

钛是20世纪50年代发展起来的一种重要的结构金属，钛合金因具有强度高、耐腐蚀性好、耐热性高等特点而被广泛用于各个领域。世界上许多国家都认识到钛合金材料的重要性，相继对其进行研究开发，并得到了实际应用。

第一个实用的钛合金是1954年美国研制成功的 Ti-6Al-4V 合金，由于它的耐热性、强度、塑性、韧性、成形性、可焊性、耐腐蚀性和生物相容性均较好，而成为钛合金工业中的王牌合金，该合金使用量已占全部钛合金的75%~85%。其他许多钛合金都可以看作是 Ti-6Al-4V 合金的改型。

20世纪50~60年代，主要是发展航空发动机用的高温钛合金和机体用的结构钛合金，70年代开发出一批耐蚀钛合金，80年代以来，耐蚀钛合金和高强钛合金得到进一步发展。耐热钛合金的使用温度已从50年代的400℃提高到90年代的600~650℃。A2 (Ti3Al) 和 r (TiAl) 基合金的出现，使钛在发动机的使用部位正由发动机的冷端（风扇和压气机）向发动机的热端（涡轮）方向推进。结构钛合金向高强、高塑、高强高韧、高模量和高损伤容限方向发展。

另外，20世纪70年代以来，还出现了 Ti-Ni、Ti-Ni-Fe、Ti-Ni-Nb 等形状记忆合金，并在工程上获得日益广泛的应用。

世界上已研制出的钛合金有数百种，最著名的合金有20~30种，如 Ti-6Al-4V、Ti-5Al-2.5Sn、Ti-2Al-2.5Zr、Ti-32Mo、Ti-Mo-Ni、Ti-Pd、SP-700、Ti-6242、Ti-10-5-3、Ti-1023、BT9、BT20、IMI829、IMI834等[2,4]。

据相关统计数据，2012年我国化工行业用钛量达2.5万吨，比2011年有所减少。这是自2009年以来，我国化工用钛市场首次出现负增长。近些年来，化工行业一直是钛加工材最大的用户，其用量在钛材总用量的占比一直保持在50%以上，2011年占比高达55%。但随着经济陷入低迷期，化工行业不但新建项目明显减少，同时还将面临产业结构调整，部分产品新建产能受到控制，落后产能也将逐步淘汰的境地。受此影响，其对钛加工材用量的萎

缩也变得顺理成章。在此之前，便有业内人士预测化工行业用钛量在2013~2015年间达到峰值。以当前市场表现看来，2012年整体经济的疲软有可能使得化工用钛的衰退期提前。

钛合金是以钛为基础加入其他元素组成的合金。钛有两种同质异晶体：882℃以下为密排六方结构 α 钛，882℃以上为体心立方的 β 钛。

合金元素根据它们对相变温度的影响可分为三类：

①稳定 α 相、提高相转变温度的元素为 α 稳定元素，有铝、碳、氧和氮等。其中铝是钛合金主要合金元素，它对提高合金的常温和高温强度、降低比重、增加弹性模量有明显效果。

②稳定 β 相、降低相变温度的元素为 β 稳定元素，又可分同晶型和共析型二种。前者有钼、铌、钒等；后者有铬、锰、铜、铁、硅等。

③对相变温度影响不大的元素为中性元素，有锆、锡等。

氧、氮、碳和氢是钛合金的主要杂质。氧和氮在 α 相中有较大的溶解度，对钛合金有显著强化效果，但却使塑性下降。通常规定钛中氧和氮的含量分别在0.15~0.2%和0.04~0.05%以下。氢在 α 相中溶解度很小，钛合金中溶解过多的氢会产生氢化物，使合金变脆。通常钛合金中氢含量控制在0.015%以下。氢在钛中的溶解是可逆的，可以用真空退火除去。

钛是一种新型金属，钛的性能与所含碳、氮、氢、氧等杂质含量有关，最纯的碘化钛杂质含量不超过0.1%，但其强度低、塑性高。99.5%工业纯钛的性能为：密度 $\rho=4.5\text{g/cm}^3$ ，熔点为1725℃，导热系数 $\lambda=15.24\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，抗拉强度 $\sigma_b=539\text{MPa}$ ，伸长率 $\delta=25\%$ ，断面收缩率 $\psi=25\%$ ，弹性模量 $E=1.078\times 10^5\text{MPa}$ ，硬度 HB195。

强度高

表 7-1 几种金属材料的性能比较

序号	材料类型	抗弯强度 σ_b/MPa	弹性模量 E / 10^4MPa	密度 ρ / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	σ_b/ρ	$E/10^4\rho$
1	超硬铝合金	588	7.154	2.8	210	2.55
2	耐热铝合金	461	7.154	2.8	165	2.55
3	高强度镁合金	343	4.41	1.8	191	2.45
4	高强度钛合金	1 646	11.76	4.5	366	2.61
5	高强度结构钢	1 421	20.58	8	178	2.57
6	超高强度结构钢	1 862	20.58	8	233	2.57

钛合金的密度一般在 4.51g/cm^3 左右，仅为钢的60%，一些高强度钛合金超过了许多合金结构钢的强度。因此钛合金的比强度（强度/密度）远大于其他金属结构材料，可制出单位强度高、刚性好、质轻的零部件。飞机的发动机构件、骨架、蒙皮、紧固件及起落架等都使用钛合金。

热强度高

使用温度比铝合金高几百度，在中等温度下仍能保持所要求的强度，可在 $450\sim 500^\circ\text{C}$ 的温度下长期工作这两类钛合金在 $150^\circ\text{C}\sim 500^\circ\text{C}$ 范围内仍有很高的比强度，而铝合金在 150°C 时比强度明显下降。钛合金的工作温度可达 500°C ，铝合金则在 200°C 以下。

抗蚀性好

钛合金在潮湿的大气和海水介质中工作，其抗蚀性远优于不锈钢；对点蚀、酸蚀、应力腐蚀的抵抗力特别强；对碱、氯化物、氯的有机物品、硝酸、硫酸等有优良的抗腐蚀能力。但钛对具有还原性氧及铬盐介质的抗蚀性差。

低温性能好

钛合金在低温和超低温下，仍能保持其**力学性能**。低温性能好，间隙元素极低的钛合金，如 TA7，在-253℃下还能保持一定的塑性。因此，钛合金也是一种重要的低温**结构材料**。

化学活性大

钛的化学活性大，与大气中 O₂、N₂、H₂、CO、CO₂、水蒸气、氨气等产生强烈的化学反应。含碳量大于0.2%时，会在钛合金中形成硬质 TiC；温度较高时，与 N 作用也会形成 TiN 硬质表层；在600℃以上时，钛吸收氧形成硬度很高的硬化层；氢含量上升，也会形成脆化层。吸收气体而产生的硬脆表层深度可达0.1~0.15 mm，硬化程度为20%~30%。钛的化学亲和性也大，易与摩擦表面产生粘附现象。

α钛合金

它是α相**固溶体**组成的单相合金，不论是在一般温度下还是在较高的实际应用温度下，均是α相，组织稳定，耐磨性高于纯钛，抗氧化能力强。在500℃~600℃的温度下，仍保持其强度和抗蠕变性能，但不能进行热处理强化，室温强度不高。

β钛合金

它是β相固溶体组成的单相合金，未热处理即具有较高的强度，**淬火**、时效后合金得到进一步强化，室温强度可达1372~1666 MPa；但热稳定性较差，不宜在高温下使用。

α+β钛合金

它是双**相合金**，具有良好的综合性能，组织稳定性好，有良好的韧性、塑性和高温变形性能，能较好地进行热压力加工，能进行淬火、时效使合金强化。热处理后的强度约比**退火**

状态提高50%~100%；高温强度高，可在400℃~500℃的温度下长期工作，其热稳定性次于 α 钛合金。

三种钛合金中最常用的是 α 钛合金和 $\alpha+\beta$ 钛合金； α 钛合金的切削加工性最好， $\alpha+\beta$ 钛合金次之， β 钛合金最差。 α 钛合金代号为TA， β 钛合金代号为TB， $\alpha+\beta$ 钛合金代号为TC。

钛合金按用途可分为耐热合金、高强合金、耐蚀合金（钛-钼，钛-钒合金等）、低温合金以及特殊功能合金（钛-铁贮氢材料和钛-镍记忆合金）等。

热处理：钛合金通过调整热处理工艺可以获得不同的相组成和组织。一般认为细小等轴组织具有较好的塑性、热稳定性和疲劳强度；针状组织具有较高的持久强度、蠕变强度和断裂韧性；等轴和针状混合组织具有较好的综合性能。

钛合金具有强度高而密度又小，机械性能好，韧性和抗蚀性能很好。另外，钛合金的工艺性能差，切削加工困难，在热加工中，非常容易吸收氢氧氮碳等杂质。还有抗磨性差，生产工艺复杂。钛的工业化生产是1948年开始的。航空工业发展的需要，使钛工业以平均每年约8%的增长速度发展。世界钛合金加工材年产量已达4万余吨，钛合金牌号近30种。使用最广泛的钛合金是Ti-6Al-4V(TC4)、Ti-5Al-2.5Sn(TA7)和工业纯钛（TA1、TA2和TA3）。

钛合金主要用于制作飞机发动机压气机部件，其次为火箭、导弹和高速飞机的结构件。60年代中期，钛及其合金已在一般工业中应用，用于制作电解工业的电极，发电站的冷凝器，石油精炼和海水淡化的加热器以及环境污染控制装置等。钛及其合金已成为一种耐蚀结构材料。此外还用于生产贮氢材料和形状记忆合金等。

中国于1956年开始钛和钛合金研究；60年代中期开始钛材的工业化生产并研制成TB2合金。

钛合金是航空航天工业中使用的一种新的重要结构材料，比重、强度和使用温度介于铝和钢之间，但比铝、钢强度高并具有优异的抗海水腐蚀性能和超低温性能。1950年美国首次在F-84战斗轰炸机上用作后机身隔热板、导风罩、机尾罩等非承力构件。60年代开始钛合金的使用部位从后机身移向中机身、部分地代替结构钢制造隔框、梁、襟翼滑轨等重要承

力构件。钛合金在军用飞机中的用量迅速增加，达到飞机结构重量的20%~25%。70年代起，民用机开始大量使用钛合金，如波音747客机用钛量达3640公斤以上。马赫数大于 2.5 的飞机用钛主要是为了代替钢，以减轻结构重量。又如，美国 SR-71 高空高速侦察机(飞行马赫数为3，飞行高度26212米)，钛占飞机结构重量的93%，号称“全钛”飞机。当航空发动机的推重比从4~6提高到8~10，压气机出口温度相应地从200~300°C 增加到500~600°C 时，原来用铝制造的低压压气机盘和叶片就必须改用钛合金，或用钛合金代替不锈钢制造高压压气机盘和叶片，以减轻结构重量。70年代，钛合金在航空发动机中的用量一般占结构总重量的20%~30%，主要用于制造压气机部件，如锻造钛风扇、压气机盘和叶片、铸钛压气机机匣、中介机匣、轴承壳体等。航天器主要利用钛合金的高比强度，耐腐蚀和耐低温性能来制造各种压力容器、燃料贮箱、紧固件、仪器绑带、构架和火箭壳体。人造地球卫星、登月舱、载人飞船和航天飞机 也都使用钛合金板材焊接件。