

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.07.011

选择性激光烧结初期卷曲控制实验

张文明, 杨来侠, 李素丽, 宗学文

(西安科技大学机械工程学院, 西安 710054)

摘要: 为改善选择性激光烧结工艺中无法消除的初期卷曲, 通过在烧结件底部外围设置围裙来间接控制烧结热影响区的温度场, 降低初期卷曲。在 SLS-300 成形机上完成了卷曲控制实验, 所用工艺参数为: 激光功率 $P=27\text{ W}$, 扫描速度 $v=1\ 800\text{ mm/s}$, 扫描间距 $d=0.39\text{ mm}$, 层厚 $h=0.25\text{ mm}$, 预热温度 $T_0=75^\circ\text{C}$; 围裙参数为: 高度 $a=2.0\text{ mm}$, 底厚 $b=0.5\text{ mm}$, 边距 $c=5.0\text{ mm}$, 水平间隙 $e=0.4\text{ mm}$, 垂直间隙 $f=0.5\text{ mm}$; 建造材料为粒径 $120\text{ }\mu\text{m}$ 的聚苯乙烯粉。接着对围裙法烧结件和原始烧结件进行 3D 扫描, 在 Geomagic 上完成 3D 重构, 并分析其偏差; 最后通过计算重构件侧面轮廓边线的算术平均值, 评估其几何误差。结果表明, 与原始烧结件相比, 围裙法烧结件的 3D 偏差平均降低 47.64%, 2D 偏差平均降低 67.93%。烧结件的轮廓直线度平均提高 73.99%; 底部粉末覆盖面积比增加 12.86%。

关键词: 卷曲; 选择性激光烧结; 热影响区; 聚苯乙烯

中图分类号: TH16 文献标识码: A 文章编号: 1001-3539(2022)07-0065-06

Experiment of Curling Control in Initial Stage of Selective Laser Sintering

Zhang Wenming, Yang Laixia, Li Suli, Zong Xuewen

(College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract : In order to improve the initial curl that cannot be eliminated in the selective laser sintering process, an apron was set at the periphery of the bottom of the sintered part to indirectly control the temperature field in the sintering heat affected zone and reduce the initial curl. The curl control experiment was completed on SLS-300 forming machine. The sintering process parameters were as follows : laser power $P=27\text{ W}$, scanning speed $v=1800\text{ mm/s}$, hatching distance $d=0.39\text{ mm}$, layer thickness $h=0.25\text{ mm}$, preheating temperature $T_0=75^\circ\text{C}$; Apron parameters : height $a=2.0\text{ mm}$, bottom thickness $b=0.5\text{ mm}$, edge distance $c=5.0\text{ mm}$, horizontal clearance $e=0.4\text{ mm}$, vertical clearance $f=0.5\text{ mm}$; The construction material was polystyrene powder with particle size of $120\text{ }\mu\text{m}$. Then, the apron sintered part and the original one were scanned in 3D, the 3D reconstructions were completed on Geomagic, and theirs deviation were analyzed; Finally, the geometric errors were evaluated by calculating the arithmetic mean of the side contours of the reconstructed parts. The results show that compared with the original part, the average 3D deviation of apron sintered part is reduced by 47.64% and the 2D deviation is reduced by an average of 67.93%. The contour straightness of sintered part is increased by 73.99% on average. The surface coverage area of the bottom profile is increased by 12.86%.

Keywords : curling; selective laser sintering; heat affected zone; polystyrene

烧结变形是选择性激光烧结 (SLS) 中的典型现象, 是影响制件精度的主要因素。SLS 加工时, 粉末被瞬时加热, 激光束停留在烧结微元上的时间远小于聚合物凝固所需时间^[1-2]。而且两层烧结间存在一个铺粉过程 (实验中约 18 s), 烧结机内部温度场

在烧结过程中不断变化。在烧结初期, 由于粉末颗粒局部温度与激光焦点处的瞬间温度相差较大 (实验中高达 150°C 以上), 松散的粉末瞬时受热粘性流动^[3-4]而凝聚收缩为固态, 在制件边缘处与粉床形成较大的温度梯度, 产生烧结变形^[5]。烧结热影响

基金项目: 国家 863 计划项目 (2015AA042503-2)

通信作者: 张文明, 博士, 主要研究方向为增材制造

收稿日期: 2022-04-03

引用格式: 张文明, 杨来侠, 李素丽, 等. 选择性激光烧结初期卷曲控制实验 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(7):65-70.

Zhang Wenming, Yang Laixia, Li Suli, et al. Experiment of curling control in initial stage of selective laser sintering [J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(7):65-70.

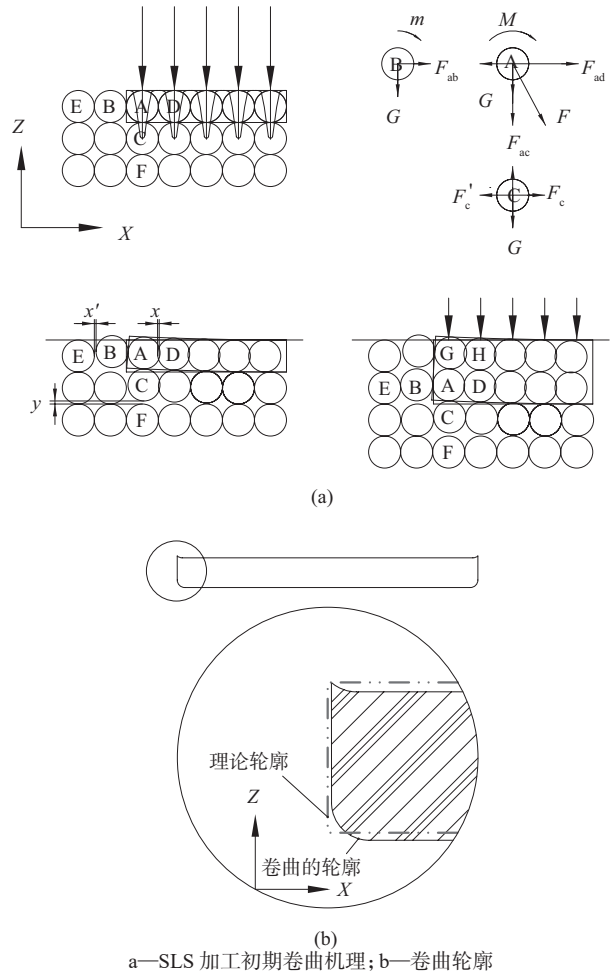
区(HAZ)内的热传递不均匀性,是导致制件烧结变形、残余应力、微观形貌等的核心因素^[6]。HAZ与工艺参数、粉末材料的特征等密切相关^[7]。在选定烧结粉末后,激光能量密度较大时,烧结初期容易发生卷曲、错层等变形行为,严重时将导致加工失败。因而均衡HAZ温度场以控制烧结初期变形,对提高制件的精度具有重要意义。

已有文献研究多从直接控制HAZ温度场的角度,研究烧结整体过程的变形问题^[8]。在理论建模仿真研究上,虽有大量不同角度的建模方法,但还没有统一的模型框架^[6,9]。烧结实验是当前研究SLS工艺的常用手段^[10-13],大量实验中观察到,烧结初期变形对制件的变形影响较大。针对实验所用聚苯乙烯(PS)粉末的导热系数较小的特性,提出一种间接控制HAZ温度场的“围裙法”,来控制SLS烧结初期的卷曲变形。

1 HAZ温度场间接控制方案

1.1 SLS初期卷曲机理

SLS加工过程中,粉末烧结微元的周围环境是不断变化的。SLS初期卷曲机理如图1所示,烧结初期,当PS粉被预热到玻璃化转变温度(T_g)附近(75℃)进行SLS加工时,粉末烧结表面瞬时温度高达225℃。如图1a所示,在烧结的第一层轮廓截面中,激光未工作时,HAZ内烧结微元A的周围B、C、D、E、F等微元温度相同;烧结开始后激光沿A、D微元方向扫描,A、D等微元瞬间加热。此时微元A、B、C的周围受力简图如图1a右上图所示,微元A与左侧B的温差较右侧D的大,A因向D粘性流动收缩产生的作用力 F_{ad} 比AB间的作用力 F_{ab} 大,在 F_{ad} 与颗粒重力 G 的合力 F 作用下形成向右下翻转力矩 M ,同理,B受 F_{ad} 与重力 G 共同作用也形成向右下翻转力矩 m 。而微元C受到的水平向作用力 F_c 、 F'_c 基本平衡。根据圣维南原理^[14],A、D等微元有向右上翘曲的趋势(图1a左下图)。与微元A粘接的微元B、C被抬离原位置而与其周围的微元E、F等形成间隙 x, x', y 。下一层铺粉开始后,这些上翘的微元被压平。第二层再次烧结(图1a右下图)再次向右上翘曲,再次被压平;最终导致边缘的A、D、G、H等微元颗粒松动、脱落,形成烧结初期特有的底部卷曲现象,制件整体看起来好似经过“倒圆”一般(图1b),严重时将导致制件底部出现错层现象。



a—SLS加工初期卷曲机理;b—卷曲轮廓

图1 SLS加工初期卷曲机理示意图

烧结进入稳定期后(实验约4~5次铺粉后),制件与粉床交界处粉末的热交换过程平稳,温度变化均匀,几乎不见卷曲现象;烧结末期,在烧结最后一层时,制件表面和大气接触,形成较大温度梯度,在制件边缘处产生向上、向内轻微的卷曲(图1b)。

这种不同阶段烧结变形不同的变形现象,在烧结能量密度较大时,特别明显。同时,大量烧结实验表明,SLS工作软件中所提供的支撑模型,其热容量太小而不能控制熔融温度场均衡,因此很难通过改进支撑形式来改善底层卷曲现象,有必要研究其它的方法。

针对SLS加工初期卷曲的特点,考虑间接控制局部温度场方法,围裙法作用原理如图2所示。原始烧结件边缘温度场如图2a中I虚线所示,在烧结件的底部周围同时多烧结一圈“围裙”,充当粉床与制件之间的热缓冲区,间接使HAZ温度场更加平滑均衡。烧结时,“围裙”外缘与粉床接触,温差较大(图2a中II),围裙边缘粉末和平常一样卷曲;而

工件和“围裙”间的粉末使工件边缘的 HAZ 温度场得到改善(图 2a 中 I),围裙内部和烧结件边缘 HAZ 温度场保持一定的平衡,从而降低烧结初期的边缘卷曲,提高制件的几何精度。

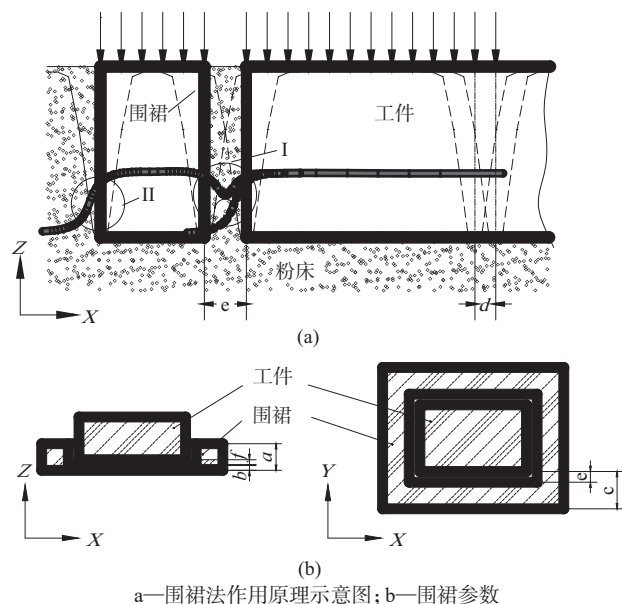


图2 围裙法作用原理示意图

为避免围裙在烧结初期铺粉过程中被推动,进一步在工件底部烧结一薄层裙底(实验中是2层铺粉层厚),并与工件底部也形成一薄层缓冲。最后形成的围裙如图 2b 所示。在合适的工艺参数下,因有水平间隙 e 和竖直间隙 f 的存在,烧结后围裙和制件并未形成稳定的粘接,容易分离,减少了边缘卷曲,从而提高了制件的几何精度。

1.2 烧结实验

SLS 工艺参数与围裙参数数据均来源于前期实验^[10-12],见表 1。SLS 建筑材料为平均粒径 d_{50} 为 $121.3\ \mu\text{m}$ 的 PS 粉(常州荣晟有限公司)。实验中 PS 粉堆积密度 $0.43\ \text{g}/\text{cm}^3$,孔隙率约 56.7%。SLS 设备为陕西恒通智能机器有限公司 SLS-300 型 SLS 快速成型机。采用深圳中沃世纪有限公司 ZSJ3D 型 3D 扫描仪对试样进行 3D 扫描,由 Geomagic 软件进行重构及偏差分析处理。SLS 试样尺寸为 $40\ \text{mm} \times 30\ \text{mm} \times 4\ \text{mm}$,烧结围裙参数如图 2b 所示。

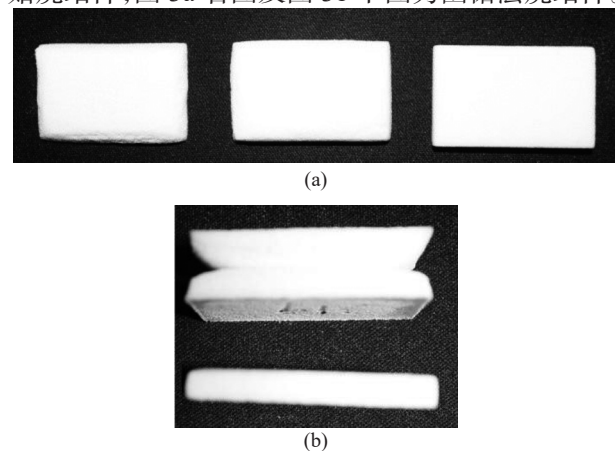
根据图 2a,围裙水平间隙 e 选值需要认真考虑。取值太大时围裙就成了另一个烧结件; e 太小(比如小于扫描间距 d)将失去意义,这里取比 1 倍扫描间距 d 稍大的值。根据初期卷曲发生在烧结早期 4~5 层的特点,可取围裙高度 a 约 4~5 倍层厚 h ,为

了保证围裙内 HAZ 的温度与烧结件间温差不至于太大,同时节约材料,降低烧结时间,围裙边距 c 也需要认真考虑。实验中各工艺参数如表 1 所示。

表 1 SLS 工艺参数

参数	数值	参数	数值
激光功率 P/W	27	围裙高度 a/mm	2.0
扫描速度 $v/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	1800	围裙底厚 b/mm	0.5
扫描间距 d/mm	0.39	围裙边距 c/mm	5.0
扫描层厚 h/mm	0.25	水平间隙 e/mm	0.4
预热温度 $T_0/^\circ\text{C}$	75	竖直间隙 f/mm	0.5

图 3 为按照表 1 参数、图 2b 所示烧结围裙参数的几个试样。图 3a 左图、中图及图 3b 上、中图为原始烧结件,图 3a 右图及图 3b 下图为围裙法烧结件。



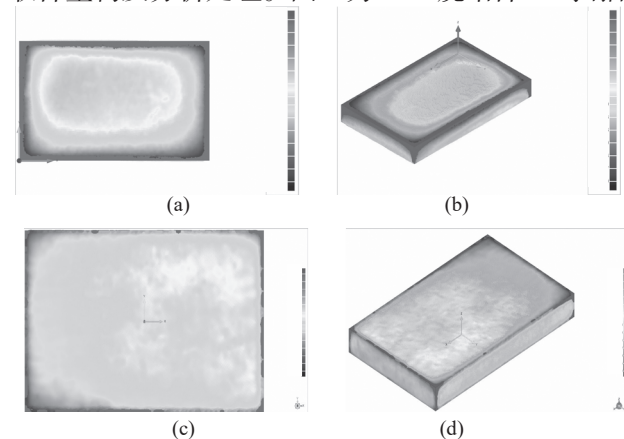
a—烧结件俯视图; b—烧结件侧视图

图3 SLS 烧结试样

2 结果与讨论

2.1 3D 偏差分析

由于 SLS 烧结后的试样表面粘附 PS 粉,用游标卡尺接触测量的结果受测力影响较大。为减少测量误差,对烧结试样进行 3D 扫描,并采用 Geomagic 软件重构及分析处理。图 4 为 SLS 烧结件 3D 扫描



a—原始烧结件底部图; b—原始烧结件轴测图;
c—围裙法烧结件底部图; d—围裙法烧结件轴测图

图4 SLS 烧结件 3D 扫描图

图。其底部边缘的粉末颗粒脱落后,在3D扫描图上表现为深色区域。从图4可直观地看到围裙法烧结件的变形更小。为方便定量说明,使用Geomagic Qualify软件对其进行偏差分析,结果见表2。从表2数据可以看到,围裙法烧结件相对于CAD原始烧结件的3D偏差降低约47.64%,关键截面的2D偏差平均偏差降低67.93%。采用围裙法烧结效果非常明显。

表2 Geomagic Qualify 2013 偏差分析结果

项目	原始烧结件/mm	围裙法烧结件/mm	变化率/%
最大临界值	1.998 0	1.046 1	47.64
3D 最大名义值	0.099 9	0.052 3	47.65
偏差 最小名义值	-0.099 9	-0.052 3	47.65
最小临界值	-1.998 0	-1.046 1	47.64
最大上偏差	0.748 2	0.199 6	73.32
2D 最大下偏差	-1.998 0	-1.046 1	47.64
偏差 平均偏差	0.206 1/-0.349 3	0.057 2/-0.127 1	72.25/63.61
标准偏差	0.414 9	0.129 0	68.91

2.2 轮廓精度分析

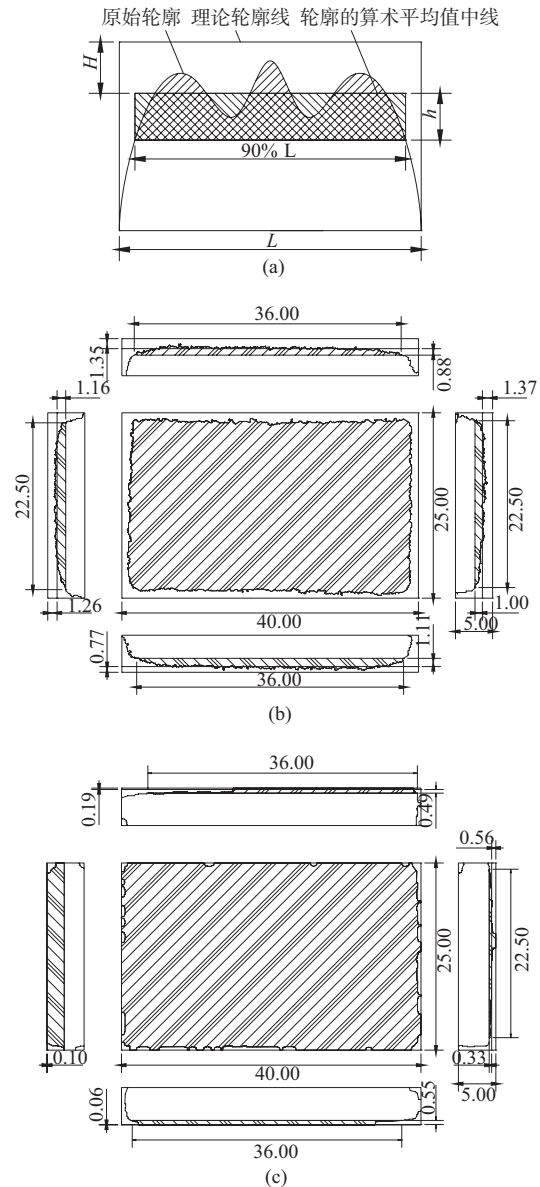
(1) 评价方法。

SLS制件的轮廓较粗糙,不利于用机械加工中的方法进行评价。图4中的深色区域反映了烧结初期卷曲的特点,即初期卷曲发生在温差大的轮廓边缘处。深色区域面积越大,说明粉末脱落越严重,初期卷曲变形越大。因此,通过观察这些深色区的大小可大致评估烧结的变形程度。这里采用算术平均值轮廓来评估侧面轮廓线的直线度误差(图5a)。

轮廓的评定长度采取理论长度的90%。图5a中的 H 为轮廓算术平均中线与理论轮廓线的距离, h 是轮廓算术平均中线与90%理论长度处轮廓线的距离。显然, H 越小制件尺寸越精密; h 越小轮廓越平滑,二者可作为直线型轮廓边线几何误差的评定指标。

(2) 轮廓几何精度误差分析。

采用上述几何误差评估方法,对原始烧结件与围裙法烧结件3D扫描图深色轮廓的侧视图进行统计(图5b、图5c)。经过数据处理,各视图的 H , h 结果见表3。由表3可知,原始烧结件的 H , h 平均值分别为1.19 mm,1.04 mm,围裙法烧结件 H , h 平均值分别为0.23 mm,0.34 mm,分别约是原始烧结件的1/5,1/3,减少率分别为80.67%,67.31%,轮廓直线度平均提高73.99%;另外,通过CAD软件测量,底部粉末覆盖面积比从86.3%增长到97.4%,增加率为12.86%。通过围裙法烧结初期卷曲率明显得到改善,围裙法烧结件比原始烧结件的卷曲更少,



a—轮廓几何误差评估方法示意图;b—原始烧结件;
c—围裙法烧结件

图5 轮廓几何误差评估方法与烧结件各侧视图的算术平均轮廓

表3 样件轮廓分析

视图	原始烧结件		围裙法烧结件		变化率	
	H /mm	h /mm	H /mm	h /mm	H /%	h /%
左视	1.37	1	0.56	0.33	59.12	67
右视	1.26	1.16	0.1	0	92.06	100
上视	1.35	0.88	0.19	0.49	85.93	44.32
底视	0.77	1.11	0.06	0.55	92.21	50.45
平均	1.19	1.04	0.23	0.34	82.33	65.44

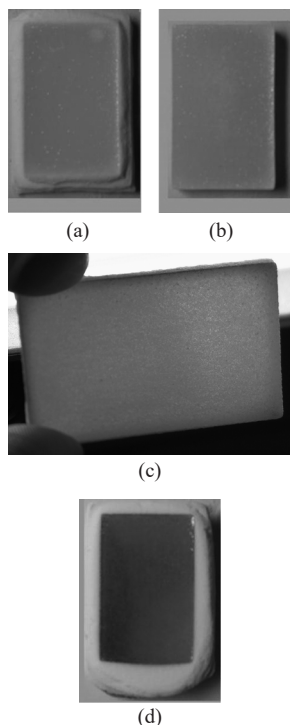
表面更平滑。

(3) 围裙法的有效性讨论。

围裙法核心思想是利用“围裙”提供的热缓冲区,间接均衡烧结初期的制件局部温度场。因而围裙法的功效与烧结工艺参数密切相关。对于PS材

料,实验中经过 4~5 层铺粉烧结后基本进入稳定期;制件尺寸增大时,相对变形误差减小;另外“围裙”需要附加烧结更多的材料,采用围裙法的效果也减小。图 3 中实验所用的能量密度较小 (0.038 J/mm^2),实验表明围裙法效果非常明显;当激光能量密度进一步增大后,热扩散在 Z 向较之于 X, Y 向更大,次级烧结现象^[15-16]更加突出,制件本身和“围裙”熔融为一体,无法清除,围裙法失效(如图 6 所示)。

图 6a 是能量密度为 0.072 J/mm^2 时烧结的样块,制件内部致密,颜色均匀(图 6c),综合性能较好,“围裙”可剥离(图 6b);图 6d 是能量密度为 0.167 J/mm^2 时烧结的样块,实验中可见黑色烟雾出现,PS 粉出现分解,制件内部充分熔融,“围裙”与样件无法剥离,围裙法失效。另外,由于制件较大时,烧结变形造成的相对误差变小,围裙法因为需要烧结更多的材料,综合有效性也有所降低。



a—激光能量密度 0.072 J/mm^2 ,围裙清除前;
b—激光能量密度 0.072 J/mm^2 ,围裙清除后;
c—激光能量密度 0.072 J/mm^2 荧光灯下透视图;
d—激光能量密度 0.167 J/mm^2 围裙无法清除

图 6 相同围裙参数、不同能量密度下的烧结件

3 结论

SLS 加工初期的变形极大地影响制件的几何精度,且无法在后处理过程中被消除。目前的研究均是围绕直接控制 HAZ 温度场的均衡性进行。笔者

根据间接均衡烧结局部温度场的思路,控制选择性激光烧结的初期卷曲现象,采用围裙法进行 PS 粉 SLS 烧结实验,得到如下结论:

(1) SLS 加工初期边缘卷曲变形与 HAZ 温度场及材料特性密切相关,是影响制件质量的重要因素,难以根除。

(2) 采用围裙法,烧结件各项偏差指标均大幅度下降;在试样较薄时,效果尤其明显。与原始烧结件相比,围裙法烧结件的 2D 偏差平均降低 67.93%。烧结件的轮廓直线度平均提高 73.99%;底部粉末覆盖面积比增加 12.86%。烧结初期卷曲得到明显改善,卷曲更少,表面更平滑。此时 SLS 工艺参数为:激光功率 27 W,扫描速度 1800 mm/s,扫描间距 0.39 mm,层厚 0.25 mm,预热温度 75°C ,激光能量密度 0.038 J/mm^2 ;围裙参数为:高度 2.0 mm,底厚 0.5 mm,边距 5.0 mm,水平间隙 0.4 mm,竖直间隙 0.5 mm。

(3) 当激光能量密度增加(例如大于 0.1 J/mm^2)或试样较厚时,因热积累作用,围裙和制件合为一体,失去改善初期卷曲变形的功效。

参考文献

- [1] 陈鹏. 高性能工程塑料的高温激光选区烧结研究[D]. 武汉:华中科技大学,2020.
Chen Peng. Research on high temperature-selective laser sintering of high-performance engineering plastics.[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [2] Yang Li, Tang Shiyang, Fan Zitian, et al. Rapid casting technology based on selective laser sintering[J]. China Foundry, 2021, 18(4):296-306.
- [3] Ristic M M, Milosevic S D. Frenkel's theory of sintering[J]. Science of Sintering, 2006, 38:7-11.
- [4] 闫春泽. 聚合物及其复合粉末的制备与选择性激光烧结成形研究[D]. 武汉:华中科技大学,2009.
Yan Chunze. Preparation of polymer and its composite powders and their selective laser sintering[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [5] 蔡令令,丁浩亮,孟娟,等. 选择性激光烧结翘曲变形模拟[J]. 模具技术, 2021(2):44-50.
Cai Lingling, Ding Haoliang, Meng Juan, et al. Warping simulation of selective laser sintering[J]. Die and Mould Technology, 2021(2):44-50.
- [6] Papazoglou E LL, Karkalos N E, Karmiris-Obratański P, et al. On the modeling and simulation of SLM and SLS for metal and polymer powders: A review[J]. Arch Computat Methods Eng, 2022, 29:941-973.
- [7] Lupone F, Padovano E, Pietrolungo M, et al. Optimization of

- selective laser sintering process conditions using stable sintering region approach[J]. *Express Polymer Letters*, 2021, 15(2):177–192.
- [8] Ha S, Park E & Kim N. Analysis of shape deformation from densification of additive manufacturing parts in selective laser Sintering[J]. *Int J Precis Eng Manuf*, 2020, 21:1 571–1 580.
- [9] Shen F, Zhu W, Zhou K, et al. Modeling the temperature, crystallization, and residual stress for selective laser sintering of polymeric powder[J]. *Acta Mech*, 2021, 232:3 635–3 653.
- [10] 杨来侠, 赵贞慧. PS/CF 复合粉末激光选区烧结工艺研究 [J]. *工程塑料应用*, 2016, 44(5):43–46.
- Yang Laixia, Zhao Zhenhui. Study on process of PS/CF composite powders based on selective laser sintering[J]. *Engineering Plastics Application*, 2016, 44(5):43–46.
- [11] 杨来侠, 陈梦瑶, 赵贞慧. GF/ 碳酸钙复合改性 PS 选择性激光烧结实验 [J]. *工程塑料应用*, 2017, 45(8):44–49.
- Yang Laixia, Chen Mengyao, Zhao Zhenhui. Selective laser sintering experiment of polystyrene modified by vapor deposited CF[J]. *Engineering Plastics Application*, 2017, 45(8):44–49.
- [12] 杨来侠, 陈梦瑶, 赵贞慧. 气相沉积 CF 改性 PS 的选择性激光烧结 [J]. *工程塑料应用*, 2017, 45(9):52–56.
- Yang Laixia, Chen Mengyao, Zhao Zhenhui. Selective laser sintering experiment of polystyrene modified by vapor deposited CF[J]. *Engineering Plastics Application*, 2017, 45(9):52–56.
- [13] Mousa A A. Experimental investigation of curling phenomenon in selective sintering process[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2016, 22(2):405–415.
- [14] Hsueh C H, Lee S, Lin H Y. Analyses of mode I edge delamination by thermal stresses in multilayer systems[J]. *Composites:(Part B)*, 2006, 37:1–9.
- [15] 闫春泽, 史玉升, 杨劲松, 等. 高分子材料 SLS 中次级烧结实验 [J]. *华中科技大学学报*, 2008, 36(5):86–89.
- Yan C Z Shi Y S, Yang J S, et al. Secondary sintering of selective laser sintering polymeric materials[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2008, 36(5):86–89.
- [16] 童强, 薛凯华, 姚山. 基于次级烧结区域调控的 SLS 制件控形控性研究 [J]. *中国激光*, 2018, 45(12):1–8.
- Tong Qiang, Xue Kaihua, Yaoshan. Accuracy and performance controlling of part made by selective laser sintering based on secondary sintering region regulation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12):1–8.
- composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(3):617–622.
- [13] 胡章平. 长玻璃纤维增强聚丙烯复合材料模压成型工艺研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- Hu Zhangping. Study on forming process of long glass fiber reinforce polypropylene composites[D]. Changsha:Hunan University, 2015.
- [14] 刘阔, 吴凤楠, 贾志欣, 等. 玻纤增强 UP 基复合材料大巴空调罩力学性能 [J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(10):115–119.
- Liu Kuo, Wu Fengnan, Jia Zhixin, et al. Mechanical properties of glass fiber reinforced UP matrix composite for bus air conditioning cover[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(10):115–119.
- [15] 吴凤楠, 刘阔, 贾志欣, 李继强, 刘立君, 王少峰, 彭河. SMC 与 PCM 复合材料模压件力学性能 [J]. *工程塑料应用*, 2020, 48(12):118–122.
- Wu Fengnan, Liu Kuo, Jia Zhixin, et al. The mechanical properties of SMC and PCM compression molding parts. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(12):118–122.
- [16] Lisa M, Processing studies in sheet molding compound compression molding [D]. Columbus:The Ohio State University, 2001.
- (上接第 43 页)
- [9] 张娟, 宁莉萍, 杨红军, 等. 玻璃纤维含量对竹粉 / 高密度聚乙烯复合材料性能的影响 [J]. *复合材料学报*, 2016, 33(3):477–485.
- Li Juan, Ning Liping, Yang Hongjun, et al. Effects of glass fiber content on properties of bamboo flour/high density polyethylene composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(3):477–485.
- [10] 李宁, 周进雄. 玻璃纤维增强铝合金层合板低速冲击响应分析 [J]. *应用力学学报*, 2021, 38(3):1 011–1 015.
- Li Ning, Zhou Jinxiong. Low speed impact response analysis of glass fiber reinforced aluminum alloy laminates[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2021, 38(3):1 011–1 015.
- [11] 卢军凯, 王之冰. 连续玻璃纤维增强聚氨酯复合材料的力学性能 [J]. *工程塑料应用*, 2017, 45(3):31–35.
- Lu Junkai, Wang Zhibing. Mechanical properties of continuous glass fiber reinforced polyurethane composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2017, 45(3):31–35.
- [12] 刘小祥, 刘翼, 安珈璇, 等. 连续长玻璃纤维 / 聚氨酯复合材料的制备与力学性能 [J]. *复合材料学报*, 2019, 36(3):617–622.
- Liu Xiaoxiang, Liu Yi, An Jiakuan, et al. Preparation and mechanical properties of continuous long glass fiber/polyurethane