

# 激光焊接热输入对26Cr-3.5Mo铁素体不锈钢组织性能的影响

刘腊腊<sup>1,2</sup> 胡绳荪<sup>1,2</sup> 申俊琦<sup>1,2\*</sup> 马立<sup>1,2,3</sup> 魏鑫<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>天津大学材料科学与工程学院, 天津 300072

<sup>2</sup>天津大学天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300072

<sup>3</sup>宝山钢铁股份有限公司研究院, 上海 200431

**摘要** 采用连续激光焊接工艺对26Cr-3.5Mo铁素体不锈钢进行焊接,研究了激光焊接热输入(HI)对焊接接头显微组织和力学性能的影响。采用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、透射电镜(TEM)和能谱分析仪(EDS)研究焊缝显微组织和析出相的析出规律,采用维氏显微硬度仪和拉伸试验机对焊接接头的机械性能进行测试。结果表明,焊缝中心产生细小的等轴晶,随着激光焊接热输入的增加,焊缝中心等轴晶区的宽度增加,其占整个焊缝截面的比例先增加再减小。热影响区(HAZ)宽度较窄,为0.1~0.2 mm,且没有发生明显的晶粒粗化现象。焊接接头HAZ发生软化,其显微硬度值低于焊缝和母材。焊接接头抗拉强度与母材相当,但断后伸长率小于母材,且随激光焊接热输入的增加而减小。

**关键词** 激光技术; 激光焊; 铁素体不锈钢; 显微组织; 显微硬度; 拉伸性能

中图分类号 TG 456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0203005

## Effect of Laser Welding Heat Input on Microstructure and Properties of 26Cr-3.5Mo Ferritic Stainless Steel

Liu Lala<sup>1,2</sup> Hu Shengsun<sup>1,2</sup> Shen Junqi<sup>1,2</sup> Ma Li<sup>1,2,3</sup> Wei Xin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

<sup>2</sup>Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China

<sup>3</sup>Baosteel Research Institute, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 200431, China

**Abstract** Continuous laser welding is conducted to investigate the effect of heat input (HI) on the microstructure and mechanical properties of 26Cr-3.5Mo ferritic stainless steel. The optical microscope (OM), scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM) and energy dispersive spectrometer (EDS) are used to observe the microstructure and the precipitates in the weld. And the mechanical properties are tested by the microhardness tester and the tensile tester. The result show that there are fine equiaxed grains at the center of the weld, and with the increase of the laser welding heat input, the width of equiaxed crystal zone increases, but the proportion of equiaxed crystal zone to the weld cross section increases firstly and then drops. The heat affected zone (HAZ) is narrow. Its width is 0.1~0.2 mm, and no obvious grain coarsening appears in the HAZ. The HAZ is soften and its microhardness is lower than that of the weld and the base metal. The tensile strength of the welded joint is close to that of the base metal. But the percentage elongation of the welded joint after fracture is less than that of the base metal and decreases with

收稿日期: 2014-07-29; 收到修改稿日期: 2014-09-16

作者简介: 刘腊腊(1987—),女,硕士研究生,主要从事不锈钢激光加工方面的研究。E-mail: liull\_tju@126.com

导师简介: 胡绳荪(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事不锈钢、铜/不锈钢异种金属激光焊接、焊接过程模拟仿真以及焊接自动化技术与设备等方面的研究。E-mail: huss@tju.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: shenjunqi@tju.edu.cn

the increase of the laser welding heat input.

**Key words** laser technique; laser welding; ferritic stainless steel; microstructure; microhardness; tensile property

**OCIS codes** 140.3390; 180.5810; 350.3390; 350.3850

## 1 引 言

铁素体不锈钢具有导热系数大、膨胀系数小、抗氧化性好、抗应力腐蚀等优点,被广泛用于制作蒸发器、冷凝器、太阳能热水器、海水淡化等化工设备<sup>[1-2]</sup>。但是,传统的弧焊方法会导致焊缝和热影响区(HAZ)晶粒严重粗化<sup>[3]</sup>,从而降低焊接接头的力学性能和耐腐蚀性能,大大限制了其工程应用。激光焊接是利用高能量密度束流作为热源的焊接方法,具有能量密度高、焊接热输入小、焊接速度快等优点<sup>[4-6]</sup>,使得焊接接头高温存留时间短,从而可以有效抑制铁素体不锈钢微观组织粗化。张红霞等<sup>[7]</sup>发现热输入对超薄443铁素体不锈钢的组织性能具有重要的影响,且脉冲激光焊能够有效降低焊接热输入(HI),提高焊接接头的综合性能。

26Cr-3.5Mo铁素体不锈钢是一种超级铁素体不锈钢,由于具有较高的Cr、Mo含量,其微观组织对焊接热输入更加敏感。目前国内外对26Cr-3.5Mo铁素体不锈钢焊接的研究相对较少,更是缺少关于激光焊这种高能束焊接方法下其组织性能的研究。为此,采用激光焊接方法对26Cr-3.5Mo铁素体不锈钢进行焊接,探讨激光焊接热输入对焊接接头显微组织、显微硬度和拉伸性能的影响规律,为解决铁素体不锈钢焊接组织粗化问题提供新的焊接方法与工艺。

## 2 实验条件及方法

采用Nd:YAG固体激光器(JK2003SM)对26Cr-3.5Mo铁素体不锈钢冷轧板进行对接焊实验,母材的化学成分如表1所示,焊接参数如表2所示。焊接试件尺寸为100 mm×100 mm×0.8 mm。

焊前使用600#砂纸打磨焊接试件表面,用酒精擦拭试件表面,去除试件表面的氧化膜及油污。焊接过程中采用纯氩气保护,为了加强保护,采取正面加拖罩以及试件背面通保护气的措施。

焊后截取焊接接头的横截面制作金相试样,进行研磨、抛光,用强腐蚀性溶液(盐酸、硝酸和冰乙酸体积之比为3:1:1)进行腐蚀。通过金相显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)和透射电镜(TEM)观察焊接接头的微观组织,采用维氏显微硬度仪测量焊接接头硬度,通过拉伸试验机进行焊接接头拉伸强度实验,断后伸长率采用拉伸测试仪进行测试,焊接接头拉伸试样的尺寸如图1所示。

表1 26Cr-3.5Mo铁素体不锈钢化学成分(质量分数: %)

Table 1 Chemical composition of 26Cr-3.5Mo ferritic stainless steel (mass fraction: %)

| C      | Cr   | Mo   | Nb    | N      | Ti    |
|--------|------|------|-------|--------|-------|
| 0.0092 | 26.5 | 3.58 | 0.335 | 0.0066 | 0.170 |

表2 激光焊接参数

Table 2 Parameters of laser welding

| Sample No. | Laser power $P / W$ | Welding velocity $V / (mm \cdot s^{-1})$ | Heat input $/(J \cdot mm^{-1})$ |
|------------|---------------------|--|---------------------------------|
| 1          | 1600                | 35                                       | 45.7                            |
| 2          | 1800                | 35                                       | 51.4                            |
| 3          | 1600                | 25                                       | 64.0                            |

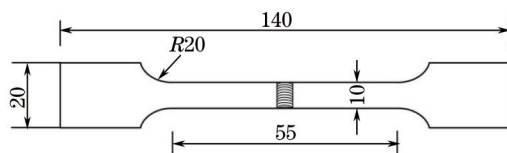


图1 拉伸试样几何尺寸

Fig.1 Dimension of tensile specimen

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 母材显微组织分析

图2为母材显微组织形貌,母材由细小的等轴晶组成,根据ASTM E112金属平均晶粒度评级标准,采用截线法,测得母材的平均晶粒尺寸为 $47\ \mu\text{m}$ ,晶粒度为6级。从图2可以看出,在母材基体的晶内和晶界上分布许多细小的析出物,通过能谱分析仪(EDS)分析其为 $(\text{Ti}, \text{Nb})\text{C}$ 。

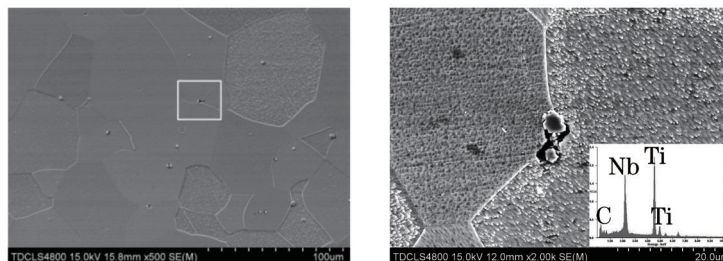


图2 母材显微组织

Fig.2 Microstructure of base metal

#### 3.2 焊接接头显微组织分析

图3显示了焊接接头的显微组织。由图3可以看出,焊缝由细小的中心等轴晶和边缘柱状晶组成,对中心等轴晶进行SEM观察(见图4)发现部分中心等轴晶以 $\text{TiN}$ 作为异质形核核心。Villafuerte等<sup>[8]</sup>对铁素体不锈钢惰性气体钨极保护焊(TIG)焊缝中心等轴晶的形成机理进行研究,指出中心等轴晶主要以 $\text{TiN}$ 和破碎的枝晶作为异质形核核心,因此可知,在激光焊接铁素体不锈钢的过程中,同样会发生焊缝中心等轴晶以 $\text{TiN}$ 为形核核心的现象。这是因为熔化母材上Ti的碳氮化物在焊接加热时全部溶解,在熔池冷却过程中这些Ti与N能够在 $1500\ \text{℃}$ 以上的液态中首先形核并析出,然后作为异质形核质点促进等轴晶的形成。同时由于激光焊能量集中,使焊接熔池内部产生强烈的对流,将这些异质形核质点带到焊缝中心,从而形成了大量中心等轴晶。

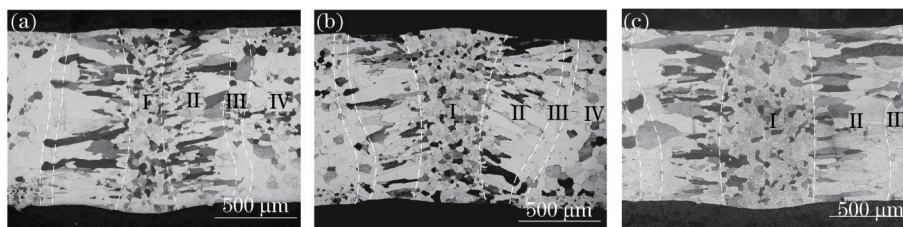


图3 焊接接头显微组织(I: 中心等轴晶区; II: 边缘柱状晶区; III: 热影响区; IV: 母材)

Fig.3 Microstructure of weld joints. (I: equiaxed crystal zone; II: columnar crystal zone; III: heat-affected zone; IV: base metal)

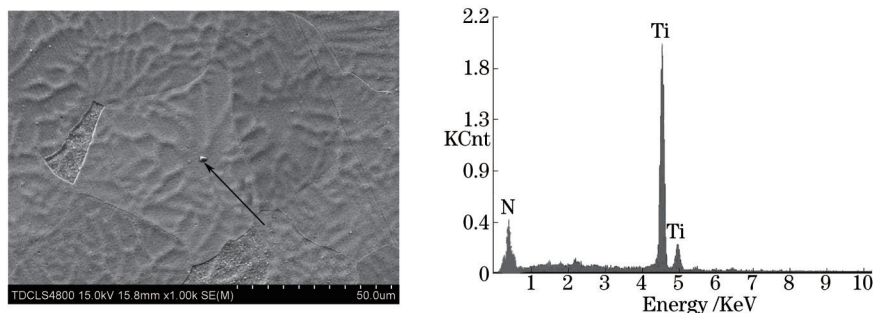


图4 焊缝中心等轴晶

Fig.4 Equiaxed grains at center of weld

图5为焊缝中心等轴晶区占整个焊缝截面积的比例 $R_s$ 、中心等轴晶晶粒尺寸和边缘柱状晶宽度随激光焊接热输入变化曲线。由图5(a)可以看出,随着热输入增加,焊缝截面积和中心等轴晶面积均增大。在激光焊接过程中,热源处等温线呈椭圆形,在移动热源的前方温度梯度较大,热源后方的温度梯度小<sup>[9]</sup>,增加激光功率使得熔池温度升高,熔池过热程度增大;减小焊接速度,熔池受热时间延长,熔池中心高温区宽度增

加。这些都会导致热源后方熔池中心区域的温度梯度  $G$  在冷却过程中进一步减小,从而温度梯度  $G$  与此时熔池凝固速度  $R$  的比值  $G/R$  减小。而  $G/R$  值越小,在柱状晶前沿产生的成分过冷程度越大,越有利于在熔池中心发生异质形核,使形成的中心等轴晶数量增加<sup>[10]</sup>。此外,当激光功率从 1600 W 增加至 1800 W 时,激光功率密度增大,焊缝中心产生的等轴晶数量快速增加,而焊缝截面增加速度相对较慢,使得  $R_s$  明显增大;当焊速从 35 mm/s 减小至 25 mm/s 时,单位长度激光作用时间延长,中心等轴晶数量增加的同时焊缝截面显著增大,使得  $R_s$  虽有所增加,但增加量却相对较小。

焊缝边缘柱状晶通过联生机制向焊缝内部生长,对于 26Cr-3.5Mo 铁素体不锈钢,由于  $\alpha$  铁的自扩散系数较高,铁素体焊缝金属比奥氏体焊缝金属更容易发生再结晶,晶粒容易粗化<sup>[7]</sup>。图 5(b)表明,随着激光焊接热输入的增加中心等轴晶晶粒尺寸和焊缝边缘柱状晶宽度逐渐增大。这是因为增加激光功率和减小焊接速度,都会使熔池的冷却速度降低,晶粒发生长大的时间增长,因而晶粒粗化倾向增大。

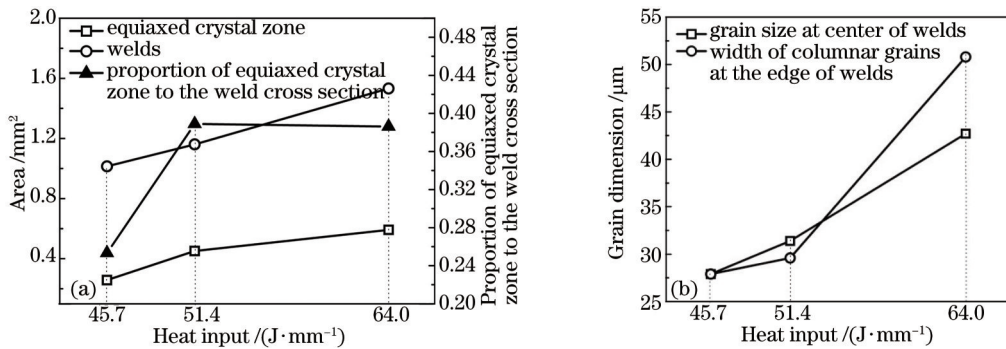


图5 激光焊接热输入对焊缝微观组织的影响。(a) 焊缝中心等轴晶区占整个焊缝截面积的比例  $R_s$ ; (b) 等轴晶尺寸及柱状晶宽度  
Fig.5 Effect of laser welding heat input on microstructure of weld. (a) Proportion of equiaxed crystal zone to the weld cross section  $R_s$ ; (b) grain size of the equiaxed crystal and width of the columnar grain

图 6 为试样 1 焊接接头部分区域的显微照片,与母材相比,焊缝内的析出物非常少。为了进一步分析焊缝中的析出物,对其进行了 TEM 分析(见图 7)。由图 7 可知,在焊缝内存在细小的圆形  $\text{TiC}$ , 直径约为  $0.2 \mu\text{m}$ , 且位错在这些圆形  $\text{TiC}$  附近发生聚集,表明  $\text{TiC}$  颗粒具有钉扎位错的作用,使焊缝区域强度、硬度升高。

由图 6 可知焊接接头的 HAZ 比较窄,为  $0.1\sim 0.2 \text{ mm}$ , HAZ 晶粒略有长大,但没有发生明显的粗化现象。而在铁素体不锈钢弧焊过程中,常常伴有 HAZ 晶粒严重粗化而导致不锈钢韧性降低的问题。但是对于激光焊来说,由于激光焊接热量集中、焊接速度快,对热影响区的影响大大减小,从而有效抑制了 HAZ 晶粒的粗化。

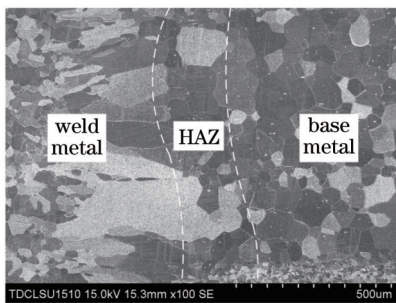


图6 焊接接头显微照片( $P=1600 \text{ W}$ ,  $V=35 \text{ mm/s}$ )

Fig.6 Micrograph of welded joint ( $P=1600 \text{ W}$ ,  $V=35 \text{ mm/s}$ )

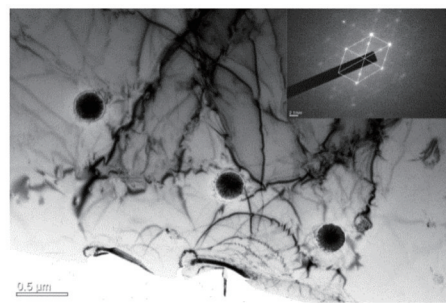


图7 焊缝 TEM 分析

Fig.7 TEM analysis of weld

### 3.3 显微硬度分析

为了研究激光焊接热输入对焊缝显微硬度的影响,对焊接接头进行了显微硬度测试,测试点距离焊缝表面  $0.2 \text{ mm}$ ,图 8 为焊接接头的显微硬度分布。由图 8 可知,焊缝中心硬度随热输入的增加而减小。根据 Hall-Petch 公式,室温下晶粒尺寸越小,单位体积所包含的晶界越多,强化效果越好<sup>[11]</sup>,所以晶粒越细小硬度值越高。而随着激光焊接热输入的增加,焊缝中心等轴晶晶粒尺寸逐渐增大,所以其硬度值逐渐降低。由图 5(b)可知,当焊接热输入为  $45.7 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-1}$  和  $51.4 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-1}$  时,焊缝晶粒尺寸小于母材,其焊缝硬度值高于母材;

当焊接热输入为  $64.0 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$  时,焊缝中心晶粒尺寸与母材相当,而边缘柱状晶晶粒明显粗化,同时由于母材是冷轧板,具有较高的位错密度,使得焊缝的硬度值低于母材。此外,焊接接头的 HAZ 发生软化,其硬度值小于焊缝和母材。这是因为经历焊接热循环后,HAZ 晶粒中的位错密度有所下降,同时 HAZ 晶粒发生长大,导致其硬度低于母材和焊缝。

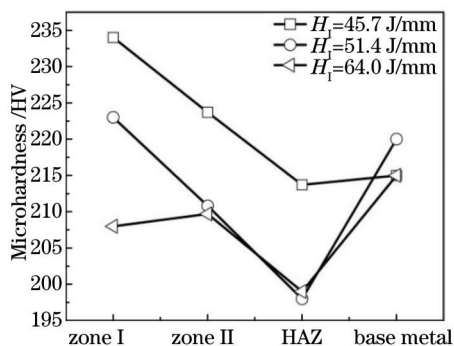


图 8 焊接接头显微硬度

Fig.8 Microhardness of welded joint

### 3.4 拉伸试验结果与分析

在室温下对 26Cr-3.5Mo 铁素体不锈钢母材及激光焊接接头进行了静载拉伸试验,拉伸速率为  $2 \text{ mm/min}$ ,试样标距为  $35 \text{ mm}$ ,表 3 为拉伸试验结果。

表 3 拉伸试验结果

Table 3 Results of tension test

| Sample No. | Heat input $H_1 / (\text{J} \cdot \text{mm}^{-1})$ | Tensile strength $R_m / \text{MPa}$ | Elongation percentage $A / \%$ | Fracture position |
|------------|--|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| Base metal | —  | 730.0                               | 25.00                          | —                 |
| 1          | 45.7   | 733.7                               | 22.79                          | Base metal        |
| 2          | 51.4   | 718.1                               | 19.53                          | Weld zone         |
| 3          | 64.0   | 726.2                               | 18.86                          | Weld zone         |

由表 3 可以看出,断裂主要发生在硬度值较高的焊缝和母材处。通过对焊缝断口起裂处的观察发现(见图 9),断裂主要发生在焊缝粗大柱状晶的晶界处,由于焊缝内柱状晶具有明显的方向性,垂直于熔合线生长,在拉伸试验时与拉伸载荷方向近似平行,使得其承载能力明显低于各向异性的等轴晶晶粒<sup>[12]</sup>。母材上存在较多的 (Ti, Nb)C 析出颗粒,破坏了基体的连续性,促进裂纹的产生。图 10 表明,在母材断口的韧窝底部存在颗粒状的 Ti(C, N)。而 HAZ 虽然硬度相对较低,但是由于激光焊产生的 HAZ 宽度非常窄,同时在拉伸过程中对 HAZ 也会产生一定的应变强化作用。因此,裂纹更容易在粗大的柱状晶和析出物较多的母材处产生。

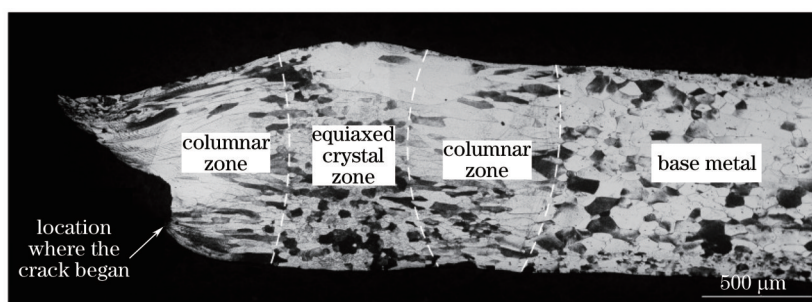


图 9 拉伸断口的微观组织( $P=1600 \text{ W}$ ,  $V=25 \text{ mm/s}$ )

Fig.9 Microstructure of tensile fracture ( $P=1600 \text{ W}$ ,  $V=25 \text{ mm/s}$ )

此外,26Cr-3.5Mo 铁素体不锈钢激光焊焊接接头的抗拉强度与母材相当,但焊接接头的断后伸长率均小于母材,而且随着激光焊接热输入的增加,焊接接头的断后伸长率逐渐减小。这是因为随着激光焊接热输入的增大,焊缝中心等轴晶及边缘柱状晶晶粒尺寸逐渐增大,晶粒之间协调变形的能力变差,导致塑性变形越困难,延展性降低。

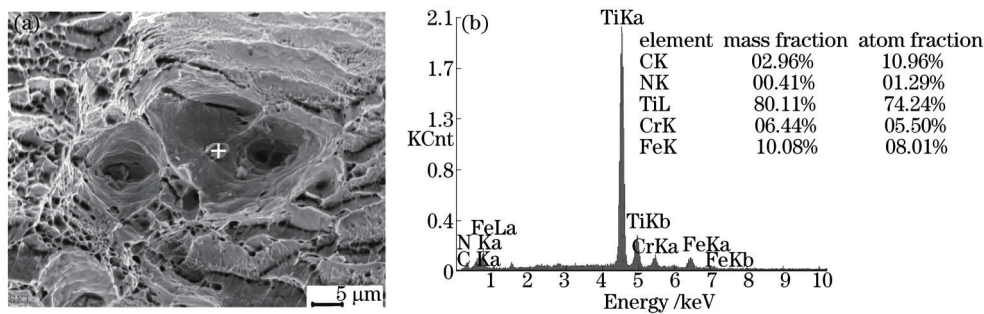


图 10 母材断口析出物分析

Fig.10 Precipitates at base metal fracture

静载拉伸后不同功率下焊缝的断口形貌如图 11 所示。由图 11 可知,当热输入为  $45.7 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$  时,焊缝断口的韧窝均匀细小,为等轴韧窝,其断裂方式为韧性断裂;当热输入为  $51.4 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$  时,焊缝断口的韧窝变浅、变少,为韧性断裂,但韧性下降;当热输入为  $64.0 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$  时,焊缝断口由大量细小的韧窝和准解理面组成,其断裂方式为韧-脆混合型断裂。

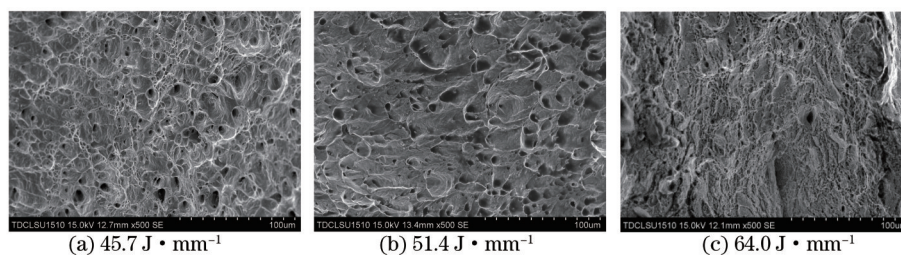


图 11 断口形貌图

Fig.11 Fracture surface morphology

## 4 结 论

1) 26Cr-3.5Mo 铁素体不锈钢激光焊焊缝中心存在细小的等轴晶,部分等轴晶以 TiN 作为异质形核核心,并且随着焊接热输入的增加,焊缝中心等轴晶区宽度增加,但其占整个焊缝截面的比例先增大,后减小。

2) 由于激光焊接热量集中、焊接速度快,得到了较窄的焊接热影响区,其宽度为 0.1~0.2 mm,且在 HAZ 内没有发生明显的晶粒粗化现象。

3) 26Cr-3.5Mo 铁素体不锈钢激光焊 HAZ 发生软化,其显微硬度值低于焊缝和母材。随着激光焊接热输入的增加,焊缝中心的硬度逐渐减小。

4) 26Cr-3.5Mo 铁素体不锈钢激光焊焊接接头抗拉强度与母材相当,但断后伸长率明显降低,并且随着热输入的增加,焊接接头的断后伸长率逐渐下降,焊缝断裂方式由韧性断裂变为韧-脆混合型断裂。

## 参 考 文 献

- 1 Kang Xifan. Ferritic Stainless Steel[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012. 14-19.  
康喜范. 铁素体不锈钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012. 14-19.
- 2 Wei Xin, Dong Junhua, Tong Jian, *et al.*. Influence of temperature on pitting corrosion resistance of Cr26Mo1 ultra pure high chromium ferrite stainless steel in 3.5% NaCl solution[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(4): 502-507.  
魏 欣, 董俊华, 佟 健, 等. 温度对 Cr26Mo1 超纯高铬铁素体不锈钢在 3.5%NaCl 溶液中耐点蚀性能的影响[J]. 金属学报, 2012, 48(4): 502-507.
- 3 Zhang Yonglan, Li Yajiang, Yu Yanzhi. Characteristics of microstructure in welding zone of the ferritic stainless steel[J]. Materials for Mechanical Engineering, 1994, 18(6): 14-16.  
张永兰, 李亚江, 于衍志. 铁素体不锈钢焊接区域的组织特征[J]. 机械工程材料, 1994, 18(6): 14-16.
- 4 Li Yang, Hu Shengsun, Shen Junqi. Microstructural characteristics and mechanical properties of pulsed Nd:YAG laser welding copper and 316L stainless steel[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0703008.

- 李 扬, 胡绳荪, 申俊琦. 紫铜与 316L 不锈钢脉冲激光焊微观组织及力学性能[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0703008.
- 5 Zhao Lin, Tsukamoto Susumu, Arakane Goro, *et al.*. Influence of welding parameters on weld depth and porosity in high power fiber laser welding[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1103004.
- 赵 琳, 塚本进, 荒金吾郎, 等. 大功率光纤激光焊接过程中工艺参数对熔深和气孔的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1103004.
- 6 Wu Dongjiang, Zhang Tianwu, Ma Guangyi, *et al.*. Influence of welding parameters on the morphology 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的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0303003.
- 7 Zhang Hongxia, Pei Feifei, Wang Zhibin, *et al.*. Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of ultra-thin 443 ferritic stainless steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(4): 15-18.
- 张红霞, 裴飞飞, 王志斌, 等. 热输入对超薄 443 铁素体不锈钢组织性能的影响[J]. 焊接学报, 2013, 34(4): 15-18.
- 8 J C Villafuerte, H W Kerr, S A David. Mechanisms of equiaxed grain formation in ferritic stainless steel gas tungsten arc welds[J]. Materials Science and Engineering, 1995, 194: 187-191.
- 9 Han Guoming, Li Jianqiang, Yan Qingliang. Modeling and simulation of the laser welding temperature field of stainless steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(3): 105-108.
- 韩国明, 李建强, 闫青亮. 不锈钢激光焊温度场的建模与仿真[J]. 焊接学报, 2006, 27(3): 105-108.
- 10 S Kou, Y Le. Welding parameters and the grain structure of weld metal- A thermodynamic consideration[J]. Metallurgical Transactions A, 1988, 19(4): 1075-1082.
- 11 C Y Cui, X G Cui, X D Ren, *et al.*. Microstructure and microhardness of fiber laser butt welded joint of stainless steel plates[J]. Materials and Design, 2013, 49: 761-765.
- 12 Zhang Tingting, Wang Wenxian, Yan Zhifeng, *et al.*. Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of 445J2 ultra-pure ferritic stainless steel welding joints[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2014, 45(2): 210-214.
- 张婷婷, 王文先, 闫志峰, 等. 热输入对 445J2 超纯铁素体不锈钢焊接接头显微组织和力学性能的影响[J]. 太原理工大学学报, 2014, 45(2): 210-214.

栏目编辑: 张 雁