

FEIJI TAIHEJIN JIEGOU  
SHEJI YU YINGYONG

# 飞机钛合金结构 设计与应用

王向明 刘文珽 等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 飞机钛合金结构设计与应用

王向明 刘文珽 等著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书以飞机钛合金结构设计/制造一体化为技术主线,以轻质高效、长寿命、低成本、多功能为设计需求,以加强框、梁、壁板等主承力结构为研究对象,按照制造技术特点进行分类,从结构设计与分析角度介绍钛合金结构设计方法与应用实例。

本书是国内首部有关飞机钛合金结构设计与分析方面的专著,全部源自工程实际,内容翔实、依据充分、实用性强,对于现代飞机结构设计与分析具有很好的示范作用和重要参考价值。可供飞机结构设计人员、工艺人员、维护修理人员、高校相关专业师生使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

飞机钛合金结构设计与应用/王向明等著. —北京:国防工业出版社,2010. 11

ISBN 978-7-118-07053-8

I. ①飞... II. ①王... III. ①飞机—钛合金—结构设计 IV. ①V252.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 197997 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

\*

开本 710×960 1/16 印张 14¼ 字数 249 千字

2010 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 36.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 《飞机钛合金结构设计与应用》

## 编 审 人 员

- 著 者 王向明 刘文珽
- 主 审 顾诵芬 关 桥 曹春晓 李 明 李 天  
杨凤田 孙 聪 郭恩明
- 副主审 李志强 章怡宁 黄季墀 杨 旭 曹奇凯  
张 爽 苗 冰 冯 军 朱银垂 成 竹
- 编 委 (按姓氏笔画排列)
- 丁庆东 王 昇 王亚军 王华明 王向明  
王忠波 毕世权 朱天文 刘文珽 刘书田  
关志东 许 平 许广兴 许希武 李红恩  
杨树勋 杨洪源 吴宏伟 陈 刚 郑春红  
胡红东 贺 飞 贺小帆 耿玉新 夏绍玉  
董彦民 韩 涛 景绿路 谢国良 魏金龙

# 前 言

钛及其合金是 20 世纪中叶兴起并开始用于飞机结构的重要金属材料,具有较高的比强度和热强度、重量轻、抗蚀性好。钛合金与先进复合材料结构的强度、刚度匹配性好,不会产生电偶腐蚀,可以提高结构效率。由于钛合金材料与工艺特点,使得钛合金结构设计与传统金属结构有诸多不同之处,具有很大的灵活性,能发挥设计/制造一体化的技术优势,甚至可以构造出多种新型、高效率结构,这有助于化解现代飞机结构轻质高效、长寿命、低成本、多功能、快速响应研制等之间的矛盾,对于减轻结构重量、提高结构效率、改善结构可靠性、提高机体寿命、满足高温和高载以及腐蚀环境要求等能发挥其它金属无法比拟的作用。钛合金已成为现代飞机主体结构的重要选用材料,其应用水平甚至成为衡量飞机结构先进程度的重要标志之一,是影响飞机战技性能的一个重要方面。

钛合金材料成本高、加工困难,导致其制件成本居高不下。因此,近几十年来,降低钛合金构件的制造成本、扩大应用范围、充分发挥其结构效率是飞机结构所用钛合金的主要发展方向。

本书以飞机钛合金结构设计/制造一体化为技术主线,以轻质高效、长寿命、低成本、多功能为设计需求,以飞机加强框、梁、壁板等主承力结构为研究对象,按照制造技术进行分类,从飞机结构工程设计角度介绍钛合金结构设计方法与应用实例。

本书是国内首部有关飞机钛合金结构设计与分析方面的专著,内容全部源自工程应用研究,具有很强的针对性和示范性,内容翔实、依据充分、实用性强,对于现代飞机结构设计与分析具有很好的指导作用和参考价值,非常适合飞机结构设计人员、工艺人员、维护修理人员、高校相关专业师生科研和教学参考使用。

我们特别感谢著名航空专家顾诵芬、关桥、曹春晓、李明、李天、杨凤田五位院士和中航集团副总工程师孙聪与郭恩明在百忙中抽出宝贵时间主审本书；同时，感谢北京航空制造工程研究所副所长李志强，沈阳飞机设计研究所副总设计师章怡宁、黄季擢、杨旭、曹奇凯、张爽，成都飞机设计研究所副总设计师苗冰，第一飞机设计研究院副总设计师冯军，中国直升机设计研究所副总设计师朱银垂，以及中国飞机强度研究所副总工程师成竹等专家对本书的审阅；感谢国防工业出版社为本书的出版所付出的努力与支持。

由于有关钛合金结构设计的应用研究仍在继续，本书有些结论只是初步的或是阶段性的，加之本书编写人员对钛合金特点和具体应用技术的认识与理解有限，在内容和文字上可能存在不当之处，请读者批评指正。

著者  
2010年7月

# 目 录

第 1 章 飞机钛合金结构应用概述 .....	1
1.1 钛合金在飞机结构中日益广泛的应用 .....	1
1.1.1 钛合金的主要特点 .....	1
1.1.2 钛合金在现代飞机结构中的应用 .....	3
1.2 用于飞机制造的钛合金 .....	4
1.2.1 钛合金的分类 .....	4
1.2.2 $\alpha$ 型钛合金 .....	5
1.2.3 $\beta$ 型钛合金 .....	6
1.2.4 $(\alpha + \beta)$ 型钛合金 .....	6
1.2.5 钛合金冶金质量 .....	7
1.3 钛合金制造的工艺特点 .....	7
1.3.1 钛合金锻造与挤压 .....	7
1.3.2 钛合金的铸造 .....	8
1.3.3 钛合金的激光成形 .....	8
1.3.4 钛合金的钣金成形 .....	9
1.3.5 钛合金的超塑成形/扩散连接 .....	9
1.3.6 钛合金的焊接工艺 .....	10
1.3.7 钛合金的化铣工艺 .....	10
1.3.8 钛合金零件的表面强化 .....	11
1.3.9 钛合金零件的热处理 .....	11
1.3.10 钛合金的机械加工与装配 .....	11
1.4 钛合金结构设计特点 .....	12
1.4.1 钛合金结构减重设计 .....	12
1.4.2 钛合金结构抗疲劳设计 .....	13
1.4.3 钛合金结构腐蚀控制 .....	14
1.4.4 钛合金结构成本控制 .....	14
1.4.5 钛合金结构多约束设计 .....	15

1.5	飞机钛合金结构设计选材	16
1.5.1	飞机结构设计选材的一般过程	16
1.5.2	选材的一般原则	17
1.5.3	选材判据	17
1.5.4	部分钛合金材料的应用特点	17
	参考文献	20
<b>第2章</b>	<b>钛合金传统结构与实例</b>	<b>22</b>
2.1	引言	22
2.1.1	本章的主要内容	22
2.1.2	关于钛合金传统结构的设计选材	22
2.2	钛合金加强框、梁设计	24
2.2.1	典型机身加强框结构设计	25
2.2.2	钛合金梁类结构件设计	29
2.3	钛合金组合壁板结构设计	36
2.3.1	结构特点	36
2.3.2	设计基本要求	37
2.3.3	设计选材	37
2.3.4	蒙皮壁板与钣金框的厚度参数	37
2.3.5	蒙皮壁板结构设计	38
2.3.6	普通框的结构设计	39
2.3.7	试验验证	40
2.4	钛合金机械连接结构设计	41
2.4.1	铆接结构设计	41
2.4.2	螺接结构设计	42
2.5	小结	43
	参考文献	43
<b>第3章</b>	<b>钛合金焊接结构与评定</b>	<b>44</b>
3.1	引言	44
3.1.1	钛合金焊接结构的意义	44
3.1.2	焊接结构静强度设计分析方法	46
3.2	钛合金焊接结构设计原则与方法	47
3.2.1	钛合金焊接结构的特点	47
3.2.2	焊接结构设计的基本要求	48
3.2.3	焊接结构设计的原则	49



3.2.4	焊接结构设计方法 .....	50
3.3	钛合金焊接加强框、梁结构设计 .....	52
3.4	钛合金焊接壁板结构设计 .....	54
3.4.1	主承力钛合金焊接壁板结构设计 .....	54
3.4.2	发动机舱焊接蒙皮壁板 .....	59
3.5	设计中对接焊缝方向(形状)选取的分析 .....	60
3.6	钛合金焊接结构疲劳特性评定方法 .....	62
3.6.1	建立钛合金焊接结构疲劳特性评估方法的必要性 .....	62
3.6.2	钛合金焊接结构疲劳特性评估的当量 $K_t$ 法 .....	63
3.6.3	钛合金焊接结构疲劳特性评估的三参数法 .....	74
3.7	4种焊接工艺下钛合金的疲劳特性 .....	76
3.7.1	4种焊接工艺钛合金疲劳特性研究方法 .....	76
3.7.2	疲劳试验与结果 .....	76
3.7.3	疲劳试验寿命的统计对比 .....	77
3.7.4	4种焊接工艺当量 $K_t$ 的对比 .....	81
3.8	焊缝方向(形状)对钛合金焊接件疲劳特性的影响 .....	83
3.8.1	对4种焊缝疲劳特性的研究方法 .....	83
3.8.2	试验与结果 .....	84
3.8.3	不同焊缝方向(形状)下疲劳试验寿命的对比 .....	85
3.8.4	综合分析 with 基本结论 .....	88
3.9	钛合金焊接件焊后表面强化工艺对寿命的影响 .....	88
3.9.1	钛合金焊接件焊后表面强化对寿命影响的研究途径 .....	88
3.9.2	考虑焊后表面处理工艺对寿命影响的方法 .....	89
3.9.3	试验与结果 .....	91
3.9.4	喷砂工艺对钛合金焊接件寿命影响的研究 .....	92
3.9.5	喷丸工艺对钛合金焊接件寿命影响的研究 .....	96
3.9.6	焊缝抛光对钛合金焊接件寿命影响的研究 .....	97
3.9.7	综合分析 with 结论 .....	98
	参考文献 .....	99
<b>第4章</b>	<b>钛合金超塑成形/扩散连接结构设计与分析 .....</b>	<b>102</b>
4.1	超塑成形/扩散连接结构的设计原则与方法 .....	102
4.1.1	超塑成形/扩散连接结构的特点 .....	102
4.1.2	超塑成形/扩散连接结构的设计原则 .....	103

4.1.3	钛合金超塑成形/扩散连接结构的设计方法	104
4.2	钛合金超塑成形/扩散接口盖结构设计与应用	108
4.2.1	传统口盖结构特点	108
4.2.2	超塑成形/扩散接口盖结构设计与应用	109
4.3	超塑成形/扩散连接壁板结构设计与分析	111
4.3.1	机体壁板结构的分类	111
4.3.2	超塑成形/扩散连接壁板结构设计与应用	112
4.4	超塑成形/扩散连接整体气动面结构设计与应用	114
4.4.1	气动面的结构特点	114
4.4.2	超塑成形/扩散连接整体气动面结构设计与应用	115
4.5	超塑成形/扩散连接框、梁结构设计与分析	117
4.5.1	框、梁的结构特点	117
4.5.2	超塑成形/扩散连接框、梁结构设计与应用	118
4.6	超塑成形/扩散连接的焊接结构设计及评定	120
4.6.1	超塑成形/扩散连接的焊接结构特点	120
4.6.2	熔焊工艺顺序对超塑成形/扩散连接的影响	121
	参考文献	123
<b>第5章</b>	<b>钛合金铸造结构件的设计与应用</b>	124
5.1	钛合金铸件结构的设计原则与方法	124
5.1.1	钛合金铸件的结构特点	124
5.1.2	钛合金铸件结构的设计原则与方法	126
5.2	钛合金精密铸造薄壁结构件的设计与分析	127
5.3	大型钛合金精密铸造结构件的设计与分析	129
5.3.1	钛合金铸件大型整体化的作用	129
5.3.2	大型钛合金热等静压精密铸件的设计实例	129
5.4	钛合金热等静压/精密铸造/电子束焊接件的性能	133
	参考文献	135
<b>第6章</b>	<b>钛合金激光成形结构设计与应用</b>	136
6.1	激光成形结构件的特点	136
6.1.1	钛合金结构传统制件的现状	136
6.1.2	钛合金激光成形的技术特点	137
6.1.3	激光成形 TA15 钛合金的基本性能	138
6.2	激光成形钛合金结构件的设计与特点分析	140
6.2.1	激光成形钛合金结构设计特点	140

6.2.2	激光成形钛合金结构所蕴含的设计基础问题 .....	143
6.3	钛合金激光成形次承力结构件的设计与应用 .....	144
6.3.1	钛合金激光成形角盒设计与应用 .....	144
6.3.2	钛合金激光成形长桁(型材)设计与应用 .....	145
6.4	激光成形主承力件设计与应用 .....	146
6.4.1	钛合金激光成形支撑梁设计与应用 .....	146
6.4.2	钛合金激光成形机翼根肋设计与应用 .....	148
6.5	钛合金激光成形新结构简介 .....	149
6.5.1	钛合金梯度复合结构 .....	149
6.5.2	钛合金成形连接结构 .....	151
6.5.3	钛合金成形修复结构 .....	152
	参考文献 .....	154
<b>第7章</b>	<b>钛合金层合结构设计 with 试验研究 .....</b>	<b>155</b>
7.1	钛合金层合结构件的特点 .....	155
7.2	钛合金层合结构耐久性试验研究 .....	157
7.2.1	引言 .....	157
7.2.2	试验概况 .....	157
7.2.3	试验结果与分析 .....	159
7.2.4	结论 .....	162
7.3	钛合金层合结构损伤容限特性试验研究 .....	163
7.3.1	引言 .....	163
7.3.2	试验概况 .....	163
7.3.3	试验结果与分析 .....	166
7.3.4	结论 .....	169
7.4	钛合金典型层合结构概念设计 .....	169
	参考文献 .....	172
<b>第8章</b>	<b>钛合金零件的表面强化 .....</b>	<b>173</b>
8.1	引言 .....	173
8.1.1	表面强化的作用与种类 .....	173
8.1.2	表面强化工艺选取与增寿效益应用的技术途径 .....	174
8.1.3	钛合金零件强化工艺的增寿效益试验研究技术途径 .....	175
8.2	钛合金结构表面强化增寿效益的试验研究 .....	175
8.2.1	TA15 钛合金元件表面强化疲劳对比试验与分析 .....	175
8.2.2	TC6 钛合金零件表面强化疲劳试验对比 .....	181

8.2.3	TC18 钛合金耳片强化疲劳对比试验 .....	183
8.3	钛合金焊接件表面强化 .....	184
8.3.1	TA15 与 TC4 焊接件表面强化(处理) .....	184
8.3.2	TC6 焊接圆筒元件表面强化疲劳试验 .....	186
	参考文献 .....	187
<b>第 9 章</b>	<b>钛合金结构设计的工程应用 .....</b>	<b>188</b>
9.1	钛合金超塑成形/扩散连接口盖结构设计与应用 .....	188
9.1.1	钛合金超塑成形/扩散连接口盖的结构特点 .....	188
9.1.2	钛合金 SPF/DB 机身口盖结构设计与应用 .....	189
9.2	钛合金超塑成形/扩散连接机身壁板设计与应用 .....	194
9.2.1	钛合金超塑成形/扩散连接机身壁板的结构特点 .....	194
9.2.2	钛合金超塑成形/扩散连接机身壁板设计与应用 .....	195
9.3	钛合金超塑成形/扩散连接加强框设计与应用 .....	198
9.3.1	钛合金超塑成形/扩散连接加强框的结构特点 .....	198
9.3.2	TC4 钛合金超塑成形/扩散连接加强框设计与应用 .....	199
9.4	钛合金焊接加强框设计与应用 .....	202
9.4.1	钛合金焊接加强框的结构特点 .....	202
9.4.2	钛合金焊接加强框的设计 .....	202
9.5	钛合金焊接加筋壁板设计与应用 .....	211
9.5.1	钛合金焊接加筋壁板的结构特点 .....	211
9.5.2	钛合金焊接加筋壁板的结构设计 .....	212
	参考文献 .....	215

# 第 1 章 飞机钛合金结构应用概述

## 1.1 钛合金在飞机结构中日益广泛的应用

### 1.1.1 钛合金的主要特点

钛及其合金是 20 世纪 50 年代兴起并开始用于飞机结构的重要金属材料,同其它金属相比,钛合金具有较高的拉压比强度,结构效率高、重量轻,见表 1-1。

表 1-1 钛合金与其它结构材料性能对比

材 料	拉伸强度/MPa	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	比强度/MPa/(g/cm <sup>3</sup> )
TC4	895	4.44	202
TA15	930	4.45	209
TB5	1080	4.76	227
TC18	1080	4.62	234
TC21	1100	4.62	238
TB6	1105	4.62	239
TB8	1250	4.93	254
2B06	390	2.76	141
7B04	490	2.85	172
30CrMnSiA	1080	7.75	139
300M	1620	8.00	203

钛是天然的活性金属,与氧有很强的亲和力,容易形成一薄层氧化膜,由此获得优良的抗腐蚀性能。因此,钛合金在海水及大多数酸、碱、盐介质中均具有较优良的抗腐蚀性能。

钛合金热强度和耐热稳定性好,在 300℃ ~ 550℃ 下仍具有足够高的强度,适合制造高温承力结构。飞机结构的发动机舱与后机身结构多采用钛合金制造,或采用钛合金做隔热罩。

钛合金与先进复合材料结构的强度、刚度匹配性好,在电化学方面与先进复合材料之间具有较好的相容性,不会产生电偶腐蚀。钛合金与先进复合材料综合使用,能获得更好的减重效果,可以大大提高结构效率。

由于钛合金材料与工艺特点,工程设计人员可根据结构功能的需要,在很大的设计空间内来设计具体构件,具有很大的灵活性,使得钛合金结构具有更多的“设计自由度”,例如基于超塑成形/扩散连接的多层整体结构,基于激光快速成形的多种钛合金梯度复合整体结构和大型或超大型成形连接整体结构等。

但是,钛合金材料的成本高、加工困难,其工艺性远不如铝合金和钢,例如钛合金的经济切削速度仅 50m/min 左右,并且需要专用刀具,而铝合金材料则达到 1200m/min 以上。

钛合金成本高并难于加工的问题,促进了工艺技术的快速发展,如冷热成形技术、热模锻、等温锻、热等静压精密铸造、超塑成形/扩散连接、焊接技术、激光快速成形技术等。

近几十年来,降低钛合金结构的制造成本、扩大钛合金的应用范围、充分发挥钛合金的结构效率,是飞机结构应用钛合金的主要发展方向。

美国早期的 BLATS 计划研究表明,对于马赫数等于 2 的飞机,如果以最轻重量为设计目标,钛合金的用量应占 45%;如果以最低成本为设计目标,钛合金的用量应占 25%。由表 1-2 可见,国外第三代战斗机用钛主要强调的是成本,而第四代战斗机 F-22 则更强调飞机的性能,“买得起”的中型第四代战斗机 F-35 强调的也是成本。

表 1-2 国外军机结构材料对比(%)

机型	设计年代	钛合金	复合材料	铝合金	钢
F-14	1969	24.4	1	39.4	17.4
F-15	1972	26.1	1.6	34.4	3.3
F-15E	1984	32	2	49	8.5
F-16	1976	5.2	2.7	83.2	1.3
F/A-18	1978	13	10	49	15
F/A-18E/F	1992	21	19	31	14
F-117	1983	25	10	20	5
Su-27	1969	15	2	63	9
EF2000	1988	12.6	29.4	35.8	2.1
F-22(F/A-22)	1989	41(38.8)	25	11	5
F-35	1996	20	31	19	7

随着现代战斗机性能的提高,其造价呈明显上升趋势(表 1-3)。这是因为,一方面飞机的高性能发动机和先进的机载设备与武器系统成本很高;另一方面,飞机机体因轻质、长寿命要求而采用先进材料和工艺制造技术。按照传统估

算,飞机机体的成本约占全机的 1/3。其中,钛合金构件与复合材料构件的制造成本占了较大比例。

表 1-3 国外先进战斗机单机售价统计

飞机	国家	代别	型别	售价/万美元
F-15	美国	三	重型	6500
F-16C	美国	三	轻型	3000
Su-27	俄罗斯	三	重型	3500
Su-30	俄罗斯	三	重型	4500
Mig-29	俄罗斯	三	轻型	2000
F/A-18E/F	美国	三代半	中型	4000~5000
F-35	美国	四	中型(控制成本型)	6930(上涨中)
F-22	美国	四	重型	16700

钛合金综合性能优异,但其构件的制造成本较高,主要是因为钛合金材料成本和加工成本较高所致,表 1-4 为国内目前 TA15 钛合金材料的市场价格。

表 1-4 国内 TA15 钛合金各规格材料售价统计(2009 年价格)

种类	规格/mm	用途	价格/元/kg
板材	0.8 以下	蒙皮、钣金件	800
	1.0~3.5	蒙皮、钣金件	500~550
	5.0~60	蒙皮壁板、框、梁	470
棒材	Φ5.0 以下	机加件	380
	Φ60~150	锻件、机加件	350~380
锻件	各异	机加件,平均材料利用率 15%	倍数关系

因此,钛合金制造的高成本是导致飞机机体制造成本较高的主要因素之一。

### 1.1.2 钛合金在现代飞机结构中的应用

目前,钛合金已成为现代飞机主体结构的重要选用材料,其应用水平甚至成为衡量飞机结构选材先进程度的重要标志之一,是影响飞机战技性能的一个重要方面。钛合金对于减轻结构重量、提高结构效率、改善结构可靠性、提高机体寿命、满足高温和高载以及腐蚀环境要求等方面能发挥其它金属无法比拟的作用。

自 20 世纪 60 年代末以来,国外军机钛合金的用量逐年稳定增长。其中,某

些第三代战斗机钛合金用量达 20% ~ 25% , 而第四代战斗机 F - 22 已高达 41% (F/A - 22 为 38.8% )(表 1 - 2)。

钛合金材料在现代战斗机结构中的应用地位呈上升趋势,并以减轻重量、降低成本、提高结构效率和延长使用寿命为主要发展方向。

以 F - 22 为代表的第四代战斗机,具有超声速巡航、隐身、非常规机动等先进战技指标性能,这对机体结构的高可靠性、轻质(结构重量系数 0.28)、长寿命(30 年日历寿命、6000 飞行小时以上)、成本控制以及一定的功能(如隐身)等提出了很高的要求。为实现这一目标,除应采用先进的规范、设计与评定方法、先进的结构构型、制造技术外,还必须以先进的材料技术来保证,即“设计是主导,材料是基础,制造是保障”。钛合金结构设计时,必须同时考虑其材料规格和工艺约束,即应按照多约束的设计思想进行钛合金结构设计。

作为当代先进飞机结构首选的 3 大材料体系(复合材料、钛合金、铝合金或铝锂合金)之一,钛合金主要用于飞机机体主体框架、集中接头和机身主承力壁板等。

## 1.2 用于飞机制造的钛合金

### 1.2.1 钛合金的分类

钛合金按平衡状态下的组织结构可分为  $\alpha$  型钛合金、近  $\alpha$  型钛合金、( $\alpha + \beta$ )型钛合金、近  $\beta$  型钛合金和  $\beta$  型钛合金,见表 1 - 5;按制备工艺分类为变形钛合金、铸造钛合金和粉末冶金钛合金;按抗拉强度级别可分为低强度钛合金、中强度钛合金和高强度钛合金。退火状态抗拉强度极限小于 700MPa 的钛合金为低强度钛合金,700MPa ~ 1000MPa 的钛合金为中强度钛合金,超过 1000MPa 的合金为高强度钛合金。

表 1 - 5 工业纯钛与钛合金类型

序号	牌号	名义成分	合金类型	工作温度/°C	强度/MPa
1	TA0	Ti	工业纯钛	300	≥280
2	TA1	Ti	工业纯钛	300	≥370
3	TA2	Ti	工业纯钛	300	≥440
4	TA3	Ti	工业纯钛	300	≥540
5	ZTA1	Ti	工业纯钛	300	≥345
6	TA7	Ti - 5Al - 2.5Sn	$\alpha$	500	≥785



(续)

序号	牌号	名义成分	合金类型	工作温度/°C	强度/MPa
7	ZTA7	Ti - 5Al - 2.5Sn	$\alpha$	500	$\geq 760$
8	TA16	Ti - 2Al - 2.5Zr	$\alpha$	400	$\geq 470$
9	TA13	Ti - 2.5Cu	$\alpha$	350	$\geq 610$
10	TA21	Ti - 1Al - 1Mn	近 $\alpha$	300	$\geq 490$
11	TC1	Ti - 2Al - 1.5Mn	近 $\alpha$	350	$\geq 590$
12	TC2	Ti - 4Al - 1.5Mn	近 $\alpha$	350	$\geq 685$
13	TA11	Ti - 8Al - 1Mo - 1V	近 $\alpha$	500	$\geq 895$
14	TA15	Ti - 6.5Al - 2Zr - 1Mo - 1V	近 $\alpha$	450	$\geq 930$
15	TA18	Ti - 3Al - 2.5V	近 $\alpha$	320	$\geq 620$
16	TC3	Ti - 5Al - 4V	$\alpha + \beta$	400	$\geq 885$
17	TC4	Ti - 6Al - 4V	$\alpha + \beta$	400	$\geq 895$
18	TC6	Ti - 6Al - 2.5Mo - 1.5Cr - 0.5Fe - 0.3Si	$\alpha + \beta$	450	$\geq 980$
19	TC16	Ti - 3Al - 5Mo - 4.5V	$\alpha + \beta$	350	$\geq 1030$
20	TC18	Ti - 5Al - 5Mo - 5V - 1Cr - 1Fe	$\alpha + \beta$	400	$\geq 1080$
21	TC21	Ti - 6Al - 2Sn - 2Zr - 2.5Mo - 1.7Cr - 2.0Nb - 0.1Si	$\alpha + \beta$	400	$\geq 1100$
22	ZTC4	Ti - 6Al - 4V	$\alpha + \beta$	400	$\geq 835$
23	TB6	Ti - 10V - 2Fe - 3Al	近 $\beta$	320	$\geq 1105$
24	TB2	Ti - 5Mo - 5V - 8Cr - 3Al	$\beta$	300	$\geq 1100$
25	TB3	Ti - 10Mo - 8V - 1Fe - 3.5Al	$\beta$	300	$\geq 1100$
26	TB5	Ti - 15V - 3Cr - 3Sn - 3Al	$\beta$	290	$\geq 1080$
27	TB8	Ti - 15Mo - 2.7Nb - 3Al - 0.2Si	近 $\beta$	500	$\geq 1250$

### 1.2.2 $\alpha$ 型钛合金

退火组织为单一  $\alpha$  相固溶体的钛合金成为  $\alpha$  型钛合金, 广义的  $\alpha$  型钛合金包括近  $\alpha$  钛合金, 它是在平衡状态下只含有很少  $\beta$  相的钛合金。 $\alpha$  型钛合金有两种类型: 一种为工业纯钛, 另一种则含有可提高  $\beta$  转变温度的  $\alpha$  稳定元素和对  $\beta$  转变温度影响较小的中性影响元素, 不含或仅含少量的可降低  $\beta$  转变温度的  $\beta$  稳定元素。