



瓦利金 N. 莫依谢耶夫 著
董宝明 张 胜 郭德伦 梁慧凤 译
朱知寿 审校

钛合金在俄罗斯飞机 及航空航天上的应用

TITANIUM ALLOYS
RUSSIAN AIRCRAFT AND
AEROSPACE APPLICATIONS

航空工业出版社

内 容 提 要

本书系统地阐述了俄罗斯钛合金的理论基础以及组织与性能的关系,着重讨论了钛合金化学成分、热处理规范与钛合金组织结构和性能变化的一般规律,并且提供了各种钛合金的化学成分、物理化学性能、力学性能,以及长期积累的大量钛合金图、表和常用技术数据。本书除了介绍俄罗斯目前在工程领域广泛使用的钛合金材料之外,同时还重点介绍了俄罗斯最新开发研制的低温钛合金、阻燃钛合金、钛-铝和钛-镍金属间化合物等新材料,以及这些合金目前研究及工程应用中的现状和发展水平。

本书既有一定的理论性,又有较大的实用价值。适用于国内从事钛合金研究与应用,可供航空航天、化学工业及其他工程领域设计选材、生产制造等方面的工程技术人员参考。

Copyright © 2006 by Taylor & Francis Group, LLC

All rights reserved. Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC.

北京市版权局著作权合同登记

图字: 01-2006-5664

图书在版编目(CIP)数据

钛合金在俄罗斯飞机及航空航天上的应用/ (美) 莫依谢耶夫著; 董宝明等译. —北京: 航空工业出版社, 2008. 9

书名原文: Titanium Alloys: Russian Aircraft and Aerospace Applications

ISBN 978-7-80243-186-7

I. 钛… II. ①莫…②董… III. 钛合金-航空材料-应用-研究-俄罗斯 IV. V252.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 115978 号

钛合金在俄罗斯飞机及航空航天上的应用

Taihejin zai Eluosi Feiji ji Hangkong Hangtian shang de Yingyong

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

发行部电话: 010-64815615 010-64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2008 年 9 月第 1 版

2008 年 9 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16

印张: 10.5

字数: 243 千字

印数: 1—3000

定价: 29.00 元

译者序

钛合金作为工程材料领域中的一种新材料，兼有钢、不锈钢、铝等结构材料的诸多优良性能，同时也是质轻、高强和耐蚀的结构材料。钛合金在现代工业上的应用日趋增多，特别是在航空航天制造工程领域尤为突出。

目前，我国钛合金研究和生产还处于发展阶段，应用技术水平与发达国家相比还存在较大差距，钛合金研究和制造工艺正处于技术突破的关键时期，满足研究与应用的任任务还很艰巨。然而，国内有关钛合金材料基础数据和制造工艺方面的书籍并不多，作为航空制造工程领域的科技工作者，深刻体会到国内非常需要出版一些钛合金研究和应用方面的专著和译著。经关桥院士和吴希孟研究员推荐，我们翻译了2006年美国最新出版的《钛合金在俄罗斯飞机及航空航天上的应用》(Titanium Alloys Russian Aircraft and Aerospace Applications)一书。

本书主要阐述了钛及钛合金的金属物理和金属化学性质，在介绍钛合金物理性能、力学性能和各种用途的同时，本书还着重讨论了钛合金化学成分、热处理制度与组织结构 and 性能变化的规律，提供了钛合金退火及热处理规范的主要工艺参数。本书着重于工程应用，内容较为详细。仅以此书，奉献给我国从事钛及钛合金研究、设计和工程应用领域的广大科技工作者。

在翻译过程中，为了使我国读者阅读和使用方便，我们将原书中我国读者还不太习惯使用的钛合金牌号，改换为熟悉或通常使用的牌号名称，对原书中的部分计量单位和数据未作转换。对于原书存在的个别不妥或印刷错误之处，做了适当的删改和更正。

译者向航空工业出版社的黄苏桥和李东南编辑，向负责版权引进的陈凯，以及为本书出版做出贡献的所有人员，表示衷心的感谢。

由于参与该书翻译和审校的人员还有繁重的科研任务，加上译者水平所限，时间较紧，译文中难免还存在一些缺点和错误，请读者批评指正。

译校者
2008年7月

翻 译 说 明

本书作者 Valentin N. Moiseyev 是著名钛合金材料专家，他长期从事钛合金材料研究，具有很高的水平，在钛合金材料研究和应用诸多领域均有开拓性建树。Valentin N. Moiseyev 教授出版的《钛合金在俄罗斯飞机及航空航天上的应用》一书的英文版，由美国 Taylor & Francis Group 有限公司出版，经由航空工业出版社与该出版公司联系，航空工业出版社从美国 Taylor & Francis Group 有限公司购买了该书的版权，随后航空工业出版社与我们签订了翻译委托协议，翻译了《钛合金在俄罗斯飞机及航空航天上的应用》一书。翻译工作得到关桥院士和吴希孟研究员的鼓励和支持，朱知寿研究员审校了全书的译稿。

译 者

2008 年 7 月

前 言

钛合金是一种比较新的金属材料，对于种类众多的金属结构材料，钛合金是用于制造大型构件少数结构材料中的最新成员。由于钛在地壳中的储量十分丰富，因此，钛与铁、铝、镁、铜和镍等金属一样，目前已成为现代机械制造业中的基本金属材料之一。

钛作为结构材料的优点是众所周知的。在许多工程领域中，钛被广泛使用的主要原因在于：钛具有高的比强度，在很宽的使用温度范围内都具有较高强度，并且在大多数腐蚀性介质环境中也具有较高的抗腐蚀性。

在机械制造领域中广泛使用的不是纯钛，而是钛的合金。钛合金在机械强度、高温强度和其他使用性能方面，都远远超过了非合金化的纯钛材料。钛合金的使用温度范围可以从零摄氏度以下（低温合金）到 500~600℃（高温合金）。

钛及钛合金的一个主要的典型特征，就是对于杂质尤其是对大气中的氧和氮具有非常高的敏感性。氧、氮和其他杂质进入纯钛后，非常容易与钛形成间隙固溶型合金或金属间化合物型合金。即使在纯钛金属中存在微量（百分之零点几，有时甚至是百分之零点零几）的氧与氮杂质，也会明显影响钛合金材料的性能，这就是为什么大量采用初始海绵钛生产钛合金半成品的主要原因。为此，俄罗斯国家标准为初始海绵钛制定了技术级别及化学成分，见表 1。

表 1 初始海绵钛的级别和化学成分

级别	最大硬度/HB (10/1500/30)	化学成分（不大于）/%						
		N ₂	C	Cl	Fe	Si	Ni	O ₂
TG-90	90	0.02	0.02	0.08	0.06	0.01	0.05	0.04
TG-100	100	0.02	0.03	0.08	0.07	0.02	0.05	0.04
TG-110	110	0.02	0.03	0.08	0.09	0.03	0.03	0.05
TG-120	120	0.03	0.04	0.08	0.10	0.03	0.05	0.06
TG-130	130	0.03	0.04	0.10	0.13	0.04	0.05	0.08
TG-150	150	0.04	0.05	0.12	0.20	0.04	0.05	0.10

钛合金结构材料与其他金属结构材料相比，具有较好的耐热性能，但热导率、电阻率和热膨胀系数等都比较低，同时因密度比较低而被划归于轻金属材料之列，介于铝和铁之间。钛与其他金属的物理性能见表 2。

表2 钛与其他金属的物理性能

性能	Ti	Mg	Al	Fe	Cu
熔点/℃	1665	650	660	1535	1083
密度/(g/cm ³)	4.51	1.74	2.70	7.86	8.94
导热率/(cal/cm·s·℃) ^①	0.0407	0.35	0.57	0.17	0.92
电阻率/(μΩ·cm)	55.4	4.40	2.68	10.0	1.72
比热容/(cal/g·℃) ^①	0.126	0.245	0.211	0.109	0.093
线膨胀系数/(×10 ⁶ ℃ ⁻¹)	8.9	25.7	24.0	11.9	16.4
弹性模量/(kgf/mm ²) ^①	11200	4500	7250	20000	12250

① 此为前苏联计量单位; 1cal=4.1868J, 1kcal/(m·h·℃)=1.6279W/(m·K), 1kgf=9.806N

钛与铁金属类似,也是一种多晶金属材料。钛的相变温度为882℃,低于此温度转变为密排六方晶格的 α -Ti;高于此温度则为体心立方晶格的 β -Ti。

目前已经形成许多不同牌号的工业钛合金,它们的组织结构、物理、化学、力学性能以及应用领域各不相同。

钛合金按照组织类型一般分为三类:

- (1) 以 α 、 β 固溶体为基的钛合金;
- (2) 以固溶体为基并含有一定数量化合物的钛合金;
- (3) 以化合物为基的金属间化合物合金。

在上述钛合金中,以固溶体为基的钛合金是最常用和应用数量最多的一种。这种合金通常具有相当好的强度和塑性、热处理强化能力、良好的热稳定性和较好的焊接性,是现代结构材料中综合性能最好的结构材料之一。固溶体为基的钛合金在350~450℃的温度范围内仍可以保持很高的强度性能。

以固溶体为基并含有一定数量化合物合金的种类也较多。这种以 α 、 $\alpha+\beta$ 和 β 固溶体为基的合金,含有一定量弥散分布的化合物,它显著提高了合金的室温强度和高温强度。这类含量少的化合物在 α 或 $\alpha+\beta$ 基体上初始阶段形成。铝(Ti₃Al)、硅(Ti₃Si₃)、碳(TiC)、硼(TiB)等合金化元素在钛中均可形成化合物。在多元化合物中还可能会形成更为复杂的化合物。研究和开发含有化合物型的固溶体合金,将有可能把钛合金的使用温度提高到500~600℃。

目前,以金属间化合物为基的钛合金虽然起步较晚,但发展很快,由于它在某些条件下具有非常独特的性能,已经迅速成为研究和关注的焦点。现在至少有三种合金材料已经受到了工业应用的关注,它们是:以钛-铝化合物Ti₃Al(α_2 相)、TiAl(γ 相)为基的耐高温合金;以钛-镍化合物(TiNi)为基的形状记忆合金;以共析体($\alpha+Ti_2Cu$ 和 $\alpha+TiCr$)为基的阻燃型合金。后者通常被划归为以化合物为基的合金,然而它的功能特性是通过含有化合物的共析相来决定的。

以铝化合物为基的合金,可以在高达700~800℃的温度下工作。

俄罗斯在各个工程领域应用的钛合金材料已经有30多种,根据应用的侧重面不同

主要可分为以下几类：结构合金、高强度可热强化合金、高温合金、铸造合金和特殊用途合金（低温合金、耐腐蚀性合金、形状记忆合金等）。

关于对钛合金的分类与应用，本书的有关章节还将继续进行论述。在介绍钛合金物理性能、力学性能以及各种用途的同时，本书还着重讨论和揭示了化学成分、热处理制度与钛合金组织结构和性能变化的一般规律。本书中给出的数据还可以判定各类合金在高温和应力条件下，结构在各工作状态下的行为。考虑到钛合金组织结构对物理性能、力学性能的影响，本书提供了钛合金退火及热处理规范的主要工艺参数。

在具有特殊用途的钛合金一章中，本书集中讨论了目前研究开发的以化合物基和金属间化合物基钛合金应用与发展（低温合金、耐腐蚀性和形状记忆合金等除外）的最新动态。总之，本书重点讨论了钛合金材料在机械制造领域应用的经验和方法。

本书适用于冶金工作者，物理冶金、材料设计和工艺制造工程师以及冶金专业学生参考。

目 录

第 1 章 钛合金的组织特点	(1)
1.1 杂质对钛性能的影响	(1)
1.2 钛与合金元素的相互作用	(4)
1.3 钛合金中的 α 、 β 固溶体	(7)
1.4 钛合金中的化合物	(10)
1.5 α 及 β 固溶体的稳定性	(14)
1.6 钛合金的相变	(16)
1.7 钛合金力学性能的强化	(19)
1.8 钛合金高温性能的强化	(23)
第 2 章 结构钛合金	(30)
2.1 绪论	(30)
2.2 低强度高塑性钛合金	(34)
2.2.1 BT1-00 工业纯钛	(34)
2.2.2 BT1-0 工业纯钛	(37)
2.2.3 OT4-0 钛合金	(39)
2.2.4 ПТ-7М 钛合金	(41)
2.2.5 OT4-1 钛合金	(42)
2.2.6 OT4-1V 钛合金	(44)
2.3 中强度钛合金	(46)
2.3.1 OT4 钛合金	(47)
2.3.2 OT4-V 钛合金	(49)
2.3.3 ПТ-3М 钛合金	(51)
2.3.4 BT5-1 钛合金	(52)
2.3.5 BT6C 钛合金	(55)
2.3.6 BT20 钛合金	(57)
2.3.7 ST5 钛合金	(59)
2.4 高强度钛合金	(61)
2.4.1 BT6 钛合金	(61)
2.4.2 BT14 钛合金	(64)
2.4.3 BT16 钛合金	(68)
2.4.4 BT15 钛合金	(71)
2.4.5 ST6 钛合金	(73)
2.4.6 BT22 钛合金	(75)
2.4.7 BT22I 钛合金	(77)
2.4.8 BT23 钛合金	(79)
2.4.9 BT32 钛合金	(81)

2.4.10	BT35 钛合金	(84)
2.4.11	BT37 钛合金	(86)
第 3 章	高温钛合金	(90)
3.1	绪论	(90)
3.2	马氏体型高温钛合金	(91)
3.2.1	BT3-1 钛合金	(92)
3.2.2	BT8 钛合金	(96)
3.2.3	BT9 钛合金	(99)
3.2.4	BT25Y 钛合金	(103)
3.2.5	BT8-1 钛合金	(105)
3.3	高温近 α 型钛合金	(108)
3.3.1	BT18Y 钛合金	(108)
3.3.2	BT36 钛合金	(110)
第 4 章	功能型钛合金	(112)
4.1	低温钛合金	(112)
4.2	特殊耐腐蚀钛合金	(113)
4.2.1	4202 钛合金	(113)
4.2.2	4201 钛合金	(115)
4.3	金属间化合物基合金	(118)
4.3.1	钛-铝化合物基合金	(118)
4.3.2	钛-镍化合物基合金	(121)
4.3.3	共析体基合金	(123)
4.4	铸造钛合金	(123)
第 5 章	钛合金加工工艺及性能	(129)
5.1	钛合金热变形时的组织变化和性能	(129)
5.2	钛合金的热处理	(133)
5.2.1	普通退火处理	(134)
5.2.2	热处理强化 (淬火 + 时效)	(137)
5.3	钛合金的焊接	(138)
5.4	钛合金的表面处理技术	(143)
5.4.1	加热时钛与气体的相互作用	(143)
5.4.2	钛合金零件的机械加工	(145)
5.4.3	钛合金零件的表面强化	(146)
第 6 章	钛及钛合金的应用	(147)
6.1	钛合金在飞机制造业中的应用	(147)
6.2	钛合金在航空发动机制造业中的应用	(151)
6.3	钛合金在宇航制造业中的应用	(152)
6.4	钛合金在船舶制造业中的应用	(152)
6.5	钛合金在化学业及其他领域中的应用	(153)

第 1 章 钛合金的组织特点

1.1 杂质对钛性能的影响

钛存在两种同素异构转变：在高温状态下呈现体心立方（bcc）晶格，而在低温状态下呈现密排六方（hcp）晶格。温度在 882℃ 以下为 α -Ti，温度高于 882℃ 直到熔点为 β -Ti。

α -Ti 的晶格常数为： $a = 2.9504\text{\AA}$ ， $c = 4.683\text{\AA}$ ；温度为 25℃ 时， $a = 3.282\text{\AA}$ （计算采用外推法， $1\text{\AA} = 0.1\text{nm}$ ）。

钛及其合金的性能在很大程度上取决于气体杂质的含量，杂质主要来源于作为原材料的海绵钛。而其杂质中的氧，还提高了钛的使用性能——力学强度。

实际上，没有杂质、非常纯的钛作为结构材料是没有什么使用意义的。例如，采用碘化物法精炼的钛具有如下的力学性能：强度极限为 250MPa，屈服强度为 106MPa，相对延伸率为 72%，断面收缩率为 86%，维氏硬度为 83.4kgf/mm^2 。在这种纯钛中氧的含量低于 0.01%，氮含量低于 0.008%，其他杂质是极其微量的。相比较而言，工业纯钛 BT1-00 的强度极限为 300~450MPa，BT1-0 钛的强度极限为 400~550MPa。其实工业纯钛强度的提高主要依靠于氧，而氮、碳、硅和铁等元素在一定程度上也起到了强化的作用。

因此，工业用钛实际上是一种含有多种元素的复合合金，各种元素对钛的多晶转变温度有着各自的影响，其影响结果主要表现为工业用钛没有一个确定的转变点，而只存在在一个转变温度区间。纯钛的 α 相在温度 882.5℃ 以上转变为 β 相。工业用纯钛与纯钛相比，其转变开始的温度比纯钛还要低，而转变结束的温度比纯钛要高。工业纯钛转变温度区间范围一般为 865~920℃（氧和氮含量总和不超过 0.15% 条件下）。

纯钛和工业纯钛在微观组织上的差异主要是由氧杂质含量不同所决定的。

在非合金化钛中高温 β 相变体，即使以最快的冷速进行淬火也不可能将其保留下来。在淬火过程中， β 相变体通过马氏体型瞬时转变而形成 α 相变体。在这种状态下形成的组织用 α' 表示，它是纯钛金属常见的多面体结晶组织。纯钛与工业纯钛的组织大致相同。如果淬火从 β 相区开始，纯钛的显微组织变化不明显，晶界呈现锯齿状特点。而对于工业纯钛来说，淬火后的组织会发生显著变化，迅速由多面形态组织转变为针状组织。如果淬火在相转变温度区间开始，即从两相区温度开始淬火，那么可以得到由平衡（初次）型和马氏体（次生）型 α 相组织按各种比例关系形成的组织。

杂质氧、氮和碳对钛力学性能的影响如图 1-1~图 1-3 所示。

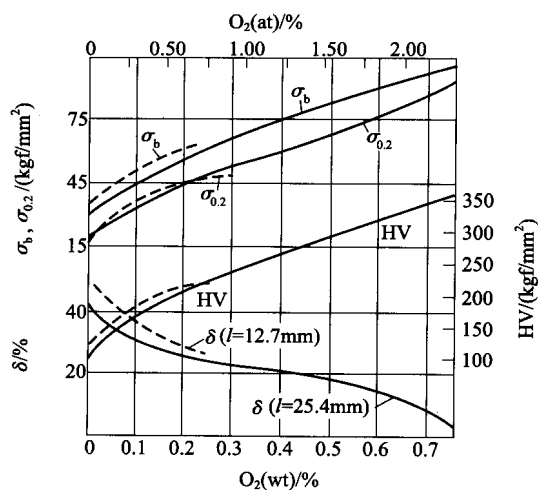


图 1-1 杂质氧对钛力学性能的影响

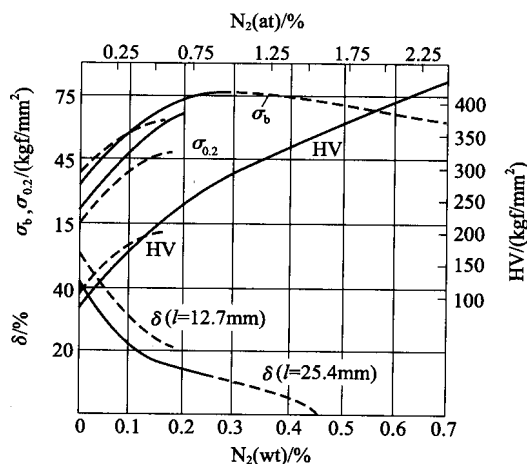


图 1-2 杂质氮对钛力学性能的影响

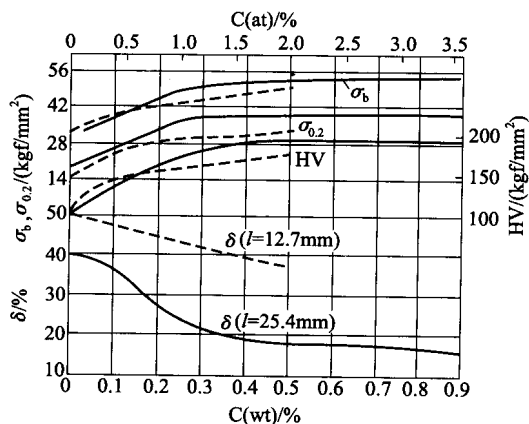


图 1-3 杂质碳对钛力学性能的影响

采用图解内插法，可以建立工业用钛的杂质含量，在允许范围内引起强化的大致系数：氧含量为0.05%时可提高钛的强度极限60MPa；氮含量为0.05%时可提高钛的强度极限125MPa；碳含量为0.05%时可提高钛的强度极限35MPa。

其次，含有0.05%铁也可以提高钛的强度极限10MPa，令人感兴趣和需要指出的是，铁与钛可以形成置换固溶体，而不像氧、氮和碳那样形成间隙固溶体。

四种典型杂质元素对钛性能产生的综合影响，一般可以采用比较准确的试验方法来计算。例如，有时为了便于计算硬度值，Brown提出了计算硬度值的常用公式，即

$$HB = 196 \sqrt{N_2} - 158 \sqrt{O_2} - 45 \sqrt{C} - 20 \sqrt{Fe} - 57$$

式中的57是纯钛的硬度值， N_2 、 O_2 、C、Fe等是这些元素的质量分数含量。

硅杂质对纯钛材料性能的影响也应该考虑在内。Goldhoff及其合作者研究的结果表明，当钛中的硅含量由0提高到16%时，钛合金的维氏硬度由150kgf/mm²直线上升到645kgf/mm²。这就是说，如果由维氏硬度换算为强度极限的系数为0.28，则工业用钛中1%的硅含量将会提高钛合金的强度极限约100MPa，而含0.05%的硅将提高强度5MPa。然而，人们发现0.5%的硅也可以使钛的强度极限提高130MPa，由此可得，当硅含量为0.05%时，将会使钛合金的强度极限提高12MPa左右。

因此，即使技术条件中所规定的杂质含量相对较小，但是这些杂质元素对钛力学性能产生的综合影响仍然是非常明显的。

各种杂质元素对钛产生强化作用的结果表明，不应把氧看做仅是一种有害的杂质，氧也是一种有益的合金添加剂。当氧含量增加到0.5%时，合金不仅明显地提高了强度（ $\sigma_b = 300 \sim 800$ MPa），而且还保持了很好的塑性性能（ $\delta_5 > 15\%$ ）。氮与氧相比，虽然也是一种更具潜力的强化元素，但是由于氮会诱发钛的脆化，因此，钛合金中氮含量只要超过0.05%，钛合金就没有实际应用意义。另外，碳也是一种相对较弱的强化元素，但是当钛合金中碳的含量超过0.2%时，将会导致钛合金出现脆而硬的固态碳化物相。

通过氧杂质对钛冷脆性影响的研究表明，氧含量为0.13%~0.15%的工业纯钛（ $\sigma_b = 500$ MPa），即使在液态氮温度（-196℃）下也不会出现冷脆性。也就是说，在低温下工业用钛的冲击韧性与在温度20℃下的冲击值相比，冲击强度仅下降了15%（即从164MPa下降到了140MPa）。在上述相同的条件下，氧含量为0.3%的钛（ $\sigma_b = 670$ MPa）的冲击韧性下降了55%。上述试验所用试样均经过真空退火处理，试样中氢含量不超过0.005%。

在评价各种杂质对强化作用的影响时，并没有考虑到氢，这是因为工业用钛的氢含量在所规定的范围之内时，氢作为强化元素产生的影响是极其微小的。然而，尽管氢作为强化元素并不是重要的，但严重的是氢会与钛形成氢化物相，导致钛的脆性破坏。正因为如此，氢一直被认为是钛中最不希望含有的有害杂质元素之一。氢的存在还增加了与其他杂质相互之间产生危害作用。

有一种观点认为，应该不断提高原始钛的纯度。如果要提高工业纯钛的强度，那么在钛中添加严格限定含量的氧，其强化效果要好于性能分散性较大的低级别的钛。

生产中经常用这种方法来提高强化作用，例如，在英国和美国有3/4数量的工业纯钛，就是采用通过人为添加氧元素来获得所需要的强度。

尽量提高合金化程度是现代钛合金发展的趋势之一。在所有强度极限大约为 1000MPa 的钛合金中（如 BT6、BT14、BT3-1、BT22 等），合金化元素组分的总量已经达到 7%~10%。目前正在研究开发的钛合金（如 BT32、BT35 等）的合金化元素组分总量已达到 18%~40%。

合金化程度的提高虽然提高了钛合金的强度，但却降低了钛合金的塑性。因此，钛的原始材料应该具有很好的塑性。合金化程度越高，原始钛杂质含量应该越低。在一般情况下，通过添加杂质元素提高强度并不是有利的，这主要是由于杂质元素的氧、氮、碳等与钛会形成间隙固溶，从而导致塑性的大量损失。除此之外，这些杂质对钛合金的一些其他重要性能（如热稳定性、蠕变抗力和缺口敏感性等）也存在许多不利的影响。

缺口敏感性是通过带缺口试样的强度极限与光滑试样强度极限的比值来确定的。对于脆性材料来说，该比值应该小于 1；而对于塑性材料来说，则该比值应该大于 1，也就是说，后者试样的缺口产生了强化作用。对于含有氧杂质的 BT6 钛合金圆形试样，试样的缺口底部圆角半径为 0.1mm、缺口角度为 60°，其缺口敏感性的影响试验结果如下：氧含量为 0.10%、0.22%、0.40% 时，缺口敏感性系数 $\sigma_{\text{hb}}/\sigma_b$ 的比值分别为 1.71、1.63、1.47。由此可见，缺口敏感性系数与氧含量存在着较为密切的关系，它会引起钛合金材料的提前断裂，尤其是螺栓接头发生提前断裂的危险性更大。

提高原始钛材料的纯度，不仅可以改善现有钛合金的质量，而且还可以开发出具有更加良好塑性与强度的新型钛合金。

1.2 钛与合金元素的相互作用

工业用合金材料（包括钛合金）的研究和开发，主要是基于基体金属元素与周期表中元素相互作用的特点，以及在不同合金体系中进行的物理、化学、力学及其他性能的变化规律来确定的。

钛与合金化元素、杂质之间相互作用的特点，在很大程度上取决于原子半径、置换序列中金属的位置、原子价、电离、电位及其他特性。根据这些因素还可以预测钛与各种元素之间相互作用的结果。

图 1-4 所示为基于钛与合金化元素原子的尺寸和结构特征的合金图。

根据 Hume-Rothery 法则，钛合金元素中原子直径大小的差异不应超过 15%，即合金化元素的原子直径与钛原子直径之比，在 0.88~1.15 之间就会形成置换固溶体。

按照 Hegg 法则，当两个相互作用的元素原子直径比值小于 0.59 时，就容易形成间隙固溶体。而介于形成置换固溶体和间隙固溶体之间的元素则可与钛形成化合物。

大多数合金化元素在一个比较宽的浓度范围内，可以与钛的同素异构转变之一或两者都形成置换和间隙固溶体。

原子直径与钛原子直径比值最小的合金化元素，则可与钛形成间隙固溶体。

在影响形成固溶体的其他因素中，溶剂与溶质金属的化合价是非常重要的。钛可以

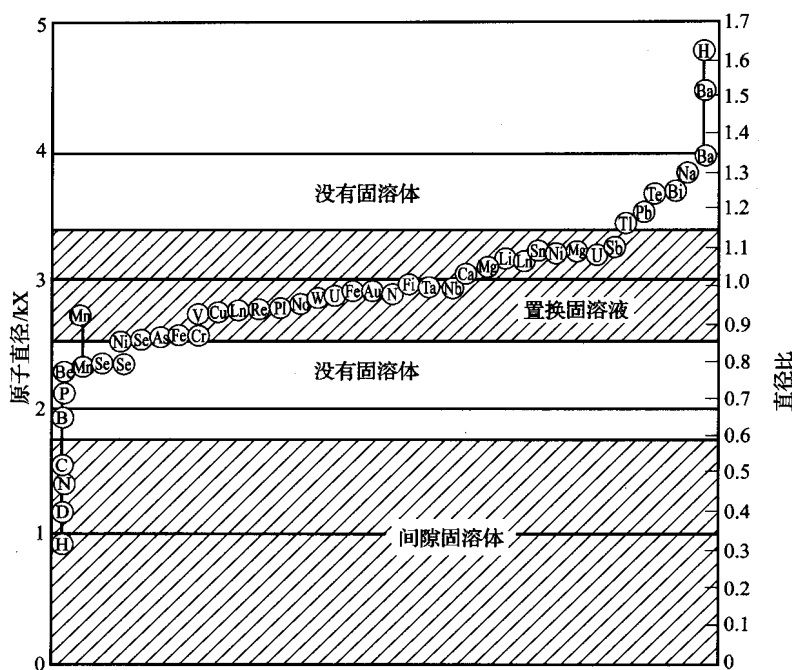


图 1-4 基于钛与合金化元素原子的尺寸和结构特征

与那些具有相似的电子配置，并且包含那些不成对 α 型电子的过渡金属形成固溶体，这些金属包括锆、钨、钒、铌、钽、铬、钼和钨等。

在一个比较小的浓度范围内，钛也能够与其他具有成对 α 型电子的过渡金属形成固溶体。这些金属主要包括锰、铁、钴、镍、钨和铂等。

溶质金属的晶格类型很重要。具有体心立方晶格的过渡元素，对 β 钛的高温体心立方晶格起稳定作用。

钛与氢、氧、氮和碳杂质元素形成间隙固溶体合金。与钛原子相比，这些杂质元素的原子半径都比较小。

钛合金元素的尺寸和结构，在很大程度上是由元素周期表中的位置决定的。电子层结构确定了原子间结合的特点和合金化过程的化学本质。

钛合金相图特征是考查各种元素组成的钛合金组织结构的基础。

根据钛纵坐标液相线的特点，可以对二元相图进行分类，利用代表二次转变部分的形状，可以对不同类别的相图作进一步的细分。更复杂的相图形式如图 1-5 所示。相图的这种分类方法，对于分析钛与各种合金化元素形成 α 、 β 固溶体是非常方便的。

分析钛与周期表中元素形成的相图，发现在室温下仅有其中一小部分元素，可以在比较宽的范围内形成 α 、 $\alpha + \beta$ 或 β 固溶体。

表 1-1 给出了钛与某些元素在各温度下形成相图的一些特性。这些元素作为合金元素或者作为钛的杂质，在以 α 、 β 固溶体为基的工业钛合金的研究开发中具有重要的意义。

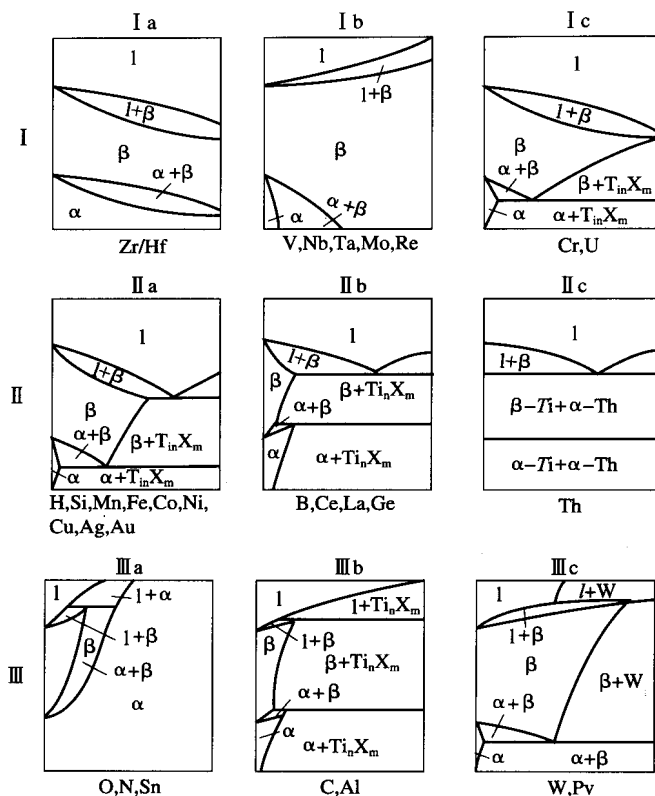


图 1-5 钛与各种元素形成的二元合金相图

分析相图中钛与周期表中元素形成 α 、 β 固溶体的存在区域，结果表明，适于开发工业钛合金的可选元素是有限的。

锆与钛可以形成连续的固溶体。钼、钒与 β 钛形成连续固溶体，但在 α 型钛中是有限溶解。铌、钽与钛形成相似的相图，这类元素在合金中与钛形成的高浓度区域可能会出现化合物。

铝和锡因在 α 型钛中溶解度较大而引人注目，这使其成为钛合金中重要的合金化元素。铝作为潜力很大的强化元素应当值得重视。

铬、锰、铁、钴、镍、铜和钨在 α 钛中溶解度很小，同时可能会发生共析转变，因而作为合金元素被限制使用。钛合金中这些元素的使用决定了共析转变率和生成的共析体对物理和力学性能的影响。

在钛合金开发研究中，某一合金元素的价值是由多种因素确定的，例如，与钛形成的 α 、 β 固溶体元素的性能，在 α 、 β 钛中元素的极限溶解度，金属间化合物对钛合金性能的影响等。

钛与几种关键合金元素的相图，通过在某一给定温度条件下经过几百或者多达几千小时达到平衡而绘制成表 1-1，而在实际工作条件下，钛合金要在工作温度下使用上万小时。此外，金属的承受应力对金属的相变特性也会产生严重影响。钛合金各种固溶体相存在的区域见表 1-1。

表 1-1 钛合金各种固溶体相存在的区域

元 素	相图类型	合金元素 (质量分数) / %			温度 / °C
		α	$\alpha + \beta$	β	
Zr	I (a)	0 ~ 100	—	—	20
Hf	I (a)	0 ~ 100	—	—	20
V	I (b)	0 ~ 2	2 ~ 30	30 ~ 100	20
Nb	I (b)	0 ~ 4	4 ~ 50	50 ~ 100	20
Ta	I (b)	0 ~ 9	9 ~ 70	70 ~ 100	20
Mo	I (b)	0 ~ 0.5	0.5 ~ 30	30 ~ 100	20
Cr	I (c)	0 ~ 0.5	—	—	670
H	II (a)	0 ~ 0.2	—	—	320
Si	II (a)	0 ~ 0.3	—	—	600
Mn	II (a)	0 ~ 0.5	—	—	550
Fe	II (a)	0 ~ 0.5	—	—	615
Co	II (a)	0 ~ 1.0	—	—	685
Ni	II (a)	0 ~ 0.2	—	—	770
Cu	II (a)	0 ~ 2.1	—	—	798
Sn	III (a)	0 ~ 18.6	—	—	865
O	III (a)	0 ~ 3.2	—	—	400
N	III (a)	0 ~ 2.5	—	—	600
C	III (b)	0 ~ 0.5	—	—	920
Al	III (b)	0 ~ 7	—	—	20
W	III (c)	0 ~ 0.8	—	—	715

1.3 钛合金中的 α 、 β 固溶体

钛与其他合金元素相互作用的最大特点之一，是通过热处理改变对钛同素异构转变温度的影响，这在很大程度上决定了钛合金的性能。

那些在统计意义上能增加原子稳定结构的合金化元素，可显著降低多晶转变温度。

钛的合金元素在溶入这些相时，提高了原子间的结合力，增强了相的稳定性。因

此，铝提高了 α 相固溶体的弹性模量，拓宽了 α 相的存在温度范围。而作为 β 稳定元素的钼和钒，则降低了 α 相固溶体的弹性模量，强化了 β 固溶体的特性。

由此可见，钛的合金元素一般分为稳定 α 相的元素和稳定 β 相的元素。

对钛同素异构转变温度影响较小的锡、锆等元素，通常称为中性强化元素。这类元素对钛合金组织和性能的影响，与 α 相稳定元素或 β 相稳定元素不同。钛相图的三种类型如图1-6所示。

在固态（低温） α 相区、 $\alpha + \beta$ 相区和 β 相区，Ti- β 相稳定元素的示意相图如图1-7所示。

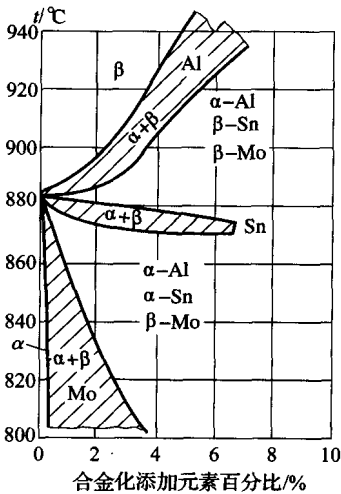
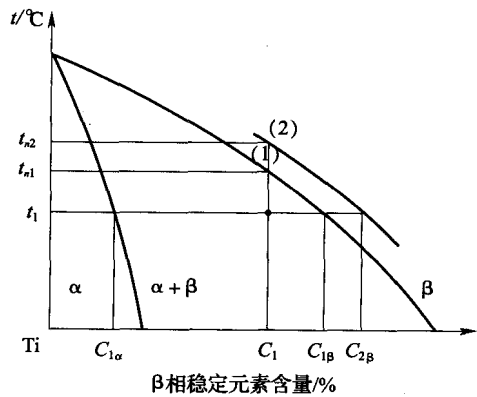


图1-6 钛相图的三种类型



α 相稳定元素对二元(1)和三元(2)合金相区的影响

图1-7 Ti- β 相稳定元素相图

该相图适用于与 β 钛具有同晶格的钒、铌、钽和钼等元素。如果钛合金的 β 固溶体未经共析转变，该相图也可用于分析含有形成共析元素的钛合金。

该相图由同一点绘出的两条曲线组成，该点对应于钛同素异构转变温度。下面的曲线确定了 α 固溶体的存在区域，曲线与横轴的截点 C_{α} 对应于室温固溶体的极限浓度。上面的曲线确定了 $\alpha + \beta$ 相区与 β 相区的边界，与横轴的截点 C_{β} 对应的是在整个温度范围内，形成稳定的 β 固溶体所需要的 β 相稳定元素的最小浓度。

相图适用于钛与 β 相稳定元素形成的二元钛合金，也适用于其他钛与多种 β 相稳定元素形成的钛合金。

钛在一定温度下，无论钛合金中 β 相稳定元素的浓度有多少，其在 α 相和 β 相中的浓度都是固定的（分别为 $C_{1\alpha}$ 和 $C_{1\beta}$ ）。在 $\alpha + \beta$ 相区的一定温度下，随着 β 相稳定元素浓度的增加，同时 β 相数量也增加，而钛合金的化学成分不变。

钛合金的物理和力学性能是由 α 、 β 固溶体所决定的。

退火状态钛合金 α 固溶体的物理和力学性能的拉伸试验见表1-2，合金的元素在 α 钛溶解度范围内。 β 固溶体的物理和力学性能是经 β 淬火，在 β 相稳定的钛合金上测试的，也就是说，在拉伸试验过程中 β 相没有发生转变，也没有对性能产生明显的影响。