

杜鹤桂 等著



# 高炉冶炼钒钛磁铁矿原理

科学出版社



国家自然科学基金委员会资助出版

# 高炉冶炼钒钛磁铁矿原理

杜鹤桂 等著

科学出版社

1996

(京)新登字 092 号

### 内 容 简 介

本书是作者多年从事钒钛磁铁矿高炉冶炼研究的总结。本书全面、系统地阐述了钒钛磁铁矿高炉冶炼的基本原理,包括钒钛磁铁矿烧结的特性及强化;钒钛磁铁矿还原过程;渣-铁、渣-焦反应;Ti(C,N)生成,钛渣变稠,渣-铁界面特性,泡沫渣,铁损等机理;钛渣脱硫性能和钒氧化物的还原。此外,书中还探讨了合理的冶炼制度。

本书可供冶金、材料科学、矿物、地质、化工等科技人员及大专院校有关专业的师生阅读、参考。

## 高炉冶炼钒钛磁铁矿原理

杜鹤桂 等著

责任编辑 董安齐

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100017

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1996年5月第 一 版 开本:787×1092 1/16

1996年5月第一次印刷 印张:17 3/4, 插页:2

印数:1—520 字数:412 000

ISBN 7-03-005118-1/TF·36

定价:43.00元

# 前 言

我国攀西地区(攀枝花-西昌)有丰富的钒钛磁铁矿资源,其储量及共生、伴生元素的种类均为世界罕见。开发利用这种矿石对发展我国钢铁工业意义重大,但高钛型炉渣具有高温还原变稠等特性,对高炉冶炼带来严重困难。

为开发攀西地区钒钛磁铁矿资源,我国自本世纪 50 年代后期开始对其进行研究。60 年代前期由有关科研院所、高等院校和工厂进行了大量科学研究和半工业、工业性试验,攻克了一系列技术难关,为攀枝花钢铁基地的设计、建设提供了工艺技术参数。60 年代后期,攀钢高炉投产后,又经多年科学试验和技术攻关,使高钛型高炉渣冶炼有了新的突破。

80 年代以来,在国家自然科学基金委员会、冶金工业部和攀枝花钢铁公司(以下简称攀钢)的支持下,我们对钒钛磁铁矿高炉冶炼进行了深入研究,取得了可喜成果,为完善和提高冶炼工艺及指标,并实现全钒钛矿冶炼提供了理论依据。

本书是在大量试验研究的基础上,重点从理论上揭示高炉冶炼钒钛磁铁矿的规律及特性,阐明冶炼的基本原理,以促进高炉冶炼钒钛磁铁矿技术水平的提高。

参加本书撰写工作的有:东北大学杜鹤桂教授(第四、六、七、八、十章);杨兆祥教授(第一、二、三章);李永镇教授(第十一、十二章);王文忠教授(第五章);施月循副教授(第九章)。全书由杜鹤桂教授审定,施月循副教授协助完成。

感谢国家自然科学基金委员会对本书的支持,以及张玉清教授的推荐和帮助。

在本书撰写和出版过程中,承蒙东北大学车荫昌教授的审查与指导,在此表示深切谢意。

由于作者水平及学识所限,书中不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

# 目 录

前言	
<b>第一章 绪论</b> .....	1
1-1 概况 .....	1
1-2 高炉冶炼钒钛磁铁矿的发展 .....	4
<b>第二章 钒钛磁铁矿的组成及综合利用</b> .....	9
2-1 钒钛磁铁矿的成分和结构 .....	9
2-2 钒钛磁铁矿的选分 .....	13
2-3 钒钛磁铁矿的综合利用 .....	16
<b>第三章 钒钛磁铁矿的造块</b> .....	21
3-1 特性 .....	21
3-2 烧结过程的特点 .....	22
3-3 结构和固结机理 .....	25
3-4 钒钛烧结矿的性质 .....	32
3-5 钒钛磁铁精矿球团 .....	38
<b>第四章 钛氧化物还原反应热力学和动力学</b> .....	40
4-1 钛氧化物还原反应热力学 .....	40
4-2 钛氧化物还原反应动力学 .....	44
4-3 高炉内钛氧化物还原过程 .....	47
4-4 Ti(C,N)生成及机理 .....	50
4-5 氧化物对 TiO <sub>2</sub> 还原的抑制作用 .....	71
4-6 钛渣氧势的测定 .....	93
<b>第五章 钒氧化物的还原</b> .....	100
5-1 钒资源概况 .....	100
5-2 钒在钒钛磁铁矿中的赋存形态 .....	101
5-3 钒还原的物理化学基础 .....	101
5-4 钒还原的实验研究 .....	108
5-5 高炉内钒的还原 .....	119
<b>第六章 钒钛磁铁矿铁还原过程</b> .....	124
6-1 还原历程 .....	124
6-2 钒钛磁铁矿还原反应热力学 .....	125
6-3 气-固还原反应数学模型 .....	132
6-4 高炉内铁氧化物的还原 .....	134
6-5 生铁的形成 .....	135
6-6 矿焦混装对钒钛磁铁矿还原的影响 .....	138

<b>第七章 含钛高炉渣的物理性质</b> .....	144
7-1 钛渣粘度 .....	144
7-2 钛渣熔化性温度 .....	153
7-3 钛渣高温还原变稠 .....	156
7-4 钛渣矿物组成及特点 .....	168
7-5 钛渣表面性质 .....	174
7-6 钛渣电导性 .....	182
<b>第八章 渣铁界面现象</b> .....	184
8-1 泡沫渣 .....	184
8-2 铁损 .....	203
8-3 粘罐 .....	208
<b>第九章 钛渣脱硫性能</b> .....	212
9-1 钛渣脱硫热力学 .....	212
9-2 钛渣碱度表达式 .....	219
9-3 钛渣脱硫动力学 .....	229
9-4 炉外脱硫 .....	232
<b>第十章 试验高炉解剖研究</b> .....	234
10-1 解剖方法 .....	234
10-2 炉内宏观状态 .....	236
10-3 冶炼过程分析 .....	242
10-4 焦炭在高炉内行为 .....	242
10-5 高炉内温度和气流分布 .....	249
<b>第十一章 钒钛磁铁矿高炉冶炼制度</b> .....	255
11-1 低钛渣冶炼 .....	255
11-2 中钛渣冶炼 .....	261
11-3 高钛渣冶炼 .....	265
11-4 高炉喷煤 .....	267
<b>第十二章 完善和提高钒钛磁铁矿冶炼</b> .....	274
12-1 发挥资源优势 .....	274
12-2 发挥合金元素的作用 .....	274
12-3 深化高炉冶炼钒钛磁铁矿的研究 .....	275
<b>参考文献</b> .....	277

# 第一章 绪 论

钒钛磁铁矿是以铁(Fe)、钒(V)、钛(Ti)元素为主,并有其它有用元素[钴(Co),镍(Ni),铬(Cr),钪(Sc),镓(Ga)等]的多元共生铁矿.由于Fe,Ti紧密共生,V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(已探明的储量估计有 $200 \times 10^8$ 多吨).过去由于技术、经济方面的原因,此种矿石曾被认为是“死矿”.近六七十年以来,由于科学技术的进步和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(高炉-转炉法,预还原-电炉法等).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V(相当世界金属V年产量的88%).关于Ti,Co,Ni,Cr,Ga,Sc等有用元素的提取,则需要进一步研究.

## 1-1 概 况

钒钛磁铁矿在世界上分布较广,目前已大量开采利用的主要有中国四川的攀枝花矿、南非的布什维尔德矿、俄罗斯的乌拉尔斯克-卡契卡纳尔矿、新西兰北岛西海岸的含钛铁矿砂等.

### 1-1-1 中国钒钛磁铁矿资源

中国钒钛磁铁矿主要分布在四川省的攀西(攀枝花-西昌)地区,储量占全国储量的95%以上,其次是河北省的承德和安徽省的马鞍山地区.

#### 1. 攀西地区

攀西地区钒钛磁铁矿的成矿带共有四大矿床.它以红格矿为中心,南有攀枝花矿,北有白马矿和太和矿,形成了一个特大成矿带.该成矿带南北长约300km.攀枝花、白马和太和三处的成矿岩体属基性岩(辉长石岩)型,红格矿属基性-超基性岩型,两者地质特征基本相同,后者除Fe,V,Ti外,伴生的Cr,Co,Ni和Pt族元素含量较高,探明储量达 $100 \times 10^8$ t以上,保有储量 $33.88 \times 10^8$ t,综合利用价值更大.对不同矿床矿石的矿物结构和组成的研究表明,钒钛磁铁矿中含有许多矿物,但富含有用组分的被选矿物是三种:钛磁铁矿主要含Fe,Ti,V,Cr及部分Co,Ni;钛铁矿主要含Ti,Fe,Sc;硫化物主要含Co,Ni,Cu及Pt族的Sc,Te等.

随矿石品级的提高,钛磁铁矿中的含铁量降低,含钛量升高,攀枝花和红格地区的钛磁铁矿中 $TiO_2$ 高、Fe低,渣中 $TiO_2$ 高,不利高炉顺行;白马和太和地区的钛磁铁矿中Fe高、 $TiO_2$ 低,渣中 $TiO_2$ 低,有利高炉顺行.白马矿床的钛磁铁矿中含 $V_2O_5$ 比其它矿床高,可使生铁和钒渣品位提高.红格矿的钛磁铁矿中含 $Cr_2O_3$ 平均高达0.49%~0.82%,综合回收利用的价值高.

随矿石品级的提高,钒铁矿中的含钒量增加,其中含有的 MgO 和 CaO 也随之增加。

硫化物中 Co、Ni 的含量随矿石变富而增高,Cu 的含量则降低。红格矿床的 Co、Ni、Cu 及铂族元素含量最高,有较大的利用价值。太和矿床的硫化物中 Co、Ni 含量较高,也应注意综合利用。

## 2. 承德地区

承德地区的钒钛磁铁矿主要集中在大庙铁矿、黑山铁矿和马营铁矿等地区。大庙铁矿早在 30 年代就已开采,为井下作业,年出原矿  $(35\sim 40)\times 10^4\text{t}$ 。黑山铁矿为 1988 年开始露天开采,目前是承德钢铁公司(简称承钢)的主要矿石供应地,计划年产量将达  $150\times 10^4\text{t}$ 。马营矿为高磷矿,目前产量较少。承德矿同攀西地区矿石的矿物组成相似,但其中  $\text{TiO}_2$  仅 8%,故磁选后的铁精矿中含 Fe 61%~62%, $\text{V}_2\text{O}_5$  0.78%, $\text{TiO}_2$  8.2%,高炉渣中  $\text{TiO}_2$  为 16%~18%。

马鞍山地区也有少量低 Ti、低 V 的磁铁矿,马鞍山钢铁公司(简称马钢)曾经冶炼过此类矿石,高炉渣中  $\text{TiO}_2$  为 2%~5%。我国钒钛磁铁矿的资源十分丰富,它的利用将对我国的经济的发展起着愈来愈大的作用。

### 1-1-2 国外钒钛磁铁矿的资源

#### 1. 俄罗斯

俄罗斯的钒钛磁铁矿资源相当丰富,总储量达  $88.97\times 10^8\text{t}$ ,主要分布在乌拉尔地区。目前开采的有古谢沃尔矿,卡契卡纳尔矿和第一乌拉尔矿。

(1)古谢沃尔矿。露天开采,低 V、低  $\text{TiO}_2$  矿石(TFe 16.6%, $\text{V}_2\text{O}_5$  0.13%, $\text{TiO}_2$  1.23%)。该矿的金属矿物为磁铁矿和钛铁矿,有少量赤铁矿和硫化矿。该矿在卡契卡纳尔采选公司选矿后的精矿含 Fe 61.5%, $\text{TiO}_2$  2.5%, $\text{V}_2\text{O}_5$  0.5%。年产精矿  $830\times 10^4\text{t}$ 。

(2)卡契卡纳尔矿。其主要部分矿石含 Fe 16%~20%,少部分矿石含 Fe 14%~16%。橄榄岩中含  $\text{V}_2\text{O}_5$  0.13%~0.14%, $\text{TiO}_2$  1.24%~1.28%。此矿经中乌拉尔采选公司选矿后的精矿含 Fe 63.0%, $\text{V}_2\text{O}_5$  0.60%, $\text{TiO}_2$  3.6%。年产精矿  $760\times 10^4\text{t}$ 。

(3)第一乌拉尔矿。位于中乌拉尔山脉西坡。其主要金属矿物为磁铁矿,它是在角闪石颗粒中以细颗粒集合体存在,尚有 3%~5%的钛铁矿。表内矿含 Fe 14%~38.1%, $\text{V}_2\text{O}_5$  0.19%, $\text{TiO}_2$  2.3%。经干式磁选后铁精矿中含 Fe 37%~40%, $\text{V}_2\text{O}_5$  0.5%, $\text{TiO}_2$  3.5%~4.0%。

以上三地精矿经造块成球团和烧结矿,供下塔吉尔钢铁厂和邱索夫厂高炉冶炼含 V 生铁。

此外,俄罗斯还有一部分高  $\text{TiO}_2$  的钒钛磁铁矿( $\text{Fe}/\text{TiO}_2 < 10$ ),如缅脱维杰夫矿、沃尔科夫矿、库班矿、普多日戈矿和齐列斯克矿。由于其含  $\text{TiO}_2$  高,利用途径目前尚在研究。

#### 2. 南非

南非拥有储量丰富的含钒高( $\text{V}_2\text{O}_5 > 1.4\%$ )的钒钛磁铁矿,储量为  $16.56\times 10^8\text{t}$ 。目前开采的是布什维尔德矿。它是南非钒生产的主要原料基地。其中主要有以下矿山。

(1)马波奇矿山。该矿山位于罗森纳卡尔地区。矿石成分是:TFe 53%~57%; $\text{TiO}_2$



12%~15%;  $V_2O_5$  1.4%~1.7%;  $Cr_2O_3$  0.15%~0.6%;  $SiO_2$  1.5%~2%;  $Al_2O_3$  3%~4%。它每年向委特班克地区的钢铁厂(6~25mm 块矿)和焙烧-浸取厂(<6mm 粉矿)提供  $300 \times 10^4 t$  原矿。

(2)特伦斯瓦尔合金公司矿山。该矿山在斯托夫贝格地区,矿石含  $V_2O_5$  1.52%。该矿供合金公司造球,然后进行回转窑氧化钠化焙烧和水浸提钒。

(3)肯尼迪河谷矿。该矿位于布什维尔德地区东部,矿石含  $V_2O_5$  2.35%,在瓦萨厂经破碎、磨矿、磁选富集后造球,再进行氧化钠化焙烧和水法提钒。

(4)瓦曼特科矿产公司矿山。该矿在博茨瓦纳共和国境内。经选矿后矿石含  $V_2O_5$  2.0%,再送工厂破碎、磨矿、磁选富集,然后提钒。

(5)隆巴斯钒公司矿山。该矿也在博茨瓦纳共和国境内,是该公司计划开采的一个矿山。该矿属磁铁矿床,与瓦曼特科矿类似。该矿含有 36% 磁铁矿,磁铁矿含  $V_2O_5$  1.85%~2.2%,供 USCO 厂提钒用,该厂年产 9000t 片状  $V_2O_5$ 。

### 3. 亚太地区

(1)澳大利亚。钒钛磁铁矿主要集中在西澳大利亚的科茨矿、巴拉矿、巴拉姆比矿等。

科茨矿矿体是磁铁矿辉长岩。原矿成分为 Fe 25.4%,  $V_2O_5$  0.54%,  $TiO_2$  5.4%,  $SiO_2$  33.0%,  $Al_2O_3$  14.4%。磁选精矿成分为 Fe 64.7%,  $V_2O_5$  2.0%,  $TiO_2$  4.9%,  $SiO_2$  1.0%,  $Al_2O_3$  1.0%。该矿供科茨提钒厂,该厂年产  $V_2O_5$  1620t。

巴拉矿含 Fe 35%~40%,  $V_2O_5$  0.45%,  $TiO_2$  13.0%, 储量  $1500 \times 10^4 t$ 。巴拉姆比矿原矿含  $TiO_2$  15%,  $V_2O_5$  0.7%, Fe 26.0%, 选矿后的精矿成分为  $TiO_2$  26%,  $V_2O_5$  1.25%, Fe 46%。

此外,澳大利亚还是世界上最大的钒矿石生产国之一。钒钛矿主要集中在西海岸,产量占世界总产量的 30%。金红石主要集中在东海岸,产量占世界总产量的 50%。

(2)新西兰。在北岛的西海岸。有大量的钒钛铁矿砂,总储量  $6.54 \times 10^8 t$ 。目前开采利用的主要是塔哈罗矿( $3 \times 10^8 t$ )和瓦卡托矿( $1.56 \times 10^8 t$ ),平均含 Fe 18%~20%,但波动范围大。矿砂中 Fe 22.1%,  $TiO_2$  4.33%,  $V_2O_5$  0.14%,经磁选、重选后,精矿含 Fe 57%,  $TiO_2$  8%,  $V_2O_5$  0.42%,供新西兰钢铁厂回转窑直接还原,然后再经电炉熔分和转炉吹钒,得含  $V_2O_5$  18%~20%的钒渣。该厂年产钒渣  $70 \times 10^4 t$ 。

(3)印度。钒钛磁铁矿主要集中在南部沿海的喀拉拉邦和泰米尔纳德邦,东部沿海的奥尼萨邦等滨海地区。原矿中含  $TiO_2$  15%~30%,经选矿后可得含  $TiO_2$  50%~60%的钒铁矿,全部出口日本、英、美等国。

(4)斯里兰卡。沿东北海岸和西部海岸,均有钒铁矿( $TiO_2$  53.61%, Fe 31%)。其中除含 70%~80%的钒铁矿外,还有 10%的金红石和 8%~10%的锆石( $ZrO \cdot SiO_2$ )。斯里兰卡年产钒铁矿  $7 \times 10^4 t$ ,金红石  $1 \times 10^4 t$ 。

### 4. 北美

加拿大魁北克省阿莱德湖区储量为  $1.5 \times 10^8 t$  的块状钒铁矿,脉石主要是斜长石。矿石经重力选矿后可得含  $TiO_2$  36.8%, Fe 41.6%的钒精矿,用于电炉冶炼高钒渣。

美国也有丰富的钒钛磁铁矿藏,多分布在阿拉斯加州,纽约州,怀俄明州和明尼苏达

州,但至今未开采利用.

### 5. 北欧

挪威有欧洲最大的钛矿山——特尔尼斯矿. 该矿储量  $3 \times 10^8 \text{t}$ , 露天开采, 年产矿石  $276 \times 10^4 \text{t}$ , 原矿成分为 Fe 20%,  $\text{TiO}_2$  17%~18%. 年产钛精矿  $30 \times 10^4 \text{t}$ , 精矿成分为  $\text{TiO}_2$  44%, Fe 36%.

瑞典的塔贝格和基律纳也有钒钛磁铁矿. 塔贝格矿含  $\text{V}_2\text{O}_5$  0.7%.

芬兰对钒钛磁铁矿的开采利用较早. 奥坦马克是 1953 年投产的矿山, 每年地下开采约  $100 \times 10^4 \text{t}$  矿石, 矿石含 Fe 30%~35%,  $\text{TiO}_2$  13%,  $\text{V}_2\text{O}_5$  0.45%, 经浮选-磁选后, 精矿中含 Fe 69%,  $\text{TiO}_2$  2%,  $\text{V}_2\text{O}_5$  1.07%. 木斯塔瓦腊矿发现于 1962 年, 1974 年动工建矿, 1976 年用于提钒生产. 年采矿石  $160 \times 10^4 \text{t}$ , 精矿  $24 \times 10^4 \text{t}$ , 用于水法提钒. 原矿含 Fe 17.0%,  $\text{V}_2\text{O}_5$  0.36%,  $\text{TiO}_2$  3.1%, 精矿含 Fe 62%,  $\text{V}_2\text{O}_5$  1.61%,  $\text{TiO}_2$  7.5%.

随着钒钛磁铁矿综合利用技术的不断开发和应用, 钒钛磁铁矿的矿藏将有新的发现, 开发未被利用的矿藏的工作将受到重视. 非洲的埃及、纳米比亚, 南美洲的巴西、智利和委内瑞拉, 亚洲的马来西亚和印度尼西亚等国均有钒钛磁铁矿资源, 但目前开采利用的不多.

## 1-2 高炉冶炼钒钛磁铁矿的发展

高炉冶炼钒钛磁铁矿经历了初期探索试验、系统冶炼试验和低钛渣冶炼工业化, 以及高钛渣冶炼成功的漫长过程.

### 1-2-1 早期探索试验

19 世纪初至 20 世纪 20 年代, 欧洲的瑞典、挪威、英国、俄国和北美的加拿大、美国, 先后在用木炭和焦炭的小高炉上试验冶炼钒钛磁铁矿, 高炉渣中含  $\text{TiO}_2$  一般不超过 10%, 个别达 36% (1988 年英国小高炉冶炼矿石含  $\text{TiO}_2$  39% 和 Fe 36%). 通过这些早期的冶炼实践, 人们对钒钛磁铁矿的高炉冶炼有了初步的认识. 高炉冶炼钒钛磁铁矿存在着渣铁不能畅流、生铁含 S 高、焦比高等缺陷. 炉渣含  $\text{TiO}_2$  愈高, 冶炼难度愈大. 小高炉虽然可以冶炼  $\text{TiO}_2$  为 2%~8% 的炉渣, 但冶炼指标很差. 包朗认为, 高炉要成功地冶炼钒钛磁铁矿, 应保持低炉温, 这可保证铁还原而不容许  $\text{TiO}_2$  还原, 因此用钒钛磁铁矿只能冶炼白口铁或半白口、半灰口的含 Ti 少的生铁. 冶炼铸造铁则需同普通矿混合使用. 此外, 他还认为以硅石和石灰石做熔剂有利于冶炼, 因这有利于降低渣中  $\text{TiO}_2$  含量、改善脱 S 和抑制  $\text{TiO}_2$  的还原. 由此逐步形成了冶炼钒钛磁铁矿的一条技术路线——低炉温、酸性渣和炉外脱 S.

在此期间钒钛磁铁矿的开发利用没有得到发展, 这同当时的经济 and 科技水平发展缓慢有关.

### 1-2-2 系统试验和低钛渣冶炼工业化

进入 20 世纪 30 年代后, 前苏联进入大规模经济建设时期, 为满足对钒的需求, 从

1929年开始,开展了大量的钒钛磁铁矿的高炉冶炼试验和科研工作.值得提出的是,以前苏联科学院院士勃列茨基为首的科研组在1931~1941年进行的4次高炉冶炼试验.试验的中心内容是企图加碱金属氧化物使难还原的钛铁矿分解,改善铁在中温区的还原,减少炉缸部分的还原耗热,同时碱金属氧化物还可以改善初渣形成条件和钛渣的熔化性温度.

1931年在土宁斯克工厂112m<sup>3</sup>高炉上进行了第一次试验.由于高炉临近炉役末期,故未获任何效果.1932年在下塔吉尔厂270m<sup>3</sup>高炉进行了冶炼库申斯克钒钛磁铁矿的生矿试验.这两次试验中,碱金属氧化物都是在炼焦过程中加入.试验中的炉渣成分为TiO<sub>2</sub> 28%~30%,(CaO+MgO+R<sub>2</sub>O) 31%~34%,碱金属氧化物R<sub>2</sub>O为1.5%~2.5%,生铁成分为Si 0.3%~0.6%,V 0.55%~0.6%,Ti 0.15%~0.20%,S 0.06%~0.08%;焦比(1.6~1.7t/t)较普通矿高11~16%.

为了减少碱金属的大量挥发,第三次和第四次试验,碱金属以霞石和云霞正长岩的形式同炉料一起加入高炉,另外还加入一定量锰矿.霞石和云霞正长岩的成分主要是(SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 70%~80%,(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O) 13%~18%.由于许多冶金工作者对此持否定态度,此项试验一直到1939年11月才由邱索夫厂进行.

第三次试验是在邱索夫厂3号高炉(257m<sup>3</sup>)上分两期进行.第一期用50%第一乌拉尔矿(TiO<sub>2</sub> 3.02%~3.65%)和50%库申斯克矿(TiO<sub>2</sub> 10.42%~12.62%),炉渣成分(平均)为TiO<sub>2</sub> 10.40%,MgO 8.52%,(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) 2.35%,CaO/SiO<sub>2</sub> 0.97.生铁成分为Si 0.3%~0.94%,Ti 0.13~0.25%,V 0.5%~0.69%,S 0.02%~0.12%;焦比1.51t/t,利用系数0.579t/(m<sup>3</sup>·d).第二期用100%库申斯克矿,渣中TiO<sub>2</sub> 17%~18%,(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) 0.82%~2.61%,MgO 6%~9%,平均CaO/SiO<sub>2</sub>为1.05;生铁成分为Si 0.1%~0.8%,S 0.02%~0.12%,V 0.52%~0.78%;焦比1.51t/t,利用系数0.584t/(m<sup>3</sup>·d).

第四次试验是在捷尔任斯基工厂457m<sup>3</sup>高炉上进行的.试验用库申斯克矿和第一乌拉尔矿模拟普多斯克矿进行冶炼.除加碱金属外,还提高炉渣碱度.试验结果认为,冶炼TiO<sub>2</sub>为15%~20%的炉渣时,炉渣碱度(CaO/SiO<sub>2</sub>)不能超过1.4.

对勃列茨基用加碱金属氧化物冶炼钒钛磁铁矿的试验,有人持不同意见.后者认为,碱金属可以降低钛渣熔化性,但不能防止钛渣变稠.加入大量碱性氧化物会导致结瘤和破坏炉料(焦炭和铁矿石等)的强度,还会使焦比升高.前苏联专家肖米克认为,该试验之所以取得一定效果,主要是由于渣碱度合适和渣中TiO<sub>2</sub>不太高的缘故.

以巴甫洛夫院士为首的研究小组,先后进行过两次试验.第一次于1932年在库申斯克钢铁厂的80m<sup>3</sup>木炭高炉上,第二次于1933年在下塔吉尔厂170m<sup>3</sup>焦炭高炉上进行试验.试验是以白云石和石英为熔剂,企图用增加MgO的方法降低钛渣的熔化性温度和和提高炉渣的脱S能力.用加石英的方法来保持渣中有一定的SiO<sub>2</sub>含量.渣中TiO<sub>2</sub> 25%~30%,MgO 11%~15%,试验未获成功.

在研究原矿入炉的同时,沙脱林于1935年在库什瓦钢铁厂167m<sup>3</sup>高炉和邱索夫厂257m<sup>3</sup>高炉上进行用钒钛烧结矿的冶炼试验.烧结矿成分为Fe 60.25%,FeO 21.32%,TiO<sub>2</sub> 8.05%,V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.43%,Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.8%.为保持渣中TiO<sub>2</sub>在10%左右,配加了30%的低TiO<sub>2</sub>第一乌拉尔矿,炉渣中TiO<sub>2</sub>为10.85%,焦比1.0t/t利用系数1.0t/(m<sup>3</sup>·d).其指标较生矿冶炼好得多.

基于上述试验结果,前苏联在冶炼钒钛磁铁矿时,采用烧结矿将渣中允许TiO<sub>2</sub>含量

规定在 8% 以下, 风温在 600℃. 邱索夫厂多年一直按此规定生产含 V 生铁. 用 30% 原矿, 渣中  $\text{TiO}_2$  为 6.69%, 渣量 1070kg/t, 风温 557~594℃, 焦比 1.02t/t, 利用系数 1.18t/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}$ ). 此后, 该厂又进一步减少渣量(926kg/t), 提高风温(826℃). 降低湿分, 高炉利用系数提高到 1.26t/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}$ ), 焦比降到 0.73t/t, 为下塔吉尔钢铁厂冶炼含 V 生铁打下基础.

60 年代, 卡契卡纳尔采选公司投产. 1964 年下塔吉尔厂用由卡契卡纳尔精矿生产的钒钛烧结矿(Fe56%)进行冶炼. 结果在渣中  $\text{TiO}_2$  为 8.03%,  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  为 1.06, 生铁含 Si 0.46% 的条件下, 获得利用系数为 1.29t/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}$ ), 焦比为 616kg/t 的指标. 生铁含 S 0.044%, V 0.43%(V 回收率 84.63%). 由于烧结矿品位高, 渣量仅 454kg/t. 在此基础上进一步认为, 为使高炉冶炼钒钛磁铁矿更有效, 应当做到: ①稳定原料, 确定合适品位, 保证合适渣量; ②生铁含 Si 控制在 0.3%~0.5%; ③炉渣碱度不能低于 1.05~1.10; ④加稀释剂的效果不大, 应当采取抑制  $\text{TiO}_2$  还原生成 TiC, TiN 及 Ti(CN)的措施(富氧鼓风、高压操作, 提高冶炼强度); ⑤风温  $\leq 1000^\circ\text{C}$ ; ⑥采用低湿分.

此后, 前苏联在高炉强化冶炼钒钛磁铁矿上又做了大量工作, 如提高烧结矿和球团矿质量, 稳定原燃料成分, 高炉采用双铁口, 富氧(22%~25% $\text{O}_2$ )和喷吹天然气(100 $\text{m}^3/\text{t}$ )的综合鼓风, 提高风温(1100℃), 生铁含 Si 从 0.31%降到 0.22%, 从而使高炉冶炼指标继续改善; 焦比降到 450~460kg/t, 利用系数大于 2.0t/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}$ ), 并使  $\text{TiO}_2$  为 9%~10% 的钛渣冶炼在大高炉上获得成功.

在此期间, 为配合高炉冶炼试验, 还进行了大量的实验室研究. 从工艺角度, 其中以肖米克对钛渣特性的研究最有代表性. 其最大贡献就是比较系统地研究了影响钛渣正常冶炼的关键问题——钛渣变稠现象, 并对防止和消除钛渣变稠提出切实可行的方法, 如低炉温和炉缸吹氧等. 他的许多观点, 在今天研究高钛渣冶炼时仍有很好的参考价值.

此外, 在这一时期日本结合高炉冶炼含钛铁矿砂, 对在炉底和炉缸堆积物的结构组成进行了深入的研究, 认为含 Ti 高的生铁熔点高、粘性大, 易在炉底和炉缸形成堆积, 影响高炉正常工作. 如将生铁含 Ti 控制在 0.15% 以下, 便可用普通高炉的操作方法冶炼含钛铁矿. 为了降低生铁中的 Ti, 有人提出从炉缸向铁水喷入铁矿粉以氧化铁水中的 Ti 的观点, 并取得一定成果. 1961 年又先后在帝国制铁所安浦工厂 50 $\text{m}^3$  高炉和东田厂 646 $\text{m}^3$  高炉进行了炉缸喷吹矿粉的试验. 试验结果是渣中  $\text{TiO}_2$  12%, 生铁含 Si 0.6%, 炉渣碱度  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  1.3~1.4, 效果比较理想. 总之, 日本炉渣含钛不高, 炉缸粘结构属缓慢堆积型.

### 1-2-3 高钛渣冶炼成功

一般认为, 渣中  $\text{TiO}_2 < 10\%$  为低钛渣,  $\text{TiO}_2 10\% \sim 20\%$  为中钛渣,  $\text{TiO}_2 > 20\%$  为高钛渣. 俄罗斯现已纳入常规生产的属低钛渣( $\text{TiO}_2 9\% \sim 10\%$ ). 攀枝花钢铁公司(以下简称攀钢)高炉渣属高钛渣( $\text{TiO}_2 23\% \sim 25\%$ ), 承德钢铁公司(以下简称承钢)炉渣属中钛渣( $\text{TiO}_2 16\% \sim 18\%$ ).

我国早在 30 年代就发现攀西地区有丰富的钒钛磁铁矿, 但一直未开采. 新中国成立后, 由于国民经济发展的需要, 国家于 1958 年开始对攀枝花钒钛磁铁矿进行选矿和小高炉试验. 国内和国外(前苏联)的选矿试验都说明, 攀枝花钒钛磁铁矿经选矿后只能获得  $\text{TiO}_2 12\% \sim 14\%$ ,  $\text{Fe} 52\% \sim 55\%$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5 0.5\% \sim 0.6\%$  的精矿. 用机械选矿方法得不到当时炼铁要求的  $\text{TiO}_2 < 8\%$  的精矿. 加上攀西地区又极少低钛和无钛的矿石可以配用, 因

此,要开发攀枝花钒钛磁铁矿,就必须首先解决高钛渣的冶炼问题,而高钛渣的冶炼在国外虽有试验,但都是不成功的。

从1958年开始,几乎与地质勘探同步,中国科学院上海冶金研究所与北京化工冶金研究所、冶金工业部北京钢铁研究院先后在 $1\text{m}^3$ 、 $0.5\text{m}^3$ 、 $11\text{m}^3$ 和 $28\text{m}^3$ 高炉上用攀西地区原矿进行了高钛渣冶炼的探索性试验。试验期渣中 $\text{TiO}_2$  20%~30%,结果生铁含硫高(0.15%~0.8%)和焦比高(1.52~2.5t/t)的问题未能解决。

1963年冶金工业部为解决承钢因生铁含S高而导致工厂停产的问题,由东北大学(原东北工学院)、承钢和马钢等单位在马钢 $255\text{m}^3$ 高炉上用承德精矿烧结矿进行试验。试验结果是渣中 $\text{TiO}_2$  20%~25%,由于采用了高碱度( $\text{CaO}/\text{SiO}_2=1.2\sim 1.4$ ),适宜高炉温( $[\text{Si}]=0.6\%\sim 0.8\%$ ),在渣量 $500\text{kg}/\text{t}$ 条件下,生铁含 $\text{S}<0.08\%$ 的可达90.4%,V回收率从60%~65%提高到80%~85%,焦比 $600\sim 800\text{kg}/\text{t}$ 。试验取得进展,但是,由于生铁含Si较高,渣中带铁严重,有时还出现炉缸堆积、工作不正常等情况。

1965~1967年,由冶金工业部组织西南钢铁研究院、东北大学等单位,在承德、西昌和北京开展了选矿、烧结和高炉冶炼的大规模工业试验以及与之相配合的实验室研究。三次试验为解决高钛渣冶炼的技术问题和作出在攀枝花地区建设现代化钢铁企业的重大决策起到了决定性的作用,为攀钢建设提供了设计依据。

1965年2~8月,在承钢 $100\text{m}^3$ 高炉上用调节承德钒钛铁精矿和铁精矿配比的方法,模拟攀枝花矿的冶炼。冶炼中将渣中 $\text{TiO}_2$ 含量分20%、25%、30%和35%四个阶段。20% $\text{TiO}_2$ 是全承德矿冶炼阶段,高炉冶炼可以做到渣铁畅流,生铁合格 $[\text{S}]\leq 0.08\%$ 的占80%,V回收率达75%,可获得同冶炼普通矿相近的指标。这一阶段的 $[\text{Si}]$ 为0.6%~0.8%,渣中 $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ 比为1.2~1.3,冶炼强度在 $0.8\text{t}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 以上,风温高于 $800^\circ\text{C}$ 。

在 $\text{TiO}_2$ 为25%的阶段,冶炼上的突出问题是出渣出铁不均,有时渣铁粘稠不出,有时渣铁“大泻”。这实际上是高钛渣在炉温较高时所反映的特点。本阶段渣碱度仍为1.2~1.3,生铁含Si前期大于0.6%,后期为消除“热结”和“大泻”,控制 $[\text{Si}]<0.6\%$ ,并辅之以增加炉缸氧势等措施。

在 $\text{TiO}_2$ 为30%的阶段,炉渣严重变稠、难流,引起炉缸堆积,甚至冶炼被迫中断。通过研究认为,炉缸堆积的原因是钛渣过还原所引起。因此,较大幅度地降低生铁含Si至0.35%~0.4%,并结合增加炉缸氧势的措施,使渣铁堆积问题得到顺利解决。生铁含S降到0.071%~0.073%,焦比 $730\sim 760\text{kg}/\text{t}$ ,在冶炼强度 $1.05\sim 1.06\text{t}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 的条件下,利用系数可达 $1.35\sim 1.47\text{t}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ ,风温 $940\sim 970^\circ\text{C}$ 。但是,试验中还存在铁损高和泡沫渣等问题。

在 $\text{TiO}_2$ 为35%的阶段,主要进行了有关消稠制度、消稠物料和喷吹重油、高风温、高湿分等条件试验。

承德试验是高钛渣冶炼走向成功的关键一步。它提出了适合于冶炼高钛渣的操作方针,并解决了渣铁畅流和生铁合格两项重大难题,但还存在铁损高和泡沫渣等问题,有待进一步解决。

1966年在西昌攀钢410厂 $28\text{m}^3$ 高炉上进行了又一次试验。这次试验的目的,主要是利用攀枝花矿和太和矿为原料,进行选矿、烧结、高炉冶炼的全流程试验,以验证承德模拟试验的结果。选矿试验的工业装置能力为日处理250t原矿,烧结机为 $8.25\text{m}^2$ 。试验期间

渣中  $\text{TiO}_2$  为 28.5%~30% (最高达 35%), 由于继续实施降低生铁中 Si, Ti 含量、增加炉缸氧势等措施; 生铁含 S  $\leq 0.07\%$  的达 98% 以上, 铁损由承德试验时的 10% 降到 5% 左右, 焦比降到 650kg/t. 结果表明, 承德试验的技术方针完全适合于攀枝花矿.

1967 年在首都钢铁公司 516m<sup>3</sup> 高炉上用承德钒钛铁精矿和钛精矿进行工业模拟试验. 烧结是在 62.5m<sup>2</sup> 烧结机上进行. 目的是在生产能力更大的装置上进行试验. 试验中还进行了加锰矿、喷吹煤粉和转炉渣返回高炉等试验. 高炉渣中  $\text{TiO}_2$  29.5%~30%,  $\text{CaO/SiO}_2$  1.37~1.43, 焦比 630~660kg/t, 生铁含 S 平均为 0.037%~0.043%. 试验中发现铁水粘罐严重、渣铁沟挂渣多等问题. 喷吹煤粉对高钛渣冶炼带来一些新的问题, 尚待研究.

至此, 高炉冶炼高钛渣的难题基本已被攻克, 这在高炉冶炼钒钛磁铁矿的历史上具有划时代的意义, 它不仅对我国, 而且对全世界钒钛磁铁矿的开发利用都有重大意义.

1970 年攀钢 1 号高炉投产, 至今已有 20 余年历史. 由于采用了过去试验总结出的操作方针, 并且在新的条件下又有所发展, 加之又吸取了普通高炉行之有效的经验 (如大料批分装, 无钟多环布料, 高碱度烧结矿, MgO 渣冶炼等), 在精矿含 Fe 只有 51% (烧结品位只有 44~45%), 焦炭灰分大于 13%, 渣中  $\text{TiO}_2$  23%~24% 的条件下, 高炉完全可以正常生产, 渣铁畅流, 生铁含 S 在 0.03%~0.07%, 月平均利用系数 1.90~1.95t/(m<sup>3</sup>·d), 焦比 600kg/t. 铁损虽降到 5%, 但仍较普通矿冶炼时高. 此外, 在渣中  $\text{TiO}_2$  大于 25% 以后, 泡沫渣和铁水粘罐问题变得突出, 有待进一步研究解决.

## 第二章 钒钛磁铁矿的组成及综合利用

我国钒钛磁铁矿的资源,主要集中在攀西地区的攀枝花、白马、太和和红格四大矿区。它们的储量约占全国钒钛磁铁矿总储量的95%以上,其次是承德矿区。钒钛磁铁矿的矿物结构和化学组成受不同的成矿条件影响,同时它又决定了矿石的预处理和综合利用的流程和方法。

### 2-1 钒钛磁铁矿的成分和结构

攀西地区的钒钛磁铁矿是一种以Fe、V、Ti为主并伴生有少量Cr、Ni、Co、Ga、Sc及Pt族等多种可综合利用元素的矿产资源。攀西地区四大矿区矿石的主要成分见表2-1。其中TFe>20%的为表内矿(Fe-I~Fe-III),TFe<20%的为表外矿(Fe-IV)。各矿区主要为中低品位矿石。

表 2-1 攀西四大矿区矿石中各种组分平均值(%)对比

品级	矿田	TFe	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	MgO	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	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-IV	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	6.46	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-III	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	8.08	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-II	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	5.75	3.34	5~7		0.218	0.011	0.010	0.017	0.553	0.0029
Fe-I	P	43.04	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——红格矿区; P——攀枝花矿区; B——白马矿区; T——太和矿区。以下均同。

攀西地区钒钛磁铁矿已知有90余种矿物,但主要的是Fe、Ti、V、Cr的氧化物和各种硅酸盐类矿物,还有少量的S、As化合物和磷酸盐矿物。矿石中的主要有用成分多分布于钛磁铁矿、钛铁矿和硫砷化物中。表2-2、表2-3和表2-4分别列出钛磁铁矿、钛铁矿及硫砷化物中的化学组分含量。

表 2-2 攀西四大矿区钒磁铁矿单矿物化学组分含量(%)比较

品级	矿区	TFe	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Co	Ni	Cu	S	Ca	TFe/TiO <sub>2</sub>	密度
岩石	H	58.74	52.07	20.15	6.75	0.54	0.023	0.16	0.136	4.30	1.71	1.34	1.72	0.013	0.002		0.01	0.008	8.70	4.861
	P	57.32	44.54	33.66	9.65	0.66	0.06	0.31		2.93	4.05	1.54	0.48	0.024	0.008		0.28	0.0058	5.94	4.610
	B	60.87	48.73	34.05	7.97	0.70	0.22	0.34	0.034	1.22	3.55	1.49	0.55	0.015	0.025	0.020	0.196	0.0063	7.64	4.799
Fe-N	T	61.01	48.83	34.55	7.52	0.43		0.26	0.096	1.92	1.70	2.06	0.70	0.008	0.044	0.019	0.041		8.14	4.733
	H	59.26	51.40	31.64	7.90	0.67	0.55	0.22	0.030	1.95	2.49	1.89	0.55	0.010	0.066	0.016	0.123	0.0050	7.50	4.842
	P	58.52	50.72	29.59	9.40	0.60	0.06	0.29	0.08	1.76	3.46	1.64	0.59	0.017	0.012		0.142	0.0050	6.23	4.779
	B	60.89	46.50	36.59	8.07	0.78	0.06	0.27	0.033	1.04	3.29	1.67	0.30	0.015	0.022	0.013	0.359	0.0056	7.55	4.841
Fe-M	T	61.47	50.19	32.57	6.75	0.60		0.29	0.037	1.31	2.27	1.57	0.68	0.005	0.002	0.032	0.15	0.0058	9.41	4.820
	H	59.30	50.76	31.29	9.46	0.64	0.82	0.25	0.030	1.27	2.29	2.33	0.49	0.017	0.097	0.025	0.130	0.0044	6.27	4.850
	P	57.60	45.55	33.03	12.50	0.54	0.09	0.40	0.105	0.96	3.76	2.03	0.14	0.017	0.010		0.167	0.0054	4.61	4.808
	B	59.40	47.52	33.31	10.16	0.74	0.15	0.35	0.018	0.94	3.43	1.92	0.27	0.014	0.021	0.033	0.198	0.0055	5.83	4.833
Fe-I	T	59.74	48.14	33.54	9.10	0.50		0.33	0.078	1.18	2.23	1.53	0.77	0.004	0.003	0.071	0.217	0.0040	6.57	4.805
	H	56.02	45.93	31.53	13.81	0.60	0.62	0.31	0.015	1.24	2.53	3.39	0.38	0.018	0.055	0.039	0.171	0.0036	4.06	4.774
	P	55.97	48.45	28.35	14.01	0.50	0.09	0.40	0.094	0.71	3.85	2.38	0.23	0.011	0.008		0.112	0.0050	4.00	4.729
	B	59.25	48.44	31.57	10.85	0.69	0.05	0.40	0.042	0.87	3.00	1.96	0.18	0.012	0.020	0.028	0.102	0.0050	5.46	4.816
Fe-I	T	58.12	45.89	33.47	12.20	0.56		0.39	0.065	0.95	1.72	1.96	0.45	0.005	0.005	0.032	0.29	0.0040	4.76	4.753
	H	54.58	43.87	29.99	14.85	0.60	0.49	0.34	0.044	0.57	2.46	0.92	0.29	0.017	0.006	0.019	0.066	0.0031	3.68	4.713
	P	55.59	43.66	32.16	14.97	0.48	0.13	0.35	0.10	0.37	3.74	2.60	0.21	0.013	0.015	0.293	0.0050	3.71	4.726	
	B	56.61	48.30	30.50	14.97	0.48		0.43	0.036	0.44	1.59	1.99	0.45	0.006	0.005	0.023	0.045	0.0040	3.78	4.730



表 2-3 攀西四大矿区钛铁矿单矿物化学组分含量(%)对比

品级	矿区	TFe	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Co	Ni	Cu	S	Ca	TFE/TiO <sub>2</sub>	密度
岩石	H	33.4	4.19	39.25	49.23	0.110	Tr	0.38	0.037	2.51	0.36	0.15	2.38	0.018	0.001		0.049	0.0043	0.58	4.655
	P	37.73	8.60	40.80	45.99	0.060	0.03	0.81		0.11	1.01	2.10	0.48	0.016	0.008		0.02		0.82	4.660
	B	35.00	5.44	39.58	50.84	0.090	0.085	0.87		0.84	0.47	1.41	0.33	0.007	0.003		0.020		0.69	4.717
	T	36.18	6.98	40.27	40.29			0.63	0.028			1.87	0.44	0.002	0.024	0.010	0.010		0.90	4.725
Fe-IV	H	34.4	5.26	39.28	49.86	0.067	0.023	0.79	0.022	1.30	0.37	2.30	0.52	0.013	0.008	0.005	0.031	0.0002	0.69	4.649
	P	35.77	9.44	37.48	48.18	0.055	0.052	0.85	0.035	0.24	0.87	2.27	0.30	0.019	0.011		0.027	0.0008	0.74	4.677
	B	34.28	4.48	40.08	50.71	0.068	0.073	0.87		0.55	0.47	2.32	0.33	0.007	0.005	0.013	0.023		0.68	4.637
	T	35.24	5.66	40.25	50.28	0.065		0.61	0.021			2.09	0.47	0.005	0.017	0.009	0.012		0.70	4.697
Fe-III	H	32.56	5.01	37.15	50.44	0.062	0.027	0.78	0.011	0.60	0.59	3.59	0.32	0.013	0.015	0.006	0.006	0.0002	0.65	4.604
	P	33.78	6.88	37.22	49.52	0.033	0.071	0.55	0.044	0.19	0.86	4.22	0.27	0.020	0.010		0.030	0.0011	0.68	4.639
	B	33.08	3.91	38.67	51.28	0.073	0.073	0.78	0.008	0.21	0.46	3.27	0.38	0.009	0.007	0.004	0.029		0.65	4.647
	T	34.82	5.54	40.82	50.36	0.040		0.70	0.035			2.66	0.46	0.005	0.011	0.009	0.016		0.69	4.658
Fe-II	H	29.54	3.49	34.39	52.45	0.043	0.021	0.71	0.015	0.43	0.33	5.96	0.31	0.016	0.014	0.004	0.050	0.0002	0.56	4.564
	P	31.60	7.62	38.37	50.79	0.032	0.055	0.47	0.05	0.19	0.85	5.82	0.40	0.020	0.012		0.017	0.0014	0.62	4.567
	B	32.23	5.29	36.16	51.83	0.117	0.60	0.85		0.25	0.52	3.70	0.38	0.068	0.013	0.008	0.033		0.65	4.641
	T	32.29	4.56	37.58	51.57	0.027		0.56	0.037	0.83	0.42	4.21	0.67	0.007	0.019	0.009	0.019		0.63	4.650
Fe-I	H	28.72	3.23	32.03	52.65	0.034	0.019	0.53	0.019	0.36	0.42	9.06	0.23	0.022	0.018	0.029	0.025		0.55	4.518
	P	30.24	5.36	34.02	51.47	0.023	0.089	0.44	0.044	0.59	0.83	6.87	0.27	0.019	0.009		0.035		0.59	4.522
	T	31.90	5.10	36.65	52.05	0.027		0.64	0.030			4.90	0.63	0.011	0.007	0.009	0.011		0.67	4.613