

激光选区熔化成形低角度无支撑结构的方法与工艺研究(特邀)

胡伟南^{1,3}, 冯颖^{3,4}, 王迪^{1*}, 闫星辰², 蒋梦龙¹, 晋刚¹, 杨超¹, 杨永强¹, 吴杰华⁵, 陈思敏⁵¹华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641;²广东省科学院新材料研究所, 广东 广州 510075;³广州城市理工学院机械工程学院, 广东 广州 510800;⁴澳门城市大学创新设计学院, 澳门 999078;⁵深圳市金石三维打印科技有限公司, 广东 深圳 518107

摘要 为了实现激光选区熔化(SLM)无支撑低角度成形,进而提高样件的成形效率和降低打印成本,笔者提出了一种基于加工层角度自适应下表面工艺区域的划分方法,并对该方法成形的样件的表面质量以及该方法的适用性进行了探究。结果表明:过高或者过低的能量密度都会对悬垂区域的多层成形产生负面影响,采用适熔工艺成形悬垂结构能在保证低孔隙率的同时实现多层打印。将悬垂结构进行上、下、内表面区域划分,基于向下比较层数 T 进行区域面积调控能够显著影响悬垂样件的可制造性和结构完整性,应用下表面工艺区域的面积越大,悬垂样件的成形性越好。对上下表面的成形机理进行了深入分析,结果显示,下表面的成形质量主要受粘粉以及熔池下陷引起的凸起的影响,而上表面除了受粘粉影响外,还主要受阶梯效应和轮廓边界熔道间隙的影响。最终,成形了不同尺寸的测试样件以及最低角度为 15° 的叶轮零件,证明了所提低角度成形方法的可行性。

关键词 激光技术; 激光选区熔化; 无支撑打印; 低角度; 成形机理; 表面质量

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231286

1 引言

激光选区熔化(SLM)是一种先进的增材制造(AM)技术,该技术凭借成形精度高、成形件致密性好和力学性能优异以及可成形复杂零件的特点,被广泛应用于航天航空领域轻质化零件^[1-2]、模具领域复杂构件的制造。SLM成形的原理是:将设计好的三维模型切割成一定厚度的薄片,然后利用激光束的能量将粉末熔化成薄片形状,成形薄片进行层层堆叠形成3D金属部件^[3]。理论上讲,SLM技术可以成形任意复杂的零件。但是在实际打印过程中,由于SLM的热成形特性,往往需要添加支撑结构来辅助散热以及防止热应力导致的成形件翘曲^[4-6],特别是在低角度样件的成形中。目前公认的SLM最佳成形角度为 45° ,当样件成形角度小于 45° 时,便需要添加支撑结构辅助成形。添加支撑结构虽然能够有效辅助零件成形,但往往伴随着打印时间和耗材的增加、后处理难度增大以及支撑面粗糙度增大等不足,而且对于一些内部镂空或者具有复杂流道的零件来说,由于其内部支撑无法去除,因而无法使用SLM技术成形。因此,开发出一种

SLM成形低角度样件的成形工艺及方法对于打印成本的降低以及SLM适用范围的增加具有重要意义。

目前,SLM成形的低角度悬垂结构主要存在两种缺陷,分别是悬垂表面粘粉挂渣和悬垂区域翘曲变形^[7]。激光能量密度对悬垂样件的成形具有较为关键的作用,过高的能量密度输入会使悬垂表面质量下降,同时会增加翘曲变形的风险,减少悬垂区域能量密度输入能有效提高成形质量。杨永强等^[8]研究了激光能量密度对悬垂结构成形质量的影响,结果显示,通过增加扫描速度从而降低激光能量输入可以有效提高悬垂面的成形质量。Feng等^[9]通过研究证明了高能量密度对悬垂面表面质量具有恶化作用。Le等^[10]发现高激光功率可以有效缓解悬垂区域的熔道不连续现象,但是高激光功率带来的高能量密度却导致了高的熔池深度,从而导致悬垂件翘曲。在保持低能量密度的情况下使用高激光功率可以消除不规则孔隙、部分未熔化粉末、深熔池形成和几何不精确等现象。Babu等^[11]采用全因子实验设计方法研究了激光功率、扫描速度、层参考等工艺参数对不锈钢表面

收稿日期: 2023-10-16; 修回日期: 2023-12-28; 录用日期: 2024-01-10; 网络首发日期: 2024-01-25

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB4600303)、广东省基础与应用基础研究基金项目(2022B1515120025)

通信作者: *mewdlaser@scut.edu.cn

粗糙度和成形尺寸的影响,结果表明:这些工艺参数对悬垂构件下表面质量有显著影响,合理组合各工艺参数有助于提高表面性能。Han 等^[12]研究了激光功率和扫描速度对样件悬垂表面质量的影响,结果显示:在相同的能量密度下,随着激光功率增加,悬垂面的表面质量呈下降趋势。Yang 等^[13]探究了激光扫描路径对悬垂面成形质量的影响,结果显示,当悬垂角度为 30°时,扫描角度对悬垂面的质量有显著影响:随着扫描角度增大,附着在悬垂面上的粉末球化现象减少,粗糙度明显改善。此外,通过调控悬垂样件的成形扫描策略能够有效减小成形过程中的温度梯度,降低成形应力,提高悬垂样件的成形稳定性。边培莹等^[14]通过研究发现,当激光扫描轨迹较长时,传热时间增加,熔池体积增大,从而导致了更大的温度梯度和热应力。刘婷婷等^[15]研究了“Z”字形和岛式两种扫描策略下熔池行为与悬垂角度、成形质量之间的关系,结果发现:与“Z”字形扫描策略相比,岛式扫描策略下的熔池面积较小,熔池更为不稳定,悬垂面的粗糙度更高。Su 等^[16]使用垂直分块填充和轮廓重熔复合扫描策略进行了 SLM 成形实验,结果发现:与传统的整体交替扫描策略相比,复合扫描策略有效改善了成形过程中的大温度梯度现象,样件中的应力明显降低,同时悬垂表面的挂渣现象明显减少。Vasileska 等^[17]提出了一种逐层控制策略,同时利用同轴熔池监测系统来提高悬垂区域的几何精度。他们将每一层采集的熔池图像用于控制回路,以便在下一层局部调整工艺参数,最大限度地减少表面缺陷。最终,他们显著提高了 5 mm 长桥梁的几何精度。Yuan 等^[18]使用散焦激光,将新的结构层直接成功打印在粉末床上。该结构层被作为水平悬垂结构的初始层,用于取代传统的支撑。最终,他们成功打印了一个带有大水平顶部的封闭盒子。

国内外许多 3D 打印公司对无支撑打印也进行了深入研究并取得了一定成果,例如:EOS 公司提出了一种高能下表面曝光法,该方法可以在不使用支撑的情况下制造 10°~15°的悬垂结构。EOS 公司利用该方法成功成形了最低角度为 10°的封闭叶轮,但叶轮的下表面质量较差,粗糙度值为 25~46 μm。国内的西安铂力特增材技术股份有限公司在设备、粉末、打印路径规划以及工艺参数调试等方面进行探索创新,成形了 15°的悬垂结构,并且成功打印出低角度叶轮盘。湖南华曙高科技股份有限公司采用自主研发的 SLM 少支撑技术打印了闭式叶轮,其支撑量相比传统 SLM 成形叶轮减少了 99.8%,而且其内外部各 25°斜面结构均在无支撑情况下顺利成形。

目前,不少研究人员对悬垂面的成形质量进行了工艺及策略上的探究和优化,但缺少实际工业零件的打印验证^[16,19],而使用悬垂工艺进行工业应用的研究

却主要集中在流体管道等具有较小悬伸长度的零部件上^[20-23]。国内外的部分厂家虽然实现了超低角度的工业零件成形,但其核心工艺都严格保密。因此,开发一种具有普遍适用性的无支撑低角度成形方法,实现大悬垂区域工业零件的有效成形,对于无支撑打印的发展及进一步突破具有重要意义。笔者在对悬垂工艺进行探究的基础上提出了一种基于下表面划分准则成形低角度悬垂样件的方法,然后对样件的表面质量以及所提成形方法的适用性进行了探讨,最后采用该方法成形了最低角度为 15°的无支撑叶轮样件,验证了所提方法的有效性。

2 实验方法

2.1 材料及设备

本次实验使用的设备为 DiMetal-100H,其技术参数如表 1 所示。实验使用的粉末是长沙骅骝冶金粉末有限公司生产的气雾化球形 316L 粉末,其化学成分如表 2 所示,粉末粒径为 15~53 μm。

表 1 DiMetal-100H 的技术参数
Table 1 Technical parameters of DiMetal-100H

Parameter	Content
Spot diameter / μm	60-80
Laser wavelength / nm	1075
Oxygen volume fraction / %	<0.03
Beam quality M^2	≤1.1
Protective gas	Argon
Maximum molding size / mm	100×100×120
Maximum laser power / W	500

表 2 316L 粉末的化学成分
Table 2 Chemical composition of 316L powder

Element	Mass fraction / %
C	≤0.03
Si	≤1.0
Cr	16-18
Ni	10-14
Mn	≤2.0
Mo	2.0-3.0
Cu	0.15-0.25
S	≤0.03
P	≤0.045
O	≤0.08
Fe	Bal.

2.2 实验设计

2.2.1 悬垂结构工艺探究

悬垂结构的切片示意图如图 1 所示。对于角度低于 90° 的样件,其每层都由实体支撑区域和水平悬垂区域组成,当切片厚度一样时,样件的水平悬伸长度 l 可由式(1)计算得到。

$$l = h \times \cot(a), \quad (1)$$

式中: h 为切片厚度; a 为倾斜角度。悬垂样件的角度越低,其悬垂长度 l 就越大,成形条件就越苛刻。因此,笔者首先对水平悬垂样件进行了工艺探究。水平悬垂样件的模型及扫描策略如图 2 所示。水平悬垂样件的水平悬垂跨度为 10 mm,扫描间距为 0.02 mm,扫描角度为 45° 和 135° 。工艺参数见表 3。同时进行叠层打印,观察不同工艺下水平悬垂样件叠层打印的稳定

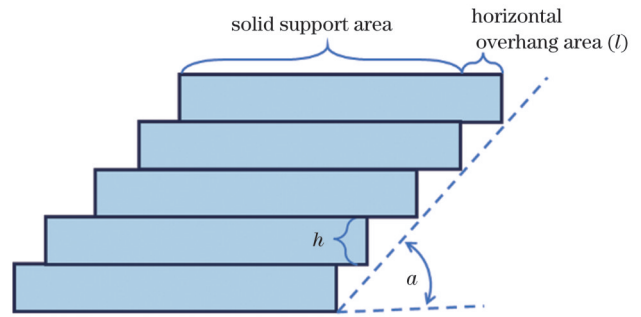


图 1 悬垂结构的切片示意图

Fig. 1 Schematic diagram of slicing of the overhanging structure

性。使用基恩士公司的 VHX-5000 型超景深三维显微镜拍摄不同工艺下成形悬垂样件的表面形貌。

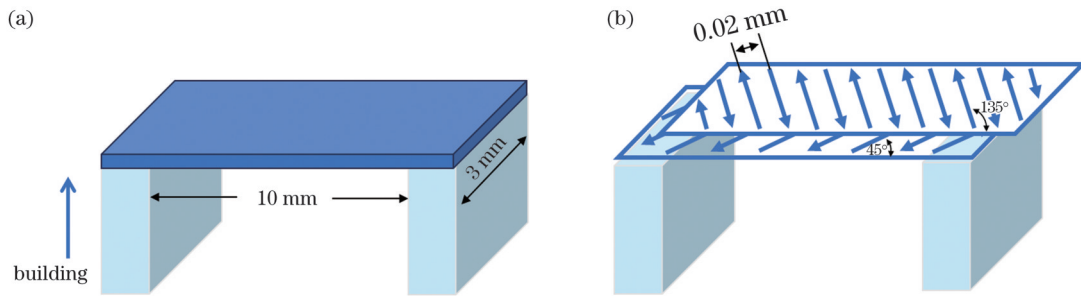


图 2 水平悬垂样件的模型及扫描策略。(a)模型;(b)扫描策略

Fig. 2 Model and scanning strategy of the overhanging sample. (a) Model; (b) scanning strategy

表 3 悬垂样件的成形工艺

Table 3 Molding process of the overhanging samples

No.	Laser power /W	Scanning speed / (mm·s ⁻¹)	No.	Laser power /W	Scanning speed / (mm·s ⁻¹)
1	80	2000	9	140	2000
2	80	2600	10	140	2600
3	80	3200	11	140	3200
4	80	3800	12	140	3800
5	110	2000	13	170	2000
6	110	2600	14	170	2600
7	110	3200	15	170	3200
8	110	3800	16	170	3800

2.2.2 低角度样件成形

基于 45° 成形理念,笔者将悬垂角度低于 45° 且不需要支撑辅助的样件成形定义为低角度样件成形。针对图 1 所示倾角样件的单层打印,笔者提出了一种基于加工层角度自适应下表面工艺区域的划分方法。该方法的基本原理如图 3(a)所示:将第 N 层与该层向下 T 层(即第 $N-T$ 层)进行比较,将第 N 层相对于第 $N-T$ 层在成形方向上的悬空区域定义为“应用下表面工艺区域”,简称“下表面工艺区”。基于这种划分方法,样件的下表面工艺区不仅只局限于实际的水平悬垂区

域,还可以向内表面拓展,从而实现下表面工艺区大小的调控。图 3(b)展示了在固定倾斜角度下不同向下比较层数 T 对下表面工艺区的调控。当向下比较层数 $T=1$ 时,即第 N 层与第 $N-1$ 层比较时,第 N 层的实际悬垂区域长度为下表面工艺区长度 l ;当向下比较层数 T 增大为 3 时,第 N 层与第 $N-3$ 层比较,第 N 层相对于第 $N-3$ 层的悬空区域长度为 $3 \times l$,故其下表面工艺区长度增大为 $3 \times l$ 。结合式(1),可以获得不同向下比较层数 T 对下表面工艺区长度 l_d 的调控公式,即

$$l_d = hT \times \cot(a). \quad (2)$$

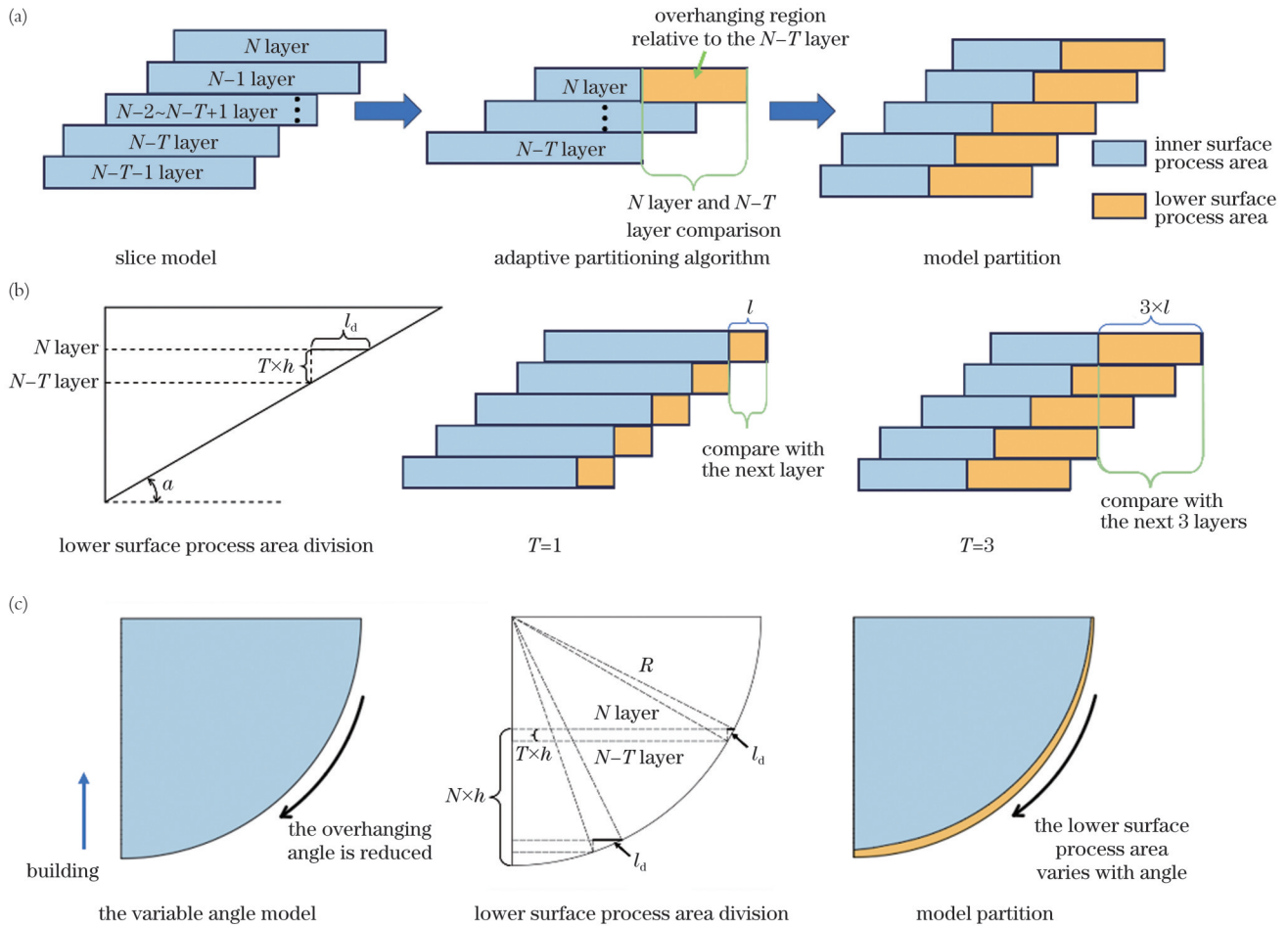


图3 下表面工艺区划分原理及不同模型下表面工艺划分结果。(a)下表面工艺区划分原理;(b)对于固定倾角样件,不同向下比较层数 T 对下表面工艺区的影响;(c)变倾斜角度样件下表面工艺区的自适应调控

Fig. 3 Principle of lower surface process area division and the division results of different models. (a) Principle of lower surface process area division; (b) influence of different downward comparison layer numbers T on the lower surface process area of the sample with the same inclination angle; (c) adaptive control of the lower surface process area for the variable angle samples

由式(2)可知,对于固定倾角样件,随着向下比较层数 T 增大,下表面工艺区长度线性增大。

接下来对该方法基于加工层角度的自适应性进行解释。该划分方法可以根据成形样件加工层倾斜角度的变化自适应地调控该层下表面工艺区的长度。以 $1/4$ 圆形样件为例,图 3(c) 中标记了不同倾斜角度区域下表面工艺区的长度 l_d 。低倾斜角度区域的下表面工艺区长度明显大于高角度区域。从区域划分结果来看,下表面工艺区随着样件倾斜角度的减小而逐渐增大,这使得低倾斜角度区域具有较大的下表面工艺区,保证了低角度区域的成形稳定性。对于 $1/4$ 圆这种规则图形,其第 N 层下表面工艺区长度 l_d 可以根据式(3)计算得到。

$$l_d = \sqrt{R^2 - (R - Nh)^2} - \sqrt{R^2 - (R - Nh + Th)^2}, \quad (3)$$

式中: h 为切片厚度; R 为圆半径; T 为向下比较层数。

基于 2.2.1 节探究的悬垂工艺以及下表面工艺区划分方法,使用确定的内表面 ($P=170 \text{ W}, V=1000 \text{ mm/s}$) 及下表面 ($P=140 \text{ W}, V=2600 \text{ mm/s}$) 工艺,重点探究

向下比较层数 T 对低角度成形的影响。成形样件模型如图 4(a) 所示,打印模型参数如表 4 所示,样件 1~7 分别采用不同的向下比较层数,图 4(c) 给出了不同向下比较层数样件内表面工艺区和下表面工艺区的划分结果。由式(2)可知,在固定角度下,样件下表面工艺区长度随着向下比较层数的增加而线性增大。应当注意,当 $T=0$ 时,第 N 层与自身进行比较,整个样件只有应用内表面工艺区域,仅用内表面工艺成形。样件 8~13 是采用相同工艺成形的宽度、厚度不同的样件,用于验证成形方法的适用性

2.2.3 测试分析方法

为了直观地展示悬垂样件的变形程度,使用游标卡尺测量成形样件的成形高度以及 3 个成形高度点处的样件厚度,测试点如图 4(b) 所示。使用德国蔡司 Merlin 型电子显微镜观察样件的上下表面形貌;使用 VHX-5000 型超景深显微镜拍摄样件上下表面轮廓数据,计算轮廓的粗糙度 R_a 。

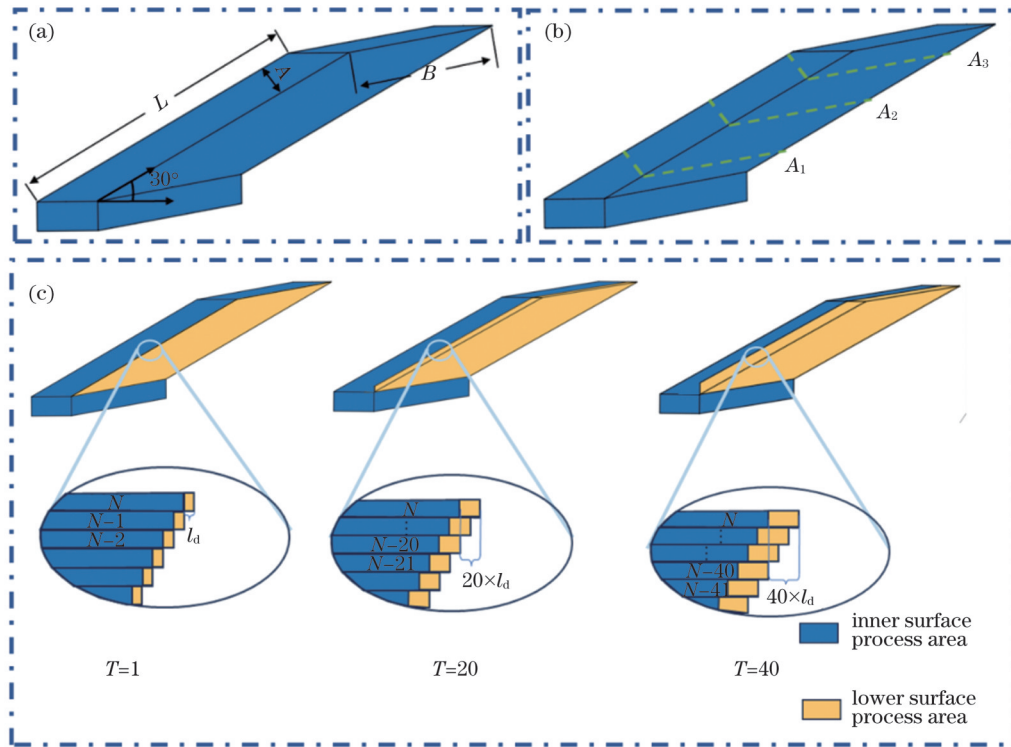


图 4 低角度成形样件模型、厚度测试点以及下表面工艺区分区。(a)成形模型；(b)厚度测试点；(c)不同向下比较层数 T 下样件的内表面工艺区和下表面工艺区

Fig. 4 Low angle molding sample model, thickness test points and lower surface process differentiation area. (a) Forming model; (b) thickness test points; (c) inner and lower surface process area of the sample under different downward comparison layer numbers T

表 4 打印模型参数及尺寸
Table 4 Print model parameters and dimensions

Serial number	T	Forming thickness /mm	Forming width /mm	Overhanging length (L) /mm
1	0	2	10	20
2	1	2	10	20
3	10	2	10	20
4	20	2	10	20
5	30	2	10	20
6	40	2	10	20
7	80	2	10	20
8	40	3	10	20
9	40	4	10	20
10	40	5	10	20
11	40	6	10	20
12	40	2	15	20
13	40	2	20	20

3 实验结果与讨论

3.1 悬垂结构的工艺探究

基于不同工艺成形的水平单层悬垂样件如图 5(a) 所示。根据悬垂样件的熔融状态,可以将成形样件划分为欠熔样件、适熔样件以及过熔样件。观察欠熔悬垂样件可以发现:在激光功率 $P=80\text{ W}$ 、扫描速度 $V=$

3800 mm/s 条件下成形的样件的强度非常低,在取件过程中便发生了破坏;其余欠熔样件虽然能够保证成形的完整性,但熔道间的搭接严重不足,存在许多大的孔洞,如图 5(d) 所示。对于过熔样件,熔道之间的搭接率非常好,几乎没有任何孔隙,但其表面出现了较为明显的过烧现象,同时存在较大的飞溅颗粒沉积。适熔样件表面没有明显的过烧现象,存在少许微孔。

由图 5(a) 可以看出,欠熔样件都是在较高的扫描速度下成形的。这是因为:一方面,扫描速度较高,激光能量密度就会较低,粉末熔融不充分;另一方面,在高速扫描条件下,熔池的冷却速率较快,熔池的湿润性差,凝固时倾向于形成球化颗粒,导致样件熔道不连续^[24],在成形单层时单熔道的不连续性会直观地以孔洞的形式表现。对于过熔样件,由于激光能量相对较高,熔池更宽,熔道连续且熔道之间的搭接率较高,因而单层成形样件的致密化程度较高;但由于粉末的导热性能较差,仅为实体的 1%^[25],在高能量输入条件下热量累积,导致单层扫描末端出现过烧现象。同时,过高的能量输入使得熔池内部的 Marangoni 效应^[26] 增强,产生飞溅的概率增大,飞溅冷却后落在样件表面,从而出现颗粒沉积,如图 6(a) 所示。

在欠熔、适熔、过熔工艺内分别选取一组工艺进行双层打印,以探究不同工艺下悬垂样件的层间结合性能。成形样件如图 7 所示。可以发现:在过熔工艺下,

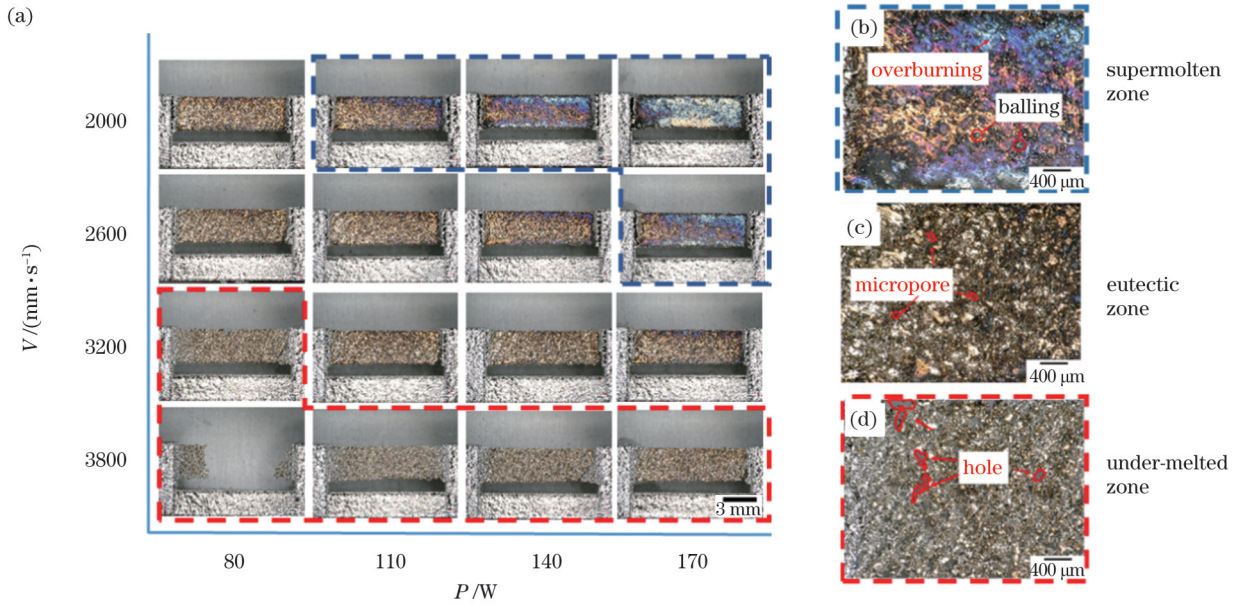


图 5 不同工艺下成形悬垂样件的形貌及分区。(a)不同工艺下成形的悬垂样件的形貌;(b)过熔样件的典型形貌;(c)适熔区样件的典型形貌;(d)欠熔样件的典型形貌

Fig. 5 Morphology and grouping of overhanging samples formed by different processes. (a) Morphology of overhanging samples formed under different processes; (b) typical morphology of over-melted samples; (c) typical morphology of melting-suitable samples; (d) typical morphology of under-melted samples

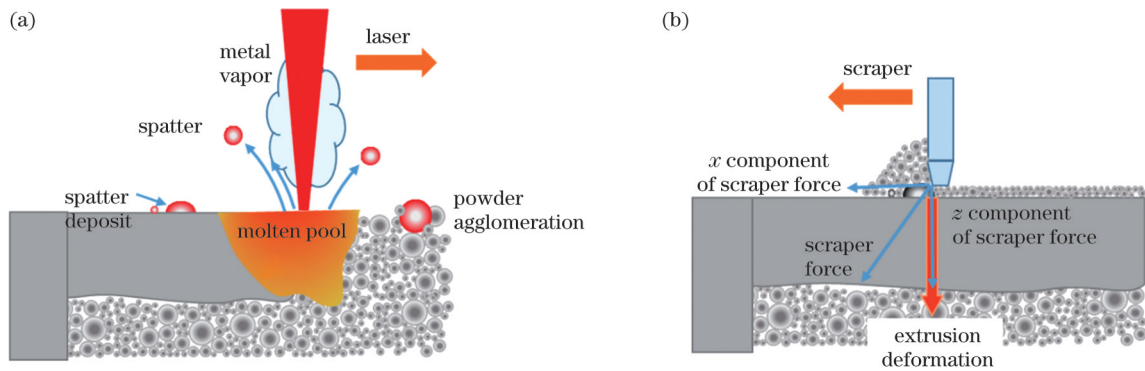


图 6 悬垂单层打印飞溅示意图及刮刀对悬垂结构的影响。(a)悬垂单层打印飞溅示意图;(b)刮刀对悬垂结构的作用

Fig. 6 Overhanging single layer printing splash diagram and the influence of scraper on overhanging structures. (a) Overhanging single-layer print splash diagram; (b) diagram of the action of scrapers on overhanging structures

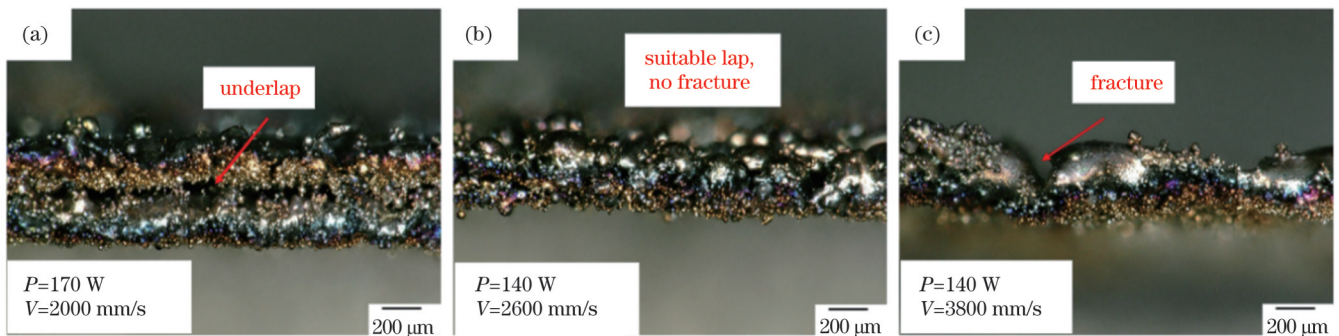


图 7 不同工艺成形悬垂样件的层间搭接。(a)过熔工艺;(b)适熔工艺;(c)欠熔工艺

Fig. 7 Interlayer lap joints of overhanging samples formed by different processes. (a) Over-melting process; (b) suitable melting process; (c) under-melting process

层间结合严重不足,出现了明显的裂痕,熔道出现了明显的断裂;适熔工艺保证了双层的成形并且样件

无明显缺陷。打印过程中采用的是硬质刮刀,在打印悬垂样件时刮刀的作用力是不可忽略的影响因素^[27]。

过熔样品表面存在较大的飞溅颗粒沉积,当刮刀铺粉时,刮条作用在凸起的飞溅颗粒上,第一悬垂层样品在较大的向下作用力下产生变形,使得铺粉厚度远大于设计值(0.03 mm)。刮刀作用示意图如图 6(b)所示。当进行第二层激光熔融时,激光能量不足以穿透粉末层,导致两层之间出现明显的结合不足。欠熔工艺在第一层成形时便表现出明显的粉末熔融不足,在成形第二层时,第一悬垂层不能对第二层提供有效的支撑,两层成形的孔隙缺陷累积,最终表现为明显的搭接断裂。适熔工艺虽然不能实现单层高致密度成形,但在多层成形时能够保证层间的有效结合,并且单层搭接没有出现明显的断裂,因此适合作为低角度悬垂探究的下表面工艺。

3.2 向下比较层数对悬垂样品成形性的影响

基于不同向下比较层数 T 成形的 30° 倾角样品的有效悬伸长度 L 如图 8 所示。向下比较 40 层和向下比较 80 层工艺完成了目标悬伸长度(20 mm)的打印成形,而其他工艺均出现了不同程度的凸起,导致打印中断。当 $T=1, 10, 20$ 时,样品在 6 mm 悬伸长度时便被中断打印,而 $T=0$ 时,样品无下表面工艺区,样品能够成形到 10 mm 的悬伸长度;当进一步增大向下比较层数 T 到 30 时,样品的有效悬伸长度达到了 12 mm;最终在 T 大于 40 时,实现了设计高度的样品成形。这表明,下表面工艺区的出现并不会一直对低角度成形起着积极作用。对于 30° 倾角样品,当 $T < 20$ 时,低角度成形会变得更加困难;只有当 $T \geq 30$ 时,开启下表面才能促进低角度成形。

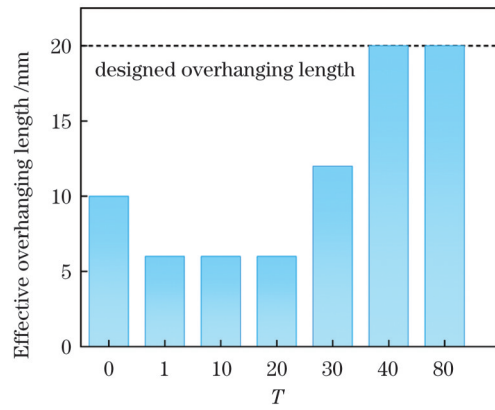


图 8 不同向下比较层数 (T) 下成形样品的有效悬伸长度
Fig. 8 Effective overhanging length of formed sample under the different downward comparison layer numbers (T)

凸起样品的侧面如图 9(a)所示。所有样品打印中断都是由悬垂区域翘曲引起的,同时,随着打印高度增加,样品尺寸特征丢失逐渐加剧。在 SLM 成形样品过程中,激光能量输入调控不仅仅会熔化单层粉末,还会重熔部分已成形的实体,从而保证层间的有效结合^[28]。对于低角度样品,当激光在支撑区域与悬垂区域交界处扫描时,高激光能量输入会熔化部分悬垂结构,同时伴随着较大的热应力^[29]。设计厚度为 0.03 mm 的悬垂区域所具有的强度并不能抵抗热应力带来的变形,导致单层发生翘曲,如图 9(b)所示。单层发生翘曲后,后续层的实际悬垂区域增大,激光扫描导致翘曲的幅度也会增大,从而陷入一种恶性循环,最终导致样

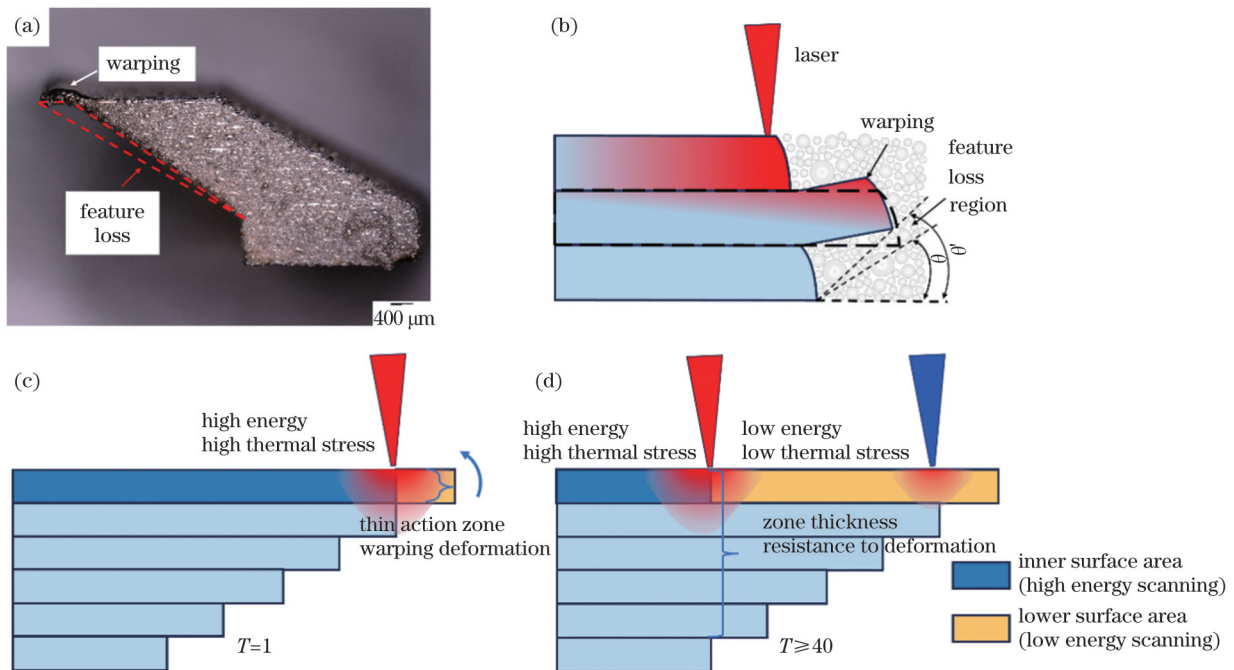


图 9 样品翘曲机理及向下比较层数的影响机理。(a)翘曲样品;(b)翘曲机理;(c) $T=0$ 时的激光作用机理;(d) $T \geq 40$ 时的激光作用机理

Fig. 9 Warping mechanism of the sample and the influence mechanism of the different downward comparison layer numbers.
(a) Warped sample; (b) warping mechanism; (c) laser action mechanism when $T=0$; (d) laser action mechanism when $T \geq 40$

件打印中断。

图 9(c)、(d) 是不同向下比较层数下激光的扫描示意图, 当开启下表面区域划分时, 内表面的高能激光扫描区域会随着 T 的增大而逐渐向内偏移, 当 T 较小时, 高能激光扫描的边界处的实体厚度较小, 难以抵抗热应力带来的变形而发生翘曲。这也是 T 小于 40 时样件发生翘曲的主要原因。当 $T \geq 40$ 时, 高能激光扫描区域的最小厚度增加, 样件足够抵抗热应力带来的变形, 因而可以实现设计高度的打印。

3.3 成形表面质量探究及优化

对于悬垂样件的成形, 其表面成形质量一直是研究人员的重点关注对象之一。笔者对成形的低角度样件的上下表面进行了粗糙度测量, 上下表面的粗糙度 R_a 分别为 $15.6 \mu\text{m}$ 和 $8.7 \mu\text{m}$ 。图 10(a)、(b) 展示了悬垂样件上下表面形貌的 SEM 照片, 可以看出, 上表面粘粉相对较少, 影响下表面粗糙度的因素主要是黏附的粉末和团聚凸起。在 SLM 成形悬垂结构时, 悬垂结构的支撑部分为粉末, 而粉末的低导热性使得熔池因热量累积而无法及时冷却, 在重力

以及毛细管力作用下熔池下沉至下方粉末, 导致悬垂面粘粉以及部分熔池团聚凸起^[30]。低角度样件上下表面粗糙度不同的原因主要有两个: 1) 上表面底部的支撑结构为实体, 不会因为熔池下沉而导致粘粉加剧, 也不会出现团聚凸起; 2) 上下表面与粉末的接触面积不同。由图 1 所示的切片示意图可知, 当切片厚度为 h 时, 样件上表面与粉末的接触面积为

$$S_u = h \times B, \quad (4)$$

下表面与粉末的接触面积为

$$S_d = h \times B + h \times B \times \cot(a), \quad (5)$$

其中 h 为切片厚度, B 为样件宽度, a 为样件的倾斜角度。

当样件倾斜角度为 30° 时, 下表面与粉末的接触面积为上表面与粉末接触面积的 2.7 倍。接触面积越大, 粘粉情况越严重。此外, 样件的倾斜角度 a 越小时, 样件与粉末的接触面积越大, 这也是在低角度打印时角度越低样件下表面成形质量越差的主要原因^[13]。

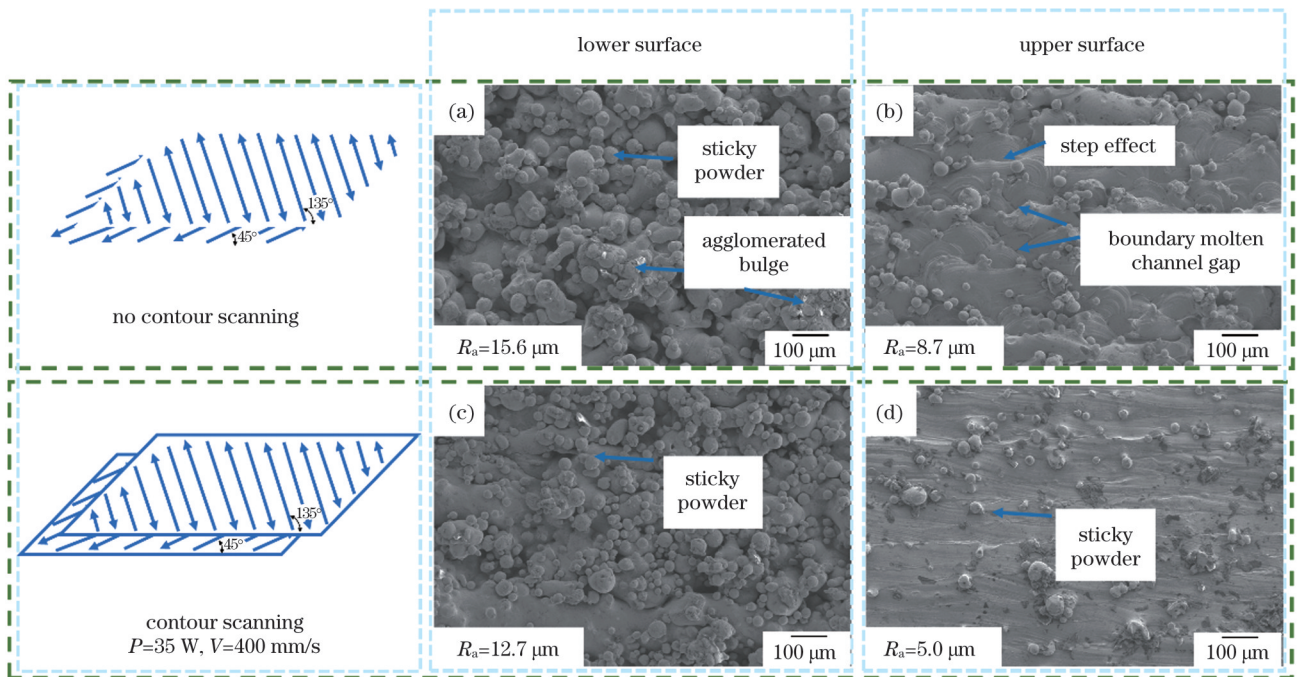


图 10 低角度样件的上下表面形貌。(a) 不开启轮廓下表面; (b) 不开启轮廓上表面; (c) 开启轮廓下表面; (d) 开启轮廓上表面
Fig. 10 Topography of the upper and lower surfaces of the low-angle samples. (a) Lower surface of the contour is not opened; (b) upper surface of the contour is not opened; (c) lower surface of the contour is opened; (d) upper surface of the contour is opened

除粘粉外, 在上表面还观察到了轮廓边界熔道间隙和层间阶梯效应。由于熔池形状与圆形相似且存在一定宽度, 在单层成形激光扫描时, 往往会因熔池的宽度而形成比理论轮廓更大的实际轮廓, 而两熔道之间由于激光扫描到理论轮廓边缘时便中止, 从而产生了未熔融间隙, 如图 11 所示。这些间隙会使上表面出现一定程度的凹陷, 从而影响了表面的成形质量。

为了消除轮廓边界熔道间隙以及层间阶梯效应

对样件表面成形质量的影响, 在低角度样件成形时添加了轮廓扫描工艺, 并对轮廓工艺进行了优化。优化后成形样件的表面 SEM 照片如图 10(c)、(d) 所示, 可以发现, 下表面粘粉相对减少, 熔池下沉产生的团聚凸起明显改善, 上表面虽然依旧存在粘粉现象, 但基本消除了轮廓边界熔道间隙和层间阶梯效应带来的影响。最终, 优化后的上下表面粗糙度测量值分别为 $12.7 \mu\text{m}$ 和 $5.0 \mu\text{m}$ 。

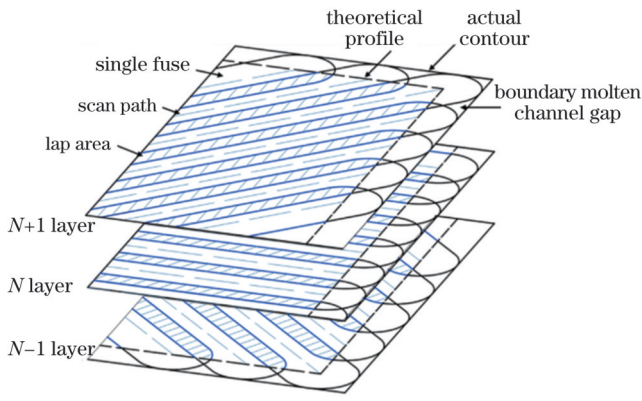


图 11 层间扫描示意图

Fig. 11 Schematic diagram of interlayer scanning

3.4 低角度成形方法适用性探究

通过成形不同尺寸的倾角样件来探究低角度成形方法的适用性。从打印结果来看,样件均实现了有效成形。图 12 展示了成形样件不同高度位置处(A_1 、 A_2 、 A_3)的成形厚度。由图 12(a)可以看出:当样件厚度为 2 mm 时,模型上 3 个测量点处的厚度平均值接近,样件基本没有发生变形,但相较于设计尺寸偏大。由 3.3

节可知,下表面熔池下沉以及粘粉都会增大样件的成形尺寸。此外,由图 11 中可知,由于熔池具有一定的宽度,实际成形尺寸相对于理论尺寸偏大。这也是实际工业样件打印时前处理工作都要通过添加光斑补偿进行修正的主要原因。随着样件厚度进一步增大,3 个测量点的数据偏差逐渐增大,这表明随着厚度增加,样件的变形逐渐加剧,当样件厚度大于 4 mm 时,测量点 A_3 的测量值均小于设计尺寸。如图 12(b)所示,随着样件宽度增加,样件的成形厚度较为均匀,无明显变形。

何洪苇^[31]在模拟中发现,随着悬垂样件的厚度增加,样件中的平均应力增大。样件的成形厚度越大,则平行于悬垂方向的长度越大,激光作用时间越长,热应力造成的变形累积越大,从而导致变形越大。而只增加悬垂样件的宽度时,由于水平悬垂样件的长度不变,该方向造成的热应力变形累积不变,因而样件的变形程度不会随着模型宽度的增大而加剧。

综上所述,虽然厚度的增加会使样件的变形加剧,但并不会影响样件实现设计高度的成形,这表明该方法在低角度成形时具有一定的适用性。

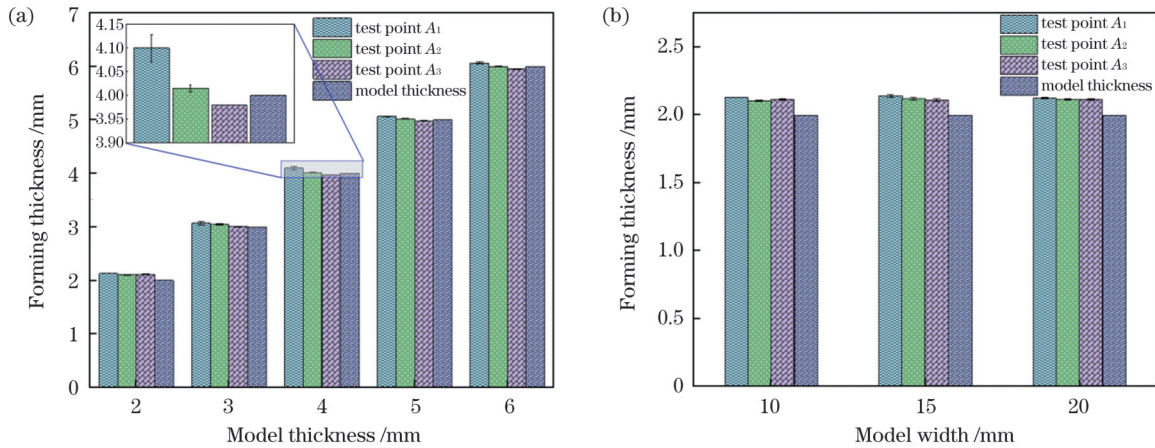


图 12 不同尺寸样件的成形厚度。(a)不同厚度样件的成形厚度;(b)不同宽度样件的成形厚度

Fig. 12 Forming thickness of the samples with different sizes. (a) Forming thickness of the samples with different thicknesses; (b) forming thickness of the samples with different widths

3.5 低角度叶轮样件的成形

3.5.1 低角度叶轮的成形

为进一步验证所提低角度打印方法的有效性,使用 3.1 节得到的下表面工艺参数(激光功率 $P=140$ W,扫描速度 $V=2600$ mm/s,扫描间距为 0.02mm,向下比较层数 $T=40$)对低角度叶轮进行了无支撑打印成形。叶轮叶片的最低角度为 15° 且整体角度均低于 45° ,如图 13(a)、(b)所示。由图 13(c)、(d)可以看出,低角度叶轮成功实现了打印,样件没有明显缺陷,同时样件表面质量良好,没有明显的粘粉和层纹现象。叶片上表面形貌如图 13(e)所示。低角度叶轮的成功打印证明了所提方法打印低角度样件的可行性。SLM 打印过程中刮刀的运动方向与倾斜样件的相对位置差异会显

著影响倾角样件的成形^[27],而本次成形的低角度叶轮为环形结构,各叶片的摆放方位不同且包含了各个方位,最终成形的叶轮无明显差异,充分证明了该成形方法的稳定性。

3.5.2 讨论

笔者提出了一种低角度无支撑有效成形方法,同时对成形热影响进行了深入分析,丰富了后续学者对低角度样件成形的研究手段及方向。此外,所提基于加工层角度自适应下表面工艺区域的划分方法能够有效应对变倾斜角度模型的打印,如图 3(c)所示。当打印样件的规则曲面时,开启下表面工艺区域划分,此时下表面工艺区会随着悬垂角度的减小而增大。由 3.2 节可知,下表面区域增大能够有效提升低角度下的成

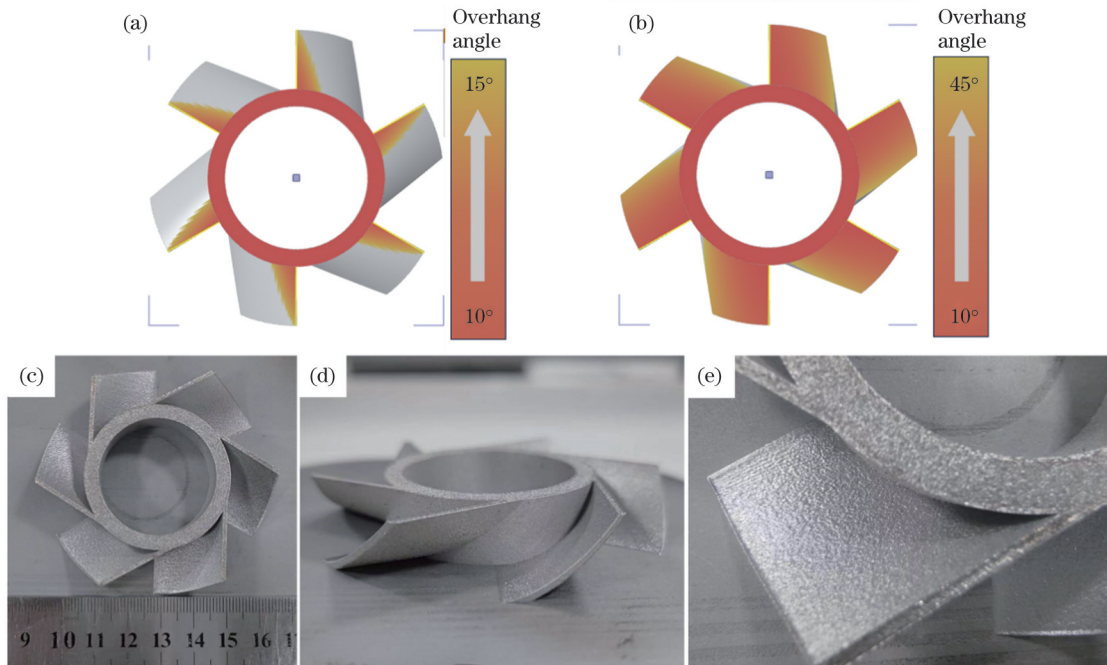


图 13 环形叶轮模型及成形样件。(a) 叶轮低于 15° 倾面区域; (b) 叶轮低于 45° 倾面区域; (c) 成形叶轮顶视图; (d) 成形叶轮侧视图; (e) 成形叶轮叶片上表面形貌

Fig. 13 Annular impeller model and the formed sample. (a) 15° inclination area of the impeller; (b) 45° inclination area of the impeller; (c) top view of the formed impeller; (d) side view of the formed impeller; (e) upper surface morphology of the formed impeller blade

形稳定性,从而保证了更低悬垂角的有效成形。

目前,基于该调控实现的低角度下的成形还具有一定的局限性。对于向下比较层数的调控,其本质是改变了划分的上、下、内表面区域的面积。在 3.2 节所述的悬垂样件的成形过程中,当向下比较层数 $T \geq 40$ 时,样件能够有效成形,但下表面区域占据了整个样件的 1/3,而下表面工艺区选择的工艺无法保证较高的致密度,样件将会牺牲一部分性能,特别是在成形叶轮样件时,叶轮较薄,其下表面区域占据了整个叶轮的 80%,导致叶轮的成形性能无法得到保证。薄壁样件的成形局限性如图 14(a)、(b) 所示。当 T 值一定时,样件越薄,其下表面划分区域相对于整个样件的占比也就越大,其性能受低能下表面工艺的影响也就越大。此外,对于具有内凹结构的模型,当向下比较层数过大时,第 N 层虽然为低角度区域,但相对于

第 $N-T$ 层并无悬空区域,即该低角度层并无下表面工艺区,如图 14(c) 所示,因而这种区域划分结果显然不适用于低角度成形。

在现有的研究成果中,许多高校及企业虽然都实现了低角度样件的成形,但都没有对其成形性能进行讨论。鉴于此,后续研究可以通过内表面工艺优化在不牺牲内表面性能的前提下降低成形应力,从而减少向下比较层数 T ,减少下表面的区域,使所提方法适用于更薄样件的成形。同时,还应进一步优化下表面成形工艺,提高样件的成形致密度,保证悬垂样件的整体性能。此外,由于悬垂样件的翘曲主要是由热累积造成的,因此,如果在打印过程中配合熔池监控,将熔池温度作为实时反馈来调控扫描路径及激光能量输入,那么低角度样件的成形完整性及成形性能将会得到进一步提高。

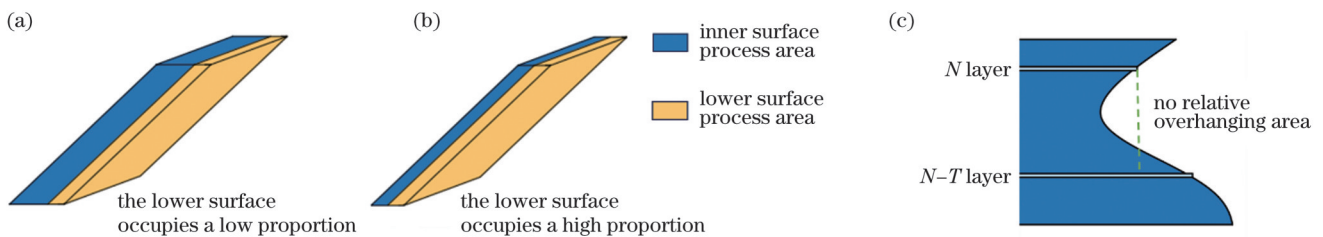


图 14 下表面工艺区划分的局限性。(a) 厚样件下表面区域占比; (b) 薄样件下表面区域占比; (c) 内凹模型

Fig. 14 Limitations of the lower surface process area division. (a) Proportion of the lower surface area of the thick sample; (b) the proportion of the lower surface area of the thin sample; (c) concave model

4 结 论

笔者提出了一种低角度样件的成形方法,并采用该方法实现了 30° 低角度样件以及最低 15° 叶轮样件的成形。对成形机理、样件表面质量以及成形方法的适用性进行了探究,获得了以下结论:

1) 在水平悬垂样件成形过程中,过高的能量密度会使悬垂样件表面飞溅累积严重,在刮刀的作用下,样件的层间结合性会被破坏。过低的能量密度会导致熔道搭接不足,甚至无法成形。采用适熔工艺,样件能够实现多层的有效搭接。

2) 在适宜的工艺条件下,下表面工艺区的划分是影响低角度样件成形的核心因素。在 30° 成形时,只有当向下比较层数 $T \geq 40$ 时,样件的悬垂区域才能抵抗高能内表面激光带来的热应力变形,实现低角度打印。

3) 下表面质量主要受粘粉以及熔池下陷引起的凸起的影响,而上表面除了受粘粉影响外,还会受到阶梯效应和激光扫描盲区的影响。此外,上下表面与粉末接触面积不同也是上下表面粘粉差异的主要原因。

4) 低角度样件成形时,随着样件厚度增加,样件变形逐渐加剧,而样件宽度的增加几乎不会对低角度样件的变形产生影响。

参 考 文 献

- [1] 郭朦,戴延丰,黄斌达.典型航空机电产品激光粉末床熔融技术应用现状与发展[J].中国激光,2023,50(16):1602304.
Guo M, Dai Y F, Huang B D. Application status and development of laser powder bed fusion technology in typical electromechanical aviation products[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(16): 1602304.
- [2] 梁家誉,张文扬,刘伟,等.点阵结构热交换器激光增材制造及换热性能测定[J].中国激光,2023,50(4):0402014.
Liang J Y, Zhang W Y, Liu W, et al. Laser additive manufacturing and heat transfer performance measurement of lattice structure heat exchanger[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(4): 0402014.
- [3] Bremen S, Meiners W, Diatlov A. Selective laser melting: a manufacturing technology for the future[J]. Laser Technik Journal, 2012, 9(2): 33-38.
- [4] Wong M, Tsopanos S, Sutcliffe C J, et al. Selective laser melting of heat transfer devices[J]. Rapid Prototyping Journal, 2007, 13(5): 291-297.
- [5] Ma Z L, Gao M D, Guo K, et al. Analysis and optimization of energy consumption for multi-part printing using selective laser melting and considering the support structure[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2023, 10(3): 693-707.
- [6] 宜亚丽,程阳洋,贾长治,等.选区激光熔化成形零件支撑结构性能差异研究[J].中国激光,2023,50(16):1602306.
Yi Y L, Cheng Y Y, Jia C Z, et al. Performance differences of support structures for parts formed by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(16): 1602306.
- [7] Wang D, Mai S Z, Xiao D M, et al. Surface quality of the curved overhanging structure manufactured from 316-L stainless steel by SLM[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(1): 781-792.
- [8] 杨永强,卢建斌,王迪,等.316L不锈钢选区激光熔化成型非水平悬垂面研究[J].材料科学与工艺,2011,19(6):94-99.
Yang Y Q, Lu J B, Wang D, et al. A study of 316L stainless steel non-horizontal overhanging surface in selective laser melting[J]. Materials Science and Technology, 2011, 19(6): 94-99.
- [9] Feng S C, Kamat A M, Sabooni S, et al. Experimental and numerical investigation of the origin of surface roughness in laser powder bed fused overhang regions[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2021, 16(sup1): S66-S84.
- [10] Le K Q, Wong C H, Chua K H G, et al. Discontinuity of overhanging melt track in selective laser melting process[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 162: 120284.
- [11] Babu J J, Mehrpouya M, Pijper T C, et al. An experimental study of downfacing surfaces in selective laser melting[J]. Advanced Engineering Materials, 2022, 24(8): 2101562.
- [12] Han J T, Duan W P, Mao Y Y, et al. Comparison of laser power and scan speed in SLM[J]. ISIJ International, 2022, 62(1): 200-208.
- [13] Yang T, Liu T T, Liao W H, et al. Effect of processing parameters on overhanging surface roughness during laser powder bed fusion of AlSi10Mg[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 61: 440-453.
- [14] 边培莹,徐可为,尹恩怀,等.扫描路径对选区激光熔化热力演变的影响[J].激光与光电子学进展,2023,60(9):0914001.
Bian P Y, Xu K W, Yin E H, et al. Effect of scanning strategy on thermodynamics evolution of selective laser melting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(9): 0914001.
- [15] 刘婷婷,张长东,廖文和,等.激光选区熔化成形悬垂结构熔池行为试验分析[J].中国激光,2016,43(12):1202004.
Liu T T, Zhang C D, Liao W H, et al. Experimental analysis of pool behavior in overhang structure fabricated by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1202004.
- [16] Su C J, Cao J Z, Li G Z, et al. Experimental investigation on the factors affecting the quality of titanium alloy overhang via selective laser melting forming[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 128(7): 3391-3402.
- [17] Vasileška E, Demir A G, Colosimo B M, et al. A novel paradigm for feedback control in LPBF: layer-wise correction for overhang structures[J]. Advances in Manufacturing, 2022, 10(2): 326-344.
- [18] Yuan Z J, Chen X D. Novel approach for fabricating horizontal overhanging structures in selective laser melting[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 85: 793-801.
- [19] Jiang J, Chen J, Ren Z, et al. The influence of process parameters and scanning strategy on lower surface quality of TA15 parts fabricated by selective laser melting[J]. Metals, 2020, 10(9): 1228.
- [20] Mao Y Y, Lü X F, Shen X D. A study on the surface quality of selective laser melted cylindrical- and parallelepiped-shaped inner structure[J]. Materials, 2023, 16(13): 4649.
- [21] Liu H, Cai G S, Xin Y X. Effect of processing parameters on the quality of overhanging round hole structure in AlSi10Mg selective laser melting[J]. Materials Today Communications, 2023, 37: 107464.
- [22] Xie Z W, Wu M P, Shi X J, et al. Study on the forming precision optimization of built-in flow channel structure manufactured by selective laser melting[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2023, 237(6/7): 1048-1059.
- [23] 朱小刚,董安平,程灵钰,等.激光粉末床熔融成形 AlSi10Mg 铝合金复杂流道构件研究[J].激光与光电子学进展,2023,60(7):0714006.
Zhu X G, Dong A P, Cheng L Y, et al. Study on AlSi10Mg alloy with complex flow channels by laser powder bed fusion[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(7): 0714006.
- [24] 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.
- [25] Wang D, Yang Y Q, Zhang M H, et al. Study on SLM fabrication of precision metal parts with overhanging structures[C]//2013

- IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM), July 30–August 2, 2013, Xi'an, China. New York: IEEE Press, 2013: 222-225.
- [26] Scriven L E, Sterling C V. The Marangoni effects[J]. *Nature*, 1960, 187(4733): 186-188.
- [27] Zhu X G, Dong A P, Wang L F, et al. Influence of inclination angle, shape and size of the flow channels on the AlSi10Mg complex products fabricated by selective laser melting[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 83: 157-171.
- [28] Wen S F, Li S, Wei Q S, et al. Effect of molten pool boundaries on the mechanical properties of selective laser melting parts[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(11): 2660-2667.
- [29] Vrancken B, Cain V, Knutsen R, et al. Residual stress via the contour method in compact tension specimens produced via selective laser melting[J]. *Scripta Materialia*, 2014, 87: 29-32.
- [30] 赵春富. 悬垂结构激光选区熔化成形质量及其切削加工变形研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
- Zhao C F. Study on the laser-selective melting printing quality of overhanging structures and their cutting properties[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021.
- [31] 何洪苇. 基于 SLM 的自支撑悬垂结构的工艺约束研究与构型设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- He H W. Process constraint study and configuration design of SLM based self-supporting overhanging structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.

Method and Process of Selective Laser Melting Forming Low-Angle Support-Free Structures (Invited)

Hu Weinan^{1,3}, Feng Ying^{3,4}, Wang Di^{1*}, Yan Xingchen², Jiang Menglong¹, Jin Gang¹,
Yang Chao¹, Yang Yongqiang¹, Wu Jiehua⁵, Chen Simin⁵

¹*School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong, China;*

²*Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510075, Guangdong, China;*

³*School of Mechanical Engineering, Guangzhou City University of Technology, Guangzhou 510800, Guangdong, China;*

⁴*School of Innovative Design, City University of Macao, Macao 999078, China;*

⁵*Shenzhen Jinshi 3D Printing Technology Co., Ltd., Shenzhen 518107, Guangdong, China*

Abstract

Objective Currently, the recognized optimal forming angle for selective laser melting (SLM) is 45°. When the forming angle of a sample is less than 45°, support structures are required for assisting the formation. Although the addition of support structures can effectively assist in the formation of parts, drawbacks, such as increased printing time, increased material consumption, increased difficulty in post-processing, and increased roughness of the support surfaces, are often observed. In some cases, for parts with internal cavities or complex channels, the inability to remove internal support can render SLM unsuitable for fabrication. Therefore, it is important to explore a forming method for samples with low forming angles in SLM to reduce printing costs and expand the applicability range.

Methods First, the treatment process of a horizontal suspension sample is discussed. Different process combinations are used to form single- and double-layer overhanging structures to obtain a stable overhang process. Accordingly, an adaptive method of lower surface process area division based on the machining layer angle is proposed to adjust the size of the lower surface process area applied to the overhanging sample. The feasibility of the low angle forming method was verified by forming a 30° overhanging sample with different downward comparison layer numbers. Samples with different widths and thicknesses were formed using the same forming process, and the applicability of the forming method was verified.

Results and Discussions No obvious overheating was observed on the surface of the single-layer overhang formed by the fusible process, and only a few micropores were present. The formation of a double-layer overhang effectively ensured bonding between the layers. When the layer comparison interval was opened, the sample was forced to interrupt printing at a 6 mm overhang length when $T=1, 10,$ and $20,$ whereas the sample without layer comparison could be formed up to a 10 mm overhang length. When the layer interval T was further increased to 30, the effective forming length of the sample reached 12 mm. Finally, when T was greater than 40, stable formation of the designed height of the sample was achieved. When printing overhang samples of different sizes, it was found that increasing the thickness exacerbated the deformation of the sample but did not affect the realization of the designed height. This indicates that this method has a certain applicability in low-angle forming.

Conclusions (1) In the horizontal overhang formation process, a high energy density caused serious spatter accumulation on the surface of the overhanging sample and destroyed the interlayer bonding under the action of the scraper. However, an energy density that is very low will lead to an insufficient weld lap or even failure to form. Using a fusible process, the sample can achieve an effective multilayer lap. (2) Under suitable conditions for the overhang process, the division of the forming region on the inner surface was a key factor affecting the formation of low-angle samples. For 30° forming, the overhanging area of the sample can resist the thermal stress deformation caused by the high-energy inner surface laser only when the layer comparison interval T is greater than or

equal to 40, thus achieving low-angle printing. (3) The quality of the lower surface was mainly affected by powder bonding and sinking of the molten pool. In addition to powder sticking, the upper surface was mainly influenced by the staircase effect and the gap between the laser contour and the boundary of the melt pool. Additionally, the difference in the contact area with the powder was the main reason for the difference in powder sticking between the upper and lower surfaces. (4) When forming the low-angle samples, as the thickness of the sample increased, the deformation of the sample gradually intensified, whereas an increase in the width had almost no effect on the deformation of the low-angle samples.

Key words laser technique; selective laser melting; support-free printing; low-angle; forming mechanism; surface quality