

# 钛合金手册

上册

46.2

科学技术文献出版社重庆分社

MCIC-HB-02

# 钛合金手册 上册

[美] R. A. Wood R. J. Favor 主编

刘静安 吴煌良 姚毅中等 译

曾苏民 校

科学技术文献出版社重庆分社

## 钛合金手册 上册

刘静安 吴煌良 姚毅中等译

---

科学技术文献出版社重庆分社	出	版
重庆市市中区胜利路 91 号		
四川省新华书店重庆发行所	发	行
重 庆 印 制 第 一 厂	印	刷

---

开本：787×1092毫米 1/16 印张：17 字数：41万  
1983年12月第一版 1983年12月第一次印刷  
科技新书目：53-256 印数：3500

---

书号：15176·567

定价：2.50 元

## 内 容 简 介

本手册是根据美国《Titanium Alloys Handbook》翻译而成的。全书共分五部分（钛冶金学；钛及其合金的适用范围；机械加工与成形；焊接；机械性能），系统、全面地叙述了钛的冶金学过程及各种钛合金（包括最新发展的合金）的合金化原理、内部组织、物理-机械性能以及热稳定性和化学稳定性；比较详尽地叙述了各种钛合金的压力加工工艺、热处理工艺、机械加工与成形工艺及接合工艺；评述了各种钛合金产品在军用与民用方面的地位及钛工业的发展和前景；拥有大量有价值的图表、数据和照片。

中译本分上、下两册出版。上册包括钛及其钛合金的冶金学部分和适用范围部分；下册包括机械加工与成形、焊接和机械性能部分。

本手册可供钛及钛合金生产部门和使用部门的工程技术人员、管理人员和工人使用，也可供有关钛的科研、设计人员以及高等院校师生参考，而且是一本图书、情报单位和材料供销人员有价值的入藏工具书。

## 译 者 的 话

由R. A. Wood, R. J. Favor 主编 1972 年出版的《Titanium Alloys Handbook》是美国目前在钛合金方面的一部最新最完善的工具书。手册全面、系统而又扼要地介绍了钛合金的冶金学过程以及压力加工、热处理、机械加工与成形、焊接等工艺过程，列举了各种钛及钛合金的化学成份、内部组织、物理-机械性能、热稳定性和化学稳定性等的图表资料。本手册的翻译出版对我国钛合金的生产、科研和使用有一定的参考价值。

全书共分五部分，中译本拟分上、下两册出版。上册包括第一部分钛冶金学和第二部分钛及钛合金的适用范围。

本书由西南铝加工厂翻译出版。

第一部分的第一章到第五章由**刘静安**翻译，**吴煌良**校对；第六章到第十一章由**吴煌良**翻译，**姚毅中**校对；第十二章到第十四章由**姚毅中**翻译，**刘静安**校对。第二部分由**邓冬桥**翻译，**张宗富**校对；第二部分中的公司名称与地址由**汪子和**翻译。全书由**高级工程师曾苏民**总审校。

本书责任编辑**汪子和**、**李博英**、**魏明康**。

由于我们的业务水平有限，在译校、审编等方面一定会有不少错误之处，敬请读者批评指教。

1982年12月于重庆

# 目 录

## 第一部分 钛冶金学

### 第一章 钛冶金学概论

1-1-1 概述	( 3 )
1-1-2 钛矿	( 3 )
1-1-3 提取冶金学	( 5 )
1-1-4 物理冶金学	( 5 )
概述	( 5 )
显微组织特征	( 5 )
合金化特点	( 7 )
间隙元素的污染	( 8 )
1-1-5 加工过程冶金学	( 9 )
概述	( 9 )
熔炼与铸造	( 9 )
铸锻	( 9 )
轧制	( 10 )
挤压	( 10 )
模锻	( 11 )
成形	( 12 )
机械加工	( 12 )
焊接	( 13 )
热处理	( 13 )
1-1-6 腐蚀特性	( 13 )
概述	( 13 )
化学介质	( 13 )
腐蚀的特殊形式	( 13 )
参考文献	( 18 )

### 第二章 纯钛

1-2-1 概述	( 20 )
1-2-2 工业牌号	( 20 )
1-2-3 常用牌号	( 20 )
1-2-4 合金类型	( 20 )
1-2-5 合金成份(范围或最大值), %	( 20 )
1-2-6 技术标准	( 21 )
1-2-7 合金评述与冶金学	( 21 )
成份与组织	( 21 )

变形工艺及其效果·····	( 21 )
热处理工艺及其效果·····	( 22 )
稳定性·····	( 22 )
参考文献·····	( 24 )
<b>第三章 钛合金Ti-5Al-2.5Sn</b>	
1-3-1 概述·····	( 25 )
1-3-2 工业牌号·····	( 25 )
1-3-3 常用牌号·····	( 25 )
1-3-4 合金类型·····	( 25 )
1-3-5 合金成份(范围或最大值), %·····	( 25 )
1-3-6 技术标准·····	( 26 )
1-3-7 合金评述与冶金学·····	( 26 )
成份与组织·····	( 26 )
变形工艺及其效果·····	( 26 )
热处理工艺及其效果·····	( 29 )
稳定性·····	( 30 )
参考文献·····	( 32 )
<b>第四章 钛合金Ti-8Al-1Mo-1V</b>	
1-4-1 概述·····	( 34 )
1-4-2 工业牌号·····	( 34 )
1-4-3 常用牌号·····	( 34 )
1-4-4 合金类型·····	( 34 )
1-4-5 合金成份(范围或最大值), %·····	( 34 )
1-4-6 技术标准·····	( 34 )
1-4-7 合金评述与冶金学·····	( 35 )
成份与组织·····	( 35 )
变形工艺及其效果·····	( 35 )
热处理工艺及其效果·····	( 36 )
稳定性·····	( 37 )
参考文献·····	( 44 )
<b>第五章 钛合金Ti-6Al-4V</b>	
1-5-1 概述·····	( 46 )
1-5-2 工业牌号·····	( 46 )
1-5-3 常用牌号·····	( 46 )
1-5-4 合金类型·····	( 46 )
1-5-5 合金成份(范围或最大值), %·····	( 47 )
1-5-6 技术标准·····	( 47 )
1-5-7 合金评述与冶金学·····	( 47 )
成份与组织·····	( 47 )
变形工艺及其效果·····	( 51 )



热处理工艺及其效果·····	( 55 )
稳定性·····	( 66 )
参考文献·····	( 73 )
<b>第六章 钛合金Ti-6Al-6V-2Sn</b>	
1-6-1 概述·····	( 75 )
1-6-2 工业牌号·····	( 75 )
1-6-3 常用牌号·····	( 75 )
1-6-4 合金类型·····	( 75 )
1-6-5 合金成份(范围或最大值), %·····	( 75 )
1-6-6 技术标准·····	( 76 )
1-6-7 合金评述与冶金学·····	( 76 )
成份与组织·····	( 76 )
变形工艺及其效果·····	( 81 )
热处理工艺及其效果·····	( 83 )
稳定性·····	( 86 )
参考文献·····	( 92 )
<b>第七章 钛合金Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo</b>	
1-7-1 概述·····	( 95 )
1-7-2 工业牌号·····	( 95 )
1-7-3 常用牌号·····	( 95 )
1-7-4 合金类型·····	( 95 )
1-7-5 合金成份(范围或最大值), %·····	( 95 )
1-7-6 技术标准·····	( 95 )
1-7-7 合金评述与冶金学·····	( 96 )
成份与组织·····	( 96 )
变形工艺及其效果·····	( 97 )
热处理工艺及其效果·····	( 98 )
稳定性·····	( 111 )
参考文献·····	( 119 )
<b>第八章 钛合金Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo</b>	
1-8-1 概述·····	( 110 )
1-8-2 工业牌号·····	( 110 )
1-8-3 常用牌号·····	( 110 )
1-8-4 合金类型·····	( 110 )
1-8-5 合金成份(范围或最大值), %·····	( 110 )
1-8-6 技术标准·····	( 110 )
1-8-7 合金评述与冶金学·····	( 111 )
成份与组织·····	( 111 )
变形工艺及其效果·····	( 111 )
热处理工艺及其效果·····	( 113 )



稳定性	(115)
参考文献	(117)
<b>第九章 钛合金Ti-3Al-2.5V</b>	
1-9-1 概述	(118)
1-9-2 工业牌号	(118)
1-9-3 常用牌号	(118)
1-9-4 合金类型	(118)
1-9-5 合金成份(范围或最大值), %	(118)
1-9-6 技术标准	(119)
1-9-7 合金评述与冶金学	(119)
成份与组织	(119)
变形工艺及其效果	(119)
热处理工艺及其效果	(120)
稳定性	(122)
参考文献	(124)
<b>第十章 钛合金Ti-13V-11Cr-3Al</b>	
1-10-1 概述	(126)
1-10-2 工业牌号	(126)
1-10-3 常用牌号	(126)
1-10-4 合金类型	(126)
1-10-5 合金成份(范围或最大值), %	(126)
1-10-6 技术标准	(126)
1-10-7 合金评述与冶金学	(127)
成份与组织	(127)
变形工艺及其效果	(128)
热处理工艺及其效果	(129)
稳定性	(131)
参考文献	(135)
<b>第十一章 钛合金Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn</b>	
1-11-1 概述	(137)
1-11-2 工业牌号	(137)
1-11-3 常用牌号	(137)
1-11-4 合金类型	(137)
1-11-5 合金成份(范围或最大值), %	(137)
1-11-6 技术标准	(137)
1-11-7 合金评述与冶金学	(138)
成份与组织	(138)
变形工艺及其效果	(139)
热处理工艺及其效果	(139)
稳定性	(141)

参考文献	(145)
<b>第十二章 钛合金Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al</b>	
1-12-1 概述	(147)
1-12-2 工业牌号	(147)
1-12-3 常用牌号	(147)
1-12-4 合金类型	(147)
1-12-5 合金成份(范围或最大值), %	(147)
1-12-6 技术标准	(148)
1-12-7 合金评述与冶金学	(148)
成份与组织	(148)
变形工艺及其效果	(148)
热处理工艺及其效果	(149)
稳定性	(151)
参考文献	(154)
<b>第十三章 钛合金Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr</b>	
1-13-1 概述	(156)
1-13-2 工业牌号	(156)
1-13-3 常用牌号	(156)
1-13-4 合金类型	(156)
1-13-5 合金成份(范围或最大最), %	(156)
1-13-6 技术标准	(156)
1-13-7 合金评述与冶金学	(157)
成份与组织	(157)
变形工艺及其效果	(158)
热处理工艺及其效果	(159)
稳定性	(162)
参考文献	(164)
<b>第十四章 其它钛合金</b>	
1-14-1 概述	(165)
1-14-2 Ti-4Al-3Mo-1V 合金	(165)
工业牌号	(165)
常用牌号	(165)
技术标准	(166)
合金成份(范围或最大值), %	(166)
合金评述与冶金学	(166)
热处理	(166)
典型性能	(167)
1-14-3 Ti-2.25Al-11Sn-5Zr-1Mo-0.2Si[Ti-679]合金	(169)
工业牌号	(169)
常用牌号	(170)

	技术标准	(170)
	合金成份(范围或最大值), %	(170)
	合金评述与冶金学	(170)
	热处理	(171)
	典型性能	(171)
1-14-4	Ti-8Mn合金	(172)
	工业牌号	(172)
	常用牌号	(172)
	技术标准	(172)
	合金成份(范围或最大值), %	(172)
	合金评述与冶金学	(173)
	热处理	(173)
	典型性能	(173)
1-14-5	Ti-2Cu合金	(175)
	工业牌号	(175)
	常用牌号	(175)
	技术标准	(175)
	合金成份(范围或最大值), %	(175)
	合金评述与冶金学	(176)
	热处理	(176)
	典型性能	(176)
1-14-6	Ti-7Al-4Mo合金	(178)
	工业牌号	(178)
	常用牌号	(178)
	技术标准	(178)
	合金成份(范围或最大值), %	(178)
	合金评述与冶金学	(178)
	热处理	(179)
	典型性能	(179)
1-14-7	Ti-1Al-8V-5Fe合金	(180)
	工业牌号	(180)
	常用牌号	(181)
	技术标准	(181)
	合金成份(范围或最大值), %	(181)
	合金评述与冶金学	(181)
	热处理	(181)
	典型性能	(183)
1-14-8	Ti-6Al-2Zr-2Sn-2Mo-2Cr-0.25 Si合金	(183)
	工业牌号	(183)
	常用牌号	(183)

技术标准	(183)
合金成份(范围或最大值), %	(183)
合金评述与冶金学	(184)
热处理	(184)
典型性能	(184)
1-14-9 Ti-2Al-11V-2Sn-11Zr	(187)
工业牌号	(187)
常用牌号	(187)
技术标准	(187)
合金成份(范围或最大值), %	(187)
合金评述与冶金学	(187)
热处理	(188)
典型性能	(188)
1-14-10 Ti-6Al-2Sn-1.5Zr-1Mo-0.35Bi-0.1Si	(190)
工业牌号	(190)
常用牌号	(190)
技术标准	(190)
合金成份(范围或最大值), %	(190)
合金评述与冶金学	(191)
热处理	(191)
典型性能	(191)
1-14-11 Ti-5Al-6Sn-2Zr-1Mo-0.25Si	(194)
工业牌号	(194)
常用牌号	(194)
技术标准	(194)
合金成份(范围或最大值), %	(194)
合金评述与冶金学	(194)
热处理	(194)
典型性能	(194)
参考文献	(200)

## 第二部分 钛及钛合金的适用范围

### 第一章 钛工业及其产品

2-1-1 概述	(205)
2-1-2 钛的生产厂家	(205)
2-1-3 钛产品	(206)

### 第二章 钛锭生产

2-2-1 概述	(208)
----------	-------

### 第三章 锻件

2-3-1 概述	(210)
2-3-2 钛模锻件按形状和公差分类	(212)
粗模锻件的设计	(212)
一般公差模锻件的设计	(212)
半精密公差模锻件的设计	(212)
精密公差模锻件的设计	(214)
轧环	(214)
<b>第四章 平轧制品</b>	
2-4-1 概述	(216)
2-4-2 厚板	(216)
2-4-3 薄板和带材	(216)
<b>第五章 棒材和线材</b>	
2-5-1 概述	(218)
<b>第六章 挤压型材</b>	
2-6-1 概述	(220)
<b>第七章 管材</b>	
2-7-1 概述	(225)
<b>第八章 铸件</b>	
2-8-1 概述	(227)
2-8-2 舂实型铸件	(229)
2-8-3 熔模铸件	(232)
2-8-4 铸件的性能	(236)
<b>第九章 钛粉</b>	
2-9-1 概述	(243)
2-9-2 性能	(243)
<b>第十章 紧固件</b>	
2-10-1 概述	(251)
<b>参考文献</b>	(252)

# 第一部分 钛冶金学





# 第一章 钛冶金学概论

## 1-1-1 概 述

钛是一种较新的材料。50年代初，当时一个突出的问题是已有的轻质合金材料远远不能满足飞机结构件和喷气发动机部件对温度的要求，促使人们对钛重视起来。钛的比重轻而熔点高，看来是一种能满足现代飞机要求的有发展前途的材料。自从这种材料第一次应用于军用飞机以来，为了使这种金属从试验珍品转变为有用的结构材料，在美国联邦政府支持下作了大量的研究发展工作。由于这种有效的支持，使钛工业获得了急速的发展。

目前（1972年），钛和钛合金已被广泛应用于先进科学技术（从关键的导弹和飞机构件到抗腐蚀的阳极化处理的机架）的各个使用部门。在加工制造这种材料方面具有丰富经验的生产厂商发现，掌握这种材料的生产仅比掌握大多数其它结构材料稍微困难一点。正如绝大多数结构材料一样，为了生产高质量的钛制件，必须遵循正确的生产工艺程序。然而，这些工艺程序并不困难，也无奇特之处，而且是直接从材料冶金学特性的基本知识推论出来的。收录于本手册中的资料所遵循的基本原则主要是阐明钛的冶金学原理，并叙述钛的应用冶金学法则，这些是选择材料最佳加工工艺和用途的基础。

可大量生产并能适用于制造各种军用产品的钛合金大约有30种。然而，绝大多数的钛结构件仅使用10来种上述合金。上述应用

的90%左右是采用三种品位的纯钛和钛合金Ti-5Al-2.5Sn、Ti-6Al-4V、Ti-8Al-1Mo-1V、Ti-6Al-6V-2Sn和Ti-13V-11Cr-3Al，而其中应用最多的钛合金要算Ti-6Al-4V，纯钛和钛合金Ti-5Al-2.5Sn也被大量应用。对于某些新型的发动机和飞机（诸如超音速飞机），钛合金Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo和Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo、Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn获得了十分广泛的应用。由于钛工业的不断完善和掌握可用合金的用户不断增多，今后其它钛合金必将得到同样广泛的应用。

可以根据某些具体的条件来选择有特殊用途的钛合金牌号，这些因素中通常应考虑诸如对加工产品形状的适应范围，强度水平，塑性和韧性水平，生产方法和使用的外界条件等等。表1-1-1介绍了几种主要钛合金的某些重要特性，它与本手册其它章节的资料一起可作为选择最佳材料的依据。

## 1-1-2 钛 矿

钛属于地壳中最常见的第九种元素，它是许多常见矿物中的组成部分。两种最重要的钛矿是钛铁矿和金红石。金红石（实质上是TiO<sub>2</sub>）很少以浓缩的沉积矿存在。与钛铁矿（FeO-TiO<sub>2</sub>）相比，通常很少用金红石来生产TiO<sub>2</sub>产品，而钛铁矿以大型的沉积矿分布在世界的很多地方。然而，金红石是获得金属钛的主要矿石。已查明的金红石和钛铁矿的沉积矿表明，金属钛的短缺不见得是

表 1-1-1

钛及钛合金产品的特性与典型应用简表

成份 (合金类型) %	应保证的最小室温 拉伸强度		工 艺 特 性				典 型 用 途
	抗拉强度, 千磅/英寸 <sup>2</sup>	屈服强度, 千磅/英寸 <sup>2</sup>	锻造时抗 裂纹的能力	薄板成型 性评价	焊接性 能评价	能否热处理 至高强度	
纯 钛	50 65 80	40 55 70	极 好	极 好	极 好	不 能	不能淬硬
Ti-5Al-2.5Sn	120	115	可以—好	可 以	极 好	不 能	不能淬硬
Ti-8Al-1Mo-1V	130—135	120—125	可以—好	可 以	好	能	1
Ti-6Al-4V	130 时效强化后可达到 170	120 160	好	好	可以—好	能	2
Ti-6Al-6V-2Sn	150 时效强化后可达到 180	140 170	好	—	差	能	2
Ti-13V-11Cr-3Al	125—130 时效强化后可达到 175	120—125 165	可 以	极好—可以	可以— 差(*)	能	7
Ti-2.25Al-11Sn-5Zr -1Mo-0.2Si	145 时效强化后可达到 180	130 160	可以—好	—	—	能	2
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	130	120	好	好	可以—好	不 能	可稍许硬化
Ti-4Al-3Mo-1V	125 时效强化后可达到 180	115 155	好	好	可以—差	能	—

(a) 焊接的合金由于脆性作用一般不进行热处理。