

本文参考文献引用格式:陈凤林,葛可可,侯春明.舰船用钛合金焊接技术进展[J].电焊机,2019,49(08):60-65.

舰船用钛合金焊接技术进展

陈凤林,葛可可,侯春明

(中国船舶科学研究中心 深海载人装备国家重点实验室,江苏 无锡 214082)

摘要:阐明舰船建造使用钛及钛合金的必要性,综述舰船用钛及钛合金种类、应用场合和焊接性。分析TIG焊、电子束焊和激光焊等先进焊接技术的工艺特征及适用性,指出现阶段舰船用钛合金在材料、工艺、设备方面存在的问题。未来舰船用钛合金焊接技术发展应重点关注高端钛合金焊接材料制备工艺的开发和自动化、智能化焊接装备的研制。

关键词:钛及钛合金;舰船;焊接技术

中图分类号: TG457.19

文献标志码: C

文章编号: 1001-2303(2019)08-0060-06

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2019.08.11

Progress in welding technology of titanium alloy for naval vessels

CHEN Fenglin, GE Keke, HOU Chunming

(State Key Laboratory of Deep-Sea Manned Vehicles, China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

Abstract: The necessity of using titanium and titanium alloys in ship construction is expounded, the types, applications and weld ability of titanium alloys used in naval ships are reviewed. Then the characteristics and adaptability of advanced welding technology of ship titanium alloy, such as TIG, electron beam, laser welding, are described, the problem in material, process and equipment of titanium alloys used in naval ships are pointed out. Finally, it is proposed that attention should be paid to advanced titanium alloy materials preparation process and automatic, intelligent equipment development.

Key words: titanium and titanium alloys; naval ships; welding technology

0 前言

舰船由于长期浸泡在海水或者暴露于海洋高盐、高湿的大气环境中,其结构及设备易受腐蚀且保护困难,其建造材料需要良好的耐蚀性、耐久性、牢固性、可靠性及稳定性。钛是20世纪50年代发展起来的一种重要结构金属,钛及钛合金因兼有高比强度、高熔化温度、小热膨胀系数、耐疲劳、非磁性、生物惰性、抗裂性等优良特质被称作“海洋金属”,是一种理想的舰船用材^[1-2]。另一方面,舰船结构规格一般厚大,大型材的焊接成型是现代造船的关键技术之一^[3]。因此,对于舰船常用钛合金及其焊接工艺研究与开发具有重要的理论和工程应用意义。

收稿日期:2019-04-19

作者简介:陈凤林(1990—),男,硕士,主要从事钛合金焊接工艺及自动化焊接设备的研究工作。E-mail: 171731305@qq.com。

1 钛及钛合金在舰船的应用

1.1 舰船用钛及钛合金介绍

钛是继铝、铁、镁之后在地壳中含量最大的金属元素,为银白色高熔点轻金属,主要物理性能:密度 4.51 g/cm^3 ,熔点 $1\ 688\text{ }^\circ\text{C}$,比热容 $522\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$,热导率 $16\text{ J/(m}\cdot\text{s}\cdot\text{K)}$ 。纯钛常温下容易与氧、氮、氢反应生成一系列稳定氧化物,而钛合金是指以钛为基体,加入铝、铬、锰、锡、钼等元素组成的合金。按照合金退火组织状态可以将钛合金大致分成 α 型(近 α 型)、 β (近 β 型)型、 $\alpha+\beta$ 型三大类,国内牌号分别以TA、TB、TC表示。

自20世纪60年代起,钛及钛合金逐渐被用于舰船工业,随着技术的发展,钛材在舰船上的应用越来越广泛,从各类大、中、小水面舰艇、到水下潜艇和深潜器,从耐压主结构体到舰艇内部管系、热交

换器、海水淡化装置、发动机零部件等,钛及钛合金在舰船领域无处不在,是海洋工程的理想材料^[4-6]。

美国、俄罗斯、日本、欧洲等国家和地区开展了一系列的舰船钛合金研究和应用,其中俄罗斯走在世界前列。俄罗斯拥有专门的船用钛合金体系,也形成了系列强度级别的钛合金成熟产品,包含 490 MPa、585 MPa、680 MPa、785 MPa 等级别。俄罗斯不仅在水面舰船、航母、深潜器制造中大量采用钛合金结构,甚至拥有多艘全钛化的大深度核潜艇,其台风级核潜艇仅外壳用钛量高达 9 000 t,最大下潜深度 500 m,潜行速度和持续潜航时间远超常规高强钢潜艇^[7-8]。美国海军主导开发了可进行大规格型材焊接的 Ti-5111 钛合金,名义成分为 Ti-5Al-1V-1Sn-1Zr-0.8Mo,其冲击韧性高于传统 TC4 钛合金,广泛用于舰船制造业,包括各种动力潜艇、水面艇动力装置、海水管路管道、冷却器、推进器、海水工作系统、消防泵、紧固件等。美国还致力于在海军中开展低成本钛材应用技术研究,设立了专项低成本焊接技术课题,加速海军上钛及钛合金应用进程^[9-10]。日本主要将钛合金应用在民用渔船、高速警备艇、导弹快艇和载人深潜器方面,包括深海潜水调查船的外壳骨架、管道、均压容器等^[11]。日本还在收集纯钛及钛合金船体结构材料的数据和制订相应强度标准方面做了大量工作,以期扩大钛在船舶上的应用^[12]。

我国舰船用钛合金研究起步很早,在钛及钛合金的研制开发、舰船制造、装船试航等方面投入了相当精力并取得大量成果。除了国外常用的 TA2、TA5、TA7、TC4,国内高校、企业专门针对舰船应用特殊要求,研制出具有不同强度的船用耐蚀钛合金,材料品种涵盖管材、型材、板材、铸件、锻件等,基本满足水面舰艇、潜艇和深潜器不同强度级别及不同部位的使用要求。国内部分典型舰船用钛合金的牌号、合金强度级别以及应用场合汇总如表 1 所示^[13-14]。

1.2 舰船用钛及钛合金焊接性分析

为了满足船舶结构的使用要求,舰船用钛合金需要强度、塑性、韧性最佳配合以及良好的焊接加工性能,多数采用 β 稳定系数 K_β 较小的 α 型和近 α 型钛合金以及 $\alpha+\beta$ 型钛合金,不同钛合金的性能特征如表 2 所示^[15-16]。 α 型钛合金是 Ti-Al 系钛合金,Al 的添入提高了 α 型钛合金的比强度、热强性以及细化合金晶粒,相比于其他钛合金其加工性能和焊接性能更好,可焊性优异。 $\alpha+\beta$ 型钛合金属于两相合金,既含大量密排六方晶格的 α 稳定相,又含

表 1 舰船用钛合金及应用

类别	牌号	屈服强度 σ_s /MPa	应用场合
低强度钛合金	TA2	320	声学装置及换能器零件
	Ti31	490	热交换器及海水淡化装置
	TA5	490	通海管路、阀、泵及附件
中强度钛合金	TA5A	590	系泊装置及发射装置
	TA17	560	船体各类结构件
	Ti75	630	动力驱动装置、推进器轴、泵、阀
高强度钛合金	Ti80	785	高压容器、潜艇耐压壳体
	TC4	825	水中兵器系统、蓄电器
	TC4-ELI	800	深潜器耐压壳体、外壳骨架、螺旋桨
	Ti-B19	1 150	舰船机械部件、高压容器

一定量的体心立方晶格的 β 相,保证可焊性的同时提高了工艺塑性和实现了可热处理性。

表 2 各类钛合金性能特征

合金分类	K_β 系数	性能特点
α /近 α 型	≤ 0.25	低/中强度、非热处理强化、易焊接、易成型、耐腐蚀
$\alpha+\beta$ 型	0.3~1.4	中强度、热处理强化、焊接性一般、综合性能优良
β 型钛合金	1.5~3.0	高强度、热处理析出强化、加工性能好,不易焊接

钛合金特有的物理化学性能决定了其焊接性与钢、铝等常规金属不同,其主要焊接特性^[17-18]有:

(1) 钛的高温化学活性强。对杂质和水分比较敏感,极易被空气、水分、油脂和氧化皮等污染形成夹杂,降低塑性和韧性。钛与 H、O、N 元素的亲和力很强,从 250 °C 开始吸氢,形成 TiH₂ 低强度相,增大焊缝脆性,继续升温至 400 °C 和 600 °C 开始吸氧、吸氮,进一步降低合金塑性。

(2) 气孔及冷裂纹倾向严重。高温状态氢易溶入焊接熔池,冷却结晶时过饱和的氢来不及从熔池逸出会在焊缝中形成气孔缺陷。同时钛及钛合金膨胀系数较大,温升引起较大的内应力,导致冷裂纹和延迟裂纹敏感性较高。

(3) 焊接易过热。钛的熔点约为 1 668 °C,热容量大,与钢相比,熔化焊接时需要更多的热量输入,熔池尺寸更大且温度更高,热导率低,传热系数约为钢的 50%,焊缝及热影响区金属在高温下的停留时间较长,易引起焊接接头的过热倾向,使晶粒变得十分粗大,甚至引起局部相变,恶化接头塑性和组织均一性。

(4) 钛合金的焊接变形大。钛的纵向弹性模量约为不锈钢的 50%，冷变形的回弹能力强，约为不锈钢的 2~3 倍，因此钛合金校形难度大，在焊接过程中需采取有效措施预防焊接变形，对工装夹具要求更加严格。

2 舰船钛合金焊接工艺

2.1 TIG 焊

舰船钛合金最常用的焊接工艺是 TIG 焊，即钨极氩弧焊。TIG 焊接利用高纯度氩气隔绝空气，保护钛合金焊接熔池免受杂质污染，然后利用钨电极与钛合金焊件间产生的电弧热熔化母材和焊丝，形成良好的冶金结合，得到质量优异的焊缝。根据不同的钛合金焊接厚度及成型品质要求，可以选择不同的 TIG 焊接工艺，各类 TIG 焊接工艺及其技术特征如表 3 所示。

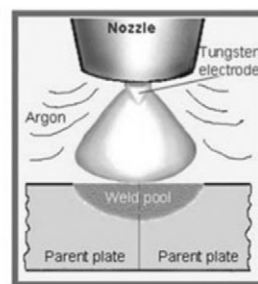
表 3 TIG 焊接工艺技术特征

分类	技术特征
手工 TIG 焊	成形好,熔深浅,效率低,适应性强,柔性好
A-TIG 焊	电弧集中、熔透能力强、残余应力和焊接变形小
窄间隙 TIG 焊	成形好,适合大厚板焊接,焊接设备成本高

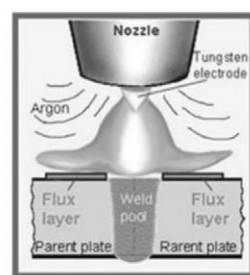
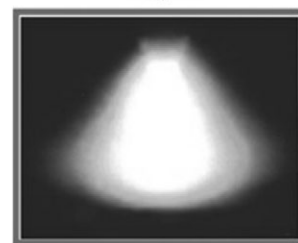
手工 TIG 焊因其设备简单、适用性强，应用场合十分广泛，一般厚度小于 10 mm 的薄板以及厚板的打底焊接均可采用。另外，TIG 多层焊可以胜任中厚钛合金板材的焊接，此时每一道焊缝的保护都对最后的成形质量起到至关重要的作用，焊接质量控制更为困难和严格。

活性焊剂氩弧焊简称 A-TIG 焊，最早由乌克兰巴顿焊接研究所在 20 世纪 60 年代研制，英国和美国在 20 世纪末也相继开展有关研究。A-TIG 焊的主要特征是在施焊板材表面覆上一层活性剂，使得电弧收缩和改变熔池流态，增加焊接熔深^[9]。与常规 TIG 相比，在焊接参数不变的条件下，A-TIG 可以形成窄而深的熔池，熔宽减小，熔深提高，如图 1 所示^[20]。在焊接厚板时能够减少焊接道次，提高焊接效率和成型质量。焊接薄板时，A-TIG 可以提高焊接速度，减少薄板热应力变形，改善薄板焊接质量。

窄间隙 TIG 焊接是由美国率先提出的为解决大厚度结构件焊接的一种新型技术，其坡口间隙窄而深，可以大幅减小焊缝截面积，降低焊缝金属填充量，用较小的线能量实现较高的生产效益，同时保留常规 TIG 特性，焊接过程电弧稳定、飞溅少，适用



a 常规 TIG



b A-TIG

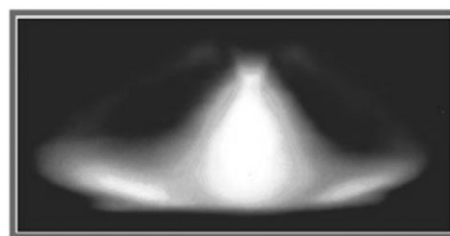


图 1 电弧及熔池形貌

全位置焊接，焊接质量高，焊缝极限深度可达 200 mm。“蛟龙”号 7 000 m 深潜器的钛合金耐压舱体就是采用手工 TIG 窄间隙焊接成型，厚度达到 114 mm。20 世纪末，乌克兰巴顿焊接研究所创造性地将磁场引入到窄间隙焊接过程中，开发出磁控窄间隙 TIG 焊接技术，其原理如图 2 所示^[21]，该技术是在 TIG 焊电弧前端、焊接方向上添加铁心和线圈，在线圈中通以交变电流提供电弧周期变化的洛伦兹力，从而解

决常规窄间隙焊接中的侧壁熔合不良问题,单面焊接厚度可达 80~120 mm。窄间隙焊缝接头横截面

宏观形貌如图 3 所示,侧壁熔合良好,接头无明显缺陷^[22]。

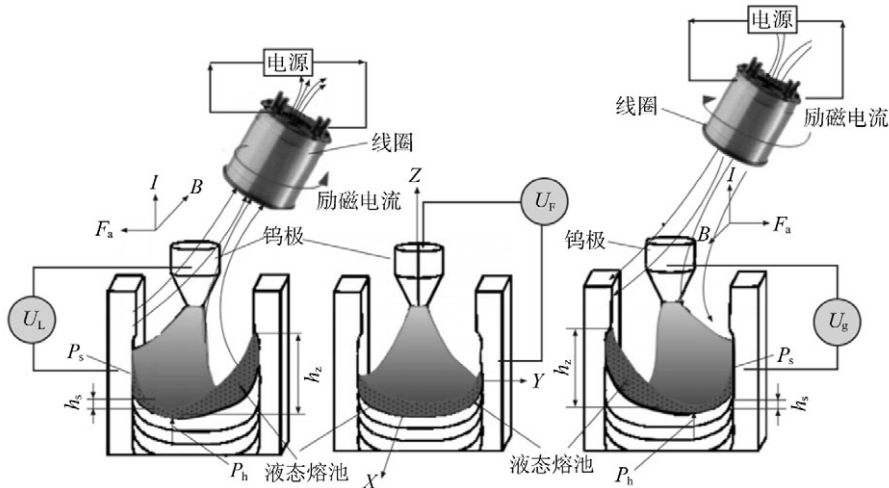


图 2 磁控窄间隙 TIG 焊接方法原理

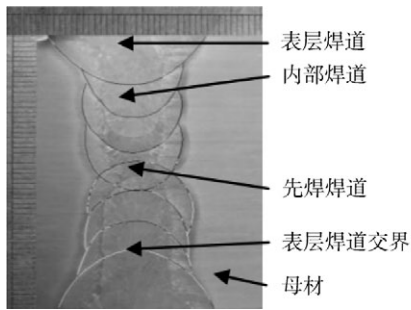


图 3 磁控窄间隙钛合金焊缝接头横截面宏观形貌

哈尔滨工业大学从巴顿焊接研究所引进 TIG 自动焊接设备,通过消化吸收,自行设计了厚板钛合金窄间隙自动化焊接系统,形成了技术领先的国产厚板钛合金焊接技术,完成了设备国产化,最大焊接厚度可达 110 mm,坡口宽度不大于 12 mm。山东大学基于 PLC 建立了一套适用于厚板窄间隙磁控 TIG 焊接自动控制系统,集成了焊接过程视频监控功能,能够对窄间隙磁控电弧 TIG 焊接过程实现有效和可靠控制,成功试焊了 110 mm 厚板钛合金。中船重工 725 所在 2005 年启动大厚度钛合金窄间隙焊接技术研究,并在 2012 年获得相关授权专利。广东省焊接技术研究所余陈、张宇鹏等人采用磁控窄间隙 TIG 焊接方法焊接 30 mm 和 100 mm 厚 TC4 钛合金,分析了磁场强度、电弧摆动、电极位置对焊缝组织成形的影响^[23]。

2.2 真空电子束焊

电子束焊接是利用聚焦的高速运动的电子轰击工件待焊处所产生的金属熔合的一种高能束焊

接方法。它一般在高真空环境下进行,既避免了电子受到磁场影响而无法聚焦,又防止了大气环境对焊接区的污染,加上其设备精准度和自动化程度高,再现性良好,非常适合焊接具有高熔点、易氧化的钛合金金属。另外,电子束焊接方法能量密度极高、加工速度极快且焊接过程精确可控,因此可获得大深宽比的焊缝,且焊缝热影响区窄,可在不开坡口情况下对大厚板件实现穿透焊接,因此成为焊接钛合金大厚板的优选方法。典型的真空电子束焊接设备、焊缝以及焊接过程如图 4 所示。

钛合金电子束焊接在深海载人装备领域应用广泛,中国的深海勇士号、日本的深海 6500 号、法国的鹦鹉螺号、美国的阿尔文号等国内外众多典型载人潜水器耐压球壳以及部分浮力球都是由真空电子束焊接完成。巴顿焊接研究所利用 60 kV\60 kW 的中压电子束设备完成了厚 100~200 mm 的钛合金舰艇舱类结构以及大型燃机发动机、热交换器管及管板结构的焊接制造^[24]。中船重工 725 所采用大功率电子束焊接 Ti80 厚板焊缝熔深达 56 mm,焊接 TB19 厚板焊缝熔深接近 130 mm,焊缝深宽比大,热影响区(HAZ)宽度远远小于传统 TIG 焊 HAZ 宽度,焊缝表面成形良好,焊缝质量优异^[25]。

2.3 激光焊

激光焊是以聚焦的激光束作为能源轰击焊件所产生的热量进行焊接的一种高效精密焊接方法,其特征是激光束能量密度高,可获得大熔深和较高的焊接速度,且焊缝和焊接热影响区窄,焊接变形和

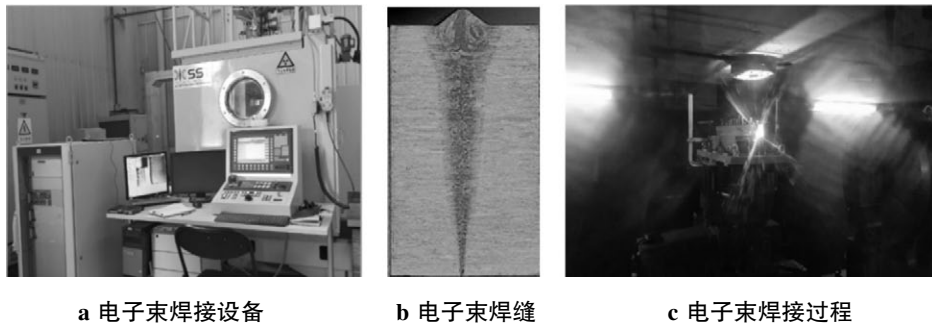


图 4 电子束焊接技术

残余应力很小。另外,激光易用反射镜或棱镜改变光路,可在工件任意位置上焊接。因此,激光焊接技术研究受到广泛重视,在钛合金结构件焊接中扮演着越来越重要的角色,尤其是钛合金热传导率较低,且对红外线光的吸收率较高,激光焊在钛及钛合金薄板及精密零件的焊接上拥有良好的应用前景^[26]。随着大功率激光器的开发与应用,激光焊接的优势也越来越明显,其质量和效率均优于其他熔焊方法。激光焊已成功应用于钛合金焊接中,只要工艺参数匹配合理,激光焊 TC4 钛合金焊缝内部质量可达到 GB3233-87K 级焊缝要求^[27]。

钛合金激光焊技术的不足之处在于,易产生咬边、凹陷和气孔缺陷,接装配精度要求高等,为此出现了激光-电弧复合焊技术。激光-TIG 电弧复合焊接过程如图 5 所示^[28],该焊接工艺结合了激光与电弧这两个独立热源的优势,同时在很大程度上避免了二者的弊端,产生了 1+1>2 的效果,兼具高能量密度、高能量利用率、高电弧稳定性等特点。

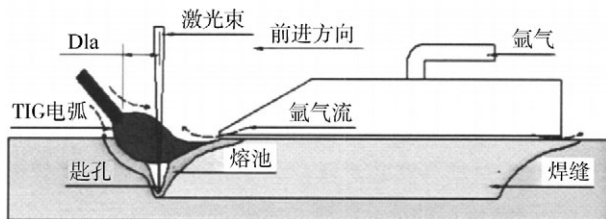


图 5 窄间隙激光-电弧复合焊接方法示意

3 存在的问题

3.1 焊材质量

国产钛合金焊材质量有待提升,高尖端船舶用钛合金焊材种类不全。目前钛合金越来越广泛地在舰船上普及应用,国内钛合金生产企业也拥有各类普通规格板材、环材、棒材的制备能力,但在批次稳定性和焊接操作工艺性能上与进口钛合金材料相比仍存在一定差距,尤其是大规格宽厚板材、型材、

复杂的铸件。国内大规格钛合金材料同一批次不同位置的组织成分呈现差异化,不同批次的质量稳定性很难保证。另外,国内配套钛合金焊丝种类较少,潜舰、钻井管等使用的大量钛合金焊材仍需进口。国产配套焊材发展相对滞后,基本通过引进国外焊材后吸收消化,缺乏高尖端高质量钛合金配套焊材自主研发能力。

3.2 焊接工艺及装备

大厚度钛合金深熔焊工艺和机理基础科学研究不足,焊接自动化专机和焊接机器人开发不充分。对于大型承力舰船用钛合金结构件而言,其主要承载焊缝长度和厚度规格大,因此对焊接接头性能和结构可靠性要求较高,然而国内从 1992 年才开始致力于 10 mm 以上厚板钛合金在舰船中的应用及其焊接技术的研究,到现在仍处于探索阶段,缺乏对大厚度、大规格钛合金深熔焊系统性的工艺规范研究,无法从理论角度阐明沿熔深和熔宽方向大厚度钛合金接头力学性能的分散差异性,未充分认识焊接工艺、焊缝形状特征、微观组织性能与接头力学行为之间的相关性规律,缺乏有效的大厚度钛合金焊接性能调控技术方法,钛合金焊缝控氢和焊接残余应力消除等关键技术与国外差距明显,需要加深对合金元素作用机理、服役可靠性、安全寿命评估等基础科学的研究^[29-30]。另外国内舰船钛合金焊接方式仍然以手工气体保护焊为主,窄间隙焊接技术近年也在大厚板钛合金焊接中发挥作用,但是国内造船及相关研究单位整体焊接自动化水平与国外存在差距,无法满足高标准作战技术性能的现代舰船制造要求,尚缺乏高可靠性、高效率的自动化焊接专机和智能化焊接机器人。

4 结论

目前我国舰船用钛合金体系已经初步建立,形成了各类型钛金牌号,在水面舰艇、潜艇和深潜

器各系统中都有应用案例,近年来国内舰船用钛及钛合金焊接技术研究也取得了一定成果,但在高端钛合金焊接材料、工艺技术以及自动化智能化集成焊接设备方面与国外还有明显差距,需要我国钛工业和焊接技术专家、学者共同努力,立足基础科学问题,积累工程经验,研发新型舰船钛合金牌号,降低钛合金材料制备成本、优化现有焊接工艺,重点突破大型钛合金的高效自动化焊接新工艺、设备,扩大钛及钛合金在舰船用材中的比例。

参考文献:

- [1] 黄晓艳,刘波,李雪. 钛合金在舰船上的应用[J]. 南方金属,2005(12):10.
- [2] 孙建科,孟祥军,陈春和,等. 我国船用钛合金研究、应用及发展[J]. 金属学报,2002,38(S):33.
- [3] 李献军,冯军宁,羊玉兰. 钛在海洋工程领域应用现状及发展趋势[J]. 世界有色金属,2014(9):30-31.
- [4] 胡耀君. 发展中的船用钛合金[J]. 钛工业进展,1998(4):1-5.
- [5] 冯颖芳,康浩方. 环境材料-钛的新应用[J]. 金属学报,2002(38):543-544.
- [6] 王镐,祝建雯,何瑜,等. 钛在舰船领域的应用现状及展望[J]. 钛工业进展,2003(6):42-44.
- [7] 李献军,王镐,马忠贤,等. 钛在舰船领域的应用及前景[J]. 中国钛业,2013(2):3-7.
- [8] 蒋成禹,徐济进,严铿,等. 俄罗斯海军用钛及我们的思考[J]. 钛工业进展,2003(6):32-36.
- [9] 邹武装. 钛手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2011:34-36.
- [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[J]. 鱼雷技术,2012,20(5):331-335.
- [11] 陈志强. 日本钛合金的开发与应用[J]. 材料开发与应用,1994(5):45-48.
- [12] 吴全兴. 纯钛船体结构材[J]. 稀有金属快报,2001(2):19.
- [13] 周廉. 美国、日本和中国钛工业发展评述[J]. 稀有金属材料与工程,2003(8):577-584.
- [14] 陈军,王廷询,周伟,等. 国内外船用钛合金及其应用[J]. 钛工业进展,2015,32(6):8-12.
- [15] 娄贯涛. ZTi60 合金及其性能研究[D]. 河南:洛阳船舶材料研究所,2002.
- [16] 廖志谦. 大厚度船用钛合金等离子弧焊成型及控制技术研究[D]. 甘肃:西北工业大学,2002.
- [17] 陈阳. 钛合金焊接工艺技术[J]. 山东工业技术,2017(18):26.
- [18] 韩忠. 钛合金焊接冶金工研究进展[J]. 材料科学与工程,2000(4):107-110.
- [19] 张瑞华,尹燕,水谷正海,等. 活性剂钨极惰性气体保护电弧焊接熔池行为的观察[J]. 机械工程学报,2009(3):115-118.
- [20] Prilutsky V P, Akhonin S V. TIG welding of titanium alloys Using fluxes[J]. Welding in the World,2014(58):245-251.
- [21] 贾传宝,杜永鹏,武传松,等. 厚板窄间隙磁控电弧 TIG 焊接自动控制系统设计[J]. 华南理工大学学报,2017,45(9):40-46.
- [22] 胡海峰. 磁控电弧窄间隙 TIG 焊接设备及工艺研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学,2012.
- [23] 余陈,张宇鹏,徐望辉,等. 厚板 TC4 钛合金磁控窄间隙 TIG 焊接工艺[J]. 电焊机,2018,48(1):52-56.
- [24] 付鹏飞. 大厚度钛合金电子束焊接接头力学行为及调控方法[D]. 湖北:华中科技大学,2016.
- [25] 刘希林,杨瑞,晏阳阳,等. TB19 大厚板电子束焊接接头的组织性能[J]. 中国有色金属学报,2010,20(S1):748-752.
- [26] Zhang L. Laser welding Techniques For Titanium Alloy Sheet[J]. Journal of Materials Processing Technology,1997(65):203-208.
- [27] 赵红凯,王春亮,任飞,等. 钛合金焊接的研究进展[J]. 材料导报,2007,21(5):342-344.
- [28] 张永操. 钛合金 T 形结构激光-电弧复合焊接工艺研究[D]. 辽宁:大连理工大学,2016.
- [29] 陈和兴,易江龙. 海洋工程焊接技术现状与分析[J]. 中国材料进展,2015,34(12):938-943.
- [30] 高顺凯. 钛合金材料在舰艇中的应用及需求分析[J]. 舰船电子工程,2009,29(11):12-13.