

特约专栏

国内外钛合金研究的发展现状及趋势

赵永庆

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘 要: 钛及钛合金因具有优异的综合力学性能, 得到各行各业的高度重视, 介绍了近 10 年国外、国内钛合金研究的发展现状、趋势与差距, 及时我国钛合金研制的建议。

关键词: 钛合金; 发展现状; 趋势

中图分类号: TG146.2⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2010)05-0001-08

Current Situation and Development Trend of Titanium Alloys

ZHAO Yongqing

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: Because of their excellent properties, great attention has been paid to Ti and Ti alloys. This paper reviews their current situation and development trend in recent ten years, and also gives the differences between China and other countries. The suggestions for development of Ti alloys are also put forward.

Key words: Ti alloys; current situation; development trend

1 前 言

钛及钛合金因具有优异的综合力学性能, 在航空、航天、船舶、石油、化工、兵器、电子等行业得到高度重视和广泛应用。15 年前国外高度重视新型钛合金的研制, 近几年国外更重视钛合金性能改性和挖潜。国内从钛合金研发开始一直重视新型钛合金研制, 10 年前重点是仿制, 之后是既创新又仿制, 目前以创新研制为主。本文介绍近 10 年国外、国内钛合金研究的发展现状、趋势与差距, 及对我国钛合金研制的建议。

2 新型钛合金的研究进展

2.1 宇航用钛合金

2.1.1 国外

由于大型航空发动机压气机对工作在 300 ~ 350 °C 用材的需要, 俄罗斯的全俄轻金属研究院研究了同时添加 Sn 和 Zr 来改善 BT22 钛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。截面尺寸为 150 ~ 200 mm 的 BT37 合金模锻件和自由锻造的静强度和疲劳强度比 BT3-1 合金高 25%; 固溶强化的 BT37 合金的静强度和疲劳强度比金属间化合物强化的高温钛合金高 20% ~ 25% 以上。用 BT37 合金来取代传统的 BT3-1, BT6 热强钛合金来制造在 300 ~ 350 °C 下工作的压气机大尺寸盘和叶片, 可使质量减轻 20% ~ 25%^[1-2]。

同时国外也研制出高强钛合金 Ti-5553 (Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr), Ti-55531 (Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr-1Zr) 等^[3-4]。Ti-5553 作为高强近 β 钛合金可替代 BT22 和 Ti-1023 钛合金大量使用在飞机的起落架上, 该合金的淬透性更好, 俄罗斯的 VSMPO 联合体分别用 β 锻和 $\alpha + \beta$ 锻制造了该合金的大型锻件。Ti-55531 是空客公司与俄罗斯合作开发的新型高强高韧近 β 型钛合金, 强度与韧性匹配良好, 首次应用的实例是 A380 机翼与挂架的连接装置。Ti3553 (Ti-3Al-5Mo-5V-3Cr) 是用做紧固件用钛合金, 其强度和加工性能均优于 Ti-64。在承压管路系统研制成功一种新的钛合金 Ti3331 (Ti-3Al-3V-3Mo-1Zr)^[3], 其强度比 Ti-3Al-2.5V 高 30% 左右。高强可焊钛合金 T-110 (Ti-5.5Al-1.2Mo-1.2V-4Nb-2Fe) 为 Antonov 飞机的重型构架设计用, 合金同 BT22 的力学性能相当, 但具有优

收稿日期: 2009-12-24

基金项目: 国家 973 计划项目(2007CB613807);

国家科技支撑计划项目(2007BAQ00087);

973 引导项目(2005CCA06400)

通信作者: 赵永庆, 男, 1966 年生, 博士, 教授, 博士生导师

良的焊接性能,焊接强度系数可达 0.95,优良的焊接性能是由于同晶型的 β 稳定元素溶于 α 相中,有利于 Fe 等元素的均匀分布, Nb 的加入细化晶粒,减少了间隙元素在晶界的偏析,典型的力学性能为 $R_m \geq 1\ 100\ \text{MPa}$ 、 $A \geq 10\%$ 、 $Z \geq 35\%$,淬透深度可达到 40 mm。

为保障飞机发动机的安全性,国外成功研制出阻燃钛合金,其典型代表是 Alloy C (Ti-35V-15Cr)^[5] 和 Ti-25V-15Cr-2Al-0.2C 合金^[6],分别是美国和英国研制的一种高稳定化的阻燃钛合金,具有良好的阻燃性能和力学性能,Alloy C 已在 F22 飞机的 F119 发动机中得到实际应用。

2.1.2 国内

2.1.2.1 高温钛合金

近 10 年及将来 5~10 年高温钛合金研发主要集中在

在 600℃ 高温钛合金。600℃ 高温钛合金研究对象主要是 Ti60 和 Ti600。表 1 为国内 600℃ 高温钛合金力学性能与国外相应合金的对比^[7],国内合金的总体性能不低于国外。Ti60 合金是以中科院金属所为主研制的^[8-9]。Ti600 是西北有色金属研究院独家研制的^[10-11],Ti600 合金的研制达到中试试验规模,国外一公司已正式订购。

Ti60 钛合金名义成分为 Ti-5.5Al-4Sn-2Zr-1Mo-0.3Si-1Nd-0.05C^[8-9],是在 Ti55 基础上改进研制的,是一种用稀土金属 Nd 强化的综合性能良好的近 α 型热强钛合金。该合金长时间工作温度可达 600℃,用于航空发动机高压段的压气机盘、鼓筒和叶片等零件。金属所在 Ti60 金基础上又研制出 Ti60A 合金 (Ti-5.8Al-4.0Sn-3.5Zr-0.4Mo-0.4Si-0.4Nb-0.4Ta-0.05C)^[12]。

表 1 600℃ 高温钛合金的典型性能
Table 1 Typical properties of 600℃ high temperature Ti alloys

Alloy	Tensile properties at RT				Tensile properties at 600℃				Residual strain * /%	Corresponding microstructure
	R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A/\%$	$Z/\%$	R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A/\%$	$Z/\%$		
Ti600	1 068	1 050	11	13	745	615	16	31	0.03	Equiaxed $\alpha + \beta_{\text{trans}}$
Ti60	1 100	1 030	11	18	700	580	14	27	0.1	Equiaxed $\alpha + \beta_{\text{trans}}$
IMI834	1 070	960	14	20	680	550	15	50	0.1	Equiaxed $\alpha + \beta_{\text{trans}}$
Ti1100	960	860	11	18	630	530	14	30	0.1	Lamellar

* creep exposure condition: 600℃/150 MPa/100 h

Ti-600 合金属 Ti-Al-Mo-Sn-Zr-Si-Y 系,是西北有色金属研究院研制的一种新型近 α 高温钛合金^[10-11],该合金具有较好的综合性能,尤其是蠕变性能非常优异,可在 600~650℃ 下长期使用。

北京航空材料研究院也研制出 600℃ 高温钛合金 TG6^[13-14]。该合金制备出的模锻件具有良好的力学性能(表 2)。

表 2 TG6 钛合金盘锻件双态组织的典型力学性能^[14]

Table 2 Typical properties of forging pancake with bimodal microstructure of TG6 Ti alloy

properties	R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A/\%$	$Z/\%$
Tensile properties at RT	1 043	942	12.4	22.8
	1 036	940	12.3	24.6
Tensile properties at 600℃	644	505	16.8	39.6
	658	528	18.8	39.5
Tensile properties after exposure at 600℃ for 100 h	1 104	1 028	3.6	7.6
	1 106	1 026	4.0	7.4
Residual strain after creep exposure at 600℃, 160 MPa for 100 h/%			0.151	
			0.180	

2.1.2.2 高强钛合金

高强钛合金研究主要集中在 TB8 (β 21s), TC18 (BT22) 高强钛合金, TC21 高强高韧损伤容限型钛合金^[15-16]等,综合性能对比见表 3。表 3 中的 TC21, Ti-B18^[17] 和 Ti-B20^[18] 为高强高冲击韧性钛合金、Ti-B19 为高强高韧耐蚀钛合金^[19],均是西北有色金属研究院创新研制的。TB8 和 TC18 为仿制合金。

TB8 钛合金的名义成分是 Ti-15Mo-3Al-2.7Nb-0.2Si (β 21s)^[5],为介稳定的 β 型钛合金,是一种较为理想的航空结构材料,如飞机液压系统、燃油箱、箔材用钛基复合材料的基体以及用于化工和石油加工工业。TB8 钛合金除了生产板材、带材外,也可生产箔材、丝材、管材、棒材和锻件。板材主要用于制造中等复杂程度的飞机冷成形钣金零件。可以代替强度水平相当于 30CrMnSiA 结构钢的零件及热成形的钛合金零件。通过不同的时效制度,可以实现不同强度和塑性的匹配,满足高结构效益、高可靠性的设计要求。TB8 钛合金板材的 3 种不同强度和塑性 ($L_0 = 50\ \text{mm}$) 的级别是: $R_m \geq 860\ \text{MPa}$, $A \geq 5\%$; $R_m \geq 1\ 015\ \text{MPa}$, $A \geq 5\%$; $R_m \geq 1\ 200\ \text{MPa}$, $A \geq 5\%$ 。

表3 高强钛合金的力学性能

Table 3 Mechanical properties of high strength Ti alloys

Alloy	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	K_{IC} /MPa $\cdot$ m $^{1/2}$	da/dN
TC18	1 050	980	8	55	
TB8	1 250	1 105	8	50	
TC21	1 100	1 000	10	70	Similar to TC4 with β annealing
Ti-B19	1 250	1 100	8	70	
Ti-B20	1 300		12	Attack	50 J/cm 2
Ti-B18	1 250		12	Attack	45 J/cm 2

TC21 (Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-1Nb-0.1Si) 是西北有色金属研究院创新研制的高强度高韧损伤容限型钛合金^[15-16], 已完成实验室、中试及工业规模3个周期的研究, 目前已扩大至3~5 t 锭型, 制备出 ϕ (18~400) mm 不同规格的棒材。大规格棒材在保证室温高强度的前提下, 断裂韧性可高达90 MPa $\cdot$ m $^{1/2}$ 。研究表明, 新型TC21钛合金各种力学性能稳定, 具有良好的强度、塑性、断裂韧性、裂纹扩展速率的匹配, 是一种非常有应用前景的高强度高韧损伤容限型结构钛合金。在航空航天工业和民用行业中可望获得广泛应用。

宝鸡有色金属加工厂开发出BTi-6554高强度高韧钛合金(Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al)^[20-21], 由 ϕ 620 mm 铸锭制备得到 ϕ 210 mm 棒材力学性能达到: $R_m=1\ 270$ MPa, $R_{p0.2}=1\ 230$ MPa, $A=10\%$, $Z=26\%$, $K_{IC}=77.8$ MPa $\cdot$ m $^{1/2}$ 。

北京有色金属研究总院和宝鸡有色金属加工厂联合研制出Ti-63高强度高韧钛合金(Ti-Al-V-Cr-Mo-Sn-Zr-Si)^[22], 其 $R_m=1\ 200$ MPa, $K_{IC}=77$ MPa $\cdot$ m $^{1/2}$ 。

西北有色金属研究院也创新研制出Ti-1300^[23]合金, Ti-5322^[24]等高强合金。Ti-1300的 $R_m>1\ 350$ MPa, $A>8\%$, $K_{IC}>55$ MPa $\cdot$ m $^{1/2}$ 。Ti-5322的 $R_m>1\ 300$ MPa, $A>7\%$ 。

2.1.2.3 阻燃钛合金

为解决“钛火”问题, 中国对阻燃钛合金进行了多年深入的研究, 西北有色院研制出成本比Alloy C(Ti-35V-15Cr)阻燃钛合金低的、具有中国特色的Ti40阻燃钛合金^[25-28], 及具有自主知识产权的Ti14阻燃钛合金^[29-30]。与常规钛合金相比, Ti40合金在具有良好力学性能的基础上, 具有良好的阻燃性能。

Ti40的名义成分为Ti-25V-15Cr-0.2Si, 是高合金化的Ti-V-Cr系全 β 型钛合金, 其主要性能特点是良好的抗燃烧性能和高温性能。Ti40钛合金将适合于飞机发动机关键部件的机匣和叶片, 在航空航天工业将获得广泛应用。

2.2 船用钛合金

2.2.1 国外

美国Timet公司与美国海军联合开发了一种具有强度适中、韧性高、焊接性能好的近 α 钛合金, 命名为Timetal 5111, 其名义化学成分为Ti-5Al-1Zr-1Sn-1V-0.8Mo-0.1Si^[3]。该合金的突出特点是具有良好的断裂韧性及抗应力腐蚀性能, 同时又具有良好的室温蠕变性能。其冲击韧性约为Ti-6Al-4V的3倍, 并且易焊接, 可以进行大规格型材的焊接, 主要用于舰船制造和海洋工程。在Timetal 5111合金基础上添加0.05% Pt, 创制出了Timetal 5111Pt合金, 主要为了提高耐缝隙腐蚀性能, 以达到一种合金多种用途的目的。除船用外, 该合金还可以向石油化工及氯碱工业推广应用。

2.2.2 国内

中国研制出具有自己特色的不同强度级别的近 α 型船用耐蚀钛合金Ti75^[31-35], Ti31^[31-35], Ti-B19^[19,32,34], Ti91^[32-35], Ti70和Ti80^[32,35]。西北有色金属研究院研制的Ti75合金具有自主知识产权, 它是630 MPa级的中强度高韧性耐蚀钛合金; 以西北有色金属研究院为主研制的Ti31合金是500 MPa级的低强度高韧耐蚀钛合金。二者均具有良好的综合性能(表4)。研究均达到工业规模, Ti75和Ti31均已趋于成熟, 并已获得实际应用。西北有色金属研究院研制的Ti91和以宝鸡有色金属加工厂为主研制的Ti70具有中强度高塑、有良好冷加工性能、可焊性和良好的透声性能。Ti-B19是西北有色金属研究院创新研制的一种高强耐蚀钛合金, 宝钢公司研制的Ti80是一种高强、可焊的 α 型钛合金, 其拉伸性能、断裂韧性、应力腐蚀抗力和低周疲劳性能均优于Ti-6Al-4VELI。

表4 我国发展的船用钛合金及其典型性能

Table 4 Ti alloys used for shipbuilding and their typical properties

Alloy	Strength scale/MPa	A /%	Compositions, $w/\%$
Ti31	630	18	Ti-3Al-1Zr-1Mo-1Ni
Ti75	730	13	Ti-3Al-2Mo-2Zr
Ti91	700	20	Ti-Al-Fe
Ti70	700	20	Ti-Al-Zr-Fe
Ti80	850	12	Ti-Al-V-Mo-Zr

Ti75是低合金化的Ti-3Al-2Mo-2Zr系近 α 型钛合金, 为730 MPa级的中强钛合金, 其主要性能特点是比TA5高的使用强度和很好的工艺塑性。该合金还具有良好的焊接性能和耐腐蚀性能。Ti75钛合金最适用于制造形状复杂的板材冲压并焊接的零部件, 在舰船行业和医用中获得了广泛应用。其主要半成品是板

材、棒材、管材、锻件、型材和丝材等。Ti75 合金在 600 ℃ 的天然海水中试验 23 d, 光亮如初, 腐蚀率小于 0.000 1 mm/a; 在 600 ℃, 3.5% NaCl 溶液中浸泡 181 d, 缝隙腐蚀率为 0.000 1~0.000 5 mm/a, 与 B30 的电偶腐蚀率为 0.000 05 mm/a, 电偶腐蚀效应为 12%; 在室温天然海水中测得 Ti75 合金的应力腐蚀断裂强度因子 K_{ISCC} 为 85.3 MPa·m^{1/2}; 在相对流速为 3.07 m/s 的天然海水中经 20 d 实验, 腐蚀率小于 0.001 mm/a。

Ti31 合金是一种新型中强耐蚀钛合金, 属于低合金化的 Ti-Al-Mo-Ni-Zr 系近 α 型钛合金, Ti31 钛合金集中等强度、高的塑性、良好的易加工性和成型性、优异的耐蚀性、可焊性于一体。Ti31 钛合金适于锻造、轧制、拉伸等加工, 产品形式多样化, 可加工成板材、棒材、

管材、锻件、型材和丝材等形式。合金还具有好的工艺性, 可进行冲压、弯曲、切削加工, 另外, 合金还具有优异的焊接性。目前, Ti31 合金已制成各种形状法兰、异径三通管、管座及阀门等部件, 其中大部分是小锻件机加工而成。该合金只在退火状态下使用, 不能采用固溶时效处理进行强化。Ti31 合金在舰船、化工、海洋工业和民用行业中获得较广泛的应用。

Ti-B19 合金是一种新型高强高韧耐蚀近 β 钛合金。Ti-B19 合金具有较高的强度、良好塑性、较高的断裂韧性、可焊性及耐海水腐蚀、冲刷腐蚀和应力腐蚀等综合性能。该合金具有良好的加工性, 可生产各种规格的棒、板、丝、饼等, 并且焊接性能、工艺性能良好。表 5 列出了 Ti-B19 合金的典型力学性能。

表 5 Ti-B19 合金典型力学性能

Table 5 Typical properties of Ti-B19 alloy

Heat treatment	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%	K_{IC} /MPa·m ^{1/2}	K_{ISCC}/K_{IC}
900 ℃/0.5 h AC + 530 ℃/24 h AC	1 255	1 205	6.7	20	86	0.83
900 ℃/0.5 h AC + 520 ℃/24 h AC	1 275	1 220	8.3	21.5	86	

Ti-B19 合金在 600 ℃, 3.5% NaCl 溶液中无腐蚀发生, 腐蚀率为 0。在 10 m/s 流速下, 冲刷腐蚀率为 2.9×10^{-4} mm/a, 具有良好的抗冲刷性能。Ti-B19 合金在 3.5% NaCl 溶液中的应力腐蚀断裂韧性 K_{ISCC} 为 69 MPa·m^{1/2}, $K_{ISCC}/K_{IC} \geq 0.8$ 。

我国于 90 年代开始研制声纳导流罩钛合金, 目前, 我国有两种声纳导流罩钛合金: 近 α 的 Ti91 和 Ti70 合金, 合金分别属于 Ti-Al-Fe 系和 Ti-Al-Fe-Zr 系。两种合金均已轧制成 4 mm × (900~1 000) mm × L 和 6 mm × (900~1 000) mm × L 板材。Ti91 合金具有中等强度、高的塑性、良好的透声性能、冷成形性能、可焊性及耐海水腐蚀等性能的良好匹配, 明显优于船用 TA5 钛合金。Ti91 关键力学性能达到: $R_m \geq 700$ MPa, $A \geq 20\%$; 在 600 ℃ 海水中浸泡, 均匀腐蚀率 ≤ 0.001 mm/a; 冷成形性: $R/t \leq 2.5$ 。Ti91 合金与其他钛合金的强度(R_m), 塑性(A), 冷弯性(R/t)等性能综合比较, Ti91 合金综合性能明显优于等强度合金 TC1 和 TA5。Ti91 合金焊接接头性能达到基材的 0.9。合金声学性能良好, 1~4 mm 厚板材的透声系数大于 96%。Ti70 合金是 Ti-2.5Al-2Zr-1Fe 系近 α 钛合金。板材力学性能: $R_m > 700$ MPa, $R_{p0.2} > 600$ MPa, $A > 20\%$ 。耐海水腐蚀性: 在 60 ℃ 海水中浸泡, 均匀腐蚀率为 0 mm/a。焊接性能: 焊接接头 $R_m > 630$ MPa, 冷弯角 180° ($D=7a$)。

STi80 合金是上海钢研所研制的一种新型的 Ti-

6.0Al-2.5Nb-2.2Zr - 1.2Mo 系近 α 钛合金, 具有高强、高韧、可焊、耐蚀等综合性能, 主要用于深潜器和舰船的耐压壳体。其配套焊丝为 Ti531 合金, 成分为 Ti-5Al-3Nb-0.5Mo。STi80 已进行工业性试验, 轧制出 22 mm × 1 000 mm × L 及 48 mm × 2 400 mm × 2 700 mm 板材。合金采用焊接 + 热处理焊接工艺可使接头性能达到焊接系数 0.9, 焊接性优于 Ti6Al4VELI。

2.3 生物医用钛合金

2.3.1 国外

最新开发的生物钛合金主要有: Ti-5Al-3Mo-4Zr, Ti-6Al-7Nb, Ti-13Nb-13Zr, Ti-35Zr-10Nb, Ti-16Nb-10Hf, Ti-35.3Nb-5.1Ta-7.1Zr, Ti-12Mo-6Zr-2Fe, Ti-15Mo-3Nb, Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr, Ti-15Mo-3Nb-3Al 等^[36-37]。

为了减少或消除 Al, V 元素的不利影响开发了一系列生物用新型钛合金, 其中 Ti-12Mo-6Zr-2Fe 是一种亚稳态合金, 与 Ti-6Al-4V 合金相比, 该合金具有较高的强度和断裂韧性, 较好的耐磨性, 优秀的耐蚀性和较低的弹性模量, 适合用于矫形器件。而另一种代表合金 Ti-13Nb-13Zr 经时效处理后, 与退火态 Ti-6Al-4V 合金相比, 有较高的强度、较低的弹性模量及较高的断裂韧性。

用 Zr, Nb, Ta, Pd, Sn 作为合金元素来改善钛合金力学性能、耐蚀性和生物相容性, 是开发生物钛合金的主要途径。如开发出的 Ti-15Mo-5Zr-3Al(时效态)及

Ti-15Sn-4Nb-2Ta-0.2Pd(时效态)的强度较高;Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr合金的耐磨性和力学性能都接近于Ti-6Al-4V合金,且弹性模量更接近于人体骨骼。

2.3.2 国内

我国从上世纪70年代开始就致力于生物医用钛合金等生物材料的研制与开发,西北有色金属研究院研制成功具有我国自主知识产权的第2代新型医用钛合金TAMZ,该合金在生物相容性、综合力学性能及工艺成形性等方面优于TC4,而在综合力学性能及工艺成形性方面也同样优于国外开发的Ti-5Al-2.5Fe, Ti-6Al-7Nb医用钛合金。早在2002年年初西北有色金属研究院就开始了生物相容性及力学相容性更好的第3代β型医

用钛合金的设计和开发,新开发的两类近β型钛合金TLE^[38]和TLM^[39],在保持合金中、高强度和高韧性的同时又具有优良的冷、热加工性能。新材料具有生物及力学相容性优良、原料易得、熔炼及加工工艺简单易控制、性价比高的优点(见表6)。

中科院金属研究所经过多年研究,创新研制出Ti-2448(Ti-24Nb-4Zr-8Sn)高强度低模量医用钛合金^[40],该合金的低弹性模量使植入物与动物骨的力学相容性显著提高。2008年2月以来,Ti2448合金加工的多种植入器件陆续通过了国家食品药品监督管理局天津医疗器械质量监督检验中心的注册检验,其合金医疗器件进入批量应用阶段。

表 6 世界各国研发的医用合金对比一览表
Table 6 Main biomedical Ti alloys developed in the world

No	Countries	Compositions, w/%	Mechanical properties					Alloy type
			R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A/%	Z/%	E/GPa	
1	China	TAMZ	850	650	15	50	105	$\alpha + \beta$
2	China	TLM1	1 000	965	18	70	78	Near β
3	China	TLM2	1 060	1 020	17	70	79	Near β
4	China	Ti-2448	900				20 ~ 50	β
5	Japan	Ti29Nb13Ta5Zr	911	864	13		84	β
6	Japan	Ti15Sn4Nb2Ta0.2Pd	990	833	14	49	100	$\alpha + \beta$
7	USA	Ti13Nb13Zr	1 030	900	15	45	79	Near β
8	USA	Ti12Mo6Zr2Fe(TMZF)	1 000	1 060	18	64	74 ~ 85	β
9	USA	Ti5Mo3Nb(21SRx)	1 034	100	14		79 ~ 83	β
10	Germany	Ti5Al2.5Fe	1 033	914	15	39	105	$\alpha + \beta$
11	Germany	Ti-30Ta					60 ~ 80	Near β
12	Swiss	Ti6Al7Nb	1 024	921	14	42	110	$\alpha + \beta$

2.4 低成本钛合金

2.4.1 国外

针对钛合金成本比较高,国外研制了成本相对较低的钛合金,如采用廉价合金元素设计成功的Ti62S, Ti-LCB, Ti-0.05Pd-0.3Co等,这3个合金均得到实际应用。为改善合金加工特性设计成功的合金有超塑性钛合金SP700、具有较高切削加工性能的DAT52F合金及具有优异冷加工性能的β21S等。SP700和β21S获得巨大成功和实际应用。

2.4.2 国内

低成本钛合金及钛合金的低成本化制备技术近几年

在中国受到高度重视。通过合金设计、添加廉价合金元素如Fe代替昂贵合金元素如V,西北有色金属研究院创新研制出具有自主知识产权的Ti12LC(Ti-Al-Fe-Mo)^[41]和Ti8LC(Ti-Al-Fe-Mo)^[42]两种低成本钛合金,二者的室温拉伸性能均优于TC4^[43](表7),已完成合金设计、实验室规模研究、中试及工业规模研究等基础技术研究,达到工业化研究规模,两种合金制备的一些零部件正在应用中,这些为合金扩大规模和推广应用奠定了良好基础。

洛阳船舶材料研究所也研制出Ti-0.8Al-1.2Fe低成本钛合金^[44],并开展了相关的应用研究。

表 7 中国研制的低成本钛合金及其典型性能

Table 7 Mechanical properties of low cost Ti alloys developed in China

Alloy	Tensile properties at RT				Tensile properties at 400 °C			
	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A/%	Z/%	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A/%	Z/%
Ti8LC	1 050	990	12	30	700	600	15	50
Ti12LC	1 100	1 050	12	40	900	800	15	50

2.5 其它钛合金

2.5.1 KSTi-19 合金

日本神户制钢所研制出了一种命名为 KSTi-19 的新型钛合金, 其名义化学成分为 Ti-4.5Al-2Mo-1.6V-0.5Fe-0.3Si, 是一种 $\alpha + \beta$ 两相钛合金。这种合金具有优良的加工性能, 采用热轧工艺可以代替传统的叠轧方法成功生产出厚度为 0.8 mm 的薄板, 是 Ti-6Al-4V 合金的替代合金之一。

由于加工性能的限制, Ti-6Al-4V 合金只能采用叠轧方法来生产薄板, 但由于工艺复杂, 成本高, 限制了 Ti-6Al-4V 合金薄板的民用推广。KSTi-19 合金的研制成功, 使钛合金薄板的成本下降, 扩展了钛合金的应用范围。目前, 该合金薄板已投入正式生产, 它主要应用于高尔夫球杆。据报道, 高尔夫球杆使用这种材料后, 可使杆头变细、坚固、质量减轻。在此之前, 高尔夫球杆头的顶部、截面及底部均采用锻造方法生产。

2.5.2 橡胶钛合金

日本丰田中央研究所 T. Saito 等人研发出一种具有超级多功能的钛合金“Gum Metal”(橡胶金属)^[45-46], 合金的组成可以表达为: Ti-24mol% (Ta + Nb + V) - (Zr, Hf) + O。范围很窄的合金成分可用理论计算进行设计, 其组分平均价电子数须满足 $e/a = 4.24$, 典型的如 Ti-12Ta-9Nb-3V-6Zr-O 和 Ti-23Nb-0.7Ta-2Zr-O 等。合金具有超高强(时效处理后强度高达 2 000 MPa)、超低模量(40 GPa)、室温下具有超塑性的特点; 合金的弹性变形能力比常规金属高出 1 个数量级, 可达 2.5; 合金在室温下具有极优的冷加工性能, 可进行断面收缩率达 99.9% 的冷加工, 板材从 $\delta 30$ mm 可一火次加工到 $\delta 0.03$ mm, 丝材从 $\phi 13$ mm 一火次拉到 $\phi 0.3$ mm, 不必进行中间退火处理。橡胶金属的弹性应变、弹性模量和拉伸强度随着氧含量的增加而增大, 要获得良好的弹性性能, 氧含量不得低于 0.7%。较高氧含量的橡胶金属由单一的 bcc 相组成, 而低氧含量的同成分合金中则存在着马氏体相。拉伸变形过程中, 高氧含量的合金中不产生相变, 而低氧含量的合金则有相变产生。橡胶金属现已用作无螺形螺钉的眼镜框架(已开始销售)和钟表用精密螺钉。合金具有良好的生物相容性、良好的耐

蚀性, 还不含有害的 Al 和 V, 因此该合金有望替代 TiNi 等合金在生物领域的应用。

2.5.3 低温钛合金

继我国开展了对已有的钛合金 TA7, TC1 和半 TC4 等的低温性能测试和应用研究后, 西北有色金属研究院研制出具有自主知识产权的、适用于低温管路系统的 α 型钛合金, 即 CT20^[47], 合金研究规模已达到工业化规模, 由此合金制备的各种零部件正在使用中。中国研制的 α 型低温钛合金的典型性能见表 8。

表 8 中国研制的部分 α 型低温钛合金的典型性能

Table 8 Mechanical Properties of cryogenic Ti alloys developed in China

Alloy compositions	T/°C	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A/%
Ti-5Al-2.5Sn	20	800	700	10
	-196	1 240	1 120	20
	-253	1 570	1 290	19.5
Ti-2Al-1.5Mn	20	600	630	15
	-196	1 150	1 090	25
	-253	1 380	949	15.4
Ti-3Al-2.5V	20	700	500	15
	-196	1 179	986	20
	-253	1 510	1 386	2
CT20	20	≥ 670	≥ 550	≥ 33
	-253	$\geq 1 300$		≥ 13

3 国内与国外钛合金研制的比较及存在的差距

国内钛合金研究水平与国外相当, 在某些方面甚至比国外还要强, 如在新型钛合金研究方面, 国内近 10 年非常活跃, 而国外很少开展新型钛合金研究。差距主要体现在以下方面。

(1) 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。

(2) 钛的应用技术远落后于国外。军事用钛比例低,民用钛领域相对较窄。如美国四代机 F22 用钛量达到 41% (结构质量)、其 F119 发动机用钛量达到 40%,而我国的战机用钛量在 3% ~ 10% 左右。

(3) 基础研究薄弱,原创性和革命性的钛材设计与工艺技术少。

4 对钛合金研究发展的建议

我国钛合金领域在以下几方面应深化研究,并提出几点建议。

(1) 钛的低成本化制备、加工技术,包括海绵钛生产、钛合金材料设计及加工过程等的低成本化,这是钛进一步扩大应用的前提条件。

(2) 大型优质钛合金坯料制备技术,包括新型电子束和等离子冷床炉熔炼技术。

(3) 高效、短流程钛合金加工技术,包括单次冷床炉熔炼直接轧制技术,钛带连续加工技术等。

(4) 近净成形技术,包括激光成形、精密铸造、精密模锻、超塑成形/扩散连接、喷射成形等。

(5) 继续加强钛的推广应用,包括生物医用钛、汽车用钛、建筑用钛等。

(6) 钛的市场看好,积极应对民机用钛量增长迅速的需求。

(7) 钛工业逐渐趋于国际化,企业竞争与兼并激烈,要制订适时的战略与对策。

(8) 发展竞争力更强的钛合金,发展方向是高性能化、多功能化和低成本化。

(9) 积极培育新的钛市场。

(10) 努力开发高效优质品的生产工艺技术。

参考文献 References

[1] Yang Guanjun(杨冠军), Zhao Yongqing(赵永庆). 钛合金研究、加工与应用的新进展[J]. *Materials Review*(材料导报), 2001, 15(10): 19-21.

[2] Mao Xiaonan(毛小南), Zhao Yongqing(赵永庆), Yang Guan-jun(杨冠军). 国外航空发动机用钛合金的发展现状[J]. *Rare Metals Letters*(稀有金属快报), 2007, 26(5): 1-7.

[3] Mao Xiaonan(毛小南). 从 2007 年世界钛会看钛新技术的发展[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程), 2008, 37(Suppl. 3): 30-35.

[4] Zhou Lian(周廉). 大飞机用钛合金材料的发展与思考[C]//*Proceedings of National Ti Association Conference 2008*(2008 年中国钛协学术年会论文集). Beijing: [s. n.], 2008.

[5] Boyer R R. An Overview on the Use of Titanium in the Aerospace Industry[J]. *Mater Sci Eng A*, 1996, A213: 103-114.

[6] Li Y G, Loretto M H. Effect of Heat Treatment and Exposure on

Microstructure and Mechanical Properties of Ti-25V-15Cr-2Al-0.2C[J]. *Acta Mater*, 2001, 49: 3 011-3 017.

[7] Zhao Yongqing(赵永庆). 高温钛合金研究[J]. *Titanium Industry Progress*(钛工业进展), 2001(1): 33-39.

[8] Zhang Shangzhou(张尚洲), Xu Huizhong(徐惠忠). 碳含量对 Ti60 合金时效过程中硅化物的影响[J]. *Chinese J of Mater Research*(材料研究学报), 2005, 19(5): 499-505.

[9] Cai Jianming(蔡建明), Li Zhenxi(李臻熙). 航空发动机用 600 °C 高温钛合金的研究与发展[J]. *Materials Review*(材料导报), 2005, (1): 50-53.

[10] Hong Quan(洪权), Zhao Yongqing(赵永庆). A Microalloying Heat-Resistant Titanium Alloy Containing Rare-Earth(一种含稀土微合金化耐热钛合金): CN ZL 200610056408.6[P]. 2006-03-05.

[11] Hong Quan(洪权), Zhao Yongqing(赵永庆). A Microalloying Heat-Resistant Titanium Alloy(一种微合金化耐热钛合金): CN ZL 200610056409.0[P]. 2006-03-05.

[12] Zhao Liang(赵亮), Qiao Lu(乔鹭). 热加工对 Ti60A 合金原始 β 晶粒尺寸分布的影响[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程), 2008, 37(Suppl. 3): 343-345.

[13] Duan Rui(段锐), Cai Jianming(蔡建明). 初生 α 相含量对近 α 钛合金 TC6 拉伸性能和热稳定性的影响[J]. *J Aeronautic Mater Research*(航空材料学报), 2007, 27(3): 17-22.

[14] Cai Jianming(蔡建明), Cao Chunxiao(曹春晓), Ye Junqing(叶俊青). 高温钛合金盘件的热模锻工艺[J]. *Forging & Metalforming*(锻造与冲压), 2007, 226(10): 56-62.

[15] Qu Henglei(曲恒磊), Zhao Yongqing(赵永庆). A High Strengthening and High Toughening Titanium Alloy and Processing Method(一种高强韧钛合金及加工方法): CN ZL03 1 05965.1[P]. 2003-09-10.

[16] Zhao Yongqing(赵永庆), Qu Henglei(曲恒磊). 高强高韧损伤容限型钛合金 TC21 研制[J]. *Titanium Industry Progress*(钛工业进展), 2004, 21(1): 22-24.

[17] Zhao Yongqing(赵永庆), Chen Jun(陈军). A Near β Type High Strength and High Toughness Titanium Alloy and Its Preparation Process(一种近 β 型高强度高韧性钛合金及其制备方法): CN ZL 02 1 01191.5[P]. 2002-06-22.

[18] Ge Peng(葛鹏), Zhao Yongqing(赵永庆). A Near β Type High Strength and High Impact Toughness Titanium Alloy and Its Preparation Process(一种近 β 型高强度高冲击韧性的钛合金及其制备方法): CN ZL 02 1 01192.3[P]. 2002-08-06.

[19] Lin Yongxin(林永新), Chang Hui(常辉). A Near β Type Titanium Alloy and Its Production Process(一种近 β 型钛合金及生产方法): CN ZL 00114739.0[P]. 2000-11-19.

[20] Wang Weiqi(王伟琪), Yang Yulan(羊玉兰). 新型高强高韧钛合金 BTi-6554[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程), 2008, 37(Suppl. 3): 43-45.

[21] Wang W Q, Yang Y L. The Microstructure and Mechanical

- Properties of High Strength and High Toughness Titanium Alloy BTi-6554 Bar[J]. *Mater Sci Forum*, 2009, 618/619: 173-176.
- [22] Yue Qiang(岳强), Liu Yuqin(刘玉芹). 高强高韧钛合金 Ti63 饼材组织与性能[J]. *Rare Metals* (稀有金属), 2008 (6): 123-125.
- [23] Zhao Yongqing(赵永庆), Ge Peng(葛鹏). A 1 300 MPa Level Ultra-Strength Structure Titanium Alloy(一种 1 300 MPa 级超高强度结构钛合金): CN 200510000974.0[P]. 2005-03-20.
- [24] Ge Peng(葛鹏), Mao Xiaonan(毛小南). A Low Cost High Strength Titanium Alloy(一种低成本高强度钛合金): CN 200810150893.2[P]. 2008-10-09.
- [25] Zhao Yongqing(赵永庆), Zhu Kangying(朱康英). Ti-V-Cr 阻燃钛合金的微观组织[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报), 1998, (3): 465-466.
- [26] Zhao Yongqing(赵永庆), Zhou Lian(周廉). Ti40 合金的阻燃特征及阻燃机理分析[J]. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程), 1999, 28(2): 77-80.
- [27] Zhao Yongqing, Zhu Kangying. Microstructures of a Burn Resistant Highly Stabilized Titanium Alloy[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2000, A282: 153-157.
- [28] Zhao Yongqing, Zhu Kangying. Effects of Alloying Element on the Properties and Microstructures of a Highly Stabilized Titanium Alloy[J]. *Materials Science & Technology*, 2000, 16(9): 1 073-1 075.
- [29] Zhao Yongqing(赵永庆), Zhu Kangying(朱康英). A Burn Resistant Titanium Alloy Containing Copper, Aluminium, Silicon and Its Production Process(一种含铜、铝、硅的阻燃钛合金及生产方法): CN ZL 97112302.0[P]. 1997-12-01.
- [30] Zhao Yongqing(赵永庆), Zhu Kangying(朱康英). Ti-Cu-Al 合金的阻燃特性和微观组织[J]. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程), 1998, 27(6): 360-364.
- [31] Li Zuochen(李佐臣), Wu Qingzhi(吴清芝). Titanium Alloy and Their Production Process Used for Shipbuilding(船用钛合金及制造方法): CN ZL90108742.4[P]. 1990-08-15.
- [32] Hu Yaojun(胡耀君), Liu Guozhong(刘国宗). A Titanium Alloy Used for Shipbuilding(一种船用钛合金): CN ZL 99118002.X[P]. 1999-10-09.
- [33] Zhao Yongqing(赵永庆), Li Zuochen(李佐臣). 西北有色金属研究院创新的船用钛合金[J]. *Titanium Industry Progress* (钛工业进展), 2003, 20(6): 12-15.
- [34] Zhao Yongqing(赵永庆). 钛合金的研究与开发[J]. *Titanium Industry Progress* (钛工业进展), 2005, 22(4): 1-7.
- [35] Chen Jun(陈军), Zhao Yongqing(赵永庆). 中国船用钛合金的研究和发展[J]. *Material Review* (材料导报), 2005, 19(6): 67-70.
- [36] Yu Zhentao(于振涛), Zhou Lian(周廉). 生物医用 β 型钛合金的设计与开发[J]. *Rare Metals Letters* (稀有金属快报), 2004, 23(1): 5-8.
- [37] Daisuke Kuroda, Mitsuo Niinomi. Design and Mechanical Properties of New β Type Titanium Alloys for Implant Materials[J]. *Mater Sci Eng A*, 1999, A260: 269-273.
- [38] Yu Zhentao(于振涛), Zhou Lian(周廉). A β Type Titanium Alloy Used for Surgical Implant(一种外科植入件用 β 型钛合金): CN ZL 03153139.3[P]. 2003-06-12.
- [39] Yu Zhentao(于振涛), Zhou Lian(周廉). A β Type Titanium Alloy Used for Blood Vessel Support(一种血管支架用 β 型钛合金): CN ZL 03153138.5[P]. 2003-06-12.
- [40] Yang Rui(杨锐), Hao Yulin(郝玉琳). 高强度低模量医用钛合金 Ti2448 的研制与应用[J]. *Advanced Material Industry* (新材料产业), 2009(9): 28-31.
- [41] Zhao Yongqing(赵永庆), Zhu Kangying(朱康英). A Low Cost β Type Titanium Alloy(一种 β 型低成本钛合金): CN ZL 02 1 01189.3[P]. 2002-09-19.
- [42] Zhao Yongqing(赵永庆), Zhu Kangying(朱康英). A Low Cost α Type Titanium Alloy(一种 α 型低成本钛合金): CN ZL 02 1 01190.7[P]. 2002-09-19.
- [43] Zhao Yongqing(赵永庆), Li Yuelu(李月璐). 低成本钛合金研究[J]. *Rare Metals* (稀有金属), 2004, 28(1): 66-69.
- [44] Jiang Peng(蒋鹏), Li Liang(李梁). 低成本钛合金的成分设计计算与制备[J]. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程), 2008, 37(Suppl. 3): 955-958.
- [45] Takashi Saito, Tadahiko Furuta. Multifunctional Alloys Obtained via a Dislocation-Free Plastic Deformation Mechanisms[J]. *Science*, 2003, 300: 464-467.
- [46] Takashi Saito, Tadahiko Furuta. Multifunctional Titanium Alloy "Gum Metal"[J]. *Mater Sci Forum*, 2003, 426/432: 681-688.
- [47] Yang Guanjun(杨冠军), Cai Xuezhong(蔡学章). A Near α Type U/Tralow-Temperature Titanium Alloy and Its Fabrication Method(一种近 α 型超低温钛合金及其制备方法): CN ZL 03105962.7[P]. 2003-05-14.

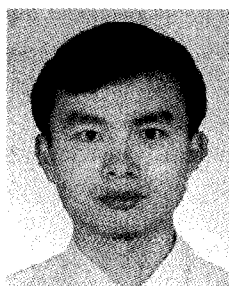
- [24] Feng Haibo, Jia Dechang, Zhou Yu. Spark Plasma Sintering Reaction Synthesized TiB Reinforced Titanium Matrix Composites [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2005, 36(5): 558-563.
- [25] Meng Qingchang, Feng Haibo. Defects Formation of the In-Situ Reaction Synthesized TiB Whiskers [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2009, 311(6): 1 612-1 615.
- [26] Ma Z Y, Mishra R S, Tjong S C. High-Temperature Creep Behavior of TiC Particulate Reinforced Ti-6Al-4V Composite [J]. *Acta Materialia*, 2002, 50(17): 4 293-4 302.
- [27] Dubey S, Srivatsan T S, Soboyejo W O. Fatigue Crack Propagation and Fracture Characteristics of In-Situ Titanium-Matrix Composites [J]. *International Journal of Fatigue*, 2000, 22(2): 161-174.



专栏特约编辑赵永庆

赵永庆:男,1966年生,博士、教授、博导,西北有色金属研究院副总工程师,科研处处长,国家钛合金 973 计划项目首席科学家;主持了国家 973、863、国防 973、科技攻关、军品配套、总装预研、自然科学基金等 40 余项国家级科研项目的研究工作;获国家科技进步三等奖 1 项,省部级科技进步一等奖 2 项,省部级科技进步二等奖 8 项,授权专利 23 项;为新世纪百万人才国家级人选,享受政府特殊津贴,获陕西省有突出贡献专家、省科技劳模等荣誉。

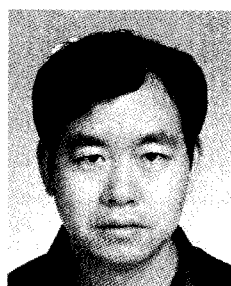
雷家峰:男,1964年生,博士,中国科学院金属研究所研究员;先后负责或参与完成国家钛合金材料研究项目 10 余项,国家 863、973 钛基复合材料计划项目多项;获中国科学院科技进步一等奖 1 项。



特约撰稿人雷家峰

朱知寿:男,1966年生,博士,北京航空材料研究院研究员;主持完成了国家科技项目 9 项,正在主持技术攻关项目 5 项;建立了损伤容限型钛合金材料应用技术,提升了我国新一代飞机钛合金用量及应用水平;发表论文 70 余篇;获部委级科技成果三等奖 1 项、二等奖 2 项,分别荣获“九五”和“十五”国防预研个人一等功和二等功各 1 次,获航空报国防优秀贡献奖 1 次;拥有授权国家发明专利 2 项(第 1 发明人),申报国家发明专利 6 项(第三发明人)。

毛小南:男,1966年生,博士、教授;自 1988 年起先后参加和主持了中国有色金属工业总公司、国家 863 以及国家“十五”高科技项目的研究工作,其中,与他人合作,创立了“熔铸法颗粒增强钛基复合



特约撰稿人朱知寿

材料”制备的新工艺,“陶瓷颗粒增强钛基复合材料研究”达到国际领先水平;获中国有色金属工业总公司科学技术进步二等奖 1 项,三等奖 1 项,陕西省国防科技工业委员会科技进步二等奖 1 项;撰写及与他人合作共发表论文 60 多篇。

蒋成禹:男,1945年生,教授,硕士生导师,江苏科技大学材料科学与工程学院名誉院长,船舶行业及武器装备系统首席专家,五一劳动奖章获得者;长期从事舰船及民用工程材料及工艺的研究工作;主持了我国所有舰船用、核电站用钛及钛合金的研制及应用研究等 30 多项国家重点科研项目;参与制定“八五”、“九五”舰船材料的研究框架;获国家科技三等奖 2 项,部级一等奖 1 项、二等奖 5 项、三等奖 6 项。



特约撰稿人毛小南



特约撰稿人王向东

蔡一湘:男,1957年生,教授;1981 年毕业于中南大学,1986 年获中南大学硕士学位;现任广州有色金属研究院粉末冶金研究所所长,国家钛及稀有金属粉末冶金工程技术研究中心副主任,中国材料研究学会、机械学会粉末冶金分会和钢协粉末冶金分会理事;在耐磨蚀粉末钛合金及复合材料、粉末钛微孔材料及应用、柔性微孔复合材料的薄带及滤芯制造、高性能不锈钢零件制造技术等方面获得多项技术成果和专利,发表论文



特约撰稿人蒋成禹



特约撰稿人蔡一湘

近 30 篇。
王向东:中国有色金属工业协会钛钎钨分会副会长兼秘书长,教授,北京有色金属研究总院和昆明理工大学兼职教授;1998 年以前,一直在北京有色金属研究总院从事钎钨钨钼研究,在高比容电容器级钼粉的研制方面获得多项部级科技进步奖,在电容器级钼粉的掺杂机理研究方面多有建树,发表了系列论文;自 1998 年以来一直从事钛行业的宏观运营、发展对策以及需求预测等方面的探索研究。