

鈦和鈦合金的热处理与鍛造

《国外航空工艺資料編譯部》編譯

國防工業出版社

內 容 簡 介

本书系根据美国NASA TMX-53445和53438編譯而成。共分两部分，其一介紹了鈦和鈦合金的热处理冶金原理、各种鈦合金的热处理、在实际操作中所用的方法、設備与注意事項；其二介紹了鈦合金的鍛造性能和工艺。

可供有关方面的工人、技術人員参考。

鈦和鈦合金的热处理与鍛造

《国外航空工艺資料編譯部》編譯

*

國防工業出版社 出版

北京市書刊出版業營業許可証出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 $\frac{1}{32}$ 印張 2 $\frac{1}{4}$ 54 千字

1970年5月第一版 1970年5月第一次印刷 印数：0,001—8,100册

統一書号：15034·1210 定价：0.32元

譯 者 序

随着偉大斗、批、改群众运动的深入发展，一个工农业生产的新高潮正在出現。在毛主席“**提高警惕，保卫祖国**”，“**备战、备荒、为人民**”的偉大战略思想指引下，国防工业战綫的形势一派大好。为适应国防工业发展的新形势，我們遵照毛主席“**洋为中用**”的教导，編譯了《**鈦和鈦合金的热处理与鍛造**》这本小册子，供国防工业战綫上的广大工人、技术人員和革命干部了解国外有关鈦及其合金的热处理与鍛造技术发展情况，并在工作中参考。

鈦及其合金在航空空間工业中，已日益得到广泛地应用。这种材料主要是以板材、挤压件和鍛压件的形式应用的。为得到所需的产品性能，要对鈦及其合金进行各种不同的热处理。本书較系統地介紹了鈦及其合金的金相、热处理工艺和生产中应注意的問題，并对鈦合金的鍛造性能和鍛造工艺也作了簡單介紹。

由于原书系国外資產階級的所謂权威編写的，所以在一些工艺技术的叙述中，很多观点是形而上学的，“**不是把对立的事物当作生动的、有条件的、可变动的、互相轉化的东西去看，而是当作死的、凝固的东西去看**”。对此我們作了些刪改，望同志们在参考使用中繼續分析批判。

由于我們学习毛澤东思想不够，在編譯出版过程中，难免有缺点錯誤，恳請批評指正。

目 录

钛和钛合金的热处理

一、钛合金的冶金性能	7
1. 钛合金的分类	7
2. 钛合金的组织	9
3. 钛合金的硬化机理	12
4. 钛合金的消除应力和退火	14
二、主要钛合金的典型热处理和性能	17
1. α 合金——Ti-5Al-2.5Sn的热处理	17
2. α - β 合金——Ti-6Al-4V的热处理	23
3. β 合金——Ti-13V-11Cr-3Al 的热处理	27
三、钛合金的热处理工艺	33
1. 污染	33
2. 污染的控制	39
3. 热处理炉	44
4. 热处理技术	47
四、结论	51

钛合金的锻造

一、锻造方法的分类和设备	54
1. 锻造方法的分类	54
2. 设备	55
二、钛合金的锻造和性能	57
1. 锻造	57
2. 锻造性能	58
三、对钛合金锻造过程的控制	62
四、钢、钛模锻件按外形和设计公差分类	65
五、设计和加工对锻造成本的影响	69

鈦和鈦合金的热处理与鍛造

《国外航空工艺資料編譯部》編譯

國防工業出版社

內 容 簡 介

本书系根据美国NASA TMX-53445和53438編譯而成。共分两部分，其一介紹了鈦和鈦合金的热处理冶金原理、各种鈦合金的热处理、在实际操作中所用的方法、設備与注意事項；其二介紹了鈦合金的鍛造性能和工艺。

可供有关方面的工人、技術人員參考。

鈦和鈦合金的热处理与鍛造

《国外航空工艺資料編譯部》編譯

*

國防工業出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 $1/32$ 印張 $2\frac{1}{4}$ 54 千字

1970 年 5 月第一版 1970 年 5 月第一次印刷 印数：0,001—8,100册

統一书号：15034·1210 定价：0.32元

譯 者 序

随着偉大斗、批、改群众运动的深入发展，一个工农业生产的新高潮正在出現。在毛主席“提高警惕，保卫祖国”，“备战、备荒、为人民”的偉大战略思想指引下，国防工业战綫的形势一派大好。为适应国防工业发展的新形势，我們遵照毛主席“洋为中用”的教导，編譯了《鈦和鈦合金的热处理与鍛造》这本小册子，供国防工业战綫上的广大工人、技术人員和革命干部了解国外有关鈦及其合金的热处理与鍛造技术发展情况，并在工作中参考。

鈦及其合金在航空空間工业中，已日益得到广泛地应用。这种材料主要是以板材、挤压件和鍛压件的形式应用的。为得到所需的产品性能，要对鈦及其合金进行各种不同的热处理。本书較系統地介紹了鈦及其合金的金相、热处理工艺和生产中应注意的問題，并对鈦合金的鍛造性能和鍛造工艺也作了簡單介紹。

由于原书系国外资产阶级的所謂权威編写的，所以在一些工艺技术的叙述中，很多观点是形而上学的，“不是把对立的事物当作生动的、有条件的、可变动的、互相轉化的东西去看，而是当作死的、凝固的东西去看”。对此我們作了些刪改，望同志们在参考使用中繼續分析批判。

由于我們学习毛澤东思想不够，在編譯出版过程中，难免有缺点錯誤，恳請批評指正。

目 录

钛和钛合金的热处理

一、钛合金的冶金性能	7
1. 钛合金的分类	7
2. 钛合金的组织	9
3. 钛合金的硬化机理	12
4. 钛合金的消除应力和退火	14
二、主要钛合金的典型热处理和性能	17
1. α 合金——Ti-5Al-2.5Sn的热处理	17
2. α - β 合金——Ti-6Al-4V的热处理	23
3. β 合金——Ti-13V-11Cr-3Al 的热处理	27
三、钛合金的热处理工艺	33
1. 污染	33
2. 污染的控制	39
3. 热处理炉	44
4. 热处理技术	47
四、结论	51

钛合金的锻造

一、锻造方法的分类和设备	54
1. 锻造方法的分类	54
2. 设备	55
二、钛合金的锻造和性能	57
1. 锻造	57
2. 锻造性能	58
三、对钛合金锻造过程的控制	62
四、钢、钛模锻件按外形和设计公差分类	65
五、设计和加工对锻造成本的影响	69

鈦和鈦合金的热处理

純鈦中同素异形变化的发生，决定合金含量高的鈦經热处理后产生的組織型別，并因此而提高合金的机械性能范围。根据所呈現的主要相的不同，鈦合金分为 α （或近 α ）、 $\alpha-\beta$ 和 β 三种。本书将对每一种有代表性的 α 合金（Ti-5Al-2.5Sn）、 $\alpha-\beta$ 合金（Ti-6Al-4V）和 β 合金（Ti-13V-11Cr-3Al）的典型热处理规范及热处理对合金性能的影响作一詳細討論。对于其他一些常用的重要合金（包括所謂超 α 合金）的典型热处理也列表加以叙述。

在高温条件下，鈦的化学性非常活潑，很容易与炉内气体如氧、氮、碳和氢化合。而且，所有污染会引起性能降低，并除氢的反应以外，都是不可逆的。因为氧化之故，为完成热处理所需的加热時間应保持最短。因鈦的化学性能非常活潑，故其热处理应尽可能在清洁的条件下进行，即应使工件与所有外物，譬如有机物、氧化鉄、高熔点金属材料屑等隔离。在有氯化物的情况下（譬如可能因有氯化物清理溶液殘迹），則鈦合金在288°C以上的溫度下工作时，也会受到应力腐蝕。

通常，鈦及其合金的热处理是在普通煤气燃烧炉、燃油炉或电炉中进行的。炉中气氛应无水蒸汽，略带氧化性。水蒸汽和不完全燃烧气体均能与鈦产生反应，而形成原子氢，极易被鈦所吸收。采用保护塗层或惰性气体可以減輕这种現象；若用真空热处理方法，便能完全消除这种現象。热处理时，决不当采用还原气氛或吸热式气氛。

为了防止变形，絕大多数半成品或成品状态的鈦材在热处理时，应固定于夹具中。在热校形压床上完成鈦零件的蠕变成形和校平时，常用消除应力的溫度。

鈦和鈦合金已有广泛的应用，飞机導彈零件、耐腐蝕的阳极化架都已用到这种材料。在加工方面已經有了广泛的經驗。实践证明，这种材料仅略比其他种材料难加工一些。为了用鈦生产出优质产品，必須遵照一定的工艺規程。本书將闡述鈦和鈦合金的热处理冶金原理、各种鈦合金所用特定热处理以及在實際操作中所用的方法、設備与注意事項。对鈦合金热处理工艺上存在的問題及进一步需要作的努力，也作了一定的介紹。

一、鈦合金的冶金性能

为了得到必要的結構性能，以便进行金屬加工和滿足产品性能的要求，需对鈦和鈦合金进行不同的热处理。因此，本节将阐述一下鈦的热处理原理。

1. 鈦合金的分类

鈦有两种結晶組織。 α 鈦經低溫改善，具有密排六方結構，在 885°C 的溫度下，仍具有穩定性。 β 鈦系高溫同素異形体，具有體心立方結構。由 885°C 轉變溫度起至 1667°C 熔點止，仍具有穩定性。用 α 穩定元素合金化，會使 α 鈦開始向 β 鈦轉變的溫度升高，用 β 穩定元素合金化，則使 α 鈦開始向 β 轉變的溫度降低。于加熱后最后殘留的 α 鈦轉變為 β 鈦的溫度稱為“ β 轉變點”。鈦合金分為主要含 α 相的、 β 相的和 α 與 β 混合相的。

圖 1 所示為鈦合金相變平衡圖的三種主要類型。 α 共析體系是含鋁、碳、氮和氧的鈦合金的典型。這些元素在 α 相中比在 β 相中有較大的溶解度。合金元素使 α 相得到穩定，并隨着 α 合金含量的增高， α - β 相區的溫度也增高。錫、鎳和鎢呈中性，既不能使 α 相得到穩定，又不能使 β 相得到穩定，但一般將這種元素看作 α 穩定元素。

β 共析體系是含錳、鐵、鉻、鎳、銅和硅的鈦合金的典型。這些 β 穩定元素優先溶解在 β 相中，并隨合金含量的提高而引起轉變溫度降低。在這種系統中，在純鈦轉變溫度和室溫之間的某一溫度上，會產生共析反應，此時， β 相分解成為 α 相固溶體和在合金元素中較多存在的中間相，一般為一種金屬間化合物。虽

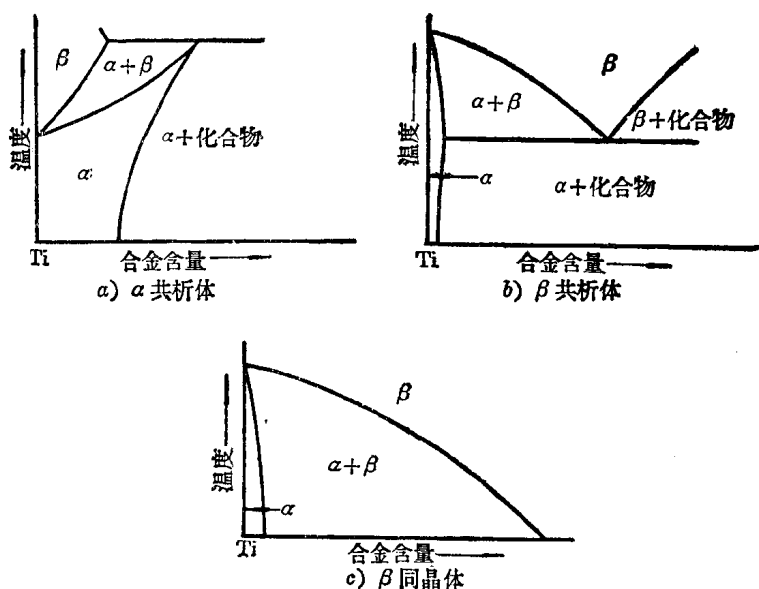


图 1 钛合金平衡图的主要类型

然在平衡状态下，但铝、锰和铁形成β共析体系统。在这种合金中共析反应非常缓慢，通常将这种合金视为不产生共析反应。合金元素铜和硅形成真正的共析型合金。

β同晶体系包括含铝、钒、钽和铌的合金。这些合金元素在β相中远比在α相中溶解的多；而且随着β相浓度的提高，β/(α-β)和α/(α-β)相界朝较低的温度移动。足量的这种合金元素使β钛在室温下有稳定性。在二元合金中，任何一种使得自β相区淬火能保留100%介稳β的β稳定元素都有一个最小量。一般β稳定元素的加入量如右表。

稳定元素	淬火时产生100%介稳β的近似百分重量
铁	4
铜	12
镁	6
铝	7
钼	11
钒	15
铌	36
钽	40

上面所述仅考虑了主要含 α 型或 β 型合金組織的情况。另外还有一組最重要的鈦合金，它既含 α 相，又含 β 相，称之为 α - β 合金。因为沒有 β 稳定合金元素便不会有 β 相存在，所以这种元素是 α - β 型合金的一种主要組分。除 β 稳定元素外， α - β 合金中可含有一种 α 可溶元素，如鋁，以使 α 相的强度增高。 α 可溶元素也能在 β 相中溶解到一定程度。因此， α - β 合金不仅受到所含 β 稳定元素量的影响，也受到 α 稳定元素量的影响。

2. 鈦合金的組織

α 合金 在 α 合金中，当經過转变溫度范围冷却时， β 相完全转变成为 α 相。此时，或形成一种核晶和长大的魏氏 α ，或形成一种馬氏 α 。快速冷却时，所形成的馬氏体組織称之为 α' 。 α' 即使合金自 β 相变以上溫度快速淬火也不改变其平衡成分。因此， α 合金对热处理不产生反应。

当 α 稳定添加剂—鋁超过6%时，便可能产生超点陣組織。它常称之为 Ti_3Al 有序組織(即 α_2)，其有序化可能是低濃度和长程的，其作用一般是提高强度和耐蠕变能力，但会降低破裂韌性，也許还降低热作性能。因此，在加工或热处理鋁含量較高的 α 鈦合金时，应避免在临界有序化的溫度范围内（譬如对近 α 的鈦合金規定为510~677°C）保持較长的時間或緩慢地冷却。

Ti-8Al-1Mo-1V 是一种 α - β 合金，不过 β 稳定元素含量很低，因此，称之为近 α 合金。对这种和其他种近 α 合金（譬如 Ti-679 ）常叫做“超 α ”合金。 Ti-7Al-12Zr 和 Ti-5Al-5Sn-5Zr 也称之为超 α 合金。这两种合金的热处理和冶金处理完全依照其他純鈦或全 α 合金进行。超 α 合金(Ti-8Al-1Mo-1V 和 Ti-679)的热处理和冶金处理一般与 α - β 相似。但也有所不同，因为其 β 稳定元素的含量較少。

α 合金的微观組織主要由100% α 相組成。 α 合金，如工业純鈦和 Ti-5Al-2.5Sn 含有少量如鉄杂质所形成的 β 相，但其量甚微，不会引起相变。

根据热处理方法的不同， α 鈦可以有数种变形体。图 2 所示为完全退火純鈦的三种不同微观組織：等軸 α 、魏氏 α 和馬氏 α (α')。后两种常归在一起，統称之为針状 α 体。在轉变溫度范围内以較慢的速度冷却，則 β 向 α 的轉变生成魏氏 α ；以較快的速度冷却則会产生馬氏 α (α')。这两种針状 α 俱为轉变的产物，等軸 α 只是材料在 α 相区經過大的变形，而产生再結晶所致。因此，針状 α 体的出現表明材料已受热至 β 相区。

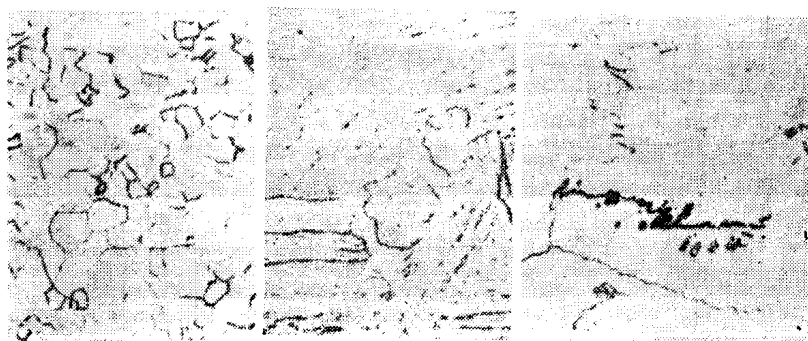


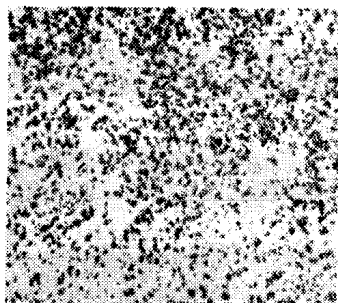
图 2 完全退火鈦的微观組織

α - β 合金 根据稳定元素及其相对数量的不同， α - β 合金可分为强 β 稳定和弱 β 稳定合金。依照定义知，馬氏体 α - β 合金自 α - β 或 β 相区淬火后含有 α' 。淬火后所产生的 α' 量随 β 稳定合金的含量的提高而降低。因此弱 β 稳定合金一般是馬氏体。在另一方面， β 稳定剂含量較高的合金自 α - β 或 β 相区淬火后将保留介稳 β 体。

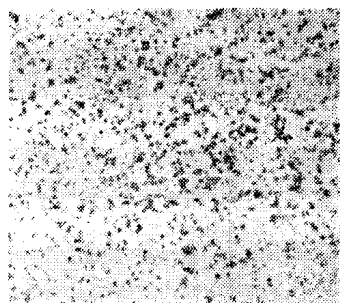
虽然 α - β 合金自 β 相变以上溫度淬火会得到强化，但在生产中并不采用，而用固溶处理和随后的时效。固溶处理过程是：(1) 加热至略低于 β 相变溫度；(2) 在此溫度下保留一定時間；(3) 快速冷却至室溫。固溶处理溫度取决于合金中 β 相的数量和成分。此点在图 3 中已有說明。如能正确選擇溫度和快速冷却，則在固溶处理溫度以下为介稳定的 β 相可一直保留至室溫。然后，

在 $482\sim 593^{\circ}\text{C}$ 下进行时效, 时效时 α 钛由 β 相中沉淀出, 合金得到强化。此外, 当 α 产生沉淀时, 残留的 β 相在 β 稳定含量中富集, 而且变得稳定。

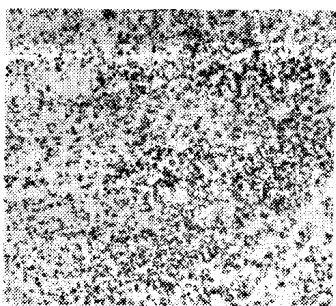
热处理过程和加热经过对 α - β 合金的微观组织有很大影响



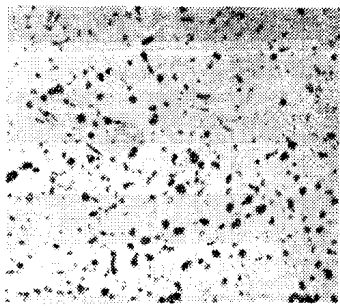
a) 在 650°C 退火 1 小时



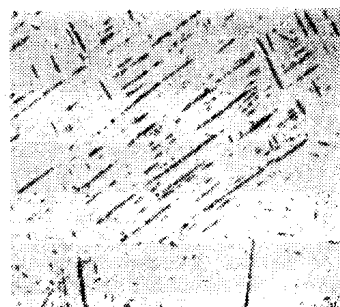
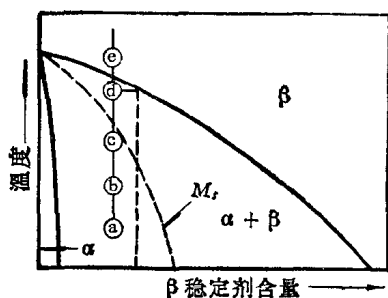
b) 在 700°C 退火 1 小时



c) 在 750°C 退火 1 小时



d) 在 810°C 退火 1 小时



e) 在 833°C 退火 1 小时

图 3 固溶处理温度对 α - β 合金 Ti-4.4Mn 微观组织的影响, 所有试样于退火后在水中淬火

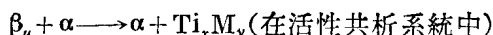
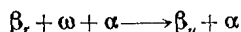
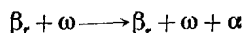
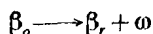
(图3)。如果合金是在低于 β 相变温度加工和热处理的,则产生细晶粒等轴微观组织。这种组织可使强度和延性得到较好的配合。如果 α - β 合金是在高于 β 相变温度下加工和热处理的,则生成粗大的 β 晶粒。当其后冷却时, β 晶粒根据合金含量和冷却速度的不同转变成为一种细晶粒组织。 β 稳定元素含量较低的合金在冷却或淬火后即生成针状或马氏体组织。但当 β 稳定元素含量较高时,转变则较迟缓,针状组织变得较细一些;当合金元素很高时,则此种组织最后消失不见。于退火后或在固溶处理和时效后,具有粗大初生 β 晶粒的合金与同一状态但晶粒较细的合金相比,强度一样,但前者的延性比后者差。针状 α - β 合金的延性较低,当加热至 β 相区,在冷却时可能产生 ω 转变,其理由偶尔归因于所谓“ β 脆性”,但这一名词不太常用。针状 α - β 组织通常在焊件和某些挤压件以及锻件中出现。为了弥补这种组织的缺陷,已对合金成分作了某些改变。

β 合金 在钛合金系统中,只有当添加元素本身在室温下为体心立方结构和在添加元素的所有浓度下,有一系列 β 相固溶体存在时,才能得到在室温下具有热稳定性的 β 相合金。 β 同晶系是其代表。在 β 同晶系中, β 稳定元素如钒、铌、钽和钼能制止 α 相形成,以致在室温下产生 β 相分解(稳定的 β 相),则会再现这种合金。介稳 β 合金(Ti-13V-11Cr-3Al)得到 β 稳定,是 β 向 α 的转变非常缓慢,而且这种合金自 β 相变温度以上(约720°C)冷却时,仍能保留100% β 相。

为了在介稳状态下保留 β 相,自固溶热处理温度的空冷速度很快。因此,对这种合金来说,固溶处理和退火是同义的。

3. 钛合金的硬化机理

在强 β 稳定合金淬火时,介稳 β 能大量保持。当 β 稳定作用增高和固溶热处理温度降低时,此种趋向愈为显著。在以后高温下保持,譬如在时效热处理时, β 相会部分分解。时效时,介稳 β 的分解可简要阐述如下:



式中 β_0 ——在固溶处理溫度存在和在淬火时保留的原合金含量的 β 相;

β_u ——在时效溫度存在的平衡或假平衡合金含量的 β 相;

β_r ——介于 β_0 和 β_u 之間合金含量的 β 相 (在时效过程中, 在 β 稳定元素中 β 相逐漸变多, 而且有时成分达到 β 相变所示的值);

ω ——一种复杂结构的过渡相;

α ——平衡 α 相;

Ti_xM_y ——金屬間化合物相。

在很多合金中, 由于淬火或时效而再次加热的最初阶段, ω 是难以避免的。而在較低的时效溫度 (482°C) 下, ω 最易形成。精确淬火和快速地再次加热至較高的时效溫度范围可以避免 ω 的形成。时效溫度一般是这样选择的: 高到能保証 ω 的反应在实际時間里完成, 低到能使足够量的 α 核晶形成細小至中等的 α 沉淀物。

β 稳定鈦合金在淬火和以后时效时, 所发生的相变的情况可由图 4 中看出。此图基本上适用于很多种鈦合金。在淬火状态下, 合金含有大量 β , 除淬火很慢足以制止 ω 的形成的情况以外, 合金的硬度均較低。

在 540°C 以下时效很短時間后, β 相开始轉变为 ω , 合金的硬度和强度大大提高。在 427°C 以下, 此种高的硬度保持很長時間。在 427~593°C 范围内时效, 合金則过时效以硬度曲綫图所示实际時間长度。这种部分地軟化便产生出鈦合金所显出的有用的机械性能。其原因是由于 ω 向 α 轉变的完成, 留下一種細的均匀的 α 沉淀在 β 基体中。