

# SLM 成形钛合金薄壁结构边缘挂渣及中心凹陷研究

刘琪<sup>a</sup>, 袁美霞<sup>a,b\*</sup>, 寇廷或<sup>a</sup>, 柳校可<sup>a</sup>, 蒋林林<sup>a</sup>

(北京建筑大学 a.机电与车辆工程学院 b.城市轨道交通车辆服役性能保障北京市重点实验室, 北京 100044)

**摘要:** **目的** 探讨激光功率和扫描速度对选区激光熔化 (Selective Laser Melting, SLM) 成形钛合金 Ti-6Al-4V 薄壁结构边缘挂渣及尺寸精度的影响规律, 分析薄壁中心凹陷的主要原因。**方法** 设计两因素三水平试验, 对比不同工艺参数下成形薄壁上表面微观形貌及壁厚, 提出影响薄壁边缘挂渣和中心凹陷的机理, 并得到较优的成形工艺参数。**结果** 挂渣现象对薄壁尺寸精度的影响较大, 薄壁的厚度越小, 影响越大。当薄壁厚度达到 2 mm 时, 边缘挂渣区域厚度明显减小。相较于扫描速度, 激光功率对挂渣区域厚度的影响更大。采用低激光功率、较高扫描速度有助于减小挂渣区域厚度。激光能量密度越大, SLM 成形薄壁尺寸误差越大, 二者存在三次非线性关系。**结论** 在低激光功率对应的低能量密度下, 成形薄壁尺寸误差较小, 当能量密度为 44.44 J/mm<sup>3</sup> 时, 薄壁获得了最小壁厚 (529.37 μm)。试验获得的成形薄壁结构误差最小的工艺参数为  $P=200$  W,  $v=900$  mm/s,  $h=50$  μm。SLM 成形过程中的勾边扫描策略及残余应力导致的翘曲变形是造成薄壁中心凹陷的主要原因。

**关键词:** 选区激光熔化; 钛合金 Ti-6Al-4V; 薄壁结构; 边缘挂渣; 中心凹陷; 激光功率; 扫描速度

**中图分类号:** TG665 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)13-0187-11

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.13.018

## Research on Edge Slagging and Center Depression of Thin Walled Titanium Alloy Structures Formed by SLM

LIU Qi<sup>a</sup>, YUAN Meixia<sup>a,b\*</sup>, KOU Tingyu<sup>a</sup>, LIU Xiaoke<sup>a</sup>, JIANG Linlin<sup>a</sup>

(a. School of Mechanical-Electronic and Vehicle Engineering, b. Beijing Key Laboratory of Performance Guarantee on Urban Rail Transit Vehicles, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

**ABSTRACT:** To investigate the accuracy of thin-walled specimens formed by Selective Laser Melting (SLM), the effects of laser power and scanning speed on the edge dross dropout and dimensional accuracy of thin-walled structures formed by SLM of titanium alloy Ti-6Al-4V were investigated, and the main factors causing the concave phenomenon in the center of thin walls were discussed. By adjusting the laser power and scanning speed, a total of nine specimens were prepared in a two-factor, three-level full-factor test to observe and compare the slagging phenomena and thin-wall dimensions on the microscopic

收稿日期: 2023-07-01; 修订日期: 2023-09-23

Received: 2023-07-01; Revised: 2023-09-23

基金项目: 国家自然科学基金 (52105426); 北京建筑大学研究生创新项目 (PG2023135)

Fund: National Natural Science Foundation of China (52105426); The BUCEA Post Graduate Innovation Project (PG2023135)

引文格式: 刘琪, 袁美霞, 寇廷或, 等. SLM 成形钛合金薄壁结构边缘挂渣及中心凹陷研究[J]. 表面技术, 2024, 53(13): 187-197.

LIU Qi, YUAN Meixia, KOU Tingyu, et al. Research on Edge Slagging and Center Depression of Thin Walled Titanium Alloy Structures Formed by SLM[J]. Surface Technology, 2024, 53(13): 187-197.

\*通信作者 (Corresponding author)

surfaces of thin walls formed under different process parameters. In this process, the influence mechanism of different process parameters on the thin-wall forming accuracy was proposed, and the optimal forming process parameters for the forming of thin-wall structures were obtained. It was found that the slag hanging phenomenon on the side surface of the thin wall was the main reason affecting its accuracy, and the laser power was the main factor causing large area slag dropping. Low laser power and low scanning speed were beneficial to reduce the slag hanging thickness, but too high scanning speed was likely to cause surface defects. Compared with the scanning speed caused by the hanging slag and sticky powder phenomenon, the laser power had a greater impact. Under the same process parameters, with the increase of thin-wall thickness, the slagging area became smaller and smaller. The wall width of SLM thin wall had a three-dimensional nonlinear relationship with laser energy density, and the wall width of SLM thin wall increased with the increase of energy degree. When having the same laser energy density at different process parameters, the specimens still exhibited large differences. The problem of diffusion of residual energy would lead to serious dimensional error problems for thin-walled structures with small thickness. Low energy density corresponding to low laser power could obtain a thin-walled structure with less error, while a reasonable scanning speed should be selected to avoid excessive defects on the upper surface of the thin wall. In this study, experimental data were compared, and the specimens all exhibited large dimensional errors when the laser power was 300 W. When the energy density is  $44.44 \text{ J/mm}^3$ , the minimum wall width value obtained is  $529.37 \text{ }\mu\text{m}$ , the final test yields the minimum process parameters for forming thin-walled structures with errors of  $P=200 \text{ W}$ ,  $v=900 \text{ mm/s}$ , and  $h=50 \text{ }\mu\text{m}$ . The degree of concavity on the surface of thin walls of different thicknesses in SLM forming varies. With the increase of thin wall thickness, the height difference between the edge of thin wall and the center also increases. Especially at the thin wall edge, the height of the thin wall shape decreases sharply. The sharp decrease in the height of the thin wall edge caused by the edge scanning strategy, and the edge warping and thermal shrinkage caused by residual stresses combined to cause the concave phenomenon in the center of the thin wall.

**KEY WORDS:** selective laser melting; titanium alloy Ti-6Al-4V; thin-walled structure; edge slagging; central depression; laser power; scanning speed

近年来,基于选区激光熔化(SLM)在原材料及其形状等方面应用的灵活性,它在医疗<sup>[1]</sup>、航空航天<sup>[2-3]</sup>和汽车零部件制造等领域<sup>[4]</sup>受到格外关注。针对传统加工方法难加工的结构,如蜂窝晶格结构<sup>[5]</sup>、负泊松比结构<sup>[6]</sup>及具有复杂内部的结构<sup>[7]</sup>可通过该技术制备。目前,SLM制造要求轻量化,以及具有可设计的尺寸特征和精度。尽管该技术在材料性能和力学性能方面取得了进步<sup>[8]</sup>,但针对精细复杂的结构仍存在一定挑战。复杂结构的设计不可避免会涉及薄壁结构,SLM成形薄壁存在尺寸误差大等问题,这成为打印高质量构件的障碍。

薄壁结构的打印成形主要依赖打印工艺参数和材料参数<sup>[9]</sup>,由于其几何特征较小,成形质量往往取决于单熔道熔池特性。采用不同激光参数组合和扫描策略,在很大程度上会影响SLM过程中熔池的几何尺寸和形状。如果熔池渗透深度与熔体高度之比过低,则将导致试件与基板的结合性较差,相反则可能引起熔体的过度熔化,导致薄壁结构坍塌。Miranda等<sup>[10]</sup>通过曲面响应法研究了激光参数对钛合金Ti-6Al-4V薄壁管厚度的影响,结果表明,微尺寸零件的精度与SLM工艺参数存在很大的关联性。同时Lu等<sup>[11]</sup>研究发现,在低激光功率与低扫描速度匹配时,成形薄壁较窄,而在高激光功率和高扫描速度时成形薄壁较宽,熔池的穿透深度与激光功率、扫描速

度均存在函数关系,这一结论解释了在等能量密度条件下采用不同激光参数组合对熔池尺寸和形状的影响也不同<sup>[12]</sup>。另外,Tan等<sup>[13]</sup>研究发现,材料参数的影响也不能忽略,针对SLM原材料,精细的粉末具有较高的分辨率,粉末颗粒度分布均匀,同时结合较小的打印层厚度,可以防止颗粒偏析的出现。不可忽略的是,薄壁特征尺寸较小引起的热量过度流失,导致粉末出现未完全熔化的现象,也会造成内部出现气孔、表面粗糙度大、开裂等缺陷<sup>[14-15]</sup>。针对此问题,Lu等<sup>[11]</sup>也在其研究中提出,可以通过适当调整工艺参数组合来预测及避免。

上述研究大多评估了SLM工艺参数中激光功率和扫描速度分别对薄壁结构的影响机理,并未深入讨论两因素之间的耦合关系。同时,针对挂渣现象对薄壁精度的影响及薄壁中心出现凹陷现象的研究较少。挂渣现象直接影响薄壁的成形尺寸精度,使薄壁的成形厚度偏大,严重影响了SLM成形标准件之间的配合精度。特别是当设计的薄壁厚度小于激光光斑直径时,受到光斑直径的约束,成形薄壁厚度无法达到设计尺寸<sup>[16]</sup>。同时,受到散热不均匀的影响,薄壁挂渣厚度也不均匀,最终导致成形薄壁的厚度不一,从而影响其综合力学性能。薄壁中心凹陷的出现使得薄壁出现边缘高、中间低的现象,不仅对薄壁上表面的粗糙度及平面度有较大影响,而且随着薄壁高度的增

加, 打印过程中残余应力的不均匀分布容易加剧薄壁的翘曲现象。薄壁中心凹陷现象的产生与扫描策略、残余应力的分布及激光扫描特点等有较大关系, 但很少有学者针对该现象进行解释。事实上, 有些学者针对 SLM 薄壁零件建立了相关模型<sup>[17-18]</sup>, 但研究所用的材料不一, 针对钛合金材料的研究文献更为稀少。

本文旨在研究 SLM 成形 Ti-6Al-4V 薄壁结构的能力, 通过设计具有厚度变量的结构, 采用全因子试验方法探究激光功率、扫描速度、壁厚对 SLM 成形薄壁边缘挂渣的影响规律, 以及作用机理。同时, 考察激光功率与扫描速度耦合作用下的激光能量密度对薄壁精度的影响, 最后探究薄壁中心凹陷现象的主要形成原因。通过以上数据来评估影响测量目标的主要因素及这些因素之间的耦合机制, 为薄壁结构的成形提供参考。

1 试验

1.1 设备和材料

使用金属 3D 打印机(AM400, 英国伦敦 Renishaw plc) 作为 SLM 成形设备, 最大功率为 400 W, 激光波长为 1 075 nm。在连续脉冲激光模式下, 激光束直径为 70 μm, 成型零件的最大尺寸为 250 mm×250 mm×300 mm, 实际打印室的环境如图 1 所示。成形室提供了一个封闭环境, 充满氩气, 且氧的质量浓度保持在 285.8 mg/m<sup>3</sup> 以下。使用基恩士 VK-X250K 形状测量激光显微仪对 SLM 成形试件的表面形貌及精度进行采集。

SLM 增材制造试验选用 Ti-6Al-4V 钛合金粉末, 该粉末的密度小、质量轻, 具有较好的力学性能和耐腐蚀性, 适用于机械制造和航空航天领域。该金属粉末所含的元素及其质量分数如表 1 所示。在振实情况下, 钛合金粉末的密度为 2.77 g/cm<sup>3</sup>。在松装情况下, 钛合金粉末的密度为 2.43 g/cm<sup>3</sup>。将粉末的颗粒度控制在 15~53 μm 之间, 粉末的形貌如图 2 所示。

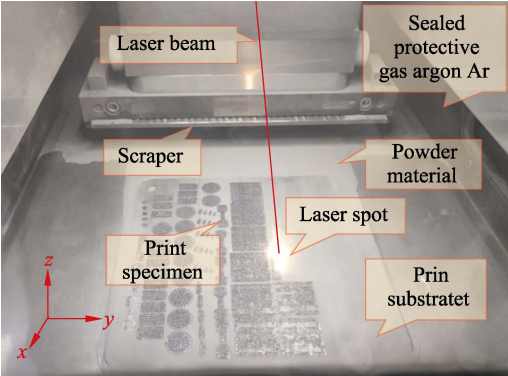


图 1 实际打印室环境  
Fig.1 Actual printing room environment

表 1 Ti-6Al-4V 钛合金粉末元素分布  
Tab.1 Element mass fraction distribution of Ti-6Al-4V titanium alloy powder

Element	Ti	Al	V	Fe	C	N	H	O
Mass fraction/%	Balance	5.5-6.5	3.5-4.5	0.25	0.08	0.03	0.012	5 0.13

1.2 方法

此次试验设计特征尺寸为 0.5、1、1.5、2 mm 薄壁结构的试件模型, 综合评价激光功率和扫描速度对试件成形质量的影响。试件的三维模型及 SLM 成形后的实物分别如图 3a、b 所示。

为了获得质量更优的试件, 采用 Z 形单道扫描模式, 相邻打印层之间的转角为 67°, 同时设置铺粉层厚度为 50 μm, 扫描间距为 0.1 mm<sup>[19]</sup>, SLM 成形示意图如图 3c 所示。为了避免打印过程中发生刮刀碰撞, 导致试件打印失败, 在打印过程中将试件的摆放位置与刮刀呈 15° 夹角, 试件摆放位置与层间转角示意图如图 3d 所示。

在之前的工作中<sup>[20]</sup>, 通过仿真方法分别探究了激光功率和扫描速度对熔池几何参数的影响。为了体现二者的交互影响, 寻求最优值, 用能量密度  $U^{[21]}$  代替

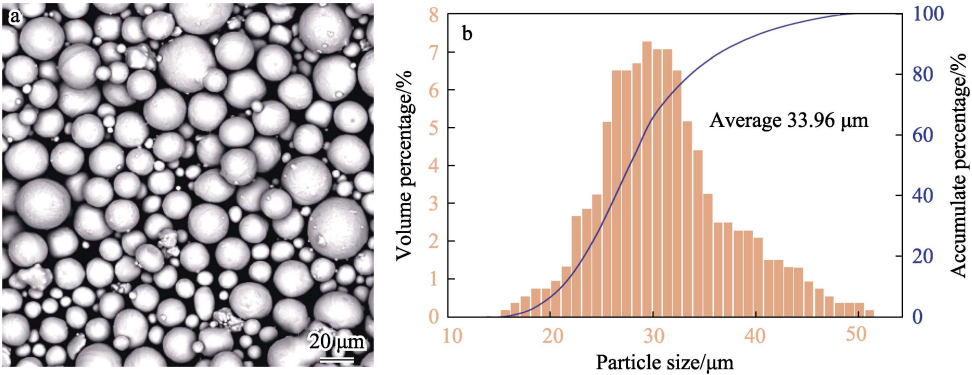


图 2 Ti-6Al-4V 粉末的扫描电子显微镜 (SEM) 图像 (a) 和通过粒度测定法测量的粒度分布 (b)  
Fig.2 SEM image of Ti-6Al-4V powder (a) and particle size distribution measured by particle size measurement (b)

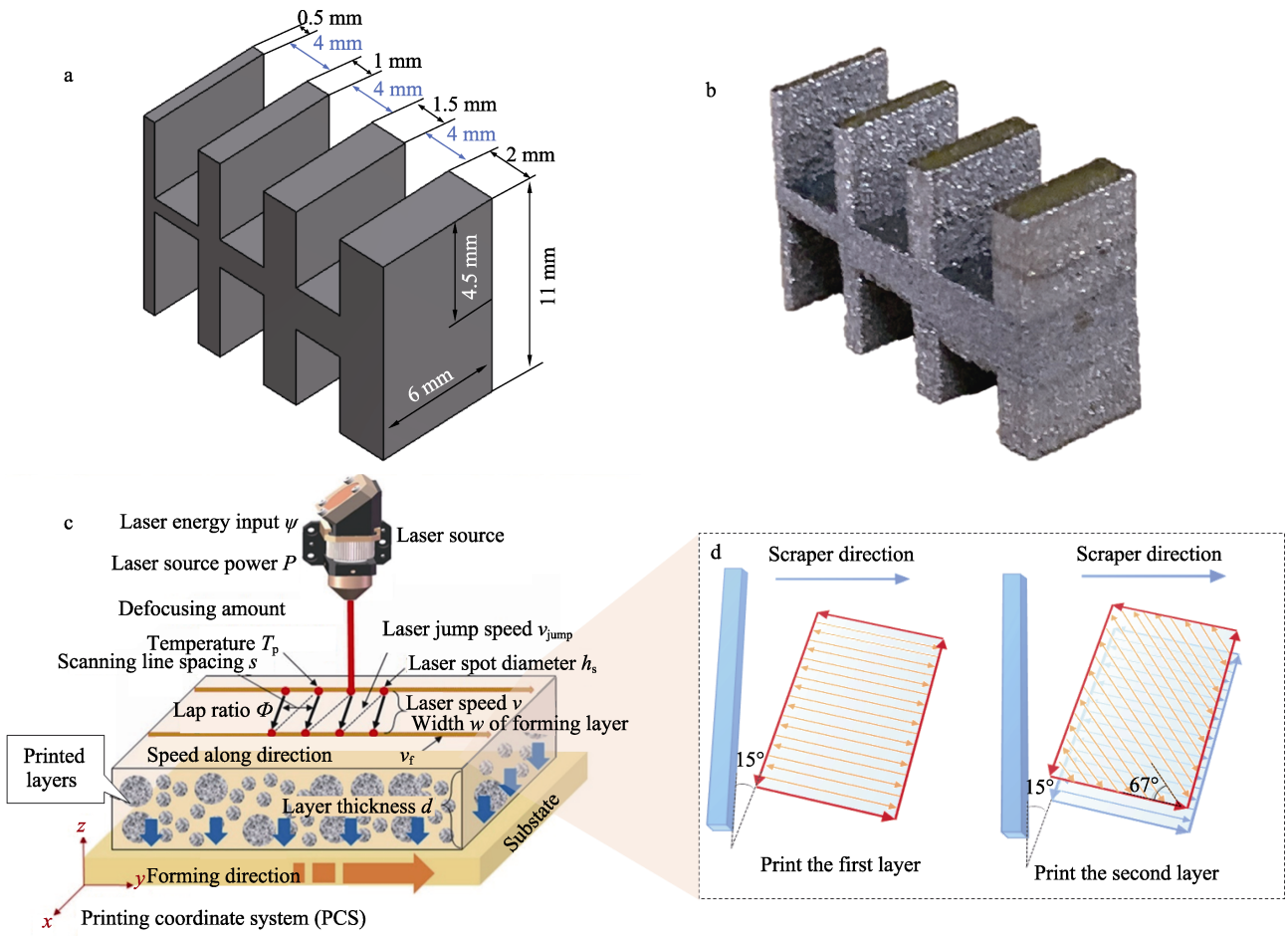


图 3 实验设计三维模型示意图 (a)、SLM 成形试验件实物 (b)、SLM 成形原理 (c)、SLM 打印过程中的扫描策略 (d)

Fig.3 Experimental design of three-dimensional model diagram (a), physical drawing of SLM forming test piece (b), SLM forming principle (c), scanning strategy in SLM printing process (d)

这 2 个参数，以探究能量密度对熔池几何参数的影响。激光能量密度与激光功率和扫描速度的关系如式 (1) 所示，激光能量密度对熔池几何参数的影响如图 4 所示。

$$U = \frac{P}{v \cdot s \cdot d} \tag{1}$$

式中： $P$  为激光功率； $v$  为激光扫描速度； $s$  为扫描间距； $d$  为铺粉层厚度。

如图 4 所示，当铺粉层厚度为 50  $\mu\text{m}$  时，获得理想熔池尺寸（参考熔池深度在 50~75  $\mu\text{m}$  之间，绿色区域内），熔池的长度与宽度之比低于 4（橙色区域内）<sup>[20]</sup>的激光能量密度为 50、55.6、62.5  $\text{J}/\text{mm}^3$ ，对应的激光功率范围为 200~300 W，扫描速度范围为 800~1 000 mm/s。由此确定本次试验变量激光功率和扫描速度的水平。最终确定设计二因素三水平全因子试验，共计 9 组试验。9 个试件一次成型。试验因素水平如表 2 所示。

为了更深入地探讨工艺参数对试件成形质量的影响，采用基恩士激光显微仪对成形试件的表面进行观测分析，对比不同厚度及工艺参数条件下成形薄壁

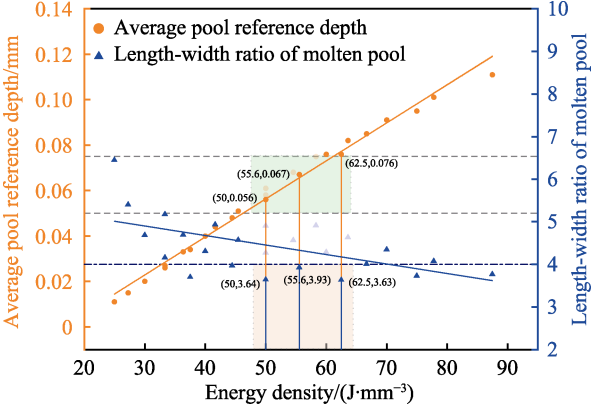


图 4 激光能量密度对熔池几何参数的影响  
Fig.4 Influence of laser energy density on geometric parameters of molten pool

结构质量的差异。从薄壁挂渣、黏粉现象及薄壁凹陷收缩等角度探讨分析设计变量（厚度）与工艺参数变量造成成形件质量出现差异的机理。在研究过程中，观测了不同的试件部位，如图 5 所示。通过对比不同参数下成形试件相同部位的特征，可以更直观地了解各工艺参数对试件的影响及机制。



表 2 SLM 成形工艺参数  
Tab.2 Parameters of SLM forming process

Levels	Factors		
	Laser power/W	Scanning speeds/(mm·s <sup>-1</sup> )	Laser energy density/(J·mm <sup>-3</sup> )
1	200	800	50.00
2	200	900	44.44
3	200	1 000	40.00
4	250	800	62.50
5	250	900	55.56
6	250	1 000	50.00
7	300	800	75.00
8	300	900	66.67
9	300	1 000	60.00

2 结果与分析

2.1 薄壁边缘挂渣现象分析

在不同工艺参数条件下,对成形试件厚度分别为  $T_1=0.5\text{ mm}$ 、 $T_2=1\text{ mm}$ 、 $T_3=1.5\text{ mm}$ 、 $T_4=2\text{ mm}$  的薄壁的表面形貌及边缘挂渣区域进行观测,并对相同长度段内的挂渣厚度进行测量统计,结果如图 6 所示,得到了 4 组不同工艺参数下薄壁厚度对边缘挂渣区域厚度的影响规律。

如图 6 所示,激光功率和扫描速度对薄壁的挂渣厚度具有不可忽视的影响。激光功率越大,扫描速度

越小,挂渣厚度越大。当激光功率为 300 W、扫描速度为 800 mm/s 时,不同壁厚均表现出最大的挂渣厚度。在高功率及低扫描速度条件下,金属粉末在单位时间内吸收的能量较多。除去金属粉末达到熔点所吸收的能量,剩余能量向粉末床扩散是造成大面积挂渣的主要原因,剩余能量越多,则挂渣厚度越厚,所以采用低激光功率、高扫描速度有助于减小挂渣厚度。

为了更直观地分析不同参数对薄壁挂渣区域厚度的影响,采用基恩士对 3 组工艺参数下成形厚度为  $T_1$ — $T_4$  的薄壁上表面的微观形貌进行观察(黑白色背景图为激光图,彩色背景图为高度图),结果如图 7 所示。图 7 明确地反映了薄壁宽度对挂渣区域的影响,同时也反映了激光功率和扫描速度对挂渣区域厚度的影响。如图 7a、b 所示,当激光功率不变时,虽然在上述分析中发现扫描速度为 800、1 000 mm/s 时形成的薄壁挂渣区域厚度更小,但从薄壁表面质量角度分析,较大的扫描速度引起的球化及飞溅缺陷较多。在扫描速度过高的条件下,成形的液态金属在表面张力作用下急剧收缩,容易出现球化及熔道不连续等缺陷<sup>[21-22]</sup>。当扫描速度不变时,随着激光功率的增大,不同壁厚的边缘均呈现挂渣区域变大的趋势,如图 7a、c 所示。为了比较激光功率和扫描速度对挂渣的影响,采集了不同参数下成形厚度  $T_1=0.5\text{ mm}$  薄壁的挂渣厚度,如图 8 所示。图 8 更明确地表明了上述现象,同时可以看出,相较于扫描速度引起的挂渣及黏粉现象,激光功率的影响更大些。

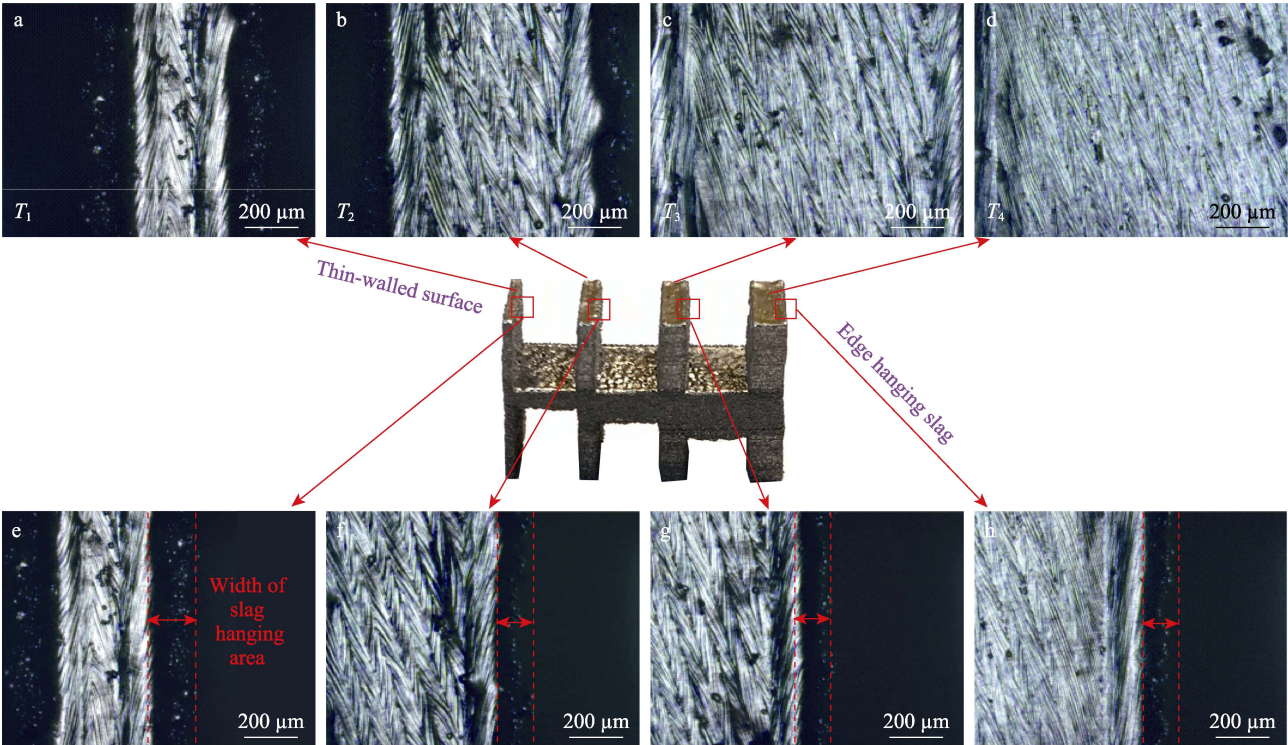


图 5 不同薄壁厚度 ( $T_1$ — $T_4$ ) 的表面形貌 (a~d)、薄壁边缘挂渣现象 (e~h)  
Fig.5 Surface morphology of different thin-walled thicknesses  $T_1$ — $T_4$  (a-d), thin-walled edge slag phenomenon (e-h)



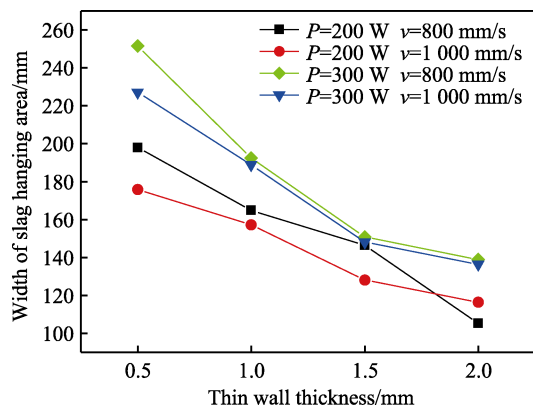


图 6 薄壁厚度对边缘挂渣区域厚度的影响  
Fig.6 Influence of thin wall thickness on thickness of edge slag area

过大的激光功率会造成熔道误差较大。在扫描成形过程中,激光沿着预定的扫描路线成形熔道,在该过程中存在一定误差,使得试件的实际成形尺寸大于理论成形尺寸,二者的误差为激光光斑与金属粉末作用产生的熔池宽度,如图 9 所示。随着激光功率的增大,单位时间内金属粉末受到的能量增大,同时成形熔池尺寸也随之增大,最终造成扫描路径宽度误差 ( $\alpha/2$ ) 不断增大。这种结果不仅使薄壁的总厚度增大了 1 个熔池宽度,造成尺寸误差,而且导致扩散传导的剩余热量增多。此时,薄壁边缘存在更大范围的金属粉末在热传递作用下熔化,并在薄壁侧表面形成挂渣。当热量传递到一定范围且不足以完全熔化金属粉末时,半熔化的金属粉末形成了黏粉现象。

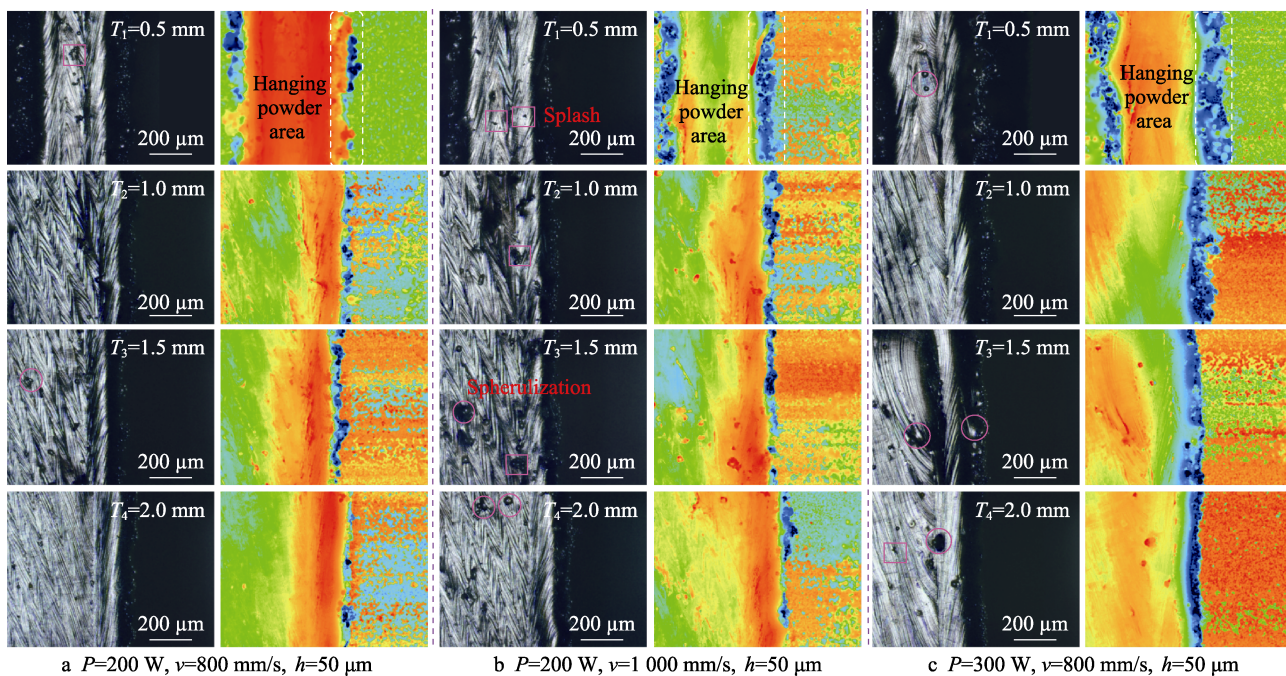


图 7 不同薄壁厚度 ( $T_1-T_4$ ) 对薄壁边缘挂渣黏粉量的影响  
Fig.7 Effect of different thin wall thickness ( $T_1-T_4$ ) on the amount of slag powder on the edge of thin wall

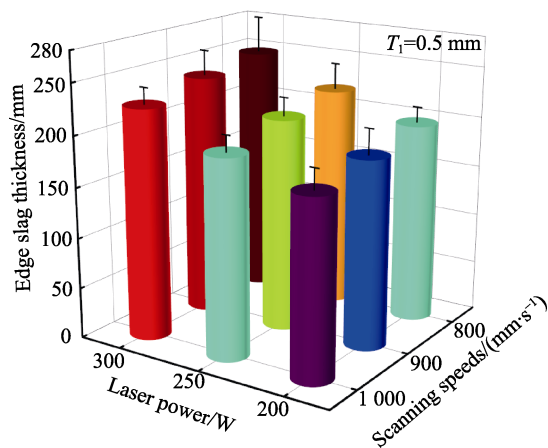


图 8 激光功率和扫描速度对薄壁挂渣厚度 ( $T_1=0.5$  mm) 的影响  
Fig.8 Influence of laser power and scanning speed on thickness of thin-walled slag with  $T_1=0.5$  mm

图 6 表明,在相同工艺参数条件下,随着薄壁厚度的增加,挂渣区域越来越小。这种现象与打印过程中的热量传递具有密切联系。在打印过程中,热量的传递一部分用来熔化金属粉末成形试件,剩余部分则通过热传递方式向周围未熔化金属粉末及打印室传播扩散<sup>[23]</sup>。其中,通过已凝固的金属层进行热传递也是热量传播的主要途径。热量通过已凝固层向下传导,最终传递至基板进而消散。当薄壁厚度较小时,已凝固成形薄壁作为向基板传热的载体的体积较小。当薄壁成形至一定高度时,热量向基板传递的凝固载体不仅体积小,而且作用距离长<sup>[24-25]</sup>。剩余的热量只有小部分经过凝固体传递到基板而消散,大部分热量通过向周围未熔化金属粉末传导,导致完成热传递的范围随之增大。随着能量的衰减,薄壁周围达到熔点的未熔化金属粉末的范围增大,从而增大半熔化颗粒的数量及挂渣区域。增大壁厚,向基板传热的载体

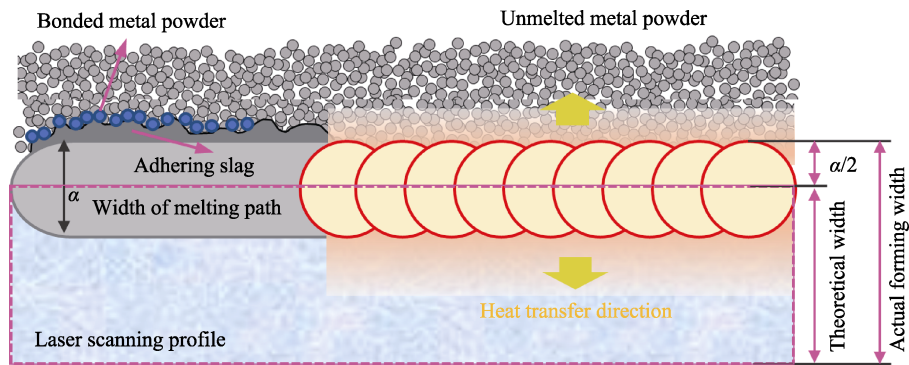


图 9 薄壁边缘挂渣示意图  
Fig.9 Diagram of thin-walled edge slag

体积增大,大部分热量可以传递到基板,更少热量向薄壁两侧粉末床传递,因此形成的挂渣面积相对较小。可见,剩余能量的扩散将导致厚度较小的薄壁结构出现严重的尺寸误差问题。图 6 表明,当薄壁厚度为 2 mm 时,边缘挂渣厚度达到最小值。

## 2.2 能量密度对薄壁尺寸精度的影响

激光功率和扫描速度通过式(1)转化为激光能量密度,激光能量密度对  $T_1=0.5$  mm 薄壁成形尺寸误差的影响如图 10 所示。随着能量密度的增大,成形薄壁的尺寸误差随之增大,且二者具有三次非线性关系。当能量密度为  $44.44 \text{ J/mm}^3$  时 ( $P=200 \text{ W}$ ,  $v=900 \text{ mm/s}$ ),薄壁获得最小尺寸误差 ( $29.37 \mu\text{m}$ ),同时获得最小壁厚 ( $529.37 \mu\text{m}$ )。当激光功率为 300 W 时,对应的能量密度 ( $60$ 、 $66.67$ 、 $75 \text{ J/mm}^3$ ) 均存在较大的尺寸误差。较大激光能量密度的输入,一方面容易导致熔融的金属溶液在反冲压力下飞溅及蒸发,从而降低薄壁上表面的质量;另一方面需要消散的剩余能量过多,导致在能量消散过程中扩大了金属粉末的熔融范围,出现了较大的尺寸误差。

值得注意的是,当激光能量密度相同时,不同的工艺参数也会引起尺寸误差。如图 10 所示,当激光

能量密度为  $50 \text{ J/mm}^3$  时,虽然在  $P=250 \text{ W}$ ,  $v=1000 \text{ mm/s}$  时具有较小的薄壁尺寸误差,但相较于  $P=200 \text{ W}$ ,  $v=800 \text{ mm/s}$  条件下,高扫描速度引起的球化现象较为严重,表面缺陷较多。可见,在低激光功率下,对应的低能量密度可以获得误差较小的薄壁结构。同时,为了避免薄壁上表面出现过多的缺陷,应选择合理的扫描速度。

## 2.3 薄壁中心凹陷现象分析

在此次研究过程中发现,沿着薄壁宽度方向均存在边缘高、中间低的中心凹陷现象。之前的研究<sup>[26]</sup>曾对试件边缘凸起现象进行了研究,在熔道起始和末端位置,脉冲激光存在速度的提升和降低,吸能的不同解释了边缘凸起现象,但并未对其他影响因素进行研究。由此,这里将对形成该现象的其他部分因素展开分析。

如图 11a 所示,不同厚度薄壁上表面的凹陷程度也不同。随着薄壁厚度的增大,薄壁边缘与中心的高度差随之增大。为了更明确地阐明上述现象,使用基恩士采集了不同厚度薄壁上表面的轮廓数据,如图 11b 所示。随着薄壁厚度的增大,轮廓跨度随之增大。特别是在薄壁边缘处,薄壁形貌高度急剧下降。将造成上述现象的原因分为 2 个部分进行讨论,一部分为薄壁边缘高度急剧下降的区域(如图 11a 中凹陷区域 A 所示);另一部分为薄壁中心高度下降平缓的区域(凹陷区域 B)。

薄壁边缘区域 A 的高度急剧下降的原因主要与打印过程中的边缘扫描策略有关。此次试验采用前后勾边扫描策略,如图 12 所示。在成形每层时,激光器先沿着该打印层轮廓扫描 1 次(前勾边),然后在轮廓内进行 Z 形扫描,最后再进行一次轮廓扫描(后勾边)。

$T_2=1 \text{ mm}$  薄壁的上表面形貌如图 13 所示,可以清晰辨别出熔道的轨迹。在薄壁中间的熔道方向与薄壁长度方向呈统一夹角排布,这与层间转角  $67^\circ$  的扫描策略有关。位于薄壁边缘的熔道方向受到勾边扫描策略的影响,平行于薄壁长度,并且在该熔道与粉末

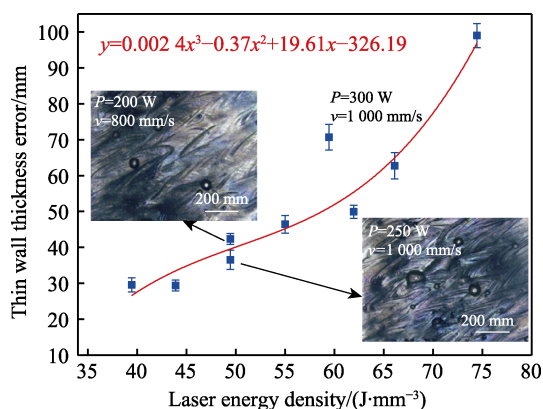


图 10 激光能量密度对薄壁尺寸误差的影响  
Fig.10 Influence of laser energy density on size error of thin wall



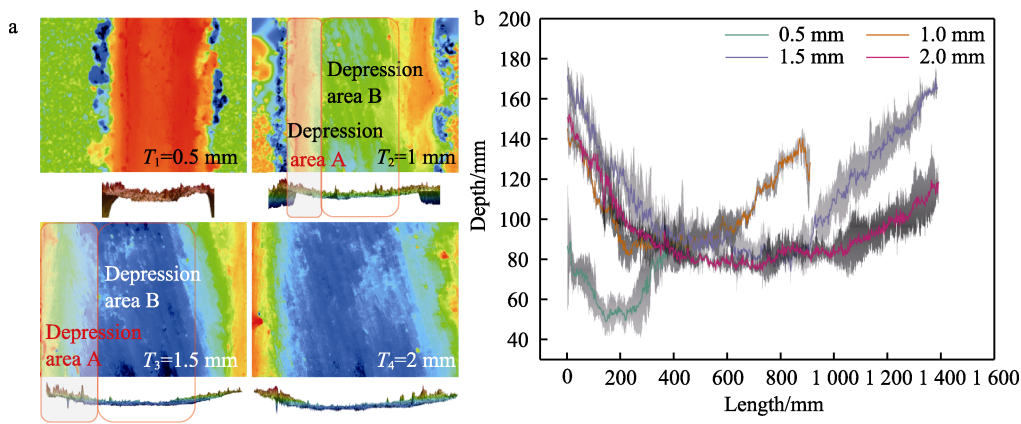


图 11 在  $P=200\text{ W}$ 、 $v=800\text{ mm/s}$  条件下成形试件不同壁厚的高度图 (a) 及截面轮廓 (b)  
Fig.11 Height diagram (a) and cross-section profile data (b) of different wall thicknesses of the formed specimens under the condition of  $P=200\text{ W}$ ,  $v=800\text{ mm/s}$

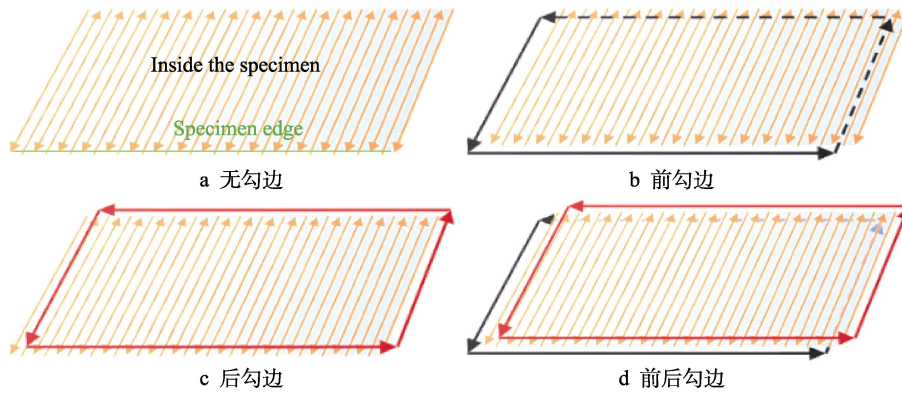


图 12 勾边扫描策略示意图  
Fig.12 Edge scanning strategy diagram: a) no edge; b) front edge; c) back edge; d) front and back edge

床接触的一侧出现大量挂渣现象。值得注意的是，位于边缘的熔道具有较长的熔池尾流轨迹，而且蔓延区域正是高度急剧下降的区域，如图 13 中黄色区域所示。后沟边扫描策略相当于在薄壁边缘进行二次扫描，即边缘轨迹重熔。通过重熔处理一方面消除了部分边缘球化及挂渣现象，但这部分在激光能量的作用下重新融入熔池，增大了熔池的体积。更大、更宽的熔池

降低了黏度，增大了液态金属的流动性（润湿性）<sup>[27-28]</sup>。在这种现象的层层积累下，薄壁边缘高于薄壁中心区域，在一定高度差产生的势能条件下，具有高流动性的溶液在高速激光作用下形成了长尾流，直至蔓延到高度相对平坦区域。可见，前后勾边的边缘扫描策略是导致凹陷区域 A 急剧下降的主要原因（图 11a）。

形成薄壁中心高度下降平缓的凹陷区域 B 的原因与残余应力引起的翘曲及热收缩变形有关<sup>[29]</sup>。为了说明残余应力对薄壁结构变形的影响，采用热结构模型对 SLM 成形薄壁结构的残余应力和变形进行分析。模型建立过程采用基于连续体假设的热传导模型，主要面向大尺寸成形件的大尺度问题模拟及残余应力与变形的分析<sup>[30]</sup>。在此过程中，控制方程可以表示为式（2）

$$\frac{\partial(ph)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{k}{c} \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial(p\Delta H)}{\partial t} - \frac{\partial(\rho u_i \Delta H)}{\partial x_i} + q \quad (2)$$

式中： $\rho$  为材料的密度； $h$  为材料焓值； $t$  为时间； $c$  为比热容； $k$  为热传导率； $q$  为移动热源。

在式（1）中，等式右边第 2 项和第 3 项表示潜热。同时，该模型需要建立粉床的等效密度及等效热传导系数<sup>[31]</sup>（Sih model），分别如式（3）、（4）所示。

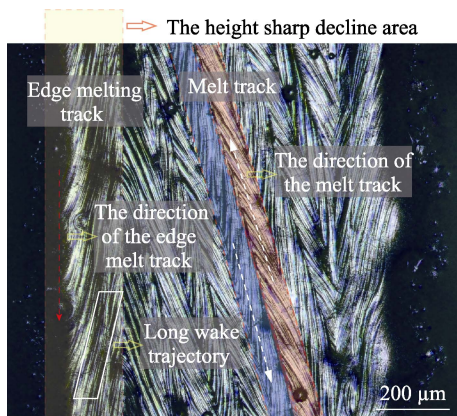


图 13 薄壁边缘熔道轨迹及内部熔道轨迹  
Fig.13 Thin-walled edge melting track and internal melting track



$$\rho_{\text{powder}} = (1 - \varphi) \rho_{\text{solid}} \quad (3)$$

$$\frac{k_e}{k_g} = (1 - \sqrt{1 - \varepsilon}) \left( 1 + \frac{\varepsilon k_R}{k_g} \right) + \sqrt{1 - \varepsilon} \left[ \frac{2}{1 - \frac{k_g}{k_s}} \left( \frac{1}{1 - \frac{k_g}{k_s}} \ln \frac{k_s}{k_g} - 1 \right) + \frac{k_R}{k_g} \right] \quad (4)$$

式中:  $k_e$  为粉床的等效热传导系数;  $k_g$  为粉末间隙中气体的热传导系数;  $k_s$  为粉末母材的热传导系数;  $\varepsilon$  为粉末层的孔隙率;  $k_R$  为由辐射产生的热传导系数。

在热固耦合状态下, 变形及应力分布仿真结果如图 14 所示。由图 14a 可知, 沿着  $y$  方向, 试件的变形量呈现两端大、中间小的趋势。这种趋势使得薄壁两端出现翘曲。翘曲现象的出现与试件的残余应力密切相关<sup>[32]</sup>。试件残余应力的分布结果如图 14c 所示, 沿着  $y$ 、 $x$  方向的残余应力分量分别如图 14b、d 所示, 沿长度方向残余应力的分布呈现中间大、两边小的趋势。如图 14b 所示, 沿  $y$  方向的应力分量对薄壁结构的变形起着主导作用。薄壁中间受拉、两端受压的方式增大了薄壁结构两端的翘曲现象。同时, 在  $x$  方向残余应力的作用下, 薄壁中心区域的高度相对于四周的高度较低, 从而形成凹陷现象。

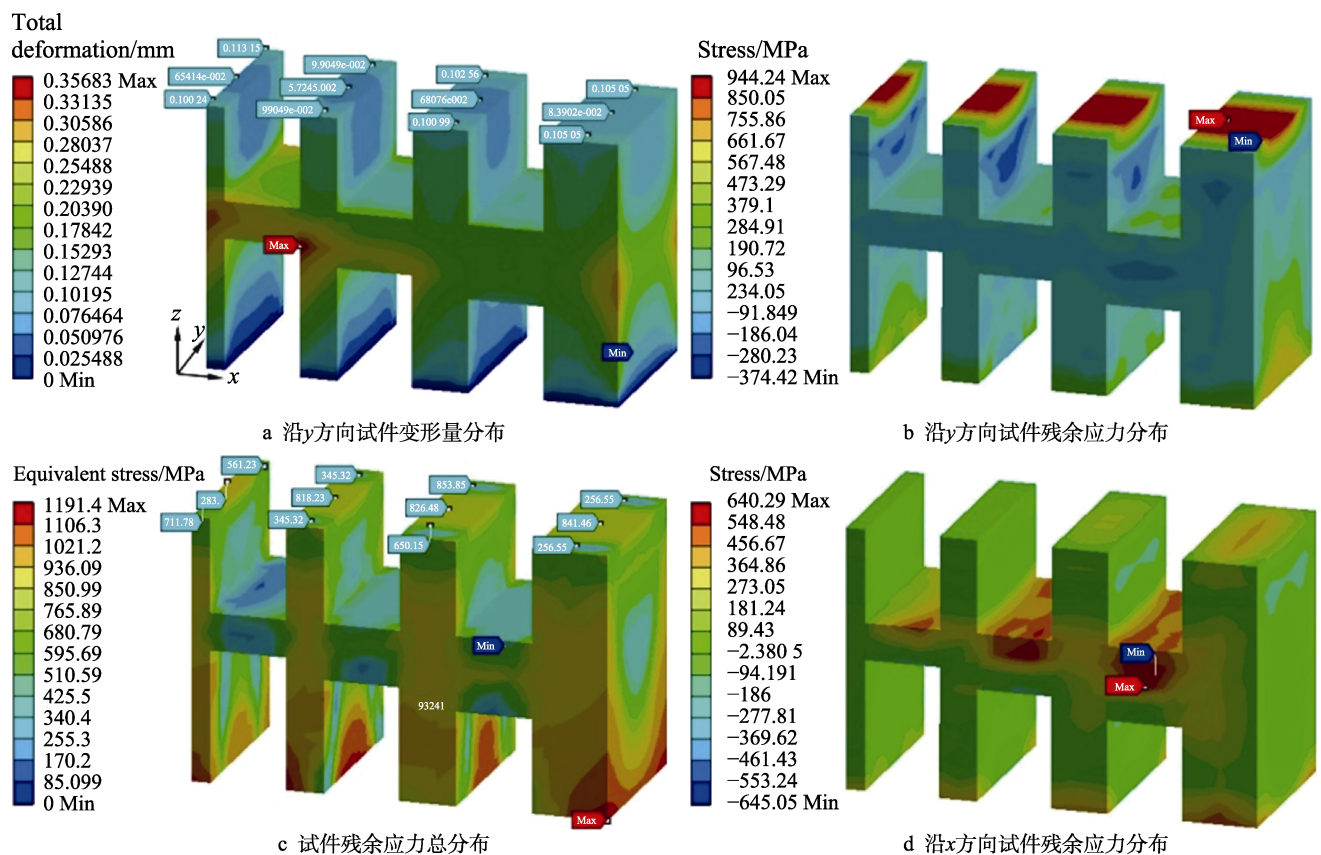


图 14 基于 Ansys 仿真 SLM 成形试件的总变形及应力分布 ( $P=200$  W,  $v=800$  mm/s,  $h=30$   $\mu$ m)

Fig.14 Total deformation and stress distribution of SLM forming specimens simulated based on Ansys

( $P=200$  W,  $v=800$  mm/s,  $h=30$   $\mu$ m): a) deformation distribution of the specimen along the  $y$  direction;

b) residual stress distribution of the specimen along the  $y$  direction; c) total residual stress distribution of the specimen; d) residual stress distribution of the specimen along the  $x$  direction

### 3 结论

1) 薄壁边缘挂渣现象对薄壁尺寸精度的影响较大, 薄壁厚度越小, 这种影响越明显。增大薄壁厚度可以减少边缘挂渣现象, 当薄壁厚度达到 2 mm 时, 边缘挂渣区域厚度较小。采用低激光功率、高扫描速度有助于减小挂渣厚度, 但过高的扫描速度容易造成表面缺陷。相对于扫描速度, 激光功率对薄壁挂渣厚度的影响更大。增大激光功率, 一方面通过影响散热

区域, 增大挂渣区域; 另一方面会造成熔道误差增大, 进而影响薄壁厚度。

2) 激光能量密度越大, 则 SLM 成形薄壁尺寸误差越大, 二者存在三次非线性关系。在工艺参数不同、激光能量密度相同的条件下, 成形的薄壁厚度误差表现出较大差异。采用低激光功率, 对应的低能量密度可以获得误差较小的薄壁。当能量密度为 44.44 J/mm<sup>3</sup> 时, 薄壁获得了最小壁厚 (529.37  $\mu$ m)。此时, 试验获得了成形薄壁结构误差最小的工艺参数:  $P=200$  W,

$v=900\text{ mm/s}$ ,  $h=50\text{ }\mu\text{m}$ 。

3) 在 SLM 成形过程中, 受到扫描策略的影响, 薄壁边缘熔道轨迹方向与内部熔道轨迹方向不一致。勾边扫描策略是造成薄壁边缘高度急剧下降的主要原因。同时, 残余应力的不均匀分布导致薄壁边缘存在热收缩和翘曲现象。在勾边扫描策略和残余应力导致的翘曲变形的共同作用下, 出现了薄壁中心凹陷现象。

#### 参考文献:

- [1] GOGOLEWSKI D, KOZIOR T, ZMARZŁY P, et al. Morphology of Models Manufactured by SLM Technology and the  $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$  Titanium Alloy Designed for Medical Applications[J]. *Materials*, 2021, 14(21): 6249.
- [2] 张海洲, 白洁, 马瑞, 等. 激光选区熔化成形技术在航空航天发动机制造领域的研究与应用现状[J]. *推进技术*, 2023, 44(3): 6-21.  
ZHANG H Z, BAI J, MA R, et al. Current Progress and Application of Selective Laser Melting Technology in Aerospace Engine Manufacturing[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(3): 6-21.
- [3] 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.  
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.
- [4] CECHEL S, MONTESANO L, CORNACCHIA G. Wear and Corrosion Characterization of a Ti-6Al-4V Component for Automotive Applications: Forging Versus Selective Laser Melting Technologies[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2022, 24(8): 2200082.
- [5] BERTOCCO A, IANNITTI G, CARAVIELLO A, et al. Lattice Structures in Stainless Steel 17-4PH Manufactured via Selective Laser Melting (SLM) Process: Dimensional Accuracy, Satellites Formation, Compressive Response and Printing Parameters Optimization[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 120(7): 4935-4949.
- [6] SORRENTINO A, CASTAGNETTI D. Negative Poisson's Ratio Lattice for Designing Vertebral Biomaterials[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2022, 29(27): 6626-6633.
- [7] SUBBAIAN KALIAMOORTHY P, SUBBIAH R, BENSINGH J, et al. Benchmarking the Complex Geometric Profiles, Dimensional Accuracy and Surface Analysis of Printed Parts[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2019, 26(2): 319-329.
- [8] HAN X S, ZHU H H, NIE X J, et al. Investigation on Selective Laser Melting  $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$  Cellular Lattice Strut: Molten Pool Morphology, Surface Roughness and Dimensional Accuracy[J]. *Materials*, 2018, 11(3): 392.
- [9] KIM D K, HWANG J H, KIM E Y, et al. Evaluation of the Stress-Strain Relationship of Constituent Phases in  $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$  Alloy Produced by Selective Laser Melting Using Crystal Plasticity FEM[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 714: 687-697.
- [10] MIRANDA G, FARIA S, BARTOLOMEU F, et al. The Influence of Laser Power and Scan Speed on the Dimensional Accuracy of  $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$  Thin-Walled Parts Manufactured by Selective Laser Melting[J]. *Metals*, 2022, 12(7): 1226.
- [11] LU X, LI M V, YANG H B. Geometric Characteristics of  $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$  Ultrathin Walls Fabricated by Selective Laser Melting with Energy Density and Related Process Parameters[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 115(11): 3773-3790.
- [12] THOMAS M, BAXTER G J, TODD I. Normalised Model-Based Processing Diagrams for Additive Layer Manufacture of Engineering Alloys[J]. *Acta Materialia*, 2016, 108: 26-35.
- [13] TAN J, WONG W L E, DALGARNO K. An Overview of Powder Granulometry on Feedstock and Part Performance in the Selective Laser Melting Process[J]. *Additive Manufacturing*, 2017, 18: 228-255.
- [14] LEARY M. Surface Roughness Optimisation for Selective Laser Melting (SLM)[M]// *Laser Additive Manufacturing*. Amsterdam: Elsevier, 2017: 99-118.
- [15] CALIGNANO F. Design Optimization of Supports for Overhanging Structures in Aluminum and Titanium Alloys by Selective Laser Melting[J]. *Materials & Design*, 2014, 64: 203-213.
- [16] 杨雄文, 杨永强, 刘洋, 等. 激光选区熔化成型典型几何特征尺寸精度研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0303004.  
YANG X W, YANG Y Q, LIU Y, et al. Study on Dimensional Accuracy of Typical Geometric Features Manufactured by Selective Laser Melting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3): 0303004.
- [17] LIU Y, ZHANG J, PANG Z C, et al. Investigation into the Influence of Laser Energy Input on Selective Laser Melted Thin-Walled Parts by Response Surface Method[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 103: 34-45.
- [18] ZHOU Y, FANG Y Z, WANG J W, et al. Process Parameter Optimization on Selective Laser Melting of  $\text{CuSn}_{10}$  Powders Based on Response Surface Methodology[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2262(1): 012002.
- [19] SHI W T, LI J H, LIU Y D, et al. Experimental Study on Mechanism of Influence of Laser Energy Density on Surface Quality of Ti-6Al-4V Alloy in Selective Laser Melting[J]. *Journal of Central South University*, 2022, 29(10): 3447-3462.
- [20] 刘琪, 袁美霞, 华明, 等. 316L 不锈钢选区激光熔化单道熔池几何尺寸演变规律[J]. *精密成形工程*, 2023, 15(1): 128-136.  
LIU Q, YUAN M X, HUA M, et al. Evolution Law of Single Pass Molten Pool Geometry of 316L Stainless

- Steel in Selective Laser Melting[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2023, 15(1): 128-136.
- [21] PRASHANTH K G, SCUDINO S, MAITY T, et al. Is the Energy Density a Reliable Parameter for Materials Synthesis by Selective Laser Melting?[J]. *Materials Research Letters*, 2017, 5(6): 386-390.
- [22] GUSAROV A V, KOVALEV E P. Model of Thermal Conductivity in Powder Beds[J]. *Physical Review B*, 2009, 80(2): 024202.
- [23] ROACH A M, WHITE B C, GARLAND A, et al. Size-Dependent Stochastic Tensile Properties in Additively Manufactured 316L Stainless Steel[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 32: 101090.
- [24] LIU S W, ZHU J J, ZHU H H, et al. Effect of the Track Length and Track Number on the Evolution of the Molten Pool Characteristics of SLMed Al Alloy: Numerical and Experimental Study[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 123: 105924.
- [25] 任忠, 王东东, 白培康, 等. 金属粉末选区激光熔化单道扫描热应力场的数值模拟[J]. *热加工工艺*, 2010, 39(15): 173-175.
- REN Z, WANG D D, BAI P K, et al. Numerical Simulation on Thermal-Stress Distribution of Metal Powders Selective Laser Melting Single-Track Scanning[J]. *Hot Working Technology*, 2010, 39(15): 173-175.
- [26] 袁美霞, 寇廷彧, 刘琪, 等. 脉冲激光 SLM 工艺参数对钛合金成形质量的影响[J]. *表面技术*, 2023, 52(11): 430-438.
- YUAN M X, KOU T Y, LIU Q, et al. Effect of Process Parameters on Forming Quality of Pulsed Laser SLM Titanium Alloy[J]. *Surface Technology*, 2023, 52(11): 430-438.
- [27] ILIN A, LOGVINOV R, KULIKOV A, et al. Computer Aided Optimisation of the Thermal Management during Laser Beam Melting Process[J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 390-399.
- [28] YAO J H, WANG Y, WU G L, et al. Growth Characteristics and Properties of Micro-Arc Oxidation Coating on SLM-Produced TC4 Alloy for Biomedical Applications[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 479: 727-737.
- [29] ZOU S, PANG L, XU C, et al. Effect of Process Parameters on Distortions Based on the Quantitative Model in the SLM Process[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(3): 1567.
- [30] LIAN Y P, GAN Z T, YU C, et al. A Cellular Automaton Finite Volume Method for Microstructure Evolution during Additive Manufacturing[J]. *Materials & Design*, 2019, 169: 107672.
- [31] CHEN J W, HUANG C Y, LIAN Y P, et al. Numerical Simulation on Metallic Additive Manufacturing[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2020, 50(9): 090007.
- [32] KHAIRALLAH S A, ANDERSON A T, RUBENCHIK A, et al. Laser Powder-Bed Fusion Additive Manufacturing: Physics of Complex Melt Flow and Formation Mechanisms of Pores, Spatter, and Denudation Zones[J]. *Acta Materialia*, 2016, 108: 36-45.

(上接第 186 页)

- [23] 梁伟文. 金属薄板激光弯曲成形的工艺参数研究[J]. *现代制造工程*, 2005(9): 64-66.
- LIANG W W. Experimental Study on Laser Forming Technology of Stainless Steel Sheet Metals[J]. *Machinery Manufacturing Engineer*, 2005(9): 64-66.
- [24] 梁伟文, 孙卫和, 王红英. 不锈钢薄板的激光弯曲成形试验研究[J]. *新技术新工艺*, 2005(8): 45-47.
- LIANG W W, SUN W H, WANG H Y. Experimental Study on Laser Forming Technology of Stainless Steel Sheet Metals[J]. *New Technology & New Process*, 2005(8): 45-47.
- [25] MAJI K, PRATIHAR D K, NATH A K. Experimental Investigations, Modeling, and Optimization of Multi-Scan Laser Forming of AISI 304 Stainless Steel Sheet[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 83(9): 1441-1455.
- [26] SUI X M, LU J, HU J, et al. Effect of Specific Energy on Microstructure and Properties of Laser Cladded TiN/Ti<sub>3</sub>AlN-Ti<sub>3</sub>Al Composite Coating[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 131: 106428.
- [27] 王子璇, 胡艳娇, 庞铭. 激光熔凝不锈钢的组织 and 综合性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(19): 1914006.
- WANG Z X, HU Y J, PANG M. Microstructure and Comprehensive Properties of Laser-Melted Stainless Steel[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(19): 1914006.
- [28] 陈宗淇, 王光信, 徐桂英. 胶体与界面化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 34-41.
- CHEN Z Q, WANG G X, XU G Y. *Colloid and Interface Chemistry*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001: 34-41.
- [29] 刘振侠. 激光熔凝和激光熔覆的数学模型及数值分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2003: 5.
- LIU Z X. Modeling and Numerical Simulation on Laser Remelting and Cladding[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003: 5.