

引用格式: 赵永庆. 海洋工程用钛思考[J]. 中国材料进展, 2025, 44(6): 513-515.

ZHAO Y Q. Think About Titanium Application for Marine Engineering[J]. Materials China, 2025, 44(6): 513-515.

特约专栏

海洋工程用钛思考

赵永庆

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘 要: 钛及钛合金因其优异的综合性能, 是海洋工程的理想结构材料, 已在海洋工程中获得了一些实际应用。简要分析了我国海洋领域用钛取得的主要业绩, 并指出未来的发展方向。

关键词: 钛合金; 海洋工程; 应用; 发展方向

中图分类号: TG146.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2025)06-0513-03

Think About Titanium Application for Marine Engineering

ZHAO Yongqing

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

Abstract: Because of their excellent comprehensive properties, titanium and its alloys are ideal structural materials for marine engineering and they have been used for marine engineering. The article briefly analyzes the main achievements of titanium use in China's marine field and points out the future development direction.

Key words: titanium alloy; marine engineering; application; development direction

1 前 言

随着全球海洋资源开发的加速, 海洋装备在船舶、石油开采、资源勘探、海底通讯等领域的需求日益增加。作为海洋装备重要部件的材料, 必须同时具备优异的耐腐蚀性、高强度、高比强度、无磁性和抗腐蚀疲劳等性能。钛合金因其优异的综合性能, 可以满足海洋装备对关键结构材料的众多性能需求, 是名副其实的“海洋金属”。目前, 钛及钛合金已在国内外海洋装备中获得了应用, 如潜艇、深潜器、航母、舰艇、石油开采装置等, 使这些装备的寿命、功能、能力、水平等得到明显提升。尽管钛合金已在海洋领域获得了应用, 但是因成本高等原因限制了钛合金在海洋领域的广泛应用。本文简要介绍我国海洋领域用钛取得的主要业绩, 并指出未来的发展方向。

2 我国海洋领域用钛取得的主要业绩

从我国开始钛及钛合金材料研发以来, 我国高度重视海洋领域用钛的研究工作, 从起初的舰船用钛到深潜器等用钛再到如今的深海装备用钛, 都取得了较好的业绩。

(1) 初步建立了海洋用钛体系

经过 60 年的发展, 我国逐步建立了海洋用钛体系, 尤其是船舶用钛体系, 形成了低强(如纯钛、TA5 等)、中强(如 Ti75、Ti31、Ti70 等)、高强(如 Ti80、Ti-B19 等)钛合金系列, 基本可以满足我国船舶用钛的需求。我国不仅仿制了必要的海洋用钛合金, 也依据海洋需求创新研制了不少海洋用钛合金(如 Ti75、Ti31、Ti70、Ti80、Ti-B19 等), 部分创新研制的钛合金也进入了国家标准(Ti75、Ti31、Ti70、Ti80 等)。不管是仿制钛合金还是创新研制的钛合金都具备耐海水腐蚀、高比强度、无磁、可焊、高韧性、良好工艺等性能, 在我国海洋工程不同部件上均获得了成功应用(Ti-B19 除外)。

(2) 为我国海洋装备提供了大量合格的材料

我国海洋用钛的主要研发、生产单位西北有色金属研究院、宝钛集团、中国船舶集团有限公司第七二五研

收稿日期: 2025-02-05

第一作者: 赵永庆, 男, 1966 年生, 教授, 博士生导师,

Email: trc@c-nin.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202502003

研究所、西部钛业有限责任公司、西部超导材料科技股份有限公司、中国科学院金属研究所等单位,根据用户的需求,提供了大量各类规格的管材、棒材、板材、环形件、焊丝、铸件、耐压壳体、管道管件等,基本满足了海洋客户的需求。

(3) 海洋用钛的科研生产装备实力大幅提升

近 10 年,我国用于海洋用钛的科研生产装备能力、工艺技术水平大幅提升。如真空熔炼设备从最早 3 t 以下真空自耗电弧炉发展到如今最大的 20 t 真空自耗电弧炉和大型冷床炉等配套系列,使我国海洋用钛的熔炼装备水平不低于美俄等海洋用钛发达国家;锻造设备从最早的 1250 t 压力锻造设备发展到如今的 10 000 t 快锻机、18 000 t 锻造机、16 m 环轧机、5.5 m 板材轧机、成套系列的管材轧机等,可以锻造 17 t 的钛合金锭坯。科研生产装备实力的提升,使服务于海洋用钛的能力得到大幅提高。

(4) 初步形成了海洋用钛的标准

经过 60 年的发展,我国初步建立了舰船用钛的国家标准,如 GJB 943A 舰船用钛合金锻件规范、GJB 9574 舰船用钛及钛合金铸件规范、GJB 944A 舰船用钛及钛合金板材规范等,但不全面,更广泛的海洋用钛还没有相应的标准规范。

(5) 初步建立了创新平台

涉及海洋用钛的国家级创新平台主要有“海洋腐蚀与防护全国重点实验室”、“海洋关键材料全国重点实验室”、“海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室”、“国家材料腐蚀与防护科学数据中心”等,主要是围绕解决船舶和海洋工程等在海环境中的腐蚀和海洋生物污损问题,开展腐蚀研究、耐蚀材料研究,电化学保护技术、涂层防护技术、生物材料技术方向的探索性、创新性的基础、应用基础研究和关键技术攻关;面向国家海洋工程与高技术装备对关键材料的战略需求,聚焦复杂海洋环境与材料相互作用的重大科学问题,发展海洋关键材料的化学、力学、温度、生物等多场耦合损伤理论,变革海洋关键材料设计与制备技术,创新海洋长效绿色防护材料,突破海洋结构与功能一体化复合材料,探索海洋前沿功能材料,实现自主可控;根据国际和行业的发展需求,针对海洋装备用金属材料急需解决的技术瓶颈与关键装备材料,主要从事海洋装备用金属材料的应用基础研究、关键技术和共性技术研究;建设我国规范化的材料环境腐蚀野外试验站网与评价技术体系,建成大型数据库和国家级共享服务平台,为新装备新材料研发奠定了坚实的基础,解决了若干国家重大工程的材料腐蚀难题。

当然也有一些国家级创新平台也开展了海洋用钛的

研发工作,如“稀有金属材料加工国家工程中心”、“稀有金属材料国家技术创新中心”、“稀有金属材料科研生产基地”等。省部级的涉及海洋用钛的创新平台更多。

这些创新平台的建立,促进了海洋用钛的研发、生产,提升了研究水平和产品的质量。

(6) 初步建立了海洋用钛的人才队伍

经过 60 年的发展,我国初步建立了海洋用钛的专业人才队伍,形成了由国家级领军人才、省部级领军人才、教授、博士、高级技师等组成的人才队伍,促进了海洋用钛的研发和生产。

(7) 设立了海洋用钛的专项

在国家的各类计划中均有海洋用钛的项目,如国家重点研发计划项目、国家自然科学基金资助项目、军科委计划项目、共性技术项目、民口配套计划项目等。2024 年国家自然科学基金委员会设立了“粉末冶金法制备低成本大体积高均质钛合金构件的基础研究”专项,针对深海装备用大单重(数十吨)钛合金坯及大尺寸构件制备难、成形难、调性难等关键难题,建立基于粉末冶金的高强韧大体积低成本钛合金成分设计新理论与新方法;揭示大体积高均质钛合金坯粉末冶金制备过程原理与调性机理;厘清大尺寸粉末冶金钛合金构件失效机理并提出全生命周期失效控制新方法。形成粉末冶金法制备低成本大尺寸高均质钛合金构件的新理论、新技术,为深海领域重大装备的材料自主保障打下坚实基础。将深入研究深海服役粉末冶金高强韧钛合金的成分设计及增韧机理、粉末冶金钛合金微纳孔隙强韧化机理、粉末冶金钛基复合材料设计与高抗损伤机理、氢在钛中的扩散行为及氢均匀脆化机理、粉末冶金高强韧钛合金构件近净成形高效致密化机理、大尺寸粉末冶金高强韧钛合金塑性成形组织演变模型与模拟预测、大尺寸高强韧钛合金构件粉末冶金制备全流程组织演变与性能调控机理、粉末冶金钛合金深海腐蚀疲劳失效机理及控制方法、深海服役粉末冶金钛合金构件长效防污表面改性技术及防污机理。

3 海洋用钛的未来技术发展方向

尽管我国海洋用钛已取得了长足的进步,但仍然有众多的科技问题需要解决。

(1) 海洋用钛材的全链条低成本化制备技术

钛是海洋金属,是海洋应用的理想金属材料,但是钛及钛合金冶金、加工等相对困难,成本高,限制了钛合金材料在海洋领域的广泛应用。在满足性能要求的前提下,需要从全链条途径降低钛材的制造成本,当制造成本达到现有钛材成本的 30%~50%,钛材才可能大量应用于海洋领域。

(2) 满足海洋服役环境的新型钛合金研制

尽管我国已研制了不少海洋用钛合金，但是针对海洋服役环境的新要求，需要研制出更好满足新应用场景要求的新型钛合金，使其达到高强、高韧、耐蚀、耐疲劳等要求，同时具有良好的工艺性能和焊接性能。

(3) 强化应用基础研究

如海洋环境的压缩蠕变机理、抗损伤机理、抗爆机制、腐蚀疲劳失效机理、防海洋生物附着技术、防污表面改性技术及防污机理等，以及海洋应用场景的多场耦合损伤机理，包括钛材的化学、力学、温度、生物等多场耦合损伤理论，及组织性能演化规律等。

(4) 海洋用各种强度级别的大规格钛材研发

包括低强、中强和高强钛合金的大规格板材、环材、管材、管件、铸件等，需要关注材料大型化后的合金成分的均匀性，组织性能一致性、均匀性、各向异性，以

及大规格材料板形等控制技术，以确保材料性能稳定，满足使用要求。

(5) 扩大海洋用钛合金品种，强化材料的工程化

随着我国海洋工程快速发展对钛合金的需求日益增加，需要继续扩大海洋用钛合金品种、规格、使用规模和应用范围，强化钛合金材料的工程化，满足海洋工程的需求。

(6) 海洋用钛的探伤技术、焊接技术等

随着海洋用钛材规格的大型化，给钛材的无损探伤、焊接带来明显的困难，需要发展相适应的探伤技术和焊接技术。

(7) 建立、完善海洋用钛合金体系及标准规范

随着海洋用钛的扩大，需要建立、完善我国海洋用钛合金体系及标准规范，形成主干钛合金，避免重复研究。



专栏特约编辑赵永庆



特约撰稿人郑友平



特约撰稿人李 瑞



特约撰稿人贾蔚菊

赵永庆：男，1966年生，博士、教授、博导，国家“973”计划首席科学家(钛合金)、国家万人计划科技创新领军人才、国家重点领域创新团队“钛合金研制创新团队”带头人，西北有色金属研究院首席工程师。自1991年参加工作以来，一直从事钛合金的研发。主持承担包括国家“973”计划项目、国家科技支撑计划项目、国家“863”计划项目、国防“973”计划项目、国际合作项目、军工类项目、国家自然科学基金(重点)资助项目等；先后获得国家科技进步二等奖、三等奖各1项，省部级科技一

等奖8项、二等奖12项；创新研制钛合金30多种；获授权发明专利102件；发表SCI收录论文440篇；作为第1主编编著《钛及钛合金金相图谱》、《钛合金相变与热处理》、《新型合金材料——钛合金》3部专著，作为第二主编编著《钛合金及应用》、《中国钛合金材料及应用发展战略研究》2部专著。先后荣获全国劳动模范、新世纪百千万人才工程国家级人选、政府特殊津贴专家、全国优秀科技工作者等荣誉。

郑友平：博士、高级工程师、中共党员。现任攀钢集团研究院钛金

属研究所研究员、副所长，兼任四川省金属学会材料学术委员会委员、鞍钢钒钛研究院学术委员会委员、攀钢集团重要产业技术牵头人。长期从事钛及钛合金材料及其加工工艺的研究工作。承担国家实验室项目课题、国家重点研发计划子课题、四川省重大专项课题、鞍钢集团重大项目、国铁集团重点课题等20余项；发表学术论文30余篇；获授权发明专利5项。获攀钢集团研究院优秀共产党员、攀钢集团研究院先进工作者、四川省金属学会先进工作者荣誉称号，以及国防科工局

国防科技青年“建言献策”二等奖、鞍钢集团科学技术二等奖等荣誉奖项。

李 瑞：男，1988年生，现任宝钛集团有限公司研究院综合部主任、校外合作硕士生导师。长期从事新型中强高韧钛合金研制及钛合金材料成型工艺和性能调控的研究。先后承担国家重点研发计划项目1项、国家科技重大专项2项、陕西省重点研发计划项目1项；已获授权专利4件；在中文核心期刊及以上期刊发表论文20多篇，其中SCI论文4篇，EI论文1篇。荣获“宝鸡市青年科技新

星”称号。

贾蔚菊：女，1981年生，正高级工程师，现任西北有色金属研究院钛合金研究所所长助理，兼任ISO/TC79/SC11国际标准化组织国内对口工作组专家、陕西有色金属学会稀有金属材料分会副主任、陕西省海洋工程稀有金属材料工程研究中心副主任等职务。长期从事钛合金材料工程化关键技术和应用基础研究。先后承担国家自然科学基金、国家重点研发计划、国家基础加强计划、国家军品配套等各类科研项目40余项；在 *Materials Science and Engineering: A*, *Materials & Design* 等国内外期刊发表学术论文50余篇；获授权发明专利10余件。获中国有色金属工业科学技术奖一等奖1项；获陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目“首席工程师”、陕西省“三八红旗手”等称号。