



航空用钛合金

王金友 葛志明 周彦邦 编著

上海科学技术出版社

616655

V257/02

航空用钛合金

王金友 葛志明 周彦邦 编著

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书共分五章,根据钛合金比强度高和耐腐蚀性好的特点,全面论述了航空用钛合金的分类、成分、组织与性能。内容包括:钛的一般特性,二元和三元相图;结构和热强钛合金的化学成分和机械物理性能;钛合金的相变、热处理,组织与性能的关系;钛合金的铸造性能及钛铸件的制造工艺与设备。本书还结合钛合金在航空工业中的应用,介绍了各种航空用钛合金的特点、应用部位及在使用条件下可能出现的问题。

本书主要供航空工业和科研设计部门从事材料应用、热处理和铸造工作的工程技术人员参考,也可供高等院校有关专业师生参考。

航空用钛合金

王金友 葛志明 周彦邦 编著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 10.875 字数 285,000

1985 年 7 月第 1 版 1985 年 7 月第 1 次印刷

印数: 1-1,700

统一书号: 15119·2391 定价: 2.65 元

前 言

钛是五十年代兴起的一种重要结构金属，同其它结构金属相比，它具有两个显著的优点：比强度高和耐腐蚀性能好。这使钛不仅能在极其恶劣的大气条件下使用，而且能耐强化学试剂的腐蚀。钛的其它一些性能，如韧性好、无磁性、熔点高、热膨胀系数低及耐生物侵蚀等，在某些用途方面也有一定意义。钛及大多数钛合金的密度约为 4.5 克/厘米^3 ，介于铝和钢之间。经过现代热处理，钛合金的强度极限可达到 150 公斤/毫米^2 以上，比强度约为 33。对于钢来说，要达到这样高的比强度，则需要具有 $255 \sim 265 \text{ 公斤/毫米}^2$ 的强度极限，然而，制造和在结构中使用这样的钢，工艺上是十分困难的；即使钢的强度还能提高，锈蚀也是一个很大的缺点，严重地影响其应用。高强度不锈钢可以进行复杂的热处理，但在许多情况下仍会产生锈蚀。铝合金密度虽低，但比强度不如钛合金，而且温度越高，钛合金比铝合金的优越性越显著。例如，在 $300 \sim 350^\circ\text{C}$ ，钛合金的强度比铝、镁合金大约高一个等级；而在 $400 \sim 500^\circ\text{C}$ ，铝、镁合金由于强度和硬度急剧下降而完全丧失工作能力，钛合金却能继续保持足够的使用强度。

由于钛合金具有上述优点，故适合于飞机和发动机设计的需要。航空工业是研制和应用钛及钛合金最早的部门，近年来，由于航空工业对高强度低密度材料的需要日益迫切，大大促进了钛制造业的迅速发展。五十年代初，美国成功地在飞机上使用了钛，虽然当时每架飞机只用了百分之一结构重量的钛，可是却开拓了钛在航空工业中应用的广阔道路。现在，世界上多种高速飞机都广泛地采用钛合金作为结构材料。用钛来制造各种飞机零件，小至螺钉、螺母等连接件，大至机身骨架、隔框等结构件，甚至能制造出六米多长、重达两吨的起落架主支撑梁。

图 0-1 是一种现代飞机的分解图, 凡是标有数字的都是采用钛合金的部位。此外, 还有许多在本图中无法显示的部位也采用了钛合金, 如机翼滑轨、机身隔框以及发动机支架等, 可见钛在飞机结构中的应用已经相当广泛。

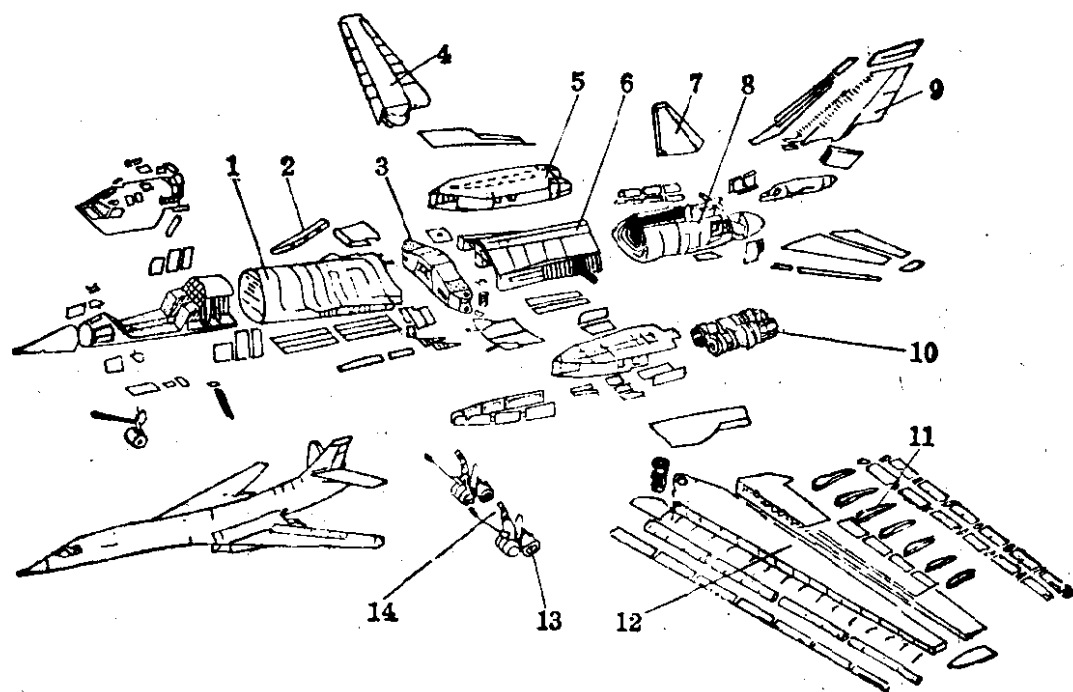


图 0-1 钛在飞机上的应用

- 1—机身蒙皮; 2—支承件; 3—中央翼盒; 4—机翼蒙皮; 5—发动机舱;
6—机身骨架; 7—尾翼蒙皮; 8—机尾罩; 9—垂尾构件; 10—发动机;
11—机翼肋条; 12—机翼梁; 13—机轮; 14—起落架构件

对于高速战斗机, 由于高速和高机动性, 要求飞机结构尽可能轻, 同时还要有耐高温的能力, 实践证明, 钛合金是最适宜的材料。例如, 飞机蒙皮材料, 传统上都是用铝合金, 但当马赫数 M 超过 2.5 时, 飞机表面温度普遍高于 200°C , 铝蒙皮已不适用, 需用钛合金取代。为了减轻飞机重量, 原用钢制的零、部件, 凡可用钛合金者均可改用钛合金。美国在一九七〇年研制的 F-14 高速战斗机, 马赫数 M 为 2.3, 机身上的中央翼盒原用钢制, 其重量为 1100 公斤, 改用钛合金后重量只有 600 多公斤, 减轻了百分之四十。可见, 在飞机结构上应用钛合金能够收到大幅度地减轻飞机重量的效果, 而减轻重量又可以提高飞机飞行性能。据统计, 如果结构重量减少 15%, 则飞机的起飞滑跑距离可以缩短 15%, 航程可增加

20%，有效载重量可提高30%。因此，高速飞机上的机身隔框、发动机舱、起落架枢轴和某些受力件等零部件都已改用钛合金。美国的YF-12A战斗机是目前世界上应用钛合金数量最多的机种，全机结构有93%是用钛合金制作的，因而有“全钛飞机”之称。

在大型运输机上应用钛合金的数量也在不断增长。早在五十年代初期，大型运输机DC-7上，靠近发动机部位的防火壁板采用了钛合金，虽然只用了230公斤钛合金，却减轻了90多公斤重量，收到了很好的经济效益。

钛合金在直升飞机上也占有重要位置，例如，英法两国研究制造的“山猫”直升飞机，其旋翼桨毂、支承架、减速器都选用了钛合金。仅就旋翼桨毂来说，若用钢材制造，重量为1020公斤；而以钛代之，则只有640公斤，减轻了380公斤。此外，钛合金桨毂还能抵抗各种介质的腐蚀，提高使用寿命。

钛合金作为航空材料大量应用的时间还不长，使用的范围也还有局限性，但随着飞机性能的不断提高与钛合金零件加工工艺的不断改进，可以预见钛合金在航空材料中将占据更重要的位置。

近年来，国际上对航空发动机的研究和设计取得了巨大的成绩，进展迅速，原因是多方面的，但在选材上大量采用了钛合金，是重要原因之一。

喷气发动机问世之后，推力不断提高，压气机增压比加大，压气机的许多零部件，如压气机盘、压气机叶片受力和受热程度大大增加，工作条件越来越苛刻。在这种情况下，原用的铝合金已不能继续使用，若改用钢材又太重，因此，选用钛合金是理所当然的，它既能代替铝合金在较高温度下工作；又在比重上小于钢，可以减少结构重量。目前，在航空发动机中用钛制作的零部件有压气机盘和叶片、机匣、隔板、发动机罩、油路导管、排气导管、热空气导管等。喷气发动机用钛情况如图0-2所示。

表0-1列出了美国通用电气公司研制的发动机选材变化统计。早期的发动机以钢和镍基合金为主，由于发动机性能提高，在高温工作的钢制部件逐渐改用镍基合金；而在大应力和较高温度

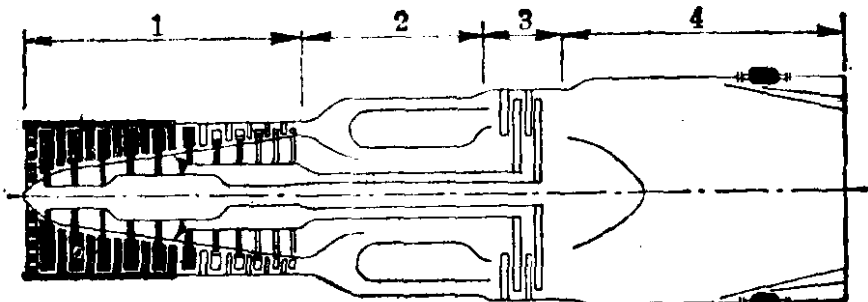


图 0-2 喷气发动机用钛示意图
(黑色区代表钛合金)

1—压气机；2—燃烧室；3—涡轮；4—尾喷管

下工作的铝、镁合金零件，则改为钛合金。以后为了提高发动机的推重比，把部分钢制零件也改用了钛合金。

表 0-1 发动机选材变化情况

发 动 机 型 号	设计年代	装配飞机	选 材 比 例 (%)				
			复合材料	铝、镁	钛	钢	镍基合金
J47	1945	F-86, B-47	0	22	0	70	8
J79	1955	F-104, F-4	0	3	2	85	10
J93	1960	XB-70	0	1	7	24	68
GE4	1965	SST	0	1	12	15	72
TF36	1965	C5A	2	1	32	18	47
CF6	1968	DC-10	4	2	27	21	46
F101	1970	B-1	3	4	20	15	58
×××	1975	××	10	3	17	15	55
×××	1980	××	15	0	15	15	55

现在，先进的复合材料已开始用于航空工业，展望未来，钛合金向上发展的趋势可能会被复合材料部分地代替，但从国外报道来看，在一九八〇年以后较长一段时期内，发动机用材中钛合金仍不会低于 10~15%。

目前，钛合金的使用温度只能达到 500℃ 左右，在发动机上应用的部位还局限于压气机部分，而涡轮部分还不能应用钛合金。压气机的转子零件由钛合金取代钢之后，可以显著降低其工作时的离心力，从而提高发动机运转的可靠性。此外，发动机重量减轻

还有很重要的经济意义,可以提高飞机的有效载荷。例如,英国生产的“奥林帕斯 593”发动机,由于选用钛合金代替部分钢制零件,每台发动机可以减轻 450 公斤,原设计的“协和号”超音速客机,需要安装四台这种发动机,于是可以赢得 1800 公斤的载重量,从而使飞机的有效载重提高了 14%。

综上所述可见,钛合金在现代飞机和发动机上的应用,已经成为航空工业发展水平的重要标志之一。

钛及其合金还在宇航工业、化学工业、石油工业、造船工业、电镀、纺织、造纸以及医学外科手术等方面使用,且使用量也在日益增长。

钛及其合金并不是十全十美的材料,它也有缺点和不足之处,例如,机械加工困难,成本比较高,阻碍了其推广应用。为了解决这一问题,许多国家正在着重研究和发展新的、经济的成型方法,如等温锻造、超塑性成型、扩散连接、精密铸造等等,且已取得了富有成效的进展。

我国的钛资源很丰富,对大量使用钛及钛合金,促进航空工业的发展有着良好的基础。

我们编著本书的目的,在于向广大飞机和发动机设计者,生产、科研和教学等方面的工作者介绍航空用钛及其合金的种类、性能、相变和热处理、组织与性能的关系,以及各种钛合金在航空上的用途等等,以期对航空工业的发展有所裨益。全书共分五章,即:概论;变形钛合金;钛合金的相变和热处理;钛合金的组织与性能的关系;铸造钛合金。

参加编著工作的还有袁文钊、朱之桀等同志,关景茹同志为本书绘制了插图。

由于水平所限,错误之处,请读者批评指正。

编者

于北京航空材料研究所

一九八四年

目 录

前 言

第一章 概论	1
第一节 钛的一般性能	1
一、物理性能	1
1. 原子构造	1
2. 晶体结构	1
3. 电性能	1
4. 热性能	3
5. 密度	3
6. 熔点与沸点	3
二、机械性能	3
1. 碘化法钛的机械性能	4
2. 氧、氮、碳对钛的机械性能的影响	4
3. 氢对钛的机械性能的影响	6
4. 其它合金元素对钛的机械性能的影响	6
三、化学特性	10
四、腐蚀性能	10
第二节 钛与诸元素相互作用的一般规律	11
一、钛与周期表中诸元素相互作用的特点和分组	11
二、钛与诸元素相互作用的周期规律	12
第三节 钛的二元系相图	15
一、钛的二元系相图的分类	15
二、 α 和 β 都是连续固溶体的系	16
三、 β_1 是连续固溶体, α 为有限固溶体的系	17
四、在固态发生包析反应和形成一种或几种化合物的系	20
五、固态起共析反应和形成某些化合物的系	28
第四节 钛的三元及多元系相图	38
一、Ti-Al-Fe 系	38

2 目 录

二、Ti-Al-Mo 系	39
三、Ti-Al-Nb 系	39
四、Ti-Al-Si 系	40
五、Ti-Al-V 系	40
六、Ti-Al-Zr 系	41
七、Ti-Cr-Zr 系	42
八、Ti-Mo-Nb 系	43
九、Ti-Mo-Ta 系	43
十、Ti-Mo-V 系	43
十一、Ti-Mo-W 系	43
十二、Ti-Nb-V 系	44
十三、Ti-Nb-W 系	44
十四、Ti-Nb-Zr 系	45
十五、Ti-Sn-V 系	46
十六、Ti-Al-Mo-V 系	47
十七、Ti-Al-Mo-Zr 系	47
十八、Ti-Cr-Mo-V 系	48
十九、Ti-Cr-Nb-Ta 系	48
二十、Ti-Mo-Nb-V 系	49
参考文献	50
第二章 变形钛合金	52
第一节 合金元素分类	52
一、 α 稳定元素对性能的影响	53
二、 β 稳定元素对性能的影响	59
第二节 钛合金分类	63
一、按照亚稳定状态相组成进行合金分类	64
二、各类钛合金的性能特点	70
第三节 结构钛合金	78
一、高塑性低强度钛合金	80
1. 工业纯钛	80
2. Ti-2Al-1.5 Mn 钛合金	85
3. 其它高塑性低强度钛合金	88
二、中等强度钛合金	91
1. Ti-6Al-4V 钛合金	91

2. Ti-5Al-2.5Sn 钛合金	100
三、高强度钛合金	103
1. 热处理强化马氏体 $\alpha+\beta$ 型钛合金	104
2. 近亚稳定 β 型钛合金	106
3. 亚稳定 β 型钛合金	108
第四节 热强钛合金	110
一、马氏体 $\alpha+\beta$ 型热强钛合金	113
二、近 α 型热强钛合金	120
参考文献	131
第三章 钛合金的相变和热处理	133
第一节 钛合金中的相变	133
一、钛及钛合金的同素异晶转变	133
二、淬火过程中的相变	137
1. 马氏体转变	137
2. 淬火 ω 相的形成	143
三、亚稳定 β 相的分解	145
1. 等温 ω 相的形成	145
2. β 相的分离	148
3. α 相的形成	150
四、马氏体相的分解	153
1. 六方马氏体的分解	153
2. 斜方马氏体的分解	155
五、共析分解	157
六、 α 相的分解	160
第二节 钛合金的退火	162
一、普通退火	163
二、其它方式退火	169
三、真空除氢退火	175
第三节 钛合金的强化热处理	179
第四节 钛合金的热机械处理	190
参考文献	196
第四章 钛合金的组织与性能的关系	199
第一节 钛合金的组织特征和形成规律	199

第二节 显微组织与性能的关系	208
一、显微组织类型对机械性能的影响	208
二、 β 晶粒尺寸对机械性能的影响	216
三、初生 α 相含量对机械性能的影响	221
四、钛合金半成品中常见的组织缺陷	223
1. 难熔金属夹杂	223
2. 间隙元素偏析	224
3. 化学成分偏析	225
4. 反常的 α 相形态	227
第三节 钛合金的热稳定性	231
一、合金成分的影响	233
二、第二相的析出	239
三、热强钛合金的表面稳定性	244
第四节 钛合金使用中遇到的问题	249
一、疲劳断裂	249
二、微振磨损	253
三、穿透性氧化	254
四、热盐应力腐蚀	255
五、摩擦着火	259
参考文献	259
第五章 铸造钛合金	262
第一节 钛合金的熔炼浇铸	262
一、真空自耗电弧凝壳熔炼浇铸法	263
二、电子束凝壳熔炼浇铸法	268
三、真空非自耗电弧凝壳熔炼浇铸法	272
四、其它熔炼浇铸法	274
1. 真空感应熔炼浇铸法	274
2. 等离子弧熔炼浇铸法	275
3. 等离子电子束熔炼浇铸法	276
4. 增量熔炼浇铸法	276
第二节 钛合金铸造用造型材料与造型工艺	277
一、造型材料的选择	277
二、硬模铸造系统	281
三、石墨捣实型系统	282

四、熔模精密铸造型壳系统·····	285
1. 石墨熔模铸型·····	286
2. 难熔金属粉面层熔模铸型·····	289
3. 氧化物陶瓷型·····	290
4. 热解碳复层的陶瓷铸型·····	290
第三节 铸造钛合金的金相组织、热处理和机械性能·····	291
一、铸造钛合金·····	291
二、钛合金的结晶学·····	298
三、铸造钛合金的金相热处理·····	302
1. α 型钛合金·····	302
2. $\alpha+\beta$ 型钛合金·····	304
3. β 型钛合金·····	306
四、铸造钛合金的机械性能·····	309
第四节 钛和钛合金的铸造性能及铸件设计·····	319
一、铸造性能·····	319
1. 流动性·····	319
2. 收缩与缩孔·····	321
3. 形成气体缺陷的倾向性·····	322
4. 抗裂性·····	324
二、铸件设计·····	325
1. 铸型的选择与设计·····	325
2. 浇铸方式与浇冒口的选择·····	327
参考文献·····	333

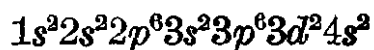
第一章 概 论

第一节 钛的一般性能

一、物理性能

1. 原子构造

钛在元素周期表中位于第四族第四长周期中, 原子序数为 22. 钛原子的 22 个外层电子在各电子层上的分布为:



其特点是 d 电子层不充满, 属于过渡金属.

钛的原子量是 47.90, 它的主要同位素的原子量有 46、47、48、49、50, 各同位素在自然界中的相对含量如下:

原子量	46	47	48	49	50
在自然界中同位素					
的相对含量, %	7.95	7.75	73.45	5.51	5.34

2. 晶体结构

钛具有两种同素异晶体, 分别以 α 和 β 来表示. 钛的同素异晶转变温度为 882.5°C , 其低温晶体 α 为密排六方点阵, 在 882.5°C 以上稳定的 β 晶体为体心立方点阵.

α -Ti 的点阵常数在 25°C 为: $a = 2.9503 \pm 0.0004 \text{ \AA}$, $c = 4.6831 \pm 0.0004 \text{ \AA}$, $c/a = 1.5873 \pm 0.0004$. β -Ti (含 0.3% C) 的点阵常数在 900°C 时为 $3.3065 \pm 0.0001 \text{ \AA}$, 用外推法获得纯 β -Ti 在 25°C 时的点阵常数为 $3.282 \text{ \AA}$.

随着温度的降低, α -Ti 形成时与母体 β -Ti 的晶体位向关系符合图 1-1 所示的柏格斯 (Burgers) 关系, 即 $(0001)_\alpha // (110)_\beta$; $[11\bar{2}0]_\alpha // [111]_\beta$.

3. 电性能

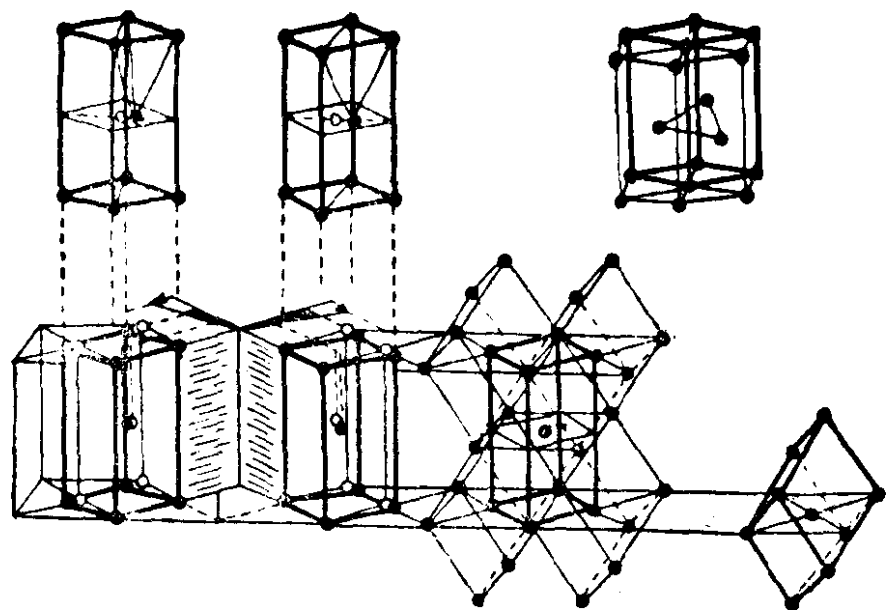


图 1-1 表示钛从 β 到 α 转变时晶体位向关系的柏格斯(Burgers)图

(1) 电阻 钛的过渡金属的原子构造决定了它具有高电阻。由于氧、氮、碳、铁等杂质对钛的电阻影响很大,所以钛的电阻测定结果比较分散,但一些可靠的资料认为,纯度最高的碘化法钛的比电阻 ρ 是 45 ± 3 微欧姆·厘米 (0.55 ± 0.05 欧姆·毫米²/米)。工业纯钛的电阻随温度的变化关系示于图 1-2, 20°C 时的 $d\rho/dT$ 等于 0.183, 电阻温度系数为 $0.0035(1/^\circ\text{C})$ 。如图所示,在 300°C 以下,电阻与温度呈直线关系变化;高于 300°C , 随温度的升高电阻的增长率有所降低,而且温度愈高降低的程度愈大;当发生 $\alpha \rightarrow \beta$ 转变

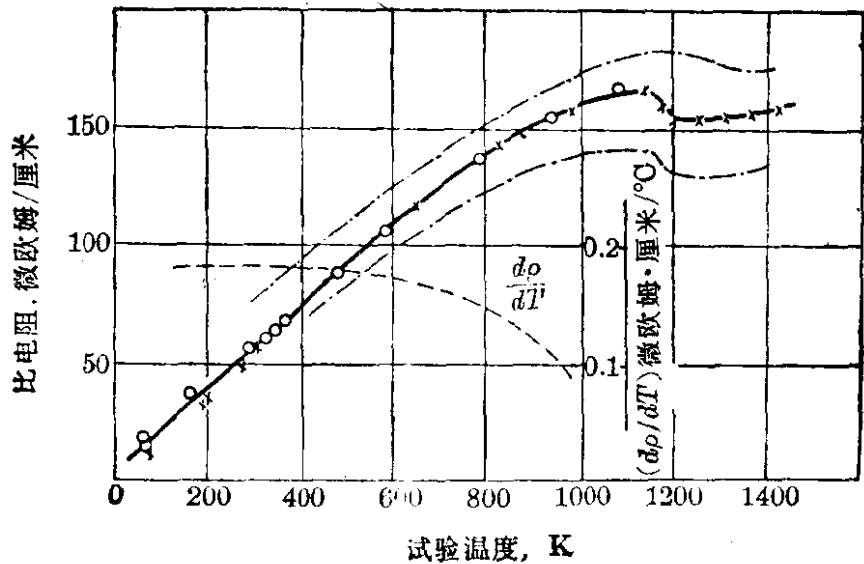


图 1-2 工业纯钛的电阻随温度的变化关系(点划线表示分散带)

时,电阻急剧下降.在 $890\sim 900^{\circ}\text{C}$ 时, $\beta\text{-Ti}$ 的比电阻平均为 160 ± 20 微欧姆·厘米.在 $890\sim 1150^{\circ}\text{C}$, $\beta\text{-Ti}$ 电阻变化的温度梯度 $d\rho/dT=0.017$.

(2) 超导性 许多研究表明,当温度接近绝对零度时,钛具有超导性.由于钛出现超导性的临界温度受冷作硬化和微量杂质的影响很大,所以纯钛超导特性数据的分散性也较大.

4. 热性能

(1) 线膨胀系数 工业纯钛在不同温度范围内的平均线膨胀系数如下:

温度范围, $^{\circ}\text{C}$	20~100	20~200	20~300	20~400
$\alpha \cdot 10^{-6}, 1/^{\circ}\text{C}$	8.30	8.80	9.20	9.50
	20~500	20~600	20~700	20~800
	9.75	9.90	9.95	10.05

其室温的平均线膨胀系数可取 $\alpha_t = (8.15 \pm 0.15) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

(2) 比热与导热系数 钛在 25°C 的比热为 0.126 卡/克· $^{\circ}\text{C}$, 原子比热为 6.05 卡/克原子.与其它金属相比,钛的导热系数较低, 20°C 时为 0.036 卡/厘米·秒· $^{\circ}\text{C}$.

5. 密度

用各种方法测得的钛的密度为 4.50 克/厘米³.用碘化法提取的高纯钛的密度为 4.507 克/厘米³; 镁还原钛的密度为 $4.52\sim 4.54$ 克/厘米³. $\beta\text{-Ti}$ 的密度在 885°C 为 4.31 克/厘米³, $\beta\text{-Ti}$ 在 20°C 的计算密度是 4.471 克/厘米³.

6. 熔点与沸点

钛的熔点是 $1660 \pm 10^{\circ}\text{C}$. 在常压下钛的沸点为 3260°C .

二、机械性能

钛中的杂质含量对钛的机械性能影响很大,杂质含量增多可提高钛的强度而降低其塑性.

碘化法钛的纯度最高(在 99.9% 以上),其性能是稳定的.工业上镁还原法获得的工业纯钛的杂质含量一般为 $0.5\sim 1.5\%$,但

随着提炼方法的改进,其性能将逐步接近于碘化法钛,所以工业纯钛的性能将随着工业技术的进步而变化。

1. 碘化法钛的机械性能

碘化法钛的机械性能如下:

σ_b , 公斤力/毫米 ²	30~25
$\sigma_{0.2}$, 公斤力/毫米 ²	19~14
δ , %	50~70
ψ , %	76~88
H_v , 公斤/毫米 ²	89~105
冲击功 A , 公斤·米	13.8(<160°C)
E , $\times 10^3$ 公斤/毫米 ²	10.8(25°C) 7.0(550°C)

碘化法钛的塑性很好,在室温下可变形 90% 而无需中间退火。如果用碘化法钛加工的缺口试样进行冲击弯曲试验,则不论是在室温还是在 -196°C ,试样都不发生脆断,只被打弯。

碘化法钛的硬度和强度随温度升高而降低,而塑性(δ 和 ψ)则提高。在 -196°C 时,其 $\sigma_b=63$ 公斤力/毫米², $H_v=200$ 公斤/毫米²;室温时, $\sigma_b=25$ 公斤力/毫米², $H_v=132$ 公斤/毫米²;当温度升高到 1000°C 时,它的 $\sigma_b=0.4$ 公斤力/毫米², $H_v=8$ 公斤/毫米²。

2. 氧、氮、碳对钛的机械性能的影响

氧、氮、碳是钛中经常存在的杂质。它们能提高钛的强度而降低其塑性,如图 1-3, 1-4, 1-5 所示。其中,氮的影响最大、碳最小而氧居中。钛中氧的含量每提高 0.1% 就使其强度约升高 15 公斤力/毫米²,并使塑性下降;如果钛合金中存在 0.3~0.4% N,它就会变脆(图 1-4);碳只在其固溶度的范围内才明显提高钛的强度,当它以 TiO 的形式存在时对钛的强度影响就很小了(图 1-5)。

表 1-1 列出了氮、氧、碳对碘化法钛机械性能影响的试验结果。从该表可以看出,氮的强化作用最大,例如,当含 0.23% N 时,碘化法钛的拉伸强度从 29.1 公斤力/毫米² 提高到 92 公斤力/毫米²;含 0.46% O 时提高到 70 公斤力/毫米²;含 0.8% O 时只提高