

T 型接头双侧激光同步焊接缺陷补焊工艺及性能

杨志斌¹ 陶汪^{1,2*} 李俐群¹ 陈彦宾¹ 张湮龙¹ 刘申¹

(¹哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001
²哈尔滨工业大学金属精密热加工国防科技重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 针对国产大型客机 6056/6156 铝合金机身壁板 T 型接头双侧激光同步焊接的表面成形缺陷, 从焊缝成形、微观组织、接头性能等方面对焊接缺陷的补焊工艺进行系统研究。结果表明: 采用双侧填丝补焊方法能够有效消除焊缝原始缺陷获得成形良好的接头; 补焊焊缝中心的等轴晶粒明显细化, 热影响区弥散分布的第二相粒子有所减少, 接头软化现象更为明显; 补焊接头平均横向和轴向拉伸强度分别为 323.9 MPa 和 183.5 MPa, 为原始接头的 95.8% 和 89.8%; 轴向拉伸断面表现为脆性与韧性混合断裂, 横向拉伸断面呈现脆性断裂特征。

关键词 激光技术; 焊接缺陷; 补焊; T 型接头; 力学性能; 焊缝成形

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0203005

Repair Welding Process and Properties of Double-Sided Laser Welding Defects for Aluminum Alloys T-Joints

Yang Zhibin¹ Tao Wang^{1,2} Li Liqun¹ Chen Yanbin¹ Zhang Yunlong¹ Liu Shen¹

¹ State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

² National Key Laboratory of Metal Precision Hot Processing, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract Contraposing the welding defects of double-sided laser beam welded 6056/6156 aluminum alloys T-joints for the aircraft panels, systematic research on the repair welding process is carried out from the weld appearance, microstructure, and mechanical properties. The results show that double-sided repair welding with filler wire can eliminate the welding defects of the original joints and obtain good weld appearance, and the equiaxial crystal grain refinement is obvious. The dispersively distributed second phase particles in the heat affected zone are reduced, which causes the joints softened more significantly. The transverse tensile strength and axial tensile strength of the double-sided repair joints with filler wire are 323.9 MPa and 183.5 MPa, being 95.8% and 89.8% of the original joints, respectively. Axial tensile fracture surface appears mixed modes of brittle and ductile fracture, and the transverse tensile fracture surface appears brittle fracture characteristics.

Key words laser technique; welding defects; repair welding; T-joints; mechanical properties; weld appearance

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引言

在飞机制造业中, 为了克服机身壁板传统铆接技术存在机身重量增加和生产效率较低的局限

性^[1~3], 以实现机身壁板轻质、高效、低成本的加工制造, 20 世纪 90 年代初空中客车公司率先开展了双侧激光同步焊接技术的研究以代替传统的铆接技

收稿日期: 2012-08-21; **收到修改稿日期**: 2012-10-10

基金项目: 国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金 (SAMC12-JS-15-009) 和国家自然科学基金 (51175115) 资助课题。

作者简介: 杨志斌 (1985—), 男, 博士研究生, 主要从事铝合金激光焊接及其数值模拟等方面的研究。

E-mail: yangzhibin@hit.edu.cn

导师简介: 陈彦宾 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光加工方面的研究。E-mail: chenyb@hit.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: taowang81@sina.com

术^[4,5]。目前,这一革新技术已被成功应用于空中客车 A318\A380 等型号飞机的机身壁板制造过程中,在相同结构刚度情况下,机身重量减轻约 20%,制造成本降低约 25%,同时生产效率也得到大幅度提升^[6,7]。

机身壁板结构的独特设计使送丝角度及位置存在很大的局限性,大尺寸机身壁板焊接变形易造成焊接路径偏差和送丝位置扰动,这些因素会导致焊接过程稳定性恶化,易产生塌陷、未熔合与咬边等成形缺陷,降低了接头的力学性能,为满足应用条件必须进行焊接返修予以清除。因此,深入研究 T 型接头双侧激光同步焊接补焊工艺以及补焊对焊接接头力学性能及组织的影响,确定合理的补焊工艺对实现国产大型客机轻质、高效、低成本的加工制造具有重要的意义。

本文针对国产大型客机 6056/6156 铝合金 T

型接头双侧激光同步焊接的表面成形缺陷,从焊缝成形、微观组织、接头性能等方面对焊接缺陷的补焊工艺进行系统分析,为国产大型客机的实际加工制造提供了一定的理论依据。

2 试验材料及方法

焊接设备采用的光纤激光器为德国 IPG 公司生产的 YLS-5000 和 YLS-10000 光纤激光器,其最大功率分别为 5 kW 和 10 kW,波长为 1.06 μm,光斑半径为 0.23 mm,光束模式为多模分布。配合德国 KUKA 六轴联动机器人和奥地利 FRONIUS KD4010 送丝系统进行试验。

桁条与蒙皮分别采用 1.8 mm 厚 6056-T4 与 6156-T6 铝合金,T 型接头示意图如图 1 所示。为了抑制焊接热裂纹填充焊丝为直径 1.2 mm 的 4047 铝硅焊丝^[8],它们的化学成分及含量如表 1 所示。

表 1 试验材料化学成分及含量(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of the experimental materials (mass fraction, %)

Materials	Mg	Si	Cu	Mn	Zn	Fe	Al
6156-skin	0.9	1.0	0.9	0.6	—	—	Bal.
6056-stringer	0.9	1.0	0.8	0.6	0.4	—	Bal.
4047-filler wire	0.01	11.52	<0.01	0.01	0.001	0.2	Bal.

试验前严格清洗待焊试件表面,进行去油和除氧化膜处理。具体的处理方法如下:丙酮除油→去除氧化膜处理[40 °C~60 °C的 6%~10%(质量分数)氢氧化钠水溶液碱洗 8 min]→清水冲洗→中和光化(浸入质量分数为 30%硝酸溶液 3 min)→清水冲洗→烘干(100 °C~120 °C)。

采用双侧激光同步焊接方法进行铝合金 T 型接头焊接及补焊,激光束与蒙皮成 30°角倾斜入射,焊丝、保护气喷嘴与激光束在同一平面内互成一定角度分布。焊接试验系统示意图如图 1 所示。

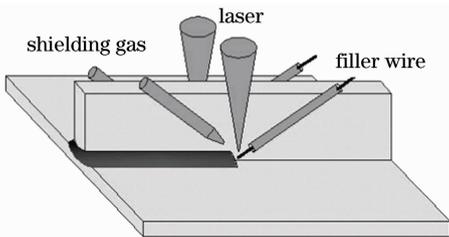


图 1 焊接试验过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser welding process

利用 OLYMPUS GX71 金相显微镜对接头成形、微观组织观察分析;利用 HXD-1000TM 数显显微硬度计进行硬度测试,加载载荷 100 g,保持时间 10 s;根据航空工业标准 HB5413-96《金属室温拉伸

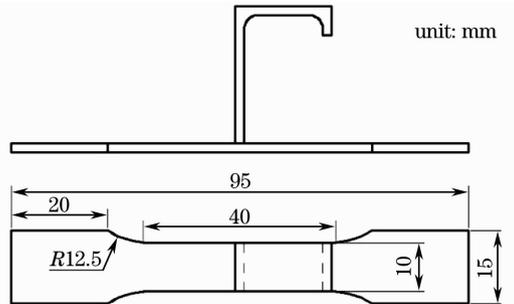


图 2 横向拉伸试件尺寸示意图

Fig. 2 Specimen geometry for transverse tensile test

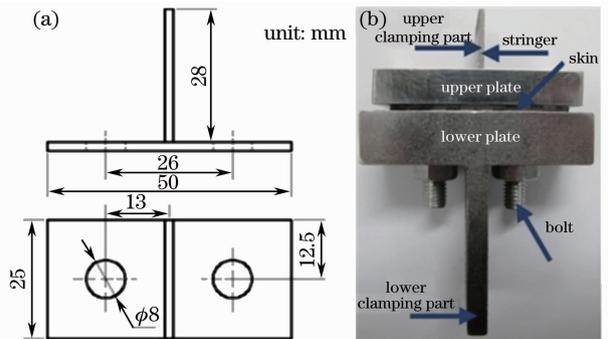


图 3 轴向拉伸试件尺寸示意图。(a)试件尺寸; (b)拉伸夹具

Fig. 3 Specimen geometry for axial tensile test. (a)

Specimen geometry; (b) man-made clamping for tensile test

试验方法》对接头进行横向拉伸和轴向拉伸试验,拉伸速度为2 mm/min,试件尺寸如图 2 和图 3(a)所示,其中轴向拉伸自制夹具如图 3(b)所示;利用 HITACHI S-3400N 扫描电镜分析断口断裂机理。

3 结果与讨论

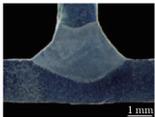
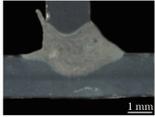
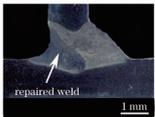
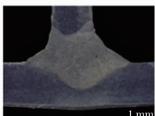
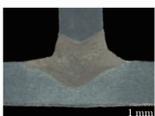
3.1 补焊方法及焊缝成形

对存在缺陷的原始焊缝进行补焊时,补焊的对中位置一般位于缺陷所处的部位。对缺陷位置进行清理去除杂质及氧化膜以防止产生二次缺陷,同时补焊方向与原焊接方向一致。为了方便起见,母材直接焊接所形成的无缺陷焊缝(接头)称为原始焊缝(原始接头),对焊缝缺陷补焊所形成的焊缝(接头)称为补焊焊缝(补焊接头)。

原始焊缝与不同补焊方法所形成的焊缝表面及截面形貌如表 2 所示,其中 P 为激光功率, V 为焊接速度, V' 为送丝速度。从 4 种不同补焊方法所获得的焊缝成形来看,采用未填丝方法进行补焊焊缝成形虽在一定程度上有所改善,但同时使焊缝成形变为内凹的形式,该接头形式较大程度地降低了接头的疲劳性能,不能满足成形要求^[9];采用填丝方法进行补焊可以较好地消除原始焊缝成形缺陷,且焊缝过渡平滑。因此,从补焊焊缝成形来看,缺陷应采用填丝补焊方法进行补焊,同时为了保证补焊焊缝能完全消除原始焊缝的成形缺陷,需要根据缺陷的严重程度以及偏移桁条或者蒙皮位置的大小合理确定焊接工艺参数。

表 2 典型不同补焊方法与未补焊焊缝表面及截面形貌

Table 2 Typical weld appearance and cross sections of T-joints with different repair welding methods and without repair welding

Welding method	Parameters	Appearances	Cross sections
Original welding (without defects)	$P=2000\text{ W}$ $V=6\text{ m/min}$ $V'=4\text{ m/min}$		
Original welding (with defects)	$P=2000\text{ W}$ $V=6\text{ m/min}$ $V'=4\text{ m/min}$		
One-sided repair welding with filler wire	$P=1800\text{ W}$ $V=6\text{ m/min}$ $V'=4\text{ m/min}$		
One-sided repair welding without filler wire	$P=1800\text{ W}$ $V=6\text{ m/min}$		
Double-sided repair welding with filler wire	$P=2200\text{ W}$ $V=6\text{ m/min}$ $V'=4\text{ m/min}$		
Double-sided repair welding without filler wire	$P=1800\text{ W}$ $V=6\text{ m/min}$		

3.2 微观组织

图 4 为原始焊缝与补焊焊缝的微观组织,可以发现:原始焊缝中心与双侧填丝补焊焊缝中心均为等轴晶组织,双侧填丝补焊焊缝中心由于受到二次热输入的影响导致其等轴晶粒明显得到细化,而单侧填丝补焊由于热输入不对称的原因导致焊缝中心

出现明显的分界线,同时分界线两侧等轴晶粒大小不一致,出现组织不均匀性的特征;原始焊缝熔合线附近为典型的柱状晶区,而单侧填丝补焊与双侧填丝补焊的熔合线附近也均存在分界线,此时原始焊缝的柱状晶区成为补焊焊缝的热影响区,导致原始焊缝热影响区弥散分布的第二相粒子减少,如果增

加热输入使补焊焊缝完全覆盖掉原始焊缝,势必会增加焊缝的熔深。根据本课题组前期研究结果,这将降低接头的力学性能,是不可取的^[10]。因此,从

补焊焊缝组织的均匀性来看,采用双侧填丝补焊焊缝组织优于单侧填丝补焊焊缝。

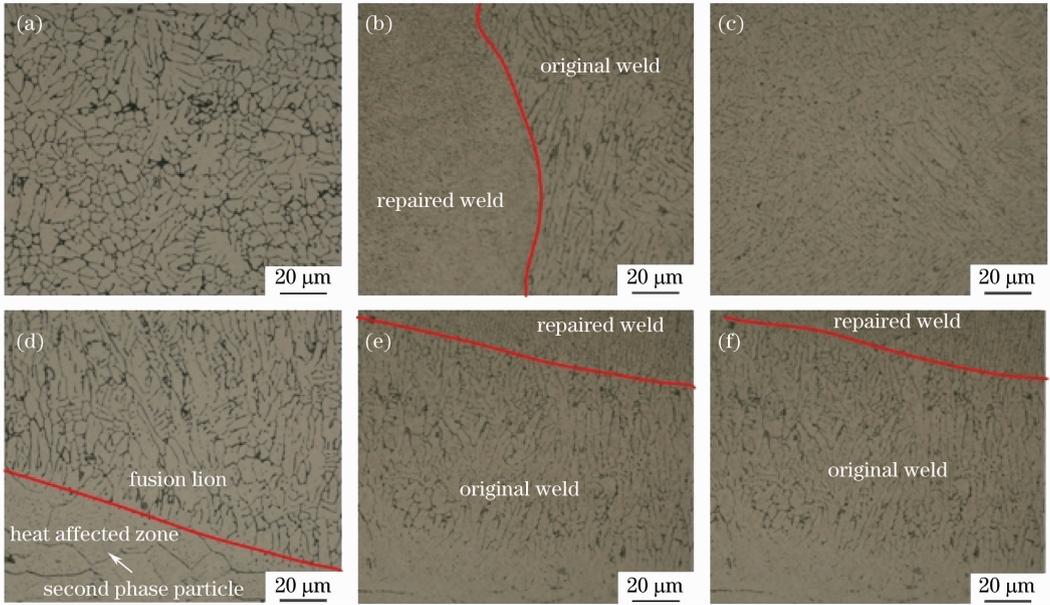


图4 T型接头焊缝组织特征。(a)原始焊缝中心;(b)单侧填丝补焊焊缝中心;(c)双侧填丝补焊焊缝中心;(d)原始焊缝熔合线;(e)单侧填丝补焊焊缝熔合线;(f)双侧填丝补焊焊缝熔合线

Fig. 4 Microstructures of T-joints. (a) Original weld center; (b) one-sided repair weld center with filler wire; (c) double-sided repair weld center with filler wire; (d) original weld fusion line; (e) one-sided repair weld fusion line with filler wire; (f) double-sided repair weld fusion line with filler wire

3.3 接头性能

3.3.1 接头拉伸性能

原始接头与补焊接头的拉伸强度如图5所示,其中1为母材,2为原始接头,3为单侧未填丝补焊接头,4为单侧填丝补焊接头,5为双侧未填丝补焊接头,6为双侧填丝补焊接头。原始接头的平均横向拉伸强度和平均轴向拉伸强度分别为338.1 MPa和204.3 MPa,分别为母材(6056/6156拉伸强度一致均约为385 MPa)的87.8%和53.1%,已达到目前已知的相关水平^[4,11];补焊接头以双侧填丝补焊接头的拉伸强度最高,其平均横向拉伸强度和平均轴向拉伸强度分别为323.9 MPa和183.5 MPa,分别为原始接头的95.8%和89.8%,同时双侧填丝补焊接头的拉伸强度值分布比较均匀。

拉伸试验过程中,原始接头与双侧填丝补焊的断裂路径一致,横向拉伸与纵向拉伸试件均起裂于蒙皮焊趾处,并沿熔合线附近扩展,不同之处在于横向拉伸最终断裂于焊缝最大熔深处,而轴向拉伸裂纹沿整个熔合线附近扩展并最终断裂,如图6所示。试件起裂于蒙皮焊趾处主要是由于此处应力集中较大,焊缝沿蒙皮侧熔合线扩展而不是沿桁条侧的熔

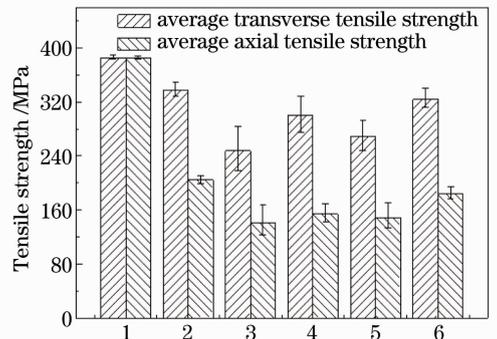


图5 原始接头与补焊接头拉伸强度

Fig. 5 Tensile strength of original and repair T-joints

合线扩展,主要有两个方面的原因:1) 由于高温停留时间长导致合金元素蒸发最为严重,2) 能量在此区域集中导致母材中合金元素更有利于向流动性更好的熔池扩散,并导致此区域的强化相粒子减少^[11]。

从拉伸断口扫描电镜图片分析:原始接头与双侧填丝补焊纵向拉伸断口均表现出明显的准解理特征并伴有少量的韧窝存在,呈现出脆性与韧性混合断裂的特征,差别只是原始接头断口的韧窝数量略多,如图7(a)和(b)所示;对于横向拉伸,原始接头

断口具有明显的韧窝断裂特征,且在韧窝底部分布着大小不一的第二相粒子,表现出明显的韧性断裂特征,双侧填丝补焊接头断口几乎未发现韧窝但出

现了一定的滑移现象,呈现出脆性断裂的特征,如图7(c)和7(d)所示。初步认为这与补焊造成焊缝的二次重熔有一定关系,需要进一步研究。

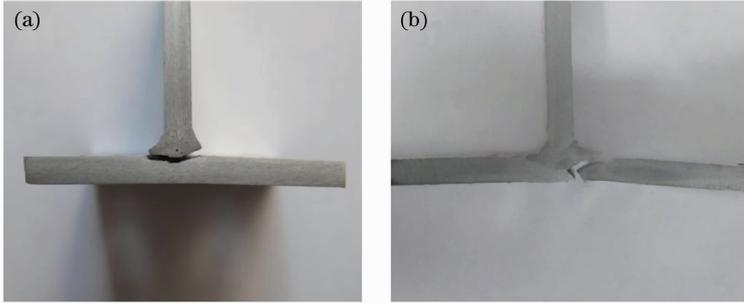


图6 拉伸试件的断裂形式。(a)轴向拉伸;(b)横向拉伸

Fig. 6 Macrographs of tensile test fractures. (a) Axial tensile test; (b) transverse tensile test

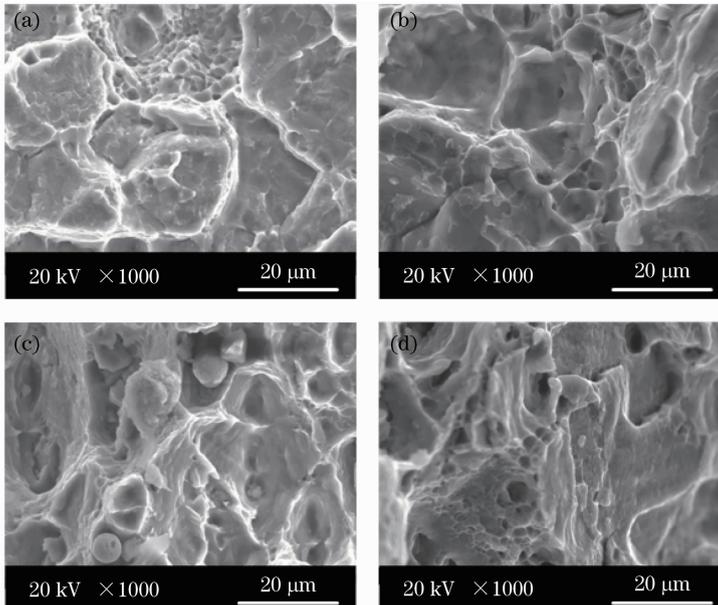


图7 原始接头与补焊接头的拉伸断口形貌。(a)原始接头轴向拉伸断口;(b)双侧填丝补焊轴向拉伸断口;(c)原始接头横向拉伸断口;(d)双侧填丝补焊横向拉伸断口

Fig. 7 Micrographs of tensile test fractures for original and double-sided repair joints. (a) Original joints for axial tensile; (b) double-sided repair joints with filler wire for axial tensile; (c) original joints for transverse tensile; (d) double-sided repair joints with filler wire for transverse tensile

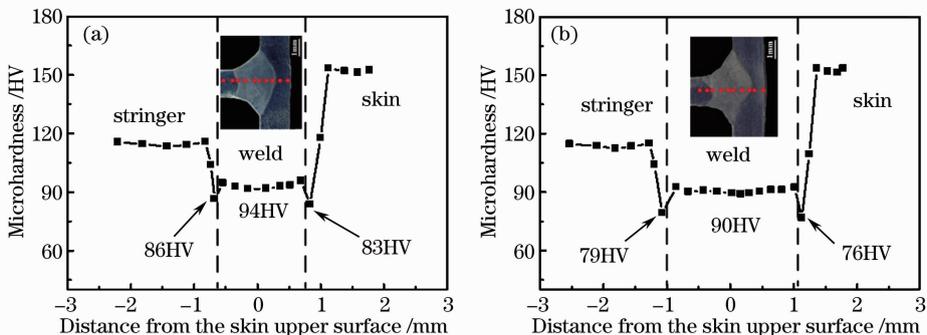


图8 接头显微硬度值分布情况。(a)原始接头;(b)双侧填丝补焊接头

Fig. 8 Microhardness of the T-joints. (a) Original joint; (b) double-sided repair joint with filler wire

3.3.2 接头显微硬度

对原始接头与双侧填丝补焊接头进行显微硬度测定,测定位置及维氏硬度值分布情况如图8所示。从图中可以发现:虽然蒙皮的硬度高于桁条,但是蒙皮侧热影响区的硬度值略低于桁条侧,是整个接头最为薄弱的环节。这主要是由于激光能量在焊缝最大熔深处最为集中导致合金元素蒸发严重以及其向熔池扩散倾向大所导致的,同时也使得该区域强化相粒子有一定程度的减少^[11,12],这也解释了拉伸试件裂纹扩展路径的原因。通过对比还可以发现,双侧填丝补焊接头各个区域的硬度值均略低于原始接头,这主要是焊接热影响区的重熔作用造成的,相比原始焊缝接头软化现象更加显著^[12],这也是双侧填丝补焊接头拉伸性能降低的原因所在。

4 结 论

1) 采用双侧填丝补焊工艺可以显著消除双侧激光同步焊接T型接头的塌陷、未熔合及咬边等表面成形缺陷,能够获得成形良好的焊接接头。

2) 二次热输入导致补焊焊缝中心的等轴晶粒明显细化且熔合线附近存在分界线,同时焊缝热影响区弥散分布的第二相粒子有所减少;双侧填丝补焊接头各个区域的硬度值均略低于原始接头的硬度值,使接头的软化现象更加明显。

3) 双侧填丝补焊接头的平均横向和轴向拉伸强度分别为323.9 MPa和183.5 MPa,分别为原始接头的95.8%和89.8%;轴向拉伸断口与原始接头断口一致表现为脆性与韧性混合断裂,横向拉伸则由原始接头的韧性断裂变为脆性断裂。

参 考 文 献

- 1 G. Neye, P. Heider. Laser beam welding of modern Al-alloy for the aircraft industry [C]. Proc Conf ECLAT' 94/Dusseldorf: Deutscher Verband für Schweißtechnik 1994; 108-117
- 2 G. Neye. Laserstrahlschweißkonzept für Rumpfschalens-Strukturen[M]. Strahltechnik, Band 5, Bremen: Bias-Verlag, 1997
- 3 P. F. Mendez, T. W. Eagar. Welding process for aeronautics [J]. *Adv. Mater. Proc.*, 2001, **159**(5): 39~43
- 4 D. Dittrich, J. Standfuss, J. Liebscher *et al.*. Laser beam welding of hard to weld Al alloys for a regional aircraft fuselage design-first results[J]. *Phys. Proc.*, 2011, **12**(1): 113~122
- 5 W. Zink. Welding fuselage shells[J]. *Industrial Laser Solutions for Manufacturing*, 2001, **16**(4): 7~10
- 6 K. Schneider, J. Schumacher. Laser technologie-ein schlüssel im wettbewerb der modernen struktur technologien im zivilen flugzeugbau[C]. Laserstrahlfügen, Strahltechnik Band 19, BIAS Verlag, Bremen, 2002. 5~14
- 7 B. Brenner, D. Dittrich, L. Morgenthal *et al.*. New technological aspects of laser beam welding of aircraft structures [C]. Düsseldorf: DVS 2004. 19~24
- 8 Zhai Yufeng, Huang Jian, Li Min *et al.*. Research on high speed high power CO₂ laser welding of 6061-T6 aluminum with filler wire[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0503001
翟玉峰, 黄坚, 李敏等. 6061-T6 铝合金高速高功率CO₂激光填丝焊接性研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0503001
- 9 J. Schumacher, I. Zerner, G. Neye *et al.*. Laser beam welding of aircraft fuselage panels [C]. In: ProcICALEO Section A. Scottsdale, USA; 2002
- 10 Z. B. Yang, W. Tao, L. Q. Li *et al.*. Double-sided laser beam welded T-joints for aluminum aircraft fuselage panels; process, microstructure, and mechanical properties [J]. *Materials and Design*, 2012, **33**(10): 652~658
- 11 A. Squillace, U. Prisco. Influence of filler material on micro- and macro-mechanical behaviour of laser-beam-welded T-joint for aerospace applications [J]. *J. Mater. Des. Appl.*, 2009, **223**(3): 103~115
- 12 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