

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20240108001

S32101 不锈钢空气和水下环境激光立焊工艺及焊缝性能对比

李松钊¹ 朱加雷¹ 宋旷达¹ 张洪涛² 李桂新¹
黄钰珊¹ 赵晓鑫¹ 李守根¹

(1. 北京石油化工学院机械工程学院 北京 102627;
2. 哈尔滨工业大学(威海)材料科学与工程学院 威海 264209)

摘要: 激光立焊在乏燃料水池壁面位置的缺陷修复过程中易出现熔滴过渡不稳定、熔池下淌等问题,导致焊缝出现气孔、未熔合等缺陷。局部干法水下焊接技术结合了水下干法焊接的高焊缝质量和湿法焊接简便易行的优点,是当前核电站水下修复的首选方式。为了进一步研究水下环境对激光立焊的影响,搭建局部干法水下激光立焊试验平台。以 S32101 双相不锈钢为母材,针对 4 mm U 型坡口,进行空气环境和水下环境坡口填充试验,对比分析空气和水下两种环境立焊焊缝的组织性能。结果表明:水下环境对焊缝的组织成分、力学性能和耐腐蚀性能造成了不同程度的影响,但其综合性能仍优于母材,局部干法水下激光立焊技术在核电站乏燃料水池覆板壁面修复上具有较高的可行性。研究成果可为乏燃料水池壁面在役维修提供理论和试验基础。

关键词: S32101 双相不锈钢; 局部干法水下激光立焊; 组织性能; U 型坡口焊接

中图分类号 TG456

Laser Vertical Welding of S32101 Stainless Steel in Air and Underwater Environments: Comparison of Process and Weld Properties

LI Songzhao¹ ZHU Jialei¹ SONG Kuangda¹ ZHANG Hongtao² LI Guixin¹
HUANG Yushan¹ ZHAO Xiaoxin¹ LI Shougen¹

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102627, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, China)

Abstract: The spent fuel pool is a square structure that requires different welding positions to repair crack defects in stainless steel cladding. However, domestic research on the repair of defects in the wall position of the spent fuel pool is limited. Vertical welding is commonly used for large, heavy structural parts, but because of its welding position, it is prone to issues such as unstable transitions of the molten droplet and downward flow of the molten pool, resulting in weld porosity, lack of fusion, and other defects. By contrast, laser welding features low heat input and rapid cooling, which effectively mitigates the downward flow of the molten pool and reduces the impact of the vertical position of the weld caused by the weld. Local dry underwater welding technology combines the advantages of high weld quality of dry underwater welding and the simplicity of wet welding, which is the current preferred method for the underwater repair of nuclear power plants. Therefore, this study examined crack defects on the wall surface of a spent fuel pool by combining local dry underwater welding technology with laser vertical welding. S32101 duplex stainless steel was used as the base

基金项目: 北京市科技计划重点项目 (KZ202210017023); 国家自然科学基金联合基金重点支持项目 (U22B20127); 北京市属高等学校高水平科研创新团队建设支持计划 (BPHR20220110); 河北省重点研发计划 (22341801D, 23311802D)。

Fund: Key Projects of Beijing Science and Technology Program (KZ202210017023); Joint Fund of National Natural Science Foundation of China (U22B20127); Project of Construction and Support for High-level Innovative Teams of Beijing Municipal Institutions (BPHR20220110); Key Research and Development Projects of Hebei Province (22341801D, 23311802D).

收稿日期: 2024-01-08; 修改日期: 2024-04-09; 接受日期: 2024-10-17; 上线日期: 2025-01-06。

Received January 8, 2024; Revised April 9, 2024; Accepted in revised form October 17, 2024; Available online January 6, 2025.

引用格式: 李松钊, 朱加雷, 宋旷达, 等. S32101 不锈钢空气和水下环境激光立焊工艺及焊缝性能对比[J]. 中国表面工程, 2025, 38(1): 265-277.

Citation format: LI Songzhao, ZHU Jialei, SONG Kuangda, et al. Laser vertical welding of S32101 stainless steel in air and underwater environment: comparison of process and weld properties[J]. China Surface Engineering, 2025, 38(1): 265-277.

material, and bevel filler tests were conducted on a 4-mm U-shape bevel in both air and underwater environments. The organization and properties of the vertical weld in the two environments were analyzed comparatively. The results showed that compared with the air environment, the heat-affected zone of the weld in the underwater environment was smaller, with less austenite precipitation and insufficient growth in the cladding zone. The ferrite content in both the air and underwater environments was ranked as follows: HAZ > covered weld channel > undercut weld channel > filler weld channel. The overall ferrite content in the cladding zone was higher in the underwater environment as compared with that in the air environment. This difference was due to the greater degree of supercooling and faster cooling rate underwater, which prevented sufficient precipitation of austenite, resulting in a lower overall austenite content. XRD test results indicated that the cladding layer in both environments contained of both ferrite and austenite phases. The hardness distribution of the welds in both environments was consistent, following the order of melt-covered zone > heat-affected zone > parent material. The hardness of each area in the melt-coated layer was slightly higher than that of the filler channel, whereas the filler channel was slightly higher than the bottoming channel. Overall, the hardness of the welds in the underwater environment was higher than that of air-environment welds. Compared with the air environment weld, the tensile strength and impact work of the underwater environment weld decreased but still exhibited good mechanical properties. The impedance spectra and polarization curves from electrochemical corrosion experiments demonstrated that the corrosion resistance of underwater environment welds is lower than that of air-environment welds but still better than that of the base material. In summary, the underwater environment affects the organizational composition, mechanical properties, and corrosion resistance of the weld to varying degrees. However, its overall performance still surpasses that of the base material. This indicates that local dry underwater laser welding technology is highly feasible for the repair of spent fuel pool cladding walls in nuclear power plants, and the research results can provide theoretical and experimental foundations for in-service repair of the spent fuel pool walls.

Keywords: S32101 duplex stainless steel; local dry underwater laser vertical welding; organizational properties; U-bevel welding

0 前言

核电站乏燃料水池为顶部敞口的方形水池，壁面位置不锈钢覆板水下焊接修复时须要采用立焊方式。立向焊接是在垂直位置自下向上或自上向下施焊的焊接方式，根据焊接方向可分为立向上焊和立向下焊^[1]。立向焊接时由于熔化金属受重力的作用容易下淌，使焊缝成形困难，因而在立向焊接中，克服重力的影响是确保焊接质量的关键因素^[1]。激光焊接具有热输入小、冷却速度快等特点，可以有效减小熔池下淌趋势，降低立焊位置对焊缝造成的影响^[2]。局部干法水下焊接是当前核电站水下修复的首选方式。

CHANG 等^[3]对 Ti6Al4V 钛合金进行了激光立焊工艺试验，研究了重力对焊缝形貌、力学性能及内部气孔率的影响。BIESTER 等^[4]采用同轴送丝激光头进行了激光金属沉积工艺试验，主要研究了工艺参数对焊缝形状的影响。WEN 等^[5]使用相同参数对钛合金进行平焊和立焊焊接，并分析了不同工艺参数下缺陷形成过程和机理。机械科学研究总院的

曹浩^[6]对高强钢进行了窄间隙激光摆动填丝平焊和立焊工艺试验。哈尔滨工业大学的苗玉刚等^[7]对 5A06 铝合金进行了激光平焊和立焊工艺试验。

本文主要针对坡口填充焊接修复进行研究。与平焊相比，局部干法水下激光立焊的难点在于激光焊接头无法在水中作业，且立焊时由于排水装置上下存在压差，排水气体优先从压力小的顶部排出，导致排水装置内部的水无法完全排干，故平焊的排水装置无法满足立向位姿的焊接。因此，为了实现局部干法水下激光焊接技术的工程应用，本文拟采用局部干法水下激光填丝焊接技术，在水下环境于 S32101 双向不锈钢基体上进行 U 型坡口填充试验，并与空气环境的焊缝进行对比分析。

1 材料与试验方法

1.1 试验材料

试验采用由鞍山钢铁集团生产的 S32101 双相不锈钢板材及昆山京群焊材科技有限公司生产提供的 GMS-2209 焊丝，焊丝直径为 1.0 mm。母材及焊丝化学成分（质量分数）见表 1、2。

表 1 S32101 双相不锈钢化学成分（质量分数）

Table 1 Nominal chemical compositions of the S32101 duplex stainless steels

Element	Mn	Ni	C	Si	S	Cr	Cu	P	Mo	N	Co
Mass fraction / wt. %	4.9	1.62	0.023	0.59	0.001	21.5	0.24	0.0199	0.26	0.21	0.025

表 2 GMS-2209 不锈钢焊丝化学成分 (质量分数)

Table 2 Nominal chemical compositions of the GMS-2209 welding wire

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	N	Co	Nb
Mass fraction / wt. %	0.012	0.35	1.59	0.015	0.001	22.56	3.05	8.62	0.06	0.15	0.049	0.002

1.2 试验方法

试验使用锐科公司生产的 RFL-C6000S 光纤激光器, 搭建的局部干法水下激光立焊试验系统总体示意图如图 1 所示, 实物图如图 2 所示。焊后, 以垂直于焊缝方向为长度方向对焊接接头进行取样, 再用 2000#表面粗糙度以下不同的砂纸对试样进行磨制, 对磨制过的试件表面进行抛光、腐蚀处理, 利用 Leica-DMi8c 型金相显微镜对焊接接头进行金相组织观察。采用 Ferrite Determ SP10a 型铁素体仪测定焊缝各区域铁素体含量, 计算两相比比例。使用 FOCUS X 射线衍射仪在 25° ~ 100° 角度范围内, 扫描并分析涂层物相。采用 HVS-1000Z 维氏硬度计研究了在 500 g 载荷作用下保持 10 s 的显微硬度。使用 MTSC64.305 型拉伸试验机和 PTM2200 金属摆锤式冲击试验机分别进行拉伸和冲击试验, 并采

用 Quanta 400 型扫描电镜 (SEM) 对焊缝拉伸、冲击断口进行观察分析, 确定焊缝断裂特征及形式。最后, 使用 Versa STAT 3F 电化学工作站, 在 3.5% 的 NaCl 溶液中, 测试两种环境焊接接头的阻抗谱和极化曲线。

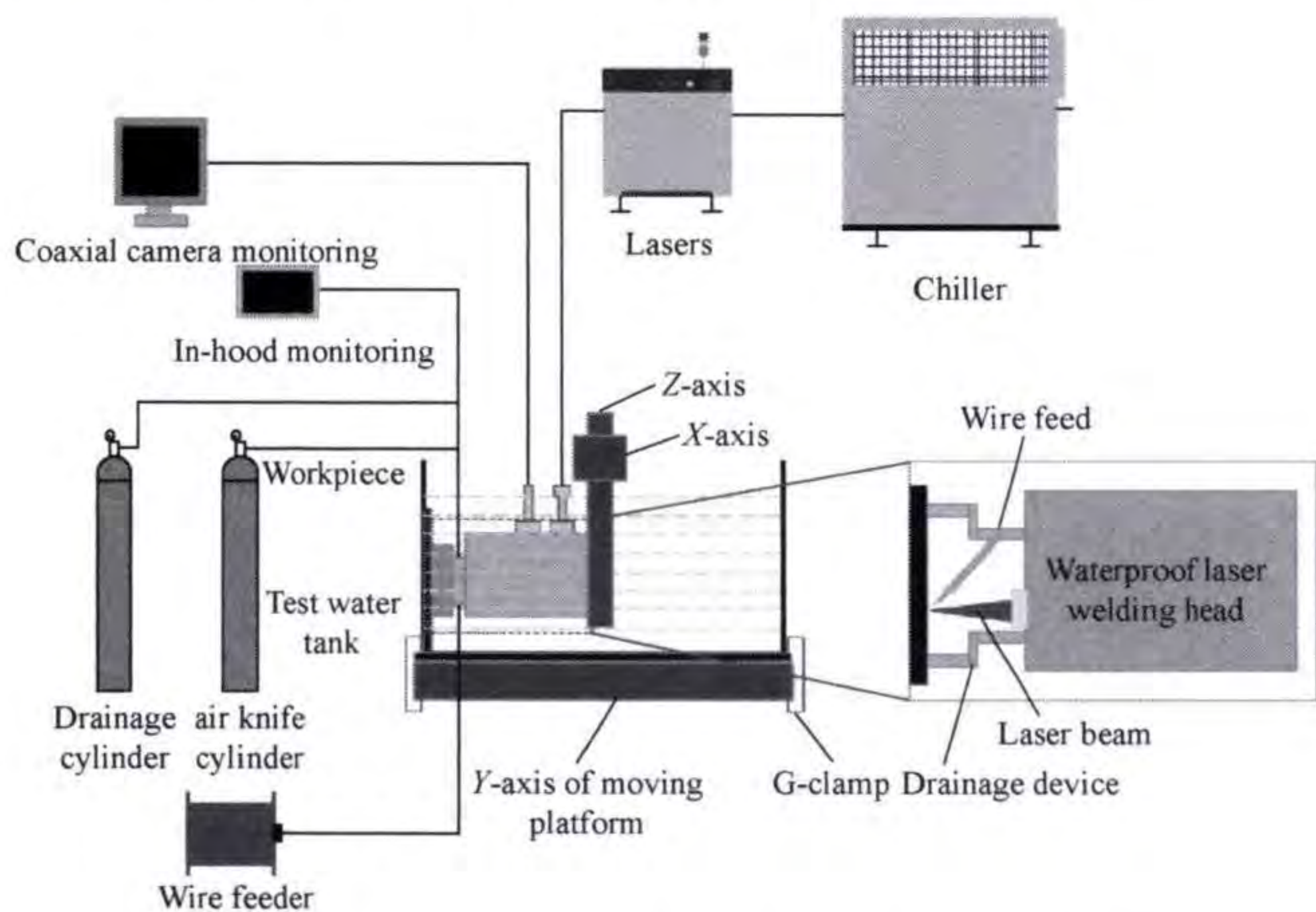


图 1 局部干法水下立焊试验系统总体示意图

Fig. 1 General diagram of partial dry underwater vertical welding test system



图 2 局部干法水下立焊试验系统实物图

Fig. 2 Partial dry underwater vertical welding test system physical diagram

通过对坡口形状及角度进行研究, 发现与 V 形坡口相比, U 形坡口内部气孔较少, 这也与文献[8]的研究结果相一致^[8]; 且当侧边切线与对称线角度为 15° 时, 可以有效避免坡口底部出现未熔合等缺陷。因此, 本文设计的坡口为 4 mm 带角度 (15°) U 形坡口, 坡口尺寸如图 3a 所示。经过前期试验探索, 坡口焊接所需焊道为 5 道, 即一道打底、两道填充、两道盖面, 模拟焊道示意图如图 3b 所示。

激光填丝焊接工艺参数见表 3, 保护气体为 99.99% 的氮气, 光斑直径 5 mm, 焊接方向为立向上焊, 第二至四焊道抬升量分别为 1.8、1.2、1 mm, 盖面两焊道搭接率为 35%。

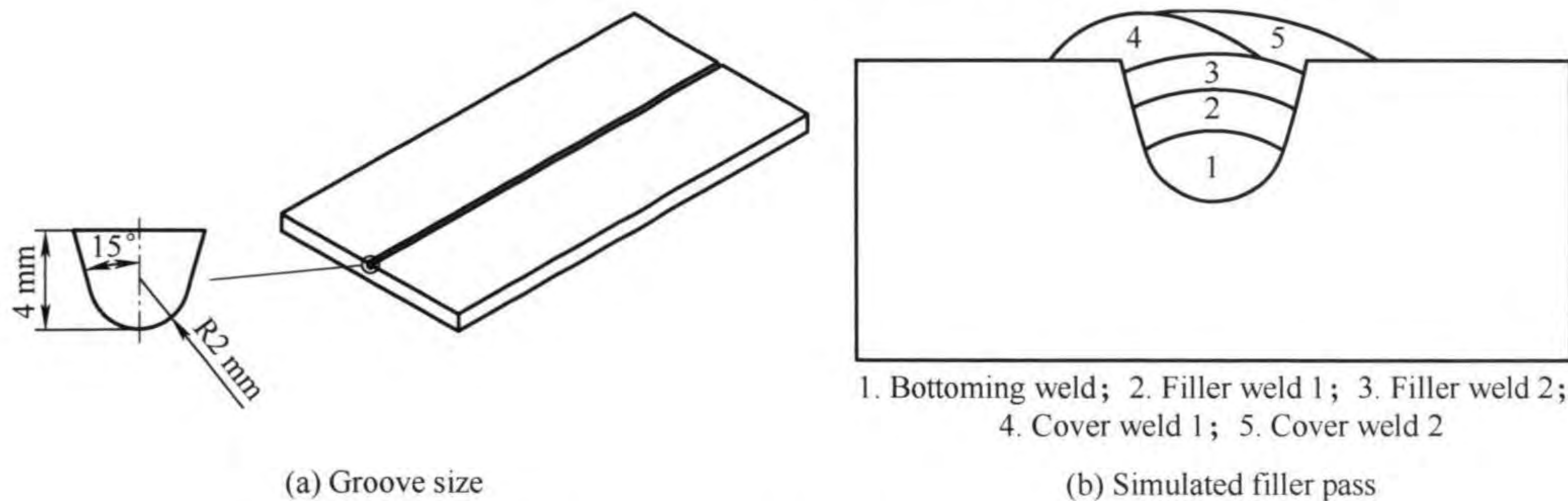


图 3 坡口尺寸和模拟焊道示意图

Fig. 3 Groove size and schematic diagram of simulated filler pass

表 3 激光填丝焊接工艺

Table 3 Laser wire filling welding process

Test environment	Laser power / kW	Welding speed / (mm · s ⁻¹)	Wire feed speed / (cm · min ⁻¹)	Shielding gas flow rate / (L · min ⁻¹)	Drainage gas flow / (L · min ⁻¹)
Air environment	5	8.9	320	20	-
Underwater environment	5	8.9	320	-	30

2 结果与分析

2.1 焊缝宏观形貌

图 4、5 分别为空气环境和水下环境焊缝的

表面形貌，两种环境下焊缝的外观连续均匀，无明显缺陷；与空气环境焊缝相比，水下环境焊缝氧化程度较小，颜色为银白色。这是由于水下环境焊缝在焊接过程中受排水气罩保护作用，为纯氮气保护环境，表面未被氧化。



图 4 空气环境焊缝

Fig. 4 Weld in air environment

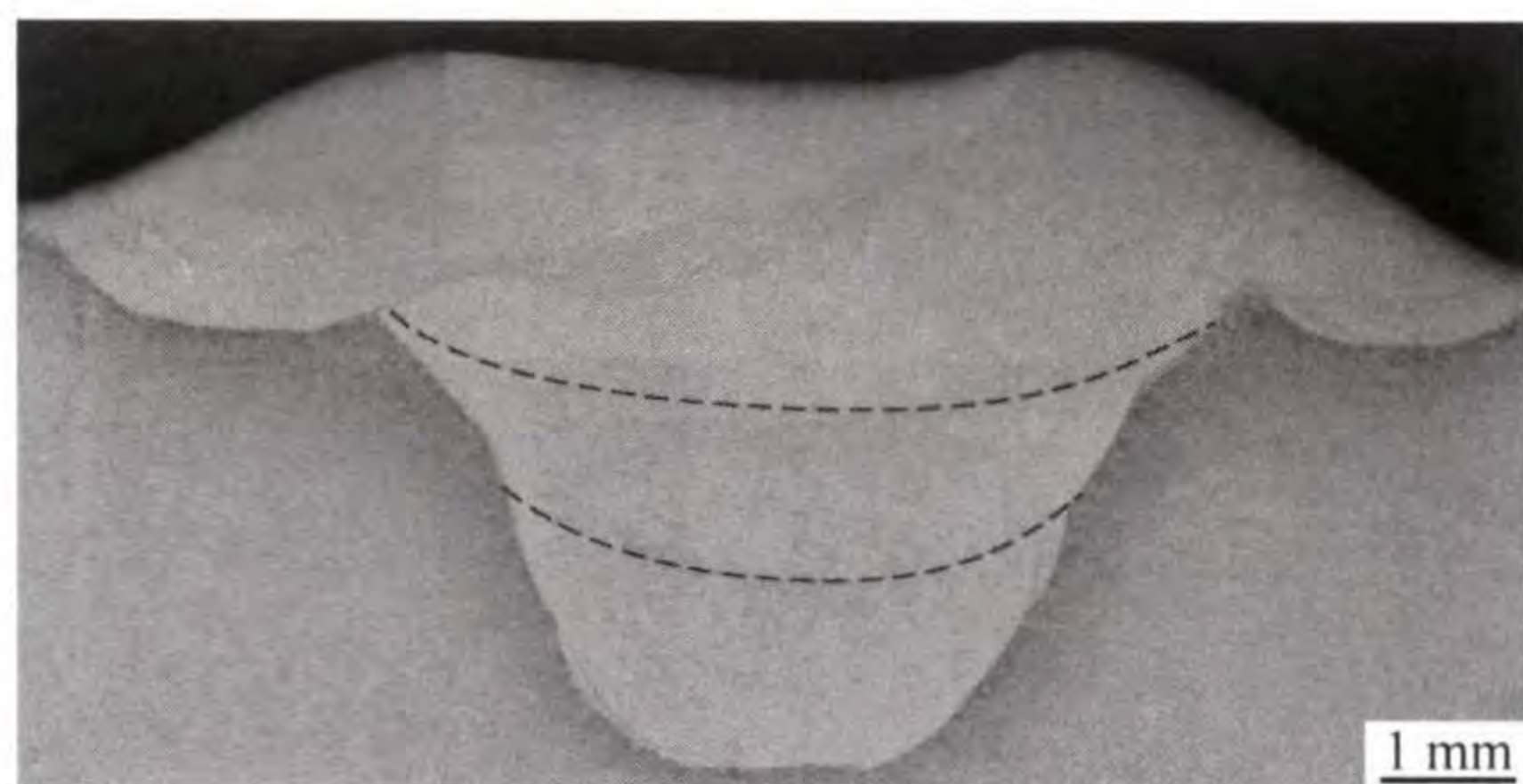


图 5 水下环境焊缝

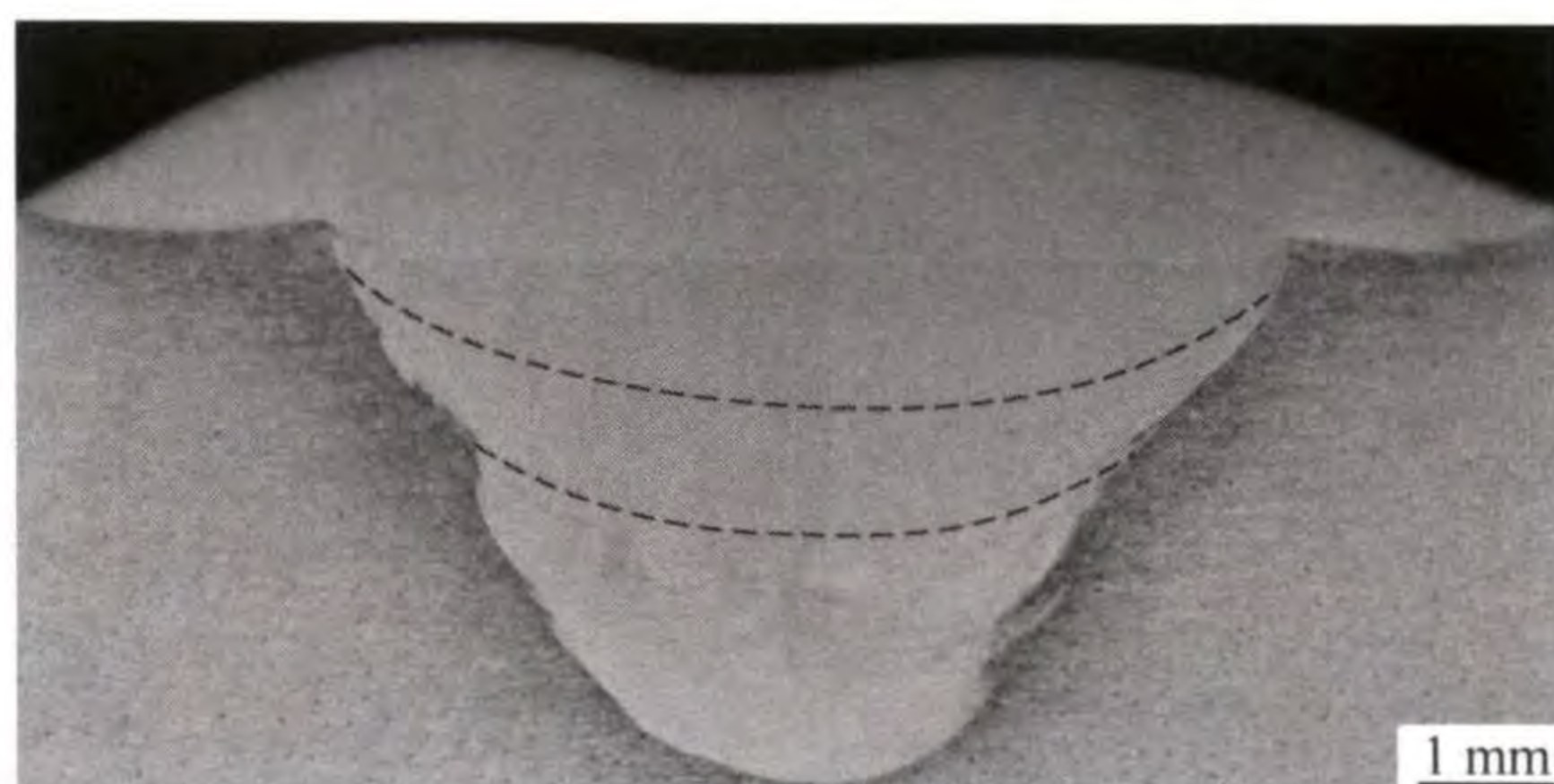
Fig. 5 Underwater environment weld

图 6a、6b 为两种环境下焊缝截面，均无气孔、裂纹、夹杂和未熔合等缺陷，焊缝金属与母材

之间、各焊道之间均形成了致密的冶金结合。与空气焊缝相比，水下焊缝熔深、熔宽略有降低，余高略有增加，原因是水下环境过冷度较大，熔池冷却速度较快，凝固时间短。



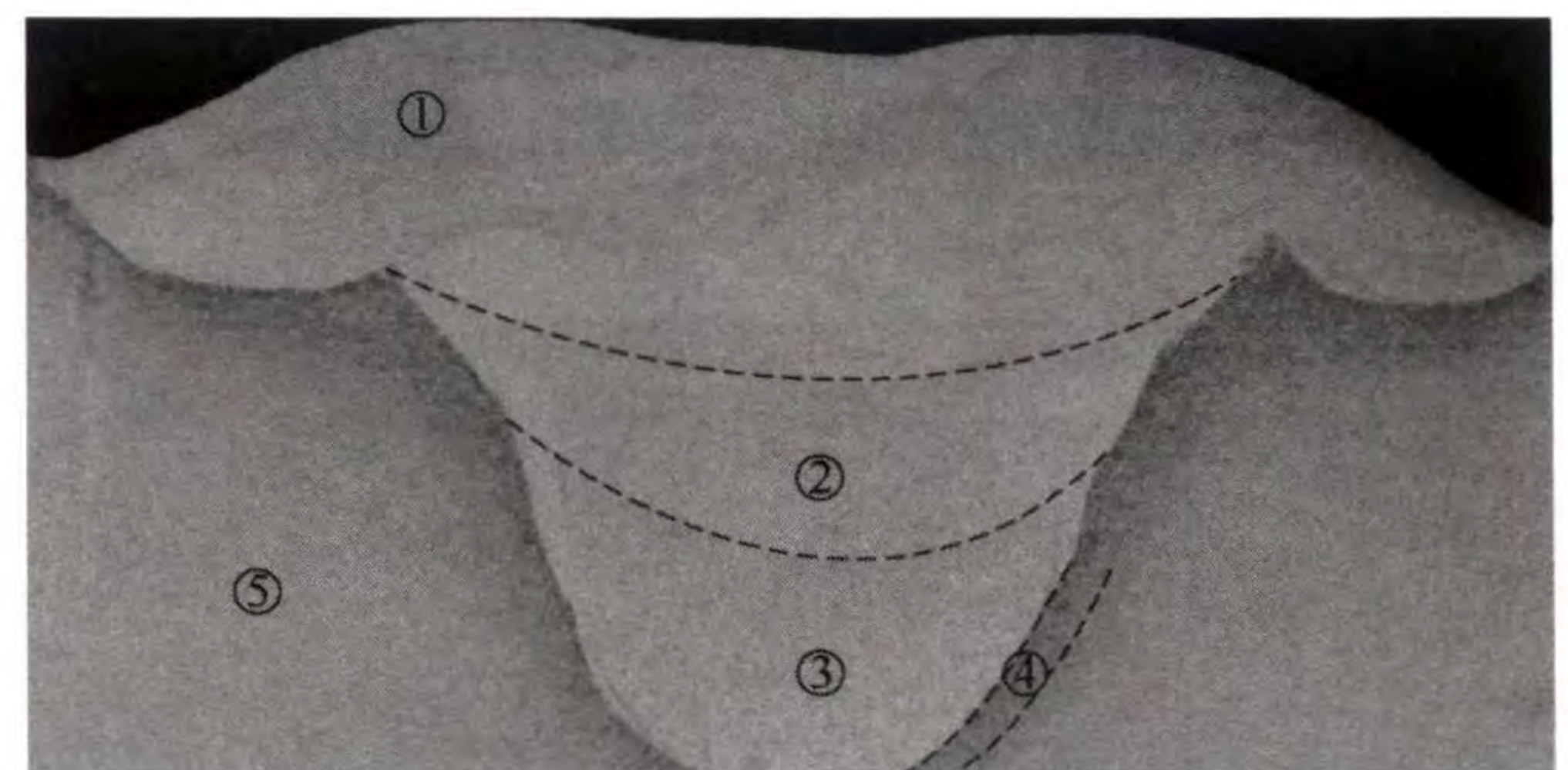
(a) Air environment



(b) Underwater environment

图 6 空气环境和水下环境焊缝的宏观截面图
Fig. 6 Macroscopic cross-section of welding seams in air environment and underwater environment

坡口填充为多条焊缝熔合搭接而成，基体与焊缝之间、各焊道之间发生复杂冶金化学反应，导致焊缝各区域组织存在差异。焊缝各区域示意图如图 7 所示，从左到右依次为母材、热影响区、熔覆区三个区域；



① Upper cladding zone ② Mid-layer cladding zone
③ Underlayer cladding zone ④ Heat affected zone
⑤ Base metal

图 7 焊缝各区域示意图

Fig. 7 Schematic diagram of each area of the weld

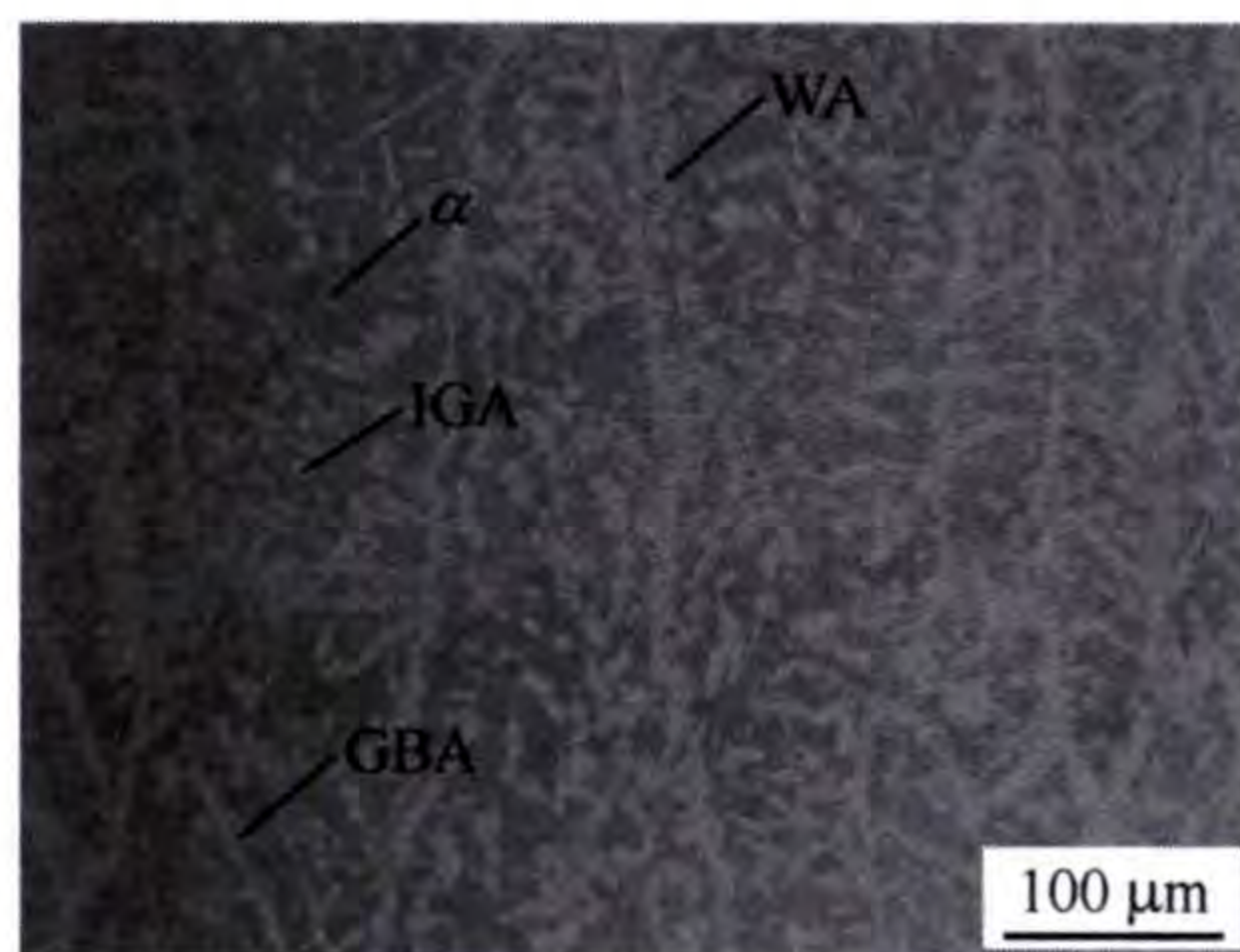
根据填充焊道, 熔覆区又可分为下层熔覆区(打底焊道)、中层熔覆区(填充焊道)、上层熔覆区(盖面焊道), 对焊缝各区域放大倍数进行观察。

2.2 熔覆区显微组织

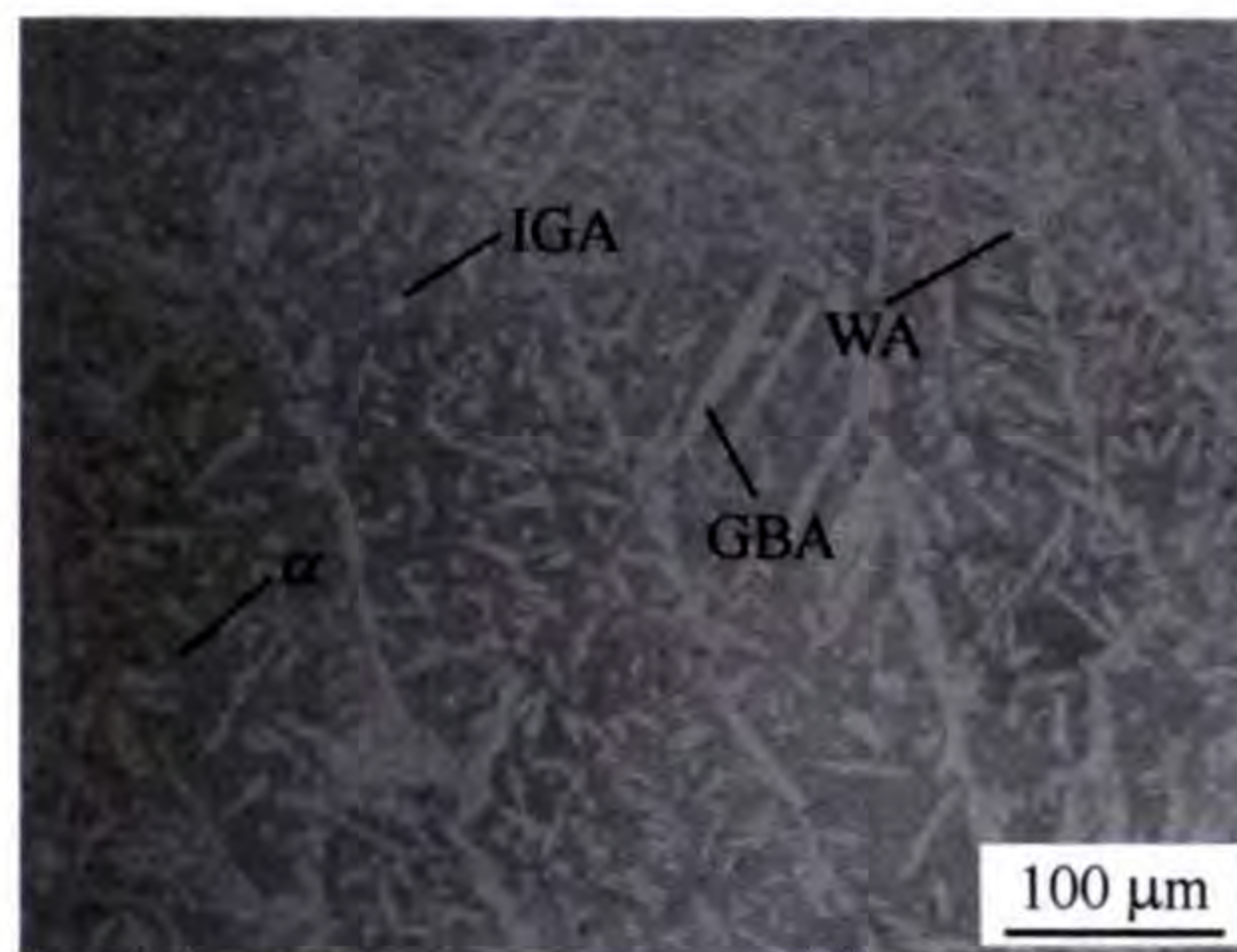
为进一步研究空气和 underwater 两种环境立焊焊接接头的组织性能, 分别对打底焊道组织、填充焊道组织、盖面焊道组织、HAZ 组织进行更深一步的金相观察。

(1) 打底焊道组织

图 8 为空气和 underwater 环境焊缝打底焊道的显微组织, 图中深色区域为铁素体(α)组织, 浅色区域为奥氏体(γ)组织, 由图 8 可以看出, 打底焊道中奥氏体由羽毛状魏氏奥氏体(WA)、长条状晶界奥氏体(GBA)与小片状晶内奥氏体(IGA)组成, 与空气环境相比, underwater 环境奥氏体晶粒具有更加明显的方向性, 原因是焊接结束后, 晶粒会沿散热快的方向生长, 即向焊缝中心生长, underwater 环境具有更快的冷却速度, 因此其方向性更加明显。



(a) Air environment



(b) Underwater environment

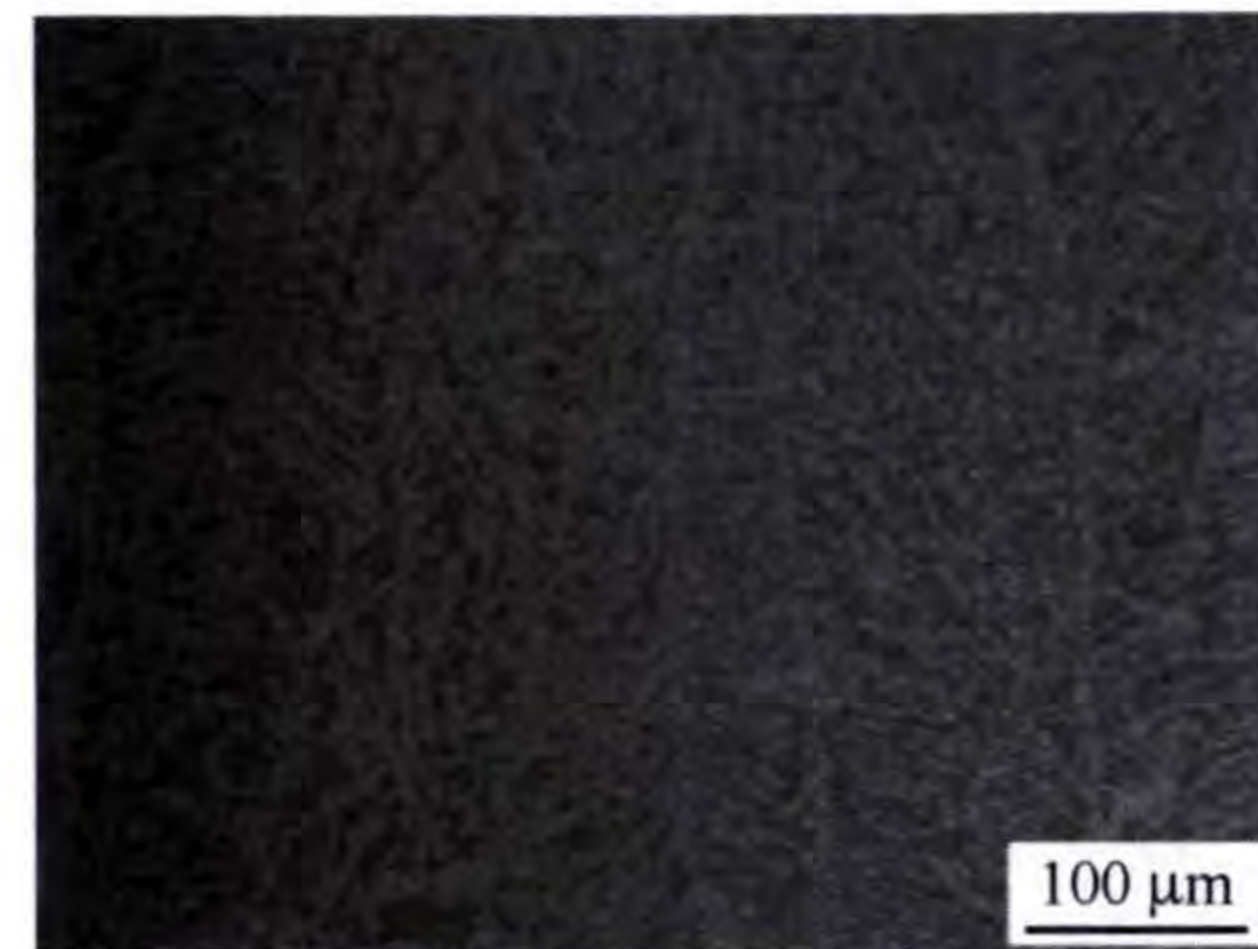
图 8 打底焊道显微组织

Fig. 8 Microstructure of bottom pass

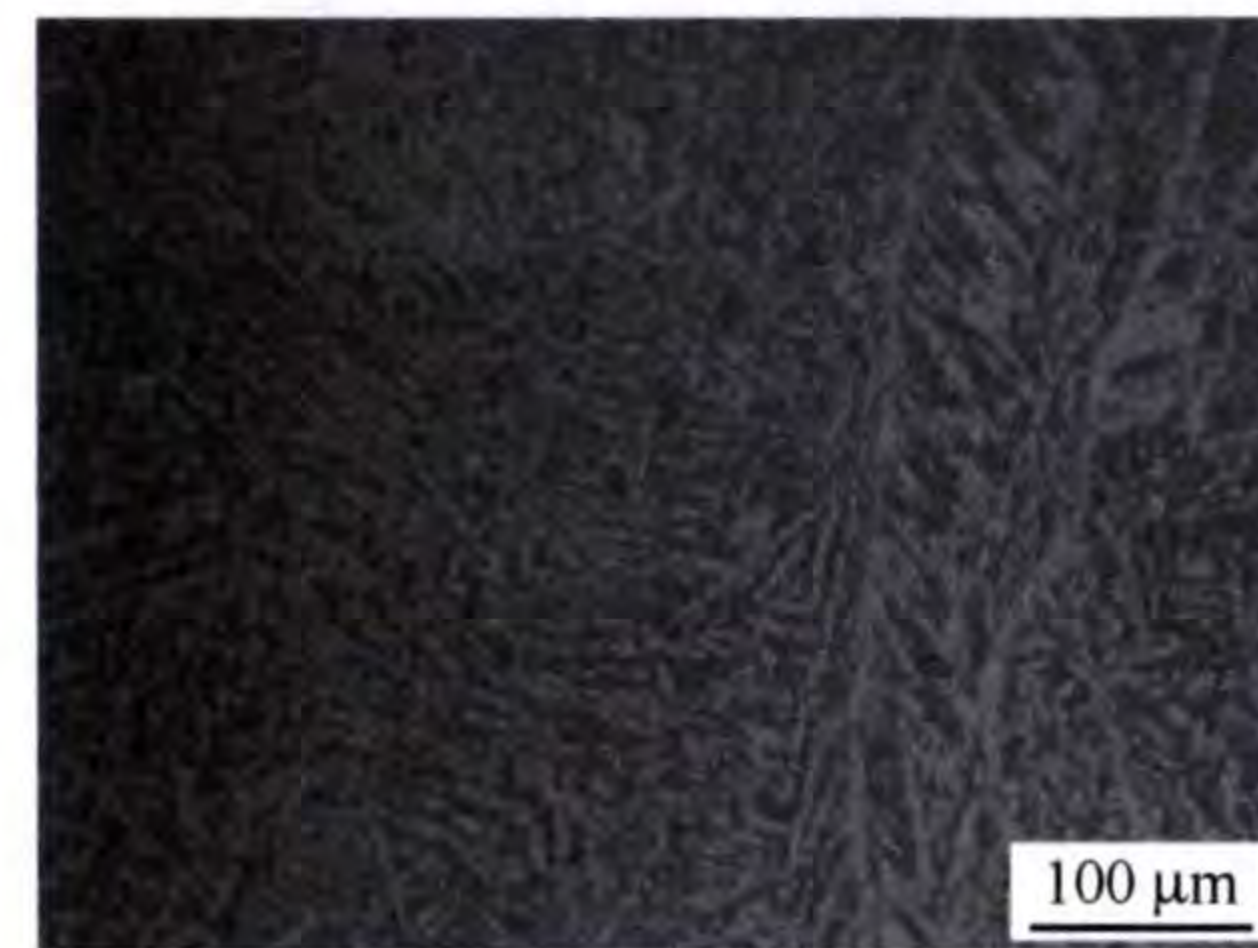
(2) 填充焊道组织

图 9 为空气与 underwater 环境焊缝填充焊道的显微组织, 可以看出, 填充焊道主要由羽毛状魏氏奥氏体及大量细小块状晶内奥氏体组成, 晶粒尺寸大小不一, 与打底焊道相比, 部分区域奥氏体转变较多, 析出较为密集。这是由于填充焊道不仅受打底焊道

的预热作用, 而且还受下一道焊道的再加热作用, 具有热量累积效果, 为铁素体向奥氏体转变提供了相对充足的反应时间, 使奥氏体转变较为充分。与空气环境相比, underwater 环境填充焊道组织晶粒较细小。原因一是 underwater 焊缝仅受下一道焊缝的再加热作用, 焊缝吸收的热输入较空气中有所下降, 导致奥氏体晶粒生长不充分; 原因二是水环境的快速冷却作用, 使焊缝组织的形核率增加, 起到了晶粒细化的作用^[9]。



(a) Air environment



(b) Underwater environment

图 9 填充焊道显微组织

Fig. 9 Microstructure of filler pass

(3) 盖面焊道组织

图 10 为空气环境和 underwater 环境盖面焊道的显微组织。由图 10 可以看出, 盖面焊缝中组织的典型形貌是树枝状晶界奥氏体与羽毛状魏氏奥氏体, 具有明显的方向性, 且生长方向一致。原因是盖面焊道位于坡口上方, 焊缝表面与空气接触的面积增大, 散热速度发生改变, 奥氏体会优先在冷却速度较慢的区域析出, 因此组织有较为明显的生长方向^[10]。与空气环境相比, underwater 环境盖面焊道组织生长不充分, 奥氏体覆盖区域略有降低。

(4) HAZ 组织

在热影响区中, 其奥氏体及铁素体形态发生了变化, 空气环境及 underwater 环境的热影响区如图 11 所示, 图中虚线之间区域为热影响区。由图 11 可以看出, 在焊接加热过程中, 与焊缝相邻热影响区中的

条带状铁素体发生回复再结晶,进而转变为铁素体等轴晶,同时大多数带状奥氏体发生固态相变转变为铁素体。随着焊缝逐渐冷却,奥氏体由铁素体边界析出。但由于其冷却速度较快,奥氏体析出不充分,含量较低。与空气环境相比,水下环境热影响区组织无明显变化,但其区域变小,这是因为水下环境具有更快的冷却速度和热循环速度。

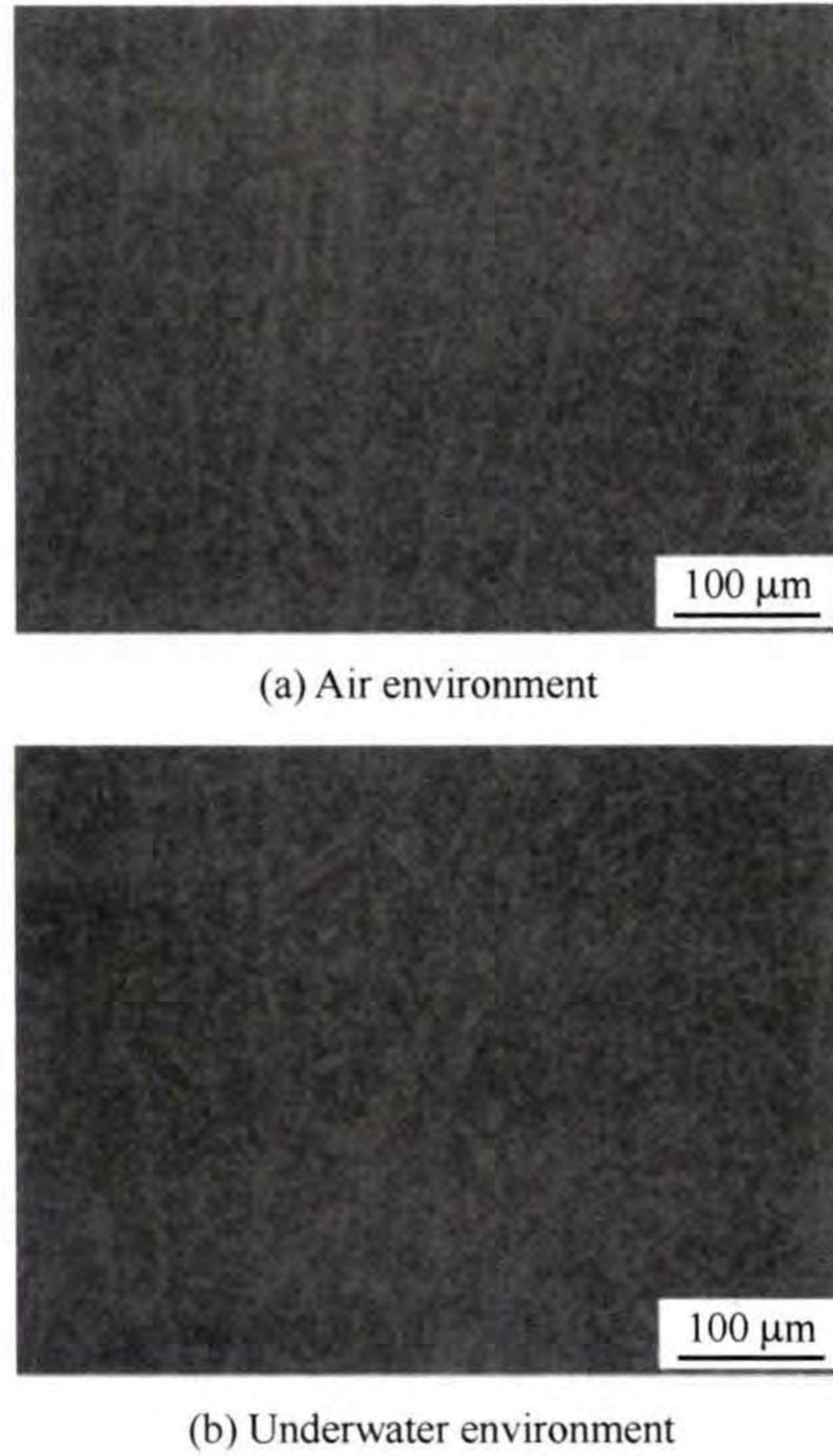
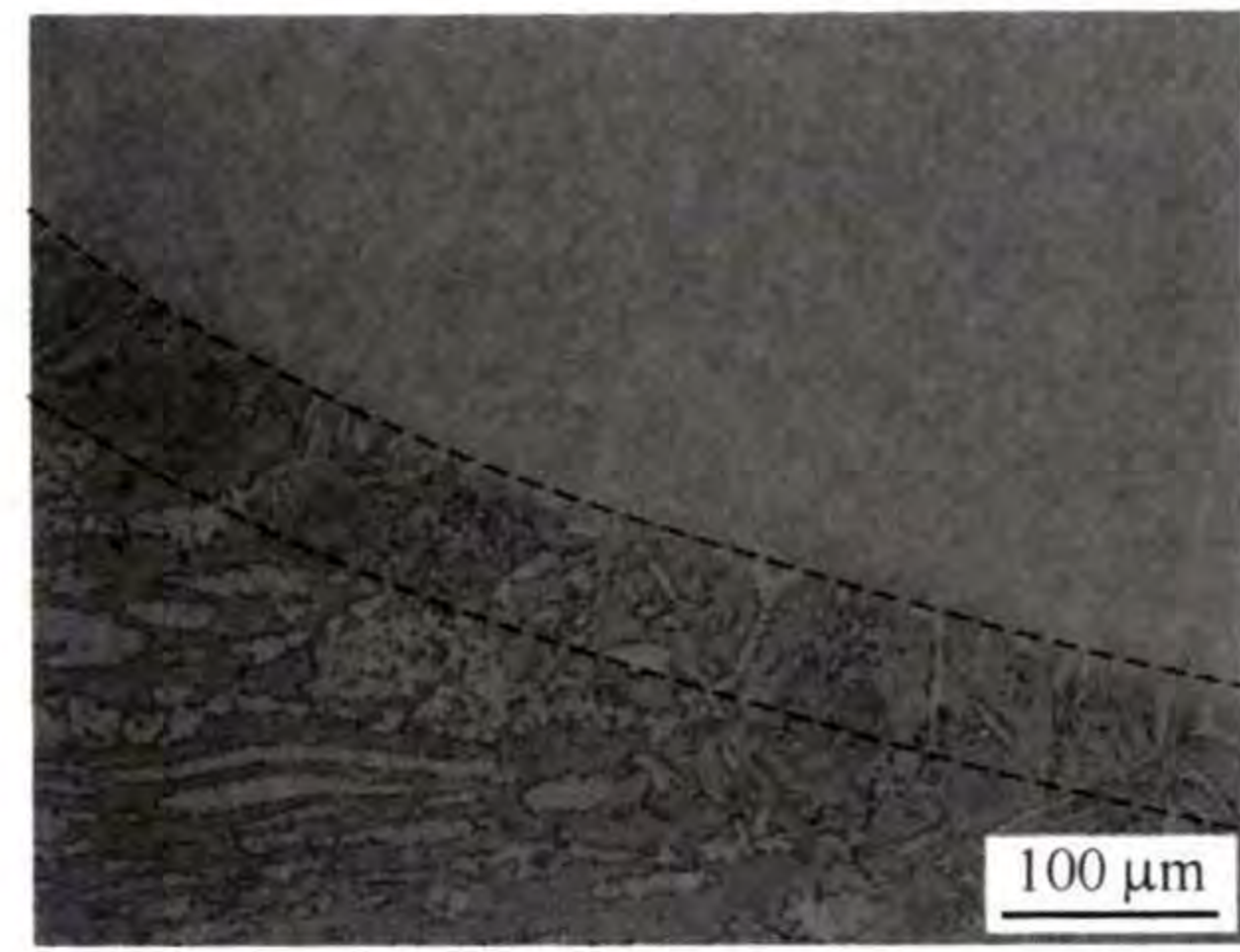
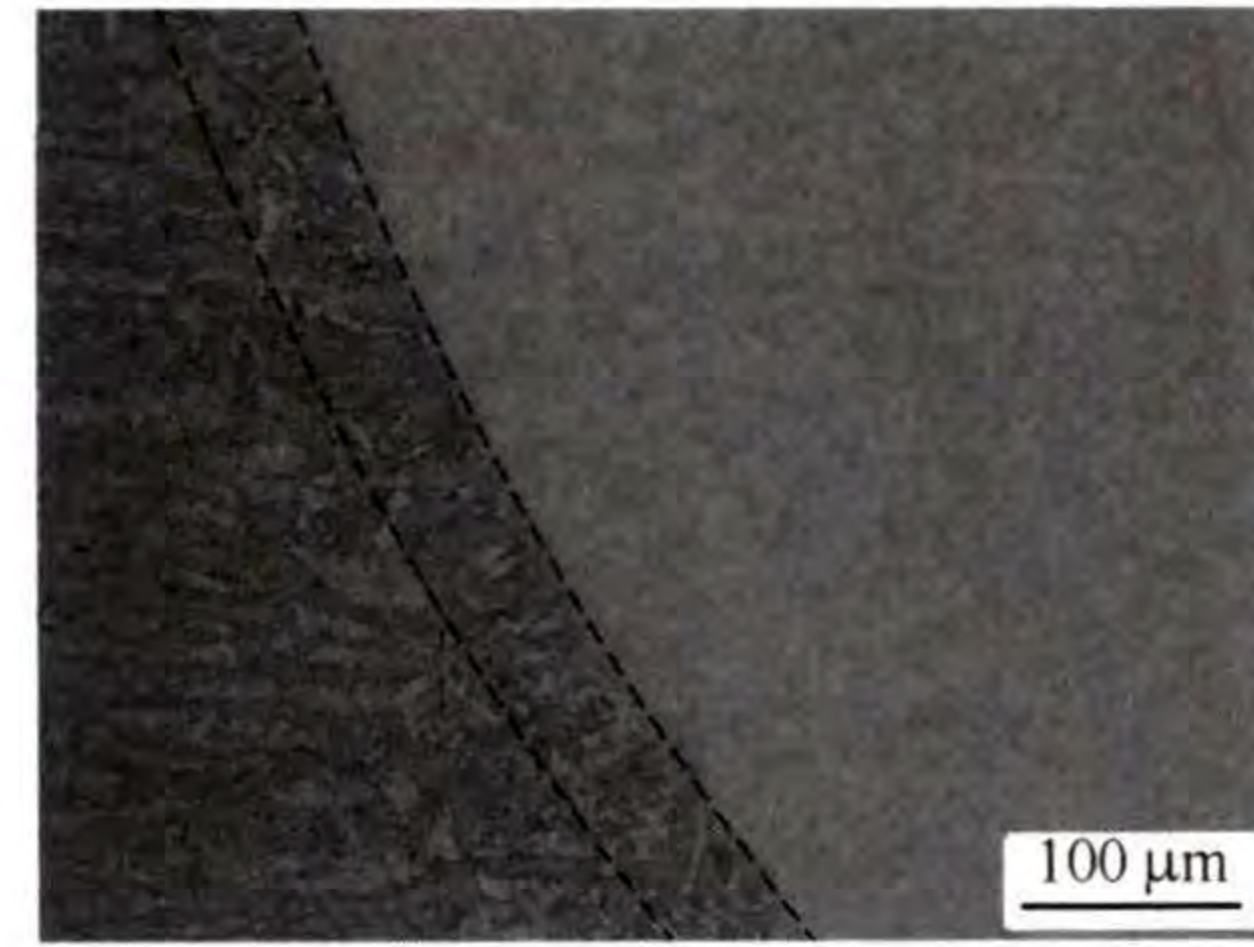


图 10 盖面焊道显微组织

Fig. 10 Microstructure of weld pass on the cover



(a) Air environment



(b) Underwater environment

图 11 HAZ 显微组织

Fig. 11 HAZ microstructure

2.3 焊缝各区域铁素体含量检测

双相不锈钢由奥氏体和铁素体两相组成,焊缝中的奥氏体与铁素体两相比比例是衡量焊接质量的重要因素,一般认为,铁素体含量应大于 30%,奥氏体含量应大于 35%^[11-12]。为确定各区域铁素体与奥氏体两相占比,使用铁素体仪测量空气及水下焊缝熔覆区、HAZ 及母材的铁素体含量,每个区域分别测定三次,取平均值,测定结果见表 4、5。

表 4 空气环境焊缝各区域铁素体含量

Table 4 Contents of ferrite in each area of weld in air environment

Determination area	Measured value 1 / %	Measured value 2 / %	Measured value 3 / %	Average content / %
Underlayer cladding zone	45.3	45.9	46.4	45.9
Mid-layer cladding zone	42.3	43.2	42.9	42.8
Upper cladding zone	46.2	48.3	47.6	47.4
HAZ	48.2	49.3	50.5	49.3
Base metal	51.2	50.9	51.5	51.2

表 5 水下环境焊缝各区域铁素体含量

Table 5 Contents of ferrite in each area of weld in underwater environment

Determination area	Measured value 1 / %	Measured value 2 / %	Measured value 3 / %	Average content / %
Underlayer cladding zone	47.1	47.5	48.4	47.7
Mid-layer cladding zone	46.5	47.2	46.9	46.9
Upper cladding	47.5	49.1	47.7	48.1
HAZ	48.5	49.9	51.8	50.1
Base metal	50.4	51.2	51.6	51.1

由表 4、5 可以看出, 空气环境与水下环境焊缝各区域内铁素体含量均表现为: HAZ > 盖面焊道 > 打底焊道 > 填充焊道, 这与焊缝各区域的焊接热输入及显微组织相互对应, HAZ 区域所受焊接热量较低, 奥氏体析出不充分, 含量最低。在打底、填充、盖面焊道中, 填充区域由于受上一焊道的预热处理和下一焊道的再热处理, 使其对奥氏体的转变生长提供了充足的时间, 因此其奥氏体含量最高; 打底焊道相较盖面焊道, 仍受到下一焊道的再热处理, 因此其含量略高于盖面焊道。

两种环境焊缝各区域铁素体含量对比如图 12 所示。由图 12 可以看出, 与空气环境相比, 水下环境焊缝熔覆区整体铁素体含量较高, 原因是水下环境过冷度较大, 冷却速度较快, 导致其奥氏体未能充分析出, 降低了奥氏体的整体含量; 除此之外, 水下环境焊缝熔覆区各焊道之间的铁素体含量较为接近。原因是在水下环境中, 下一焊道在焊接起始时, 上一焊道已充分冷却, 未能为下一焊道提供预热, 下一焊道受上一焊道的影响较小, 熔覆区各焊道之间热量影响较低, 其铁素体含量较为接近。

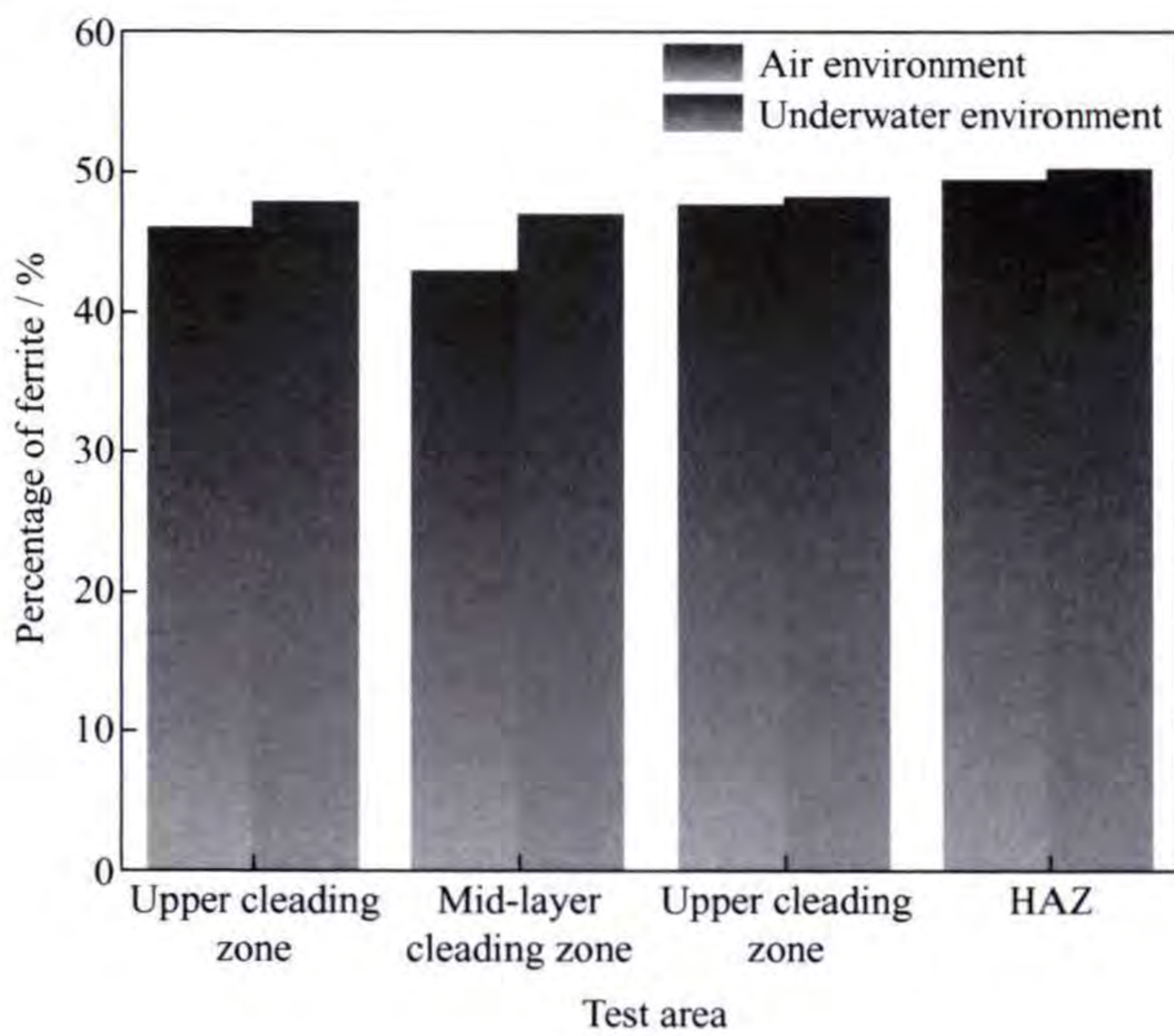


图 12 两种环境各区域铁素体含量对比

Fig. 12 Comparison of ferrite content in different regions of two environments

2.4 XRD 结果分析

图 13 为两种环境熔覆区的 XRD 图谱, 空气环境和水下环境熔覆层均由 δ 和 γ 相组成, 包括四个 δ 峰 $\{(110) (200) (211) (220)\}$ 和五个 γ 峰 $\{(111) (200) (220) (311) (222)\}$, 这与 LI 等^[13]的研究相一致。结果表明, 两种环境下熔覆层均由铁素体及奥氏体两相组成, 无其他有害相生成。

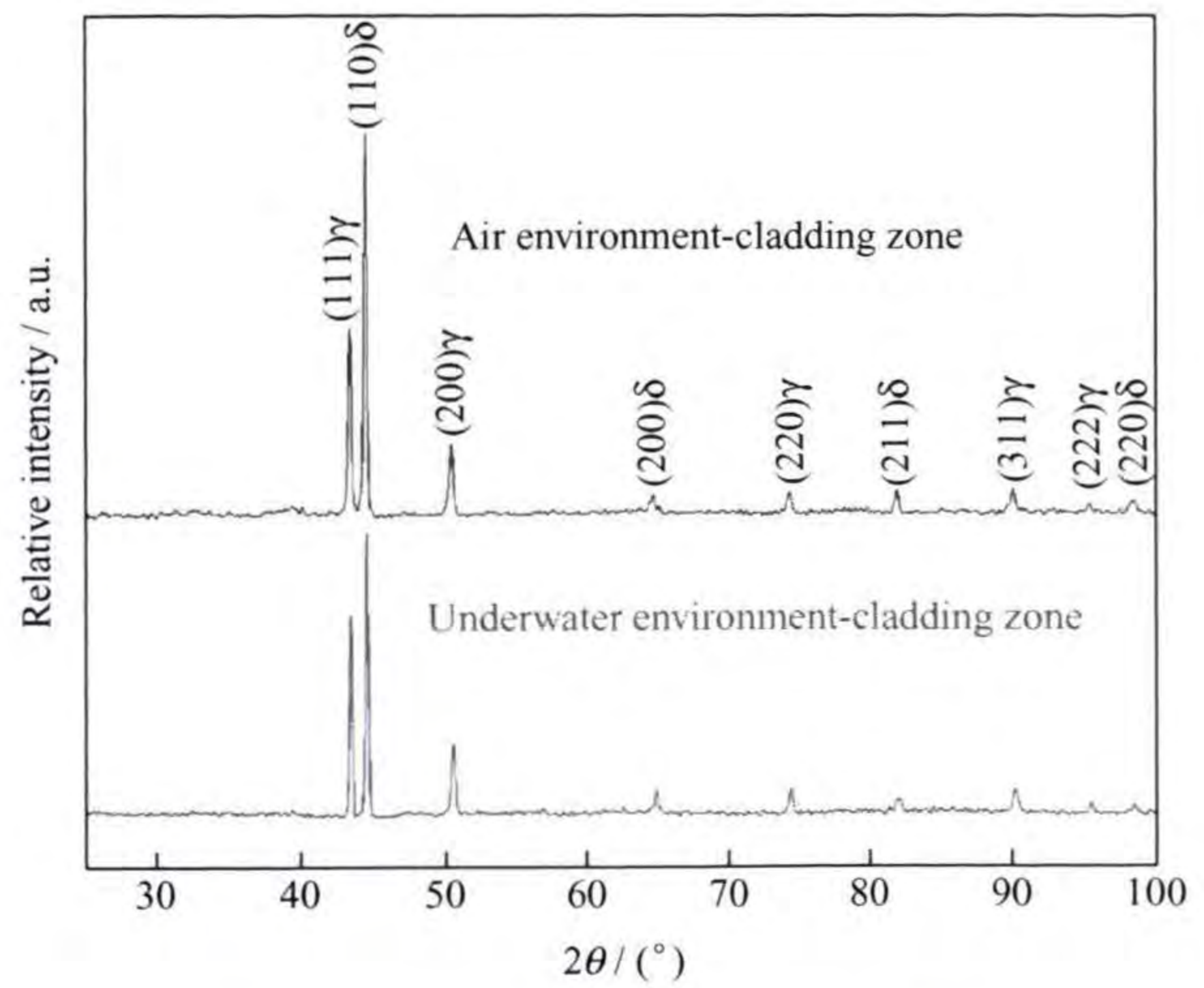


图 13 两种环境熔覆区 XRD 图谱

Fig. 13 XRD patterns of the two environmental cladding zone

2.5 力学性能检测

2.5.1 显微硬度

对焊缝各区域进行维氏硬度测试, 测试区域为上层、中层、底层熔覆区, 所加载荷为 500 g, 作用时间为 10 s, 每隔 0.3 mm 取一个点, 显微硬度测试示意图如图 14 所示。

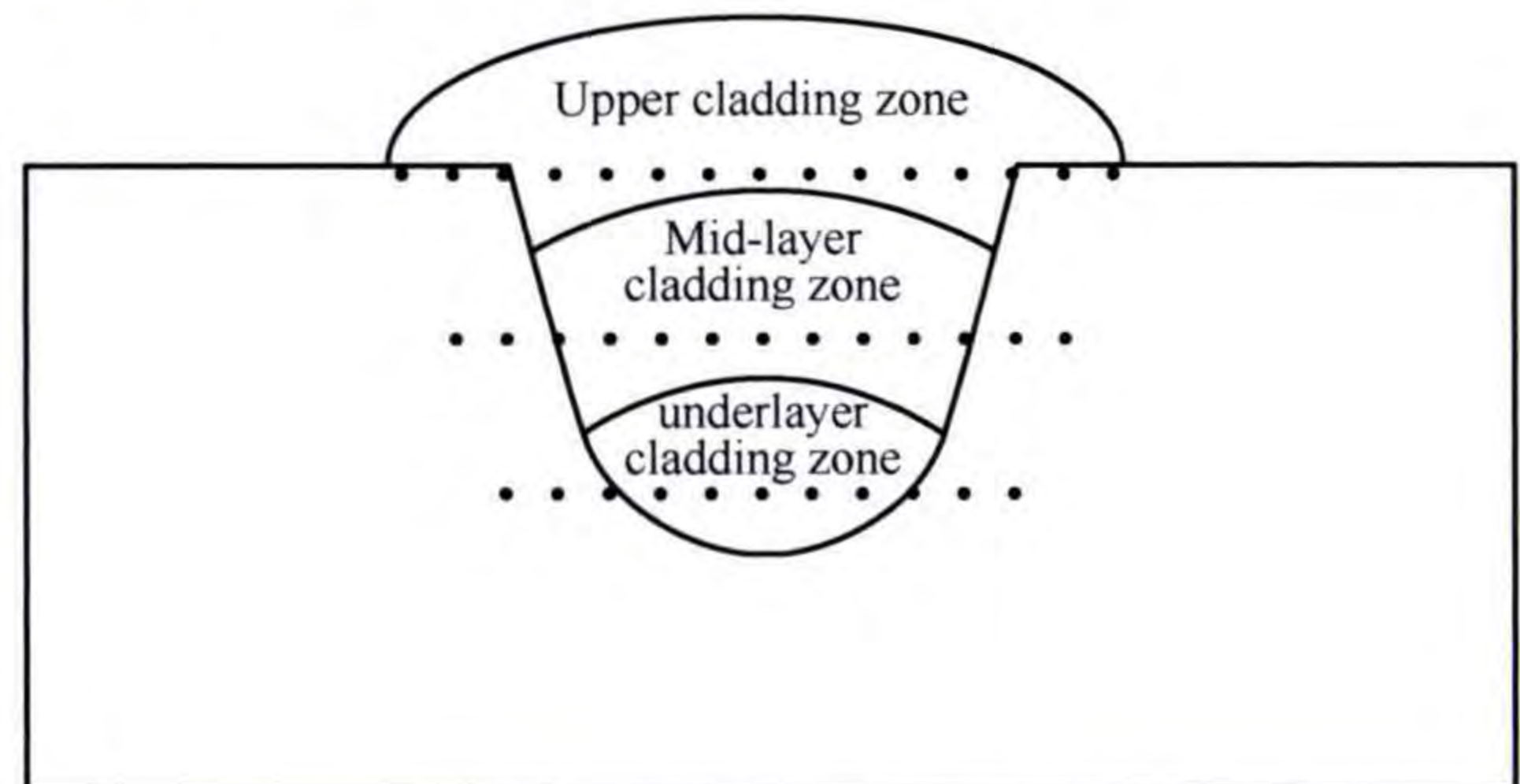


图 14 硬度取点示意图

Fig. 14 Dot distribution of microhardness

空气环境和水下环境熔覆层显微硬度分布如图 15、16 所示, 由图可以看出, 各熔覆层硬度存在差异, 但其分布特征基本一致, 均呈现为: 熔覆区 > 热影响区 > 母材, 原因一是熔覆区在焊接时加入了一定的合金元素, 大量合金元素冷却凝固时堆积在焊缝中心^[14]; 原因二是与母材相比, 熔覆区晶粒细化明显, 奥氏体晶粒尺寸小于母材, 因此熔覆区硬度最高。热影响区是在焊接过程中, 母材因受热影响但未熔化而发生金相组织和力学性能变化的区域, 并无合金元素的加入, 所以热影响区是修复区较为薄弱的区域。但与母材相比, 热影响区经过激光加热处理, 对晶粒细化、两相平衡仍有一定的帮助, 所以热影响区硬度仍略高于母材。

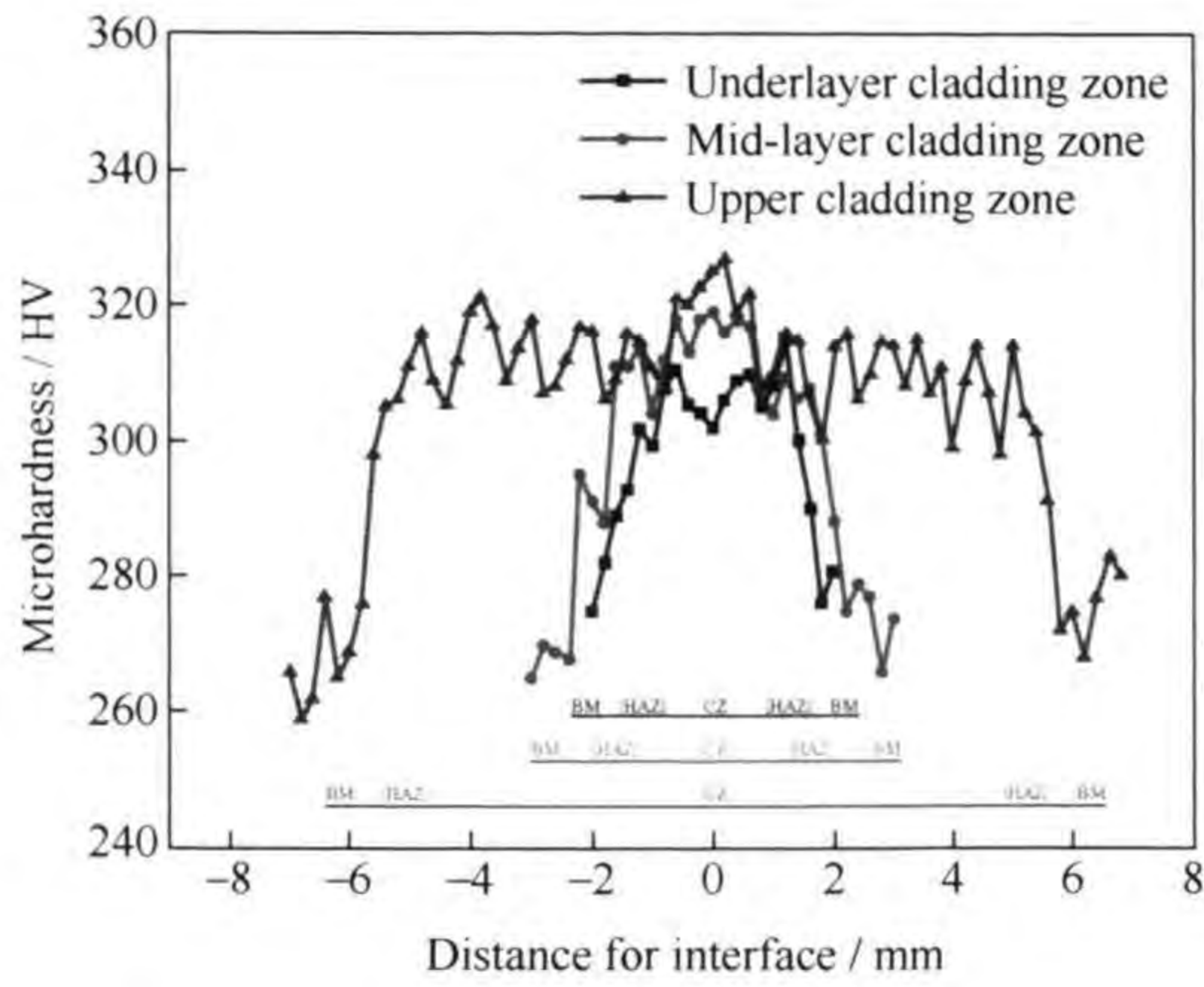


图 15 空气环境焊缝硬度分布示意图
Fig. 15 Schematic diagram of weld hardness distribution in air environment

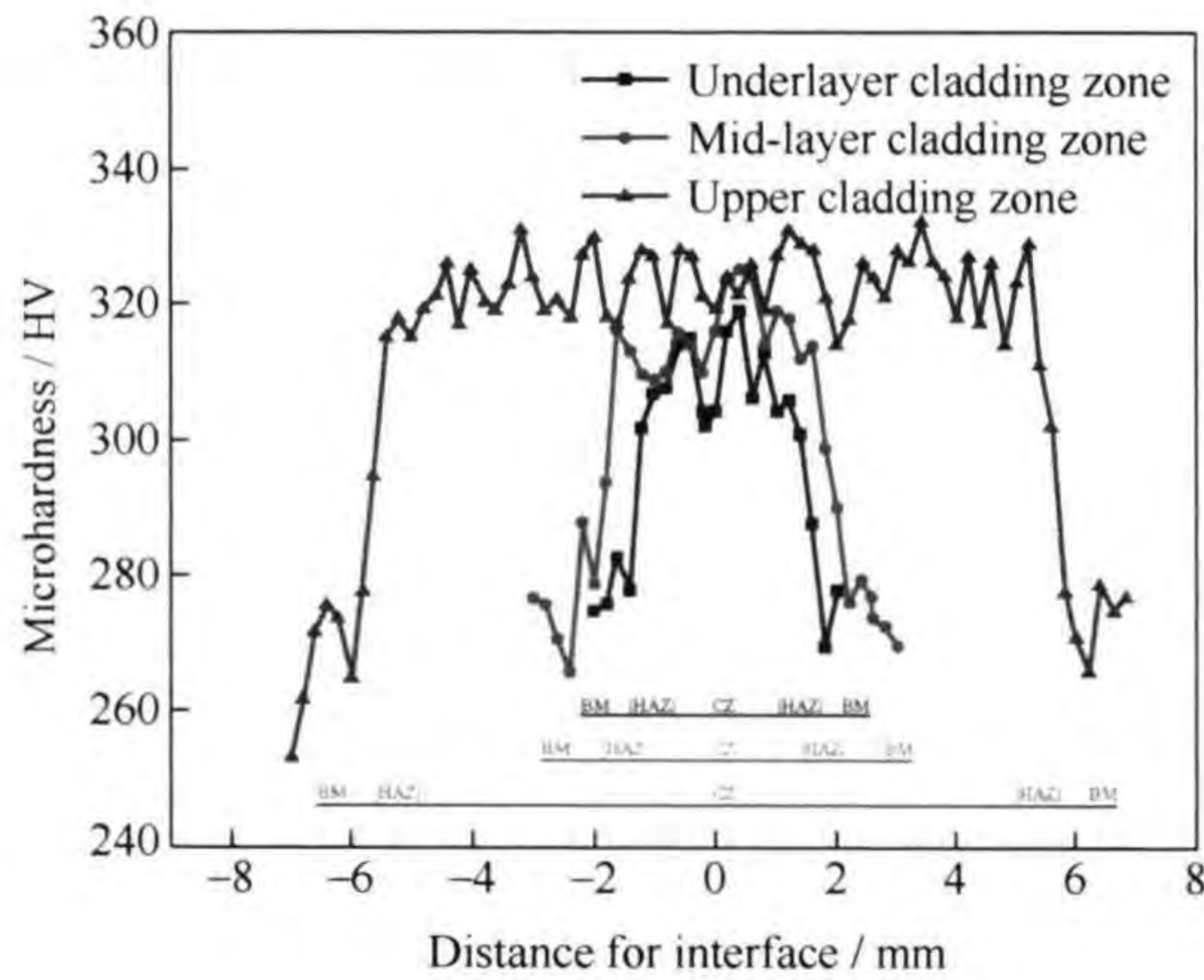


图 16 水下环境焊缝硬度分布示意图
Fig. 16 Schematic diagram of weld hardness distribution in underwater environment

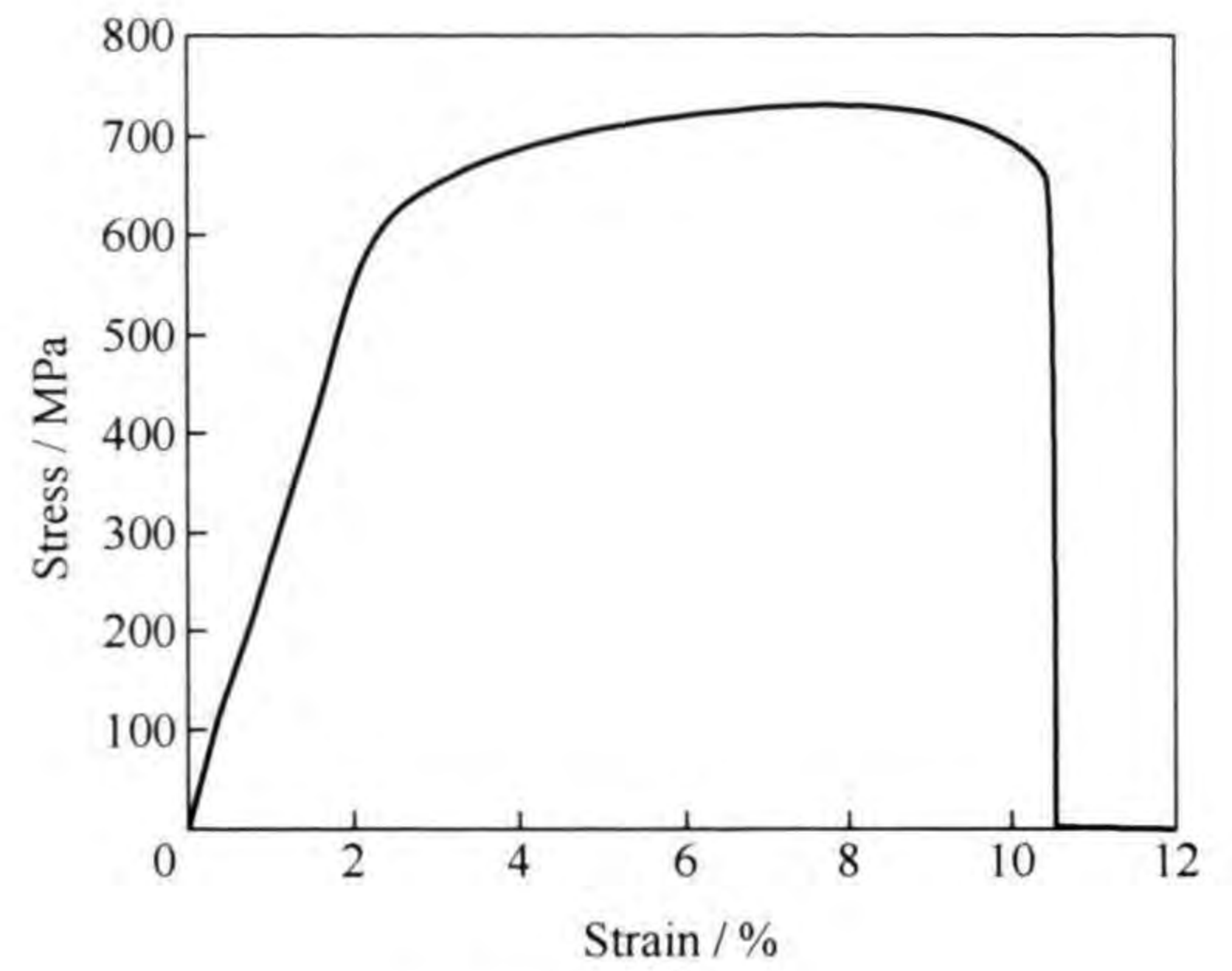
空气环境及水下环境各熔覆层硬度均表现为：盖面焊道略高于填充焊道，填充焊道略高于打底焊道，结合各区域显微组织及铁素体与奥氏体两相比比例分析认为，盖面焊道铁素体含量最高，焊接接头硬度与铁素体相所占比例呈现正相关，因此盖面焊道硬度最高；填充焊道铁素体含量虽低于打底焊道，但因其受二次循环加热，产生大量细小奥氏体晶粒，有细晶强化的效果，增大了该区域的显微硬度，因此填充焊道硬度略高于打底焊道。

与空气环境相比，水下环境熔覆区的整体硬度增大，主要原因是水下环境熔覆区铁素体含量较高，导致其整体硬度升高。

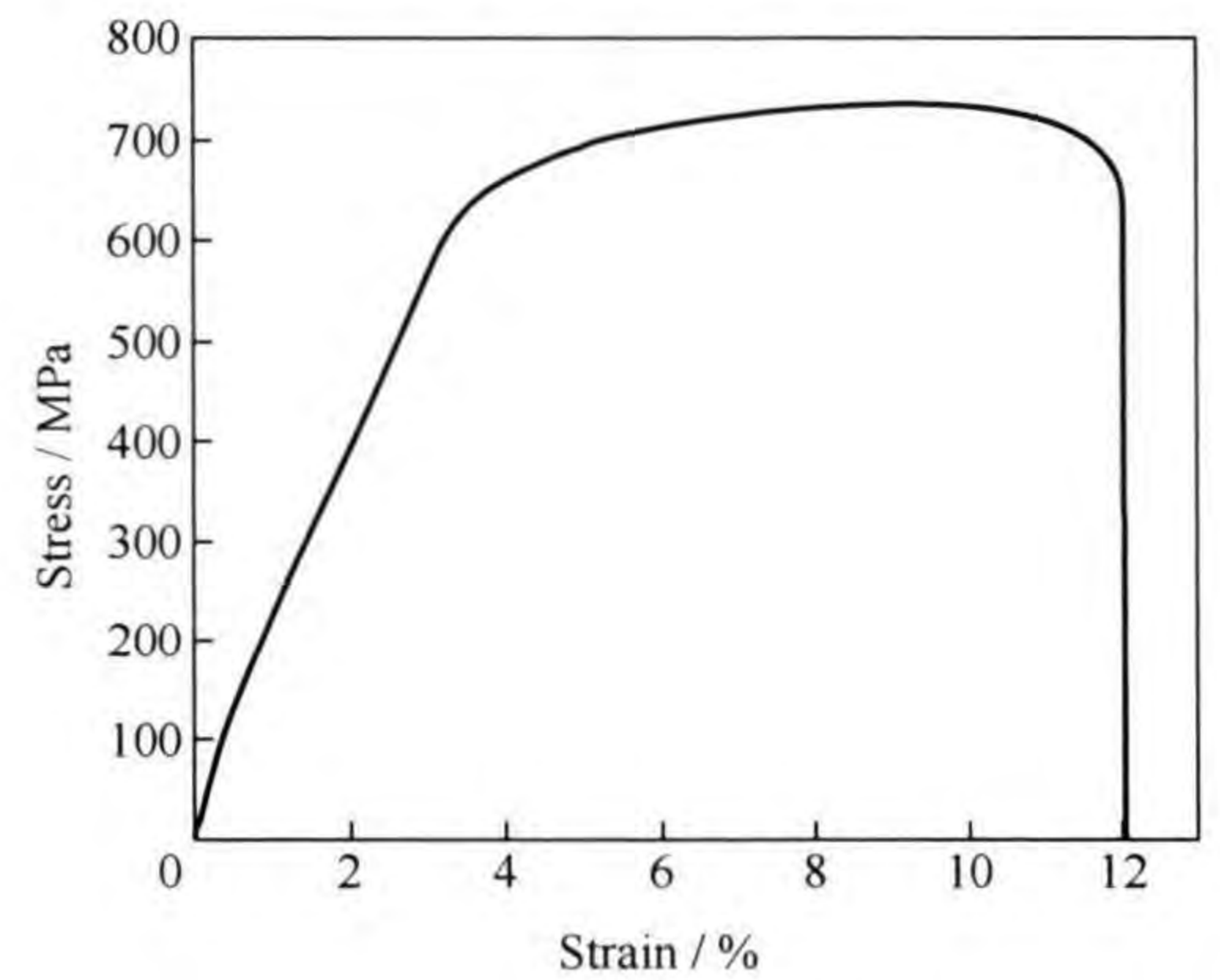
2.5.2 拉伸性能

对空气和水下环境的焊缝进行拉伸性能检测，图 17 为空气和水下环境焊缝的横向拉伸曲线，表 6 为横向拉伸试验结果。由图 17 可知，空气及水下环境横向拉伸试样均断裂于母材，表明两种环境下焊

缝的拉伸性能均优于母材。原因一是在焊接过程中熔池的 Cr, Ni 等原子在高温下将晶格中的 Fe 原子置换，形成了置换固溶体，此时晶格畸变，一定程度上阻碍了位错运动，提高了焊缝处的强度^[15]；原因二是相较于母材，焊缝熔覆区的组织晶粒更加细小均匀，提高了其拉伸性能。



(a) Air environment



(b) Underwater environment

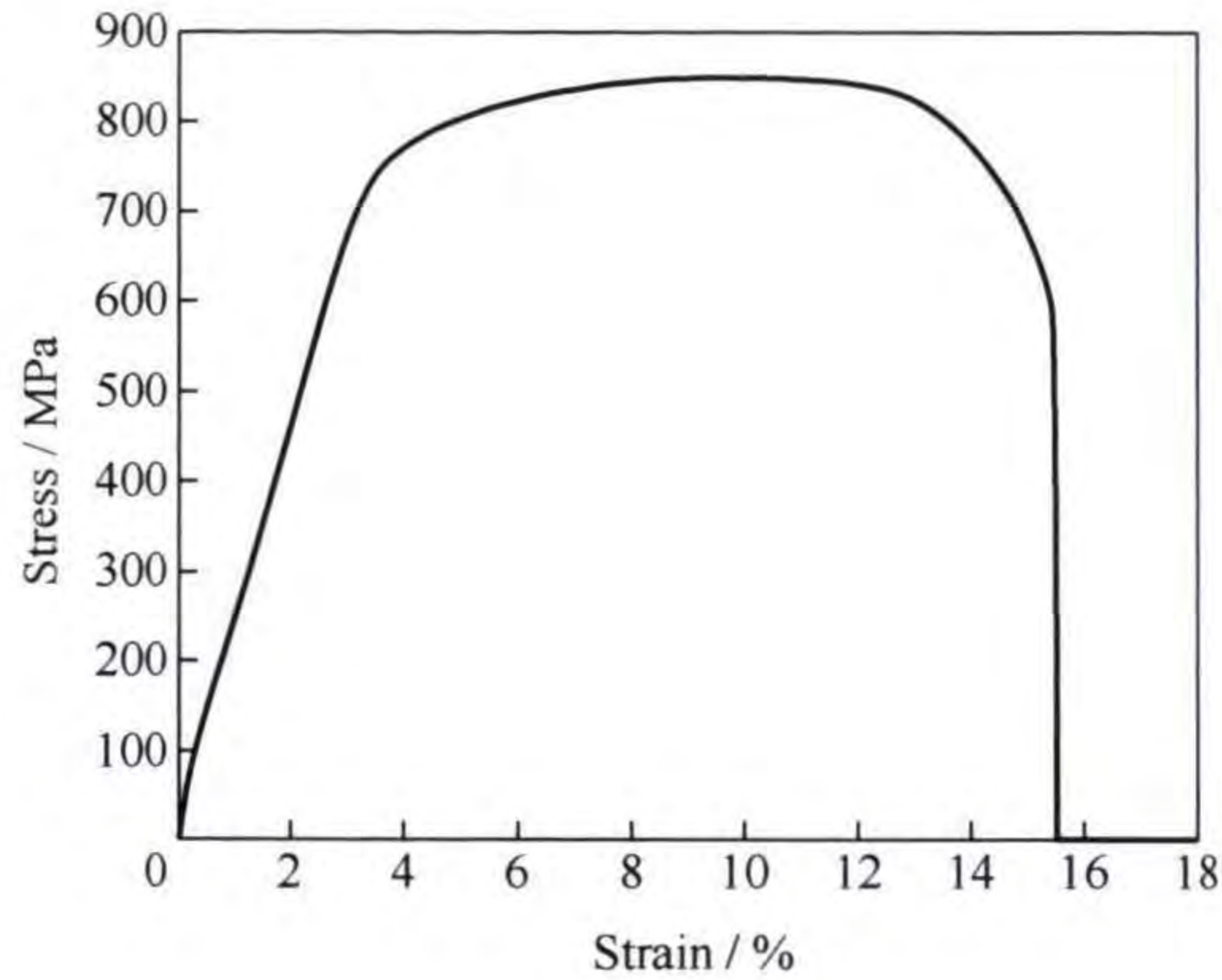
图 17 两种环境熔覆层横向拉伸曲线
Fig. 17 Transverse tensile curves of cladding layer in two environments

表 6 两种环境熔覆层横向拉伸结果
Table 6 Transverse tensile results of cladding layers in two environments

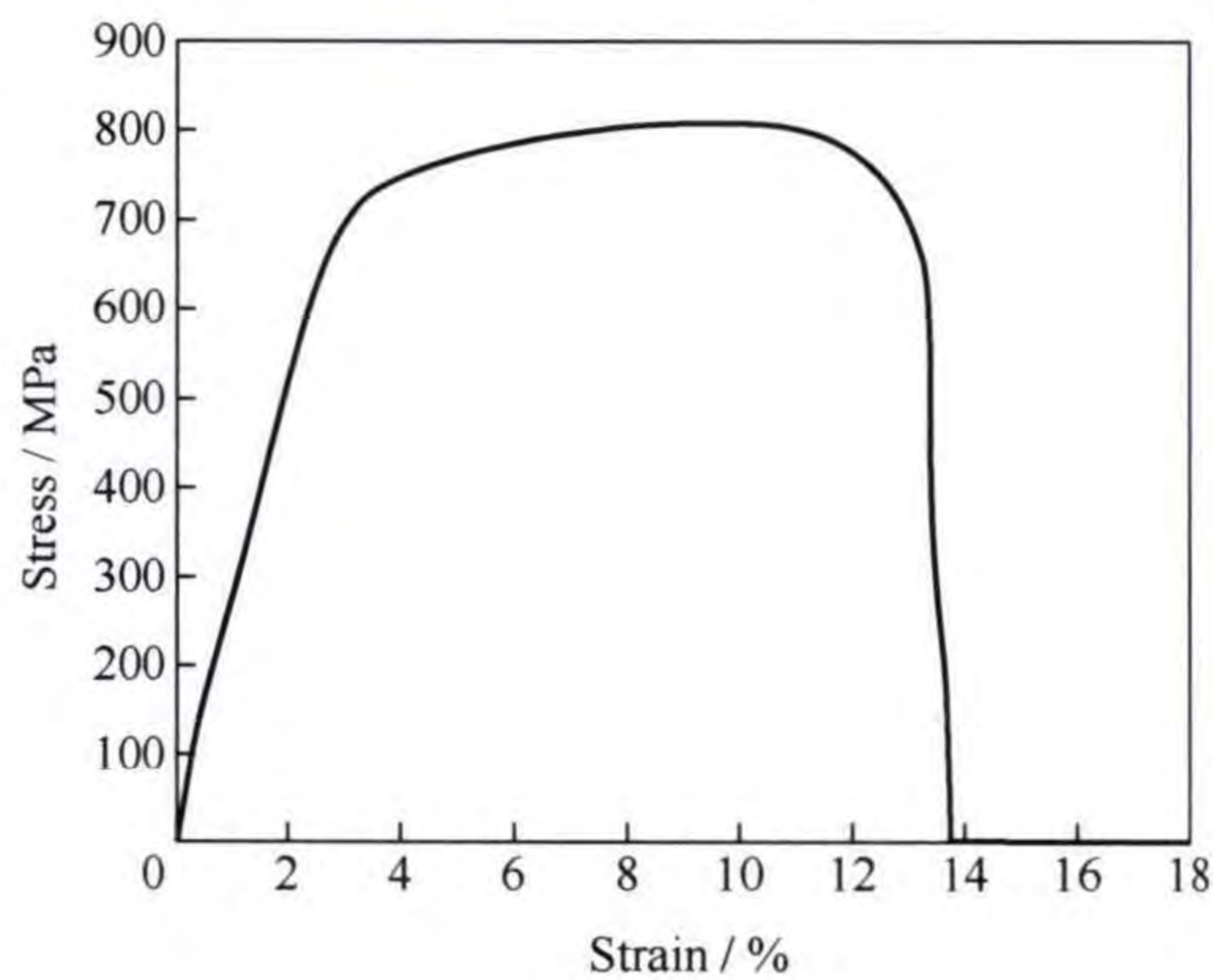
Specimen type	Tensile strength / MPa	Yield strength / MPa	Fracture position
Air environment	732	622	Base metal
Underwater environment	739	654	Base metal

为确定焊缝的拉伸强度及断裂形式，取纵向(全焊缝)拉伸试样进行检测，并使用 SEM 观察拉伸断口，两种环境的纵向拉伸曲线如图 18 所示，拉伸试验结果见表 7。由表 7 可以看出，空气环境焊缝的抗拉强度和屈服强度均优于水下焊缝，表明空气环境焊缝拉伸性能更优，分析其原因，空气环境焊缝

在焊接过程中冷却速度较慢, 所获得热量更大, 使其组织得到充分生长, 奥氏体组织以树枝状为主, 且铁素体相与奥氏体相交错无序布置, 这种结构在发生位错时会产生更大的滑移阻力, 从而使接头强化。



(a) Air environment



(b) Underwater environment

图 18 两种环境熔覆层纵向拉伸曲线

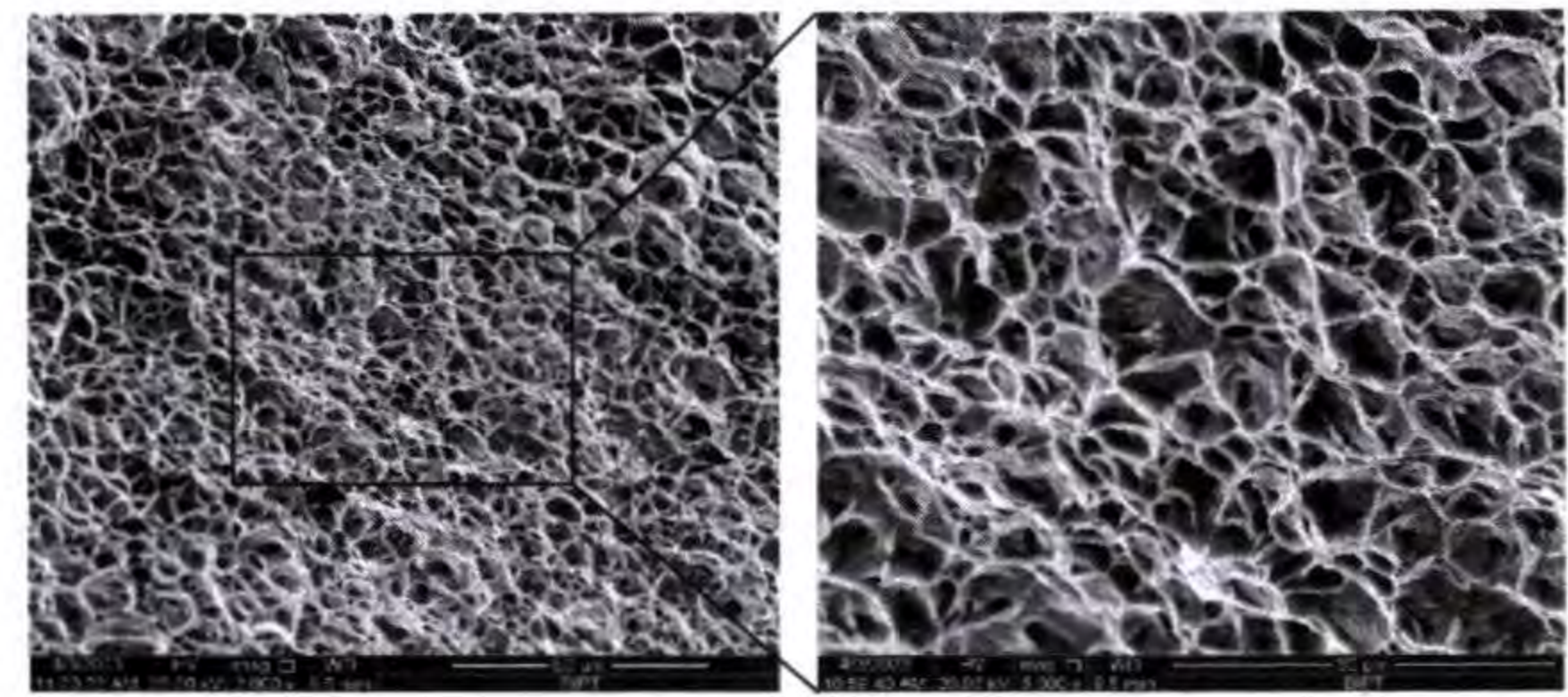
Fig. 18 Longitudinal tensile curves of cladding layer in two environments

表 7 两种环境熔覆层纵向拉伸结果

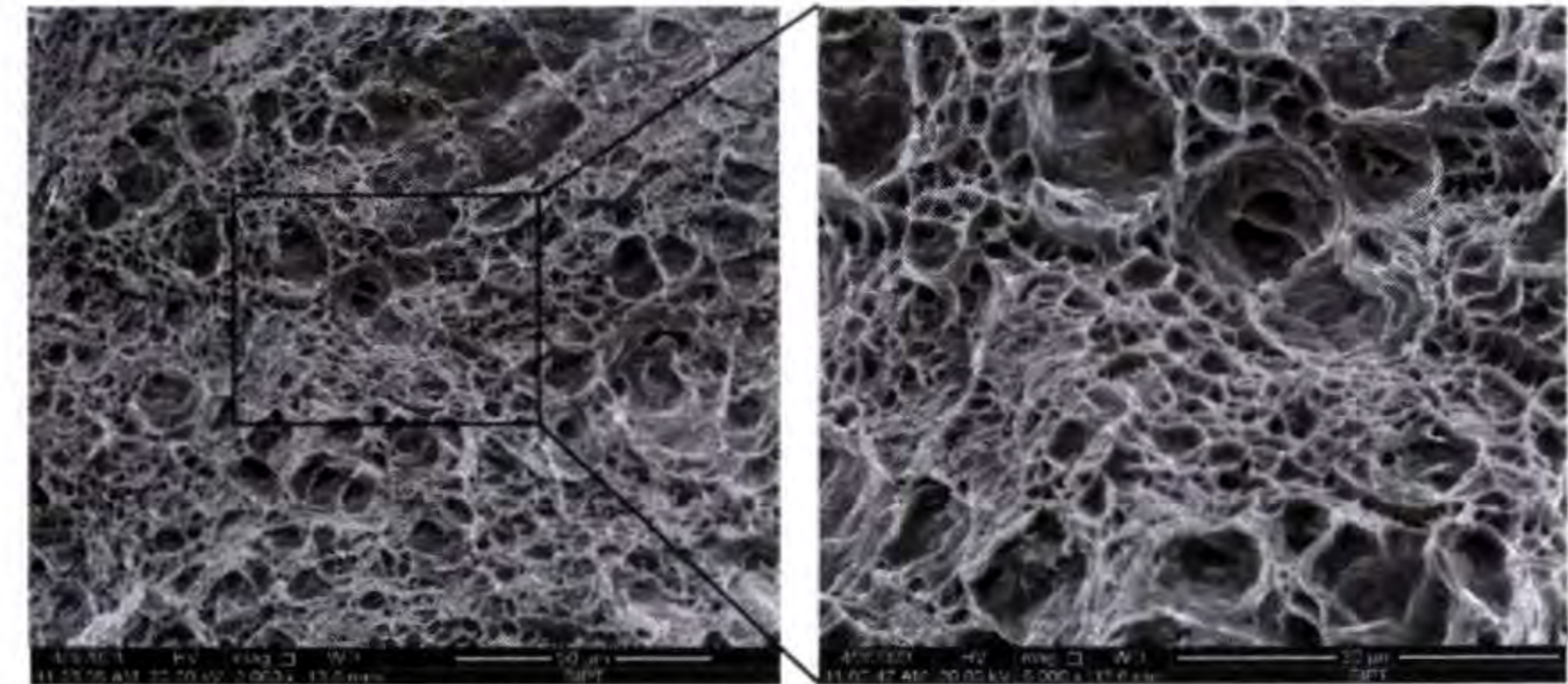
Table 7 Longitudinal tensile results of cladding layers in two environments

Specimen type	Tensile strength / MPa	Yield strength / MPa
Air environment	849	735
Underwater environment	806	673

两种环境下拉伸断口 SEM 形貌如图 19 所示, 空气环境下焊缝断面为许多细小的凹坑并夹杂少量孔洞, 凹坑尺寸均匀, 为典型的等轴状韧窝, 表明空气环境下焊缝均有良好的韧性。与空气环境相比, 水下环境拉伸断面部分区域出现了撕裂棱、河流纹等准解理断裂特征, 表明其韧性有所降低, 因此空气环境焊缝的韧性优于水下环境。



(a) Air environment



(b) Underwater environment

图 19 拉伸断口形貌

Fig. 19 Tensile fracture morphology

2.5.3 冲击性能

对两种环境下焊缝熔覆区 (CZ) 和热影响区 (HAZ) 进行低温冲击检测, 热影响区冲击试样取件时冲击缺口以热影响区为中心, 测试结果见表 8。可以看出, 两种环境下熔覆区冲击功均高于热影响区, 分析其原因, 热影响区奥氏体析出不充分, 主要以粗大的铁素体组成, 造成接头脆化, 降低了焊接接头的冲击韧性^[16]。

表 8 低温冲击测试结果

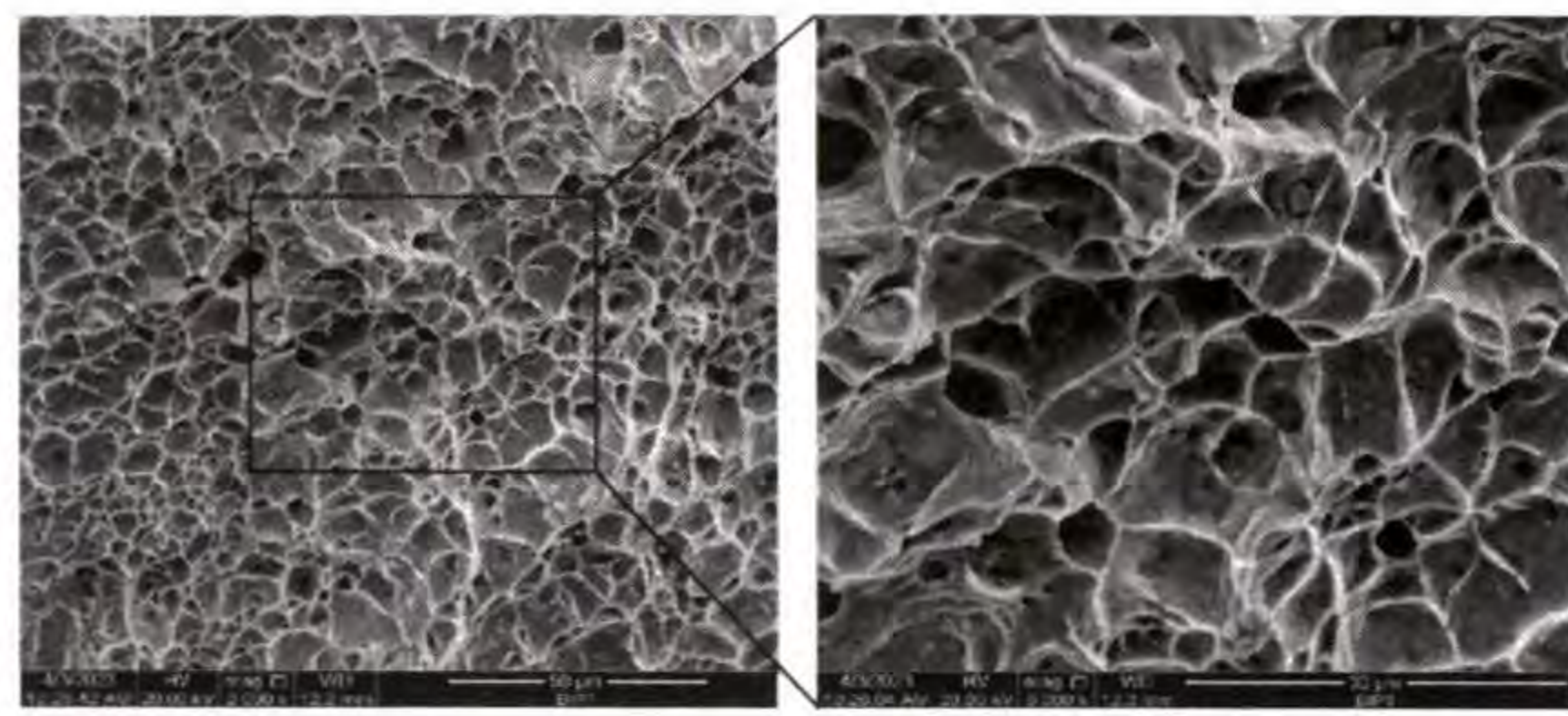
Table 8 Low temperature impact test results

Specimen type	Test area	Test temperature / °C	Impact power / J
Air environment	CZ	-40	46
Air environment	HAZ	-40	44
Underwater environment	CZ	-40	39
Underwater environment	HAZ	-40	29

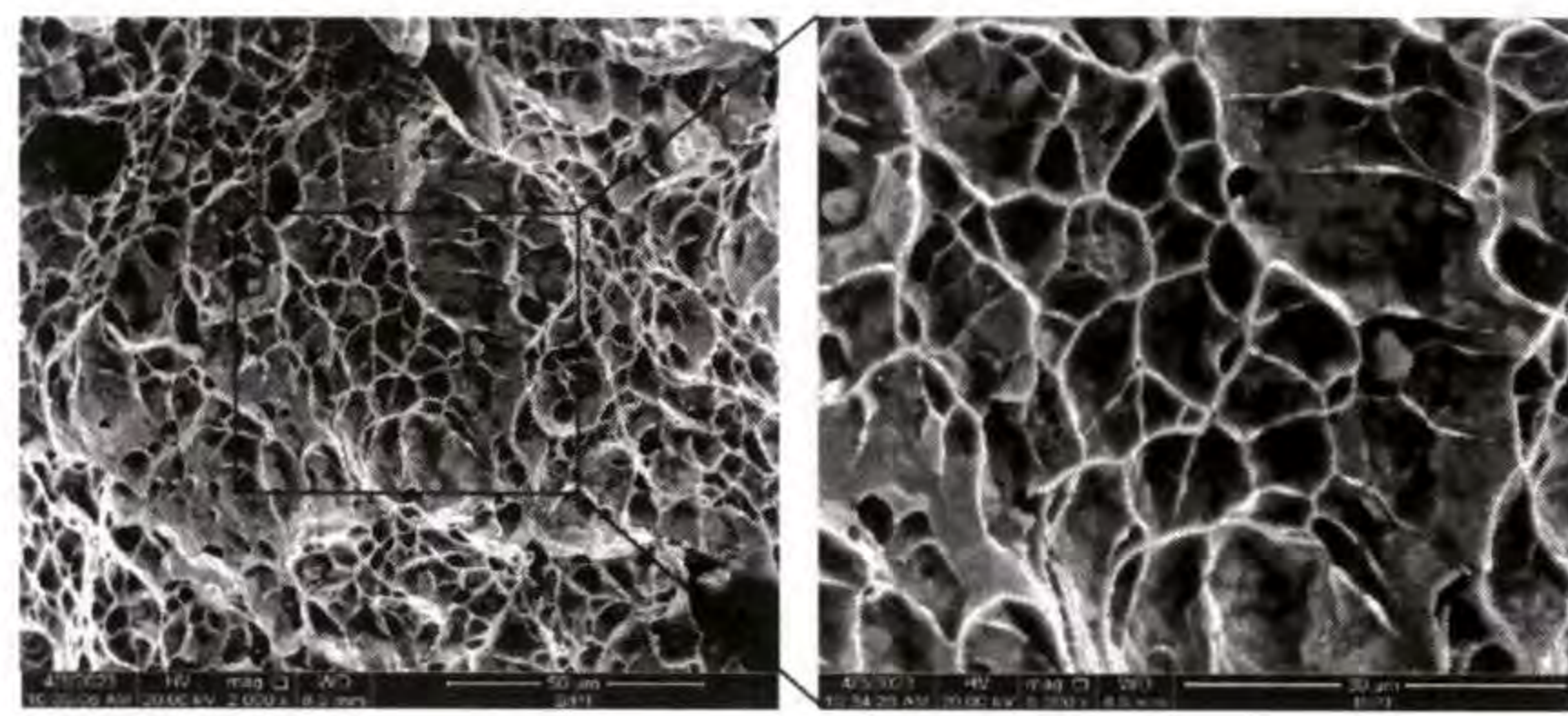
空气环境焊缝的冲击韧性优于水下环境, 这也与拉伸断口 SEM 结果相对应, 分析其原因, 双相不锈钢焊接接头中奥氏体相能抑制铁素体相中裂纹的扩展, C、N 等间隙元素在奥氏体相中的溶解度高, 抑制晶界脆化, 并能阻止铁素体晶粒在高温时的长大^[17], 因此奥氏体含量的升高是空气环境焊缝冲击韧性优于水下环境焊缝的主要原因。

两种环境熔覆区及热影响区冲击断口 SEM 形貌如图 20 所示。由图 20 可以看出, 断口形貌与其冲击功大小相对应, 空气环境熔覆区为典型的韧性断裂, 冲击韧性最优; 空气环境热影响区及水下环境熔覆区具有准解理特征, 表明其断裂形式仍为韧

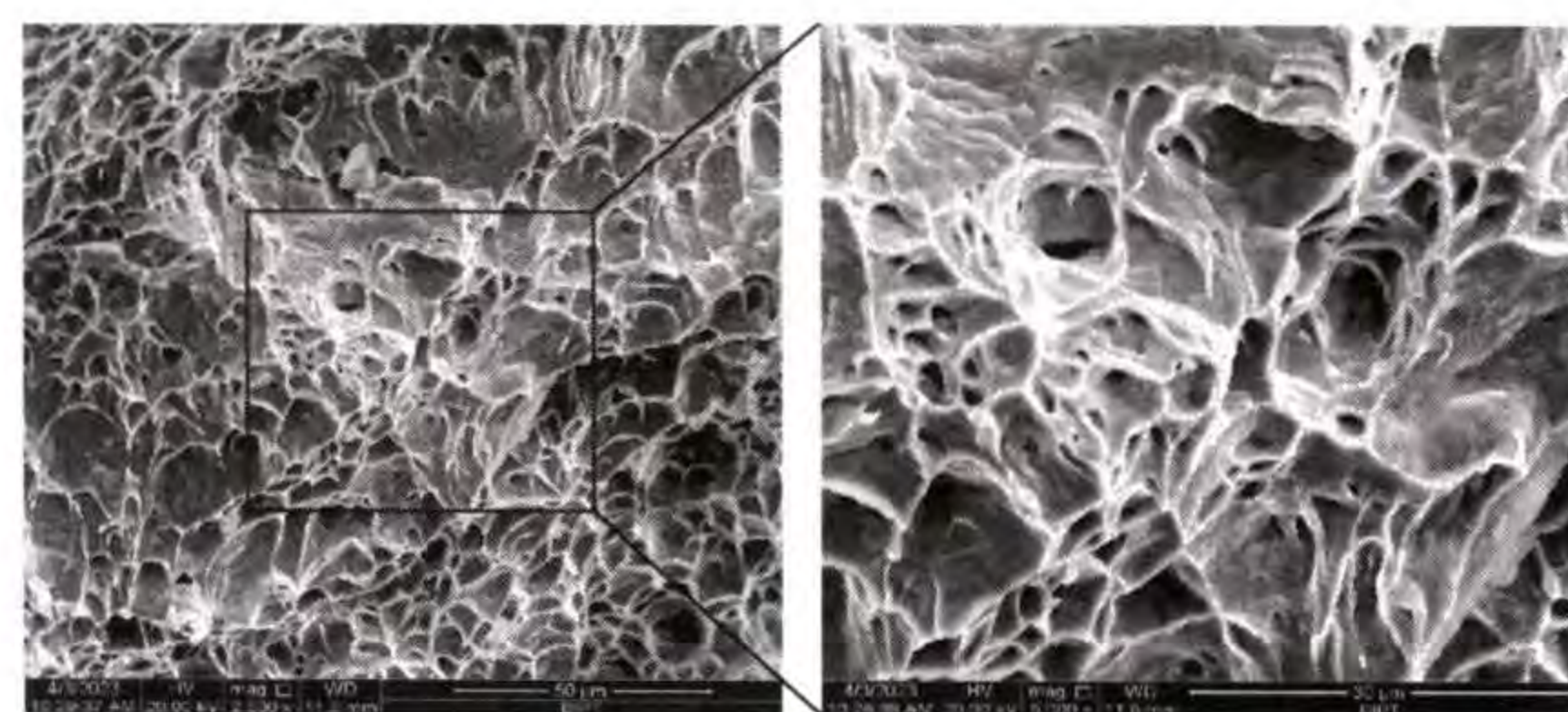
性断裂但韧性有所下降；水下环境热影响区断口部分区域出现解理台阶及河流、舌状花样等解理断裂特征，表明其断裂时存在脆性断裂倾向。



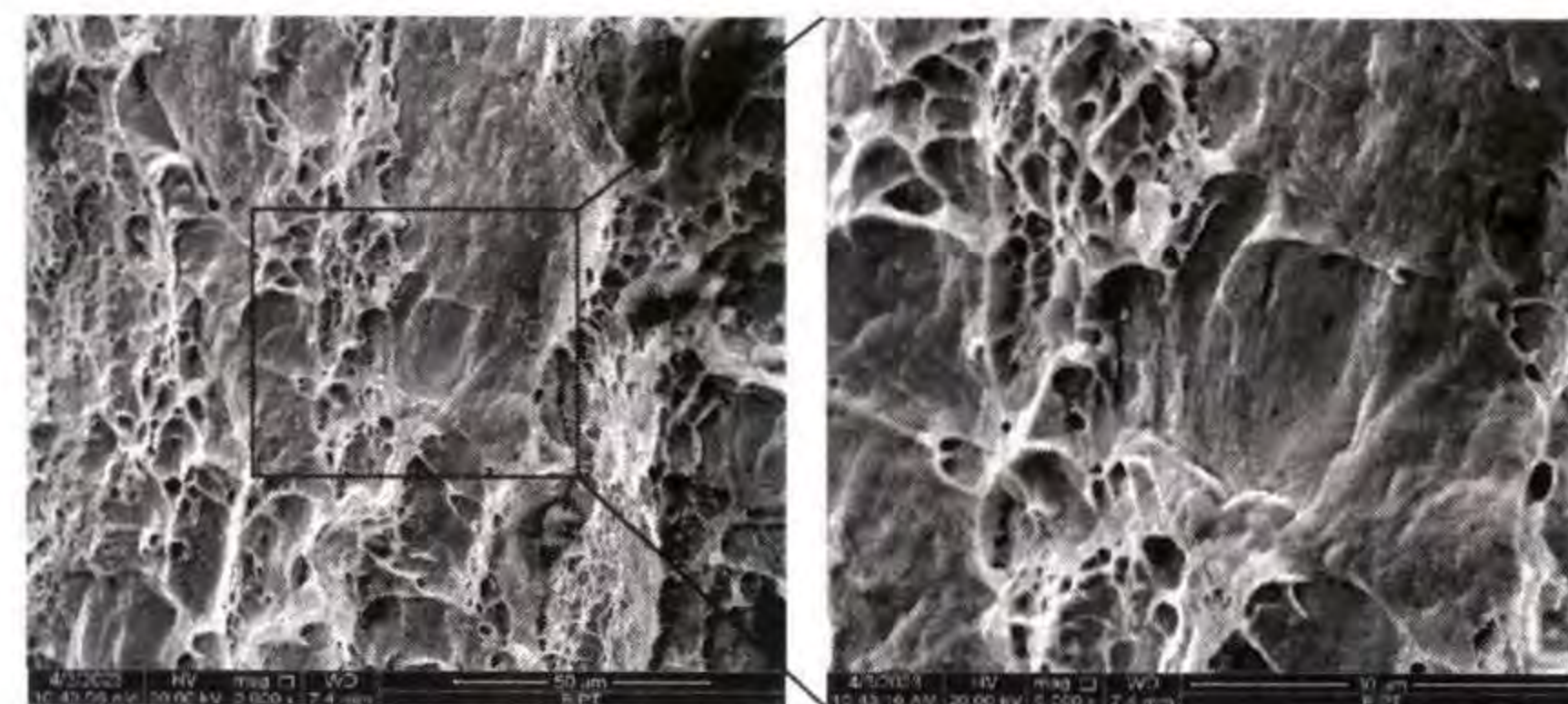
(a) Cladding zone in air environment



(b) HAZ in air environment



(c) Cladding zone in underwater environment



(d) HAZ in underwater environment

图 20 冲击断口形貌

Fig. 20 Impact fracture morphology

2.6 力学性能检测

2.6.1 阻抗谱 (EIS)

图 21 为空气、水下环境及母材的电化学阻抗谱 Nyquist 图，通过比较容抗弧半径大小可以评定两种环境下熔覆区的耐腐蚀性能，通常认为，容抗弧半径越大，测定区域的耐腐蚀性能越强^[18-19]。由图 21 可以看出，两种环境下的熔覆区和母材均呈现出单容抗弧特性，表明具有相同的腐蚀机理，其容抗弧半径大小为空气环境熔覆区 > 水下环境熔覆区 > 母材，表明水下环境熔覆区的耐腐蚀性能低于空气环境，但仍优于母材。

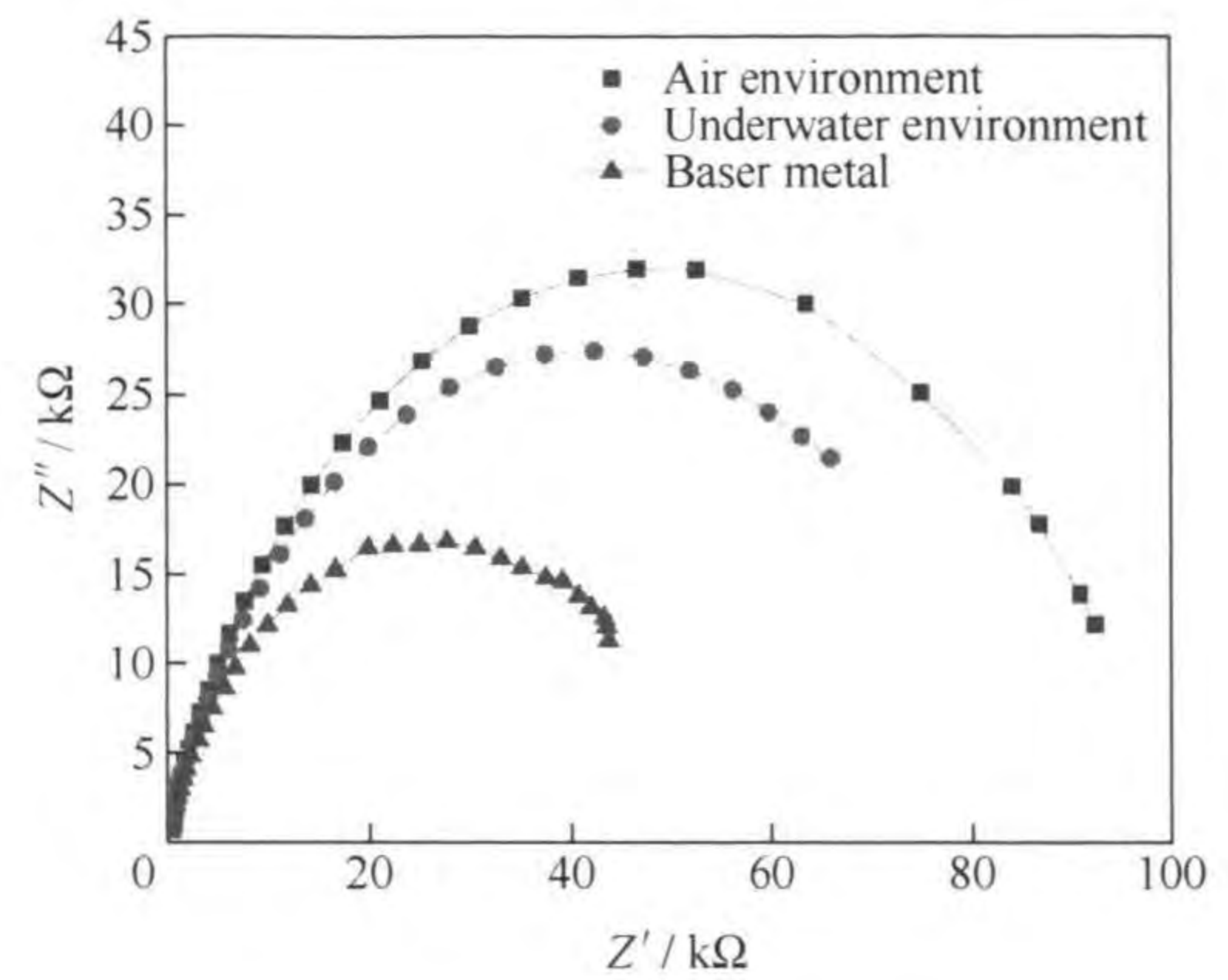


图 21 不同环境下熔覆区阻抗谱

Fig. 21 Impedance spectra of cladding area under different environments

2.6.2 动电位极化曲线 (PDP)

对空气、水下环境熔覆区及母材进行动电位极化曲线 (PDP) 测试，结果如图 22 所示，通过拟合可以得到各试样的自腐蚀电位和电流密度，两种环境熔覆区和母材的极化曲线拟合结果见表 9。

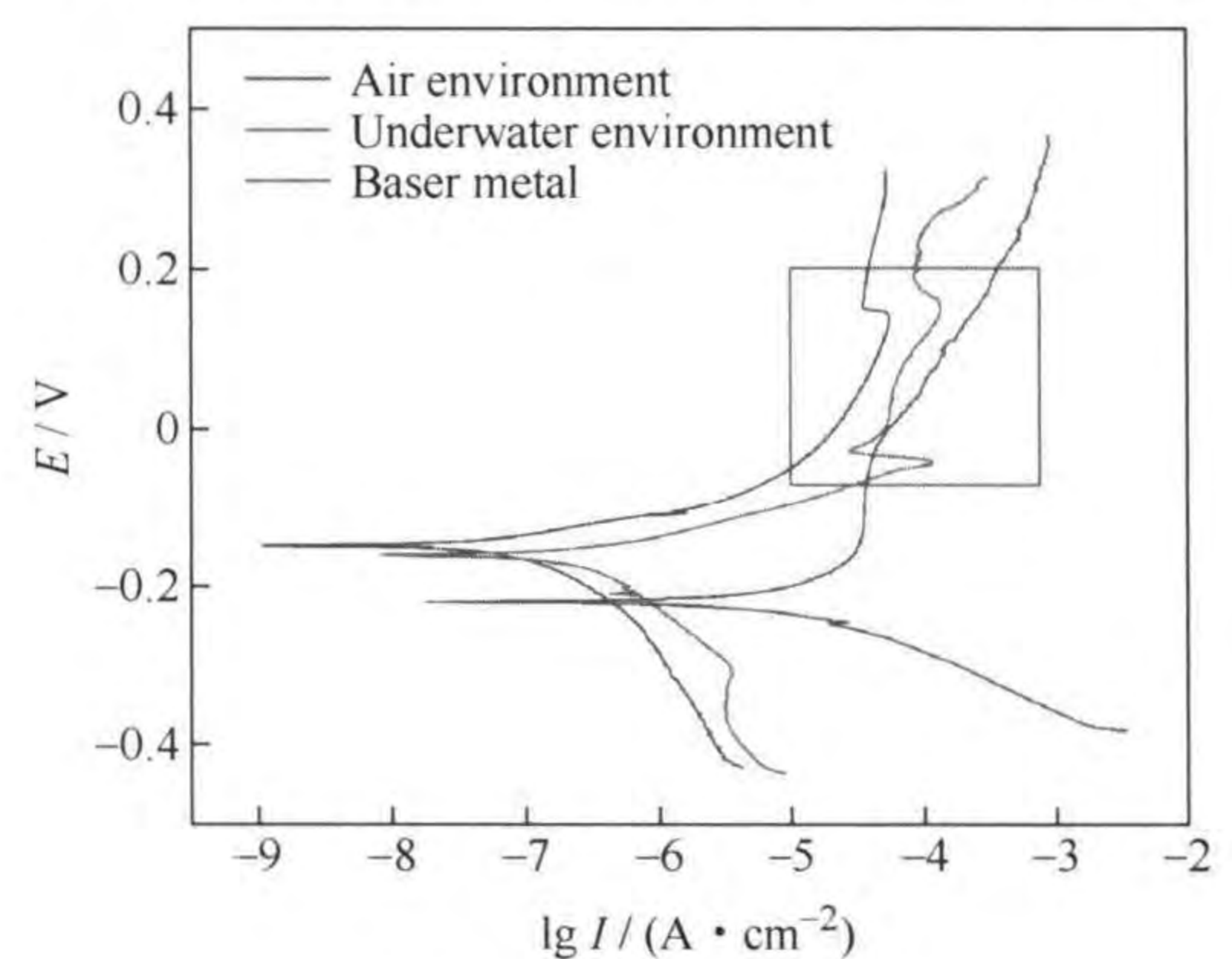


图 22 冲击断口形貌

Fig. 22 Impact fracture morphology

表 9 自腐蚀电位和电流密度拟合结果

Table 9 Fitting results of self-corrosion potential and current density

Specimen type	Air environment	Underwater environment	Base metal
$E_{\text{corr}} / \text{mV}$	-163.582	-175.385	-218.146
$I_{\text{corr}} / (\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	0.421	0.608	2.106

由图 22 可以看出，在极化曲线的阳极极化过程中，两种环境下熔覆层和母材的极化曲线都出现了钝化区间，表明在腐蚀过程中均产生了致密的氧化膜，可以有效阻碍离子的扩散，提升耐腐蚀性能。自腐蚀电位和腐蚀电流密度可以反映测试试样的耐腐蚀性能，自腐蚀电位决定了腐蚀的难易程度，腐蚀电流密度决定了腐蚀速率^[20]。拟合后的自腐蚀电

位和腐蚀电流密度结果见表 9, 由表 9 可以看出, 自腐蚀电位 (E_{corr}): 空气环境 (-163.582 mV) > 水下环境 (-175.385 mV) > 母材 (-218.146 mV); 腐蚀电流密度 (I_{corr}): 母材 ($2.106 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) > 水下环境 ($0.608 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) > 母材 ($0.421 \mu\text{A}/\text{cm}^2$)。结果表明, 空气环境下熔覆区的耐腐性能最好, 水下环境熔覆区耐腐略低于空气环境, 但优于母材; 母材的腐蚀速率最高, 其次是水下环境熔覆区, 空气环境熔覆区的腐蚀速率最低。

极化曲线的测量结果与开路电位及阻抗谱测量结果一致, 耐腐性能均呈现为: 空气环境熔覆区 > 水下环境熔覆区 > 母材。空气环境和水下环境熔覆区耐腐性能优于母材的原因有两个: 一是组织差异, 熔覆层组织均匀, 与母材相比晶粒明显细化; 二是焊丝中合金元素的加入, 尤其是 Ni 元素的增加, Ni 元素热力学稳定性好, 能够提高基体的点蚀电位及耐腐性能^[21-22], 所以熔覆区合金元素含量的增加也是耐腐性能提高的主要原因之一。

对于空气环境熔覆区耐腐性能优于水下环境熔覆区, 分析原因, 认为点蚀发生在铁素体和奥氏体的相界面处并向铁素体内生长^[23], 相比铁素体, 奥氏体具有较好的耐腐能力, 所以空气环境熔覆区奥氏体含量增多是其耐腐性能升高的主要原因。

3 结论

(1) 针对 4 mm U 型坡口, 进行了空气环境和水下环境坡口填充试验, 对比分析了空气环境、水下环境焊缝的宏观形貌、微观组织和铁素体含量, 并对焊缝进行了 XRD、力学性能及耐腐性能检测, 综合评定了空气和 underwater 激光立焊坡口填充焊缝的组织性能。研究结果表明, 局部干法水下激光立焊技术在核电站乏燃料水池覆板壁面修复上具有较高的可行性。

(2) 水下环境与空气环境相比, 由于其过冷环境, 热影响区较小, 熔覆区奥氏体析出较少且生长不充分。与空气环境相比, 水下环境熔覆区整体铁素体含量较高, 原因是水下环境过冷度较大, 冷却速度较快, 导致奥氏体未能充分析出, 降低了奥氏体的整体含量。空气环境和水下环境熔覆层均由铁素体及奥氏体两相组成, 无其他有害相生成。与空气环境相比, 水下环境熔覆区的整体硬度较大。空气及水下环境横向拉伸试样均断裂于母材, 表明两种环境下焊缝的拉伸性能均优于母材。两种环境下熔覆区冲击功均高于热影响区, 空气环境焊缝整体

的冲击韧性优于水下环境。两种环境下焊缝均具有良好的耐晶间腐蚀性能和抗弯性能。水下环境熔覆区的耐腐性能虽低于空气环境熔覆区, 但仍优于母材。

(3) 进行的坡口填充试验在浅水环境下进行, 而实际乏燃料水池最大深度为 20 m, 修复位置存在一定的环境压力。因此, 为了模拟实际乏燃料水池的修复工况, 后续应使用高压焊接试验舱进行压力环境下的水下焊接试验, 分析在不同压力下水下焊缝组织性能的演变规律。同时, 主要进行了立焊位置的坡口填充焊接; 对于核电站常见裂纹缺陷, 也可采用表面堆焊和补板焊接的方式进行维修, 后续可以开展局部干法水下激光立焊堆焊和补板焊接等方面的研究。

参 考 文 献

- [1] 刘浩东, 张龙, 王建江, 等. 立焊工艺研究现状及手工自蔓延焊接立焊工艺探讨[J]. 热加工工艺, 2011, 40(7): 166-170.
LIU Haodong, ZHANG Long, WANG Jianjiang, et al. Vertical welding process research status and manual self-propagation welding vertical welding process discussion[J]. Thermal Processing, 2011, 40(7): 166-170. (in Chinese)
- [2] 王东, 朱德才, 康泽坛. 核电站耐热钢新型激光热丝立焊工艺稳定性及参数优化[J]. 焊接技术, 2021, 50(3): 53-59, 106.
WANG Dong, ZHU Decai, KANG Zetan. Stability and parameter optimization of a new laser hot wire vertical welding process for heat-resistant steel in nuclear power plants[J]. Welding Technology, 2021, 50(3): 53-59, 106. (in Chinese)
- [3] CHANG B H, YUAN Z, PU H, et al. Study of gravity effects on titanium laser welding in the vertical position[J]. Materials, 2017, 10(9): 1031.
- [4] BIESTER K, BUDDE L, BARROI A, et al. Investigation of deposition welding in vertical and horizontal position with a coaxial laser wire welding head[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120(7-8): 5399-5410.
- [5] WEN P, YELKENCI D, CHEN J H, et al. Numerical analysis of the effect of welding positions on formation quality during laser welding of TC4 titanium alloy parts in aerospace industry[J]. Journal of Laser Applications, 2019, 31(2): 022401.
- [6] 曹浩. 大厚度高强钢板窄间隙激光摆动填丝焊接工艺

- 研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2019.
- CAO Hao. Research on narrow-gap laser oscillating wire-filling welding process for large-thickness high-strength steel plates[D]. Beijing: General Research Institute of Machinery Science, 2019. (in Chinese)
- [7] 苗玉刚, 陈彦宾, 李俐群, 等. 铝合金激光立焊特性分析[J]. 焊接学报, 2007(10): 57-60, 116.
- MIAO Yugang, CHEN Yanbin, LI Liqun, et al. Characterization of laser vertical welding of aluminum alloys[J]. Journal of Welding, 2007(10): 57-60, 116. (in Chinese)
- [8] 寇荣魁. 921A 舰船钢高压干法水下激光熔覆修复工艺及性能研究[D]. 北京: 北京石油化工学院, 2022.
- KOU Rongkui. Research on the repair process and performance of 921A ship steel by high-pressure dry underwater laser cladding [D]. Beijing: Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2022. (in Chinese)
- [9] 马兆炫, 刘一搏, 王建峰, 等. 双相不锈钢水下局部干法 TIG 焊接工艺[J]. 机械工程学报, 2022, 58(4): 48-54.
- MA Zhaoxuan, LIU Yibo, WANG Jianfeng, et al. Localized dry TIG welding of duplex stainless steel underwater[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(4): 48-54. (in Chinese)
- [10] 王端. S32205 双相不锈钢管窄间隙激光填丝焊工艺及接头组织性能研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2021.
- WANG Duan. Research on narrow gap laser wire filling welding process and joint organization and properties of S32205 duplex stainless steel pipe[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [11] 刘榕瑞. S32101 双相不锈钢厚板窄间隙激光填丝焊工艺及接头组织性能研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2019.
- LIU Rongrui. Research on narrow gap laser filler wire welding process and joint organization properties of S32101 duplex stainless steel thick plate [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [12] 焦也. 核电用双相不锈钢 S32101 热加工性及低温韧性的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.
- JIAO Ye. Research on hot workability and low temperature toughness of duplex stainless steel S32101 for nuclear power generation[D]. Shenyang: Northeastern University, 2018. (in Chinese)
- [13] LI C W, ZHU J L, CAI Z H, et al. Microstructure and corrosion resistance of underwater laser clad duplex stainless steel coating after underwater laser remelting processing[J]. Materials, 2021, 14(17): 4965.
- [14] LI K B, LI D, LIU D Y, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of multiple-layer laser cladding coating of 308L stainless steel[J]. Applied surface science, 2015, 340: 143-150.
- [15] 刘先文. S32101 双相不锈钢焊接工艺及其接头组织与性能[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- LIU Xianwen. Welding process of S32101 duplex stainless steel and its joint organization and properties[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [16] 王旭友, 雷振, 毛辉, 等. 铁素体不锈钢激光-MAG 复合热源焊缝成形及接头冲击韧性分析[J]. 焊接学报, 2009, 30(12): 21-25, 114.
- WANG Xuyou, LEI Zhen, MAO Hui, et al. Impact toughness analysis of ferrite stainless steel welds formed by laser-MAG composite heat source[J]. Journal of Welding, 2009, 30(12): 21-25, 114. (in Chinese)
- [17] 于守海. 2205 双相不锈钢薄板 GTAW 和 SMAW 焊接接头组织性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- YU Shouhai. Research on the organization and properties of welded joints of 2205 duplex stainless steel sheet GTAW and SMAW[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [18] 向嵩, 曾洪涛, 杨阳, 等. 浓硫酸中 904L 不锈钢焊接接头的耐蚀性能[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(1): 69-73.
- XIANG Song, ZENG Hongtao, YANG Yang, et al. Corrosion resistance of 904L stainless steel welded joints in concentrated sulfuric acid[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(1): 69-73. (in Chinese)
- [19] CHEN S J, ZHANG R Y, SHI Z M, et al. Effect of La on microstructure and corrosion resistance of in-situ synthesized TiC-Al₂O₃ / Al composites[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35: 1-6.
- [20] 丛发敏, 夏春智, 刘鹏. 固溶处理对 S31803 钢 TIG 焊缝组织与腐蚀性能的影响[J]. 焊接, 2020(2): 20-23, 66.
- CONG Famin, XIA Chunzhi, LIU Peng. Effect of solid solution treatment on the organization and corrosion performance of TIG welds of S31803 steel[J]. Welding, 2020(2): 20-23, 66. (in Chinese)
- [21] 冯向阳. 油船货油舱用耐蚀钢焊接接头耐蚀性的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
- FENG Xiangyang. Corrosion resistance of welded joints of corrosion-resistant steel for cargo tanks of oil tankers[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012. (in Chinese)
- [22] 徐鸣悦. 镍对碳钢材料显微组织及耐蚀性能影响的研

- 究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2016.
- XU Mingyue. Research on the effect of nickel on microstructure and corrosion resistance of carbon steel materials[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [23] 孟庆森, 王皓, 胡利方. Cr₂N 沉淀相对 2101 双相不锈钢焊接接头综合性能的影响[J]. 焊接学报, 2013, 34(10): 105-108, 118.
- MENG Qingsen, WANG Hao, HU Lifang. Effect of Cr₂N precipitation on the comprehensive performance of

welded joints of 2101 duplex stainless steel[J]. Journal of Welding, 2013, 34(10): 105-108, 118. (in Chinese)

作者简介: 李松钊, 男, 1998 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为水下焊接修复和 underwater 激光增材。

E-mail: 2433974758@qq.com

朱加雷 (通信作者), 男, 1981 年出生, 教授, 硕士研究生导师。研究方向为水下焊接维修、激光增材制造和激光成形加工等。

E-mail: zhujialei@bipt.edu.cn

李守根 (通信作者), 男, 1990 年出生, 博士, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为水下焊接工艺与装备。

E-mail: lishougen@bipt.edu.cn