

电磁场辅助 SUS316L 不锈钢扫描激光窄间隙 焊接接头成形及组织性能

孙清洁^{1,2*}, 李军兆^{1,2}, 刘一搏^{1,2}, 甄祖阳^{1,2}, 靳鹏^{1,2}, 李富祥^{1,2}, 侯少军², 李振锋²

¹哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 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 研究外加交变电磁场对 SUS316L 奥氏体不锈钢激光填丝窄间隙焊接接头宏观成形、铁素体-奥氏体微观组织、接头力学行为及耐蚀性的影响, 结果表明: 交变电磁场能够实现焊丝在焊缝横向位置的可控熔化行为, 使窄间隙焊接接头的熔宽增加, 熔深减小, 焊缝对称性提高, 而且接头中的未熔合及气孔缺陷也得到了抑制。外加交变电磁场将振动能量直接引入到焊接熔池中, 改变了熔池原有的自然对流模式, 促使熔池中心的高温液态金属向坡口侧壁润湿铺展, 改善焊缝成形; 同时, 熔池的搅拌作用使焊缝温度均匀, 降低了熔池的温度梯度, 抑制了粗大奥氏体柱状晶的生长, 增加了晶粒取向的多样性。电磁场辅助焊接接头焊缝晶粒尺寸细小, 枝晶间距较小, 枝晶形态交错复杂。接头拉伸试验和电化学腐蚀试验表明, 电-磁场辅助 SUS316L 不锈钢窄间隙焊接接头具有良好的力学性能和耐蚀性。

关键词 激光技术; 窄间隙焊接; 激光焊接; 电磁场; 侧壁润湿; 微观组织; 耐蚀性

中图分类号 TG456.7

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1002005

Formation, Microstructure, and Properties of Electromagnetic Field-Assisted SUS316L Austenite Stainless Steel Laser Narrow-Gap Joint

Sun Qingjie^{1,2*}, Li Junzhao^{1,2}, Liu Yibo^{1,2}, Zhen Zuyang^{1,2},

Jin Peng^{1,2}, Li Fuxiang^{1,2}, Hou Shaojun², Li Zhenfeng²

¹State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China;

²Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology, Harbin Institute of Technology at Weihai,
Weihai, Shandong 264209, China

Abstract This study investigates the effects of an external alternating electromagnetic field on the joint formation, ferrite-austenite microstructure, mechanical properties, and corrosion resistance of SUS316L austenite stainless steel narrow-gap laser hot-wire feeding welded joint. The experimental results show that the controlled melting of the filler wire in a transverse direction is achieved by the alternating electromagnetic field. The joints with wider width, shallower penetration and highly symmetric weld are obtained, in addition, non-fusion and pore defects in the joints are also suppressed. The external alternating electromagnetic field introduces vibration energy into the weld pool, thereby changing the original natural convection mode of the weld pool and promoting a high-temperature liquid metal flow from the weld center to the groove sidewall. The stirring effect of the molten pool makes the temperature uniform, decreases the temperature gradient of the molten pool, inhibits the growth of coarser austenite columnar crystals, and increases the grain orientation diversity. The electromagnetic field-assisted welds have small grain size and dendritic spacing as well as a complex dendrite morphology. In summary, the joint tensile and electrochemical corrosion tests show that the electromagnetic field-assisted SUS316L stainless steel narrow-gap welded joint has good mechanical properties and corrosion resistance.

Key words laser technique; narrow-gap welding; laser welding; electromagnetic field; sidewall wetting;

收稿日期: 2020-03-16; 修回日期: 2020-04-16; 录用日期: 2020-06-03

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0300602)、国家自然科学基金(U196102,51705103,51475104)

* E-mail: qjsun@hit.edu.cn

microstructure; corrosion resistance

OCIS codes 140.3390; 140.3510; 160.3900

1 引 言

随着船舶制造、核电建设、海洋工程等工业的发展,大型厚板构件的应用日趋广泛,而焊接技术作为大型构件连接的必要技术得到了越来越多的关注。激光填丝窄间隙焊接技术将高能束激光焊接与窄间隙焊接结合,通过逐层添加焊缝金属实现厚板的焊接,可以显著减小坡口尺寸,提高焊接效率^[1-2]。在激光焊接过程中,传统激光的点热源能量分布形式和不断变化的熔池流动行为都会影响焊接过程的稳定性,从而导致焊接缺陷产生^[3]。因此,研究如何调控激光能量分布、促进焊缝侧壁润湿行为来解决激光窄间隙焊接过程中侧壁、层间未熔合、气孔等缺陷具有重要意义。

为了提高激光填丝窄间隙焊接的效率,通常采用深熔、多层焊接的方式。在这种焊接方式下,激光能量向焊缝熔深方向传输,易导致焊接接头存在较为严重的气孔和未熔合缺陷^[4-5]。离焦焊接通过增加热源作用面积降低了激光能量密度,可以较好地抑制焊接缺陷,但较窄的坡口宽度降低了焊接适应性,并且低的热源密度显著降低了焊缝的填充效率^[6-7]。研究人员发现,采用振镜扫描技术控制激光光斑的运动轨迹来调控激光能量在窄间隙坡口内部的分布形式,有利于解决窄间隙焊接气孔缺陷。邹吉鹏等^[8]发现,采用振镜扫描激光填丝焊接技术可以增加激光热源的加热面积、增强焊接过程的稳定性和抑制铝合金焊接气孔的产生。Wang等^[9]采用振镜激光-电弧复合焊接技术对铝合金进行焊接后发现,圆形光束扫描形式能够增加焊接匙孔的稳定性,并能对气孔起到重熔作用,铝合金焊接接头中的气孔率显著降低。李军兆等^[10]发现,采用扫描激光焊接异种金属可以使焊缝中的微量元素分布得更加均匀,且能抑制界面化合物的产生。Wei等^[11]的研究表明,热丝的引入能够显著提高激光能量利用率,

表1 SUS316L奥氏体不锈钢母材和ER316L焊丝的主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of SUS316L base metal and ER316L filler metal

Material	Mass fraction / %								
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Fe
Base metal	0.02	1.58	0.02	—	0.45	16.74	12.89	2.05	Bal.
Filler wire	0.02	1.89	0.02	0.01	0.76	18.7	12.2	2.3	Bal.

使更多的激光能量用于熔化母材,提高焊接效率。

采用外部激励措施(如施加超声场^[12]、机械振动场^[13-14]、磁场^[15]等)来改善焊接接头质量得到了研究人员的广泛关注。其中,磁场由于具有非接触、可控性强等特征而被广泛应用于机械加工领域。Sun等^[16]发现,在交变纵向磁场下,熔化极气体保护焊接电弧和熔滴会发生旋转,因此焊接加热区的面积增加,焊缝的润湿铺展性得以增强。Sun等^[15]将交变横向磁场引入到窄间隙氩弧焊接中,结果发现,焊接电弧在电磁力作用下可以对坡口侧壁进行直接加热,有利于侧壁金属的熔化。张勋等^[17]发现,定向磁场能够增加激光-电弧复合焊接熔池的流动性,细化316L奥氏体不锈钢焊缝的晶粒尺寸,增加晶粒取向的多样性,并且可使熔池的凝固速率降低,促进铁素体-奥氏体转变。Sabzi等^[18]将电磁振动引入到非熔化极惰性气体保护电弧焊接过程中,结果发现,该方法可以有效改善316L不锈钢奥氏体组织的形态,细化晶粒,抑制焊接接头中热裂纹的产生。Singh等^[19]通过钨棒将振动能量引入到低碳钢焊接熔池内部,熔池受迫运动,柱状枝晶破碎,从而细化了组织,提高了接头的性能。

目前,关于电磁辅助焊接技术、振镜扫描激光焊接技术以及两者协同作用在厚板构件激光填丝窄间隙焊接领域的相关研究较少。鉴于此,本文深入研究了电磁场辅助作用对SUS316L不锈钢振镜扫描激光填丝窄间隙焊接接头宏观成形、铁素体-奥氏体转变组织特征、力学行为及耐蚀性的影响。

2 试验材料与试验方法

2.1 试验材料

采用SUS316L奥氏体不锈钢母材(尺寸为150 mm×100 mm×8 mm)以及直径为1.0 mm的ER316L奥氏体不锈钢焊丝进行焊接实验。母材和焊丝的主要成分如表1所示。

2.2 试验方法与设备

激光填丝窄间隙焊接过程如图 1 所示。由图 1 可知,焊接过程中主要涉及激光热源、热丝能量和磁场能量。激光焊接热源采用 HFB PHOTONICS 6000 W 型激光器,其最大输出功率为 6000 W,波长为 1070 nm;采用振镜扫描激光焊接头,以实现激光光斑运动轨迹的精确控制。本试验采用圆形激光扫描方式。采用 TransTig 2200 热丝电源和 KD 7000 送丝机对焊丝进行预热和持续送进,对热丝电流进行逆变和滤波处理使其产生交流预热效果。在焊丝送进路径上安装磁控装置,磁场能量由永磁铁产生,定向磁场方向垂直于焊接热丝的送进方向。磁场能量与交流热丝电源相互作用促使焊丝在送进的同时进行横向摆动,使焊丝以一定的初速度对未凝固熔池进行冲击,以期达到既能控制焊丝熔化的

液态金属位置,又能调控熔池中液态金属的横向流动,增加其与侧壁金属的结合面,有效避免侧壁未熔合缺陷,改善窄间隙焊接的侧壁润湿。通过调节交流热丝电源频率来控制焊丝横向摆动的频率。将整个激光头和焊枪部分集成于 FANUC 机器人前部,以实现窄间隙多层焊接过程的轨迹控制。

窄间隙焊接坡口由三块尺寸为 150 mm × 100 mm × 8 mm 的母材组合而成,激光焊接试验前采用氩弧点焊固定母材,保证坡口宽度为 6.0 mm,坡口深度为 8.0 mm。焊前对试样进行刚性固定;采用机械打磨方式对焊接部位进行清理,并用酒精擦拭。焊接试验采用前置送丝三层焊方式,其中激光倾角为 5°,焊丝倾角为 45°。表 2 为具体的焊接试验参数,焊接过程中保持激光功率为 4500 W,焊接速度为 0.3 mm/min,送丝速度为 3.5 m/min。

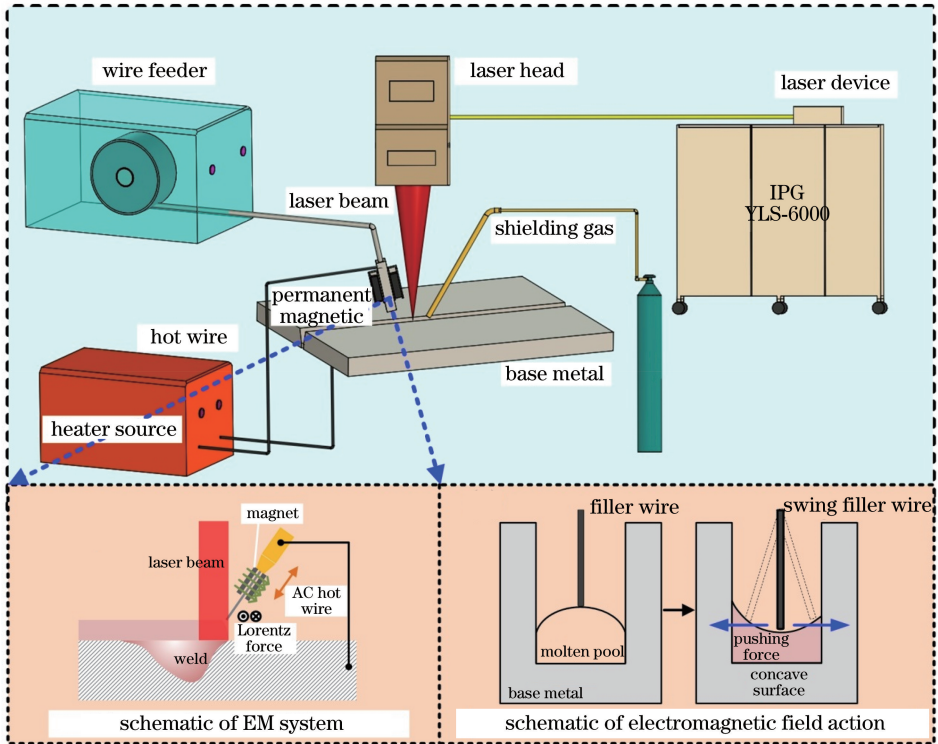


图 1 电磁场辅助激光填丝窄间隙焊接示意图

Fig. 1 Schematic of electromagnetic assisted laser hot wire narrow-gap welding process

表 2 窄间隙激光焊接试验参数

Table 2 Narrow-gap laser welding variables

Sample	Wobble amplitude /mm	Wobble frequency /Hz	AC hot-wire frequency /Hz
a	—	—	—
b,c,d	0.5, 1.0, 2.0	100	—
e,f,g	2.0	20, 50, 150	—
h,i,j	2.0	100	20, 50, 70

焊后在垂直于焊缝方向(横向)切取金相试样和拉伸试样,试样经研磨和抛光之后,采用光学显微镜(OM)进行组织观察,采用万能材料试验机以

$1.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的拉伸速度进行拉伸试验,测试接头的抗拉强度。拉伸试样的取样位置及尺寸如图 2 所示。

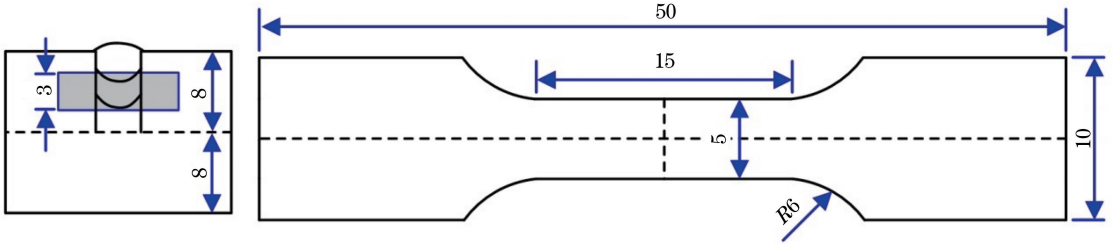


图 2 拉伸试样的取样位置及尺寸

Fig. 2 Sampling position and dimension of tensile sample

采用场发射扫描电子显微镜(SEM)对断口形貌进行观察。采用 Zahner 工作站及配套的 Thales 电化学软件对腐蚀试样进行电化学测试,电化学测试采用三电极体系,测试溶液为 3.5% NaCl 溶液(溶液中 NaCl 的质量分数为 3.5%),在室温下进行测试。在窄间隙焊缝位置制取电化学测试试样,测试面积为 1.0 cm^2 。将制备好的试样放在测试溶液中静置 30 min,待开路电位稳定之后开始动电位极化测试,采用的电位扫描范围为 $-1.0 \sim 1.0 \text{ V}$,扫描速率为 1.0 mV/s 。阻抗谱测试时将开路电位设为阻抗测试电压,施加幅值为 10 mV 的正弦波扰动

信号,阻抗测试频率从高频 100 kHz 反向扫描至低频 10 mHz 。

3 试验结果与分析

3.1 窄间隙焊缝成形分析

图 3 表示常规激光焊接(CLW)、振镜扫描激光焊接(LWW)和电磁场辅助激光填丝窄间隙焊接(EMLWW)接头的横截面形貌,以及窄间隙焊接熔池形貌示意图。可以发现,激光填丝窄间隙焊接结构的主要缺陷为侧壁、层间熔合不良和气孔,这会严重影响焊接构件的使用性能。由图 3(a)可以看出:

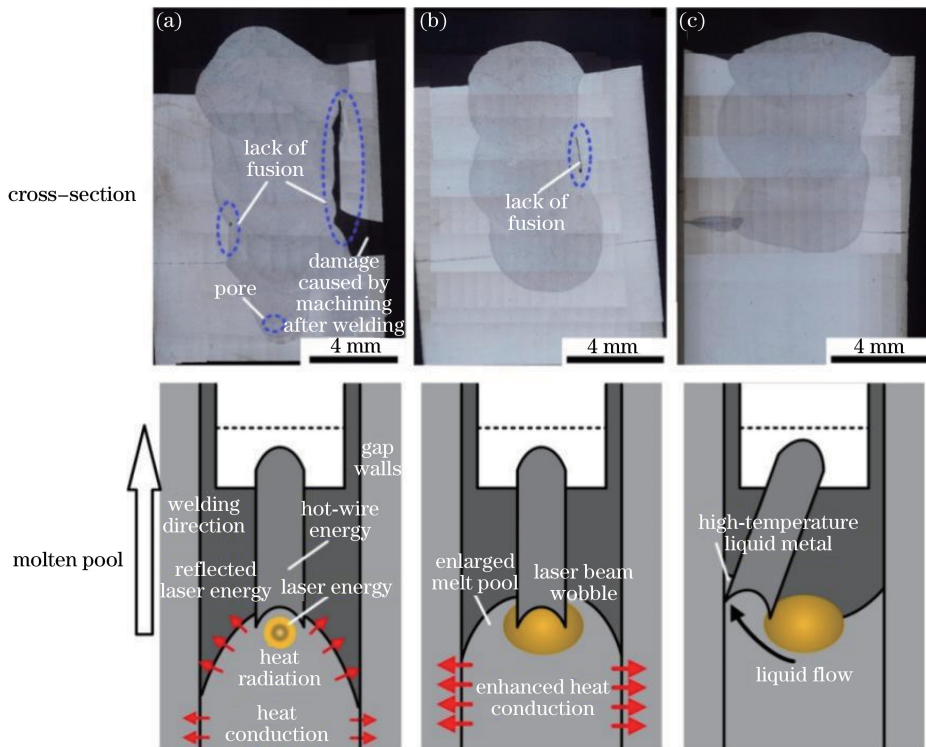


图 3 激光填丝窄间隙焊接焊缝横截面形貌以及熔池形貌。(a)常规激光焊接;(b)振镜扫描激光焊接;(c)电磁场辅助激光焊接
Fig. 3 Cross-sectional morphologies of laser hot wire narrow-gap weld and molten pool morphologies. (a) Conventional laser welding (CLW); (b) laser-beam wobble welding (LWW); (c) electromagnetic assisted laser beam wobble welding (EMLWW)

常规激光焊接由于激光光斑作用面积较小,熔池中的液态金属难以与母材侧壁形成紧密连接,易导致严重的未熔合焊接缺陷;同时,激光深熔焊接模式易导致接头中产生少量气孔。这是由于常规激光焊接能量密度相对集中,焊接熔池存在的时间相对较短^[5],熔池中心的高温区与侧壁低温区存在较大的温度梯度,熔池从边缘向焊缝中心凝固,熔池中未凝固的液态金属会向熔池中心的高温位置堆积,坡口侧壁温度较低,熔池冷却速度较大,焊缝熔池中的液态金属来不及润湿坡口侧壁就提前凝固,最终导致焊缝成形较差,不利于窄间隙焊道的填充。

窄间隙焊接温度场分布特征如图4所示,其中:热电偶1位于焊缝背面,用以检测热源的熔透能力;热电偶2位于焊缝熔宽位置,用以检验焊接热源在焊缝宽度方向(特别是坡口侧壁)的位置。由图4(c)所示的侧壁峰值温度可以看出,扫描激光和电磁振动焊丝技术可以促使熔池能量向坡口侧壁传输,有助于侧壁熔化。振镜扫描激光会显著改变焊接熔

池表面的流动场、温度场,使得熔池面积增大,对流加快,熔池的温度梯度减小^[9]。由于窄间隙坡口空间的约束,激光束能量难以直接作用于坡口侧壁,熔池波动范围较小,熔池液态金属与坡口侧壁之间的表面张力难以维持有效的侧壁润湿,因此仍会产生未熔合缺陷,如图3(b)所示。电磁辅助激光填丝窄间隙焊接横截面如图3(c)所示,焊丝的横向摆动改变了熔池原有的自然流动模式,熔池的受迫运动加快了熔池中液态金属的流速,熔池中的液流可以向坡口侧壁输送高温液态金属,使得侧壁温度升高;坡口对液流的滞留使得液体流的动能转化为势能,液态金属将在侧壁产生堆积作用,熔池中的液态金属冷却凝固后形成对侧壁的润湿铺展,改善了窄间隙焊缝成形。由图3(c)可见,焊缝侧壁熔合良好,对称性有所提高,获得了质量良好的焊接接头。

焊缝熔池金属在窄间隙坡口侧壁位置的润湿动力学如图5(a)所示。由Young方程

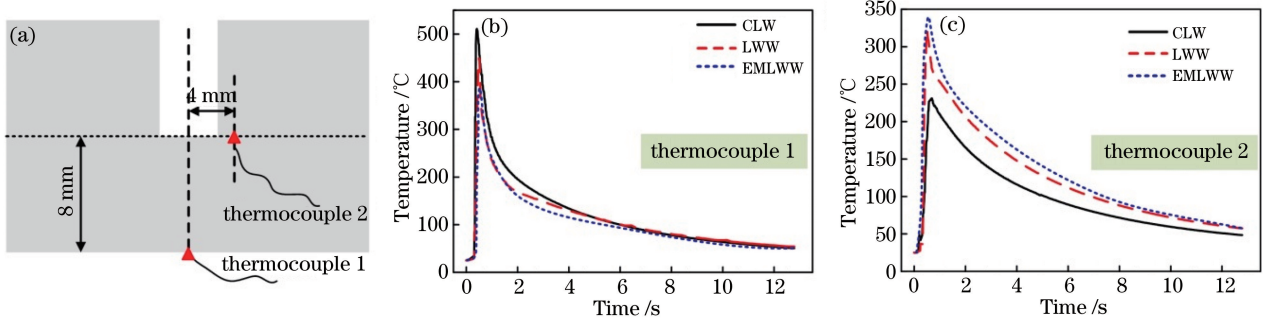


图4 单道窄间隙焊接温度场分布。(a)热电偶位置;(b)热电偶1的温度曲线;(c)热电偶2的温度曲线

Fig. 4 Temperature distribution of single narrow-gap welding. (a) Positions of thermocouples; (b) temperature curves of thermocouple 1; (c) temperature curves of thermocouple 2

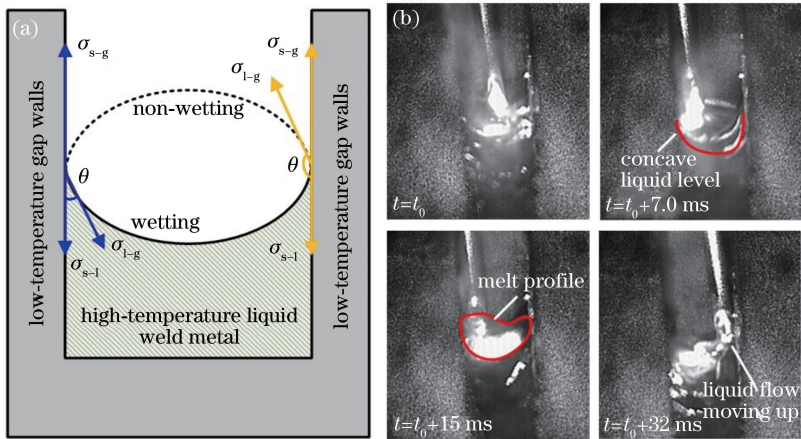


图5 窄间隙焊接熔池分析。(a)窄间隙焊缝侧壁润湿界面能;(b)电磁场作用下熔池的流动行为

Fig. 5 Analysis of narrow-gap melt pool. (a) Interface energy at gap walls of narrow-gap welding; (b) flow behavior of melt pool under electromagnetic field

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{s-g} - \sigma_{l-s}}{\sigma_{l-g}} \quad (1)$$

可知,增大 $\cos \theta$,即增大固-气界面张力 σ_{s-g} 或减小液-气界面张力 σ_{l-g} 、液-固界面张力 σ_{l-s} ,均可促进窄间隙坡口液态熔池与侧壁之间的良好润湿。

对固-液-气界面能及其影响因素进行分析可知:1)固-液界面能主要由固液前沿的界面张力差异引起,固液相的表面张力与温度、界面反应等有关。在窄间隙焊接过程中主要通过提高界面温度和降低固-液界面张力差异来减小固液界面能。焊丝横向运动可以驱动熔池的受迫对流,加快熔池的对流,提高侧壁温度,减小熔池固液前沿的温度梯度,降低固-液界面能。2)液-气界面的表面张力(即熔池的表面张力)主要与熔池温度分布、熔池流动行为有关。不锈钢的表面张力系数为负值,熔池在表面张力作用下从中心位置向周边流动,熔池温度在焊丝驱动下均匀化,从而降低了熔池的表面张力。3)固-气界面张力主要与固相界面的氧化膜、温度、粗糙度等有关。焊丝驱动液态熔池金属向侧壁铺展润湿,有利于熔池对侧壁金属的润湿,改善焊缝的成形质量。

图 5(b)为电磁场作用下焊丝熔化和熔池流动特征。可见,熔池中的高温液态金属在焊丝横向摆动的驱动下向侧壁润湿,形成了良好的“凹形”液面形态。

3.2 焊缝组织及接头性能

图 6、7 为常规激光窄间隙焊接和电磁场辅助激光窄间隙焊接接头不同位置的微观组织,可见,SUS316L 奥氏体不锈钢激光填丝焊接的焊缝组织主要为奥氏体和少量未转变的铁素体(F-A)。在常规激光焊接过程中,晶粒以竞争生长的方式沿最大热流方向向焊缝内部生长,晶粒具有显著的择优取向;奥氏体柱状晶组织沿垂直于熔合线方向向焊缝内部延伸;在焊缝中心位置,温度梯度和熔池凝固速率降低,促进了晶粒形核,形成了较多的奥氏体等轴晶组织。在窄间隙多层焊接过程中,随着焊接层数增加,熔池中心位置金属的冷却速率和凝固速率逐渐降低,熔池固-液界面的温度梯度也逐渐降低,柱状枝晶形态不明显;在重熔焊缝区,由于焊接热源的二次加热,奥氏体晶粒沿垂直熔合线方向继续长大,形成不稳定的胞状组织,如图 6 所示。

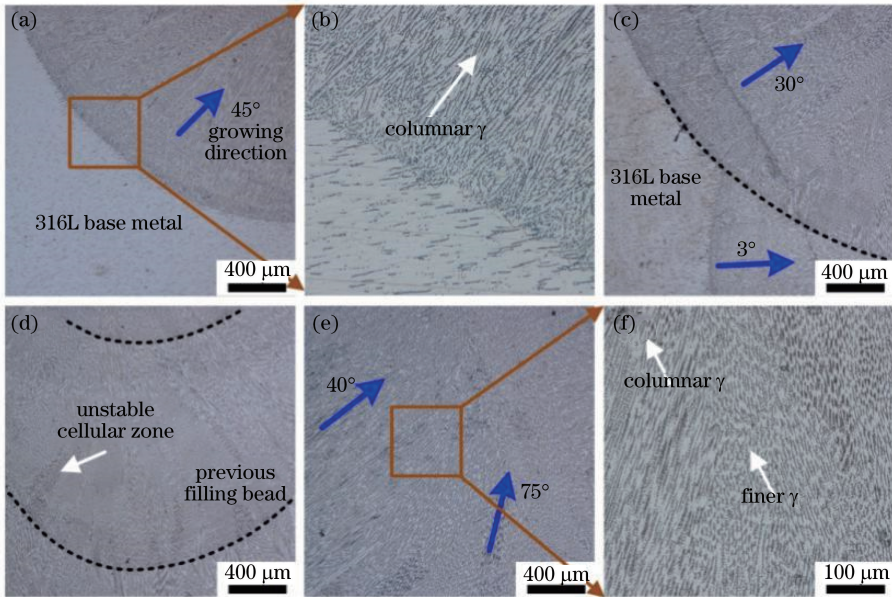


图 6 常规激光焊接接头的微观组织。(a)(b)焊缝底部及局部放大图;(c)焊缝熔合区;(d)重叠焊缝区;(e)(f)焊缝中心及局部放大图

Fig. 6 Microstructures of welded joint obtained by CLW. (a)(b) Weld bottom and its enlarged picture; (c) weld fusion zone; (d) overlapped weld zone; (e)(f) weld center and its enlarged picture

采用电磁场辅助焊接技术之后的焊接接头如图 7 所示,磁场改变了熔池中的热流方向,同时使晶粒的生长方向发生了改变。由图 7 可见:焊缝内部分布着细小的奥氏体等轴晶和树枝晶,粗大的柱状晶得到了抑制,并且重叠焊缝区域的胞状晶转变为取

向各异的树枝晶,并交错生长;在焊缝中心区域主要分布着等轴晶,其枝晶间距相比于常规激光焊接的有所减小。这是因为在电磁场作用下,振动能量可以通过焊丝金属直接引入到熔池中,产生更强的机械搅拌作用和受迫对流效果^[20-21]。焊丝在熔池中的

横向搅拌使焊缝温度更均匀,焊缝凝固结晶速率加快,有利于获得均匀细化的焊缝金属组织。此外,固-液界面处已结晶的枝晶会在熔池强制对流的作用下破碎,改变其原有的生长取向;而且这些破碎的枝晶会作为形核质点进入熔池内部,细化焊缝组织。

焊丝横向搅拌导致熔池受迫对流,对焊接熔池产生扰动,元素扩散速度加快,熔池凝固前沿溶质的浓度梯度减小,凝固温度升高,成分过冷区变窄,从而在一定程度上抑制了柱状晶的长大速度,使焊缝元素的偏析有所减缓。

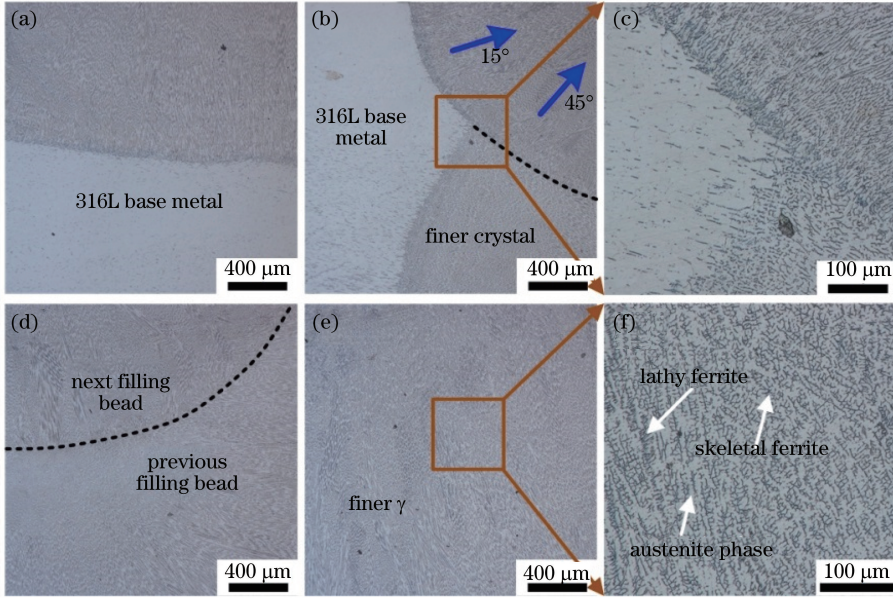


图 7 电磁场辅助激光焊接接头的微观组织。(a)焊缝底部;(b)(c)焊缝熔合区及其局部放大图;(d)重叠焊缝区;(e)(f)焊缝中心区及其局部放大图

Fig. 7 Microstructures of welded joint obtained by EMLWW. (a) Weld bottom; (b)(c) weld fusion zone and enlarged picture; (d) overlapped weld zone; (e)(f) weld center zone and its enlarged picture

图 8、9 为不同焊接参数下的焊接接头的拉伸性能及断口形貌。相比于常规激光焊接,振镜扫描激光焊接技术可以显著改善焊接接头的力学性能,当扫描激光幅度为 2.0 mm、频率为 100 Hz 时,焊接接头的抗拉强度较高;在此基础上引入电磁场辅助技术,结果发现,窄间隙焊接接头的抗拉强度基本维持在较高水平,最大抗拉强度可达到 592.3 MPa,接

头断裂位置均位于焊缝处。

由图 9 所示的断口形貌可知:常规激光焊接接头存在严重的未熔合缺陷(这会降低接头的承载面积),断口内部存在大量氧化物,接头发生脆性断裂,强度很低;采用振镜扫描激光和电磁场辅助技术之后,焊接接头中的未熔合、气孔等缺陷被抑制,断口上分布着韧窝,为典型的塑性断裂模式。电磁场辅助激光焊接接头断口上的韧窝相对大而深,且拉伸试样接头的缩颈区域更显著。

SUS316L 不锈钢窄间隙激光焊接接头在 3.5%NaCl 溶液中的电化学腐蚀性能如图 10 和图 11 所示,相应的试验数据如表 3 所示。图 10 为窄间隙焊接接头的电化学腐蚀极化曲线(i 为自腐蚀电流密度),据此可以确定焊接接头的自腐蚀电位(E_{corr})和腐蚀击穿电位(E_b),并可利用 Tafel 直线外推法计算得到自腐蚀电流(I_{corr})。可以看出,相比于常规激光焊接接头和振镜扫描激光焊接接头,电磁场辅助激光焊接接头具有更高的自腐蚀电位,这意味着其具有更好的耐腐蚀性能。电磁场辅助激光焊接接头在 $-200 \sim +600$ mV 的较宽电位区间

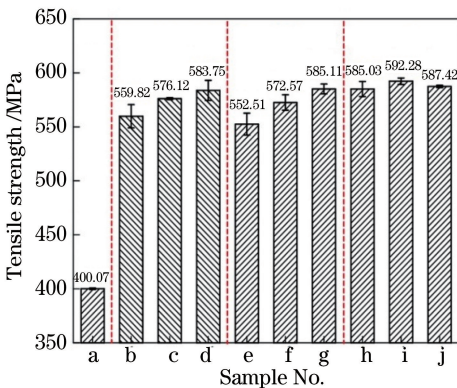


图 8 不同焊接参数下窄间隙焊接接头的抗拉强度
Fig. 8 Tensile strength of narrow-gap welded joints obtained at various welding parameters

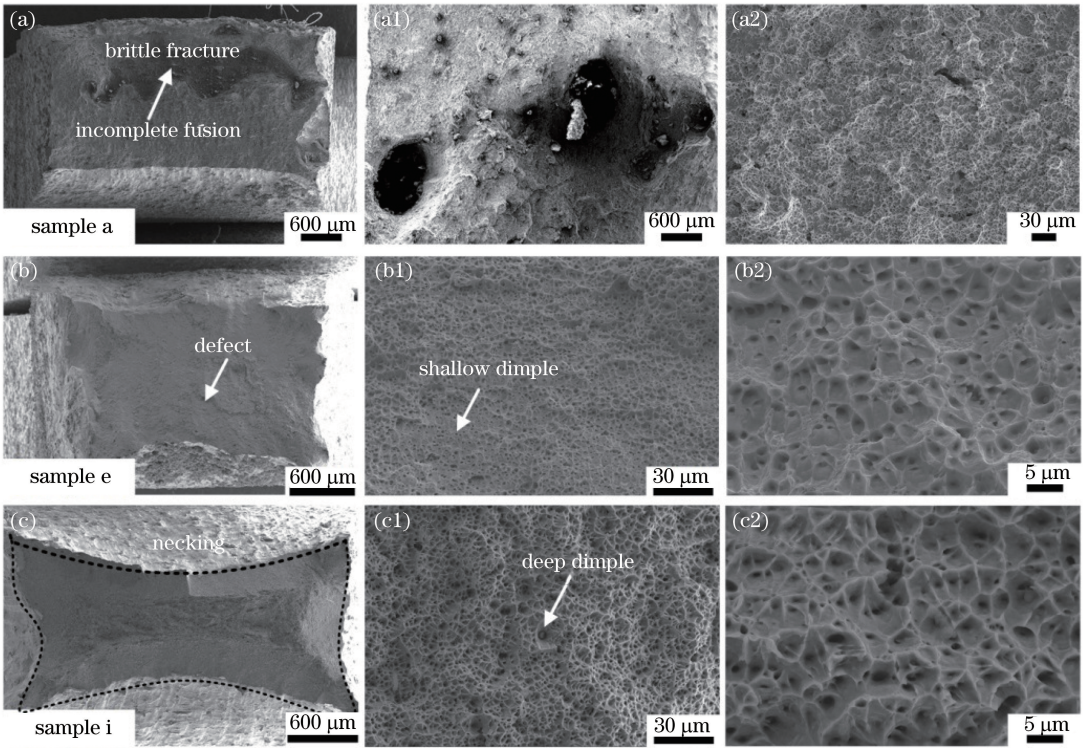


图 9 不同焊接参数下窄间隙焊接接头拉伸试样的断口形貌。

(a) 常规激光焊接; (b) 振镜扫描激光焊接; (c) 电磁场辅助激光焊接

Fig. 9 Tensile fracture of narrow-gap welded joint obtained at different welding parameters.

(a) CLW; (b) LWW; (c) EMLWW

内维持着钝态,表现出了较好的耐腐蚀性;常规激光焊接接头在较宽的电位区间内存在活化-钝化交替出现的现象,且在 0 mV 附近出现了明显的尖角形二次钝化峰。当处于过钝化区时,由于阳极电位进一步增大,试样因钝化膜被破坏而溶解,表面溶解速度再度增大。过钝化态试样具有较高的腐蚀速率。

表 3 窄间隙焊接接头的电化学腐蚀试验结果

Table 3 Electrochemical corrosion results of narrow-gap welded joints

Parameter	Welded joint obtained by CLW	Welded joint obtained by LWW	Welded joint obtained by EMLWW
E_{corr}/V	-0.477	-0.339	-0.33
I_{corr}/A	3.06×10^{-6}	7.78×10^{-7}	1.63×10^{-7}
R_s/Ω	14.03	6.252	16.51
(Error)	(0.72138)	(0.6239)	(0.6109)
R_p/Ω	10979	64529	1108100
(Error/%)	(0.73974)	(1.5824)	(3.6837)
$CPE_1 \text{ value}/F$	2.66×10^{-5}	5.47×10^{-5}	1.12×10^{-5}
(Error/%)	(0.99846)	(0.56919)	(0.44526)
$CPE_2 \text{ value}/F$	0.8706	0.90844	0.90228
(Error/%)	(0.19487)	(0.12716)	(0.095097)

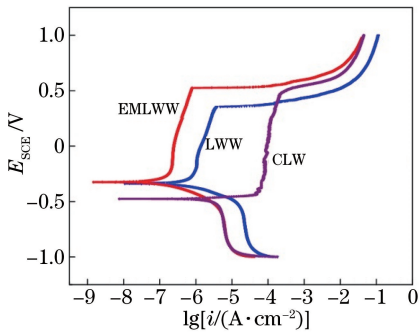


图 10 窄间隙焊接接头的电化学腐蚀极化曲线

Fig. 10 Electrochemical corrosion polarization curve of narrow-gap welded joints

窄间隙焊接接头的电化学阻抗谱如图 11 所示,其中 R_s 表示溶液电阻, R_f 表示钝化膜电阻, R_c 表示电荷转移电阻。 CPE_1 与 CPE_2 为两个常相位角元件,由于钝化膜引起的弥散效应,其在等效电路中

用来替代电容器。电磁场辅助焊接接头具有最大的容抗弧半径,表明此焊接接头具有良好的耐腐蚀性能;Bode 图中三条曲线的形状比较相似,且阻抗模值的变化规律与容抗弧半径变化一致。由等效电路拟合所得数据可知,电磁辅助激光焊接接头的电荷转移电阻值远大于常规激光焊接接头和振镜扫描激

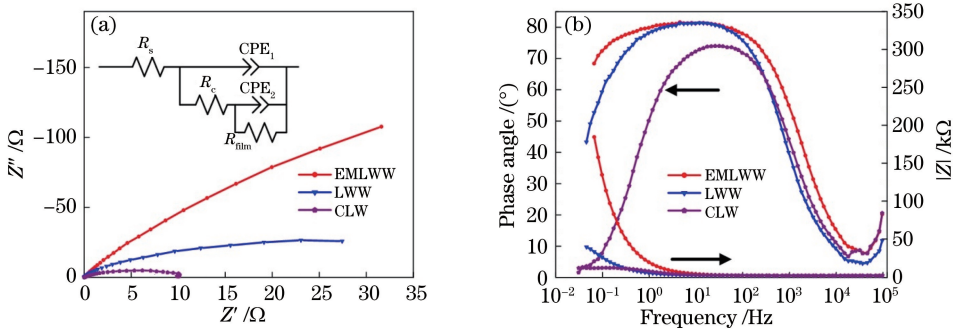


图 11 窄间隙焊接接头的电化学腐蚀阻抗谱。(a) Nyquist 图;(b) Bode 图

Fig. 11 Impedance spectroscopy of narrow-gap welded joints. (a) Nyquist figure; (b) Bode figure

光焊接头,说明其耐腐蚀性能最好。这是因为电磁场辅助焊接接头焊缝区的晶粒尺寸和枝晶间距相对较小,并且铁素体-奥氏体转变得更加充分,焊缝区域的残余铁素体数量减少。此外,电-磁场辅助焊接技术能够增强焊缝金属的流动性能,增加晶粒取向的多样性,使晶界更加不规则,有利于铬元素在焊缝区域均匀分布,焊后在焊缝区不易形成贫铬区,降低了焊缝的晶间腐蚀倾向^[22-23]。

4 结 论

对于 SUS316L 奥氏体不锈钢激光填丝窄间隙焊接,未熔合和气孔缺陷是制约其发展的主要技术因素。电磁场辅助激光焊接技术能够显著改善窄间隙焊接接头的焊缝成形质量,使焊缝熔宽增加,熔深减小,焊缝金属在坡口侧壁的润湿铺展性得到改善。

电磁场辅助激光焊接技术能够促使焊缝中心的高温液态金属向侧壁铺展润湿,熔池金属的横向运动增强,并可增加对熔池的搅拌作用。与常规激光焊接相比,在电磁场辅助激光焊接过程中,焊缝熔池金属内部的热流方向发生变化,熔池的温度梯度降低,铁素体-奥氏体转变时间增加,粗大的柱状奥氏体枝晶被破碎,焊缝内部的晶粒组织细化,枝晶间距减小。

与常规激光焊接接头相比,电磁场辅助激光焊接接头的抗拉强度和延伸率增加,拉伸试样的缩颈更加明显,拉伸断口上的韧窝直径和深度更大,焊接接头的耐腐蚀性能得到提升。

参 考 文 献

[1] Zhu H Y, Nie P L, Li Z G, et al. Microstructures and properties of joints in ultra-narrow-gap laser wire welding of P92 steel and inconel 625 alloy thick plates [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45 (6): 0602003.

朱洪羽, 聂璞林, 李铸国, 等. P92 钢与 Inconel 625 合金厚板超窄间隙激光填丝焊接头的组织与性能 [J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0602003.

[2] Zhang G W, Xiao R S. Microstructure and mechanical properties of 5083 aluminum alloy joint of heavy section by ultra-narrow gap fiber laser beam welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(9): 0903006.

张国伟, 肖荣诗. 5083 铝合金厚板超窄间隙光纤激光焊接接头组织与性能 [J]. 中国激光, 2014, 41 (9): 0903006.

[3] Zhao Y, Wang Q Z, Huang J, et al. Microstructures and properties of ultra-narrow-gap multi-pass welded joint of 50 mm turbine rotor steel by laser welding with filler wire [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(2): 0203007.

赵勇, 王清翌, 黄坚, 等. 50 mm 转子钢超窄间隙激光填丝焊接头组织与性能 [J]. 中国激光, 2015, 42 (2): 0203007.

[4] Sun J H, Ren W J, Nie P L, et al. Study on the weldability, microstructure and mechanical properties of thick Inconel 617 plate using narrow gap laser welding method [J]. Materials & Design, 2019, 175: 107823.

[5] Li G, Lu X F, Zhu X L, et al. The defects and microstructure in the fusion zone of multipass laser welded joints with Inconel 52M filler wire for nuclear power plants [J]. Optics & Laser Technology, 2017, 94: 97-105.

[6] Ning J, Zhang L J, Yang J N, et al. Characteristics of multi-pass narrow-gap laser welding of D406A ultra-high strength steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 270: 168-181.

[7] Yang W X, Xin J J, Fang C, et al. Microstructures and mechanical properties of hundred-millimeter-grade 304 stainless steel joints by ultra-narrow gap laser welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 0702005.

杨武雄, 信纪军, 方超, 等. 百毫米级 304 不锈钢超

- 窄间隙激光焊接头的组织及性能[J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0702005.
- [8] Zou J P, Li L S, Gong J F, et al. Aluminum alloy thick plate laser scanning wire filling welding porosity suppression[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(10): 43-47, 66, 163.
邹吉鹏, 李连胜, 宫建锋, 等. 铝合金厚板激光扫描填丝焊接气孔抑制[J]. 焊接学报, 2019, 40(10): 43-47, 66, 163.
- [9] Wang L, Gao M, Hao Z Q. A pathway to mitigate macrosegregation of laser-arc hybrid Al-Si welds through beam oscillation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 151: 119467.
- [10] Li J Z, Liu Y B, Sun Q J, et al. Effect of laser beam wobble on weld characteristics, microstructure and mechanical properties of Al/steel joints[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0402010.
李军兆, 刘一搏, 孙清洁, 等. 摆动激光模式对铝/钢焊接接头成形特征及组织性能研究[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0402010.
- [11] Wei H Y, Zhang Y, Tan L P, et al. Energy efficiency evaluation of hot-wire laser welding based on process characteristic and power consumption[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 87: 255-262.
- [12] Yuan T, Kou S, Luo Z. Grain refining by ultrasonic stirring of the weld pool[J]. Acta Materialia, 2016, 106: 144-154.
- [13] Peng B R, Lu Q H, He X F, et al. Effects of mechanical vibration on microstructure of laser welded joint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(20): 94-100.
彭必荣, 卢庆华, 何晓峰, 等. 机械振动对激光焊接接头组织的影响[J]. 机械工程学报, 2015, 51(20): 94-100.
- [14] Zhang W, Lu Q H, Ren X H, et al. Fatigue properties and fracture behavior of 5052 aluminum alloys welded by high frequency micro-vibration laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0302012.
张巍, 卢庆华, 任新怀, 等. 5052 铝合金高频微振激光焊接疲劳性能及损伤行为[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0302012.
- [15] Sun Q J, Wang J F, Cai C W, et al. Optimization of magnetic arc oscillation system by using double magnetic pole to TIG narrow gap welding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(1/2/3/4): 761-767.
- [16] Sun Q J, Li J Z, Liu Y B, et al. Arc characteristics and droplet transfer process in CMT welding with a magnetic field [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 32: 48-56.
- [17] Zhang X, Li R Y, Zhao Z Y, et al. Influence of external longitudinal magnetic field on weld joint morphology and microstructure in laser-metal inert gas hybrid welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 0802008.
张勋, 李若杨, 赵泽洋, 等. 外加纵向磁场对激光-MIG 复合焊接接头形貌及微观组织的影响[J]. 中国激光, 2017, 44(8): 0802008.
- [18] Sabzi M, Dezfuli S M. Drastic improvement in mechanical properties and weldability of 316L stainless steel weld joints by using electromagnetic vibration during GTAW process [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 33: 74-85.
- [19] Singh P K, Patel D, Prasad S B. Optimization of process parameters during vibratory welding technique using Taguchi's analysis [J]. Perspectives in Science, 2016, 8: 399-402.
- [20] Guo H M, Zhang A S, Yang X J, et al. Grain refinement of Al-5%Cu aluminum alloy under mechanical vibration using meltable vibrating probe [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(8): 2489-2496.
- [21] Zhu Z W, Ma X Q, Mi G Y, et al. Effect of longitudinal magnetic field on microstructure and fatigue crack propagation of 316L stainless steel joints prepared by narrow gap multi-layer laser-MIG welding [J]. Chinese Journal of Laser, 2020, 47(5): 0502007.
朱政武, 马修泉, 米高阳, 等. 纵向磁场对 316L 不锈钢窄间隙激光-MIG 多层焊接接头微观组织与疲劳裂纹扩展的影响 [J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0502007.
- [22] Yan S H, Shi Y, Liu J, et al. Effect of laser mode on microstructure and corrosion resistance of 316L stainless steel weld joint [J]. Optics & Laser Technology, 2019, 113: 428-436.
- [23] Zumelzu E, Sepúlveda J, Ibarra M. Influence of microstructure on the mechanical behaviour of welded 316L SS joints [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 94(1): 36-40.