

船用高强钢焊接技术的研究现状与展望

陈峯^{1,3}, 王凯¹, 江泽新², 马金军², 罗子艺³

(1. 佛山科学技术学院, 广东 佛山 528225; 2. 广船国际有限公司, 广州 511462;
3. 广东省焊接技术研究所(广东省中乌研究院), 广东省现代焊接技术重点实验室, 广州 510650)

摘要: 船用高强钢焊接技术是当下造船行业中的重要技术之一, 高效、优质的船舶焊接技术已成为船舶工业制造产业长期战略的关键因素。从船用高强钢传统焊接技术、高效电弧焊接技术、高效新型焊接技术等方面介绍了船用高强钢焊接技术的研究现状, 重点讨论了船用高强钢焊接技术的细分领域现状, 分析了船用高强钢焊接技术的发展趋势。研究表明, 船用钢板的板厚朝着厚板、大厚板方向发展, 船用钢板的强度朝着高强度、超高强度方向发展, 国内外船用高强钢焊接技术相差不大, 高效混合焊接技术、高新焊接技术是未来船用高强钢焊接技术的研究热点。

关键词: 船用高强钢; 焊接技术; 高效焊接; 发展现状

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2020.04.007

中图分类号: TG457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2020)04-0065-11

Research Status and Prospects of Marine High Strength Steel Welding Technology

CHEN Feng^{1,3}, WANG Kai¹, JIANG Ze-xin², MA Jin-jun², LUO Zi-yi³

(1. Foshan University, Foshan 528225, China; 2. Guangzhou Shipyard International Company Limited, Guangzhou 511462, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, Guangdong Welding Institute (China-Ukraine E. O. Paton Institute of Welding), Guangzhou 510650, China)

ABSTRACT: Marine high-strength steel welding technology is one of the important technologies in the current shipbuilding industry. Efficient and high-quality ship welding technology has become a key factor in the long-term strategy of the shipbuilding industry. This paper introduced the current research status of marine high-strength steel welding technology from the traditional high-strength steel welding technology, high-efficiency arc welding technology and new-efficiency welding technology. The study focused on the current status of the subdivided areas of marine high-strength steel welding technology, and then the future trends were also discussed. The results showed that the thickness of the marine steel plate developed towards the direction of thick and ultra-thick plates, and the strength of the marine steel plate developed towards the direction of high strength and ultra-high strength. The domestic and foreign marine high-strength steel welding technology is not much different. High-efficiency hybrid welding technology and new-efficiency welding technology are the research hotspots of marine high-strength steel welding technology in the future.

KEY WORDS: marine high strength steel; welding technology; efficient welding; development status

收稿日期: 2020-04-22

基金项目: 广东省高校现代陶瓷与铝型材装备重点实验室建设项目(2017KSYS012); 海洋高端装备腐蚀防护与绿色再制造联合实验室建设项目(2020006); 广东省科技计划(2018A050506058); 广州市科技项目(201704030112, 201704030113, 201604046026); 佛山市科技项目(1920001000409)

作者简介: 陈峯(1994—), 男, 硕士生, 主要研究方向为激光-电弧复合焊接。

通讯作者: 王凯(1981—), 男, 博士, 特聘教授, 硕士生导师, 主要研究方向为焊接与增材制造。

随着海洋资源的不断勘探,造船业对船用钢的要求也不断改变,如今船用钢正向着高强度、高韧性和易焊接的方向发展^[1]。焊接是船舶制造过程中的一种重要工艺,焊接工时约占船体建造总工时的 30%~40%,焊接成本约占船体建造总成本的 30%~50%,因此焊接质量和效率对船舶制造的影响十分显著^[2]。船用高强钢焊接技术是当下造船行业中的重要技术之一,高效、优质的船舶焊接技术已成为船舶工业制造的关键技术,也是我国船舶工业制造产业长期战略的关键因素^[3-5]。

由于船舶的工作环境非常恶劣,高强度和良好的耐蚀性对船舶来说至关重要,因此,高强度结构钢在造船中得到了广泛的应用,因而,对船用高强钢焊接技术的研究也是很有必要的。文中综述了船用高强钢焊接技术的研究现状,分析船用高强钢焊接技术中存在的主要问题,对未来船用高强钢焊接技术的发展方向进行论述。

1 船用高强钢传统焊接技术

目前国内外船用高强钢的传统焊接技术主要有手工电弧焊和埋弧焊。手工电弧焊和埋弧焊等传统焊接技术具有技术简单、灵活、通用性强等特点,适用于不同厚度、不同形状材料的焊接。手工电弧焊和埋弧焊等传统焊接技术在造船工业、压力容器制造工业、管道焊接等领域有广泛应用。本节将重点介绍手工电弧焊和埋弧焊等传统焊接方法的原理及船用高强钢传统焊接技术的研究现状。

1.1 手工电弧焊

手工电弧焊(Shielded metal arc welding, SMAW)是利用焊条和工件之间的电弧产生的热量来焊接金属。焊接过程中形成的熔渣需要在焊件冷却后清除。电极燃烧和分解产生的气态屏蔽层,可以保护电极头、电弧、焊缝熔池和高温工件免受大气污染^[6]。手工电弧焊是工程行业特别是结构和管道应用行业常用的焊接工艺之一。

郑惠锦等^[7]采用中国自主研发的耐蚀手工焊条 CJ07NS,对国产船用耐蚀钢 DH32 分别进行横位置和立位置焊接,坡口如图 1 所示,研究了两种位置焊接接头的组织和性能。结果表明,国产耐蚀手工焊条与国产耐蚀 DH32 具有较好的匹配性,立位置焊接接头抗拉强度为 526 MPa,横位置焊接接头的抗拉强度为 516 MPa;立位置焊接接头在-20℃时的平均冲击功为 103 J,横位置焊接接头在-20℃时的平均冲击功为 235 J。两种位置焊接接头的力学性能和耐腐蚀性能良好,都满足现有船级社的规定。

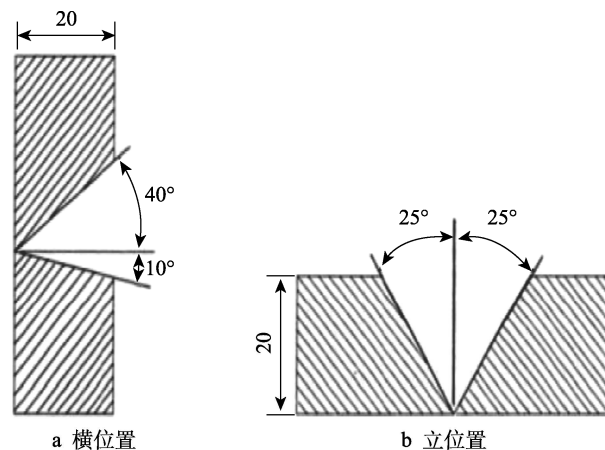
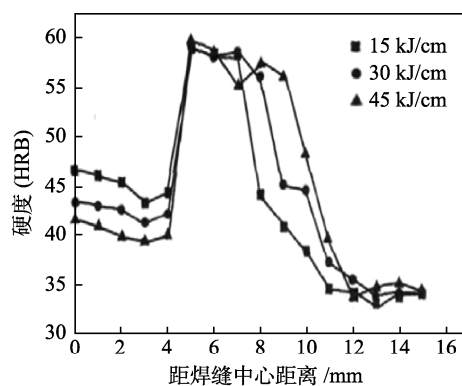


图 1 不同焊接位置坡口示意图

Fig.1 Sketch of grooves at different welding positions

邓汉忠等^[8]为了研究不同的热输入对 AH32 高强钢焊接接头的影响,对 16 mm 厚的 AH32 船用高强钢采用 NB-1SJ 焊丝进行手工电弧焊试验,焊后对焊接接头进行了综合性能测试和微观组织分析,不同热输入的接头力学性能如图 2 所示。结果表明,不同热输入的焊缝组织均为铁素体+珠光体组织,随着热输入的增加,冷却速度变慢,铁素体晶粒变得粗大,硬度增加。随着热输入的增加,焊缝及过热区的冲击韧性降低,其断口形貌由韧性向脆性转变。



a 不同热输入下硬度分布

热输入/ (kJ·cm ⁻¹)	焊缝 A_K /J	过热区 A_K /J
15	123.7, 126.6, 25.6, 平均125.3	107.5, 106.9, 109.1, 平均107.8
30	115.9, 117.2, 119.8, 平均117.6	103.2, 100.7, 101.4, 平均101.8
45	83.9, 85.0, 91.1, 平均86.7	78.4, 76.1, 77.0, 平均77.2

b 不同热输入下冲击韧性

图 2 不同热输入下接头力学性能

Fig.2 Mechanical properties of joints with different heat inputs

1.2 埋弧焊

埋弧焊(Submerged arc welding, SAW)是在连续送入的焊丝和工件之间形成电弧,颗粒状的助焊剂

层为工件提供了保护层,为焊接区提供了熔渣,不需要保护气体^[9]。SAW 通常以自动或半自动模式运行。埋弧焊在汽车工业、轨道交通装备工业、大型工程结构制造工业、造船工业、压力容器制造工业、管道焊接、储罐等行业均有应用。

梁国俐^[10]采用埋弧焊对 36 mm 厚 DH32 高强度船板钢进行了对接焊,对接接头开有 X 型坡口,在 X 型坡口进行 10 道次焊接后对焊接接头进行力学性能测试。结果表明,焊接接头的抗拉强度与母材相当,无明显的软化现象,焊接接头冲击功测试结果满足中国船级社的规定。

李德强等^[11]对 100 mm 厚 EH36 高强钢进行了多层多道埋弧焊对接试验,焊接工艺图如图 3 所示,焊后对焊接接头进行了综合性能测试和微观组织分析。结果表明,焊缝表面及中心部位组织由大量针状铁素体、少量先共析铁素体和少量马氏体-奥氏体组成,焊接接头具备良好的低温冲击韧性、较高的硬度,细晶区和不完全重结晶区有轻微的软化现象。

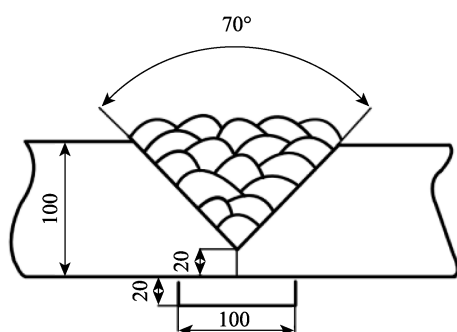


图 3 埋弧焊焊接工艺

Fig.3 Submerged arc welding process

Ribeiro 等^[12]为了研究单丝埋弧焊和双丝埋弧焊对焊接 AH36 高强钢的影响,对 20 mm 厚 AH36 进行埋弧焊试验,焊后对焊接接头进行了力学性能测试和微观组织分析。结果表明,焊缝由针状铁素体、晶界铁素体和第二相铁素体 3 部分组成,裂纹沿晶界扩散,在低角度的第二相铁素体板间易扩展,焊缝的断口为穿晶断口。

从船用高强钢的传统焊接技术研究现状可以看出,手工电弧焊尽管易产生焊接缺陷、焊接效率低,但是其适应强、焊接操作灵活,又由于船体结构的大型化和复杂化,手工电弧焊因其焊接特性在船体的修补和狭小空间焊接等领域有独特的优势。埋弧焊因其焊缝质量高、生产效率高、机械程度高等优点,在中厚船用钢的焊接上被广泛应用。

2 船用高强钢高效电弧焊接技术

随着对深海领域的探索,造船业对大厚度高强度船用钢接头焊接需求不断增加。手工电弧焊和埋弧焊

等传统焊接技术具有技术简单、灵活、通用性强等特点,适用于不同厚度、不同形状材料的焊接。由于存在焊接熔深浅、焊接效率低的缺点,传统的电弧焊接技术越来越难以完全满足造船业不断增长的制造要求。近些年来出现的气电立焊、大热输入埋弧焊、药芯气保焊、窄间隙焊、缆式焊丝焊等高效电弧焊接方法,为厚板船用高强钢焊接提供了新的途径。下面重点介绍气电立焊、大热输入埋弧焊、药芯气保焊、窄间隙焊、缆式焊丝焊等高效电弧焊接方法的原理及船用高强钢高效电弧焊接技术的研究现状。

2.1 气电立焊

气电立焊 (Electro-gas welding, EGW) 是一种连续的垂直位置电弧焊工艺,在消耗电极和工件之间产生电弧。EGW 比其他焊接工艺 (例如 SAW 或 FCAW) 需要更高的热量输入,因为它仅需要一层或两层厚的焊缝^[13]。气电立焊在船舶、大口径厚管道、压力容器和储罐等领域被广泛应用。气电立焊原理如图 4 所示。

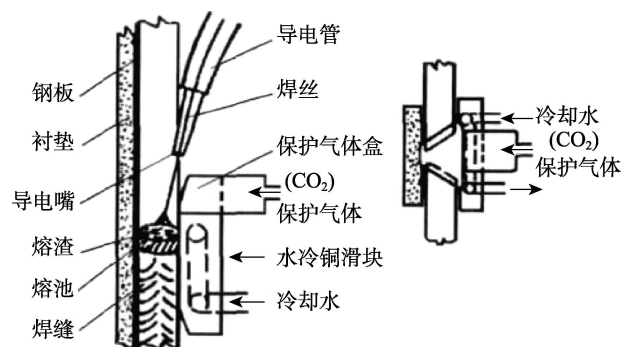


图 4 EGW 原理

Fig.4 EGW schematic

端传宝等^[14]为研究热输入对 EH40 钢大厚板双丝气电立焊接头组织和性能的影响,对 68 mm 厚 DH40 高强度船板钢采用 20° 的 V 形坡口进行双丝气电立焊焊接试验,焊后对焊接接头进行了力学性能测试和微观组织分析,不同热输入下的硬度分布如图 5 所示。结果表明,随着热输入增加,接头强度降低,热影响区软化倾向增大,热输入对焊缝金属韧性有重要影响。

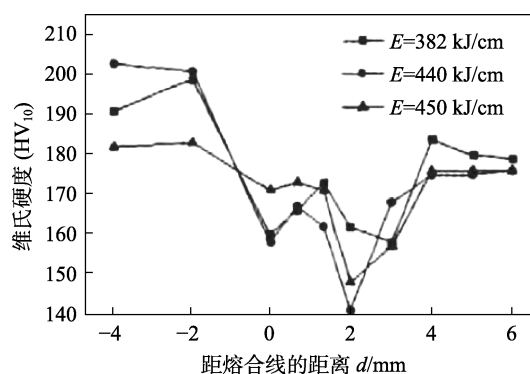


图 5 硬度分布

Fig.5 Hardness distribution

Yi 等^[15]为了研究气电立焊 EH36 焊接接头的非均质组织和耐腐蚀性,对 EH36 高强度船板钢采用大热输入(约 308 kJ/cm)垂直气电立焊试验,焊后对焊接接头进行了腐蚀性能测试和组织分析。结果表明,焊接接头由粗晶粒热影响区、细晶粒热影响区、不完全热影响区和焊缝金属区 4 种不同的显微组织组成;除根层外,其余部位均表现出良好的耐蚀性。

Seo 等^[16]为了研究影响焊接接头局部脆性的微观结构因素,对 80 mm 厚高氮型 DH40 高强钢和 EH36 高强钢进行 EGW 焊接试验,焊后对焊接接头进行了综合性能测试和微观组织分析。结果表明,与 EH36 相比,DH40 在热影响区近熔合线处的冲击值显示出较大的散射;晶界铁素体的脆性使裂纹易于通过条纹传播,导致焊缝金属中心的冲击韧性突然下降。

2.2 大热输入埋弧焊

2.2.1 焊剂铜衬垫单面焊

焊剂铜衬垫单面焊(Flux copper backing,FCB)是在待焊钢板后面粘贴铜衬垫的一种大热输入的单面焊双面成形焊接技术,又称焊剂铜垫法。FCB 单面埋弧焊技术在船厂平面分段流水线上广泛应用^[17]。FCB 法焊接示意图如图 6 所示。

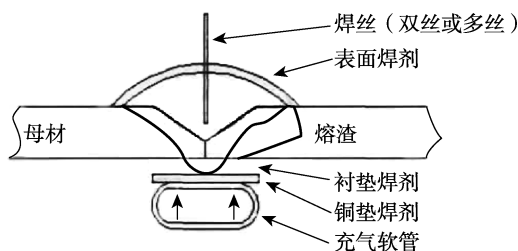


图 6 FCB 法焊接示意图

Fig.6 Schematic diagram of FCB welding

Wang 等^[18]为了研究 FCB 法焊接 EH36 的性能,对 EH36 进行大热输入(190 kJ/cm)FCB 法埋弧自动焊接试验,焊后对焊接接头进行了力学性能测试和微观组织分析。根据焊接接头截面上的显微硬度分布,发现了焊缝软化现象;根据焊接接头的电化学行为,揭示了微针状铁素体的对称热影响区结构和均匀的母材微观结构。

刘永翔等^[19]为了研究 FCB 法埋弧自动焊接中不同焊剂下焊接接头力学性能差异,对 20 mm 厚的 DH40 高强钢进行了 3 种不同焊剂 FCB 法埋弧自动焊接试验,焊后对焊接接头进行了力学性能测试和微观组织分析。结果表明,PF-55E 焊剂所得焊接接头的伸长率和冲击韧性最好,焊缝主要由针状铁素体构成。

徐雁飞^[20]对 12 mm 厚的 EH36 高强钢进行双丝、三丝埋弧焊 FCB 法试验,焊后对焊接接头进行了力学性能测试和微观组织分析。结果表明,采用双丝、三丝 FCB 法焊接工艺均能满足中国船级社对焊接接

头的性能要求;三丝 FCB 法更大的热输入和更长的熔池长度,增大了结晶裂纹倾向,降低了热影响区韧性。

2.2.2 焊剂石棉垫单面焊

焊接石棉垫单面焊(Flux asbest backing, FAB)是在待焊钢板后面粘贴陶瓷衬垫的一种大热输入的单面焊双面成形焊接技术,由于石棉属于海事禁止使用的物质,所以石棉衬垫现在改为陶瓷衬垫,这种方法现在也叫 FGB(Flexible glassfiber backing)。FAB 法不局限于平直板架,曲面拼板亦能使用^[21]。FAB 法焊接示意图如图 7 所示。

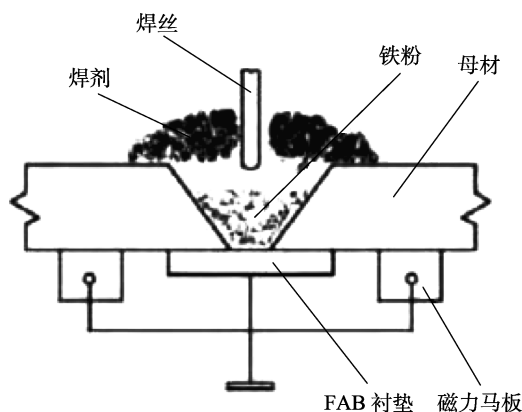


图 7 FAB 法焊接示意图

Fig.7 Schematic diagram of FAB welding

刘磊^[22]为研究铁粉中合金元素对 FAB 法接头的影响,用不同类型合金粉对 25 mm 厚 EH36 船用高强钢采用开 V 型坡口,进行 FAB 法埋弧焊试验,对比分析 EH36 船用高强钢 FAB 法埋弧焊接头的显微组织和性能。结果表明,焊缝金属化学成分相同,在较高焊接热输入下,焊缝金属冲击韧性更低;在较高焊接热输入下,焊接高温停留时间长,焊缝金属更易生产韧性差的先共析铁素体。

李远远等^[23]为研究不同厚度 DH36 船用高强钢对 FAB 法接头的影响,对不同厚度 DH36 船用高强钢进行 FAB 埋弧焊接试验,焊后对焊接接头进行了综合性能测试和微观组织分析。结果表明,不同厚度 DH36 船用高强钢焊后的焊缝组织都主要为先共析铁素体;随着钢板厚度的增加,焊缝组织中的晶内针状铁素体含量减小,先共析铁素体和侧板条铁素体含量增加,FAB 埋弧焊接头力学性能变差。

马金军等^[24]为了提高 FAB 埋弧焊的适用范围,解决国内造船企业精度控制不良造成的大间隙问题,对不同厚度的 DH36 船用钢板进行大间隙不同填充材料的 FAB 埋弧焊打底、多道焊填充盖面的工艺试验,焊后对焊接接头的力学性能和微观组织进行分析。结果表明,焊接接头的综合性能指标都能满足规范要求;焊缝中心是整个接头冲击韧性最薄弱位置,表面焊缝中心冲击值高于根部。

2.3 药芯气保焊

药芯气体保护焊 (Flux Cored Arc Welding, FCAW) 是用 CO_2 作为保护气体, 依靠药芯焊丝与焊件之间产生的电弧来熔化金属的一种气体保护熔化焊方法^[25]。船体由于随机因素、腐蚀缺陷、船舶碰撞等因素易造成损伤, 药芯焊丝气体保护焊因自身焊接特性而在船体修复有广泛的应用。

孙强等^[26]对 60 mm 厚 DH36 船用高强钢采用 X 形对称坡口、两种药芯进行药芯焊丝气体保护焊试验, 焊后对焊接接头进行了综合性能测试和微观组织分析, 不同焊丝焊接接头力学性能如图 8 所示。结果表明, 焊接接头显微组织为细小铁素体+弥散粒状渗碳体+少量珠光体, 具有优良的强韧性匹配; 选用 DWA-55LSR 药芯焊丝焊接的焊接接头的力学性能较 GFL-71NiSR 焊丝具有更为优越的性能。

Yang 等^[27]为了研究碱性药芯焊丝和金红石药芯

焊丝对焊接 DH36 船用高强钢的影响, 对 8 mm 厚 DH36 船用高强钢进行药芯钨极惰性气体保护 (FCTIG) 试验, 焊后对焊接接头进行了综合性能测试和微观组织分析。结果表明, 与 FCAW 相比, FCTIG 焊接 DH36 船用高强钢产生的飞溅少、烟雾少, 焊接性能更好; 金红石型药芯焊丝中大量合金元素的存在促进了焊缝中针状铁素体的形成, 从而增强了焊缝的显微硬度和强度。

Ramazan^[28]为了研究不同保护气成分对 FCAW 焊接的影响, 对厚度为 14 mm 的船用高强钢 AH36 和 316L 不锈钢采用 E309 LT1-1/4 的药芯焊丝进行 FCAW 焊接试验, 焊后对焊接接头进行了综合性能测试和微观组织分析。结果表明, 由于保护气体中 CO_2 的增加, 焊件的冲击韧性值降低; 整个焊缝金属的显微硬度值变化取决于保护气体的成分。

2.4 窄间隙焊

窄间隙焊接 (Narrow Gap Welding, NGW) 是一种高效、高质量的厚板焊接方法, 它采用窄深间隙代替宽角坡口^[29]。窄间隙焊接电弧具有特殊性能, 窄间隙电弧焊具有焊接变形小、低热输入等优点, 窄间隙激光焊具有热影响区小、热变形小、残余应力小等优点。窄间隙焊在厚板、大厚板船用钢的焊接有广泛应用。

刘健等^[30]为了研究窄间隙坡口设计、坡口间隙、焊接工艺参数等对焊道成形的影响, 对 150 mm 厚 12CrNi5MoV 船用高强钢进行窄间隙热丝 TIG 焊接试验。结果表明, 窄间隙 U 形对称坡口, 与传统 X 形坡口相比, 焊接填充量可减少 76%; 选择合适的焊接工艺参数时, 焊缝成形及焊接质量良好。

胡奉雅等^[31]对 84 mm 厚 EH40 船用高强钢进行双丝窄间隙 MAG 焊接试验, 焊后对焊接接头进行了综合性能测试和微观组织分析。结果表明, 采用双丝窄间隙 MAG 焊接 DH40 船用高强钢, 焊缝成形良好, 无宏观缺陷, 焊接接头力学性能良好; 接头热影响区组织主要为板条贝氏体、粒状贝氏体与针状铁素体组织。

2.5 缆式焊丝焊

缆式焊丝焊 (Cable-type welding wire welding, CWWW) 是一种以缆式焊丝为熔化极的高效、优质和低成本的创新型焊接工艺, 其中缆式焊丝采用 1+N 根分焊丝经过特殊绞合形成, 其中 1 根分焊丝位于中间, 其余 N 根分焊丝围绕中心分焊丝绞合而成^[32]。缆式焊丝示意图如图 9 所示。

方臣富等^[33]为了研究缆式焊丝埋弧焊的残余应力, 对 22 mm 厚 DH36 船用高强钢采用直径为 7.2 mm 的七丝缆式焊丝进行平板对接缆式焊丝埋弧试验, 焊

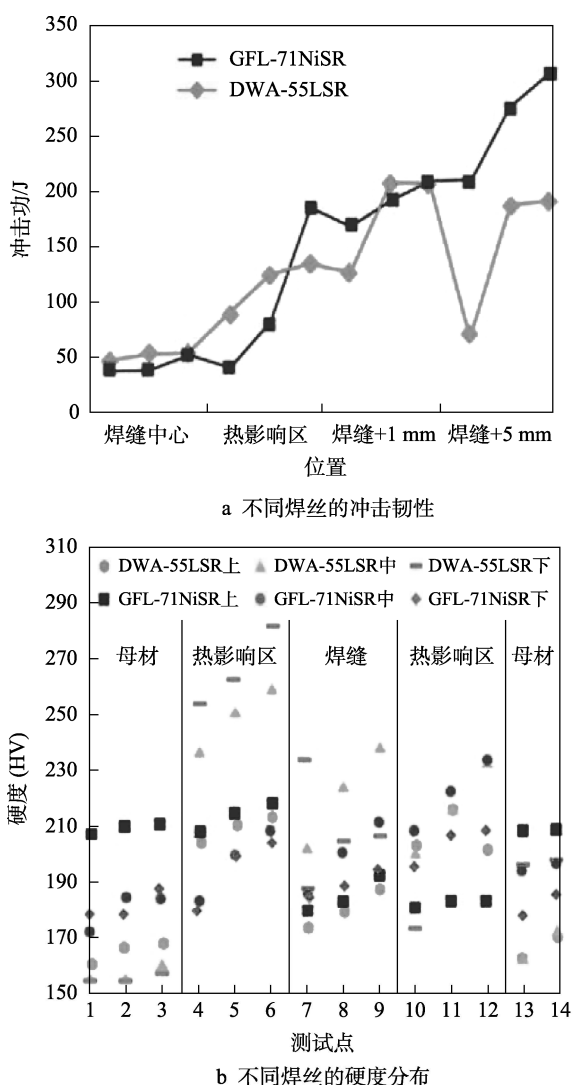


图8 不同焊丝焊接接头力学性能
Fig.8 Mechanical properties of welding joints with different welding wires

后测试焊接接头的残余应力并进行有限元分析,工件表面应力如图 10 所示。结果表明,缆式焊丝埋弧焊应力分布特征和特征值与单丝埋弧焊相近,纵向应力为拉应力,横向应力较小。

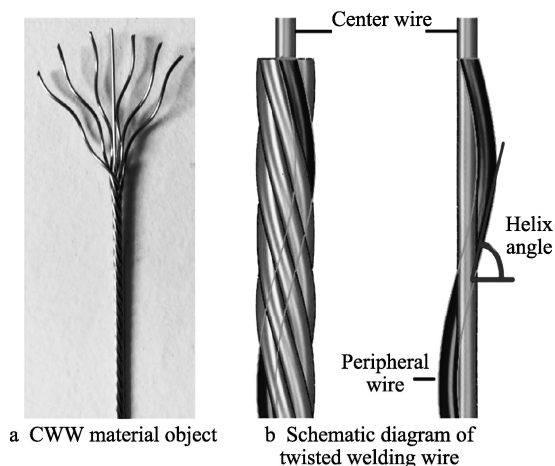


图 9 缆式焊丝示意图

Fig.9 Schematic diagram of CWW

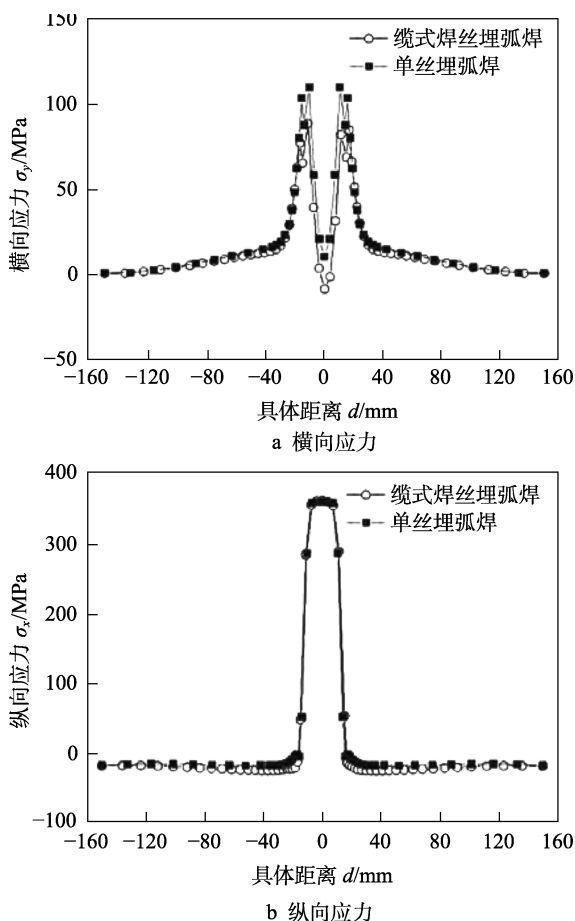


图 10 工件表面应力

Fig.10 Stress distribution on workpiece

Chen 等^[34]为了研究缆式焊丝气电立焊过程中的电弧特性和熔滴过渡特性,对 20 mm 厚 AH36 船用高强度钢采用直径为 1.6 mm 的七丝缆式焊丝进行缆式

焊丝气电立焊试验。结果表明,随着焊接电流的增大,电弧长度减小,电弧宽度增大,熔滴尺寸减小,熔滴转移频率显著增大,电弧迁移周期和熔滴柱长度缩短。

Yang 等^[35]为了研究单丝埋弧焊和缆式焊丝埋弧焊对焊接接头的影响,对 22 mm 厚 DH36 船用高强度钢采用直径为 5.4 mm 的四十九丝缆式焊丝进行平板对接缆式焊丝埋弧试验,焊后对焊接接头进行综合分析。结果表明,与单丝埋弧焊相比,缆式焊丝埋弧焊工艺较为稳定,其截面不存在气孔、裂纹、熔渣等缺陷,缆式焊丝埋弧焊的焊接接头抗拉强度大、能耗低、冲击韧性低。

从船用高强度钢的高效电弧焊接技术研究现状可以看出,船用钢厚度由 8 mm 到 150 mm,厚度不断变厚,船用钢的强度由 AH36 到 EH40,强度也不断增强,因此,传统的船体焊接技术已经不能满足如今造船业的需求。在这种背景下,药芯气保焊、气电立焊、窄间隙焊、缆式焊丝焊、FCB/FAB 埋弧焊等高效电弧焊接技术会逐渐代替传统船用高强度钢焊接技术。

3 船用高强度钢的高效新型焊接技术

随着各行业科技的发展,气电立焊、大热输入埋弧焊、药芯气保焊、窄间隙焊、缆式焊丝焊等高效电弧焊接方法工艺稳定性差、焊接变形大、热输入大等缺点日益凸显。高效电弧焊接方法在工业中占比过大,在一定程度上会制约我国先进制造技术的发展。残余应力和变形是对焊接结构有害的主要因素,残余应力不仅引起焊接结构的变形,而且对焊接结构的使用特性有重要影响。激光焊、激光-电弧复合焊、搅拌摩擦焊等高效新型焊接技术具有热输入小、焊接深度深、焊接变形小、适应性好等优点,是极具发展前景的厚板船用高强度钢板焊接技术。本节将重点介绍激光焊、激光-电弧复合焊、搅拌摩擦焊等先进、高效、新型焊接方法的原理及船用高强度钢高效新型焊接技术的研究现状。

3.1 高能束焊接

3.1.1 激光焊接

激光焊接(Laser beam welding, LBW)是造船工业、汽车工业、航空航天等领域中广泛使用的技术,该技术使用移动的激光束作为热源,通过局部熔化和固化过程组装两个工件^[36]。由于激光能量输入响应的特性,故激光焊接具有高度的时间稳定性和空间分布的灵活性。

Huang 等^[37]为了研究 AH36 船用高强度钢光纤激光焊接过程中气孔形成机理,对 10 mm 厚 AH36 船用

高强钢进行激光焊试验,分析了无磁场和磁场辅助激光焊接在小孔失稳和气孔形成方面的差异,无磁场和磁场辅助激光焊接成形如图 11 所示。结果表明,外加磁场可获得无咬边缺陷的焊接接头,焊缝底部熔宽变宽,外加磁场有利于提高小孔的稳定性,从而抑制气孔的形成。

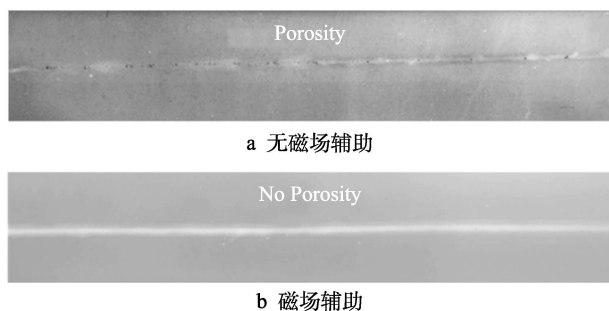


图 11 激光焊接射线照片
Fig.11 Radiographs of laser welding

Cao 等^[38]为了研究焊接速度对焊接接头组织和力学性能的影响,对 6 mm 厚 AISI316L 奥氏体不锈钢与 EH36 船用钢的异种材料进行了光纤激光焊接,焊后对焊接接头进行了综合性能测试和微观组织分析。结果表明,焊接速度为 0.8 m/min 时,焊缝外观良好;随着焊接速度的提高,中心焊缝的粗马氏体晶粒转变为较细的马氏体晶粒,接头显微硬度是母材的 2 倍。

Zhang 等^[39]为了研究激光焊接过程中焊接参数对焊接接头的影响,对 6 mm 厚 HSLA 船用钢高强钢进行冷丝激光焊接 (LWACW) 和自组织激光焊接 (ALW) 试验,焊后对焊接接头进行了综合性能测试和微观组织分析。结果表明,无论是 ALW 还是 LWACW 接头,焊缝中心的微观结构主要由针状铁素体组成,而热影响区主要是珠光体和铁素体的混合物。LWACW 工艺中,获得了良好的焊接接头且微观组织更细、更均匀,力学性能更好。

3.1.2 激光-电弧复合焊

激光-电弧复合焊接 (Laser-arc hybrid welding, HLAW) 是将激光与电弧两种物理性质和热源传输机理截然不同的热源相结合在一起,共同作用于工件同一位置的新型焊接方法^[40]。激光-电弧复合焊具有焊接效率高、工艺稳定性高、焊接适应性强等优点,在船用高强钢的焊接应用方面具有广阔的前景。激光-电弧复合焊原理如图 12 所示。

高艳等^[41]为研究送丝速度对 12 mm 厚 DH36 船用耐蚀钢光纤激光-MIG 复合焊的影响,对 12 mm 厚 DH36 船用耐蚀钢进行 4 组不同送丝速度的激光-MIG 复合焊试验,焊后对焊接接头进行了综合性能测试和微观组织分析,不同送丝速度下接头的熔宽、余高和

电弧区熔深变化如图 13 所示。结果表明,在送丝速度为 8.5 m/min 时可获得成形优良的接头,随着送丝速度的增加,电弧区和激光区焊缝的熔宽均增加;焊缝区主要由针状铁素体、先共析铁素体和一定量的贝氏体组成。

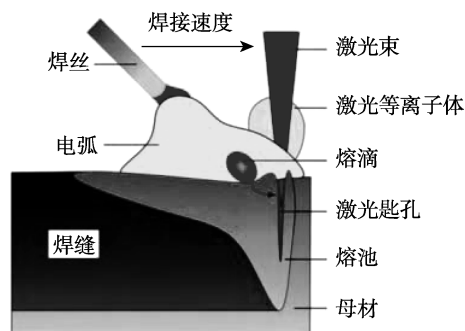


图 12 激光-电弧复合焊原理
Fig.12 Schematic diagram of laser-arc hybrid welding

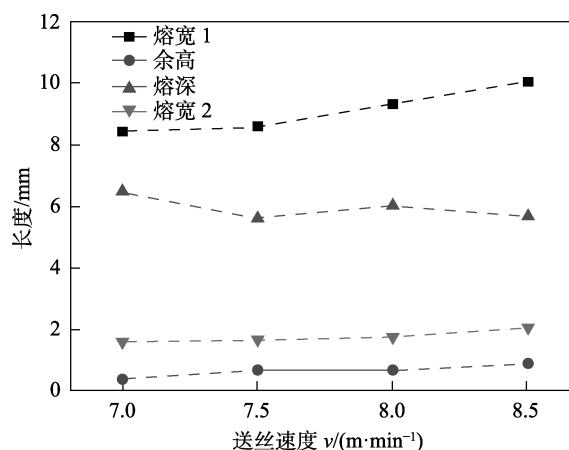


图 13 不同送丝速度下接头的熔宽、余高和电弧区熔深变化

Fig.13 Weld width, reinforcement and fusion depth in arc area at different filler wire speeds

Zhang 等^[42]为了研究激光-电弧复合焊接过程中的残余应力 (WRS) 分布与形成机理,对 10 mm 厚船用高强钢 AH36 进行激光-电弧复合焊试验,并进行一系列仿真研究,焊后对焊接接头进行综合性能分析。结果表明,数值计算结果与实验数据吻合较好,受峰值温度和冷却速率影响,奥氏体-贝氏体相变产生高水平残余应力,而奥氏体-马氏体相变有效降低残余应力,相变类型和相变温度是影响残余应力的其他关键因素。

Anna 等^[43]为了研究不同的光纤径芯对激光-电弧复合焊接性能的影响,对 8 mm 厚船用高强钢 AH36 采用 3 种光纤径芯 (200, 400, 600 μm) 进行激光-电弧复合焊试验,焊后对焊接接头进行综合性能分析。结果表明,要获得较好的焊接接头,激光功率、

焊接速度、焊丝进给速度之间要平衡,光纤径芯为600 μm 时,焊接质量最好。

Zhang 等^[44]研究了激光-电弧焊工艺参数对异种钢接头焊缝成形的影响,对20 mm厚EH36高强钢和316L不锈钢进行激光-电弧复合焊试验,焊后对焊接接头进行了综合性能测试和微观组织分析。结果表明,与激光区相比,混合区具有更高的热输入和更大的晶粒尺寸,焊缝具有良好的拉伸性能,断裂为韧性断裂,激光区的耐蚀性弱于混合区。

3.2 搅拌摩擦焊

搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)是一种利用非消耗性工具在焊缝区对焊接材料进行塑化处理,使焊接金属处于固态时形成焊接接头的新技术^[45]。搅拌摩擦焊是一种新型、高效、环保的焊接工艺,在造船工业、汽车工业和航空航天工业等领域有广泛的应用。搅拌摩擦焊的原理如图14所示。

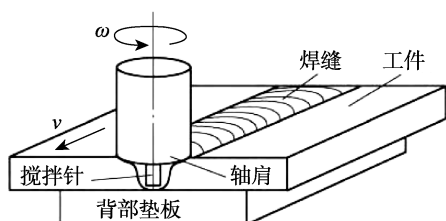


图14 搅拌摩擦焊原理

Fig.14 Schematic diagram of friction stir welding

Athanasios 等^[46]对6 mm厚DH36高强钢进行搅拌摩擦焊试验,焊后对其微观组织和综合性能进行分析。结果表明,提高搅拌摩擦焊的焊接导线速度可以提高焊缝的冲击韧性且不影响其强度和硬度。

Almoussawi 等^[47]为了研究在DH36高强钢的搅拌摩擦焊中,焊接速度在Mn, Si, Al和氧元素偏析中的作用,对6 mm厚DH36高强钢进行搅拌摩擦焊试验。结果表明,当温度超过1400 $^{\circ}\text{C}$ 时,开始出现偏析,可以通过选择合适的刀具旋转/横向速度来避免焊接接头中元素的偏析。

Beaudet 等^[48]对8 mm厚DH36和S690QL进行异种钢搅拌摩擦焊试验,焊后对其进行综合性能分析。结果表明,DH36和S690QL在循环载荷下表现出非常好的性能,由于接合部的根部有缺陷,S690QL具有较低的疲劳寿命。

Almoussawi 等^[49]为了研究DH36和EH46两种不同牌号钢的搅拌摩擦焊缺陷,对DH36和EH46进行搅拌摩擦焊试验,焊后对其进行综合性能分析。结果表明,较高的刀具移动速度会形成缺陷,例如空洞、焊缝根部缺陷和接缝,这些缺陷的主要原因是由于停滞区的形成而造成材料流动不足。

从船用高强钢的高效新型焊接技术研究现状可

以看出,随着科技的发展与进步,激光焊、激光-电弧复合焊、搅拌摩擦焊等新型、先进、高效焊接技术也不断的发展,新型高效焊接技术在船用钢的应用是世界各国的研究热点。整体来说,国内外对船用高强钢高效新型焊接技术的研究差别不大。

4 总结与展望

从船用高强钢焊接技术的研究现状可以看出,手工电弧焊虽然焊接效率不高,但在空间狭小的船体结构件的焊接效果不错;SAW相较于手工电弧焊,具有焊缝质量高、效率高、机械程度高等优点,在中厚板船用高强钢焊接领域应用较广;FCB法和FAB法通常采用大热输入,进一步提高了船用高强钢的焊接效率;FCAW焊接效率高、焊缝质量好、焊接飞溅少,容易实现机械化和自动化焊接;EGW因其工艺特性被应用在船体舷侧、隔舱壁的焊接;窄间隙焊在焊接厚板、大厚板应用较广;LBW,HLAW,FSW等高效新型焊接技术作为一种高效、优质、节能的焊接方法,是众多科研机构研究热点。

随着焊接技术的不断发展,我国船用高强钢的焊接技术正向高效优质发展迈进,出现了一些如激光焊、激光-电弧复合焊、搅拌摩擦焊等新型高效焊接技术,船用高强钢焊接技术有了新动向、新进展。船用高强钢的传统焊接方式逐渐被新型高效焊接方式取代。船用高强钢焊接技术正朝着高效化、智能化、绿色化的方向发展。

1) 随着对海洋领域探索的深入、造船业的发展,船用钢厚度由薄板、中厚板,向着厚板、大厚板方向发展,船用钢强度由普通船用钢,向着高强度船用钢、超高强度船用钢方向发展。

2) 船用高强钢国内外焊接技术差别不大。对于激光焊、激光-电弧复合焊、搅拌摩擦焊等高新焊接技术的研究国内外差别不大,但国外对高效新型焊接技术的工业应用程度高于国内。

3) 高效复合焊接技术(SAW+FACW/TIG, FACW+EGW),新型高效焊接技术(LBW,HLAW,FSW),是未来船用高强钢焊接技术的研究热点。

参考文献:

- [1] 孟祥海,王伟,李孟星,等.船体高强钢焊接接头质量控制的现状[J].铸造技术,2019,40(1):101—105.
MENG Xiang-hai, WANG Wei, LI Meng-xing, et al. Research Status of Quality Control of Hull High Strength Steel Welding Joints[J]. Foundry Technology, 2019, 40(1): 101—105.
- [2] 李宁.我国船用钢高效焊接技术发展现状[J].热加工

- 工艺, 2015, 44(23): 10—12.
- LI Ning. Development Status of High Efficient Welding Technology for Hull Steel in China[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(23): 10—12.
- [3] 鲍亮亮, 王勇, 韩涛, 等. 海洋平台焊接技术及发展趋势[J]. 焊接, 2019(1): 21—30.
- BAO Liang-liang, WANG Yong, HAN Tao, et al. Welding Technology and Development Trend of Offshore Platform[J]. Welding, 2019(1): 21—30.
- [4] 洪森, 彭茂清. 高效焊接技术在船舶建造中的应用及推广[J]. 广东造船, 2018(1): 76—78.
- HONG Sen, PENG Mao-qing. Application of High-efficiency Welding in Shipbuilding[J]. Guangdong Shipbuilding, 2018(1): 76—78.
- [5] 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.
- CHEN He-xing, YI Jiang-long. The Current Situation Analysis of Welding Technology of the Ocean Engineering[J]. Materials China, 2015, 34(12): 938—943.
- [6] 隋志强. E36-RCW耐蚀钢焊接接头力学性能和耐蚀性的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015: 21—22.
- SUI Zhi-qiang. Study on Mechanical Properties and Corrosion Resistance of E36-RCW Corrosion Resistant Steel Welded Joints[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015: 21—22.
- [7] 郑惠锦, 阎璐, 兰玲, 等. 国产船用耐蚀钢焊条电弧焊接头组织和性能[J]. 焊接, 2015(11): 57—61.
- ZHENG Hui-jin, YAN Lu, LAN Ling, et al. Microstructure and Properties of Arc Welding Joints for Domestic Marine Corrosion-resistant Steel Electrodes[J]. Welding, 2015(11): 57—61.
- [8] 邓汉忠, 孟祥峰. 焊接热输入对 AH32 高强度钢焊接接头组织及性能的影响[J]. 热加工工艺, 2014, 43(17): 47—50.
- DENG Han-zhong, MENG Xiang-feng. Influences of Welding Heat Input on Microstructure and Properties of Welded Joint of AH32 High Strength Steel[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(17): 47—50.
- [9] 张弛. 埋弧焊在现代工业生产的应用研究[J]. 军民两用技术与产品, 2017(24): 219—220.
- ZHANG Chi. Application Research of Submerged Arc Welding in Modern Industrial Production[J]. Dual Use Technologies & Products, 2017(24): 219—220.
- [10] 梁国俐. DH32 船板钢埋弧焊接头的力学性能[J]. 机械工程材料, 2016, 40(11): 103—105.
- LIANG Guo-li. Mechanical Properties of Submerged Arc Welded Joint of DH32 Shipping Plate Steel[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2016, 40(11): 103—105.
- [11] 李德强, 王树森. EH36 大线能量用钢焊接接头组织与性能研究[J]. 鞍钢技术, 2017(3): 14—18.
- LI De-qiang, WANG Shu-sen. Study on Microstructures and Properties of Welded Joint for EH36 Steel with High Heat Input[J]. An Gang Technology, 2017(3): 14—18.
- [12] RIBERIRO A C N, HENENIN H, IVEY D G, et al. Evaluation of AH36 Microalloyed Steel Welded Joint by Submerged Arc Welding Process with One and Two Wires[J]. Materials Research, 2016, 19(1): 143—152.
- [13] HWANG S Y, KIM Y, LEE J H. Finite element Analysis of Residual Stress Distribution in a Thick Plate Joined Using Two-pole Tandem Electro-gas Welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229: 349—360.
- [14] 端传宝, 王欢, 岑越, 等. EH40 船用高强度钢双丝气电立焊接头组织与性能[J]. 热加工工艺, 2014, 43(17): 203—205.
- DUAN Chuan-bao, WANG Huan, CEN Yue, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Welded Joints of EH40 Ship Steel Plate by Two-electrode Electro-gas Welding[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(17): 203—205.
- [15] YI J L, NIU B, GAO W W, et al. Heterogeneous Microstructure and Corrosion Resistance of the EH36 Steel Joined by Vertical Electro-Gas Welding[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2020, 15: 2822—2838.
- [16] SEO K, RYOO H, KIM H J, et al. Local Variation of Impact Toughness in Tandem Electro-gas Welded Joint[J]. Welding in the World, 2020, 64: 457—465.
- [17] 李亚军. FCB 法焊接技术的特点及缺陷介绍[J]. 世界海运, 2015, 38(10): 25—27.
- LI Ya-jun. Introduction to the Characteristics and Defects of FCB Welding Technology[J]. World Shipping, 2015, 38(10): 25—27.
- [18] WANG K, JIANG Z X, MA J J, et al. Investigation on the Characterization and Properties of EH36 Steel FCB Welded Joint[C]// Proceedings of the Second International Conference on Mechanics and Structural Engineering (ICMMSE 2017), 2017.
- [19] 刘永翔, 晋家兵, 张伟, 等. 不同焊剂下 FCB 法埋弧自动焊接低合金高强度钢接头力学性能[J]. 热加工工艺, 2015, 44(13): 230—231.
- LIU Yong-xiang, JIN Jia-bing, ZHANG Wei, et al. Mechanical Property of Joints in Flux Copper Backing Submerged Arc Welded HSLA Steel with Different Flux[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(13): 230—231.
- [20] 徐雁飞. 船用 EH36 薄钢板 FCB 法双丝、三丝焊接工艺认可试验[J]. 焊接技术, 2020, 49(2): 55—59.
- XU Yan-fei. Marine EH36 Thin Steel Plate FCB Method Double Wire and Three Wire Welding Process Approval Test[J]. Welding Technology, 2020, 49(2): 55—59.
- [21] 冯朝闻, 李鹏, 钟克焱, 等. FAB 单面埋弧焊接技术的应用[J]. 船舶标准化工程师, 2015, 48(4): 27—29.
- FENG Chao-wen, LI Peng, ZHONG Ke-yan, et al. Application of Welding Technology of Flux Asbestos Backing Welding with FAB[J]. Ship Standardization Engineer, 2015, 48(4): 27—29.

- [22] 刘磊. 合金元素对 FAB 法埋弧焊 EH36 钢接头组织与性能的影响[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2017, 31(6): 746—750.
LIU Lei. Effect of Alloy Elements on Microstructure and Properties of EH36 Steel Joint by FAB Submerged Arc Welding[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 31(6): 746—750.
- [23] 李远远, 吴铭方, 浦娟. 不同厚度 DH36 船用板 FAB 埋弧焊缝微观组织及力学性能研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(7): 232—234.
LI Yuan-yuan, WU Ming-fang, PU Juan. Study on Microstructure and Mechanical Properties of FAB Submerged Arc Weld for DH36 Ship Plate with Different Thicknesses[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(7): 232—234.
- [24] 马金军, 段正启, 江泽新, 等. 大间隙 FAB 埋弧焊焊接试验及接头性能[J]. 电焊机, 2019, 49(1): 41—47.
MA Jin-jun, DUANG Zheng-qi, JIANG Ze-xin, et al. FAB Submerged-arc Welding Test with Big Gap and Analysis of Joint Property[J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(1): 41—47.
- [25] 刘洪伟, 张玮. SA-335P91 药芯焊丝气体保护焊工艺试验[J]. 电焊机, 2018, 48(2): 76—81.
LIU Hong-wei, ZHANG Wei. Procedure Experimental Study on FCAW of SA-335P91 for Spacecraft Cabin Structure[J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(2): 76—81.
- [26] 孙强, 周喜成, 陶正辉, 等. 船用大厚度高强高韧钢焊接工艺研究[J]. 焊管, 2018, 41(4): 24—27.
SUN Qiang, ZHOU Xi-cheng, TAO Zheng-hui, et al. Study on Welding Process of Heavy Thickness and High Strength-toughness Steel for Ships[J]. Welded Pipe and Tube, 2018, 41(4): 24—27.
- [27] YANG L J, WANG Y W, SUN T, et al. Microstructure and Mechanical Properties of FCTIG-welded DH36 Steel with Rutile-type and Basic-type Flux Cored Wires[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 275: 116363.
- [28] RAMAZAN Y M T. Microstructural Studies and Impact Toughness of Dissimilar Weldments between AISI 316L and AH36 Steels by FCAW[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2013, 67: 1433—1447.
- [29] CAI X Y, DONG B L, LIN S B, et al. Heat Source Characteristics of Ternary-Gas-Shielded Tandem Narrow-Gap GMAW[J]. Materials, 2019, 12: 1397.
- [30] 刘健, 贺智涛, 牛继承. 船用高强度钢板窄间隙热丝 TIG 焊接工艺研究[J]. 焊接, 2018, 33(3): 10—15.
LIU Jian, HE Zhi-tao, NIU Ji-cheng. Research on Narrow Gap Hot Wire TIG Welding of Thick Plate of High Strength Steel for Shipbuilding[J]. Welding, 2018, 33(3): 10—15.
- [31] 胡奉雅, 倪志达, 林三宝, 等. EH40 大热输入钢双丝窄间隙 MAG 焊接接头组织与性能[J]. 焊接, 2019(9): 39—43.
HU Feng-ya, NI Zhi-da, LIN San-bao, et al. Microstructure and Performance of EH40 Large Heat Input Steel Double Wire Narrow Gap MAG Welding Joint[J]. Welding, 2019(9): 39—43.
- [32] 杨志东. 缆式焊丝气保焊电弧旋转及熔滴过渡行为研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2018: 26—27.
YANG Zhi-dong. Study on Arc Rotation and Droplet Transfer Behavior of Cable-type Welding Wire GMAW[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2018: 26—27.
- [33] 方臣富, 杨志东, 陈勇, 等. 缆式焊丝埋弧焊残余应力有限元分析[J]. 焊接学报, 2016, 37(11): 1—6.
FANG Chen-fu, YANG Zhi-dong, CHEN Yong, et al. Finite Element Analysis of Residual Stress of Cable-type Welding Wire Submerged Arc Welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(11): 1—6.
- [34] CHEN Y, FANG C F, YANG Z D, et al. Arc Properties and Droplet Transfer Characteristics in Cable-type Welding Wire Electrode Gas Welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 32: 506—512.
- [35] YANG Z D, FANG C F, WU M F, et al. A Study on the Mechanisms of the CWW SAW Process[J]. Int J Adv Manuf Technology, 2018, 94: 1161—1169.
- [36] DAL M, FABBRO R. An Overview of the State of Art in Laser Welding Simulation[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 78: 2—14.
- [37] HUANG L J, LIU P, ZHU S, et al. Experimental Research on Formation Mechanism of Porosity in Magnetic Field Assisted Laser Welding of Steel[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 50: 596—602.
- [38] CAO L C, SHAO X Y, JIANG P, et al. Effects of Welding Speed on Microstructure and Mechanical Property of Fiber Laser Welded Dissimilar Butt Joints between AISI316L and EH36[J]. Metals, 2017, 7: 270.
- [39] ZHANG S W, SUN J H, ZHU M H, et al. Fiber Laser Welding of HSLA Steel by Autogenous Laser Welding and Autogenous Laser Welding with Cold Wire Methods[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 275: 116353.
- [40] 余玮. 激光电弧复合焊接工艺在邮轮上的应用[J]. 船舶工程, 2019, 41(6): 96—100.
YU Wei. Application of Laser Arc Hybrid Welding Technology in Cruise Ship[J]. Ship Engineering, 2019, 41(6): 96—100.
- [41] 高艳, 崔丽, 常耀卿, 等. 船用耐蚀钢 DH36 光纤激光-MIG 复合焊接接头组织和性能[J]. 焊接学报, 2019, 40(5): 60—66.
GAO Yan, CUI Li, CHANG Yao-qing, et al. Microstructure and Properties of DH36 Fiber Laser-MIG Composite Welding Joint for Marine Corrosion-resistant Steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(5): 60—66.
- [42] ZHANG H J, WANG Y, HAN T, et al. Numerical and Experimental Investigation of the Formation Mechanism

- and the Distribution of the Welding Residual Stress Induced by the Hybrid Laser-arc Welding of AH36 Steel in a Butt Joint Configuration[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 51: 95—108.
- [43] ANNA U, ILKKA P, ANTTI S. Influence of Filler Wire Feed Rate in Laser-Arc Hybrid Welding of T-butt Joint in Shipbuilding Steel with Different Optical Setups[J]. *Physics Procedia*, 2015, 78: 45—52.
- [44] ZHANG X, MI G Y, WANG C M. Microstructure and Performance of Hybrid Laser-arc Welded High-strength Low Alloy Steel and Austenitic Stainless Steel Dissimilar Joint[J]. *Optics and Laser Technology*, 2020, 122: 105878.
- [45] 谭锦红, 赵运强, 王春桂, 等. 机器人搅拌摩擦焊应用发展现状[J]. *金属加工(热加工)*, 2020(1): 8—12.
TAN Jin-hong, ZHAO Yun-qiang, WANG Chun-gui, et al. Development Status of Robotic Friction Stir Welding Applications[J]. *MW Metal Forming*, 2020(1): 8—12.
- [46] ATHANASIOS T, ALEXANDER G, STEPFEN C, et al. Development of a Process Envelope for Friction Stir Welding of DH36 Steel-A Step Change[J]. *Materials and Design*, 2014, 62: 64—75.
- [47] ALMOUSSAWI M, SMITH A J, FARAJI M, et al. Segregation of Mn, Si, Al, and Oxygen during the Friction Stir Welding of DH36 Steel[J]. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2017, 6: 569—576.
- [48] BEAYDET J, RVCKERT G, CORTIAL F. Fatigue Behavior of FSW High-yield Strength Steel Welds for Shipbuilding Application[J]. *Welding in the World*, 2019, 63: 1369—1378.
- [49] ALMOUSSAWI M, SMITH A J. Defects in Friction Stir Welding of Steel[J]. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2018, 7: 194—202.