

# 304 不锈钢/T2 紫铜超薄板激光搭接焊

周学凯<sup>1</sup>, 米高阳<sup>1</sup>, 刘 森<sup>2</sup>, 胡席远<sup>1</sup>, 王春明<sup>1</sup>

<sup>1</sup>华中科技大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074;

<sup>2</sup>恩耐激光技术(上海)有限公司, 上海 201203

**摘要** 采用波长为 1070 nm 的光纤激光,对厚度均为 0.2 mm 的 304 不锈钢和 T2 紫铜超薄板进行了激光搭接焊。采用钢-铜-钢三层搭接方法时,能得到良好的焊缝和较宽的工艺窗口。焊缝显微结构呈现出与焊缝边缘平行的黑色层状花纹。能谱分析结果表明,焊缝下部的铜含量高于上部的。显微硬度测试结果表明,接头硬度最低区域为铜层热影响区,单侧热影响区的宽度在 1 mm 左右。拉伸试验结果显示,断裂位置处于铜层热影响区,其最大拉伸强度为 213 MPa。

**关键词** 激光技术; 激光焊接; 超薄板焊接; 异种金属; 304 不锈钢; T2 紫铜

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0802006

## Laser Lap Welding of 304 Stainless Steel/T2 Red Copper Ultra-Thin Sheets

Zhou Xuekai<sup>1</sup>, Mi Gaoyang<sup>1</sup>, Liu Sen<sup>2</sup>, Hu Xiyuan<sup>1</sup>, Wang Chunming<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Material Science and Engineering, Huazhong University of Science & Technology,

Wuhan, Hubei 430074, China;

<sup>2</sup>nLight Laser Technique (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201203, China

**Abstract** Laser lap welding of 0.2 mm thickness 304 stainless steel and 0.2 mm thickness T2 red copper ultra-thin sheets is conducted by using a fiber laser with a wavelength of 1070 nm. With the steel-copper-steel tri-layer lap welding method, good welds and wide process windows can be obtained. Black layered patterns parallel to the weld edge are observed in the weld microstructure. Energy spectral analysis results show that the content of copper at the weld bottom is higher than that at the weld top. The microhardness test results show that the lowest hardness zone is in the heat affected zone of the copper sheet, and the unilateral width of the heat affected zone is about 1 mm. The tensile test results show that the fracture occurs in the heat affected zone of the copper sheet, and the maximum tensile strength is 213 MPa.

**Key words** laser technique; laser welding; ultra-thin sheet welding; dissimilar metal; 304 stainless steel; T2 red copper

**OCIS codes** 140.3510; 160.3900; 220.4610

## 1 引 言

随着现代电子工业的高速发展,超薄板的用途越来越广泛,在燃料电池<sup>[1]</sup>和手机外壳等领域都有重要应用,而传统的焊接技术无法达到高质量焊接的要求。光纤激光具有光束质量好、功率密度高、光斑直径小和热输入量集中等特点,其作为焊接光源时焊缝宽度窄、焊接变形小,因此特别适合超薄板的焊接<sup>[2-4]</sup>。Ventrella 等<sup>[5]</sup>利用脉冲激光器对 0.1 mm 厚的镍基 Monel 400 合金进行激光搭接焊时发现,搭接板之间的间隙对板间热传递有阻碍作用;陈龙<sup>[6]</sup>使用光学扫描振镜对 0.3 mm 厚的 304 不锈钢(SUS304)板进行了脉

收稿日期: 2017-02-20; 收到修改稿日期: 2017-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(51375191)

作者简介: 周学凯(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: xkzhou@hust.edu.cn

导师简介: 王春明(1975—),男,博士,教授,主要从事激光加工及过程检测方面的研究。

E-mail: cmwang@hust.edu.cn(通信联系人)

冲激光焊接,焊缝深宽比超过 10;胡唯等<sup>[1,7]</sup>提出了一种胶接与激光焊接复合的激光胶焊工艺方法,确定了适于进行金属双极板激光胶焊的工艺参数,并且已将其成功应用到了超薄金属双极板的焊接中。但是关于超薄板激光焊接工艺过程及接头组织性能的研究鲜有报道。

在铜钢激光焊接方面,Yao 等<sup>[8-9]</sup>对 10 mm 厚的紫铜和 Q235A 钢进行斜面对接和光束偏向钢侧的激光对接焊研究时发现,当激光偏向钢侧并合理控制钢熔量时,能得到具有较好性能的接头;李扬等<sup>[10]</sup>采用脉冲激光器对 0.4 mm 厚的紫铜和 0.9 mm 厚的 316L 不锈钢进行搭接焊时发现,采用紫铜在上、不锈钢在下的搭接形式能获得具有良好性能的接头。

在薄板和中厚板方面,铜钢激光焊接已经取得较大的进展,但是在超薄板方面鲜有研究。铜和钢作为两种最古老的金属应用广泛,且两种金属物性参数有很大区别,具有代表性。由于超薄板刚度较小,因此在焊接时极易产生变形,严重影响焊接过程;同时,由于其刚度较低,超薄板的对接焊也难以实现。本文采用光纤激光,针对厚度均为 0.2 mm 的 SUS304 和 T2 紫铜板,进行了不同工艺参数下的搭接焊试验对比研究,根据不同焊接工艺参数下的焊缝成型,探究了工艺参数对超薄板焊缝成型的影响规律和机理,并在此基础上对接头的显微组织和力学性能进行了分析。

## 2 试验材料与方法

试验采用 0.2 mm 厚的 SUS304 热轧不锈钢和 T2 紫铜。试样规格均为 100 mm×60 mm×0.2 mm。两种金属的成分经 X 射线荧光光谱仪(XRF)测定的结果见表 1。

表 1 母材成分(质量分数,%)

Table 1 Compositions of base metals (mass fraction, %)

Element	C	Mn	Co	Cu	Si	Cr	Ni
SUS304	≤0.08	1.038	0.370	0.165	0.427	18.445	8.137
Element	Cu	Fe	Ca	S	Si	Others	
T2	>99.9	0.010	0.018	0.006	0.003	≤0.06	

试验采用武汉锐科公司生产的 RFC-C3000 连接光纤激光器,波长为 1070 nm,最大输出功率为 3000 W。激光焊头焦长为 300 mm、焦点直径为 0.3 mm。焊头固定于德国 KUKA 公司生产的机械手臂,通过轨迹程序实现焊接过程。为防止高温氧化,采用氩气保护。

采用单因素法,改变焊接功率  $P$  进行不同工艺参数下的焊接试验,激光焊接的工艺参数见表 2,采用搭接的方式进行焊接。焊接前对试样进行激光清洗以除去表面油污和氧化层,然后用丙酮清洗干净。通过自制夹具固定在焊接工作台上。焊接过程结束后截取焊缝试样,取三个结果的平均值作为试验值。利用上海尚材公司生产的 YMP-2B 金相试样抛磨机进行金相制备,再利用上海测维光电公司的 LWD300LMDT 金相显微镜和日本 KEYENCE 公司的 VHX-1000C 超景深显微镜进行焊缝截面形貌和金相的观察;利用莱州华银公司的 HVS-1000A 显微硬度计测量焊缝硬度分布;最后利用长春科新的 WDW3200 微控电子万能试验机对接头进行拉伸试验,并利用荷兰 FEI 公司的 Quanta200 环境扫描电镜进行能谱分析(EDS)和断口观察。

表 2 激光焊接工艺参数

Table 2 Process parameters of laser welding

Power /W	Welding speed /( $m \cdot min^{-1}$ )	Plate sequence
600,800,1000,1200,1500,2200,2300	3.6	SUS304+T2,T2+SUS304
		SUS304+T2+SUS304

## 3 试验结果与分析

### 3.1 工艺参数对焊缝形貌的影响

#### 3.1.1 装夹条件对焊接质量的影响

在图 1 所示的装夹条件下,得到图 2 所示的焊缝。可以看出,在 600 W 和 800 W 的焊接功率下,上板烧

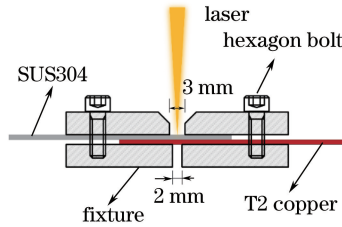


图 1 超薄板装夹示意图

Fig. 1 Clamp schematic for ultra-thin sheet

穿,通过烧穿孔洞观察下板,下板未熔化,即两板未完成连接;而在 1000 W 的焊接功率下,上板严重烧穿,下板上表面有黑色的氧化层,同样未得到良好的焊缝。

铜的线热膨胀系数为  $16.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,热导率为  $398 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;铁的线热膨胀系数为  $11.8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,明显低于铜的,而其热导率仅为  $80.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [11]。试验中铜的硬度低,受热时由于超薄板刚度很小,且铜相较于铁膨胀得更严重,因此在焊接过程中形成了图 3 所示的变形和间隙。过大的功率密度将上部的不锈钢板烧穿,但是通过孔洞的激光功率并不足以将下部铜板熔化或者熔透,故出现上板烧穿而下板基本无变化或仅有黑色氧化膜的现象。

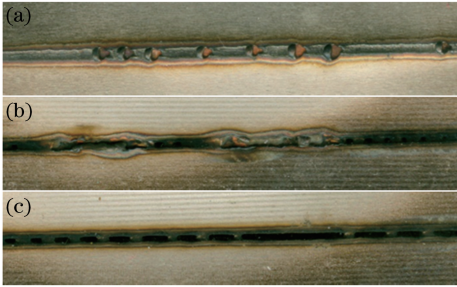


图 2 未装夹好时,不同激光功率下的焊缝缺陷形貌。

(a)  $P=600 \text{ W}$ ; (b)  $P=800 \text{ W}$ ; (c)  $P=1000 \text{ W}$

Fig. 2 Appearances of weld defects with poor clamping

under different laser powers. (a)  $P=600 \text{ W}$ ;

(b)  $P=800 \text{ W}$ ; (c)  $P=1000 \text{ W}$

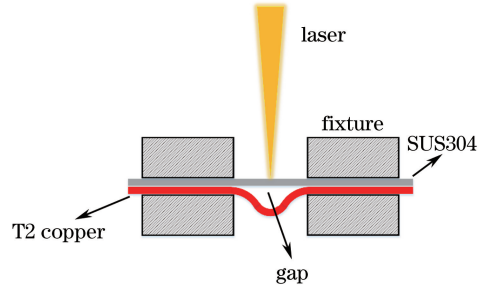


图 3 受热情况下部铜板的变形及间隙示意图

Fig. 3 Schematic of deformation of bottom copper plate and gap under heat condition

### 3.1.2 搭接顺序对焊接质量的影响

改变搭接顺序,使铜板在上、不锈钢板在下,得到的焊缝如图 4 所示。当激光功率为 2200 W 时,铜板上表面有一道光滑的熔化痕迹,实际焊接过程中可以看到火星四溅,但不锈钢板并未焊上;激光功率为 2300 W 时,上下板均烧穿,这些现象的解释为:紫铜对 1070 nm 波长激光的吸收率非常低,因此需要用高功率才能进行焊接;当激光功率为 2200 W 时,焊接模式为热传导焊,激光仅将上部铜板熔化,而金属铜液的温度不足以将不锈钢熔化,因此无法将两板焊到一起;当激光功率增大到 2300 W 时,焊接模式突变为深熔焊,此时铜板被完全焊透,但对不锈钢板而言,在激光功率过大且深熔焊情况下,激光能量容易在熔池底部沉积,因此将底部不锈钢板烧穿,且在保护气的双重作用下,产生严重烧穿的现象。

上述两种搭接焊方式均无法完成对钢、铜两种金属的有效焊接,钢铜搭接焊中的主要缺陷来自于二者变形不同引起的搭接间隙。为了避免铜钢线膨胀系数不同所引起的焊缝缺陷,并降低工装复杂性,采用了异种金属的“三明治”搭接方式,即钢+铜+钢搭接焊。第三层采用的是与第一层相同的薄片,这样能防止第三类材料的掺入。不同工艺参数下的焊缝形貌见表 3,其中焊接速度  $v=3.6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,离焦量  $f=0 \text{ mm}$ ,保护气流量  $Q=1.0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。

由表 3 可以看出,当激光功率为 600 W、焊接速度为  $3.6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,即线能量为  $100 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-1}$ 时,激光仅能将铜板焊上但并未焊透;当线能量为  $133 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-1}$ 时,第三层板未焊透;而当焊接功率增大至 1500 W 后,焊缝中间出现了塌陷,此时的线能量为  $250 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。可见,“三明治”搭接焊的工艺窗口较大,当线能量在  $100 \sim 250 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-1}$  区间时,均可得到良好的焊缝。

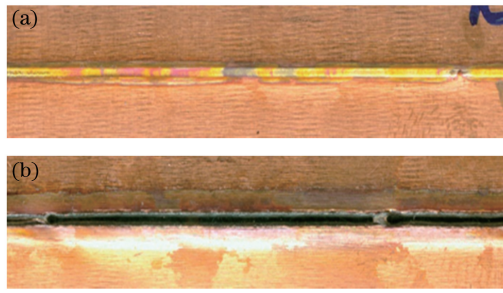


图 4 铜板在上,SUS304 在下时的焊缝形貌。(a)  $P=2200\text{ W}$ ; (b)  $P=2300\text{ W}$   
 Fig. 4 Weld appearances when SUS304 is under copper sheet. (a)  $P=2200\text{ W}$ ; (b)  $P=2300\text{ W}$

表 3 “三明治”搭接焊中功率对焊缝形貌的影响

Table 3 Influence of laser power on weld appearance in sandwich lap welding

Laser power /W	Weld appearance	Cross section of weld
600	front	
	back	
800	front	
	back	
1000	front	
	back	
1200	front	
	back	
1500	front	
	back	

如图 5(a)所示,从焊缝整体形貌来看,焊缝细小美观,表面平整、无飞溅物出现,并且焊缝边缘氧化的痕迹不明显,说明保护气的保护效果良好。焊缝上表面呈现黄褐色光泽,而下表面由于没有保护气被氧化后呈暗灰色。图 5(b)所示为在体式显微镜下焊缝的上表面,可以观察到红色的金属,说明下部的铜在焊接过程

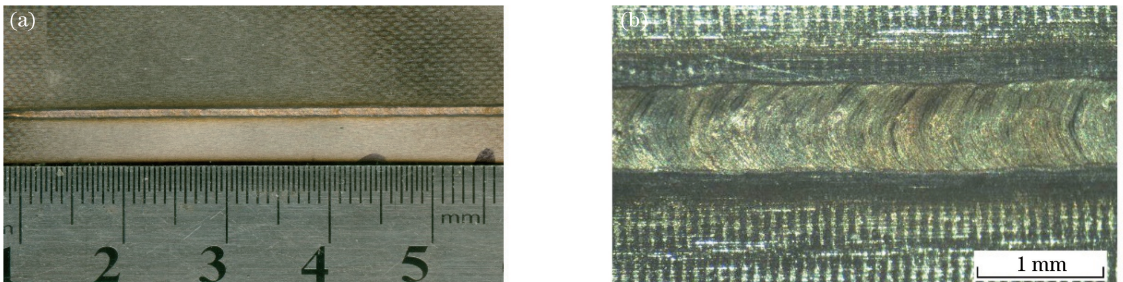


图 5 (a)焊缝良好的整体形貌;(b)显微镜下焊缝形貌  
 Fig. 5 (a) Good overall appearance of weld; (b) weld morphology obtained by microscope

中扩散到了上表面。由其腐蚀钢的横截面形貌来看,焊缝由最初的楔形变为束腰型。激光深熔焊中匙孔的形成主要由功率密度决定,并且随着功率密度的增大,深熔焊模式的匙孔由“闭匙孔”向“开匙孔”转变。当功率密度增大到一定程度后,匙孔穿透金属熔液,匙孔中的金属蒸气、等离子体等由板的上下两个方向喷出,高热量使焊缝两端金属的熔化量增加,形成双熔池结构。向上和向下蒸气喷出产生的摩擦力,使焊缝下表面熔池中的液体向熔池外边缘流动,导致焊缝下表面的熔宽增大。熔池中的 Marangoni 效应导致“开匙孔”下表面的熔宽增加<sup>[12]</sup>。中间铜层的热导率较高,散热较快,导致中间区域熔宽相应减小。0.2 mm 钢在本试验所采用的线能量条件下变形量很小;第三层钢作为垫板,利用其刚度可以有效抑制图 3 所示的铜板变形,控制间隙产生,保证三层板的紧密贴合,完成高质量连接。

另外,铜的熔点为 1083.4 °C,铁的熔点为 1538 °C。激光将不锈钢板熔化,由于铁的熔点高于铜的,熔化的不锈钢金属液的温度高于铜的熔点,因而将下部铜板熔化;两种金属混合在一起随着温度的降低而凝固,完成两种金属的连接。

### 3.2 显微组织分析

#### 3.2.1 接头组织

图 6(a)所示为单独腐蚀 SUS304 后的焊缝横截面整体形貌,可以明显看出与焊缝边缘平行的层状花纹,其中 1~4 区的显微结构如图 6(b)~(e)所示。图 6(f)所示为单独腐蚀铜后的接头形貌,将其与图 6(a)对比可以看出,大量钢元素入侵铜板,形成了焊缝的基底,而铜元素以团簇形态存在于钢基底中,其中 5 区的显微结构如图 6(g)所示。从图 6(b)、(e)可以看出,整个焊缝是由细小的柱晶构成,且柱晶的生长方向垂直

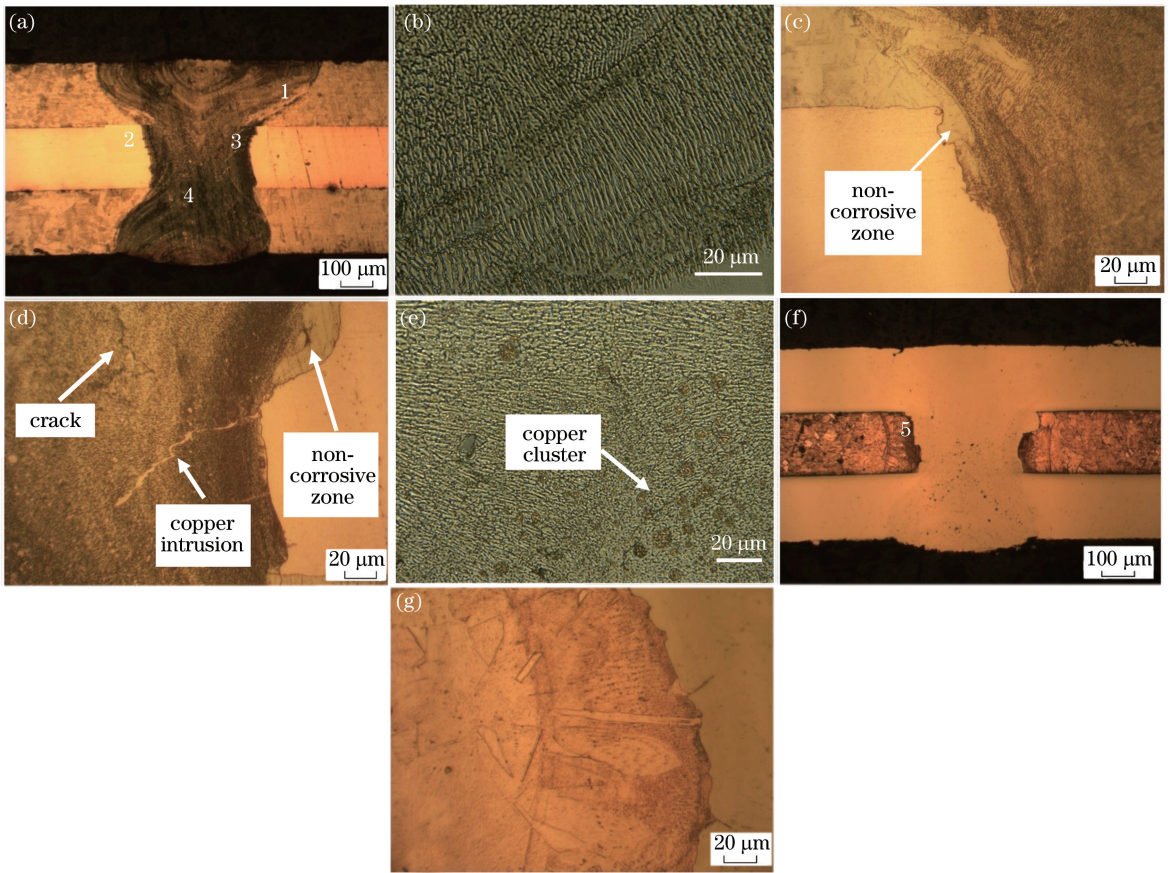


图 6 (a)单独腐蚀 SUS304 后的接头形貌;(b) 1 区显微结构;(c) 2 区显微结构;(d) 3 区显微结构;(e) 4 区显微结构;  
(f)单独腐蚀铜后的接头形貌;(g) 5 区显微结构

Fig. 6 (a) Appearance of welding joint with SUS304 corroded; (b) microstructure of zone 1; (c) microstructure of zone 2;  
(d) microstructure of zone 3; (e) microstructure of zone 4; (f) appearance of welding joint with copper corroded;  
(g) microstructure of zone 5

于层状花纹。图 6(d)中靠近铜的区域有一道裂纹状的曲线,其是熔池流动过程中铜的入侵导致的。如图 6(c)、(d)所示,焊缝与铜板的界面非常清晰,但是比较曲折,这与焊接过程中熔池内金属液的流动有关。图 6(c)、(d)所标示的部分属于焊缝的一部分,但并未显示出组织形貌,同样由图 6(b)可以看到,热影响区和母材区域并没有微观组织显现。从图 6(e)中可以看到,直径为几微米的铜元素呈团簇状聚集,这与图 6(f)中所观察到的相同。在图 6(f)下部还可以看出,“点云”铜元素勾勒出了焊缝的下部形貌,而试样的上部则很难看出铜元素的存在。

在金属腐蚀学中,异种金属的结合构成了一个原电池,其相较于纯金属而言,更容易被腐蚀。异种金属的结合面由于电位差的形成,相较于母材而言,能产生更大的电流,尤其是在焊缝区铜和铁元素充分混合的情况下,对腐蚀液中的母材形成了一定的保护。基于以上因素,含有铜元素的区域显现出其微观组织,但没有铜元素混入的部分,如图 6(b)所示,区域中紧邻焊缝的母材被“保护”起来,没有显现出微观组织。图 6(c)、(d)中标示的部分在焊接过程中熔化,但熔池中铜液并未扩散到此位置,因此在腐蚀过程中,铜钢混合部分对此位置发生了“保护”,使其难以显现微观组织。

### 3.2.2 焊缝元素含量的 EDS 分析

焊缝元素含量的 EDS 分析结果如图 7 所示。由图 7(a)、(b)可以大体看出,铜、铁元素存在于整个焊缝中,表明熔池的搅拌作用比较充分;同时,各元素在焊缝内的颜色比在母材中的颜色暗淡很多,表明焊缝内的元素浓度比母材的要低很多。图 7(a)所示为铜元素在焊缝内的分布,可以看出,在焊缝与铜母材的界面存在贫铜点,说明钢液侵入铜层后在此位置没有参与熔池搅拌。

由图 7(c)中焊缝横向元素的分布看出,Fe 元素浓度在焊缝边缘位置相比于焊缝内部有一定的降低,这与 Cu 元素在此位置有一定的富集有关,其中 K 代表 K 线系,L 代表 L 线系;Cu 元素和 Fe 元素在焊缝内的分布有较明显的波动,其余元素横向分布的变化不明显。图 7(d)所示为各元素纵向的含量分布,可以看出,Fe 元素在焊缝下部区域向下的尖峰明显增多,说明存在一定的贫铁位置;而与 Fe 相对应,Cu 元素在焊缝下部区域向上的尖峰密度增大,且其含量的平均值略微增加,说明在焊缝下部区域存在一定的富铜点,且焊缝下部区域的含铜量略高于焊缝上部区域的,这与图 6(e)、(f)中所观察到的团簇状铜现象相对应。

关于层状花纹,在  $Ti_2AlNb$  基钛合金的激光-电弧复合焊<sup>[13]</sup>和电子束焊<sup>[14]</sup>中都观察到了相似的花纹,

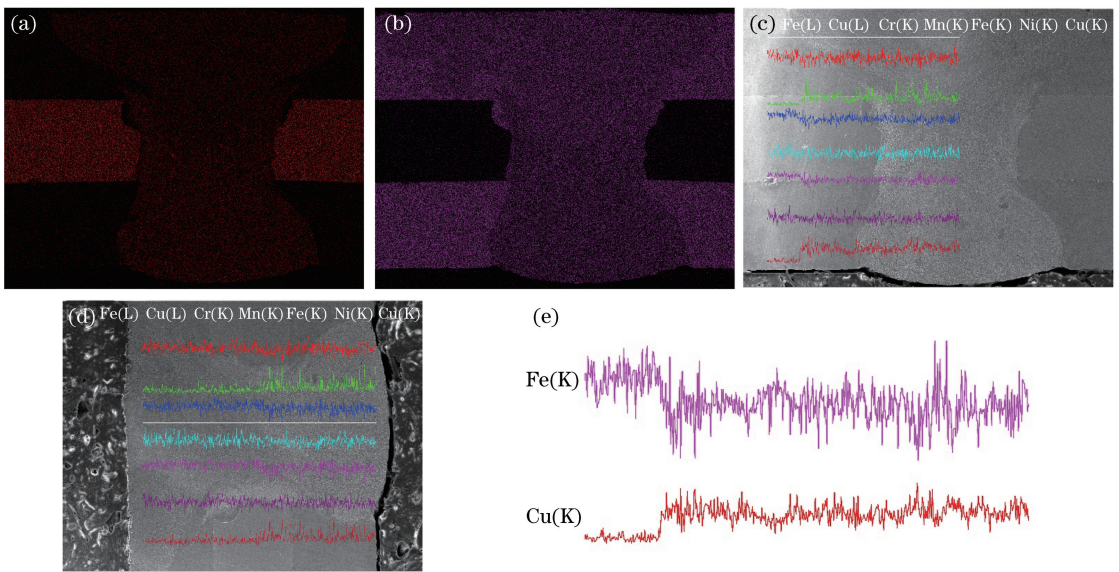


图 7 焊接接头的 EDS 结果。(a)焊缝内铜元素分布;(b)焊缝内铁元素分布;(c)焊缝上部水平方向铬、锰、铁、镍、铜元素含量变化曲线;(d)焊缝纵向元素含量变化曲线;(e)图 7(c)中铁元素和铜元素含量变化曲线详图

Fig. 7 EDS results of welding joint. (a) Cu distribution in weld; (b) Fe distribution in weld; (c) content fluctuation curves of Cr, Mn, Fe, Ni and Cu in upper weld along horizontal direction; (d) content fluctuation curves in weld along longitudinal direction; (e) detailed content fluctuation curves of Fe and Cu in Fig. 7(c)

由此可以推测,层状花纹的出现与多种金属的存在相关。但是在其他关于钢铜焊接的文献[8-10,15]中并没有发现。这可能是由于在中厚板的对接焊中,熔池中的金属液浓度均在横向上呈渐变趋势,即不能充分混匀;对超薄板而言,焊接熔池内金属液的量少,向铜层扩散的钢液和向钢层扩散的铜液很容易充分混匀,因此凝固后会产生层状条纹。

吴会强等<sup>[14]</sup>认为, Ti<sub>2</sub>AlNb 基钛合金焊缝中黑色带状物的形成原因在于,焊接过程中熔化潜热释放和热输入量周期性改变共同引起了成分偏析。在铁铜混合金属液中,铁的熔点比铜的熔点高,在凝固过程中,虽然铁凝固的同时也有一部分铜发生凝固,但整体上铁元素先于铜发生凝固形成奥氏体,并以柱状晶的形式向焊缝中心推进。该过程中金属液中的铁、镍浓度不断降低,铜浓度逐渐增大,铜元素发生富集,当冷却速度很大时,富集的铜元素来不及“均匀化”就已凝固形成黑色带状物。在图 7(c)中,焊缝上部的 Cu 元素含量在横向上有一定的波动,在条纹呈现黑色的 Cu 元素富集地带,折线上升,反之则下降。

在形成匙孔的过程中,蒸汽、等离子体等的反冲压力会将液态铜向下挤压。在激光的搅拌作用下,熔池内金属液发生流动,此时一部分铜液会扩散至整个焊缝;但由于熔池的凝固速度大,有一定量的聚集铜来不及与钢液混合均匀即发生凝固,表现为显微结构中焊缝下部的团簇状铜和 EDS 结果中铜元素在焊缝下部形成的尖峰。

### 3.3 力学性能分析

#### 3.3.1 焊缝显微硬度

SUS304 的硬度为 250 HV 左右,紫铜的硬度为 75 HV 左右。

在异种材料的焊接中,随着元素的扩散,接头不同位置的硬度值可能会有变化。硬度值的测定可以帮助研究人员找到接头力学性能薄弱的环节,从而提高后续接头的质量。试验中对“束腰”焊缝进行了显微硬度测定,结果如图 8 所示。可以看出,对于“束腰”焊缝来说,焊缝中心区的显微硬度为 125~225 HV;蓝色曲线为最上部钢板层的硬度分布,焊缝中心区的硬度明显低于母材的;存在宽为 0.1 mm 左右的热影响区,其硬度值低于母材的且高于焊缝中心区的。这是因为钢母材为轧制态,而焊缝内的钢为铸态,本身硬度值偏低;另一方面,大量低硬度铜元素的混入,使得焊缝硬度明显下降。同时可以明显看到,焊缝单侧 1 mm 左右范围内的硬度值在 50~60 HV 之间,说明铜层的热影响区比较宽。

由硬度值分析可见,铜层热影响区的硬度值最低,且热影响区很宽,因此铜层热影响区是接头力学性能的薄弱环节。

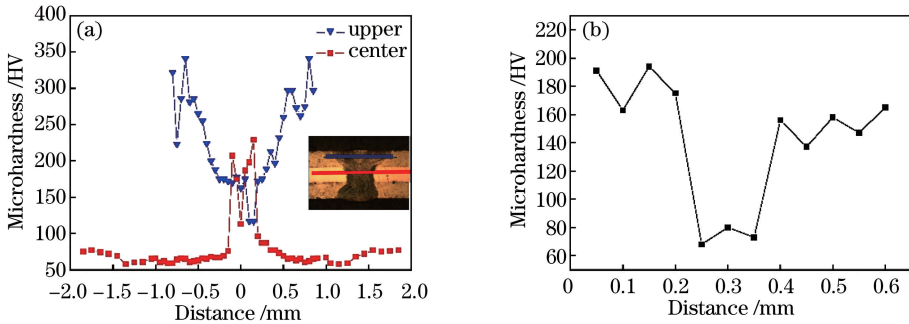


图 8 焊缝硬度分布曲线。(a)横向硬度;(b)纵向硬度

Fig. 8 Distribution curves of weld microhardness. (a) Lateral microhardness; (b) vertical microhardness

#### 3.3.2 拉伸断裂分析

拉伸断裂分析结果如图 9、10 所示。由图 9(a)可以看出,工艺参数的改变对接头拉伸强度的影响并不大。本次拉伸的断裂位置位于图 10 所示的铜的热影响区。因此,焊接热循环对热影响区的影响是决定接头性能的关键<sup>[16]</sup>。图 9(b)所示为断口的电子显微镜形貌,结合图 10(b)可以看出,在断裂位置附近产生了颈缩,且最终断裂位置较尖锐,说明接头的塑性较好;在断口处可以看出,最终断裂位置周围有微小的孔洞,表明最终断裂的位置受热影响区内材料固有的微小缺陷的影响。接头的最大抗拉强度可达 213 MPa 左右,为母材(320 MPa)的 66%;由图 10(a)可以看出,左侧铜片的厚度小于右侧的,说明接头的主要延伸来自于铜层热影响区,接头的断后延伸率在 1.5%左右,较断后母材的延伸率(2.5%)低很多。

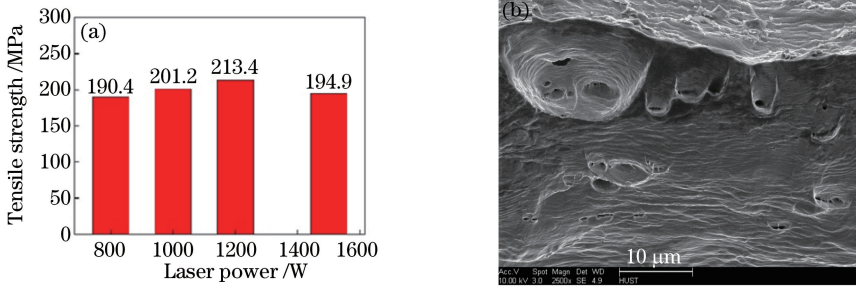


图 9 (a)不同激光功率下的抗拉强度;(b)电子显微镜下的拉伸断口形貌

Fig. 9 (a) Tensile strengths under different laser powers; (b) morphology of tensile fracture obtained by electronic microscope

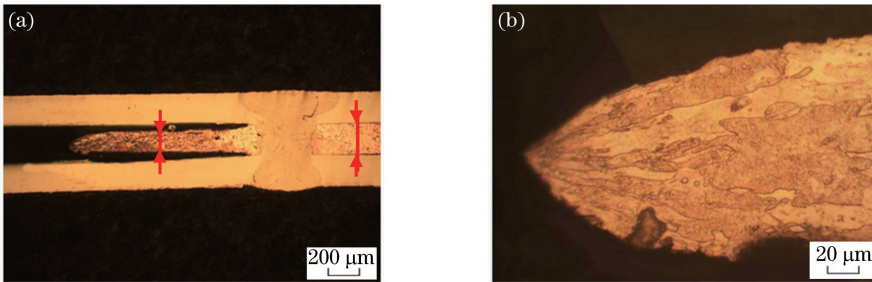


图 10 (a)拉伸断裂位置;(b)断裂位置显微结构

Fig. 10 (a) Position of tensile fracture; (b) microstructure of fracture position

## 4 结 论

针对超薄 SUS304 和紫铜板,采用光纤激光进行了不同工艺参数下的搭接焊试验,并对接头的显微组织和力学性能进行了分析,结论如下。

1) 对物性参数不同的两种金属超薄板进行激光搭接焊时,“三明治”方式的搭接能取得较好的焊接效果。在钢+铜+钢激光搭接焊中,当线能量高于  $100 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-1}$  时,上部两层板焊透;当线能量高于  $135 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-1}$  时,三板全部焊透;当线能量高于  $250 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-1}$  时,容易出现塌陷缺陷。

2) 三层搭接焊接时焊缝的主要成分为钢,并且贯穿整个焊缝;铜扩散至整个焊缝,但受匙孔挤压以及凝固速度的影响,焊缝底部存在很多团簇状的铜元素。焊缝显微结构具有明显的层状纹路,焊缝主要组织为柱晶。

3) 钢层接头硬度由低至高的区域分别为焊缝区、热影响区、母材;铜层接头硬度由低至高的区域分别为热影响区和铜熔区、母材、钢铜混合区。铜的存在降低了焊缝硬度,且含铜量越高,硬度越低。接头强度可达 213 MPa,为母材的 66%,断后延伸率为 1.5%。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Qimin, Lai Xinmin, Mai Jianming, *et al.* Study on fiber laser welding process of ultra-thin metal sheet[J]. Machine Design & Research, 2011, 27(1): 69-72.  
王琪珉, 来新民, 麦建明, 等. 金属超薄板光纤激光焊接[J]. 机械设计与研究, 2011, 27(1): 69-72.
- [2] Zhang Weizhe. Research on laser welding 304 austenitic stainless steel sheet[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.  
张维哲. 304 不锈钢超薄板激光焊接技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [3] Gong Yubing, Wang Shanlin, Chen Yuhua, *et al.* Forming and mechanical properties of FeSiB amorphous ribbon joint by laser welding[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(3): 0303001.  
龚玉兵, 王善林, 陈玉华, 等. FeSiB 非晶薄带激光焊焊缝成形及接头力学性能[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0303001.



- [4] Hu Linxi, Zhou Dianwu, Jia Xiao, *et al.* Numerical simulation and laser butt welding of Zr-Sn-Nb-Fe zirconium alloy sheets[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(7): 0702002.  
胡林西, 周惦武, 贾 骁, 等. Zr-Sn-Nb-Fe 钎合金薄板激光对接焊及数值模拟[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0702002.
- [5] Ventrella V A, Berretta J R, de Rossi W. Micro welding of Ni-based alloy Monel 400 thin foil by pulsed Nd:YAG laser [J]. Physics Procedia, 2011, 12(1): 347-354.
- [6] Chen Long. Study on the laser welding of ultra-thin sheet based on the scanning galvanometer[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2014.  
陈 龙. 基于光学扫描振镜的超薄板激光焊接技术[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [7] Hu Wei. Research on performance optimization and welding deformation control of laser weld-bonded joint for metal bipolar plate manufacturing[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013  
胡 唯. 燃料电池金属双极板激光胶接头性能优化与焊接变形控制[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [8] Yao C, Xu B, Zhang X, *et al.* Interface microstructure and mechanical properties of laser welding copper-steel dissimilar joint[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2009, 47(7/8): 807-814.
- [9] Fu Jun. Laser welding for copper-steel joint[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.  
付 俊. 铜钢异种材料激光焊接研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [10] Li Yang, Hu Shengsun, Shen Junqi. Microstructural characteristics and mechanical properties of pulsed Nd:YAG laser welded 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.
- [11] Hu Gengxiang, Cai Xun, Rong Yonghua. Fundamentals of material science[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2010: 428.  
胡庚祥, 蔡 珣, 戎咏华. 材料科学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2010: 428.
- [12] Fang Junfei. Study on the mechanism of penetration mode for thin sheet laser deep penetration welding[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.  
方俊飞. 薄板激光深熔焊接熔透模式的机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [13] Zhang K, Liu M, Lei Z, *et al.* Microstructure evolution and tensile properties of laser-TIG hybrid welds of Ti<sub>2</sub>Al Nb-based titanium aluminide[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(10): 3778-3785.
- [14] Wu Huiqiang, Feng Jicai, He Jingshan, *et al.* Microstructure evolution of high Nb containing Ti<sub>3</sub>Al based alloy electron beam welding joints[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(8): 1313-1317.  
吴会强, 冯吉才, 何景山, 等. 焊接工艺对高铌 Ti<sub>3</sub>Al 合金电子束焊接接头显微组织和显微硬度的影响[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(8): 1313-1317.
- [15] Wang G, Wu L Z, Huang J C, *et al.* Microstructure and mechanical properties of laser welded joints of pure copper and 304 stainless steels[J]. China Welding, 2014, 23(3): 69-72.
- [16] Galun R, Bordfeld H, Gattermann S, *et al.* Processing and influence on mechanical properties of precision laser beam welding of dissimilar material combination of stainless steel and brass[J]. Lasers in Engineering, 2002, 12(3): 191-200.