

# 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

王红阳 李 权 宋 刚 刘黎明

大连理工大学材料科学与工程学院辽宁省先进材料连接技术重点实验室, 辽宁 大连 116024

**摘要** 运用激光-电弧复合热源焊接方法,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,并对搭接接头横截面形貌、微观组织、相成分、力学性能及断裂位置进行了分析。结果表明,钛合金与不锈钢复合焊接接头过渡区组织成分主要包括 Ti-Cu 金属间化合物、铜基固溶体及 Fe-Cu 共析混合物。随着激光功率的增加,在钛-铜界面一侧,生成的 Ti-Cu 金属间化合物厚度逐渐增大,对接头性能产生不良影响,激光功率较大时断裂发生在钛-铜界面处。在铜-不锈钢界面一侧,Cu 和 Fe 元素互扩散的深度和密度随激光功率的增大逐渐增加,有利于提高接头性能,激光功率较小时断裂发生在铜-不锈钢界面处。实现钛合金与不锈钢的良好焊接的关键在于 Ti-Cu 金属间化合物与 Fe-Cu 共析混合物的协调控制。

**关键词** 激光技术; 激光-电弧复合焊接; 钛合金; 不锈钢; 铜中间层; 金属间化合物

**中图分类号** TG44 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.0503002

## Laser-Arc Hybrid Welding of Titanium Alloy and Stainless Steel with Copper Interlayer

Wang Hongyang Li Quan Song Gang Liu Liming

Liaoning Provincial Key Laboratory of Advanced Welding and Joining Technology, School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

**Abstract** The TC4 titanium alloy and 304 stainless steel are welded by laser-arc hybrid heat source with copper interlayer. Macrostructure and microstructure of cross sections, main compositions, mechanical properties and fracture positions of welding joints are examined. The results show that the transition zone is characterized by Ti-Cu intermetallic, solid solution of copper, and Fe-Cu eutectic mixture. With the increase of laser power, the thickness of Ti-Cu intermetallic near the Ti-Cu interface increases, which has harmful effect on mechanical properties. Fracture of joint mainly happens at the interface between titanium alloy and copper when laser power is higher. The mutual diffusion depth and density of elements, such as copper and iron near the interface between copper and stainless steel, also increase, which is beneficial to enhancing mechanical properties. Fracture of joint mainly happens at the interface between the copper and stainless steel when laser power is lower. The key point to achieve favorite welding joint is the control of Ti-Cu intermetallic and Fe-Cu eutectic mixture.

**Key words** laser technique; laser-arc hybrid welding; titanium alloy; stainless steel; copper interlayer; intermetallic

**OCIS codes** 140.3380; 140.3390; 140.3538

## 1 引言

钛合金具有高强度、高耐蚀性、低密度等优点;不锈钢(SS)作为重要的工业结构钢,具有良好的耐蚀性和优

**收稿日期:** 2015-11-19; **收到修改稿日期:** 2016-01-11

**基金项目:** 国家自然科学基金(51304034)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-13-0079)、辽宁省高等学校优秀人才支持计划(LJQ2013007)

**作者简介:** 王红阳(1982-),男,博士,副教授,主要从事轻合金激光焊接技术方面的研究。E-mail: wang-hy@dut.edu.cn

异的综合力学性能。实现两种材料的高性能连接能更好地发挥各自优点,获得优良的综合使用性能,可以减少钛合金的使用量,节约成本,促进钛合金在航空航天、医疗器械、化工、船舶汽车等行业的广泛应用<sup>[1-4]</sup>。

钛合金与不锈钢在物理和化学性能上存在明显差异,这会对焊接质量产生不利影响,如线膨胀系数和导热性差异较大,焊接时大量的热输入会产生较大应力;二者发生冶金反应极易形成 Ti-Fe 脆性金属间化合物而导致接头脆化甚至开裂,很难满足实际零件设计制造要求<sup>[5-6]</sup>。在现有的焊接方法中,熔焊<sup>[7]</sup>接头极易产生 Ti-Fe 脆性相,二者连接性能仍有待进一步提升,目前钛/钢异种金属焊接的主要可靠方法有扩散焊<sup>[8-9]</sup>、摩擦焊<sup>[10]</sup>、热轧焊<sup>[11-12]</sup>等,但焊接效率低,接头形式受限,在复杂结构焊接制造过程中受到一定影响。在钛合金和不锈钢钎焊焊接时,通常使用复合型钎料或金基、银基钎料<sup>[13-14]</sup>,钎料成本相对较高,低成本高性能钎焊材料仍有待深入研究。

激光-电弧复合热源焊接具有能量密度高、热输入小、热影响区窄等优点,焊接过程中激光与电弧相互辅助。通过激光对电弧的诱导增强,电弧的能量密度大幅提升,与单一电弧焊接相比,焊接熔深及焊接效率都会得到显著提高<sup>[15]</sup>;与激光焊接相比,电弧熔池能够有效提高激光的吸收率,减少焊接飞溅和气孔的产生,更有利于实现异种金属界面的良好控制<sup>[16-18]</sup>。低功率激光诱导电弧复合焊接可以对热源能量密度及梯度进行调控,从而实现对焊接熔池传热状态的精确控制。

本文以 Cu-Zn 合金箔作为中间层,重点围绕 TC4-Cu-304 不锈钢搭接接头的激光-电弧复合焊接技术展开研究,采用激光-电弧复合焊接方法实现了钛合金和不锈钢之间良好连接,通过对金属界面组织及元素分布的综合分析,简要阐述了 TC4 钛合金与 304 不锈钢连接界面组织和性能的变化规律。

## 2 实验材料及方法

### 2.1 实验材料

实验采用 TC4 钛合金和 304 不锈钢作为研究对象,板材厚度均为 2 mm,主要化学成分如表 1 所示,Cu 箔选用厚度为 0.1 mm 的铜锌合金 H62(Cu 质量分数为 62%,余量为 Zn)。

表 1 TC4 钛合金和 304 不锈钢母材的主要化学成分(质量分数,%)

Table 1 Main chemical compositions of TC4 Ti alloy and 304 stainless steel (mass fraction, %)

TC4	Fe	Al	V	Ti
	≤0.30	5.5~6.8	3.5~4.5	else
304	C	Cr	Ni	Fe
	≤0.08	18.0~20.0	8.0~10.5	else

### 2.2 实验方法

实验采用 1000 W 功率的激光和钨极氩弧焊(TIG)电源组成的激光-TIG 复合焊接系统,焊接结构示意图如图 1 所示。实验中使用脉冲式 YAG 固体激光,电弧是直流 TIG,实验过程中激光与 TIG 电弧之间夹角约为 45°,保持 TIG 电流恒定不变,分析焊接接头组织和性能随激光能量的变化规律,实验参数如表 2 所示。

焊前对金属表面进行机械打磨、去污处理。焊后沿垂直焊缝方向切取金相试样,采用金相显微镜观察接头横截面形貌,并利用扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射分析(XRD)和电子探针(EPMA)对微观组织和

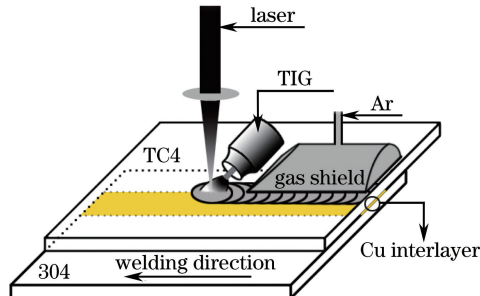


图 1 钛合金和不锈钢激光-电弧复合焊接示意图

Fig. 1 Sketch map of laser-arc hybrid welding for TC4 Ti alloy and 304 stainless steel

化学相成分进行分析。垂直焊缝方向切取 140 mm × 15 mm 的板材剪切试件(参考标准:GB/T 11363-2008),对接头的剪切强度进行测量。

表 2 激光-电弧复合焊接工艺参数

Table 2 Welding parameters of laser-arc hybrid welding process

Laser power $P$ /W	TIG current $I$ /A	Defocus /mm	$D_{la}$ /mm	Speed $v$ /(mm/min)
390~630	90	2.5	2	1100

### 3 结果与分析

#### 3.1 接头界面的微观组织及成分

钛合金和不锈钢焊接接头中间层组织成分的分布对接头的力学性能产生直接影响,首先对接头界面不同位置处的组织成分进行分析。研究发现当获得较好接头时,随着焊接参数的变化,钛侧组织出现分层现象,不锈钢侧组织也发生了变化,但是分层现象不是十分明显,图 2 所示为典型的 TC4 钛合金与不锈钢激光-电弧复合焊接接头横截面宏观形貌 SEM 图像。此时的焊接参数如下:激光功率为 485 W, TIG 电流为 90 A,离焦量为 2.5 mm,焊接速度为 1100 mm/min,钨极尖端与激光间距为 2 mm,钨极高度为 1.5 mm,保护气流量为 16 L/min。

从图 2 可以看出,采用铜合金中间层可以实现钛-不锈钢的良好连接,激光-电弧复合焊接焊缝横截面呈现明显的层状过渡,未发现气孔、裂纹缺陷。铜合金中间层的加入避免了钛合金与不锈钢母材直接发生冶金反应,有效抑制了 Ti-Fe 脆性金属间化合物的产生。钛-铜界面处呈不规则曲线状,上层钛合金在激光-电弧复合热源作用下完全熔化,通过与铜合金中间层的冶金发生反应实现连接;而在铜-不锈钢界面处,铜箔几乎在热源作用下完全熔化,不锈钢与铜箔的界面保持平直的状态,可见不锈钢并未发生明显的熔化,铜和不锈钢的界面处主要通过元素扩散实现连接。

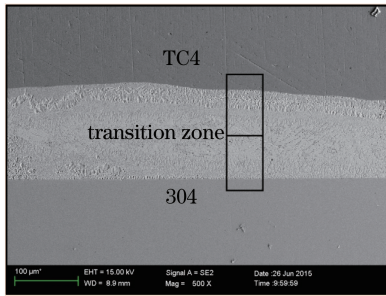


图 2 钛合金及不锈钢复合焊接接头横截面的宏观形貌

Fig. 2 Macrostructure of cross section of laser-arc hybrid welding joint for Ti alloy and stainless steel

图 3 和图 4 分别为钛-铜界面和铜-不锈钢界面在 SEM 下的微观组织形貌。表 3 和表 4 分别给出了图 3 和图 4 中各标注位置处主要元素成分的原子数分数。由图 3 可以发现靠近钛-铜界面处的组织呈现明显分层现象,结合能谱分析结果(表 3)可知,靠近钛-铜界面的相组织主要为 Ti-Cu 金属间化合物,即形状不规则

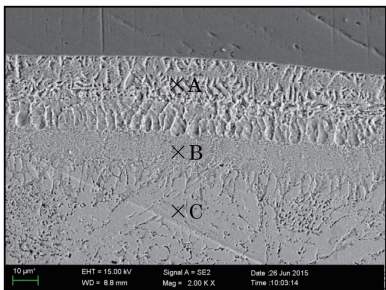


图 3 钛-铜界面附近的微观组织

Fig. 3 Microstructure of weld zone at Ti-Cu interface

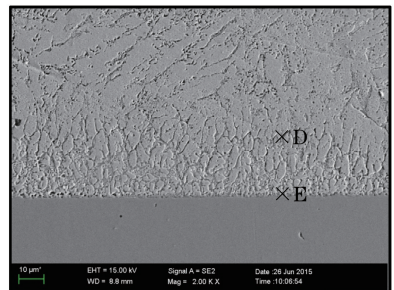


图 4 铜-不锈钢界面附近的微观组织

Fig. 4 Microstructure of weld zone at Cu-SS interface

的多相组织 A,此层厚度约为 20 μm。由于激光-电弧复合焊接速度快,冷却速度快,钛合金熔池凝固十分迅速,其反应主要集中在 Ti-Cu 界面处。随着位置远离 Ti-Cu 异质界面,Ti 元素含量逐渐降低,并以铜基固溶体的形式存在,如图 3 中 B、C 两处所示,B 位置由于靠近上层界面,冷却速度较快,于是沿传热最快方向(垂直于界面)延伸出枝晶状组织,而 C 处组织经冷却后凝固成为稳定的铜基固溶体。

表 3 图 3 中各标注位置的主要成分(原子数分数,%)

Table 3 Primary composition of marked positions in Fig. 3 (atom fraction, %)

Point	Ti	Cu	Zn	Al	Phase
A	28.49	54.64	12.29	4.58	Ti-Cu
B	2.24	74.20	23.56	0	Cu(s,s)
C	0.78	75.25	23.97	0	Cu(s,s)

结合图 4 和表 4 可以发现由于靠近铜-不锈钢界面处冷却速度更快,因此沿传热最快方向(垂直于界面)快速生长出枝晶结构的铜基固溶体,即 D 处所示;由于下层熔化量很少,界面结合主要靠界面处元素的互扩散完成,而在较快的冷却速度下,扩散集中发生在 Cu-Fe 界面附近,因此只有靠近界面处的相含有较多的 Fe 元素,形成极薄的铁与铜的共析混合物,即 E 处所示<sup>[19]</sup>。

表 4 图 4 中各标注位置的主要成分(原子数分数,%)

Table 4 Primary composition of marked positions in Fig. 4 (atom fraction, %)

Point	Ti	Cu	Zn	Fe	Cr	Ni	Phase
D	0.67	66.09	32.20	1.04	0	0	Cu(s,s)
E	1.28	27.23	9.21	44.61	13.40	4.28	Fe-Cu eutectoid phase

钛-铜断裂界面处的 XRD 分析结果显示多相组织 A 处成分比较复杂,包含多种金属间化合物成分。图 5 所示为钛-铜断裂界面(即位置 A)的 X-射线衍射,结合 Ti-Cu 相图及不同区域的成分分析可知,焊接过程的初始阶段,熔化的钛合金只能与少量的 Cu 发生共析反应而生成 Ti<sub>2</sub>Cu 金属间化合物;随着熔化的进行,熔融的金属成分比例不断变化,不同成分的液态金属发生不同的共晶反应而生成不同的金属间化合物,包括 Ti<sub>2</sub>Cu、TiCu 和 Ti<sub>3</sub>Cu<sub>3</sub>;同时钛合金中的 Al 元素也与 Cu、Ti 发生三元反应生成金属间化合物 AlCu<sub>2</sub>Ti。在这个过程中 Zn 元素仍然与 Cu 形成 Cu(Zn)固溶体,对 Ti 与 Cu 之间的反应影响不大。通过上述分析可以发现,钛合金与不锈钢复合焊接接头中间层的组织成分主要分为三个部分,Ti-Cu 金属间化合物、铜基固溶体及 Fe-Cu 共析反应混合物。

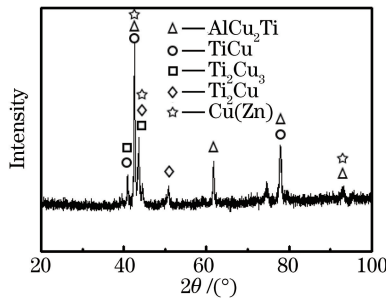


图 5 钛-铜断裂界面的 X 射线衍射图谱

Fig. 5 X-ray diffraction pattern of the fracture surface of Ti-Cu joint

### 3.2 激光功率对异质连接界面的影响

在简要分析钛合金和不锈钢激光-电弧复合焊接接头主要结构的基础上,分析激光功率变化对异质焊接界面的影响。图 6 所示为激光-电弧复合热源焊接条件下,接头力学性能随激光输出功率的变化情况,焊接过程中选择频率为 30 Hz,脉冲宽度为 2 mm。从图中可以看出,随着激光输出功率的增加,接头的拉剪强度呈现先增后减的趋势,在激光功率为 485 W 时存在峰值。

图 7 和图 8 是不同激光功率条件下,钛-铜界面的 Ti 元素分布及铜-不锈钢界面的 Fe 元素分布。综合分析图 7 及图 8 可以发现,在功率较低( $P=390\text{ W}$ ,  $P_{\text{plus}}=6500\text{ W}$ )时,在钛-铜界面附近生成的 Ti-Cu 金属间化合物较少,由于激光功率此时相对较低,钛与铜反应时间短,Ti-Cu 金属间化合物的形成被抑制,此时传

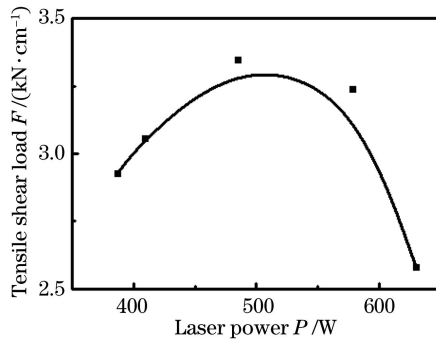


图 6 拉剪强度随激光功率的变化

Fig. 6 Relationship between tensile shear load and laser power

递到铜与不锈钢界面处的热量也较少,铜-不锈钢界面附近的元素扩散并不充分,导致结合处连接强度低于钛-铜界面处强度,并成为整个接头的薄弱环节。当激光功率相对较低时断裂主要发生在不锈钢与铜的连接界面处,如图 9 中激光功率为 390 W 时的断裂状态。

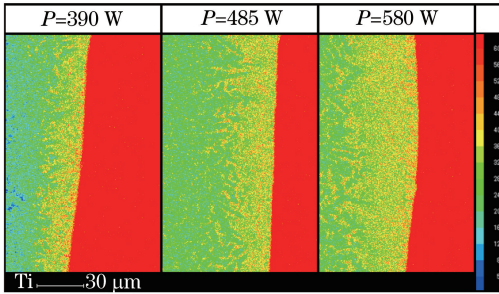


图 7 不同激光功率下钛-铜界面 Ti 元素分布图

Fig. 7 Distribution of element Ti with varied laser power near the Ti-Cu interface

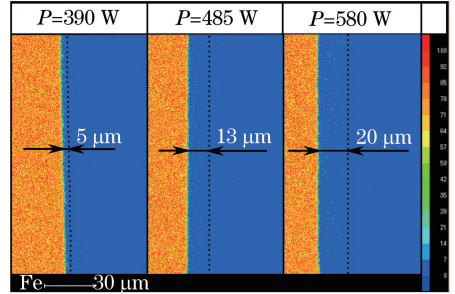


图 8 不同激光功率下铜-不锈钢界面 Fe 元素分布图

Fig. 8 Distribution of element Fe with varied laser power near the Cu-SS interface

当激光功率较高时( $P = 580 \text{ W}$ ,  $P_{\text{plus}} = 9670 \text{ W}$ ),钛合金熔池温度升高,加速了界面的冶金反应,钛-铜界面附近生成的 Ti-Cu 金属间化合物厚度增加,影响了钛-铜界面的连接强度;此时传递到铜与不锈钢界面处的热量增加,Fe 元素扩散明显增强,使此处结合强度也得到提高,并高于此时钛-铜界面处的强度。因此,当激光功率较高时钛-铜界面成为接头的薄弱界面,拉伸试件主要断裂在钛-铜界面,如图 9 中激光功率  $P = 580 \text{ W}$  所示。

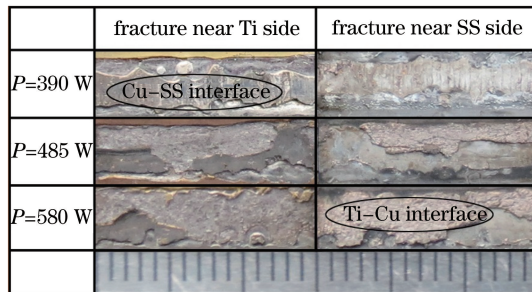


图 9 不同激光功率条件下接头断口界面对比图

Fig. 9 Comparison of different fractures under different laser welding powers

由图 9 可以看出,激光功率  $P = 485 \text{ W}$ 、 $P_{\text{plus}} = 8083 \text{ W}$  时,接头断口断裂于钛-铜界面与断裂于铜-不锈钢界面的面积基本相等,结合图 7 和图 8 可以推测,激光输出功率适中的接头在两侧界面的强度比较平衡并获得了最佳焊接性能。因此以铜合金作为中间层进行钛合金与不锈钢的激光-电弧复合焊接的关键在于对 Ti-Cu 金属间化合物与 Fe-Cu 共析混合物的协调控制。

## 4 结 论

1) 在激光-电弧复合焊接 TC4 钛合金和 304 不锈钢焊接头中,钛-铜界面完全熔化,发生明显的冶金反应,生成 Ti-Cu 金属间化合物( $Ti_2Cu$ 、 $TiCu$  和  $Ti_2Cu_3$ )及  $AlCu_2Ti$ ,实现有效结合;而铜-不锈钢界面基本未发生熔化,主要通过元素的扩散作用实现结合。中间层组织由上而下主要为 Ti-Cu 金属间化合物、铜基固溶体、Fe-Cu 共析混合物。

2) 激光-电弧复合热源焊接接头强度随激光功率增加呈现先增后减的趋势,在激光功率  $P=485\text{ W}$  附近处存在峰值。低能量输入下获得的接头,其断裂面主要位于铜-不锈钢界面处;高能量输入下获得的接头,其断裂面主要位于钛-铜界面处;强度最高时接头在两处界面的断裂面积比较均衡。

3) 随着激光功率的提高,钛-铜界面附近中间层生成的 Ti-Cu 金属间化合物增多,铜-不锈钢界面附近,元素互扩散的深度和密度也随之增加。对 Ti-Cu 金属间化合物与 Fe-Cu 共析混合物的协调控制成为钛合金与不锈钢激光-电弧复合焊接的关键。

## 参 考 文 献

- Zhu Zhishou. Recent research and development of titanium alloys for aviation application in China [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(4): 44-50.  
朱知寿. 我国航空用钛合金技术研究现状及发展 [J]. 航空材料学报, 2014, 34(4): 44-50.
- Yu Zhentao, Yu Sen, Zhang Minghua, *et al.*. Design, development and application of novel biomedical Ti alloy materials applied in surgical implants [J]. Materials China, 2010, 29(12): 35-51.  
于振涛, 余 森, 张明华, 等. 外科植入物用新型医用钛合金材料设计、开发与应用现状及进展 [J]. 中国材料进展, 2010, 29(12): 35-51.
- Lü Xianghong, Shu Ying, Zhao Guoxian, *et al.*. Research and application progress of Ti alloy oil country tubular goods [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(6): 1518-1524.  
吕祥鸿, 舒 滢, 赵国仙, 等. 钛合金石油管材的研究和应用进展 [J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(6): 1518-1524.
- Yang Yingli, Luo Yuanyuan, Zhao Hengzhang, *et al.*. Research and application status of titanium alloys for warships in China [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(s2): 538-544.  
杨英丽, 罗媛媛, 赵恒章, 等. 我国舰船用钛合金研究应用现状 [J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(s2): 538-544.
- Lu Lei. Research on electron beam welding of TC4 titanium alloy and 304 stainless steel [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.  
鲁 磊. TC4 钛合金与 304 不锈钢的电子束焊接方法研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- Satoh G, Yao Y L, Qiu C A. Strength and microstructure of laser fusion-welded Ti-SS dissimilar material pair [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(1-4): 469-479.
- Li Biaofeng. Study on the weldability of titanium and steel and titanium clad steel plate (I) [J]. Development and Application of Materials, 2004, 19(1): 41-44.  
李标峰. 钛与钢及钛复合钢板的焊接性研究(I) [J]. 材料开发与应用, 2004, 19(1): 41-44.
- Kundu S, Chatterjee S. Interface microstructure and strength properties of diffusion bonded joints of titanium-Al interlayer-18Cr-8Ni stainless steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(10-11): 2714-2719.
- Kundu S, Sam S, Chatterjee S. Interface microstructure and strength properties of Ti-6Al-4V and microduplex stainless steel diffusion bonded joints [J]. Materials & Design, 2011, 32(5): 2997-3003.
- Akbarimousavi S A A, GohariKia M. Investigations on the mechanical properties and microstructure of dissimilar cp-titanium and AISI 316L austenitic stainless steel continuous friction welds [J]. Materials & Design, 2011, 32(5): 3066-3075.
- Zhao Dongsheng. Mechanism on the vacuum hot rolling-deformation bonding of titanium alloy and stainless steel [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.  
赵东升. 钛合金与不锈钢真空热轧形变连接机理研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- Zhao D S, Yan J C, Liu Y J, *et al.*. Interfacial structure and mechanical properties of hot-roll bonded joints between titanium alloy and stainless steel using niobium interlayer [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(9): 2839-2844.
- Chen Mingjie, Xu Daorong. Present situation about brazing technology study of Ti, Ti alloy and stainless steel [J]. Modern Welding Technology, 2010(7): 5-8.

- 陈明洁, 徐道荣. 钛及钛合金与不锈钢的钎焊技术研究现状[J]. 现代焊接, 2010(7): 5-8.
- 14 Tashi R S, Mousavi S A A A, Atabaki M M. Diffusion brazing of Ti-6Al-4V and austenitic stainless steel using silver-based interlayer[J]. Materials & Design, 2014, 54(2): 161-167.
- 15 Wang Hongyang, Zhang Zhaodong, Cao He. Laser-TIG-adhesive hybrid welding of magnesium to steel with Ni alloy interlayer[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(4): 83-86.  
王红阳, 张兆栋, 曹 贺. 基于镍合金中间层的镁/钢异质金属激光-电弧复合胶焊技术[J]. 焊接学报, 2014, 35(4): 83-86.
- 16 Ma Ran, Dong Bizhe, Wu Shikai, *et al.*. Study on fiber laser-tungsten inert gas hybrid welding of titanium sheet[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0503003.  
马 然, 董韶喆, 吴世凯, 等. 薄板钛合金光纤激光钨极惰性气体保护焊电弧复合焊接工艺研究[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0503003.
- 17 Wang Xiaonan, Chen Changjun, Zhu Guangjiang, *et al.*. Research progress on laser-arc hybrid welding of steel[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(3): 030008.  
王晓南, 陈长军, 朱广江, 等. 钢铁材料激光-电弧复合焊接技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(3): 030008.
- 18 Li Fei, Zou Jianglin, Kong Xiaofang, *et al.*. Experimental research on high power fiber laser-TIG hybrid welding[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0503004.  
李 飞, 邹江林, 孔晓芳, 等. 高功率光纤激光-TIG 复合焊接实验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0503004.
- 19 Wang T, Zhang B G, Feng J C, *et al.*. Effect of a copper filler metal on the microstructure and mechanical properties of electron beam welded titanium-stainless steel joint[J]. Materials Characterization, 2012, 73: 104-113.