

# 国内外高温钛合金材料的应用与发展

杨海涛<sup>1</sup>, 包春玲<sup>1</sup>, 姚谦<sup>1</sup>, 兰天<sup>2</sup>, 于波<sup>2</sup>, 赵军<sup>1</sup>

(1. 沈阳铸造研究所, 辽宁 沈阳 110022;

2. 第二炮兵驻沈阳地区军事代表室, 辽宁 沈阳 110034)

**摘要:** 本文介绍了国内外高温钛合金的发展历程、研究现状和发展趋势, 并分析了我国高温钛合金的发展趋势。

**关键词:** 高温钛合金; 发展; 应用; 国内外

## Application and Development of High Temperature Titanium Alloys

YANG Hai-tao<sup>1</sup>, BAO Chun-ling<sup>1</sup>, YAO Qian<sup>1</sup>, LAN Tian<sup>2</sup>, YU Bo<sup>2</sup>, ZHAO Jun<sup>1</sup>

(1. Shenyang Research Institute of Foundry, Liaoning, Shenyang 110022; 2. The Second Artillery Force stationed in Shenyang Military Representative Office, Shenyang 110034, Liaoning)

**Abstract:** The worldwide development history, research status and development trend of high temperature titanium alloy were introduced. And then the development trend of the high temperature titanium alloys in China was discussed.

**Key words:** high temperature titanium alloy; development; application; worldwide

### 1 高温钛合金概况

国内外高温钛合金的研究一直极为活跃, 极为重要, 但其发展历程却极为艰辛, 这主要是因为高温钛合金主要用于飞机发动机的压气盘、叶片和机匣等<sup>[1]</sup>。因发动机对高温钛合金的要求苛刻: 它要求材料具有良好的室温性能、高温强度、蠕变性能、热稳定性、疲劳性能和断裂韧性等的匹配, 而这些性能对材料的成分和组织的要求是矛盾的, 典型高温钛合金的性能特点如表 1 所示。

表 1 典型高温钛合金的性能特点

合金 类型	Al 当量	Mo 当量	(A+B)/B 相 转变温度 TB	密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	性能特点
Ti26242S	8.3	2.0	995±10℃	4.54	热稳定性与蠕变强度结合良好
IMI834	8.7	0.7	1045±10℃	4.55	良好的变形能力; 良好的疲劳性能和蠕变性能 匹配
Ti21100	8.6	0.4	1015℃	4.50	良好的高温蠕变性能; 较低的韧性和较大疲劳 裂纹扩展速率
BT36	8.5	2.7	1000~1025℃	4.59	良好的高温蠕变性能; 非常细小的显微组织
Ti260	8.5	1.0	1025℃	4.5	良好的热稳定性和高温抗氧化性

目前已成功地应用在军用和民用飞机发动机中的新型高温钛合金有：英国的 IMI829、IMI834 合金，美国的 Ti1100 合金，俄罗斯的 BT18Y、BT36 合金等，使用温度达 550~600℃。国外在传统高温钛合金的基础上仍在进行深化研究。我国研制出了 Ti55、Ti633G、Ti53311S、Ti-65Nd、Ti60、7715D 及 Ti600 等 7 种高温钛合金，比美、英、俄三国的总和还多两个。表 2 为部分国家高温钛合金的使用温度及化学成分。但我国研制的高温钛合金在航空上并没有得到真正应用<sup>[2]</sup>，Ti53311S 和 7715D550 高温钛合金反而在航天上得到很好应用。作者对美国、俄罗斯、欧洲和中国等国家高温钛合金的发展、现状及趋势进行了介绍，评述了高温钛合金的发展趋势，为我国高性能钛合金的研发及应用提供一定的思路和启示。

表 2 高温钛合金的使用温度及化学成分

Table 2 Working temperature and chemical composition of some high temperature titanium alloys										
国家	合金类型	时间	使用温度 /℃	化学成分						
				Al	Sn	Zr	Mo	Nb	Si	其它
美国	Ti64	1954	300	6						4V
	Ti811	1961	425	8			1			1V
	Ti6246	1966	450	6	2	4	6			
	Ti6242	1967	450	6	2	4	2			
	Ti6242S	1974	520	6	2	4	2		0.1	
	Ti1100	1988	600	6	2.7	4	0.4		0.45	
英国	IMI550	1956	425	6	2	4			0.5	
	IMI679	1961	450	2	11	5	1		0.2	
	IMI685	1969	520	6	5		0.5		0.25	
	IMI829	1976	580	5.5	3.5	3	0.3	1	0.3	
	IMI834	1984	590	5.5	4	4	0.3	1	0.5	0.06C
俄罗斯	BT321	1957	400~450	6.5			2.5		0.3	0.5Fe1.5Cr
	BT8	1958	500	6.5			3.5		0.2	
	BT9	1958	500~550	6.5	2		3.5		0.3	
	BT18	1963	550~600	8		8	0.6	1	0.22	0.15Fe
	BT18Y		550~600	6.5	2.5	4	0.7	1	0.25	
	BT25	1971	500~550	6.8	2	1.7	2		0.2	
	BT25Y			6.5	2	4	4		0.2	1.0W
	BT36		600	6.2	2	3.6	0.7		0.15	5W
中国	TC4	1965	300~400	6						4V
	TC6		450	6			2.5		0.3	0.5Fe1.5Cr
	Ti811		425	8			1			1V
	TC9		500	6.5	2.5		3.5		0.3	
	TC11	1979	500	6.5		1.5	3.5		0.3	
	Ti55	1995	550	5	4	2	1		0.25	1Nd
	Ti53311S		550	5.5	3.5	3	1	1	0.3	
	Ti60	1994	600	5.8	4.8	2	1		0.35	0.85Nd
	Ti600		600	6	2.8	4	0.5		0.4	0.1Y

## 2 国外高温钛合金研究现状

高温钛合金以其优良的热强性和高的比强度,在航空发动机中获得了广泛的应用,以其为材料生产的零件包括风扇盘、叶片、压气机盘等。美国、英国、俄罗斯等航空工业发达国家先后研制出了在 350~600℃环境中使用的高温钛合金。高温钛合金的使用温度逐步提高,目前在研发中的高温钛合金使用温度覆盖了 550~850℃的范围。

### 2.1 美国高温钛合金的发展

美国是世界上最先研制出钛合金的国家,美国在钛合金研究领域,取得了举世瞩目的成果,这可从美国刊登在历届国际钛合金学术论文集的研究论文中看出,无论从数量还是质量上都居首位,美国研制的一系列实用性高温和高强钛合金,为其军事工业的发展提供了强大的动力。

1954 年,美国人成功研制出世界上第一个实用的钛合金 Ti-6Al-4V,奠定了耐热钛合金发展的基础,其工作温度仅 300℃,但是由于其具有良好的综合性能和较低的成本,至今仍是使用量最多的钛合金。但随着使用条件的提高,Ti-64 合金也逐渐暴露出了一些不足,主要有:冷加工性较差、淬透性不理想、耐热性不够好、制备工艺复杂等。上世纪 60 年代,开发了 Mo 含量较高的 Ti-6246 和 Ti-6242 合金,将使用温度提高到 450℃左右。Ti-6246 合金的  $\beta$  稳定化程度进一步提高,固溶时效和双重退火后的低周疲劳强度明显高于相应的 Ti-64 合金,同时具有较高高温蠕变强度和瞬时强度。70 年代,美国活性金属公司通过添加 Si 元素,开发了使用温度超过 500℃的 Ti-6242S 合金,该合金的最高使用温度为 540℃,室温的  $\sigma_b=930\text{MPa}$ <sup>[3]</sup>,特点是具有强度、蠕变强度、韧性和热稳定性的良好结合,并具有良好的焊接性能,主要应用于燃气涡轮发动机零件、发动机结构板材零件、飞机机体热端零件<sup>[4]</sup>。

80 年代初,发动机制造商对高温钛合金的抗蠕变性能提出了更高的要求,于是美国研究开发了钼含量较低的 Ti-1100 合金。该合金是 Ti-6242S 的改进型合金,是以前使用温度为 1100°F 而命名的。Ti-1100(Ti-6Al-2.75Sn-4Zr-0.4Mo-0.45Si)合金是近  $\alpha$  型钛合金,使用温度达到 600℃,特点是具有较低的韧性和较大的疲劳裂纹扩展速率。该合金已用于制造莱康明公司 T55-712 改型发动机的高压压气机轮盘和低压涡轮叶片等零件<sup>[5]</sup>。

进一步提高合金的工作温度往往受到蠕变温度、组织稳定性和表面抗氧化能力的限制。美国冶金学家用 0.5%~1% Ta (质量分数)代替 IMI834 合金中的 Nb,称为 IMI834-Ta。IMI834-Ta 合金的高温性能与 IMI834 几乎相同,600℃时屈服强度达 580MPa、蠕变性能高于 IMI834<sup>[6]</sup>。

近几年国外把采用快速凝固/粉末冶金技术研制钛合金作为高温钛合金的发展方向,使钛合金的使用温度可提高到 650℃以上。美国麦道公司采用这种技术成功地研制出一种高纯度、高致密性钛合金,在 760℃下其强度相当于目前室温下使用的钛合金强度<sup>[7]</sup>。

### 2.2 俄罗斯(含前苏联)高温钛合金的发展

高温钛合金以其优良的热强性和高比强度,在航空发动机上获得了广泛的应用。为了满足设计高性能航空发动机的需求,多年来,俄罗斯十分重视对高温钛合金的研制与开发。早在 20 世纪 50 年代末期就开发出了 BT6、BT3-1、BT8、BT9 等牌号的钛合金,六七十年代又研制和开发了 BT18、BT25 合金。为了提高高温钛合金的性能和工作寿命,在原有合金的基础上改进研制了 BT18y、BT25y、BT8M、BT8-1 和 BT8M-1 等牌号的高温钛合金。此外,综合性能优良的 BT22(Ti-5Al-5Mo-5V-1Fe-1Cr)、BT6 合金也被列入航空发动机选用材料系列中。如 BT22 合金既可用于制造在 350~400℃下长期工作的机身、机翼受力件及操作系统等的紧固件,也可用于制造工作温度不高于 350℃的发动机的风扇盘和叶片等。这些合金的热强性能由低到高的顺序依次为 BT22、BT6、BT8、BT8M-1、BT9、BT25y、BT18y、BT36,为此,俄罗斯新型发动机多采用综合性能优良的钛合金。当工作温度不大于 350℃时使用 BT22 和 BT6 合金;而在 400~500℃范围使用 BT8-1、BT8M-1 合金,在 500~550℃范围使用 BT25y 合金;在 550~600℃范围使用 BT18y 合金。而 BT3-1、BT9、BT25 等合金仅在老式发动机上使用。这些经验可为中国高温钛合金的研制、开发和选用上述合金提供参考<sup>[8]</sup>。

全俄材料研究院在 BT36 合金研究方面投入了很大的力量, 高温钛合金 BT36 是一种含 W 的 8 元复杂钛合金<sup>[9]</sup>, 并用其制造了压气机盘<sup>[10]</sup>。BT36 合金是俄罗斯目前耐热温度最高的高温钛合金, 可在 600℃工作。与 BT18Y 合金在成分上的差别在于用 5%W 代替了 1%Nb, 钨的熔点(3410℃)和蠕变极限(95MPa)都比铌要高得多(2000℃, 43 MPa), W 的加入有利于提高合金的室温强度、持久强度和抗蠕变性能, 尤其在 550~600℃时更加明显。因此, 该合金比 BT18Y (其使用温度在 500~550℃之间)更具竞争力, 已在某发动机上得到了应用。在多元合金系基础上添加 W 元素(0.7%~5.0%)是俄罗斯高温钛合金发展的新趋势<sup>[11]</sup>。

此外, 由于大型航空发动机压气机对工作温度在 300~350℃用材的需要, 俄罗斯全俄轻合金研究院研究了同时增添锡和锆的 BT22 合金的强度和高温蠕变性能, 研制出了性能优于 BT22 的一种新的航空用钛合金。新合金的名义化学成分为: Ti-5Al-5Mo-5V-1Fe-1Cr-1.7Sn-2.5Zr, 被赋予正式牌号 BT37。用该合金来取代传统的 BT3-1, BT6 热强钛合金来制造在 300~350℃工作的压气机大尺寸盘和叶片, 可使质量减轻 20%~25%<sup>[9]</sup>。

高温钛合金今后的发展方向将是突破 600~650℃使用温度, 有报道说俄罗斯已研制出 650℃使用的高温钛合金<sup>[13]</sup>。

### 2.3 欧洲

70 年代以来, 在美国和日本技术冲击下, 欧洲各国感到发展高技术已成为同美日竞争中决定胜负的关键因素。促进了以军事为背景的钛合金应用研究的迅速发展。例如, 用于高性能航空发动机的高温钛合金 IMI829、IMI834 合金已领先于美国, 高温钛合金和 TiAl 金属间化合物及其制备技术已取得了很大进展; 钛合金和 TiAl 化合物的雾化制粉和沉积成形技术研究也属世界先进水平<sup>[10]</sup>。

#### 2.3.1 法国

法国在新合金开发方面, 使用 Ti-17 合金制造了 GE90 和 M88 发动机零件, 其工作温度为 350~400℃。用 Ti-6242 和 Ti-6246 合金制造了 MTR390 发动机零件。法国人还利用 Ti-6246 合金制造了阿里亚娜-5 发射器的结构零件; 将  $\beta$ -CEZ 钛合金用于 M88-X 未来型发动机中, 其工作温度为 400~450℃<sup>[10]</sup>。

#### 2.3.2 英国

英国是最早研究高温钛合金的国家之一, 但在开发钛合金的指导思想上与美国不同, 以  $\alpha$  相固溶强化作为提高蠕变强度的主要手段, 侧重于研究以提高蠕变强度为目的的近  $\alpha$  型钛合金。由于认识到 Si 元素对合金蠕变性能的重大影响, 所以英国的高温钛合金几乎都是含 Si 的<sup>[7]</sup>。

IMI 550 合金是英国于 20 世纪 50 年代中期研制成功的, 与同期的美国合金 Ti-64 相比, 抗拉强度提高了 10%, 使用温度提高到 400℃, Si 元素的加入有效地提高了蠕变强度。至此, 英国确立了开发高温钛合金的基础技术。60 年代, 为进一步提高蠕变强度, 研制开发了 IMI 679 和 IMI 685 合金。两者均具有较低的 Mo 含量, IMI 679 含有 11%Sn 元素, 这在高温钛合金中是不多见的, 其使用温度为 450℃, 抗拉强度与 Ti-6242 合金相当, 蠕变强度优于美国的 Ti-64 和 Ti-811 合金。IMI 685 合金是高 Al、低 Mo、中 Zr 的近  $\alpha$  型钛合金, 合金通过控制针状组织来提高高温蠕变强度, 使用温度在 500℃以上, 是一个专门为航空发动机设计的、同时具有良好蠕变性能、加工性能和焊接性能的合金<sup>[7]</sup>。

20 世纪 70~80 年代, 英国研究开发了以改善疲劳强度为主的 IMI 829 和 IMI 834 合金, 属于 Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Nb-Si 合金系, IMI834(Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Nb-0.5Mo-0.35Si)合金是英国在 1984 年研制成功的一种近  $\alpha$  型钛合金。IMI 834 还含有 0.06%C。这样的成分使合金的抗氧化能力和蠕变性能大大提高, 而且有效地细化了宏观和微观组织, 工作温度可望达到近 600℃。IMI 834 合金是  $\alpha + \beta$  处理的近  $\alpha$  合金, 其组织是针状转变  $\beta$  + 少量的初生  $\alpha$ ; IMI 829 合金经  $\beta$  处理的组织是针状  $\alpha$  + 少量转变  $\beta$ , 使合金具有最好的抗蠕变性能和断裂韧性。试验证明: 当组织为 5%  $\alpha$  相+95%针状转变  $\beta$  时, 合金具有高温蠕变性能和疲劳性能的最佳结合。两合金已分别在 RB211 535E4 和 Trent 600-800, EJ200 和 PW350 等发动机上得到了应用。另外, 进一步提高这些合金的工作温度往往受到

蠕变温度、组织稳定性和表面抗氧化能力的限制<sup>[12]</sup>。

英国的钛公司主要是帝国金属工业公司(IMI)，它虽然也被美国的 Timet 兼并，但在钛合金研究方面也取得了一定的成绩。如 IMI 834 钛合金就广泛用于罗尔斯-罗伊斯 Trent700 发动机中，其工作温度可达 600℃，重量比镍基超合金同等部件减轻了 50kg。在 Trent800 高压压气机中，前 3 级使用的也是 IMI834 钛合金。

但 IMI834 合金本身的稳定性、表面易氧化缺点及高温性能使其在使用温度上受到了限制。据英刊报道，在合金中添加硅和铁是至关重要的问题，硅能有效地改变蠕变强度；相反，增加铁含量对蠕变强度却有致命影响，铁含量必须控制在 0.015% 以下。减少偏析程度和夹杂物，对提高高温合金的性能有明显的作用。要保证疲劳强度和蠕变强度，在  $\alpha + \beta$  区固溶处理后的初生  $\alpha$  相量一定要控制在 7%~15%，这已是实验所证明的<sup>[13]</sup>。

### 2.3.3 德国

德国目前研究了 Ti-6Al-4V 雾化球形粉末注射成形并经烧结和热等静压处理后，其性能明显优于锻造件的情况。德国宇航中心对 SiC/IMI834、SiC/Ti-25Al-10Nb-3V-1Mo(原子分数)和 SiC/Ti-22Al-25Nb(原子分数)复合材料进行了详细的研究。研究表明，这些复合材料具有良好的性能和应用前景，其使用温度可达 700℃ 以上，将是宇航发动机压气机部件的优选材料。

## 3 中国高温钛合金的发展

高温钛合金研究一直是钛领域的主导课题。但我国高温钛合金在开发和应用方面落后于工业发达国家，英国的 600℃ 高温钛合金 IMI834 已正式应用于多种航空发动机，美国的 Ti-1100 也开始用于 T55-712 改型发动机，而我国在 20 世纪 80 年代以前一直走仿制的道路<sup>[14]</sup>。

近 20 年来，我国钛及钛合金研制走的是仿制与自主研发相结合的道路。70 年代末到 80 年代初主要完成 400~450℃ 高温钛合金研究，‘九五’期间主要从事 600~620℃ 高温钛合金研究。随着研究进展，高温钛合金的使用温度会不断提高。我国高温钛合金研制的初期大多是仿制俄罗斯和英国的，尔后逐步走上自己创制的道路。如西北有色金属研究院在英国 IMI829 合金基础上，研制的 550℃ 高温钛合金 Ti633G(Ti-6.5Al-3Sn-3Zr-1Nb-0.3Mo-0.3Si-0.2Gd)通过稀土元素 Gd 的内氧化粒子  $Gd_2O_3$  获得了热强性与热稳定的良好匹配。与此同时研制的 Ti-53311S(Ti-5Al-3Sn-3 Zr-1Nb -1Mo -0.25 Si)通过增加抗氧化性元素铌含量，550℃ 的热稳定性提高了。上海钢铁研究所研制的 540℃ 使用的高温钛合金 7715C(Ti-6.5Al-2.2Sn-1.2 Zr- 2Mo-2.2Nb-0.2 Si- B-Ce)通过硼与稀土元素 Ce 的交互作用，增强了相界及  $\alpha$  和  $\beta$  相的强化效果，获得良好的抗蠕变性能，538℃/315MPa/100h 条件下残余变形量为 0.157%， $\sigma_b$ (540℃/510MPa)持久 152h。该合金制成的盘件和叶片已在等型发动机上通过了长期工艺试车<sup>[15]</sup>。自主研发了在 550℃ 使用高温钛合金 TA12(Ti- 55)<sup>[15]</sup>。该合金中加入了稀土元素 Nd，通过熔炼过程内氧化，形成与基体非共格的弥散分布的富 Nd 第二相颗粒，降低了基体中的氧含量，从而提高了合金的热稳定性。随后，在 TA12 合金的基础上，研制了 Ti- 60 合金。该合金适当增加了 Al、Sn、Si 的含量，进一步提高了合金的高温蠕变性能和强度，使合金的使用温度达到了 600℃。最近又在美国 Ti- 1100 合金的基础上，添加约 0.1% Y，研制出 Ti- 600 合金。该合金在 600~650℃ 均具有良好的力学性能，尤其是蠕变性能更好。700~1000℃ 下使用的钛合金主要有  $Ti_3Al$  金属间化合物、TiAl 基合金、高 Nb-TiAl 基合金(研究表明，TiAl 中加入 Nb 是提高 TiAl 合金高温性能最有效的手段之一)等。它们均具有低的密度，高的弹性模量，优良的高温强度以及良好的抗氧化性和抗燃烧性。但这类合金的室温塑性和断裂韧性较低，阻碍了它们的实际应用<sup>[16]</sup>。表 3 列出了我国自主研发的部分高温钛合金。

值得一提的是我国 550~600℃ 使用的高温钛合金都含有少量稀土元素(如 Gd、Nd、Y、Er、Ce 等)，稀土的加入有两种途径：一是稀土的加入量严格控制在基体合金的固溶范围内，使其在凝固后保留在过饱和固溶体内，随后热机械加工和热处理、热暴露后可能有少量细小弥散的稀土氧化物析出，大部分保留在基体合金固溶体内，起固溶强化作用，对细化晶粒和抗蠕变性能有明显的改善，根据

这一原则西北有色金属研究院和上海钢铁研究所发展了 Ti633G、Ti600 和 Ti7715D 合金；另一种途径是加入 0.4%~1.0% 的稀土 (如 Nd)，这大大超过了基体合金的固溶度，因此在合金凝固中形成粗大的稀土氧化物粒子和稀土金属间化合物，通过对基体的净化可以显著增加合金 Al 当量裕度，同时明显细化晶粒和改善合金的抗蠕变和热稳定性，为此沈阳金属研究所和北京有色金属研究总院发展了 Ti55、Ti60 及 Ti65-Nd 一系列含 Nd 高温钛合金<sup>[17]</sup>。

表 3 我国自主研发的部分高温钛合金

Table 3 Partial high temperature titanium alloys developed for oneself in my country

合金牌号	名义成分	使用温度/℃
Ti- 55	Ti- 5.3Al- 4Sn- 2Zr- 1Mo- 0.25Si- 1Nd	550
Ti- 633G	Ti- 6.5Al- 3Sn- 3Zr- 1Nb- 0.3Mo- 0.3Si- 0.2Gd	550
Ti- 53311S	Ti- 5.5Al- 3.5Sn- 3Zr- 1Nb- 1Mo- 0.3Si	550
Ti- 18	Ti- 6Al- 2Sn- 4Zr- 4Mo- 1W- 0.2Si	550
Ti- 60	Ti- 6.5Al- 4.8Sn- 2Zr- 1Mo- 0.35Si- 1Nd	600
Ti- 600	Ti- 6Al- 2.75Sn- 4Zr- 0.4Mo- 0.45Si- 0.1Y	600
7715D	Ti- 6.5Al- 3Sn- 2Zr- 2Nb- 2Mo- [Si+Ce]	600

在实用的航空材料方面，近年研究开发的重点是 Ti-55、Ti-17、Ti-6242、Ti-811、Ti-15-3、Ti-10-2-3 及 B21S 等合金，并取得了较大进展。例如，由 550℃ 用的高温钛合金 Ti-55 制成的高压压气机盘、鼓筒和叶片通过了超转、破裂、疲劳试验，并经受了长期试车考验<sup>[18]</sup>。

目前我国正在开展 600℃ 和 600℃ 以上使用的高温钛合金研究，表 4 为 600℃ 钛合金的主要性能。近年来，高温钛合金研究主要集中在 600℃ 高温和 650℃ 高温的复合材料。600℃ 高温钛合金研究主要是 Ti60 和 Ti600，包括合金设计、加工工艺、合金的相结构、第二相及稀土元素钕的作用、焊接性能、热稳定性、蠕变行为、高温氧化行为、疲劳行为等的研究<sup>[19]</sup>。

表 4 600℃ 钛合金的主要性能

合金	室温拉伸				600℃ 拉伸				600℃ 蠕变			
	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_s$ /MPa	$\delta$ /%	$\psi$ /%	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_s$ /MPa	$\delta$ /%	$\psi$ /%	$\sigma$ /MPa	t /h	$\epsilon_e$ /%	$\sigma_{100}^{600}$ /MPa
Ti600	1068	1050	11	13	745	615	16	31	150	100	0.03	
Ti60	1100	1030	11	18	700	580	14	27	150	100	0.1	350
IMI834	1070	960	14	20	680	550	15	50	150	100	0.1	340
Ti1100	960	860	11	18	630	530	14	30	150	100	0.1	300
BT36	1080	-	10	15	640	-	-	-	147	100	0.2	335

总体来说，我国 600℃ 及其以上高温钛合金还处于研究阶段，在国内航空发动机上还没有得到应用。

## 4 结束语

高温钛合金的研制与应用一直受到各国研究者的高度重视和政府的大力支持，在中国亦是如此，但国内研制高温钛合金与国外有较大差距，这种差距不仅是在研究水平上，更是在工业化生产水平

和应用上,尤其是应用上。国内 500℃以上高温钛合金虽众多,但目前得到实际应用的只有 Ti53311S 合金,多数是实验室或半工业试制性的成果。尽管如此,高温钛合金研究仍是一个热门领域,材料研制部门研制高温用钛合金已从仿制走向创新。根据国际研制现状,笔者认为高温钛合金的发展趋势是:

(1) 已在航空发动机上应用的传统高温钛合金的最高使用温度仍为 600℃。在 600℃以上,蠕变抗力和高温抗氧化性的急剧下降是限制钛合金向更高温度发展的两大主要障碍,研制 600℃的新型高性能的高温钛合金,即在保持良好抗蠕变强度、疲劳强度、抗氧化性能和热稳定性的前提下,提高钛合金使用温度迫在眉睫<sup>[20]</sup>。

(2) 合金朝着多元强化的方向发展。合金成分的优化越来越重要, Ti - Al - Sn-Zr-Mo-Si - (Re) 系近  $\alpha$  钛合金占主导地位; Si 元素是高温钛合金中必不可少的重要元素<sup>[19]</sup>。

(3) 稀土元素是高温钛合金中具有应用前景的重要元素,稀土元素在高温钛合金中的作用尚待进一步研究。稀土元素在合金中的机制作用需进一步研究,为含稀土元素的高温钛合金的发展奠定理论基础。

(4) 继续研制开发具有特殊用途的高温钛合金。

(5) 目前金属间化合物型耐热钛合金成为研究热点,为适应航空航天工业发展的需求,研究开发了 Ti-Al 系金属间化合物为基的合金。

(6) 国内在老合金挖潜方面远远落后于国外,如针对典型的 TC4 合金,国外开展了深层次的加工工艺与组织性能关系的研究,改善了 TC4 合金的性能,扩大了合金的应用,而国内较少开展老合金的挖潜研究工作<sup>[21]</sup>。

## 参考文献

- [1] 赵永庆. 钛工业进展. 高温钛合金研究[J]. 2001,1:33.
- [2] 刘奇先, 刘 杨, 高 凯. 航天制造技术. 钛合金的研究进展与应用[J]. 2011(8) 4.
- [3] Boyer R R. An overview on use of titanium in the aerospace industry[J]. Mater Sci Eng A, 1996,213:103.
- [4] 黄张洪, 曲恒磊, 邓 超, 杨建朝. 材料导报[J]. 航空用钛及钛合金的发展及应用. 2011(25) 1.
- [5] 胡耀君. 综合评述. 中国钛发展的四十年-历届全国钛合金学术会回顾及总结.
- [6] 钱 九 红. 稀 有 金 属. 航空航天用新型钛合金的研究发展及应用[J]. 2000 5 (24) 3.
- [7] 萧今声, 许国栋. 中国有色金属学报[J], 1997, (7)4:97.
- [8] 魏寿庸, 何 瑜, 王青江, 刘羽寅. 航空发动机. 俄航空发动机用高温钛合金发展综述[J]. 2005(31)1.
- [9] 杨冠军. 钛工业进展. 钛合金研究和加工技术的新进展[J]. 2001,3.
- [10] 高 敬, 姚 丽. 世界有色金属. 国内外钛合金研究发展动态[J]. 2001,2.
- [11] 曲选辉, 肖平安. 高温钛合金和颗粒增强钛基复合材料的研究和发展[J]. 稀有金属材料与工程, 2001, 30(3): 161.
- [12] 许国栋, 王凤娥. 稀 有 金 属. 高温钛合金的发展和应用[J]. 2008,12,(32),6.
- [13] 郑生奎. 西北有色金属研究院. 新型钛合金及其应用.
- [14] 颜鸣皋, 吴学仁, 朱知寿. 北京航空材料研究院. 航空材料技术的发展现状与展望.
- [15] 谢惠茹. 稀有金属快报. 我国钛及钛合金研发与进展[J]. 2007(26)8.
- [16] 白保良, 朱梅生. 钛工业进展. 西北有色金属研究院钛合金研究进展[J]. 2013(30), 3.
- [17] 罗国珍, 周, 廉, 邓, 炬. 稀有金属材料与工程. 中国钛的研究和发展[J]. 1997(26)5.
- [18] 邓 炬. 稀有金属材料与工程. 我国钛科学技术的发展动向和新进展-第 9 届全国钛及钛合金学术交流会述评[J]. 1997.(26),2.
- [19] 赵永庆, 周 廉. 技术与装备·应用. 勇攀钛及钛合金稀有金属的科技高峰.
- [20] 付艳艳, 宋月清, 惠松晓, 米绪军. 稀 有 金 属. 航空用钛合金的研究与应用进展[J]. 2006(30),6.
- [21] 赵永庆. 中国材料进展. 国内外钛合金研究的发展现状及趋势[J]. 2010(29),5.