

引文格式: 丁振, 邹吉鹏, 徐富家, 等. 0Cr13Ni5Mo 不锈钢窄间隙激光-TIG 复合焊工艺与力学性能[J]. 焊接学报, 2026, 47(5): 63 – 73. DING Zhen, ZOU Jipeng, XU Fujia, *et al.* Narrow-gap laser-TIG hybrid welding process and mechanical properties of 0Cr13Ni5Mo stainless steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2026, 47(5): 63 – 73.



0Cr13Ni5Mo 不锈钢窄间隙激光-TIG 复合焊 工艺与力学性能

丁振, 邹吉鹏, 徐富家, 张焱, 杨义成, 齐万利, 张云舒

(中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司, 哈尔滨, 150028)

摘要: 为解决冲击式水轮机转轮传统弧焊工艺焊缝金属冲击韧性不足、焊接效率低的问题, 提出了一种窄间隙激光-TIG 复合焊工艺方法, 通过单因素控制变量法研究工艺参数对窄间隙坡口焊缝成形质量的影响, 并对微观组织与力学性能进行分析. 结果表明, 当激光功率 3 000 W、焊接电流 320 A、焊接速度 0.2 m/min、送丝速度 5 m/min、摆动角度 10°和熔敷效率 2.7 kg/h, 焊缝成形良好无缺陷; 采用此优化焊接工艺参数, 在 50 mm 厚的超级马氏体不锈钢模拟件上实现了高质量焊接; 焊缝不同区域因热循环差异呈现不同的组织特征, 其中中部区域经多次热循环和回火作用形成均匀细小等轴晶粒组织; 焊缝显微硬度在 303 ~ 320 HV10 之间波动; 屈服强度达到 937 MPa ± 58 MPa, 同时具有良好的塑性; 焊缝整体冲击韧性优异, 在 0 °C 下冲击吸收能量为 303 J ± 21 J. 综上所述, 窄间隙激光-TIG 复合焊技术能够显著提升转轮的焊接质量与效率, 为大型转轮的焊接作业提供了新的技术路径与实践指导.

创新点: (1) 采用激光-TIG 复合焊实现了 50 mm 厚 0Cr13Ni5Mo 超级马氏体不锈钢窄间隙焊接.

(2) 改善了 0Cr13Ni5Mo 不锈钢焊接接头强度与冲击韧性.

关键词: 水轮机转轮; 超级马氏体不锈钢; 激光-TIG 复合焊; 窄间隙焊接; 冲击韧性

中图分类号: TG 457.11 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20250424001

Narrow-gap laser-TIG hybrid welding process and mechanical properties of 0Cr13Ni5Mo stainless steel

DING Zhen, ZOU Jipeng, XU Fujia, ZHANG Yan, YANG Yicheng, QI Wanli, ZHANG Yunshu

(Harbin Welding Institute Limited Company, Harbin, 150028, China)

Abstract: To address the issues of insufficient impact toughness of the weld metal and low welding efficiency of the traditional arc welding in Pelton turbine runners, a narrow-gap laser-TIG hybrid welding process was proposed in this paper. The influence of process parameters on the weld formation quality in narrow-gap grooves was investigated through a single-factor controlled variable method, and the microstructure and mechanical properties were analyzed. The results indicate that the weld exhibits good formation without defects when the laser power is 3 000 W; the welding current is 320 A; the welding speed is 0.2 m/min; the wire feeding speed is 5 m/min; the oscillation angle is 10°, and the deposition efficiency is 2.7 kg/h. By using these optimized welding process parameters, high-quality welding is achieved on a 50 mm-thick super martensitic stainless steel mock-up. Different regions of the weld exhibit distinct microstructural characteristics due to the variations in thermal cycles, and the middle region forms a uniform and fine equiaxed grain structure after experiencing multiple thermal cycles and tempering effects. The microhardness of the weld fluctuates in the range of 303 ~ 320 HV10; the yield strength reaches 937 MPa ± 58 MPa, while retaining good plasticity. The

收稿日期: 2025 – 04 – 24; 录用日期: 2025 – 06 – 25

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2023YFB3408400); 国家自然科学基金资助项目 (52375308)

overall impact toughness of the weld is excellent, and the impact absorbed energy at 0 °C is $303 \text{ J} \pm 21 \text{ J}$. In summary, the narrow-gap laser-TIG hybrid welding technology can significantly improve the welding quality and efficiency of the runner, providing a new technical path and practical guidance for the welding operations of large-scale runners.

Highlights: (1) The narrow-gap welding of 50 mm-thick 0Cr13Ni5Mo super martensitic stainless steel was achieved by using the laser-TIG hybrid welding.

(2) The strength and impact toughness of the 0Cr13Ni5Mo stainless steel welded joints were improved.

Key words: turbine runner; super martensitic stainless steel; laser-TIG hybrid welding; narrow-gap welding; impact toughness

0 序言

超级马氏体不锈钢是以传统 Cr13 型马氏体不锈钢为基础, 通过降低 C 含量并添加 Ni 和 Mo 元素, 进行成分优化的新型不锈钢, 具有良好的焊接性、耐蚀性以及较高的强度与冲击韧性, 广泛应用于水轮机核心部件—转轮的制造^[1-2]. 随着高水头大容量冲击式水轮机组的快速发展, 转轮的尺寸持续增大^[3-4]. 对于大尺寸转轮, 受现有设备制造能力限制, 无法采用整体锻造工艺, 通常采用分体锻造 + 对焊的方式制造: 先分别加工轮毂与水斗锻件, 再装配焊接为整体. 因此, 焊接接头的冲击韧性直接决定转轮在交变冲击载荷下的服役性能, 进而影响锻焊结构转轮的运行寿命^[5-8].

目前转轮焊接多采用大角度坡口手工 MAG 焊, 焊接效率较低, 且焊接接头的冲击韧性普遍低于母材, 接头性能的可靠性仍有待进一步提升^[9-10]. 焦帅杰等人^[11]研究了 0Cr13Ni5Mo 马氏体不锈钢 MAG 立向上焊焊接工艺, 回火热处理后熔敷金属的冲击吸收能量达到 120 J, 优于平焊位置, 但提升效果有限; 杜兵等人^[12]研究了不同焊接方法对超级马氏体不锈钢焊缝冲击韧性的影响, 结果表明, 熔敷金属中 C 和 O 含量越低冲击韧性越高, TIG 焊中两种元素含量均处于最低水平, 冲击韧性值显著优于激光-MIG 焊、激光-MAG 焊与 MAG 焊, 但熔敷效率相对较低, 仅适用于关键位置焊接; 周鑫等人^[13]采用四钨极耦合电弧双丝增材制造技术制备 0Cr13Ni5Mo 沉积件, 通过四钨极耦合电弧实现能量耦合与原位热处理的协同作用, 使沉积件的冲击吸收能量达到 208 J, 但此方法只能用于转轮的焊接修复; SHEIDA 等人^[14-15]利用电子束焊接低碳马氏体不锈钢, 相比于母材, 拉伸强度与冲击吸收能量都得到提升, 但是此种方法需在真空中进行, 当前不适用大尺寸构件于实际焊接生产. 因此, 亟需探索新的焊接方法在既能保证转轮焊接的适用性

与焊接效率的同时, 又能显著提高转轮焊接接头冲击韧性.

激光-TIG 复合焊技术兼具激光和 TIG 电弧热源的优点, 具有低热输入、焊接速度快、高工艺适应性和宽工艺参数等优点, 构件焊缝成形美观, 显微组织致密, 力学性能优异^[16-17]. 窄间隙焊接采用小角度坡口, 可有效减少焊接道次与填充金属量, 降低焊接热输入, 从而减小焊后接头残余应力及变形程度, 提高生产效率、降低能耗与成本, 是大尺寸构件焊接的发展趋势^[18-19]. 然而, 目前将两种技术结合焊接超级马氏体不锈钢相关研究却鲜有报道.

文中采用激光-TIG 复合焊技术对 0Cr13Ni5Mo 马氏体不锈钢进行窄间隙焊接, 系统分析各工艺参数对焊缝表面形貌以及截面形状尺寸的影响, 优化得到焊缝外形美观, 内部无明显缺陷的工艺参数. 在此基础上完成 50 mm 厚超级马氏体不锈钢窄间隙坡口的填充焊接, 并对焊缝微观组织与力学性能开展研究与分析, 为冲击式转轮窄间隙焊接工程化应用提供新的焊接技术指导.

1 试验方法

试验所用焊接母材为调质态 0Cr13Ni5Mo 马氏体不锈钢, 显微组织为回火马氏体和少量逆奥氏体, 焊丝为直径 1.2 mm 的 HS13/5L(相当于 ER410NiMo 焊丝), 化学成分见表 1. 焊接试板尺寸分别为 $300 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 和 $100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$, 后者 15 mm 厚的试板用于激光-TIG 复合窄间隙焊接工艺参数优化试验. 窄间隙试板坡口底部半径为 7 mm, 钝边 5 mm, 坡口角度 2°, 焊接前用无水乙醇清洗表面, 去除杂质与油污.

如图 1(a) 所示, 焊接试验所使用激光设备为 IPG 公司 MPMC 20000 光纤激光器, 激光束波长为 1 070 nm, 最大输出功率为 20 kW. 采用的 TIG 弧焊电源为 EWM 公司 Tetrix 452 DC 型焊机, 最大

表 1 母材与焊丝化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of base metal and welding wire

材料	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Fe
0Cr13Ni5Mo	0.02	0.43	0.61	0.005 0	0.003 7	13.4	5.03	0.52	余量
HS13/5L焊丝	0.016	0.46	0.54	0.008 3	0.001 9	12.3	4.51	0.48	余量

电流 500 A. 焊丝、激光和钨极相对位置如图 1(b) 所示, 激光束方向垂直于焊缝, 离焦量为 0 mm, 钨极与激光之间间距为 5 mm, 钨极与激光束的夹角为 30°, 送丝管与激光束之间夹角为 60°, 保护气体使用 99. 99% 的高纯度氩气, 流量为 25 L/min, 钨极按照预设角度与速度左右摆动.

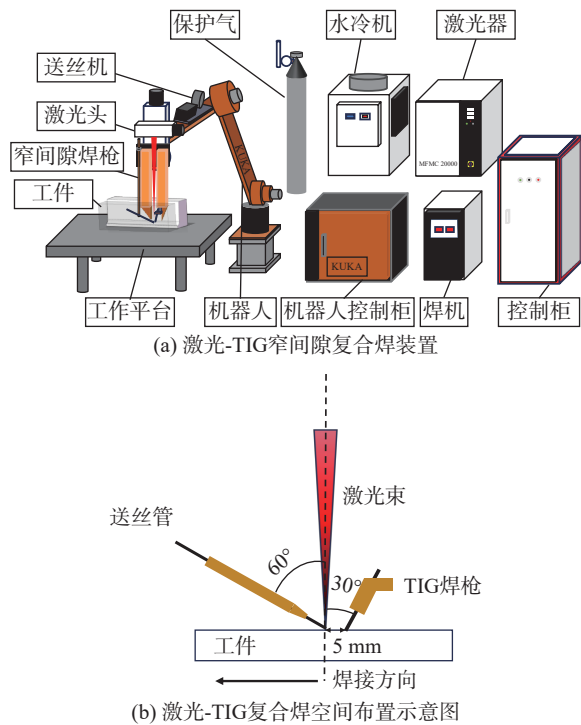


图 1 激光-TIG 窄间隙复合焊工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser-TIG narrow-gap hybrid welding process. (a) laser-TIG narrow-gap hybrid welding device; (b) spatial layout diagram of laser-TIG hybrid welding

焊接完成后的试件使用数控电火花线切割机进行金相及力学性能试样取样, 取样位置为焊缝底部、中部和顶部. 金相试样经过切割、研磨和抛光后, 用 5 g FeCl₃ + 15 mL 盐酸 + 85 mL 水试剂腐蚀. 通过金相显微镜 (OM) 观察焊缝的横截面形态, 并测量焊缝横截面形状参数焊缝熔宽 W 、焊缝熔深 H 与表面凹度 D , 窄间隙焊缝成形系数定义为 W/H , 如图 2 所示. 硬度测试根据国家标准 GB/T 2654 《焊接接头硬度试验方法》, 采用 HVS-50 型数显维氏硬度仪进行测试, 加载载荷 10 kgf, 停留时间 15 s.

拉伸性能按照 GB/T228. 1—2010 《金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法》标准进行取样. 焊缝接头冲击试验按照国家标准 GB/T 2650—2022 《焊接接头冲击试验方法》在 0 °C 下进行, 夏比 V 形缺口冲击试样尺寸为 55 mm × 10 mm × 10 mm, 缺口位于焊缝中心, 缺口方向为熔敷金属厚度方向. 拉伸及冲击试件断口采用蔡司 EVO18 型扫描电子显微镜 (SEM) 进行观察.

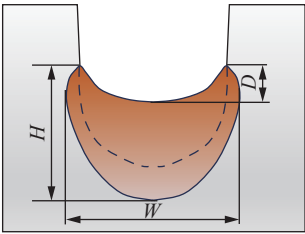


图 2 焊缝横截面形状参数示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the shape parameters of the weld cross-section

2 试验结果与分析

2.1 焊接工艺对焊缝成形的影响

焊缝单层单道的成形质量直接决定整个窄间隙截面坡口形貌特征, 激光功率、焊接电流、焊接速度、摆动角度及送丝速度等参数均对单道填充层宏观形貌产生显著影响. 为保证熔丝效率以及良好的热输入, 结合前期激光熔丝试验, 选定激光功率为 3 000 W, 采用单因素控制变量法, 分析工艺参数对窄间隙单道填充层成形的影响规律, 量化研究其与焊缝几何特征之间的映射关系, 为优化窄间隙焊工艺提供数据支撑. 焊接试验后得到焊缝表面成形以及横截面形貌, 中心凸起的焊缝定义为凸焊缝, 表面呈凹形面的焊缝为凹焊缝, 较大的熔宽与较浅的熔深能够促进熔池向两侧均匀铺展, 改善焊缝侧壁与根部的熔合效果, 而凹形焊缝形貌可以有效避免层间未熔合, 如图 3 所示. 因此, 具备较大的焊缝成形系数并保持一定的凹度, 对焊缝成形更加有利.

图 4 为固定激光功率 3 000 W、焊接速度 0.2 m/min、送丝速度 4 m/min 和摆动角度 10°时,

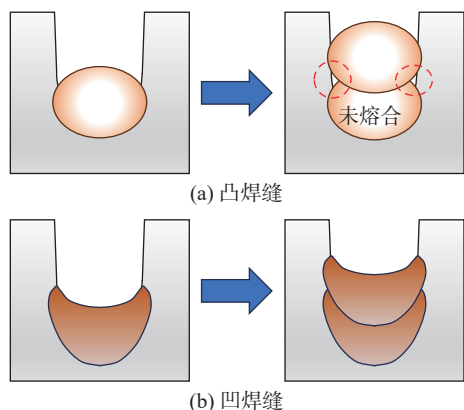


图 3 焊缝形貌分类

Fig. 3 Classification of weld morphology. (a) convex weld; (b) concave weld

不同焊接电流 (160 ~ 320 A) 下的焊缝成形特征. 当焊接电流为 160 A 时, 焊缝形貌为凸焊缝, 根部与侧壁未充分熔合, 焊缝宽度较窄、表面鱼鳞纹粗糙起皱, 成形质量较差; 电流升至 200 A, 焊缝表面凸起程度有所降低, 侧壁未熔合问题仍存在; 当电流处于 240 ~ 320 A 区间, 焊缝形貌得到改善, 表面波纹细腻且截面为凹焊缝, 电流 320 A 时, 焊缝表面最为光滑平整.

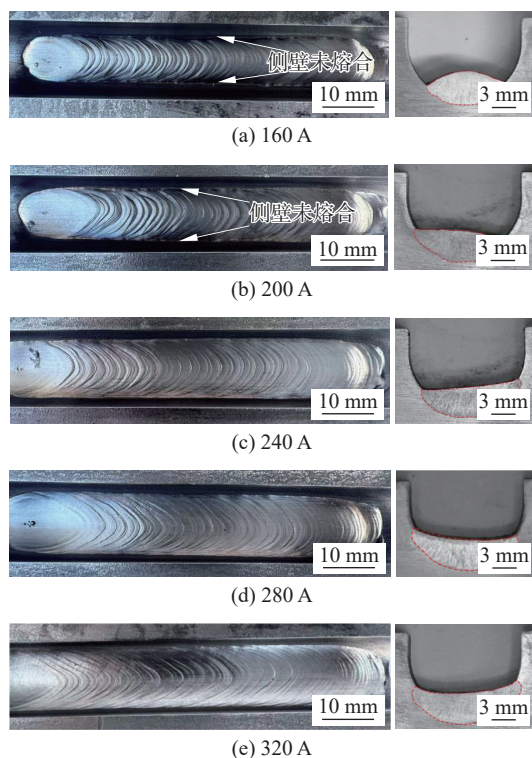


图 4 不同焊接电流焊缝表面成形及截面形貌

Fig. 4 Surface formation and cross-sectional morphology of welds under different welding currents. (a) 160 A; (b) 200 A; (c) 240 A; (d) 280 A; (e) 320 A

图 5 为焊接电流对焊缝截面尺寸及成形系数的影响. 随着电流逐渐增大, 复合能场热量增加, 熔

池横向扩展能力增强, 熔宽显著扩大; 电弧穿透力与能量吸收效率提升使焊缝熔深稳定增加; 表面凹度从凝固收缩主导的中心凸起, 逐渐过渡为热输入与表面张力驱动的凹陷加深.

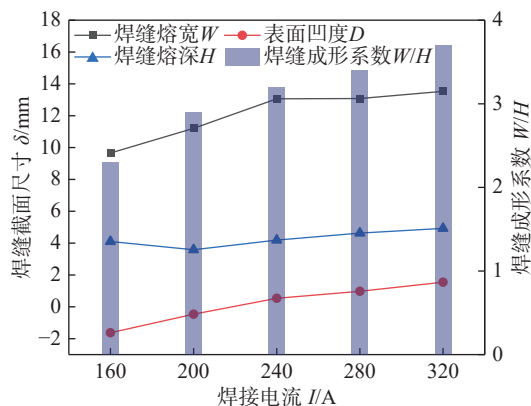


图 5 焊接电流对焊缝截面尺寸及成形系数的影响

Fig. 5 Influence of welding current on the cross-sectional dimensions and forming coefficient of welds

综上, 电流在 280 A ~ 320 A 时, 焊缝成形系数较高, 既保障窄间隙侧壁充分润湿, 又实现稳定熔透深度, 满足高质量焊接的成形要求.

图 6 为固定激光功率 3 000 W、焊接电流 320 A、送丝速度 4 m/min 和摆动角度 10°, 不同焊接速度 (0.1 ~ 0.5 m/min) 下的焊缝成形特征. 随着焊接速度不断增大, 焊缝横截面积逐渐减小, 焊接速度 0.1 ~ 0.2 m/min 时, 焊缝成形良好、填充饱满; 当焊接速度大于 0.3 m/min 时, 鱼鳞纹间距增大、外观呈波浪形, 由于焊接速度加快, 单位长度内填充金属量减少, 钨极在焊缝两侧停留时间缩短, 致使侧壁热输入不足, 母材边缘无法充分润湿形成咬边缺陷.

图 7 为焊接速度对焊缝截面尺寸及成形系数的影响, 低速焊接时, 热输入较大使熔池充分扩展, 熔宽大、厚度均匀且凹陷适中; 高速焊接时, 尽管成形系数较高, 但单位时间内热输入骤降, 熔池凝固加快, 导致熔宽收缩、凹陷趋平, 熔透深度与侧壁润湿性显著下降. 综合成形质量与热输入匹配性, 低速区间 (0.1 ~ 0.2 m/min) 通过维持熔池热动态平衡, 既能保证窄间隙焊缝的饱满填充与合理凹陷, 又可避免咬边缺陷, 满足成形质量要求.

图 8 为固定激光功率 3 000 W、焊接速度 0.2 m/min 和送丝速度 4 m/min, 不同摆动角度 (0° ~ 13.3°) 焊缝成形特征. 摆动角度 0° ~ 10° 时, 焊缝表面成形良好, 角度越小鱼鳞纹越细密; 随着摆动角

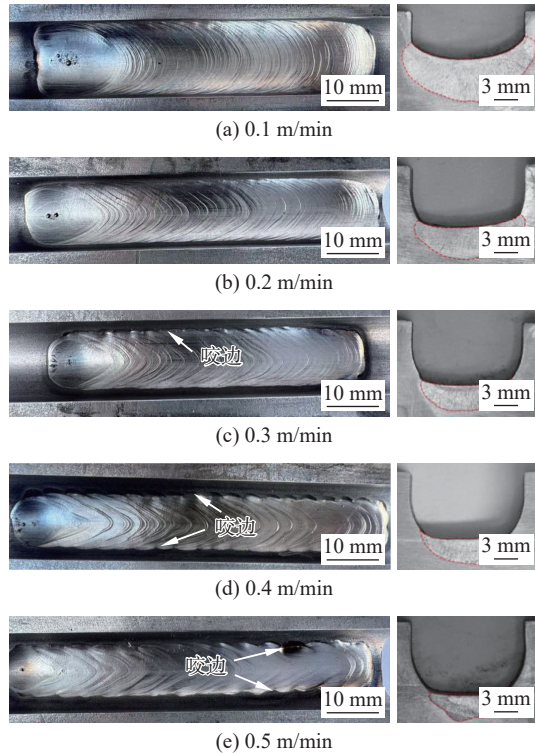


图6 不同焊接速度焊缝表面成形及截面形貌

Fig. 6 Surface formation and cross-sectional morphology of welds under different welding currents different welding speeds. (a) 0.1 m/min; (b) 0.2 m/min; (c) 0.3 m/min; (d) 0.4 m/min; (e) 0.5 m/min

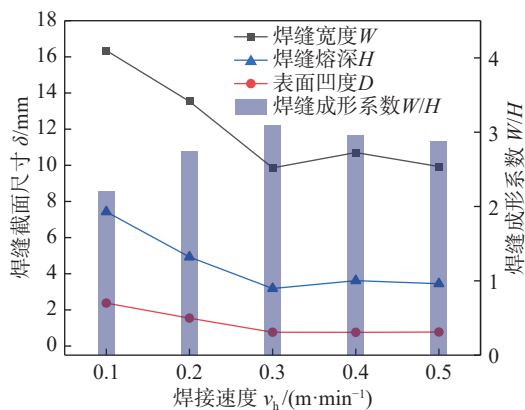


图7 焊接速度对焊缝截面尺寸及成形系数的影响

Fig. 7 Influence of welding speed on the cross-sectional dimensions and forming coefficient of welds

度增大,侧壁熔化金属增多,电弧力与表面张力作用使焊缝逐渐下凹;摆动角度 13.3° 时,焊缝表面形貌变差,侧壁出现咬边缺陷。

图9为摆动角度对焊缝截面尺寸及成形系数的影响,摆动角度影响呈三阶段特征:小角度($0^\circ \sim 6.6^\circ$)通过小幅摆动扩展熔宽;中等角度($6.6^\circ \sim 10^\circ$)因热输入分散导致熔宽轻微收缩,但电弧摆动增强熔池流动性,凹度加深改善侧壁润湿性;大角度(13.3°)虽扩大侧壁熔化量使熔宽增加,但电弧

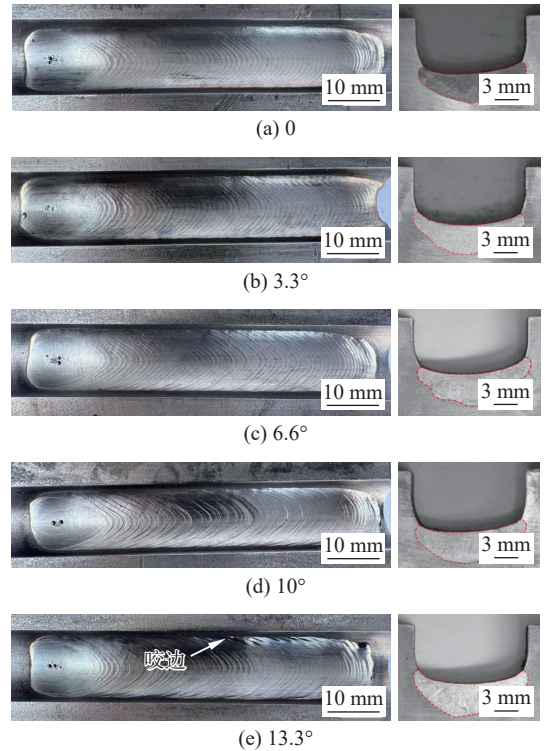


图8 不同摆动角度焊缝表面成形及截面形貌

Fig. 8 Surface formation and cross-sectional morphology of welds under different swing angles. (a) 0° ; (b) 3.3° ; (c) 6.6° ; (d) 10° ; (e) 13.3°

贴近侧壁易引发熔池过度波动,而产生咬边缺陷。综合熔宽控制、凹度需求及工艺稳定性,中等摆动角度区间($6.6^\circ \sim 10^\circ$),焊缝成形系数较稳定,可以实现窄间隙焊缝的优质成形。

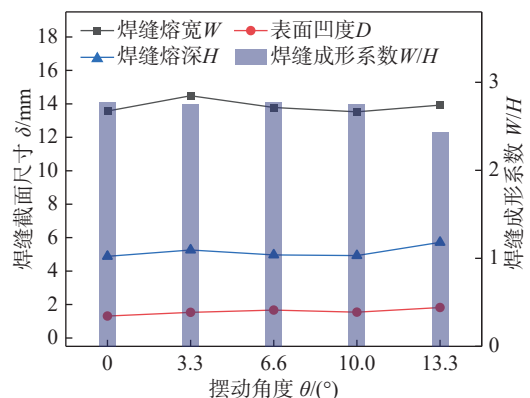


图9 摆动角度对焊缝截面尺寸及成形系数的影响

Fig. 9 Influence of swing angle on weld cross-sectional dimensions and forming coefficient

图10为固定激光功率3000 W、焊接电流320 A、焊接速度0.2 m/min和摆动角度 10° ,不同送丝速度(3~7 m/min)的焊缝成形特征。当送丝速度小于3.5 m/min时,因送丝量较少,焊缝熔宽较窄;送丝速度4~5 m/min时,熔敷量增加,焊缝表面波纹细腻平滑;当送丝速度在5.5~7 m/min区间

时,成形质量开始变差,6.5 m/min 时形成带尖角的凸焊缝,7 m/min 时复合能场热量不足以使焊丝熔化成形。

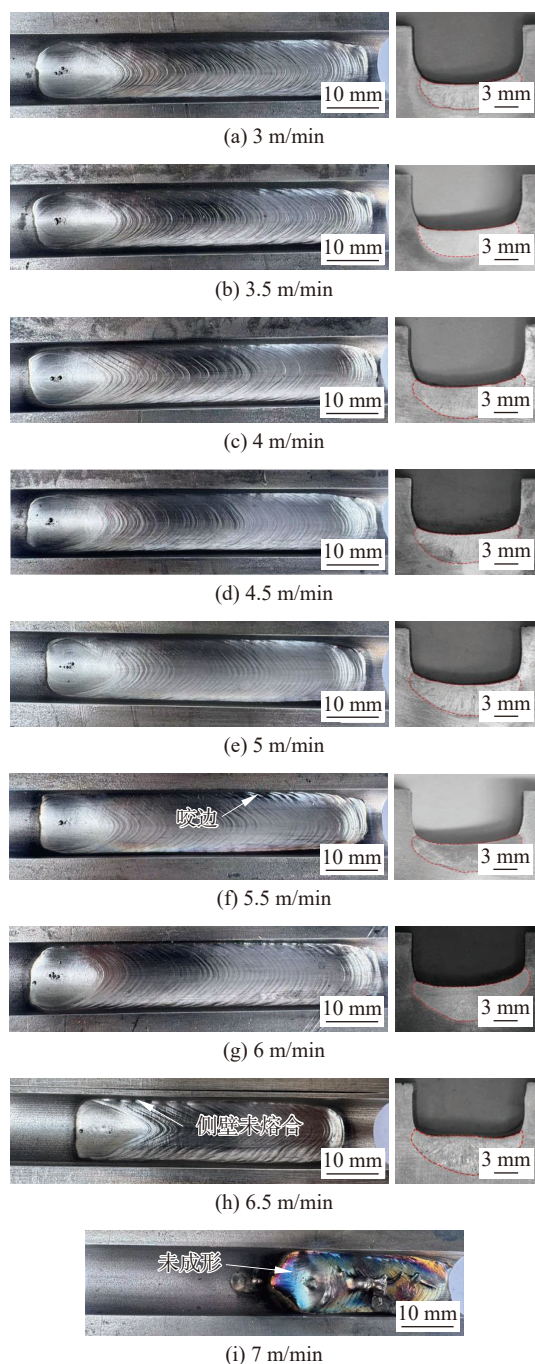


图 10 不同送丝速度下焊缝表面成形及截面形貌

Fig. 10 Surface forming and cross-sectional morphology of the weld seam under different wire feeding speeds. (a) 3 m/min; (b) 3.5 m/min; (c) 4 m/min; (d) 4.5 m/min; (e) 5 m/min; (f) 5.5 m/min; (g) 6 m/min; (h) 6.5 m/min; (i) 7 m/min

图 11 为送丝速度对焊缝截面尺寸及成形系数的影响。低速时填充金属增加促使熔池横向扩展,熔宽显著增大;中速区间熔敷效率与熔池流动性平衡,熔宽稳定增长且表面均匀;高送丝速度下,过量

焊丝堆积导致熔池边缘凝固过快,横向扩展受限,母材熔透不足无法稳定成形。综合焊缝成形系数及表面凹度,送丝速度 4~5 m/min 可兼顾成形质量与熔敷效率,满足窄间隙焊接工艺需求。

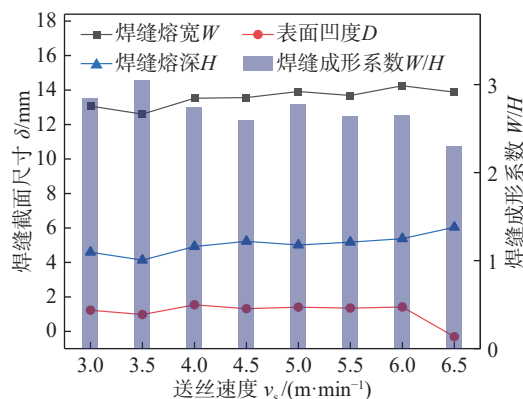


图 11 送丝速度对焊缝截面尺寸及成形系数的影响

Fig. 11 Influence of wire feeding speed on weld cross-sectional dimensions and forming coefficient

通过上述单因素变量试验,找到了一组能够得到良好焊缝成形的优化工艺参数,即激光功率 3 000 W、焊接电流 320 A、焊接速度 0.2 m/min、送丝速度 5 m/min、摆动角度 10°和熔敷效率 2.7 kg/h,通过 X 射线检测,未检出尺寸大于 0.5 mm 的气孔、裂纹等明显缺陷,如图 12 所示。为了验证上述参数效果,对 50 mm 厚的马氏体不锈钢进行了窄间隙填充焊接,预热温度大于 80 °C,层间温度不高于 150 °C,得到的焊缝内部无裂纹、气孔、侧壁未熔合等缺陷,焊缝成形美观,截面对称性良好,通过计算坡口截面积与传统 V 形坡口相比,填充金属量降低近 60%,如图 13 所示。



图 12 优化参数单道焊缝 X 射线照片

Fig. 12 Optimize the parameters for the X-ray photograph of a single-pass weld seam

2.2 焊缝微观组织

在整个窄间隙坡口填充过程中,后焊焊道对先焊焊道的焊接热循环作用,相当于快速原位热处理。焊缝金属经历多次冷却与凝固,当层道间热循环峰值温度处于 A_{c1} 点以上,焊件中会形成高温相奥氏体和 δ 铁素体,在随后的冷却过程中转变为淬火马氏体组织^[14]。当焊缝层间温度高于马氏体转变终点温度 M_s 时,后焊焊道的热循环会对先焊焊道回火作用,在此作用下,先焊焊道中的淬火马氏体

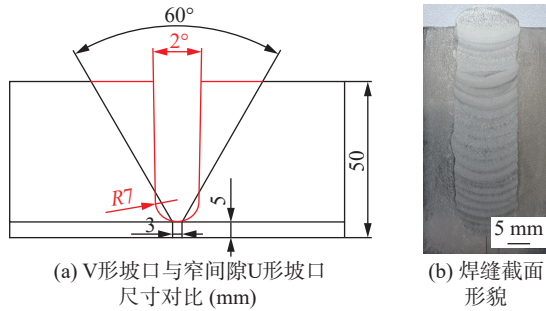


图 13 50 mm 厚窄间隙坡口填充

Fig. 13 Filling of 50 mm-thick narrow gap groove. (a) comparison of dimensions between V - shaped groove and narrow - gap U - shaped groove; (b) weld cross-sectional morphology

组织会发生转变,形成回火马氏体组织,并在马氏体板条间弥散分布着逆变奥氏体组织^[20]。

底部、中部和顶部位置经历了不同的热循环,微观组织有所差异。图 14 为焊缝底部微观组织,前几层焊道由于坡口母材底部散热的作用,温度梯度大,冷却速度快,熔合线下方为沿热流方向垂直生长的柱状晶形态,而熔合线上方区域组织,由于随后的填充焊道的热作用产生自回火使得组织变的相对均匀细小^[21]。

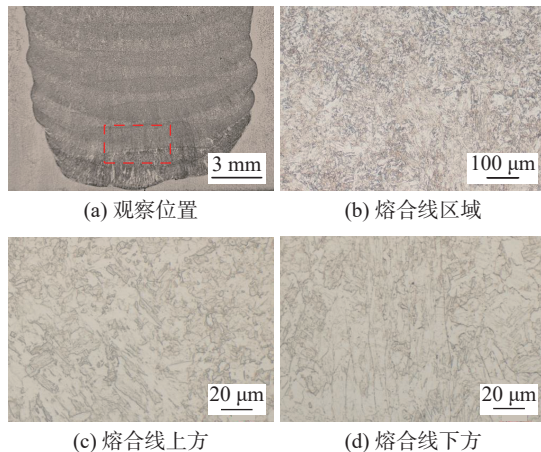


图 14 焊缝底部微观组织

Fig. 14 Microstructure of the bottom of the weld seam. (a) observation position; (b) fusion line area; (c) above the fusion line; (d) below the fusion line

图 15 为焊缝中部微观组织,占整个焊缝 90%,熔合线区域均展现出尺寸极其细小的等轴晶,在顶部与底部双重热量的作用下,使得这种类似高温回火处理效果更加显著,晶粒尺寸显著细化,已几乎观察不到马氏体板条位向,该区域经历了多次完整的原位高温回火热处理过程^[22]。

图 16 为焊缝顶部微观组织,熔合线区域上方为粗晶区柱状晶淬火马氏体,下方区域为等轴晶的

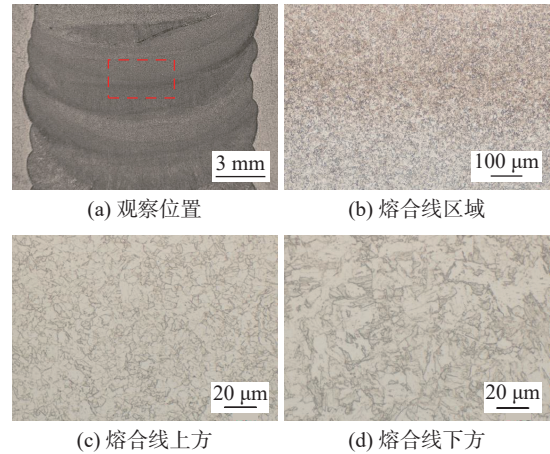


图 15 焊缝中部微观组织

Fig. 15 Microstructure of the middle part of the weld seam. (a) observation position; (b) fusion line area; (c) above the fusion line; (d) below the fusion line

组织形貌,在激光-TIG 复合热源的作用下,顶部区域的热积累也随之增多,温度梯度比底部和中部小,冷却速度较慢,过冷度小导致晶粒沿着热流方向垂直长大形成粗大柱状晶,并且仍保持一定的马氏体板条位向与形貌^[23]。

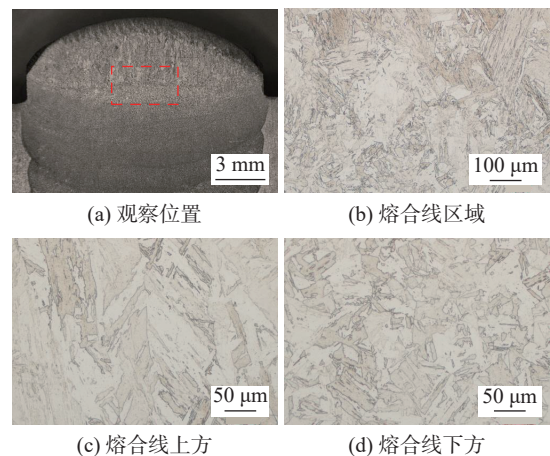


图 16 焊缝顶部微观组织

Fig. 16 Microstructure of the top part of the weld seam. (a) observation position; (b) fusion line area; (c) above the fusion line; (d) below the fusion line

2.3 焊缝接头显微硬度

在焊缝截面上进行竖直与水平方向的显微硬度测量。图 17 为焊缝纵向硬度分布曲线,从图中可以看出,随着焊缝底部到顶部距离的增加,焊缝硬度在 303 ~ 320 HV10 之间波动呈下降趋势,这是由于焊接热循环中底部区域因快速冷却形成硬化区,随着焊接道次的增加,焊缝中心板条马氏体组织因为自回火而软化,硬度逐渐降低,顶部位置由于靠近表面冷却速度慢,晶粒粗大,硬度稍低于底部与

中部. 图 18 为焊缝横向硬度分布曲线, 不同位置硬度分布曲线走向相似, 呈现硬度由大到小依次为焊缝区、热影响区和母材的分布规律, 焊缝区两侧受到母材的激冷作用, 晶粒尺寸更加细小, 如图 19 所示, 因此焊缝区硬度随着中心距母材距离增大而逐渐升高。

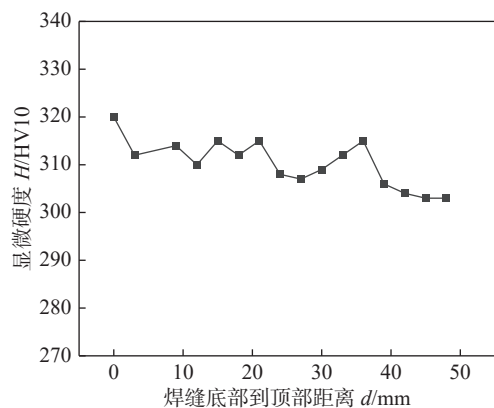


图 17 焊缝纵向硬度分布

Fig. 17 Hardness distribution along the longitudinal direction of the weld seam

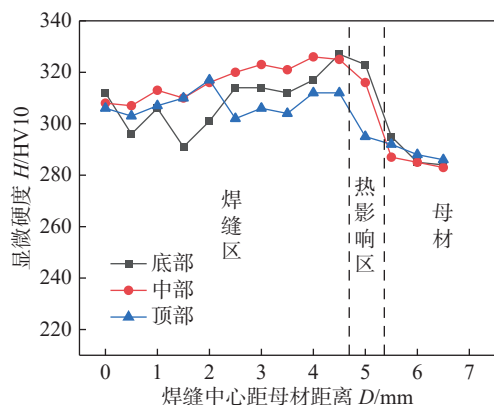


图 18 焊缝横向硬度分布

Fig. 18 Hardness distribution in the transverse direction of the weld seam

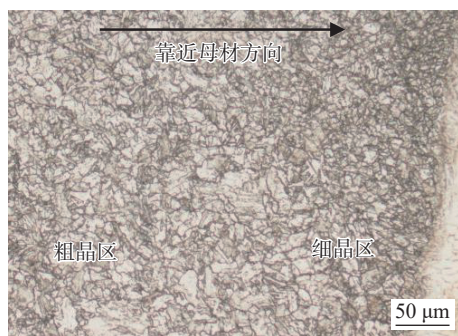


图 19 近母材侧组织

Fig. 19 Microstructure on the base metal side near the weld seam

2.4 焊缝熔敷金属拉伸性能

图 20 为焊缝熔敷金属室温下拉伸试验结果,

从焊缝底部到顶部焊缝抗拉强度呈下降趋势, 熔敷金属屈服强度平均值为 $937 \text{ MPa} \pm 58 \text{ MPa}$, 塑性指标表现为中部位置断后伸长率最高为 17.5%, 底部位置断面收缩率最高 81%。

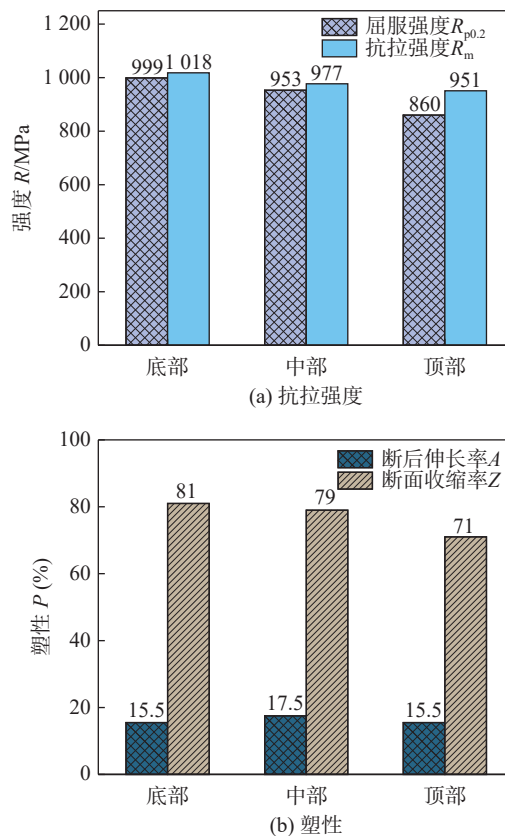


图 20 焊缝熔敷金属不同位置拉伸性能

Fig. 20 Tensile properties of welded deposited metal at different positions. (a) tensile strength; (b) plasticity

焊缝顶部区域冷却速率慢, 层间温度降至马氏体转变开始温度 M_s 以下. 在前一道次冷却过程中形成的淬火马氏体发生部分回火, 导致组织软化强度降低. 底部和中部区域的热循环更为稳定, 且冷却速率相对顶部更快, 使得层间温度高于 M_s 温度. 在此条件下, 材料发生马氏体相变, 形成了更为均匀的回火马氏体组织结构, 同时逆变奥氏体含量也有所增加. 此外, 当弥散在基体中的亚稳态奥氏体被诱导发生相变时, 转变应变的协调使周围基体的位错密度和内应力增加, 导致应变硬化, 这种转变产生的应变将导致材料塑性与韧性的提高^[24].

如图 21 所示, 拉伸试样断裂表面特征是典型的延展性断裂, 随着载荷的增加, 微孔隙的聚合发生扩大, 并发生较大的塑性变形, 形成大韧窝, 韧窝尺寸越大比例越多, 材料在受力的情况下, 其裂纹扩展的区域越少, 抵抗裂纹扩展的能力越强,

图 21(a) 与图 21(b) 中大尺寸韧窝占比更多,表现出更加优异的强度与塑性,而图 21(c) 中顶部位置由

于粗大柱状晶的存在韧窝相对平坦,性能指标均低于前两者。

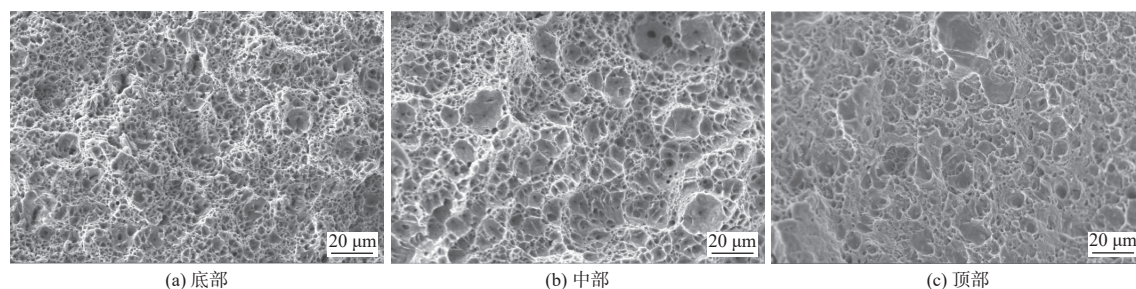


图 21 不同位置拉伸试样断口形貌

Fig. 21 Fracture morphologies of tensile specimens at different positions. (a) bottom of the weld seam; (b) middle of the weld seam (c) top of the weld seam

2.5 焊接接头冲击韧性

图 22(a) 为不同位置焊接接头 0 °C 条件下夏比 V 形缺口冲击试验测试值, 焊件整体冲击吸收能

量平均值 $303 \text{ J} \pm 21 \text{ J}$, 图 22(b) 为窄间隙激光-TIG 与其他焊接方法制备的焊接接头冲击性能对比^[11-15]。

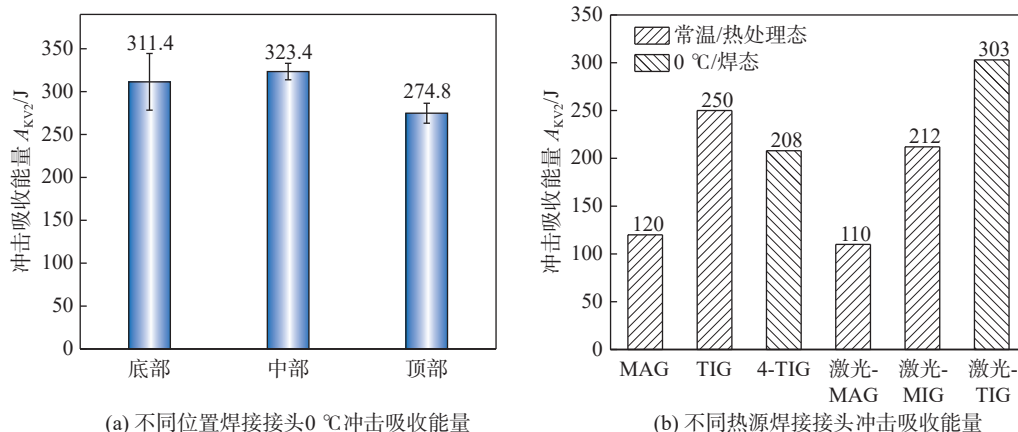


图 22 焊接接头冲击吸收能量

Fig. 22 Charpy impact energy of welded joint. (a) the Charpy impact energy at 0 °C of the welded joints at different positions; (b) the Charpy impact energy of welded joints with different heat sources

图 23 所示断口形貌均为韧性断裂, 中部位置试样断口扩展区撕裂型韧窝占大部与少部分等轴型韧窝, 表面凹凸不平, 撕裂型韧窝的存在表明试样经过切向的作用力, 撕裂型韧窝占比越大说明抵抗作用越明显, 韧性越优异。相比于中部, 底部试样

撕裂形韧窝比例略微有所下降, 而顶部试样断口为尺寸更加精细的等轴韧窝。除此之外, 在顶部与底部位置韧窝都观察到类球状夹杂物, 顶部相比底部位置夹杂物更多, EDS 分析结果如图 24 所示, 分析表明该圆形粒子主要为 Al 氧化物, 这种夹杂物的

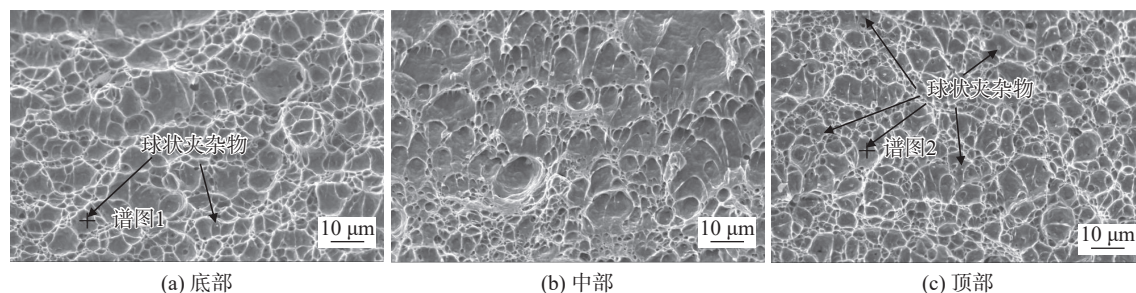


图 23 不同位置冲击试样断口形貌

Fig. 23 Fracture morphologies of impact specimens at different positions. (a) bottom of the weld seam; (b) middle of the weld seam; (c) top of the weld seam

存在会优先成为裂纹源削弱基体之间结合力,进而影响冲击韧性,这也是顶部冲击韧性相对较低的原因。

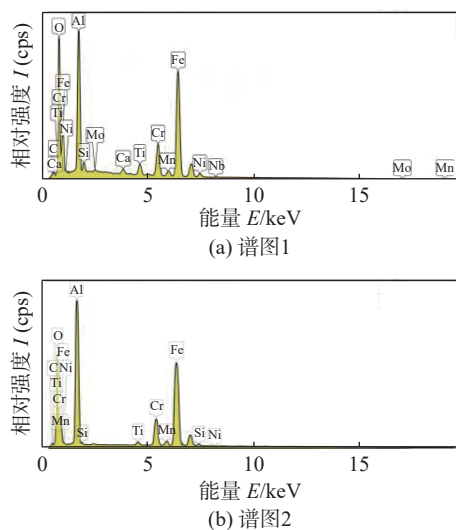


图 24 夹杂物 EDS 分析结果

Fig. 24 Results of EDS elemental analysis of inclusions. (a) spectrogram 1; (b) spectrogram 2

3 结论

(1) 采用激光-TIG 复合焊技术对超级马氏体不锈钢进行窄间隙焊接,通过单因素控制变量法研究工艺参数对窄间隙坡口焊缝成形质量的影响,并获得了高质量焊接工艺窗口,优化后的参数为激光功率 3 000 W、焊接电流 320 A、焊接速度 0.2 m/min、送丝速度 5 m/min、摆动角度 10°和熔敷效率 2.7 kg/h,在此基础上成功制备出无未熔合、裂纹、气孔等缺陷的 50 mm 厚窄间隙焊缝。

(2) 微观组织分析表明,焊缝组织主要为回火马氏体与逆变奥氏体,不同区域因热循环差异导致的组织分布有所区别,其中中部区域经历多次完整原位高温自回火,形成均匀细小的等轴晶组织。

(3) 显微硬度测试显示,焊缝硬度在 303 ~ 320 HV10 之间波动,不同位置硬度分布曲线走向相似,呈现硬度由大到小依次为焊缝区、热影响区和母材的分布规律。拉伸性能测试表明,焊缝屈服强度平均值达到 937 MPa ± 58 MPa。冲击韧性测试结果显示,窄间隙激光-TIG 复合焊均获得良好的韧性,冲击吸收能量平均值为 303 J ± 21 J,其中中部位置最优,顶部位置因少量夹杂物影响导致韧性稍低。

参考文献

[1] 李开颜. 热处理工艺对 00Cr13Ni5Mo 超级马氏体不锈钢组织

和性能的影响[D]. 太原: 中北大学, 2023.

LI Kaiyan. Influence of heat treatment on microstructure and properties of 00Cr13Ni5Mo super martensitic stainless[D]. Taiyuan: North University of China, 2023.

[2] LIU Peng, MA Jian, FANG Youtong, *et al.* Effect of repeated weld repairs on microstructure and mechanical properties of heat-affected zone in CA6NM stainless steel[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022(1): 4527917.

[3] 蔡爽, 杨彬, 张海库, 等. 500 MW 级冲击式水轮机设计制造可行性研究[J]. *大电机技术*, 2023(1): 53 - 59.

CAI Shuang, YANG Bin, ZHANG Haiku, *et al.* Feasibility study on design and manufacture of 500 MW pelton turbine[J]. *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*, 2023(1): 53 - 59.

[4] MÓNICA E, CARME V, DAVID V, *et al.* Dynamic response of pelton runners: Numerical and experimental analysis in prototypes[J]. *Renewable energy*, 2020, 157: 116 - 129.

[5] 谭晓霞. 大型冲击式转轮用国产 04Cr13Ni5Mo 马氏体不锈钢锻件研究现状[J]. *材料导报*, 2022, 36(S2): 422 - 425.

TAN Xiaoxia. Research status of domestic 04Cr13Ni5Mo martensitic stainless steel forgings for runner of large impact hydropower unit[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(S2): 422 - 425.

[6] 蒋坤臣, 袁真洪. 高水头大容量卧式冲击式水轮机的设计介绍[J]. *水电站机电技术*, 2018, 41(8): 1 - 3, 24.

JIANG Kunchen, YUAN Zhenhong. Introduction to the design of a horizontal impulse turbine with high head and large capacity[J]. *Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station*, 2018, 41(8): 1 - 3, 24.

[7] ESTEBAN F, NIXON R, JOSÉ A A, *et al.* Finite element analysis of the localized post-weld heat treatment of a Pelton runner[J]. *Materials Today Communications*, 2023, 36: 106795.

[8] MILAN M, BRANISLAV Đ, SIMON S, *et al.* Damage analysis and restoring of structural integrity of pelton runner after repair welding: Case study[J]. *Structural Integrity and Life*, 2024, 24(2): 217 - 221.

[9] 徐玉君, 王伟波, 杜兵, 等. 气体含量对马氏体不锈钢熔敷金属冲击性能的影响[J]. *焊接*, 2007(9): 34 - 36, 62.

XU Yujun, WANG Weibo, DU Bing, *et al.* Influence of gas content on the impact properties of deposited metal of martensitic stainless steel[J]. *Welding & Joining*, 2007(9): 34 - 36, 62.

[10] GAVRYK R, TSARYUK K, OSYPENKO G, *et al.* Technology of MIG welding of chromium steel of martensitic grade CA-6NM[J]. *Paton Welding Journal*, 2023, 5: 22 - 28.

[11] 焦帅杰, 王国佛, 贾玉力, 等. 超级马氏体不锈钢焊丝 MAG 熔敷金属冲击性能优化[J]. *焊接学报*, 2022, 43(3): 93 - 100.

JIAO Shuaijie, WANG Guofo, JIAYuli, *et al.* Impact performance optimization of supermartensitic stainless steel welding wire deposited metal by MAG welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2022, 43(3): 93 - 100.

[12] 杜兵, 孙凤莲, 徐玉君, 等. 焊接方法对超低碳马氏体不锈钢焊

- 丝熔敷金属冲击韧性的影响[J]. 焊接学报, 2014, 35(8): 1-4.
- DU Bing, SUN Fenglian, XU Yujun, *et al.* Effect of welding methods on impact toughness of ultra-low carbon martensitic stainless steel welding wire deposited metal[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(8): 1-4.
- [13] 周鑫, 梁晓梅, 王建昌, 等. 00Cr13Ni5Mo 不锈钢四钨极耦合电弧双丝增材制造工艺[J]. 焊接, 2024(5): 37-43.
- ZHOU Xin, LIANG Xiaomei, WANG Jianchang, *et al.* Quadruple-electrode gas tungsten coupling arc double-wire additive manufacturing process of 00Cr13Ni5Mo stainless steel[J]. Welding & Joining, 2024(5): 37-43.
- [14] SHEIDA S, PRITI W, JAVAD G, *et al.* Mechanical properties of electron beam welded joints in thick gage CA6NM stainless steel[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26(10): 1-13.
- [15] SHEIDA S, PRITI W, JEAN-BENOÎT L, *et al.* Through-thickness residual stresses, microstructure, and mechanical properties of electron beam-welded CA6NM martensitic stainless steel after postweld heat treatment[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020(1): 7194214.
- [16] YAN Jun, GAO Ming, ZENG Xiaoyan. Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by TIG, laser and laser-TIG hybrid welding[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2010, 48(4): 512-517.
- [17] HAN Hao, LIU Jiyan, REN Daxin, *et al.* Improving microstructure uniformity and mechanical properties of Al-Si coating 22MnB5 steel welded joints by pulsed laser-TIG hybrid welding[J]. Optics and Laser Technology, 2025, 186: 112673.
- [18] ZHAO Honglei, ZHANG Siyu, YU Xianglong, *et al.* Research status of insufficient sidewalls penetration in narrow gap TIG welding of thick metal plates[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 134(1): 39-56.
- [19] YU Jie, CAI Chuang, XIE Jia, *et al.* Weld formation, arc behavior, and droplet transfer in narrow-gap laser-arc hybrid welding of titanium alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 91: 44-52.
- [20] 焦帅杰, 贾玉力, 周宝金, 等. 超级马氏体不锈钢焊丝 MAG 焊熔敷金属微观组织和力学性能研究[J]. 电焊机, 2022, 52(11): 68-74.
- JIAO Shuaijie, JIA Yuli, ZHOU Baojin, *et al.* Microstructure and mechanical properties of the supermartensitic stainless steel welding wire deposited metal by MAG welding[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(11): 68-74.
- [21] YANG Xiaoliang, CHEN Xiaoxiao, LI Ming, *et al.* Porosity suppressing and grain refining of narrow-gap rotating laser-MIG hybrid welding of 5A06 aluminum alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68: 1100-1113.
- [22] 周鑫, 黄瑞生, 梁晓梅, 等. 00Cr13Ni5Mo 不锈钢四钨极电弧增材制造原位热处理组织与力学性能分析[J]. 焊接学报, 2024, 45(12): 1-8.
- ZHOU Xin, HUANG Ruisheng, LIANG Xiaomei, *et al.* Analysis of in-situ heat treatment on microstructure and mechanical properties by quadruple-electrode gas tungsten arc additive manufacturing of 00Cr13Ni5Mo stainless steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(12): 1-8.
- [23] 王新日. 超级马氏体不锈钢的 CMT 电弧增材制造工艺及组织性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2022.
- WANG Xinri. Process, microstructure and properties of wire arc additive manufactured supermartensitic stainless steel based on cold metal transfer welding [D]. Shenyang: Northeastern University, 2022.
- [24] TIAN Wanping, JIN Zhiqi, XIE Guangming, *et al.* Wire-arc directed energy deposition super martensitic stainless steel with excellent strength and plasticity[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 103: 11-22.

作者简介: 丁振, 硕士; 主要从事窄间隙激光-电弧复合焊接科研工作; Email: zhending@hrbeu.edu.cn.

徐富家 (通信作者), 博士, 正高级工程师; 主要从事激光及激光电弧复合、焊接和激光装备研制等相关的工作; Email: xufujia_hit@126.com.

(编辑: 郑红)