

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.06.04

# 304 不锈钢局部干法水下激光焊接头成形与性能

徐磊<sup>1</sup>, 吴梁禄<sup>1</sup>, 尹玉环<sup>1</sup>, 包云峰<sup>1</sup>, 王卫东<sup>1</sup>, 郟默繁<sup>1</sup>, 孙清洁<sup>2,3</sup>

1. 上海航天设备制造总厂有限公司, 上海 200245
2. 哈尔滨工业大学 材料结构精密焊接与连接全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001
3. 哈尔滨工业大学(威海) 山东省特种焊接技术重点实验室, 山东 威海 264209

**摘要:** 针对水下焊接环境中水介质对焊缝质量的不利影响, 采用局部干法对 4 mm 厚 304 奥氏体不锈钢进行水下激光焊接试验。在 0~50 mm 水深范围内验证了双层排水罩的排水稳定性, 系统研究了焊速 (0.8~1.2 m/min) 对焊缝成形与气孔率的影响规律, 并对比了水下与常规环境焊缝微观组织及力学性能的差异。结果表明, 局部干法可有效隔离焊缝正面水环境, 但背部水环境促进氢卷入及匙孔失稳; 气孔率随焊速呈先降后升趋势, 1.0 m/min 时最低为 1.4%, 1.2 m/min 时以冶金型氢气孔为主达 7.8%, 0.8 m/min 时匙孔失稳导致工艺型气孔回升至 5.9%。背部水环境的强化散热使水下焊缝组织显著细化, 并抑制高热输入下的凹陷与驼峰缺陷。优选参数 (功率 3 800 W、焊速 1.0 m/min、离焦量 +3 mm) 下水下焊缝抗拉强度 668 MPa、屈服强度 367 MPa, 拉伸与弯曲性能略优于同材质常规焊缝, 少量小尺寸气孔及背部轻微成形不均匀对力学性能影响可忽略。

**关键词:** 局部干法; 水下激光焊; 气孔率; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)06-0037-08

## Forming and Properties of 304 Stainless Steel Joints by Local Dry Underwater Laser Welding

XU Lei<sup>1</sup>, WU Lianglu<sup>1</sup>, YIN Yuhuan<sup>1</sup>, BAO Yunfeng<sup>1</sup>, WANG Weidong<sup>1</sup>, QIE Mofan<sup>1</sup>, SUN Qingjie<sup>2,3</sup>

1. Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer Co., Ltd., 200245 Shanghai, China
2. State Key Laboratory of Precision Welding & Joining of Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China
3. Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology, Harbin Institute of Technology at Weihai, 264209 Weihai, China

**Abstract:** To address the adverse effects of water environment on weld quality, underwater laser welding of 4 mm thick 304 austenitic stainless steel was conducted using a local dry method. The drainage stability of a double-layer drainage hood was verified within 0-50 mm water depth. The influence of welding speed (0.8-1.2 m/min) on weld formation and porosity was systematically investigated, and the differences in microstructure and mechanical properties between underwater and conventional welds were compared. The results show that the local dry method effectively isolates the weld top surface from water, but the backside water environment promotes hydrogen entrapment and reduces keyhole stability. The porosity exhibits a decrease-then-increase trend with welding speed: the minimum of 1.4% is achieved at 1.0 m/min, metallurgical hydrogen porosity dominates at 1.2 m/min (7.8%), and process-induced porosity due to keyhole instability rises to 5.9% at 0.8 m/min. Enhanced heat dissipation from the backside water environment significantly refines the underwater weld microstructure and mitigates depression and hump defects under high heat input. Under optimal parameters (laser power 3800 W, welding speed 1.0 m/min, defocusing distance +3 mm), the underwater weld exhibits a tensile strength of 668 MPa and yield strength of 367 MPa, with tensile and bending properties slightly superior to conventional welds. Small-scale pores and minor backside inhomogeneity have negligible effects on mechanical performance.

**Keywords:** local dry method; underwater laser welding; porosity; microstructure; mechanical property

收稿日期: 2025-05-08 修回日期: 2025-08-15

作者简介: 徐磊 (1999—), 硕士, 主要从事特种焊接相关工作。E-mail: xlpayment2022@163.com。

引用格式:徐磊,吴梁禄,尹玉环,等. 304不锈钢局部干法水下激光焊接头成形与性能[J]. 电焊机, 2026, 56(6): 37-44.

Citation: XU Lei, WU Lianglu, YIN Yuhuan, et al. Forming and Properties of 304 Stainless Steel Joints by Local Dry Underwater Laser Welding[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(6): 37-44.

## 0 引言

水下焊接技术作为深海装备制造与修复的核心工艺之一<sup>[1]</sup>,其开发是基于海洋工程装备制造与维护需求,海底管道修复、核反应堆压力容器维护及海上平台结构件连接等领域的发展促进了水下焊接技术的研究<sup>[2-3]</sup>。不锈钢材料因其优异的耐腐蚀性及力学性能,被广泛应用于海洋管道、核反应堆压力容器等关键部件<sup>[4]</sup>。但不锈钢材料中,高铬、钼含量的类型(如双相不锈钢、超级奥氏体不锈钢及部分铁素体不锈钢),因其高合金含量,存在热裂纹敏感性以及在特定温度区间长期暴露时的 $\sigma$ 相析出倾向,对水下焊接热输入控制提出了严苛要求<sup>[5]</sup>。

目前水下焊接主要有湿法、干式高压法和局部干法三种。湿法水下焊接操作灵活、成本低,但水在电弧高温下分解产生的氢气大量溶解于熔池中,焊缝冷却时氢无法完全逸出,易形成氢气孔和氢脆<sup>[7-8]</sup>;同时,水的热传导系数是空气的40倍,导致焊缝及热影响区快速冷却,形成淬硬组织,降低接头韧性和抗拉强度<sup>[8]</sup>;电弧周围气泡因水流和压力变化频繁破裂,还会造成电弧漂移、熔滴过渡不稳定,甚至熄弧,这种不稳定性易导致飞溅、气孔和未熔合等缺陷<sup>[9]</sup>。干式高压焊接虽能有效提高接头质量,但需建造大型排水舱和配套维持系统,成本高昂,且排水舱的设计受工件形状和尺寸限制,仅适用于规则结构(如管道),不适用于大型结构件的焊接<sup>[10]</sup>。局部干法水下焊接是通过动态排水技术在焊接区域形成局部无水环境,兼具湿法焊接的灵活性与干式焊接的高质量特征,可显著抑制水环境对熔池的干扰<sup>[11]</sup>。BLOOM等的研究表明,采用局干法水下焊接技术可使304L不锈钢焊接接头强度达到母材的95%以上,较传统方法提升约30%<sup>[12]</sup>。

近年来,激光焊接技术凭借能量密度高(可达 $10^6$  W/cm<sup>2</sup>)、热影响区窄(通常小于1 mm)等优势,为水下精密连接提供了新途径<sup>[6]</sup>。本文采用局部干法对4 mm厚304奥氏体不锈钢进行水下激光焊接

试验,验证不同水深下焊接系统的稳定性,通过焊接参数优化获得低气孔率焊缝,系统对比水下与常规环境对焊缝气孔率、成形、微观组织以及力学性能的影响,为局部干法水下激光焊接的工程应用提供依据。

## 1 试验方法与材料

水下激光焊接系统采用HFB连续激光器和定制摆动激光头,最大输出功率6.0 kW,波长1 070 nm,将激光焊接头和双层排水罩装置集成于FANUC i10A六轴机器人,以实现对接头轨迹的精确控制。采用双层排水罩装置在焊接区域形成局部无水环境,以实现局部干法水下激光填丝焊接。焊接装置示意如图1所示。试验在模拟海水水槽中进行,水温20℃。焊接方向垂直于试板轧制方向,单道焊。



图1 水下激光焊接设备示意

Fig. 1 Schematic diagram of underwater laser welding equipment

试板为304奥氏体不锈钢板材,尺寸200 mm×100 mm×4 mm,坡口形式为保护气体氩气,气流量15L/min,填充焊丝为直径1.0mm的316L奥氏体不锈钢焊丝,母材及焊丝主要化学成分如表1所示。

焊缝截面经线切割取样后,依次经砂纸打磨、抛光,采用王水腐蚀剂腐蚀后,使用OLYMPUS-BX53M光学显微镜对焊缝截面微观组织。使用CMT5205SANS电子万能试验机测试试样的拉伸力

表1 母材及焊丝主要化学成分(质量分数,%)

Table 1 Main chemical composition of austenitic stainless steel base metal (wt. %)

材料	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni
母材	0.071	1.53	0.57	0.027	0.028	17.51	8.02
焊丝	0.02	1.89	0.76	0.02	0.01	18.7	12.2

学性能和弯曲性能(拉伸速率为2 mm/min,弯曲试验加载速度为1 mm/min,弯心半径8mm)。使用扫描电子显微镜(SEM, ZEISS GeminiSEM 300)观察拉伸试样断口形貌。拉伸与弯曲试样尺寸及取样方式如图2所示。

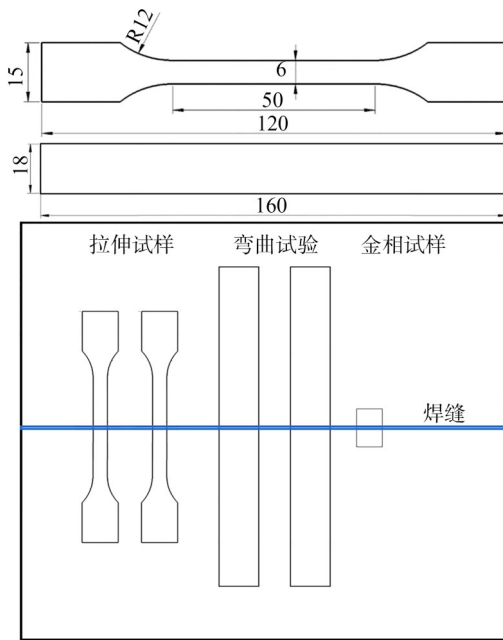


图2 拉伸试样、弯曲试样尺寸及取样方式示意

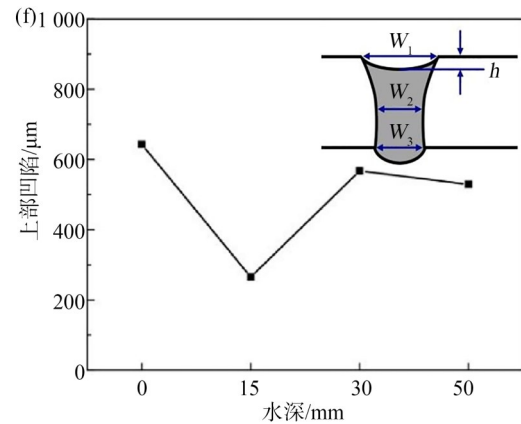
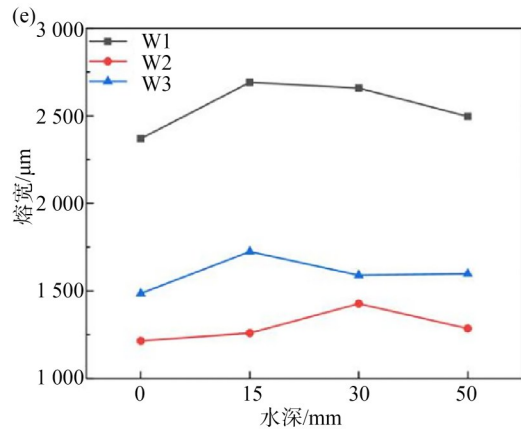
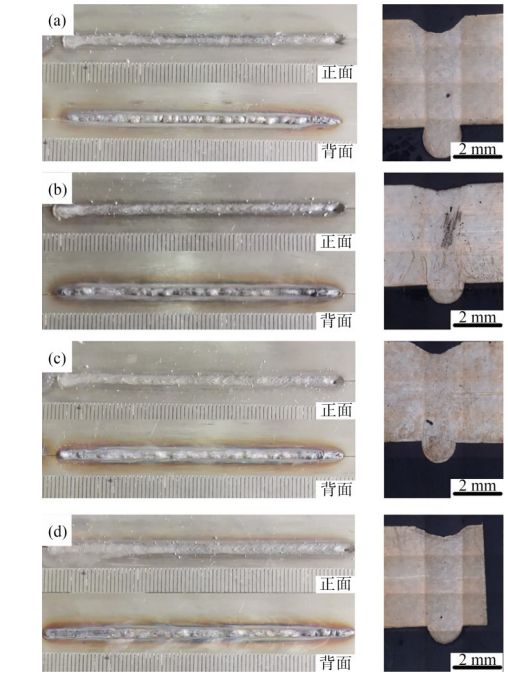
Fig. 2 Diagram of tensile test specimen, bend test specimen dimensions and sampling location

## 2 结果与分析

### 2.1 焊接系统稳定性验证

为验证装置排水效果,以试板上表面为0 mm水位高度,分别在0 mm、15 mm、30 mm、50 mm水深下进行焊接试验,焊接参数为激光功率4200 W、离焦量+3 mm、焊速0.8 m/min。

图3a~3d分别为4种水位下焊缝正面与背面成形及横截面形貌,定义接头横截面的顶部、中部及底部熔宽分别为 $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ 。由图可知,四种水位下焊缝正面均存在明显凹陷,背部出现驼峰,这与较



(a) $h=0$  mm; (b) $h=15$  mm; (c) $h=30$  mm; (d) $h=50$  mm; (e)不同水位下熔宽变化曲线; (f)不同水位下表面凹陷变化曲线

图3 水深对焊缝表面成形、截面形貌的影响

Fig. 3 The influence of water depth on the surface forming and cross-sectional morphology of the weld

高的焊接热输入有关。图3e、3f为各接头熔宽及上表面凹陷变化曲线,可见不同水位下焊缝熔宽和上部凹坑深度波动变化较小,这种波动与测量截面选取的偶然性有关,表明水下激光焊接装置在不同水深下均可形成稳定的局部无水环境,排水效果良好。

## 2.2 焊接速度对焊缝成形与气孔的影响

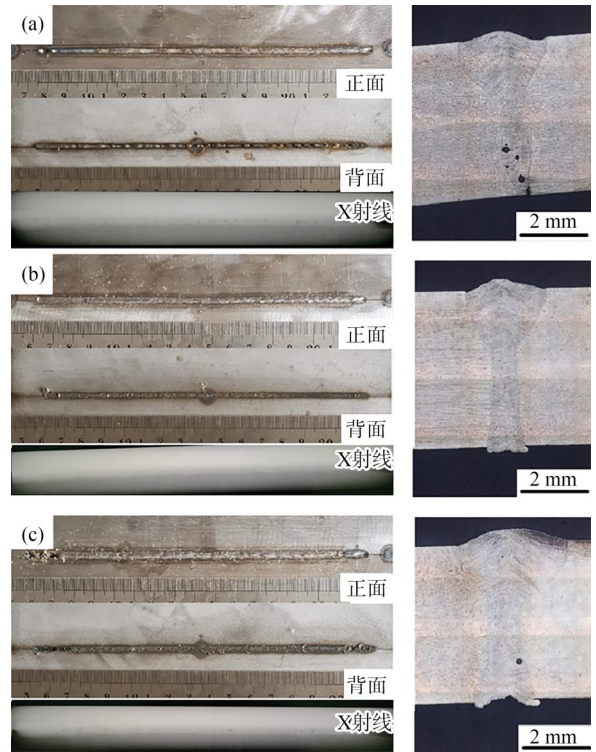
保持激光功率3 800 W、离焦量+3 mm不变,在15 mm水深下,分别采用焊速1.2 m/min、1.0 m/min、0.8 m/min进行焊接。

(1)焊速1.2 m/min如图4a所示,焊缝背部可见未熔合及驼峰特征,截面底部同样存在明显未熔合。X射线检验结果显示焊缝内部气孔较多,采用Image Pro Plus软件统计焊缝气孔率率约为7.8%。激光焊中气孔主要有冶金型及工艺型两类,前者主要源于表面氧化膜、杂质等携带的水分在熔池中分解形成的氢气孔,以及合金元素汽化产生的气孔;后者主要由激光深熔焊过程中匙孔失稳引起<sup>[13]</sup>。图4a中气孔形状规则、尺寸较小,推测以冶金型气孔为主。焊接速度较快时,熔池凝固时间短,氢气来不及逸出;同时试板处于水环境中,水汽在高温下分解为氢气孔提供了来源。

(2)焊速1.0 m/min如图4b所示,焊缝正面及背面成形良好,板材背部未熔透特征消失,但背部成形相对不均匀,这是由于背部水环境导致熔池底部金属迅速凝固,阻碍了熔池底部金属的流动。X射线检测显示气孔率显著降低至约1.4%。焊接速度的降低使热输入增加,焊缝熔深显著增大,同时熔池凝固时间延长,气孔有更充分的时间逸出。

(3)焊速0.8 m/min如图4c所示,焊缝整体成形良好,背部呈现轻微的成形不均匀。对比三种焊速的截面形貌,测量结果显示,顶部熔宽由2 689  $\mu\text{m}$  (1.2 m/min)、2 423  $\mu\text{m}$  (1.0 m/min)增至3 515  $\mu\text{m}$ ,底部熔宽由331  $\mu\text{m}$ 、1 183  $\mu\text{m}$ 增加至1 809  $\mu\text{m}$ ,可见焊速降低导致热输入增大,熔宽明显增加。熔池内熔融金属体积增大,底部金属与背部水环境直接接触而快速冷却,导致焊缝背部出现轻微的成形不良。此外,气孔率升至约5.9%,气孔尺寸较大且形状不规则,推测以工艺型气孔为主:热输入增大使熔融金属体积增加,匙孔稳定性下降,上端易出现颈缩和膨胀,随热源移动,颈缩处受表面张力作用

导致匙孔坍塌,气泡滞留于焊缝中。



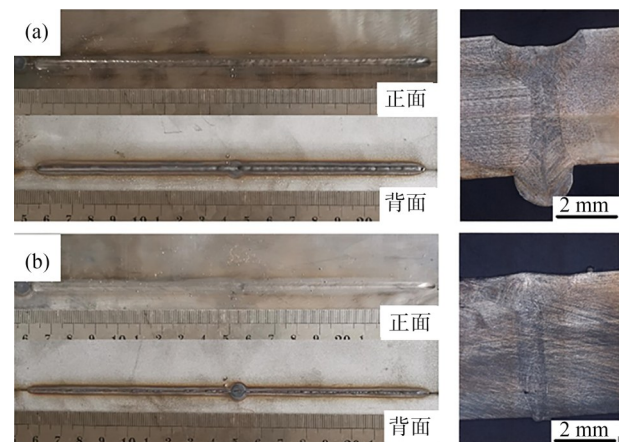
(a)焊速1.2 m/min;(b)焊速1.0 m/min;(c)焊速0.8 m/min

图4 不同焊速下焊缝形貌及X射线结果

Fig. 4 Weld morphology and X-ray results at different welding speeds

(4)水下与常规环境对比。

为对比水下与常规环境激光焊接头的组织与性能,采用水下焊接成形最优参数(激光功率3 800 W、离焦量+3mm、焊速1.0 m/min)在常规环境下进行焊接,结果如图5a所示,焊缝熔宽较大,正面明显凹



(a)焊速1.0 m/min;(b)焊速1.2 m/min

图5 常规环境不同焊速下焊缝形貌

Fig. 5 Weld morphology under different welding speeds in conventional environment

陷,背部出现明显驼峰。对比图 4b,相同参数下,水下焊接时水介质的散热作用使焊缝冷却速度明显提高,从而获得成形良好的焊缝。此外,图 4c 中水下热输入较大时熔宽增加,但焊缝背部未出现驼峰,这是因为焊缝背部并未与水环境完全隔离,熔池底部凝固速度加快,抑制了熔融金属下淌,使背部来不及形成驼峰。如图 5b 所示,常规环境下焊速提高至 1.2 m/min 时,焊缝下凹及背部驼峰问题明显改善,可获得成形良好的激光焊缝。

对焊速 1.0 m/min 和 0.8 m/min 的水下激光焊焊缝(功率 3 800 W、离焦量+3 mm)与常规环境焊缝(焊速为 1.2 m/min)进行截面金相组织分析,结果如

图 6 所示。不同环境和焊速下,焊缝组织均由奥氏体枝晶和少量铁素体组成,熔合线边界可见细小的柱状晶,凝固时晶核在半熔化的母材基础上垂直于熔合线生长;随着凝固的进行,晶粒形态转变为树枝晶并向中心生长,最终在焊缝中心相交。焊缝晶粒形态主要取决于液态金属的温度梯度、晶粒生长速度及过冷度,激光焊凝固速度快、过冷度大,最终形成枝晶<sup>[14]</sup>。

对比图 6(a1、b1)水下 1.0 m/min 与图 6(a2、b2)水下 0.8 m/min 的微观组织,前者奥氏体枝晶二次枝晶臂间距更小,枝晶生长方向一致性更高,表明焊速较大、热输入较低时熔池冷却更快,焊缝通过试

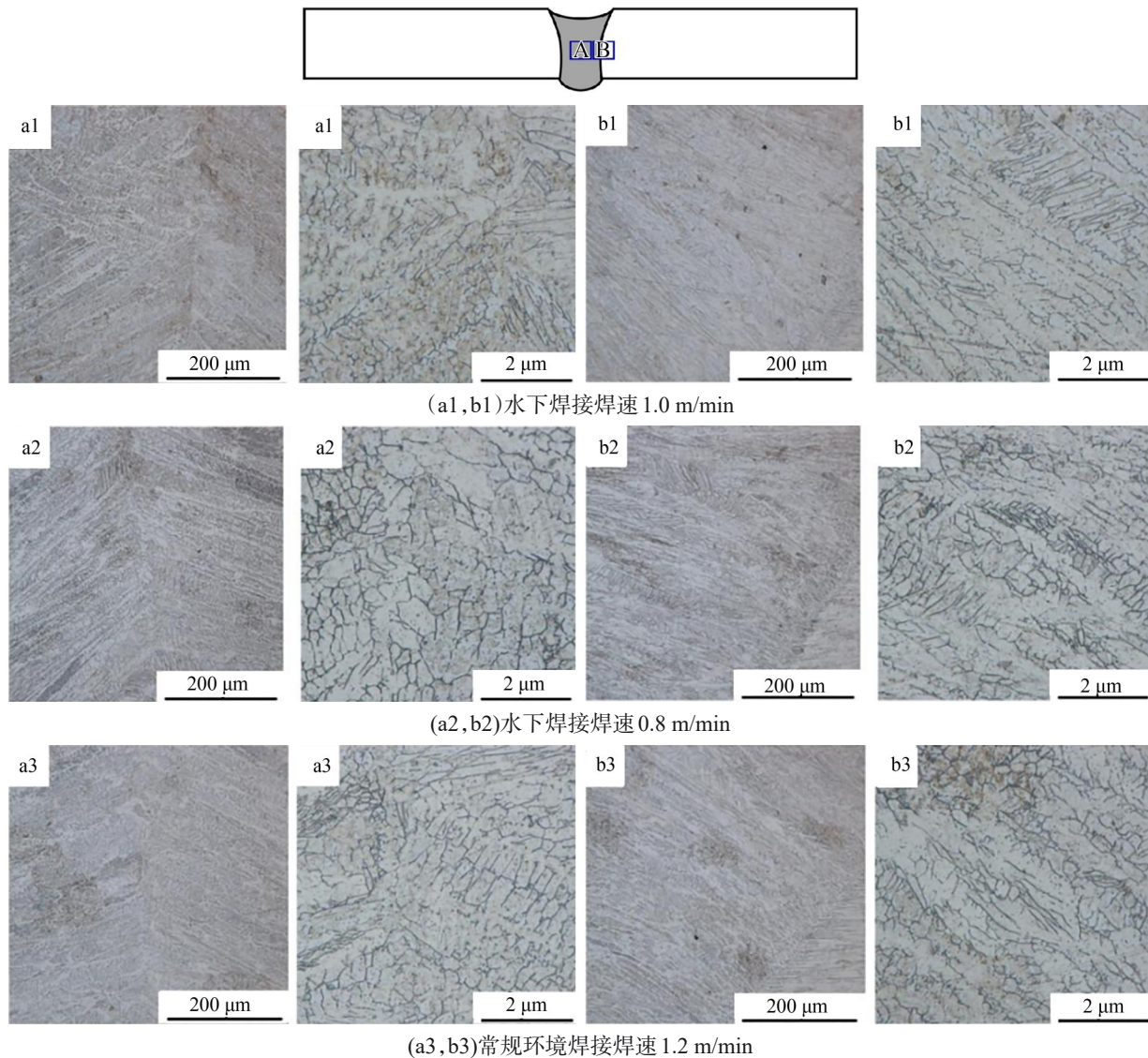


图 6 不同条件下焊缝微观组织图片

Fig. 6 Pictures of the microstructure of the weld under different conditions

板向两侧散热的趋势更明显。进一步对比常规环境下焊速为1.2 m/min时的激光焊缝微观组织(见图6)和 underwater 焊接焊速为1.0 m/min时的焊缝组织,虽然水下焊接时焊速更小,热输入相对更高,但两者晶粒尺寸接近、宏观熔宽基本一致,说明水下焊接时背部水环境的导热作用有效提高了冷却速度,抵消了热输入增加对组织粗化的影响,从而细化了焊缝组织。

2.3 力学性能

为探究水下与常规环境下激光焊缝力学性能的差异,对焊速1.2 m/min、1.0 m/min、0.8 m/min时的水下焊缝和焊速为1.2 m/min、1.0 m/min的常规焊缝进行拉伸及三点弯曲试验。弯曲试验统一以焊缝背面作为受拉侧,正面受压侧。各参数组合如表2所示。

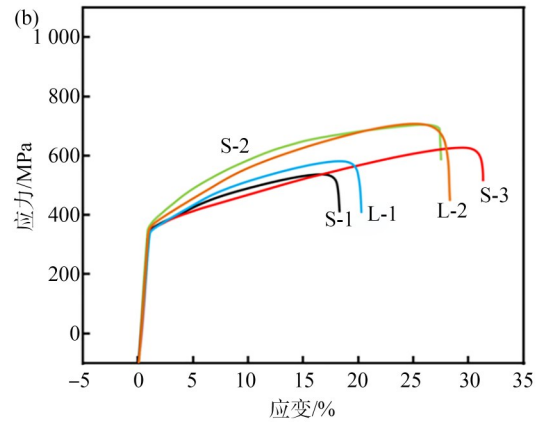
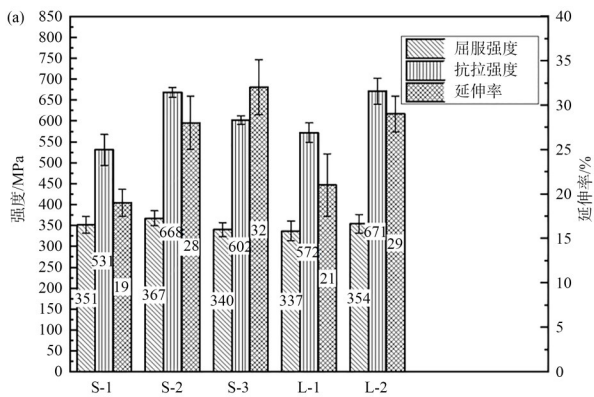
图7d为不同工艺下焊缝拉伸与弯曲试样破坏后的形貌,试样断裂位置均在焊缝区域内。图7a中

表2 各焊接参数下接头的拉伸及弯曲试样

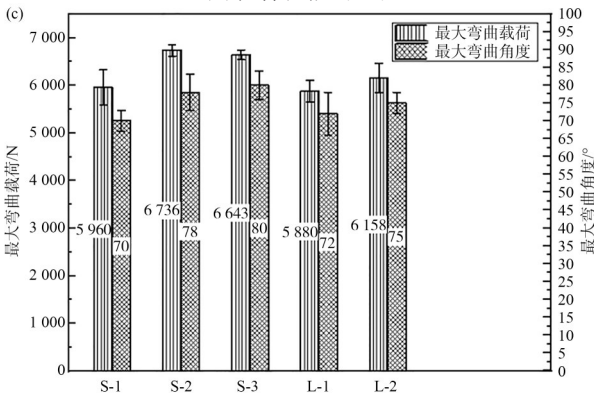
Table 2 Tensile and bend test specimens of welding joints fabricated under varying welding parameters

试样	焊速/(m·min <sup>-1</sup> )	激光功率/W	离焦量/mm	水深/mm
S-1	1.2	3 800	+3	15
S-2	1.0	3 800	+3	15
S-3	0.8	3 800	+3	15
L-1	1.0	3 800	+3	陆上
L-2	1.2	3 800	+3	陆上

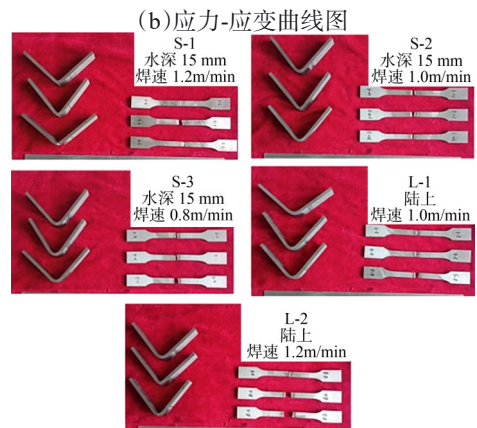
S-1、S-2、S-3分别为焊速为1.2 m/min、1.0 m/min、0.8 m/min的水下激光焊缝拉伸性能。S-2时焊缝强度最高,屈服强度367 MPa,抗拉强度668 MPa,延伸率28%。S-1时,焊缝背部存在未熔合,内部气孔率较高,未熔合和气孔处应力集中降低了有效承载面积,成为裂纹源,导致焊缝拉伸性能较低。S-3时,与S-2相比晶粒尺寸较大,根据霍尔-佩奇规律,组织粗化通常伴随强度降低,拉伸过程中晶界更易出现位错堆积而萌生裂纹,同时气孔的存在进一步



(a) 拉伸性能对比图



(c) 弯曲性能对比图



(d) 断后拉伸和弯曲试样

图7 不同条件下焊缝力学性能

Fig. 7 Mechanical properties of welds under different conditions

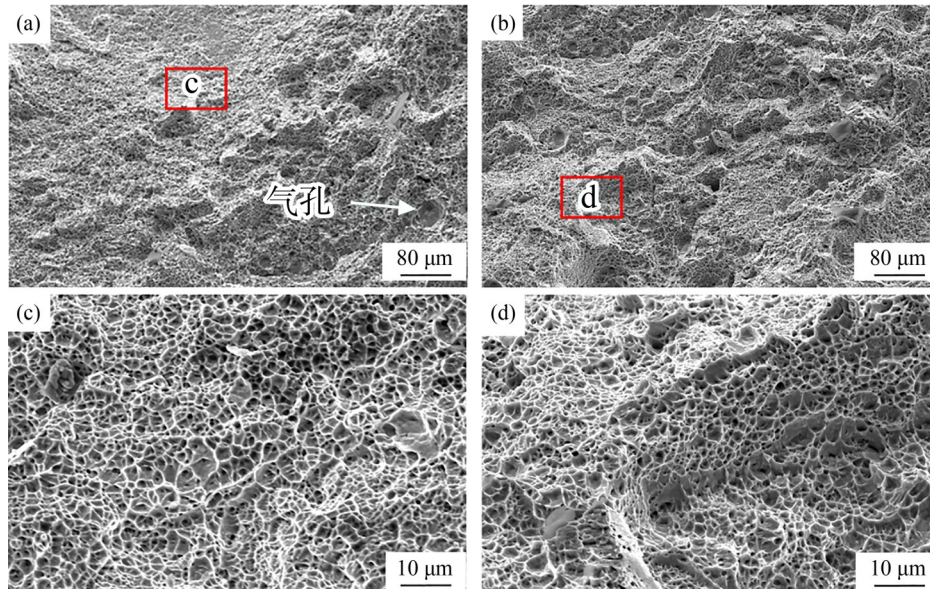
降低了焊缝强度。

如图7a所示,常规环境下焊速1.0 m/min(L-1)时,焊缝下凹严重导致强度较低;焊速1.2 m/min(L-2)时,焊缝强度与水下S-2接近,但屈服强度略低,这主要是由于水下焊接接头组织细化,拉伸过程中同等变形量下晶界位错密度更低,裂纹萌生更困难。

图7c为不同工艺下的弯曲性能。弯曲试验中焊缝背部受拉,正面受压,背部缺陷对弯曲性能影响较大,因此背部存在未熔合缺陷和驼峰的焊缝弯曲性能较差。而焊速为1.0 m/min、0.8 m/min时的水下激光焊缝与常规1.2 m/min时的焊缝相比,弯曲性能接近,最大弯曲载荷甚至略高于常规环境,说明水下焊缝背部轻微的成形不均匀对弯曲性能几

乎无影响。局部干法下的水下激光焊缝力学性能可达到常规激光焊缝性能水平。

对力学性能良好且相当的水下激光焊缝(S-2,焊速1.0 m/min)与常规焊缝(L-2,焊速1.2 m/min)拉伸断口进行SEM观察,如图8所示。图8a为水下焊缝低倍断口形貌,断口表面粗糙;放大区域(见图8b)可见大量均匀圆形韧窝,尺寸约5  $\mu\text{m}$ ,表明断裂形式为韧性断裂。常规焊缝断口(见图8c、8d)特征与水下焊缝一致,韧窝形态与尺寸基本相同,与两者拉伸性能接近的试验结果吻合。此外,水下激光焊缝断口表面可观察到尺寸约40  $\mu\text{m}$ 的气孔,少量小尺寸气孔的存在对拉伸性能的影响可以忽略不计。



(a)S-2试样断口;(b)c位置放大;(c)L-2试样断口;(d)d位置放大

图8 拉伸试样断口SEM图片

Fig. 8 SEM image of the fracture of the tensile specimen

### 3 结论

(1)局部干法水下激光焊可有效隔离焊缝正面与水环境,在不同水深(0~50 mm)下均能形成稳定的局部无水环境,排水效果良好。但焊缝背部水环境的存在导致熔池更易卷入氢而形成氢气孔,同时水环境降低了匙孔稳定性,加剧了工艺型气孔的产生倾向。

(2)焊接速度对水下激光焊缝气孔率与成形质

量影响明显。焊速1.2 m/min时熔池凝固过快,背部未熔合且气孔率达7.8%,以冶金型氢气孔为主;焊速1.0 m/min时气孔率降至1.4%,成形良好;焊速0.8 m/min时热输入增大导致匙孔失稳,气孔率回升至5.9%,以工艺型气孔为主。激光功率3 800 W、离焦量+3 mm、焊速1.0 m/min为本研究条件下的优选参数组合。

(3)与常规激光焊相比,水下焊缝背部水环境提高了散热效率,使焊缝组织明显细化。水下焊速

1.0 m/min焊缝的晶粒尺寸与常规1.2 m/min焊缝接近,但前者热输入更高,说明水环境的冷却作用有效抵消了热输入增加对组织粗化的影响。同时,背部快速凝固可抑制高热输入下熔融金属下淌,改善焊缝凹陷与驼峰缺陷,但也会导致背部轻微成形不均匀。

(4)水下激光焊缝(焊速1.0 m/min)的抗拉强度(668 MPa)与弯曲性能略优于常规激光焊缝(焊速1.2 m/min),主要归因于组织细化延缓了晶界裂纹的萌生与扩展。少量小尺寸气孔(约40 μm)及背部轻微成形不均匀对拉伸与弯曲性能的影响可忽略。

#### 参考文献:

- [1] Alajmi E F, Alqenaei A A. Underwater welding techniques[J]. *Int. J. Eng. Res. Appl.*, 2017, 7(2): 14-17.
- [2] Li J, Jiang P, Gong Z, et al. A coaxial nozzle assisted underwater laser welding of 316L stainless steel[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 171: 110176.
- [3] 张鹏,李桓,杨立军. 水下焊接技术研究现状及发展趋势[J]. *焊接学报*, 2018, 39(2): 1-8+131.  
ZHANG P, LI H, YANG L J, et al. Research Status and Development Trend of Underwater Welding Technology [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2018, 39(2): 1-8.
- [4] Zhang H Y, Zheng L W, Shi Q X, et al. Anisotropy in mechanical property and hydrogen embrittlement resistance of selective laser melted 304 austenitic stainless steel[J]. *Materials Letters*, 2023, 339: 134104.
- [5] Khalfallah I Y, Rahoma M N, Abboud J H, et al. Microstructure and corrosion behavior of austenitic stainless steel treated with laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 43(4): 806-813.
- [6] KATAYAMA S. Handbook of laser welding technologies [M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013: 245-268.
- [7] Rowe M, Liu S. Recent developments in underwater wet welding [J]. *Science and Technology of welding and Joining*, 2001, 6(6): 387-396.
- [8] 李超航,赵博,咎佳岐,等. 水下湿法焊接关键工艺问题及调控措施的研究进展[J]. *电焊机*, 2024, 54(4): 159-169.  
LI C H, ZHAO B, ZAN J Q, et al. Research Progress on Underwater Wet Welding—Key Process Issues and Control Measures [J]. *Electric Welding Machine*, 2024, 54(4): 159-169.
- [9] 王建峰. 超声辅助水下湿法焊接电弧气泡行为及焊接特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.  
WANG J F. Research on arc bubble behavior and welding characteristics in ultrasonic wave-assisted underwater wet welding [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [10] SILVA R J, TELMO S. Underwater hyperbaric welding: a review[J]. *Soldagem & Inspeção*, 2016, 21(3): 324-336.
- [11] Ning G, Yunlong F, Xiao X, et al. Underwater local dry cavity laser welding of 304 stainless steel [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 260: 146-155.
- [12] Ke W, Liu Y, Teshome F B, et al. Numerical study on multiphase evolution and molten pool dynamics of underwater wet laser welding in shallow water environment [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 220: 124976.
- [13] 赵才宇. 441 不锈钢焊接接头组织及力学性能研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2022: 45-50.  
ZHAO C Y. Study on Microstructure and Mechanical Properties of 441 Stainless Steel Welded Joints [D]. Changchun: Jilin University, 2022: 45-50.
- [14] 王浩军,张兵宪,李静,等. 激光焊接工艺对304 不锈钢薄板搭接接头组织性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2021, 50(1): 30-34.  
WANG H J, ZHANG B X, LI J, et al. Effect of Laser Welding Process on Microstructure and Properties of 304 Stainless Steel Sheet Lap Joint [J]. *Hot Working Technology*, 2021, 50(1): 30-34.