

灰色关联分析选区激光烧结成型研究

许勤

九江学院, 江西 九江 332000

摘要 选区激光烧结(SLS)是重要的3D技术之一。烧结高分子材料成型过程中,材料的不均匀收缩导致制件翘曲变形及尺寸减小。而在烧结过程中工艺参数起着主要影响作用。激光烧结聚丙烯(PP)复合粉末成型过程中,采用各工艺参数不同水平组合烧结成型制件;用灰色关联分析法(GRA)研究工艺参数对成型精度的影响。结果表明,对于翘曲量及尺寸精度最重要的影响因子为扫描速度。综合工艺参数对翘曲量和尺寸误差的影响,得到激光烧结PP制件的优化工艺参数:扫描速度为1.9 m/s,激光功率为16.5 W,铺粉厚度为0.15 mm,扫描间距为0.12 mm。

关键词 激光技术;选区激光烧结;成型精度;灰色关联分析;优化工艺参数

中图分类号 TN249; TH161 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.121406

Study on Process Parameters Optimization of Selective Laser Sintering with Gray Relational Analysis

Xu Qin

Jiujiang University, Jiujiang, Jiangxi 332000, China

Abstract The selective laser sintering (SLS) is one of the important 3D printing technologies. In the sintering process of the polymer material the uneven shrinkage will cause warp and decrease the size of parts. The SLS processing parameters playing the major influence are discussed. Based on the theory of the gray relational analysis (GRA) in the SLS experiment with the polypropylene (PP) composite powder, the results show that the most important parameter is the scan speed. Considering the comprehensive effects of the warp and molding accuracy, the optimized fabrication parameters of the forming process are got as follows: the scanning speed is 1.9 m/s, the laser power is 16.5 W, the scanning width is 0.12 mm and the single layer of powder is 0.15 mm.

Key words laser technique; selective laser sintering; molding accuracy; gray relational analysis; optimized fabrication parameters

OCIS codes 140.3390; 220.4610; 160.5470

1 引言

现代制造业正迎来变革3D打印技术(又称快速成型技术)是基于材料堆积法的一种高新制造技术。选区激光烧结(SLS)是快速成型的重要分支,在分层制造技术中占据了特殊的地位。SLS技术具有成形可逐层分割的任意几何形状,无需工模具,材料利用率高、生产周期短等特点,广泛应用于现代制造业领域^[1]。

国内外研究单位正在开展SLS技术的研究,近日GE Aviation收购了Morris Technologies,该公司投资研究航空发动机零件的3D打印技术,使用激光烧结工艺直接成型零件。华中科技大学^[2]研制出世界最大的3D打印机,正是采用了选区激光烧结技术。基于现有的成型设备,开发出高性能材料、提高成型效率与精度、改善激光烧结件的性能,是SLS技术的重要发展方向。

SLS的烧结机理、成型工艺等方面还有许多问题尚待完善。激光烧结粉末材料成型过程中存在收缩,导致制件翘曲变形而影响成型精度。减小收缩的主要方法是采用改性材料和选用合理的SLS工艺参数。本文研究激光烧结聚丙烯复合粉末成型过程中工艺参数对成型精度的影响,并实验探索优化工艺参数。

收稿日期: 2014-09-22; 收到修改稿日期: 2014-09-29; 网络出版日期: 2014-11-19

作者简介: 许勤(1972—),男,硕士,副教授,主要从事SLS成型及控制等技术方面的研究。

E-mail: xuqin918020416@sohu.com

2 实验部分

2.1 主要原料与实验设备

聚丙烯(PP), T30S, 上海金山石化公司, 白色固体, 相对密度为 0.90, 玻璃化温度 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 熔点 $178\text{ }^{\circ}\text{C}$, 熔体流动速率为 0.3 g/min , 成型收缩为 $1\%\sim 2.5\%$ 。活性碳酸钙(ACCARB-1T), 由安徽明光曼迪矿业科技有限公司提供。SLS系统型号为 HRPS-III A, 由华中滨湖公司提供。采用物理共混方法制备聚丙烯 SLS 粉料。在 PP 粉末中按照质量比($M_{\text{PP}}:M_{\text{C}}:M_{\text{Ca}}$)添加石墨、活性碳酸钙填料以减小 PP 的结晶程度, 来降低收缩和减小变形。

2.2 实验方法

在激光成形机上烧结制件, 预热温度到 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$, 设计尺寸为 $64.0\text{ mm}\times 32.0\text{ mm}\times 3.0\text{ mm}$ 。对成型制件进行尺寸和翘曲量的测量。根据理论分析和前期试验结果, 选取工艺参数激光功率、扫描速度、扫描间距和铺粉厚度为实验考察因子, 各因子选取水平值如表 1 所示。

表 1 因子水平表

Table 1 Table of factors levels

Level	Laser power /W	Scanning speed /(mm/s)	Pitch /mm	Powder thickness /mm
1	13.5	1700	0.12	0.10
2	15.0	1800	0.14	0.12
3	16.5	1900	0.16	0.15

3 结果与分析

3.1 工艺参数对成型精度的影响

3.1.1 SLS 成型精度

SLS 烧结过程中存在收缩, 不仅影响制件尺寸大小, 而且会引起翘曲变形^[3]。成型精度主要受烧结和冷却过程中收缩影响。收缩包括烧结收缩和温降收缩。要控制烧结制件的精度, 就必须减小材料不均匀收缩。为降低烧结材料的收缩率, 可采用的方法: 1) 控制选择的烧结材料。如采用改性材料, 降低材料的收缩, 在粉末材料中添加适当的填料等措施。2) 合理的烧结工艺。采用适当的烧结工艺参数(如采用较小的激光功率、较高的激光扫描速度、小的切片厚度、适当的扫描间距等), 以及控制烧结室和粉末层的预热温度和冷却速度。3) 采用软件补偿^[4]。其中烧结工艺参数对成型精度起着主要影响作用, 且影响比较复杂。

3.1.2 工艺参数

SLS 工艺参数中, 激光功率与扫描速度共同决定了输入能量密度。能量密度过高, 会发生过烧结现象, 而能量密度太低, 会导致层与层之间烧结不透, 产生分层, 影响成型。

1) 激光功率对翘曲变形的影响。激光功率越大则输送给粉末材料的能量就大, 粉末的烧结程度增加, 收缩也随之增大。激光功率小, 输送给粉末的能量就低, 粉末烧结程度减小、收缩降低。但是激光功率太小, 粉末不能充分熔化粘结, 导致烧结原型件强度较低, 甚至无法成型。2) 扫描速度对翘曲变形的影响。在激光功率等参数不变的情况下, 较低激光扫描速度增大了输入能量密度, 烧结制件的致密性较好。但扫描速度太低时, 粉末吸收能量过大, 造成表面温度过高, 导致制件受热不均匀而增大翘曲, 降低成型精度, 也降低烧结效率^[4-5]。

SLS 工艺参数相互之间存在联系与影响, 不能单一加大激光功率或降低扫描速度来增加材料熔化粘结, 应通过实验寻求优化的工艺参数, 提高烧结制件的成型精度。

3.2 灰色关联分析

1) 灰色关联分析模型

灰色关联分析法(GRA)是一种基于因子序列的微观或宏观几何接近, 以分析和确定因子的影响程度的系统分析方法^[6]。它是根据因素之间的变化的相似或相异程度来衡量因素之间的关联度, 从而找出最主要影响因素。SLS 实验中涉及因子的关系比较复杂, 采用灰色关联分析方法处理实验结果, 讨论工艺参数因子对成型精度的影响程度, 确定影响成型精度最重要的因子, 并进一步优化工艺参数。

以激光功率、扫描速度、扫描间距、铺粉厚度为主要影响因子建立比较因素数列 X_i :

$$\{X_i(K)\} = \{X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(n)\}, K=1,2,\dots, n, i=1,2,\dots, m. \quad (1)$$

由于各因素之间的量纲不同,无法直接比较,因此对因素序列进行无量纲化。得到数列 $X'_i(K)$ 。根据序列求出差值 $\delta_i(K) = |X'_0(K) - X'_i(K)|$, 得到序列 $\delta_i(K)$ 。根据下列计算公式计算出第 K 个试验比较因素相对分析因素的相关系数 $\xi_i(K)$:

$$\xi_i(K) = \frac{\min(i)\min(k)|X_0(K) - X_i(K)| + \rho \max(i)\max(k)|X_0(K) - X_i(K)|}{|X_0(K) - X_i(K)| + \rho \max(i)\max(k)|X_0(K) - X_i(K)|}, \quad (2)$$

式中 $\xi_i(K)$ 是比较因素 X_i 与参考因素 X_0 在第 K 时刻的关联系数; ρ 为分辨系数,一般取 $\rho = 0.5$ 。

为获得整个试验序列 K 个试验中比较因素和分析因素的相关程度,可用 K 个点的关联系数的平均值作为比较因素与分析因素的整个度量,即关联度^[5]。关联度反映了系统中各因子对目标值的影响程度,关联度最大的为首要影响因子:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(K). \quad (3)$$

2) 翘曲量分析

对翘曲量进行灰色关联分析,计算出影响因子对翘曲量的关联度,求得比较因素 X_i 和参考因素 X_0 的关联度: $\gamma_1 = 0.637$, $\gamma_2 = 0.702$, $\gamma_3 = 0.588$, $\gamma_4 = 0.595$ 。

由大到小排序结果 $\gamma_2 > \gamma_1 > \gamma_4 > \gamma_3$, 说明工艺参数对翘曲量影响程度由大到小依次为扫描速度,激光功率,铺粉厚度和扫描间距。扫描速度为影响翘曲量的最重要因子。

3) 尺寸精度分析

采用 GRA 处理尺寸精度实验数据,结果表明工艺参数对尺寸精度影响程度由大到小依次为扫描速度、激光功率、扫描间距和铺粉厚度。

通过 GRA 可知影响激光烧结 PP 制件成型精度的最重要因子是扫描速度。

3.3 优化工艺参数研究

在确定扫描速度为影响成型精度的最重要因子之后,寻求优化工艺参数,为实现 PP 成型粉末的 SLS 应用提供工艺基础。翘曲量实验数据处理结果表明,取 A3B3C1D3 的工艺组合时烧结制件的翘曲量最小,因此优化工艺条件为 B3A3D3C1。尺寸精度实验数据处理结果表明优化条件为扫描速度在 1800~1900 mm/s,激光功率在 15.0~16.5 W,扫描间距为 0.12 mm,铺粉厚度为 0.10 mm。综合考虑工艺参数对翘曲量和尺寸误差的影响,确定激光烧结 PP 成型精度的优化工艺参数,如表 2 所示,其中扫描速度为 1900 mm/s,激光功率为 16.5 W,铺粉厚度为 0.15 mm,扫描间距为 0.12 mm。

表 2 成型精度优化工艺参数

Table 2 Table of optimized fabrication parameters

Scanning speed /(mm/s)	Laser power /W	Scanning width /mm	Powder thickness /mm
1900	16.5	0.12	0.15

在优化工艺参数条件下,烧结改性 PP 材料制备 64.0 mm×32.0 mm×3.0 mm 制件,尺寸测量值如表 3 所示,翘曲量小于 0.20 mm。从而得到激光烧结 PP 材料的优化工艺参数。图 1 为优化工艺参数下烧结的 PP 制件。

表 3 优化工艺参数实验结果

Table 3 Experimental result of optimization fabrication parameters

Parameter	Length	Width
Value of design /mm	64.00	32.00
Actual dimension /mm	62.24	31.07
Error /mm	-1.76	-0.93
Rate of error /%	2.75	2.91

优化工艺条件下采用系数补偿方法来保证制件尺寸精度满足设计要求。根据测试数据计算收缩修正系数,在控制软件中设定补偿系数,再根据试验结果作适当调整,最终得到准确的补偿系数。表 4 为补偿系数实验数据。



图1 优化工艺参数条件下烧结PP制件

Fig.1 Part by SLS on the optimization fabrication parameters

表4 补偿系数的计算

Table 4 Table of compensation factor

	Value of design /mm	Compensation factor	Actual dimension /mm	Error /mm	Rate of error /%
Length	64.00	1.0328436	64.06	+0.06	0.094
Width	37.50	1.0320139	37.53	+0.03	0.08

4 结 论

通过选区激光烧结PP成型系列实验,研究工艺参数对制件成型精度的影响。实验得到激光烧结PP制件的优化工艺参数,并采用软件系数补偿方法保证制件成型精度。1)采用GAR进行数据分析,结果表明影响成型精度的最重要的工艺参数是扫描速度,其次为激光功率。2)综合考虑翘曲量和尺寸误差方面的影响,确定激光烧结PP制件的优化工艺参数为扫描速度为1.9 m/s,激光功率为16.5 W,铺粉厚度为0.15 mm,扫描间距为0.12 mm。

参 考 文 献

- Zhu Linqun. Rapid Prototyping Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003.
朱林泉. 快速成型与快速制造技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- Yan Yongnian, Li Shengjie, Zhang Renji. Rapid prototyping and manufacturing technology: principle, representative technics, applications, and development trends[J]. Tsinghua Science & Technology, 2009, 14(s1): 112-116.
- Li Xiangsheng, Yin Yanfang, Huang Shuhuai. Investigation on shrinkage of parts made by SLS[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2003, (6): 830-832.
李湘生, 殷燕芳, 黄树槐. 激光选区烧结的成型收缩研究[J]. 材料科学与工程学报, 2003, (6): 830-832.
- Pang Guoxing. Research on Rapid Prototyping Forming Technology and Post-treatment Coating with Powder Selective Laser Sintering[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.
庞国星. 粉末激光烧结快速成型工艺及后处理涂层研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
- Wang Xiang, Cui Rui, Yang Hao. Theoretical and experimental studies on three-dimensional temperature field of selective laser sintering of engineering plastics powder[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0103005.
王翔, 崔瑞, 杨浩. 工程塑料粉末激光烧结三维温度场的理论和实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0103005.
- Liu Sifeng. Grey System Theory and Its Applications[M]. Beijing: Science Press, 2010.
刘思峰. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.