

文章编号: 1001-4888(2018)04-0543-08

选择性激光熔化 316L 不锈钢在不同成形策略下的冲击性能研究^{*}

戴雨华¹, 刘行健¹, 李中伟¹, 文世峰¹, 赵玉津², 史玉升¹

(1. 华中科技大学 材料科学与工程学院, 武汉 430074; 2. 南卡罗莱纳大学 机械工程系, 哥伦比亚, 美国 29208)

摘要: 采用选择性激光熔化(SLM)成形系统 HK M250 制备了垂直于 Z 轴的水平类型和平行于 Z 轴的垂直类型等多种工况的 316L 不锈钢冲击试样, 并对试样缺口采取了 SLM 直接成形和机械加工成形两种方式。在室温条件下进行了 316L 不锈钢冲击实验, 使用 KEYENCE 光学成像系统和扫描电镜观察了试样断口形貌, 并用扫描电镜观察了不同成形截面的微观组织。实验结果表明, 通过机械加工制作缺口相比于 SLM 直接成形缺口, 其试样冲击性能更好; 对于两种缺口制作方式, T(t) 类型试样的冲击功明显低于 H(h) 类型试样, 这主要是由于 T(t) 类型试样承载截面的内部缺陷多于 H(h) 类型试样, 从而降低了其冲击功。

关键词: 选择性激光熔化成形; 316L 不锈钢; 冲击性能

中图分类号: TN249; TF124

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-048

0 引言

选择性激光熔化(Selective Laser Melting, SLM), 是一种基于分层叠加制造, 通过高能激光束逐层扫描并熔化金属粉末而成形的快速制造技术^[1,2]。该技术能直接成形各种复杂零件, 致密度较高, 力学性能良好, 材料多样化且利用率高, 与其他成形技术相比具有明显优势^[3,4]。但是, 目前 SLM 技术仍存在一定的弊端和工艺缺陷, 比如 SLM 设备价格高昂, 原料粉末费用较高, 表面光洁度较差, 性能存在各向异性等^[5]。在 SLM 金属材料中, 316L 不锈钢由于其生物相容性良好, 与人骨力学性能相匹配, 且耐体液腐蚀, 在医学上应用广泛并受到科研工作者的关注与研究^[6-10]。

目前, 已经有许多学者研究了不同加工工艺对 SLM 316L 不锈钢机械性能的影响。Itziar 等人研究了 316L 不锈钢在不同成形方向下的力学性能, 指出试样最大截面与 Z 轴垂直, 其轴线与铺粉方向成 30° 时拉伸性能最优, 试样最大截面与 Z 轴平行时, 其拉伸性能最差^[11]; 李洋等人研究了扫描间距对 316L 不锈钢力学性能的影响, 指出随扫描间距增大, 两相邻激光辐照区域搭接率降低, 其抗压强度及弹性模量均减小^[12]; 杨健等人研究了 316L 不锈钢在激光快速成形过程产生的残余应力分布, 发现与激光扫描方向平行的残余应力较大, 为薄板的主要残余应力, 而与激光扫描方向垂直的残余应力相对较小^[13]; 郑阳等人研究了激光喷丸强化对 316L 不锈钢拉伸性能的影响, 证实了喷丸强化能提高 316L 不锈钢的韧性^[14]。除拉伸性能外, 冲击性能对于结构件也非常重要, 它反映了金属材料对外来冲击负荷的抵抗能力, 决定了在高应变速率下的断裂行为, 因此选择性激光熔化成形 316L 不锈钢的冲击性能是生物医学和结构力学等领域重点关注的性能指标。为此, 本文主要对 SLM 316L 的冲击性能开展研究,

^{*} 收稿日期: 2017-03-06; 修回日期: 2017-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(51675208)资助

通讯作者: 李中伟(1981—), 男, 博士, 副教授。主要研究领域: 光学测量、增材制造。Email: zwli@hust.edu.cn

重点研究成形方向和试样缺口制备方法对 SLM 316L 不锈钢的冲击性能影响,并对其微观组织及断口进行分析,以期为载体零部件的缺口加工方式提供参考,并为 SLM 成形样品冲击性能测试提供必要的参考依据。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

实验采用雾化法制备的 316L 不锈钢粉末。实验之前,将实验所用粉末材料在真空干燥箱内进行烘干处理,以降低粉末中水分对成形质量带来的不良影响。该粉末的化学成分如表 1。粉末的扫描电子显微镜图像(Scanning Electron Microscope, SEM)如图 1 所示,粉末颗粒为球状分布,存在大小不均匀的现象。采用激光衍射粒度分析测量的粒径分布尺寸如图 2,其中值粒径为 12.37 μm 。

表 1 316L 不锈钢化学成分(%)

Tab. 1 Chemical components of 316L stainless steel(%)

Cr	Ni	Mo	C	Si	Mn	Fe
16~18	10~14	2~3	≤ 0.03	≤ 1	≤ 2	Bal

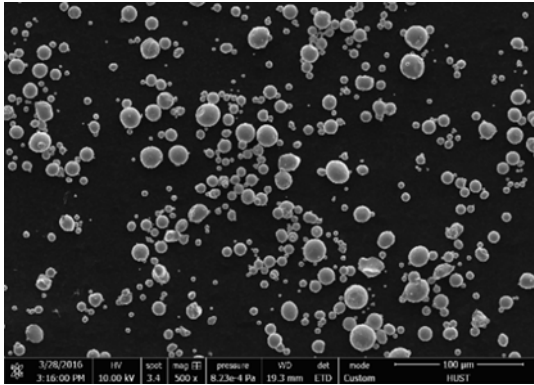


图 1 316L SEM 粉末图

Fig. 1 SEM observation of 316L steel powder

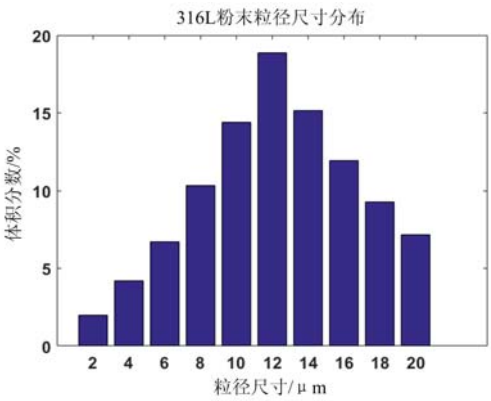


图 2 316L 粉末粒度分布柱状图

Fig. 2 Distribution histogram of 316L steel powder particle size

1.2 实验方法

实验采用华中科技大学与华科三维科技有限公司共同研制的 HK M250 设备,机械铺粉系统采用自动上送粉,单缸单向铺粉的方式;基板选用 1Cr18Ni9Ti 不锈钢,尺寸为 100mm $\times$ 100mm $\times$ 10mm(厚度 10mm),实验前用砂纸进行打磨,再用丙酮清洗以保证基板表面清洁。为防止成形过程中粉末材料发生氧化,成形室始终处于抽真空和高纯氮气保护相结合的双重保护气氛状态下。

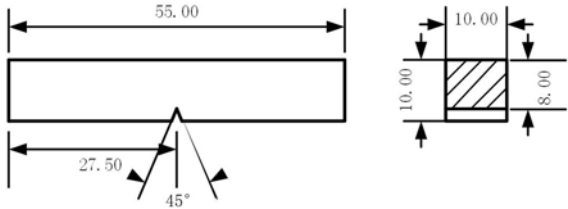


图 3 V 型标准冲击试样

Fig. 3 V-type standard charpy test specimen

为了研究成形策略与冲击性能之间的关系,采用相同参数(分层厚度 0.03mm,填充间距 0.06mm,扫描速度 1000mm/s,扫描功率 260W)分别从不同方向制备 V 型标准冲击试样(如图 3 所示,试样尺寸为 55mm $\times$ 10mm $\times$ 10mm,含 45 $^\circ$ 、2mm 高的缺口)及未切 V 型缺口的冲击试样(缺口由后续机械加工获得),示意图和实际效果图分别如图 4 和图 5 所示。

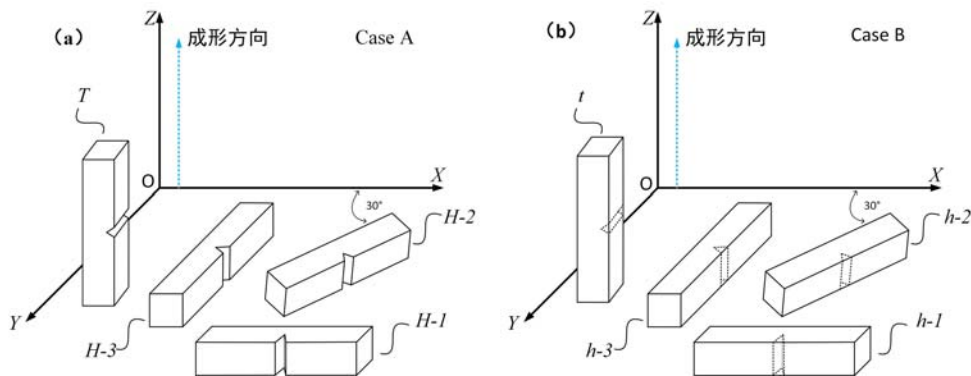


图4 SLM不同成形策略示意图:(a)Case A:V形缺口直接SLM制造, 试样分别与X轴成 0° 、 30° 、 90° 、平行于Z轴;(b)Case B:V形缺口由后续机械加工制造, 试样分别与X轴成 0° 、 30° 、 90° 、平行于Z轴

Fig. 4 Schematic diagrams of different forming strategies: (a)Case A:the notches direct formed by SLM, specimens are with $0, 30, 90$ degrees with the X-axis and perpendicular to the Z axis; (b)Case B:the notches formed by EDM, specimens are with $0, 30, 90$ degrees with the X-axis and perpendicular to the Z axis

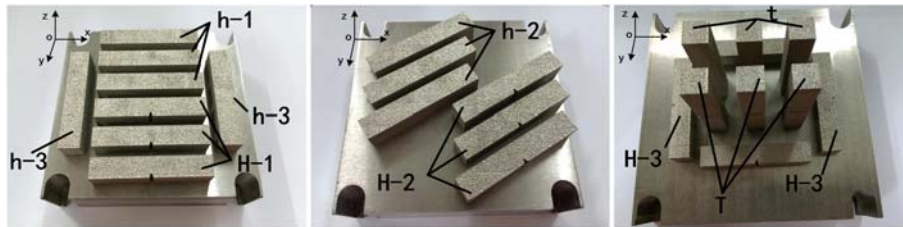


图5 不同成形策略下的316L冲击试样

Fig. 5 316L charpy impact specimens under different forming strategies

依照成形策略不同,分为以下两种情况:

Case A: V形缺口直接SLM制造,其中,水平试样分别与X轴成 0° 、 30° 、 90° ,根据成形角度的不同依次命名为H-1、H-2、H-3。垂直试样命名为T。

Case B: V形缺口由后续机械加工制造,其中,水平试样分别与X轴成 0° 、 30° 、 90° ,根据成形角度的不同依次命名为h-1、h-2、h-3。垂直试样命名为t。

选择性激光熔化成形后,将试样采用线切割方式从基板分离,本研究中未对试样采取任何形式的热处理。试样制备完成,使用乙酸乙酯、酒精对试样进行清洗,采用阿基米德排水法确定SLM 316L的相对密度,在室温条件下采用国产JB-30A冲击试验机测定不同成形策略下试样的冲击功,冲击功测试方法如1.3,实验结果中对3组数据取平均值以降低数据分散性,运用标准差评价其数据分散程度。使用超景深三维显微镜(VHX-1000C,日本,KEYENCE)观察断口表面形貌。通过镶样、研磨、抛光,用侵蚀剂王水进行化学侵蚀来制作金相试样,在金相显微镜和扫描电镜(SEM)下观察试样截面的微观组织和缺陷分布。

1.3 冲击功测试方法

316L不锈钢不同成形策略下的室温冲击韧性实验在JB-30A型冲击试验机上进行,该设备的实物图及实验原理分别如图6和图7所示。

该设备的挂摆、扬摆、冲击、制动过程均为机械电气控制,为半自动操纵试验机。实验时,将试样水平放置在试验机支座上,缺口位置背向冲击方向。具有一定质量 G 的摆锤在电动机的驱动下上扬一定高度 H_1 ,获得位能 GH_1 。按动“冲击”按钮,释放摆锤冲击试样,摆锤在惯性力的作用下上升高度 H_2 ,剩余能量为 GH_2 ,则摆锤在此过程中失去的位能 $GH_1 - GH_2$,即为试样断裂变形的冲击吸收功,以 A_K 表示,单位为J。



图 6 JB-30A 型冲击试验机
Fig. 6 JB-30A type charpy test machine

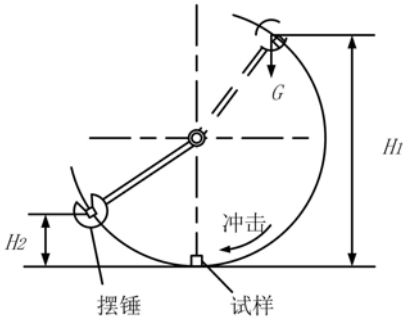


图 7 冲击功测试原理
Fig. 7 The principle of charpy test

2 实验结果与分析

2.1 相对密度与室温冲击功

不同成形策略下 316L 不锈钢试样的相对密度和冲击功结果如表 2 所示。

表 2 不同成形策略下试样的相对密度和冲击功

Tab. 2 Relative density and impact work of specimens under different forming strategies

Case A:

试样类型	H-1			H-2			H-3			T		
编号	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
AKV(J)	18.4	17.2	15.6	15.6	13.2	19.6	17.2	16.0	13.6	15.6	11.2	14
AVE(J)	17.07			16.13			15.6			13.6		
SD	1.15			2.64			1.50			1.82		
相对密度/%	94.79			93.36			94.53			96.71		

Case B:

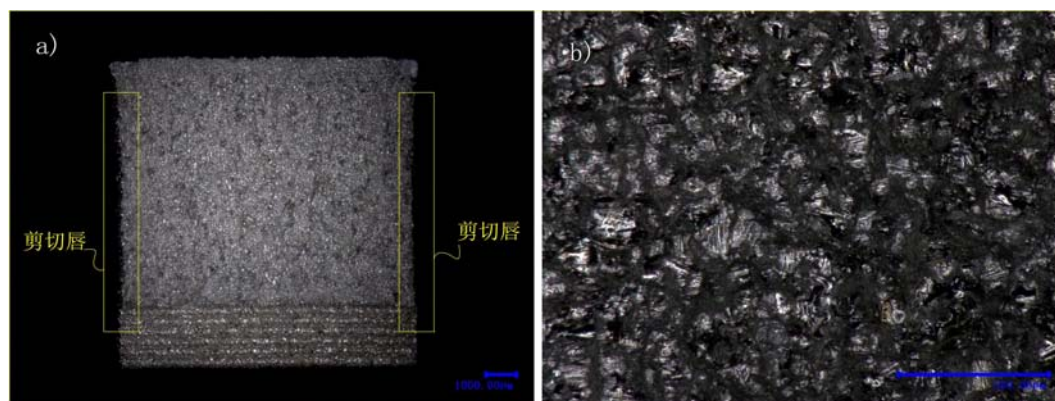
试样类型	h-1			h-2			h-3			t		
编号	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
AKV(J)	20.0	19.6	20.0	19.6	20.0	20.4	20.0	20.4	21.2	15.2	19.2	15.6
AVE(J)	19.87			20			20.53			16.67		
SD	0.19			0.33			0.50			1.80		
相对密度/%	94.67			93.41			94.74			96.77		

表中,AKV 为 V 型缺口试样的冲击功;AVE 为冲击功平均值;SD 为标准偏差。

可以看出,垂直 Z 轴成形的 H 类型试样相对密度约为 94.25%,平行 Z 轴成形的 T 类型试样相对密度约为 96.74%,后者相对密度明显增加。这是由于 T 类型试样相比其他类型试样,距离基板中心位置更近,加工过程中激光能量损耗最小,与王黎之前的研究相一致^[15];在平行于基板成形的试样中,与 X 轴成 30°的试样相对密度与另外两种情况基本保持一致。

通过后续机械加工制作缺口与 SLM 直接成形缺口相较而言,前者的冲击功更高一些,大约高出 23.51%,其中 H 类型试样的数据结果离散程度明显降低。这是由于经 SLM 直接成形的试样在层与层之间存在台阶效应^[16],在缺口处表现尤为明显,表面粗糙度较高,其缺口更加尖锐,应力集中的程度更

大,更容易在冲击载荷下形成裂纹,即减小了裂纹形成功,由此降低对缺口十分敏感的冲击功;SLM 成形过程中由于不均匀温度场在快速冷却过程中会产生热应力和组织应力,在成形试样中形成了残余应力,机械加工制作缺口这一过程释放了部分残余应力而使冲击功得到提高。无论是 SLM 直接成形缺口还是后续机械加工缺口,H 类型试样的冲击功均明显高于 T 类型试样冲击功,提高 20% 左右,该结果与微观组织密不可分,具体分析见 2.2;而 H 类型中与 X 轴呈不同角度成形的试样,测试所得冲击功较为接近,其中与 X 轴成不同角度的机械加工制作缺口的试样相差约 3.2%,因此我们认为除 T 型试样外,其他类型试样的冲击性能基本一致。与传统工艺加工的冲击试样水平(经热处理后的铸件 135J,锻件 200J 以上)相比,其冲击功大大降低,这说明本实验中 SLM 加工的 316L 不锈钢试样冲击性能有待加强,一般情况下,可通过增加后处理的方式进一步改善 SLM 成形试样的冲击性能。



(a) 200 倍

(b) 500 倍

图 8 H-1 试样断口在超景深光学显微镜下的表面形貌

Fig. 8 Fractographs of H-1 specimen under optical microscope

2.2 冲击断面与微观组织

选取试样 H-1、T 分别作为 H 类型和 T 类型试样的代表,仅对以上两种形式的试样进行观察比较。图 8 和图 9 分别为试样进行冲击测试后经超景深光学显微镜和扫描电镜拍摄的断面形貌。其中,图 8 为 H-1 试样在超景深光学显微镜下的表面形貌,图 9(a)和(c)分别为试样 H-1 放大 2000 倍和 20000 倍的形貌,图 9(b)和(d)分别为试样 T 放大 2000 倍和 20000 倍的形貌。如图 8 所示,断口表面颜色灰暗,无金属光泽,剪切唇在断口表面所占例较小。在图 9(a)中可看到分布着尺寸较为均匀的大韧窝,在这些大韧窝的周围密集地分布着图 9(c)中所示的小韧窝,在一些韧窝的自由表面产生了新的滑移,形成了涟波花样,一些未完全熔化的原料粉末、球化后的杂质和大小形状不一的孔洞随机分布在断面各处。图 9(b)中断口韧窝不均匀,尺寸及形态差别较大,随大尺寸韧窝深度增加,断口起伏程度增大,在韧窝周围存在明显的撕裂棱。

激光快速成形件性能取决于其微观组织。本实验中试样的冲击功均小于参考值,与其微观组织关系密不可分。根据以上分析,除 XOY 面外,其他平面对冲击性能影响是一致的,选取 YOZ 截面为例,讨论其与 XOY 面的微观情况。

图 10(a)和(b)分别为 H-1 试样和 T 试样的承载截面,即 YOZ 截面和 XOY 面。可以观察到,在 SLM 加工过程中产生了明显的加工缺陷,且缺陷或孔洞的形态并不固定,其尺寸大小不一,可高达数百微米。YOZ 面与 XOY 面相较而言,表面更加光洁,缺陷程度更低,数量更少且尺寸较小。也就是说,在 XOY 承载截面的减少程度明显大于 YOZ 承载截面的减少。T 型试样更多的加工缺陷减少了承载截面,降低了对冲击载荷的抵抗阻力,降低了冲击功,在冲击载荷加载过程中更容易发生断裂。将部分缺陷放大,如图 11 中可以明显观察到一些 SLM 加工过程中未完全熔化的残余原料粉末和球化后金属颗粒仍存在于这些加工缺陷上,这些缺陷和孔洞不仅在试样内部产生大量孔隙,降低了相对密度,增加了表面粗糙度,也破坏了连续加工面,对试样的冲击性能产生了不利影响。

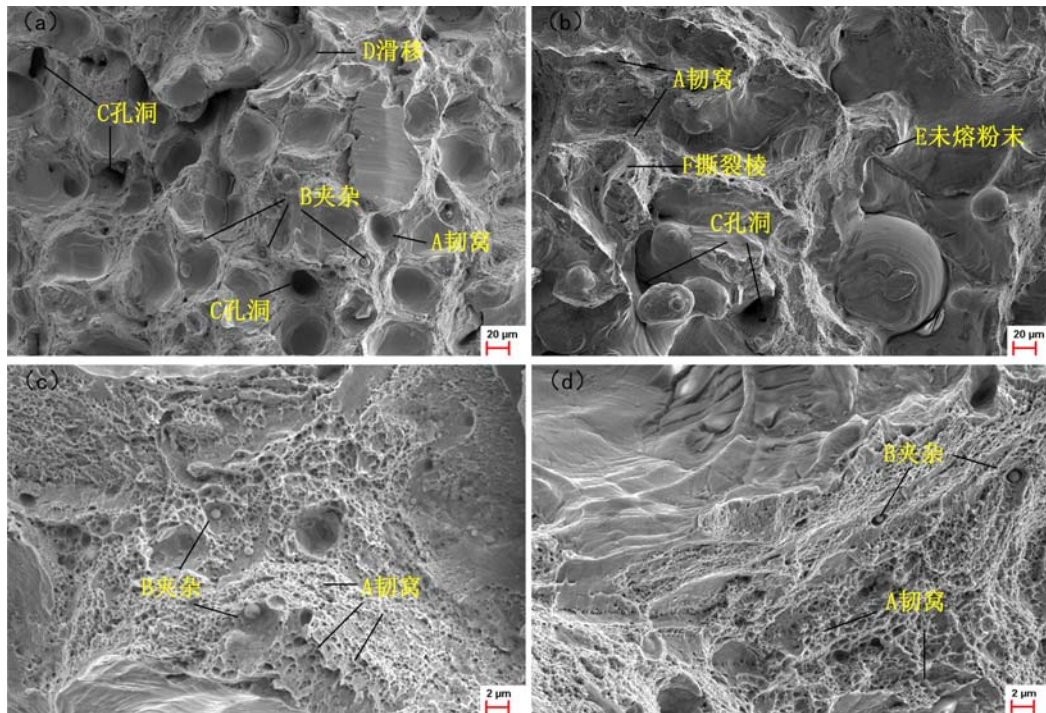


图 9 SEM 下断口形貌:(a)H-1 试样断口放大 2000 倍下的形貌,(b)T 试样断口放大 2000 倍下的形貌,
(c)H-1 试样断口放大 20000 倍下的形貌和(d)T 试样断口放大 20000 倍下的形貌

Fig. 9 SEM fractographs of the charpy impact specimens:(a)the fractograph of H-1 specimen under the magnification of 2000, (b)the fractograph of T specimen under the magnification of 2000, (c)the fractograph of H-1 specimen under the magnification of 20000, and (d)the fractograph of T specimen under the magnification of 20000

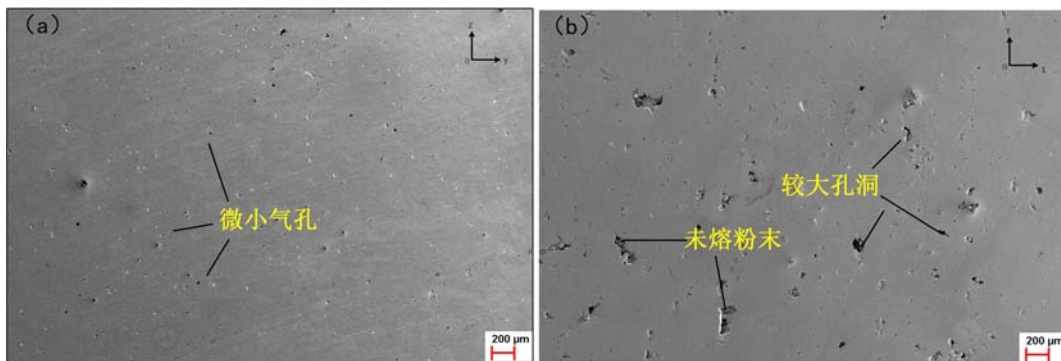


图 10 SEM 下截面形貌:(a) H-1 试样的 YOZ 截面 和 (b)T 试样的 XOY 截面

Fig. 10 SEM images of cross section: (a)The YOZ cross section of H-1 specimen,
and (b) The XOY cross section of T specimen

3 结论

通过不同成形策略加工的 SLM 316L,其冲击性能表现不同。通过后续机械加工制作缺口比 SLM 直接成形缺口,其冲击性能高出 20%左右。因此对于 SLM 316L 及其他金属材料的冲击实验,在制样时应对缺口的制备方法给予足够关注与区分,避免由于缺口制备方式不同带来的数据偏差。此外,无论是 SLM 直接成形缺口,还是通过机械加工制作缺口,T 型试样的冲击性能明显低于 H 型试样。微观组织结果清晰表明,试样加工过程中产生了无固定形态的缺陷或孔洞。在相同的承载截面上,T(*t*)试样的缺陷与孔洞多于 H(*h*)试样,这是造成平行于 Z 轴的 T 试样冲击性能减弱的主要原因。因此在需要考虑冲击性能应用的场合,应该对试件的增材制造方式进行优化设计以保证冲击性能。

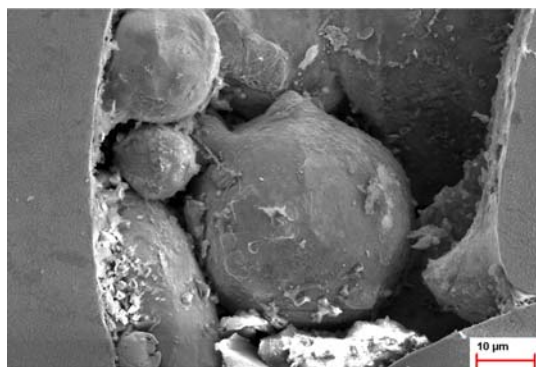


图 11 316L 试样部分缺陷

Fig. 11 Defects of 316L specimens

参考文献:

- [1] Li L, Fuh J Y H, Chen Z D, et al. In situ formation of TiC composite using selective laser melting[J]. Materials Research Bulletin, 2000, 35(9):1555—1561.
- [2] 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.
- [3] Osakada K, Shiomi M. Flexible manufacturing of metallic products by selective laser melting of powder[J]. International Journal of Machine Tool & Manufacture, 2006, 46(11):1188—1193.
- [4] Wehmoller M, Warnke P H, Zilian C, et al. Implant design and production—a new approach by selective laser melting[J]. International Congress Series, 2005, 1281:690—695.
- [5] 潘琰峰, 沈以赴, 顾冬冬, 等. 316 不锈钢粉末直接激光烧结的球化效应[J]. 中国机械工程, 2005, 16(17):1573—1576 (PAN Yanfeng, SHEN Yifu, GU Dongdong, et al. Balling effect during direct laser sintering of 316 stainless steel powders[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(17):1573—1576 (in Chinese))
- [6] Yap C Y, Chua C K, Dong Z L, et al. Review of selective laser melting: Materials and applications[J]. Applied Physics Reviews, 2015, 2(4):041101.
- [7] 杨永强, 宋长辉, 王迪. 激光选区熔化技术及其在个性化医学中的应用[J]. 机械工程学报, 2014(21):140—151 (YANG Yongqiang, SONG Changhui, WANG Di. Selective laser melting and its applications on personalized medical parts [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(21):140—151 (in Chinese))
- [8] Sivakumar M, Dhanadurai K S K, Rajeswari S, et al. Failures in stainless steel orthopaedic implant devices: a survey[J]. Journal of Materials Science Letters, 1995, 14(5):351—354.
- [9] 蒲素云. 金属植入材料及其腐蚀[M]. 北京航空航天大学出版社, 1990 (PU Suyun. Metal implanted materials and corrosion[M]. Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1990 (in Chinese))
- [10] Salmi M, Paloheimo K S, Tuomi J, et al. Accuracy of medical models made by additive manufacturing (rapid manufacturing)[J]. Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery, 2013, 41(7):603—609.
- [11] Itziar T, Fermin G, Fidel Z, et al. Study of mechanical properties of AISI 316 stainless steel processed by “selective laser melting”, following different manufacturing strategies[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 51:639—647.
- [12] 李洋, 陈长军, 王晓南, 等. 选区激光熔化技术制备 316L 多孔不锈钢工艺及性能研究[J]. 应用激光, 2015, 35(3):319—323 (LI Yang, CHEN Changjun, WANG Xiaonan, et al. Study on the process and properties of Biomedical 316L porous stainless steel prepared by selective laser melting technique[J]. Applied Laser, 2015, 35(3):319—323(in Chinese))
- [13] 杨健, 黄卫东, 杨海欧. 激光快速成形 316L 不锈钢残余应力分布[J]. 应用激光, 2005, 25(3):151—154 (YANG Jian, HUANG Weidong, YANG Haiou. Study of planar residual stress distribution of laser rapid forming 316L sheet [J]. Applied Laser, 2005, 25(3):151—154 (in Chinese))
- [14] 郑阳, 周建忠, 孟宪凯, 等. 激光喷丸强化 316L 不锈钢的拉伸性能[J]. 应用激光, 2016, 36(3):276—280 (ZHENG Yang, ZHOU Jianzhong, MENG Xiankai, et al. Strengthening the tensile properties of 316L stainless

- steel by laser shock peening[J]. *Applied Laser*, 2016, 36(3):276—28 (in Chinese))
- [15] 王黎. 选择性激光熔化成形金属零件性能研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2012:82—84 (WANG Li. Research on the performance in selective laser melting of metallic part [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012:82—84(in Chinese))
- [16] Vandenbroucke B, Kruth J P. Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2007, 13(4):196—203.

Experimental investigation on the impact properties of 316L stainless steel specimens made by different selective laser melting forming patterns

DAI Yu-hua¹, LIU Xing-jian¹, LI Zhong-wei¹, WEN Shi-feng¹, CHAO Yuh-jin², SHI Yu-sheng¹

(1. Department of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Department of Mechanical Engineering, University of South Carolina, Colombia, SC, USA 29208)

Abstract: Both types of 316L stainless steel impact specimens were manufactured by selective laser melting (SLM) forming based on HK M250, forming system, including horizontal type that is perpendicular to the Z axis and vertical type that is parallel to the z axis. In addition, two patterns of sample notch forming were adopted: one is direct SLM forming and the other one is machining operation. The impact experiment of 316L stainless steel specimens was carried out at room temperature. In experiment, the fracture morphology of specimen was observed by KEYENCE optical imaging system and scanning electron microscope, and the microstructure of different forming sections was observed by scanning electron microscope. Experimental results show that the impact properties of specimen made by machining operation are better than that of specimen made by SLM direct forming. For two types of notch, the impact work of vertical type specimen is obviously lower than that of horizontal type sample, which is mainly due to the internal defects of vertical type specimen are more than those of the horizontal type, then reduce the impact work.

Keywords: selective laser melting forming (SLM); 316L stainless steel; impact property