

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

“十五”国家重点图书

先/进/铸/造/技/术/丛/书

丛书主编 张武城

# 钛及钛合金 铸造

谢成木 编 著  
姜不居 李传斌 主 审



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



“十五”国家重点图书

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

先进铸造技术丛书

丛书主编 张武城

# 钛及钛合金铸造

谢成木 编著

姜不居 李传棣 主审



机械工业出版社

为了进一步推动与促进钛及钛合金铸造的研究与发展,作者综合了国内外的资料,并结合几十年的工作实践,编写了这本基础性的专业书。书中概述了钛及钛合金的基本特性及其铸造性能,比较详细地讨论了钛及钛合金铸件的结构和铸造工艺设计,介绍了相关的造型材料和造型工艺、熔炼铸造设备与工艺以及铸件的后处理和焊接等。

## 图书在版编目(CIP)数据

钛及钛合金铸造/谢成木编著. —北京:机械工业出版社, 2004.10

(先进铸造技术丛书)

ISBN 7-111-15404-5

I. 钛… II. 谢… III. ①钛-铸造②钛合金-铸造 IV. TG146.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第104814号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)  
责任编辑: 邝 鸥 版式设计: 霍永明 责任校对: 姚培新  
封面设计: 鞠 杨 责任印制: 洪汉军  
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行  
2005年1月第1版·第1次印刷  
890mm×1240mm A5·13.625印张·400千字  
定价: 28.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
本社购书热线电话(010)68993821、88379646  
封面无防伪标均为盗版

## 丛书编委会

丛书主编	张武城				
丛书副主编	李传棻				
丛书顾问	柳百成	陈蕴博			
丛书编委	黄天佑	姜不居	李传棻	毛卫民	
	谢成木	熊守美	颜永年	张伯明	
	张武城	张乃蕴			
丛书策划	邝 鸥				

# 序

铸造是机械工业重要的基础工艺与技术，广泛地应用于机械制造、航空航天、能源、交通、化工、建筑以及社会生活的各个领域，并随着各相关技术领域的发展自身不断更新、发展和完善，是我们生产和生活中时时不可或缺的一项重要工艺技术。

今天，铸造作为一种传统工艺与技术又面临着新的挑战。高速发展的社会，对铸造的精密性、质量与可靠性、经济、环保等要求越来越高。铸造已从单一的加工工艺发展成为新兴的综合性的先进工艺技术。它涉及到工艺方法、设备及工装、成型、生产过程的自动化与机械化、材料、环保等众多领域。不同学科之间的交叉、渗透及融合，高新技术对传统技术的不断影响，是当代科技发展的重要趋势。

为了解决广大铸造科技人员迫切需要了解和掌握铸造领域各学科的国内外先进技术及发展趋势的要求，以便指导他们的生产、科研及教学工作，北京机械工程学会组织了铸造行业有较快进步和较新发展的数个重要领域中有突出贡献的著名专家、学者编写、出版了这套先进铸造技术丛书。同时，邀请我国铸造、材料业界德高望重的著名专家柳百成院士、陈蕴博院士作为丛书的编写顾问。

本丛书旨在全面、系统地介绍国内外先进铸造技术的发展趋势，对我国铸造技术的发展起指导作用。本丛书是高层次的普及型丛书，深层次地介绍铸造相关领域的高新技术和基本规律，并兼顾知识性和实用性，面向广大铸造工作者、研究人员、高等院校师生及相关领域技术人员等。

本丛书的特点是突出“高、新”二字，有较宽的知识覆盖面，注意相关学科的相互渗透，博采国际、国内最新研究和发展成果。

本丛书愿为广大铸造技术人员适应国际大环境、大市场的要求，使我国铸造界迅速加入国际经济市场，从铸造大国向铸造强国迈进的过程中作出重要贡献。

北京市发展和改革委员会及机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目对本丛书的出版提供了经济支持，中国机械工程学会副理事长宋天虎对丛书的出版给予了关心和支持，在此一并表示衷心的感谢。

**丛书主编 张武城**

# 前 言

钛和钛合金具有密度低、比强度高、耐腐蚀、线胀系数小、生物相容性好等优异性能，在航空、航天、海洋运输、化工、冶金、医疗卫生等行业中都是不可缺少的结构材料。钛和钛合金在熔融状态下具有高化学活性，要与常用的各种耐火材料发生化学反应，熔炼和铸造成形难度很大，必须有其专用的造型材料和造型工艺以及专用的熔炼与铸造设备。因而，它的发展和应用的远远落后于钢、铁、铝、铜等金属及合金。迄今为止，只有美国、德国、俄罗斯、中国、日本及其他少数国家掌握了这项技术。

由于上述原因，工业上开始应用的钛和钛合金制件是变形件，随着其用量的增多和应用范围的扩大，发现变形钛件的机械加工量大，材料利用率低（只有 20% ~ 50%），生产成本高。为此，人们开始寻求钛和钛合金的近净形成形工艺，经过研究比较发现净铸造是比较经济且又容易实现的近成形工艺。此后，美国、前苏联等开始积极研究和发发展钛和钛合金铸造。从 20 世纪 60 年代末开始，钛和钛合金铸件逐步在工业上获得应用。

随着钛和钛合金铸造技术的发展和日益成熟，加上热等静压技术在钛合金铸件方面的成功应用，较好地解决了铸件的质量问题，提高了铸件的可靠性。因此，从 20 世纪 80 年代以后，钛和钛合金铸件在航空、航天及其他方面的应用，每年以近 20% 的速度递增。在铸造工艺方面，目前已经由单件铸造发展到几件或几十件零件组合成的大型整体精铸件，如 21 世纪的第四代战斗机 F—22、V—22 已经采用了几种整体精铸的大型复杂的 Ti-6Al-4V 合金件。目前，钛合金精铸件的最大尺寸已达到  $\phi 1300\text{mm}$ ，最大重量达到 182kg。

我国在钛和钛合金铸造方面的研究与发展起步于 20 世纪 60 年代末期，目前国内从事钛合金铸件研究、生产的单位已达 10 多家，技术水平也与发达国家比较接近。

为了进一步推动与促进钛和钛合金铸造的研究与发展，作者综合了国内外比较多的资料，并结合自己几十年的工作实践，编写了这本基础性的专业书。书中概述了钛和钛合金的基本特性及其铸造性能，比较详细地讨论了钛和钛合金铸件的结构和铸造工艺设计，介绍了相关的造型材料和造型工艺、熔炼铸造设备与工艺以及铸件的后处理和焊接。参加本书编写的人员有：卢新昌、王新英、南海、黄东、赵嘉琪等。我的导师薛志痒老师对本书主要技术问题进行了认真审校，清华大学姜不居和中国铸造协会李传栋两位老师对本书进行了全面仔细认真的审校和修改，在此一并深表感谢。

由于作者水平有限，书中难免有疏误之处，热忱希望同行和读者提出宝贵意见。

**作者**

**2004年11月**



# 目 录

序

前言

<b>第1章 绪论</b> .....	1
1.1 钛的发展史、生产过程及其重要特性 .....	1
1.2 钛和钛合金铸造的发展 .....	3
1.3 钛和钛合金铸造的现状与展望 .....	4
参考文献 .....	7
<b>第2章 铸造钛和钛合金</b> .....	8
2.1 钛和钛合金的物理性质 .....	8
2.1.1 晶体结构 .....	8
2.1.2 密度 .....	8
2.1.3 熔点与沸点 .....	8
2.1.4 导热性 .....	9
2.1.5 热胀系数 .....	9
2.1.6 比热容 .....	10
2.1.7 导电性 .....	10
2.1.8 钛与其他金属物理性能的比较 .....	11
2.2 钛和钛合金的化学性能 .....	12
2.2.1 与氧的反应 .....	12
2.2.2 与氮的反应 .....	13
2.2.3 与氢的作用和氢脆 .....	13
2.2.4 与碳和硅的作用 .....	13
2.2.5 与化合物的反应 .....	14
2.2.6 耐腐蚀性能 .....	14
2.2.7 电化学腐蚀 .....	20

2.2.8 应力腐蚀裂纹·····	20
2.3 钛与合金元素的相互作用·····	20
2.3.1 钛与合金元素相互作用的特点·····	20
2.3.2 钛合金元素和杂质的分类·····	21
2.4 铸造钛和钛合金·····	25
2.4.1 铸造钛和钛合金的牌号及其化学成分·····	26
2.4.2 铸造钛和钛合金的力学性能·····	26
2.4.3 铸造钛合金的新发展与展望·····	33
参考文献·····	38
<b>第3章 钛和钛合金的铸造性能</b> ·····	<b>40</b>
3.1 流动性和充填性·····	40
3.2 钛和钛合金的凝固收缩·····	46
3.2.1 体收缩和气缩孔·····	46
3.2.2 线收缩·····	47
3.3 凝固过程形成的铸造表面特性·····	49
3.4 液态钛浇注和凝固过程形成气体缺陷的倾向·····	51
3.5 抗裂性·····	55
3.6 凝固过程形成铸造组织的特性·····	57
3.6.1 影响钛和钛合金铸造结晶组织的因素·····	58
3.6.2 改善钛和钛合金铸造结晶组织的方法·····	63
参考文献·····	64
<b>第4章 钛和钛合金铸件结构及铸件工艺的设计</b> ·····	<b>66</b>
4.1 铸件结构的设计·····	67
4.1.1 铸件结构设计的基本要求·····	67
4.1.2 铸件结构基本要素的设计·····	68
4.1.3 转制件的结构设计·····	78
4.2 铸件工艺设计·····	85
4.2.1 确定工艺方案·····	85
4.2.2 铸件工艺结构及其参数的设计·····	86
4.3 浇注系统的设计·····	91
4.3.1 浇注系统的组元·····	92
4.3.2 铸件的位置·····	95

4.4 铸件结构和铸件工艺设计的综合完成 .....	96
参考文献 .....	96
<b>第5章 钛和钛合金铸造的造型材料及辅助材料 .....</b>	<b>97</b>
5.1 概述 .....	97
5.2 耐火材料 .....	98
5.2.1 石墨 .....	98
5.2.2 部分普通金属和难熔金属(粉) .....	102
5.2.3 难熔化合物 .....	104
5.2.4 氧化物 .....	106
5.3 粘结剂 .....	110
5.3.1 碳质粘结剂 .....	110
5.3.2 氧化物粘结剂 .....	113
5.4 辅助材料 .....	117
5.4.1 模料 .....	117
5.4.2 辅助添加剂 .....	118
参考文献 .....	119
<b>第6章 钛和钛合金铸造的造型工艺 .....</b>	<b>121</b>
6.1 概述 .....	121
6.2 造型工艺 .....	121
6.2.1 硬模铸造 .....	121
6.2.2 砂型铸造 .....	127
6.2.3 熔模精密铸造 .....	151
6.2.4 壳型铸造 .....	196
参考文献 .....	206
<b>第7章 钛和钛合金铸造的熔炼铸造设备与工艺 .....</b>	<b>209</b>
7.1 概述 .....	209
7.2 钛和钛合金铸造的熔炼铸造设备 .....	209
7.2.1 自耗炉 .....	213
7.2.2 凝壳炉 .....	214
7.3 钛和钛合金铸造的熔炼与铸造工艺 .....	231
7.3.1 真空自耗电极电弧熔炼 .....	231

7.3.2 钛和钛合金的其他熔炼铸造方法 .....	251
7.4 铸件成形 .....	262
7.4.1 静止浇注(重力浇注) .....	262
7.4.2 离心浇注 .....	264
7.4.3 其他试验性的成形方法 .....	268
参考文献 .....	274
<b>第8章 钛和钛合金铸件的清理与精修</b> .....	<b>276</b>
8.1 概述 .....	276
8.2 铸件清砂、脱壳 .....	277
8.3 切割浇注系统 .....	277
8.4 消除应力退火 .....	278
8.5 去除浇冒口残根 .....	279
8.6 精整 .....	280
8.7 喷砂和抛丸清理 .....	280
8.8 酸洗 .....	281
8.9 补焊 .....	283
8.10 热等静压 .....	293
8.11 铸件的矫正 .....	299
参考文献 .....	300
<b>第9章 钛和钛合金铸件的热处理</b> .....	<b>302</b>
9.1 钛和钛合金铸件热处理的基础和目的 .....	302
9.1.1 热处理的基础 .....	302
9.1.2 热处理的目的 .....	304
9.2 热处理的特点和热处理前的准备工作及注意事项 .....	305
9.2.1 热处理的特点 .....	305
9.2.2 热处理前的准备工作及注意事项 .....	306
9.3 热处理的类型 .....	306
9.3.1 退火 .....	307
9.3.2 热等静压 .....	314
9.3.3 强化热处理 .....	318
9.3.4 氢处理 .....	324
9.3.5 特种热处理 .....	330

9.4 钛和钛合金铸件热处理过程容易发生的问 题及其防止措施 .....	331
9.5 热处理后的处理 .....	333
参考文献 .....	334
<b>第 10 章 钛和钛合金铸件的质量检验与常见缺陷</b> .....	<b>336</b>
10.1 概述 .....	336
10.1.1 铸件质量检验的有关标准 .....	336
10.1.2 铸件分类和质量级别 .....	339
10.1.3 铸件质量检验项目、要求和方 法 .....	340
10.2 铸件质量检验过程和需要说明的几个 问题 .....	342
10.2.1 化学成分分析 .....	342
10.2.2 力学性能检验 .....	342
10.2.3 铸件表面质量检验 .....	343
10.2.4 铸件内部质量检验 .....	343
10.2.5 铸件的几何形状和尺寸检验 .....	344
10.3 影响钛和钛合金铸件质量的因素 .....	344
10.4 钛和钛合金铸件的常见缺陷 .....	345
10.4.1 材料缺陷 .....	345
10.4.2 表面缺陷 .....	345
10.4.3 内部缺陷 .....	346
10.4.4 尺寸和几何形状缺陷 .....	346
参考文献 .....	364
<b>第 11 章 钛和钛合金铸件的焊接</b> .....	<b>366</b>
11.1 钛和钛合金铸件的焊接性 .....	366
11.1.1 间隙元素的影响 .....	366
11.1.2 合金元素的影响 .....	367
11.1.3 焊接热循环造成的显微组织变 化的影响 .....	368
11.2 钛和钛合金铸件的焊接工艺 .....	370
11.2.1 钨极氩弧焊 .....	371
11.2.2 真空电子束焊 .....	385
11.3 钛和钛合金铸件焊接过程中缺陷的 产生和防止 .....	388
11.4 钛和钛合金铸件焊接后的热处理和 质量检验 .....	392

11.4.1	焊后热处理	392
11.4.2	焊后质量检验	393
	参考文献	396
<b>第 12 章</b>	<b>钛和钛合金铸件的应用</b>	<b>397</b>
12.1	概述	397
12.2	钛和钛合金铸件的应用现状	398
12.2.1	在航空、航天工业中的应用	398
12.2.2	在化工及其他工业部门中的应用	405
12.2.3	在海洋运输及其有关方面的应用	407
12.2.4	在医疗卫生和运动器械领域中的应用	407
12.2.5	在汽车工业上的应用	410
12.2.6	在艺术铸造和其他方面的应用	411
12.3	钛和钛合金铸件应用中应注意的几个问题	411
12.3.1	表面的完整性	411
12.3.2	与异体金属的接触及其防护	412
12.3.3	应力腐蚀	413
12.4	应用钛和钛合金铸件的技术、经济效益	414
	参考文献	417
<b>附表</b>	<b>中国、俄罗斯、美国铸造钛和钛合金牌号对照表</b>	<b>419</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 钛的发展史、生产过程及其重要特性

1791 年英国牧师 W. 格雷格尔 (Gregor) 在黑铁矿中发现了钛元素, 但未给予命名。1795 年, 德国 M.H 克拉普鲁斯 (Klaproth) 在研究金红石时, 也发现了该元素, 并以希腊神话中的泰坦神 Titans 命名。1910 年, 美国 M.A 亨特 (Hunter) 首次用钠还原  $TiCl_4$  制取了纯钛, 称为钠还原法。卢森堡科学家 W.J 克劳尔 (Kroll) 于 1940 年, 用镁还原  $TiCl_4$  制得了纯钛, 称为镁还原法。这两种方法后来成了工业生产海绵钛的方法。1948 年, 美国人用镁还原法制出了 2t 海绵钛, 开创了钛的工业生产规模。之后, 英国、日本、前苏联和我国也相继进入了工业化生产<sup>[1-2]</sup>, 据资料估计, 美国 2000 年钛金属的需求量已达到约 45000t。

钛在地壳中的储量丰富, 在金属中居第四位。但由于钛是一种活性很高的金属, 它的生产提炼过程是非常繁杂的, 成本很高。图 1-1 为钛的提炼及钛和钛合金制品的生产流程<sup>[1]</sup>。生产海绵钛的方法有镁还原法和钠还原法, 它们各有优缺点。20 世纪 80 年代以后, 海绵钛生产主要是采用镁还原-真空蒸馏法。海绵钛经过破碎、筛分、压制电极, 一次或二次真空自耗电极电弧精炼后, 就获得了银灰色有金属光泽的金属钛或钛合金。

钛从实现工业生产至今才 50 多年, 由于其具有一系列优异的特性: 如密度小、比强度高、耐腐蚀等, 发展非常快, 短时间内已经显示出了它强大的生命力, 成了航空和航天工业、能源工业、海上运输业、化学工业以及医疗保健等方面不可缺少的材料。但是由于钛的高化学活性, 铸造难度较大, 因而钛和钛合金刚开始使用时都是变形结构件。

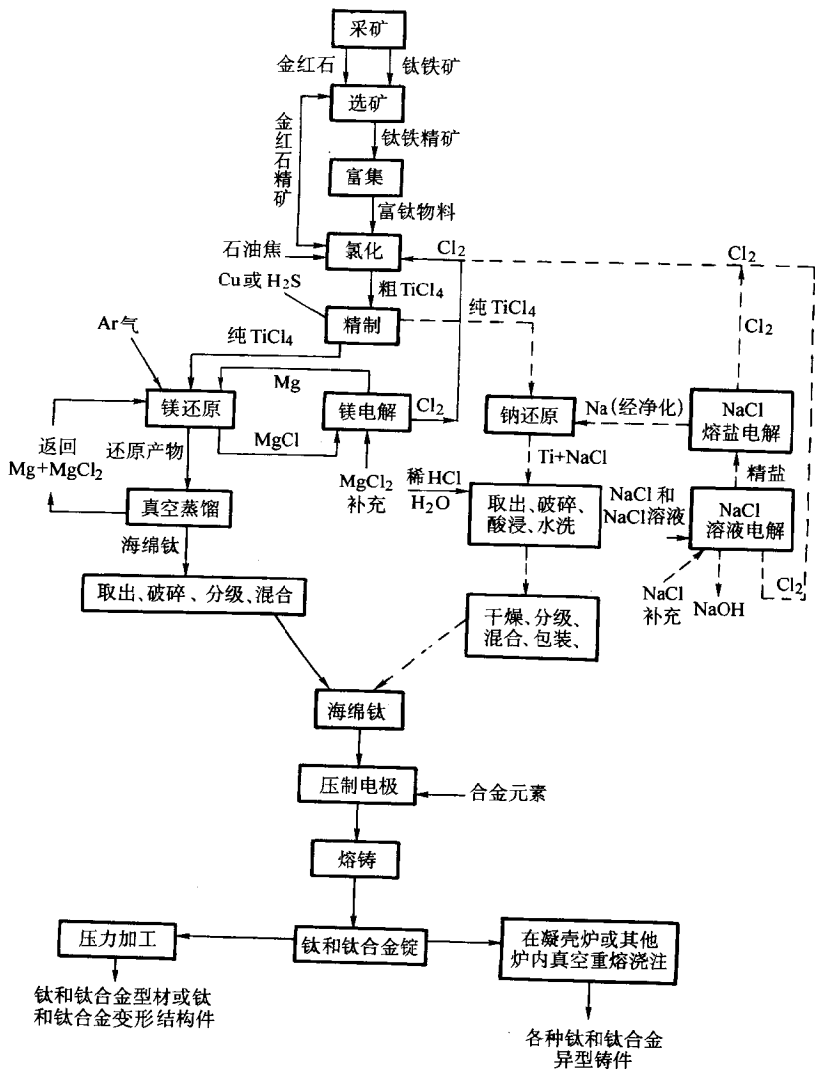


图 1-1 钛的提炼以及钛和钛合金制品生产过程<sup>[1]</sup>



## 1.2 钛和钛合金铸造的发展

钛的提炼生产过程非常繁杂，成本很高，因而钛和钛合金是比较昂贵的材料。随着钛合金变形件用量的增多，应用范围的扩大，发现钛合金变形件的金属利用率很低（只有 20% ~ 50%），机械加工量很大。有些零件，如图 1-2 所示的飞机偏转喷嘴，采用锻造或其他变形工艺制造是难度很大，而且非常不合理的。为此，从 20 世纪 60 年代末开始，许多国家都积极研究近净形成形工艺，如粉末冶金、超塑成形、精锻和铸造等。研究比较发现，铸造，特别是熔模精密铸造，是最有生命力的，此后迅速发展其应用日见广泛。

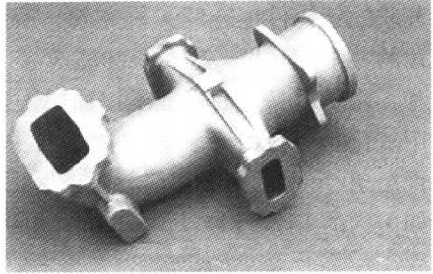


图 1-2 飞机的偏转喷嘴

1949 年，卢森堡的科学家 W.J 克劳尔采用钨电极非自耗炉和石墨机加工型进行了首次钛铸造的尝试，但是这种装置与工艺不适合于工业生产。1950 年美国的 R. A. Beal 等在试验真空自耗电极电弧炉熔炼钛时，发现可以保持一定量可供浇注的钛的大熔池。在此基础上，美国矿山局经过一段时间的试验研究，于 1956 ~ 1960 年发展了冷却铜坩埚的真空自耗电极电弧凝壳炉熔铸法，并建立了适合于工业生产的真空自耗电极电弧凝壳炉<sup>[6]</sup>，从而使获得没有污染的可供浇注的大量熔融钛成了现实，解决了钛和钛合金熔炼和铸造的第一个基本问题——熔炼和铸造设备。

1954 年，美国矿山局在试验研究熔炼和铸造钛设备的同时，采用机加工的高密度石墨型成功地铸造出了第一个钛铸件<sup>[6]</sup>。此后不久，美国矿山局又发展了捣实石墨型工艺，从而开创了钛和钛合金复杂铸件的生产。前苏联铸钛技术的发展比美国晚，1961 ~ 1963 年才建立了生产型的凝壳炉。1964 年，美国、前苏联开始把机加工石墨型和捣实石墨型铸件应用于工业中。捣实石墨型工艺及其由此派生的工