

## 采用激光预置铜层钛钢接头成形与组织

朱明<sup>1,2</sup>, 祁先刚<sup>1</sup>, 张宗智<sup>1</sup>, 石玗<sup>1,2</sup>

(1. 兰州理工大学, 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州, 730050; 2. 兰州理工大学, 有色金属合金及加工教育部重点实验室, 兰州, 730050)

**摘要:** 钛钢复合板在爆炸成形过程中会产生局部未熔合等缺陷, 目前采用电弧焊修复时精度、质量与自动化程度相对较低, 主要难点集中在钢表面铜过渡层的高质量制备方面。为此提出采用半导体激光同轴送粉的方法精确成形铜过渡层, 并在铜层表面 TIG 熔覆钛层实现复合板的局部修复, 采用半导体激光熔覆试验系统, 分析了激光功率、送粉速率、扫描速度对铜层熔覆成形参数及微观组织的影响, 并在铜层表面继续 TIG 熔覆钛层, 工艺优化后得到了成形良好的 Ti-Cu-Fe 接头并对接头进行了微观组织测试与性能评价。结果表明, 采用半导体激光可以实现铜层熔覆厚度的精确控制, 厚度范围为 0.236 ~ 0.462 mm; 从 Cu-Fe 接头能谱仪 (energy dispersive spectrometer, EDS) 可以发现, 通过铜层厚度的控制, 上表面区域的 Fe 元素含量明显减小, 有利于减少脆硬的 Fe-Ti 金属间化合物生成; TIG 堆焊钛层后, 接头主要以 CuTi<sub>2</sub> 金属间化合物为主, 接头平均抗剪强度为 194 MPa, 接头断裂方式为脆性断裂。

**创新点:** (1) 通过半导体激光熔覆可以在钢基材表面实现铜熔覆层成形的精确控制  
(2) 激光熔覆的 Cu 层厚度能满足 TIG 堆焊钛层对熔深的要求, 接头以 CuTi<sub>2</sub> 金属间化合物为主, 性能良好。

**关键词:** 钛钢复合板; Cu 过渡层; 激光熔覆; 同轴送粉; 熔覆成形工艺

中图分类号: TG 444.74 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.20231124002

## Laser-induced pre-placed copper layer titanium-steel joint forming and microstructure research

ZHU Ming<sup>1,2</sup>, QI Xiangang<sup>1</sup>, ZHANG Zongzhi<sup>1</sup>, SHI Yu<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050, China; 2. Key Laboratory of Non-ferrous Metal Alloys and Processing of State Education Ministry, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050, China)

**Abstract:** During the explosive forming of titanium-steel composite plates, defects such as incomplete fusion may occur. Currently, the accuracy, quality, and level of automation in using arc welding for repair are relatively low. The main difficulty lies in the high-quality preparation of the copper transition layer on the steel surface. In this study, a method that utilizes semiconductor laser coaxial powder feeding was proposed to accurately form the Cu transition layer, followed by TIG cladding of a Ti layer on the surface of the Cu layer to achieve localized repair of the composite plate. Using the established semiconductor laser cladding experimental system, the influences of laser power, powder feeding speed, and scanning speed on the cladding parameters and microstructure of the Cu layer were analyzed. After TIG cladding of the Ti layer on the Cu layer surface, a well-formed Ti-Cu-Fe joint was obtained through process optimization, and its microstructure was tested and performance evaluation. The results indicate that :The use of semiconductor lasers enables precise control of the copper cladding thickness, achieving a thickness range of 0.236 ~ 0.462 mm; Energy dispersive spectrometer (EDS) analysis of the Cu-Fe joint reveals that controlling the copper layer thickness significantly reduces Fe content in the upper surface region, thereby suppressing the formation of brittle Fe-Ti intermetallic compounds;After TIG surfacing of the titanium layer, the joint primarily consists of CuTi<sub>2</sub> intermetallic compounds,

exhibiting an average shear strength of 194 MPa with a brittle fracture mode.

**Highlights:** (1) The precise control of copper cladding layer formation on the surface of steel substrates can be achieved through semiconductor laser cladding.

(2) The thickness of the copper layer achieved through laser cladding meets the requirements for the depth of fusion in TIG welding of titanium, the joints mainly consist of CuTi<sub>2</sub> intermetallic compounds, exhibiting good properties.

**Key words:** titanium-steel composite plate; copper transition layer; laser cladding; coaxial powder feeding; cladding forming process

## 0 序言

钛钢复合板兼具钛的优良耐腐蚀性和钢高强度的优点, 大量用于海洋工程、能源化工等领域<sup>[1-2]</sup>。目前钛钢复合板的制造工艺主要以爆炸法、轧制复合法为主<sup>[3-4]</sup>, 由于二者的物化性能差异较大且冶金行为复杂, 接头界面区会产生空洞、微裂纹等结合不良缺陷, 现场需要手工电弧焊熔覆铜过渡层后再堆焊钛层进行修补<sup>[5]</sup>。但人工修复的生产效率与质量较低, 严重影响了钛钢板的生产效率, 因此急需开发新型高效、自动化程度高、性能优良的钛钢板修复技术体系。

激光熔覆技术<sup>[6]</sup>具有自动化程度高、能量密度集中、接头热影响区小、稀释率低以及绿色环保等特点<sup>[7-9]</sup>, 逐步成为增材与再制造技术的重要选择之一。但在钛钢复合板修复领域, 现有激光熔覆再制造工艺体系还不成熟, 主要难题集中在铜过渡层的成形与接头性能提升方面。国内外众多学者也对此进行了研究, Mitelea 等人<sup>[10]</sup>和 Gnyusov 等人<sup>[11]</sup>均利用 YAG(钇铝石榴石晶体)激光器进行了钛合金和不锈钢的研究, 发现在钛/铜界面主要由  $\alpha$ -Ti、少量 Ti-Cu 和 Ti-Fe 相构成, 熔化区则以 Cu 基固溶体为主, 且夹杂有些许的 Ti-Fe 金属间化合物, 铜/钢界面则主要由 Cu 基与 Fe 基固溶体构成; 郭顺等人<sup>[12]</sup>采用电子束焊获得高强度 T2 铜和 Ti-6Al-4V 钛合金异种金属接头; 常敬欢等人<sup>[13]</sup>采用

铜—镍复合填充金属进行了钛合金和不锈钢的冷金属过渡焊接, 发现添加铜—镍复合填充金属后得到了无焊接缺陷的钛合金/不锈钢焊接接头。接头中形成了硬度相对 Ti-Fe, Ti-Cu 金属间化合物较低的 TiNi 金属间化合物, 改善了钛合金/不锈钢焊接接头的拉伸性能; 王红阳等人<sup>[14]</sup>运用激光—电弧复合热源焊, 通过添加 Cu-Zn 中间层实现了 TC4 钛合金与 304 不锈钢的良好焊接。上述研究主要集中在钛钢接头过渡层的选择、冶金结合机理等方面, 但在成形控制及对组织、性能影响方面的研究相对较少。

文中提出采用半导体激光精确控制铜过渡层熔覆并在此基础上 TIG 堆焊钛层的复合板修复工艺体系, 分析激光工艺参数对铜过渡层的作用规律, 通过微观组织测试研究过渡层内 Fe、Cu 元素的分布特征, TIG 熔覆钛层后接头的微观组织形貌及对性能的影响。

## 1 试验方法

基体材料为 Q345 钢, 试样尺寸为 80 mm × 60 mm × 30 mm, 选用的熔覆粉末为纯铜粉, 其粉末粒径范围为 50 ~ 150  $\mu\text{m}$ , 其化学成分见表 1, TIG 熔覆材料为 TA1 钛丝。试验前, 将粉末放置在 120 °C 的保温箱中烘干 1 h 以去除粉末中的水分, 试验中使用纯度为 99.99% 的氩气为送粉气, 载粉气流量为 6 L/min。

表 1 铜粉的化学成份(质量分数, %)  
Table 1 Chemical composition of copper powder

Cu	Fe	Pb	Zn	O	Ni	Sn	Bi
99.8	0.01	0.05	0.03	0.02	0.05	0.001	0.03

试验采用的激光热源为 FL-Dlight-1500 直接输出型矩形光斑半导体激光器, 其最小光斑尺寸为 1 mm × 3 mm, 工作波长为 976 ± 10 nm, 最大输出

功率为 1 500 W, 送粉设备为 ECPF 2-2 LC 等离子送粉器, 同时配备了高精度同轴环形送粉喷嘴, 整体设计的试验与采集系统和松下 YC-300TSP 钨极

氩弧焊机系统, 如图 1 所示。

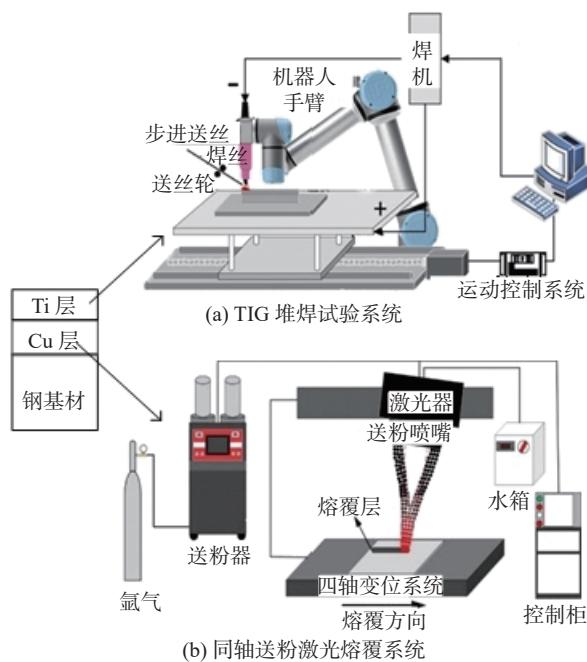


图 1 试验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental systems. (a) TIG welding experimental system; (b) coaxial powder feed laser cladding system

在进行结构微观组织分析测试时, 针对不同工艺参数下接头的金相组织采用 LSM800 激光共聚焦显微镜进行分析, 采用 Quanta-FEG450 扫描电子显微设备, 研究试样的表面形貌、进行物相的化学

成分分析、对铜钢界面元素分布进行分析, 采用 EDS 对试样微区进行成分分析, 采用 D8-ADVANCE 型 X 射线衍射仪对样品进行物相分析, XRD 检测时, 扫描范围为  $20^\circ \sim 90^\circ$ , 步长为  $0.02^\circ$ , 并利用 Jade 软件和以标准相位 PDF 卡的  $2\theta$  角度和衍射峰强度为基础进行比较, 从而最终确定晶体类型和相位类型。

在进行接头性能分析时, 采用 Wilson-VH1102 维氏硬度计进行显微硬度检测, 使用 200 g 负载和 10 s 的停留时间, 采用 WDW-100D 电子万能试验机, 根据国家标准 GB/T 6396-2008《复合钢板力学及工艺性能试验方法》进行复合层界面结合强度的室温抗剪试验。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 激光熔覆铜层的成形特征及微观组织分析

#### 2.1.1 工艺参数对铜熔覆层几何尺寸的影响

根据铜粉的特点和激光熔敷工艺特点, 工艺参数范围取激光功率  $900 \sim 1500$  W, 扫描速度  $2 \sim 6$  mm/s, 送粉速率  $0.25 \sim 0.75$  r/min。试验通过改变激光功率、送粉速率和扫描速度制备不同的熔覆层, 分析 3 个工艺参数与成形参数的影响及微观组织特征, 采用的具体工艺参数见表 2。

Table 2 Morphological parameters of copper cladding coatings under different process parameters

组号	试样编号	功率 $P/W$	扫描速度 $v_s/(mm \cdot s^{-1})$	送粉速率 $v_f/(r \cdot min^{-1})$	熔宽 $W/mm$	余高 $H/mm$	熔深 $h/mm$	高宽比 $n/\%$	稀释率 $\eta/\%$
第一组 (不同功率)	a	900	4	0.50	2.95	0.314	0.008	10.8	2.48
	b	1100	4	0.50	3.29	0.428	0.029	13.0	6.35
	c	1300	4	0.50	3.37	0.457	0.142	13.6	23.71
	d	1500	4	0.50	3.84	0.462	0.414	12.0	47.26
第二组 (不同送粉速率)	e	1100	4	0.25	3.43	0.327	0.242	9.5	42.53
	b	1100	4	0.50	3.29	0.428	0.029	13.0	6.35
	f	1100	4	0.75	3.58	0.457	0.018	12.8	3.79
第三组 (不同扫描速度)	g	1100	2	0.50	3.55	0.452	0.063	12.7	12.23
	b	1100	4	0.50	3.29	0.428	0.029	13.0	6.35
	h	1100	6	0.50	3.18	0.236	0.015	7.4	5.98

不同工艺参数下的熔覆层形貌, 如图 2 所示, 激光功率在 900 W(试样 a)时, 熔覆层表面比较粗糙, 在 1 100 和 1 300 W(试样 b、试样 c)时, 表面变得较为平整致密, 获得的熔覆层表面质量较高, 组

织为多边形晶粒, 呈微黄色, 晶粒边界明显、形状规则。形成的晶粒在各方向上尺寸相差较小, 为等轴晶见图 2(b)-a、图 2(b)-b 和图 2(b)-c, 且随着激光功率的增加, 熔覆层的等轴晶晶粒逐渐长大。当激

光功率提高到1500 W(试样d)时,表面比较平整整洁,但是试件表面开始出现了轻微过烧现象,铜表面金属光泽变暗。在铜钢界面上方形成铜钢互溶组织区见图2b-(d),由铁—铜二元合金相图可知,两相固态有限互溶,液态无限互溶,室温下形

成固溶体。固溶区域主要是颗粒状 $\epsilon$ -Cu相分散在 $\gamma$ 相为主的( $\gamma+\epsilon$ )双相固溶体组织结构,在靠近钢侧区域中弥散分布着球状和小枝晶状的铜相,而在熔覆层中上部区域中又存在着枝状和球状富铁相。

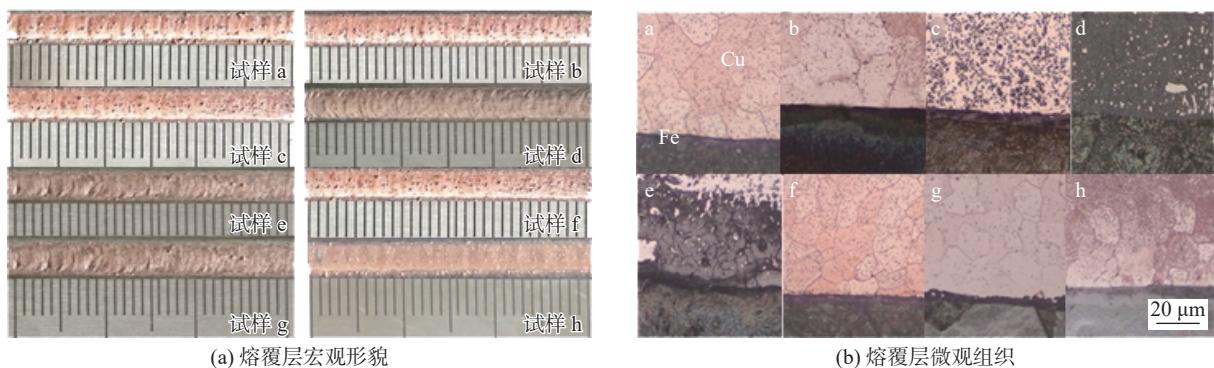


图2 不同工艺参数下的熔覆层形貌

Fig. 2 Cladding layers under different process parameters. (a) macroscopic morphology; (b) microscopic structure

送粉速率为0.25和0.50 r/min(试样e、试样b)时,熔覆层表面平整光滑无明显缺陷,但随着送粉速率的增大到0.75 r/min时,粘粉现象明显(试样f),其原因是大量未熔化的粉末颗粒进入熔池反向吸收熔池热量来熔化自身,因而熔池没有足够热量来完成润湿铺展而凝固造成粉末颗粒粘结在熔覆层表面。从图2(b)-e中可以看到当送粉速率为0.25 r/min时,在铜钢界面上方形成铜钢互溶组织区,从试样b、试样f发现随着送粉量的增加,如图2(b)-b、图2(b)-f所示,铜钢界面逐渐变得平整,熔覆层中的晶粒更加细小,这是因为随着送粉速率的增加,单位面积粉末上获得的激光辐照能量最低,晶粒来不及长大粗化,因而晶粒较为细小。

扫描速度为2 mm/s(试样g)时,熔覆层表面光亮,有较多粘结的未铺展的粉末颗粒在熔覆层表面,当扫描速度提高为4或6 mm/s(试样b、试样h)时,铜层表面粗糙度逐渐减小。从试样g、试样b和试样h组织图中(图2(b)-g、图2(b)-b和图2(b)-h)可以看出,激光扫描速度的变化对熔覆层组织的晶粒影响不大,随着扫描速度的增加,铜钢界面逐渐变得平整,当扫描速度到一定程度时,熔池的移动速率变快,粉末刚好熔化与钢板形成冶金结合。因为当激光扫描速度增加时,单位时间内作用于粉末和基材的激光能量减小,导致熔池温度随降低。

根据表2激光熔覆工艺参数对熔覆层几何尺寸的影响,如图3所示,随着激光功率的增加(试样a~试样d),熔覆层的余高、熔深、熔宽和稀释率均

增大。随着送粉量的增加(试样e、试样b和试样f),熔覆层的熔宽呈上下波动变化,余高增加且熔深和稀释率明显减小。在相同激光功率下,随着送粉量的增加,进入熔池的粉末量增多,因此熔覆层厚度增加;另一方面随着送粉量的增加,粉末颗粒吸收的能量增多而作用在熔池上的能量相对减少,最终导致熔深的减小。随着扫描速度的增加(试样g、试样b和试样h),熔覆层的余高、熔深、熔宽和稀释率都呈减小趋势。这是因为扫描速度增大,热输入下降,熔池金属来不及充分的流动和熔化,导致成形参数均有所降低。

### 2.1.2 熔覆层Fe元素分布

不同工艺参数下Fe元素的分布,如图4所示,图中右侧呈黑色一侧为熔覆层铜侧,左侧为基材钢侧。根据图4(a)结果所示,功率为900和1100 W时,在基体中的只有极少部分的Fe元素扩散到铜一侧,当功率为提高到1300 W时,从图中可以看到有黑色区域与Fe元素相间分布,在右边黑色区域出现了Fe元素的富集。在1500 W时,黑色区域与Fe元素的分布变得逐渐均匀,同时可以明显看到黑色区域呈现不规则的椭球状与Fe元素相间分布。结合图金相组织分析可得,在激光功率达到1300 W时,基材的大量熔化使得大量Fe元素扩散到覆层中,形成了如图所示的铜钢互溶组织区。根据图4(b)结果所示,送粉量为0.25 r/min时,出现了黑色区域与Fe元素呈不规则状相间分布,在铜侧区域出现了Fe元素的富集。这是由于在送粉量较

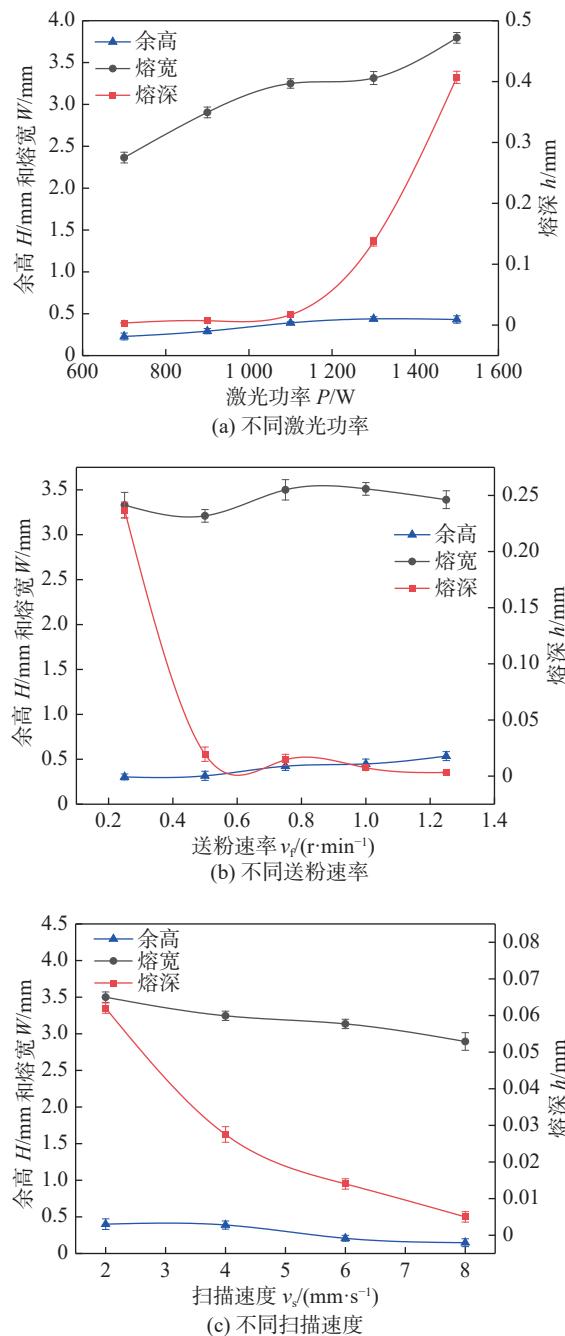


图 3 不同工艺参数对熔覆层成形参数的影响

Fig. 3 Influence of different process parameters on cladding layer formation parameters. (a) different laser powers; (b) different powder feeding rates; (c) different scanning speeds

小时, 基体的大量熔化使得大量 Fe 元素扩散到覆层中, 同时因为激光熔覆是一个快速凝固的过程, Fe 元素在覆层中来不及扩散会形成偏析, 形成不规则块状区域。随着送粉量的增大, Fe 元素的分布在铜钢界面呈现出了明显的界限。在激光扫描速度为 2 mm/s 时, 可以在铜侧看到有 Fe 元素的富集呈点状分布在铜侧。但随着激光扫描速度的增加, 铜钢界面处没有明显 Fe 元素的偏析过渡发生。发现当

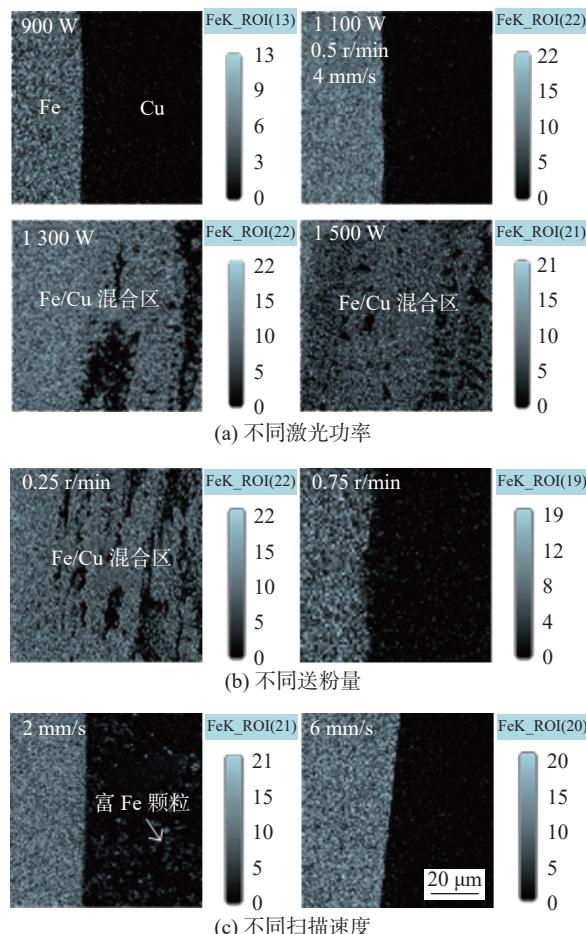


图 4 不同工艺参数下 Fe 元素的区域分布含量

Fig. 4 Regional distribution content of Fe element under different process parameters. (a) different laser powers; (b) different powder feeding rates; (c) different scanning speeds

激光功率过大、送粉量过小或扫描速度过慢均容易造成 Fe 元素大量扩散至铜熔覆层。

## 2.2 TIG 堆焊钛层试验

在钢表面通过激光熔覆制备铜过渡层, 对比不同工艺参数试样的形貌特征、组织及 Fe 元素的扩散情况筛选出了满足工艺条件的试样 a、试样 b、试样 f 和试样 h, 然后在这 4 组试样的铜过渡层表面 TIG 熔覆钛层, 发现试样 a 和试样 h 的铜过渡层由于厚度不够在熔覆钛层时熔池热量过大导致钢基材也被熔化, 使得 Fe 元素大量扩散至钛层, 并不能起到阻止 Fe 元素扩散的作用, 只有试样 b 和试样 f 在熔覆钛层时铜过渡层并没有完全熔化, 有效阻止了基材中 Fe 向钛层的扩散, 为了考虑经济和保护环境, 因此在 TIG 电弧熔覆钛层时选用试样 b。

### 2.2.1 工艺试验

试验测试了单层单道熔覆层其高脉冲群参数相同, 对比低脉冲组平均电流在 20、40、60 和 80

A变化时的结果,试验参数见表3,熔覆层的宏观形貌如图5所示。

表3 TIG焊试验参数  
Table 3 Experimental parameters for TIG welding

高脉冲群峰值电流 $I_{\max}/A$	高脉冲群基值电流 $I/A$	高脉冲群占空比 $\delta_h(\%)$	高脉冲群频率 $f_h/Hz$	低脉冲群频率 $f_l/Hz$	低脉冲群占空比 $\delta_l(\%)$	焊接速度 $v_a/(cm \cdot s^{-1})$	送丝速度 $v_b/(mm \cdot s^{-1})$
145	103	50	90	10	50%	0.18	35

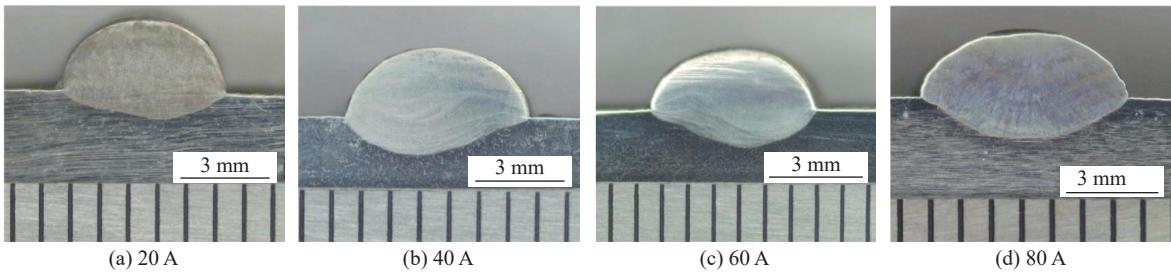


图5 不同焊接电流下的熔覆层宏观形貌

Fig. 5 Macroscopic morphology of cladding coatings at different currents. (a) 20 A; (b) 40 A; (c) 60 A; (d) 80 A

在试样b表面TIG熔覆所得到的熔覆层无气孔、未熔合等缺陷,如图6所示。结果表明,随着电流的增大,熔覆层宽深逐渐增加,高度逐渐降低。从热输入的角度来看,在TIG电弧熔覆过程中,随着低脉冲群平均电流增大,熔化的母材逐渐增大,因此可以减小电流来减少在熔覆过程中对母材的热

输入,从而调节熔覆层的熔深。根据单层单道熔覆的试验结果,在能够保证熔覆成形的基础上,选择在较小的焊接电流条件下,即低脉冲群平均电流20 A时,在激光熔覆了铜过渡层的试样表面进行了钛层的表面熔覆,得到熔覆成形良好的钛钢复合板,试样宏观成形良好,无明显缺陷。

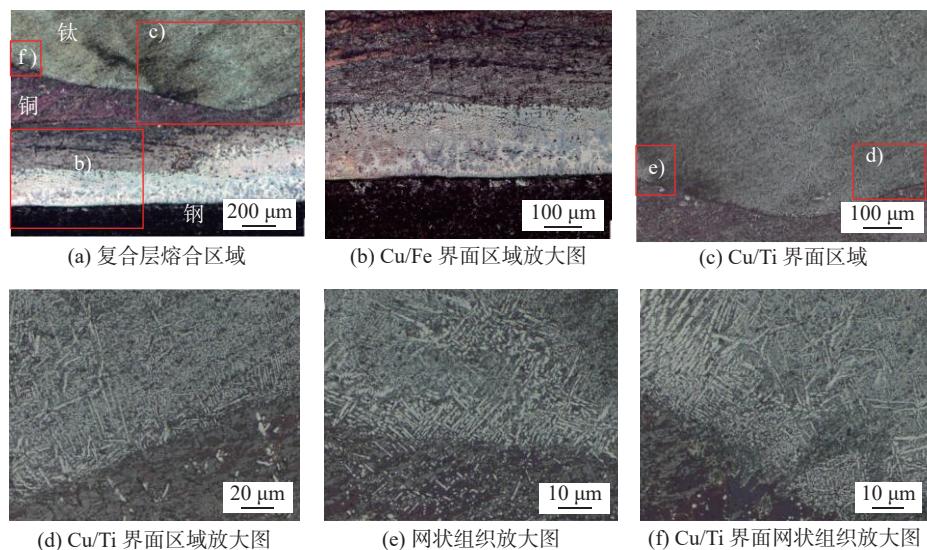


图6 钛/铜/钢界面区域金相组织形貌

Fig. 6 Metallographic microstructure of the Titanium/Copper/Steel interface region. (a) composite layer fusion area; (b) amplification diagram of Cu/Fe interface region; (c) Cu/Ti interface region; (d) amplification map of Cu/Ti interface region; (e) reticular tissue enlarged map; (f) Cu/Ti interface reticular tissue enlarged map

## 2.2.2 复合层的微观组织分析

分别对复合层界面的微观形貌进行了分析,如图6所示。图6(a)为复合层熔合区,从图中可见钢层、铜层及钛层界面分界线较清晰,钢铜界面依然

平整光滑,在铜过渡层上侧可以明显看到电弧对铜层的熔化,形成了起伏状的铜钛界面,界面结合良好,未发现明显的裂纹缺陷。图6(b)为铜钢界面区域放大图,从图中可以看到在靠近钢侧铜层有较亮

的白色和灰色组织相互交替分布, 在靠近 Ti 侧的铜层中有紫红色带状组织。图 6(c) 为铜钛界面区域图, 在钛侧可以明显看到细小的呈网状的组织, 在铜侧区域有紫红色带状组织和少量的白色相。图 6(d) 为铜钛界面区域的放大图, 从图中看到网状组织的生长沿着铜侧金属边界, 在靠近铜侧其生长方向垂直于铜熔覆层沿着钛层厚度方向生长, 同时在铜侧可以观察到在图中细小的点状白色呈枝晶状生长, 弥散分布在靠近钛层侧的铜层中。图 6(e)、(f) 铜钛界面处网状组织的放大图, 放大区域见图 6(a)、图 6(c), 该区域组织生长形态与图 6(d) 中铜钛界面区域组织相似, 都是有白色针状组织相互交错生长。

采用 SEM 对界面局部区域进一步分析, 发现

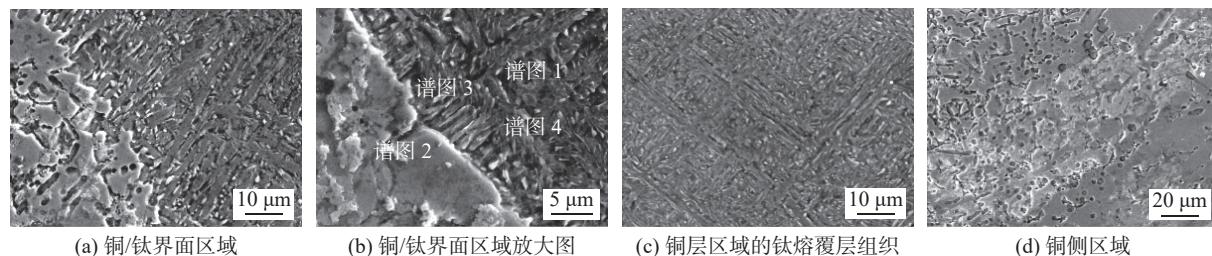


图 7 铜/钛界面区域 SEM 下形貌

Fig. 7 Morphology of the copper-titanium interface region under SEM. (a) Cu /Ti interface region; (b) amplification of Cu/Ti interface region; (c) microstructure of titanium cladding layer in copper layer area; (d) Cu side area

表 4 图中各相主要元素含量(质量分数, %)

Table 4 Main elemental composition of each phase in the figure

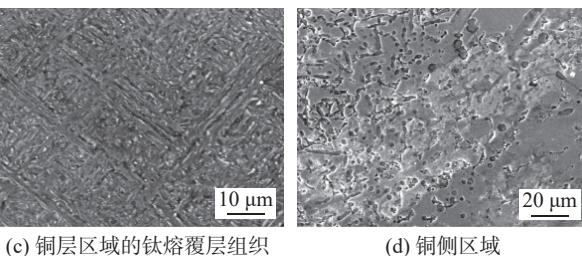
谱图	Ti	Cu	Ni	成分
1	88.9	9.4	1.7	CuTi <sub>2</sub>
2	17.9	75.6	6.4	Cu <sub>4</sub> Ti
3	83.9	12.1	3.1	CuTi <sub>2</sub>
4	90.6	5.3	2.5	$\alpha$ -Ti

结合铜钛二元相图, 从图 7(b) 铜钛界面区域电子图像可以判断在图中针状组织为 CuTi<sub>2</sub> 金属间化合物, 同时从图 7(b) 铜钛界面区域 SEM 下形貌可以判断在枝晶间生长的白色点状相为  $\alpha$ -Ti 中析出的微量 Cu 元素。结合图 8 的复合层 XRD 物相分析结果和 Ti-Cu 二元合金相图, 各种可能的相类型列于表 4 中。

### 2.2.3 复合层元素分布

对复合层界面进行了线扫描, 测试起点位于钢侧, 终点位于钛熔覆层一侧, 该区域为电弧作用时

由于铜的导热性良好, 在电弧的作用下产生熔池, 铜钛金属互溶后在靠近铜层一侧快速冷却, 晶粒生长呈柱状晶, 生长方向垂直于铜钛界面, 如图 7 所示。从图 7(a) 和 7(b) 可见, 在铜钛界面存在金属间化合物层, 主要在靠近铜侧以长针状和枝晶状的形式以黑灰相相互交错分布生长, 在枝晶之间有二次枝晶的生长, 呈白色颗粒状分布在枝晶之间。图 7(c) 为靠近铜层区域的钛熔覆层组织, 主要是以树枝状生长的灰色相相互交错生长, 图 7(d) 为铜侧区域, 在铜侧主要分布有块状浅灰色相。根据枝晶生长理论, 大量自由枝晶的存在是由于在这些试验条件下, 液相温度梯度小, 凝固速度大, 满足了熔体中自由枝晶的形成条件, 对以上各相元素的含量进行能谱分析, 结果见表 4。



为了进一步确定在钛层熔覆过程中钛/铜界面

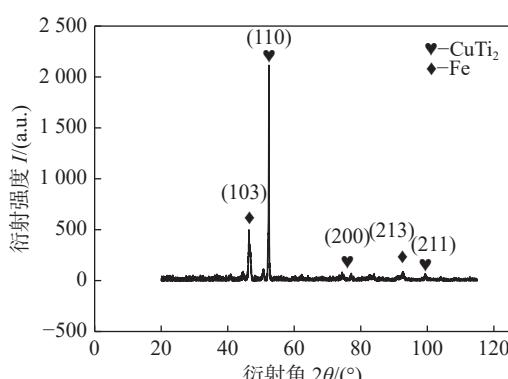


Fig. 8 XRD analysis results of the composite layer

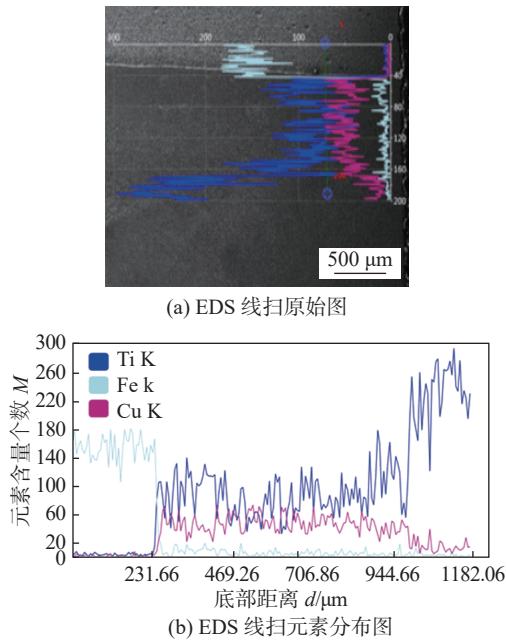


图 9 钢/铜/钛界面线扫描结果

Fig. 9 Results of the line scan at the steel/copper/titanium interface. (a) EDS line scan raw data image; (b) EDS line scan elemental distribution map

各元素在界面处的变化规律, 对界面进行面扫描, 如图 10 所示。发现 Fe, Ti, Cu 元素区域分区明显, 其中在铜—钢界面表现为平整的界面, 铜—钛界面有 Ti, Cu 元素互溶区域的形成, 从熔覆层到基体的转变过程中, Ti 元素的扩散效应明显优于 Cu 元素。

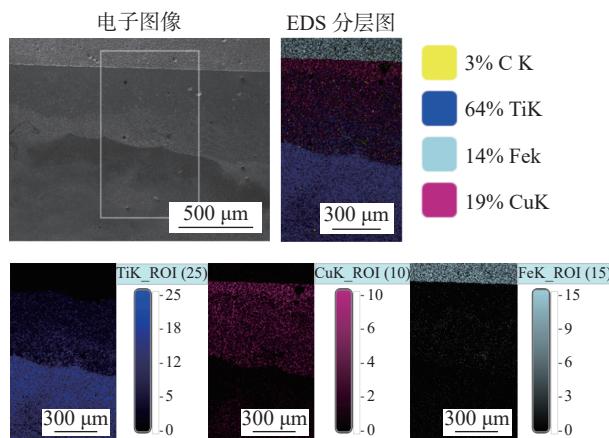


图 10 钢/铜/钛界面 EDS 面扫结果

Fig. 10 Results of the EDS surface scan at the steel/copper/titanium interface

#### 2.2.4 复合层性能测试分析

对复合层界面区域进行显微硬度分析, 试验采用维氏硬度计, 载荷为 2 N, 保压时间为 10 s, 测试点之间相隔 100 μm, 如图 11 所示, 在不同位置的钢/铜/钛界面的硬度分布变化趋势基本相似, 硬度最高区域在铜/钛混合区域, 随着铜层的过渡, 硬度

在基材达到最低, 在靠近钛侧区域, 硬度也呈现下降趋势。与前面元素分布分析的结果一致, 在铜钢界面处由于激光熔覆的热影响区较小, 并未形成元素扩散区域, 该区域显微硬度即为基材硬度, 而随着电弧热的作用, 铜层表面逐渐熔化, 熔融钛能够深入到其内部, 因此在图中也可以看到该区域硬度在逐渐增加, 随着 Ti 元素含量的增加在铜钛混合界面处硬度最高, 因为此区域存在大量脆性较小的 CuTi<sub>2</sub> 金属化合物。

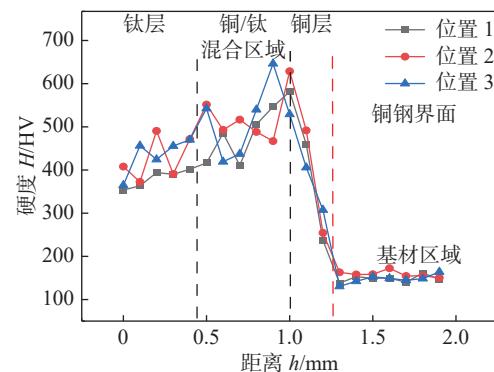


图 11 钢/铜/钛不同位置界面的硬度分布

Fig. 11 Hardness distribution at different locations of the steel/copper/titanium interface

复合板剪切性能试验重复进行 3 次, 取 3 次的平均剪切值作为该样品最终的结合强度, 结果如图 12 所示。试验结果表明焊接接头未出现显著塑性变形, 而是呈现脆性断裂破坏, 复合层抗剪强度为 194 MPa。根据国家标准 GB/T8547-2019《钛钢复合板》, 0 类钛/钢复合板的抗剪强度应不低于 196 MPa, 1 类和 2 类钛/钢复合板则不低于 140 MPa。因此该抗剪强度满足 1 类和 2 类钛/钢复合板的界面抗剪强度要求。

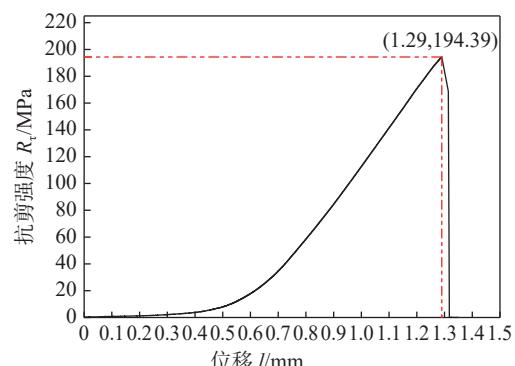


图 12 复合层剪切试验强度一位移曲线

Fig. 12 Shear strength-displacement curve of the composite layer in shear testing

为分析 TIG 熔覆制备复合板的界面失效行为,

将复合板结合界面 TA1 一侧的断口进行扫描电镜的观察,如图 13 所示。在图 13(a)和图 13(c)中可以看到断口表面有河流花样和多个解理台阶形貌具有以解理断裂为断口特征。图 13(b)放大图显示了断口表面上的平坦解理面(见箭头),在这些面上可

以清晰地观察到河流状花纹。图 13(d)是图 13(c)局部区域的放大图,断口表面还出现了许多金属间化合物凸起,这些凸起呈层状或阶梯状形状。以上分析表明,复合层接头在剪切试验中发生了脆性断裂失效。

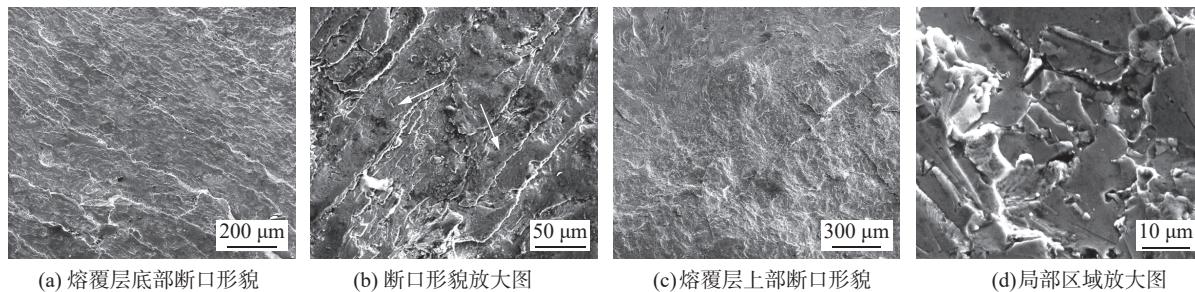


图 13 复合层剪切断口形貌

Fig. 13 Shear fracture morphology of the composite layer. (a) bottom of the cladding layer; (b) magnified image of fracture morphology; (c) upper layer of cladding; (d) magnified view of a specific region

### 3 结论

(1) 分析了不同工艺参数对熔覆成形参数的作用规律,发现随着激光功率的增加,熔覆层的形貌参数均升高;随着送粉量的增加,熔覆层的熔宽呈上下波动变化,余高增加且熔深和稀释率明显减小;随着扫描速度的增加,熔覆层的余高、熔深、熔宽和稀释率都呈减小趋势。

(2) 激光功率为 1100~1300 W,送粉量为 0.5~0.75 r/min,扫描速度为 4~6 mm/s 时铜层厚度为 0.236~0.462 mm,且 Fe 元素很难扩散至铜层表面,可以避免后续工艺中钛钢金属间化合物的产生。

(3) 设计的铜层厚度可以满足 TIG 熔覆 Ti 层对熔深的要求,在 Ti-Cu 接头主要以形成 CuTi<sub>2</sub> 金属间化合物为主,没有脆硬相 Ti-Fe 金属间化合物的生成,接头平均抗剪强度为 194 MPa,接头断裂方式为脆性断裂。

### 参考文献

- [1] Kagawa Y, Nakamura S, Honma K, et al. Corrosion prevention performance of titanium clad steel plates applied on the splash and tidal zones of steel piers[J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 2010(435): 79~87.
- [2] Su H ,Luo X ,Chai F , et al. Manufacturing technology and application trends of titanium clad steel plates[J]. Journal of Iron & Steel

- Research International, 2015, 22(11): 977~982.
- [3] Findik F. Recent developments in explosive welding[J]. Materials & Design, 2011, 32(3): 1081~1093.
- [4] Qiang Z, Rui L, Qiang Z, et al. Effect of microstructure on mechanical properties of titanium-steel explosive welding interface[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 830: 142260.
- [5] 史长根, 尤峻, 冯建. 压力容器用钛钢复合板缺陷的爆炸堆焊修复技术 [J]. 压力容器, 2008(7): 29~31.  
Shi Changgeng, You Jun, Feng Jian. Explosive welding repair technology for defects in titanium steel composite plates for pressure vessels[J]. Pressure Vessels, 2008(7): 29~31.
- [6] 朱明, 王博, 石珂, 等. 激光熔覆过程预置粉末熔化行为的动态检测与分析 [J]. 中国激光, 2021, 48(14): 135~144.  
Zhu Ming, Wang Bo, Shi Yu, et al. Dynamic detection and analysis of powder melting behavior in laser cladding process[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 135~144.
- [7] Zhu L D, Xue P S, Lan Q, et al. Recent research and development status of laser cladding: A review[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 138(3): 106915.
- [8] 巩江涛, 舒林森, 王家胜, 等. 激光熔覆工艺优化方法研究现状及发展趋势 [J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(19): 22~35.  
Gong Jiangtao, Shu Linsen, Wang Jiasheng, et al. Research status and development trends of optimization methods for laser cladding process[J]. Advances in Laser and Optoelectronics, 2023, 60(19): 22~35.
- [9] 韩辉辉, 黎文强, 王腾飞, 等. 激光熔覆再制造技术影响因素的研究 [J]. 能源与环保, 2022, 44(9): 225~228.  
Han Huihui, Li Wenqiang, Wang Tengfei, et al. Research on the influencing factors of laser cladding and remanufacturing technology[J]. China Energy and Environmental Protection, 2022, 44(9): 225~228.

2020.

- [14] Cai C Y, An R, Wang C Q, et al. Robust tuning of Kirkendall void density in circuit interconnections through substrate strain annealing[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2018, 29(10): 8287 – 8292.
- [15] 李瑞, 乔媛媛, 任晓磊, 等. 温度梯度下 Cu/Sn-58Bi/Cu 微焊点热迁移及界面反应行为 [J]. 焊接学报, 2024, 45(4): 71 – 78.  
Li Rui, Qiao Yuanyuan, Ren Xiaolei, et al. Thermomigration and interfacial reaction in Cu/Sn-58Bi/Cu micro solder joint under

temperature gradient[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2024, 45(4): 71 – 78.

**第一作者:** 孙磊, 博士, 副教授; 主要从事电子封装材料与技术方面的科研和教学工作; Email: [sunlei956@cczu.edu.cn](mailto:sunlei956@cczu.edu.cn).

**通信作者:** 姜加伟, 学士, 高级工程师; Email: [jw.jiang@quick-global.com](mailto:jw.jiang@quick-global.com).

(编辑: 刘启明)

## [ 上接第 26 页 ]

- [10] Mitelea I, Groza C, Craciunescu C. Copper interlayer contribution on Nd: YAG laser welding of dissimilar Ti-6Al-4V alloy with X5CrNi18-10 steel[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2013, 22(8): 2219 – 2223.
- [11] Gnyusov S F, Klimenov V A, Alkhimov Y V, et al. Formation of the structure of titanium and stainless steel in laser welding[J]. *Welding International*, 2013, 27(4): 295 – 299.
- [12] 郭顺, 罗添元, 彭勇, 等. Ti/Cu 异种金属电子束焊接界面行为 [J]. 焊接学报, 2019, 40(8): 26 – 32.  
Guo Shun, Luo Tianyuan, Peng Yong, et al. Interfacial behavior of Ti/Cu dissimilar metal electron beam welding[J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2019, 40(8): 26 – 32.
- [13] 常敬欢, 余刚, 曹睿, 等. 钛合金/铜-镍/不锈钢焊接接头的组织

与性能 [J]. 焊接学报, 2023, 44(7): 48 – 55.

Chang Jinghuan, YuGang, Cao Rui, et al. Microstructure and properties of titanium alloy/copper-nickel/stainless steel weld joints[J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2023, 44(7): 48 – 55.

- [14] 王红阳, 李权, 宋刚, 等. 基于铜合金中间层的钛合金与不锈钢激光-电弧复合热源焊接研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(5): 44 – 50.  
Wang Hongyang, Li Quan, Song Gang, et al. Research on laser-arc hybrid heat source welding of titanium alloy and stainless steel based on copper alloy interlayer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 44 – 50.

**第一作者:** 朱明, 博士, 副研究员; 主要研究方向先进自动化焊接, 激光增材再制造; Email: [zhumings@yeah.net](mailto:zhumings@yeah.net).

(编辑: 刘启明)