

选区激光熔化成形 Al-Mg-Er-Zr 高强铝合金工艺

冯紫微 张立平 王 猛 马国栋

(西安航天动力机械有限公司, 西安 710025)

文 摘 针对高强度铝合金结构件的增材制造需求,采用选区激光熔化(SLM)技术开展了 Al-Mg-Er-Zr 高强铝合金成形工艺研究,通过控制激光功率和扫描速度优化合金成形质量,并研究了热处理温度对铝合金力学性能的影响。结果表明,合理选择激光功率和扫描速度能够控制试样中的孔隙和缺陷数量,提升致密度,最优工艺参数组合为:激光功率 280 W、扫描速度 1.2 m/s、扫描间距 0.08 mm、层厚 0.03 mm。此外,随热处理温度升高,铝合金的抗拉强度和屈服强度增加,延伸率降低,当热处理温度为 350 °C、保温时间 2 h 时,试样最大抗拉强度超过 500 MPa,延伸率大于 10%。最后,获得了外观成形良好、内部质量合格的 SLM 高强铝合金样件,为 SLM 成形高强铝合金在航空航天上的应用奠定了技术基础。

关键词 激光选区熔化,高强铝合金,力学性能

中图分类号: TG146.2

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2025.S1.011

The Selective Laser Melting Process of High-strength Al-Mg-Er-Zr Aluminum Alloy

FENG Ziwei ZHANG Liping WANG Meng MA Guodong

(Xi'an Aerospace Power Machinery Co., Ltd., Xi'an 710025)

Abstract The additive manufacturing of Al-Mg-Er-Zr high-strength aluminum alloy is achieved by selective laser melting (SLM) technology to meet the demand for structural components. The formation quality of the alloy is optimized by controlling the laser power and scanning speed, and the influence of heat treatment temperature on the mechanical properties of the aluminum alloy is investigated. The results show that the suitable laser power and scanning speed can control the pores and defects, and the density of samples is also improved. The optimal process parameter is as follows: laser power 280 W, scanning speed 1.2 m/s, scanning pitch 0.08 mm, and layer thickness 0.03 mm. In addition, the tensile strength and yield strength of aluminum alloy increase as the heat treatment temperature increases, while the elongation decreases. The maximum tensile strength of the sample exceeds 500 MPa when the heat treatment temperature is 350 °C and the holding time is 2 h, and the elongation is greater than 10%. Finally, the high-strength aluminum alloy samples with good appearance and qualified internal quality are obtained, which laies the technical foundation for the application of high-strength aluminum alloys by SLM in aerospace.

Key words Selective laser melting (SLM), High-strength aluminum alloy, Mechanical properties

0 引言

金属增材制造技术(Additive Manufacturing)因其具有加工柔性高、研制周期短等特点,已广泛应用于航空航天等领域^[1-2]。其中,选区激光熔化(SLM)技术在制备复杂内部流道的薄壁精密构件上具有突出优势,经工艺优化能获得高精度的成形件,兼顾好的表面质量与力学性能^[3-4]。目前 SLM 技术在高温合金、钛合金以及不锈钢等材料上都展现了成熟的工艺质量,相比而言,SLM 成形铝合金存在较大的技术

局限性。这是因为铝合金粉末对激光的吸收率低,且铝易发生氧化,生成的氧化物难以去除,导致熔滴与氧化膜间的润湿性差,从而产生成形缺陷^[5]。当前能实现 SLM 成形的铝合金主要集中在 Al-Si 系合金(例如:AlSi10Mg、Al-12Si),其主要原因在于,该系列铝合金在熔融状态下具有较好的流动性,热裂倾向更小^[6]。

一般而言,SLM 成形 Al-Si 系合金的力学性能较低,大多数铝合金屈服强度低于 350 MPa,伸长率低

收稿日期:2025-05-17

第一作者简介:冯紫微,1995 年出生,博士生,主要从事激光加工在固体发动机金属壳体上的应用研究工作。E-mail: 17861080616@163.com

于6%,且具有明显的各向异性^[7-8],因此限制了SLM铝合金在先进制造业的应用。为了解决这一问题,众多学者提出利用微合金化原理提高合金力学性能,例如Sc、Zr^[9-10],但Sc元素价格昂贵,相比而言,稀土元素Er不仅具有与Sc类似的微合金化作用,与Zr元素复合添加时表现出协同增强作用,而且其价格仅为Sc的1/80~1/100。因此,利用Er改性铝合金具有广阔的发展前景。

另一方面,减轻金属结构件质量是科研技术人员持续追求的目标,对于一些具有特殊结构的复杂件,传统制造方式(如锻造、机加)加工难度大,往往会带来原材料的浪费。此外,铝合金具有密度低、成本低、耐腐蚀等突出优势,在航空航天等诸多领域具有广阔的应用前景,采用SLM成形铝合金能够进一步拓宽铝合金的应用范围。基于此,本文以航空航天用高强铝合金结构件为背景,开展Al-Mg-Er-Zr高强铝合金选区激光熔化成形技术研究,分别对热输入工艺参数及热处理制度进行优化,并对力学性能进行评估,拟为SLM成形Al-Mg-Er-Zr高强铝合金的应用夯实技术基础。

1 实验

材料为Al-Mg-Er-Zr合金粉末,化学成分(质量分数,%)如下:Mg(3.5~5.0);Er(0.5~1.8);Zr(0.5~1.0);Sc(0.2~0.6);Mn(0.3~0.6);Fe(0.2~0.6);Si(0.2~0.6);Zn(\leq 0.2);O(\leq 0.05);N(\leq 0.06);Al(余量)。该粉末通过气雾化获得,粒径分布在15~53 μm ,相应的D10、D50和D90分别是21.1、32.8和50.8 μm 。此外,从图1中铝合金粉末的SEM形貌可以看出,所选用的高强铝合金粉末球形度较高,卫星粉少,具有良好的流动性。

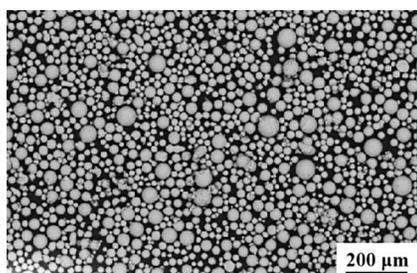


图1 高强铝合金粉末SEM形貌

Fig. 1 SEM morphology of powders of high-strength aluminum alloy

进行铝合金工艺参数优化研究时,主要考虑激光功率(P)、扫描速度(v)这两个变量,扫描间距(H)和层厚(t)分别固定为100和30 μm ,根据如下公式进行激光能量密度的计算: $E=PI(Hvt)$ 。前期优化结果表明,功率过高或扫描速度过快时打印过程中熔池不稳定,导致表面翘起严重、铺粉时刮刀卡顿等问题。最终,按照表1中所设计的SLM工艺参数进一步

开展优化试验。

表1 选区激光熔化工艺参数设计

Tab. 1 Process parameters design of selective laser melting

序号	激光功率 /W	扫描速度 /m·s ⁻¹	扫描间距 /μm	层厚 /μm	体能量密度 /J·mm ⁻³
1 [#]	260	1.0	0.08	0.03	108
2 [#]	260	1.1	0.08	0.03	98
3 [#]	260	1.2	0.08	0.03	90
4 [#]	260	1.3	0.08	0.03	83
5 [#]	280	1.0	0.08	0.03	117
6 [#]	280	1.1	0.08	0.03	106
7 [#]	280	1.2	0.08	0.03	97
8 [#]	280	1.3	0.08	0.03	90
9 [#]	300	1.0	0.08	0.03	125
10 [#]	300	1.1	0.08	0.03	114
11 [#]	300	1.2	0.08	0.03	104
12 [#]	300	1.3	0.08	0.03	96
13 [#]	320	1.0	0.08	0.03	133
14 [#]	320	1.1	0.08	0.03	121
15 [#]	320	1.2	0.08	0.03	111
16 [#]	320	1.3	0.08	0.03	103

获得优化工艺区间后,对SLM试样进行金相组织观察和力学性能分析。其中,采用光学显微镜对典型参数下的SLM高强铝合金组织进行微观观察,利用拉伸测试对SLM高强铝合金试样的力学性能进行评估,并分别沿两个方向(x_y 、 z)各取3个试样。拉伸试验标准参照GB/T 228.1—2021,该试验在室温下进行,拉伸速率为0.2 mm/min,并记录试验过程中的载荷-位移曲线,用以计算试样的抗拉强度、屈服强度及延伸率。

2 结果分析讨论

2.1 能量密度对SLM微观组织的影响

对上述测试方案打印的10 mm×10 mm×10 mm金相试样进行了显微组织分析,重点对比了不同工艺参数条件下孔隙分布的变化情况。如图2所示,通过对不同工艺参数的金相试样进行观察与分析,发现激光功率、扫描速度等工艺参数对孔隙的生成与分布有显著影响。具体而言,在激光功率为280 W、扫描速度为1.2 m/s、扫描间距为0.08 mm、层厚为0.03 mm的工艺参数组合下,试样中的孔隙和缺陷数量最少,致密度最高,致密度最高可达99.95%,成形质量达到了最佳状态(7[#]试样)。从7[#]试样的图像分析中可以看出,该工艺参数条件下,孔隙均匀分布,且缺陷较少,说明激光功率和扫描速度的合理选择对于抑制孔隙的生成起到了关键作用。因此,基于该工艺组合的金相试样在成形过程中展现了较高的致密度和优异的成形性能。

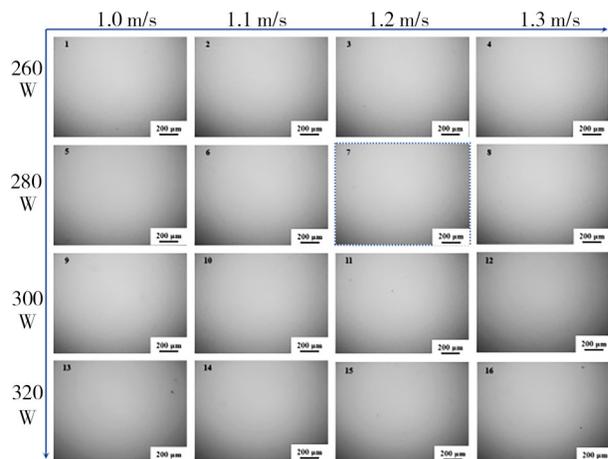


图2 不同工艺参数下的SLM金相照片

Fig. 2 SEM images of SLM specimens under different process parameters

对7#试样的金相试块进行腐蚀处理,并通过光学显微镜观察其微观组织,其结果如图3所示。



(a) xy方向



(b) z纵向

图3 典型参数下SLM高强铝合金微观组织

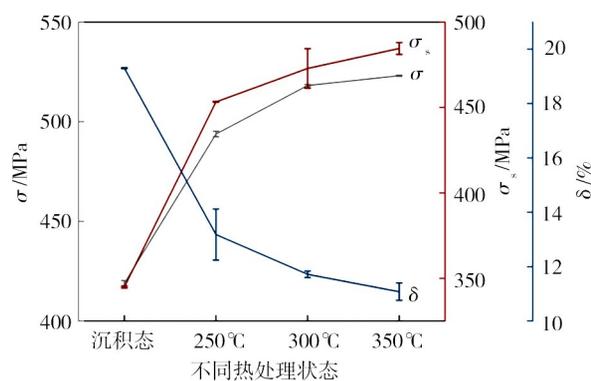
Fig. 3 Microstructure of SLM high-strength aluminum alloy under typical parameter

可以发现,该试样的微观结构呈现出细小的层状熔池堆叠形貌特征。这种层状结构是激光熔化沉积过程中熔池在不断的扫描路径中逐层堆叠形成的。每一层熔池之间的界面清晰可见,且层与层之间的过渡较为平滑,表明在此工艺条件下材料的凝固过程较为均匀,未出现明显的裂纹或其他缺陷。该层状熔池堆叠结构有助于提高材料的致密度和力学性能,此结果表明,7#工艺参数在控制微观结构方

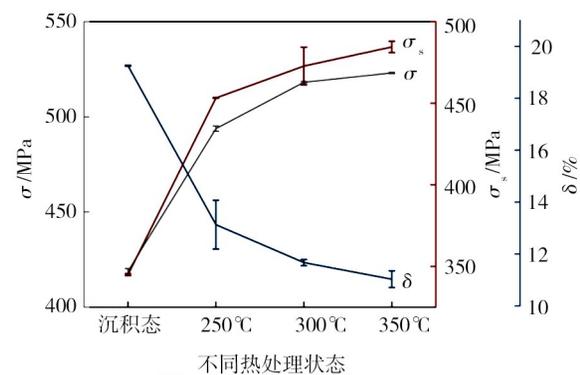
面具有较好的效果,为提升材料的整体性能奠定了结构基础。

2.2 热处理对SLM高强铝合金力学性能的影响

在确定了最优打印参数后,采用该参数对沉积态试样进行热处理制度优化,分析不同热处理制度对材料力学性能的影响。根据前期优化试验发现,随热处理温度的升高,硬度值先升高后降低,并在350℃时出现峰值,其原因在于SLM的高冷却速度抑制了第二相的析出,进行退火热处理后,析出强化效应得到改善。基于此,分别选择250、300、350℃三个热处理温度,固定保温时间为2h,探究不同热处理温度对合金力学性能的影响,横向和纵向拉伸结果如图4所示。



(a) xy方向



(b) z纵向

图4 不同热处理制度下SLM高强铝合金拉伸性能

Fig. 4 Tensile properties of SLM high-strength aluminum alloys under different heat treatment regimes

对比分析力学数据,结果发现,随着热处理温度的升高,抗拉强度和屈服强度逐渐增加,而延伸率逐渐降低。一方面,热处理后晶粒细化,缺陷减少,同时改善了第二相的析出,这起到了阻碍位错运动的作用,最终表现为材料强度提高。另一方面,第二相粒子的析出同时阻碍了晶体内部原子的滑移和孪生等塑性变形,这易导致材料在外力加载过程中产生应力集中,因此材料延伸率降低^[8]。因此,这一结果

充分验证了在最优打印参数条件下制备的力学试样,具有较好的力学性能,能够满足实际应用要求。

2.3 试验验证

上述通过SLM打印参数及热处理制度优化完成了SLM高强铝合金成形质量及力学性能的优化研究,为进一步验证SLM高强铝合金应用的可行性,以典型铝合金环形件产品为例,采用上述优化工艺制备高强铝合金样件,其宏观成形如图5所示。可以发现,所选工艺参数下样件成形良好,无明显宏观缺陷。此外,还对样件进行了X射线探伤,内部质量符合标准HB963—1993《铝合金铸件》I级要求。这说明采用SLM制备高强铝合金样件能够满足性能要求,该研究的开展同时为后续SLM成形高强铝合金在其他结构上的应用提供了技术基础。

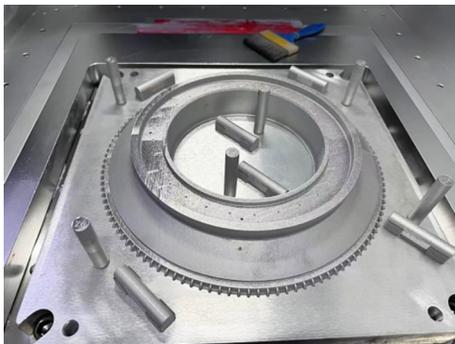


图5 SLM成形高强铝合金样件制备

Fig. 5 Preparation of high-strength aluminum alloy samples by SLM

3 结论

(1)采用激光功率为280 W、扫描速度为1.2 m/s、扫描间距为0.08 mm、层厚为0.03 mm的最佳成形工艺参数组合,能够显著减少试样中的孔隙和缺陷数量,提升致密度,最终实现最优的成形质量。

(2)经过350 °C保温2 h热处理后的试样展现出优良的力学性能,抗拉强度超过500 MPa,延伸率大于10%,表明该工艺参数不仅赋予了材料高强度,还保证了良好的塑性延展性,满足材料的性能使用要求。

(3)利用最佳工艺参数进行SLM高强铝合金打印,获得了表观成形良好、内部质量合格的环形样件,进一步验证了SLM高强铝合金应用的可行性。

参考文献

[1] 李志勇,韩冬雪,姜士坤,等. 激光增材制造在航天领域的实践与展望[J]. 中国激光,2024,51(24):193-207.

LI Z Y, HAN D X, JIANG S K, et al. Practice and prospect of laser additive manufacturing in aerospace field [J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(24): 193-207.

[2] 熊孝经,吴晓鹏,张唯,等. Al-Mn-Sc合金的选区激光熔化工艺优化及室温与高温力学性能研究[J]. 铸造,2024,73(5):626-631.

XIONG X J, WU X P, ZHANG W, et al. Optimization of selective laser melting process for Al-Mn-Sc alloy and its mechanical properties at room and high temperature [J]. Foundry, 2024, 73(5): 626-631.

[3] BRANDT M. The role of lasers in additive manufacturing[M]. Duxford: Woodhead Publishing, 2017.

[4] HERZOG D, SEYDA V, WYCISK E, et al. Additive manufacturing of metals[J]. Acta Materialia, 2016, 117: 371-392.

[5] 关杰仁,陈超,丁红瑜,等. 激光选区熔化成形Al-Mg-Sc-Zr高强铝合金研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(5): 1224-1236.

GUAN J R, CHEN C, DING H Y, et al. Research development of selective laser melted Al-Mg-Sc-Zr high strength aluminum alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(5): 1224-1236.

[6] 徐远财,李广宇,蒋文明,等. Mg、Ce、Sr复合微合金化对A356铝合金组织和性能的影响[J]. 铸造,2023,72(9): 1147-1151.

XU Y C, LI G Y, JIANG W M, et al. Effect of Mg, Ce, Sr composite microalloying on microstructure and properties of A356 aluminum alloy [J]. Foundry, 2023, 72(9): 1147-1151.

[7] TANG H, GAO C, ZHANG Y, et al. Effects of direct aging treatment on microstructure, mechanical properties and residual stress of selective laser melted AlSi10Mg alloy [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2023, 139: 198-209.

[8] 程志瑶,沈显峰,王国伟. 退火工艺对选区激光熔化成形AlSi10Mg合金组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51(2): 121-125.

CHENG Z Y, SHEN X F, WANG G W. Effects of annealing process on microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting [J]. Hot Working Technology, 2022, 51(2): 121-125.

[9] 李敬洋,刘贺,祁俊峰,等. 热处理对激光选区熔化Al-Mg-Sc-Zr合金组织及性能影响[J]. 载人航天, 2023, 29(2): 215-222.

LI J Y, LIU H, QI J F, et al. The effect of heat treatment on microstructure and properties of laser selective melting Al-Mg-Sc-Zr alloy [J]. Manned Spaceflight, 2023, 29(2): 215-222.

[10] 肖罡,张喜龙,项菲菲,等. 选区激光熔化Al-Mg-Sc-Zr铝合金成形过程数值模拟[J]. 塑性工程学报, 2024, 31(11): 112-122.

XIAO G, ZHANG X L, XIANG F F, et al. Numerical simulation of selective laser melting process of Al-Mg-Sc-Zr aluminum alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31(11): 112-122.