

# 基于响应面法的聚苯乙烯粉末选择性激光烧结成型工艺参数优化

鄢然<sup>1\*</sup>, 李浩<sup>2</sup>, 李军超<sup>2\*\*</sup>, 朱丽<sup>1</sup>

<sup>1</sup>重庆理工大学机械工程学院, 重庆 400054;

<sup>2</sup>重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 310027

**摘要** 以聚苯乙烯粉末为实验材料,以尺寸精度作为评价指标,研究了激光功率、扫描间距、单层厚度、扫描速度及它们的交互作用对选择性激光烧结制件成型精度的影响,通过响应面法建立了工艺参数与尺寸精度之间的数学模型,得出了最优的工艺参数。研究表明,尺寸偏差率随激光功率与扫描速度的增大而减小,随单层厚度的增大先增大后减小,随扫描间距的增大而增大;激光功率和单层厚度及扫描间距和单层厚度的交互作用对尺寸偏差率影响较显著;响应面预测值与实际值最大误差低于 7%。

**关键词** 激光技术; 选择性激光烧结; 响应面法; 尺寸精度; 聚苯乙烯粉末

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0302015

## Process Parameters Optimization of Polystyrene Powder Selective Laser Sintering Based on Response Surface Methodology

Yan Ran<sup>1\*</sup>, Li Hao<sup>2</sup>, Li Junchao<sup>2\*\*</sup>, Zhu Li<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Mechanical college, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

<sup>2</sup>College of Materials science and engineering, Chongqing University, Chongqing 310027, China

**Abstract** Taking polystyrene powder as experimental material and dimensional accuracy as evaluation index, we study the effects of laser power, scanning pitch, layer thickness and scanning speed and their interactions on the forming precision of selective laser sintering parts. The mathematical model between process parameters and dimensional accuracy are achieved and the optimal process parameters are obtained by response surface methodology. The research results show that the dimensional deviation rate decreases with the increase of laser power and scanning speed, increases at first and then decreases with the increase of layer thickness, and increases with the increase of scanning pitch. The interaction between laser power and single layer thickness and the interaction between scanning pitch and layer thickness have a significant effect on the dimensional deviation rate. The maximum error between the predicted value of the response surface method and the actual value is less than 7%.

**Key words** laser technique; selective laser sintering; response surface methodology; dimensional accuracy; polystyrene powder

**OCIS codes** 140.3390; 160.5470

## 1 引 言

选择性激光烧结(SLS)技术是近几年来发展最快且最为成功的一种快速成型技术之一,在小批量、快速制模、精密铸造和医学定制等方面应用广

泛<sup>[1-2]</sup>。材料的多样性是 SLS 工艺的突出优点之一,如聚碳酸酯(PC)、尼龙(PA)等<sup>[3]</sup>。相比于 PC 粉末而言,聚苯乙烯(PS)粉末的烧结温度低,且其烧结变形小,成型性能优良,也是一种适合于选择性激光烧结的材料<sup>[4]</sup>。尽管 SLS 技术发展很快,但实

收稿日期: 2018-11-08; 修回日期: 2018-12-04; 录用日期: 2018-12-21

基金项目: 国家自然科学基金(51775069)、重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN201801118)

\* E-mail: yanran@cqut.edu.cn; \*\* E-mail: ljchust@163.com

际应用中,材料的烧结工艺及相关参数的设定往往依赖于操作人员的经验,缺乏工艺参数的定量表征。一旦烧结工艺参数设置不合理,烧结过程中将会出现制件尺寸精度低、翘曲及力学性能差等问题,甚至会出现加工失败的情况<sup>[5]</sup>。因而,SLS工艺参数优化一直是研究的重点。史玉升等<sup>[6]</sup>将专家系统和神经网络结合起来以优化SLS工艺参数,但该方法需要大量的样本数据支撑;任继文等<sup>[7]</sup>利用正交试验设计法及有限元分析法对SLS工艺参数进行优化;王传洋等<sup>[8]</sup>基于神经网络和遗传算法对选择性激光烧结工艺过程进行优化。以往的研究主要考虑单一工艺参数对成型性能的影响,而较少考虑工艺参数之间的交互作用。

针对上述问题,本文选用PS粉末为研究对象,以尺寸精度作为评价指标,研究激光功率(激光功率百分比)、扫描间距、单层厚度、扫描速度及其交互作用对SLS制件成型精度的影响,进而基于响应面法建立工艺参数与尺寸精度之间的数学模型,并得出优化的工艺参数组合。

## 2 实验设计

### 2.1 试样设计

考虑到加工效率的问题,本研究重点考虑扫描平面(XY平面)上的尺寸精度,同时为体现X向与Y向的差别,将试样设计为60 mm×50 mm×5 mm

(X×Y×Z)的立方体,X方向平行于铺粉辊移动方向。实验仪器为武汉三迪创为科技有限公司生产的HW-S3232选区激光烧结设备,实验材料为荣晟新材料有限公司生产的RSPSP系列PS粉末,粒径为120 μm。

### 2.2 响应面设计

针对PS粉末SLS成型工艺,文献[9-11]等通过优化激光功率和扫描间距等工艺参数来改善制件的翘曲变形和力学性能。综合以往研究成果,选取X、Y方向的尺寸偏差率S作为性能指标。 $S = (L_0 - L_1) / L_0 \times 100\%$ ,其中 $L_0$ 为设计尺寸, $L_1$ 为实际测量尺寸。结合响应面法,以激光功率、扫描间距、单层厚度和扫描速度为影响因素,分析工艺参数及其交互作用对PS粉末SLS成型性能的影响,并进行参数优化。实验因素及水平如表1所示,其中激光器功率为55 W。

采用BBD(Box-Behnken Design)实验设计方法进行实验方案的设计,最终确定了27组实验,其中3组为中心重复实验。详细的实验设计如表2所示。在基底为2 mm、基底温度为110 °C、粉缸预热温度为75 °C、工作缸温度为95 °C保持不变的条件下,基于27组实验设计参数采用HW-S3232设备分别进行加工,所得制件如图1所示。由游标卡尺测量各制件X、Y方向的尺寸5次,取平均值,而后计算得到的对应尺寸偏差率如表2所示。

表1 实验因素及水平

Table 1 Experimental factors and levels

Level	Factor			
	Laser power percentage /%	Scan pitch /mm	Layer thickness /mm	Scan speed /( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )
1	30	0.12	0.15	1800
2	40	0.16	0.20	2000
3	50	0.20	0.25	2200



图1 测试样件

Fig. 1 Tested samples

表 2 实验设计参数与结果

Table 2 Design parameters and results of experiments

No.	Laser power percentage /%	Scan pitch /mm	Layer thickness /mm	Scan speed /( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Error in X /%	Error in Y /%
1	50	0.16	0.2	1800	0.840	0.892
2	50	0.2	0.2	2000	0.733	1.36
3	40	0.12	0.2	2200	0.340	0.608
4	30	0.16	0.2	1800	0.383	1.172
5	40	0.12	0.2	1800	0.913	1.36
6	30	0.16	0.2	2200	0.823	0.976
7	30	0.2	0.2	2000	0.977	1.748
8	40	0.2	0.25	2000	1.217	1.768
9	30	0.16	0.15	2000	0.857	1.528
10	30	0.12	0.2	2000	0.010	0.808
11	40	0.16	0.2	2000	0.473	1.044
12	40	0.2	0.2	2200	0.540	0.8
13	40	0.16	0.2	2000	0.460	1.012
14	50	0.16	0.25	2000	0.903	1.408
15	40	0.16	0.15	2200	0.757	1.024
16	30	0.16	0.25	2000	1.337	1.792
17	40	0.16	0.15	1800	1.270	1.848
18	40	0.12	0.15	2000	0.580	0.924
19	40	0.16	0.25	1800	0.687	1.276
20	40	0.2	0.15	2000	0.617	1.372
21	50	0.16	0.15	2000	0.490	1.036
22	40	0.16	0.2	2000	0.737	1.164
23	50	0.12	0.2	2000	0.300	0.924
24	40	0.12	0.25	2000	0.887	1.224
25	50	0.16	0.2	2200	0.773	0.648
26	40	0.16	0.25	2200	0.690	0.872
27	40	0.2	0.2	1800	0.597	1.136

由表 2 可知, Y 方向的尺寸偏差率大于 X 方向的尺寸偏差率, 因而以 Y 方向尺寸偏差率为目标值, 对模型进行二次方程方差分析, 并将一些影响不大的交互项删除, 结果如表 3 所示, 其中 Y 代表非常显著, N 代表不显著, 未标明的是介于两者之间, A 为激光功率, B 为扫描间距, C 为层厚, D 为扫描速度, AB 表示激光功率和扫描间距共同作用, AC、BC、BD、CD 含义同上。P 和 F 是用来表征模型与方程拟合程度的计算结果因子。通常当 P 小于 0.05 时, 该项因子对目标函数的影响显著。失拟项表示回归方程未能拟合的部分及未考虑到的因素, 失拟项 P 越大, 方程拟合越好。本模型 P 为 0.0028, 远小于 0.05, 失拟项 P 则大于 0.1, 表示模型显著及方程拟合良好。R<sup>2</sup> 为多元相关系数, 模型 R<sup>2</sup> 与调整 R<sup>2</sup> 均大于 0.5, 表明模型精确, 回归关系

显著。此外, 模型的信噪比 R<sub>SNR</sub> 为 8.562, 大于 4, 满足要求。标准化残差的概率分布如图 2 所示, 散点基本分布在一条直线上, 这表明标准化残差满足正态分布。方程的预测值与实际值之间的差异如图 3 所示, 数据点均匀分布在直线两侧, 进一步证明了模型的有效性。

### 2.3 回归方程

在响应面模型中, P 值小于 0.05 的因素为显著因素, P 值小于 0.01 表示影响非常显著, P 值越小, 因素影响越显著。由表 3 中各因素的 P 值可知, A、B、D、AB、C<sup>2</sup> 为显著因素。各因素影响的主次顺序为 D > C<sup>2</sup> > A > AB > B > D<sup>2</sup> > CD > BD > C > AC > BC。对不同工艺参数组合下的尺寸偏差率进行二次回归拟合, 可得尺寸偏差率的回归方程表达式为

表 3 优化模型的方差分析结果

Table 3 Variance analysis results of optimized model

Source of variance	Sum of square	Degree of freedom	Mean square error	<i>F</i>	<i>P</i>	Significant
Model	2.46	11	0.22	5.09	0.0028	Y
A-Laser power	0.41	1	0.41	9.26	0.0088	
B-Scan pitch	0.20	1	0.20	4.62	0.0495	
C-Layer thickness	0.031	1	0.031	0.70	0.4166	
D-Scan speed	0.63	1	0.63	14.40	0.0020	
AB	0.21	1	0.21	4.88	0.0443	
AC	$2.916 \times 10^{-3}$	1	$2.916 \times 10^{-3}$	0.066	0.8005	
BC	$2.304 \times 10^{-3}$	1	$2.304 \times 10^{-3}$	0.052	0.8222	
BD	0.043	1	0.043	0.98	0.3380	
CD	0.044	1	0.044	1.00	0.3336	
C <sup>2</sup>	0.58	1	0.58	13.22	0.0027	
D <sup>2</sup>	0.080	1	0.080	1.83	0.1975	
Residual	0.62	14	0.044			
Lack of fit	0.60	12	0.050	7.82	0.1188	N
Pure error	0.013	2	$6.421 \times 10^{-3}$			
Total	3.08	25				
<i>R</i> <sup>2</sup>	0.7999	<i>R</i> <sup>2</sup> adjustment	0.6927	<i>R</i> <sub>SNR</sub>	8.562	

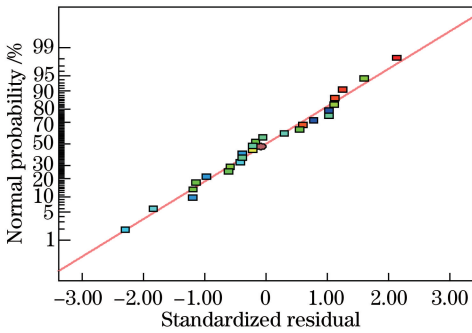


图 2 残差正态概率图

Fig. 2 Residual normal probability map

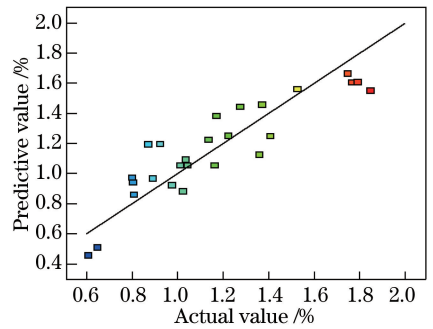


图 3 预测值与实际值的比较

Fig. 3 Comparison between predicted and actual values

$$S = 1.06 - 0.2A + 0.14B + 0.051C - 0.23D - 0.29AB + 0.027AC + 0.024BC + 0.1BD + 0.11CD + 0.32C^2 - 0.12D^2 \quad (1)$$

### 3 结果分析

#### 3.1 单因素影响分析

在选取的水平范围内,各因素对尺寸偏差率 *S* 的影响如图 4 所示。尺寸偏差率随激光功率 *A* 和扫描速度 *D* 的增大而减小,随扫描间距 *B* 的增大而增大;随着单层厚度 *C* 的增大,尺寸偏差率先减小后增大。激光功率较小时,粉末制件烧结不够紧密,后处理时容易导致尺寸偏差加大;激光功率增大时,因能量密度增大,制件强度增加,尺寸偏差减小;扫描间距增大时,粉末烧结程度不足会造成偏差增大;而扫描间距减小时,扫描轨迹重叠区域增大,使得尺寸精度提高;单层厚度过小时,单位面积内的粉末得

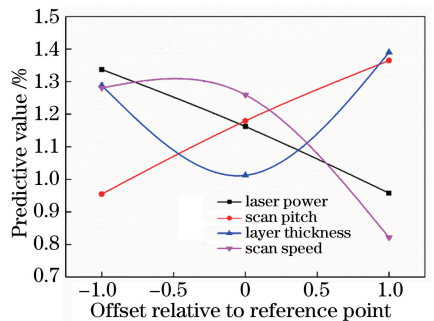


图 4 不同因素对尺寸偏差率的影响

Fig. 4 Influences of different factors on dimensional deviation rate

到的能量过高,收缩量增大会导致尺寸精度下降;单层厚度过大时,能量密度减小导致层间黏结紧密度



不足,使得烧结件尺寸偏差增大;扫描速度过小时,单位输入能量过大导致尺寸偏差增大,而随着扫描速度的增大,单位输入能量过大的问题得到抑制。

### 3.2 工艺参数交互作用分析

图5为尺寸偏差率与激光功率和扫描间距的关系示意图(单层厚度为0.21 mm,扫描速度为2100 mm/s)。曲面较陡,说明激光功率与扫描间距对尺寸偏差率的影响较为显著,且由激光功率变化带来的坡度变化略大于由扫描间距变化带来的坡度

变化,这表明激光功率的影响大于扫描间距,这与前面P值分析结果一致;等高线的形状可反映出交互效应的强弱大小,椭圆形或马鞍形表示两因素之间的交互作用显著,而圆形则与之相反<sup>[12]</sup>。图5(b)等高线图近似马鞍形,说明激光功率与扫描间距之间的交互作用对尺寸偏差率影响较大。且在等高线图中,从左往右尺寸偏差率逐步减小。因此,为获得较高的成型精度,应选取较大的激光功率和较小的扫描间距。

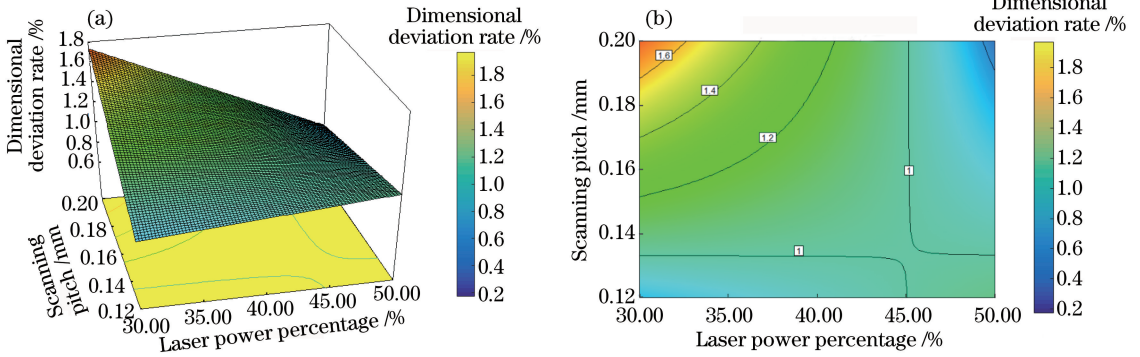


图5 尺寸偏差率与激光功率和扫描间距的关系示意图。(a)响应面图;(b)等高线图  
Fig. 5 Relationship of dimensional deviation rate versus laser power and scanning pitch.

(a) Response surface diagram; (b) contour map

图6为尺寸偏差率与激光功率和单层厚度的关系示意图(扫描间距为0.16 mm,扫描速度为2100 mm/s)。激光功率确定时,尺寸偏差率随层厚的增大先减小后增大,但坡度较为平缓,说明单层厚度对尺寸偏差率的影响较小。当层厚确定时,尺寸

偏差率随激光功率的增大而减小。如图6(b)所示,等高线非椭圆或马鞍形,说明激光能量与层厚对尺寸偏差率的交互作用不显著。从左往右,尺寸偏差率逐渐减小,因此,在实际中要得到较小的尺寸偏差率,层厚应适中,同时选择较大的激光功率。

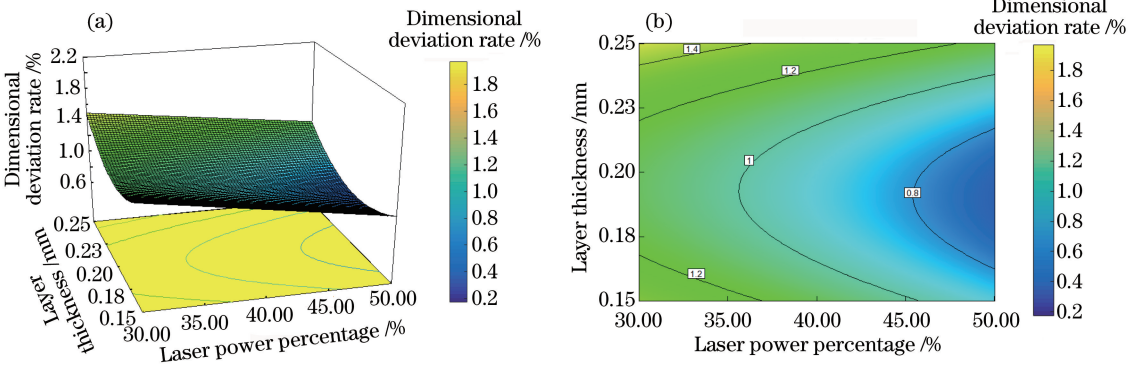


图6 尺寸偏差率与激光功率和单层厚度的关系示意图。(a)响应面图;(b)等高线图  
Fig. 6 Relationship of dimensional deviation rate versus laser power and layer thickness.

(a) Response surface diagram; (b) contour map

图7所示为尺寸偏差率与扫描间距和单层厚度的关系示意图(激光功率为40%,扫描速度为2100 mm/s)。扫描间距一定时,尺寸偏差率随着单层厚度的增加先减小后增大,但曲面的坡度较为平缓,即层厚对尺寸偏差率的影响较小。当单层厚度

一定时,尺寸偏差率随扫描间距的增大而增大。如图7(b)所示,等高线非近似椭圆形或马鞍形,即扫描间距与单层厚度之间的交互作用对尺寸收缩率的影响并不显著,因此实际成型时应选取较小的扫描间距与适中的层厚。

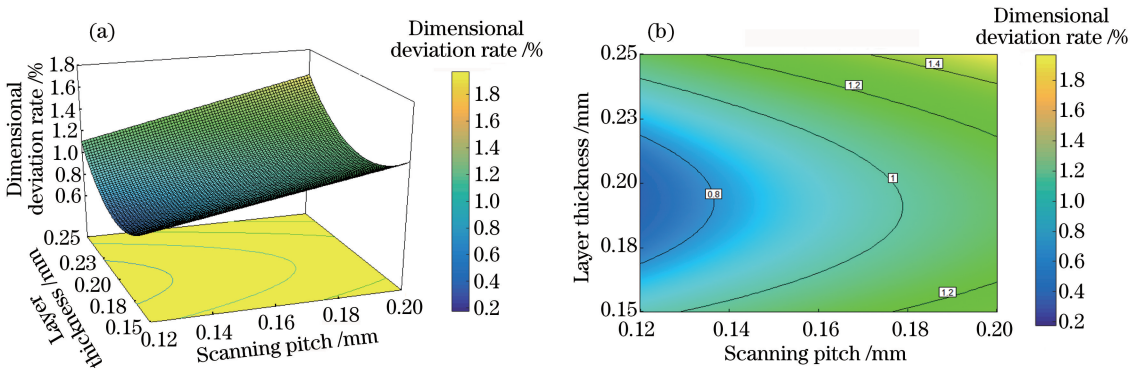


图 7 尺寸偏差率与扫描间距和单层厚度的关系示意图。(a)响应面图;(b)等高线图  
Fig. 7 Relationship of dimensional deviation rate versus scanning pitch and layer thickness.  
(a) Response surface diagram; (b) contour map

图 8 为尺寸偏差率与扫描间距和扫描速度的关系示意图(激光能量 40%,单层厚度为 0.20 mm)。曲面的变化比较陡峭,说明扫描间距与扫描速度交互作用对尺寸偏差率的影响较大。当扫描速度较大时,扫描间距对尺寸偏差率的影响非常显著,表现为尺寸偏差率随扫描间距的增大而增大;当扫描速度较小时,扫描间距对尺寸偏差率的影响较小。当扫描间距较小时,尺寸偏差率随扫描速度的增大而明

显地减小;当扫描间距较大时,扫描速度对尺寸偏差率的影响减小,呈现出随扫描速度的增大缓慢减小的趋势。同时,扫描速度引起的坡度下降大于扫描间距导致的坡度下降程度,说明扫描速度较扫描间距对尺寸偏差率的影响更大。与  $P$  值的分析结果一致。非椭圆状或马鞍状的等高线分布表明,扫描间距与扫描速度的交互作用对尺寸偏差率的影响不显著,应采用较小的扫描间距与大的扫描速度。

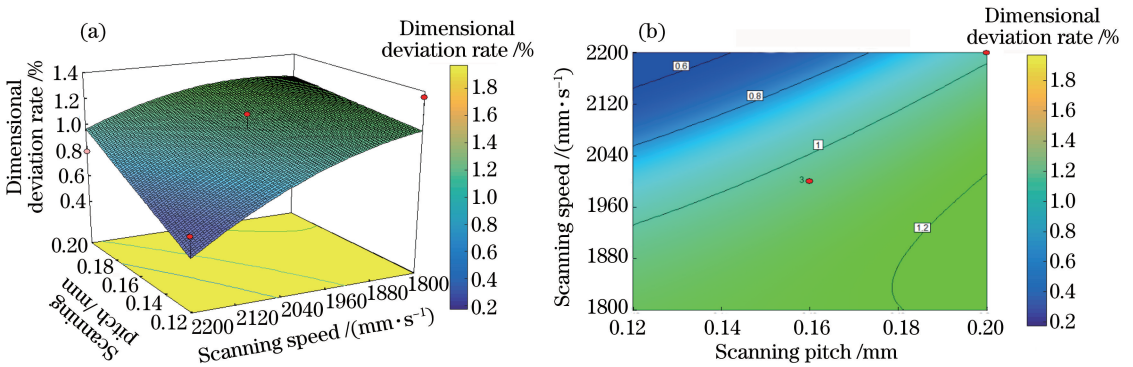


图 8 尺寸偏差率与扫描间距和扫描速度的关系示意图。(a)响应面图;(b)等高线图  
Fig. 8 Relationship of dimensional deviation rate versus scanning pitch and scanning speed.  
(a) Response surface diagram; (b) contour map

图 9 为尺寸偏差率与单层厚度和扫描速度的响应面及等高线分布图(激光功率为 40%,扫描间距为 0.2 mm)。当层厚较小时,扫描速度对尺寸偏差率的影响较大,尺寸偏差率随扫描速度的增大而减小;当层厚较大时,扫描速度对尺寸偏差率的影响减小,但总体还是呈现随扫描速度的增大而减小的趋势。当扫描速度较大时,随着层厚的增加,尺寸偏差率先缓慢减小再增加;当扫描速度较小时,随着层厚的增加,尺寸偏差率先减小再增加,减小与增加的速度一致。同时,由扫描速度增大引起的曲面坡度下

降程度大于由层厚变化引起的坡度下降程度,这表明扫描速度对尺寸偏差率的影响大于层厚对其的影响。等高线呈马鞍状表明,层厚和扫描速度的交互作用显著,且应选择适宜的层厚和较大的扫描速度。

综上,激光功率与扫描间距( $AB$ )、层厚与扫描速度( $CD$ )之间的交互作用对尺寸偏差率的影响显著,交互作用影响程度由低到高依次为  $BC < AC < BD < CD < AB$ ,这与  $P$  值分析的结果一致。

### 3.3 工艺参数优化

根据各影响因素对尺寸偏差率的影响趋势,最

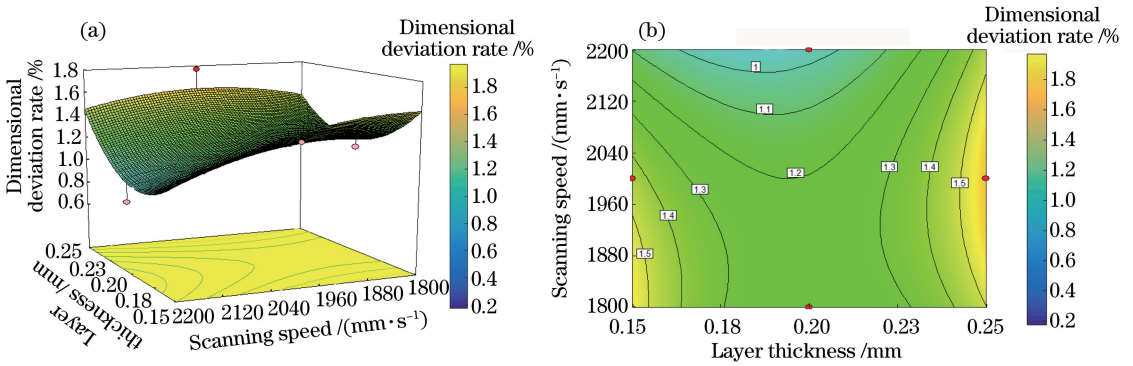


图 9 尺寸偏差率与单层厚度和扫描速度的关系示意图。(a)响应面图;(b)等高线图

Fig. 9 Relationship of dimensional deviation rate versus layer thickness and scanning speed.

(a) Response surface diagram; (b) contour map

优方案为 D3A3B1C2。基于 Design- Expert 软件中的优化模块,以最小尺寸偏差率为优化目标来获得最优方案。取激光功率的最大值,取扫描间距的最小值,单层厚度在 0.15~0.25 mm 间取值,取扫描速度的最大值,所得优化方案如表 4 所示。在激光功率为 50%,扫描间距为 0.12 mm,层厚为

0.19 mm,扫描速度为 2200 mm/s 时,尺寸偏差率最小,预测值为 0.538%。为便于控制,取层厚为 0.2 mm,此时尺寸偏差率预测值为 0.558%。同时,随机选取另外两组工艺参数组合进行验证性实验。最大和最小误差分别为 6.2%和 3.2%,结果说明该回归模型具有可靠性。

表 4 最优工艺方案及模型验证

Table 4 Optimal process plan and model verification

Condition	No.	Laser power percentage /%	Scanning pitch /mm	Layer thickness /mm	Scanning speed / (mm·s <sup>-1</sup> )	Predicted S /%	Real S /%	Predicted error /%
Optimal	1	50	0.12	0.19	2200	0.538		
	2	50	0.12	0.19	2199.98	0.540		
	3	50	0.12	0.18	2200	0.541	0.53	5.0
	4	50	0.12	0.20	2200	0.558		
	5	50	0.12	0.17	2200	0.568		
Verification	6	30	0.2	0.15	2000	1.958	1.837	6.2
	7	40	0.16	0.25	1800	1.436	1.39	3.2

## 4 结 论

以尺寸偏差率为优化目标,以激光功率、扫描间距、单层厚度和扫描速度为影响因素,基于 BBD 实验设计方法进行了 SLS 工艺实验设计,建立了工艺参数与尺寸偏差率之间的二次回归方程,验证了其可靠性。同时基于响应面分析方法分析了单一工艺参数及其交互作用对尺寸偏差率的影响,结果表明尺寸偏差率随激光功率与扫描速度的增大而减小,随单层厚度的增大先增大后减小,随扫描间距的增大而增大;激光功率与单层厚度、扫描间距与单层厚度之间的交互作用对尺寸偏差率的影响较显著。

最终确定了 PS 粉末 SLS 成型的优化方案参数如下:激光功率 50%,扫描间距 0.12 mm,单层厚度 0.20 mm,扫描速度 2200 mm/s。该方案实际收缩率为 0.53%,与预测值相比误差为 5.0%,该结果证

明了响应面模型的可靠性。

## 参 考 文 献

[1] Du Y Y, Liu H M, Yang Q, *et al.* Selective laser sintering scaffold with hierarchical architecture and gradient composition for osteochondral repair in rabbits[J]. *Biomaterials*, 2017, 137: 37-48.

[2] Wei Q, Wang R N, Xu Q Y, *et al.* Effects of process parameters on dimensional precision and tensile strength of wax patterns for investment casting by selective laser sintering [J]. *China Foundry*, 2018, 15(4): 299-306.

[3] Dadbakhsh S, Verbelen L, Verkinderen O, *et al.* Effect of PA12 powder reuse on coalescence behaviour and microstructure of SLS parts [J]. *European Polymer Journal*, 2017, 92: 250-262.

[4] Verbelen L, Dadbakhsh S, van den Eynde M, *et al.* Characterization of polyamide powders for

- determination of laser sintering processability [J]. *European Polymer Journal*, 2016, 75: 163-174.
- [5] Fu C A, Chen P H. Research of curl distortion and raster scanning way of selective laser sintering [J]. *China Foundry*, 2008, 57(12): 1237-1240.  
傅蔡安, 陈佩胡. 选择性激光烧结的翘曲变形与扫描方式的研究 [J]. *铸造*, 2008, 57(12): 1237-1240.
- [6] Shi Y S, Huang S H, Pan C Y. A kind of artificial intelligent method and system for automatic optimization of selective laser sintering process [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2003, 22(2): 259-264.  
史玉升, 黄树槐, 潘传友. 选择性激光烧结工艺参数智能优化方法研究 [J]. *机械科学与技术*, 2003, 22(2): 259-264.
- [7] Ren J W, Yin J J, Dong L J. The quality prediction of SLS part based on BP neural network [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2012, 40(21): 15-18.  
任继文, 殷金菊, 董连杰. 基于 BP 神经网络的 SLS 烧结件质量的预测 [J]. *机床与液压*, 2012, 40(21): 15-18.
- [8] Wang C Y, Chen Y, Dong Q. Research on tensile strength of selective laser sintering polystyrene [J]. *Applied Laser*, 2014, 34(5): 377-382.  
王传洋, 陈瑶, 董渠. 选择性激光烧结聚苯乙烯拉伸强度研究 [J]. *应用激光*, 2014, 34(5): 377-382.
- [9] Yang X S, Wang Y, Chen Y W. Study on properties of nylon 6 powder for selective laser sintering [J]. *China Plastics Industry*, 2018, 46(3): 135-138.  
杨旭生, 汪艳, 陈亚武. 选择性激光烧结用尼龙 6 粉末的性能研究 [J]. *塑料工业*, 2018, 46(3): 135-138.
- [10] Shuai C J. The research on warp distortion inhibition of selective laser sintering [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.  
帅昌俊. 选择性激光烧结翘曲变形抑制研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [11] Li N, Wang G C. Effect of the sintering parameters on precision and strength of parts form with selective laser sintering [J]. *Die & Mould Manufacture*, 2004, 4(10): 51-54.  
李宁, 王高潮. SLS 烧结参数对快速成型制件精度与强度的影响 [J]. *模具制造*, 2004, 4(10): 51-54.
- [12] Xu C, Wang B, Yang L X. Effect of selective laser sintering process parameters on the forming precision of PS /PE hybrid powder [J]. *China Plastics Industry*, 2018, 46(8): 64-68, 127.  
徐超, 王勃, 杨来侠. 选区激光烧结工艺参数对 PS/PE 混合粉末成型精度的影响 [J]. *塑料工业*, 2018, 46(8): 64-68, 127.
- [13] Gao Y. Research on virginiamycin fermentation medium and process optimization [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.  
高远. 维吉尼亚霉素发酵培养基及发酵条件优化 [D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [14] Xu X H, He M Z. Experimental design and Design-Expert, SPSS [M]. Beijing: Science Press, 2010.  
徐向宏, 何明珠. 试验设计与 Design-Expert, SPSS 应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [15] Ni C Y, Zhang C D, Liu T T, *et al.* Deformation prediction of metal selective laser melting based on inherent strain method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(7): 0702004.  
倪辰旖, 张长东, 刘婷婷. 基于固有应变法的激光选区熔化成形变形趋势预测 [J]. *中国激光*, 2018, 45(7): 0702004.
- [16] Liu J H, Zhu H H, Hu Z H, *et al.* Control of elevated edge in selective laser melt molding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(12): 1202007.  
刘家赫, 朱海红, 胡志恒, 等. 激光选区熔化成形边缘堆高控制 [J]. *中国激光*, 2017, 44(12): 1202007.