

2060 铝锂合金光纤激光填丝焊接工艺研究

安 娜 张心怡 王启明 杨武雄 肖荣诗

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 2060-T8 铝锂合金是具有低密度、高比强度,及良好低温性能的新型轻量化航空材料。采用光纤激光器并填充 5087(Al-Mg-Zr)焊丝焊接 2 mm 厚 2060-T8 铝锂合金,研究了工艺参数对焊接接头热裂纹敏感性的影响,分析了焊接接头的显微组织及力学性能。研究表明,结晶裂纹敏感性随激光功率和焊接速度的增加而增加,随送丝速度的增加而降低。在激光功率为 3 kW、焊接速度和送丝速度为 3 m/min 的工艺参数下接头成形良好,无焊接裂纹,焊接接头的平均抗拉强度为 309 MPa,断裂发生在焊缝区。同焊缝上部及下部相比,焊缝腰部熔合线附近晶区等轴晶数量较多且柱状晶明显细化,这与熔池流动机制与边界层厚度有关。

关键词 激光技术; 激光焊接; 光纤激光; 2060 铝锂合金; 结晶裂纹; 组织性能

中图分类号 TN249; TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1003009

Fiber Laser Welding of 2060 Aluminum-Lithium Alloy with Filler Wire

An Na Zhang Xinyi Wang Qiming Yang Wuxiong Xiao Rongshi

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

Abstract 2060-T8 Al-Li alloy is a new aircraft material with low density, high specific strength and well properties in low temperature conditions. 2060-T8 Al-Li alloy in 2 mm thick is welded by fiber laser with 5087 (Al-Mg-Zr) filler wire. The cracking susceptibility of joints obtained under different welding parameters is investigated. The microstructure and mechanical properties are analyzed as well. The result indicates that, a higher laser power or a larger welding speed causes the increase of crack number, and a lower wire feeding rate results in a higher cracking susceptibility. Under the condition of 3 kW laser power, 3 m/min welding speed and 3 m/min wire feeding rate, the weld with great formation and few welding defects are obtained. The average tensile strength of joints reaches to 309 MPa, and the tensile fractures occur in the weld zone. At the waist of weld, the fine equiaxed grains are in larger quantities and the columnar crystals are more refined than the upside and downside near the fusion line, which results from the mode of fluid flow in weld pool and the thickness of the boundary-layer.

Key words laser technique; laser welding; fiber laser; 2060 aluminum-lithium alloy; solidification cracking; structure and properties

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

1 引 言

铝锂合金具有高弹性模量、低密度、高比强度和比刚度的特点。研究发现在铝中每添加质量分数为 1% 的锂可以减少密度约 3%, 提高弹性模量约 6%。

在节省构件质量 10%~16% 的基础上, 刚度可以提高 15%~20%^[1]。2060 高强铝锂合金属于第三代新型铝锂合金, 在成分设计上, 增加了 Cu/Li 比例, 并添加了 Ag、Mn、Zn 等合金元素, 能够明显克服第

收稿日期: 2014-04-21; **收到修改稿日期**: 2014-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(51175008)

作者简介: 安 娜(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事铝锂合金激光加工方面的研究。

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

导师简介: 肖荣诗(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光先进制造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)

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

二代铝锂合金中的各向异性高、塑性低等问题,提高了合金的强度韧性匹配。目前第三代铝锂合金主要用于飞机蒙皮制造^[2-3],其中,2060 铝锂合金是我国实现飞机轻量化制造的重要备选材料。

激光焊接具有能量密度高、焊接速度快、焊接结构变形小、柔性等特点,是实现高效、高质量焊接铝锂合金的较为理想的焊接方法。空中客车公司率先实现了铝合金下机身壁板结构的激光焊接制造,替代铆接连接减轻了机身重量,降低了制造成本。由于此焊接技术符合了民用飞机的轻量化制造趋势,因而得到了航空领域的广泛关注^[4]。与其他大功率激光器相比,大功率光纤激光器具有输出功率高、光束质量好等优势。相比于 CO₂ 激光器,光纤激光器大大克服了常温下铝合金对 CO₂ 激光吸收率不足 2% 的缺陷,因此更易实现激光深熔焊^[5]。

表 1 2060 Al-Li 合金与 5087 Al-Mg-Zr 焊丝化学成分(质量分数, %)

Table 1 Compositions of 2060 Al-Li alloy and 5087 Al-Mg-Zr filler wire (mass fraction, %)

	Cu	Li	Mg	Mn	Zn	Ag	Zr	Si	Fe	Cr	Ti	Al
2060	3.4~4.2	0.6~0.9	0.6~1.1	0.10~0.50	0.30~0.45	0.10~0.50	0.04~0.18	0.05	0.10	—	—	bal.
5087	<0.05	—	4.5~5.2	0.7~1.0	<0.25	—	0.10~0.20	<0.25	<0.4	0.05~0.25	<0.15	bal.

2.2 试验方法

激光器采用 IPG YLS-6000 型光纤激光器,波长为 1060~1070 nm,聚焦镜焦距为 250 mm,聚焦

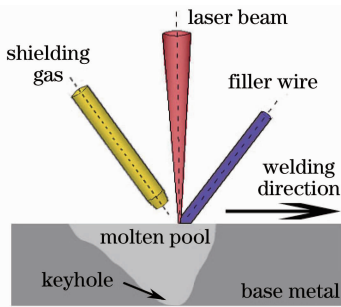


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

铝锂合金为典型共晶型合金,热膨胀系数大,激光焊接时容易产生热裂纹^[5]。第三代铝锂合金在进行成分设计时并未考虑焊接性问题,进行激光焊接时裂纹倾向很大。本文采用大功率光纤激光器焊接 2 mm 厚 2060 铝锂合金薄板,填充 5087(Al-Mg-Zr) 焊丝,研究了工艺参数对焊缝裂纹敏感性的影响,分析了焊缝结晶组织形态及接头力学性能。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料

试验材料为 2060-T8 铝锂合金薄板,试样尺寸为 200 mm×50 mm×2 mm,填充 5087(Al-Mg-Zr) 焊丝,焊丝直径为 1.2 mm,母材及焊丝的化学成分如表 1 所示。

光束直径为 0.25 mm。试验装置如图 1 所示。激光功率为 2~5 kW,焊接速度为 2~5 m/min,送丝速度为 1~3 m/min。焊接保护气为氩气,正、背保护气流量分别为 15 L/min、10 L/min。

焊后采用 OLYMPUS SZ61 型体视镜观察焊缝表面成形,利用金相图像分析系统观察焊缝表面裂纹个数。制备金相试样并采用 Keller 试剂进行腐蚀,采用 OLYMPUS GX51 型金相显微镜观察焊缝宏观形貌与微观组织。采用 FM-300e 型硬度仪进行硬度测试。拉伸性能试验采用 ZWICK-Z100 型材料试验机,拉伸试样尺寸如图 2 所示。采用日立 S-3400N 型扫描电镜观察焊缝显微组织和断口形貌。

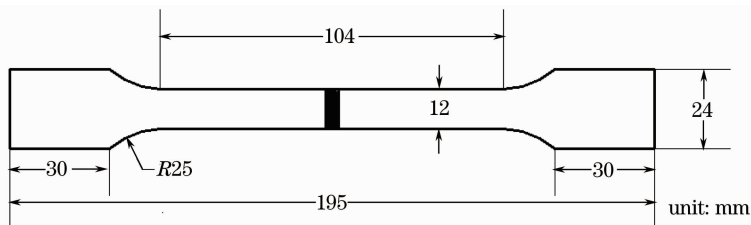


图 2 拉伸试样尺寸

Fig. 2 Specification of the tensile test sample

3 试验结果与分析

3.1 焊接工艺参数对裂纹的影响

表 2 为不同工艺参数下的焊接接头裂纹倾向，以每 20 mm 焊缝表面的平均裂纹个数进行表征。

表 2 不同工艺参数下焊接裂纹倾向

Table 2 Cracking susceptibility under different welding conditions

Experiment number	Laser power /kW	Welding speed /($m \cdot min^{-1}$)	Feeding rate /($m \cdot min^{-1}$)	Number of cracks /20 mm
1	2	3	3	0
2	3	2	2	0
3	3	3	1	1
4	3	3	2	0
5	3	3	3	0
6	3	4	2	4
7	3	5	2	4
8	4	3	3	3
9	5	3	3	6

焊缝表面呈现的裂纹均为横向裂纹，图 3(a) 为宏观裂纹形貌，裂纹扩展方向大体与焊接方向垂直，单个裂纹长度在 221~1816 μm 之间。通过微观组

织观察，裂纹形貌具有明显沿晶界开裂特征，为典型的结晶裂纹，如图 3(b) 所示。结晶裂纹的产生与凝固后期晶界共晶状态有关。

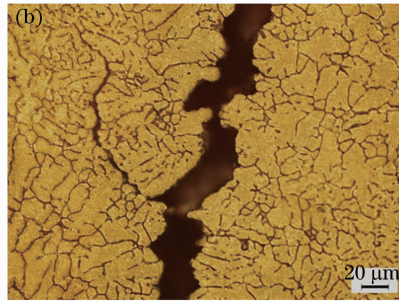
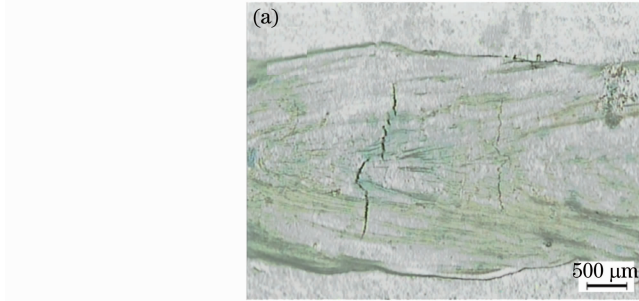


图 3 典型裂纹形貌。(a) 宏观形貌；(b) 微观形貌

Fig. 3 Typical morphology of cracks. (a) Macro scale; (b) micro scale

由于激光焊接速度快，熔池凝固时间短，在熔池的非平衡冷却条件下，合金元素偏析于晶界，形成大量的低熔点共晶，呈液态薄膜状，在拉应力条件作用下极易沿晶界开裂，产生结晶裂纹。随着激光功率增加，热输入量提高，使得熔池凝固过程中产生的拉应力增加，同时焊缝结晶组织粗化，裂纹更易扩展，从而增大热裂纹倾向^[5]。

焊接速度的提高会降低热输入量，有利于细化焊缝组织，防止形成粗大柱状晶。但是，随着焊接速度的增加，焊缝应变速率也随之增加，同时结晶组织方向性更加明显，因此裂纹敏感性增大^[5]。

图 4 为焊缝中心显微组织形貌。对比图 4(a) 与(b)可知，固定激光功率和焊接速度，增加送丝速度 w 后，晶粒明显细化，且焊缝平均共晶含量增加，

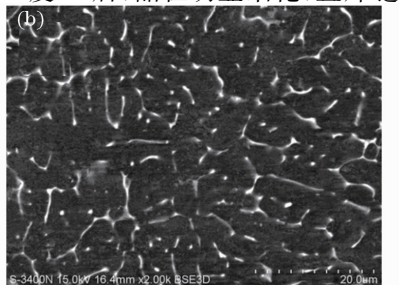
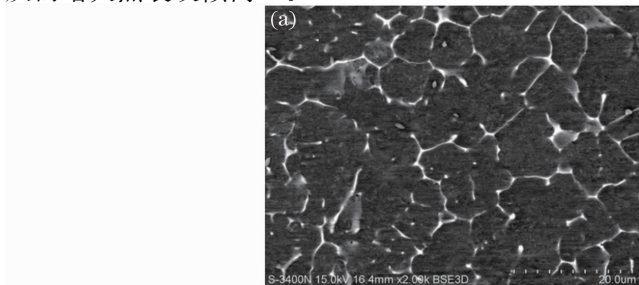


图 4 焊缝中心背散射电子显微组织。(a) $w=1$ m/min；(b) $w=3$ m/min

Fig. 4 Backscattered electron image of weld metals. (a) $w=1$ m/min; (b) $w=3$ m/min

其中离散分布的共晶比例明显增加。2060 铝锂合金中的 Mg 元素含量很少,引入 5087 铝镁焊丝后,熔池中 Mg 元素相对含量的增加使晶界处低熔点共晶的数量增加,有利于及时愈合凝固过程中可能产生的裂纹。同时,焊丝中 Zr 的引入增加了 Al_3Zr 粒子的异质形核作用,而 Mg 元素在结晶前沿的富集增加了成分过冷的程度,两者皆有利于焊缝中等轴晶的形成,使晶粒明显细化,共晶组织分布更加均匀。晶粒细化的同时晶界面积增加,使共晶组织的连续性减弱,离散分布的共晶比例增加,从而降低了热裂纹敏感性,达到了抑制热裂纹的目的^[6-7]。

3.2 焊缝结晶组织形态

在激光功率为 3 kW,焊接速度为 3 m/min,送丝速度为 3 m/min 的工艺参数下获得的接头宏观形貌如图 5 所示,焊缝成形良好,无气孔、裂纹等缺陷。焊缝横截面呈“X”形,为束腰型焊缝,将焊缝横截面熔宽最窄的位置定义为“腰部”,从腰部至焊缝上、下表面熔宽逐渐增加。

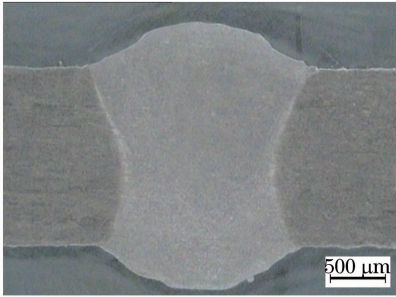


图 5 焊缝形貌($P=3\text{ kW}$, $v=3\text{ m/min}$, $w=3\text{ m/min}$)
Fig. 5 Cross section macrograph of laser welding joint ($P=3\text{ kW}$, $v=3\text{ m/min}$, $w=3\text{ m/min}$)

从熔合线至焊缝中心,焊缝金属的结晶形态从等轴晶、柱状晶转变为等轴树枝晶。其中,沿熔化边界形成的等轴细晶区(EQZ)是铝锂合金熔焊典型的微观组织特征,图 6 为焊缝腰部等轴细晶区附近的组织形态。在熔焊过程中,熔化边界存在一个流动近乎停滞的液体边界层^[8]。由于母材中含有 Li、Zr 等元素,它们形成的 $Al_3(Li_x, Zr_{1-x})$ 、 Al_3Zr 等金属间化合物的熔点高,而边界层温度低,仅略高于热影响区,且高温存留时间短,边界层内这些金属间化合物来不及熔化,成为异质形核的质点,发生非均匀形核,从而抑制了母材的联生结晶,形成等轴细晶区^[8-9]。

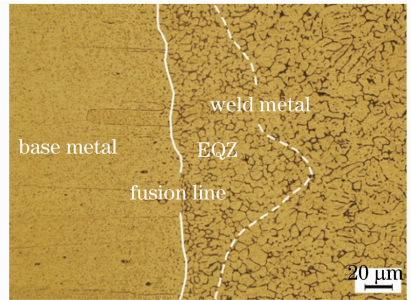


图 6 焊缝腰部等轴细晶区

Fig. 6 Equiaxed grain zone at the waist of weld

焊缝不同区域熔合线附近等轴细晶区的等轴晶数量及柱状晶形态存在明显差异,图 7 为焊缝上部及下部熔合线附近的微观组织。与图 6 所示焊缝腰部熔合线附近的结晶组织相比,焊缝上部及下部(图 7)等轴细晶区的等轴晶数量较少,且近熔合线附近的柱状晶较为粗大,其生长方向具有一致性,呈现与熔池最大散热方向相反的趋势。

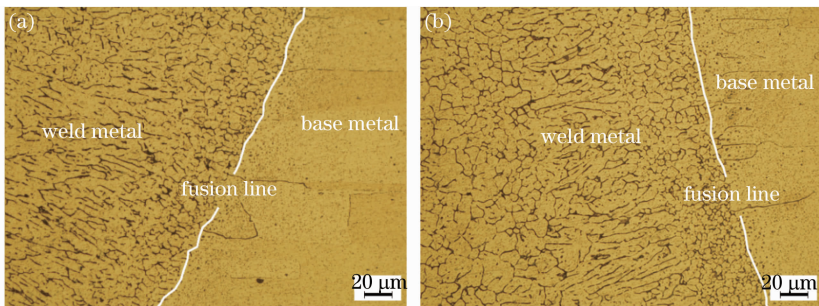


图 7 熔合线附近金相组织。(a) 焊缝上部; (b) 焊缝下部

Fig. 7 Metallographic microstructure around fusion line. (a) Upside in weld metal; (b) downside in weld metal

这种差异与激光焊接熔池中液体流动行为有关。影响小孔穿透焊熔池流动的主要因素是表面张力驱动的 Marangoni 效应以及由于冲蚀反压造成的金属蒸气喷射形成的蒸气压力^[10]。Marangoni 效应的产生是由于熔池温度由中心向边缘逐渐降

低,导致表面张力随温度的降低而增大,从而使熔池表面的液态金属由中心向边缘移动,形成回流。在小孔穿透焊模式下,金属蒸气通过深熔小孔同时向上、下两个方向喷出,熔池上方和下方均受到金属蒸气和激光热辐射的作用。蒸气压力通过小孔壁使熔

池两表面液体向熔池外边缘流动,从而增加了焊缝两表面熔宽。同时,Marangoni 效应作用于熔池两表面,在熔池上、下部分别产生对流环,从而使焊缝背部熔宽明显增加。由于对流在熔池腰部两对流环连接处最弱^[11-12],则形成如图 5 所示的束腰型焊缝。图 8 为小孔穿透焊模式下的熔池流动机制。在这种流动模式下,熔池腰部相对缓慢的流动使更多的异质形核粒子得以保留。因此,2060 铝锂合金小孔穿透焊的焊缝腰部等轴细晶区的细晶数量较多。同时,更多等轴细晶的存在也可以使柱状晶得到细化,并使柱状晶向等轴晶转化^[13]。

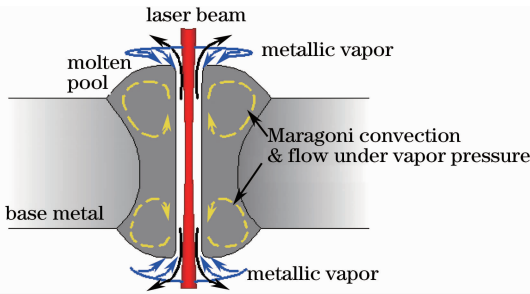


图 8 激光穿透焊接的熔池流动机制

Fig. 8 Mode of fluid flow in weld pool for laser fully penetration welding

另外,等轴细晶区的存在一方面由于速度边界层的存在导致液态金属流动缓慢从而形成异质形核空间,另一方面由于热边界层的存在导致温度较低从而保留了未熔化的异质形核质点。熔池腰部热传导较快,温度梯度较小,因此热边界层较厚。同时,在液态金属条件下,由于熔池腰部降温速率更快,其粘性系数 μ 以更大的速率增加,而速度边界层的厚度随粘性系数 μ 增加而增加,因此熔池腰部速度边界层较厚^[14]。相对于熔池上部及下部,腰部两个较厚的边界层一个提供了更大的异质形核空间,一个

保留了更多的异质形核质点,因此焊缝腰部形成的等轴细晶数量更多。

3.3 接头力学性能

激光功率为 3 kW,焊接速度为 3 m/min,送丝速度为 3 m/min 时,焊接接头横截面腰部沿水平方向的显微硬度分布如图 9 所示。焊缝区硬度较低,平均显微维氏硬度为 79.9 HV_{0.1},为母材硬度的 57.5%。焊缝边缘等轴细晶区的维氏硬度相对较高,为 95.8 HV_{0.1}。焊缝两侧的热影响区宽度约为 2.5 mm,硬度随距焊缝中心距离的增加而逐渐上升。由于铝锂合金是典型的沉淀强化型合金,激光焊接后焊缝区的时效不足与热影响区的过时效导致了明显的接头软化现象^[5]。而等轴细晶区硬度相对焊缝中心较高,这正与等轴细晶区晶粒较小的组织形态特征相符合。

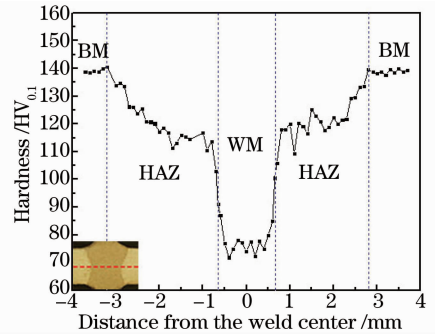


图 9 接头显微硬度分布

Fig. 9 Micro-hardness profile of laser welding joint

激光功率为 3 kW,焊接速度为 3 m/min,送丝速度为 3 m/min 时,接头平均抗拉强度为 309 MPa,约为母材的 62.0%,延伸率为 0.7%,接头均在焊缝位置断裂,典型断裂位置如图 10(a)所示。从图中可以看出接头断口轮廓与拉伸轴线方向近似成 45°,呈剪切断裂。图 10(b)为接头断口形貌,呈沿晶断裂。

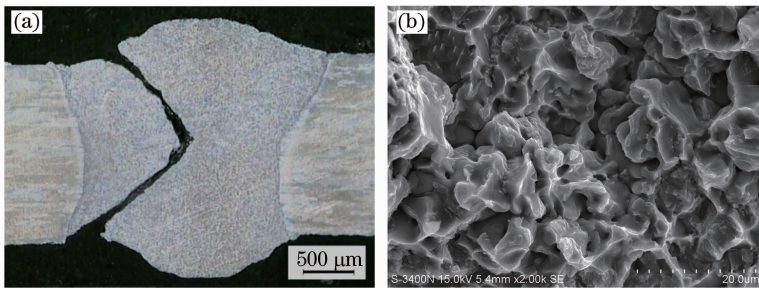


图 10 (a) 接头断裂宏观截面;(b) 断口形貌

Fig. 10 (a) Fracture macroscopic cross section; (b) fracture morphology

4 结 论

1) 填充 5087(Al-Mg-Zr)焊丝的薄板 2060-T8

铝锂合金激光焊接时,结晶裂纹敏感性随激光功率和焊接速度的增加而增加,随送丝速度的增加而降

低。适当增加送丝速度可细化晶粒,增加焊缝中共晶含量和离散分布的共晶比例,有利于及时愈合凝固过程中产生的裂纹。

2) 在小孔穿透焊模式下,熔池上、下部分别存在对流环,对流在熔池腰部最弱,使更多的异质形核粒子得以保留;另外,熔池腰部边界层相对较厚,可提供更大的异质形核空间并保留更多的异质形核质点,使焊缝腰部相比于焊缝上部及下部细晶区等轴晶数量较多且柱状晶明显细化。

3) 在激光功率为 3 kW,焊接速度为 3 m/min,送丝速度为 3 m/min 的工艺参数下,焊接接头的平均抗拉强度为 309 MPa,达到母材的 62.0%;平均断后延伸率约为 0.7%;断裂均发生在焊缝区,为沿晶断裂。

参 考 文 献

- 1 P K Gupta, N Nayan, G Nagasireesha. Development and characterization of Al-Li alloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, A420(1-2): 228-234.
- 2 Wang Haojun, Shi Chunling, Jia Zhiqiang, *et al.*. Development and current status of aluminum-lithium alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2012, 41(14): 82-85.
王浩军, 史春玲, 贾志强, 等. 铝锂合金的发展及研究现状[J]. *热加工工艺*, 2012, 41(14): 82-85.
- 3 R Muzzolini, M Niedzinski, H Ribes, *et al.*. FEA optimizes airframe panels[J]. *Advanced Materials Processes*, 2005, 163(11): 37-39.
- 4 F Vollertsen, J Schumacher, K Schneider, *et al.*. Innovative welding strategies for the manufacture of large aircraft [J]. *Welding Research Abroad*, 2005, 51(2): 1-17.
- 5 Zuo Tiechuan, Xiao Rongshi, Chen Kai, *et al.*. *Laser Materials Processing of High Strength Aluminum Alloys* [M]. Beijing:

National Defense Industry Press, 2002. 53-63.

左铁钊, 肖荣诗, 陈 铠, 等. 高强铝合金的激光加工[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 53-63.

- 6 Rongshi Xiao, Xinyi Zhang. Problems and issues in laser beam welding of aluminum-lithium alloys[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2014, 16(2): 166-175.
- 7 G D Janaki Ram, T K Mitra, M K Rajuc, *et al.*. Use of inoculants to refine weld solidification structure and improve weldability in type 2090 Al-Li alloy[J]. *Materials Science and Engineering*, 2000, A276(1-2): 48-57.
- 8 A Kostrivas, J C Lippold. Weldability of Li-bearing aluminium alloys[J]. *International Materials Reviews*, 1999, 44(6): 217-237.
- 9 Xu Fei, Chen Li, Gong Shuili, *et al.*. Microstructure and mechanical properties of Al-Li alloy by laser welding with filler wire[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, 10, 40(10): 1775-1779.
许 飞, 陈 俐, 巩水利, 等. 铝锂合金激光填丝焊接接头组织性能研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2011, 10, 40(10): 1775-1779.
- 10 T Fuhrich, P Berger, H Hügel. Marangoni effect in laser deep penetration welding of steel[J]. *Journal of Laser Applications*, 2001, 13(5): 178-186.
- 11 N Postacioglu, P Kapadia, J Dowden. A theoretical model of themocapillary flows in laser welding[J]. *Appl Phys*, 1991, 24(1): 15-20.
- 12 Yang Jing. Study on the Process Behavior and Defects Control during Laser Deep Penetration Welding of Aluminum Alloy[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011. 21-48.
杨 璟. 铝合金激光深熔焊接过程行为与缺陷控制研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2011. 21-48.
- 13 A Siqueira, A Garcia. Solidification thermal parameters affecting the columnar to equiaxed transition [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2002, 33(7): 2107-2118.
- 14 H Schlichting. *Boundary-Layer Theory* [M]. Xu Yanhou, Transl. Beijing: Science Press, 1988, 1-50: 288-354.
史里希廷. *边界层理论* [M]. 徐燕侯, 译. 北京: 科学出版社, 1988, 1-50: 288-354.

栏目编辑: 王晓琰