

铝合金轮毂的激光增材修复工艺研究

张明明¹ 刘 静¹ 高玉阳² 吕云卓² 陆 兴² 王永喆³

(1.中车大连机车车辆有限公司; 2. 大连交通大学材料科学与工程学院; 3. 暨南大学先进耐磨蚀及功能材料研究院)

摘 要 以 2A14 铝合金轮毂为研究对象,选用 AlSi10Mg 粉末,利用激光增材制造技术修复典型的破损 2A14 铝合金轮毂,优化激光增材制造工艺,当激光功率为 2 800 W、光斑直径为 3 mm、送粉速率为 10 g/mm、搭接率为 30%、扫描速率为 480 mm/min、基板厚度为 10 mm 时,成形试样内部组织最为均匀,品质和打印效果最为理想。2A14 铝合金轮毂修复区域填充饱满,加工处理后修复区域表面光滑,且无明显的裂纹和气孔等缺陷产生,达到使用要求。

关键词 激光增材制造;铝合金轮毂;2A14 铝合金;AlSi10Mg

中图分类号 TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.07.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Laser Additive Repairing Technology of Aluminum Alloy Wheel Hub

Zhang Mingming¹, Liu Jing¹, Gao Yuyang², Lü Yunzhuo², Lu Xing², Wang Yongzhe³

(1.CRRC Dalian Locomotive & Rolling Stock Co., Ltd.; 2. School of Material Science and Engineering, Dalian Jiaotong University; 3. Institute of Advanced Wear & Corrosion Resistance and Functional Materials, Jinan University)

Abstract: Taking 2A14 aluminum alloy wheel hub as object, the crack damage was repaired by laser additive manufacturing technology using AlSi10Mg powder, and the laser additive manufacturing process was optimized. With the laser power of 2 800 W, spot diameter of 3 mm, powder delivery rate of 10 g/mm, the lap rate of 30%, the scanning rate of 480 mm/min and the thickness of the substrate of 10 mm, the internal microstructure of forming specimens is the most uniform with desirable quality and printing effect. Repairing area of 2A14 aluminum alloying wheel hub is fully filled, which exhibits smooth surface without obvious cracks and porosities after processing, meeting the usage requirements.

Key Words: Laser Additive Manufacturing, Aluminum Alloy Wheel Hub, 2A14 Aluminum Alloy, AlSi10Mg

车轮是汽车的重要组成部分之一。在行驶期间,车轮不仅承受垂直载荷,冲击载荷和周期性载荷,而且承受不同方向的力,包括正压力、起动和制动期间的扭矩和冲击,以及转弯时的复杂力^[1-2]。目前,汽车轮毂多采用铝合金制造^[3-4],最典型的为 A356 铝合金^[5-6]。与钢制轮毂相比,铝合金车轮具有更高的舒适性,并且更加安全^[7-8]。然而,由于制备工艺复杂,轮毂在铸造、机械加工过程可能出现缺陷导致报废^[9],铝合金轮毂在制造和使用过程中常会出现裂纹等缺陷,且轮胎外侧发生碰撞会鼓包,而内侧碰撞会造成变形、凹痕甚至裂痕^[10]。因此,实现对铝轮毂高品质修复是汽车制造领域亟需解决的难题。

激光增材制造技术是一种基于离散堆叠原理,可直

接成形和处理 3D 计算机辅助设计(CAD)模型的技术^[11-14],也是破损零部件高质量修复的较好工具。激光增材制造过程为:高功率激光束聚焦在基板上形成熔池,同时金属粉末被同轴粉末所在的进料器输送至熔池中^[15-17]。当激光束移动时,熔池在液体表面张力作用下开始朝向激光束移动,前者熔化形成沉积层,激光束移动轨迹是沉积层的轨迹^[18-20]。激光增材制造是逐点扫描堆积成形的过程,允许通过调节激光的移动来获得所设计的包层形状^[21]。因此,激光增材制造技术可实现对铝合金轮毂的高精度、高质量和低成本的修复,使得待修复铝合金轮毂的结构尺寸和力学性能得到恢复。

基于此,本研究以典型的破损 2A14 铝合金轮毂为研究对象,使用 AlSi10Mg 粉末为原料,利用激光增材

收稿日期:2022-10-08;修改稿收到日期:2022-11-18
基金项目:广东省自然科学基金资助项目(2021A1515011728)
第一作者简介:张明明,男,1979 年出生,高级工程师,辽宁大连(116021),E-mail:zhangmingming120@163.com
通信作者:吕云卓,男,1985 年出生,教授,辽宁大连(116028),E-mail: luyz@djtu.edu.cn
引用格式:张明明,刘静,高玉阳,等. 铝合金轮毂的激光增材修复工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(7):884-887.
ZHANG M M, LIU J, GAO Y Y, et al. Laser additive repairing technology of aluminum alloy wheel hub[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(7):884-887.

制造技术修复裂纹损伤。首先优化激光增材制造工艺参数,研究成形铝合金的微观组织以及力学性能,分析 AlSi10Mg 与 2A14 铝合金的结合性能,最终利用上述技术成功修复 2A14 铝合金轮毂。

1 试验材料与方法

使用雾化法制得 AlSi10Mg 粉末粒度为 40~120 μm ,粉末圆整度良好,具有良好的流动性,成形件抗拉强度大于 220 MPa,伸长率大于 2%。其化学成分见表 1。

表 1 AlSi10Mg 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of AlSi10Mg aluminum alloy %								
wt%								
Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Sn	Pb	Fe	Al
8.0~10.5	≤0.3	0.17~0.30	≤0.30	0.2~0.5	≤0.01	≤0.05	0~1.00	余量

采用同步送粉式激光增材制造设备(RC-YLS-6000),配备 6 kW 的光纤激光器,在纯氩气的保护氛围下加工。利用 Leica I621-G10 型光学显微镜和 ZEISS IHMA 型扫描电镜观察试样微观结构。使用 HV-1000A 型显微硬度计对成形试样进行显微硬度测试。室温拉伸试验在 UTM5105 型电子万能试验机上进行,加载速率为 2 mm/min。

2 试验结果与分析

2.1 激光增材制造工艺参数优化

由于同轴送粉角度不可调,根据对设备操作的经验,为了保证成形过程的稳定性,所形成的散焦量(光斑尺寸)被视为固定值。绝对粉末进料速率得到保证。在恒定常数下,研究了激光功率和扫描速率对激光沉积 AlSi10Mg 铝合金单层沉积层形貌的影响。在基板厚度为 10 mm、光斑直径为 3 mm、送粉速率为 10 g/mm、搭接率为 30% 条件下,分别以 1 800、2 000、2 400、2 600、2 800 和 3 000 W 的激光功率进行打印,获得的试样宏观形貌见图 1。可以看出,随着激光功率增加,沉积层表面上“球化和粘附粉末”的现象逐渐减少,沉积层的表面变得越来越平整和明亮。在保证绝对送粉速度和光斑尺寸的前提下,在一定的工艺参数范围内,随着激光功率增加,沉积层的厚度增加。穿透深度随着激光功率的增加而增加。当沉积层的高度达到 2 mm 时,沉积层的高度对功率和扫描速度的变化不敏感。

当扫描速率保持一定时,激光功率(P)对激光增材制造的单层试样宏观形貌有一定影响。由图 1 可以看出,当 P 为 1 800、2 000、2 200、2 400 和 2 600 W 时,单层高度较低,宽度不稳定,且单层表面不稳定、不均匀。

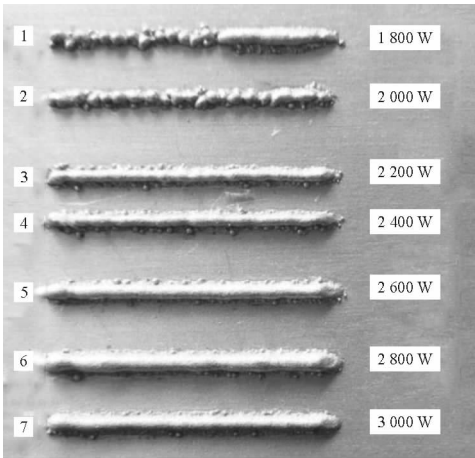


图 1 在不同功率下的激光增材制造的试样宏观形貌
Fig.1 Macromorphologies of LAM specimens with different powers

当 $P=2\ 800\ \text{W}$ 时,单层高度适宜,宽度稳定,并且表面稳定、光滑。当 $P=3\ 000\ \text{W}$ 时,虽然表面光滑且很稳定,但是单层高度和宽度略大。因此, $P=2\ 800\ \text{W}$ 时单层宏观形貌最好,确定为最佳激光功率。

图 2 是基板厚度为 10 mm、激光功率为 2 800 W、光斑直径为 3 mm、送粉速率为 10 g/mm、搭接率为 30% 时,不同的扫描速率下试样的宏观形貌。可以看出,改变扫描速率相比于改变激光功率对双层试样的宏观形貌的影响更小。从宏观形貌看出,不同的扫描速率下的宏观形貌差别不大,试样的成形品质较为理想,层间单道明显,表面光滑且光泽度良好,没有未熔化的粉末颗粒物附着,且没有明显的裂纹和气孔缺陷产生。但是,当扫描速率为 720 和 600 mm/min 时,试样的层厚较大且在边缘发生严重凹陷,在打印过程中容易出现中间凸、四周凹的现象;当扫描速率为 360 mm/min 时,试样的层厚尺寸仍然较大且在两侧发生轻微凹陷,在打印过程中容易出现中间凸、两侧凹的现象;当扫描速率为 480 mm/min 时,试样的层厚在 0.5 mm 左右,

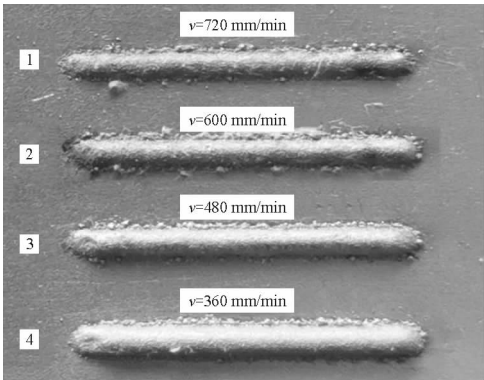


图 2 在不同扫描速率下激光增材制造试样的宏观形貌
Fig.2 Macromorphologies of LAM specimens at different scanning rates

且试样表面平整,第一打印层的枝状晶晶粒尺寸适中,内部组织最为均匀,成形品质和打印效果最为理想。最终确定的最佳工艺参数是基板厚度为 10 mm、激光功率为 2 800 W、光斑直径为 3 mm、送粉速率为 10 g/mm、搭接率为 30%、扫描速率为 480 mm/min。

2.2 激光增材制造 AlSi10Mg 铝合金的微观组织

图 3 为用单道打印获得最佳工艺制备多层 AlSi10Mg 铝合金的微观组织和 EDS 分析结果。从图 3a 看出,主要物相为浅色的网状相和深色的岛状相。白色呈连续网络状分布的为共晶 Si 相,灰色岛屿状为 α -Al 基质相。同时看出,晶粒细小,晶界很多,这是因为熔池在激光增材形成过程中快速凝固,液相中产生的大量晶核很快相互接触,不能继续生长,使得其晶粒非常细小;共晶 Si 相分布在 α -Al 基体的晶界处,这是因为在 AlSi10Mg 合金的液相中 α -Al 优先成核生长,液相中的 Si 原子被排出到固-液界面的前沿,导致剩余液相中 Si 原子浓度增加,溶液到达共晶组分,最后形成共晶结构,分布在 α -Al 中的 α -Al+Si 在晶界处形成连续的网络结构。

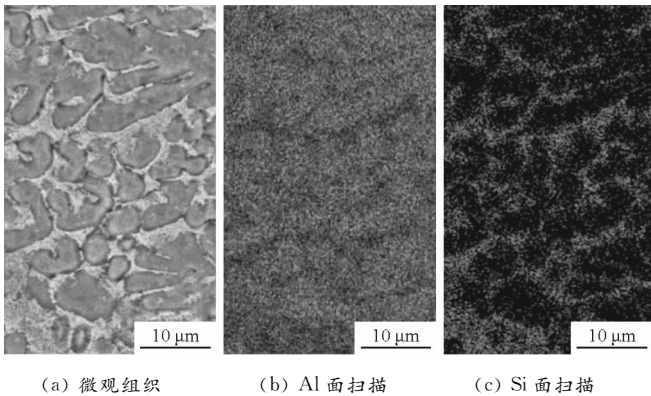


图 3 激光增材制造 AlSi10Mg 铝合金微观组织形貌和 EDS 能谱分析
Fig.3 Morphologies and EDS results of LAM AlSi10Mg alloy

2.3 激光增材制造 AlSi10Mg 铝合金的力学性能

图 4 为最佳工艺制备的 AlSi10Mg 铝合金的拉伸应力-应变曲线。可以看出,试样的屈服强度为

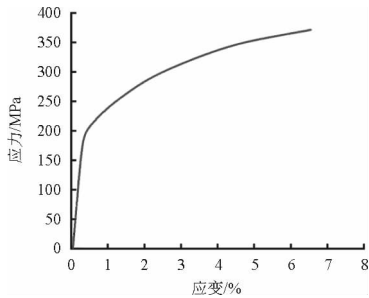


图 4 AlSi10Mg 铝合金的拉伸应力-应变曲线
Fig.4 Tensile stress-strain curves of AlSi10Mg alloy

200 MPa,抗拉强度为 370 MPa,伸长率为 6.4%。

2.4 AlSi10Mg 与 2A14 铝合金结合性能研究

为了模拟激光增材修复 2A14 铝合金轮毂的实际过程,首先在 2A14 基板上切割出一道梯形凹槽,上凹槽宽为 10 mm,下凹槽宽为 15 mm,高为 3 mm,然后用旋转锉将锐角磨成钝角,再用 AlSi10Mg 铝合金粉末激光增材填补梯形凹槽,完成后的试样的宏观形貌见图 5,可见填充饱满,无缝隙衔接。



图 5 激光沉积修复试样的形貌
Fig.5 Morphology of laser deposition repairing specimen

图 6 为 AlSi10Mg 铝合金与 2A14 铝合金结合的 SEM 形貌。可以看到,AlSi10Mg 铝合金与 2A14 铝合金界面结合良好,没有裂纹以及孔洞等缺陷。

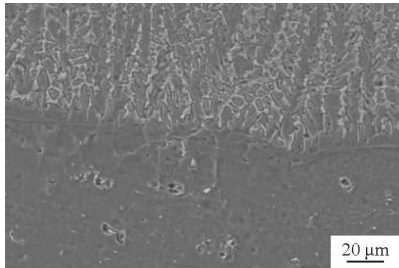
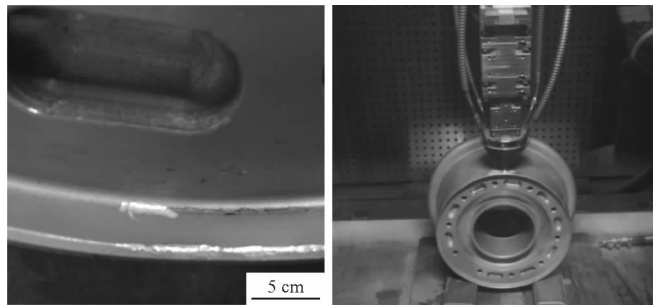


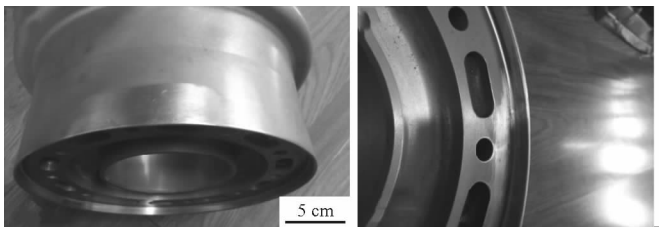
图 6 激光增材制造 AlSi10Mg 铝合金与 2A14 铝合金界面的微观形貌
Fig.6 Interface microstructure of LAM AlSi10Mg aluminum alloy and 2A14 aluminum alloy

2.5 2A14 铝合金轮毂的激光增材修复

图 7 为 2A14 铝合金轮毂裂纹区域及轮毂修复后的形貌。将激光增材修复后的铝合金轮毂加工,将凸出的部分进行车工和精磨,将表面处理平整,可见裂纹处平整,无任何修复处理痕迹,见图 8。



(a) 铝合金轮毂裂纹缺陷 (b) 轮毂修复
图 7 铝合金轮毂裂纹及轮毂修复
Fig.7 Cracks and repairing on aluminum alloy wheel hubs



(a) 外侧和内侧

(b) 局部观察

图8 经激光增材修复轮毂加工后裂纹处形貌

Fig.8 Morphologies at the crack after laser additive repair processing

3 结 论

选用 AlSi10Mg 粉末,利用激光增材制造技术在 2A14 铝合金基板上进行单道试验,确定 AlSi10Mg 粉末激光增材制造修复 2A14 铝合金材料的最佳工艺参数是激光功率为 2 800 W,扫描速率为 480 mm/min,单层厚度为 0.5 mm。采用最佳工艺参数制备成形的 Al-Si10Mg 铝合金试样的微观组织为呈连续网络状分布的共晶 Si 相和 α -Al 基体相。激光增材制造的 AlSi10Mg 与 2A14 铝合金的结合性能良好,没有裂纹以及孔洞等缺陷。对 2A14 铝合金轮毂进行激光增材修复发现,修复区域填充饱满,加工处理后修复区域表面光滑,且无明显的裂纹和气孔等缺陷。

参 考 文 献

- [1] 李晓敏. 我国汽车铝合金轮毂发展现状及建议[J]. 轻金属, 2011(6): 3-7.
- [2] 钟强强. 简述铝合金汽车轮毂发展现状[J]. 上海有色金属, 2014, 35(3): 128-133.
- [3] 侯世忠. 汽车用铝合金的研究与应用[J]. 铝加工, 2019(6): 8-13.
- [4] 徐一展. 汽车铝合金轮毂的应用和分析[J]. 河南建材, 2019(1): 188-189.
- [5] 怯喜周,王研,陶然,等. 稀土 Er 对 A356.2 合金微观组织和力学性能的影响[J]. 铸造技术, 2016, 37(12): 2 527-2 531.
- [6] KARI O L, GHOMASHCHI R. Deformation behavior of semi-solid A356 Al-Si alloy at low shear rates: The effect of sample size[J]. Materials Science and Engineering, 2007, A444 (3): 198-205.
- [7] ZHU M, JIAN Z Y, YANG G C, et al. Effects of T6 heat treatment on the microstructure, tensile properties, and fracture behavior of the modified A356 alloys[J]. Materials and Design, 2012, 36: 243-249.
- [8] LEE C D. Variability in the impact properties of A356 aluminum alloy on microporosity variation[J]. Materials Science and Engineering, 2013, A565: 187-195.
- [9] 刘宏磊. 铝合金轮毂热处理工艺节能探讨[J]. 金属加工, 2013(5): 61-62.

- [10] 余洋. 汽车铝合金轮毂铸造工艺研究[J]. 民营科技, 2018(7): 17.
- [11] 罗军. 中国 3D 打印的未来[M]. 北京: 东方出版社, 2014.
- [12] 李涤尘, 苏秦, 卢秉恒. 增材制造——创新与创业的利器[J]. 航空制造技术, 2015, 479(10): 40-43.
- [13] SING S L, YEONG W Y, WIRIA F E, et al. Characterization of titanium lattice structures fabricated by selective laser melting using an adapted compressive test method[J]. Experimental Mechanics, 2016, 56(5): 735-748.
- [14] 王小军. Al-Si 合金的选择性激光熔化工艺参数与性能研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2014.
- [15] RIEMER A, LEUDERS S, THÖNE M, et al. On the fatigue crack growth behavior in 316L stainless steel manufactured by selective laser melting[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2014, 120: 15-25.
- [16] MAZUMDER J, DUTTA D, KIKUCHI N, et al. Closed loop direct metal deposition: Art to part[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2000, 34(4-6): 397-414.
- [17] GIBSON I, ROSEN D W, STUCKER B. Guidelines for process selection. Additive Manufacturing Technologies[M]. Boston: Springer, 2010.
- [18] GU D D, MEINERS W, WISSENBAACH K, et al. Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms[J]. International Materials Reviews, 2012, 57 (3): 133-164.
- [19] FRAZIER W E. Metal additive manufacturing: A review[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23 (6): 1 917-1 928.
- [20] CAMPBELL I, DIEGEL O, KOWEN J, et al. Wohlers Report 2018: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry: Annual Worldwide Progress Report[M]. Colorado: Wohlers Associates, 2018.
- [21] GUO N, LEU M C. Additive manufacturing: Technology, applications and research needs[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2013, 8 (3): 215-243.

(编辑: 刘卫)

欢迎关注
“特种铸造”
微信公众号



- | | | |
|--------|---------|--------|
| ● 微官网 | ● 行业动态 | ● 联系我们 |
| ● 微商城 | ● 铸造前沿 | ● 免费推广 |
| ● 本刊会议 | ● 经典案例 | ● 铸造职场 |
| ● 收录动态 | ● 铸造学堂 | ● 产品库 |
| ● 稿件系统 | ● 专利与发明 | ● 企业库 |