

# 紫铜与 316L 不锈钢脉冲激光焊微观组织及力学性能

李 扬<sup>1,2</sup> 胡绳荪<sup>1,2</sup> 申俊琦<sup>1,2\*</sup>

(<sup>1</sup> 天津大学天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300072)  
(<sup>2</sup> 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300072)

**摘要** 采用脉冲 Nd:YAG 激光对紫铜和 316L 不锈钢进行焊接, 对不同搭接方式下的紫铜/不锈钢搭接接头的组织及界面进行研究分析, 从而找到适合紫铜/不锈钢的搭接接头形式, 并对其力学性能进行分析。实验中采用光学显微镜和能谱分析仪(EDS)对搭接界面进行观察。采用 X 射线衍射(XRD)对界面进行物相分析。采用扫描电镜(SEM)对端口形貌进行观察。采用维氏显微硬度机和拉伸试验机对焊接接头的机械性能进行测试。实验结果表明, 因为铜和铁无限固溶所以紫铜与不锈钢焊接过程中没有金属间化合物生成, 并且焊接接头采用紫铜在上, 不锈钢在下的搭接方式能够获得良好的微观组织及力学性能。

**关键词** 激光技术; 脉冲激光焊; 微观形貌; 力学性能; 紫铜; 不锈钢

**中图分类号** TG457.6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0703008

## Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of Pulsed Nd:YAG Laser Welded Copper and 316L Stainless Steel

Li Yang<sup>1,2</sup> Hu Shengsun<sup>1,2</sup> Shen Junqi<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)  
(<sup>2</sup> School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** A pulsed wave Nd:YAG laser is used to weld copper and 316L stainless steel. The microstructural characteristics and interfaces of the welded joints by different laser lap welding of copper and 316L stainless steel are investigated to search for the suitable welded joints and then analyze their mechanical properties. Optical microscopy and energy dispersive spectroscopy (EDS) are used to observe the interface of the welded joints. X-ray diffraction (XRD) is used to analyze the phase of the interface. Scanning electron microscopy (SEM) is used to observe the fracture surface morphology of welded joint. Microhardness and tensile testing are used to analyze the mechanical properties of the welded joints. Results show that intermetallic compounds are absent in the welded joints because copper and stainless steel exhibit unlimited solid solubility. The welded joints with the copper on stainless steel overlap configuration show better microstructure and mechanical performance.

**Key words** laser technique; pulsed wave laser welding; microstructure; mechanical properties; copper; stainless steel

**OCIS codes** 140.3390; 140.3538; 180.5810; 350.3390; 350.3850

## 1 引 言

紫铜/不锈钢异种金属复合结构, 不仅兼顾了紫铜良好的塑性和导热导电性能, 同时又兼顾了不锈钢良好的强度和机械性能, 被广泛应用于航空航天、石油化工、机械、电子、造船等领域中。铜与铁高温

时的原子半径、晶格类型等比较接近, 在液相时无限固溶, 在固态下不易形成金属间化合物, 因此有利于焊接生产制造<sup>[1]</sup>。但是由于铜和不锈钢的熔点、导热系数、线膨胀系数和力学性能等都有很大的差异<sup>[2]</sup>, 尤其铜的导热性高对焊接过程保持局部焊接

**收稿日期**: 2013-12-26; **收到修改稿日期**: 2014-02-12

**作者简介**: 李 扬(1985—), 女, 博士研究生, 主要从事激光加工方面的研究。E-mail: ly09121885@126.com

**导师简介**: 胡绳荪(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事焊接过程模拟仿真与自动控制, 现代焊接工艺方法与设备, 焊接自动化技术与设备等方面的研究。E-mail: huss@tju.edu.cn

\* **通信联系人**。E-mail: shenjunqi@tju.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

温度不利,需要使用较强的焊接热源,但是随温度的升高,焊接接头处结晶组织容易出现晶粒粗大,裂纹等缺陷,从而降低焊接接头的使用性能,使得铜与不锈钢的相互焊接具有一定的难度<sup>[3]</sup>。

激光焊接是利用高能量密度束流作为热源的高度精密的焊接方法<sup>[4-8]</sup>,具有能源密度高且集中、焊缝的深宽比大、线能量低、焊后变形小、可控性好、加热及冷却速度快等特点,特别适合于薄板高质量高速度的焊接<sup>[9-11]</sup>,可以有效地减少晶粒粗大现象。另外,在相同参数条件下,脉冲激光焊与连续激光焊相比,脉冲形式的激光能够获得更大的熔深<sup>[12-13]</sup>,因此,采用脉冲激光进行铜/不锈钢薄板金属材料的焊接。目前,国内外对铜/钢异种金属焊接做了一些研究<sup>[14-17]</sup>,但是,研究主要是针对铜和不锈钢厚板的对接形式进行激光焊接,主要集中在激光斑点位置对焊缝成形、焊接接头力学性能影响的研究,对于铜和不锈钢薄板激光焊接过程的微观组织及界面扩散的研究少有研究报道。本文对铜/不锈钢薄板激光搭接焊过程的微观组织及力学性能进行了研究,为工程应用提供了理论依据。

## 2 实验条件及方法

紫铜/不锈钢激光搭接焊(不锈钢在上,紫铜在下以及紫铜在上,不锈钢在下两种搭接方式)实验采用固体激光器 Nd:YAG(JK2003SM)。纯氩气作为保护气体,保护气体流速为 20 mL/min。实验所用的材料为纯铜(T3)和 316L 不锈钢,经过大量的实验而选取的适合铜/不锈钢的尺寸分别为:铜试样尺寸为 100 mm×20 mm×0.4 mm;不锈钢试样尺寸为 100 mm×20 mm×0.9 mm。实验中得到的优化工艺参数范围为:平均功率为 1500 W,频率为 100 Hz,焊接速度为 10 mm/s,峰值功率为 1667~3000 W,脉冲持续时间为 5~9 ms。在此参数范围内,针对不同的搭接方式,分别进行了 5 组实验。

焊接前对材料进行打磨、擦拭,以去除其表面的氧化膜及待焊表面残留的油污。焊后沿工件横截面进行切割、镶样、研磨和腐蚀,实验中所用腐蚀液是 FeCl<sub>3</sub>(10 g)+HCl(20 mL)+H<sub>2</sub>O(40 mL)。铜/不锈钢接头微观组织和成分分布采用扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线能谱分析仪(EDS)进行分析。界面物相分析采用 X 射线衍射(XRD)。工件的显微硬度采用维氏显微硬度机进行测试,拉伸剪切强度采用拉伸测试仪进行测试。每组数据测试 4 次,然后取平均值。断口形貌分析采用 SEM。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 宏观形貌分析

#### 3.1.1 不锈钢在上,紫铜在下的搭接方式

考虑到紫铜对激光焊接的高反射率,采用不锈钢在上,紫铜在下的搭接方式进行焊接。但是,得到的焊缝横截面宏观形貌结果并不理想,5 组实验参数下得到的焊接接头形貌没有明显差别,如图 1 所示,均出现焊缝外观成形差,焊缝中出现严重的变形、裂纹及不锈钢塌陷现象。图 1 焊缝横截面宏观形貌对应的参数是:平均功率为 1500 W,频率为 100 Hz,焊接速度为 10 mm/s,峰值功率为 2500 W,脉冲持续时间为 6 ms。

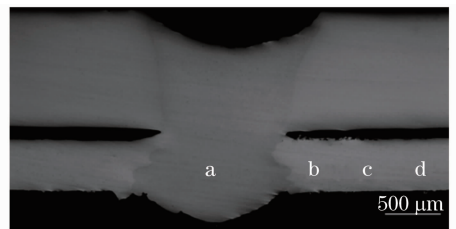


图 1 紫铜在下时焊缝横截面形貌

Fig. 1 Appearance of weld seam intersecting surface when copper in the lower

#### 3.1.2 紫铜在上,不锈钢在下的搭接方式

有研究发现,激光焊接时可采用机械加工的方式增加工件的激光吸收率,尤其注意的是,由于砂纸打磨后的工件在其表面残留的砂粒对激光有较高的吸收率<sup>[18]</sup>。因此,当采用紫铜在上,不锈钢在下的搭接方式时,针对紫铜对激光焊接的高反射率问题,在激光焊接实验之前用砂纸对工件表面进行打磨,增加铜表面粗糙度,进而提高铜表面对激光的吸收率。5 组实验参数下得到的焊接接头形貌焊缝外观成形均良好,焊缝中没有出现变形以及不锈钢塌陷现象,随着热输入的不同在熔深和熔宽方面有差别。通过实验得到优化工艺参数为:焊接速度为 10 mm/s,峰值功率为 3000 W,平均功率为 1500 W,频率为 100 Hz,脉冲持续时间为 5 ms。得

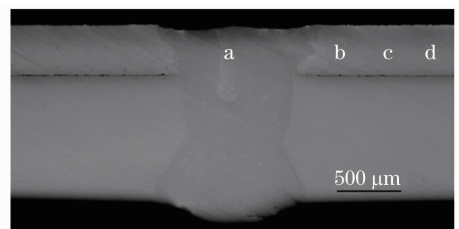


图 2 紫铜在上时焊缝横截面形貌

Fig. 2 Appearance of weld seam intersecting surface when copper in the upper

到的焊缝横截面形貌如图 2 所示,表面成形均匀一致,焊接接头变形小,成型美观,没有塌陷、变形等成形缺陷,背面熔透均匀。说明采用紫铜在上,不锈钢在下的搭接方式,可以实现紫铜/不锈钢之间的良好连接。

### 3.2 微观组织分析

#### 3.2.1 不锈钢在上,紫铜在下的搭接方式

对焊缝界面处的结合情况,采用高倍金相显微镜进行分析。本文主要对图 1 所示焊接接头处铜侧的 4 个区域:焊缝区(a),熔合区(b),热影响区(c)以及母材(d) 4 个区域的微观组织进行分析,如图 3 所示。焊缝区图 3(a)是 316L 不锈钢,为典型的等轴

奥氏体组织,同时可以看到,在焊缝区域出现了一些细小的裂纹,这是因为激光焊接的能量密度高且焊接速度大,使得局部晶界产生某些合金元素的富集而达到共晶成分,这样会导致局部组织的熔点下降,从而形成局部晶界液化,造成冷却过程中冷热不均匀,从而在凝固过程中形成裂纹。熔合区图 3(b)受热温度较高,晶粒在较高的温度下迅速长大,形成粗大的柱状晶组织。热影响区图 3(c)距离焊缝中心比熔合区要远,且靠近母材,会受到母材的冷却作用,所以晶粒较熔合区要细一些。母材图 3(d)组织最细,仍为细小的冷轧晶粒组织。

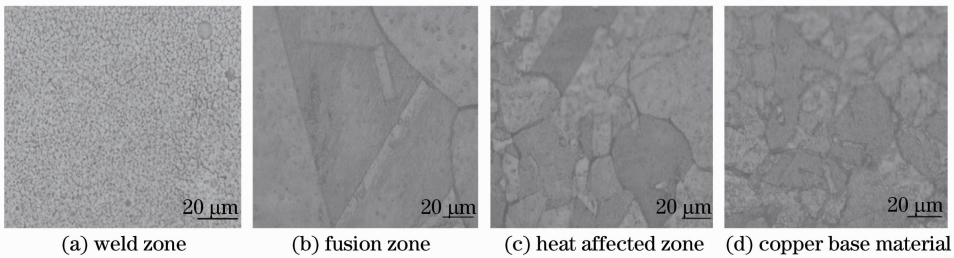


图 3 紫铜在下时焊缝接头处 4 个区域显微结构

Fig. 3 Microstructure of welded joint 4 regions when copper in the lower

#### 3.2.2 紫铜在上,不锈钢在下的搭接方式

对图 2 参数下的焊接接头处铜侧的 4 个区域:焊缝区(a),熔合区(b),热影响区(c)以及母材(d) 4 个区域的微观组织进行分析,如图 4 所示。焊缝区图 4(a)为细小的等轴晶,这是因为,在焊接过程中,母材在高温下熔化,发生形核长大过程,由于激光焊接过程冷却速度很快,当冷却速度大时,母材图 4(d)晶粒来不及长大,形成的晶粒较细,表现为细小的等轴晶。熔合区图 4(b)为粗大的柱状晶组织,但是与图 3(b)所示的熔合区组织相比,组织要细小很

多。同样的,热影响区图 4(c)的组织也比图 3(c)所示的热影响区的组织细小很多,这是因为不锈钢在上,紫铜在下的搭接形式使得焊接接头的冷却及散热效果比紫铜在上的时候差很多,从而使晶粒容易长大。因此,不锈钢在上,紫铜在下的搭接接头与紫铜在上,不锈钢在下搭接接头相比,力学性能会更差一些。另外,由图 3 和图 4 可知,在整个焊缝中熔合区的组织最为粗大,所以力学性能应该是最差的,当承受载荷的时候,最先发生破坏。

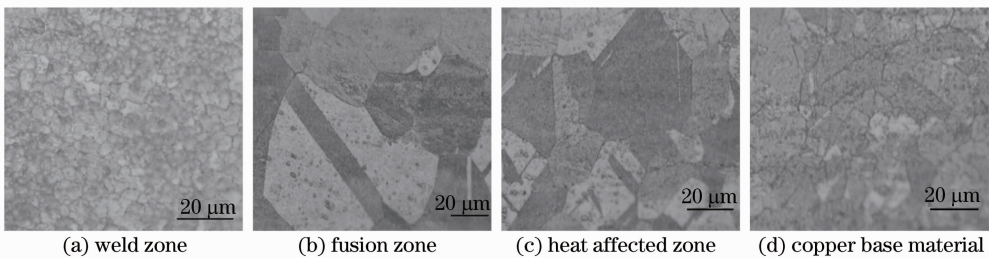


图 4 紫铜在上时焊缝接头处 4 个区域显微结构

Fig. 4 Microstructure of welded joint 4 regions when copper in the upper

### 3.3 界面及元素分布分析

#### 3.3.1 不锈钢在上,紫铜在下的搭接方式

为进一步了解界面处合金元素分布情况,采用 EDS 测定线的分布位置以及界面处 Cu、Fe、Cr、Mo

和 C 五种元素的线分布测量结果,如图 5 所示。测量结果表明:焊接接头主要是不锈钢充满了整个焊缝,几乎没有与紫铜发生混合。采用不锈钢在上,紫铜在下的搭接方式会产生这种现象的原因是:铜的

熔点比较低,不锈钢的熔点比较高,在铜达到熔化状态时,不锈钢仍呈固态状态,这时,熔化的铜在固态不锈钢的挤压下沿着焊缝中心向两侧移动。另外,由于激光焊接冷却速度比较快,使得铜和不锈钢没有足够的时间混合,在冷却过程中,熔点较高的不锈钢先发生凝固,从而充满了整个焊缝区,所以焊缝中没有铜存在。

钢元素扩散较充分,形成了良好的扩散结合。

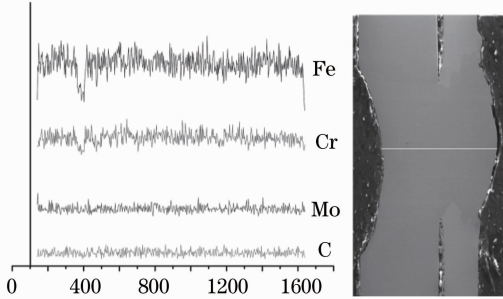


图 5 紫铜在下时焊缝的元素分布

Fig. 5 Elements distribution of the welded joints when copper in the lower

### 3.3.2 紫铜在上,不锈钢在下的搭接方式

当紫铜在上不锈钢在下时,元素的线分布结果如图 6 所示。测量结果表明在焊接过程中, Fe、Cr、Mo 等元素渗透到了焊接接头中,也就是说,不锈钢中的元素向铜侧发生了成分迁移,这是因为低熔点的铜先熔化,由于重力原因逐渐向下面的不锈钢移动,当不锈钢熔化时,两种材料之间就会发生元素的扩散和迁移。因此可以说,在焊接接头处,铜/不锈

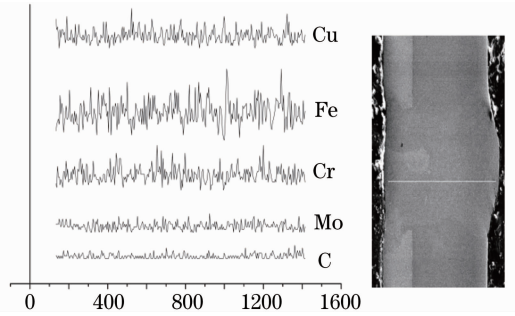


图 6 紫铜在上时焊缝的元素分布

Fig. 6 Elements distribution of the welded joints when copper in the upper

### 3.4 物相分析

因为两种搭接方式均为铜与不锈钢的的焊接,所以物相分析结果是一样的。对整个焊接接头进行 XRD 分析,因为有效的测试区域为 10 mm × 10 mm,如图 7(a)所示的红色区域,这样测试的结果必然包含了黑色基体(matrix)的成分,所以单独对 matrix 做 XRD 分析,结果如图 7(b)中 matrix 曲线所示。图 7(b)中上面一条曲线中的衍射峰除去 matrix 的衍射峰,即为焊接接头的成分,从图 7(b)中可以看出,在焊接接头中没有金属间化合物生成。

通过前面的组织及界面分析可知,采用紫铜在上,不锈钢在下的搭接方式更适合紫铜与不锈钢的焊接,所以只对紫铜在上,不锈钢在下的搭接接头进行力学性能分析。

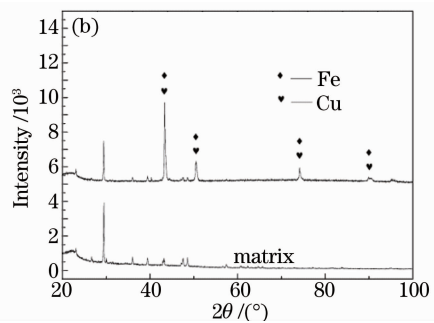
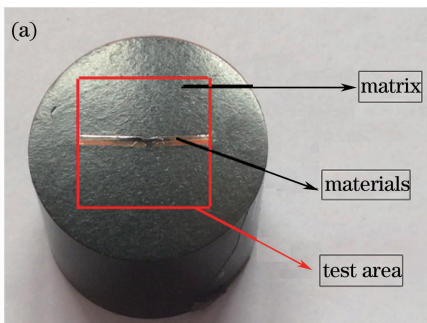


图 7 (a) 测试区域; (b) 焊缝的 XRD 分析结果

Fig. 7 (a) Test area; (b) X-ray diffraction (XRD) results of the welded joint

### 3.5 显微硬度分析

对紫铜在上,不锈钢在下的搭接接头进行显微硬度测试。沿着焊缝,从紫铜一侧向不锈钢一侧测试显微硬度值,结果如图 8 所示。可以看出,焊接接头处的显微硬度值都在 140 HV 左右,比紫铜母材

的硬度值高出了 60 HV 左右,原因可能是,一方面是因为激光焊接是一个快速加热及冷却的过程,使得焊缝处的组织的到了细化。另一方面也可能是因为在焊接过程中,不锈钢渗透到了铜中形成了焊接接头,从而大大提高了焊接接头的显微硬度。

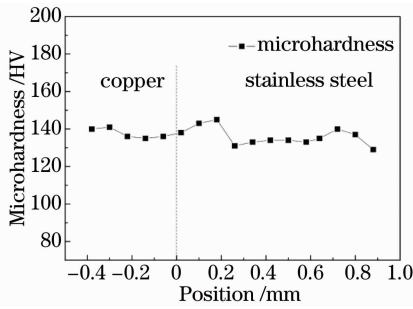


图 8 紫铜在上时焊接接头的显微硬度

Fig. 8 Microhardnesses of the welded joint when copper in the upper

### 3.6 拉伸结果分析

采用型号为 CCS-44100 的万能试验机对紫铜在上, 不锈钢在下的搭接接头进行拉伸-剪切力测试(焊接速度为 10 mm/s, 峰值功率为 3000 W, 平均功率为 1500W, 频率为 100 Hz, 脉冲持续时间为 5 ms)。测试 4 个试件, 拉伸试样的尺寸如图 9 所示。对 4 次拉伸测试结果取平均值, 得到的拉伸-剪切力值为 1.70 kN, 并且发现断裂均发生在熔合区, 如图 10(a)所示, 这是因为熔合区的组织最为粗大, 所以力学性能较差, 当焊件承受载荷时, 最先发生破坏, 这与上述进行组织分析结果一致。用 SEM 对铜/不锈钢搭接试样进行断口分析, 结果如图 10(b)所示, 从断裂面的形貌可以看出断裂方式为韧性断裂。

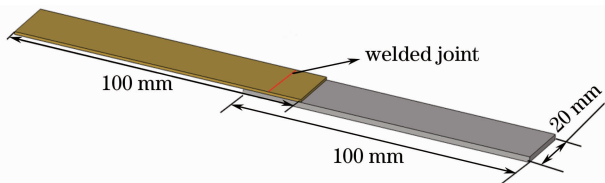


图 9 拉伸测试试样的尺寸

Fig. 9 Dimension of the sample for tensile test

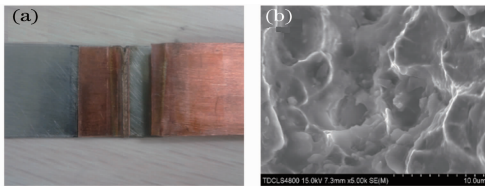


图 10 (a) 断裂区; (b) 断口 SEM 分析

Fig. 10 (a) Fracture zone; (b) fracture surface scanning electron microscopy (SEM) analysis

## 4 结 论

1) 紫铜/316L 不锈钢异种金属激光搭接焊接过程中, 采用紫铜在上, 不锈钢在下的搭接方式能够获得组织及性能良好的焊接接头。

2) 紫铜在上, 不锈钢在下的搭接接头中, 两种材料中的元素发生了充分的扩散和混合, 焊缝处并未发现金属间化合物存在。

3) 紫铜在上, 不锈钢在下的焊接接头的显微硬度在 140 HV 左右, 超出了紫铜 60 HV。

4) 焊接接头中, 熔合区的组织更为粗大, 所以力学性能最差, 拉伸时断裂首先发生在熔合区。

## 参 考 文 献

- Zhang Wenyue, Zhou Zhenfeng. Welding Metallurgy and Metal Weldability[M]. Beijing: China Machine Press, 1987.  
张文钺, 周振丰. 焊接冶金与金属焊接性[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- Li Yajiang, Wang Juan, Liu Peng. Dissimilar Welding and the Application of the Difficult Welding Materials [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.  
李亚江, 王娟, 刘鹏. 异种难焊材料的焊接及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- Zhang Wenyue. Welding Metallurgy [M]. Beijing: China Machine Press, 1999.  
张文钺. 焊接冶金学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- Zhao Lin, Tsukamoto Susumu, Arakane Goro, *et al.*. Influence of welding parameters on weld depth and porosity in high power fiber laser welding [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1103004.  
赵琳, 塚本进, 荒金吾郎, 等. 大功率光纤激光焊接过程中工艺参数对熔深和气孔的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1103004.
- Cai Hua, Kong Xiaofang, Xiao Rongshi. Effect of surface status on microstructures and solidification cracking susceptibility in laser beam welding of 2524 aluminum alloy[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0203002.  
蔡华, 孔晓芳, 肖荣诗. 表面状态对 2524 铝合金激光焊接组织和结晶裂纹的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0203002.
- Zhang Keke, Tu Yimin. Special Advanced Welding and Joining Technology[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2008.  
张柯柯, 涂益民. 特种先进连接方法[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2008.
- Wu Dongjiang, Zhang Tianwu, Ma Guangyi, *et al.*. Influence of welding parameters on the morphology of Fe-Ni alloy with continuous wave YAG laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0303003.  
吴东江, 张天武, 马广义, 等. 连续激光焊接 Fe-Ni 合金工艺参数对焊缝形貌的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0303003.
- Wang Jifeng, Liu Liming, Song Gang. Microstructure character of YAG laser welding AZ31B Mg alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(3): 15-18.  
王继锋, 刘黎明, 宋刚. 激光焊接 AZ31B 镁合金接头微观组织特征[J]. 焊接学报, 2004, 25(3): 15-18.
- Zhang Jian, Yang Rui. Control of laser power during titanium alloy thin plate welding [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0103003.  
张健, 杨锐. 激光焊接钛合金薄板时的功率控制[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0103003.
- Chen Yanbin. The Modern Laser Welding Technology [M]. Beijing: Science Press, 2005.  
陈彦斌. 现代激光焊接技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- Liu Bili, Xie Songjing, Yao Jianhua. Application and development trend of laser welding [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(9): 43-47.

- 刘必利, 谢颂京, 姚建华. 激光焊接技术应用及其发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(9): 43—47.
- 12 Eurico Assuncao, Stewart Williams. Comparison of continuous wave and pulsed wave laser welding effects[J]. Opt & Laser in Engng, 2013, 51(6): 674—680.
- 13 Mai T A, Spowage A C. Characterisation of dissimilar joints in laser welding of steel-kovar, copper-steel and copper-aluminium [J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 374(1): 224—233.
- 14 Phanikumar G, Manjini S, Dutta P, *et al.*. Characterization of a continuous CO<sub>2</sub> laser-welded Fe-Cu dissimilar couple [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005, 36(8): 2137—2147.
- 15 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.
- 16 Yao C W, Xu B S, Zhang X Ch, *et al.*. Interface microstructure and mechanical properties of laser welding copper-steel dissimilar joint[J]. Opt & Laser in Engng, 2009, 47(7): 807—814.
- 17 Pi Youdong, Dong Peng, Yang Wuxiong, *et al.*. Laser penetration brazing of brass and low carbon steel[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(11): 1562—1566.
- 皮友东, 董 鹏, 杨武雄, 等. 黄铜-低碳钢异种金属激光深熔钎焊[J]. 中国激光, 2007, 34(11): 1562—1566.
- 18 Chen Jun, Zhang Qunli, Yao Jianhua, *et al.*. Influence of surface roughness on laser absorptivity[J]. Laser Technology, 2008, 32(6): 624—627.
- 陈 君, 张群莉, 姚建华, 等. 材料表面粗糙度对激光吸收率影响的研究[J]. 激光技术, 2008, 32(6): 624—627.

栏目编辑: 张浩佳