

SLM 激光单道扫描成型纯钨薄壁件的研究

伍 方¹, 孙中刚², 李邦悱¹, 陈 颢³, 郭圣达³, 朱玉斌¹

(1. 上海大学, 上海 200444)

(2. 南京工业大学, 江苏 南京 210009)

(3. 江西理工大学, 江西 赣州 341000)

摘 要: 通过选区激光熔化 (SLM) 技术激光单道扫描成型了纯钨薄壁件, 采用二维影像仪和光学显微镜分别测量了成型薄壁件壁厚和熔化道宽度, 研究了激光功率和扫描速率对成型纯钨薄壁件壁厚和熔化道宽度的影响。利用光学显微镜观察了成型薄壁件表面 2D 和 3D 形貌。使用扫描电镜观察了成型薄壁件侧面粘粉情况, 并分析了粘粉的原因。研究表明, 成型薄壁件壁厚要大于熔化道宽度; 随着激光功率的增大, 薄壁件壁厚和熔化道宽度逐渐增大, 薄壁件表面逐渐变得平坦; 随着扫描速率的增大, 薄壁件壁厚和熔化道宽度逐渐减小, 熔化道由扭曲变得平直再变得扭曲, 熔化道高度方向上的高度差先减小后增大; 纯钨薄壁件由完全熔化区、球化区、半熔化区和未熔化区 4 部分组成。

关键词: 选区激光熔化; 纯钨薄壁件; 薄壁件壁厚; 熔化道宽度; 粘粉现象

中图分类号: TG146.4⁺11

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)10-3490-08

金属钨是熔点最高的金属材料,同时具有高密度、良好的导热性和高温强度,被广泛应用于航天、核工业、军事和医学等领域^[1-3]。在医疗领域,薄壁状钨常用于制备准直器,在 CT 中用于吸收发生了散射的 X 射线,以提高成像质量^[4-6]。目前,准直器的传统制备方法一般需经过烧结、轧制、热处理、线切割、打磨和组装等诸多工序,同时由于钨脆性大,易在轧制过程中发生开裂,导致效率低,制备的准直器精度差。因此,急需一种新型成型工艺来取代当前传统工艺。

选区激光熔化 (SLM) 是近几年来最热门的金属增材制造技术之一。SLM 可以一次性成型得到冶金结合强、组织结构致密、综合性能良好且尺寸精度较高的金属零部件^[7-10]。目前,通过 SLM 成型金属零件主要有钛合金、铝合金、不锈钢、钴合金等。而钨由于具有高熔点和高脆性,且在熔融状态下具有粘度高、表面张力大和流动性差等特点,通过 SLM 成型时容易产生裂纹、孔洞和球化等缺陷。近几年来,一些研究人员也开始对 SLM 成型纯钨进行了研究。Zhou 等^[11]研究了 SLM 成型纯钨时的球化现象,发现球化现象的产生是由于钨熔滴铺展时间大于凝固时间而产生的,通过激光重熔过程可以有效抑制球化现象。Tan 等^[12]通过 SLM 成型了致密度达 98.5%,无球化现象,且机械性

能可媲美于传统成型方法的纯钨工件。Zhang 等^[13]在研究中发现由于 SLM 成型纯钨时产生的熔池冷却速率快,温度梯度大,因此形成了纳米晶体。Wang 等^[14]研究发现,SLM 成型纯钨时的开裂是由于熔池中的温度梯度产生的,通过改变激光扫描路径能够一定程度上抑制开裂现象。Wang 等^[15]通过 SLM 成型出了致密度达 96%的纯钨工件,并发现以球形钨粉为原料能够提升 SLM 成型纯钨工件的致密度。Xie 等^[16]对 SLM 成型钨薄壁件的壁厚控制和表面形貌进行了研究,发现适当的激光参数可成型纯钨薄壁件,避免球化现象;激光功率的增大和扫描速率的降低会增大成型薄壁件壁厚;同时发现激光重熔工艺可以降低薄壁件表面粗糙度。

上述研究证实了 SLM 成型纯钨工件的可行性,为 SLM 成型高质量纯钨工件提供了实验依据。SLM 成型工件过程是通过激光熔化金属粉末形成熔化道,相邻熔化道之间相互搭接形成零件的一层,再逐层堆积形成三维实体零件。因此,激光单道扫描是 SLM 成型的基础。本工作通过激光单道扫描成型了纯钨薄壁件,研究了激光功率和激光扫描速率对成型纯钨薄壁件壁厚、熔化道宽度、表面形貌的影响,同时分析了成型薄壁件两侧的粘粉现象,为后续利用 SLM 技术成型纯钨薄壁零件提出了建议。

收稿日期: 2019-10-12

基金项目: 国家自然科学基金 (51875274, 51464013); 江西省自然科学基金 (20181BBE58001); 江西省教育厅科学基金 (GJJ180431); 江西理工大学博士科研启动项目 (jxxjbs18041)

作者简介: 伍 方,男,1989 年生,博士生,上海大学材料科学与工程学院,上海 200444,电话: 021-56339290, E-mail: 43242289@qq.com

1 实 验

本实验所用的纯钨粉末形貌如图 1 所示。为球形，表面光滑且基本无粘附的细小行星粉末。球形钨粉的粒径除少数达到 35.9 和 42.0 μm 外，其余均在 30 μm 以下。

本实验样品是在 EOS M290 SLM 设备上制备的。激光光斑直径为 100 μm ，铺粉层厚为 30 μm ，扫描间距为 0.05 mm。制备 2 组样品，第 1 组为固定激光功率 260 W，扫描速率分别为 150，200，250，300 和 350 mm/s；第 2 组为固定扫描速率 250 mm/s，激光功率分别为 180，200，220，240 和 260 W。激光扫描方向为平行于薄壁件长度方向。设计成型的纯钨薄壁件长度为 10 mm，高度为 10 mm，厚度为激光光斑直径 0.1 mm。打印成型的纯钨薄壁件宏观照片如图 2 所示。图中箭头方向为薄壁的成型方向(building direction, BD)。由于采用线切割工艺将成型薄壁件从基板上切割下来，因此最终得到的薄壁件的高度为 6~7 mm。

通过 Nikon 二维影像仪检测了成型薄壁件样品的厚度。在测前，将样品置于乙醇中超声 30 min；通过

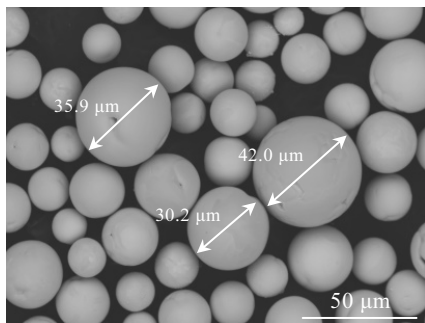


图 1 球形纯钨粉末形貌

Fig.1 Morphology of pure tungsten powder with spherical shape

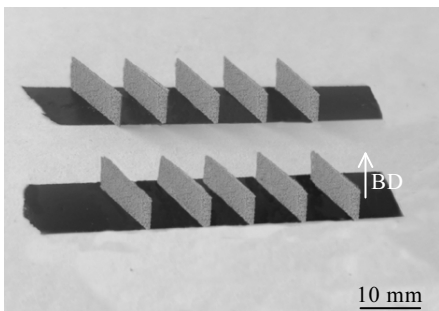


图 2 成型纯钨薄壁件宏观照片

Fig.2 Macro photograph of the formed pure tungsten thin walls

Keyence VHX-1000 光学显微镜观察了成型薄壁样品的表面三维形貌和熔化道的二维形貌，并测量了熔化道宽度，每条熔化道测量 10 处宽度，取其平均值；通过 Hitachi TM3030 桌面式钨灯丝扫描电镜观察了成型薄壁样品的侧面粉末粘接情况。

2 结果与分析

2.1 激光参数对壁厚及熔化道宽度的影响

图 3 所示为激光功率为 260 W，扫描速率为 150~350 mm/s 时成型的各薄壁件壁厚及熔化道宽度。由图可知，相同激光参数下成型的薄壁件壁厚大于熔化道宽度；壁厚及熔化道宽度均随扫描速率的增加而减小；当扫描速率为 350 mm/s 时，熔化道宽度减小至 93.2 μm 。SLM 过程中，纯钨粉末吸收激光能量而被熔化并通过流动、铺展和浸润过程连接在一起形成连续的熔池。激光扫描过后，熔池中的热量被传递到周围粉末和下层已凝固部分，使得熔池冷却凝固形成熔化道。而周围被加热的粉末粘附在熔化道两侧，导致薄壁件壁厚增大，大于熔化道宽度^[17]。随着扫描速率的增大，单位体积的粉末被激光照射的时间缩短，形成的熔池温度低。一方面，熔池的流动性差，导致其向周围扩散的能力差；另一方面，熔池凝固时间短，导致其扩散时间短。因此导致壁厚和熔化道宽度随扫描速率的增大而减小。当扫描速率达到 350 mm/s 时，熔化道宽度小于激光光斑直径，是因为过大的扫描速率导致熔池温度过低，熔池边缘的热量向周围粉末扩散而导致其流动性差，凝固时间短，从而产生球化现象，无法形成连续的熔池。因此减小了熔化道的宽度。

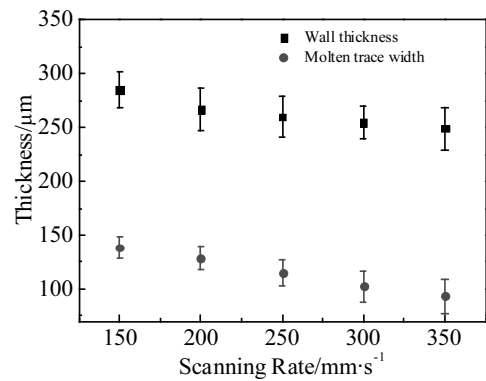


图 3 激光功率为 260 W 时，薄壁件壁厚及熔化道宽度随激光扫描速率的变化

Fig.3 Variation of thin wall thickness and molten channel width with laser scanning rate for the samples fabricated with laser power of 260 W

图 4 为扫描速率为 250 mm/s, 激光功率为 180~260 W 时成型的各薄壁件壁厚及熔化道宽度。由图可知, 随着激光功率的升高, 壁厚和熔化道宽度均增大。其原因与扫描速率对壁厚及熔化道宽度的影响类似。激光功率也是通过影响纯钨粉末熔化后形成的熔池的温度来影响成型薄壁件壁厚和熔化道宽度的。激光能量密度与激光功率成正比, 随着激光功率的增加, 纯钨粉末受到的激光能量增加, 纯钨粉末熔化后形成的熔池温度增加, 从而增强了熔池的流动性、铺展性和润湿性, 同时也使得激光照射区域以外更多的纯钨粉末被熔化而增大了熔池表面积, 最终导致熔池凝固后形成的熔化道宽度增大。

2.2 激光参数对薄壁件表面形貌的影响

图 5a~5e 所示为激光功率 260 W, 扫描速率 150~350 mm/s 参数下成型的薄壁件表面 2D 和 3D 形貌。当扫描速率为 150 mm/s 时, 薄壁件表面熔化道在高度方向上表现出了明显的高低起伏, 在宽度方向上表现出了明显的波动和扭曲。其原因在于, 在较低的扫描速率下, 纯钨粉末受到激光照射的时间更长, 粉末熔化后形成的熔池温度更高, 且熔池热量向周围扩散更多, 导致熔池中心与熔池边缘的温度梯度增大, 表面张力差增大, 从而引起强烈的 Marangoni 对流, 导致熔池在成型薄壁件的高度和宽度方向上产生强烈的波动, 从而在凝固后形成的薄壁件中表现出了明显的高低起伏、波动和扭曲^[18]。随着激光扫描速率增加至 250 mm/s, 熔化道形貌逐渐变得平直且平整, 高度方向上的高度差也逐渐减小。这是因为随着激光扫描速率的增加, 照射到纯钨粉末上的激光能量密度逐渐

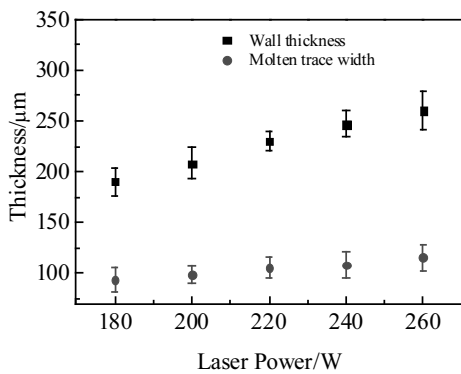


图 4 激光扫描速率为 250 mm/s 时, 薄壁件壁厚及熔化道宽度随激光功率的变化

Fig.4 Variation of thin wall thickness and molten channel width with laser power for the samples fabricated with laser scanning rate of 250 mm/s

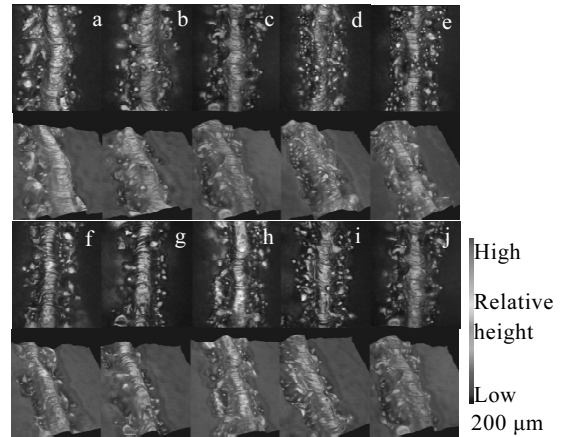


图 5 薄壁件表面 2D 和 3D 形貌

Fig.5 2D and 3D topographies of the thin walls: (a~e) $P=260$ W, $v=150, 200, 250, 300, 350$ mm/s; (f~j) $v=250$ mm/s, $P=180, 200, 220, 240, 260$ W

减小, 纯钨粉末熔化后形成的熔池温度逐渐降低, 此时熔池中的各部分之间的温度梯度逐渐降低, 温度梯度的降低也使得熔池各部分之间的表面张力差得到了减小, 由熔池表面张力差引起的 Marangoni 对流也较弱, 因此熔池中的波动较弱, 最终熔池凝固后形成的薄壁件具有较好的表面平整度和较平直的熔化道^[8,18]。当进一步增加激光扫描速率至 350 mm/s, 此时的激光能量密度也得到进一步减小。熔化道又出现了较为明显的高低起伏和略微的弯曲。这是因为较低的激光能量密度使得纯钨粉末熔化后形成的熔池温度较低。一方面, 熔池温度较低时, 具有较差的流动性、铺展性和润湿性, 同时具有较快的凝固速度, 激光与纯钨粉末相互作用产生的波动在熔池中难以完全被平息而导致凝固后的熔化道形貌出现高低起伏和弯曲; 另一方面, 较低的熔池温度使得熔池的表面张力较大, 具有自发凝固成球体的趋势, 在熔化道表面以及熔化道两侧均产生了明显的球化现象。此外, 在较高的激光扫描速率下, 熔化道在各个方向上会产生过度的体积收缩而产生球化现象^[19], 同时也会使熔体产生飞溅而凝固成球状掉落在 SLM 成型工件表面而产生球化现象^[20-23]。

图 5f~5j 所示为扫描速率 250 mm/s, 激光功率 180~260 W 参数下成型的薄壁件表面 2D 和 3D 形貌。当激光功率为 180 W 时, 所成型的薄壁件表面熔化道宽度较窄且表现出一定的扭曲, 高度方向上也存在较明显的高低起伏, 熔化道两侧的球化现象产生的球体直径较大。这是因为在较低的激光功率下, 激光能量

密度小, 纯钨粉末熔化后所形成的熔池温度低, 热量向熔化道两侧传导得少, 导致熔池向两侧扩张得少, 因此熔化道宽度窄。同时, 较低的熔池温度导致熔池凝固速度快, 激光与纯钨粉末相互作用时产生的波动没有足够的时间变得平稳, 导致熔化道的扭曲和高低起伏。而熔化道两侧因球化而产生的球体直径大是因为低温下熔体的铺展性和润湿性差, 粘度和表面张力大, 且凝固速度快, 导致熔体在下层已经凝固成型的表面的接触角大, 凝固后形成较大直径的球体^[24]。随着激光功率的增加, 激光能量密度也增加, 导致纯钨粉末熔化后形成的熔池温度增加。一方面, 更高的熔池温度使得激光光斑以外更多区域内的纯钨粉末被加热至其熔点温度以上而被熔化, 并经过流动和铺展过程与熔池连接在一起, 增大了熔池的面积, 从而使得熔化道变宽; 另一方面, 较高的熔池温度增强了熔体的铺展性和润湿性, 降低了熔体的粘度和表面张力, 且延长了熔池的凝固时间, 从而使得熔池中的波动能够有足够的时间变得平稳, 因此抑制了所成型的薄壁件表面熔化道的扭曲和高低起伏, 使熔化道变得更加平直和平坦。

2.3 薄壁件两侧粘粉现象的讨论

通过前文的研究发现, 激光单道扫描成型的纯钨薄壁件壁厚往往要大于激光光斑直径和熔化道宽度, 这是由于成型薄壁件两侧的粘粉现象造成的。SLM 过程中激光熔化纯钨粉末形成的熔池中的热量将传递到熔池周围的粉末中, 并且呈梯度分布, 距离熔池越远的地方, 温度越低。熔池周围的粉末由于受到的热量不足而熔化不充分或未被熔化, 从而粘附在熔化道周围, 产生粘粉现象^[17]。粘粉现象不仅导致薄壁件壁厚增加, 还会造成壁厚均匀性降低。

图 6 所示为纯钨薄壁件各部分组成示意图。其中 r_b 为激光光斑半径, r_m 为熔池宽度的一半, r 为成型的薄壁件厚度的一半。由于激光熔化纯钨粉末后形成的熔池中的热量向周围粉末扩散, 使得接近熔池部分的纯钨粉末熔化后经过铺展和流动与熔池融合在一起, 所以最终形成的熔池宽度要稍大于光斑直径。而由于粘粉现象, 熔池周围粉末粘附在熔池边缘, 使得薄壁的厚度大于熔池宽度。图 7 为对薄壁件各组成部分侧表面形貌取样示意图。如图所示, 将薄壁件侧面打磨至不同厚度, 再在光学显微镜下观察其侧面形貌。图 8 为薄壁件各组成部分的侧表面形貌图。图 7 中 1~4 各截面分别为图 8a~8d 各表面形貌取样位置。图 8a~8c 为经过打磨抛光的表面形貌, 8d 为成型薄壁件原始的侧表面形貌。

薄壁件组成的第 1 部分为 r_m 以内的区域, 为完全

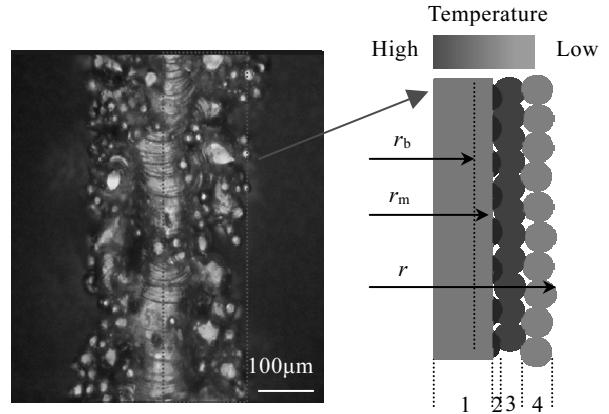


图 6 纯钨薄壁件各组成部分示意图

Fig.6 Diagram of the components of pure tungsten thin wall

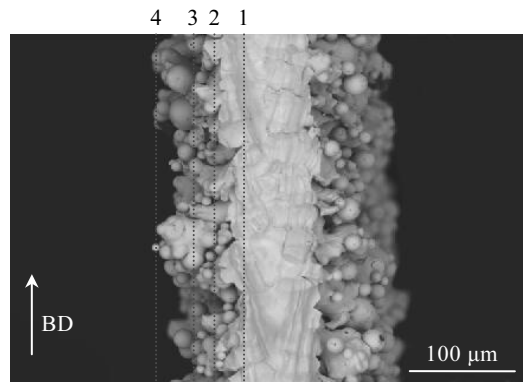


图 7 纯钨薄壁件各组成部分表面形貌取样示意图

Fig.7 Surface morphology sampling diagram of each component of pure tungsten thin wall

熔化区, 其侧表面形貌如图 8a 所示。由图可以看出, 第 1 部分的侧表面孔洞数量较少, 孔径较小, 具有较致密的凝固组织。这是因为这部分的纯钨粉末被激光直接照射或接近于光斑照射范围, 纯钨粉末被完全熔化且熔化后具有较高的温度, 较低的动力学粘度和表面张力, 从而具备良好的流动性、铺展性和润湿性。原本铺粉过程中球形纯钨粉末之间的空隙能够通过熔滴的铺展和流动而被较完全地填充, 形成连续的熔池。此外, 在完全熔化区内的凝固体中有明显的裂纹, 这是因为该区域内的纯钨粉末熔化后相互融合形成高致密度的熔池, 在熔池凝固的过程中由于激光热源的温度梯度以及熔池中热量的扩散导致熔池各处温度不同, 在熔池中产生温度梯度。熔池中的温度梯度引起了熔池在凝固过程中各个部分的凝固速度不一致, 因此各部分的收缩程度不同, 从而在凝固体中产生了较

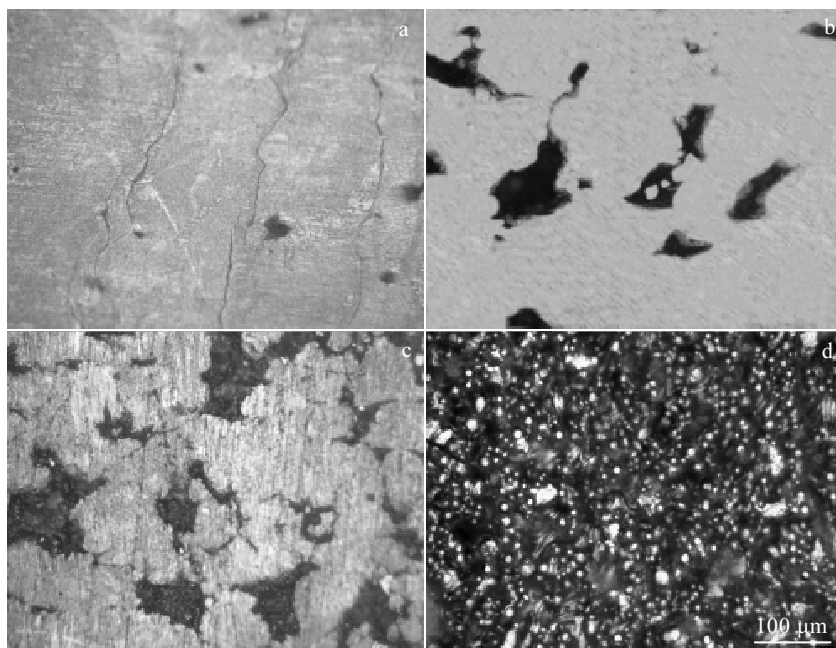


图 8 薄壁件各组成部分侧表面形貌

Fig.8 Side surface morphology of each component of tungsten thin wall: (a) complete melting zone, (b) balling zone, (c) semi-melting zone, and (d) unmelted zone

大的拉应力^[25]。再加上纯钨本身具有高脆性和低塑性的特点，导致凝固时产生的拉应力不能够完全地被释放，因此导致了熔池凝固后开裂的现象^[26-28]。

组成纯钨薄壁件的第 2 部分为 r_m 至 r 之间靠近凝固体的部分，为球化区。该部分未被激光直接照射，纯钨粉末吸收熔池中传递过来的热量而被熔化。因此纯钨粉末熔化后温度较低，润湿性差，表面张力大。熔滴凝固时间较铺展时间短，导致熔滴还未完全铺展就已经凝固，因此产生球化现象。其表面形貌如图 8b 所示，表面有较多且直径较大的孔洞。图 9 为纯钨薄壁件上表面的形貌图。其中编号为 1 的红色圈内为发生球化现象的钨熔滴，为不规则的类球形，同时由于球化是纯钨粉末熔化后凝固过程中形成的，在熔融状态下与熔池之间产生了相互融合，因此其与熔化道之间发生了冶金结合。

组成纯钨薄壁件的第 3 部分为纯钨粉末的半熔化区。该区域由于距离熔池较远，单个纯钨粉末中只有靠近熔池的这一部分才被熔化，而远离熔池的一侧未被熔化。其表面形貌如图 8c 所示。与第 2 部分一样，其表面存在较多且直径较大的孔洞。由于此区域内的纯钨粉末未被完全熔化，因此粉末之间的间隙无法被填充。图 9 中编号为 2 的红色圈内为发生半熔的纯钨粉末，其靠近熔池的一侧被熔化，熔化部分与熔池在

凝固过程中发生了冶金结合。同时由于激光与纯钨粉末之间强烈的相互作用，在熔池中产生的波动也被传递到半熔化的纯钨粉末中发生熔化的一侧，且熔化一侧的熔体温度低，流动性差，凝固时间短，因此熔体凝固后在其表面也还能观察到波纹的存在。而在纯钨粉末未熔化的一侧，还保持着原纯钨粉末的形貌。

组成纯钨薄壁件的第 4 部分为未熔化的纯钨粉末区域。该区域为成型的纯钨薄壁件的最外层，距离熔池最远，因此受到的热量最少。此区域内的纯钨粉末完全未被熔化，只是被加热到熔点以下的某一较高的温度。被加热的纯钨粉末由于具有较高的表面活性而粘附在成型的纯钨薄壁件侧表面上。如图 9 中编号为 3 的红色圈内的粉末为粘附在薄壁件周围的未熔化的纯钨粉末。一般情况下，未熔化的纯钨粉末位于薄壁的最外侧，且仍保持原材料的形貌和尺寸。

激光单道扫描成型的纯钨薄壁件的侧表面形貌如图 8d 所示。从图中可以看到，表面布满了尺寸不均匀的颗粒，这些颗粒可能是球化、半熔化或者是高温粘附在侧表面上的未熔纯钨粉末。同时在侧表面上也能观察到具有较大面积的熔体。为进一步研究成型的纯钨薄壁件侧表面形貌，在扫描电子显微镜 (SEM) 下观察了其形貌，如图 10 所示。从图中可以看出，侧表面上不仅有粘附的未熔化纯钨粉末，同时也有半熔化

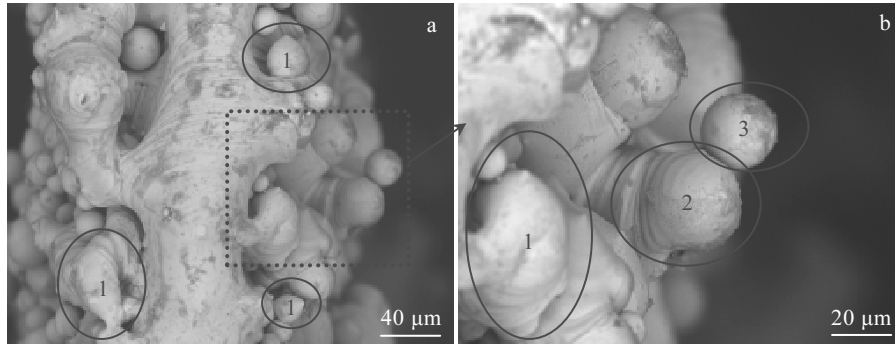


图 9 纯钨薄壁件上表面形貌
Fig.9 Top surface morphology of pure tungsten thin wall

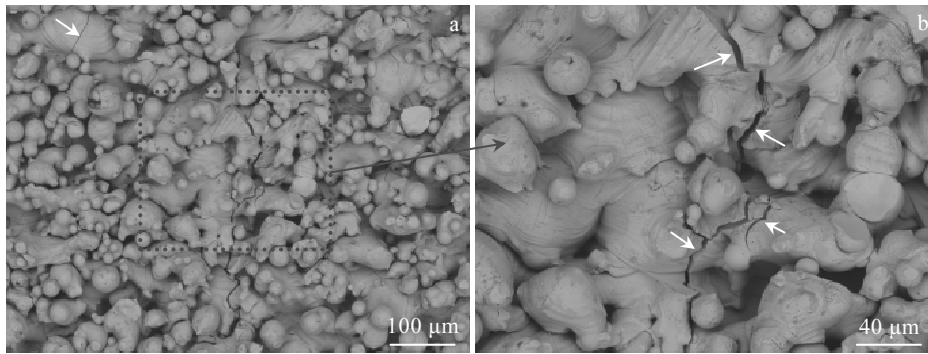


图 10 纯钨薄壁件侧表面形貌
Fig.10 Side surface morphology of pure tungsten thin wall

的纯钨粉末、凝固时发生了球化的熔体以及凝固了的连续的熔池。这是因为在激光与纯钨粉末相互作用时引起了熔池的强烈波动，这种强烈的波动不仅表现在熔池的高度方向上，同时也引起了熔池在薄壁件的宽度方向上的波动，从而导致了在成型薄壁件的最外侧的不同位置上温度的差异，因此同时在侧表面上产生了纯钨粉末的未熔、半熔、球化及连续的凝固体。此外，在图 10 中白色箭头指示的位置上产生了裂纹。这些裂纹一般产生于连续的凝固体中，而在球化、半熔和未熔的粉体中未发现。这与图 8 中薄壁件不同部位的侧表面形貌中产生裂纹的位置相似，即只有发生熔化且形成了较为致密的凝固体中较容易产生裂纹。

从以上的研究中可以发现，SLM 成型的纯钨薄壁件两侧粘粉现象产生的原因在于，SLM 成型是先铺粉，再用激光扫描熔化纯钨粉末的工艺，因此纯钨粉末熔化后形成的熔池中的热量会被传递到周围的纯钨粉末中，在熔池周围产生温度梯度。熔池周围的温度

梯度又将引起单道扫描成型的纯钨薄壁件由熔池中心向两侧依次产生了致密区、球化区、半熔区以及未熔区。从而使得成型的纯钨薄壁件壁厚大于激光光斑直径。而实际上由于激光与纯钨粉末相互作用而引起的熔池波动造成了这 4 个区域之间无清晰的界限，在侧表面均能观察到以上 4 个区域。

通过对 SLM 成型纯钨薄壁件两侧粘粉现象的研究和讨论，在后续成型纯钨薄壁件时应从以下几个方面改善成型工艺，以提高成型薄壁件的尺寸精度：(1) 采用按需铺粉或者同轴送粉的方式取代现有的大面积预铺粉的方式，以防止熔池以外区域的粉末被加热而粘附在薄壁两侧；(2) 采用喷砂、打磨等后处理方式来去除成型纯钨薄壁件两侧粘结的粉末；(3) 通过图 3 和图 4 可知，激光功率为 260 W 时，扫描速率从 150 mm/s 增加至 350 mm/s，壁厚减小量较熔化道宽度减小量少，即粘粉量增加。扫描速率为 250 mm/s 时，激光功率从 180 W 增加至 260 W，壁厚增加量较熔化道

宽度增加量大,即粘粉量增加。因此在 SLM 成型纯钨薄壁件时,适当减小扫描速率和激光功率能够在一定程度上抑制粘粉现象。

3 结 论

1) 随着扫描速率的增大,成型的纯钨薄壁件壁厚和熔化道宽度逐渐减小;随着激光功率的增大,成型薄壁件壁厚和熔化道宽度逐渐增大;由于粘粉现象,成型薄壁件壁厚要大于熔化道宽度。

2) 当激光功率为 260 W 时,随着激光扫描速率的增大,成型薄壁件表面熔化道由扭曲变得平直再变得扭曲,熔化道高度方向上的高度差先减小后增大;当激光扫描速率为 250 mm/s 时,随着激光功率的增大,成型薄壁件表面熔化道逐渐变得平直和平坦。

3) 由于 SLM 成型的纯钨薄壁件两侧存在粘粉现象,因此成型薄壁件的壁厚大于激光熔化道宽度。粘粉现象是由于熔池的温度梯度而形成的。从激光光斑中心向薄壁件两侧随着温度的降低依次为完全熔化区、球化区、半熔化区以及未熔化区。

参考文献 References

- [1] Zi Xuhui, Chen Chao, Wang Xiaojun *et al.* *Materials Science and Technology*[J], 2018, 34(6): 735
- [2] Fang Z Zak, Wang Xu, Ryu Taegong *et al.* *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*[J], 2009, 27(2): 288
- [3] Wang Congcong, Jia Chengchang, Gao Peng *et al.* *Rare Metals* [J], 2015(3): 1
- [4] Deprez Karel, Vandenberghe Stefaan, Van Audenhaege Karen *et al.* *Medical Physics*[J], 2013, 40(1): 12 501
- [5] Van Audenhaege Karen, Van Holen Roel, Vanhove Christian *et al.* *Medical Physics*[J], 2015, 42(11): 6679
- [6] Gear Jonathan I, Taprogge Jan, White Owen *et al.* *EJNMMI Physics*[J], 2019, 6: 1
- [7] Osakada Kozo, Shiomi Masanori. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*[J], 2006, 46(11): 1188
- [8] Mumtaz Kamran Aamir, Erasenthiran Poonjolai, Hopkinson Neil. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2008, 195(1-3): 77
- [9] Wu Weihui, Yang Yongqiang, Huang Yanlu. *Chinese Optics Letters*[J], 2007, 5(1): 37
- [10] Abe F, Osakada K, Shiomi M *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2001, 111(1-3): 210
- [11] Zhou Xin, Liu Xihe, Zhang Dandan *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2015, 222: 33
- [12] Tan Chaolin, Zhou Kesong, Ma Wenyou *et al.* *Science and Technology Advanced Materials*[J], 2019, 19(1): 370
- [13] Zhang Danqing, Cai Qizhou, Liu Jinhui. *Materials and Manufacturing Processes*[J], 2012, 27(12): 1267
- [14] Wang Dianzheng, Li Kailun, Yu Chenfan *et al.* *Acta Metallurgica Sinica-English Letters*[J], 2019, 32(1): 127
- [15] Wang Dianzheng, Yu Chenfan, Zhou Xin *et al.* *Applied Sciences-Basel*[J], 2017, 7(4): 430
- [16] Xie Yanjun, Yang Huaichao, Wang Xuebing *et al.* *Journal of Iron and Steel Research International*[J], 2019, 26(2): 182
- [17] Su Xubin, Yang Yongqiang, Xiao Dongming *et al.* *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2013, 64(9-12): 1231
- [18] Khairallah Saad A, Anderson Andrew T, Rubenchik Alexander *et al.* *Acta Materialia*[J], 2016, 108: 36
- [19] Gu Dongdong, Shen Yifu. *Materials & Design*[J], 2009, 30(8): 2903
- [20] Gu Dongdong, Shen Yifu, Yang Jialin *et al.* *Materials Science and Technology*[J], 2006, 22(12): 1449
- [21] Mirkoohi Elham, Seivers Daniel E, Garmestani Hamid *et al.* *Materials*[J], 2019, 12(13): 2052
- [22] Gusarov A V, Smurov I. *Applied Surface Science*[J], 2009, 255(10): 5595
- [23] Simchi A, Asgharzadeh H. *Materials Science and Technology* [J], 2004, 20(11): 1462
- [24] Wu Weihui(吴伟辉), Yang Yongqiang(杨永强), Lai Kexian(来克娴). *Journal of South China University of Technology, Natural Science Edition*(华南理工大学学报, 自然科学版)[J], 2007, 35(3): 22
- [25] Mercelis Peter, Kruth Jean-Pierre. *Rapid Prototyping Journal* [J], 2006, 12(5): 254
- [26] Sidambe A T, Tian Y, Prangnell P B *et al.* *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*[J], 2019, 78: 254
- [27] Ren Chai, Fang Z Zak, Koopman Mark *et al.* *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*[J], 2018, 75: 170
- [28] Butler Brady G, Paramore James D, Ligda Jonathan P *et al.* *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*[J], 2018, 75: 248

Research on Pure Tungsten Thin Wall Part Fabricated by Laser Single Track Scanning via SLM

Wu Fang¹, Sun Zhonggang², Li Bangyi¹, Chen Hao³, Guo Shengda³, Zhu Yubin¹

(1. Shanghai University, Shanghai 200444, China)

(2. Nanjing Technology University, Nanjing 210009, China)

(3. Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: The pure tungsten thin wall parts were fabricated by laser single track scanning via SLM. The wall thickness and molten trace width of the parts were measured by two-dimensional imager and optical microscope, respectively, and the influence of laser power and scanning rate on the wall thickness and molten trace width were investigated. The surface 2D and 3D morphology of thin wall parts were detected by optical microscope. The powder adhesion on the side surface of the thin wall parts was detected by scanning electron microscope and the reason for powder adhesion was analyzed. The results indicate that the wall thickness of parts is greater than molten trace width. With the increase of laser power, the wall thickness and molten trace width increase, the surface of thin wall parts becomes smooth. With the increase of scanning rate, the wall thickness and molten trace width decrease, the molten trace becomes twisted first and then straight, and twisted again, while the height difference of the molten trace decreases first and then increases. The thin wall parts consist of complete melting zone, balling zone, semi-melting zone and unmelted zone.

Key words: selective laser melting; pure tungsten thin wall part; thin wall part thickness; molten trace width; powder adhesion

Corresponding author: Zhu Yubin, Ph. D., Professor, College of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, P. R. China, Tel: 0086-21-56339290, E-mail: ybzhu@staff.shu.edu.cn