

特约专栏

我国海洋工程用钛合金现状和发展趋势

常 辉¹, 董月成^{1,2}, 淡振华¹, 李 峰¹, 郭艳华¹, 周 廉¹

(1. 南京工业大学材料科学与工程学院, 江苏 南京 211816)

(2. 中国人民解放军 92228 部队, 北京 100072)

摘 要: 钛合金轻质、高强、耐蚀, 是一种优异的“海洋金属”, 随着我国海洋装备提质增效及钛合金行业产能释放的迫切需求, 海洋工程用钛合金材料的发展迎来了很好的契机。梳理了近年来钛合金在我国海洋工程领域的战略规划、材料体系和基础研究等工作, 对存在的问题和发展趋势进行了剖析, 以期推动我国钛合金材料在海洋工程领域更加广泛的应用, 并为钛合金研发人员及海洋工作者提供相关的借鉴。

关键词: 海洋工程; 钛合金; 低成本; 材料体系; 基础研究

中图分类号: TG146.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2020)07-0585-06

Current Status and Development Trend of Titanium Alloy for Marine Engineering in China

CHANG Hui¹, DONG Yuecheng^{1,2}, DAN Zhenhua¹, LI Feng¹,
GUO Yanhua¹, ZHOU Lian¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

(2. Unit 92228 of the Chinese People's Liberation Army, Beijing 100072, China)

Abstract: Titanium alloy is a kind of marine material due to its high specific strength and excellent corrosion resistance, it is ushering in development opportunities of marine engineering because of the urgent demand for the marine equipment upgrading and the release of production capacity of titanium alloy industry in China. The present paper summarized the strategic plan, material system and fundamental research of China's titanium alloy in the field of marine engineering in recent years, the existing problems and development trends were analyzed to promote the application of titanium alloy in the marine engineering field, and provide relevant reference for researchers of titanium alloy and marine engineering fields.

Key words: marine engineering; titanium alloy; low cost; material system; fundamental research

1 前 言

海洋是 21 世纪世界政治、经济和军事竞争的制高点, 海洋科学研究、海洋技术开发等已上升到各国最高层次战略性规划与决策范畴。钛金属轻质、高强、耐蚀, 尤其耐海水和海洋大气腐蚀, 是优异的海洋工程用

轻量化结构材料, 对提高海洋工程装备的作业能力、安全性、可靠性及战术水平具有十分重要的意义。我国海洋工程用钛金属材料经过 50 余年的发展, 已经取得了很大的进步, 具备完整的工业体系, 初步形成了由低到高不同强度级别的钛合金材料体系, 其制备加工装备的水平与世界处于同一水平^[1]。但同美、俄、日等海洋强国相比, 我国在海洋工程用钛合金的基础研究、制备加工技术、应用技术、钛装备和部件的设计与制造技术以及相应的配套技术等各个环节还有待提高^[2,3]。党的十九大报告指出:“坚持陆海统筹, 加快建设海洋强国”。在海洋强国战略、《中国制造 2025》计划和“一带一路”战略的共同推动下, 海洋工程产业迎来巨大的市场空间。“蛟龙号”“深海勇士号”“全海深载人潜水器”和“深海空间站”等国家重大项目的陆续启动, 为钛合金材料在海洋工

收稿日期: 2020-06-19 修回日期: 2020-06-29

基金项目: 江苏省重点研发计划项目(产业前瞻与关键核心技术——竞争项目)(BE2019119); 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室开放基金(SKLM EA-K201807); 国家自然科学基金重点项目(51931008)

第一作者: 常 辉, 男, 1969 年生, 教授, 博士生导师,

Email: ch2006@njtech.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202006024

程上的推广应用提供了最佳的发展时机。

本文综述了我国近年来海洋工程用钛合金的发展战略和平台建设、领域热点和重点问题、重大项目支持计划以及在基础和应用研究领域取得的重要成果,对存在问题和发展趋势进行了分析,以期推动钛合金在我国海洋工程领域更加广泛的应用,并为钛合金研发人员及海洋工作者提供相关借鉴。

2 顶层规划和平台建设

2.1 顶层规划

中国工程院在 2013 年由周廉院士作为负责人,分别启动了“中国海洋工程材料研发现状及发展战略初步研究”咨询项目和“海洋工程中关键材料发展战略研究”重点咨询项目。钛合金材料作为这两个咨询项目的重要组成部分,由南京工业大学牵头,联合我国钛合金研发、生产和应用的骨干单位,历时 3 年,以现场调研、文献调研和学术研讨等形式,系统地开展了国内外海洋工程领域用钛合金的研发、生产和应用现状的调研工作,完成了《中国海洋工程材料发展战略咨询报告》中的钛金属材料部分和《海洋工程钛金属材料》编写,并建议了海洋工程用钛合金的发展路线图,规划了重点的研究方向。基于此,2019 年,在科技部“海洋领域面向 2035 年国家中长期科技发展规划战略政策”研究 & 第六次国际技术预测工作中,也拟将海洋装备用长效高性能轻量化结构材料及连接技术列入关键技术,钛合金材料作为海洋装备轻量化材料的典型代表,将会受到充分的重视。

2.2 平台建设

为推进我国海洋材料产业技术创新工作,加快建立以企业为主体、市场为导向、“产学研用”紧密结合的技术创新体系,实现技术创新成果的快速工程化,推动海洋材料行业结构调整升级,提升行业核心竞争力,促进我国海洋材料产业可持续发展,在周廉院士的推动下,2016 年 6 月在武汉成立了“中国海洋材料产业技术创新战略联盟”,“钛合金材料及其在海洋工程中的应用”是战略联盟的重要分盟之一。该分盟集合了军方、设计所及国内研发和生产优势单位,目标在于寻求钛合金在海洋工程应用领域获得突破。同时,根据中国工程院咨询报告的建议和周廉院士的大力倡导和推动,我国各地方政府围绕钛合金在海洋工程的应用,先后成立了若干研发平台。2015 年,江苏省海洋先进材料工程技术研究中心在南京成立,海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室在鞍山成立;2018 年,先进钛及钛合金材料技术国家地方联合工程研究中心在洛阳成立。这些与海洋工程钛合金材料密切相关的国家和地方研发平台的建设,

将为我国海洋工程用钛合金的研发和应用提供良好的合作平台。

2.3 学术活动

为了推动海洋工程材料,特别是海洋工程用钛合金材料领域的学术交流及人才培养,在周廉院士的倡导、建议和推动下,“新材料国际发展趋势高层论坛”“海洋材料与腐蚀防护大会”“中国海洋材料高峰论坛”“第一届海军装备腐蚀控制及新材料发展论坛”等一系列高端学术会议相继召开,会议影响力逐渐扩大,参会人员逐年增长。海洋工程用钛合金作为会议主题的重要组成部分,受到越来越多科研人员的关注,也为海洋工程用钛合金材料得到国家相关部委的重视起到了积极的作用。同时,周廉院士非常重视青年人才的培养工作,在南京、西安等地连续举办“钛合金暑期培训班”活动,邀请国内钛合金领域的知名专家为在校硕士研究生、博士研究生及青年教师免费授课,为我国钛合金行业,特别是海洋钛合金领域人才梯队的培养和建设发挥了重要作用。

3 领域热点和重点问题

3.1 海洋工程钛合金材料体系

钛合金是我国“三航”发展的基础关键材料。目前我国在航空航天钛合金方面都有大量的积累,开发了覆盖 600~1500 MPa 强度级别的钛合金的多个合金序列,基本可满足我国在航空航天领域的需求,但我国海洋工程用钛合金材料不成体系,缺乏海洋服役环境下的适应性研究,导致“点式应用”为主,用量也极少。到目前为止,我国海洋钛合金尚未形成公认的材料体系,而且钛合金的数据积累尚不能完全支撑我国海洋工程关键装备的选材需求。特别是针对目前海洋装备走向深海、远海和两极的目标,并无适用于深海、两极等苛刻服役环境的专用牌号钛合金,急需借助高效材料设计开发手段填补空白,满足我国深海、远海和两极工程发展的要求。集成计算材料工程技术具有开发周期短、筛选样本数多、合金成分范围广等优点,近年来在材料设计、开发和性能优化方面发挥了巨大的作用。高性能钛合金多为四元及以上复杂合金体系,仅完成材料的体系确定、成分优选等必要过程,就需要经历较长的开发周期和大量的设计开发成本。以典型的 Ti-6Al-4V 体系为例,微量 Fe, Mo 合金元素和 C, H, O, N 等杂质元素,均会对材料组织、焊接性能、服役性能等产生直接影响。例如通过第一性原理计算揭示了钛合金中 O 原子溶质强化造成螺位错核间隙位置扭转大幅提升其力学性能(屈服强度、塑性等)的机制^[4]。利用第一性原理计算、分子动力学模拟、有限元模拟等介观、微观、宏观的跨尺度模拟,可预测材

料原子、分子、相、组织、性能等不同层面的材料基础性能及微观作用机制，为材料成分、组织、性能等优化提供一定的借鉴。针对目前海洋工程用钛合金可选牌号稀少、选择准则缺失、基础数据积累不足等问题，利用大数据技术、集成计算材料工程技术开发海洋工程用钛合金是目前钛合金领域重要的研发方向之一。

3.2 海洋工程用钛合金制备加工新工艺开发

海洋工程、海洋装备等用钛量的持续增长，对我国钛合金加工制备新工艺的开发和制造成本的进一步降低提出了更高的要求。在周廉院士“把钛合金用到海洋中、将钛合金的价格降低一半以上”的倡导下，目前国内主要钛合金生产企业及研发机构已积极开展降低成本、优化传统工艺、开发先进新工艺的工作。传统的钛合金制备加工工艺暴露出了过程能量损失大、控制精度差、生产制造效率低等诸多问题，因此亟需开发具有颠覆性、开创性的新工艺。例如短流程工艺、连续铸造工艺、高效辅助冶炼工艺、增材制造工艺、近净成型工艺、在线组织调控工艺等，均可在钛合金的加工、制造的单个环节或多个环节中实现海洋工程用钛合金的加工效率、成品质量等方面质的飞跃。此外，由于钛合金的导热性能差，造成其焊接过程中热量分布不均，进而导致其焊接组织粗大、均匀性差、亚稳相含量高、焊缝母材性能匹配性低等，这些问题一直是钛合金连接方面有待解决的关键技术问题。因此，目前亟需开展在线热处理焊接工艺和免热处理大型结构体焊接工艺技术来满足我国未来大型装备建造过程的需要。

3.3 海洋工程用钛合金的服役性能优化

钛及钛合金在海洋工程中的应用比例逐年提高。相较于传统的铁基合金，钛及钛合金在深海环境下不易发生腐蚀^[5,6]，作为深海管道材料耐腐蚀能力强，可大大减少维护和修理费用^[7]。钛合金材质的深海工程装备在深海中服役时，不仅会受到海水腐蚀，同样亦受到海水静水压力、海水流速、温度等诸多综合因素的影响，因而钛合金的腐蚀行为与浅层海水或常规水溶液中的腐蚀大为不同。因此，对于深海环境使用的钛合金，为了满足其特殊的服役环境及要求，对材料性能提出了很高的要求。所以研究深海独特的腐蚀环境以及钛合金在深海环境下特殊的腐蚀行为及机理对于深海大型装备、重大工程等的服役性能评测具有重要意义^[8]。此外，不同于钢铁材料，钛合金在深海高静水压力作用下会发生高压压缩蠕变，从而导致其发生塑性变形，导致重大装备的结构失稳等系列问题。但是，目前综合考虑蠕变和腐蚀双重因素对钛合金性能影响的研究还未有报道。为满足未来重大海洋工程装备需求，亟需开展服役环境因素与

钛合金使用性能的耦合机制研究。

4 重大项目支持计划

钛合金由于具有质轻、耐蚀和高强的特性，是建造深空站主体、深潜器和潜艇结构的首选材料。国家在海洋工程用钛合金领域支持了一系列重大项目。作为深海资源开发和海洋安全维护平台的深海空间站，已被国务院印发的《“十三五”国家科技创新规划》作为面向2030年部署的6个体现国家战略意图的重大科技项目之一。该项目主要开展深海探测与作业前沿共性技术及通用与专用型、移动与固定式深海空间站核心关键技术等方面研究，周廉院士也被委以重任，作为材料方面的责任专家参与该项目。在深潜器用钛合金方面，“蛟龙”号载人潜水器是“十五”期间国家“863”计划重大专项“7000 m载人潜水器”的重要成果，其设计最大下潜深度为7000 m。该项目于2002年立项，2008年完成设备研制工作，随后又先后获得科技部“973”计划、中国科学院深海先导计划和国家自然科学基金委南海深部计划等国家重要科技计划的支持，并于2017年获得国家科技进步一等奖。2015年12月国家“863”计划项目“4500 m深潜器用TC4 ELI钛合金载人球壳制造技术”通过验收，该项目研制的载人球舱已被优选安装在“深海勇士”号载人深潜器上，完成了4535 m的海试。“全海深载人潜水器用钛合金载人舱研制”是我国“十三五”部署的首批国家重点研发计划项目。该潜水器建成后，将在覆盖世界最大深度(约1.1万米)的海洋完成载人下潜并进行科考作业，是深海进入能力的顶级体现，是继“深海勇士”号之后，由我国自主设计、自主研制和加工制造，作业范围可覆盖世界所有海域的载人潜水器。2017年，中国船舶重工集团702所承担了国家重点研发计划“深海关键技术与装备”的重点专项“深海装备耐压结构体、材料耐压特性及评估技术研究”项目，拟建立深海装备钛合金耐压结构安全性评估方法，进而对我国现役及在研的深海载人潜水器等大型深海装备耐压结构长期服役的安全性评估提供技术支撑。由云南钛业股份有限公司牵头的国家重点研发计划项目“低成本高耐蚀钛及钛合金管材与高品质钛带制造技术开发及应用”，拟解决管材加工及复杂海洋环境应用过程中微观组织-综合性能-残余应力-耐蚀性能协同控制等关键科学问题，构建复杂海洋环境服役条件下钛及钛合金管材耐腐蚀性能评价体系。

为了解决海洋工程用钛合金成分设计、加工制备、焊接和性能评价等关键技术和共性技术问题，国内从事海洋工程用钛合金研究的优势单位强强联合，拟以“集中力量办大事”的方式，系统解决海洋工程用钛合金中的相

关基础问题。此外,为了提升国防和海军装备水平,军方也陆续发布了“十三五”装备预研和科研项目,针对舰船用钛合金开展相关基础和应用研究。

5 海洋工程用钛合金研究成果

5.1 成分设计

针对海洋工程对钛合金高强、耐冲击、耐腐蚀和焊接性的需求,国内团队开发设计出了多种新型合金。其中,南京工业大学以廉价 Fe 元素改性为主,开发出了低成本高强韧的 Ti-3Al-3.5Fe-0.1B 合金,屈服强度 ≥ 1000 MPa,延伸率 $\geq 15\%$ ^[9]; Ti-3Al-5Mo-4Cr-2Zr-1Fe (Ti-35421) 合金,抗拉强度为 1313 MPa,屈服强度为 1240 MPa,延伸率为 8.62%,断面收缩率为 17.58%,断裂韧性 K_{IC} 为 75.8 MPa·m^{1/2},在 3.5% NaCl 溶液中的应力腐蚀敏感性小,拥有较好的耐腐蚀性^[10]。哈尔滨工业大学通过添加 Zr, Mo 元素开发了钝化能力提高的耐蚀钛合金,包括 Ti-5.5Al-4Zr-1Sn-0.3Mo-1Nb 合金^[11],屈服强度为 987.62 MPa,极限应变量为 24.64%, K_{IC} 为 71.29 MPa·m^{1/2}; Ti-5.5Al-3Nb-3Zr-1.2Mo-0.3Ni 合金^[12],压缩屈服强度为 808.05 MPa,极限应变量为 23.42%。西北有色金属研究院以可焊性为主要思路,开发了高强韧海洋工程用 Ti-Al-Zr-Mo-Cr-Nb 系可焊钛合金^[13],屈服强度 > 900 MPa,延伸率 $> 13\%$, $K_{IC} > 75$ MPa·m^{1/2},且经电弧焊或电子束焊后的焊接接头系数 ≥ 0.9 。中国船舶重工集团 725 研究所针对现有高强钛合金焊接处冲击韧性较低的特点,开发了高强高冲击韧性的耐蚀可焊钛合金^[14],他们利用 Al, Mo, V, Nb, Cr, Zr 等元素,调控合金的铝当量 $[Al]_{\text{当}} \geq 6$,钼当量 $[Mo]_{\text{当}} \leq 8$,使合金锻件与板材的抗拉强度 > 1060 MPa,屈服强度 > 980 MPa,冲击功 > 40 J, $K_{IC} > 80$ MPa·m^{1/2},且焊接系数 > 0.9 。

5.2 服役性能

针对钛合金在海洋多场耦合服役环境下面临的主要失效形式,国内钛合金研发单位开展了钛合金低周疲劳^[15-18]、应力腐蚀^[19-21]和高压蠕变^[22, 23]等方面的研究工作。应力水平较高时的低周疲劳性能是海洋工程装备耐久性的重要指标。对 TC4 ELI 合金的低周疲劳性能研究发现:在最大应力水平下,不同组织的 TC4 ELI 合金均表现出显著的循环软化现象,相比于片层组织,双态组织具有更加优异的疲劳性能,这主要是因为双态组织中位错的有效滑移距离远小于片层组织,此外具有高位错密度的等轴 α 相的存在也阻碍了疲劳裂纹的萌生和扩展。对断口形貌的扫描电镜分析发现:具有双态组织的试样疲劳断口平整光滑,而片层组织的试样断口则出现了与原始粗大的 β 晶粒有关的几何形刻面^[15]。上海海洋

大学对于潜在的可用于全海深载人舱的 TB19 材料的低周疲劳性能研究发现, TB19 具有比 TC4 ELI 合金更好的低周疲劳性能^[16]。对可用于深海载人探测器的 TC4 ELI 合金,得到了其保载时间与疲劳性能的关系曲线,为后续研究预测 TC4 ELI 的服役时间提供了理论依据^[17]。另一方面,通过建立数学模型,开发了较为准确的、通过简单试验参数来预估 TC4、IMI834 等钛合金疲劳及低周疲劳性能的方法^[18]。

针对钛合金应力腐蚀的特征,南京工业大学对强度级别在 1200 MPa 级的 Ti-35421 合金的应力腐蚀开裂行为和钝化膜自修复行为进行了研究^[19]。Ti-35421 合金存在强韧性匹配等问题,具有一定的应力腐蚀敏感性,在空气(A)和 3.5%NaCl 溶液(SSRT)中的 3 种不同应变速率下应力腐蚀敏感性指数排序为: $I_A(1.67 \times 10^{-5} \text{ mm/s}) > I_A(5.00 \times 10^{-5} \text{ mm/s}) > I_A(1.33 \times 10^{-5} \text{ mm/s})$; $I_{SSRT}(1.67 \times 10^{-5} \text{ mm/s}) > I_{SSRT}(5.00 \times 10^{-5} \text{ mm/s}) > I_{SSRT}(1.33 \times 10^{-5} \text{ mm/s})$,呈现随着应变速率的降低先上升后下降的趋势。1.67 $\times 10^{-5}$ mm/s 速率下,应力腐蚀敏感性最高, I_{SSRT} 为 0.2786, I_A 为 27.27%,判断 Ti-35421 合金在 3.5%NaCl 溶液中存在发生应力腐蚀的可能性,宏观断口形貌表现为脆性断裂,微观上韧窝较浅,出现平台区域,为准解理断裂形貌。在较慢的应变速率下,无明显的钝化膜破裂修复行为,腐蚀是造成断裂的主要原因;在中等应变速率下,应力-化学交互作用提高了 Ti-35421 合金的应力腐蚀敏感性,且在钝化膜损伤、出现裂纹后,随着时间的延长造成的伤害也越来越大,电位下降,损伤修复时间延长。而在对钝化膜自修复行为研究时发现,无压应力条件下,溶解氧浓度高有利于钝化膜的自修复过程发展。在较大外加压应力作用下,随着压应力的增加划痕造成的伤害增加,同时钝化膜修复时间显著增加。不同压应力下 Ti-35421 合金划痕试验时的电流-时间变化曲线,总体呈现出和无压应力作用下相同的趋势,再钝化也分为 I-暂态阶段、II-暂态、稳态转变阶段、III-稳定化 3 个阶段。随着压应力的增加,划痕所引起的电流越来越大,当压应力为 5 MPa 时,划痕电流增加至 5.05 mA·cm⁻²,当压应力为 10 MPa 时,划痕电流增加至 11.73 mA·cm⁻²,当压应力为 20 MPa 时,划痕电流增加至 20.66 mA·cm⁻²。钝化膜自修复时间由 20 ms 增加到 500 ms,呈现数量级差别。

深海环境下,材料长期处于接近屈服强度的压应力下,导致了材料内部发生局部应力集中和结构体宏观应力分配不均等现象。相较于传统钢铁材料,钛合金由于其轻质的特性可提供更高的容重比,在深海重大工程装备中可以作为耐压结构的材料进行使用,但在长时间压

缩应力作用下的形变累积效应,导致结构体的安全性和稳定性下降。因此近年来已在钛合金高压压缩蠕变方面开展了先导性研究^[21-23]。在室温下对 Ti80 和 TC4 两种钛合金进行高压压缩蠕变实验时,发现这两种钛合金在室温压缩蠕变过程中均存在较大的应力阈值。当外加应力低于应力阈值时,蠕变曲线存在蠕变饱和现象,之后蠕变变形量几乎不再增加;当外加应力高于应力阈值时,蠕变曲线出现稳态蠕变阶段。蠕变速率对外加应力有着很强的敏感性,随外加应力增加,蠕变速率与蠕变变形量都有明显的增加^[21]。Ti80 合金在室温下压缩蠕变前后的 TEM 照片显示,合金经 610 MPa 应力下压缩蠕变实验后, α 相内的位错密度提高,大量的位错塞积在相界和晶界处,形成了位错网。位错网会阻碍位错的运动,并且在 610 MPa 下,没有新的可移动位错生成,这使得初始阶段的蠕变速率越来越慢,最终达到蠕变饱和,几乎不再产生蠕变变形。当外加应力提高到 780 MPa,发现 α 相内的位错数量和位错密度急剧增加。高应力下多个方向的滑移系被激活,柱面和锥面滑移开动,生成了新的可移动位错,使得蠕变变形继续进行下去,达到稳态蠕变阶段。通过 TEM 分析,认为 Ti80 钛合金蠕变变形主要是由 α 相内位错滑移导致的^[22]。

6 存在问题和发展趋势

经过近几年的发展,我国海洋工程用钛合金研发和应用已经获得了长足的进步,但依然存在诸多问题亟待解决,主要包括:

(1) 成本问题。经济性仍是制约钛合金在海洋工程领域推广应用的“阿喀琉斯之踵”。如何在保证质量的前提下,降低钛合金成本是重中之重。低成本钛合金的成分设计、回收料的利用、短流程技术的开发及高效的焊接技术,都是突破经济性的有效手段。

(2) 牌号杂乱。俄罗斯的海洋工程用钛合金以易焊接、焊后不预热为发展方向,美国以军民通用为主要原则,而我国在强度级别之外,至今没有形成海洋工程用钛合金材料体系的主攻方向,需要针对设备、管路、耐压壳体等的应用属性制定不同的合金体系。

(3) 规格型号不足。宽厚板、大口径无缝管等大尺寸钛合金产品加工技术尚不成熟,批次稳定性有待进一步提高。

(4) 基础研究不足。对合金元素和杂质元素以及组织、形貌等对合金性能的影响缺乏定量化描述,对多场耦合条件下(腐蚀介质、应力、温度等)钛合金的主要失效形式和防护技术的研究缺乏。

(5) 设计和评价方法缺失。缺乏钛质装备的设计方

法,缺乏使用及评价相关的规范和标准。

7 结 语

相比于钢铁、铜合金、复合材料等海洋工程材料,钛合金仍属于小众金属,但随着我国海洋装备向深海、远海及两极发展,钛合金轻质耐蚀的特性对装备的安全性和可靠性提供了巨大的保障。我国钛合金科技工作者应抓住机遇,夯实基础,在关键技术领域实现突破,为我国经济发展和国防力量建设做出应有的贡献。

参考文献 References

- [1] 常辉,周廉,王向东. 航空材料学报[J], 2014, 34(4): 37-43.
CHANG H, ZHOU L, WANG X D. Journal of Aeronautical Materials [J], 2014, 34(4): 37-43.
- [2] 周廉,等. 中国海洋工程材料发展战略咨询报告[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
ZHOU L, et al. Consultation Report on Development and Strategy of Engineering Materials for Ocean Applications in China[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [3] 常辉,廖志谦,王向东. 海洋工程钛金属材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
CHANG H, LIAO Z Q, WANG X D. Titanium Alloys for Marine Applications[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017.
- [4] YU Q, QI L, TSURU T, et al. Science[J], 2015, 347(6222): 635-639.
- [5] 周建龙,李晓刚,程学群,等. 腐蚀科学与防护技术[J], 2010, 22(1): 47-51.
ZHOU J L, LI X G, CHENG X Q, et al. Corrosion Science and Protection Technology[J], 2010, 22(1): 47-51.
- [6] VENKATESAN R, VENKATASAMY M A, BHASKARAN T A, et al. British Corrosion Journal[J], 2002, 37(4): 257-266.
- [7] 陈军,王廷询,周伟,等. 钛工业进展[J], 2015, 32(6): 8-12.
CHEN J, WANG T X, ZHOU W, et al. Titanium Industry Progress [J], 2015, 32(6): 8-12.
- [8] VENKATESAN R, DWARAKADASA E, RAVINDRAN M. Corrosion Prevention and Control[J], 2004, 51(3): 98-103.
- [9] 刘畅,董月成,方志刚,等. 稀有金属材料与工程[J], 2020, 49(5): 1607-1613.
LIU C, DONG Y C, FANG Z G, et al. Rare Metal Materials and Engineering[J], 2020, 49(5): 1607-1613.
- [10] 常辉,李佳佳,高桦,等. 一种含 Fe 的低成本近 β 型高强钛合金及其制备方法: CN106521236A[P]. 2017-03-22.
CHANG H, LI J J, GAO H, et al. A Low Cost Near Beta Titanium Alloy with Content of Fe and its Processing Method: CN106521236A[P]. 2017-03-22.
- [11] 王妍. 高强耐蚀 Ti-Al-Zr-Sn-Mo-Nb 合金的成分优化及组织性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
WANG Y. Study on the Composition Optimization and Microstructures

- and Properties of High-Strength and Corrosion Resistant Ti-Al-Zr-Sn-Mo-Nb Alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [12] 陈才敏. 耐蚀 Ti-Al-Nb-Zr-Mo 合金的成分优化及组织性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- CHEN C M. Study on the Composition Optimization and Microstructures and Properties of Corrosion Resistant Ti-Al-Nb-Zr-Mo Alloy [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [13] 尹雁飞, 赵永庆, 贾蔚菊, 等. 一种海洋工程用高强高韧可焊接钛合金: CN110106395A[P]. 2019-08-09.
- YIN Y F, ZHAO Y Q, JIA W J, *et al.* A Weldable Titanium Alloy Used for Marine Engineering with High Strength and High Toughness: CN11010 6395A[P]. 2019-08-09.
- [14] 李士凯, 杨治军, 张斌斌, 等. 一种高强度高冲击韧性的耐蚀可焊钛合金及其制备方法: CN106148761A[P]. 2016-11-23.
- LI S K, YANG Z J, ZHANG B B, *et al.* A High Strength and High Impact Toughness Titanium Alloy with Good Corrosion Resistance and Good Weldability and Its Processing Method; CN106148761A [P]. 2016-11-23.
- [15] 孙洋洋, 常辉, 方志刚, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2020, 49(5): 1623-1628.
- SUN Y Y, CHANG H, FANG Z G, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2020, 49(5): 1623-1628.
- [16] WANG F, JIANG Z, CUI W C, *et al.* Journal of Ship Mechanics[J], 2018, 22(6): 727-735.
- [17] WANG F, CUI W C. Materials Science & Engineering: A[J], 2015(642): 136-141.
- [18] WANG K, WANG F, CUI W C, *et al.* Acta Metallurgica Sinica [J], 2015, 28(5): 619-627.
- [19] 渠佳慧. 高强 Ti-35421 合金应力腐蚀及表面钝化膜自修复[D]. 南京: 南京工业大学, 2019.
- LIANG J H. Stress Corrosion and Surface Passivation Film Self-Repair of High Strength Ti-35421 Alloy [D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2019.
- [20] 山川. 钛合金的应力腐蚀开裂与腐蚀电化学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- SHAN C. The Study of Stress Corrosion Cracking Behavior and Corrosion Electrochemical Behavior of Titanium Alloy [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [21] 董月成, 方志刚, 常辉, 等. 中国材料进展[J], 2020, 39(03): 185-189.
- DONG Y C, FANG Z G, CHANG H, *et al.* Materials China [J], 2020, 39(03): 185-189.
- [22] 陈博文. Ti80 和 TC4 ELI 钛合金的室温高压压缩蠕变行为研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2017.
- CHEN B W. Research on High Pressure Compression Creep Behaviors of Ti80 and TC4 ELI Titanium Alloy at Room Temperature [D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2017.
- [23] 屈平. 深海钛合金耐压结构蠕变特性探索研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2015.
- QU P. Exploratory Study of the Creep Characteristic for Titanium Deep-Sea Pressure Shell [D]. Beijing: China Ship Research Academy, 2015.

(编辑 惠 琼)