

# 浅析钛及钛合金在海洋装备上的应用

## Brief Analysis of the Application of Titanium and Titanium Alloy in Marine Equipment

供稿|海敏娜, 黄帆, 王永梅 / HAI Min-na, HUANG Fan, WANG Yong-mei

### 内容导读

钛及钛合金在海洋工程装备领域应用非常广泛,如船体结构件、潜艇和深潜器的耐压壳体、管件、阀及附件、动力驱动装置中的推进器、冷凝器、冷却器、换热器、舰船声呐导流罩、螺旋桨等。本文在介绍钛及钛合金在海洋装备领域应用特点的基础上,总结了目前国内形成的舰船用钛及钛合金体系和性能特征,分析了国内外钛及钛合金在海洋装备领域的应用现状及优势,展望了钛材在海洋装备的应用前景,以期对后续海洋工程装备设计选材提供参考,从而大幅度加速推动钛材在我国海洋装备领域的应用。

钛具有质轻、比强度高、抗冲击性高、耐海水腐蚀性能优异、断裂韧性好、疲劳强度高、焊接性能好、无磁、透声性好、耐冷热性优异、抗放射性、减震抗噪等一系列优点<sup>[1-10]</sup>,被誉为“海洋金属”,是一种理想的、具前景的海洋工程装备用结构材料。

钛在海洋工程装备领域应用非常广泛,如船体结构件、潜艇和深潜器的耐压壳体、管件、阀及附件等,动力驱动装置中的推进器和推进器轴,冷凝器、冷却器、换热器等,舰船声呐导流罩、螺旋桨等<sup>[2-7]</sup>。但目前国内仍未见有关海洋工程装备用钛材的选材手册的报道,未见有关完善的海洋工程装备用钛及钛合金使用评价体系的报道,这在很大程度上制约了钛材在海洋工程装备上的推广使用。

本文在介绍钛及钛合金在海洋装备领域应用特

点的基础上,总结了目前国内形成的舰船用钛及钛合金体系和性能特征,论述了国内外钛及钛合金在海洋装备领域的应用现状及优势,展望了钛材在海洋装备的应用前景,以期对后续海洋工程装备设计选材提供参考,从而大幅度加速推动钛材在我国海洋装备领域的应用。

### 海洋工程装备用钛

为确保海洋装备的战技性能和航行的绝对安全可靠,选择合适的装备材料至关重要。

钛及钛合金几乎具备海洋装备材料所需的全部特性,即钛及钛合金的诸多优点。

#### 物理特性

①质轻。钛密度为  $4.5 \text{ g/cm}^3$ ,仅为钢的 57.7%,

在舰船领域应用可减轻船体质量、增加载重、提高航速；②热膨胀系数低，焊接应力小，从而使部件焊接变形量小；③无磁性，在强磁场下也不会磁化，并可防电磁干扰，使装磁引信的水雷或鱼雷失效，避免磁性雷的攻击，从而提高水下潜艇的隐身技术和反侦察能力；④导热率与热传递速率匹配良好，是理想的热交换器材料；⑤透声性好，钛材透声系数大于0.85，甚至高达0.98，是舰船声呐导流罩最理想选材；⑥加工性良好，可通过多种加工方式如铸造、轧制、锻造、挤压等生产铸件、板材、丝材、型材、锻件、复杂的零部件等。

### 力学性能

钛及钛合金力学性能优异，其比强度高、塑性好，在-253~600℃范围内，它的屈强比和比强度在海洋装备用金属材料中最高；冲击韧性良好，在-60~20℃范围内，无明显韧-脆转变点；断裂韧性较高，在80~110 MPa·m<sup>1/2</sup>之间<sup>[2-3]</sup>。疲劳强度高，钛材低应力高周疲劳均在10<sup>7</sup>周次以上。

### 腐蚀性能

钛在海洋环境介质中具有优异耐腐蚀性能。由于钛和氧亲和力极高，在空气或氧介质中，钛材表面极易快速形成一层薄、致密、坚固的氧化膜。钛

的氧化膜具有很强的自愈性，当氧化膜受到破坏或划伤后，也会很快自愈或再生，形成新的氧化膜。这层氧化膜可使钛材几乎不被自然海水腐蚀。

## 国内外舰船用钛材体系

钛材是一种优良的舰船材料，得到了各国海军和造船业的青睐。近五十年来，俄罗斯、美国、中国和日本等先后都建立了适用于自己的舰船用钛及钛合金体系。

### 国外舰船用钛材体系

俄罗斯、美国是最早研究舰船用钛及钛合金的国家，并各自形成舰船用钛及钛合金体系，日本相对较晚，舰船用钛材体系较简单。俄、美、日各国常见的舰船用钛及钛合金牌号及屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 按低、中、高强度级别划分见表1<sup>[1-3,6-10]</sup>。

俄罗斯舰船用钛及钛合金研究及应用水平居世界前列，是最早拥有专用舰船用钛合金体系的国家，如船体钛合金ИТ-1М，船机用钛合金ИТ-7М、3М、37，动力工程用钛合金ИТ-3В、40、5В、23а等。几十年来，俄罗斯在核潜艇、常规潜艇、水面舰艇、航空母舰、深潜器等舰船领域都大量采用了钛材。

表1 俄罗斯、美国、日本常见舰船用钛及钛合金牌号及屈服强度<sup>[1-3,6-10]</sup>

国家	低强钛合金			中强钛合金			高强钛合金		
	牌号	合金成分	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	牌号	合金成分	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	牌号	合金成分	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$
俄罗斯	ИТ-1М	—	$\geq 390$	ИТ-3В	Ti-4Al-2V	$\geq 590$	BT6	Ti-6Al-4V	$\geq 850$
	TL3	Ti-3.5Al-0.4V	$\geq 440$	37	—	$\geq 690$	BT8	Ti-6.5Al-3.3Mo-0.3Si	$\geq 900$
	ИТ-7М	Ti-2Al-2.5Zr	$\geq 490$	5В	—	$\geq 690$	BT14	Ti-5Al-3Mo-1V	$\geq 900$
	TL5	Ti-3.5Al-2V	$\geq 490$	—	—	—	23a	—	$\geq 1050$
美国	Gr1	Cp-Ti	$\geq 165$	Gr.32	Ti-5Al-1Zr-1Sn-1V-0.8Mo-0.1Si	$\geq 586$	Gr.23	Ti-6Al-4VELI	$\geq 795$
	Gr2	Cp-Ti	$\geq 275$	—	Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo	$\geq 655$	Gr.5	Ti-6Al-4V	$\geq 820$
	Gr12	Ti-0.3Mo-0.8Ni	$\geq 345$	—	—	—	Ti38644( $\beta$ c)	Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	$\geq 1100$
	Gr9	Ti-3Al-2.5V	$\geq 485$	—	—	—	—	—	—
日本	CP-Ti	—	$\geq 280$	—	—	—	SAT-64	Ti-6Al-4V	$\geq 830$
	—	—	—	—	—	—	SAT-64ELI	Ti-6Al-4VELI	$\geq 795$

美国海军自1963年开始对舰船用钛材进行大量的工程应用研究，主要的船用钛及钛合金有纯钛、Ti-6Al-4V、Ti-6Al-4VELI、Ti-0.3Mo-0.8Ni、Ti-3Al-2.5V、Ti-5Al-1Zr-1Sn-1V-0.8Mo-0.1Si、Ti-6Al-2Nb-

1Ta-0.8Mo、Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr等，现已成功将钛材应用于各种水面舰艇、动力潜艇、民船等。

日本的船用钛及钛合金主要有纯钛、Ti-6Al-4V、Ti-6Al-4VELI，集中应用于深潜器耐压壳体、

民用渔船、游船等。

### 国内舰船用钛材体系

国内舰船用钛材的研究始于 1962 年,五十多年来,我国从研发到应用已逐渐形成了较完整的舰船用钛及钛合金体系<sup>[1-3,6-9]</sup>,其屈服强度在 320~1130 MPa 之间。业界通常按材料屈服强度大小对其分类,即屈服强度在 500 MPa 以下为低强钛合金,500~790 MPa 为中强钛合金,高于 790 MPa 为高强钛合金。上述强度级别材料基本可满足国内舰船、潜艇、深潜器及深海空间站用结构材料的指标要求。现阶段我国已制定了舰船用钛及钛合金板材、棒材、锻件、无缝管材及铸件的相关规范,具体舰船用钛及钛合金体系、性能、应用及规范标准号见表 2。

与俄罗斯、美国相比,中国舰船用钛及钛合金体系还不够完善,且应用数据较少,无准确、高效的舰船用钛材的评价体系。

### 钛材在海洋装备上的应用现状及优势

钛材是海洋环境中最理想的材料,使用钛材可使海军舰船及装备大大提高战斗力、降低维护成本、延长使用寿命、提高隐蔽性<sup>[1,10]</sup>。俄、美、中国海军已将钛材广泛应用于深潜器、水下潜艇、水面舰艇、舰船等装备的耐压壳体、海水管路系统、上层建筑及其他部件等<sup>[9-11]</sup>。

### 耐压壳体

国内外选用钛材作为耐压壳体的实例较多,主要用于深潜器载人球壳、潜艇壳体<sup>[11]</sup>,具体典型应用所选用钛材的牌号及拉伸性能见表 3。

国内外深潜器载人球壳选用钛材牌号主要有 Ti-6Al-4V、Ti-6Al-4VELI(对应国内牌号 TC4、TC4ELI)。很多深潜器载人球壳前期选用钢材,但后期都采用钛材替代,既可以减轻重量,增加下潜深度,又可以提高使用寿命。例如:①美国 Alvin 深潜器,1964 年建造时采用的是 HY100 高强钢(板厚 33.8 mm),下潜深度为 2000 m,1973 年改建时将耐压壳体换成钛合金(板厚 49 mm),下潜深度增加到 3600 m,其辅助箱及高压气器也采用 Ti-6Al-4VELI;②日本的“深海 2000”载人球壳采用钢材制

备,后续在建造“深海 6500”时选用钛材制备载人球壳以增加下潜深度。

在潜艇耐压壳体应用方面,俄罗斯最早选用钛材,是目前世界上使用钛材制造耐压壳体技术最先进最成熟的国家,其全钛核潜艇制造选用的唯一的钛材牌号为 IIT-3B 钛合金(对应国内牌号 TA17)。近年来,国内在建造潜艇时也更青睐于选用钛材,牌号主要集中于 TA17、TC4、TC4ELI、TC11、纯钛等。

除此之外,目前许多国家都正在建造大深度载人潜水器和大深度全钛武器装备。国内建造的“奋斗者”号全海深载人潜水器已于 2020 年 11 月 10 日成功挑战全球海洋最深处——马里亚纳海沟,深度达 10909 m,实现了中国人的深海梦,该深潜器的载人球壳材料为高强高韧损伤容限型钛合金,由宝钛股份制造;国内已开始建造全钛的大深度装备。

### 海水管路系统

海水管路系统复杂、通径规格多,所选材料要求具有耐海水腐蚀、强度高、疲劳性能好等特点,钛材均可满足,采用钛合金制造的管道较传统材料(碳钢、不锈钢、铜合金)优势显著<sup>[1,9-10]</sup>。

(1) 提高服役寿命,与舰船本体同寿命。俄罗斯对比研究了传统材料和钛材制造的管道系统服役寿命。结果表明,钛材与舰船同寿命,只需投入一次,且在使用过程中仅需简单维护即可;传统材料服役期限约 2~10 a,服役期内必须定期维修,甚至更换,尤其是在高速推动环境作用下,各种接头均会产生局部腐蚀。美国海军舰船应用数据显示,钛制管系寿命为 40 a,铜镍合金管系寿命只有 6~8 a。国内开展了采用“钛合金”替代“铜合金”制造海水管路系统的验证考核试验,宝钛提供的 TA2 钛无缝管材、配套管件和钛法兰在整套试验系统运行近 3 a 后,拆解检验管路及配套材料,均未发现有裂纹、孔洞和腐蚀等异常情况。

(2) 降低成本。采用钛合金部件,虽一次投入成本较高,但一次投入即可满足全寿命使用,使用过程中仅需简单维护保养,大量节省维修和维护费用。美海军舰船热交换器用的铜镍合金管每年大约需更换 97 km,而在 LPD17 两栖船坞运输舰的 2 个

表 2 我国舰船用钛及钛合金体系、性能及应用<sup>[1-3,6-9]</sup>

类别	牌号	合金成分	$R_m/MPa$	$R_{p0.2}/MPa$	$A/\%$	$Z/\%$	$KV_2/J$	性能特点	应用
低强	TA2	Cp-Ti	$\geq 400$	275~450	$\geq 25$	—	—	成型、焊接性能好,耐海水腐蚀	非耐压铸件、冷成型件、管路等
	TA3	Cp-Ti	$\geq 500$	380~550	$\geq 20$	—	—	成型、焊接性能好,耐海水腐蚀	非耐压铸件、冷成型件、管路等
	TA4	Cp-Ti	$\geq 580$	485~655	$\geq 20$	—	—	成型、焊接性能好,耐海水腐蚀	低强度承压壳体、冷成型件、结构件等
	Ti-31(TA22)	Ti-3Al-1Mo-1Zr-0.8Ni	$> 637$	$> 490$	$\geq 18$	$\geq 35$	$\geq 47$	成型、焊接性好,耐180℃海水腐蚀	换热器、冷凝器、泵体、管路、阀门、压力容器、承载焊接结构件等
	ZTA5	Ti-4Al-0.005B	$\geq 590$	$\geq 490$	$\geq 10$	$\geq 25$	$\geq 24$	铸造性能好	船舶推进、电子及辅助系统的泵、阀等
中强	TA18 M	Ti-3Al-2.5V	$\geq 620$	$\geq 515$	$\geq 15$	—	—	冷成型性、焊接性优异	舰船排气管、喷气偏导装置、舱盖、舱门等
	TA17	Ti-4Al-2V	685~835	$\geq 560$	$\geq 10$	—	—	良好焊接性能、抗腐蚀性能、冲击韧性高	封头、声呐导流罩骨架、结构件等
	TA5	Ti-4Al-0.005B	$\geq 685$	$\geq 585$	$\geq 12$	—	—	耐蚀、可焊性好	鱼雷发射装置、框架结构件、船舶各类机械部件等
	ZTi60	Ti-5.5Al-4Sn-2Zr-1Mo-1.0Ta-0.5Nd-0.5Si	$\geq 670$	$\geq 590$	$\geq 10$	$\geq 20$	$\geq 43$	铸造性能好、耐蚀、可焊	各种耐压系统铸件等
	Ti70(TA23)	Ti-2.5Al-2Zr-1Fe	$\geq 700$	$\geq 590$	$\geq 10$	—	—	耐蚀性、透声性、冷成型、焊接性好	透声罩、声呐导流罩、桅杆、冷成型件等
	Ti75(TA24)	Ti-3Al-2Mo-2Zr	$\geq 730$	$\geq 630$	$\geq 13$	$\geq 25$	—	耐蚀性、焊接性、成型性优异,断裂韧性、冲击韧性高	船舶结构、压力容器、高压管路、推进系统构件等
	Bti431	Ti-5Al-3Mo-1V	$\geq 770$	$\geq 650$	$\geq 9$	$\geq 25$	—	焊接性、铸造性良好	管材结构、紧固件、气瓶等耐压罐体等
	Ti91	Ti-3Al-1V-1Zr-1Fe	$\geq 700$	$\geq 660$	$\geq 20$	$\geq 35$	—	冷成型性、焊接性、耐蚀性、透声性优异	透声罩、声呐导流罩等
	ZTC4	Ti-6Al-4V	$\geq 835$	$\geq 765$	$\geq 5$	$\geq 12$	—	抗裂纹扩展、抗疲劳、铸造性能好	螺旋桨、可承受重载荷的壳体等高强铸件
	Ti80(TA31)	Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo	$\geq 880$	$\geq 785$	$\geq 10$	$\geq 40$	—	耐蚀、可焊	紧固件、结构件、壳体等
	高强	TC4ELI	Ti-6Al-4VELI	$\geq 860$	$\geq 795$	$\geq 10$	$\geq 25$	$\geq 24$	抗裂纹扩展、抗疲劳、耐腐蚀、焊接性好
TC4		Ti-6Al-4V	$\geq 895$	$\geq 830$	$\geq 10$	—	—	抗裂纹扩展、抗疲劳、耐腐蚀、焊接性好	耐压壳体、发动机外壳、蒸汽透平机叶片、蓄电器、船舶部件、紧固件等
TB8		Ti-15Mo-3Al-2.7Nb-0.25Si	825~1000	795~965	$\geq 6$	—	—	高强、塑性、韧性,耐蚀	高强紧固件、海水管路、弹簧、弹射装置等
TB9		Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	—	—	—	—	—	塑性好、强度和弹性高、淬透性好、耐蚀性和抗盐应力腐蚀性能优异	弹簧、紧固件等
TC11		Ti-6.5V-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si	$\geq 1010$	$\geq 910$	$\geq 8$	$\geq 23$	$\geq 24$	高强、高韧、耐高温	高压压气机转子、低压压气机叶片及轮盘等
TiB19		Ti-3Al-1Mo-5V-4Cr-2Zr	$\geq 1175$	$\geq 1130$	$\geq 5$	$\geq 10$	—	强度高、塑韧性好、焊接性好	船舶高压容器、筒体、机械部件等
Ti62A		Ti-6Al-2Sn-2Zr-3Mo-1Cr-1V	$\geq 1010$	$\geq 930$	$\geq 9$	$\geq 18$	$\geq 20$	高强、高韧、耐冲击	大深度耐压壳体、耐压罐体、紧固件等

注: 1)舰船用钛合金锻件规范 GJB 943A—2018; 2)舰船用钛及钛合金板材规范 GJB 944A—2018; 3)舰船用钛及钛合金棒材规范 GJB 9571—2018; 4)舰船用钛及钛合金铸件规范 GJB 9574—2018; 5)舰船用钛及钛合金无缝管材规范 GJB 9579—2018。

表3 国内外载人球舱和潜艇耐压壳体材质、制备工艺及材料性能

国家	牌号	成型、焊接工艺	拉伸性能				潜艇名称	设计深度/mm	使用年份
			$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	A/%	Z/%			
俄罗斯	BT6	瓜瓣/拼焊 手工TIG焊接	$\geq 800$	$\geq 850$	$\geq 10$	$\geq 20$	“和平”号	6000	1987
美国	Ti-6Al-4VELI	整半球冲压成型	$\geq 760$	$\geq 825$	$\geq 8$	$\geq 15$	新“阿尔文”号	6500	1994
		赤道缝电子束焊接 螺栓连接					Triton 36000/2	11000	2019
法国	Ti-6AL-4VELI	整半球冲压成型 螺栓连接	$\geq 795$	$\geq 860$	$\geq 10$	—	“鸚鵡螺”号	6000	1985
中国	TC4 ELI	整半球冲压成型 赤道缝电子束焊接	$\geq 795$	$\geq 860$	$\geq 10$	—	“深海勇士”号	4500	2017
	TC4	瓜瓣/拼焊 手工TIG焊接	$\geq 825$	$\geq 895$	$\geq 10$	—	“蛟龙”号	7000	2009
日本	Ti-6Al-4VELI	整半球冲压成型 赤道缝电子束焊接	$\geq 810$	—	—	—	深海“6500”号	6500	1989
俄罗斯	IIT-3B (对应国内TA17)	—	640~835	$\geq 590$	$\geq 9$	$\geq 15$	核潜艇	—	1960

主海水配管系统上选用了 Gr.2 纯钛管材，约 1000 多个管件，总长度 3350 m 以上，全寿命期节省成本达 1700 万美元。

综上所述，钛材在管路系统的使用，既可以减重、又可以实现与本体同寿命，同时，降低成本。近几年，国内已在 022 艇等多型号海洋装备上批量应用。

### 上层建筑

目前，在国内舰船上层建筑中也已有钛材应用

实例，如：桅杆用 Ti70(TA23)、雷达天线用 TA5 和 TA7 棒材、机库蒙皮和框架结构用 TA2 和 TA5 板材。

美海军在 LPD17 两栖船坞运输舰的关键部位上层建筑区也大量使用了钛，使其质量减轻约 50%，大大提高了该舰的稳定性<sup>[10]</sup>。

### 其他领域应用

除上述耐压壳体、管路系统和上层建筑大量用钛材外，国内外海洋装备上还有其他部件也有用钛，应用实例见表 4。

表4 国内外海洋装备其他部件用常见钛材

序号	用途	常用牌号	产品类型
1	泵、阀	纯钛、ZTC4、ZTA5、ZTi60	铸件
2	螺旋桨	ZTC4	铸件
3	声呐导流罩、透声罩	Ti70、IIT-3B	板材
4	框架结构	TA2、TA5、TC4	板材、型材
5	气瓶、耐压罐体	Bti341、TC4、TC4ELI、Ti62A	棒材、板材
6	冷却器/管/水套、冷凝器等	TA2、TA16、Ti75、Ti31	管材
7	紧固件、弹簧、销	TC4、TC4ELI、TC11、TB8、TB9(Ti38644)	棒材、丝材

### 结束语

钛合金不仅使海洋装备实现向“深、大、远、高、低”的方向发展，也可完全实现与海洋装备本体同寿命，是海洋装备的最佳选材<sup>[11-14]</sup>。目前，我国对钛材在海洋装备上的应用也越来越重视，用量也在不断的增加。深海耐压壳体、海水管路、气瓶、

上层建筑、框架等将成为海洋用钛的重点发展方向。

现阶段国内外钛材在船舶领域应用实例较多，但相关规范中材料体系并不完善。希望相关单位组织讨论并完善现行“钛制压力容器”、“材料与焊接”等相关规范中的材料体系，以便于设计人员参考。

## 参考文献

- [1] 钱江, 王怡, 李瑶. 钛及钛合金在国外舰船上的应用. 舰船科学技术, 2016, 38(11): 1
- [2] 杨英丽, 罗媛媛, 赵恒章, 等. 我国舰船用钛合金研究应用现状. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(s2): 538
- [3] 杨英丽, 苏航标, 郭荻子, 等. 我国舰船钛合金的研究进展. 中国有色金属学报, 2010, 20(s1): 1002
- [4] 孟祥军. 降低钛材价格、促进钛在舰船上的应用. 钛工业进展, 2003, 20(6): 39
- [5] 姜建伟, 曲银化, 刘正红. 我国航海级钛及钛合金现状思考. 船舶材料与工程应用学术会议论文集//中国造船工程学会. 敦煌, 2012
- [6] 陈军, 赵永庆, 常辉. 中国船用钛合金的研究和发展. 材料导报, 2005(6): 67
- [7] 王镒, 祝建雯, 何瑜, 等. 钛在舰船领域的应用现状及展望. 钛工业进展, 2003(6): 42
- [8] 周文萌. 船用钛合金装备材料及制备技术研究进展评述. 化工管理, 2017(21): 92
- [9] 陈军, 王廷询, 周伟, 等. 国内外船用钛合金及其应用. 钛工业进展, 2015, 32(6): 8
- [10] 匡蒙生, 胡伟民, 郭爱红, 等. 钛及钛合金在美海军舰船上的应用. 鱼雷技术, 2012, 20(5): 331
- [11] 李文跃, 王帅, 刘涛, 等. 大深度载人潜水器耐压壳结构研究现状及最新进展. 中国造船, 2016, 57(1): 210
- [12] 王文杰. 高性能先进舰船用合金材料的应用现状及展望. 材料导报, 2013, 27(7): 98
- [13] 范丽颖, 刘俊玲, 安红. 钛在海洋工程上的应用现状及前景展望. 中国金属通报, 2006(Z2): 25
- [14] 方志刚, 刘斌, 李国明, 等. 舰船装备材料体系发展与需求分析. 中国材料进展, 2014, 33(7): 385

**作者简介:** 海敏娜 (1987—), 女, 陕西宝鸡人, 工程师, 硕士, 2015年毕业于西安建筑科技大学材料加工工程专业, 工作于宝鸡钛业股份有限公司, 主要从事与海洋装备领域用钛相关的研究。通信地址: 721013 陕西省宝鸡市渭滨区高新大道 88 号, E-mail: [haiminna@126.com](mailto:haiminna@126.com)。