

2205双相不锈钢局部干法水下可调环形激光焊接组织性能研究

张清华^{1,2}, 刘一搏^{1,2}, 赵永庆², 孙琪^{1,2}, 郭佳威^{1,2}, 侯少军², 孙清洁^{1,2}

(1. 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)

(2. 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: 针对水下焊接凝固过程冷却速度快, 焊缝组织性能恶化等问题, 采用可调环形激光对2205双相不锈钢进行局部干法水下焊接试验, 同时与陆上焊缝做对比, 具体研究中心和环形激光不同比例对焊缝成形、微观组织及力学性能的影响。结果表明, 熔深主要受中心激光的影响, 且中心功率占比增大时, 焊缝表面氧化程度变得严重, 表面粗糙度增大。与陆上同参数的组织相比, 水下焊缝的魏氏奥氏体含量增加, 晶内奥氏体数量减少甚至消失。随着环形激光占比提高, 焊缝中奥氏体含量无明显变化, 焊缝晶粒尺寸和纵横比降低, 焊缝两侧柱状晶生长的方向性减弱, 小角度晶界数量增多。在性能方面, 水下接头的抗拉强度略高于陆上, 但延伸率比陆上要低, 而随着环形激光功率占比由1/3提高到2/3, 水下接头延伸率提升了约50%。

关键词: 2205双相不锈钢; 局部干法水下焊接; 可调环形激光; 焊缝成形; 组织性能

中图分类号: TG456.5; TG142.71

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2026)03-0665-09

1 引言

双相不锈钢由几乎相同比例的铁素体和奥氏体组成, 兼有两者的高强度和耐腐蚀性, 广泛应用于海洋工程、能源及核电领域^[1-2]。在腐蚀介质和核辐射应力作用下, 核电站核反应堆相关设备会产生腐蚀裂纹、表面磨蚀等缺陷, 对核电站安全运行构成严重威胁。从核电站的经济效益出发, 在保证安全运行前提下, 对难以更换的构件及设备进行在役维修是行之有效的方法^[3]。因此需要采用水下焊接方法进行漏点补板焊、裂纹开坡口补焊、磨损腐蚀表面堆焊等修复^[4-5]。然而, 由于高放射性及狭窄的水下空间等环境因素, 传统的人工修复方法成本高、操作难度大^[6]。同时与传统电弧焊方法相比, 激光焊接具有受水压影响小、焊缝热影响区窄和残余应力小等优势^[7], 适宜精确位置的水下自动化焊接维修。

目前, 水下激光焊接技术已经尝试应用到核电站的维修, 但水下快的冷却速度也导致了许多问题。哈工大Guo^[6]和Fu^[8]等人进行了不锈钢的水下自熔与填丝对接试验, 得到的水下接头拉伸强度和冲击韧性接近于陆上接头, 但由于水的冷却作用, 焊缝中出现较多板条状铁素体。北京化工大学李丛伟等人^[9]在水下激光熔覆奥氏体不锈钢过程中也发现了快速冷却所导致的焊缝硬度上升

与部分奥氏体发生马氏体转变的现象。天津大学Huang等人^[10]研究了不锈钢薄板水下激光焊接弯曲变形的行为及机理, 并与陆上焊接做对比, 证明激光焊接过程中焊缝弯曲与工件温度梯度有关。

可调环形激光作为一种新兴的光束模式, 通过调控中心环形功率比, 能够增大焊接工艺窗口, 抑制飞溅、气孔等缺陷。在近几年受到越来越多的国内外研究学者的重视。美国南卫理公会大学Mohammadpour等人^[11]在焊接不锈钢时提出当中心功率高于环形光束时, 能够增加熔深, 当环形光束的功率高于中心光束时, 飞溅明显减少, 同时环形激光的加入改善了焊缝表面质量。广东工业大学的Wang等人^[12-13]发现等离子体的强度与匙孔开口的面积呈正相关, 纯中心激光在焊接过程中匙孔会周期性地打开和坍塌, 但纯环形激光在焊接过程中匙孔一直稳定存在。除了对焊接过程稳定性的改善, 可调环形激光焊接对焊缝的组织及力学性能也有一定影响。东北电力大学Xie等人^[14]在焊接不锈钢时发现引入环形激光焊接得到的柱状晶粒尺寸最小, 相比之下, 使用传统高斯热源得到的样品中存在粗大的柱状晶。南京航空航天大学Zhan等人^[15]采用双波长组成的可调环形激光也对奥氏体不锈钢进行了焊接, 发现由于可调环形激光使焊接

收稿日期: 2025-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(52275320, 52175299); 中广核-哈工大先进核能与新能源研究院项目(202210)

作者简介: 张清华, 男, 1998年生, 博士, 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, E-mail: zqh_hitwh@163.com

区域的温度梯度减小,和环形激光横向分布对液态金属的扰动,会减弱沿易滑纹理<100>形成的柱状晶粒,使奥氏体晶粒取向多样化,使可调环形激光接头具有更高的强度和伸长率。以上研究表明,可调环形激光不仅能够改善表面成形,稳定匙孔,抑制飞溅、气孔等缺陷,还能调控焊接区域附近的温度梯度,改善焊缝组织。因此,将环形激光引入水下焊接,对提高水下激光焊接匙孔稳定性,改善水下焊接温度梯度具有重要意义。

针对双相不锈钢的水下焊接,Prokop 等人^[16]在湿法焊接 2205 双相钢时发现由于电弧燃烧不稳定,容易产生冷裂纹。海军工程大学尤家玉等人^[17]采用自主设计的助焊剂在 6 mm 水下成功连接了 5 mm 厚的双相不锈钢板。华南理工大学 Hu 等人^[18-19]也对 S32101 双相不锈钢的水下药芯焊丝电弧焊接进行了大量研究,发现湿法焊接时,气孔较多,气孔率与奥氏体的微观结构尺寸呈正相关^[20]。而在(局部)干法焊接时发现双相比比例和接头性能与不同水深(压力)产生的热循环有关,并在 0.45 MPa 下获得了综合性能最佳的焊缝^[21]。Łabanowski 等人^[22]采用局部干法熔化极气体保护焊(GMA)焊接 2205 双相钢时发现水环境的强制冷却不会导致焊接中铁素体含量的显著增加。哈尔滨工业大学马兆炫等人^[23]将自制的局部干法水下 TIG 焊枪用于水下焊接 2205 双相钢,获得了与陆上环境性能相似的焊缝。北京石油化工学院朱加雷等人采用局部干法水下激光填丝方法在水下进行 S32101 双相钢的增材^[24]及 U 形坡口填充焊接试验^[25],发现采用氮气作为保护气体可促进铁素体向奥氏体的转变,保证铁素体-奥氏体的双相组织平衡。上述研究大多集中于水下电弧焊接,关于水下激光焊接双相钢的研究较少。因此,本工作采用自主研发的双层气体排水装置对 2205 双相不锈钢进行局部干法水下激光焊接试验,同时在陆上做相应的对比试验,具体研究不同功率环芯比对焊缝成形、微观组织及力学性能的影响。为局部干法水下环形激光焊接的工业应用提供理论基础。

2 实验

实验材料为 2205 双相不锈钢板材,主要化学成分如表 1 所示,用于对接实验的尺寸为 3 mm×100 mm×200 mm。

自主搭建的环形激光水下焊接系统、光纤芯径及能量分布状态如图 1 所示。试验采用锐科 4000/2000 W 环形激光器,波长为 1080 nm,中心芯径为 50 μm ,环形芯径

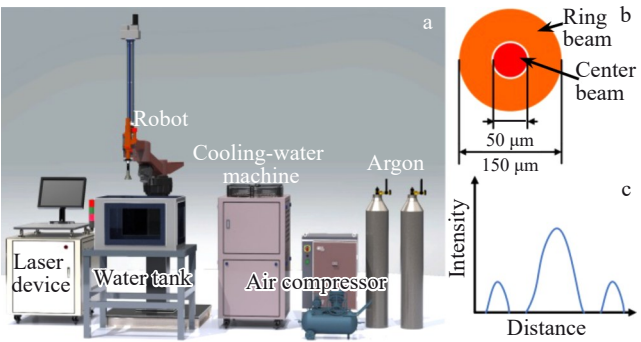


图1 环形激光水下焊接系统及光纤芯径及能量分布状态
Fig.1 Adjustable ring-mode laser underwater welding system (a), fiber core diameter (b) and energy distribution state (c)

为 150 μm ,中心和环形激光可独立控制,实现不同光斑模式输出。焊接过程使用宜功五轴机器人执行运动轨迹。采用自主设计的双层排水罩营造焊接区域局部无水环境,以实现局部干法水下激光自熔焊接。局部干法排水罩装置示意图如图 2 所示,排水罩包括内层纯氩保护气形成正压力对焊接熔池进行保护,外层环形高速气流营造无水环境。激光头倾斜角度为 0°,在水深(H)为 20 mm、离焦量为 0 mm、焊接速度为 1.2 m/min 条件下进行试验,研究不同中心功率(P_c)、环形功率(P_r)及不同环芯比(环形/中心功率占比)对接头成形、组织及性能的影响规律,对接工艺参数如表 2 所示。

在焊后垂直于焊缝方向上(横向)切取金相试样,对金相试样进行磨抛处理后,采用配制的腐蚀液

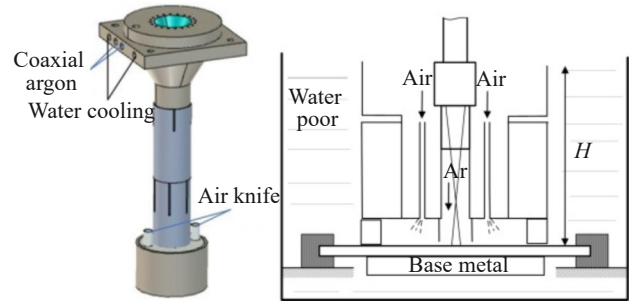


图2 排水罩示意图
Fig.2 Schematic diagram of drainage cover

表2 对接工艺参数
Table 2 Welding parameters

Number	Center power/W	Ring power/W	Environment
a	1000	2000	In air
b	1500	1500	In air
c	2000	1000	In air
d	1000	2000	Underwater
e	1500	1500	Underwater
f	2000	1000	Underwater

表1 2205 不锈钢母材主要化学成分

Table 1 Chemical composition of 2205 stainless steel base metal (wt%)

C	Mn	Si	Ni	Mo	Cr
0.03	1.27	0.50	5.21	3.15	22.69

(0.5 g $K_2S_2O_5$ +20 mL HCl +80 mL H_2O)对表面进行腐蚀, 然后采用 OLYMPUS DSX510 光学显微镜对焊缝横截面形貌和微观组织形态进行观察。此外, 为了进一步研究焊缝的晶体学特征, 对试样进行电解抛光处理, 并采用 Zeiss 场发射扫描电子显微镜进行了电子背散射技术分析 (EBSD)。拉伸样品采用 INSTRON 5967 型 30 kN 万能试验机, 以 2 mm/min 的拉伸速率进行拉伸试验分析, 每组工艺参数下进行 3 组拉伸试验, 取其平均值作为试验结果。拉伸测试结束后, 采用扫描电镜对断口形貌进行拍摄。

3 结果与分析

3.1 环形激光焊接自熔工艺研究

首先在不锈钢板上进行陆上自熔实验, 研究了焊缝表面成形及横截面形貌随内外功率的变化趋势。如图 3、图 4 所示, 在保持环形功率 2.0 kW 不变, 中心功率逐渐

由 0 增加至 2.0 kW 的情况下, 焊缝横截面形貌由“碗状”向“指状”过渡, 焊缝熔深显著增大, 由 0.73 mm 增加到 4.1 mm, 熔宽也随之增大, 但增幅较小, 由 2.64 mm 增加到 4.7 mm, 同时发现在中心功率较低时, 焊缝表面光滑且保护良好, 而在中心功率增大至 1.5 kW 时, 焊缝表面氧化程度变得严重, 表面粗糙度增大。

而在中心功率保持 2.0 kW 不变, 环形功率逐渐增加时, 焊缝横截面形貌均为典型的激光焊接“指状”熔深。由图 5 可知, 环形激光加入促进焊缝上部分熔化宽度进一步横向增大且沿纵向深度方向范围扩大, 增大了焊缝上半部分的熔化面积。如图 6 所示, 焊缝熔深熔宽均随中心功率的增大而增大, 熔深由 3.08 mm 增加到 3.97 mm, 熔宽由 3.46 mm 增加到 4.71 mm, 可见熔宽的增长幅度更大, 即焊缝的深宽比逐渐减小。

图 7、图 8 为保持总功率 3.0 kW 不变, 不同中心环形比

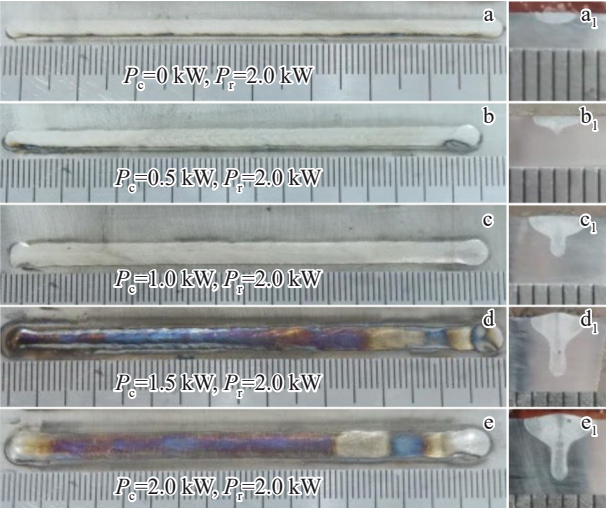


图3 不同中心功率下的焊缝成形及横截面形貌
Fig.3 Weld formation (a-e) and cross-section morphologies (a₁-e₁) under different center powers

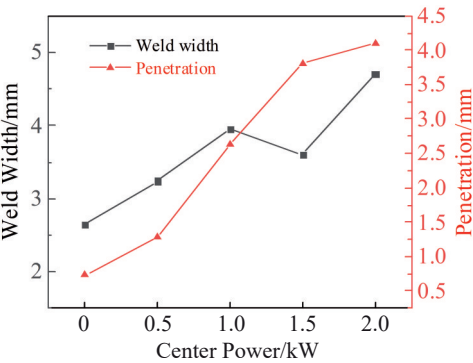


图4 不同中心功率下焊缝的熔宽熔深
Fig.4 Weld width and penetration of weld seam at different center powers

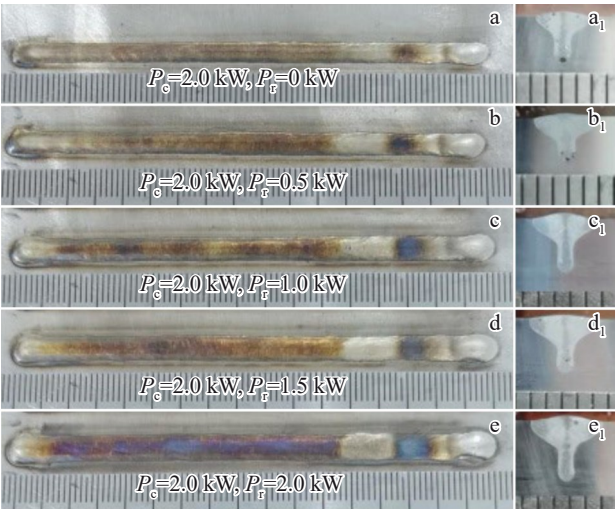


图5 不同环形功率下的焊缝成形及横截面形貌
Fig.5 Weld formation (a-e) and cross-section morphologies (a₁-e₁) under different ring powers

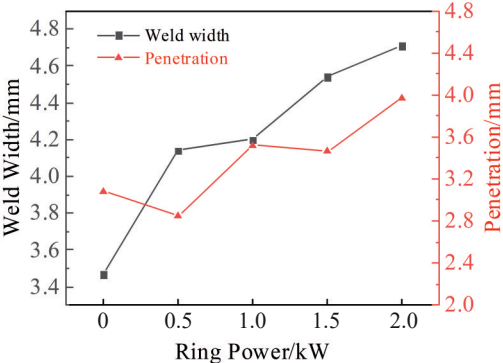


图6 不同环形功率下焊缝的熔宽熔深
Fig.6 Weld width and penetration of weld seam at different ring powers

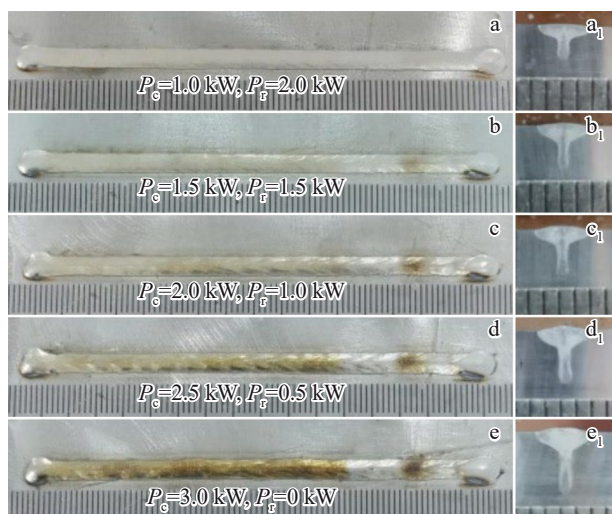


图7 不同环芯比下的焊缝成形及横截面形貌

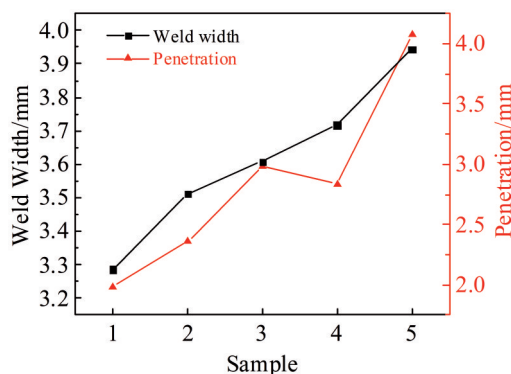
Fig.7 Weld formation (a-e) and cross-section morphologies (a₁-e₁) under different ring-core ratios

图8 不同环芯比下焊缝的熔深熔宽

Fig.8 Weld width and penetration of weld seam at different ring-core ratios

例下的焊缝成形及横截面形貌,图7a~7e的试样分别编号为1~5。可以看出在总功率不变的情况下,随着中心激光功率所占比例增大,焊缝熔深熔宽增加。而且随着中心功率的升高,能量密度逐渐增大,焊缝表面氧化区域逐渐增多,焊缝表面粗糙度逐渐提高。从以上结果可以看出,中心激光和环形激光的作用不同,中心激光能量密度集中,主要在深度方向上挖掘母材,而环形激光对熔深作用不大,主要在熔池上部起到增大熔宽的作用。相同功率下,与单一的高斯热源焊接相比,可调环形激光焊接可获得表面粗糙度较低的焊缝且表面氧化程度较轻。

3.2 对接焊缝组织形貌

在上述研究基础上,保持总功率3.0 kW不变,改变环芯比进行了陆上和水下的对接试验,焊缝横截面形貌及微观组织如图9、图10所示。从焊缝横截面可以看出,随着中心功率比例的上升,焊缝由“Y”型向“X”型转变,同时焊缝热影响区宽度增大,陆上焊缝热影响区宽度如

图9a₁~9c₁所示,由83.6 μm增大到127.3 μm,水下焊缝热影响区宽度由96.4 μm增加至134.5 μm,水下焊接时较大的温度梯度导致同参数下热影响区宽度与陆上相比要大。同时,当中心功率过高时,焊缝中心能量密度集中,导致焊缝整体的温度梯度较大^[15],也会使焊缝的热影响区宽度增大。

陆上接头热影响区和焊缝中心的微观组织如图9a₂~9c₂与图9a₃~9c₃所示,由于激光焊接快的冷却速度,焊缝组织主要由向焊缝中心生长的柱状铁素体构成。热影响区晶粒尺寸较小,奥氏体主要由少量晶界奥氏体(GBA)和针状魏氏奥氏体(WA)构成,同时在铁素体中还有微量的点状晶内奥氏体(IGA),而焊缝中心γ相的微观结构由GBA和少量的WA组成,IGA的数量极少。

在激光焊接过程中,2205双相不锈钢的凝固过程遵循F-A模式,即铁素体晶粒优先在液相中成核和生长,然后形成各种奥氏体晶粒^[26]。由于晶界相对不稳定,奥氏体晶粒很容易沿晶界成核生长形成GBA,随着温度的进一步降低,可用的成核铁素体晶界数量也会减少,从而导致WA的形成。WA从生成的GBA边缘裂开,并向铁素体晶粒内部生长,最后,由于晶格扩散所需的能量较高,IGA在铁素体晶粒内部成核。随着中心功率的增大,焊接区域的温度梯度增大,使奥氏体形成元素(Ni、N等)在晶内的扩散时间变短,进而导致IGA含量的降低。而高的温度梯度、快的冷却速率会促进WA的生成。因此随着中心功率占比增加,热影响区和焊缝中心的WA数量增加,IGA数量减少。

水下接头的微观组织如图10所示,焊缝区组织主要也是铁素体和少量的奥氏体。与陆上同参数相比,水环境的强制冷却作用导致奥氏体形成元素扩散时间不足,GBA形核受限,部分晶界被铁素体占据,形成不连续的GBA,同时快速冷却也严重抑制了IGA的形成,使其含量大幅度降低,甚至完全消失。但是快的冷却速率使铁素体晶界处形成更多细密的WA,针状结构更细小且分布杂乱。

同时对比不同环芯比下的水下接头组织,可以看出随着中心功率的增大,焊缝热影响区的WA数量增多,IGA数量逐渐减少甚至消失,如图10a₂~10c₂所示。焊缝中心处奥氏体形态变化不大,主要由断续分布的GBA和细密的WA组成,如图10a₃~10c₃所示。这是由于环形激光的引入使焊接区域的温度梯度减小、冷却速度减慢^[27],削弱了水环境的强制冷却作用,增加了奥氏体形成元素扩散的时间,所以当环形功率占比较大时,GBA和IGA的析出数量较大。而当中心功率占比较大时,温度梯度较大,同时叠加水的强冷效果,δ→γ相变被压缩至更低温度区间,WA因形核能垒低而优先形成。除此之外,快速冷却也促进了WA的非扩散性形核,使其含量增加。

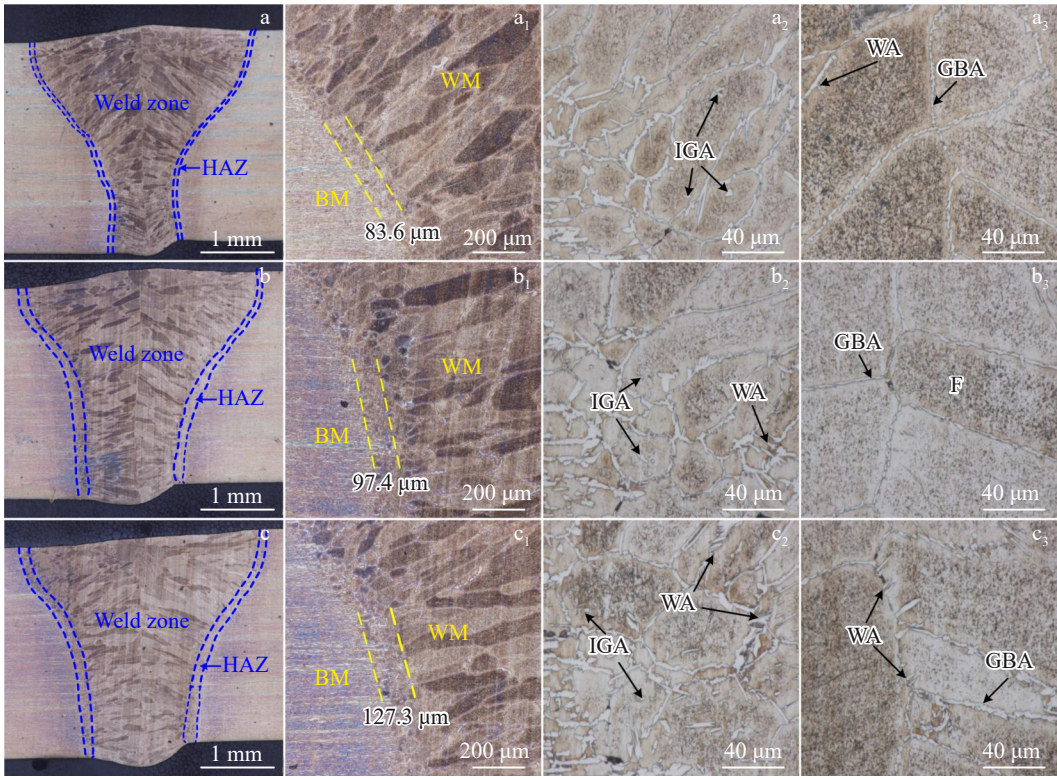


图9 陆上不同环芯比下的焊缝横截面形貌及微观组织

Fig.9 Cross-section morphologies (a-c), HAZ width (a₁-c₁), HAZ (a₂-c₂) and weld seam center (a₃-c₃) microstructures under different ring-core ratios in air: (a-a₃) $P_c=1.0$ kW, $P_r=2.0$ kW; (b-b₃) $P_c=1.5$ kW, $P_r=1.5$ kW; (c-c₃) $P_c=2.0$ kW, $P_r=1.0$ kW

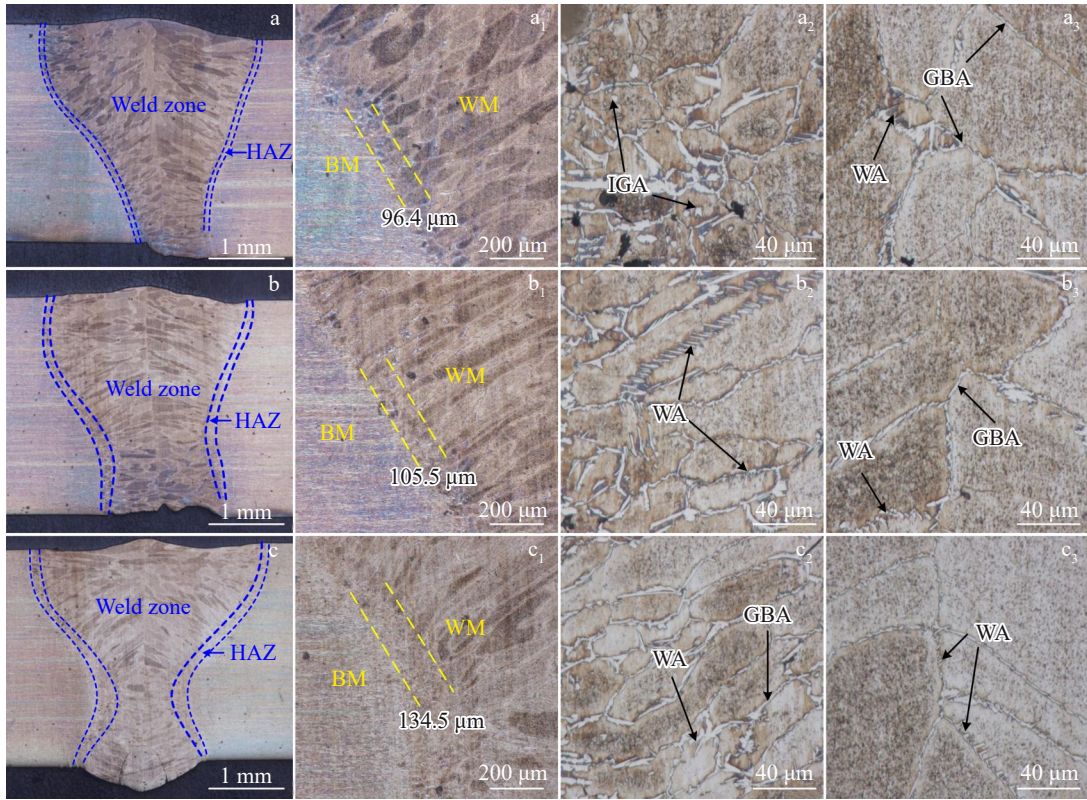


图10 水下不同环芯比下的焊缝横截面形貌及微观组织

Fig.10 Cross-section morphologies (a-c), HAZ width (a₁-c₁), HAZ (a₂-c₂) and weld seam center (a₃-c₃) microstructures under different ring-core ratios underwater: (a-a₃) $P_c=1.0$ kW, $P_r=2.0$ kW; (b-b₃) $P_c=1.5$ kW, $P_r=1.5$ kW; (c-c₃) $P_c=2.0$ kW, $P_r=1.0$ kW

3.3 微观结构分析

图 11 所示为陆上和水下不同环芯比下焊缝的 EBSD 反极图 (IPF)。红色、绿色和蓝色分别代表 (001)、(101) 和 (111) 取向。在空气中, 中心功率占比较大时, 晶粒取向主要是 (001) 和 (101) 方向, 如图 11c 所示。随着环形功率占比增大, (111) 方向的晶粒逐渐增多, 当中心功率为 1.0 kW, 环形功率为 2.0 kW 时, 晶粒生长没有明显的择优取向。而在水下环境中, 不同环芯比下的晶粒取向主要是 (001) 和 (101) 方向, (111) 方向的晶粒较少, 随着中心

功率占比提高, (101) 方向的晶粒数量增多, 如图 11d、11f 所示。同时从反极图上可以看出, 陆上和水下焊缝两侧主要为近乎平行生长的柱状晶。从 EBSD 相分布结果得出上述柱状晶均为铁素体, 不同参数下的双相比例没有明显变化, 奥氏体主要分布在晶界处, 铁素体的占比均在 95% 以上。

随后用 Image J 对焊缝的晶粒尺寸和纵横比进行了统计, 同时分析了不同参数下的晶粒取向差, 结果如图 12 所示。随着环形功率占比增大, 陆上焊缝平均晶粒尺

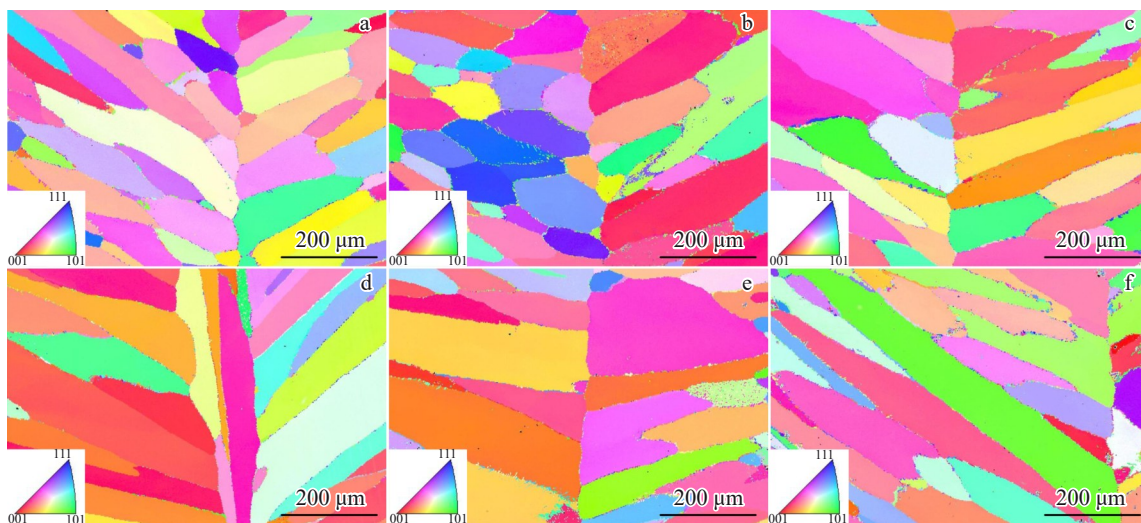


图 11 陆上和水下不同环芯比下焊缝的 IPF 图

Fig.11 IPF maps under different ring-core ratios in air (a-c) and underwater (d-f): (a, d) $P_c=1.0$ kW, $P_r=2.0$ kW; (b, e) $P_c=1.5$ kW, $P_r=1.5$ kW; (c, f) $P_c=2.0$ kW, $P_r=1.0$ kW

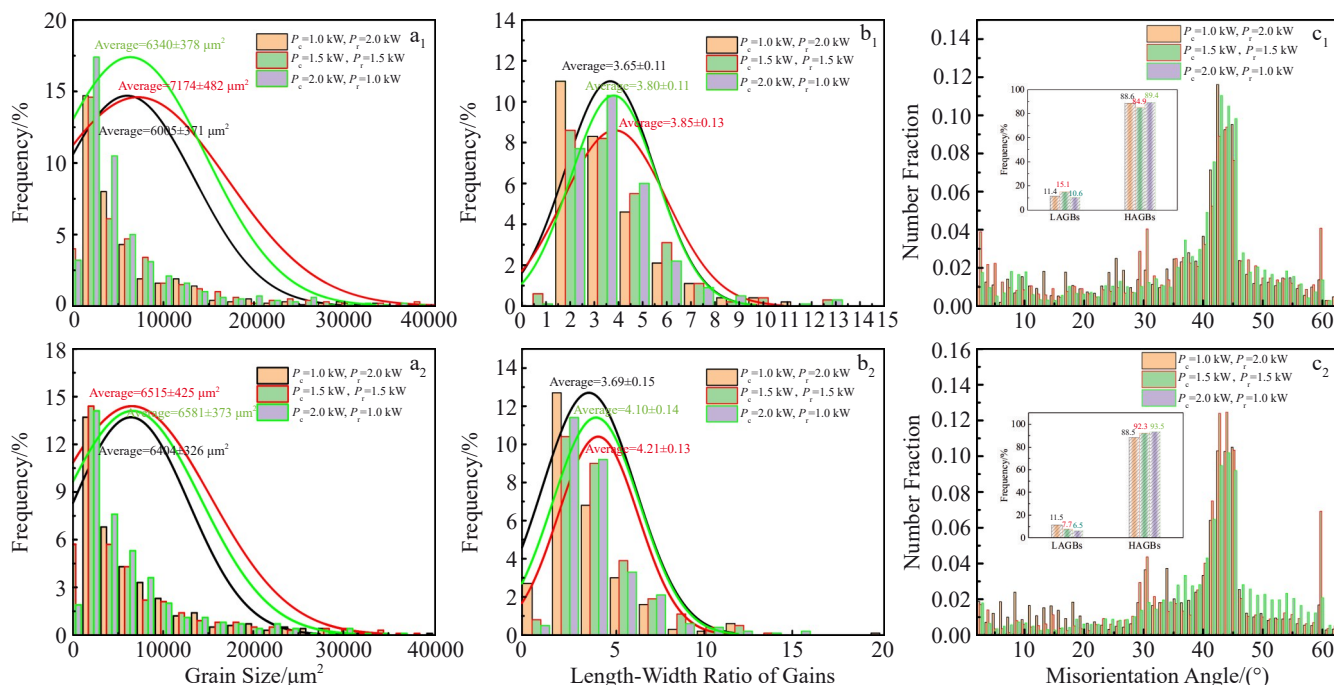


图 12 陆上水下不同环芯比下焊缝的晶粒尺寸、纵横比及晶界角

Fig.12 Grain size (a_1 , a_2), grain aspect ratio (b_1 , b_2) and misorientation angle (c_1 , c_2) of weld seam under different ring-core ratios in air (a_1 - c_1) and underwater (a_2 - c_2)

寸和纵横比呈下降趋势,在中心功率为 1.0 kW,环形功率为 2.0 kW 时,焊缝晶粒尺寸减小到 $6005\ \mu\text{m}^2$,焊缝纵横比降到 3.65。水下焊缝平均晶粒尺寸由 $6581\ \mu\text{m}^2$ 减小到 $6404\ \mu\text{m}^2$,焊缝晶粒的纵横比也由 4.10 降为 3.69。正是由于环形激光降低了焊缝附近的温度梯度,使原本快速向中心生长的柱状晶得到了抑制,从而减小了晶粒尺寸和纵横比。图 12c₁、12c₂ 展示了陆上和水下不同环芯比下晶界的错位角分布。发现在中心功率为 1.5 kW,环形功率为 1.5 kW 时,陆上焊缝小角度晶界(LAGBs)最多,达到 15.1%。随着环形功率的增加,水下 LAGBs 由 6.5% 增加到 11.5%。小角度晶界晶粒数量越多,意味着晶粒中位错密度越高,当晶粒受到外部载荷时,位错运动受阻,变形减小,从而改善了焊接性能^[28]。

为了验证不同环芯比激光功率对焊缝热循环的具体影响,采用热电偶测得了距离焊缝中心 5 mm 处的热循

环曲线(图 13a₁、13a₂)。图 13b₁、13b₂ 显示的是经过归一化时间处理后的冷却速率曲线。虽然这些测得的温度曲线并不是液态熔池的温度,但也可以看出焊接过程中水环境和环形激光引起的温度场变化。结果表明,陆上不同环芯比焊接的峰值温度分别为 419.4、422.9 与 501.2 °C,水下不同环芯比焊接的峰值温度分别为 315.1、321.2 与 390.8 °C,整体要比陆上低 100 °C 左右,冷却速率约为陆上焊接的 2 倍。且随着环形功率的提升,峰值温度逐渐降低,冷却速率逐渐减慢,陆上焊接的最大冷却速率由 -159.4 °C/s 降到 -112.0 °C/s,水下焊接的最大冷却速率由 -310.7 °C/s 降到 -252.3 °C/s。说明环形激光的引入可显著降低熔池附近的冷却速率。同时由峰值温度与冷却速率的关系也说明环形激光可降低焊缝附近的温度梯度。

3.4 力学性能分析

不同环芯比下的陆上水下拉伸性能如图 14 所示,其中

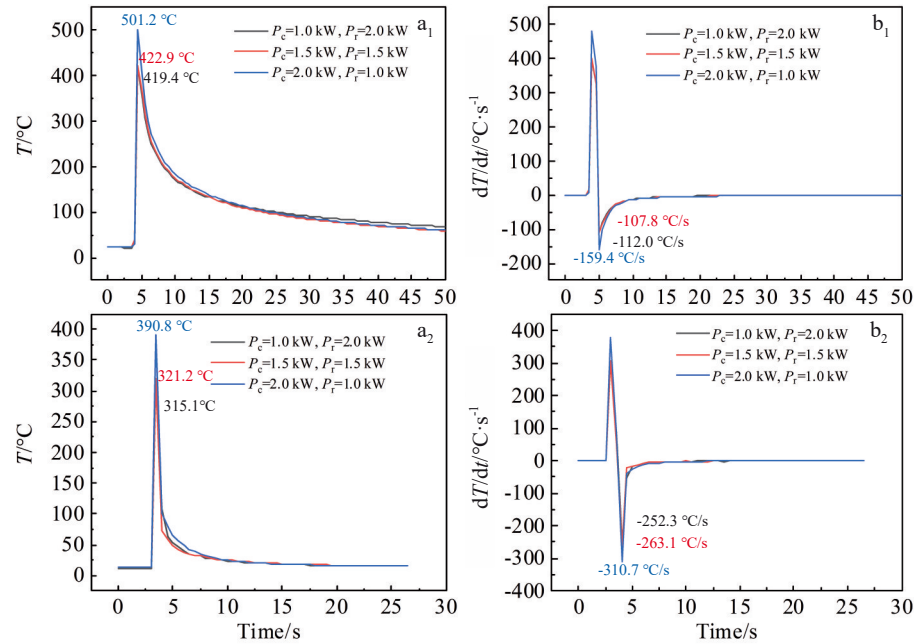


图 13 不同环芯比下焊缝的陆上和下水热循环及冷却速度曲线

Fig.13 Thermal cycle curves (a₁-a₂) and cooling rate curves (b₁-b₂) of weld seam under different ring-core ratios in air (a₁, b₁) and underwater (a₂, b₂)

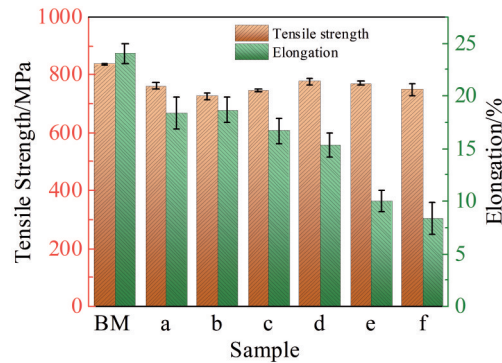


图 14 不同环芯比下焊接接头的陆上和下水抗拉强度和延伸率

Fig.14 Tensile strength and elongation of welded joint under different ring-core ratios in air and underwater

序号 a~c 代表陆上, d~f 表示水下, a 和 d 的参数为 $P_c=1.0\ \text{kW}$, $P_r=2.0\ \text{kW}$; b 和 e 的参数为 $P_c=1.5\ \text{kW}$, $P_r=1.5\ \text{kW}$; c 和 f 的参数为 $P_c=2.0\ \text{kW}$, $P_r=1.0\ \text{kW}$ 。母材(BM)的抗拉强度为 836 MPa, 延伸率为 24%。水下接头的抗拉强度比陆上略高, 但延伸率低于陆上。陆上接头的抗拉强度随着环形激光占比的增大先减小后增大, 延伸率先增大后减小。在中心功率为 1.5 kW, 环形功率为 1.5 kW 时延伸率达到最大, 为 18.7%。水下接头抗拉强度没有明显变化, 随着环形功率占比由 1/3 提高到 2/3, 延伸率由 8.3% 增加至 15.3%, 提高了约 50%。

由上述结果可知, 环形激光可改善焊缝延伸率。首先可能是因为环形激光可以降低凝固前沿的温度梯度,

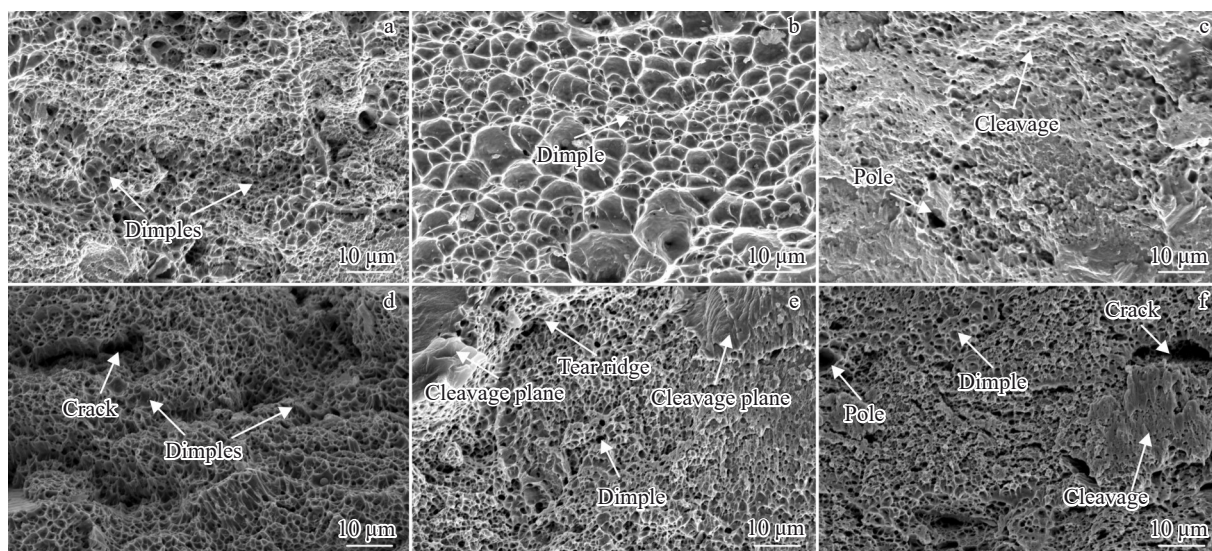


图 15 不同环芯比下的陆上和水上拉伸断口形貌

Fig. 15 Tensile fracture morphologies under different ring-core ratios in air (a-c) and underwater (d-f): (a, d) $P_c=1.0$ kW, $P_r=2.0$ kW; (b, e) $P_c=1.5$ kW, $P_r=1.5$ kW; (c, f) $P_c=2.0$ kW, $P_r=1.0$ kW

减弱焊缝两侧柱状晶的生长趋势,降低晶粒纵横比,同时使晶粒取向多样化,得到更高的延伸率。另一方面,环形激光使焊缝中晶粒尺寸减小、低角度晶界占比提高,阻碍位错运动,提高了焊缝的塑性。

图 15 为焊缝的断口形貌,当环形功率占比较大时,断口中的韧窝深且密,随着环形功率的降低,韧窝变浅,断口逐渐呈现出复杂的凹坑、撕裂棱和解理台阶,水下断口甚至出现裂纹,属于脆韧混合断裂模式,这表明随着环形功率的降低,焊缝的力学性能会进一步恶化。机械性能的提高主要归功于 LAGBs 含量的增加、晶粒尺寸的均匀性及晶粒取向的多样化。

4 结论

1) 熔深主要受中心激光的影响,而焊缝的平均宽度主要受环形激光的影响。相同功率下,与单一的高斯热源焊接相比,可调环形激光焊接可获得表面粗糙度较低的焊缝且表面氧化程度较轻。

2) 焊缝组织主要由焊缝两侧的柱状晶组成,不同参数下的双相比例没有明显变化。与陆上相比,水下焊缝 IGA 含量明显降低,WA 数量明显增加。随着环形激光占比提高,焊缝由“X”形向“Y”形转变,焊缝中 WA 数量减少,IGA 数量增多,焊缝晶粒尺寸及纵横比降低。

3) 拉伸试验表明,水下接头的抗拉强度比陆上要高,但延伸率低于陆上。随着环形激光功率占比的提高,抗拉强度变化不大,水下延伸率从 8.3% 提高到 15.3%,且断口形貌具有更均匀且更深的韧窝。机械性能的提高主要归功于 LAGBs 含量的增加、晶粒尺寸的均匀性及晶粒取向的多样化。

参考文献

References

- [1] Zhao Yan(赵岩), Wang Xu(王旭), Chen Dayu(陈达宇) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(2): 535
- [2] Guo Youdan(郭幼丹), Cheng Xiaonong(程晓农). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(6): 2258
- [3] Fan Y, Liu T G, Xin L *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 2021, 544(2): 152693
- [4] Takehisa Hino, Masataka Tamura, Yoshimi Tanaka *et al.* *Journal of Power and Energy Systems*[J], 2009, 3(1): 51
- [5] Guo Ning(郭宁), Cheng Qi(成奇), Fu Yunlong(付云龙) *et al.* *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2020, 56(6): 118
- [6] Guo Ning, Fu Yunlong, Xing Xiao *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2018, 260: 146
- [7] Shao Yingkai(邵盈恺), Chen Li(陈俐), Yu Cangrui(余仓瑞) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2024, 53(9): 2678
- [8] Fu Yunlong, Guo Ning, Cheng Qi *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2020, 9(6): 15648
- [9] Li Congwei(李丛伟), Shao Changlei(邵长磊), Zhu Jialei(朱加雷) *et al.* *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2021, 42(8): 67
- [10] Huang Zunyue, Luo Zhen, Ao Sansan *et al.* *Optics & Laser Technology*[J], 2018, 106: 123
- [11] Mohammadpour Masoud, Wang Lin, Kong Fanrong *et al.* *Manufacturing Letters*[J], 2020, 25: 50
- [12] Wang Lin, Gao Xiangdong, Kong Fanrong. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2022, 74: 201
- [13] Wang Lin, Yao Mingpu, Gao Xiangdong *et al.* *Optics & Laser*

- Technology[J], 2023, 161: 109202
- [14] Xie Weifeng, Tu Hao, Nian Keyu *et al.* *Optics & Laser Technology*[J], 2024, 174: 110563
- [15] Zhan Xiaohong, Zhang Jiahao, Wang Jianfeng *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2022, 854: 143884
- [16] Prokop Karolina, Rogalski Grzegorz. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*[J], 2016, 60(2): 35
- [17] You Jiayu(尤家玉), Hu Chenyu(胡晨珂), Zhang Zhenhai(张振海) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2024, 53(8): 2314
- [18] Hu Yu, Shi Yonghua, Sun Kun *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2018, 261: 31
- [19] Hu Yu, Shi Yonghua, Shen Xiaoqin *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2018, 49: 3306
- [20] Shi Yonghua, Hu Yu, Yi Yaoyong *et al.* *Metallography, Microstructure, and Analysis*[J], 2017, 6: 383
- [21] Hu Yu, Shi Yonghua, Sun Kun *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2019, 264: 366
- [22] Łabanowski Jerzy, Fydrych Dariusz, Rogalski Grzegorz *et al.* *Solid State Phenomena*[J], 2011, 183: 101
- [23] Ma Zhaoxuan(马兆炫), Liu Yibo(刘一搏), Wang Jianfeng(王建峰) *et al.* *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2022, 58(4): 48
- [24] Li Congwei, Zhu Jialei, Wang Caimei *et al.* *Virtual and Physical Prototyping*[J], 2024, 19(1): e2401925
- [25] Zhang Xiaochun(张晓春), Shen Guangyao(沈光耀), Mei Le(梅乐) *et al.* *Nuclear Power Engineering*(核动力工程)[J], 2024, 45(5): 225
- [26] Lai Rui, Cai Yan, Wu Yue *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2016, 231: 397
- [27] Pamarthi Venkat Vivek, Sun Tianzhou, Das Abhishek *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2023, 25: 7154
- [28] Liao Haipeng, Zhang Wenxu, Xie Huimin *et al.* *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2023, 88: 84

Microstructure and Properties of 2205 Duplex Stainless Steel Welded by Local Dry Underwater Laser with Adjustable Ring-Mode

Zhang Qinghua^{1,2}, Liu Yibo^{1,2}, Zhao Yongqing², Sun Qi^{1,2}, Guo Jiawei^{1,2}, Hou Shaojun², Sun Qingjie^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Precision Welding & Joining of Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(2. Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, China)

Abstract: To address the issues of rapid cooling rate during the solidification in underwater welding and the deterioration of the microstructure and properties, this work conducted local dry underwater welding experiments on 2205 duplex stainless steel using adjustable ring-mode laser. Meanwhile, compared with in-air welds, the effects of the power ratio between center and ring lasers on weld formation, microstructure and mechanical properties were investigated. The results show that the center laser mainly affects the penetration depth. With the increase in proportion of central power, the oxidation degree and surface roughness of the weld become more severe. In terms of microstructure, the underwater weld exhibits an increase in Widmanstätten austenite content, but a decrease in or even disappearance of intragranular austenite, compared to welds produced with the same parameters in air. With the increase in proportion of ring laser, the austenite content in the weld shows no significant change, the grain size and aspect ratio of the weld decrease, the directionality of columnar crystal growth on both sides of the weld weakens, and the number of low-angle grain boundary increases. In terms of performance, the underwater joints exhibit slightly higher tensile strength but lower elongation than those welds in air. As the proportion of ring laser power increases from 1/3 to 2/3, the elongation of underwater joints increases by about 50%.

Key words: 2205 duplex stainless steel; local dry underwater welding; adjustable ring-mode laser; weld formation; microstructure and properties

Corresponding author: Sun Qingjie, Ph. D., Professor, Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, P. R. China, E-mail: qjsun@hit.edu.cn