

激光沉积修复 ZL114A 铝合金的显微组织及显微硬度研究

钦兰云, 庞爽, 杨光, 王超, 王维

(沈阳航空航天大学 航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 辽宁 沈阳 110136)

摘要: 为了研究激光沉积技术修复 ZL114A 铝合金构件的工艺及性能, 采用多参数组合激光沉积工艺实验制备了单道单层试样, 在分析了其表面形貌、气孔等缺陷产生的原因的基础上, 得到了一组相对优化的工艺参数, 制备了无缺陷的块状修复试样, 并对试样进行了组织分析及硬度检测。结果表明: 铝合金修复试样修复区与基材形成良好的冶金结合, 沉积层底部为以熔池边缘为起点外延生长的柱状树枝晶, 且一次枝晶间距 $18.38\ \mu\text{m}$, 二次枝晶间距 $9.55\ \mu\text{m}$, 在沉积层顶层顶部出现 $\alpha\text{-Al}$ 柱状枝晶转变为等轴枝晶现象。层带区域 Si 相脱溶析出并趋于粒状化。由于晶粒细化和固溶强化作用, 沉积区显微硬度较基材提高 25.8%。

关键词: 激光沉积修复; ZL114A 铝合金; 显微组织; 显微硬度

中图分类号: TG146.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0506004

Microstructure and micro-hardness of laser deposition repair ZL114A aluminum alloy

Qin Lanyun, Pang Shuang, Yang Guang, Wang Chao, Wang Wei

(Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process,
Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: To study the process and properties of laser deposition repair (LDR) ZL114A aluminum alloy samples, the basic process experiment of multi parameter combination was accomplished by laser single-pass process, on the basis of analyzing surface features, the reasons of gas porosity, a set of optimized process parameters were obtained, and defect-free block specimens were prepared, microstructure analysis and hardness testing of the samples were carried out. Results show that the repair area and the substrate form a good metallurgical combination. $\alpha\text{-Al}$ columnar dendrites took melt pool edge as a starting point at the bottom of the deposition layer. The primary dendrites arm spacing was $18.38\ \mu\text{m}$ and the distance between dendrite crystal was $9.55\ \mu\text{m}$. On the top of the deposited layers, $\alpha\text{-Al}$ dendrite columnar crystal was changed into equiaxed dendrite microstructure. Si phase was precipitated and tended to be spheroidized in the layer band of the repaired zone. Due to the function of grain refinement and solution strengthening, the micro-hardness of the deposited area was 25.8% higher than that of the substrate.

Key words: laser deposition repair; ZL114A aluminum alloy; microstructure; micro-hardness

收稿日期: 2016-09-06; 修订日期: 2016-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(51505301, 51305280, 51375316); 辽宁省自然科学基金(2015020118)

作者简介: 钦兰云(1977-), 女, 副教授, 博士, 主要从事激光沉积成形、修复方面的研究。Email: qinly@sau.edu.cn

0 引言

ZL114A 铝合金为高强度铸造铝合金,具有良好的铸造性、流动性、焊接性、耐磨性等优点,近年来被广泛应用于航空航天、军用及民用工业等领域高性能承力构件中,如飞机、汽车发动机外壳等承受高载荷零件。铸造过程中易产生气孔、粘砂、夹砂、疏松空洞等缺陷,且制造过程中经常出现大量加工超差。就目前的研究现状来看,针对铝合金缺陷的修复方法主要有电镀、电弧焊、焊接、热喷涂、熔化极惰性气体保护焊(Metal Inert-gas Welding, MIG)等^[1],然而传统焊接技术在修复缺陷时,易形成咬边、气孔、裂纹等表面缺陷,焊接内部易造成应力集中,破坏零件疲劳强度,同时焊接接头易出现软化等问题^[2]。激光沉积修复技术(Laser Deposition Repair, LDR)因其热量集中、热输入量小等原因,近年来被广泛用于修复各类金属,如钛合金、镍基高温合金、铝合金、铁基合金、难熔合金、非晶合金等材料^[3-4];同时,激光沉积修复技术可用于修复具有形状要求的表面缺陷,且修复形状与零件损伤形状接近,减少后续加工处理。K.G Watkins 等人利用激光熔凝技术,研究了铝合金在熔凝时的显微组织和腐蚀性能^[5]。澳大利亚 W. Zhuang 等人研究表明,激光修复 7075-T651 铝合金具有良好的疲劳性能^[6]。Ehsan Toyserkani 等人早在 2000 年利用激光熔覆的方法修复了 7075 铝合金海下武器壳体部件,以提高其耐蚀性和耐磨能力^[7]。国内学者对于铝合金的激光沉积修复也进行了研究,西北工业大学王小艳等研究激光成形修复 7050 铝合金,通过优化工艺参数,研究修复后的组织和性能,消除修复过程中产生的气孔、熔覆不良、液化裂纹等缺陷^[8]。薛蕾等人利用激光成形修复技术对 ZL104 铝合金发动机缸体、缸盖等零部件进行了修复,并对其组织和性能进行了分析^[9]。

铝合金对激光的反射率高达 97%^[10],且具有高导热性和极易氧化的特性,使得铝合金的激光加工受到局限,因此国内外对于铝合金的激光沉积修复/制造相对于钛合金等其他高强合金而言较少,而研究对象多集中于 7xxx 和 4xxx 铝合金。因此,文中通过优化激光沉积修复 ZL114A 合金工艺参数,并对修复后的组织进行分析和硬度测试,以期对铸造铝合金构件的激光沉积修复提供实验数据和参考。

1 实验设备与材料

激光沉积修复 ZL114A 铝合金实验是在沈阳航空航天大学构建的 LDM-800 系统上完成,该系统由 6 kW 的 IPG 光纤激光器、数控工作台、粉末输送系统以及氩气保护箱等部分组成。试验中氩气保护箱中的氧含量控制在 0.01% 以下。

实验采用的基体材料为 ZL114A 铝合金铸件,尺寸为 100 mm×70 mm×10 mm。熔覆材料为真空等离子旋转电极法制备的 ZL104 铝合金球形粉末,粒度分布为 40~16 μm,粉末成分(质量分数,%)为 Si:8.0~10.5, Mg:0.17~0.35, Mn:0.2~0.5, Al:Bal。试验前,将 ZL104 铝合金粉末在 60 °C 真空炉中烘干 6 h;基体表面用砂纸打磨以去除氧化层,并用丙酮清洗。采用多参数组合激光沉积修复单道工艺实验对激光功率和扫描速度进行优化,并制备了多道多层表面损伤修复试样,尺寸为 40 mm×30 mm×5 mm,如图 1 所示。

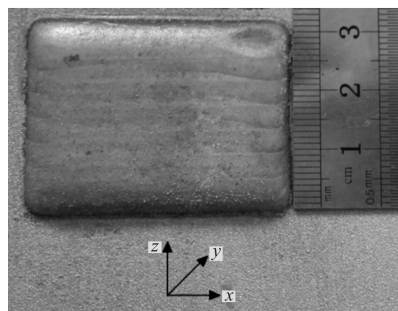


图 1 ZL114A 合金表面修复试样

Fig.1 Photo of surface repaired sample of ZL114A alloy samples

利用电火花线切割沿垂直于激光扫描方向(YOZ 截面)截取试样,经镶嵌、预磨和抛光后,金相试样采用 HF+H₂O(体积比 1:10)的腐蚀液进行腐蚀,腐蚀时间为 10~15 s。采用 OLYMPUS-GX51 型光学显微镜和 SSX-550 型扫描电镜对金相试样进行显微组织分析;利用 MPDDY2094 型 X 射线衍射仪分析相的组成;采用 HVS-1000A 型显微硬度计测定试样的显微硬度,加载载荷为 100 g,加载时间为 10 s;利用 X 射线无损方式检测试样的内部缺陷情况。

2 结果与分析

2.1 工艺参数影响分析及优化

激光沉积修复是个多因素影响的过程,工艺参

数的匹配不当会导致修复件出现诸如气孔、熔合不良等缺陷。

由于铝粉粉末密度较小,当载气量过大时,粉末从送粉嘴送出不易汇聚,造成粉量流失,粉末利用率降低;另一方面送粉载气流量要与送粉量匹配适宜,若载气流量过小,粉末无法均匀送出。综合考虑粉末颗粒及粉末密度等因素,给定送粉相关参数如下:送粉量为 2 g/min,载气压力为 0.2 MPa,载气流量 2.2 L/min,在此基础上对激光功率和扫描速度进行优化。

经查阅文献,激光沉积单道试验初步采用激光功率 P 在 1 200~2 500 W 之间;扫描速度 V_s 在 3~7 mm/s 之间,具体试验参数及其对应的表面形貌特征如表 1 所示。图 2 为激光沉积单道试样的宏观形貌。根据能量密度方程 $E = \frac{P}{VD}$ (光斑直径 D 为 3 mm) 可知,当能量密度过低时,如激光功率不足或扫描速度过大,单位质量的粉末吸收的热量少或激光对基材表面的辐射时间过短时,导致粉末熔化不彻底,部分未熔化粉末颗粒夹杂在熔池内部形成熔合不良等缺陷从而影响表面成形质量(图 2 中 1、2、10、11、12、13、14)。当能量密度过大时,沉积层出现过烧和成分烧蚀现象(图 2 中 5、6、7)^[11],且极易造成薄板样件弯曲、变形。

表 1 单道单层修复试验参数表

Tab.1 Parameters of single pass single layer sample test

Sample number	Laser power P/W	Scanning speed $V_s/mm \cdot s^{-1}$	Surface features
1	1 200	3	Spheroidization
2	1 500	3	Spheroidization
3	1800	3	Good
4	2 000	3	Good
5	2 200	3	Good
6	2 500	3	Good
7	2 500	5	Good
8	2 200	5	Good
9	2 000	5	Good
10	1 800	5	Good
11	1 500	5	Spheroidization
12	1 200	5	Spheroidization
13	2 000	7	Spheroidization
14	2 200	7	Spheroidization
15	2 500	7	Good

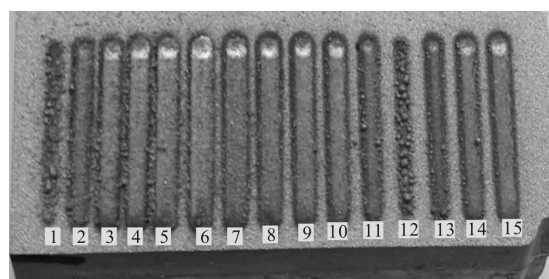


图 2 不同工艺参数下单道单层成形件外貌

Fig.2 Surface features of laser single pass sample repaired with different process parameters

图 3 为 ZL114A 单道试样沉积层熔池底部气孔缺陷照片,气孔孔径约为 75 μm 。气孔是引起断裂、冶金不良的主要原因,影响修复后试件的耐腐蚀性、耐磨损性、硬度等力学性能。产生气孔的主要原因有两个,其一是粉末吸附少许水分或者保护气体中掺杂少许水分进入到熔池,熔池底部温度梯度较大,水分受激光束加热迅速气化,气体未及时散出而残留在熔池底部。由参考文献[12]可知,该气孔属于氢气孔,而氢气孔很难自发形核,大多数氢气孔都是非自发形核形成,熔池底部的形核基底为气孔形成提供条件,这也是气孔出现在熔池底部的主要原因。其二,由于激光沉积属于急冷急热技术,加工过程中所形成的熔池体积相对于冶炼金属和铸造金属要小得多,熔池冷却速度高达 $10^2 \sim 10^6 \text{ K/s}$,进入沉积层的气体来不及溢出就形成了气孔缺陷。光学显微镜下观察发现,图 2 中 9、10、15 沉积区存在一些位于熔池底部的规则的球形或类似球形的气孔。同时,在提高加工效率的前提下(图 2 中 3、4 工艺参数效率较低),确定了优化后的激光功率为 2 200 W,扫描速度为 5 mm/s。

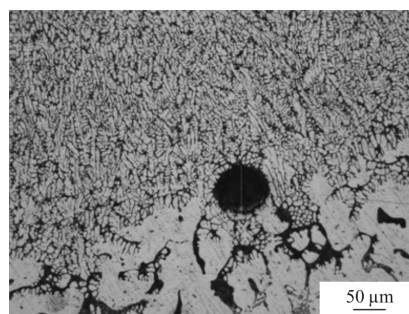


图 3 激光沉积单道修复试样气孔缺陷照片

Fig.3 Porosity defect photo of laser deposition single pass repaired sample

多道多层激光沉积试验中,相邻道间的搭接率

和 Z 轴的单层行程(ΔZ)两工艺参数的选择对工件成形精度及质量有重要影响。通常情况下,搭接率控制在 30%~40% 之间^[13]。理想情况下 ΔZ 等于单层沉积厚度,实际工艺生产中无法精确控制,通常取 ΔZ 略小于单层沉积厚度值(实际测量值约为 0.83 mm),因此取为 0.8 mm。

综合以上分析得到相对优化的激光沉积修复工艺参数:激光功率 2 200 W,扫描速度 5 mm/s,搭接率 30%~40%,Z 轴的单层行程 0.8 mm。

2.2 XRD 分析

对 ZL114A 表面修复试样的沉积层进行 X 射线衍射分析,结果如图 4 所示,表明:激光沉积修复区仅含有 Al 相和 Si 相,无其他相生成,四个明显衍射峰均为 Al 相,且 Al 相衍射强度为 Si 相 6~12 倍。

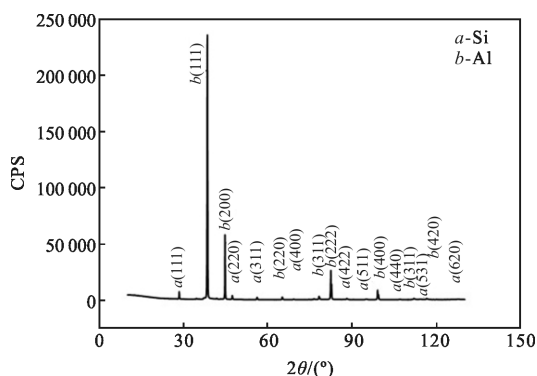


图 4 ZL114A 合金修复区 X 射线衍射谱
Fig.4 XRD patterns for the LDRed ZL114A alloy

2.3 组织分析

图 5 为激光沉积修复单道单层试样显微组织形貌,可见,基材与沉积层(修复区)形成良好的冶金结合。基材组织(图 5(a))为粗大等轴晶,粒径平均为 113 μm ,主要是由粗大 α -Al 枝晶和枝晶间 Si 相组成。结合区组织较基材略有长大,受熔池热影响作用,灰色区域 Al-Si 共晶组织先熔化,白色区域 α -Al 受热后部分熔化,快速凝固时熔融态金属发生共晶反应,Si 相作为母材中原有的脱溶相开始脱溶析出并聚集长大,图 5(b)结合区位置灰色枝晶间区域体积分数相比基材显著增多,由此共晶相含量较基材高。结合区较窄,宽度约 104 μm 。

图 5(c)为修复层中部显微组织形貌。位于修复区底部组织以熔池边缘为起点生长且具有较强烈的方向性。图中白色区域为 Al 枝晶,枝晶间区域为

Al-Si 共晶,一次枝晶间距 18.38 μm ,二次枝晶间距 9.55 μm ,在 α -Al 最初从液态析出的过程中,熔池底部与固态基材间存在强烈的温度差且热量的散失方向性强,在生长的起点上就呈现出一定的取向性。长大过程中,柱状枝晶相互融合吞并,最终在不断的熔化凝固过程后,形成方向性很强的柱状晶。

顶部组织如图 5(d)所示,由熔池底部到顶层顶部发生柱状树枝晶向等轴晶转变。由于修复区底部熔池与基材之间温度梯度较大,散热方式是以基材的热传导为主,而修复区顶部熔池以已凝固沉积层为底(此凝固层具有一定的温度),因此其温度梯度较小,但顶层散热方式是多向的,不仅向底层热传导,还向空气中散热,因此凝固速度较大。由此,修复区底部至顶部的温度梯度降低、凝固速度增大是柱状晶转变为等轴晶的主要原因。

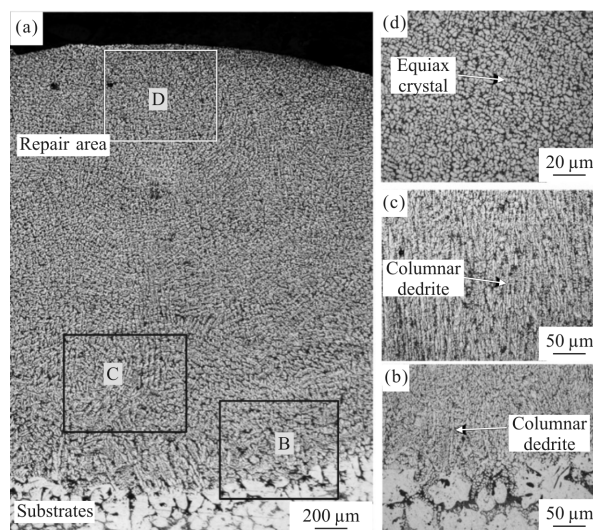


图 5 激光沉积单道试样显微组织照片,(a)宏观形貌,(b)结合区,(c)修复层中部,(d)顶层顶部

Fig.5 Microstructure of single pass by LDRed, (a) Macrograph, (b) Bonding zone, (c) Middle of repair layer, (d) Top of top layer

图 6 为激光沉积表面修复 ZL114A 试样的组织照片,图 6(c)中亮白区域为 Al-Si 共晶,黑色区域为 Al 枝晶,EDS 能谱分析结果显示,Al 枝晶中 Si 质量分数为 2.3%,Al-Si 共晶中 Si 质量分数为 30.14%,共晶反应时 Si 的质量分数为 12.5%,由此 α -Al 固溶体呈现为过饱和状态。快速凝固后大部分的 Si 元素固溶于 α -Al 固溶体中,少部分析出,片状 Si 分布于树枝晶和等轴晶 α -Al 相之间。当足够高的重熔率

重熔掉第 n 层顶部等轴晶时, 位于熔合线附近由于热影响作用, 出现层与层之间的白亮地带 (图 6(a)、(b)), 该区域宽度约 $80\ \mu\text{m}$ 。经热循环作用使该区域中部分片状 Si 出现熔断、块状化。

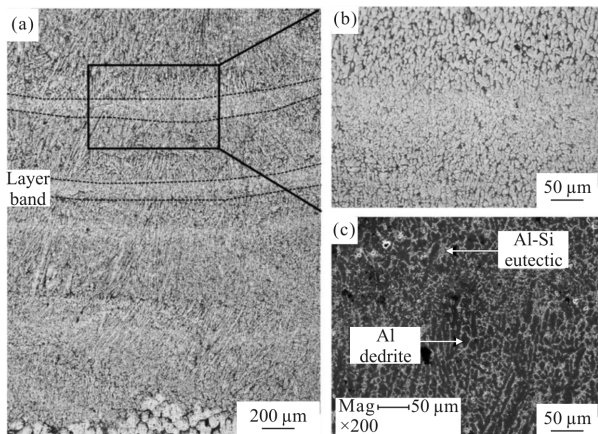


图 6 激光沉积表面修复 ZL114A 试样的组织照片, (a) 宏观形貌, (b) OM 照片, (c) SEM 照片

Fig.6 Microstructure of LDRed ZL114A alloy, (a) Macrograph, (b) OM image, (c) SEM image

由于 Si 的小平面界面的生长特征, 在过热条件影响下, 脱溶析出的 Si 相聚集并长大, 非密排面渐渐消失而出现趋于规则化的几何形状^[14], 片状、块状化 Si 相趋于粒状化。

2.4 显微硬度

图 7 为表面修复试样的显微硬度分布图, 基材硬度平均约 $60.26\ \text{HV}$, 修复区硬度平均约 $81.24\ \text{HV}$, 其硬度比基材高 25.8% 。这是因为: (1) 修复区组织较

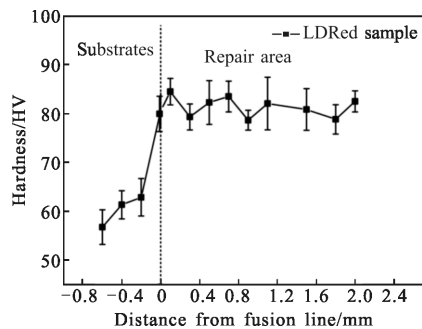


图 7 表面修复试样的显微硬度分布

Fig.7 Micro-hardness distribution of surface repaired sample

为细密, 由 α -Al 枝晶和 Al-Si 共晶构成, 而基体组织粗大, 因此组织细化是修复区硬度提高的原因之一。 (2) 激光沉积修复属于快速凝固过程, 能谱分析(EDS)结果表明 Al 枝晶中 Si 质量分数为 2.3% , Al-Si 共晶

中 Si 质量分数为 30.14% , 处于过饱和状态, 固溶强化时, 溶质元素的过固溶量更大, 固溶强化和晶粒细化强度会明显增强^[15-16]。综上所述: 固溶强化和晶粒细化是修复区显微硬度明显提高的主要原因。

3 结论

(1) 在分析给定送粉量、载气压力、搭接率等工艺参数基础上, 对激光功率和扫描速度进行优化, 综合考虑表面形貌、内部质量及沉积效率, 确定了相对优化的激光功率为 $2\ 200\ \text{W}$, 扫描速度为 $5\ \text{mm/s}$ 。

(2) X 射线衍射检测表明修复区中仅有 Al 相和 Si 相, 无其他相生成。修复区由 Al-Si 共晶和以熔池边缘为起点生长的 α -Al 柱状树枝晶组成, 顶部出现柱状树枝晶向等轴晶转变。修复区 α -Al 固溶体呈现为过饱和状态, 热影响作用使层带区 Si 相趋于粒状化。

(3) 基材硬度约 $60.26\ \text{HV}$, 修复区硬度约 $81.24\ \text{HV}$, 由于固溶强化和细晶强化作用, 修复区硬度比基材高 25.8% 。

参考文献:

- [1] Casalino G, Mortello M, Paola Leo, et al. Study on arc and laser powers in the hybrid welding of AA574 Al-alloy [J]. *Materials and Design*, 2014, 61: 191-198.
- [2] Ma Siqun, Gu Lixiang, Yuan Yongwen, et al. Research on influence of welding defects on fatigue life of EMU aluminum-alloy car body [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2014, 36(2): 42-48. (in Chinese)
马思群, 谷理想, 袁永文, 等. 焊接缺陷对动车组铝合金车体疲劳寿命影响研究[J]. 铁道学报, 2014, 36(2): 42-48.
- [3] Lin Xin, Huang Weidong. High-performance laser gain material of metal components manufacturing [J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2015, 45(9): 1111-1126. (in Chinese)
林鑫, 黄卫东. 高性能金属构件的激光增材制造[J]. 中国科学: 信息学, 2015, 45(9): 1111-1126.
- [4] Wang Huaming. Materials fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(10): 2690-2698. (in Chinese)
王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造: 若干材料基础问题[J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2690-2698.
- [5] Watkins K G, McMahon M A, Streen W M. Microstructure and corrosion properties of laser surface processed aluminium

- alloys: a review [J]. *Materials Science and Engineering A*, 1997, 231(1-2): 55-61.
- [6] Zhuang W, Liu Q, Djugum R, et al. Deep surface rolling for fatigue life enhancement of laser clad aircraft aluminium alloy[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 320: 558-562.
- [7] Ehsan Toyserkani, Stephen Corbin, Amir Khajepour. Laser Cladding[M]. New York: CRC Press, 2005.
- [8] Wang Xiaoyan, Chen Jing, Lin Xin, et al. Microstructure of laser forming repair 7050 aluminum alloy with AlSi12 powder [J]. *Chinese of Journal of Lasers*, 2009, 36(6): 1585-1590. (in Chinese)
王小艳, 陈静, 林鑫, 等. AlSi12 粉激光成形修复 7050 铝合金组织[J]. 中国激光, 2009, 36(6): 1585-1590.
- [9] Xue Lei, Huang Yixiong, Lu Penghui, et al. Study on microstructure and property of laser forming repaired ZL104 alloy[J]. *China Surface Engineering*, 2010, 23(1): 97-100. (in Chinese)
薛蕾, 黄一雄, 卢鹏辉, 等. 激光成形修复 ZL104 合金的组织与性能研究[J]. 中国表面工程, 2010, 23(1): 97-100.
- [10] Zuo Tiechuan. Laser Material Processing of High Strength Aluminum Alloy [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 2-10. (in Chinese)
左铁钊. 高强铝合金的激光加工[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 2-10.
- [11] Chen Xiaoming, Song Renguo, Zhang Yu, et al. Effects of overfire on microstructure and properties of 7003 aluminum alloy[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2009, 37(2): 48-52. (in Chinese)
陈小明, 宋仁国, 张宇, 等. 过烧对 7003 铝合金组织与性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2009, 37(2): 48-52.
- [12] Zhou Wansheng, Yao Junshan. The Welding of Aluminium and Aluminium Alloy [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 40-46. (in Chinese)
周万盛, 姚军山. 铝及铝合金的焊接 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 40-46.
- [13] Huang Weidong. Laser Solid Forming [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007: 57-60. (in Chinese)
黄卫东. 激光立体成形 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007: 57-60.
- [14] Shi Lei, Wang Youqi, Wang Ying, et al. Effect of solution treatment on microstructure and mechanical properties of quasi eutectic Al-Si Alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, 22(12): 3372-3377. (in Chinese)
石磊, 王有祁, 王英, 等. 固溶处理对准共晶 Al-Si 合金显微组织及力学性能影响 [J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(12): 3372-3377.
- [15] Chen Yongcheng, Zhang Shuquan, Tian Xiangjun, et al. Microstructure and microhardness of 4045 aluminium alloy fabricated by laser melting deposition. [J]. *Chinese of Journal of Lasers*, 2015, 42(3): 0303008. (in Chinese)
陈永城, 张述泉, 田象军, 等. 激光熔化沉积 4045 铝合金显微组织及显微硬度[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303008.
- [16] Wang Aiqin, Xie Jingpei, Liu Zhongxia, et al. Microstructure and phase structure of rapidly solidified Al-Si alloy [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2008, 29(2): 99-102. (in Chinese)
王爱琴, 谢敬佩, 刘忠侠, 等. 快速凝固 Al-Si 合金的组织形态及相结构[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(2): 99-102.