

SLM 成形 316L 工艺对滑动磨损特性及硬度的影响

黄明吉, 杨颖超, 冯少川

(北京科技大学, 北京 100083)

摘要: **目的** 提高选区激光熔化 (SLM) 成形 316L 不锈钢的耐磨性和硬度。**方法** 在能量密度为 50~110 J/mm³、扫描间距为 0.04~0.12 mm 范围内, 改变能量密度和扫描间距两种工艺参数, 采用选择性激光熔化技术 (SLM) 制备了 12 种 316L 不锈钢试样。通过表面粗糙度测量、孔隙率测量、销盘摩擦试验和布氏硬度试验, 研究了工艺参数对 SLM 成形 316L 不锈钢试样的摩擦磨损特性和硬度的影响。**结果** 能量密度为 90 J/mm³ 且扫描间距为 0.12 mm 时, 表面粗糙度 R_a 最小, 为 5700 nm。孔隙率范围为 12.35%~0.94%, 扫描间距为 0.12 mm 的试样的孔隙率比扫描间距为 0.04 mm 和 0.08 mm 的孔隙率小。扫描间距不变时, 孔隙率随能量密度增大而减小。能量密度为 50 J/mm³ 时, 扫描间距为 0.12 mm 的试样的摩擦系数和磨损率比扫描间距为 0.04 mm 和 0.08 mm 的要小; 能量密度不变时, 扫描间距为 0.12 mm 的试样硬度比扫描间距为 0.04 mm 和 0.08 mm 的试样高。**结论** 改变扫描间距和能量密度会直接影响成形试样的表面粗糙度、孔隙率。研究范围内, 表面粗糙度和孔隙率随扫描间距增大而减小。孔隙率与磨损量及硬度存在相关性: 孔隙率越小, 硬度越大, 磨损率越小。因此, 合理选择工艺参数可以降低孔隙率, 进而提高表面质量, 降低磨损率, 增大硬度。

关键词: SLM; 316L 不锈钢; 工艺参数; 表面粗糙度; 孔隙率; 摩擦磨损; 硬度

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)01-0221-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.01.026

Effect of 316L SLM Forming Process on Sliding Wear Characteristics and Hardness

HUANG Ming-ji, YANG Ying-chao, FENG Shao-chuan

(University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the wear resistance and hardness of 316L stainless steel formed by selective laser melting (SLM). In the range of energy density 50 to 110 J/mm³ and hatch space 0.04 to 0.12 mm, 12 kinds of 316L stainless steel samples were prepared through SLM by changing the energy density and hatch space. The effects of process parameters on the wear characteristics and hardness of SLM-formed 316L stainless steel samples were investigated by surface roughness measurement, porosity measurement, pin-on-disk friction test and Brinell hardness test. When the energy density was 90 J/mm³ and the hatch space was 0.12 mm, the surface roughness was the smallest, reaching 5700 nm. When the porosity ranged from 12.35% to 0.94%, and the porosity of the sample with hatch space of 0.12 mm was smaller than that of sample with the hatch space of 0.04 mm and 0.08 mm. When hatch space remained unchanged, the porosity decreased as the energy density increased. When the energy density was 50 J/mm³, the friction coefficient and wear rate of samples with hatch space of 0.12 mm were

收稿日期: 2019-08-19; 修订日期: 2019-12-01

Received: 2019-08-19; Revised: 2019-12-01

作者简介: 黄明吉 (1972—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为增材制造。邮箱: huangmingji@ustb.edu.cn

Biography: HUANG Ming-ji (1972—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: additive manufacturing. E-mail: huangmingji@ustb.edu.cn

smaller than those with s hatch space of 0.04 mm and 0.08 mm. When the energy density remained unchanged, the hardness of the sample with hatch space of 0.12 mm was higher than that with hatch space of 0.04 mm and 0.08 mm. The surface roughness and porosity of the molded samples are affected directly by the change of hatch space and energy density. The surface roughness and porosity decrease with the increase of hatch space. Wear and hardness have correlation with porosity: the smaller the porosity, the greater the hardness and the smaller the wear rate. Therefore, the reasonable selection of process parameters can reduce porosity, thereby improving surface quality, reducing wear rate and increasing hardness.

KEY WORDS: SLM; 316L stainless steel; process parameters; surface roughness; porosity; friction wear; hardness

选择性激光熔融技术 (selective laser melting, SLM) 作为一种增材制造技术 (additive manufacturing, AM), 因满足技术人员快速开发产品的需求而发展迅速, 已广泛应用于航空航天、生物医学、汽车制造等工程领域。虽然 SLM 在零件加工制造上具有重要的优势, 但它也面临着许多问题^[1-2]。激光功率、扫描速度和扫描间距等 SLM 加工参数选取不当, 可能会导致 SLM 零件凝固过程中形成孔隙缺陷^[3]。Liverani 等人^[4]研究了激光功率、扫描速度、扫描间距和加工方向对 SLM-316L 不锈钢试样组织和力学性能的影响, 并为这些参数建立了最佳工艺参数组合。Li 等人^[5]研究了工艺参数对孔隙率的影响, 结果表明, 随着扫描速度的增加, 孔隙率显著增加。Gu 和 Shen^[6]通过增加激光功率、降低扫描速度或减少粉末层厚度提高试样致密度。这些文献表明, 改变工艺参数能够直接影响成形试样的性能。

316L 不锈钢作为医用材料, 除了要具有适当的强度, 高耐磨性也是获得生物相容性的必要条件^[7-10]。此外, 在其他工程领域中, 对 316L 不锈钢的摩擦性能和硬度也有一定的要求。Y. Sun 等人^[11]研究表明, SLM 产生的孔隙缺陷导致材料在无润滑摩擦过程中磨损加速。Kumar 和 Kruth^[12]发现在微动磨损试验中, 不锈钢试样的微动区形成了薄膜, 使试样免受进一步的磨损。Sander 等人^[13]比较了 SLM 和传统铸造法制备的 FeCrMoVC 工具钢构件的组织、力学性能和磨损性能的差别, 结果表明, SLM 试样具有较高的硬度和抗压强度, 同时具有较低的磨损率和断裂应变。Bartolomeu 等人^[14]总结出 SLM 制造的 316L 不锈钢试样的磨损率低于铸造和热压制造的 316L 不锈钢试样。Li 等人^[15]采用线性往复摩擦磨损仪对 316L 不锈钢试样进行了不同激光功率和累积方向的干摩擦磨损试验, 结果表明, 激光功率和累积方向对 COF 和磨损率的影响不显著。

综上, 目前有关能量密度和扫描间距对 SLM 成形 316L 不锈钢的摩擦学性能以及硬度的影响研究还

很有限, 故本文采用销盘摩擦和布氏硬度试验重点研究能量密度、扫描间距对 SLM 制备的 316L 不锈钢试样硬度和滑动磨损性能的影响, 这对于 SLM 零件的设计和制造工艺参数的优选具有重要意义。

1 试验

1.1 材料成形

材料采用气雾化 316L 奥氏体不锈钢粉末, 如图 1 所示, 其颗粒尺寸为 15~55 μm , 平均直径约为 35.5 μm , 化学成分如表 1 所示。试验采用型号为 EP-M100T 的金属 3D 打印机, 打印机配有波长为 1030 nm 的光纤激光器, 光斑直径为 50 μm 。所有试样均在氧气含量 $\leq 1000 \text{ mg/L}$ 的气氛环境中成形, 试样如图 2 所示。

SLM 工艺参数可表示为公式 (1)^[16]。其中, L 为激光功率 (W), v 为扫描速度 (mm/s), t 为层厚 (mm), h 为扫描间距 (mm), E 为单位体积的总能量输入或能量密度 (J/mm^3)。

$$E = \frac{L}{v \cdot t \cdot h} \quad (1)$$

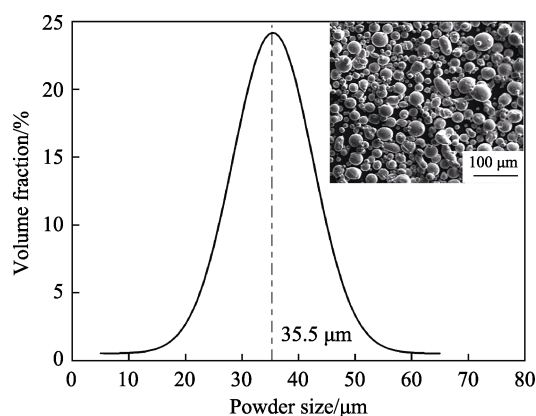


图 1 316L 不锈钢粉末
Fig.1 316L powder

表 1 316L 不锈钢粉末化学成分
Tab.1 Chemical composition of 316L powder

| wt% | | | | | | | | |
|-------------|------------|------------|-------------|--------------|-----------|-----------|---------|------|
| C | Si | Mn | S | P | Cr | Ni | Mo | Fe |
| ≤ 0.03 | ≤ 1.0 | ≤ 2.0 | ≤ 0.03 | ≤ 0.035 | 16.0~18.0 | 10.0~14.0 | 2.0~3.0 | Bal. |

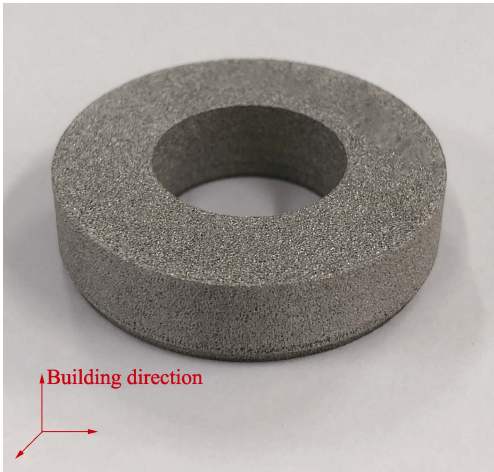


图 2 316L 不锈钢试样
Fig.2 316L sample

由于试验主要研究扫描间距和能量密度对加工的影响，故选择层厚 $t=0.02\text{ mm}$ ，激光功率 $L=100\text{ W}$ 。Li 的工作表明^[5]，硬度增大的能量密度范围介于 $50\sim125\text{ J/mm}^3$ 之间，硬度低的试样伴有大量的气孔和缺陷，因此选择能量密度范围为 $50\sim110\text{ J/mm}^3$ 。为了研究扫描间距对成形质量的影响，选择扫描间距范围为 $0.04\sim0.12\text{ mm}$ 。基于公式（1），采用正交试验法得到如表 2 所示的参数组合。

表 2 SLM-316 工艺参数
Tab.2 SLM-316 process parameters

| ID | $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$ | h/mm | $E/(\text{J}\cdot\text{mm}^{-3})$ |
|----|-----------------------------------|---------------|-----------------------------------|
| A1 | 2500 | 0.04 | 50 |
| A2 | 1250 | 0.08 | 50 |
| A3 | 833 | 0.12 | 50 |
| B1 | 1786 | 0.04 | 70 |
| B2 | 893 | 0.08 | 70 |
| B3 | 595 | 0.12 | 70 |
| C1 | 1389 | 0.04 | 90 |
| C2 | 694 | 0.08 | 90 |
| C3 | 463 | 0.12 | 90 |
| D1 | 1136 | 0.04 | 110 |
| D2 | 568 | 0.08 | 110 |
| D3 | 379 | 0.12 | 110 |

在成形过程中，为降低试样的局部热应力，采用分区棋盘式扫描策略，将每层划分为 $5\text{ mm}\times5\text{ mm}$ 的正方形块，每个方块交替标记为绿色和白色，如图 3 所示。首先熔化绿色标记的块，然后熔化白色标记的块。每个块的扫描轨迹相互平行，各块重叠 0.03 mm ，以保证各块连接处（Blocks junction）的连接强度。在成形过程中，为获得低温度梯度，下一层（Next layer）扫描轨迹相对于当前层（Current layer）顺时针旋转 45° 。

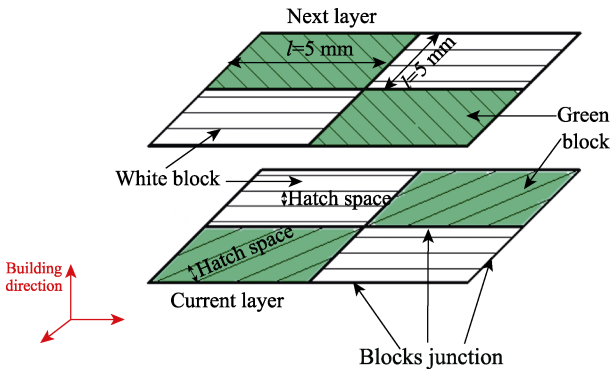


图 3 棋盘格扫描策略
Fig.3 Checkerboard scanning strategy

1.2 表面粗糙度测量

采用 Rtec 三维白光干涉仪对喷砂过的试样表面进行粗糙度分析，每个试样选取 3 个区域进行测量，求取平均值。

1.3 孔隙率测量

孔隙是 SLM 制造过程中常见缺陷，通常会降低制件致密度，从而降低制件材料强度。孔隙率用于量化试样孔隙缺陷（如气孔、裂纹、孔洞），将 OM 记录的图像用于量化表面缺陷（如孔隙和裂缝）。在每个样本表面不同位置拍摄十张图像，位置均匀分布在圆环试样表面。测量试样 1/3 左右面积的孔隙度，孔隙率为样品的缺陷面积占总面积的百分比。

1.4 滑动磨损试验

通过 MMW-1A 微机控制万能摩擦磨损试验机，选择小销盘摩擦副进行滑动摩擦试验，图 4 为摩擦副。滑动销采用淬火 45 钢，摩擦头为球形，直径 9.5 mm ，硬度 45 HRC，以控制的速度旋转。试样作为摩擦环，在受控接触下与旋转的滑动销接触。所有试验均以固定转速 120 rad/min 进行，共持续 3600 s （即 7200 次滑动周期），接触载荷为 20 N ，在室温（ $22\text{ }^\circ\text{C}$ ）、环境气氛干燥、无润滑条件下进行。每种参数组合进行三次试验，计算平均结果。

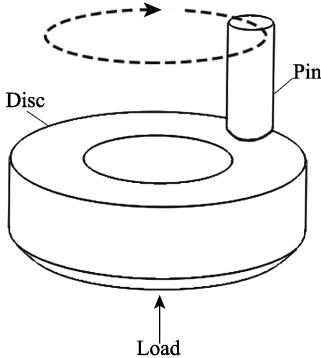


图 4 小销盘摩擦副
Fig.4 Small pin-on- disk friction

1.5 硬度试验

布氏硬度试验具有硬度代表性好、试验数据稳定、重复性好、实验数据准确等优点。本试验使用 NHB 布氏硬度计, 选择负载 187.5 kg 的试验力、直径 2.5 mm 压头进行硬度测试, 负载保持时间为 15 s。试验要求试样表面光亮, 压痕中心距试样边缘至少应为压痕平均直径的 2.5 倍, 两相邻压痕中心距离至少应为压痕平均直径的 3 倍。测量摩擦环表面 24 个均匀分布点的硬度值, 求取硬度平均值。

2 试验结果与分析

2.1 表面粗糙度分析

通过白光干涉仪进行表面粗糙度分析, 每个试样选取 3 个区域进行测量, 求取平均值。如图 5 所示, 能

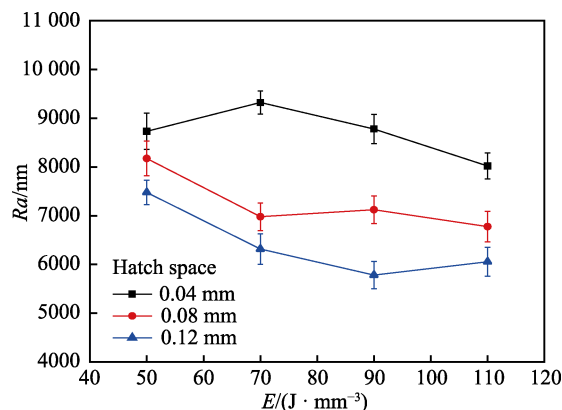


图 5 表面粗糙度和能量密度关系

Fig.5 Relationship between surface roughness and energy density

量密度在 50~110 J/mm³ 范围内, 扫描间距为 0.04 mm 时, 随着能量密度增大, 表面粗糙度先增大再减小; 扫描间距为 0.08 mm 和 0.12 mm 时, 表面粗糙度随着能量密度的增大, 先减小后增大。能量密度 (E) 不变, 扫描间距为 0.04 mm 时的粗糙度最差, 0.12 mm 系列表面粗糙度最好。

2.2 孔隙率分析

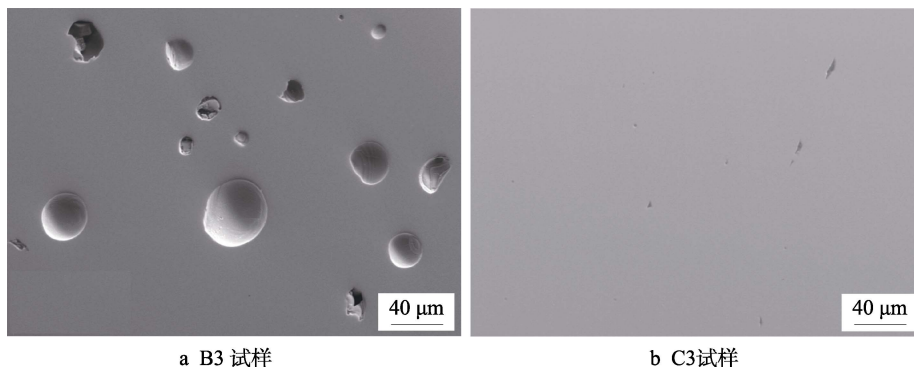
孔隙率的大小直接影响成形的致密度 (致密度 = 1 - 孔隙率)。通过对工艺参数的研究来降低零件的孔隙率, 从而提高成形的质量。表 3 是基于 OM 分析出的 SLM-316L 孔隙率结果。表 3 中, 能量密度为 50 J/mm³ 时的孔隙率非常大, 正如文献[17]表明, 较低的能量密度 (<50 J/mm³) 不足以完全熔化粉末, 因此成形的零件具有较大的孔隙、裂纹和球化特征。

Sames^[18]给出了两种一般类型的孔隙, 这些孔隙可能由粉末及加工过程诱导形成。粉末诱导的孔隙被认为是由粉末雾化过程中, 粉末进料时生成的气相形成的, 然后直接转移到制件上^[19]。加工诱导形成的孔隙是主要的孔隙类型, 通常是非球形的, 而且尺寸可变。由于表面张力的作用, 液体球化, 会发生球状现象, 球体是 SLM 试样孔隙的来源之一^[20-21]。如图 6a 所示, 孔隙率为 3.0% ($E=70$ J/mm³、 $h=0.12$ mm) 的 B3 试样可以看到许多气孔、未熔融粉末、不规则孔隙等成形缺陷; 孔隙率为 0.94% ($E=90$ J/mm³、 $h=0.12$ mm) 的 C3 试样, 几乎没有缺陷, 如图 6b。由图 6a 可以看出, 存在未熔融的颗粒以及球形气孔, 这是因为当能量密度低时, 粉末原料由于功率不足而未完全熔化, 导致相邻层结合不良, 成形缺陷以结合缺陷为主。

表 3 SLM-316 孔隙率测量结果

Tab.3 Results of SLM-316 porosity measurement

| ID | A1 | A2 | A3 | B1 | B2 | B3 | C1 | C2 | C3 | D1 | D2 | D3 |
|-----------------------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $E/(J \cdot mm^{-3})$ | 50 | 50 | 50 | 70 | 70 | 70 | 90 | 90 | 90 | 110 | 110 | 110 |
| h/mm | 0.04 | 0.08 | 0.12 | 0.04 | 0.08 | 0.12 | 0.04 | 0.08 | 0.12 | 0.04 | 0.08 | 0.12 |
| $v/(mm \cdot s^{-1})$ | 2500 | 1250 | 833 | 1786 | 893 | 595 | 1389 | 694 | 463 | 1136 | 568 | 379 |
| Porosity/% | 12.35 | 6.60 | 3.17 | 10.45 | 4.78 | 3.0 | 6.2 | 1.8 | 0.94 | 3.92 | 1.5 | 0.95 |



a B3 试样

b C3 试样

图 6 试样孔隙率观测 SEM 图

Fig.6 SEM diagram of sample porosity observation: a) B3; b) C3

一些作者指出^[6,22], 利用优化的参数, SLM 工艺能够产生高致密度的 (理论密度 98%~99.5%) 零件。

之前研究^[18]表明, SLM 成形大尺寸 (毫米级以上) 的 316L 制件的孔隙率随能量密度增大而减小的能量密度范围是 50~80 J/mm³。SLM-316L 孔隙率与能量密度的关系如图 7 所示, 只有在扫描间距为 0.08 mm 时, 孔隙率与能量密度的关系与文献[18]提到的相同: 孔隙率随着能量密度的增大而减小。扫描间距为 0.04 mm 和 0.12 mm 时, 随着能量密度从 50 J/mm³ 增大到 90 J/mm³, 孔隙率呈现出不断减小的趋势; 能量密度在 90~110 J/mm³ 时, 孔隙率几乎不变。此外, 还发现扫描间距为 0.04 mm 的试样的孔隙率明显偏高。

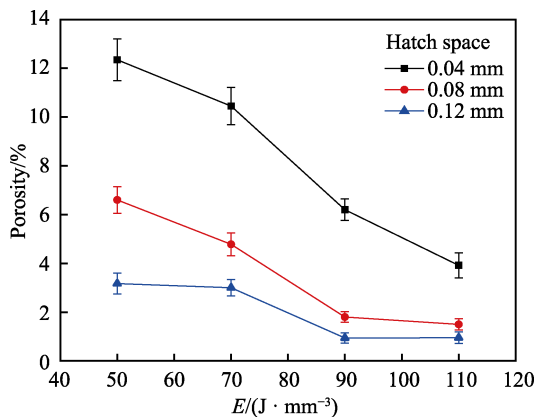


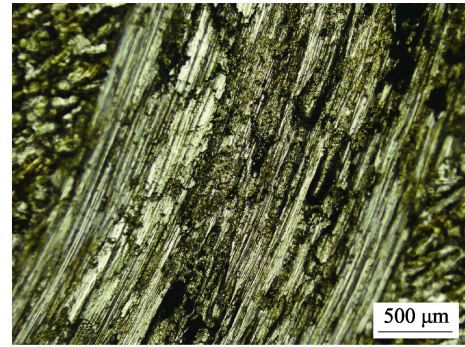
图 7 孔隙率和能量密度的关系

Fig.7 Relationship between porosity and energy density

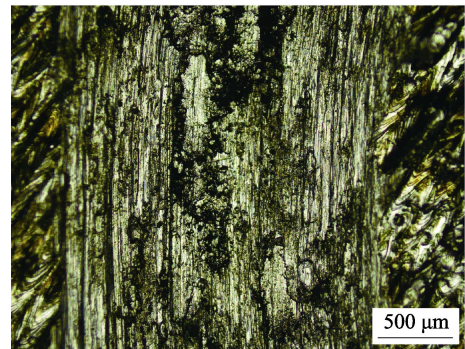
2.3 滑动磨损特性

干滑动磨损 60 min 后, 在试样上形成一个圆形磨损轨迹, 磨损轨迹宽度平均约为 2 mm, 如图 8 所示。试验发现摩擦系数曲线趋势为先快速增加, 最后长时间趋于平缓。为了研究扫描间距对摩擦性能的影响, 取能量密度为 50 J/mm³、扫描间距不同的摩擦系数进行对比, 得到图 9 所示曲线, 同时将磨损轨迹剖面中评估的磨损量绘制在图 10 中。由图 9 和表面粗糙度可知, 扫描间距越小, 表面越粗糙, 最初的摩擦系数也越大。此外, 通过图 10 发现, 扫描间距越小, 磨损率越大。由图 9 和图 10 可知, 扫描间距越小使孔隙率越大, 最终导致摩擦系数和磨损率也越大。

为了研究能量密度对摩擦性能的影响, 选择扫描间距为 0.04 mm、能量密度不同的试样进行摩擦试验, 得到的摩擦系数曲线如图 11 所示。不难看出, 随着能量密度增大, 摩擦系数整体减小, 这与孔隙率随着能量密度增大而减小的趋势相同。由此可以得出, 摩擦系数与孔隙率存在关系: 孔隙率越大, 摩擦系数越大, 磨损越严重。



a $E=110 \text{ J/mm}^3$, $h=0.08 \text{ mm}$



b $E=110 \text{ J/mm}^3$, $h=0.12 \text{ mm}$

图 8 试样磨损轨迹

Fig.8 Sample wear track

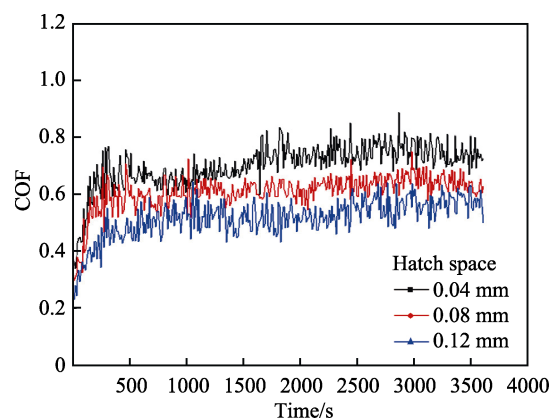


图 9 能量密度为 50 J/mm³ 时试样的摩擦系数

Fig.9 Friction coefficient of sample at energy density of $E=50 \text{ J/mm}^3$

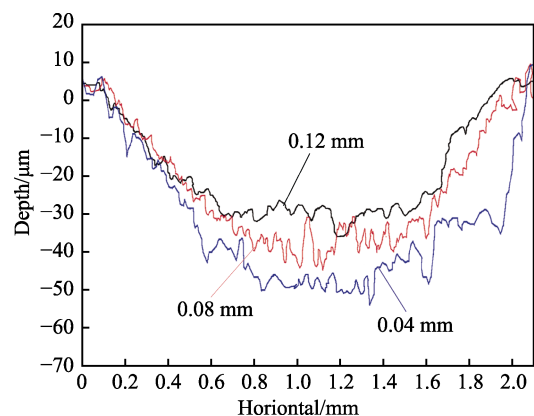


图 10 能量密度为 50 J/mm³ 时试样的磨痕深度

Fig.10 Wear depth of sample at energy density of $E=50 \text{ J/mm}^3$

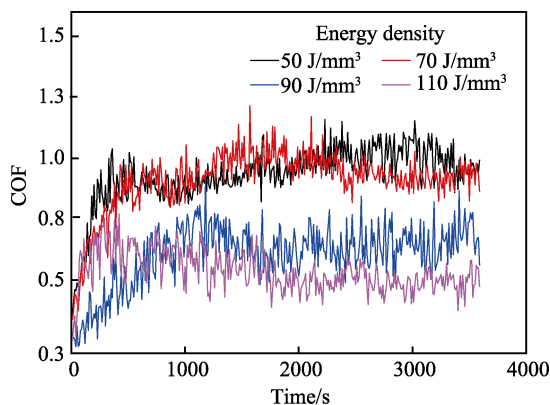


图 11 扫描间距为 0.04 mm 时试样的摩擦系数
Fig.11 Coefficient of friction of sample
with hatch space of 0.04 mm

Y. Sun 等人^[11]曾将 SLM 成形的 316L 试样与标准加工的 316L 试样进行对比,得出 SLM 试样的主要磨损机制是断裂,其根源是磨损轨迹中已有的孔隙、裂纹容易萌生和扩展。在滑动磨损过程中,孔隙是应力集中点,会加速材料断裂。在磨损机理方面,316L 不锈钢试样的磨损表面均表现出粘着磨损引起的塑性变形和磨粒磨损引起的沿滑动方向排列的凹槽。如图 8 所示,试样的磨损表面由一系列犁槽、划痕和细磨屑组成,这些都表明磨粒磨损为 SLM-316L 不锈钢摩擦磨损的主要磨损机理。

2.4 硬度分析

表 4 列出了 SLM 制造的 316L 试样的布氏硬度测量结果,得出硬度-能量密度的关系图,如图 12 所示,

表 4 硬度比较
Tab.4 Hardness comparison

| h/mm | Hardness(HB) | | | |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| | 50 J/mm ³ | 70 J/mm ³ | 90 J/mm ³ | 110 J/mm ³ |
| 0.04 | 80.02 | 142.13 | 190.55 | 207.40 |
| 0.08 | 178.9 | 221.38 | 233.65 | 237.98 |
| 0.12 | 199.8 | 235.76 | 239.81 | 238.74 |

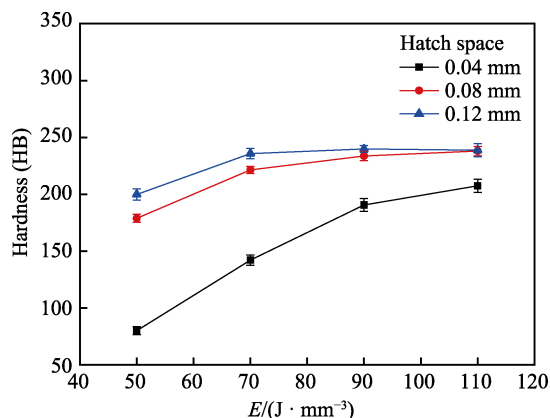


图 12 硬度和能量密度的关系
Fig.12 Relationship between hardness and energy density

硬度范围跨度较大,最大硬度为 239.81 HB,最小硬度为 80.02 HB。能量密度不变时,改变扫描间距,硬度随着扫描间距的增大而增大;控制扫描间距不变,改变能量密度,硬度随着能量密度增大而增大。

SLM 成形材料的硬度与孔隙率相关,而且材料的孔隙率对材料的硬度影响十分强烈。为了方便研究,选取扫描间距为 0.04 mm、能量密度不同的试样,将前面得到的孔隙率与硬度相结合得到图 13,发现硬度受到材料孔隙度的影响与文献[23-25]一致:硬度随着孔隙率的增加而减小,反之亦然。这是因为材料的孔隙率越小,试样的致密度越好,硬度越高。

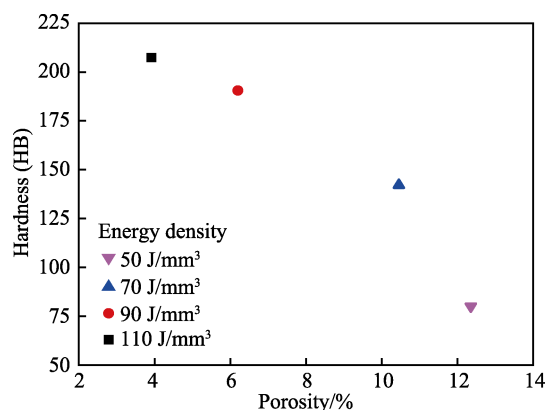


图 13 扫描间距为 0.04 mm 时硬度和孔隙率的关系
Fig.13 Relationship between hardness and porosity
with hatch space of 0.04 mm

3 结论

1) 扫描间距和能量密度可以影响成形试样的表面质量。扫描间距不同,表面粗糙度随能量密度变化的趋势也不一致。能量密度一定,表面粗糙度随着扫描间距的增大而减小,扫描间距为 0.04 mm 时,表面最粗糙。

2) 能量密度一定时,随扫描间距的增大,孔隙率减小,致密度随之增大;扫描间距不变时,孔隙率与能量密度呈线性变化,孔隙率随能量密度的增大而减小。

3) 在研究范围内,扫描间距越大,磨损量越小。试样孔隙越多,表面越粗糙,摩擦系数和磨损率也越大。由此得出 SLM 试样的磨损率与孔隙率之间存在相关性。

4) 在研究范围内改变能量密度、扫描间距,能得到高硬度的试样。硬度随能量密度呈线性增加;当能量密度不变时,硬度随扫描间距的增大而增大。孔隙率和硬度相关,孔隙率越大,致密度越小,硬度也越小。

5) 结合表面粗糙度、孔隙率、摩擦磨损、硬度分析,可得到最佳工艺参数组合为:能量密度 110 J/mm³,扫描间距 0.12 mm。

参考文献:

- [1] 蒲以松, 王宝奇, 张连贵. 金属3D打印技术的研究[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 78-84.
PU Yi-song, WANG Bao-qi, ZHANG Lian-gui. Metal 3D printing technology[J]. Surface technology, 2018, 47(3): 78-84.
- [2] 徐仰立, 张冬云, 郭彦梧, 等. 选区激光熔化成形Ti6Al4V合金拉伸性能提高的研究[J]. 表面技术, 2019, 48(5): 108-115.
XU Yang-li, ZHANG Dong-yun, GUO Yan-wu, et al. Improvement of tensile properties of Ti6Al4V alloy by selective laser melting[J]. Surface technology, 2019, 48(5): 108-115.
- [3] 石文天, 王朋, 刘玉德, 等. 选区激光熔化成形316L表面质量及工艺试验研究[J]. 表面技术, 2019, 48(3): 257-267.
SHI Wen-tian, WANG Peng, LIU Yu-de, et al. Experimental study on surface quality and process of selective laser melting forming 316L[J]. Surface technology, 2019, 48(3): 257-267.
- [4] LIVERANI E, TOSCHI S, CESCINI L, et al. Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel[J]. Journal of materials processing technology, 2017, 63: 255-249.
- [5] LI R, LIU J, SHI Y, et al. 316L stainless steel with gradient porosity fabricated by selective laser melting[J]. Journal of materials engineering and performance, 2010, 19(5): 666-671.
- [6] GU D D, SHEN Y F. Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods[J]. Materials & design, 2009, 30(8): 2903-2910.
- [7] SUN Z J, TAN X P, TOR S B, et al. Selective laser melting of stainless steel 316L with low porosity and high build rates[J]. Materials & design, 2016, 126: 197-204.
- [8] WANG L, ZHAO X, DING M H, et al. Surface modification of biomedical AISI 316L stainless steel with zirconium carbonitride coatings[J]. Applied surface science, 2015, 340: 113-119.
- [9] ANTONY K, ARIVAZHAGN N, SENTHILKUMARAN K. Numerical and experimental investigations on laser melting of stainless steel 316L metal powders[J]. Journal of manufacturing processes, 2014, 16(3): 345-355.
- [10] BUFORD A, GOSWAMI T. Review of wear mechanisms in hip implants: paper I-genera[J]. Materials & design, 2004, 25(5): 385-393.
- [11] SUN Y, MOROZ A, ALRBAEY K. Sliding wear characteristics and corrosion behaviour of selective laser melted 316L stainless steel[J]. Journal of materials engineering and performance, 2014, 23(2): 518-526.
- [12] KUMAR S, KRUTH J P. Wear performance of SLS/SLM materials[J]. Advanced engineering materials, 2008, 10(8): 750-753.
- [13] SANDER J, HUFENBACH J, GIEBELER L, et al. Microstructure, mechanical behavior and wear properties of FeCrMoVC steel prepared by selective laser melting and casting[J]. Scripta materialia, 2017, 126: 41-44.
- [14] BARTOLOMEU F, BUCIUMEANU M, PINTO E, et al. 316L stainless steel mechanical and tribological behavior—a comparison between selective laser melting, hot pressing and conventional casting[J]. Additive manufacturing, 2017, 16: 81-89.
- [15] LI H, RAMEZANII M, LI M, et al. Effect of process parameters on tribological performance of 316L stainless steel parts fabricated by selective laser melting[J]. Manufacturing letters, 2018, 16: 36-39.
- [16] SIMCHI A. Direct laser sintering of metal powders: mechanism, kinetics and microstructural features[J]. Materials science and engineering A—structural materials properties microstructure and processing, 2006, 428: 148-158.
- [17] CHOI J P, SHIN G H, BROCHU M, et al. Densification behavior of 316L stainless steel parts fabricated by selective laser melting by variation in laser energy density[J]. Materials transactions, 2016, 57(11): 1952-1959.
- [18] SAMES W J, LIST F A, PANNAL A S, et al. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing[J]. International materials reviews, 2016, 61(5): 315-360.
- [19] SHEN Y F, GU D D, WU P. Development of porous 316L stainless steel with controllable microcellular features using selective laser melting[J]. Materials science and technology, 2008, 24(12): 1501-1505.
- [20] KRUTH J P, FROYEN L, VAN V J, et al. Selective laser melting of iron-based powder[J]. Journal of materials processing technology, 2004, 149(1/3): 616-622.
- [21] LI R, LIU J, SHI Y, et al. Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2012, 59(9/12): 1025-1035.
- [22] RAUS A A, WAHAB M S, SHAYFULL Z, et al. The influence of selective laser melting parameters on density and mechanical properties of AISi10Mg[J]. MATEC web of conferences, 2016, 78: 01078.
- [23] SANDER G, THOMAS S, CRUZ V, et al. On the corrosion and metastable pitting characteristics of 316L stainless steel produced by selective laser melting[J]. Journal of the electrochemical society, 2017, 164(6): C250-C257.
- [24] CHERRY J A, DAVIES H M, MEHMOOD S, et al. Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2015, 76(5/8): 869-879.
- [25] WANG D, SONG C, YANG Y, et al. Investigation of crystal growth mechanism during selective laser melting and mechanical property characterization of 316L stainless steel parts[J]. Materials & design, 2016, 100: 291-299.