



中航工业首席专家  
技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目  
中航工业科技与信息化部组织编写

朱知寿 著

# 新型航空高性能钛合金 材料技术研究与发展

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF  
NEW-BRAND TITANIUM ALLOYS  
OF HIGH PERFORMANCE FOR  
AERONAUTICAL APPLICATIONS

航空工业出版社

中航工业首席专家技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

# 新型航空高性能钛合金 材料技术研究与发展

朱知寿 著

航空工业出版社

北京

## 内 容 提 要

本书综述了我国 50 年来钛合金材料及钛工业的快速发展,并阐述了我国航空用钛合金材料与世界发达国家相比在发展体系化、生产规模化、应用成熟化和制造低成本化等诸多方面存在的主要差距,提出应在优化产业结构、自主创新、建立具有中国特色的航空结构用钛合金材料体系等方面开展新型钛合金材料技术研究,以提高我国钛合金材料在航空工业领域的用量与应用水平。本书以新一代飞机用低强度高塑性、中强度高韧性、高强度高韧性、超高强度及损伤容限等钛合金系列为主线,通过第 1 章和第 2 章介绍钛合金材料技术基础与发展,阐明了采用一系列综合强韧化手段创建钛合金主干材料体系的可行性;通过第 3 章梳理我国现有航空结构用钛合金材料体系特点,指出应进一步精简和优化主干钛合金材料的发展目标;第 4~第 7 章重点介绍研究团队在发展飞机结构用新型主干钛合金材料及应用技术方面所取得的研究进展。

本书可供从事航空、航天、装备设计、加工制造的科研工作者和工程技术人员参考。

### 图书在版编目 ( C I P ) 数据

新型航空高性能钛合金材料技术研究与发展/朱知寿著. --北京:航空工业出版社,2013.12  
(中航工业首席专家技术丛书)  
ISBN 978-7-5165-0311-9

I. ①新… II. ①朱… III. ①航空材料—钛合金—研究 IV. ①V252.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 279690 号

新型航空高性能钛合金材料技术研究与发展  
Xinxing Hangkong Gaoxingneng Taihejin  
Cailiao Jishu Yanjiu yu Fazhan

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑路 2 号院 100012)

发行部电话: 010-84936555 010-64978486

北京印刷学院实习工厂印刷

全国各地新华书店经售

2013 年 12 月第 1 版

2013 年 12 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16

印张: 18.5 字数: 474 千字

印数: 1—2000

定价: 98.00 元

# 总 序

航空工业被誉为“现代工业之花”，是国家战略性高技术产业，同时也是技术密集、知识密集、人才密集的行业。中国是世界航空产业格局中的后来者，而中航工业作为支撑中国航空工业发展的核心力量，履行国家使命，必须大力推进自主创新，必须在科技创新和知识创新上有所作为。

从2009年开始，中航工业按照航空技术体系，在科研一线技术人才中陆续遴选出近百位集团公司级“首席技术专家”。此举既是集团公司对这些技术人才技术水平和能力的肯定，也意味着集团公司赋予了他们更大的责任和使命。我们希望这些技术专家在今后的工作中，要继续发挥科研技术带头人的作用，更加注重学习和创新，不断攀登航空科技新的高峰；要坚持潜心科研，踏实工作，不断推动航空科技进步；要带队伍、育人才，打造高水平的科研队伍，努力培养更多的高层次专业技术人才，为中航工业的发展做出更大的贡献。

21世纪企业的成功，越来越依赖于企业所拥有知识的质量，利用企业所拥有的知识为企业创造竞争优势和持续竞争优势，这对企业来说始终是一个挑战。正因如此，“知识管理”在航空工业等高科技产业领域得以快速推广和应用。依照这个思路，将首席技术专家们所积淀和升华出来的显性或隐性知识纳入知识管理体系，是进一步发挥其人才效益的重要方式，也是快速提升中航工业自主创新能力的的重要途径。

知识管理理论的核心要义，就是把知识作为一种重要资产来进行管理，正如知识管理的创始人斯威比所说：“知识资本是企业的一种以相对无限的知识为基础的无形资产，是企业核心竞争能力的源泉。”如果专家们把其掌握的各类显性或隐性知识，用书面文字的形式呈现出来，就相当于构建了一个公共资料库，提供了一个交流平台，可以让更多的人从中受益——这就是出版这套“中航工业首席专家技术丛书”的初衷。

集团公司的这近百位“首席技术专家”，基本覆盖了航空工业的所有专业。每位专家撰写一部专著，集合起来，就相当于一个航空工业的“四库全书”，很有意义。在此，我要特别感谢这些专家们，他们在繁重的科研生产任务中，不辞辛劳地撰写出了自己的专著，无私地将自己的宝贵经验呈现给大家，担当起了传承技术、传承历史的责任。

相信这套丛书的出版，会使更多的航空科技工作者从中获益，也希望在一定程度上能助力中航工业的自主创新，对我国航空工业的科技进步产生积极影响。



中国航空工业集团公司董事长

# 前 言

钛及钛合金自 20 世纪 50 年代诞生并工业化生产以来就开始用于航空工业，目前用于航空工业的钛材占世界钛市场总量的 50% 以上，是名副其实的航空材料。随着 21 世纪航空航天工业的飞速发展，新型钛合金材料及其应用技术也迅速发展。50 年来，我国钛合金材料及钛工业也得到了快速发展，特别是近 10 年来，我国的海绵钛和钛加工材的产量已经跃居世界第二位。但与世界发达国家相比，我国航空航天用钛材只占总产量的 10%，与世界发达国家的平均水平还相差甚远。所以，我国航空用钛合金材料及应用技术仍需要在发展体系化、品种系列化、生产规模化、结构整体化、性能综合化、应用成熟化、用量扩大化和制造低成本化等方面加强技术基础和工程应用的研究力度，并着力提升我国钛材的总体质量，优化钛材产业结构，立足国内，自主创新，逐步摆脱“杂”、“乱”、“散”的被动局面，建立具有中国特色的航空结构用钛合金材料体系，提高我国钛合金材料在航空工业领域的用量及应用水平，促进我国民用钛材的深加工能力，力争钛合金的综合技术赶超世界先进水平。

为此，本书在综合评述钛及钛合金特性、综合应用、合金化、制备工艺与加工方法等技术基础研究和现状的基础上，从钛合金的成分、工艺、组织和性能四要素的相互关系出发，提出了钛合金按显微组织分类的工程化内涵，评述了钛合金的组织类型与力学性能的一般关系，提出了为实现钛合金显微组织与力学性能的最佳匹配，必须立足国内，自主创新，突破钛合金组织类型与力学性能的一般关系限制，并结合新型合金化设计理论和综合强韧化工艺手段，改变或优化钛合金的显微组织结构、晶体学结构和显微组织参数，以建立新一代飞机用新型综合高性能钛合金材料与技术。

本书以新一代飞机用低强度高塑性、中强度高韧性、高强度高韧性、超高强度及损伤容限等钛合金系列研究和发展为主线，阐述了纯净化熔炼技术、新型准  $\beta$  热处理技术、新型准  $\beta$  锻造技术、新型焊接工艺、冷成形工艺和超塑性成形工艺等在提升我国新型钛合金材料的强度、韧性、抗疲劳裂纹扩展能力、焊接性能、抗疲劳性能、损伤容限性能等综合性能方面的关键作用。为满足飞机用钛合金构件的设计和使用要求，阐述了固溶强化、细晶强化、相变强化、形变强化和新型合金化、纯净化熔炼、显微组织控制等综合强韧化手段。在创建具有我国特色的新一代飞机用钛合金主干材料体系——Ti45Nb 低强度高塑性钛合金、TC4-DT 中强度高韧性损伤容限型钛合金、TC21 高强韧损伤容限型钛合金和 TB8 超高强度钛合金等材料与应用技术的过程中，在提升普通 TC4 钛合金、TC6 钛合金和 TC18 钛合金等综合性能的过程中，在研制新型钛合金薄板、钣金零件、管材、紧固件用线材、铆钉、螺栓、螺钉、大规格棒材、大型锻件、电子束焊接构件等系列产品过程中所发挥的综合作用。

书中通过梳理我国航空结构用钛合金材料体系发展特点，按先进性、成熟性、工艺性与经济性等指标对我国新型飞机结构钛合金主干系列牌号进行了综合评价，提出了按体系

发展要求，建立具有中国特色飞机结构钛合金材料体系的必要性，建议为完善我国飞机结构钛合金材料系列需在全系统和跨领域开展结构钛合金系列牌号的精简工作，在综合性能优化、规格品种齐全化、应用规模扩大化、规范标准完善化、考核验证数据充分化等几个方面进一步提高主干钛合金的技术成熟度，从而实现主干钛合金材料的低成本和高性能设计与使用目标。

本书是在综合研究团队多年工作的基础上编写而成的，在这过程中还参阅了协作单位、航空专业化厂、高等院校和科研院所的试验与研究结果，也得到了颜鸣皋院士、曹春晓院士和北京航空材料研究院有关领导与研究室王新南、祝力伟、商国强、李军等同仁的指导与帮助，作者在此表示衷心的感谢。

希望本书能对从事航空、航天、装备设计、加工制造的科研工作者和工程技术人员有所借鉴与帮助。由于作者能力有限，不妥之处敬请指正。

朱知寿

2013年6月

# 目 录

<b>第 1 章 钛及钛合金的技术基础与发展现状</b> .....	( 1 )
1.1 钛及钛合金的主要特性与应用 .....	( 1 )
1.1.1 钛及钛合金的主要特性 .....	( 1 )
1.1.2 钛的合金化与钛合金 .....	( 7 )
1.1.3 钛及钛合金的主要应用 .....	( 11 )
1.2 钛合金的主要制备工艺与加工方法 .....	( 15 )
1.2.1 钛合金真空熔炼 .....	( 15 )
1.2.2 钛合金的锻造 .....	( 18 )
1.2.3 热处理 .....	( 22 )
1.2.4 机械加工 .....	( 24 )
1.2.5 近净成形技术 .....	( 26 )
1.2.6 先进焊接技术 .....	( 31 )
1.2.7 表面处理技术 .....	( 32 )
1.3 中国钛及其合金的产业发展现状与存在的主要问题 .....	( 32 )
1.3.1 中国钛及钛合金的产业发展现状 .....	( 32 )
1.3.2 中国钛及钛合金产业发展存在的主要问题 .....	( 34 )
1.4 航空用钛合金材料研究现状与存在的主要差距 .....	( 38 )
1.4.1 新一代航空钛合金材料综合性能要求 .....	( 38 )
1.4.2 研究现状与存在的主要差距 .....	( 38 )
参考文献 .....	( 41 )
<b>第 2 章 航空用钛合金组织、结构与力学性能关系研究</b> .....	( 45 )
2.1 钛合金的显微组织类型及工程化定义 .....	( 45 )
2.1.1 钛合金显微组织类型的一般分类 .....	( 45 )
2.1.2 钛合金显微组织类型的工程化分类 .....	( 47 )
2.2 钛合金的显微组织特征 .....	( 48 )
2.2.1 等轴组织 .....	( 48 )
2.2.2 双态组织 .....	( 48 )
2.2.3 网篮组织 .....	( 49 )
2.2.4 片层组织 .....	( 50 )
2.3 钛合金组织类型与力学性能的一般关系 .....	( 51 )
2.3.1 静强度性能 .....	( 52 )
2.3.2 断裂韧性 .....	( 54 )
2.3.3 疲劳裂纹扩展速率 .....	( 56 )
2.3.4 疲劳性能 .....	( 58 )



2.4	钛合金晶体学择优取向（织构）对性能的影响	( 59 )
2.5	合金化和工艺创新是发展航空用综合高性能钛合金材料技术的关键途径	( 64 )
2.5.1	合金化设计的应用	( 65 )
2.5.2	工艺创新的应用	( 66 )
	参考文献	( 67 )
<b>第3章</b>	<b>航空用钛合金材料体系的形成与发展</b>	( 71 )
3.1	中国飞机用钛合金材料按体系发展的必要性	( 71 )
3.2	钛合金的一般分类	( 72 )
3.2.1	按组织结构分类	( 72 )
3.2.2	按用途与特性分类	( 74 )
3.2.3	按制备方法分类	( 78 )
3.3	中国飞机用钛合金材料基本体系	( 78 )
3.3.1	低强度高塑性钛合金系列	( 81 )
3.3.2	中强度高韧性钛合金系列	( 83 )
3.3.3	高强高韧钛合金	( 84 )
3.3.4	铸造钛合金	( 85 )
3.4	飞机结构钛合金基本性能指标体系	( 86 )
3.5	飞机结构钛合金的技术标准体系	( 92 )
3.6	飞机结构用钛合金基本体系	( 93 )
3.7	飞机结构钛合金系列综合评价	( 96 )
3.8	我国飞机结构钛合金材料系列的完善与未来发展建议	( 100 )
3.8.1	当前存在的主要问题	( 100 )
3.8.2	系列发展与完善的建议	( 101 )
	参考文献	( 102 )
<b>第4章</b>	<b>中等强度高损伤容限型钛合金材料的研究与发展</b>	( 104 )
4.1	损伤容限设计概念与应用发展现状	( 104 )
4.2	损伤容限型钛合金研究与应用	( 106 )
4.2.1	国外损伤容限型钛合金的研究与应用现状	( 106 )
4.2.2	国内中等强度高损伤容限型钛合金的研究与应用现状	( 107 )
4.3	TC4 - DT 钛合金的锻造变形与组织均匀化控制	( 107 )
4.3.1	TC4 - DT 钛合金锻坯的组织细化与均匀化	( 108 )
4.3.2	TC4 - DT 钛合金锻件的均匀化改锻试验研究	( 109 )
4.3.3	TC4 - DT 钛合金锻件的变形与组织性能的关系	( 112 )
4.4	TC4 - DT 钛合金的新型准 $\beta$ 热处理工艺与组织性能控制	( 114 )
4.4.1	新型准 $\beta$ 热处理工艺对片层组织及其组织参数的影响	( 114 )
4.4.2	新型准 $\beta$ 热处理工艺与力学性能的关系	( 116 )
4.4.3	初生 $\alpha$ 相含量对 TC4 - DT 钛合金的力学性能和疲劳裂纹扩展行为的影响	( 120 )
4.4.4	片层组织参数对 TC4 - DT 钛合金疲劳裂纹扩展行为的影响	( 126 )

4.4.5	TC4 – DT 钛合金疲劳裂纹扩展断口的特征分析	(128)
4.4.6	近门槛区疲劳裂纹扩展速率的组织敏感性及其转折点形成机制	(132)
4.5	TC4 – DT 合金疲劳裂纹扩展速率模型与数学描述	(133)
4.5.1	用 Paris 方程对裂纹扩展速率的描述	(134)
4.5.2	Forman 方程对裂纹扩展速率的描述	(135)
4.5.3	用 Elber 型方程对裂纹扩展速率的描述	(136)
4.5.4	考虑转折点 $\Delta K_I$ 的新型 F – E 分段方程	(137)
4.6	TC4 – DT 合金的综合性能评价	(140)
4.6.1	TC4 – DT 钛合金的电子束焊接性能	(140)
4.6.2	TC4 – DT 钛合金锻件的综合性能评价	(143)
	参考文献	(144)
<b>第 5 章</b>	<b>高强度高韧性损伤容限型钛合金的研究与发展</b>	<b>(148)</b>
5.1	国内外高强度高韧性钛合金的研究与应用	(148)
5.1.1	国外高强度高韧性钛合金的研究与应用	(148)
5.1.2	国内高强度高韧性钛合金的研究概况	(153)
5.2	高强度钛合金的强韧化工艺和技术发展状况	(154)
5.2.1	新型合金化	(154)
5.2.2	新型 $\beta$ 热处理工艺	(154)
5.2.3	新型准 $\beta$ 锻造工艺	(155)
5.2.4	损伤容限型钛合金的 $\beta$ 加工综合强韧化技术基础	(159)
5.3	自主研发的我国飞机结构用 TC21 新型高强高韧损伤容限型钛合金	(162)
5.3.1	TC21 钛合金的合金化与综合性能特点	(162)
5.3.2	TC21 合金的相组成和相变特点	(163)
5.4	TC21 钛合金的新型准 $\beta$ 锻造工艺	(173)
5.5	TC21 钛合金的热处理、组织与性能关系	(176)
5.5.1	第一次退火 (固溶处理) 的影响	(176)
5.5.2	第二次退火 (时效) 温度的影响	(178)
5.5.3	第二次退火 (时效) 时间的影响	(179)
5.6	TC21 钛合金的主要工艺性能	(181)
5.6.1	焊接性能	(181)
5.6.2	超塑性能	(189)
5.6.3	氢置塑性	(195)
5.7	TC21 钛合金的损伤容限和综合性能评价	(197)
5.7.1	疲劳裂纹扩展速率	(197)
5.7.2	断裂韧性	(199)
5.7.3	疲劳性能	(201)
5.7.4	高温性能	(209)
5.7.5	腐蚀疲劳性能	(211)
5.7.6	损伤容限特性	(212)

5.7.7 综合性能的对比分析 .....	(215)
5.8 TC21 钛合金的应用与前景 .....	(217)
参考文献 .....	(217)
<b>第6章 超高强度高韧性钛合金的研究与应用 .....</b>	<b>(222)</b>
6.1 国内外亚稳 $\beta$ 型钛合金研究与发展现状 .....	(222)
6.1.1 亚稳 $\beta$ 型钛合金的主要特点 .....	(222)
6.1.2 国内外亚稳 $\beta$ 型钛合金的研究与发展情况 .....	(224)
6.1.3 亚稳 $\beta$ 型钛合金的相变特点 .....	(232)
6.2 航空用超高强度钛合金的研制与应用 .....	(235)
6.2.1 TB8 超高强度钛合金的组织、相组成和相变特点 .....	(236)
6.2.2 TB8 钛合金的锻造 .....	(239)
6.2.3 TB8 钛合金的热处理 .....	(240)
6.2.4 TB8 钛合金的冷成形 .....	(242)
6.2.5 TB8 钛合金的抗氧化性 .....	(243)
6.2.6 TB8 钛合金的焊接 .....	(244)
6.3 TB8 超高强度钛合金的主要力学性能特点 .....	(252)
6.3.1 TB8 钛合金板材主要力学性能特点 .....	(252)
6.3.2 TB8 钛合金棒材与锻件主要力学性能特点 .....	(255)
6.4 TB8 超高强度钛合金的典型应用 .....	(260)
6.4.1 “九五”期间的主要应用 .....	(261)
6.4.2 “十一五”期间的主要应用 .....	(263)
6.4.3 应用前景 .....	(263)
参考文献 .....	(263)
<b>第7章 新型低强度高塑性钛合金材料研究与应用 .....</b>	<b>(269)</b>
7.1 低强度高塑性钛合金的主要特点与应用 .....	(269)
7.1.1 Ti45Nb 合金丝材 .....	(269)
7.1.2 TA18 (Ti-3Al-2.5V) 钛合金管材 .....	(271)
7.2 Ti45Nb 低强度高塑性钛合金的工艺、组织与性能关系控制 .....	(272)
7.2.1 Ti45Nb 丝材的变形、再结晶及相结构 .....	(272)
7.2.2 Ti45Nb 丝材组织与性能关系控制研究 .....	(274)
7.3 国产与进口 Ti45Nb 丝材的综合性能对比 .....	(276)
7.3.1 冷墩性能 .....	(276)
7.3.2 室温拉伸性能对比 .....	(276)
7.3.3 剪切性能 .....	(279)
7.3.4 扭转性能 .....	(279)
7.4 Ti45Nb 钛合金的其他力学性能与工艺性能 .....	(280)
7.4.1 热加工与冷加工 .....	(280)
7.4.2 热处理 .....	(280)
7.4.3 拉伸和剪切性能 .....	(281)

7.4.4 热稳定性能 .....	(281)
7.4.5 冷顶锻性能 .....	(282)
7.4.6 表面处理 .....	(282)
7.4.7 机械加工 .....	(282)
7.5 Ti45Nb 钛合金的应用 .....	(282)
参考文献 .....	(283)

# 第 1 章 钛及钛合金的技术基础与发展现状

**摘要：**本章简述了钛及钛合金的特性、综合应用、合金化特点、制备工艺与加工方法等技术基础知识，评述了我国钛及钛合金工业发展现状、存在的主要问题与差距，指出了虽然我国目前钛产业规模已位居世界前两位，但钛及钛合金产品总体质量仍需提高、产业结构仍需优化、技术创新仍需要加强等努力方向。特别是，我国航空用钛合金产品只占钛及钛合金产品总量 10%，与世界发达国家钛及钛合金在航空工业领域的平均用量 50% 这一水平相距甚远。所以，我国应在航空工业用高端钛合金材料技术、民用钛材深加工能力及综合应用水平等方面，按发展体系化、品种系列化、生产规模化、结构整体化、性能综合化、应用成熟化、用量扩大化和制造低成本化等基本原则，加大技术基础和工程应用研究力度，立足国内、自主创新，逐渐摆脱合金牌号“杂”、“乱”、“散”，产业结构不合理的被动局面，建立具有中国特色的航空结构用钛合金材料体系，努力提高我国钛合金材料在航空工业领域的用量及应用水平，力争钛合金研制与综合应用技术赶超世界先进水平。

## 1.1 钛及钛合金的主要特性与应用

### 1.1.1 钛及钛合金的主要特性

钛是 20 世纪 50 年代发展起来的一种重要的结构金属，相比铜诞生 6000 年、铁诞生 4000 年、铝诞生 100 年来说，钛是一种非常“年轻”的金属。

钛位于元素周期表中第 IV B 族、原子序数为 22、原子核半径为  $5 \times 10^{-13}$  cm、核外电子结构排列为  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3d^2 4s^2$ ，属于过渡族金属。钛的密度为  $4.506 \sim 4.516 \text{ g/cm}^3$  (20℃)、熔点  $1668 \pm 4^\circ\text{C}$ 、熔化潜热  $15 \sim 21 \text{ kJ/mol}$ 、沸点  $3260 \pm 20^\circ\text{C}$ 。钛的导热性核导电性较差，近似或略低于不锈钢。在 25℃ 时，钛的比热容为  $0.577 \text{ J/(g} \cdot \text{K)}$ 、热焓  $45.98 \text{ J/mol}$ 、摩尔熵为  $30.6 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$ ，金属钛是顺磁性物质，导磁率为  $1.00004 \text{ H/m}$ 。

钛的主要特性如下。

#### (1) 同素异晶转变

纯钛有两种同素异构体（同一种元素有两种晶体结构），在  $882.5^\circ\text{C}$  以下为密排六方晶格，称为  $\alpha\text{-Ti}$ ，或称为  $\alpha$  相；在  $882.5^\circ\text{C}$  以上为体心立方晶格，称为  $\beta\text{-Ti}$ ，或称为  $\beta$  相，见图 1-1。 $882.5^\circ\text{C}$  称为相变点，或称为  $\alpha\text{-Ti}$  与  $\beta\text{-Ti}$  的转变点，一般用符号  $T_\beta$  来表示。相变点 ( $T_\beta$ ) 主要是指  $\alpha$  和  $\beta$  相相互转变的温度点，亦称  $\beta$  转变点。对于  $\alpha$  和  $\alpha + \beta$  型合金，则是指  $\alpha$  全部转变为  $\beta$  相的温度点。

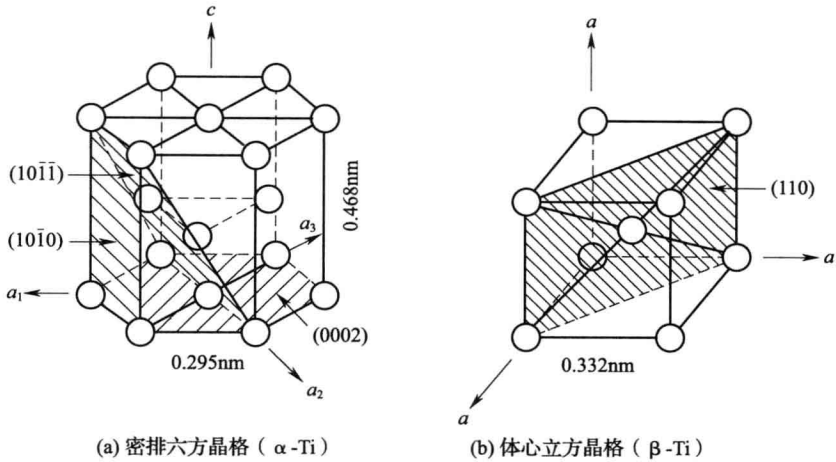


图 1-1 纯钛的晶格结构

由于  $\alpha$ -Ti 和  $\beta$ -Ti 相结构不同，从而决定了加工性能和力学性能的差异。如  $\alpha$ -Ti，它是密排六方晶格结构，只有 1（滑移面） $\times$ 3（滑移方向），即有 3 个滑移系。而  $\beta$ -Ti，它是体心立方晶格结构，有 6（滑移面） $\times$ 2（滑移方向），即有 12 个滑移系。因此， $\alpha$ -Ti 塑性变形能力差，而  $\beta$ -Ti 塑性变形能力强，这就是钛及其合金一般必须采用高温锻造以改善塑性变形能力的主要原因之一。只有在温度高、变形量大、变形速率剧烈变化等特殊条件下，钛及其合金的次要滑移面才开动，这时  $\beta$ -Ti 的主要滑移面和次要滑移面共有 48 个滑移系可参与变形，塑性变形能力可以进一步提高。

## (2) 具有高的化学活性

钛具有很高的化学活性使其在高温下容易产生氧化。钛在常温空气中也会发生氧化反应，形成一层很薄的淡黄色氧化膜。钛与许多元素均能发生反应，在较高温度下可以和一氧化碳 (CO)、二氧化碳 (CO<sub>2</sub>)、水蒸气及多种挥发性有机物发生反应。当某些气体与钛反应时，不但会在钛的表面形成化合物，而且气体能进入金属晶格，形成间隙式固溶体。在冶金工业就是利用钛的化学活性，将其用作炼钢时的优良脱气剂，化合钢在冷却时析出的氧和氮。在钢中加入少量的钛 (<0.1%)，即可使钢变得坚韧而富有弹性。钛也是炼铝等工业中重要的合金添加剂。

由于钛的高化学活性，使用中应注意以下几个问题：

① 钛合金在有温度的氧化或腐蚀环境中使用时，应考虑钛合金的高温抗氧化性能。

钛的熔点很高（约为  $1668 \pm 4^\circ\text{C}$ ），但钛及钛合金的长期最高使用温度目前只能达  $600^\circ\text{C}$ ，正在研发  $650^\circ\text{C}$  高温结构钛合金，远远没有达到以 Fe、Ni、Co 为基体的高温合金使用温度（可达  $900^\circ\text{C}$  以上）。

② 热加工后的钛及其合金在使用前应去除表面富氧  $\alpha$  层，并制订有关标准严格执行，以确保钛及其合金构件的安全可靠使用。

由于钛及钛合金的高化学活性，在热成形或热处理加热过程中会与空气中的氧、氮等气体发生反应形成氧化皮和富氧  $\alpha$  层（氧、氮等间隙元素为  $\alpha$ -Ti 的稳定元素，主要溶于  $\alpha$ -Ti 从而形成富氧的  $\alpha$  相）。富氧  $\alpha$  层硬度高、塑性低，使钛合金在继续变形或受力

时导致表面开裂，塑性降低，特别是细薄承力件如钛合金钣金件热成形时，严重的氧化会造成穿透性脆化的危险<sup>[2]</sup>。

研究表明<sup>[3]</sup>，钛及其合金在较低的温度（小于 500℃）下时，合金表面的 Ti 与 O 反应生成一层稳定的氧化膜（TiO<sub>2</sub>），可以阻止氧向基体内部的扩散，从而阻止钛的进一步氧化，具有保护作用。在 500℃左右加热，钛合金表面会形成厚度 0.01mm 以下的氧化膜，氧化膜的主要成分为 TiO。通过采用显微硬度法测试热处理后的 OT4、OT4-1 和 BT20（TA15）钛合金富氧层深度的规律得知，钛合金在 450~600℃加热 15~120min 时，富氧层的形成速度较慢。富氧层的深度随热处理等温时间的延长变化不大，一般在 700℃以下热处理时的富氧层深度约为 0.02mm；800~900℃热处理时的富氧层深度一般为 0.05~0.08mm；而在高于相变点的 900℃以上热处理时，富氧层的深度一般在 0.08~0.10mm 以上，而且在表面还可以观察到 TiO<sub>2</sub>氧化皮。

根据钛表面氧化色可以判断氧化程度（见表 1-1），氧化色也是真空热处理时判断工件表面是否受氧化污染（因真空度不够或出炉冷却不当等）的判据之一（按真空热处理标准）。

表 1-1 钛表面氧化色与温度的对应关系

温度/℃	200	300	400	500	600	700~800	900
氧化膜颜色	银白色	浅黄色	金黄色	蓝色	紫色	红灰色	灰色

从显微组织的变化来看（见图 1-2），在相变点以下温度如 900℃氧化时，基体和富氧层组织的长大不明显，组织较均匀细小。这是由于合金中 α 相的含量较多，阻止了合金中 β 相组织的长大。而当加热温度高于合金相变点时，随着密排六方 α 相向体心立方 β 相的转变，基体中 β 转变组织的含量增加，加剧了氧在体心立方 β 相中的扩散速度；同时，粗大的 β 相晶界也提供了氧扩散的良好通道，不仅加快了氧扩散的速度，而且也增加了氧扩散的方向性和不均匀性。反映在金相组织特征上，出现了粗大的针状 α 相；反映在硬度上，出现了富氧层与基体界面处硬度的不均匀性。

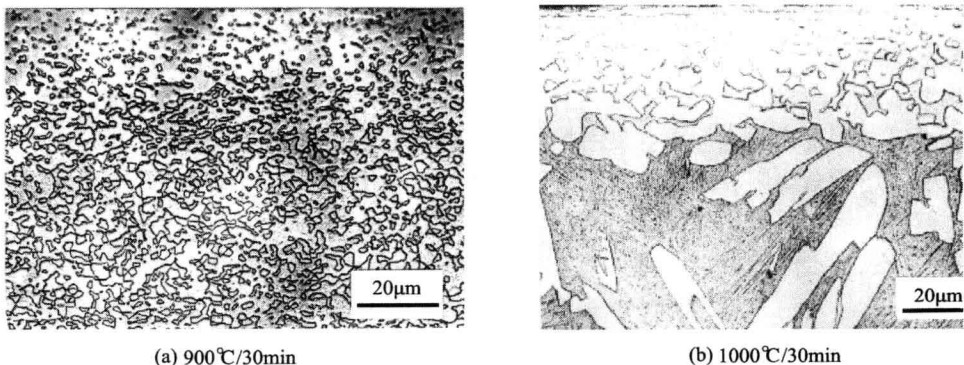


图 1-2 TA15 钛合金在 900℃和 1000℃氧化 30min 后的富氧层显微组织

采用金相法并结合硬度法的测试研究表明，用显微硬度法可以较精确地确定合金氧化的规律和富氧层的深度变化。金相法可以作为硬度法的一种辅助方法，当温度

较高时，金相法可以估计富氧层的深度范围。金相法测出的富氧层的深度滞后于硬度法。

根据研究结果，建立了基于金相法和显微硬度法的 Q/6S 1623—2001《钛合金富氧层检验方法》供生产使用部门参照执行<sup>[3]</sup>。

### ③钛及钛合金铸锭的真空熔炼

由于钛的高化学活性，钛及其合金铸锭在熔炼温度下会与许多元素发生反应，包括与耐火材料的表面反应，因此，钛及其合金铸锭的熔炼只能在真空中或惰性气氛中进行。真空熔炼还可以起到挥发去除多种杂质达到提纯的作用。所以，尽管真空熔炼存在工艺要求严格、设备复杂、成本高等缺点，但仍是获得优质钛及其合金铸锭的唯一可行途径，这也是导致钛及其合金成本一直居高不下的原因之一。

另外，航空用钛合金铸锭必须采用真空自耗电弧熔炼炉、真空自耗凝壳炉或冷壁坩埚熔炼方法进行熔炼，而且一般均需要两次真空熔炼。含难熔或高合金化元素的合金，或对成分均匀性要求较高的合金，按标准规定一般需要经过三次真空熔炼。

### ④钛及钛合金制品的真空处理

钛及其合金制品经机械加工、冷成形或焊接等加工后，或当氢含量超标时，一般要进行去残余应力退火或稳定化退火或除氢退火等处理。为了避免产生表面氧化层并残留在最终钛制件表面，上述退火处理应在真空炉中进行。钛合金的真空去应力退火应严格执行相应的规范和随炉件检验规定（例如：Q/J11—3027—2002《钛合金的真空热处理》），以确保安全可靠使用。

## （3）钛耐腐蚀性能优异

钛的一个显著特点是耐腐蚀性强，这也是由于它与氧的亲合力强所导致的。氧在钛表面上反应生成一层致密的氧化膜，可保护钛不受介质腐蚀。金属钛在大多数水溶液中，都能在表面生成钝化氧化膜。因此，钛在酸性、碱性、中性盐水溶液和氧化性介质中都具有很好的稳定性，比现有的不锈钢和其他有色金属的耐腐蚀性都好，可与铂相当。但是，如果处在某种能连续溶解钛表面氧化膜的介质中时，钛就会受到腐蚀。例如，钛在氢氟酸、浓或热盐酸、硫酸和磷酸中时，由于这些溶液能溶解钛表面的氧化膜，钛就会被腐蚀。然而，如果在这些溶液中加入氧化剂或某些金属离子，钛表面的氧化膜就会受到保护，此时钛的稳定性增加。

除氢氟酸、浓或热盐酸、硫酸和磷酸外，钛在各种酸、碱、盐介质中都具有很好的稳定性。所以，钛是化学工业中优良的抗腐蚀材料，得到了越来越广泛的应用。例如，在氯碱工业中使用钛金属阳极和钛制湿氯气冷却器，收到很好的经济效果，被誉为氯碱工业中的一大革命。钛在有机化合物中，除了较高温度下的5种有机酸（甲酸、乙酸、草酸、三氯乙酸和三氟乙酸）外，也都具有非常好的稳定性。因此，钛是石油炼制和石油化工中优良的结构材料，可以用来制作各种热交换器、反应器、高压容器和蒸馏塔等。另外，钛在含有金属离子的酸性溶液中具有很好的稳定性，因此钛在湿法冶金工业中，如铜、镍、钴、锰等有色金属的电解生产中，也有着十分广泛的应用。另外，钛抗海水腐蚀的能力也比其他金属都好，无论是在静止的或高速流动的海水中，钛都具有特殊的稳定性。因此，钛是海水淡化装置的理想材料，用量将越来越大，同时也是造船工业的理想结构材料，已广泛应用在各种舰艇、深水潜艇的多种部件中。



此外，钛的耐腐蚀性能，还使其被广泛应用在化肥工业设备、电力工业热交换器冷却管、造纸和纺织工业的漂白设备以及医疗、制药和食品等工业部门。

#### (4) 导热性差和导热系数小

钛的导热系数为 $0.036\text{cal}^{\text{①}}/(\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，远小于铝（导热系数为 $0.52\text{cal}/(\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C})$ ）和铁（导热系数为 $0.19\text{cal}/(\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C})$ ）。为此，因钛及钛合金的导热性差和导热系数小这一特点，在使用中应注意以下几个问题：

##### ①大尺寸钛及其合金坯料宜采取缓慢加热方式

钛及其合金铸锭开坯或大规格棒材锻造加热时，均不能采取快速加热，一般采取预热、分段加热等缓慢加热方式。按相应的标准规定，钛及钛合金一般在相变点以下的两相区加热时，采用加热系数为 $0.8\sim 1.0\text{min}/\text{mm}$ ；而在相变点以上的 $\beta$ 区加热时，加热系数为 $0.5\sim 0.8\text{min}/\text{mm}$ 。在 $\beta$ 区的加热时间不宜过长，否则会引起晶粒长大、氧化损耗大等不良影响。

##### ②高速切削加工应避免表面烧伤

钛及其合金在高速切削等机械加工过程中，应特别注意冷却方式或刀具切削量不合适等因素而造成机加工零件表面烧伤（见图1-3）。一般地，表面烧伤组织比基体内部组织细小，这是因为加工时冷却液会导致过烧表面快速冷却而使表面产生针状的魏氏组织，结果使表面局部烧伤组织的塑性相对降低，强度相对升高。由于表面烧伤部位的针状魏氏组织，会显著影响零件服役时的疲劳性能，所以，带烧伤的表面必须经机械加工清除后才能使用。按相应标准规定，钛合金零件机械加工时不允许存在过烧，但允许机械加工去除过烧层后使用。

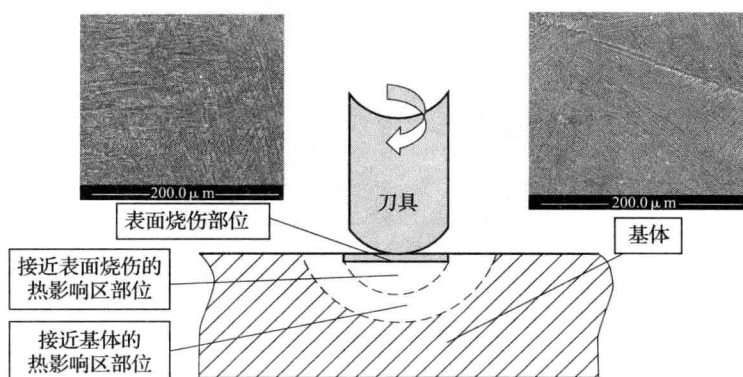


图1-3 钛合金表面烧伤及对显微组织组织的影响

另外，因磨削易烧伤零件，使用时也应尽量避免采用磨削工序，如不可避免要采用磨削加工以降低表面粗糙度 $R_a$ 值时，磨削加工时应禁止产生火花或使零件表面产生变色。禁止采用砂轮干打磨，可采用刮削锉修或用砂纸（ $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）打磨。

#### (4) 钛的摩擦因数大

摩擦因数大即说明钛合金比较黏、金属流动性不好，所以在加热锻造变形时，特别是在模具中进行模锻变形时，为了减少摩擦应在模具型腔和经吹砂后的工件表面喷涂润滑

①  $1\text{cal}=4.1868\text{J}$ 。