

# E36与304异种金属光纤激光焊接接头的组织分析

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** 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)、能谱仪(EDS)和X射线仪(XRD)对焊接接头的金相组织进行了分析,并测试了接头处的显微硬度。结果表明,光纤激光焊对异种钢焊接的焊缝成形良好。在304侧的熔合区位置析出的 $\delta$ 铁素体随着焊接速度的增加逐渐减少。靠近304不锈钢的焊缝区为平面晶,焊缝中心和靠近E36侧焊缝区为柱状晶。随着焊接速度的增加,304不锈钢侧柱状晶逐渐增多,在焊缝中心胞状晶数量逐渐增多,E36侧没有明显变化。焊缝主要由马氏体组织和少量碳化物组成,焊接速度对焊缝组织的影响不明显。焊缝区成分较均匀,两侧的熔合区存在成分梯度且受焊接速度影响较大。在E36侧热影响区生成了板条马氏体、铁素体和珠光体组织。最高硬度出现在焊缝区,随着焊接速度的增加,焊缝和E36侧的热影响区硬度增加。

**关键词** 激光技术;激光焊接;异种钢;组织分析

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.041403

## Microstructure Analysis of Fiber Laser Welding between E36 and 304 Stainless Steel

Liu Dongyu Li Dong Li Kaibin Chen Qianqian

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

**Abstract** E36 high-strength steel and 304 austenitic stainless steel are welded by fiber laser. Microstructure is investigated by means of optical microscopy (OM), energy disperse spectroscopy (EDS), scanning electron microscopy (SEM) and X-ray Diffraction (XRD). Micro hardness of weld is tested by micro hardness tester. The results show that the weld joint of dissimilar steel with good quality could be obtained by fiber laser. In the position of 304 fusion zone,  $\delta$ -ferrites are gradually decreased with the increase of welding speed. The microstructures of welding metal close to 304 stainless steel is planar crystal while that close to E36 and welding center are columnar crystal. With the increase of welding speed, the quantity of cellular crystal of welding metal close to 304 stainless steel is increasing and so does cellular crystal of welding center, but there has no significant change in weld microstructure near the E36. Weld zone is mainly consisted by martensites and a small amount of carbides. Microstructural evolution caused by welding speed is not obvious. Composition of welding line zone is well-distributed. However, there is composition gradient on both sides of the fusion zone, which is influenced significantly by welding speed. Lath-shaped martensites ferrites and pearlites are produced on the heat affected zone of E36. The highest hardness value appears on welding center. The hardness of weld zone and E36 heat affected zone is increasing with the increase of welding speed.

**Key words** laser technique; laser welding; dissimilar steel; microstructure analysis

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3390

### 1 引言

随着经济的发展和科学技术的不断进步新材料新工艺应用日益广泛,对零部件的综合性能要求越来越高,单一金属结构很难满足工业生产的需求<sup>[1]</sup>。为了满足不同工作条件下对材料性能的要求,同时为了降低

收稿日期: 2014-11-09; 收到修改稿日期: 2014-11-24; 网络出版日期: 2015-03-26

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

成本,常常需要将不同的材料焊接起来。

目前不锈钢与碳钢或镍基合金等异种金属对接时多以氩弧焊、手工电弧焊、熔化极气体保护焊等填丝方式进行焊接。河北工业大学的王可等<sup>[2]</sup>采用手工钨极惰性气体保护焊(TIG)焊对 254SMO/Q235B 异种钢板进行焊接试验。上海交通大学欧平等<sup>[3]</sup>采用手工 TIG 焊对 SA508/316L 异种钢板进行焊接试验。铝、镁、钛等异种合金对接时多采用激光和电子束进行焊接。清华大学的宋志华等<sup>[4]</sup>采用激光焊对 3 mm 厚钛合金 TA15 和铝合金 5A06 进行焊接。北京航空制造工程研究所左从进等<sup>[5]</sup>采用电子束对高温钛合金 Ti-55 和 Ti-60 进行焊接。而有关激光焊接碳钢与不锈钢的报道相对较少。

本文利用光纤激光器对 E36 高强钢和 304 不锈钢进行了焊接试验,研究了在快速凝固条件下焊接接头的显微组织、相组成、成分分布和显微硬度,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 $\geq 490$  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 $\geq 520$  MPa,其化学成分见表 2。

表 1 E36 高强钢的化学成分(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         |
|-------------|-------------|-----------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| $\leq 0.15$ | $\leq 0.40$ | 0.10-1.50 | $\leq 0.015$ | $\leq 0.010$ | $\geq 0.015$ | $\leq 0.35$ | $\leq 0.38$ |

表 2 304 奥氏体不锈钢的化学成分(质量分数,%)

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

| C           | Si         | Mn         | Cr                   | Ni                  | S           | P            |
|-------------|------------|------------|----------------------|---------------------|-------------|--------------|
| $\leq 0.07$ | $\leq 1.0$ | $\leq 2.0$ | $\leq 17.0\sim 19.0$ | $\leq 8.0\sim 11.0$ | $\leq 0.03$ | $\leq 0.035$ |

采用 IPG 公司生产的 YLS-5000 光纤激光器(波长约为 1.07  $\mu\text{m}$ ,光斑直径为 0.27 mm)进行焊接,如图 1 所示。在保持激光功率为 2 kW、离焦量为 -2 mm、保护气体 Ar 的气体流量为 17 L/min 不变的情况下,分别采用 20、25、30、35、40 mm/s 等不同的焊接速度进行焊接。

分别采用质量分数为 4% 硝酸酒精和 FeCl<sub>3</sub> 盐酸硝酸腐蚀液(含 50 ml 的 HCL, 10 ml 的 HNO<sub>3</sub>, 100 ml 的 H<sub>2</sub>O, 10 g 的 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(OM)和 HITACHI S-3400N 扫描电镜(SEM)对微观组织和成分进行分析;用 PANalytical X'pert PRO 型多晶 X 射线衍射仪(XRD)分析相组成;采用 HXD-1000TMC 显微硬度计沿焊缝横向进行硬度测试,加载 200 g,加载时间为 15 s。

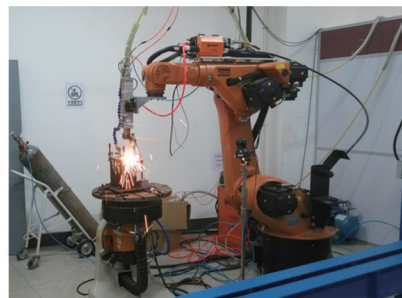


图 1 激光焊

Fig.1 Laser welding

## 3 结果与讨论

### 3.1 焊缝组织的宏观形貌特征

不同焊速条件下焊缝的成型平整均匀,焊缝表面无裂纹产生,未出现飞溅和气孔等焊接缺陷,如图 2(a)所示。在激光焊极高的加热和冷却速率下,焊后得到的焊缝和热影响区的宽度较窄,组织也相对细小。随着焊接速度的增加热输入量的减小焊缝的宽度由 1 mm 减小到 0.7 mm, E36 侧的热影响区的宽度也由 0.8 mm

减小到 0.5 mm。304 不锈钢的热影响区没有明显的变化,宽度约为 0.035 mm。焊接接头由 304 不锈钢侧的热影响区和熔合区、焊缝、E36 高强钢侧的熔合区和热影响区组成,如图 2(b)所示。

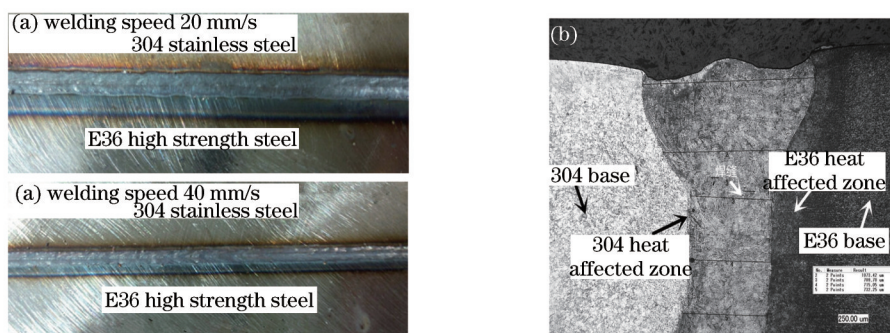


图2 焊缝。(a)不同焊接速度焊缝形貌;(b)焊缝微观形貌

Fig.2 Welding seam. (a) Macrography of the welding seam at different welding speeds; (b) microstructure of the welding seam

### 3.2 焊接接头微观组织分析

#### 3.2.1 304 不锈钢热影响组织分析

从图 3 可以观察发现,与 TIG 焊接方法<sup>[6]</sup>相比,304 侧的热影响区晶粒粗化现象不明显,晶界和晶内也未发现碳化物。熔合区的组织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。细小的铁素体是加热过程中局部熔化的金属在重新凝固结晶过程中生成的,如沿晶界或沿轧制方向形成的铁素体,通常认为它的形成机理是:由于过热度较低,熔合区在液态停留时间短,冷却速度快,且该区中 Cr、Ni 元素含量较 304 不锈钢母材低,形成的铁素体组织较细小<sup>[7]</sup>。如图 3(a)在焊接速度为 20 mm/s 的条件下,熔合区与 304 不锈钢母材之间形成一个 20  $\mu\text{m}$  左右的热影响区,在此区域的奥氏体晶粒由于受热循环的影响而发生粗化,在熔合区位置生成的  $\delta$ -铁素体多以骨架状的形态存在。随着焊接速度增加热影响区晶粒粗化不明显,熔合区铁素体的析出被抑制,生成的  $\delta$ -铁素体多以颗粒状和蠕虫状的形态存在,如图 3(b)所示。在晶粒边界形成的铁素体对奥氏体的晶粒长大起到了一定的限制作用。

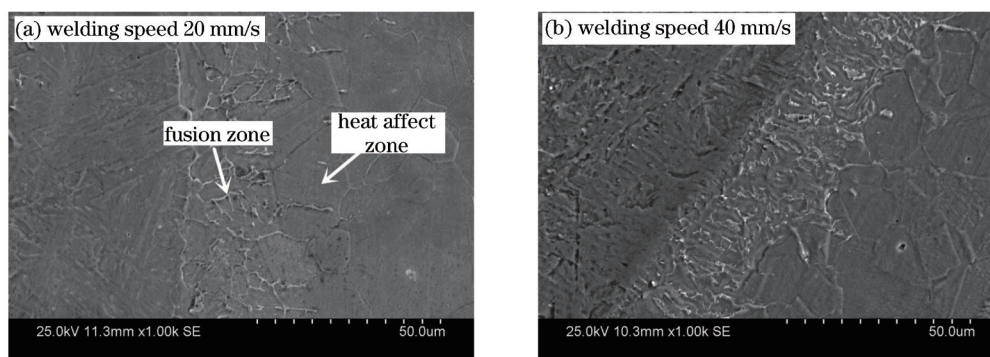


图3 不同焊接速度下 304 侧热影响区组织

Fig.3 Microstructure of 304 heat affected zone at different welding speeds

#### 3.2.2 焊接接头组织形成及变化的原因

焊接完成后熔池快速凝固。根据快速凝固理论分析可知:焊缝凝固组织的形态主要受凝固条件及材料合金元素的影响。一般促使微观组织转变的原因是温度梯度(G)和结晶速度(V)的改变,如图 4(f)所示。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>[8]</sup>。如图 4(a)和 4(c)所示,在 304 不锈钢侧的熔合线附近,主要以细小的平面晶进行生长,在靠近 E36 高强钢侧的熔合线附近,多以胞状晶或树枝晶进行生长。这是由于 304 奥氏体不锈钢热导率比较低,结晶时释放出来的结晶潜热来不及散失,温度梯度较高,结晶速度较慢,因此在熔合线附近多以平面晶进行生长。而 E36 高强钢侧的热导率较高,结晶时释放出的结晶潜热很快散失,熔合线附近温度梯度较低,晶粒结晶速度较高,多以胞状和树枝晶进行生长。一般地,从熔合区到焊缝中心,温度梯度逐渐降低,结晶速度逐渐增大,所以

从熔合线到近焊缝中心区域,晶粒逐渐从平面晶向胞状晶或树枝晶进行转变,如图4(b)所示。随着焊接速度的增加,热输入量不断减小、温度梯度不断降低、结晶速度不断增大,304侧的平面晶逐渐向胞状晶或树枝晶进行转变,如图4(e)所示。E36侧由于散热较快,温度梯度较低,所以晶粒形态没有发生明显变化,如图4(d)所示。焊缝中心区则由树枝晶向胞状晶转变,从而阻碍了柱状晶的生长,使得近焊缝中心区柱状晶变窄,焊缝中心区胞状晶区宽化。此外,随着焊接速度的增加,凝固时间减少,造成树枝晶间的距离减小,晶粒逐渐细化。

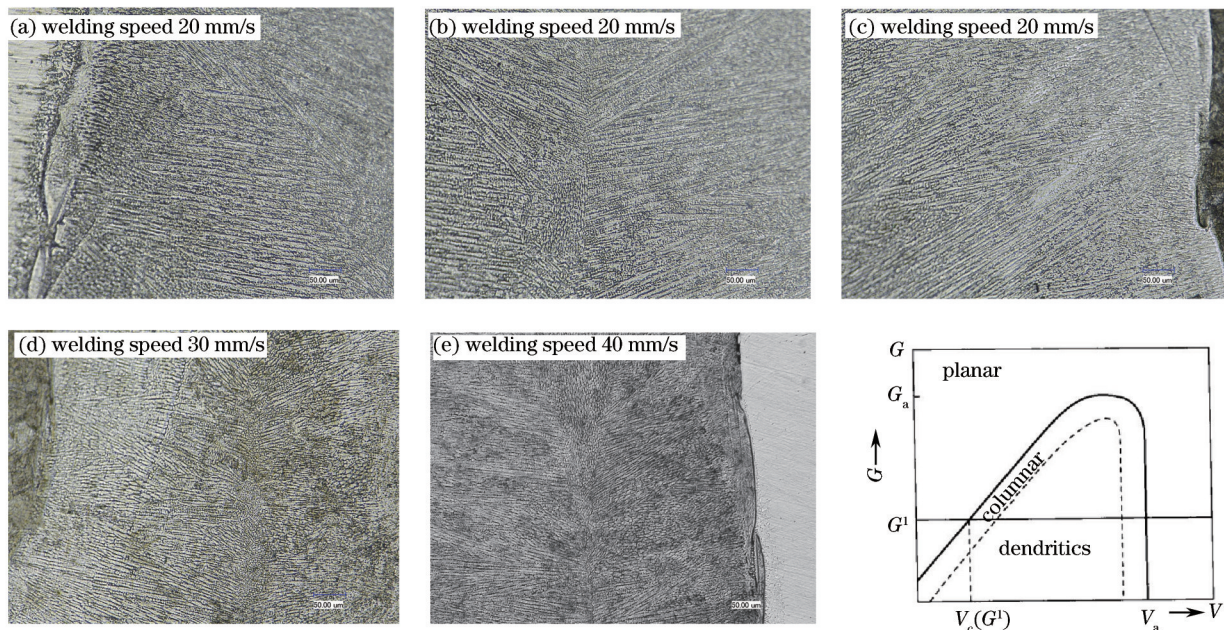


图4 焊缝组织。(a) 304侧焊缝;(b)焊缝中心;(c) E36侧焊缝;(d)焊缝;(e)焊缝;(f)快速凝固图

Fig.4 Microstructure of welding seam. (a) Weld edge near the 304; (b) weld center; (c) weld edge near the E36; (d) welding seam; (e) welding seam; (f) rapid solidification figure

### 3.2.3 焊接接头组织组成与成分分布

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, Cr、Ni 元素的含量相对于 304 不锈钢母材都有所降低,如表 3 所示。这将导致奥氏体组织不能在室温下保持稳定,同时奥氏体在向马氏体转变时的温度也会随着 Cr、Ni 含量的减少不断升高。焊接完成后,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 5(a)所示,焊缝组织主要由板条马氏体和颗粒状碳化物组成,这些碳化物颗粒析出数量随着距焊缝中心的距离的减小而增多,这是因为在焊缝中心处凝固时间较晚,有较长的析出时间,因此析出物较多。经 XRD 衍射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。在不同焊接速度条件下衍射峰的强度和位置没有发生变化,说明在一定条件下,焊接速度对焊缝的组织产生的影响不大,如图 5(b)所示。通过对整条焊缝的成分分析发现:焊缝位置的 Cr、Ni 元素含量的总体分布较均匀,只在靠近焊缝中心位置出现了 Cr 元素突变。焊缝两侧的熔合区位置 Cr、Ni 元素含量则出现明显的成分梯度。这是由于激光焊具有极高的冷却速率,熔池具有充分的流动性,合金元素能够平均地分布于焊缝中,这有利于接头保持均匀的力学性能和耐腐蚀性能<sup>[9]</sup>。在靠近焊缝中心的位置由于析出的碳化铬的颗粒较多,且该碳化物熔点较高,在焊接过程中不易被溶解,在焊缝中以未熔碳化物的形式存在<sup>[10]</sup>,因此在图 5(c)中存在一个突变点。而 Ni 元素在焊缝中不形成化合物,只是以元素单质的形式存在,在焊接过程中会逐渐扩散到焊缝中,且分布均匀。由于 E36 高强钢中含 Fe 元素较多,不含 Cr、Ni 等合金元素,而 304 不锈钢金属中含有大量的 Cr、Ni 合金元素,经稀释后造成 Cr、Ni 元素在熔合区两侧存在较大的浓度差。此外,在熔合区位置可以明显的发现随着焊接速度的增加 Cr、Ni 元素扩散的距离逐渐减小,这是由于在焊接速度较低、热输入量较高的情况下,熔合区的 Cr、Ni 元素可以有更多的时间进行较长距离的扩散。在 304 奥氏体不锈钢中 Ni 含量较高,使得

黏滞性较高、液体流动性较差,因此在同样的焊接速度条件下 E36 侧熔合区 Cr 和 Ni 扩散距离较大,如图 5 (d)所示。Cr、Ni 含量的增加会提高对抗应力腐蚀和沿晶腐蚀的能力,因此激光焊接时在保证力学性能的情况下可以适当向 304 不锈钢侧偏移,提高焊缝的 Cr、Ni 的含量以起到提高耐腐蚀性的作用。

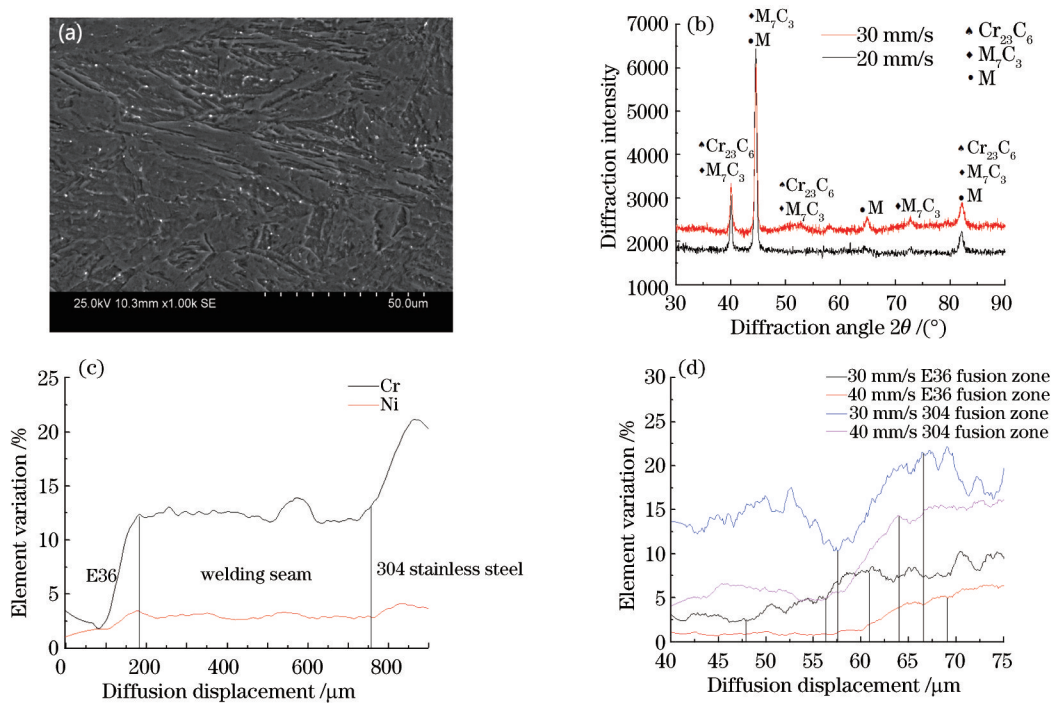


图 5 焊缝的组织 and 成分。(a)焊缝组织;(b)焊缝区 XRD 图谱;(c)焊缝成分;(d)熔合区两侧成分  
Fig.5 Microstructure and elementary composition of welding seam. (a) Microstructure of welding seam; (b) X-ray diffraction of welding seam; (c) composition of welding seam; (d) composition of fusion zone

表 3 焊缝处的化学成分(质量分数,%)

Table 3 Chemical composition of welding seam (mass fraction,%)

| Position         | C    | Cr    | Ni   | Fe    |
|------------------|------|-------|------|-------|
| Martensite base  | 0.84 | 10.11 | 5.65 | 84.23 |
| Carbide particle | 1.23 | 12.53 | 5.50 | 80.74 |

### 3.24 E36 热影响组织分析

由于热影响区受焊接热循环作用的影响,在 E36 侧距焊缝不同距离的位置,其加热和冷却过程都不相同,各点的组织也是不均匀的<sup>[11]</sup>。E36 侧热影响区由完全淬火区和不完全淬火区组成,如图 6 所示。完全淬火区的温度达到  $AC_3$  以上,该区内所有金属在加热过程中都经历了奥氏体化,因而在焊接快冷后形成了马氏体组织。不完全淬火区的温度值处于  $AC_1 \sim AC_3$  区域,在焊接加热时,铁素体基本不变化,只有珠光体转变为含碳量较高的奥氏体。在随后快速冷却的过程中,奥氏体转变为马氏体,而铁素体的形态基本不变,但是有所长大,因此该区的组织特征是马氏体、铁素体以及珠光体的混合组织。在较高焊接速度下热影响区组织

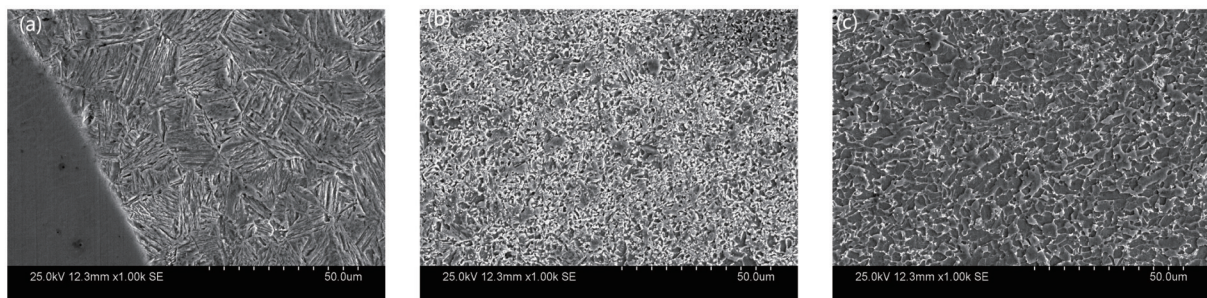


图 6 E36 热影响区。(a)完全淬火区;(b)不完全淬火区;(c)E36 母材

Fig.6 Microstructure of E36 heat affect zone. (a) Completely quenched zone; (b) incompletely quenched zone; (c) E36 base metal

变得更加细小,且宽度随着焊接速度的增加逐渐变窄。

## 4 硬度分析

### 4.1 焊接接头硬度

对不同焊速条件下的焊接接头横截面进行硬度测试,如图7所示。观察发现,在不同焊速条件下的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,导致此区域硬度值偏高。随着距焊缝距离的增加,生成的马氏体的数量逐渐减少而珠光体和铁素体的数量逐渐增多,硬度值也相应的降低。

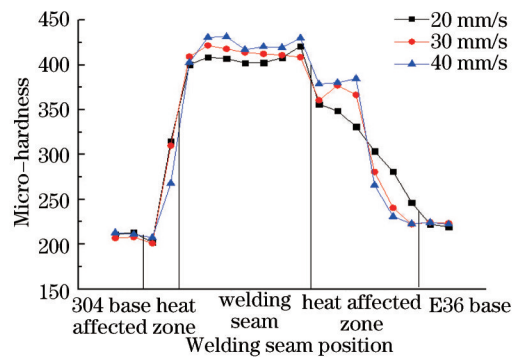


图7 硬度分布

Fig.7 Microhardness distribution

### 4.2 不同焊速焊缝硬度变化

随着焊接速度的增加,可以明显发现焊缝区的硬度逐渐增大,在距离E36熔合区的相同位置处,硬度值逐渐增大,且随着焊接速度的增加,组织硬度值变化加快。这是因为焊接速度增大,冷却速度加快,焊缝区生成的柱状晶晶粒逐渐细化,所以硬度值逐渐增大。焊接热输入的减小会使E36侧金属冷却速度升高,热影响区的组织变得更加细小,从而导致显微硬度升高<sup>[12]</sup>。

## 5 结 论

1) 采用激光焊接E36高强度钢和304不锈钢实现了对异种钢的深熔对接,焊缝成形良好。随着焊接速度的增加,在304不锈钢的熔合区析出 $\delta$ 铁素体逐渐减少,靠近304侧的焊缝位置逐渐从平面晶转变为柱状晶,焊缝区逐渐从柱状晶转变为胞状晶,且晶粒逐渐细化。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,焊接速度对焊缝组织影响较小。E36侧热影响区生成了板条状的马氏体、铁素体和索氏体,随着焊接速度的增加组织细化且热影响区变窄。

2) 焊缝区的Cr和Ni分布较均匀。两侧的熔合区则存在成分梯度,且随着焊接速度增加,熔合区两侧的Cr和Ni元素扩散距离逐渐减小。

3) 在不同的焊接速度条件下,焊接接头最高硬度均出现在焊缝中心区。同时随着焊接速度的增加,E36侧热影响区和焊缝区随着晶粒的细化硬度值呈现逐渐增大的趋势。

### 参 考 文 献

1 Feng Jicai, Wang Ting, Zhang Binggang, *et al.*. Analysis of present condition of vacuum electron beam welding in dissimilar materials [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(10): 108-111.

冯吉才,王 廷,张秉刚,等.异种材料真空电子束焊接研究现状分析[J]. 焊接学报, 2009, 30(10): 108-111.

- 2 Wang Ke, Zheng Zhentai, Xue Haitao, *et al.*. Microstructure of 254SMO/Q235B dissimilar steel welded joint [J]. China Welding Institution, 2013, 34(2): 105–108.  
王 可, 郑振太, 薛海涛. 254SMO/Q235B 异种钢焊接接头显微组织[J]. 焊接学报, 2013, 34(2): 105–108.
- 3 Ou Ping, Sun Jian, Zhang Maolong, *et al.*. Microstructure of SA508/316L dissimilar steel welding joints [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2013, 34(10): 132–138.  
欧 平, 孙 坚, 张茂龙, 等. SA508/316L 异种钢焊接接头的显微组织[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(10): 132–138.
- 4 Song Zhihua, Wu Aiping, Yao Wei, *et al.*. Influence of laser offset on microstructure and mechanical properties of Ti/Al dissimilar joint by laser welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(1): 105–108.  
宋志华, 吴爱萍, 姚 为, 等. 光束偏移量对钛/铝异种合金激光焊接接头组织和性能的影响[J]. 焊接学报, 2013, 34(1): 105–108.
- 5 Zuo Congjin, Li Jinwei, Yu Wei, *et al.*. Tensile performance of Ti55 and Ti60 joint welded by electron beam welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(4): 103–106.  
左从进, 李晋伟, 余 伟, 等. 高温钛合金 Ti-55 与 Ti-60 电子束焊接接头力学性能[J]. 焊接学报, 2011, 32(4): 103–106.
- 6 Zhang Qi, Wang Jiaqing, Chen Guohong, *et al.*. Microstructures and mechanical properties of T92/Super304H dissimilar steel weld joints [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(2): 396–402.  
张 祺, 王家庆, 陈国宏, 等. T92/Super304H 异种钢焊接接头的组织结构和力学性能[J]. 中国有色金属报, 2013, 23(2): 396–402.
- 7 Chen Chen. Research on Welding Technology and Microstructure and Properties of Welded Joint of Stainless Steel/Carbon Steel Composite Plate [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012: 27.  
陈 忱. 不锈钢/碳钢复合板的焊接工艺及接头组织性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012: 27.
- 8 W Kurz, D J Fisher. Fundamentals of Solidification [M]. 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.
- 9 Wang Baiping, Zhao Yong, Huang Jian. Investigation on microstructure of thick plate stainless steel joint welded by multi-pass laser welding with filler wire [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0203008.  
王柏平, 赵 勇, 黄 坚. 厚板不锈钢激光填丝多道焊的接头组织分析[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0203008.
- 10 Chen Gang, Yang Quanyi, Zhou Mingzhe, *et al.*. Study of the microstructure and properties 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.
- 11 Dong Danyang, Wang Guanjun, Ma Min, *et al.*. Study on microstructure and properties of laser welding dual phase steel joints for an auto-body [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0903002.  
董丹阳, 王观军, 马 敏, 等. 车用双相钢激光焊接接头组织性能研究[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0903002.
- 12 Jia Jin, Yang Shanglei, Ni weiyuan, *et al.*. Study on microstructure and properties of laser welding joints of marine high strength steel E36 [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0203002.  
贾 进, 杨尚磊, 倪维源, 等. 船用高强钢 E36 激光焊接接头组织和性能的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0203002.

栏目编辑: 张浩佳