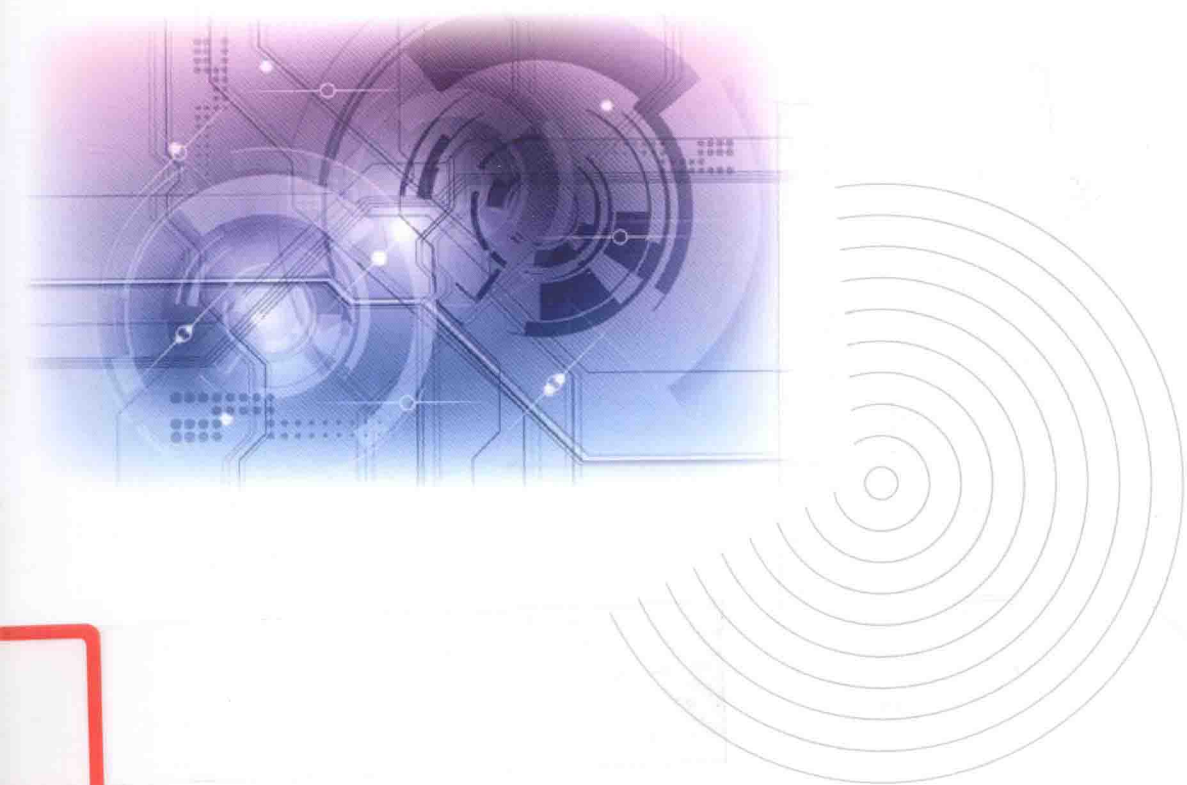


钛合金精密锻造

李淼泉 李宏 罗皎 著



科学出版社

钛合金精密锻造

李淼泉 李 宏 罗 皎 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是作者在国家自然科学基金项目和 973 计划等项目的资助下,近二十年研究成果的总结。本书主要包括:钛及钛合金的微观组织和性能,锻造技术发展及应用;锻造变形过程的物理模拟方法,常见钛合金的流动应力、硬化与软化效应,工艺参数对钛合金锻造变形力学行为的影响;钛合金的固态相变,工艺参数对钛合金微观组织和力学性能的影响;锻造变形过程的建模方法,材料参数的识别方法,多尺度微观组织模型和本构关系模型,锻造变形过程的数值模拟方法,锻造变形全过程的多尺度耦合数值模拟与微观组织参数预测方法,典型钛合金锻件的锻造变形规律;高性能钛合金叶片精密锻造技术,复杂高性能等温锻造技术,特大型钛合金构件锻造成形技术等。

本书可供从事精密塑性变形理论研究、新技术开发及应用工作的科研人员、工程技术人员和管理人员使用,也可作为高等院校材料专业本科生、研究生和教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

钛合金精密锻造/李淼泉,李宏,罗皎著. —北京:科学出版社,2016.9

ISBN 978-7-03-049866-3

I. ①钛… II. ①李…②李…③罗… III. ①钛合金-锻造 IV. ①TG31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 217785 号

责任编辑:祝 洁 / 责任校对:郑金红
责任印制:赵 博 / 封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

天津新科印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 9 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 9 月第一次印刷 印张:16 1/2

字数:330 000

定价:85.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

钛合金是一种重要的金属结构材料，以其密度低，比强度高，耐腐蚀性好，可焊性好和中温性好等优点在航空、航天、舰船、核能、发电和汽车等领域应用十分广泛，尤其在高新技术和国防装备领域发挥了极为重要的作用。钛合金锻件优点众多，应用前景十分广阔，但钛合金锻件的微观组织与性能难以控制、变形载荷高及机械加工余量大等国际性难题限制了其工程应用，攻克这些难题有利于充分发挥钛合金的优势，扩大其应用领域。

钛合金精密锻造是指钛合金经过锻造后形成接近零件形状和尺寸的锻件，仅需要少量的机械加工或不需要机械加工就可以用作机械构件的制造技术，是 21 世纪先进制造技术领域重点发展方向。虽然钛合金精密锻造是一种国民经济科学发展和国防现代化建设急需的先进制造技术，但是在本书之前，还没有系统论述钛合金精密锻造理论和技术的书籍问世。为了促进钛合金精密锻造理论和技术的发展，作者系统总结了近二十年来的研究成果，同时吸纳了国内外相关领域学者的公开研究成果，撰写了这部著作，希望对钛合金精密锻造理论研究与工程实践有所帮助。

本书力求以介绍钛合金精密锻造理论、方法和技术为基础，详细论述钛合金高温塑性变形时的流动行为、微观组织和力学性能，多尺度与多场效应下材料模型、耦合数值模拟方法及技术，重点论述关键钛合金锻件锻造过程中的形性调控理论和技术。本书不仅适合从事塑性变形理论和技术研究工作的科研人员阅读，也可从事塑性变形技术实践与创新的工程技术人员提供参考。全书共七章：第 1 章介绍钛及钛合金的微观组织和性能，锻造技术发展及应用；第 2 章论述高温塑性变形的物理模拟方法，流动应力、加工硬化与动态软化效应以及变形工艺参数对力学行为的影响；第 3 章论述固态相变，变形工艺参数、变形历史对微观组织和力学性能的影响；第 4 章论述锻造变形过程的建模方法，材料参数识别方法，模糊神经网络模型，多尺度微观组织模型，多尺度本构关系模型；第 5 章论述锻造变形过程的数值模拟方法，锻造变形过程多尺度数值模拟及微观组织预测，典型锻件变形规律；第 6 章论述加工图理论，锻造变形加工图及应用；第 7 章论述高性能叶片精密锻造技术，复杂高性能盘等温锻造技术，大型整体框近净锻造技术。

李淼泉教授规划了本书的内容结构框架，并进行撰写、审定、修改和定稿。书中第2章～第6章的内容取材于李淼泉教授负责的研究团队及指导研究生在钛合金精密锻造理论及技术研究方面的科研工作成果。在撰写本书过程中采纳了相关领域学者在期刊、手册、会议和网络等媒介中的研究成果，限于篇幅，未全部列出。同时，钛合金精密锻造理论及技术尚在快速发展中，加之作者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

本书涉及的工作得到了国家自然科学基金委员会、工业和信息化部、教育部、科学技术部、航空科学基金委员会和西北工业大学，以及诸多研究院所和企业的支持，在此一并表示感谢。

作 者

2016年5月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 钛合金的微观组织和性能	1
1.1.1 钛及钛合金的特性	1
1.1.2 钛合金的微观组织	3
1.1.3 钛合金的加工性能	10
1.1.4 钛合金的应用	13
1.2 钛合金锻造技术	17
1.2.1 锻造技术发展概况	17
1.2.2 钛合金锻造工艺特性	19
1.2.3 钛合金锻造工艺分类	21
1.2.4 典型应用	25
参考文献	27
第 2 章 高温塑性变形力学行为	29
2.1 物理模拟方法	29
2.1.1 物理模拟方法及特点	29
2.1.2 物理模拟试验装置	30
2.1.3 锻造变形过程的物理模拟方法	32
2.2 高温压缩变形时的流动应力	33
2.2.1 典型钛合金的流动应力-应变曲线	33
2.2.2 变形工艺参数对流动应力的影响	45
2.3 高温压缩变形时的加工硬化与动态软化	48
2.3.1 加工硬化	48
2.3.2 动态软化	50
2.3.3 变形热效应	54
2.4 高温压缩变形时的不连续屈服行为	56
2.4.1 不连续屈服特征	56
2.4.2 不连续屈服形成机理	58
2.5 变形工艺参数对高温变形力学行为的影响	61
2.5.1 表观变形热激活能	61
2.5.2 应变速率敏感性指数	64

2.5.3 应变硬化指数	69
参考文献	73
第3章 高温塑性变形微观组织和性能	76
3.1 钛合金的固态相变	76
3.2 变形工艺参数对微观组织的影响	79
3.2.1 Ti60 合金	79
3.2.2 TC4 合金	83
3.2.3 TC6 合金	88
3.2.4 TC8 合金	92
3.2.5 TC11 合金	96
3.2.6 TC17 合金	104
3.2.7 TC18 合金	109
3.3 变形工艺参数对力学性能的影响	114
3.4 变形历史对微观组织和力学性能的影响	122
3.4.1 高温压缩+拉伸变形	122
3.4.2 多次锻造变形	127
3.4.3 锻后多次热处理	127
参考文献	128
第4章 锻造变形过程理论模型	130
4.1 建模方法	130
4.1.1 本构关系模型	130
4.1.2 微观组织模型	134
4.2 材料参数识别方法	138
4.2.1 最小二乘法	138
4.2.2 误差反向传播算法	138
4.2.3 遗传算法	140
4.3 模糊神经网络模型	141
4.3.1 模糊神经网络原理	141
4.3.2 模糊神经网络类型	145
4.3.3 模糊神经网络模型应用	147
4.4 多尺度微观组织模型	153
4.4.1 位错密度模型	153
4.4.2 晶粒尺寸模型	155
4.4.3 模型应用	157

4.5 多尺度本构关系模型	158
参考文献	160
第 5 章 锻造变形过程耦合数值模拟	164
5.1 数值模拟方法	164
5.2 塑性变形-传热-微观组织耦合数值模拟	166
5.2.1 刚黏塑性有限元法基本原理	166
5.2.2 塑性变形-传热-微观组织耦合分析	169
5.2.3 耦合数值模拟关键技术	170
5.3 锻造变形过程多尺度数值模拟	175
5.4 锻造全过程的微观组织预测	177
5.4.1 TC4 合金叶片	177
5.4.2 TC6 合金盘	187
5.5 典型锻件锻造变形规律	192
5.5.1 TC4 合金叶片	192
5.5.2 TC6 合金盘	197
参考文献	202
第 6 章 锻造变形加工图	204
6.1 加工图理论	204
6.2 钛合金锻造变形加工图	206
6.2.1 Ti60 合金	206
6.2.2 TC4 合金	210
6.2.3 TC11 合金	213
6.2.4 TC18 合金	222
6.2.5 TC17 合金	224
6.2.6 Ti1023 合金	226
6.3 锻造变形加工图新理论	227
6.3.1 能量耗散率	227
6.3.2 塑性流动失稳准则	229
6.4 加工图新理论的应用	231
参考文献	234
第 7 章 典型锻件精密锻造技术	237
7.1 高性能叶片精密锻造技术	237
7.1.1 叶片精密锻造工艺	237
7.1.2 Ti6Al4V 合金叶片等温锻造	239

7.1.3	带阻尼台 TC4 合金叶片锻造.....	242
7.2	复杂高性能盘等温锻造技术	247
7.2.1	TC11 合金盘	247
7.2.2	TC17 合金整体叶盘	250
7.3	大型整体框近净锻造技术	252
7.3.1	TA15 合金框结构特征.....	252
7.3.2	TA15 合金整体框锻造.....	253
7.3.3	TA15 合金整体框力学性能.....	254
	参考文献.....	255

第 1 章 绪 论

1.1 钛合金的微观组织和性能

1.1.1 钛及钛合金的特性

钛是银白色金属，密度小，为 4.5g/cm^3 ，比钢轻 43%，比轻金属镁稍重，与铝、镁统称为轻金属。钛的强度高，与钢相近，比铝大 2 倍，比镁大 5 倍，钛的比强度（强度/密度）位于金属之首；熔点高，为 1668°C ，比铝、镁高约 1000°C ；耐腐蚀性、抗阻尼性和生物相容性好等。但是，钛的导热性和导电性差。钛的性能与其所含碳、氮、氢、氧等元素的含量有关。高纯钛的塑性好，延伸率可达 50%~60%，断面缩减率可达 70%~80%，但是强度低，不宜用作结构材料^[1~4]。

钛合金的比强度高，与铝合金、镁合金统称为轻合金，同时耐热性和耐腐蚀性好，被广泛应用于航空、航天、舰船、海洋工程、兵器、能源、冶金和石化等领域。1954 年，美国研制出第一个实用钛合金——Ti6Al4V 合金，由于其强度高，热强性、塑性、韧性、成形性、可焊性、耐腐蚀性和生物相容性均较好，成为钛合金中的王牌合金。Ti6Al4V 合金的使用量已占全部钛合金的 75%~85%，后续研制的许多钛合金可以看做是 Ti6Al4V 合金的改进。20 世纪 50~60 年代，主要发展了航空发动机用高温钛合金和机体用结构钛合金；70 年代以后，耐腐蚀钛合金得到进一步发展，其使用温度由 400°C 提高到 $600\sim 650^\circ\text{C}$ ，钛铝金属间化合物（Ti3Al、TiAl）在航空发动机热端部件（涡轮）中得到初步应用，结构钛合金向高强高韧、高弹性模量、高塑性、高损伤容限方向发展，钛基形状记忆合金（TiNi、TiNiFe、TiNiNb）在工程上得到应用。目前，世界上已经研制出多种钛合金，著名的钛合金有 20~30 种，如 Ti6Al4V、Ti6Al4V ELI、Ti5Al2.5Sn、Ti2Al2.5Zr、Ti32Mo、TiMoNi、TiPd、SP700、Ti6242、Ti17、Ti1053、Ti1023、Ti62222S、Ti5553、BT3-1、BT9、BT20、BT22、Ti811、Ti679、IMI829、IMI834 和 Gum Metal（Ti23Nb0.7Ta2Zr1.20）等。钛及钛合金具有许多优良特性，如表 1-1 所示，归纳起来主要包括以下九个方面^[1,2,4,5]。

表 1-1 钛及部分其他金属的物理性能

物理性能	钛	镁	铝	铁	镍	铜
密度/(g/cm^3)	4.54	1.74	2.7	7.87	8.9	8.9
熔点/ $^\circ\text{C}$	$1\,668\pm 5$	650	660	1\,535	1\,455	1\,083
膨胀系数/($10^{-6}/^\circ\text{C}$)	8.5	26	23.9	11.7	13.3	16.5
导热系数/[$\text{cal}/(\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C})$]	0.04	0.35	0.50	0.20	0.142	0.92
弹性模量/MPa	112\,500	43\,600	72\,400	200\,000	210\,000	130\,000

(1) 比强度高。钛合金的密度低, 约为钢的 60%; 强度高, 纯钛的强度接近普通钢的强度, 钛合金的抗拉强度为 686~1176MPa, 一些高强度钛合金超过了许多合金结构钢的强度, 如表 1-2 所示。钛合金的比强度远大于其他金属结构材料的比强度, 可制造出单位强度高、刚性好、质量轻的零件或部件。目前, 航空发动机盘、叶片、环、飞机骨架、蒙皮、紧固件和起落架等都采用钛合金制造。

表 1-2 典型钛合金的室温和高温力学性能

合金 牌号	室温力学性能, 不小于					高温力学性能, 不小于		
	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	延伸率 δ /%	断面缩减 率 ψ /%	冲击韧性 α_k /($J \cdot cm^2$)	试验温 度/℃	抗拉强度 σ_b /MPa	持久强度 $\sigma_{(100)}$ /MPa
TA1	343	275	25	50	—	—	—	—
TA2	441	373	20	40	—	—	—	—
TA3	539	461	15	35	—	—	—	—
TA5	686	—	15	40	58.8	—	—	—
TA6	686	—	10	27	29.4	350	422	392
TA7	785	—	10	27	29.4	350	490	441
TC1	588	—	15	30	44.1	350	343	324
TC2	686	—	12	30	39.2	350	422	392
TC4	902	824	10	30	39.2	400	618	569
TC6	981	—	10	23	29.4	400	736	667
TC9	1059	—	9	25	29.4	500	785	588
TC10	1030	—	12	25~30	34.3	400	834	785
TC11	1030	—	10	30	29.4	500	686	588

(2) 热强度高。钛合金的使用温度比铝合金高几百度, 在中等温度条件下仍能保持高的强度, 在 450~500℃ 下长期工作过程中仍具有很高的比强度, 如表 1-2 所示。然而, 铝合金在 150℃ 时的比强度明显下降, 其工作温度不高于 200℃。

(3) 耐腐蚀性好。在常温下, 钛表面容易生成一层极薄的致密氧化物, 可以抵抗强酸甚至王水的作用, 耐腐蚀性好。钛合金在潮湿的大气和海水介质中工作, 其耐腐蚀性明显优于不锈钢; 对点蚀、酸蚀、应力腐蚀的抵抗力特别强; 对碱、氯化物、硝酸和硫酸等也有优良的耐腐蚀能力。但是, 钛对具有还原性氧及铬盐的抗腐蚀性差。

(4) 低温性好。在低温和超低温下, 钛合金仍能保持优良的力学性能。间隙元素极低的钛合金的低温性能好, 如 TA7 合金在 -253℃ 下仍具有一定的塑性。因此, 钛合金也是一种重要的低温结构材料。

(5) 化学活性大。钛的化学活性大, 易与大气中氧、氮、氢、一氧化碳、二氧化碳、水蒸气和氨气等产生强烈的化学反应。当含碳量大于 0.2% 时, 碳与钛作用会在钛合金中形成碳化钛 (TiC) 硬质层。当温度较高时, 钛与氮作用也会在钛合金中形成氮化钛 (TiN) 硬质表层。当温度高于 600℃ 时, 钛吸收氧在钛合金中

形成硬度很高的硬化层 (TiO_x)。钛吸收过多的氢也会在钛合金中形成脆化层 (Ti_xH)。钛吸收气体而形成的硬化层深度可达 $0.1\sim 0.15\text{mm}$, 硬化增大程度为 $20\%\sim 30\%$ 。由于钛的化学活性大, 钛合金易与摩擦表面产生黏附现象。

(6) 导热系数小。钛的导热系数约为镍的 $1/4$, 铁的 $1/5$, 铝的 $1/13$, 如表 1-1 所示。钛合金比纯钛的导热系数低 50% 左右。

(7) 弹性模量小。退火态钛合金的弹性模量为 $10\,780\sim 11\,760\text{MPa}$, 约为钢和不锈钢的 $1/2$ 。因此, 钛合金的刚性差、易变形, 不宜用于制造细长杆件和薄壁件。钛合金的机械加工表面回弹量大, 为不锈钢的 $2\sim 3$ 倍, 在刀具的后刀面容易发生剧烈的摩擦、黏附和黏结磨损等现象。

(8) 抗阻尼性好。与钢、铜相比, 钛合金受到机械振动和电振动后的自身振动衰减时间最长。因此, 钛合金可用于制造医学用超声粉碎机振动元件和高级音响扬声器的振动薄膜等。

(9) 无毒、无磁性。钛合金无毒, 与人体组织及血液有良好的相容性, 被广泛应用于制造人工关节和心脏起搏器等。钛合金无磁性, 即使在强大的磁场中也不会被磁化。因此, 用钛合金制造的舰艇外壳可以避免磁性雷爆炸, 还可以应用于制造磁控设备的元件。

1.1.2 钛合金的微观组织

钛合金是以钛为基加入其他合金元素形成的合金。钛有两种同质异晶体, 当温度低于 882.5°C 时为密排六方结构 (hexagonal close packed, HCP), 称为 α 钛; 当温度高于 882.5°C 时为体心立方结构 (body centered cubic, BCC), 称为 β 钛。根据钛的两种晶体结构的不同特点, 添加适量的合金元素, 改变其相变温度及组分含量可以获得不同微观组织的钛合金, 如图 1-1 和图 1-2 所示。图中 M_s 是冷却过程中 β 相开始转变为马氏体相的最高温度, M_f 是马氏体转变的终止温度。

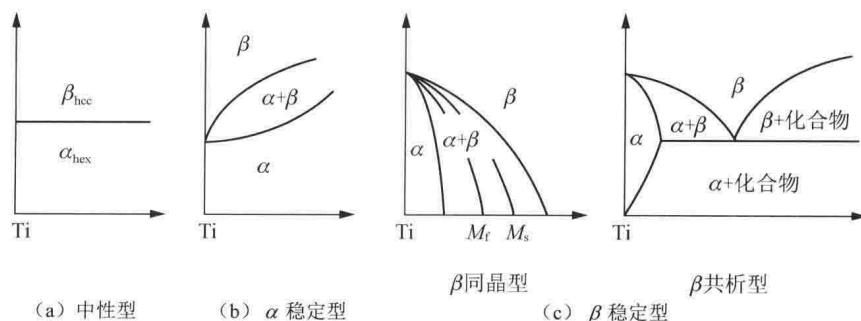


图 1-1 合金元素对钛合金相图的影响^[1]

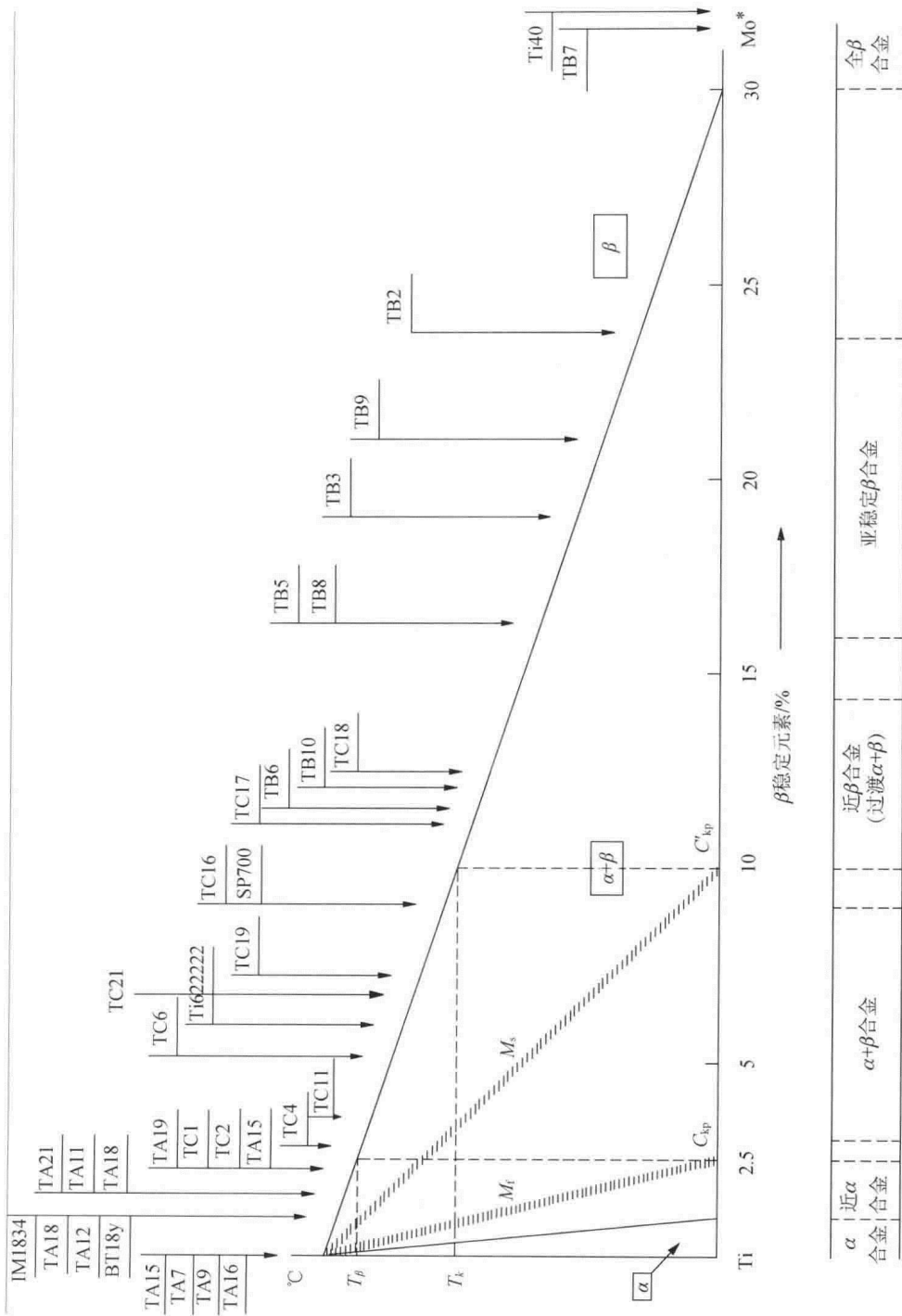


图 1-2 β 稳定元素含量与钛合金类型的关系

根据合金元素对钛合金相变温度的影响,添加在钛合金中的合金元素可分为三类:①稳定 α 相、提高相变温度的元素被称为 α 稳定元素,包括铝、碳、氧和氮等。铝是钛合金的主要合金元素,对提高钛合金的室温强度和高温强度、降低密度和增加弹性模量有显著作用。②稳定 β 相、降低相变温度的元素被称为 β 稳定元素。 β 稳定元素又可分同晶型和共析型两种,同晶型 β 稳定元素包括钼、铌和钒等,共析型 β 稳定元素包括铬、锰、铜、铁和硅等。③添加在钛合金中的中性合金元素对相变温度的影响不大,包括锆、锡等。氧、氮、碳和氢在钛合金中属于杂质元素,需要控制它们的含量。氧和氮在钛合金 α 相中有较大溶解度,对钛合金的强化效果显著,但是会导致其塑性下降,通常规定钛合金中氧和氮的含量应分别控制在0.15%~0.2%和0.04%~0.05%以下。氢在钛合金 α 相中的溶解度很小,在钛合金中溶解过多的氢会形成氢化物,使得钛合金变脆,通常氢在钛合金中的含量应控制在0.015%以下。氢在钛合金中的溶解是可逆的,可以用真空退火处理除去钛合金中的氢^[3]。

根据相的组成,钛合金可分为三类,即 α 合金、 $\alpha+\beta$ 合金和 β 合金。我国分别用TA、TC和TB表示,如图1-3所示,各国/组织钛合金牌号对照如表1-3所示^[4]。

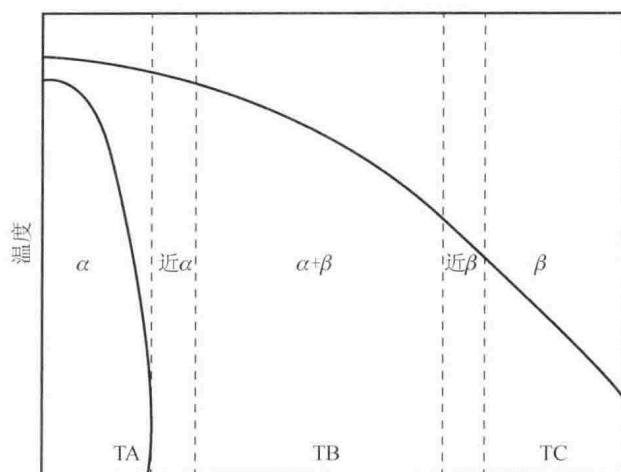


图 1-3 钛合金的相组成

表 1-3 各国/组织钛合金牌号对照表

合金 类型	中国 (GB)	独联体 (ГОСТ)	美国 (ASTM)	英国 (IMI)	德国 (BWB)	法国 (NF)	日本 (JIS)
CP Ti	TA0	—	—	—	—	—	—
	TA1	BT1-0	Ti35A	IMI115	LW3.7024	T-35	KS50
	TA2	BT1-1	Ti50A	IMI125	LW3.7034	T-40	KS60
	TA3	BT1-2	Ti65A	IMI135	—	—	KS85

续表

合金 类型	中国 (GB)	独联体 (ГОСТ)	美国 (ASTM)	英国 (IMI)	德国 (BWB)	法国 (NF)	日本 (JIS)
α 合金	TA4	48-T2	—	—	—	—	—
	TA5	48-OT3	—	—	—	—	—
	TA6	BT5	Ti5Al2.5Sn	—	—	—	KS115AS
	TA7	BT5-1	—	IMI317	—	T-A5E	—
	TA8	BT10	—	—	—	—	—
β 合金	TB1	BT15	—	—	—	—	—
	TB2	—	—	—	—	—	—
	TB3	—	—	—	—	—	—
$\alpha + \beta$ 合金	TC1	OT4-1	—	IMI315	—	—	ST-A90
	TC2	OT4	—	—	—	—	—
	TC3	BT6C	—	—	—	—	—
	TC4	BT6	Ti6Al4V	IMI318	LW3.7164	T-A6V	—
	TC5	BT3	—	—	—	—	—
	TC6	BT3-1	—	—	—	—	—
	TC7	AT6	—	—	—	—	—
	TC8	BT8	—	—	—	—	—
	TC9	—	Ti6Al6V2Sn	—	—	T-A6V6Sn	—
	TC10	—	—	—	—	—	—

(1) α 合金在平衡状态下主要由 α 相组成, 含有一定量的 α 稳定元素 (铝) 和一些中性强化元素 (锆、锡和铅)。在 α 合金中加入少量的 β 稳定元素, 可以获得近 α 合金, 近 α 合金中除 α 相基体之外有少量的 β 相。常见的 α 合金 (包括近 α 合金) 主要包括 TA5、TA6、TA7、Ti811 (Ti8Al1Mo1V)、Ti6Al2Zr1Mo1V、Ti679 (Ti2.25Al11Sn5Zr1Mo0.25Si)、BT18 (Ti7.7Al11Zr0.6Mo1Nb0.3Si) 和 Ti6242S (Ti6Al2Sn4Zr2Mo0.1Si) 等^[6]。 α 合金密度小, 微观组织稳定, 强度高, 热强性、抗蠕变性、冲击性、焊接性和耐腐蚀性好。但是, α 合金室温强度低, 不能进行热处理强化; α 合金的锻造性能较差, 容易产生锻造缺陷, 可通过控制锻造变形程度和增加热处理工序消除锻造缺陷。 α 合金一般用于制造使用温度在 500℃ 以下的耐热或耐腐蚀零件。

(2) $\alpha + \beta$ 合金在平衡状态下由 α 相和 β 相共同组成, 含有较多的 α 稳定元素和 β 稳定元素, 使得 α 相和 β 相均得到强化。常见的 $\alpha + \beta$ 合金主要包括 TC1、TC2、TC6 (Ti6Al1.5Cr2.5Mo0.5Fe0.3Si)、Ti6Al4V、TC11 (Ti6.5Al3.3Mo1.5Zr0.3Si)、Ti17 (Ti5Al2Sn2Zr4Mo4Cr)、TC19 (Ti6Al2Sn4Zr6Mo) 和 Ti62222S (Ti6.2Al2.8Mo2Nb2Sn2.1Zr1.3Cr) 等^[6]。 $\alpha + \beta$ 合金成分、高温变形和热处理方式对其相形貌、数量、尺寸和分布有显著影响, 其中 β 相含量一般为 5%~40%。 $\alpha + \beta$ 合金具有中等强度, 室温综合性能较好, 可以进行冷变形、高温变形和热处理强化的优点, 但是焊接性和耐热性比 α 合金差。 $\alpha + \beta$ 合金应用最为广泛, 一般用于制造使用

温度在 400℃ 以下有一定高温强度要求的发动机零件或低温用零件。

(3) β 合金在平衡状态下由 β 相组成, 是将高温 β 相全部保留到室温的钛合金, 含大量的 β 稳定元素, 多数 β 合金中还含有铝、锆和锡等, 如 TB2 合金。近 β 合金在平衡状态下由 α 相和 β 相共同组成, 少量 α 相作为强化相分布于 β 相之间, 高温变形和热处理方式对其相形貌、数量、尺寸和分布有影响。 β 合金的强度较高, 冲击性能优良, 可进行热处理强化, 但是焊接性差, 切削加工困难。 β 合金的合金元素多, 冶炼工艺复杂, 密度大, 成本高。 β 合金的室温强度与 $\alpha + \beta$ 合金的水平相当, 高温强度低于 $\alpha + \beta$ 合金, 但是工艺性比 $\alpha + \beta$ 合金好。 β 合金一般用于制造使用温度在 350℃ 以下的零件。 α 合金、 β 合金和 $\alpha + \beta$ 合金的性能比较如表 1-4 所示。

表 1-4 α 合金、 β 合金和 $\alpha + \beta$ 合金性能比较

合金种类	密度	强度	塑性	断裂韧性	蠕变强度	腐蚀性	氧化性	焊接性	冷成形性
α 合金	较好	较差	较差/较好	较好	较好	好	好	较好	差
β 合金	较好	较好	较好	较差/较好	较好/较差	较好	较好/较差	较好/较差	差
$\alpha + \beta$ 合金	较差	好	较好/较差	较好/较差	差	较好/较差	差	差	较差/较好

钛合金按用途又可分为耐热钛合金、高强钛合金、耐腐蚀钛合金(钛-钼合金和钛-钡合金等)和低温钛合金和特殊功能钛合金(钛-铁贮氢合金和钛-镍记忆合金)等。正在发展的新型钛合金有: 高温钛合金, 钛铝金属间化合物, 高强高韧 β 合金, 损伤容限型钛合金, 阻燃钛合金和医用钛合金等。

微观组织是影响钛合金性能的决定性因素。国外将钛合金的微观组织类型分为片层组织、过渡组织和球状组织。国内将钛合金的微观组织类型分为等轴组织、混合组织、网篮组织和魏氏组织。工程上, 一般将钛合金的微观组织类型分为等轴组织、网篮组织、双态组织和片层组织, 如图 1-4 所示。

(1) 等轴组织由等轴 α 和 β 转变组织构成, 等轴 α 以球形、椭圆形、橄榄形、棒锤形和短棒形等多种形态存在, 总量不低于 40%, 其余为 β 转变组织, 如图 1-5 所示。等轴组织钛合金的综合力学性能较好, 具有较高的拉伸塑性和疲劳强度, 而且随着微观组织中初生 α 与 β 转变组织的比例、形貌和晶粒尺寸的不同有所变化。钛合金中初生 α 含量增加, 其塑性和疲劳性能提高, 而断裂韧性、高温蠕变和高温持久强度降低。反之, 钛合金中初生 α 含量减少, 断裂韧性及高温性能提高, 而室温塑性降低。

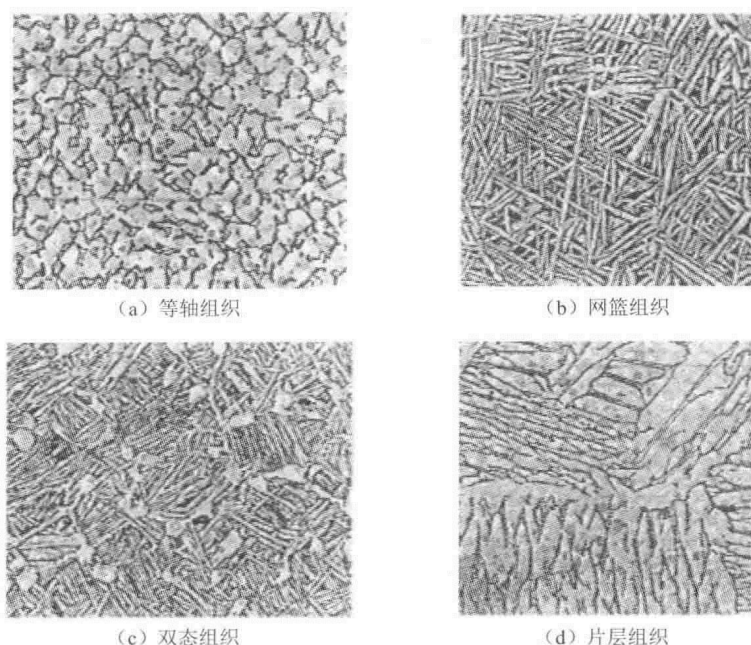


图 1-4 钛合金微观组织的工程化分类

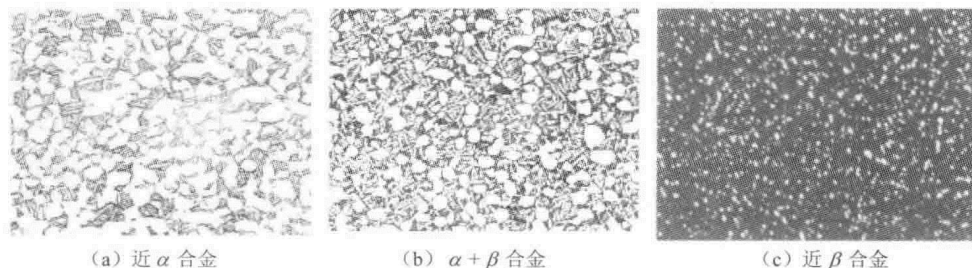


图 1-5 等轴组织及类型变化

(2) 双态组织由等轴 α 和 β 转变组织构成, 等轴 α 以球形、椭圆形、橄榄形、棒锤形和短棒形等多种形态存在, 总量不超过 40%, 其余为 β 转变组织, 如图 1-6 所示。双态组织钛合金具有较高的塑性和疲劳强度, 因为变形协调性好, 不易产生空洞, 裂纹萌生困难。但是, 双态组织钛合金的断裂韧性、疲劳裂纹扩展性能和高温性能低于魏氏组织, 原因在于裂纹在双态组织中扩展时路径平直, 分枝少, 在破坏时只能吸收较少的能量。

(3) 篮筐组织仅由变形 β 转变组织构成, 等轴 α 完全消失, 如图 1-7 所示。篮筐组织钛合金具有较高的持久和蠕变强度, 但是, 与等轴组织相比, 疲劳性能较差。另外, 篮筐组织中的歪扭、短粗、纵横交错的微观组织可以不断改变钛合金裂纹扩展方向, 降低裂纹扩展速率, 使得钛合金的断裂韧性提高。