

光纤激光水下切割 1 mm 厚 304 不锈钢的实验研究

李倩 孙桂芳* 卢轶 张永康

东南大学机械工程学院, 江苏 南京 211189

摘要 在氩气辅助下,利用光纤激光水下切割 1 mm 厚 304 不锈钢板。通过切缝平均宽度研究激光功率、切割速度、水层厚度、水体条件等对切割效率及切割质量的影响规律。宏观上,激光功率过低、切割速度过快、水层过厚等因素会降低激光切割效率和质量。在模拟海洋环境的盐水中进行切割试验,水的高盐度和低温大大降低了切割效率。微观上,熔化区、热影响区(HAZ)和基体的组织成分、显微硬度各异,熔化区边缘出现表面形核现象,熔化区晶胞尺寸随着激光能量密度增大而增大;热影响区组织粗大,显微硬度低于基体与熔化区硬度。熔化区边缘硬度达到 242.8 HV,局部氧化区域硬度高达 963 HV,是基体硬度的 4.3 倍;熔化区中部硬度为 165.1 HV;热影响区硬度为 124.6 HV,不锈钢基体硬度为 223.4 HV。

关键词 激光技术;激光水下切割;微观组织;不锈钢

中图分类号 TG485

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0602001

Experimental Research on Fiber Laser Underwater Cutting of 1 mm Thick 304 Stainless Steel

Li Qian Sun Guifang Lu Yi Zhang Yongkang

School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China

Abstract Laser underwater cutting of 1 mm thick 304 stainless steel is demonstrated by a fiber-transmitted laser beam aided by high pressure argon gas. In order to evaluate cutting efficiency and quality via average kerf width, laser underwater cutting is carried out by changing the parameters of laser power, cutting speed, thickness of the water layer, salinity and temperature of the water. On a macro level, lower laser power, faster cutting speed and thicker water layer decrease laser cutting efficiency and quality. Meanwhile, high salinity and low temperature of water decrease laser cutting efficiency as well. On a micro level, metallographic structure and microhardness of the fusion zone, heat affected zone (HAZ) and substrate are different. Nucleation is detected on the surface of fusion zone. High laser power density promotes crystal grain growth. The microstructure in HAZ is coarse. The microhardness of HAZ is lower than that of the substrate and fusion zone. Microhardness of the outer surface of the fusion zone is 242.8 HV with some oxidized zone showing a hardness of 963 HV, 4.3 times of the substrate. While those of the middle part of the fusion zone, HAZ and substrate are 165.1, 124.6 and 223.4 HV, respectively.

Key words laser technique; laser underwater cutting; microstructure; stainless steel

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 180.5810

1 引言

21 世纪是海洋的世纪,在建造、维修及拆除海洋平台、海底管道、海底储油库、海底隧道等海洋工程结构物

收稿日期: 2016-02-01; 收到修改稿日期: 2016-03-01

基金项目: 国家博士后基金(2015M570395)、江苏省科技支撑计划(BE2013119)、江苏省产学研项目(BY2015070-05)、江苏省博士后基金(1501028A)

作者简介: 李倩(1991-),女,硕士研究生,主要从事先进激光制造方面的研究。E-mail: liqian6192@163.com

导师简介: 张永康(1963-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光加工与检测、海工装备先进制造等方面的研究。

E-mail: zyksu@163.com

* 通信联系人。E-mail: gfsun@seu.edu.cn

时,存在着维修或拆除费用高昂、作业环境恶劣、安全性差和破坏海洋生态环境等问题,而水下激光切割技术具有高效便捷、节约成本、安全环保的优势,并且可实现智能化和自动化,已经成为一种前景广阔的技术手段^[1-4]。

Alfille等^[5]运用5 kW的CO₂激光器切割水下500 mm处10 mm厚的316不锈钢板。Jain等^[6]以250 W激光功率切割水下100 mm处4.2 mm厚的铝合金压力容器板材和6 mm厚的钢板。Hilton等^[7]运用5 kW光纤激光器以100 mm/min的切割速度对32 mm厚的不锈钢板进行水下切割。Choubey等^[8]在干燥空气和水下两种环境中,运用Nd:YAG脉冲激光器以500 W激光功率切割4~20 mm厚304不锈钢板,获得最佳工艺参数。王威等^[9]采用高压密封舱模拟水深50 m的水下切割环境,运用60~6000 W的Trudisk 6002型激光器水下切割30 mm厚Q235-A钢板,切割速度最快可达到2 m/min。朱华等^[10]采用200 W的CO₂激光器和Nd:YAG固体激光器进行水下熔化切割(无辅助气体)304不锈钢的研究实验,发现水下光程增大、水中杂质增多会导致激光切割质量降低,未研究不同的激光功率和切割速度对水下切割效果的影响。杨伟等^[11]为消除激光切割产生的热效应,进行4 mm水下切割0.5 mm厚硅片的工艺研究。陈聪等^[12]研究3 kW光纤激光器切割2 mm厚AA6061-T6铝合金薄板的工艺参数优化。徐国建等^[13]研究光纤激光切割6 mm厚SS400钢板,其切割效率比CO₂激光切割系统提高了2.6倍。与CO₂激光器相比,光纤激光器具有小型轻量化、维护成本低、稳定性强、容易实现大功率化、可长距离传输等优势,适合于水下复杂环境的切割作业。激光水下切割技术不是传统激光切割技术的简单延伸,目前国内外光纤激光水下切割技术研究侧重于挖掘大功率下可切割的板厚,以及达到最优切割质量的最佳工艺参数,很少涉及水下激光切割过程中切缝形貌形成机理以及切缝微观组织成分的研究。

本文进行光纤激光水下切割1 mm厚不锈钢板试验,研究激光参数和环境参数对光纤激光水下切割效率和质量的影响,以及切割过程中切缝形貌成形规律。同时,从凝固方式、物相成分、晶粒尺寸、显微硬度等角度对不锈钢板切缝横截面的熔化区和热影响区(HAZ)的微观组织形貌进行全面评估。

2 试验方法

2.1 激光水下切割过程

激光水下切割不锈钢板过程如图1所示,高压辅助气体吹开不锈钢板上层水膜,在激光喷嘴与钢板之间形成一个暂时稳定的气腔,保证激光光束直接照射于钢板。激光照射使钢板温度瞬间上升到几千甚至上万摄氏度,切口处材料迅速熔化汽化,辅助气体吹除切口处的熔融金属。随着激光束的移动,在钢板上形成宽度均匀的切缝^[14]。

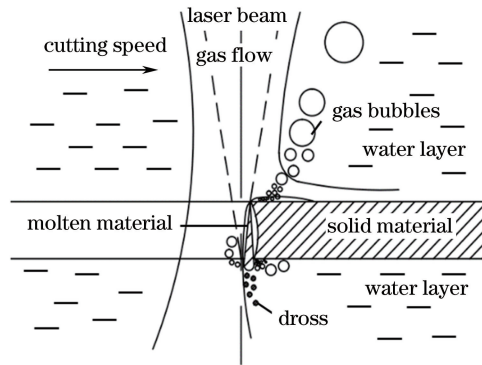


图1 激光水下切割过程

Fig. 1 Laser underwater cutting process

2.2 水下切割试验方案

试验所用激光器为IPG光纤激光器,激光设备参数:型号YLS-2000-S2T-TR,运行模式CW/QCW,中心辐射波长为1070~1080 nm,标准输出功率为2000 W,调制速度为5 kHz,传输光纤直径为50~100 μm,光斑直径为2 mm。试验材料为100 mm×100 mm×1 mm的304不锈钢,其化学成分如表1所示。

表 1 304 不锈钢化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of 304 stainless steel (mass fraction, %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0.07	0.46	0.78	0.032	0.006	8.10	18.32	Bal.

水下切割试验中保持离焦量为 0(焦点位于材料上表面),辅助气体压力为 5 MPa。光纤激光水下切割试验参数如表 2 所示,其中模拟海洋环境的参数:含盐量为 3.5%,水温为 10 ℃。

表 2 激光水下切割试验参数

Table 2 Laser underwater cutting experimental parameters

Specimen	Temperature /℃	Salt /%	Water layer	Laser power	Cutting speed	P/V value
			thickness /mm	P /kW	V /(mm/min)	/[W/(mm/s)]
A1	20	0	5	1.5	100	900
A2	20	0	5	1.5	150	600
A3	20	0	5	1.5	200	450
A4	20	0	5	1.5	250	360
A5	20	0	5	1.5	300	300
A6	20	0	5	1.5	350	257.1
A7	20	0	5	1.5	400	225
B1	20	0	5	1.3	100	780
B2	20	0	5	1.3	150	520
B3	20	0	5	1.3	200	390
B4	20	0	5	1.3	250	312
B5	20	0	5	1.3	300	260
C1	10	3.5	5	1.5	100	900
C2	10	3.5	5	1.5	150	600
C3	10	3.5	5	1.5	200	450
C4	10	3.5	5	1.3	100	780
D1	10	3.5	0	1.5	100	900
D2	10	3.5	7	1.5	100	900
D3	10	3.5	10	1.5	100	900

2.3 显微组织和硬度检测方法

为了进一步研究工艺参数对光纤激光水下切割 304 不锈钢板微观组织和性能的影响,挑选 10 个试样(A1~A4、B1~B4、C1 和 C2)通过线切割技术沿切缝垂直方向切开切缝。将切缝横截面用 XQ-1 型金相试样热镶机镶嵌成标准试样,用 400#~2000# 砂纸依次打磨并抛光,然后将其放于酒精溶液中进行超声波清洗,冷风吹干后腐蚀。腐蚀液是采用 2 g 的 $FeCl_3$ 固体颗粒、5 mL 盐酸溶液和 10 mL 蒸馏水配成的溶液。

采用 Primotech(Zeiss)光学显微镜、FEI 3D 场发射环境扫描电子显微镜观察熔化区和热影响区的显微组织形貌。同时,采用 HXD-1000TMS/LCD 数字式显微硬度计测量切缝横截面的显微硬度,硬度检测采用 50 g 的压头载荷,持续加载 10 s,从切缝边缘至热影响区再至基体的方向上,每隔 50 μm 取一个测试点,绘出切缝横截面上的硬度分布图。

3 结果与分析

3.1 宏观形貌分析

3.1.1 激光功率和切割速度对水下切割的影响

图 2 为 5 mm 水层下以不同激光功率和切割速度切割 1 mm 厚不锈钢板的切缝平均宽度变化曲线。随着切割速度的增加,切缝平均宽度呈现由窄变宽,再变窄的趋势。当切割速度过慢时,切缝边缘过烧严重,挂渣较多,造成切缝平均宽度较窄;当切割速度合适时,切缝边缘平直,几乎没有挂渣,切缝平均宽度比挂渣多的切缝平均宽度更宽;当切割速度过快时,激光能量不足以完全切割开钢板,挂渣滞留在切口造成切缝平均宽度变窄。

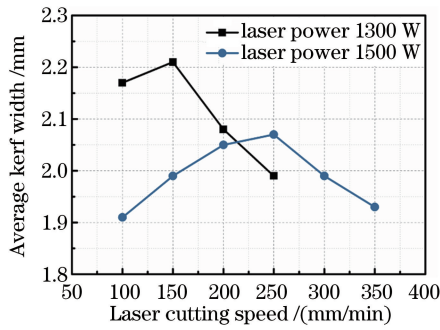


图 2 不同激光功率与切割速度下切缝平均宽度

Fig. 2 Average kerf width of specimens under different powers and cutting speeds

图 3 为 1500 W 激光功率下, 试样 A1~A7 的切缝外观形貌。从图 3(a) 中发现, 当切割速度为 100 mm/min 时, 激光能量滞留, 热量过剩, 造成切割过程中钢板过度烧蚀, 热影响区较大, 挂渣呈圆珠状粘附在切口, 降低了光纤激光切割质量。从图 3(b)~(d) 中可见, 当切割速度逐渐增加, 切缝表面的挂渣越来越少, 切口也越来越平整, 热影响区比图 3(a) 中的大大减小。图 3(e) 切割质量最优, 切口平整, 热影响区最窄。从图 3(f) 中发现, 当切割速度为 350 mm/min 时, 激光束仍能切割开钢板, 但是切口质量相比图 3(e) 变得粗糙, 热影响区也增大, 原因是切割速度过快时, 切口前沿材料未被充分预热, 环境中的水加速了热量的损耗, 导致单位时间内提供给切口的热量减少, 钢板不易被熔化切割。图 3(g) 中, 当切割速度达到 400 mm/min 时, 切割速度过快, 材料未被割开, 说明单位时间内钢板吸收的能量已不足以将材料熔化切割, 而只是在切割行径处形成一条熔融再凝固的焊缝, 不锈钢板的背面有气泡破裂冲击形成的光滑内球壁。

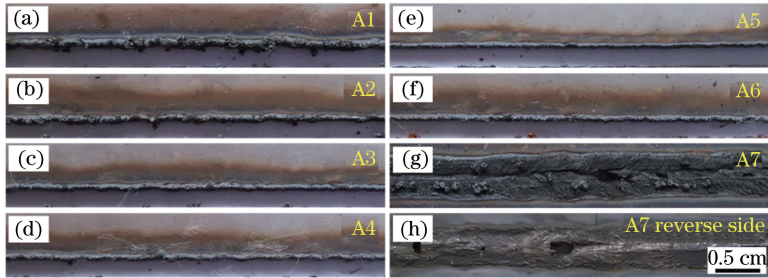


图 3 试样 A1~A7 切缝外观形貌

Fig. 3 Macroscopic kerf surface of specimen A1~A7

图 4 为 1300 W 激光功率下, 试样 B1~B5 的切缝外观形貌。在图 4(a)~(e) 中, 图 4(c) 的切口最为平整, 热影响区最窄, 切割质量最佳。对比图 4 与图 3, 在相同切割速度下, 激光功率越低, 切割质量越差, 体现在挂渣现象增多、切缝呈现锯齿状、热影响区变宽。当切割速度达到 300 mm/min 时已不能够切割开钢板。相同条件下, 激光功率越大, 激光能量越大, 越容易切割开板材。相同条件下, 激光速度的提高会适当改善切缝粗糙度, 使切口较为平整; 当激光切割速度过快时, 切割过程中难以蓄积足够热量熔化切割板材, 挂渣冷却

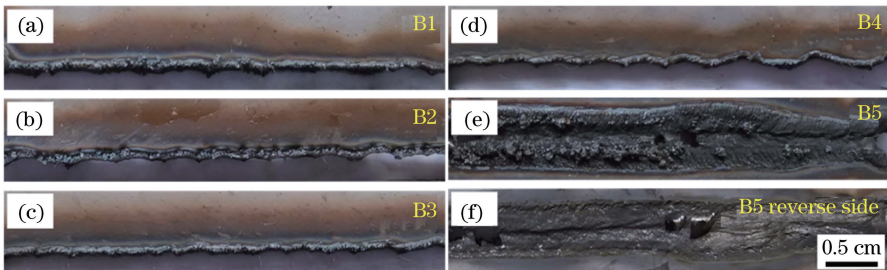


图 4 试样 B1~B5 切缝外观形貌

Fig. 4 Macroscopic kerf surface of specimen B1~B5

滞留在切口造成切缝平均宽度逐渐减小,直至无法切割开钢板。

试样 A7(激光功率为 1500 W,切割速度为 400 mm/min,氩气辅助水下切割)的烧蚀形态如图 3(g)所示。图中切割方向从右至左,靠近切割中线的熔凝波纹方向与激光扫描方向一致;在熔凝区域边缘处,小细纹的方向与激光扫描方向相反,不锈钢上表面熔凝波纹俯视示意图如图 5 所示。

根据表面张力梯度驱动理论^[15],熔池内温度分布不均匀所造成的表面张力差驱使溶液由低张力区流向高张力区,从而使液面产生高度差;由此形成的重力梯度又驱使溶液回流,使熔池产生对流,金属溶液表面张力随温度升高而降低。激光熔池横截面对流示意图如图 6 所示。激光熔池内表面中心温度最高而边缘最低,熔池内的溶液被拉向边缘。随着激光扫描自右向左,光束前缘产生熔化,后边缘开始快速冷凝,如图 5 中 A 点与 B 点之间所示,热流方向自 A 到 B,形成弧形熔凝波纹。由于烧蚀宽度较大,在图 5 中 B 点到 C 点,表面张力小于溶液重力和辅助气体压力的合力作用,在熔池中央温度最高,塌陷最深,导致 B 点处溶液流向 C 点,形成山脊式熔凝波纹,所以扫描中心线上的熔凝波纹方向与扫描方向一致。

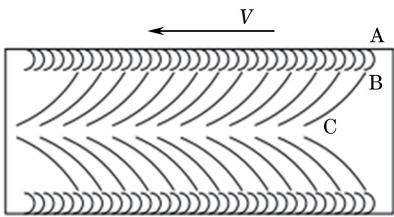


图 5 熔凝波纹示意图

Fig. 5 Schematic of melting and solidifying striation

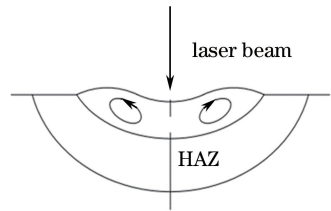


图 6 激光熔池热对流示意图

Fig. 6 Schematic of heat convection in fusion pool

图 7 为激光扫描过程中熔融物质的流动方向。当激光束轴心位置从 M 点移动到 N 点,图 7(a)为熔池俯视图,烧蚀边缘 A 点比 B 点温度低,B 点熔融物质受表面张力影响,流动到 A 点位置。图 7(b)为熔池正视图,烧蚀中心 C 点比 B 点塌陷严重,B 点熔融物质受重力和气体压力影响,流动到 C 点位置。从而形成图 5 中的熔凝纹理。

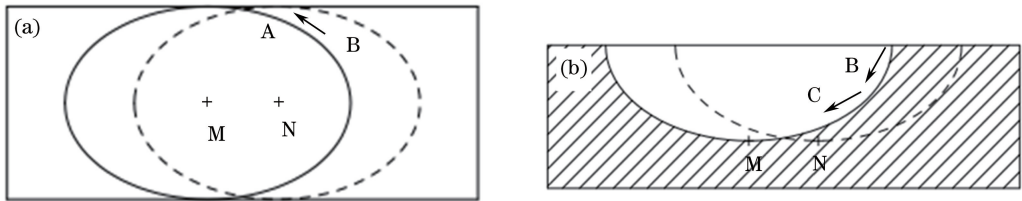


图 7 熔融物质流动方向。(a) 熔池俯视图; (b) 熔池截面图

Fig. 7 Direction of melting material flow. (a) Top view of fusion pool; (b) sectional view of fusion pool

3.1.2 不同水体条件对水下切割的影响

图 8 为不同水体条件下,保持 1500 W 激光功率,以不同切割速度切割 5 mm 水层下的 1 mm 厚不锈钢板的切缝平均宽度。在 10 °C 盐水中比在纯净水中切割效率低,切割质量差。在 10 °C 盐水环境中,150 mm/min 切割速度下的切缝[图 9(b)]呈锯齿状,挂渣粘附较多,比 100 mm/min 切割速度下的切缝平直度[图 9(a)]更差。如图 9(c)所示,随着切割速度增加至 200 mm/min,由于 10 °C 盐水中离子含量多、水温低,吸收大量激光能量,导致激光切割效率下降,无法切透 1 mm 厚的钢板,上层熔融材料无法向下排除,被辅助气体吹向烧蚀痕迹的两侧,挂渣毛边翻起。烧蚀宽度达到 6 mm,热影响区大。

3.1.3 水层厚度对水下切割的影响

表 3 为在 10 °C 盐水环境中,当水层厚度分别为 0.5、7、10 mm 时,以 1500 W 激光功率和 100 mm/min 速度切割 1 mm 厚不锈钢板的切缝平均宽度。随着水层厚度增加,激光能量被水层吸收,造成激光能量大量损失,热量急剧散失,最终无法切割开钢板。

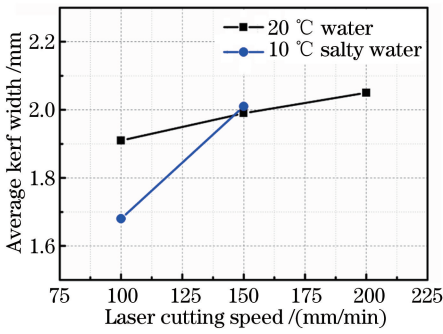


图 8 不同水体条件下切缝平均宽度

Fig. 8 Average kerf width of specimens under different water conditions

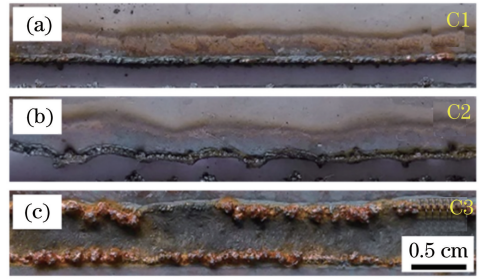


图 9 试样 C1~C3 切缝外观形貌

Fig. 9 Macroscopic kerf surface of specimen C1~C3

表 3 不同水层厚度下切缝平均宽度

Table 3 Average kerf width under different water layer thicknesses

Water layer thickness /mm	0	5	7	10
Average kerf width /mm	2.08	1.68	Not cut through	

图 10 呈现了在 0、5、7、10 mm 水层厚度下,以 1500 W 激光功率,100 mm/min 速度切割不锈钢板的切缝外观形貌。图 10(c)烧蚀痕迹中有若干切透的孔洞,并且孔洞边缘处有空穴,说明在切割过程中水沸腾汽化,形成大量气泡对钢板有爆破冲击力。熔化的材料在流动状态中混入气泡,冷凝成型过程中,气泡破裂形成内壁光滑锃亮的球型空穴。水沸腾汽化、气泡爆破对切缝的冲击作用增加了切缝形状的不确定性。

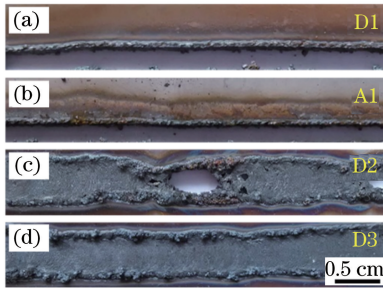


图 10 试样 D1, A1, D2, D3 切缝外观形貌

Fig. 10 Macroscopic kerf surface of specimen D1, A1, D2, D3

3.2 切缝横截面显微组织

3.2.1 切缝横截面显微组织描述

试样的材料为 304 不锈钢,其中铬当量为 19.79、镍当量为 10.59,从而得到 304 不锈钢铬镍当量比为 1.86。根据 Lippold 等^[16]研究的凝固模式和显微组织可得,当镍铬当量比值在 1.5~2.0 之间时为 FA 凝固模式,初始析出相为铁素体,凝固终了前通过包晶-共晶反应生成一些奥氏体,存在于 δ 铁素体边界。

图 11 为试样 A1 切缝横截面的显微组织图片。图 11(a)为切缝横截面整体的组织形貌,根据组织形貌的不同,大体上分为 3 个区域:熔化区(重凝固区)、热影响区和基体。

1) 熔化区

如图 11(c)[图 11(a)中 1 处]所示,熔化区主要分布着不规则的细小的铁素体组织。在这个快速非平衡凝固过程中,靠近激光束中心线的不锈钢板升温速度非常快,同时高压辅助气体快速吹除熔融金属并带走热量,环境中的水也加快了冷却速率,晶核没有足够时间长大。液态金属熔池中热流方向的多向性导致晶胞生长方向不统一,彼此的枝桠阻碍临近的晶胞生长。

接近切缝处出现表面形核现象,如图 11(d)[图 11(a)中 2 处]所示。当移开热源后,熔池的表面金属暴露在高压辅助气流或者冷水中使之产生表面过冷,从而引发表面形核,固态晶核就会在切缝表面形成。

靠近热影响区一侧的熔化区边缘,如图 11(e)[图 11(a)中 3 处]所示,该区主要分布着蠕虫状或骨架状

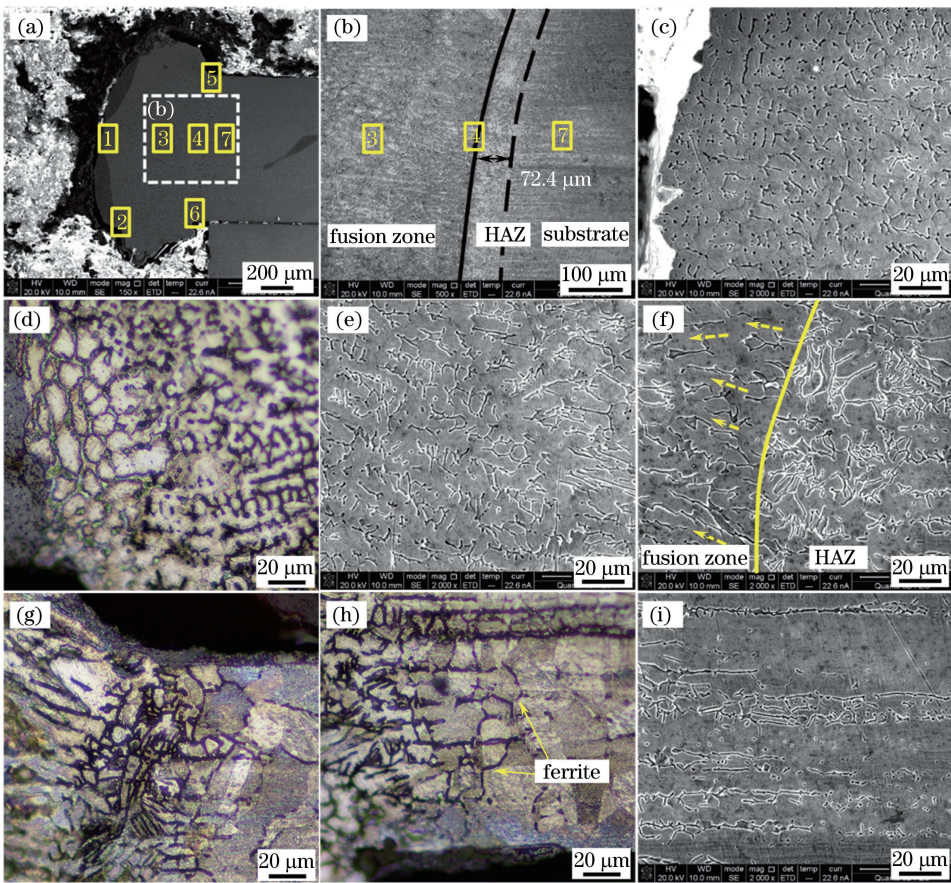


图 11 试样 A1 的显微组织

Fig. 11 Microstructure of specimen A1

的铁素体。由于越靠近热影响区的熔融金属冷却速度越慢,奥氏体依靠消耗铁素体不断生长,残留在铁素体中的铬等铁素体生成元素不断富集,而镍、碳等奥氏体生成元素不断贫化,直到这个过程使铁素体在一个扩散受到限制的较低温度下稳定为止^[16]。

相比靠近切口前沿的微观形貌,靠近热影响区的熔池边缘的晶枝长度提高,晶粒生长方向,即图 11(f) [图 11(a)中 4 处]中箭头方向,几乎与熔池边界的法线方向一致,因为这个方向具有最大的温度梯度,散热最快。熔化边界处基体晶粒可作为形核的基础,当液态金属与这些基体晶粒直接接触、充分浸润后,液态金属中晶胞很容易在基体晶粒上发生外延生长,而不改变原有的晶粒取向。但是图 11(f)中箭头方向不尽相同。因为在凝固过程中,那些生长方向与熔池边界的法线方向一致的晶粒更容易长大,并排挤那些取向不利的晶粒,这种竞争生长机制决定了熔池边缘晶粒的结构。

2) 热影响区

热影响区由图 11(g) [图 11(a)中 5 处]所示,在快速冷却下,板条状铁素体逐渐取代骨架状铁素体。原因是奥氏体相变时扩散受到限制,当扩散距离减小时,以紧密排列的板条形态进行相变更为容易,结果促成残留铁素体成为横切过原始枝状晶或胞状晶生长方向的板条形状,而板条状铁素体的区域宽度约为 72.4 μm [图 11(b)]。

靠近基体的热影响区,由图 11(h) [图 11(a)中 6 处]所示,热影响区组织为晶胞间的铁素体和胞晶奥氏体,奥氏体晶胞之间出现少量铁素体,在热影响区的热循环过程,奥氏体相变成为铁素体相对缓慢,所以形成的铁素体数量不多。

基体的显微组织具有明显的方向性,如图 11(h)和图 11(i) [图 11(a)中 7 处]所示。其奥氏体晶粒沿热轧方向拉长,呈现竹节型的带条状分布。腐蚀之后析出碳化物等细小颗粒物,在轧制方向上,基体出现沿加工方向变形分布的条带组织。

3.2.2 激光参数对晶胞间距的影响

切缝横截面熔化区存在表面激冷层,该层分布着细小均匀的晶胞,如图 12 所示。主要原因是,较大的过冷度和不锈钢板表面异质形核质点导致形核速率较大,生长速率相对较小。切缝前沿相对均匀的过冷度促成晶胞大小均匀生长。

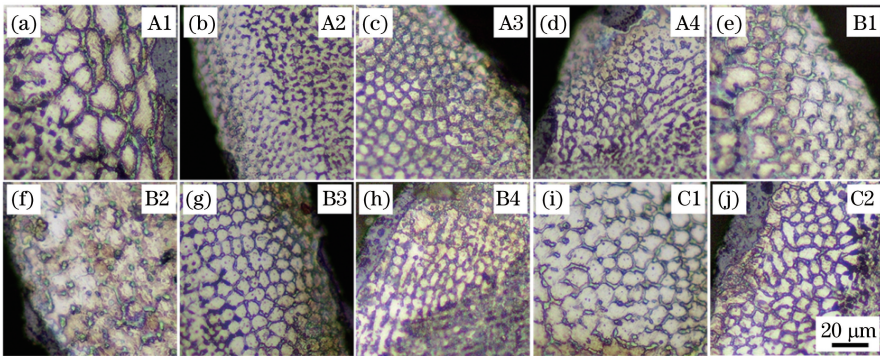


图 12 各试样切缝边缘熔化区的晶胞尺寸

Fig. 12 Crystal grain size of fusion zone in different specimens

从图 13 晶胞尺寸与 P/V 值(正比于激光能量密度^[17])的关系可以看出,晶胞尺寸随着 P/V 值的增加而增大。在 Origin 中利用指数函数拟合晶粒尺寸与激光功率密度的关系

$$Y = \exp(1.94944 - 9.31962 \times 10^{-4} \times X + 1.77572 \times 10^{-6} \times X^2), \quad (1)$$

式中 Y 为晶粒尺寸,单位为 μm , X 为 P/V 值,单位为 $\text{W}/(\text{mm}/\text{s})$ 。存在一个临界值 X_0 ,约为 $262.4 \text{ W}/(\text{mm}/\text{s})$,当 P/V 值等于 X_0 时,熔化区边缘的晶粒尺寸最小;当 P/V 值大于 X_0 时,切缝熔化区边缘处的晶粒尺寸随着激光能量密度的增大而增大;当 P/V 值小于 X_0 时,切缝熔化区边缘处的晶粒尺寸随着激光能量密度的减小而增大。后续工作中将在此方面继续展开研究。

晶胞尺寸变化的主要原因是:激光能量密度越小,冷却速率越快(凝固时间越短),晶胞或者枝晶越细化。在枝晶生长过程中,随着凝固进行,小的枝晶臂具有更大的比表面积,大的枝晶臂通过消耗小的枝晶臂而生长。反之,凝固过程的冷却速率越低,晶粒粗化时间越充分,枝晶臂间距越大^[18]。

在相同 P/V 值下,切割环境不同也造成晶胞的尺寸变化,由图 13 可知,在盐水中成长的晶胞尺寸比在纯水中的要小。盐水中冷却凝固时间较短,因此晶胞尺寸相对较小。

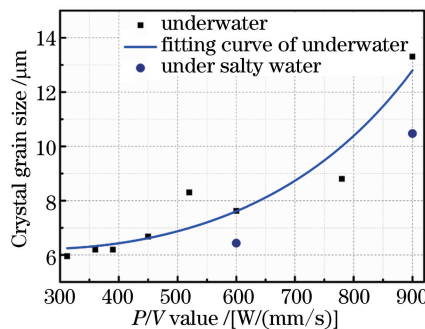


图 13 晶胞尺寸与 P/V 值的关系

Fig. 13 Relationship between crystal grain size and P/V value

3.2.3 切缝横截面显微硬度

图 14 为 304 不锈钢切缝横截面从切缝边缘至基体方向的显微硬度分布曲线。由图 14 可知,熔化区、热影响区和基体 3 部分的硬度各不相同。不锈钢基体硬度为 223.4 HV ;在熔化区边缘硬度达到 242.8 HV ,边缘处组织细密,甚至有局部氧化的部分硬度高达 963 HV ,是基体硬度的 4.3 倍;熔化区中部硬度为 165.1 HV ,由于热流循环导致组织方向多样性,形成的枝晶方向不一致,组织不够致密,相应的硬度低于基体和熔化区边缘处的硬度;热影响区硬度为 124.6 HV ,明显低于熔化区和基体的硬度,虽然热影响区再结晶

有可能发生细晶化效应,但是越靠近熔化区边界的热影响区温度越高,高温停滞时间越长,有利于晶粒的长大,奥氏体晶粒受热循环的影响而发生粗化^[19],热影响区硬度降低。

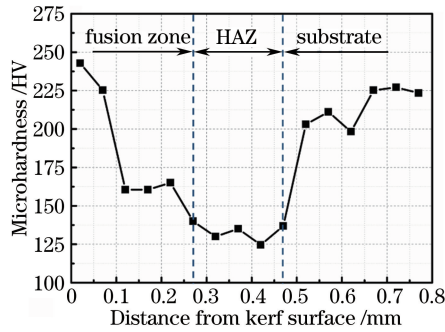


图 14 试样 C2 横截面显微硬度分布

Fig. 14 Microhardness distribution of cross-section of specimen C2

4 结 论

从宏观角度研究激光参数及环境参数对光纤激光水下切割效率和质量的影响规律;从微观角度研究了光纤激光水下切割不锈钢板的熔化区、热影响区和基体的物相、组织成分和显微硬度,主要结论如下:

1) 光纤激光水下切割实验中,以 1500 W 激光功率和 300 mm/min 切割速度切割水下 5 mm 处的 1 mm 厚 304 不锈钢板获得的切缝最为平整,切割质量最佳。光纤激光切割效率和质量随着水层的增加、水温的降低、水中盐度的增加而降低。水层过厚和水温低会加速钢板冷却,盐水中众多离子吸收激光能量,都会大大损耗激光能量。

2) 光纤激光水下切割过程中切缝宏观形貌成形的熔池流体情况为:当烧蚀宽度窄时,表面张力梯度占优;当烧蚀宽度较大时,在接近熔池边缘的溶液流向受表面张力影响,在接近熔池中心的溶液流向受重力梯度和辅助气体压力梯度影响。

3) 切缝横截面微观形貌中,熔化区、热影响区和基体的组织成分、显微硬度各异。熔化区边缘出现表面形核,晶胞尺寸随着激光能量密度增大而增大;熔化区与热影响区的边界出现外延生长;热影响区奥氏体晶粒受热循环的影响而发生粗化。显微硬度分别对应于这 3 个区域,熔化区局部氧化后的硬度远高于基体硬度,高达 963 HV,熔化区大部分组织细密,硬度为 165.1 HV;热影响区组织粗大,显微硬度为 124.6 HV,低于基体与熔化区硬度。

参 考 文 献

- Du Wenbo, Zhu Sheng, Meng Fanjun. Application and technology of underwater laser cutting[J]. Welding Technology, 2009, 38(10): 1-5.
杜文博,朱 胜,孟凡军. 水下切割技术研究及应用进展[J]. 焊接技术, 2009, 38(10): 1-5.
- Weng Zhenping, Xie Junyuan. Research on marine development strategy to strengthen marine equipment innovation and development[J]. Ocean Development and Management, 2012, 29(1): 1-7.
翁震平,谢俊元. 重视海洋开发战略研究强化海洋装备创新发展[J]. 海洋开发与管理, 2012, 29(1): 1-7.
- Zhang Wenyao, Qiu Dafu, Chen Ruifang. Research on underwater laser cutting technology[J]. China Ship Repairing, 2012, 25(2): 42-43.
张文瑶,裘达夫,陈瑞芳. 水下激光切割技术的探讨[J]. 中国修船, 2012, 25(2): 42-43.
- Chen Jiming, Xu Xiangyang, Xiao Rongshi. Modern laser manufacturing technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007: 1-2.
陈继明,徐向阳,肖荣诗. 激光现代制造技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 1-2.
- Alfille J P, Pilot G, De Prunele D. New pulsed YAG laser performances in cutting thick metallic materials for nuclear applications[C]. Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1996, 2789: 134-144.
- Jain R K, Agrawal D K, Vishwakarma S C. Development of underwater laser cutting technique for steel and zircaloy for

- nuclear applications[J]. *Pramana Journal of Physics*, 2010, 75(6): 1253-1258.
- 7 Hilton P A, Khan A. Underwater cutting using a 1 μm laser source[J]. *Journal of Laser Applications*, 2015, 27(3): 032013.
- 8 Choubey A, Jain R K, Ali S, *et al.*. Studies on pulsed Nd:YAG laser cutting of thick stainless steel in dry air and underwater environment for dismantling applications[J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 71: 6-15.
- 9 Wang Wei, Tan Caiwang, Xu Liang, *et al.*. Characteristic research on 50 m underwater laser cutting 30 mm steel plate [J]. *Welding Journal*, 2015, 36(1): 35-38.
王 威, 檀财旺, 徐 良, 等. 水下 50 m 激光切割 30 mm 厚钢板特性[J]. *焊接学报*, 2015, 36(1): 35-38.
- 10 Zhu Hua. The experimental research of laser-cutting stainless steel underwater[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2007: 28-40.
朱 华. 激光水下切割不锈钢的试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2007: 28-40.
- 11 Yang Wei, Peng Xinhan, Zhang Jun. Study of laser cutting technology for silicon wafer under water [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(1): 3064-3067.
杨 伟, 彭信翰, 张 骏. 水下激光切割硅片的工艺研究[J]. *中国激光*, 2009, 36(1): 3064-3067.
- 12 Chen Cong, Gao Ming, Gu Yunze, *et al.*. Study on fiber laser cutting of aluminum alloy sheet [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0603004.
陈 聪, 高 明, 顾云泽, 等. 水下激光切割硅片的工艺研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 0603004.
- 13 Xu Guojian, Li Hongli, Hang Zhengxiang, *et al.*. Performance of 6 mm mild steel sheet laser cutting [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(4): 040601.
徐国建, 李宏利, 杭争翔, 等. 6 mm 碳钢板的激光切割性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(4): 040601.
- 14 Zhang Yongkang, Cui Chengyun, Xiao Rongshi, *et al.*. *Advanced laser manufacturing technology* [M]. Zhenjiang: Jiangsu University Press, 2011: 198-199.
张永康, 崔承云, 肖荣诗, 等. *先进激光制造技术* [M]. 镇江: 江苏大学出版社, 2011: 198-199.
- 15 Guan Zhenzhong. *Laser processing technology* [M]. Beijing: Chinese Metrology Press, 2007: 260-268.
关振中. *激光加工工艺手册* [M]. 北京: 中国计量出版社, 2007: 260-268.
- 16 Lippold J C, Kotecki D L. *Welding metallurgy and weldability of stainless steels* [M]. Chen Jianhong, Transl. Beijing: China Machine Press, 2008: 140-152.
Lippold J C, Kotecki D L. *不锈钢焊接冶金学及焊接性* [M]. 陈剑虹, 译. 北京: 机械工业出版社, 2008: 140-152.
- 17 Zheng Haizhong, Zhang Jian, Xu Zhifeng, *et al.*. Effects of laser energy density on densities and microstructures of nano- $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PS}$ composites [J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(10): 1430-1433.
郑海忠, 张 坚, 徐志峰, 等. 激光能量密度对纳米 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{P/S}$ 复合材料致密度和显微结构的影响 [J]. *中国激光*, 2006, 33(10): 1430-1433.
- 18 Kou Sindo. *Welding metallurgy* [M]. Yan Jiuchun, Yang Jianguo, Zhang Guangjun, Transl. Beijing: Advanced Education Press, 2012: 153-219.
柯伸道. *焊接冶金学* [M]. 闫久春, 杨建国, 张广军, 译. 北京: 高等教育出版社, 2012: 153-219.
- 19 Liu Dongyu, Li Dong, Li Kaibin, *et al.*. Microstructure analysis of fiber laser welding between E36 and 304 stainless steel [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(4): 041403.
刘东宇, 李 东, 李凯斌, 等. E36 与 304 异种金属光纤激光焊接接头的组织分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(4): 041403.