

中国

钒钛磁铁矿选矿

朱俊士 主编

ZHONGGUO
FANTAI
CITIEKUANG
XUANKUANG

冶金工业出版社

中国钒钛磁铁矿选矿

朱 俊 士 主 编

冶金工业出版社

内 容 提 要

本书全面地总结了我国钒钛磁铁矿选矿科学研究及生产实践知识,内容包括资源、工艺矿物学、选矿技术、生产实践及新技术应用等方面。本书内容丰富、资料翔实,具有较强的实用性及应用理论基础。

本书可供矿产资源开发利用人员,选矿专业科技人员及专业管理人员学习参考,也可作为大专院校有关专业师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

中国钒钛磁铁矿选矿 / 朱俊士主编. —北京: 冶金工业出版社, 1995

ISBN 7-5024-1812-1

I. 中… II. 朱… III. 钒钛磁铁矿-选矿-中国 IV. TD951

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 22230 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

北京昌平长城印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1996 年 7 月第 1 版, 1996 年 7 月 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 27.25 印张; 660 千字; 426 页; 1-1200 册

48 元

主 编

朱俊士

副 主 编

刘吉实 董学恩 丁斯华

编写组成员

丁良茗 丁斯华 丁大富 朱俊士 朱家骥 刘吉实
苏 波 陈正学 程希翱 董学恩 黄淦祥

责任编辑：黄淦祥

前 言

钒钛磁铁矿资源，在中国得天独厚，十分丰富。我国对这类资源开发利用中的选矿研究及生产实践，获得了大量试验研究资料及较高水平的科研成果。这就使得有可能对我国钒钛磁铁矿石选矿进行系统地分析、研究及总结其特征与规律，以利于钒钛磁铁矿全面开发利用。

因此，我们决定要编写一部《中国钒钛磁铁矿选矿》专著。特邀国内多年从事钒钛磁铁矿石选矿研究单位、生产厂矿的科技专家参加撰写，并议定本书要充分利用各单位及作者多年积累的大量选矿科学研究成果及实践经验，加以总结提高，写出一本内容全面及有一定深度的钒钛磁铁矿选矿专著，为国内外钒钛磁铁矿石选矿研究、生产及开发提供借鉴。

本专著实际上是全国钒钛磁铁矿选矿工作者辛勤劳动的结晶，它总结了我国钒钛磁铁矿选矿的最新成果及工业实践知识。在进行编著出版全过程中，得到冶金工业部科技司、攀钢（集团）矿业公司选矿厂（简称攀矿公司选厂-后同）、承德钢铁公司、攀钢集团公司西昌分公司（简称西昌攀钢410厂）、长沙矿冶研究院、马鞍山矿山研究院及冶金工业出版社等有关部门的支持及指导。还应说明的是在收集生产资料及编写过程中，得到攀枝花冶金矿山公司、攀枝花钢铁公司及承德钢铁公司等选矿工作者的热情协助，尤其得到于又川、王鸿钧、韩启盛、闫子雪、孟长春、沈本俊、王安五、马胤等同志的支持并提供资料，在此一并表示深切谢意。

本专著内容丰富，观点明确，有助于科研、教学、设计及生产实际工作，尤其希望能对将来新矿区开发建设提供科学依据。但由于作者水平有限，不足之处一定很多，殷切希望读者不吝示教，以求修正补充，使本专著内容更加充实准确。

本书由攀矿公司刘吉实编写第7章、丁良茗编写第6章的第1及2节、承德钢铁公司丁斯华编写第6章的第3及4节、西昌攀钢410厂董学恩编写第6章的第6节、马鞍山矿山研究院丁大富编写第6章的第5节及合编第4章、长沙矿冶研究院程希翔编写第3章、陈正学编写第5章、朱俊士编写第1、2及4章。冶金部科技司朱家骥组织编委会对本专著初稿进行多次讨论及审查。全书由长沙矿冶研究院朱俊士主编，并负责全书的校正。黄淦祥对全书稿作了整理。

值此本专著出版之际，对资助本专著出版的长沙矿冶研究院、攀矿公司、承德钢铁公司及西昌攀钢410厂致以谢意。

编 著 者

一九九五年七月

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 钒钛磁铁矿选矿及其重要意义	1
1.3 钒钛磁铁矿资源开发成就及发展	2
2 钒钛磁铁矿矿产资源	3
2.1 概述	3
2.2 成矿特征及矿床类型	3
2.3 攀枝花-西昌地区钒钛磁铁矿矿床	4
2.3.1 矿石中主要金属矿物组分特征	6
2.3.2 矿石中有益组分的分布特征	10
2.4 承德大庙钒钛磁铁矿矿床	12
3 钒钛磁铁矿工艺矿物学研究	14
3.1 矿石自然类型及工业品级	14
3.1.1 矿石自然类型	14
3.1.2 矿石工业品级	14
3.2 矿石的结构构造	15
3.3 矿石物质成分及赋存规律	18
3.3.1 矿石化学成分	18
3.3.2 矿物组成及矿物学特征	19
3.4 有益元素赋存状态及其分配规律	46
3.4.1 有益组分的赋存状态	46
3.4.2 主要组分的分配规律与选矿理论指标	64
3.5 矿物工艺特性	67
3.5.1 矿物物理性质	67
3.5.2 矿物粒度特性	78
3.5.3 矿物解离分析与选矿合理技术指标	82
3.6 钛铁矿晶体化学、晶体结构特征及其可浮性	91
3.6.1 晶体结构特征	91
3.6.2 钛铁矿表面性质与可浮性关系	93
3.6.3 钛铁矿表面与苯乙腈磷酸的键合机理	96
3.6.4 硫酸的活化作用	99
3.7 选矿产品工艺矿物分析	102
3.7.1 磁选尾矿的工艺矿物研究	102

3.7.2	电选产品矿物分析	106
4	钛磁铁矿选矿技术	112
4.1	概述	112
4.2	矿石破碎磨矿性质及工艺	112
4.2.1	矿石物理性质	112
4.2.2	矿石性质与破碎磨矿功耗规律	113
4.2.3	矿石可磨度研究	114
4.2.4	破碎磨矿工艺	119
4.3	选矿工艺流程	121
4.3.1	钒钛磁铁矿选矿过程的主要基本特性	122
4.3.2	一段磨矿磁选工艺流程	128
4.3.3	阶段磨矿磁选工艺流程	138
4.3.4	极贫矿石(表外矿石)磁选工艺流程	143
4.3.5	铁(钒)精矿产品特性	161
4.4	主要选矿技术装备	170
4.4.1	破碎设备	170
4.4.2	磨矿分级设备	173
4.4.3	磁选设备	175
4.4.4	脱水设备	178
5	钛铁矿及伴生硫化矿选矿技术	183
5.1	概述	183
5.2	物料性质	183
5.3	重选法	186
5.4	浮选法	193
5.4.1	硫化矿物浮选	194
5.4.2	钛铁矿浮选	198
5.5	联合分选法	205
5.5.1	重-浮选联合法	205
5.5.2	重-电选联合法	205
5.5.3	强磁-浮选法	213
5.5.4	强磁-重选-电选法	222
5.5.5	强磁-重选法	224
5.5.6	分级联合选矿法	224
5.5.7	工业型设备研制	227
5.6	微细粒钛铁矿浮选行为研究	237
5.6.1	试样及试验方法	237
5.6.2	苯乙烯膦酸浮选钛铁矿	237
5.6.3	水杨羟膦酸浮选钛铁矿	241
5.6.4	水杨羟膦酸与钛铁矿的作用机理	245

5.6.5	自载体浮选研究	247
5.6.6	钛铁矿、长石絮凝行为的研究	249
5.7	钛精矿产品特性	253
5.7.1	钛精矿化学成分及其工艺特性	253
5.7.2	钛精矿加工工艺特性	254
6	钒钛磁铁矿石选矿生产	255
6.1	攀矿公司选矿厂	255
6.1.1	概况	255
6.1.2	矿床、矿石及矿物	256
6.1.3	建厂前选矿试验研究及设计	258
6.1.4	选矿厂生产	264
6.1.5	生产沿革及技术进步	271
6.2	攀矿公司选钛厂	280
6.2.1	概况	281
6.2.2	矿石及矿物	281
6.2.3	建厂前选矿试验研究及设计	282
6.2.4	选钛厂生产调试	291
6.2.5	选钛厂生产	293
6.2.6	生产沿革及技术进步	299
6.3	双塔山选矿厂	302
6.3.1	概况	302
6.3.2	矿床、矿石及矿物	302
6.3.3	建厂前后选矿试验研究及设计	303
6.3.4	选矿厂生产	306
6.3.5	生产沿革及技术进步	314
6.3.6	生产技术经济及设备总表	324
6.4	黑山选矿厂	329
6.4.1	概况	329
6.4.2	矿床、矿石及矿物	329
6.4.3	建厂前后选矿试验研究	330
6.4.4	选矿厂生产	334
6.4.5	生产沿革及技术进步	338
6.5	太和铁矿选矿厂	339
6.5.1	概况	339
6.5.2	矿床、矿石及矿物	339
6.5.3	建厂前选矿试验研究及设计	339
6.5.4	选矿厂生产	341
6.6	西昌攀钢410厂选矿车间	343
6.6.1	攀枝花兰家火山及太和矿石选矿工业试验	343

6.6.2 红格矿选矿工业试验	362
6.6.3 白马矿选矿工业试验	396
6.6.4 选矿生产	400
7 钒钛磁铁矿选矿新技术及发展方向	411
7.1 选矿工艺流程中引入筛分作业的试验研究	411
7.1.1 螺旋分级机返砂磁选试验	411
7.1.2 球磨与细筛闭路磨矿磁选流程试验	412
7.1.3 磁选工艺流程中加筛分作业试验	414
7.2 利用剩磁的聚团作用进行分选的研究	416
7.3 大筒径非均匀场强永磁磁选机的研究	416
7.3.1 不同规格的永磁磁选机的试验	418
7.3.2 磁选机磁系结构选择的试验研究	419
7.3.3 工业生产连续对比考查试验	420
7.4 磁选尾矿分级作业的研究	421
主要参考资料	425

1 绪 论

1.1 概 述

社会发展和科学技术的进步,都与矿产资源的开发利用有密切的关系。现代工业的发展,无不以矿产资源为基础。同时,随着社会发展,对矿产资源的消耗量与日俱增。1993年世界铁矿石产量已达9.7亿t以上,同年中国铁矿石产量为2.23亿t。这就为钢铁工业发展提供了可靠的物质基础。钢铁工业又是发展其他工业的基础。由此可见,铁矿资源开发利用的重要意义。

在中国铁矿资源中,蕴藏着极其丰富的钒钛磁铁矿。四川攀枝花-西昌地区是中国钒钛磁铁矿的主要成矿区,也是世界上此类矿床的重要产区之一。其将来发展更会显现出它的重要地位,前景十分可观与广阔。

根据中国建设攀枝花钢铁基地的战略计划,前后于1958年及1964年开始对攀枝花-西昌地区钒钛磁铁矿进行了大规模的选冶试验,制定出选矿-烧结-高炉冶炼高钛型铁精矿-提钒-转炉炼钢的生产工艺流程,并于1970年建成一处现代化的钢铁基地^[1]。

攀枝花钒钛磁铁矿选矿厂生产原矿规模为1350万t/a,产铁(钒)精矿588万t/a;选钛厂生产钛精矿规模为10~20万t/a。

承德双塔山钒钛磁铁矿选矿厂生产原矿规模为100万t/a,产铁(钒)精矿40万t/a,产钛精矿0.5万t/a左右。

1.2 钒钛磁铁矿选矿及其重要意义

钒钛磁铁矿资源的开发利用,首先是矿石分选,其主要目的是将矿石中有价矿物,按其不同性质,分选成各类产品。也就是将其富集成适于高炉冶炼的铁精矿(人造富矿),同时回收各种金属产品,如钛精矿及硫钴镍精矿等,并使其适宜下步冶炼过程的要求。

近代选矿技术的发展,为分选富集钒钛磁铁矿提供了技术保证。磁力选矿技术能大规模的从矿石中分选出含钒的钛磁铁矿产品(铁精矿),在下面有关章节中将详细论述这一选矿产品的各种特性。由于这种铁精矿大量的产出和高炉冶炼技术的进步,在中国西南攀枝花地区兴建起一座大型现代化的钢铁基地,成功的生产出优质钢材及钒产品。这一工业基地正在辐射着这一地区及国内其他地区工业的发展。重力选矿及电力选矿技术的发展与应用,促使矿石中钛铁矿能有效地分选出钛铁矿产品(钛精矿),它的特征也可见下面有关章节的详细论述部分。它是用途广泛的一种产品,其主要用途是制金属钛及制作钛白工业的原料。金属钛及其合金,广泛应用于航天、航空、造船及化工耐腐蚀工业;钛白广泛用于涂料、塑料、造纸、化纤、橡胶、油墨、搪瓷、电焊条、玻璃等工业部门。钛铁矿在冶炼工业中也被用作护炉剂,起到保护炉衬及延长炉龄的作用等。钒钛磁铁矿中富含硫、钴、镍、铜及铂族元素,多呈硫化物存在,可应用浮选技术富集成含多种有价组分的硫化物精矿,它是提取上述

元素的原料, 将能开发出相应产业。由此可见, 中国钒钛磁铁矿资源开发及利用, 将为中国经济建设及国内外相关产业提供雄厚的物质基础。

1.3 钒钛磁铁矿资源开发成就及发展

中国钒钛磁铁矿资源开发利用研究工作一直列为国家重点科研项目, 并取得很大成绩。尤其是攀枝花-西昌地区钒钛磁铁矿资源综合利用科研和工业生产取得了一系列重大科研成果^[3]。

专家们首先对钒钛磁铁矿进行了大规模的选冶试验, 解决了世界上尚未解决的高炉冶炼高钛型铁(钒)精矿的技术难题, 正常地生产出生铁; 同时, 从铁水中生产出标准的钒渣, 建立起一套完整的钒钛磁铁矿选冶工艺。

从选铁(钛磁铁矿)尾矿中, 攻克了尾矿选钛(钛铁矿)技术关键, 选出优质的钛精矿, 发展了原生钛铁矿选矿技术; 钛精矿产品成功的制成海绵钛和钛白, 推进了中国高档钛白和镁法海绵钛的生产。

从选钛过程中同时得到的硫化物精矿(含硫、钴、镍、铜、铂族元素等产品)除制取氧化钴、氧化镍外, 还成功地开展各种应用研究, 为低品位钴、镍及其他有价值组分的回收开辟了新途径。

另外, 从提钒后的渣中回收镓及从提钛的氯化渣中回收钪的技术已经试验成功。

中国钒钛磁铁矿资源开发和发展前景广阔。在攀枝花矿区建设的攀枝花钢铁公司及攀矿公司已形成一定规模, 为国防及建设大西南起到历史性的作用。现在进一步提高攀枝花-西昌地区钒钛磁铁矿资源的综合利用, 应是该地区资源综合开发的下一个战略目标。

攀枝花-西昌地区四个矿区(攀枝花、白马、太和、红格)全部开发, 按有关规划部门计划, 每年可得铁精矿几千万吨, 折合金属超过千万吨, 可供千万吨以上钢铁厂的原料。这当然要考虑到建设需要分期建设, 同时还应考虑为内陆钢铁生产基地保存一定数量的后备资源, 如红格矿区可暂不开发, 做为该地区的后备钢铁资源; 白马矿区可先行开发, 因为白马矿含钛低, 比较适合高炉冶炼流程。目前生产中, 应加速全面开发回收钛铁矿的工作, 这样, 当生产千万吨以上原矿时, 可以获得含二氧化钛 47~48%的钛精矿几十万吨, 同时获得含钴 0.3%, 镍 0.25%, 硫 35%的硫钴镍精矿 5 万 t 以上^[2]。

中国钒钛磁铁矿资源开发利用, 已经取得举世瞩目的成就, 但由于资源的特殊性, 还有许多科研课题需要解决。充分实现铁、钛、钒分离和镓、钪的提取以及高炉渣的合理利用等问题的解决^[1], 对目前生产发展至关重要, 同时, 为国内外钒钛磁铁矿的开发利用创造更好的前景及借鉴。

2 钒钛磁铁矿矿产资源

2.1 概 述

钒钛磁铁矿矿床在中国分布广泛,储量丰富,储量和开采量居全国铁矿的第三位,已探明储量 61.9 亿 t,占全国探明铁矿总储量的 11.6%^[4]。此类矿床主要分布在四川攀枝花-西昌地区,河北承德地区,陕西汉中地区,湖北郧阳,襄阳地区等。大地构造位置上多产在地台区、地台边缘或地槽褶皱带中。含矿岩体呈带分布,受区域内的深大断裂带控制^[5]。

四川攀枝花-西昌地区是中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。该成矿带南北长约 300km,已探明大型、特大型矿床 7 处,中型矿床 6 处,矿石中铁、钛、钒等多种可供综合利用的组分都具有巨大的资源优势^[6]。

河北承德地区钒钛磁铁矿床已开发数十年之久,从本世纪 50 年代起就是承德钢铁公司的原料基地,现有大庙及黑山二处矿床在开发利用。

陕西及湖北等地钒钛磁铁矿资源已作过大量地质工作,都具有一定规模和远景。

在中国对如此巨大的钒钛磁铁矿床资源开展的地质、选矿、冶炼及综合利用研究十分成功,为开发及合理利用打下了基础。四川攀枝花-西昌地区钒钛磁铁矿资源的存在及开发研究,曾对中国西南建设的决策起到历史性的作用。

2.2 成矿特征及矿床类型

钒钛磁铁矿矿床主要产在基性、超基性侵入岩中,矿石以富含铁钛为特征。矿床的形成与基性、超基性杂岩体有密切关系。矿体产在岩体内的一定部位。含矿岩体的岩石类型为富铁质超基性岩及基性岩^[8]。按矿床生成方式可分为晚期岩浆分异型矿床及晚期岩浆贯入型矿床。含矿岩石组合类型有辉长岩型及辉长岩-辉石岩-橄辉岩型等。中国钒钛磁铁矿矿床类型如表 2-1 所列^[5]。

表 2-1 中国钒钛磁铁矿矿床类型

成因类型	岩石组合类型	典型矿床
晚期岩浆分异型	辉长岩型	四川攀枝花、太和
	辉长岩-橄辉岩-橄辉辉长岩型	四川白马、巴洞
	辉长岩-辉石岩-橄辉岩型	四川红格
	辉长岩-苏长岩型	陕西毕机沟、望江山
	辉绿岩型	陕西铁佛寺-桃园
晚期岩浆贯入型	斜长岩-辉长岩-苏长岩型	河北太庙、黑山

2.3 攀枝花-西昌地区钒钛磁铁矿矿床^[6~8]

矿区成矿带分布在扬子板块西部, 该区从加里东期到燕山期, 经历了一次大陆裂谷的发生、发展、消亡的重大地质事件, 伴随有基性超基性岩侵入-玄武岩喷发-碱性岩侵入、喷发的大规模岩浆活动。含钒钛磁铁矿基性、超基性岩为幔源碱性玄武岩浆的深层侵入体, 形成于裂谷发育早期的慢隆两侧, 受引张性的东支安宁河断裂及两支攀枝花断裂等深断裂所控制, 侵位于前震旦系或震旦系以碳酸盐岩为主的地层中, 侵入年代大致为 3.4~5.6 亿年, 即加里东-华力西早期。慢隆中心在攀枝花-米易一带, 形成红格、攀枝花、白马、太和等特大型矿床。其区域地质略图见图 2-1。

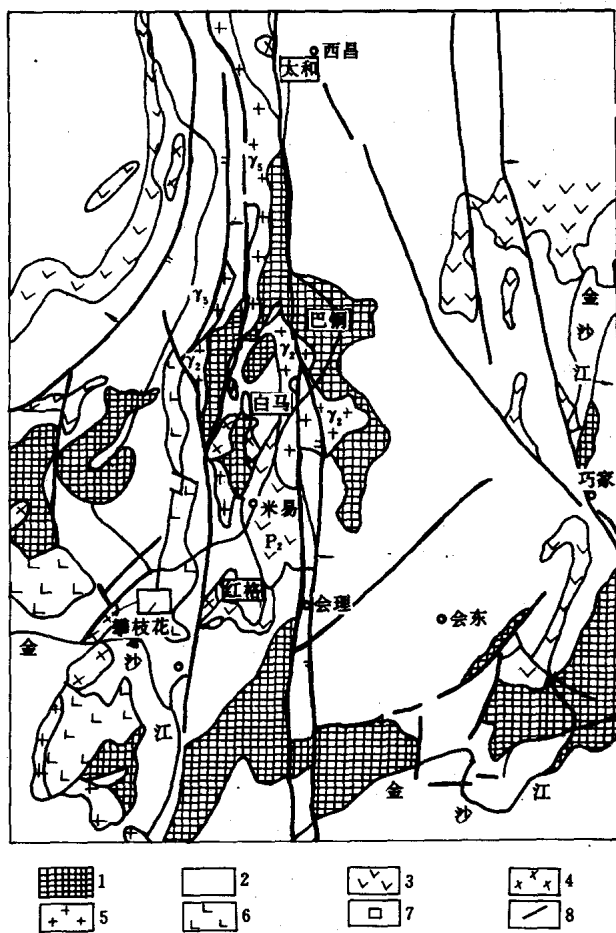


图 2-1 攀枝花-西昌区域地质略图

(据地科院矿床所)

1—前震旦系; 2—震旦系及古生代地层; 3—二叠系玄武岩; 4—基性岩; 5—花岗岩类。
 γ_5 为中生代花岗岩, γ_2 为元古代花岗岩; 6—闪长岩; 7—大型钒钛磁铁矿矿床; 8—主要断裂

攀枝花、白马、太和等含钒钛磁铁矿岩体为基性岩, 即辉长岩型; 红格等含钒钛磁铁矿岩体为基性-超基性岩, 即辉长岩-辉石岩-橄辉岩型。其含矿层状岩体岩相对比见图 2-2 所示。

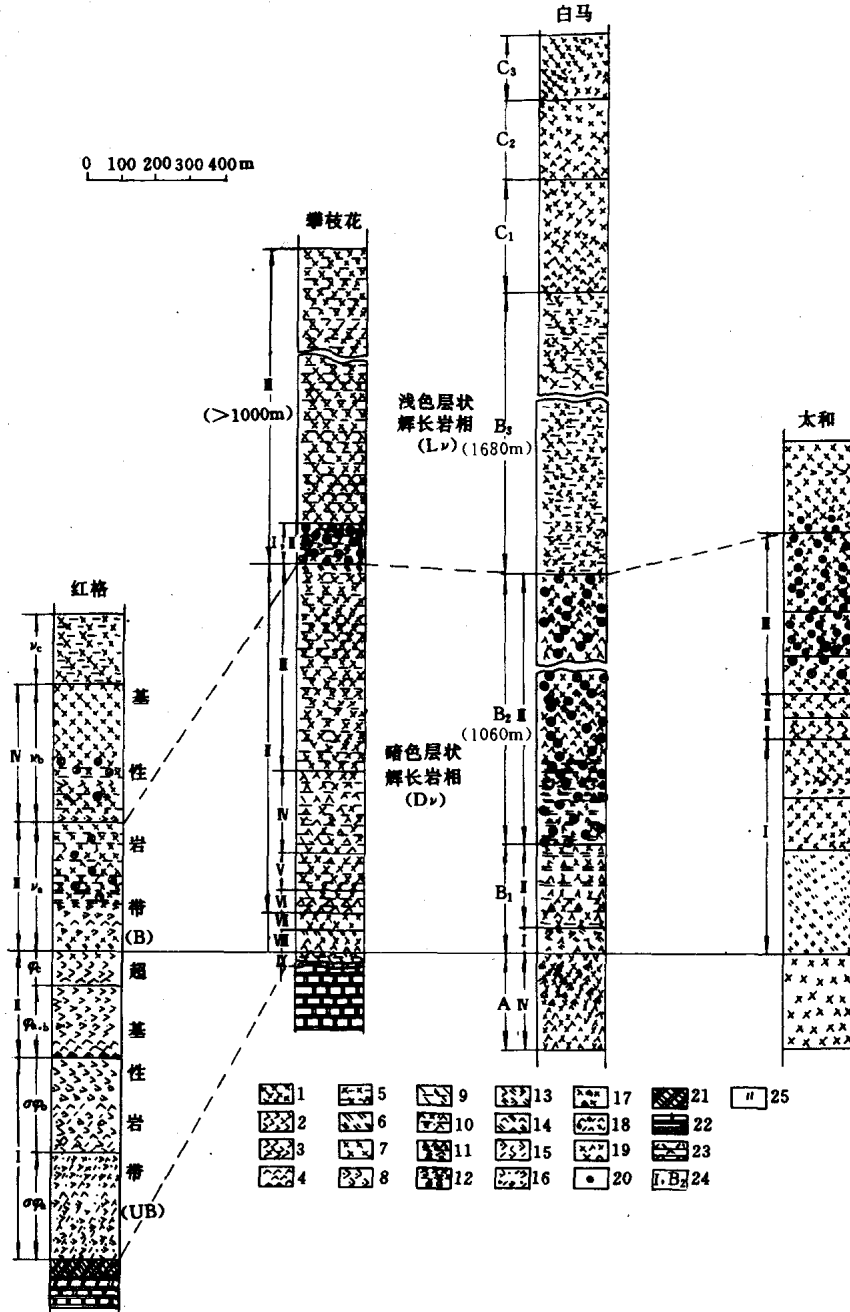


图 2-2 攀西地区含钒钛磁铁矿层状岩体柱状对比图

1—辉长岩；2—辉石岩；3—含长辉石岩；4—橄辉岩；5—黑云母辉长岩；6—斜长岩；
 7—粗-伟晶辉长岩；8—辉橄岩；9—流状含橄辉长岩；10—流状橄辉长岩；11—条
 带状橄辉长岩；12—条带状橄岩；13—斜长橄辉岩；14—斜长橄岩；15—角闪橄
 辉岩；16—色橄角闪橄辉岩；17—橄长岩；18—包橄角闪橄辉岩；19—橄辉长岩；20—
 磷灰石；21—角岩；22—大理岩；23—角闪片岩；24—II、III级韵律层编号；25—含矿带编号

两种岩体地质特征基本相同，只是在基性-超基性岩体矿石中除铁、钛、钒外，伴生的
 铬、钴、镍及铂族组分含量较高。

岩体多呈巨大的单斜层状或岩盆状侵入前寒武纪变质岩系中如图 2-3 所示。

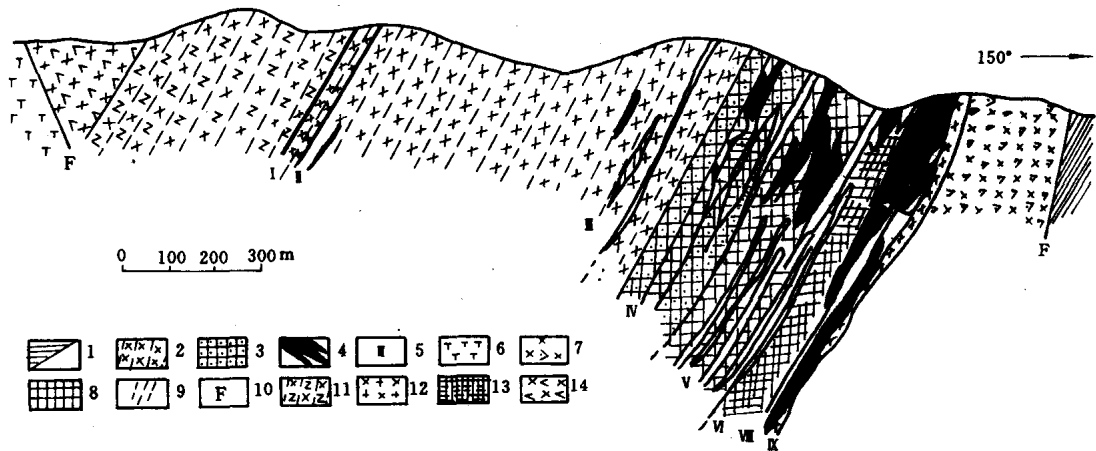


图 2-3 攀枝花矿床地质剖面图

(据四川 106 地质队资料)

- 1—上三叠统砂页岩；2—暗色片麻状辉长岩；3—层状含铁辉长岩；4—致密状矿体；
5—矿带编号；6—角闪正长岩；7—底板围岩即条纹状辉石斜长角闪岩；8—稀疏浸染状矿体；9—辉长岩层状构造；10—断层；11—浅色片麻状辉长岩；12—伟晶辉长岩；
13—稠密浸染状矿体；14—角闪辉长岩

岩体向深部基性程度增高，常显示韵律性的变化。从上到下斜长石含量逐渐降低且基性程度逐渐增高，辉石和橄榄石含量逐渐增加，因此，岩体上部为辉长岩，下部则多为橄辉岩及橄岩，矿物颗粒也随之增大。伴生金属含量也自上而下递增，上部矿体较贫，富矿体主要在岩体下部。属典型的层状火成堆积杂岩。矿床的形成是含矿岩浆不断脉动上侵及液态分异与结晶重力分异的产物，成岩及成矿是紧密相关的连续过程。矿床系岩浆结晶分异而成，金属矿物形成于岩浆结晶的晚期，属晚期岩浆分异—分凝矿床。

2.3.1 矿石中主要金属矿物组分特征

攀枝花—西昌地区钒钛磁铁矿是一种含铁、钛、钒为主并伴生有少量铬、镍、钴、铂族、铀等多种可综合利用组分的矿产。矿石中各种组分平均值如表 2-2 所示。

表 2-2 攀枝花—西昌地区钒钛磁铁矿石中各类型矿石各种组分平均值 (%)

品级	矿田	TFe	TiO ₂	V ₂ O ₅	MnO	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Co	Ni	Cu	S	Ga
岩石	H	12.05	3.69	0.11	0.16	6.92	8.74	2~15.5	0.004	1.011	0.005	0.009	0.005	0.301	
	B	13.38	3.16	0.13	0.18	6.74	9.50	5~21.5	0.085	0.129	0.009	0.023	0.022	0.205	0.0020
	T	12.29	3.50	0.12	0.06	7.34	14.75	5~19		0.133	0.002	0.027	0.018	0.108	
Fe ₄	H	16.41	7.39	0.14	0.21	9.67	13.08	5.90	0.113	1.846	0.011	0.030	0.018	0.370	0.0016
	P	16.99	7.76	0.16	0.17	5.80	9.46	2~22.5	0.20	0.092	0.014	0.009		0.25	0.0032
	B	17.29	3.93	0.13	0.21	7.97	8.77		0.034	0.121	0.011	0.022	0.043	0.453	0.0023
	T	18.13	7.72	0.16	0.26	6.97	12.62			1.40	0.005	0.004	0.010	0.406	0.0022
Fe ₃	H	24.07	9.12	0.21	0.23	14.27	9.91	4.71	0.267	0.137	0.018	0.083	0.042	0.633	0.0020
	P	23.87	9.08	0.20	0.16	6.74	8.57	2~14.5	0.169	0.80	0.014	0.015		0.46	0.0033
	B	25.84	5.98	0.25	0.30	10.46	5.98	5~14	0.103	0.062	0.015	0.029	0.031	0.602	0.0021
	T	22.34	9.41	0.17	0.27	8.04	12.59	5~10		0.923	0.007	0.002	0.017	0.518	0.0020
Fe ₂	H	38.38	14.04	0.36	0.30	9.16	3.75	3.90	0.415	0.060	0.024	0.105	0.038	0.435	0.0029
	P	38.00	14.08	0.35	0.24	5.84	3.49	3~7	0.141	0.287	0.017	0.017		0.603	0.0034
	B	34.41	8.17	0.35	0.38	12.51	3.10	5~7	0.07	0.038	0.019	0.070	0.045	0.421	0.0025
	T	39.13	16.17	0.36	0.35	5.57	3.34	5~7		0.218	0.011	0.010	0.017	0.553	0.0029
Fe ₁	P	48.04	16.72	0.44	0.29	4.72	0.74		0.12	0.121	0.023	0.016		0.497	0.0044
	T	46.63	17.05	0.42	0.37	4.39	1.20			0.129	0.013	0.006	0.014	0.183	0.0042

注：H—红格；P—攀枝花；B—白马；T—太和。以下同。

攀枝花-西昌地区钒钛磁铁矿石中, 已知有 90 多种矿物。主要金属矿物有: 钛磁铁矿-铬钛磁铁矿-钛铬铁矿 (统称钛磁铁矿)、钛铁矿、镁铝尖晶石-镁铁尖晶石-铁尖晶石系列、磁黄铁矿、黄铁矿以及少量的黄铜矿、方黄铜矿、墨铜矿、毒砂、镍黄铁矿、钴镍黄铁矿、紫硫镍矿、钴紫硫镍矿、硫钴矿、硫镍钴矿、辉钴矿、辉镍钴矿、针镍矿、砷镍矿、红砷镍矿、方钴矿、砷铂矿、硫钨矿等。主要非金属矿物有: 橄榄石、辉石 (普通辉石-次透辉石, 统称钛普通辉石)、斜长石、钛普通角闪石、黑云母、磷灰石等。主要矿物相对生成顺序如表 2-3 所示。

表 2-3 攀枝花-西昌地区钒钛磁铁矿主要矿物相对生成顺序

生成时期	岩浆作用阶段		伟晶作用阶段	岩浆期后阶段		
	早期岩浆	晚期岩浆		高温热液期	中温热液期	低温热液期
钛磁铁矿						
钛铁晶石-钛铁矿						
钛铈铁矿						
铁尖晶石						
镁尖晶石						
橄榄石						
含钛普通辉石						
磷灰石						
棕色角闪石						
棕色黑云母						
基性斜长石						
透辉石, 次透辉石						
磁黄铁矿						
镍黄铁矿						
黄铁矿						
黄铜矿						
角闪石						
黑云母						
滑石						
蛇纹石						
绿帘石、黝帘石						
绿泥石						

2.3.1.1 钛磁铁矿

钛磁铁矿是主要含铁的工业矿物，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，也是有用组分钛、钒、铬、钴、镍、镓等元素的主要负载矿物之一。其单矿物化学组分含量如表 2-4 所示。

表 2-4 攀枝花-西昌地区钛磁铁矿单矿物化学组分含量 (%)

品级	矿田	Fe	Fe ₂ O ₃	FeO	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	MnO	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃
夹石	H	58.74	52.07	20.15	6.75	0.54	0.023	0.16	0.136	4.30	1.71
	P	57.32	44.54	33.66	9.56	0.66	0.06	0.31		2.93	4.05
	B	60.87	48.73	34.05	7.97	0.70	0.22	0.34	0.034	1.22	3.55
Fe ₄	T	61.01	48.83	34.55	7.52	0.43		0.26	0.096	1.92	1.70
	H	59.26	51.40	31.61	7.90	0.67	0.55	0.22	0.030	1.95	2.49
	P	58.52	50.72	29.59	9.40	0.60	0.06	0.29	0.08	1.76	3.46
	B	60.89	46.50	36.59	8.07	0.78	0.06	0.27	-0.033	1.04	3.29
Fe ₃	T	61.47	50.19	32.57	6.75	0.60		0.29	0.087	1.31	2.27
	H	59.30	50.76	31.29	9.46	0.64	0.82	0.25	0.030	1.27	2.29
	P	57.60	45.55	33.03	12.50	0.54	0.09	0.40	0.105	0.96	3.76
	B	59.40	47.52	33.31	10.16	0.74	0.15	0.35	0.018	0.94	3.43
Fe ₂	T	59.74	48.14	33.54	9.10	0.50		0.33	0.078	1.18	2.23
	H	56.02	45.93	31.53	13.81	0.60	0.62	0.31	0.015	1.24	2.53
	P	55.97	48.45	28.35	14.01	0.50	0.09	0.40	0.094	0.71	3.85
	B	59.25	48.44	31.57	10.85	0.69	0.05	0.40	0.042	0.87	3.00
Fe ₁	T	58.12	45.89	33.47	12.20	0.56		0.39	0.065	0.95	1.72
	H	54.58	43.87	29.99	14.85	0.60	0.49	0.34	0.044	0.57	2.46
	P	55.59	43.66	32.16	14.97	0.48	0.13	0.35	0.10	0.37	3.74
	B	56.61	48.30	30.50	14.97	0.48		0.43	0.036	0.44	1.59
品级	矿田	MgO	CaO	Co	Ni	Cu	S	Ca	Fe/TiO ₂	密度 (g/cm ³)	
夹石	H	1.34	1.72	0.013	0.002		0.01	0.008	8.70	4.861	
	P	1.54	0.48	0.024	0.008		0.28	0.0038	5.94	4.610	
	B	1.49	0.55	0.015	0.025	0.020	0.196	0.0063	7.64	4.799	
Fe ₄	T	2.06	0.70	0.008	0.044	0.019	0.041		8.11	4.733	
	H	1.89	0.55	0.010	0.066	0.016	0.123	0.0050	7.50	4.842	
	P	1.64	0.59	0.017	0.012		0.142	0.0050	6.23	4.779	
	B	1.67	0.30	0.015	0.022	0.013	0.359	0.0056	7.55	4.841	
Fe ₃	T	1.57	0.68	0.005	0.002	0.032	0.15	0.0058	9.11	4.820	
	H	2.33	0.49	0.017	0.097	0.025	0.130	0.0044	6.27	4.850	
	P	2.03	0.14	0.017	0.010		0.167	0.0054	4.61	4.808	
	B	1.92	0.27	0.014	0.021	0.033	0.198	0.0055	5.85	4.833	
Fe ₂	T	1.53	0.77	0.004	0.003	0.071	0.217	0.0040	6.57	4.805	
	H	3.39	0.38	0.018	0.055	0.039	0.171	0.0036	4.06	4.774	
	P	2.38	0.23	0.011	0.008		0.112	0.0050	4.00	4.729	
	B	1.96	0.18	0.012	0.020	0.028	0.102	0.0050	5.46	4.816	
Fe ₁	T	1.96	0.45	0.005	0.005	0.032	0.29	0.0040	4.76	4.753	
	H	0.92	0.29	0.017	0.006	0.019	0.066	0.0031	3.68	4.713	
	P	2.60	0.21	0.013	0.015		0.293	0.0050	3.71	4.726	
	B	1.99	0.45	0.006	0.005	0.023	0.045	0.0040	3.78	4.730	