

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.08.05

EH40钢用金红石型药芯焊丝熔化极气体保护焊接工艺及组织性能分析

武鹏博¹, 马青军², 信国松³, 常朝祥⁴, 陈邵鑫⁵, 刘大双⁶, 张天理⁷,
牛董山钰⁴, 邓军林⁵, 方乃文^{4*}

1. 中国机械科学研究总院集团有限公司, 北京 100044
2. 天津市特种设备监督检验技术研究院, 天津 300350
3. 聚力新材料科技(日照)有限公司, 山东 日照 276800
4. 中焊科技发展(哈尔滨)有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150028
5. 北部湾大学, 广西 钦州 535011
6. 合肥工业大学, 安徽 合肥 230009
7. 上海工程技术大学, 上海 201620

摘要: 针对EH40高强度钢在工程应用中存在焊缝韧性和接头强度匹配性差的问题, 本文自主设计一款以金红石为主渣系、多元合金复合强化的新型高强度药芯焊丝, 采用熔化极气体保护焊(GMAW)工艺开展EH40高强度钢焊接试验。通过对焊接接头拉伸、冲击、硬度等核心力学性能系统测试, 研究焊接接头焊缝区、熔合区、热影响区的显微组织演变规律, 揭示金红石型药芯焊丝焊接工艺特性与接头强韧化机理。结果表明, 优化工艺后获得的焊接接头无气孔、裂纹、未熔合等缺陷, 焊缝区主要由针状铁素体和少量先共析铁素体的混合组织组成, 呈现网状/块状分布; 熔合区主要由针状铁素体和粗大的板条贝氏体等组成, 组织极不均匀; 正火区主要由铁素体、粗大的板条贝氏体和细小粒状贝氏体等组织组成; 不完全正火区主要由细小的等轴铁素体组成。力学性能测试显示靠近熔合线的热影响区为接头硬度较高区域, 显微硬度区间为232~244 HV, 焊接接头的平均抗拉强度为597 MPa, 断后延伸率为27%, 断裂位置为母材; 在-30 °C的试验条件下, 焊缝区冲击性能平均值为73 J, 熔合区冲击性能平均值为65.5 J, 热影响区冲击性能平均值为99 J, 呈现出熔合区<焊缝区<热影响区的分布趋势。

关键词: 高强度钢; 药芯焊丝; 熔化极气体保护焊; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG442 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)08-0049-11

Analysis of Process, Microstructure and Properties of Gas Metal Arc Welding with Rutile Flux-cored Wire for EH40 Steel

WU Pengbo¹, MA Qingjun², XIN Guosong³, CHANG Zhaoxiang⁴, CHEN Shaoxin⁵, LIU Dashuang⁶,
ZHANG Tianli⁷, NIU Dongshanyu⁴, DENG Junlin⁵, FANG Naiwen^{4*}

1. China Academy of Machinery Science and Technology Group Co., Ltd., Beijing 100044, China
2. Tianjin Special Equipment Inspection Institute, Tianjin 300350, China
3. Juli New Material Technology (Rizhao) Co., Ltd., Rizhao 276800, China
4. China Welding Technology Development (Harbin) Co., Ltd., Harbin 150028, China
5. Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China
6. School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China
7. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

收稿日期: 2026-07-01 修回日期: 2026-07-23

基金项目: 泰山产业领军人才工程专项经费(2024001); 广西重点研发计划(桂科AB25069254); 黑龙江省自然科学基金(PL2025E073)

作者简介: 武鹏博(1996—), 男, 工程师, 博士, 主要从事高强度钢、有色金属激光焊接工艺开发及焊接材料研究设计。E-mail: wpbwelding@163.com。

通讯作者: 方乃文(1987—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事高强度钢、有色金属焊接性研究及焊接材料研究设计开发、标准制修订、焊接行业服务等。
E-mail: naiwen20@163.com。



重点专刊——高强度优质高效焊接

Abstract: Aiming at the problems of insufficient weld toughness and poor strength matching of EH40 high strength steel in engineering welding, a new flux-cored wire with rutile as the main slag system and multi-alloy composite strengthening was independently designed in this paper. The welding test of EH40 high strength steel was carried out by GMAW process. The microstructure evolution of the weld zone, fusion zone and heat affected zone of the welded joint was systematically studied. The core mechanical properties such as tensile, impact and hardness of the joint were tested, and the deposition characteristics of the rutile flux-cored wire and the strengthening and toughening mechanism of the joint were revealed. The results show that there are no defects such as pores, cracks and incomplete fusion in the welded joint under the optimized process. The weld zone is mainly composed of acicular ferrite and a small amount of proeutectoid ferrite, showing a network / block distribution. The fusion zone is mainly composed of acicular ferrite and coarse lath bainite, and the microstructure is extremely uneven. The normalizing zone is mainly composed of ferrite, coarse lath bainite and fine granular bainite. The incomplete normalizing zone is mainly composed of fine equiaxed ferrite. The mechanical properties test shows that the heat affected zone near the fusion line is the high hardness zone of the whole joint. The microhardness range of the line is 232-244 HV, the average tensile strength of the welded joint is 597 MPa, the elongation after welding is 27%, and the fracture position is the base metal. Under the condition of $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, the average impact performance of the weld zone is 73 J, the average impact performance of the fusion zone is 65.5 J, and the average impact performance of the heat affected zone is 99 J, showing a trend of fusion zone < weld zone < heat affected zone.

Keywords: High strength steel; flux-cored wire; gas metal arc welding; microstructure; mechanical properties

引用格式:武鹏博,马青军,信国松,等. EH40 钢用金红石型药芯焊丝熔化极气体保护焊接工艺及组织性能分析[J]. 电焊机,2026,56(8):49-59.

Citation: WU Pengbo, MA Qingjun, XIN Guosong, et al. Analysis of Process, Microstructure and Properties of Gas Metal Arc Welding with Rutile Flux-cored Wire for EH40 Steel[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(8): 49-59.

0 引言

EH40 钢是船舶与海洋工程领域常用的微合金化高强船板钢,通过 Nb、V、Ti 微量合金化细化晶粒、净化组织,具备高强度、优良低温韧性与焊接适应性,广泛应用于船体甲板、舱壁、海洋平台承重结构等关键构件^[1-3]。船舶结构长期承受交变载荷、低温冲击与复杂海洋环境侵蚀,对焊接接头的组织均匀性、力学稳定性及抗疲劳性能提出了严苛要求,因此焊接接头的组织性能匹配度直接决定整体结构的服役安全性与使用寿命^[4-7]。

焊接作为 EH40 钢主要加工手段,学者们开展了相关焊接工艺研究。肖晓明等人^[8]对 EH40 船板钢进行大热输入埋弧焊,结果表明,焊缝金属组织为大量针状铁素体、少量先共析铁素体和少量 M-A 组元。大量晶内针状铁素体的生成分割了原奥氏体晶粒,焊缝有效晶粒尺寸为 $3.2\text{ }\mu\text{m}$ 。焊缝分析区域内大角度晶界比例为 78.6%,大角度晶界主要分布在 $50^{\circ}\sim 60^{\circ}$,对焊缝冲击韧度非常有利。M-A 组元尺寸较小,数量较少且均匀分布,不会对焊缝金

属的韧性产生不利影响;Liang 等人^[9]对 EH40 船板钢进行等离子焊接,研究通过引入不同厚度的镍板来调控焊缝中的镍含量,结果表明 3.35% 适中的镍含量可细化针状铁素体组织,提高大角度晶界比例,显著改善低温韧性,冲击能吸收值提升至 67 J,较无镍焊缝提高 644%;焊缝显微硬度也随之提升,达到 333.1 HV;胡奉雅等人^[10]采用弯曲焊丝窄间隙熔化极活性气体保护焊接(MAG)法对 EH40 船用高强钢进行了平焊位置的焊接试验,试验结果表明焊缝质量良好,无侧壁未熔合及其他焊接缺陷。焊接接头的热影响区比较窄,其组织主要为贝氏体和铁素体,平均冲击吸收能量为 267 J,与母材基本相同。焊接接头的强度高于母材。焊接接头的力学性能满足船级社要求。综上所述,目前国内外针对 EH40 钢埋弧焊、等离子焊、实心焊丝 MAG 焊的工艺与性能研究较多,其中实心焊丝 MAG 焊凭借焊接效率高和适应性强的优势,已成为船用高强钢主流焊接工艺。相较于实心焊丝,药芯焊丝通过药芯组分的精准配比,可实现焊接过程中的造渣、脱氧、合金化、净化熔池、晶粒细化等多重冶金作用,相较于实



心焊丝具备更强的成分可调性与性能可控性,是解决高强钢焊接缺陷、优化接头性能的核心技术路径。

目前针对药芯焊丝 MAG 焊接头多区域组织演变规律、相组成占比及强韧耦合机理的系统性研究仍不完善,尤其缺乏对焊缝针状铁素体形核机制、热影响区晶粒粗化抑制规律的深度分析,难以支撑船舶工程规模化高效焊接工艺标准化应用。本文基于 EH40 船用高强钢焊接强韧化需求,设计一款金红石基多元合金强化新型药芯焊丝,精准配比造渣剂、脱氧剂、合金强化剂、晶粒细化剂与脱硫去气助剂,开展 MAG 焊接工艺研究,通过金相观察、扫描电镜分析、力学性能测试,系统表征焊接接头各区域显微组织特征、力学性能分布规律,探究焊丝组分对焊接工艺性、接头微观组织及力学性能的影响规律,阐明金红石药芯体系对焊缝组织的调控机制与接头强韧化机理,为 EH40 钢船舶结构高效优质焊接及工艺参数优化提供理论依据与数据支撑。

1 试验材料及设备

试验选用尺寸为 250 mm(长)×150 mm(宽)×

20 mm(厚)的 EH40 钢板,填充金属为直径 1.2 mm 自主研发的金红石型高强钢药芯焊丝,药芯焊丝外皮为 H08MnA 低碳冷轧钢带,药芯粉料成分见表 1,填充率为 20%,金红石型渣系药芯焊丝具备电弧柔和、飞溅小、焊缝成形美观、工艺适应性强等优点,是低碳低合金高强钢焊接的优选渣系体系。母材及焊丝的化学成分见表 2。待焊试板加工成 Y 形坡口,其坡口钝边厚度为 2 mm,单边坡口角度为 30°,坡口间隙为 3 mm。在焊接前,对待焊试板的坡口及其周边区域进行打磨处理,并使用酒精清洗以去除油污。焊接设备选用 Cloos StarT 502 Premium,并由 FANUC M-10iD_12 机器人控制焊接轨迹,焊接系统如图 1 所示。

焊接完成后,将试板放置于线切割设备中进行试样加工。经过打磨和抛光处理后,试样浸入 4% HNO_3 +96% $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 溶液中进行电解腐蚀;利用 OLYMPUSGX71 光学显微镜(OM)、FEI Quanta-200 型扫描电子显微镜(SEM)及 D/MAX-rB 型 X 射线衍射仪对焊缝的微观结构和相组成进行观察与分析,采用电子背散射衍射技术(EBSD)表征试样微观晶粒取向、晶界分布及织构特征,实验加速电

表 1 药芯粉料成分及占比(质量分数,%)

Table 1 Composition and proportion of core powder (wt. %)

金红石	镍粉	锰硅合金	氟化钠	镁粉	锆英砂	钛酸钾	氟钛酸钾	钛铁	硼铁	雾化铁粉	石英
38	9	22	1.8	5	2.8	4	1	3.5	0.3	10.8	1.8

表 2 母材和焊丝化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of base metal and welding wire (wt. %)

成分	C	Si	Mn	P	S	Al	V	N	Cu	Ti	Ni	Nb	Mo	Cr
母材	0.08	0.25	1.5	0.008	0.003	0.029	0.028	0.003	0.21	0.014	0.19	0.038	—	0.21
焊丝	0.052	0.33	1.39	0.012	0.006	0.003	0.02	—	—	—	1.55	—	0.010	0.015

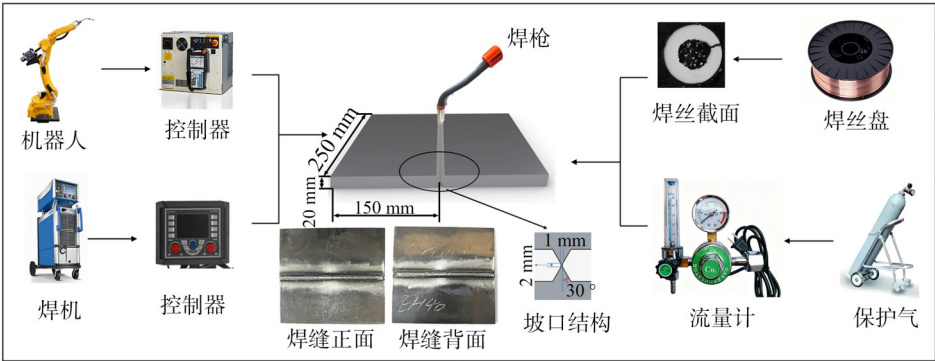


图 1 焊接系统

Fig. 1 Specific requirements of maps

重点
专利
—
高强
钢优
质高
效焊
接

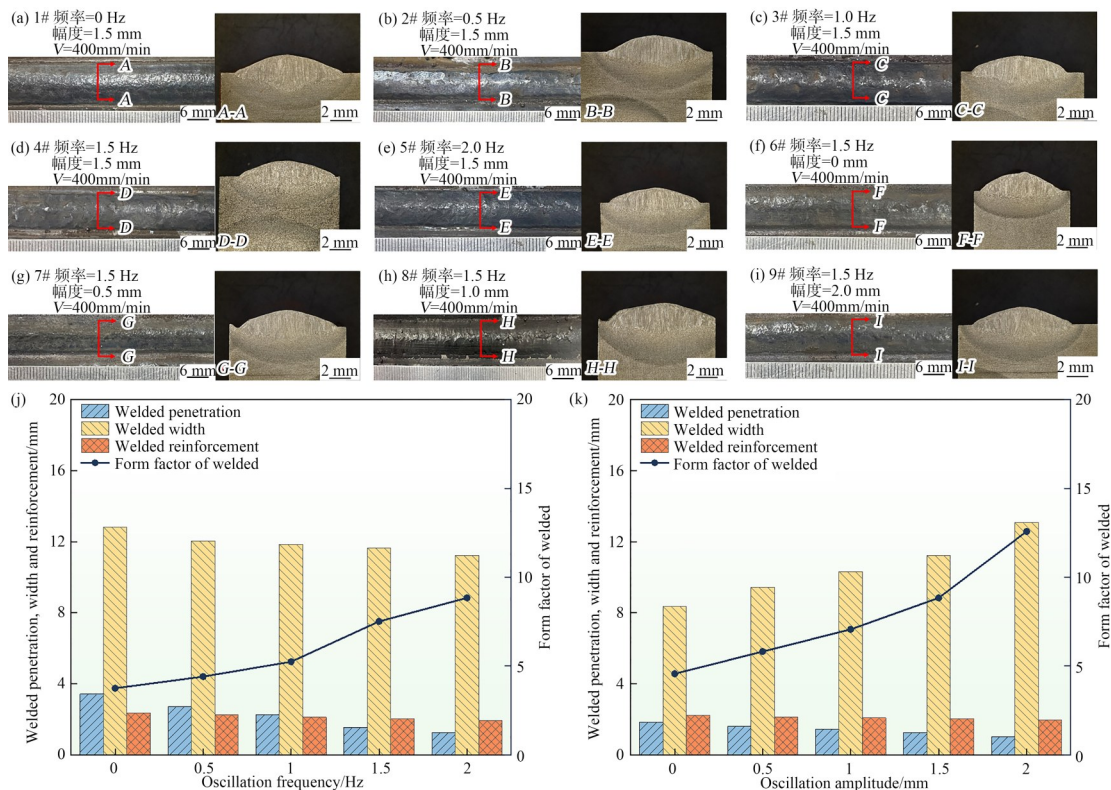
压 20 kV, 工作距离 12 mm, 扫描步长 0.5 μm 。室温下的拉伸性能通过 INSTRON 5569 电子万能试验机依据 GB/T 2651 进行测试; V 形缺口冲击试样的加工尺寸为 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 55 mm, 采用 ZBC2452-C 型冲击试验机进行 -30 $^{\circ}\text{C}$ 冲击试验, 依据 GB/T 2650 进行测试。室温下的显微硬度通过 Qness 10/60 A+EVO 显微硬度测试仪依据 GB/T 2654 标准进行测试, 载荷 1 000 g, 保荷时间 15 s, 测试点间距 0.5 mm, 覆盖母材、热影响区和焊缝全区域。

2 试验结果与分析

2.1 摆动焊接工艺研究

不同摆动幅度和摆动频率下对焊缝表面宏观形貌和焊缝横截面低倍金相的影响规律如图 2 所示。基于前期工艺试验采用电压 26.5 V 配合 230 A 的焊接电流, 能够获得优良焊缝成形质量, 不同摆动幅度和摆动频率基于此电流和电压开展。图 2a~

2e 为摆动幅度 1.5 mm、0~2 Hz 范围内不同摆动频率下焊缝表面及横截面的宏观形貌, 随摆动频率升高, 焊缝横向鱼鳞纹细密均匀性提升, 电弧对熔池两侧润湿铺展效果持续改善, 焊缝两侧无明显咬边缺陷; 熔宽持续增大, 熔深小幅下降, 焊缝余高变化平缓。图 2f~2i 为摆动频率 1.5 Hz、0~2 mm 范围内不同摆动幅度下焊缝表面及横截面的宏观形貌, 随着摆幅增大, 焊缝表面鱼鳞纹横向跨度显著增加, 焊道宽度肉眼可见加宽; 横截面熔宽大幅提升, 熔深持续降低。由图 2j 可知, 随摆动幅度上升熔深呈现降低趋势, 熔宽略微降低, 成形系数线性增加; 由图 2k 可知, 随摆动频率上升熔深持续线性降低, 熔宽显著增加, 成形系数线性增加。上述结果可能是因为: 摆动频率越高, 电弧单位时间内横向往返次数越多, 热量向焊缝两侧分散, 母材垂直方向热积累减少, 熔透能力下降; 在振幅固定前提下, 最大横向电弧作用距离不变, 因此熔宽基准值稳定; 频率提升仅轻微缩短单侧电弧停留时间, 熔宽略有收



(a) 0 Hz、1.5 mm; (b) 0.5 Hz、1.5 mm; (c) 1.0 Hz、1.5 mm; (d) 1.5 Hz、1.5 mm; (e) 2.0 Hz、1.5 mm; (f) 1.5 Hz、0 mm; (g) 1.5 Hz、0.5 mm; (h) 1.5 Hz、1.0 mm; (i) 1.5 Hz、2.0 mm; (j) 振荡频率对焊缝成形的影响规律; (k) 振荡幅度对焊缝成形的影响规律

图2 摆动参数对焊缝成形影响

Fig. 2 The influence of swing parameters on welded formation

缩。摆动振幅直接决定电弧横向极限作用宽度,振幅越大,热量横向分散越剧烈,垂直母材的热输入损耗越大,熔深衰减更明显,熔宽增加更明显。综上所述,采用摆动频率1.5 Hz和摆动幅度1.5 mm的焊接参数能够获得更优良的宽深比及焊缝成形质量。因此本文选用送丝速度8 m/min、焊接电流230 A、焊接电压26.5 V、焊接速度400 mm/min、摆动频率1.5 Hz和摆动幅度1.5 mm的焊接参数下,双面各填充4道层间温度控制在100 ℃以内,焊接保护气体为80%Ar+20%CO₂,保护气流量为25 L/min,完成20 mm厚EH40钢焊接。

2.2 金相组织分析

焊接接头的宏观低倍形貌+分区显微组织如图3所示。图3a为焊接接头的宏观横截面,上下焊道成形饱满,焊趾过渡平缓,未观察到宏观裂纹、未焊透、夹渣、咬边等缺陷。图3b为焊缝区的显微组织,由针状铁素体(AF)和少量先共析铁素体(PF)的混合组织组成,针状铁素体呈交错、无序的针状/板条状分布,而少量的先共析铁素体沿原奥氏体晶界析

出,呈现网状/块状分布。图3c为熔合区的显微组织,由针状铁素体(AF)和粗大的板条贝氏体(B)等组成,组织极不均匀。图3d为正火区的显微组织,由铁素体(F)、粗大的板条贝氏体(B)和细小粒状贝氏体(B)等组织组成,正火区靠近熔合线(FZ),因高温热循环影响,奥氏体晶粒显著粗化,冷却后形成了粗大的铁素体和板条贝氏体(B)晶粒。图3e为不完全正火区的显微组织,由细小的等轴铁素体(EF)组成。在热循环过程中,材料经历了完全奥氏体化的阶段,随后的冷却导致细小等轴晶粒的形成,晶粒尺寸显著小于粗晶区。图3f为母材区的显微组织,由多边形铁素体(PF)组成。综上所述,焊接接头的组织结构从焊缝到熔合区、热影响区再到母材,呈现出铸态柱状晶、粗大过热组织、粗晶、细晶及原始母材组织之间的连续梯度变化。

2.3 XRD分析

焊缝区的X射线衍射(XRD)分析结果如图4所示,图谱中清晰呈现了三个高强度的特征衍射峰。通过与标准PDF卡片的对比可知,焊缝区的显微组

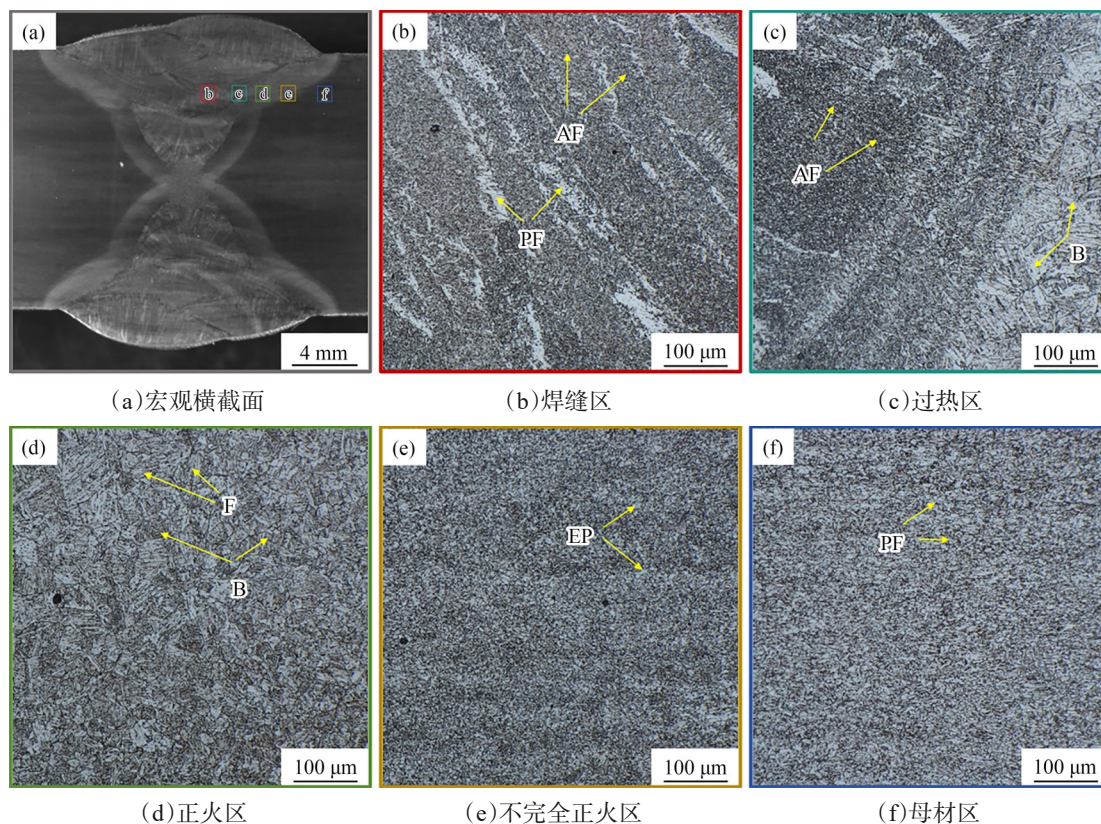


图3 焊接接头金相组织分析

Fig. 3 Metallographic structure analysis of welded joints

织主要由体心立方结构的铁素体相组成^[11]。

2.4 EBSD 分析

焊接接头晶粒取向及尺寸分析如图 5 所示,图 5a~5c 为焊接接头的 IPF (Inverse Pole Figure) 图,图 5a 可知,图中存在一条贯穿视场的粗大取向条带,其余区域为细密多彩针状细晶;晶粒取向分散,无极强单一织构。 $\{100\}$ 、 $\{110\}$ 、 $\{111\}$ 极点强度分布分散,无明显集中高亮区,说明焊缝凝固柱状晶经相变后,整体织构弱、晶粒取向随机;粗大条带为凝固先共析铁素体柱状晶残留取向。由图 5b 可知,图中全部为板条状、块状粗大晶粒,彩色取向块尺寸显著大于 WM、HAZ,晶粒取向分区明显,板条簇取向统一; $\{110\}$ 、 $\{111\}$ 出现局部高强度极点,存在明显板条贝氏体织构;熔合线高温奥氏体完全粗化,冷却形成

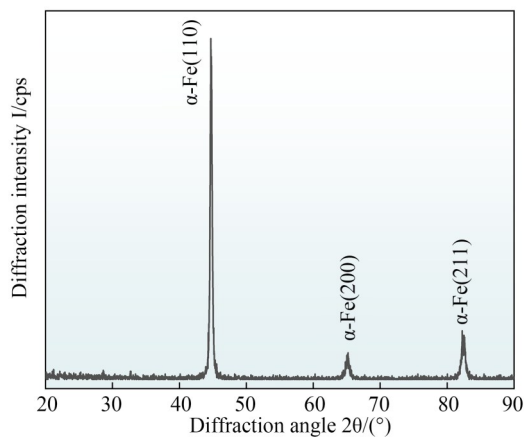
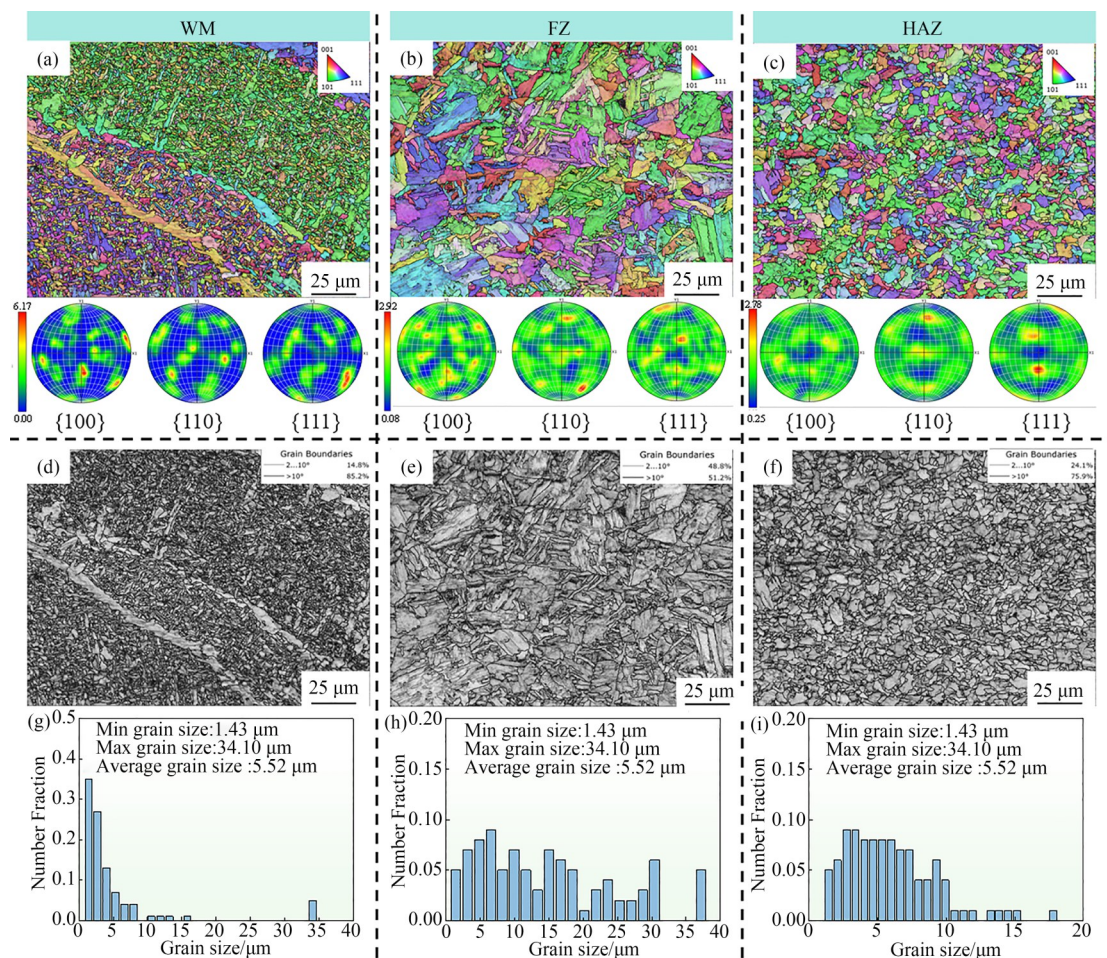


图 4 焊缝 XRD 分析

Fig. 4 XRD analysis of welded seam

粗大板条组织,晶粒取向高度集中。由图 5c 可知,图中晶粒尺寸均匀细小,彩色取向无大块统一色块,



(a)焊缝金属区反极图;(b)熔合区反极图;(c)热影响区反极图;(d)焊缝金属区晶界分布图;(e)熔合区晶界分布图;(f)热影响区晶界分布图;(g)焊缝金属区晶粒尺寸分布统计图;(h)熔合区晶粒尺寸分布统计图;(i)热影响区晶粒尺寸分布统计图

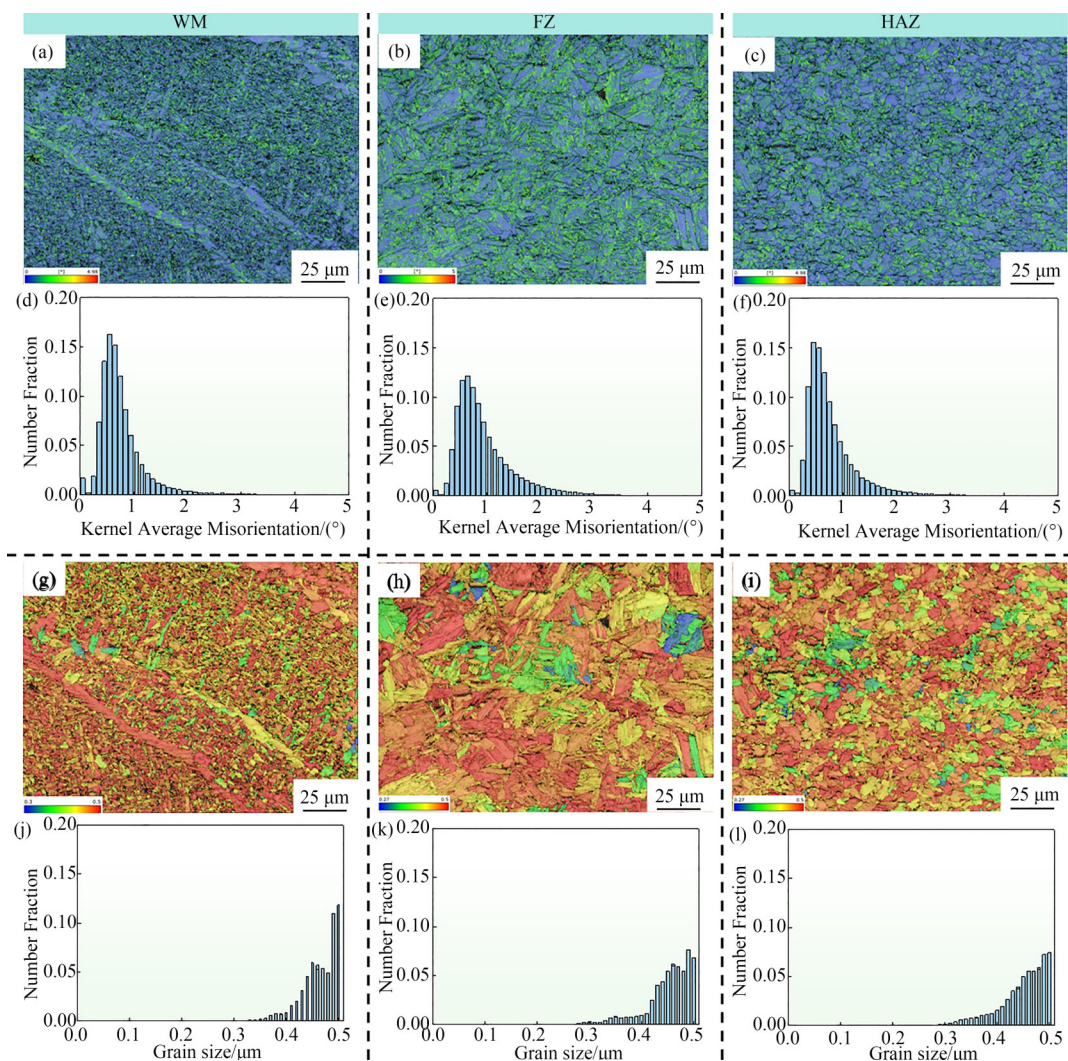
图 5 焊接接头晶粒取向和尺寸分析

Fig. 5 Analysis of grain boundary and grain size of welded joint

等轴晶占绝对主体; $\{100\}\{110\}\{111\}$ 极点分布均匀弥散, 织构强度最弱, 晶粒取向完全随机, 无明显择优取向。由图 5d~5i 可知, 为焊接接头晶粒尺寸分析; 由图 5d、5g 可知, 基体细晶区域晶界密集, 大角度晶界占比高; 长条粗大区域晶界稀疏, 单颗晶粒尺寸较大。晶粒尺寸统计可知最小晶粒尺寸为 $1.43\ \mu\text{m}$, 最大晶粒尺寸为 $34.10\ \mu\text{m}$, 平均晶粒尺寸为 $5.52\ \mu\text{m}$; 晶粒尺寸呈双峰分布, 主峰集中在 $0\sim 5\ \mu\text{m}$ 超细针状铁素体, 少量大晶粒延伸至 $30\ \mu\text{m}$ 以上; 焊缝熔池凝固先生成柱状粗大先共析铁素体, 在柱状粗大先共析铁素体中间生成针状铁素体 (AF), 造成尺寸两极分化。由图 5e、5h 可知, 晶界以长平直板条边界为主, 单位面积晶界密度大幅降低, 大尺寸连续晶粒占主

导, 细小晶粒占比极低。晶粒尺寸统计可知最小晶粒尺寸为 $1.43\ \mu\text{m}$, 最大晶粒尺寸为 $44.04\ \mu\text{m}$, 平均晶粒尺寸为 $17.37\ \mu\text{m}$; 整体晶粒尺寸大幅右移, 峰值集中在 $10\sim 25\ \mu\text{m}$, 最大晶粒为三区域最高。图 5e、5h 可知, 全域高密度交错晶界, 无连续粗大晶粒边界, 细晶组织占满视场。晶粒尺寸统计可知最小晶粒尺寸为 $1.45\ \mu\text{m}$, 最大晶粒尺寸为 $17.80\ \mu\text{m}$, 平均晶粒尺寸为 $6.37\ \mu\text{m}$; 晶粒尺寸集中在 $0\sim 10\ \mu\text{m}$, 无超长尺寸晶粒, 尺寸分布最窄、均匀。

焊接接头局域取向差和施密特因子如图 6 所示。由图 6a、6d 可知, 焊缝区基体以蓝绿色低 KAM 区域为主, 仅左侧长条粗大柱状晶带出现连续黄绿色高畸变区; 细小针状铁素体基体晶格畸变均匀偏



(a-c) KAM 图; (d-f) KAM 数值分布直方图; (g-i) Schmid 因子图; (j-l) Schmid 因子数值分布直方图

图 6 焊接接头局域取向差和施密特因子分析

Fig. 6 local misorientation and schmitt factor analysis of welded joints

低。KAM数值集中在 $0^{\circ}\sim 1^{\circ}$ 区间,峰值极靠左,仅少量晶粒延伸至 2° 以上;焊缝冷却相变产生的内应力集中在原始粗大柱状晶界,针状铁素体交错结构可释放局部应力,整体平均位错密度偏低。由图6b、6e可知,熔合区为全域大面积黄绿色高KAM区域,板条晶界、相界面遍布高畸变带,整体畸变程度显著高于WM、HAZ;分布区间宽于WM, $1^{\circ}\sim 2^{\circ}$ 区间晶粒占比明显提升,高取向差晶粒数量增多;熔合区经历接近固相线的高温热循环,冷却过程中板条贝氏体相变产生大量相变内应力,粗大板条相界面堆积高密度GND位错。由图6c、6f可知,热影响区整体大面积深蓝色低KAM衬度,仅局部少量细碎黄绿色斑点,无连续高畸变条带;分布形态与WM接近,峰值集中在极小KAM区间,高畸变晶粒占比为三区最低;细晶HAZ,焊接热循环仅发生完全再结晶,无剧烈相变应力;高密度大角度晶界可分散、释放晶格畸变。由图6g、6j可知,焊缝区大面积红色高施密特因子区域,仅粗大柱状晶条带呈现蓝绿色低因子硬取向带;数值分布整体右移,大量晶粒集中在 $0.4\sim 0.5$ 高施密特因子区间;焊缝针状铁素体大多为软取向,塑性变形协调能力好;但局部粗大柱状晶为硬取向,变形时无法同步滑移,应力会在软硬取向界面集中。由图6h、6k可知,红绿黄混杂,大块板条晶粒呈现高因子红黄色,板条间界面为低因子蓝绿色;取向分区性极强,软硬取向晶粒交错分

布;高施密特因子晶粒占比略低于WM, $0.3\sim 0.5$ 区间分布更平缓;粗大板条贝氏体晶粒塑性各向异性极强,平行板条方向易滑移、垂直板条方向滑移受阻。由图6i、6l可知,热影响区为红、黄、绿色均匀弥散分布,无连续大片硬取向蓝色区域,晶粒取向搭配均衡;分布形态与FZ接近,但高、低因子晶粒过渡更平缓;HAZ等轴细晶取向随机,软、硬取向晶粒均匀交错,塑性变形可全域协同分担,不会出现局部极端应力集中。

综上所述,FZ同时存在两大不利晶体学特征,KAM数值高,高密度GND位错堆积,晶格畸变严重,裂纹扩展驱动力大;施密特因子各向异性强,板条软硬取向分层,变形无法均匀释放,局部应力峰值急剧升高;二者叠加使熔合粗晶区韧脆转变温度上升,是EH40钢焊接接头的核心薄弱环节。

2.5 力学性能分析

2.5.1 显微硬度测试

焊接接头显微硬度测试结果如图7所示,其中图7a为距焊缝表面3 mm显微硬度曲线,图7b为距焊缝表面7 mm显微硬度曲线。横轴自外向内依次为BM→HAZ→WM,母材区硬度数值稳定在190~196 HV,波动极小;HAZ硬度呈现先升后降的梯度变化,可细分为三个子区域:靠近母材侧热影响区、热影响区、靠近熔合线热影响区。靠近母材侧热影响区,从母材向熔合线移动,硬度从195 HV平缓上

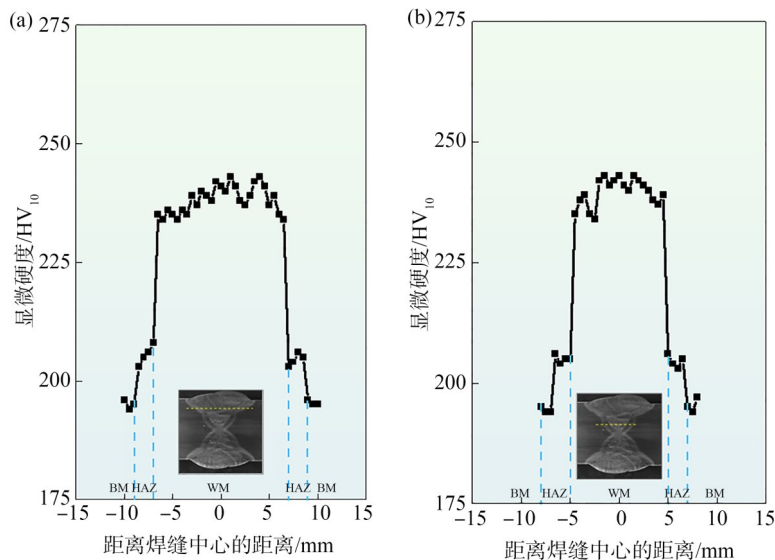


图7 焊接接头显微硬度测试

Fig. 7 XRD analysis of welded metal

升至 205~210 HV;仅部分母材铁素体发生回复,析出相粗化轻微,硬度小幅提升。热影响区硬度持续抬升,达到 210~230 HV 区间;部分组织奥氏体化后冷却细化,细晶强化使硬度升高,但混晶组织会造成硬度小幅波动。靠近熔合线热影响区硬度曲线陡升至峰值区间 232~244 HV,为全接头硬度较高区域;该区域峰值温度接近固相线,奥氏体晶粒剧烈粗化,冷却后生成粗大板条贝氏体,高密度位错+板条相界带来显著加工硬化/相变硬化,硬度最高;结合前文 EBSD 数据,此区域同时存在高 KAM 晶格畸变,是接头硬度峰值。焊缝区维持高硬度,整体稳定在 235~244 HV 之间,焊缝熔池凝固后形成大量针状铁素体,针状铁素体交错网络、细小亚结构带来高硬度^[12]。

2.5.2 拉伸性能测试

焊接接头拉伸性能测试结果如表 3 所示,焊接接头平均抗拉强度为 598.5 MPa,平均断后延伸率为 27%,断裂位置为母材。

焊接接头拉伸断口形貌如图 8 所示。由图 8 可知,断口分布尺寸细小、深浅均匀的等轴韧窝,韧窝内壁光滑,韧窝边界由细小晶粒撕裂形成,几乎无粗大夹杂物诱发的超大韧窝;典型微孔聚集型韧性

表 3 拉伸试验结果

Table 3 Tensile test result

试样编号	抗拉强度 R_m /MPa	断后伸长率 A /%	断裂位置
1	600	28	母材
2	597	26	母材
平均值	598	27	—

断裂,拉伸过程中材料内部均匀形核微孔、同步长大并聚合断裂,塑性变形能力稳定。

2.5.3 冲击性能测试

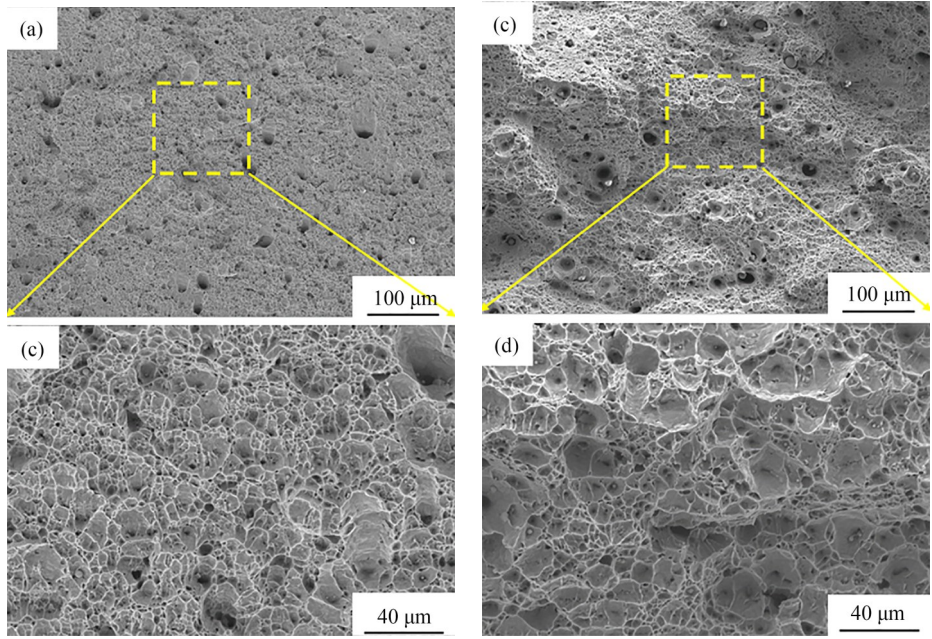
焊接接头-30℃冲击性能测试结果如表 4 所示,焊缝区-30℃冲击性能平均值为 73 J,熔合区-30℃冲击性能平均值为 65.5 J,热影响区-30℃冲击性能平均值为 99 J。

表 4 冲击试验结果

Table 4 Impact test results

取样位置	试验温度/℃	冲击吸收能量 KV_2 /J	平均值 KV_2 /J
焊缝区	-30	71.0, 76.0, 73.0	73.0
熔合区	-30	64.0, 65.0, 68.5	65.5
热影响区	-30	107.5, 92.0, 98.5	99.0

焊接接头冲击断口形貌如图 9 所示。焊缝区冲击韧性断口形貌如图 9a、9d 所示,断口整体起伏中等,分布着大小较为均一的微孔凹坑,无大面积平整解理面、无粗大撕裂棱或宏观裂纹,局部仅有少



(a)试样 1 拉伸断口低倍形貌(b)试样 2 拉伸断口低倍形貌;(c)试样 1 拉伸断口高倍形貌;(d)试样 2 拉伸断口高倍形貌

图 8 拉伸断口形貌

Fig. 8 Tensile fracture morphology diagram

量细小夹杂诱发的凹坑,宏观表现为韧性断裂特征。视野内以深浅中等、尺寸偏均匀的韧窝为主,韧窝边界清晰,存在少量撕裂棱衔接韧窝,属于典型微孔聚集型韧性断裂;低温下仍能通过微孔形核、长大、聚合吸收冲击能量,塑性变形能力较好。熔合区冲击韧性断口形貌如图9b、9e所示,断口粗糙度显著提升,出现大量凹凸不平的撕裂台阶,能观察到颗粒状夹杂脱落留下的大孔洞,局部有近似平整的解理小刻面,宏观断裂不均匀性最强。韧窝尺寸两极分化严重,既有少量浅小韧窝,也有大量宽大、浅平的撕裂韧窝,同时可见平直的解理刻面与粗大沿晶撕裂边界;粗大板条组织在低温下变形协调性差,易沿晶界发生脆性撕裂,冲击能量吸收能力最弱。热影响区冲击韧性断口形貌见图9c、9f,断口整体布满细密凹坑,起伏平缓均匀,几乎无大

尺寸孔洞与平整解理面,宏观塑性变形程度最充分。满视野是密集、细小、等轴且深度充足的韧窝,韧窝尺寸均匀性为三区最优,大角度晶界促进微孔均匀形核,低温下可以持续通过微孔扩展耗散冲击能,几乎无明显脆性解理特征,韧性表现最优^[13]。

上述结果可能是因为,HAZ冲击功最高低KAM低畸变和均匀随机施密特取向和超细等轴晶三重优势,-30℃低温下仍维持韧性断裂,冲击吸收功最大,韧脆转变温度最低。WM焊缝冲击功居中,整体高滑移协调能力、平均晶格畸变低;但局部粗大柱状晶硬取向高畸变带会造成冲击功离散下降,低温韧性略低于细晶HAZ。FZ熔合区冲击功最低,全域高KAM高密度位错和板条组织强各向异性、软硬取向分层^[14-15],-30℃极易发生解理脆性断裂,冲击吸收功大幅衰减。

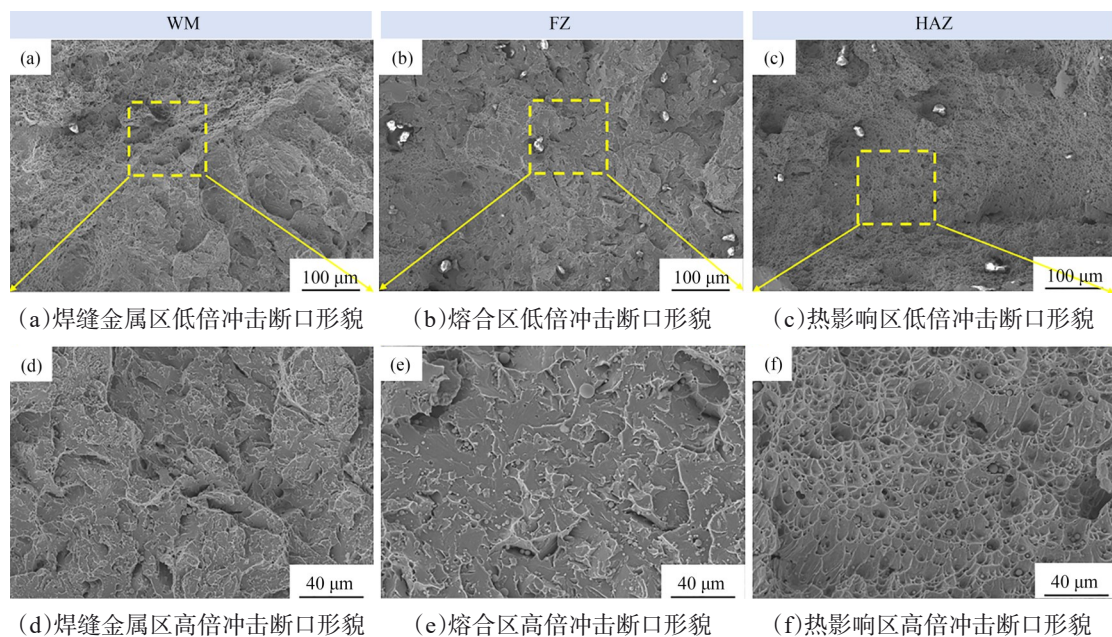


图9 冲击断口形貌

Fig. 9 Impact fracture morphology diagram

3 结论

(1)焊接工艺试验结果表明,摆动幅度上升熔深呈现降低趋势,熔宽略微降低;随摆动频率上升熔深持续线性降低,熔宽显著增加。采用摆动频率1.5 Hz和摆动幅度1.5 mm的焊接参数,可以获得更优良的宽深比,同时实现无气孔、裂纹及未熔合的

良好焊接接头。

(2)焊缝区主要由针状铁素体和少量先共析铁素体的混合组织组成,呈现网状/块状分布。熔合区主要由针状铁素体和粗大的板条贝氏体等组成,组织极不均匀。正火区主要由铁素体、粗大的板条贝氏体和细小粒状贝氏体等组织组成。不完全正火区主要由细小的等轴铁素体组成。



(3)焊接接头的平均抗拉强度为598.5 MPa,焊后延伸率为27%,断裂位置为母材。在-30℃的条件下,焊缝区冲击性能平均值为73 J,熔合区冲击性能平均值为65.5 J,热影响区冲击性能平均值为99 J,呈现出熔合区<焊缝区<热影响区的趋势。

参考文献:

- [1] 刘芳芳,傅博,韩严法,等.基于ABAQUS的单丝双面气电立焊数值模拟[J].电焊机,2024,54(6):45-52.
LIU F F, FU B, HAN Y F, et al. Numerical simulation study of single wire double-sided electro-gas welding based on ABAQUS [J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(6):45-52.
- [2] Wen T, Quan H, Zhang P, et al. A study on mechanical properties and microstructure of welded joints in EH40 steel with high heat input welding[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2026, 35 (1): 765-776.
- [3] Zhang G, Huang Y, Liu X, et al. Laser welding thermal analysis of 20mm-thick EH40 steel with gap through an equivalent thermal conductivity method[J]. Journal of Advanced Joining Processes, 2024, 10: 100266.
- [4] Peli S, Bonaldo F, Riva M. Welding of 20 mm thick EH40 steel by means of a single-pass hybrid laser-arc welding technique [J]. Procedia CIRP, 2024, 124: 394-398.
- [5] 武鹏博,徐锴,滕彬,等.AH36钢激光-埋弧复合焊接接头组织和性能[J].焊接学报,2026,47(5):102-111.
WU P B, XU K, TENG B, et al. Microstructure and properties of AH36 steel joints by laser-submerged arc hybrid welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2026, 47(5):102-111.
- [6] Wu R, Wu X, Hu S, et al. Investigation of laser-welded EH40 steel joint stress with different thicknesses based on a new heat source model [J]. Metals, 2025, 15 (2):188.
- [7] Wang L, Zhang G, Xu J, et al. Effect of collapse and hump on the mechanical behavior in high-power laser welding of 16-mm marine steel EH40[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120(3):2003-2013.
- [8] 肖晓明,彭云,姜宇航,等.EH40船板钢大热输入埋弧焊接头韧化机理研究[J].机械工程学报,2013,49(08):97-104.
- XIAO X M, PENG Y, LOU Y H, et al. Study on toughening mechanism of EH40 ship plate steel submerged arc welded joint with large heat input [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(08):97-104.
- [9] Liang Z, Xu T, Wu L, et al. Effect of Ni content on the microstructure and mechanical properties of weld metal for keyhole TIG welded EH40 steel: grain refinement and toughness enhancement[J]. Metallography, Microstructure, and Analysis, 2025, 14(2):369-387.
- [10] 胡奉雅,韩严法,傅博,等.EH40船板钢的弯曲焊丝窄间隙MAG焊工艺研究[J].上海金属,2018,40(4):25-28.
HU F Y, HAN Y F, FU B, et al. Study on narrow gap MAG welding process of bending wire for EH40 ship plate steel[J]. Shanghai Metals, 2018, 40(4):25-28.
- [11] Choi K S, Lee S H, Chung W J, et al. Study of brittle crack propagation welding for EH40 steel plate in ship-building steel [J]. Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 2019, 18(5):9-16.
- [12] 孙震,黄坚,张宏,等.微合金化EH40船用钢板大热输入焊接接头的组织与力学性能[J].焊接学报,2008(3):41-44.
SUN Z, HUANG J, ZHANG H, et al. Microstructures and mechanical properties of joints of microalloyed EH40 ship steel plate with high heat-input welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008 (3):41-44.
- [13] Wu R, Huang Y, Xu J, et al. Stress and distortion of the 10 mm thick plate EH40 and 316L different butt joints in 10 kW laser welding [J]. Optics & Laser Technology, 2022, 152:108179.
- [14] Zhang P, Zhang J, Li B. Mechanical properties and microstructure transformation behavior for welded joints in ship plate steel with high-heat input welding [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31(2):944-952.
- [15] An G B, Park J S. Brittle crack arrestability of thick steel plate welds in large structure[J]. Metals and Materials International, 2011, 17(5):841-845.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

