

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

张 勋, 李若杨, 赵泽洋, 米高阳, 王春明, 胡席远

华中科技大学材料成形及模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074

摘要 研究了外加纵向磁场对 SUS316L 奥氏体不锈钢激光-稀有气体保护复合焊接接头成形特点、微观组织及显微硬度分布的影响。实验结果表明, 在外加纵向磁场的作用下, 接头的余高减小, 熔宽增大, 成形系数增大, 截面宽而深。外加磁场改变了接头的热循环, 使热影响区析出长条形 δ -铁素体, 抑制了晶粒的生长。外加磁场使熔池旋转, 接头晶粒得到细化, 结晶均匀性得到提高, 显微硬度分布变得稳定。这种影响随着磁感应强度的增加而增强, 随着接头深度的增大而减弱。

关键词 激光技术; 激光-电弧复合焊接; 外加纵向磁场; SUS316L 奥氏体不锈钢; 微观组织; δ -铁素体

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0802008

Influence of External Longitudinal Magnetic Field on Weld Joint Morphology and Microstructure in Laser-Metal Inert Gas Hybrid Welding

Zhang Xun, Li Ruoyang, Zhao Zeyang, Mi Gaoyang, Wang Chunming, Hu Xiyuan

State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract The influences of external longitudinal magnetic field on weld joint forming characteristics, microstructure and microhardness distribution are investigated in SUS316L austenitic stainless steels by laser-metal inert gas hybrid welding. The experimental results show that, under the action of external longitudinal magnetic field, the weld joint reinforcement decreases, the weld width increases, the forming coefficient increases, and the cross section appears wide and deep. The external magnetic field alters the thermal cycle of the weld joint, which makes the striped δ -ferrite precipitation occur in the heat affected zone and the grain growth is inhibited. The external magnetic field causes the rotation of the molten pool and the weld joint grains are refined. The uniformity of crystallization is improved and the microhardness distribution becomes stable. This effect enhances with the increase of the magnetic induction intensity but weakens with the increase of the weld joint depth.

Key words laser technique; laser-arc hybrid welding; external longitudinal magnetic field; SUS316L austenitic stainless steel; microstructure; δ -ferrite

OCIS codes 140.3390; 140.3510; 160.3900

1 引言

激光-电弧复合焊接作为一种较新的复合焊接方式, 在造船、列车、汽车等工业领域中得到了较为广泛的应用。社会的发展对构件的焊接质量提出了越来越高的要求, 如更均匀细小的晶粒、更高的成形精度等。传统的激光-电弧复合焊接不能满足上述要求。

收稿日期: 2016-09-08; 收到修改稿日期: 2016-12-21

基金项目: 国家 973 计划(2014CB045703)

作者简介: 张 勋(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事多能场焊接方面的研究。E-mail: xun_zhang@hust.edu.cn

导师简介: 王春明(1975—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光加工方面的研究。

E-mail: cmwang@hust.edu.cn(通信联系人)

早在 20 世纪 70 年代, Blinkov 等^[1]就开始研究磁场在钨极稀有气体保护焊中的作用。近年来,外加磁场作为一种简单、有效且低成本的方式,已广泛应用于电弧焊中,以改善接头成形及组织性能。Wu 等^[2]在高速熔化极稀有气体保护(MIG)焊接中,通过施加纵向磁场成功抑制了驼峰及咬边等缺陷,得到了优质接头。Malinowski-Brodnicka 等^[3]指出,外加交变磁场可以使钨极氩弧焊的焊接熔宽增大,并且细化晶粒。Mousavi 等^[4]的铝合金焊接实验表明,磁场产生的电磁搅拌能增强接头的异质形核,进而细化接头组织。Liu 等^[5]对铝/钢异种金属进行了冷金属过渡焊接,发现交变磁场可以抑制接头中 Al/Fe 金属间化合物的形成。更多研究表明,磁场可以稳定焊接过程,改善熔池液态金属流动方式,细化晶粒,提高接头力学性能^[6-8]。

除了在弧焊中应用磁场,磁场在激光焊接中也有应用。Zhou 等^[9]发现,外加磁场可以改善激光焊接的接头余高、横截面形貌以及表面成形等。杨德才等^[10]在 CO₂ 激光焊接中利用纵向磁场提高了熔深,并且指出这种提高存在一个最大值。陈武柱等^[11]发现,对等离子体电流施加横向磁场可使等离子体发生偏离激光束的横向运动,提高了激光与工件的耦合效率。许多学者研究发现,磁场在激光焊接熔池中起到了电磁搅拌的作用,使元素均匀分布,减少了热裂纹及气孔等缺陷^[12-13]。余圣甫等^[14]使用旋转磁场细化了 CO₂ 激光焊接 Al-Si12 合金的晶粒,消除了裂纹等焊接缺陷,且这种效果随磁场旋转速度的增加而增强。Bachmann 等^[15]在高功率激光焊接中,通过磁场成功抑制了接头的下塌,获得了成形良好的接头。王维等^[16]通过模拟研究发现,外加磁场在激光熔池中产生的电磁搅拌作用使熔池内液体的流动方向发生改变,并形成多个环流,加速了热量传输,减小了温度梯度。宋诗英等^[17-18]发现,磁场在熔池中产生的洛伦兹力阻碍了熔池对流,使熔池中液态金属的流速减缓。

目前,关于将磁场应用于激光-MIG 复合焊接的研究鲜有报道。为进一步提高焊接效率及质量,本文把纵向磁场引入激光-MIG 电弧复合焊接中,探究磁场对接头成形特点、微观组织(焊缝区及热影响区)、硬度分布等的影响。

2 实验材料、设备与方法

2.1 实验材料

实验采用 SUS316L 奥氏体不锈钢作为母材,试样尺寸为 200 mm×150 mm×4 mm;焊丝的材料为 ER316LSi 奥氏体不锈钢,直径为 1.2 mm。母材及焊丝的化学成分见表 1。

表 1 母材及焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of base metal and filler wire (mass fraction, %)

Element	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Fe
Base metal	≤0.03	≤2.00	≤0.75	≤0.030	≤0.045	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	Bal.
Filler wire	≤0.03	1.0-2.5	0.83	≤0.020	≤0.030	18.0-20.0	11.0-14.0	2.5-3.0	Bal.

2.2 实验设备

实验中使用光纤激光器(YLR-4000, IPG Photonics 公司, 美国)作为光源,其最大输出功率为 4 kW,波长为 1.07 μm。弧焊采用逆变电源(TPS4000, Fronius 公司, 奥地利),可实现电流、电压及送丝速度的一体化调节。机器人(IRB4400, ABB 公司, 瑞士)额定负载为 60 kg。磁场发生源采用表面磁感应强度(B)为 120 mT 的铁氧体永磁体,其尺寸为 110 mm×105 mm×10 mm。实验中通过调整试样表面与永磁体的距离来改变磁感应强度,并使用南京米厘特精密仪器有限公司的 HT-201 型高斯计测量磁感应强度。

2.3 实验方法

采用平板堆焊的实验形式,焊前采用机械打磨的方法去除试样表面氧化膜,再用丙酮清洗试样待焊表面,去除油污。焊接时使用夹具将试样固定在工作台上,为防止发生高反现象,激光焊接头轴向与竖直方向成 10°夹角。激光-MIG 电弧复合焊接实验的工艺参数见表 2,其中焦点距离为焦点与零离焦平面之间的距离。焊接示意图如图 1 所示,其中 D_{LA} 为激光与电弧间的距离。

为探索外加纵向磁场对激光-MIG 电弧复合焊接接头成形及微观组织的影响规律,使用线切割方法获取两个金相试样,并采用砂纸进行研磨、抛光、腐蚀,选用的腐蚀剂为王水稀释液。使用金相显微镜及扫描电子显微镜(SEM)进行接头显微组织分析;使用能谱仪(EDS)分析接头元素分布;使用 X 射线衍射(XRD)仪

来确定接头的物相组成;使用维氏显微硬度计对接头进行显微硬度测试,其载荷为 300 g,加载时间为 15 s,分别测量每个接头的上部、中部及底部三个区域,如图 2 所示。

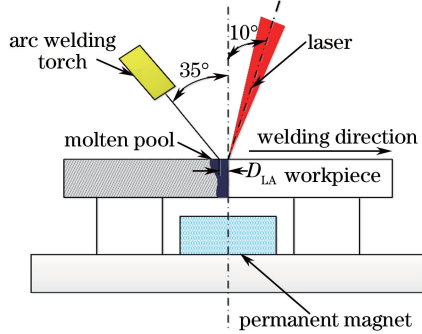


图 1 外加纵向磁场辅助激光-MIG 电弧复合焊接示意图

Fig. 1 Schematic of laser-MIG hybrid welding assisted with external longitudinal magnetic field

表 2 外加纵向磁场辅助激光-MIG 电弧复合焊接参数

Table 2 Parameters of laser-MIG hybrid welding assisted with external longitudinal magnetic field

Laser power /kW	Current /A	Welding speed / (m · min ⁻¹)	Focal point distance /mm	D _{LA} /mm	B /mT
2.0	150	1.1	0	2	0, 8, 12, 16, 22

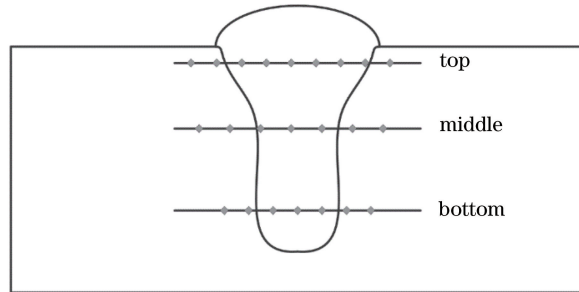


图 2 接头显微硬度测试示意图

Fig. 2 Schematic of microhardness test of weld joint

3 实验结果与分析

3.1 外加纵向磁场对接头宏观成形的影响

不同磁感应强度下的接头表面及横截面形貌见表 3,可以看出,随着磁感应强度的增加,接头熔宽明显增大;同时,接头横截面形貌由钉头状逐渐转变为蘑菇状,上部开口逐渐增大,底部内径逐渐减小。宏观形貌在一定程度上反映了接头的质量,为了较好地评估接头的成形特点,建立了一套包含多种典型参数的评价方法,如图 3 所示,参数包括接头熔宽(b)、熔深(H)、余高(a)、接头成形系数(Φ)、余高系数(ψ)、熔合比(C)及

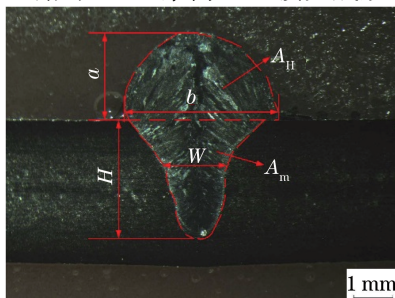



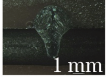


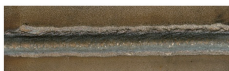
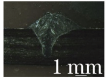

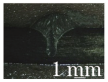

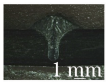
图 3 接头形貌示意图

Fig. 3 Schematic of weld joint morphology

宽腰比(η),其中 $\Phi=b/H, \psi=b/a, C=A_m/(A_m+A_H), \eta=b/W, A_m, A_H$ 分别为图中对应区域的面积, W 为距离上表面 $H/2$ 处的宽度。

表 3 不同磁感应强度下接头及横截面形貌

Table 3 Weld joints and cross-sectional morphologies under different magnetic induction intensities

B /mT	Weld joint morphology	Cross-sectional morphology of weld joint
0		
8		
12		
16		
22		

通过分析上述参数,可以清晰地了解外加纵向磁场对接头形貌和成形特点的影响。如图 4 所示,初始阶段,随着 B 的增加, b 增加, a 降低, H 相对稳定,当 $B=12$ mT 时, b 取得最大值;当 B 进一步增加时, b 降低了一点;当 B 的值分别为 16 mT 和 22 mT 时,对应的 b 值几乎相等。这表明当外加纵向磁场增加时,接头熔宽的增加存在一个极限值;在送丝速度不变的条件下,接头熔宽的增加意味着接头余高的降低;在激光-电弧复合焊接中,接头熔深取决于激光的输出功率,因为外加磁场对激光的输出功率几乎没有影响,所以接头熔深保持稳定。

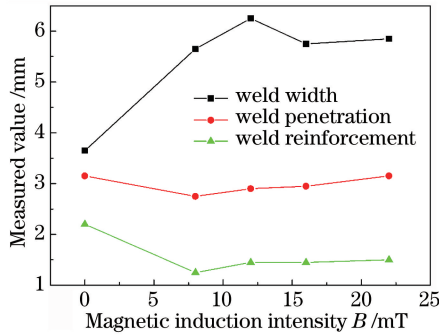


图 4 外加纵向磁场对接头形貌的影响

Fig. 4 Influence of external longitudinal magnetic field on weld joint morphology

外加纵向磁场对接头成形特点的影响如图 5 所示, Φ 随着 B 的增加而增大,与 b 的变化趋势相似, Φ 也在 $B=12$ mT 时取得最大值,较大的 Φ 值意味着接头呈现出一种深而宽的形貌。 Φ 值的大小对接头有重要意义,若 Φ 较小,接头形状窄而深,熔池冷却结晶时,低熔点共晶物、杂质等会被挤向焊缝中心,并恰好集中在树枝状结晶的对接部位,使得该部位抵抗拉应力的能力较弱,故接头中心易产生热裂纹;同时,由于接头的熔深大,熔池中的夹杂物和气体不易逸出,在接头中易形成夹杂、气孔等缺陷。当 Φ 值过大时,熔深往往较小,无法达到焊接要求。从图 4 和图 5 中可以看出,外加纵向磁场在不降低熔深的情况下,使 Φ 得到了明显增加,这有益于熔池中夹杂物及气体的逸出,降低了裂纹及气孔产生的可能性^[19]。由于熔宽增加,余高降低,接头余高系数增加明显。接头熔合比在 $B=8$ mT 时取得最大值,随后降低至初始值附近。接头宽腰比随着 B 的增大而增大,表面接头呈现出深而宽的形貌。

接头成形发生变化的原因如下:在纵向磁场的作用下,电弧中的带电粒子出现绕轴方向的旋转运动,故整个电弧发生旋转,这种旋转运动导致电弧上部收缩,下部扩张^[20]。复合焊接的熔宽主要由电弧决定,因此电弧下部直径的增加导致熔宽的增加。当磁感应强度增大时,电弧扩张更加明显,熔宽也增加。当磁感应强

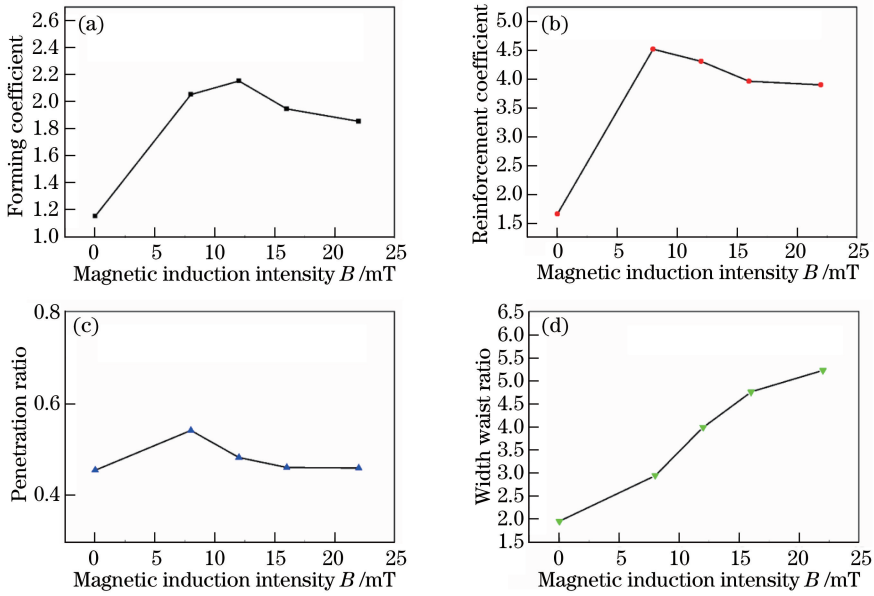


图 5 外加纵向磁场对接头成形特点的影响。(a)成形系数;(b)余高系数;(c)熔合比;(d)宽腰比

Fig. 5 Influence of external longitudinal magnetic field on weld joint forming characteristics.

(a) Forming coefficient; (b) reinforcement coefficient; (c) penetration ratio; (d) width waist ratio

度超过一定值(12 mT)后,一方面,电弧旋转产生的涡旋环形电流较大,环形电流产生的磁场削弱了外加磁场的作用^[21];另一方面,电弧高速旋转将散失更多的能量,根据能量平衡理论,电弧将自动收缩,减小散热面积。这两方面的原因导致了外加磁场超过某个值时熔宽的下降。

3.2 外加纵向磁场对接头微观组织的影响

SUS316L 奥氏体不锈钢母材主要由奥氏体等轴晶粒组成,如图 6 所示,母材中固溶了大量的 Cr、Ni 等元素,晶间存在少量的碳化物及 δ -铁素体。图 7 所示为不同磁感应强度下接头的 XRD 测试结果,其中 2θ 为衍射角。可以看到,三种接头中均存在 δ -Fe 和 γ -Fe 相,相比于 γ -Fe, δ -Fe 的含量要少很多。在所有的衍射峰中, δ -Fe 的(110)面的峰值强度随着磁感应强度的增加而逐渐减小。研究表明,不锈钢接头中的 δ -Fe 含量与焊接的热循环过程紧密相关,冷却速度越快,接头中的 δ -Fe 含量越低^[22]。

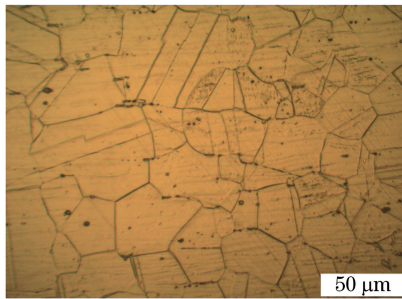


图 6 SUS316L 奥氏体不锈钢母材微观组织

Fig. 6 Microstructure of SUS316L austenitic stainless steel base metal

图 8 所示为不同磁感应强度下接头顶部的微观组织。在无外加纵向磁场时,接头顶部分主要由奥氏体柱状晶及枝晶间的 δ -铁素体组成,组织较为整齐;当 $B = 12$ mT 时,组织仍然由奥氏体柱状晶及 δ -铁素体组成,但其均匀性降低,奥氏体柱状晶出现了一定程度的破碎;当 $B = 22$ mT 时,接头顶部分几乎看不到奥氏体柱状晶,取而代之的是破碎的枝晶。进一步观察接头中部,发现与顶部组织变化相类似的情况,如图 9 所示。在无磁场时, δ -铁素体呈现出板条状,其长度大约为 $50 \mu\text{m}$;当施加 12 mT 的纵向磁场时,板条状 δ -铁素体的长度减小至 $17 \mu\text{m}$ 左右;当 B 进一步增加到 22 mT 时,尽管仍然存在少量的长度为 $10 \mu\text{m}$ 的板条状 δ -铁素体,但大部分 δ -铁素体呈现出骨架状。同时也可以看出,存在磁场时,接头的结晶更为均匀。

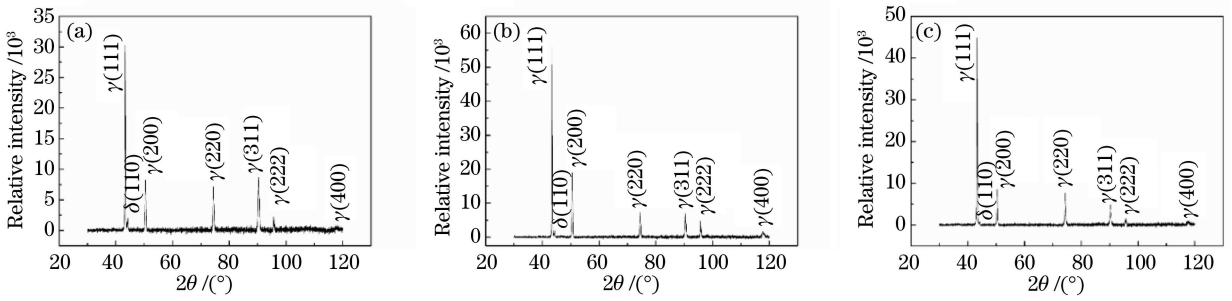


图 7 不同磁感应强度下接头的 XRD 图。(a) $B = 0$ mT; (b) $B = 12$ mT; (c) $B = 22$ mT

Fig. 7 XRD patterns of weld joint under different magnetic induction intensities.

(a) $B = 0$ mT; (b) $B = 12$ mT; (c) $B = 22$ mT

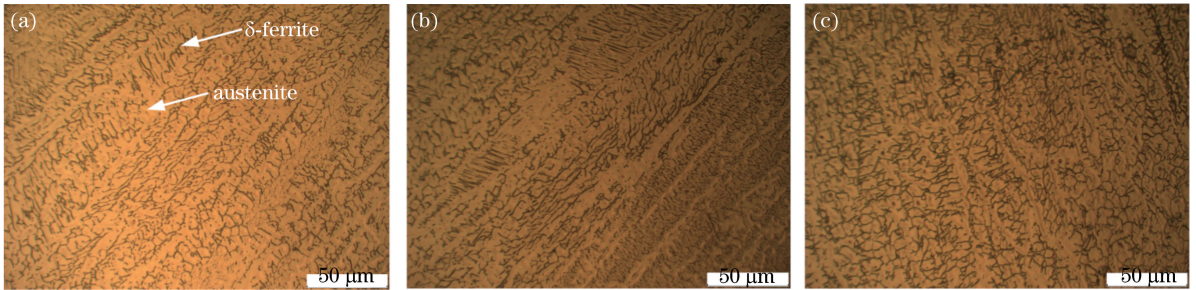


图 8 不同磁感应强度下接顶部微观组织。(a) $B = 0$ mT; (b) $B = 12$ mT; (c) $B = 22$ mT

Fig. 8 Microstructure of top area of weld joints under different magnetic induction intensities.

(a) $B = 0$ mT; (b) $B = 12$ mT; (c) $B = 22$ mT

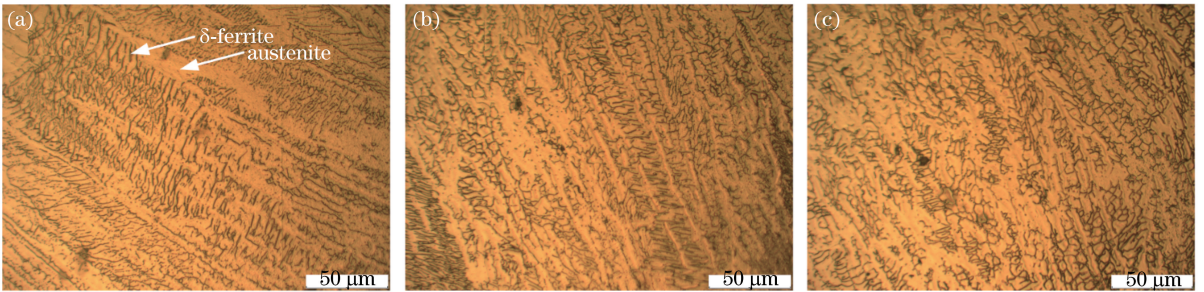


图 9 不同磁感应强度下接头中部微观组织。(a) $B = 0$ mT; (b) $B = 12$ mT; (c) $B = 22$ mT

Fig. 9 Microstructure of middle area of weld joints under different magnetic induction intensities.

(a) $B = 0$ mT; (b) $B = 12$ mT; (c) $B = 22$ mT

外加磁场导致的电弧高速旋转使熔池中液态金属也发生旋转,此外,通过熔池的电流也会受到安培力的作用,这引起了熔池内部的电磁搅拌。这两种作用共同导致熔池中温度梯度的降低,使过冷度加大,故熔池的结晶更为均匀。同时,沿熔合线向熔池中生长的柱状晶也会被磁场产生的旋转及搅拌作用打碎,晶粒尺寸减小。由于熔池的扩大,熔池内结晶速度会有所降低,导致 δ -Fe 转变为 γ -Fe,故接头中的 δ -Fe 含量降低。因此,外加纵向磁场可以改变熔池的结晶形态,细化晶粒,并改善结晶的均匀性。

图 10 所示为不同磁感应强度下接头热影响区(HAZ)的 SEM 照片,可以看到,外加磁场对 HAZ 形貌的影响较大。无外加磁场时,接头熔合线清晰,沿熔合线往母材方向有一些细小的白色析出;当存在外加磁场时,白色析出物变得长且粗大,长度达到 $100 \sim 150 \mu\text{m}$;随着磁感应强度的增加,析出物呈现增多、增大的趋势,且析出物并不沿母材奥氏体晶界析出,而是平行于母材轧制方向析出,在高倍率(2500 倍)SEM 下进行观察,发现这种白色析出物沿母材外延生长,如图 10(d)所示。在白色析出物上取点 A,在奥氏体母材上取点 B,对这两个点进行了 EDS 测试,结果如图 11 和表 4 所示。可以发现,白色析出物和奥氏体母材均主要由 Fe、Cr、Ni 及 Mo 四种元素组成,但四种元素的比例存在较大的区别。与奥氏体母材相比,点 A 中 Cr 和 Mo 元

素含量上升, Ni 元素含量下降。对于奥氏体不锈钢而言, Ni 元素为奥氏体稳定元素, 而 Cr 和 Mo 元素为铁素体稳定元素, 因此, 可以认为, 该白色析出物为在焊接热循环作用下生成的 δ -铁素体。这种在 HAZ 析出的 δ -铁素体可以抑制 HAZ 中晶粒的过分增长, 降低热裂纹敏感性^[23]。根据前文的分析, 在磁场的作用下, 熔池形状会发生极大变化, 这导致焊接过程中接头热循环的变化。磁场使熔池上部尺寸变大, 进而使接头的中部高温区域扩大, 高温时间延长, Cr、Ni、Mo 等元素扩散加剧。当温度超过转变温度时, 奥氏体向铁素体转变。生成的铁素体固溶了大量的 Cr、Mo 元素, 不会发生奥氏体相变, 进而导致室温下组织中仍有铁素体存在。

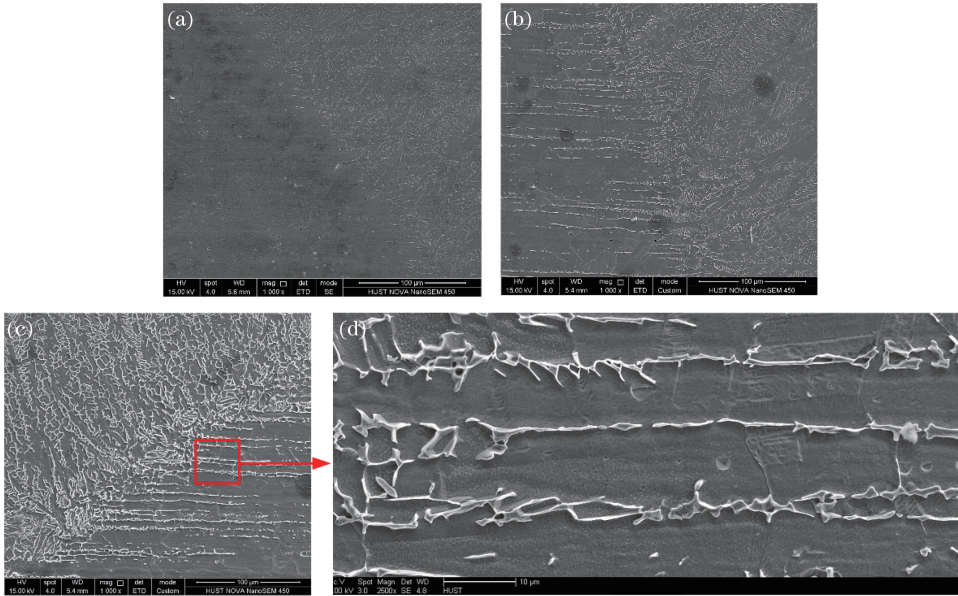


图 10 不同磁感应强度下接头 HAZ 的 SEM 照片。(a) $B=0$ mT; (b) $B=12$ mT; (c) $B=22$ mT; (d) 图(c)的局部放大照片

Fig. 10 SEM images of HAZ of weld joints under different magnetic induction intensities. (a) $B=0$ mT; (b) $B=12$ mT; (c) $B=22$ mT; (d) partial enlarged view of Fig. 10(c)

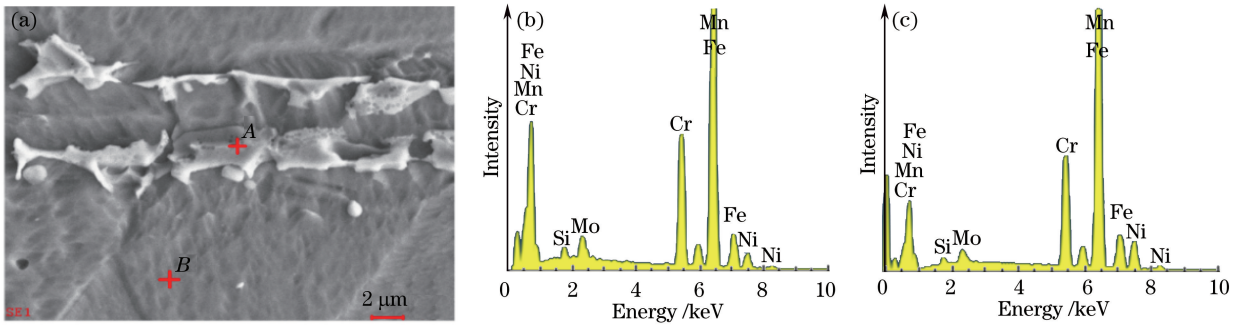


图 11 EDS 分析结果。(a) 测试区; (b) 测试点 A; (c) 测试点 B

Fig. 11 EDS analysis results. (a) Test area; (b) test point A; (c) test point B

表 4 EDS 分析结果

Table 4 EDS analysis results

Element	Point A		Point B	
	Mass fraction /%	Atomic fraction /%	Mass fraction /%	Atomic fraction /%
Si	0.98	1.94	0.65	1.29
Cr	22.44	24.02	18.66	19.95
Mn	1.22	1.24	1.76	1.78
Fe	64.47	64.24	64.87	64.57
Ni	6.08	5.77	11.58	10.97
Mo	4.80	2.79	2.47	1.43

3.3 接头显微硬度分析

图 12 所示为不同磁感应强度下接头不同位置的显微硬度。图 12(a)所示为接头顶部显微硬度分布,可以看出,随着磁感应强度的增大,接头顶部硬度分布趋于均匀;图 12(b)表明在接头中部,硬度有相似的变化,但其均匀程度较顶部的弱。当深入接头底部时,不同磁感应强度下的硬度分布几乎相同,如图 12(c)所示。为了进一步阐明磁场对硬度分布的影响,分别计算了三个位置的硬度标准差,结果如图 13 所示,可以明显看出,存在外加磁场时,接头顶部和中部的硬度标准差急剧下降,底部的却几乎不变。这表明,纵向磁场可以使接头组织变得更均匀,结晶形态更稳定,且磁感应强度越大,稳定效果越好,但从接头顶部至底部,稳定程度递减。

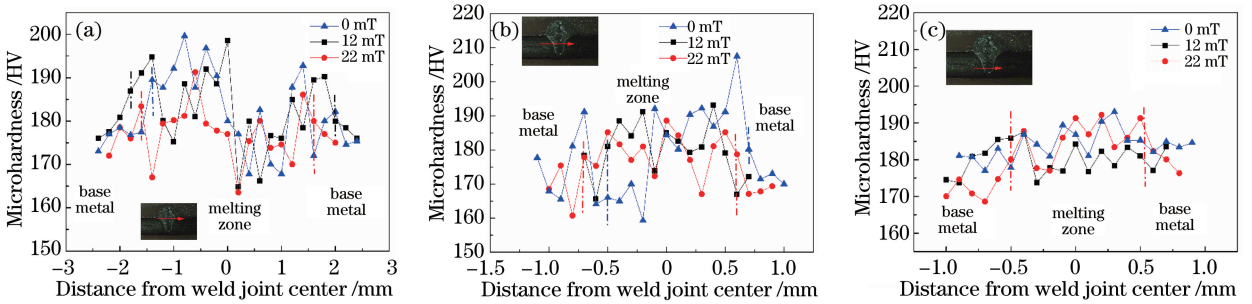


图 12 不同磁感应强度下接头显微硬度分布,插图为对应测试区域。(a)顶部;(b)中部;(c)底部

Fig. 12 Microhardness distributions of weld joints under different magnetic induction intensities and illustrations show corresponding test areas. (a) Top; (b) middle; (c) bottom

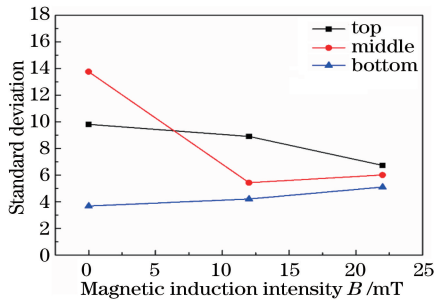


图 13 显微硬度分布的标准差

Fig. 13 Standard deviation of microhardness distribution

显微硬度与接头组织密切相关,均匀的组织必然具有均匀的硬度分布。外加磁场可以显著改善接头组织的均匀性,并且细化组织;同时,外加磁场使熔池快速旋转,熔池中的温度梯度减小,柱状晶的生长得到抑制,组织的不均匀结晶也得到改善。然而,电磁搅拌作用在向熔池内部传递时会减弱,甚至消失,导致熔池底部的结晶形式与无磁场时的几乎相同。

4 结 论

外加纵向磁场辅助激光-MIG 电弧复合焊接时,磁感应强度对接头的成形及微观组织有显著影响。随着磁感应强度的增加,接头熔宽增加,余高减小,熔深几乎不变,这使接头成形系数及余高系数增大,接头变得深而宽。在外加磁场作用下,接头 HAZ 有白色长条形 δ -铁素体析出,这种析出能抑制 HAZ 晶粒的生长,降低热裂纹敏感性。磁场能在一定程度上细化晶粒,改善接头组织均匀性,并使接头的显微硬度分布变得稳定;当磁感应强度增加时,这种效应得到增强,但由接头顶部至底部,电磁搅拌作用递减,故这种效应减弱。

参 考 文 献

[1] Blinkov V A, Sheninkin M Z, Abralv M A. Grains of solidifying metal refined under vibrations[J]. Autom Weld, 1975, 28(11): 11-12.
 [2] 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.
- [3] Malinowski-Brodnicka M, den Ouden G, Vink W J P. Effect of electromagnetic stirring on GTA welds in austenitic stainless steel[J]. Welding Journal, 1990, 69: 52s-59s.
- [4] Mousavi M G, Hermans M J M, Richardson I M, *et al.* Grain refinement due to grain detachment in electromagnetically stirred AA7020 welds[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2003, 8(4): 309-312.
- [5] Liu Y B, Sun Q J, Liu J P, *et al.* Effect of axial external magnetic field on cold metal transfer welds of aluminum alloy and stainless steel[J]. Materials Letters, 2015, 152: 29-31.
- [6] Sundaresan S, Ram G D J. Use of magnetic arc oscillation for grain refinement of gas tungsten arc welds in α - β titanium alloys[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 1999, 4(3): 151-160.
- [7] Yue Jianfeng, Li Liangyu, Liu Wenji, *et al.* Downward welding pool shape control based on exterior high frequency alternative magnetic field[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(8): 65-70.
岳建锋, 李亮玉, 刘文吉, 等. 基于外加高频交变磁场下向 MAG 焊熔池成形控制[J]. 机械工程学报, 2013, 49(8): 65-70.
- [8] Yao Q, Luo Z, Li Y, *et al.* Effect of electromagnetic stirring on the microstructures and mechanical properties of magnesium alloy resistance spot weld[J]. Materials and Design, 2014, 63: 200-207.
- [9] Zhou J, Tsai H L. Application of electromagnetic force in laser welding [C]. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2007, 8: 1025-1030.
- [10] Yang Decai, Liu Jinhe. Effect of outer magnetic field on laser beam welding penetration depth[J]. Laser Technology, 2001, 25(5): 347-350.
杨德才, 刘金和. 外加磁场对激光焊接熔深的影响[J]. 激光技术, 2001, 25(5): 347-350.
- [11] Chen Wuzhu, Peng Yun, Wang Cheng, *et al.* Diffusion of plasma and effect of electric and magnetic fields in laser welding[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(s1): 529-531.
陈武柱, 彭云, 王成, 等. 激光焊接等离子体的扩散行为及电磁场对其作用的研究[J]. 中国激光, 2002, 29(s1): 529-531.
- [12] Vollertsen F, Thomy C. Magnetic stirring during laser welding of aluminum[J]. Journal of Laser Applications, 2006, 18(1): 28-34.
- [13] Gatzen M, Tang Z, Vollertsen F, *et al.* X-ray investigation of melt flow behavior under magnetic stirring regime in laser beam welding of aluminum[J]. Journal of Laser Applications, 2011, 23(3): 032002.
- [14] Yu Shengfu, Zhang Youshou, Lei Yi, *et al.* Mechanisms of rotational magnetic field stirring of laser welded non-magnetic alloy for laser welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(3): 109-112.
余圣甫, 张友寿, 雷毅, 等. 非磁性合金激光焊旋转磁场搅拌机理[J]. 焊接学报, 2006, 27(3): 109-112.
- [15] Bachmann M, Avilov V, Gumenyuk A, *et al.* Experimental and numerical investigation of an electromagnetic weld pool support system for high power laser beam welding of austenitic stainless steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(3): 578-591.
- [16] Wang Wei, Liu Qi, Yang Guang, *et al.* Numerical simulation of electromagnetic flow, temperature field and flow field in laser molten pool with electromagnetic stirring[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0202007.
王维, 刘奇, 杨光, 等. 电磁搅拌作用下激光熔池电磁场、温度场和流场的数值模拟[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0202007.
- [17] Song Shiyong, Wang Liang, Hu Yong, *et al.* Graded coating produced by laser melt injection under steady magnetic field[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(5): 0503005.
宋诗英, 王梁, 胡勇, 等. 稳态磁场辅助激光熔注制备梯度涂层[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0503005.
- [18] Wang Liang, Hu Yong, Song Shiyong, *et al.* Suppression effect of a steady magnetic field on surface undulation during laser remelting[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(11): 1103005.
王梁, 胡勇, 宋诗英, 等. 稳态磁场辅助对激光熔凝层表面波纹的抑制作用研究[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1103005.
- [19] Kou S. Welding metallurgy[M]. New Jersey: John Wiley and Sons, 2002: 294-295.
- [20] Zhang X, Zhao Z Y, Wang C M, *et al.* The effect of external longitudinal magnetic field on laser-MIG hybrid welding [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(5): 1735-1743.
- [21] Zhao Bo. Research on arc behaviors of narrow-gap MAG[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009: 89-94.
赵博. 窄间隙 MAG 焊电弧行为研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 89-94.
- [22] Capello E, Chiarello P, Previtali B, *et al.* Laser welding and surface treatment of a 22Cr-5Ni-3Mo duplex stainless steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 351(1/2): 334-343.
- [23] John C L, Damian J K. Welding metallurgy and weldability of stainless steels[M]. New Jersey: John Wiley and Sons, 2005.