

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.07.02

海工装备用低合金高强钢焊接现状与展望

陈绍鑫^{1,2}, 方乃文³, 信国松², 冯志强¹, 武鹏博³, 罗玖田¹, 黎 泉¹,
陈昊睿¹, 牛董山钰^{1,2}

1. 北部湾大学, 广西 钦州 535011

2. 聚力新材料科技(日照)有限公司, 山东 日照 276826

3. 中国机械研究总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150028

摘要: 海洋工程装备的转型与升级对钢材性能提出了更高的要求。低合金高强钢凭借其高强、高韧、耐腐蚀等优异性能,在海工装备制造领域得到广泛应用。系统梳理了海工装备用低合金高强钢焊接过程中冷裂纹产生与接头力学性能下降的核心原因,深入分析了合金元素优化、焊接工艺参数调控等解决方案的作用机制。此外,焊条电弧焊、埋弧自动焊等传统焊接技术,以及激光-电弧复合焊、窄间隙焊接等新型技术在海工低合金高强钢中的应用现状,对比了不同技术在热影响区控制、焊接效率及接头性能方面的优劣。通过协同优化,包括Cr、Ni、Mo等合金元素的精准配比以强化组织与耐蚀性,焊接热输入的精细调控以抑制晶粒粗化,以及新型焊接技术的推广应用等手段,可显著提升焊接接头的强韧性与耐腐蚀性。最后,展望了智能化焊接、增材制造等技术在海工装备用低合金高强钢焊接领域的发展趋势,为极端海洋环境下焊接结构的安全服役提供理论支撑与技术参考。

关键词: 海洋工程装备; 低合金高强钢; 冷裂纹; 焊接接头力学性能

中图分类号: TG457.11 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)07-0015-21

Current Situation and Prospect of Welding of Low-alloy High-strength Steel for Offshore Equipment

CHEN Shaoxin^{1,2}, FANG Naiwen³, XIN Guosong², FENG Zhiqiang¹, WU Pengbo³, LUO Jiutian¹,
LI Quan¹, CHEN Haorui¹, NIU Dongshanyu^{1,2}

1. Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China

2. Juli New Material Technology (Rizhao) Co., Ltd., Rizhao 276826, China

3. Harbin Welding Institute Limited Company, Harbin 150028, China

Abstract: The transformation and upgrading of marine engineering equipment have set higher requirements for the performance of steel materials. Low-alloy high-strength steel, with its superior strength, toughness, and corrosion resistance, has been widely used in the field of marine engineering equipment manufacturing. This paper systematically reviews the core reasons for the formation of cold cracks and the decline of joint mechanical properties during the welding process of low-alloy high-strength steel for marine engineering equipment, and deeply analyzes the mechanism of solutions such as alloy element optimization and welding process parameter control. In addition, the application status of traditional welding technologies such as electrode arc welding and submerged arc automatic welding, as well as new technologies such as laser-arc hybrid welding and narrow gap welding in marine engineering low-alloy high-strength steel, are compared in terms of heat-affected zone control, welding efficiency, and joint performance. Through collaborative optimization, including the precise matching of alloy elements such as Cr, Ni, and Mo to strengthen the structure and corrosion resistance, the fine control of welding heat input to suppress grain coarsening, and the promotion and application of new welding technologies, the

收稿日期: 2024-10-15 修回日期: 2024-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(52261044); 泰山产业领军人才工程(2024001)

作者简介: 陈绍鑫(1999—),男,硕士研究生。

通讯作者: 方乃文(1987—),博士,高级工程师,主要从事有色金属焊接性研究及焊接材料开发设计。E-mail: naiwen20@163.com。

strength, toughness, and corrosion resistance of welding joints can be significantly improved. Finally, the development trend of intelligent welding, additive manufacturing, and other technologies in the field of low-alloy high-strength steel welding for marine engineering equipment is prospected, providing theoretical support and technical reference for the safe service of welding structures under extreme marine environment.

Keywords: offshore engineering equipment; low-alloy high-strength steel; cold cracks; mechanical properties of welded joints

引用格式:陈绍鑫,方乃文,信国松,等. 海工装备用低合金高强钢焊接现状与展望[J]. 电焊机, 2025, 55(7): 15–35.

Citation: CHEN Shaoxin, FANG Naiwen, XIN Guosong, et al. Current Situation and Prospect of Welding of Low-alloy High-strength Steel for Offshore Equipment[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(7): 15–35.

0 引言

随着工业化进程的持续推进和经济的高速发展,工业制造领域对资源的需求日益增加。传统化石能源(如煤炭、石油和天然气等)不仅储量有限,其开采与利用过程还会对生态环境造成较大破坏,相比之下,海洋资源种类丰富、储量巨大,已成为缓解资源短缺的重要途径^[1-2]。对海洋资源进行绿色、高效且可持续开发利用的过程中,海洋工程装备的安全稳定服役是核心保障^[3-4]。如海洋平台与船舶会受到极端海洋环境的载荷冲击^[5-7];海底运输管道与海洋风电设备需要同时承受海浪和风浪载荷与海洋环境的腐蚀^[8-9];海洋钻井设备在深海油气勘探和开发作业中,需要承受巨大的钻压和海底地质条件不确定性的双重考验^[10-11]。这些服役条件都对装备用钢材的强度、韧性与焊接性能提出了更为严苛的要求。

低合金高强钢不仅具有高强度、高韧性和良好的耐腐蚀性能与焊接性,而且相对较低的制造成本也使其在大型海工装备中得到了广泛应用^[12-13]。尽管国内外学者已针对低合金高强钢的合金体系与焊接工艺开展了全面且深入的探究,并取得了一些成果,但在深海、极地等极端服役环境下,该类钢材仍面临诸多亟待解决的问题。本文以低合金高强钢的材料性能为切入点,系统综述了合金元素对其强度、韧性及耐腐蚀性能的作用机理;深入剖析焊接过程中存在缺陷的共性问题,如裂纹敏感性、接头力学性能下降等,并着重讨论传统与新型焊接技术在海工装备用低合金高强钢的应用现状及发展趋势,以期为该领域的进一步研究与工程应用提供理论参考与技术借鉴。

1 低合金高强钢特性

低合金高强钢(HLSA)是一类通过添加适量合金元素来显著提高铁碳合金强度和韧性的工程材料,其主要成分为铁(Fe)和碳(C),并含有少量杂质元素,如磷(P)、硫(S)等^[14-16]。通过添加适宜的合金元素(如Si、Mn、Mo、Cr、Ti、Nb)等,一般总量配比为2.5 wt.%或3 wt.%,并利用沉淀强化、固溶强化与细晶强化等强化手段提高低合金高强钢的强度与低温韧性^[17-19]。同时,这些合金元素的协同作用还能显著增加低合金高强钢的耐腐蚀性能,从而有效保障海洋工程装备结构的稳定性和操作安全性。

1.1 合金元素的作用机制

C在HLSA中主要起到保证强度和促进形成强化相粒子的作用,其含量直接影响钢的力学性能^[20-21]。此外,C可以与V、Ti、Nb等微合金元素形成纳米级析出物,作为第二相细化晶粒,实现沉淀强化,提升材料性能^[22-23]。

Mn主要通过固溶强化机制来显著提升低合金高强钢的抗拉强度与屈服强度。相关研究表明,钢材中每增加1 wt.%Mn,其抗拉强度约增加100 MPa^[24]。

Ti是低合金高强钢中固定C、N的关键元素,能够优先与钢中的C、N结合,形成细小且分布均匀的碳氮化物。在钢再加热至奥氏体化过程中,未发生溶解的TiN和TiC颗粒像“锚”一样固定奥氏体晶界,可以显著细化晶粒,提升低合金高强钢的韧性^[25-26]。

随着低合金高强钢的广泛应用,研究人员通过添加或控制不同合金元素的含量来协同优化材料的强韧性和耐腐蚀性,以满足海工装备在复杂海洋环境下的苛刻要求。几种典型海工装备用低合金高强钢化学成分^[27-36]如表1所示。

表 1 典型海工装备用低合金高强钢的化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical composition of a typical low-alloy high-strength steel (wt. %)

钢材	C	Si	Mn	P	S	其他合金元素含量
1MnCrMoNi	0.031	0.21	1.23	0.003	0.003	0.50Cr, 1.68Ni, 0.30Mo
BS700MCK2	0.071	0.22	1.85	0.0001	0.0022	0.17Mo, 0.14Ti, 0.056Nb
34Cr2Ni2Mo	0.30~0.37	0.30~0.60	0.60~1.00	—	—	1.40~1.70Cr, 0.15~0.35Mo, 1.40~1.70Ni
35CrMoV	0.30~0.38	0.17~0.37	0.40~0.70	—	—	1.00~1.30Cr, 0.20~0.30Mo
BWELDY960Q	0.18	0.50	1.60	0.02	0.01	1.00Ni, 0.08Cr, 0.60Mo, 0.05Nb, 0.03Ti
E690	0.15	0.20	1.00	0.005 8	0.001 4	0.99Cr, 1.45Ni, 0.0091Cu, 0.37Mo, 0.030V
30Si2MnCrMoV	0.31	1.56	0.76	0.006	0.002	0.25Ni, 1.14Cr, 0.11V, 0.47Mo, 0.05Cu
Q355D	0.12	0.26	1.38	0.018	0.011	0.066Cr, 0.036Ni, 0.08Cu
13MnNiMoR	≤0.15	0.15~0.50	1.2~1.6	≤0.020	≤0.010	≤0.30Cu, 0.6~1.0Ni, 0.2~0.4Cr, 0.2~0.4Mo
20Si2Mn2CrNi	0.20	1.80	0.50	<0.01	<0.01	1.0Cr, 1.0Ni, 0.3Mo
HG785D	0.13	0.21	1.41	—	—	0.35Cr, 0.02Ni, 0.18Mo

1.2 合金元素的优化作用

近年来,高热输入焊接技术因可提升焊接效率并降低施工成本而逐渐成为研究热点。然而,高热输入易导致焊接过程中奥氏体晶粒明显粗化,并伴随脆性微观组织生成,这会显著降低热影响区(HAZ)的低温冲击韧性,特别是在焊接熔合线附近的粗晶热影响区(CGHAZ),由于峰值温度较高,高温停留时间长,导致晶粒异常,从而影响焊接接头的低温冲击韧性。研究发现,通过细沉淀物的钉扎效应细化晶粒,既能提升低合金高强钢的韧性,又可显著增强其强度,是现代材料科学中一项被广泛认可和应用的^[37-38]。如Cr、Ni等元素可通过细化晶粒尺寸及促进细小组碳氮化物沉淀相的形成,赋予钢材卓越的综合性能^[39-42]。此外,Medina等人指出,VN沉淀物能使高氮含量V微合金钢的晶粒尺寸显著减小^[43],而稳定的TiN沉淀物则被证实是抑制奥氏体生长最有效的微合金化沉淀颗粒^[44]。钢的晶粒细化方法可分为轧制工艺和冷却工艺两大类,其中轧制工艺涵盖在奥氏体自发再结晶区间进行再加热及正火受控轧制等技术手段。

Xiaoyan Wu等^[45]设计了四种不同Mo含量的低合金高强钢(具体成分见表2),并系统研究了高热输出条件下Mo对低合金高强钢韧性的影响。如图1所示,随着Mo元素含量的逐步提升,铸锭钢板的微观组织结构发生显著演变:初始阶段,组织主要由多边形铁素体(PF)与珠光体构成(见图1a与图1b);当Mo含量达到0.06 wt.%时,铁素体晶粒尺寸出现明显细化现象,同时伴随着少量针状铁素体

表 2 钢的化学成分(质量分数,%)

Table 2 The chemical composition of steel(wt. %)

钢材	C	Si	Mn	P	S	Mo
N1	0.06	0.23	1.44	0.016	0.004	0.00
N2	0.06	0.21	1.43	0.015	0.006	0.04
N3	0.06	0.23	1.41	0.015	0.006	0.06
N4	0.06	0.24	1.60	0.015	0.008	0.07

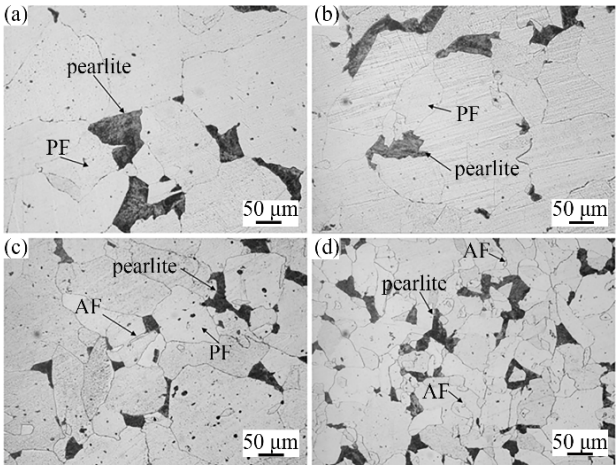


图 1 铸锭钢板的显微组织^[46]

Fig. 1 Microstructure of ingot steel plates

(AF)的析出(见图1c);进一步增加Mo的含量至0.07 wt.%时,铁素体晶粒尺寸更为均匀且细小(见图1d)。图2所示的铸锭钢板与热轧钢板的平均粒度分布结果显示,二者均符合对数正态分布特征,这表明当Mo含量在0~0.07 wt.%时,铁素体晶粒尺寸呈逐渐减小的趋势。结合图3的定量数据与图4中CGHAZ的显微组织图像可进一步观察到:随着Mo元素含量的升高,CGHAZ中粒状贝氏体(GBF)的宽度逐渐减小,且该区域内的奥氏体尺寸同步减

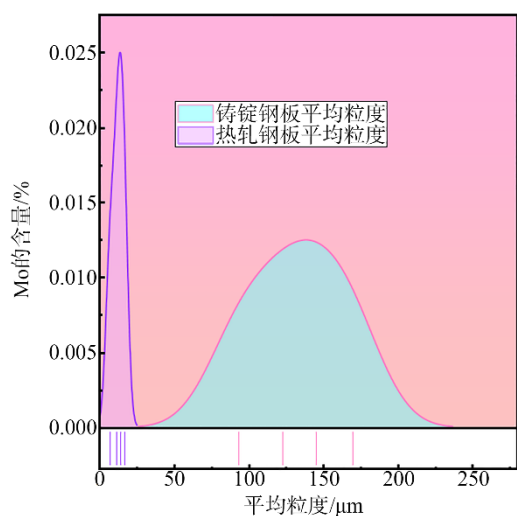


图2 平均粒度分布图

Fig. 2 Average particle size distribution plot

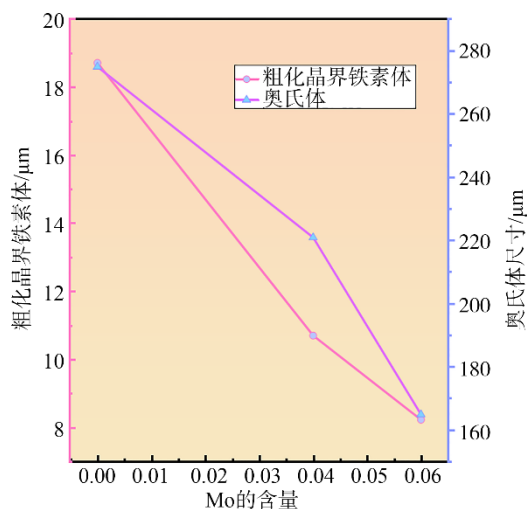


图3 粗化晶界铁素体与奥氏体尺寸图

Fig. 3 Size diagram of ferrite and austenite at coarsening grain boundaries

小(如图4a~图4c所示);当Mo含量达到0.07%时,CGHAZ的显微组织发生了显著变化,主要由AF所构成(见图4d)。上述试验结果表明,向低合金高强度钢中添加Mo元素可通过调控CGHAZ的显微组织结构,显著影响HAZ的冲击韧性,这对提升钢材的整体力学性能和拓宽其工程应用领域具有重要的理论与实践意义。

Wang等^[46]为了验证Nb对微合金钢韧性的有益影响是否与晶粒细化有关,将两种钢材重新加热至1 200℃的高温状态,随后在约1 000℃下进行热轧处理,试样取自150 mm厚轧制板的1/4位置(即板表面下38 mm处)。两种材料的Nb含量存在差

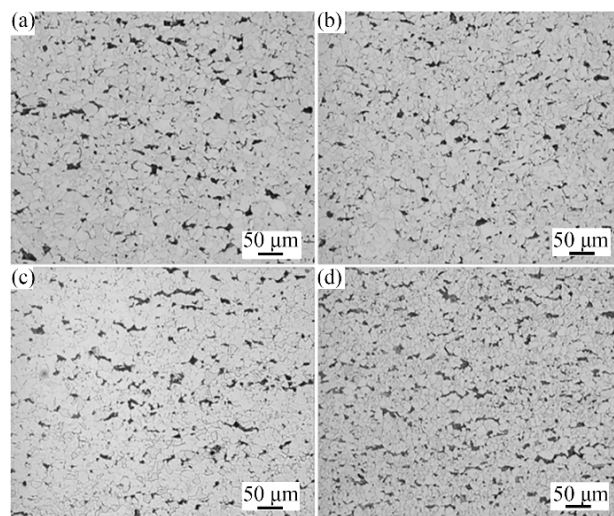
图4 热轧钢板的显微组织^[46]

Fig. 4 Microstructure of hot-rolled steel plate

异,而其他合金元素的浓度基本一致。研究人员对CrMo钢与CrMoNb(0.026 wt.%Nb)钢进行淬火和回火(Q态和T态)处理后,在-10℃至-40℃的温度内,对9个标准夏比冲击试样开展测试,研究Nb对屈服强度和冲击韧性的影响。由图5可直观发现,冲击韧性得到显著提升,且CrMoNb钢在-40℃时表现出更优异的冲击韧性,这表明Nb在低合金铁素体钢中具有有益作用,但本研究中未能证实Nb对微合金钢韧性的有益影响与晶粒细化存在关联。现有研究表明,Nb通过与NbC形成相关的稳定性机制来提高低温冲击韧性。

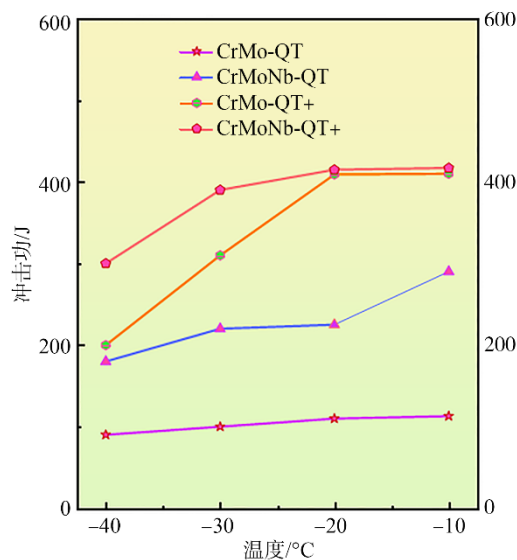


图5 夏比冲击功

Fig. 5 Charpy impact power

Liu等^[47]深入研究了在高线能量焊接热循环条件下,Zr元素的添加如何通过影响微观组织演变来调控含Zr钢的冲击韧性,并将其与未添加Zr的钢进行对比,以揭示Zr在提升焊接热影响区(CGHAZ)性能方面的潜在机制。由图6、图7可知,由于Zr元素的添加会降低Al含量,形成大量更细小的Zr-Al-Ti络合氧化物和(Al,Ti,Nb)N析出物;同时,在Zr的脱氧作用以及钢液中固溶Zr与Al-Ti-O复合夹杂物的双重作用下,钢液中固溶Al和Ti的含量有所增加。因此,在冷却阶段,会形成更细小的含铝氮化物沉淀。而在含Zr钢中,细小的夹杂物与析出相会起到钉扎作用,使奥氏体晶粒更加细小且均匀。由图8可以明显看出,在模拟CGHAZ中,与无Zr钢(见图8b)相比,含Zr钢的钉扎效应与针状铁素体的形成共同作用,其晶粒结构显著细化;细晶组织中大量存在的大角度晶界,能够有效地抑制解理裂纹的蔓延,并展现出典型的韧性断裂特征,从而赋予了材料卓越的低温冲击韧性。

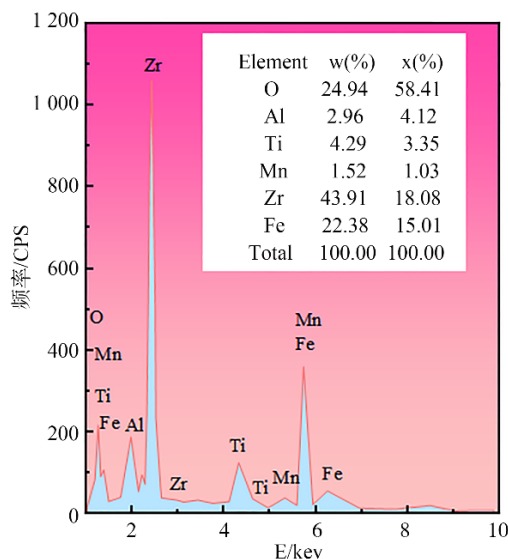


图6 含Zr元素能谱图

Fig. 6 Energy spectrum with Zr element

综上,高热输入焊接技术在大幅提升生产效率、降低施工成本的同时,不可避免地给低合金高强钢的热影响区韧性带来了严峻挑战,具体体现在焊接过程中奥氏体晶粒的显著粗化和脆性显微组织的形成,这些因素直接劣化了焊接接头的力学性能,进而威胁整体结构的可靠性。为了应对这一技术瓶颈,科研工作者通过深入研究和实践,构建了

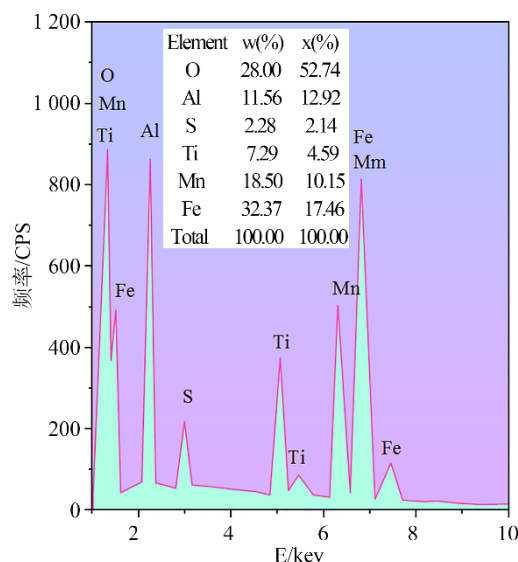


图7 不含Zr元素能谱图

Fig. 7 No Zr elemental energy spectrum

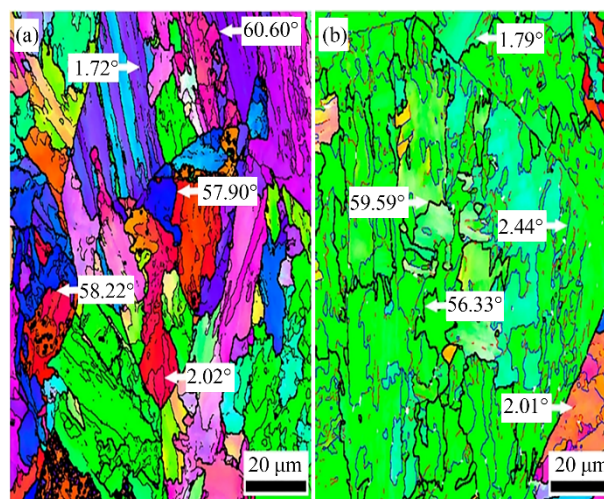
图8 含Zr(a)与不含Zr(b)的微观图^[50]

Fig. 8 Microplots with and without Zr

一系列有效的化学成分优化和微观组织结构调控策略。在化学成分优化方面,添加Cr、Ni等合金元素是细化晶粒与提升钢材性能的关键手段。这类元素不仅能够促进细碳氮化合沉淀物的形成,有效钉扎晶界,抑制晶粒长大,还能通过固溶强化作用,提升钢材的整体强度和韧性。此外,Mo元素的加入进一步丰富了微观组织的调控手段,它在特定含量范围内能减小铁素体晶粒尺寸,优化铸坯和轧制钢板的微观结构均匀性,进而提升钢材的韧性。

1.3 合金元素强化HLSA耐腐蚀性

尽管低合金高强度钢已在海底管道及海洋风

力发电设施中得到普遍应用,但考虑到这些海工装备的服役条件,有必要提高低合金高强钢在海水中的耐腐蚀性能^[48-49]。因此,海洋环境下低合金高强钢的耐蚀性优化已成为该领域的研究热点。当前关于低合金高强钢耐蚀性提升的研究,可以进行多元分析:如Ren^[50]研究了高钒含量低合金高强度钢经不同温度回火处理后的应力腐蚀行为;图9为不同微观组织试样在3.5 wt.%的NaCl溶液中浸泡48 h后的表面腐蚀产物扫描电镜(SEM)图像。值得注意的是,钢材界面处腐蚀现象显著,而在多边形铁素体(PF)和马氏体表面(见图9a、9c)可观察到大量针状腐蚀产物;相比之下,针状铁素体(AF)表面的腐蚀产物呈现更为紧密的结构(见图9b),这一结果证实了针状铁素体相较于珠光体和马氏体具有更优的耐腐蚀性^[51-53];Zhang等^[54]通过直流电沉积技术在65Mn钢表面制备了一层具有层状微/纳米结构的硬脂酸钙疏水涂层,图10显示,随沉积时间延长,涂层润湿性改善、厚度增加,但对硬脂酸钙的相组成无影响;得益于涂层表面的分级微/纳米结构和硬脂酸钙的低表面能,该涂层表现出良好的疏水性,其中HC-30的耐腐蚀性能尤为突出。上述研究分别从工艺控制与表面处理技术角度为耐蚀性提升提供了思路,而合金元素的添加在低合金高强钢耐蚀性调控中发挥着更为核心的作用。

Zhao等^[55]采用循环盐雾试验研究了550 MPa

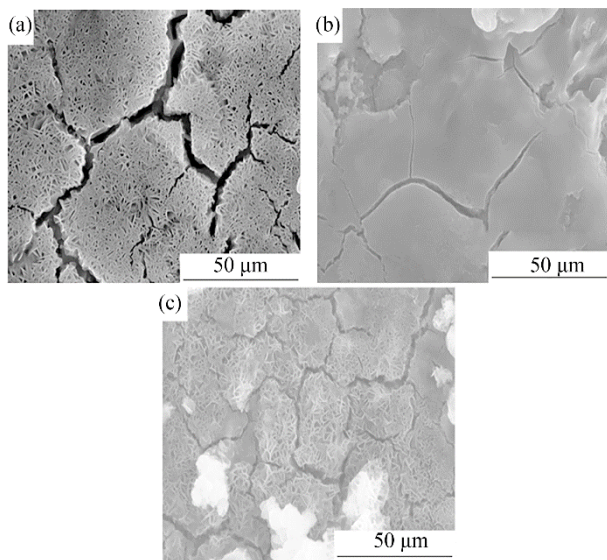


图9 钢材表面形貌^[54]

Fig. 9 Surface topography of steel

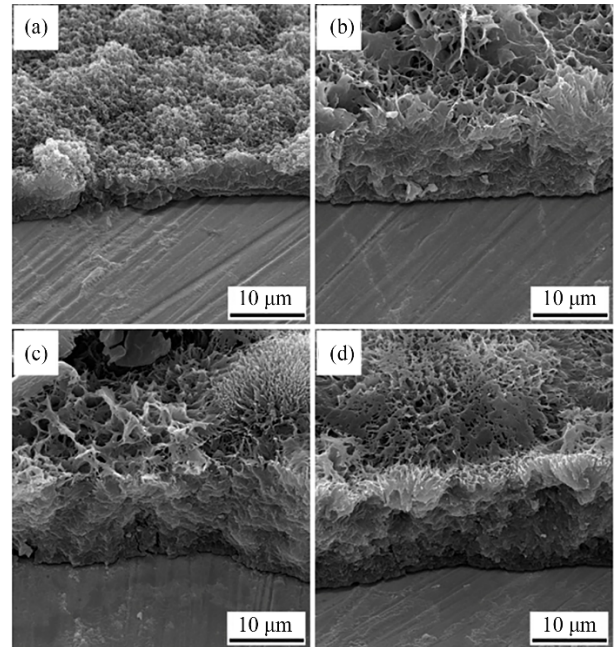


图10 涂层试样的45°旋转表面形貌^[57]

Fig. 10 45° rotating surface topography of the coated specimen

级船用低合金高强钢中Si含量(0.30 wt.%、0.50 wt.%、1.0 wt.%)对腐蚀行为的影响。Si含量为0.30 wt.%的钢材平均腐蚀速率显著高于0.50 wt.%和1.0 wt.%的试样;其中0.30 wt.%与0.50 wt.%钢材的腐蚀速率随时间延长呈上升趋势,而1.0 wt.%钢材虽初始腐蚀速率较高,但随后降至更低水平并趋于稳定,证实了提高S含量对低合金高强钢耐蚀性的积极作用。Chen等人^[56-57]指出,较高的Si含量可促进 α -FeOOH的形成,并提升锈层的致密性与保护能力。在低合金高强钢的锈层中, α -FeOOH相被认为是最为稳定且致密的,相比之下, γ -FeOOH相则通常呈现为疏松多孔的结构,难以有效阻挡氯离子的渗透,因此 α -FeOOH/ γ -FeOOH比值常作为评价锈层保护能力的重要指标。图11显示,随Si含量增加, α -FeOOH的形成得到显著促进;但结合图12a、12d与图12c、12f可知,Si含量为0.30 wt.%与1.0 wt.%的钢材显微组织相似,均由PF和粒状贝氏体组成;而0.5 wt.% Si钢材的显微组织以粒状贝氏体为主,含细碳化物或马氏体/奥氏体(M/A)组元。这表明,适量Si添加有助于提升耐蚀性,但过高的Si含量会促进先共析铁素体的形成与粗化,导致高强钢低温韧性显著下降。

研究学者发现,即使微量的B元素也会对低合

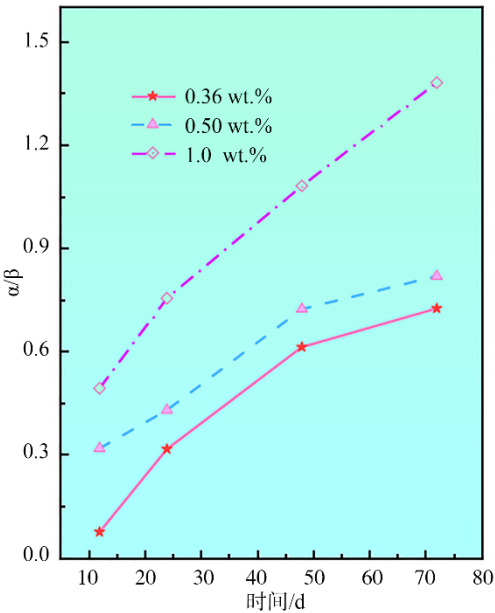


图 11 α -FeOOH/ β -FeOOH 比值图
Fig. 11 α -FeOOH/ β -FeOOH Odds plot

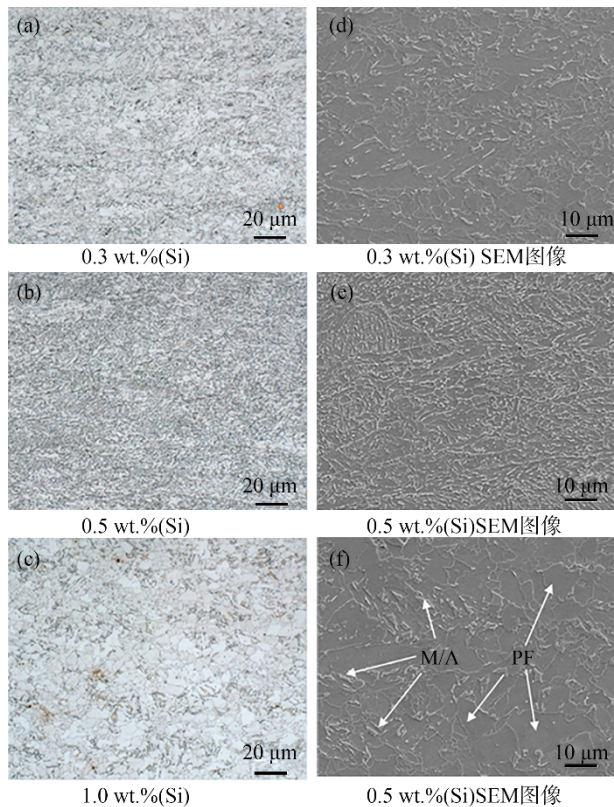


图 12 光学显微镜和扫描电镜下的图像^[58]
Fig. 12 Image under light microscope and scanning electron microscope

金高强钢的耐蚀性能产生显著影响。Wang 等人发现,在不锈钢中添加 B 可形成复杂的 B 化物层,耐磨

性得到了显著提高^[58-59]。Yan-hui Hou 等^[60]通过全浸腐蚀试验(浸泡 460 h 和 960 h)研究了 3 种不同 B 含量(0.000 3 wt.%, 0.003 wt.%, 0.004 4 wt.%)对试验钢腐蚀行为的影响。腐蚀失重法计算结果显示,1 号试验钢(0.000 3 wt.% B)的腐蚀速率最快,2 号钢(0.003 wt.% B)次之,3 号钢(0.0044 wt.% B)最慢,表明随着 B 含量的增加,腐蚀速率呈下降趋势,证实了 B 元素对钢材耐蚀性的提升作用。此外,对图 13 所示的动电位极化曲线的 Tafel 拟合结果(见表 3)显示,点蚀电位(E_{pit} , 定义为破坏钝化膜击穿电位)随 B 含量增加显著正移(1 号钢: -841.386 mV, 2 号钢: -805.512 mV, 3 号钢: -644.589 mV),进一步证实了 B 元素可提高钢材的耐点蚀性能。

表 3 电化学参数的拟合结果

钢材	1 号	2 号	3 号
$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	-982.598	-950.693	-905.631
$I_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	22.622	15.964	13.070
E_{pit}/mv	-841.386	-805.512	-644.589

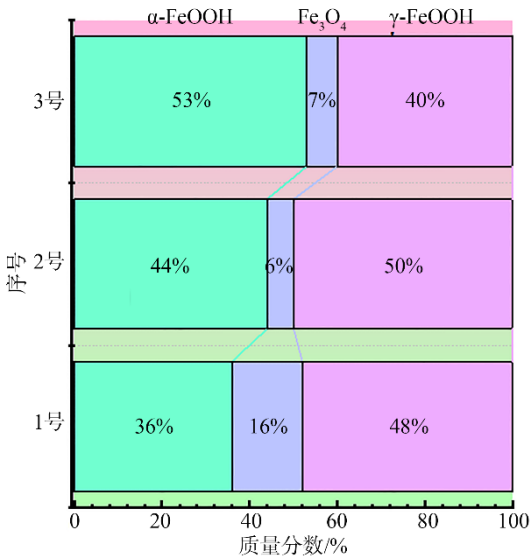


图 13 动电位极化曲线
Fig. 13 Dynamic polarization curve

在部分研究中, N 元素通常被视为被动体系中的组成部分, 当与其他合金元素的协同作用可在一定程度上提升材料耐蚀性。例如, Bayoumi 和 Ghanem^[61]观察到, 在铁离子存在的情况下, N 可降低材料对全面腐蚀的敏感性; Wang 等人^[62]研究表明, N 可消除冷加工对高氮不锈钢点蚀性能的不利影响; 而 Mudali 等人^[63]认为, N 仅在 316L 不锈钢冷

加工量低于 20% 时发挥有益作用。为明确 N 元素在低合金高强钢中的作用, Liu 等^[64]模拟海洋大气环境, 系统研究了不同 N 含量 (0%、0.01 wt.%、0.02 wt.%) 在多种活化体系中对钢材腐蚀行为的影响。结果显示, 所有试样的弹性行为重叠度较高, 表明 N 添加对弹性区影响较小; 图 14 显示, 随腐蚀时间延长, α -FeOOH 未显著增长, 腐蚀速率未得到有效抑制, 且腐蚀产物中未检测到硝酸盐峰值, 但 0.02 wt.% N 试样的平均硬度较无 N 试样提高 17 倍。总体而言, N 元素的添加未能有效提升低合金高强钢的耐蚀性, 仅使抗拉强度提高 39 MPa。

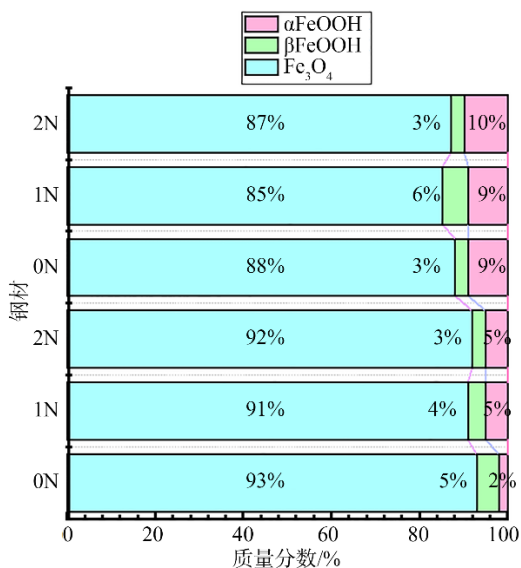


图 14 质量分数占比

Fig. 14 Percentage of quality score

上述研究深入揭示了合金元素对低合金高强钢在海洋等腐蚀环境中耐蚀性的强化机制, 明确了微观组织与腐蚀行为的内在关联。通过对比马氏体、针状铁素体、多边形铁素体等不同组织的腐蚀速率发现, 针状铁素体因其独特的组织结构表现出最低的腐蚀速率, 证实了微观结构对耐蚀性能的显著影响。

在合金元素的作用机制方面, 除 Si、B 外, Ni、Cr 等元素的协同作用进一步提升了低合金高强钢的耐蚀性: 例如, Si 通过促进 α -FeOOH 的形成来增强锈层的保护能力, 与 B 元素协同作用可进一步降低腐蚀速率并提高点蚀电位; Ni 元素形成的氯离子阻挡层与 Cr 元素促进的锈层致密化相结合, 构建了更为全面的腐蚀防护体系。

此外, 表面处理技术对低合金高强钢耐蚀性的提升作用也受到广泛关注。除电沉积硬脂酸钙疏水涂层外, 热喷涂、化学气相沉积等先进技术通过形成致密保护层或调控表面化学性质, 为耐蚀性优化提供了补充方案。

这些研究成果为低合金高强钢在海底管道、海洋风电等腐蚀环境中的规模化应用提供了坚实的理论支撑与技术保障。

2 低合金高强钢焊接性研究

随着中国对低碳环保、节能减排重视程度的日益提升, 以及焊接结构向轻量化、大型化、高参数化方向发展, 海洋工程装备领域对强度超 1 000 MPa 的低合金高强钢需求持续攀升。然而, 焊接过程中焊接区域经历高温快速加热与随后的迅速冷却, 会引发两大焊接性问题: 一是焊接接头对裂纹的敏感性显著增强, 易形成裂纹; 二是焊接热循环导致受热与冷却不均匀, 会使焊接接头力学性能下降^[65-68]。

2.1 焊接冷裂纹

在低合金高强钢焊接生产中, 裂纹是常见问题, 也是导致焊接结构件受损的首要因素, 其中热裂纹和冷裂纹较为典型。这些裂纹不仅大幅增加构件制造的复杂性与挑战性, 还时常引发灾难性安全事故。尤其是冷裂纹, 其形成过程难以察觉且具有突发性, 危害更为严重^[69-70]。冷裂纹产生主要涉及三个因素: 钢的淬硬倾向大、扩散氢的存在、焊接接头产生的应力。因此, 明晰低合金高强钢裂纹机理及影响因素 (如焊接参数、材料成分、热处理等), 能更精准掌握裂纹形成规律。在此基础上, 制定并实施优化焊接顺序、预热处理、焊后热处理等有效工艺措施, 最大限度避免焊接裂纹产生, 对保障低合金高强钢在实际工程应用中的安全可靠具有重要指导意义^[71-72]。

杨东青等^[73]为解决 NiCrMoV 钢材焊接过程中的冷裂纹问题, 采用高氮奥氏体焊丝作为填充材料, 并运用超高强钢熔化极气体保护焊 (GMAW) 技术。研究重点关注 60° 和 90° 两种不同坡口角度下, 焊接接头的组织结构和力学性能变化, 旨在为超高强钢的焊接工艺提供新的思考方向。图 15 为不同

坡口焊缝与热影响区组织形貌,60°坡口焊接时,接头热影响区的马氏体组织晶粒偏大,且马氏体与奥氏体的混合组织过渡区域较小(见图 15a、15c,图 16a);相比之下,90°坡口焊接的接头,其热影响区马氏体组织晶粒更为细小,同时马氏体与奥氏体的混合组织过渡区域也更大(见图 15b、15d,图 16b)。焊缝主要由被奥氏体基体环绕的密集铁素体树枝晶构成,而在这些树枝晶之间,散布着一些随机分布的“粒状”铁素体,它们同样被奥氏体基体包围,遍布整个金相组织。由表 4 可知,在采用高氮奥氏体焊丝的 GMAW 焊接过程中,90°坡口接头的抗拉强度达到 850 MPa,高于 60°坡口接头的 690 MPa。可见,该工艺在保证硬度的同时,避免了超高强度低合金钢出现冷裂纹焊接问题。

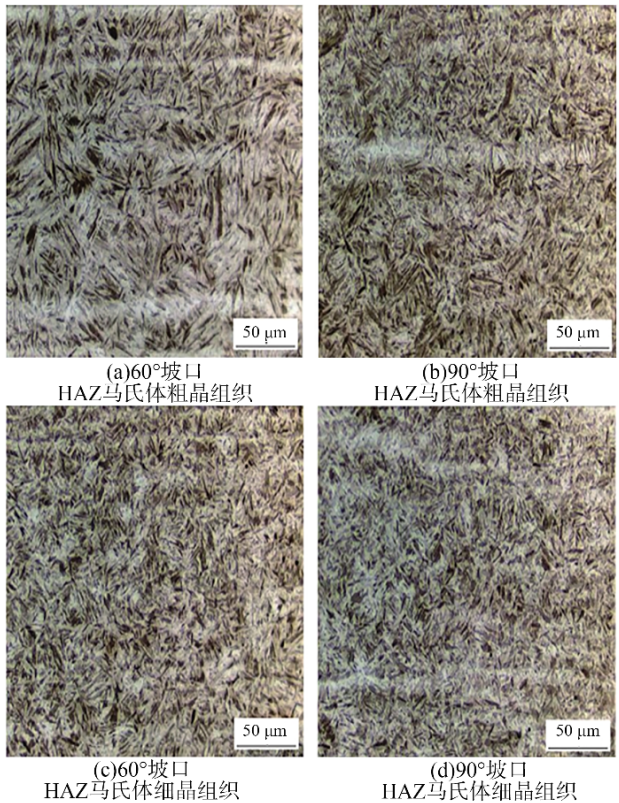


图 15 60°坡口与 90°坡口热影响区显微组织^[76]

Fig. 15 Microstructure of heat-affected zone at 60° and 90° slope

安国邦等^[74]通过测定 1 100 MPa 级 LG110QT 钢、1 400 MPa 级 LG1400QT 钢在不同 $t_{8/5}$ 冷却时间下热影响区微观组织发现:在相同冷速下, LG1100 QT 钢热影响区组织变化(贝氏体、珠光体等)早于 LG1400QT 钢;随着 $t_{8/5}$ 时间增长,组织从板条马氏体

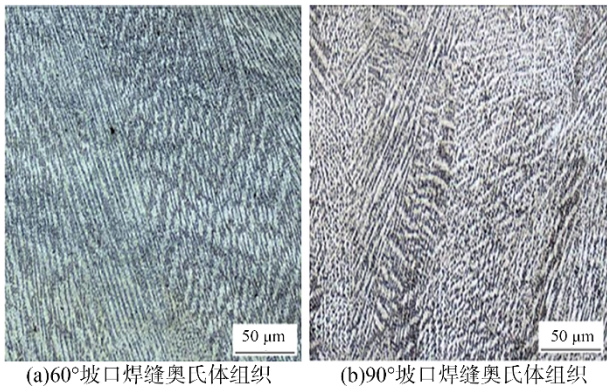


图 16 60°坡口与 90°坡口焊缝奥氏体组织^[76]

Fig. 16 Austenite structure of 60° groove and 90° groove welds

表 4 接头抗拉强度(单位:MPa)

Table 4 Tensile strength of joints(Unit:MPa)

坡口角度/(°)	试样 1	试样 2	试样 3	平均值
60	720	678	672	690
90	887	834	829	850

转变为贝氏体及铁素体/珠光体,导致热影响区硬度降低;当 LG1100QT 钢 $t_{8/5}>75$ s、LG1400QT 钢 $t_{8/5}>30$ s 时,会出现热影响区软化。根据表 5 及国际焊接协会推荐指标, LG1100QT 与 LG1400QT 钢的碳含量(分别为 0.14%、0.23%)及冷裂纹敏感系数(分别为 0.27%、0.25%),其中 LG1100QT 钢冷裂纹敏感系数高于评定冷裂倾向的敏感系数指标 0.25%,两种钢碳含量均高于 0.45%。因此,在焊接 LG1100QT 和 LG1400QT 钢时,为获得高性能接头, $t_{8/5}$ 时间应分别控制在 75 s 和 30 s 内,以防冷裂纹出现。

表 5 试验钢的化学成分(质量分数,%)

Table 5 Test the chemical composition of the steel (wt. %)

试样钢	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
LG1100QT	0.24	0.24	1.24	0.011	0.004	0.33	0.016	0.47
LG1400QT	0.23	0.24	0.93	0.004 7	<0.002	0.38	1.21	0.53

朱双春等^[75]提出 Q690 在焊接过程中易出现焊接裂纹,原因是其合金含量过高,如表 6 所示。为此,采用插销试验法测试预热和不预热以及小线能量和大线能量不同组合条件下的手工焊条焊接的冷裂敏感性。由表 7 不同焊接条件下 Q690 钢插销实验结果可知:Q690 钢具有一定的冷裂敏感性,采用小线能量(1.48 kJ/mm)焊条电弧焊,不预热焊接时临界断裂应力仅有 650 MPa,预热 75 °C 时临界断裂应力可达 930 MPa,可极大降低冷裂敏感性,避免冷裂纹的产生;而在大线能量(3.08 kJ/mm)条件下,

不预热和预热 75 °C 临近断裂应力接近,在一定程度上提高了抗冷裂敏感性性能,但效果不如小线能量、预热 75 °C 条件下焊接的抗冷裂效果。

表 6 钢的化学成分(质量分数,%)
Table 6 Chemical Composition of steel (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.074	0.12	1.54	0.008	0.001	0.44
Ni	Nb	Cu	Mo	Ti	V
0.60	0.045	0.31	0.38	0.012	0.007

表 7 插销试验结果

Table 7 Bolt test results

试验组别	插销试棒编号	焊接线能量/J	预热温度/°C	试验应力/MPa	试验结果
A	A1	1.48	室温	630	加载 24 h 未断裂
	A2	1.48	室温	650	加载 24 h 未断裂
	A3	1.48	室温	670	加载 209 min 断裂
B	B1	1.48	75	890	加载 24 h 未断裂
	B2	1.48	75	930	加载 24 h 未断裂
	B3	1.48	75	960	加载时断裂
C	C1	3.08	室温	830	加载 24 h 未断裂
	C2	3.08	室温	870	加载 24 h 未断裂
	C3	3.08	室温	890	加载 65 min 断裂
D	D1	3.08	75	830	加载 24 h 未断裂
	D2	3.08	75	850	加载 24 h 未断裂
	D3	3.08	75	870	加载 32 min 断裂

上述内容全面深入探讨了低合金高强钢焊接性研究,从多个角度识别焊接过程中的主要问题,如裂纹敏感性显著提升和焊接接头力学性能下降,详细分析了裂纹的类型及其危害,特别是冷裂纹的产生因素。针对冷裂纹问题,研究学者提出了多种解决方案,包括深入了解裂纹机理、优化焊接顺序与工艺等,这些方案在实际工程应用中效果良好。此外,通过 NiCrMoV 钢材、LG1100QT 与 LG1400QT 钢以及 Q690 钢的焊接研究案例,展示了不同材料在焊接过程中冷裂纹问题的具体表现和解决方案。最后从化学成分出发,分析了 LG1100QT 与 LG1400QT 钢的碳含量和冷裂纹敏感系数与冷裂纹形成的相关性,为进一步改进材料性能和优化焊接工艺提供了依据。

2.2 焊接接头力学性能

海洋工程装备长期服役于海浪、风暴、寒流以及大气和海水的严重腐蚀等复杂多变且极端恶劣的自然环境中,同时还面临着海啸和地震等自然灾

害的潜在威胁,这对海洋工程结构的整体性能提出了严苛要求^[76]。焊接接头易因受焊接缺陷、残余应力以及力学性能的不均匀分布等因素影响,往往成为海洋工程结构中最为脆弱的环节^[77]。因此,提升低合金高强钢焊接接头力学性能的关键在于选用强韧性平衡优异的焊接材料,并制定科学合理的焊接工艺方案。

李岳等^[78]针对焊接接头腐蚀疲劳行为,采用基于断裂力学的疲劳裂纹扩展测试方法,系统研究了 S355 钢焊接接头的预腐蚀疲劳特性,并结合裂纹扩展轨迹与疲劳断面分析,开展了微观结构表征。结果表明,随着预腐蚀时间的延长,焊接接头疲劳裂纹扩展速率显著增大,表明预腐蚀处理对 S355 钢焊接接头疲劳性能存在显著劣化作用;且焊接接头不同区域对预腐蚀的敏感度存在差异,其中热影响区表现最为突出。这是由于热影响区存在大量碳化物聚集,且其主导组织为通过切变机制形成的板条马氏体,上述因素共同导致热影响区成为焊接接头耐蚀性的薄弱环节。

曾道平等^[79]研发了 Mn-Si-Ni-Cr 系实心焊丝用于新型船用 440 MPa 级低合金高强钢的焊接。图 17 显示,当焊接热输入分别为 11.5 kJ/cm, 16.5 kJ/cm 和 21.5 kJ/cm 时,接头硬度与抗拉强度随热输入增大呈递减趋势。图 18(Olympus GX51 光学显微镜观察结果)揭示了不同热输入下的焊缝组织演变规律:热输入较低时,焊缝主要由粗大粒状贝氏体(GB)和长条状板条贝氏体(LB)构成(见图 18a);随热输入增加,组织逐渐转变为以细小交织状针状铁素体(AF)为主(见图 18b);当热输入进一步增大时,组织则以 AF、侧板条铁素体(FSP)和多边形铁素体(PF)为主要成分(见图 18c)。同时,焊缝中马氏体/奥氏体(M-A)组元含量、直径>1.0 μm 夹杂物占比及夹杂物平均直径均随热输入增加而增大。弯曲试验结果显示,三种热输入条件下的焊接接头拉伸弯曲试样均断裂于母材,弯曲试样无损伤,表明接头具有良好的塑性匹配。

Q960 钢因合金元素添加导致焊接过程中低温冲击韧性难以保证,极大限制了其在低温环境中的应用^[80-81]。Zou 等^[82]采用自保护焊工艺,通过调控药芯焊丝中 Al 含量优化 Q960 钢焊接接头的低温冲

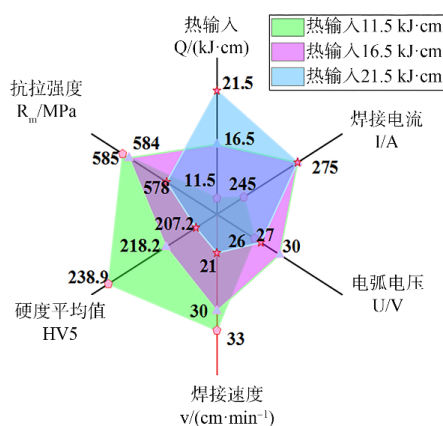


图17 三种热输入参数对比雷达图

Fig. 17 Comparison of the radar charts of the three thermal input parameters

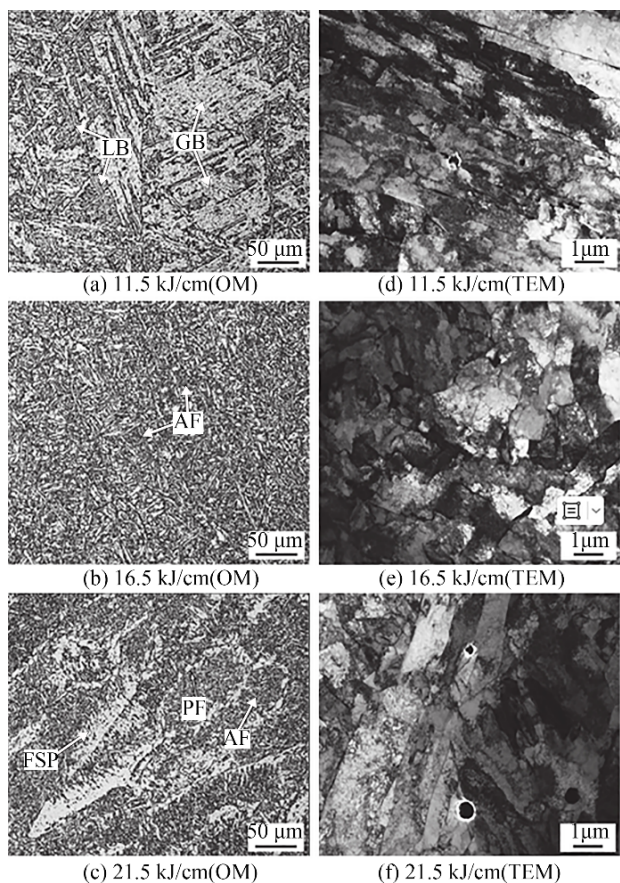
图18 不同热输入的焊缝组织^[82]

Fig. 18 Weld structure with different heat inputs

击韧性。图19表明,Al含量增加可显著降低焊缝金属中O、N含量,体现出强脱氧与固氮能力:在熔滴阶段,Al对焊缝气孔起预脱氧作用,进入熔池后仍保持强脱氧效果,使焊缝气孔随Al含量增加而减少,有利于提升接头强度与低温韧性。然而,焊缝

金属拉伸性能与低温冲击性能随Al含量增加呈先升后降趋势:当Al含量为0.21 wt.%时,接头拉伸强度达1 035 MPa,0℃冲击功180 J,-60℃冲击功为58 J,且多数AF尺寸为1.0 μm,性能达到最优。因此,Al含量应控制在0.21 wt.%以内,以形成有益的Al₂O₃相(见图20),从而提升焊缝冲击能量吸收能力;若Al含量过高,则会生成有害AlN相(见图21),反而劣化冲击性能。

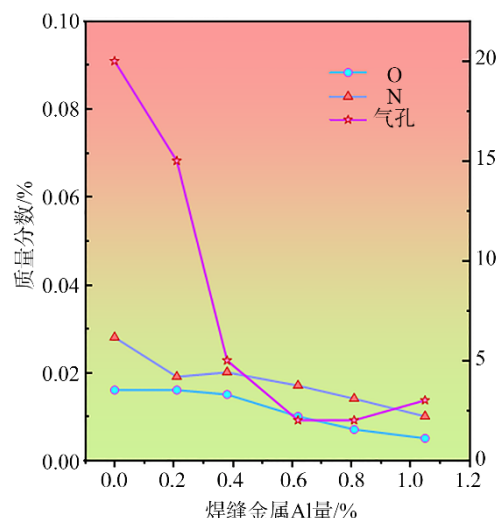
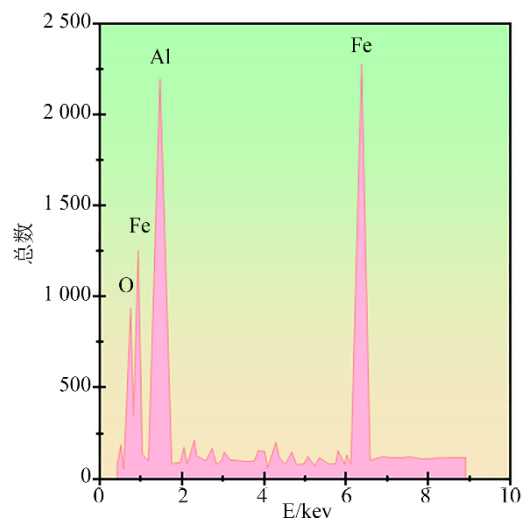


图19 焊缝金属Al含量

Fig. 19 Al content of the weld metal

图20 Al₂O₃能谱图Fig. 20 Al₂O₃ energy spectrum

孟满丁等^[83]针对800 MPa级低合金高强钢,采用熔化极气体保护焊,研究了14 kJ/cm、17 kJ/cm和20 kJ/cm三种热输入对焊接接头显微组织与力学性能的影响,旨在为该级别钢材的焊接工艺优化提供

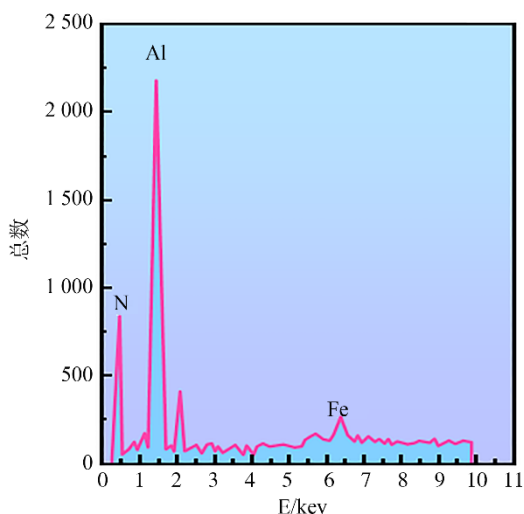


图 21 AlN 能谱图

Fig. 21 AlN spectra

数据支撑与理论依据。图 22 显示,三种热输入条件下,焊缝金属、熔合线及热影响区在 -50°C 时的最低冲击吸收功分别为 105 J、190 J 和 166 J。表 8 数据表明,焊缝金属与母材抗拉强度接近,体现出优异的焊材-母材匹配性,确保接头强韧性平衡。显微组织分析发现,焊缝金属冲击韧性随热输入增加呈先升后降趋势:当热输入为 17 kJ/cm 时,焊缝组织由短条状板条贝氏体、板条马氏体与细小粒状贝氏体交织分布构成,板条块呈交织排列,赋予焊缝高韧性且韧性分散度较小。

上述文献针对 Q960 钢焊接接头中铝含量的影

表 8 母材的力学性能

Table 8 Mechanical properties of the base metal

材料	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A/\%$	$Z/\%$	$KV(-50^{\circ}\text{C})/\text{J}$
母材	835	792	20.5	75	230
熔敷金属	885	897	18.5	70	139

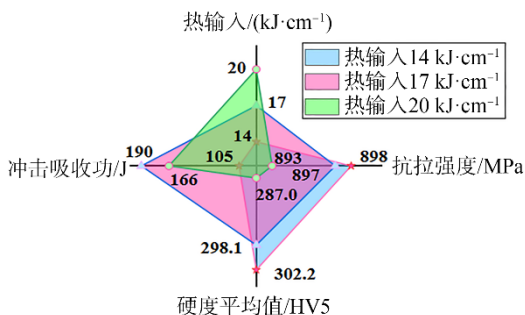


图 22 三种热输入参数对比雷达图

Fig. 22 Comparison of the radar charts of the three thermal input parameters

响进行了详细分析。结果表明,通过调控药芯焊丝中的铝含量,可以确保焊接接头在低温时保持良好的冲击韧性。铝含量的增加对拉伸性能和低温冲击性能呈现先增后降的趋势,最优铝含量确定为 $0.21\text{ wt.}\%$ 。此外,铝含量对焊缝金属组织结构也有显著影响,适量的铝可以减少焊缝气孔,形成有利于提高冲击能量吸收的 Al_2O_3 ,但过高的铝含量会产生不利的 AlN 。

同时还关注了焊接接头的腐蚀疲劳现象,以及不同热输入对焊接接头显微组织和力学性能的影响。研究发现,随着预腐蚀时间的延长,焊接接头的疲劳裂纹扩展速率增大,疲劳性能下降,其中热影响区对预腐蚀处理最为敏感。同时,不同热输入条件下,焊缝金属的显微组织和力学性能也会发生变化。通过优化热输入和焊材成分,可以显著提高焊缝金属的冲击韧性,并保持良好的焊缝金属与母材匹配性,从而确保焊接接头在强度和韧性方面均达到优异效果。

3 焊接工艺选择

焊接技术在低合金高强钢加工中扮演着至关重要的角色。低合金高强钢因其高强度、良好的韧性和焊接性而被广泛应用于桥梁、建筑、船舶、压力容器等领域^[84]。然而,这类钢材在焊接过程中容易出现热影响区脆化、冷裂纹等缺陷,对焊接技术提出了很高的要求。通过采用合适的焊接方法、焊材以及预热、层间温度控制等工艺措施,可以有效降低焊接缺陷的产生,确保焊缝的质量和性能^[85-86]。同时,焊接技术还能实现低合金高强钢的高效、自动化加工,提高生产效率和产品质量。因此,掌握和应用先进的焊接技术对于低合金高强钢的加工和制造具有重要意义,是确保工程结构安全、可靠的关键环节。

3.1 传统焊接技术

目前适用于海工装备低合金高强钢的传统焊接技术主要包括焊条电弧焊(SMAW)、埋弧自动焊(SAW)和药芯焊丝电弧焊(FCW)^[87-89]。焊条电弧焊以其操作灵活性与工况适应性的显著优势,在焊接质量要求严苛或焊接位置受限的复杂场景中占

据不可替代的地位;埋弧自动焊凭借高效稳定的焊接过程、较快的焊接速度、优良的焊缝质量一致性及较小的焊接变形,广泛应用于船体、海洋平台等大型结构件的焊接制造;药芯焊丝电弧焊则整合了前两种技术的优点,兼具较高的焊接效率、稳定的焊缝性能与较强的工况适应性,在海工装备制造中对焊接质量与效率均有较高要求的场景中得到广泛应用。上述传统焊接技术虽各具特点,但均能满足海工装备低合金高强钢的基本焊接需求。

李少峰等^[90]针对 800 MPa 级船用钢(具有优良的抗焊接裂纹敏感性),采用焊条电弧焊(焊条: $\varnothing 4.0$ mm V840)与气体保护焊(焊丝: $\varnothing 1.2$ mm 的 JS80,保护气体 95%Ar+5%CO₂)进行对接接头焊接试验。结果显示,两种焊接接头的抗拉强度均达到较高水平,且断裂位置均位于母材,表明二者强度特性相近(见表 9)。然而,GWAM 接头弯曲性能更优,而 SMAW 接头因存在气孔、夹杂等缺陷,在弯曲测试中产生了 0.5 mm 的裂纹。光学显微镜观察发现,V840 与 JS80 焊接接头的焊缝金属微观组织具有高度相似性,均由板条贝氏体、马氏体及一定数量的针状铁素体(AF)组成,部分板条束呈现“交织”形态(见图 23a、23b);两种焊接方法的热影响区均以粗大马氏体为主(见图 24),且 SMAW 因高热输入,其晶粒组织比 GMAW 更为粗大。低温(-50℃)冲击试验表明,两种接头各区域的冲击吸收能均超过 27 J(见表 10),但气体保护焊接头的冲击吸收能更高;断口分析显示,手工电弧焊接头为韧-脆混合断裂(存在河流花样与少量韧窝),而气体保护焊接头为典型的韧性断裂(断口布满小而深的韧窝)。

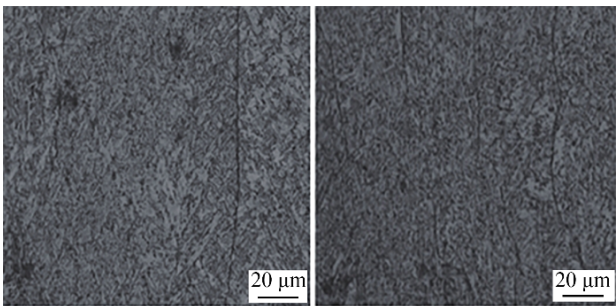
梁国俐等^[91]采用埋弧焊技术对热轧 EH36 船板

表 9 焊接接头力学性能

Table 9 Mechanical properties of welded joints				
焊接方法	抗拉强度 R_m /MPa	断裂位置	120°弯曲	180°弯曲
SMAW	935	母材	裂纹	裂纹
GMAW	935	母材	完好	完好

表 10 焊接接头冲击能量(单位:J)

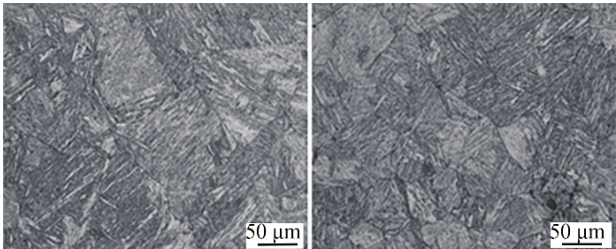
Table 10 Impact energy of welded joints(Unit:J)		
焊接方法	SMAW	GMAW
焊缝	52.7	81
熔合线	96.7	127
熔合线+1	111	205



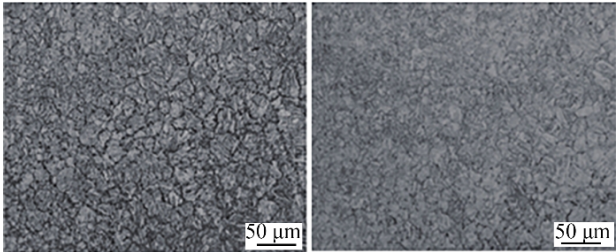
(a)V840焊缝 (b)JS80焊缝

图 23 两种焊接方法的焊缝微观组织^[93]

Fig. 23 Microstructure of the weld seam of the



(a)V840粗晶热影响区 (b)JS80粗晶热影响区



(c)V840细晶热影响区 (d)JS80细晶热影响区

图 24 热影响区微观组织对比^[93]

Fig. 24 Comparison of microstructure in the heat-affected zone

钢进行多道次、高热输入焊接试验,系统研究了焊接接头的微观组织与力学性能。结果表明:高热输入条件下,焊缝组织由晶界铁素体、块状铁素体及少量针状铁素体组成,未发现侧板条铁素体,这一组织特征有利于保障焊缝的力学性能。图 25 显示,粗晶热影响区受焊接热输入的影响最为显著,而焊缝区域的冲击韧性最差;焊接接头的最高硬度出现在粗晶区靠近熔合线处(222 HV),最低硬度位于细晶区(181 HV),未出现焊接软化区。

刘畅等^[92]采用埋弧焊技术焊接典型海洋结构用钢 EH36,并通过单边缺口拉伸试验(SENT)研究焊缝金属中针状铁素体(AF)与先共析铁素体(PF)的临界断裂韧性。结果表明,相较于先共析铁素体,针状铁素体具有更高的断裂韧性。其原因在于,针状铁素体内部具有更高的位错密度与位错

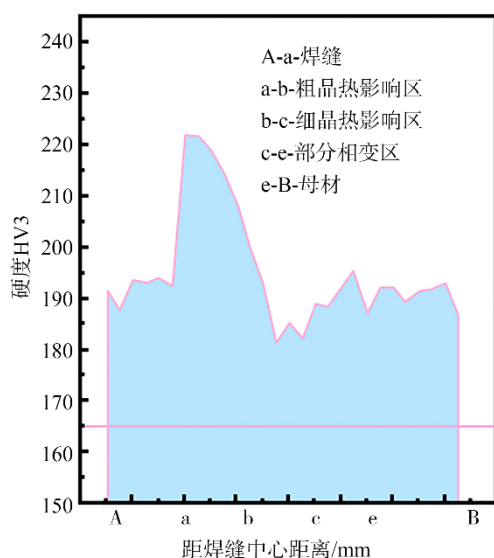


图 25 接头硬度分布曲线

Fig. 25 Stiffness distribution curve of the joint

能,在外力作用下,裂纹尖端更易发生塑性变形并实现钝化;而先共析铁素体组织结构相对纯净均匀,位错密度较低,导致裂纹尖端难以发生钝化。

傅锁林等^[93]为确保船用吊机稳定运行,采用小热输入、CO₂气体保护焊对船用吊机基座EH36-Z35的焊接性进行分析。按照相关标准要求进行的侧弯试验显示,所有试样均能顺利达到180°弯曲角度,且未观察到任何缺陷,弯曲测试结果合格(见表11)。由图26可知,厚度为50 mm的EH36-Z35钢焊接接头,其抗拉强度超过613.8 MPa,且在-20 °C条件下,各位置的冲击吸收功均超过47 J。

表 11 焊接接头弯曲试验值

Table 11 Bending test value of welded joints

板材厚度	焊接方法	焊接材料	侧弯试验
50 mm	FCAW	SH, Y71Ni	$\alpha=180^\circ$ 完好
			$\alpha=180^\circ$ 完好
			$\alpha=180^\circ$ 完好
			$\alpha=180^\circ$ 完好

综上所述,现有研究从多方面探讨了低合金高强钢的焊接技术,不仅明确了焊接技术在其加工过程中的重要性及面临的挑战,还深入分析了传统焊接技术的特性与应用案例。通过对焊接接头抗拉强度、弯曲性能、冲击吸收能等关键力学性能指标的系统测试与不同焊接方法的对比研究,揭示了热输入对显微组织及力学性能的影响机制。同时,研究通过具体案例展示了不同焊接技术在特定材料

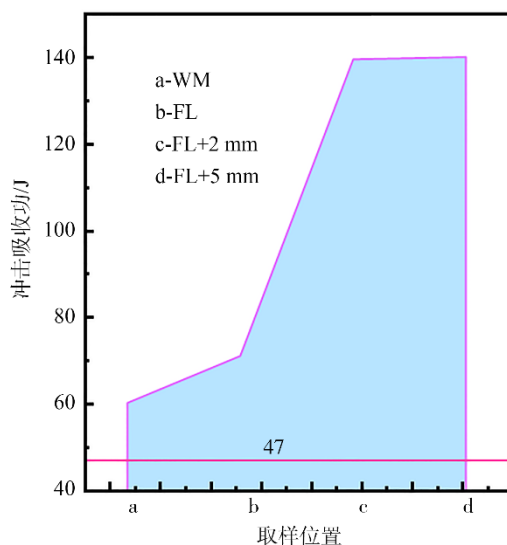


图 26 焊接接头冲击试验结果

Fig. 26 Impact test results of welded joints

上的应用效果,间接凸显了焊接材料选择及腐蚀疲劳现象在焊接接头性能评估中的重要性,为低合金高强钢焊接技术的优化与应用提供有价值的参考。

3.2 新型焊接技术

在低合金高强钢焊接领域,新型焊接技术的涌现为解决传统工艺瓶颈提供了突破性方案,其中窄间隙焊接、激光-电弧复合焊接及超声波辅助焊接等技术,凭借其在热输入控制、焊接效率及接头性能优化方面的显著优势,成为推动海工装备制造技术升级的关键力量^[94-96]。这类技术通过精准调控焊接热循环,有效降低了热影响区(HAZ)脆化风险,同时实现了高熔敷效率与低变形量的协同,为大型复杂结构件的高精度制造奠定了基础。

许轲^[97]针对宝钢890 MPa级低合金高强钢(BG 890QL,屈服强度890 MPa,抗拉强度约1 000 MPa)开展激光-电弧复合焊接试验,结果显示焊缝成形良好且无明显缺陷;焊缝金属主要由板条马氏体与粒状贝氏体组成。冲击性能测试表明(见图27),室温下母材平均冲击功约117 J,热影响区达147 J,焊缝区为58 J;-40 °C时,热影响区冲击功降至66.5 J,母材为65 J,焊缝区为40 J,各项指标均满足工程应用要求。

激光-电弧复合焊接技术作为新型焊接技术的典型代表,其融合了激光的高能密度特性与电弧的良好填充能力,在低合金高强钢中厚板焊接中展现

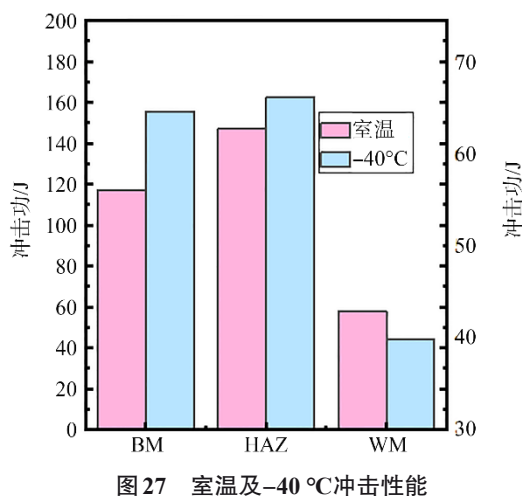


图 27 室温及-40 °C冲击性能

Fig. 27 Room temperature and -40 °C impact performance

出广阔的应用潜力^[98-99]。Bao等^[100]和Li等^[101-102]对低合金高强钢多道次焊接的研究表明,热循环的叠加作用会加剧单道次焊缝热影响区(尤其是粗晶区)的组织与性能劣化,其中临界再热粗晶区常成为整个接头的性能薄弱环节。Tao等^[103-104]采用有限元数值模拟与热电偶实测相结合的方法,对EQ70钢激光-电弧复合焊接过程的热循环进行了系统分析,证实单次焊接过程中热影响区内存在局部脆化区域(即粗晶区),其组织转变与热循环参数存在显著关联性。

在此基础上,鲍亮亮等^[105]采用焊接热模拟技术制备了低合金高强钢双道次激光电弧复合焊热影响区的均匀化组织试样,重点探究了二次峰值温度对微观组织及韧性的影响。结果表明,未转变粗晶区为粗大的板条马氏体,晶粒尺寸84~98 μm;超临界再热粗晶区为细小的板条马氏体,晶粒尺寸15.7~19.2 μm;临界再热粗晶区为晶界和亚晶界分布有块状M-A组元的板条马氏体;亚临界再热粗晶区组织仍为板条马氏体,晶粒尺寸79~88 μm。示波冲击试验进一步揭示,临界再热粗晶区试样的抗裂纹形成能力最低,而临界再热粗晶区与未转变粗晶区的抗裂纹扩展能力均表现最差,这为优化多道次焊接工艺提供了关键依据。

上述内容概述了窄间隙焊接、激光-电弧复合焊接及超声波辅助焊接等新型焊接技术在低合金高强钢焊接中的应用,重点阐述了激光-电弧复合焊接技术在BG890QL钢中的焊接效果、热影响区

组织与韧性、二次峰值温度影响等研究,为提高焊接效率和接头质量提供了技术支持,有助于制造高精度、高性能的大型结构件。

4 结论与展望

随着海洋工程向深海、远海领域拓展,海工装备对低合金高强钢焊接结构的可靠性、服役寿命及制造效率提出了更为严苛的要求。综合现有研究进展,低合金高强钢焊接技术的发展需在解决热影响区脆化、冷裂纹控制等核心问题的基础上,向高性能化、智能化及绿色化方向突破,具体可归纳为以下几个关键方向:

(1)焊接接头性能的优化。通过对焊接工艺参数的精细调控,实现焊接接头力学性能和耐腐蚀性的进一步提升。这包括优化焊接热输入、焊接速度等参数,以获得更为理想的焊缝组织结构和性能。深入研究焊接接头在海洋环境下的腐蚀行为,探索提高焊接接头耐腐蚀性的新途径。例如,通过合金元素的优化配比和微观组织的精细调控,提升焊接接头在海水中的耐蚀性能。

(2)新型焊接技术的应用。推动激光焊、电子束焊等新型焊接技术在低合金高强钢焊接中的应用。这些技术具有能量密度高、焊接速度快、热影响区小等优点,有助于获得高质量的焊缝。探索增材制造技术在低合金高强钢焊接领域的应用潜力,以实现复杂结构件的快速、精准制造。

(3)智能化焊接技术的发展。结合物联网、大数据、人工智能等先进技术,推动低合金高强钢焊接过程的智能化和自动化。通过实时监测焊接过程中的关键参数和焊缝质量,实现焊接质量的精准控制和预测。建立低合金高强钢焊接数据库和专家系统,为焊接工艺的制定和优化提供科学依据和智能支持。

综上所述,未来海工装备用低合金高强钢的焊接技术将朝着高性能、高效率、智能化和绿色化的方向发展。通过不断创新和优化,将为海洋工程领域的发展提供更为坚实的技术支撑和保障。

参考文献:

- [1] 王东坡,利成宁,邸新杰,等.海洋工程装备用焊接结

- 构高强钢研究现状及存在问题[J]. 鞍钢技术, 2018, (05): 1-7.
- WANG D P, LI C N, DI X J, et al. Research status and existing problems of welded structural high-strength steel for marine engineering equipment [J]. Anshan Iron and Steel Technology, 2018(5): 1-7.
- [2] Zhang T, Li Z, Young F, et al. Global progress on welding consumables for HSLA steel[J]. ISIJ international, 2014, 54(7): 1472-1484.
- [3] 师桂杰, 冯加果, 康美泽, 等. 极地海洋工程装备的应用现状及关键技术分析[J]. 中国工程科学, 2021, 23(3): 144-152.
- SHI G J, FENG J G, KANG M Z, et al. Application Status and Key Technology Analysis of Polar Ocean Engineering Equipment [J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2021, 23(3): 144-152.
- [4] 阎军, 苏琦, 许琦, 等. 海洋工程典型装备智能化研究进展 [J]. 科技导报, 2024, 42(13): 16-26.
- YAN J, SU Q, XU Q, et al. Research Progress on Intelligent Equipment of Typical Marine Engineering Equipment [J]. Science & Technology Review, 2024, 42(13): 16-26.
- [5] Ta W G A S, Sedmak A, Grab ulo V. Cold weld cracking susceptibility of high strength low alloyed (HSLA) steel NIONIKRAL 70[J]. Metal, 2014, 53(4): 624-626.
- [6] Wojta cha A, Kci UK M, Opiela M. Effect of heat treatment conditions on corrosion resistance of 0.28 C-1.4 Mn-0.3 Si-0.26 Cr steel with Nb, Ti, and V micro additions[J]. Materials, 2021, 14(12): 3254.
- [7] 宫旭辉, 薛钢, 高珍鹏, 等. 船用低合金高强钢止裂温度相关性研究 [J]. 材料开发与应用, 2021, 36(06): 1-6+35.
- GONG X H, XUE G, GAO Z P, et al. Study on temperature correlation of anti-cracking of marine low-alloy high-strength steel [J]. Materials Development and Application, 2021, 36(06): 1-6+35.
- [8] Sun D, Wu M, Xie F, et al. Hydrogen permeation behavior of X70 pipeline steel simultaneously affected by tensile stress and sulfate reducing bacteria[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(43): 24065-24074.
- [9] Almeida L S, Marques S C, dos Santos D S. The influence of steelmaking processes on the hydrogen embrittlement of a tempered martensitic steel[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 78: 662-673.
- [10] 董振国, 熊伟, 龚长芳, 等. 海上油田开发井钻井优化设计和应用实践[J]. 钻探工程, 2021, 48(7): 46-57.
- DONG Z G, XIONG Wei, GONG C F, et al. Drilling optimization design and application practice of offshore oilfield development wells [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(7): 46-57.
- [11] 陈国明, 李家仪, 畅元江, 等. 深水油气水下井口系统疲劳损伤影响因素[J]. 石油学报, 2019, 40(S2): 141.
- CHEN G M, LI J Y, CHANG Y J, Influencing factors of fatigue damage in deep water oil and gas subsea wellhead system [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(S2): 141.
- [12] 王艳华, 谢耿, 张斌, 等. S690QL 低合金高强钢焊接接头组织特征和低温韧性研究[J]. 电焊机, 2024, 54(05): 17-24.
- WANG Y H, XIE G, ZHANG B, et al. "Microstructure characteristics and low-temperature toughness of welded joints of S690QL low-alloy high-strength steel [J]. Electric Welding Machine, 2025, 54(5): 17-24.
- [13] 翟雁, 郭晓波, 丁再超, 等. 不同强度级别低合金高强钢疲劳断裂行为分析[J]. 塑性工程学报, 2023, 30(7): 145-150.
- ZHAI Y, GUO X B, DING Z C, et al. Analysis of fatigue fracture behavior of low-alloy high-strength steels with different strength grades [J]. Chinese Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30(7): 145-150.
- [14] Gru ji ci M, Snipes J S, Ramaswami S. New high-strength low-alloy steels with improved mechanical properties and processability using materials by design [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2018, 232(2): 89-105.
- [15] Kim S J, Lee C G, Choi I, et al. Effects of heat treatment and alloying elements on the microstructures and mechanical properties of 0.15 wt.% pct C transformation-induced plasticity-aided cold-rolled steel sheets [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2001, 32: 505-514.
- [16] Li X, Wang Z, Deng X, et al. Precipitation behavior and kinetics in Nb-V-bearing low-carbon steel [J]. Materials letters, 2016, 182: 6-9.
- [17] Du Y, Hu X, Zhang S, et al. Precipitation behavior of Cu-NiAl nanoscale particles and their effect on mechanical properties in a high strength low alloy steel [J]. Materials Characterization, 2022, 190: 112014.
- [18] Zhao W, Zhou H, Fang L, et al. Study on Diversified Carbide Precipitation in High-Strength Low-Alloy

- Steel during Tempering [J]. Steel research international, 2021, 92(7): 2000723.
- [19] Wang B, Hu Y W, Yang X F, et al. Microstructure and properties of Nb-bearing high-strength low-alloy surfacing layers [J]. Materials Science and Technology, 2017, 33(8): 1004-1012.
- [20] Baker T N. Titanium micro alloyed steels [J]. Ironmaking and Steelmaking, 2018: 1-55.
- [21] Xu L, Wu H, Tang Q. Effects of coiling temperature on microstructure and precipitation behavior in Nb-Ti micro alloyed steel [J]. ISIJ International, 2018, 58(6): 1086-1093.
- [22] Jang J H, Lee C H, He Y U, et al. Stability of (Ti, M) C (M=Nb, V, Mo and W) carbide in steels using first-principles calculations [J]. Acta Materialia, 2012, 60: 208-217.
- [23] S E J, Speer J G, Matlock D K, et al. Effect of Mo in combination with Nb on austenite grain size control in vacuum carburizing steels [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 12: 1-10.
- [24] Shim J H, Byun J S, Cho Y W, et al. Mn absorption characteristics of Ti_2O_3 inclusions in low carbon steels [J]. Scripta Materialia, 2001, 44: 49-54.
- [25] Zhu Z X, Kuz M K L, Marimuthu M, et al. Role of Ti and N in line pipe steel welds [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2013, 18(1): 1-10.
- [26] Shen Y, Wan X, Liu Y, et al. The significant impact of Ti content on microstructure-toughness relationship in the simulated coarse-grained heated-affected zone of high-strength low-alloy steels [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2018: 1-13.
- [27] 董立松, 李宇兴, 林广庆, 等. 1MnCrMoNi合金钢焊接接头的组织和力学性能 [J/OL]. 热加工工艺, 1-5 [2024-09-26].
LI N X, LI N X, LIN G Q, et al. Study on microstructure and properties of welded joints of 1MnCrMoNi alloy steel [D]. Hot Working Technology, 1-5 [2024-09-26].
- [28] 周波, 易伟, 倪川皓, 等. 碳弧气刨对 700 MPa 级低合金钢焊接接头组织与性能的影响 [J]. 焊接技术, 2018, 47(05): 24-25.
ZHOU B, YI W, NI C H, et al. Effect of carbon arc gouging on microstructure and properties of welded joints in 700 MPa grade low-alloy steel [J]. Welding Techniques, 2018, 47(05): 24-25.
- [29] 郭嘉琳, 张富巨, 庞昊红, 等. 34Cr2Ni2Mo 与 35CrMoV 钢厚板超窄间隙 MAG 焊接接头组织性能分析 [J]. 电焊机, 2018, 48(02): 51-54+60.
GUO J L, ZHANG F J, PANG H H, et al. Microstructure and performance analysis of MAG welded joints with ultra-narrow gap between 34Cr2Ni2Mo and 35CrMoV steel thick plates [J]. Electric Welder, 2023, 48(2): 51-54.
- [30] 秦华, 刘政军, 苏允海, 等. 热输入对 BWELDY960Q 钢焊接接头组织性能的影响 [J]. 焊接学报, 2015, 36(06): 103-106+118.
QIN H, LIU Z J, SU Y H, et al. Effect of heat input on microstructure properties of welded joints in BWELDY 960Q steel [J]. Journal of Welding Science, 2015, 36(6): 103-106.
- [31] Ma H, Chen L, Zhao J, et al. Effect of prior austenite grain boundaries on corrosion fatigue behaviors of E690 high strength low alloy steel in simulated marine atmosphere [J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 773: 138884.
- [32] Wang H, Liu D, Wang J, et al. Characterization of hot deformation behavior of 30Si2MnCrMoVE low-alloying ultra-high-strength steel by constitutive equations and processing maps [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2020, 27: 807-819.
- [33] 程元义. 渗碳钢 17Cr2Ni2Mo 和低合金高强钢 Q355D 的异种钢焊接工艺 [J]. 焊接技术, 2024, 53(06): 64-66.
CHENG Y Y. Welding process of dissimilar steel of carburized steel 17Cr2Ni2Mo and low-alloy high-strength steel Q355D [J]. Welding Technology, 2024, 53(06): 64-66.
- [34] 刘玉祥. 13MnNiMoR 低合金高强钢厚板封头拼缝焊接工艺研究 [J]. 西部特种设备, 2023, 6(05): 9-16.
LIU Y X. Study on seam welding process of 13MnNiMoR low-alloy high-strength steel thick plate head [J]. Western Special Equipment, 2023, 6(05): 9-16.
- [35] 李世文, 熊伟, 张文亮, 等. 20Si2Mn2CrNi 钢锻后晶粒细化及强韧性提升工艺 [J]. 金属热处理, 2023, 48(07): 157-161.
LI S W, XIONG W, ZHANG W L, et al. Grain refinement and toughness improvement process of 20Si2Mn2CrNi steel after forging [J]. HTM, 2023, 48(7): 157-161.
- [36] 刘国荣, 颜勇清, 周军, 等. 起重机臂架接头 HG785D 低合金高强钢焊接工艺研究 [J]. 西部特种设备, 2021, 4(03): 7-11.

- LIU G R, YAN Y Q, ZHOU J, et al. Research on welding process of HG785D low-alloy high-strength steel for crane boom joint[J]. Western Special Equipment, 2021, 4(03):7-11.
- [37] Ver kt S, Verb ek K, Lopez B, et al. Modern HSLA steels and role of non-recrystallisation temperature[J]. International Materials Reviews, 2012, 57(4):187-207.
- [38] Shao Y, Liu C, Yan Z, et al. Formation mechanism and control methods of acicular ferrite in HSLA steels: A review[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(5):737-744.
- [39] Huang G, Wan X L, Wu K M. Effect of Cr Content on Microstructure and Impact Toughness in the Simulated Coarse-Grained Heat-Affected Zone of High-Strength Low-Alloy Steels [J]. Steel Research International, 2016, 87(11):1426-1434.
- [40] Huang G, Wan X, Wu K, et al. Effects of small Ni addition on the microstructure and toughness of coarse-grained heat-affected zone of high-strength low-alloy steel[J]. Metals, 2018, 8(9):718.
- [41] Ma Q, Jia S, Liu Q, et al. Effects of Cr and Ni addition on critical crack tip opening displacement (CTOD) and supercritical CO₂ corrosion resistance of high-strength low-alloy steel (HSLAs) [J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 908:146772.
- [42] Keehan E. Effect of microstructure on mechanical properties of high strength steel weld metals[D]. Chalmers University of Technology and Göteborg University, 2004.
- [43] Medina S F, Gómez M, Rancel L. Grain refinement by intragranular nucleation of ferrite in a high nitrogen content vanadium micro alloyed steel[J]. Scripta Mater, 2008, 58:1110-1113.
- [44] P M, Kroupa A, Weatherly G C, et al. Precipitation behavior in a medium carbon, Ti-VN micro alloyed steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1996, 27:1149-1165.
- [45] Wu X, Xiao P, Wu S, et al. Effect of molybdenum on the impact toughness of heat-affected zone in high-strength low-alloy steel [J]. Materials, 2021, 14(6):1430.
- [46] Wang H C, Somsen C, Li Y J, et al. Effect of Nb on improving the impact toughness of Mo-containing low-alloyed steels[J]. Journal of Materials Science, 2019, 54:7307-7321.
- [47] Liu Y, Li G, Wan X, et al. Toughness improvement by Zr addition in the simulated coarse-grained heat-affected zone of high-strength low-alloy steels [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2019, 46(2):113-123.
- [48] Cai F, Huang Y, Xing S, et al. Characteristics and mechanisms of low-alloy high-strength steel corrosion behavior under barnacle adhesion based on a comparison experiment [J]. Corrosion Science, 2023, 217:111146.
- [49] Zhang J, Sun W, Sun H. Mechanical properties and microstructure of X120 grade high strength pipeline steel [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2010, 17(10):63-67.
- [50] Ren Y, Cheng X, Li W, et al. Effect of tempering temperature on stress corrosion resistance of a low alloy high strength steel with high vanadium content[J]. Materials Today Communications, 2024, 39:108730.
- [51] Guo Y, Li C, Liu Y, et al. Effect of microstructure variation on the corrosion behavior of high-strength low-alloy steel in 3.5wt% NaCl solution [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2015, 22:604-612.
- [52] Wu D, Zhang H, Liu S, et al. Effect of Microstructure on Wear Resistance of Low-Alloy High-Strength Wear-Resistant Steel[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2019, 14(8):7570-7581.
- [53] Zhao Q, Jia Z, Fan E, et al. Role of the microstructures on uniform corrosion and SCC behavior of high-strength low-alloy steels[J]. Journal of Materials Science, 2022, 57(47):21756-21776.
- [54] Zhang Y, Du Q, Lin T, et al. A study on the corrosion resistance of hydrophobic coatings on 65Mn steel[J]. Coatings, 2021, 11(11):1399.
- [55] Zhao J, Wang P, Ma H, et al. Essential role of Si in enhancing corrosion resistance of high strength low alloy steels in marine environment [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30:3328-3339.
- [56] Mejia Gomez J A, Antonis J, Palacio CA, De Grave E. Effects of Si as alloying element on corrosion resistance of weathering steel[J]. Corrosion Sci., 2012, 59:198-203.
- [57] Chen Z, Yu Q, Zhao L, et al. Insight into the role of Sion corrosion resistance of weathering steel in a simulated industrial atmosphere [J]. J Mater Res Technol, 2023, 26:487-503.
- [58] P M, Be T D, Ordonez M F C, et al. High-temperature oxidation of sintered austenitic stainless steel contain-

- ing boron or yttria [J]. Corrosion Science, 2017, 129: 26–37.
- [59] Wang R, Qiu T, Luo Y, et al. Improved Corrosion Resistance of Ni-Based Alloys by B-Induced Passivation Behavior [J]. Advanced Engineering Materials, 2024, 26(16):2400496.
- [60] Hou Y, Xu Z, Li G. Effect of trace boron on corrosion resistance of rust layer of high-strength low-alloy steel in 3.5 wt.% NaCl solution [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2023, 30(10):2080–2090.
- [61] Bayoumi F M, Ghanem W A. Effect of nitrogen on the corrosion behavior of austenitic stainless steel in chloride solutions [J]. Mater Lett, 2005, 59:3311–3314.
- [62] Wang Q, Zhang B, Ren Y, et al. Eliminating detrimental effect of cold working on pitting corrosion resistance in high nitrogen austenitic stainless steels [J]. Corrosion Sci., 2017, 123:351–355.
- [63] Mu D L UK, Shankar P, Ning S, et al. On the pitting corrosion resistance of nitrogen alloyed cold worked austenitic stainless steels [J]. Corrosion Sci., 2002, 44: 2183–2198.
- [64] Liu M, Du C, Zhang Z, et al. Effect of nitrogen on the corrosion behavior of high-strength low-alloy steel in simulated marine atmosphere [J]. Journal of Materials Science, 2023, 58(31):12827–12845.
- [65] 温长飞, 邓想涛, 王昭东, 等. 1300MPa级超高强钢临界粗晶热影响区组织和韧性 [J]. 钢铁研究学报, 2018, 30(08):650–656.
- WEN C F, DENG X T, WANG Z D, et al. Microstructure and toughness of the critical coarse-grained heat-affected zone of 1300MPa grade ultra-high-strength steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2018, 30(8):650–656.
- [66] Christ M, Guo X, Sharma R, et al. Hydrogen embrittlement susceptibility of gas metal arc welded joints from a high-strength low-alloy steel grade S690QL [J]. Steel research international, 2020, 91(11):2000131.
- [67] Zhang D, Li W, Gao X, et al. Effect of cold deformation before heat treatment on the hydrogen embrittlement sensitivity of high-strength steel for marine risers [J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 845: 143220.
- [68] 安同邦, 郑庆, 张永林, 等. 1300 MPa级低合金高强度钢 SH-CCT 曲线及冷裂敏感性分析 [J]. 焊接学报, 2022, 43(09):75–81+117–118.
- AN T B, ZHENG Q, ZHANG Y L, et al. SH-CCT curve and cold crack sensitivity analysis of 1300 MPa grade low-alloy high-strength steel [J]. Journal of Welding Science, 2022, 43(9):75–81.
- [69] 童乐为, 牛立超, 任珍珍. Q550D 高强度焊接节点疲劳强度试验研究 [J]. 工程力学, 2021, 38(12):214–222+248.
- TONG L W, NIU L C, REN Z. Experimental study on fatigue strength of welded joints of Q550D high-strength steel [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(12):214–222+248.
- [70] 李方坡, 刘五兵, 李旭. 油气钻井装备用低合金高强度结构钢国内研制现状与展望 [J]. 石油管材与仪器, 2020, 6(06):1–6.
- LI F P, LIU W B, LI Xu. Domestic development status and prospect of low-alloy high-strength structural steel for oil and gas drilling equipment [J]. Petroleum Tubing Products & Instruments, 2020, 6(6):1–6.
- [71] 钟大正, 李圭艳, 李靖. 1000MPa级低合金高强度钢焊接工艺改进研究 [J]. 金属加工(热加工), 2023(01):35–37.
- ZHONG D Z, LI G Y, LI J. Research on Improvement of Welding Process of 1000 MPa Grade Low Alloy High Strength Steel [J]. Metalworking (Hot Working), 2023(01):35–37.
- [72] 温长飞. 1 300 MPa 级超高强工程机械用钢研制及其焊接性能研究 [D]. 辽宁: 东北大学, 2019.
- WEN C F. Development of 1300 MPa grade ultra-high-strength steel for construction machinery and its welding performance [D]. Liaoning: Northeastern University, 2019.
- [73] 杨东青, 熊涵英, 黄勇, 等. 高氮奥氏体焊丝焊接超高强钢接头组织和性能 [J]. 焊接学报, 2020, 41(12):44–48+99–100.
- YANG D Q, XIONG H Y, HUANG Y, et al. Microstructure and properties of ultra-high-strength steel joints welded by high-nitrogen austenitic wires [J]. Journal of Welding Science, 2020, 41(12):44–48.
- [74] 安同邦, 郑庆, 张永林, 等. 1100、1400 MPa 级低合金高强度钢 SH-CCT 曲线及冷裂敏感性 [J]. 金属功能材料, 2023, 30(01):73–80.
- AN T B, ZHENG Q, ZHANG Y L, et al. SH-CCT curves and cold crack susceptibility of 1100, 1400 MPa grade low-alloy high-strength steels [J]. Functional Materials for Metals, 2023, 30(1):73–80.
- [75] 朱双春, 曹莹, 吉荣亮. 基于插销试验法 Q690 高强度钢焊接冷裂敏感性研究 [J]. 热加工工艺, 2023, 52

- (23):45-49.
- ZHU S C, CAO Y, JI R L. Study on cold crack susceptibility of Q690 high-strength steel welded based on bolt test method [J]. Hot Process Technology, 2023, 52 (23):45-49.
- [76] Zhang H, Hao F, Zhang Y, et al. Corrosion behavior and mechanism of the high-strength low-alloy steel joined by multilayer and multi pass welding method [J]. Materials and Corrosion, 2022, 73 (11): 1826-1832.
- [77] 邓磊, 尹孝辉, 袁中涛, 等. 焊接热输入对 800MPa 级低合金高强钢焊接接头组织性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2015, 44(01):36-38+41.
- DENG L, YIN X H, YUAN Z T, et al. Effect of welding heat input on microstructure properties of welded joints of 800MPa grade low-alloy high-strength steel [J]. Thermal Process Technology, 2015, 44(1):36-38.
- [78] 李岳, 赵洋洋, 邓彩艳, 等. 全浸腐蚀后焊接接头疲劳裂纹扩展速率分析 [J]. 焊接学报, 2024, 45(09):14-22.
- LI Y, ZHAO Y Y, DENG C Y, et al. Analysis of fatigue crack growth rate of welded joints after total immersion corrosion. Journal of Welding Science, 2024, 45 (9): 14-22.
- [79] 曾道平, 安同邦, 郑韶先, 等. 热输入对船用 440 MPa 级低合金高强度钢焊缝组织及性能的影响 [J]. 焊接学报, 2023, 44(08):74-82+133.
- ZENG D P, AN T B, ZHENG S X, et al. Effect of heat input on weld microstructure and properties of marine 440 MPa grade low-alloy high-strength steel [J]. Journal of Welding Sin, 2023, 44(8):74-82.
- [80] Ai X, Liu Z, Wu D. Study on improvement of welding technology and toughening mechanism of Zr on weld metal of Q960 steel [J]. Materials, 2020, 13(4):892.
- [81] Shao Y, Liu C, Yan Z, et al. Formation mechanism and control methods of acicular ferrite in HSLA steels: A review [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(5):737-744.
- [82] Zou Z, Liu Z, Ai X, et al. Effect of aluminum on microstructure and mechanical properties of weld metal of Q960 steel [J]. Crystals, 2021, 12(1):26.
- [83] 孟满丁, 魏金山, 安同邦, 等. 热输入对 800 MPa 级 HSLA 钢焊接接头组织及性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2023, 52(23):35-39+49.
- MENG M D, WEI J S, AN T B, et al. Effect of heat input on microstructure and properties of 800 MPa grade HSLA steel welded joints [J]. Hot Process Technology, 2023, 52(23):35-39+49.
- [84] 谢耿, 张斌, 刘海龙, 等. 690 MPa 低合金高强钢焊接技术及接头组织研究进展 [J]. 热加工工艺, 2024, 53 (17):8-12+19.
- XIE G, ZHANG B, LIU H L, et al. Research progress on welding technology and joint microstructure of 690 MPa low-alloy high-strength steel [J]. Hot Process Technology, 2024, 53(17):8-12+19.
- [85] 韩恩厚, 陈建敏, 宿彦京, 等. 海洋工程结构与船舶的腐蚀防护—现状与趋势 [J]. 中国材料进展, 2014, 33 (02):65-76+113.
- HAN E H, CHEN J M, SU Y J, et al. Corrosion Protection of Marine Engineering Structures and Ships—Current Status and Trends [J]. Materials Progress in China, 2014, 33(2):65-76.
- [86] 王娜娜, 孙永超, 王体涛. 绿色船舶技术应用与发展 [J]. 船舶工程, 2022, 44(04):54-57+63.
- WANG N, SUN Y C, WANG T. Application and development of green ship technology [J]. Naval Ship Engineering, 2022, 44(4):54-57.
- [87] 邓汉忠, 孟祥峰. 焊接热输入对 AH32 高强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 H Z, MENG X F. Effect of Welding Heat Input on Microstructure and Properties of AH32 High-strength Steel Welded Joints [J]. Hot Working Technology, 2014, 43(17):47-50.
- [88] 王颖, 齐伟, 田凤玉, 等. 船舶制造高效焊接 [J]. 金属加工(热加工), 2013, 697(22):15-22.
- WANG Y, QI W, TIAN F Y, et al. Efficient welding in shipbuilding [J]. Metal Processing: Hot Working, 2013 (22):15-22.
- [89] 高有进, 王乘, 徐宗林. 屈服强度 900MPa 级高强钢焊接工艺 [J]. 焊接学报, 2007, 28(9):103-107.
- GAO Y J, WANG C, XU Z L. Welding process of high-strength steel with yield strength of 900MPa [J]. Journal of Welding Science, 2007(9):103-107.
- [90] 李少峰, 马成勇, 宋志刚, 等. 800 MPa 级高强钢焊接接头组织及力学性能 [J]. 焊接学报, 2020, 41(05):91-96+102.
- LI S F, MA C Y, SONG Z G, et al. Microstructure and mechanical properties of welded joints of 800 MPa grade high-strength steel [J]. Journal of Welding Science, 2020, 41(5):91-96.
- [91] 梁国俐. EH36 船板钢埋弧焊接头的组织和力学性能 [J]. 机械工程材料, 2016, 40(01):28-31.

- LIANG G L. Microstructure and mechanical properties of EH36 submerged arc welded joint of ship plate steel [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2016, 40 (1):28-31.
- [92] 刘畅,邓彩艳,王胜,等. EH36钢埋弧焊焊缝金属组织临界断裂韧性[J]. *焊接学报*, 2019, 40(03):107-110.
- LIU C, DENG C Y, WANG S, et al. Critical fracture toughness of metal structure of EH36 steel submerged arc weld [J]. *Journal of Welding Science*, 2019, 40(3): 107-110.
- [93] 傅锁林,王锐艺,吴军. 船用吊机基座EH36-Z35焊接工艺[J]. *江苏船舶*, 2022, 39(05):39-41.
- FU S L, WANG K Y, WU J. Welding process of marine crane base EH36-Z35 [J]. *Jiangsu Shipbuilding*, 2022, 39(05):39-41.
- [94] 赵璇,张富巨. 热输入对低合金高强钢超窄间隙焊接热影响区组织和性能的影响[J]. *电焊机*, 2013, 43 (09):5-9.
- ZHAO X, ZHANG F J. Effect of heat input on microstructure and properties of heat-affected zone in ultra-narrow gap welding of low-alloy high-strength steel [J]. *Electric Welding Machine*, 2013, 43(9):5-9.
- [95] 秦浩,雷正龙,陈彦宾,等. 低合金高强钢激光-MAG复合多层焊接头力学性能[J]. *中国激光*, 2011, 38 (10):67-72.
- QIN H, LEI Z L, CHEN Y B, et al. Mechanical properties of laser-MAG composite multilayer welding joint of low-alloy high-strength steel [J]. *China Lasers*, 2011, 38(10):67-72.
- [96] Lago J, T K L, Jambor M, et al. Fatigue life improvement of the high strength steel welded joints by ultrasonic impact peening [J]. *Metals*, 2019, 9(6):619.
- [97] 许轲. 低合金高强钢激光-电弧复合焊焊缝组织及性能研究[J]. *宝钢技术*, 2021(06):20-26.
- XU K. Study on microstructure and properties of laser-arc composite welding weld of low-alloy high-strength steel [J]. *Bao steel Technology*, 2021(06):20-26.
- [98] Cao X, Wan J P, Huang J, et al. Hybrid fiber laser-Arc welding of thick section high strength low alloy steel [J]. *Materials & Design*, 2011, 32(6):3399-3413.
- [99] Kristensen J K. Thick plate CO₂-laser based hybrid welding of structural steels [J]. *Welding in the World*, 2009, 53:48-57.
- [100] Bao L, Wang Y, Han T. Study on microstructure-toughness relationship in heat affected zone of EQ70 steel by laser-arc hybrid welding [J]. *Materials Characterization*, 2021, 171:110788.
- [101] Li X, Fan Y, Ma X, et al. Influence of martensite-austenite constituents formed at different inter critical temperatures on toughness [J]. *Materials & Design*, 2015, 67:457-463.
- [102] Li X, Ma X, Subramanian S V, et al. Structure - property - fracture mechanism correlation in heat-affected zone of X100 ferrite-bainite pipeline steel [J]. *Metallurgical and Materials Transactions E*, 2015, 2:1-11.
- [103] BAO L, WANG Y, ZHANG H, et al. Welding thermal cycle of the laser-arc hybrid welding of the EQ70 steel and its effects on the microstructure evolution of the heat affected zone [J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2021, 42(3):26-33.
- [104] Tao H, Hongjie Z, Qian W, et al. Numerical simulation of 80 °C temperature field distribution of thick plate multi-pass welding with SYSWELD [J]. *China Welding*, 2018, 27(1):20-25.
- [105] 鲍亮亮,刘福建,徐艳红,等. 双道次激光电弧复合焊热影响区微观组织与冲击韧性[J]. *机械制造文摘(焊接分册)*, 2023(03):9-17+24.
- BAO L, LIU F J, XU Y H, et al. Microstructure and impact toughness of heat-affected zone in double-pass laser arc composite welding [J]. *Journal of Welding Science*, 2022, 43(12):90-99.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>