

激光成形修复 ZL104 合金的组织与性能研究*

薛 蕾¹, 黄一雄², 卢鹏辉¹, 陈 静¹, 林 鑫¹, 黄卫东¹

(1.西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 西安 710072; 2.中国人民解放军第 5719 工厂, 四川 彭州 611936)

摘 要: 激光成形修复 ZL104 合金的修复区组织由 α -Al 和 α -Al+Si 共晶组织构成, 熔池底部组织由列状 α -Al 枝晶构成, 中部和顶部组织由 α -Al 等轴晶和枝晶间 α -Al+Si 共晶组织构成, 观察到的气泡多封存在熔池底部的 α -Al 列状枝晶层中。基体区组织由粗大的 α -Al 枝晶和 α -Al+Si 共晶构成, 观察不到明显的热影响区。从修复区向基体区过渡, 硬度值呈减小趋势。修复试样拉伸测试中, 断裂均发生在铸件基体处, 表明激光修复区的强度高于所修复的铸件材料。

关键词: 激光成形修复 (LFR); ZL104; Al-12Si (%); 微观组织; 拉伸性能

中图分类号: TG 142

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2010)01-0097-04

Study on Microstructure and Property of Laser Forming Repaired ZL104 Alloy

XUE Lei¹, HUANG Yi-xiong², LU Peng-hui¹, CHEN Jing¹, LIN Xin¹, HUANG Wei-dong¹

(1. Northwestern Polytechnical University, State Key Laboratory of Solidification Processing, Xi'an 710072; 2. No.5719 Factory of the Chinese People's Liberation Army, Peng Zhou 611936)

Abstract: In the present paper, ZL104 was repaired by Laser Forming Repair (LFR). Microstructure of laser repaired zone(LRZ) was composed by α -Al and α -Al+Si eutectic, epitaxial α -Al dendritic distributed in the bottom region of molten pool and α -Al equiaxed dendrites and α -Al+Si eutectic distributed in top region of molten pool. The porosities observed almost all embedded in the α -Al dendritic belts located in the bottom of molten pool. Microstructure of substrate zone(SZ) is composed by α -Al and α -Al+Si eutectic, and heat affected zone (HAZ) is hard to be figured out. Hardness value decreased from LRZ to SZ. Fractures were observed on casting substrate during tensile test, which showing that the strength of laser repaired zone is higher than that of casting substrate.

Key words: laser forming repair (LFR); ZL104; Al-12Si (%); microstructure; tensile properties

0 引 言

ZL104 铝合金是一种具有耐磨性能好、线膨胀系数小、体积稳定性好、导热能力强等特点的铸造铝合金^[1], 是制造发动机的理想材料, 目前已经在汽车发动机的缸体、缸盖、飞轮制造中获得广泛的应用^[2]。零件某些部位经过长时间使用后易产生磨损, 造成超差报废。对于磨损超差, 现有的修复手段多采用 TIG 焊, 但是由于 TIG 焊热输入大, 易在修复区产生气孔, 影响零件本体的组织和造成零件变形, 致使有些精密零件和薄壁零件无法进行修

复。激光成形修复 (LFR) 技术由于其自动化程度高、热输入小、修复区性能优异等特点为精密、薄壁铝合金的修复提供了一条可行途径。文中拟通过对 ZL104 铝合金的激光成形修复进行研究, 考察激光成形修复件不同区域的组织分布特征及形成规律, 并对合金修复后的力学性能进行评价。

1 试 验

文中的激光成形修复试验是在西北工业大学凝固技术国家重点实验室自制的 LFR-M1 型激光成形修复系统上完成的。激光成形修复系统由 300 WYAG 固体脉冲激光器、六轴机器人、高精度送粉系统、气氛控制系统等组成。激光加工参数为: 电流 90 A; 频率 35 Hz; 光束扫描速度 4 mm/s; 送粉

收稿日期: 2009-12-14; 修回日期: 2009-12-28

基金项目: *凝固技术国家重点实验室自主研究课题 (No. 16-TZ-2007)

项目资助, 中国博士后科学基金资助项目 (20090451394) 资助

作者简介: 薛蕾(1980—), 男(汉), 郑州市人, 博士后。

率 3 g/min; 加工点光斑直径 1 mm; 搭接率 40 %; 离焦量 0。

试验用修复材料 AlSi12 合金粉末为雾化法制备的球形粉, 粉末颗粒尺寸在 40~160 μm 。修复过程在气氛保护箱中进行, 气氛氧含量小于 10×10^{-6} , 以防止铝合金发生氧化。保护气和载粉气均采用纯氩。

修复基体为 ZL104 合金铸件, 采用线切割制备带预置缺陷槽的修复试样 2 个, 修复试样厚度为 2 mm, 缺陷槽深度为 1 mm, 宽 3 mm。修复试样在 70 $^{\circ}\text{C}$ 8 % 的 NaOH 溶液中浸泡 3 min, 然后在 30 % 的 HNO_3 溶液中浸泡直到表面恢复金属亮色, 最后用清水冲洗、烘干。随后在处理好的修复试样上进行激光成形修复试验, 修复后试样如图 1(a)所示。

修复后试样用线切割进行切分, 经镶嵌、打磨、抛光后, 采用适合于铝合金显微组织观察的腐蚀液 (2.5 mL HNO_3 , 1.5 mL HCl , 1 mL HF , 100 mL H_2O), 制备金相组织观察样品。利用 OLMPUS 光学显微镜观察金相组织。在 HBV-30A 型数字显示式布维硬度计进行硬度测试, 加载载荷为 100 g, 加载时间为 20 s。在 INSTRON11-96 电子拉力实验机上对 2 个激光成形修复试样及 1 个同批 ZL104 铸件试样拉伸实验, 最大载荷 15 吨, 加载速度 2~5 mm/min, 拉伸试样尺寸如图 1(c)示, 图 1(b)为拉断后的试样。

2 组织分析

激光成形修复的 ZL104 试样截面宏观形貌如图 2 所示, 修复区组织细密且分布均匀, 熔覆层的层与层之间冶金结合良好, 修复区内能观察到直径介于 5~50 μm 的球形气孔。修复区与铸件基体实现了良好的冶金结合, 组织自熔合线向基体方向基本保持均匀, 无明显的热影响区。

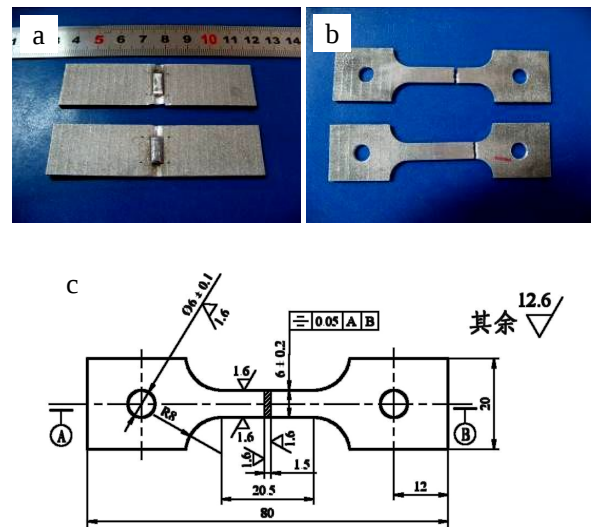


图 1 激光修复预置槽缺陷的修复试样及拉伸试样尺寸
Fig.1 The dimensions of the LFR sample and tensile sample

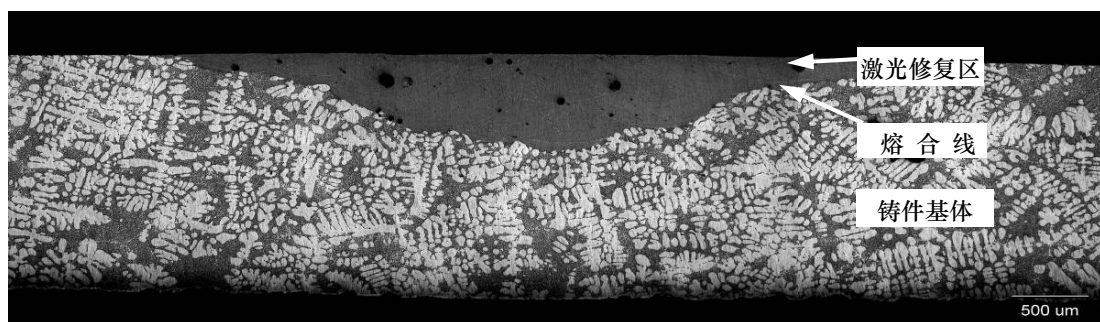


图 2 激光成形修复 ZL104 合金试样截面宏观形貌
Fig.2 Overview of LFR ZL104 sample cross-section

试样截面微观组织如图 3 所示。从图 3(a)中可以看出, 修复区与基体结合很好, 无冶金缺陷。图 3(b)给出了熔合线区域的组织, 熔合线近基体区组织完全一致。熔合线近修复区组织与修复区组织一致。修复区组织如图 3(c)所示, 同样是由 $\alpha\text{-Al}$ 枝晶和 $\alpha\text{-Al}+\text{Si}$ 共晶构成, 但是 $\alpha\text{-Al}$ 枝晶尺寸非常小, 在熔池底部, $\alpha\text{-Al}$ 枝晶紧密排列的形成外延生长的列状枝晶层, 沿温度梯度方向由熔池底部向熔

池顶部延伸。激光成形修复过程中, 高能密度的激光束快速扫描铸件基体的表面使表面一薄层及熔覆粉末熔化并在极快的冷却速度下凝固, 由于激光熔池中的液相和底部的固相接触, 并且固液界面前沿存在很大的正温度梯度, 因此凝固过程中, 修复区组织直接从铸件基体外延生长, 呈现强制定向枝晶生长, 形成图 3(c)中观察到的紧密排列的 $\alpha\text{-Al}$ 枝晶组织形貌。但由于从激光熔池底部到顶部, 温

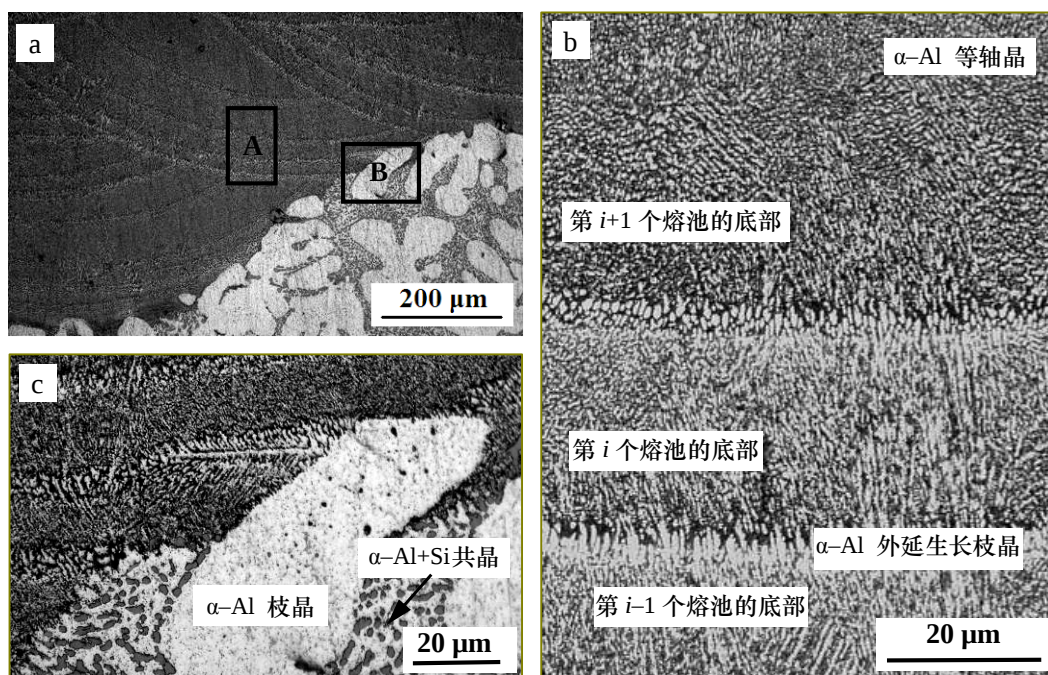


图 3 激光成形修复 ZL104 合金试样的组织分布形貌 (a) 试样截面局部形貌

(b) A 区-熔合线区微观组织 (c) B 区-修复区微观组织

Fig.3 Microstructural distribution of laser forming repaired sample (a) partial microstructure of LFR sample cross-section (b) A-microstructure close to melting line (c) B-microstructure of LRZ

度梯度逐渐减小,而凝固速度逐渐增大,同时,温度梯度的方向由底部垂直扫描方向逐渐转变为顶部的接近甚至平行扫描方向,柱状晶生长将向等轴晶生长转变,发生柱状晶/等轴晶生长转变(Columnar to Equiaxed Transition, CET),因此在熔池顶部观察到 α -Al 等轴晶组织。

需要指出的是,试验中使用的是脉冲激光器,激光脉冲频率为 35 Hz,当激光脉冲形成第 i 个熔池并停光后,熔池会迅速冷却并凝固,同时激光头沿扫描方向以既定扫描速率移动一个微小距离,下一个脉冲形成第 $i+1$ 个熔池时,第 $i+1$ 个熔池尾部叠加于已凝固的第 i 个熔池,并重熔第 i 个熔池的顶部区域,随着修复过程的进行,熔池与熔池不断叠加,修复区沿激光扫描方向的组织将形成如图 4 所示的熔池叠加效应,因此在修复区垂直于激光扫描方向某一截面的组织中(图 3(a)),某一熔池宽度范围内能观察到多个熔池底部。

3 气孔的分布与形成

光学显微镜下观察可以发现,ZL104 铝合金激光成形修复件内部存在一些规则的球形或类球形的气孔。气孔在修复件内部的分布具有一定的规律

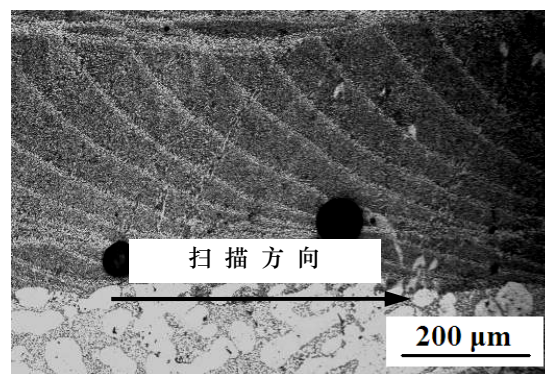


图 4 沿激光扫描方向修复区组织形貌

Fig.4 Microstructure of LFR following scanning direction

性,基本分布于列状枝晶层带结构中,即熔池底部,如图 5 所示。

分析原因,气孔主要是由粉末表面吸附的水分及保护气氛中残余的水分进入熔池造成的。其他研究表明^[3],铝合金焊缝中的气孔成分主要是氢气,文中所发现的气孔也应属于氢气孔。由于熔池中的氢气泡自发形核非常困难,绝大多数气泡是通过非自发形核的方式形成^[4],因此熔池内部形成气泡的难度较大,而熔池底部提供的形核基底更有利于气泡析出及长大件。同时由于激光所形成的熔池冷却

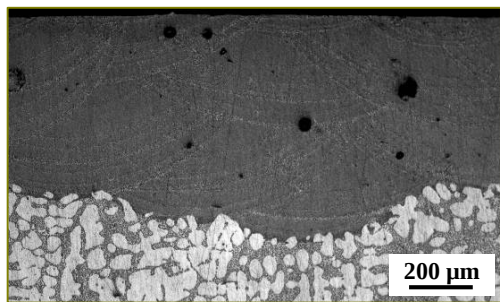


图 5 激光成形修复熔覆层内气孔分布

Fig.5 Distribution of porosities in LFR deposition

速率较大,最快凝固时间仅为 $10^{-3} \sim 10^{-9} \text{s}$ ^[5],因此自熔池底部析出的气泡没有足够的时间上浮,最后以气孔的形式被封存在熔池底部的枝晶层带组织中。

严格控制粉末材料、修复区表面及保护气氛中的水含量,可以减少气孔的形成。

4 力学性能

激光成形修复的关键问题是修复后零件的性能能否满足使用要求,因此对修复件进行力学性能研究就非常重要。修复件力学性能与基体区、熔合线区与修复区组织密切相关,是这三个区域性能的综合体现。从图 6 中可以看到,修复区硬度较高,而基体区硬度较低,熔合线附近的硬度介于二者之间。根据前文可知,修复区填充材料为 Al-Si12,其 Si 含量高于基体,且修复区组织由非常细小且致密的 α -Al 枝晶组织构成,而基体区的组织相对粗大,因此综合体现的结果为从修复区向基体区过渡,硬度值呈减小趋势。

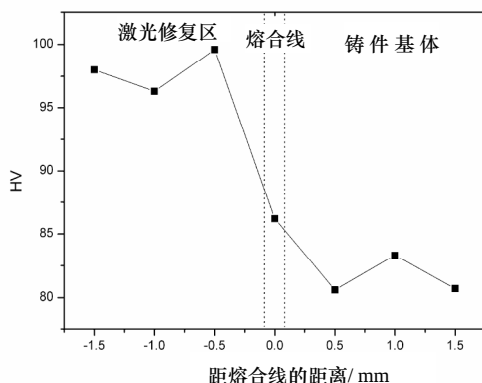


图 6 激光成形修复试样显微硬度分布

Fig.6 Micro-hardness distribution of LFR sample

组织及相应的硬度分布的不均匀性会影响最终激光成形修复件的力学性能,因此需要考察修复后零件的力学性能。将修复试样与同批铸件进行室

温拉伸试验对比(表 1 所示),可以发现修复试样的抗拉强度为 189~220 MPa,屈服强度为 151~171 MPa,且断裂均发生在铸件基体处,说明修复处的强度高于同批铸件,与硬度分布趋势所反映的情况相一致,均是由激光修复区极其细小的组织与铸件基体区粗大组织的差异所决定的。

表 1 修复试样及同批铸件试样的拉伸性能

Table 1 Tensile strength comparison between LFR samples and as-cast substrate material samples

类型	拉伸强度	
	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$
同批铸件	192	152
LFR-1	189	151
LFR-2	220	171

5 结 论

(1) 基体区组织由 α -Al 枝晶和 α -Al+Si 共晶构成,观察不到明显的热影响区。修复区组织由 α -Al 枝晶组成,在熔池底部, α -Al 枝晶紧密排列的形成外延生长的列状枝晶层,沿温度梯度方向由熔池底部向熔池顶部延伸,熔池顶部由 α -Al 等轴晶构成。

(2) 由于熔池底部提供的形核基底更有利于气泡析出,且熔池内冷却速度较大,因此观察到的气孔封存在熔池底部的枝晶层带中。

(3) 修复试样的抗拉强度为 189~220 MPa,屈服强度为 151~171 MPa,且断裂均发生在铸件基体处,其强度达到甚至超过同批铸件的实测值。

参考文献:

- [1] 王东辉,李建国,郑燕康,等. ZL104 合金在铸态及热处理状态下耐蚀性的比较 [J]. 稀有金属, 2002, 26(5): 376-379.
- [2] 刘倩. ZL104 铝合金的铸造工艺规程 [J]. 湖南工程学院学报, 2005, 15(3): 38-40.
- [3] 周万盛,姚君山. 铝及铝合金的焊接 [M]. 北京: 机械工业出版社: 2007. 40-45.
- [4] 耿浩然,滕新营,王艳,等. 铸造铝、镁合金 [M]. 北京: 化学工业出版社. 2007. 42-44.
- [5] 陈光,傅恒志. 非平衡凝固新型金属材料 [M]. 北京: 科学出版社. 第二版: 2005. 64-65.

作者地址: 西安市西北工业大学 543 信箱

710072

凝固技术国家重点实验室

Tel: 15929552699

E-mail: xuenwpu@gmail.com