



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属 理论与技术前沿丛书
SERIES OF THEORETICAL AND TECHNOLOGICAL FRONTIERS OF
NONFERROUS METALS

钛合金相变及热处理

PHASE TRANSFORMATION AND HEAT TREATMENT OF TITANIUM ALLOYS

赵永庆 陈永楠 张学敏 曾卫东 王磊 编著

Zhao Yongqing Chen Yongnan Zhang Xuemin Zeng Weidong Wang Lei



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团



国家出版基金项目

NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属理论与技术前沿丛书

钛合金相变及热处理

赵永庆 陈永楠 张学敏 曾卫东 王磊 编著

Zhao Yongqing Chen Yongnan Zhang Xuemin

Zeng Weidong Wang Lei



中南大学出版社

www.csupress.com.cn



中国有色集团

图书在版编目(CIP)数据

钛合金相变及热处理/赵永庆等编著. —长沙:中南大学出版社,
2012. 01

ISBN 978-7-5487-0389-1

I. 钛... II. 赵... III. ①钛合金-相变②钛合金-热处理
IV. ①TG146.2②TG166.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 186003 号

钛合金相变及热处理

赵永庆 陈永楠 张学敏 曾卫东 王 磊 编著

-
- 责任编辑 史海燕
 责任印制 文桂武
 出版发行 中南大学出版社
社址:长沙市麓山南路 邮编:410083
发行科电话:0731-88876770 传真:0731-88710482
 印 装 长沙超峰印刷有限公司
-

- 开 本 720×1000 B5 印张 16.25 字数 303 千字 插页
 版 次 2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷
 书 号 ISBN 978-7-5487-0389-1
 定 价 68.00 元
-

图书出现印装问题,请与经销商调换

前言

Foreword

自 20 世纪 50 年代以来,钛及钛合金因具有优异的综合性能,得到世界各国的高度重视,在各行各业获得了广泛的应用。尽管如此,钛及钛合金方面的专著很少,尤其是专门介绍钛合金相变和热处理的专著。而钛合金的相变和热处理是钛合金研究的基础,也是控制钛合金性能的关键。本书编著的目的在于为从事钛合金及相关材料专业的工作者提供一本较为系统的有关钛合金相变、热处理、力学性能、应用等方面知识的著作,既比较实用,也兼顾学术性。

本书第 1 章由西北工业大学的曾卫东教授撰写,第 2 章和第 3 章由西北有色金属研究院赵永庆教授撰写,第 4 章、第 5 章和第 8 章由长安大学的陈永楠博士撰写,第 6 章由东北大学的王磊教授和于腾博士撰写,第 7 章由长安大学的张学敏博士撰写,并由赵永庆和陈永楠进行了最后统稿和修改。需要指出的是,由于作者的侧重点所致,各章节论述繁简也不尽相同,是否妥当,尚待商榷。另外,限于时间和资料收集等原因,疏漏之处在所难免,诚恳欢迎批评指正,待有机会再版时修订。

感谢国家 973 计划“钛合金材料制备加工的基础研究”项目(2007CB613800)的支持!

在本书撰写过程中参考了大量文献资料,但各章后面所附参考文献仅为其中部分资料,在此对本书引用的参考文献的作者表示衷心感谢。

赵永庆 谨识

2011 年 2 月 16 日

目录

Contents

第 1 章 钛及钛合金的特点、分类及锻造加工	1
1.1 钛及钛合金的发展概况	1
1.2 钛及钛合金的特点	2
1.3 钛合金的分类	5
1.3.1 钛的合金元素	5
1.3.2 钛合金的分类	7
1.4 钛合金的显微组织	12
1.5 钛合金的锻造工艺	15
1.5.1 钛合金的锻造特性	15
1.5.2 钛合金的锻造方法	17
1.5.3 $\alpha + \beta$ 锻造工艺	17
1.5.4 β 锻造工艺	18
1.5.5 近 β 锻造工艺	22
1.5.6 准 β 锻造工艺	28
参考文献	29
第 2 章 钛合金研究的发展现状及趋势	31
2.1 概述	31
2.2 新型钛合金的研究进展	31
2.2.1 宇航用钛合金	31
2.2.2 船用钛合金	35
2.2.3 生物医用钛合金	37
2.2.4 低成本钛合金	39
2.2.5 其他合金	39
2.3 国内外钛合金研制的差距	41
2.4 钛合金发展趋势	41
参考文献	42
第 3 章 钛及钛合金的应用	45
3.1 概述	45

2 / 钛合金相变及热处理

3.2	宇航应用	47
3.3	化工、汽车及能源等工业上的应用	58
3.4	日常生活领域中的应用	60
3.4.1	体育器械	60
3.4.2	医疗器械与人工器官	61
3.4.3	照相器材	63
3.4.4	建筑用钛	64
3.4.5	其他日常生活用途	64
3.5	粉末冶金钛合金的民用	66
3.5.1	汽车工业应用	66
3.5.2	生物医疗应用	67
3.5.3	储氢应用	69
3.5.4	其他应用	70

参考文献	72
------	----

第4章 钛合金相变研究方法 74

4.1	概述	74
4.2	物相类型分析	74
4.2.1	物相种类分析原理	74
4.2.2	X射线衍射分析	76
4.2.3	电子衍射分析	79
4.3	微观组织分析	81
4.3.1	光学电子显微镜	81
4.3.2	扫描电子显微镜	85
4.3.3	透射电子显微镜	89
4.4	相变过程的分析方法	92
4.4.1	热分析法	92
4.4.2	电阻分析法	93

4.5	小结	95
-----	----	----

参考文献	95
------	----

第5章 钛合金的相变 97

5.1	概述	97
5.2	钛与钛合金的同素异晶转变	98
5.3	β 钛合金热处理过程中的相变	100
5.3.1	马氏体相变	102
5.3.2	ω 相变	106

5.3.3 β 相的分离	112
5.3.4 α 相的形成	113
5.3.5 马氏体相的分解	115
5.3.6 共析分解	117
5.3.7 α 相的分解	121
5.3.8 界面相的形成	122
5.4 小结	122
参考文献	122
第 6 章 热处理对钛合金组织和强韧性的影响	125
6.1 概述	125
6.1.1 钛合金的热处理特点	125
6.1.2 钛合金的热处理类型	126
6.2 钛合金的显微组织特征	128
6.2.1 片层组织	128
6.2.2 网篮组织	129
6.2.3 双态组织	129
6.2.4 等轴组织	130
6.3 热处理工艺对钛合金显微组织演化的影响	130
6.3.1 固溶温度对 TC21 合金显微组织的影响	130
6.3.2 固溶时间对 TC21 合金显微组织的影响	131
6.3.3 冷却方式对 TC21 合金显微组织的影响	132
6.3.4 时效温度对 TC21 合金组织的影响	133
6.3.5 时效时间对 TC21 合金组织的影响	134
6.3.6 热处理对典型钛合金显微组织的影响	135
6.4 显微组织对钛合金强韧性的影响	137
6.4.1 LM 和 BM 组织对钛合金拉伸变形行为的影响	137
6.4.2 LM 和 BM 组织对钛合金低周疲劳 (low cycle fatigue, LCF) 行为的影响	140
6.4.3 α_2 相对钛合金 LCF 行为的影响	143
6.4.4 α 相时效析出行为对钛合金拉伸性能的影响	145
6.4.5 针状 α 相对钛合金韧性的作用	151
6.5 小结	155
参考文献	155
第 7 章 钛合金置氢处理组织与性能间的关系	159
7.1 概述	159

4 / 钛合金相变及热处理

7.2 钛合金中氢的特性	159
7.2.1 氢在钛中的存在形式	159
7.2.2 氢在钛中的溶解	161
7.2.3 氢在钛中的扩散	161
7.2.4 钛氢微观作用机理	162
7.3 置氢处理对钛合金组织和相结构的影响	163
7.3.1 置氢处理对 α 型 Ti600 合金组织和相结构的影响	164
7.3.2 置氢处理对 $(\alpha + \beta)$ 型 TC21 合金组织和相结构的影响	167
7.3.3 置氢处理对 β 型 Ti40 合金组织和相结构的影响	172
7.4 置氢处理对钛合金性能的影响	176
7.4.1 置氢处理对钛合金室温性能的影响	176
7.4.2 置氢处理对钛合金高温性能的影响	182
7.4.3 置氢处理对钛合金超塑性能的影响	185
7.5 钛合金置氢处理技术的应用前景	196
7.6 小结	197
参考文献	197
第 8 章 钛合金半固态热处理及半固态加工技术	201
8.1 概述	201
8.2 半固态热处理对微观组织的影响	201
8.2.1 半固态温度对钛合金组织的影响	203
8.2.2 半固态保温时间对钛合金组织的影响	207
8.2.3 半固态冷却方式对钛合金组织的影响	210
8.3 钛合金半固态热模拟压缩变形行为	213
8.3.1 不同半固态变形温度下 Ti14 合金的应力应变关系及微观组织演变	214
8.3.2 不同应变速率下 Ti14 合金的应力应变关系及微观组织演变	218
8.3.3 不同变形量合金的应力应变关系及微观组织演变	220
8.4 钛合金半固态锻造	223
8.4.1 Ti14 合金半固态可锻性	223
8.4.2 Ti14 合金半固态锻造中的微观组织演变特征	225
8.4.3 锻件力学性能评价	231
8.5 小结	240
参考文献	240

第1章 钛及钛合金的特点、 分类及锻造加工

1.1 钛及钛合金的发展概况

钛是地壳中分布最广的元素之一，约占地壳总质量的0.6%，仅次于铝、铁、镁，居第四位，在自然界主要以金红石(TiO_2)和钛铁矿石($\text{FeO}\cdot\text{TiO}_2$)的形式存在，此外还有锐钛矿石(TiO_2)、板钛矿石(TiO_2)和低品位的黑砂等。国外已经勘察的最大的矿产地是在美国、澳大利亚、印度、加拿大等地。

钛元素最早是在1791年被英国的矿物学家和化学家 William Gregor 发现的。1795年，德国化学家 Martin Heinrich Klaproth 从匈牙利产的矿石(即金红石)中分解出了氧化钛，并以古代希腊神话中的“大地之子”的名字 Titans 来命名。尽管在两百多年前就发现了钛元素，并且钛资源在地壳中的储量丰富，但是由于钛与氧、氢、氮、碳等元素和绝大多数耐火材料在高温下容易发生反应，从而使金属钛的提取工艺变得非常复杂和困难。因此，早期的钛主要用于绘画、造纸和塑料用白色颜料，全世界大部分白色颜料为二氧化钛。

在此后的一百多年里，世界各国的学者对钛的提炼工艺进行了不断地探索和改进。但是早期提取的钛由于含有少量的杂质，如氧、氮、碳、氢等而呈现出极大的脆性，限制了其实际应用。1910年，美国的 Matthew Albert Hunter 在钢瓶中用钠还原出高纯的 TiCl_4 ，制得高温下可变形、含氧量低的钛，后来发展成为工业上的钠还原法。真正具有商业应用价值的钛金属提取方法是卢森堡化学家 Wilhelm Justin Kroll 于1932年提出的镁热法，该工艺包含在惰性气体环境中用镁还原 TiCl_4 ，目前仍然被广泛采用，称为“Kroll 工艺”。

第一个商业化的钛产品是在1950年由美国钛金属公司(TMCA)生产的，从此拉开了钛金属大规模工业化生产的序幕。英国钛的大规模生产是帝国金属工业公司(IMI)从1951年开始的。日本海绵钛的生产是从1952年大阪钛公司开始的。苏联从1954年开始生产海绵钛，并于1979年成为世界上最大的海绵钛生产厂家。

第二次世界大战之后，世界上许多国家都意识到钛合金对国防工业的重要性，钛合金迅速发展成为航空、航天等高新技术领域不可缺少的关键材料，并在舰

船、兵器、石油、化工、能源、生物医学等领域得到越来越多的应用，被誉为“崛起的第三金属”。目前，世界上已研制出的钛合金有数百种，最著名的有二三十种，如 Ti-6Al-4V、Ti-5Al-2.5Sn、Ti-6242、Ti-6246、Ti-1023、Ti-15-3、Ti-6-22-22、IMI834 等合金。

第一个实用的钛合金是 1954 年美国研制成功的 Ti-6Al-4V 合金，由于它具有良好的综合性能、成形性能和焊接性能等优势，因而成为钛合金工业中的王牌合金，该合金的使用量占全部钛合金的 50% 以上。从世界钛工业的发展趋势来看，钛的发展速度是非常快的，大约以每年 8% 的速度增长。但是，中间经历了几次大起大落，每次都与飞机和发动机的制造有关。1950 年美国首次在 F-84 战斗轰炸机上用钛制作机身隔热板、导风罩等非承力构件。20 世纪 60 年代，开始使用钛合金代替结构钢制造隔框、梁、襟翼滑轨等重要承力构件，钛合金在军机中的用量迅速增加到 20%~25%。20 世纪 70 年代开始，民用飞机开始大量使用钛合金，如波音 757 客机的钛合金用量占整个结构质量的 5%，用量高达 3640 kg。麦道公司生产的 DC10 飞机，钛合金用量达 5500 kg，占结构质量的 10%。与此同时，钛合金大量在航空发动机中使用，一般占结构总质量的 20%~30%，主要用于制造压气机部件，如风扇盘、压气机盘和叶片、压气机机匣、轴承壳体和尾喷口调节器等。20 世纪 80~90 年代，钛合金在飞机和发动机中的用量大幅度提高。美国的第四代战斗机 F22 的用钛量占全机质量的 41%，其动力装置 F119 发动机的用钛量占总质量的 36%。钛合金已成为现代飞机和发动机不可缺少的结构材料之一。

进入 21 世纪以来，世界上进入到以空客 380 和波音 787 型飞机为代表的大型宽体客机的研制高峰，同时军机也处于一个三代机向四代机过渡的时期，世界航空工业对钛合金的需求迅猛增长。中国钛工业生产起步较晚，但是近年来，随着中国大飞机项目、探月工程等项目的实施，推动了中国钛工业的迅速发展。到 2007 年为止，我国海绵钛的总产量已居世界第 1 位，钛加工材的产量也已超过 23000 t，成为一个钛工业大国。然而，我国在钛冶金和加工技术方面与国外尚有一定差距。如何缩小与发达国家的差距，把我国从一个钛工业大国建设成为钛工业强国，是历史赋予我国钛业工作者的责任。

1.2 钛及钛合金的特点

钛及钛合金具有以下优良特性。

(1) 比强度高

比强度是指材料的抗拉强度与材料的密度之比，提高比强度是满足现代飞机减轻结构质量和提高飞行速度的重要手段之一。钛合金的强度与一般的高强度结

原
书
缺
页

原
书
缺
页

合金的刚性差、回弹大、易变形，不适宜制作对刚性要求高的结构件。然而，正是由于钛合金的弹性模量低，合金的弹性效应更加明显，故可以用来制作螺旋弹簧、高尔夫球棒、网球拍和台球弹击棒等体育用品。如高档的 F1 赛车和摩托车的螺旋弹簧大多用钛合金制造的。

钛及钛合金的导热系数低，约为镍的 1/4、铁的 1/5、铝的 1/14，在切削加工过程中容易引起局部温度升高，冷却较困难，因此切削速度不能太快。

(6) 化学活性高

钛是一种化学性质非常活泼的金属，在较高的温度下容易与 C、N、O、H 等发生强烈的反应。钛在室温下就与氧发生反应形成一层致密的氧化膜，可以阻止氧进一步向基体扩散，但当加热至 500℃ 以上时，钛的氧化膜变得疏松且易剥落，甚至变硬变脆。钛在使用过程中极易吸氢，在 300℃ 时的吸氢量就很高。当含氢的 β 钛共析分解以及含氢的 α 钛冷却时，均可析出 TiH 而使合金变脆，称为氢脆。钛吸收的氢可以通过真空退火完全去除。钛与碳和氮也容易发生强烈的化学反应，当含碳量大于 0.2% 时，会在钛合金中形成坚硬的 TiC，温度较高时，与氮作用也会形成 TiN 硬质表层。

钛在熔融状态下不能用氧化膜来保护，在空气中会发生自燃现象，甚至发生爆炸。粉状、尘状和细屑状钛很容易由于一个小火花引起燃烧。在航空发动机的实际工作条件下，由于各种原因造成的钛合金零件之间的摩擦也有可能引发燃烧，产生所谓的“钛火”。最近研发的美国系列的 Alloy C (Ti-35V-15Cr)、中国的 Ti40 (Ti-25V-15Cr-0.2Si) 和俄罗斯系列的 BTT-1/BTT-3 阻燃钛合金就是为防止钛火而专门设计的。

此外，某些钛合金还具有储氢、超导、形状记忆、超弹、高阻尼等特殊功能。由于钛合金具有以上诸多特点，目前已广泛应用于自动化、能源、航空航天、医疗卫生、汽车和家电等领域。

1.3 钛合金的分类

1.3.1 钛的合金元素

纯钛的塑性高，但强度很低，限制了其在工业生产中的应用。为了满足实际生产中高强度、耐腐蚀性等要求，可以向纯钛中添加一些合金元素形成钛合金。根据合金元素和杂质对钛的 β 转变温度的作用性质进行分类，可分为 α 稳定元素、 β 稳定元素和中性元素，形成的四种类型的相图示意图见图 1-1。

(1) α 稳定元素

提高 β 转变温度，扩大 α 相区，也即增大 α 相稳定性的元素称为 α 稳定元素

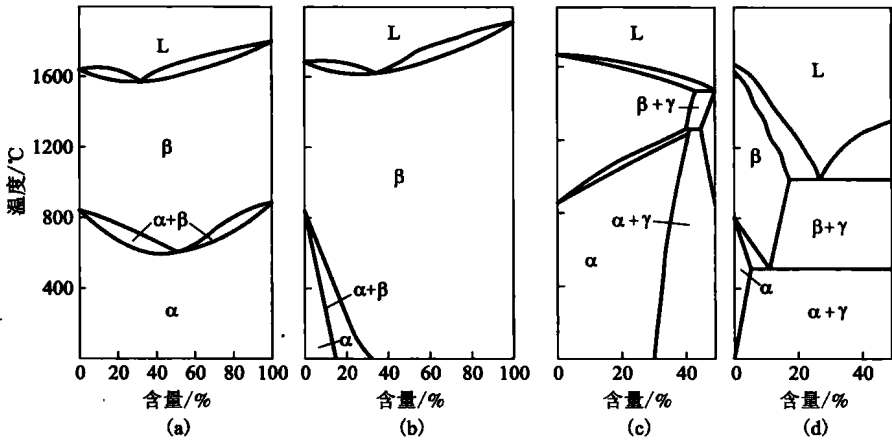


图 1-1 合金元素对钛合金相图的影响示意图

[图 1-1(a)]。 α 稳定元素主要包括合金元素铝、镓、锆、硼和杂质元素氧、氮、碳等。铝是工业中最常用的 α 稳定元素，通过形成置换固溶体产生固溶强化。因而加入适量的铝元素可以提高钛合金室温和高温强度以及热强性。因此，国内外各种类型的钛合金中几乎都添加了适量的铝。但是，铝含量超过 7% (质量分数) 后，易形成脆性的 Ti_3Al 相，这在合金设计中要避免。镓和锆元素在实际生产中很少采用。硼元素被称为金属材料的维生素，在钛合金中添加少量的硼可以细化晶粒，改善合金的性能。杂质元素氧、氮能大幅度提高钛的强度，同时也严重降低合金的塑性。因此，在实际生产中要严格限制其含量。碳元素对合金的强度及塑性影响较小，生产中比较容易控制。

(2) 同晶型 β 稳定元素

与钛具有相同的晶格结构和相近的原子半径，降低 β 转变温度，在 β 相中无限固溶，扩大 β 相区，增大 β 相稳定性的元素称为同晶型 β 稳定元素 [图 1-1 (b)]，它包括钼、钒、铌、钽等。其中钼的强化作用最明显，可提高室温和高温强度，增加淬透性，并提高含铬和铁合金的热稳定性。钼和钒的应用最广泛。铌的强化作用较弱，但也经常在钛合金中添加，特别是在 $Ti-Al$ 系金属间化合物中添加铌以提高塑性和韧性。钽的强化作用最弱，且密度大，因而只有少量合金中添加以提高抗氧化性和抗腐蚀性。

(3) 共析型 β 稳定元素

降低 β 转变温度，扩大 β 相区，且会引起共析转变的元素，称为共析型 β 稳定元素 [图 1-1(c)]。这类元素包含的范围较广，且共析反应速度相差悬殊。其中铬、锰、铁等元素与钛共析反应温度较低，转变速度极慢，在一般热处理条件

下转变难以进行,故称为非活性共析型元素。反之,硅、铜、氢、镍、银等元素,共析转变速度极快,淬火也无法抑制其进行,故不能将 β 相稳定到室温,称为活性共析元素。铁是最强的 β 稳定元素之一,但对热稳定性不好,熔炼时易产生偏析,因而应用较少,某些低成本的钛合金中可以添加铁元素替代昂贵的钒。铬是广泛添加的元素之一,加铬的合金具有高的强度和好的塑性,并可热处理强化,但某些条件下会因析出化合物而降低塑性。锰是早期合金设计广泛使用的元素,可提高强度和塑性,但某些条件下产生共析分解,不稳定。硅是提高热强性和耐热性的重要微量元素之一,大多数高温钛合金中都会添加,但一般不超过0.5%。氢作为有害元素要严格控制,其主要原因是析出氢化物造成氢脆。其他的元素如铜、镍、银等应用很少。

(4) 中性元素

对 β 转变温度的影响不大的元素称为中性元素[图1-1(d)],主要有锆、铪和锡。锆和铪与钛的性质相似,原子尺寸也十分接近,能在 α 相和 β 相中无限固溶。锆的室温强化作用弱,但高温强化作用强,通常用于热强钛合金。锡的室温强化更弱,会发生共析反应,但能提高热强性。

1.3.2 钛合金的分类

钛合金的分类方法很多,早期大多采用麦克格维纶提出的按照退火状态相的组成对钛合金进行分类。然而在钛合金的实际生产和应用中,经常遇到的是非平衡状态下的组织。因此,目前普遍按照亚稳状态下的相组织和 β 稳定元素含量对钛合金进行分类,可将钛合金分为 α 型、 $\alpha + \beta$ 型和 β 型三大类,进

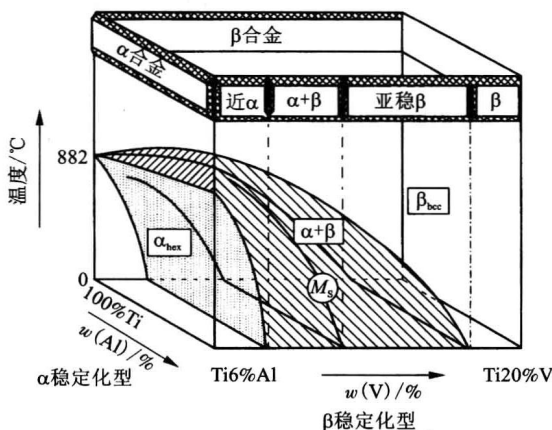


图1-2 钛合金分类的三维相图示意图

一步可细分为近 α 型和亚稳定 β 型钛合金。这种分类的示意图见图1-2。我国钛合金牌号分别以TA、TB和TC开头,表示 α 钛合金、 β 钛合金和 $\alpha + \beta$ 钛合金。

由于钛合金中 β 相的数量及稳定程度与 β 稳定元素种类及含量有直接关系,为了衡量钛合金中 β 相的稳定程度或 β 稳定元素的作用,提出了按照 β 相稳定系数来对钛合金进行分类。 β 相稳定系数是指合金中各 β 稳定元素浓度与各自的临界浓度的比值之和,即

$$K_{\beta} = \frac{C_1}{C_{k1}} + \frac{C_2}{C_{k2}} + \frac{C_3}{C_{k3}} + \dots + \frac{C_n}{C_{kn}} \quad (1-1)$$

常用的 β 稳定元素的临界浓度见表 1-2。

根据 β 相稳定系数划分合金类型为： α 型合金 K_{β} 为 0 ~ 0.07，近 α 型合金 K_{β} 为 0.07 ~ 0.25， $\alpha + \beta$ 型合金 K_{β} 为 0.25 ~ 1.0，近 β 型合金 K_{β} 为 1.0 ~ 2.8， β 型合金 K_{β} 为 > 2.8。

表 1-2 常用钛合金的 β 稳定元素的临界浓度

元素	Mo	V	Cr	Nb	Ta	Mn	Fe	Co	Cu	Ni	W
C_k	10	15	7	33	40	6.4	5	7	13	9	20

(1) α 型钛合金

α 型钛合金主要包括 α 稳定元素和中性元素，在退火状态下一般具有单相 α 组织， β 相转变温度较高，具有良好的组织稳定性和耐热性。焊接性能好，焊缝性能与基体接近。但是 α 合金对热处理和组织类型不敏感，不能通过热处理来提高材料的强度，一般只具有中等强度。典型的 α 型钛合金有工业纯钛 (TA1、TA2、TA3)、TA5 (Ti-4Al-0.005B) 和 TA7 (Ti-5Al-2.5Sn) 等。

工业纯钛不含其他合金元素，按照氧含量不同分为不同级别，氧作为间隙元素在提高强度的同时降低塑性。工业纯钛的强度不高，工艺塑性好，一般用于对耐腐蚀性能要求高而强度要求不高的场合，如化工的管道、压力容器等。为了满足更高强度的要求， α 合金还通过添加中性元素 (如锡) 来强化，典型的例子是 TA7 (Ti-5Al-2.5Sn) 合金，它是最早开发的钛合金之一，在室温和高温下具有良好的断裂韧性，耐热强度较好，长期工作温度达 500 °C，可用于制作机匣壳体、壁板等零件。低间隙元素的 TA7ELI 合金适用于低温条件下，用来制作储氢罐和压力容器。TA7 合金的铝含量高，热加工性差，工艺塑性较低。常用钛合金的 Mo 当量和 β 稳定系数见表 1-3。

表 1-3 常用钛合金的 Mo 当量和 β 稳定系数

合金类型	合金牌号	名义成分	Mo 当量	β 稳定系数
α 合金	TA1, TA2, TA3	工业纯钛		
	TA5	Ti-4Al-0.005B		
	TA7	Ti-5Al-2.5Sn		
	TA16	Ti-2Al-2.5Zr		

续表 1-3

合金类型	合金牌号	名义成分	Mo 当量	β 稳定系数
近 α 合金	TA10	Ti - 0.3Mo - 0.8Ni	1.2	0.12
	TA11	Ti - 8Al - 1Mo - 1V	1.7	0.17
	TA15	Ti - 6.5Al - 2Zr - 1Mo - 1V	1.7	0.17
	TA18	Ti - 3Al - 2.5V	1.7	0.17
	TA19	Ti - 6Al - 2Sn - 4Zr - 2Mo	2.0	0.2
	TA21	Ti - 1Al - 1Mn	1.6	0.16
	TC1	Ti - 2Al - 1.5Mn	2.3	0.23
	TC2	Ti - 4Al - 1.5Mn	2.3	0.23
$\alpha + \beta$ 合金	TC4	Ti - 6Al - 4V	2.7	0.27
	TC6	Ti - 6Al - 2.5Mo - 1.5Cr - 0.5Fe - 0.3Si	5.6	0.56
	TC11	Ti - 6.5Al - 3.5Mo - 1.5Zr - 0.3Si	3.5	0.35
	TC16	Ti - 3Al - 5Mo - 4.5V	8.0	0.8
	TC17	Ti - 5Al - 2Sn - 2Zr - 4Mo - 4Cr	9.7	0.97
	TC19	Ti - 6Al - 2Sn - 4Zr - 6Mo	6.0	0.6
近 β 合金	TB2	Ti - 5Mo - 5V - 8Cr - 3Al	19.8	1.98
	TB3	Ti - 10Mo - 8V - 1Fe - 3.3Al	17.3	1.73
	TB5	Ti - 15V - 3Cr - 3Sn - 3Al	14.3	1.43
	TB6	Ti - 10V - 2Fe - 3Al	10.7	1.07
	TB8	Ti - 15Mo - 3Al - 2.7Nb - 0.2Si	15.8	1.58
	TB9	Ti - 3Al - 8V - 6Cr - 4Mo - 4Zr	17.9	1.79
	TB10	Ti - 5Mo - 5V - 2Cr - 3Al	11.2	1.12
	β 合金	TB7	Ti - 32Mo	32
Ti40		Ti - 25V - 15Cr - 0.2Si	38.1	3.81

(2) 近 α 型钛合金

合金中含有少量的 β 稳定元素 (<2%), 退火组织中含有少量 (8% ~ 15%) 的 β 相或金属间化合物。近 α 型钛合金具有良好的焊接性和高的热稳定性, 对热处理制度不敏感。由于近 α 合金添加了少量 β 稳定元素 (如钼、钒、硅等) 和中性元素 (如锆、锡等), 可进一步提高常温及高温性能, 具有较高的蠕变强度和高温瞬时强度, 最高使用温度可达 600 $^{\circ}\text{C}$ 。典型的近 α 型钛合金有 IMI834、Ti - 1100、BT36、Ti60、TA10 (Ti - 0.3Mo - 0.8Ni)、TA11 (Ti - 8Al - 1Mo - 1V)、TA12 (Ti - 5.5Al - 4Sn - 2Zr - 1Mo - 0.25Si - 1Nd)、TA18 (Ti - 3Al - 2.5V)、TA19 (Ti - 6Al - 2Sn - 4Zr - 2Mo)、TC1 (Ti - 2Al - 1.5Mn)、TC2 (Ti - 4Al - 1.5Mn) 和 TA15 (Ti - 6.5Al - 2Zr - 1Mo - 1V) 等。

TC1 和 TC2 合金是典型的低铝当量近 α 合金。这类合金的主要特点是室温拉伸强度比较低, 但塑性较好, 热稳定性好, 具有良好的焊接性能和成形性能,