

海洋工程焊接技术现状与分析

陈和兴, 易江龙

(广州有色金属研究院 中国-乌克兰巴顿焊接研究院 广东省现代焊接技术重点实验室, 广东 广州 510000)



陈和兴

摘要: 简要汇总了中国-乌克兰巴顿焊接研究院组织开展的“中国海洋工程中关键材料发展战略研究”咨询项目之焊接技术专项调研的阶段成果, 概述了海洋工程关键材料的焊接技术现状, 重点关注了舰船交通、海洋能源等领域已广泛使用或具有良好发展前景的钢铁、铝合金、钛合金材料的焊接制造技术现状及存在的主要问题, 随后从焊接材料、焊接工艺、焊接设备及生产3个方面梳理分析目前存在的主要技术壁垒, 并指出未来的研发需求, 希望能为海洋工程关键材料焊接技术研究与发展提供借鉴或参考。

关键词: 海洋工程; 关键材料; 焊接技术; 技术壁垒; 研发需求

中图分类号: TG47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2015)12-0938-06

The Current Situation Analysis of Welding Technology of the Ocean Engineering

CHEN Hexing, YI Jianglong

(Guangzhou Research Institute of Non-Ferrous Metal, E. O. Paton Chinese-Ukrainian Institute of Welding, Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, Guangzhou 510000, China)

Abstract: This paper is considered as the staged achievement of the special investigation of the welding technology included in the consulting project of the strategy research of the development of the key materials in the Chinese ocean engineering. This consulting project is organized by the E. O. Paton Chinese-Ukrainian Institute of Welding. It summarizes the current situation of the welding technology for the key ocean engineering materials, especially focused on the current technical situation and existing problems of the steel, aluminum and titanium materials, which are widely used or have good prospects in the field of the ship traffic and ocean energy. It sorts out the current technical barriers and the future research demands by analyzing the welding materials, procedure and equipment of the key ocean engineering materials welding. Hoping this paper could provide a reference for the research and development of the welding technology of the key ocean engineering materials.

Key words: ocean engineering; key materials; welding technology; technical barriers; research demands

1 前言

海洋工程装备制造业是国家“十二五”规划中明确重点培育和发展的战略性新兴产业, 也是高端装备制造业的重要方向, 是海洋工程装备产业调整和振兴的重要方向, 尤其是海洋钻井平台业与船舶制造业^[1]。

海洋工程装备用材料的加工制造工艺主要以焊接为

主, 而我国新型海洋工程各种材料的焊接制造技术明显落后于发达国家, 差距较大, 难以满足国内海洋开发和参与国际竞争的需要, 因此优质、高效的焊接技术已成为海洋平台装备制造的关键技术, 也是海洋工程装备产业长期战略的关键因素。

为了更好地通过调研总结和凝练海洋工程中关键材料存在的焊接技术共性问题和技术需求, 根据中国工程院化工、冶金与材料工程学部的安排, 由中国-乌克兰巴顿焊接研究院(简称中乌院)为牵头单位进行“焊接技术调研”专项。针对海洋工程材料焊接技术现状、存在技术壁垒和今后发展方向等进行全面调研与分析。

收稿日期: 2015-02-15

基金项目: 广东省重点实验室建设项目(2012A061400011); 国家国际科技合作项目(2014DFR50310)

第一作者: 陈和兴, 男, 1961年生, 工学博士, 教授, Email: 13500018529@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2015.12.12

2 海洋工程关键材料焊接技术现状

海洋工程材料通过装备制造工业转化为在海洋工业使用的大型装备,是开发海洋资源的物质前提。由海洋工程材料到具体装备的制造过程中,离不开重要的传统制造方法——焊接,它占海工装备制造工作量的 30 ~ 40%,不仅是海工装备制造安装的关键施工工艺,也是改造及维修的常用方法。焊接质量是评价海洋工程装备制造质量优劣的重要指标,合理的焊接方法能够提高装备制造效率,保证焊接产品的质量可靠性,提升装备制造整体水平^[2]。

我国海洋工程装备制造使用多种性能各异的材料,涉及焊接技术种类繁多。本文重点关注舰船交通、海洋能源等领域已广泛使用或具有良好发展前景的钢铁、铝合金、钛合金材料的焊接制造技术现状。

2.1 钢铁材料的焊接技术

2.1.1 焊接方法及工艺现状

海洋工程用钢铁主要分为:海洋平台、海底油气管线、舰船制造、海洋风力发电用钢铁材料等,如海洋平台桩腿齿条钢使用的 Q690、海底油气管线使用的 X65/70 钢、舰船制造使用的 EQ56/70 钢、LNG 船使用的殷瓦钢等^[3]。现阶段,欧美、韩国、新加坡等海洋工程装备制造强国已经掌握钢铁材料的先进焊接制造技术,也是世界范围内相关技术的引领者。国内海洋工程装备制造中的普通钢结构件焊接工艺已较为成熟,但重要结构件的特殊钢材的焊接工艺整体水平还有待提升。

国内针对海洋工程装备用钢铁材料的焊接方法依然以传统焊接方法为主,包括手工电弧焊(SMAW)、药芯焊丝电弧焊(FCW)、钨极氩弧焊(GTAW)、埋弧自动焊(SAW)、气电立焊(EGW)、焊剂铜衬垫单面焊(FCB)等,其中手工电弧焊、埋弧自动焊、药芯焊丝电弧焊是现阶段海工装备制造企业广泛使用的焊接方法^[4]。

随着海洋平台用钢材强度和厚度的增加,高强度钢板在海洋工程装备制造中的应用比例逐渐升高。目前国内大厚板高强钢的焊接仍采用手工电弧焊或半自动药芯焊丝电弧焊方法,如图 1 所示,自升式平台桩腿齿条板 Q690 钢的焊接仍以手工电弧焊为主。因海工装备制造用高强度钢板均有一定厚度,手工电弧焊的工艺复杂,同时厚板的清根亦十分繁琐,使得整体焊接效率不高。在劳动力成本高企不下的情况下,促使企业寻求更为高效的焊接方法和工艺。窄间隙焊接技术因其能显著提高焊接效率,节省焊接材料,近年来成为海洋工程装备大厚板焊接技术的热点和发展趋势。此外,复合焊接方法(激光电弧复合,等离子电弧复合等)因可集中利用各种焊接

方法的优点,提高海洋平台用钢的焊接效率,且随着自动化程度的提高,也日益受到海洋平台用钢铁材料焊接制造的青睐。



图 1 自升式平台桩腿齿条板焊接现场

Fig. 1 On-site welding for the rack plate of the rack-up platform leg

要实现我国油气开采从大陆架走向深海的跨越,除海洋平台的油气开采外,还必须有油气储存、运输和卸油系统的配套。目前国内海洋工程企业已具备浮式生产储油装置(FPSO)、液化天然气(LNG)液货舱的生产能力,其中 LNG 船更是誉为世界造船工业“皇冠上的明珠”。FPSO 船舶建造的关键仍是厚板高强钢的焊接以及如何实现焊接接头在低温环境下保持高断裂韧性。LNG 船舶制造的难点是实现其关键材料殷瓦钢的焊接。殷瓦钢是一种镍铁合金,热膨胀系数极低,在温度变化时几乎不变形,能适应常温至 -163 ℃ 的温度变化,是 LNG 船舶制造必不可少的材料,用于防止船体结构在超低温环境下冷裂。因其材质极为娇贵,汗渍即能锈穿 0.7 mm 厚的殷瓦钢,需最高级别的 G 级焊工使用手工氩弧焊完成,对焊接参数、工艺稳定性及焊缝质量要求极高,在 LNG 船液货舱数百公里长的焊缝上即使一个焊点质量不合格,就会造成船毁人亡的惨剧^[3,5]。

针对海洋工程装备的应用环境,钢铁材料的水下焊接技术在国内也一直受到重视和应用。目前,水下焊接采用较多的焊接方法是水下湿法手工电弧焊,主要填充材料为实芯焊丝与药芯焊丝。以药芯焊丝为基础的半自动或自动焊接是未来水下焊接技术的重要发展方向,现阶段我国水下焊接技术与国际先进工业国家尚有一定差距,现有的水下焊接材料仍然以焊条为主,主要用于水下焊补等工作,还不能应用于重要的海洋工程结构的焊接工作^[6-7]。

图 2 为由乌克兰国家科学院 C. И. 古丘克-亚岑科院士研发的水下管道闪光对焊工艺示意图。该技术具有诸多优势:焊接效率高,焊接时间 60 ~ 180 s(取决于管道尺寸);焊接过程可实现自动化,所有的准备及辅助操作都可借助远程控制系统完成,无需潜水焊工;无需使用焊材即可完成焊接;焊前工件端面无需精细准备,可

以焊接异种金属工件;焊接接头无弧焊时产生的缺陷(夹渣、孔穴、空心、咬边等),废品率低;焊接接头质量可以由焊接设备计算机检测系统进行评估,无需对接头质量进行无损检测。

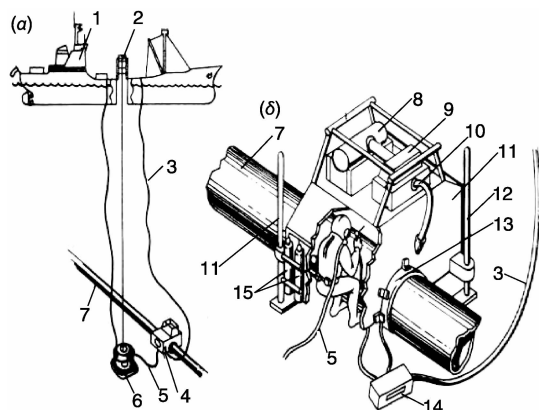


图 2 水下管道维修焊接示意图

Fig. 2 Schematic diagram of underwater pipe welding

2.1.2 焊接材料现状

海洋工程结构对焊接材料的选用要求苛刻,不仅需要取得相关船级社的认可,还必须满足海洋工程的特殊性能要求,在具有优良的焊接操作工艺性能前提下,在大厚度板拘束度高的情况下,应具有良好的抗裂性能,并保证焊缝金属具有优良的低温韧性及断裂韧性(CTOD)。

目前,国内海工装备普通结构的焊接主要使用国产焊材,重要特殊结构材料的焊材仍依赖进口。如船体普通结构件的 EH36/DH/36 等钢的焊接主要使用国产焊材,40kg 级以上船体结构钢、海洋平台桩腿齿条钢 Q690、海工半潜船的 E690 钢、LNG 船的双向不锈钢、殷瓦钢及焊剂铜衬垫埋弧自动单面焊(FCB)、气电自动立焊等焊接均使用国外品牌焊材。主要是因为国产海工配套焊材整体质量稳定性不足,品种不齐全,更缺乏海工结构所需要的接头断裂韧性、热处理后的接头性能和完整的焊接工艺参数^[8]。

欧美、日韩等国在海洋工程建设方面起步早,钢材、焊材等方面研发投入较深,因此产品线齐全,有各级别的配套焊材。海洋工程用钢一般需要采用低氢焊材进行焊接,因此采用无缝药芯焊丝焊接是发展趋势,其氢含量 $<5 \text{ mL}/100 \text{ g}$,抗吸湿性好,即使长期存放在潮湿环境下,无需烘干即可使用,但目前国内还很少生产无缝药芯焊丝。

2.1.3 存在主要问题

现阶段国内针对海洋工程装备用钢铁材料的焊接方法依然以传统焊接方法为主,针对新型钢铁材料开发的高效焊接方法仍比较欠缺,未能在实际制造中具体应用,

如船舶、舰艇新型钢铁材料的激光电弧复合焊接技术,国外已经实际应用,但国内还基本处于研究阶段,急需缩短与国际先进制造企业的差距。此外,目前海洋工程装备焊接的自动化水平与国外相比尚存在一定的差距,无法满足现阶段装备制造的需求。如海洋平台桩腿的复杂节点 TKY 焊接,其主要为相贯线的焊接,由于接头坡口角度小,导致枪头无法伸入,只能通过自动化焊接系统实现高质量的焊接。

另外,对大厚板高强度钢的焊接工艺和机理方面仍有诸多方面需要探究,包括:需进一步研究如何在预热条件下,焊接更高强度的高强钢而不产生裂纹;焊缝中针状铁素体形核和相变机制目前尚无定论;800 MPa 级以上低合金高强钢接头区软化、脆化及韧性下降问题,以及对于低合金高强钢焊接出现的热影响区软化、脆化和冷裂纹等问题仍是高强钢焊接研究的重点。

2.2 铝合金材料的焊接技术

2.2.1 国内外现状

铝合金材料因具有密度低、比强度高及耐腐蚀性优良等特点,使其作为结构材料在造船业日益受到重视,可以实现有效地减轻船舶的重量,提高稳性和航速,增强舰艇的技术战术性能的目的。从最初的普通船舶用材到军事船舶(驱逐舰、巡洋舰、航空母舰等)的翘板、甲板室、飞机发射架、升降舵等结构用材和能源运输设备(LNG 船,直升机平台等)用材,同时由于铝合金的良好导热效率等特点逐渐被开发用于海水淡化、温差发电等新兴产业^[9]。

美国、日本、英国和前苏联早已把铝合金作为船舶结构的主要材料之一。目前,日本已有一百多家公司正在建造铝合金高速船、客轮和渔船,铝合金船只总数已超过 2 500 艘;美国采用铝合金建造的各种舰船有 2 000 多艘;北欧、法国、澳大利亚等国建造的铝合金客船、科学考察船等约有 1 000 艘,并且铝合金船日趋大型化。在国外,铝合金焊接的研究相对比较成熟,率先研发出了铝合金焊接新技术,如 A-TIG 焊接、双面双弧 TIG 焊接、脉冲 MIG 焊接(PMIG)、双脉冲 MIG 焊接(DPMIG)、双丝 MIG 焊接、搅拌摩擦焊等新工艺,对与之相配套的基本原理、设备设计、工艺特点等各方面也在不断深入研究,应用研究也日渐成熟。

我国从 20 世纪 50 年代就开始研制和建造铝合金高速船,但是,至今除气垫船可以小批量生产外,其它各类铝合金船均处于研制或首制阶段,而铝质气垫船仍多采用落后的铆接连接工艺。海洋工程装备采用铝合金作为结构材料越来越多,国内也相继开展了大量的铝合金焊接工艺、焊接技术以及应用研究,包括钨极交流氩弧

焊(TIG)、钨极直流正接混合气体保护焊、钨极脉冲氩弧焊(TIG-P)和熔化极脉冲惰性气体保护焊(MIG-P)等焊接工艺,如图3所示,铝合金船舶现场焊接采用钨极交流氩弧焊^[10]。现阶段对铝合金的搅拌摩擦焊与激光焊等焊接方法研究较为集中,但相关焊接技术主要是通过从俄罗斯、乌克兰等欧洲国家引进舰船等海工装备的制造技术,在中国进行消化吸收、创新,形成成套的焊接技术。



图3 铝合金船舶采用钨极交流氩弧焊现场焊接图

Fig. 3 On-site welding for Al alloy ships

2.2.2 存在主要问题

国内海洋工程装备铝合金材料焊接技术与国际先进水平还存在较大差距,在实际制造过程中应用极其有限。而对于国外没有采用的铝合金不敢轻易在舰船等装备上进行应用,也不敢大幅度改用其他先进焊接技术进行焊接。缺乏海工装备铝合金焊接技术的基础性研究和高效的焊接制造技术。此外,对铝合金焊接技术的基础性研究相对较少,包括合金微量元素对第二相粒子形成的作用机理、不同焊接方法影响基体与第二相粒子分布、形态等,缺乏焊接工艺参数与基体和第二相粒子等的组织演变规律认识、疲劳可靠性、安全寿命评估等。

2.3 钛合金材料的焊接技术

2.3.1 国内外现状

钛及钛合金质量轻、强度高、耐腐蚀性良好,特别是对海水和海洋大气具有优良的耐腐蚀性,是优异的轻型结构材料,被称为“海洋金属”。钛及钛合金在海洋工程中具有广泛的用途,特别适用于做轻型海工装备,对提高海洋工程装备,尤其是武器装备的作业、作战能力、安全性、可靠性等方面具有十分重要的意义,是建设海洋强国的重要战略材料,钛及钛合金的焊接技术的先进水平及焊接质量是海工工程装备及武器的重要保障^[11-12]。

俄罗斯、美国等军事发达国家在航母、核潜艇、常规潜艇、水面舰艇等海军装备中大量使用了钛合金,并采用各种焊接方法焊接而成,比如TIG焊、MIG焊、等离子焊、激光焊、电子束焊及窄间隙焊等工艺。实践证

明没有优良的钛合金焊接技术就不能保障钛合金在以上海军装备中的良好应用,更不能保障舰船等装备的作战技术性能。其中,俄罗斯在舰船及潜艇用钛合金方面最先进,率先研制出全钛壳体核潜艇^[13-14]。针对钛合金的焊接,乌克兰巴顿焊接研究所开发了厚板钛合金磁控电弧窄间隙TIG焊接工艺及设备(如图4所示)。该技术可解决窄间隙焊接中的侧壁熔合不良问题,兼具TIG焊接方法加工精度高的优点^[15]。

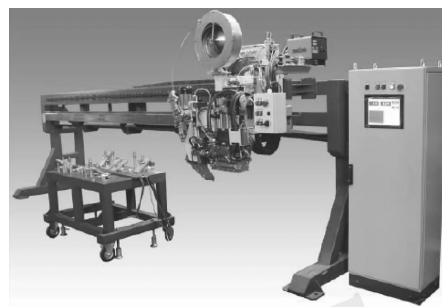


图4 厚板钛合金磁控电弧窄间隙TIG焊设备照片

Fig. 4 Image of magnetic control arc narrow-gap TIG welding equipment for thick Ti alloy plate

中国从20世纪60年代末期开始效仿苏联的钛合金及焊接工艺。目前已初步形成了具有我国特色,适合我国国情的船用钛合金系列,能满足水面舰艇、水下潜艇和深潜器用的不同强度级别及不同部位的要求^[16]。中国舰船钛合金的焊接工艺主要采用TIG,也有脉冲TIG以及MIG焊接工艺。

2.3.2 存在主要问题

钛合金材料在海洋工程装备产业中应用及基础研究在国内还处于起步的初级发展阶段,与国际差距明显,主要表现在焊接技术研究方面,比如在舰船用钛合金焊接方面如何控制氢和焊接应力是关键技术问题,国内外还鲜有资料报道。这是制约我国舰船等用高强钛合金焊接的主要技术难题,亦是与国外的技术差异所在。目前我国海洋工程用钛合金焊接的应用技术研究严重滞后,缺乏高可靠、高效率的焊接制造技术和对钛合金焊接技术的基础性研究,包括合金元素作用机理、服役可靠性、安全寿命评估等。

3 存在技术壁垒

我国目前已经形成系列海洋工程装备制造技术,在高、中端产品建造方面已具备一定技术积累,海洋平台及船舶钢焊接技术较为成熟,最新数据显示,中国企业已取代新加坡成为全球最大的自升式钻井平台制造商。总体来看,目前我国海洋工程装备制造企业的焊接整体技术水平能满足生产需要,但仍存在设备自动化、智能

化水平较低,中高端焊材国产化率低,焊接质量难以控制,缺乏对结构安全评价等问题。从焊接材料、焊接工艺、焊接设备及生产 3 个方面进行分析,梳理以下存在的主要技术壁垒。

3.1 焊接材料

海洋工程用国产高端焊接材料缺乏,产品质量稳定性 随着国内焊接材料的不断发展,市场已有满足海洋工程使用的普通焊接材料,但其在质量稳定性和焊接操作工艺性能上与进口焊接材料仍存在一定差距。此外,国产海工焊接材料还存着产品种类不全,高端焊接材料匮乏的问题,如缺乏与 EQ47 以上等级钢材、特殊材料(殷瓦钢、铝合金、钛合金等)相匹配的焊接材料。分析其原因,一方面是海洋工程在建造质量的控制程序上远远高于普通船舶的建造,对焊接材料要求比普通船舶更为苛刻,使得国内高端海工焊接材料研发难度较高;另一方面国内焊材企业进入海工领域时间不长,技术积累与产品知名度与国外大厂商有一定差距,导致国产焊接材料市场推广应用困难,阻碍产品质量进一步提升。

国产高效焊接工艺配套用焊接材料发展相对滞后 目前国内海工装备制造企业为提高焊接效率,已逐渐开始使用多种高效焊接工艺,如气电自动立焊(单丝/双丝)、FCB(焊剂铜衬垫)埋弧自动单面焊平面分段流水线、双丝/多丝 MAG(熔化极活性气体保护电弧焊)焊等,此类高效焊接设备多从国外引进,其配套焊接材料亦使用进口焊材。国产配套焊材厂商需在吸收和消化焊接工艺后,再进行产品研发,导致国产配套焊材发展相对滞后,无法及时满足配套焊材国产化需求,阻碍高效焊接工艺在海工装备制造中的大规模应用。

铝合金、钛合金等有色金属焊材缺乏 随着有色金属材料在海洋工程领域的大量应用,对有色金属焊材的需求与日俱增,但国内有色金属焊材的研发还处于起步阶段,尤其缺乏目前海工装备制造急需的铝合金、钛合金焊材。如铝合金船舶大量使用的 5083 铝合金、在国内潜舰、钻井管等使用的 TC4 钛合金焊接均需使用大量进口焊材,价格昂贵,且国内尚无替代性产品,制约高性能有色金属在海工装备制造中的推广应用。

3.2 焊接工艺

高强度钢焊接工艺复杂,焊接效率较低 海洋石油平台高强度钢的焊接多采用手工电弧焊,尤其在管子节点等关键部件焊接上使用。此类节点多为拘束度大、应力集中的重要结构,因其构件密集、狭小和焊接位置多样化,导致焊接施工困难,焊接的机械化程度也受到一定限制。另一方面,高强度钢对焊接热影响区的淬硬性和焊接裂纹敏感性较高,要求对预热温度、层间温度、焊接热输入

和焊后冷却速度等进行严格控制,使得高强度钢焊接工艺复杂,难以实现高效率的焊接自动化。

大厚度高强度钢焊接结构件刚性大,焊后残余应力高,变形难以控制 大厚度高强度钢焊接时采用手工电弧多层多道焊,其焊接热输入量大,且海洋工程焊接件的结构尺寸大,使得焊后残余应力高,变形难以控制。基于海工装备服役的特殊环境,其对焊接接头性能要求较高,若结构件尺寸变形较大,会导致不能满足尺寸要求及装配精度,增加复杂的后续加工,甚至致使整个结构件报废。此外,焊接过程中产生的残余应力峰值及分布情况将直接影响结构件的性能及服役时间。

铝合金焊接易产生气孔,变形控制比钢结构难度大 和钢材相比,铝合金在焊接过程中,凝固点的溶解度会急剧下降,且由于铝的导热性强,导致冷却速度快,不利于气泡的浮出,导致焊缝容易产生气孔。此外,由于铝合金的导热率大,使得在焊接过程中工件热量分布不均匀,易产生不同程度的收缩和内应力(纵向内应力和横向内应力),致使焊接结构产生各种变形,加大变形控制难度。

3.3 焊接设备及生产

焊接自动化水平较低,机器人焊接设备匮乏 目前海工装备制造使用的焊接设备仍以手工电弧焊、CO₂ 半自动焊和埋弧焊机为主,专用的机器人焊接设备缺乏,且对大厚板高强度钢的加工装配能力欠缺,整体自动化水平较低。

缺乏对焊接设备与焊接质量的信息化、智能化控制,焊缝质量稳定性不足 普遍缺乏对生产线焊接设备信息化、智能化控制,各焊接部件信息量的传递十分有限,难以实现复杂的焊接工艺协调控制。且在焊接生产中主要对焊后的焊缝质量进行检测,缺乏对焊接过程的在线质量监控,难以保证焊缝质量的重现性,也无法实现在焊接过程中实时优化工艺参数,以获得最优的焊缝质量。

4 未来研发需求

开展海洋工程用高端焊接材料国产化研究,包括高强度钢(屈服强度 560 MPa 以上)用高断裂韧性(CTOD)焊材、单面焊双面成型埋弧焊材料(FCB 焊材)、特殊位置高效焊接材料(立向上不用摆药芯焊丝)、高品质有色金属用焊材(铝合金、镁合金、钛合金等)。

推进高效自动化焊接设备、先进焊接工艺在海工装备制造中的大规模应用,包括自动横焊、立焊、环形焊、角焊设备或机器人开发、耐高温、狭窄空间施焊机器人开发、FCB 生产线国产化、中厚板高效自动化焊接装备(窄间隙 MAG、窄间隙埋弧焊等)、激光

焊接在船体焊接的应用、铝合金的搅拌摩擦焊技术研发(平面和分段)。

提高焊接结构安全评估及变形控制技术,包括船舶及海洋工程焊接结构的数值模拟技术研究、复杂/薄壁结构焊接变形控制设备/技术开发及应用研究、铝合金复杂焊接结构全寿命评估技术研究、半潜船 60 mm 厚甲板焊接变形控制、铝合金薄板变形控制技术、在线焊缝跟踪与质量检测技术。

5 对策及建议

当前,劳动力成本不断上涨及紧缺现象已成为制约国内海洋工程在船市低迷时期正常发展的主要因素。因此,需大力发展高效焊接技术,提升焊接自动化水平,以减少人为因素对海洋工程发展制约的影响。此外,通过加大力度培养综合性焊接人才及与科研院所开展人才交流合作,以弥补企业焊接技术人才匮乏的窘况。

随着焊接技术的发展,焊接已和电子技术、自动控制及信息化等多学科紧密结合。对未来海洋工程领域焊接技术的发展,主要应集中在多学科协同合作的焊接智能化、自动化焊接系统、优质高效焊接工艺、高效焊接材料开发等方向。

6 结 语

本文基于中国-乌克兰巴顿焊接研究院组织开展的“中国海洋工程中关键材料发展战略研究”咨询项目之焊接技术专项调研阶段工作的汇报,结合近年来与乌克兰国家科学院巴顿焊接研究所合作的研究项目,对海洋工程关键材料的焊接技术现状、存在的技术壁垒、未来研发需求进行初步梳理分析,希望为海洋工程关键材料的焊接技术研究与发展提供一些借鉴与参考。

致谢 感谢中国工程院的项目支持,感谢项目负责人周廉院士的鼓励和支持。

参考文献 References

- [1] Han Enhou (韩恩厚), Chen Jianmin (陈建敏), Su Yanjing (宿彦京), *et al.* 海洋工程结构与船舶的腐蚀防护-现状与趋势[J]. *Materials China*(中国材料进展), 2014, 33(2): 65-74.
- [2] Chen Hexing (陈和兴), Yi Yaoyong (易耀勇), Zhang Yupeng (张宇鹏). *The Welding and Joining Industry Technology Roadmap of Guangdong Province* (广东省焊接产业技术路线图)[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2014: 43-51.
- [3] Chen Jiaben (陈家本). 海洋工程制造中的关键焊接技术分析[J]. *Electric Welding Machine* (电焊机), 2012, 42(11): 11-14.
- [4] Zhao Weisong (赵为松). 海洋工程结构焊接技术[J]. *Electric Welding Machine* (电焊机), 2012, 42(12): 63-65.
- [5] Guan Jinyu (管金钰), Zhang Hai (张海), Shan Chen (单陈). NO96 薄膜型 LNG 船殷瓦钢非脉冲氩弧焊焊接工艺探讨[J]. *Ship & Ocean Engineering* (船海工程), 2013, 42(5): 73-79.
- [6] Jiao Xiangdong (焦向东), Zhu Jialei (朱加雷). 海洋工程水下焊接自动化技术应用现状及展望[J]. *MW Metal Forming* (金属加工-热加工), 2013 (2): 24-27.
- [7] Zhou Li (周利), Liu Yibo (刘一搏), Guo Ning (郭宁), *et al.* 水下焊接技术的研究发展现状[J]. *Electric Welding Machine* (电焊机), 2012, 42(11): 6-10.
- [8] Tang Lianyan (唐连元). 海洋工程中焊接材料应用分析[J]. *MW Metal Forming* (金属加工-热加工), 2012 (8): 9-10.
- [9] Zhang Bo (张波), Fang Zhigang (方志刚), Li Xiangyang (李向阳), *et al.* 铝合金船舶的腐蚀防护技术现状与展望[J]. *Materials China* (中国材料进展), 2014, 33(4): 414-417.
- [10] Cai Detao (蔡得涛), Yan Dejun (闫德俊), Han Shangguo (韩善果), *et al.* 船用 5083 铝合金双面单弧焊接接头组织与性能研究[J]. *Welding & Joining* (焊接), 2014, 10: 1-4.
- [11] Li Xianjun (李献军), Feng Junning (冯军宁), Yang Yulan (羊玉兰), *et al.* 钛在海洋工程领域应用现状及发展趋势[J]. *World Nonferrous Metals* (世界有色金属), 2014(9): 30-32.
- [12] Yang Yingli (杨英丽), Luo Yuanyuan (罗媛媛), Zhao Hengzhang (赵恒章), *et al.* 我国舰船用钛合金研究应用现状[J]. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程), 2011, 40(2): 538-544.
- [13] Li Bin (李斌). 钛在前苏联核潜艇上的应用[J]. *China Titanium Industry* (中国钛业), 2011, (3): 9-11.
- [14] Kuang Mengsheng (匡蒙生), Hu Weimin (胡伟民), Guo Aihong (郭爱红), *et al.* 钛及钛合金在美军军舰船上的应用[J]. *Torpedo Technology* (鱼雷技术), 2012, 20(5): 331-335.
- [15] Belous V. Yu (别洛乌斯), Ahonin S. V (阿霍宁). 电弧磁控窄间隙钛焊接钨电极自动调节系统[J]. *The Paton Welding Journal* (自动焊接), 2011, 7 (C): 36-40.
- [16] Jiang Chengyu (蒋成禹), Zhao Yong (赵勇). 钛材在海军工程中的应用及需要解决的问题[J]. *Materials China* (中国材料进展), 2010, 29(5): 25-30.

(编辑 惠琼)