

# 激光与光电子学进展

## T2 铜/304 不锈钢激光焊接接头组织及性能研究

李继红\*, 雷龙宇, 杜明科, 张云龙, 张敏, 史杰, 高俊

西安理工大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710048

**摘要** 针对铜/不锈钢异种材料激光焊接过程中的物理性能差异较大、冶金相容性较差等问题,利用光学显微镜、扫描电子显微镜、能谱仪,结合拉伸、硬度等试验研究了不同光束偏移量对焊接接头组织及性能的影响。结果表明:焊缝在金属蒸发作用力及马兰戈尼对流效应的共同影响下呈半沙漏状形貌;光束偏向铜侧时,焊缝由于液相分离导致富铁相弥散分布,造成焊缝成分和硬度分布不均匀,熔覆金属中铜的含量较多使得接头强度较低;光束偏向钢侧时焊缝组织为奥氏体和富铜相,焊接接头的强度较高,抗拉强度最高可达 240 MPa,与铜母材相当;当光束偏移量为 -0.4 mm 时,可得到综合性能最优的焊接接头。

**关键词** 激光技术; 激光焊接; 铜/钢复合结构; 光束偏移; 微观组织; 力学性能

中图分类号 TG456.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1316001

### Structure and Properties of T2 Copper/304 Stainless Steel Laser Welded Joint

Li Jihong\*, Lei Longyu, Du Mingke, Zhang Yunlong, Zhang Min, Shi Jie, Gao Jun

School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China

**Abstract** The effect of various beam offsets on the microstructure and the properties of welded joints was studied using optical microscope, scanning electron microscope, and energy dispersive spectrometer, combined with tensile and hardness tests to investigate the challenges caused by large differences in physical properties and poor metallurgical compatibility in the laser welding of dissimilar materials such as copper/stainless steel. The results show that the weld is semi-hourglass shaped under the influence of an evaporation force and Marangoni convection effect. When the beam is biased towards the copper side, the iron-rich phase disperses in the weld due to the liquid phase separation, resulting in an uneven distribution of the weld composition and hardness. In addition, the more copper content in the deposited metal, the lower the joint strength. When the beam is biased towards the steel side, the microstructure of the weld is austenite with a copper-rich phase, and the strength of the welded joint increases. Moreover, the maximum tensile strength can reach 240 MPa, equivalent to the copper base metal. Therefore, the best comprehensive performance of the welding joint can be obtained when the beam offset is -0.4 mm.

**Key words** laser technique; laser welding; copper/steel composite structure; beam offset; microstructure; mechanical properties

## 1 引言

T2 紫铜具有优良的导电性、导热性、耐腐蚀性和较小的磁化系数<sup>[1]</sup>,在工业领域应用广泛,但其强度较低、成本较高,因此工程上常把铜/钢制成复合结构使用。铜/钢复合结构兼具优良的性能和较低的成本,广泛应用于电气设备、核反应堆和航空航天等领域<sup>[2-3]</sup>。铜/钢复合结构目前主要采用焊接方法制造,但铜和钢的熔点、

热导率、线膨胀系数等物理性能存在较大差异,且冶金相容性较差,导致铜-钢异种材料焊接难度较大<sup>[4-5]</sup>。

激光焊接具有热影响区(HAZ)小、焊接质量好、焊接精度高等优点,尤其适合异种材料的焊接<sup>[6-9]</sup>。国内外诸多研究表明,铜/钢激光焊接时,两种母材的熔合比对熔池的冶金特性影响较大,是影响焊接接头性能的主要因素,因此利用激光束的偏移来控制母材熔合比成为提高接头质量的关键所在<sup>[10-14]</sup>。Yao 等<sup>[15]</sup>研

收稿日期: 2021-06-30; 修回日期: 2021-08-01; 录用日期: 2021-08-09

基金项目: 国家自然科学基金(51974243)、中国博士后科学基金(2020M673449)、陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JZ-31)、陕西省科技厅自然科学基金基础研究计划(2020JQ-637)、陕西省教育厅自然科学基金专项(19JK0590)

通信作者: \*lijihong@xaut.edu.cn

究发现,使激光束适当偏向钢侧可获得缺陷较少、性能良好的铜/钢焊接接头,但未深入研究焊缝形貌的形成机理。Meng等<sup>[16]</sup>采用激光-CMT复合焊进行了T2铜和304不锈钢的焊接,并研究了激光偏移对组织性能的影响,结果表明当激光束偏铜侧约0.5~1.0 mm时可获得组织和性能良好的焊接接头,但未对光束偏向钢侧的情况进行研究。Chen等<sup>[17]</sup>研究发现,与光束无偏移时相比,使光束适当偏向钢侧可获得力学性能较好的焊接接头,但未对光束偏向铜侧的情况进行研究。

虽然国内外学者对光束偏移量已有较多研究,但目前对于焊接过程中激光束应偏向铜侧还是钢侧尚无

定论。本文对T2-Y紫铜和304不锈钢在不同工艺参数下进行激光焊接,研究了光束偏移量对焊接接头组织和性能的影响,通过分析焊接接头宏观形貌和组织性能,选择出了最优的焊接工艺,为T2-Y紫铜和304不锈钢激光焊接的工艺设计提供参考依据。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 试验材料

试验材料为T2-Y紫铜和304不锈钢,规格均为300 mm×150 mm×5 mm,其化学成分如表1所示,力学性能如表2所示。

表1 T2-Y紫铜和304不锈钢的化学成分  
Table 1 Chemical composition of T2-Y and SUS304

Material	Mass fraction / %						
	Cu	C	Cr	Ni	Mn	Fe	Si
T2-Y	≥99.95	—	—	—	—	≤0.005	—
SUS304	—	≤0.08	18—20	8.0—10.5	≤2.00	Bal.	≤1.00

表2 T2-Y紫铜和304不锈钢的力学性能  
Table 2 Mechanical properties of T2-Y and SUS304

Material	Tensile strength / MPa	Yield strength / MPa	Hardness / HV <sub>0.1</sub>
T2-Y	215—275	60—70	60—90
SUS304	≥520	205	210

### 2.2 试验方法

本次试验采用的焊接设备为Arnold光纤激光器,最大激光功率为4 kW,焊接示意图如图1所示。焊前对铜、钢母材进行清理,焊接过程中使用纯度为

99.99%的氩气作为保护气体。激光焦点光斑直径为0.8 mm,同时为了合理控制铜和钢的熔化量,设计光束最大偏移量为0.4 mm,并设计5组不同偏移量的试验作为对比,以研究不同铜、钢熔化量对焊接接头组织和性能的影响。规定光束偏向铜侧时偏移量为正,偏向钢侧为负,具体的焊接工艺参数如表3所示。

焊后使用线切割机切取金相试样,经预磨、抛光后,用FeCl<sub>3</sub>-HCl溶液(比例为5 g FeCl<sub>3</sub>+10 mL HCl+100 mL H<sub>2</sub>O)进行腐蚀,用OLYMPUS-GX71型光学显微镜(OM)和带有能谱仪(EDS)的JSM-

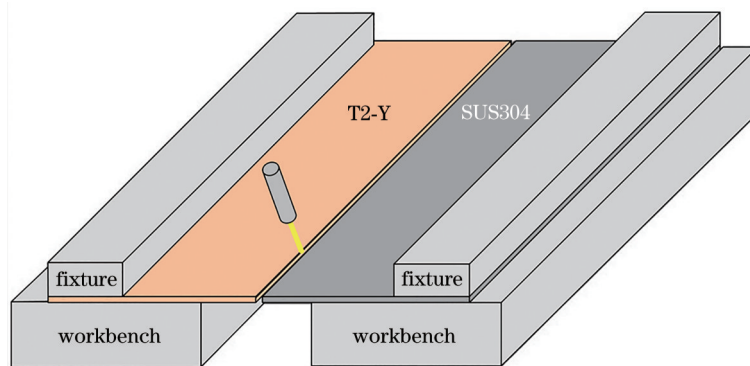


图1 激光焊接示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser welding

表3 激光焊接工艺参数

Table 3 Laser welding parameters

Sample No.	Laser power $P$ / kW	Welding speed $v$ / (mm·min <sup>-1</sup> )	Beam offset / mm	Defocus / mm	Gas flow / (L·min <sup>-1</sup> )
1#			0		
2#			0.20		
3#	3.7	1000	0.40	-2	25
4#			-0.20		
5#			-0.40		

6700F型扫描电子显微镜(SEM)观察焊接接头的微观组织。在MTS810拉伸试验机上进行拉伸试验,试验速度为2 mm/min,并在扫描电镜下观察断口形貌。采用显微维氏硬度计进行接头硬度测试,试验点间距为0.4 mm,试验力为0.1 kgf(1 kgf=9.806 N),保荷时间为15 s。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 焊接接头宏观形貌分析

5组工艺下焊接接头的宏观形貌如图2所示,可以看出焊缝横截面均为半沙漏状,即铜侧界面较为平直,钢侧为表面宽中心窄的沙漏状形貌。当激光光束偏向铜侧[图2(b)、(c)]时,焊缝中铜与钢呈层片状交错分布,焊缝成分不均匀。随着激光光束向钢侧偏移[图2(a)、(d)、(e)],焊缝中分层现象逐渐消失,成分趋向均匀。另外,2#、4#试样焊缝的铜基体上存在气孔,如图2(b)、(d)所示,这是由于铜的凝固速率较快、熔

池中的气体来不及逸出。

铜/钢激光焊缝半沙漏状形貌的形成与金属蒸发反作用力及马兰戈尼对流效应有关<sup>[8,18]</sup>。如图3(a)所示,激光焊接过程中熔池上部受激光能量的集中辐射,同时激光深熔焊的匙孔效应使得熔池底部沉积了大量能量,引起熔池两端金属液蒸发产生金属蒸气,熔池内部压力升高,金属蒸气在压力差的驱动下向熔池边缘逃逸。由于铜侧凝固速率快,致使金属蒸气只能向未凝固的钢侧逃逸,因此在钢侧熔合区两端形成了沙漏状熔池形貌。影响熔池形貌的另一个重要因素是马兰戈尼对流效应,由于熔池从中心到边缘温度 $T$ 逐渐降低,表面张力 $\sigma$ 逐渐升高,由表面张力变化而引发的马兰戈尼力驱动液态金属产生如图3(b)所示的回流<sup>[19]</sup>,使得熔宽增大。文献<sup>[20]</sup>的分析结果表明,熔池上下表面的液体流速高于熔池中部,使得输送到熔池上下表面的热量较多、熔宽较大,而熔池中部的熔宽较小,最终,焊缝形成了半沙漏状形貌。

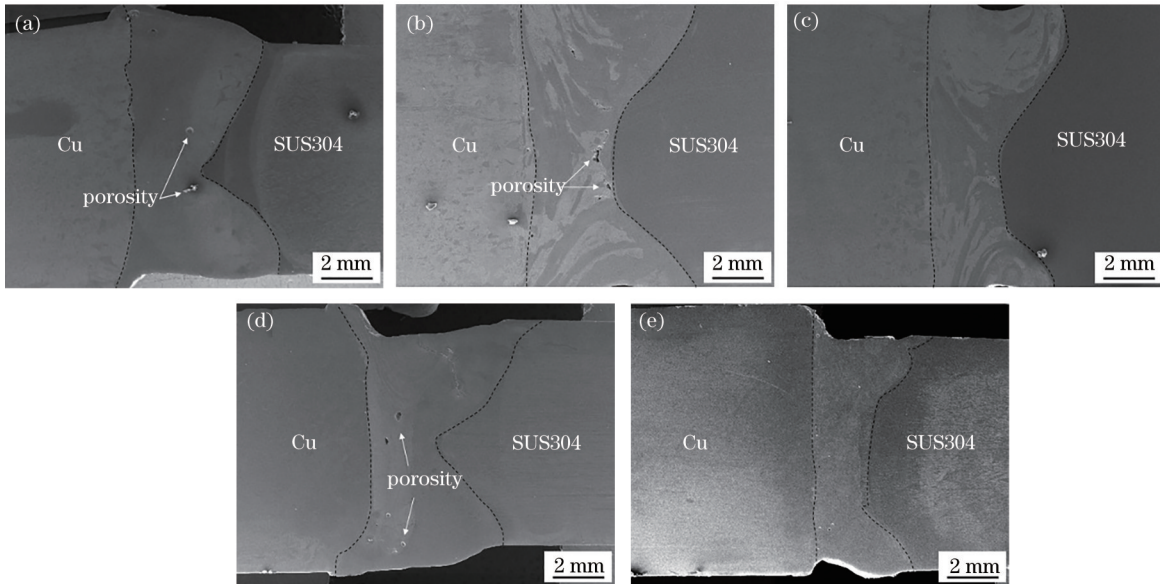


图2 不同光束偏移量下焊接接头的宏观形貌。(a) 0 mm;(b) 0.2 mm;(c) 0.4 mm;(d) -0.2 mm;(e) -0.4 mm

Fig. 2 Macro morphology of welded joints under different beam offsets. (a) 0 mm; (b) 0.2 mm; (c) 0.4 mm; (d) -0.2 mm; (e) -0.4 mm

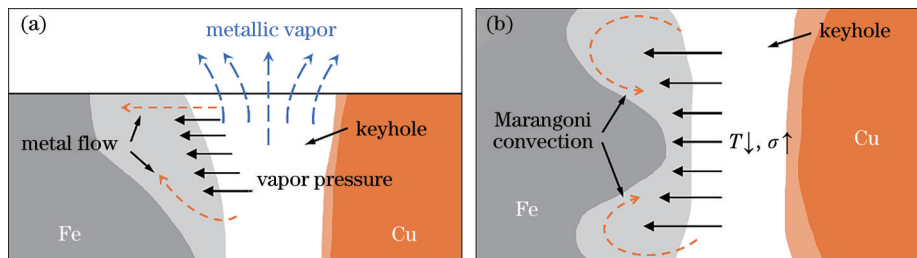


图3 焊缝形貌形成机制示意图。(a)金属蒸发作用力;(b)马兰戈尼对流效应

Fig. 3 Schematic diagrams of formation mechanism of weld morphology. (a) Metal evaporation force; (b) Marangoni convection

#### 3.2 焊接接头微观组织分析

##### 3.2.1 铜侧熔合区微观组织

研究认为,对于这种铜/钢熔焊异质接头,铜侧熔

合区及焊缝往往成为整个接头性能较薄弱的区域<sup>[21]</sup>。因此,本文着重研究这两个区域的组织演化机制。图4为五组工艺下铜侧熔合区的微观组织,可见铜侧

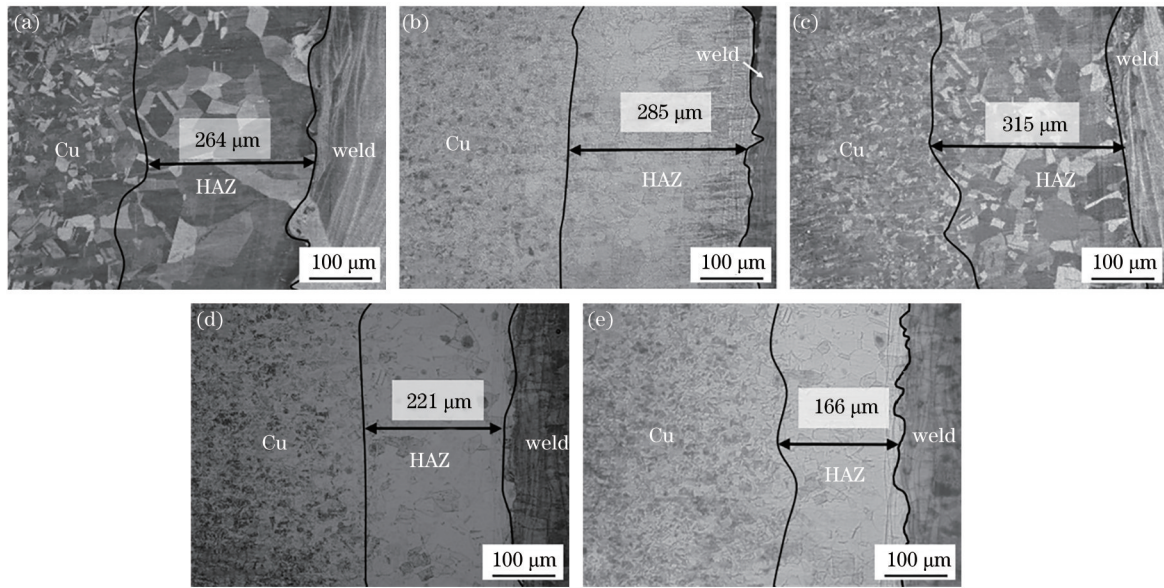


图4 不同光束偏移量下铜侧熔合区显微组织。(a) 0 mm; (b) 0.2 mm; (c) 0.4 mm; (d) -0.2 mm; (e) -0.4 mm  
Fig. 4 Microstructure of the copper fusion zone under different beam offsets. (a) 0 mm; (b) 0.2 mm; (c) 0.4 mm; (d) -0.2 mm; (e) -0.4 mm

热影响区在焊接热循环的影响下晶粒粗化严重,并产生了退火孪晶组织,这是由于铜晶粒再结晶过程中,晶界在(111)晶面上发生偶然层错,产生共格孪晶界从而形成孪晶<sup>[22]</sup>。焊接过程中金属蒸发反作用力和马兰戈尼效应对熔池的搅拌作用驱使金属液剧烈流动,使得焊缝与铜侧的界面较为曲折,并且有焊缝金属呈漩涡状侵入铜侧基体,有研究<sup>[12]</sup>认为这有利于提升焊接接头的力学性能。由图4可知,光束偏移量对热影响区宽度影响较大,随着光束从铜侧偏移向钢侧,铜侧受热影响程度逐渐降低,使得铜侧热影响区宽度和晶粒尺寸逐渐减小。

### 3.2.2 焊缝微观组织

图5为不同工艺下焊缝中心的SEM图像,图中深色区域为Fe,浅色区域为Cu,可见二者的分布和形貌主要受光束偏移量影响。焊缝区域的EDS检测结果如表4所示。图5(a)为光束未偏移时的焊缝组织,可见焊缝基体主要为网状 $\gamma$ -Fe,晶界间存在球状富Cu相析出物。图5(b)、(c)是光束偏向铜侧的微观组织,可以看出富Cu相与富Fe相交错分布,这是由于激光焊接时熔池的冷却速率较快,同时铜的高热导率也会加快熔池散热速率,使得熔池金属很容易因为过冷而进入Cu-Fe相图的亚稳溶解度间隙,含过饱和Cu的熔池金属液会分离成互不相溶的Cu和Fe液体,产生液相

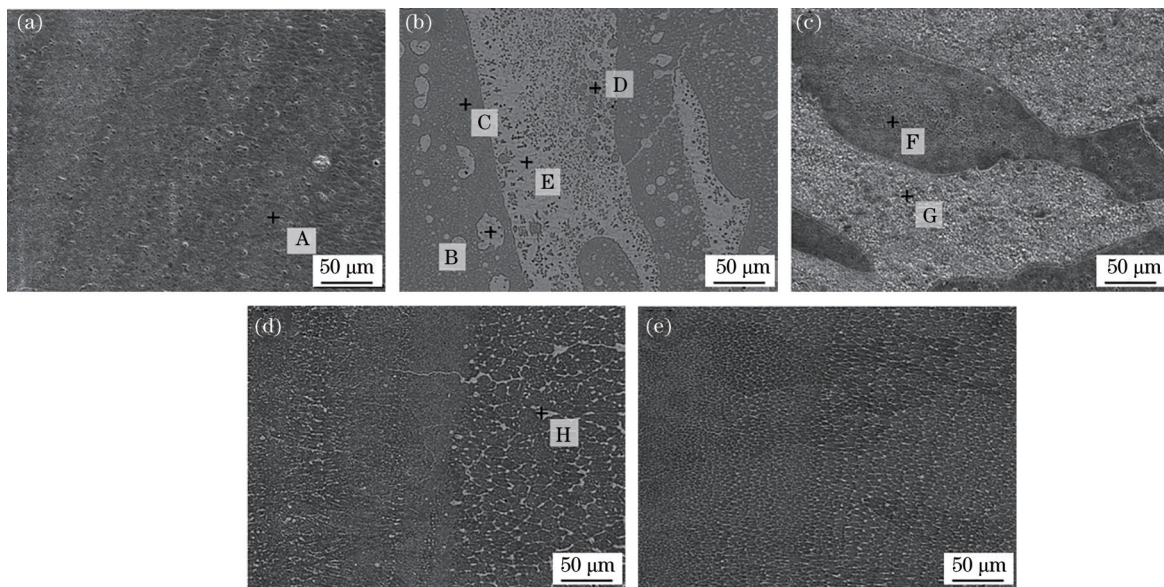


图5 不同光束偏移量下焊缝中心的微观组织。(a) 0 mm; (b) 0.2 mm; (c) 0.4 mm; (d) -0.2 mm; (e) -0.4 mm  
Fig. 5 Microstructure of the weld center under different beam offsets. (a) 0 mm; (b) 0.2 mm; (c) 0.4 mm; (d) -0.2 mm; (e) -0.4 mm

表 4 焊缝 EDS 检测结果  
Table 4 EDS test results of weld

Detection location	Mass fraction / %				Phase composition
	Fe	Cu	Cr	Ni	
A	56.00	16.00	21.00	6.00	$\gamma$ -Fe
B	4.90	93.80	1.30	—	Cu
C	67.39	9.70	16.08	6.83	Fe
D	56.75	23.77	13.71	5.77	$\alpha$ -Fe
E	10.00	85.29	2.18	2.53	Cu
F	60.61	15.89	17.53	5.89	Fe
G	51.70	30.89	11.54	5.86	Fe
H	8.00	86.89	3.58	1.53	Cu

分离现象,造成焊缝成分不均匀,这也是焊缝宏观形貌中分层现象产生的原因。图 5(d)、(e)为光束偏向钢侧的微观组织,组织主要为网状  $\gamma$ -Fe 胞晶,并且在网

状  $\gamma$ -Fe 的亚晶界处会析出少量铜。可见随着激光束从铜侧偏移向钢侧,焊缝成分逐渐趋向均匀。

### 3.3 焊接接头力学性能分析

#### 3.3.1 拉伸性能分析

对 5 组焊接接头分别进行室温拉伸试验,试验结果如图 6 所示。可以看出:当光束偏向钢侧时,接头抗拉强度和延伸率较高;当光束无偏移或偏向铜侧时,抗拉强度和延伸率相对较低。其中:偏移量为 0 和 0.2 mm 时的拉伸试样断裂位置为焊缝,这与焊缝内部的气孔和液相分离现象有关;其他试样均断在铜侧热影响区,这是由于铜的热导率高,焊接过程中铜侧热影响区受热较为严重,导致晶粒粗大,致使铜侧热影响区成为整个接头最为薄弱的区域;另一方面,当激光光束偏向钢侧时,焊缝组织主要为细小的胞状  $\gamma$ -Fe,并且晶界处还会析出铜,产生第二相强化,从而使得焊缝强度相对较高,很难在焊缝处发生断裂。

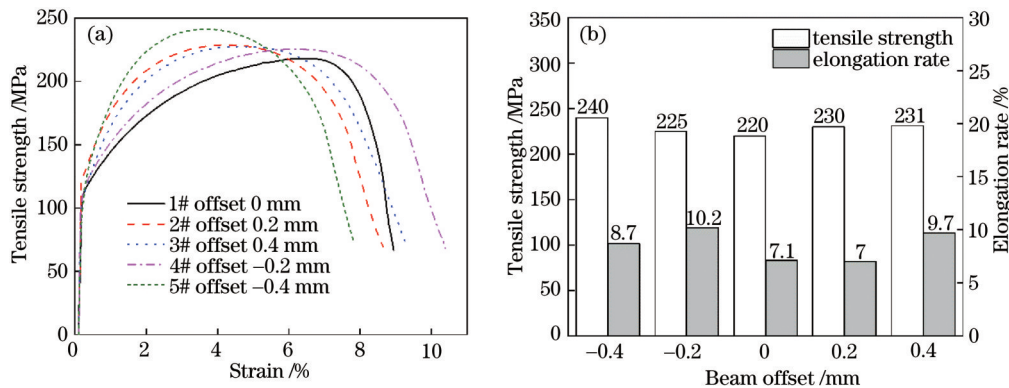


图 6 焊接接头拉伸试验结果。(a)应力-应变曲线;(b)应力-延伸率柱状图

Fig. 6 Tensile test results of welded joints. (a) Stress-strain curve; (b) stress-elongation histogram

为了进一步研究断裂机理,对拉伸断口进行 SEM 观察和 EDS 分析,断口形貌如图 7 所示,EDS 检测结果见表 5。从图 7(a)可以看出,1#试样的断口形貌不

平整,可知试样在拉伸时呈缓慢撕裂状态,断口部位分布有大量球状颗粒,EDS 分析表明该球状颗粒的成分为  $\text{Cu}_2\text{O}$ 。 $\text{Cu}_2\text{O}$  是焊接过程中铜与氧在高温下反应生

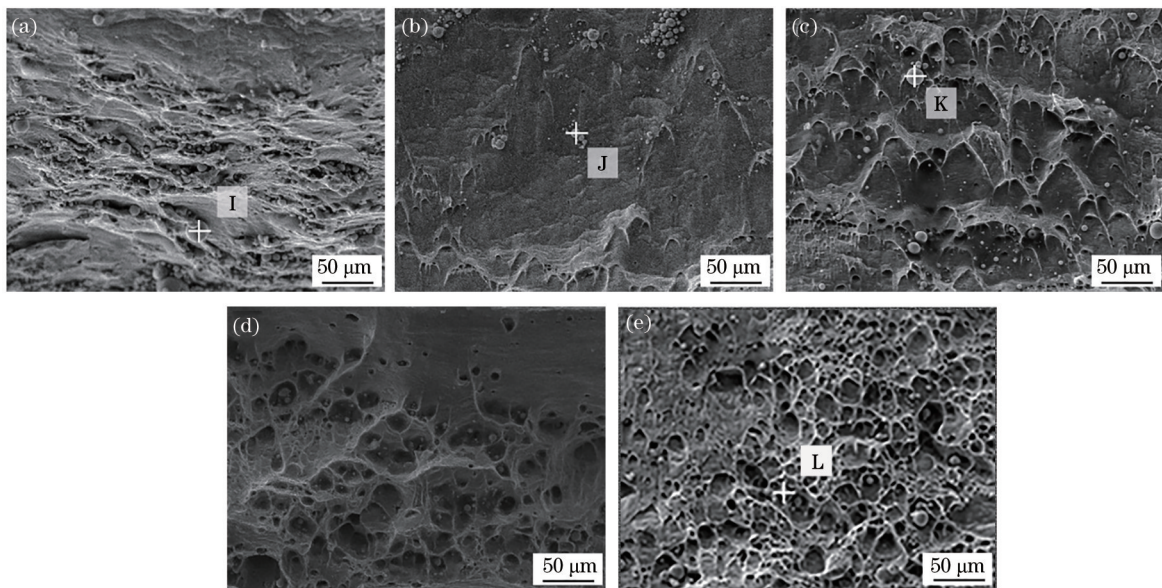


图 7 不同光束偏移量下焊接接头的断口形貌。(a) 0 mm; (b) 0.2 mm; (c) 0.4 mm; (d) -0.2 mm; (e) -0.4 mm

Fig. 7 Fracture morphology of welded joints under different beam offsets. (a) 0 mm; (b) 0.2 mm; (c) 0.4 mm; (d) -0.2 mm; (e) -0.4 mm

表 5 拉伸断口 EDS 检测结果

Table 5 EDS test results of stretch fracture

Detection location	Mass fraction / %			Phase composition
	Fe	Cu	O	
I	5.03	66.82	28.15	Cu <sub>2</sub> O
J	13.58	57.55	28.87	Cu <sub>2</sub> O
K	5.79	68.57	25.64	Cu <sub>2</sub> O
L	11.49	58.28	30.23	Cu <sub>2</sub> O

成的一种脆性化合物<sup>[23]</sup>,可能与气体保护不充分有关,Cu<sub>2</sub>O通常分布于晶界,对接头韧性会产生一定的不利影响。图 7(b)、(c)为激光束偏向铜侧时的拉伸断口形貌,其中:图 7(b)断面光滑,且伴有河流状花样,为典型的解理断裂,断面上分布有团簇状 Cu<sub>2</sub>O 颗粒;图 7(c)中河流状花样明显增多,存在微孔聚集倾向,断口分布有较多 Cu<sub>2</sub>O 颗粒。当激光束偏向钢侧时,拉伸断口均存在明显的韧窝,属于典型的韧性断裂,如图 7(d)、(e)所示。随着光束在钢侧的偏移量增大,韧

窝的数量明显增多,且韧窝中存在 Cu<sub>2</sub>O 颗粒。当试样发生微孔聚集型断裂时,微孔以 Cu<sub>2</sub>O 颗粒或第二相粒子为中心形核并逐渐长大、合并,最终使试样发生断裂,形成韧窝。

### 3.3.2 显微硬度分析

图 8 为 5 组焊接接头的显微硬度试验结果。由于铜与钢的硬度差异较大,因此在接头熔合区处硬度发生陡变。从图 8 可以看出,钢侧母材硬度最高,焊缝次之,铜侧母材硬度最低。4#、5#接头焊缝硬度接近钢侧母材(其中 5# > 4#),这是由于当激光束偏移至钢侧时,焊缝中 Fe 含量较多,并且少量分布在网状  $\gamma$ -Fe 晶界处的铜具有强化作用,使得焊缝硬度较高;2#、3#接头焊缝的硬度存在明显波动。为了进一步表征光束偏向铜侧时焊缝的硬度分布情况,对 2# 接头框选区域进行点间距 0.2 mm 的硬度测试,并绘制如图 9 所示的硬度云图。从图 9 可以看出,焊缝区域内硬度分布不均匀,富铜相的硬度低于富铁相,这与液相分离导致的焊

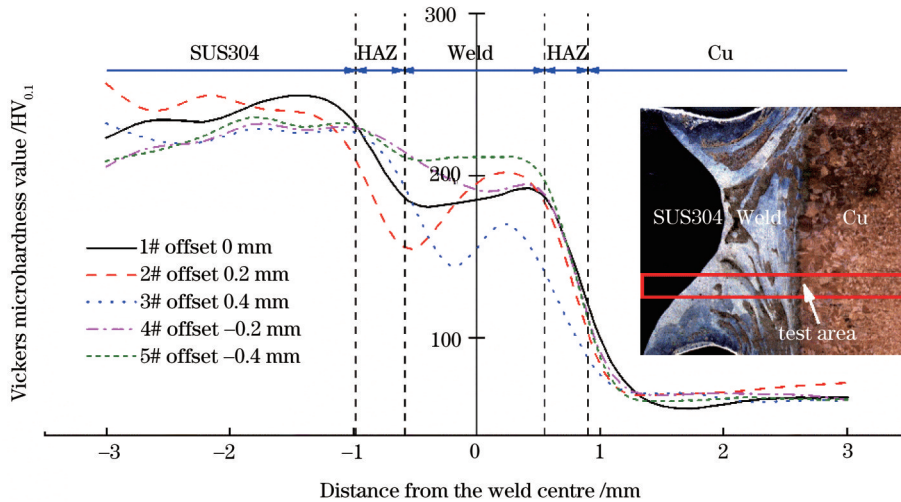


图 8 显微硬度试验结果

Fig. 8 Results of microhardness test

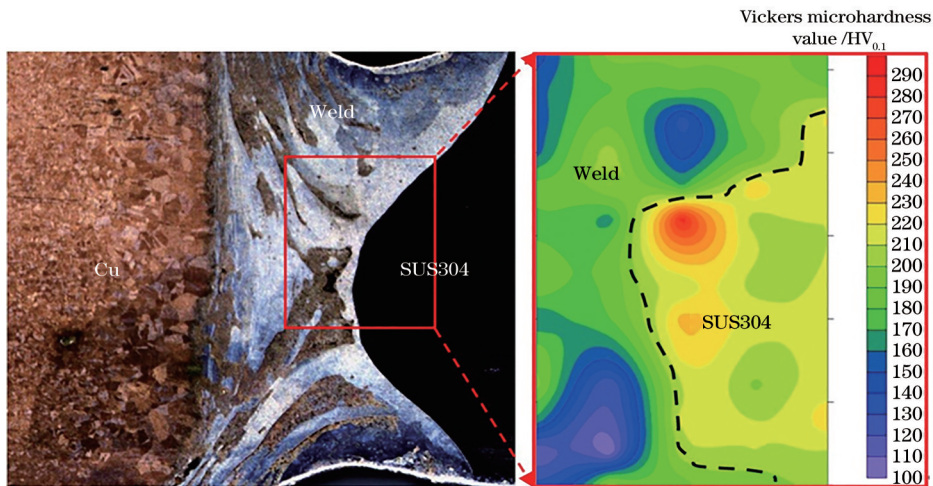


图 9 显微硬度分布云图

Fig. 9 Distribution of microhardness

缝成分不均匀有关,且焊缝整体硬度低于钢侧母材。

## 4 结 论

本文采用激光焊接方法,研究了光束偏移量对 T2 紫铜/304 不锈钢焊接接头微观组织及力学性能的影响,结果表明:

1) 焊缝宏观形貌在金属蒸发作用力和马兰戈尼效应的共同影响下呈半沙漏状。当激光束偏向铜侧时,焊缝中出现液相分离现象,铜与钢呈片状交错分布;当激光束偏向钢侧时焊缝成分较为均匀,未出现明显的分层现象。

2) 激光束未偏移或偏向钢侧时,焊缝组织为  $\gamma$ -Fe 基体和 Cu 析出相,且随着钢侧偏移量增大,析出物减少;当激光偏向铜侧时,焊缝内因液相分离出现了片层状分离的富 Fe 相与富 Cu 相交错的形貌。

3) 与光束无偏移或偏向铜侧相比,光束偏向钢侧时接头的拉伸性能较好;硬度分布由大到小依次为钢侧、焊缝、铜侧,且当光束偏向铜侧时,焊缝区域由于液相分离导致硬度分布不均匀。综合抗拉强度与显微硬度数据可知,光束偏移量为  $-0.4$  mm 时可获得综合性能最优的焊接接头。

## 参 考 文 献

- [1] 程东海, 邵景辉, 陈益平, 等. 铜钢异种材料等离子弧焊接头性能[J]. 焊接学报, 2012, 33(9): 97-100, 118.  
Cheng D H, Shao J H, Chen Y P, et al. Plasma arc welding of copper-steel dissimilar metals[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(9): 97-100, 118.
- [2] Ramachandran S, Lakshminarayanan A K. An insight into microstructural heterogeneities formation between weld subregions of laser welded copper to stainless steel joints[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(3): 727-745.
- [3] 周利, 蒋智华, 雷淑贵, 等. 铜/钢异种金属搅拌摩擦焊接工艺[J]. 焊接学报, 2019, 40(4): 22-27, 161.  
Zhou L, Jiang Z H, Lei S G, et al. Process study for friction stir lap welding of copper/steel dissimilar metals [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(4): 22-27, 161.
- [4] 尚大智, 张健, 冯爱新, 等. 焊面结构化对铜/钢激光焊接接头组织及力学性能的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0902004.  
Shang D Z, Zhang J, Feng A X, et al. Effect of surface texturization on microstructure and mechanical properties of laser welded copper/steel joint[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0902004.
- [5] Singh G, Saxena R K, Pandey S. An examination of mechanical properties of dissimilar AISI 304 stainless steel and copper weldment obtained using GTAW[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 26: 2783-2789.
- [6] 赵乐, 韩雪, 邹江林, 等. 光纤激光深熔焊接小孔形成过程的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 071402.
- [7] Zhao L, Han X, Zou J L, et al. Research on formation process of keyhole during fiber laser deep penetration welding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 071402.
- [7] 许赛, 杨立军, 徐书峰, 等. 激光深熔焊等离子体电信号振荡特征与焊缝熔深的特征关系[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0102006.  
Xu S, Yang L J, Xu S F, et al. Relation between plasma electrical signal oscillation and weld depth in laser deep penetration welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0102006.
- [8] 顾凡, 孙茜, 皇甫圆翔, 等. 激光偏移量对镍钛/铜激光焊缝组织和性能的影响研究[J]. 中国激光, 2021, 48(10): 1002107.  
Gu F, Sun Q, Huangfu Y X, et al. Effects of laser offset on microstructure and properties of NiTi/copper laser-welded joint[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(10): 1002107.
- [9] 蔡远征, 闫飞, 黎硕, 等. 铜钢异种合金激光对接焊工艺研究[J]. 应用激光, 2017, 37(6): 829-834.  
Cai Y Z, Yan F, Li S, et al. A study of copper-steel dissimilar alloy laser welding[J]. Applied Laser, 2017, 37(6): 829-834.
- [10] 周学凯, 米高阳, 刘森, 等. 304 不锈钢/T2 紫铜超薄板激光搭接焊[J]. 中国激光, 2017, 44(8): 0802006.  
Zhou X K, Mi G Y, Liu S, et al. Laser lap welding of 304 stainless steel/T2 red copper ultra-thin sheets[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 0802006.
- [11] Mannucci A, Tomashchuk I, Vignal V, et al. Parametric study of laser welding of copper to austenitic stainless steel[J]. Procedia CIRP, 2018, 74: 450-455.
- [12] 付俊, 黄坚, 姚成武, 等. 铜钢激光对接焊研究[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1256-1260.  
Fu J, Huang J, Yao C W, et al. Laser butt welding for copper-steel joint[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(5): 1256-1260.
- [13] Shaibu V B, Sahoo S K, Kumar A. Computational modeling of dissimilar metal CO<sub>2</sub> laser welding: applied to copper and 304 stainless steel[J]. Procedia Engineering, 2015, 127: 208-214.
- [14] 刘文东, 李红. 黄铜与不锈钢异种金属激光焊接工艺研究[J]. 应用激光, 2019, 39(6): 966-969.  
Liu W D, Li H. Research on laser welding process of dissimilar metal with brass-stainless steel[J]. Applied Laser, 2019, 39(6): 966-969.
- [15] Yao C W, Xu B S, Zhang X C, et al. Interface microstructure and mechanical properties of laser welding copper-steel dissimilar joint[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(7/8): 807-814.
- [16] Meng Y F, Li X W, Gao M, et al. Microstructures and mechanical properties of laser-arc hybrid welded dissimilar pure copper to stainless steel[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 111: 140-145.
- [17] Chen S H, Huang J H, Xia J, et al. Microstructural characteristics of a stainless steel/copper dissimilar joint made by laser welding[J]. Metallurgical and Materials

- Transactions A, 2013, 44(8): 3690-3696.
- [18] Fuhrich T, Berger P, Hügel H. Marangoni effect in laser deep penetration welding of steel[J]. Journal of Laser Applications, 2001, 13(5): 178-186.
- [19] 吴家洲. 激光深熔焊接过程流体流动分析和传热传质机理研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.  
Wu J Z. Fluid flow analysis and mechanism research on heat and mass transfer during deep-penetration laser welding[D]. Nanchang: Nanchang University, 2019.
- [20] 杜汉斌, 胡伦骥, 王东川, 等. 激光穿透焊温度场及流动场的数值模拟[J]. 焊接学报, 2005, 26(12): 65-68, 100, 126.  
Du H B, Hu L J, Wang D C, et al. Simulation of the temperature field and flow field in full penetration laser welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(12): 65-68, 100, 126.
- [21] Chen S H, Huang J H, Xia J, et al. Influence of processing parameters on the characteristics of stainless steel/copper laser welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 222: 43-51.
- [22] 郭顺, 彭勇, 周琦, 等. 304 不锈钢/T2 紫铜电子束焊接熔池凝固行为及组织性能研究[J]. 焊接, 2019(2): 6-10, 65.  
Guo S, Peng Y, Zhou Q, et al. Study on solidification behavior and microstructure-property of 304 SS/T2 copper electron beam welded joints[J]. Welding & Joining, 2019(2): 6-10, 65.
- [23] 刘欢, 高晓龙, 刘晶, 等. 钛/铜异种金属焊接技术研究进展[J]. 宝鸡文理学院学报(自然科学版), 2019, 39(1): 63-67, 79.  
Liu H, Gao X L, Liu J, et al. Research progress on welding technology of Ti/Cu dissimilar metal[J]. Journal of Baoji University of Arts and Sciences (Natural Science Edition), 2019, 39(1): 63-67, 79.