

# 相同激光线能量对焊缝组织和性能的影响

刘东宇 李东 李凯斌 陈倩倩

上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201600

**摘要** 在相同线能量条件下对 E36 高强钢和 304 奥氏体不锈钢进行了激光对焊。采用光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、X射线仪(XRD)对焊接接头的形貌,金相组织进行了分析,并对焊缝的显微硬度和抗拉强度进行了评价。结果表明:焊接线能量和激光功率密度同时对焊接接头的宏观形貌起着决定性作用。焊接速度对焊接接头的微观晶粒形态影响较大。焊缝主要是由马氏体组织和少量碳化物组成。304 侧熔合区的组织主要是由奥氏体和少量  $\delta$ -铁素体组成, E36 侧热影响区生成了板条马氏体、贝氏体和铁素体组织。激光功率为 1 kW 时,焊缝硬度较其他条件低且拉伸试样在焊缝处断裂,而其他试样均在 E36 基体上断裂。

**关键词** 光学制造; 激光焊接; 线能量; 形貌; 组织和性能

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.101402

## Influence of Laser with Same Line Energy on the Microstructure and Properties of welded

Liu Dongyu Li Dong Li Kaibin Chen Qianqian

College of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

**Abstract** High-strength steel E36 and stainless steel 304 are welded by laser welding with the same line energy. Microstructure and fracture morphology of welded joint are investigated by means of optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD), and the mechanical properties of the weld are evaluated by micro-hardness and tensile strength testing. The results show that both heat input and laser power density play a crucial role in macro-morphology of welded joint. Welding speed has a significant impact on micro grain morphology. Weld zone is made up of martensite and some carbide particles. There are mainly austenites and a bit  $\delta$ -ferrites on the 304 fusion zone while lath-shaped martensite, bainite and ferrites are produced on the heat affected zone of E36. When the laser power is 1 kW, micro-hardness of the welding seam is lower than that of the others, and the tensile specimen break occurs at the seam, while the other specimens occur at the side of E36.

**Key words** optical fabrication; laser welding; line energy; appearance; microstructure and property

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3390

### 1 引言

目前不锈钢与碳钢异种金属的对接多采用氩弧焊、手工电弧焊、熔化极气体保护焊等传统方式进行焊接,焊后组织粗大,焊缝和热影响区较宽,焊接缺陷较多。激光焊由于具有热源密度集中、焊缝深宽比大、热影响区小、可控性好等特点,而且相对电子束焊气氛要求低,不需要真空环境,因此比较适合焊接特殊难焊的同种或异种金属。

针对异种金属的激光焊的研究主要集中在激光功率、焊接速度、离焦量等单因素变量对焊缝形貌和组织的影响。如中国科学院力学研究所的庞铭<sup>[1]</sup>、大连理工大学的吴东江<sup>[2]</sup>、北京工业大学的周春阳<sup>[3]</sup>和湖南大学的陈刚等<sup>[4]</sup>均从激光功率、焊接速度、离焦量等不同的工艺参数对异种金属焊缝形貌和组织的影响进行了

收稿日期: 2015-03-05; 收到修改稿日期: 2015-04-27; 网络出版日期: 2015-09-23

基金项目: 上海市自然科学基金(11ZR1414600)、上海市教委创新项目(11YZ214)

作者简介: 刘东宇(1987—),男,硕士研究生,主要从事异种金属的激光焊接方面的研究。

E-mail: liudongyu1016@126.com

导师作者: 李东(1974—),男,博士,副教授,主要从事激光焊、激光熔敷和电子束焊接等方面的研究。

E-mail: lid@sues.edu.cn(通信联系人)

研究。北京有色金属研究总院的王家淳等<sup>[9]</sup>对不同激光焊接线能量进行研究得出了有效的线能量曲线。仅有加拿大的Dowden等<sup>[9]</sup>对CO<sub>2</sub>激光深熔焊进行了数学模拟分析,发现在相同线能量输入的条件下,焊缝熔深随激光功率的提高而增大,而熔宽的变化很小。

采用连续光纤激光器对E36高强钢和304不锈钢进行了焊接,初步分析了在相同的激光能量条件下的焊接接头的形貌、显微组织、相组成、显微硬度和抗拉强度。为异种金属激光焊接工艺的改进提供了试验依据。

## 2 试验材料与方法

试验材料为110 mm×70 mm×3 mm的E36船用高强钢和304奥氏体不锈钢。E36组织由大量铁素体和少量的珠光体组成,其抗拉强度大于等于490 MPa,其化学成分见表1。304不锈钢组织由块状奥氏体组成,抗拉强度大于等于520 MPa,其化学成分见表2。

表1 E36高强钢化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of the E36 high strength steel (mass fraction, %)

C	Si	Mn	P	S	Als	Nb+Ni	Ceq
≤0.15	≤0.40	0.10~1.50	≤0.015	≤0.010	≥0.015	≤0.35	≤0.38

表2 304奥氏体不锈钢化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of the austenitic stainless steel 304 (mass fraction, %)

C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P
≤0.07	≤1.0	≤2.0	≤17.0~19.0	≤8.0~11.0	≤0.03	≤0.035

采用IPG公司生产的YLS-5000光纤激光器(波长约为1.07 μm,光斑直径为0.2 mm)进行焊接。在保持离焦量为-2 mm、保护气体为Ar、气体流量为17 L/min不变的情况下,激光功率分别为1、2、3、4 kW与之相对应的焊接速度为17.5、35、52.5、70 mm/s在线能量相同条件下进行对接。

分别采用质量分数为4%的硝酸乙醇和FeCl<sub>3</sub>盐酸硝酸腐蚀液(含50 mL HCL, 10 mL HNO<sub>3</sub>, 100 mL H<sub>2</sub>O, 10 g FeCl<sub>3</sub>)对E36与焊缝区和304不锈钢进行腐蚀。采用VHX-600光学显微镜和HITACHI S-3400N扫描电镜对宏观形貌和微观组织进行分析;采用PANalytical X'pert PRO型多晶X射线衍射仪(XRD)分析相组成;采用HXD-1000TMC/LCD硬度仪对焊缝进行硬度分析,加载应力为2 N,加载时间为15 s;按照GB/T2651-2008标准切割成标准片状拉伸试样并采用Zwick/RoellZ100型电子万能材料试验机对拉伸标准样进行拉伸试验。

## 3 结果与讨论

### 3.1 焊缝宏观形貌

如图1所示在相同线能量条件下的焊缝表面宏观形貌。由图可以看出,焊缝表面平整、连续,没有出现明显的裂纹和飞溅等缺陷。激光功率为1 kW的焊缝上表面宽度不均匀,在焊缝的起焊处较窄,在向后焊接过程中宽度逐渐增大然后趋于平稳。而其他激光功率条件下焊缝上表面宽度均匀但焊缝的表面平整度较差。

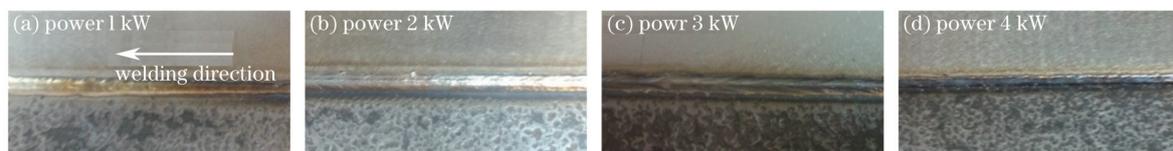


图1 焊缝的宏观形貌。(a) 1 kW; (b) 2 kW; (c) 3 kW; (d) 4 kW

Fig.1 Macrography of the welding seam. (a) 1 kW; (b) 2 kW; (c) 3 kW; (d) 4 kW

定义激光焊缝正面宽度为 $W_s$ ,焊缝中部宽度为 $W_z$ ,焊缝背面宽度为 $W_x$ ,焊缝深度为 $H$ 。将线能量和激光功率密度作为激光深熔焊的两个参数,研究对异种钢焊缝形貌、微观组织、显微硬度以及抗拉性能的影响。线能量指单位时间内焊缝单位长度上激光对工件所施加的能量,焊接线能量 $J$ 可表示为 $J=P/V$ ;激光功率密度指焊缝单位面积上激光对工件所施加的能量,激光功率密度 $I$ 可表示为 $I=P/S$  ( $P$ 为激光功率、 $V$ 为焊接速度、 $S$ 为光斑面积)。由此可计算出线能量和激光功率密度值,与焊缝宽度和深度的对应关系如表3所示。

表3 激光焊接时焊缝成形与激光线能量和功率密度的关系

Table 3 Relationship between weld shaping and heat input and power density in laser welding

Samples	Heat input $J/(W/mm)$	Power density $I/(W/mm^2)$	$W_s/mm$	$W_z/mm$	$W_x/mm$	$H/mm$
1	57.1	$3.2 \times 10^4$	1.89	0.64	0	1.60
2	57.1	$6.4 \times 10^4$	1.11	0.65	0.80	3
3	57.1	$9.6 \times 10^4$	1.15	0.55	0.52	3
4	57.1	$12.8 \times 10^4$	1.14	0.55	0.53	3

激光进行深熔焊时,金属表面在激光束的照射下被迅速加热,其表面温度在极短的时间内升高到沸点,使得金属熔化和气化。产生的金属蒸气以一定的速度离开熔池,逸出的蒸气对熔化的液态金属产生一个附加压力,使熔池金属表面向下凹陷,在激光光斑下产生一个小孔。当激光束在小孔底部继续加热时,产生的金属蒸气压迫孔底的液态金属使小孔进一步加深,当金属蒸气的反冲压力与液态金属的表面张力和重力平衡后,小孔不再继续加深,形成一个深度稳定的小孔而进行焊接<sup>[7]</sup>。

如图2所示在低倍显微镜下进行观察,发现焊缝的横截面均呈上宽下窄的锥形,但相同线能量条件下的焊缝形貌并不相似或一致。如图2(a)所示焊接过程中形成的小孔并没有穿透母材,焊缝上部较宽, $W_s$ 约为1.89 mm,且熔池形状近似为半球形,存在明显的激光热传导焊的特征,而其他三个试样则均被焊透,焊缝上部宽度 $W_s$ 约为1.1 mm。这是因为激光功率密度为 $3.2 \times 10^4 W/mm^2$ 时,虽已达到气化阈值但焊接速度低到一定程度后,随着热输入增加,熔化的金属越来越多,所产生的金属蒸气反冲压力不足以维持小孔的存在,小孔不仅不再加深,甚至会崩溃,焊接过程蜕变为传热焊,导致焊缝上部熔池变宽。与此同时小孔区温度上升,等离子体的浓度增加,对激光吸收增加,均使得在进行低速焊接时激光焊熔深存在一个最大值,约为1.6 mm。随着激光功率密度的增大,激光在深度方向热作用被强化而在宽度方向的热作用被弱化,所产生的金属蒸气压力足以维持小孔的存在使得金属母材被焊透,形成典型的上宽下窄的锥形焊缝。这与吴东江等<sup>[2]</sup>在研究工艺参数对焊缝形貌的影响的结论略有差异,与Dowden等<sup>[6]</sup>得到结论相一致。如表3所示试样2的焊缝中下部宽度( $W_z$ )要明显略大于试样3、4的中下部宽度。随着激光功率密度的增大,激光熔化和气化的金属增多从而使得焊缝变宽,但焊接速度的增加同时会减少激光作用于液态金属热传导熔化周围金属的时间,从而使得焊缝变窄。当激光功率与焊接速度同等比例的增加时,可以明显发现焊接速度对焊缝宽度的影响程度要大于激光功率。这与天津大学高燕等<sup>[8]</sup>所建立激光焊缝成形的数学模型结论相一致。如图2(c)与2(d)中所示激光功率为3 kW和4 kW条件下的两个焊缝形貌和尺寸上基本保持一致,可认为采用较高的激光功率进行焊接能够获得较稳定焊接工艺区间,对焊缝形貌的影响相对较小。综上所述,在进行激光深熔焊时焊接线能量和激光功率密度对焊缝形貌共同起决定性作用。

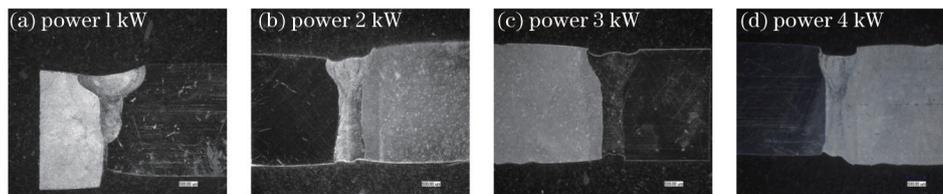


图2 焊缝的微观形貌。(a) 1 kW; (b) 2 kW; (c) 3 kW; (d) 4 kW

Fig.2 Microstructure of the welding seam. (a) 1 kW; (b) 2 kW; (c) 3 kW; (d) 4 kW

### 3.2 焊接接头的微观组织分析

#### 3.2.1 焊接接头一次组织

在4个焊接接头的中上部相同位置处取样观察微观形貌。在相同线能量条件下,虽然在单位长度上激光对工件所施加的能量相同,但是最终获得的焊缝微观形貌却不相同,如图3所示。在试样1中可以观察到焊缝多以胞状晶或胞状树枝晶进行生长;试样2中的焊缝则主要以树枝晶进行生长;试样3中的焊缝是以树枝晶和胞状晶的混合晶粒形态进行生长;试样4中焊缝同样是以树枝晶和胞状晶的混合晶粒形态进行生长,但胞状晶组织相对试样3较多。根据快速凝固理论分析可知:一般促使微观组织转变原因是温度梯度和结晶速度的改变。对于给定的合金,在正温度梯度下凝固时,如果结晶速度足够高,凝固界面将一直是平面状;如果温度梯度不够高,随着结晶速率的增大,凝固界面将经历从平面状到胞状、到树枝状、再到胞状、再

回到平面状的转变<sup>[9]</sup>。在激光功率为 1 kW 条件下进行焊接时,焊接过程中形成的小孔并没有穿透母材,激光在深度方向热作用被弱化而在宽度方向的热作用被强化,导致焊缝上部热输入较大,温度梯度较高,结晶速度较慢,因此在焊缝中多以胞状晶和胞状树枝晶进行生长,如图 3(a)所示。随着激光功率和焊接速度的增大,焊缝组织逐渐由胞状晶向树枝晶转变,如图 3(b)所示,经分析只有在试样 2 焊缝中的温度梯度低于试样 1,结晶速度大于试样 1 的条件下才会发生胞状晶向树枝晶的转变,由此可知,激光功率密度和焊接速度同比例增加的情况下,焊接速度对晶粒形态的影响程度要大于激光功率密度。在试样 3、4 中均存在胞状晶组织,且试样 4 胞状晶组织多于试样 3。由快速凝固理论分析得知可能有两种原因:1) 随着激光功率的增大,使得焊缝中的温度梯度增高,结晶速度降低,因此出现胞状晶;2) 随着焊接速度的增大,使得焊缝中的温度梯度降低,结晶速度增高,导致胞状晶的出现。观察发现,两个试样的焊缝中均存在一定数量的树枝晶,且试样 3 和试样 4 晶粒度均小于试样 2,由此可知胞状晶是第二种条件下生成(如果在温度梯度较高,结晶速度较低的情况下焊缝位置只有胞状晶的出现,且晶粒粗大)。这进一步论证了在相同的线能量条件下,焊接速度对晶粒形态的影响程度大于激光功率密度。

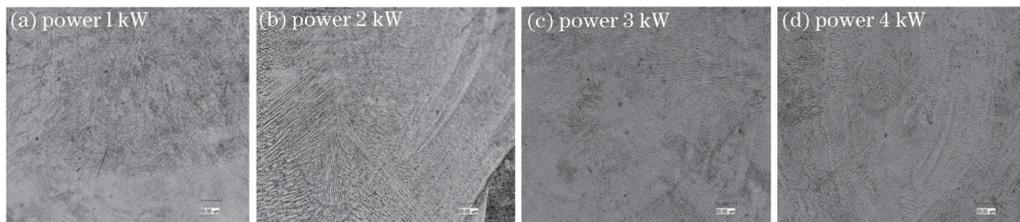


图3 焊缝的微观组织。(a) 1 kW; (b) 2 kW; (c) 3 kW; (d) 4 kW

Fig.3 Microstructure of the welding seam. (a) 1 kW; (b) 2 kW; (c) 3 kW; (d) 4 kW

### 3.2.2 焊接接头二次组织

在不添加焊丝的情况下 E36 高强钢和 304 不锈钢进行激光对焊,生成的焊缝组织取决于焊前两种板材的化学成分和焊接热输入。熔化的母材在经历冶金和稀释作用后,焊缝区的冷却速度以高于马氏体的临界冷却速度过冷到转变温度以下时会发生奥氏体向马氏体的组织转变,形成马氏体组织。如图 4(a)和 4(b)所示,焊缝组织主要为板条马氏体和颗粒状碳化物组成。经 XRD 分析发现焊缝主要是由树枝状的非平衡凝固的 M-FeCrNi 固溶体以及颗粒状的碳化物  $M_7C_3$  和  $Cr_{23}C_6$  组成。304 熔合区的组织则主要是由奥氏体和少量分布在奥氏体晶界上的  $\delta$ -铁素体组成,如图 4(c)所示。E36 侧的热影响区由于所受焊接热循环作用

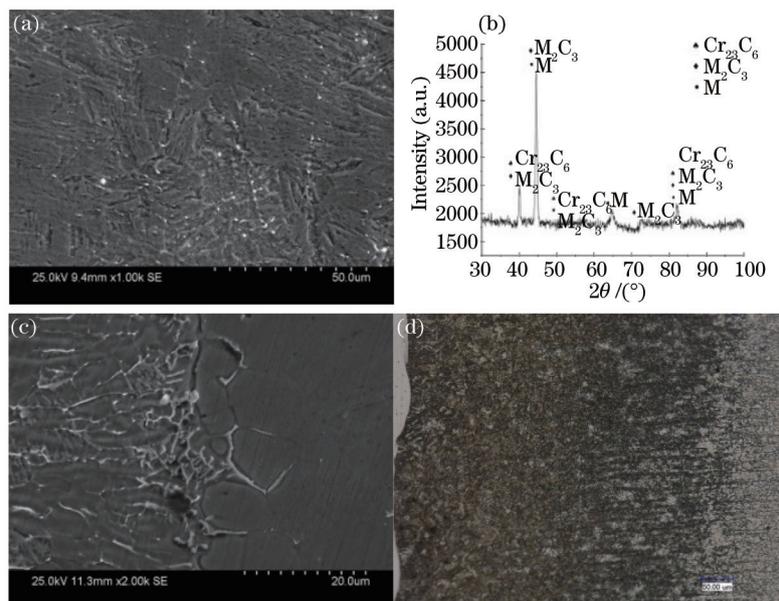


图4 焊缝的微观组织。(a) 焊缝组织; (b) 焊缝区 XRD 图谱; (c) 304 熔合区; (d) E36 热影响区

Fig.4 Microstructure of the welding seam. (a) Microstructure of welding seam; (b) X-ray diffraction of welding seam; (c) microstructure of 304 heat affect zone; (d) microstructure of E36 heat affect zone

不同,其加热和冷却过程都不相同,从熔合线向母材方向可分为过热区、正火区和不完全淬火区。该区域主要是由粗大的板条马氏体、贝氏体、铁素体混合组成,如图4(d)所示。

### 3.3 相同激光能量对焊缝硬度的影响

在相同线能量条件下沿焊缝的横向截面进行硬度测试如图5所示。观察发现,在线能量相同的条件下硬度值分布规律基本上保持一致。焊接接头的最高硬度均出现在焊缝区域,在304侧的熔合区的位置存在一个硬度突变,而热影响区的硬度相对于母材稍有降低,E36侧热影响区的硬度则逐渐从靠近焊缝区的较高硬度过渡到与母材硬度相一致。这是因为焊缝在熔池凝固后在高速冷却的条件下生成了硬度较高的板条马氏体组织,此外焊缝中析出的碳化物颗粒也起到了二次硬化的效果,所以焊缝区硬度最高。在304侧熔合区内析出了大量细小而无方向性的铁素体,铁素体的硬度明显高于奥氏体,因此在此区域的硬度明显高于304母材,而在热影响区的奥氏体晶粒由于受热循环的影响而发生粗化,晶粒粗化使得热影响区发生一定程度的软化。在E36侧靠近焊缝的热影响区由于生成了板条状的马氏体组织,导致在此区域硬度值偏高。观察还发现,激光功率为1 kW的硬度值要明显低于其他情况的硬度。由以上分析可知在1 kW条件下功率密度虽然较低,但焊接速度相对较慢,焊缝多以生成的粗大胞状树枝晶形态存在,硬度值相对较低。随着激光功率的增大,激光功率密度也随之增大,但焊接速度也相应增大,此时熔池中心温度梯度减小,过冷度增大,所以生了相对细小的树枝晶,硬度值较高。

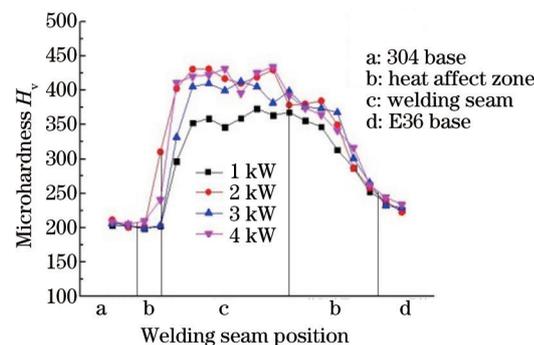


图5 焊缝横向硬度分布

Fig.5 Microhardness distribution of laser weld along transverse direction

### 3.4 相同激光能量对抗拉强度的影响

焊接接头的力学性能测试结果如表4所示,由于激光功率为1 kW的焊接接头未焊透,拉伸试验断口位于焊缝,其余试样均断在E36母材处。经计算,试样1的焊接接头的抗拉强度为248.8 MPa,约为E36母材的(抗拉强度为628 MPa)40%。利用扫描电镜观察两处的断口形貌,如图6(a)所示,母材的微观断口均呈延性韧窝断裂特征,这些初窝大致均匀细小,这是在正应力作用下形成的等轴韧窝断口。在韧窝底部发现有细小颗粒杂质,在拉伸试验过程当中,断裂首先在这些细小颗粒夹杂的表面与基体界面处脱开,进而开始形成显微空洞。随着应变的增加,显微空洞不断增大相互并吞,直至材料发生颈缩和破断。所以在母材中存在的非金属夹杂或第二相粒子会对母材的强度造成不利的影晌。在焊缝微观断口可以明显发现焊合区和未焊合区如图6(b)所示。在焊合区存在一些大小不等的韧窝,韧窝较浅且分布不均匀。由于焊缝组织为板条马氏体,接头强度很高,但是塑性相对较差,试样断裂时没有明显的屈服现象发生,塑性变形量很小,表现为准解理的特征,如图6(c)所示。

表4 焊接接头抗拉强度

Table 4 Tensile test of welding sample

No	Heat input $J/(W/mm)$	Power density $I/(W/mm^2)$	Tensile strength /MPa	Crack place
1	57.1	$3.2 \times 10^4$	248.8	Welding seam
2	57.1	$6.4 \times 10^4$	628.1	E36 base
3	57.1	$9.6 \times 10^4$	629.2	E36 base
4	57.1	$12.8 \times 10^4$	628.9	E36 base

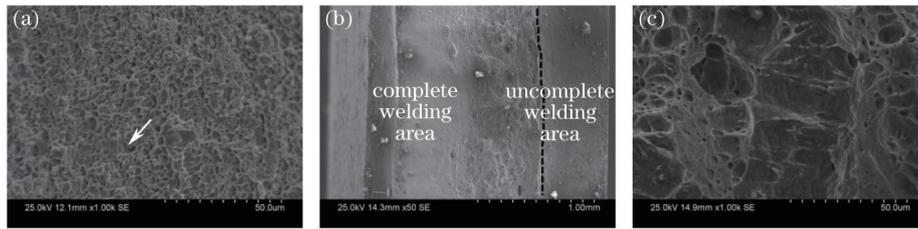


图6 断口形貌。(a) E36母材;(b)焊缝宏观缝;(c)焊缝微观缝

Fig.6 Fracture morphology. (a) E36 base metal; (b) macroscopic seam of welding seam; (c) microcosmic seam of welding seam

## 4 结 论

1) 在相同的线能量条件下,低功率密度激光进行焊接时对焊缝形貌影响较大;反之,则可以获得稳定焊接工艺区间,对焊缝形貌影响较小。

2) 激光功率密度和焊接速度同比例增加的情况下,焊接速度对晶粒形态的影响程度大于激光功率密度。

3) 焊缝区主要是由马氏体组织和少量的颗粒状碳化物 $M_7C_3$ 和 $Cr_{23}C_6$ 组成。304侧熔合区的组织主要是由奥氏体和少量 $\delta$ -铁素体组成。E36侧热影响区生成了板条马氏体、贝氏体和铁素体组织。

4) 在相同线能量条件下,焊接接头最高硬度均出现在焊缝中心区。在激光功率为1 kW时,焊缝硬度略低于其他条件下的硬度值。

5) 在相同线能量条件下,激光功率为1 kW时由于存在未焊透,断裂位置在焊缝处,焊合区呈现准解理的特征。其他条件下的断裂位置均在E36母材上,断口处呈韧性断裂。

## 参 考 文 献

- Pang Ming, Yu Gang, Liu Zhao, *et al.*. Dissimilar metal of K418 and 42CrMo full penetration laser welding[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(8): 1122-1126.  
庞 铭, 虞 钢, 刘 兆. K418与42CrMo异种金属的激光穿透焊接[J]. 中国激光, 2006, 33(8): 1122-1126.
- Wu Dongjiang, Zhang Tianwu, Ma Guangyi, *et al.*. Influence of welding parameters on themorphology of Fe-Ni alloy with continuous wave YAG laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0303003.  
吴东江, 张天武, 马广义, 等. 连续激光焊接Fe-Ni合金工艺参数对焊缝形貌影响[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0303003.
- Chen Gang, Yang Quanyi, Zhou Mingzhe, *et al.*. Study of the microstructure and proper of M42/X32 dissimilar metal CO<sub>2</sub> laser welding joints[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, 40(11): 89-94.  
陈 刚, 杨全毅, 周明哲, 等. M42/X32异种金属CO<sub>2</sub>激光焊接接头组织和性能的研究[J]. 湖南大学学报, 2013, 40(11): 89-94.
- Zhou Chunyang, Wu Shikai, Xiao Rongshi. Experimental investigation on fiber laser welding stainless steel 304 to super alloy GH3128[J]. Applied Laser, 2012, 32(2): 108-111.  
周春阳, 吴世凯, 肖荣诗. 高温合金-不锈钢异种金属光纤激光焊接试验研究[J]. 应用激光, 2012, 32(2): 108-111.
- Wang Jiachun, Wang Xizhe, Hui Songxiao. Research of linear heat input and laser focus position for laser welding HE130 Titanium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(2): 179-183.  
王家淳, 王希哲, 惠松晓. HE130合金激光焊接线能量与焦点位置研究[J]. 中国激光, 2003, 30(2): 179-183.
- Dowden J, Kapadia P. A mathematical investigation of the penetration depth in key hole welding with continuous CO<sub>2</sub> lasers[J]. Journal of Physics D: Appl Phys, 1995, 28(11): 2252-2261.
- 李亚江, 李嘉宁. 激光焊接/切割/熔敷技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012: 47-53.
- Gao Yan, Han Guoming, Li Jianqiang. Numerical model of formation of laser seam for welding stainless steel[J]. Electric Welding Machine, 2005, 35(10): 46-49.  
高 燕, 韩国明, 李建强. 不锈钢激光焊缝成形的数学模型[J]. 电焊机, 2005, 35(10): 46-49.
- Kurz W, Fisher D J. Fundamentals of Solidification[M]. Li Jianguo, Hu Qiaodan Transl. Beijing: Higher Education Press, 2010: 120-121.  
库尔兹, 费希尔. 凝固原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 120-121,

栏目编辑: 张浩佳