

# 选择性激光熔化 AlSi10Mg 微波组件 表面质量的影响因素研究

刘尚阳<sup>1</sup>, 杨波<sup>2</sup>, 茅健<sup>1</sup>

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620;

2. 中国电子科技集团公司第二十研究所, 陕西西安 710068)

**摘要:** 微波组件内部结构复杂且壁薄腔多, 对表面质量的要求较高。传统的加工方法影响了微波组件的加工效率和成品率, 而选择性激光熔化制造出的金属零件具有均匀细密枝晶组织和优良的质量。本文设计了微波组件脊喇叭的结构, 建立了脊喇叭SLM工艺流程, 采用正交试验法研究激光功率、扫描速度和扫描间距这三个参数在选择性激光熔化过程中对AlSi10Mg脊喇叭表面质量的影响。试验结果表明, 影响表面粗糙度的主要因素是扫描间距, 激光功率和扫描速度为次要影响因素, 最佳工艺参数组合为激光功率为350 W、扫描速度为1 200 mm/s和扫描间距为0.08 mm, 从SLM工艺参数的角度为提高微波组件成形表面精度提供了依据。

**关键词:** 微波组件; AlSi10Mg; 选择性激光熔化; 工艺参数; 表面粗糙度

选择性激光熔化 (Selective Laser Melting, SLM) 是一种通过高温熔融金属粉末再冷却凝固的成形技术, 成形件可直接使用或需进行少量精加工即可使用<sup>[1-2]</sup>。SLM具有成形件致密度高、显微维氏硬度高以及尺寸精度高等优点, 在航空航天、雷达、通信、汽车毫米波雷达等方面有广阔的应用价值<sup>[3-5]</sup>。随着电子装备向着综合化、集成化、小型化、轻量化等方向发展, 微波组件结构件日趋复杂, 呈现出薄壁深腔、微小缝隙、复杂曲面等多形态的结构形式<sup>[6]</sup>。微波组件脊喇叭传统的机械加工采用铣削、焊接、电加工等工艺, 加工难度大、容易变形, 效率低。提高微波组件的精度和效率、降低成本是其应用亟待解决的问题<sup>[7]</sup>, SLM工艺是微波组件加工的理想方法。

由于表面质量对微波组件的传输效率存在较大影响, 微波组件有很高的精度和表面质量要求, 如具有极小的不平度和极低的表面粗糙度<sup>[8]</sup>。国内外众多学者进行了SLM工艺对表面质量的研究, 邹烜等人研究了激光功率和扫描速度对合金组织和硬度的影响, 发现激光功率和扫描速度较大或较小会影响网络状Si相, 选择合适的加工参数大大提升了显微硬度<sup>[9]</sup>。申川等人通过对扫描间距的研究发现, 过小的扫描间距出现球化现象, 过大的扫描间距会出现未熔粉末, 影响成形件致密度<sup>[10]</sup>。时云等人通过优化表皮扫描功率等参数, 降低了孔隙率, 发现适当提高扫描功率可以获得较好的表面质量<sup>[11]</sup>。Liu等人通过响应面设计法研究了激光能量与成形件硬度和表面粗糙度之间的关系<sup>[12]</sup>。史振伟等人分析了铺粉厚度等参数对AlSi10Mg合金试样基本性能的影响, 随着粉末铺层厚度的增加, 多孔缺陷出现的概率增大且表面粗糙度逐渐增大, 打印高精度零件时应选用较小的铺粉厚度<sup>[13]</sup>。Leon等人选择SLM工艺参数时, 在一定范围内提高激光功率, 试件表面粗糙度降低, 当激光功率过高时, 产生球化现象, 表面质量反而降低<sup>[14]</sup>。赵鑫等人研究了保护气氛和热处理温度等参数对AlSi10Mg成形件的影响, 最终成形件尺寸精度误差小于0.2 mm<sup>[15]</sup>。Majeed等人分析了热处理对AlSi10Mg样件致密度和孔隙率的影响<sup>[16]</sup>。王孟等人基于离散元和流体力学分析了粉末粒径对SLM成形AlSi10Mg样件成形质量的影响, 中等粉末粒径可

作者简介:

刘尚阳 (1999-), 男, 硕士生, 研究方向为激光增材技术。E-mail: 992829765@qq.com

通讯作者:

茅健, 男, 博士, 教授。E-mail: jmiao@sues.edu.cn

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2024) 10-1367-07

基金项目:

陕西省重点研发计划 (2023-YBCY-110)。

收稿日期:

2024-01-02 收到初稿,

2024-03-21 收到修订稿。

以提高致密度<sup>[17]</sup>。Ham等人从SLM测量数据中得到回归模型和趋势,能量密度的变化率影响工件内部的相对密度和孔隙率的形成,最佳能量密度范围为50~60 J/mm<sup>3</sup><sup>[18]</sup>。朱小刚等人研究了SLM成形不同倾斜角度下倾斜面的表面质量,倾斜角度不超过45°时,成形件表面质量较好,当倾斜角度超过50°时,成形表面出现坍塌现象<sup>[19]</sup>。刘嘉源研究了粉末利用循环次数对AlSi10Mg合金成形件质量的影响,循环次数达到15次后成形件产生较多孔洞,从而导致成形件质量降低<sup>[20]</sup>。Yang等人研究了能量密度对样件悬垂面的影响,通过优化轮廓工艺参数,使得悬垂面的表面粗糙度降低至4 μm<sup>[21]</sup>。

为了探究SLM成形微波组件脊喇叭的表面质量,本文提出了正交试验法对其表面质量进行研究,分析激光功率、扫描速度和扫描间距这三个工艺参数,得到最佳工艺参数,旨在为后续提高微波组件的表面质量提供参考。

## 1 脊喇叭的结构设计

微波组件脊喇叭结构如图1所示,它包含脊喇叭外壁、波导和通孔。脊喇叭的喇叭外壁互相平行,与波导结构形成开口结构,通孔预留给馈电探针耦合馈电,脊喇叭整体采用AlSi10Mg材料。脊喇叭整体尺寸104 mm×29 mm×18 mm,脊喇叭波导口径的尺寸分别为12.5 mm和9.9 mm,脊宽为3.1 mm,波导到短路板之间的距离为1 mm,阶梯脊长度为6.25 mm。

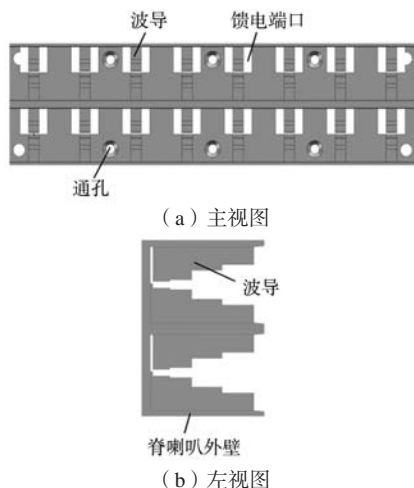


图1 脊喇叭结构立体图

Fig. 1 Stereogram of the ridge horn structure

## 2 SLM成形脊喇叭工艺设计

### 2.1 SLM 原理

图2为SLM增材制造工艺原理及装置,增材制造设

备主要结构包括粉床、氩气保护室、激光发射器、粉容器、基座等。激光根据预设好的扫描速度和功率对粉床进行扫描,由于高能激光束的输入,金属粉末迅速熔融,然后粘附在先前粘附的基底或成形层上,从而形成金属粘结。在这个过程中发生了相变等一些现象<sup>[22]</sup>。

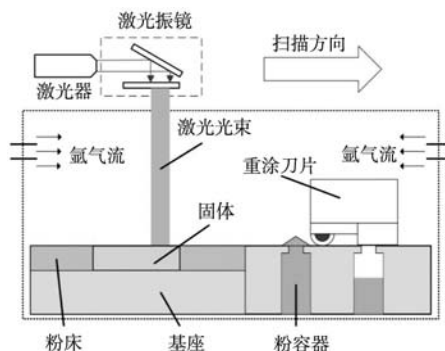


图2 SLM增材制造工艺原理

Fig. 2 Principle of the SLM additive manufacturing process

### 2.2 SLM 打印 AlSi10Mg 脊喇叭工艺路线

脊喇叭的SLM工艺流程(图3)分为前处理、脊喇叭加工、后处理、零件检测四个部分,各环节包含如下的流程。

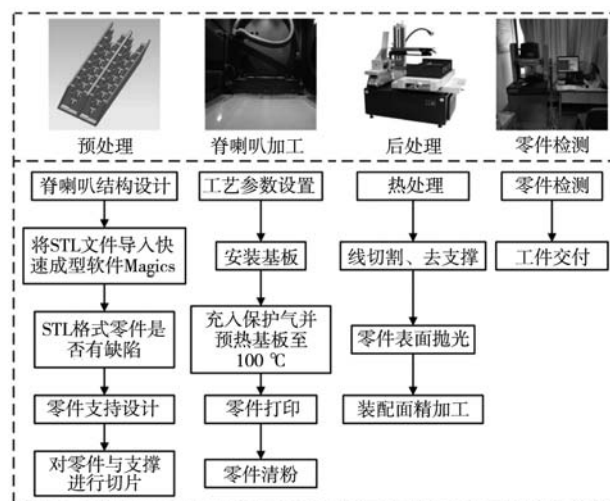


图3 脊喇叭SLM加工流程图

Fig. 3 Flow chart of the SLM processing of the ridge horn

(1) 前处理主要是将设计好的脊喇叭结构STL文件通过Magics软件检查是否存在法向量反向、三角面片缺损、重叠等缺陷,然后再对零件自动或手动生成支撑,最后对零件与支撑进行切片,设定切片参数。

(2) 脊喇叭加工通过打印参数设置并基于增材制造设备完成脊喇叭成形。本流程主要包含调入切片后的文件、在成形室内装上基板、对成形室内充入保护

气、基板预热、加工零件、对零件上的粉末进行清除等工艺流程。

(3) 后处理包括零件和基板进行去应力热处理、线切割、去支撑等工艺流程。

(4) 最后的零件检测环节包括对AlSi10Mg脊喇叭表面形貌、粗糙度等进行观测，最后是零件交付。

### 3 试验研究

#### 3.1 试验设备及材料

试验采用如图4所示的SLM280金属3D打印机和白光干涉轮廓仪，AlSi10Mg金属粉末作为试验材料，粒径为20~63  $\mu\text{m}$ ，平均粒径为45.1  $\mu\text{m}$ ，化学成分如表1所示。将AlSi10Mg金属粉末进行真空干燥处理，为了防止AlSi10Mg金属粉末在高温成形过程中出现氧化，在设备的工作室内注入氩气保护气体。



(a) 金属3D打印机 (b) 白光干涉轮廓仪

图4 试验设备

Fig. 4 Experimental equipment

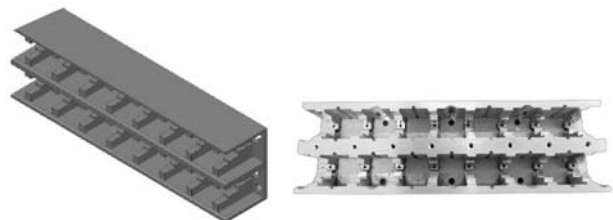
表1 AlSi10Mg 的化学成分

Table 1 Chemical composition of the AlSi10Mg  $w_B/\%$

Si	Mg	Fe	Mn	N	O	Ti	Al
9-11	0.25-0.45	$\leq 0.25$	$\leq 0.1$	$\leq 0.2$	$\leq 0.2$	$\leq 0.15$	余量

#### 3.2 试验方法

微波组件脊喇叭的三维打印模型与样件实物如图5所示。脊喇叭打印完成后，利用线切割方式将脊喇叭与基板剖开。随机选取6个测量点进行表面粗糙度的测量，以6个测量点的平均值作为该工艺参数下的表面粗糙度的值。采用正交试验方法，对激光功率、扫描速



(a) 模型 (b) 实物图

图5 脊喇叭打印模型与实物图

Fig. 5 Ridge horn print model with physical drawings.

率和扫描间距进行研究，试验设计与试验结果如表2所示。其中因素1为激光功率（300~400 W，步进值为50 W）三水平；因素2为扫描速率（600~1 200 mm/s，步进值为600 mm/s）三水平；因素3为扫描间距（0.08~0.12 mm，步进值为0.02 mm）三水平，铺粉层厚30  $\mu\text{m}$ 。

表2 SLM工艺参数正交试验表

Table 2 Orthogonal experiment table of the SLM process parameters

序号	激光功率/W	扫描速度 / ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	扫描间距/mm	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$
1	300	600	0.08	2.51
2	300	1 200	0.10	2.93
3	300	18 00	0.12	2.58
4	350	600	0.12	2.92
5	350	1 200	0.08	2.39
6	350	1 800	0.10	2.54
7	400	600	0.10	2.72
8	400	1 200	0.12	2.66
9	400	1 800	0.08	2.49

#### 3.3 结果与分析

根据表2的试验结果，对SLM打印AlSi10Mg脊喇叭表面作为响应指标进行数据处理和分析，得到了表3表面粗糙度均值与极差。极差大小反应出了每个因素在试验中的影响程度，从表3中可得激光功率、扫描速度和扫描间距都对表面粗糙度有不同程度的影响，其中扫描间距的极差比激光功率和扫描速度都要大，因此扫描间距是影响SLM打印AlSi10Mg脊喇叭表面粗糙度的主要因素，激光功率和扫描速度为次要影响因素。最佳工艺参数组合为激光功率为350 W、扫描速度为1 200 mm/s和扫描间距为0.08 mm。

表3 表面粗糙度均值与极差

Table 3 Mean and range of the surface roughness

序号	激光功率/W	扫描速度/ ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	扫描间距/mm
平均值1	2.67	2.72	2.46
平均值2	2.61	2.66	2.72
平均值3	2.62	2.54	2.73
极差	0.06	0.18	0.27

图6为扫描速度为1 800 mm/s时不同激光功率下AlSi10Mg样品的表面轮廓。当激光功率分别为300 W、350 W和400 W时，对应的表面粗糙度 $R_a$ 值分别是2.58  $\mu\text{m}$ 、2.54  $\mu\text{m}$ 和2.49  $\mu\text{m}$ ，这表明随着激光功率从300 W增至400 W，表面粗糙度 $R_a$ 经历了微小的波动，

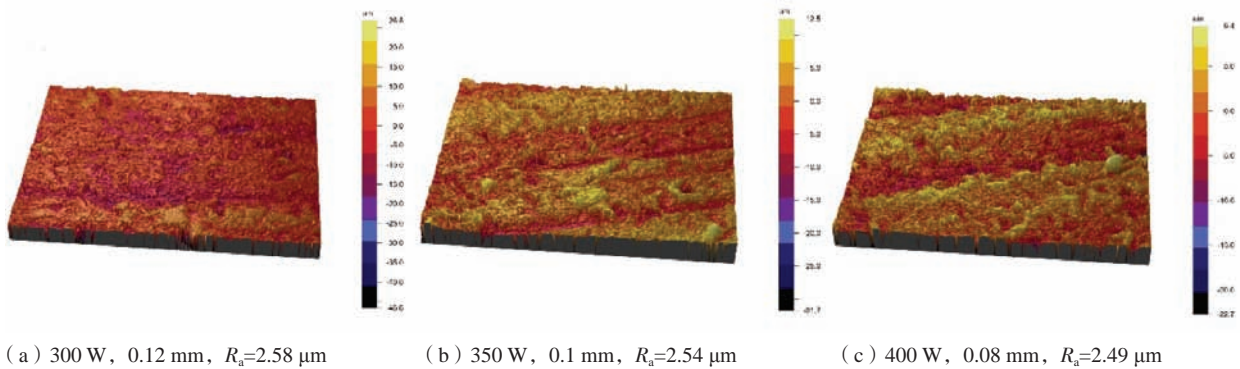


图6 不同激光功率下的试件表面轮廓图

Fig. 6 Surface profiles of the samples under different laser powers

先是略微上升后又降低,但这种变化幅度较小。如图6a所示,在激光功率为300 W时,虽然表面相对平整,但仍可见多处凹坑。当激光功率提升至400 W时,由于粉末吸收了更多能量而更充分熔化,从而表面质量得到一定程度的提升,但表面缺陷依然存在。由此可得,通过调整激光功率,可以在一定范围内优化样品表面质量。

图7为在激光功率设定为400 W条件下不同扫描速度对AlSi10Mg样品表面轮廓的影响。扫描速度分别为

600 mm/s、1 200 mm/s和1 800 mm/s时,样件的表面粗糙度 $R_a$ 值分别记录为2.72  $\mu\text{m}$ 、2.66  $\mu\text{m}$ 和2.49  $\mu\text{m}$ ,表明,随着扫描速度的提高,表面粗糙度逐渐降低,且减小的速率由缓变快。如图7a所示,在扫描速度为600 mm/s的情况下,粉末由于能量吸收不足而导致的熔化不完全,产生了显著的球化现象,使得表面质量较低。然而,随着扫描速度的增加至1 800 mm/s,样件的表面轮廓变得更加平滑,凹坑数量显著减少。

图8为激光功率设为350 W时,不同扫描间距对

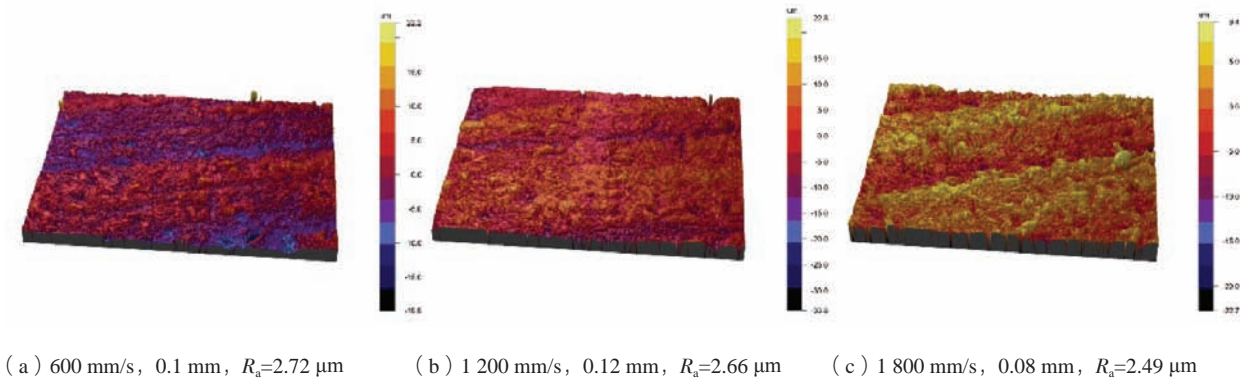


图7 不同扫描速度下的试件表面轮廓图

Fig. 7 Sample surface profiles at different scanning speeds

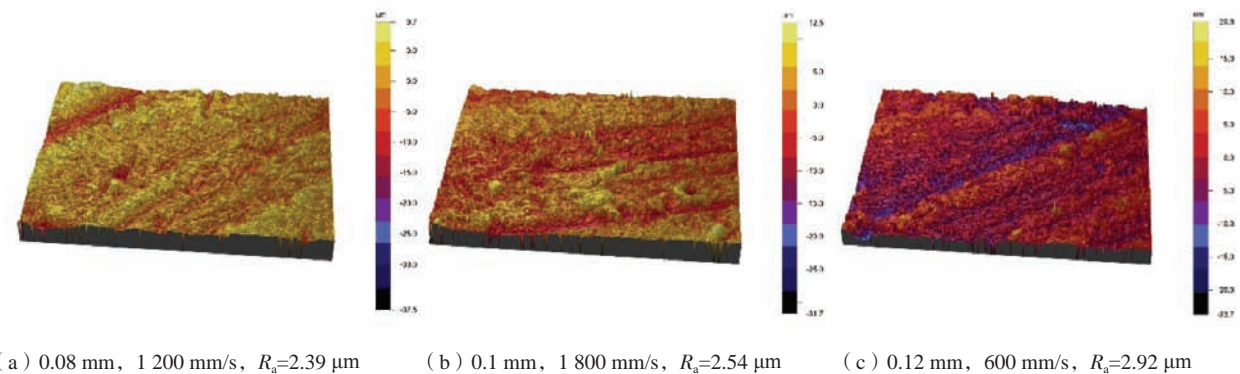


图8 不同扫描间距下的试件表面轮廓图

Fig. 8 The surface profiles of the samples under different scanning spacings

AlSi10Mg样品表面轮廓的影响。扫描间距设置为0.08 mm、0.1 mm和0.12 mm时,样品的表面粗糙度 $R_a$ 值分别是2.39  $\mu\text{m}$ 、2.54  $\mu\text{m}$ 和2.92  $\mu\text{m}$ ,显示出,随着扫描间距的增加,表面粗糙度逐步上升,且增幅趋势由快转慢。如图8a所示,在扫描间距为0.08 mm的条件下,样品表面较平滑,仅有少量凹凸,说明在较小的扫描间距下粉末能够得到充分熔化,达到较好的表面质量。然而,随着扫描间距的扩大,样品表面开始出现更加明显的波浪状纹理和更多的凹坑,导致表面质量下降。这表明,适当的扫描间距对于保证样品表面光滑度和减少表面缺陷至关重要,而扫描间距的增加会对表面质量产生负面影响。

为了深入研究样件的微观组织结构,对序号为4、5、7的AlSi10Mg脊喇叭上表面进行EBSD测量,测量区集中在包含粗晶区和细晶区以及热影响区的熔池边界,在AlSi10Mg脊喇叭上出现较为明显的熔合线。在图9b中可以看到,尺寸较小的等轴晶粒,晶粒尺寸越小,金属材料的强度和硬度会越高,对位错运动的阻碍作用增强,使得材料更难以变形和断裂。同时,较

小的晶粒尺寸还可以提高材料的塑性和韧性,使得材料在受到冲击和振动时能够更好地吸收能量。在图9c中,晶粒尺寸较大,除了等轴晶粒还存在少许柱状晶粒,在较高冷却速度的凝固条件下,柱状晶粒更容易形成。如果在凝固过程中某些区域或时间点的冷却速度较慢,可能会形成等轴晶粒。因此,晶粒尺寸较大且同时存在等轴和柱状晶粒可能表明,凝固过程中存在温度梯度的变化或冷却速度的不均匀性。

通过EBSD图进一步分析不同工艺参数下晶粒的取向特征,如图10所示为{100}、{110}和{111}方向的极图和反极图。由图10可得,不同工艺参数下的AlSi10Mg脊喇叭都表现出显著的织构方向,当选用序号4和序号5的工艺参数时,试件呈现立方织构特征,立方织构特征通常提供更均匀的材料性质,会使得电磁特性的均匀分布,这种均匀性可以提供一致的电磁响应,从而保证微波组件在各个方向上的性能一致。而序号7的试件呈现纤维织构特征,纤维织构特征会导致各向异性的电磁特性,这意味着沿着不同的晶体取向,材料的电导率和磁导率可能会变化。

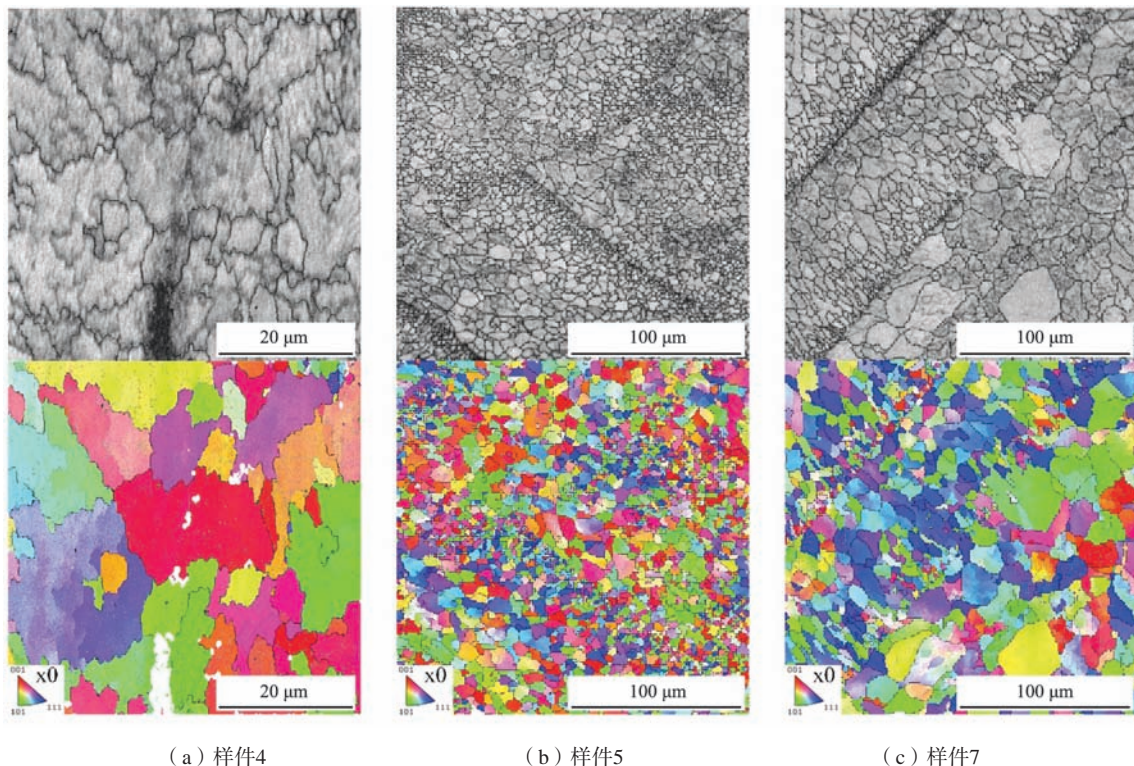


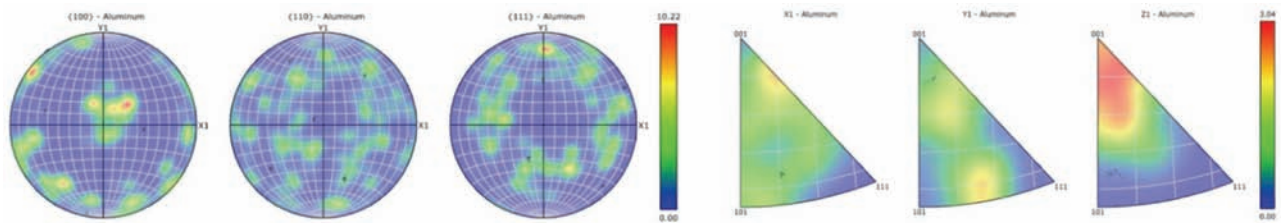
图9 样件的EBSD取向成像图  
Fig. 9 EBSD orientation images of the samples

## 4 结论

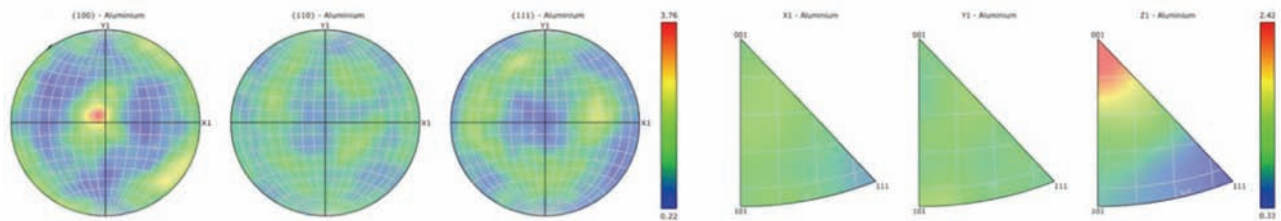
(1) 扫描间距是影响表面粗糙度的主要因素,而激光功率和扫描速度则是次要因素。试验确定了最优

的工艺参数组合:激光功率350 W、扫描速度1200 mm/s和扫描间距0.08 mm。

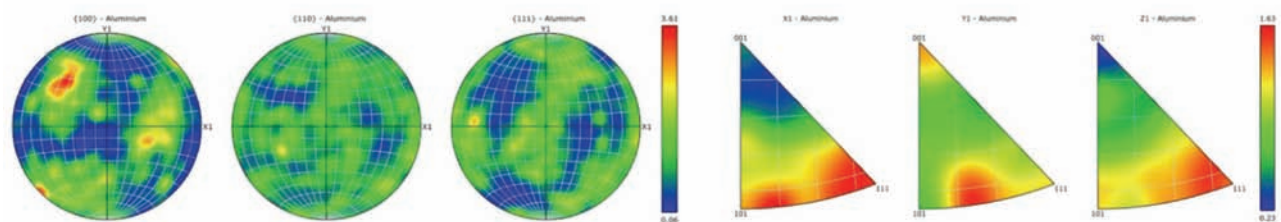
(2) 激光功率在300 W到400 W变化时,表面粗



(a) 样件4的极图与反极图



(b) 样件5的极图与反极图



(c) 样件7的极图与反极图

图10 AlSi10Mg样件的极图与反极图

Fig. 10 Pole diagram and inverse pole diagrams of the AlSi10Mg samples

糙度 $R_a$ 有轻微的先增后减变化；扫描速度从600 mm/s增加至1 800 mm/s时，表面粗糙度 $R_a$ 逐渐降低；扫描间距从0.08 mm增至0.12 mm时，表面粗糙度 $R_a$ 持续上升。表面质量不佳主要由粉末熔化不充分引起的球化现象和波纹现象导致，通过优化粉末重熔和调整激光能量

密度可以有效减少这些表面缺陷。

(3) 对AlSi10Mg脊喇叭进行的EBSD分析表明，在最佳工艺参数下，脊喇叭表面形成了较小的等轴晶粒，显示出立方织构特征，显著提升了表面质量。

#### 参考文献:

- [1] 姜海燕, 林卫凯, 吴世彪, 等. 激光选区熔化技术的应用现状及发展趋势 [J]. 机械工程与自动化, 2019 (5): 223-226.
- [2] 刘泊良, 马志毅, 赵军, 等. 选区激光熔化制备镍基高温合金的研究进展 [J]. 铸造, 2023, 72 (5): 485-495.
- [3] 奥妮, 何子昂, 吴圣川, 等. 激光增材制造AlSi10Mg合金的力学性能研究进展 [J]. 焊接学报, 2022, 43 (9): 1-19+113.
- [4] 刘志权, 尹家新, 徐志锋, 等. ZL114A铝合金激光选区熔化成形工艺 [J]. 铸造, 2018, 67 (11): 961-967.
- [5] 黄洁, 易俊兰, 李明亮, 等. 浅析影响选区激光熔化技术在民用飞机领域应用的关键 [J]. 应用激光, 2022, 42 (10): 53-60.
- [6] 许立讲, 韩宗杰, 胡永芳. 星载微波组件微组装技术研究 [J]. 电子机械工程, 2022, 38 (3): 55-58.
- [7] 王彬文, 陈先民, 苏运来, 等. 中国航空工业疲劳与结构完整性研究进展与展望 [J]. 航空学报, 2021, 42 (5): 6-44.
- [8] 高逸晖, 吴昕雷. 磨粒流技术在3D打印脊波喇叭中的应用 [J]. 电子工艺技术, 2021, 42 (5): 278-280, 288.
- [9] 邹炬, 陈盛贵, 陈秋丹, 等. 工艺参数对SLM成形AlSi10Mg合金组织与硬度的影响 [J]. 中国铸造装备与技术, 2022, 57 (1): 74-79.
- [10] 申川, 章桥新, 余金桂, 等. 选区激光熔化扫描间距对AlSi10Mg合金致密度的影响 [J]. 热加工工艺, 2024 (3): 14-18.
- [11] 时云, 王联凤, 杜洋, 等. AlSi10Mg铝合金选区激光熔化成形缺陷控制和表面质量优化 [J]. 应用激光, 2023, 43 (3): 19-25.
- [12] LIU Y, ZHANG J, PANG Z, et al. Investigation into the influence of laser energy input on selective laser melted thin-walled parts by response surface method [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018 (103): 34-45.
- [13] 史振伟, 王敏杰, 戚文军, 等. 激光选区熔化3D打印AlSi10Mg合金的铺粉厚度 [J]. 中国机械工程, 2022, 33 (8): 959-964.

- [14] LEON A, AGHION E. Effect of surface roughness on corrosion fatigue performance of AlSi10Mg alloy produced by selective laser melting (SLM) [J]. *Materials Characterization*, 2017, 131: 188–194.
- [15] 赵鑫, 虞雨涯, 吴圣川, 等. 新型飞机用铝合金薄壁件的选区激光熔化成形研究 [J]. *电焊机*, 2021, 51 (3): 1–7, 111.
- [16] MAJEED A, MUZAMIL M, LV J X, et al. Heat treatment influences densification and porosity of AlSi10Mg alloy thin-walled parts manufactured by selective laser melting technique [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2019, 41 (6): 1–13.
- [17] 王孟, 杨永强, VYACHESLAV Trofimov, 等. 粉末粒径对AlSi10Mg合金选区激光熔化成形的影响 [J]. *金属学报*, 2023, 59 (01): 147–156.
- [18] MAAMOUN A H, XUE Y F, ELBESTAWI M A, et al. Effect of selective laser melting process parameters on the quality of Al alloy parts: Powder characterization, density, surface roughness, and dimensional accuracy [J]. *Materials*, 2018, 11 (12): 2343.
- [19] 朱小刚, 孙靖, 王联凤, 等. 激光选区熔化成形铝合金的组织、性能与倾斜面成形质量 [J]. *机械工程材料*, 2017, 41 (2): 77–80.
- [20] 刘嘉源. 粉末循环次数对AlSi10Mg合金选区激光熔化成形规律影响研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
- [21] YANG T, LIU TT, LIAO W H, et al. The influence of process parameters on vertical surface roughness of the AlSi10Mg parts fabricated by selective laser melting [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 266: 26–36.
- [22] 陶攀, 李怀学, 许庆彦, 等. 激光选区熔化工艺过程数值模拟的国内外研究现状 [J]. *铸造*, 2017, 66 (7): 695–701.

---

## Study on Factors Affecting Surface Quality of Selective Laser Melting AlSi10Mg Microwave Module

LIU Shang-yang<sup>1</sup>, YANG Bo<sup>2</sup>, MAO Jian<sup>1</sup>

(1. Shanghai University of Engineering Science, School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai 201620, China; 2. The 20th Institute of CETC, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

### Abstract:

The internal structure of the microwave module is complex and the wall is thin and there are many cavities, which requires high surface quality. Traditional processing methods affect the processing efficiency and yield of microwave components, but the metal parts produced by Selective Laser Melting (SLM) have uniform dendrite structure and excellent quality. In this paper, the structure of the ridge horn of the microwave module was designed, and the SLM process of the ridge horn was established. The influences of laser power, scanning speed and scanning distance on the surface quality of the ridge horn of AlSi10Mg during selective laser melting were studied by orthogonal experiment. The experimental results showed that the main factors affecting the surface roughness were the scanning distance, and the laser power and scanning speed were the secondary factors. The optimal combination of the laser power was 350W, the scanning speed was 1 200 mm/s and the scanning distance was 0.08mm, which provides a basis for improving the surface accuracy of the microwave module from the perspective of SLM process parameters.

### Key words:

microwave module; AlSi10Mg; selective laser melting; process parameters; surface roughness