

# 6061-T6 铝合金高速高功率 CO<sub>2</sub> 激光填丝 焊接性的研究

翟玉峰<sup>1</sup> 黄坚<sup>1</sup> 李敏<sup>1</sup> 陈洁<sup>2</sup> 杨模聪<sup>2</sup> 赵勇<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup> 上海交通大学上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240)  
(<sup>2</sup> 上海飞机制造有限公司, 上海 200436)

**摘要** 为实现 6061-T6 铝合金薄板的高速高功率 CO<sub>2</sub> 激光填丝焊接, 选用了 ER4043, ER5356 两种焊丝进行了焊接性试验。利用鱼骨状试样对两种焊丝的激光焊接铝合金 6061-T6 的热裂纹敏感性进行了分析; 利用金相显微镜、扫描电镜、显微硬度计以及万能材料试验机分析了焊接接头的组织与性能。研究表明, 与填充 ER5356 焊丝相比, 填充 ER4043 焊丝的焊接接头热裂纹敏感性较低, 焊接速度可达 6 m/min。焊缝主要是柱状晶、等轴晶及少量树枝晶, 显微硬度在 60~80 HV, 拉伸强度可达 240~262 MPa, 弯曲性能良好。

**关键词** 激光技术; 激光填丝焊接; 6061-T6 铝合金; 高功率激光; 焊接性

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0503001

## Research on High Speed High Power CO<sub>2</sub> Laser Welding of 6061-T6 Aluminum with Filler Wire

Zhai Yufeng<sup>1</sup> Huang Jian<sup>1</sup> Li Min<sup>1</sup> Chen Jie<sup>2</sup> Yang Mocong<sup>2</sup> Zhao Yong<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Key Laboratory of Laser Processing and Material Modification,  
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)  
(<sup>2</sup> Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436, China)

**Abstract** In order to realize the high power CO<sub>2</sub> laser welding of 6061-T6 aluminum alloy sheet under high travel speed, filler wire ER4043 and ER5356 are selected for welding. In the experiments, welding hot cracking sensitivity is analyzed by use of fishbone samples, and optical microscope, scanning electron microscope, micro-hardness test and mechanical property test are applied to analyze the microstructure and properties of the joints. Results indicate that compared with filling wire ER5356, the hot crack sensibility of the joint welded with wire ER4043 is lower, and a maximal welding speed of 6 m/min can be reached. The weld contains columnar grains, equiaxes grains, and some dendrites grains. The weld has a micro-hardness of joint with ER4043 of 60~80 HV, a tensile strength of 240~262 MPa and a good bending property.

**Key words** laser technique; laser wire welding; 6061-T6 aluminum alloy; high power laser; weldability

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3390; 350.3850

## 1 引言

材料是飞机结构的基础, 铝合金由于其具有比强度高、成形和加工性能好及耐腐蚀性能好等特点, 已成为非常重要的飞机结构材料, 在大型客机结构中占有很大的使用比例<sup>[1]</sup>。目前铝合金的焊接主要采用钨极氩弧(TIG)焊和惰性气体熔化极电弧

(MIG)焊, 但是由于铝合金熔点低、热传导系数大、密度小和线膨胀系数大等特点, 电弧焊接时容易产生气孔、裂纹以及热变形缺陷, 焊后接头强度较低, 大大限制了其在工业上的应用<sup>[2~4]</sup>。

激光焊接具有能量密度高、焊接热输入小、焊接速度快、焊缝和热影响区都比较窄、接头变形小等优

**收稿日期**: 2010-09-29; **收到修改稿日期**: 2010-12-06

**作者简介**: 翟玉峰(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事铝合金激光焊接方面的研究。E-mail: zhaiyufeng@sjtu.edu.cn

**导师简介**: 黄坚(1967—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事激光焊接与熔敷技术、焊接过程分析与数值模拟等方面的研究。E-mail: jhuang@sjtu.edu.cn(通信联系人)

点,在焊接铝合金方面有较大的优势<sup>[5~7]</sup>。但铝合金自身的物理特性及对激光的高反射率给铝合金的激光焊接带来了一系列的问题,如等离子体的控制、急速冷却凝固产生的裂纹和焊接过程的稳定性<sup>[8~10]</sup>等。通过添加填充材料,可以降低对接焊时的装配精度,改善焊缝成形,防止裂纹产生,提高接头的力学性能<sup>[11~14]</sup>。薄板对接激光熔透焊接时极少产生气孔,焊接气孔不敏感,但在高速高功率激光焊接条件下,焊丝种类、激光功率与送丝速度和焊接速度的配合等对热裂纹敏感性、力学性能等焊接性方面的影响却有待于分析研究。

本文采用 CO<sub>2</sub> 激光对高速高功率激光焊接 6061-T6 铝合金薄板进行了焊接性研究,通过 ER4043 和 ER5356 两种焊丝的 6061-T6 铝合金激光焊接热裂纹敏感性的分析,进行焊丝优选,对优选焊丝的对焊接

接头显微组织和力学性能进行了测试分析。

## 2 试验材料及方法

### 2.1 试验材料

试验用母材为 6061-T6 铝合金,属于 Al-Mg-Si 系列,化学成分如表 1 所示,其抗拉强度为 310 MPa。焊接试板尺寸为 250 mm×100 mm×1.8 mm。根据母材成分,通常 6061 铝合金焊接可以选用 ER4043 (Al-Si)焊丝,以获得较好的抗裂性;或选用 ER5356 (Al-Mg)焊丝,以获得较好的力学性能。因此,试验中分别选用 ER4043 和 ER5356 焊丝进行热裂敏感性试验,并以此选出适合高速激光焊接的焊丝。ER4043 和 ER5356 焊丝的化学成分分别如表 2、3 所示,焊丝直径均为 1.2 mm。

表 1 6061-T6 铝合金化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of aluminum 6061-T6(mass fraction, %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.4~0.8	0.7	0.15~0.40	0.15	0.8~1.2	0.10	0.25	0.15	Bal.

表 2 焊丝 ER4043 化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of wire ER4043(mass fraction, %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
4.5~6.0	<0.8	0.30	0.05	0.05	—	0.10	<0.02	Bal.

表 3 焊丝 ER5356 化学成分(质量分数,%)

Table 3 Chemical composition of wire ER5356(mass fraction, %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.20	0.30	0.10	0.05~0.20	4.5~5.5	0.05~0.20	0.10	0.06~0.20	Bal.

### 2.2 试验方法

在焊接试验之前,对母材进行去氧化膜处理。首先采用化学清除方法:用金属清洗剂去除表面油污,然后室温下用质量分数为 10% 的 NaOH 溶液浸泡 2 min,后用冷水清洗 2~3 min,再用质量分数为 30% 稀 HNO<sub>3</sub> 进行光化处理,同时中和余碱,再用清水清洗 2~3 min,之后采用丙酮擦拭表面,然后用吹风机烘干 5 min,放入 30 ℃ 的干燥箱里。然后在使用前,将经过化学清除氧化膜的试样用抛光毡轮进行机械打磨,再次去氧化膜,并可增加表面的粗糙度,从而降低试板对激光的反射。

焊接试验采用德国 TRUMPF 生产的 TLF 15000 turbo 快速轴流型 CO<sub>2</sub> 激光器,最大输出功率为 15 kW,光束聚焦后光斑直径为 0.86 mm。送丝采用 Kemppi Pro 型 MIG 焊机送丝系统,焊接过

程中侧吹保护气体为纯 He,流量为 20 L/min。高速焊接时焊接速度基本设在 5 m/min 或以上;在所用光束质量和光斑直径下达到深熔焊的激光功率在 6.5 kW 以上。

### 2.3 试样制备与测试

根据焊手册规定<sup>[15]</sup>,采用鱼骨状可变拘束裂纹试验来评定激光焊接 6061-T6 铝合金的热裂纹敏感性。焊后沿焊缝横截面制备金相试样,经研磨抛光后用腐蚀液腐蚀进行宏观形貌和微观组织分析,腐蚀剂为:5 mL HF(质量分数为 48%)+10 mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+85 mL H<sub>2</sub>O。使用 MEF4M 金相显微镜观察显微组织,使用 JSM-6460 型扫描电镜观察拉伸断口形貌;使用 HVS-10 显微硬度计,在 2.943 N 载荷下对接头的显微硬度进行测试;按照 GB/2651-89,使用 AG-100KNA 万能材料试验机测试了接头的拉伸性能,试

验速度为 1 mm/min;按照 GB/T 2653-1989,采用三点弯曲法,使用 Zwick/Roell Z010 试验机测试了焊接接头的弯曲性能。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 6061-T6 铝合金 CO<sub>2</sub> 激光高速焊接的热裂纹敏感性

试验采用鱼骨状可变拘束裂纹试验分别评定了采用 ER4043, ER5356 焊丝激光焊接 6061-T6 铝合金的热裂纹敏感性,选用试样裂纹总长度与焊缝长度的比值作为评定指标。在热裂纹敏感性试验之

前,针对高速焊接和接头熔透保证的需要,先采用平板堆焊确定了可进行裂纹试验的焊接工艺参数范围。试验表明,工艺参数范围较窄,超出范围时将导致或未熔透或烧穿或堵丝等。对于 ER4043 焊丝,其焊接参数区间为:焊接速度 4.8~6.6 m/min,激光功率 6.8~7.5 kW,送丝速度 4.8~6.5 m/min;对于 ER5356 焊丝的焊接工艺参数区间为:焊接速度 5~6 m/min,激光功率 7.0~7.5 kW,送丝速度 5.0~6.5 m/min。试验时,在其他参数不变条件下分别改变激光功率、焊接速度或送丝速度。试验结果如图 1 所示。

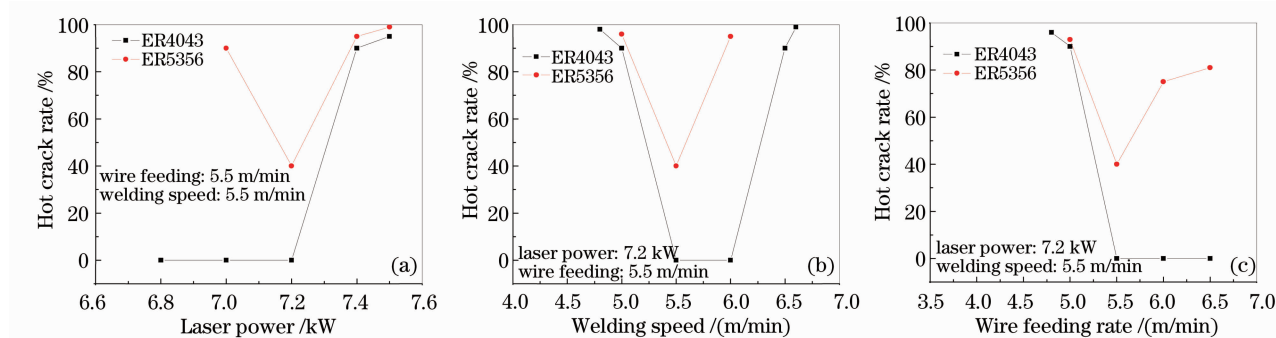


图 1 工艺参数对热裂纹敏感性的影响。(a)激光功率,(b)焊接速度,(c)送丝速度

Fig. 1 Influence of (a) laser power, (b) welding speed and (c) wire feeding rate on hot crack sensibility

在本实验室的焊接条件下,从两种焊丝的鱼骨状热裂纹敏感性试验结果比较可知,在相同的工艺参数下,填充 ER4043 焊丝的焊缝热裂纹敏感性较低,且在一定工艺参数范围下热裂纹率可降为零,而采用 ER5356 焊丝的焊缝热裂纹敏感性明显偏高,在试验参数范围内均出现焊缝开裂,最低裂纹率也达 40%。这说明在高速焊接时,填充 ER4043 焊丝很好地改善了铝合金激光焊接的热裂纹敏感性,这是由于 ER4043 焊丝为 Al-Si 共晶合金,在凝固时可以形成一定量的低熔点共晶物,熔池液体流动性较好,在高速焊接时具有良好的填充能力,从而较好地抑制了热裂纹的产生。而采用 ER5356 焊丝时,由于其合金成分不在共晶范围内,其合金不能形成共晶反应,凝固末期熔池流动性较差,焊缝的热裂纹敏感性非常高,即 ER5356 焊丝不适合在高速下进行铝合金 6061-T6 的激光焊接。因此在后续的试验中,仅采用 ER4043 焊丝进行了焊接,并对其接头性能进行了分析。

对试验结果的进一步观察可发现,在填充 ER4043 焊丝时,工艺参数对热裂纹敏感性有显著的影响。当激光功率从 6.8 kW 增加到 7.4 kW 时,热裂纹率由 0% 增加至 90%,这主要是由于功率的

增加使焊接热输入增大所致。当改变焊接速度时,过高或过低的焊接速度均会使热裂纹敏感性增加。在过高的焊接速度时焊缝冷却速度进一步加快,产生的凝固应力相对较大,低熔点共晶在应力的作用下被拉断;而焊接速度偏低时,热输入的增加导致热裂纹敏感性增加。当送丝速度由 6.5 m/min 减少到 5.0 m/min 时,由于具有愈合能力的焊丝填充量减少,液态金属流动性降低,使裂纹率也逐渐增加。

#### 3.2 焊接接头显微组织

图 2 为在激光功率 7.2 kW,焊接速度 5.5 m/min 和送丝速度 5.5 m/min 下采用 ER4043 填充焊丝所获焊接接头的焊缝外观及横截面形貌。图 3 为接头的显微组织,其中图 3(a)为焊缝中心,图 3(b)为接头熔合线处。从图 3 中可以看到,在熔合线附近组织为典型的柱状晶,晶体优先沿着散热最快的方向生长,而散热最快的方向就是温度梯度最大的方向,即与熔池结晶等温面相垂直的方向,所以熔合线附近的晶粒都垂直于熔合线生长。在凝固过程中熔池中的最大温度梯度方向在不断变化,这使得柱状晶方向发生变化而不完全一致。焊缝中心由于温度梯度变小,成分过冷度增大,形成了树枝状形态的 Al-Si 共晶组织,并伴有大量均匀的等轴晶,

且焊缝组织比母材组织晶粒细小得多。填充 ER4043 焊丝时,焊丝中 Si 的质量分数在 4.5%~6.0%,在母材的稀释下,熔池中的 Si 质量分数平均约在 2.5%,

焊缝组织属于亚共晶组织,即为初晶  $\alpha$ -Al 和细小的共晶组织( $\alpha$ -Al+Si)。

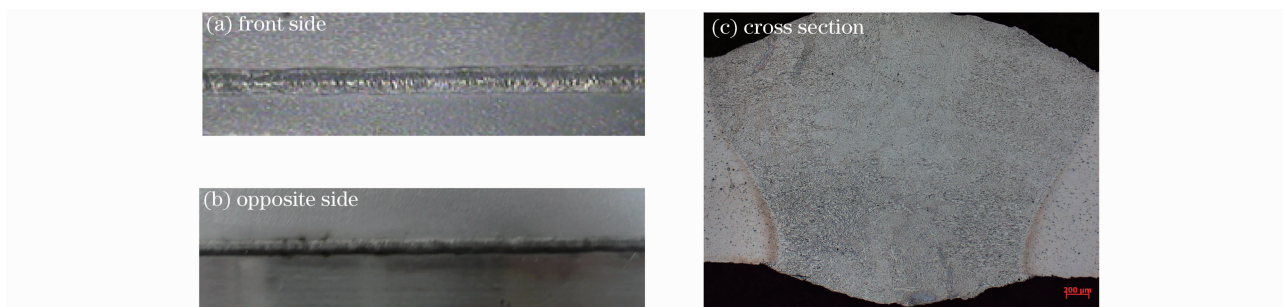


图 2 焊接接头的宏观形貌

Fig. 2 Macrograph of the joint

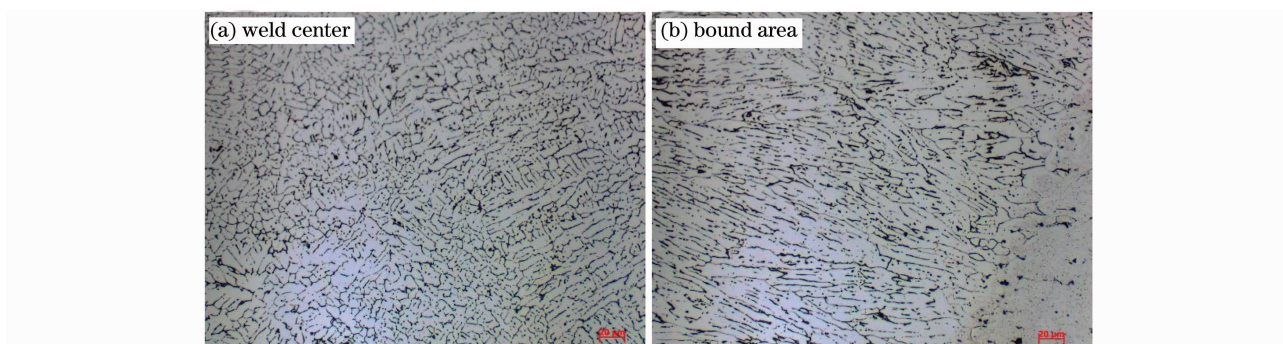


图 3 激光填丝焊接接头的显微组织(ER4043)

Fig. 3 Microstructure of the weld joint obtained with ER4043

### 3.3 焊接接头的显微硬度测试

对不同工艺参数下获得的 6061-T6 铝合金填充 ER4043 焊丝激光焊接接头的显微硬度进行了分析,图 4 为硬度测量结果,图中以熔合线所在位置为坐标原点,负方向为焊缝区(至焊缝中心)。结果显示,母材的硬度维持在 120~130 HV,进入热影响区之后硬度逐渐下降,焊缝中心的硬度值最低。对于 6061-T6 铝合金的激光填丝焊接,接头热影响区均存在软化。而焊缝为铸态组织,原热处理强化效应消失,并且 Mg 元素的烧损导致冷却后形成的  $\beta$  强化相减少,最终使焊缝区硬度值降低。同时发现,功率减小或增大焊接速度时,焊缝中心硬度有不同程度的提高,软化区相应地变小,软化倾向减小;而增大送丝速度时,焊缝的硬度值有所减小,是由于焊缝中热输入和填充量的增大共同造成的。

### 3.4 焊接接头的力学性能测试

对在不同工艺参数下,填充 ER4043 焊丝所得的焊接接头进行了拉伸和弯曲性能测试,其中拉伸试样中的焊缝余高予以了保留。试验结果分别如表 4,5 所示。接头拉伸强度在 240~262 MPa,达到母材强度的 75%~80%,均断于母材热影响区。图 5

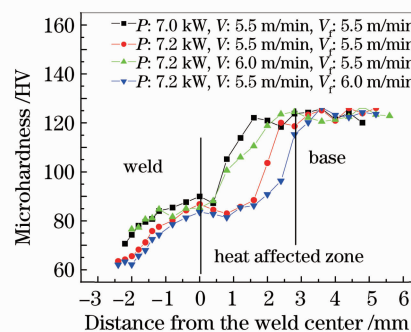


图 4 焊接接头显微硬度分析

Fig. 4 Microhardness of the weld joints

是典型的接头拉伸断口,断口处有大量的韧窝,呈微孔聚集型,为韧性断口,韧窝外侧具有明显的撕裂棱;在正弯及背弯 120°的情况下均未出现裂纹,正弯强度在 630~660 MPa,背弯强度在 570~600 MPa,弯曲性能良好。同时可以看到,热输入减小时,由于接头的冷却速度加快,晶粒有所细化,热影响区减小,接头的抗拉强度提高,而弯曲强度有所下降;送丝量增加时,虽然焊缝中心硬度稍微降低,但抗拉强度基本不变,正弯弯曲强度略有提高。



表 4 接头拉伸性能测试结果

Table 4 Tensile properties of the welded joints

Laser power /kW	Welding speed / (m/min)	Feeding speed / (m/min)	Front bending /MPa	Results
7.0	5.5	5.5	254	Heat affected zone
7.2	5.5	5.5	249	Heat affected zone
7.2	6.0	5.5	262	Heat affected zone
7.2	5.5	6.0	240	Heat affected zone

表 5 接头 120° 弯曲性能测试结果

Table 5 120° bending properties of the welded joints

Laser power / kW	Welding speed / (m/min)	Feeding speed / (m/min)	Front bending / MPa	Opposite bending / MPa	Results
7.0	5.5	5.5	638.7	580.3	No cracking
7.2	5.5	5.5	645.9	592.8	No cracking
7.2	6.0	5.5	630.0	576.3	No cracking
7.2	5.5	6.0	660.1	600.5	No cracking

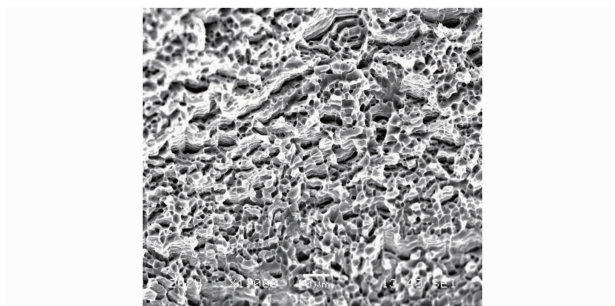


图 5 拉伸断口形貌

Fig. 5 Fracture microstructure of the weld joint

## 4 结 论

在本实验室的焊接条件下,采用 5 m/min 以上的高速焊接时对铝合金 6061-T6 的高功率 CO<sub>2</sub> 激光填丝焊接进行了试验研究,通过试验结果分析和讨论,可以得出以下结论:

1) 采用 ER4043 焊丝时,焊缝的热裂纹敏感性低,可以获得无裂纹的焊接接头;而采用 ER5356 焊丝时焊缝热裂纹敏感性高,不适于高速焊接;

2) 采用 ER4043 焊丝的接头焊缝中心为树枝晶、等轴晶,熔合线附近则为典型的柱状晶。焊缝组织为由初晶  $\alpha$ -Al 和细小的共晶组成的亚共晶组织;

3) 采用 ER4043 焊丝的接头焊缝硬度为 60~80 HV,低于母材。保留余高的焊接接头拉伸强度在 240~262 MPa,断于母材热影响区;正弯强度为 630~660 MPa,背弯强度为 570~600 MPa,弯曲角度达 120°,弯曲性能良好。

## 参 考 文 献

1 Chen Yali. Application of aluminum alloys to aircraft [J].

*Nonferrous Metals Processing*, 2003, **32**(2): 11~17

陈亚莉. 铝合金在航空领域中的应用[J]. *有色金属加工*, 2003, **32**(2): 11~17

2 Chang Yanjun, Dong Junhui, Zhang Yi. The microstructure and property of 6061 aluminum alloy welding joint [J]. *Welding*, 2006, (1): 21~26

常艳君,董俊慧,张毅. 6061 铝合金焊接接头的组织与性能分析[J]. *焊接*, 2006, (1): 21~26

3 B. Hu, I. M. Richardson. Mechanism and possible solution for transverse solidification cracking in laser welding of high strength aluminum alloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, **429**(1-2): 287~294

4 Xu Lianghong, Tian Zhiling, Peng Yun *et al.*. Microstructure and mechanical properties of high strength aluminum alloy laser welds [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 456~461

许良红,田志凌,彭云等. 高强铝合金的激光焊接接头组织及力学性能[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 456~461

5 Li Liqun, Tao Wang, Zhu Xianliang. Wire filling laser multilayer welding of high strength steel thick plate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1251~1255

李俐群,陶汪,朱先亮. 厚板高强钢激光填丝多层焊工艺[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1251~1255

6 Wu Shikai, Xiao Rongshi, Chen Kai. Laser welding of heavy section stainless steel plants [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2422~2425

吴世凯,肖荣诗,陈铠. 大厚度不锈钢板的激光焊接[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2422~2425

7 Fu Jun, Huang Jian, Yao Chengwu *et al.*. Laser butt welding for copper-steel joint [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1256~1260

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

8 Chen Ying. Technological properties and the development of laser welding of aluminum [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2006, **34**(1): 19~21

陈颖. 铝合金激光焊接的工艺特性及其发展现状[J]. *轻合金加工技术*, 2006, **34**(1): 19~21

9 E. Cicala, G. Duffet, H. Andrzejewski *et al.*. Hot cracking in Al-Mg-Si alloy laser welding-operating parameters and their effects [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, **395**(1-2): 1~9

10 Xiao Rongshi, Chen Kai, Zuo Tiechuan. Development of laser beam welding of high strength aluminum alloy [J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(2): 206~208

- 肖荣诗, 陈 铠, 左铁钊. 高强铝合金激光焊接新进展[J]. 应用激光, 2002, **22**(2): 206~208
- 11 Qi Junfeng, Zhang Dongyun, Xiao Rongshi *et al.*. Joint performance of CO<sub>2</sub> laser beam welding 5083-H321 aluminum alloy [J]. *China Welding*, 2007, **16**(2): 40~45
- 12 Xu Fei, Chen Li, Gong Shuili *et al.*. Microstructure and mechanical properties of laser welding 5A06 aluminum with filling wire [J]. *Applied Laser*, 2009, **29**(2): 83~86
- 许 飞, 陈 俐, 巩水利 等. 5A06 铝合金激光填丝焊接头组织性能分析[J]. 应用激光, 2009, **29**(2): 83~86
- 13 Z. Sun, M. Kuo. Bridging the joint gap with wire feed laser welding [J]. *J. Materials Processing Technology*, 1999, **87**(1-3): 213~222
- 14 Yu Yangchun, Wang Chunming, Yu Shengfu. Microstructure and property of butt laser joints of aluminum alloy 5A06 sheets with filler [J]. *Laser Technology*, 2010, **34**(1): 34~36
- 余阳春, 王春明, 余圣甫. 5A06 铝合金的激光填丝焊接头组织与性能 [J]. 激光技术, 2010, **34**(1): 34~36
- 15 Zou Zengda. *Welding Handbook* [M]. 3<sup>rd</sup> Edition. Beijing: China Machine Press, 2004. 165~166
- 邹增大. 焊接手册 [M]. 第 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2004. 165~166