

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.07.011

基于RSM-BBD的选择性激光烧结制件尺寸补偿预测

孙天爱, 郭艳玲, 国一凡, 张新悦, 李健, 王扬威

(东北林业大学机电工程学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 选择性激光烧结(SLS)技术是一种快速成型技术,该技术具有低成本、高效率、高质量等特点。由于传统的补偿算法未能同时考虑扫描线烧结宽度和冷却收缩的影响,这导致尺寸误差的产生。为了更好地控制SLS的打印精度,以聚醚砜(PES)粉末为材料,采用响应面试验设计(RSM-BBD)研究不同工艺参数如预热温度、激光功率、扫描间距、扫描速度4个因素对制件尺寸的影响。建立这4个因素与响应值之间的多项式回归方程。根据工艺参数组合对尺寸补偿进行预测。结果表明,影响因素与响应值呈现二次多项式关系,其回归系数 R^2 大于0.9、 R^2 预测值与 R^2 校正值的差值小于0.2,两者较为接近。信噪比比值大于4,变异系数(CV)小于10%,这说明试验可信度和精确度高。通过响应面分析可知,尺寸补偿预测值和实际测量值的误差皆小于5%。所以该尺寸补偿预测模型具有较高的预测可靠性。基于该预测值对轮廓进行补偿可以提高制件的尺寸精度,为SLS尺寸补偿的研究提供了一定帮助。

关键词: 选择性激光烧结;尺寸补偿;工艺参数;冷却收缩;响应面试验设计;尺寸精度

中图分类号: TQ322.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)07-0065-08

Dimensional Compensation Prediction of Selective Laser Sintered Parts based on RSM-BBD

Sun Tianai, Guo Yanling, Guo Yifan, Zhang Xinyue, Li Jian, Wang Yangwei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract : Selective laser sintering (SLS) technology is a rapid prototyping technology, which is characterized by low cost, high efficiency and high quality. However, the current compensation algorithm does not take into account the effects of scan line sintering width and cooling shrinkage, leading to dimensional errors. To better control the printing accuracy of SLS, using polyether-sulfone resin (PES) powder as the test material, the response surface experimental design (RSM-BBD) response surface method was used to study the effects of four factors of different process parameters such as preheating temperature, laser power, scan spacing, and scan speed on the dimensions of the fabricated parts. A polynomial regression equation was established between the four factors and the response values to predict dimensional compensation based on the combination of process parameters. Results indicate that there is a quadratic polynomial relationship between the factors and response values, the regression coefficient R^2 is greater than 0.9 and the difference between the predicted and corrected R^2 values is less than 0.2. Additionally, the signal-to-noise ratio ratio is greater than 4, and the coefficient of variation (CV) is less than 10% indicating high reliability and accuracy of the test. And the response surface analysis shows that the error between predicted and actual measured values is less than 5%. Therefore, this size compensation prediction model provides high prediction reliability. Compensating the contour based on this predicted value can significantly improve the dimensional accuracy of fabricated parts, thereby aiding in the study of dimensional compensation for SLS.

Keywords : selective laser sintering ; size compensation ; process parameter ; cooling shrinkage ; response surface experimental design ; dimensional accuracy

选择性激光烧结(SLS)是一种以三维实体模型为基础,利用具有较高能量密度的激光束按照设计好的扫描路径进行逐层烧结黏结堆积的快速成型技术^[1-3]。其相对于传统成型技术具有应用广泛、工艺

基金项目:国家自然科学基金项目(52075090),黑龙江省重点研发项目(GA21 A403)

通信作者:郭艳玲,教授,博士,主要研究方向为增材制造

收稿日期:2023-06-12

引用格式:孙天爱,郭艳玲,国一凡,等.基于RSM-BBD的选择性激光烧结制件尺寸补偿预测[J].工程塑料应用,2023,51(7):65-72.

Sun Tianai, Guo Yanling, Guo Yifan, et al. Dimensional compensation prediction of selective laser sintered parts based on RSM-BBD[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(7): 65-72.

简单、制造效率高等特点^[4-5]。因此该快速成型技术在各行各业的应用都有巨大的前景,但由于SLS是一种复杂的热物理化学过程^[6],在SLS成型过程中,不同工艺参数如预热温度、激光功率、扫描间距、扫描速度等均对扫描线烧结宽度有一定影响,此时对光斑进行合理补偿有利于提高成型精度^[7]。与此同时,打印时的温度升高会使粉末熔化黏接,打印结束后腔体温度开始下降腔内粉末收缩并固化,此时制件尺寸也会发生变化^[8-10]。因此,单独补偿光斑半径或单独对冷却收缩进行补偿是不准确的,需要将两者进行结合以更好地提高制件精度。

近年来,针对不同工艺参数对SLS成型精度的研究层出不穷^[11-13],由于不同工艺参数对模型尺寸补偿有一定影响,从而会影响制件精度,因此针对工艺参数对扫描线烧结宽度和尺寸收缩率的影响,预测不同参数组合下的尺寸补偿值,并通过变半径补偿值的方法提高制件精度是解决问题的关键,这也是一大难点。Ha等^[14]提出一种SLS中3D打印零件垂直弯曲变形的尺寸补偿算法,可以改善制件由于变形引起的尺寸不准确。Brajlih等^[15]研究了零件几何参数对SLS收缩率和激光热影响区尺寸的影响,进而提高了尺寸精度。殷勤等^[16]研究了基于尺寸补偿模型的SLS工艺精度优化方法,实现了基于该模型的精度优化。潘翔等^[17]提出一种变激光扫描速度和变光斑补偿量对轮廓进行加工的新方法,采用两种不同的扫描速度和光斑补偿量对相同区域的轮廓进行固化,经验证发现,可通过变光斑补偿量方法在提高制件成型精度的同时保证制件的固化强度。

综上所述,现有的关于SLS补偿的研究都是基于光斑半径或冷却收缩的研究,并未将两者有效地结合。所以笔者以快速成型设备为依托,以聚醚砜(PES)为材料,探究不同工艺参数组合下的制件尺寸精度并建立尺寸补偿量的回归模型。当已知预热温度、激光功率、扫描间距、扫描速度4个工艺参数时,通过该预测模型,得到尺寸补偿量,从而进一步提高制件精度。相比传统的尺寸补偿模型,不同之处在于本模型同时考虑了扫描线烧结宽度和冷却收缩对制件精度的影响,这将有利于制件精度的进一步提高。该研究为SLS成型制件的精度控制提供了一定的参考。

1 实验部分

1.1 原材料

PES: Y1201P60, 白色粉末, 平均粒径约为 60 μm (250 目), 安徽天念材料有限公司。

1.2 仪器及设备

激光快速成型设备: AFS-360 型, 北京隆源自动成型系统有限公司。

1.3 试样制备

采用激光快速成型设备, 利用SLS工艺成型PES, 将PES粉末筛选后加入到成型箱和供粉箱中, 供粉箱下降7 mm, 以保证制件烧结过程中供粉充足, 在计算机中打开已经切好片的文件, 激光按规划好的路径进行烧结加工, 加工完成后重复上述操作, 进行下一层的烧结, 并依次叠合在一起最终形成三维原型, SLS成型工艺如图1所示。其中激光功率、预热温度、扫描间距、扫描速度是影响SLS成型件精度的主要工艺参数, 设定需要调整的烧结工艺参数为激光功率(10, 13, 16 W)、预热温度(80, 83, 86 $^{\circ}\text{C}$)、扫描速度(1 800, 2 000, 2 200 mm/s)、扫描间距(0.1, 0.15, 0.2 mm), 以150 mm $\times$ 10 mm $\times$ 4 mm的制件作为测试件, 每次实验同时烧结5个相同尺寸的测试件, 共计29组。待测试件烧结成型并冷却后将其取出, 用刷子清除掉测试件表面多余粉末, 并标号记录及测量。

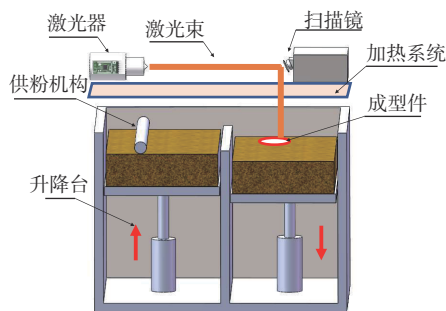


图1 SLS成型工艺

1.4 试验方法

(1) 试验目的。

由于SLS成型工艺是一种复杂的热物理化学过程。加工时制件由于不同工艺参数组合的影响, 其扫描线烧结宽度会有一定的偏差且制件在加工过程中会造成尺寸的收缩, 扫描线烧结宽度对尺寸影响如图2所示, 收缩对尺寸的影响如图3所示。在加工过程中, 激光功率、预热温度、扫描速度及扫描间距发生变化时, 计算根据不同参数打印出的制

件所需的尺寸补偿值,得到回归尺寸补偿方程,从而预测不同参数应采用的尺寸补偿。对制件进行变光斑补偿值调整,可降低SLS工艺引起的尺寸误差影响,以提高制件的尺寸精度。

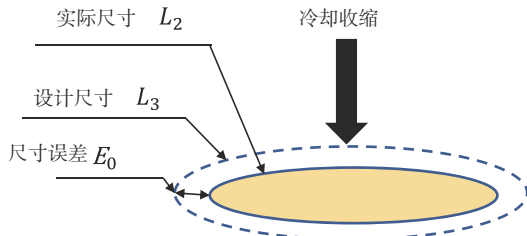


图3 收缩影响下对尺寸影响

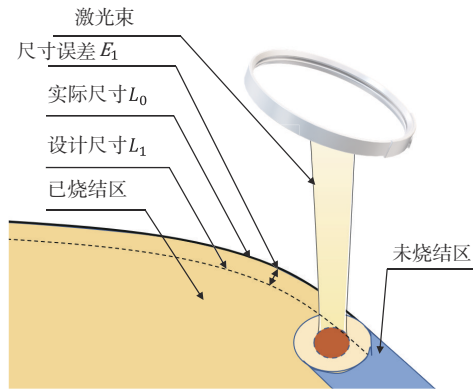


图2 扫描线烧结宽度对尺寸影响

(2) 尺寸补偿预测模型。

通过前期试验结果表明,SLS的制件精度误差主要是由于制件的收缩和扫描线烧结宽度变化使半径补偿值有一定偏差导致的误差,并且这两者之间互相还会产生影响,因此,在烧结过程中,针对尺寸误差要同时分析多种工艺参数对扫描线烧结宽度和制件收缩率的影响,在设计尺寸补偿公式时需同时对激光功率、预热温度、扫描间距、扫描速度这4个参数的系数进行计算。

扫描线烧结宽度影响尺寸误差、收缩影响尺寸误差、实际尺寸补偿值、预测尺寸补偿值计算如公式(1)~式(4):

$$E_1 = L_0 - L_1 \quad (1)$$

$$E_0 = L_2 - L_3 \quad (2)$$

$$R_0 = \frac{E_0 + E_1}{2} = f(P, T, V, S) \quad (3)$$

$$R_1 = \beta_0 + \beta_1 P + \beta_2 T + \beta_3 V + \beta_4 S + \beta_{12} PT + \beta_{13} PV + \beta_{14} PS + \beta_{23} TV + \beta_{24} TS + \beta_{34} VS + \beta_{11} P^2 + \beta_{22} T^2 + \beta_{33} V^2 + \beta_{44} S^2 \quad (4)$$

式中: E_1 ——扫描线烧结宽度影响下尺寸误差;

E_0 ——收缩影响下尺寸误差;

L_0 ——光斑影响下实际尺寸;

L_1 ——光斑影响下设计尺寸;

L_2 ——收缩影响下实际尺寸;

L_3 ——收缩影响下设计尺寸;

R_0 ——实际尺寸补偿值;

R_1 ——预测尺寸补偿值;

P ——激光功率;

T ——预热温度;

V ——扫描速度;

S ——扫描间距;

β_0 ——常数项;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ ——线性系数;

$\beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{14}, \beta_{23}, \beta_{24}, \beta_{34}$ ——交互项系数;

$\beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{33}, \beta_{44}$ ——二次项系数。

(3) 实验设计。

试验应用 Design Expert 13 软件中的 Box-Behnken Design (RSM-BBD) 进行方案的设计。查阅相关文献及进行前期的实验后,选取激光功率(P)、预热温度(T)、扫描间距(S)、扫描速度(V)作为4个影响因素,其中分别用1,0,-1来表示试验中的高、中、低的水平编码值。选取激光功率最小为10 W,最大16 W;选取预热温度最小80℃,最大86℃;扫描速度最大2 200 mm/s,最小1 800 mm/s;扫描间距最大0.2 mm,最小0.1 mm,作为基础参数进行试验,并以尺寸补偿值作为响应值,各因素编码及水平见表1。

表1 BDD试验因素及水平表

水平	P/W	$T/^\circ\text{C}$	$V/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	S/mm
1	10	80	1 800	0.1
0	13	83	2 000	0.15
-1	16	86	2 200	0.2

采用RSM-BBD的方法可以建立接近于实际情况的复杂多维空间曲面^[18-19],对SLS过程中的尺寸补偿值进行分析,并对烧结过程中的尺寸收缩和扫描线烧结宽度变化两者的影响进行模型的预测。RSM方法在分析多因素问题一般采用 Box-Behnken Design 和 CCD 法进行试验设计,通过设计合理的试验采用二次多项式函数回归拟合所选影响因素与响应值之间的关系,并通过回归曲线的分析各因素组合下尺寸补偿的变化情况。由于有4个试验因素,所以笔者选择BBD法来设计试验,此方法比正交设计方法在分析因素之间的相互影响方面更加有效。试验设计采用150 mm×10 mm×4

mm的样件为模型。试验材料为PES粉末,选取影响因素 P, T, S, V 设计试验,每组试验同时烧结5个测试件,烧结结束,待测试件冷却至室温后,利用数显游标卡尺量取测试件水平方向尺寸,将每组测试结果求取平均值,计算得到每组成型件实际尺寸补偿值进行SLS成型制件尺寸补偿预测,从而进行变光斑补偿值的研究。

2 结果与讨论

2.1 试验结果与模型分析

根据快速成型机和PES粉末的烧结实验研究,制件的尺寸测量方法如图4所示。为避免不可控因素对试验结果的影响,本试验的序号顺序为随机生成,试验结果见表2。

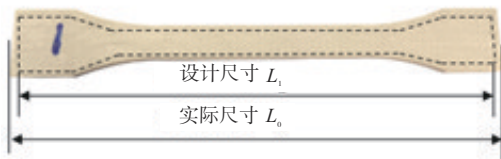


图4 制件的尺寸测量方法

通过数据统计软件Design Expert 13对表2中的29组数据进行多元回归拟合的分析,分析结果列于表3。软件主要通过失拟检验分析和假设检验分析来选取适宜模型,由 p 来表示显著性。在一般情况下,模型不显著时 $p>0.05$,模型显著时 $0.01\leq p\leq 0.05$,模型非常显著时 $p<0.001$ 。经过显著性的分析可知,二次模型的 $p<0.0001$,表明拟合二次模型的连续性最好,模拟效果非常显著。失拟检验则采用的是真实与模型函数的差异,其中的差异越小,即可表明其效果越明显,当 $p<0.05$ 时,表明差异很大,此时的模型拟合方程无效, p 值越大(不超过1),说明拟合模型方程效果越好。尺寸模型拟合二次方程中的失拟项 $p>0.05$,说明拟合模型方程效果较好。根据模型回归系数 $R^2=0.8789$,表明模型可解释87.89%的响应变化,模型存在误差相对较小。

$$R_1 = 33.30587 - 0.241583P - 0.662241T - 0.003535V - 1.92S + 0.008635P^2 + 0.003977T^2 + 8.94792 \times 10^{-7}V^2 + 5.81667S^2 \quad (5)$$

显著性检验是利用Design Expert 13软件中的方差分析,进行验证该回归模型的可靠性,对模型系数及模型进行显著性分析。由表4可知,SLS的激光功率、预热温度、扫描速度、扫描间距对尺寸补偿的二次多项式回归方程的 F 值分别为0.022, 4.95, 9.71, 9.70, p 值分别为0.8835, 0.0377, 0.0054, 0.0053,表明了模型较为显著。这4个单因

表2 BDD试验结果

试验号	P/W	$T/^\circ\text{C}$	$V/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	S/mm	R_0/mm
1	14	86	1 800	0.15	0.44
2	14	80	2 000	0.10	0.475
3	14	83	2 000	0.15	0.395
4	14	83	1 800	0.20	0.43
5	16	83	2 000	0.20	0.44
6	14	86	2 000	0.10	0.455
7	12	83	1 800	0.15	0.465
8	14	80	2 000	0.20	0.45
9	14	83	2 000	0.15	0.405
10	16	83	2 200	0.15	0.485
11	16	80	2 000	0.15	0.465
12	14	80	1 800	0.15	0.46
13	12	83	2 200	0.15	0.48
14	14	80	2 200	0.15	0.49
15	14	83	2 000	0.15	0.395
16	12	80	2 000	0.15	0.47
17	16	83	2 000	0.10	0.45
18	14	83	1 800	0.10	0.46
19	14	83	2 000	0.15	0.4
20	12	83	2 000	0.20	0.435
21	14	83	2 000	0.15	0.395
22	12	83	2 000	0.10	0.435
23	16	86	2 000	0.15	0.465
24	12	86	2 000	0.15	0.48
25	14	83	2 200	0.10	0.465
26	14	86	2 200	0.15	0.46
27	14	83	2 200	0.20	0.445
28	16	83	1 800	0.15	0.465
29	14	86	2 000	0.20	0.435

表3 尺寸补偿多种模型综合分析结果

模型	p 值		R^2	
	连续项	失拟项	校正值	预测值
线性模型	0.594 5	0.000 9	-0.043 6	-0.118 2
二次模型	<0.000 1	0.052 8	0.878 9	0.807 9
立方模型	0.486 3	0.011 7	0.842 5	-3.339 3

2.2 回归模型建立

对表2中的试验数据采用RSM-BBD的方法进行二次多元回归拟合,可获得尺寸补偿值 R_1 的二次多项式回归方程,见式(5)。

素中,对于尺寸补偿的影响,其中扫描速度和扫描间距影响非常显著,预热温度影响较为显著,功率影响不显著,四者的影响程度为 $S>V>T>P$ 。

对模型可信度检测分析的结果列于表5。 R^2 预测值为0.8079, R^2 校正值为0.8789,由于回归方程的拟合程度可以通过 R^2 校正值和 R^2 是否接近来验证,两者差值小于0.2,故接近程度较高,可验证该回

表4 尺寸补偿回归模型方差分析

来源	df	F值	p值	均方差	平方和
模型	8	26.40	<0.000 1	0.002 5	0.020 0
<i>P</i>	1	0.022	0.883 5	0.000 002 083	0.000 002 083
<i>T</i>	1	4.95	0.037 7	0.000 5	0.000 5
<i>V</i>	1	9.71	0.005 4	0.000 9	0.000 9
<i>S</i>	1	9.70	0.005 3	0.000 9	0.000 9
<i>P</i> ²	1	81.79	<0.000 1	0.007 7	0.007 7
<i>T</i> ²	1	87.81	<0.000 1	0.008 3	0.008 3
<i>V</i> ²	1	87.81	<0.000 1	0.008 3	0.008 3
<i>S</i> ²	1	14.50	0.001 1	0.001 4	0.001 4
残差	20			0.000 1	0.001 9
失拟值	16	5.66	0.052 8	0.000 1	0.001 8
纯误差	4				0.000 1
总和	28				0.021 9

注:df为该统计量的自由度,是指当以样本的统计量来估计总体的参数时,样本中独立或能自由变化的数据的个数;*F*为检验回归模型的参数,以显著性水平 $\alpha=0.05$ 为检验指标,*F*值越大,表示因素对指标的影响程度越大;*p*为回归方程拒绝原假设的值,当 $p<\alpha$ (取0.05),表示回归系数显著。

归方程的拟合程度较高;且信噪比的比值为15.978>4,信号充足;变异系数(CV)为2.17%<10%,表明本试验模型预测效果理想。由图5可知,表明式(5)具有较高的预测可靠性。

表5 模型可信度检验分析结果

标准偏差	均值	<i>R</i> ²	<i>R</i> ² 校正值	<i>R</i> ² 预测值	CV/%	信噪比
0.009 7	0.447 9	0.913 5	0.878 9	0.807 9	2.17	15.977 5

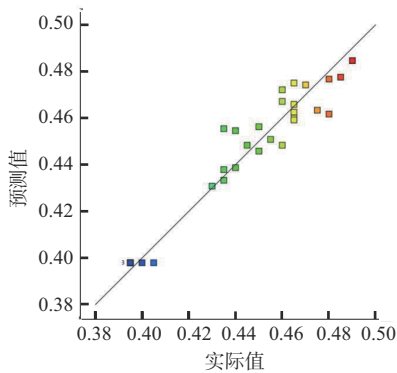
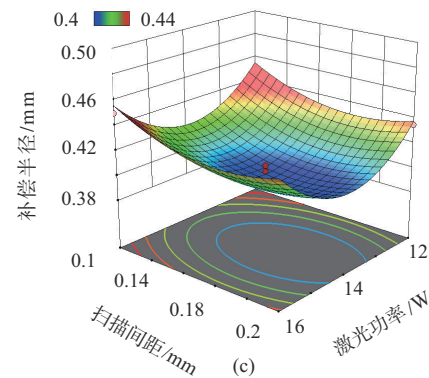
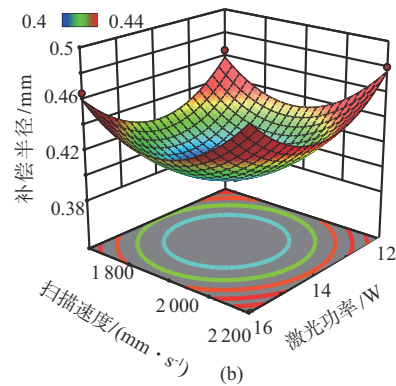
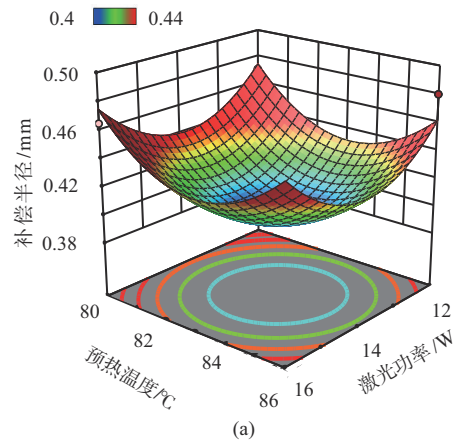


图5 预测值与实测值对比

2.3 响应曲面分析

图6为激光功率与预热温度、扫描速度和扫描间距作用对尺寸补偿影响的响应曲面图。

由图6a可以看出,在预热温度处于80~86℃时,尺寸补偿值随着预热温度的增加先减小后增大,由于预热温度较高时,材料的热膨胀加剧,制件在冷却过程中易发生变形;由图6a可见,尺寸补偿值随着激光功率的增加先减少到达一定值后再增加。由图6b可见,当扫描速度为1 800~2 200 mm/s



a—预热温度; b—扫描速度; c—扫描间距

图6 激光功率与预热温度、扫描速度和扫描间距作用对尺寸补偿值影响的响应曲面

时,尺寸补偿值随着扫描速度的增加先不断减小后增加。由于激光功率主要决定了烧结材料的能量密度,对尺寸补偿值的影响相较于预热温度影响程度较小,由表4可证实,预热温度的*p*值为0.037 7<0.05表明影响效果显著。激光功率的*p*值为0.883 5,影响效果不显著,但是当激光功率过高时,会产生过度熔化现象,导致加工的精度降低。由图6c可见,扫描间距在0.1~0.2 mm范围内增加时,尺寸补偿值随着扫描间距的增大而减小,在SLS过程中,扫描间距是指激光轨迹之间的间距,扫描间距

较小时,易导致能量密度过大,使得尺寸补偿值有增长趋势。

图7为预热温度与扫描速度和扫描间距作用对尺寸补偿值影响的响应曲面。由图7a可以看出,在预热温度处于80~88℃之间,扫描速度处于1800~2200 mm/s时,尺寸补偿值随着预热温度和扫描速度的增加先减小后增大。当激光功率不变时,随着扫描速度变小,其激光照射在烧结材料表面的能量密度就越多,区域的能量密度过高会使得制件的收缩变形加剧;由图7b可以看出,在预热温度处于80~88℃之间时,扫描间距在0.1~0.2 mm之间变化,尺

寸补偿值会随着扫描间距的增加而减小,扫描间距越大,能量密度越小,制件收缩变形趋势下降,使得尺寸补偿值有减小趋势。

图8为扫描速度与扫描间距作用对尺寸补偿值影响的响应曲面。由图8可看出,在扫描速度处于1800~2200 mm/s时,扫描间距从0.1~0.2 mm变化,尺寸补偿值随扫描间距的增加而减小,由表4可知,扫描速度和扫描间距的 p 值小于 <0.05 ,表明两者对尺寸补偿的影响显著。

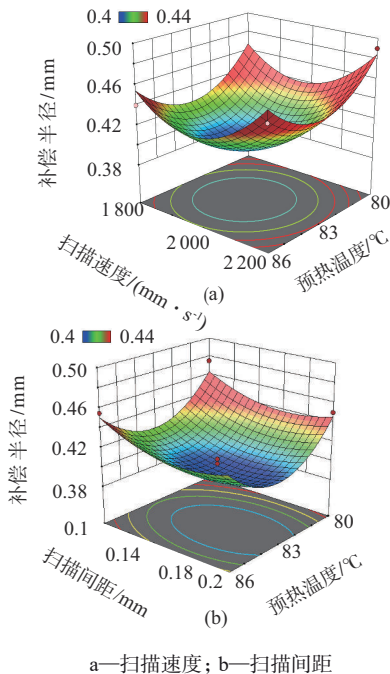


图7 预热温度与扫描速度和扫描间距作用对尺寸补偿值影响的响应曲面

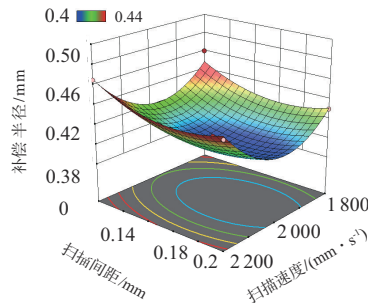


图8 扫描速度与扫描间距作用对尺寸补偿值影响的响应曲面

2.4 响应面模型验证

采用Design-Expert 13软件对数据进行分析,得出响应面残差正态概率情况如图9所示。由图9可知,在直线周围排布的该模型的残差序列点呈正态分布关系,可表明该模型的内部标准化残差达到最小二乘模型拟合要求。

另外,从该响应面模型的分析可知 R^2 接近于1,表明模型的拟合效果好。表6为实际与预测补偿值的误差分析。图10为实际与预测补偿值对比图。图11为实际与预测补偿值误差分析。由表6以及图10和图11可知,预测和实际误差皆小于5%,表明响应面模型的预测精度高,拟合效果好。

表6 实际补偿与预测值的误差分析

试验号	实际值/mm	预测值/mm	误差/%	试验号	实际值/mm	预测值/mm	误差/%
1	0.44	0.456 335	3.5 796	16	0.47	0.475 877	1.235
2	0.475	0.465 023	-2.1 46	17	0.45	0.457 987	1.743 9
3	0.395	0.399 761	1.191	18	0.46	0.450 011	-2.22
4	0.43	0.432 511	0.5 805	19	0.4	0.399 761	-0.06
5	0.44	0.440 487	0.1 105	20	0.435	0.439 699	1.0 686
6	0.455	0.452 669	-0.5 15	21	0.395	0.399 761	1.191
7	0.465	0.460 865	-0.8 97	22	0.435	0.457 199	4.8 554
8	0.45	0.447 523	-0.5 54	23	0.465	0.464 311	-0.1 48
9	0.405	0.399 761	-1.3 11	24	0.48	0.463 523	-5.55
10	0.485	0.479 32	-1.1 85	25	0.465	0.467 678	0.5 726
11	0.465	0.476 665	2.4 472	26	0.46	0.474 002	2.9 541
12	0.46	0.468 689	1.8 539	27	0.445	0.450 178	1.150 2
13	0.48	0.478 532	-0.3 07	28	0.465	0.461 653	-0.725
14	0.49	0.486 356	-0.7 49	29	0.435	0.435 169	0.038 8
15	0.395	0.399 761	1.191				

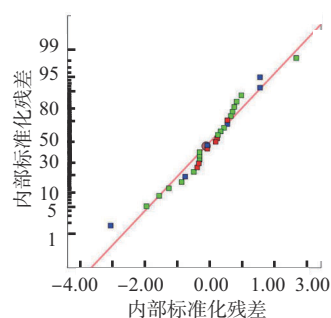


图9 残差正态概率图

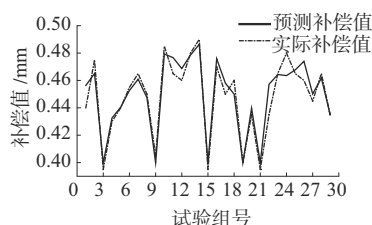


图10 实际与预测补偿值对比图

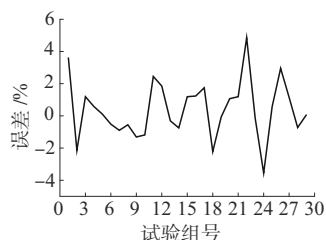


图11 实际与预测补偿值误差分析

3 结论

(1)利用RSM-BBD进行试验设计,建立激光功率、预热温度、扫描速度、扫描间距与尺寸补偿值之间的二次回归模型,经过对模型的失拟和假设检验与方差和误差分析等可知,该模型预测的精度较高,表明该响应面模型拟合效果较好且有较高的可行性,为该材料的智能工艺参数库提供数据。

(2)方差和响应面分析表明,扫描速度和扫描间距对尺寸补偿值的影响非常显著,预热温度的影响与扫描速度和扫描间距相比稍小,但其对尺寸补偿值的影响非常显著,激光功率对尺寸补偿值的影响不显著,影响次序为:扫描间距>扫描速度>预热温度>激光功率。

(3)通过响应面分析可知,尺寸补偿的预测值和实际测量值的误差皆小于5%,表明该模型预测的精度较高。

影响选择性激光烧结尺寸补偿值的因素较多。该研究方法可为根据不同因素组合获得更合适的尺寸补偿值提供参考。

参考文献

[1] 费磊,邢娜,孙晶. 基于SLS汽车零件铸造模具快速成型技术的

研究[J]. 自动化技术与应用, 2018, 37(6):130-133.

Fei Lei, Xing Na, Sun Jing. Research on rapid prototyping technology of automotive parts casting mold based on SLS[J]. Automation Technology and Application, 2018, 37(6):130-133.

[2] 陈鹏,刘继波,董志鹏,等. 浅析快速成型技术在铸造中的应用[J]. 铸造设备与工艺, 2017(2):39-41, 44.

Chen Peng, Liu Jibo, Dong Zhipeng, et al. Rapid prototyping technology application in foundry is analysed[J]. Journal of Casting Equipment and Technology, 2017(2):39-41, 44.

[3] 陈旭. 选择性激光烧结技术在机械制造领域中的应用[J]. 制造技术与机床, 2022(12):11-14.

Chen Xu. Application of selective laser sintering technology in mechanical manufacturing field[J]. Manufacturing Technology and Machine tool, 2022(12):11-14.

[4] 张得栋,李磊,杨玮婧,等. 聚丙烯粉末选择性激光烧结3D打印研究进展[J]. 塑料工业, 2020, 48(9):6-12.

Zhang Dedong, Li Lei, Yang Weijing, et al. Research progress in 3D printing of polypropylene powder by selective laser sintering [J]. China Plastics Industry, 20, 48(9):6-12.

[5] 冯淑莹,张慧梅. 选择性激光烧结的研究进展[J]. 江西化工, 2020 (4):56-57.

Feng Shuying, Zhang Huimei. Research progress of selective laser sintering[J]. Jiangxi Chemical Industry, 2020(4):56-57.

[6] 肖亚宁,孙雪,郭艳玲,等. 基于BP-PID的选择性激光烧结温度控制系统设计[J]. 机床与液压, 2021, 49(24):95-100.

Xiao Yaning, Sun Xue, Guo Yanling, et al. Design of temperature control system for selective laser sintering based on BP-PID[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(24):95-100.

[7] 蒋佳雯,康杰虎,吴斌. 激光光斑中心高精度定位补偿算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(14):362-367.

Jiang Jiawen, Kang Jiehu, Wu Bin. Research on high-precision location compensation algorithm for laser spot center[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(14):362-367.

[8] 宁文波,张良栋,胡光忠. 覆膜陶瓷粉末的选择性激光烧结试验研究[J]. 机械制造, 2018, 56(3):60-62.

Ning Wenbo, Zhang Liangdong, Hu Guangzhong. Experimental study on selective laser sintering of coated ceramic powders[J]. Machinery, 2018, 56(3):60-62.

[9] 杨来侠,杨繁荣,周文明. 聚苯乙烯/玻璃纤维复合粉末SLS烧结件收缩率实验研究[J]. 塑料工业, 2017, 45(12):54-58.

Yang Laixia, Yang Fanrong, Zhou Wenming. Experimental Study on shrinkage of SLS sintered polystyrene/glass fiber composite powder[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(12):54-58.

[10] 刘兆平,王宏松,修辉平. 基于BP神经网络的覆膜砂选择性激光烧结件精度预测[J]. 热加工工艺, 2016, 45(21):91-93.

Liu Zhaoping, Wang Hongsong, Xiu Huiping. Based on BP neural network of selective laser sintering of precoated sand accuracy prediction[J]. Journal of Thermal Processing, 2016, 45(21):91-93.

- [11] Idriss A, Li J, Wang Y W, et al. Effects of various processing parameters on the mechanical properties of sisal fiber/pes composites produced via selective laser sintering[J]. *Bioresources*, 2020, 15(3):5 710–5 724.
- [12] 王凡. 基于选择性激光烧结聚苯乙烯复合材料的实验研究[J]. *科学技术创新*, 2021(30):22–24.
Wang Fan. Experimental study of polystyrene matrix composites based on selective laser sintering[J]. *Science and Technology Innovation*, 2021(30):22–24.
- [13] Czelusniak T, Amorim F L. Influence of energy density on selective laser sintering of carbon fiber-reinforced PA12[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 111(7):2 361–2 376.
- [14] Ha S, Ransikarbun K, Han H, et al. A dimensional compensation algorithm for vertical bending deformation of 3D printed parts in selective laser sintering[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2018, 24(6):955–963.
- [15] Brajlili T, Kostevsek U, Drstvensek I. Influence of part's geometrical properties on shrinkage and laser heat affected zone size at selective laser sintering[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2019, 25: 208–220.
- [16] 殷勤, 曹腾飞, 鄢然, 等. 基于尺寸补偿模型的PA12粉末选择性激光烧结工艺精度优化方法[J]. *工程塑料应用*, 2022, 50(12): 49–55.
- Yin Qin, Cao Tengfei, Yan Ran, et al. Precision optimization method for selective laser sintering of PA12 powder based on size compensation model[J]. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(12):49–55.
- [17] 潘翔. 光固化成形系统中光斑补偿若干问题的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
Pan Xiang. Research on some problems of spot compensation in photocuring forming system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [18] 符柳, 李淑娟, 胡超. 基于RSM的三维打印参数对材料收缩率的影响[J]. *机械科学与技术*, 2013, 32(12):1 835–1 840.
Fu Liu, Li Shujuan, Hu Chao. RSM based 3D printing parameters on the influence of material shrinkage rate[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2013, 32(12): 1 835–1 840.
- [19] 刘艳, 周梅, 张凯, 等. 基于RSM-BBD的自燃煤矸石骨料透水混凝土配比优化研究[J]. *矿业科学学报*, 2022, 7(5):565–576.
Liu Yan, Zhou Mei, Zhang Kai, et al. Optimization of pervious concrete ratio of coal gangue aggregate based on RSM-BBD[J]. *Journal of Mining Science*, 2022, 7(5):565–576.