

激光-MIG 复合焊接中厚度不锈钢组织及性能研究

陈志伟¹, 马程远¹, 陈波^{1,2*}, 檀财旺^{1,2}, 宋晓国^{1,2}

¹ 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;

² 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

摘要 采用激光焊与激光-MIG 复合焊两种打底焊方式和激光-MIG 复合焊与 MIG(熔化极惰性气体)保护焊两种填充焊方式进行两两组合,完成了 15 mm 厚 316L 奥氏体不锈钢的焊接。对各试验组焊接接头的显微组织和力学性能进行了研究,结果表明,采用全激光-MIG 复合焊得到的焊接接头成形最优。激光-MIG 复合焊焊层中心部位存在胞状晶组织,而 MIG 焊焊层几乎全为柱状晶结构。复合焊填充层的拉伸强度高于 MIG 焊填充层,而激光打底层与复合打底层强度相当,所有断裂均为韧性断裂。两种打底焊层焊缝中心显微硬度均高于母材,复合填充焊层焊缝中心显微硬度略高于母材,MIG 焊填充焊层则低于母材。

关键词 激光技术; 激光电弧复合焊; 中厚板不锈钢; 显微组织; 力学性能

中图分类号 TG456.7 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.231405

Microstructure and Properties of Medium-Thick Stainless Steel by Laser-MIG Hybrid Welding

Chen Zhiwei¹, Ma Chengyuan¹, Chen Bo^{1,2*}, Tan Caiwang^{1,2}, Song Xiaoguo^{1,2}

¹ Shandong Key Laboratory of Special Welding Technology, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai, Shandong 264209, China;

² State Key Laboratory of Advanced Welding and Connection, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract The methods of underlying welding including laser welding and laser-MIG hybrid welding in combination with methods of filling welding including laser-MIG hybrid welding and MIG welding (melt inert-gas welding), are used to complete the welding of 15-mm-thick 316L austenitic stainless steel. The microstructure and mechanical properties of the weld joints in each group were studied. The results show that the weld joint obtained by all laser-MIG hybrid welding has the best formation. There is cellular structure in the center of laser-MIG hybrid welding layer, while the MIG welding layer is almost all columnar crystal structure. The tensile strength of the filling layer welded by hybrid welding is higher than that welded by MIG, while the strength of the underlying layer welded by laser is comparable to that welded by hybrid welding, and all fractures are ductile fractures. The micro-hardness of the weld center of the two different underlying layers is higher than that of the base metal, the micro-hardness of the weld center of the hybrid welding filling layer is slightly higher than that of the base metal, and the micro-hardness of MIG filling layer is lower than that of the base metal.

Key words laser technique; laser-arc hybrid welding; medium-thick stainless steel; microstructure; mechanical properties

OCIS codes 140.3390; 140.3510; 350.3390

收稿日期: 2020-02-28; 修回日期: 2020-04-05; 录用日期: 2020-04-15

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1107900)、山东省重点研发计划(2018GGX103026)、山东省自然科学基金(ZR2017MEE042)

* E-mail: chenbo@hitwh.edu.cn

1 引言

316L 不锈钢是一种奥氏体不锈钢,拥有较高的强度、良好的塑性以及优异的耐腐蚀性能,是核电及海洋等领域厚壁构件的关键材料^[1-3]。目前,厚板焊接实际生产中主要还是采用传统的多层多道电弧焊接工艺,这种方法不仅效率低,而且焊接过程不稳定,焊后材料变形大,热影响区较宽,严重制约了接头的力学性能。Tabatabaeipour 等^[4]采用 TIG 焊(钨极惰性气体保护焊)焊接了 25 mm、开有 60°大坡口的 316L 不锈钢,一共填充了 21 道,效率较低。Zhen 等^[5]分别采用激光-MAG 复合焊和 MAG 焊(熔化极惰性气体保护焊)对 15 mm S355J2W+N 钢进行焊接,在保证焊缝成型的前提下,MAG 焊的焊缝面积和热影响区宽度都大于复合焊焊缝,从而降低了焊缝的力学性能。激光焊虽能穿透较厚板材进行焊接,但其对焊前工件装配精度要求高,且随着工业设备日趋大型化,板材越来越厚,激光焊对激光器的功率要求也越来越高。信纪军等^[6]采用 20 kW 光纤激光器对 20 mm 厚的 316LN 不锈钢一次焊接成形,得到了无缺陷的焊缝。这种高功率激光器往往价格昂贵,限制了激光焊在厚板焊接领域的广泛应用。激光-电弧复合焊接技术结合了激光焊能量集中、熔深大和电弧焊桥接能力强的优点,能解决当前厚板焊接存在的许多问题^[7-9]。

国内外学者对厚板激光电弧复合焊接进行了相关研究,Zhang 等^[10]采用激光-MIG 复合焊对 40 mm 316L 不锈钢进行了窄间隙多层单道焊接,焊缝中存在 F-A(铁素体-奥氏体)和 A-F(奥氏体-铁素体)两种

表 1 316L 奥氏体不锈钢和 ER316L 不锈钢焊丝化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition (mass fraction) of 316L austenitic stainless steel and ER316L stainless steel filler wire unit: %

Material	C	Cr	Ni	Mo	Mn	P	S	Si
316L	0.02	16.82	9.84	1.78	1.52	0.03	0.03	0.50
ER316L	0.03	18.91	12.03	2.01	2.02	0.02	0.01	0.56

焊接过程的示意图见图 1,激光束与工件表面的夹角为 85°,MIG 焊枪与工件表面的夹角为 60°,激光离焦量为 0,光丝间距为 2 mm,焊丝干伸长为 12 mm。不锈钢板开 30°V 型坡口,保留 5 mm 钝边,如图 2 所示。本文采用了两种不同的打底焊和两种不同填充焊两两组合的方式焊接厚板,具体焊接工艺参数见表 2。

焊接前对母材表面进行机械打磨抛光,并使用丙酮去除坡口内侧及待焊表面的油污,完成一道焊接后,待温度降至 100 °C 以下时,进行下一道焊接。

组织转变模式,焊缝拉伸强度与母材的拉伸强度相当,硬度从上到下逐渐增大。Zhan 等^[11]采用激光-MIG 复合焊实现了 19.05 mm 厚开 V 型坡口的 Invar 合金对接焊,发现焊接过程中气孔易出现在熔合线和重熔层处,这是由焊接过程中激光匙孔的不稳定导致的匙孔坍塌造成的。Zhang 等^[12]对开矩形坡口的 40 mm 低碳钢进行了激光电弧复合焊接,结果发现打底焊缝由于针状铁素体含量较低导致其抗拉强度较低,不过其抗拉强度依旧高于母材强度。

目前,国内外对奥氏体不锈钢激光电弧复合焊的研究主要集中于厚度为 10 mm 以下的单道对接焊,对于中厚板焊接,多采用多层多道电弧焊完成,因此对多层单道复合焊接接头组织及性能研究较少,且激光电弧复合焊接的工艺参数较多,这给实际焊接过程的稳定性增加了难度。为了进一步优化不锈钢厚板多层单道复合焊接过程,本文采用了激光-MIG 复合焊和单激光焊两种打底焊接方法与激光-MIG 复合焊和 MIG 焊两种填充焊接方法进行交叉搭配得到 4 种组合焊接方法,对 15 mm 厚的 316L 不锈钢进行焊接,并研究了各组合焊接焊缝的组织特征及其力学性能。

2 试验材料和方法

选取尺寸为 150 mm × 75 mm × 15 mm 的 316L 奥氏体不锈钢和直径为 1.2 mm 的 ER316L 焊丝作为试验材料,两者的化学成分见表 1。试验平台由美国 IPG Photonics 公司的 YLS-6000 光纤激光器。美国 Lincoln 焊机和德国 KUKA 公司的 KR60HA 六轴机械手组成。

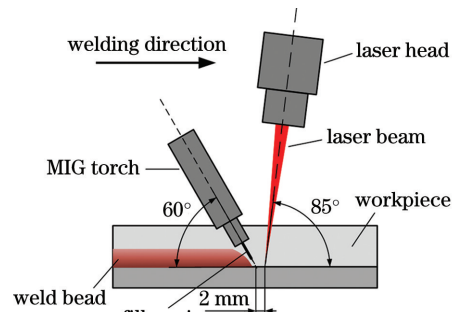


图 1 焊接过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the welding process

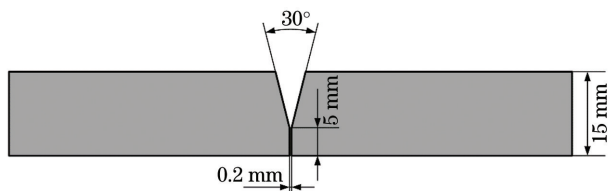


图2 坡口尺寸示意图

Fig. 2 Schematic diagram of bevel size

焊接完成后在焊缝处截取尺寸为 $100\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 的块状件, 研磨抛光后采用浓盐酸

(HCl)和浓硝酸(HNO_3)按体积比为 3 : 1 组成的混合物(俗称“王水”)进行化学腐蚀, 拉伸试样的截取位置以及试样的尺寸如图 3 所示。采用日本 OLMPUS DSX510 光学显微镜对腐蚀后的试样进行微观组织观察, 拉伸试验的拉伸机为美国 Instron 300 kN 型, 采用德国 Zeiss MERLIN Compact 场发射扫描电子显微镜对断口进行拍摄, 利用 HMAZD-1000 维氏硬度计进行试样的硬度检测。

表2 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters

Sample	Position	Laser power /W	Current /A	Welding speed /($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)
A1	Root pass	3500	150	0.8
	Filler or cover pass	1500	250	0.8
A2	Root pass	4000	0	0.8
	Filler or cover pass	1500	250	0.8
A3	Root pass	3500	150	0.8
	Filler or cover pass	0	280	0.6
A4	Root pass	4000	0	0.8
	Filler or cover pass	0	280	0.6

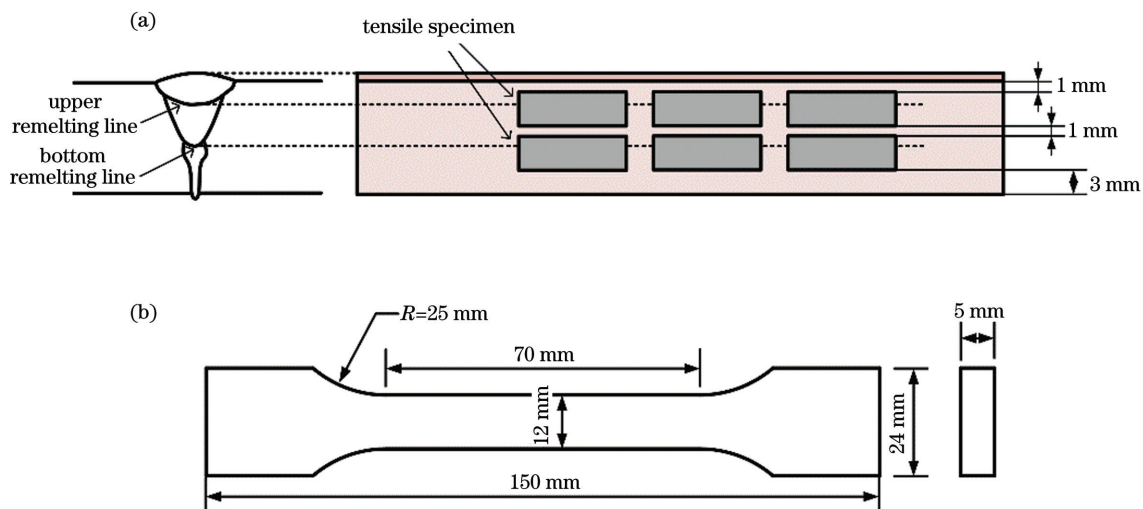


图3 拉伸试样示意图。(a)拉伸试样选取位置;(b)拉伸试样尺寸

Fig. 3 Schematic of the tensile specimen. (a) Selection location of tensile sample; (b) size of tensile sample

3 试验结果及分析

3.1 焊缝截面形貌

四种不同组合焊接的焊缝宏观形貌如图 4 所示, 四组试样均由打底焊、填充焊和盖面焊三道完成。图 4(a)是采用激光-MIG 复合焊打底、填充和盖面后得到的焊缝, 无明显缺陷。保持填充和盖面

焊的参数不变, 打底焊改为激光自熔焊, 如图 4(b)所示, 焊缝表面微微塌陷, 这是由于此时打底层高度较复合焊时低, 相同参数下进行填充和盖面焊时坡口中金属填充量稍显不足造成的。保证激光-MIG 复合打底焊的参数不变, 同时分别控制填充和盖面焊接的总热量输入不变, 采用 MIG 焊进行填充和盖面焊, 焊缝截面形貌如图 4(c)所示, 光镜下可看出

在焊道层间存在一些细小的气孔。图 4(d)为激光焊打底、MIG 焊填充和盖面后得到的焊缝,与采用复合焊填充盖面得到的焊缝相比,其填充焊层与打底焊层间出现了层间未熔合缺陷,这主要是因为激光焊得到的打底层高度低,单一的 MIG 电弧在进入

V 型坡口内部与侧壁接触后能量发散,电弧根部能量不足从而导致层间熔合不良^[13]。加入激光后,激光对电弧的压缩作用使电弧根部收缩,减小了其侧壁接触的面积,能量更集中,避免了侧壁不熔合的缺陷^[14]。

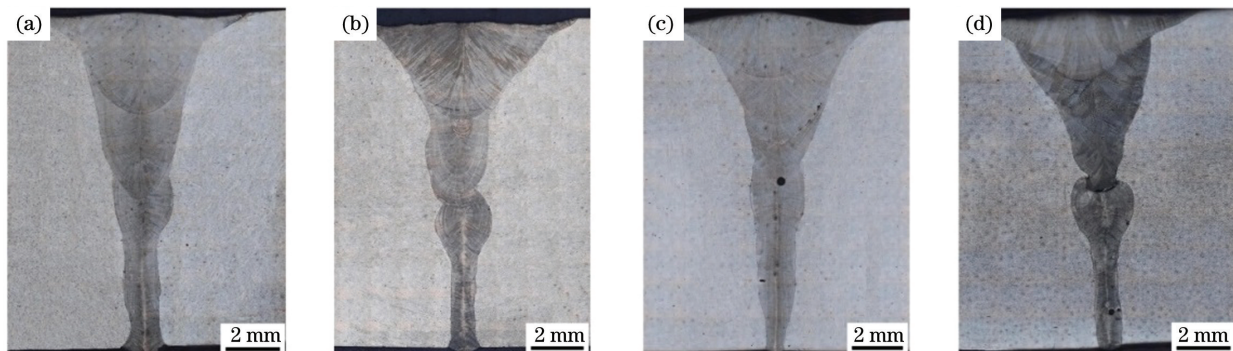


图 4 不同组合焊接焊缝截面形貌。(a) A1 试样;(b) A2 试样;(c) A3 试样;(d) A4 试样

Fig. 4 Cross-section morphology of welds with different combinations. (a) Sample A1; (b) sample A2; (c) sample A3; (d) sample A4

3.2 焊接接头显微组织

本文中所使用的是冷轧的 316L 奥氏体不锈钢,其微观组织由等轴的奥氏体晶粒和沿轧制方向排列分布的残留高温铁素体组成,如图 5 所示。残留的铁素体是材料在凝固和热-机械加工过程中铁素体生成元素发生偏聚产生的,含量很低,并不影响材料性能^[15]。

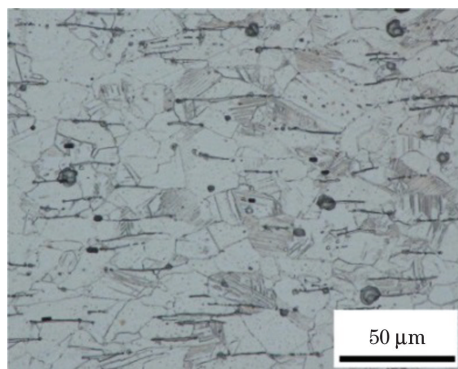


图 5 316L 奥氏体不锈钢微观组织

Fig. 5 Microstructure of 316L austenitic stainless steel

奥氏体不锈钢的焊缝组织类型与其凝固模式紧密相关,本文所用 316L 不锈钢的铬镍当量比 1.70,所用 ER316L 焊丝的铬镍当量比 1.56,查阅奥氏体不锈钢的伪二元共晶相图后,可知焊接过程焊缝组织凝固模式为 FA 模式,即先生成铁素体,之后随温度降低而生成奥氏体的过程^[16]。

图 6(a)和图 6(d)是在保证焊接总热量输入一定的情况下,分别采用激光-MIG 复合焊和 MIG 焊进行填充后得到的焊缝中部热影响区的显微组

织,这两种填充焊热影响区的宽度相当,大约在 100~200 μm 。两者熔合线母材侧均出现了一定宽度的锯齿状铁素体,这是由于母材中残留的铁素体经过加热后长大粗化得到的,且 MIG 焊得到的宽度大于复合焊后的宽度,这是因为 MIG 焊焊缝冷却速度较慢,从而导致原先母材中细小的铁素体得到了更多的生长。图 6(b)和图 6(e)是复合焊和 MIG 焊进行填充后得到的焊缝中部显微组织,可以看出焊缝中均存在大量的柱状组织,复合焊填充的焊缝中心存在约 500~600 μm 宽的胞状组织,而 MIG 焊填充得到的焊缝中心有较窄的胞状结构存在甚至无胞状结构存在。这是因为激光的加入使得复合焊焊缝中心形成较宽的成分过冷区,焊缝中心液态金属自发形核长大,得到一定宽度的胞状组织,阻碍了两侧柱状晶向焊缝中心生长,而 MIG 焊焊缝冷却速度慢,焊缝中的柱状晶有足够的时间沿垂直于熔合线的方向生长到焊缝中心,形成完全的柱状晶焊缝。图 6(c)和图 6(f)分别是 A 区域和 B 区域的微观组织,均由骨架状铁素体和奥氏体组成,这是 FA 凝固模式的典型组织。

图 7(a)和图 7(d)分别是激光-MIG 复合打底焊和单激光打底焊的焊缝热影响区组织,两种打底焊方法都未得到明显的热影响区,但是复合焊焊缝熔合线处依然存在较窄的锯齿状铁素体带,这同样是由母材中残留的铁素体受热生长而成,单激光焊的焊缝熔合线处十分光滑,无粗大的高温铁素体聚集,

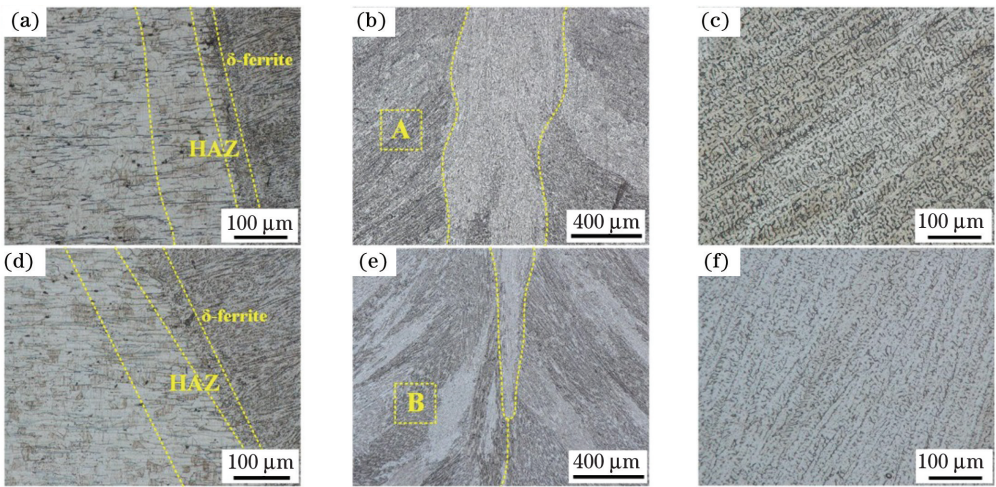


图 6 填充焊层组织。(a)(d) A1 和 A3 热影响区;(b)(e) A1 和 A3 焊缝中心;(c)(f) A 区和 B 区

Fig. 6 Filling weld structure. (a) (d) HAZ of A1 and A3; (b) (e) weld center of A1 and A3; (c) (f) zones of A and B

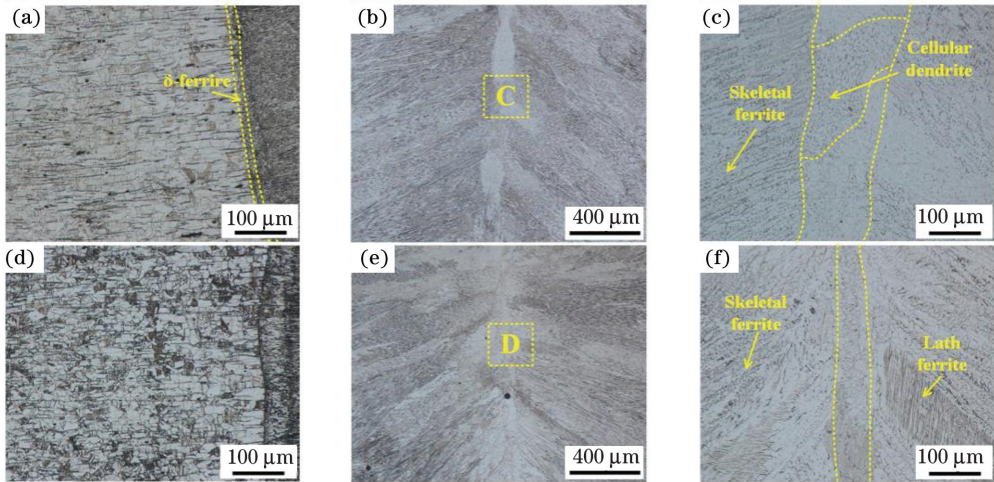


图 7 打底层组织。(a)(d)A1 和 A2 热影响区;(b)(e)A1 和 A2 焊缝中心;(c)(d)C 区和 D 区

Fig. 7 Underlying weld structure. (a) (d) HAZ of A1 and A2; (b) (e) weld center of A1 and A2; (c) (f) zones of C and D

这与激光焊焊缝极快的冷却速度有关。图 7(b)和图 7(e)分别是复合焊和单激光焊的焊缝中心区域组织,两者焊缝均存为大量的柱状结构,比较可知,单激光焊缝中的柱状结构尺寸小于复合焊中的,这是由于复合焊的总热量输入大于单激光焊的热量输入,从而焊缝中的柱状组织较单激光的有一定的生长。两种打底焊焊缝中部均存在胞状组织,如图 7(c)和图 7(f)所示,且复合焊的胞状区宽度更宽,其原因与填充焊类似。复合焊中的组织为骨架状铁素体和奥氏体,而单激光焊中铁素体有骨架状和板条状两种形态,这种现象是 Cr 元素和 Ni 元素的偏聚导致铁素体向奥氏体转变时扩散受限产生的^[15]。

3.3 焊接接头力学性能

每组试验分别取上部 (UL) 和下部 (BL) 两组

拉伸试样,所有拉伸试样均断裂于焊缝位置,如图 8 所示。两部位的应力-应变曲线如图 9 所示,结合

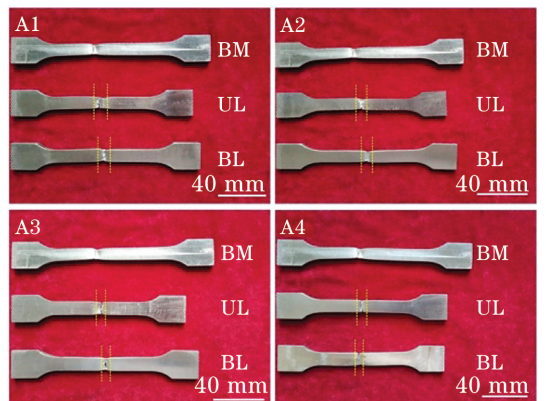


图 8 各试验组拉伸试样断裂位置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of fracture locations of tensile test specimens

表 3 可知,上部强度最高的为 A1 组,采用激光-MIG 复合填充焊,强度达到 637.01 MPa,下部强度最高的为 A2 组,采用激光焊打底,强度达到 661.98 MPa,两者强度分别达到母材(BM)强度的 93.8%和 97.5%。综合分析可知,激光-MIG 复合填充的焊缝强度明显高于 MIG 焊填充的焊缝强度,这是因为复合焊焊缝中部宽区域的胞状晶有效地提

高了焊缝抗拉强度,而激光焊打底与激光-MIG 复合焊打底的强度相当,这是因为两种焊缝中部均形成胞状晶区,提高了抗拉强度。A4 试样由于填充层与打底层间存在未熔合缺陷,因此其强度较 A2 组打底焊大幅降低。

对各部位的拉伸断口进行扫描电镜观察,图 10(a)和图 10(c)分别为激光-MIG 复合填充焊与

表 3 各试样不同位置抗拉强度与拉伸率

Table 3 Tensile strength and elongation of different samples

Parameter	Location	A1	A2	A3	A4
UL	Tensile strength /MPa	637.01	619.27	554.52	551.57
	Elongation /%	25.13	22.71	13.29	11.35
BL	Tensile strength /MPa	648.58	661.98	625.63	406.48
	Elongation /%	29.07	34.98	23.84	11.57
BM	Tensile strength /MPa		678.92		
	Elongation /%		47.50		

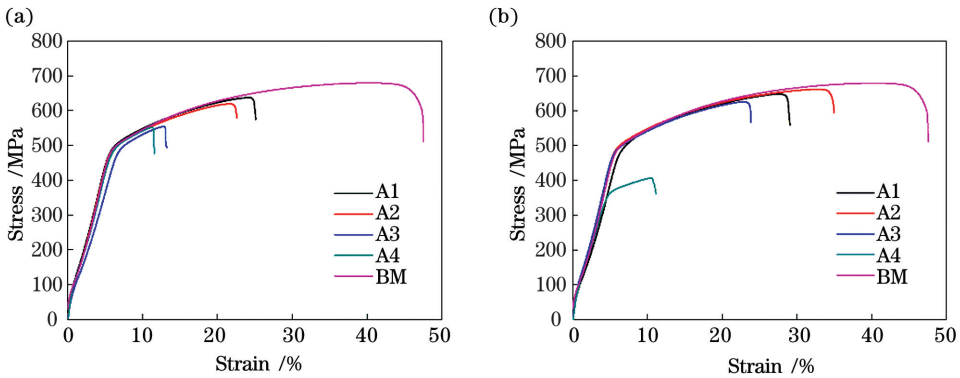


图 9 各试样接头不同位置的应力-应变曲线。(a)填充焊;(b)打底焊

Fig. 9 Stress-strain curves at different positions of each sample joint. (a) Filling weld; (b) underlying weld

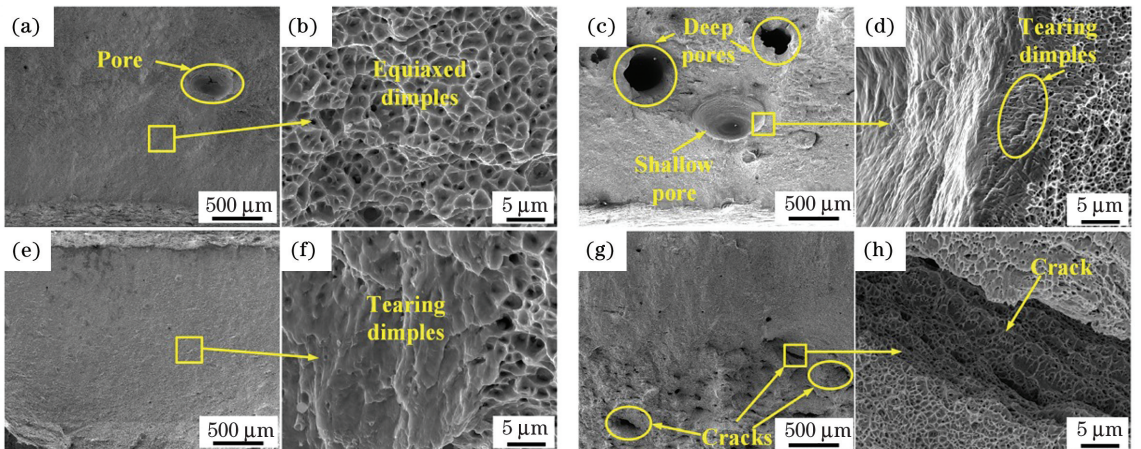


图 10 拉伸试样断口形貌图。(a)(b)A1 上层断口及其微区;(c)(d)A3 上层断口及其微区;
(e)(f)A1 下层断口及其微区;(g)(h)A2 下层断口及其微区

Fig. 10 Fracture morphology of tensile samples. (a) (b) Upper layer fracture of A1 and its micro area; (c) (d) upper layer fracture of A3 and its micro area; (e) (f) lower layer fracture of A1 and its micro area; (g) (h) lower layer fracture of A2 and its micro area

MIG 填充焊的拉伸断口电镜的宏观形貌,可见复合焊断口十分平整,几乎没有气孔缺陷,其微区显示为等轴韧窝,如图 10(b)所示,为典型的韧性断裂。而 MIG 焊断口中存在着许多大小、深浅不一的气孔,这些气孔可能是由焊接过程中电弧的波动将外部气体卷入熔池产生的,它们是降低 MIG 焊填充层强度的主要原因。对气孔周边进行观察,发现其周边存在较多撕裂韧窝,这是因为气孔的存在使得此处受剪切力作用,形成撕裂韧窝。图 10(e)和图 10(g)分别是复合焊打底和激光焊打底的拉伸断口电镜的宏观形貌,复合焊打底的断口表面平滑,微区结构为等轴韧窝与撕裂韧窝共存,如图 10(f)所示,可知其在塑性变形过程中所受应力方向并非完全一致。激光焊打底的断口上部较平滑,但下部却出现许多细小的裂缝,这可能与此处所受应力状态相关,对裂缝内部进行观察,发现其中亦存在大量韧窝,为韧性断裂。

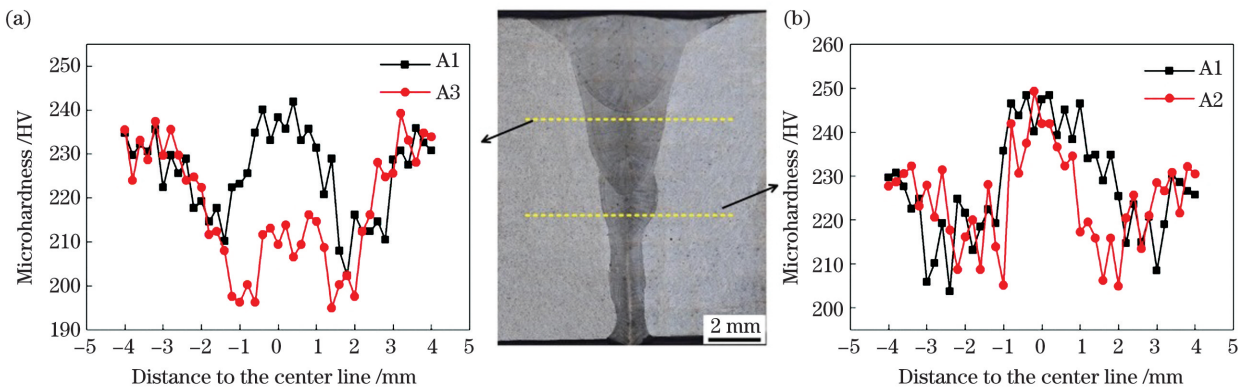


图 11 焊接接头各部位显微硬度。(a)填充层;(b)打底层

Fig. 11 Microhardness of different parts of the weld joint. (a) Filling layer; (b) underlying layer

4 结 论

采用激光焊与激光-MIG 复合焊两种打底焊方式和激光-MIG 复合焊与 MIG 焊两种填充焊方式进行两两组合,完成了 15 mm 厚的 316L 奥氏体不锈钢开 V 型坡口的焊接,并对不同方法下组合焊接的焊缝显微组织和力学性能进行了研究,得到了以下结论。

1) 除单激光打底、MIG 焊填充盖面焊的组合出现了层间未熔合之外,其余组合焊均能实现 15 mm 厚、开 30°坡口且留 5 mm 钝边的 316L 奥氏体不锈钢的焊接,其中成形最好的是采用全激光-MIG 复合焊的试验组。

2) 激光-MIG 复合填充焊层与 MIG 填充焊层相比,多了中部的胞状晶区,激光-MIG 打底层和激光打底层中部都存在胞状晶区,所有焊层的凝

对各部位接头进行显微硬度测试,复合填充焊层焊缝中心显微硬度值略高于母材硬度值,远高于 MIG 焊填充层焊缝中心硬度,如图 11(a)所示,这主要归功于复合焊中心部位较致密的胞状组织,复合填充焊中由于激光的加入加快了焊后焊缝的冷却速度,从而有助于焊缝中心组织的细化。两种不同方法下的填充焊层热影响区硬度均低于母材硬度值,这是因为循环热作用导致部分高温铁素体析出,较软的铁素体导致硬度降低^[17],而 MIG 焊填充层的热影响区硬度值降幅更大,这与 MIG 焊焊缝冷却速度慢,循环热作用时间更长从而析出更多的铁素体有关。激光焊打底层和激光-MIG 复合打底层焊缝中心显微硬度均大于母材,如图 11(b)所示,这是由于复合打底层中心部位胞状晶区更宽,胞状晶区提高了焊缝中心硬度,故其中心高硬度区域也更宽些。

固模式均为 FA 模式,焊后组织均为 F+A 的混合组织。

3) A1 组试验的激光-MIG 复合填充层是强度最高的填充焊层,A2 组试验的激光打底层是强度最高的打底层,各层拉伸试样断裂类型均为韧性断裂。

4) 激光-MIG 复合打底层与激光打底层的显微硬度相当,激光-MIG 复合填充层的显微硬度值远高于 MIG 填充层,这与复合填充层中部的胞状组织有关。

参 考 文 献

- [1] Buddu R K, Chauhan N, Raole P. Mechanical properties and microstructural investigations of TIG welded 40 mm and 60 mm thick SS 316L samples for fusion reactor vacuum vessel applications[J]. Fusion

- Engineering and Design, 2014, 89(12): 3149-3158.
- [2] Fang C, Song Y, Wei J, et al. Microstructural characteristics of the laser welded joint of ITER correction coil sub case[J]. Fusion Engineering and Design, 2015, 98: 1960-1963.
- [3] Xin J J, Song Y T, Fang C, et al. Evaluation of inter-granular corrosion susceptibility in 316LN austenitic stainless steel weldments [J]. Fusion Engineering and Design, 2018, 133: 70-76.
- [4] Tabatabaeipour S M, Honarvar F. A comparative evaluation of ultrasonic testing of AISI 316L welds made by shielded metal arc welding and gas tungsten arc welding processes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(8): 1043-1050.
- [5] Zhen S, Duan Z Z, Sun D Q, et al. Study on microstructures and mechanical properties of laser-arc hybrid welded S355J2W + N steel [J]. Optics & Laser Technology, 2014, 59: 11-18.
- [6] Xin J J, Fang C, Song Y T, et al. Autogenous laser welding of 20-mm-thick 316LN stainless steel plate by ultra high power fiber lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0502007.
信纪军, 方超, 宋云涛, 等. 20 mm 厚 316LN 不锈钢板的超高功率光纤激光自熔焊[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0502007.
- [7] Liu T, Yan F, Liu S, et al. Microstructure and mechanical properties of laser-arc hybrid welding joint of GH909 alloy [J]. Optics & Laser Technology, 2016, 80: 56-66.
- [8] Ribic B, Palmer T A, DebRoy T. Problems and issues in laser-arc hybrid welding [J]. International Materials Reviews, 2009, 54(4): 223-244.
- [9] Sathiya P, Mishra M K, Shanmugarajan B. Effect of shielding gases on microstructure and mechanical properties of super austenitic stainless steel by hybrid welding [J]. Materials & Design, 2012, 33: 203-212.
- [10] Zhang X, Mi G, Chen L, et al. Microstructure and performance of hybrid laser-arc welded 40 mm thick 316 L steel plates[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 259: 312-319.
- [11] Zhan X, Zhang D, Wei Y, et al. Research on the microstructure and properties of laser-MIG hybrid welded joint of Invar alloy [J]. Optics & Laser Technology, 2017, 97: 124-136.
- [12] Zhang C, Li G, Gao M, et al. Microstructure and mechanical properties of narrow gap laser-arc hybrid welded 40 mm thick mild steel[J]. Materials, 2017, 10(2): 106.
- [13] Meng Y F, Li G, Gao M, et al. Effects of groove parameters on space constraint of narrow gap laser-arc hybrid welding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 33: 144-149.
- [14] Gao M, Zeng X Y, Hu Q W, et al. Mechanism and remedy of undercut formation during laser-arc hybrid welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(6): 85-88, 117.
高明, 曾晓雁, 胡乾午, 等. 激光-电弧复合焊接咬边缺陷分析及抑制方法[J]. 焊接学报, 2008, 29(6): 85-88, 117.
- [15] Lippold J C, Kotecki D J. Welding metallurgy and weldability of stainless steels [M]. Chen J H, Transl. 1st ed. Beijing: China Machine Press, 2008: 135-153.
约翰·C·利珀德, 达米安·科特奇基. 不锈钢焊接冶金学及焊接性[M]. 陈剑虹, 译. 1版. 北京: 机械工业出版社, 2008: 135-153.
- [16] Meng Y F, Kang K, Gao M, et al. Microstructures and properties of single-pass laser-arc hybrid welded stainless clad steel plate[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 36: 293-300.
- [17] Yang W X, Xin J J, Fang C, et al. Microstructure and mechanical properties of ultra-narrow gap laser weld joint of 100 mm-thick SUS304 steel plates[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 265: 130-137.