

# 激光选区熔化 AlSi7Mg 合金高周疲劳性能研究

邹田春, 陈敏英\*, 祝贺, 欧尧

中国民航大学适航学院, 天津 300300

**摘要** 为研究激光选区熔化(SLM)成形 AlSi7Mg 合金的高周疲劳性能,对合金沉积态试样进行静态拉伸试验和不同应力载荷的疲劳试验,通过金相显微镜和电子显微镜观察试样微观组织和疲劳断口形貌,并探究疲劳失效机理。结果表明,SLM AlSi7Mg 试样的拉伸性能明显高于铸造 AlSi7Mg,且抗拉强度和屈服强度均小于 SLM AlSi10Mg,但二者疲劳极限相当。与传统制备方法相比,试样微观组织分为三个区域:细晶区、粗晶区和热影响区,Si 相呈网状结构均匀嵌入  $\alpha$ -Al 基体中。通过断口分析,发现 SLM 成形 AlSi7Mg 试样的疲劳裂纹在气孔和夹杂物等缺陷处萌生,呈半圆形向四周放射状扩展,在剩余截面无法承受疲劳载荷时试样瞬间断裂,瞬断区具有解理面和韧窝的形貌特征。将 SLM AlSi7Mg 沉积态与 SLM AlSi10Mg 沉积态进行对比发现,二者拉伸性能和疲劳性能目前在宏观上差异较小,SLM 成形试样的微观组织相似且均含大量分散的缺陷。

**关键词** 激光光学; 激光选区熔化; AlSi7Mg; 微观组织; 高周疲劳; 失效机理

中图分类号 TG135

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.231408

## Research on High Cycle Fatigue Performance of AlSi7Mg Alloy Fabricated by Selective Laser Melting

Zou Tianchun, Chen Minying\*, Zhu He, Ou Yao

College of Airworthiness, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

**Abstract** In order to study the high-cycle fatigue properties of AlSi7Mg alloy fabricated by selective laser melting (SLM), the static tensile test and fatigue test under different stress loadings were performed on the as-built specimens. The microstructure and fatigue fracture morphology of the as-built specimens were observed by metallographic microscope and electron microscope, and the fatigue failure mechanisms were investigated. The results show that the tensile properties of SLM AlSi7Mg specimens are significantly higher than those of cast AlSi7Mg, and the tensile strength and yield strength are lower than those of SLM AlSi10Mg, but their fatigue limits are similar. Compared with traditional manufacturing method, the microstructure of the specimens is divided into three regions, namely the fine zone, coarse zone, and heat-affected zone. The Si phase is uniformly embedded in  $\alpha$ -Al matrix in a network structure. Through fracture morphology analysis, it is found that the fatigue cracks of SLM AlSi7Mg specimens are initiated at the defects such as pores and inclusion, and propagate radially in a semicircle manner. When the remaining section cannot bear the fatigue load, the samples fracture instantaneously, and the fracture zone has the morphology characteristics of cleavage surface and dimple. Comparing the as-built specimens of SLM AlSi7Mg and SLM AlSi10Mg, it is found that the macroscopic differences between the tensile properties and fatigue properties of the two specimens are currently small. The microstructure of specimens formed by SLM is similar and contains a large number of scattered defects.

**Key words** laser optics; selective laser melting; AlSi7Mg; microstructure; high cycle fatigue; failure mechanism

**OCIS codes** 140.3390;160.3900;180.5810

## 1 引言

铝合金作为轻金属材料,因具有比强度高、密

度低、导热性好、硬度和耐腐蚀性良好等性能,已在各种制造方法中得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。激光选区熔化(SLM)技术是以离散-堆积思想为基础,利用高能

收稿日期: 2020-02-17; 修回日期: 2020-03-20; 录用日期: 2020-04-17

基金项目: 天津市研究生科研创新项目(2019YJSS079)

\*E-mail: chenminying292@163.com

束激光熔化金属粉末,通过逐层铺粉、固化的方法成形致密度极高的实体零件,是近年来发展最迅速的金属增材制造技术之一,具有柔性高、无模具、周期短、不受材料限制等优点,可制造几何结构复杂的零件,因此 SLM 成形铝合金零部件在航空航天领域具有优越的发展前景<sup>[3-7]</sup>。在实际应用中,许多零部件处于低循环载荷环境,断裂形式以高周疲劳断裂为主,一般不发生明显的塑性变形,难以进行检测和预防。SLM 零件微观组织与传统制造零件不同,由于微观组织结构会影响裂纹萌生与扩展情况,其疲劳性能与传统制造试样存在差异,因此开展 SLM 铝合金的高周疲劳性能研究具有重要意义<sup>[8]</sup>。

目前,国内学者对 SLM 技术研究的主要关注点为工艺条件、冶金缺陷、热处理工艺改良、微观组织,以及拉伸性能和显微硬度等,对疲劳性能的研究较少。杨锦等<sup>[9-10]</sup>分别研究了 200  $\mu\text{m}$  层厚、不同激光功率和不同扫描速度对 SLM 316L 的微观组织、缺陷以及力学性能的影响。潘爱琼等<sup>[11]</sup>研究了不同扫描速度、扫描间距、层厚对 SLM 镍基单晶高温合金的缺陷和微观组织的影响。田健等<sup>[12]</sup>研究了不同工艺参数下的 SLM Cu-13.5Al-4Ni-0.5Ti 形状记忆合金试样的硬度和拉伸性能。侯伟等<sup>[13]</sup>研究了 SLM AlSi10Mg 试样水平和垂直方向的微观组织和力学性能的各向异性。国外对于 SLM 铝合金的疲劳性能研究相对较多。Brandl 等<sup>[14]</sup>等研究了不同粉末床温度、峰值硬化热处理和沉积方向对 SLM 成形 AlSi10Mg 合金微观组织和疲劳性能影响,发现沉积方向对 AlSi10Mg 的抗疲劳性影响最小。Aboulkhair 等<sup>[15]</sup>研究了热处理和机加工对 SLM AlSi10Mg 合金疲劳寿命的影响,发现热处理显著改善了材料的疲劳性能,未进行表面加工的单热单独处理可以产生更好的疲劳性能。Uzan 等<sup>[16]</sup>研究了不同热处理条件下 SLM AlSi10Mg 合金的疲劳性能,发现应力释放和热等静压处理会降低疲劳极限强度,通过评估疲劳试验后的断裂表面形态,建立了估算临界应力强度因子(K<sub>IC</sub>)的方法。Leon 等<sup>[17]</sup>研究了 SLM 成形 AlSi10Mg 合金低周疲劳性能,发现疲劳裂纹萌生总是始于未融化粉末和孔隙等缺陷。Siddique 等<sup>[18]</sup>研究了 SLM 成形 AlSi12 合金疲劳裂纹扩展行为,发现疲劳裂纹扩展机制由近表面的孔隙控制。Ngnekou 等<sup>[19]</sup>使用三维 X 射线断层扫描技术研究了热处理和缺陷尺寸与 SLM AlSi10Mg 疲劳性能间的关系,发现缺陷尺寸对疲

劳性能影响显著,T6 热处理能够提高疲劳性能。总体来说,国内外尚未对 SLM 成形铝合金疲劳性能开展系统的研究工作,目前仍处于起步阶段,且多局限于 AlSi10Mg 这一种材料,对其他 SLM 铝合金的疲劳性能的研究报道较少。AlSi7Mg 合金属于 Al-Si-Mg 系合金,相比于 AlSi10Mg,SLM AlSi7Mg 零部件具有更均衡的强度和延展性。近年来,对 SLM AlSi7Mg 进行工艺参数优化已可获得致密度 99% 以上的试样,提高试样质量和静态力学性能<sup>[20-21]</sup>,疲劳强度在一定程度上与材料的静态力学强度相关<sup>[22]</sup>,由于二者材料的差异,有必要对 SLM AlSi7Mg 疲劳性能进行研究。

本文对 SLM AlSi7Mg 合金沉积态试样开展了拉伸试验和高周疲劳试验,观察试样微观组织,分析不同应力幅值对 SLM AlSi7Mg 合金试样疲劳寿命的影响,并与 SLM AlSi10Mg 合金沉积态性能进行对比。对 SLM AlSi7Mg 试样的疲劳断口进行观察与分析,并探究疲劳失效类型和失效机理,展望后续关于 SLM AlSi7Mg 的研究方向与内容,为增材制造铝合金疲劳性能评估和疲劳寿命预测提供理论基础和依据。

## 2 试验制备与方法

### 2.1 SLM 试样制备

试验采用德国 SLM Solutions SLM 280 设备制备试样,使用由气雾化方法制备的 AlSi7Mg 合金粉末(见图 1,化学成分见表 1),粒径为 20~63  $\mu\text{m}$ ,平均粒径为 38.88  $\mu\text{m}$ 。制备试样时,充入氩气作为惰性保护气体,使成形腔内氧气含量小于 0.02%,基板预热至 200  $^{\circ}\text{C}$ 。SLM 成形的工艺参数:激光功率为 350 W、扫描速度为 1600 mm/s、扫描间距为 0.13 mm、铺粉层厚为 30  $\mu\text{m}$ 。采用单向扫描、逐层旋转 67 $^{\circ}$ 的扫描策略,SLM 成形方向为 XY(水平)方向。成形结束后,采用线切割机从基板上切割试样。

本试验成形 15 mm $\times$ 15 mm $\times$ 15 mm 的块状试样,成形后采用 Keller 试剂(95 mL 去离子水、2.5 mL HNO<sub>3</sub>、1.5 mL HCl、1.0 mL HF)腐蚀试样 15 s,作为金相试样。成形全长 75 mm、直径 15 mm 的柱状试样,按图 2 进行机加工并抛光,作为疲劳试样。对柱状试样加工成总长为 71 mm、平行长度为 31.5 mm、平行长度直径为 5 mm、过渡弧半径为 5 mm 的拉伸试样,采用英斯特朗 5982 拉伸机对试样进行拉伸性能试验。

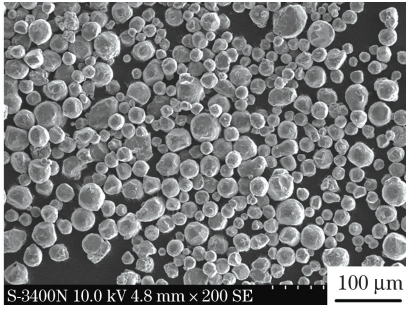


图 1 AlSi7Mg 合金粉末形貌

Fig.1 Morphology of AlSi7Mg alloy powders

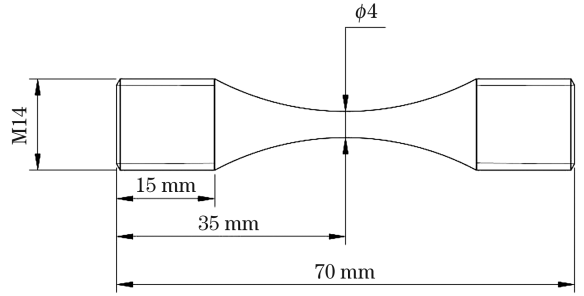


图 2 SLM 成形 AlSi7Mg 合金疲劳试样

Fig. 2 Standard fatigue sample of AlSi7Mg alloy formed by SLM

表 1 AlSi7Mg 合金粉末化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of the AlSi7Mg alloy powders (mass fraction, %)

Sample	Si	Mg	Fe	Cu	Zn	Ti	Mn	Al
Norm value	6.5—7.5	0.45—0.7	≤0.19	≤0.05	≤0.07	0.08—0.25	≤0.10	Bal.
Actual value	7.01	0.617	0.141	0.01	<0.009	0.089	<0.003	Bal.

## 2.2 疲劳试验与性能表征

试验使用长春仟邦 QBG-100 型高频疲劳试验机进行恒定幅值加载的高周疲劳试验, 设定试验温度为室温(25 °C), 加载频率  $f = 75$  Hz, 加载波形为正弦波, 应力比  $R = -1$ , 最大应力为 220 MPa。试验结束后, 采用蔡司 Scope A1 金相显微镜和日立 Hitachi S-3400N 型电子显微镜对沉积态合金试样的微观组织和疲劳试样的断口形貌进行观察。

## 3 结果与分析

### 3.1 微观组织观察

图 3 为 SLM 成形 AlSi7Mg 合金沉积态微观组织横截面和纵截面的光学显微镜(OM)图。图 3(a) 为深色区域为柱状熔池, 浅色为熔池边缘, 相邻熔

池之间存在搭接区域, 部分熔池之间存在一定夹角, 这是因为本文采用了单向扫描、逐层旋转 67° 的扫描策略。图 3(b) 为纵截面呈半圆形分布, 这是因为 SLM 过程具有重熔现象, 上层粉末在熔化时导致下层熔池的上部分发生再次熔化<sup>[23-26]</sup>。图 4 为熔池搭接处的 SEM 图, 微观组织呈 Si 相网状结构嵌入  $\alpha$ -Al 基体中。微观组织可以分为三个区域: 细晶区、粗晶区和热影响区(HAZ)。熔池边界的温度梯度大、凝固速率小, 使得组织过冷生成相对较粗糙的平面晶粒, 形成粗晶区。从熔池边缘到中心, 温度梯度逐渐降低, 凝固速率逐渐提高, 晶粒由胞状向树枝状转变, 最终在熔池中心形成等轴晶粒组成的细晶区。在相邻熔池的搭接区, 重熔产生的余热导致 Si 颗粒析出并分布在 Al 基体中, 在细晶区与粗晶区之间形成热影响区。

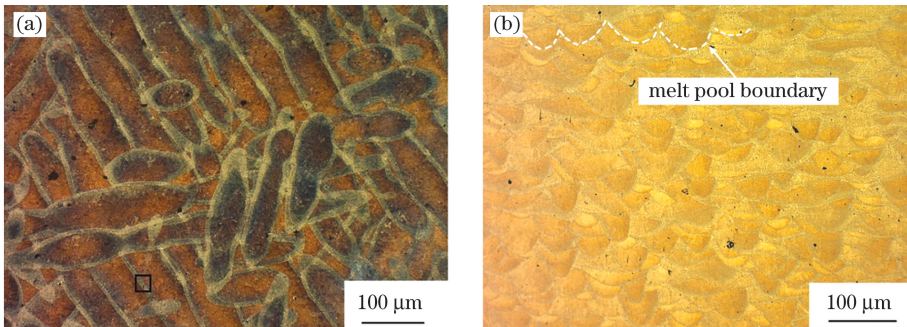


图 3 SLM 成形 AlSi7Mg 合金沉积态微观组织 OM 像。(a)横截面;(b)纵截面

Fig. 3 OM image of microstructure of as-built AlSi7Mg alloy formed by SLM. (a) Horizontal cross section; (b) vertical cross section

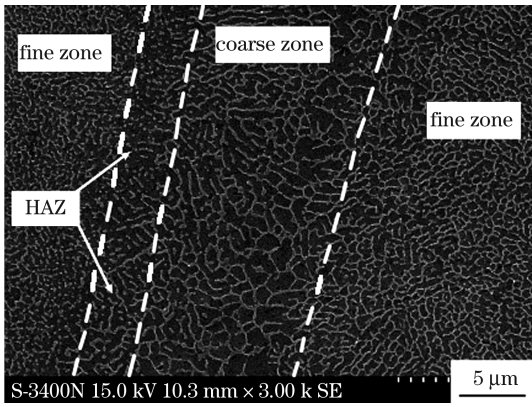


图 4 SLM 成形 AlSi7Mg 合金沉积态微观组织横截面搭接处 SEM 像

Fig. 4 SEM image of the cross-section overlap of as-built microstructure of the AlSi7Mg alloy formed by SLM

表 2 铸造与 SLM 成形 AlSi7Mg 和 AlSi10Mg 合金拉伸性能对比

Table 2 Comparison of tensile properties of cast and SLM formed AlSi7Mg and AlSi10Mg alloys

Specimen	Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Ductility/%
Cast AlSi7Mg	275.00	185.00	5.00
SLM AlSi7Mg(as-built specimens)	435.78	299.23	14.36
Cast AlSi10Mg	315.00	165.00	5.00
SLM AlSi10Mg(as-built specimens)	477.50	319.00	4.00

### 3.3 S-N 曲线

应力-寿命(S-N)曲线是表征一定循环特征下标准时间的加载应力与疲劳寿命之间关系的曲线。应力幅值和循环周次的关系通常以指数形式表达,表达式为

$$\exp(m \cdot \sigma_a) \cdot N_f = C, \quad (1)$$

式中:  $\sigma_a$  为所施加循环载荷的应力幅值;  $N_f$  为疲劳寿命值;  $m$  为 S-N 曲线的斜率;  $C$  为材料常数。

S-N 曲线的斜率  $m$  可利用最小二乘法原理拟合获得,拟合公式为

$$\sigma_a = B \lg(N_f) + A, \quad (2)$$

式中:  $B$  和  $A$  为拟合常数。

根据各组试样结果可获得沉积态 AlSi7Mg 合金试样 S-N 曲线拟合公式为

$$\sigma_a = -28.06 \lg(N_f) + 324.26. \quad (3)$$

根据上述公式,对疲劳试样的测试结果进行计算拟合得到图 5 所示的 S-N 曲线图(对应存活率为 50%)。根据疲劳循环周次达到  $10^5$  以上为高周疲劳水平,可知本次试验在应力幅值最大为 200 MPa 时就已达到高周疲劳。当应力幅值为 120 MPa 时,试样的疲劳寿命超过  $10^7$  周次,达到超高周疲劳水

### 3.2 拉伸性能

对 SLM AlSi7Mg 沉积态试样进行静态拉伸试验,得到该试样的抗拉强度、屈服强度和延伸率分别为 435.78 MPa、299.23 MPa 和 14.36%。如表 2 所示,将传统铸造 AlSi7Mg、铸造 AlSi10Mg<sup>[27]</sup>、SLM AlSi7Mg 和 SLM AlSi10Mg 合金<sup>[28]</sup> 拉伸性能进行对比,发现 SLM 铝合金抗拉强度和屈服强度明显高于铸造铝合金,这是因为 SLM 铝合金成形过程中冷却速率高,细化晶粒产生细晶强化和固溶强化的共同作用,导致 SLM 铝合金的拉伸强度和屈服强度高于铸造铝合金<sup>[29,30]</sup>。本文中 SLM AlSi7Mg 的抗拉强度和屈服强度均小于 SLM AlSi10Mg,但是延伸率显著大于 SLM AlSi10Mg。

平,应力幅值为 100 MPa 时的试样并未断裂。铝合金没有明显的疲劳极限,将循环周次为  $10^7$  所对应的应力幅值定为疲劳极限<sup>[31-32]</sup>,由(3)式可以求得试样疲劳极限为 127.84 MPa。对比 SLM AlSi10Mg 沉积态试样 125 MPa 的疲劳极限<sup>[16]</sup>,二者疲劳强度相当,无明显差异。根据钟群鹏<sup>[22]</sup>给出的经验公式可知,铝合金对称弯曲疲劳极限( $\sigma_{-1}$ )主要与抗拉强度有关,由 3.2 节内容可知,SLM AlSi7Mg 和 AlSi10Mg 的抗拉强度差异较小,因此

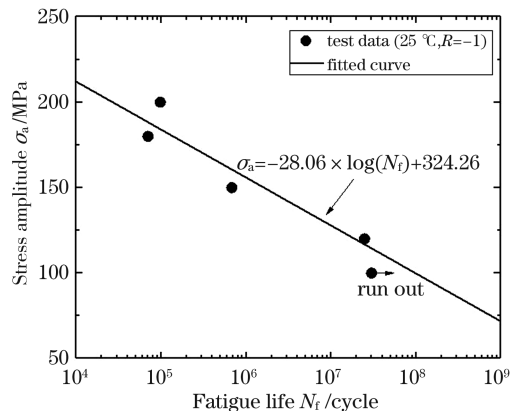


图 5 AlSi7Mg 铝合金疲劳试样 S-N 曲线图

Fig. 5 S-N curve of AlSi7Mg aluminum alloy fatigue specimen

二者疲劳极限值也相当。

### 3.4 疲劳断口分析及失效机理

通过扫描电镜对疲劳损伤进行分析,得到图6不同应力幅值(120、150、180、200 MPa)时 AlSi7Mg 合金的疲劳断口图及部分区域的放大图。由图6可知,疲劳源区和疲劳裂纹扩展区均呈半圆形或半椭圆形,疲劳源区所占面积较小,且均为单个疲劳源。随着应力幅值的增大,试样的瞬断区面积占断口总面积的比例增大,疲劳寿命减小。疲劳裂纹萌生于次表面上的气孔和夹杂物等缺陷中,其中孔隙是气体未能及时溢出或液态金属收缩而形成的,夹杂物为氧化物或未熔化粉末聚集而成的。在循环载荷作用下,缺陷使试样表面不连续,产生应力集中,从而引起局部塑性变形,加快微裂纹的萌生<sup>[13,15,31]</sup>。疲劳裂纹从疲劳源处呈放射状向四周辐射,并在疲劳扩展区的气孔、蚀坑和夹杂物等缺陷处产生新的疲劳裂纹。由图6(c)中的疲劳裂纹扩展区与瞬断

区交界处的放大图可知,上部分疲劳扩展区变形程度较小且较为平坦,可以清晰看到垂直于裂纹扩展方向的疲劳条纹,下部分可确定为瞬断区,表面较为光亮。相对于疲劳扩展区,瞬断区表面变形程度较大且不平坦,观察到小气孔、夹杂物等缺陷。在图6瞬断区中可明显观察到河流状解理面和韧窝形貌,表明 SLM AlSi7Mg 合金试样断口同时具有脆性断裂和韧性断裂的特点。

对 SLM AlSi7Mg 合金疲劳失效机理进行分析可知,疲劳源区出现在试样次表面,由于位错相互作用,疲劳裂纹在气孔和夹杂物形成的缺陷处萌生。裂纹源产生后,裂纹沿着垂直最大应力方向扩展,进入裂纹扩展阶段。由于 SLM 成形过程中产生的孔隙和夹杂物等缺陷的存在,疲劳扩展区产生小裂纹。随着裂纹的不断扩展,剩余截面的应力不断增大,裂纹扩展速度加快,裂纹尺寸达到临界值时,剩余截面无法承受疲劳载荷,试样瞬间断裂。

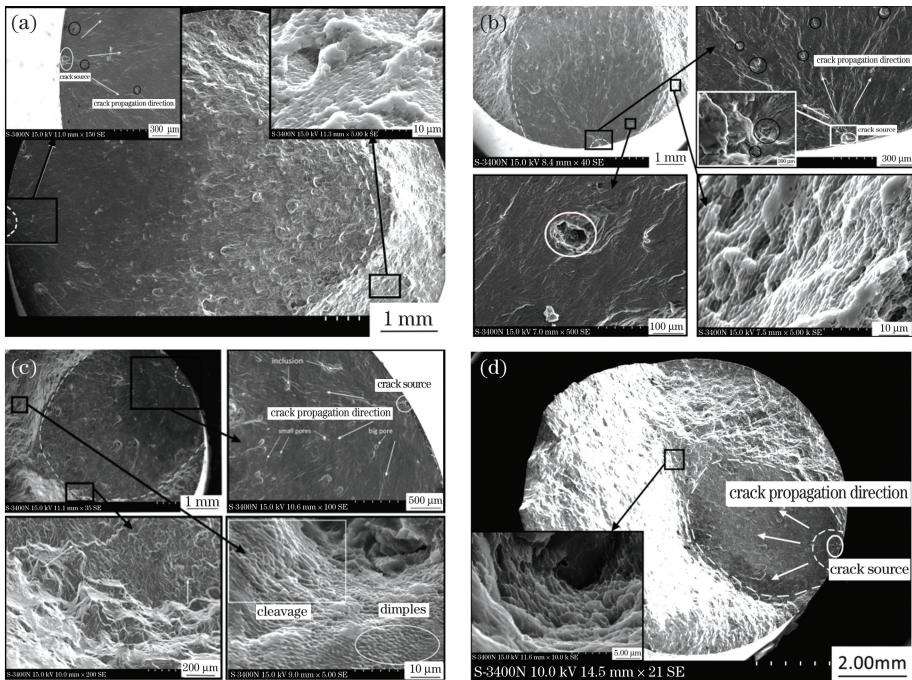


图6 不同应力幅值下 AlSi7Mg 合金疲劳断口图。(a)120 MPa; (b)150 MPa; (c)180 MPa; (d)200 MPa

Fig. 6 Fatigue fracture diagrams of AlSi7Mg alloy under different stress amplitudes. (a) 120 MPa; (b) 150 MPa; (c) 180 MPa; (d) 200 MPa

## 4 结 论

本文对激光选区熔化 AlSi7Mg 合金沉积态试样进行了不同应力幅值下的疲劳试样测试,分析了试样的微观组织、S-N 曲线和断裂机理,发现与传统制备方法相比,由于试样存在网状结构的微观组织,所以在一定程度上可以降低疲劳裂纹的扩展,

从而提高了试样疲劳寿命,甚至在应力幅值为 200 MPa 时,达到超高周疲劳范围( $2 \times 10^7$  周次)。SLM AlSi7Mg 试样的疲劳裂纹均起源于试样次表面的孔洞和夹杂物等缺陷,试样断口同时具有脆性断裂和韧性断裂的特点,断裂过程相对复杂。由于 AlSi7Mg 和 AlSi10Mg 在材料上具有一定差异,在 SLM 成形下,相比于 AlSi10Mg 试样,AlSi7Mg 的

抗拉强度和屈服强度较低,延展性更高,但最后结果显示,二者疲劳极限几乎相等,这可能是因为 SLM 试样出现了无法控制的缺陷,导致其疲劳性能与常规铸造金属的规律有所不同,因此对 SLM 成形试样的缺陷控制及其微观组织和疲劳性能之间的内在联系进行研究仍是目前需要攻克的主要难题。

本文数据只研究了沉积态试样的疲劳性能,而在实际应用中零部件会进行一定的后处理,后续应考虑继续研究关于 SLM AlSi7Mg 后处理之后的疲劳性能,并与其他材料进行对比分析,更加全面地了解 SLM 铝合金试样微观组织与力学性能之间的影响规律,探索可以获得优异力学性能的 SLM 工艺参数,以实现 SLM 铝合金在工程中的实际应用。

### 参 考 文 献

- [1] Zou T C, Ou Y, Zhu H, et al. Effect of heat treatment on microstructure and tensile properties of AlSi7Mg alloy fabricated by selective laser melting [J]. Hot Working Technology, 2019, 48(20): 154-157.  
邹田春, 欧尧, 祝贺, 等. 热处理对激光选区熔化 AlSi7Mg 合金微观组织和拉伸性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2019, 48(20): 154-157.
- [2] Liu Y L, Yi J H, Yang D L, et al. Effects of solution temperature on microstructure and high cycle fatigue performance of 7075 aluminum alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41(3): 1-7.  
刘义伦, 羿九火, 杨大炼, 等. 固溶温度对 7075 铝合金组织及高周疲劳性能的影响 [J]. 金属热处理, 2016, 41(3): 1-7.
- [3] Yuan X B, Wei Q S, Wen S F, et al. Research on selective laser melting AlSi10Mg alloy powder [J]. Hot Working Technology, 2014, 43(4): 91-94.  
袁学兵, 魏青松, 文世峰, 等. 选择性激光熔化 AlSi10Mg 合金粉末研究 [J]. 热加工工艺, 2014, 43(4): 91-94.
- [4] Zhang S, Gui R Z, Wei Q S, et al. Cracking behavior and formation mechanism of TC4 alloy formed by selective laser melting [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(23): 21-27.  
张升, 桂睿智, 魏青松, 等. 选择性激光熔化成形 TC4 钛合金开裂行为及其机理研究 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(23): 21-27.
- [5] Ma T, Liu T T, Liao W H, et al. Fatigue properties of Ti-6Al-4V produced by selective laser melting [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1102012.  
马涛, 刘婷婷, 廖文和, 等. 激光选区熔化成形 Ti-6Al-4V 疲劳性能研究 [J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1102012.
- [6] Zou T C, Ou Y, Qin J X. Research development of additive manufacturing of high-strength aluminium alloy [J]. Hot Working Technology, 2018, 47(20): 34-37.  
邹田春, 欧尧, 秦嘉徐. 高强铝合金增材制造技术的研究进展 [J]. 热加工工艺, 2018, 47(20): 34-37.
- [7] Yang Q, Lu Z L, Huang F X, et al. Research on status and development trend of laser additive manufacturing [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 507(12): 26-31.  
杨强, 鲁中良, 黄福享, 等. 激光增材制造技术的研究现状及发展趋势 [J]. 航空制造技术, 2016, 507(12): 26-31.
- [8] Chen D, Zhang Q X, Ning R, et al. The behavior of fatigue crack propagation of powder metallurgy aluminium alloys [J]. Materials Review, 2014, 28(17): 10-14.  
陈鼎, 张倩霞, 宁荣, 等. 粉末冶金铝合金的疲劳裂纹扩展行为 [J]. 材料导报, 2014, 28(17): 10-14.
- [9] Yang J, Liu Y D, Shi W T, et al. Process optimization and performance investigation in selective laser melting of large layer-thickness 316L powder [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(1): 011401.  
杨锦, 刘玉德, 石文天, 等. 大层厚 316L 选区激光熔化工艺优化及性能研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(1): 011401.
- [10] Ma Y Y, Liu Y D, Shi W T, et al. Effect of scanning speed on forming defects and properties of selective laser melted 316L stainless steel powder [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(10): 101403.  
马英怡, 刘玉德, 石文天, 等. 扫描速度对选区激光熔化 316L 不锈钢粉末成形缺陷及性能的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(10): 101403.
- [11] Pan A Q, Zhang H, Wang Z M. Process parameters and microstructure of Ni-based single crystal superalloy processed by selective laser melting [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(11): 1102007.  
潘爱琼, 张辉, 王泽敏. 镍基单晶高温合金选区激光熔化成形工艺及组织 [J]. 中国激光, 2019, 46(11): 1102007.
- [12] Tian J, Wei Q S, Zhu W Z, et al. Selective laser melting process and mechanical properties of Cu-Al-

- Ni-Ti alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46 (3): 0302001.
- 田健, 魏青松, 朱文志, 等. Cu-Al-Ni-Ti 合金激光选区成形工艺及其力学性能[J]. 中国激光, 2019, 46 (3): 0302001.
- [13] Hou W, Chen J, Chu S L, et al. Anisotropy of microstructure and tensile properties of AlSi10Mg formed by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 0702003.
- 侯伟, 陈静, 储松林, 等. 选区激光熔化成形 AlSi10Mg 组织与拉伸性能的各向异性研究[J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0702003.
- [14] Brandl E, Heckenberger U, Holzinger V, et al. Additive manufactured AlSi10Mg samples using selective laser melting (SLM): microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior[J]. Materials & Design, 2012, 34: 159-169.
- [15] Aboulkhair N T, Maskery I, Tuck C, et al. Improving the fatigue behaviour of a selectively laser melted aluminium alloy: influence of heat treatment and surface quality[J]. Materials & Design, 2016, 104: 174-182.
- [16] Uzan N E, Shneck R, Yeheskel O, et al. Fatigue of AlSi10Mg specimens fabricated by additive manufacturing selective laser melting (AM-SLM) [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 704: 229-237.
- [17] 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.
- [18] Siddique S, Imran M, Walther F. Very high cycle fatigue and fatigue crack propagation behavior of selective laser melted AlSi12 alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 94: 246-254.
- [19] Ngnenkou J N D, Nadot Y, Henaff G, et al. Fatigue properties of AlSi10Mg produced by additive layer manufacturing[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 119: 160-172.
- [20] Kimura T, Nakamoto T. Microstructures and mechanical properties of A356 (AlSi7Mg0.3) aluminum alloy fabricated by selective laser melting [J]. Materials & Design, 2016, 89: 1294-1301.
- [21] Munizlerma J A, Nommeotsnamm A, Waters K E, et al. A comprehensive approach to powder feedstock characterization for powder bed fusion additive manufacturing: a case study on AlSi7Mg [J]. Materials, 2018, 11(12): 2386.
- [22] Zhong Q P. Some empirical formulas for estimating metal fatigue performance [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 1985 (6): 39-47.
- 钟群鹏. 估算金属疲劳性能的若干经验公式[J]. 兵器材料科学与工程, 1985(6): 39-47.
- [23] Wu W H, Yang Y Q, Mao G S. Morphology analysis of molten pools lapping and accumulation in selective laser melting of 316L stainless steel [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2014 (4): 46-49.
- 吴伟辉, 杨永强, 毛桂生. 316L 选区激光熔化增材制造熔池搭接堆积形貌分析[J]. 制造技术与机床, 2014(4): 46-49.
- [24] Wang M, Song B, Wei Q S, et al. Effects of annealing on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted AlSi7Mg alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 739: 463-472.
- [25] Takata N, Kodaira H, Sekizawa K, et al. Change in microstructure of selectively laser melted AlSi10Mg alloy with heat treatments[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 704: 218-228.
- [26] Thijs L, Kempen K, Kruth J P, et al. Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder [J]. Acta Materialia, 2013, 61 (5): 1809-1819.
- [27] Pan F S, Zhang D F. Aluminum alloy and application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 265-275.
- 潘复生, 张丁非. 铝合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 265-275.
- [28] Zhang C C, Zhu H H, Liao H L, et al. Effect of heat treatments on fatigue property of selective laser melting AlSi10Mg [J]. International Journal of Fatigue, 2018, 116: 513-522.
- [29] Yan Q, Song B, Shi Y S. Comparative study of performance comparison of AlSi10Mg alloy prepared by selective laser melting and casting[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 41: 199-208.
- [30] Chen W Z. A comparative study on performance of aluminum alloy parts with selective laser melting and casting[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017: 19-25.
- 陈蔚泽. 选择激光熔化与铸造的电网铝合金部件性能对比研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017: 19-25.
- [31] Zhang W, Lu Q H, Ren X H, et al. Fatigue

properties and fracture behavior of 5052 aluminium alloys welded by high frequency micro-vibration laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46 (3): 0302012.

张巍, 卢庆华, 任新怀, 等. 5052 铝合金高频微振激光焊接疲劳性能及损伤行为 [J]. 中国激光, 2019, 46 (3): 0302012.

[32] Qiao Y X, Zhao L, Xu L Y, et al. Fatigue property and fracture mechanism of 5754 aluminium alloys GTAW and FSW joints [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2019, 43(10): 30-34, 40.

乔亚霞, 赵雷, 徐连勇, 等. 5754 铝合金钨极氩弧焊和搅拌摩擦焊接头的疲劳性能及断裂机理 [J]. 机械工程材料, 2019, 43(10): 30-34, 40.