

扫描方式对激光选区熔化成形 316 不锈钢性能的影响

胡全栋, 孙帆, 李怀学, 巩水利

(中航工业北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室, 北京 100024)

[摘要] 为了揭示激光选区熔化成形过程中熔池行为, 以 316 不锈钢粉末为对象展开激光选区熔化试验, 研究了激光选区熔化成形时不同的扫描方式对成形件内部缺陷、微观组织以及室温拉伸性能的影响。结果表明: 将层片分区短线扫描成形可以有效地控制成形零件内部的气孔缺陷; 与无分区长线扫描相比, 采用分区短线扫描后零件内部组织呈现明显的柱状且晶粒尺寸较大。

关键词: 激光选区熔化; 增材制造; 扫描方式; 缺陷; 微观组织

Effects of Scanning Patterns on the Defects and Microstructure of 316 Stainless Steel Fabricated by Selective Laser Melting (SLM)

HU Quandong, SUN Fan, LI Huaixue, GONG Shuili

(The Key Laboratory of Power Beam Processing Technology, AVIC Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] In order to disclose the behavior of molten pool during the Selective Laser Melting (SLM) process, this paper focus on effects of scanning patterns on the defects and microstructure of 316 stainless steel fabricated by SLM. The results show that dividing the part area in small rectangular sectors decreased pores defects in the parts fabricated by SLM. At the same time, the microstructure of 316 stainless steel is typical cylindrical crystal and have larger size in parts fabricated by dividing the part area in small rectangular sectors.

Keywords: Selective Laser Melting (SLM); Additive manufacturing; Scanning patterns; Defects; Microstructure

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.1/2.124

激光选区熔化 (Selective Laser Melting, SLM) 技术是由德国 Fraunhofer 研究所于 1995 年最早提出, 在金属粉末选择性烧结基础上发展起来的。该技术可一次性地直接制造出致密度接近 100% 的金属零件, 且制造出的金属零件具有良好的尺寸精度及表面质量^[1-2]。但是在金属粉末熔化与凝固的过程中存在以下主要问题: (1) 发生球化而使致密度下降, 表面粗糙^[3]; (2) 零件内部具有很大的应力, 容易导致裂纹与翘曲变形^[4]; (3) 成形件内存在熔合不良及气孔等缺陷。

影响 SLM 成形金属零件质量的因素很多, 国内外研究人员对此也展开了大量的基础研究工作。英国的 Morgan^[5] 等研究了半导体泵浦 Nd:YAG 激光器 SLM 成形过程中激光脉冲频率、扫描速度、扫描间距对 316L 不锈钢成形件密度的影响。Li 等^[6] 研究了 316L 不锈钢 SLM 成形过程中的球化现象产生的机理并提出了一些改进方法。比利时的 Mercelis^[7] 研究了 316L 不锈钢熔化成形时残余应力的影响和机制, 并提出了一些解决

方法。Kruth 等^[4] 研究了扫描策略对 SLM 成形过程热应力的影响。本文通过 316 不锈钢粉末选区激光熔化成形试验, 对比研究了不同的扫描策略对 SLM 成形零件内部缺陷和组织的影响。

1 试验设备、材料及方法

1.1 试验基本原理及设备

本次 316 不锈钢零件激光选区熔化成形试验是在中航工业北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室建立的激光选区熔化设备 M360 上完成的, 基本流程如图 1 所示。该设备由光纤激光器、振镜扫描系统、高精密铺粉装置、气体循环再生系统及控制系统等几部分组成。本次试验采用的主要工艺参数如表 1 所示。

1.2 试验材料

试验所选用的材料尺寸为 250mm × 250mm 的 316 不锈钢基板和粒度为 60μm 以下的 316 不锈钢球形粉

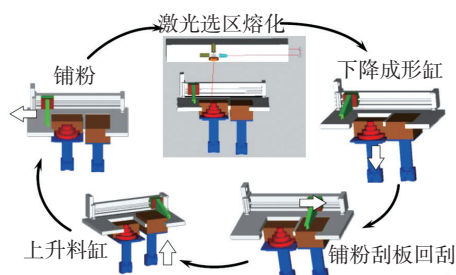


图1 激光选区熔化流程图

Fig.1 Flow chart of SLM

表1 316不锈钢激光选区熔化成形主要工艺参数

激光功率 / W	扫描速度 / (mm · s ⁻¹)	层厚 / mm	扫面间距 / mm
150~450	200~800	0.02~0.1	0.07~0.15

末。316 不锈钢是一种奥氏体不锈钢,在工业领域具有广泛的应用。316 不锈钢粉末化学成分如表 2 所示,粉末形貌如图 2 所示。试验之前,将试验用粉末材料在真空干燥箱内烘干处理,减少粉末在存放过程中所吸收的水分对成形质量带来的不良影响。整个试验过程中,成形舱室内充满氩气进行保护,避免成形过程中的氧化。

表2 316不锈钢粉末化学成分

元素	Si	Cr	Ni	Mn	Mo	C	O	Fe
质量分数 / %	0.74	17.2	12.5	1.47	2.50	0.052	0.059	Bal.

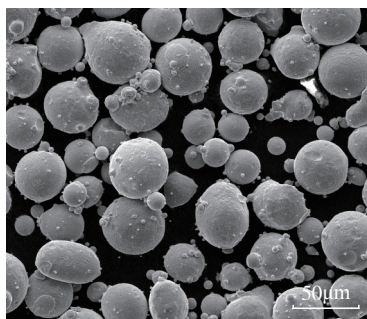


图2 316不锈钢粉末SEM形貌

Fig.2 SEM of 316 stainless steel

1.3 试验方法

1.3.1 组织观察

本次试验中采用了两种不同的激光扫描方式来成形尺寸为 15mm × 15mm × 15mm 的立方体试块,试块 1 采用的是整体扫描的方式(图 3 (a)),加工过程中,层与层之间采用变向扫描的方式,即在扫描相邻两层时,扫描线会有一些的夹角^[8]。试块 2 采用分区扫描方式(图 3 (b)),将层片的轮廓面人为的分成若干个小的矩形区域,且相邻的矩形区域内扫描线方向相互垂直^[4],层与层之间也采取变向扫描方式。激光选区熔化成形

完后将每个试块切成三块,对试样进行镶嵌、打磨、抛光并腐蚀。在光学显微镜和扫描电镜下观察试样的 XOY、YOZ、XOZ 面的微观组织和缺陷分布,并计算不同扫描方式的气孔率。

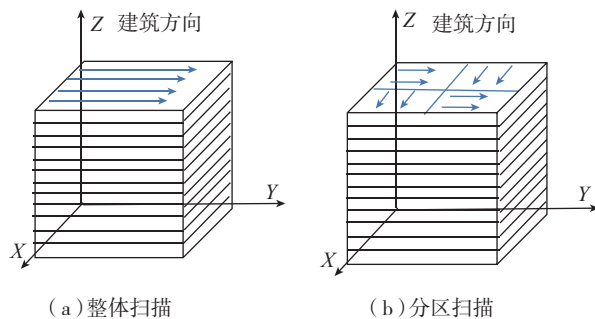


图3 层片扫描方式

Fig.3 Layer scanning pattern

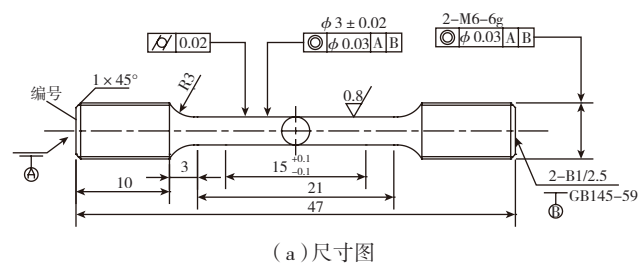
1.3.2 室温拉伸性能测试

试验中分别采用上述两种扫描方式分别加工尺寸为 50mm × 8mm × 8mm 的长方体试样,考虑到 SLM 成形零件存在各向异性,故在成形时成形了沿 XY 方向和 Z 方向的试样各 3 根,试验结果中对 3 组数据取平均值以减少误差。

试样成形完成后,按图 4 (a) 所示尺寸加工成 $\phi 3$ 规格的棒状拉伸试样,在室温条件下测定成形试样的抗拉强度 R_m 、屈服强度 $R_{p0.2}$ 和延伸率 A 和断面收缩率 Z 。加工的棒状拉伸试样实物如图 4 (b) 所示。

2 结果与讨论

2.1 缺陷特征



(a) 尺寸图



(b) 实物图

图4 $\phi 3$ mm棒状拉伸试样尺寸图及实物图

Fig.4 $\phi 3$ mm rod tensile samples

激光选区熔化成形的 316 不锈钢零件中主要存在的缺陷为熔合不良和气孔。熔合不良缺陷的产生主要是由于成形过程中能量输入不足引起的,通过前期工艺试验,优化工艺参数,本次试验中融合不良缺陷已基本消除。气孔缺陷的产生主要是由于成形过程中熔池中的气体在液态金属完全凝固之前来不及逸出或是外界气体进入熔池而产生的。影响激光选区熔化成形金属零件气孔缺陷的工艺参数很多,而本次试验只是分析比较了两种不同层片扫描策略对成形件内部气孔缺陷的影响。

对比图 5 中两种扫描方式成形的试样气孔分布状况(金相照片中用绿色将气孔标出来)可以发现,采用分区扫描成形的试样(2# 试样)在 XOY 面(b)、 YOZ 面(d)、 XOZ 面(f)上的气孔缺陷均明显少于采用整体扫描成形的试样(1# 试样)的 XOY 面(a)、 YOZ 面(c)、 XOZ 面(e)上的气孔缺陷。

2.2 组织特征

激光选区熔化成形的 316 不锈钢零件的组织特征呈现出一定的各向异性。相邻的层片之间存在有明显的带状特征,通常会存在贯穿多个层片的柱状晶。晶粒

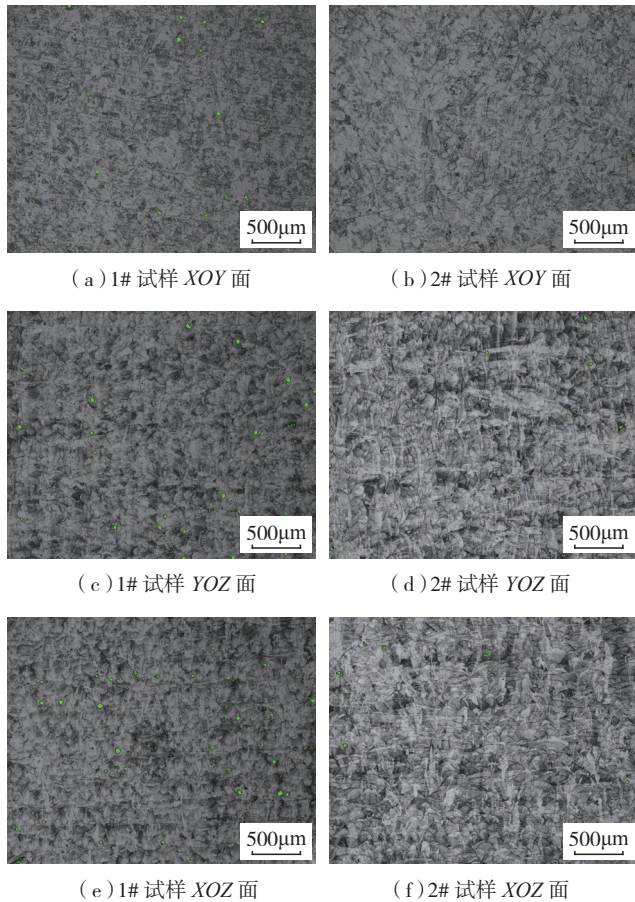


图5 SLM成形316不锈钢试样气孔缺陷分布

Fig.5 Distribution of pores in SLM 316 stainless steel sample

内部为细小胞状树枝晶,其一次枝晶间小于 $1\mu\text{m}$ 。

对比图 6 中 1# 试样(图 a)和 2# 试样(图 b)在光学显微镜(OM)下拍摄的金相照片可以发现,在采取分区扫描后,零件内部组织呈现明显的柱状晶组织且柱状晶晶粒更粗大,晶粒的外延生长更加明显。从图 7 中的扫描电镜(SEM)照片可以发现,两种扫描方式下一次枝晶的形态差别不大,其尺寸大都在 $1\mu\text{m}$ 以下。

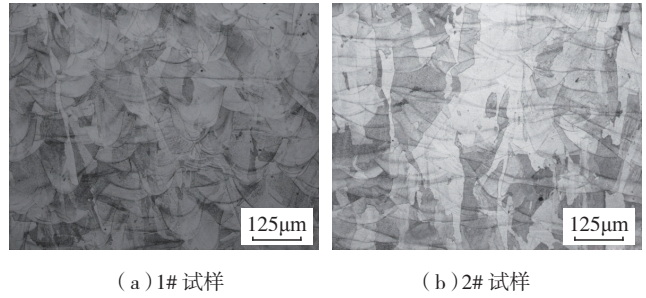


图6 SLM成形316不锈钢试样OM照片

Fig.6 OM photograph of SLM 316 stainless steel samples

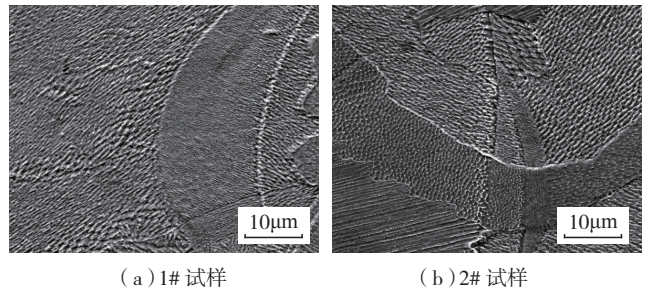


图7 SLM成形316不锈钢试样SEM照片

Fig.7 SEM photograph of SLM 316 stainless steel samples

2.3 室温拉伸性能

采用两种扫描方式成形的拉伸试样测试结果如表 3 所示,采用分区扫描方式成形的 XY 方向的试样的抗拉强度和屈服强度稍高于整体扫描成形的试样,相应的,其延伸率和断面收缩率稍低于整体扫描试样。但是,在 Z 方向上却表现出了相反的结果,分区扫描方式成形的试样 Z 方向的抗拉强度和屈服强度低于整体扫描成形的试样;延伸率和断面收缩率低于整体扫描试样。

表3 两种扫描方式成形件室温拉伸性能

扫描方式	取样方向	抗拉强度 R_m/MPa	屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	延伸率 $A/\%$	断面收缩率 $Z/\%$
整体扫描	XY 方向	700.44	592.55	24.33	30.56
	Z 方向	612.52	513.71	33.61	42.10
分区扫描	XY 方向	724.38	622.93	22.76	25.04
	Z 方向	595.93	505.88	41.00	46.22

2.4 结果讨论

激光选区熔化成形过程中,通常用激光能量密度 E ($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$) 来衡量层片扫描时激光照射到单位体积粉末材料上的能量:

$$E = \frac{P}{v \cdot h \cdot t}$$

其中, P 为激光功率(单位为 W); v 为激光扫描速度(单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); h 为扫描线间距(单位为 m); t 为分层厚度(单位为 m)^[9]。

激光选区熔化成形过程中液态熔池的形态、温度与激光能量密度、材料对激光的吸收率及成形件散热条件等因素有关。本次试验中激光功率、激光扫描速度、扫描线间距及分层厚度均相同,即激光能量密度相同,只有层片扫描方式不同,1# 试样采用整体扫描,扫描线长,如图 3(a) 所示,2# 试样采用分区扫描,扫描线短,如图 3(b) 所示。

与采用整体扫描方式相比,采用分区扫描方式时,激光扫描线变短,相邻两条扫描线加工的时间间隔减少,已加工区域散热时间减少,能量散失减少,即能量积累增加,使得熔池温度升高,熔池变宽变深,液态熔池凝固结晶的时间更长,这样就有利于熔池内部气体的逸出和熔池内部柱状晶的生长。与此同时,由于熔池温度较高,熔池附近基体温度也较高,更有利于材料对激光能量的吸收,这也进一步的促进了熔池温度的升高,延长了熔池凝固结晶的时间。

3 结论

(1) 激光选区熔化成形 316 不锈钢零件时,层片扫描方式采用分区域扫描可以大大减少成形件内部的气孔缺陷,提高零件的成形质量。

(2) 激光选区熔化成形 316 不锈钢零件中,层片扫描方式采用分区域扫描成形的零件内部晶粒更为粗大。

(3) 激光选区熔化成形 316 不锈钢零件过程中,采用两种扫描方式扫描成形对室温性能影响不大。

参考文献

- [1] SANTOS E C, SHIOMI M, OSAKADA K, et al. Rapid manufacturing of metal components by laser forming[J]. Int. J. Mach. Tools Manuf., 2006, 46(12/13):1459-1468.
- [2] DUTTA MAJUMDAR J, PINKERTON A, Liu Z, et al. Microstructure characterisation and process optimization of laser assisted rapid fabrication of 316L stainless steel[J]. Appl. Surf. Sci., 2005, 247: 320-327.
- [3] GU D D, SHEN Y F. Balling phenomena during direct laser sintering of multi-component Cu-based metal powder[J]. Alloy Compd., 2007, 432(1/2):163-166.
- [4] KRUTH J P, FROYEN L, VAN VAERENBERGH J, et al.

Selective laser melting of iron-based powder[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149(1-3):616-622.

[5] MORGAN R, SUTCLIFFE C J, NEILL W O. Density analysis of direct metal laser re-melted 316L stainless steel cubic primitives[J]. Journal of Materials Science, 2004, 39:1195-1205.

[6] LI R D, LIU J H, SHI Y S, 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.

[7] MERCELIS P, KRUTH J P. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting[J]. Rapid Prototyping Journal, 2006, 12(5):254-265.

[8] 王迪, 杨永强, 黄延禄, 等. 层间扫描策略对 SLM 直接成型金属零件质量的影响[J]. 激光技术, 2010, 34(4):447-451.

WANG D, YANG Y Q, HUANG Y L, et al. Impact of inter-layer scan strategy on quality of direct fabrication metal parts in SLM process [J]. Laser Technology, 2010, 34(4):447-451.

[9] THIJS L, VERHAEGHE F, CRAEGHS T, et al. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V[J]. Acta Materialia, 2010, 58:3303-3312.

(责编 李丹)

(上接第 123 页)

提升了国产数控系统在航空领域的应用水平。最后,对主轴自动换挡过程中常见的问题进行了分析和总结,为国产数控系统安装调试与维护提供了重要实践经验。

参考文献

- [1] 陈年华. 数控机床自动换挡控制及常见故障诊断[J]. 机床电器, 2012(6):14-20.
- CHEN N H. Numerical control lathe to be automatic shift control and the common fault diagnosis[J]. Machine Tool Electric Apparatus, 2012(6): 14-20.
- [2] 潘月斗, 许镇琳, 喻志火, 等. PLC 实现机床主轴的换挡控制[J]. 制造业自动化, 2001(6):14-17.
- PAN Y D, XU Z L, YU Z H, et al. PLC control of gear shift for machine spindle[J]. Manufacturing Automation, 2001(6):14-17.
- [3] 邹方. PLC 实现机床主轴自动换挡[J]. 航空制造技术, 1999(5): 53-56.
- ZOU F. Auto gear change of machine spindle by PLC[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1999(5): 53-56.
- [4] 杜坤梅, 李铁才. 机电控制技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000.
- DU K M, LI T C. Mechanical and electrical control technology[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2000.
- [5] 冯清秀, 邓星钟. 机电传动控制[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2000.
- FENG Q X, DENG X Z. Mechanical and electrical transmission control[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2000.

(责编 李丹)