

前 言

钛合金以其优异的比强度、耐腐蚀性和高温性能，在现代航空航天领域扮演着不可替代的角色。随着飞行器向轻量化、高推重比和长寿命方向的发展，航空结构材料面临更为严苛的服役环境与性能要求。传统 α 或 $\alpha+\beta$ 钛合金虽已在航空装备中广泛应用，但难以兼顾强度、塑性和韧性，也难以满足新一代航空结构件的综合性能需求。在此背景下，亚稳 β 钛合金凭借其独特的成分设计思路和优异的综合力学性能，逐渐成为材料科学研究和工程应用的前沿与热点。

亚稳 β 钛合金的突出优势在于，可以通过合金元素的合理配比与多样化热处理路径，在保证高比强度的同时，实现强度、塑性与韧性的良好匹配。这类合金的力学行为兼具复杂性与多样性：显微组织受控于扩散型与非扩散型相变的协同作用，变形机制则涉及位错滑移、变形孪晶及应力诱发马氏体转变等多种模式。在工程应用中，亚稳 β 钛合金不仅具备优异的淬透性和成形性，还在疲劳性能、损伤容限和耐腐蚀性等方面表现突出，特别适用于起落架、机翼连接件等关键承力结构。近年来，随着先进材料表征技术和计算模拟手段的不断发展，人们对亚稳 β 钛合金的组织-性能关系有了更深入的理解，推动了其成分设计的理论化和精准化，逐步突破了传统“试错法”合金研发的瓶颈。

正是基于这一研究背景和学科发展需求撰写了本书，旨在为从事钛合金研究与应用的科研人员、工程技术人员及高校师生提供一部系统、全面且具有前瞻性的参考著作。全书共 7 章，各章之间既相互独立又紧密联系，构成了较为完整的知识体系。第 1 章从钛合金的发展历史和分类体系入手，明确亚稳 β 钛合金的设计逻辑与应用现状；第 2 章深入剖析相变特征与力学性能之间的内在联系；第 3 章聚焦于热处理工艺与组织演化的作用机制；第 4 章系统总结复杂的变形机制；第 5 章讨论强化/韧化协同的核心问题与解决途径；第 6 章从疲劳损伤特征角度揭示微观组织对服役寿命的决定性作用；第 7 章展望基于成分设计和组织表征方法的未来发展方向。通过各章的层层递进，读者不仅能够掌握亚稳 β 钛合金的基础理论和典型工艺，还能深入理解其结构-性能关系与工程应用价值。

与已有相关书籍或综述相比，本书的特点主要体现在三个方面。首先，本书系统总结了近年来国内外亚稳 β 钛合金领域的研究成果，注重理论与实验的结合，既揭示基本科学问题，又紧扣航空工程应用需求。其次，本书突出材料成分-工艺-组织-性能之间的逻辑链条，从微观机制到宏观性能逐层展开，体现了

跨尺度的系统性。最后,本书在内容安排上兼顾基础性与前沿性,既适合作为高校师生及科研人员的学习资料,也可工程设计人员在材料选择与应用中提供参考。

李金山教授和赖敏杰教授负责全书的总体框架设计与统筹,在撰写过程中得到了多位年轻学者的积极参与和大力支持。黄欣、张欣蔚、章嘉敏、郭敏、陈初阳、王一君和杨秀静不仅在文献调研、实验数据整理与书稿整理方面付出了大量心血,也在全书定稿过程中提出了许多宝贵建议,使得本书内容更加完善和系统,在此谨向他们表示衷心的感谢。

本书的出版离不开多方面的支持。感谢国家重点研发计划项目、国家重大科技专项项目和国家自然科学基金项目等资助,使作者得以在长期研究积累的基础上开展本书的撰写工作;感谢西北工业大学凝固技术全国重点实验室提供的科研平台与实验条件,为本书相关内容的研究提供了坚实保障;感谢同行专家在交流讨论中给予的启发与建议,对本书的质量提升起到了重要作用。特别感谢西北工业大学稀有金属材料与加工研究团队在数据处理、图表绘制与参考文献整理过程中所做的细致工作。

虽然在本书写作过程中力求系统、严谨,但由于亚稳 β 钛合金研究的复杂性与快速发展,书中难免存在不足与疏漏。真诚希望读者批评与指正,以便在未来的修订与再版中不断完善。衷心希望本书能够为广大读者在科研探索与工程实践中提供有价值的参考,也期待它能在推动航空结构用钛合金的发展与应用中发挥积极作用。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 钛合金简介	1
1.1.1 钛及钛合金的基本特性	2
1.1.2 钛合金的分类	3
1.2 亚稳 β 钛合金的成分特点	11
1.2.1 常用合金化元素	12
1.2.2 钼当量	17
1.3 亚稳 β 钛合金的应用现状	21
1.3.1 在航空领域的应用	21
1.3.2 在生物医学领域的应用	23
1.4 航空结构用亚稳 β 钛合金的发展历史	25
参考文献	27
第 2 章 航空结构用亚稳 β 钛合金的相变	28
2.1 航空结构用亚稳 β 钛合金的组成相	28
2.1.1 稳定相	29
2.1.2 亚稳相	29
2.2 航空结构用亚稳 β 钛合金的扩散型相变	31
2.2.1 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变	32
2.2.2 等温 ω 相变	41
2.2.3 $\omega \rightarrow \alpha$ 相变	43
2.2.4 $\alpha \rightarrow \beta$ 相变	46
2.3 航空结构用亚稳 β 钛合金的非扩散型相变	47
2.3.1 绝热 ω 相变	48
2.3.2 应力诱发 $\beta \rightarrow \alpha''$ 马氏体相变	49
参考文献	58
第 3 章 航空结构用亚稳 β 钛合金的热处理及组织演化	63
3.1 航空结构用亚稳 β 钛合金的固溶处理及组织演化	63
3.1.1 β 单相区固溶及组织演化	64

3.1.2	$\alpha+\beta$ 两相区固溶及组织演化	69
3.2	航空结构用亚稳 β 钛合金的时效处理及组织演化	70
3.2.1	低温时效及组织演化	71
3.2.2	高温时效及组织演化	75
3.2.3	双重时效及组织演化	78
3.3	航空结构用亚稳 β 钛合金在热力耦合作用下的组织演化	80
	参考文献	87
第 4 章	航空结构用亚稳 β 钛合金的变形机制	95
4.1	航空结构用亚稳 β 钛合金中 β 相的变形机制	95
4.1.1	位错滑移	96
4.1.2	变形孪晶	97
4.1.3	应力诱发马氏体相变	102
4.1.4	剪切与扭折	107
4.2	航空结构用亚稳 β 钛合金中 β 相变形机制的影响因素	108
4.2.1	合金元素的影响	108
4.2.2	亚稳相的影响	113
4.3	航空结构用亚稳 β 钛合金中 α 相的变形机制	115
4.3.1	位错滑移	116
4.3.2	变形孪晶	120
	参考文献	122
第 5 章	航空结构用亚稳 β 钛合金的强化/韧化途径	127
5.1	航空结构用亚稳 β 钛合金的强化途径	127
5.1.1	固溶强化	127
5.1.2	细晶强化	130
5.1.3	ω 相析出强化	133
5.1.4	α 相析出强化	136
5.2	航空结构用亚稳 β 钛合金的韧化途径	143
5.2.1	本征韧化	147
5.2.2	非本征韧化	155
5.3	航空结构用亚稳 β 钛合金的强化-韧化协同作用	157
	参考文献	158
第 6 章	航空结构用亚稳 β 钛合金的疲劳损伤特征	164
6.1	航空结构用亚稳 β 钛合金的疲劳行为	164
6.1.1	疲劳概述	164
6.1.2	疲劳行为的影响因素	173

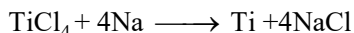
6.1.3 提升航空结构用亚稳 β 钛合金疲劳性能的途径·····	186
6.2 航空结构用亚稳 β 钛合金的疲劳裂纹萌生特征·····	188
6.2.1 疲劳裂纹萌生位置·····	188
6.2.2 疲劳裂纹萌生机理·····	190
6.3 航空结构用亚稳 β 钛合金的裂纹扩展特征·····	194
参考文献·····	197
第 7 章 航空结构用亚稳 β 钛合金的成分设计和组织表征方法 ·····	200
7.1 航空结构用亚稳 β 钛合金的成分设计·····	200
7.1.1 基于经验参数的设计方法·····	201
7.1.2 基于 d 电子理论的设计方法·····	208
7.1.3 基于第一性原理计算的设计方法·····	213
7.2 航空结构用亚稳 β 钛合金的组织表征方法·····	214
7.2.1 X 射线衍射表征·····	214
7.2.2 扫描电子显微镜表征·····	217
7.2.3 电子背散射衍射表征·····	222
7.2.4 透射电子显微镜表征·····	224
参考文献·····	227

第 1 章 绪 论

钛合金因其优异的比强度、耐腐蚀性与高温性能，已成为航空航天等高端装备领域中不可替代的关键结构材料。本章首先从钛合金的发展历史和类型入手，结合其广泛的应用背景，系统阐述钛合金的分类体系，并重点聚焦于亚稳 β 钛合金这一先进类型，介绍钛合金的基本分类标准及显微组织特征，详细剖析亚稳 β 钛合金的成分特点，阐明其通过 β (相)稳定元素合金化与时效处理实现高强度和高韧性匹配的机理。其次，总结亚稳 β 钛合金在航空、生物医学等领域的应用现状，突出其在高性能、轻量化方面的显著优势。最后，回顾航空结构用亚稳 β 钛合金发展的历程，体现材料成分设计、制备工艺与工程应用需求之间的协同演进。本章旨在为读者建立系统而清晰的知识框架，深入理解亚稳 β 钛合金的设计逻辑与应用前景，为后续章节的理解奠定基础。

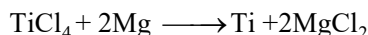
1.1 钛合金简介

金属钛最早发现于 18 世纪末。从最早的发现，到通过亨特法(Hunter process)和克劳尔法(Kroll process)的工业化生产，钛及其合金逐渐从一种被视为稀有和难以获得的金属转变为现代高科技和日常应用中不可或缺的材料。亨特于 1910 年首次成功地将金属钛从其矿石中提炼出来，亨特法是一种使用金属钠作为还原剂在高温条件下将 TiCl_4 (四氯化钛)还原成钛的过程，通常是通过金属热还原法进行的，该方法在钛的工业化生产中占据了核心地位。该过程涉及几个关键步骤，首先是将天然的钛铁矿(主要成分是 FeTiO_3)与炭粉混合并加热进行氯化处理，形成 TiCl_4 和 FeCl_2 等产物。其次， TiCl_4 再与其他金属(如 Na)作为还原剂在高温及惰性气体(如氩气)保护环境下进行反应，其化学反应方程式为



此反应需要在高温下进行，并且通常在惰性气体环境中，以防止金属钠的氧化。使用金属钠可以发生较为完全的还原反应，但亨特法的实施受限于较高的成本和操作难度。虽然这一方法标志着钛金属首次从实验室走向工业化生产的重要步骤，但高昂的成本和技术限制使得这一方法在后来的应用中逐渐被新的技术所取代。克劳尔法由威廉·J·克劳尔(William J. Kroll)在 1932 年提出，该方法使用镁作为还

原剂在高温下还原 TiCl_4 来生产金属钛，对应的工艺如下：在这一过程中， TiCl_4 被引入装有熔融镁的反应器中，反应在 $800\sim 1000^\circ\text{C}$ 的高温下进行，并在氩气氛围中，避免镁和钛的氧化，化学反应方程式为



生成的产物是多孔的海绵钛，随后需要进一步精炼，包括粉碎、真空电弧熔炼等步骤，以去除杂质并得到纯度更高的金属钛。与亨特法相比，克劳尔法具有更高的效率和较低的成本，故成为 20 世纪中叶至今生产金属钛的主流方法^[1]。

尽管钛在地壳中的含量排名前列，达到 0.565%，位列金属中的第四位，但由于它广泛分布于众多矿物中，尤其是以钛铁矿(主要成分 FeTiO_3)和金红石(TiO_2)等形式存在，与其他元素紧密结合，而非易于直接利用的纯净状态，使得钛的提取过程复杂且成本较高。这是钛元素虽然丰富但直到有效的提取方法出现之前一直未能广泛应用的原因之一。尽管存在这些挑战，金属钛因其优异的性能(如低密度、良好的耐腐蚀性等)在航空航天、生物医学、化工设备等多个领域有着不可替代的应用，促使人们不断探索更经济高效的钛金属提取技术^[2]。

1.1.1 钛及钛合金的基本特性

钛(titanium, Ti)为一种金属元素，原子序数为 22，熔点约为 $1668^\circ\text{C} \pm 4^\circ\text{C}$ ，密度为 $4.506\text{g}/\text{cm}^3$ ，纯钛以轻质高强及良好的延展性著称，并展现出卓越的耐海水腐蚀特性。钛主要表现为两种晶体结构类型： α 相，具备密排六方(HCP)结构的晶格； β 相，采用体心立方(BCC)的晶格排列， $\alpha \rightarrow \beta$ 相变温度为 882.5°C ，这两种相的存在，为钛及钛合金的多样性和性能调控奠定了基础。钛的同素异构晶体结构如图 1.1 所示。

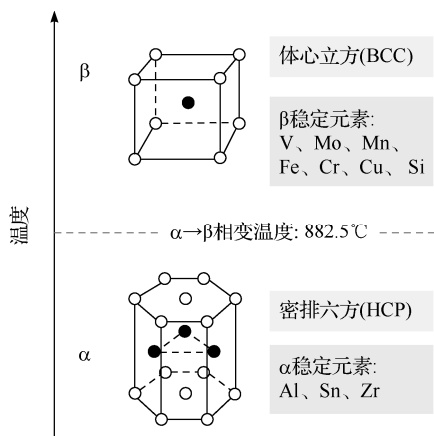


图 1.1 钛(Ti)的同素异构晶体结构示意图^[2]

研究人员根据其相变特点进行后续热处理工艺的设计。从力学性能角度来看,金属纯钛(TA1、TA2、TA3、TA4)对比其他金属具有其不可取代的优势,其弹性模量为 107GPa,仅为铁的 57%,高纯 Ti 的断裂延伸率可以达到 60%,其断面收缩率在 70%~80%,强度低^[2,3]。

为了拓宽钛材料的应用范围,钛合金的开发成为研究的重点,通过合金化不仅增强了钛原有的性能,还赋予其新的特性。全球相关学者积极投身于钛及钛合金的创新研究中,不断拓展材料科学的边界,旨在解锁更多潜在应用领域。研究人员通过添加不同的合金化元素(相稳定元素),如 V、Mo、Fe、Al、Cr 等调控其中 α 相和 β 相的形态和占比,设计出一系列可以满足不同工况要求的钛合金材料,很多已经投入应用。全球范围内钛合金加工材料的年产量已突破 4 万 t,涵盖了超过 30 种不同的典型牌号。其中, Ti-6Al-4V(TC4)、Ti-5Al-2.5Sn(TA7)等类型的 $\alpha + \beta$ 钛合金及 α 钛合金,是应用最为广泛的。 β 钛合金的使用主要集中在高强件上。

1.1.2 钛合金的分类

按照不同的分类标准可将钛合金划分成各种类别。随着钛合金技术的进步和广泛应用,特别是在热处理强化领域的深入探索,非平衡组织的出现使得依据材料在亚稳态下的相组成进行分类变得尤为重要。尤其考虑到钛合金经过 β 相区淬火后,其相结构与含有的 β 稳定元素含量(质量分数)密切相关,可将钛合金归纳为三大基本类别: α 钛合金、 $\alpha + \beta$ 钛合金及 β 钛合金,它们在我国通常被标记为 TA、TC、TB 系列,以此作为简便的识别系统。图 1.2 显示了钛合金的六种主要类型及钛合金经淬火处理后的相结构特征与其内部 β 稳定元素的含量关系,图 1.3 展示了不同类型钛合金的主要特点和典型合金牌号^[2]。

早期此类命名体系中,后续的数字直接标示了合金中添加元素的种类和含量,以及合金化程度的高低,为选材提供了直观参考。但是,随着新钛合金类别的不断增加,已不具有实际含义,有时候仅仅大致反映了标准合金注册时的顺序。此外,未采用 TA、TB、TC 标识的钛合金,表明这些合金属于各研究机构独立研发的成果,尚未被收入国家标准体系内。这类合金通常以其主要成分的质量分数*(%)组成来命名,如 Ti-7333(Ti-7Mo-3Nb-3Cr-3Al)。值得注意的是,钛合金的类型与其性能之间存在密切的对应联系,意味着合金类型及成分在很大程度上决定了材料的具体性能特征^[2]。

* 如无特殊说明,本书中合金成分均以质量分数计。

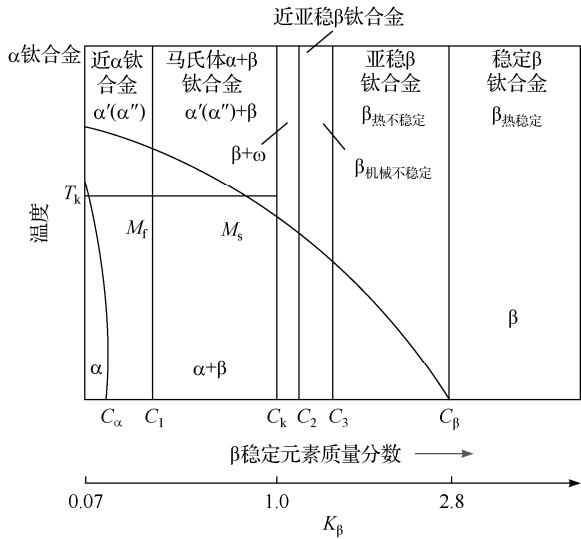


图 1.2 钛合金经淬火处理后的相结构特征与其内部 β 稳定元素质量分数的关系^[1]
 M_s -马氏体相变的起始温度； M_f -马氏体相变的结束温度； T_k -纯钛相变点温度； K_β - β 相稳定系数； C_α -工业纯钛和只含 α (相)稳定元素的合金； C_1 -近 α 钛合金中 β 稳定元素含量上限； C_k -马氏体 $\alpha+\beta$ 钛合金中 β 稳定元素含量上限； C_2 -近亚稳 β 钛合金中可发生 $\beta \rightarrow \omega$ 相变的 β 稳定元素含量上限； C_3 -近亚稳 β 型钛合金中 β 稳定元素含量上限； C_β -稳定 β 型钛合金中 β 稳定元素含量下限

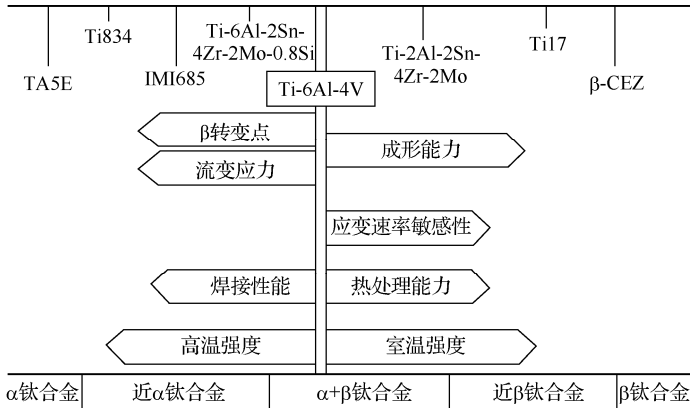


图 1.3 不同类型钛合金的主要特点和典型合金牌号^[2]

值得注意的是，工业纯钛指的是高纯度的钛材料，通常含有 95%以上的钛元素，其余成分主要是氧、氮、碳、氢、铁和硅等微量元素杂质。这些微量元素虽含量不多，却会对工业纯钛的机械性能产生关键影响，具体表现为在增强材料强度的同时，可能牺牲一部分塑性。尤其是氧、碳和氮对金属钛强度的提升效果显著，其中氮元素对于增强钛的力学强度贡献最大。氢元素也是一种对金属钛性能影响较大的元素，尤其是在降低冲击韧性方面。

为了避免材料变脆,金属钛中的氢含量应控制在 0.007%~0.015%。在热处理工艺方面,工业纯钛不能通过热处理(如淬火和回火)来实现强化。这是因为热处理通常涉及相变,而在工业纯钛中几乎不包含可以产生相变强化的成分。在力学性能方面,尽管其强度相比于钛合金较低,但工业纯钛拥有良好的塑性和成形性能。这使得它在加工时更加灵活,适合制作复杂形状的部件。在耐腐蚀与工作温度范围,工业纯钛特别适合作耐蚀结构材料,具有优异的耐腐蚀性,适合在化学压力容器、泵体、阀门、管道系统等环境中使用。另外,氢元素的存在会显著降低金属钛的冲击韧性。控制金属钛中氢含量在 0.02%以下是必要的,氢含量超过 0.02%可能导致脆性相析出和脆断现象,此外,金属钛的氢脆损坏属于氢化物型氢脆损坏,氢化物型氢脆损坏的特点是在高速变形下才呈现脆性断裂,而在低速变形时,通常不呈现氢脆灵敏性。

工业纯钛不具备热处理强化的能力,但因其固有强度相对较低,展现出优越的塑性特性和杰出的加工成形能力,如优异的焊接适应性。这种材料适用于制作无须承受重大负荷的组件,并能在 300℃高温环境下持续保持稳定。它以多种形式出现,涵盖厚薄板材、棒丝、管道、锻造和铸造产品,广泛服务于需要高度耐腐蚀性的应用场景,如化工行业的压力容器、泵体、阀门及管道系统。工业纯钛根据纯度及杂质含量的不同,被细分为 TA1~TA4 等多个牌号,每个牌号的差异直接影响其力学性能和最终用途。重要的是要区分工业纯钛与 α 钛合金,二者虽都具备良好的耐腐蚀性和加工性,但因工业纯钛强度限制,它主要定位在非关键承重部件的制造上,利用其耐腐蚀性和成形能力上的优势满足特定行业的需求^[4]。

1. α 钛合金

α 钛合金主要特点如下。

(1) 单一相结构: α 钛合金全由 α 相固溶体组成,在常温和高温状态下都保持 α 相结构,因此在各种温度下均具有较为稳定的微观组织。

(2) 耐高温性: α 钛合金在 500~600℃温度下能保持较好的力学性能,特别是抗蠕变性能,使其适合在这一温度范围内长期使用。

(3) 耐腐蚀性和低温稳定性: α 钛合金展现出卓越的耐腐蚀性与出色的低温韧性,使之能很好地适应各种严峻的环境条件。

(4) 焊接适应性: 鉴于其组织结构的高度稳定性, α 钛合金一般呈现出优良的焊接性能,有利于制造过程中的焊接操作。

(5) 加工性: 虽然 α 钛合金的室温塑性较低,使得冷加工可能比较困难,但它在热加工条件下仍然表现出良好的塑性。

(6) 无热处理强化: α 钛合金不能通过热处理(如回火和淬火)来改变机械性能, 主要依赖于合金元素的固溶强化作用。

不同 α 钛合金分类(如 TA5、TA6、TA7 及 TA8)展示出多样化的性能与特殊的应用范畴。具体而言, TA7 合金展现了中等级别的强度与充足的延展性, 加之卓越的焊接性能, 使其适用于不超过 500℃ 的温度, 并在极低温度条件下依然保持良好的韧性, 故被公认为高性能的超低温材料之一。TA5 与 TA6 合金则适用于 400℃ 以下, 且在腐蚀性环境运行的组件与焊接结构中展现出优异适应性, 常应用于航空发动机的压缩机壳体和航海设施组件等领域。TA8 合金设计用于承受 500℃ 高温并能维持长期稳定工作的零件, 如航空发动机的压气机盘与叶片, 体现了其在极端热力条件下的稳定效能。 α 钛合金的应用受限于其室温下的较低强度, 但由于其高温、低温、耐腐蚀及其他特殊性能, 它们在航空航天、国防军事、海洋工程、化学工业及深冷技术等领域, 彰显了举足轻重的应用意义与价值。

2. β 钛合金

β 相固溶体钛合金(β 钛合金)是指那些在室温下几乎完全由 β 相组成的材料, 这种合金通常含有能够稳定 β 相的元素, 如钒、钼、铌等, 但是合金冶炼工艺复杂, 热稳定性较差, 一般用于 350℃ 以下, 不推荐在极高温环境下应用, 其制备宜选用真空自耗电弧炉进行熔炼处理。由于 β 相的晶体结构, 这些合金通常具有更高的强度和可淬硬性。退火空冷是一种热处理过程, 它涉及将合金加热到一个高温(通常在 β 相的转变温度以上), 以使合金的晶体结构达到均匀的 β 相, 然后让它在空气中慢慢冷却到室温。这种缓慢的冷却过程有助于维持合金的 β 相晶体结构, 从而得到单一的 β 相固溶体。为了进一步增强材料的性能, 可以进行淬火和时效处理。淬火是将材料迅速冷却以保留在高温时形成的微观结构; 时效则是在较低温度下进行加热处理, 以诱导材料内部微观结构的变化, 从而提高材料的强度和硬度。合金未经热处理便已具备较高的熔点与初始强度水平, 而历经淬火和时效处理后, 力学性能可实现进一步增强, 其抗拉强度范围提升至 1372~1666MPa, 延伸率为 6%~10%, 这要归功于它们的微结构以及合金化元素的作用^[4-6]。减重或轻量化是航空航天工业非常关注的一个领域, 因为往往需要寻找更轻但力学性能不下降的材料来提高燃油效率、负载能力和整体性能, 如用于铆钉、大型紧固件、飞机构架和火箭等要求高强材料的零部件中。 β 相固溶体钛合金在这方面很有吸引力, 提供了一种比传统合金(如钢)轻但具有高强度和良好耐腐蚀性的解决方案。表 1.1 中展示了常见的 β 钛合金牌号、成分、力学性能及应用环境^[2], 有助于大致了解其应用及性能。

表 1.1 常见的 β 钛合金牌号及特点^[2]

序号	名义成分	类型	国内牌号	国外相近 牌号(国家)	工作温 度/℃	强度 /MPa	特点与应用
1	Ti-5Mo-5V-8Cr-3Al	近 β	TB2	—	300	≥ 1100	处于固溶状态时,该材料展现出卓越的冷成形特性和焊接性能。固溶时效后高塑性较好匹配,因此它适合作为火箭连接构件及航空航天领域中紧固件的首选材料
2	Ti-10Mo-8V-1Fe-3.5Al	近 β	TB3	—	300	≥ 1100	与 TB2 合金相仿,该材料在固溶状态下表现出卓越的冷成形性能,而经过固溶时效处理后,其强度与韧性达到了良好的综合平衡,可作航空航天紧固件和弹性元件
3	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	近 β	TB5	Ti153 (美国)	290	≥ 1080	该材料展现出卓越的冷变形能力,即使在常温条件下,也能成功成形,具有中等复杂度的钣金部件;在温度超过 700℃ 时,更可实施超塑性成形工艺,加之其优秀的焊接性能,极大地扩展了加工应用的可能性,适用于制造航空航天钣金件和紧固件
4	Ti-10V-2Fe-3Al	近 β	TB6	Ti1023 (美国)	320	≥ 1105	高强度且具备优异韧性的钛合金,适宜应用于等温锻造成形工艺中。此类合金广泛应用于航空器的主体结构,如机身、机翼部分,以及起落架系统的关键构件中。若在相应结构中用其替代传统同等强度级别的高强度钢材,有望实现结构质量减轻约 40%
5	Ti-15Mo-3Al-2.7Nb-0.25Si	近 β	TB8	β -21S (美国)	—	≥ 1200	抗氧化、耐蚀,可用于中等复杂程度的冷成形钣金零部件和高强、抗氧化的承力构件
6	Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	近 β	TB9	β -C (美国)	—	≥ 1140	高强、耐蚀,可制作紧固件、弹簧、扭力棒,以及油、气、地热井的井管和壳体,钛箔为复合材料的基体

续表							
序号	名义成分	类型	国内牌号	国外相近 牌号(国家)	工作温 度/℃	强度 /MPa	特点与应用
7	Ti-5Mo-5V-8Cr-3Al	近 β	TB10	—	—	≥ 1100	该材料展现出优越的断裂韧性、显著的比强度优势及高水平的淬透性,加之其热加工与切削加工性能均表现优异。目前已用于承压及航空航天高强构件
8	Ti-5Mo-5V-8Cr-3Al	β	TB7	Ti-32Mo (美国)	—	≥ 800	鉴于其卓越的耐腐蚀性能,此类材料非常适合用于铸造化工机械设备中泵、阀门等关键部件,以确保长期耐用与化学稳定性
9	Ti-5Mo-5V-8Cr-3Al	β	Ti-40	—	400	≥ 950	具备阻燃特性的钛合金,能够承受 500℃ 以下的高温环境,是航空发动机组件的理想选材

3. $\alpha+\beta$ 钛合金

$\alpha+\beta$ 钛合金属于双相钛合金,其在钛基合金中的使用量居首位,彰显出全面且优良的性能特征。该合金的组织具有高度稳定性,兼备出色的韧性、塑性及在高温下的良好变形能力,有利于热压力加工过程。通过淬火和时效处理,合金的力学性能可得到有效增强,其强度在热处理后相较于退火状态可提升 50%~100%。此外,该合金展现出卓越的高温强度,能够在 400~500℃ 的高温环境中持久运行,尽管其热稳定性略逊于 α 钛合金。表 1.2 列举了常见的 $\alpha+\beta$ 钛合金的牌号及其特性概览。值得注意的是, Ti-6Al-4V 合金因其卓越的力学性能表现,成为市场上应用最广泛的 $\alpha+\beta$ 钛合金^[7, 8]。

表 1.2 常见的 $\alpha+\beta$ 钛合金牌号及特点^[2]

序号	名义成分	类型	国内牌号	国外相近 牌号(国家)	工作温 度/℃	强度 /MPa	特点与应用
1	Ti-2Al-1.5Mn	$\alpha+\beta$	TC1	OT4-1 (俄罗斯)	350	≥ 590	与纯钛相比,其强度略胜一筹,同时展现出良好的延展性,兼备优异的焊接性能和热稳定性。可在工况温度 350℃ 下长期工作,可用于制造形状复杂的航空钣金件

续表

序号	名义成分	类型	国内牌号	国外相近 牌号(国家)	工作温 度/℃	强度 /MPa	特点与应用
2	Ti-4Al-1.5Mn	$\alpha+\beta$	TC2	OT4 (俄罗斯)	350	≥ 685	中强近 α 钛合金, 无法进行热处理强化, 有良好的冲击焊接性能, 与 TC1 类似, 可在 350℃ 温度下长期工作, 适于制造航空钣金件
3	Ti-6Al-4V	$\alpha+\beta$	TC4 (TC4 ELI)	Gr.5 BT-6 (俄罗斯)	400	≥ 895	属中强 $\alpha+\beta$ 钛合金, 具有优良的综合性能, 热加工性能好, 在航空航天工业中获得最广泛的应用。该材料在 400℃ 温度持续工作的环境中表现稳定。因此, 它是制造航空发动机中的风扇、压气机盘片与叶片, 以及飞机结构中的框架和连接件等关键部件的理想选择
4	Ti-6Al-2.5Mo- 1.5Cr-0.5Fe-0.3Si	$\alpha+\beta$	TC6	BT3-1 (俄罗斯)	450	≥ 980	该合金归类为马氏体型的 $\alpha+\beta$ 钛合金, 能够在 450℃ 的高温条件下保持长期稳定的工作性能, 展现出卓越的热强度特性, 并伴有优异的热加工性能。因此, 它被推荐用于航空发动机压气机盘片、叶片以及飞机结构中承受高负载的推力部件和连接件的制造
5	Ti-6.5Al-1.5Zr- 3.5Mo-0.3Si	$\alpha+\beta$	TC11	BT9 (俄罗斯)	500	≥ 1030	该合金为 $\alpha+\beta$ 型耐热强化钛合金类别, 能在 500℃ 的高温环境中持续工作, 展现出卓越的热强性, 同时在室温下也能保持较高的强度水平, 并具备良好的热加工工艺性能。因此, 它非常适合用来制造诸如航空发动机的压气机盘与叶片等关键部件
6	Ti-3Al-5Mo-4.5V	$\alpha+\beta$	TC16	BT16 (俄罗斯)	350	≥ 1030	马氏体型 $\alpha+\beta$ 钛合金, 被归类为准高强度级别, 经历固溶时效处理后, 其强度可超过 1030MPa, 且显示出较低的应力集中敏感性, 因而在紧固件的制造中展现出高度适用性

续表							
序号	名义成分	类型	国内牌号	国外相近 牌号(国家)	工作温 度/℃	强度 /MPa	特点与应用
7	Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr	$\alpha+\beta$	TC17	Ti-17(美国)	430	≥ 1120	该合金为富含 β 稳定元素的 $\alpha+\beta$ 型高强度钛合金, 其特性包括高强度、优异的断裂韧性、卓越的淬透性以及广泛的锻造温度范围。因此, 它是制作航空发动机大型截面锻件, 如风扇与压气机盘的理想材料, 并能在 490℃ 的高温下保持长期、稳定的工作性能
8	Ti-5Al-4.75Mo-4.75V-1Cr-1Fe	$\alpha+\beta$	TC18	BT22 (俄罗斯)	400	≥ 1080 (退火)	在退火状态下, 该材料展现出卓越的强度特性; 经淬火处理后, 则具备深度淬透性 (250mm), 这些独特性能使之成为制造承载结构元件及飞机起落架部件的理想选择
9	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	$\alpha+\beta$	TC19	Ti-6246 (美国)	400	1170	该材料适用于中等温度环境下要求高强度的关键部件制造, 如航空发动机的压气机盘、风扇盘以及叶片等
10	Ti-6Al-7Nb	$\alpha+\beta$	TC20	—	550	≥ 980	用 Nb 取代 TC4 合金中的 V。其主要力学性能与 TC4 相当, 是一种外科植入物医用钛合金, 目前在国内已有临床应用, 并符合《外科植入物 金属材料 第 11 部分: 锻造钛-6 铝-7 钕合金》(ISO 5832-11)标准
11	—	$\alpha+\beta$	TC21	—	—	≥ 1100	高强韧性损伤容限钛合金, 被选用为航空领域中承载关键部件的制造材料
12	Ti-6.5Al-2Mo-1Zr-1Sn-1W-0.2Si	$\alpha+\beta$	TC25	—	—	—	500~550℃ 温度下工作, 用于航空重要承载构件
13	Ti-4.5Al-5Mo-2Cr-2Zr-0.2Si	$\alpha+\beta$	Ti451	—	—	≥ 850	适于超塑性成形, 该合金展现出优越的热处理特性, 尤其在维持相同强度水平的前提下, 其塑性 with 韧性表现超过 Ti-6Al-4V 合金。此外, 它还具备良好的冷热加工成形能力和可靠的焊接性能