

# 金属钛及其应用

〔日〕草道英武等 编

程敏 赵克德 屈翠芬 译

陈彰勇 校



中国有色金属加工工业协会组织翻译

## 金属钛及其应用

〔日〕草道英武等 编

程敏 赵克德 屈翠芬 译

陈彰勇 校

责任编辑 张泉

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿大街 嵩祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所经销

冶金工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张  $10\frac{7}{8}$  字数 283 千字

1989年8月第一版 1989年8月第一次印刷

印数00,001~1,400册

ISBN 7 5024 0308 6

TG.53 定价7.55元

# 目 录

## I 基础篇

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第一章 金属钛的资源 and 冶炼 .....         | 3  |
| 1.1 钛的资源 .....                  | 3  |
| 1.2 钛矿石和四氯化钛 .....              | 4  |
| 1.2.1 钛矿石的前处理 .....             | 5  |
| 1.2.2 钛矿石的氯化 .....              | 6  |
| 1.2.3 $\text{TiCl}_4$ 的提炼 ..... | 6  |
| 1.3 金属钛的还原 .....                | 8  |
| 1.3.1 克洛尔法 (镁还原法) .....         | 8  |
| 1.3.2 钠还原法 (亨特法) .....          | 11 |
| 1.3.3 电解法 .....                 | 13 |
| 1.4 高纯碘化法钛 .....                | 14 |
| 第二章 金属钛的熔炼和加工 .....             | 16 |
| 2.1 钛和钛合金的熔炼 .....              | 16 |
| 2.1.1 非自耗电极电弧熔炼法 .....          | 18 |
| 2.1.2 自耗电极电弧熔炼法 .....           | 19 |
| 2.1.3 等离子束熔炼法 .....             | 22 |
| 2.2 钛的加工 .....                  | 24 |
| 2.2.1 钛的塑性加工 .....              | 24 |
| 2.2.2 压延加工 .....                | 26 |
| 2.2.3 钛铸件 .....                 | 28 |
| 2.3 钛及钛合金的焊接 .....              | 29 |
| 2.3.1 焊接方法 .....                | 30 |
| 2.3.2 钛的施焊技术 .....              | 31 |
| 2.3.3 TIG 的焊接操作 .....           | 32 |
| 2.3.4 钛的钎焊 .....                | 33 |

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| 2.4 机械加工 .....                                      | 33 |
| 2.4.1 钛的切削性 .....                                   | 34 |
| 2.4.2 工具的烧接、粘着 .....                                | 34 |
| 2.4.3 钛的切削技术 .....                                  | 35 |
| 第三章 金属钛的性质和特征 .....                                 | 38 |
| 3.1 工业纯钛和 $\alpha$ 钛合金 .....                        | 39 |
| 3.1.1 工业用纯钛 .....                                   | 39 |
| 3.1.2 $\alpha$ 钛合金 .....                            | 43 |
| 3.2 $\alpha + \beta$ 型钛合金 .....                     | 51 |
| 3.2.1 $\alpha + \beta$ 型钛合金的组成 .....                | 51 |
| 3.2.2 通过塑性加工、热处理来控制 $\alpha + \beta$ 型合金的显微组织 ..... | 53 |
| 3.2.3 $\alpha + \beta$ 型合金的特性 .....                 | 60 |
| 3.3 $\beta$ 合金及其他 .....                             | 64 |
| 3.3.1 $\beta$ 合金的种类 .....                           | 61 |
| 3.3.2 $\beta$ 合金的性质 .....                           | 67 |
| 3.3.3 粉末冶金 .....                                    | 72 |
| 3.3.4 新材料 .....                                     | 73 |

## II 应用篇

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第四章 民用飞机和钛 .....            | 79  |
| 第五章 日本国产飞机和钛 .....          | 105 |
| 第六章 宇宙火箭和钛 .....            | 113 |
| 第七章 钛合金在宇宙飞船和航天飞机上的应用 ..... | 120 |
| 第八章 喷气发动机和钛 .....           | 126 |
| 第九章 喷气发动机钛合金部件的机械加工 .....   | 146 |
| 第十章 超导和钛 .....              | 153 |
| 第十一章 超导发电机和钛 .....          | 167 |
| 第十二章 用作传热管材的薄壁焊接钛管 .....    | 170 |
| 第十三章 能源和钛 .....             | 213 |
| 第十四章 用作耐蚀材料的钛和化学工业 .....    | 228 |

|       |                         |     |
|-------|-------------------------|-----|
| 第十五章  | 电极和钛 .....              | 250 |
| 第十六章  | 表面处理工业和钛 .....          | 257 |
| 第十七章  | 深海和钛 I (深海潜水调查船) .....  | 263 |
| 第十八章  | 深海和钛 II (潜水艇和救难艇) ..... | 281 |
| 第十九章  | 钛在汽车上的应用 .....          | 291 |
| 第二十章  | 运动器具、娱乐用品、时装、装饰品 .....  | 303 |
| 第二十一章 | 钛在一般工业领域的新用途开发动向 .....  | 314 |
| 参考文献  | .....                   | 329 |

# I 基 础 篇

第一章 金属钛的资源和冶炼

第二章 金属钛的熔炼和加工

第三章 金属钛的性质和特征



# 第一章 金属钛的资源 and 冶炼

〔木村啓造〕<sup>①</sup>

## 1.1 钛的资源

钛在构成地壳的元素中仅次于O、Si、Al、Fe、Ca、Na、K、Mg，而列为第九位(0.44~0.57%)，是含量较多的元素。具体来说，作为矿物资源，以目前的技术而被利用的钛矿主要是钛铁矿( $\text{FeTiO}_3$ )和金红石( $\text{TiO}_2$ )，此外还有锐钛矿( $\text{TiO}_2$ )、板钛石( $\text{TiO}_2$ )以及黑砂(低品位钛铁矿)等(如表1.1所示)。

表 1.1 含钛的矿物

| 矿物名称                  | 化学组成                                                      | TiO <sub>2</sub> % | 晶体形状 | 摘 要    |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------|------|--------|
| 金红石(Rutile)           | TiO <sub>2</sub>                                          | 100~95             | 正方晶  | 红褐色    |
| 板钛矿(Brookite)         | TiO <sub>2</sub>                                          | 100~95             | 斜方晶  | 红褐色    |
| 锐钛矿(Anatase)          | TiO <sub>2</sub>                                          | 100~95             | 正方晶  | 褐色     |
| 伪金红石(Pseudorutile)    | FeO <sub>3</sub> ·3TiO <sub>2</sub>                       | 60                 | 六方晶  | 红褐色    |
| 钛铁矿(Ilmenite)         | FeTiO <sub>3</sub>                                        | 52.7               | 三方晶  | 黑色,弱磁性 |
| 镁钛石(Geikite)          | (Mg·Fe)TiO <sub>3</sub>                                   | 66.3               | 三方晶  | 褐黑色    |
| 灰钛石(Perovskite)       | CaTiO <sub>3</sub>                                        | 58.8               | 等轴晶  | 褐黑色    |
| 榍石(Sphene)(Titelite)  | CaTiSiO <sub>5</sub>                                      | 40.8               | 单斜晶  | 锥状     |
| 钛尖晶石(Ulvöspinel)      | Fe <sub>2</sub> TiO <sub>4</sub> (2FeO·TiO <sub>2</sub> ) | 27.9               | 等轴晶  | 强磁性    |
| 伪板钛石(Pseudobrookite)  | Fe <sub>2</sub> TiO <sub>7</sub>                          | 20                 | 斜方晶  | 短粗晶状   |
| 钛磁铁矿(Titanomagnetite) | FeTi <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                          | 2~25               | 等轴晶  | 强磁性    |
| 钛赤铁矿(Titanohematite)  | (FeTi) <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                        | 2~16               | 三方晶  | 弱磁性    |
| 白铁石(Leucoxene)        | —                                                         | —                  | 变质物  | 黄至褐色   |

当钛在某个特定地方集聚时（钛矿），因采掘和冶炼易于进行，因而具有经济价值，然而当分布较为分散时，则被判断为缺乏经济价值。表示埋藏量的数字，是以当前技术能力和经济价格对企业十分合算的矿石为对象的。

世界上，虽已提出如下钛资源储量：金红石约是2亿吨，钛铁矿换算成  $\text{TiO}_2$  约有14亿吨等数字，然而鉴于钛的重要性，其价格是浮动的。另外考虑到矿山技术的进步也将显著，而世界上的探矿调查不充分等原因，完全可以预料，世界钛资源的数字将有很大变化。正如表 1.2 中所示，1974年钛资源有16亿吨，而其假设的储藏量推算为36亿吨，随着勘探调查和采掘、精炼技术的进步，上述钛资源的数据可望进一步增加。

表 1.2 世界钛矿石资源（1974年估算）

| 洲 名         | 换成 $\text{TiO}_2$<br>(百万吨) | 比例<br>(%) | 备 注                                                                                                                                                            |
|-------------|----------------------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 北美       | 400                        | 25        | <div> <div>1 次矿床（岩石型）</div> <div>纽约、明尼苏达、阿拉斯加、怀俄明</div> <div>（钛铁矿）（磁铁矿）</div> <div>2 次矿床（海滨型）</div> <div>佛罗里达、佐治亚、南卡罗来纳、北卡</div> <div>罗来纳（独居石、锆石）</div> </div> |
| 2. 南美       | 200                        | 13        | 巴西、阿根廷、智利                                                                                                                                                      |
| 3. 澳大利亚，新西兰 | 100                        | 5         | 巴布亚新几内亚、斐济、所罗门群岛                                                                                                                                               |
| 4. 欧洲       | 200                        | 13        | 瑞典、挪威、芬兰、西班牙、苏联                                                                                                                                                |
| 5. 非洲       | 500                        | 31        | 马拉维、坦桑尼亚、马达加斯加                                                                                                                                                 |
| 6. 亚洲       | 200                        | 13        | 北越、喀麦隆、马来西亚、缅甸、印度                                                                                                                                              |
| 合计          | 1600                       | 100       |                                                                                                                                                                |

（资料来源）U.S.G.S. (1973) United States Mineral Resources  
(U.S.G.S. Prof Paper No.820, pp. 662 1973)

## 1.2 钛矿石和四氯化钛

生产金属钛时，可考虑各种还原反应，但都不能从氧化物矿

石直接进行还原，所以目前怎么也得用四氯化钛作中间原料的还原方法。

钛矿石都是以氧化物形态存在的，在氯化时，不希望有钛以外的成分使氯化工艺效率降低。依此观点，矿石中以纯度大于95%  $\text{TiO}_2$  的金红石最合适。然而金红石的资源在世界上较少，随着消费量的增加，出现了价格上涨，不能稳定供应等问题。

### 1.2.1 钛矿石的前处理

钛铁矿因含铁量多， $\text{TiO}_2$  纯度低（约为50%），然而其埋藏量丰富，价格也便宜，因此采用由钛铁矿除铁而浓缩  $\text{TiO}_2$  的前处理，制造所谓合成金红石（或叫浓缩金红石），或高钛渣等，尽管精炼成本增加，但对钛精炼是合算的。

这些钛铁矿的浓缩工艺，有各种各样的方法。无论用什么方法，其原理都是用某种媒介物除去钛矿中的铁成分，把剩余部分浓缩成  $\text{TiO}_2$ 。实用时，从成本和环境的立场出发，必须使浓缩反应的媒介物能够回收并循环使用，或靠别的系统配合，而达到同样的效果。

具体来说，Luberk 法（石原产业），是把硫酸作为媒介物的方法，它已在工业化上得到了成功，该法本身不能回收硫酸，而由别的废硫酸铁处理工厂进行处理。三菱法是把钛铁矿中的氧化铁作为氯化铁使其挥发的选择氯化法，由矿石预氧化处理，选择氯化， $\text{FeCl}_3$  的氧化，粉尘处理及氯气的液化工艺等组成，反应媒介物的氯气能回收再使用。此外 Benelite 法和 Murso 法在反应媒介物中使用了盐酸，但在盐酸萃取之前，用回转炉将铁质部分地还原成二价铁，然后用18~20%的盐酸进行萃取。盐酸能回收再使用，铁分可作  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  而再使用。

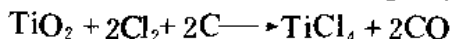
早期进行的浓缩法，是把钛铁矿在电炉中用碳进行还原，使铁分以生铁而除去，而将钛浓缩于渣中。该法存在有：因杂质 Ca、Mg 的作用而影响氯化反应效率，电力成本上涨等问题。

Western Titanium NL 法，把煤作燃料，采用回转炉，在第一阶段把大部分铁分还原成金属铁，从物理上进行分离，然

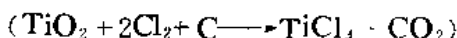
后在第二阶段，在吹入空气的水中，用  $\text{NH}_4\text{Cl}$  作为催化剂，在阳极处溶解除去剩下的铁，浓缩  $\text{TiO}_2$ ，最后再加上酸洗、干燥工艺。

### 1.2.2 钛矿石的氯化

金属钛中间原料  $\text{TiCl}_4$  的制造，主要是在金红石或合成金红石中加碳，进行氯化而成，其反应式如下（参照图1.1）：



$$\Delta F = -10.9 \text{ 千卡, } 1000^\circ\text{C}$$



氯化现在采用流动氯气炉，这是在立式炉中把金红石和再干馏石油焦以原有的粉状投入，氯气从炉底吹入，操作温度约  $950^\circ\text{C}$ 。从上部取出反应生成物，在冷凝器中分离粗  $\text{TiCl}_4$  和  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$  气体，由于冷却到约  $30^\circ\text{C}$ ，除  $\text{TiCl}_4$  外，还凝集有  $\text{FeCl}_3$ 、 $\text{MnCl}_2$  以及少量  $\text{VOCl}_3$  等杂质。

直至1977年，作为氯化炉虽然使用了金红石和碳混合的团矿，但该法已发展为以高钛渣为原料的一系列方法。但由于原料的变迁，效率及公害等问题，现在几乎没有采用。此外，关于处理含有大量对流动氯化有坏影响的  $\text{CaO}$  和  $\text{MgO}$  的矿石的对策，据报导苏联提出的方法是：在熔盐中（碱和碱土族的混合盐）混入上述的矿石粉和碳粉，然后吹入氯气进行氯化。

另外，对由钛铁矿直接氯化而得到  $\text{TiCl}_4$  的方法也进行了研究，这是在约  $700^\circ\text{C}$  温度下仅仅使铁分氯化，然后利用在  $850^\circ\text{C}$  下钛被氯化的方法。由第一阶段的氯化而分离的  $\text{FeCl}_3$ ，在  $650 \sim 700^\circ\text{C}$  靠氧化焙烧，使反应介质的氯回收和再使用。

### 1.2.3 $\text{TiCl}_4$ 的精炼

为了维持金属钛的纯度， $\text{TiCl}_4$  的纯度是重要的，所以采用蒸馏法精炼。虽然蒸汽压差大的杂质容易去掉，然而因为  $\text{VOCl}_3$ （钒氧氯化物）的沸点和  $\text{TiCl}_4$  的沸点很接近，在蒸馏之前为了先改变其形态，用  $\text{H}_2\text{S}$  把  $\text{TiCl}_4$  中的  $\text{VOCl}_3$  部分地还原，或者加铜粉或矿物油先与  $\text{VOCl}_3$  进行反应。此外，对四氯化钛的杂质，

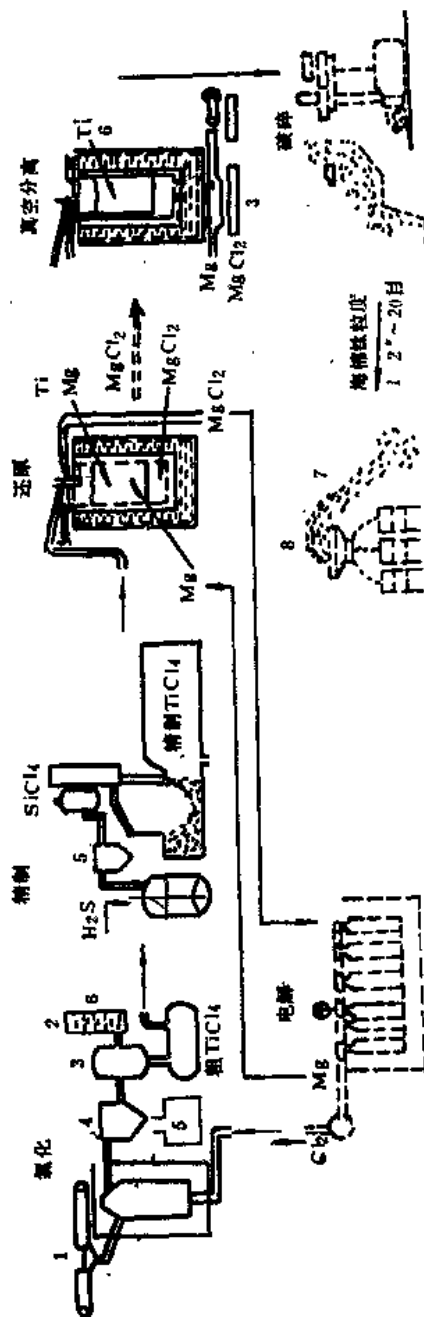


图 1.1 用克罗拉法制造海绵钛的流程

1—金红石 + 焦炭; 2—洗塔器; 3—冷凝器; 4—分离器; 5—固体氯化物; 6—海绵钛;

7—充入氩气; 8—混合包装

通过能自动处理残留在蒸馏釜内的固体氯化残渣的连续蒸馏，以提高生产率和质量，还可以利用冷凝热，预热原液而节省能量。

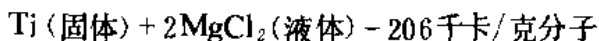
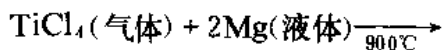
另外，由于  $\text{TiCl}_4$  纯度对钛的质量有影响，因此必须考虑到将蒸馏系统内的空气置换成氮等惰性气体进行操作。

### 1.3 金属钛的还原

在现在工业中，把作为中间原料的  $\text{TiCl}_4$  还原成金属钛的方法，大致分为（1）克罗尔法（Kroll），即镁还原法（参阅图 1.1）；（2）亨特法（Hunter），即钠还原法，（3）电解法，即熔盐电解。此外，在理论上虽然也有  $\text{TiCl}_4$  高温氢还原反应法，但在能源、成本、炉子构造以及材料和质量问题上是不实用的。另外还有碘化法，即由  $\text{TiI}_4$  热分解生成高纯钛（晶棒），此外还进行过将氧化物作为原料直接还原成金属的试验，但还没有达到实用阶段。

#### 1.3.1 克罗尔法（镁还原法）

使  $\text{TiCl}_4$  和约  $900^\circ\text{C}$  的熔融镁进行反应（参阅图 1.2），根据下式这是放热反应。和一般金属精炼不同的地方是：在反应气氛中，哪怕是有极少量的氧气混入的话，也会使海绵钛受到污染，因而纯度下降。



为此，反应是在密封的钢制容器中进行，所以操作过程为分批式的。现在规模以 3~8 吨为一批，在操作上把必要的 Mg 全量装入钢制反应容器中，把容器内空气用惰性的氩气置换后，加热升温，采取从上部送入  $\text{TiCl}_4$  液体的方式。反应生成物钛的熔点为  $1668^\circ\text{C}$ ，由于比反应温度高，在反应容器的侧面和底面，附着树枝状多孔质的固体钛，最终形成海绵钛块。又因在  $900^\circ\text{C}$  的自由能是  $-76.2$  千卡/克分子，所以几乎不会发生可逆反应。

因还原反应是放热反应，反应随着  $\text{TiCl}_4$  的送入而进行。然

而如果一下子进行大量反应，则因温度过高而造成沸腾，以及生成的海绵钛的松装比重和状态发生变化，造成质量不均匀。

进一步过热时，则将发生钛和容器内壁生成钛合金等意外情况。为了得到优质而且在分离精制工艺等后部工序中具有容易处理的宏观构造的海绵钛，需要正确地控制其反应温度，故把 $900\sim 960^{\circ}\text{C}$ 定为反应的标准温度。在分离工艺上，采用美国的浸出法时，反应温度应稍微低些，一般定为 $900^{\circ}\text{C}$ 以下。

上述的反应是在Mg过剩状态下进行的，送入的 $\text{TiCl}_4$ 虽然大体上能完全进行反应，但随着低级氯化物的生成和在容器壁上附着了钛成分等而有若干损失。海绵钛的收得率约是98%。而收得率随批量的大小、反应容器的构造、有无使用内筒、已生成的海绵钛块的处理技术、去掉反应生成的副产物的分离工艺的种类，这些操作技术，以及作业时间和生产效率之间的结合情况而变化。

生成的宏观呈海绵状的钛块，首先靠在熔融镁的表面上气化的Mg和气体 $\text{TiCl}_4$ 的气相反应而稳定地生长。副产物氯化镁比镁的比重大而聚集在反应器底部，虽间断地抽出，但由于在上部积聚生成的海绵钛块内部还含有镁，因此尚需继续进行还原反应，直至结束。末期的还原反应速度慢，而且温度等的调节也困难，海绵钛的微观构造也有改变，所以从生产效率和海绵钛构造等观点出发，要在恰当的时候停止还原反应，而过剩镁和残留副产物 $\text{MgCl}_2$ 的回收，要移到分离工艺去进行。

分离工艺可用机械的、物理的、化学的方法进行。最基本的分离方法是：将高温反应器倒立，能将底部生成的海绵钛块和过剩的还呈熔融态的镁，以及副产物 $\text{MgCl}_2$ 的大部分机械地加以分离。接着用真空蒸馏或稀盐酸等萃取，进行把上述在海绵钛微观结构内部残存的镁和 $\text{MgCl}_2$ 完全去除的分离精炼。

真空分离是日本在工业上开发的一种非常合理的技术，得到的海绵钛质量也优良，可是在具体操作上需要很高的技术。萃取法操作比较简单，是最初在美国被开发而至今仍使用的方法，

而湿法费工，且精炼效果的完全程度和残留水分等的去除效率因受工业过程的制约，所得到的钛的质量比不上真空分离法得到的钛的质量。

另外，在真空分离法中，直到最近还采用还原反应工艺和真空分离工艺的二段作业，其中，反应温度约从  $900^{\circ}\text{C}$  开始，一旦冷却到适当的温度就转到分离工艺，并再加热到  $1000^{\circ}\text{C}$ ，浪费能源，有点不合理。另一方面，使还原和分离一体化的技术，当然从五十年代初期就开始考虑过，也进行过试验，但在大型装置的高温连续处理技术上有困难，综合生产率反而下降等原因，直到近几年没能实现工业生产。

最近，由于国际上能源成本高涨，节能的需要高，而且各种控制技术也有进步，所以，在日本及美国、苏联也在谋求还原和分离工艺一体化，各个公司已分别确立了有各种特色的操作方式。

钛精炼比其他金属精炼使用更多的能量，采用现行克罗尔法，每吨钛所用能量可以说为铝的二倍。根据 1972 年布拉瓦德 (Bravard) 的计算，这个值更大，从矿石到铸锭所需的能量是 33100 千瓦小时 (电力) + 相当于 42800 千瓦小时的燃料。其中大的能量消耗项目是镁的电解，为 16500 千瓦小时 (电力)，还原分离约为 15000 千瓦小时 (电力) + 相当于 11500 千瓦小时的干燥用燃料，铸锭熔化是 5500 千瓦小时 (电力) 以及  $\text{TiCl}_4$  是 2600 千瓦小时 (电力) 等等。最近，对每个工序，均在增加以节能为目的的技术改造。

在镁的电解方面，过去每吨镁消耗 2 万千瓦小时，现在减低到 1.4 万千瓦小时这是靠引进 8 万安培大型电解槽或采用节能型电解槽取得的。对还原分离来说，在真空分离中，由于把反应和分离一体化，所需能量约为原来的二分之一。在镁的电解方面，通过把再生熔融镁不经冷却，供给还原反应，把副产物  $\text{MgCl}_2$  以熔融状态返回电解槽，依靠  $\text{TiCl}_4$  的蒸馏等高温原料处理技术的提高和热能利用的合理化等，在现代新型的节能工厂中每吨钛所

需电力大约为1.9~1.8万千瓦小时以下。

采用本法得到的海绵钛，全量为3~8吨，在海绵钛熔炼操作时应将它们破碎成合适的粒度，象图 1.2 那样，以 $\frac{1}{2}$  inch~20 目为标准粒度。还原分离完了的海绵钛块虽大致充满反应容器，但通过精巧的设计仍能够高效率地取出。采用浸出法时，也有从反应器中铲出的情况。大型海绵钛块切开后还要在破碎机等设备上使粒度细化，并经筛分。成品海绵钛，为保持其质量，装入密封的鼓型筒中，里面的空气用氩气置换出来。如果在大气中长时间曝露，则残存的微量  $MgCl_2$  就吸气，虽然是微量，一成为水分就可使海绵钛纯度下降。这种水分在熔化时污染海绵钛，造成提高氢、氧杂质含量等的有害影响。

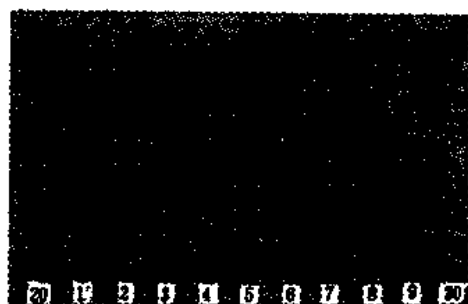
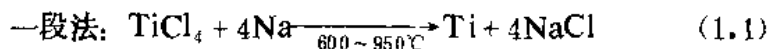
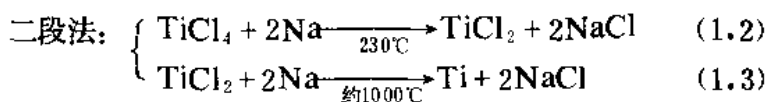


图 1.2 用克罗尔法生产的海绵钛破碎产物

### 1.3.2 钠还原法（亨特法）

这是一种用金属钠作  $TiCl_4$  还原剂的方法。1910 年由亨特（Hunter）最初试验，利用制碱工业中的副产品纯  $NaCl$  制作金属钠的有利供给条件，所以有很大工业价值。作为工业流程，有把  $TiCl_4$  和金属钠使其一起反应的一段法和二段法，即首先制作低级氯化物，然直至还原成金属钛。





因上述反应都是放热反应，不发生逆反应，式 (1.2) 的反应能在  $230^\circ\text{C}$  左右的低温进行反应，所以工业处理容易，其生成物具有可以用螺旋式运输机等输送的优点。

因  $\text{TiCl}_4$  或  $\text{TiCl}_2$  和金属钠的反应是放热反应，直到还原成金属钛反应的总发热量为克罗尔法 (镁还原法) 的 2 倍。调节这种反应热将给成品海绵钛质量、性状带来微妙的影响，从而需要很高的生产技术。反应生成物，哪个方法都需冷却到室温，破碎后用水和稀盐酸处理，然后进行真空干燥。

在日本，采用一段法，每批以约 2 吨的规模生产。在美国象图 1.3 所示那样，采用二段法，其主要理由是容易调节影响质量的反应热。

采用钠还原的海绵钛的特征是纯度高、布氏硬度低，特别是铁含量非常少，可得到微细粉，松装比重小 (约为  $0.9\text{克/厘米}^3$ )，压缩成型性好，但电弧熔化时的状况比镁还原海绵钛时稍有不同。这是由于海绵钛的微观构造和随着生产方法不同其微量杂质成分也不同所致。

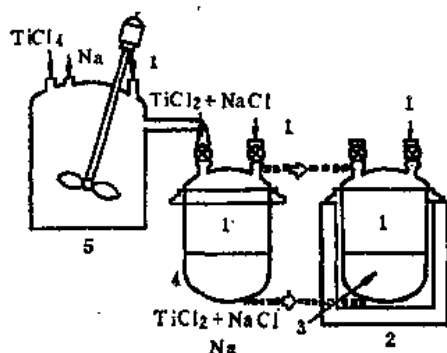


图 1.3 二段钠还原法的流程图 (亨特法)

1—氢气；2—烧结炉；3—海绵钛 + 盐类；4—反应釜；  
5—连续还原装置