

舰船及海洋工程用钛合金研究进展

杨晶^{1,2,3}、李涵^{2,3}、汪启明^{2,3}、刘向宏^{*2,3}、孙广达^{2,3}、詹梅¹、郑泽邦¹、和永岗^{2,3}、王涛^{2,3}、杜予暄^{2,3}、王凯旋^{2,3}

(1 西北工业大学凝固技术全国重点实验室, 陕西 西安 710072)

(2 西部超导材料科技股份有限公司, 陕西 西安 710018)

(3 特种钛合金材料制备技术国家地方联合工程实验室, 陕西 西安 710018)

摘 要: 随着海洋强国战略的深入推进, 钛合金因其低密度、高比强度、优异耐蚀性, 在载人深潜器、海水管路系统展现出良好的减重和耐腐蚀效果, 延长装备服役寿命, 降低维护保养费用和综合使用成本, 在舰船及海洋工程领域展现出重要应用价值。本文首先阐述了舰船及海洋工程对钛合金大型化、高强高韧、耐腐蚀和长时服役性能等的核心要求。随后, 重点围绕深潜器耐压壳体、海水管路系统、动力系统等不同服役工况环境, 系统介绍 Ti80、TC4 等典型钛合金的成分、组织、性能及其工程应用研究进展。此外, 还着重探讨了钛合金在深海环境下的应力腐蚀行为、蠕变及疲劳等长时力学性能的研究现状。当前, 钛合金在真实海洋环境下的长时性能数据仍较为匮乏, 且尚未形成统一的评价体系和标准。本文指出了钛合金在海洋领域规模化应用仍存在的制造成本高、深海环境下材料实验数据不足等关键问题与技术挑战, 仍需进一步开展系统化研究, 以支撑我国海洋重大装备的高质量发展。

关键词: 舰船及海洋工程用钛合金; 大型化; 应力腐蚀; 长时力学性能

中图分类号: TG???

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)0?-0???-0?

1 引言

海洋强国战略的深入推进对舰船及海洋工程装备的性能提出了前所未有的高标准。高性能、高可靠性、长寿命等已成为现代舰船及海洋工程装备发展的核心方向。舰船材料的选择直接关系到装备的综合性能和全生命周期可靠性, 传统的船用材料如钢、不锈钢和铝合金等虽然技术成熟且成本相对较低, 但在强度-塑性-韧性匹配和耐腐蚀性等方面已逐渐难以满足深海极端服役环境下的性能需求。

钛及钛合金因其卓越的综合性能, 已在航空航天、生物医疗、高端装备等领域实现广泛应用, 且各领域正朝着高性能专用钛合金方向持续发展。在航空航天领域, 为满足高载荷、高温服役需求, 钛合金研发聚焦高强韧和高温性能, 并将其用于飞机机身主承力件、起落架、航空发动机及航天器结构件等, 以实现轻量化与极端环境下的服役可靠性提升; 在生物医疗领域, 为更好适配人工关节、骨科植入等医用场景, 目前正重点发展低模量、高生物相容性钛合金, 降低力学性能不匹配风险; 在化工、能源行业, 高耐蚀、抗疲劳钛合金成为极端腐

蚀工况装备的核心选材, 保障其长期稳定服役。上述领域专用钛合金的研发思路与产业化技术积累, 也为其在舰船及海洋工程领域的应用提供了重要参考与技术支持。钛及钛合金不仅具有低密度、高比强度的特性, 更在海水及海洋大气环境中兼具优秀的耐腐蚀性能^[1,2]。同时, 钛合金较小的线膨胀系数、良好的抗冲击性能以及在高温环境下均能保持优良的综合力学性能等特性, 使其在耐压壳体、海水管路系统、动力系统等关键部位具有较高的应用价值。早在上世纪, 前苏联和美国便在船舶和海洋工程领域大规模应用钛合金制造主承力构件和深海管路等, 其技术积累与工程实践已充分验证了钛合金在该领域应用的巨大潜力与可靠性。

近年来, 随着我国钛工业技术的飞速发展, 在钛合金熔炼、锻造及轧制等加工技术及基础理论研究方面都取得了巨大进步, 逐步构建了自主的舰船及海洋工程用主干钛合金材料体系, 并在多型装备上实现了成功应用。

本文首先介绍了舰船及海洋工程用钛合金的核心要求, 其次围绕不同构件服役环境特征, 系统阐述了我国舰船及海洋工程用钛合金的研究进展, 包括深潜器耐压壳体、海水管路及动力系统等, 并辅以实例说明; 此外,

收到初稿日期:

基金项目: 陕西省重点研发计划 (2026CY-YBXM-579)、秦创原引用高层次创新创业人才项目 (2026RC-YJRC-05)

作者简介: 杨晶, 男, 1990 年生, 高级工程师, 陕西 西安 710018, 电话: 029-86514525, E-mail: cailiaoyangjing@163.com

通讯作者: 刘向宏, 男, 1967 年生, 教授, E-mail: xhliu@c-wst.com

着重探讨了对钛合金深海应力腐蚀性能和蠕变疲劳等长时力学性能的研究现状。旨在为钛合金领域科研和工程技术人员提供一定参考。

2 舰船及海洋工程用钛合金的核心要求

舰船及海洋工程装备目前在我国的战略地位愈发重要,对钛合金材料的综合性能及制造技术也提出了更高要求。舰船及海洋工程用钛合金构件正呈现出显著的大型化、整体化发展趋势,设计需求已经实现从单重“吨级”向“十吨级”的跨越^[3,4],这一趋势对制造技术体系提出多方面挑战。首先是铸锭的大型化,需突破大吨位、高均质化的熔炼技术,这是后续所有加工的根基。继而,在构件制备环节,更强调超宽/超厚板材的轧制与组织均匀性控制、大尺寸筒形件与球壳的成型,以及大口径超长无缝管材等的高效制备。以美国“新阿尔文”号为例,“新阿尔文”号钛合金球壳由两个半球通过电子束焊接而成,每个半球由一个重约 8 吨的钛合金铸锭制备得到^[5]。因此,构件的大型化不仅是对设备能力的考验,更是对材料基础研究、工艺创新能力与全流程质量控制体系的综合检验。

舰船及海洋工程用构件作为在严苛海洋环境中长期服役的复杂系统,其不同构件承受的服役环境、载荷类型及性能需求存在显著差异,这对材料综合性能提出了极为苛刻的要求^[2]。

首先,静态力学性能是保障构件安全服役的基础,足够的屈服强度可有效抵抗静水压力等载荷,经过几十年的研究开发,俄罗斯、美国、我国等均已形成各自特点的主干钛合金体系^[6],可满足舰船及海洋工程钛合金的强度需求。如俄罗斯的船用钛合金系列强度可达 490 MPa 至 785 MPa 级。我国也已形成屈服强度 300 MPa 到 1000 MPa 以上的钛合金体系,并划分为低强、中强、高强钛合金。我国典型的钛合金牌号和性能如下表 1 所示,可见单纯追求高强度并非舰船结构的唯一目标。较高的延伸率意味着材料在破坏前能发生显著塑性变形,从而吸收更多能量,避免脆性断裂。因此,钛合金良好的强塑性匹配是其成为舰船及海洋工程用钛合金的理想材料的原因之一。

表 1 我国典型钛合金牌号及力学性能

Table 1 Typical Mechanical Properties of Alloy

分类	牌号	R _{p0.2} /MPa	R _m /MPa	A/%
低强钛合金	TA2	≥200	≥400	≥20
	Ti31	~500	~600	≥15
中强钛合金	Ti75	≥700	~800	~20
	Ti80	≥750	≥850	≥15
高强钛合金	Ti62A	≥950	≥1050	≥10
	Ti-B19	≥1200	≥1250	≥6.5

其次,抗冲击性能也是舰船及海洋工程用钛合金的核心性能,冲击韧性直接反映了材料抵抗突然过载和抑制裂纹快速扩展的能力,是衡量材料韧脆转变倾向的关键参数,对在低温深海环境中服役的构件尤为关键。目前我国也已制定了部分舰船及海洋工程用钛合金的技术标准,如 GJB 944A 明确规定了舰船用钛合金板材的室温拉伸性能、室温冲击性能、弯曲性能等力学性能指标。除上述的短时力学性能外,深海服役环境,还需考虑疲劳和蠕变等长时力学性能,这些性能指标直接决定了材料在深海环境下的使用寿命。然而这些指标在舰船及海洋工程用钛合金领域中尚未形成完整体系和相关标准。

此外,考虑到舰船用钛合金的特殊服役环境,海洋环境对材料的腐蚀作用是舰船装备面临的最严峻挑战之一^[7],钛合金的选用很大程度上源于其卓越的耐蚀性。钛合金在海水中能形成稳定、致密的氧化膜,使其具有极佳的抗腐蚀性能。然而,在静拉应力和特定腐蚀介质的共同作用下,材料可能发生应力腐蚀开裂^[8]。因此,要求材料具有极低的应力腐蚀(SCC)敏感性,以确保材料长期服役安全。

3 不同服役环境钛合金选择及研究进展

3.1 深潜器耐压壳体

深潜器耐压壳体长期服役于高压、低温及复杂应力状态的深海极端环境中,对材料的综合性能有严苛的要求^[9]。首先是壳体的优良强塑性匹配要求,壳体需承受巨大的静水压力,材料的高屈服强度是减小壳体壁厚、实现结构轻量化的首要前提。然而,单纯追求高强度易导致材料塑性下降,引发脆性断裂风险。因此,必须在保证材料高强度的前提下,维持足够的延伸率,以确保壳体在受到高压突变时可以通过塑性变形吸收能量,避免灾难性失效的发生。此外,壳体材料还需要良好的冲击韧性,高冲击韧性意味着壳体在承受冲击载荷时能通过裂纹尖端塑性变形吸收大量能量,有效防止裂纹扩展。

3.1.1 Ti80 钛合金

Ti80 钛合金是我国自主研发的一种 800 MPa 级近 α 型钛合金,其名义成分为 Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo,具有优异的强塑性匹配和抗冲击性能,退火后典型显微组织为双态组织,如图 1 所示。与 TC4 系列合金相比,Ti80 合金通过优化合金元素配比,在保持了高强度的同时拥有良好的塑性和冲击韧性,已成为深海耐压壳体结构的首选材料。

近年来,舰船用大规格钛合金宽厚板材的需求越来越多,各家钛企也投入资源开展了大量工程化研制工作。西部超导材料科技股份有限公司(以下简称西部超导)依托多年 Ti80 钛合金的工程化技术积累,2022 年在国

内率先突破了 8 吨级 Ti80 钛合金铸锭均质熔炼技术和单重 4 吨级宽厚板材控形控性技术, 相关成果已成功应用于新一代海洋工程装备; 2024 年在国内首先突破了 15 吨级 Ti80 钛合金铸锭熔炼和单重 8 吨级宽厚超大规格板材的制备和强韧性匹配技术, 相关性能均满足指标要求。图 2 为西部超导公司制备的 4 吨级和 8 吨级 Ti80 合金板材实物图。

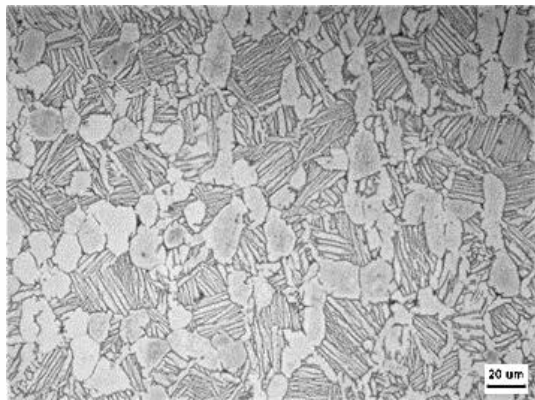
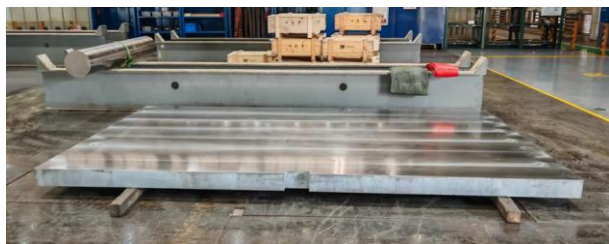


图 1 Ti80 合金的微观组织图

Fig.1 Microstructure of Ti80 alloy



(a) 4 吨级 Ti80 板材

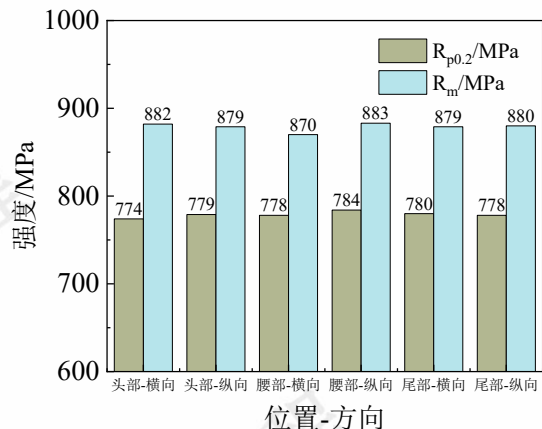


(b) 8 吨级 Ti80 板材

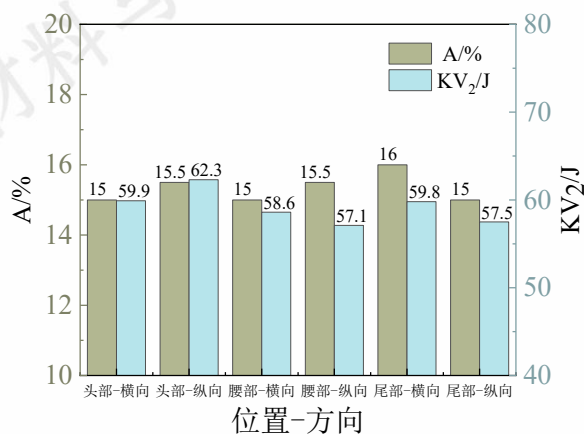
图 2 西部超导公司制备的不同规格 Ti80 板材

Fig.2 Ti80 plates of different specifications fabricated by Western Superconducting Technologies Co., Ltd.

图 3 为西部超导公司制备的单重 8 吨级 Ti80 钛合金宽厚板材不同位置的典型力学性能, 板材头部、中部和尾部的横纵向性能均能满足 GJB 944A 的标准要求, 且无明显各向异性, 板材均匀性良好。



(a)屈服强度和抗拉强度



(b)延伸率和冲击功

图 3 8 吨级 Ti80 钛合金板材不同位置的力学性能

Fig.3 Mechanical properties of 8 ton Ti80 titanium alloy plate at different positions

3.1.2 TC4 系列钛合金

TC4 钛合金 (即 Ti-6Al-4V), 是目前各国深潜器耐压壳体的主要材料之一。在 TC4 钛合金基础上改良的 TC4 ELI 钛合金, 其主要特点是通过严格控制间隙元素的含量, 以提高合金的塑性和断裂韧性^[10,11]。2017 年, 我国自主研发建造的 TC4 ELI 合金球壳成功应用于“深海勇士号”载人深潜器, 其最大的下潜深度可达 4500 m^[12]; 我国从俄罗斯引进的瓜瓣成型的 TC4 ELI 载人球壳的最大下潜深度可达 7000 m^[13]。

在大规格铸锭及板材制备技术方面, 西部钛业有限责任公司采用真空自耗电弧熔炼工艺, 成功制备出单重达 12.8 吨, 直径 1020 mm 的高均质低间隙的 TC4 钛合金铸锭, 并成功制备出厚度 42mm, 幅宽超过 2500mm 的超大规格 TC4 钛合金板材, 如图 4 所示, 组织性能均达到了相关设计要求。



图4 西部钛业有限责任公司生产的大规格 TC4 板材

Fig.4 Large-scale TC4 plates produced by Western Titanium Technologies Co., Ltd.

在突破大规格板材制备技术后,为了进一步实现降本增效,针对 TC4 大规格钛合金的低成本制造,在铸锭熔炼方面,西部钛业公开了一种采用高比例钛残料制备大规格 TC4 钛合金铸锭的方法,提高了 TC4 铸锭的成材率及生产效率,产生较大的经济效益,降低了生产成本^[14];此外,西部钛业公司还公布了一种 TC4 钛合金细等轴组织大规格棒材短流程制备方法,采用“大吨位压力机热锻制坯+大吨位精锻机径向成型”的工艺,使得晶粒充分破碎细化,提高了晶粒细化效率,显著减少了锻造火次,缩短了制备流程且提高了 TC4 钛合金棒材的成材率^[15]。

3.1.3 其他高强度钛合金

Ti90 钛合金是西北有色金属研究院设计的一种新型 Ti-Al-Sn-Zr-Mo-V-Nb 系近 α 钛合金^[16],屈服强度可达 900 MPa 级,是集可加工性、可工业化生产为一体的新型海洋工程用钛合金,具备良好的应用前景。西北有色金属研究院和西部钛业有限责任公司通过开坯锻造、两相区多火次锻造及成品轧制制备了 Ti90 钛合金棒材,并开展了热处理工艺对其组织和性能影响的研究^[17],发现合金在 β 单相区退火并水冷后, β 晶粒内析出了细针状 α' 马氏体相,如图 5 所示,这显著提高了合金强度,同时保持了较好的塑性。

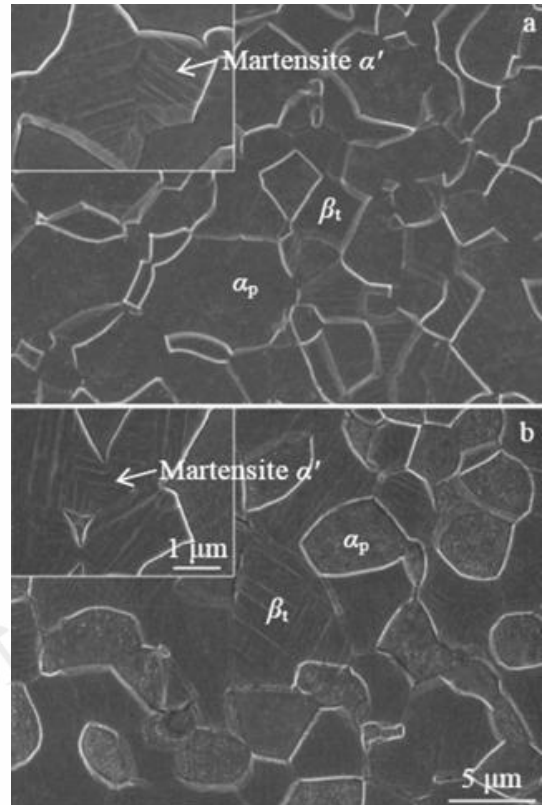
图5 不同热处理制度 Ti90 合金微观组织图^[17]

Fig.5 Microstructures of Ti90 alloy under different heat treatment

Ti62A 合金是近年来中国科学院金属研究所和宝鸡钛业股份有限公司为我国“奋斗者”号全海深载人潜水器用载人舱研制的一种更高性能的钛合金^[18,19],其抗拉强度可突破 1000 MPa。由该合金打造的国之重器“奋斗者号”在太平洋马里亚纳海沟创造了 10,909 m 的中国载人深潜新纪录,使中国成为世界上第二个实现万米载人深潜的国家^[20]。Ti62A 合金冲击韧性的进一步优化,可实现其在海洋工程领域更大规模的使用。

Ti-B19 钛合金是西北有色金属研究院自主研发的一种高强度近 β 型钛合金^[21],具有优异的强韧性匹配、良好的焊接性能和出色的耐海水腐蚀能力,在航空、航天及海洋工程领域具有重要应用价值。Ti-B19 合金的性能对热处理制度高度敏感,其核心机理源于时效过程中复杂的相变路径与显微组织演变。该合金经 β 区固溶处理后在两相区时效,抗拉强度可达 1250 MPa 以上,其典型性能如表 2 所示^[1]。长时间的时效处理以保证复杂相变过程的充分完成,实现了合金良好的强韧性匹配。

表2 Ti-B19 合金典型力学性能^[1]

Table 2 Typical Mechanical Properties of Ti-B19 Alloy

Heat treatment	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	A/%	Z/%
900°C/0.5h,AC+ 530°C/24h,AC	1205	1255	6.7	20
900°C/0.5h,AC+ 520°C/24h,AC	1220	1275	8.3	21.5

3.1.4 国外深潜器耐压壳体用钛合金研究进展

俄罗斯深潜器耐压壳体用钛合金最经典牌号为 BT6 钛合金,成分对应国内牌号 TC4,退火后屈服强度可达 850 MPa,且延伸率超过 10%。此外,俄罗斯中央材料研究所也已研制出部分中强及高强钛合金可用于深潜器耐压壳体的建造,均为近 α 钛合金,主要牌号、成分及力学性能如下表所示^[22]。

表 3 俄罗斯壳体用钛合金典型牌号及性能

Table 3 Typical grades and properties of titanium alloys for shells

in Russia				
牌号	合金化元素	R _{p0.2} /MPa	R _m /MPa	A/%
PT-3V	Al-V	540	638	5
19	Al-Mo-Zr-Nb	618	687	5
5V	Al-V-Mo-Zr	687	756	5
37	Al-Mo-Zr-Nb	736	786	5

美国将常用的钛合金按照 ASTM B265 的等级进行划分,包括 Gr.1、Gr.2、Gr.3 等,以 Gr.23 即 TC4-ELI 钛合金工程化验证最完善^[23]。在此基础上,美国还开发了一种近 α 合金 Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo,其屈服强度可达 700 MPa 级^[24];美国 Timet 公司与美国海军联合开发了一种近 α 钛合金,命名为 Ti5111,其名义化学成分为 Ti-5Al-1Zr-1Sn-1V-0.8Mo-0.1Si^[25],该合金在保持较好强度的同时,冲击韧性约为 Ti-6Al-4V 的 3 倍,可用于深潜器耐压壳体的建造。可见各国在原有钛合金牌号体系日趋成熟的同时,均在加大新型钛合金的设计开发。

3.2 海水管路系统

海水管路系统作为船舶及海洋工程装备的重要组成部分,是以海水为介质构建的综合性管道网络系统。其核心功能涵盖海水抽取、输送分配及废水排放三大环节:通过主泵从船舶舷侧或海洋中汲取海水,经管道网络输送至冷却系统、消防装置等用海设备,最终将使用后的海水或处理废水排回海洋环境。该系统长期处于高盐度、高湿度及复杂应力耦合的严苛工况,对材料的耐久性提出了极高的要求。传统材料如铜合金、不锈钢等在强腐蚀性的海水介质中面临如点蚀破坏、应力腐蚀开裂和电偶腐蚀等挑战。钛及钛合金凭借其优异的耐腐蚀性和轻质高强的特性,成为海水管路系统的理想替代材料,展现出广阔的应用前景。国内外已开始探索并实践钛合金在海水管路系统中的应用,如美国、俄罗斯等国家已实现规模应用,国内也在部分小型船舶上进行了系统性的尝试,并取得了显著的应用效果。

海水管路系统用钛合金应具有卓越的耐腐蚀性能,虽然钛及钛合金在海水环境下其表面会形成一层致密且附着力强的氧化膜,但依旧存在电偶腐蚀、应力腐蚀等问题。

3.2.1 工业纯钛

工业纯钛的钛含量超过 99%,含有微量铁、氧、碳、氮等元素,如俄罗斯的 PT-1M,美国的 Gr.2,我国的 TA2 工业纯钛,此类钛合金耐蚀性较好,均是海洋管路系统的主流用材之一,广泛应用于船舶、海洋平台、海水淡化等领域,王广夫等^[26]将 TUP 紫铜、B10 铜镍合金、TA2 钛合金三种海水管路用材的力学和腐蚀性能对比,发现 TA2 合金耐蚀性最好,且具有最高的抗拉强度。

目前各国针对海水管路用钛合金均已成熟的工程实践和材料标准。如中国船舶集团第七二五研究所牵头构建了舰船海水管路系统用钛材应用标准体系^[27],针对海水管路产品形式的多样性需求,建立了涵盖 TA2 钛合金板材、棒材、管材、丝材、铸件及管件等全品类的标准化框架。然而,较高的初始成本一直是制约其在海水管路系统大范围应用的重要因素之一,各国也针对海水管路用纯钛的低成本问题进行一系列实验及验证。如相比于传统的熔炼-锻造-挤压-轧制工艺,宝鸡有色金属加工厂直接对纯钛铸锭进行热挤压,缩短管材的制备工艺流程,大大提高其经济效益^[28];陈晨等采用斜连轧技术制备钛合金无缝管,在节能高效的同时可改善合金的微观组织^[29]。在短流程工艺制备方面,美国以粉末冶金工艺制备管坯为核心,通过常用的氢化脱氢法制备低成本粉末,然后通过冷等静压成型、真空烧结制备坯料,最终采用旋压成型工艺制备出无缝纯钛管材,材料利用率超过 90%^[30]。

3.2.2 TA10 钛合金

TA10 钛合金是在纯钛基础上研制的一种低合金化近 α 型钛合金,其成分设计为 Ti-0.3Mo-0.8Ni。微量的钼元素和镍元素的添加不仅通过固溶强化机制提高合金强度,更关键的是显著改善了其耐腐蚀性能^[31];TA10 钛合金的微观组织主要由 α 相构成, α 相稳定的晶体结构赋予材料良好的室温强度与加工性能,同时少量弥散分布的第二相粒子进一步强化了合金基体,使其综合性能得到提升。目前,TA10 钛合金已成为舰船及海洋工程用钛合金体系的重要组成部分之一。

然而,现有关于 TA10 钛合金的研究大多集中在铸态的电子束(EB)熔炼以及后续开坯与反复锻造变形工艺上,多道次加工工序导致生产成本居高不下。为突破这一瓶颈,亟需优化生产工艺以降低制造成本并提升生产效率。史亚鸣等^[32]在带钢热连轧机组上开展 TA10 钛合金带的轧制工艺优化研究,通过创新性地结合带钢轧制工艺设计理念,直接在热连轧机上实施 TA10 钛合金带的热连轧生产试验,成功制备出综合性能良好的 TA10 板材,为解决传统工艺成本高、效率低的问题提供了新路径。

3.2.3 Ti31 合金

Ti31 钛合金是西北有色金属研究院“七五”、“八五”期间自主研发的一种 Ti-Al-Zr-Mo-Ni 系的近 α 型钛合金, 专为海洋工程与船舶制造领域的特殊需求而设计。Ti31 合金优势在于其卓越的环境适应性, 可在常温常压、高温高压等多种环境下稳定服役, 可适用于制造板材、棒材、管材、饼材及各类精密零部件, 是海水管路系统的理想材料^[33]。Ti31 合金室温屈服强度可达 490 MPa, 抗拉强度突破 600 MPa, 同时还保持着 18% 的较高延伸率, Ti31 合金制备的通海管路、法兰等关键部件已成功应用于舰船装备^[34], 经受住了海水腐蚀、压力波动等严苛工况的考验。

目前关于 Ti31 钛合金的研究多集中在新制备工艺上。中国核动力设计研究院采用选区激光熔化 (SLM) 成形制备 Ti31 钛合金, 发现沉积态和退火态的强度均高于相应锻件, 退火态的延伸率也达到了锻件的水平^[35]; 通过调控热处理工艺, SLM 制备的 Ti31 合金冲击吸收能可接近 80J, 有良好的综合力学性能^[36]。虽然该工艺制备的 Ti31 合金尚未大规模工程化应用, 但已表现出较好的应用前景。

3.3 动力系统和特种装备等

在船舶和海洋工程领域, 除了遍布全船的壳体装备和海水管路系统外, 动力系统和其他特种装备的性能表现也决定了其最终的使用性能。其中, 对于推进器、传动轴等动力系统部件和声纳导流罩等特种装备, 对材料综合性能提出了更高要求, 即力学性能、工艺性能与耐腐蚀性的平衡。

3.3.1 Ti75 钛合金

Ti75 钛合金是西北有色金属研究院联合中国船舶集团第七二五研究所、宝鸡有色金属加工厂共同研发, 属于 Ti-3Al-2Mo-2Zr 系钛合金^[1,34], 该合金兼具中等强度与优异的断裂韧性及冲击韧性, 同时具备良好的加工塑性和耐腐蚀性, 专为深海高压及化工腐蚀环境设计。在船舶和海洋工程方面, 除了可用于制造深海载人潜水器耐压壳体和海底管道外, 还可用于船舶推进器叶片等动力系统部件, 目前我国已具备 Ti75 钛合金板材、饼材、棒材等多种规格产品的工业化生产能力。如西部超导公司公开了一种超大规格 Ti75 钛合金饼坯的锻造方法^[37], 经过多次火的改锻, 制备出的 Ti75 钛合金饼坯直径可达 1470 mm, 单重接近 6 吨, 图 6 为饼坯实物图。且该饼坯有良好的综合力学性能, 屈服强度超过 700 MPa, 抗拉强度可达 800 MPa, 延伸率接近 20%, 冲击功突破 60 J, 且批次稳定性较好, 连续 3 批 Ti75 钛合金饼坯力学性能水平如图 7 所示。



图 6 西部超导公司生产的大规格 Ti75 合金饼坯实物图

Fig.6 Picture of the large-scale Ti75 alloy bloom produced by Western Superconducting Technologies Co., Ltd.

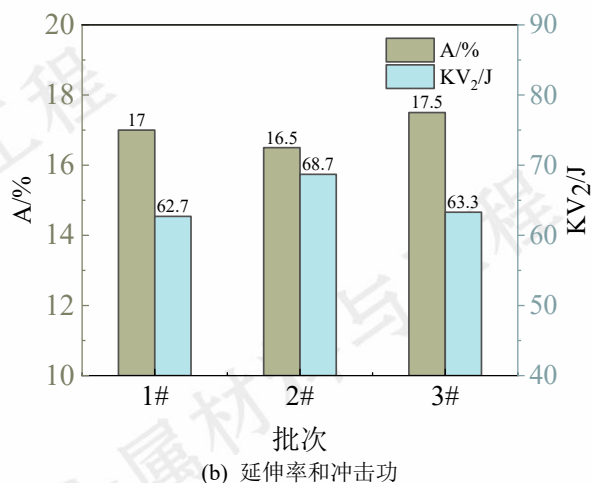
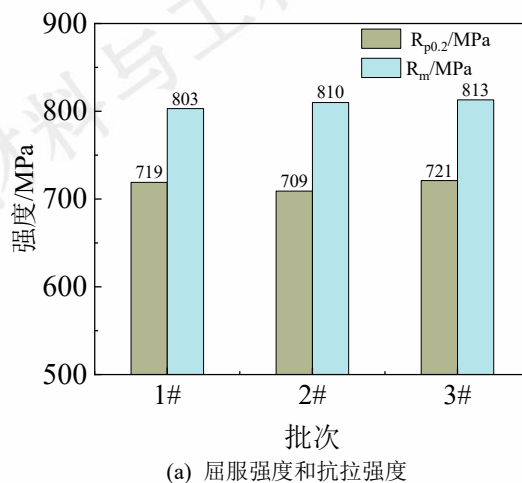


图 7 三批 Ti75 饼坯的力学性能

Fig.7 Mechanical properties of the three Ti75 alloy blooms

3.3.2 Ti70 钛合金

Ti70 钛合金是我国自主研制的近 α 型中强耐蚀钛合金, 其名义成分为 Ti-2.5Al-2Zr-1Fe, 创新性的采用低成本铁元素替代部分贵金属, 在确保综合性能基本不受影响的前提下, 实现了生产成本的显著降低, 为海洋工程及船舶制造领域提供了更具性价比的材料解决方案。

Ti70 钛合金凭借其优异的透声性、耐蚀性及其他特殊物理性能, 成为声纳导流罩制造的理想材料。该合金

在服役过程中表现出显著的热稳定性,即使在温度升高条件下,其力学性能仍保持稳定,有效避免了因热应力导致的导流罩裂纹风险^[38]。目前,Ti70 钛合金制备的声纳导流罩已成功应用于多型舰船装备,经受住了复杂海洋环境的严苛考验,展现出可靠的工程应用价值。

西部钛业公司研究了热加工工艺对 Ti70 板材组织和力学性能的影响^[39],对 Ti70 钛合金进行了不同轧制工艺条件下的轧制试验,并结合后续的退火试验,结果表明适当降低成品火次轧制温度,在较低温度下发生了较大变形,随后退火后再结晶更加充分,组织更均匀细小,最终使板材强度提高约 30 MPa。

4 钛合金服役性能研究进展

深海环境对比于浅海环境,是典型的复杂腐蚀系统,静水压力、温氧条件、化学介质等因素协同作用,显著改变钛合金的腐蚀行为与力学响应。首先是静水压力的主导作用,它随下潜深度呈线性增长,每增加 100 米约提升 1 MPa,该压力会直接加速钛合金的电化学腐蚀过程。与此同时,低温低氧环境形成加剧效应,深海区域温度稳定在 2-4℃ 且溶解氧含量低于 4mg/L,这种条件会加剧钛合金的局部腐蚀。此外,深海环境中的化学介质进一步恶化钛合金的服役条件。深海中的硫化物主要源于热液喷口与有机物分解,会严重破坏钝化膜稳定性。深海装备服役期间,钛合金构件需同时承受三类载荷:静水压力引发的持续压应力、腐蚀环境工作过程中的交变疲劳应力和蠕变变形、制造与装配产生的残余应力。钛合金材料长期服役于海水等复杂环境时,其性能考量需超越常规力学指标的范畴。除强度、塑性、冲击韧性等具有明确标准要求的力学性能外,应力腐蚀性能、蠕变行为及疲劳特性等长时力学性能同样对材料可靠性具有决定性影响。然而,当前针对这些关键性能的统一标准体系尚未建立,相关研究亦未形成系统化的理论框架。基于此,本章将从机理分析与研究进展的视角,深入阐释船用钛合金服役性能的重要性,旨在为该领域钛合金材料的深化应用提供坚实的理论支撑与实践指导。

4.1 应力腐蚀

应力腐蚀开裂(SCC)是材料在应力和特定腐蚀环境协同作用下引发的脆性断裂现象。如 B. Pazhanivel^[40]等已证明模拟的氯化钠腐蚀环境会使 TC4 合金腐蚀开裂敏感性增加。而相较于浅海或实验室模拟环境,深海环境具有高静水压力、低温及其它特殊化学环境等复杂特征,因此钛合金在深海服役环境下的应力腐蚀性能直接影响其在舰船及海洋工程使用的可靠性与适用性。

针对该领域应用的钛合金,其深海 SCC 机理研究主要集中在以下两种及其交互作用^[41]:(一)阳极溶解机理:

该机理认为,在应力作用下,材料表面的保护性氧化膜发生局部破裂,暴露出活化点,这些活化点作为阳极,发生快速溶解并萌生裂纹;(二)氢致开裂机理:这是目前公认的导致钛合金深海 SCC 的最主要机理,腐蚀过程中产生的氢原子在应力驱动下,扩散并富集在裂纹尖端的塑性区或界面处,如 Joseph 等^[42]在 Ti6246 合金热盐应力腐蚀开裂的研究中观察到析出氢化物的存在,这种富集会降低原子键合力并促进局部塑性变形,从而降低裂纹扩展所需的应力强度因子,即 SCC 门槛值,应力腐蚀开裂示意图如图 8。钛合金应力腐蚀开裂因素主要与材料本身(如合金组织、成分等),应力条件和环境因素有关。

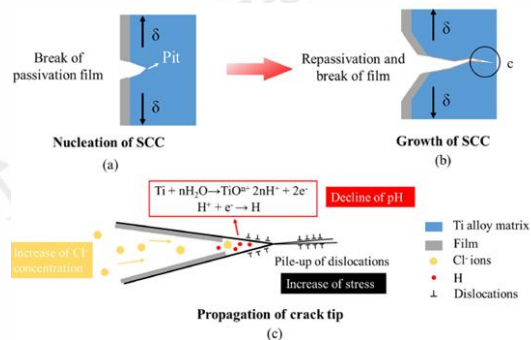


图 8 应力腐蚀开裂示意图 (a)腐蚀裂纹形核 (b)裂纹扩展 (c)裂纹尖端的扩展^[41]

Fig.8 Schematic showing the SCC caused by anodic dissolution and hydrogen evolution: (a) Neacleation of SCC, (b) growth of SCC and (c) propagation of crack tip

钛合金的微观组织对其应力腐蚀性能有直接影响。有研究表明^[43],在应力腐蚀过程中,H 元素易被 Ti 吸收,且 H 元素在 β 相中的扩散速度和溶解度远高于 α 相,这说明 α 相在深海应力环境下更容易被腐蚀。有学者在对 TC4 ELI 合金的研究中也发现这一现象^[44],通过调控热处理工艺制备出含不同 β 相含量的合金,发现 β 相含量高时,合金的耐蚀性更好。除了 α 与 β 相的应力腐蚀性能差异外,不同 α 相亦有差异,Wang^[45]等制备了不同组织的 Ti-4Al-6Mo-2V-5Cr-2Zr 合金,在裂纹起裂区域观察到明显的 Al 元素富集,说明 α 相优先被腐蚀,如图 9 所示。

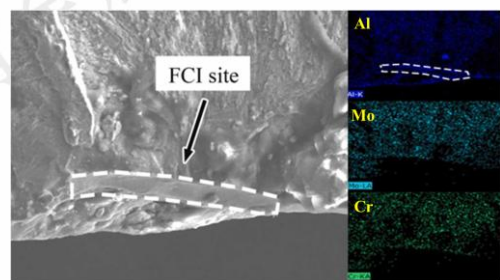


图 9 裂纹起裂部分的元素分布^[45]

Fig.9 Elemental Distribution at the Crack Initiation Site

基于上述研究, β 相应力腐蚀性能优于 α 相, 这说明钛合金应力腐蚀性能与合金元素成分有着直接关系。有研究表明^[46], β 稳定元素如 V、Mo、Nb 等可以提高钛合金应力腐蚀抗力, α 稳定元素中 Al 含量增加会形成有序相 Ti_3Al , Sn 增加会扩大含有 Ti_3Al 的相区, Ti_3Al 会改变变形时形成的位错亚结构, 出现局部化平面滑移, 造成表面氧化膜破裂, 降低其耐蚀性。这也为新型抗应力腐蚀钛合金设计提供新思路, 如 Stephen^[47]设计了 Cr 改性 TC4 合金, 合金具有良好的 α -板条结构, 有良好的抗应力腐蚀性能。此外, 元素偏析也会导致 α 相和 β 相之间形成微孔, 导致 α 相作为阳极优先溶解。

应力条件也是影响钛合金应力腐蚀的重要因素之一, 褚洪^[48]在钛合金应力腐蚀中提出: 残余应力和外部应力都会影响其应力腐蚀性能, 且应力水平越高, 出现应力腐蚀裂纹时间越短^[49]。725 所许亚丽等^[50]对 Ti80 合金施加预应变, 发现在非均匀变形时, 位错密度显著增大, 缺陷区域积累高应变, 有利于裂纹形核扩展。

深海环境本身也从物理化学等多维度影响着材料的应力腐蚀性能。Liu^[51]等揭示了静水压力对变形钛合金钝化膜的影响, 较高的静水压力通过降低 TiO_2 含量和促进钝化膜的溶解来降低钝化膜的稳定性, 从而使其更容易发生应力腐蚀。Li^[52]等研究了氯和氧对 TC11 钛合金应力腐蚀的影响, 发现在高氯环境下, 氯元素通过裂纹尖端氯、氧和氢的协同反应加速裂纹扩展, 促进沿应力激活的优先滑移面断裂。Chen^[53]等还发现交流和直流电对钛合金应力腐蚀开裂的影响机制也不同。以上研究都证明了构件所在的深海服役环境对应力腐蚀性能的影响。

目前已有诸多对于钛合金深海应力腐蚀的研究, 包括腐蚀机理, 微观组织, 应力条件以及深海环境等且研究较为深入全面。针对深海应力腐蚀风险, 可从材料、结构、环境三方面建立防护体系: 材料层面, 优化合金成分, 调控双相组织 α 和 β 相比比例; 结构层面, 通过热处理消除残余应力, 优化构件几何形状避免应力集中; 环境层面, 可采用表面涂层、阴极保护等方式隔绝腐蚀介质, 抑制钝化膜破坏, 提升深海服役安全性。然而, 绝大多数关于 SCC 的研究数据均来自实验室模拟, 缺乏与真实深海长期服役数据的对标与验证。未来可以将先进的实地监测技术与模拟技术相结合, 从根本上提升舰船及海洋工程用钛合金在极端深海环境下的服役可靠性。

4.2 长时力学性能

舰船与深海装备的服役寿命普遍较长, 其材料性能要求不仅涵盖冲击、拉伸等短时力学指标, 更需重点关注长期环境载荷作用下的长时力学行为。对于钛合金在海洋工程中的应用而言, 蠕变与疲劳是两大关键的长时

失效模式, 决定了装备在长周期服役过程中的可靠性与安全性。具体而言, 深潜器的反复下潜上浮, 推进系统轴系持续不断的旋转振动, 以及在长期驻扎于数百米甚至数千米深海的海底空间站所承受的恒定静水压力下, 材料都面临着疲劳与蠕变的严峻考验。此外, 深海特有的高静水压力与低温环境, 会通过材料与材料微观结构的复杂交互作用, 显著影响蠕变变形机制和疲劳裂纹的萌生扩展规律, 进而对装备的长期服役性能产生显著影响。

4.2.1 深海环境下的蠕变行为

不同于常见的高温蠕变, 长时间承受深海极高的静水压力时, 合金也可能发生室温蠕变, 且蠕变机制相比于高温蠕变也有差别。目前对室温蠕变的研究中更多集中在蠕变机制的研究上, 且普遍认为位错滑移是室温蠕变的主要机制^[54,55], 但也有学者持其他观点, 如 Lei 等^[56]研究了 Ti-Nb-Mo-Sn 基形状记忆合金, 发现合金的室温蠕变是由马氏体孪生和位错滑移控制的, 且孪晶马氏体占主导作用; Zhang 等^[57]在 Ti-Nb-Ta-Zr-O 合金中发现蠕变机理与冷变形密切相关, 不止受位错滑移控制。虽然室温蠕变的主导机制目前尚未完全统一, 但仍可证明位错滑移普遍存在于室温蠕变中, 位错的成核和运动除了与应力水平有关外, 还与微观组织密切相关。Li 等^[58]以 Ti80 合金为例进行研究, 发现 α/β 界面上的纳米级 γ 相具有较低的临界分解剪切应力 (CRSS), 并可作为位错传递的桥梁。Arohi 等^[59]也在 Ti-5553 合金中发现位错运动受到 α/β 板条的限制, 该合金有较好的抗蠕变性能。

室温蠕变性能同样存在各向异性, 蠕变各向异性与织构和位错滑移系开动有关, 同时织构又影响着位错类型和位错密度。Zhang 等^[54]在 TC4 轧制板中发现板中大多数 α 晶粒的 c 轴垂直于法向, 且法向样品具有丰富的柱滑移, 导致该方向的蠕变应变高于轧向和横向。除了板材不同方向的室温蠕变性能差异外, 同一面上的不同方向也存在各向异性如表 4 所示, Zhang 等^[60]以 Ti80 板材为例, 在轧制面分别取 RD, TD 和 45° 试样, 发现 45° 方向试样的蠕变应变最高, 因为该方向大多数基滑移和棱柱滑移更易被激活。

表 4 不同方向试样滑移系活化分数^[60]

Table 4 Fraction of activation with respect to slip systems in three specimens

Specimens	Non-Activation	Basal	Prismatic	Pyramidal <a>	Pyramidal <c+a>
RD	0.19	0.21	0.61	0.17	0.13
45°	0.05	0.57	0.20	0.13	0.11
TD	0.38	0.67	0.14	0.11	0.10

因此, 通过调控变形和热处理工艺, 有望降低钛合金室温蠕变各向异性, 如 Sathe 等^[61]在激光粉末床熔合

处理的 TC4 合金中发现循环热处理引起的 α' 相球化可以显著降低蠕变的各向异性。而关于钛合金室温蠕变性能的改善还需进一步研究。

目前关于改善室温蠕变性能的研究相对较少,但通过调控合金的微观组织、阻碍位错运动可能是提高其抗蠕变性能的有效方法之一^[62], Li 等^[63]对 Ti80 合金进行预压缩处理,优先增加软晶粒中的位错密度,抑制位错运动,以 0.9 倍屈服强度蠕变 1000 h 后,总蠕变应变降低了 80%。有学者^[64]模拟了双相组织 Ti80 合金的室温蠕变行为,发现细化晶粒,增加界面比以及控制软相体积分数可抑制蠕变应变速率。此外, Gerland 等^[65]在 β 锻造的 Ti6242 合金中发现当氢含量增加到 300 ppm 时,根据施加的应力不同,它可以减缓或增强合金室温蠕变,这也为改善室温蠕变钛合金的设计提供思路。

4.2.2 深海环境下的疲劳行为

疲劳可分为低周疲劳,高周疲劳和保载疲劳。低周疲劳应力幅较高而频率较低(通常 $<10^4$ 次循环),如深潜器每一次下潜和上浮,就是一个完整的应力循环。对于耐压结构,它往往是主导的疲劳模式。高周疲劳应力幅值较低而频率较高,在动力系统中较为常见,如螺旋桨轴、推进器叶片在高速旋转时,受到水流的不均匀作用以及发动机、泵、压缩机等旋转机械。而保载疲劳是指在循环载荷的峰值应力处保持一段时间,对合金危害极大。下文将主要阐述舰船及海洋工程领域低周疲劳和保载疲劳的研究进展。

目前关于低周疲劳的研究主要集中在疲劳裂纹萌生、扩展机制以及疲劳性能的改善上。Wu 等^[66]在 Ti-5Al-7.5V 双相钛合金中发现低周疲劳的主要变形方式为平面位错滑移,且主要发生在 α 相基面和棱柱面。Huang 等^[67]在 Ti-6.2Al-4.26Mo-1.33Mn 双相钛合金中发现裂纹倾向于在等轴初生 α 相 (α_p) 和 β 相界面处萌生,并沿 α_p 扩展。可见低周疲劳裂纹的萌生和扩展与合金组织状态关系密切,通过调控合金元素成分和工艺,改善合金微观组织,进而改善合金的低周疲劳性能是可行的。

成分优化方面, Sun 等^[68]系统研究了双相组织 TC4-0.55Fe 的低周疲劳性能和循环变形机理,发现 Fe 元素可阻碍位错运动,使合金具有更持久的循环硬化行为和更低的循环软化速率。Wang 等^[69]对比了 Ti80 合金和 TC4 ELI 合金的低周疲劳性能,认为 Ti80 的疲劳性能更优是因为 Al 含量低,其棱柱滑移和基滑移更易激活,位错带更密集、更均匀,有利于降低局部应力集中,延长疲劳寿命。工艺优化方面,有学者^[70]对 Ti-13Nb-13Zr 合金进行超声喷丸和 400 °C 去应力退火处理,疲劳寿命改善明显;还有学者^[71]对比了 CP-Ti 的低温低周疲劳和室温低周疲劳,发现低温下疲劳性能更优,这主要归因

于低温下变形孪晶的强化作用,这也为后续从工艺优化角度改善钛合金的低周疲劳性能提供思路。

保载疲劳不同于低周疲劳,最直观的区别就是在断口形貌上。Zhu 等^[72]以 Ti80 合金为例对比了低周疲劳和保载疲劳的区别,发现二者断口形貌区别较大;Li 等^[73]也发现,低周疲劳断裂为表面单源起裂,而保载疲劳试样的疲劳裂纹源位于近表面。目前关于钛合金保载疲劳的研究主要集中在外在条件和内在组织因素的影响上,但外在条件如保载载荷、保载时间最终都通过影响合金内在的位错滑移等机制影响其保载疲劳性能。Fan^[74]等研究了不同保载载荷下的 Ti80 合金的滑移系激活,发现保载时间是控制滑移激活趋势的关键,而大部分滑移变形发生在保载疲劳的早期阶段,与保载载荷无关;陈小平等^[75]等研究了保载时间对合金疲劳行为的影响,发现随着保载时间的增加,裂纹扩展速率增加,但疲劳寿命趋于饱和,见图 10。

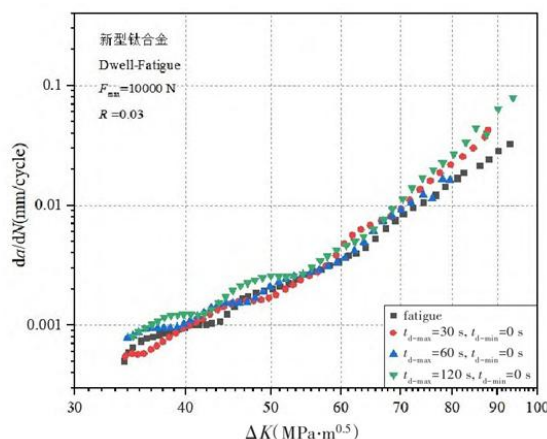


图 10 不同保载时间的疲劳试验结果^[75]

Fig.10 Fatigue test results under different dwell times

从组织结构层面进行考量,位错、相结构以及织构等因素均会对钛合金保载疲劳性能产生显著影响。有学者^[76]分析了 β 相和初始位错密度对 Ti-5Al-2Fe-3Mo 合金保载疲劳的影响,发现位错密度主要在 β 相中均匀分布,其加工硬化可以减少保载疲劳期间的塑性应变积累且初始位错密度的不同会影响裂纹萌生的位置;Cizek 等^[77]表征了 TC4 合金在近屈服应力室温保载条件下 α 相与 β 相的位错结构演化规律, α 相内优先萌生螺位错,且多在 α/β 相界面处产生,而随保载时间增加, β 相内部位错结构的演变程度更为显著。此外,不同的初生 α 相比例^[78]和织构对合金保载疲劳行为也有影响,高度的微织构会导致疲劳寿命的显著降低^[79]。然而,钛合金微观组织与保载疲劳失效之间的内在关联机理尚未形成统一共识;同时,针对舰船及海洋工程用钛合金的抗保载疲劳性能调控与优化研究仍较为匮乏,相关理论与工程技术均有待进一步深入探索。

5 舰船及海洋工程用钛合金的发展趋势与未来展望

舰船及海洋工程用钛合金正逐步形成覆盖不同服役环境的专用材料体系。随着深海装备发展, Ti80、TC4 等中强钛合金逐步实现量产, 在兼顾耐蚀性的同时提升了结构承载能力; 面向万米级深海极端高压环境, 高强钛合金成为研发重点, 通过成分优化、变形工艺及热处理调控, 实现强韧性的最佳匹配, 为深潜器耐压壳体等核心构件提供材料支撑。

构件大型化、整体化是舰船及海洋工程用钛合金的重要发展趋势, 当前已突破大规格铸锭和宽厚板材制备技术, 可生产大尺寸球壳、大口径管路、整体框架等构件, 有效提高承载效率。未来将进一步发展超大型整体构件制备技术, 适配全深海装备对大尺寸、高可靠性结构的需求。

此外, 钛合金服役性能评价正从传统静态力学指标(强度、塑性等)向深海极端环境下的长时力学性能(应力腐蚀、蠕变、疲劳等)延伸。以往研究多关注室温、大气环境下的短期力学性能, 难以反映深海高压、低温、腐蚀等工况下的长期服役行为; 当前研究重点转向应力腐蚀开裂、室温蠕变、疲劳-腐蚀交互作用等长时失效机制, 建立更贴近实际工况的性能评价体系与寿命预测方法, 为钛合金装备的长期安全服役提供理论支撑。

低成本化与高效改性技术是推动钛合金规模化应用的核心方向之一, 旨在破解传统制备工艺成本高、流程长的瓶颈。未来在舰船及海洋工程用钛合金领域, 亦需大力发展残废料回收利用、短流程制备、增材制造等高效低成本技术, 同时通过表面改性(如渗氮、覆涂层等)提升钛合金耐蚀、耐磨等服役性能。从而降低钛合金全生命周期成本, 提升其在舰船及海洋工程领域的市场竞争力与大规模应用。

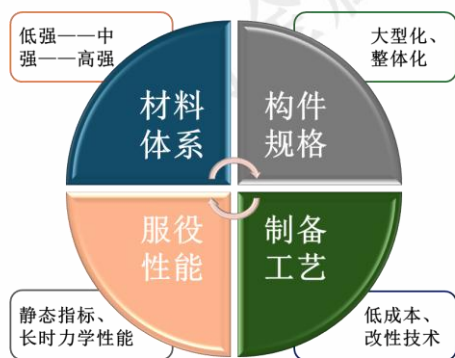


图 11 舰船及海洋工程用钛合金的发展趋势

Fig.11 The development trend of titanium alloys for ships and Marine engineering

6 结语

近年来, 国家高度重视舰船及海洋工程用钛合金的研制工作, 积极引导并大力推动相关领域的技术创新, 各科研院所、高等院校及钛合金企业均在不同程度上实现了技术突破, 为行业发展注入了新的活力。目前, 国内关于舰船及海洋工程用钛合金的研究已颇具规模, 但多数研究仍侧重于材料研制或制备工艺的优化, 缺乏针对深海服役环境特点的系统性研究, 尚未全面涵盖不同应用环境下钛合金的制备工艺、性能表现及其相互关系, 尤其是对深海高压、腐蚀等极端条件下的材料行为研究尚显不足。因此, 本文旨在从不同服役环境出发, 系统梳理了我国舰船及海洋工程用钛合金的研究进展, 包括深潜器耐压壳体、海水管路、动力系统等环境特点及其对钛合金性能的主要要求; 通过具体案例进行深入剖析, 并着重阐述了当前针对钛合金深海应力腐蚀性能和蠕变疲劳等关键性能的研究进展。但相关工作仍存在一定短板有待完善。

从试验角度出发, 目前试验主要关注钛合金强度、冲击韧性和静态耐蚀性能, 针对深海高压的复合环境试验研究偏少。数值模拟研究往往对多因素耦合作用进行简化处理, 缺少深海海长期服役数据作为模型验证依据, 缺少相同深海服役环境的性能对比分析。

在工程化方面, 钛合金在舰船及海洋工程领域的规模化应用仍面临多方面的巨大挑战: 一是初始制造成本高昂, 涉及从海绵钛原材料到复杂构件加工的全生产流程; 二是工艺技术和性能突破仍有较大空间, 如复杂构件或超大规格大型结构件的制备、针对不同构件的低成本技术与改性技术等工程化制备, 仍缺少成熟的工艺机理和长期服役稳定性研究。

针对现有研究不足及未来发展趋势, 后续可从研究方式完善、合金牌号优化、工程应用性能拓展三个方面开展深入研究。试验应尽量贴近深海实际服役工况, 搭建能够模拟高压、低温、腐蚀与交变载荷等协同作用的复合试验条件, 用实测数据与仿真模型结合, 降低理论假设与工程实际的偏差。在合金研发上, 可在国内外现有研究基础上开发高强韧、抗腐蚀的新型专用钛合金; 并进一步优化低成本制备工艺等, 逐步完善舰船及海洋工程用钛合金的专用体系。期望各高校、科研院所和钛企共同努力, 加速推动高性能钛合金在舰船与海洋工程领域的规模化应用, 为我国海洋强国战略提供坚实的材料支撑。

参考文献 References

- [1] Zhao Yongqing(赵永庆). *Materials China*[J].2014,33(07):398-404

- [2] Xie Huiru(谢惠茹). *Rare Metals Letters*[J]. 2007, (08): 7-9
- [3] Hou Zhimin(侯智敏), Yan Xincheng(闫新成), Liang Shuhua(梁淑华) et al. *Materials China*[J]. 2025, 44(12): 1144-1152
- [4] Yang Yingli(杨英丽), Luo Yuanyuan(罗媛媛), Zhao Hengzhang(赵恒章) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*[J]. 2011, 40(02): 538-544
- [5] Lei Jiafeng(雷家峰), Ma Yingjie(马英杰), Yang Rui(杨锐) et al. *Journal of Engineering Studies*[J]. 2016, 8(02): 179-184
- [6] Fang Zhigang(方志刚), Liu Bin(刘斌), Li Guoming(李国明) et al. *Materials China*[J]. 2014, 33(07): 385-393
- [7] Lin Junhui(林俊辉), Dan Zhenhua(淡振华), Lu Jiafeig(陆嘉飞) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*[J]. 2025, 49(03): 1090-1099
- [8] Zhu Yuhui(朱玉辉), Yang Shengli(杨胜利), Dang Hengyao(党恒耀) et al. *Iron Steel Vanadium Titanium*[J]. 2025, 46(05): 177-183
- [9] Qian Jiang(钱江), Wang Yi(王怡), Li Yao(李瑶) et al. *Ship Science and Technology*[J]. 2016, 38(11): 1-6, 19
- [10] Liu Qinghua(刘清华), Hui Songxiao(惠松骁), Ye Wenjun(叶文君) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*[J]. 2012, 22(10): 2749-2755
- [11] Dong Xiaofeng(董晓峰), Zhang Mingyu(张明玉), Zhou Jiangshan(周江山) et al. *Hot Working Technology*[J]. 2022, 51(24): 142-146
- [12] Yang Dongmei(杨冬梅). *Iron Steel Vanadium Titanium*[J]. 2018, 39(01): 159
- [13] Zhang Aifeng(张爱锋), Li Yanqing(李艳青), Xu Qiang(徐强) et al. *Ship & Boat*[J]. 2024, 35(06): 81-91
- [14] Liao Qiang(廖强), Ge Peng(葛鹏), Yun Pengfei(贲鹏飞) et al. 采用高比例钛废料制备大规格 TC4 钛合金铸锭的方法: CN 108359808B[P]. 2019-10-11
- [15] Hou Zhimin(侯智敏), Wang Xing(王兴), Yang Jian(杨健) et al. 一种 TC4 钛合金细等轴组织大规格棒材短流程制备方法: CN 111286686B[P]. 2021-09-10
- [16] Lv Qi(吕琦), Su Baoxian(苏宝献), Wang Yan(王妍) et al. *Titanium Industry Progress*[J]. 2020, 37(01): 27-31
- [17] Wang Ke(王可), Zhao Yongqing(赵永庆), Jia Weiju(贾蔚菊) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*[J]. 2021, 50(02): 552-561
- [18] Yang Jing(杨晶), Ren Xiaolong(任晓龙), Wang Tao(王涛) et al. *Hot Working Technology*[J]. 2024, 53(14): 127-129
- [19] Wang Ruofei(王若飞), Zhang Huan(张欢), Ou Xiaoxiao(欧笑笑) et al. *Forging & Metalforming*[J]. 2024, (17): 54-58
- [20] Wang Zhutang(王祝堂). *Light Metals*[J]. 2021, (10): 18
- [21] Jiang Hong(江洪), Chen Yayang(陈亚杨). *Advanced Materials Industry*[J]. 2018, (12): 11-14
- [22] Chang Hui(常辉), Wang Xiangdong(王向东), Zhou Lian(周廉). *Materials China*[J]. 2014, 33(Z1): 603-607+629
- [23] Kuang Mengsheng(匡蒙生), Hu Weimin(胡伟民), Guo Aihong(郭爱红) et al. *Journal of Unmanned Undersea Systems*[J]. 2012, 20(05): 331-335
- [24] W.Lee.Williams. *Ocean Engineering*[J]. 1969. 01(04): 375-383.
- [25] Zhao Yongqing(赵永庆). *Materials China*[J]. 2010, 29(05): 1-8+24
- [26] Wang Guangfu(王广夫), Jia Zhiqi(贾智棋), Dong Caichang(董彩常) et al. *Corrosion & Protection*[J]. 2022, 43(04): 24-27
- [27] Qian Jiang(钱江), Song Dejun(宋德军), Gao Fuyang(高福洋) et al. *Development and Application of Materials*[J]. 2020, 35(05): 97-100
- [28] Zhang Guifu(张贵福), Xin Shewei(辛社伟), Sun Huamei(孙花梅) et al. *Materials China*[J]. 2026, 45(01): 1-13
- [29] Chen Chen(陈晨), Shuang Yuanhua(双远华), Chen Jianxun(陈建勋) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*[J]. 2023, 52(03): 959-967
- [30] Zhao Yanying(赵彦营). *Development and Application of Materials*[J]. 2022, 37(03): 93-96
- [31] Qu Jiadong(曲家东), Zhang Wei(张薇), Gao Shangfei(高尚飞) et al. *Metal World*[J]. 2025, (03): 69-73
- [32] Shi Yaming(史亚鸣), Huang Haiguang(黄海广), Li Zhimin(李智敏) et al. *China Metallurgy*[J]. 2017, 27(08): 41-44
- [33] Hu Yaojun(胡耀君), Liu Guozong(刘果宗). *Rare Metal Materials and Engineering*[J]. 1995, (05): 39-44
- [34] Zhao Yongqing(赵永庆), Yang Guanjun(杨冠军). *Titanium Industry Progress*[J]. 2006, (05): 14-18
- [35] Nie Xiangyu(聂翔宇), Tan Xiaolian(谭小练), Zhao Yong(赵勇) et al. *Electric Welding Machine*[J]. 2026, 56(03): 60-66+94
- [36] Chen Haohan(陈浩瀚), Jiang Wentian(蒋文天), Gai Xin(盖欣) et al. *Heat Treatment of Metals*[J]. 2026, 51(02): 257-265
- [37] Yang Jing(杨晶), Zhang Sheng(张胜), Wu Ming(吴明) et al. 一种超大规格 Ti75 钛合金饼坯的锻造方法: CN111922265A[P]. 2022-06-07
- [38] Hao Yaxin(郝亚鑫). *World Nonferrous Metals*[J]. 2020, (05): 179, 181
- [39] Xie Wenlong(谢文龙), Zhang Yiheng(张一恒), Li Wentao(李文涛). *Hunan Nonferrous Metals*[J]. 2023, 39(02): 47-49, 62
- [40] B. Pazhanivel, P. Sathiyar, K. Muthuraman et al. *Engineering Failure Analysis*[J]. 2021, 127: 105515
- [41] Li Zhen, Fan Lin, Ma Li et al. *Journal of Materials Science & Technology*[J]. 2025, 222: 228-249
- [42] Joseph S, Lindley C T, Dye D et al. *Corrosion Science*[J]. 2018, 134: 169-178

- [43] Li Jing, Zhang Tao, Li Li *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J]. 2025, 37: 4417-4432
- [44] Longhitano A G, Arenas A M, Conde A *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J]. 2018, 765: 961-968
- [45] Wang Shengyuan, Liu Ruochong, Zhang Haoyu *et al.* *Corrosion Science*[J]. 2026, 262: 113645
- [46] Sun Zhijie(孙志杰), Wang Yang(王 洋). *Development and Application of Materials*[J]. 2020, 35(02): 94-100
- [47] Yeboah S B, Kyoungdoc K, Jaekook K *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J]. 2023, 25: 354-368
- [48] Chu Hong(褚 洪). *Chinese Journal of Engineering*[J]. 2002, (01): 47-48
- [49] Yan Liyuan, Zhang Haoyu, Zhang Shuai *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J]. 2025, 1010: 177258
- [50] Xu Yali, Wu Xiaofei, Li Shuaiqi *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J]. 2025, 1019: 179337
- [51] Liu Rui, Cui Yu, Zhang Bo *et al.* *Corrosion Science*[J]. 2021, 190: 109705
- [52] Li Mengyao, Liu Daoxin, Zhou Kai *et al.* *Materials Chemistry and Physics*[J]. 2026, 349(P2): 131850
- [53] Chen Tianqi, Zeng Zhongping, Gao Hui *et al.* *International Journal of Hydrogen Energy*[J]. 2024, 55: 177-188
- [54] Zhang Mengmeng, Qiu Jianke, Fang Chao *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J]. 2024, 30: 2311-2321
- [55] Zhang Mengmeng, Qiu Jianke, Fang Chao *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J]. 2023, 27: 1579-1592
- [56] Lei Chenglong, Zhu Chengpeng, Lin Jianguo *et al.* *Smart Materials in Manufacturing*[J]. 2023, 1: 100019
- [57] Zhang Weidong, Liu Yong, Wu Hong *et al.* *Materials Characterization*[J]. 2016, 118: 29-36
- [58] Li Ming, Jiang Kun, Duan Yu *et al.* *Scripta Materialia*[J]. 2026, 272: 117070
- [59] Charan A A, Shashi S, Indrani S. *Materials Today Communications*[J]. 2024, 38: 107834
- [60] Zhang Wenyuan, Fan Jiangkun, Huang Hao *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J]. 2022, 854: 143728
- [61] Sathe K A, Kumar A D, Mehta K *et al.* *Acta Materialia*[J]. 2025, 299: 121454
- [62] Lee R J, Lee S M, Baek S H *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J]. 2024, 33: 2803-2811
- [63] Li Ming, Zhang Zhenghao, Bu Yejiang *et al.* *Mechanics of Materials*[J]. 2025, 207: 105383
- [64] Zhang Yujie, Li Ming, Jiang Kun *et al.* *International Journal of Mechanical Sciences*[J]. 2025, 295: 110294
- [65] Gerland M, Lefranc P, Doquet V *et al.* *Materials Science and Engineering: A*[J]. 2008, 507(1): 132-143
- [66] Wu Zhihong, Kou Hongchao, Li Jinshan *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J]. 2023, 865: 144654
- [67] Huang Qingguo, Wang Zhilei, Feng Xinming *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J]. 2024, 912: 146987
- [68] Sun Yangyang, Qian Shenwei, Chang Hui *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J]. 2024, 30: 8396-8408
- [69] Wang Q, Ren J.Q, Xin C *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J]. 2023, 934: 167856
- [70] Kumar Pramod, Mahobia G.S., Singh V *et al.* *International Journal of Fatigue*[J]. 2023, 166: 107289
- [71] Ji Seob An, Min Ji Jo, A. Ra Jo *et al.* *Materials Characterization* [J]. 2025, 228: 115407
- [72] Zhu Junchen, Xie Jijia, Wang Jun *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J]. 2024, 29: 2204-2215
- [73] Li Xing, Liu Shishuang, Zhou Yi *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J]. 2024, 1002: 175535
- [74] Fan Jiangkun, Zhang Wenyuan, Li Bobo *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J]. 2023, 865: 144610
- [75] Chen Xiaoping(陈小平), Lei Yinhui(雷银慧), Zeng Qingbo(曾庆波) *et al.* *Journal of Ship Mechanics*[J]. 2023, 27(09): 1346-1355
- [76] Miyashita D, Nakao Y, Umezawa O *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J]. 2025, 924: 147852
- [77] Cizek P, Kada R S, Wang J *et al.* *Materials Characterization*[J]. 2024, 209: 113757
- [78] Anish R, Amit S, S. J J *et al.* *International Journal of Fatigue*[J]. 2023, 175: 107745
- [79] Hémery S., Bertheau D., Hamon F. *et al.* *International Journal of Fatigue*[J]. 2024, 179: 108068

Research Progress in Titanium Alloys for Ships and Marine Engineering

Yang Jing^{1,2,3}, Li Han^{2,3}, Wang Qiming^{2,3}, Liu Xianghong^{*,2,3}, Sun Guangda^{2,3}, Zhan Mei¹, Zheng Zebang¹, He Yonggang^{2,3}, Wang Tao^{2,3}, Du Yuxuan^{2,3}, Wang Kaixuan^{2,3}

(1. State Key Laboratory of Solidification Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

(3. National & Local Joint Engineering Laboratory for Special Titanium Alloy Processing Technologies, Xi'an 710018, China)

Abstract: With the deepening advancement of the China's Maritime Power Strategy, the titanium alloys, due to their low density, high specific strength and excellent corrosion resistance, have demonstrated excellent weight reduction and corrosion resistance effects in the pressure-resistant shells of deep-sea submersible vessels and seawater pipeline systems, extending the service life of equipment, reducing maintenance costs and overall usage costs, and showing significant application value in the fields of ships and Marine engineering. The paper first elaborates on the core requirements of naval ships and marine engineering for titanium alloys, including large-scale components, high strength and toughness, corrosion resistance, and long-term service performance. Subsequently, focusing on different service environments such as deep-sea submersible pressure hulls, seawater piping systems, and power systems, systematic review is provided on the composition, microstructure, properties, and engineering applications of typical titanium alloys like Ti80 and TC4. Furthermore, emphasis is placed on discussing the current research status of long-term mechanical properties of titanium alloys in deep-sea environments, such as stress corrosion behavior, creep, and fatigue. At present, long-term performance data of titanium alloys in real marine environments are still insufficient, and a unified evaluation system and standard has not yet been established. The paper also highlights the existing shortcomings and technical challenges hindering the large-scale application of titanium alloys in the marine sector, including high manufacturing costs and insufficient material experimental data under deep-sea environments, and the further systematic research is still required to support the high-quality development of China's marine equipment.

Key words: Titanium Alloys for Ships and Marine Engineering; Large-Scale; Stress Corrosion; Long-Term Mechanical Properties

Author: Yang Jing, Senior Engineer, Xi'an 710018, P. R. China, Tel: 029-86514525, E-mail: cailiaoyangjing@163.com

Corresponding author: Liu Xianghong, Professor, E-mail: xhliu@c-wst.com