

# 激光与光电子学进展

## 倾斜角对激光选区熔化 TC4 构件内部孔道成形精度的影响

戚增欣<sup>1</sup>, 任旭东<sup>1\*</sup>, 冒浴沂<sup>2</sup>

<sup>1</sup>江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013;

<sup>2</sup>国家增材制造产品质量监督检验中心, 江苏 无锡 214028

**摘要** 以激光选区熔化 TC4 构件为研究对象, 研究了倾斜角对构件内部结构成形精度的影响。设计了具有不同倾斜孔道结构的 TC4 构件, 采用优化后的参数打印成形。采用工业计算机断层成像设备观察样品的内部结构, 并建立逆向三维模型, 将其与设计模型导入 PolyWorks 软件中进行拟合和对比, 从而检测该试样内部结构悬垂面的表面偏差程度和表面质量。结果表明, 倾斜角对 TC4 构件内部结构的悬垂程度和表面质量具有很大影响: 当倾斜角增大到 50° 左右时, 激光选区熔化 TC4 成形件内部结构悬垂面的表面偏差程度明显变小, 且打印质量明显提升; 而当倾斜角继续增大时, 激光选区熔化 TC4 成形件内部结构悬垂面的表面偏差程度明显变大, 且打印质量明显下降。

**关键词** 测量; 激光选区熔化; 倾斜角; 内部结构; 成形精度

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2114002

## Influence of Inclination Angle on Forming Precision of Internal Channel in Selective Laser Melted TC4 Component

Qi Zengxin<sup>1</sup>, Ren Xudong<sup>1\*</sup>, Mao Yuyi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

<sup>2</sup>National Center of Supervision and Inspection on Additive Manufacturing Products Quality, Wuxi, Jiangsu 214028, China

**Abstract** In this paper, a TC4 component produced by laser selective melting was used as the research objects and the influence of inclination angle on the forming accuracy of their internal structure was explored. A TC4 component with different inclined channel structures was designed and printed under optimized parameters. The internal structure of the sample was observed using industrial computed tomography equipment. Then, it was imported to PolyWorks software for fitting and comparison to detect the deviation degree and surface quality of the internal structure of the sample. The results demonstrate that the inclination angle greatly influences the overhang degree and surface quality of the internal structure of the TC4 component. When the inclination angle increases gradually to 50°, the deviation degree of the suspended surface of the internal structure is reduced and the printing quality is considerably improved. Additionally, as the inclination angle continues to increase, the deviation degree increases and the printing quality is notably reduced.

**Key words** measurement; selective laser melting; inclination angle; internal structure; forming accuracy

**OCIS codes** 120.4290; 140.3430; 160.3900

收稿日期: 2020-12-01; 修回日期: 2021-01-13; 录用日期: 2021-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(51975261)

通信作者: \*865768965@qq.com

## 1 引言

自 20 世纪 90 年代以来,增材制造行业发展迅猛。激光选区熔化(SLM)技术作为一种典型的增材制造技术,其原理是在计算机的指导下将设计的三维零件模型进行分层,接着通过高能激光选择性扫描特定区域内平铺的金属粉末使其快速熔化,逐层铺粉、扫描,叠加成形<sup>[1-2]</sup>。由于打印过程中的原材料是接近于完全熔化的,因此通过 SLM 技术制造出来的零件具有良好的表面质量和较小的孔隙率<sup>[3]</sup>。凭借这种独特的成形机理,SLM 技术能够实现传统模具制造所不能完成的一些复杂金属零件的制造,因此被广泛应用于航空航天<sup>[4-5]</sup>、医疗器械<sup>[6]</sup>、汽车工业<sup>[7]</sup>等领域。

随着常用能源的日益短缺,轻量化零部件越来越受到人们的关注,更多的研究人员对构件的内部结构进行了大量研究,期望通过 SLM 技术制造出内部结构较为复杂的轻量化零部件。肖泽锋<sup>[8]</sup>提出了一种基于性能的网络结构轻量化设计方法,该方法结合了增材制造与拓扑优化两种技术的优点;Zhang 等<sup>[9]</sup>尝试采用先进的内部分支支撑结构来代替典型的格构结构,结果发现,采用内部分支支撑结构不仅节省了制造时间和材料,还可以提高支撑结构的强度;张小川等<sup>[10]</sup>针对 SLM 增材制造工艺建立了工件成形取向优化模型,以确定工件的最优成形取向,结果发现优化成形取向可以减少支撑的数量并显著提高了成形效率。Xiong 等<sup>[11]</sup>采用有限元分析法对负泊松比结构进行了定量优化,结果发现当支撑的倾斜角为 $9^\circ$ 且对应的再入角为 $79^\circ$ 时,结构处于相对最优状态。

从增材成形件内部结构的现有研究成果来看,目前增材成形件的结构成形有两种打印选择方案:添加支撑结构<sup>[12]</sup>和不添加支撑结构<sup>[13]</sup>。固然,添加支撑结构可以起到优化悬垂面性能的作用,但同时增加了时间和经济成本,最重要的是这些支撑结构很难从打印的内部结构中完美地移除,从而造成支撑残留<sup>[14]</sup>。鉴于此,本课题组在此次设计的实验模型中并没有添加支撑结构。受限于 SLM 设备的极限打印尺寸以及内孔结构的特殊性,大多数情况下,零部件内部孔道在进行打印时悬垂结构不可避免。目前,SLM 构件内部圆形孔道和方形孔道的成形精度已有诸多研究报道<sup>[15]</sup>,而多边形孔道的成形精度却鲜有报道。为了拓展孔道形状的多

样性,本课题组设计了具有不同倾斜度孔道结构的 TC4 增材制造典型构件,采用优化后的参数进行打印,并通过比较内部孔道的悬垂面以及侧面的质量,阐明了倾斜角对不加支撑的内孔结构质量的影响。

## 2 实验材料及设备

### 2.1 实验材料

本实验所使用的原材料是由深圳微纳增材技术有限公司提供的 TC4 粉末,其化学成分如表 1 所示。

表 1 TC4 粉末的化学组成

Element	O	Al	V	C	H	N	Ti
Mass fraction / %	0.102	5.710	3.780	0.012	0.010	0.027	Balance

### 2.2 模型设计

考虑到悬垂结构的 SLM 制造极限,本实验所设计的内部孔道结构的倾斜角分别为 $40^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $52.5^\circ$ 和 $55^\circ$ ,具体的模型尺寸、设计模型及打印实物如图 1 所示。

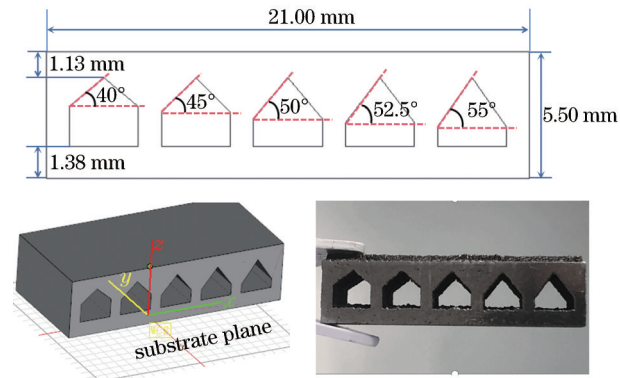


图 1 增材构件模型及打印实物。(a)模型尺寸;(b)设计模型;(c)打印实物

Fig. 1 Model and printed physical component of additive component. (a) Model size; (b) designed model; (c) printed physical component

### 2.3 实验设备

本次实验采用的增材制造设备为南京航空航天大学研制的 RAP-IV 型 SLM 打印机。该设备所用光纤激光器的波长为 1064 nm,工作舱尺寸为 $275\text{ mm}\times 275\text{ mm}\times 275\text{ mm}$ 。样品打印使用的基板直径为 100 mm,保护气体为氩气,激光功率为 300 W,扫描速度为 600 mm/s,光斑直径为 100  $\mu\text{m}$ ,扫描策略为“Z”形扫描(如图 2 所示),打

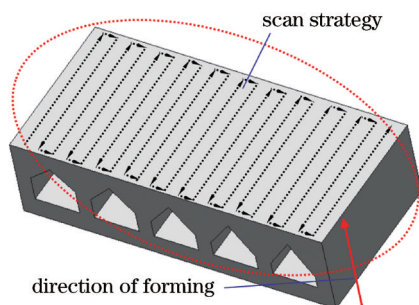


图 2 扫描路径示意图

Fig. 2 Scanning path diagram

印层厚为 0.12 mm, 固定扫描间距为 0.1 mm, 通过逐层铺粉扫描叠加成形。增材制造设备如图 3(a)所示。

本次实验用于扫描并重建图像的设备为 YXLON FF35 型工业计算机断层成像设备(工业 CT)。该工业 CT 扫描采用的射线管为折射管, 滤波片是厚度为 0.5 mm 的铜片, 选定的电压为 160 kV, 电流为 60  $\mu$ A, 功率为 9.6 W, 放大倍数为 9.23, 体素大小为 15.1  $\mu$ m  $\times$  15.1  $\mu$ m  $\times$  10  $\mu$ m。设备图片见图 3(b)。



图 3 本次实验所用设备。(a) SLM 打印机; (b) 工业 CT; (c) 扫描电子显微镜

Fig. 3 Equipments used in this paper. (a) SLM printer; (b) industrial CT; (c) scanning electron microscope

本次实验采用 Sigma300 型扫描电子显微镜观察孔道表面的微观形貌, 电子显微镜的加速电压为 20 kV, 工作距离为 8 mm, 放大倍数为 45~50 倍, 探测器为 SE2。设备图片如图 3(c)所示。

### 3 实验成果和讨论

#### 3.1 工业 CT 扫描结果分析

本次实验通过工业 CT 完成 SLM TC4 构件的扫描, 通过 VGStudio 软件图像重建技术完成模型的拟合, 拟合模型如图 4 所示。

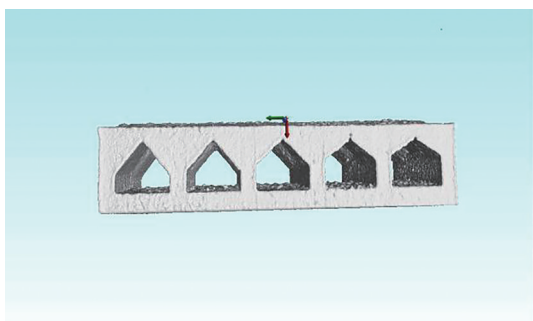
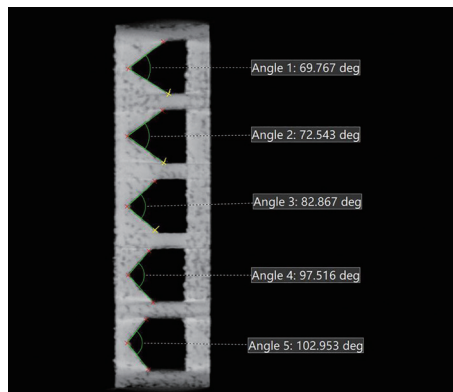


图 4 VGStudio 拟合模型

Fig. 4 VGStudio fitting model

因为倾斜角不便测量, 所以使用 VGStudio 软件测量该构件内孔结构坡顶夹角( $\gamma$ ), 测量结果如图 5 所示。

图 5 TC4 构件内部孔道结构坡顶夹角  $\gamma$  测量图Fig. 5 Measured slope top angle  $\gamma$  for internal channel structure of TC4 member

将设计的数字三维模型中坡顶夹角的数值记作  $\gamma_1$ , 打印构件完成图像重建后坡顶夹角的测量值记作  $\gamma_2$ , 绘制折线统计图, 如图 6 所示。

由图 6 可知: 当坡顶夹角大于 70° 时, 打印出来的坡顶夹角与设计模型的坡顶夹角的度数相差较大, 说明没有支撑结构时 SLM TC4 构件内部结构悬垂面的打印质量不理想; 当坡顶夹角等于 70° 时, 图中  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  两点相近, 但这并不意味着该度数下 SLM TC4 构件内部结构悬垂面的打印质量良好, 这仅意味着该度数下坡顶的悬垂程度和坡底的悬



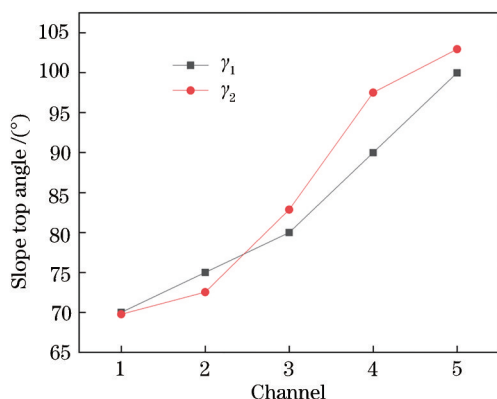


图 6 坡顶夹角的统计图

Fig. 6 Statistical chart of slope top angle

垂程度较为相近。 $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  之间的距离只能代表该构件的内部结构在  $\gamma_1$  时坡顶悬垂程度和坡底悬垂程度之间的差距： $\gamma_1 - \gamma_2 > 0$ ，表示该构件内部结构在  $\gamma_1$  时坡顶的悬垂程度小于坡底的悬垂程度； $\gamma_1 - \gamma_2 < 0$ ，表示该构件内部结构在  $\gamma_1$  时坡顶的悬

垂程度大于坡底的悬垂程度。因此， $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  的间距并不能用来表示该构件内部结构悬垂面的悬垂程度。造成悬垂面下沉的原因以及倾斜角对 SLM TC4 构件内部结构悬垂面的影响后文将具体分析。

### 3.2 悬垂面下沉的潜在机理

通过图 5~6 可以发现，倾斜度不同的 5 个孔道的悬垂面与原模型相比都有明显的下沉趋势，而侧面和底面无明显变化。通过分析可以推测有以下两点原因：

1) 当激光通过透镜折射对 TC4 粉末进行选区熔化时，位于悬垂面下方的 TC4 粉末仍然会受热融化，从而造成熔池高度“加厚”的情况，从外观上就表现为有着明显的下沉趋势，如图 7(a) 所示。

2) 位于孔道内的 TC4 粉末松散排列，由于没有支撑结构，松散粉末上方的熔池因自身重力而下沉，从而使得悬垂面表现出明显的下沉趋势，如图 7(b) 所示。

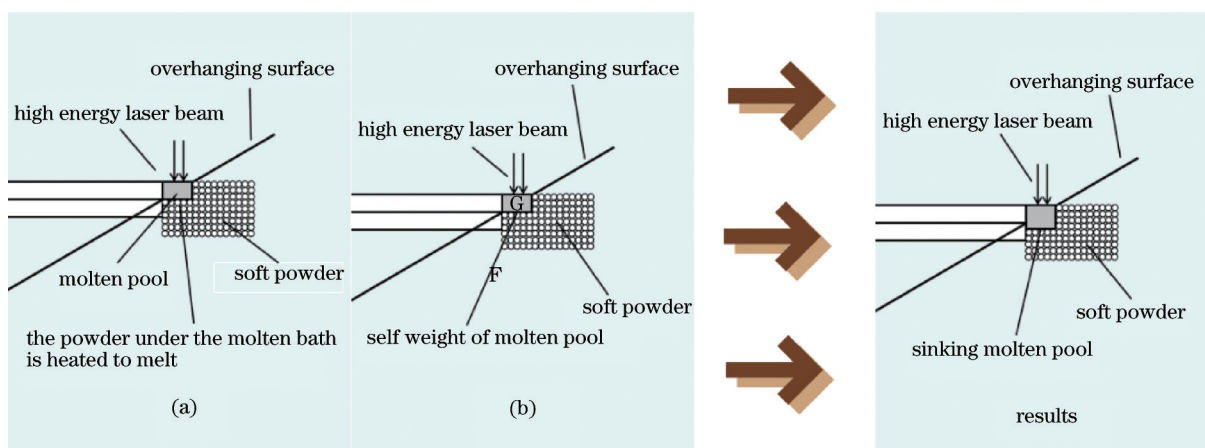


图 7 悬垂面下沉示意图

Fig. 7 Schematic of subsidence of the suspension surface

### 3.3 分析与证明

#### 3.3.1 SEM 形貌图

使用 SEM 对试样进行观察，放大倍数为 50 倍。

SLM TC4 构件内部结构坡顶的形貌如图 8 所示。从图 8 中的放大部分可以清楚地看到熔池下沉的形貌，其中图 8(a) 所示的坡顶甚至出现了熔池黏结的

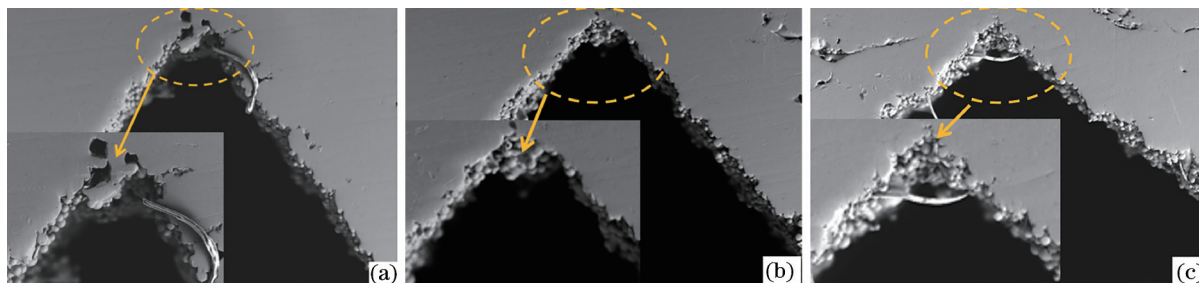


图 8 倾斜角不同的内部结构的 SEM 形貌图。(a) 55°；(b) 50°；(c) 40°

Fig. 8 SEM morphologies of internal structures with different inclination angles. (a) 55°; (b) 50°; (c) 40°

情况,这也证明了图 7(a)和图 7(b)所示的悬垂面下沉的潜在机理。

### 3.3.2 PolyWorks 模型拟合

由于并不能从 SEM 形貌图中直观地看出不同倾斜角悬垂面的偏离程度,因此选择将原模型和扫描模型导入 PolyWorks 中进行拟合。由于是采用线切割的方法从基板上取下该增材构件,因此线切割有一定的宽度,所以悬垂面拟合时存在  $(0.3 \pm 0.1)$  mm 的误差。不同倾斜角  $\theta$  的孔道结构悬垂面的拟合结果如图 9 所示。

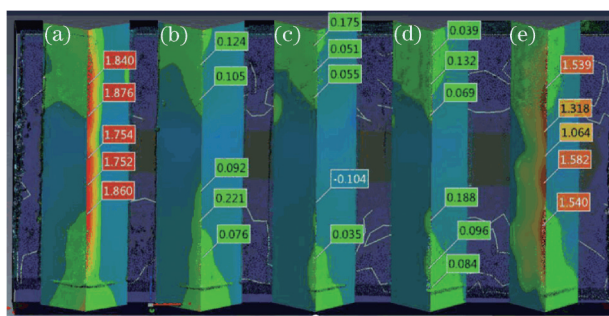


图 9 原模型和扫描模型的 PolyWorks 拟合断面图。(a) 倾斜角为 40°; (b) 倾斜角为 45°; (c) 倾斜角为 50°; (d) 倾斜角为 52.5°; (e) 倾斜角为 55°

Fig. 9 Fitting section of original model and scanning model obtained by PolyWorks. (a) Inclination angle is 40°; (b) inclination angle is 45°; (c) inclination angle is 50°; (d) inclination angle is 52.5°; (e) inclination angle is 55°

从图 9 中可以直观地发现,倾斜角为 40° 和 55° 的悬垂面坡顶的变形非常明显,且倾斜角为 40° 的悬垂面坡顶的变形最为直观。因为存在  $(0.3 \pm 0.1)$  mm

线切割宽度导致的拟合误差,所以从 PolyWorks 拟合断面图中不能直观地看出倾斜角为 45°、50° 和 52.5° 的悬垂面的打印质量。但由于线切割宽度是固定的,因此可以将之设为  $\alpha$  ( $0.2 \text{ mm} \leq \alpha \leq 0.4 \text{ mm}$ ),选择悬垂面上的多个位置点对设计模型和拟合模型的重合度进行测量,测得的偏差值  $(\beta)$  如表 2 所示(表内的偏差数据表示该点处拟合模型相对于设计模型的凸出值或凹进值),测量数据的均值和标准差如表 3 所示。

表 2 PolyWorks 测得的偏差值  $\beta$

Table 2 Measured deviation  $\beta$  by PolyWorks

No.	$\beta$ / mm				
	40°	45°	50°	52.5°	55°
1	0.158	0.137	0.034	0.107	0.268
2	0.151	0.082	0.011	0.068	0.722
3	0.102	-0.055	-0.065	0.022	1.049
4	-0.111	-0.177	-0.165	-0.077	0.451
5	-0.103	-0.053	-0.090	-0.178	0.457
6	0.066	-0.005	-0.029	-0.074	1.002
7	0.043	-0.073	-0.053	-0.037	0.013
8	-0.178	0.031	-0.032	-0.064	-0.026
9	1.679	-0.095	-0.050	0.029	0.023
10	1.733	-0.131	-0.048	-0.042	-0.037
11	1.545	-0.072	-0.045	-0.021	-0.250
12	-0.095	-0.014	-0.017	-0.064	-0.114
13	-0.068	-0.039	-0.027	-0.039	-0.308
14	-0.178	-0.084	-0.034	-0.032	-0.112
15	-0.094	-0.058	-0.034	0.023	0.045
16	0.013	0.074	-0.029	0.051	0.079

表 3 测量数据的均值和标准差

Table 3 Average value and standard deviation of measured data

Inclination angle / (°)	40	45	50	52.5	55
Average value ( $\bar{\beta}$ )	0.29144	-0.03325	-0.04206	-0.02050	0.20388
Standard deviation ( $\sigma$ )	0.662556976	0.079161623	0.041976882	0.066710194	0.406096952

因为存在由值为  $\alpha$  ( $0.2 \text{ mm} \leq \alpha \leq 0.4 \text{ mm}$ ) 的线切割宽度引起的误差,因此,平均值  $\bar{\beta}$  整体需要加上  $\alpha$  ( $0.2 \text{ mm} \leq \alpha \leq 0.4 \text{ mm}$ ),但标准差不受其影响,所以它们的函数图像没有变化。将平均值和标准差绘制成折线统计图,如图 10 和图 11 所示。

从图 10~11 中可以发现,  $\bar{\beta}_{40^\circ} > \bar{\beta}_{55^\circ} > \bar{\beta}_{52.5^\circ} > \bar{\beta}_{45^\circ} > \bar{\beta}_{50^\circ}$ , 且  $\sigma_{40^\circ} > \sigma_{55^\circ} > \sigma_{45^\circ} > \sigma_{52.5^\circ} > \sigma_{50^\circ}$ , 其中  $\bar{\beta}$  值代表悬垂面的表面偏差程度,  $\sigma$  值代表悬垂面的表面打印质量。两个函数的变化趋势较为相似,说明 SLM TC4 成形件内部结构悬垂面的表面打印质量与其

悬垂程度息息相关。

### 3.3.3 倾斜角对 SLM TC4 构件内部结构悬垂面的影响

由图 10 和图 11 可知,当倾斜角  $\theta$  小于 50° 时,随着倾斜角变小,SLM TC4 成形件内部结构悬垂面的表面偏差程度明显变大,且打印质量明显下降。这主要是因为铺粉层厚  $h$  相同,随着倾斜角减小,凸出熔池的长度  $\Delta d$  变大 ( $\Delta d \approx \frac{120}{\tan \theta}$ , 如图 12 所示),需要下层粉末支撑的熔池体积变大,而由于材料的

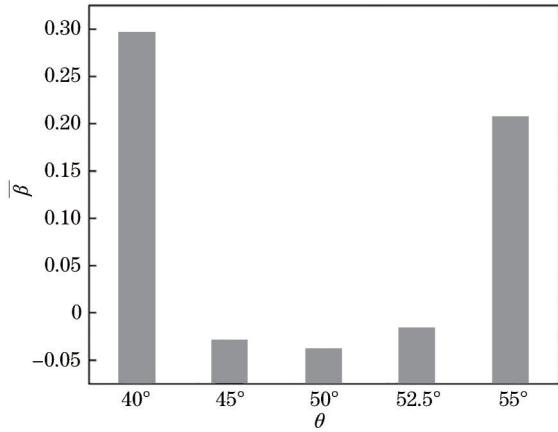


图 10  $\theta - \bar{\beta}$ 关系图  
Fig. 10  $\theta - \bar{\beta}$  chart

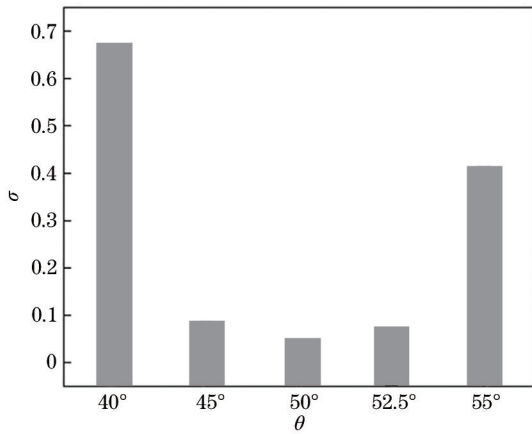


图 11  $\theta - \sigma$ 关系图  
Fig. 11  $\theta - \sigma$  chart

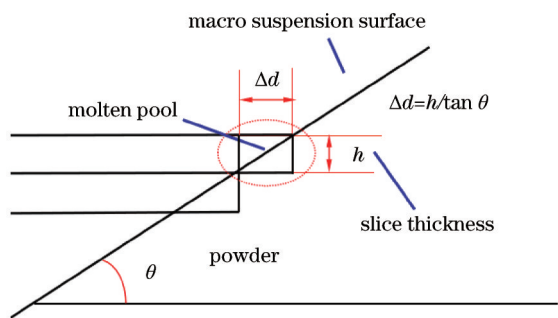


图 12 倾斜角  $\theta$  小于  $50^\circ$  时悬垂面悬垂误差分析示意图  
Fig. 12 Schematic of suspension error analysis of suspension surface when  $\theta$  is less than  $50^\circ$

密度是固定的,因此需要下层粉末支撑的熔池的重量增大。对于熔池的下层粉末来说,随着倾斜角变小,粉末需要提供的支撑力变大,而此时位于孔道内的 TC4 粉末呈分散排列,不能提供足够的支撑,因此熔池的塌陷程度越来越严重。从图 8 所示的

SEM 形貌图中也可以明显看出倾斜角为  $40^\circ$  的悬垂面的表面质量非常差,而倾斜角为  $50^\circ$  的悬垂面的表面质量较好,从而可知小于  $50^\circ$  时倾斜角  $\theta$  的变化对 SLM TC4 构件内部结构悬垂面的影响很大。此时造成悬垂面打印质量较差且悬垂程度较大的主要原因是熔池下方松散的粉末无法承受熔池自重而引起的熔池下沉。

综上所述,当  $\theta$  小于  $50^\circ$  时,随着倾斜角变小,SLM TC4 成形件内部结构悬垂面的表面偏差程度明显变大且打印质量明显下降。

当倾斜角  $\theta$  大于  $50^\circ$  时,随着倾斜角变大,SLM TC4 成形件内部结构悬垂面的表面偏差程度明显变大且打印质量明显下降,这与倾斜角小于  $50^\circ$  时的情况截然相反。说明当倾斜角大于  $50^\circ$  时,造成悬垂面打印质量较差且悬垂程度较大的主要原因不仅仅是熔池下方松散粉末无法承受熔池自重而引起的熔池下沉。

倾斜角  $\theta$  大于  $50^\circ$  时悬垂面悬垂误差分析示意图如图 13 所示。通过分析可以发现本次实验选择的 SLM 打印机的激光光斑直径为  $100 \mu\text{m}$ ,固定扫描间距为  $100 \mu\text{m}$ ,而层厚  $h$  为  $120 \mu\text{m}$ ,当  $\theta$  大于  $50^\circ$  时, $\Delta d \approx \frac{120}{\tan \theta} \leq 100 \mu\text{m}$ 。也就是说,此时的  $\Delta d$  不仅小于光斑直径,还小于两条扫描线之间的最小间距,而扫描速度和激光器提供的功率是一定的,因此在进行  $\Delta d$  处的扫描时,此处吸收的能量是一定的,进而此处熔池的体积是固定的。而需要打印的体积  $V_1 \approx \Delta d \cdot h$ ,其中  $\Delta d \approx \frac{120}{\tan \theta}$ ,当  $50^\circ < \theta < 90^\circ$  时, $\tan \theta$  随着  $\theta$  的增大而迅速增大,因此每层应有的打印体积  $V_1$  随着  $\theta$  的变大而迅速缩小,但熔池大小却没有变化,导致每层多出的误差体积 ( $V_2 \approx V - V_1$ ) 迅

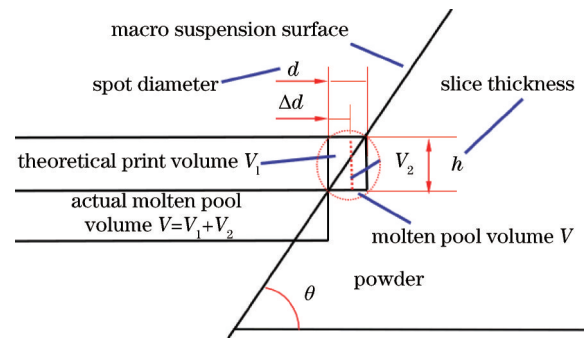


图 13 倾斜角  $\theta$  大于  $50^\circ$  时悬垂面悬垂误差分析示意图  
Fig. 13 Schematic of suspension error analysis of suspension surface when  $\theta$  is greater than  $50^\circ$



速增大,进而导致 SLM TC4 成形件内部结构悬垂面的表面偏差程度变大且打印质量下降。特别是当打印到接近两个悬垂面的交界线时,会出现两悬垂面上熔池的  $V_2$  相黏结的情况。在图 8(a)、(b) 所示的倾斜角为  $55^\circ$  和  $50^\circ$  的 SEM 形貌图中可以清晰地看到坡顶有熔池黏结造成的形貌,其中图 8(a) 所示的悬垂面坡顶的熔池黏结现象尤为明显;但在图 8(c) 所示的倾斜角为  $40^\circ$  的 SEM 形貌图并不能明显地看出坡顶有熔池黏结造成的形貌,这也说明此时影响悬垂面表面偏差程度和打印质量的另一个因素是打印设备的打印精度。由此可知,当倾斜角  $\theta$  大于  $50^\circ$  时,倾斜角  $\theta$  的变化对 SLM TC4 构件内部结构悬垂面的影响很大,此时造成悬垂面打印质量较差且悬垂程度较高的主要原因是熔池下方松散的粉末无法承受熔池自重而引起的熔池下沉,以及打印设备的精度问题引起的无法忽略的熔池体积偏差。

综上所述,当倾斜角  $\theta$  大于  $50^\circ$  时,随着  $\theta$  值变大,SLM TC4 成形件内部结构悬垂面的表面偏差程度明显变大且打印质量明显下降。

## 4 结 论

本文基于 SLM 技术研究了倾斜角对 TC4 构件内部孔道成形精度的影响,得到的主要结论如下: 1) 倾斜角对 SLM TC4 成形件内部结构悬垂面表面偏差程度及表面质量的影响较大,而对其侧面和底面的影响可以忽略不计。2) 造成悬垂面表面偏差程度较大且表面质量较差的主要原因有两点,一是打印设备的精度会导致悬垂面处的熔池体积大于正常应有的体积,二是打印时熔池下方的粉末呈松散排列,不足以支撑熔池的重量而导致熔池下降。3) 使得 SLM TC4 成形件内部结构的悬垂程度和表面质量最佳的倾斜角数值范围为  $45^\circ \sim 50^\circ$ , 当倾斜角偏离该范围时,成形件内部结构悬垂面的表面偏差程度迅速变大且表面质量急剧变差。此时要根据成形设备的精度添加支撑结构。4) 本次实验所得出的倾斜角的最佳数值并不是固定的,需要根据 SLM 打印设备的光斑大小、扫描间距以及铺粉层厚等因素来确定。

本研究可以为复杂内部结构 TC4 零部件的增材制造设计和打印提供理论基础,也可以为 SLM 构件内部流道形状的多样性研究提供参考。

## 参 考 文 献

[1] Zong X W, Gao Q, Zhou H Z, et al. Effects of bulk

laser energy density on anisotropy of selective laser sintered 316L stainless steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0502003.

宗学文, 高倩, 周宏志, 等. 体激光能量密度对选区激光熔化 316L 不锈钢各向异性的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0502003.

[2] Ge Y N, Wu M P, Mao Y Y, et al. Effect of scanning strategy on forming precision of titanium alloy by selective laser melting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(9): 091403.

葛亚楠, 武美萍, 冒浴沂, 等. 激光选区熔化扫描策略对钛合金成形精度的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 091403.

[3] Wu M L, Sun H T, Sun X K, et al. Effect of process parameters on the deformation of selective laser melting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 051403.

吴懋亮, 孙翰霆, 孙玄错, 等. 工艺参数对选区激光熔化中成形形变的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 051403.

[4] Ferro C G, Varetti S, de Pasquale G, et al. Lattice structured impact absorber with embedded anti-icing system for aircraft wings fabricated with additive SLM process[J]. Materials Today Communications, 2018, 15: 185-189.

[5] Gu D D, Zhang H M, Chen H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500002.

顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500002.

[6] Yang Y Q, Song C H, Wang D. Selective laser melting and its applications on personalized medical parts[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(21): 140-151.

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, 50(21): 140-151.

[7] Chen H Y, Gu D D, Gu R H, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of 5CrNi4Mo die steel parts by selective laser melting additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(2): 0203003.

陈洪宇, 顾冬冬, 顾荣海, 等. 5CrNi4Mo 模具钢选区激光熔化增材制造组织演变及力学性能研究[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0203003.

[8] Xiao Z F. Research on design for additive manufacturing

- of lightweight complex component manufactured by selective laser melting[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- 肖泽锋. 激光选区熔化成型轻量化复杂构件的增材制造设计研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [9] Zhang Z X, Wu C B, Li T, et al. Design of internal branch support structures for selective laser melting [J]. Rapid Prototyping Journal, 2018, 24(4): 764-773.
- [10] Zhang X C, Kang J W, Rong Y M, et al. Optimization of building orientation of parts in SLM additive manufacturing[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(13): 1-4.
- 张小川, 康进武, 融亦鸣, 等. SLM 增材制造工件成形取向的优化[J]. 热加工工艺, 2019, 48(13): 1-4.
- [11] Xiong J P, Gu D D, Chen H Y, et al. Structural optimization of re-entrant negative Poisson's ratio structure fabricated by selective laser melting[J]. Materials & Design, 2017, 120: 307-316.
- [12] Huang R K, Dai N, Cheng X S. Optimization of support structures based on numerical simulation of SLM temperature field[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(19): 2346-2354.
- 黄仁凯, 戴宁, 程筱胜. 基于选区激光熔化温度场数值模拟的支撑结构优化[J]. 中国机械工程, 2020, 31(19): 2346-2354.
- [13] Han G L, Shi W T, Han Y F, et al. Review on the research progress of metal additive manufacturing forming structure[J]. China Metal Bulletin, 2020(4): 12-13.
- 韩国梁, 石文天, 韩玉凡, 等. 金属材料增材制造成型结构研究进展综述[J]. 中国金属通报, 2020(4): 12-13.
- [14] Lu J B, Yang Y Q, Wang D, et al. Analysis of affecting factors of overhanging surface quality by selective laser melting[J]. Laser Technology, 2011, 35(2): 148-151.
- 卢建斌, 杨永强, 王迪, 等. 选区激光熔化成型悬垂面质量的影响因素分析[J]. 激光技术, 2011, 35(2): 148-151.
- [15] Han J T. A study on the surface quality of the SLMed titanium alloy inner structure part[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.
- 韩基泰. 面向表面成形质量的内置流道钛合金结构件 SLM 工艺优化研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020.