



# 热处理温度及冷却速度对 *Ti6Al4V* 组织和力学性能的影响

杨宝震<sup>1</sup>      田欣洋<sup>2</sup>

2023 年 3 月 27 日

<sup>1</sup> : 新疆大学机械工程学院教师

<sup>2</sup> : 新疆大学机械工程学院本科学生


## 摘要

Ti6Al4V 合金又名 TC4 合金，拥有较好的塑韧性、耐热性、成形性、耐蚀性等，在机械、军事、航空航天等领域获得了极为广泛的应用。但 TC4 合金仍存在硬度较低、摩擦磨损系数高、耐磨性能差、较低的塑韧性和力学性能上的各向异性等缺点，制约了其进一步的应用。结构决定组织，组织决定性能。合金的显微组织显然不能轻易被各种冷塑性变形所改变，而热处理恰恰具有这种控制结构、组织的能力。热处理制度的不同会带来不同的组织，进而得到各异的性能。对 Ti6Al4V 合金而言，普通处理方式得到的合金存在着硬度低、摩擦性能差的缺点，经过调研 Ti6Al4V 合金近几十年的研究可以发现固溶 + 时效处理是一种不错的强化手段，可以很好地调控合金的显微组织，提高强度、硬度与耐磨性，从而大幅改善构件的性能。

本文通过固溶时效处理 Ti6Al4V 合金的强度性能研究，分析了不同固溶时效工艺参数下处理 Ti6Al4V 合金的力学性能，旨在确定最佳的固溶温度、时效温度、失效时间等参数，为工程应用提供参考。本文全面系统地描述了 950 °C 附近固溶处理、550°C 附近时效处理所得的 Ti6Al4V 合金在室温下 10 240N 施加载荷范围内的力学性能与组织特征。在不同的参数下，确定合金的强度、硬度等力学参数，分析高性能的 Ti6Al4V 合金所处的工艺参数范围。并结合金相特征和电子显微镜分析测试结果，通过分析合金微观组织特征和力学性能变化，探索固溶体组织转变的机理。主要研究成果如下<sup>1</sup>：

- 1.（从热处理制度）在 950°C 进行固溶、550°C 进行时效处理时可以得到合金最佳的力学性能。
- 2.（从微观组织）冷却速率越高，得到组织所含  $\beta$  相含量越多，综合性能越好。
- 3.（从转变机理）时效时间越久，亚稳定  $\beta$  相分解的就越充分，得到的组织性能更好。

---

<sup>1</sup>  以下几点为胡诌，待实验结束后再整理之！

# 目 录

第一章 绪论	1
1.1 钛工业的发展历程与国内外现状	1
1.1.1 引言	1
1.1.2 钛与钛合金的特点	1
1.1.3 国外发展	2
1.1.4 国内发展	2
1.1.5 应用领域	3
1.2 钛合金的分类	3
1.2.1 合金元素	3
1.3 钛合金的显微组织	5
1.4 钛合金相变	6
1.5 钛合金组织分析方法	6
1.6 小结	6
第二章 TC4 钛合金的热处理实验	7
2.1 TC4 型钛合金的热处理工艺	7
2.2 TC4 钛合金的热处理方案设计	7
2.3 TC4 钛合金的热处理方案实验过程	7
2.4 小结	7
第三章 TC4 钛合金的力学性能实验与组织表征	8
3.1 TC4 钛合金的力学实验过程	8
3.2 TC4 钛合金的显微组织表征	8
3.3 小结	8
第四章 综合分析	9
4.1 基于机器学习的金相组织分析	9
4.2 性能与热处理的关系	9
4.3 微观机理	9
4.4 结论	9

# 第一章 绪论

## 1.1 钛工业的发展历程与国内外现状

### 1.1.1 引言

钛（Titanium），原子序数为 22，最早于 1791 年由格雷戈尔在英国康沃尔郡发现，是一种银白色的金属，具有密度小、比强度高、耐高温、化学性质稳定等明显优于传统金属的特性而备受重视。钛及钛合金常用来制造飞机、火箭等航天机械，一直以来都是航空航天工业的“脊柱”之一，被誉为“太空机械”<sup>[1]</sup>。与纯钛一同发展起来的钛合金也毫不逊色，钛合金是在纯钛的基础上添加了各种各样的合金元素而形成的合金，凭借其更高的强度、耐蚀性、抗高温性能，得到了广泛的应用，尤其是在机械制造、航空航天、化工、军工等领域，钛合金的占比更大。钛工业的发展水平在一定程度上是衡量一个国家航空航天、汽车工业等发展水平的重要标志<sup>[2]</sup>。

### 1.1.2 钛与钛合金的特点

钛合金具有密度小，强度高的显著特点，相较于高强度钢而言，不仅强度相差无几，而且还具有更大的比强度。

表 1.1 不同合金比强度比较表

合金	镁合金	铝合金	高强钢	钛合金
比强度	16	21	23	29

钛合金的特点如下<sup>[3]</sup>：

1. 熔点高，钛的熔点为 1668℃，比铁的熔点还高出 138℃。加入合金元素后可以获得极佳的热强性。
2. 弹性模量低，屈服强度高，适合做弹簧材料，高端赛车内部的弹簧大多数都是由钛合金制成，它同时还具有较好的耐磨性。
3. 表面极易生成致密的氧化层，在氧化性或中性介质中有较强的耐腐蚀能力。
4. 此外还有无磁性，形状记忆性等优良特点。
5. 化学活性高，当钛加热到 500℃ 以上时，氧化膜变得稀松且易脱落，在熔融状态下，极易发生自然。
6. 此外，某些钛合金还具有储氢、超导、低阻尼性，生物相容性、形状记忆、超弹、高阻尼等特殊功能。

由于钛合金具有以上诸多特点，目前已广泛应用于自动化、能源、航空航天、医疗卫生、汽车和家电等领域。

### 1.1.3 国外发展

钛工业的发展充满曲折。从钛元素的发现 (1791) 到第一次制得较纯的金属钛 (1910) 经历了 120 年的历程。又由实验室第一次获得纯钛 (1940) 到首次进行工业生产，又花费了近 30 年的时间。钛在自然界中主要以钛矿石的形式存在，如钛铁矿、金红石 ( $\text{TiO}_2$ ) 等，需要进行精炼 (refining) 才能获得纯金属。起初，钛的提取是通过高温还原法，但这种方法费时费力，成本高昂。直到了二十世纪四十年代，一种利用氯化钛矿与氯气进行反应来制备四氯化钛，然后通过还原反应（比如 Na、Mg 等）来得到纯钛的精炼工艺方法终于以其低廉的成本、高效的回收率得到了广泛的商业化应用。

第二次世界大战之后，世界上许多国家都开始意识到钛工业的重要性，钛工业在数年间便迅速发展成为航空、航天、军事等领域的关键材料。1954 年，美国成功研发出一种 Ti-6Al-4V 合金，这种合金在耐热性、强度、塑性、韧性、成形性、可焊性、耐蚀性和生物相容性方面均达到较高水平，使它成为钛工业的主要合金，并占据全部用钛量的 50% 以上，可以说，许多其他型号钛合金也可以作为 Ti-6Al-4V 的改良版<sup>[4]</sup>。

### 1.1.4 国内发展

我国的钛工业发展起源于 20 世纪 50 年代，在六七十年代，成为了世界上第四个拥有完整钛工业体系的国家。自 21 世纪以来我国钛工业进入高速发展阶段，产能与产量已经连续多年占据世界第一的位置，目前海绵钛产量占全球比重已经达到六成，钛加工材产量稳定增长，钛产品消费端需求旺盛<sup>[5]</sup>，无论是在生产还是在加工领域均保持在世界前列，我国已成为名副其实的世界钛工业大国。2014 年，浙江余杭高端钛材的研发投产，标志着中国彻底摆脱了对国外的依赖，填补了中国高端钛材的技术空白。<sup>[6]</sup>

目前，我国的钛产品消费正处于上升期，如工业、航空航天、海洋船舶和体育休闲等中高端领域的钛材料的需求量平均增长约 20%，而医疗行业受疫情影响，需求有所减少，电力和制盐等行业仍有小幅增长，整体盈利水平也有所改善<sup>[7]</sup>。

此外，近年来计算机技术的发展也为钛工业带来了新的发展机遇。计算机模拟技术用于优化钛合金的生产工艺，显著提高了产品质量。邵一涛等通过采用 BP 人工神经网络方法建立 TC17 钛合金组织与性能的关系模型，克服了传统 BP 人工神经网络训练高精度而预测低精度的过拟合问题<sup>[8]</sup>；计算机辅助设计和制

造技术也为钛制品的设计和生產带来了更多的可能，李淼泉等人对 TC6 合金叶片在等温锻造过程中初生  $\alpha$  晶粒尺寸的演变进行了数值模拟<sup>[9]</sup>，将有限元法与 Yada 微观组织模型结合起来，并给出了 TC6 合金叶片在等温锻造过程中初生  $\alpha$  相的分布和晶粒尺寸的变化。在未来，随着物联网、大数据、人工智能、AIGC 等技术的不断发展，钛工业也将迎来更多新的机遇和挑战。

### 1.1.5 应用领域

进入 21 世纪以来，钛工业在多个领域遍地开花。

- 在航空航天领域中，大型客机的研制如火如荼、军机也处于过渡时期，世界航空工业对钛合金的需求也随之迅猛增长。
- 在医疗健康领域，由于钛合金生物相容性良好，可以降低人体对植入物的排斥反应和感染风险，它也被广泛用于制造人工关节、牙科种植体和其他医疗设备。
- 在汽车制造领域，钛合金的应用主要集中在高档汽车的制造中。钛合金零部件可以减少车辆的自重，从而提高燃油效率和运行性能。同时，钛合金也具有优异的耐腐蚀性能，可以延长汽车零部件的使用寿命。
- 在建筑工程领域，钛合金被广泛应用于大型建筑的外墙幕墙、顶棚和立面系统。钛合金具有良好的耐候性和抗腐蚀性能，可以抵御各种恶劣气候条件的侵蚀，并且具有高度的可塑性和装饰性，可以为建筑带来更加优美的外观。

## 1.2 钛合金的分类

由于纯钛的塑性高，但强度很低，限制了其在工业生产中的应用。为了满足实际生产中高强度、耐腐蚀性等要求，可以向纯钛中添加一些合金元素形成钛合金。

### 1.2.1 合金元素

工业钛合金的主要合金元素为铝、钒、钼三种，此外还有 Cr、Mn、Fe、Cu、Sn、Zr、W 等元素组成，可以根据合金元素对钛多晶型转变温度的影响可将其分为三大类： $\alpha$  稳定元素、 $\beta$  稳定元素、中性元素，形成的四种类型的相图示意图如下：

具体来讲，就是根据  $\beta$  相稳定元素系数  $K_\beta$  来划分， $K_\beta$  是指合金中各  $\beta$  稳定元素与各自的临界浓度的比制之和，即：

$$K_\beta = \frac{C_1}{C_{k1}} + \frac{C_2}{C_{k2}} + \frac{C_3}{C_{k3}} + \cdots + \frac{C_n}{C_{kn}}$$

根据  $\beta$  相稳定系数划分合金类型为：

1.  $\alpha$  型合金  $K_\beta$  为 0 ~ 0.07

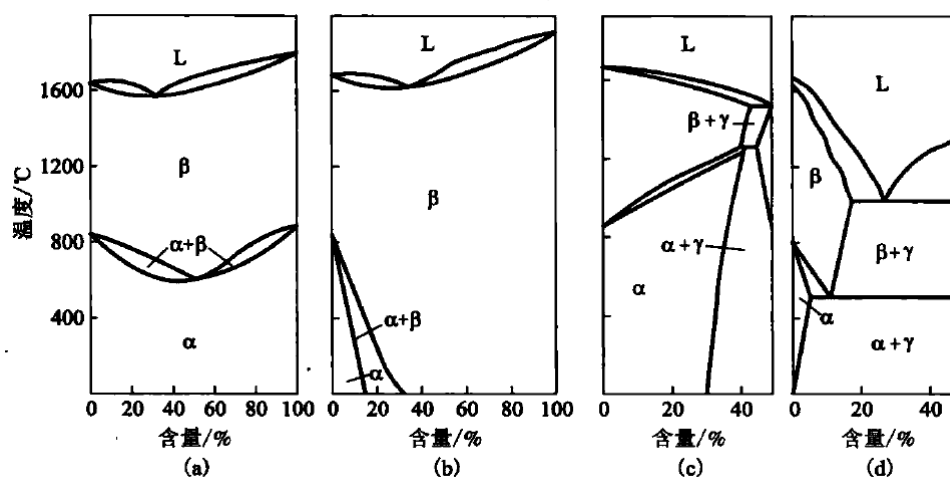


图 1.1 合金元素对钛合金相图的影响示意图

2. 近  $\alpha$  型合金  $K_\beta$  为 0.07 ~ 0.25
3.  $\alpha + \beta$  型合金  $K_\beta$  为 0.25 ~ 1.0
4. 近  $\beta$  型合金  $K_\beta$  为 1.0 ~ 2.8
5.  $\beta$  型合金  $K_\beta$  为 > 2.8

## $\alpha$ 型

$\alpha$  型钛合金经退火处理，其组织常以 \*\* 单相的  $\alpha$  固溶体 \*\* 或者以含微量金属化合物的  $\alpha$  固溶体形式存在，主要合金元素为铝、锡、锆等  $\alpha$  稳定元素，并少量含有钒、钼、铌等中性元素，各个元素均可起到固溶强化的作用。

常用的  $\alpha$  型钛合金包括 TA1、TA2、TA7 等。

$\alpha$  型钛合金的  $\beta$  相转变温度较高，因而具有良好的热强性、高温稳定性。焊接性能性好，并在高温环境下具有极好的组织稳定性和抗蠕变性能，在低温环境下也依然保持良好的延展性，因而适合制作各种飞行器形状复杂的外层板材。但它对热处理和组织类型不敏感，故不能采用热处理的方式强化其组织。

## $\beta$ 型

$\beta$  型钛合金中主要有钒、钼、铌、钽等  $\beta$  相稳定元素，若在合金中加入少量的铝、锆、锡，可提高  $\beta$  型钛合金的塑性并改善其热稳定性。

常见的  $\beta$  型钛合金有 TB1 TB5、TB7、TB10 等。

$\beta$  型钛合金的显微组织一般比  $\alpha$  型、 $\alpha + \beta$  型钛合金的显微组织更粗大。 $\beta$  型钛合金常表现出良好的冷成形、冷加工性能，较好的淬火态塑性以及可焊接性，但是亚稳态  $\beta$  型钛合金热稳定性较差  $\beta$  型钛合金含有较高的  $\beta$  稳定元素，主要分为稳定  $\beta$  型钛合金和亚稳定  $\beta$  型钛合金。稳定  $\beta$  型钛合金在平衡状态下全部



由稳定的  $\beta$  相，热处理后不易产生变化。

## $\alpha+\beta$ 型

$\alpha+\beta$  型钛合金经退火处理，所得到的室温组织为不同比例的  $\alpha$  和  $\beta$  相。该类型的钛合金中除含有定量的铝元素外，还含有少量的其它元素。可采用适当的热处理方法对  $\alpha+\beta$  型钛合金进行组织强化， $\alpha+\beta$  型钛合金的强度和淬透性随着  $\beta$  相稳定元素含量增加而提高，其锻造和轧制等加工成型性能优于  $\alpha$  型、 $\beta$  型钛合金。

最常用的  $\alpha+\beta$  型钛合金包括 TC4、TC6、TC12 等，其中 TC4 钛合金（等轴马氏体型两相合金）作为最早被应用的钛合金，该合金以其优越的性能占据了钛工业的大量市场，现在占到 Ti 合金总产量的 50%，占到全部 Ti 合金加工件的 95%。

## 1.3 钛合金的显微组织

众所周知，材料的最终性能是由显微组织的形态决定的，不同的组织对应于不同的力学性能，而微观组织形态主要取决于合金的化学成分、变形工艺和热处理方式等。

前面提到过：钛合金的基本组织是由密排六方的低温  $\alpha$  相和体心立方的高温  $\beta$  相构成。而且除了少数稳定  $\beta$  型钛合金之外，体心立方的高温  $\beta$  相一般都无法保留到室温，冷却过程中会发生  $\beta$  相向  $\alpha$  相的多晶转变，以片状形态从原始  $\beta$  晶界析出。片状组织由片状  $\alpha$  与片状  $\alpha$  之间的残余  $\beta$  相构成，由于其与母相之间存在着一定的结晶学位向关系，称为  $\beta$  转变组织。片状组织在  $\alpha + \beta$  两相区承受足够大的塑性变形后再结晶球化得到等轴组织。因此，按照晶内  $\alpha$  相的形状变化， $\alpha + \beta$  型钛合金的显微组织大致分为 4 类：

- 等轴组织：在  $\beta$  转变温度以下 30 ~ 100°C 加热，经过充分的塑性变形和再结晶退火形成。具有较好的塑性，延伸率和较高的断面收缩率，且抗缺口敏感性和热稳定性最好。综合性能好，使用广泛。
- 网篮组织：在  $\beta$  区加热或开始变形，在  $\alpha + \beta$  两相区的变形量不太大时形成。具有高的持久强度和蠕变强度，在热强性方面具有明显的优势，具有高的断裂韧性、低的疲劳裂纹扩展速率。缺点是塑性和热稳定性较低。
- 双态组织：在  $\alpha + \beta$  两相区的上部加热或者进行变形可以获得。双态组织兼顾了等轴组织和片状组织的优点，等轴  $\alpha$  含量在 20% 左右的双态组织具有强度 - 塑性 - 韧性 - 热强性的最佳综合匹配。与片状组织相比，双态组织具有更高的屈服强度、塑性、热稳定性和疲劳强度；与等轴组织相比，双态组织具有较高的持久强度、蠕变强度和断裂韧性，以及较低的疲劳裂纹扩展速率  $da/dN$ 。



- 魏氏组织：在较高温度的  $\beta$  区加热或变形量不够, 时可以形成。魏氏组织具有最高的蠕变抗力、持久强度和断裂韧性, 但是其致命的弱点是塑性低, 尤其是断面收缩率远低于其他组织类型。类似于钢中的过热组织, 在实际生产过程中没有特殊的需求应尽量避免。

表 1.2 不同组织的性能

机械性能	抗拉强度 $\sigma$ MPa	延伸率 $\delta\%$	冲击韧性	断裂韧性
片层组织	1020	9.5	355.3	102
网篮组织	1010	13.5	533	-
双态组织	980	13	434.3	-
等轴组织	961	16.5	473.8	58.9

## 1.4 钛合金相变

钛合金中的相变主要包括：多晶转变、共析转变、有序化、亚稳相等稳转变、非等温转变等。

## 1.5 钛合金组织分析方法

## 1.6 小结

## 第二章 TC4 钛合金的热处理实验

### 2.1 TC4 型钛合金的热处理工艺

### 2.2 TC4 钛合金的热处理方案设计

### 2.3 TC4 钛合金的热处理方案实验过程

### 2.4 小结

## 第三章 TC4 钛合金的力学性能实验与组织表征

### 3.1 TC4 钛合金的力学实验过程

### 3.2 TC4 钛合金的显微组织表征

### 3.3 小结

## 第四章 综合分析

### 4.1 基于机器学习的金相组织分析

### 4.2 性能与热处理的关系

### 4.3 微观机理

### 4.4 结论

## 参考文献

- [1] 李玲玲. 用碘化物精炼高纯钛[J/OL]. 新疆有色金属, 2001(48). DOI: [10.16206/j.cnki.65-1136/tg.2001.02.015](https://doi.org/10.16206/j.cnki.65-1136/tg.2001.02.015).
- [2] 马蕊王鹏, . TC4 钛合金电子束焊接头性能研究[J/OL]. 焊接技术, 2021(20-23). DOI: [10.13846/j.cnki.cn12-1070/tg.2021.09.012](https://doi.org/10.13846/j.cnki.cn12-1070/tg.2021.09.012).
- [3] EZUGWU E, WANG Z. Titanium alloys and their machinability—a review[J]. Journal of materials processing technology, 1997, 68(3): 262-274.
- [4] 高敬姚丽. 国内外钛合金研究发展动态[J]. 世界有色金属, 2001(4-7).
- [5] 申晨. 我国钛工业技术进展及趋势[J]. 中国金属通报, 2022(1-3).
- [6] 李梁孟祥军. 钛合金的应用现状及发展前景[J]. 钛工业进展, 2004(19-24).
- [7] AMP; YUFENG GUO G Q. Current situation and development trend of titanium metal industry in china[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2022(599-610).
- [8] 邵一涛韩远飞周建华 王晓英; 周义刚. 基于 BP 人工神经网络的 TC17 钛合金显微组织-力学性能关系预测[J]. 稀有金属材料与工程, 2011(225-230).
- [9] 史延沛李淼泉; 罗皎. TC4 钛合金叶片锻造过程中晶粒尺寸的数值模拟[J/OL]. 锻压装备与制造技术, 2009(101-104). DOI: [10.16316/j.issn.1672-0121.2009.02.014](https://doi.org/10.16316/j.issn.1672-0121.2009.02.014).