

稀有金属材料
加工手册

XIYOUJINSHU

CAILIAO

JIAGONG

SHOUCE

冶金工业出版社

冶金工业出版社
PDG

TG146.4

12

2

稀有金属材料加工手册

《稀有金属材料加工手册》编写组 编

b079/27

冶金工业出版社



B 074863



稀有金属材料加工手册

《稀有金属材料加工手册》编写组 编

冶金工业出版社出版
(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行
冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张 55 1/2插页1 字数1334千字

1984年3月第一版 1984年3月第一次印刷

印数00,001~2,300册

统一书号: 15062·3953 定价6.70元



前 言

在毛主席的无产阶级革命路线指引下，特别是无产阶级文化大革命以来，我国冶金战线上的广大工人、干部和科技人员，遵照毛主席“**独立自主、自力更生**”的教导，为发展我国难熔金属及钛合金的生产、科研和应用作出了一定的贡献，相应地这些材料的测试技术也取得了较大的进展。为了认真总结测试技术经验，广泛地进行技术交流，在冶金部的关怀下，在各有关单位的大力协助下，于1975年10月在宝鸡召开了难熔金属及钛合金性能测试第一次学术交流会议。会上就力学、物性、金相和X光等测试工作共提出了报告50多篇。会议责成冶金部金属研究所、冶金部有色金属研究院、冶金部钢铁研究院，上海有色金属研究所、宝鸡有色金属研究所五单位组成文集编辑小组，负责将会上推荐的26篇文章汇编成本文集。由于我们水平有限，缺点错误难免，希读者批评指正。

文集编辑组



出版说明

根据我国社会主义建设的需要，为满足有色金属材料加工领域广大技术人员、工人、干部的迫切要求，我们组织有关单位，在系统总结建国三十多年来有色金属材料及其加工技术经验的基础上编写了一套《有色金属材料加工手册》，陆续出版。

这套书共分四种，即《重有色金属材料加工手册》、《轻金属材料加工手册》、《贵金属材料加工手册》和《稀有金属材料加工手册》。洛阳铜加工厂、东北轻合金加工厂、冶金工业部贵金属研究所和宝鸡有色金属加工厂分别为上述四种《手册》编写组的组长单位。各《手册》均是在组长单位党委领导下，由参加编写单位和执笔的同志，依据总的编写原则，结合各专业具体情况共同负责编写的。

本书为《稀有金属材料加工手册》，内容分二篇，第一篇：稀有金属及其合金，分成四章。第一章，钛及钛合金；第二章，锆、铪及其合金；第三章，钨、钼及其合金；第四章，铌、钽及其合金。第二篇：稀有金属材料加工，分成八章。第一章，粉末冶金锭坯制备；第二章，铸锭生产；第三章，自由锻造；第四章，丝、棒材生产；第五章，管、棒材生产；第六章，轧制棒材和型材；第七章，板、带、箔材生产；第八章，辅助工序。此外，书末还附有一些常用数据资料。

本《手册》是一部稀有金属材料及其加工技术的综合性工具书。主要供从事稀有金属材料加工生产部门的技术人员、工人和干部使用，亦可供科研、设计、教学和使用部门的有关人员参考。

本书编写工作的主要负责人有：李青云、王道隆、刘雅庭。参加编写的单位和执笔人有：宝鸡有色金属加工厂(研究所)江河、胡钰、刘振球、刘祖荫、刘天文、王春兴、刘洪义、沈玉蓉、尹朝忠、任文魁、冯王氏、韩世荣、郑黑汉、黄国伟、魏寿庸、胡清熊、杨素丽、杨昭苏、曹规循、杜国仁；中南矿冶学院左铁庸、金展鹏；北京有色金属研究总院肖今声；沈阳有色金属加工厂杨文甲；上海钢铁研究所方平伟、朱荣乐；上海有色金属研究所杨永健；抚顺钢厂栗喜君；洛阳有色冶金设计研究院郑金科；上钢三厂王玉含；本溪合金厂殷德征。

本书在编写过程中，得到了全国各有关单位和同志的大力支持和协助，特此致谢。

由于我们组织编写这类书籍的经验不足，水平有限，书中错误之处在所难免，请广大读者批评指正。

一九八二年

目 录

第一篇 稀有金属及其合金

第一章 钛及钛合金	1	第二节 元素在锆中的作用	99
第一节 概述	1	一、锆合金系平衡相图	99
第二节 合金元素在钛及钛合金中的作用	4	二、元素在锆中的作用	111
一、钛及钛合金中的合金元素及杂质元素	4	第三节 锆及其合金的热处理	113
二、 α 稳定元素在钛及钛合金中的作用	4	一、锆及其合金的热处理	113
三、 β 稳定元素在钛及钛合金中的作用	8	二、锆及其合金的金相组织	119
四、中性元素在钛及钛合金中的作用	19	第四节 锆及其合金的腐蚀和辐照	121
五、间隙元素在钛及钛合金中的作用	22	一、锆及其合金与气体的反应	121
第三节 钛及钛合金的热处理	28	二、锆及其合金在水和蒸汽中的腐蚀	127
一、钛及钛合金热处理时的组织变化	28	三、锆及其合金在液态金属中的腐蚀	135
二、钛及钛合金的热处理基本工艺	35	四、锆在酸、碱和其他介质中的腐蚀	136
三、钛及钛合金的热处理设备及其注意事项	44	五、锆及其合金的氢化物	136
第四节 钛及钛合金性能	49	六、锆及其合金的辐照性能	142
一、工业纯钛	49	第五节 锆及其合金的性能	151
二、TA4	54	一、纯锆	151
三、TA5	54	二、锆-锡系合金	155
四、TA6	56	三、锆-铌系合金	158
五、TA7	58	第六节 铪	161
六、TA8	61	一、概述	161
七、TB1	63	二、铪合金系	162
八、TB2	65	三、铪的物理性能	163
九、TC1	68	四、铪的机械性能	164
十、TC2	69	五、铪的腐蚀性能	165
十一、TC3	72	六、铪的辐照性能	167
十二、TC4	74	第三章 钨、钼及其合金	168
十三、TC5	79	第一节 概述	168
十四、TC6	80	第二节 钼及其合金	169
十五、TC7	82	一、钼的性能	169
十六、TC8	83	二、钼的合金化原理	172
十七、TC9	85	三、钼合金相图	176
十八、TC10	87	四、钼及其合金的热处理	183
第五节 钛及钛合金的焊接	90	五、钼及其合金的成分和性能	186
一、钛及钛合金的焊接性能	90	第三节 钨及其合金	193
二、焊接方法及设备	91	一、钨的性能	193
三、钨极惰性气体保护焊工艺	91	二、钨的合金化原理	198
第二章 锆、铪及其合金	97	三、钨合金相图	203
第一节 概述	97	四、钨及其合金的热处理	210
一、锆、铪的基本性质和特点	97	五、钨及其合金的成分和性能	210
二、锆、铪的发展概况	98	第四章 铌、钽及其合金	218
三、锆、铪的应用	98	第一节 概述	218

新 知 识
PDG

第二节 元素在铈、钽中的作用	220	三、钽及其合金的热处理	255
一、间隙元素在铈、钽中的作用	220	第四节 铈、钽合金的成分和性能	257
二、稀土元素在铈、钽中的作用	229	一、强化机理	259
三、卤族元素在铈、钽中的作用	231	二、抗拉性能	262
四、二元相图	232	三、物理性能	267
第三节 铈、钽及其合金的热处理	251	四、抗氧化性能	269
一、铈及其合金的热处理	251	五、几种铈、钽合金的工程性能	270
二、铈基合金中强化相 (M _c) 的演变	253		
第二篇 稀有金属材料加工			
第一章 粉末冶金铈坯制备	287	三、基本工艺及参数	391
第一节 概述	287	四、熔炼工艺参数实例	398
第二节 加工用粉末冶金铈坯	288	五、自耗熔炼铸锭质量	403
第三节 粉末的制取	291	第六节 电子束熔炼	407
一、铈坯对粉末的一般要求	291	一、电子束熔炼原理	407
二、还原法制粉	291	二、电子束熔炼炉	411
三、制粉的主要设备	304	三、基本工艺及参数	419
第四节 粉末性能及其检验方法	307	四、熔炼工艺参数实例	423
一、粉末的物理性能及其检验方法	307	五、电子束熔炼铸锭质量	423
二、粉末的工艺性能	309	第七节 铸锭处理及检验	424
第五节 粉末成型	310	一、铸锭处理	424
一、成型过程中的一般规律	310	二、铸锭检验	425
二、成型方法及工艺	311	第八节 铸锭生产中的安全问题	426
三、影响型坯质量的主要因素	314	一、真空自耗电弧熔炼的安全问题	426
四、钢模冷压成型时压坯易出现的缺陷	316	二、钛、锆、铪铸锭生产中的安全与防火	427
五、成型设备	317	第九节 残料的回收和利用	427
第六节 烧结	318	一、概述	427
一、预烧结	318	二、钛材残料的回收	428
二、烧结	320	三、锆及锆合金残料回收	433
第二章 铸锭生产	334	四、铪残料回收	441
第一节 概述	334	五、钽残料回收	442
一、稀有金属铸锭生产的特点及方法	334	六、钽、铈材残料回收	444
二、稀有金属真空熔炼的热力学	338	第三章 自由锻造	447
三、稀有金属真空熔炼的动力学	342	第一节 自由锻造的基本方法	447
第二节 主要产品及其生产工艺流程	347	一、锻粗	447
一、铸锭品种	347	二、拔长	450
二、生产工艺流程	348	三、冲孔与扩孔	454
第三节 原料准备	354	四、切割	455
一、原料选择	354	第二节 锻制产品	456
二、原料处理	363	一、钛及钛合金的锻制产品	456
第四节 电极(料棒)的制备	364	二、钨、钼及其合金的锻制产品	461
一、配料	364	三、钽、铈及其合金的锻制产品	461
二、电极(料棒)的制备	368	四、锆、铪及其合金的锻制产品	461
第五节 真空自耗电弧熔炼	376	第三节 锻造设备与工具	461
一、真空电弧熔炼原理	376	一、设备的选择	461
二、真空自耗电弧熔炼炉	381	二、锻造的主要工具	467



第四节 锻造工艺.....	470	一、产品品种及规格.....	559
一、钛及钛合金锻造工艺.....	470	二、技术条件规定的产品机械性能.....	562
二、钨、钼及其合金的锻造.....	484	第二节 管、棒材生产方法.....	563
三、钽、铌及其合金的锻造.....	487	一、管材生产方法.....	563
四、锆、铪及其合金的锻造.....	488	二、棒材生产方法.....	563
第五节 锻件的检查和主要缺陷及 消除方法.....	488	三、管、棒材生产工艺流程表.....	565
一、锻件的检查.....	488	第三节 挤压.....	565
二、锻件的主要缺陷及消除方法.....	489	一、概述.....	565
第四章 丝、棒材生产.....	490	二、设备.....	570
第一节 丝、棒材产品.....	490	三、挤压力和穿孔力.....	572
一、钨及钨合金丝、棒材产品.....	490	四、挤压坯锭.....	607
二、钼及钼合金丝、棒材产品.....	493	五、挤压坯锭的加热及工模具的预热.....	610
三、钽、铌及其合金丝、棒材产品.....	494	六、主要挤压工艺参数的选择.....	615
四、钛及钛合金丝、棒材产品.....	495	七、润滑剂.....	623
五、锆、铪及其合金丝、棒材产品.....	496	八、常见的挤压制品缺陷及消除办法.....	631
第二节 旋锻.....	497	第四节 斜轧穿孔.....	631
一、旋锻的基本原理.....	497	一、斜轧穿孔方法.....	631
二、旋锻坯料准备.....	498	二、斜轧穿孔设备的技术特性.....	631
三、旋锻工艺流程.....	498	三、斜轧穿孔工艺.....	632
四、旋锻坯料加热.....	499	第五节 管材的旋压.....	634
五、旋锻加工率的选择.....	500	一、旋压方法.....	634
六、旋锻棒料退火.....	501	二、旋压设备.....	634
七、旋锻棒材生产工艺实例.....	501	三、用板片旋压管材(锥形件旋压)的工艺.....	637
八、旋锻制品的常见缺陷,产生原因及防止措施.....	503	四、管形件旋压工艺.....	639
九、旋锻模具的选择.....	503	五、常见的旋压管材缺陷及其消除办法.....	643
十、旋锻设备.....	504	第六节 管材轧制.....	646
第三节 拉伸.....	505	一、管材轧制方法.....	646
一、拉伸的基本原理.....	505	二、冷轧管机.....	647
二、拉伸坯料的来源.....	519	三、轧制力.....	647
三、拉伸工艺流程图.....	520	四、管坯的选择及其质量要求.....	656
四、拉伸坯料加热.....	520	五、冷轧工艺参数的选择.....	656
五、拉伸润滑.....	522	六、冷轧管材的工艺润滑与冷却.....	665
六、拉伸道次加工率的分配.....	525	七、管材的温轧.....	666
七、拉伸丝材的退火.....	525	八、常见的冷轧管材的缺陷及消除办法.....	668
八、拉伸棒材的矫直.....	530	第七节 管、棒材的拉伸.....	670
九、拉伸丝材的复绕.....	530	一、拉伸方法.....	670
十、拉伸丝材的表面清洗.....	531	二、拉伸设备.....	671
十一、丝材生产工艺实例.....	531	三、拉伸力.....	672
十二、丝材的缺陷、产生原因及防止措施.....	539	四、拉伸工艺.....	674
十三、丝材生产的主要设备及其性能.....	540	五、拉伸润滑方法.....	679
第四节 旋锻模和拉伸模.....	541	六、常见的拉伸制品的缺陷及消除办法.....	681
一、旋锻模.....	541	第八节 焊接管.....	681
二、拉伸模.....	547	一、板(带)的弯型.....	681
第五章 管、棒材生产.....	559	二、管缝的焊接.....	682
第一节 产品.....	559	三、焊接钛管的冷加工.....	684
		第九节 工具.....	685

一、挤压工具	685	三、轧辊预热	796
二、冷轧工具	704	四、辊型	796
三、拉伸工具	730	五、热轧板材常见缺陷及消除方法	797
四、旋压工具	735	第五节 温 轧	798
第十节 管、棒材的热处理	739	一、温轧特点	798
一、方法及其应用	739	二、温轧工艺参数的选择	798
二、钛及钛合金的热处理制度	739	三、换向轧制	800
三、钨、钼及其合金的退火制度	739	四、辊型	802
四、钽、铌及其合金的退火制度	740	五、润滑	802
五、锆、钎及其合金的热处理制度	740	六、温轧板材常见缺陷和消除方法	803
第六章 轧制棒材和型材	741	第六节 冷 轧	803
第一节 产品及其技术条件	741	一、冷轧的特点	803
一、钛及钛合金轧棒及其技术条件	741	二、冷轧工艺参数的选择	803
二、钛合金型材及其技术条件	741	三、辊型	808
三、钨、钼轧棒	742	四、润滑与冷却	811
第二节 轧制时的特点	742	五、冷轧板、带、箔材的缺陷及消除方法	813
一、不均匀变形	742	第七节 热 处 理	815
二、轧制中的展宽	743	第八节 加热设备与轧机	817
第三节 轧制时的变形计算	744	一、加热炉	817
一、压下量	744	二、轧机	818
二、延伸系数和压下系数	745	三、轧辊	819
第四节 孔型系的选择和轧制设备	746	第九节 轧制力	826
一、孔型的一般概念	746	一、轧制力的计算	826
二、轧制钛及钛合金棒材的孔型系	747	二、轧制力的实测	837
三、轧制钛合金角材的孔型系	752	第八章 辅助工序	840
四、轧制钨、钼棒材的孔型系	760	第一节 概 述	840
五、轧制设备	761	第二节 机械加工	841
第五节 轧制时力、能的计算	761	一、稀有金属切削加工的特点	841
一、金属对轧辊压力的计算	761	二、切削加工的一般原则	841
二、道次电机功率的确定	762	三、车削	842
第六节 轧制工艺	764	四、铣削与刨削	845
一、坯料准备	764	五、钻孔	846
二、轧制时的加热制度和终轧温度	764	六、切断	848
三、轧制速度	765	七、喷砂(喷丸)	849
四、道次平均延伸系数和压下系数的确定	765	八、磨削	850
五、轧制工艺对组织和性能的影响	766	第三节 化学和电化学加工	852
第七章 板、带、箔材生产	770	一、碱洗	852
第一节 板、带、箔材产品的品种及规格	771	二、酸洗	855
第二节 板、带、箔材生产工艺流程和工 艺卡片	771	三、电解加工	857
第三节 板坯准备	785	四、除油清洗	859
一、板坯选择	785	五、阳极氧化	860
二、现用板坯概况	786	第四节 矫 直	862
第四节 热 轧	787	一、压力矫直	862
一、热轧特点	787	二、辊式矫直	862
二、热轧工艺参数的确定	788	三、张力矫直	865
		四、丝材矫直	865

附 录

附录 1	稀有金属及合金中常见金属间化合物和碳化物一览表·····	867
附录 2	稀有金属及合金常用抛光液·····	869
附录 3	稀有金属及合金电解抛光工作参数·····	869
附录 4	稀有金属及合金化学抛光工作参数·····	871
附录 5	稀有金属及合金常用化学腐蚀剂·····	871
附录 6	稀有金属及合金常用电解腐蚀液及工作参数·····	874
附录 7	硬度换算表·····	874
附录 8	化学元素周期表·····	876



第一篇 稀有金属及其合金

第一章 钛及钛合金

第一节 概 述

钛在化学元素周期表中属IVB族元素,其原子序数为22。它在地壳中的含量为0.61%,在所有元素中,名列第九,但在常用金属元素中仅次于铝、铁、镁,居第四位。钛在地壳中大都以金红石(TiO_2)和钛铁矿等形式存在。由于分离提取困难,具有工业意义的金属钛直到本世纪四十年代才生产出来。因而一般把钛称为稀有轻金属。

钛的主要物理性能列于表1-1-1。

表 1-1-1 钛的主要物理性能

原子量		47.90
克原子体积	厘米 ³ /克原子	10.7
熔 点	℃	1668 ± 4
熔化潜热	千卡/克分子	5
沸 点	℃	3535
气化潜热	千卡/克分子	112.5 ± (0.3%)
同素异构转变温度	℃	882
低温相 α (Ti)		
晶格类型		密集六方
晶格参数	埃(20℃)	a = 2.9503 c = 4.6831 C/A = 1.5873
密 度	克/厘米 ³ (20℃)	4.505
高温相 β (Ti)		
晶格类型		体心立方
晶格参数	埃(20℃) 埃(900 ± 5℃)	a = 3.283 a = 3.3132
密 度	克/厘米 ³ (20℃)	4.32
转变时的体积变化	%	5.5
转变时焓的变化	卡/℃	0.587
转变潜热	千卡/克分子	678 ± (10%)
导热系数	卡/厘米·秒·℃	0.036
热膨胀系数	$\times 10^{-6}/\text{℃}$ (0~100℃)	8.2
电阻系数	$\times 10^{-6}$ 欧姆·厘米(0℃)	47.8
电阻温度系数	$\times 10^{-3}/\text{℃}$ (0℃)	3.97
磁化率	$\times 10^{-6}$ 厘米 ³ /克(18℃)	+ 3.2
弹性模量	公斤/毫米 ²	10850

钛及钛合金的密度小, 抗拉强度高(可达140公斤/毫米²)。在-253~600°C范围内, 它的比强度(抗拉强度/密度)在金属材料中几乎最高(见图1-1-1及图1-1-2)。它在适当的氧化性环境中可形成一种薄而坚固的氧化物膜, 具有优异的耐腐蚀性能。此外, 它还具有非磁性、线膨胀系数小等特点。这就使钛及其合金首先成为重要的宇航结构材料, 随后又推广应用到舰船制造、化学工业等领域, 并得到迅速的发展。钛及钛合金的应用情况列于表1-1-2。应该指出, 在使用中, 当钛及钛合金与液氧接触时, 会因受到冲击载荷而发生燃烧, 曾在高速度穿孔(或从爆炸源来的)激震波影响下, 观察到有猛烈的爆炸反应, 应予注意。

钛合金按退火后的组织和特点分成三大类(见表1-1-3)。

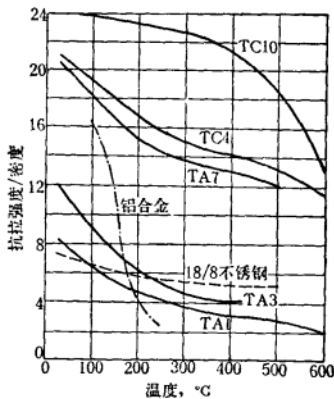


图 1-1-1 几种工业用合金的高温比强度

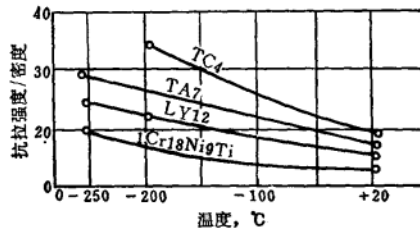


图 1-1-2 几种工业用合金的低温比强度

表 1-1-2 钛及钛合金的应用情况

应用领域	材料的使用特性	应用部位	
飞机制造业	喷气发动机	在500°C以下, 具有高的屈服强度/密度比和疲劳强度/密度比, 良好的热稳定性, 优异的抗大气腐蚀性能, 可减轻重量	在500°C以下的部位使用: 压气盘, 静叶片, 动叶片, 机壳, 燃烧室外壳, 排气机构外壳, 中心体, 喷气管等
	机身	在300°C以下, 比强度高	防火壁, 蒙皮, 大梁, 起落架, 翼肋, 隔框, 紧固件, 导管, 舱门, 拉杆等
火箭、导弹及宇宙飞船工业	在常温及超低温下, 比强度高, 并具有足够的韧性及塑性	高压容器, 燃料贮箱, 火箭发动机及导弹壳体, 飞船船舵蒙皮及结构骨架, 主起落架, 登月舱等	
舰船制造业	比强度高, 在海水及海洋气氛下具有优异的耐腐蚀性能	耐压艇体, 结构件, 浮力系统球体, 水上船舶的艇体, 管道和甲板配件, 快艇推进器, 推进轴, 水翼艇水翼, 鞭状天线等	
化学工业	在氧化性和中性介质中具有良好的耐腐蚀性, 在还原性介质中也可通过合金化改善其耐腐蚀性	在石油化工、纤维、纸浆、化肥、酸碱、钠、碱、氯气、电化学及海水淡化等工业中, 作热交换器、反应塔、蒸馏器、洗涤塔、合成器、高压釜、阀门、导管、泵、管道、电解电极、电解槽, 阳极框、喷头头	

续表 1-1-2

应用 领域		材料的使用特性	应 用 部 位
其它工业	常规武器制造	耐蚀性好, 密度小	火炮尾架, 迫击炮底板, 火箭炮炮管及药室, 喷管, 火炮套筒, 坦克车轮, 履带, 扭力棒, 战车驱动轴, 装甲板等
	冶金工业	有高的化学活性和良好的耐蚀性	在镍、钴、钛等有色金属冶炼中做耐蚀材料, 在钢铁冶炼中是良好的脱氧剂及合金元素
	医疗卫生	对人体体液有极好的耐蚀性, 没有毒性, 与肌肉组织亲合性能良好	做医疗器械和外科矫形材料, 钛制牙、心脏内瓣、隔膜, 骨关节及固定螺钉、钛骨头等
	超高真空	有高的化学活性, 能吸附氧、氮、氢、CO、CO ₂ 、甲烷等气体	钛离子泵

表 1-1-3 钛及钛合金的分类及特点

分 类	成 分 特 点	显 微 组 织 特 点	性 能 特 点	典型合金	
α 型钛合金	全 α 合金	含有6%以下的铝和少量的中性元素	退火后, 除杂质元素造成的少量 β 相外, 几乎全部是 α 相	密度小, 热强性好, 焊接性能好, 低间隙元素含量及有好的超低温韧性	TA1~TA7
	近 α 合金	除铝和中性元素外, 还有少量(不超过4%)的 β 稳定元素	退火后, 除大量 α 相外, 还有少量的(10%体积左右) β 相	可热处理强化, 有很好的热强性和热稳定性, 焊接性能良好	—
	α +化合物合金	在全 α 合金基础上添加少量活性共析元素	退火后, 除大量 α 相外, 还有少量的 β 相及金属间化合物	有沉淀硬化效应, 提高了室温及高温抗拉强度和蠕变强度, 焊接性良好	TA8及Ti-2.5Cu
α + β 型钛合金	含有一定量的铝(6%以下)和不同量的 β 稳定元素及中性元素	退火后, 有不同比例的 α 相及 β 相	可热处理强化, 强度及淬透性随 β 稳定元素含量的增加而提高, 可焊性较好, 一般冷成型及冷加工能力差, TC4合金在低间隙元素含量时具有良好的超低温韧性	TC1~TC10	
β 型钛合金	热稳定 β 合金	含有大量 β 稳定元素, 有时还有少量其它元素	退火后, 全部为 β 相	室温强度较低, 冷成型和冷加工能力强, 在还原性介质中耐蚀性较好, 热稳定性、可焊性好	Ti-32Mo
	亚稳定 β 合金	含有临界浓度以上的 β 稳定元素, 少量的铝(一般不大于3%)和中性元素	从 β 相区固溶处理(水淬或空冷)后, 几乎全部为亚稳定 β 相。在提高温度时效后的组织为 α 相, β 相, 有时还有少量化合物相	固溶处理后, 室温强度低, 冷成型和冷加工能力强, 可焊性好。经时效后, 室温强度高。在高屈服强度下具有高的断裂韧性, 在350℃以上热稳定性差。此类合金淬透性好	TB1、TB2
	近 β 合金	含有临界浓度左右的 β 稳定元素, 和一定量的中性元素及铝	从 β 相区固溶处理后有大量亚稳定 β 相, 可能有少量其它亚稳定相(α' 或 ω 相), 时效后, 主要是 α 相和 β 相, 此外, 亚稳定 β 相可发生应变转变	除有亚稳定 β 合金的特点外, 固溶处理后, 屈服强度低, 均匀伸长率高, 时效后, 断裂韧性及锻件塑性较高	Ti-10V-2Fe-3Al

第二节 合金元素在钛及钛合金中的作用

一、钛及钛合金中的合金元素及杂质元素

钛是一种高活性金属元素。它与元素周期表中大多数元素都能发生一定作用(见图1-1-3)。但足以影响其性能的只有那些与钛形成连续或不连续固溶体的元素。这些元素按它们对钛的同素异晶转变温度的影响可分成三大类(见表1-1-4)。

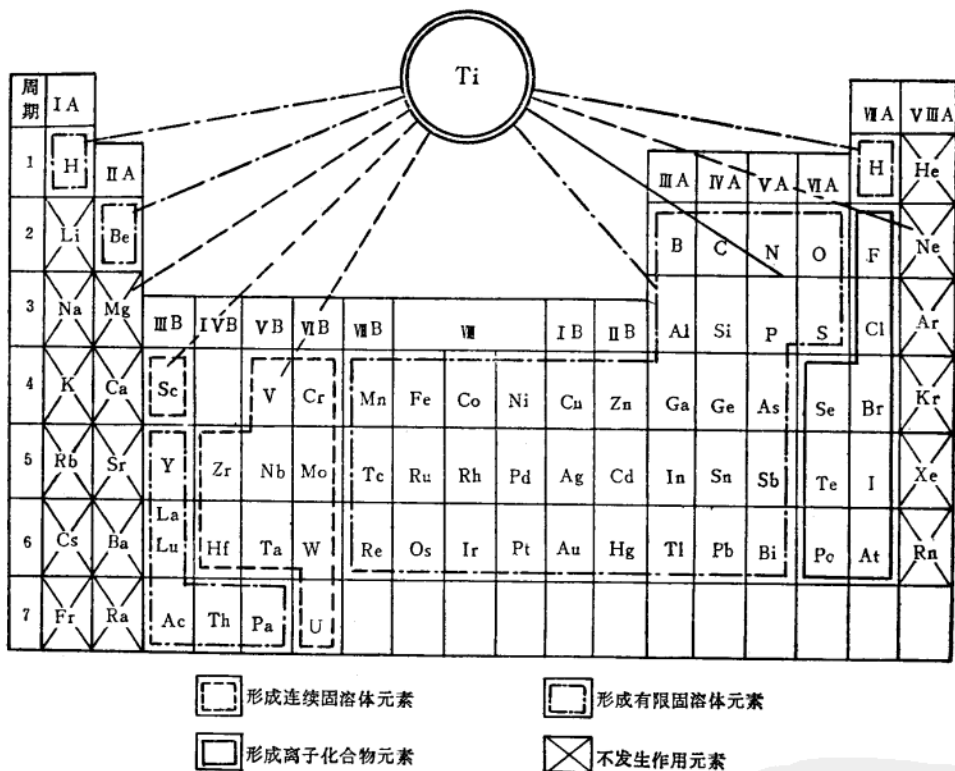


图 1-1-3 钛与元素周期表中元素的相互作用

表中的碳、氧、氮、氢,有时还包括硅、铁等是由原料或加工过程中不免带人的,一般称为杂质元素或残存元素。这些元素可使钛及钛合金强度提高、塑性下降,甚至使断裂韧性、低温韧性、疲劳性能、耐腐蚀性、冷成型性和可焊性等变坏。其中碳、氧、氮、氢等影响最烈。因此,在钛及钛合金中,对杂质元素都规定了它们的最高允许含量。其它元素(有时也包括铁、硅)均按一定含量范围有意地加入钛及钛合金中,以改变其组织和性能,故称合金元素。

二、 α 稳定元素在钛及钛合金中的作用

α 稳定元素主要有铝、镓、锗、镧、铈、钕及氧、碳、氮、硼等。最近有人认为钐和铪也可属于这一类。在工业钛合金中应用最广的 α 稳定元素是铝。近年来,镓在研制近

表 1-1-4 钛及钛合金中常见化学元素的分类

分 类	元素名称	该类元素与钛的反应特征		
α 稳定元素	间隙式	O、C、N、B 在与钛的二元相图中有包析反应，提高 $\alpha + \beta/\beta$ 相变点，能更多地固溶于 α 钛，与钛形成间隙式固溶体		
	替代式	Al、Ga 在与钛的二元相图中有包析反应，提高 $\alpha + \beta/\beta$ 相变点，能更多地固溶于 α 钛，与钛形成替代式固溶体		
中性元素	Zr、Sn	对 $\alpha + \beta/\beta$ 相变点影响不大(一般略有降低)，在 α 钛及 β 钛中均有较大的固溶度		
β 稳定元素	替代式	同晶型	Mo、V、Ta、Nb 降低 $\alpha + \beta/\beta$ 相变点，由于与 β -钛晶格类型相同，可以无限固溶于 β 相，无化合物相	
		共析型	快共析型 (活性共析型)	Cu、Ag、Au、Ni、Si 与钛发生共析相变，生成化合物相，较强烈地降低 $\alpha + \beta/\beta$ 相变点，共析温度高，共析反应活性高，易生成珠光体片层状组织
			慢共析型	Cr、Mn、Fe、Co、Pd 与钛发生共析相变，生成化合物能强烈降低 $\alpha + \beta/\beta$ 相变点，共析反应活性极差，不易出现珠光体组织
	间隙式	H(Si) ^①	与钛发生共析相变，降低 $\alpha + \beta/\beta$ 相变点，生成间隙式固溶体和化合物相	

① Si是间隙型 β 稳定元素，但在钛合金中主要作为快共析元素使用。

α 型的高温合金中正逐渐引起重视。因此，这里将着重叙述铝和镓的作用。

1. 二元相图

1) 钛-铝二元系

图 1-1-4 给出了有代表性的钛-铝相图。如图所示，铝在 β 钛中的最大固溶度出现在1460°C，约为30%。铝在 α 钛中的最大固溶度出现在1080°C，约为11%，550°C时，铝在 α 钛中的固溶度约为7.5%。相图上出现两种化合物， γ 相和 α_2 相。 γ 相是以TiAl为基的有序化合物，具有面心正方(差不多是正方)的晶格； $a=4.005$ 埃， $c=4.073$ 埃， $c/a=1.0162$ 。 α_2 相是以Ti₃Al为基的有序化合物，具有六方晶格， $a=5.8730$ 埃， $c=4.6543$ 埃， $c/a=0.8047$ 。在这种相图中， α_2 相可以由 β 相转变而来。

所发表的钛-铝二元相图，争论的主要焦点是 α_2 相出现的形式和成分范围。

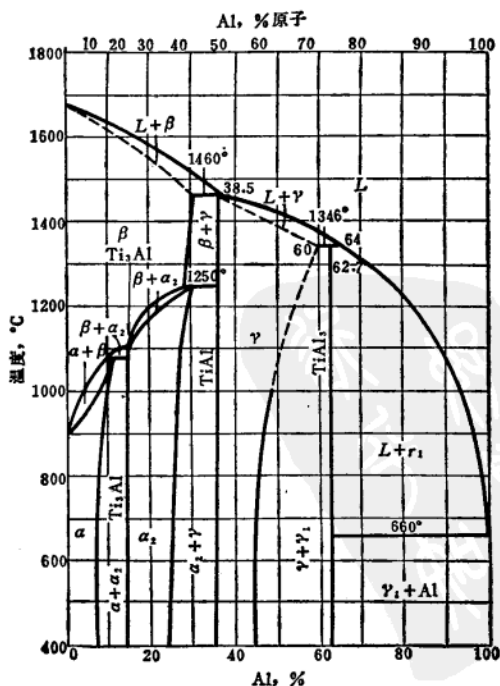


图 1-1-4 钛-铝系二元相图

近年来,对该问题倾向于给出的钛-铝二元相图富钛角形式(图1-1-5)。在该图上当铝含量在4.4%以上即出现 α_2 相,它只能与 α 相平衡存在并由 α 相析出来。

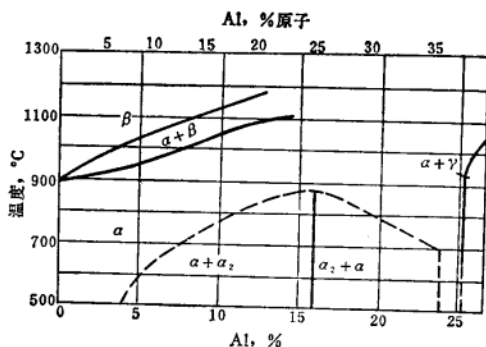


图 1-1-5 另一种钛-铝二元相图(富钛角)

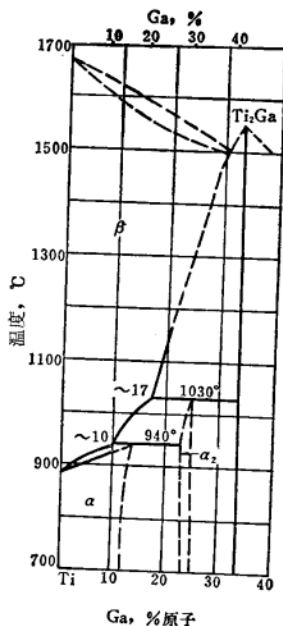


图 1-1-6 钛-镓系二元相图

2) 钛-镓系

钛-镓系二元相图示于图1-1-6。镓在 β 钛中的最大固溶度出现在1500°C左右,约为38% (30%原子)。镓在 α 钛中最大固溶度出现在940°C约为17% (13%原子)。固溶度随着温度的降低而降低。相图中 α_2 相是以 Ti_3Ga 为基的有序相。

2. 对热处理及组织的影响

铝和镓都提高钛的 $\alpha+\beta/\beta$ 相变点。10%的铝可将相变点提高到1080°C左右。镓的能力要弱一些。

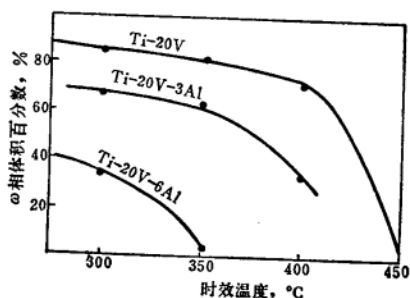


图 1-1-7 铝对Ti-V系合金中 ω 相体积分数的影响

铝提高钛的开始再结晶温度对钛合金中马氏体转变开始点(M_s)影响不大。

过量的铝和镓会在使用温度下生成以 Ti_3M 为基的 α_2 有序相。此外,存在于亚稳定 β 相中的铝,可促进 ω 相往 α 相的转变,从而减少合金中时效 ω 相的体积百分数。其影响示于图1-1-7。

3. 对性能的影响

铝和镓都能提高钛的室温及高温抗拉强度,对高温塑性影响不大。见图1-1-8及图1-1-9。

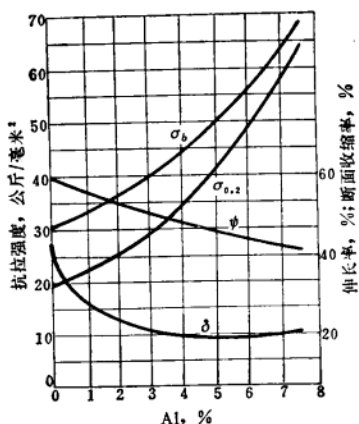


图 1-1-8 铝含量对高纯钛室温抗拉性能的影响

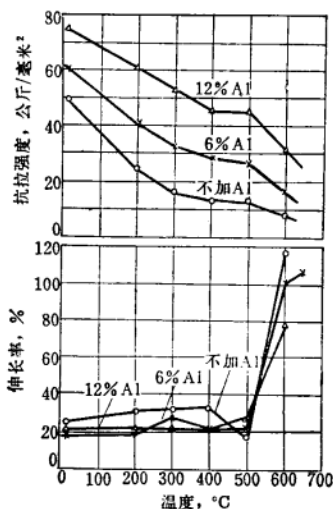


图 1-1-9 铝含量对纯钛高温抗拉强度及伸长率的影响

随着铝含量的增加，钛-铝合金的密度和泊松系数呈线性下降。在固溶度范围内，铝能有效地提高钛的弹性模量、剪切模量、比电阻及线膨胀系数。当出现 α_2 相时，这些性能会出现一个峰值（见图1-1-10）。

在钛-铝系合金中出现以 Ti_3Al 为基的 α_2 有序相时，合金的抗拉强度升高，塑性和韧性变坏。这个有序相往往在耐热钛合金于高温长时使用出现，使合金热稳定性能变坏。 Ti_3Ga 相的作用与 Ti_3Al 相类似。

4. 在钛及钛合金中的作用

铝和镓均与 α 钛和 β 钛形成替代式固溶体，主要起固溶强化作用。冶标中的合金，除工业纯钛外，几乎都含有一定量的铝。

为了控制因出现 α_2 相引起的脆化，考虑了铝和其它元素对 α_2 相析出的影响，提出了铝当量的概念。在 α 钛合金中，铝当量有如下关系：

$$Al^* = Al + \frac{1}{3}Sn + \frac{1}{6}Zr + 10O^* \leq 8$$

式中， Al^* 为铝当量， Al 、 Sn 、 Zr 皆为这些元素在合金中的重量百分含量。 O^* 为间隙元素的影响，也称为氧当量。氧当量为：

$$O^* = O + C + 2N$$

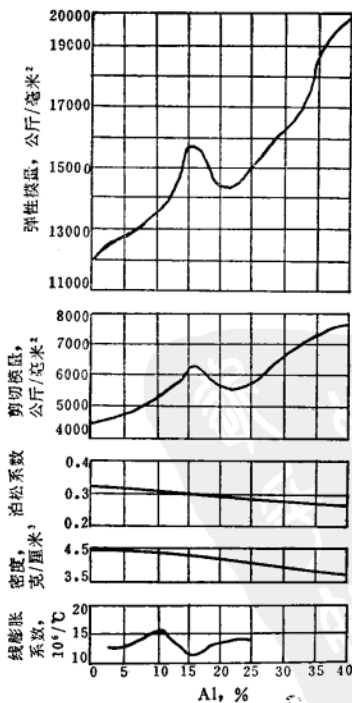


图 1-1-10 铝含量对纯钛弹性模量、剪切模量、泊松系数及某些物理性能的影响