

激光沉积修复 ZL114A 铝合金组织和力学性能分析

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 采用激光沉积修复技术修复预制槽损伤拉伸试样,通过光学显微镜和扫描电子显微镜对修复试件的显微组织、拉伸断口及断口附近变形组织进行分析观察。结果表明,修复区组织由 Al 枝晶和枝晶间 Al-Si 共晶组成, Si 相呈珊瑚状形貌;修复占比为 10% 和 20% 的试件的室温抗拉强度分别达到了铸件标准的 90% 和 88%, 断后伸长率均优于铸件标准;基材区断裂机制为脆性断裂,而修复区为韧性断裂;基材区微裂纹断裂方式为穿晶断裂,而修复区为沿晶断裂。

关键词 激光技术; 激光沉积修复; ZL114A 铝合金; 显微组织; 拉伸性能; 断裂机制

中图分类号 TG146.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1202009

Microstructure and Mechanical Property Analysis of ZL114A Aluminum Alloy Repaired by Laser Deposition

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, Liaoning 110136, China

Abstract The laser deposition repair technology is used to repair the tensile specimen with pre-damage and the microstructure, tensile fracture and its neighboring deformation structure are examined and analyzed by the optical microscope and scanning electric microscope. The results show that the microstructure at repaired zone is composed of Al dendrites and Al-Si eutectic whose Si-phase presents Coral-like morphology. The tensile strengths at room temperature of specimens with repair-ratios of 10% and 20% can reach up to 90% and 88% of the casting standard and their elongation rates are both superior to the casting standard; the fracture mechanism at substrate zone is brittle-fracture type, while that at repair zone is ductile-fracture type; the fracture mode for micro-fractures at substrate zone is transgranular, while that at repair zone is granular.

Key words laser technique; laser deposition repair; ZL114A aluminum alloy; microstructure; tensile property; fracture mechanism

OCIS codes 140.3390; 350.3850; 160.3900

1 引言

Al-Si-7Mg(7%指对应组分的质量分数,下同)铝合金即 ZL114A 铝合金,属于高强度铸造 Al-Si 系亚共晶合金,具有优良的铸造性能和综合力学性能,广泛应用于汽车、航空航天等承受高载荷的结构件中^[1]。ZL114A 铝合金在零件铸造、精加工及零件服役过程中会出现孔洞、裂纹、磨损等损伤,如果将受损零件直接报废,无疑会增加成本,因此能够带来巨大经济效益的修复技术得到越来越多的关注^[2]。激光沉积修复技术(LDR)是一种以激光熔覆和快速成形技术为基础,以修复损伤零件为目的,使熔覆粉末与基材形成良好的冶金结合的技术^[3-4]。目前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、惰性气体保护焊(MIG)等^[5],然而传统焊接技术易形成咬边、气孔、裂纹等表面缺陷,焊接接头易出现软化等问题^[6]。与其他

收稿日期: 2016-07-26; 收到修改稿日期: 2016-09-23

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,博士,副教授,硕士生导师,主要从事激光沉积制造和修复技术方面的研究。

E-mail: qinly@sau.edu.cn

修复技术相比,激光沉积修复技术因其热量集中、热输入量小等特点,近年来广泛用于各类金属修复,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^[7-8]。激光沉积修复铝合金的组织 and 力学性能相比于其他修复技术(如焊接、氩弧焊等)具有明显不同,电弧焊接头强度不及母材一半,激光-电弧焊接头抗拉强度仅为铸件标准的 69%左右^[9]。YAG-MIG 复合焊接 ZL114A 铝合金的接头抗拉强度为铸件标准的 74%~77%^[10]。Durandet 等^[11]采用 Al-12Si 粉末对 7075 铝合金的激光熔覆修复进行了研究,分析了工艺参数对熔覆特性的影响。Zhuang 等^[12]的研究表明,激光修复 7075-T651 铝合金具有良好的抗疲劳性能。郭永利等^[13]研究了激光熔覆修复超高强 7050 铝合金的工艺,结果表明修复试件力学性能达到基材试样的 90%以上,其断裂方式为韧窝和准解理相结合的混合型断裂。王小燕等^[14]利用不同粉末修复 7075 铝合金,并研究了修复组织及其性能。陈永城等^[15]研究了激光熔化沉积 4045 铝合金,阐述了沉积层不同区域 Si 相的形貌演化,分析了等温热处理后不同保温时间下沉积层硅相的分布形态。

目前,在激光沉积领域,因铝合金的高反射性和高导热性,铝合金的激光加工受到局限。激光沉积修复 ZL114A 沉积层组织缺陷(如易形成氢气孔)形成的机理尚未明晰,沉积层组织在不同热条件下形成和演化机制尚缺乏深入研究,对于拉伸断裂机制,特别是共晶 Si 形貌与断裂行为的内在联系等问题均需深入研究。本文研究了 ZL114A 铝合金的激光沉积修复,分析了修复试件的拉伸性能以及拉伸断口的亚表面形貌特征,为铸造铝合金构件的激光沉积修复提供了实验数据和参考。

2 实验方法和材料

ZL114A 铝合金的激光沉积修复实验在沈阳航空航天大学建立的 LDM-800 系统上完成,该系统由 6 kW 光纤激光器、悬臂式三轴运动系统、双料仓送粉系统、气体循环净化系统以及氩气保护箱等组成。实验中氩气保护箱中氧的体积分数在 1×10^{-4} 以下。

实验所用基材为热处理态 ZL114A 铝合金铸件。熔覆材料为真空等离子旋转电极法制备的 ZL114A 合金球形粉末,粒度分布为 40~160 μm ,其化学成分如表 1 所示。实验前将 ZL114A 金属粉末在 60 $^{\circ}\text{C}$ 真空炉中烘 6 h。根据 ZL114A 合金零件的铸造气孔、裂纹等缺陷的尺寸特点,将常见的损伤规则化为槽状,ZL114A 拉伸试样取样示意图如图 1 所示。图 2 为棒状拉伸试样尺寸图,其中槽底部宽 2 mm;修复占比为 10%时,槽顶宽 D 为 10.2 mm,槽高度 H 为 4.1 mm;修复占比为 20%时,槽顶宽 D 为 11.4 mm,槽高度 H 为 4.7 mm;坡度角为 45° 。

表 1 ZL114A 铝合金粉末成分(质量分数,%)

Table 1 Compositions of ZL114A aluminum alloy powder (mass fraction, %)

Element	Si	Mg	Ti	Al
Content	6.5-7.5	0.45-0.6	0.1-0.2	Bal.

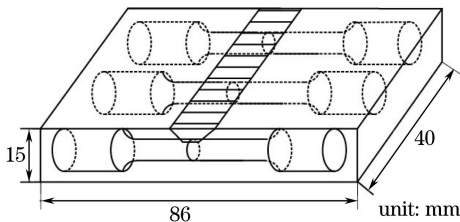


图 1 激光沉积修复预制损伤 ZL114A 拉伸试样取样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling laser deposition repaired ZL114A tensile specimen with pre-damage

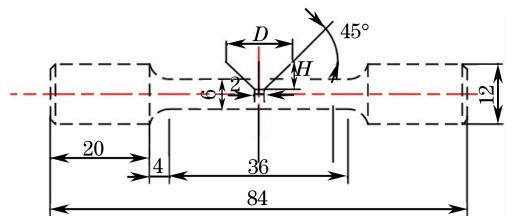


图 2 激光沉积修复 ZL114A 铝合金棒状拉伸试样尺寸图

Fig. 2 Dimensions of tensile specimen of laser deposition repaired ZL114A aluminum alloy

激光沉积修复实验扫描方式如图 3 中箭头所示,沉积方向为 Z 向,采用工艺参数如下:激光功率 2200 W,扫描速度 5 mm/s,送粉速度 2 g/min,搭接率 45%~55%,光斑直径 3 mm,单道成形宽度 2 mm,分层厚度 0.8 mm,载气流量 2.2 L/min。基材表面用砂纸打磨以去除氧化层,并用丙酮清洗后备用。金相试样包括修复预制损伤金相试样和断口金相试样(其中断口金相试样是沿修复部分垂直断面取样),经镶

嵌、打磨和抛光后腐蚀,腐蚀时间为 10~15 s(深腐蚀时腐蚀时间为 35 min)。采用光学金相显微镜(OM)以及扫描电子显微镜(SEM)对金相试样和断口组织进行分析;利用 Image-Pro Plus 图像软件统计 Al 枝晶的体积分数;采用英国 INSTRON-5982 电子万能试验机测试修复试样的室温拉伸性能;试件拉伸时采用位移控制,加载速率为 2 mm/min。

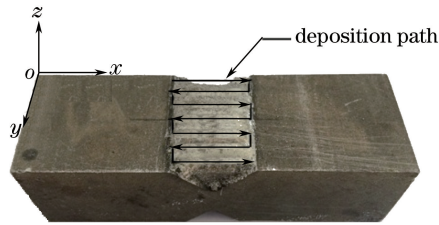


图 3 激光沉积修复 ZL114A 试样

Fig. 3 Laser deposition repaired ZL114A specimen

3 实验结果及讨论

3.1 组织及成分分析

图 4 为激光沉积修复 ZL114A 铝合金试样的显微组织,修复试样由底部铸件基材区,中部结合区和顶部激光沉积修复区三部分组成。修复区与基材形成良好的冶金结合,结合区较窄,约为 80~100 μm。

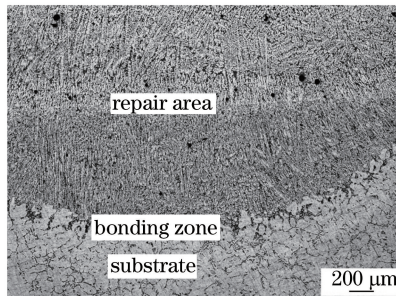


图 4 激光沉积修复 ZL114A 铝合金显微组织

Fig. 4 Microstructure of laser deposition repaired ZL114A aluminum alloy

图 5 为激光沉积修复 ZL114A 铝合金不同区域显微组织 OM 照片。图 5(a)基材区为 ZL114A 铸造铝合金,主要由粗大 α-Al 枝晶和枝晶间析出相共晶 Si 组成,析出相位于 α-Al 枝晶晶界处,如图 5(a)所示。修复区底部组织是位于熔池底部以熔池的边缘为起点进行外延生长的柱状树枝晶组织,如图 5(b)所示。其中白色区域为 Al 枝晶,枝晶间区域为 Al-Si 共晶,一次枝晶间距约为 17.3 μm,二次枝晶间距约为 6.2 μm。在熔池的作用下,基材中的 Al-Si 组织熔化,当 α-Al 部分熔化时,熔池底部形成粗糙的液/固界面,新的枝晶以未熔化的 α-Al 为基点,逆着热流方向,近似平行于熔合线法线生长。图 5(c)为修复区中部显微组织,与修复区底部相同,是典型的定向凝固柱状树枝晶组织。每一沉积层顶部出现了柱状晶向等轴晶的转变,形成原因主要是低温度梯度和高凝固速度^[14]。如图 5(d)所示,修复区顶部组织为极细小的完全等轴晶,这是由于熔池顶部向空气散热加剧,温度梯度方向接近甚至是平行于扫描方向,温度梯度最小且凝固速度最大,熔池内近似均匀形核,晶核在各个方向生长速率趋于一致,因此凝固时容易形成等轴晶。

根据凝固学原理,亚共晶合金平衡凝固过程中首先析出初生 α-Al,当温度降低至 577 °C 时发生共晶反应析出 Al-Si 共晶组织,因此凝固后组织为初生 α-Al 和 Al-Si 共晶。由于 Si 相呈各向异性,且铝硅间具有较低的界面能,同时 Al-Si 共晶属于非规则共晶,因此共晶硅形貌为典型的片层组织,有关片状 Si 相的生长机制已有大量研究,片状 Si 相主要以固有台阶侧向生长为主,且其晶粒生长方向为(111)晶面的〈211〉方向^[16-17]。激光沉积修复 ZL114A 铝合金修复区 Si 相 SEM 图如图 6(a)中白色区域所示。由于激光沉积急冷急热的特点,在快速凝固时,其冷却速度高达 10²~10⁵ K/s,这种凝固行为属于近快速凝固。随着冷却速度的增加,其过冷度增大,Si 相的小平面生长特征减弱,部分棒状硅在片层共晶硅组织上生长;又因(111)晶面

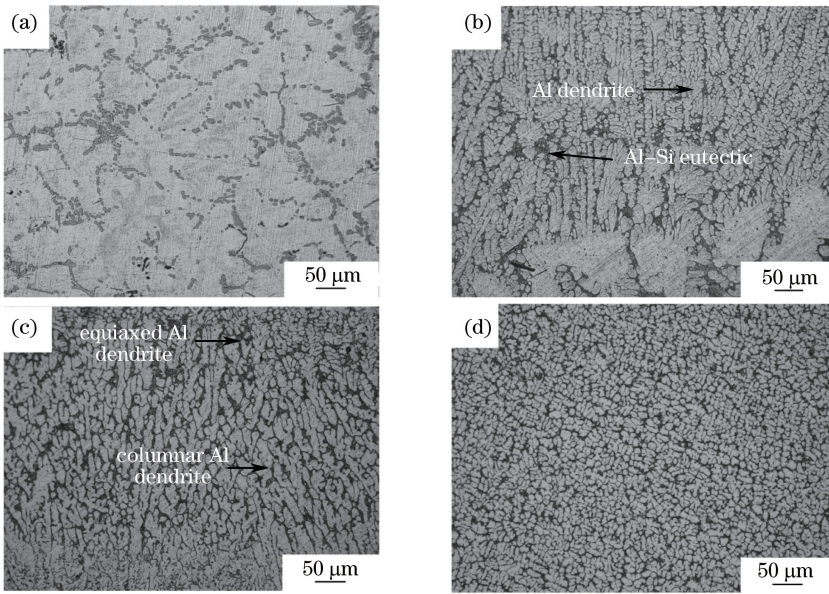


图 5 激光沉积修复 ZL114A 铝合金不同区域处的显微组织形貌。(a) 基材; (b) 修复区底部; (c) 修复区中部; (d) 修复区顶部

Fig. 5 Microstructure morphologies of different regions of laser deposition repaired ZL114A aluminum alloy.

(a) Substrate; (b) repair zone at the bottom; (c) repair zone in the middle; (d) repair zone at the top

的〈211〉方向生长速度受到抑制,其他方向上具有较大生长速度, Si 相转变为连续生长机制,呈分枝生长结构,在扫描电镜下呈现密集珊瑚状立体形貌,深腐蚀照片如图 6(b)所示。

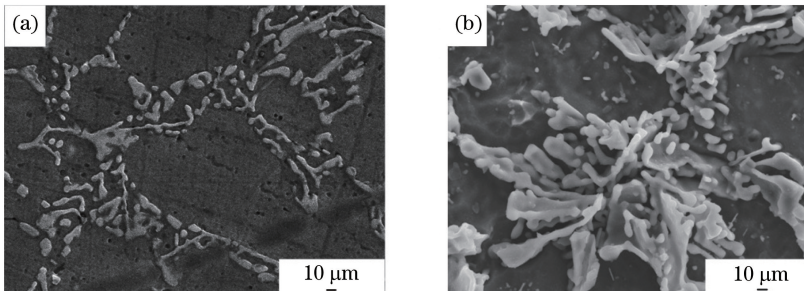


图 6 激光沉积修复 ZL114A 铝合金沉积层中部 Si 相的 SEM 照片。(a) 未深腐蚀; (b) 深腐蚀

Fig. 6 SEM images of Si-phase in the middle of deposition layer of laser deposition repaired ZL114A aluminum alloy.

(a) No deep-etch; (b) with deep-etch

表 2 为基材、激光沉积修复区和沉积用粉末的成分分析测试结果。激光沉积修复区各元素成分均达到基材的技术标准。

表 2 ZL114A 铝合金样品及粉末成分测试结果(质量分数,%)

Table 2 Component content of ZL114A aluminum alloy sample and powder (mass fraction, %)

Parameter	Si	Mg	Ti	Cu	Zn	Mn	Be
Substrate	6.5-7.5	0.45-0.75	0.08-0.25	≤0.1	≤0.1	≤0.1	≤0.07
Repair area	7.4	0.56	0.1	0.013	0.01	0.0047	<0.07
Powder	7.4	0.74	0.08	0.015	0.028	0.0027	<0.07

3.2 激光沉积修复 ZL114A 的拉伸性能

在室温下对修复试件进行拉伸实验,断裂位置位于试件中部,力学性能如表 3 所示。其中 10% 修复占比试件的平均抗拉强度为 280 MPa,断后伸长率平均值约为 6.2%; 20% 修复占比试件平均抗拉强度约为 271 MPa,断后伸长率平均值约为 5.8%。由表可知,室温拉伸的抗拉强度达到铸件标准 GB/T1173-1995 的 90% 和 88%,断后伸长率均优于铸件标准。由于铝合金热传导系数大,在复杂的热循环作用下,修复过程产

生了软化现象,导致试件强度略有降低。查阅相关文献可知,电弧焊接头、激光-电弧焊接头以及 YAG-MIG 复合焊接 ZL114A 铝合金的接头抗拉强度均为铸件标准的 77% 以下,且其断裂位置多集中于接头处热影响区域。铸造过程中留下的孔洞等缺陷会严重影响试件断后伸长率,激光沉积修复具有热量集中、热输入小等特点,将软化区的大小降到最小,修复后试件的断后伸长率得到显著提高。实验验证,10% 修复占比试件和 20% 修复占比试件力学性能相当。

表 3 ZL114A 铝合金铸件基材及激光沉积修复试样室温拉伸性能

Table 3 Tensile property comparison between ZL114A aluminum alloy casting substrate and laser deposition repaired specimen

Parameter	Repair ratio	Sample No.	Tensile strength /MPa	Elongation /%	Reduction of area /%
Substrate		1	321	1.6	2.0
		2	317	3.3	2.0
		3	295	5.5	3.8
laser deposition repaired specimen	10%	4	270	6.2	4.7
		5	277	6.9	9.9
	20%	6	275	5.7	3.9
		7	268	6.3	6.3
		8	272	5.4	3.3
GB/T1173-1995			310	3.0	

3.3 拉伸断口形貌

图 7 为激光沉积修复占比 10% 试样的拉伸断口形貌。断裂位置在试件中部,在拉伸断口表面基材区存在大量铸造孔洞,孔洞尺寸小的只有几微米,大的达到几百微米,如图 7(a) 中箭头所示。图 7(b) 左部为拉伸试样铸件基材区断口形貌,右部为修复区断口形貌。将左右两边 C、D 区域放大观察,其断口显微组织如图 7(c)、(d) 所示。可以看到,左右两边断裂机制存在明显不同:铸件基材区表现为脆性断口,试件断口布满大量解理面,局部有少量韧窝,断口表面观察到多处微裂纹和铸造孔洞;修复区断口布满韧窝,韧窝较细密且分布均匀,说明断裂机制为韧性断裂。

3.4 拉伸断口附近变形组织

将修复占比为 20% 的拉伸断口纵剖后制成金相试样,断口附近变形组织形貌如图 8 所示。图 8(a) 为基

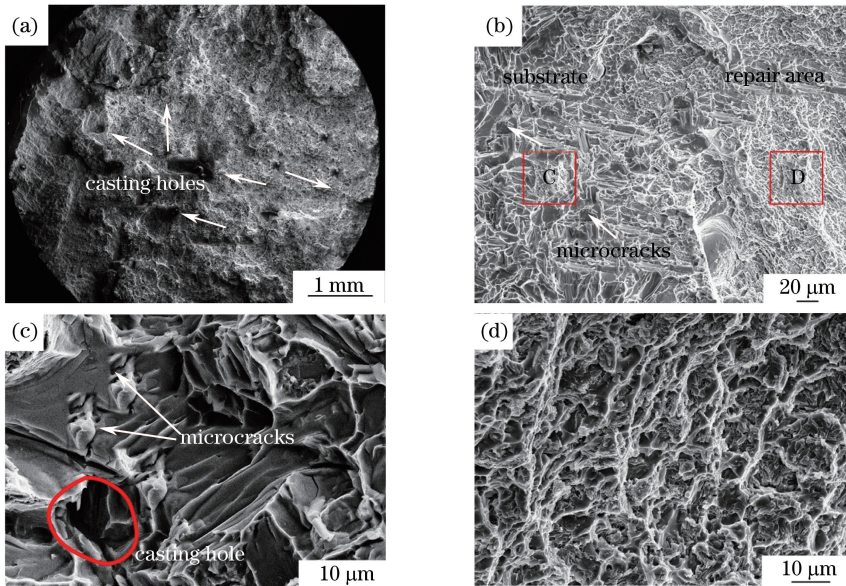


图 7 激光沉积修复 ZL114A 合金拉伸试样的拉伸断口形貌。(a) 宏观形貌;(b) 结合区形貌;(c) 基材区形貌;(d) 修复区形貌
Fig. 7 Tensile fracture morphology of laser deposition repaired ZL114A aluminum alloy. (a) Macroscopic morphology; (b) morphology of bonding zone; (c) morphology of substrate zone; (d) morphology of repair zone

材区断口附近的变形组织,可以看到,共晶硅颗粒在基体的不均匀性较修复区[图 8(c)]更加明显,Al-Si 共晶组织较修复区稀疏。这是由于激光沉积修复后 Si 相形态和分布发生了较大变化,共晶 Si 相组织较为细密,尺寸和形状趋于均匀化和规则化。由图 8(a)还可以明显观察到微裂纹,其萌生于共晶硅颗粒密集处,如图 8(a)中箭头所示,并沿着共晶硅与基体的结合处进行扩展。因 Si 颗粒属于脆性相,在拉伸过程中,当裂纹遇到与前进方向不一致的共晶硅颗粒时,共晶硅颗粒发生断裂,如图 8(b)中箭头所示。从图 8(b)中可观察到,断裂的共晶硅颗粒位于拉伸断口处,从微裂纹扩展的路径来看,裂纹穿过脆性共晶硅颗粒扩展,其断裂方式为穿晶断裂。图 8(c)为修复区拉伸断口附近的变形组织,从图中可明显观察到完整枝晶胞,枝晶胞内未发现裂纹。断口处显微组织中可见 Al-Si 共晶组织保持完整,如图 8(d)中箭头所示。修复区共晶硅颗粒成簇状并密集分布于晶胞间,使 Al-Si 共晶组织的不均匀性得到改善。在应力作用下,当裂纹遇到细小共晶硅颗粒时, Si 相不易断裂,裂纹绕过细小共晶硅颗粒,沿着 Al-Si 共晶组织与晶胞结合处扩展,降低了裂纹扩展速率,提高了材料的断后伸长率,其断裂方式为沿晶断裂。

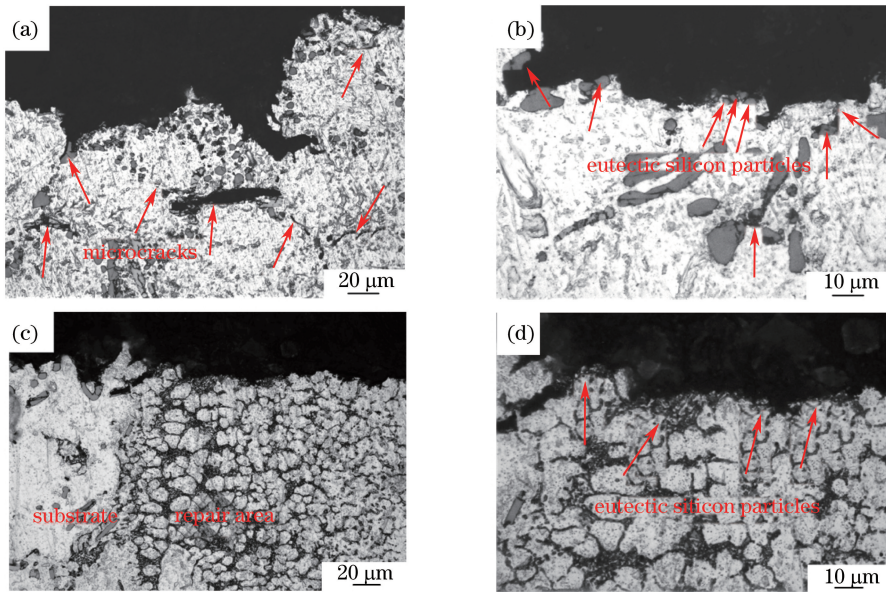


图 8 激光沉积修复 ZL114A 合金拉伸断口附近变形组织。(a)(b)基材区;(c)(d)修复区

Fig. 8 Deformation structures around tensile fracture of laser deposition repaired ZL114A aluminum alloy.

(a)(b) Substrate zone; (c)(d) repair zone

4 结 论

采用激光沉积工艺对预制槽损伤 ZL114A 试件进行了修复实验,修复区底部是以熔池边缘为起点进行外延生长的柱状树枝晶组织,修复区顶部组织为极其细小的完全等轴晶。激光沉积修复的急冷急热技术特点,使修复区共晶 Si 相呈珊瑚状立体形貌。使用激光沉积修复 ZL114A 铝合金,修复占比为 10%的试件和修复占比为 20%的试件的平均抗拉强度分别达到铸件标准的 90%和 88%,断后伸长率均优于铸件标准,两种不同修复占比试件的力学性能相当。修复试样拉伸断口的研究表明,基材区断裂机制为脆性断裂,修复区断裂机制为韧性断裂。

通过观察并分析拉伸断口附近变形组织可知,基材区裂纹沿着共晶硅颗粒扩展,其断裂方式为穿晶断裂;修复区拉伸断口可明显观察到完整枝晶胞,裂纹绕过细小共晶硅颗粒,沿着 Al-Si 共晶组织与晶胞结合处进行扩展,其断裂方式为沿晶断裂。

参 考 文 献

1 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.

- 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的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(12): 3372-3377.
- 2 Liu C M, Wang H M, Tian X J, *et al.* Development of a pre-heat treatment for obtaining discontinuous grain boundary α in laser melting deposited Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 604: 176-182.
- 3 Lin Xin, Xue Lei, Chen Jing, *et al.* Laser forming repair of titanium alloy parts [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2010(8): 55-58.
林 鑫, 薛 蕾, 陈 静, 等. 钛合金零件的激光成形修复[J]. 航空制造技术, 2010(8): 55-58.
- 4 Qin Lanyun, Wang Ting, Yang Guang, *et al.* Experimental study on laser deposition repair BT20 alloy component[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 404-410.
钦兰云, 王 婷, 杨 光, 等. 激光沉积修复 BT20 合金试验研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 404-410.
- 5 Casalino G, Mortello M, Leo P, *et al.* Study on arc and laser powers in the hybrid welding of AA5754 Al-alloy[J]. *Materials & Design*, 2014, (61): 191-198.
- 6 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.
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.
- 7 Lin Xin, Huang Weidong. Laser additive manufacturing of high-performance metal components [J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2015, 45(9): 1111-1126.
林 鑫, 黄卫东. 高性能金属构件的激光增材制造[J]. 中国科学信息科学, 2015, 45(9): 1111-1126.
- 8 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.
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.
- 9 Chen Guozhu. Investigation on microstructure distribution and properties of ZL114A aluminium alloy welded by laser-arc hybrid welding[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2011.
陈国珠. ZL114A 铝合金激光-电弧复合焊接接头组织分布与性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- 10 Yu Yangchun, Wang Chunming, Deng Yuping, *et al.* Microstructure and properties of YAG-MIG hybrid welding joint of ZL-114A aluminum alloy[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(6): 601-604.
余阳春, 王春明, 邓玉平, 等. YAG -MIG 复合焊接 ZL-114A 铝合金的接头组织与性能研究[J]. 激光技术, 2008, 32(6): 601-604.
- 11 Durandet Y, Brandt M, Liu Q. Challenges of laser cladding Al7075 alloy with Al-12Si alloy powder [J]. *Materials Forum*, 2005, 29: 136-142.
- 12 Zhuang W, Liu Q, Djugum D, *et al.* Deep surface rolling for fatigue life enhancement of laser clad aircraft aluminium alloy[J]. *Applied surface Science*, 2014, 320: 558-562.
- 13 Guo Yongli, Liang Gongying, Li Lu. Laser cladding repair of aluminum alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(2): 303-306.
郭永利, 梁工英, 李 路. 铝合金的激光熔覆修复[J]. 中国激光, 2008, 35(2): 303-306.
- 14 Wang Xiaoyan, Chen Jing, Lin Xin, *et al.* Microstructure of laser forming repair 7050 aluminum alloy with AlSi12 powder[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(6): 1585-1590.
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.
- 15 Chen Yongcheng, Zhang Shuquan, Tian Xiangjun, *et al.* Microstructure and microhardness of 4045 aluminium alloy fabricated by laser melting deposition[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(3): 0303008.
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 Li Bao. Modifition evolution of eutectic silicon in AlSi7Mg alloy and micro-mechanism[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 2-12.
李 豹. AlSi7Mg 合金共晶硅变质规律及其微观机制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 2-12.
- 17 Lu S Z, Hellowell A. Growth mechanisms of silicon in Al-Si alloys[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1985, 73(2): 316-328.