



普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

# 钒钛磁铁矿 非高炉冶炼技术

主编 杨绍利

副主编 马兰 吴恩辉



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

# 钢铁磁铁矿非高炉冶炼技术

主 编 杨绍利

副主编 马 兰 吴恩辉

北 京

冶金工业出版社

2012

## 内 容 提 要

本书简要介绍了国内外钒钛磁铁矿资源情况,钒钛磁铁矿高炉冶炼概况,钒钛磁铁矿非高炉冶炼主要新工艺流程的研究及应用情况,包括钒钛铁精矿粉造球、直接还原基本原理、直接还原工艺及主要设备等。重点介绍了钒钛磁铁矿直接还原基本原理及其还原特点,转底炉、车底炉、隧道窑、竖炉及回转窑还原钒钛磁铁矿工艺研究情况。另外,还展望了钒钛磁铁矿非高炉还原工艺的发展趋势和发展前景。

本书可作为有关高校相关专业教学用书、有关企业工程技术人员及员工培训教材,也可供有关科研人员、工程设计人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

钒钛磁铁矿非高炉冶炼技术/杨绍利主编. —北京:冶金工业出版社,2012.2

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-5421-0

I. ①钒… II. ①杨… III. ①钒钛磁铁矿—熔炼—高等学校—教材 IV. ①TF521

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第014362号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号,邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 张 晶 卢 敏 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-5421-0

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销

2012年2月第1版,2012年2月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;8.25印张;199千字;123页

19.00元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿信箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

# 前 言

钒钛磁铁矿是以铁(Fe)、钒(V)、钛(Ti)元素为主,并有其他有用元素[钴(Co)、镍(Ni)、铬(Cr)、钪(Sc)、镓(Ga)等]的多元共生铁矿。由于铁、钛紧密共生,钒以类质同象赋存在钛磁铁矿中,故通常称为钒钛磁铁矿。钒钛磁铁矿在世界上分布很广,储量较大。过去由于技术、经济方面的原因,此种矿石曾被认为是“死矿”。近六七十年来,由于选矿和综合利用技术的进步以及钒钛磁铁矿冶炼研究工作的开展,钒钛磁铁矿不仅具有相当大的工业生产规模,而且形成了具有不同特色的工艺流程。冶炼钒钛磁铁矿不仅能产出大量的生铁,而且还可提取大量的金属钒、钛等,为相关产业提供了不可替代的物质基础。

炼铁生产主要有两种方法:一种是高炉法,另一种是少用焦炭或是不用焦炭的非高炉炼铁法。高炉炼铁仍是钒钛磁铁矿炼铁生产的主体,经过长期的发展,技术已经非常成熟,但高炉炼铁对冶金焦的依赖较强。随着焦煤资源的日渐贫乏,冶金焦的价格越来越高。为使炼铁生产彻底摆脱对冶金焦的依赖,开发了非高炉炼铁技术,并已初步形成以直接还原和熔融还原为主体的现代化非高炉炼铁工业体系。可以说,铁矿石直接还原与熔融还原是非高炉炼铁方法的两大课题,是炼铁冶金技术中的新工艺。

钒钛磁铁矿非高炉冶炼是非高炉炼铁技术的重要组成部分,由于钒钛磁铁矿成分及物相组成的特殊性,其非高炉冶炼工艺技术也存在特殊性。本书主要介绍钒钛磁铁矿几种主要直接还原新技术的原理、工艺流程及其主要特点。

本书由四川攀枝花学院杨绍利任主编,马兰、吴恩辉任副主编。其中第1章由高仕忠、邹建新、苟淑云、刘松利、马兰编写,第2章由周兰花、杨绍利、张利民、刘松利编写,第3章由马兰、杨绍利、李俊翰编写,第4章由杨绍利、吴恩辉、马兰、张树立、方民宪、刘松利、李亮编写,第5章由杨绍利、吴恩辉编写。

本书可作为材料科学与工程专业、材料成型及控制工程专业、冶金工程专业

及矿物加工工程专业等本科生的技术基础课教材,以及相关专业硕士研究生的选修课教材,还可供钒钛及其相关产业工程技术人员、研究人员、项目开发商、投资者、企业员工及管理人员以及大专院校师生参考。

本书编写过程中,得到了陈厚生教授的大力指导和帮助,参阅了国内外公开发表的大量文献资料,借此向各位作(译)者致谢。由于编者水平有限、经验不足、时间紧迫,不妥之处在所难免,恳请读者不吝赐教、批评指正。

编 者

2011年11月于四川攀枝花

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 钒钛磁铁矿资源概况 .....	1
1.1.1 国外钒钛磁铁矿分布情况 .....	1
1.1.2 我国钒钛磁铁矿分布情况 .....	4
1.1.3 河北承德地区钒钛磁铁矿资源情况 .....	4
1.1.4 攀枝花地区钒钛磁铁矿资源情况 .....	5
1.1.5 钒钛磁铁矿资源开发利用情况 .....	6
1.2 钒钛磁铁矿选矿工艺概况 .....	7
1.2.1 重选 .....	7
1.2.2 电选 .....	11
1.2.3 磁选 .....	13
1.2.4 浮选 .....	13
1.3 钒钛磁铁矿高炉冶炼概况 .....	16
1.3.1 攀枝花钒钛磁铁矿高炉冶炼的发展历程 .....	16
1.3.2 攀枝花钒钛磁铁矿高炉冶炼的特点 .....	17
1.3.3 钒钛磁铁矿高炉冶炼的操作制度 .....	23
1.4 非高炉炼铁基本概念和基本方法 .....	28
1.4.1 直接还原的基本概念和基本方法 .....	28
1.4.2 熔融还原的基本概念和基本方法 .....	29
本章小结 .....	30
复习思考题 .....	30
参考文献 .....	31
<b>2 钒钛磁铁矿精矿粉造球</b> .....	32
2.1 概述 .....	32
2.2 滚动成球工艺及原理 .....	33
2.2.1 滚动成球工艺及常用设备介绍 .....	33
2.2.2 圆盘造球机滚动成球基本原理 .....	34
2.2.3 钒钛磁铁矿的滚动成球 .....	35
2.3 粉末压力成形原理及对辊压机成形工艺 .....	36
2.3.1 粉末压力成形原理 .....	36
2.3.2 对辊压机成形 .....	37

2.3.3 钒钛磁铁矿不同直接还原工艺下的压球制度	38
2.4 球团的干燥	40
2.4.1 生球干燥的目的和意义	40
2.4.2 生球干燥的机理	40
2.4.3 影响生球干燥速度的因素	41
2.4.4 生球干燥过程中的强度变化	42
2.5 球团物理机械性能表征	43
2.5.1 球团水分含量	43
2.5.2 密度和气孔度	43
2.5.3 抗压强度	45
2.5.4 落下强度	45
2.5.5 高温破裂性能	46
2.5.6 养生性能	47
本章小结	47
复习思考题	48
参考文献	48
<b>3 钒钛磁铁矿直接还原基本原理</b>	<b>50</b>
3.1 钒钛磁铁矿矿物特征及其直接还原特点	50
3.1.1 钒钛磁铁矿的工艺矿物学特征	50
3.1.2 钒钛铁精矿的工艺矿物学特征	52
3.1.3 钛精矿的工艺矿物学特征	53
3.1.4 钒钛磁铁矿直接还原特点	54
3.2 铁氧化物的还原	55
3.2.1 主要含铁矿物的还原历程	55
3.2.2 各种含铁矿物还原时所允许的最大 $\text{CO}_2/\text{CO}$ 值	57
3.3 钒、铬氧化物的还原	60
3.3.1 钒氧化物的还原	60
3.3.2 铬氧化物的还原	61
3.4 钛氧化物的还原	62
3.4.1 非高炉冶炼法处理钒钛磁铁矿回收利用钛的原则流程	62
3.4.2 钒钛铁精矿中钛的直接还原	63
3.5 锰、硅氧化物的还原	66
3.5.1 锰氧化物的分解及还原特点	66
3.5.2 硅氧化物的还原	67
3.6 钒钛铁精矿钠化球团的直接还原	69
3.6.1 钒钛铁精矿钠化球团概述	69
3.6.2 添加钠盐的作用	70
3.6.3 钒钛铁精矿钠化球团的还原过程	71

3.6.4 钒钛铁精矿钠化球团的还原特点	73
3.7 钒钛磁铁矿球团还原膨胀	74
3.7.1 铁精矿球团还原膨胀的一般机理	74
3.7.2 钠盐对钒钛铁精矿氧化球团的还原膨胀性的影响	75
3.7.3 CaO 对铁矿球团还原膨胀的影响	77
3.7.4 MgO 对铁矿球团还原膨胀的影响	78
3.7.5 直接还原过程中球团的还原膨胀	78
本章小结	78
复习思考题	78
参考文献	78
<b>4 钒钛磁铁矿直接还原工艺</b>	<b>80</b>
4.1 转底炉还原工艺	80
4.1.1 转底炉法研究概况	80
4.1.2 钒钛磁铁矿转底炉煤基直接还原工艺新流程	84
4.2 隧道窑还原钒钛磁铁矿	85
4.2.1 隧道窑结构	85
4.2.2 隧道窑生产操作过程	85
4.2.3 隧道窑直接还原工艺流程	87
4.2.4 还原工艺制度	88
4.3 车底炉还原工艺	89
4.3.1 车底炉还原工艺流程	89
4.3.2 车底炉还原工艺主要参数	90
4.4 回转窑还原工艺	90
4.4.1 回转窑的结构及工作原理	90
4.4.2 回转窑还原工艺流程	93
4.4.3 钒钛磁铁矿的回转窑还原工艺	94
4.5 竖炉还原工艺	100
4.5.1 概述	100
4.5.2 竖炉炉型及结构	102
4.5.3 气基竖炉直接还原工艺流程	103
4.5.4 竖炉直接还原工作原理	104
4.5.5 竖炉还原工艺主要参数	107
4.6 流态化还原工艺	107
4.6.1 流态化还原工艺流程	107
4.6.2 流态化设备	107
4.6.3 流态化还原工艺特点	109
4.7 倒焰窑还原工艺	109
4.7.1 概述	109



4.7.2 倒焰窑结构 .....	109
4.7.3 倒焰窑还原工艺及流程 .....	111
本章小结 .....	113
复习思考题 .....	113
参考文献 .....	113
<b>5 钒钛磁铁矿非高炉还原技术经济分析及发展趋势 .....</b>	<b>115</b>
5.1 直接还原——电炉炼铁工艺与高炉炼铁工艺技术经济对比分析 .....	115
5.1.1 对比分析的基础条件 .....	115
5.1.2 投资比较 .....	115
5.1.3 成本比较 .....	116
5.1.4 能耗比较 .....	118
5.1.5 转底炉直接还原工艺处理钒钛磁铁矿的技术经济分析 .....	119
5.1.6 对比分析的结论 .....	120
5.2 非高炉还原工艺发展趋势及技术前景 .....	121
5.2.1 非高炉还原工艺发展趋势 .....	122
5.2.2 非高炉还原工艺的技术前景 .....	122
本章小结 .....	123
复习思考题 .....	123
参考文献 .....	123

# 1 绪 论

## 本章学习要点：

1. 我国钒钛磁铁矿资源储量及其分布概况；
2. 钒钛磁铁矿几种典型选矿工艺的基本原理、工艺流程及其应用；
3. 钒钛磁铁矿高炉冶炼特点；
4. 非高炉冶炼的基本概念和主要工艺方法分类。

## 1.1 钒钛磁铁矿资源概况

含钒钛磁铁矿岩体分为基性岩（辉长岩）型和基性-超基性岩（辉长岩-辉石岩-辉岩）型两大类，两种类型的地质特征基本相同，前者相当于后者的基性岩相带部分，后者除铁、钛、钒外，伴生的铬、钴、镍和铂族组分含量较高，因而综合利用价值更大。钒钛磁铁矿不仅是铁的重要来源，而且伴生的钒、钛、铬、钴、镍、铂族和铀等多种组分，具有很高的综合利用价值。

### 1.1.1 国外钒钛磁铁矿分布情况

目前国外钒钛磁铁矿主要分布在南非、前苏联、新西兰、加拿大、印度等地。但富矿和贫矿差别较大，其含量相对不均匀。表 1-1 是世界钒钛磁铁矿分布。

表 1-1 世界上钒钛磁铁矿分布（不包括中国）

国家和地区	矿床名称或所在地	储量/万吨		矿 石		精矿中含量/%	
		富矿	贫矿	类型	Fe/TiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
美国	纽约州阿德朗达克					(16)	
	圣弗尔德·列克	20000		TCTK-TTK	1.5~2.5	9~12	0.6~0.9
	艾伦·梅津	5800	12000	TTK-TCTK	2.0~2.5	19	
	纽约州桑福德湖	20000				18~20	0.45
	加利福尼亚州洛杉矾圣加勃里山区					20	0.53
	德卢斯矿山						(1.0)
	科罗拉多州加里布和铁山						(0.3)
	怀俄明铁山						(0.4)

续表 1-1

国家和地区	矿床名称或所在地	储量/万吨		矿 石		精矿中含量/%	
		富矿	贫矿	类型	Fe/TiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
美国	罗得岛铁矿山						(0.3)
	阿拉斯加西南部		1000000	TCTK	7~10	2~3	0.3~0.5
加拿大	魁北克阿德湖					(35)	(0.27~0.35)
	摩林	500	200000	TCTK-CTK	1.5~4.0	1.5~6.0	0.3~0.5
	多里列克、齐博嘎梅		7200	TTK-TCTK	3~6	10~12	1.2~1.4
	拉克圣焦	300	20000	TTK-TCTK	2~4	0.1~16	0.1~0.8
	圣依列斯	200	100000	TTK-TCTK	1.8~3.0	7.6~9.2	0.5~0.54
	魁北克马格皮矿床	100000		TTK-TCTK	4	7.6~9.2	0.5~0.54
南非	布什维尔得	200000		TTK-TCTK	4	12~18	1.5~2.0
	里甘加	120000			4.5		
芬兰	奥坦马克	3500		TTK-CTK	3	4.7	1.1
	木斯塔瓦拉		3800	TCTK	8~9	4~8	1.6
瑞典	塔贝格		150000	TCTK	3~5	15.3	0.5~1.0
	鲁乌特瓦尼矿山					(10~20)	(0.26)
	克腊姆斯塔						(0.4)
	基律纳						(0.1~0.2)
挪威	特尔尼斯矿床	300000				18.4	0.5~1
	罗弗敦群岛 (捷尔涅斯)	40000		TTK	1	3.2	
	勒德萨德矿床	10000				4	0.31
	鲁济瓦拉	5000		TTK-TCTK	4		
印度	比哈尔						(1.5~3)
	辛格布胡姆			TTK-TCTK	2~5		1.5~5.0
	梅尔布罕兹	800		TTK-TCTK	4	14	0.5~1.8
	迈索尔						1.5~3
前苏联	乌拉尔库萨矿床					12~14	0.54
	切尔诺烈申斯克矿床					10~16	0.4~0.8
	卡巴斯克矿床					14	
	科拉半岛普道 日哥尔斯克					7~10	0.17
	卡奇卡纳尔						0.5~0.6
	谢布里雅夫尔			GTK-TCTK	1.0~1.5	7.8	0.2
	格列木雅哈			TTK-TCTK	2~3	14	0.4
	科夫多尔			GTK-TCTK	5~20		
	古谢夫戈尔				0.6	2~4	
	恰津			TTK-TCTK	4~6	11~12	0.5~0.6

续表 1-1

国家和地区	矿床名称或所在地	储量/万吨		矿 石		精矿中含量/%	
		富矿	贫矿	类型	Fe/TiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
前苏联	萨尔马戈尔			GTK-TCTK	1~3	3.4~10.4	0.05~0.1
	维里雅尔维			GTK-TCTK	1.5~4.0	5.8~7.8	0.1~0.2
	叶列却吉尔			GTK-TCTK	2~3	9.4~12.0	0.6~0.8
	阿弗里坎德			GTK-TCTK	1~5	9.0~10.4	0.1~0.2
	维亚姆			TCTK	15~20	1.3~2.0	0.3~0.7
	沃尔柯夫			TCTK		5~8	1.0~1.2
	第一乌拉尔			TCTK	6~13	1~4	0.5~1.0
	斯瓦兰茨			TCTK	10~15	3.2~4.5	0.2~0.6
	沃林			TCTK-TTK	1.5~4.0	8~20	0.7~1.0
	诺沃谢尔科夫			TTK-CTK	6	0.5~1.9	0.9
	米德维杰夫			TTK-TCTK	3	9~13	0.5~1.0
	科潘			TTK-TCTK	3~4	9~15	0.5~0.9
	马特卡尔			TTK-TCTK	3~4	10~15	0.5~1.0
	维里霍夫			TCTK	10	3.9~5.0	0.6~0.8
	苏洛亚姆			LHS-TCTK	10	3.4	0.2~0.3
	杰宾布拉克			TCTK	8	4.7~5.6	0.1~0.5
	库林			GTK-TCTK	4~5	10.3~18.8	0.1~0.25
	库格达			GTK-TCTK	7~8	8~11	0.1~0.22
	波尔尤思赫			GTK-TCTK	5~8	10~14	0.1~0.2
	哈尔洛夫			TTK-TCTK	2.5~3.0	5~12	0.5~0.9
	帕延			TTK-TCTK	3.5	11~19	0.2~0.54
	里山			TTK-TCTK	1~3	7~15	0.2~0.3
	马洛-塔古尔			CTK-TCTK	2.5~5.0	2~8	0.4~1.5
	基吉			TTK-TCTK	2~4	7~18	0.16~0.5
	哈克特格			TTK-TCTK	4.3	8~14	0.15~0.52
	吉多依			TTK-TCTK	0.9~2.0	12~16	0.02
	阿尔申吉叶夫			TTK-TCTK	3.0~3.5	3~8	0.1~0.45
	斯留金			TCTK-TTK	2.0~2.5	5~15	0.6~0.95
	唯吉姆康			TCTK-TTK	2~3	5~11	0.67~1.0
	齐涅			TTK-TCTK	6	8~12	0.7~1.37
	安格莎			TTK-TCTK	2.5	7~14	0.1~0.7
	朱格朱尔			TTK-TCTK	2~4	14~20	0.06~0.3
澳大利亚	新南威尔士						(0.2~1.5)
	巴拉姆比	400		TTK-TCTK	1.7	29	1.2
	文多维	40		TTK-TCTK	5	7.5	1.6

续表 1-1

国家和 地区	矿床名称或所在地	储量/万吨		矿 石		精矿中含量/%	
		富矿	贫矿	类型	Fe/TiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
澳大利亚	西部钛铁矿						(0.2~0.5)
新西兰	北岛						0.3~0.5
智利							<0.5

注: 1. TTK—钛铁矿, TCTK—钛磁铁矿, CTK—磁铁矿, GTK—钙钛矿, LHS—磷灰石。

2. 含量有括弧的为原矿。

### 1.1.2 我国钒钛磁铁矿分布情况

我国铁矿资源的现状是总量丰富但矿石含铁品位较低。目前已探明储量的矿区有 1834 处, 总保有储量矿石 463 亿吨, 居世界第 5 位。铁矿在全国各地均有分布, 以东北、华北地区资源为最丰富, 西南、中南地区次之。就省而言, 探明储量辽宁位居榜首, 河北、四川、山西、安徽、云南、内蒙古次之。中国铁矿以贫矿为主, 富铁矿较少, 富矿石保有储量在总储量中占 2.53%, 仅见于海南石碌和湖北大冶等地。

我国钒钛磁铁矿床分布广泛, 储量丰富, 储量和开采量居全国铁矿的第 3 位, 已探明储量达 300 亿吨以上, 主要分布在四川攀西(攀枝花—西昌), 陕西汉中, 河北承德, 湖北郧阳, 襄阳, 广东兴宁, 山西代县及黑龙江呼玛等地区。

我国现在已探明的主要大型钒钛磁铁矿床有:

(1) 攀西地区钒钛磁铁矿: 位于四川省西南部, 包括攀枝花和凉山州的 20 余个县市。南北长约 300km, 已探明大型、特大型矿床 7 处, 中型矿床 6 处。矿床主要分布在攀枝花的红格、米易白马、安宁、中干沟、湾子田、新街、中梁子等矿区, 凉山州的矿床主要分布在太和、德昌、会理等矿区。2009 年攀西地区钒钛磁铁矿探明储量约 200 亿吨(按  $TFe \geq 15\%$ 、 $TiO_2 \geq 5\%$  或  $V_2O_5 \geq 0.1\%$  测算), 是全国储量最大的钒钛磁铁矿。

(2) 承德地区钒钛磁铁矿: 主要分布在大庙、黑山、头沟等地, 现已探明的储量 85 亿吨, 是仅次于攀西的全国第二大钒钛磁铁矿。

(3) 广东省兴宁市霞岗钒钛磁铁矿: 近年经普查和详查, 探明矿山远景储量在 4.5 亿吨。

(4) 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, 现已探明  $TiO_2$  储量 210 万吨, 远景储量可达 1 亿吨以上。此外, 陕西省紫阳县境内近年也发现钒钛磁铁矿, 已详查和普查的 5 处矿床, 钛磁铁矿储量达 2.4 亿吨, 且伴生钒、磷等多种有用矿产。

(5) 甘肃大滩钛铁矿: 大滩钛铁矿地处天祝藏族自治县赛什斯镇, 该矿是特大型单一钛铁矿, 具有矿物组分简单、规模巨大、品位低等特点。目前, 共发现 9 个矿区, 55 个矿体, 资源储量 3300 万吨, 其  $TiO_2$  平均品位 6.17%。

### 1.1.3 河北承德地区钒钛磁铁矿资源情况

#### 1.1.3.1 资源分布

承德地区钒钛磁铁矿资源丰富, 在河北省和全国均占有重要地位。主要类型分为大庙式钒钛磁铁矿和超贫钒钛磁铁矿。截止 2006 年年底, 承德地区共探明大庙式钒钛磁铁矿

矿产地 38 处, 保有资源储量可达 3.57 亿吨; 超贫钒钛磁铁矿矿产地 54 处, 保有资源储量可达 78.25 亿吨; 伴生钒、钛、磷等资源储量分别为: 钒 ( $V_2O_5$ ) 金属量 703.06 万吨, 钛 ( $TiO_2$ ) 金属量 1.28 亿吨, 磷 ( $P_2O_5$ ) 矿物量 8218.49 万吨。

承德地区钒钛磁铁矿产于超基性岩体、基性岩体中, 展布于深断裂或大断裂及其附近的次级构造中, 从南到北集中分布于承德南部的密云—喜峰口孤山子次级断裂、中部的红石砬—大庙—娘娘庙深断裂和北部的康保—围场深断裂等三个成矿区带中。其中, 大庙式钒钛磁铁矿主要分布在双滦区大庙至承德县黑山—头沟一带。

超贫钒钛磁铁矿主要分布在宽城县碾子峪—亮甲台、滦平县铁马—喇叭沁、平泉县娘娘庙、隆化县大乌苏沟—龙王庙、双滦区罗锅子沟、丰宁县前营—石人沟和承德县高寺台—岔沟等七大成矿区域。另外, 在围场县朝阳地温珠沟一带也有少量分布。

### 1.1.3.2 资源特点及潜力

钒钛磁铁矿是国际上公认的战略矿产。承德是我国重要的钒钛磁铁矿资源基地, 与四川省攀西地区比较, 承德地区钒钛磁铁矿矿物结晶颗粒粗, 矿石结构松散, 硬度小, 主要含有铁、钒、钛元素, 不含其他稀有元素, 易采易磨易选, 选出的含钒铁精矿品位可达到 60%~65%。承德钢铁公司自 20 世纪五六十年代即开始进行钒钛磁铁矿冶炼, 是我国钒钛磁铁矿冶炼的发祥地。

依据矿体赋存状态, 大庙式钒钛磁铁矿多采用地采方式开采, 但占承德地区绝大部分的超贫钒钛磁铁矿多为大、中型矿床, 开采技术条件简单, 适于露天开采, 规模开发, 多数采选企业实现了零排放, 采选对当地及区域水环境影响较轻。此外, 超贫钒钛磁铁矿选矿企业尾矿排放量虽然很大, 但尾矿中富含磷元素, 有利于植物生长, 易于恢复治理, 开发利用对矿区生态环境影响不大。

## 1.1.4 攀枝花地区钒钛磁铁矿资源情况

### 1.1.4.1 资源分布

攀西地区钒钛磁铁矿资源极为丰富, 主要以攀枝花钒钛磁铁矿为主。有最新数据显示, 攀西地区钒钛磁铁矿探明储量已达 600 多亿吨, 预计储量可达 1000 亿吨以上 (按  $TFe \geq 10\%$ 、 $TiO_2 \geq 5\%$  或  $V_2O_5 \geq 0.1\%$  测算), 可开发 300 年, 是我国重要的铁矿石基地之一。铁矿储量占全国的 25% 以上, 其中钛资源储量占全国的 90% 以上, 占世界钛储量的 35% 以上。钛资源储量居世界首位, 钒资源储量居世界第三位, 全国第一位, 铬资源储量占全国第一位。其中主要有攀枝花、红格、太和及白马 4 大矿床, 都属于大型或特大型矿床, 均产于基性及超基性岩体中。

### 1.1.4.2 资源特点及潜力

攀枝花钒钛磁铁矿的矿物成分较为特别: (1) 矿体与岩体的矿物组成基本一致, 只是含量不同而已; (2) 含铁矿物种类较多, 以钛磁铁矿为主, 其次是钛铁矿、硫化物、硅酸盐矿物 (主要是斜长石、辉石), 次生的矿物有磁赤铁矿、赤铁矿、褐铁矿和绿泥石等。其中钛磁铁矿是一种复合矿物相, 是固溶体分解形成的产物, 溶剂矿物是磁铁矿, 溶质矿物是钛铁晶石、微片晶状钛铁矿、镁铝尖晶石等。钛磁铁矿是最主要的含铁工业矿物, 也是钛、钒、铬、锰等组分的主要载体矿物。

多年大量研究表明,攀西地区的钒钛磁铁矿主要以铁为主,并含有丰富的钒、钛、铬、镓、钴、镍、钨、铜、硫、磷、锰、硒、碲、铂族元素等多种有用伴生成分,实际上均为以铁为主的大型金属矿床,具有很高的综合利用价值。其化学成分见表 1-2。

表 1-2 钒钛磁铁矿三种选矿新产品的化学成分

类 别	化学成分/%						
	Fe	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Co	Ni	S	P
铁钒精矿	51.56	12.73	0.564	0.020	0.013	0.53	0.004
钛精矿	31.56	47.53	0.68	0.016	0.006	0.25	0.01
硫钴精矿	49.01	1.62	0.282	0.258	0.192	36.61	0.019

目前,攀枝花市从事钒制品生产的企业就有 17 家。钒产品成系列,品种最多,包括钒渣、工业五氧化二钒、高纯五氧化二钒、三氧化二钒、多钒酸铵、钒氮合金(氮化钒)、钒铁(中钒铁 FeV50、高钒铁 FeV80)、硫酸氧钒等。钒制品的国内市场占有率达到 60%,国际市场占有率达到 15%,已成为国内第一、世界第二的钒产品生产基地。钛精矿生产厂共有 50 余家,钛精矿生产能力超过 160 万吨,是国内最大的钛精矿生产基地,国内市场占有率 50% 左右;钛渣生产企业有 9 家,总产能 25 万吨/年;生产钛白的企业 9 家,钛白粉产能 33.5 万吨/年,占全国的 13.5%,总生产能力和生产规模已位居全国第一。

2001 年 12 月 18 日,国家科技部批准攀枝花为国家新材料成果转化及产业化基地。2008 年 7 月 19 日,攀枝花市被中国矿业联合会授予“中国钒钛之都”称号。“十二五”期间,攀枝花市将打造“千亿钒钛产业”,建成世界一流高水平战略资源开发基地。

### 1.1.5 钒钛磁铁矿资源开发利用情况

经过广大科技工作者几十年的技术攻关,攀枝花钒钛磁铁矿、承德钒钛磁铁矿高炉冶炼已实现了铁、钒元素的回收利用,突破了关键技术,形成了钒钛磁铁矿高炉-转炉流程的大规模工业生产,生产出了大量钢材及钢铁产品,为国民经济发展和地方经济建设做出了突出贡献。

高炉-转炉流程处理钒钛磁铁矿的主要优点是生产效率较高、规模大;主要缺点:一是“为取铁钒而丢掉了钛”,附产大量高钛型高炉渣,造成钛资源的大量流失,同时对环境造成污染和大的环保压力;二是工艺流程较长,生产成本较高,同时还必须以宝贵的焦炭作原料,限制了高炉流程的可持续发展。虽经多年研究和攻关,但对这种高钛型高炉渣仍没有得到科学合理的大规模应用,特别是攀钢高炉附产的大量高钛型高炉渣(含二氧化钛 22%~25%)堆积在金沙江边渣场,既对环境造成大的压力,又未能大规模提钛利用。

攀枝花钒钛磁铁矿资源大规模工业化开发利用始于 20 世纪 70 年代。在当时的历史条件下,主要以获得钢铁和钒作为开发的主攻方向。从 1970 年 7 月 1 日攀钢高炉投产到现在,每年高钛型高炉渣产量达 300 多万吨,目前已经堆积了上亿吨。这一方面造成了钛资源的严重浪费,另一方面又形成了巨大的环境压力,严重影响长江中上游地区的生态环境。

综上所述,随着钒钛磁铁矿综合利用技术的进步以及环保要求的日益提高,迫切需要

开发新的钒钛磁铁矿处理工艺技术,以克服高炉冶炼工艺存在的固有缺点。

## 1.2 钒钛磁铁矿选矿工艺概况

中国各类型钒钛磁铁矿石究其矿物成分,则大同小异。主要有用矿物有钛磁铁矿、钛铁矿、黄铁矿及磁黄铁矿等;脉石矿物主要有辉石、长石、橄榄石等。按其选矿性质则可分为钛磁铁矿、钛铁矿、硫化矿及脉石四大类。通过合理分选过程,将能获得铁精矿、钛精矿、硫化物精矿及脉石(尾矿)等选矿产品。

中国钒钛磁铁矿石选矿研究工作,到目前为止约有数百篇试验研究报告及文献资料,也有一定数量的文章公开发表。至今,已建成的钛磁铁矿选矿厂有攀矿公司选矿厂、太和铁矿选矿厂、双塔山选矿厂、黑山选矿厂及原攀钢-西昌410选矿试验厂;正在建设的有白马铁矿选矿厂等。随着科学技术及生产实践不断发展,钒钛磁铁矿选矿技术,在选矿工艺、设备、新技术应用及技术经济指标等方面,都在不断地取得新的发展。

多年来,通过攀枝花—西昌地区钒钛磁铁矿选矿研究工作,为开发利用钒钛磁铁矿资源制定了一套较完整的钒钛磁铁矿选矿合理流程。

具体在选别方法上,钒钛磁铁矿的选别工艺包括重选、磁选、浮选和电选等方法。对钒钛磁铁矿的分选,采用磁选工艺最合理,也最广泛。

### 1.2.1 重选

#### 1.2.1.1 概述

不同物料颗粒间存在密度差异,利用其在运动介质中所受重力、流体动力和其他机械力的不同,实现按密度分选矿粒群的过程称为重选(gravity concentration),粒度和形状亦影响按密度分选的精确性。

分选介质:水、重介质和空气,常用的是水。

在缺水干旱地区或处理特殊原料时可用空气,即风力分选。

在密度大于水或轻物料密度的重介质中分选,即重介质分选。

#### 1.2.1.2 重介质种类

重介质包括重液、悬浮液和空气重介质。

重液:密度大于水的液体或高密度盐类的水溶液。

悬浮液:固体微粒与水的混合物。

空气重介质:固体微粒与空气的混合物。

水、空气、重液是稳定介质;悬浮液、空气重介质是不稳定介质。重选的特点是生产成本低,对环境污染少,因而备受重视。目前在提高重选效率、研制及使用新设备方面有了新进展。

#### 1.2.1.3 基本原理

重选基本规律可概括为:松散—分层—分离。松散和运搬分离几乎是同时发生的;松散是分层的条件,分层是目的,而分离则是结果。

最早,从20世纪50年代研究从磁选尾矿中回收铁矿就是由重选法开始的。在开展重选



法回收铁矿时，一般可以依据分选系数公式预先近似地评价矿物间分选的难易程度。利用重选方法对物料进行分选的难易程度可简易地用待分离物料的密度差判定，根据式 (1-1)：

$$\eta = \frac{\delta_2 - \Delta}{\delta_1 - \Delta} \quad (1-1)$$

式中  $\eta$ ——分选系数；

$\delta_1$ ——轻矿物密度， $\text{g}/\text{cm}^3$ ；

$\delta_2$ ——重矿物密度， $\text{g}/\text{cm}^3$ ；

$\Delta$ ——分选介质密度， $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

根据  $\eta$  值结合表 1-3 来确定矿物的难选或易选。

表 1-3 矿物按密度分离的难易度

$\eta$ 值	$\eta > 2.5$	$2.5 > \eta > 1.75$	$1.75 > \eta > 1.5$	$1.5 > \eta > 1.25$	$\eta < 1.25$
难易度	极易选	易选	可选	难选	极难选

#### 1.2.1.4 重选方法

根据介质运动形式和作业目的的不同，重力选矿可分为：重介质选矿、跳汰选矿、摇床选矿、溜槽选矿和水力分级。

重选过程的共同特点：

- (1) 矿粒间必须存在密度（或粒度）的差异；
- (2) 分选过程在运动介质中进行；
- (3) 在重力、流体动力及其机械力的综合作用下，矿粒群松散并按密度分层；
- (4) 分层好的物料，在运动介质的运搬下达到分离，并获得不同的最终产品。

根据钒钛磁铁矿石特点主要介绍两种常用的重选方法：螺旋工艺和摇床工艺。

##### A 螺旋工艺

螺旋选矿机内，物料之所以得到分选，主要是受水流特性的影响。在螺旋槽面的不同半径处，水层的厚度和平均流速不同。越向外缘水层越厚、流速越快。随着流速的变化，水流在螺旋槽内表现为两种流态，即靠近内缘的层流和靠近外缘的紊流。

螺旋分选分离经过以下三个主要阶段：

第一阶段为分层阶段，在紊流作用下，重颗粒逐渐进入下层，轻颗粒逐渐进入上层。这一阶段在第一圈后初步完成。

第二阶段是分层结束的轻重颗粒的横向展开、分带过程。离心加速度较小的底层重颗粒向内缘运动，上层的轻颗粒向中间偏外运动，而悬浮的细泥则被甩向最外缘。流体的横向循环和螺旋面的横向坡度对这种分布具有重要的影响。随着回转运动次数的增加，不同的颗粒逐渐达到稳定运动的过程。

第三阶段即平衡阶段，不同性质的物料颗粒沿着各自的回转半径运动，分选过程完成，此后的运动将失去实际意义。

螺旋选矿机是综合利用重力、摩擦力、离心力和水流特性，使矿粒按密度、粒度、形状分离的一种斜槽选矿设备，其主体是一个 3~5 圈的螺旋槽，用支架垂直安装，如图 1-1 所示。

分选原理：槽的断面呈抛物线或椭圆形的一部分，见图 1-2。矿浆自上部给入后，在沿槽流动过程中，矿粒按密度发生分层，底层重矿物运动速度低，在槽的横向坡度影响下