

激光与光电子学进展

D36 钢窄间隙激光焊接接头组织和性能研究

柴旭天¹, 尹燕^{1*}, 王志鹏¹, 董开基¹, 李志慧¹, 张瑞华^{2,3}¹兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050;²中国钢研科技集团有限公司, 北京 100081;³阳江市五金刀剪产业技术研究院, 广东 阳江 529533

摘要 采用窄间隙激光填丝焊接的方式对低合金高强钢 D36 进行对接, 实现了良好的多层多道厚板焊接, 焊后无裂纹、无气孔等缺陷。通过拉伸、弯曲试验, 以及显微硬度测试、显微组织观察等分析手段对焊接接头的微观组织和力学性能进行了分析和表征。结果表明: 热影响区粗晶区组织由大量板条状马氏体组成, 细晶区组织由晶粒细小的珠光体和铁素体组成; 焊缝中心组织为先共析铁素体+针状铁素体+粒状贝氏体。填丝焊道硬度从大到小依次为热影响区、焊缝中心、母材; 钝边自熔打底焊接硬度从大到小依次为焊缝中心、热影响区、母材; 焊接接头拉伸试样均断裂在母材位置, 断口与受力方向成 45° 夹角, 并出现明显颈缩现象, 这属于典型韧性断裂。焊缝平均抗拉强度为 537 MPa, 平均断后延伸率为 15.6%。

关键词 激光技术; 窄间隙; 填丝焊接; 力学性能; 微观组织

中图分类号 TG456.7

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1714008

Joint Microstructure and Properties of D36 Steel Using Narrow Gap Laser Welding

Chai Xutian¹, Yin Yan^{1*}, Wang Zhipeng¹, Dong Kaiji¹, Li Zhihui¹, Zhang Ruihua^{2,3}¹State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;²China Iron & Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China;³Hardware Knife Cut Industrial Technology Research Institute of Yangjiang, Yangjiang, Guangdong 529533, China

Abstract The low-alloy and high-strength steel D36 is joined by narrow-gap laser wire-filled welding, which results in good multi-layer and multi-pass thick plate welding without cracks, pores, and other defects after welding. The microstructure and mechanical properties of the welded joints are analyzed by the tension and bending test, microhardness test, microstructure observation, and other analytical methods. The results show that the coarse-grained heat-affected zone consists of a large number of lamellar martensite, and the microstructure of the fine-grained zone is composed of the fine-grained pearlite and ferrite. The weld center structure is proeutectoid ferrite + acicular ferrite + granular bainite. The regions with filler wire weld bead hardness in order from high to low is heat affected zone, weld center, and base material. The regions with laser primer welding hardness in order from high to low is weld center, heat affected zone, and base metal. The tensile specimens of the welded joints all fractured at the

收稿日期: 2020-12-28; 修回日期: 2021-01-05; 录用日期: 2021-01-20

基金项目: 广东省“扬帆计划”引进创新创业团队(2015YT02G090)、海上风电厚板高功率激光焊接技术开发及应用(SDZX2019038)、阳江市高功率激光应用实验室建设(2018057)、阳江市高功率激光应用实验室有限公司支持粤东西北新型研发机构建设(20180902)

通信作者: *yinyan@lut.cn

base metal position. The fracture is at an angle of 45° with the force direction, and there is obvious necking, which is a typical ductile fracture. The average tensile strength of the welds is 537 MPa, and the average elongation after fracture is 15.6%.

Key words laser technique; narrow gap; filler wire welding; mechanical properties; microstructure

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390; 350.3850

1 引言

近年来,随着激光技术的不断发展,激光焊接技术在工业中的应用也越来越广泛^[1-3]。海洋工业领域的大型设备需要在海洋环境中支撑上百吨的重量,这就决定了海洋工业平台用钢必须有高强度、高韧性和良好的焊接性^[4]。此外,海洋工业用钢与普通机械钢材选取存在明显差异,厚度更大,焊缝更长。采用传统焊接方式往往会出现焊接效率低、翘曲变形严重等问题,这严重制约了我国海洋工业的发展。

自 1966 年由 Milewski 和 Sklar 提出窄间隙激光填丝焊接技术后^[5],由于激光的高能量密度带来的高焊接速度及深穿透的优点,该技术得到了飞速的发展。朱洪羽等^[6]采用超窄间隙激光填丝焊接技术实现了 25 mm 厚异种钢板 P92/Inconel 625 的对接,得到焊缝整齐、熔合良好的焊接接头。Huang 等^[7-8]利用高速摄影监控窄间隙填丝焊接过程,并通过研究发现光丝间距和送丝速度可显著影响焊丝的熔化、转移行为,液桥传递方式可显著减少不熔合缺陷的产生。孙清洁等^[9]通过电磁场辅助实现

SUS316L 不锈钢对接,发现电磁场的加入对熔池有搅拌作用,增加了焊缝金属的润湿性和铺展性,提高了接头的抗拉强度和延伸率。

与传统的焊接方式相比,激光焊接能量密度高、热输入小、焊接变形小^[10-11],能大大提高生产效率。窄间隙填丝焊接更是用较小的功率完成了较大厚度板的焊接,弥补了纯激光焊接板厚度较小的问题,应用前景十分广阔。D36 钢是一种低合金高强度钢,具有较高的强度和硬度以及良好的塑性和韧性,是海洋工业中不可或缺的材料^[12-13]。目前国内对于激光填丝焊接海洋平台用钢板的研究报道还比较少。本文针对海洋工业用钢 D36 进行多道填丝对接试验,研究其焊接接头的组织和力学性能,为后续工业化应用提供理论基础。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料及设备

试验材料为 D36 低合金高强度钢,试样尺寸为 $100\text{ mm} \times 75\text{ mm} \times 40\text{ mm}$,焊丝选用直径为 1.2 mm 的 ER50-6 焊丝,两种材料的化学成分分别见表 1 和表 2。

表 1 高强度钢 D36 化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical compositions of D36 steel with high strength (mass fraction)

Element	C	Mn	Si	Ni	P	S	Cu	Cr
Mass fraction	≤ 0.180	0.900–1.600	≤ 0.500	≤ 0.400	≤ 0.035	≤ 0.035	≤ 0.350	≤ 0.200

表 2 ER50-6 焊丝化学成分(质量分数)

Table 2 Chemical compositions of ER50-6 filler wire (mass fraction)

Element	C	Mn	Si	P	S	Cr	Cu
Mass fraction	≤ 0.150	1.400–1.850	0.800–1.150	≤ 0.025	≤ 0.035	≤ 0.500	≤ 0.200

2.2 试验条件

采用的激光器为 Trumpf 公司的碟片激光器(型号: TruDisk 32002-2)。其额定功率高达 32.0 kW,波长为 1030 nm。送丝机构采用 TBi 公司生产的行星轮冷送丝机 PF16,焊接过程中,由于坡口窄而小的特点,送丝与气保护只能在与焊道平行的同一水平面上进行。采用前送丝后送保护气的方式,其原因是前送丝焊接时,以激光束能量为热源熔化焊

丝;后送丝焊接时,焊丝通过焊接过程中形成的等离子体和熔池的热量熔化,热稳定性较差。此外,在激光填丝焊接过程中,由于激光束的光斑直径较小,所以焊丝与激光束的位置精确度较高,若出现偏丝现象,极易造成粘丝。若采用后送丝,轻微偏丝,焊丝会碰撞焊材,导致送丝系统损坏。整体激光填丝焊接示意图如图 1 所示。

焊接采用纯激光打底焊接和单道多层激光填

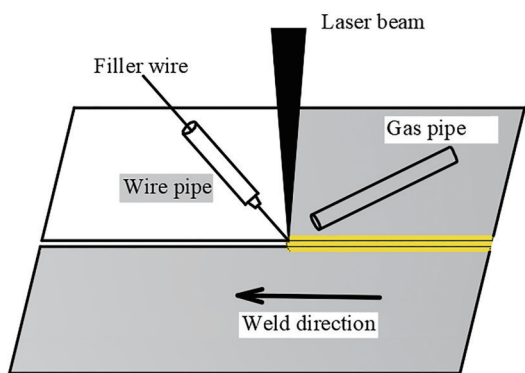


图 1 窄间隙激光填丝焊接示意图

Fig. 1 Schematic diagram of narrow gap laser filler wire welding
 丝焊接工艺,实现厚度为 40 mm 的 D36 低合金高强钢的对接。纯激光打底焊接可实现 5 mm 钝边的对接,其焊接参数为:离焦量为 0 mm,激光功率为 5 kW,焊接速度为 24 mm/s,保护气流量为 10 L/min。激光填丝焊接工艺的参数为:离焦量为 +20 mm,焊接速度为 5 mm/s,送丝速度为 3.5 m/min,焊接全程用 Ar 气保护,气流量为 10 L/min。

40 mm 厚板的窄间隙激光填丝坡口剖面图如图 2 所示。

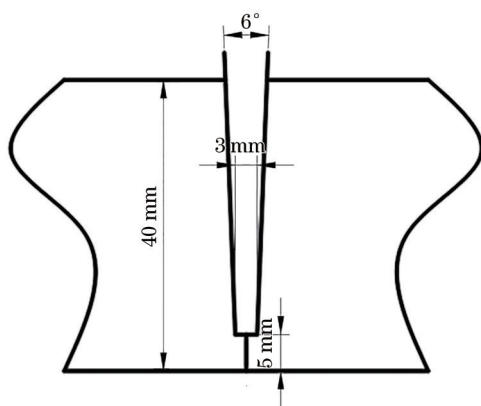


图 2 窄间隙焊接坡口

Fig. 2 Narrow gap welding groove

2.3 接头组织分析

在焊接接头处取样,制备金相试样,对焊接接头不同区域的微观组织进行观察和分析。

根据标准 GB/T2975-2018,分别截取焊接接头包括盖面焊道、中部填充焊道和激光自熔打底焊道等 3 个不同区域的试样进行显微硬度测试和拉伸、弯曲试验。采用维氏硬度计(HVS-30 型)进行接头显微硬度测试,加载 5 N 的力,测量点间距为 0.3 m,加载时间为 10 s,位置如图 3 所示。采用万能材料

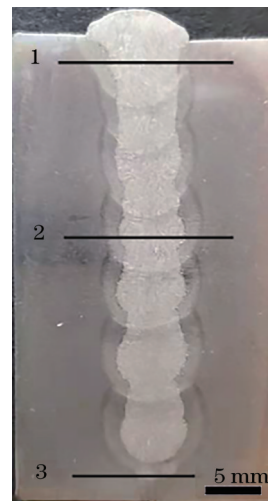


图 3 焊缝宏观横截面及显微硬度取样

Fig. 3 Sampling of macroscopic cross-section and micro-hardness of weld

试验机以 2 mm/min 的拉伸速率进行拉伸试验,测试接头的抗拉强度和屈服强度。采用场发射扫描电子显微镜对断口进行分析。

3 试验结果与分析

3.1 焊接接头组织和形貌分析

整个焊缝的对接总共焊接了 8 道,包括纯激光打底自熔焊接 5 mm 厚的钝边。在最佳的焊接参数下,焊接过程平稳,飞溅小,坡口内金属填充饱满,与母材两侧壁较好地融合,焊缝上下整体形貌均匀,成型良好,且焊缝中未能检测到气孔和未熔合缺陷。试验所得 40 mm 厚 D36 低合金高强钢窄间隙激光填丝焊接接头的宏观横截面如图 3 所示。

3.1.1 焊接接头不同区域微观组织分析

焊接接头如图 4 所示,可分为母材区(BM)、热影响区(HAZ)和焊缝中心区(FZ),其中热影响区又

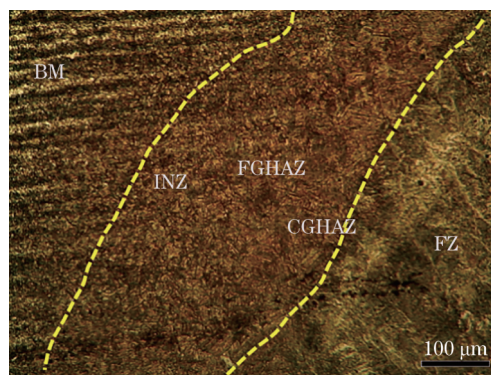


图 4 焊接接头各区域的组织分布

Fig. 4 Structure distribution of each zone of welded joint

可分为粗晶区(CGHAZ)、细晶区(FGHAZ)和不完全正火区(INZ)^[14]。图 5 为母材微观组织,从图中

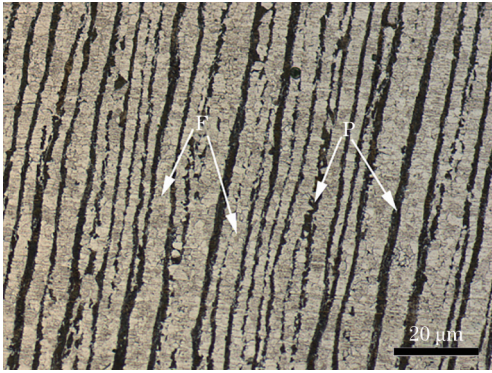


图 5 母材显微组织

Fig. 5 Microstructure of base metal

可知母材组织主要由珠光体(P)和铁素体(F)组成,白色的带状部分为铁素体,黑色的带状部分为珠光体。由于母材为轧制状态,晶粒受轧制力被拉长,所以整体的组织呈现出条带状分布。

从图 6 可以看出,焊缝中心微观组织呈现出典型的金属凝固组织特征,激光焊接冷却速度快,使得焊缝中心出现粗大的柱状晶组织,粗大的柱状组织由两

侧熔合线向焊缝中心生长,组织为先共析铁素体(PF)和针状铁素体(AF)。焊丝中含有一定的Si、Nb、Ti合金元素,使焊缝中心组织得到一定程度的细化。

图 7 为热影响区内粗晶区、细晶区和不完全正火区的微观组织。热影响区各个部分距离焊缝中心的距离不同,使得各部分的局部温度峰值、高温停留时间和冷却速率也不同,进而导致各个部位的微观组织发生不同程度的相变^[15]。从图 7(a)中可以看出,该区域组织为贯穿晶粒的板条状马氏体。激光焊接能量高,热输入大,厚板焊接热量散失快,而粗晶区紧靠焊缝中心,温度急剧升高和降低,导致奥氏体均匀化的时间过短,奥氏体来不及发生扩散性相变,直接发生切变型相变,进而生成了板条状马氏体(LM)。图 7(b)为细晶区,此处的母材被完全奥氏体化,经加热和冷却两次重结晶后发生相变,晶粒得到明显细化。冷却后得到晶粒细小的珠光体和铁素体。图 7(c)为不完全正火区,该区域的组织主要是不均匀的带状珠光体和铁素体。由于该部位温度刚好低于合金重结晶的温度范围,仅有部分母材奥氏体化,经冷却得到细小的铁素体和珠

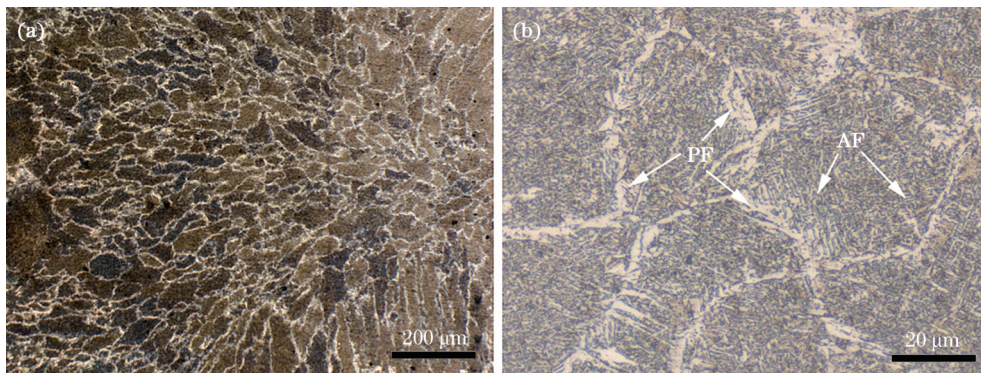


图 6 焊缝中心微观组织。(a)低倍组织;(b)高倍组织

Fig. 6 Microstructures of weld center. (a) Low magnification ; (b) high magnification

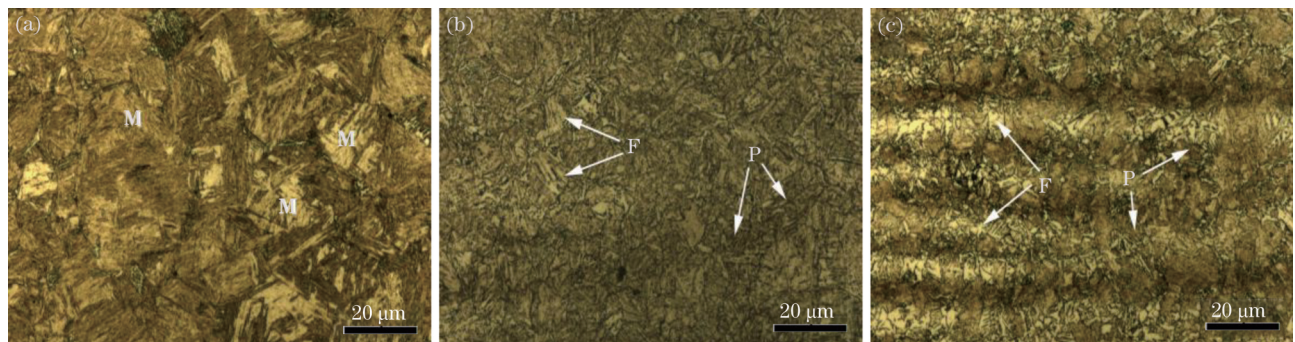


图 7 热影响区微观组织。(a)粗晶区;(b)细晶区;(c)不完全正火区

Fig. 7 Microstructures of HAZs. (a) CGHAZ; (b) FGHAZ; (c) INZ

光体, 未经奥氏体化的晶粒在晶界处有重新长大的趋势, 使得该区域晶粒大小分布不均匀。

3.1.2 受二次热循环的焊缝重叠部分微观组织

激光填丝焊接接头由多层焊缝搭接完成, 焊接过程中, 除盖面道填丝焊外, 其他道都会受到后一道焊缝的热影响, 部分区域会先后受到两次焊接热循环的影响。以其中两道搭接焊缝为例, 焊缝搭接区域如图 8 所示, 图 8(a) 为低倍组织, 图 8(b) 为高倍微观组织。从图 8 可以看出, 焊缝中心重叠区域的

微观组织不同于上、下两次焊缝区域, 其最根本的原因是该重叠区域为上层焊缝在下层焊缝的热影响区。重叠区域微观组织中无马氏体组织形成, 而由大量粗化的铁素体构成。枝晶内部的铁素体粗化, 打破了焊缝中心原始枝晶晶界, 从而导致无明显取向的层间区域形成。热影响区搭接区域如图 9 所示, 图 9(a) 为低倍组织, 图 9(b) 为高倍微观组织。该热影响区受到两次热循环作用的影响, 组织转变为回火马氏体和少量铁素体。

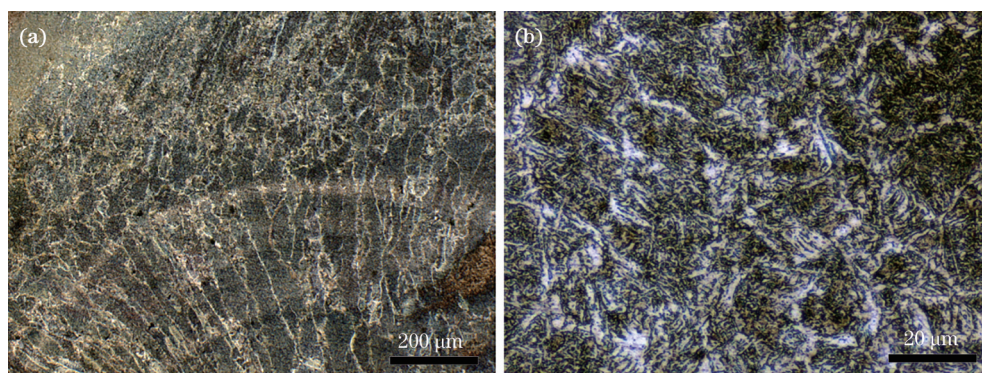


图 8 焊缝区重叠组织。(a)低倍重叠组织;(b)高倍重叠组织

Fig. 8 Overlapping microstructures in weld zone. (a) Low magnification overlapping microstructure; (b) high magnification overlapping microstructure

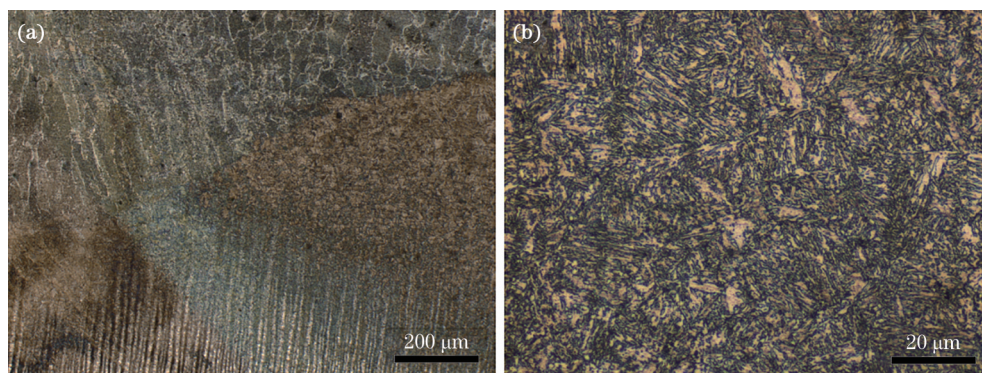


图 9 热影响区重叠部分微观组织。(a)低倍重叠组织;(b)高倍重叠组织

Fig. 9 Overlapping microstructures in heat affected zone. (a) Low magnification overlapping microstructure; (b) high magnification overlapping microstructure

3.2 接头力学性能测试与分析

3.2.1 显微硬度

焊接接头上、中、下部显微硬度试验结果如图 10 所示。一般来说, 钢铁材料中常见组织的硬度从大到小依次是马氏体、贝氏体、珠光体和铁素体。从图中可看出不同的接头区域硬度呈现明显差异。在焊缝中部和上部填丝焊接位置, 材料硬度在热影响区出现急剧增加, 其主要原因是激光线能量高, 厚板散热快, 热影响区快速冷却, 导致大量马氏体生成, 大量的板条状马氏体显著提高了热影响区硬

度。焊缝中心形成了粗大的先共析铁素体, 导致焊缝中心硬度低于热影响区。上部盖面道焊缝硬度高于中部焊缝硬度的主要原因是中部焊缝受到后一道焊接工序的二次热循环作用, 中部热影响区板条状马氏体经回火处理, 产生回火马氏体, 从而降低了焊缝硬度。而填丝部位热影响区硬度明显高于自熔焊热影响区硬度, 其主要原因是填丝焊热输入高, 激光能量作用于焊丝和母材, 焊缝熔池受热时间长, 晶粒长大, 使热影响区马氏体更粗大, 淬硬更明显。

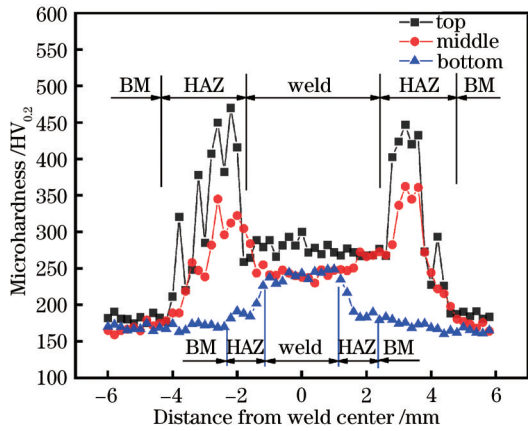


图 10 焊缝不同区域显微硬度

Fig. 10 Microhardness of different areas of weld

3.2.2 拉伸试验

图 11 为拉伸试样宏观断裂形貌,图 12 为工程应力-应变曲线。表 3 为拉伸试验结果。从图 11 可以看出,试样均断裂在母材位置,说明接头的抗拉强度高于母材,符合 GB/T12467 标准要求。断口处有明显的颈缩,并且断口方向与拉伸方向成 45°角,呈现剪切应力断裂特征。通过计算得到平均抗拉强度为 534 MPa,平均断后延伸率为 15.6%。

图 13 为拉伸试样断口的微观组织。宏观来看,断口粗糙,无金属光泽。局部放大观察发现有大量的韧窝形貌,韧窝细小且有深度,属于典型的韧性断裂特征。此外,韧窝中心有沉淀相析出,沉淀相

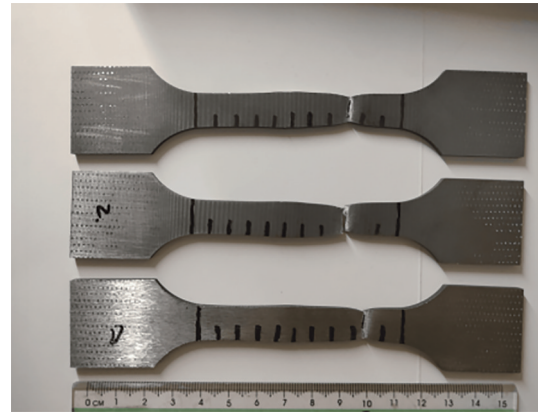


图 11 焊接接头拉伸断裂

Fig. 11 Tensile fracture of welded joint

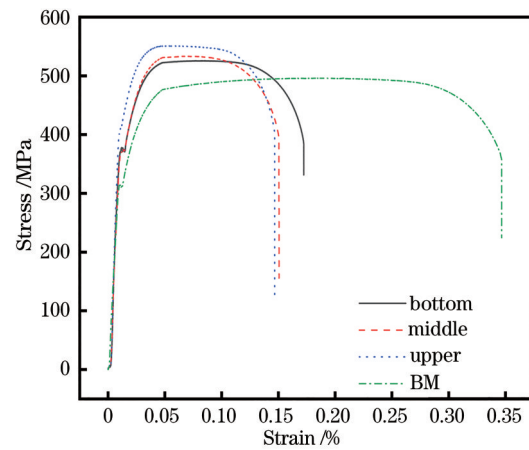


图 12 拉伸试样工程应力-应变曲线

Fig. 12 Stress-strain curves of tensile sample

表 3 拉伸试验结果

Table 3 Results of tensile test

Sampling location	Yield strength /MPa	Tensile strength /MPa	Elongation /%	Fracture position
BM	312	496	34.6	BM
Upper	376	525	17.2	BM
Middle	370	533	15.0	BM
Bottom	402	550	14.6	BM

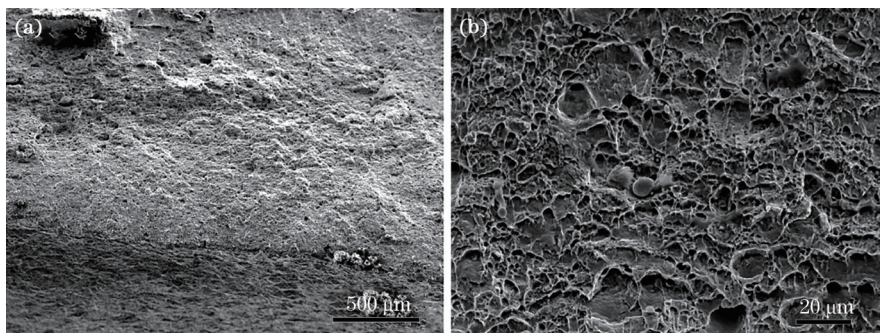


图 13 拉伸断口形貌。(a)宏观形貌;(b)微观形貌

Fig. 13 Tensile fracture morphologies. (a) Macro morphology; (b) micro morphology

与金属界面产生微裂纹,随着载荷的增加,微裂纹沿载荷方向形成空洞,大量空洞连接导致断裂^[16]。

4 结 论

采用窄间隙激光填丝焊接 40 mm 厚海洋工业用钢,获得了性能良好的焊缝组织和无气孔、无裂纹等缺陷的优质接头。研究发现,热影响区粗晶区组织主要为板条状马氏体,填充道焊缝中心组织为沿晶界分布的先共析铁素体和针状铁素体。热影响区重叠组织受后一道焊接作用后转变为回火马氏体和少量铁素体。焊缝重叠区域为上层焊缝在下层焊缝的热影响区,二次受热后枝晶内部粗化的铁素体打破了焊缝中心原始枝晶晶界,使重叠区域枝晶无明显生长取向。焊缝不同的接头区域硬度呈现明显差异,焊接接头钝边焊缝中心硬度最高;填充焊道热影响区硬度最高,母材硬度最低。接头上部和中部硬度整体呈现热影响区高于焊缝中心的特点,且后道焊缝硬度整体高于前道焊缝,最高硬度可达到 470 HV;接头下部激光自熔打底焊接焊缝中心硬度高于热影响区。焊接接头拉伸试样均在母材处断裂,断后伸长率比母材略低,断口呈现大量韧窝,属于典型的韧性断裂,平均抗拉强度为 534 MPa。

参 考 文 献

- [1] Li S, Zhang Z H, Han S G, et al. Application and development of laser technology in the field of material processing[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(4): 76-85.
李苏, 张占辉, 韩善果, 等. 激光技术在材料加工领域的应用与发展[J]. 精密成形工程, 2020, 12(4): 76-85.
- [2] Zhang P, Wang X J. Research status and progress of narrow gap laser welding[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(9): 9-12.
张攀, 王湘江. 窄间隙激光焊接研究现状及进展[J]. 热加工工艺, 2019, 48(9): 9-12.
- [3] Hu Y H, Zhang Y L. Research status and development trend of laser welding technology[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2019(17): 166-167.
胡延鹤, 张玉兰. 论激光焊接技术的研究现状及发展趋势[J]. 内蒙古煤炭经济, 2019(17): 166-167.
- [4] Liu Z Y, Zhou Y L, Di G B, et al. Research progress and application of high performance offshore platform steel[J]. Engineering Sciences, 2014, 16(2): 31-38.
刘振宇, 周砚磊, 狄国标, 等. 高强度厚规格海洋平台用钢研究进展及应用[J]. 中国工程科学, 2014, 16(2): 31-38.
- [5] Zhang G W. Theoretical and experimental investigation on ultra-narrow gap welding with fiber laser for heavy sections [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014.
张国伟. 厚板超窄间隙光纤激光焊接理论及实验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
- [6] Zhu H Y, Nie P L, Li Z G, et al. Microstructure and properties of ultra-narrow gap laser filler wire welded joints between P92 and Inconel 625 alloy[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.
- [7] Huang W H, Chen S J, Xiao J, et al. Investigation of filler wire melting and transfer behaviors in laser welding with filler wire[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 134: 106589.
- [8] Yang T, Liu J F, Zhuang Y, et al. Studies on the formation mechanism of incomplete fusion defects in ultra-narrow gap laser wire filling welding[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 129: 106275.
- [9] Sun Q J, Li J Z, Liu Y B, et al. Formation, microstructure, and properties of electromagnetic field-assisted SUS316L austenite stainless steel laser narrow-gap joint[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1002005.
孙清洁, 李军兆, 刘一搏, 等. 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[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1002005.
- [10] Zhang Z H. Research on characteristics and control of microstructure and properties of narrow-gap laser weldind with filler wires for thick 7A52 aluminum alloy plate[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018: 9-15.
张智慧. 7A52 铝合金厚板窄间隙激光填丝焊接特性及组织性能调控研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 9-15.
- [11] Reisgen U, Olschok S, Jakobs S, et al. Laser beam welding under vacuum of high grade materials[J]. Welding in the World, 2016, 60(3): 403-413.
- [12] Zhang Q. Simulation research on the law of angular distortion of D36 steel for shipbuilding during multi-pass welding[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 1-8.
张琪. 船用 D36 钢多层多道焊角变形规律的数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 1-8.
- [13] Wei J, Wang H, Shi S J, et al. Microstructure and properties of fiber laser wire welded joints of

- 10CrSiNiCu high strength shipbuilding steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(3): 0303003.
- 魏菁, 王欢, 石少坚, 等. 10CrSiNiCu 船用高强度光纤激光焊接接头组织和性能[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0303003.
- [14] Huan P C, Wang X N, Zhu T C, et al. Microstructure and mechanical properties of laser welded joints of 800 MPa hot rolled high strength steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0102002.
- 环鹏程, 王晓南, 朱天才, 等. 800 MPa 级热轧高强度激光焊接接头的组织和力学性能[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0102002.
- [15] Sun Q, Di H S, Li J C, et al. A comparative study of the microstructure and properties of 800 MPa microalloyed C-Mn steel welded joints by laser and gas metal arc welding[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 669: 150-158.
- [16] Zhang G, Jiang H, Tian S, et al. Isothermal tensile deformation behaviors and fracture mechanism of Ti-26Al-20Nb-0, 5Mo alloy at different phase regions [J]. Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik, 2020, 51(1): 8-16.