

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

朱政武¹, 马修泉¹, 米高阳², 王春明^{2*}

¹华中科技大学机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074;

²华中科技大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074

摘要 研究了外加纵向恒定磁场对 10 mm 厚 SUS316L 奥氏体不锈钢窄间隙激光-MIG 多层焊接接头成形、奥氏体和铁素体微观组织以及疲劳裂纹扩展的影响。结果表明:在磁场作用下,接头上部复合焊接层的熔深减小,熔宽增大,下部复合焊接层的对称性提高,但上、下部焊接层的面积和层间重熔面积无明显变化;磁场的加入导致了不同的熔合线形状,改变了熔合线附近组织的生长方向,改善了熔合线附近母材的热循环,减小了焊接热影响区的宽度并抑制了晶粒的粗化;磁场可以促进层间胞状晶向树枝晶转变,改变铁素体枝晶的形态,细化层间和层内奥氏体组织;焊缝组织细化可以增大层间组织疲劳裂纹扩展的阻力,降低接头的裂纹敏感性。

关键词 激光技术; 激光-电弧复合焊接; 纵向磁场; 组织; 缺口疲劳测试; 裂纹扩展

中图分类号 TG456.7

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0502007

Effects of Longitudinal Magnetic Field on Microstructures and Fatigue Cracks Propagation in 316L Stainless Steel Joints Prepared via Narrow-Gap Multi Layer Laser-MIG Welding

Zhu Zhengwu¹, Ma Xiuquan¹, Mi Gaoyang², Wang Chunming^{2*}

¹School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

²School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract In this study, we investigate the effects of longitudinal magnetic field on the welded joint formation characteristics, ferrite/austenite microstructures, and fatigue crack propagation in the laser-MIG welding of 316L austenitic stainless steels. The experimental results indicate that the upper hybrid layer exhibits shallower penetration and larger width, whereas the lower hybrid layer exhibits a better symmetry with the addition of the magnetic field. Further, the melting area of the two hybrid layers and the remelted area between the two hybrid layers remain almost constant. The agitation of the solid-liquid front of the molten pool is promoted by the addition of the magnetic field, resulting in different fusion line shape characteristics. Furthermore, the addition of the magnetic field changes the growth direction of the microstructure near the fusion line, improves the thermal cycle of the base metal near the fusion line, reduces the width of the heat-affected zone, and restrains the coarsening of the grains. The magnetic field can promote the transition of cellular grains to the dendrites in the interlayer, change the ferrite dendritic morphology, and refine the interlayer and intralayer austenite structures. The fatigue crack growth resistance increases owing to the refinement of the microstructure, reducing the crack sensitivity of the joint.

Key words laser technique; laser-arc hybrid welding; longitudinal magnetic field; microstructure; notch fatigue test; crack propagation

OCIS codes 140.3380; 160.3900

收稿日期: 2019-07-05; 修回日期: 2019-08-07; 录用日期: 2019-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(51705173)、广东省科技计划(2017B090913001)、中央高校基本科研业务费资助项目(HUST:2018JYCXJJ033)

* E-mail: cmwang@hust.edu.cn

1 引 言

窄间隙激光-电弧复合焊接是一种新型的中厚板复合焊接方式,它在窄间隙中将激光与电弧结合起来,利用两种热源的耦合作用来减少焊接缺陷,提升焊接质量,在船舶、列车轨道、核工业等领域得到了广泛应用。目前,对中厚板焊接接头服役环境和服役寿命的要求越来越高,如要求海洋平台导流管在动态洋流中具有较大的抗腐蚀疲劳性能,要求列车转向架可以承受火车运行时的冲击作用等。在热力作用更加剧烈的服役环境中,要求焊接接头具有更均匀细化的晶粒组织、更高的成形精度与动静态力学性能等,而传统的窄间隙激光-电弧复合焊接技术已经不能满足上述要求。

近年来,采用外加能场(如超声^[1-2]、电场、磁场等)来改善接头质量的技术得到了广泛关注。磁场具有非接触特性以及可控性和安全性高的特点,许多学者对外加磁场下的焊接进行了研究,结果表明,外加合适的磁场可以提升焊接过程的稳定性。华爱兵等^[3]发现,在纵向磁场作用下,MAG (metal active gas)电弧会产生旋转运动,在离心力和等离子体流力的作用下,熔滴的过渡频率提高。常云龙等^[4]对纵向磁场下的TIG (tungsten inert gas)电弧进行了研究,发现外加磁场会引起电弧收缩和旋转,使带电粒子呈螺旋线运动。Kang等^[5]在进行外加横向磁场辅助TIG焊接时发现,横向磁场会使电弧偏离焊丝轴向,形成非对称性电弧。Wang等^[6]将横向交变磁场引入到窄间隙TIG焊接中,结果发现磁场可以使电弧沿窄间隙两侧偏摆,增大电弧对侧壁的加热效果。Sun等^[7]发现在窄间隙TIG焊接中加入横向磁场后,电弧对两侧的加热会增加侧壁熔深,改变坡口底部的热分布。Zhang等^[8-9]发现在激光-MIG(melt inert-gas)焊接中加入磁场会增大激光与电弧的耦合作用,与不加入磁场相比,当加入磁感应强度为16 mT的磁场时,电弧的铺展性和熔

滴的过渡频率增大,熔滴的尺寸减小。

磁场除了可以改善焊接过程的稳定性外,还可以影响接头的微观组织和力学性能:张勋等^[10]发现纵向磁场可以改变激光-MIG焊接接头的成形系数,进而改变接头的热循环和微观组织;Lim等^[11]发现外加交变磁场下的电弧偏摆有助于细化焊缝组织,减少粗大柱状晶的生成;Yuan等^[12]发现电弧偏摆可以改变固液前沿的温度分布,提高成分过冷,促进晶粒形核,从而达到细化晶粒的目的;蔡秀玲等^[13]发现磁场可以细化AZ91镁合金TIG焊接接头的晶粒,使 β -Mg₁₇Al₁₂相分布得更加弥散,从而提升了焊缝的力学性能;Chen等^[14-16]发现外加磁场可以细化晶粒,改变组织取向,提升接头的低温冲击性能、耐蚀性能和疲劳性能。另外,磁场还可以抑制焊缝中的成形缺陷:Fritzsche等^[17]发现外加磁场可以促进激光焊接熔池中气泡的上浮,进而将铝合金焊缝中的气孔率由未加磁场时的3.81%降至0.39%;Bachmann等^[18]利用高频交变磁场抑制了高功率激光焊接接头的下榻;Wang等^[19]利用横向磁场抑制了高速弧焊中的驼峰。

目前,关于外加磁场对激光及其复合焊接影响的研究主要集中在平板对接焊方面,而对厚板多层焊接成形、组织和力学性能等方面的研究较少;同时,在厚板焊接工艺中,层间组织的硬度、抗拉强度和电化学等性能较差^[20]。因此,本文深入研究了纵向磁场对10 mm厚316L奥氏体不锈钢窄间隙激光-电弧多层焊接接头宏观成形、铁素体和奥氏体组织以及层间疲劳裂纹扩展的影响。

2 实验材料与方法

2.1 实验材料

本文采用10 mm厚SUS316L奥氏体不锈钢作为研究对象,试样尺寸为40 mm×150 mm×10 mm;采用的焊丝牌号为ER316LSi(奥氏体不锈钢),直径为1.2 mm。母材和焊丝的化学成分见表1。

表1 母材和焊丝的化学成分

Table 1 Chemical compositions of base metal and filler wire

Material	Mass fraction /%							
	Fe	Ni	Mo	Cr	Si	C	Mn	P+S
Base metal	Bal	11.41	1.77	17.47	0.48	0.03	1.4	0.06
Filler wire	Bal	12.49	2.18	19.59	0.80	≤0.03	2.27	≤0.050

2.2 实验方法与设备

焊接过程如图1所示。由图1(a)可知,焊接过程主要涉及到激光、电弧和磁场三种能量源。激光

能量源采用美国IPG Photonics公司生产的光纤激光器,其型号为YLR-4000,最大输出功率为4000 W,波长为1.07 μm;电弧能量源采用奥地利

Fronius 公司生产的弧焊机,型号为 TPS4000,它可实现送丝速度、电流和电压的一元化设置与调节;磁场能量源由自制的方形通电线圈产生,通过调节电流(0~12 A)可以改变焊接过程中的磁感应强度,通过高斯计确定磁感应强度,实现磁感应强度在0~24 mT 之间变化。采用瑞士 ABB 公司生产的 IRB4400 型机器人进行焊接轨迹确定,激光头和焊枪通过机械装置集成在焊接机器人前端,试板通过夹具固定在线圈上部。

图 1(b)给出了 10 mm 厚不锈钢试板所开的坡

口尺寸,钝边高度为 4 mm,坡口底部宽度为 2 mm,坡口角度为 20°。图 1(c)为激光-MIG 复合焊接时的光丝位置关系。在本实验中,先进行单激光打底,将 4 mm 厚的钝边进行穿透性深熔焊接,之后采用光在前丝在后的方式进行第二层和第三层焊接,其中光丝间距 D_{LA} 为 2 mm,激光倾角为 10°,焊丝倾角为 36°。磁场加载于激光-电弧复合焊接过程,具体的焊接参数见表 2。在进行焊接实验前,对试板的焊接端面、表面及附近位置进行激光清洗,并用酒精擦拭干净。

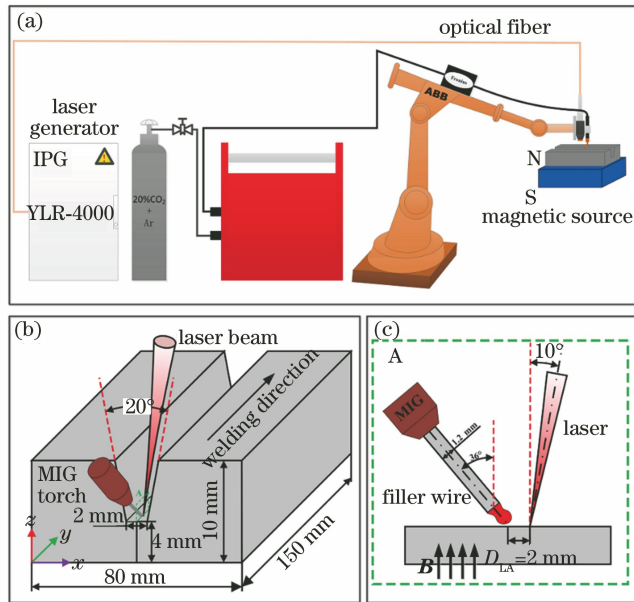


图 1 外加纵向磁场辅助窄间隙激光-MIG 多层焊接过程示意图。(a)焊接过程;(b)不锈钢试板的坡口尺寸;(c)光丝位置

Fig. 1 Schematics of longitudinal magnetic field-assisted narrow gap laser-MIG multi-layer welding process.

(a) Welding process; (b) groove size of stainless steel plate; (c) spatial position of laser and wire

表 2 焊接参数

Table 2 Welding variables

Layer No.	Laser power /kW	Welding speed / ($m \cdot min^{-1}$)	Welding current /A	D_{LA} /mm	Defocusing distance /mm	Magnetic induction intensity /mT
1	3.2	1.0	—	—	0	—
2	1.0	0.72	150	2	0	0,6,12,18,24
3	1.0	0.72	150	2	0	0,6,12,18,24

为探究纵向磁场对窄间隙激光-MIG 多层复合焊接接头宏观成形、层间奥氏体和铁素体微观组织以及层间裂纹扩展的影响。在实验完成后,首先用扫描仪记录焊缝上表面和下表面的宏观成形,再用线切割机在各试板焊缝长度方向的中心处切取横截面金相试样,然后用砂纸对金相试样进行研磨、抛光。采用荷兰帕纳科公司生产的 X'pert3 powder 型 X 射线粉末衍射仪(XRD)对焊缝横截面进行测试,角度范围为 40°~90°。采用电解液(高氯酸和无

水乙醇以 1:9 的体积比配制)对试样表面进行电解抛光,之后用王水稀释液(HCl、HNO₃ 和 H₂O 以 3:1:4 的体积比配制)进行腐蚀,并用光学显微镜(OM)观察焊缝的横截面形貌;在扫描电子显微镜(SEM)的背散射模式(BSD)下观察接头铁素体和奥氏体的微观组织(在较大范围内观察奥氏体组织特征,在较小区域内观察铁素体组织特征)。使用疲劳试验机对焊缝横截面的层间组织进行裂纹扩展研究,试验机型号为 Instron 8801,用线切割机进行层

间取样和开缺口,疲劳试样的缺口尺寸如图 2 所示;疲劳试验过程中的应力变化范围为 100~400 MPa,频率为 5 Hz,波形为正弦波,循环次数为 20000 次;

对裂纹扩展部位进行背散射电子衍射(EBSD)分析,从微观组织上进一步分析产生不同裂纹扩展行为的原因。

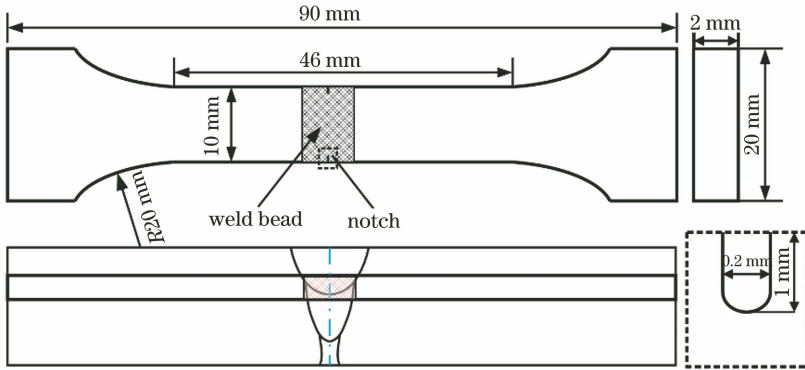


图 2 缺口疲劳试样的尺寸

Fig. 2 Size of notched fatigue specimen

3 分析与讨论

3.1 接头的宏观成形

不同磁感应强度(0,6,12,18,24 mT)下得到的接头的表面成形如图 3 所示,磁场会影响焊缝上表面的成形。在未加磁场时,焊缝上表面出现了明显的驼峰现象,并伴有粗大的鱼鳞纹;加入磁场后,焊缝上表面的驼峰现象得到抑制,并且鱼鳞纹得到细化,这主要是因为熔池中安培力的方向与熔池的流动方向相反,阻碍了熔池向后流动^[21]。此外,磁场

的加入也促使焊缝上表面产生了更多的飞溅,且飞溅仅出现在一侧。其主要原因是:加入磁场后,熔池单向旋转,图中焊缝上侧位置流入的熔体比流出的熔体多,此处熔体堆积,进而在上侧边缘形成飞溅^[3]。通过分析收弧位置熔池尾部的长度可以发现,磁场使熔池尾部有拉长的趋势。这主要是因为加入磁场后,电弧的铺展性增强^[7],故而熔池面积增大。对于焊缝下表面,由于未加入电弧和磁场,且采用了同样参数的激光深熔焊,因此焊缝底部的成形几乎一致。

	upper surface	back surface
0		
6 mT		
12 mT		
18 mT		
24 mT		

图 3 不同磁感应强度下得到的接头的表面成形

Fig. 3 Surficial morphology of welded joints prepared at different magnetic induction intensities

不同磁感应强度下得到的焊缝的横截面形貌如图 4 所示,焊缝可分为三层,第一层是激光作用层,第二层和第三层是复合焊接层。由图 4 可知,激光焊接层形貌几乎没有明显的变化,但磁场显著改变了上、下部复合焊接层的成形特征。随着磁感应强度逐渐增大,下部复合焊接层的对称性逐渐提高。对于上层复合焊接层,随着磁感应强度增大,成形特征由丁字形向三角形和圆形转变。

为了定量地研究磁场对焊缝成形的作用规律,采用两类典型成形参数来表征焊缝横截面的成形特征,如图 5 所示。其中:第一类成形参数为上部复合焊接层的成形参数,主要包括上部复合焊接层的熔宽(W)、熔深(D)和深宽比(φ),其中 $\varphi = D/W$;第二类为上部和下部复合焊接层的面积参数,主要包括上部复合焊接层的面积(S_2)、下部复合焊接层的面积(S_1)和两者的面积比(θ),其中 $\theta = S_2/S_1$ 。

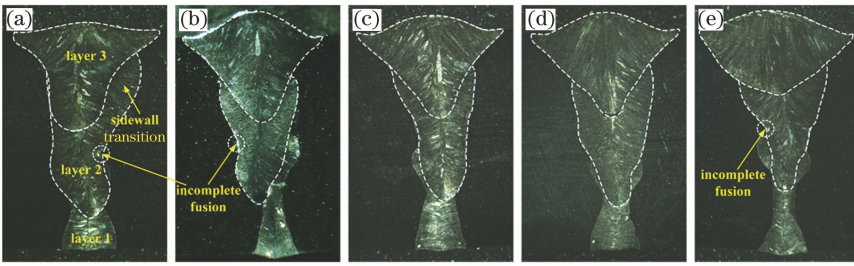


图4 不同磁感应强度下得到的焊缝的横截面形貌。(a) 0 mT;(b) 6 mT;(c) 12 mT;(d) 18 mT;(e) 24 mT

Fig. 4 Cross-sectional morphology of welds prepared at different magnetic induction intensities.

(a) 0 mT; (b) 6 mT; (c) 12 mT; (d) 18 mT; (e) 24 mT

两类焊缝典型成形参数与磁感应强度之间的变化规律如图6所示。由图6(a)可以看出,随着磁感应强度增大,上部复合焊接层的熔宽变大,熔深减小

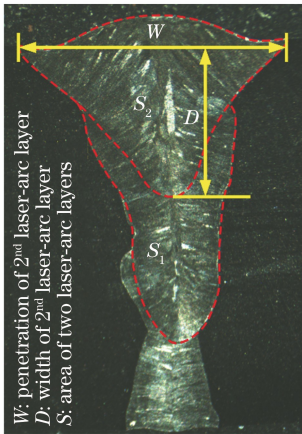


图5 表征焊缝横截面形貌的典型成形参数

Fig. 5 Typical formation parameters characterizing cross-section of weld

小,从而导致焊缝的深宽比减小,成形系数增大,焊缝的抗裂性提高^[22]。由图6(b)可以看出:随着磁感应强度增大,下部复合焊接层熔化区的横截面积在11.21 mm²附近分布,波动幅度不超过1 mm²,且磁感应强度为12 mT时的面积与平均面积相差最小;上部复合焊接层熔化区横截面积在16.65 mm²附近分布,波动幅度不超过0.5 mm²,且在18 mT时与平均面积相差最小。由于进行多层焊接时,下部焊缝会进行重熔,所以下部焊缝的横截面积会小于上部焊缝的横截面积,从面积比值随磁感应强度变化的曲线可知,面积比值在0.67附近分布,波动不超过0.1,且在12 mT时与平均水平相差最小。说明随着磁感应强度增大,多层焊缝横截面积和层间重熔面积并未发生显著改变。为了减小上下焊缝面积的影响,特别选取面积参数更相近的0 mT和18 mT试样的焊缝进行微观组织与疲劳裂纹扩展研究。

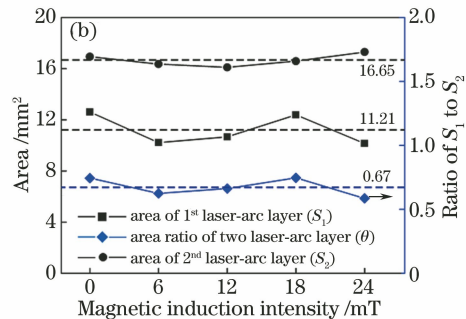
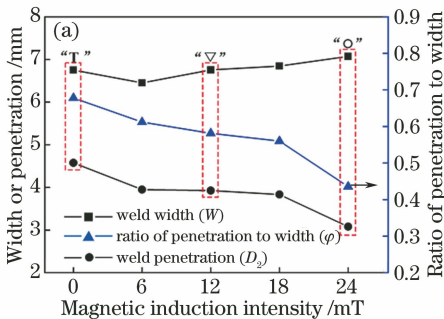


图6 磁感应强度对焊缝横截面成形参数的影响。(a)上部复合焊缝的成形参数;(b)上、下部复合焊接层的面积参数

Fig. 6 Effects of magnetic induction intensity on cross-sectional formation parameters of weld.

(a) Formation parameters for upper hybrid welds; (b) area parameters for upper and lower hybrid welds

在进行下部复合焊接时,坡口宽度较小,侧壁对电弧和熔池流动的限制作用很大,因此下部复合焊接层的宽度和形状几乎不变。在窄间隙中,根据电弧的最小电压原理,电弧容易被侧壁吸引,使电弧根部在侧壁燃烧,导致焊丝端部熔滴的受力偏离垂直方向,产生侧壁过渡,使得单侧侧壁熔化增多^[7],从

而易产生不对称焊缝和未熔合缺陷,如图4(a)、(b)所示;加入合适的磁场(磁感应强度为12~18 mT)后,带电粒子与磁场相互作用产生的洛伦兹力使电弧旋转,电流与磁场相互作用产生的安培力使熔滴的过渡稳定性增大,并增加熔池的横向对流,进而提高了焊缝的对称性^[9],如图4(c)、(d)所示;当磁感

应强度过大(24 mT)时,洛伦兹力和安培力就会过大,使得电弧、熔滴过渡和熔池流动变得不稳定^[8],也易形成未熔合缺陷,如图4(e)所示。

在进行上部复合焊接时,由于坡口宽度增大,侧壁对电弧和熔池流动的限制减小,因而磁场对复合焊接层的作用更加明显。在未加磁场时,激光的匙孔效应使焊缝形状呈丁字形,进而形成弯向焊缝中心的熔合线,如图4(a)所示;加入合适的磁场(磁感应强度为12~18 mT)后,熔池横向对流使焊缝中部母材的熔化量增多,两侧熔合线变得平直,呈三角形特征,如图4(c)、(d)所示;随着磁感应强度进一步增大,焊缝中部母材的熔化量进一步增多,使得熔合线向母材弯曲,形成圆形焊缝,如图4(e)所示。

3.2 层间铁素体组织

本实验使用的316L不锈钢为供货态,即轧制固溶态。由母材和焊丝的成分可知,焊缝组织的凝固模式为FA,即先析出铁素体,再析出奥氏体,如图7所示^[23]。焊缝横截面的XRD测试结果如图8和图9所示,结果表明,磁场的加入改变了焊缝中组织的相含量和择优生长。XRD测试结果中有4个峰最明显,分别为 $\gamma(111)$ 、 $\delta(110)$ 、 $\gamma(200)$ 和 $\gamma(220)$ 。由图8(a)、(b)可见,316L不锈钢焊缝中

主要存在面心立方结构(FCC)的奥氏体(γ)和体心立方结构(BCC)的铁素体(δ),其中 δ 是先析出相,经过FA转变后, δ 大部分都转化成了 γ ,还有极少部分未转化的形成残留 δ ,因此 $\delta(110)$ 的峰值高度最低。未加磁场时,焊缝组织主要是大量奥氏体和少量铁素体,且在奥氏体的三个峰中, $\gamma(111)$ 峰最高,说明焊缝中奥氏体晶粒4个次轴(100)的长度较长;加入磁场后,铁素体峰明显减小,且 $\gamma(200)$ 峰最高,说明只有主轴得到了生长,次轴的生长得到了抑制。

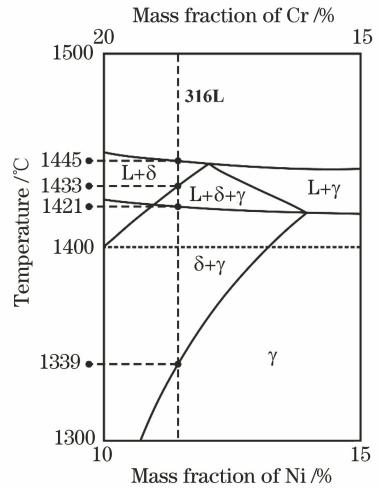


图7 316L 不锈钢的相转变图

Fig. 7 Phase transformation diagram of 316L stainless steel

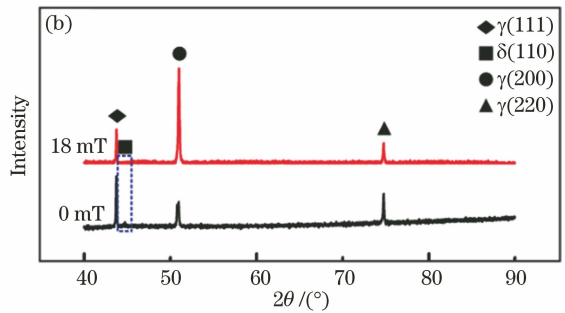
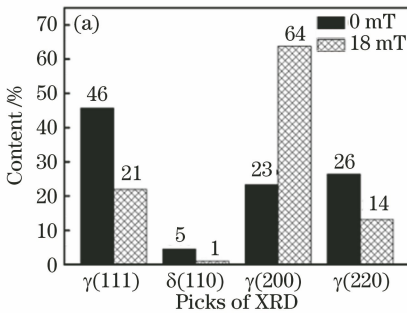


图8 0 mT 和 18 mT 接头的 XRD 测试结果。(a)统计图;(b)曲线图

Fig. 8 XRD results of welded joints prepared at magnetic induction intensities of 0 mT and 18 mT.

(a) Statistical graph; (b) curve graph

对 0 mT 和 18 mT 试样的上部层间和下部层间进行铁素体微观组织转变研究,结果如图9所示。在未加磁场时,上部和下部层间组织均在熔合线处形成一定厚度的稳定胞状晶区,且上部的胞状晶区厚度大于下部。由焊缝的坡口尺寸特征可知,下部复合焊层的焊缝宽度小,层高大,在相同的焊接速度下,下部层间组织的凝固速度高于上部层间附近组织的,凝固速度增大会加剧界面成分过冷,提高胞状生长界面的不稳定性,组织演变成树枝晶^[24]。此

外,较高的温度梯度会使下部层间界面附近的铁素体沿热流反方向垂直向上生长^[25]。加入磁场后,上部和下部层间的胞状晶区消失,形成了树枝状结构。下部层间铁素体枝晶结构变得紊乱、扭曲,而上部铁素体组织的单侧侧枝变得发达,枝晶间距减小。这说明磁场的加入改变了固液界面前沿的溶质分布,打碎先析出的铁素体的生长主轴^[26],并通过恒定磁场和电流产生的安培力,控制溶质的定向流动,促进铁素体单侧枝晶的生长。先析出的铁素体在向奥氏

体转变过程中, 主轴越粗越长, $\delta \rightarrow \gamma$ 转变后残余的铁素体就越多, 磁场对铁素体枝晶主轴的“搅拌破

碎”作用会促进 $\delta \rightarrow \gamma$ 转变, 降低残余铁素体的含量, 此分析与图 8 中铁素体相的减少一致。

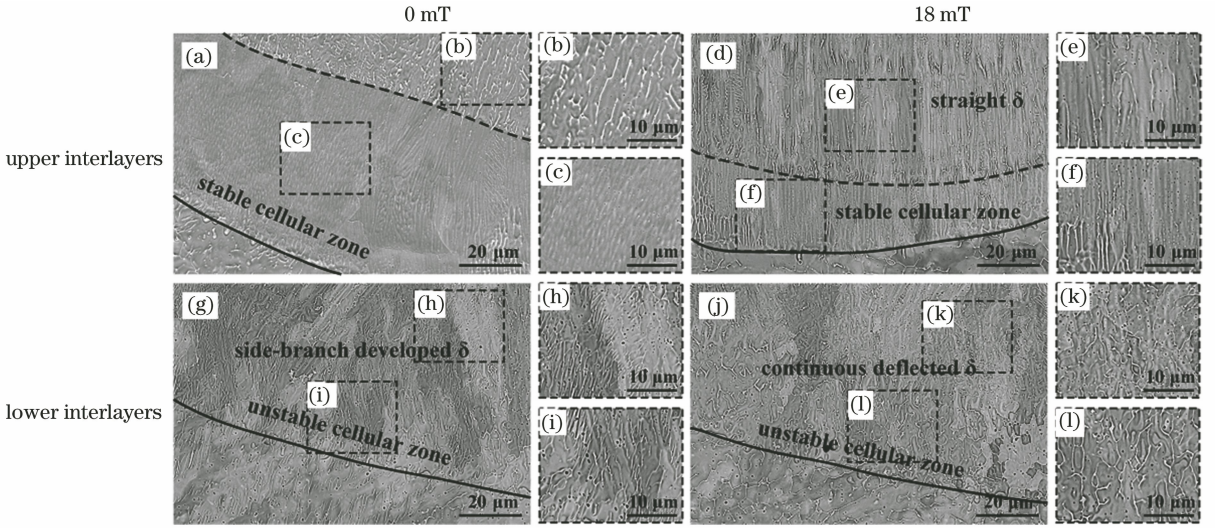


图 9 磁感应强度对上部层间(上部复合层—下部复合层)和下部层间(下部复合层—激光焊接层)铁素体组织的影响
Fig. 9 Influences of magnetic induction intensity on ferrite in upper interlayer (between upper hybrid layer and lower hybrid layer) and lower interlayer (between lower hybrid layer and laser layer)

3.3 层间奥氏体组织

进一步对焊缝层间和焊缝中心的奥氏体组织进行分析, 结果表明, 磁场对接头热影响区、熔合线和焊缝中心的奥氏体晶粒有显著影响。上部和下部复合焊接层热影响区和熔合线附近奥氏体晶粒的大小与生长特性如图 10 所示。熔合线附近晶粒的生长方向与熔合线垂直, 这是因为热流密度在此方向上最大, 最利于晶粒的生长, 磁场在改变熔合线形状的同时也改变了熔合线附近晶粒的生长方向; 同时, 热

流由熔合线流向母材, 使得热影响区中等轴奥氏体晶粒粗化。由图 10 可见, 焊缝下部热影响区中的奥氏体晶粒明显大于焊缝上部的, 在进行上层复合焊接时, 下部焊层被再次加热, 进而导致下部复合层热影响区晶粒进一步粗化。加入磁感应强度为 18 mT 的磁场后, 上部复合层的热影响区宽度由未加磁场时的 278 μm 减小到 193 μm , 这是因为 0 mT 时丁字形熔合线弯曲处易产生热量积累, 导致热影响区的高温停留时间较长; 而加入 18 mT 的磁场后, 三

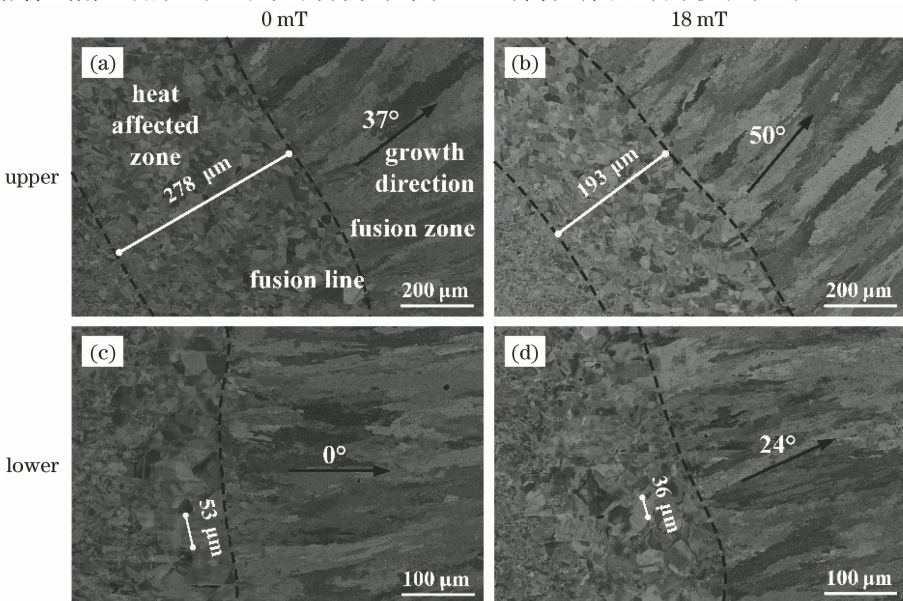


图 10 上部和下部复合焊接层热影响区的组织
Fig. 10 Microstructures in HAZ of upper and lower hybrid layers

角形熔合线变得平直,利于向两侧母材散热,热影响区的高温停留时间较短,同时上层向下层的热量传递减小,下部复合层热影响区的晶粒直径由未加磁场时的 $53\ \mu\text{m}$ 减小到 $36\ \mu\text{m}$ 。

上部复合焊接层中心和上下部复合层间奥氏体的晶粒形态如图 11 所示。在焊缝中心处,未加磁场时,形成了粗大的奥氏体柱状晶,宽度约为 $100\ \mu\text{m}$;加入磁场后,柱状晶明显细化,宽度减小到 $70\ \mu\text{m}$ 左右。在层间处,未加磁场时,奥氏体颜色较

为一致,说明其取向变化不明显,晶粒沿层间交界处的生长方向保持不变,且逐渐粗化;加入磁场后,上部层间的奥氏体颜色深浅不一,说明其取向变化明显,晶粒明显细化,生长方向各异。上述结果与图 8 中 $18\ \text{mT}$ 试样焊缝横截面 XRD 谱中 $\gamma(111)$ 峰降低、 $\gamma(200)$ 峰升高所表现出的奥氏体宽度减小、细化的结果一致,其主要原因是 $\delta \rightarrow \gamma$ 转变中 γ 相和 δ 相之间的继承性,奥氏体也发生了类似于铁素体的破碎与细化。

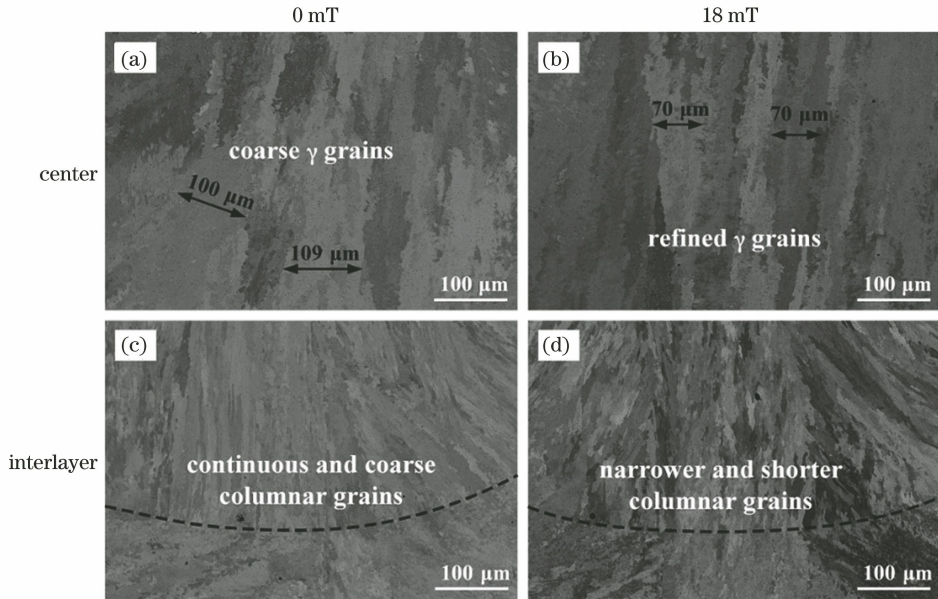


图 11 上部焊缝中心和层间奥氏体的晶粒形态

Fig. 11 Morphology of γ grains in central area of upper welds and interlayers

3.4 焊缝层间的疲劳性能

对 $0\ \text{mT}$ 和 $18\ \text{mT}$ 试样的层间组织进行缺口疲劳测试,疲劳试验机记录的试样拉长位移随时间变化的曲线如图 12 所示。由图 12 可见,曲线主要分为 4 个阶段:过渡、平衡、裂纹萌生和裂纹扩展。在弹性变形阶段, $18\ \text{mT}$ 试样的拉长距离小于 $0\ \text{mT}$ 试样;在裂纹萌生和裂纹扩展阶段, $18\ \text{mT}$ 试样拉长距离的增大速率低于 $0\ \text{mT}$ 试样,表明 $18\ \text{mT}$ 试样中的裂纹萌生速率和裂纹扩展速率更小。

用线切割机在试样裂纹扩展位置取样,然后进行 EBSD 测试,并分析晶界角度分布,结果如图 13 所示。结果表明: $0\ \text{mT}$ 试样和 $18\ \text{mT}$ 试样中的裂纹大多是穿晶裂纹,仅有少数沿晶裂纹; $0\ \text{mT}$ 试样中裂纹的扩展路线较为连续, $18\ \text{mT}$ 试样中的裂纹扩展发生了偏转。在裂纹扩展过程中,原子排列不规则的晶界和晶格畸变会对位错迁移产生阻碍作用,进而影响裂纹的扩展速率。进一步分析后可知:在 $18\ \text{mT}$ 试样中,晶界角度 θ 分布在 $31^\circ \sim 63^\circ$ 间的

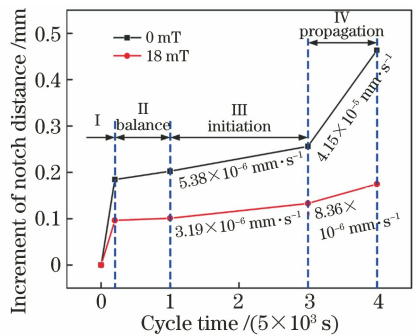


图 12 $0\ \text{mT}$ 和 $18\ \text{mT}$ 试样拉长距离与时间的关系

Fig. 12 Relationship of elongated distance versus cycle time for samples prepared at magnetic induction intensities of $0\ \text{mT}$ and $18\ \text{mT}$

晶界比例均高于 $0\ \text{mT}$; $0\ \text{mT}$ 试样裂纹附近的奥氏体晶粒粗大,晶界数量少。因此 $18\ \text{mT}$ 试样中裂纹扩展的阻力大于 $0\ \text{mT}$ 试样。在相同的疲劳时间下, $0\ \text{mT}$ 试样的裂纹更宽,如图 13(a)、(c) 所示。进一步分析裂纹的缝宽随深度的变化规律可以看出: $0\ \text{mT}$ 试样中裂纹的缝宽由 $250\ \mu\text{m}$ 减小到

100 μm , 呈现线性减小的趋势; 18 mT 试样中裂纹的缝宽在缺口处为 200 μm , 之后迅速减小到 100 μm , 并出现一个过渡平台, 裂纹宽度保持在

100 μm 左右, 说明 18 mT 试样裂纹尖端强度更高, 发生的塑性变形小。综上所述, 18 mT 试样层间组织对裂纹扩展的阻力较大, 裂纹敏感性较低。

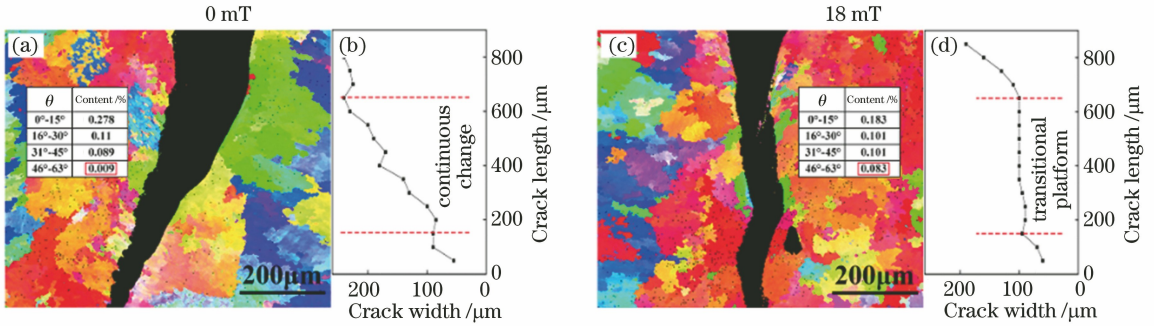


图 13 焊缝裂纹的扩展方向和宽度

Fig. 13 Propagation direction and width of crack in weld

4 结 论

本文在外加纵向恒定磁场下对 10 mm 厚 SUS316L 奥氏体不锈钢激光-电弧多层焊接工艺进行研究, 结果发现磁场对厚板接头复合焊接层成形貌、奥氏体和铁素体微观组织以及缺口疲劳裂纹扩展具有显著影响。

随着磁感应强度增大, 熔池的横向流动增强, 熔池两侧的金属熔化量增多, 导致焊接接头上部复合焊接层的熔深减小, 熔宽增大, 并使熔合线形状由丁字形向三角形和圆形转变。

加入磁场后, 层间组织中的铁素体枝晶由胞状向树枝状转变, 同时枝晶形态变得紊乱、扭曲, 侧枝变得发达, 出现不对称生长现象。

熔合线形状改变后, 散热增加, 导致熔合线附近热影响区的高温时间缩短, 从而使热影响区宽度由未加磁场时的 278 μm 减小到 193 μm ; 焊缝中部的奥氏体组织细化, 晶粒宽度由 100 μm 左右减小到 70 μm 左右; 层间奥氏体晶粒细化, 生长方向各异。

加入磁场可以细化奥氏体晶粒和增多大角度晶界的数量, 并使裂纹尖端强度增大, 疲劳裂纹扩展阻力增大, 层间组织的裂纹敏感性降低。

参 考 文 献

[1] Xu J L, Zhou J Z, Tan W S, et al. High-temperature oxidation resistance of Co-based alloy coatings by ultrasonic vibration assisted laser cladding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0102006. 徐家乐, 周建忠, 谭文胜, 等. 超声振动辅助激光熔覆钴基合金涂层的抗高温氧化性能[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0102006.

[2] Zhang A F, Fu T, Wang T, et al. Effect of

ultrasonic vibration on microstructure and properties of laser cladded and solution-aging treated Ti6Al4V alloys[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1202004.

张安峰, 付涛, 王潭, 等. 超声振动对激光熔覆及固溶时效 Ti6Al4V 合金组织和性能的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1202004.

[3] Hua A B, Chen S J, Zhang X L, et al. Kinetic analysis of spray transfer welding arc in a longitudinal magnetic field[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(6): 53-56. 华爱兵, 陈树君, 张晓亮, 等. 纵向磁场作用下 MAG 焊电弧的动力学分析[J]. 焊接学报, 2008, 29(6): 53-56.

[4] Chang Y L, Yang X, Li D Y, et al. Arc shapes of TIG welding in a longitudinal magnetic field [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(4): 49-52. 常云龙, 杨旭, 李大用, 等. 外加纵向磁场作用下的 TIG 焊接电弧[J]. 焊接学报, 2010, 31(4): 49-52.

[5] Kang Y H, Na S J. A study on the modeling of magnetic arc deflection and dynamic analysis of arc sensor: a magnetic field applied to a welding arc produced an output signal beneficial for an arc sensor [J]. Welding Journal, 2002, 81(1): 8-13.

[6] Wang J F, Sun Q J, Feng J C, et al. Characteristics of welding and arc pressure in TIG narrow gap welding using novel magnetic arc oscillation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(1/2/3/4): 413-420.

[7] 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.

[8] Zhang X, Zhao Z Y, Wang C M, et al. The effect of

- external longitudinal magnetic field on laser-MIG hybrid welding [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 85(5/6/7/8): 1735-1743.
- [9] Zhang X, Zhao Z Y, Mi G Y, et al. Effect of external longitudinal magnetic field on arc plasma characteristics and droplet transfer during laser-MIG hybrid welding [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92(5/6/7/8): 2185-2195.
- [10] 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.
- [11] Lim Y C, Yu X, Cho J H, et al. Effect of magnetic stirring on grain structure refinement: nickel alloy weld overlays[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2010, 15(5): 400-406.
- [12] Yuan T, Luo Z, Kou S. Grain refining of magnesium welds by arc oscillation[J]. *Acta Materialia*, 2016, 116: 166-176.
- [13] Qi X L, Liu Z J, Su Y H, et al. Effect of post weld heat treatments on microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy joints welded by TIG method with adding magnetic field [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2015, 36(3): 89-92.
綦秀玲, 刘政军, 苏允海, 等. 热处理对磁场作用下 AZ91 镁合金焊接接头组织和性能的影响 [J]. *焊接学报*, 2015, 36(3): 89-92.
- [14] Chen R, Jiang P, Shao X Y, et al. Improvement of low-temperature impact toughness for 304 weld joint produced by laser-MIG hybrid welding under magnetic field [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 247: 306-314.
- [15] Chen R, Jiang P, Shao X Y, et al. Effect of magnetic field applied during laser-arc hybrid welding in improving the pitting resistance of the welded zone in austenitic stainless steel [J]. *Corrosion Science*, 2017, 126: 385-391.
- [16] Chen R, Jiang P, Shao X Y, et al. Effect of magnetic field on crystallographic orientation for stainless steel 316L laser-MIG hybrid welds and its strengthening mechanism on fatigue resistance [J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 112: 308-317.
- [17] Fritzsche A, Hilgenberg K, Teichmann F, et al. Improved degassing in laser beam welding of aluminum die casting by an electromagnetic field[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 253: 51-56.
- [18] Bachmann M, Avilov V, Gumenyuk A, et al. About the influence of a steady magnetic field on weld pool dynamics in partial penetration high power laser beam welding of thick aluminium parts[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 60: 309-321.
- [19] Wang L, Wu C S, Chen J, et al. Influence of the external magnetic field on fluid flow, temperature profile and humping bead in high speed gas metal arc welding[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 116: 1282-1291.
- [20] Zhang X, Mi G Y, Xiong L D, et al. Effects of interlaminar microstructural inhomogeneity on mechanical properties and corrosion resistance of multi-layer fiber laser welded high strength low alloy steel [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 252: 81-89.
- [21] Wu C S, Yang F Z, Gao J Q. Effect of external magnetic field on weld pool flow conditions in high-speed gas metal arc welding[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2016, 230(1): 188-193.
- [22] Wu S S, Liu Y Q. *Principle of material forming*[M]. 2ed ed. Beijing: China Machine Press, 2008: 201
吴树森, 柳玉起. *材料成形原理*[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2008: 201.
- [23] Xu X, Mi G Y, Luo Y Q, et al. Morphologies, microstructures, and mechanical properties of samples produced using laser metal deposition with 316L stainless steel wire[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 94: 1-11.
- [24] Gäumann M, Trivedi R, Kurz W. Nucleation ahead of the advancing interface in directional solidification [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1997, 226/227/228: 763-769.
- [25] Pocheau A, Deschamps J, Georgelin M. Dendrite growth directions and morphology in the directional solidification of anisotropic materials [J]. *JOM*, 2007, 59(7): 71-76.
- [26] Lu Z Y, Fautrelle Y, Ren Z M, et al. Effect of a high magnetic field on the morphology of the primary dendrite in directionally solidified Pb-25at%Bi peritectic alloy [J]. *Materials Letters*, 2015, 160: 366-370.