# ͱ 热处理温度及冷却速度对

*Ti6Al4V* 组织和力学性能的影响

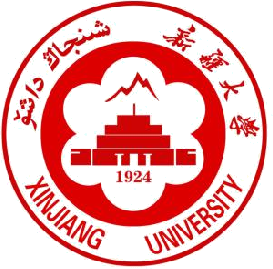
杨宝震1 田欣洋2

#### 2023 年 4 月 13 日

1 ̩：新疆大学机械工程学院教师

2 ϱ：新疆大学机械工程学院本科学生

# 新疆大学本科毕业论文(设计)



论文题目**:** 热处理温度及冷却速度对 **Ti6Al4V**

组织和力学性能的影响

学生姓名**:**

田欣洋

学 号： **20192000226**

所属院系： 智能制造与现代产业学院

专 业： 材料成型及控制工程

班 级： 材料 **2019-1**

指导老师**:** 杨宝震

日 期： **2023** 年 月 日

新疆大学毕业论文（设计）

## 新 疆 大 学

本科毕业论文（设计）任务书（2023 届）

学院： 智能制造现代产业（机械工程学院） 班级： 材料 19-1 姓名： 田欣洋

毕业论文(设计)题目： 热处理温度及冷却速度对 Ti6Al4V 组织和力学性能的影响

毕业论文(设计)工作自 2023 年 1 月 4 日起至 2023 年 5 月 30 日止

毕业论文(设计)题目的目的及意义

通过本研究使学生掌握合运材料学、材料加工、热处理工艺设计等方面知识，了解金属材料热处理过程组织转变过程，熟悉材料组织和力学性能的测试方法；培养学生学会并能综合运材料学、材料加工等方面知识，以及结合实际材料独立完成课题的工作能力。通过本研究使学生掌握合金的热处理工艺设计，了解金属材料热处理过程组织转变过程，熟悉材料组织和力学性能的测试方法。对材料设计、材料制备及力学性能分析知识进行综合梳理和总结；培养文献检索、钛合金

材料研究进展总结整理及合金材料力学性能测试能力；

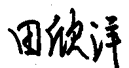
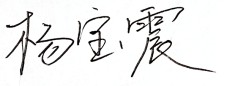
毕业论文(设计)的主要工作任务

1. 对 Ti6Al4V 合金研究现状进行调研，形成该材料研究进展报告；

2）设计合适的热处理工艺；

3）制备试样，测试试样力学性能，表征材料微观组织；

4）毕业设计论文一份。



指 导教 师： 教研室主任： 学 生签 名： 接受毕业论文(设计)任务日期： 2023.01.04

（注：本任务书由指导教师填写）

II

#### 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 ℃ 附近固溶处理、550℃ 附近时效处理所得的 Ti6Al4V 合金在室温下 10 240*𝑁* 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[1](#_bookmark0)：

1.（从热处理制度）在 950℃ 进行固溶、550℃ 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 *𝛽* 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 *𝛽* 相分解的就越充分，得到的组织性能更好。

关键字: 热处理；固溶；时效；组织；钛合金；工艺

1 以下几点为胡诌，待实验结束后再整理之！



新疆大学毕业论文（设计）

## 目 录

第一章 [绪论](#_bookmark1) [**1**](#_bookmark1)

* 1. [钛工业的发展历程与国内外现状](#_bookmark2) [1](#_bookmark2)
     1. [钛与钛合金的特点](#_bookmark3) [1](#_bookmark3)
     2. [国外发展](#_bookmark5) [2](#_bookmark5)
     3. [国内发展](#_bookmark6) [2](#_bookmark6)
     4. [应用领域](#_bookmark7) [3](#_bookmark7)
  2. [钛合金的分类](#_bookmark8) [3](#_bookmark8)
  3. [钛合金的显微组织](#_bookmark10) [5](#_bookmark10)
  4. [钛合金的相变](#_bookmark12) [6](#_bookmark12)
  5. [Ti6Al4V 合金研究进展](#_bookmark13) [7](#_bookmark13)
  6. [研究背景意义与研究内容](#_bookmark14) [7](#_bookmark14)
     1. [研究意义](#_bookmark15) [7](#_bookmark15)
     2. [研究内容](#_bookmark16) [8](#_bookmark16)
     3. [研究路线方法](#_bookmark17) [8](#_bookmark17)

第二章 [试样加工与热处理实验](#_bookmark19) [**9**](#_bookmark19)

* 1. [材料属性与试样加工过程](#_bookmark20) [9](#_bookmark20)
     1. [实验材料属性](#_bookmark21) [9](#_bookmark21)
     2. [试样加工](#_bookmark25) [10](#_bookmark25)
  2. [TC4 型钛合金的热处理工艺](#_bookmark28) [10](#_bookmark28)
  3. [TC4 钛合金的热处理方案设计](#_bookmark29) [11](#_bookmark29)
     1. [正交实验设计](#_bookmark30) [11](#_bookmark30)
     2. [正交实验分析方法](#_bookmark35) [13](#_bookmark35)
  4. [TC4 钛合金的热处理方案实验过程](#_bookmark36) [13](#_bookmark36)
     1. [实验设备](#_bookmark37) [13](#_bookmark37)
     2. [实验过程](#_bookmark41) [14](#_bookmark41)

2.5 [小结](#_bookmark42) [15](#_bookmark42)

第三章 [力学性能实验与组织表征](#_bookmark43) [**16**](#_bookmark43)

* 1. [TC4 钛合金的力学实验过程](#_bookmark44) [16](#_bookmark44)
  2. [TC4 钛合金的显微组织表征](#_bookmark45) [16](#_bookmark45)

3.3 [小结](#_bookmark46) [16](#_bookmark46)

ii

iii

第四章 [综合分析](#_bookmark47) [**17**](#_bookmark47)

* 1. [基于机器学习的金相组织分析](#_bookmark48) [17](#_bookmark48)
  2. [性能与热处理的关系](#_bookmark49) [17](#_bookmark49)
  3. [微观机理](#_bookmark50) [17](#_bookmark50)

4.4 [结论](#_bookmark51) [17](#_bookmark51)

[插图清单](#_bookmark52) [18](#_bookmark52)

[附表清单](#_bookmark53) [19](#_bookmark53)

[参考文献](#_bookmark54) [20](#_bookmark54)

[附录](#_bookmark75) [22](#_bookmark75)

[致谢](#_bookmark76) [23](#_bookmark76)

## 第一章 绪论

### 钛工业的发展历程与国内外现状

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 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”[[1](#_bookmark55)]。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[[2](#_bookmark56)]。

#### 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[[3](#_bookmark57)]：

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。

#### 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（TiO2）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[[4](#_bookmark58)]。

#### 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[[5](#_bookmark59)]，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。[[6](#_bookmark60)]

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[[7](#_bookmark61)]。

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[[8](#_bookmark62)]；计算机辅助设计和制

造技术也为钛制品的设计和生产带来了更多的可能，李淼泉等人对 TC6 合金叶片在等温锻造过程中初生 *𝛼* 晶粒尺寸的演变进行了数值模拟[[9](#_bookmark63)]，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 *𝛼* 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。

#### 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。

### 钛合金的分类

由于纯钛的强度很低，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。

#### 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：*𝛼* 稳定元素、*𝛽* 稳定元素、中性元素，形成的四种类型的相图示意图如图 1.1 所示。

工业上一般根据 *𝛽* 相稳定元素系数 *𝐾𝛽* 来划分不同的合金元素，*𝐾𝛽* 是指合金中各 *𝛽* 稳定元素与各自的临界浓度的比制之和，即：

*𝐾* = *𝐶*1 + *𝐶*2 + *𝐶*3 + · · · + *𝐶𝑛*

*𝛽 𝐶*

*𝑘*1

*𝐶𝑘*2

*𝐶𝑘*3

*𝐶𝑘𝑛*

根据 *𝛽* 相稳定系数划分合金类型为:

1. *𝛼* 型合金 *𝐾𝛽* 为 0 ∼ 0*.*07

2. 近 *𝛼* 型合金 *𝐾𝛽* 为 0*.*07 ∼ 0*.*25

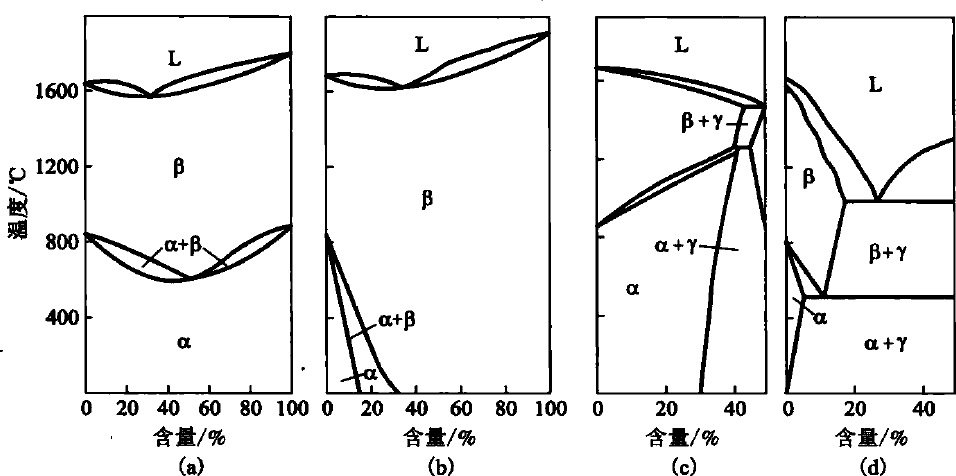


图 1.1 合金元素对钛合金相图的影响示意图

3. *𝛼* + *𝛽* 型合金 *𝐾𝛽* 为 0*.*25 ∼ 1*.*0

4. 近 *𝛽* 型合金 *𝐾𝛽* 为 1*.*0 ∼ 2*.*8

5. *𝛽* 型合金 *𝐾𝛽* 为 > 2.8

（1）*𝛼* 型

*𝛼* 型钛合金经退火处理，其组织常以单相的 *𝛼* 固溶体或者以含微量金属化合物的 *𝛼* 固溶体形式存在，主要合金元素为铝、锡、锆等 *𝛼* 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 *𝛼* 型钛合金包括 TA1、TA2、TA7 等。

*𝛼* 型钛合金的 *𝛽* 相转变温度较高，因而具有良好的热强性、高温稳定性。焊接性性能好，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[[10](#_bookmark64)]。

（2）*𝛽* 型

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

常见的 *𝛽* 型钛合金有 TB1 TB5、TB7、TB10 等。

*𝛽* 型钛合金的显微组织一般比 *𝛼* 型、*𝛼*+*𝛽* 型钛合金的显微组织更粗大。*𝛽* 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 *𝛽* 型钛合金热稳定性较差 *𝛽* 型钛合金含有较高的 *𝛽* 稳定元素，主要分为稳定 *𝛽* 型钛合金和亚稳定 *𝛽* 型钛合金。稳定 *𝛽* 型钛合金在平衡状态下全部由稳定的 *𝛽* 相，热处理后不易产生变化。

（3）*𝛼*+*𝛽* 型

*𝛼*+*𝛽* 型钛合金经退火处理，所得到的室温组织为不同比例的 *𝛼* 和 *𝛽* 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 *𝛼*+*𝛽* 型钛合金进行组织强化，*𝛼*+*𝛽* 型钛合金的强度和淬透性随着

*𝛽* 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 *𝛼* 型、*𝛽* 型钛合金。

最常用的 *𝛼*+*𝛽* 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）作为做早被应用的钛合金，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% 。

从成分上来看，这类钛合金中的合金元素基本上是以铝为主要合金元素，*𝛽* 稳定化元素为辅助元素。这使得 *𝛼*+*𝛽* 型钛合金组织变动的余地较为灵活，性能变动范围大，可以满足各种应用场合及工况要求[[10](#_bookmark64)]。

### 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 *𝛼* 相和体心立方的高温 *𝛽* 相构成。而且除了少数稳定 *𝛽* 型钛合金之外, 体心立方的高温 *𝛽* 相一般都无法保留到室温, 冷却过程中会发生 *𝛽* 相向 *𝛼* 相的多晶转变, 以片状形态从原始

*𝛽* 晶界析出。片状组织由片状 *𝛼* 与片状 *𝛼* 之间的残余 *𝛽* 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 *𝛽* 转变组织。片状组织在 *𝛼* + *𝛽* 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 *𝛼* 相的形状变化, *𝛼* + *𝛽* 型钓合金的显微组织大致分为 4 类：

* 等轴组织：在 *𝛽* 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縮率，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 *𝛽* 区加热或开始变形, 在 *𝛼* + *𝛽* 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 *𝛼* + *𝛽* 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 *𝛼* 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、蜻变强度和断裂韧性, 以及较低的疲劳裂纹扩展速率 d*𝑎*/d*𝑁* 。

* 魏氏组织：在较高温度的 *𝛽* 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 *𝜎* MPa | 延伸率 *𝛿*% | 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 |

### 钛合金的相变

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。

由于 *𝛽* 钛合金的用途更为广泛，本设计侧重于对 *𝛽* 合金进行说明。众所周知，*𝛽* 钛合金按照亚稳定状态相组成可分为 3 类：稳定 *𝛽* 型钛合金、亚稳定 *𝛽* 型钛合金和近 *𝛽* 型钛合金。其中亚稳态 *𝛽* 合金的综合性能最好，其相变过程也最复杂。

亚稳定 *𝛽* 相的分解

亚稳定 *𝛽* 相的分解的分解过程如下：

1. 当加热温度较低时，*𝛽* 相将分解为无数极小的溶质原子贫化区 *𝛽*′ 和与其相邻的溶质原子富集区 *𝛽*。
2. 随着加热温度升高或加热时间延长，则根据 *𝛽* 相化学成分不同而从溶质原子贫化区中析出 w 相或 *𝛼*” 相。
3. 最后在贫化区析出的 *𝛼*” 和 w 相分解为平衡的 *𝛼* 和 *𝛽* 相。

出现这种逐步分解的原因就在于虽然成分范围宽广的钛合金，通过快速冷却 *𝛽* 相可以保持在亚稳定状态，随后在高于室温的温度下逐渐分解，但是在温度不太高的情况下，由于密排六方点阵的 *𝛼* 相在体心立方点阵的 *𝛽* 相基体中生核比较困难，而一些中间分解产物比较容易生核，因此，亚稳定 *𝛽* 相不能直接分解形成平衡的 *𝛼* 相，而是经过一些中间分解过程，由生成的一些中间分解产物

（或称过渡相）再转变为平衡的 *𝛼* 相。至于形成哪一种过渡相，取决于加热温度和合金成分。

### Ti6Al4V 合金研究进展

近些年来国内对于 Ti6Al4V 合金的研究，主要在热处理工艺上取得了较多成果[[11](#_bookmark65)]。

1. 固溶处理：实施固溶处理工艺，是为了得到等轴稳定的 *𝛼* 相、马氏体弥散的

*𝛼*′ 相、亚稳定状态的 *𝛽* 相，等轴的 *𝛼* 相能够让合金的力学性能得到综合性的提升，马氏体弥散的 *𝛼*′ 相能够让合金，在强度、硬度上得到提高，塑性、韧性被降低[[12](#_bookmark66)]。

1. 时效处理：有研究[[13](#_bookmark67)]发现，次生的 *𝛼* 相体积分数在TC4 钛合金中，会对屈服强度产生很大的影响。在条件相等的情况之下，时效温度越低组织越小，时效温度高低组织越大。研究人员主要是通过控制参数，来影响对次生 *𝛼* 相的含量，从而来实现 TC4 钛合金在力学的性能上得到更好的提升。
2. 深冷处理：深冷处理是近些年来新兴的一种处理工艺，其可以对金属内部的 组织进行改善，在进行深冷处理的时候操作比较方便，对环境也不会造成太 大的污染，并且能够让在热处理之后残留的奥氏体被清除掉。实验研究发现，

原始的 *𝛽* 相会在深冷处理的过程当中，逐渐的向 *𝛼*′ 相去转变，残余应力在组

织中会变少，与此同时网篮状组织的增加，会让 TC4 钛合金的韧性、强度、塑性，在组织上的性能得到提高。

### 研究背景意义与研究内容

#### 研究意义

Ti6Al4V 合金具有比强度高、生物相容性好、耐高温、化学性质性质稳定， 等优良特性，在航空航天、汽车工业、医疗健康领域等领域得到了广泛应用，是目前应用最广泛的钛合金。但其室温塑性较低，加工硬化能力较差，冷加工成型困难。目前相关研宄中，提升 TC4 钛合金室温塑性的手段包括添加合金元素、剧烈塑性变形和相变热处理等。其中，前两种对于塑性提升明显，但工艺复杂、成本较高[[14](#_bookmark68)]，而第三种方法虽然工艺简单，成本低，但是合适的工艺参数很难确 定。本设计的目的就是确定 Ti6Al4V 合金最佳的热处理工艺参数。

#### 研究内容

本设计对 TC4 钛合金进行两相区热处理，重点研究不同固溶温度和冷却方式、时效的温度和时间下，TC4 合金显微组织与力学性能的变化规律，重点关注 *𝛽* 相稳定性变化及其对钛合金加工硬化和塑性的影响，以期为实际生产中探索高塑性 TC4 钛合金加工工艺提供理论依据。具体的步骤是：从 Ti6Al4V 合金板材中切取试样，采用JC-MF12-30型箱式电阻炉进行固溶时效热处理，采取的热处理工艺见第二节。将热处理好的试样，打磨抛光后进行腐蚀，腐蚀液的配比为*𝐻𝑁𝑂*3最后在 PMG3 型倒置式光学金相显微镜下进行观察拍照。室温力学性能测试在 AG-1250 精密万能试验机上按 GB/T228-2002 进行试验。

#### 研究路线方法

本设计采用实验 + 分析的研究方法，热处理在JC-MF12-30型箱式电阻炉中进行。热处理完成后，进行了断裂形态的显微组织分析、拉伸力学试验、仪器冲击试验、X 射线衍射（XRD）试验和环境扫描电子显微镜（ESEM）观察，研究的路线如[图 1.2](#_bookmark18)所示：

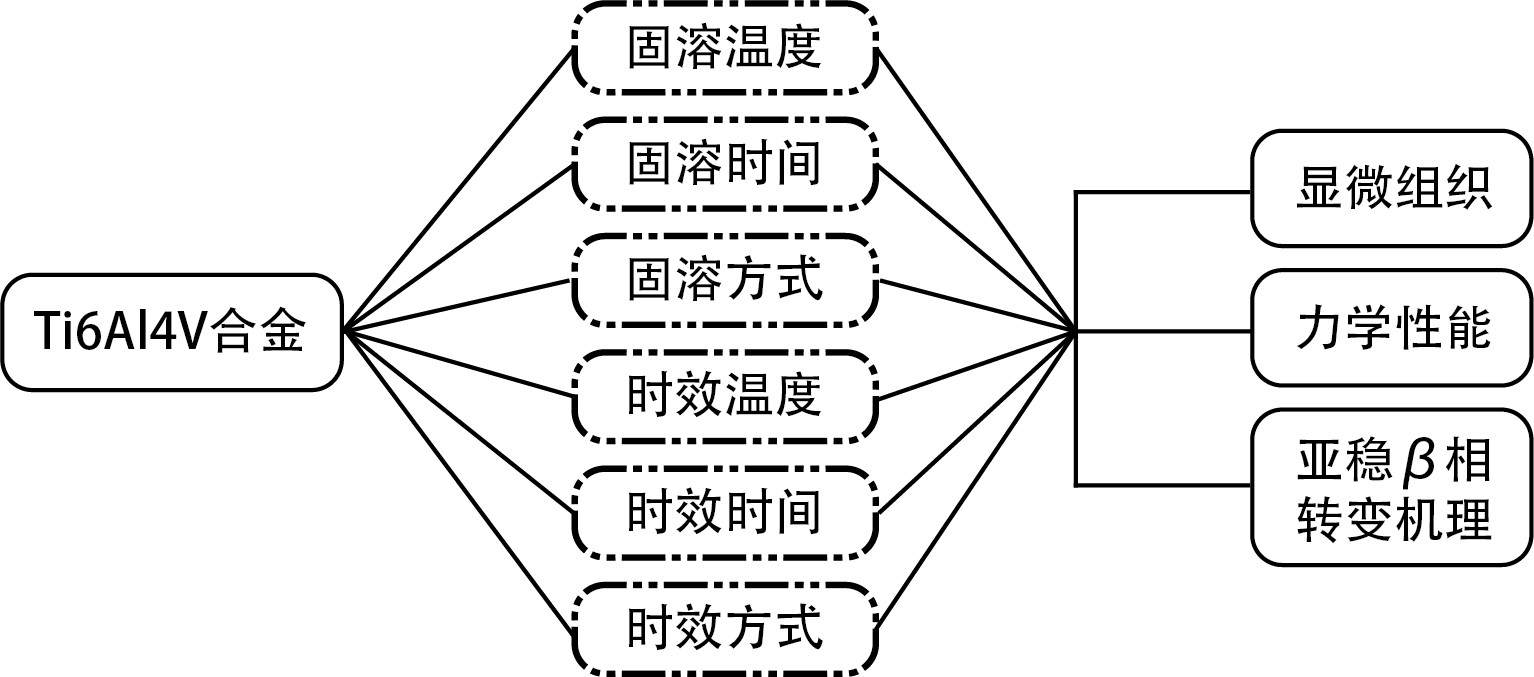


图 1.2 研究路线图

## 第二章 试样加工与热处理实验

### 材料属性与试样加工过程

#### 实验材料属性

实验用的是真空自耗两次熔炼所得的钛合金板，其化学成分参数与室温

（20℃）力学性能参数如[表 2.1](#_bookmark22)与[表 2.2](#_bookmark23)所示：

表 2.1 试样的化学成分参数

元素（%） Al V Fe C O N H 其他杂质

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 实际含量 | 6.12 | 4.06 | 0.13 | 0.012 | 0.112 | 0.009 | 0.004 ≤ 0*.*4 |
| 标准要求 | 5*.*5 ∼ 6*.*75 | 3*.*5 ∼ 4*.*5 | ≤ 0*.*30 | ≤ 0*.*05 | ≤ 0*.*20 | ≤ 0*.*03 | ≤ 0*.*015 – |

表 2.2 试样的力学性能参数

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 力学性能 | 抗拉强度 *𝑀 𝑝𝑎* | 屈服强度 *𝑀 𝑝𝑎* | 断后伸长率 % |
| 实测值 | 983 | 902 | 13 |
| 标准值 | ≥ 895 | ≥ 830 | ≥ 10 |

为了节约成本，本设计选择了尺寸较小的试样来进行实验，整体尺寸为

25*𝑚𝑚* × 7*.*5*𝑚𝑚* 的狗骨状片体，具体参数如[图 2.1](#_bookmark24)所示：

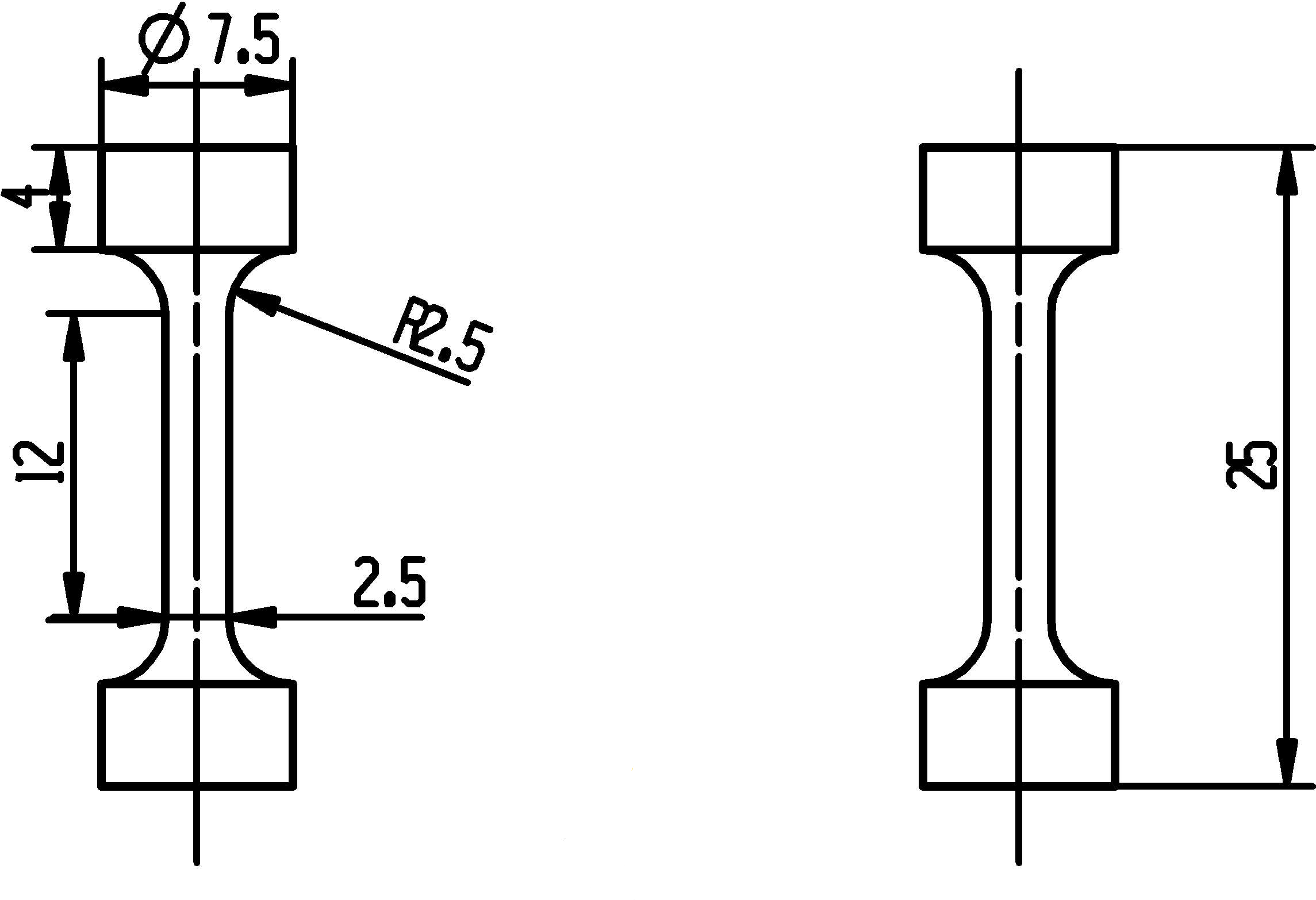


图 2.1 试样的尺寸参数

#### 试样加工

本设计采用电火花线切割加工（Wire cut Electrical Discharge Machin- ing，简称 WEDM）的方法进行加工。在一开始只考虑了材料的利用率，就设计了如[图 2.2](#_bookmark26)所示的密集排列。但是在实际加工的时候，却发现在这样的设计方式根本不可行——没有夹具的位置，且刀路比较长。

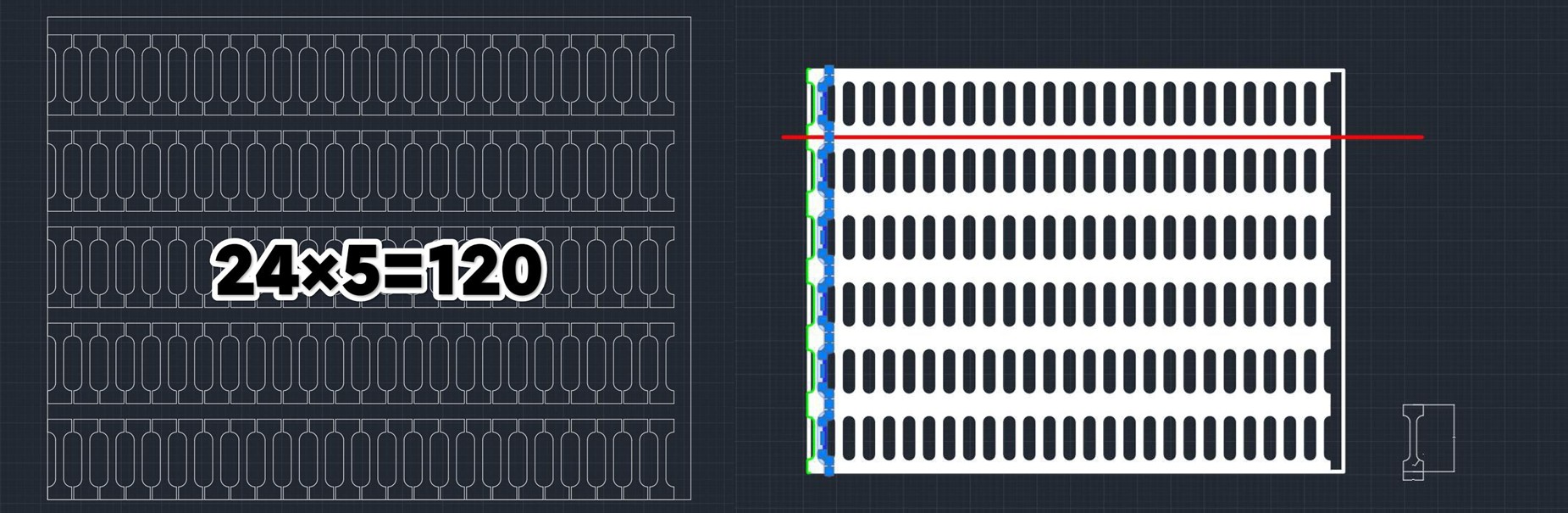


图 2.2 初步设计的刀路

在仔细考虑了加工方法、设备特点、加工成本等因素后，在工程训练中心张冠老师的协助下，将加工方式改进成了：先把大板切割成八个小板，再把小板叠在一起进行加工。的方法，最终切割出来了 7 × 8 = 56 个试样。

图 2.3 堆叠式切割

### TC4 型钛合金的热处理工艺

由 [节 1.2](#_bookmark8)可知，钛合金可以通过各种各样的相变过程来得到不同的组织结构。因而可以设计适宜的热处理工艺参数，来获得具有高强度的显微组织，由此

实现 Ti6Al4V 合金力学性能和工艺性能的改善。Ti6Al4V 合金热处理的一些特性如下：

1. α+β 钛合金的淬透性差，淬火热应力大，淬火时零件易翘曲。由于导热性差， 钛合金变形时易引起局部温升过高，使局部温度有可能超过 β 转变点而形成魏氏组织。
2. 化学性质活泼。热处理时，钛合金易与氧和水蒸气反应，在工件表面形成具有一定深度的富氧层或氧化皮，使合金的性能降低。同时钛合金热处理时容易吸氢，引起氢脆。
3. β 转变点差异大。即使是同一成分，但由于冶炼炉次的不同，其 β 转变温度有时差别很大。

常见的Ti6Al4V 钛合金热处理工艺有：退火、淬火 (往往加上时效处理)、形变热处理等，不同的热处理方式得到的组织性能各异。鲁媛媛, 马保飞等人研究发现在时效温度为 450、500 和 550℃ 时初生 α 相的含量随温度升高逐渐增加; 而在时效温度为 600℃ 和 650℃ 条件下初生 α 相含量因高温溶解而明显减少, β 相尺寸相应增大。当时效温度为 550℃ 时, 所得钛合金的显微组织最佳[[13](#_bookmark67)]。刘婉颖、林元华等人通过实验发现：在 960 ℃/1 h + WQ 进行固溶处理和 500 ℃/4 h

+ AC 下进行时效处理得到的Ti6Al4V 具有最佳的力学性能[[15](#_bookmark69)]；陈冠宇通过实验表明，在 850℃ 进行退火处理时，在 600℃ 进行时效处理可以使合金得到更好的耐腐蚀性能[[16](#_bookmark70)]；李宸宇证明 Ti6Al4V 合金在 900℃ 空冷固溶两小时在 530℃ 时效四小时后具有更好的强硬度，而且固溶后冷速越快，合金的强硬度越高、塑韧性越差[[17](#_bookmark71)]。

### TC4 钛合金的热处理方案设计

对于 α+β 型的 Ti6Al4V 钛合金的固溶时效热处理工艺而言，其主要影响参数为温度和时间。在阅读了一些前人的研究报告[[18](#_bookmark72)] [[19](#_bookmark73)]之后，初步确定了固溶处理的最佳温度为 *𝛽* 相变点以下 30℃ 左右处理一个小时、时效温度在 450℃ 左右处理三个小时后，组织组成与综合力学性能最好，于是本设计首先确定了如下四个变量：固溶温度、固溶方式、时效温度、时效时间。

#### 正交实验设计

用正交实验代替传统的控制变量法来提高实验效率、材料利用率。传统的控制变量法在面对低因素、低水平的实验时可以设计出很清晰直观的实验，但是面对多因素（变量）、多水平的实验时，控制变量法就显得极为繁琐了。比如一个含有三个变量，每个变量有三个水平的实验就需要 3 × 3 × 3 = 27 次实验，为了直观性而牺牲大量的成本、同时包含了太多无关的对照组，这样的实验设计在很

大程度上是不符合可持续发展理念的，是在浪费资源。但好在有另外一种方法可以解决问题——正交试验设计法 (Orthogonal experimental design)。

正交实验设计是研究多因素多水平的又一种设计方法，它是根据正交性从 全面试验中挑选出部分有代表性的点进行试验，这些有代表性的点具备了“均匀分散，齐整可比”的特点[[20](#_bookmark74)]。当实验次数太多时，根据正交实验设计，实验者可以选择一部分有代表性水平组合进行试验。例如前面说的三因素三水平的实验， 若按 *𝐿*9(34) 正交表安排实验，只需作 9 次，按 *𝐿*15(37) 正交表进行 15 次实验， 显然大大减少了工作量。

在没有通过正交实验设计之前，笔者的实验是如[表 2.3](#_bookmark31)这样设置的：

表 2.3 Ti6Al4V 原本的热处理制度设计

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 固溶温度/℃ | 处理时间/h | 冷却方法 | 时效温度/℃ | 处理时间/h | 冷却方法 |
| 910 | 1 | WQ | 510 | 4 | AC |
| 910 | 1 | FC | 510 | 4 | AC |
| 910 | 1 | WQ | 550 | 4 | AC |
| 910 | 1 | FC | 550 | 4 | AC |
| 910 | 1 | WQ | 590 | 4 | AC |
| 910 | 1 | FC | 590 | 4 | AC |
| 950 | 1 | WQ | 510 | 4 | AC |
| 950 | 1 | FC | 510 | 4 | AC |
| 950 | 1 | WQ | 550 | 4 | AC |
| 950 | 1 | FC | 550 | 4 | AC |
| 950 | 1 | WQ | 590 | 4 | AC |
| 950 | 1 | FC | 590 | 4 | AC |
| 990 | 1 | WQ | 510 | 4 | AC |
| 990 | 1 | FC | 510 | 4 | AC |
| 990 | 1 | WQ | 550 | 4 | AC |
| 990 | 1 | FC | 550 | 4 | AC |
| 990 | 1 | WQ | 590 | 4 | AC |
| 990 | 1 | FC | 590 | 4 | AC |

从[表 2.3](#_bookmark31)可见，如果按照控制变量法设计实验，则至少需要 3 × 2 × 3 = 18 次实验，才能穷举完所有变量各个水平之间的关系。为了给子孙后代留下天蓝、地绿、水清的美丽家园[1](#_bookmark32)，本实验高举可持续发展理念伟大旗帜，并结合正交实验方法 *𝐿*9*.*3*.*4对实验进行了优化。最终的热处理制度如下表所示[2](#_bookmark33)

1 出自 2022 年 6 月 5 日，习近平致 2022 年六五环境日国家主场活动的贺信

2 其中 WQ 表示水冷、FC 表示炉冷、AC 表示空冷。

表 2.4 Ti6Al4V 合金的热处理制度

实验编号 固溶温度/℃ 处理时间/h 冷却方法 时效温度/℃ 处理时间/h 冷却方法

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 910 | 1 | WQ | 510 | 1 | AC |
| 2 | 910 | 1 | FC | 590 | 2 | AC |
| 3 | 910 | 1 | WQ | 550 | 3 | AC |
| 4 | 950 | 1 | WQ | 590 | 3 | AC |
| 5 | 950 | 1 | FC | 550 | 1 | AC |
| 6 | 950 | 1 | WQ | 510 | 2 | AC |
| 7 | 990 | 1 | WQ | 550 | 2 | AC |
| 8 | 990 | 1 | FC | 510 | 3 | AC |
| 9 | 990 | 1 | WQ | 590 | 1 | AC |

#### 正交实验分析方法

经过正交实验方法设计的实验虽然节省了试验次数，但是不能兼顾直观性， 因而我们需要专门的分析工具才能分析出来，不同变量之间的相关性。

# 待补充

### TC4 钛合金的热处理方案实验过程

#### 实验设备

本次设计热处理实验所用的设备为JC-MF12-30型箱式电阻炉，外观如[图](#_bookmark39)

* 1. 所示，设备规格如[表 2.5](#_bookmark38)所示：

表 2.5 JC-MF12-30型箱式电阻炉的规格

|  |  |
| --- | --- |
| 参数 | 值 |
| 型号 | JC-MF12-30 |
| 编号 | 803229 |
| 电压 | 380V |
| 功率 | 12KW |
| 常用温度 | 1150℃ |
| 最高温度 | 1200℃ |
| 炉膛尺寸 | 500× 300× 200(mm)  2023 年 2 月 |

制造日期

制造商 青岛聚创® 环保集团有限公司

固溶实验需要淬火，用到的淬火液体如[图 2.5](#_bookmark40)所示：



图 2.4 马弗炉外形



* + 1. 水淬液 (b) 淬火油

图 2.5 淬火用的液体

#### 实验过程

本次实验需要进行两次热处理——固溶与时效，基本步骤大同小异：

1. 设定好预定的温度梯度与加热时间。
2. 当温度到了预设值附近，戴好隔热手套，镊住式样，开炉门，快速准确放置好试样。
3. 保温了足够时间后，开炉门，迅速夹取处理后的试样，并放入准备好的对应淬火液中。
4. 擦拭淬火后的试样，处理表面脱落，归类试样。

### 小结

## 第三章 力学性能实验与组织表征

### TC4 钛合金的力学实验过程

### TC4 钛合金的显微组织表征

### 小结

## 第四章 综合分析

### 基于机器学习的金相组织分析

### 性能与热处理的关系

### 微观机理

### 结论

## 插图清单

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 图 1.1 | [合金元素对钛合金相图的影响示意图](#_bookmark9) · · · · · · · · · · · · · · · · · · · | [4](#_bookmark9) |
| 图 1.2 | [研究路线图](#_bookmark18)· · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · | [8](#_bookmark18) |
| 图 2.1 | [试样的尺寸参数](#_bookmark24) · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · | [9](#_bookmark24) |
| 图 2.3  图 2.3  图 2.5 | [初步设计的刀路](#_bookmark26) · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·  [堆叠式切割](#_bookmark27)· · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·  [马弗炉外形](#_bookmark39)· · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · | [10](#_bookmark26)  [10](#_bookmark27)  [14](#_bookmark39) |
| 图 2.5 | [淬火用的液体](#_bookmark40) · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · · | [14](#_bookmark40) |

## 附表清单

表 1.1 [不同合金比强度比较表](#_bookmark4) [1](#_bookmark4)

表 1.2 [不同组织的性能](#_bookmark11) [6](#_bookmark11)

表 2.2 [试样的化学成分参数](#_bookmark22) [9](#_bookmark22)

表 2.2 [试样的力学性能参数](#_bookmark23) [9](#_bookmark23)

表 2.4 [Ti6Al4V 原本的热处理制度设计](#_bookmark31) [12](#_bookmark31)

表 2.5 [Ti6Al4V 合金的热处理制度](#_bookmark34) [13](#_bookmark34)

表 2.5 [JC-MF12-30型箱式电阻炉的规格](#_bookmark38) [13](#_bookmark38)

## 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: [10.1](https://doi.org/10.16206/j.cnki.65-1136/tg.2001.02.015) [6206/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. GUO G Q Y. Current situation and development trend of tita- nium metal industry in china[J]. International Journal of Miner- als,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](https://doi.org/10.16316/j.issn.1672-0121.2009.02.014)

[-0121.2009.02.014](https://doi.org/10.16316/j.issn.1672-0121.2009.02.014).

* + 1. 邢淑仪，王世洪编. 铝合金和钛合金[M]. 北京：机械工业出版社, 1987.10.
    2. 郭凯何忝锜; 和蓉. TC4 钛合金热处理工艺的研究现状及进展[J]. 世界有色金属, 2021(16-17).
    3. 王新英谢成木. ZTC4 钛合金固溶时效热处理工艺研究[J]. 金属学报, 2002 (z1): 4.
    4. 鲁媛媛马保飞; 刘源仁. 时效处理对TC4 钛合金微观组织和力学性能的影响[J/OL]. 金属热处理, 2019(34-38). DOI: [10.13251/j.issn.0254-6051.2019](https://doi.org/10.13251/j.issn.0254-6051.2019.07.007)

[.07.007](https://doi.org/10.13251/j.issn.0254-6051.2019.07.007).

* + 1. 刘子霖. TC4 钛合金两相区热处理组织与性能研究[D]. 东南大学, 2021.
    2. 刘婉颖陈宇海施太和；Ambrish Singh. 不同热处理工艺对Ti6Al4V 钛合金微观结构和力学性能影响（英文）[J]. 稀有金属材料与工程, 2017(634-639).
    3. 陈冠宇. 热处理工艺对TC4 钛合金腐蚀性能的影响[D/OL]. 河北：石家庄铁道大学, 2021. DOI: [10.27334/d.cnki.gstdy.2021.000355.](https://doi.org/10.27334/d.cnki.gstdy.2021.000355)
    4. 李宸宇. 热处理对 TC4 钛合金组织结构及铣削加工性能的影响[D/OL]. 合

肥工业大学, 2021. DOI: [10.27101/d.cnki.ghfgu.2021.001505.](https://doi.org/10.27101/d.cnki.ghfgu.2021.001505)

* + 1. 刘磊吴建 ;. Ti6Al4V 钛合金不同热处理方法的试验与复合材料力学性能分析[J]. 粘接, 2022(119-123).
    2. 冉兴李海宾 吕志刚; 李培杰. 固溶温度对 Ti6Al4V ELI 钛合金显微组织及性能的影响[J]. 钢铁钒钛, 2021(66-71).
    3. 王学深. 正交试验设计法[J]. 上海人民出版社.

## 附录

附录编号依次编为附录 1，附录 2。附录标题各占一行，按一级标题编排。每一个附录一般应另起一页编排，如果有多个较短的附录，也可接排。附录中的图表公式另行编排序号，与正文分开，编号前加“附录 1-”字样。

每位学生须阅读一定的专业外文资料（专著、期刊、学位论文、论文集、报纸文章、报告、标准、专利、教材、网络资料等），通过文献查阅与阅读，进一步提高使用外文的能力，熟悉本专业的几种主要外文书刊，了解毕业论文（设计） 课题的国内外信息与动态。

翻译的原文应该是来源于学校认可的数据库资源，且是与毕业论文（设计） 题目密切相关的资料。译文字数 3000 字符左右，要求译文与原文内容相符。

译文要求：

1.（1）标题（2）署名（3）翻译正文（4）外文著录

2. 附被翻译文字资料原件的复印件

## 致谢

致谢：对于毕业论文（设计）的指导教师，对毕业论文（设计）提过有益的建议或给予过帮助的同学、同事与集体，都应在论文的结尾部分书面致谢，言辞应恳切、实事求是。应注明受何种基金支持（没有可不写）。