

DOI: 10.3901/JME.2014.21.152

电子束选区熔化成形 316L 不锈钢的工艺研究*

郭 超^{1,2,3} 林 峰^{1,2,3} 葛文君^{1,2,3}

(1. 清华大学机械工程系 北京 100084;

2. 清华大学先进成形制造教育部重点实验室 北京 100084;

3. 清华大学生物制造与快速成形技术北京市重点实验室 北京 100084)

摘要: 电子束选区熔化是一种利用电子束逐层熔化金属粉末制造三维实体零件的增材制造技术,在航空航天、医学植入体等领域有很好的应用前景。利用 316L 不锈钢粉末为材料,研究粉末熔化阶段电子束功率恒定、单遍扫描对成形件上表面粗糙度的影响。发现电子束功率 P 与扫描速度 v 的比值是影响上表面形貌的关键因素,随着 P/v 值的增加,上表面形貌由网结状变化为沟壑状,同时粉末材料的飞溅增加。研究上表面形貌随成形高度增加而演变的过程,发现形貌随高度增加不断恶化,并解释了形貌恶化的原因。提出电子束功率递增、多遍扫描的方法,先用低功率电子束使粉末材料熔化聚球但不飞溅,再用大功率电子束使材料重新熔化并充分流动、浸润。这种方法改善了成形件上表面的形貌,表面粗糙度 R_a 小于 $8\text{ }\mu\text{m}$,获得的组织均匀细密,致密度高达 99.96%。相对于单遍扫描,多遍扫描不会造成主要元素的额外烧损。

关键词: 增材制造; 电子束; 选区熔化; 表面形貌; 扫描方法

中图分类号: TN29

Study on the Fabrication Process of 316L Stainless Steel via Electron Beam Selective Melting

GUO Chao^{1,2,3} LIN Feng^{1,2,3} GE Wenjun^{1,2,3}

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084;

2. Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology of Ministry of Education,
Tsinghua University, Beijing 100084;3. Biomanufacturing and Rapid Forming Technology Key Laboratory of Beijing,
Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Electron beam selective melting (EBSM) is an additive manufacturing technology that utilizes an electron beam to build three-dimensional object layer by layer from metal powder, and can be applied in manufacturing aerospace components and medical implants. Effect of the single-pass scanning with constant power on the top surface topography is studied by using the 316L stainless steel powder material. It's found that the ratio of the electron beam power P to the scanning velocity v is the key factor affecting the top surface topography. With the increase of P/v , the top surface topography changes to a gully type from a balling-net type, and the spatters increase. The evolution of the top surface topography with the increase of the fabricated height is also studied. And it's found that the topography worsens with the increase of the fabricated height. The reasons for the topography worsening are explained in detail. A multi-pass scanning process with progressively increasing power is developed, and it largely improves the top surface topography of the fabricated parts. The roughness R_a of the top surface is lower than $8\text{ }\mu\text{m}$. Uniform and fine microstructures can be obtained, and the relative density of the fabricated sample reaches up to 99.96%. Compared to the single-pass process, the multi-pass process does not cause additional melting loss of the elements.

Key words: additive manufacturing; electron beam; selective melting; surface topography; scanning method

0 前言

增材制造技术根据零件的 CAD 数据不断累加材料制造三维实体零件,是近 20 年来信息技术、新

材料技术与制造技术多学科融合发展的先进制造技术^[1]。电子束选区熔化(Electron beam selective melting, EBSM)是众多增材制造工艺的一种。类似于激光选区熔化,电子束选区熔化工艺利用电子束在真空中逐层熔化金属粉末、由 CAD 模型直接制造金属零件。EBSM 技术的成形过程如下:活塞下降一个层厚的距离,在底板或已成形零件的上表

* 2013 北京市科技计划资助项目(D13110400300000),20131205 收到初稿,20140707 收到修改稿

面铺一层粉末, 然后电子束选择性扫描并熔化截面内的粉末, 完成一层的成形; 重复以上过程, 直到零件分层成形全部完成。目前, 激光选区熔化的相关研究工作已经开展较为深入, 如华南理工大学的吴伟辉等^[2]对激光选区熔化成形系统及工艺进行了研究, 解决了其中的关键技术问题。相对于激光, 电子束能量密度高, 材料对电子束能量几乎全部吸收、没有反射, 成形件完全致密, 无须提高致密度的后处理^[3]。由于成形在真空环境下进行, EBSM 技术在成形钛合金等对氧敏感金属材料方面有很大的优势^[4]。

目前, EBSM 技术已经实现 316L 不锈钢、钛合金、镍基高温合金、TiAl 基高温合金等难成形金属材料的成形。MURR 等^[5]利用 EBSM 实现了钛合金 Ti-6Al-4V 的增材制造, 其力学性能与锻件相当。FACCHINI 等^[6]对 EBSM 成形的 Ti-6Al-4V 的微观组织与力学性能做了深入的分析。EBSM 在成形多孔的钛合金医学植入体方面具有很大优势。HARRYSSON 等^[7-8]设计了多种网格结构并用 EBSM 成形, 比较了不同网格结构的力学性能。LI 等^[9]设计了一种蜂窝状的多孔结构, 通过 EBSM 工艺制造并测试。EBSM 还可用于高温合金的成形, 比如镍基高温合金^[10-11]、钛铝高温合金^[12-13], 成形零件具有优良的力学性能。这些研究工作表明, EBSM 技术在航空航天、医学植入体等领域有很好的应用前景。

在 EBSM 成形过程中, 成形件的上表面形貌和内部微观组织是判断工艺质量的重要指标^[14]。理想的成形件上表面应该尽量平整, 不平整的上表面形貌会导致以下问题: 一是降低成形件的尺寸精度; 二是成形件表面的凸起部分不利于铺粉器的移动, 容易卡住甚至损坏铺粉器; 三是不平整的上表面会导致下一层粉末厚度不均匀, 粉末层较厚的区域在成形中熔化不充分, 形成层间孔隙缺陷。EBSM 成形件的内部应当高度致密, 组织细化, 具有快速熔凝特征。

大部分 EBSM 成形研究利用瑞典 Arcam 公司的商业化电子束选区熔化设备与工艺。该工艺使用的粉末材料事先经过优化选择, 利用恒定功率的电子束对粉末层单遍扫描, 得到致密零件。该工艺对粉末材料的要求比较高, 对不同粉末材料的适应性不足。在实际研究中发现, 对于某些材料, 电子束功率恒定、单遍扫描难以找到合适的工艺参数, 成形件的表面质量、内部组织不够理想。

为此, 提出电子束功率递增、多遍扫描的方法, 以 316L 不锈钢粉末为材料, 比较了该工艺与电子

束功率恒定、单遍扫描工艺的成形效果, 研究了不同工艺对 EBSM 成形件的上表面形貌及微观组织的影响。

1 试验设备、材料与方法

试验采用清华大学自主研发的 EBSM-250 电子束选区熔化设备。图 1 是设备的电子枪与真空室部分的示意图。

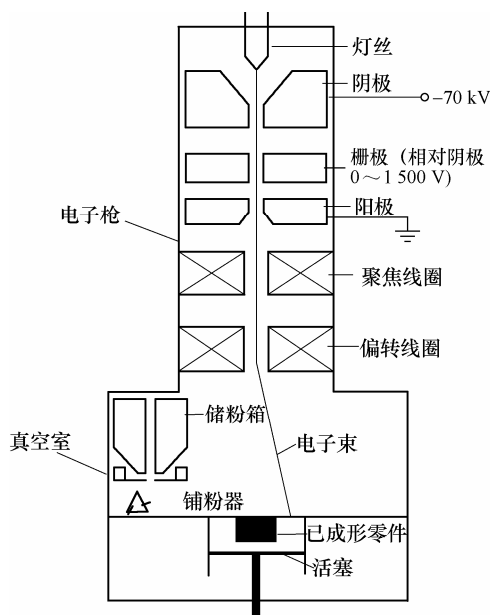


图 1 EBSM 设备的电子枪与真空室部分示意图

灯丝发射的电子被阳极电压加速, 依次通过聚焦线圈、偏转线圈, 作用在工作平台上。通过控制通过偏转线圈的电流, 可以实现电子束的偏转扫描。工作平台上设置有活塞缸以及铺粉器, 用于逐层铺设粉末。真空室内真空度可达 10^{-3} Pa, 电子枪最大功率 3.5 kW, 束斑直径约 0.4 mm, 电子束的偏转范围为 200 mm×200 mm, 采用数字化的电子束扫描系统, 电子束的偏转精度优于 ± 0.2 mm。通过成形控制软件实现分层成形的连续自动进行, 可对电子束功率、扫描速度、扫描路径、粉末层厚度等参数进行调节。

试验采用 316L 不锈钢粉末为材料, 粉末颗粒为球形, 粒径分布为 30~180 μm , 平均粒径为 80 μm 。试验所用底板为 316L 不锈钢板, 尺寸为 230 mm×230 mm×10 mm。在真空室中, 利用电子束在底板上逐层熔化粉末进行成形试验。成形之前进行底板预热: 1.5 kW 的大功率电子束以 20 m/s 的速度快速扫描底板上 180 mm×180 mm 的方形区域, 扫描线间距 1 mm, 预热时间 45 min。底板预热的目的是使铺在底板上的第一层粉末轻微烧结, 避免粉末在电子束作用下积累电荷而在电荷斥力下溃散。

粉末层厚度为 0.1 mm, 每一层的成形都包括粉末预热、粉末熔化两个阶段。粉末预热阶段的目的是使粉末材料进一步升温烧结, 获得一定的强度以避免在电子束作用下溃散。在粉末预热阶段, 电子束以 10 m/s 的速度扫描粉末层上 180 mm×180 mm 的方形区域, 扫描线间距 1 mm, 预热时间 70 s, 电子束功率由 60 W 随时间递增至 1.2 kW; 粉末材料的最终熔化发生在粉末熔化阶段, 粉末熔化阶段的工艺参数对成形件上表面的形貌起决定性的影响。粉末熔化阶段的扫描线间距为 0.2 mm, 使用不同的电子束功率 P 、扫描速度 v 进行成形。

成形结束后, 烧结的粉末可以在轻微外力下去除并回收利用, 留下与底板固结的成形件。对成形件上表面形貌进行记录分析, 将成形件沿电子束扫描方向的垂直面切开, 利用光学显微镜观察上表面轮廓及微观组织, 以研究成形件上表面形貌及微观组织的影响因素与原因。利用排水法测定试样的致密度, 利用接触式粗糙度测量仪测量成形件上表面粗糙度, 利用 X 射线能谱仪对粉末及成形件的元素成分进行测定并比较。

2 试验结果的分析与讨论

2.1 P/v 值对成形件上表面形貌的影响

图 2 是在底板上成形的 9 个成形件, 成形层数均为 50 层, 对应的电子束功率 P 、扫描速度 v 如表 1 所示。可以发现, 相同的 P/v 值得到的成形件上表面形貌基本相同, 随着 P/v 值由 0.48 升高到 1.44, 成形件上表面形貌由网结状逐渐过渡至沟壑状。试验观察还发现, P/v 值越大, 粉末材料的飞溅现象越严重。图 3 是拍摄的预热后的粉末层在电子束作用下飞溅的照片, 飞溅的产生一方面是由于粉末材料导电性能差, 在电子束作用下积累电荷, 在同种电荷的斥力下飞溅; 另一方面是由于熔池与周边环境剧烈的温度差使熔池周围的粉末材料溅出。

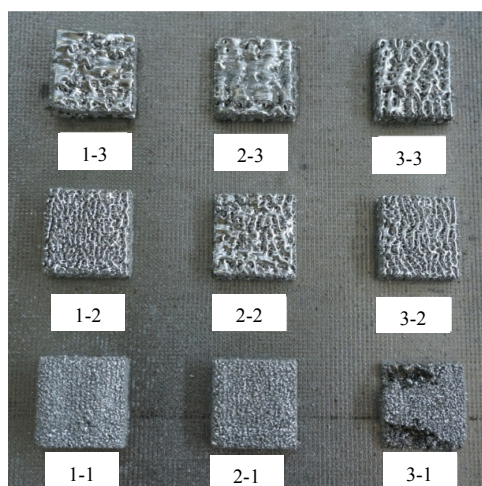


图 2 不同工艺参数得到的上表面形貌

表 1 粉末熔化阶段的工艺参数

零件编号	速度/(mm/s)	功率/W	功率速度比
1-1	250	120	0.48
1-2	250	240	0.96
1-3	250	480	1.44
2-1	500	240	0.48
2-2	500	480	0.96
2-3	500	960	1.44
3-1	750	360	0.48
3-2	750	720	0.96
3-3	750	1 080	1.44



图 3 已预热粉末层在电子束作用下的飞溅

P/v 值的大小标志着成形过程中平均能量密度的高低。能量密度是指电子束扫描熔化一层粉末的过程中, 单位体积粉末材料所获得的能量输入。假设电子束功率为 P , 扫描速度为 v , 扫描线间距为 s , 粉末层厚度为 e , 则可以计算出能量密度

$$\psi = \frac{P}{esv}$$

能量密度 ψ 与 P/v 值成正比, 与粉末层厚度 e 、扫描线间距 s 成反比。也就是说, 随着能量密度增大, 粉末材料的飞溅程度增加, 成形件表面形貌由网结状向沟壑状转变。

2.2 上表面形貌随成形高度增加而演变

为进一步研究不同功率密度下成形件上表面形貌的形成机理, 设计了成形区域随成形层数增加不断减小的试验, 得到第 1 层到第 18 层的上表面形貌。将成形试样沿电子束扫描方向的垂直面切开, 在 100 倍光学显微镜下观察其截面形貌。

如图 4a~4c 所示, 当 $v=250$ mm/s, $P=120$ W 时, 成形 4 层时, 成形件上表面已经出现明显聚球, 随着层数增加, 上表面形貌不断恶化, 最终成形件上表面为沟壑状, 并且内部有大量孔隙。当 $v=250$ mm/s, $P=240$ W 时, 成形前 7 层的上表面都较为平整, 没有明显聚球, 成形 15 层时出现瘤状聚球, 之后上表面形貌不断恶化, 最终的成形件上表面为沟壑状, 内部结合不致密。当 $v=250$ mm/s, $P=360$ W 时, 成形前 10 层的上表面都较为平整, 第 16 层的上表面出现较大波动, 成形 50 层之后上表面则出现

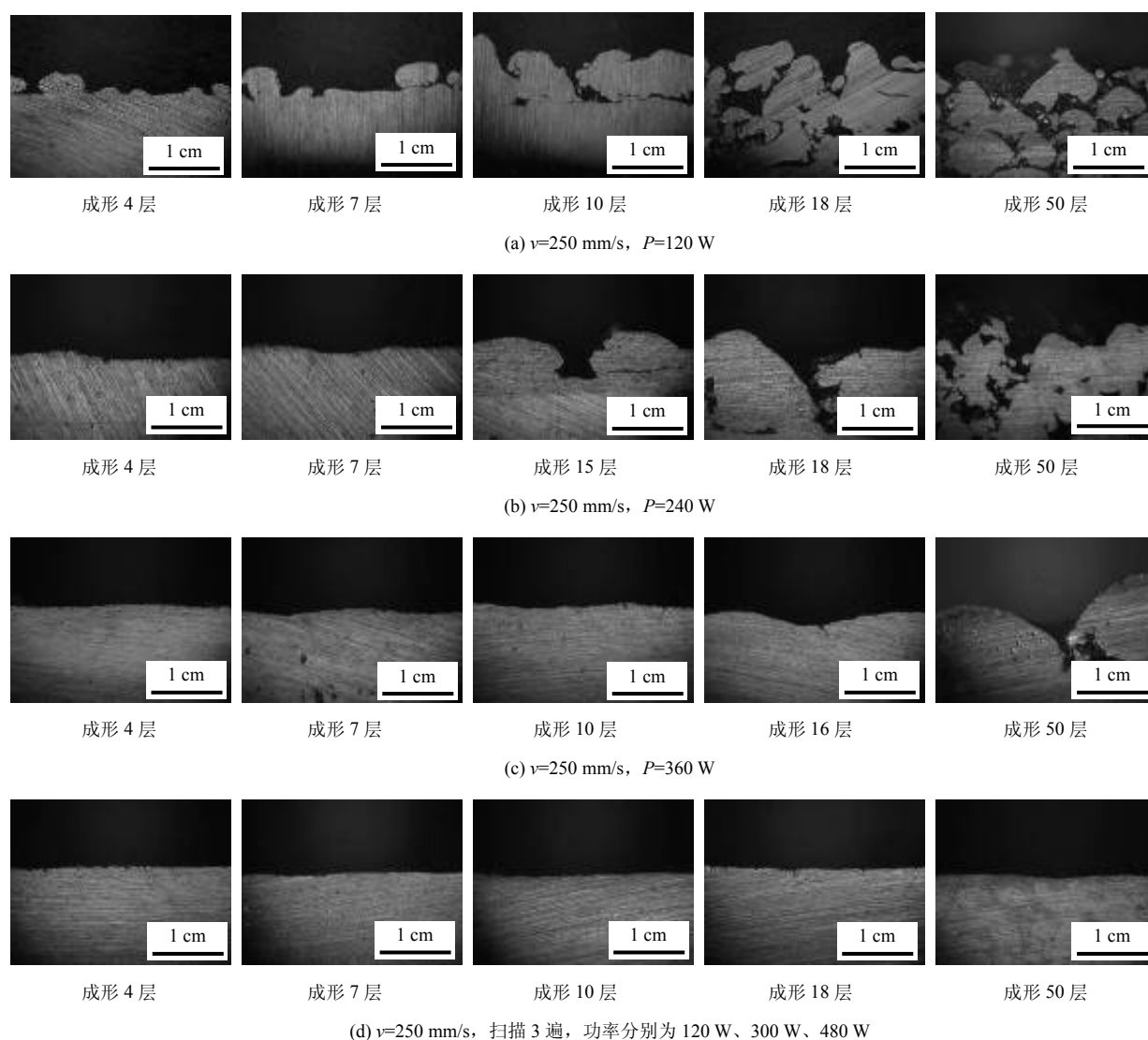


图 4 上表面形貌随成形高度增加而演变的过程

较大起伏, 同时内部出现孔隙。

由以上结果可知, 成形件上表面形貌不是一次形成的, 是在成形过程中不断积累缺陷而恶化。在图 4a 中, 能量密度较低, 粉末材料飞溅少, 基体熔化量较少, 对熔池的约束作用较弱, 熔池在表面张力作用下聚球; 在聚球的表面铺设的粉末层厚度不均匀, 粉末层较厚的地方能量密度低, 粉末材料熔化后聚球并依附在表面的凸起处, 使上一层的聚球进一步长大; 如此, 随着成形高度增加, 上表面形貌不断恶化, 最终演变为沟壑起伏的形貌。

如图 4b、4c 所示, 增加电子束功率, 基体熔化量增加, 对熔池约束作用较强, 熔池寿命较长, 与熔化的基体充分浸润, 从而减弱或者消除聚球, 可以暂时维持上表面的平整形貌; 但增加电子束功率会使粉末材料的飞溅增加, 粉末材料飞溅后, 当前实际成形厚度减小, 下一层粉末厚度相应增加。随

着成形层数增加, 粉末层厚度累积至一定值, 能量密度不足导致聚球, 上表面不再维持平整形貌, 逐渐恶化为沟壑状。另外, 飞溅的粉末颗粒为成形增加了偶然因素, 也会导致上表面形貌逐渐恶化。

2.3 功率递增、多遍扫描对上表面形貌的改善

功率递增、多遍扫描是指电子束多遍扫描零件的截面区域, 并且随着扫描遍数逐渐增加功率。图 5 是不同工艺参数成形 50 层后的上表面形貌。四个零件的扫描速度均为 250 mm/s , 图 5a 中电子束以 120 W 功率扫描 1 遍, 图 5b 中电子束扫描 2 遍, 功率分别为 120 W 、 240 W , 图 5c 中电子束扫描 3 遍, 功率分别为 120 W 、 240 W 、 360 W , 图 5d 中电子束扫描 3 遍, 功率分别为 120 W 、 300 W 、 480 W 。试验结果发现不同的功率递增方式获得不同的上表面形貌: 在图 5b 中, 第二遍扫描导致更大的聚球, 在图 5c 中, 聚球仍然没有完全消除, 上表面仍然呈

现沟壑状;而在图 5c 中,第一遍扫描以后的电子束功率足够大,获得了基本平整的上表面形貌。

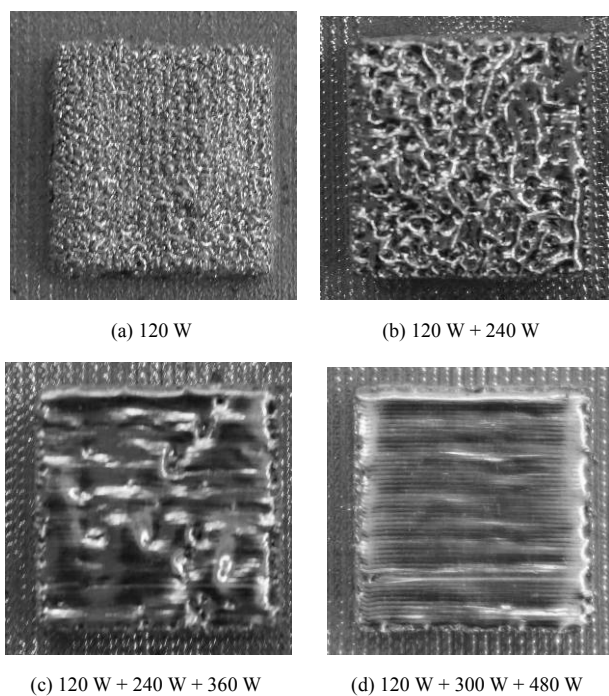


图 5 功率递增、多遍扫描后的上表面形貌

功率递增、多遍扫描能够改善成形件上表面形貌的原因在于:先用低功率的电子束扫描粉末层,使粉末材料熔化聚球,同时飞溅程度最小,保证绝大部分材料都留在扫描区域之内;然后在后续扫描中不断增加电子束功率,只要电子束功率足够,就能使已经聚球的材料再次熔化,熔池寿命延长、充分流动浸润,最终获得致密的平整表面。

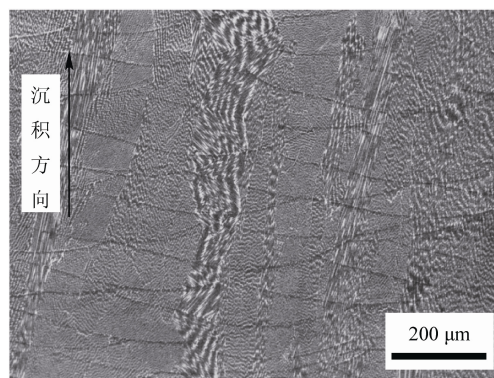
图 4d 是采用功率递增、多遍扫描方法后的上表面形貌随成形高度增加而演变的过程,可以看到成形件的上表面始终保持平整状态,没有随着成形层数的增加而恶化。

利用接触式粗糙度测量仪测量上表面粗糙度,取样长度 2.5 mm,连续 5 个取样长度,取样方向垂直于电子束的扫描纹理,测量得到 R_a 值为 7.9 μm 。

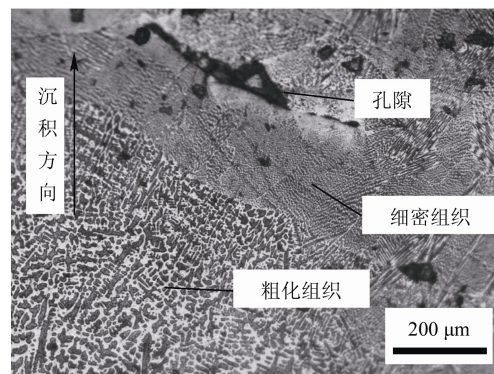
2.4 功率递增、多遍扫描工艺成形的微观组织

分别对电子束功率递增、多遍扫描工艺和功率恒定、单遍扫描工艺和成形的不锈钢试样的微观组织进行观察。图 6a 为电子束功率递增、多遍扫描工艺成形的 316L 不锈钢的微观组织,可见有规律鱼鳞状的扫描线熔合痕迹,相邻的扫描线之间为冶金结合,零件高度致密,没有明显孔隙。由于熔池主要向基体及零件已沉积部分散热,可以看到沿着沉积方向连续生长的晶体,其生长不受电子束多遍扫描的影响。晶体内部组织具有明显的快速熔凝特征,为细小的柱状晶或等轴晶。

图 6b 为电子束以速度 0.25 m/s、功率 360 W 单遍扫描的试样微观组织,其中有明显的未闭合的孔隙,孔隙中有未完全熔化的粉末。由于孔隙的存在,晶体沿沉积方向的生长被打断。图中既有由于快速熔凝形成的细密组织,也有粗化的枝晶组织。这是由于孔隙导致某些部位的熔池散热条件变差,从而形成粗化的枝晶组织,这会直接削弱成形件的力学性能。



(a) $v=250 \text{ mm/s}$, 扫描 3 遍, 功率分别为 120 W、300 W、480 W



(b) $v=250 \text{ mm/s}$, $P=360 \text{ W}$

图 6 电子束选区熔化 316L 不锈钢的微观组织

因此,电子束功率递增、多遍扫描不仅可以改善成形件的表面质量,还可以获得晶粒细小的致密组织。利用排水法测定了电子束功率递增、多遍扫描工艺成形的 316L 不锈钢零件,其致密度达 99.96%。

对 316L 不锈钢粉末、电子束 360 W 功率单遍成形、电子束 120~480 W 功率递增 3 遍扫描成形的试样分别进行 X 射线能谱分析,主要元素的质量分数列于表 2 中。由于成形在高真空环境下进行,元素的氧化很小,氧的质量分数在粉末与成形件中都很小。电子束扫描主要导致低熔点的锰(Mn)元素的烧损,其质量分数明显下降;高熔点的钼(Mo)元素则烧损最小,其质量分数明显上升。比较电子束功率恒定、单遍扫描与电子束功率递增、多遍扫描这两种工艺,可以发现电子束多遍扫描对元素成分

的影响很小, 材料元素成分几乎不变。

表 2 电子束扫描对成分的影响

元素	质量分数(%)			熔点/℃
	粉末	功率恒定、单遍扫描	功率递增、多遍扫描	
硅(Si)	1.02	1.04	1.00	1 410
铬(Cr)	17.50	17.70	17.10	1 857
镍(Ni)	12.40	12.10	12.90	1 453
钼(Mo)	2.70	3.17	3.20	2 617
锰(Mn)	1.51	—	—	1 246

3 结论

(1) 粉末熔化阶段的工艺参数影响 316L 不锈钢成形件的上表面形貌, 若采用功率恒定、单遍扫描方法, 随着 P/v 值的增加, 上表面形貌由网结状过渡为沟壑状。

(2) 功率恒定、单遍扫描工艺成形的上表面质量差、粗糙度大是一个逐渐累积、不断恶化的过程。增加 P/v 值能够在前面若干层消除聚球、保持较平整表面, 但由于飞溅增加, 仍然不能避免上表面形貌的不断恶化。

(3) 功率递增、多遍扫描工艺能够有效地改善成形件的上表面形貌, 避免上表面形貌随成形高度增加而恶化。成形的 316L 不锈钢试样上表面粗糙度 R_a 小于 $8\ \mu\text{m}$ 。

(4) 功率递增、多遍扫描工艺形成均匀细密、具有快速熔凝特征的微观组织, 组织高度致密, 致密度达 99.96%。相对于单遍扫描, 多遍扫描不会造成 316L 不锈钢主要元素的额外烧损。

参 考 文 献

- [1] 李涤尘, 贺健康, 田小永, 等. 增材制造: 实现宏微结构一体化制造[J]. 机械工程学报, 2013, 49(6): 129-134.
LI Dichen, HE Jiankang, TIAN Xiaoyong, et al. Additive manufacturing: Integrated fabrication of macro/microstructures[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(6): 129-134.
- [2] 吴伟辉, 杨永强. 选区激光熔化快速成形系统的关键技术[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 175-180.
WU Weihui, YANG Yongqiang. Key techniques for selective laser melting rapid prototyping system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 175-180.
- [3] 颜永年, 齐海波, 林峰, 等. 三维金属零件的电子束选区熔化成形[J]. 机械工程学报, 2007, 43(6): 87-92.
YAN Yongnian, QI Haibo, LIN Feng, et al. Produced

three-dimensional metal parts by electron beam selective melting[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(6): 87-92.

- [4] 闫占功, 林峰, 齐海波, 等. 直接金属快速成形制造技术综述[J]. 机械工程学报, 2005, 41(11): 1-6.
YAN Zhongong, LIN Feng, QI Haibo, et al. Overview of direct metal rapid prototyping and manufacturing technologies[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(11): 1-6.
- [5] MURR L E, ESQUIVEL E V, QUINONES S A, et al. Microstructures and mechanical properties of electron beam-rapid manufactured Ti-6Al-4V biomedical prototypes compared to wrought Ti-6Al-4V[J]. Materials Characterization, 2009, 60(2): 96-105.
- [6] FACCHINI L, MAGALINI E, ROBOTTI P, et al. Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V produced by electron beam melting of pre-alloyed powders[J]. Rapid Prototyping Journal, 2009, 15(3): 171-178.
- [7] HARRYSSON O, CORMIER D R. Evaluation of titanium implant components directly fabricated through electron beam melting technology[J]. Advanced Materials and Processes, 2005, 163(7): 72.
- [8] HARRYSSON O, CANSIZOGLU O, MARCELLIN-LITTLE D J, et al. Direct metal fabrication of titanium implants with tailored materials and mechanical properties using electron beam melting technology[J]. Materials Science and Engineering C, 2008, 28(3): 366-373.
- [9] LI X, WANG C T, ZHANG W G, et al. Fabrication and compressive properties of Ti6Al4V implant with honeycomb-like structure for biomedical applications[J]. Rapid Prototyping Journal, 2010, 16(1): 44-49.
- [10] STRONDLA, MILENKOVIC S, SCHNEIDER A, et al. Effect of processing on microstructure and physical properties of three nickel-based superalloys with different hardening mechanisms[J]. Advanced Engineering Materials, 2012, 14(7): 427-438.
- [11] MURR L E, MARTINEZ E, GAYTAN S M, et al. Microstructural architecture, microstructures, and mechanical properties for a nickel-base superalloy fabricated by electron beam melting[J]. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 2011, 42(11): 3491-3508.
- [12] CORMIER D, HARRYSSON O, MAHALE T, et al. Freeform fabrication of titanium aluminide via electron

- beam melting using prealloyed and blended powders[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2008(2007): 6822-6825.
- [13] PORTER J, WOOTEN J, HARRYSSON O, et al. Digital manufacturing of gamma-TiAl by electron beam melting[C]//*Materials Science and Technology Conference and Exhibition 2011, MS and T'11*, October 16-20, 2011, Columbus, OH, United states: Association for Iron and Steel Technology, AISTECH, 2011: 1434-1441.
- [14] SAFDAR A, HE H Z, WEI L Y, et al. Effect of process parameters settings and thickness on surface roughness of EBM produced Ti-6Al-4V[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2012, 18(5): 401-408.

作者简介: 郭超, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为增材制造、三维打印。

E-mail: c-guo10@mails.tsinghua.edu.cn

林峰(通信作者), 男, 1966 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为重型锻压设备、增材制造、生物三维打印。

E-mail: linfeng@tsinghua.edu.cn