

# 10CrSiNiCu 船用高强钢光纤激光焊接接头组织和性能

魏菁<sup>1</sup> 王欢<sup>2</sup> 石少坚<sup>2</sup> 黄坚<sup>1</sup> 施可扬<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海交通大学上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240

<sup>2</sup>沪东中华造船(集团)有限公司, 上海 200129

**摘要** 为了促进船用高强钢结构激光焊接技术发展,利用光纤激光对8 mm厚的10CrSiNiCu钢板进行了填丝对接焊接。分析了焊接接头的微观组织形貌与硬度、拉伸、弯曲和冲击等力学性能,研究了焊接热输入对接头组织与性能的影响。结果表明,10CrSiNiCu钢激光焊缝区组织主要为马氏体+铁素体+贝氏体;热影响区粗晶区组织主要为块状铁素体+粒状贝氏体+马氏体。焊接接头硬度分布不均匀,焊缝区硬度最高,热影响区次之。当焊接线能量从5.00 kJ/cm降至3.64 kJ/cm时焊缝区硬度从346 HV增加至396 HV。接头拉伸试样均断裂在母材。3倍板厚压头作用下焊接试样可正向弯曲约113°,比母材降低近60°。熔合线和焊缝区的低温(-40℃)冲击功随着焊接热输入的增加而先增加后减小,在 $E=4.20$  kJ/cm时熔合线和焊缝区的冲击功最高,分别达到95 J和101 J,冲击试样断口均呈韧性断裂特征。

**关键词** 激光技术; 10CrSiNiCu钢; 激光填丝焊接; 力学性能

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0303003

## Microstructure and Properties of Fiber Laser Wire Welded Joints of 10CrSiNiCu High Strength Shipbuilding Steel

Wei Jing<sup>1</sup> Wang Huan<sup>2</sup> Shi Shaojian<sup>2</sup> Huang Jian<sup>1</sup> Shi Keyang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

<sup>2</sup>Hudong-Zhonghua Shipbuilding (Group) Co., Ltd., Shanghai 200129, China

**Abstract** To promote the mechanical properties of marine high strength steels joints, fiber laser butt welding on 8 mm thick 10CrSiNiCu steel is performed by using filler wire. The microstructures, hardness, tensile strength, bending property and impact energy (at sub-zero temperature) of the welded joints are analyzed. Also, the effects of welding heat input on microstructures, hardness and fracture behavior of the welded joints are also studied. The results show that the microstructure of the weldment mainly consists of martensite + ferrite + bainite, and its hardness is the highest among the welded joint zones. When heat input decreases from 5.00 kJ/cm to 3.64 kJ/cm, the average hardness of weldment increases from 346 HV to 396 HV. Tensile specimens are all broken in base metal. A bending angle of 113° can be reached at room temperature, which is 60° lower than base metal. At the heat input of  $E=4.20$  kJ/cm, the impact energy at fusion line and weld seam reaches its highest value, 95 J and 101 J, respectively.

**Key words** laser technique; 10CrSiNiCu steel; laser wire welding; mechanical property

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 180.5810; 350.3390

## 1 引 言

船舶甲板和舱壁的焊缝具有平直、长度长<sup>[1]</sup>的特点,焊接接头形式为平板对接和T型接头,适合自动化焊

收稿日期: 2015-7-17; 收到修改稿日期: 2015-10-29

基金项目: 国防基础科研计划(A0720132003)

作者简介: 魏菁(1990—),女,硕士研究生,主要从事激光焊接方面的研究。E-mail: danningshui@126.com

导师简介: 黄坚(1967—),男,副教授,硕士生导师,主要从事激光焊接方法、组织与性能以及激光表面改性等方面的研究。

E-mail: jhuang@sjtu.edu.cn(通信联系人)

接。随着造船精度要求的不断提高,而激光焊接的高效、快速、低热输入、小变形等特点<sup>[2]</sup>则能适应船舶结构低变形焊接的要求<sup>[3-4]</sup>。光纤激光因其比CO<sub>2</sub>激光具有更好的光束质量、更大的连续输出功率、更高的电光转换效率以及可光纤导光等优点<sup>[5-6]</sup>引起了国内外学者的重视<sup>[7]</sup>,在激光焊接中也得到了越来越广泛的使用<sup>[8]</sup>。

10CrSiNiCu 钢是我国自行研制的船舶非耐压壳体用钢,它既具有较高的屈服强度(>400 MPa),又具有良好的低温(-40 ℃)冲击韧性和焊接性能<sup>[9]</sup>。由其构成的船舶甲板和舱壁的焊接制造目前采用的是埋弧焊、熔化极气体保护焊等常规焊接方法,但是应用常规焊接方法产生的主要问题是热输入大、焊接变形大,给船舶制造精度的提高带来了困难。现国内船用高强钢的激光焊接处于研究阶段,尚未在工程中得到应用。杨榄生等<sup>[10]</sup>采用 IPG YLS-5000 光纤激光器自熔焊接了 10CrSiNiCu 钢三明治板 T 型接头,所得的焊缝和热影响区的显微硬度均高于母材,焊缝组织为板条马氏体,热影响区组织主要为马氏体、残余奥氏体及少量析出碳化物。贾进等<sup>[11]</sup>采用 YAG 激光器研究了 3.2 mm 厚的 E36 激光自熔焊接接头组织和性能,发现接头组织以及硬度特性也随着焊速变化而变化,当焊接速度达到 70 mm/s 时,焊缝区域的最高硬度达到 448.9 HV,焊接速度为 20~60 mm/s 的拉伸试样均断裂在母材。低合金高强度钢的激光自熔焊和复合焊的接头力学性能、接头区软化、接头疲劳性能等方面也得到了一定的研究<sup>[12-16]</sup>。

由上可知,10CrSiNiCu 船用高强钢的激光焊接研究较少,针对其光纤激光填丝焊接接头的组织和性能的研究尚未见报道。激光填丝焊接既具有较好的间隙容忍度,又具有比激光复合焊更低的焊接热输入和变形,在船用钢结构低变形焊接制造中有应用潜力。因此,本文采用 IPG-10000 型光纤激光器,针对 10CrSiNiCu 船用高强钢对接接头,研究激光热输入对接头组织、显微硬度、拉伸、三点弯曲、低温冲击性能的影响,进而确定合适的工艺参数范围,为后续激光填丝焊接 10CrSiNiCu 船用高强钢的工业应用提供参考。

## 2 试验材料及试验方法

试验采用船用高强钢 10CrSiNiCu 钢板,厚度为 8 mm,激光填丝焊中所使用的焊丝是 ER50-6 焊丝,母材和焊丝熔敷金属的化学成分及力学性能分别见表 1 和表 2。如图 1 所示,母材金相组织主要由块状铁素体和带状珠光体组成,其中带状组织为轧制组织。

表 1 10CrSiNiCu 钢板和 ER50-6 焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of the 10CrSiNiCu base metal and ER50-6 wire (mass fraction, %)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
10CrSiNiCu base metal	0.061	0.600	0.910	0.014	0.005	0.480	0.651	0.644
ER50-6 wire	0.06~0.15	0.80~1.15	1.40~1.85	0.025	0.025	0.50	0.15	0.15

表 2 10CrSiNiCu 钢板和 ER50-6 焊丝的力学性能

Table 2 Mechanical properties of the 10CrSiNiCu base metal and ER50-6 wire

	Yield strength /MPa	Tensile strength /MPa	Elongation /%
10CrSiNiCu base metal	458	555	31
ER50-6 wire	≥420	500	≥22

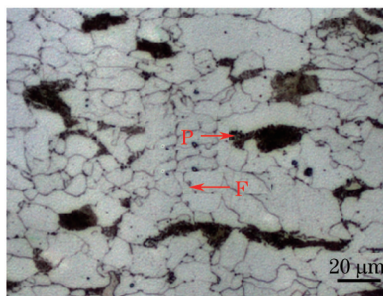


图 1 10CrSiNiCu 钢板金相组织

Fig.1 Microstructure of 10CrSiNiCu base metal steel

试验采用 YLS 10000 光纤激光器,其光束质量为 12 mm·mrad。激光工作头为 Precitec 公司的 YW52,焦

距为 300 mm, 聚焦后焦斑直径为 0.68 mm。保护气体采用氩气, 其流量为 15 L/min。离焦量设为 0。试验发现, 在离焦量、焊接速度、送丝速度等其他参数不变的情况下, 只改变激光功率, 得到熔透且成形良好的对接焊缝的激光功率窗口宽度很窄, 只有 50~100 W。为了获得明显的不同焊接热输入(即焊接线能量), 试验选取了 1.5、1.2、0.9 m/min 三个焊接速度, 分别在激光功率为 9100、8400、7500 W 时得到刚好焊透且成形最优的焊缝, 进而开展不同焊接热输入下的接头组织性能分析, 具体焊接参数如表 3 所示。

表 3 10CrSiNiCu 钢板激光填丝焊工艺参数

Table 3 Parameters of 10CrSiNiCu steel feeding wire laser welding

No.	Power/W	Welding speed /(m/min)	Feeding speed /(m/min)	Line energy /(kJ/cm)
1	9100	1.5	4.5	3.64
2	8400	1.2	3.6	4.20
3	7500	0.9	2.7	5.00

选用平板对接形式, 焊前利用铣床对母材进行车铣, 去除试样边缘的毛刺及表面氧化膜, 保证焊接零间隙, 再用丙酮清洗钢板焊接端面, 焊接试验现场照片如图 2 所示。



图 2 焊接试验现场

Fig.2 Welding experiment site

焊后试样用侵蚀液为体积分数 4% 的硝酸酒精腐蚀, 采用 Zeiss 金相显微镜观察焊接接头微观组织形貌; 采用 ZwickZH $\mu$  HD 型全自动硬度计, 200 g 载荷保压 15 s 下测定焊接接头的显微硬度; 用刨床加工力学性能测试试样至厚度 6 mm, 以去除焊后变形和焊缝余高, 并采用 Zwick/Roell 多功能材料试验机在室温条件下进行拉伸试验和三点弯曲试验; 采用摆锤式冲击试验机, 在 -40℃ 条件下进行冲击试验, 非标试样尺寸为 55 mm $\times$  10 mm $\times$  6 mm, 分别在焊缝中心和熔合线(FL)上板厚一半处开 V 型缺口, 并测量冲击断口侧膨胀值; 采用 NOVA NanoSEM230 场发射低真空超高分辨扫描电镜对冲击试样断后缺口表面形貌进行观察。

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 激光焊接接头微观组织形貌

试验得到的焊接试样均焊缝成形良好、变形小、有少量飞溅, 图 3 是热输入为 4.20 kJ/cm(焊接速度 1.2 m/min) 时的焊缝正反面照片。经过 X 射线检测, 焊接接头未发现裂纹, 焊缝中均匀分布有少量的小气孔。

不同焊接速度下获得的熔透焊缝横截面宏观形貌如图 4 所示。图中可以看出, 随着焊接热输入增加, 接



图 3 焊接试样的正反面照片。(a) 正面; (b) 背面

Fig.3 Photos of a laser welded specimen. (a) Top side; (b) bottom side

头热影响区和焊缝的宽度均不断增加。当焊接热输入由 3.64 kJ/cm 依次增加到 4.20 kJ/cm 和 5.00 kJ/cm 时, 接头中部热影响区宽度由 0.62 mm 依次增大到 0.69 mm 和 0.96 mm, 焊缝宽度则由 1.30 mm 依次增大至 1.32 mm 和 1.63 mm。在热输入为 5.00 kJ/cm 时因焊缝熔池温度较高和高温停留时间过长, 熔化金属在重力作用下下淌严重, 焊缝上表面出现了凹陷。综合而言, 热输入为 4.20 kJ/cm 时的焊缝成形最优, 焊缝无凹陷, 背面成形饱满, 上下熔宽接近。

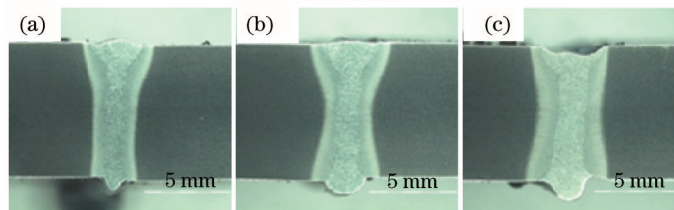


图4 10CrSiNiCu 钢激光焊接横截面形貌。(a)  $E=3.64$  kJ/cm; (b)  $E=4.20$  kJ/cm; (c)  $E=5.00$  kJ/cm

Fig.4 Weld cross-section of laser welded 10CrSiNiCu steel.

(a)  $E=3.64$  kJ/cm; (b)  $E=4.20$  kJ/cm; (c)  $E=5.00$  kJ/cm

图 5 是低倍下接头焊缝和左侧热影响区各区域的宏观分布图, 从左至右分别为母材(BM)、热影响区(HAZ)和焊缝区(WS), 其中热影响区包括了不完全重结晶区(NFR)、细晶区(FGZ)和近焊缝区的粗晶区(CGZ)。

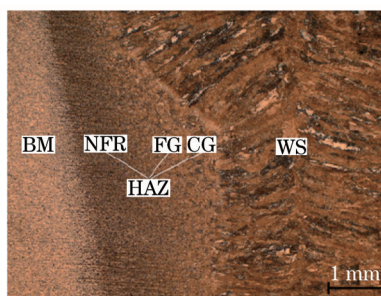


图 5 接头焊缝和左侧热影响区各区域的分布图

Fig.5 Regional distribution of the joint weld seam and left HAZ

图 6(a)~(c)为不同热输入下焊缝区的微观金相照片。焊缝区组织主要为马氏体+铁素体+贝氏体, 呈柱状晶形态。不同热输入下的焊缝区组织相似, 只是晶粒尺寸上稍有区别。当焊接热输入由 5.00 kJ/cm 依次降低到 4.20 kJ/cm 和 3.64 kJ/cm 时, 焊缝组织尺寸变小, 马氏体含量增加, 铁素体含量减少, 贝氏体含量先增加后减少。

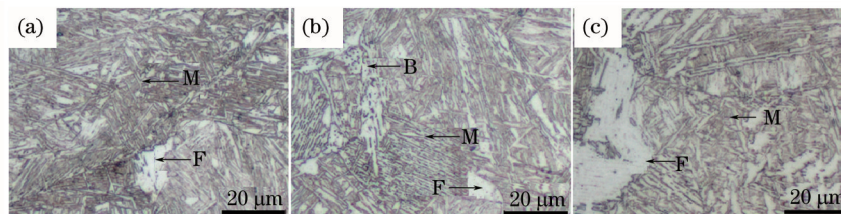


图 6 不同焊接热输入下焊缝区的组织。(a)  $E=3.64$  kJ/cm; (b)  $E=4.20$  kJ/cm; (c)  $E=5.00$  kJ/cm

Fig.6 Microstructures in WS at different welding heat inputs. (a)  $E=3.64$  kJ/cm; (b)  $E=4.20$  kJ/cm; (c)  $E=5.00$  kJ/cm

焊接接头力学性能最薄弱的区域往往是热影响区的粗晶区。图 7 所示为不同焊接热输入下接头热影响区的粗晶区和细晶区的微观组织形貌。图 7(a)、(c)、(e)为不同热输入下粗晶区微观金相, 其组织比较复杂, 主要为板条马氏体+块状铁素体+粒状贝氏体。该区域金属处于过热状态, 奥氏体晶粒发生严重长大, 冷却后得到粗大的组织, 晶粒形状逐渐正多边形化。不同热输入下的粗晶区组织相似, 只是晶粒尺寸和组织含量上稍有区别, 随着焊接热输入增加, 马氏体和贝氏体含量增加, 铁素体含量减少。图 7(b)、(d)、(f)为不同热输入下细晶区位置金相图, 其组织主要为细小的铁素体+珠光体+粒状贝氏体组织, 兼有少量马氏体, 珠光体类组织呈无序分布。一般细晶区相当于热处理时的正火组织, 其塑性和韧性都比较好; 但由于激光焊接速度

较快,造成冷却速度较大,试验中焊接接头细晶区产生了粒状贝氏体,并在低热输入下出现了极少量马氏体。随着热输入增大,细晶区中的珠光体含量减少,铁素体和粒状贝氏体含量增加。

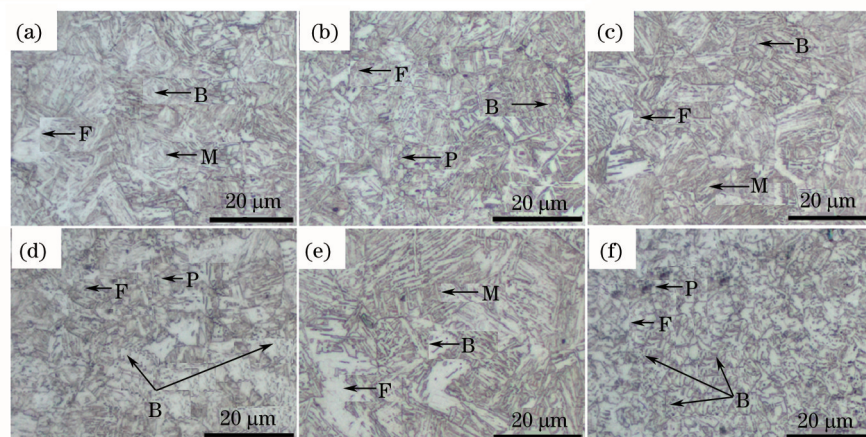


图7 不同焊接热输入下热影响区的CG区和FG区的微观金相组织形貌。(a)、(b)分别是 $E=3.64$  kJ/cm时的CG区和FG区; (c)、(d)分别是 $E=4.20$  kJ/cm时的CG区和FG区; (e)、(f)分别是 $E=5.00$  kJ/cm时的CG区和FG区

Fig.7 Microstructures of CG and FG zones in HAZ at different welding heat input. (a), (b) are FG and CG zone at  $E=3.64$  kJ/cm respectively; (c), (d) are FG and CG zone at  $E=4.20$  kJ/cm respectively; (e), (f) are FG and CG zone at  $E=5.00$  kJ/cm respectively

### 3.2 焊接热输入对接头力学性能的影响

#### 3.2.1 显微硬度

图8是热输入4.20 kJ/cm下10CrSiNiCu钢激光填丝焊接接头的上、中、下部的硬度分布。从图中可以看出,接头上、中、下部的硬度分布态势基本相同,从母材依次到热影响区和焊缝区,硬度不断增加,在焊缝区达到最大,热影响区中未出现软化区。接头上、中、下部焊缝区平均硬度分别为348、347、353 HV。粗晶区粒状贝氏体晶粒比较粗大,淬硬组织含量更多,其硬度为热影响区中最高的;细晶区虽然马氏体等淬硬组织很少但晶粒明显细化,故其硬度有所降低但仍明显高于母材。

图9是在不同焊接热输入下,10CrSiNiCu钢焊接接头中部的硬度分布比较。由接头的硬度分布可以看出,焊缝区内的硬度值基本随着热输入的减小而升高,焊缝区和热影响区的宽度随着热输入的增大而显著增大。当焊接热输入由5.00 kJ/cm降低到3.64 kJ/cm时,焊缝区平均硬度从346 HV升高到396 HV,而热影响区平均硬度则几乎不变,约为270 HV。显然,低热输入下焊缝区硬度值升高是因为其在快速冷却条件下形成了更多的马氏体组织。工程应用中,焊缝的最大硬度应不超过380 HV,故焊接热输入应选用3.64 kJ/cm以上。

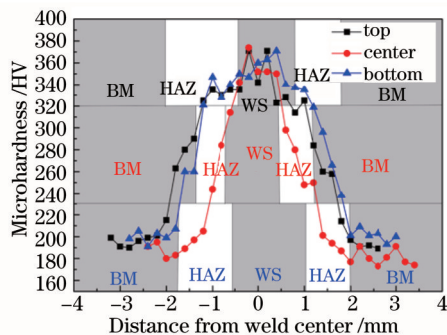


图8 热输入为 $E=4.20$  kJ/cm试样各区域硬度分布

Fig.8 Hardness distributions of the joint welded at the heat input  $E=4.20$  kJ/cm

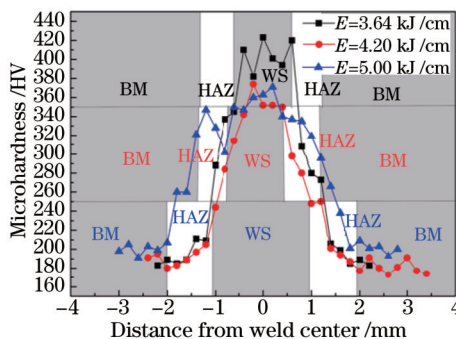


图9 不同热输入下接头中部的硬度分布

Fig.9 Hardness distributions of the middle joint under different heat inputs

#### 3.2.2 力学性能

10CrSiNiCu钢焊接接头室温拉伸测试结果如图10所示。在热输入为3.64~5.00 kJ/cm时,试样均断裂在母材,说明接头与母材等强。试样拉伸断裂时均出现颈缩,但延伸率均比母材有所下降,低热输入( $E=3.64$  kJ/cm)

下的焊接试样延伸率降低最多,只有16%。由此可见,在所采用的焊接热输入范围内,10CrSiNiCu钢焊接接头抗拉强度差别不大,但延伸率有较大差别,焊缝硬度越高,延伸率越低。

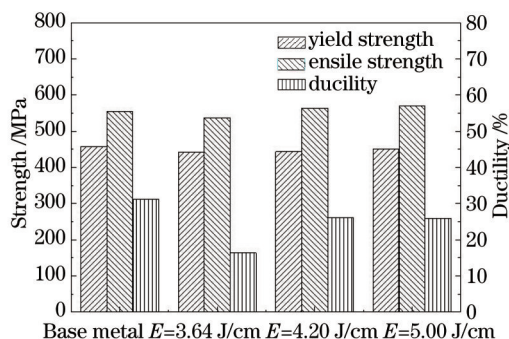


图10 10CrSiNiCu钢激光焊接试样拉伸试验结果

Fig.10 Tensile test results of laser welded 10CrSiNiCu steel

10CrSiNiCu母材和焊缝试样弯曲测试试样结果如图11所示,母材在3倍厚度压头下可弯曲170°而不出现裂纹,在热输入为3.64~5.00 kJ/cm下,焊接试样的正弯弯曲角分别可达100°、113°、115°而不出现裂纹,塑性相比母材有所降低(降低约60°)。随着热输入的增加,焊接试样的正弯可弯曲角度逐渐增大。这是因为热输入增加,冷却速度降低,抑制马氏体等脆硬相生成,使得焊缝塑性变好。

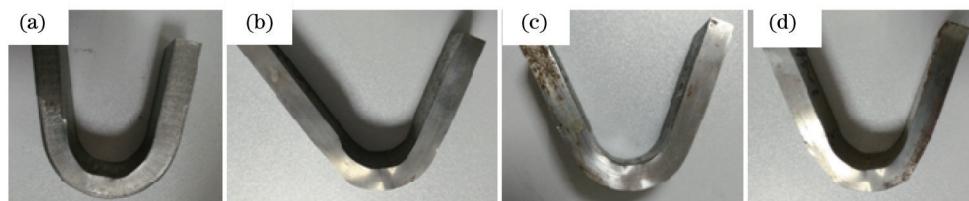


图11 10CrSiNiCu钢激光焊接试样弯曲试验结果。(a)母材;(b)  $E=3.64$  kJ/cm;(c)  $E=4.20$  kJ/cm;(d)  $E=5.00$  kJ/cm

Fig.11 Bending test results of laser welded 10CrSiNiCu steel. (a) BM; (b)  $E=3.64$  kJ/cm; (c)  $E=4.20$  kJ/cm; (d)  $E=5.00$  kJ/cm

表4为10CrSiNiCu钢焊接熔合线和焊缝区在-40℃下的冲击试验结果。接头熔合线和焊缝区的冲击性能优于母材,当焊接热输入从3.64 kJ/cm增加至4.20 kJ/cm,熔合线和焊缝区的低温冲击功先增加后减小,在 $E=4.20$  kJ/cm时熔合线和焊缝区的冲击功最高,平均值分别达到94.5 J和100.7 J。当热输入进一步增加至5.00 kJ/cm,冲击功反而减小,主要是因为热输入越大,高温停留时间越长,熔合区和粗晶区越易获得粗大的脆性组织(如马氏体、粒贝),使韧性降低。

表4 10CrSiNiCu钢激光焊接试样冲击试验结果

Table 4 Impact test results of laser welded 10CrSiNiCu steel

Line energy	$A_{kv}$ (FL)	$A_{kv}$ (WS)
Base metal	84 J	84 J
$E=3.64$ kJ/cm	92 J	88 J
$E=4.20$ kJ/cm	95 J	101 J
$E=5.00$ kJ/cm	88 J	85 J

测定不同热输入下焊缝处的冲击断口侧膨胀值分别为0.68、0.80、0.60mm。 $E=3.64$  kJ/cm和5.00 kJ/cm时焊缝处的冲击功、侧膨胀值相近,冲击断口微观形貌相似,比较 $E=4.20$  kJ/cm和 $E=3.64$  kJ/cm时焊缝处的冲击断口微观形貌,断口表面以韧窝为主,均为韧性断裂。如图12所示, $E=3.64$  kJ/cm下的断口(b)处呈现脆性倾向,韧窝很浅,(c)处韧窝为剪切韧窝,为细长型; $E=4.20$  kJ/cm下的断口近似等轴韧窝,韧窝大小均匀,细小且深度较深,故 $E=4.20$  kJ/cm下焊缝冲击韧性优于 $E=3.64$  kJ/cm。

以上试验表明当热输入 $E=4.20$  kJ/cm时,焊缝的成形良好,且焊后热影响区和焊缝区得到最佳综合力学性能。

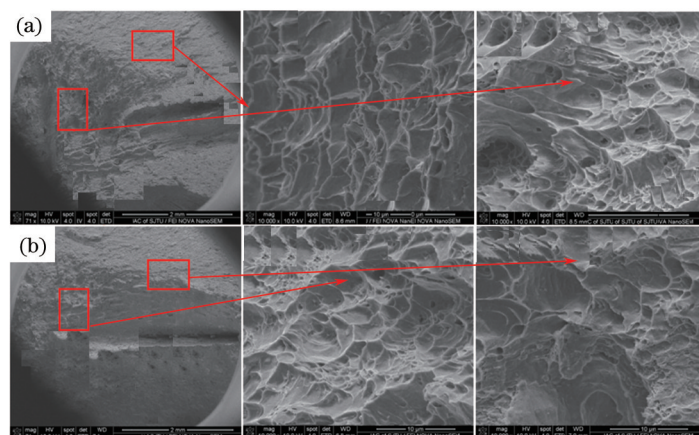


图12 不同热输入下焊缝处的冲击断口微观形貌。(a)  $E=3.64$  kJ/cm; (b)  $E=4.20$  kJ/cm

Fig.12 Morphology of impact fracture at WS under different heat inputs. (a)  $E=3.64$  kJ/cm; (b)  $E=4.20$  kJ/cm

## 4 结 论

1) 采用ER50-6焊丝的10CrSiNiCu钢激光填丝焊缝区组织为M+F+B,粗晶区主要为块状F+粒状B+M,细晶区组织主要为细小的F+P+粒状B,兼有少量M。随着焊接热输入的增加,焊缝区和粗晶区的组织尺寸变大,微观组织中M含量减少,F含量增加;

2) 焊接接头焊缝和热影响区的硬度均高于母材,最高硬度出现在焊缝中心。焊缝区平均硬度值随着热输入的升高而可降低至HV350以下。焊缝和热影响区的宽度随着热输入的增大明显增大;

3) 焊接热输入对接头抗拉强度影响不大,热输入过小时接头塑性变形能力大大降低,弯曲性能也随着热输入增大而改善,低温冲击功随着热输入的增加先增加后减小,在 $E=4.20$  J/cm时熔合线和焊缝区的冲击功最高,且冲击试样断口呈韧性断裂特征。

## 参 考 文 献

- 1 Chen Yan, Qi Dianwei, Wu Meiqing. R&D present status and progress of high strength ship plate steel at home and abroad[J]. Special Steel, 2011, 32(5): 26-30.  
陈 妍, 齐殿威, 吴美庆. 国内外高强度船板钢的研发现状和发展[J]. 特殊钢, 2011, 32(5): 26-30.
- 2 Quintino, L, A Costa, R Miranda, *et al.*. Welding with high power fiber lasers—a preliminary study[J]. Materials & Design, 2007, 28(4): 1231-1237.
- 3 Zuo Tiechuan, Zhang Dongyun, Qi Junfeng, *et al.*. Discussion about applying high power CO<sub>2</sub> welding to ship building[J]. Welding, 2007, (5): 79-83.  
左铁钊, 张冬云, 祁俊峰, 等. 关于大功率CO<sub>2</sub>激光器在船舶制造中应用的探讨[J]. 焊接, 2007, (5): 79-83.
- 4 Lu Bin, Lu Fengui, Tang Xinhua, *et al.*. Present status and progress of laser welding[J]. Welding, 2008, (4): 53-57.  
陆斌锋, 芦凤桂, 唐新华, 等. 激光焊接工艺的现状与进展[J]. 焊接, 2008, (4): 53-57.
- 5 Li Xiaona. Study on fiber laser welding in ship buiding and marine engineering[J]. Modern Welding, 2007, 56(8): 82-84.  
李晓娜. 光纤激光焊在造船及海洋工程中的应用研究[J]. 现代焊接, 2007, 56(8): 82-84.
- 6 Zou Jianglin, Wu Shikai, Xiao Rongshi, *et al.*. Comparison of melting efficiency in high power fiber laser and CO<sub>2</sub> laser welding[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0803002.  
邹江林, 吴世凯, 肖荣诗, 等. 大功率光纤激光和CO<sub>2</sub>激光焊接熔化效率对比[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0803002.
- 7 Cui Li, Zhang Yanchao, He Dingyong, *et al.*. Research progress of high power fiber laser welding[J]. Laser Technology, 2012, 36(2): 154-159.  
崔 丽, 张彦超, 贺定勇, 等. 大功率光纤激光焊接的研究进展[J]. 激光技术, 2012, 36(2): 154-159.
- 8 Cheng Qijun, Ou Yaohui, Zhou Shuibo, *et al.*. Discussion about high power fiber laser welding process[J]. Welding Technology, 2011, 40(12): 28-31.  
程齐军, 欧耀辉, 周水波, 等. 大功率光纤激光焊接工艺的探讨[J]. 焊接技术, 2011, 40(12): 28-31.

- 9 Yang Lansheng, Yu Zhishui, Lu Qinghua, *et al.*. Study of laser welding T-joint of sandwich structure[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0403003.  
杨橄生, 于治水, 卢庆华, 等. 激光焊接三明治结构T型接头的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0403003.
- 10 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. 船用高强度钢E36激光焊接接头组织和性能的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0203002.
- 11 Yang Lansheng. Study on Laser Welding of High Strength Sandwich Steel and The Joint Property[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2014.  
杨橄生. 高强度钢三明治板的激光焊接及其接头性能研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2014.
- 12 Dong H, X Hao, D Deng. Effect of welding heat input on microstructure and mechanical properties of HSLA steel joint[J]. Metallography, Microstructure, and Analysis, 2014, 3(2): 138-146.
- 13 Li Zhi, Wu Yanming, Zhang Junxu, *et al.*. Study on thermal cycle and microstructure characteristics of 10CrNiCu steel by hybrid laser-MAG welding[J]. Development and Application of Materials, 2014, 29(1): 18-22.  
李 治, 吴艳明, 张俊旭, 等. 10CrNiCu 钢激光-MAG复合焊热循环及组织特性研究[J]. 材料开发与应用, 2014, 29(1): 18-22.
- 14 Chen Genyu, Chen Fei, Zhang Yi, *et al.*. Effect of butt joint gap to high-strength automobile steel of fiber laser welding[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603013.  
陈根余, 陈 飞, 张 屹, 等. 对接间隙对车用高强度钢光纤激光焊接的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603013.
- 15 Xu W, D Westerbaan, S S Nayak, *et al.*. Tensile and fatigue properties of fiber laser welded high strength low alloy and DP980 dual-phase steel joints[J]. Materials & Design, 2013, 43: 373-383.
- 16 Cao X, P Wanjara, J Huang, *et al.*. Hybrid fiber laser - arc welding of thick section high strength low alloy steel[J]. Materials & Design, 2011, 32(6): 3399-3413.

栏目编辑: 张浩佳