

激光束摆动焊接低碳钢焊接接头的组织和力学性能

陈靖雨¹, 王晓南^{1*}, 吕凡^{1**}, 夏志新¹, 陈夏明¹, 刘珍光², 张敏³, 陈长军³

¹苏州大学沙钢钢铁学院, 江苏 苏州 215021;

²江苏科技大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212003;

³苏州大学机电与工程学院, 江苏 苏州 215021

摘要 利用 IPG YLS-6000 型光纤激光器和摆动焊接头对 Q235 钢进行了线性焊接和摆动焊接试验, 对比分析了两种焊接接头的显微组织及力学性能。结果表明: 激光束摆动焊接较线性焊接可显著增加焊缝宽度 (1.34 mm → 1.60 mm); 两种焊接接头各微区的显微组织相同, 焊缝组织为板条马氏体、板条贝氏体和晶界铁素体, 热影响区的完全奥氏体化区主要为铁素体和板条马氏体, 不完全奥氏体化区则为晶粒尺寸不均匀的铁素体和珠光体; 摆动焊接接头的整体硬度高于母材, 焊缝纵向抗拉强度约为母材的 1.74 倍, 延伸率仅为母材的 66.7%, 冲击韧度可达母材的 90% 左右, 与线性焊接接头具有相同的力学性能。摆动焊接可以有效降低激光焊接对组对间隙的要求, 且对焊接接头的硬度、强度和韧性无不利影响。

关键词 激光技术; 低碳钢; 激光焊接; 激光束摆动焊接; 显微组织; 力学性能

中图分类号 TG456.7

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0302006

Microstructure and Mechanical Properties of Welded Joints of Low Carbon Steels Welded by Laser Beam Oscillating Welding

Chen Jingyu¹, Wang Xiaonan^{1*}, Lü Fan^{1**}, Xia Zhixin¹, Chen Xiaming¹,
Liu Zhengguang², Zhang Min³, Chen Changjun³

¹School of Iron and Steel, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 210521, China;

²School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology,
Zhenjiang, Jiangsu 212003, China;

³School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

Abstract In this study, Q235 steel was welded by linear welding and oscillating welding using an IPG YLS-6000 fiber laser and oscillating welding head. The microstructures and mechanical properties of the two welded joints were compared and analyzed. Results show that laser beam oscillating welding can significantly increase the weld width from 1.34 mm to 1.60 mm when compared with linear welding; the microstructures of the two welded joints are lath martensite, lath bainite, and grain boundary ferrite; the complete austenitizing zones in heat-affected zones are made of ferrite and lath martensite, and the incomplete austenitizing zones consist of ferrite and pearlite with uneven grain sizes. The overall hardness of the oscillating welded joint is higher than that of the base metal. In addition, the tensile strength of the oscillating welded joint is 1.74 times that of the base metal, while the ductility and impact toughness of the joint are 66.7% and 90% that of the base metal, respectively. The oscillating welded joint has the same mechanical properties as the linear welded joint. Oscillating welding can effectively reduce the gap requirement associated with laser welding and has no adverse effects on the hardness, strength, and toughness of the welded joint.

Key words laser technique; low carbon steel; laser welding; laser beam oscillating welding; microstructure; mechanical properties

OCIS codes 160.3900; 140.3390; 180.5810; 350.3390

收稿日期: 2019-08-01; 修回日期: 2019-08-20; 录用日期: 2019-10-28

基金项目: 国家重点研发计划专项(2018YFB1105801)、中国博士后基金特别资助项目(2018T110542)

* E-mail: wxn@suda.edu.cn; ** E-mail: lvfan@suda.edu.cn

1 引 言

低碳钢具有良好的加工性、焊接性,且成本较低,在工业制造中具有广泛应用。焊接是先进制造技术的重要组成部分,焊接接头的质量决定着工件的安全性和服役寿命。不同于传统的焊接方式,激光焊接具有热输入低、焊接速度快、焊后变形小、焊接接头质量高等特点,在制造中得到了越来越广泛的应用^[1-3],但其对焊件位置精确程度的要求非常高。

激光束摆动焊接是利用摆动焊接头使激光束在焊接过程中进行高速摆动的新型的焊接技术,近年来国内外学者针对激光束摆动焊接开展了诸多有价值的研究工作。Gerhards 等^[4]研究了激光束摆动焊接对铝硅涂层 22MnB5 的影响,结果表明,摆动焊接会增大熔池的流动,改善熔合线处铝的偏聚,将熔合线附近的铝推至熔池中间,促进元素均匀化。Vakili-Farahani 等^[5]对 Ti6Al4V 合金的摆动激光点焊工艺参数进行了优化,发现摆动频率对设计空间内焊缝几何特征的影响最大,但其对焊缝显微硬度的影响不显著。Shah 等^[6]对 Al/Mg 进行了激光束摆动焊接试验,发现摆动焊接可以增大熔合区的宽度,减少区域中脆性相的形成,从而提高焊接质量。陈晓宇等^[7]发现激光束摆动焊接技术可以细化焊缝晶粒,显著提高焊缝的强度和韧性,并且可以抑制和消除气孔,减小裂纹长度。邹吉鹏^[8]将间隙和激光束摆动焊接技术结合起来对 5A06 铝合金厚板进行焊接,焊后发现激光束以圆形轨迹运动时,

可以抑制气孔和改善焊缝的表面成形情况。单莹等^[9]通过研究后发现,与线性焊接相比,摆动焊接时焊缝熔深略有下降。

激光束摆动焊接实际上是利用光束摆动来扩大激光作用区^[6],但由于其类似于脉冲激光焊接,对于固定的某一点而言,它会受到多个光斑的重复作用,从而增加了该点的热输入^[10-11],有可能导致焊接接头的显微组织粗化和力学性能降低。因此,本文以 Q235 钢为研究对象,对其进行线性焊接和激光束摆动焊接,分析摆动焊接对焊接接头组织和性能的影响,从而为激光束摆动焊接的应用提供理论依据和基础数据。

2 试验材料与方法

图 1 给出的是母材的显微组织,表 1 给出的是母材的化学成分。母材的显微组织由细小的粒状珠光体(GP)和铁素体(F)组成。经试验测定,母材的屈服强度和抗拉强度分别为 245 MPa 和 340 MPa。

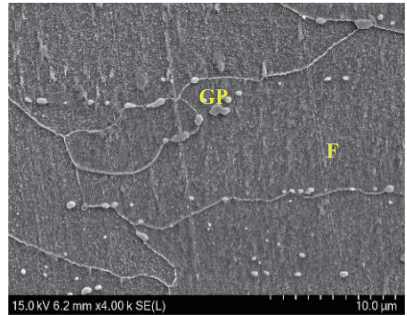


图 1 母材的显微组织

Fig. 1 Microstructure of base metal

表 1 母材的化学成分

Table 1 Chemical composition of base metal

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe
Mass fraction /%	0.18	0.25	0.5	0.016	0.018	0.01	0.02	0.01	Others

利用 IPG YLS-6000 型光纤激光器和 WSX 摆动焊接头对 3 mm 厚 Q235 钢进行激光束摆动焊接试验。激光器光纤直径为 0.3 mm,保护气体为氮气,气体流量为 20 L·min⁻¹,气体纯度为 99.99%,激光束摆动振幅为 0.6 mm,摆动频率为 50 Hz。激光束摆动焊接示意图和光斑摆动轨迹如图 2 所示。

对 Q235 钢进行激光束摆动焊接,获得了全熔透焊缝,随后研究激光束摆动焊接接头的宏观形貌、显微组织以及力学性能。焊前用砂纸打磨试验钢表面,并用酒精进行清洗,以去除工件表面的油污和杂质,避免对焊接质量产生影响。

腐蚀金相样品的溶液采用的是 4% 硝酸酒精溶液(硝酸的体积分数为 4%),表征焊接接头显微组织的仪器是蔡司光学显微镜和 SU5000 热场场发射扫描电子显微镜。测量金相样品焊接接头显微硬度的仪器为维氏硬度计(焊接接头的横向硬度测试点为距试样上表面 1/3 处,采集点间距为 0.1 mm),加载载荷为 2.94 N,加载时间为 10 s。利用线切割机在激光焊接件上取拉伸试样,拉伸试样的尺寸如图 3(a)所示。随后在 DNS-300 万能材料试验机上按照国标 GB/T 228—2015 完成室温拉伸测试,拉伸速度为 3.00 mm·min⁻¹,然后利用 SU5000 热场场发射扫描电子显微镜对拉伸断口进行观察。

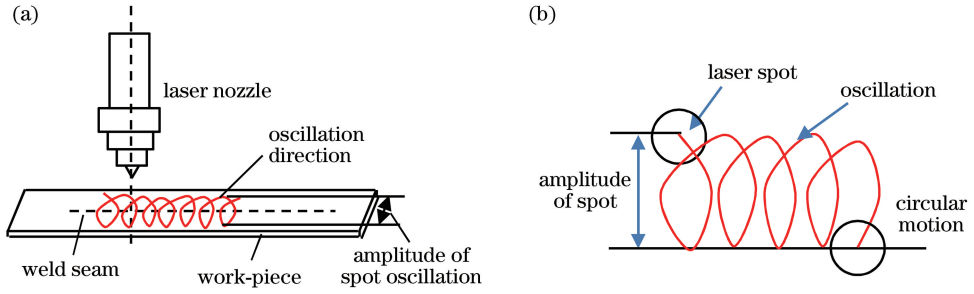


图 2 激光焊接示意图。(a) 激光束摆动焊接;(b) 光斑摆动轨迹

Fig. 2 Schematics of laser welding. (a) Schematic of laser beam oscillating welding; (b) track map of spot oscillating

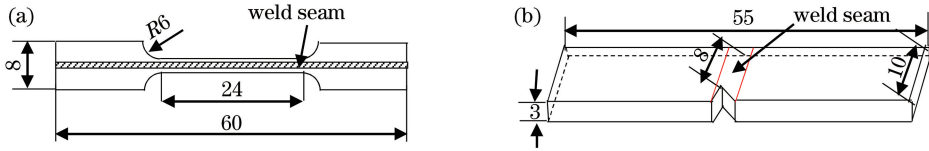


图 3 力学性能测试试样的形状和尺寸。(a) 拉伸试样;(b) 冲击试样

Fig. 3 Schematics of mechanical property test samples. (a) Tensile sample; (b) impact sample

图 3(b)是冲击试样尺寸示意图。冲击试验在 ZBC2302-B 摆锤式冲击试验机上完成,摆锤冲击能量为 150 J,冲击温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在采用温度补偿措施和保温 40 min 后再进行冲击试验,以保证试验温度的准确性。用无水乙醇作为低温冲击试验的冷却介质。随后利用 SU5000 热场场发射扫描电子显微镜对冲击断口进行观察。

3 分析与讨论

3.1 焊接接头的宏观形貌

图 4 和图 5 分别给出了两种焊接接头的表面形貌和横截面形貌。由图 4 可知,两种焊接条件下得到的均为全熔透焊缝,焊缝成形美观,无裂缝、气孔和夹渣等焊接缺陷,焊缝熔宽均匀,焊接过程稳定^[12]。熔池保护良好,正面与背面颜色光亮,焊缝

表面无明显的氧化现象。

焊缝(WS)和热影响区(HAZ)是焊接接头的组成部分。由图 5 可见,两种焊缝均为全熔透焊缝,焊缝中无裂纹等宏观缺陷,焊缝界面熔合良好。图 5 是两种焊接接头的横截面形貌,对两种焊接接头的宽度(测试点为距焊接接头上表面 1/3 处)进行测量,测得线性焊接接头和摆动焊接接头的宽度分别为 1.34 mm 和 1.60 mm,说明摆动焊接可以增大焊缝宽度。这主要是因为摆动效应导致激光束在每一光束平移前进中将热量扩散到更大的区域,即激光束在宽度方向上扫过的面积增加,母材吸收的热量增多,基体金属的熔化量增大,最终导致焊接接头的宽度增大^[13-16]。与此同时,焊接接头宽度的增加使得摆动焊接接头的温度梯度减小,避免了焊接接头的烧蚀,进而避免了熔体的损失^[17]。

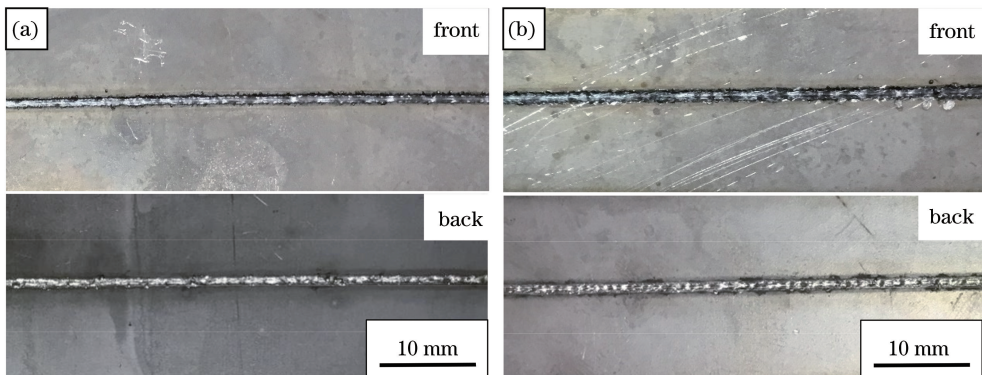


图 4 不同焊接接头的表面形貌。(a) 线性焊接接头;(b) 摆动焊接接头

Fig. 4 Surface morphology of different welded joints. (a) Linear welded joint; (b) oscillating welded joint

由此可见,在其他参数相同的情况下,摆动焊接较线性焊接可以产生更多的熔融材料来填充间隙,表明摆动焊接可以提高焊缝间隙的容忍度,从而弥

补了因激光焊接光斑和焊缝小使得焊接要求精度极高而导致其在工业应用上受限制的不足^[16-17],可用于间隙要求较低的构件上^[18]。

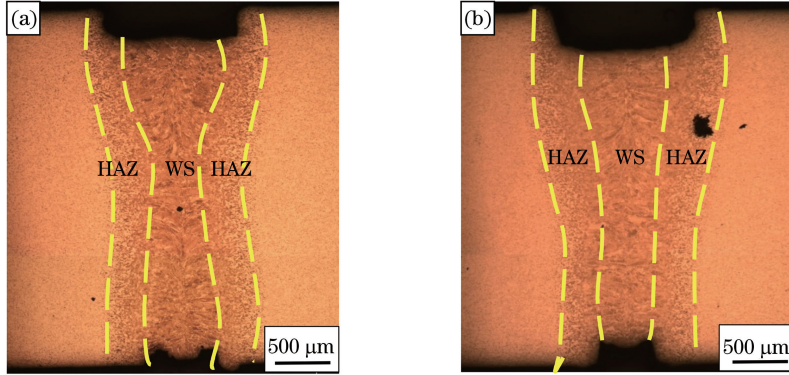


图 5 不同焊接接头的横截面形貌。(a)线性焊接接头;(b)摆动焊接接头

Fig. 5 Cross-section morphology of different welded joints. (a) Linear welded joint; (b) oscillating welded joint

3.2 焊接接头的显微组织

焊接接头主要由焊缝、熔合线和热影响区三部分构成^[19]。图 6 是线性焊接接头和摆动焊接接头各微区的显微组织,可见,两种激光焊接接头的显微组织类型一致。

由图 6(a)、(b)可见,焊缝显微组织由板条马氏体(LM)、板条贝氏体(LB)以及在原奥氏体晶界形成的晶界铁素体(GF)组成。焊缝区在焊接热循环过程中的峰值温度最高,达到了试验钢的熔点以上,焊缝组织完全奥氏体化;同时,激光焊接时冷速极快,焊缝区

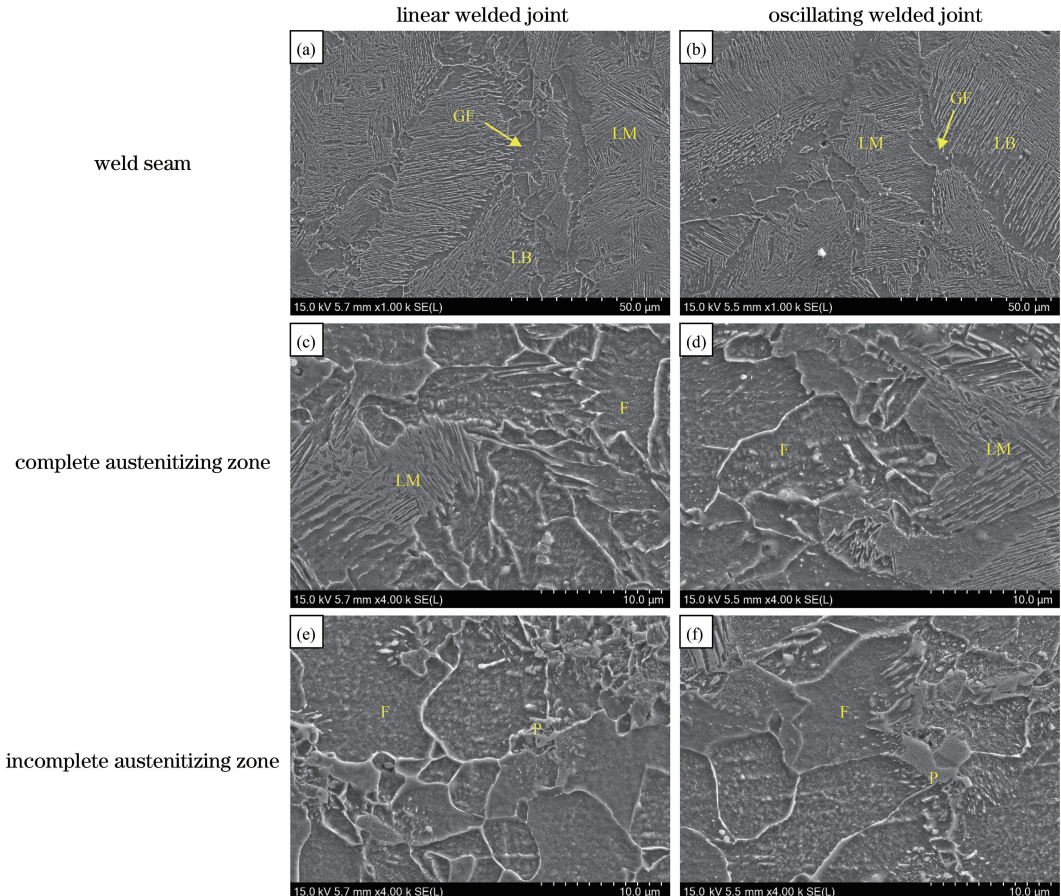


图 6 不同焊接接头的显微组织

Fig. 6 Microstructures of different welded joints

金属相当于经历了淬火处理,奥氏体组织大部分转变为板条马氏体和板条贝氏体,为柱状晶,垂直于熔合线向焊缝中心生长。晶界铁素体为过冷奥氏体在冷却过程中于原奥氏体晶界形成的先共析铁素体。

焊接热影响区中距焊缝远近不同的部位所经历的焊接热循环不同,导致不同部位的组织不同,因此可将 Q235 钢的热影响区分为完全奥氏体化区和不完全奥氏体化区两部分。在完全奥氏体化区,部分马氏体中的过饱和碳析出,形成了铁素体组织,组织发生了再结晶现象,因此该区域的主要组织为板条马氏体和铁素体,如图 6(c)、(d)所示。不完全奥氏体化区主要由晶粒尺寸不均匀的铁素体和珠光体组成,主要原因是该区焊接温度较低,焊接热循环过程中峰值温度在 $A_{c1} \sim A_{c3}$ (A_{c1} 为加热时珠光体向奥

氏体转变的开始温度, A_{c3} 为加热时铁素体完全转变为奥氏体的终了温度)之间,原始组织发生不完全奥氏体化和重结晶,如图 6(e)、(f)所示。

3.3 焊接接头的力学性能

图 7 给出的是两种焊接接头的显微硬度变化规律,可见,两种焊接接头的硬度分布呈相同的变化规律,焊接接头各区域硬度的变化趋势呈“马鞍”型,热影响区和母材的硬度和宽度呈对称分布。焊接接头的显微组织会影响显微硬度,而钢中组织的硬度从大到小的顺序为马氏体、贝氏体、珠光体、铁素体^[20]。由图 7 可见,两种焊接条件下得到的焊接接头的整体硬度远高于母材,其主要原因是激光焊接有着极高的冷却速率,导致了淬火组织的形成,从而使得焊缝的硬度与残余应力增大^[21-22],硬度远高于母材。

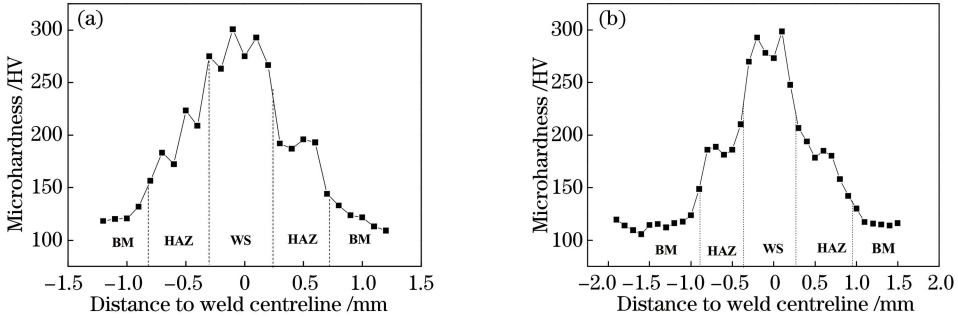


图 7 不同焊接接头的显微硬度分布图。(a)线性焊接接头;(b)摆动焊接接头

Fig. 7 Microhardness profile of different welded joints. (a) Linear welded joint; (b) oscillating welded joint

线性焊接接头和摆动焊接接头焊缝的平均硬度分别为 273 HV 和 270 HV,两者基本相当,说明激光束摆动焊接对焊接接头的硬度没有不利影响。

利用万能材料试验机对 Q235 钢母材、线性焊接接头和摆动焊接接头的拉伸性能进行了测定,图 8和图 9 分别给出的是焊接接头拉伸试样拉断后的宏观照片和工程应力-应变曲线。可见,试样在拉伸失效前均发生了明显的颈缩变形现象,拉断后的试样均为韧性断裂。测得母材、线性焊接接头、摆动

焊接接头的抗拉强度分别为 340, 625, 590 MPa,延伸率分别为 15%、11%和 10%。这是由于焊接后焊缝处生成了大量的板条马氏体和板条贝氏体,相比于母材组织,强度提高而塑性降低,因此摆动焊接接头的抗拉强度约为母材的 1.74 倍,而延伸率仅为母材的 66.7%。两种焊接接头各微区的显微组织一致,而性能决定于组织,因此激光束摆动焊接接头与线性焊接接头的力学性能持平。

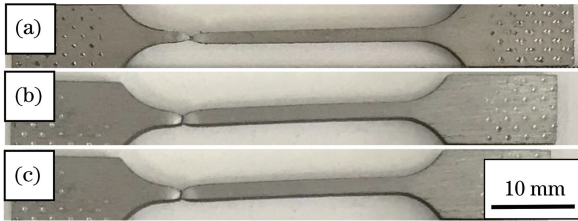


图 8 不同拉伸试样断裂后的宏观形貌。(a)母材;
(b)线性焊接接头;(c)摆动焊接接头

Fig. 8 Macroscopic morphology of different tensile samples after fracture. (a) Base material; (b) linear welded joint; (c) oscillating welded joint

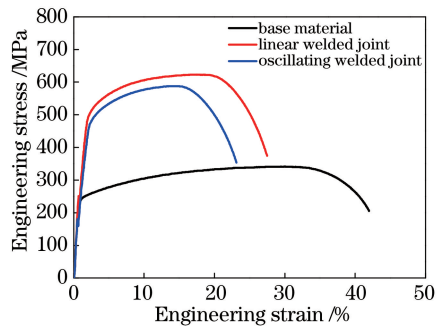


图 9 不同拉伸试样的工程应力-应变曲线
Fig. 9 Engineering stress-strain curves of different tensile samples

图 10 给出了母材以及线性焊接接头、激光束摆动焊接接头焊缝区拉伸断口的宏观形貌和微观形貌。由图 10(a)、(c)、(e)可见,断裂位置出现了少量孔洞。有研究认为^[23],断口上一些较深的孔是在焊接过程中形成的缩孔缺陷,拉伸时缩孔处易形成

应力集中,成为微裂纹的形核部位,随着应力的持续增加,微孔聚集长大直至断裂口处形成大量的韧窝。由图 10(b)、(d)、(f)可见,试样的拉伸断口上密布着韧窝,且韧窝发生了一定程度的变形,说明焊接接头的断裂方式是韧性断裂。

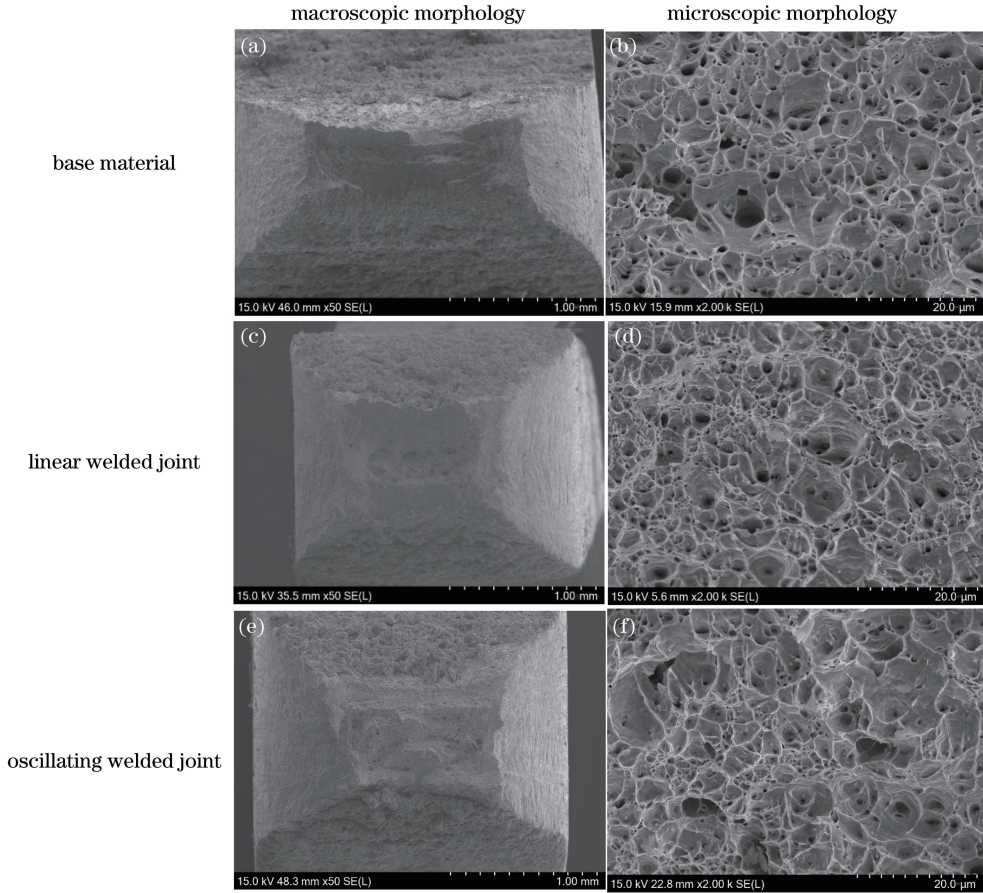


图 10 母材及焊接接头拉伸断口的宏观和微观形貌

Fig. 10 Macroscopic morphology and microscopic morphology of tensile fracture of base material and welded joints

图 11 给出的是母材、线性焊接接头和激光束摆动焊接接头焊缝区冲击断口的微观形貌,可见,焊缝中的韧窝均呈等轴状或抛物线状。同时,还测得了母材、线性焊接接头和摆动焊接接头的冲击韧度分

别为 45,38,38 J,这是由于激光焊接时焊缝处生成了硬质相板条马氏体,因此冲击韧性略有降低,约为母材的 90%。摆动焊接接头与线性焊接接头的冲击韧性一致。

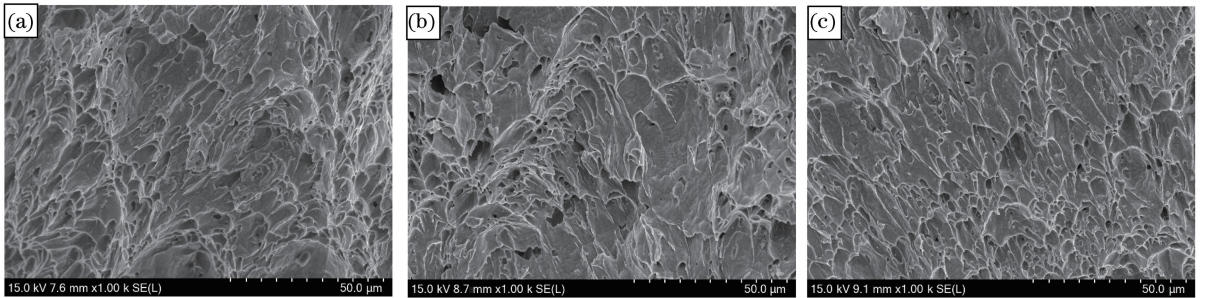


图 11 母材及焊接接头冲击断口的微观形貌。(a)母材;(b)线性焊接接头;(c)摆动焊接接头

Fig. 11 Microscopic morphology of impact fracture of base material and welded joints.

(a) Base material; (b) linear welded joint; (c) oscillating welded joint

4 结 论

本文对 Q235 钢进行激光束摆动焊接和线性焊接试验,对比分析了摆动焊接和线性焊接对 Q235 激光焊接接头组织和力学性能的影响,得到的结论如下。

1) 在两种焊接下均获得了表面无缺陷、成形良好的焊缝。相比于传统的线性焊接,激光束摆动焊接接头焊缝的宽度显著增大(1.34 mm→1.60 mm),降低了激光焊接对间隙的要求。

2) 两种焊接接头各微区的显微组织相同:焊缝组织为板条马氏体、板条贝氏体和晶界铁素体;热影响区由完全奥氏体化区和不完全奥氏体化区两部分组成,完全奥氏体化区主要为铁素体和板条马氏体,不完全奥氏体化区则由晶粒尺寸不均匀的铁素体和珠光体组成。

3) 摆动焊接接头的整体硬度高于母材,焊缝纵向抗拉强度可达到 590 MPa,约为母材的 1.74 倍,而延伸率仅为母材的 66.7%;摆动焊接接头的冲击韧度为 38 J,约为母材的 90%。激光束摆动焊接接头与线性焊接接头的力学性能基本一致,说明激光束摆动焊接对焊接接头的硬度、强度和韧性没有不利影响。

参 考 文 献

- [1] Guo W, Wan Z D, Peng P, et al. Microstructure and mechanical properties of fiber laser welded QP980 steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 256: 229-238.
- [2] Jia J, Yang S L, Ni W Y, et al. Microstructure and properties of fiber laser welded joints of motor ultrahigh-strength steel 22MnB5 and 22MnB5-Q235 [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41 (10): 1003002.
贾进, 杨尚磊, 倪维源, 等. 车用超高强钢 22MnB5 及 22MnB5-Q235 光纤激光焊接接头组织及性能的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1003002.
- [3] Yu X, Luo J Q, Xiao X S, et al. Research progress of high-power ultrafast fiber lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0508007.
余霞, 罗佳琪, 肖晓晟, 等. 高功率超快光纤激光器研究进展[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508007.
- [4] Gerhards B, Engels O, Olschok S, et al. Modified laser beam welding of aluminum-silicon coated 22MnB5 [J]. Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik, 2019, 50(2): 115-125.
- [5] Vakili-Farahani F, Lungershausen J, Wasmer K.

Process parameter optimization for wobbling laser spot welding of Ti6Al4V alloy[J]. Physics Procedia, 2016, 83: 483-493.

- [6] Shah L H, Khodabakhshi F, Gerlich A. Effect of beam wobbling on laser welding of aluminum and magnesium alloy with nickel interlayer[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 37: 212-219.
- [7] Chen X Y, Wang X Y, Zhou L T, et al. The research status of laser scanning welding technology [J]. Welding Digest of Machinery Manufacturing, 2014(4): 6-11.
陈晓宇, 王旭友, 周立涛, 等. 激光扫描焊接技术的研究现状[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2014(4): 6-11.
- [8] Zou J P. Characteristics of laser scanning welding process for 5A06 aluminum alloy thick plate with narrow gap [D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology, 2018.
邹吉鹏. 5A06 铝合金厚板窄间隙激光扫描焊接工艺特性研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2018.
- [9] Shan Y, Du J J, Jiang H T, et al. Effect of beam scanning on microstructure of laser weld of 5A06 aluminum alloy [J]. New Technology & New Process, 2018(5): 40-43.
单莹, 杜俊杰, 蒋海涛, 等. 光束扫描对 5A06 铝合金激光焊缝组织的影响[J]. 新技术新工艺, 2018 (5): 40-43.
- [10] Huang D L, Yang Y Q, Yang S N, et al. Study on galvanometer scanning fiber laser welding plexiglass technology [J]. China Plastics Industry, 2009, 37 (9): 43-45.
黄冬林, 杨永强, 杨胜男, 等. 振镜扫描式光纤激光焊接有机玻璃工艺研究[J]. 塑料工业, 2009, 37 (9): 43-45.
- [11] Sun Q, Di H S, Li J C, et al. Effect of pulse frequency on microstructure and properties of welded joints for dual phase steel by pulsed laser welding[J]. Materials & Design, 2016, 105: 201-211.
- [12] Du W Z, Huang T, Cao Z, et al. Galvanometer scanning laser micro-welding of 304 stainless steel foils[J]. Chinese Journal of Lasers: 1-12 [2019-09-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.TN.20190709.0835.010.html>.
杜伟哲, 黄婷, 曹政, 等. 304 不锈钢箔振镜扫描激光微焊接工艺[J/OL]. 中国激光:1-12[2019-09-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.TN.20190709.0835.010.html>.
- [13] Tan X J, Hu Y, Guo L, et al. The effect of galvanometer spiral scanning welding of 3003 aluminum alloy on weld forming and mechanical properties[J]. Applied Laser, 2015, 35 (5): 558-

- 563.
- 谭小军, 胡玉, 郭亮, 等. 振镜螺旋扫描焊接对 3003 铝合金焊缝成形和抗拉强度的影响 [J]. 应用激光, 2015, 35(5): 558-563.
- [14] Kaneko M, Tsuji T. A whisker tracing sensor with 5 μm sensitivity [C] // Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No. 00CH37065), April 24-28, 2000, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE, 2000: 3907-3912.
- [15] Benyounis K Y, Olabi A G, Hashmi M S J. Effect of laser welding parameters on the heat input and weld-bead profile [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 164/165: 978-985.
- [16] Wang L, Gao M, Zhang C, et al. Effect of beam oscillating pattern on weld characterization of laser welding of AA6061-T6 aluminum alloy [J]. Materials & Design, 2016, 108: 707-717.
- [17] Chen H, Deng L M, Duan J, et al. Picosecond laser welding of glasses with a large gap by a rapid oscillating scan [J]. Optics Letters, 2019, 44(10): 2570-2573.
- [18] Zhao L, Zhang X D, Chen W Z, et al. Repression of porosity with beam weaving laser welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(1): 29-32.
- 赵琳, 张旭东, 陈武柱, 等. 光束摆动法减小激光焊接气孔倾向 [J]. 焊接学报, 2004, 25(1): 29-32.
- [19] Lomozik M. Effect of the welding thermal cycles on the structural changes in the heat affected zone and on its properties in joints welded in low-alloy steels [J]. Welding International, 2000, 14(11): 845-850.
- [20] Wang X N, Chen X M, Sun Q, et al. Formation mechanism of δ -ferrite and metallurgy reaction in molten pool during press-hardened steel laser welding [J]. Materials Letters, 2017, 206: 143-145.
- [21] Chen W J, Chen Q Y, Wang Y J. Effect of heat treatment temperature on dissimilar welded joint [J]. China Weld, 2013, 22(3): 60-65.
- [22] Wang X Y, Lei W J. Effect of postweld heat-treatment on microstructure and properties of 12Cr1MoVG/12Cr2MoWVTiB steel welded joints [J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36(6): 92-96.
- 王香云, 雷文娟. 焊后热处理对 12Cr1MoVG/12Cr2MoWVTiB 钢焊接接头组织性能的影响 [J]. 金属热处理, 2011, 36(6): 92-96.
- [23] Wang T, Zhang M, Xiong W, et al. Microstructure and tensile properties of the laser welded TWIP steel and the deformation behavior of the fusion zone [J]. Materials & Design, 2015, 83: 103-111.