

The book cover features a dark blue background with a large, stylized yellow gear on the left side. A smaller, white gear is positioned at the bottom right. In the upper right, a white comet streaks across the sky. A ringed planet, resembling Saturn, is depicted in the lower left. Several white stars of varying sizes are scattered throughout the design. The title '钛合金切削加工技术' is printed in a bold, black, sans-serif font across the center.

钛合金切削加工技术

张春江 主编

西北工业大学出版社

内 容 简 介

钛合金因其性能优越,是当前航空航天工业的重要材料,同时在其他许多工业部门也获得了日益广泛的应用。但因钛合金的切削加工性差,研究和解决钛合金的切削加工问题便具有十分重要的意义。

本书共分四章。第一章简要介绍了钛合金的性质、特点以及钛合金的特殊切削规律和切削加工性等。第二、三章着重叙述了钛合金各类切削和磨削的基本问题、技术诀窍,同时也适当地介绍了适宜使用的刀具磨具材料和切(磨)削液等。第四章是日益受到人们重视的表面完整性问题。除较系统地论述有关表面完整性的知识外,重点说明了钛合金零件切削加工表面完整性的控制与保证。

本书可作为飞行器制造、机械制造类专业工程技术人员及大专院校师生研究参考用书,也可作为熟练技工切削钛合金时的指导资料。

出 版 说 明

本书原组织编写时定名为《钛合金切削加工手册》,根据定稿内容,并征得作者同意,现改为《钛合金切削加工技术》,特此说明。

钛合金切削加工技术

主 编 张春江

责任编辑 郑文治

*

西北工业大学出版社出版

陕西省新华书店发行

西北工业大学印刷厂印刷

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 10.75 字数 246 千字
1986 年 5 月第一版 1986 年 5 月第一次印刷 印数 0001—3000 册
统一书号: 15493·022 定价: 1.95 元

前 言

钛在自然界分布很广，早在1790年就已经发现了钛。由于钛的熔点高(1668℃)并且化学性质非常活泼，钝钛较难制取；冶炼和钛锭的浇铸需要在真空中进行，制造工艺复杂。尽管钛及其合金具有特殊优越的性质，却长期不能作为结构材料用于工业生产。

随着科学技术的进步，钛工业从五十年代起才获得了迅速发展。目前钛及钛合金已成为航空航天工业中不可缺少的重要结构材料，同时也在兵器、船舶、化学、石油、冶金工业以及食品、医疗等部门得到了应用。在国外，金属钛主要用在航空航天工业方面，近十五年来发达国家中非航空航天方面的用钛量有明显增长，七十年代末达到了钛产量的(30~50)%。例如1966年美国就已将钛列为第九号主要工业金属。这九种金属的排列次序为：Fe、Al、Cu、Ni、Pb、Zn、Sn、Mg、Ti。

我国钛资源十分丰富，储量居世界前列。钛合金的应用在我国工业部门，特别是航空航天工业部门，已取得很大的进展，收到了良好的效果。可以预料，钛合金今后必将得到更为广泛的应用。但由于钛合金切(磨)削加工性差，切削加工困难。因此，为适应发展的需要，航空工业部有关工厂、研究所、高等院校在部科技局和三〇一所的组织领导下，近年来对钛合金的切削加工进行了一系列的试验研究工作；生产现场也积累了丰富的切削加工经验，从而形成了一整套比较完整的切削数据资料。本书就是在这个基础上并参考国外先进经验编著而成的，以期能在钛合金切削加工方面为工程技术人员、熟练技工提供有益的指导，帮助他们改进生产提高经济效益。

对钛合金切削时的一些规律或现象有所了解，才有可能较为合理地利用现有数据资料，进而充实和发展这些数据资料。为此，本书第一章首先对钛及钛合金作了简要介绍，着重论述了钛合金的切削机理以及钛合金的切(磨)削加工性。第二章和第三章分别提供了钛合金各种切削加工和磨削加工的一般原理、技术诀窍和数据资料。此外也还适当地介绍了加工钛合金用的刀具材料、砂轮材料和切(磨)削液等。鉴于表面完整性的重要性日益为人们所认识，为满足科研、生产对这方面的需要，第四章用较大的篇幅专门论述零件的切削加工表面完整性的问题，同时也提供了控制与保证钛合金切削加工表面完整性方面的资料。这一章中还增加了一些有关其他金属的材料的切削加工表面完整性的资料，以便读者对切削加工表面完整性有个系统完整的概念。

本书由刘肇发同志编写第一章，张春江同志编写第二章和第三章，何光皓同志编写第四章。华定安副教授、王尚志高级工程师分别参加了磨削和表面完整性部分的初稿编写工作。全书由张幼桢教授、王在文高级工程师担任主审，并经有关专家学者协助审查，最后由主编统一审订，对原稿作了较大的增删与修改。

在本书的编写过程中，还得到了有关方面的大力支持。新都机械厂、新艺机械厂、峨眉机械厂、黎明机械公司、松陵机械公司、西安飞机制造公司、黎阳机械公司、红湖机械厂、

西安航空发动机公司、航空工业部六二五所、航空工业部三〇三所、南京航空学院、北京航空学院以及西北工业大学等单位，或为本书进行过验证切削试验或提供数据资料，谨此向上述单位有关同志致以谢意。并向协助审稿以及对审稿工作给予支持的同志深表衷心感谢。

由于作者水平所限，书中可能有缺点和错误，诚恳地请读者批评指正。

编著者

1985 年 11 月

符 号 表

A	面积; 振幅	k	传热系数
a	加速度	l_c	被切削层长度
a_c	切削厚度	l_{ch}	切屑长度
a_{ch}	切屑厚度	l_m	切削路程长度
a_{cmax}	最大切削厚度	M	单位时间内工序总费用; 力矩; 切削扭矩
a_e	径向铣削深度; 径向磨削深度	m	质量
a_f	每齿进给量	NB	刀具径向磨损量
a_K	冲击值	NB_r	相对径向磨损
a_P	车削切削深度; 轴向铣削深度	NB_{rs}	相对表面径向磨损
a_w	切削宽度	n	旋转频率(转速)
b	宽度; 修磨后钻头横刃长度	P_B	电动机功率
$b_{\alpha 1}$	后刀面上刃带的宽度	P_m	切削功率
$b_{\gamma 1}$	倒棱; 第一前刀面的宽度	P_s	比切削能; 单位切削功率
C	工序生产成本; 热容; 切削力公式中的系数	p	单位切削力; 压力(压强)
c	比热容; 钻头原始横刃对中心之偏移量	Q	热量; 切削热
C_t	刀具成本	R_a	轮廓算术平均偏差
D	直径	R_z	显微不平度十点高度
d	孔径; 厚度; 相对密度	r	半径
E	弹性模量	r_c	切削比
F_n	法向力	r_n	刃口圆弧半径
F_t	切向力	r_e	刀尖圆弧半径
F_x	进给抗力; 轴向力	S	刀具螺旋槽导程
F_y	吃刀抗力; 径向力	s	距离
F_z	主切削力	T	刀具耐用度
f	每转进给量	T_c	经济耐用度
G	切变模量	T_P	最大生产率耐用度
HB	布氏硬度值	t	时间
HRA	洛氏A标度硬度值	t_{ct}	换刀时间
HRC	洛氏C标度硬度值	t_m	切削时间
HV	维氏显微硬度值	t_{ot}	辅助工时
h	高度	t_w	工序工时
KT	月牙洼深度	V	体积
		VB	后刀面磨损带中部平均宽度

	(磨损量)	γ_o	前角
VB_{max}	后刀面磨损带中部最大宽度	γ_{o1}	倒棱前角
	(磨损量)	γ_P	纵向前角
VB_r	后刀面相对磨损	δ	延伸率; 阻尼系数
VC	刀尖后刀面磨损带宽度	ε	相对滑移(相对剪切)
VN	边界磨损处后刀面磨损带宽度	ε_r	刀尖角
v	切削速度; 速度	ξ	变形系数(切屑收缩系数)
v_f	进给速度	η	效率
v_T	一定耐用度下的切削速度	η_m	机床效率
W	功(能)	θ	切削温度
Z_w	单位时间内的金属切除量	κ_r	主偏角
Z	刀具齿数	κ_r'	副偏角
Z_e	刀具同时工作齿数	λ	热导率(导热系数)
α	线[膨]胀系数; 导温系数; 切削力公式中的指数	λ_o	刀具螺旋升角
		λ_s	刃倾角
α_f	横向后角	μ	摩擦系数; 泊松比
α_n	法后角	ρ	密度
α_o	后角	σ_b	抗拉强度
α_{o1}	消振棱或刀带的后角	σ_{bb}	抗弯强度
α_P	纵向后角	σ_{bc}	抗压强度
β	螺旋角; 前刀面上的摩擦角	τ	剪切应力
β_o	楔角	τ_s	金属的屈服强度
γ	工件螺旋升角; 重度	ϕ	剪切角
γ_f	横向前角	ψ	晶粒伸长方向与剪切面之间的
γ_n	法前角		夹角

目 录

符号表

第一章 钛合金及其切削加工性	1
1.1 钛及工业钛合金	1
1.2 钛合金在航空工业中的应用	8
1.3 钛合金切削过程的特点	10
1.4 钛合金的切削加工性	20
1.5 钛合金的磨削加工性	25
第二章 切削加工	26
2.1 切削加工的共同问题	26
2.2 车 削	35
2.3 铣 削	43
2.4 钻 削	55
2.5 铰 削	63
2.6 攻 丝	68
2.7 车螺纹	75
2.8 拉 削	79
第三章 磨削加工	85
3.1 钛合金的磨削特点	85
3.2 砂轮的特性及其选择	89
3.3 磨削液	95
3.4 一般磨削	95
3.5 低应力磨削	100
3.6 缓进磨削	102
3.7 提高磨削效率的途径	103
3.8 磨削问题及其对策	104
第四章 切削加工零件的表面完整性	110
4.1 表面完整性的概念	110
4.2 表面完整性对零件使用性能的影响	121
4.3 表面完整性的检测	124

4.4	加工条件对表面完整性的影响	130
4.5	钛合金零件表面完整性的控制与保证	146
4.6	提高零件使用性能的处理方法	149
附 录		153
A-1	常用单位及换算	153
A-2	各国高速钢钢号近似对照表	155
A-3	硬质合金牌号标注方法的识别	155
A-4	焊接刀片型号的识别	156
A-5	几个国家硬质合金牌号近似对照表	156
A-6	ISO 切削加工用硬质合金成份及物理力学性能	157
参考文献		157

表 目 录

表1-1	钛及其他金属的物理性质	1
表1-2	工业纯钛的耐腐蚀性	2
表1-3	钛合金的按组织分类	4
表1-4	钛中常用合金元素的分类	4
表1-5	工业钛合金的化学成份	5
表1-6	工业钛合金的机械性能	6
表1-7	国产钛及钛合金材的品种规格	7
表1-8	钛及钛合金各国牌号对照表	7
表1-9	常用材料的比强度	8
表1-10	几种飞机的钛合金使用量	9
表1-11	钛及钛合金的主要用途	9
表1-12	几种金属的切屑变形系数	11
表1-13	难加工材料的切削加工性	23
表1-14	TC11 ($\alpha + \beta$ 型) 不同热处理时的切削加工性	24
表1-15	TB1 (β 型) 不同热处理时的切削加工性	25
表2-1	切削钛合金用的硬质合金成份及性能	27
表2-2	成份对硬质合金性能的影响	28
表2-3	钴含量对高速钢耐热性的影响	28
表2-4	几种高速钢的化学成份	29
表2-5	几种高速钢的机械性能	29
表2-6	合金元素对高速钢性能的影响	30
表2-7	切削液配方	31
表2-8	钛合金切削液的选用	33
表2-9	切削液流量	33
表2-10	废品起因和预防对策	34
表2-11	刀具材料的平均磨损率	37
表2-12	车刀用硬质合金牌号	37
表2-13	车刀几何角度推荐值	38
表2-14	切削力公式中的系数和指数	39
表2-15	平均单位车削功率 P	40
表2-16	钛合金车削用量	41
表2-17	不同钛合金的速度修正系数	41
表2-18	切削深度对速度影响的修正系数	42
表2-19	相对磨损最小的切削速度	42

表2-20	钛合金有氧化皮时的车削用量	43
表2-21	铣刀齿与工件接触分类	45
表2-22a	加工钛合金用铣刀的几何参数	48
表2-22b	后角与立铣刀直径的关系	49
表2-23	钛合金平均单位铣削功率 P	49
表2-24	钛合金的铣削用量	50
表2-25	钛合金立铣时的速度及进给量	51
表2-26	立铣加工精度问题及其对策	52
表2-27	立铣刀的损伤问题及其对策	54
表2-28	端铣刀的损伤及其对策	54
表2-29	钻头切削刃跳动量	57
表2-30	钻尖X形修磨几何参数名称及符号	58
表2-31	钛合金平均单位钻削功率	59
表2-32	钛合金钻削用量	61
表2-33a	不同类型钛合金钻削用量	61
表2-33b	进给量	61
表2-34	钻深孔时 v 、 f 的降低量	61
表2-35	钻孔精度和表面粗糙度问题	62
表2-36	钻头损伤的原因及对策	63
表2-37	高速钢铰刀齿数	64
表2-38	硬质合金铰刀齿数	65
表2-39	钛合金铰削余量	66
表2-40	高速钢铰刀铰削用量	66
表2-41	改善铰刀耐用度的对策	66
表2-42	铰孔常见的问题及对策	67
表2-43	丝锥的合理几何角度	68
表2-44	底孔钻头直径推荐值	72
表2-45	钛合金攻丝速度	72
表2-46	攻丝表面粗糙度问题及对策	73
表2-47	螺孔精度问题及其对策	73
表2-48	丝锥的损伤及其对策	74
表2-49	车螺纹时的走刀次数和吃刀量	77
表2-50	车外螺纹时的切削用量	78
表2-51	螺纹表面粗糙度问题及对策	78
表2-52	车螺纹时刀具损伤的原因及对策	79
表2-53	钛合金用拉刀的几何角度	80
表2-54	单位拉削宽度拉削力	80
表2-55	钛合金的拉削用量	81
表2-56	拉削表面粗糙度问题及对策	81

表2-57	拉削时的精度问题及对策	82
表2-58	拉刀的损伤及其对策	84
表3-1	磨料的物理机械性能	89
表3-2	磨具常用的结合剂	91
表3-3	砂轮硬度分类及代号	92
表3-4	砂轮的组织分类和组织号	93
表3-5	钛合金磨削时砂轮的选择	94
表3-6	砂轮的标记方法	94
表3-7	钛合金的一般磨削用量	98
表3-8	无心磨削用量	99
表3-9	钛合金(叶片)砂带磨削用量	99
表3-10	钛合金叶片手工打磨及抛光数据	99
表3-11	钛合金低应力磨削用量	100
表3-12	低应力磨削工艺参数准则	101
表3-13	低应力磨削的典型径向进给量	101
表3-14	磨削参数对残余应力及生产率的影响	102
表3-15	缓进磨削用量	103
表3-16	钛合金内、外圆磨削产生的问题及对策	104
表3-17	钛合金平面磨削产生的问题及其原因	108
表4-1	表面粗糙度常用参数的定义和符号	111
表4-2	加工纹理方向的符号及意义	112
表4-3	图纸上表示零件表面特征的符号	114
表4-4	表面粗糙度参数的标注	114
表4-5	光洁度等级与表面粗糙度 R_a 、 R_z 值对照表	115
表4-6	表层变化的主要类型	116
表4-7	切削加工产生的表层变化	117
表4-8	表层变化深度	117
表4-9	表层变化的术语及示意简图	118
表4-10	表面粗糙度与接触疲劳寿命的关系	123
表4-11	残余应力对 TC6 疲劳强度的影响	124
表4-12	金相试样的制备方法	125
表4-13	表面粗糙度的测量方法和仪器	125
表4-14	表层变化的检测方法	126
表4-15	车削条件对钛合金表层变化的影响	131
表4-16	钛合金 TC11 车削后的残余应力	131
表4-17	车削条件对钛合金疲劳性能的影响	132
表4-18	端铣条件对 TC4 表面完整性的影响	132
表4-19	周边铣削条件对钛合金疲劳强度的影响	133
表4-20	高速钢立铣刀周边铣削 TC4 的表面完整性	134

表4-21	硬质合金立铣刀周边铣削 TC4 的表面完整性	134
表4-22	不同拉削速度下拉削 TC9 的表层变化	135
表4-23	不同齿升量下拉削 TC9 的表层变化	135
表4-24	拉削条件对 TC9 疲劳性能的影响	135
表4-25	试验用钻头、铰刀的材料与几何参数	136
表4-26	钛合金钻削和铰削的表面完整性	136
表4-27	TA6 试件表面磨削条件	140
表4-28	磨削条件对 TA6 表层变化的影响	141
表4-29	平磨条件对 TC11 表面完整性的影响	143
表4-30	三种磨削条件	143
表4-31	磨削条件对钛合金疲劳性能的影响	143
表4-32	磨削条件对 TC4 表面完整性的影响	144
表4-33	加工方法对钛合金表面完整性的影响	145
表4-34	TC6 压气机叶片叶身工艺方案及表层状态、疲劳性能	145
表4-35	加工方案对 TC11 试件和压气机叶片表面完整性的影响	146
表4-36	容易引起钛合金零件产生应力腐蚀的介质	147
表4-37	喷丸强化对 TC6 疲劳强度的影响	149
表4-38	钛合金零件的退火处理方法	151

第一章 钛合金及其切削加工性

1.1 钛及工业钛合金

钛有两种同素异构体:

(1) α 钛 在 882.5℃ 以下为 α 钛, 具有密排六方晶格, 在 25℃ 时其晶格常数 $a = 2.9504 \text{ \AA}$; $c = 4.6833 \text{ \AA}$; $c/a = 1.587$ 。

(2) β 钛 在 882.5℃ 以上至熔点为 β 钛, 具有体心立方晶格, 900℃ 时其晶格常数 $a = 3.3065 \text{ \AA}$, 25℃ 时 $a = 3.282 \text{ \AA}$ (按外推法求得)。

1.1.1 钛的性质

(1) 钛的特性

- 1) 质轻而强度高。比重在铁与铝之间, 强度约为铁的二倍、铝的六倍。
- 2) 耐热性好。耐热性在轻金属中仅次于铍。
- 3) 耐腐蚀性优异。
- 4) 化学亲和力强。容易与氢、氧、氮化合, 其他金属同钛接触时形成合金的倾向也很大。

(2) 物理性质

金属钛的物理性质见表 1-1。为了进行比较, 表中同时列举了航空工业常用的其他几种金属的数据。

表 1-1 钛及其他金属的物理性质

性 质	Ti	Mg	Al	Fe	Cu
原子序	22	12	13	26	29
原子量	47.90	24.305	26.982	55.84	63.54
比重(相对密度)	4.507	1.738	2.6989	7.86	8.9
熔点 ℃	1668	650	660	1535	1083
沸点 ℃	3535	1090	2441	2870	2575
线胀系数 (cm/cm·K)	9.0×10^{-6}	25.7×10^{-6}	24×10^{-6}	11.9×10^{-6}	16.4×10^{-6}
导热系数 (W/m·K)	17.165	146.54	238.65	71.76	385.19
热容量 (J/kg·K)	527.54	1025.77	883.41	456.36	389.37
电阻率 ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	55.4	4.4	2.68	10	1.72
电导率 (与铜相比, %)	3.1	39.09	64.17	17.2	100
弹性模量 (GPa)	109.838	44.622	71.100	196.140	120.136
泊松比	0.34				

(3) 耐腐蚀性

金属钛的耐腐蚀性很好。工业纯钛的耐腐蚀性见表 1-2。

表 1-2 工业纯钛的耐腐蚀性

药 品 名 称	浓度,重量%	温度 ℃	耐蚀性	药 品 名 称	浓度,重量%	温度 ℃	耐蚀性
醋 酸	5, 25, 50, 75, 99.5	沸腾	A	盐酸、硝酸混合液	5:1	常温	B
无 水 醋 酸	99	常温	A		7:1	常温	A
硝 酸	10, 20, 30, 40, 60, 70	100	A, B		20:1	常温	A
	50	100	A	硫 酸	5	35	A
	65	沸腾	A		10	35	B
发烟硝酸 (红色)	—	常温	A		20~50	35	C
发烟硝酸 (白色)	98	常温	A		60~70	35	B
	95	70	A		70以上	35	C
盐 酸	1	70	A	硫酸、硝酸混合液	10:90	35	A
	1	沸腾	C		30:70	35	A
	3, 5	常温	A		50:50	35	A
	3, 5	70	B		60:40	35	A
	3, 5	沸腾	C		70:30	35	B
	10	常温	B		80:20	35	B
	10	70	C		90:10	35	B
	20, 37	常温	C		99:1	35	B
盐酸 (200 mg Cu ⁺⁺ /l)	37	常温	A	磷 酸	5, 10, 20, 30	35	A
盐酸、硝酸混合液	1:3	常温	A		35~85	35	B
	2:1	常温	A		5~35	60	B
	3:1	常温	A		5	100	B
	4:1	常温	A		10	80	C
草 酸 (与空气接触)	0.5, 5, 30	35	A	三氯化醋酸	100	100	C
	0.5, 1, 5, 10, 25	60	C	硫 (熔化状)	100	240	A
氢 氟 酸	1	常温	C	(水中悬浮)	—	常温	A
(无 水)	100	常温	C	二氧化硫 (饱和)	—	常温	A
双 氧 水	3, 6, 30	常温	A		—	70	A
硫化氢水 (饱和)	—	70	A	氨(无水, 1.4MPa)	100	40	A
氯 水 (饱和)	—	常温	A	氢 氧 化 钾	10	沸腾	A
氯 气 (干燥)	—	30	C	氢 氧 化 钠	40	沸腾	A
氯气(湿润, H ₂ O>0.1%)	—	75	A	氢 氧 化 铵	28	常温	A
酒 石 酸	10, 25, 50	100	A	氯 化 铝	5, 10	100	A
乳 酸 (与空气接触)	10, 25, 50, 85	100	A		25	60	A
(与空气隔绝)	10, 25, 50, 85, 100	沸腾	A		25	100	C
铬 酸	10	沸腾	A	氯 化 铵	1, 10, 饱和	100	A
	36.5	90	A	氯 化 钡	5, 20	100	A
柠檬酸 (与空气接触)	10, 25, 50	100	A	次 氯 酸 钙	2, 6	100	A
(与空气隔绝)	50	沸腾	B	氯 化 铜	1, 20	100	A
蚁 酸 (与空气接触)	10	沸腾	A	氯 化 铁	1~30	100	A
(与空气隔绝)	25, 50, 90	沸腾	C	氯化铁+10%食盐	10	100	A
					5	100	A

(续表 1-2)

药品名称	浓度, 重量 %	温度 ℃	耐蚀性	药品名称	浓度, 重量 %	温度 ℃	耐蚀性
鞣酸	25	100	A	氯化镁	5, 20, 42	沸腾	A
硬脂酸	100	180	A	氯化钙	5, 10, 25, 28	100	A
一氯化醋酸	30	80	A	二氯化锰	5, 20	100	A
二氯化醋酸	100	沸腾	A	氯化汞	1, 5, 10, 饱和	100	A
氯化镍	5, 10	100	A	四氯化碳	—	沸腾	A
氯化钠	20, 饱和液	沸腾	A	盐酸苯胺	5, 20	100	A
氯化锡	5, 24	100	A	甲醛	37	沸腾	A
硫化钠	10	沸腾	A	氯仿水	—	沸腾	A
次氯酸钠 (5.6% Cl ₂)	—	常温	A	菠萝汁	—	常温	A
氯化锌	5, 10, 20	沸腾	A	—	—	沸腾	A
二氯乙烯	100	沸腾	A	洋葱汁	—	常温	A
三氯乙烯 稳定	同水的混合物	沸腾	A	—	—	沸腾	A
三氯乙烯 不稳定	同水的混合物	沸腾	A	葡萄汁	—	常温	A
四氯乙烯	同水的混合物	沸腾	A	—	—	沸腾	A
四氯乙烷	—	沸腾	A	红茶	—	沸腾	A

注: 1. 未特别指明的情况, 均与空气不接触。

2. 耐蚀性 A 0.13 mm/年以下之腐蚀, 耐腐蚀性很好。

B 0.13~1.3 mm/年之腐蚀, 可用作耐腐蚀材料。

C 1.3 mm/年以上之腐蚀, 不可用作耐腐蚀材料。

1.1.2 工业钛合金

(1) 工业钛合金的分类

钛中加入合金元素能提高其性能, 可得到不同类型的钛合金, 以满足航空、航天等工业对材料日益增长的要求。常用的合金元素有铝、锡、锆、钒、钼、锰、铁、铬、铜、硅等。几乎所有的钛合金中都含有 8% 以下的铝。

1) 按组织分类

按退火(空冷)后的组织特点, 钛合金可分为 α (包括工业纯钛)、 $(\alpha + \beta)$ 和 β 三类, 见表 1-3。这三类钛合金在示意相图上的位置见图 1-1。

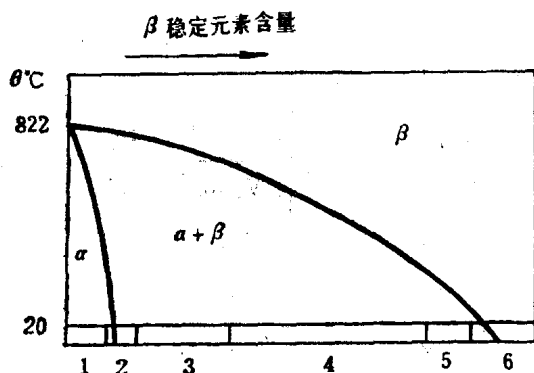


图 1-1 β 稳定元素含量与合金组织的关系

1— α 型合金, 不含 β 稳定元素, 一般不能热处理强化, 如 TA 6、TA 7 等。

2—近 α 型合金, 为 α 相加少量 β 相。 β 稳定元素 $< 2\%$, 不能热处理强化, 淬火后为马氏体, 如 TC 1、TC 2 等。

3— $(\alpha + \beta)$ 型合金, 含 β 稳定元素 (2~4)%, 淬火后硬化, 如 TC 5、TC 6、TC 8 等。

4— $(\alpha + \beta)$ 型合金, 含 β 稳定元素 (4~8)%, 淬火后硬度不高, 时效后硬化, 如 TC 4 等。

5— β 型合金, 含 β 稳定元素 (13~20)%, 一般 $< 30\%$, 淬火后硬度不高, 时效后硬化, 如 TB 1、TB 2 等。

6— β 型合金, 含 β 稳定元素 $> 30\%$, 不能热处理强化。如 4201 合金含钼 33.0%。

2) 按性能特征分类

a. 低强度高塑性钛合金。抗拉强度小于686MPa, 塑性良好, 焊接性也好。如TA 2、TA 3、TC 1等。

b. 中强度钛合金。抗拉强度为736~981MPa, 塑性较好。如TA 6、TA 7、TC 2、TC 3等。

c. 高强度钛合金。抗拉强度为1030~1373MPa。如TC 4、TC 8、TC 9、TC 11、TB 1等。

d. 耐热钛合金。工作温度可达400~500℃, 热强性靠合金化和恰当的加工及热处理来保证。如TC 6、TC 8、TC 9和TC 11等。

表 1-3 钛合金的按组织分类

类 别	退火(空冷)组织	主要合金元素	主 要 特 点
工业纯钛	α 相组织	—	抗拉强度接近高强度铝合金水平(539 MPa), 塑性良好, 容易焊接, 抗蚀性很好。
α 型	以 α 钛为基体的单相固溶体	α 稳定元素 Al, 中性元素 Sn、Zr, 不含或含少量的 β 稳定元素	高温性能好, 组织稳定, 焊接性好, 抗蚀性好。强度不高, 不能热处理强化(Ti-2Cu 除外), 变形抗力大, 热加工性差。
($\alpha + \beta$) 型	α 相为主, 一般 β 相少于30%	(2~6)%的 β 稳定元素(一般小于10%)	综合机械性能较好, 强度比 α 型钛合金高, 可热处理强化, 热压力加工性好, 中温下耐热性也好, 但组织不够稳定, 焊接性不好。
β 型	β 相组织	>17%的 β 稳定元素	淬火时效后可得到很高的室温强度, 高温组织不稳定, 耐热性差, 焊接性不好。

注: 钛中常用合金元素见表 1-4。

表 1-4 钛中常用合金元素的分类

类 别		作 用 特 点		元 素
		对 β 相变点的影响	其 他	
中性元素		小	与 α 和 β 钛无限互溶(Sn 除外)	Zr、Hf、(Sn)
β 稳定元素	同晶型	降低	与 β 钛无限互溶, 无共析、包析反应	V、Mo、Nb、Ta、Re
		降低	与 β 钛无限互溶, 有共析或单析反应	Cr、W
	慢共析	降低	与 β 钛有限溶解, 共析反应慢	Mn、Fe、Co、Ni
	快共析	升高	与 β 钛有限溶解, 共析反应快	Cu、Si、H
α 稳定元素		升高	与 β 钛有限溶解, 有包析反应	Al、Ga、Ge、Ca、O、N、C

表 1-5 工业钛合金的化学成份

合金 牌号		主 要 成 份 %										杂 质 % (不大于)							
Ti		Al	Cr	Mo	Sn	Mn	V	Fe	Cu	Si	Zr	B	Fe	Si	C	N	H	O	
TA0	基													0.030	0.030	0.030	0.010	0.0150	0.05
TA1	基													0.150	0.100	0.050	0.030	0.0150	0.10
TA2	基													0.300	0.150	0.100	0.050	0.0150	0.15
TA3	基													0.300	0.150	0.100	0.050	0.0150	0.15
TA4	基	2.0~3.3												0.300	0.050	0.100	0.050	0.0150	0.15
TA5	基	3.3~4.3										0.005		0.300	0.150	0.100	0.040	0.0150	0.15
TA6	基	4.0~5.5												0.300	0.150	0.100	0.050	0.0150	0.15
TA7	基	4.0~5.5			2.0~3.0									0.300	0.150	0.100	0.050	0.0150	0.20
TA8	基	4.5~5.5			2.0~3.0				2.5~3.2		1.0~1.5			0.300	0.150	0.100	0.050	0.0150	0.15
TB1	基	3.0~4.0	1.00~11.57	0~8.0										0.300	0.150	0.100	0.040	0.0150	0.15
TB2	基	2.5~3.5	7.5~8.5	4.7~5.7			4.7~5.7							0.300	0.050	0.050	0.040	0.0150	0.15
TC1	基	1.0~2.5				0.8~2.0								0.400	0.150	0.100	0.050	0.0150	0.15
TC2	基	2.0~3.5				0.8~2.0								0.400	0.150	0.100	0.050	0.0150	0.15
TC3	基	4.5~6.0					3.5~4.5							0.300	0.150	0.100	0.050	0.0150	0.15
TC4	基	5.5~6.8					3.5~4.5							0.300	0.100	0.100	0.050	0.0150	0.15
TC5	基	4.0~6.2	2.0~3.0											0.500	0.400	0.100	0.050	0.0150	0.20
TC6	基	4.5~6.3	1.0~2.5	1.0~2.5				0.5~1.5						0.400	0.100	0.050	0.0150	0.20	
TC7	基	5.0~6.5	0.4~0.9					0.25~0.60				0.01							
TC8	基	5.8~6.8		2.8~3.8										0.40					
TC9	基	5.8~6.8		2.8~3.8	1.8~2.8									0.40					
TC10	基	5.5~6.5			1.5~2.5		5.5~6.5	0.35~1.0	0.35~1.0					0.150	0.100	0.040	0.0150	0.20	
TC11	基	5.8~6.8		2.8~3.8						0.20~0.4	2		0.40						