

# 5083 铝合金光纤激光焊接工艺研究

孔晓芳 李 飞 吴世凯 杨武雄 肖荣诗

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要** 采用 IPG YLS-6000 光纤激光器焊接 4 mm 厚 5083-H116 铝合金板,研究了焊接工艺参数对焊缝成形及缺陷的影响规律,分析了接头显微组织及力学性能。研究表明,激光功率、焊接速度及离焦量三者的匹配综合影响焊缝的熔透情况;光纤激光焊接 5083 铝合金的主要问题是表面下凹及咬边;在熔透条件下采用较高功率 5 kW 及 6 kW,速度范围在 6 m/min~9 m/min 的光纤激光能够得到较为理想的焊缝;在零离焦、功率 6 kW 及焊接速度 9 m/min 的优化参数下,焊接接头中从熔合线至焊缝中心,结晶形态从细密的柱状晶逐渐转变为等轴树枝晶,并存在较明显的成分偏析;硬度测试表明焊缝区显微硬度存在波动,其平均值低于母材;接头抗拉强度为 287 MPa,约为母材的 83.9%,屈服强度为 227 MPa,延伸率为 3.57%,断裂位置位于焊缝区,断裂类型属韧性断裂。

**关键词** 激光技术; 光纤激光; 焊接; 5083 铝合金; 咬边; 下凹

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.s103005

## Study on Fiber Laser Welding of 5083 Aluminum Alloy

Kong Xiaofang Li Fei Wu Shikai Yang Wuxiong Xiao Rongshi

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** Welding of 5083-H116 aluminum plate with thickness of 4 mm using IPG YLS-6000 fiber laser is presented. The influence of parameters on the weld forming and weld defects is carried out in this paper. Also, microstructure and mechanical properties of joint is analyzed. It indicates that laser power, speed and defocus have great effects on penetration state. The main problems of weld of 5083-H116 aluminum plate are sag and undercut. Under the condition of penetration, using high power of 5 kW and 6 kW and speed range from 6 m/min to 9 m/min can get ideal weld formation. With the optimal parameters of zero defocus, 6 kW power and 9 m/min welding speed, metallographic observations indicate that crystalline morphology near the fusion line is dense columnar, and in center of the weld which is isometric dendrite. Besides, the segregation of weld is more visible. The test shows that the micro-hardness of weld fluctuates and the mean value is less than the parent material. Tensile strength of joint is up to 287 MPa, about 83.9% of parent material. Yield strength is about 227 MPa. Elongation is about 3.57%. The tensile fracture happens in weld, and belongs to ductile fracture.

**Key words** laser technique; fiber laser; welding; 5083 aluminum alloy; undercut; sag

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3390

## 1 引 言

5083 铝合金具有中等强度、耐腐蚀性良好及焊接裂纹倾向小等特性,是舰船、汽车以及高速列车等交通工具高速、轻量化较为理想的材料。由于铝合金的热膨胀系数较大,采用热输入量较大的电弧焊方

法,极易造成构件的严重变形和力学性能的大幅降低<sup>[1]</sup>。而激光焊能量集中度高、热输入量小,因此能够很大程度上改善构件变形大的问题,为铝合金的优质连接提供了新的途径<sup>[2-3]</sup>。

目前 5083 铝合金的激光焊接大都采用 CO<sub>2</sub> 激

**收稿日期**: 2013-07-30; **收到修改稿日期**: 2013-09-01

**基金项目**: 国家自然科学基金(51175008)、国家科技重大专项(2013ZX04001-131)

**作者简介**: 孔晓芳(1990—),女,硕士研究生,主要从事铝合金激光加工方面的研究。

E-mail: kongxiaofang@emails.bjut.edu.cn

**导师简介**: 肖荣诗(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事先进材料激光加工理论与技术等方面的研究。

E-mail: rsxiao@bjut.edu.cn(通信联系人)(中国光学学会会员号: S0420111435)

光器和 YAG 激光器。而近几年光纤激光器作为一种新型的激光器,因其体积小、重量轻、运行成本低、功率高、光束质量高、光电转换效率高及柔性强等诸多优点而备受青睐<sup>[4-5]</sup>。已有的研究结果表明 CO<sub>2</sub> 激光和 YAG 激光焊接高镁含量铝合金的共性问题金属镁的强烈蒸发,而由此引起的熔池剧烈波动是带来气孔、下凹和咬边缺陷的主要原因<sup>[1,4,6-8]</sup>。此外,采用 CO<sub>2</sub> 激光焊接铝合金过程中等离子体的波动直接影响到达板材表面激光能量的变化,增加了焊接小孔的不稳定性,使得气孔、咬边和下凹缺陷更加严重<sup>[1,3,9]</sup>。通过控制等离子体的行为以及采用双光束焊接的方法可以使焊接过程的稳定性得到提高,同时使焊缝中的气孔率大大降低<sup>[7,9]</sup>。Katayama 等<sup>[10]</sup>针对光纤激光焊接 5083 的工艺规

律进行了探究,但并未给出优化气孔及解决咬边缺陷的方案。迄今针对 5083 铝合金光纤激光焊接工艺规律的研究还比较少,有待于深入探讨和总结。本文采用高功率光纤激光器焊接 4 mm 厚 5083 铝合金,着重分析了工艺参数对焊缝成形及下凹和咬边缺陷的影响规律,针对优化后的工艺,进行焊接接头组织分析和力学性能试验。

## 2 试验材料及方法

### 2.1 试验材料

试验材料为 4 mm 厚 5083-H116 铝镁合金,尺寸为 150 mm×50 mm×4 mm。化学成分如表 1 所示。材料的屈服强度为 235 MPa,抗拉强度为 342 MPa,延伸率为 12.5%。

表 1 5083 铝合金名义化学成分(质量分数,%)

Table 1 Nominal chemical composition of 5083 aluminum alloy (mass fraction, %)

	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Cr	Cu	Al
5083	4.0~4.9	0.4~1.0	0.4	0.4	0.25	0.15	0.05~0.25	0.1	Bal.

### 2.2 试验方法

试验布置如图 1 所示,采用平板扫描焊接方式。激光器为 IPG YLS-6000 光纤激光器,传输光纤芯径为 200 μm,输出耦合准直镜的焦距为 200 mm,聚焦镜焦距为 300 mm,焦点直径为 0.3 mm。焊接保护气和背保护气均采用氩气,流量分别为 15 L/min 和 10 L/min。

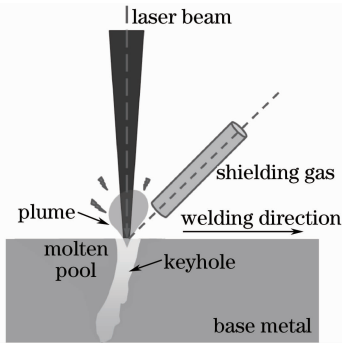


图 1 试验布置示意图

Fig. 1 Schematic setup of experimental device

焊前对试样进行处理,首先采用丙酮去除试样表面油污,然后采用 NaOH 溶液去除表面氧化膜,再用体积分数 30% 的 HNO<sub>3</sub> 溶液中和残留碱液,用流动水冲洗后,吹干,放入干燥箱。对焊后试样进行 X 射线无损探伤,制备金相试样并采用 OLYMPUS SZ61 体视镜观测焊缝形貌,利用金相图像分析系统测量焊缝凹陷及咬边深度。使用 OLYMPUS GX51 金相显微镜分析接头微观组织,硬度测试采用的是

FM-300e 型硬度仪,拉伸性能的实验在 ZWICK-Z100 型材料试验机上完成,并通过日立 S-3400N 型扫描电镜观察断口情况。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 工艺参数对焊缝成形的影响

图 2 所示为板材熔透最大焊接速度与离焦量和功率的变化关系。当离焦量一定时最大焊接速度随激光功率的增大而递增。从整体来看,三种功率条件下,最大焊接速度随离焦量由负到正的变化过程中均呈现出先增大后减小的趋势,且离焦量的绝对值越小熔透的最大焊接速度越大,当激光作用焦点落在铝板表面时,能够获得铝板完全熔透的峰值速度。这表明在高功率零离焦情况下激光能量的利用

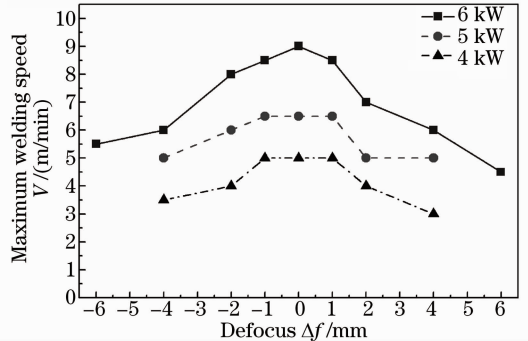


图 2 最大焊接速度与离焦量和功率的变化关系

Fig. 2 Maximum welding speed changes with defocus and power

率最高,焊接效率可以达到最大。

焊缝表面的典型形貌如图 3 所示。焊接过程中保护良好,焊缝正面和背面均呈现明亮的金属光泽。但焊缝正面没有形成均匀的鱼鳞纹,而是呈现一定

的波动性,且局部的下凹及咬边程度也不同;焊缝背面也存在小幅度的熔池波动的痕迹。焊缝不同位置处的截面形貌如图 4 所示。

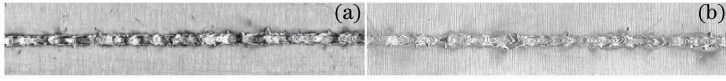


图 3 焊缝表面典型形貌( $\Delta f=0, P=5 \text{ kW}, V=6.5 \text{ m/min}$ )。(a) 正面; (b) 背面

Fig. 3 Typical morphology of weld surface ( $\Delta f=0, P=5 \text{ kW}, V=6.5 \text{ m/min}$ ). (a) Front; (b) back

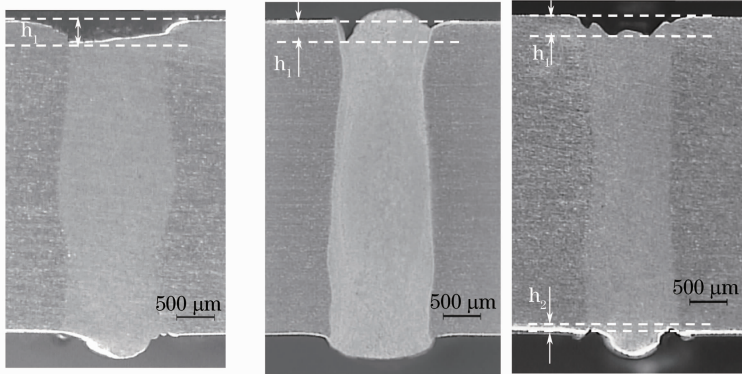


图 4 焊缝不同位置横截面形貌 ( $\Delta f=0, P=5 \text{ kW}, V=6.5 \text{ m/min}$ )

Fig. 4 Cross section profile of the weld at different positions ( $\Delta f=0, P=5 \text{ kW}, V=6.5 \text{ m/min}$ )

### 3.2 焊缝缺陷

表 2 为针对几组焊接参数下获得的焊缝进行 X 射线探伤检验结果。结果表明焊缝中未发现裂纹和气孔,但是存在不同程度的下凹及咬边缺陷,其中功率为 2 kW 和 3 kW 参数所对应焊缝中下凹及咬边缺陷比较严重,而功率为 5 kW 和 6 kW 参数所对应焊缝中下凹及咬边缺陷程度相对较小。

表 2 不同功率和速度的匹配条件下所对应焊缝的 X 射线探伤照片

Table 2 X-ray inspection of the welds under different power and speed conditions

Laser power / kW	Welding speed / (m/min)	NDT X-ray films
2	1	
3	2.5	
4	4.5	
5	6.5	
6	9	

光纤激光焊接 5083 铝合金的主要缺陷是下凹和咬边。造成焊缝中下凹及咬边现象的主要原因是合金元素镁的蒸汽压很高,在高能量密度激光的辐

照下,镁会发生强烈蒸发引起小孔和熔池的剧烈波动,由此产生不规则的下凹和咬边缺陷。

由于焊缝中下凹及咬边缺陷的共同特征是缺少了一部分金属材料,那么将这种下凹或/和咬边的缺陷定义为“缺肉”,并记焊缝中缺肉的最大深度  $h$  为对应的上表面深度  $h_1$  与下表面深度  $h_2$  之和(如图 4 所示)。将这一缺肉深度  $h$  作为评价焊缝质量的指标进行统计和比较,结果如图 5~7 所示。功率分别为 4、5、6 kW,采用不同离焦量时,  $h$  的最小值均基本出现在熔透所允许的最大焊接速度或最小焊接速度附近。随着功率的提高,焊接速度的变化范围相应变宽,同时熔透状态的最大焊接速度也有显著提高,峰值可达 9 m/min。此外,随着焊接速度由小到大,对应  $h$  值的变化规律也不尽相同。在功率 4 kW 的条件下(图 5),  $h$  随焊接速度的变化呈现先增大后减小的趋势仅在零离焦条件时符合,在正离焦与负离焦条件下,  $h$  随焊接速度变化的规律性并不十分明显,这与离焦导致熔透焊接速度的工艺窗口变窄以及样本量减少有着密不可分的关系。在功率 5 kW 和 6 kW 时(如图 6 和图 7 所示),  $h$  随焊接速度的增大均呈现出先增大后减小的变化趋势,且高速度更利于  $h$  的减小。在  $h$  值较小的高速工艺范围内进行比较,功率 4 kW 零离焦时对应  $h$  的最小值为 0.47 mm;功率 5 kW 零离焦时对应  $h$  的最小值



为0.36 mm;功率6 kW时,零离焦及±1 离焦分别对应  $h$  的最小值非常接近,约为 0.46 mm。所以,在保证焊缝熔透的情况下,采用较高功率 5 kW 及 6 kW,速度范围在 6~9 m/min 的光纤激光能够获得较为理想的焊缝。因此选择零离焦,激光功率 6 kW,焊接速度 9 m/min 的优化工艺参数,进一步考察对接接头的组织及力学性能。

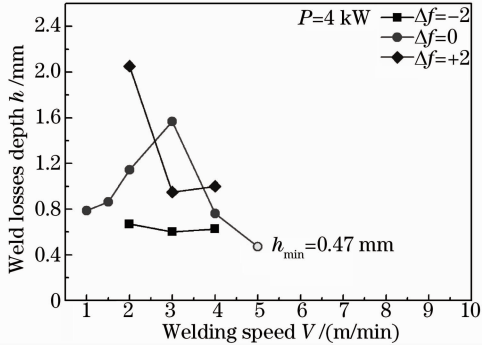


图 5 功率 4 kW 时缺肉深度随焊接速度的变化  
Fig. 5 Weld losses depth at different welding speeds in 4 kW

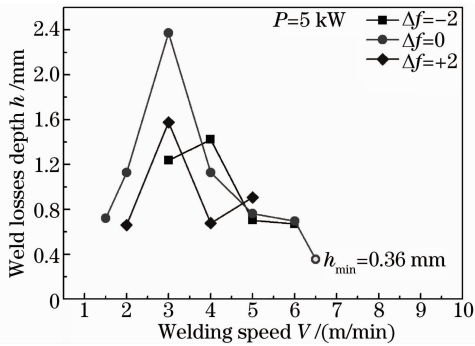


图 6 功率 5 kW 时缺肉深度随焊接速度的变化  
Fig. 6 Weld losses depth at different welding speeds in 5 kW

### 3.3 接头显微组织

如图 8 所示,5083 铝合金激光焊接接头由母材 (BM)、热影响区 (HAZ)、熔合区及焊缝 (WM) 组成。图 9 所示为焊接接头中不同区域的显微组织。由于激光焊接参数选择为高功率高速度,激光焊接

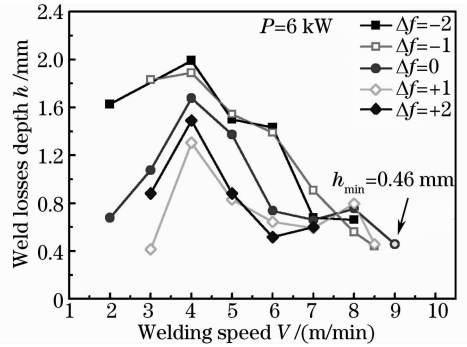


图 7 功率 6 kW 时缺肉深度随焊接速度的变化  
Fig. 7 Weld losses depth at different welding speeds in 6 kW

的能量密度高度集中,冷却速度极大,且铝合金本身具有极大的热传导率使得焊缝呈现出独特的组织特征,即从熔合线至焊缝中心,结晶形态从细密的柱状晶转变为等轴树枝晶,且两类晶型所占比例相当。焊缝中心等轴树枝晶分布相互独立,数量较多且形态比较完整,同时发现存在明显的显微偏析现象。分析认为,熔池凝固过程中柱状晶与等轴树枝晶的形核、生长同步进行,柱状晶沿最大散热方向反向生长,等轴树枝晶在过冷度极大的熔池心部自由形核并向周围发散式生长,形成柱状晶与树枝晶重叠交

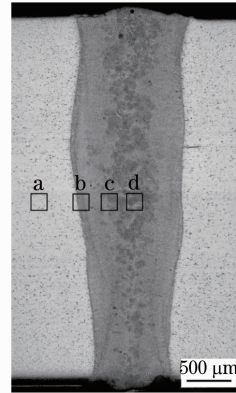


图 8 5083 铝合金焊接接头宏观金相组织  
( $\Delta f=0$ ,  $P=6$  kW,  $V=9$  m/min)

Fig. 8 Metallographic microstructure of 5083 aluminum alloy welds ( $\Delta f=0$ ,  $P=6$  kW,  $V=9$  m/min)

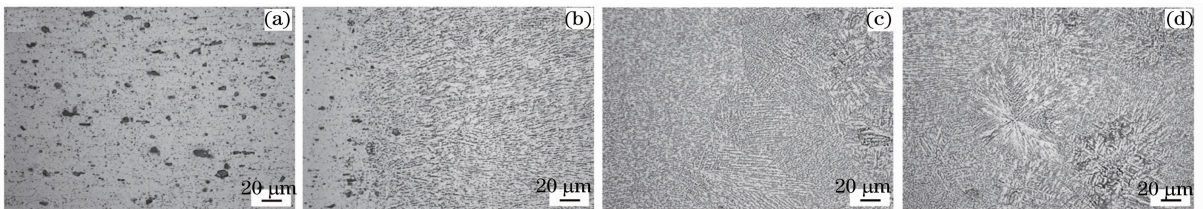


图 9 (a) 母材金相组织; (b) 熔合线附近柱状晶; (c) 柱状晶与等轴晶交界; (d) 焊缝中心等轴树枝晶  
Fig. 9 (a) Metallographic microstructure of base metal; (b) columnar grain in fusion line; (c) interface between columnar grain and equiaxed grain; (d) equiaxed dendrite in weld metal

错的组织形态区且该区域的显微偏析比较严重。然而由于熔池表面受保护气冷却影响与内部的凝固条件存在差异,这种枝晶交错区在焊缝表层并不明显。

### 3.4 接头力学性能

图 10 为接头横截面中部沿水平方向的显微硬度分布。从图中可知焊缝硬度较低,约为 82 HV<sub>0.1</sub>;焊缝两侧存在宽度 1 mm 左右的热影响软化区,原因是该区域内的变形晶粒受焊接热作用的影响发生了回复与再结晶,抵消了部分晶粒原本的形变硬化效果。

采用静载拉伸试验对接头拉伸性能进行测试,

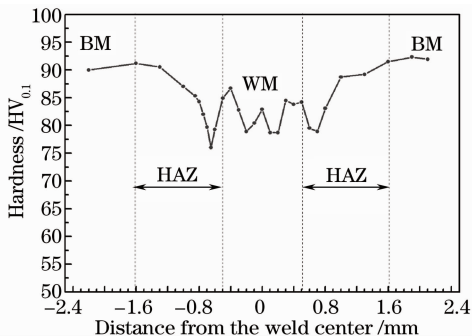


图 10 接头显微硬度分布

Fig. 10 Micro-hardness profile of the weld joint

典型应力应变曲线如图 11 所示。拉伸试验结果表明接头抗拉强度的平均值为 287 MPa,约为母材的 83.9%;屈服强度  $\sigma_{0.2}$  平均为 227 MPa;延伸率平均为 3.57%。宏观观察接头均断在焊缝位置,断裂位置及断口形貌如图 12 所示,在断面横截面中可见明显的剪切唇特征,即在焊缝上部 and 下部出现与拉伸力轴向大致成 45° 角的锥形面。断裂位置在焊缝内部可能是受到晶界偏析的影响,断裂路径优先选择较低能量的晶界,因此在焊缝内部发生晶间断裂。断口微观形貌显示断裂区为尺寸相近的等轴韧窝,其断裂形式属由微孔聚集引发的韧性断裂。

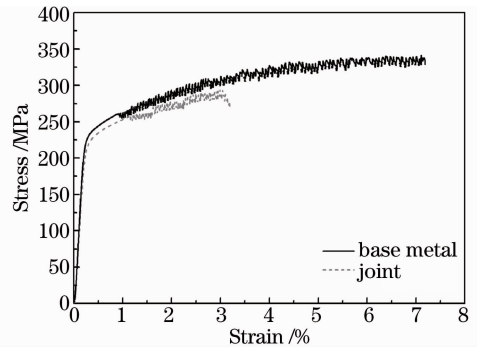


图 11 拉伸试样应力应变曲线

Fig. 11 Stress versus strain the sample

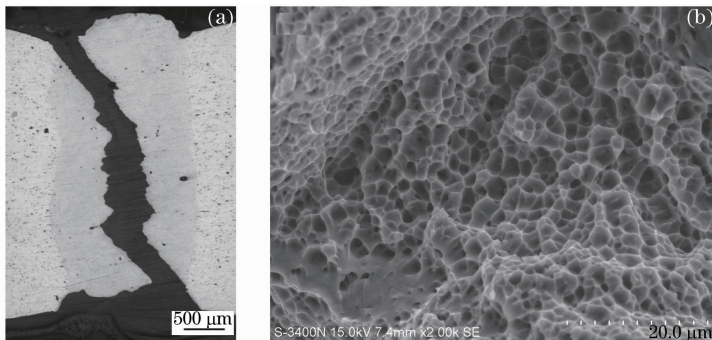


图 12 (a) 接头断裂位置; (b) 典型断口形貌

Fig. 12 (a) Fracture location of joint; (b) typical fracture morphology

## 4 结 论

采用光纤激光深熔透焊接 5083 铝合金,焊接接头的裂纹,气孔倾向较小,主要缺陷为表面下凹及咬边。采用优化的焊接工艺参数可以将焊缝下凹及咬边缺陷程度降到最低,从而获得质量较好的接头。焊接接头抗拉强度为 287 MPa,约为母材的 83.9%;屈服强度  $\sigma_{0.2}$  约为 227 MPa;延伸率约为 3.57%;断裂发生在焊缝,为韧性断裂。

### 参 考 文 献

1 Qi Junfeng, Niu Zhen, Zhang Dongyun, *et al.*. Control of

shaping of welds for CO<sub>2</sub> laser welding shipbuilding T-section aluminum alloy[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(2): 297-302.

祁俊峰,牛振,张冬云,等. CO<sub>2</sub> 激光焊接船用铝合金 T 型材的焊缝成形控制[J]. 中国激光, 2008, 35(2): 297-302.

2 Cai Hua, Xiao Rongshi, Chen Kai. Mechanical property of CO<sub>2</sub> laser welded joint of 1420 aluminum-lithium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(s1): 122-125.

蔡华,肖荣诗,陈铠. 1420 铝锂合金 CO<sub>2</sub> 激光焊接接头的力学性能研究[J]. 中国激光, 2009, 36(s1): 122-125.

3 Xiao Rongshi. Laser beam welding of aluminum alloys[C]. SPIE, 2007, 6825: 682505.

4 Mei Lifang, Chen Genyu, Jin Xiangzhong, *et al.*. Study on fiber laser overlap welding of automobile aluminum alloy[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2091-2097.

梅丽芳,陈根余,金湘中,等. 车用铝合金光纤激光搭接焊的研究[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2091-2097.

- 5 Beyer E, Mahrle A, Lütke M, *et al.*. Innovation in high power fiber laser applications[C]. SPIE, 2012, 8237: 823717.
- 6 Wang Xijing, Katayama Seiji, Matsunawa Akira. Character of melting and evaporation in laser welding for different aluminum alloys[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1995, 16(1): 30-35.  
王希靖, 片山圣二, 松绳朗. 不同铝合金在激光焊接时的熔化和蒸发特性[J]. 焊接学报, 1995, 16(1): 30-35.
- 7 Haboudou A, Peyre P, Vannes A B, *et al.*. Reduction of porosity content generated during Nd:YAG laser welding of A356 and AA5083 aluminum alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 363(1-2): 40-52.
- 8 Zhang Honggui, Jin Xiangzhong, Chen Genyu, *et al.*. Study on the burning loss of magnesium element in fiber laser welding aluminum alloy 5052 [J]. Laser Technology, 2012, 36(6): 713-718.  
张宏圭, 金湘中, 陈根余, 等. 光纤激光焊接 5052 铝合金镁元素烧损研究[J]. 激光技术, 2012, 36(6): 713-718.
- 9 Hong Lei, Wu Gang, Chen Wuzhu. Influence of shielding gas flow on welding quality for CO<sub>2</sub> laser welding of aluminum alloy [J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(11): 1571-1576.  
洪 蕾, 吴 钢, 陈武柱. 保护气流对 CO<sub>2</sub> 激光焊接铝合金的影响[J]. 中国激光, 2005, 32(11): 1571-1576.
- 10 Katayama S, Nagayama H, Mizutani M, *et al.*. Fiber laser welding of aluminum alloy[J]. Welding International, 2009, 23(10): 744-752.

栏目编辑: 宋梅梅