

“十一五”国家重点图书出版规划项目

Ti

中国有色金属丛书

中国有色金属工业协会组织编写

钛及钛合金
金相图谱

赵永庆 洪权 葛鹏 编著

Nonferrous Metals



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



“十一五”国家重点图书出版规划项目



钛及钛合金金相图谱

中国有色金属工业协会组织编写

赵永庆 洪 权 葛 鹏 编著



中南大学出版社

www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

钛及钛合金金相图谱/赵永庆,洪权,葛鹏编著. —长沙:中南大学出版社,2011. 6

ISBN 978-7-5487-0260-3

I. 钛... II. ①赵... ②洪... ③葛... III. ①钛 - 金相组织 - 图谱②钛合金 - 金相组织 - 图谱 IV. TG146. 2 - 64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 084290 号

钛及钛合金金相图谱

赵永庆 洪权 葛鹏 编著

责任编辑 唐仁政

责任印制 文桂武

出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

印 装 国防科技大学印刷厂

开 本 787 × 1092 1/16 印张 10 字数 248 千字

版 次 2011 年 6 月第 1 版 2011 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5487-0260-3

定 价 40.00 元

图书出现印装问题,请与出版社调换

王海东
乐维宁
许健
刘同高
刘良先
刘柏禄
刘继军
李宁
李凤轶
李阳通
李沛兴
李旺兴
杨超
杨文浩
杨安国
杨龄益
吴跃武
吴锈铭
邱冠周
冷正旭
汪汉臣
宋玉芳
张麟
张创奇
张洪国
张洪恩
张培良
陆志方
陈成秀
武建强
周江
赵波
赵翠青
胡长平
钟卫佳
钟晓云
段玉贤
胥力
黄河
黄粮成
蒋开喜
傅少武
瞿向东

中南大学出版社
中铝国际沈阳铝镁设计研究院
中冶葫芦岛有色金属集团有限公司
厦门钨业集团有限公司
中国钨业协会
赣州有色冶金研究所
荏平华信铝业有限公司
兰州铝业股份有限公司
西南铝业(集团)有限责任公司
柳州华锡集团有限责任公司
白银有色金属股份有限公司
中铝郑州研究院
云南铜业(集团)有限公司
甘肃稀土集团有限责任公司
河南豫光金铅集团有限责任公司
锡矿山闪星锑业有限责任公司
洛阳有色金属加工设计研究院
中国有色金属工业协会镁业分会
中南大学
中铝山西分公司
宝钛集团有限公司
江西钨业集团有限公司
大冶有色金属有限公司
宁夏东方有色金属集团有限公司
中国有色金属工业协会
河南中孚实业股份有限公司
山东丛林集团有限公司
中国有色工程有限公司
厦门厦顺铝箔有限公司
中铝广西分公司
东北轻合金有限责任公司
中国有色金属工业协会
中国有色金属工业协会
中国有色金属工业协会
中铝洛阳铜业有限公司
江西稀有稀土金属钨业集团公司
洛阳栾川钼业集团有限责任公司
遵义钛厂
中电投宁夏青铜峡能源铝业集团有限公司
中铝国际贵阳铝镁设计研究院
北京矿冶研究总院
株洲冶炼集团有限责任公司
中铝广西分公司

中国有色金属丛书
NMS 学术委员会

主任:

王淀佐 院士 北京有色金属研究总院

常务副主任:

黄伯云 院士 中南大学

副主任(按姓氏笔划排序):

于润沧 院士 中国有色工程有限公司
古德生 院士 中南大学
左铁镞 院士 北京工业大学
刘业翔 院士 中南大学
孙传尧 院士 北京矿冶研究院
李东英 院士 北京有色金属研究总院
邱定蕃 院士 北京矿冶研究院
何季麟 院士 宁夏东方有色金属集团有限公司
何继善 院士 中南大学
汪旭光 院士 北京矿冶研究院
张文海 院士 南昌有色冶金设计研究院
张国成 院士 北京有色金属研究总院
陈景 院士 昆明贵金属研究所
金展鹏 院士 中南大学
周廉 院士 西北有色金属研究院
钟掘 院士 中南大学
黄培云 院士 中南大学
曾苏民 院士 西南铝加工厂
戴永年 院士 昆明理工大学

委员(按姓氏笔划排序):

卜长海 厦门厦顺铝箔有限公司
于家华 遵义钛厂
马保平 金堆城钼业集团有限公司
王辉 株洲冶炼集团有限责任公司
王斌 洛阳栾川钼业集团有限责任公司

王林生	赣州有色冶金研究所
尹晓辉	西南铝业(集团)有限责任公司
邓吉牛	西部矿业股份有限公司
吕新宇	东北轻合金有限责任公司
任必军	伊川电力集团
刘江浩	江西铜业集团公司
刘劲波	洛阳有色金属加工设计研究院
刘昌俊	中铝山东分公司
刘侦德	中金岭南有色金属股份有限公司
刘保伟	中铝广西分公司
刘海石	山东南山集团有限公司
刘祥民	中铝股份有限公司
许新强	中条山有色金属集团有限公司
苏家宏	柳州华锡集团有限责任公司
李宏磊	中铝洛阳铜业有限公司
李尚勇	金川集团有限公司
李金鹏	中铝国际沈阳铝镁设计研究院
李桂生	江西稀有稀土金属钨业集团公司
吴连成	青铜峡铝业集团有限公司
沈南山	云南铜业(集团)公司
张一宪	湖南有色金属控股集团有限公司
张占明	中铝山西分公司
张晓国	河南豫光金铅集团有限责任公司
邵武	铜陵有色金属(集团)公司
苗广礼	甘肃稀土集团有限责任公司
周基校	江西钨业集团有限公司
郑萧	中铝国际贵阳铝镁设计研究院
赵庆云	中铝郑州研究院
战凯	北京矿冶研究总院
钟景明	宁夏东方有色金属集团有限公司
俞德庆	云南冶金集团总公司
钱文连	厦门钨业集团有限公司
高顺	宝钛集团有限公司
高文翔	云南锡业集团有限责任公司
郭天立	中冶葫芦岛有色金属集团有限公司
梁学民	河南中孚实业股份有限公司
廖明	白银有色金属股份有限公司
翟保金	大冶有色金属有限公司
熊柏青	北京有色金属研究总院
颜学柏	陕西有色金属控股集团有限责任公司
戴云俊	锡矿山闪星锑业有限责任公司
黎云	中铝贵州分公司

总序



有色金属是重要的基础原材料，广泛应用于电力、交通、建筑、机械、电子信息、航空航天和国防军工等领域，在保障国民经济建设和社会发展等方面发挥了不可或缺的作用。

改革开放以来，特别是新世纪以来，我国有色金属工业持续快速发展，已成为世界最大的有色金属生产国和消费国，产业整体实力显著增强，在国际同行业中的影响力日益提高。主要表现在：总产量和消费量持续快速增长，2008年，十种有色金属总产量2 520万吨，连续七年居世界第一，其中铜产量和消费量分别占世界的20%和24%；电解铝、铅、锌产量和消费量均占世界总量的30%以上。经济效益大幅提高，2008年，规模以上企业实现销售收入预计2.1万亿以上，实现利润预计800亿元以上。产业结构优化升级步伐加快，2005年已全部淘汰了落后的自焙铝电解槽；目前，铜、铅、锌先进冶炼技术产能占总产能的85%以上；铜、铝加工能力有较大改善。自主创新能力显著增强，自主研发的具有自主知识产权的350 kA、400 kA大型预焙电解槽技术处于世界铝工业先进水平，并已输出到国外；高精度内螺纹铜管、高档铝合金建筑型材及时速350 km高速列车用铝材不仅满足了国内需求，已大量出口到发达国家和地区。国内矿山新一轮找矿和境外矿产资源开发取得了突破性进展，现有9大矿区的边部和深部找矿成效显著，一批有实力的大型企业集团在海外资源开发和收购重组境外矿山企业方面迈出了实质性步伐，有效增强了矿产资源的保障能力。

2008年9月份以来，我国有色金属工业受到了国际金融危机的严重冲击，产品价格暴跌，市场需求萎缩，生产增幅大幅回落，企业利润急剧下降，部分行业

已出现亏损。纵观整体形势，我国有色金属工业仍处在重要机遇期，挑战和机遇并存，长期发展向好的趋势没有改变。今后一个时期，我国有色金属工业发展以控制总量、淘汰落后、技术改造、企业重组、充分利用境内外两种资源，提高资源保障能力为重点，推动产业结构调整和优化升级，促进有色金属工业可持续发展。

实现有色金属工业持续发展，必须依靠科技进步，关键在人才。为了提高劳动者素质，培养一大批高水平的科技创新人才和高技能的技术工人，由中国有色金属工业协会牵头，组织中南大学出版社及有关企业、科研院校数百名有经验的专家学者、工程技术人员，编写了《中国有色金属丛书》。《丛书》内容丰富，专业齐全，科学系统，实用性强，是一套好教材，也可作为企业管理人员和相关专业大学生的参考书。经过编写、编辑、出版人员的艰辛努力，《丛书》即将陆续与广大读者见面。相信它一定会为培养我国有色金属行业高素质人才，提高科技水平，实现产业振兴发挥积极作用。

康翔

2009年3月

前 言

根据中国有色金属工业协会《中国有色金属丛书》编委会要求，我们编写了《钛及钛合金金相图谱》一书。

三位作者均是长期在科研一线从事钛合金研究、开发的科技人员，结合我们的实际科技成果及在研的科技项目实际，编写了该本书。本书系统介绍了三大类型钛合金(α 型合金、 $\alpha + \beta$ 型合金和 β 型合金)的特征、应用及常见的微观金相组织等几部分内容。

本书可供大专院校材料科学与工程及相近学科的大学生作为参考书，也可供从事材料加工研究或生产的工程技术人员参考。

本书由赵永庆教授、洪权教授和葛鹏博士编著，郭萍、雷文光、韩栋、辛社伟、曾立英、戚运莲、吴欢等同志参与了图片的收集整理工作。唐仁政教授主审。

在编写和出版过程中，得到国家科技部973计划项目“钛合金材料制备及加工的基础研究”(2007CB613800)和中南大学出版社的大力支持，在此深表感谢！

由于编者水平有限，加之编写时间仓促，书中难免有错误和疏漏之处，敬请广大读者批评指正！

赵永庆 洪 权
2010年2月

目 录



第 1 章 钛及钛合金概述	1
1.1 钛合金的分类	1
1.2 钛合金的显微组织	2
1.3 钛合金的相与相变	3
1.3.1 冷却时的转变	3
1.3.2 在时效中的转变	4
1.3.3 共析转变	5
1.3.4 应变转变	6
1.4 钛合金的热处理	6
1.5 钛及钛合金术语	6
1.5.1 工业纯钛 (commercial titanium)	6
1.5.2 钛合金 (titanium alloy)	7
1.5.3 α 钛合金 (α titanium alloy)	7
1.5.4 近 α 钛合金 (near α titanium alloy)	7
1.5.5 $\alpha + \beta$ 钛合金 ($\alpha + \beta$ titanium alloy)	7
1.5.6 β 钛合金 (β titanium alloy)	7
1.5.7 消除应力退火 (stress relieving anneal)	7
1.5.8 退火 (annealing)	7
1.5.9 β 退火 (β annealing)	7
1.5.10 等温退火 (isothermal annealing)	7
1.5.11 双重退火 (duplex annealing)	7
1.5.12 固溶热处理 (solution heat treating)	7
1.5.13 淬火 (quenching)	8
1.5.14 时效 (aging)	8
1.5.15 α 稳定元素 (α stabliizer)	8
1.5.16 β 同晶稳定元素 (β isomorphous stabiliz)	8
1.5.17 β 共析稳定元素 (β eutectoid stabilizer)	8
1.5.18 置换元素 (substitutional element)	8

1.5.19	间隙元素 (interstitial element)	8
1.5.20	α 转变点 (α transns)	8
1.5.21	β 转变点 (β transns)	8
1.5.22	M_s	8
1.5.23	M_f	8
1.5.24	有序结构 ordered structure	9
1.5.25	无序结构 (disordered structure)	9
1.5.26	原始 β 晶粒 (prior β grain)	9
1.5.27	$\alpha + \beta$ 组织 ($\alpha + \beta$ structure)	9
1.5.28	集束 (colonies)	9
1.5.29	β 转变组织 (structure of β transformation)	9
1.5.30	魏氏组织 (widmanstatten structure)	9
1.5.31	等轴组织 (equiaxed structure)	9
1.5.32	孪晶 (twin)	9
1.5.33	双态组织 (bimodal structure)	9
1.5.34	基体 (matrix)	10
1.5.35	α 相 (α phase)	10
1.5.36	针状 α (acicular α)	10
1.5.37	球状 α (globular α)	10
1.5.38	片状 α 组织 (platelet α structure)	10
1.5.39	片状 α (platelet α)	10
1.5.40	初生 α (primary α)	10
1.5.41	次生 α (secondary α)	10
1.5.42	拉长的 α (elongated α)	10
1.5.43	晶界 α (grain boundary α)	10
1.5.44	纤维状 α (Stringy α)	10
1.5.45	马氏体 (martensite)	10
1.5.46	α' (六方马氏体) [α prime(hexagonal martensite)]	11
1.5.47	α'' (斜方马氏体) [α -double prime(orthorhombic martensite)]	11
1.5.48	α_2 相 (α_2 phase)	11
1.5.49	β 相 (β phase)	11
1.5.50	晶间 β (intergranular β)	11

1.5.51	亚稳定 β (metastable β)	11
1.5.52	时效 β (aged β)	11
1.5.53	中间相 (intermediate phase)	11
1.5.54	金属间化合物 (intermetallic compound)	11
1.5.55	γ 相 (γ phase)	11
1.5.56	ω 相 (ω Phase)	12
1.5.57	氢化物相 (hydride phase)	12
1.5.58	β 斑 (β fleck)	12
1.5.59	α 层 (α case)	12
1.5.60	高间隙缺陷 (HID)	12
	[high interstitial defect (HID)]	
1.5.61	高铝缺陷 (HAD)	12
	[high aluminium defect (HAD)]	
1.5.62	贫 β 区 (β -lean region)	12
1.5.63	网篮组织 (basketweave)	12
1.5.64	蠕虫 α (wormy α)	12
1.5.65	高密度夹杂 [high density inclusion (HDI)]	13
1.5.66	冷却条件表示符号	13
第 2 章 α 型钛合金		14
2.1	工业纯钛	14
2.2	TA16 钛合金	17
2.3	TA7 钛合金	22
2.4	Ti811 钛合金	24
2.5	Ti600 高温钛合金	31
2.6	CT20 低温钛合金	38
2.7	Ti230 合金	42
2.8	Ti75 合金	48
2.9	BT20 合金	51
2.10	TP650 颗粒增强钛合金	57
2.11	Ti3Al2.5V 合金	61
第 3 章 $\alpha + \beta$ 钛合金		65
3.1	TC4 钛合金	65
3.2	TC21 高强高韧钛合金	70
3.3	TC11 高温钛合金	74

3.4	BT22 高强钛合金	76
3.5	BT16 钛合金	79
3.6	BT25 高温钛合金	86
3.7	Ti8LC 低成本钛合金	87
3.8	SPZ 钛合金	92
3.9	Ti17 钛合金	95
第4章 β 型钛合金		99
4.1	稳定 β 钛合金 Ti40	99
4.2	亚稳定 β 钛合金	104
4.2.1	TB3 合金	104
4.2.2	Ti-15-3 合金	108
4.2.3	Ti26 合金	115
4.3	近 β 钛合金	121
4.3.1	Ti1023 合金	121
4.3.2	Ti1300 合金	125
第5章 金属间化合物		129
5.1	Ti ₃ Al	129
5.2	TiAl	131
5.3	TiNi	135
第6章 铸造钛合金		139
6.1	Ti75 合金	139
6.2	Ti600 合金	140
参考文献		143

第1章 钛及钛合金概述

纯净的钛具有银灰色光泽。钛在化学元素周期表中属IVB族元素，原子序数为22，相对原子质量为47.90。钛的密度为 4.51g/cm^3 ，只相当于钢的57%，位于轻金属与重金属的分界点上。钛在地球上的储量并不少，约占地壳总质量的0.61%，在所有元素中名列第九。但由于分离提取困难，具有工业意义的金属钛直到20世纪40年代才生产出来。因而一般把钛称为稀有金属。钛的熔点较高，导电性差，热导率和线膨胀系数均较小，钛的热导率只有铁的1/4，是铜的1/7。钛无磁性，在很强的磁场下也不会磁化，用钛制人造骨和关节植入人体内不会受雷雨天气的影响。

钛及钛合金具有各种优良性能（密度小，比强度高，耐腐蚀，耐高、低温性能好，无磁，无毒），是继钢铁、铝之后又一种重要的结构材料，随着钛及其合金应用的广泛性及人们重视程度的提高，钛获得了“第三金属”、“太空金属”等美称。尽管钛的工业化生产只有半个世纪的历史，但现在钛及其合金已经被广泛应用于航天、航空、航海、石油、化工、轻工、冶金、机械、医疗、能源等许多领域。

1.1 钛合金的分类

钛有两种同素异构体， α -Ti在 882°C 以下稳定，为密排六方结构(hcp)； β -Ti在 882°C 与熔点 1678°C 之间稳定存在，为体心立方结构(bcc)。在 882°C 两者发生转变。

根据对 β 转变温度的影响，钛的合金化元素可分为中性元素、 α 相稳定化元素和 β 相稳定化元素，合金化元素对钛合金相图的影响如图1-1所示。在Al、O、N、C等 α 相稳定化元素中，Al是最重要的合金化元素。 α 相稳定化元素除了将 α 相区扩展到更高温度以外，还形成了 $\alpha+\beta$ 两相区。 β 相稳定化元素可以细分为 β 同晶型元素和 β 共析型元素。 β 相同晶型

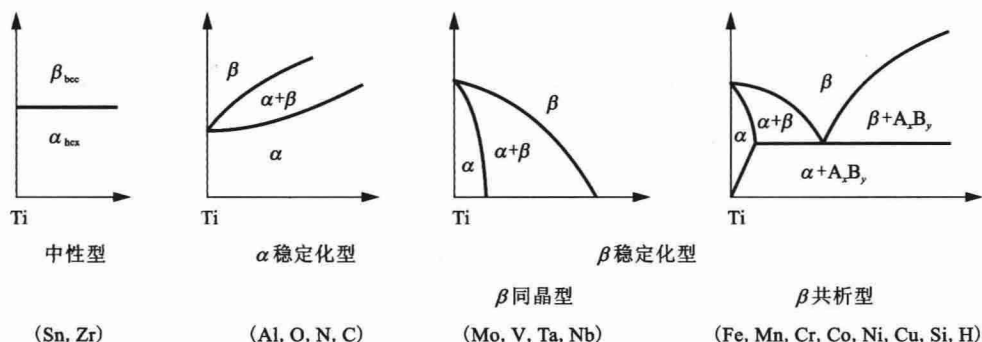


图1-1 合金元素对钛合金相图的影响

元素(如 Mo、V 和 Ta)都与钛无限互溶; β 共析型元素(如 Fe、Mn、Cr、Co、Ni、Cu、Si 和 H)在 α -Ti 中的溶解度都很小,即使加入量很少(体积分数)也可以与钛形成金属间化合物。Sn 和 Zr 由于对 α/β 相界几乎没有影响,因此被看作中性元素。但就强度而言,Sn 和 Zr 在钛中的溶解度都比较大,可以显著强化 α 相。不同的合金元素对钛合金的作用不同,在增加强度方面,可以用表 1-1 来显示合金元素的作用。

表 1-1 钛中加入 1%(质量分数)合金元素增加的强度值

元素	α 稳定元素	中性元素		β 稳定元素						
	Al	Sn	Zr	Mn	Fe	Cr	Mo	V	Nb	Si
$\Delta R_m/\text{MPa}$	50	25	20	75	5	65	50	35	15	12

通常将钛合金划分为三大类: α 型、 $\alpha+\beta$ 型和 β 型合金,进一步细分 α 型可以分为 α 型和近 α 型; β 型合金可以分为 β 型和亚稳 β 型钛合金。

1.2 钛合金的显微组织

钛合金组织因组成相的形貌、尺寸、分布特点的不同而差别很大,这主要取决于合金成分、加工变形工艺和热处理工艺。钛合金组织的多样化决定其力学性能在宽广范围内变化。通过组织的最佳化,可以显著提高钛合金的力学性能。钛合金的显微组织主要用 α 和 β 两相的尺寸及其排列方式来描述。表 1-2 定性的说明了两相尺寸(细小与粗大显微组织的对比)以及两相的排列(层状显微组织与等轴状显微组织的对比)对一些重要的力学性能都有影响。

表 1-2 显微组织对钛合金性能的影响*

性能	细小	粗大	片层状	等轴状
弹性模量	*	*	*	+/- (织构)
强度	+	-	-	+
塑性	+	-	-	+
断裂韧度	-	+	+	-
抗疲劳裂纹萌生	+	-	-	+
抗疲劳裂纹扩展	-	+	+	-
蠕变强度	-	+	+	-
超塑性	+	-	-	+
氧化性能	+	-	+	-

注: * 表示无影响; + 表示性能提高; - 为性能降低。

1.3 钛合金的相与相变

钛合金中最基本的相是 α 相和 β 相， α 相是合金元素溶入 α -Ti中形成的固溶体，呈密排六方结构， β 相是合金元素溶入 β -Ti中形成的固溶体，呈体心立方结构。大量研究发现， α 相和 β 相的尺寸、形貌及分布强烈影响着钛合金的力学性能。两者之间的转变也是钛合金一切相变的基础。但在相变过程中，随着合金成分和外界条件(应力状态、温度等)的改变， β 相往往不能直接转变成 α 相，这就使得钛合金的相复杂多样。

1.3.1 冷却时的转变

1) 在缓慢冷却时的转变

钛及钛合金从 β 相区缓慢冷却到 $\alpha + \beta$ 相区时，要发生 $\beta \rightarrow \alpha$ 的多型性转变。在高纯钛中已经得到证实，此时的 α 相的形核是马氏体型的，长大则靠热激活过程。形核时，试样表面也有通常马氏体型相变浮凸，而且也同样与母相保持严格的布拉格位向关系：

$$\begin{aligned} (110)_{\beta} // (0001)_{\alpha} \\ [111]_{\beta} // [1120]_{\alpha} \end{aligned}$$

2) 在快速冷却中的转变

钛及钛合金在由 β 相区快速冷却时发生的转变及转变产物随着 β 稳定元素含量的变化有所不同，见表1-3。

表1-3 钛及钛合金在快速冷却时的转变及转变产物*

转变类型	转变产物	晶格类型	生成条件	转变机制及形态	特点
马氏体型相变	α'	六方	α 合金或 β 稳定元素含量较小的 $\alpha + \beta$ 合金，从 β 相区或接近 $\alpha + \beta/\beta$ 相变点的高温淬火	依 β 稳定元素含量大小而不同，含量小时 β 相以块状机制转变；含量大时 β 相以针状机构转变	块状马氏体无法测得位向关系；针状马氏体 α' 与 β 相保持布拉格位向关系，惯析面为 $(334)_{\beta}$ 或 $(344)_{\beta}$
	α''	斜方	在 β 稳定元素较多的 $\alpha + \beta$ 合金中，由 β 相区或接近 $\alpha + \beta/\beta$ 相变点的高温淬火		在Ti-Mo, Ti-W, Ti-Re中发现，但Ti-V系却没有； α'' 的点阵参数随成分而变化； α'' 使合金塑性降低
淬火 ω 相形成	ω_q	六方	在 β 稳定元素含量处于临界浓度附近的系统中，在 β 相区淬火	通过位移控制型相变方式进行	ω_q 是尺寸很小的粒子， ω_q 使弹性模量及硬度提高，使塑性下降

转变类型	转变产物	晶格类型	生成条件	转变机制及形态	特点
高温 β 相的保留	稳定的 β 相	体心立方	β 相中 β 稳定元素含量在临界浓度以上, 其成分在室温时处于 β 相区, 合金在温度变化时没有相变发生	高温相保留	温度和应力不能使其发生分解
	亚稳 β 相 (β_m)	体心立方	β 相中 β 稳定元素含量在临界浓度以上, 其成分在室温时处于 $\alpha + \beta$ 相区, 但合金在快冷至相变点以下时未发生 $\beta \rightarrow \alpha + \beta$ 相变	高温相保留	提高温度或施加应力可以发生分解
过饱和 α 相的形成	过饱和 α 相	六方	在钛与快共析型 β 稳定元素的系统中, 亚共析成分, 于共析温度之下快速冷却	高温相保留	提高温度可以发生分解

* 摘自《稀有金属材料加工手册》, 冶金工业出版社, 1984 年。

1.3.2 在时效中的转变

钛及钛合金在快速冷却中生成的亚稳定相, 在时效时均要向平衡的组织转变。相变过程主要有亚稳定 β 相的分解、马氏体回火、过饱和 α 相的分解。表 1-4 给出了这些转变的情况。

表 1-4 钛及钛合金在时效时的转变及转变产物*

转变类型	转变过程	转变条件	转变方式	形态及特点
亚稳定 β 相的 分解	$\beta_m \rightarrow \beta + \omega_\alpha$ $\rightarrow \beta + \alpha$	亚稳定 β 相在 550℃ 以下温度时效首先析出 ω_α , 继续时效 ω_α 转变为 α 相	$\beta_m \rightarrow \beta + \omega_\alpha$ 的机理尚不清楚, 但 ω_α 向 α 相转变可按合金系统和时效温度分为三种情况: ①在 β_m/ω_α 之间点阵错配度小的系统中, α 相在 β_m 晶界或 $\beta_m + \omega_\alpha$ 母相上不均匀形核, 长大并吞食 ω_α ②在点阵错配度大的系统中, α 相在 β_m/ω_α 界面位错或锋刃处形核并吞食 ω_α 长大 ③在接近 ω_α 相稳定限的高温时效, 上述系统中 ω_α 均以单析反应析出 α 相	在全部分解方式中, 这是最快的一种: ω_α 呈椭球形态, 最终组织为片层状 $\alpha + \beta$ 瘤状区或不均匀的 α 针; ω_α 呈立方形态, α 相粒子均匀弥散