高强钢优质高效焊接
QUALITY AND EFFICIENCY IN HIGH-STRENGTH STEEL WELDING

DOI：10.7512/j.issn.1001-2303.2026.08.01

低合金高强钢焊接接头组织性能研究现状

马青军[1]，信国松[2]，方乃文[3]，邓军林[4]，罗玖田[4]，夏义江[4]，陈珺鑫[4]，常朝祥[3]

1. 天津市特种设备监督检验技术研究院，天津 300350
2. 聚力新材料科技（日照）有限公司，山东 日照 276826
3. 中焊科技发展（哈尔滨）有限公司，黑龙江 哈尔滨 150028
4. 北部湾大学，广西 钦州 535011

摘　要：低合金高强钢（HSLA）兼具较高强度、良好韧性和一定耐蚀性能，已广泛应用于轨道交通、船舶与海洋工程、建筑结构及能源装备等重大工程领域。然而焊接过程中复杂的热循环会使接头各区域产生显著的组织梯度，进而影响焊接接头的低温韧性、力学性能与耐蚀行为。本文系统综述了HSLA钢焊接接头组织性能的研究进展：在低温韧性方面，针状铁素体（AF）的异质形核与三维互锁结构是提升断裂韧性的关键，冷却速率与原始奥氏体晶粒尺寸（PAGS）共同决定AF的转变行为与细化程度；在力学性能方面，焊接热输入通过调控组织类型与晶粒尺寸影响接头强韧性匹配，Nb、Mo、Ca等微合金元素的添加可有效拓宽大热输入条件下的工艺窗口；在耐蚀性方面，HAZ因电极电位最负而成为腐蚀敏感区，热输入为10~16.5 kJ/cm时焊缝耐蚀性较优。此外，综述了激光焊、激光-电弧复合焊等高效焊接技术在HSLA钢中的应用进展，指出其在降低热输入、细化组织方面的优势，以及数值模拟在组织-性能预测中的潜力。在此基础上，提出了复杂热循环下组织演变机制、合金元素协同调控、失效风险前置控制及多尺度智能焊接技术4个重点研究方向。

关键词：低合金高强钢；焊接接头；针状铁素体；焊接热输入；耐蚀性能

中图分类号：TG457.1　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-2303（2026）08-0001-18

Research Status of Microstructure and Properties of HSLA Steel Welded Joints

MA Qingjun[1], XIN Guosong[2], FANG Naiwen[3], DENG Junlin[4], LUO Jiutian[4], XIA Yijiang[4], CHEN Shaoxin[4], CHANG Zhaogxiang[3]

1. Tianjin Special Equipment Inspection Institute of Technology, Tianjin 300350, China
2. Juli New Material Technology(Rizhao) Co., Ltd., Rizhao 276826, China
3. China Welding Technology Development (Harbin) Co., Ltd., Harbin 150028, China
4. Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China

Abstract: High-strength low-alloy (HSLA) steel possesses a combination of high strength, good toughness, and certain corrosion resistance, and has been widely applied in major engineering fields such as rail transportation, shipbuilding and offshore engineering, building structures, and energy equipment. In recent years, researchers have conducted various experimental studies on the microstructure and mechanical properties of welded joints in HSLA steel. It has been found that different welding methods and welding thermal cycles have a significant influence on the morphology and distribution of the microstructure in welded joints, thereby affecting the low-temperature toughness, mechanical properties, and corrosion behavior of the welded joints. Based on the above reasons, this paper reviews the research progress on the microstructure and prop-

收稿日期：2026-07-01　　**修回日期：**2026-07-15

作者简介：马青军（1990—），男，硕士，工程师，主要从事焊接工艺及材料的研发，国家、行业、团体焊接标准的制修订。E-mail：hwimqj@163.com。

erties of welded joints in HSLA steel, focusing on the mechanisms for improving low-temperature toughness, the effect of welding heat input on mechanical properties, and the current status of research on corrosion resistance. On this basis, the research progress of efficient welding technologies for HSLA steel is briefly introduced, along with future prospects for the application of welding technology in the industrial field of HSLA steel. It is expected that deeper research will be conducted in the future to improve the performance of welded joints, extend service life, and optimize welding process parameters.

Keywords: high-strength low-alloy steel; welded joint; acicular ferrite; welding heat input; corrosion resistance

引用格式:马青军,信国松,方乃文,等. 低合金高强钢焊接接头组织性能研究现状[J]. 电焊机,2026,56(8):1-18.

Citation:MA Qingjun, XIN Guosong, FANG Naiwen, et al. Research Status of Microstructure and Properties of HSLA Steel Welded Joints[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(8): 1-18.

0 引言

低合金高强钢(High Strength Low Alloy Steel,HSLA)是指在碳含量为0.05%~0.25%的低碳钢基础上,加入适量Mn、Ni、Cr、Mo等合金元素(总含量≤2.0%),经热轧、正火轧制或热机械轧制等工艺冷却后获得较高综合性能的一类钢板[1-2]。HSLA兼具高强度(抗拉强度≥500 MPa,屈服强度≥300 MPa)、良好低温韧性(–40 ℃最低冲击吸收功不小于38 J)及较好耐蚀性能三大核心优势[3-6],被广泛应用于桥梁、船舶制造及海洋平台等对大厚度钢板要求较高的场景,在恶劣海洋服役环境下仍能展现出良好的服役稳定性[7-8]。

焊接是HSLA钢结构制造中的关键环节,直接决定了结构的服役稳定性[9-11]。传统熔化极气体保护焊(GMAW)在制造大型结构件时不可避免地产生多层叠加的复杂热循环,使得焊接热影响区(HAZ)成为微观组织最为敏感且最难稳定控制的区域[12]。HAZ内部通常呈现显著的组织梯度:从熔合线附近晶粒尺寸大于50 μm的粗晶区逐渐过渡到晶粒尺寸为5~15 μm的细晶区,并伴随粗大粒状贝氏体(GBF)、M–A岛(马氏体+奥氏体复合体)及针状铁素体(AF)等组织的形成或转变[13-14]。这些组织差异不仅导致硬度显著波动,也造成区域间断裂韧性的不均一化,使焊接接头的整体服役安全性面临潜在风险。

从材料组织调控角度看,焊接接头性能取决于各类相的分布、形貌、晶粒尺寸及第二相粒子等微观参数,而这些因素与焊接热输入、冷却速度、预热温度、层间温度以及焊后热处理规范密切相关[15]。当热输入量大于20 kJ/cm时,焊缝金属(WM)组织以铁素体+贝氏体为主,硬度降至约250 HV,抗硫化氢应力腐蚀开裂能力较好,但晶粒粗化(>50 μm)导致韧性显著劣化[16-17];当热输入量小于15 kJ/cm时,WM组织以GBF、板条贝氏体(LB)和M–A岛等硬脆相为主(硬度>300 HV),强度较高但韧性下降且应力腐蚀敏感性增强[18-19]。

尽管已有大量研究聚焦热输入控制、组织演化机制与力学性能关联,但现有认知仍存在不足:多层多道焊接的真实热循环高度复杂,现有模型难以准确描述其对组织梯度的全过程影响;HSLA焊接过程中的组织细化、M–A转变机制及其与宏观韧性之间的定量关系仍缺乏统一认识;工艺参数窗口的设定仍依赖经验,如何在强度、韧性与耐蚀性之间实现稳健平衡仍是行业亟需攻克的问题。

本文从低温韧性提升机制、热输入对力学性能的影响、耐蚀性研究及高效焊接技术4个维度,综述HSLA焊接接头组织性能的研究进展,分析现阶段存在的问题,并提出进一步深化的研究方向,以期为HSLA在装备制造业的广泛应用提供理论支撑。

1 极端服役环境对HSLA焊接接头可靠性的制约作用

在极端服役工况下,焊接接头最易发生低温韧性失效。海洋工程装备需在极端环境中承受复杂的物理–化学耦合作用,如为了避免受到巨大的破坏性波高(30 m量级)对半潜式钻井平台造成损害,其应用材料需要保证钻井平台结构能承载500 MPa级的等效应力;超大型集装箱船在北极航道航行

时，船体结构需要在−50 ℃的极端低温条件下承受海冰撞击所产生的200 MPa峰值压力[20-22]。同时在复杂的海水环境中会显著加速材料的劣化进程，如在海水中所含有的Cl^-（3.5 wt.%），H_2S（50 ppm）腐蚀介质会导致海底输油管道发生0.5 mm/年的点蚀速率；在海上风电塔架中，焊缝区域由于长期暴露在浪溅区及干湿交替的服役环境，其耐蚀强度相较于母材显著降低，衰减幅度超过60%[23-24]。在深海作业的工程装备不仅需要应对极端地静水压力，而且还要兼顾有害的氢脆效应，例如3 000 m级深水钻井平台除了需要承受150 MPa静水压力，还需承受±30 MPa地层压力波动；在南海可燃冰的开采作业过程中，“蓝鲸一号”需要面对2 ℃低温与30 MPa高压的耦合作用，这会使材料氢脆指数提升3~5倍，极大地增加了可燃冰开采过程中出现灾难级功能失效的可能性[25-26]。

上述极端工况会使HSLA焊接接头面对低温韧性储备不足、力学性能衰减及耐蚀能力弱化等处境。因此，针对这些问题进行深入研究对保障深海资源开发设备安全可靠运行具有重要意义，同时也有利于促进我国整体装备制造业水平的提高，在节能降耗等多方面发挥积极作用。

1.1　AF对焊接接头低温韧性的提升机制

在极端工况条件下，焊接接头最易发生低温韧性失效，因此提升接头的韧性不仅是保障其服役可靠性的首要前提，也是优化力学性能和耐蚀性能的重要基础。为了提高HSLA焊接接头在极端低温环境下的断裂韧性，研究人员一般会从微观组织调控方面着手，其中引入针状铁素体（AF）组织结构被认为是最有效的强化方式之一。AF是以细小羽毛状或者针状形式弥散分布在奥氏体晶粒内部的一种细化组织，具有大角度晶界、细小晶粒、随机取向、高位错密度等微观特征。细小且形态固定的AF组织不仅能够有效阻止裂纹扩展，而且在提升强度的同时具有良好的低温断裂韧性，是实现组织强韧均衡的理想类型。

相关研究结果表明，冷却速率及原始奥氏体晶粒尺寸（PAGS）是控制AF形成的关键因素，对组织演化及性能调控具有决定性作用[27]。Yang Y[28]等人发现，在Ti–Zr脱氧钢焊缝中，随着冷却速率的增加，铁素体形核起始温度降低，且AF与铁素体侧板条（FSP）首次形核温度的差值减小；当冷却速率增至10.0 ℃/s时，AF与FSP在564.5 ℃同时形核，如图1所示。此外，AF的实际生长速率随冷却速率增加而上升，在10.0 ℃/s冷却速率下达到30.13 μm/s；显微组织中AF的比例随冷却速率增加先升高后降低，在1.0 ℃/s冷却速率下达到最大值45.83%。Liu等人[29]发现，Ti–Mg脱氧钢中的Ti–Mg–Mn–O、Ti–Mg–Mn–O·TiN和Ti–Mg–Mn–O·MnS夹杂物均能有效促进针状铁素体（AF）形核。随着夹杂物尺寸的增大，AF的形核概率先升高后降低，尺寸在1.2~2.1 μm范围内的夹杂物最有利于AF形核。Ti–Mg–Mn–O氧化物周围形成锰贫化区可增加铁素体形成的驱动力，且对于与氧化物无取向关系的AF晶粒的形核贡献更大，该发现能够为调控焊接接头中AF的形成及优化接头性能提供新的思路。Ma Y等人[30]研究证实了该观点，他们发现焊接接头粗晶热影响区中的Mn–S–Al–Ti–Ca–O复合夹杂物能够有效诱导AF形核，并且一次AF可以诱发二次AF的共生形核，从而全面提高了冲击韧性。

为了进一步研究PAGS对AF相变动学及晶粒细化效应的影响机制，Zhao H等人[31]在进行一系列的显微组织演化实验后发现，当PAGS处于较小尺度（22.3 μm、37.0 μm）时（如图2a、2b所示），奥氏体晶界的高密度成核点位为AF提供了良好的异质成核条件，其羽毛状形态可以借助三维互锁结构有效分割原始晶粒，最终形成以AF为主导的细晶区微观组织；当原始奥氏体晶粒尺寸从37.0 μm进一步减小到22.3 μm时，针状铁素体比例不再增加，转变组织也不再细化。排除动态再结晶和静态再结晶等回复过程后，认为原始奥氏体晶粒尺寸为37.0 μm和22.3 μm时变形奥氏体中变形亚结构的类型、分布和密度可能存在差异，这导致了组织细化效应的终止；而当PAGS增至52.4 μm和62.8 μm时（如图2c、2d所示），虽然仍能观察到少量AF成核，但是较大的奥氏体晶粒内部元素扩散距离延长，致使碳化物的析出倾向增强，相变产物逐渐向贝氏体铁素体（BF）转变，其板条束尺寸显著增大。晶粒细化能够通过Hall–Petch效应提高屈服强度，同时借助大角度晶界增多和裂纹扩展路径复杂化改善低温韧性。

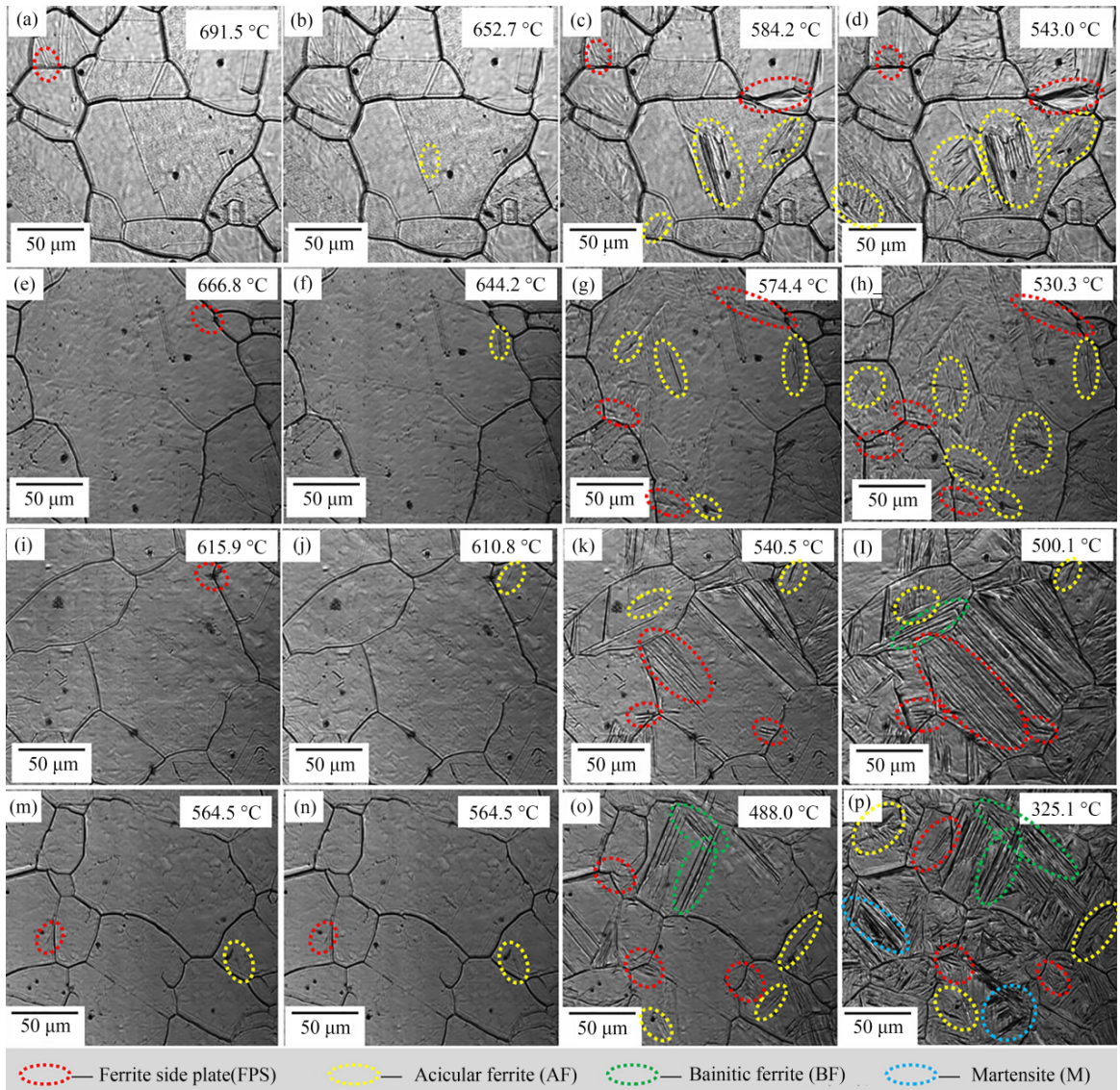


图1　试样在不同冷却速率下，针状铁素体（AF）形核与长大过程的典型高温共聚焦激光扫描显微镜（HT-CLSM）：（a-d）冷却速率0.5 ℃/s；（e-h）冷却速率1.0 ℃/s；（i-l）冷却速率5.0 ℃/s；（m-p）冷却速率10.0 ℃/s

Fig. 1　Typical HT-CLSM images, AF nucleation and growth at different cooling rate: (a-d) 0.5 ℃/s, (e-h) 1.0 ℃/s, (i-l) 5.0 ℃/s; (m-p) 10.0 ℃/s

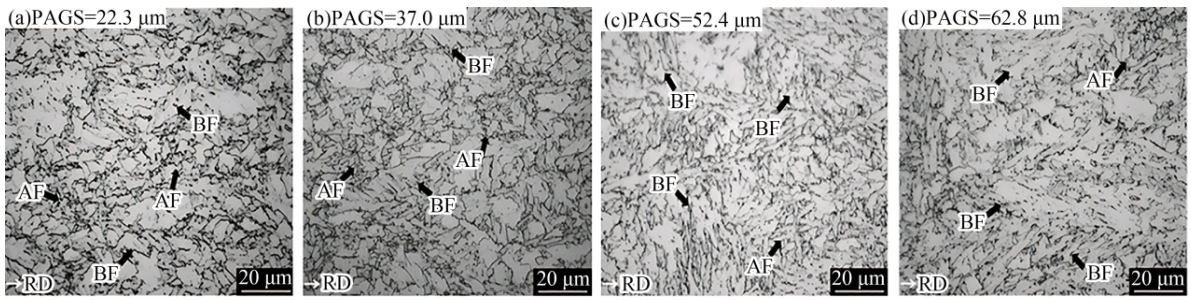


图2　不同PAGS下转变组织的光学显微照片：（a）22.3 μm，（b）37.0 μm，（c）52.4 μm和（d）62.8 μm

Fig. 2　Optical micrographs show the transformed microstructures with different PAGS: (a) 22.3 μm, (b) 37.0 μm, (c) 52.4 μm and (d) 62.8 μm

因此，通过控制焊接热循环和奥氏体晶粒长大行为，可实现AF与BF组织比例的有效调节，进而突破HSLA钢焊接接头强度—韧性倒置关系的技术瓶颈。

尽管上述研究已经系统揭示了冷却速率与PAGS对AF转变行为的影响规律，但主要基于试验手段，难以深入探讨多因素协同作用下的组织演化机制。因此，Lv S等人[32]为了研究冷却速率在相变过程中对AF组织演变和生长动力学的影响，选取三组冷却速率进行比较。如图3a~3c所示，随着冷却速率从2 ℃/s增加到10 ℃/s，在相同特定温度下AF的晶粒尺寸减小。在特定冷却速率下，随着温度降低，AF晶粒持续长大并穿透原始奥氏体晶粒，从而在原始奥氏体晶界附近保留部分残余奥氏体。不同AF之间的碰撞和相互作用使其难以粗化，并在晶粒细化中发挥重要作用。模拟结果证明，在奥氏体–铁素体相变过程中，随着冷却速率的增加，AF可显著细化。该研究从相变动力学路径出发，阐明了通过冷却速率控制工艺调控铁素体晶粒尺寸及分布的理论基础，为HSLA焊接接头的强韧化设计提供了关键指导。

Lv S等人[32]在完成上述试验后，又分别选取了3组不同条件下的PAGS进行模拟研究。如图4a~4c所示，在相同温度下，随着PAGS面积从976 μm^{2}减小到78 μm^2，WM中的晶界数量显著增加并阻止AF晶粒的生长，具有明显的晶粒细化效果；随着PAGS面积的持续减小，AF晶粒长径在逐渐降低，晶粒形貌趋近于等轴化。该研究进一步阐明了PAGS与冷却速率共同作用能够明显影响AF的组织演变规律，并指出在一定PAGS条件下，温度降低不仅会加快AF晶粒的生长，同时也会导致新晶粒的不断成核而形成多方向扩展的细化结构，这也充分说明减小PAGS不仅能够细化AF组织，同时还能提高其分布均匀性，而且其组织稳定性也得到了明显改善。

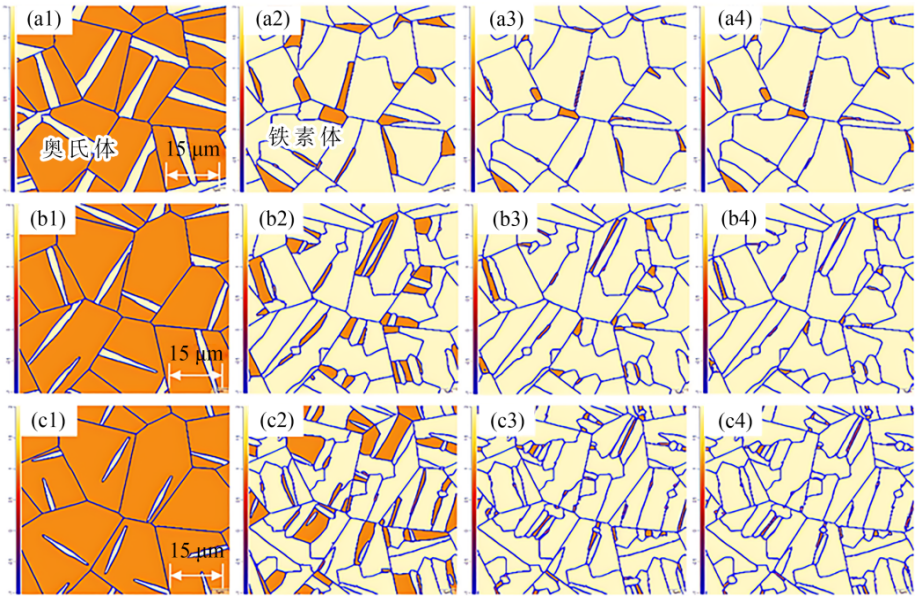


图3　焊后冷却速率：(a)2 ℃/s、(b)5 ℃/s、(c)10 ℃/s

Fig. 3　Cooling rate after welding: (a)2 ℃/s、(b)5 ℃/s、(c)10 ℃/s

综上所述，尽管AF组织处理后会显著提高焊接接头的低温韧性，但是焊接过程中存在大量的热输入起伏变化会导致焊接接头HAZ组织出现不均一的情况，导致整个焊接接头力学性能不稳定。因此，为了确保接头性能满足相关规范要求，需要进一步分析热输入的变化是如何影响焊接接头的综合力学性能。

1.2　热输入对焊接接头力学性能的影响

大热输入易出现奥氏体晶粒粗化、接头强度降低等问题，亟须开展系统探究以消除不利因素的影响。本节从热输入变化和合金元素添加两个方面，对焊接接头组织特征和性能演变过程开展相关研究工作，并给出相应的组织调控措施，为高性能焊接结构的制备提供研究思路。

在研究大热输入对低合金高强钢焊接接头的影响机制时，可从热输入控制和合金元素添加两个方面综合分析。孟满丁等人[33]采用熔化极气体保护焊，以14 kJ/cm、17 kJ/cm及20 kJ/cm三种不同热

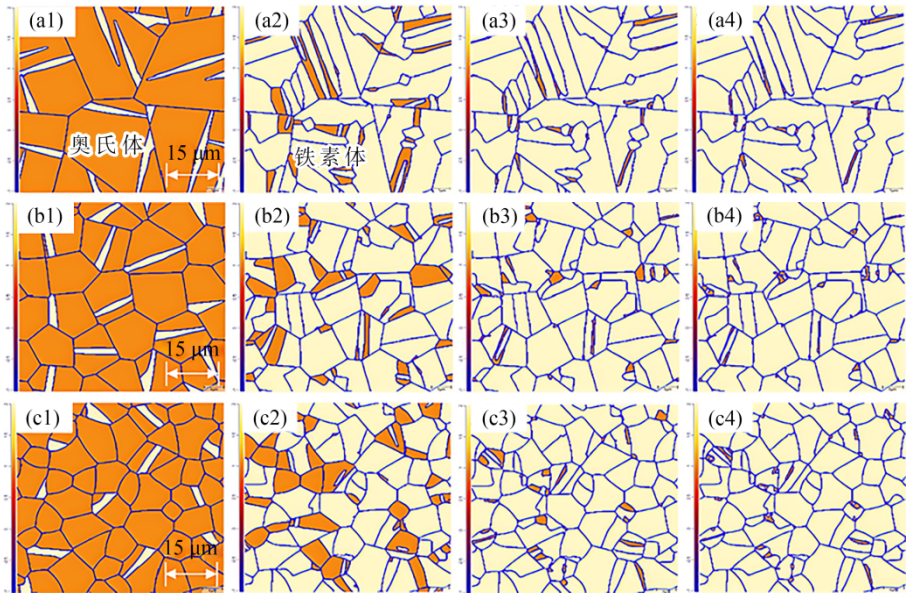


图4　成核密度：(a)5.12×10⁻³ μm，(b)6.91×10⁻³ μm，(c)3.07×10⁻² μm

Fig. 4　Nucleation density：(a)5.12×10⁻³ μm，(b)6.91×10⁻³ μm，(c)3.07×10⁻² μm

输入对800 MPa级HSLA进行焊接，测试结果如表1所示。焊接接头各区域的低温韧性呈现显著差异：焊缝金属在−50 ℃环境下测得最低冲击功为105 J，熔合线区域表现出最优异的抗裂性能（190 J），而HAZ则以166 J的冲击功居其次。结合表2母材的力学性能数据可见，焊缝金属与母材之间的抗拉强度相近，表明焊材与母材之间具有良好的匹配性，从而确保焊接接头在强度和韧性实现优异匹配。

表1　不同热输入下焊接接头的力学性能

Table 1　Mechanical properties of welded joints under different heat inputs

热输入 /kJ·cm^{-1}	抗拉强度 /MPa	平均硬度 /HV5	冲击吸收功/J
14	898	302.2	105（焊缝金属）
17	897	298.1	190（熔合线处）
20	893	287	166（HAZ）

表2　母材的力学性能

Table 2　Mechanical properties of the base metal

材料	$R_{p0.2}$ /MPa	抗拉强度 /MPa	断后伸长率/%	断面收缩率/%	冲击吸收功（−50 ℃）/J
母材	835	885	20.5	75	230
熔敷金属	792	897	18.5	70	139

基于上述研究结论，Ma Y等人[30]发现当焊接热输入从50 kJ/cm升高至400 kJ/cm时，粗晶热影响区（CGHAZ）的冲击韧性（0 ℃）在焊接热输入量为100 kJ/cm时达到最大值154 J，从100 kJ/cm增加到400 kJ/cm时，韧性和显微硬度均显著下降。焊接热影响区显微组织发生了显著变化：由于50 kJ/cm热输入较低，奥氏体晶界清晰可见，且未产生明显的晶界铁素体（GBF）；随着热输入增加到100 kJ/cm，GBF在奥氏体晶界处生成，针状铁素体（AF）含量进一步增加，交叉互锁的AF可以将原始奥氏体晶粒分割成更细小的组织，从而细化奥氏体晶粒；随着热输入增加到200 kJ/cm和300 kJ/cm，显微组织以晶内AF、GBF和珠光体为主；当热输入达到400 kJ/cm时，显微组织由大量GBF、多边形铁素体和少量AF组成。总体而言，随着热输入的增加，AF明显减少，而GBF趋于显著增加。

上述研究结果发现，通过对热输入的控制可在一定程度上影响HSLA钢焊接接头的显微组织演变与力学性能，但是单一控制热输入难以使焊接接头综合性能得到有效提升。因此，亟须通过微合金化设计拓展工艺窗口，重点突破大热输入环境下析出相与基体的协同稳定机制，实现组织细化与性能强化的一体化调控。

为深入理解大热输入条件下CGHAZ组织与性能的演化机制，Yang Y等人[34]采用热机械控制加工（TMCP）技术制备了不同Nb含量的钛脱氧低碳高强度钢板，并模拟了300 kJ/cm大热输入条件下的CGHAZ显微组织特征。研究结果表明，在未添加

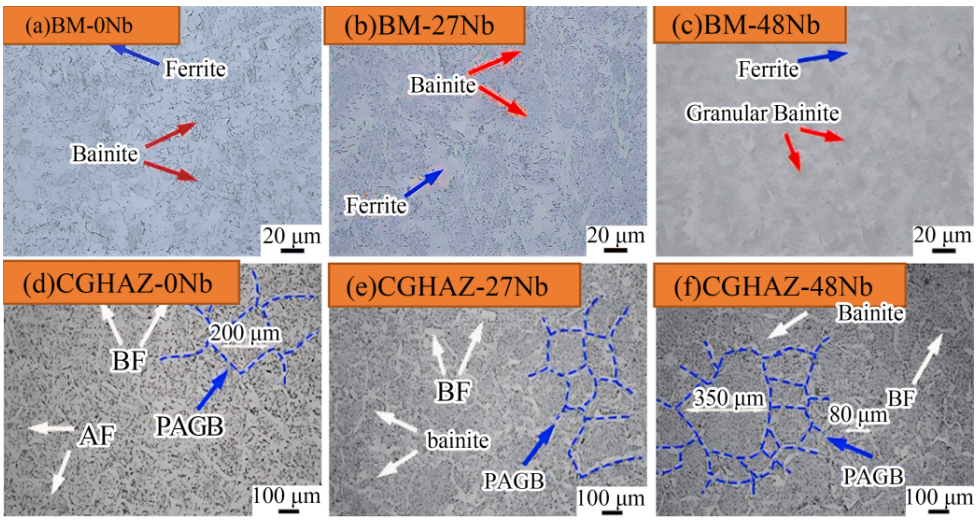


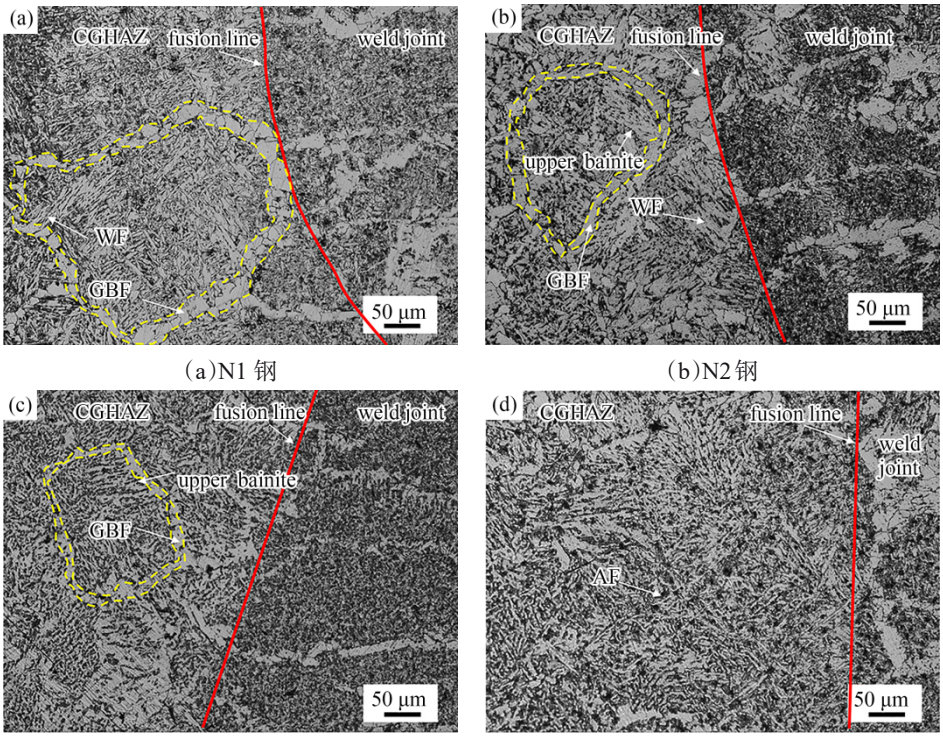
图 5　BM 和 CGHAZ 的光学微观结构

Fig. 5　Optical microstructure of BM and CGHAZ

Nb 的 BM–0Nb 样品中（如图 5a 所示），显微组织主要由多边形铁素体构成基体，仅能在局部观察到少量贝氏体相（如图 5a 的箭头所指）；随着 Nb 含量的逐步增加，晶粒尺寸逐渐减小，贝氏体相的占比显著提高；当 Nb 含量增至 0.048 wt.%时（如图 5c 所示），显微组织转变以贝氏体为主导的块状碳化物颗粒的根本性变化。在模拟 300 kJ/cm 焊接热输入的 CGHAZ–0Nb 样品中（见图 5d），原奥氏体晶粒内部主要由 AF 构成，随着 Nb 含量的提升，粗大的 AF 逐渐变为含有明显块状碳化物的细密贝氏体组织（见图 5e、5f），同时贝氏体铁素体（BF）的晶粒生长受到明显抑制（对比图 5d、5e、5f）。此外，Nb 的添加抑制了晶内铁素体，促进了含有粗大碳化物的贝氏体的形成，这不利于 CGHAZ 的冲击韧性，但 Nb 纳米析出物有助于提高 CGHAZ 的显微硬度。该研究表明 Nb 对铁素体相变的显著抑制作用。

为进一步拓展研究视角，Wu 等人[35]采用 4 个不同 Mo 含量的 HSLA 进行对比试验，在大热输出条件下系统研究了 Mo 元素含量对焊接热影响区粗晶区组织和韧性的影响。图 6a~6d 分别为 N1（0 wt.% Mo）、N2（0.04 wt.% Mo）、N3（0.06 wt.% Mo）和 N4（0.07 wt.% Mo）钢中 CGHAZ 的显微组织。如图 6a 所示，在 N1 钢的 CGHAZ 中观察到粗大的 GBF 和魏氏铁素体（WF）；含 0.04% wt.% Mo 的 N2 钢的显微组织由 GBF、WF 和上贝氏体组成，见图 6b，且 GBF 和奥氏体（A）的尺寸比 N1 钢更细小；如图 6c 所示，在含 0.06 wt.% Mo 的 N3 钢中，GBF 和奥氏体（A）的尺寸进一步细化。N1、N2 和 N3 钢中的奥氏体由黄色虚线标出，如图 6a~6c 所示。N1、N2 和 N3 钢 CGHAZ 中 GBF 宽度分别约 18.72 μm、10.71 μm 和 8.24 μm，表明其随 Mo 含量的增加而减小。N1、N2、N3 钢 CGHAZ 奥氏体尺寸分别约为 275 μm、221 μm 和 165 μm，也随 Mo 含量的增加而减小。当钢中添加 0.07 wt.% Mo 时，CGHAZ 的显微组织主要由 AF 组成，见图 6d。添加 Mo 减少了不利于韧性的 GBF 和 WF 的形成，并促进了有助于提高韧性的细小 AF 的转变。因此，Mo 的添加可显著影响 CGHAZ 的显微组织，从而提高热影响区的冲击韧性。

尽管 Mo 元素在细化组织、改善性能方面取得了一定进展，但在超大热输入条件下，晶粒异常长大与组织波动问题仍然存在，尤其是焊接接头低温韧性的不稳定性仍是制约因素。为解决该问题，Yin Z 等人[36]发现在 400 kJ/cm 超大热输入焊接条件下，不同 Ca 含量的 HSLA 钢 CGHAZ 的冲击韧性与原始奥氏晶粒和晶内组织密切相关。通过图 7 所示，平均冲击韧性随 Ca 含量的增加而提高，这主要归因于 Ca 脱氧改善了 TiN 颗粒的细分散性，从而在焊接热循环过程中防止晶粒长大。然而 Ca 含量为 11 ppm 和 18 ppm 的 HSLA 由于晶粒尺寸分布不均匀，导致焊接接头韧性出现显著波动。图 8 的显微组织表征表明，这两种钢的粗晶热影响区晶粒组织不均匀，细小晶粒的尺寸比粗大晶粒小约 40 μm，这



(a)N1 钢　(b)N2 钢　(c)N3 钢　(d)N4 钢

图6　不同Mo含量的热影响区粗晶区显微组织

Fig6　The microstructure of coarse-grained heat-affected zone (CGHAZ) in steels

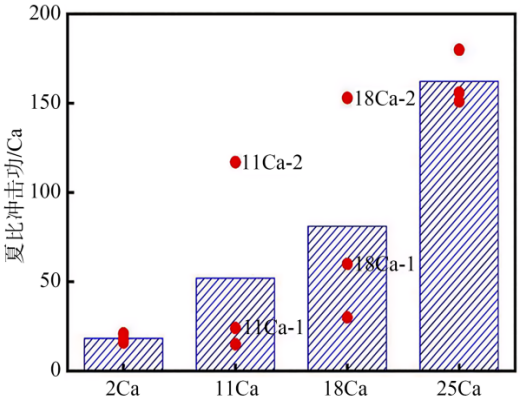


图7　−20 ℃下CGHAZ的夏比冲击功

Fig. 7　Charpy impact toughness in the coarse-grained HAZ at -20 ℃

是由于Ca含量为11 ppm和18 ppm钢中TiN颗粒的数量有所增加，但其数量仍然不足以像Ca含量为25 ppm钢那样在这些钢中获得均匀分散。因此，TiN颗粒的不均匀分散细化了Ca含量为11 ppm和18 ppm钢粗晶热影响区的部分晶粒组织，导致了冲击试验结果的较大波动。

综上所述，合金元素的调控策略经历了从Nb元素在组织调控中的初步应用、Mo元素在焊接接头性能优化方面的研究，最终发展到Ca元素的添加有效提升大热输入条件下的低温韧性，逐步形成了系统而完善的性能优化路径。这些研究均为解决大热输入焊接条件下的组织调控问题，由浅入深的研究过程也为降低HSLA在海洋工程等极端服役环境中焊接性能对服役条件影响程度提供了理论参考与实践指导。

1.3　焊接接头耐腐蚀性研究进展

尽管焊接接头的力学性能已满足使用需求，但其在极端环境中的长期可靠服役性仍面临耐蚀风险的挑战。深海环境中的高压、高盐和多介质腐蚀作用，使耐蚀性能成为保障结构安全的核心指标[37-38]。针对这一问题，近年来已有学者从不同角度展开了系统研究。

Zhang等人[39]首先从腐蚀起始机制出发，通过电化学测量与扫描开尔文探针(SKP)等方法对焊接接头的结构和性能进行了研究。由图9可以看出，随着电极电位的逐步升高，腐蚀电流密度也不断增加，表明焊接接头的各区域在海水环境中会表现出活性溶解行为；当电位升高至−600 mV时，电极反应机制由活化控制转变为扩散控制，此时的腐蚀电流

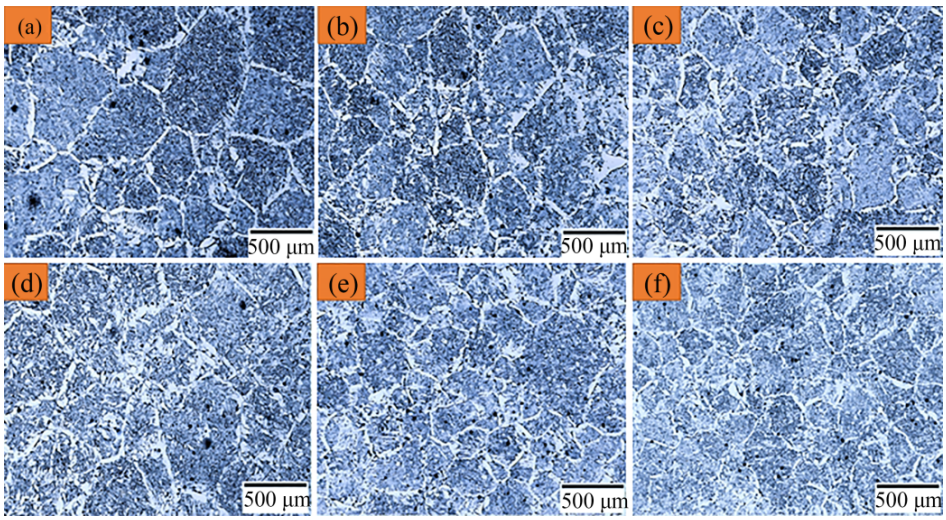


图8　(a)2Ca、(b)11Ca-1、(c)11Ca-2、(d)18Ca-1、(e)18Ca-2和(f)25Ca钢在400 kJ/cm下大热输入焊接后的CGHAZ晶粒结构光学图像

Fig. 8　Optical images of CGHAZ grain structure welded with (a) 2Ca, (b) 11Ca-1, (c) 11Ca-2, (d) 18Ca-1, (e) 18Ca-2, and (f)25Ca steels with high heat input at 400 kJ/cm

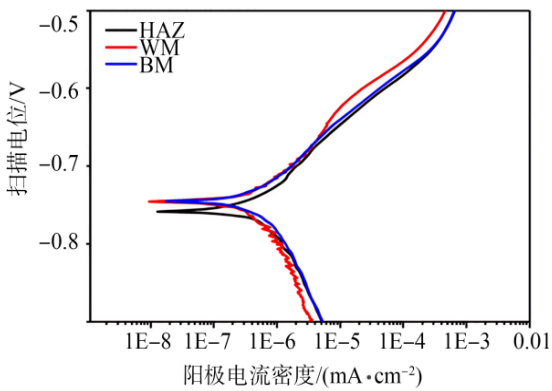


图9　焊接接头各区域在海水中的极化曲线

Fig. 9　Polarization curves of each area of the welded joint in seawater

正在显著上升，这表明样品表面存在一层能够有效防止各区域腐蚀的保护膜。当电极电位升高到一个平稳水平时，表面保护膜遭到破坏，腐蚀加剧。为了进一步表征和分析实际腐蚀情况，对焊接接头进行了SKP测量，如图10所示。由图10的结果可知，在海水中浸泡3天后，焊接接头各区域的伏特电位均出现了负偏差，其中HAZ最为显著（见图10c、10d），说明该区域最易发生腐蚀。这主要归因于HAZ区域的电极电位比WM和BM更负，在接头内部形成电偶效应，从而加剧了HAZ的局部腐蚀，如图11所示。

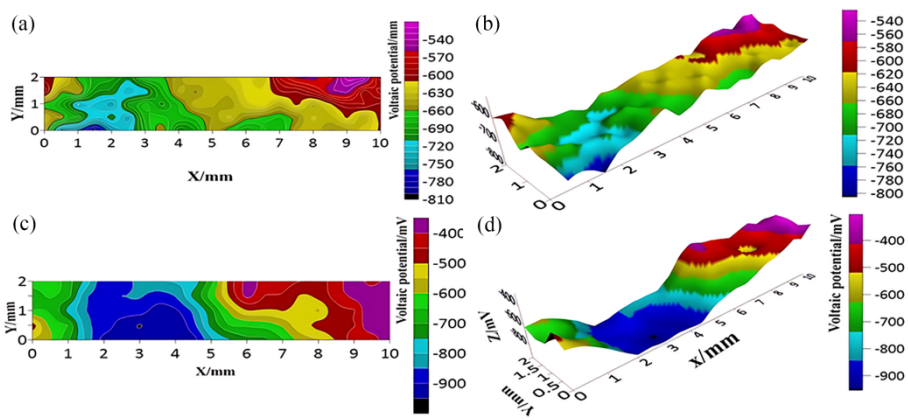


图10　焊接接头的扫描开尔文探针测量：(a、c)在海水腐蚀0 min、3天时的伏特电位平面图，(b、d)在海水中腐蚀0 min、3天时的伏特电位三维分布图

Fig. 10　Scanning Kelvin probe measurements of welded joints: (a, c) volt potential plane at 0 min and 3 days in seawater, and (b, d) 3D map of volt potential at 0 min and 3 days in seawater

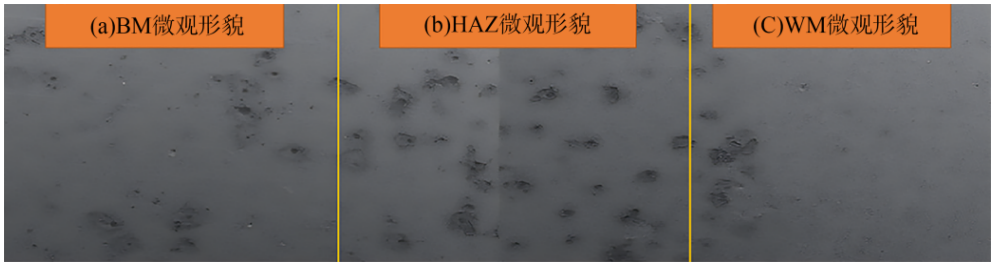


图 11　在海水中浸泡 3 天后焊接接头表面的微观形貌

Fig. 11　Micromorphology of welded joint surface after 3 days of immersion in seawater

尽管 Zhang 等人的研究揭示了焊接接头各区域在腐蚀初期的电化学响应与空间分布规律，但对于热输入对腐蚀行为的影响尚未深入探讨。基于此，曾道平等人[40]进一步开展了关于焊接热输入对焊缝耐蚀性能的研究，选用不同热输入对新型船用 440 MPa 级 HSLA 进行熔化极活性气体保护焊试验，根据表 3 中的 EIS 拟合结果及图 12 所示的 Nyquist 图可知，当热输入为 16.5 kJ/cm 时焊缝的容抗弧半径最大，相应的电荷转移电阻（R_{ct}）明显高于其他两个焊接热输入，证明焊接热输入为 16.5 kJ/cm 时焊缝电化学稳定性和耐蚀性能更好。相比之下，母材的 R_{ct} 略高于焊缝，说明在此条件下可使焊缝的耐蚀性能接近于母材。该研究进一步明确了热输入对整体腐蚀性能的调控作用，为优化焊接工艺参数提供了实证依据。

在曾道平等人的研究基础上，为进一步解析焊接接头局部腐蚀行为的动态演变规律，陈杰等人[41]采用 10.0 kJ/cm 和 15.0 kJ/cm 两种不同热输入对 Q1100 级 HSLA 进行熔化极气体保护焊，利用电化学阻抗谱（EIS）与扫描振动电极技术（SVET）分析焊接接头的局部腐蚀行为。结果表明，BM 区的 R_{ct} 最大，说明其对离子迁移阻力大，耐蚀性最好；而 WM 区 R_{ct} 最小，电化学活性高，耐蚀性最差。在热输入 10 kJ/cm 下，HAZ 和 WM 的 R_{ct} 值高于 15 kJ/cm，表明较低热输入有助于提升局部区域的耐蚀性。由于 EIS 测试会破坏接头结构，需结合 SVET 进一步分析。图 13、图 14 为不同热输入条件下焊接接头

表 3　焊缝和母材在 3.5%NaCl 溶液中 EIS 拟合参数

Table 3　WM and BM EIS fitting parameters in 3.5% NaCl solution

热输入 Q/(kJ·cm^{-1})	电荷转移电阻 R_{ct}/(Ω·cm^2)	溶液电阻 R_s/(Ω·cm^2)
11.5	14.37	1.623
16.5	29.46	2.106
21.5	26.76	2.025
母材	35.18	4.069

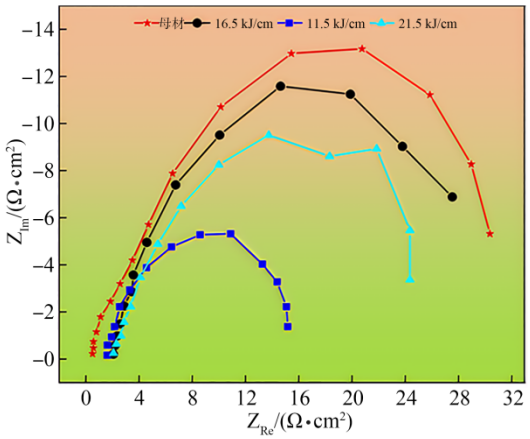


图 12　焊缝在 3.5%NaCl 溶液中的 Nyqusist 图

Fig. 12　Nyqusist plot of WM in 3.5% NaCl solution

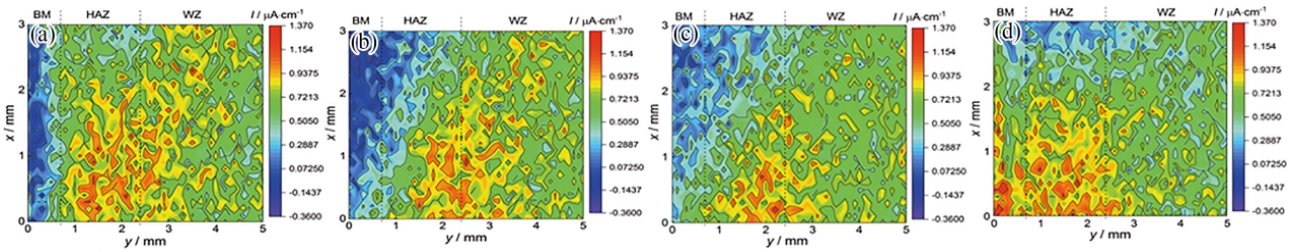


图 13　10 kJ/cm 焊接接头腐蚀不同时间后表面电流密度分布图及其宏观腐蚀形貌：(a)2 h；(b)5 h；(c)8 h；(d)20 h

Fig. 13　Surface current density distribution and macroscopic corrosion morphology of 10 kJ/cm welded joints after corrosion for different time：(a)2 h；(b)5 h；(c)8 h；(d)20 h

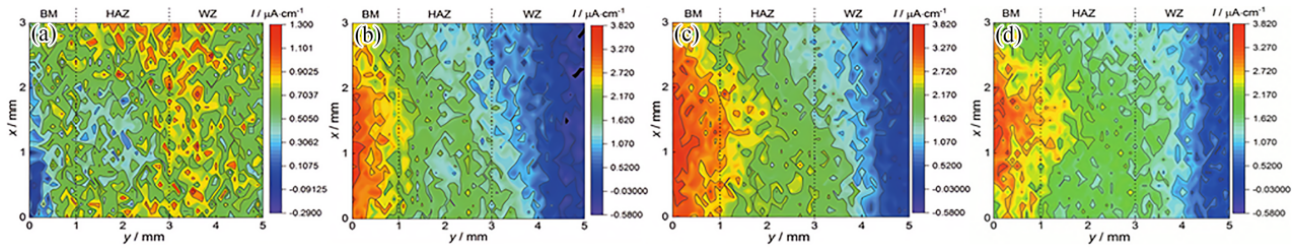


图 14　15 kJ/cm 焊接接头腐蚀不同时间后表面电流密度分布图及其宏观腐蚀形貌：(a)2 h；(b)5 h；(c)8 h；(d)20 h

Fig. 14　Surface current density maps of the 10 kJ/cm welded joint after corrosion for (a) 2 h, (b) 5 h, (c) 8 h and (d) 20 h; and 20 h

在3.5% NaCl溶液中的电流密度演变。当热输入为10 kJ/cm时，初期HAZ和WM为阳极腐蚀区域，BM为阴极；至20 h后，BM转为阳极，腐蚀加剧。相比之下，15 kJ/cm热输入早期腐蚀亦集中于WM和HAZ，但更早出现BM阳极腐蚀，20 h时腐蚀明显加剧，HAZ相对完好。综上所述，不同热输入对焊接接头各区域的腐蚀行为演变具有显著影响，热输入10 kJ/cm下接头整体耐蚀性更优，腐蚀分布更均衡，而15 kJ/cm热输入则导致BM腐蚀加剧，耐蚀性能较差。

综上所述，焊接接头耐蚀性的研究已经逐渐从腐蚀机理到焊接工艺参数，再到腐蚀行为空间演化等方面进行优化改进，促进焊接结构在极端服役环境下的防腐设计、寿命提升等方面的应用和发展，研究成果可为焊接结构防腐设计与寿命提升提供一定指导意义。

2　高效焊接方法研究现状

尽管以上工作已从微观组织、力学性能、耐蚀行为三个方面系统地揭示了HSLA焊接接头面临的主要问题，并对热输入等因素的影响机制进行了初步探索，但是上述良好性能仍是基于较理想的焊接工艺和匹配条件。在装备制造业的实际应用中，焊接方法不仅直接影响接头性能，而且也影响着制造效率、质量一致性和复杂结构的成形能力[42]。随着装备制造业的不断发展，对焊接质量和生产效率的要求日益提高，传统的焊接方法因工艺成熟稳定，在很多领域仍得到广泛应用，尤其是在焊接低合金高强钢中。手工电弧焊(SMAW)、埋弧焊(SAW)和二氧化碳气体保护焊(GMAW)等传统方法凭借其成熟稳定的工艺特性，在HSLA焊接领域仍具有广泛应用价值。然而，这些方法在实际应用中也暴露出一系列问题，特别是在HSLA焊接中，组织可控性较差、热输入高、焊接缺陷时常发生、接头性能波动大等问题日益凸显[43]。高效焊接方法能够满足高速度、低热输入、窄热影响区等更高质量的要求，因此本节展开论述高效焊接方法的研究现状。

针对传统焊接方法在热输入控制、组织调控和焊接质量稳定性等方面的不足，近年来高效焊接方法不断取得突破，成为提升HSLA焊接质量与生产效率的关键。高效焊接方法在降低焊接缺陷发生率、细化焊接组织和提升焊接接头综合性能等方面表现出显著优势，代表性技术包括LBW、激光电弧-复合焊(LAHW)以及搅拌摩擦焊(FSW)等[43-44]。

为比较传统SMAW工艺与新型低热输入方法的适应性，Chen等人[45]对比了多层多道SMAW和单层自熔激光焊(LBW)接头的微观组织形貌和力学性能。如图15a所示，LBW焊缝成形良好且无明显缺陷；如图15b所示，对于16 mm厚试件的V型坡口，SMAW采用多层多道焊接，工艺相对复杂，焊接接头形成更为复杂的显微组织与双重热影响区。如图16所示，LBW焊接接头与SMAW接头的平均焊道宽度分别为4.2 mm和15.4 mm，LBW的平均焊道宽度显著小于SMAW。两种接头的粗晶热影响区(CGHAZ)、细晶热影响区(FGHAZ)宽度差异较小，但SMAW接头的粗晶、细晶热影响区内贝氏体相含量更高，且晶界处分布有链状碳化物颗粒，其根本原因是SMAW焊接热输入更大。在综合力学性能上，由于LBW焊接接头的晶粒被细化且热输入控制较好，因而具有更高的抗拉强度和更好的延展性。

Cao L等人[46]研究了AISI 316LA奥氏体不锈钢和EH36船用钢激光焊接过程中焊接速度对接头组

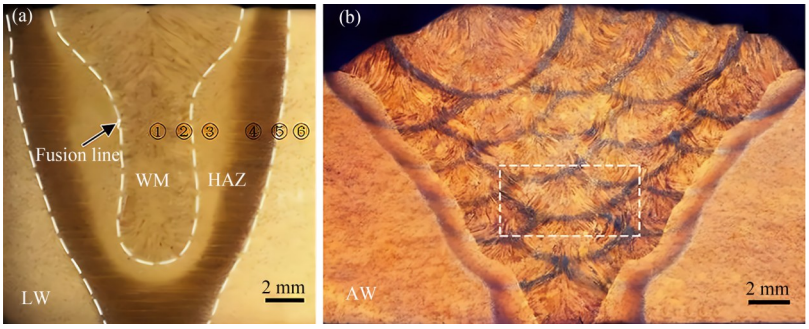


图 15　焊接接头的光学形态：(a)LBW；(b)SMAW

Fig. 15　Optical morphology of welded joints：(a)LBW；(b)SMAW

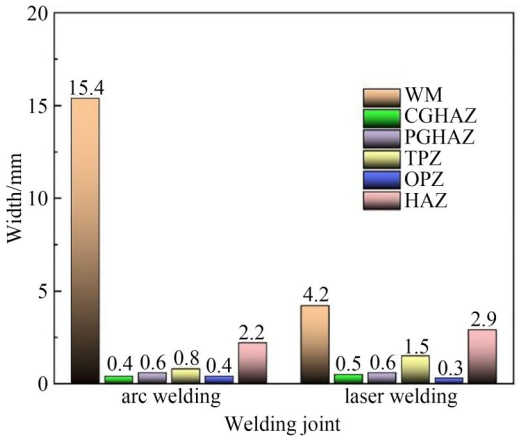


图 16　焊接接头不同区域的尺寸

Fig. 16　Dimensions of each zone in different welding joints

织和成形质量的影响。由图 17 可以看出，在低焊接速度下，焊缝顶面略微凹陷；随着焊接速度增加，顶面变得凸起且更窄。当焊接速度从 0.4 m/min 增至 1.2 m/min 时，焊道宽度和熔深明显减小，接头外观从完全熔透变为部分熔透。当焊接速度低于 0.8 m/min 时，由于热输入较高，焊接缺陷表现为过熔透形式。焊接速度在影响焊缝形貌的同时，也会影响显微组织，进而影响接头性能。如图 18a 所示，柱状晶是主要的晶体类型，晶体在焊缝中心相互接触。随着焊接速度从 0.4 m/min 增加到 1.2 m/min，晶粒尺寸得到细化，这归因于较低的低能量缩短了高温停留时间，降低了晶粒长大趋势。焊接速度为 1.2 m/min 时，焊缝中心出现一条明显的裂纹，其形成原因是焊接速度增加导致冷却速率增大，快速冷却使元素扩散不充分，从而引起成分偏析和应力集中。此外，由于激光焊接过程中的快速冷却速率以及较低的 Cr_{eq}/Ni_{eq} 比，焊缝中形成了马氏体相。随着焊接速度增加，冷却速率提高，焊缝中心粗大的马氏体晶粒转变为更细小的马氏体晶粒。这一发现不仅说明焊接参数对焊接接头形貌及组织有决定性作用，也暴露了单一激光焊接在应力控制和组织稳定性方面的局限性。

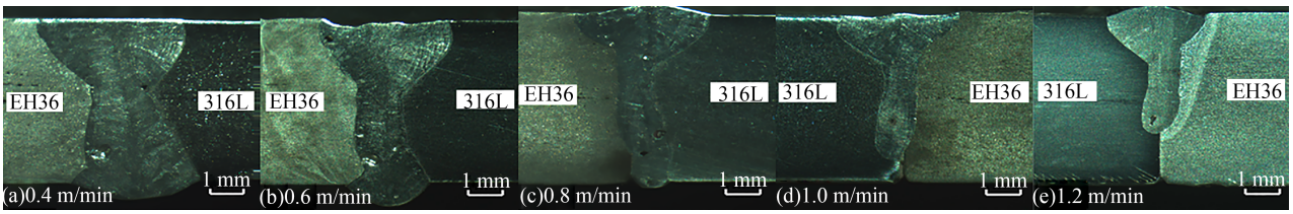


图 17　焊接速度对横截面的影响

Fig. 17　Effect of welding speed on cross-section

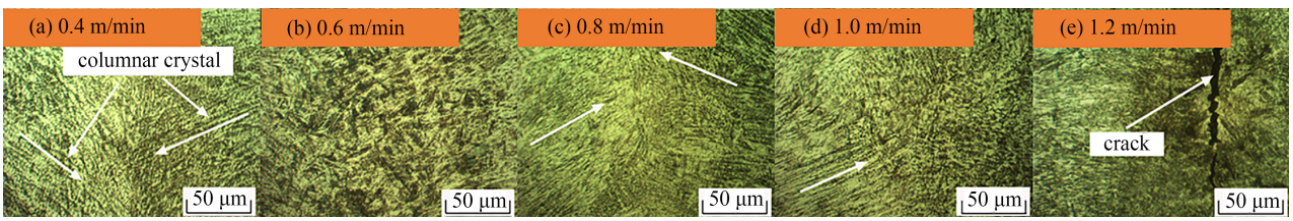


图 18　不同焊接速度下焊缝中心的显微组织

Fig. 18　Microstructure of the center of the weld at different welding speed

在Cao L等人的研究基础上，Shi Z等[47]进一步探索了ALW和LWACW两种工艺在HSLA焊接中的可行性。在ALW焊接过程中，随着热输入的增加，依次观察到咬边、飞溅和驼峰缺陷；通过高速摄像观察发现，焊缝形貌依次经历了从部分熔透到根部驼峰、再到良好成形、最后到过熔透的演变过程。在LWACW焊接过程中观察到三种典型的过渡模式，包括铺展过渡、液桥过渡和爆炸过渡。在优化参数（激光功率6 kW、焊接速度0.8 m/min、送丝速度3.5 m/min）下，液桥过渡实现了良好的工艺稳定性。对显微组织（见图19、图20）的分析表明，ALW和LWACW接头FZ均呈现出主要由AF组成的枝晶组织，是决定焊接接头强韧性的关键组织。HAZ的显微组织为铁素体、珠光体、马氏体以及部分贝氏体的混合物，其中不完全热影响区（ICHAZ）内组织非常不均匀，FGHAZ内组织呈现均匀化的细小双相组织（见图19c、图20c）。ALW接头因热输入量较高，CGHAZ区存在粗大的马氏体和少量的贝氏体组织（见图19d），可能不利于焊接接头的韧性。而LWACW加入冷焊丝降低了冷却速度，促进了异质形核，使CGHAZ组织得到明显细化（见图20d）。结果表明，两种工艺焊缝FZ区组织均为AF交叉分布，但LWACW通过引入冷丝调节热输入与凝固速

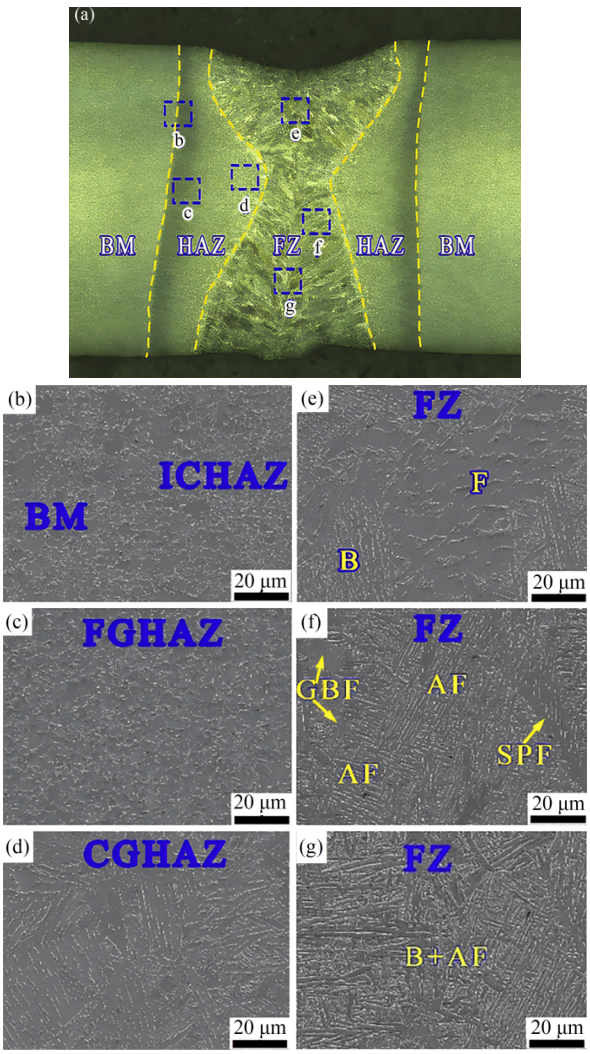


图19　最佳参数下ALW接头不同区域的微观结构：v=0.8 m/min，P=5.0 kW

Fig. 19　Microstructure of different regions obtained by ALW at optimal parameters: v=0.8 m/min, P=5.0 kW

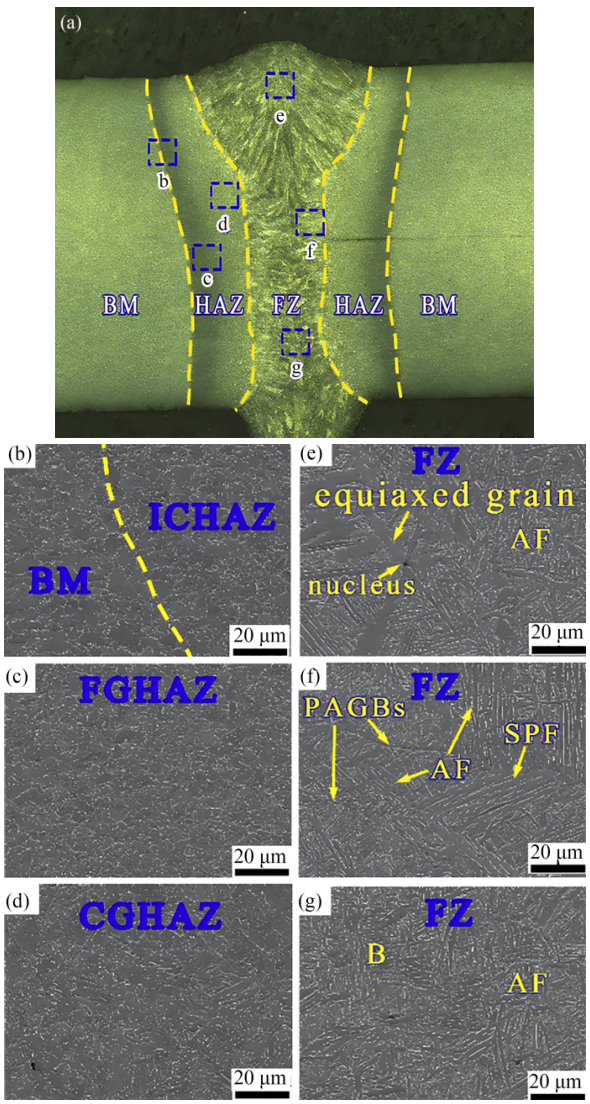


图20　最佳参数下LWACW获得不同区域的微观结构：v=0.8 m/min，P=5.0 kW

Fig. 20　Microstructure of different regions obtained by LWACW at optimal parameters: v=0.8 m/min, P=5.0 kW

率，有效细化了CGHAZ组织，缓解了马氏体含量升高带来的脆化问题。

在此基础上，高艳等[48]将研究拓展至更复杂的激光-MIG复合焊接工艺，通过调控送丝速度研究厚板DH36船用结构钢的焊缝成形和组织构成。如图21所示，在4个不同送丝速度下DH36钢板均被完全熔透，焊缝均为典型的“高脚杯”形。随着送丝速度增加，焊缝宽度明显增大：电弧WM熔宽由8.44 mm增加到10.03 mm；激光WM熔宽从1.63 mm增加到2.09 mm。送丝速度不仅影响焊缝成形，也会影响焊缝组织及力学性能。如图22所示，随着送丝速度增加，AF的形态和数量发生变化，送丝速度为7.0 m/min时WM中形成的AF数量最多。改变送丝速度对接头的抗拉强度和屈服强度影响不大，但对接头断后伸长率有显著影响，送丝速度的增加降低了接头的断后伸长率。相较于前两项研究，该工作不仅进一步验证了热输入调节对组织调控的核心作用，还提出了复合焊中“工艺参数—组织调控—性能匹配”三位一体的优化路径，是推动高效焊接技术向智能调控演进的关键一步。

然而，微观组织的多尺度演化过程受多种因素耦合影响，试验手段已逐渐难以满足结构焊接中对组织-性能精准预测的需求。为此，Zhang等[49]利用SYSWELD程序对混合激光-电弧焊接AH36钢残余应力分布及成因进行了有限元分析。SYSWELD计算的微观组织分布轮廓如图23、图24所示，模拟预测的微观组织与光学显微镜（OM）观察结果基本一致，验证了模型的可行性与准确性。分析结果表明，由于焊材的碳当量当量值（CEV）显著高于焊缝金属，HAZ的显微组织主要为马氏体，占比约为90%。微观组织观察结果表明，根焊（Root）的稀释率高于盖焊（Cap），导致Root焊的CEV升高，进而影响焊缝的微观组织。Root焊中贝氏体含量为68%，高于Cap焊的34%；而Root焊中铁素体含量为32%，低于Cap焊的66%。该工作不仅填补了前人研究中“组织演化机理清楚但预测性不足”的空白，也标志着高效焊接技术正从“参数调控-组织观察”走向“数值模拟-性能预测”的智能化发展新阶段。

由此可见，高效焊接技术突破了从“工艺参数

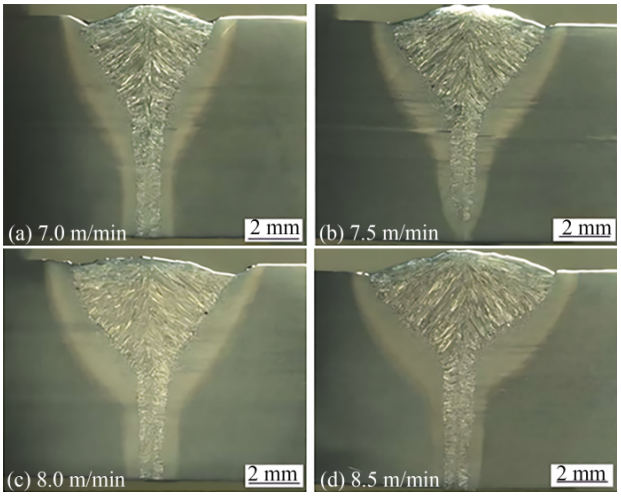


图21　不同送丝速度下接头的横截面成形

Fig. 21　Cross-sectional forming of joints at different feed speeds

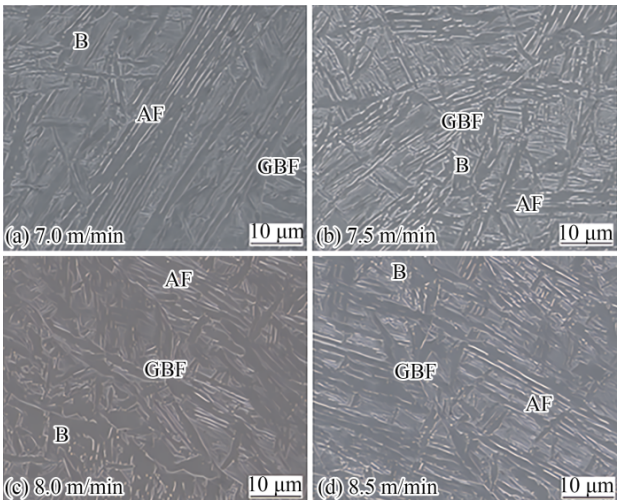


图22　不同送丝速度下焊缝的微观组织

Fig. 22　Microstructure of welds at different wire feed speeds

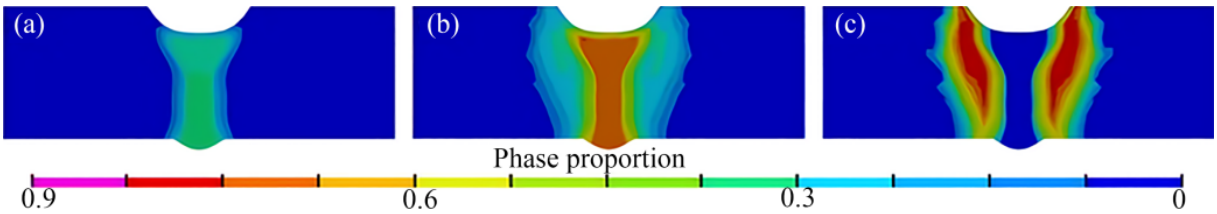


图23　根焊后微观结构的数值分布：(a)铁素体；(b)贝氏体；(c)马氏体

Fig. 23　Numerical distribution of the microstructure after root welding: (a)ferrite; (b)bainite; (c)martensitic

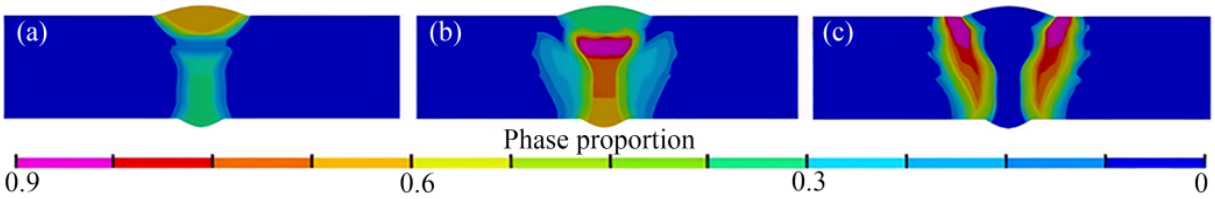


图 24　盖焊后微观结构的数值分布：(a)铁素体；(b)贝氏体；(c)马氏体

Fig. 24　Numerical distribution of the microstructure after overshoot welding: (a) ferrite; (b) bainite; (c) martensite

优化”向“组织—性能—模拟”的跨越，并推动了新一代高性能结构钢焊接工艺的高效化、精准化和智能化的进步。

3　结论

如何有效地控制焊接热输入量、冷却速度及优化焊缝合金元素的选择，成为提升焊接接头质量的一项关键技术。本文基于相关学者的研究成果，综述了焊缝显微组织演变规律及其对焊接性能的影响，进一步归纳总结了未来研究的四个重点方向：

(1)揭示复杂热循环下显微组织演变机制。

焊接热输入和冷却速率是影响焊缝金属及热影响区组织转变的核心变量。实际多层多道焊接过程中，重复加热和局部过热会导致粗晶区、细晶区及临界热影响区组织差异显著，进而引发性能不均匀。未来应加强原位表征、热模拟试验与数值模拟结合，明确针状铁素体、贝氏体、马氏体及M-A组元在不同热循环条件下的形成、转变和稳定机制。

(2)完善合金元素与焊接工艺协同调控路径。

Nb、Mo、Ca、Ti等微合金元素可通过析出强化、晶界钉扎和相变调控改善焊接接头组织性能；预热、层间温度控制和焊后热处理则有助于降低残余应力和硬化倾向。未来应进一步建立合金元素、析出相、焊接热输入和冷却速度之间的耦合关系，形成兼顾强度、韧性、耐蚀性和抗裂性的工艺参数窗口。

(3)加强焊接接头失效风险及服役行为研究。

低合金高强钢焊接接头在低温、腐蚀、氢环境和交变载荷作用下易出现冷裂纹、氢脆、局部腐蚀和疲劳损伤等失效问题。裂纹多萌生于硬脆组织、夹杂物、粗晶区或高残余应力区域。后续研究应将组织调控、去氢处理、腐蚀防护和寿命评估相结合，实现焊接接头失效风险的前置控制。

(4)推动多尺度建模与智能焊接技术应用。

面向高强钢焊接结构的高可靠制造，需要建立跨尺度组织—性能预测模型，完善温度场、应力场、相变行为和服役性能之间的耦合分析方法。同时，应加快激光焊、激光-电弧复合焊、搅拌摩擦焊及机器人自动化焊接等高效技术的工程化应用，推动低合金高强钢焊接由经验参数控制向模型驱动和智能调控转变。

参考文献：

[1] YE Z, YANG B, WANG W L, et al. High strength low alloy steel joint fabricated by laser welding with real-time high-frequency resistance heating[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2024, 332: 118573.

[2] WU R L, HUANG Y, XU J J, et al. Single-pass full penetration laser welding of 10-mm-thick EH40 using external magnetic field[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31(11): 9399-9410.

[3] HUANG Y, YU X, ZHANG Q, et al. Corrosion performance of high strength low alloy steel AISI 4135 in the marine splash zone[J]. Electrochemistry, 2017, 85(1): 7-12.

[4] YOUNES R, TOMKÓW J, IDIR A, et al. Mechanical and structural behavior of high-strength low-alloy steel pad welded by underwater wet welding conditions[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 129(11/12): 5615-5624.

[5] GAO X Y, WEI H, ZHANG L F. Effect of oxide inclusions on MnS precipitates and tensile mechanical property of high-strength low-alloy steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2024, 31(5): 1210-1220.

[6] WANG D, ZHONG Q D, YANG J, et al. Effects of Cr and Ni on the microstructure and corrosion resistance of high-strength low alloy steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23: 36-52.

[7] 厉文墨,刘芳芳,王佳骥,等. EH40船板钢奥氏体晶粒长大及连续冷却相变规律[J]. 金属热处理,2023,48(12):189-193.
LI W M, LIU F F, WANG J J, et al. Austenite grain growth and continuous cooling phase transformation of EH40 ship plate steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2023,48(12):189-193.

[8] 王佳骥,林三宝,蔡笑宇,等. EH40船板钢厚板焊接技术研究现状[J]. 机械制造文摘(焊接分册),2020(6):1-6.
WANG J J, LIN S B, CAI X Y, et al. Research status of welding technology for thick plate of EH40 ship plate steel[J]. Machinery Manufacturing Abstracts (Welding),2020(6):1-6.

[9] 高国天. 热输入对工程机械用高强钢焊接接头组织和性能的影响[J]. 热加工工艺,2016,45(13):250-253.
GAO G T. Effect of heat input on microstructure and properties of welded joints of high strength steel for construction machinery[J]. Hot Working Technology, 2016,45(13):250-253.

[10] 袁少波,彭国平,张勇,等. 超声振动复合TIG对HG70高强钢焊接接头组织及性能的影响[J]. 焊接,2025(3):86-90.
YUAN S B, PENG G P, ZHANG Y, et al. Effects of ultrasonic vibration combined with TIG on microstructure and properties of welded joints of HG70 high strength steel[J]. Welding & Joining,2025(3):86-90.

[11] 康涛,陈斌,赵征志,等. 600 MPa级低合金高强钢的组织调控与工艺优化[J]. 中国冶金,2019,29(9):45-50.
KANG T, CHEN B, ZHAO Z Z, et al. Microstructure control and process optimization of 600 MPa grade low alloy high strength steel[J]. China Metallurgy,2019,29(9):45-50.

[12] 刘洪波,李建新,吝章国,等. 大热输入焊接用EH40船板钢焊接热影响区组织转变与力学性能[J]. 焊接,2020(11):21-27.
LIU H B, LI J X, LIN Z G, et al. Microstructure transformation and mechanical properties of HAZ of EH40 ship plate steel for high heat input welding[J]. Welding & Joining,2020(11):21-27.

[13] 孙占,黄继华,张华,等. 微合金EH40型船板钢大热输入焊接接头组织和力学性能[J]. 焊接学报,2008,29(3):41-44.
SUN Z, HUANG J H, ZHANG H, et al. Microstructure and mechanical properties of high heat input welded joints of microalloyed EH40 ship plate steel[J]. Transactions of the China Welding Institution,2008,29(3):41-44.

[14] HU B, SHI G H, WANG Q M, et al. Elucidating the heat input on CGHAZ microstructure and its irregular effect on impact toughness for a novel V-N microalloying weathering steel[J]. Journal of Materials Research and Technology,2023,25:5888-5906.

[15] 利成宁,邢玉翔,王佳骥,等. 低相变温度焊材对Q1100超高强钢焊接接头氢扩散行为和冷裂敏感性的影响[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2025,58(4):434-440.
LI C N, XING Y X, WANG J J, et al. Effects of low transformation temperature welding consumables on hydrogen diffusion behavior and cold cracking sensitivity of Q1100 ultra-high strength steel welded joints[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology),2025,58(4):434-440.

[16] ZHANG H X, HAO F Y, ZHANG Y, et al. Corrosion behavior and mechanism of the high-strength low-alloy steel joined by multilayer and multipass welding method[J]. Materials and Corrosion, 2022, 73(11): 1826-1832.

[17] FAN G W, LIU J, ZHANG G N, et al. Multiple welding simulated microstructure and corrosion resistance of super austenitic stainless steel 254SMo welding heat affected zone[J]. International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering, 2020,9(1):38-52.

[18] PAN J, XU Z C, DU Q, et al. Research on local material constitutive model of nickel-based welding joint based on digital image correlation[J]. Rare Metal Materials and Engineering,2022,51(5):1667-1673.

[19] MA J J, ZHONG M, WU Y W, et al. Characterizing phase transformations in the coarse-grained heat-affected zone of EH550 offshore engineering steel subjected to varied high heat inputs[J]. Metallurgical and Materials Transactions B,2024,55(6):4115-4120.

[20] TAWENGI A S, SEDMAK A, GRABULOV V, et al. Cold weld cracking susceptibility of high strength low alloyed (HSLA) steel NIONIKRAL 70[J]. Metalurgija,2014,53(4):624-626.

[21] WOJTACHA A, KCIUK M, OPIELA M. Effect of heat treatment conditions on Nb, Ti, V microalloyed corrosion resistant steel[J]. Materials,2021,14(12):3254.

[22] LIU X Y, SUN Y P, LI W Z, et al. Effect of welding

current on the organization and properties of welded joints of Q690D high-strength steel[J]. Materials Today Communications, 2024, 40: 110219.

[23] SUN D P, 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.

[24] ALMEIDA L S, MARQUES S C, DOS SANTOS D S, et al. The influence of steelmaking processes on the hydrogen embrittlement of a tempered martensitic steel [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 78: 662-673.

[25] DONG Z G, XIONG W, GONG C F, et al. Drilling optimization design and application practice of offshore oilfield development wells[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(7): 46-57.

[26] CHEN G, LI J, CHANG Y, et al. Influencing factors of fatigue damage of deepwater oil and gas subsea wellhead system[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(S2): 141-144.

[27] LIU X J, YUAN G, MISRA R D K, et al. A comparative study of acicular ferrite transformation behavior between surface and interior in a low C-Mn steel by HT-LSCM[J]. Metals, 2021, 11(5): 699.

[28] YANG Y, ZHAN D, LEI H, et al. In situ observation of acicular ferrite nucleation and growth at different cooling rate in Ti-Zr deoxidized steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2019, 50(6): 2536-2546.

[29] LIU F, WANG Q, LI J, et al. Systematic study on orientation relationships between acicular ferrite and Ti-Mg oxide at different cooling rates in low-carbon steel [J]. Materials Characterization, 2021, 181: 111503.

[30] MA Y X, YANG Y L, JIA X, et al. Effect of welding heat input on microstructure and properties of coarse-grained HAZ of 500 MPa high-strength low-alloy steel [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2022, 75(7): 1877-1884.

[31] ZHAO H T, PALMIERE E J. Effect of austenite grain size on acicular ferrite transformation in a HSLA steel [J]. Materials Characterization, 2018, 145: 479-489.

[32] LV S, WU H H, WANG K, et al. The microstructure evolution and influence factors of acicular ferrite in low alloy steels[J].Computational Materials Science, 2023, 218: 111989.

[33] 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.
MENG M D, WEI J S, AN T B, et al. Effect of heat input on microstructure and properties of welded joints of 800 MPa grade HSLA steel[J]. Hot Working Technology, 2023, 52(23): 35-39.

[34] YANG Y L, JIA X, MA Y X, et al. Effect of Nb on microstructure and mechanical properties between base metal and high heat input coarse-grain HAZ in a Ti-deoxidized low carbon high strength steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18: 2399-2412.

[35] 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.

[36] ZHANG Y H, YANG J, DU H L, et al. Effect of Ca deoxidation on toughening of heat-affected zone in high-strength low-alloy steels after large-heat-input welding [J]. Metals, 2022, 12(11): 1830.

[37] CAI F F, HUANG Y L, XING S H, 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.

[38] ZHANG J M, SUN W H, 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.

[39] LIU X H, SUI Y Q, ZHANG H X, et al. Corrosion behavior of the high-strength low alloy steel welded joint in natural seawater[J]. Materials and Corrosion, 2023, 74(4): 535-543.

[40] 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(8)：74-82.
ZENG D P, AN T B, ZHENG S X, et al. Effect of heat input on microstructure and properties of 440 MPa grade low alloy high strength steel weld for ship[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(8): 74-82.

[41] 陈杰，李红英，周文浩，等. 热输入对Q1100钢焊接接头低温韧性及耐蚀性能的影响[J]. 材料研究学报，2022，36(8)：617-627.
CHEN J, LI H Y, ZHOU W H, et al. Effect of heat input on low temperature toughness and corrosion resis-

tance of Q1100 steel welded joints[J]. Chinese Journal of Materials Research,2022,36(8):617-627.

[42] 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.
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 Working Technology,2024,53(17):8-12.

[43] CHURIAQUE C,CHLUDZINSKI M,PORR-LARA M,et al. Laser hybrid butt welding of large thickness naval steel[J]. Metals,2019,9(1):100.

[44] 丁振斌,张亚运,安同邦. 不同焊接方法下440 MPa级海洋工程用钢焊接接头组织和力学性能研究[J]. 热加工工艺,2018,47(1):75-78.
DING Z B,ZHANG Y Y,AN T B. Study on microstructure and mechanical properties of 440 MPa grade steel welded joints for marine engineering under different welding methods[J]. Hot Working Technology,2018,47(1):75-78.

[45] CHEN Y X,XU X,LIU Y J,et al. A comparative study on microstructural characterization of thick high strength low alloy steel weld by arc welding and laser welding[J]. Materials,2023,16(6):2212.

[46] 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(7):270.

[47] 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.

[48] 高艳,崔丽,常耀卿,等. 船用耐蚀钢DH36光纤激光-MIG复合焊接头组织和性能[J]. 焊接学报,2019,40(5):60-66.
GAO Y,CUI L,CHANG Y Q,et al. Structure and properties of marine corrosion-resistant steel DH36 fiber laser-MIG hybrid welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution,2019,40(5):60-66.

[49] ZHANG H,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.

编辑部网址:http://www.71dhj.com