致密粗粒斜长岩，上盘为浸染状或致密、细粒到中粒的辉长岩石，上下盘相互平行，倾角 45°。矿石平均含 34%Fe，18%~20% TiO₂，0.45% V₂O₅；阿拉斯加州斯内梯斯哈姆矿石类型为层状透镜状，矿颈矿墙式产出，主要岩石为辉长岩、斜长岩、碱性岩和超镁铁质岩石，原矿品位 TFe 19%，TiO₂ 2.6%，V₂O₅ 0.09%。

芬兰钒钛磁铁矿石中主要金属矿物为磁铁矿、钛铁矿、黄铁矿，主要脉石矿物为绿泥石、角闪石和斜长石。其中，主要有奥坦马基矿和木斯塔瓦腊矿两个重要矿床，奥坦马蒂矿位于芬兰北部，矿石类型为浸染状，矿颈矿墙式块状产出，主要岩石为辉长岩、斜长岩、碱性岩和超镁

铁质岩石；木斯塔瓦腊矿石类型也是浸染状，产状与岩石类型与奥坦马基类似。

挪威的钒钛磁铁矿主要是特尔尼斯矿和罗德萨德矿。挪威钒钛磁铁矿主要以利用铁、钛为主，并且浮选出含 Cu、Ni 的硫化精矿，实现了这两种元素的利用，挪威是欧洲主要的钛矿石生产国。

瑞典塔贝格以及基律纳都有钒钛磁铁矿，矿石类型为浸染状，矿颈矿墙式块状产出，主要岩石有辉长岩、斜长岩、碱性岩和超镁铁质岩石，而且塔贝格的钒钛磁铁矿储量 1.5 亿 t，矿中含钒较高，可达到 V₂O₅ 0.7%。

新西兰南、北二岛的西海岸，有大量的钒钛磁铁矿砂，是全球主要的钒钛磁铁矿生产地之一，平均含 TFe 18.0%~20%，但波动范围达 4%~60%。矿砂中 TFe 22.1%，TiO₂ 4.33%，V₂O₅ 0.14%。

澳大利亚钒钛磁铁矿矿床主要集中在西澳大利亚科茨矿、巴拉矿、巴拉姆比等矿。其中，科茨矿在澳大利亚温多海海滨地区，矿体是磁铁矿辉长岩，具有较佳的矿石成分；巴拉矿含铁钒钛较高，与南非布什维尔德矿类似；巴拉姆比、加巴番宁撒原矿中 TiO₂ 15%、V₂O₅ 0.7%、TFe 26.0%。

印度钒铁磁铁矿主要集中在南部喀拉拉邦特里凡得浪沿岸，奥里萨邦玛乌尔伯汉吉及哈尔邦锡伯姆和泰米尔纳德邦乌德拉斯附近，有达布拉伯腊和辛格布胡姆等矿点，大部分为海滨矿，原矿中 TiO₂ 15%~30%。

斯里兰卡除东北海岸伯慕达外，从康狄勒玛兰湾西北海岸到南部的克林达西岸均有钛铁矿，含 TiO₂ 53.61%，Fe 31%。矿物中除有 70%~80% 钛铁矿外，还有 10% 的金红石及 8%~10% 的锆英石。

南美洲的钒钛磁铁矿主要在巴西，包括有马拉佳斯和 Campo Alegre de Lourdes，巴西马拉佳斯钒钛磁铁矿属于典型的高钒矿床，V₂O₅ 1.27%，矿物主体为粗晶粒辉长岩或辉岩浸入体，同时含有钛和铂族元素，储量适中；巴西 Campo Alegre de Lourdes 矿床主体为铁镁质浸入体，矿石含 Fe 50%，TiO₂ 21%，V₂O₅ 0.75%，储量适中。

1.3 中国钒钛磁铁矿分布

中国钒钛磁铁矿分布广泛，储量也很丰富，已探明储量约为 100 亿 t，远景储量达 300 亿 t 以

上,即储量和开采量在全国铁矿中名列前茅,绝大部分钒钛磁铁矿分布于基性岩体中,主要分布在四川攀西(攀枝花-西昌)地区和河北承德地区,还有零星位于陕西洋县、汉中地区、湖北郧阳、襄阳地区、山西代县地区、广东兴宁、新疆喀什、哈密地区和辽宁朝阳等地区^[12]。

四川攀枝花-西昌地区位于四川西南腹,矿区新构造运动强烈,主要形成一系列以北西-北西西向为主的断层、南北向断裂的活化、强烈的差异升降,形成由不同时期、不同类型的岩浆岩组成的岩浆杂岩带,沿此杂岩带由南向北依次有攀枝花、红格、白马和太和含钛磁铁矿的层状基性-超基性侵入体,他们构成了南北向的钒钛磁铁矿成矿带,是钒钛矿资源分布最广、储量最大的地区,也是世界上同类矿床的重要产区之一,其因潜在资源巨大而被称为“天然资源库”,被广泛运用于各个行业中。攀枝花、红格、白马和太和四个典型的超大型钒钛磁铁矿矿区,是我国非常重要的特种钢铁矿石供应基地,同时也是钒、钛金属的重要生产地,具有非常重要的战略及经济地位^[13]。

河北承德地区是我国北方著名的钒钛磁铁矿基地,该地区钒钛磁铁矿探明储量仅次于攀西地区,居全国第二位。承德地区的矿物主要分布在黑山和大庙等地,矿物的主要类型为超贫钒钛磁铁矿和超贫磁铁矿,并伴有钒、钛、硫等有价元素,承德地区钒钛磁铁矿的矿物结晶颗粒较粗,矿石结构松散,硬度小,主要含铁、钛、钒等元素,不含其他稀有元素,易采易磨易选^[14]。

辽宁省朝阳地区也发现了大量的超贫钒钛磁铁矿,据估计储量 200 亿 t 以上。这类矿石的钒、钛和铁的质量分数与攀西地区的矿石相比较低,但其磁选精矿中钒、钛质量分数较高,具有很高的开发利用价值^[15]。

新疆哈密超低品位钒钛磁铁矿沿大南湖岛弧带呈带状分布,西起库木塔格沙龙,经尾亚至沁城乡南约 400 km,产于华力西中期基性侵入杂岩体-辉长-斜长岩石中,矿体呈大型透镜体状或规则的脉状,点型矿山有库木塔格钛铁矿、尾亚钒钛磁铁矿和沁城钛铁矿,TFe 品位一般在 20%~30%,TiO₂ 品位一般在 7%~14%,铁矿石储量超 10 亿 t^[16]。

陕西洋县毕机沟钒钛磁铁矿,矿区位于洋县、佛坪县、石泉县三县交界处,主体属洋县桑

溪乡范围。其原矿平均品位 TiO₂ 含量 6%^[17]。

综上所述,全球钒钛磁铁矿的储量较大,遍及六大洲,非洲南部、北美洲和亚太等地区是钒钛磁铁矿分布相对丰富的地区,俄罗斯、中国、南非、美国和加拿大等国家的钒钛磁铁矿储量较多。我国钒钛磁铁矿主要分布在四川的攀枝花-西昌地区和河北的承德等地区,以攀西地区为例,其钒钛磁铁矿资源分布集中,蕴藏量巨大,蕴藏有丰富的铁、钒、钛资源,还伴生有钴、铜等组分,综合利用价值巨大。相较我国而言,国外钒钛磁铁矿的钒品位普遍较高,大型矿床比较多,而且矿床成分也较为稳定。

2 钒钛磁铁矿的综合利用工艺

由于钒钛磁铁矿成分和结构复杂,是世界公认的难选冶矿种。传统上,磁性铁矿物主要采用磁选工艺进行选别回收,选铁尾矿作为选钛作业的原料,通常采用磁选、浮选、重选或几种联合流程进行选钛作业^[18]。近年来随着选冶技术的提高,越来越多的精细选矿技术应运而生,例如针对我国攀枝花地区钒钛磁铁矿综合利用的难点,有学者利用晶体结构差异形成的可碎性差异及不同磨矿介质所产生的不同破碎效果,提出“选择性解离-强化分选”技术路线,极大地提高了难选钒钛磁铁矿磨矿-分选效率。同时,提出进一步升级矿物分选装备,通过泡沫浮力、重力、电磁力和水流冲击力等多重复合力场改变矿物运动轨迹和性质,实现钒铁精矿的短流程提质降杂,显著降低钒铁精矿的硫含量,获得高品质的钒铁精矿,从而有效提升选矿效率和品质。在此需要特别强调的是,随着全世界钒钛磁铁矿的开发,贫、细、杂资源特点的不断凸显,加之市场对于铁精矿品位要求的不断提高,选冶尾矿粒度的不断减小,微细粒钛铁矿的工艺矿物学特性研究是进行选冶技术突破的前提,根据尾矿中钛铁矿的嵌布特征、粒度分布等特点,采取相应选冶工艺流程能够为微细粒钛铁矿的高效回收起到十分重要的指导作用^[19-20]。下面简述目前世界常用钒钛磁铁矿的综合利用工艺。

2.1 选矿分离工艺

2.1.1 预选工艺

磨前预选业已成为选矿工艺中一个重要环节,获得业界广泛认可,对选矿厂节能降耗,降

本增效起着极为关键的作用。李国平等^[21]以CYB磁异步干选机为核心的新型短流程干式预选工艺应用于攀西某钒钛磁铁矿细碎后、入磨前的预选作业，抛尾率高达25%，铁、钛精矿品位分别提高4.4%与1.8%，尾矿TiO₂品位控制在3.6%以下，分选指标明显优于常规筒式干选机组成的预选系统。彭欣苓等^[22]利用新型NLCT外磁筒式磁选机，对钒钛磁铁矿进行磨前湿式预选，在原矿TFe平均品位23.45%、TiO₂平均品位9.79%条件下进行预选抛废，可获得产率77.13% TFe平均品位为27.75%、产率76.45%、TiO₂平均品位为11.65%的精矿，及TFe平均品位9.01%及TiO₂平均品位3.90%的尾矿。实现平均抛废率达23%左右，回收率达90%左右，综合指标较好。尾矿中平均品位3.90%，相比筒式预选尾矿TiO₂品位降低0.8%左右，满足了选矿厂对湿式预选尾矿TiO₂品位的要求。

2.1.2 阶段磨矿-阶段选别选铁工艺

阶段磨矿-阶段选别是降低磨矿能耗、同时降低钛铁矿过磨的有效方法，攀西地区钒钛磁铁矿的选铁过程基本都采用阶段磨矿-阶段选别工艺流程。随着开采深度的增加，攀西地区采出矿石辉长岩、辉石岩含量逐渐降低，而橄辉岩含量逐渐提高，导致企业采用原工艺无法获得合格的铁精矿产品，为给红格中深部难选橄辉岩型钒钛磁铁矿石合理选矿工艺确定提供依据，杨耀辉等^[23]对TFe品位为14.75%、TiO₂含量为5.59%的红格中深部钒钛磁铁矿，破碎至-3 mm经湿式预选抛尾，可以获得TFe品位为21.05%、回收率为83.61%的预选精矿，预选精矿经磨矿-弱磁选-搅拌磨再磨-弱磁粗选-磁团聚重选机精选，可以获得TFe品位为57.25%、回收率为46.54%的精矿，铁精矿TiO₂含量为9.55%。

2.1.3 铁精矿提质降杂工艺

提高钒钛磁铁矿铁精矿铁品位对降低高炉渣量、提高高炉产率、降低焦比有着显著的效果。2004年攀钢矿业公司实施了阶磨阶选改造，将攀精矿的品位由52.5%全部提高到54.0%以上，分析表明，采用高品位精矿替代进口矿、增加中品位加工粉配比方案，烧结原料成本下降7.7元/t，炼铁原料成本下降12元/t^[24]。因此，对铁精矿的提质降杂具有重要意义。吴雪红^[25]通过对密地选

厂七段阶磨阶选的极限探索试验，最终将铁精矿TFe品位提高至接近其理论品位，达到57.30%。李国平等^[26]应用SXCT湿式高频谐波磁场磁选机，通过产生高频磁扰动来打破磁团聚，大幅提高分选精度，经工业考查可实现TFe品位提高1.85%、铁回收率达96.12%。陈超等^[27]针对攀枝花铁精矿分别采用细磨深选、粗细粒级分别分选、复合力场分选（包括新型提铁降杂磁选机磁选、磁选柱分选、磁场筛分选）等工艺进行了提铁降杂试验研究，结果表明，无论采用何种磁选工艺，均可有效提高攀枝花铁精矿品位2个百分点以上，且能保证回收率在97%以上。

攀枝花地区钒钛磁铁矿普遍分布有硫化物。硫化物的矿物量，不同矿区不同层位有差别，攀枝花矿区8.72%~0.05%；白马矿区2.59%~0.4%；太和矿区4.03%~0.34%，红格矿区7.15%~0.13%。硫化物的矿物种类很多，主要是磁黄铁矿，占硫化物总数的80%以上，在选矿过程中，进入铁精矿中的硫化物以磁黄铁矿为主，黄铁矿次之，两者占硫化物总量的25%~30%。随着攀西地区开采深度的加深，其硫含量也越来越高，甚至部分已经影响到了铁精矿的后续利用，现阶段攀枝花密地选厂铁精矿含S 0.8%左右，白马选厂铁精矿含S 0.5%左右，且有升高的趋势。普通高炉冶炼钒钛磁铁矿，因其高钛型炉渣冶炼的特殊性，炉渣脱硫能力低，致生铁含硫偏高^[28]，因此，对冶炼原料提出了更高的要求。

陈超等^[29]针对攀枝花铁精矿开展了磨矿-磁选-浮选提铁降杂试验，TFe品位从53.65%提高到了56.60%，S含量从0.81%降低到了0.32%，铁回收率在95%左右，提铁降杂效果明显。熊涛等^[30]对云南某钛磁铁矿进行了磁选提铁和精矿反浮选降硫试验，可获得铁品位67.04%、S含量0.11%的优质钛磁铁矿精矿。谢美芳等^[31]针对TFe含量53.52%的钛磁铁矿精矿，经磁选-浮选后获得了TFe品位57.17%，S含量0.26%的铁精矿，铁回收率为89.94%。由此可以看出，钛磁铁矿精矿中的硫通过常规浮选，可有效降低铁精矿中的硫含量。

2.1.4 选钛工艺

钛铁矿的选矿工艺取决于钛矿物的物料性质，目前国内外普遍采用的钛铁矿选矿方法有：

重选、磁选、电选和浮选等。目前单一的选矿方法已经很难达到工艺要求^[32]。工业上选钛工艺流程有以下几种：重选-电选工艺，采用重选法先丢弃低密度的脉石或废石矿物，获得的粗精矿进行电选得到钛铁矿精矿，对于含硫矿石，在电选之前需要用浮选法脱除硫化矿物；重选-磁选-浮选工艺，先将入选物料分级，粗粒采用重选粗选、磁选精选的方法，细粒采用浮选的方法获得钛精矿；粗粒重选-电选，细粒磁选-浮选工艺。该流程特点是将入选物料分成粗、细两部分，粗粒用重选粗选、电选精选方法处理；细粒则用磁选-浮选获得细粒钛精矿；单一浮选或磁选-浮选工艺，对嵌布粒度细的钛铁矿石，磨矿选铁后直接用浮选法获得钛精矿或先用湿式强磁选机作粗选设备，然后磁选精矿用浮选法回收钛。

单一浮选法或磁选-浮选法工艺流程都比较简单，操作管理方便，但使用浮选药剂会增加选矿成本。强磁-浮选是回收细粒级钛铁矿的有效方法，联合流程选别钛铁矿是钛铁矿选矿技术的发展方向^[33]。目前工业上钛铁矿选矿主要存在的问题是：

(1) 钛铁矿回收率低。钛铁矿一般结晶粒度较粗，在选铁过程中通常将钛铁矿磨得过细，导致细粒级含量过高，而常用的磁选、浮选工艺对细粒级的回收效果较差。

(2) 浮选药剂成本较高，存在一定的环境污染。

攀西地区的攀枝花、红格、太和矿区选钛都以“强磁-浮选”工艺为主，但是根据矿区矿石特性不同，有所区别。攀枝花矿区钛铁矿的回收是对选铁尾矿进行分级后，按粗细粒尾矿各自特点分别处置，采用粗细粒级分别“强磁-浮硫-浮钛”工艺流程。红格、太和矿区直接采用全粒级“强磁-浮硫-浮钛”流程。攀西地区的白马矿区是典型的低钛型钒钛磁铁矿，矿区钛铁矿含量仅有 4.96%，而攀西其他矿区钛铁矿含量均大于 10%。中国地质科学院矿产综合利用研究所、四川省地质矿产勘查开发局成都综合岩矿测试中心以攀西地区白马矿区深部 (>500 米) 低钛型钒钛磁铁矿石为研究对象，通过自主创新和技术集成，重点突破低钛型钒钛磁铁矿有用成分回收利用关键技术，形成了选铁尾矿两段强磁富集钛-脱硫-浮选选钛技

术，可获得产率 5.34%，TiO₂ 品位 47.26%，对原矿回收率为 24.17% 的钛精矿产品。攀枝花青杠坪矿业采用此工艺技术，生产 TFe 品位大于 56% 的钒铁精矿和 TiO₂ 品位大于 46.5% 的钛精矿。

2.1.5 微细粒钛铁矿选别工艺

随着钒钛磁铁矿资源的开发，“贫、细、杂”的资源特点越发凸显，同时受选铁为主的开发流程影响，选铁尾矿中微细粒 (-19 μm) 钛铁矿含量不断增加，由于其粒度细、比重小、可选性差等性质，为避免微细粒物料对选矿回收的影响，该部分物料一直作为细泥丢弃，导致了资源的严重浪费，开展 -19 μm 微细粒级钛铁矿选别工艺技术的研究，对提高钛资源利用率，减少资源浪费具有重要意义^[34]。目前，围绕着微细粒钛铁矿选矿工艺，在原有选钛工艺基础上主要开展了浮选、磁选-浮选联合、重选/磁选-浮选、分级选别等多种选矿工艺优化研究，不同的工艺在一定的适用范围内均有一定的分选效果。其中，浮选作为最主要的选别方法，科研工作者还针对微细粒钛铁矿开展了浮选擦洗-浮选、微波-浮选、絮凝浮选和载体浮选等浮选方法和新型捕收剂、选择性调整剂等选矿药剂的优化研究^[35-36]，对微细粒钛铁矿的回收均有一定的突破。

2.2 冶金分离工艺

2.2.1 高炉法

高炉法是采用高炉冶炼结合转炉提钒工艺，以实现铁、钒和钛资源的分离提取。高炉法在目前国内外处理钒钛磁铁矿的工艺中占据主导地位，由于其具有近 100 年的悠久发展历史，所以与其他方法相比较为成熟，国外对高炉法处理钒钛磁铁矿资源研究较早的国家有前苏联、南非以及瑞典等^[37]。同时，高炉法是目前我国处理钒钛磁铁矿资源应用最普遍、处理技术最成熟的方法，攀钢、承钢等均使用此工艺对钒钛磁铁矿进行冶炼^[38]。

高炉法的操作步骤如下，首先将钒钛铁精矿烧结/球团后放入炼铁高炉进行冶炼，在此过程中选择性的对铁、钒氧化物分别进行还原，进而得到含钒铁水，而钛氧化物则会以二氧化钛的形态进入炉渣形成高炉渣。接着用转炉吹炼的方法对含钒铁水进行处理，生产出钒渣和半钢，利用湿法对钒渣进行提取得到合格钒产品，而半钢则

经过再次加工能获得合格的钢材。在此过程中产生的高炉渣由于其所含二氧化钛低、性质复杂等原因，难以得到有效回收利用，造成了钛资源的浪费^[39]。

高炉法冶炼钒钛磁铁矿是一种较为传统的冶炼方式，目前，虽然使用高炉法对钒钛磁铁矿进行冶炼的工艺技术已较为完善，不断发展进步，而且生产规模也在不断进行扩大，但是仍没有实现钒钛资源的高效综合利用的目标。同时，高炉法还存在工艺过程繁琐、环境污染严重、能耗高等缺点，因此，从资源高效绿色开发角度来看，高炉法处理钒钛磁铁矿不但给环境保护带来了压力，也不利于资源的综合利用。

2.2.2 非高炉法

(1) 预还原电炉法

预还原-电炉法是一种将选好的钒钛磁铁矿与煤粉经过按比例混匀与造球后，进行预还原，得到金属化球团，然后再将其放入电炉中进行熔炼，进而获得含钒铁水和富钛炉渣的冶炼方法。与传统的高炉冶炼法比较而言，它与高炉法的冶炼原理有些相似，但是整个工艺流程短，使得冶炼难度有所降低，生产效率也大幅提高，是一种高经济效益的冶炼方式^[40]。

但是预还原-电炉法的应用率没有高炉法高，最先对该方法进行研究的主要是国外的一些国家，比如加拿大、南非、新西兰、俄罗斯等，但由于此方法操作难度较大，钛资源也无法得到合理高效的利用，所以目前仅在南非与新西兰得到推广使用。近年来，我国也对此工艺进行了探索，发现其存在着消耗能量较高、操作难度较大等缺点，而且钒钛回收率也较低，无法达到预期目标，因而在实际处理钒钛磁铁矿时较少采取此方法。所以如何优化还原过程，提高预还原-电炉法的还原效率，仍然值得大批科研工作者投身于新工艺的研究中^[41,42]。

(2) 还原-磨选法

还原-磨选法是在温度低于铁矿石的熔化温度的前提下，通过利用铁、钒、钛氧化物之间的还原性存在差异这一性质，有选择性地将铁氧化物还原为金属铁，而钒和钛则仍然保留为氧化物不变，接着继续控制还原条件使金属铁颗粒长大到一定粒度，然后将还原后的金属化产物进行研

磨，再对其进行分选，进而得到铁精矿和钒钛材料，最后再通过对富含钒钛的原料进行加工处理，从中提取出钒铁的一种方法^[43]。

关于对还原-磨选法的研究，首先开始于俄罗斯，虽然俄罗斯利用此方法进行了一些小型试验，但并未将其进行工业化的应用。我国也对该方法进行过较为深入的研究，并且认识到还原-磨选法在处理钒钛磁铁矿时，具有消耗能量较低、污染较小等优点，并且也可以在固态条件下将钛铁进行分离。但是还原-磨选法对还原要求很高，要求还原球团的金属化率需要高达90%以上，同时要求在整个还原过程当中铁晶粒也要长大到一定的分选粒度，才能够使铁和钛进行有效的分离。然而，在实际的应用过程中，钒钛磁铁矿的熔炼很难，所以只能通过提高还原温度来弥补不足，从而更好地满足还原要求，因此在这一工艺工程中还原能耗较大，成本增多，与高炉法和预还原-电炉法相比工艺规模太小，无法进行高效的工业化应用^[44]。

(3) 钠化/钙化提钒-预还原-电炉法

钠化提钒-预还原-电炉法的主要是将钒钛磁铁矿铁精矿与钠盐混匀之后进行造球，然后在1000℃左右的高温下将其进行氧化钠化焙烧，在焙烧过程中钒会和钠盐发生反应形成可以溶于水的钒酸钠，再通过水浸让钒酸钠溶于水里，进而使钒同铁、钛分离，残球经回转窑还原、电炉熔分获得铁水和钛渣，从而使钒钛磁铁矿中的铁、钒、钛资源得以综合利用^[45]。

芬兰的科研人员最先对此方法进行了系统性的研究，并运用了该方法对钒元素进行回收利用，但发现铁和钛的利用率不高。同时，我国的科研工作者也曾利用此方法对攀西地区的钒钛磁铁矿进行过大量实验，发现此方法的钒和钛资源的回收率高，在攀西钒钛磁铁矿中钒的回收率可达80%左右，但为了提高钒元素的还原率，该工艺所需的钠盐用量大，能耗高，增加工业成本，不利于其应用在工业化生产过程中。传统“钠化焙烧-水浸提钒”工艺排出大量有害气体 Cl_2 和HCl，严重污染环境，钒渣钙化焙烧-酸浸-水解沉钒”工艺是另一种提钒工艺，该方法可以有效解决高钙高磷钒渣无法高效提钒问题，同时其污染较小，但存在产品质量差^[46]。

3 结论与建议

钒钛磁铁矿在世界范围内分布广泛, 储量丰富, 对全世界各国的社会发展以及国民经济水平都具有至关重要的作用。尽管钒钛磁铁矿的冶炼方法经历了复杂且漫长的演变过程, 但迄今为止, 钒、钛资源的高效利用仍未完全实现, 在选冶过程中仍然存在一些问题阻碍着生产工艺的进步。近年来, 科研工作者针对我国复杂难选钒钛磁铁矿进行了广泛、深入的研究, 钒钛磁铁矿的回收利用率大幅提升。在矿山企业原有选铁、选钛流程的基础上, 根据原料特性创新了选矿工艺、设备及浮选药剂应用于生产, 并对废石、尾矿等进行了再选等研究, 使得钒钛磁铁矿资源得以有效利用。

在选矿工艺方面, 选铁, 目前主要集中在预选技术、多碎少磨和阶段磨矿阶段选别工艺的开发, 但还需加强提铁降杂方面研究, 尽可能脱除铁精矿中有害组分, 降低有害组分对后续工艺的影响。选钛, 目前微细粒钛铁矿等复杂难选钛资源的综合利用水平仍然不足, 选钛回收率不高, 随着进入选钛作业的矿石粒度变细, 应该更注重-19 μm 钛铁矿回收的工艺技术开发和成果应用推广, 切实提高钛铁矿回收率。浮选作为选钛的重要步骤, 还应注重浮选过程中辅助强化手段以及高效、无毒浮选剂的开发应用, 提高钛的回收率。

在冶金工艺方面, 应用最普遍、技术最成熟的就是高炉法, 其具有工艺成熟、处理量大、生产规模大等优点, 但是其也存在着一些不足与问题: 如钛资源回收利用率低、钒回收率低造成资源浪费, 环境压力大等。随着国家大力提倡环境友好型的经济发展, 该工艺已经逐渐无法满足良好的经济环保要求, 绿色高效开发利用钒钛磁铁矿资源对我国现代化建设具有重要意义, 高炉法终将会被其他工艺所取代。其他的方法相较于高炉法而言, 虽然能够较好地处理钒钛磁铁矿, 对钒钛资源利用率高, 流程短, 但是由于其条件和操作的困难性, 无法实现工业化的应用, 仍需进行优化改进。因此, 在保留现有部分适宜流程的前提下, 开发和改进新的工艺流程, 从而提高钒钛资源的综合利用率已经迫在眉睫, 需要科研人员基于投入研究新的改进技术, 分析其优势和劣势, 从优化冶炼工艺的角度, 控制成本, 进一步

提高钒钛资源的利用率。

总之, 目前我们在钒钛磁铁矿综合利用上已经取得了长足进步, 但离钒钛磁铁矿的高效利用还存在较大的差距, 任重而道远, 钒钛磁铁矿的高效综合利用需要各方的努力合作, 积极开展技术攻关, 全面提升铁、钒、钛以及其伴生元素的回收利用水平。

参考文献:

- [1] 马家源, 孙希文. 钒钛磁铁矿高炉冶炼的强化[J]. *钢铁*, 2000(1):4-12.
- MA J Y, SUN X W. Strengthening of blast furnace smelting of vanadium titanium magnetite[J]. *Steel*, 2000(1):4-12.
- [2] 杜鹤桂. 高炉冶炼钒钛磁铁矿原理[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- DU H G. Principle of smelting vanadium titanium magnetite in blast furnace [M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [3] 北京有色金属研究总院. 有色与稀有金属国外动态[M]. 北京: 北京有色金属研究总院, 1993.
- Beijing Nonferrous Metals Research Institute. Foreign dynamics of non-ferrous and rare metals [M]. Beijing: Beijing General Institute of Non ferrous Metals Research, 1993.
- [4] 金和喜, 魏克湘, 李建明, 等. 航空用钛合金研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(2):280-292.
- JIN H X, WEI K X, LI J M, et al. Research progress in titanium alloys for aviation[J]. *Chinese Journal of Non ferrous Metals*, 2015, 25(2):280-292.
- [5] 常福增, 赵备备, 李兰杰, 等. 钒钛磁铁矿提钒技术研究现状与展望[J]. *钢铁钒钛*, 2018(5):71-78.
- CHANG F Z, ZHAO B B, LI L J, et al. Research status and prospect of vanadium extraction technology from vanadium titanium magnetite[J]. *Iron and Steel Vanadium Titanium*, 2018(5):71-78.
- [6] 赵国君, 赵祺彬, 兰井志, 等. 攀西地区钒钛磁铁矿资源特点及选矿新技术[J]. *现代矿业*, 2017, 33(7):198-200.
- ZHAO G J, ZHAO Q B, LAN J Z, et al. Resource characteristics and new beneficiation technology of vanadium titanium magnetite in Panxi area[J]. *Modern Mining*, 2017, 33(7):198-200.
- [7] 吴本羨. 钒钛磁铁矿主要有益元素赋存状态的研究与综合利用[J]. *矿物岩石*, 1982(1):105-108.
- WU B X. Study on occurrence state of main beneficial elements of vanadium titanium magnetite and comprehensive utilization[J]. *Mineral Rocks*, 1982(1):105-108.

- [8] 汪镜亮. 国外钒钛磁铁矿的开发利用[J]. 钒钛, 1993(5):1-11.
- WANG J L. Development and utilization of vanadium titanium magnetite abroad[J]. Vanadium Titanium, 1993(5):1-11.
- [9] 李兴华. 攀枝花钒钛磁铁矿综合利用技术路线图研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
- LI X H. Study on Technology roadmap map of comprehensive utilization of Panzhihua vanadium titanium magnetite[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011.
- [10] Dworzanowski M. The role of metallurgy in enhancing beneficiation in the South African mining industry[J]. Journal-South African Institute of Mining and Metallurgy, 2012, 113(9):677-680.
- [11] 史丽羽. 碱熔盐体系中钒钛磁铁矿还原过程物相转变规律 [D]. 北京: 中国科学院大学 (中国科学院过程工程研究所), 2018.
- SHI L Y. Phase transformation law of vanadium titanium magnetite during reduction in alkali molten salt system [D]. Beijing: University of the Chinese Academy of Sciences (Process engineering Institute, Chinese Academy of Sciences), 2018.
- [12] 锡淦, 胡克俊. 攀钢钒钛回收新进展[J]. 钢铁钒钛, 1998, 19(4):11-17.
- XI G, HU K J. New progress of vanadium and titanium recovery in Panzhihua Iron and Steel Co., Ltd.[J]. Iron and Steel Vanadium Titanium, 1998, 19(4):11-17.
- [13] 陈小婷, 罗保荣. 四川省攀枝花钒钛磁铁矿床地质特征及成矿作用[J]. 矿物学报, 2015(S1):81.
- CHEN X T, LUO B R. Geological characteristics and mineralization of Panzhihua vanadium titanium magnetite deposit in Sichuan Province[J]. Journal of Minerals, 2015(S1):81.
- [14] 陈露露. 我国钒钛磁铁矿资源利用现状[J]. 中国资源综合利用, 2015, 33(10):31-33.
- CHEN L L. Current situation of utilization of vanadium titanium magnetite resources in China[J]. Comprehensive Utilization of Resources in China, 2015, 33(10):31-33.
- [15] 关智浩. 辽西低品位钒钛磁铁矿铁、钛分步富集试验研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2021.
- GUAN Z H. Experimental study on fractional enrichment of iron and titanium in low-grade vanadium titanium magnetite from western Liaoning [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2021
- [16] 李庆禄. 哈密低品位钒钛磁铁矿选矿研究[J]. 中国资源综合利用, 2017, 35(10):5-8.
- LI Q L. Study on beneficiation of Hami low-grade vanadium titanium magnetite[J]. Comprehensive Utilization of Resources in China, 2017, 35(10):5-8.
- [17] 白亚菊, 常红盼. 浅析毕机沟钒钛磁铁矿床成矿模式[J]. 科技风, 2019(36):124-125.
- BAI Y J, CHANG H P. Analysis on the metallogenic model of Bijigou vanadium titanium magnetite deposit[J]. Technology Wind, 2019(36):124-125.
- [18] 杨耀辉, 严伟平, 徐东, 等. 陕西安康地区低品位钒钛磁铁矿选矿实验研究[J]. 矿产综合利用, 2021(5):193-197.
- YANG Y H, YAN W P, XU D, et al. Experimental study on beneficiation of low-grade vanadium titanium magnetite in Ankang, Shaanxi[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(5):193-197.
- [19] 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 Panxi Fine Ilmenite[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(3):131-135.
- [20] 印万忠, 徐东, 杨耀辉, 等. 承德某钒钛磁铁矿尾矿资源化利用技术研究[J]. 矿产综合利用, 2020(6):37-42.
- YIN W Z, XU D, YANG Y H, et al. Research on resource utilization technology of tailings from a vanadium titanium magnetite mine in Chengde[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(6):37-42.
- [21] 李国平, 尚红亮, 王芝伟, 等. 新型磨前干式预选工艺在攀西某钒钛磁铁矿的应用[J]. 有色金属 (选矿部分), 2018(2):53-56.
- LI G P, SHANG H L, WANG Z W, et al. Application of a new dry pre concentration process before grinding in a vanadium titanium magnetite mine in Panxi[J]. Non ferrous Metals:Mineral Processing Section, 2018(2):53-56.
- [22] 彭欣苓, 胡永会, 尚红亮, 等. 新型 NLCT 磁选机在某钒钛磁铁矿磨前预选中的应用[J]. 有色金属 (选矿部分), 2017(2):76-80.
- PENG X L, HU Y H, SHANG H L, et al. Application of new NLCT magnetic separator in pre grinding of a vanadium titanium magnetite[J]. Non-ferrous Metals(Mineral Processing Section), 2017(2):76-80.
- [23] 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石选矿试验[J]. 金属矿山, 2016, 45(10):77-82.
- YANG Y H, HUI B, LIAO X W, et al. Beneficiation test of

- Hongge low-grade refractory olivine pyroxene type vanadium titanium magnetite ore[J]. *Metal Mines*, 2016, 45(10):77-82.
- [24] 张建树, 冯成建. 提高钒钛铁精矿品位及其对高炉生产的影响[J]. *钢铁钒钛*, 1999(2):17-23.
- ZHANG J S, FENG C J. Improving the grade of vanadium titanium iron concentrate and its impact on blast furnace production[J]. *Iron and Steel Vanadium Titanium*, 1999(2):17-23.
- [25] 饶家庭, 王敦旭, 康斌, 等. 攀钢低成本炼铁技术现状与建议[J]. *四川冶金*, 2013, 35(1):7-13.
- RAO J T, WANG D X, KANG B, et al. Current status and suggestions of low cost ironmaking technology at Pangang[J]. *Sichuan Metallurgy*, 2013, 35(1):7-13.
- [26] 吴雪红. 提高密地选矿厂铁精矿品位的试验研究[J]. *矿冶工程*, 2013, 33(6):38-41.
- WU X H. Experimental study on improving the grade of iron concentrate in Midi mineral processing plant[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2013, 33(6):38-41.
- [27] 李国平, 赵海亮, 尚红亮, 等. SXCT 型湿式高频谐波磁场磁选机在攀西钒钛磁铁矿中的应用[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2019(1):100-104.
- LI G P, ZHAO H L, SHANG H L, et al. Application of SXCT wet high-frequency harmonic magnetic field separator in Panxi vanadium titanium magnetite[J]. *Non Ferrous Metals (beneficiation part)*, 2019(1):100-104.
- [28] 陈超, 张裕书, 张少翔, 等. 攀枝花铁精矿磁选提铁降杂工艺研究[J]. *矿产保护与利用*, 2018, 214(2):69-73.
- CHEN C, ZHANG Y S, ZHANG S X, et al. Research on the magnetic separation process for improving iron and reducing impurities in Panzhihua iron concentrate[J]. *Mineral Protection and Utilization*, 2018, 214(2):69-73.
- [29] 何绍刚. 攀钢高炉提高生铁质量的实践[J]. *四川冶金*, 1998(1):19-21.
- HE S G. Practice of improving pig iron quality in Panzhihua iron and steel blast furnace[J]. *Sichuan Metallurgy*, 1998(1):19-21.
- [30] 陈超, 张裕书, 张少翔, 等. 攀枝花铁精矿特性及提铁降杂试验研究[J]. *矿产综合利用*, 2018(3):61-64.
- CHEN C, ZHANG Y S, ZHANG S X, et al. Research on the characteristics of Panzhihua iron concentrate and the experiment of improving iron and reducing impurities[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018(3):61-64.
- [31] 熊涛, 谢美芳, 苏卫. 某钒钛磁铁矿选矿工艺试验研究[J]. *矿冶工程*, 2014, 34(1):51-53.
- XIONG T, XIE M F, SU W. Experimental study on beneficiation process of a titanium magnetite[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2014, 34(1):51-53.
- [32] 谢美芳, 文书明, 郑海雷. 钒钛磁铁矿精矿提铁降硫工艺试验研究[J]. *金属矿山*, 2010(7):44-46.
- XIE M F, WEN S M, ZHENG H L. Experimental study on iron extraction and sulfur reduction process of vanadium titanium magnetite concentrate[J]. *Metal Mines*, 2010(7):44-46.
- [33] 周友斌. 攀枝花细粒钒钛铁矿浮选工艺在生产中应用探讨[J]. *金属矿山*, 2000(1):32-36.
- ZHOU Y B. Discussion on application of panzhihua fine ilmenite flotation process in production[J]. *Metal Mines*, 2000(1):32-36.
- [34] 崔毅琦, 王凯, 童雄, 等. 难选微细粒钒钛铁矿资源的回收利用研究概述[J]. *矿冶*, 2014(6):14-18.
- CUI Y Q, WANG K, TONG X, et al. Overview of research on recovery and utilization of refractory fine Ilmenite resources[J]. *Mining and Metallurgy*, 2014(6):14-18.
- [35] 惠博, 杨耀辉. 攀西红格矿区橄辉岩型钒钛磁铁矿矿石性质研究及对选矿工艺的影响[J]. *矿产综合利用*, 2020(4):126-129.
- HUI B, YANG Y H. Properties of olive-pyroxene vanadium-titanium magnetite ore in Hongge mining area of Panxi research and influence on mineral processing technology[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(4):126-129.
- [36] 邓建, 杨耀辉, 王洪彬, 等. 攀西某选铁尾矿中钒钛铁矿浮选药剂优化试验研究[J]. *钢铁钒钛*, 2022, 43(3):77-83.
- DENG J, YANG Y H, WANG H B, et al. Experimental study on optimization of flotation reagents for Ilmenite in an iron dressing tailings in Panxi[J]. *Iron and Steel Vanadium Titanium*, 2022, 43(3):77-83.
- [37] Taylor P R, Shuey S A, Vidal E E, et al. Extractive metallurgy of vanadium-containing titaniferous magnetite ores: A review[J]. *Minerals and Metallurgical Processing*, 2006, 23(2):80-86.
- [38] 邓君, 薛逊, 刘功国. 攀钢钒钛磁铁矿资源综合利用现状与发展[J]. *材料与冶金学报*, 2007, 6(2):5.
- DENG J, XUE X, LIU G G. Current situation and development of comprehensive utilization of vanadium titanium magnetite resources in Panzhihua Iron and Steel Group Co., Ltd.[J]. *Journal of Materials and Metallurgy*, 2007, 6(2):5.
- [39] 彭英健, 吕超. 钒钛磁铁矿综合利用现状及进展[J]. *矿业研究与开发*, 2019(5):6.

- PENG Y J, LV C. Current situation and progress of comprehensive utilization of vanadium titanium magnetite[J]. [Mining Research and Development](#), 2019(5):6.
- [40] Guo Y, Tang M, Jiang T, et al. Research on the slag phase type of vanadium - titanium magnetite in pre-reduction-electric furnace smelting[M]. John Wiley & Sons, Inc. 2013.
- [41] 郭宇峰. 钒钛磁铁矿固态还原强化及综合利用研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- GUO Y F. Study on solid reduction strengthening and comprehensive utilization of vanadium titanium magnetite[D]. Changsha: Central South University, 2007.
- [42] Mingyu Wang, Shengfan Zhou, Xuewen Wang, et al. Recovery of Iron from Chromium Vanadium-Bearing Titanomagnetite Concentrate by Direct Reduction[J]. *JOM*, 2016.
- [43] 黄丹. 钒钛磁铁矿综合利用新流程及其比较研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- HUANG D. New process of comprehensive utilization of vanadium titanium magnetite and its comparative study [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [44] 梁典德. 直还技术在钒钛磁铁矿铁钛分离和提钒工艺中的利用探讨 [J]. *重钢技术*, 2002(3):1-6.
- LIANG D D. Discussion on the application of direct reduction technology in vanadium titanium magnetite iron titanium separation and vanadium extraction process[J]. *Chongqing Iron and Steel Technology*, 2002(3):1-6.
- [45] 王莎. 钒钛磁铁矿冶炼炉渣性能及渣/铁间钒分配行为研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学.
- WANG S. Study on the properties of vanadium titanium magnetite smelting slag and vanadium distribution behavior between slag and iron [D] Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology.
- [46] 付自碧. 钒钛磁铁矿先提钒工艺研究现状及产业化前景分析 [J]. *矿产综合利用*, 2009(4):13-17.
- FU Z B. Research status and industrialization prospect analysis of vanadium extraction process from vanadium titanium magnetite concentrate[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2009(4):13-17.

Overview of Global Vanadium-titanium Magnetite Resources and Comprehensive Utilization

Yang Yaohui, Hui Bo, Yan Shiqiang, Chen Chao, Deng Jian

(Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Technology Innovation Center for Comprehensive Utilization of Strategic Minerals Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: This is an essay in the field of mineral engineering. This paper summarizes the distribution of vanadium titanium magnetite in the world and its comprehensive utilization progress. vanadium titanium magnetite is a composite ore of iron, titanium and vanadium, which is also associated with chromium, gallium, scandium, cobalt, nickel, copper, platinum group elements and other useful polymetallic elements. vanadium titanium magnetite is rich in reserves and widely distributed in the world, with high comprehensive utilization value. As far as China is concerned, the utilization technology of iron, titanium and vanadium in vanadium titanium magnetite is relatively mature at present, but the comprehensive utilization level is still not high. Under the background that efficient and green development has become an inevitable requirement of today's social development, we should improve the comprehensive utilization process of vanadium titanium magnetite as soon as possible, to achieve efficient and comprehensive utilization of vanadium titanium resources.

Keywords: Mineral engineering; Vanadium titanium magnetite; Global resource distribution; Comprehensive utilization; Efficient and green development; Beneficiation and smelting process