

● 李大成 刘恒 周大利 编著

TAI YELIAN GONGYI



钛 冶炼工艺



化学工业出版社



欢迎订购冶金与金属类图书

钢铁 (CIP) 目录题录在图

工学位, 京北 ● 李大成 刘恒 周大利 编著

TAI YELIAN GONGYI

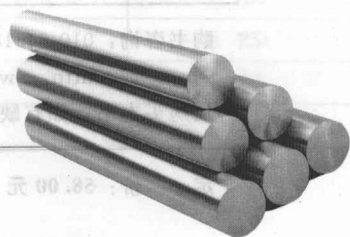
江苏工业学院图书馆
藏书章

钛 冶炼工艺



化学工业出版社

北京



图书在版编目 (CIP) 数据

钛冶炼工艺/李大成, 刘恒, 周大利编著. —北京: 化学工业出版社, 2009.5
ISBN 978-7-122-04854-7

I. 钛… II. ①李…②刘…③周… III. 钛-有色金属冶金
IV. TF823

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 023403 号

责任编辑: 丁尚林
责任校对: 李 林

文字编辑: 徐雪华
装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司
720mm×1000mm 1/16 印张 22¼ 字数 385 千字
2009 年 5 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究

前 言

钛及钛合金，由于其优良的理化性质和应用效能，在国民经济许多部门有着广泛的用途。过去因为价格昂贵，很长时间主要用于国防军工，民用不多。近年来，随着我国钛冶炼技术的进步，质量提高，成本降低，应用领域扩大，销售量激增。在这种情况下，老的钛厂不断扩产，新的钛厂纷纷上马，呈现出蓬勃发展的趋势。因此，钛厂职工的培训，需要教材；工程技术人员需要参考书；另外，在我国高等教育中，很长一段时间以来，由于种种原因，一些学校减少了生产实习次数，还有一些学校取消了课程设计和毕业设计，基本上都转向做论文，学生工程训练有所削弱，因此，高校有色及稀有金属冶金专业也需要这方面的教材和专著。为适应社会需求和满足高校教学之需，我们编写了本书。

本书一方面总结了编者长期从事钛冶金教学、培训与科研工作的资料，同时结合国内钛冶炼企业的实际情况而编写，重点介绍了钛冶炼的工艺过程，对钛冶金过程中的一些热力学计算和物料平衡、热量平衡以例题形式作了定量介绍。力求做到：过程全、信息新、内容广、有理论、有实践。

在编写过程中，得到恩师彭少方教授的鼓励和关心，得到攀钢钢企金沙钛业有限公司汪智德总经理、张建安副总经理的大力支持，万仁述高工提供了一部分资料，在此对他们表示衷心感谢。

由于编者水平有限，时间仓促，不妥之处敬请读者批评指正。

编著者
于四川大学

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 钛冶金发展简史	1
1.1.1 钛的发现及实验室研究	1
1.1.2 国外金属钛工业生产的发展情况	1
1.1.3 我国钛工业生产发展及目前状况	3
1.1.4 世界几家主要海绵钛厂简介	4
1.2 钛资源概况	5
1.2.1 钛在地壳中的分布	5
1.2.2 钛矿物的种类及其一般特征	6
1.2.3 钛矿物形成的矿床	7
1.2.4 钛矿的储量及其开采	10
1.2.5 国内外钛精矿的化学组成	15
1.2.6 我国天然金红石及钛铁矿精矿标准及产能	15
1.3 金属钛的应用	19
1.4 金属钛的生产方法简介	25
第 2 章 钛及其重要化合物的性质	28
2.1 钛的性质	28
2.1.1 金属钛的物理性质和热力学性质	28
2.1.2 化学性质	28
2.1.3 力学性能	34
2.2 钛的重要化合物的性质	35
2.2.1 氧化物	35
2.2.2 卤化物及氯氧化物	40
2.2.3 碳化物、氮化物、硼化物及氢化物	45
2.2.4 钛的无机盐和有机化合物	49
第 3 章 人造金红石和钛渣的生产	50
3.1 人造金红石的生产	51

3.1.1	选择性氯化法	52
3.1.2	还原-锈蚀法	54
3.1.3	稀硫酸浸出法	56
3.1.4	BCA 稀盐酸循环浸出法	57
3.1.5	浓盐酸浸出法	60
3.1.6	选-冶联合稀盐酸加压浸出法	60
3.1.7	稀盐酸流态化浸出法	63
3.1.8	其他方法	63
3.2	钛渣熔炼	63
3.2.1	钛渣熔炼概况	64
3.2.2	电炉还原熔炼钛渣的原理	65
3.2.3	钛渣的相结构、化学组成及主要物理性质	68
3.2.4	影响钛渣熔炼的主要因素	74
3.3	钛渣生产工艺流程	77
3.3.1	原料准备	79
3.3.2	电炉料制备	80
3.3.3	电炉熔炼	80
3.3.4	成品渣加工	80
3.4	钛渣生产的主要设备	81
3.4.1	破碎磨粉设备	81
3.4.2	电炉料制备设备	81
3.4.3	电炉设备	82
3.4.4	烧穿器和渣包	90
3.4.5	磁选设备	90
3.5	钛渣生产实践	90
3.5.1	原料准备	90
3.5.2	电炉料制备	91
3.5.3	电炉熔炼	92
3.5.4	成品渣加工	95
3.6	钛渣熔炼的物料平衡及热量平衡	96
3.7	有代表性的钛渣生产实例	102
3.7.1	QIT 公司的钛渣熔炼	102
3.7.2	前苏联的钛渣熔炼	104
3.7.3	我国的钛渣熔炼	105

3.8 钛渣电炉冶炼的技术经济指标	105
3.8.1 我国某厂 6300kV·A 电炉的技术经济指标	105
3.8.2 前苏联半密闭电炉熔炼钛渣的主要指标	106
3.9 钛渣生产的发展方向	107
3.10 节能措施	112
第 4 章 粗 TiCl_4 的生产	113
4.1 氯化过程的基本原理	113
4.1.1 氯化过程的热力学分析	113
4.1.2 氯化过程的动力学分析	126
4.1.3 影响氯化的因素	128
4.2 氯化工艺	130
4.2.1 氯化方法概述	130
4.2.2 钛渣的沸腾氯化	133
4.2.3 钛渣的熔盐氯化	158
4.3 节能措施	164
第 5 章 粗 TiCl_4 的精制	165
5.1 精制的原理和方法	165
5.1.1 粗四氯化钛中杂质的分类	165
5.1.2 用蒸馏和精馏的方法除去高沸点杂质和低沸点杂质的 基本原理	167
5.1.3 除钒的原理和方法	169
5.2 精制工艺流程	174
5.3 精制主要设备	175
5.3.1 浮阀塔	175
5.3.2 铜丝塔	178
5.3.3 蒸馏釜	178
5.3.4 冷凝器	179
5.4 精制工艺	179
5.4.1 对粗 TiCl_4 的要求	179
5.4.2 精馏塔的操作	180
5.4.3 铜丝塔的操作	182
5.5 节能措施	184
5.6 对精 TiCl_4 的质量要求	184

第 6 章 镁热还原法生产海绵钛	185
6.1 镁还原 TiCl_4 反应的理论基础	185
6.1.1 镁还原反应的热力学	186
6.1.2 还原反应的机理和动力学	189
6.2 真空蒸馏的理论基础	195
6.2.1 真空蒸馏的原理和过程	195
6.2.2 真空蒸馏动力学	198
6.3 生产准备	201
6.3.1 原材料准备 (加液镁工艺)	201
6.3.2 还原设备准备 (渗钛工艺)	202
6.4 镁还原 TiCl_4 的生产工艺和主要设备	203
6.4.1 工艺流程	203
6.4.2 镁还原生产过程及工艺条件的选择	204
6.4.3 还原结束及产品冷却、拆卸	206
6.4.4 还原设备	206
6.5 真空蒸馏工艺流程和主要设备	212
6.5.1 还原-蒸馏分开式生产的工艺流程	212
6.5.2 I 型半联合法 (及联合法) 和倒 U 形联合法流程	212
6.5.3 真空蒸馏主要设备	215
6.6 真空蒸馏生产工艺	220
6.6.1 蒸馏设备的安装和准备	220
6.6.2 真空蒸馏过程及工艺条件的选择	220
6.6.3 真空蒸馏结束	221
6.6.4 真空蒸馏可能发生的故障和处理	221
6.6.5 自控与车间布置	223
6.7 海绵钛的后处理	223
6.7.1 产品取出	225
6.7.2 产品破碎	225
6.7.3 产品挑选	226
6.7.4 产品包装	227
6.8 提高产品质量的措施	227
6.8.1 铁	227
6.8.2 氯根 (Cl^-)	229

6.8.3 氮	230
6.8.4 氧	231
6.8.5 其他杂质	231
6.8.6 产品硬度	232
6.9 镁热法海绵钛生产的成本分析	233
6.10 节能措施	233
6.11 对镁热法海绵钛生产过程的评价	234
6.11.1 世界几个主要海绵钛生产国近几年的产能和产量	234
6.11.2 我国海绵钛生产线情况统计	236
6.11.3 海绵钛生产过程的评价	236
6.11.4 海绵钛生产目前状况及发展趋势	237
第7章 钠热还原法生产海绵钛	240
7.1 钠热还原 TiCl_4 生产海绵钛的热力学	240
7.1.1 钠热还原反应标准自由焓变化 ΔG_T^0 与温度 T 的关系	240
7.1.2 钠热反应的反应热	243
7.1.3 Na-NaCl 二元系、 TiCl_3 -NaCl 二元系、 TiCl_2 -NaCl 二元系和 TiCl_3 - TiCl_2 -NaCl 三元系简介	244
7.2 钠热还原法生产海绵钛的工艺流程	247
7.3 还原剂钠的净化提纯和准备	247
7.4 钠热还原 TiCl_4 制取海绵钛的生产方法	249
7.4.1 一段还原法	250
7.4.2 二段还原法	257
7.4.3 从反应产物中分离出钛	259
7.5 钠热还原法所得海绵钛的质量	260
7.6 节能措施	261
7.7 钠热法与镁热法海绵钛生产的比较	262
第8章 其他制取金属钛的方法	264
8.1 以 TiCl_4 为原料制取金属钛	265
8.2 以 TiO_2 为原料制取金属钛	267
8.2.1 TiO_2 的金属热还原	267
8.2.2 TiO_2 直接电解还原制取金属钛	270
8.3 TiCl_4 的电解还原	272
8.3.1 电解质体系的选择	272

8.3.2	钛氯化物在熔盐中的理论分解电压	273
8.3.3	电解工艺	275
8.4	TiO ₂ 的熔盐电解	276
8.5	钛粉的生产	278
8.5.1	TiO ₂ 的钙还原法	278
8.5.2	海绵钛直接粉碎法	278
8.5.3	熔盐电解法	278
8.5.4	熔盐电解精炼处理残钛法生产钛粉 (见 8.6)	278
8.5.5	氢化-脱氢法 (HDH Process)	278
8.6	残钛的回收利用——钛的电解精炼	279
8.6.1	废残钛的来源	279
8.6.2	残钛回收处理后的利用	280
8.6.3	钛的熔盐电解精炼	280
8.6.4	电解精炼的电解槽结构	284
8.6.5	阴极析出物的湿法冶金处理	284
8.6.6	电解精炼钛的质量	285
8.7	高纯钛的生产——碘化物热离解法	286
第 9 章	致密金属钛的生产	289
9.1	电弧熔炼法	289
9.1.1	非自耗电极真空电弧炉	289
9.1.2	自耗电极真空电弧炉	291
9.1.3	自耗电极真空电弧熔炼工艺	291
9.1.4	自耗电极真空电弧熔炼实例	293
9.2	粉末冶金法	294
第 10 章	MgCl₂ 的电解和粗镁的精炼	296
10.1	氯化镁电解的基本原理	298
10.1.1	电解的基本原理	298
10.1.2	电流效率和电能效率的计算	299
10.2	镁电解的主要设备	302
10.2.1	电解槽	302
10.2.2	氯压机和阳极氯气处理系统	308
10.2.3	阴极气体处理系统	309
10.3	镁电解操作工艺	311

10.3.1	电解槽的烤槽和启动	311
10.3.2	电解槽的加料和排废电解质	313
10.3.3	出镁	313
10.3.4	出渣	314
10.3.5	电解槽的温度和极距	314
10.3.6	电解槽故障及消除方法	316
10.3.7	镁电解槽的节能	317
10.4	镁的精炼	318
第 11 章	钛冶金中的三废处理和工业卫生	321
11.1	三废处理	321
11.1.1	废气和废渣的处理	321
11.1.2	废水和废液的处理	324
11.2	工业卫生及安全	325
11.2.1	氯和一些氯化物对人体的危害及安全知识	326
11.2.2	放射性物质的危害	328
11.2.3	CO 的危害	329
11.2.4	安全防御措施	329
	参考文献	332
	附录	339
表 1	常用钛化合物的基本性质	339
表 2	TiCl ₄ 及其中所含杂质的某些性质	340
表 3	镁还原系各组分性质比较	341
表 4	中国、美国、日本、前苏联海绵钛标准的主要技术指标	341

1.1 钛冶金发展简史

1.1.1 钛的发现及实验室研究

18 世纪末期, 英国牧师兼业余矿物学家 W. 格列戈尔 (William Gregor) 和德国化学家 M. H. 克拉普罗特 (M. H. Klaproth) 先后于 1791 年和 1795 年分别从一种黑色的磁铁矿砂 (后来知道这就是钛磁铁矿) 和一种非磁性的氧化物矿 (后来明白它就是天然金红石矿) 中发现了一种新元素, 被他们分别称为“墨纳昆”(发现钛磁铁矿的地名) 和“钛土”。几年后证明, 从这两种矿物中发现的所谓“墨纳昆”和“钛土”其实是同一种元素的氧化物, 并以希腊神话中的大力神泰坦 (Titans) 来命名这种新元素为“钛” (Titanium)。

从钛元素的发现到第一次制得较纯的金属钛经历了 120 年的历程。又由实验室第一次获得纯钛到首次进行工业生产, 又花费了近 40 年的时间。许多研究者做了大量的探索, 遭受一次又一次失败, 终于在 1948 年杜邦公司取得了成功, 生产出了吨位级的海绵钛。表 1-1 列出了一些具有代表性的试验研究情况。表 1-2 总结了国外几个海绵钛生产国历年的工业生产情况。我国海绵钛和钛锭的生产能力见表 1-3。

1.1.2 国外金属钛工业生产的发展情况

全世界 1955 年生产钛 $2 \times 10^4 \text{ t}$, 1962 年猛增到 $6 \times 10^4 \text{ t}$, 20 世纪 70 年代年达产 $11 \times 10^4 \text{ t}$, 80 年代至 1990 年年产 $13 \times 10^4 \text{ t}$, 1992 年达 $14 \times 10^4 \text{ t}$ 。

表 1-1 历史上对制取金属钛的研究工作大事记

年份	研究者	研究情况
1791	W. 格列戈尔	从墨纳昆城产出的钛磁铁矿砂中发现了元素钛
1795	M. H. 克拉普罗特	从金红石矿中发现了元素钛
1825	I. J. 贝齐里乌斯	用钾还原 K_2TiF_6 的方法,在实验室第一次制得金属钛,但量少又不纯,不能供研究之需
1887	尼尔森和彼得森	用钠热还原 $TiCl_4$ 的方法制备了杂质含量小于 5% 的金属钛,同样因量少杂质多,无法对其进行进一步研究
1895	缪萨拉	用碳还原 TiO_2 再精炼的方法制得了少量约含 2% 杂质的金属钛
1910	M. A. 亨特	在钢弹中,真空钠热还原高纯 $TiCl_4$,第一次制取了几克量的纯金属钛,含杂质 0.5%。这就是被称为亨特法或钠热法的海绵钛生产,后来实现了大规模工业生产
1925	V. 阿尔克尔和 D. 布尔	在灼热钨丝上的 TiI_4 热离解法,制得了具有优良延展性的高纯金属钛。此法至今还在工业上应用
1938	W. J. 克劳尔	在内衬了钼的反应器中,在 Ar 惰气保护下,用镁热还原纯 $TiCl_4$ 的方法制取海绵钛。这就是沿用至今并不断发展改进的克劳尔法或镁热海绵钛生产法 1948 年起,此法进入大规模工业生产阶段

表 1-2 国外几个海绵钛生产国历年的工业生产情况

国家	年份	生产情况/(t/a)
美国	1948	9 月杜邦公司发布了镁法海绵钛生产获得成功的消息。当年共生产海绵钛 3t,纯度 $>99\%$
	1950	年产海绵钛 60t
	1951	海绵钛产量为 450t
	1957	海绵钛产量 15500t
	1981	年产海绵钛 26300t
	1985	年产海绵钛 34000t
	2005	年产海绵钛 8900t
	2006	年产海绵钛 12300t
	2007	年产海绵钛 14000t
日本	2009(预计)	产量达 31000t
	1951	大阪钛公司实验室制取了海绵钛 20kg
	1954	制造成功月产海绵钛 50t(炉产量 1t)的工业设备,为海绵钛生产奠定了基础。20 世纪 70 年代后海绵钛产量不断增加
	1975	7600t
	1978	9200t
	1981	24800t

续表

国家	年份	生产情况/(t/a)	
日本	2005	30600t	
	2006	39000t	
	2007	39700t	
	2009(预计)	60000t	
	2010(预计)	66000t	
英国		因镁原料缺乏,过去海绵钛生产全部采用钠还原法。1994 年以前年产量约 2500t,1994 年以后最后一家钛厂(迪赛德厂)关闭。英国从此退出海绵钛生产国之列	
前苏联	1947	开始海绵钛生产工艺的研究	
	1950	进行了金属钛的工业生产试验	
	1952	解决了原料供应问题,具备了生产海绵钛的基本条件	
	1954	在俄罗斯境内的波多尔斯克化冶厂,用镁热法生产出了第一批海绵钛	
	1956	在乌克兰扎波罗热市的第聂伯镁钛联合企业投产	
	1960	在俄罗斯乌拉尔的别列兹尼科夫镁钛联合企业投产	
	1965	在哈萨克斯坦乌斯季卡明诺哥尔斯克镁钛联合企业投产	
现独联体三国	2005	三国总产量 45750t	现在独联体三国是美国波音公司和欧盟空客公司的主要钛材供应商
	2006	三国总产量 56500t	
	2007	三国总产量 67500t	
	2009(预计)	三国总产量 70000t	
	2010(预计)	三国总产量 70000t	

2005 年 $10.195 \times 10^4 \text{t}$, 2006 年 $12.58 \times 10^4 \text{t}$, 2007 年 $17.12 \times 10^4 \text{t}$, 2009 年预计 $25.1 \times 10^4 \text{t}$, 2010 年和 2011 年预计都是 $26.7 \times 10^4 \text{t}$ 。

1.1.3 我国钛工业生产发展及目前状况

我国于 1955 年在原北京有色金属综合研究所(现有有色金属研究总院)开始钛生产工艺的研究工作,1958 年以 10kg/炉的实验室规模制取了第一批海绵钛。1959 年在抚顺铝厂扩大至 100kg/炉的小规模试生产,为我国海绵钛的生产奠定了基础。在 20 世纪 60 和 70 年代上海第二冶炼厂、湛江化工厂和遵义钛厂相继建立了海绵钛厂(前两个厂早已停产),现仅遵义钛厂和抚顺钛厂在继续生产。目前,还有多家海绵钛厂正在建设和准备建设中。2007 年,继续按计划推进的海绵钛项目有以下一些:遵义钛业现有产能 $1.4 \times 10^4 \text{t/a}$,正在新扩建的产能 $1.5 \times 10^4 \text{t/a}$ 。金川公司 $1.5 \times 10^4 \text{t/a}$ 。攀

钢集团 $1.5 \times 10^4 \text{ t/a}$ 。攀枝花钢企金沙钛业有限公司 $5 \times 10^3 \text{ t/a}$ 。中信锦铁 $1.0 \times 10^4 \text{ t/a}$ 。东方铝业 $1.0 \times 10^4 \text{ t/a}$ 。云南冶金集团 $1.0 \times 10^4 \text{ t/a}$ 。攀枝花恒为制钛公司一期工程 $5 \times 10^3 \text{ t/a}$ （二期工程计划 $1.5 \times 10^4 \text{ t/a}$ ）。

我国 2007 年海绵钛产能已达 $5.8 \times 10^4 \text{ t/a}$ ，比 2006 年增加 $2.8 \times 10^4 \text{ t/a}$ 。实际产量 $4.52 \times 10^4 \text{ t/a}$ ，比 2006 年多生产 $2.7163 \times 10^4 \text{ t}$ ，增长 1.5 倍。

2007 年，我国钛锭生产能力达到 $4.83 \times 10^4 \text{ t/a}$ ，比 2006 年增加 $7.7 \times 10^3 \text{ t/a}$ 。实际生产钛锭 $3.4469 \times 10^4 \text{ t}$ ，比 2006 年多生产 $1.24 \times 10^4 \text{ t}$ ，增长 55.8%。宝钛股份公司正在扩大钛锭生产能力，预计 2008 年达到 $2.0 \times 10^4 \text{ t/a}$ 。攀长钢正在进行 $1.0 \times 10^4 \text{ t/a}$ 钛材项目建设。湖南金天集团也正在进行 $0.5 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^4 \text{ t/a}$ 钛加工材项目的建设。我国近年海绵钛和钛锭产能增长情况见表 1-3。

表 1-3 我国近年海绵钛和钛锭的生产能力 $\times 10^4 \text{ t/a}$

年 份		2002	2003	2004	2005	2006	2007
海绵钛	全国	0.38	0.42	0.5	1.3	3.0	5.8
	其中遵义钛业	0.3	0.3	0.35	1.0	1.4	1.4
	抚顺钛业	0.08	0.12	0.15	0.2	0.5	0.5
	其他厂家				0.1	1.1	3.9
钛 锭	全国	1.1	2.46	2.55	2.63	4.06	4.83
	其中宝钛集团	0.4	0.6	0.6	0.6	1.2	1.2
	宝钢特钢	0.03	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	西北院			0.05	0.05	0.4	0.4
	其他厂家	0.64	1.36	1.4	1.48	1.96	2.73

2007 年我国共生产钛粉约 $1.52 \times 10^3 \text{ t/a}$ ，比 2006 年增长 8.4%。

2007 年我国共生产钛加工材 $2.364 \times 10^4 \text{ t/a}$ ，比 2006 年多生产 $1.0 \times 10^4 \text{ t/a}$ ，增幅达 84.6%。

1.1.4 世界几家主要海绵钛厂简介

世界几家海绵钛厂 2005 年和 2006 年的生产能力见表 1-4。至今海绵钛的世界产量仍很小，根本原因在于成本太高。而成本高的根本原因又在于：①工序多、流程长，生产周期长，从炼钛渣算起到产出海绵钛需时在 15~20 天以上，单是还原-蒸馏，1~3t 炉，需 5~6 天；5t 炉需 8~10 天。②能耗太大。镁-钛联合企业生产 1t 海绵钛的电耗在 $3.5 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 以上（其中钛生产与镁电解约各占 1/2）。③过程不连续，间歇操作，劳动强度较大。

表 1-4 世界几家海绵钛厂 2005 年和 2006 年的生产能力

序号	国别	工厂或公司名称	工厂所在地	建厂年份	2005 年 和 2006 年生产 能力 (/kt/a)	备 注
1	哈萨克 斯坦	乌斯季卡缅诺戈尔斯克镁 钛联合企业(现名 UKTMP)	东哈萨克斯坦	1965	23	属前苏联, 全 部镁还原-真 空蒸馏
2	俄罗斯	别列兹尼科夫镁钛联合企 业(现名 AVISMA-VSMPO)	西乌拉尔	1962	28~30	
3	乌克兰	扎波罗热市第聂伯镁钛联合 企业(现名 ZAPOROZHYE)	南乌克兰	1957	8~9	
4	日本	大阪钛公司(SUMITO- MO)	尼崎兵库县	1952-1953	18~24	镁法真空 蒸馏
		东邦钛公司(TOHO)	神奈川县茅崎	1953	12.5~15	镁法真空 蒸馏
5	美国	钛金属公司(TIMET)	内华达州	1951	8.9	镁法酸浸出
		俄勒冈冶金公司 (OREMET)	俄勒冈州	1967	5.4	镁法氢吹扫
		国际钛公司(现名 ATI 公 司)			3.4	
6	中国	遵义钛厂	贵州省遵义市	1969	14	镁法真空 蒸馏
		抚顺钛厂	辽宁省抚顺市	1957	5	镁法真空 蒸馏
总计					126~141	

④“三废”较多,处理费用高。⑤原材料和设备费用贵,一次性投资大(1t 海绵钛的建设投资约 13 万~15 万元)。

1.2 钛资源概况

1.2.1 钛在地壳中的分布

钛在地壳(在矿物学和地质学上,地壳厚度假定为 16km,主要由岩石圈构成,此外还包括全部水圈和部分大气圈,这与地理学上对地壳的定义有别。)中的含量,按质量百分比计为 0.45%。

按照元素在地壳中的丰度值(质量百分数),钛在地壳中的含量是十分丰富的,其分布序列占第九位,按金属计为第七位,如按结构金属计,仅次于铝、铁、镁而居第四位。比常见的铜、镍、锡、铅、锌等普通有色金属在

地壳中的含量总和还要多十几倍。在岩石、土壤、泥煤、烟煤、砂粒及许多植物中都有钛的存在，动物的骨、血中也含有钛。钛不仅广泛分布于地壳中，而且也广泛地分布在月球、恒星系及陨石中。因此，按其在地壳中的储量而论，钛并不稀有，而是一种储量十分丰富的元素。但由于冶炼技术复杂，工业生产年代较迟，产量不是很大等种种原因，仍被称为“稀有金属”。

1.2.2 钛矿物的种类及其一般特征

钛是一个十分活泼的元素，可和周期表中许多元素发生化合反应，特别是对氧的亲合力非常大。因此，自然界中没有游离态的元素钛存在，而总是与氧结合在一起以二氧化钛和钛酸盐状态存在。钛是一个典型的亲石性元素。地壳中含钛1%以上的矿物有80多种（ TiO_2 含量 $>1\%$ 的钛矿物有140多种），但主要的钛矿物只有十多种（见表1-5）。钛最重要的原生矿物是金

表 1-5 重要的钛矿物

序号	矿物	化学式	结晶构造	TiO_2 的理论含量/%	密度 ρ /(g/cm^3)	莫氏硬度	颜色	条痕	磁性
1	金红石	TiO_2	正方晶系	100	4.2~4.3	6~6.5	红褐色	浅褐色	无磁性
2	锐钛矿	TiO_2	正方晶系	100	3.9	5.5~6	褐色	无色	无磁性
3	板钛矿	TiO_2	斜方晶系	100	4.1	5.5~6	黄色到褐色	无色	无磁性
4	钛铁矿	FeTiO_3	三方晶系	52.66	4.5~5	5~6	黑色	黑色	弱磁性
5	白钛石	$\text{TiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (变质物)	组成不固定	3.5~4.5	4~5.5	灰黄色到褐色			非磁性
6	钙钛矿	CaTiO_3	立方晶系	58.75	4.1	5.5	深褐色	灰白色	通常为非磁性矿物
7	榍石	CaTiSiO_5	单斜晶系	40.82	3.5	5~5.5	黄色,褐色,绿色		
8	假板钛矿	Fe_2TiO_5	斜方晶系	33.35	4.39	6.0	赤褐色暗褐色		
9	红钛铁矿	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{TiO}_2$	六方晶系	60.01	4.25		赤褐色		
10	钛磁铁矿	$\text{FeTiO}_3 \cdot \text{Fe}_3\text{O}_4$	等轴晶系						强磁性
11	赤铁钛铁矿	$\text{FeTiO}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	三方晶系						弱磁性
12	钛铁晶石	Fe_2TiO_4 ($2\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$)	等轴晶系	35.73	3.5~4.0	5~5.5	黑色		强磁性
13	镁钛矿	MgTiO_3	三方晶系	66.46	4.03~4.05	5~6	暗褐色		
14	红锰钛矿	MnTiO_3		52.97	4.54~4.58	5~6	褐黑色		
15	钙铈钛矿	$(\text{Ca}, \text{Ce})\text{TiO}_3$		54~59	4.21~4.88				
16	钙铈钛矿	$(\text{Ca}, \text{Nb})\text{TiO}_3$		34.95	4.13~4.26				