

特约专栏

我国创新研制的主要船用钛合金及其应用

赵永庆

(西北有色金属研究院, 陕西 西安, 710016)

摘要: 钛及钛合金因优异的综合性能在航空、航天、舰船、化工等行业获得广泛应用, 为满足不同的应用需求, 近20年我国新型钛合金的研制非常活跃, 其中舰船用钛合金是我国钛合金研究和发展的主要研究方向之一。经过近50多年的努力, 我国创新研制的不同强度级别船用钛合金已基本形成体系, 也制备出这些合金不同规格的管、板、棒、丝材等, 已基本能够满足我国工程的需求。简要介绍了中国创新研制的主要船用钛合金及其应用, 如中强高韧Ti75合金、中强高塑Ti31合金、高强高韧Ti-B19合金、中强Ti91和Ti70合金、高强Ti80合金等, 同时也简要介绍了可能用于海洋工程的其他创新研制的钛合金, 如高强(1 100 MPa)高韧损伤容限型TC21合金、中强(900 MPa)高韧损伤容限型TC4-DT合金、强度为1 300 MPa的Ti-1300、强度为1 500 MPa的Ti-1500、强度为1 600 MPa的Ti-1600合金以及中强的低温钛合金CT20等。

关键词: 钛合金; 船用钛合金; 力学性能; 应用

中图分类号: U668.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2014)07-0398-07

The New Main Titanium Alloys Used for Shipbuilding Developed in China and Their Applications

ZHAO Yongqing

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

Abstract: Because of their excellent properties, titanium and its alloys have been widely used in aviation, aerospace, shipbuilding, chemical industries, and so on. In order to meet the different requirement, new titanium alloy research was very active in China in recent 20 years. Among them, titanium alloy used for shipbuilding is one of the main directions of titanium alloy research and development in China. After nearly 50 years' hard working, titanium alloys with different strength scale used for shipbuilding are formed in China, and their bars, plates, sheets, rods, wires, i. e. of different size are produced, which basically meet the requirement. This paper reviews the new main titanium alloys used for shipbuilding and their applications, such as Ti75 alloy with middle strength and high toughness, Ti31 alloy with middle strength and high plasticity, Ti-B19 alloy with high strength and high toughness, Ti91 and Ti70 with middle strength, Ti80 with high strength and so on. This paper also introduces some new titanium alloys which can be used for marine, such as damage tolerance TC21 alloy with high strength (1 100 MPa) and toughness, damage tolerance TC4-DT alloy with middle strength (900 MPa) and high toughness, Ti-1300 alloy with 1 300 MPa strength, Ti-1500 alloy with 1 500 MPa strength, Ti-1600 alloy with 1 600 MPa strength, CT20 alloy with middle strength and so on.

Key words: titanium alloy; titanium alloy used for shipbuilding; mechanical properties; application

1 前言

钛合金因密度小、比强度高、耐海水腐蚀及海洋大气腐蚀、无磁、透声、抗冲击震动、可加工性好等综合性能而成为理想的船用金属结构材料。钛及钛合金在舰船中的使用大大延长了设备的使用寿命, 减轻了重量, 减少了设备, 提高了整体舰船的技术战术性能。

到目前为止, 世界上只有俄罗斯、美国和中国进行专门的船用钛合金研究, 并有自己的船用钛合金体系。俄罗斯船用钛合金的研究和实际应用水平居世界前列, 拥有490 MPa、585 MPa、686 MPa、785 MPa强度级别的系列船用钛合金。为便于设计选材, 俄罗斯把船用钛合金按其在船舶上的用途分类, 如船体用钛合金ИТТ-1М, 船舶机械用钛合金ИТТ-7М、ИТТ3、3М、37, 船舶动力工程用钛合金40、ИТТ-3В、5В、37、23等。但这种分类对于设计选材也不方便, 如船舶机械用钛合金ИТТ-7М, 多用于核动力装置一回路设备, 动力工程用的ИТТ-3В, 也用于船舶球鼻艏。美国海军于1950年开始注

收稿日期: 2014-04-04

作者简介: 赵永庆, 男, 1966年生, 教授, 博士生导师, Email: tre@c-nin.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2014.07.03

意到钛及钛合金用于舰船工业的可能性, 1963年开始进行大量的工程化研究, 成功地将钛用于各类动力的航母、潜艇、水面艇、民用船。主要应用的合金有: 纯钛、Ti-0.3Mo-0.8Ni、Ti-3Al-2.5V、Ti-6Al-4V、Ti-6Al-4V ELI、Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo、Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr。钛合金主要用于耐压壳体、海水管路系统、冷凝器和热交换器、排风扇的叶片、推进器和轴、弹簧、航母上的消防设备等。

中国船用钛合金的研究与应用始于20世纪60年代, 几十年来, 船用钛合金的研究及应用水平有了很大提高, 已形成较完整的船用钛合金系列, 能满足不同船只和舰艇等对不同强度级别的要求并适用于其不同部位。我国船用钛合金体系, 屈服强度从320 MPa ~ 1100 MPa, 变化范围大。屈服强度从320 MPa ~ 490 MPa为低强钛合金, 主要有TA2、Ti31、ZTA5等; 屈服强度从590 MPa ~ 785 MPa为中强钛合金, 主要有TA5、ZTi60、Ti75、Ti80等; 屈服强度在800 MPa以上为高强钛合金, 主要有TC4、TC11、Ti-B19等。本文针对我国创新研制的主要船用钛合金Ti31、Ti75、Ti-B19、Ti91、Ti70、Ti80等做了简要介绍, 同时也简要介绍了可能用于海洋工程的其他创新研制的钛合金。

2 Ti31 合金

钛的热中子吸收截面为 $56 \times 10^{-28} \text{ m}^2$, 大约是锆的30倍、铪的1/2。钛合金的核性能也比较稳定, 在 $3 \sim 20 \times 10^{-19}$ 慢中子流辐射下, 布氏硬度、屈服强度略有增加, 延伸率、电阻率略有下降, 但冲击韧性没有改变, 合金的密度及产品的尺寸形状均无改变。这种稳定的核性能及其他优异性能使Ti31合金在核动力装置中

的高温高压、常温常压部位使用^[1-2]。

Ti31合金是西北有色金属研究院“七五”、“八五”期间自行设计研制的新型耐高温、耐腐蚀、抗氢脆Ti-Al-Zr-Mo-Ni系钛合金^[1], 洛阳725所负责该合金的应用研究。该合金集中了多种钛合金的优点, 与同等强度的其他钛合金相比, 具有高的塑性、中温热强性、高温持久性、良好的耐蚀性及可焊性; 可采用常规锻造、挤压、轧制、冷成型等方法加工成各种板、棒、锻件、管和饼等产品, 合金可在300℃~400℃的高温环境下使用。

Ti31合金性能如表1所示。合金板材、锻件、管材典型的力学性能为: $R_m > 590 \text{ MPa}$, $R_{p0.2} > 490 \text{ MPa}$, $A > 16\%$, $Z > 35\%$, $a_k \geq 59 \text{ J/cm}^2$ 。Ti31强度约为纯钛的1.5倍, 但工艺塑性与纯钛相当, 具有良好的弯曲、压扁、扩口性能。采用 $2d$ (d : 管子直径)和 $2t$ (t : 管子壁厚)弯心, 管材及板材弯曲可达 180° ; 采用 60° 锥头, 管材扩口量大于50%; 最小压扁板间距可达 $4.5t$ 不出现裂纹。在反复塑性应变中合金不发生循环软化现象。耐海水腐蚀性能优异: 在榆林港天然海水全浸腐蚀速率为 0 mm/a , 在 $180 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下天然海水介质中无缝隙腐蚀, 动海水腐蚀(流速为 3 m/s)腐蚀率为 0 mm/a , 与船体钢电偶腐蚀效果为1.25。焊接性能良好, 焊接接头 $R_m > 590 \text{ MPa}$, $a_k \geq 58.8 \text{ J/cm}^2$, 焊接系数大于0.9。应用的产品有板、棒、饼及管材和各种功能的机加件, 如法兰、异径三通管、管座等, 使用的环境有高温氯化物、高温海水、常温高速海水, 用该合金制造各类热交换器、管路、泵体、阀门等, 并取得了成功应用。“九五”之后, 开展了该合金的工业化生产。Ti31合金已成功用于余热排出冷却器, 它是我国首台全钛合金焊接结构管式换热器, 是一回路余热排出系统的主要设备。

表1 Ti31合金主要性能

Table 1 The main mechanical properties of Ti31 alloy

Products	Tensile test at room temperature				R_m (350 °C) /MPa	Endurance, R_m (350 °C, 3 000 h)/MPa	Corrosion resistance in sea water, K_{ISCC}/K_{IC}
	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%			
Sheet/plate: thickness 2 ~ 20mm	665	598	23	-	430		
Rod: ϕ 16 ~ 130 mm	665	600	20	50	430	> 350	0.78
Tube: ϕ 40 ~ 73 \times 5 mm	675	600	18	-	410		
Pancake: ϕ 220 ~ 650 \times 60 ~ 255 mm	650	580	18	43	410		

3 Ti75 合金

Ti75合金是西北有色金属研究院在“七五”、“八五”期间自行设计研制的中强耐高温耐腐蚀抗氢脆Ti-Al-Zr-Mo系钛合金^[3], 洛阳725所负责该合金的应用研究。Ti75合金强度、塑性、耐蚀性、加工性能等综合性能优于TA5, 它是动力装置设备、船舶焊接结构件的

重要材料^[1]。合金性能如表2所示。其板材、棒材、锻件等的典型力学性能为: $R_m > 730 \text{ MPa}$, $R_{p0.2} > 630 \text{ MPa}$, $A > 13\%$, $Z > 25\%$, $K_{IC} \geq 80 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $a_k \geq 580 \text{ kJ/m}^2$, $K_{ISCC} \geq 75 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。Ti75合金耐海水腐蚀性优异: 海水浸泡腐蚀、缝隙腐蚀、动海水腐蚀(流速为 3 m/s)腐蚀速率为 0 mm/a ; 与船体钢电偶腐蚀效果为1.33。焊接性能: 焊接系数大于0.9。

与 TA5 钛合金相比, Ti75 合金在保证良好的综合性能前提下, 强度高出 50 MPa, 冲击韧性和断裂韧性是 TA5 的 1.4 倍和 1.2 倍, KISCC 为 TA5 的 2 倍, 并且具有比 TA5 合金优异的冷、热加工性、低的杂质敏感性。该合金填补了国内 730 MPa 级船用钛合金

空白, 达到国际先进水平。目前已能够批量生产 Ti75 合金的板材、棒材、管材、环材、锻饼、丝材、铸件以及宽厚板和大环锻件, 也已试制成功 Ti75 合金外径为 $\phi 650$ mm 的无缝弯管和 $\phi 350$ mm 的无缝直管等。

表 2 Ti75 合金典型产品及性能

Table 2 Typical products and main mechanical properties of Ti75 alloy

Products	Tensile test at room temperature				Fracture toughness, $K_{IC}/\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	Stress corrosion fracture toughness, $K_{ISCC}/\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	Welding angle/($^{\circ}$)
	R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A/\%$	$Z/\%$			
Sheet/plate: thickness 1.5 ~ 18 mm	760	685	20	50	117	88	>100
Rod: $\phi 20$ mm	752	737	18	63			
Tube: $\phi 22 \sim 27 \times 1.0 \sim 1.8$ mm	749	609	20				
Ring: $\phi 450/\phi 220 \times 50$	730	667	14	45			
Casting	802	690	12	30			

由 Ti75 合金制作的零部件已成功应用于某工程的往复式盐水泵、通海系统、海水四通、接管和舷侧双座双球阀阀杆等, 并且已有 15 个 Ti75 合金零件于 1993 年安装到某艇上进行装艇使用, 正常运行至今。Ti75 合金在艇上的成功应用, 开创了钛合金在某潜艇二回路系统中实艇应用的先例, 综合水平居 20 世纪 90 年代国际领先水平。目前, Ti75 合金已被指定用于某工程, 是我国主要的一种船用耐蚀钛合金。Ti75 合金也已用于制作我国永磁推进电机所需的钛合金转子支架(直径约 3 m, 壁厚约 100 mm)。

4 Ti-B19 合金

“九五”期间, 西北有色金属研究院设计、研制成功一种新型高强高韧耐蚀钛合金——近 β 钛合金 Ti-B19^[4],

洛阳 725 所为该合金的应用研究单位。Ti-B19 合金具有较高的强度, 良好的塑性, 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。“九五”期间完成高强钛合金 Ti-B19 筒体的研制, 并通过了压力试验, 其筒体尺寸为: $\phi 450/\phi 215 \times 2008$ mm, 主要力学性能达标, 它是我国当前高强 β 钛合金最大的锻件。

Ti-B19 合金在 600 $^{\circ}\text{C}$ 、3.5% NaCl 溶液中无腐蚀发生, 腐蚀率为 0 mm/a。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 $69 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $K_{ISCC}/K_{IC} \geq 0.8$ 。Ti-B19 合金的典型力学性能如表 3 所示。

表 3 Ti-B19 合金典型力学性能

Table 3 Typical mechanical properties of Ti-B19 alloy

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

5 Ti91 和 Ti70 合金

由于海水中声波比光波、无线电波、电磁波的衰减小, 人们将声纳作为探测和搜索的工具。一般将船舶声纳安装在流线型声纳导流罩内, 其目的是减小舰船运动时产生的水动力噪音, 保证水声设备有效和正常工作, 从而提高声纳的作用距离。声纳导流罩必须有良好的透声性能, 使水声信号通过时只有很小的损耗和畸变。另外, 声纳导流罩又是船体的一部分, 它必须有足够的强度和刚度, 以经受得住舰船航行时作用在它上面的流体

压力。制作导流罩的材料要求具有中等强度 ($R_m \geq 700$ MPa)、良好的塑性 ($A \geq 20\%$)、冷成型性、易焊接、耐海水腐蚀、透声等特点, 并适合于各种冷成型产品的加工和生产。

声纳导流罩材料包括不锈钢、玻璃钢、橡胶、钛合金等。我国现役海军在役舰艇声纳导流罩所选用的壳板透声材料基本有两种: 一种是不锈钢, 另一种是纤维增强的复合材料——玻璃钢。俄罗斯过去也选用玻璃钢, 但后来大多采用近 α 钛合金 ИТ-3В, 并取得了良好的效果。

我国于 20 世纪 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^[5]和Ti70^[2]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 $4 \times 900 \sim 1\,000 \times L$ mm和 $6 \times 900 \sim 1\,000 \times L$ mm板材。

Ti91钛合金是西北有色金属研究院于1994年开始设计、研制的一种新型中强透声近 α 型钛合金^[5]。众所周知,纯钛和 β 钛合金冷成型性良好,但纯钛的拉伸性能较低,而 β 钛合金的合金元素则较多,需添加成本较高的中间合金,且加工成本也高于 α 钛合金,使合金总体成本高。另外, β 钛合金的焊接性能不如 α 型钛合金。因此两种类型合金均不能满足要求。由于 β 稳定元素Fe的加入,使Ti91合金的加工性能得到改善,同时也为通过热处理调整性能提供了有利条件。该合金具有中等强度、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合金典型的性能如表4所示。关键力学性能达到 $R_m \geq 700$ MPa, $A \geq 20\%$;在60℃海水中浸泡,均匀腐蚀率 ≤ 0.001 mm/a;冷成型性: $R/t \leq 2.5$ 。Ti91合金与其他钛合金的强度、塑性、冷弯性等性能综合比较,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厚度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^[2]。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: $R_m > 630$ MPa, $D = 7$ a,冷弯角180°。与船体钢电偶腐蚀效果为1.43。成功研制了Ti70透声钛合金实船钛合金声纳导流罩,并已成功应用于多条水面舰艇。

表4 Ti91合金主要性能

Table 4 The main mechanical properties of Ti91 alloy

Sheet size	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Cold deformation, R/t	Acoustical transmission factor/%
$4 \times 900 \sim 1\,000 \times 1\,500$ mm	720	700	22	2.5	98
$6 \times 900 \sim 1\,000 \times 1\,500$ mm	710	690	22	2.5	-

6 Ti80合金

Ti80合金是上海钢研所于20世纪80年代研制的一种新型的Ti-6.0Al-2.5Nb-2.2Zr-1.2Mo系近 α 钛合金^[2],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,成份为Ti-5Al-3Nb-0.5Mo。Ti80已进行工业性试验,轧制

出 $22 \times 1\,000$ mm及 $48 \times 2\,400 \times 2\,700$ mm板材。Ti80合金的拉伸性能、断裂韧性与Ti-6Al-4V ELI的对比如表5所示。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Ti-6Al-4V ELI。Ti80合金主要用于大通径压力管道及承受较大载荷的结构件中,如法兰、承压结构的耐压壳体、耐高压管路、紧固件、铸件等,是目前较多使用的船用钛合金之一。

表5 Ti80合金与Ti-6Al-4V ELI的拉伸性能、断裂韧性的对比(厚30~48 mm板)

Table 5 Comparison between Ti80 and Ti-6Al-4V ELI alloys for tensile properties and fracture toughness (plate: thickness 30~80 mm)

Alloy	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%	a_k /J·cm ⁻²	K_{IC} /MPa·m ^{1/2}	K_{ISCC} /MPa·m ^{1/2}
Ti80	880~925	785~885	12	34	77~81	117	84
Welding + heat treatment	927	793	13	35	70	-	-
Standard	850	784	12	-	60	93	-
Ti-6Al-4V ELI	974~950	872~892	15	33	29~39	88.4	55.8

7 其它有可能用于海洋工程的创新研制的钛合金

7.1 中强高韧损伤容限型钛合金TC4-DT

TC4-DT是针对航空长寿命结构件研发的一种中强高韧损伤容限型钛合金^[6-7],物理性能和力学性能与TC4 ELI一致,差异主要在于合金成分的控制、锻造工艺及热处理工艺。TC4 ELI是海洋工程用钛合金的一种重要选择,在美国舰船上已获得成功应用。中国研制的TC4-DT合金已在我国航空飞机上获得成功应用,也应

获得海洋工程方面的应用。表6为TC4-DT合金不同规格棒材的力学性能,不同规格棒材的性能稳定,一致性好^[8]。同时该合金具有良好的工艺性能和焊接性能。

TC4-DT由西北有色金属研究院和北京航空材料研究院在2005年研制成功,之后得到高度重视和快速发展。TC4-DT合金研制规模已由2005年的1 t铸锭扩大到2009年的5 t以上规模铸锭,西部超导公司已成功批量生产出TC4-DT合金 $\phi 200 \sim \phi 500$ mm棒材,也已试制成功 $\phi 600$ mm超大规格棒材。同时,西部钛业公司也研制出TC4-DT合金 $40 \sim 100 \times 2\,500 \times L$ mm的厚板和

表 6 TC4-DT 合金不同规格棒材的力学性能

Table 6 The mechanical properties of TC4-DT alloy bars with different size

Diameter/mm	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%	K_{IC} /MPa · m ^{1/2}	da/dN /mm · cycle ⁻¹
φ50	915	845	16	48	—	—
φ90	925	855	18	53	109	3.733×10^{-6}
φ140	920	860	15	53	112	2.309×10^{-6}
φ300	920	850	14	33	93	5.109×10^{-6}

1 ~ 10 × 1 500 × L mm 的薄板, 合金板材的性能达到技术指标要求。

7.2 高强高韧损伤容限型钛合金 TC21

TC21 合金是我国研制的第一个高强高韧损伤容限型钛合金, 由西北有色金属研究院于 2003 年研制成功^[9-10], 北京航空材料研究院负责该合金的应用研究。2005 年以后得到高度重视和快速发展。TC21 合金研制规模已由 2005 年的 1 t 铸锭扩大到 2009 年的 5 t 以上规模铸锭, 研制的合金棒材有 φ20 mm、φ90 mm、φ130 mm、

φ180 mm、φ300 mm、φ500 mm, 目前西部超导公司已能批量生产 TC21 合金 φ300 mm 以上大规格棒材。TC21 合金棒材的典型性能如表 7 所示, 合金不同规格棒材的性能稳定, 一致性好^[8]。同时, 也试制出 TC21 合金厚度为 2 mm 和 12 mm 的板材。

TC21 合金已成功应用于我国航空飞机, 在海洋工程方面可用于要求屈服强度为 1 000 MPa 的承力结构件, 该合金在具有高强度、高韧性同时, 还具有良好的焊接性能。

表 7 TC21 合金不同规格棒材的力学性能

Table 7 The mechanical properties of TC21 alloy bars with different size

Diameter/mm	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%	K_{IC} /MPa · m ^{1/2}	da/dN /mm · cycle ⁻¹
φ20	1 200	1 130	13	52	—	—
φ90	1 100	1 000	12	35	85	1.39×10^{-5}
φ130	1 110	1 020	12	30	80	1.47×10^{-5}
φ180	1 110	1 030	12	30	90	2.03×10^{-5}
φ300	1 110	1 060	18	48.5	86	7.88×10^{-4}

7.3 超高强钛合金 Ti-1300

Ti-1300 是西北有色金属研究院在 2005 年研制成功的一种 1 350 MPa 级别的新型超高强钛合金^[11-12]。合金研制的规模已达到 1 000 kg 铸锭, 研制的棒材规格已由 φ20 mm 扩大至 φ200 mm。棒材的典型性能见表 8, 不同规格棒材的性能稳定。该合金制造的零部件已在航空、航天等部门获得应用, 在海洋工程方面, Ti-1300 可用于要求屈服强度为 1 200 MPa 的钛合金承力结构件。

表 8 Ti-1300 合金不同规格棒材的力学性能

Table 8 The mechanical properties of Ti-1300 alloy bars with different size

Diameter/mm	R_m /MPa	A /%	Z /%	K_{IC} /MPa · m ^{1/2}
φ20	1 400	12	40	—
φ90	1 380	9	25	63
φ150	1 350	10	32	57

7.4 CT20 低温钛合金

西北有色金属研究院根据航天火箭发动机管路系统的需求, 自主开发了一种 Ti-Al-Mo-Zr 系近 α 型中强低

温 CT20 钛合金^[13]。表 9 为 CT20 合金室温和 20 K 下的力学性能, 该合金具有优良的超低温物理性能, 减少了热量传递, 改善热漏, 替代钢制管路后可减轻 1/3 重量。CT20 合金制造的液氢管路用弯管、接管嘴、连接法兰等零部件, 已被组装到发动机上进行试车试验并获得成功, 获得了实际应用, 发动机管路重量减轻约 1/3, 提高了发动机的性能。该合金同时具有良好的工艺性能和焊接性能。西北有色金属研究院先后生产了 CT20 钛合金管材、棒材、丝材几十吨, 并且制造出了 CT20 钛合金螺旋弯管、异径三通和直角三通等复杂产品, 增加了该合金产品的品种。CT20 钛合金在海洋工程方面应有较好的应用前景。

7.5 定量设计的超高强钛合金

以往, 钛合金成分设计主要采用经验方法、Al 当量、Mo 当量及电子浓度理论进行定性设计。近几年在发明钛合金定量设计方法^[14-17]的基础上, 针对两个不同强度级别要求的目标合金, 开展定量计算, 定量设计了两种合金成分。针对定量设计的两种新合金, 按照钛合金制备的常规方法, 采用 0 级海绵钛、Al-Mo、

表9 CT20合金4种规格棒材室温及20K下拉伸性能和冲击性能
Table 9 The mechanical properties of CT20 alloy bars with different size

Diameter/mm	Room temperature					20K		
	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A/%	Z/%	a_k /J·cm ⁻²	R_m /MPa	A/%	Z/%
φ25	662	625	22	60	120	1 340	21	40
φ90	622	530	18	38	98	1 290	20	33
φ100	603	515	18	44	100	1 250	23	35
φ150	630	540	20	39	100	1 283	16	49

Al-V、Al-Sn等中间合金及原子能级Zr、高纯电解Cr、Fe等,采用真空自耗电弧熔炼方法,制备了25 kg铸锭。经铸锭开坯锻造及棒材轧制后得到φ22 mm的棒材,热处理后测试了合金的室温力学性能。性能测试结果如表10所示,可以看出,设计合金的强度准确度超过98%,延伸率准确度超过93%。这说明两种新合金(Ti-1500、Ti-1600)的合金成分定量设计是成功的。

在海洋工程领域,新合金可用于要求屈服强度1 300 MPa的承力结构件。

表10 定量设计的两种合金试验验证的力学性能

Table 10 The mechanical properties of two quantitative designed titanium alloys

Alloy	Tensile strength/MPa		Elongation/%	
	Target	Test value	Target	Test value
Ti-1600 ^[18]	1 650	1 650	8	8.3
Ti-1500 ^[19]	1 550	1 580	8	8.5

8 结 语

舰船用钛合金是我国钛合金研究开发的重要方向之一。经过近50年的努力,创新研制的船用钛合金和仿制的船用钛合金已形成我国船用钛合金体系,利用我国钛合金工业化生产设备,可以生产出钛合金板、管、棒、饼、环、丝和铸件等产品,通过研究合金的物理、力学性能,为舰船及海洋工程构件的设计、制造和使用提供了依据。创新研制的部分钛合金在舰船上已装艇使用,为扩大钛合金在海洋工程方面的应用奠定了基础,同时可以推广针对航空、航天等研制的钛合金到舰船上应用,为舰船应用选材提供更宽广的材料基础。

参考文献 References

[1] Zhao Yongqing(赵永庆). 西北有色院创新研制的船用钛合金[J]. *Titanium Industry Progress*(钛工业进展), 2003, 20(6): 12-15.

[2] Sun Jianke(孙建科). 我国船用钛合金研究、应用及发展[J]. *Acta Metallurgical Sinica*(金属学报), 2002(z1): 33-36.

[3] Li Zuochen(李佐臣), Wu Qingzhi(吴清芝), Wang Weimin

(王为民), et al. *Marine Titanium Alloy and the Manufacturing Method*(船用钛合金及制造方法): China, ZL90108742.4 [P]. 1992-05-13.

- [4] Lin Yongxin(林永新), Chang Hui(常辉). *A New Near β Titanium Alloy and the Manufacturing Method*(一种近β型钛合金及生产方法): China, ZL00114739.0 [P]. 2000-11-19.
- [5] Hu Yaojun(胡跃君). *A Cold Forming, Medium Strength Titanium Alloy*(一种冷成形中强钛合金): China, ZL 99118005.4 [P]. 1999-11-13.
- [6] Qu Henglei(曲恒磊), Zhao Yongqing(赵永庆). *A Low Cost Damage-Tolerant Titanium Alloy and the Processing Method*(一种低成本损伤容限钛合金及其加工方法): China, No. 200510001210.3 [P]. 2005-10-22.
- [7] Guo Ping(郭萍), Zhao Yongqing(赵永庆), Hong Quan(洪权). 损伤容限型TC4-DT钛合金性能[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程), 2013, 42(11): 2367-2370.
- [8] Zhao Yongqing. Research and Development of Some Typical Ti-Alloys in China in Recent 5 Years[J]. *Materials China*(中国材料进展), 2011, 30(6): 1-5.
- [9] 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.
- [10] Qu Henglei(曲恒磊), Zhao Yongqing(赵永庆). *A High Strength and Fracture Toughness Titanium Alloy and the Processing Method*(一种高强韧钛合金及加工方法): China, ZL03105965.1 [P]. 2003-09-10.
- [11] Zhao Yongqing(赵永庆), Ge Peng(葛鹏). *A 1300 MPa Level Ultrahigh Strength Structure Titanium Alloy*(一种1300 MPa超级高强结构钛合金): China, ZL200510000974.0 [P]. 2005-03-20.
- [12] Zhou Wei(周伟), Ge Peng(葛鹏), Zhao Yongqing(赵永庆). 一种近β型钛合金的热处理响应[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程), 2010, 39(4): 723-726.
- [13] Yang Guanjun(杨冠军), Cai Xuezhong(蔡学章). *A Near α Titanium Alloy Used at Ultra Low Temperature and the Processing Method*(一种近α型超低温钛合金及其制备方法): China, ZL03105962.7 [P]. 2003-05-14.
- [14] Lin Chen(林成), Zhao Yongqing(赵永庆). *Titanium Alloy*

- Component Quantitative Design Method* (钛合金成分定量设计方法): China, ZL200910248943.5[P]. 2009-06-16.
- [15] Lin Cheng, Liu Zhilin, Zhao Yongqing. Theoretical Research on Phase Transformation in Metastable β -Titanium Alloy [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2009, 40A: 1 049-1 058.
- [16] Zhao Yongqing(赵永庆), Zeng Weidong(曾卫东), Lin Chen(林成). 钛合金数据库系统的开发、显微组织定量表征及亚稳 β 钛合金的成分理论设计研究[J]. *Materials China* (中国材料进展), 2009, 28(6): 51-55.
- [17] Lin Cheng(林成), Yin Guili(尹桂丽), Liu Zhilin(刘志林). 高强钛合金抗拉强度的理论计算[J]. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程), 2010, 39(7): 1 189-1 194.
- [18] Zhao Yongqing(赵永庆), Guo Ping(郭萍), Lin Chen(林成). A 1 600 MPa Level Ultrahigh Strength Structure Titanium Alloy (一种 1 600 MPa 级高强钛合金): China, ZL200910124037.4[P]. 2009-08-12.
- [19] Zhao Yongqing(赵永庆), Guo Ping(郭萍), Lin Cheng(林成), et al. A 1 500 MPa Level Ultrahigh Strength Structure Titanium Alloy (一种 1 500 MPa 级高强钛合金): China, ZL200910124038.9[P]. 2009-08-15.

“中国海洋工程中关键材料发展战略研究”咨询项目 腐蚀防护研讨会在北京成功举行

2014年6月23日,中国工程院化工、冶金与材料工程学部在北京成功举办了“中国海洋工程中关键材料发展战略研究”咨询项目之腐蚀防护研讨会。会议特别邀请了中国工程院周廉院士、吴有生院士、侯保荣院士、丁文江院士、蹇锡高院士以及来自国内海洋工程材料及防护领域的近36家研究机构、高校和企业单位的70余位专家学者参加,中科院金属研究所韩恩厚研究员主持了会议。

周廉院士做了主题讲话。他希望项目组讨论的首要问题应该是有关海洋工程材料腐蚀、污损的共性机理问题、防护要求等。他说,海洋强国是中华民族复兴的关键,海洋强国的主要内容是将海洋工程所有的装备做到一流水平:如舰船一流水平、石油钻井平台一流水平等等。一流水平的装备需要有一流的材料,要拥有自己的新材料、先进材料发展设计路径。所有海洋工程材料遇到的主要问题就是腐蚀、污损和防护问题,这是一个贯穿整个海洋工程及建设海洋强国的关键技术问题。

周廉院士特别强调的第二个需要关注的问题是希望研讨成果能对海洋工程装备中对于腐蚀、污损和防护整体设计有所贡献,不能够单搞某项。一套海洋装备,它整体寿命几年?几年大修?什么时间能达到一流水平?针对这一系列问题,他建议成立一个专门研究机构和研究队伍,就海洋工程装备腐蚀、污损和防护整体设计、评估等展开基础研究,真正对国家海洋工程发展做出贡献。他提到我国南海某空间发射基地,没等投入使用钢材就腐蚀掉了,非常可惜。项目组在2013年建立了海洋工程材料文献数据库,本次会议选取了其中25篇国外相关领域文献,组织人员翻译,由《中国材料进展》杂志社编辑出版了《海洋工程材料腐蚀防护译文集》。从这些文献可以看出,国外在该领域已经做得非常深入,对新的防护材料及方法进行了大量的研究,我们应该不断吸收国外的先进经验,对关键问题集中讨论,这对促进我国海洋工程材料的发展是一个非常有意义的事情。

随后,研讨会进入了大会交流,侯保荣院士等15位报告人分别从腐蚀成本经济性分析与防腐策略战略研究;对高性能耐海洋腐蚀材料的几点认识;海洋工程腐蚀国家重大基础研究情况介绍;海洋钢的腐蚀机理与抗腐蚀设计;船舶及海洋工程阴极保护技术发展现状及展望;海洋关重件的腐蚀与防护策略;海底油气管道发展现状及防腐技术需求探讨;耐海洋环境腐蚀新一代钢铁材料发展现状;海洋耐蚀钢国内外进展与对策;海工混凝土的特性、腐蚀与防护;钛合金在海洋环境中的腐蚀与防护;钛在海洋中的生物附着及防护;从材料的设计和制备审视铝/铜合金的腐蚀及防护;海洋环境下耐腐蚀复合材料技术等方面展开了交流,研讨会气氛热烈,取得了预期的效果。会议同期还印制了《中国海洋工程材料腐蚀防护研讨会论文集》,供与会代表参考及宣传,以期扩大学术影响。

最后,周廉院士进行了总结发言,肯定了项目组腐蚀防护分组的工作,感谢所有报告人及各位院士、学者参加本次研讨会。并就“中国海洋工程中关键材料发展战略研究”咨询项目后期的相关工作进行了通告。他认为我国海洋工程材料远远没有形成体系,希望利用中国工程院的这个咨询项目呼吁建立这个体系,包括国家重点实验室的申请、国家重点项目投入、科技人才如何向海洋领域转型、建立专业的海洋工程材料生产企业、制定一个20~30年的长远发展规划等等。希望通过该项目的实施,形成顶层设计,建立联盟,创新研发机制,开展示范工程,用可靠的实验数据,加速进入国家海洋重点工程建设。

(根据会议影音资料整理 本刊通讯员 王方)

友情提示: 如有需要《海洋工程材料腐蚀防护译文集》及《中国海洋工程材料腐蚀防护研讨会论文集》的单位或个人,可以与《中国材料进展》杂志社联系(029-86226599)