

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 5 月 4 日

¹ ：新疆大学机械工程学院教师

² ：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)



新疆大学
Xinjiang University

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

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：

杨宝震

教研室主任：

李长勇

学生签名：

田欣洋

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)

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 合金存在着硬度低、摩擦磨损系数高、耐磨性能差等缺点，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。不同的热处理制度会形成不同的组织，进而引起性能的差异。对 Ti6Al4V 合金而言，常规处理方式得到的合金存在着强硬度偏低、摩擦性能差等缺点，经过调研 Ti6Al4V 合金近几十年的研究可以发现：固溶 + 时效处理是一种比较理想的强化手段，可以通过调控合金的显微组织，从而大幅改善合金的强度、硬度与耐磨性。

本文通过对比九个不同固溶-时效处理工艺参数后得到的 Ti6Al4V 合金，分析了不同参数下处理 Ti6Al4V 合金的力学性能，旨在进一步确定 TC4 合金的最佳固溶温度、时效温度、时效时间等参数，为实际工程应用提供参考。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。得到了力学性能优良的热处理后 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. (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 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

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 钛与钛合金的特点 ······	1
1.1.2 国外发展 ······	2
1.1.3 国内发展 ······	2
1.1.4 应用领域 ······	3
1.2 钛合金的分类 ······	3
1.3 钛合金的显微组织 ······	5
1.4 钛合金的相变 ······	6
1.5 Ti6Al4V 合金研究进展 ······	7
1.6 研究背景意义与研究内容 ······	7
1.6.1 研究意义 ······	7
1.6.2 研究内容 ······	8
1.6.3 研究路线方法 ······	8
第二章 试样加工及研究方法设计 ······	9
2.1 材料属性与试样加工过程 ······	9
2.1.1 实验材料属性 ······	9
2.1.2 β 转变温度的计算 ······	9
2.1.3 试样加工 ······	11
2.2 TC4 钛合金的热处理方案设计 ······	11
2.2.1 TC4 合金的热处理工艺性能 ······	11
2.2.2 TC4 合金热处理工艺设计 ······	12
2.2.3 优化实验设计 ······	12
2.3 TC4 钛合金的热处理方案实验过程 ······	14
2.3.1 实验设备 ······	14
2.3.2 固溶处理实验过程 ······	14
2.3.3 时效处理实验过程 ······	16
第三章 力学性能实验与组织表征 ······	17
3.1 TC4 钛合金的力学实验过程 ······	17
3.2 TC4 钛合金的显微组织表征 ······	18

第四章 综合分析	19
4.1 固溶处理的影响	19
4.1.1 固溶温度对组织性能的影响	19
4.1.2 冷却方式对组织性能的影响	20
4.2 时效处理的影响	21
4.2.1 时效温度对组织性能的影响	21
4.3 结论	22
插图清单	23
附表清单	24
参考文献	25
附录	28
致谢	29

第一章 绪论

1.1 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]。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、汽车工业等领域发展水平的重要标志^[2]。

1.1.1 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]：

1. 熔点高。钛的熔点为 1660°C，比铁的熔点还高出 120°C 左右。此外，在钛中加入铝、锆、锡等合金元素后，可以提高其热强性。
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。
3. 具有良好耐磨性、耐腐蚀性。钛表面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. 化学活性高。当钛加热到 500°C 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。
5. 特殊性能多。某些类型的钛合金还具有储氢、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。

1.1.2 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(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Ti-6Al-4V合金，该合金在耐热性、强度、塑性、韧性、耐蚀性和生物相容性等方面均达到较高水平，凭借性能上的优势，Ti6Al4V迅速成为钛工业的主要合金，现已占据全部用钛量的50%以上，甚至可以说，许多其他型号钛合金不过是Ti-6Al-4V的改良版而已^[4]。

1.1.3 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，我国成为了全球第四个建立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]，无论是在生产还是在加工领域均保持在世界前列。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]

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]。

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。邵一涛等人利用BP人工神经网络的方法，构建了TC17钛合金组织和性能之间的关系模型，解决了传统BP人工神经网络的过拟合问题，从而获得更高的预测精度^[8]；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]，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。

1.1.4 应用领域

- 在航空航天领域，大型客机的设计制造推进迅速，同时军用飞机也在不断更新换代，因此全球钛合金的需求量也在急速增长。
- 在医疗健康领域，钛合金材料有着良好的生物相容性，可以降低人体对植入物的排斥反应和感染风险，因此广泛用于人工关节、牙科种植体和其他医疗设备的制造。
- 在汽车制造领域，高级车型的制造中广泛采用了钛合金零部件，以降低整车自重，提高燃油效率和汽车的运行性能。此外，钛合金耐腐蚀性好也能延长汽车零部件的使用寿命。
- 在建筑工程领域，钛合金广泛应用于大型建筑的外墙幕墙、顶棚和立面系统中。这种材料具有优秀的耐候和抗腐蚀性能，可抵御各种恶劣气候的侵蚀，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效果。

1.2 钛合金的分类

因为纯钛的强度较低，限制了其在工业生产中的应用范围。钛合金是通过在纯钛中添加一些合金元素来提高其强度、耐腐蚀性等性能而形成的。常用的合金元素有铝、钒、锆、锂、铁、铜、镍等，通过调整元素配比和控制制备工艺，可以获得适合不同领域应用的各种高性能钛合金材料。

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 K_β 来划分不同的合金元素， K_β 是指合金中各 β 稳定元素与各自的临界浓度的比值之和，即：

$$K_\beta = \frac{C_1}{C_{k1}} + \frac{C_2}{C_{k2}} + \frac{C_3}{C_{k3}} + \cdots + \frac{C_n}{C_{kn}} \quad (1.1)$$

根据 β 相稳定系数划分合金类型为：

1. α 型合金 K_β 为 $0 \sim 0.07$
2. 近 α 型合金 K_β 为 $0.07 \sim 0.25$
3. $\alpha + \beta$ 型合金 K_β 为 $0.25 \sim 1.0$
4. 近 β 型合金 K_β 为 $1.0 \sim 2.8$
5. β 型合金 K_β 为 > 2.8

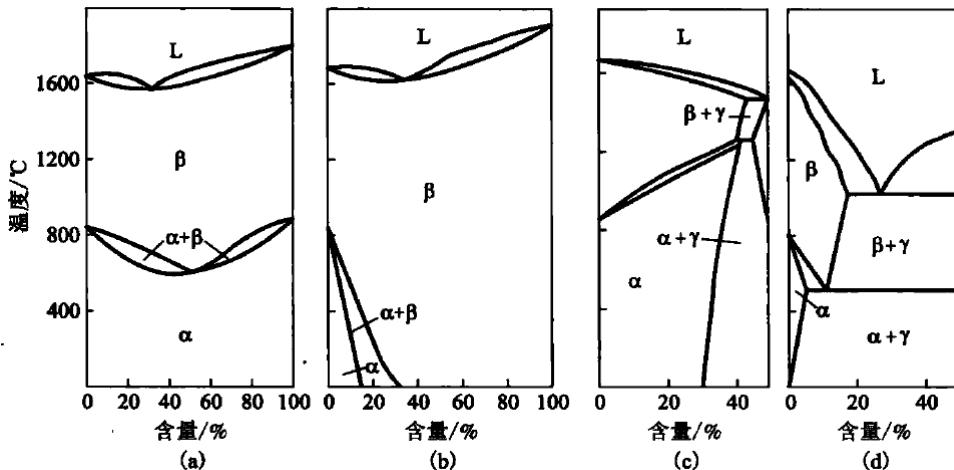


图 1.1 合金元素对钛合金相图的影响示意图

(1) α 型

经退火处理后， α 型钛合金的组织通常存在单相的 α 固溶体，或者以含微量金属化合物的 α 固溶体的形式存在。其主要合金元素包括铝、锡、锆等 α 稳定元素，以及钒、钼、铌等中性元素，各个元素都可以起到固溶强化的作用，因此这些元素都被广泛地应用于钛合金的制备中。

常用的 α 型钛合金包括 TA2（工业纯钛）、TA9（Ti-0.2Pb）、TA10（Ti-0.3Mo-0.8Ni）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]。

(2) β 型

β 型钛合金主要包含钒、钼、铌、钽等 β 相稳定元素，若在合金中加入少量的铝、锆、锡等元素，则可以提高 β 型钛合金的塑性，并且改善其热稳定性。这些合金元素的加入可以控制合金的相转变温度，使其具有更加优异的力学性能和高温耐久性。常见的 β 型钛合金有 TB2 (Ti-5Mo-5V-8Cr-3Al)、TB6 (Ti-10V-2Fe-3Al)、TB7 (Ti-36Mo) 等。

与 α 型、 $\alpha + \beta$ 型钛合金相比， β 型钛合金的显微组织通常更粗大。该合金具有良好的冷成形、冷加工性能，较好的淬火态塑性以及可焊接性。但是，亚稳定 β 型钛合金的热稳定性较差。 β 型钛合金中含有较高的 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 相组成，经热处理后不易产生变化。

(3) $\alpha+\beta$ 型

经过退火处理的 $\alpha+\beta$ 型钛合金在室温下具有不同比例的 α 和 β 相组织，其锻造和轧制等加工成型性能比 α 型、 β 型钛合金更加优异。合金中除了含有定量的铝元素外，还含有少量的其他元素，可以通过适当的热处理方法对 $\alpha+\beta$ 型钛合金进行组织强化。其强度和淬透性随着 β 相稳定元素含量的增加而提高。

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%。

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 $\alpha+\beta$ 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]。

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。

如前所述，钛合金的基本组织由密排六方的低温 α 相和体心立方的高温 β 相构成。除少数稳定 β 型钛合金外，体心立方的高温 β 相一般难以保留到室温，会在冷却过程中发生 β 相向 α 相的多晶转变，并以片状形态从原始 β 晶界析出。片状组织主要由片状 α 和片状 β 相构成，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。在 $\alpha+\beta$ 两相区受到足够大的塑性变形后，片状组织可再结晶球化得到等轴组织。因此，根据晶内 α 相的形状变化， $\alpha+\beta$ 型钛合金的显微组织大致分为四类：

- **等轴组织：**在 β 转变温度以下 30~100 摄氏度加热，在充分的塑性变形和再结晶退火后可以形成等轴组织。具有良好的塑性、延伸率和较高的断面收缩率，同时热稳定性也很高，综合性能优良。
- **网篮组织：**在 β 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 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、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 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 $\delta\%$	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、亚稳相等温转变、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。其中亚稳定 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。

1.5 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]。

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]。
2. 时效处理：有研究^[13]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。在条件相等的情况下，时效温度越低组织越小，时效温度越高组织越大。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。
3. 深冷处理：深冷处理是近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。

1.6 研究背景意义与研究内容

1.6.1 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。目前相关研究中，提升 TC4 钛合金室温塑性的手段主要包括添加合金元素、剧烈塑性变形和相变热处理。虽然前两种处理工艺对于合金的塑性提升明显，但工艺复杂、成本较高^[14]，而第三种热处理方法则工艺简单，成本较低，是提升 TC4 合金性能的不二之选。

钛合金的热处理方式属于共析和有序化转变，在退火和时效过程中存在共析转变，时效过程中存在有序化转变，现阶段 Ti6Al4V 合金的基本热处理工艺主要有：深冷处理、固溶处理、渗氮处理等。不同的热处理工艺互相组合可以对合金产生更好的强化效果，现阶段工业上常采用^[15]：淬火 + 时效；固溶 + 时效；双重固溶 + 时效；固溶 + 双重时效；时效 + 冷轧 + 低温氮化等，其中固溶 + 时效处理是应用最为广泛的一种热处理工艺组合。但是目前对于固溶 + 时效处理方

法的最佳工艺参数一直没有定论，本设计的目的就是确定 Ti6Al4V 合金最佳的固溶 + 时效热处理工艺参数，并分析参数对于合金组织与力学性能的影响。

1.6.2 研究内容

本设计通过对 TC4 钛合金进行多种不同工艺参数的热处理，来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。设计的具体内容是：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与时效热处理；将热处理好的试样，放置在万能试验机上按 GB/T228-2002 进行室温力学性能测试，以得到合金的力学性能数值；然后对试样进行打磨抛光，在光学金相显微镜下进行组织的观察；最后分析工艺参数、力学性能与微观组织的关系，得到最佳热处理的工艺参数。

1.6.3 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 所示：

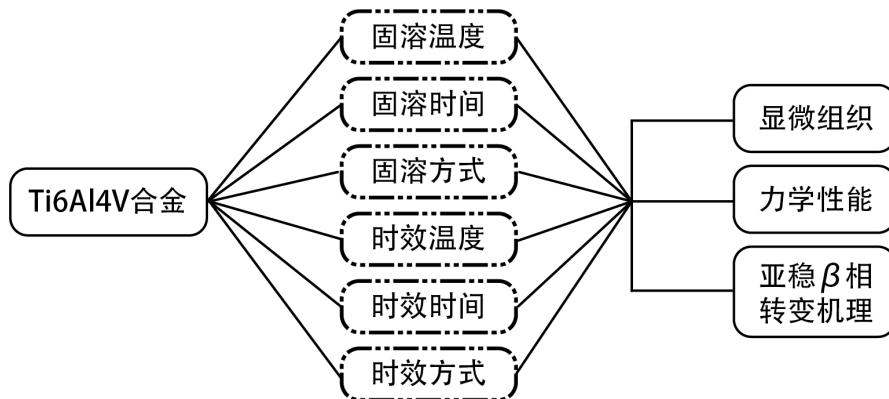


图 1.2 研究路线图

第二章 试样加工及研究方法设计

2.1 材料属性与试样加工过程

2.1.1 实验材料属性

本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°C）力学性能参数如表 2.1 与表 2.2 所示：

表 2.1 试样的化学成分参数

元素 (%)	Al	V	Fe	C	O	N	H
实际含量	6.12	4.06	0.13	0.012	0.112	0.009	0.004
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 Mpa	屈服强度 Mpa	断后伸长率 %
实测值	983	902	13
标准值	≥ 895	≥ 830	≥ 10

2.1.2 β 转变温度的计算

β 转变温度是钛合金的重要参数之一，它是制定钛合金的热机械工艺和热处理工艺的重要依据，相变过程如表 2.3 所示。郭凯^[11]等人表示：当固溶温度高于 β 相变时的温度时，合金的强度伴随温度的增加而下降，而且残余应力也开始大幅度的降低；当固溶温度低于 β 相变时的温度时，合金的强度伴随温度的增加而增加，残余应力也略微提高。但是徐戊矫、谭玉全^[16]却表明：在相变点以下，随着退火温度的升高，材料的强度、塑性和冲击韧性呈降低趋势。之所以会出现这种完全相反的结论，很可能是研究者对于相变点的具体值定义不清晰导致的，可见相变点的确定在固溶处理过程中是非常关键的。

近年来，确定 β 相变点的常见计算方法^[17]主要有：连续升温金相法、X 射线衍射法、电阻法、等热膨胀法、元素含量法和神经网络模型预测预测法^[18]等。

由于能力所限，本试验采用元素含量法来进行相变点的计算：根据合金中各元素对相变温度的影响来对相变点进行推算，通过表 2.4 所示^[19]的因素，利用经

表 2.3 Ti6Al4V 合金 $\alpha + \beta \rightarrow \beta$ 转变时发生的相变及存在的相

室温相	相变过程	高温相
$\alpha - \text{Ti}$	$\alpha - \text{Ti} \rightarrow \beta - \text{Ti}$	$\beta - \text{Ti}$
$\alpha - \text{Ti} - \text{Al}$	$\alpha - \text{Ti} - \text{Al} \rightarrow \beta - \text{Ti} + \beta - \text{Ti} - \text{Al}$	$\beta - \text{Ti}, \beta - \text{Ti} - \text{Al}$
$\beta - \text{Ti} - \text{V}$	$\beta - \text{Ti} - \text{V} \rightarrow \beta - \text{Ti} - \text{V}$	$\beta - \text{Ti} - \text{V}$

验公式来计算。

$$T_\beta = 885^\circ\text{C} + \sum \text{各元素含量} \times \text{各元素含量对}(\alpha + \beta)/\beta \text{ 相变点的影响} \quad (2.1)$$

其中 885°C 为纯钛的相变点。

表 2.4 部分元素含量对钛合金相变点的影响

元素名称	元素含量 (Wt%)	差值	累积值
Al	2.0 ~ 7.0	$29 + 23.0^\circ\text{C}/1.0\%$	$+123.76^\circ\text{C}$
V	0 ~ 10.0	$-14.0^\circ\text{C}/1.0\%$	-56.84°C
Fe	0 ~ 15.0	$-16.5^\circ\text{C}/1.0\%$	-2.145°C
C	0 ~ 0.15	$+2.0^\circ\text{C}/0.01\%$	$+2.4^\circ\text{C}$
O	0 ~ 1.0	$+2.0^\circ\text{C}/0.01\%$	$+22.4^\circ\text{C}$
N	0 ~ 0.5	$+5.5^\circ\text{C}/0.01\%$	$+4.95^\circ\text{C}$
H	0 ~ 0.50	$-5.5^\circ\text{C}/0.01\%$	-2.2°C

关于 β 转变温度的具体值，目前广泛认同的是位于 975°C 附近，但是由于不同试样的合金元素的种类与含量的差异，尤其是局部化学成分的差异，使得不同研究人员实际测得的相变点温度有所差异^[20]。

姚德人等^[21]表明相变温度为 975°C 到 980°C 之间，此时的合金拥有最低的硬度，当温度略大时会发生 β 晶粒的显著长大；相变点以下 50°C 以内水淬，可以得到不同数量的初生 α 和马氏体 α' ，而后再进行低温退火时，马氏体 α' 又会转变为稳定的次生 α 和 β ，可以得到较好的综合性能¹。刘伟东等人^[22]通过连续升温金相法，使用 EET²模型建模测得了 Ti6Al4V 合金的相变温度为 974.58°C ；孙宇、曾卫东等人^[23]通过人工神经网络 ANN 技术，运用反向传播算法，建立了三层神经网路-钛合金相变预测模型，最终预测得到在绝对误差为 9.8°C 的情况下，TC4 的相变点为 994.8°C 。

$$\begin{aligned} T_\beta &= 885^\circ\text{C} + \sum (\delta_{\text{Al}} + \delta_V + \delta_{\text{Fe}} + \delta_C + \delta_O + \delta_N + \delta_H) \\ &= 885^\circ\text{C} + (123.76 - 56.84 - 2.145 + 2.4 + 22.4 + 4.95 - 2.2)^\circ\text{C} \\ &= 885^\circ\text{C} + 92.325^\circ\text{C} \\ &= 977.325^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (2.2)$$

本设计的试样通过计算法得到的相变点温度为 977.325°C ，与广泛认同的相

¹ 此文章写于 1975 年，但是仍然非常有参考价值

² Empirical Electron Theory of solids and molecules “固体与分子经验电子理论”(简称余氏理论)

变点温度值相差 $\delta = \frac{977.325 - 975}{975} = 0.238\%$, 可见还是比较符合现实情况的。

2.1.3 试样加工

本设计采用电火花线切割加工（Wire cut Electrical Discharge Machining, 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 2.1 所示的密集排列。但是在实际加工的时候，却发现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。

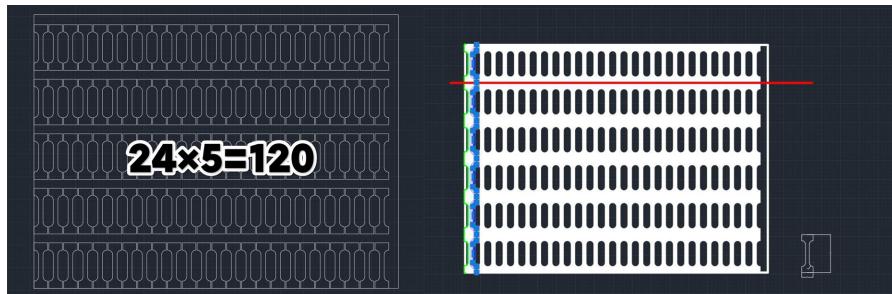


图 2.1 初步设计的刀路

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 $7 \times 8 = 56$ 个试样。



(a) 堆叠式切割



(b) 切割结果

图 2.2 切割方法与切割结果

2.2 TC4 钛合金的热处理方案设计

2.2.1 TC4 合金的热处理工艺性能

由节 1.2 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. $\alpha + \beta$ 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。

2.2.2 TC4 合金热处理工艺设计

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°C、500°C 和 550°C 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°C 和 650°C 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°C 时，所得钛合金的显微组织最佳^[13]。刘婉颖、林元华等人通过实验发现：在 960 °C/1 h + WQ 进行固溶处理和 500 °C/4 h + AC 下进行时效处理得到的 Ti6Al4V 具有最佳的力学性能^[24]；陈冠宇通过实验表明，在 850°C 进行退火处理时，在 600°C 进行时效处理可以使合金得到更好的耐腐蚀性能^[25]；李宸宇证明 Ti6Al4V 合金在 900°C 空冷固溶两小时在 530°C 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^[26]。

总之，对于 $\alpha + \beta$ 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^[27-28]。根据初步预测确定了固溶处理的最佳工艺制度为 β 相变点以下 30°C 左右（这里取整数 $977.325 - 30 = 947.325 \approx 950^\circ\text{C}$ ）处理一个小时、时效温度在 450°C 左右处理一个小时。于是本设计设置了如下三个变量：固溶温度、固溶方式、时效温度。根据控制变量法，设计了如表 2.5 所示的 18 组热处理实验：

2.2.3 优化实验设计

控制变量法是科学实验中最常使用的方法，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。但其也存在巨大的缺点，尤其是多个因素交互作用的影响，面对多因素（变量）、多水平的实验时，就需要设计很多次的实验，显得极为繁琐。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

表 2.5 Ti6Al4V 原本的热处理制度设计

固溶温度/°C	处理时间/h	冷却方法	时效温度/°C	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

$3 \times 3 \times 3 = 27$ 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，可以用更少的试验次数来研究多个变量之间的关系。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^[29]。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 L9(3⁴) 正交表安排实验，只需作 9 次，按 L15(3⁷) 正交表进行 15 次实验，就可以大大减少试验次数，提高实验效率、材料利用率。

在没有通过正交实验设计优化之前，笔者的实验是如表 2.5 所示，需要做 $3 \times 2 \times 3 = 18$ 次实验。但为了给子孙后代留下天蓝、地绿、水清的美丽家园，本实验高举可持续发展理念伟大旗帜，结合了正交实验方法 L9.3.4 对实验进行了优化。

最终的热处理制度如下表所示：

表 2.6 Ti6Al4V 改进后的热处理制度

实验编号	固溶温度/°C	处理时间/h	冷却方法	时效温度/°C	处理时间/h	冷却方法
1	910	1	水冷	510	1	AC
2	910	1	油冷	590	1	AC
3	910	1	水冷	550	1	AC
4	950	1	水冷	590	1	AC
5	950	1	水冷	550	1	AC
6	950	1	油冷	510	1	AC
7	990	1	水冷	550	1	AC
8	990	1	油冷	510	1	AC
9	990	1	水冷	590	1	AC

2.3 TC4 钛合金的热处理方案实验过程

按照表 2.6 设置好的工艺，本实验分先后两次进行热处理：先进行固溶处理，随后进行时效处理，方案路线如图 2.3 所示。

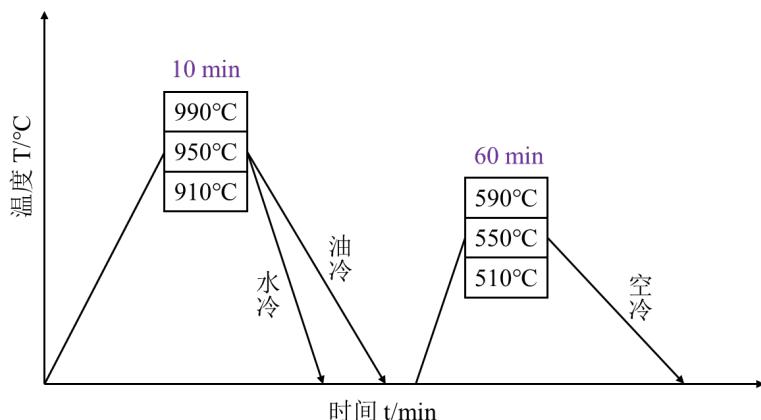


图 2.3 固溶-时效热处理试验路线

2.3.1 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 2.4 所示，设备规格如表 2.7 所示：

固溶实验需要淬火，用到的淬火液体如图 2.5 所示：

2.3.2 固溶处理实验过程

- 设备与试样准备：把样品用去离子水等清洗干净，确保表面干净无杂质，无水分。准备陶瓷样品架，以便样品可以均匀加热。准备好后，将热处理炉预热至 900°C 左右，并保持稳定。
- 样品装入：将切好的样品用放置在样品架上，不要使样品直接接触炉子底部或顶部，以免影响加热效果。并确保样品间距均匀，并记录好摆放顺序。

表 2.7 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°C
最高温度	1200°C
炉膛尺寸	500×300×200(mm)
制造日期	2023年2月
制造商	青岛聚创®环保集团有限公司



图 2.4 马弗炉外形



(a) 水淬液

(b) 淬火油

图 2.5 淬火用的液体

3. 加热过程控制：将样品架或钛合金网放入炉中，启动加热程序。根据实验要求，控制加热速率、温度和保温时间等参数（这里分三批次 **910-950-990**，每批次六个试样进行处理）。
4. 保温时间控制：加热到设计的温度后后，让试样保温一段时间，使其完全进入固溶状态。保持加热系统稳定，避免温度波动。
5. 停止加热：当固溶处理时间³到达后，停止加热并关闭加热系统，取出处理好的试样。
6. 水淬或油淬：将处理后的样品快速分别浸入水中、淬火油中进行淬火（每批次四个水淬，两个油淬）。
7. 后处理：取出样品进行干燥、清洗、归类，并记录初步记录数据。

经过固溶时效处理后的试样如图所示：



图 2.6 固溶处理后的试样

2.3.3 时效处理实验过程

时效处理过程温度稍低，为 **510-550-590** 三个温度，冷却方式为空冷，具体步骤与固溶处理相同，在此不做赘述。

处理后，使用砂纸将表面氧化层打磨干净，根据试样所处的不同工艺路线，将各个试样分组归类。

³ 由于试样过小，老师建议加热 10 分钟，这样既可以节约时间，也可达到其他实验者粗大试样一个小时的效果

第三章 力学性能实验与组织表征

3.1 TC4 钛合金的力学实验过程

力学性能是表征材料性能的重要参数，本实验采用常规的拉伸试验来测量试样的力学性能。测量的包括屈服强度、抗拉强度。

本设计采用拉伸试验机对经固溶时效热处理工艺的试样进行常温微拉伸性能测试，拉伸速率为 $2mm/min$ ，每组试样进行两次测定，取其平均值。

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 $25mm \times 7.5mm$ 的狗骨状片体，具体参数如图 3.1 所示：

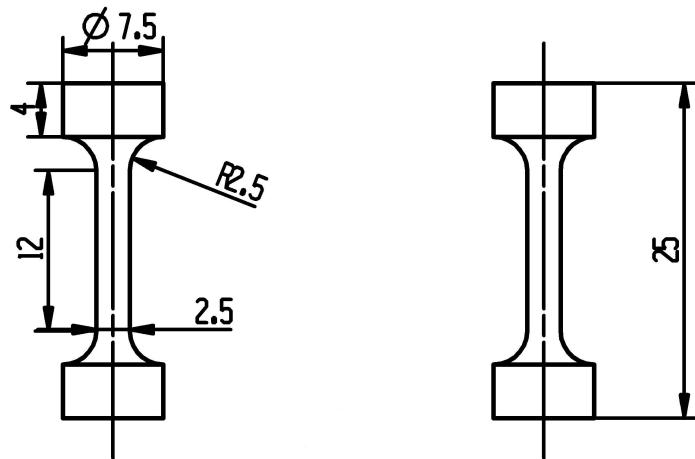


图 3.1 试样的尺寸参数

在某型号万能力学试验机上测试得到的结果如下：

表 3.1 Ti6Al4V 合金的力学性能实验结果

实验编号	R_m/Mpa	$R_{p0.2}/Mpa$
1	950	866
2	946	872
3	976	884
4	988	894
5	990	920
6	972	886
7	966	820
8	978	849
9	959	836

3.2 TC4 钛合金的显微组织表征

试验期间用来观察组织和分析相结构的检测方法，主要包括光学显微镜(OM)、扫描式电子显微镜(SEM)、X射线衍射分析(XRD)以及透射式电子显微镜(TEM)等。

将固溶与时效后的试件进行线切割截取显微组织分析试样，截取后的试样进行150#、400#、1000#、1500#、2000#、2500#金相砂纸磨制，对磨制后的试样采用0.05umSiO₂抛光液在抛光机上进行抛光，去除试样表面的划痕或杂质颗粒，经抛光后的试样采用HF : HNO₃ : H₂O = 2 : 4 : 94的Kroll试剂进行腐蚀。腐蚀后的试样分别采用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)对其微观形貌进行观察。

三种不同固溶温度得到的试样组织如下：

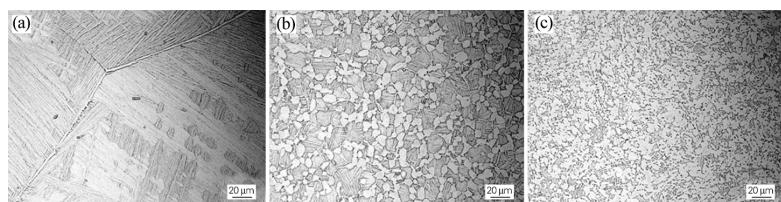


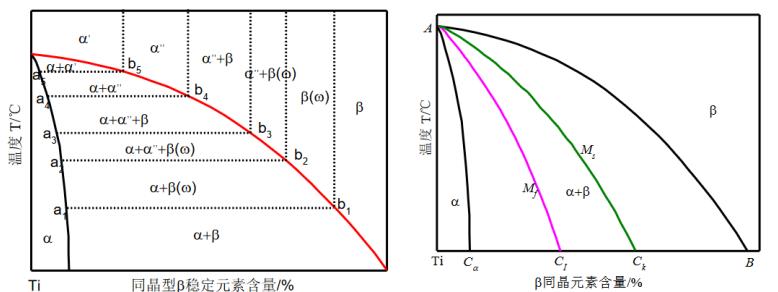
图 3.2 不同热处理工艺下 TC4 钛合金的显微组织

第四章 综合分析

本设计采用固溶-时效工艺对合金进行处理。

固溶处理的目的是为了使合金在高温状态下内部合金元素发生充分扩散，促使一定体积分数的 $\alpha \rightarrow \beta$ 转变，然后在较快冷却条件下抑制连续冷却过程中 $\beta \rightarrow \alpha$ 转变，从而获得 α' 相、 α'' 相以及 β' 相等亚稳定相，为后期的时效处理提供良好的组织状态。时效处理的目的是通过将固溶处理过程中得到的亚稳定相加热到一定温度进行等温处理，在热力学的条件下，促使亚稳定相向稳定状态转变，产生细小弥散分布的析出相，从而对钛合金起到强化作用。

TC4 钛合金在稳定状态下含有少量的 β 相， β 相的存在使其具有热处理强化的能力。由图 4.1 可知，固溶处理过程中固溶温度对固溶后的亚稳定相种类起决定作用，不同固溶温度下 α 与 β 相的平衡体积分数不同，造成 β 相中合金元素含量不同，从而在快速冷却过程中产生不同的亚稳定相。



a) 不同 β 稳定元素含量在不同温度淬火相图 b) 淬火马氏体转变开始及终了温度与成分的关系

图 4.1 钛合金在淬火过程中的亚稳定相及马氏体转变温度

4.1 固溶处理的影响

4.1.1 固溶温度对组织性能的影响

钛合金在进行固溶处理时，固溶温度对其在高温平衡状态下 α 相体积分数具有决定性作用。选取经 910°C 、 950°C 与 990°C 分别固溶 1h 水冷的显微组织进行观察，如所示。可以看出在 $\alpha+\beta$ 两相区进行固溶后水冷，显微组织为初生的等轴 α 相与细针 α' 状马氏体组成；由图 3-4 e) 所示，在 β 单相区进行固溶后水冷，显微组织为粗大的原始 β 晶粒内部分布着单一的细针状马氏体，马氏体在晶内交错排列，夹角成 60 度或 90 度。

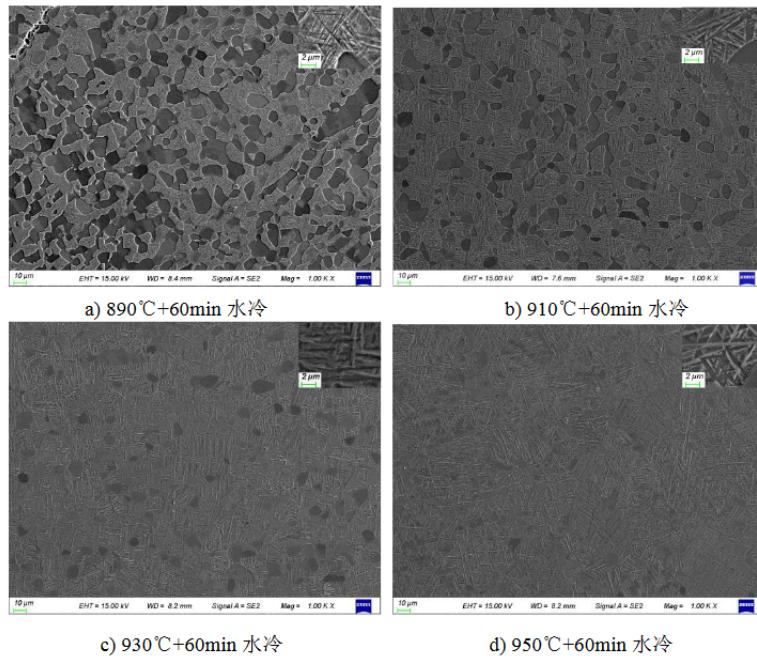


图 4.2 不同固溶温度下的组织

4.1.2 冷却方式对组织性能的影响

图 3-2 为 TC4 钛合金经 950°C 保温 1 小时分别进行油冷和水冷后的显微组织形貌，从图中可以看出，油冷后组织主要是由初生等轴 α 相和 β 转变组织组成的双态组织，水冷后组织主要是由等轴初生 α 相和针状马氏体组成。TC4 钛合金在加热过程中，随着温度的升高， α 相逐渐转变为 β 相，当加热温度未高于相变点温度时，高温状态下组织由未溶解的初生等轴 α 相和 β 相构成。在连续冷却过程中，未溶解的初生等轴 α 相进行扩散型长大，由于油冷的冷却速率小于水冷，初生等轴 α 相的长大时间要多于水冷，造成油冷后初生等轴 α 相的晶粒尺寸大于水冷。利用 XRD 分析了固溶后经不同冷却方式后的相组成，如图 3-3 所示。

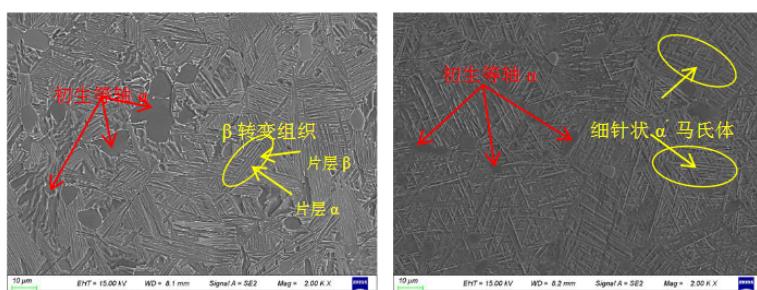


图 4.3 不同冷却方式下的 TC4 钛合金显微组织

TC4 钛合金 950°C 固溶分别经油冷和水冷后，相的组成存在较大差异，油冷时的冷却速率较低，高温 β 相中的合金元素在冷却过程中发生扩散，进行扩

散型相变，导致次生 α 相在初生 α 与 β 相界面处形核，并向 β 相晶内长大，生成 α 片层与 β 片层相间的 β 转变组织，最终相的构成包 α 相与 β 相；水冷时的冷却速率极快，冷却过程基本在瞬间完成，导致 $\beta \rightarrow \alpha$ 的扩散型相变来不及发生， β 相通过晶格切变的形式进行原子集体的、有规律的近程迁移，生成 α' 马氏体，最终相的构成包含 α 相与 α' 相，没有发现 β 相存在。

4.2 时效处理的影响

4.2.1 时效温度对组织性能的影响

时效处理时组织转变的物质基础是：固溶或者退火处理得到的马氏体 α' 相和亚稳 β 相，这两种相是热力学上不稳定的物质，加热时会分解。

固溶在高温下将大量的 α 相转变为 β 相，然后进行快速冷却，可以防止过多的 β 相转变为 α 相。在保留了高温 β 组织的同时，发生了马氏体相变，部分 β 相转变为不稳定的 α' 相和 α'' 相，为时效相转变提供了良好的组织^[30-31]。时效处理通过对亚稳定组织低温热处理，促使亚稳定组织 β 相、 α' 相及 α'' 相转变为细小、室温稳定的等轴组织与片层组织，以起到弥散强化作用，改善组织的塑性和韧性。常见的组织为^[32]： α' 相、 α' 相脱溶出来的等轴 α 相与 β 相、变粗大的 α 相、 β 相。

对于固溶-时效组合处理工艺而言，固溶后 TC4 钛合金中马氏体仍保持 α 相软而韧的性能，在随后进行时效强化可以使得马氏体分解，获得弥散的轴 $\alpha + \beta$ 组织，从而进一步提高其抗拉强度。但随着时效温度的升高，伸长率会逐渐上升，抗拉强度则呈下降趋势。当时效温度过高时，组织会粗化，使合金的塑性、韧性下降^[33]。

时效处理温度主要影响 Ti6Al4V 合金中次生 α 的尺寸，Sauer^[34]等人研究发现 Ti6Al4V 合金中沿着 β 晶界形成的连续 α 片层组织对合金的机械加工性能有负面影响，等轴 β 相越大，负面影响越强烈；经过重结晶等匀质化处理后，可以调整 α 相的体积分数，进而改善性能。鲁媛媛、马保飞^[13]等人研究了 970°C 固溶处理之后，在不同固溶温度下合金的组织，研究发现，当时效温度在 450°C 到 550°C 之间时，随温度增加，合金的强度值逐渐增加；但当温度大于 600°C 时，强度随温度增加而逐渐下降，当时效温度为 550°C 时，合金的强度最高。李露^[35]研究发现 TC4 合金的硬度随时效温度的升高而下降，当固溶快冷组织为亚稳的 β 、 α' 、 α'' 相，时效过程分解产物为弥散的 α 和 β 相，而且时效温度越高，分解越充分，硬度越低。

顾晓辉^[33]人研究发现同等条件下，时效温度越低， α' 转变得到的 $\alpha + \beta$ 相组织越细小，越弥散；当固溶温度提高时，组织变粗，这与二次 β 相的分解密切

相关，当初生 α 相的尺寸较大时，随时效温度升高，析出的 α 相会与初生 α 相聚集长大，发生球化。

在时效后的得到等轴组织和双态组织中，均含有一定量的等轴初生 α 相。而拉伸变形通常是在等轴初生 α 相的某晶粒开始滑移，裂纹往往在在相界面上产生。变形过程中，随着变形量的增大，初生 α 晶粒会产生更多的滑移，并向周围的 β 转变组织扩展，导致空洞形核、和扩展变慢迟，断裂前将产生更大的变形，从而获更高的塑性^[36]。

4.3 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	4
图 1.2 研究路线图	8
图 2.2 初步设计的刀路	11
图 2.2 切割方法与切割结果	11
图 2.5 固溶-时效热处理试验路线	14
图 2.5 马弗炉外形	15
图 2.5 淬火用的液体	15
图 2.6 固溶处理后的试样	16
图 3.1 试样的尺寸参数	17
图 3.2 不同热处理工艺下 TC4 钛合金的显微组织	18
图 4.2 钛合金在淬火过程中的亚稳定相及马氏体转变温度	19
图 4.3 不同固溶温度下的组织	20
图 4.3 不同冷却方式下的 TC4 钛合金显微组织	20

附表清单

表 1.1 不同合金比强度比较表	1
表 1.2 不同组织的性能	6
表 2.3 试样的化学成分参数	9
表 2.3 试样的力学性能参数	9
表 2.4 Ti6Al4V 合金 $\alpha + \beta \rightarrow \beta$ 转变时发生的相变及存在的相	10
表 2.4 部分元素含量对钛合金相变点的影响	10
表 2.6 Ti6Al4V 原本的热处理制度设计	13
表 2.7 Ti6Al4V 改进后的热处理制度	14
表 2.7 JC-MF12-30型箱式电阻炉的规格	15
表 3.1 Ti6Al4V 合金的力学性能实验结果	17

参考文献

- [1] 李玲玲. 用碘化物精炼高纯钛[J]. 新疆有色金属, 2001(48).
- [2] 王鹏, 马蕊. TC4 钛合金电子束焊接头性能研究[J]. 焊接技术, 2021(20-23).
- [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, 孙健科, 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] Guanzhou Qiu, Yufeng Guo. 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, 曾卫东, 韩远飞, 等. 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]. 锻压装备与制造技术, 2009(101-104).
- [10] 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.
- [11] 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(7): 16-17.
- [12] 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.
- [13] 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]. 金属热处理, 2019, 44(7): 34-38.
- [14] 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.
- [15] 周开祥. 基于深冷处理的难加工材料切削特性研究[D]. 北方工业大学, 2022.
- [16] 徐坚, 王文焱, 张豪胤, 等. 固溶时效工艺对 TC4 钛合金组织及性能的影响[J]. 粉末冶金工业, 2014, 24(5): 29-32.
- [17] 朱红, 廖鸿. 钛合金 $\alpha+\beta/\beta$ 相变点的几种测试方法探讨[J]. 现代机械, 2013 (3): 85-87.
- [18] 任驰强, 丁一明, 李佳佳, 等. 固溶-时效对 TC4 钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. 湖南有色金属, 2022, 38(2): 44-46+55.

- [19] ANANYA S, VENKATALAKSHMI B. Location Based Intelligent Mobile Organizer[C]//2011 International Conference on Computer Science and Service System (CSSS). Nanjing, China: IEEE, 2011: 488-491.
- [20] 王涛,白新房,王松茂,等. TC4 合金相变温度检测中结果不一致原因分析[J]. 西安文理学院学报(自然科学版), 2013, 16(3): 80-83.
- [21] 姚德人. Tc_4 钛合金相变点的测定[J]. 稀有金属合金加工, 1975(10): 19-23.
- [22] 刘伟东,屈华. TC4 合金 $(\alpha+\beta)/\beta$ 转变温度的金相法测定与理论计算[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(11): 1210-1213.
- [23] 孙宇,曾卫东,赵永庆,等. 应用人工神经网络研究化学元素对钛合金相变点的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(6): 1031-1036.
- [24] Liu Wanying, Lin Yuanhua, Chen Yuhai, et al. Effect of different heat treatments on microstructure and mechanical properties of ti6al4v titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017(634-639).
- [25] 陈冠宇. 热处理工艺对 TC4 钛合金腐蚀性能的影响[D]. 河北: 石家庄铁道大学, 2021.
- [26] 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]. 合肥工业大学, 2021.
- [27] 吴建, 刘磊. 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).
- [28] 冉兴, 王哲, 李海宾, 等. 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, 42(6): 66-71.
- [29] 王学深. 正交试验设计法[J]. 上海人民出版社, 2016.
- [30] 辛社伟, 赵永庆. 关于钛合金热处理和析出相的讨论[J]. 金属热处理, 2006 (9): 39-42.
- [31] 邹海贝. TC4 钛合金热处理强化工艺及相变行为研究[D]. 2019.
- [32] 张豪胤, 王文焱, 祝要民, 等. 固溶、时效对 TC4 钛合金组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(6): 659-661.
- [33] 顾晓辉, 刘君, 石继红. 淬火、时效温度对 TC4 钛合金组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2011, 36(2): 29-33.
- [34] SAUER C, LUETJERING G. Thermo-mechanical processing of high strength β -titanium alloys and effects on microstructure and properties[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 117(3): 311-317.
- [35] 李露. 固溶时效对 TC4 合金组织与机械性能的影响[J]. 特钢技术, 2014, 20 (1): 29-31.

- [36] 叶康源, 叶勇松, 陈开勇, 等. 热处理对 TC4 钛合金锻件组织和性能的影响 [C]//第十届中国航空学会青年科技论坛论文集. 中国航空学会, 2022: 379-385.

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）。