

L 形 304 不锈钢激光填丝多层多道角焊工艺 试验及焊缝分析

李桂新, 朱加雷*, 刘铠瑜, 李松钊, 赵志博, 赵友亮, 赵亮

(北京石油化工学院机械工程学院, 北京 102617)

摘要 以核电站乏燃料水池拐角处覆板缺陷修复为背景, 研究不同层数、不同焊道对多层多道角焊缝宏观形貌、微观组织、力学性能和耐腐蚀性能的影响规律。结果表明: 在宏观形貌方面, 二层二道和三层五道能有效增加角焊缝厚度, 分别可达 3.6 mm 和 5.7 mm; 二层三道和三层六道能在增加焊缝厚度的基础上增加焊脚尺寸, 分别可达 6 mm 和 9 mm。在微观组织方面, 铁素体以不同的形态分布在焊缝中, 在焊缝中心多为骨架状或蠕虫状铁素体, 在焊缝表面多为树枝状铁素体, 在底板与竖板交界处多为丝带状铁素体; 随着焊接次序的增加, 粗大的晶粒细化, 同时细小的组织二次生长, 使得焊缝组织尺寸以及生长方向各有不同。在力学性能方面, 所测角焊缝显微硬度均高于母材。在耐腐蚀性能方面, 二层二道和三层五道成形焊缝经点蚀试验后腐蚀严重, 表面出现均匀腐蚀区和氧化区; 而二层三道和三层六道成形焊缝耐腐蚀性能良好, 未出现明显的点蚀坑。上述试验结果对角焊缝多层多道焊接具有一定指导意义。

关键词 304 不锈钢; 激光填丝角焊; 多层多道; 组织性能

中图分类号: TG456.7

文献标志码: A

doi: 10.14128/j.cnki.al.20254504.019

L Shape 304 Stainless Steel Laser Wire Filling Multi-Layer Multi-Pass Fillet Welding Process Test and Weld Analysis

Li Guixin, Zhu Jialei*, Liu Kaiyu, Li Songzhao, Zhao Zhibo, Zhao Youliang, Zhao Liang

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

Abstract This study investigates the influence of different layers and welding passes on the macroscopic morphology, microstructure, mechanical properties, and corrosion resistance of multi-layer and multi-pass fillet welds in the context of repairing cladding defects at the corners of spent fuel pools in nuclear power plants. The results show that two-layer two-pass and three-layer five-pass welding can effectively increase the thickness of the fillet weld to 3.6 mm and 5.7 mm, respectively. Meanwhile, two-layer three-pass and three-layer six-pass welding can increase the size of the weld foot to 6 mm and 9 mm, respectively, based on the increased thickness. In terms of microstructure, ferrite is distributed in the weld with varying morphologies: skeleton-shaped or worm-like ferrite is predominantly found in the weld center, while tree-like ferrite is mainly present on the weld surface. Additionally, ribbon-like ferrite is observed at the junction of the bottom plate and the vertical plate. As the welding sequence increases, coarse grains are refined, and fine tissues undergo secondary growth, resulting in differences in the size and growth direction of the weld tissues. Regarding mechanical properties, the measured microhardness of the fillet welds exceeds that of the base material. In terms of corrosion resistance, two-layer two-pass and three-layer five-pass welds exhibit severe corrosion after pitting tests, with uniform corrosion and oxidation zones appearing on the surface. In contrast, two-layer three-pass and three-layer six-pass welds demonstrate good corrosion resistance, with no obvious pitting pits. These findings provide guidance for multi-layer and multi-pass fillet welding.

Key words 304 stainless steel; laser fillet welding; multi-layer multi-pass; organizational property

收稿日期: 2023-08-14; **修回日期:** 2023-09-18

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点支持项目(U22B20127)、北京市教委科技计划项目(No. KM202010017003)、北京市科技计划重点项目(KZ202210017023)、北京市属高等学校高水平科研创新团队建设支持计划项目(BPHR20220110)

作者简介: 李桂新(1998—), 男, 硕士研究生。研究方向为激光焊接等。E-mail: 379512516@qq.com

* **通信作者:** 朱加雷(1981—), 男, 博士, 教授。研究方向为水下焊接维修、激光增材制造和激光成型加工等领域的相关技术。E-mail: zhujialei@bipt.edu.cn

0 引言

在核电站长期服役过程中,乏燃料水池会出现腐蚀、裂纹等缺陷^[1],增加核废水泄漏风险,如果不及时修复、替换,将造成严重后果。目前比较成熟的焊接修复技术有电弧焊、CO₂气体保护焊、电渣焊、钎焊等^[2]。因乏燃料水池的特殊性,其焊接技术未来的发展将朝高速化、高效化、绿色化、智能化等方向发展。随着大功率激光器的快速发展,激光焊接技术逐渐成熟,可以对金属材料快速而高效地焊接,并且具备无机械接触、焊缝质量高、焊接接头的残余应力小、焊件变形小等优点^[3]。

针对乏燃料水池钢覆面拐角处出现的缺陷,可以采用激光自熔焊或激光填充焊的方法修复。相对于激光自熔焊,激光填充焊可以改善焊接过程中出现的气孔、裂纹等缺陷,同时填补自熔焊下凹部分,改善了焊缝形貌,增加了壁板和底板的连接面积,降低了焊趾处的应力集中^[4]。填充材料的形式可以采用填丝或填粉。有研究表明,填粉焊的焊接过程稳定性较差,容易造成气孔等缺陷^[5]。目前对于激光角焊缝的研究,主要是针对T形角焊缝和搭接角焊缝等,且多为自熔,L形单面直角角焊缝的研究相对较少。

对于自熔的角焊缝,Cui等^[6]用光纤激光器进行3 mm厚和6 mm厚304不锈钢角接焊,在2 kW的激光功率下获得元素分布均匀、焊缝中心显微硬度最高的焊缝。梁梓铭^[7]对中厚板激光角焊缝成形机制进行研究,发现焊缝都呈现“钉子头”形貌,熔宽随焊接速度的降低或激光功率的增大而变大,且在

零离焦量的时候熔宽最小。热输入量过大会导致焊缝晶粒较大,当热输入量不足时焊缝成形较差,这都导致焊缝力学性能降低,通过背部吹保护气的方式可以避免焊缝上表面塌陷和底部驼峰。对于填丝角焊缝,杨璐等^[8]主要对比了6个正面和5个侧面补板角焊缝连接试件,进行了拉伸实验。因受正应力和剪应力共同作用,正面角焊缝连接试件破坏截面为25°~32°,侧面角焊缝连接试件主要受纯剪应力,破坏截面为46°。Tsibulskiy等^[9]研究了激光电弧复合焊中筋板与底板的间隙宽度对T形角焊缝焊接接头质量的影响,发现当间隙在0.1 mm时,焊缝金属与母材没有缺口;当间隙为0.6 mm时,可以观察到大的“金属流出”的焊缝。

综合考虑乏燃料池拐角位置的特点及修复要求,本文研究了不同层数、不同焊道的激光填丝多层多道角焊工艺,验证不同层数、不同堆焊方式对角焊缝表面形貌、微观组织、力学性能以及耐腐蚀性能的影响规律,对角焊缝多层多道焊接具有一定指导意义。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验材料为304奥氏体不锈钢,试验所用板材尺寸为150 mm×100 mm×4 mm(长×宽×厚),通过长度方向上垂直放置两个试板,组合成一个L形角焊缝试件。板材的主要化学成分如表1所示。焊丝采用ER-308L实心焊丝,焊丝直径为1.2 mm,其主要化学成分如表2所示。

表1 304奥氏体不锈钢化学成分

Table 1 304 austenitic stainless steel chemical composition

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	N	Ni	Cu	Fe
Mass fraction/%	0.040 0	0.330 0	1.160 0	0.027 5	0.001 0	18.030 0	0.030 0	8.010 0	0.100 0	Bal.

表2 ER-308L焊丝化学组织成分

Table 2 Chemical and microstructure composition of ER-308L welding wire

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
Mass fraction/%	0.030	0.450	1.950	0.015	0.008	19.850	0.430	9.780	0.035	Bal.

1.2 试验方法

多层多道激光填丝焊接是一个逐层堆积的过程,因直角角钢位置、结构的特殊性,角焊缝的多层多道堆焊方式与平板多层多道有所不同。在角焊缝多层多道焊接过程中,随着层数的增加,焊脚

尺寸不断增加,焊缝厚度不断增加,同时角焊缝的残余应力也不断增加。不同的激光填丝工艺路径将会影响到角焊缝成形质量及综合使用性能;焊道的规划不合理,会导致角焊缝多道累积后凸起,形成凸形角焊缝,造成焊缝应力集中较严重,材料

变形严重。因此,分别针对如图 1 所示不同层数、不同焊道的激光填丝角焊堆焊方式进行研究。其

中角焊工艺参数如表 3 所示,激光入射位置如图 1 中黑色方点所示。

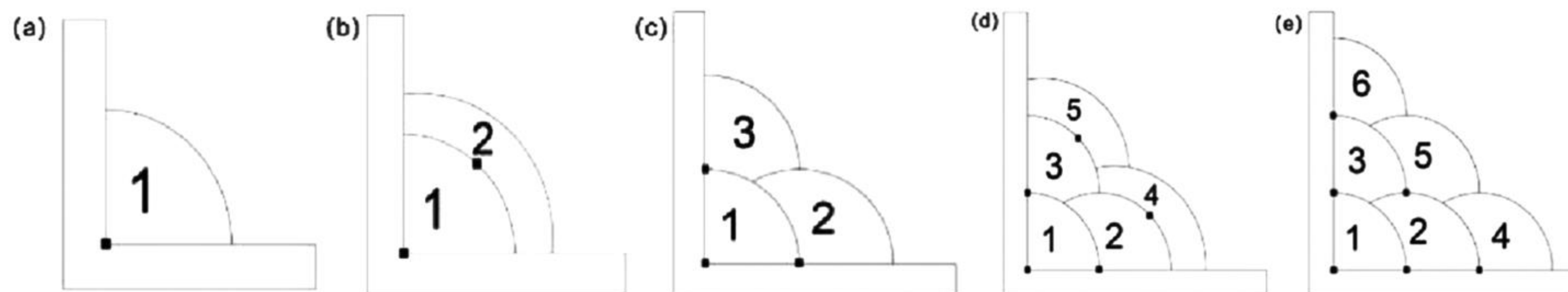


图 1 不同堆焊次序下激光填丝角焊示意图

(a)单层单道;(b)二层二道;(c)二层三道;(d)三层五道;(e)三层六道

Fig. 1 Schematic diagram of laser fillet welding with different overlay welding sequences

(a)Single-layer single pass; (b)two layers and two passes; (c)two layers three lanes;

(d)three layers and five lanes; (e)three layers and six lanes

表 3 角焊工艺参数

Table 3 Angle welding process parameters

Laser power/ W	Wire feed speed/ ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	Welding speed/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Gas flow/ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	Spot size/ mm	Laser incidence angle/ $(^\circ)$	Feed angle/ ($^\circ$)	Wire feed direction/ $(^\circ)$
3 500	210	6.5	30	5	45	25	150

将焊后的角焊缝利用电火花线切割机切割试件,经过打磨、抛光、腐蚀后,使用光学金相显微镜对角焊缝的宏观形貌和显微组织进行观察。采用 HVS-1000Z 显微维氏硬度计对焊缝截面进行维氏硬度测试。利用超声设备对试件进行清洗,测量试件总暴露面积,记录试件初始质量,配制质量分数 6% FeCl_3 溶液,利用电热炉保持恒温 $22\text{ }^\circ\text{C} \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$,进行 72 h 密封溶液浸泡点蚀试验。点蚀后的试件用光学金相显微镜观察点蚀坑等形貌,并洗净后称重,计算其腐蚀速率。

2 试验结果与分析

2.1 宏观形貌分析

表 4 为不同层数、不同焊道情况下激光填丝角焊缝的表面和截面形貌。从表面形貌可以看出,5 组试样均成形较好,焊缝表面未见明显缺陷。从截面形貌可以看出,焊道之间结合紧密、无明显缺

陷。在二层三道、三层六道逐层堆焊时,每层焊道的熔合边界也被堆叠起来,在焊道熔合处形成锯齿状边界,且在边界结合处略微塌陷,形成理想的微凹形角焊缝。二层二道、三层五道分别因第 2 道和第 4、5 道直接覆盖在原有焊缝表面,熔化的焊丝直接在前道焊缝表面铺展堆积,使角焊缝变为凸焊缝。

表 5 为不同层数、不同道数的角焊缝焊脚尺寸及焊缝厚度数据表,图 2 为对应曲线。采用二层二道、三层五道的堆焊方式可有效增加角焊缝厚度,但对焊脚尺寸的变化影响较小。采用二层三道、三层六道的堆焊方式可有效增加焊脚尺寸,且能够在保证堆焊角焊缝为凹焊缝的基础下有效增加焊缝厚度;但角焊缝焊脚尺寸过大,焊缝反复堆积,会造成母材受热严重,产生较大的应力及变形,塑性韧性降低。采用三层六道多层多道堆焊方式时,双边焊脚尺寸均超过 9 mm,焊缝厚度达 7 mm。

表 4 不同堆焊次序下角焊缝表面和截面形貌

Table 4 Surface and cross-sectional morphology of fillet weld under different overlay welding sequences

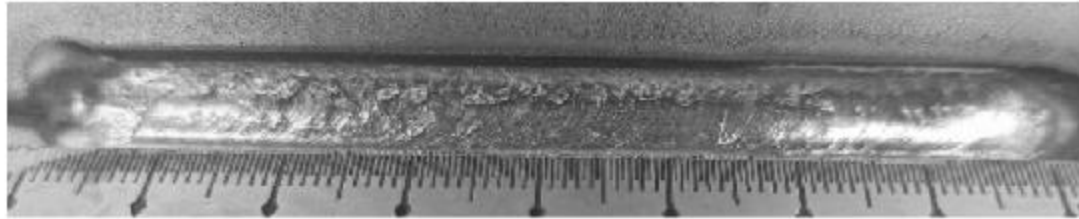
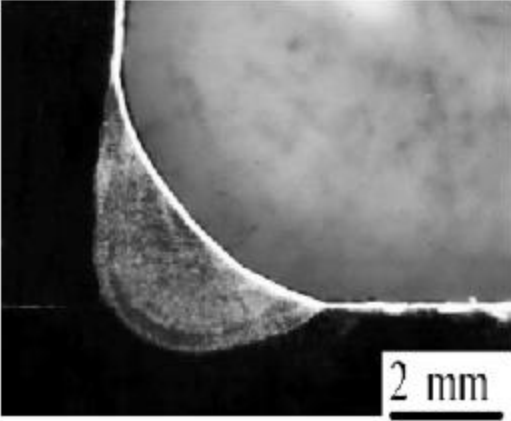
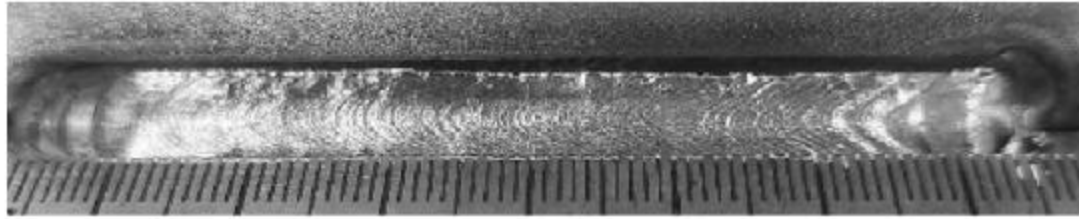
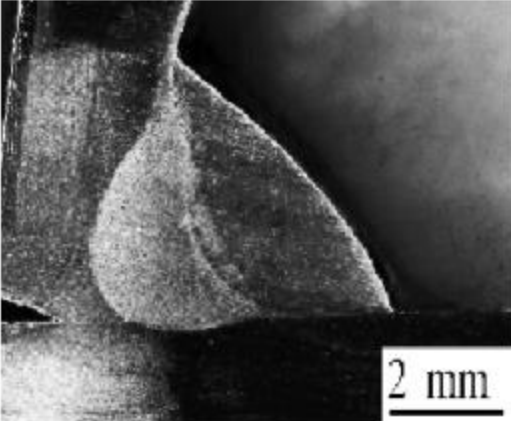
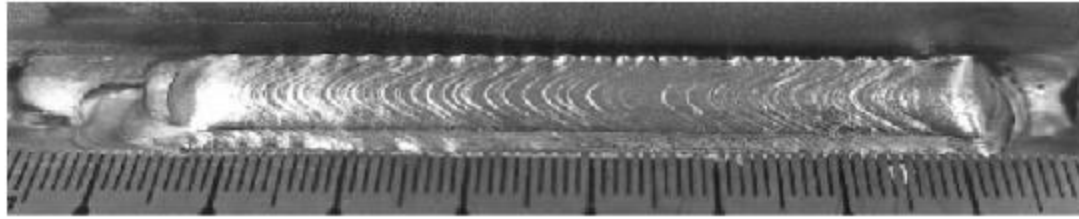
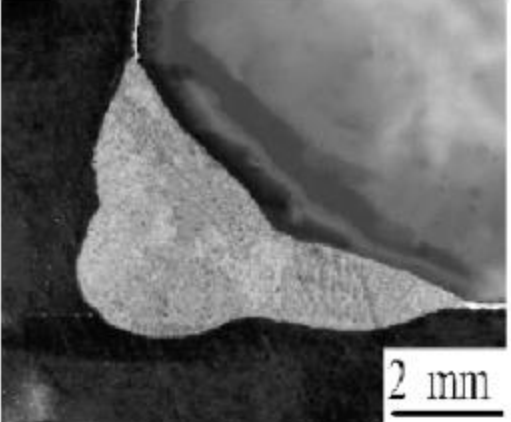

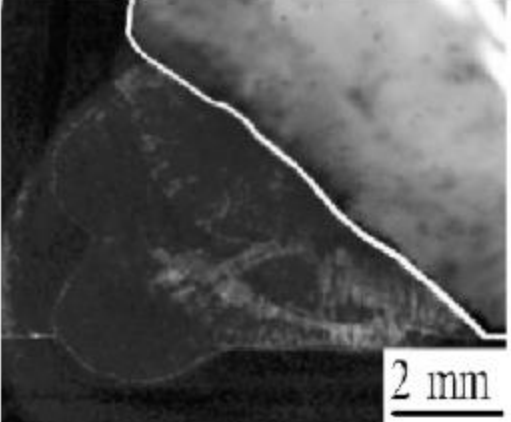

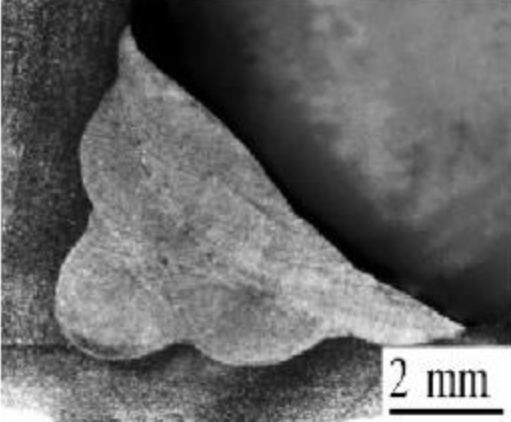
Serial number	Cladding sequence	Weld surface morphology	Weld cross-section morphology
a	single-layer single pass		
b	two layers and two passes		
c	two layers three lanes		
d	three layers and five lanes		
e	three layers and six lanes		

表 5 不同堆焊次序下角焊缝的相关尺寸

Table 5 Relevant dimensions of fillet welds under different surfacing sequences

Serial number	Cladding sequence	Vertical plate welding foot size/mm	Base plate soldering foot size/mm	Weld thickness /mm
a	single-layer single pass	4.037	3.745	2.101
b	two layers and two passes	4.585	4.304	3.602
c	two layers three lanes	6.654	6.224	4.042
d	three layers and five lanes	7.393	7.223	5.767
e	three layers and six lanes	9.543	9.145	7.099

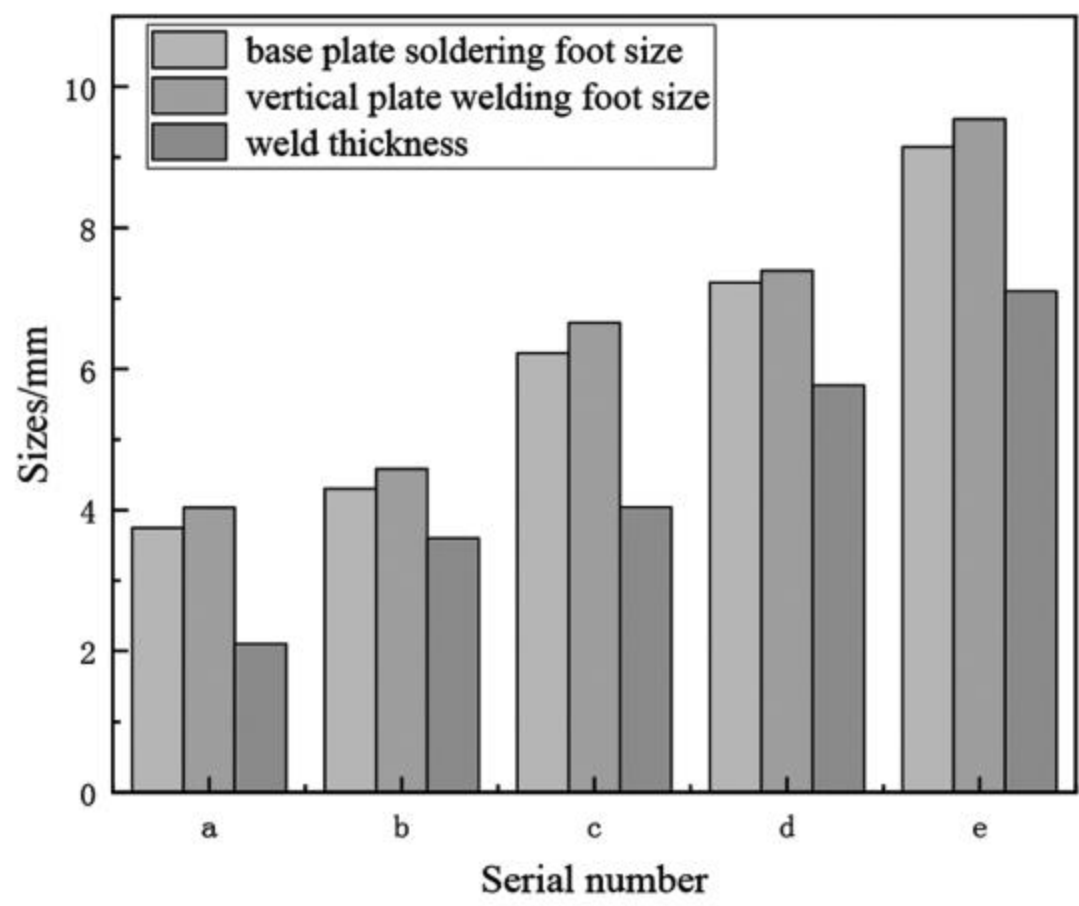


图 2 不同堆焊次序下角焊缝的相关尺寸
Fig. 2 Relevant dimensions of fillet welds under different overlay sequences

2.2 微观组织分析

图 3~图 6 给出了不同焊道、不同层数下角焊

缝的微观组织图,图 7 为结晶形态与温度梯度 G 和结晶速度 R 的关系图。可以看出所焊试样均未观察到明显缺陷,直角角钢拐角处结合紧密,熔覆层和母材之间形成一道明亮的界限区,焊道之间结合处为平滑的曲线。这说明在熔融状态下已经相互扩散并充分冷凝,达到了很好的冶金效果^[10]。组织主要为不同形态的铁素体与奥氏体,晶粒形态主要为等轴晶、树枝晶、柱状晶,铁素体形态为蠕虫状或骨架状。观察图 4 中 b-2 和图 5 的 c-1,可以发现在层间结合处附近的晶粒生长方向及大小明显不同,由于焊道结合处激光能量相互交叉,且冷却过程中各个方向冷却速率不同,所以层间结合部位熔合线附近显微组织排布各不相同。熔合线底部多为二次生长的树枝晶,熔合线顶部因温度梯度 G 变小,结晶速度 R 变慢,熔覆层组织多为等轴晶。

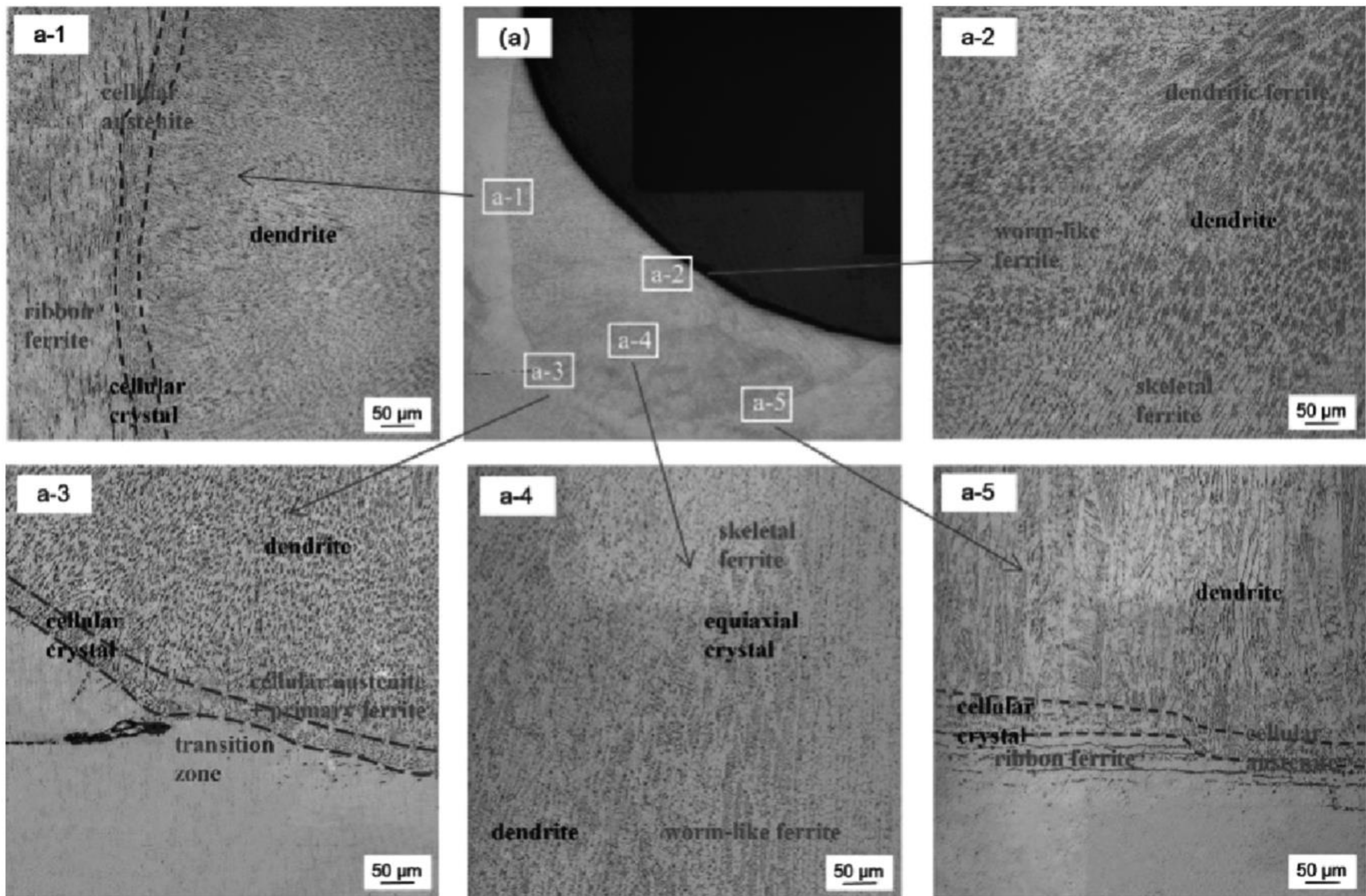


图 3 单层单道角焊缝微观组织
(a)横截面图;(a-1)竖板结合处;(a-2)角焊缝表面;(a-3)拐角结合处;(a-4)角焊缝中心;(a-5)底板结合处
Fig. 3 Microstructure of single-layer single-pass fillet weld
(a)Cross-sectional diagram; (a-1)the junction of the vertical plate; (a-2)the surface of fillet weld;
(a-3)the corner junction; (a-4)the center of fillet weld; (a-5)the bottom plate junction

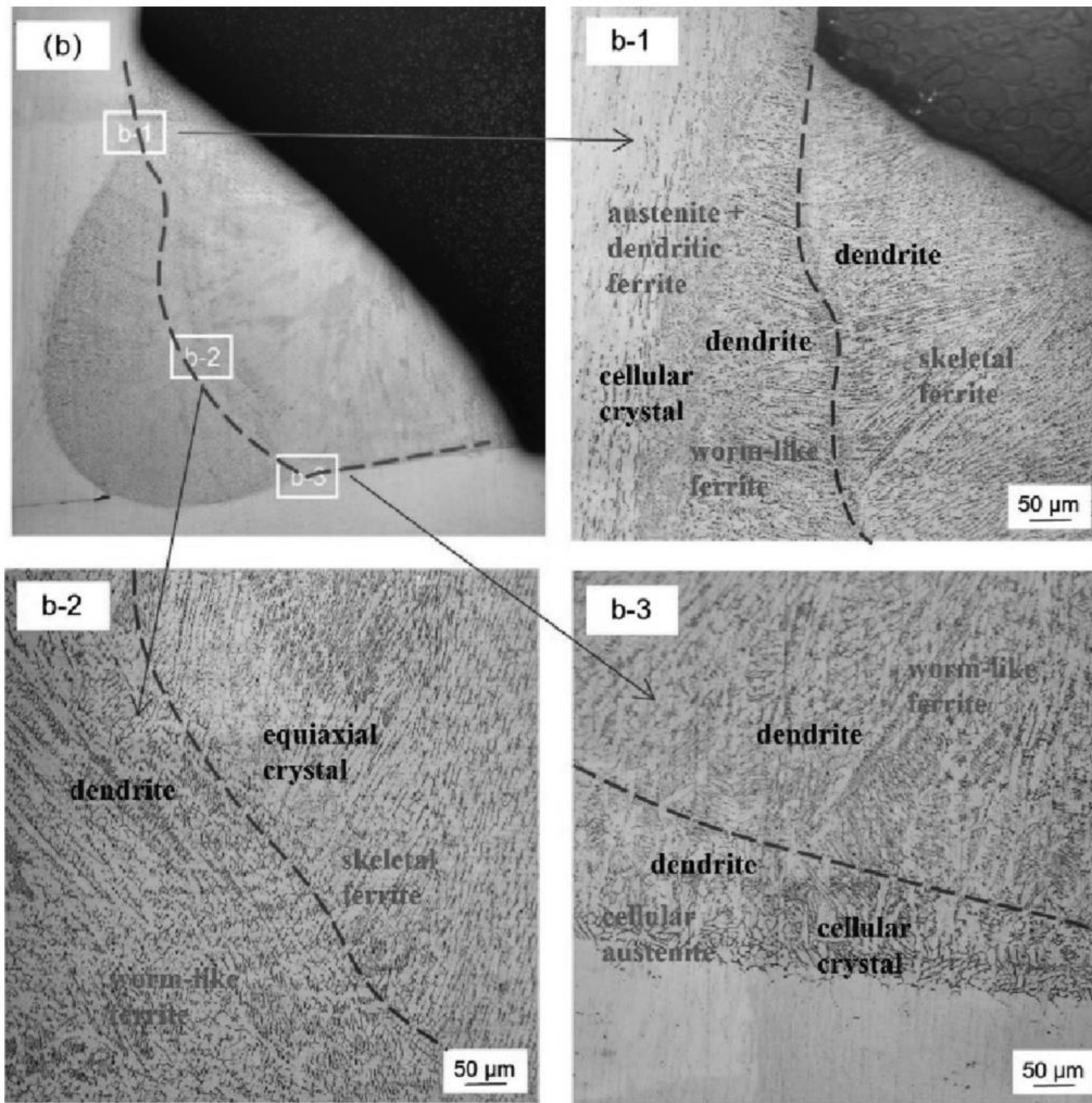


图4 二层二道角焊缝微观组织

(b)横截面图;(b-1)竖板结合处二次重熔区;(b-2)焊缝中心结合处;(b-3)底板结合处二次重熔区

Fig. 4 Microstructure of the second fillet weld of the second layer

(b)Cross-sectional view; (b-1)secondary remelting zone at the junction of vertical plate; (b-2)weld center junction; (b-3)secondary remelting zone at the bottom plate junction

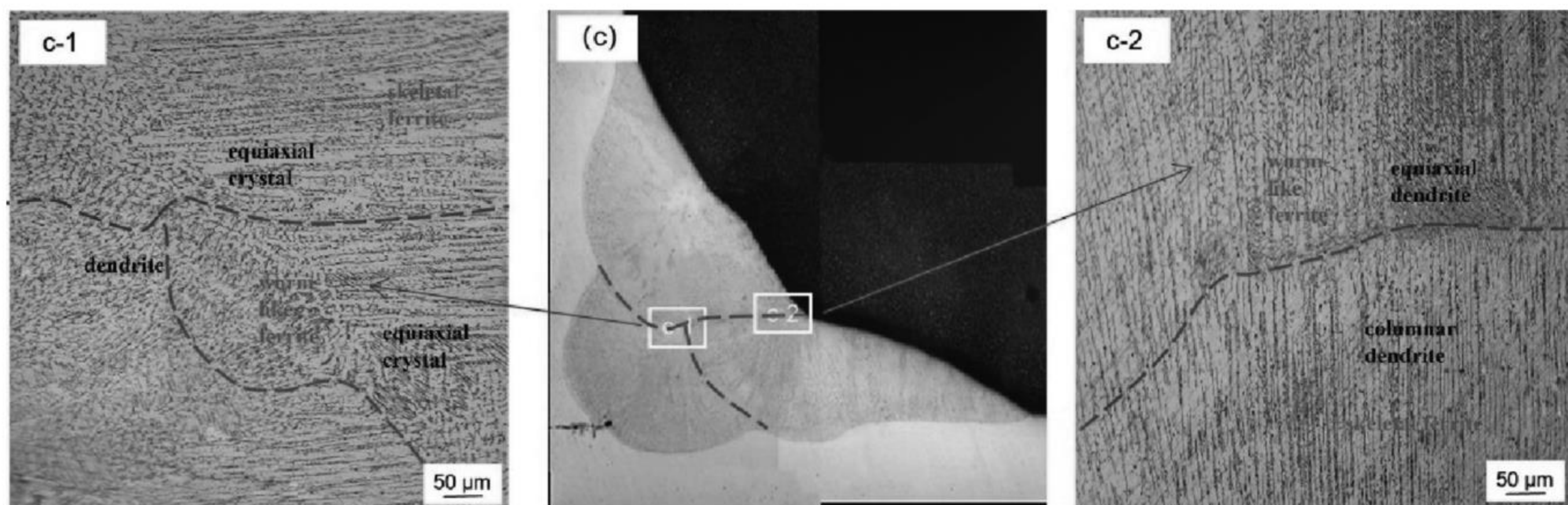


图5 二层三道角焊缝微观组织

(c)横截面图;(c-1)角焊缝三次重熔区;(c-2)焊缝表面二次重熔区

Fig. 5 Microstructure of the two-layer three-pass fillet weld

(c)Cross-sectional view; (c-1)three times remelting zone of fillet weld; (c-2)the secondary remelting zone on the weld surface

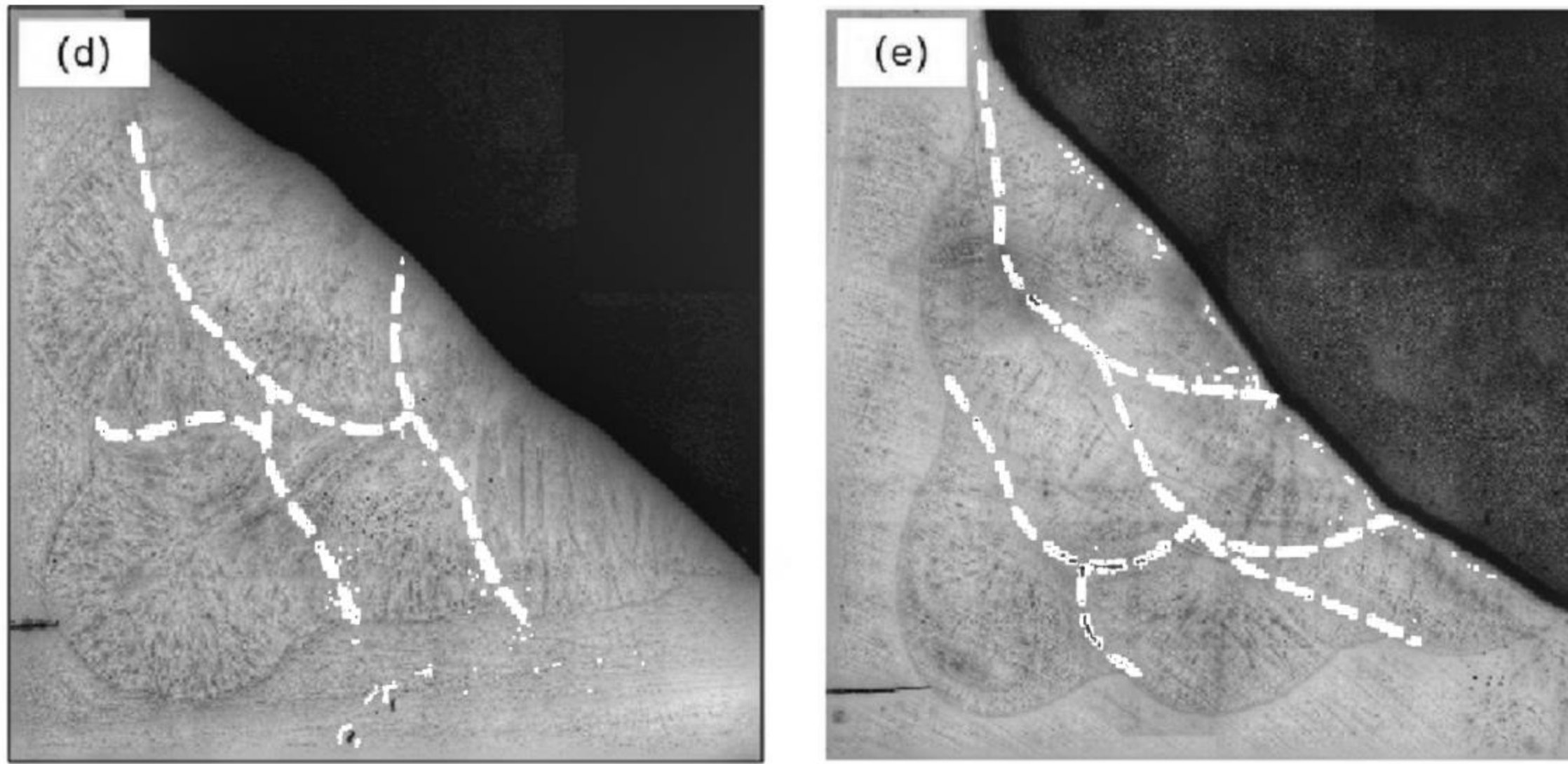


图6 角焊缝微观组织
(d)三层五道(e)三层六道

Fig. 6 Microstructure of fillet weld

(d) Three layers and five passes; (e) three layers and six passes

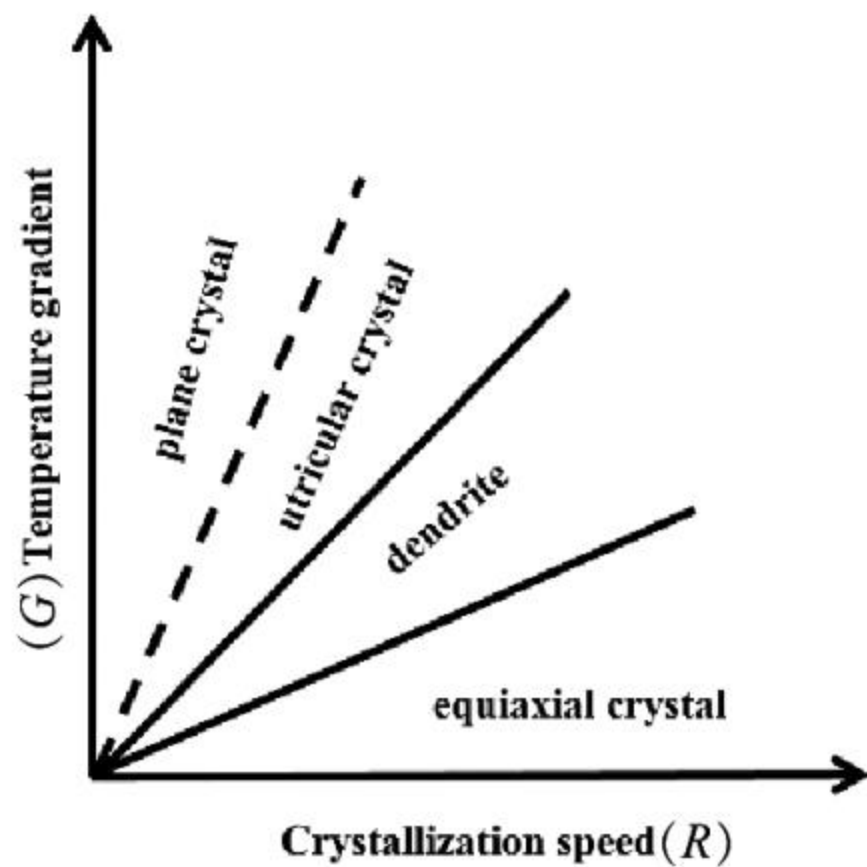


图7 结晶形态与G和R的关系^[11]

Fig. 7 Relationship between crystal morphology and G and R^[11]

角焊缝底部区即底板焊脚结合处与竖板焊脚结合处主要为胞状奥氏体+丝带状铁素体,在激光填丝角焊过程中,激光能量除熔化焊丝外,还直接作用于母材,且作用时间较长,结晶速度 R 小,熔覆层热量逐渐向基体扩散,温度梯度 G 较大,因此在此区域主要为胞状晶,如图3的a-1和a-5所示,且竖板区域的丝带状铁素体范围明显高于底板区域,这是因为竖板所受的激光能量高于底板。当进行多层多道焊接时,熔覆层与基体存在二次重熔。如图4的b-1和b-3所示区域,此区域结合处底部胞状晶生长,结合处顶部受二次加热处理,使得粗大的晶粒细化,细小的组织二次生长,同时此区域的温度梯度 G 较小,结晶速度 R 较小,因此该区域组织主要为树枝晶。观察图4的b-1,可以发现在焊缝与母材结

合处丝带状铁素体明显增多,这可以减少P、S等有害元素的聚集,细化晶粒,有效减少应力集中。

图3的a-3为角焊缝近表面处的微观组织图,此区域可以将热量直接散发到空气中,焊缝金属的快速冷却导致焊缝中一些富含铬的铁素体不能及时转化为奥氏体,形成了树枝状铁素体,同时越靠近熔覆层表面,温度梯度 G 越大,结晶速度 R 越快,树枝晶越多。而进行多层多道角焊过程中,熔覆层表面存在二次重熔区,如图5的c-2所示,受二次热循环影响,此区域奥氏体不断消耗,铁素体不断生长,铁素体由树枝状转变为蠕虫状,这是因为在层间、道间结合处热量逐渐积累,且冷却速度明显下降,焊缝元素充分扩散,在析出铁素体后,与液态金属发生包晶反应生成奥氏体;由于结合处冷却速度比较缓慢,奥氏体不断消耗铁素体生长,在残留的铁素体中Cr、Mo等铁素体元素不断聚集,最终使铁素体在较低的温度下变成稳定的蠕虫状或骨架状铁素体;熔覆层组织在熔合线处分别为等轴状树枝晶和柱状树枝晶,其中柱状树枝晶生长方向一致,晶轴间距较小。图6分别为三层五道和三层六道角焊缝微观组织图,其中各层间组织与二层二道和二层三道相似。

2.3 显微硬度分析

304奥氏体不锈钢角焊缝不同层数、不同焊道的显微硬度分布如图8所示,对焊缝沿着焊缝中心线进行显微硬度分布试验,相邻测试点的间隔为0.5 mm。从图8可以看出,沿着中心线测量时,角焊缝不同区域显微硬度并不均匀,在单层单道、二层

二道和二层三道时,焊缝硬度场大致呈“n”形分布;而在三层五道和三层六道时,因为沿着中心线方向存在多次焊接热循环区域,导致焊缝硬度场大致呈“M”形分布。与母材相比,角焊缝硬度明显增高,结合显微组织图发现熔覆层的晶粒较母材明显变小,这就会让晶界面积增大,对位错运动产生较大的阻碍作用,同时熔覆层中合金元素往中心区域堆积,起到了一定的固溶强化作用,因此熔覆层显微硬度高于母材。从图 8 还可以看出,在经历拐点后焊缝显微硬度不断下降,结合显微组织图分析,此区域应为图 5 中 c-2;在此区域相当于经历 3 次焊接热循环,晶粒在细化后又再次生长,晶粒过多生长后粗大,导致细晶强化的作用降低,硬度减小;但受前几道焊缝积累的热量影响,焊缝硬度依然整体高于母材硬度。

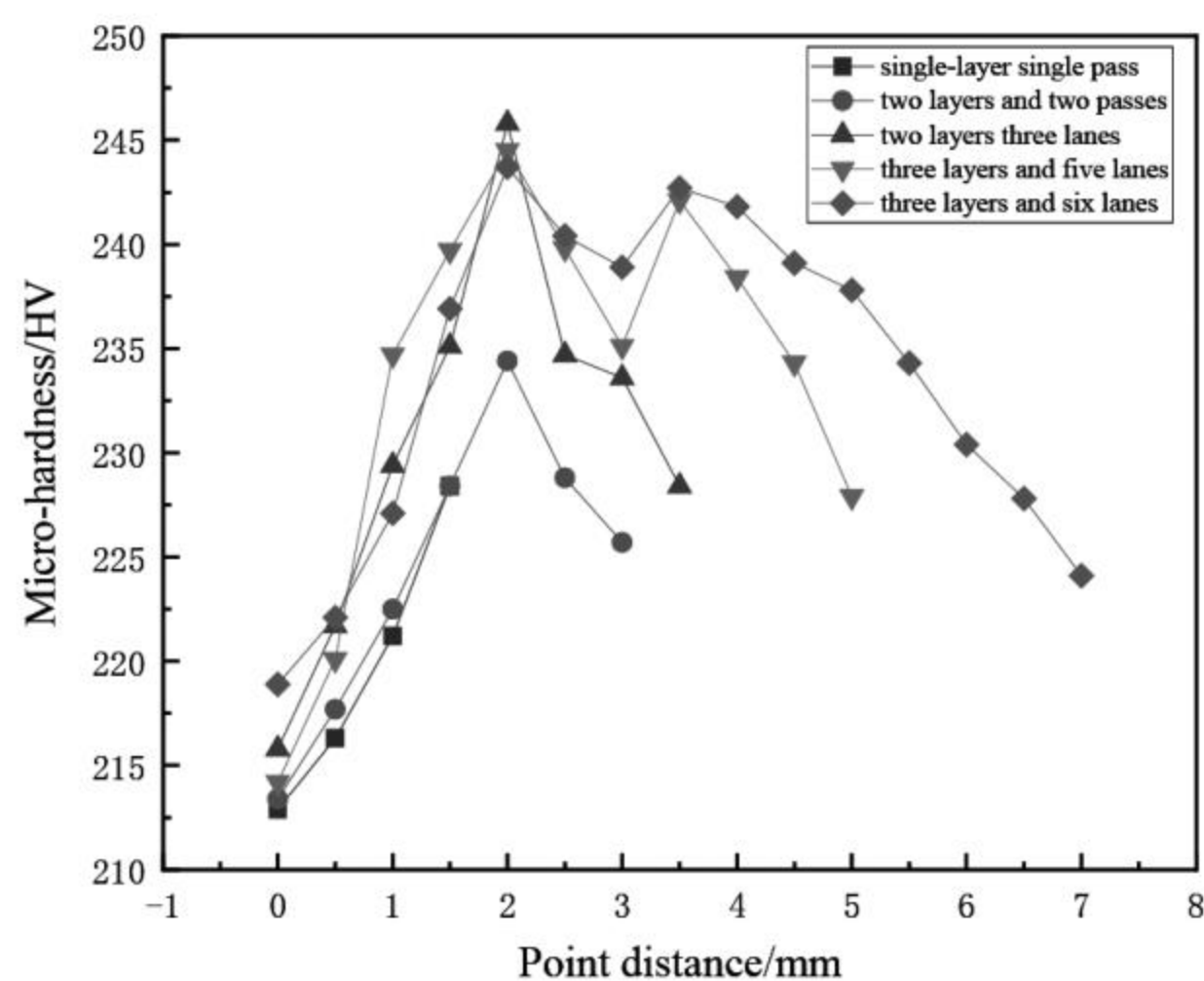


图 8 显微硬度分布

Fig. 8 Microhardness distribution

2.4 耐腐蚀性能分析

2.4.1 焊缝耐腐蚀原理

在激光填丝角焊过程中,不同的角焊缝区域会存在不同形态的组织及不同大小的应力状态,而焊缝组织和焊缝应力状态对 304 奥氏体不锈钢耐腐蚀性能影响较大。不锈钢表面的点蚀坑会随着时间的累积逐渐塌陷形成点蚀空洞,严重影响材料的使用性能。由于在激光填丝焊接过程中,母材-焊缝结合处以及焊缝-焊缝结合处的钝化膜处组织分布不均匀,存在薄弱区域,在此区域会形成阳极区,与阴极区形成局部电解池,加速不锈钢的腐蚀^[12]。现普遍认为点蚀的过程主要有以下几步:(1)点蚀孔的形成;(2)点蚀孔扩展、长大为点蚀坑;(3)形成点蚀均匀腐蚀区。局部点蚀示意图如图 9 所示。

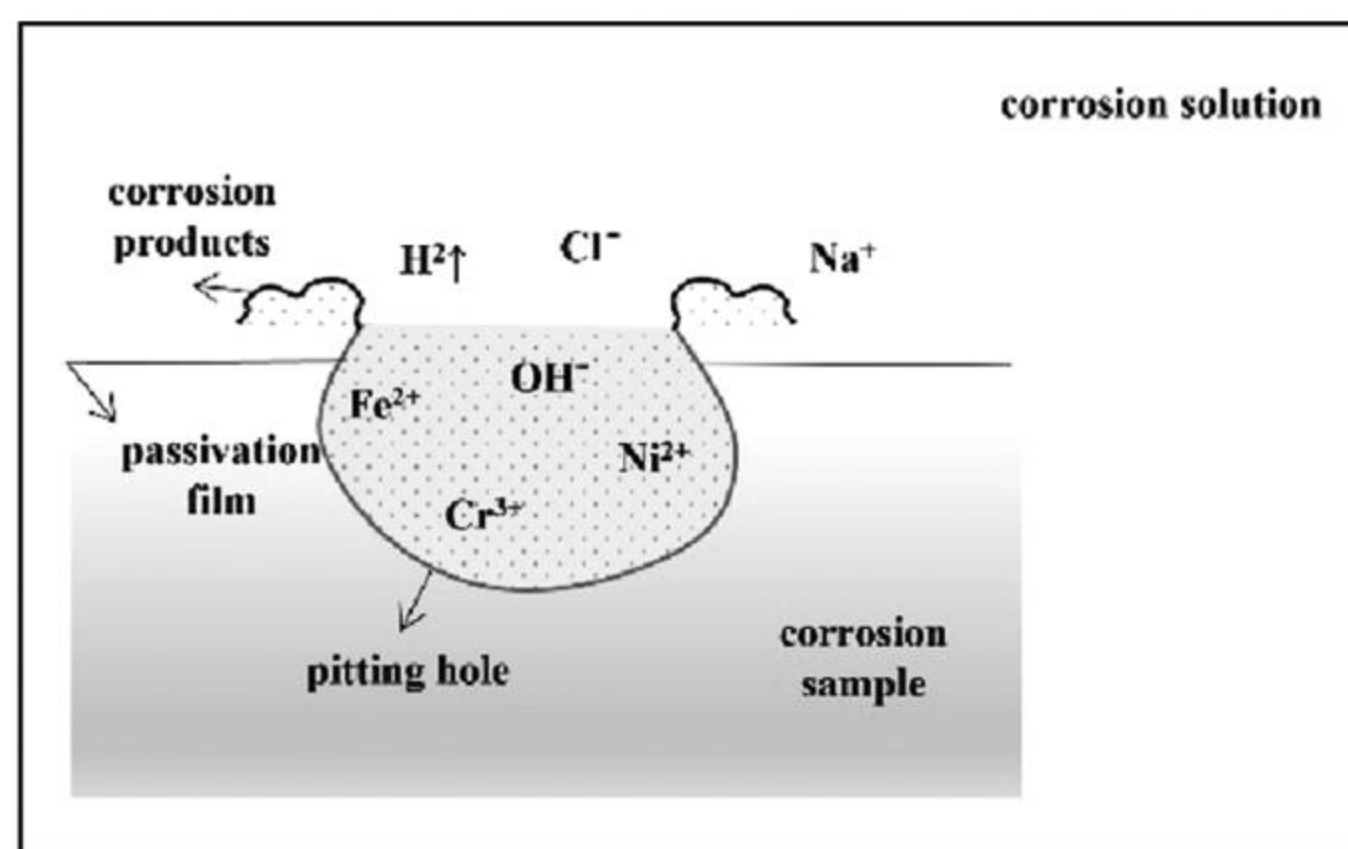


图 9 局部点蚀示意图

Fig. 9 Diagram of local pitting

其中在阳极和阴极发生的化学方程式如下所示^[13]:

在腐蚀过程中阳极发生的化学反应为: $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$, $\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^-$, $\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^-$ 等。

阴极发生的反应为: $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ 。

溶液中发生的反应为: $\text{Fe}^{2+} + \text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Cr}^{3+} + \text{OH}^- \rightarrow \text{Cr}(\text{OH})_3$, $\text{Ni}^{2+} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Ni}(\text{OH})_2$, $4\text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_3$ 。

研究认为,点蚀坑的形成并长大主要是因为不锈钢中金属阳离子和腐蚀溶液中的 Cl^- 相互作用^[12],存在的钝化膜薄弱区会产生 Cl^- 吸附,并造成金属阳离子快速产生,加速钝化膜的溶解;同时促进不锈钢薄弱区与溶液中的 H^+ 优先腐蚀,导致腐蚀孔进一步长大,直接影响不锈钢板的使用性能^[14]。

2.4.2 点蚀试验方法

不锈钢的耐点腐蚀试验方法有两种:电化学测定法和化学浸泡法。本试验采用的试验方法为化学浸泡法,按照 GB/T 17897—2016《金属和合金的腐蚀不锈钢三氯化铁点腐蚀试验方法》,用符合 HG/T 3474 规定的分析纯三氯化铁($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 100 g 溶于 900 mL 蒸馏水或去离子水中,配制成质量分数 6% FeCl_3 溶液^[15];将不同层数、不同焊道的角焊缝制备的试件(厚度 ≤ 5 mm)浸泡在所配制的 FeCl_3 溶液中,试验温度为 $22 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$,连续试验时间为 72 h。通过观察试样表面腐蚀情况、腐蚀坑形貌及测量浸泡前后试件质量,进行单位面积失重分析,来评估 304 奥氏体不锈钢角焊缝在 Cl^- 环境中的耐腐蚀性能^[15]。

2.4.3 表面腐蚀分析

腐蚀后的宏观形貌如图 10 所示。在多层多道

试样上,角焊缝试样底板与竖板有轻微的腐蚀坑,主要存在于焊缝与母材的交接处、两直角角钢的拐角交界处。这是因为焊缝与母材的交界处为薄弱区,同时多次焊接导致底板与竖板应力值不断增加,更容易发生点腐蚀现象。在三层六道试样上[图 10 (e)],焊缝表面出现点腐蚀坑但未扩展,点蚀坑的位置在焊缝交界处,且竖板母材已出现均匀腐蚀;在二层二道试样上[图 10(b)],角焊缝试样表面存在点腐蚀坑,点腐蚀坑扩展在表面形成均匀腐蚀且试样表面发生氧化现象;而在三层五道试样上[图 10 (d)],点腐蚀严重且表面发生严重氧化。分析认为,采用二层二道或三层五道角焊缝堆焊方式时,激光能量更多直接通过前一道焊缝传递给竖板与底板,不断加剧焊缝热量分布不均匀的现象,同时焊缝中应力不断增加,这导致在形成点腐蚀坑后,形成原

电池的不平衡的趋势增大,加速了点腐蚀的进程;同时结合金相组织对比可以发现,过多的热量积累会导致晶粒粗大,晶粒与晶界处的电阻不平衡变大,同时析出过量的铁素体,铁素体电极电位与奥氏体不同,当焊缝中铁素体含量超过 8%以后,点蚀的倾向增大,导致焊缝耐腐蚀性降低。在单层单道和二层三道角焊缝试样上,焊缝并无明显的腐蚀坑,试样耐腐蚀性能较好。

对比图 10 中所有图片可以发现,母材在不同多层多道焊接方式中均出现点蚀坑,而焊缝只在应力集中处或层间结合处出现点蚀坑。分析原因为:Cr、Mo、Ni 等元素能够有效地抑制局部腐蚀的扩展,而所用的焊丝 ER-308L 组织成分中 Cr、Mo、Ni 含量较高^[16]。因此选用 ER-308L 焊丝获得的焊缝比母材的耐腐蚀性能更好。

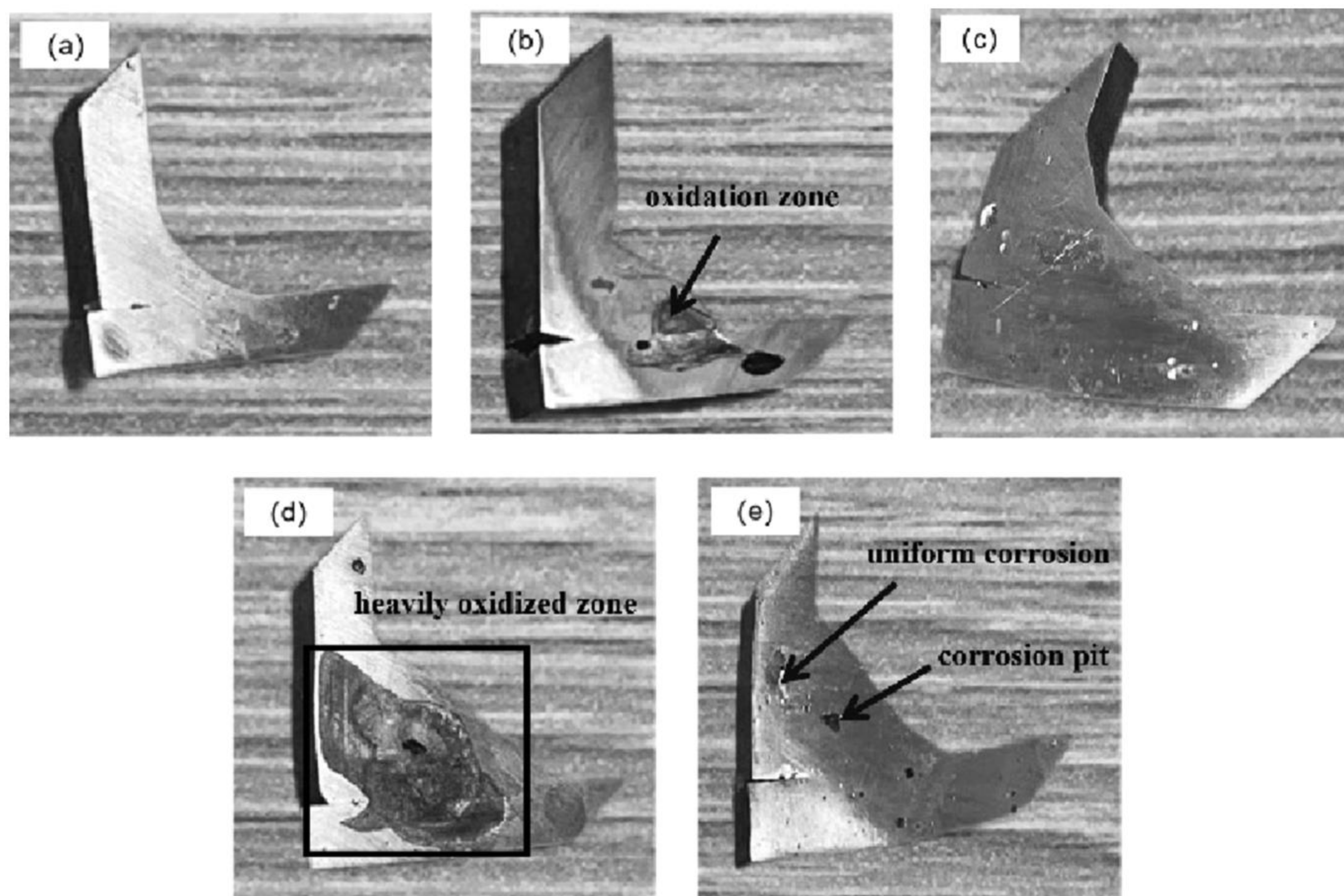


图 10 不同堆焊次序下角焊缝点蚀情况

(a)单层单道;(b)二层二道;(c)二层三道;(d)三层五道;(e)三层六道

Fig. 10 Pitting corrosion of fillet weld under different overlay welding sequences

(a)Single-layer single pass; (b)two-layer two-pass; (c)two-layer three-pass;

(d)three-layer five-pass; (e)three-layer six-pass

2.4.4 腐蚀后微观形貌分析

观察试样母材区域,可以看出母材试样上存在点蚀坑、剥落区、点蚀空洞等腐蚀形貌,点蚀坑周边

出现不同程度的剥落,使得点蚀坑彼此相连,逐渐形成点蚀空洞。对比试样焊缝区域,可以发现在焊缝与母材交界处、层间与焊道交接处焊缝容易出现点

蚀坑,且随着时间的增加,这种凹坑在此区域不断产生,数量不断增加,彼此相互连接及重叠,使试样表面产生严重的塌陷与氧化,形成点蚀空洞。随着腐蚀的扩展,点蚀坑逐渐由深而窄逐渐向浅而宽转变,

转变为均匀腐蚀。二层二道试样的腐蚀坑出现在焊缝与母材交界处,三层五道和三层六道试样的腐蚀坑出现在焊缝层间结合处。

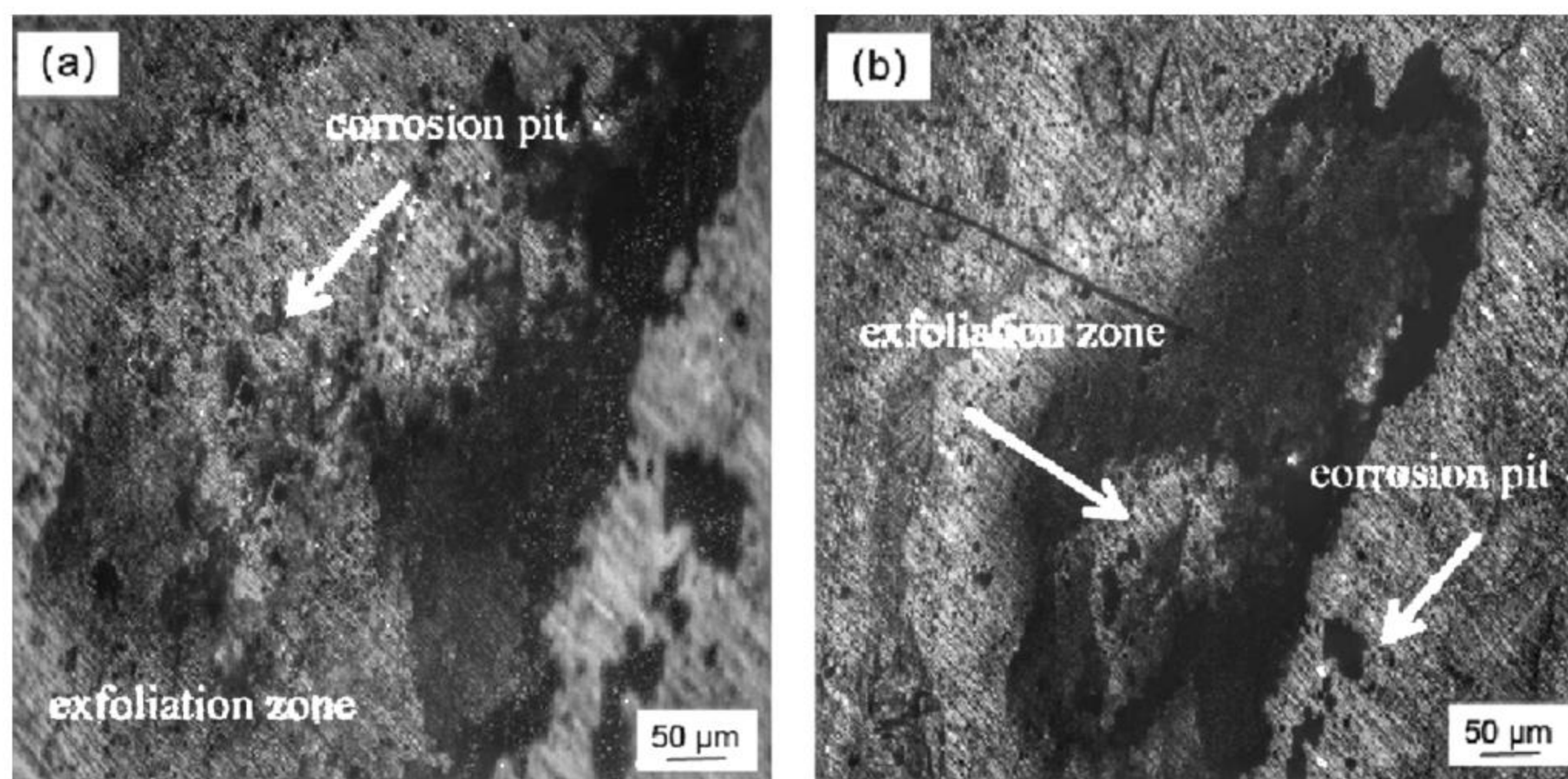


图 11 母材腐蚀区

(a)竖板;(b)底板

Fig. 11 Base metal corrosion zone

(a)Vertical plate; (b)bottom plate

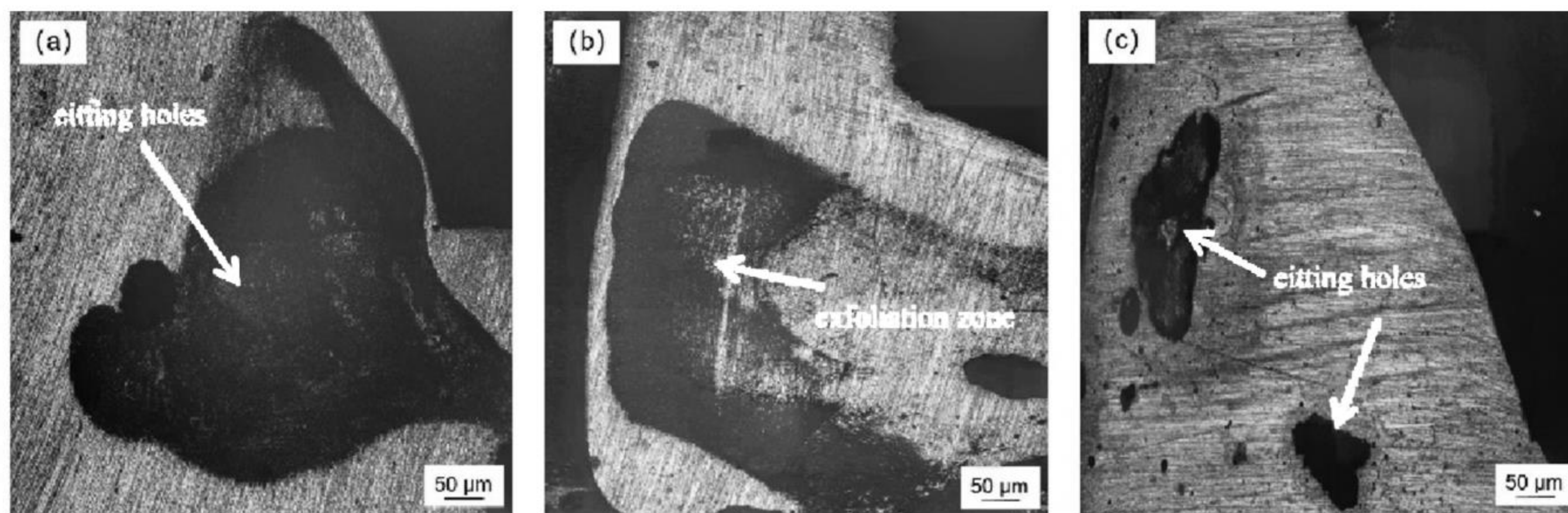


图 12 腐蚀区形貌

(a)二层二道试样;(b)三层五道试样;(c)三层六道试样

Fig. 12 Corrosion zone morphology

(a)Two layers of two samples; (b)three layers of five samples; (c)three layers of six samples

进一步分析高倍数下的腐蚀坑金相照片,可以看出随着腐蚀时间的增长,试样的腐蚀方式变为均匀腐蚀和氧化腐蚀,并在试样表面生成了一层致密的氧化膜,如图 13(b)所示,而随着时间推移,氧化膜发生溶解,溶液中大量的 Fe^{3+} 进入腐蚀坑,与基

体中的 Fe 进行氧化还原反应,使腐蚀坑不断向四周扩展。由图 13(d)可知腐蚀坑内部破坏严重,凹坑彼此相连形成凹线,将焊缝细小的分割成大小不一的区域。

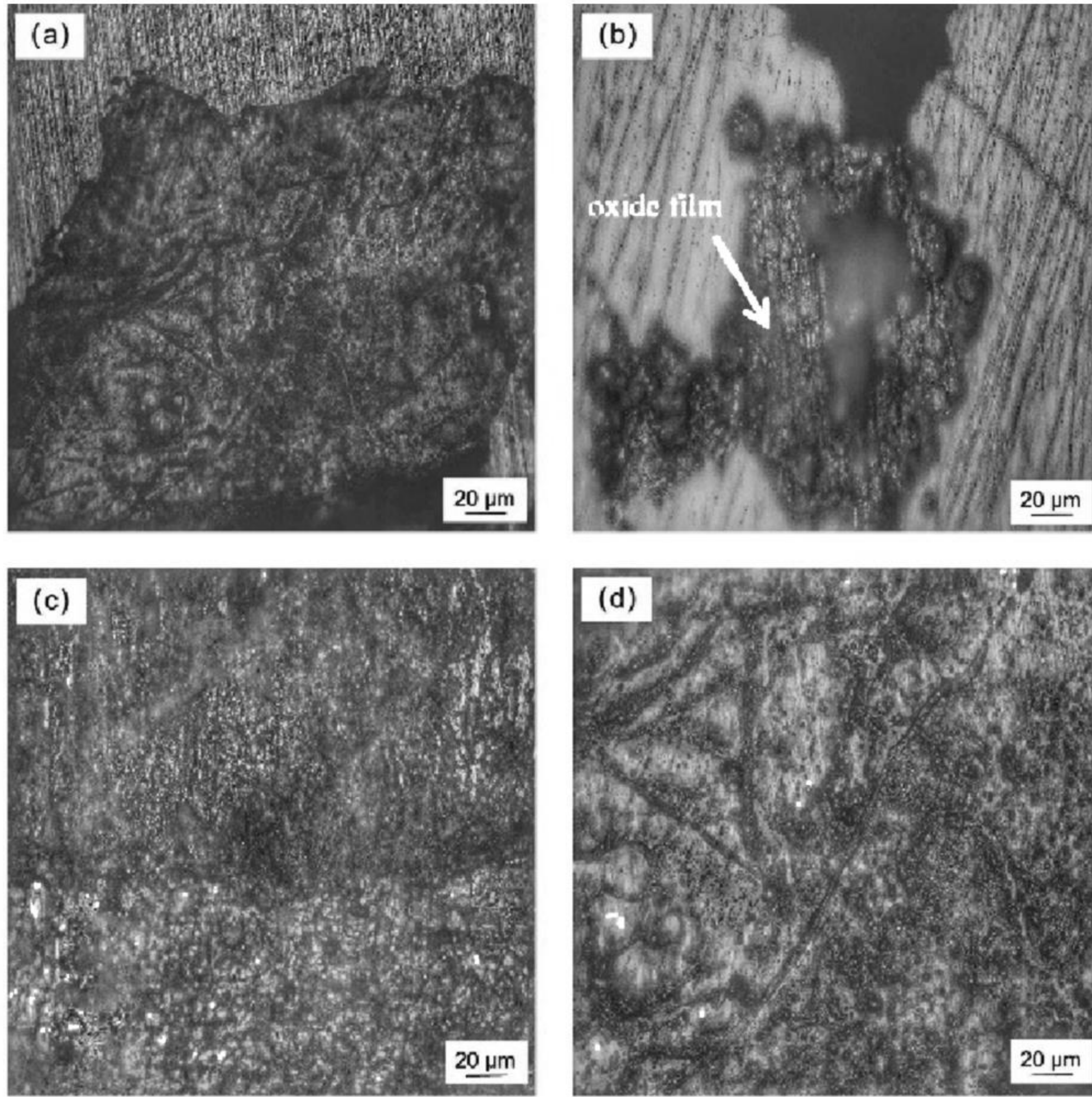


图 13 高倍数下焊缝腐蚀区形貌
(a)氧化区;(b)氧化膜;(c)腐蚀坑;(d)腐蚀坑内部

Fig. 13 Morphology of weld corrosion zone under high multiples
(a)Oxidation zone; (b)oxide film; (c)corrosion pits; (d)inside the corrosion pit

2.4.5 失重分析

根据 GB/T 17897—2016《金属和合金的腐蚀 不锈钢三氯化铁点腐蚀试验方法》，可以用腐蚀率来表明试验材料的耐点蚀性，即单位时间内单位面积的失重情况^[15]，单位是 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。计算公式为：

$$V = \frac{W_a - W_b}{S \cdot t} \times 10^6 \quad (1)$$

式中：计算修约到小数点后第 2 位； W_a 为点腐蚀试验前试样的质量，g； W_b 为点腐蚀试样后试样的质量，g； S 为试样点蚀的总面积， mm^2 ； t 为点腐蚀时间，h。计算得到的试验结果如表 6 所示。

表 6 试样浸泡实验结果
Table 6 Sample immersion test results

Serial number	a	b	c	d	e
Cladding sequence	single-layer single pass	two layers and two passes	two layers three lanes	three layers and five lanes	three layers and six lanes
S/mm^2	455.6	459.3	480.1	494.6	519.8
W_a/g	2.684	2.921	3.702	4.504	5.029
W_b/g	2.638	2.814	3.635	4.360	4.942
$V/(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	1.4023	3.2356	1.9383	4.0436	2.7521

由腐蚀率可以看出,采用二层二道、三层五道多层多道角焊方式时,腐蚀率明显增加,且与同层数其他角焊方式相比,腐蚀率增加的幅度明显。原因是在二层二道和三层五道中,激光热源直接作用在原有焊缝表面,使得角焊缝处于高能量状态,导致残余应力较为集中,容易在层间结合处发生腐蚀并迅速扩展;而二层三道、三层六道的焊道分布均匀,角焊缝内部应力分布均匀,不易发生点蚀,使得腐蚀率变化不大,且腐蚀率小于规定的最大的腐蚀等级,说明采用此方式进行多层多道激光填丝直角角焊能获得耐腐蚀较好的焊缝。

3 结论

本文在确定不同堆焊次序后,研究了激光填丝L形直角焊接试验,探讨了不同焊道、不同层数对角焊缝宏观形貌、显微组织、显微硬度及耐腐蚀性能的影响规律,结论如下:

(1)不同层数、不同焊道的工艺路径均能获得成形良好、层间结合紧密的直角角焊缝。采用二层二道、三层五道的堆焊方式可有效增加角焊缝厚度,焊脚尺寸分别可达4 mm和7 mm;采用二层三道、三层六道的堆焊方式可有效增加焊脚尺寸,分别能达到6 mm和9 mm,且能在保证堆焊角焊缝为凹焊缝的基础上有效增加焊缝厚度。

(2)在微观形貌方面,不同焊道及焊缝与母材的结合面为平滑的曲线,形成了性能优异的冶金结合;角焊缝在多层多道焊过程中,由于激光能量、散热方式不一致,使得层间、道间焊缝组织的尺寸以及生长方向各有不同。焊缝组织主要为奥氏体和铁素体,经多次热循环后,铁素体以不同的形态存在于焊缝中。

(3)焊缝显微硬度测试结果显示,单层单道、二层二道和二层三道时,焊缝硬度场大致呈“n”形分布;在三层五道和三层六道时,因为沿着中心线方向存在多次焊接热循环区域,导致焊缝硬度场大致呈“M”形分布。焊缝整体硬度均高于母材硬度。

(4)采用单层单道、二层三道、三层六道方式堆焊时,焊缝耐腐蚀性能较好,并未出现连续扩展的点蚀坑和大面积的氧化区,而二层二道和三层五道的堆焊次序下出现均匀腐蚀和氧化区,不宜用来进行多层多道角焊。

参考文献

- [1] 邵长磊,朱加雷,梅乐,等. S32101 双相不锈钢激光填丝焊接工艺及焊缝性能研究[J]. 应用激光, 2021, 41(5): 943-947.
- SHAO C L, ZHU J L, MEI L, et al. Study on laser wire filling welding process and weld properties of S32101 duplex stainless steel[J]. Applied Laser, 2021, 41(5): 943-947.
- [2] 张旭,曹玉库,曹素红. 船舶焊接与结构设计优化[J]. 科技风, 2020(9): 150.
- ZHANG X, CAO Y K, CAO S H. Ship welding and structural design optimization[J]. Technology Wind, 2020(9): 150.
- [3] 杨景卫,陈嘉乐,李涛,等. QP980 高强钢小光斑激光焊接接头组织与性能研究[J]. 应用激光, 2023, 43(5): 37-42.
- YANG J W, CHEN J L, LI T, et al. Study on microstructure and properties of QP980 high strength steel joint welded by small laser spot welding[J]. Applied Laser, 2023, 43(5): 37-42.
- [4] 陈建华,杨金荣,张衍坤,等. 06Cr₁₉Ni₉NbN 高强奥氏体不锈钢焊接工艺评定[J]. 压力容器, 2020, 37(8): 19-23.
- CHEN J H, YANG J R, ZHANG Y K, et al. Welding procedure qualification of 06Cr₁₉Ni₉NbN austenitic stainless steel[J]. Pressure Vessel Technology, 2020, 37(8): 19-23.
- [5] KE W C, BU X Z, OLIVEIRA J P, et al. Modeling and numerical study of keyhole-induced porosity formation in laser beam oscillating welding of 5A06 aluminum alloy [J]. Optics Laser Technology, 2021, 133: 106540.
- [6] CUI C Y, CUI X G, REN X D, et al. Microstructure and microhardness of fiber laser butt welded joint of stainless steel plates [J]. Materials & Design, 2013, 49: 761-765.
- [7] 梁梓铭. 中厚板激光角接焊焊缝成形机制研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
- LIANG Z M. Study on weld formation mechanism of laser fillet welding of medium and heavy plate[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020.
- [8] 杨璐,张有振,周晖,等. 双相型 S22053 不锈钢角焊缝连接拉伸试验研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(11): 19-25.
- YANG L, ZHANG Y Z, ZHOU H, et al. Tensile test study on fillet weld connections of S22053-grade duplex stainless steel [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(11): 19-25.
- [9] TSIBULSKIY I A, AKHMETOV A D, KORSMIK R S, et al. The influence of the gap size on the formation

- of a welded joint in hybrid laser-arc welding of angular joints and T-joints[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1109: 012033.
- [10] 刘铠瑜, 朱加雷, 李丛伟, 等. S32101 双相不锈钢单道多层激光填丝熔覆层研究[J]. *精密成形工程*, 2022, 14(12): 176-183.
LIU K Y, ZHU J L, LI C W, et al. Study on single pass multilayer laser filament cladding of S32101 duplex stainless steel[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2022, 14(12): 176-183.
- [11] KOU S. *Welding metallurgy*[M]. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2003.
- [12] 刘伟. S32101 双相不锈钢焊接工艺与接头耐蚀性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
LIU W. Study on welding technology and joint corrosion resistance of S32101 duplex stainless steel[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [13] 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 R K. Research on repair process and performance of 921A ship steel by high pressure dry underwater laser cladding [D]. Beijing: Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2022.
- [14] ALKAN S. Evaluation of pitting susceptibility and tribocorrosion behaviors of AISI 304 stainless steel in marine environments[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2023, 237(4): 808-823.
- [15] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属和合金的腐蚀 不锈钢三氯化铁点腐蚀试验方法: GB/T 17897—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
GENERAL ADMINISTRATION OF QUALITY SUPERVISION, INSPECTION AND QUARANTINE OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA, STANDARDIZATION ADMINISTRATION OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. Corrosion of metals and alloys—Corrosion test for pitting corrosion resistance of stainless steels in the ferric chloride solution; GB/T 17897—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [16] 卢志明, 金皋峰, 黄六一, 等. 合金元素含量对 316 不锈钢耐点蚀性能影响[J]. *浙江工业大学学报*, 2019, 47(3): 243-249.
LU Z M, JIN G F, HUANG L Y, et al. Influence of alloying elements concentrations on pitting corrosion resistance of AISI 316 stainless steels[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2019, 47(3): 243-249.