

我国航空用变形钛合金材料

张利军¹, 薛祥义^{1,2}, 常 辉^{1,2}

(1. 西安超晶科技发展有限公司, 陕西 西安 710016)
(2. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)



张利军

摘 要: 钛合金材料作为一种 20 世纪中叶出现并发展起来的新兴结构材料, 因其具有优异的耐腐蚀性、高的比强度以及无磁性等一系列独特的优点, 在航空航天等高端工业部门获得了广泛应用, 目前飞机机体结构中的隔框、大梁、起落架以及航空发动机压气机匣、轮盘、叶片等承力部件大量使用钛合金材料制造。在上世纪 60 年代, 美国、英国、前苏联等工业发达国家就已经在飞机及航空发动机制造中大量使用钛合金材料。我国钛合金材料在航空工业中的应用起步较晚, 上世纪 80 年代开始才陆续在飞机及航空发动机制造中少量使用钛合金材料, 但是进入 21 世纪之后, 我国航空工业钛合金材料的应用水平大幅度提升。对我国目前已经进入工业化生产并在航空工业中获得工程化应用的变形钛合金材料进行了系统阐述。

关键词: 钛合金; 航空; 飞机; 温度

中图分类号: TG146.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2012)08-0040-07

Deformation of Titanium Alloy Materials for China Aircraft

ZHANG Lijun¹, XUE Xiangyi^{1,2}, CHANG Hui^{1,2}

(1. Xi'an Super Crystal Sci-Tech Development Co., Ltd., Xi'an 710016, China)
(2. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Titanium alloy appears as a mid-twentieth century, and developed new structural materials, because of its excellent corrosion resistance, high specific strength and non-magnetic and a series of unique advantages, such as high-end in the aerospace industry access to a wide range of applications, the current structure of the airframe bulkheads, beams, landing gear and the aircraft engine compressor tray, roulette, blades and other parts of extensive use of titanium bearing materials. 60s in the last century, the United States, Britain, the former Soviet Union and other industrialized countries has been in the manufacture of aircraft and aero-engine heavy use of titanium material. Titanium alloy material of the application in the aviation industry started late 80's until the last century, one after another in the manufacture of aircraft and aircraft engines use a small amount of titanium alloy materials, but the 21st century, China's aviation industry application level of a large titanium alloy Rate increase, this article in China has entered the industrial production of and access to engineering applications in the aviation industry formulation of deformation of titanium alloy materials.

Key words: titanium alloy; aviation; aeroplane; temperature

1 前 言

材料科学与工程是现代科学技术的重要领域, 航空材料则处于材料科学与工程最富有挑战性的研究前沿, 是决定航空产品技术水平和发展的关键因素之一。航空产品设计和制造的先进性很大程度上取决于航空材料的

水平, 因此航空材料是发展航空技术的物质基础和先导^[1]。

钛及钛合金具有比强度高、抗腐蚀性好、耐高温等一系列突出优点, 能够进行各种方式的零件成形、焊接和机械加工, 50 多年来, 航空科研和生产发展与钛合金的推广应用有着紧密的联系。早在上世纪 50 年代初期, 有一些军用飞机上就开始用工业纯钛制造后机身隔热板、机尾罩、减速板等受力不大的结构件。上世纪 60 年代开始, 钛合金在飞机上的应用逐步扩大到承力

收稿日期: 2011-06-10

第一作者: 张利军, 男, 1981 年生, 工程师

隔框、梁等主要受力结构件，同时航空发动机压气机部分大量开始采用钛合金^[2]。美国在上世纪 70 年代的军用战斗机上，钛合金的用量就已经达到结构重量的四分之一了。目前，钛合金已经发展成为现代航空工业设计与生产中广有前途的金属结构材料，目前对于飞机的先进程度以钛合金的使用量来划分。

1978 年在原国家计委和国防科工委的要求下，我国原第三机械工业部（现中国航空工业集团公司前身）、冶金工业部等单位组成了航空材料赴英考察组赶赴英国进行了为期一个半月的考察工作。其中航空材料赴英考察组钛合金分组参观了国际航空博览会，并先后考察了英国宇航公司的 6 个飞机厂、英国罗罗公司的 3 个航空发动机厂、英国帝国金属公司钛分公司的冶炼厂和锻造厂以及英国皇家航空研究院等单位。通过这次考察学习，我国航空界人士才真正认识到钛合金在航空工业中的重要程度以及我们国家航空材料与西方发达国家的差距。当时我们国家航空工业主要生产机种为 J6 飞机和 WP6 航空发动机，钛合金在飞机及航空发动机中的工程应用几乎为零。为此考察组上书国家计委、国防科工委和三机部，要求解决钛合金加工工艺和质量方面的关键技术以及编制钛合金产品相关技术标准，以加快我国航空工业用钛的发展，同时推动我国航空工业现代化的发展^[3]。在此种背景条件下，我国原冶金部抚顺特钢厂、宝鸡有色金

属加工厂等单位开展了工业规模钛合金研制生产，航空工业部 621 所、148 厂、3007 厂等单位开展了钛合金锻件的研制生产，其中航空 148 厂于 1984 年为美国波音公司成功研制生产出了 B747 飞机用大型 TC4 钛合金模锻件，1985 年该厂被正式批准为波音钛锻件合格供应商。上世纪 80 年代，我国 WP13 等航空发动机开始大量使用钛合金制造压气机盘、叶片、机匣等部件，同时 J7、J8 等改型飞机开始使用 TC4、TB5、TB6 等钛合金零部件。上世纪 90 年代至今，随着我国新一代涡扇航空发动机和第 3 代战斗机的研制生产，钛合金在我国航空工业中的应用得到了快速发展，例如其中 J11 系列飞机用钛占整个机体结构的 18% 左右。在这期间为了适应航空工业用钛需要，逐步形成了我国航空钛合金系列标准，包括国家标准、航空工业标准、国家军用标、型号标准、企业标准等。

本文结合 GB/T 3620.1 - 2007《钛及钛合金属牌号和化学成分》、GB/T 2965 - 2007《钛及钛合金棒材》、GJB 2218 - 1994《航空用钛及钛合金棒材和锻坯规范》、GJB 2744A - 2007《航空用钛及钛合金锻件规范》、11 - CL - 045C《TA15 钛合金棒材》、《航空材料手册》等文献资料，对目前我国航空工业使用的主要变形钛合金材料进行了汇总分类，并对其成分、发明情况、使用特性进行了简要介绍。表 1 列出了我国航空用主要变形钛合金材料，并对每种材料逐一扼要介绍。

表 1 我国航空用主要变形钛合金材料
Table 1 Deformation Titanium Alloys of China Aviation Industry

NO.	Trademark	Chemical Composition	Invented Country	Type	Work Temperature/℃	R_m Level/MPa
1	TA7	Ti-5Al-2.5Sn	USSR	α	500	≥ 785
2	TA13	Ti-2.5Cu	UK	α	350	≥ 610
3	TC1	Ti-2Al-1.5Mn	USSR	Near α	350	≥ 590
4	TC2	Ti-4Al-1.5Mn	USSR	Near α	350	≥ 685
5	TA11	Ti-8Al-1Mo-1V	US	Near α	500	≥ 895
6	TA12	Ti-5.5Al-4Sn-2Zr-1Mo-1Nb-0.25Si	UK	Near α	550	≥ 980
7	TA15	Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V	USSR	Near α	500	≥ 930
8	TA18	Ti-3Al-2.5V	US	Near α	320	≥ 620
9	TA19	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	US	Near α	500	≥ 930
10	TC4	Ti-6Al-4V	US	$\alpha + \beta$	400	≥ 895
11	TC6	Ti-6Al-2.5Mo-1.5Cr-0.5Fe-0.3Si	USSR	$\alpha + \beta$	450	≥ 980
12	TC11	Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si	USSR	$\alpha + \beta$	500	$\geq 1\ 030$
13	TC16	Ti-3Al-5Mo-4.5V	USSR	$\alpha + \beta$	350	$\geq 1\ 030$
14	TC17	Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr	US	$\alpha + \beta$	430	$\geq 1\ 120$
15	TC18	Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe	USSR	$\alpha + \beta$	400	$\geq 1\ 080$
16	TC21	Ti-6Al-2Mo-1.5Cr-2Zr-2Sn-2Nb	CHINA	$\alpha + \beta$	450	$\geq 1\ 100$
17	TC25	Ti-6.5Al-2Mo-1Zr-1Sn-1W-0.2Si	USSR	$\alpha + \beta$	550	≥ 980
18	TB3	Ti-10Mo-8V-1Fe-3.5Al	CHINA	β	300	$\geq 1\ 100$
19	TB6	Ti-10V-2Fe-3Al	US	Near β	320	$\geq 1\ 105$
20	TB8	Ti-15Mo-2.7Nb-3Al-0.2Si	US	β	500	$\geq 1\ 250$

2 我国航空用变形钛合金

2.1 α 型钛合金

2.1.1 TA7 钛合金

合金名义成分为 Ti-5Al-2.5Sn, 该合金是前苏联 1957 年研制的 BT5-1 钛合金, 主要用于 500 °C 以下工作的航空发动机机匣等零件^[2]。我国于 1965 年仿制, 命名为 TA7, 用于制造涡喷 13 发动机前机匣壳体, 封严圈壳体、环件和模锻件转接座等^[1], 目前该合金在我国的多种型号航空发动机环形零件制造中获得了大量应用。该合金 β 稳定元素含量为零, 中性元素 Sn \approx 2.5%, 主要靠 Al 固溶强化 α 相, $\alpha + \beta/\beta$ 转变温度 1 040 ~ 1 090 °C, 不能热处理强化, 通常在退火状态下使用, 在室温和高温下具有良好的断裂韧性, 焊接性能良好, 但工艺塑性较差。长期工作温度可达 500 °C, 短时工作温度可达 800 °C, 室温抗拉强度 \geq 785 MPa, 大量用于制造航空发动机环轧件, 目前也用于航空钛合金铸件的生产。

2.1.2 TA13 钛合金

合金名义成分为 Ti-2.5Cu, 该合金是英国研制的 IMI230 钛合金, 我国上世纪 70 年代从英国引进了斯贝航空发动机(MK202)全套生产技术, 随着斯贝航空发动机的国产化, 宝鸡有色金属加工厂等相关单位开展了 IMI230 钛合金的仿制, 命名为 TA13。该合金最初一直在退火状态下使用, 后来发现, 该合金在淬火状态下具有非常好的塑性, 可以进行各种复杂板材的零件冷加工成形, 然后在时效过程中析出弥散的 Ti_2Cu 金属化合物颗粒使强度提高大约 25%^[2]。所以该合金是目前唯一能够热处理强化的 α 型钛合金, $\alpha + \beta/\beta$ 转变温度 895 °C \pm 10 °C, 合金具有良好的工艺塑性、焊接性能、热稳定性, 一般在退火状态下使用, 室温抗拉强度 \geq 610 MPa, 长期工作温度可达 350 °C, 我国已经使用该合金成功制造了航空发动机燃烧室外引射机匣、后锥体、排气收集器加强带、加强圈、支撑圈等^[1]。

2.2 近 α 型合金

2.2.1 TC1 钛合金

合金名义成分为 Ti-2Al-1.5Mn, 该合金是前苏联研制的 OT4-1 钛合金, 我国于上世纪 60 年代开始仿制生产, 后命名为 TC1^[2]。该合金是 1 种中等强度、高塑性的近 α 型合金, $\alpha + \beta/\beta$ 转变温度 920 ~ 930 °C, 具有良好的热稳定性、焊接性能及工艺塑性, 长期工作温度可达 350 °C, 室温抗拉强度 \geq 590 MPa。大量用于飞机及航空发动机钣金冲压件的生产。由于该合金中的 Mn 元素在真空熔炼状态下熔炼时容易挥发, 所以该合金熔炼

时一般在充氩状态下进行^[1]。

2.2.2 TC2 钛合金

合金名义成分为 Ti-4Al-1.5Mn, 该合金是前苏联研制的 OT4 钛合金, 我国于上世纪 60 年代初期开始仿制, 后命名为 TC2^[2]。该合金是 1 种低强度、高塑性的近 α 型合金, $\alpha + \beta/\beta$ 转变温度 940 °C \pm 20 °C, 具有良好的热稳定性、焊接性能及工艺塑性, 长期工作温度可达 350 °C, 短时使用温度为 750 °C, 室温抗拉强度 \geq 685 MPa。目前广泛用于制造飞机结构和航空发动机的各种板材冲压成形零件及蒙皮。由于该合金中的 Mn 元素在真空熔炼状态下熔炼时容易挥发, 所以该合金熔炼时和 TC1 钛合金一样在充氩状态下进行^[1]。

2.2.3 TA11 钛合金

合金名义成分 Ti-8Al-1Mo-1V, 该合金是美国上世纪发明, 具有较高的弹性模量和较低的密度, 是目前比刚度最高的工业钛合金。合金 $\alpha + \beta/\beta$ 转变温度 1 040 °C 左右, 长期工作温度可达 450 °C, 双重退火状态下室温抗拉强度 \geq 895 MPa。主要用于制造航空发动机高压压气机盘、压气机叶片、压气机机匣等^[1]。我国大量使用该合金制造航空发动机转子叶片, 该合金对氯化物应力腐蚀较敏感。

2.2.4 TA12 钛合金

相近牌号英国 IMI829 (Ti55), 合金名义成分 Ti-5.5Al-4Sn-2Zr-1Mo-1Nb-0.25Si, 该合金长期工作温度可达 550 °C, 用于制造航空发动机压气机盘、鼓筒、叶片等。该合金具有良好的塑性, 适合于各种压力加工成形。我国使用该合金制造的涡喷发动机鼓筒、高压压气机盘、转子叶片等都已经通过了长期试车。合金 $\alpha + \beta/\beta$ 转变温度 1 005 °C 左右, 一般在双重或三重退火状态下使用, 室温抗拉强度 \geq 950 MPa^[1]。

2.2.5 TA15 钛合金

合金名义成分 Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V, 该合金是前苏联上个世纪 60 年代初研制成功的 BT20 近 α 型钛合金。我国上个世纪 90 年代从俄罗斯引进了 Su-27 飞机生产线, 为了满足 Su-27 飞机的国产化需求, 国内相关单位随即开展了 BT20 钛合金的国产化工作, 我国仿制后命名为 TA15 钛合金, 该合金制造的结构件占是 Su-27 飞机整机结构的 15% 以上, 该合金兼有 α 型合金及 $\alpha + \beta$ 两相钛合金的优点, 具有中等的室温和高温强度、良好的热稳定性、焊接性能, 工艺塑性良好^[4]。该合金长时间(3 000 h)工作温度可达 500 °C, 450 °C 工作时寿命可达 6 000 h。合金 $\alpha + \beta/\beta$ 转变温度 1 020 °C \pm 30 °C, 退火状态下室温抗拉强度 \geq 930 MPa^[1]。目前主要用于制造飞机和航空发动机主要承力结构件, 尤其是焊接件。

2.2.6 TA18 钛合金

合金名义成分 Ti-3Al-2.5V, 该合金是美国上个世纪发明的近 α 型钛合金。我国上个世纪 80 年代开始仿制, 后命名为 TA18 钛合金。该合金具有良好的冷成形性能和焊接性能, 主要用于制造飞机和航空发动机各种燃油、液压管件, 合金 $\alpha + \beta/\beta$ 转变温度 $925\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 一般在退火状态下使用, 最高工作温度约为 $315\text{ }^{\circ}\text{C}$, 室温抗拉强度 $\geq 620\text{ MPa}$ ^[1]。

2.2.7 TA19 钛合金

合金名义成分 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo, 该合金是美国 20 世纪 60 年代为了满足改善钛合金高温性能的需要, 特别是为了满足喷气航空发动机使用要求而研制的 1 种近 α 型钛合金。合金 $\alpha + \beta/\beta$ 转变温度 $990\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 合金最高使用温度 $540\text{ }^{\circ}\text{C}$, 长期工作温度 $540\text{ }^{\circ}\text{C}$, 双重或三重退火状态下使用, 室温抗拉强度 $\geq 930\text{ MPa}$ ^[1]。特点是具有强度、蠕变强度、韧性和热稳定性性能的良好结合, 并具有良好的焊接性能, 主要用于制造燃气涡轮发动机零件, 发动机结构板材零件, 飞机热端零件^[5]。目前国外大量使用 Ti6242 合金制造航空发动机的转动部件。如普惠公司制造的 JT9D 及 2037 发动机是用 Ti6242 合金制造发动机的压气机盘和转子叶片, 通用电子公司的 CF6-5、CF6-80 等发动机的压气机盘和转子叶片也使用了 Ti6242 合金^[6-7]。我国上个世纪 90 年代开始仿制, 后命名为 TA19, 我国用于制造航空发动机机匣等零件。该合金也可应用于铸件的生产, 其铸造牌号为 ZTC6 钛合金。

2.3 $\alpha + \beta$ 型双相钛合金

2.3.1 TC4 钛合金

合金名义成分为 Ti-6Al-4V, 该合金最初由美国在 1954 年首先研制成功, 目前已经发展成为 1 种国际性的钛合金, 是目前人们对其研究最为全面、最为深入的钛合金。在航空、航天、民用等工业中得到了广泛应用。我国牌号 TC4, 该具有优异的综合力学性能, 已经广泛用于制造飞机结构中的梁、框、起落架, 航空发动机风扇、压气机盘、机匣、叶片等, 同时也大量用于其它各工业行业中, 目前占钛合金产量的一半以上^[8]。该合金具有良好的工艺塑性和超塑性, 合金 $\alpha + \beta/\beta$ 转变温度 $980 \sim 1\ 010\text{ }^{\circ}\text{C}$, 长期工作温度可达 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, 一般在退火或固溶时效状态下使用, 室温抗拉强度 $\geq 895\text{ MPa}$ 。我国目前广泛用于制造飞机主要承力结构件和航空发动机风扇盘、压气机盘、叶片等。

TC4 合金中的间隙杂质虽然能提高合金的强度, 但是这种杂质不仅严重降低合金的塑性和断裂韧性, 而且会加快疲劳裂纹扩展速率, 并使其他一些重要性能, 如

热稳定性、蠕变抗力、缺口敏感性等变坏, 所以近年来国内外为了适应飞机结构设计所需的损伤-容限要求, 研制生产出了高纯度的 Ti-6Al-4V(ELI)合金, 其 O 含量小于 0.13%, C 含量小于 0.08%, 适宜于低温或要求高的断裂韧性时使用。

2.3.2 TC6 钛合金

该合金是前苏联研制的 BT3-1 钛合金, 合金名义成分为 Ti-6Al-2.5Mo-1.5Cr-0.5Fe-0.3Si, 目前在俄罗斯得到广泛应用。该合金是 1 种综合性能良好的马氏体型 $\alpha + \beta$ 型双相钛合金, 一般在退火状态下使用, 也可进行适当的热处理强化。具有较高的室温强度, 室温抗拉强度 $\geq 980\text{ MPa}$ 。具有良好的热强性能, 可长时间在 $400 \sim 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下工作, 合金 $\alpha + \beta/\beta$ 转变温度 $960 \sim 1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$, 该合金具有良好的热加工性能。目前主要用于制造航空发动机压气机盘和叶片等, 也用于制造中等强度的飞机主要承力结构件等, 如隔框、接头等^[1]。

2.3.3 TC11 钛合金

该合金是前苏联 1958 年开始研制、1966 年研制成功的用于 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 BT9 热强钛合金, 合金名义成分为 Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si, 我国于上世纪 70 年代末 80 年代初开始仿制, 后命名为 TC11 钛合金。TC11 是 1 种综合性能良好的中 $\alpha + \beta$ 型钛合金, 在 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下有优异的热强性能(高温强度、蠕变抗力等), 并具有较高的室温强度。该合金具有良好的热加工工艺性, 合金 $\alpha + \beta/\beta$ 转变温度 $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该合金常用于制造航空发动机压气机盘、叶片、鼓筒等零件, 也用于制造飞机结构件。TC11 合金通过 $\alpha + \beta$ 区热加工和 $\alpha + \beta$ 热处理, 获得最高长期工作温度为 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, 室温下其强度 $\geq 1\ 030\text{ MPa}$ 。通过近 β 锻造工艺生产的 TC11 压气机盘锻件长期工作温度可达 $520\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[9]。该合金是我国目前使用范围最广、使用量最大、技术最为成熟的热强钛合金, 目前几乎所有型号的航空发动机都有应用。

2.3.4 TC16 钛合金

合金名义成分 Ti-3Al-5Mo-4.5V, 该合金是前苏联上个世纪研制的 BT16 马氏体型 $\alpha + \beta$ 型双相钛合金。我国上个世纪 90 年代从俄罗斯引进了 Su-27 飞机生产线, 为了满足 Su-27 飞机的国产化需求, 国内相关单位随即开展了 BT16 钛合金的国产化工作, 我国仿制后命名为 TC16 钛合金。该合金主要用于制造工作温度 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下条件下工作的航空标准件, 合金 $\alpha + \beta/\beta$ 转变温度 $860\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 该合金退火状态下强度中等, 但塑性非常好, 可以像 β 型钛合金一样冷锻成形制造螺栓、铆钉等标准件。强化热处理后可获得高的强度, 室温强度 $\geq 1\ 030\text{ MPa}$ 。我国在新型飞机上已经开始使用 TC16 钛合

金制造的螺栓、铆钉。

2.3.5 TC17 钛合金

合金名义成分 Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr, 该合金是上个世纪 70 年代美国通用电气公司以提高综合性能为目的而发展起来的 1 种高强度、高韧性和高淬透性的近 β 型变形钛合金, 我国从“七五”期间开始仿制, 国产牌号 TC17。合金最高工作温度 427 $^{\circ}\text{C}$, 室温下其抗拉强度 $\geq 1\,120\text{ MPa}$ ^[1,10]。我国目前使用该合金制造航空发动机风扇盘、压气机盘等。

2.3.6 TC18 钛合金

合金名义成分为 Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe, 该合金是前苏联航空材料研究院于上世纪 70 年代中期研制成功的 1 种高合金化、高强度近 β 型合金, 俄罗斯牌号 BT22, 该合金具有高强、高韧、高淬透性, 故称“三高”钛合金, 退火状态下强度极限可达 1 080 MPa, 强化热处理状态下可达 1 200 MPa 或更高, 具有满意的延伸率、断面收缩率和冲击韧性。根据不同性能和用途分为 3 种不同等级: ① $R_m \geq 1\,078\text{ MPa}$, $K_{IC} \geq 70\text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; ② $R_m \geq 1\,127\text{ MPa}$, $K_{IC} \geq 65\text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; ③ $R_m \geq 1\,176\text{ MPa}$, $K_{IC} \geq 53\text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。在伊尔 76、伊尔 86、伊尔 96、及图 204、安 124 等飞机上大量制造承力框及起落架部件^[11-12]。随着我国军机型号的不断发展和大型运输机研制的开展^[13], 我国开始仿制该合金, 我国仿制后命名为 TC18(2007 版 GB/T3620.1-2007)。

2.3.7 TC21 钛合金

TC21 钛合金是西北有色金属研究院、北京航空材料研究院等单位联合研制的具有我国自主知识产权的第 1 个高强高韧损伤容限钛合金, 合金名义成分 Ti-6Al-2Mo-1.5Cr-2Zr-2Sn-2Nb。该合金目前用于制造飞机重要结构件^[14]。目前使用状态下 $R_m \geq 1\,100\text{ MPa}$, $K_{IC} \geq 70\text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。该合金已经在我国第 3 代先进飞机上获得了工程化应用。

2.3.8 TC25 钛合金

TC25 钛合金是我国近年来在仿制某型航空发动机过程中仿制的俄罗斯 BT25 钛合金, BT25 是前苏联 1971 年研制的马氏体型的 $\alpha + \beta$ 两相热强钛合金, 合金里添加了高熔点的 Mo, W 大大提高了合金的热强性和耐热性, 也提高了合金的工作寿命, BT25 合金在常温、高温下均具有优异的力学性能, 其使用温度可达 550 $^{\circ}\text{C}$, 合金名义成分 Ti-6.5Al-2Mo-1Zr-1Sn-1W-0.2Si。BT25 合金可在适当的热变形条件、热处理制度下(950 ~ 970 $^{\circ}\text{C}$, 1 h, 空冷 + 530 ~ 570 $^{\circ}\text{C}$, 6 h, 空冷)可获得较为理想的综合性能。作为马氏体型 $\alpha + \beta$ 两相钛合金, BT25 合金较该系列其它热强合金的突出优点是其工作使

用温度 500 ~ 550 $^{\circ}\text{C}$, 在 500 $^{\circ}\text{C}$ 以下工作时间达 6 000 h, 在 550 $^{\circ}\text{C}$ 工作时间达 3 000 h, 因此被推荐用于制造高压压气机零件(主要是压气机盘)。BT25 合金制造的半成品有锻件、模锻件、棒材和其他形式的半成品^[15-18]。

2.4 β 及近 β 钛合金

2.4.1 TB3 钛合金

TB3 钛合金是 1 种可热处理强化的亚稳定 β 型钛合金, 合金名义成分为 Ti-10Mo-8V-1Fe-3.5Al。该合金的主要优点是固溶处理状态具有优异的冷成形性能, 其冷锻比(D_f/D_0)可达 2.8, 固溶 + 时效制度处理后可获得高的强度, 主要用于制造使用温度低于 300 $^{\circ}\text{C}$ 的 1 100 MPa 级以上高强度航空航天紧固件^[1]。

2.4.2 TB6 钛合金

上世纪 50 年代的朝鲜战争, 美国飞机在战场被击落击伤近 1 000 架, 60 年代的越南战争, 美国飞机的损失更加惨重, 累计 4 000 多架。两次大的战争美国的财力损失很大, 但大大促进了美国钛工业和钛加工技术的发展。美国在总结越南战争中飞机事故时发现, 飞机机体结构常常出现一种低应力的断裂事故, 即构件的工作应力低于材料的屈服强度而发生的脆性断裂事故。经材料和力学家的分析发现, 构件内部常常存在一种宏观尺度裂纹。这种裂纹有可能是铸造、锻造、热处理, 甚至机械加工产生的。因此, 这种带有裂纹的构件使用时的安全性、可靠性和寿命, 当然不能用 R_m , $R_{p0.2}$, A , Z , a_k 来衡量了。而是应该用裂纹失稳扩展的抵抗能力来评价。如果材料的裂纹失稳扩展抵抗能力越好, 那么使用越安全, 或者说, 即使构件中存在裂纹, 照样可以使用而且不会造成断裂或者很快就断裂。把这个能力叫做断裂韧性, 材料上称 K_{IC} 。20 世纪 70 年代的飞机设计者, 已经考虑到提高飞机构件的结构效益和构件的寿命了。而 β 钛合金正好可满足这一点。可以在更高的强度水平上比 $\alpha + \beta$ 两相钛合金具有更好的断裂韧性。

在这种需求背景下, 美国 Timet 公司于 1971 年研制生产了 Ti-1023 钛合金, 该合金名义成分为 Ti-10V-2Fe-3Al, 常规使用状态下 $R_m \geq 1\,100\text{ MPa}$, $K_{IC} \geq 60\text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 是迄今为止应用最为广泛的一种高强高韧近 β 型钛合金, 是一种为适应损伤容限性设计原则而产生的高结构效益、高可靠性和低制造成本的变形钛合金, 合金中以 Fe 和 V 为主要 β 稳定元素。已经应用于波音 777 客机起落架主梁、A380 主起落架支撑等部件制造^[11]。我国从 1986 年开始该合金材料的仿制及应用研究工作, 仿制后命名为 TB6 钛合金。国内生产的 Ti-1023, 早期用于生产歼八 II 飞机 58 框腹鳍接头模锻件、用于歼七系列飞机减速板梁自由锻件和模锻件, 在后期的 JH7 飞机

中获得了大量应用。该合金的主要缺点就是 β 稳定元素偏析,该缺点是我们国内至今未能完全解决的技术难点。

2.4.3 TB8 钛合金

该合金是美国 Timet 公司于 1989 年针对美国国家航空航天飞机计划 NASP 对抗氧化金属及复合材料基体的需求而研制的 1 种亚稳定 β 型钛合金,美国牌号为 $\beta 21s$,该合金名义成分 Ti-3Al-15Mo-2.7Nb-0.25Si。TB2, TB3, TB5, TB6 等 β 钛合金主要 β 稳定元素都采用 V,但由于 V 的抗氧化能力很差,所以这些 β 钛合金的使用温度一般都不超过 300℃。由于 $\beta 21s$ 钛合金是针对 NASP 计划而研制的,要求合金要具有良好的抗氧化性能和高温性能,所以 $\beta 21s$ 合金设计时 β 稳定元素选用抗氧化性能良好的高熔点 Mo 和 Nb。该合金不仅具有优异成形性、深淬透性、良好的抗腐蚀能力,还具有优异的高温抗氧化性能,可用于制作有温度要求的飞机结构件或发动机部件紧固件和液压管材等,还可用作金属基复合材料的基体、铸件等。该合金是飞机发动机舱附近导风罩类零件的理想材料,例如波音 777 飞机发动机舱导风罩选用该合金后产生了很好的效果^[20-23]。

我国在 20 世纪 90 年代初开始对 $\beta 21s$ 钛合金进行国产化研究,材料已研制成功,该合金国内相对应的牌号为 TB8,主要产品型态为板材、棒材、锻件、带材,也可生产箔材、丝材、管材等。国内某型号飞机机身发动机风罩零件上用 TB8 代替 1Cr18Ni9Ti 不锈钢,使飞机减重 14 kg,并提高了零件的抗腐蚀性、热稳定性。而采用该材料代替 30CrMnSiA 结构钢制造某机后,机身承力框上框段 3 个锻件结构件的焊接组合件实现减重 15%~20%,大大提高了飞机的结构效益。

航空航天标准件在其生产制造过程中要求材料具有良好的冷镦成形性能,且在其热处理后要获得足够高的强度。 β 型钛合金由于在固溶状态下具有优异的冷成形性能,且其在随后时效处理状态下可获得很高的强度,所以大量应用于高品质航空航天标准件的生产制造。列入我国《航空材料手册》的用于制造航空标准件的 β 型钛合金主要有 TB2、TB3,这两种 β 型钛合金主要应用于 1 100 MPa 级标准件的制造。随着我国航空航天工业的迅速发展,新一代标准件要求其强度水平达 1 300 MPa 级以上,所以研究和发展 1 300 MPa 级以上的 β 型钛合金材料及其加工工艺成为我国材料工程技术人员的当务之急。对于冷加工成形性能优异的 1 300 MPa 级超高强度 β 型钛合金,我国目前尚无十分成熟的合金可用,国外资料显示, $\beta 21s$ 钛合金具有优异的冷加工成形性能及深的淬透性,热处理后可获得很高的强度。为

此,我公司开展了超高强度紧固件用 TB8 合金棒丝材的研制生产及应用研究工作,目前已经研制生产出了 $R_m \geq 1\ 300\text{ MPa}$ 、 $A \geq 8\%$ 的 TB8 钛合金棒丝材及形成了全套冷热加工工艺,并已经在航空航天标准件生产厂加工出了各种规格的超高强度航空航天标准件,满足了型号设计需求。

3 结 语

目前我国航空工业使用变形钛合金材料 90% 以上是仿制前苏联、美国等工业发达国家,而且大多数是在航空发动机或飞机的仿制、技术借鉴或引进改进过程中被动进行的。虽然,我国很多材料研制单位从上世纪 80 年代至今研制开发了很多自主知识产权的钛合金,但因为种种原因大多数未获得工程化应用,最终在实验室不了了之。所以,我们国家钛合金工业今后发展的方向应立足于产学研用一体化发展,开发合金应立足于工程应用,真正实现研有所用。

参考文献 References

- [1] The Editorial Committee of《China Aeronautical Materials Handbook》(中国航空材料手册编委). *China Aeronautical Materials Handbook*(航空材料手册)[M]. BeiJing: China Standard Press, 2002.
- [2] Wang Jinyou(王金友), Ge Zhiming(葛志明). *Titanium Alloy for Aerospace*(航空用钛合金)[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1985.
- [3] The Seeing About Group of Aviation Materials to U. K. *Technology Reports of Titanium Materials*(赴英考察“钛合金”技术报告)[R]. Third Mechanical Industry Ministry, 1978.
- [4] Min Xinhua(闵新华), Zhu Yipan(朱益潘), Liou Jiansheng(刘金生). TA15 钛合金大规格棒材的锻造[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程), 2008, 37(Suppl. 3): 250-252.
- [5] Fu Yanyan(付艳艳), Song Yueqing(宋月清), Xi Songxiao(惠松骁), et al. 航空用钛合金的研究与应用进展[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属), 2006, 30(6): 850-856.
- [6] Wei Zhijian(魏志坚), Jiang Ming(姜明). Ti6242 钛合金整体机匣大型异形环成形工艺研究[J]. *Aviation and Aerospace*(航空与航天), 1999(3): 125-128.
- [7] Shi Zhengming(史正敏). 6242S 高温钛合金板材的组织特点[J]. *China Titanium Industry*(中国钛业), 2007, 12(3): 32-35.
- [8] Zhang Yuan(张源), Zhang Aili(张爱荔), Li Huijuan(李惠娟), et al. TC4 钛合金的表面氧化及其对疲劳性能的影响[J]. *Titanium Industry Progress*(钛工业进展), 2010, 27(1): 25-27.
- [9] Zhao Yongqing(赵永庆), Xi Zhengping(奚正平), Qu Henglei(曲恒磊). 我国航空用钛合金材料研究现状[J]. *Journal of*

- Aeronautical Metals* (航空材料学报), 2003, 23(10): 215–219.
- [10] Wang Xiaoying (王晓英), Zhou Huajian (周建华), Pang Kechang (庞克昌), *et al.* TC17 钛合金盘轴等温精密锻件[J]. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程), 2008, 37(Suppl. 3): 227–229.
- [11] Fu Yanyan (付艳艳), Song Yueqing (宋月清), Hui Songxiao (惠松晓), *et al.* 航空用钛合金的研究与应用进展[J]. *Chinese Journal of Rare Metals* (稀有金属), 2006, 30(6): 850–856.
- [12] Wei Shouyong (魏寿庸), Wang Dingchun (王鼎春), Lei Jiafeng (雷家峰), *et al.* BT22 及其改进型钛合金[J]. *China Titanium Industry* (中国钛业), 2007(3): 21–27.
- [13] Han Dong (韩栋), Zhang Pengsheng (张鹏省), Mao Xiaonan (毛小南), *et al.* 两种典型热处理工艺对 TC18 钛合金组织性能的影响[J]. *Titanium Industry Progress* (钛工业进展), 2009, 26(6): 19–21.
- [14] Zhao Yongqing (赵永庆), Qu Henglei (曲恒磊), Chen Jun (陈军). 损伤容限钛合金研究[J]. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程), 2008, 37(Suppl. 3): 26–29.
- [15] Shi Xiaoyong (史小云), Du Jianchao (杜建超), Wang Wengsheng (王文盛), *et al.* BT25 钛合金棒材的组织 and 性能研究[J]. *Titanium Industry Progress* (钛工业进展), 2009, 26(2): 28–30.
- [16] Yuan Shaochong (袁少冲), Mao Xiaonan (毛小南), Zhang Pengsheng (张鹏省), *et al.* 热强钛合金 BT25 组织与性能[J]. *Titanium Industry Progress* (钛工业进展), 2006, 23(3): 19–22.
- [17] Yang Huili (扬慧丽), Wei Shouyong (魏寿庸), He Shulin (何书林), *et al.* 改进型 BT25y 钛合金热处理工艺对棒材组织性能的影响[J]. *China Titanium Industry* (中国钛业), 2007(3): 36–38.
- [18] Zhu Yipan (朱益潘), Min Xinhua (闵新华), Yu Weimei (于卫敏), *et al.* β 25 钛合金盘 β 锻盘件的组织与性能[J]. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程), 2008, 37(Suppl. 3): 46–48.
- [19] Peng Yanping (彭艳萍), Zeng Fanchang (曾凡昌), Wang Junjie (王俊杰), *et al.* 国外航空钛合金的发展应用及其特点分析[J]. *Materials Engineering* (材料工程), 1997, 10: 3–6.
- [20] Li Mingyi (李明怡). 航空用钛合金结构材料[J]. *International Nonferrous Metals* (世界有色金属), 2000(6): 17–20.
- [21] Zhang Xiyan (张喜燕), Zhao Yongqing (赵永庆), Bai Chengguang (白晨光). *Titanium Alloys and Applications* (钛合金及应用)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [22] Qian Jioujiang (钱九红). 航空航天用新型钛合金的研究发展及应用[J]. *Chinese Journal of Rare Metals* (稀有金属), 2000, 3(24): 218–223.
- [23] Qiou Huizhong (邱惠中), Wu Zhihong (吴志红). 国外航天材料的新进展[J]. *Technology of Aeronautical Metals* (宇航材料工艺), 1997, 27(4): 5–14.

金属硫化物纳米薄膜性能研究获进展

金属硫化物纳米材料因其具有优异的光电特性而成为太阳能转换、光电器件、催化等前沿领域的研究热点。通过对金属硫化物纳米结构的设计及其薄膜材料的可控合成和组装, 使其在太阳能利用和光电子集成器件等应用上发挥更大作用。

中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室贾均红研究员带领的课题组, 在对金属硫化物纳米材料及其功能薄膜的设计、制备和性能研究方面, 取得了一系列突破和重要进展。他们利用化学浴沉积结合自组装技术, 在单晶硅及玻璃上可控制备了一系列金属硫化物如 Cu_2S 、 CdS 、 In_2S_3 及 Bi_2S_3 等纳米晶薄膜。同时, 采用自组装结合紫外光刻技术, 制备了完整、有序的硫化物图案化薄膜, 研究了图案特征对薄膜光学及光电性能的影响, 并揭示了硫化物沉积薄膜的形成和生长机理。

研究表明, 自组装薄膜可作为一种有效的模板来控制金属硫化物纳米材料的晶轴定向、晶型选择和表面形貌, 所制备的薄膜具有稳定的光电流及灵敏的光电响应特性; 可通过调节图案尺寸实现对薄膜光学及光电性能的控制。这种图案化功能薄膜的特性在微型光学器件、传感器及太阳能电池等领域有着广泛的应用前景。

该项研究工作得到中科院“百人计划”和国家自然科学基金项目支持。研究结果最近发表在《CrystEngComm》(2012, 14: 3 433) 以及《Journal of Colloid and Interface Science》(2009, 332: 32–38; 2011, 356: 726–733.), 《ACS Appl Mater Interfaces》(2010, 2: 3 467–3 472), 《Applied Surface Science》(2010, 256: 7 316; 2011, 258: 649–656) 上。

(来源: 中国科学院兰州化学物理研究所)