

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.03.009

工艺参数对 PS/CF 混合粉末 SLS 烧结件尺寸精度的影响

杨来侠,王勃,杨繁荣

(西安科技大学机械工程学院,西安 710054)

摘要:以机械混合的方式制备了聚苯乙烯/碳纤维(PS/CF)混合粉末材料。在环境温度25℃、扫描间距0.30 mm和扫描方式XYSTA等条件下,采用选区激光烧结(SLS)工艺,通过单因素试验法分别研究了预热温度、激光功率、扫描速度及分层厚度对PS/CF混合粉末烧结件尺寸精度的影响及规律;根据综合平衡法原则通过正交试验和极差分析确定了烧结件尺寸精度的最佳工艺参数组合。结果表明,激光功率对PS/CF烧结件X向尺寸精度的影响最大,预热温度对其影响最小;扫描速度对Y向尺寸精度的影响最大,分层厚度对其影响最小;分层厚度对Z向尺寸精度的影响最大,预热温度对其影响最小。最佳工艺参数组合为:预热温度85℃,扫描速度1800 mm/s,激光功率30 W,分层厚度0.22 mm,此时PS/CF烧结件与同种工艺参数下的纯PS烧结件相比,X向、Y向和Z向的尺寸精度分别提高18.44%,30%和40.84%。

关键词:选区激光烧结;聚苯乙烯;短切碳纤维;工艺参数;尺寸精度

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)03-0044-06

Effects of Process Parameters on Dimensional Accuracy of PS/CF Hybrid Powder Sintering Parts Based on SLS

Yang Laixia, Wang Bo, Yang Fanrong

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

Abstract: Polystyrene / carbon fiber (PS / CF) hybrid powder were prepared by mechanical mixing. Under the condition of ambient temperature 25℃, scanning interval 0.30 mm and scanning mode XYSTA and so on, the effects and the law of preheating temperature, laser power, scanning velocity and layer thickness on the dimensional precision of PS / CF hybrid powder sintering parts were studied by using single factor experiment and selective laser sintering process. The optimal combinations of process parameters of sintered parts size accuracy are determined by orthogonal experiment and extreme difference analysis according to the principle of comprehensive balance method. The results show that the effect of laser power on dimensional precision in X direction of the specimen is maximum, and the preheating temperature is minimum. The effect of scanning speed on dimensional precision of the specimen's Y direction is maximum, and the layer thickness is minimal. The layer thickness to the Z direction dimensional precision of the specimen is maximum, and preheating temperature is minimum. The optimal combinations of process parameters are preheating temperature 85℃, scanning speed 1800 mm/s, laser power 30 W and layer thickness 0.22 mm. The dimensional accuracy of the PS/CF sintered parts in X, Y and Z directions are increased by 18.44%, 30% and 40.84% respectively, compared with the pure PS sintered parts under the same process parameters.

Keywords: selective laser sintering; polystyrene; short carbon fiber; process parameter; dimensional accuracy

快速铸造技术是目前应用广泛的制造技术之一,它通过快速成型技术制作铸造模样,并结合传统铸造工艺快速浇铸出零件^[1]。而在快速铸造技术中

所使用的快速成型技术应用较为广泛的是选区激光烧结(SLS)技术^[2],它是在被加工零件三维模型的驱动下,以激光作为能源,以高分子有机粉末材料作

基金项目: 国家863计划项目(2015AA042503)

通讯作者: 杨来侠,教授,博导,主要从事快速成型与模具制造方面的研究 E-mail: 1078654261@qq.com

收稿日期: 2017-12-15

引用格式: 杨来侠,王勃,杨繁荣. 工艺参数对PS/CF混合粉末SLS烧结件尺寸精度的影响[J]. 工程塑料应用,2018,46(3):44-49.

Yang Laixia, Wang Bo, Yang Fanrong. Effects of process parameters on dimensional accuracy of PS/CF hybrid powder sintering parts based on SLS[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(3):44-49.

为加工材料,有选择地进行层层烧结并累加,待烧结完成后去除多余的材料,即可得到加工完成的零件或铸造模样^[3-4]。

在众多的有机高分子材料中,聚苯乙烯(PS)的密度小、流动性好,玻璃化转化温度与分解温度之间有着较宽的温度控制区域,满足SLS工艺对材料的要求^[5],因此PS在SLS工艺中得到一定的应用^[6]。但是在利用纯PS进行烧结的过程中发现,纯PS在烧结过程中易发生烧结件移动、错层、翘曲变形等精度缺陷^[7-8]。短切碳纤维(CF)粉末作为一种良好的增强纤维材料,具有良好的导热性,可降低激光烧结过程中产生的热应力,从而防止烧结件的变形,因此在SLS工艺中常用来改善高分子有机材料的成型精度^[9]。鉴于此,笔者通过机械混合的方式制备了用于SLS工艺的PS/CF混合粉末材料,采用单因素实验分别研究了预热温度、激光功率、扫描速度及分层厚度对PS/CF混合粉末烧结件X向、Y向及Z向精度的影响及变化规律,根据综合平衡法的原则,通过正交试验和极差分析法,以烧结件成型精度为衡量指标,确定最佳工艺参数组合,并在最佳工艺参数下对纯PS和PS/CF混合粉末材料进行了烧结对比实验。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PS粉末:工业级,平均粒径为150 μm,上海冠步机电科技有限公司;

短切CF粉末:T300型,单丝直径为7 μm,长度为75 μm,淄博坤茂达新材料有限公司。

1.2 主要仪器与设备

数显式游标卡尺:352-101型,量程为(150±0.03) mm,上海恒量量具有限公司;

电子分析天平秤:BSM-52002型,上海卓精电子科技有限公司;

高速搅拌机:LXTGS01型,苏州利欣特机电有限公司;

圆形振动筛粉机:S49-400型,新乡市天龙振动设备有限公司;

激光快速成型机:XJRPSLS300型,陕西恒通智能机器有限公司。

1.3 PS/CF混合粉末的制备

根据前期大量的基础性实验,可以确定当PS/CF烧结件的烧结质量最佳时,PS与CF的质量比为9:1左右^[10-11]。因此设定混合粉末中PS与CF

质量比为9:1,利用电子天平称取一定质量的PS粉和CF粉放入高速搅拌机中混合均匀,选择滤网孔径为150 μm的圆筛,然后将混合的粉末放入圆形振动筛粉机中进行筛分,得到平均粒径在100~150 μm之间的PS/CF混合粉末,该材料粒径满足SLS工艺对高分子有机粉末材料粒径的要求。

1.4 实验方法设计

(1) 实验目的。

在快速铸造技术中,铸造模样的制作精度间接决定了铸件的品质,而铸造模样的精度依赖于快速成型技术的成型精度^[12]。在SLS工艺中,决定烧结件精度的主要因素为烧结材料和烧结工艺参数^[13-14];经过前期的基础实验,笔者发现采用SLS工艺烧结小中型件的成型精度在X向、Y向的尺寸精度的变化基本一致,主要区别为Z向尺寸精度的变化;当烧结件的Z向尺寸不小于10 mm时,即可认为该烧结件为中型件,笔者选取可同时代表小中型件的长方体(尺寸为50 mm×50 mm×10 mm)作为烧结件精度测试件;为了排除其它无关因素的干扰,每次同时烧结3个精度测试件,以烧结件成型精度作为衡量指标,分别讨论分析了预热温度、激光功率、扫描速度及分层厚度等工艺参数对烧结件成型尺寸精度的影响及其变化规律;并根据综合平衡法原则通过正交试验和极差分析确定了PS/CF混合粉末材料烧结的最佳成型工艺参数,为扩展PS及CF的应用范围提供一定的基础。

(2) 尺寸精度测试及表征。

采用X向、Y向及Z向的尺寸相对误差绝对值来衡量烧结件的尺寸精度,尺寸相对误差绝对值越小说明精度越高,烧结件的实测尺寸为同一组3个烧结件实测尺寸的平均值,以尺寸相对误差绝对值表示精度,按式(1)计算^[15]:

$$\delta = \frac{|A_1 - A_0|}{A_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:δ——尺寸相对误差绝对值;

A₁——烧结件的实测尺寸;

A₀——烧结件的理论尺寸。

2 结果与讨论

2.1 单因素试验分析

SLS工艺中决定烧结件精度的主要影响因素为烧结所采用的烧结工艺参数。在前期大量的基础实验中,笔者发现,在保证PS/CF烧结件质量和加工效率的双重前提下,得到的一组较为合理的参

数组组合为: 预热温度 75℃、扫描速度 2 200 mm/s、激光功率 25 W 和分层厚度 0.25 mm。在环境温度 25℃、扫描间距 0.30 mm 和扫描方式 XYSTA 等条件下,通过单因素实验法分别讨论分析了预热温度、扫描速度、激光功率和分层厚度对烧结件精度的影响及其变化规律。

(1) 预热温度对烧结件精度的影响。

被烧结粉体的表面温度由预热温度决定。图 1 为不同预热温度下烧结件 X 向、Y 向及 Z 向尺寸精度的变化曲线。

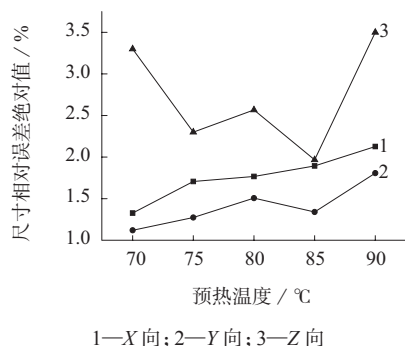


图1 不同预热温度下烧结件 X 向、Y 向及 Z 向尺寸精度的变化曲线

从图 1 可以看出,烧结件 X 向和 Y 向的尺寸精度随着预热温度的升高而逐渐变低,Z 向的尺寸精度随着预热温度的升高先变高后变低。这是由于 PS 粉末作为热塑性材料会随着预热温度的升高发生一定的热熔胀,从而增加了粉末颗粒之间的运动摩擦力,在铺粉过程中导致烧结件在 X 向及 Y 向产生轻微的移动,因此造成 X 向和 Y 向尺寸精度逐渐变差。当粉体温度较低时,激光照射的温度与粉体温度之间的温度差大,PS/CF 混合粉末材料不能在激光照射下充分融化;而当粉体温度过高时,PS/CF 混合粉末材料与已烧结部分之间的粘连作用比较明显,因此造成 Z 向尺寸精度变差。实验中发现,当预热温度为 70℃时,烧结件产生了较为严重的翘曲变形现象,Z 向尺寸精度急剧变差;当预热温度为 90℃时,由于摩擦力的作用,烧结件产生了明显的错层现象,X 向、Y 向和 Z 向的尺寸精度均得不到保证,因此在正交试验中预热温度选取 75,80,85℃作为试验的水平值。

(2) 扫描速度对烧结件精度的影响。

图 2 为不同扫描速度下烧结件 X 向、Y 向及 Z 向尺寸精度的变化曲线。

从图 2 可以看出,随着扫描速度的增大,烧结件 X 向及 Y 向的尺寸精度没有受到明显的影响;而 Z 向的尺寸精度在扫描速度小于 2 000 mm/

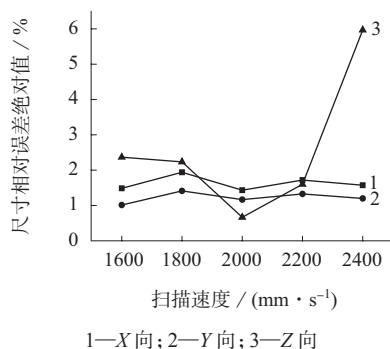


图2 不同扫描速度下烧结件 X 向、Y 向及 Z 向尺寸精度的变化曲线
s 时,随着扫描速度的增大而提高,在扫描速度大于 2 000 mm/s 时,随着扫描速度的增大而迅速降低。这是因为当扫描速度过低时,相当于激光束作用在粉体上的时间延长,造成烧结件的“过烧结”;当扫描速度过高时,相当于作用在粉体上的激光能量减小,从而造成烧结件的“欠烧结”,使得烧结件层与层之间的粘接不紧密,从而导致烧结件的部分缺失。因此当扫描速度过高或过低时,均会造成烧结件 Z 向尺寸精度变差。在 PS/CF 烧结实验中发现,当扫描速度为 1 600 mm/s 时,烧结件出现碳化现象,Z 向尺寸偏差急剧增大;当扫描速度为 2 400 mm/s 时,烧结件层与层之间发生粘接不牢固,出现烧结层缺失现象。所以在正交试验中扫描速度选取 1 800,2 000,2 200 mm 作为试验的水平值。

(3) 激光功率对烧结件精度的影响。

激光功率直接决定着被烧结粉末的融合程度和粉末颗粒之间的粘接效果。图 3 为不同激光功率下烧结件 X 向、Y 向及 Z 向尺寸精度的变化曲线。

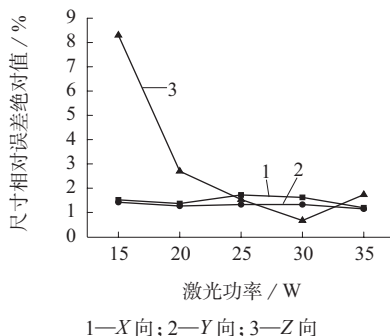


图3 不同激光功率下烧结件 X 向、Y 向及 Z 向尺寸精度的变化曲线

从图 3 可以看出,随着激光功率的增加,PS/CF 烧结件 X 向及 Y 向的尺寸精度没有受到明显的影响,而 Z 向尺寸精度总体上也有一定的提高,但是在 30~35 W 时,Z 向尺寸精度产生了小幅的下降。这是因为当激光功率过低时,烧结件的强度过低,所以在清粉过程中已烧结部分很容易从烧结件的表面剥离,从而造成烧结件尺寸精度变差;当激光功率

过高时,多余的热量会传递到烧结件周围的粉末中,使得周围的粉末粘连在已烧结部分上,所以在激光功率为 30~35 W 时,烧结件 Z 向尺寸精度产生了小幅的下降。在烧结实验中发现,当选取激光功率 15 W 时,烧结能量过低,烧结件难以顺利成型;当激光功率为 35 W 时,烧结件出现明显的气化和碳化现象,造成 Z 向尺寸精度产生小幅下降趋势。因此在正交试验中激光功率选取 20,25,30 W 作为试验的水平值。

(4) 分层厚度对烧结件精度的影响。

图 4 为不同分层厚度下烧结件 X 向、Y 向及 Z 向尺寸精度的变化曲线。

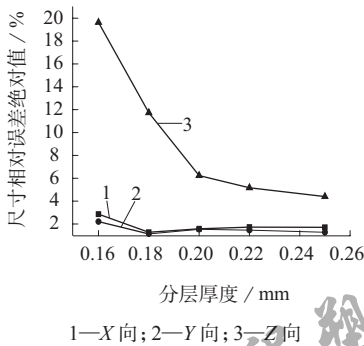


图 4 不同分层厚度下烧结件 X 向、Y 向及 Z 向尺寸精度的变化曲线

从图 4 可以看出,随着分层厚度的增加,烧结件 X 向及 Y 向的尺寸精度没有受到明显影响,而 Z 向尺寸精度随着分层厚度的增加而提高。这是因为分层厚度越小,到达每层底部粉末的激光能量就越高,当分层厚度过小时容易发生过热烧结现象,使得已烧结部分与未烧结部分发生粘连,进而造成烧结件清粉困难,导致烧结件的 Z 向尺寸精度分布不均并变差。在烧结实验中发现,当选取分层厚度为 0.16 mm 和 0.18 mm 时,已烧结部分与未烧结部分之间的粘连较为严重,清粉困难, Z 向尺寸精度分布不均,精度较差;因此在正交试验中分层厚度选取 0.20,0.22,0.25 mm 作为试验的水平值。

2.2 工艺参数优选

(1) 正交试验。

将预热温度、激光功率、扫描速度及分层厚度 4 个工艺参数作为正交试验的变量,每个试验变量取 3 个试验水平,进行“四因素三水平”正交试验,试验因素水平表列于表 1。正交试验方案及结果列于表 2。

从表 2 正交试验结果可以看出,烧结件 X 向尺寸相对误差绝对值为 0.99%~1.93%, Y 向尺寸相对误差绝对值为 0.75%~1.63%, Z 向尺寸相对误差绝

表 1 正交试验因素水平表

试验水平	试验因素			
	预热温度 (A) / °C	扫描速度 (B) (mm · s ⁻¹)	激光功率 (C) W	分层厚度 (D) mm
1	75	1800	20	0.20
2	80	2000	25	0.22
3	85	2200	30	0.25

表 2 正交试验方案及结果

试验编号	A / °C	B / (mm · s ⁻¹)	C / W	D / mm	X 向尺寸 偏差绝对 值 / %	Y 向尺寸 偏差绝对 值 / %	Z 向尺寸 偏差绝对 值 / %
1	75	1800	20	0.20	1.63	1.29	13.80
2	75	2000	25	0.22	1.79	1.25	7.03
3	75	2200	30	0.25	1.62	1.33	0.67
4	80	1800	25	0.25	1.71	1.21	0.80
5	80	2000	30	0.20	1.19	1.37	6.40
6	80	2200	20	0.22	1.93	1.63	11.77
7	85	1800	30	0.22	0.99	0.75	0.93
8	85	2000	20	0.25	1.82	1.41	1.73
9	85	2200	25	0.20	1.61	1.28	11.03

对值为 0.67%~13.80%。

(2) 极差分析。

通过极差分析可得到不同工艺参数对 X 向、Y 向及 Z 向尺寸精度的影响规律,并对工艺参数进行优选。同一因素水平下的 K_i 值为该因素水平下的 3 个实验值之和, $i=1,2,3$ 。在同一实验因素下,实验结果的极差值越大,说明该因素对于实验过程及结果的影响程度越大。X 向、Y 向及 Z 向尺寸精度极差分析结果分别列于表 3、表 4 和表 5。将试验因素水平作为横坐标,将 K 值作为纵坐标,得到 X 向、Y 向及 Z 向尺寸精度与各试验因素水平的关系曲线,分别如图 5、图 6 和图 7 所示。

表 3 X 向尺寸精度极差分析结果

计算值	A	B	C	D	%
K_1	5.04	4.34	5.38	4.43	
K_2	4.82	4.80	5.10	3.63	
K_3	4.42	5.15	3.80	5.15	
$K_{\text{总}}$	14.28	14.29	14.28	13.21	
极差 R	0.62	0.81	1.58	1.52	

表 4 Y 向尺寸精度极差分析结果

计算值	A	B	C	D	%
K_1	3.87	3.25	4.33	3.93	
K_2	4.21	4.03	3.75	3.63	
K_3	3.44	4.23	3.44	3.95	
$K_{\text{总}}$	11.52	11.51	11.52	11.51	
极差 R	0.77	0.98	0.89	0.32	

表 5 Z 向尺寸精度极差分析结果

计算值	A	B	C	D	%
K_1	21.50	15.53	27.30	31.23	
K_2	18.97	15.17	18.87	19.73	
K_3	13.70	23.47	8.00	3.20	
$K_{\text{总}}$	54.17	54.17	54.17	54.16	
极差 R	7.80	8.30	19.30	28.03	

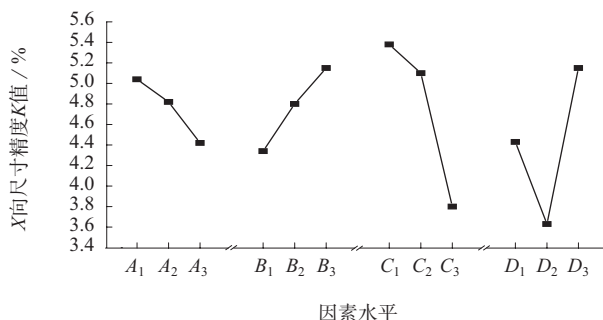


图5 X向尺寸精度K值与各因素水平的关系曲线

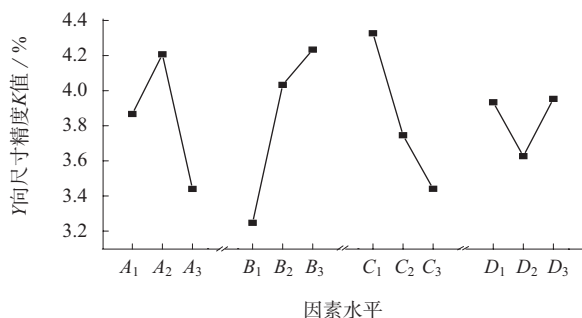


图6 Y向尺寸精度K值与各因素水平的关系曲线

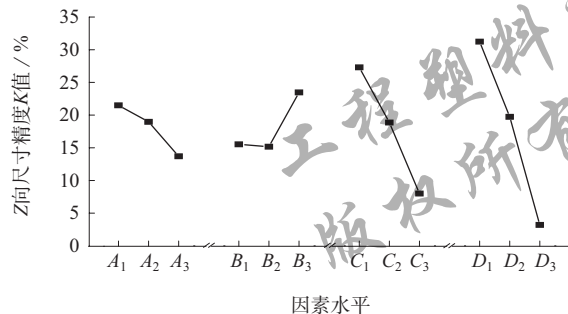


图7 Z向尺寸精度K值与各因素水平关系曲线

由表3可得, $R(A) < R(B) < R(D) < R(C)$, 即激光功率对X向尺寸精度的影响最大, 分层厚度和扫描速度的影响次之, 预热温度的影响最小。尺寸精度K值越小表明尺寸精度越高, 即最小K值所对应的工艺参数为最优工艺参数。因此, 从图5可以看出, X向尺寸精度的最优工艺参数组合为: $A_3B_1C_3D_2$, 即最优工艺参数为: 预热温度 85°C , 扫描速度 1800 mm/s , 激光功率 30 W , 分层厚度 0.22 mm 。

由表4可得, $R(D) < R(A) < R(C) < R(B)$, 即扫描速度对Y向尺寸精度的影响最大, 激光功率和预热温度的影响次之, 分层厚度的影响最小。从图6可以看出, Y向尺寸精度的最优工艺参数组合为: $A_3B_1C_3D_2$, 即最优工艺参数为: 预热温度 85°C , 扫描速度 1800 mm/s , 激光功率 30 W , 分层厚度 0.22 mm 。

由表5可得, $R(A) < R(B) < R(C) < R(D)$, 即

分层厚度对Z向尺寸精度的影响最大, 激光功率和扫描速度的影响次之, 预热温度的影响最小。从图7可以看出, Z向尺寸精度的最优工艺参数组合为: $A_3B_2C_3D_3$, 即最优工艺参数为: 预热温度 85°C , 扫描速度 2000 mm/s , 激光功率 30 W , 分层厚度 0.25 mm 。

根据以上X向、Y向及Z向尺寸精度与工艺参数之间的变化规律, 得出了各自的最佳工艺参数。但是在实际生产中衡量烧结件的尺寸精度往往是X向、Y向及Z向三个方向同时进行考量; 根据综合平衡法原则, 分别以X向、Y向及Z向三个方向尺寸精度作为衡量指标, 均衡烧结工艺参数对三者的影响程度, 在保证三者的精度均可达到较优水平的前提下, 优选烧结件X向、Y向及Z向三个方向尺寸精度, 得出的最佳工艺参数组合为: $A_3B_1C_3D_2$, 即最优工艺参数为: 预热温度 85°C , 扫描速度 1800 mm/s , 激光功率 30 W , 分层厚度 0.22 mm 。

2.3 烧结实例对比分析

在最佳工艺参数下, 参照GB/T 1447-2005 烧结拉伸力学测试件, 如图8所示, 分析CF对烧结件尺寸精度的影响。结果表明, 纯PS烧结件的X向尺寸精度为 1.41% , Y向尺寸精度为 0.30% , Z向尺寸精度为 4.31% ; PS/CF烧结件的X向尺寸精度为 1.15% , Y向尺寸精度为 0.21% , Z向尺寸精度 2.55% 。与纯PS烧结件相比, PS/CF烧结件的X向尺寸精度提高了 18.44% , Y向尺寸精度提高了 30% , Z向尺寸精度提高了 40.84% ; 与纯PS烧结件相比, PS/CF烧结件的表面质量较好, 轮廓清晰, 棱角分明, 并未出现明显的翘曲变形、错层等现象, 烧结成型质量优于纯PS。



图8 PS/CF与纯PS烧结件对比图

3 结论

通过机械混合法制备了PS/CF混合粉末材料, 以X向、Y向及Z向的尺寸精度作为衡量指标, 分别讨论分析了预热温度、激光功率、扫描速度及分层厚度对烧结件尺寸精度的影响及其变化规律, 并在最佳工艺参数下进行了PS粉末与PS/CF混合粉末的对比烧结实验, 得到以下结论:

(1) 通过极差分析可知:就 X 向尺寸精度而言,激光功率、分层厚度、扫描速度和预热温度对其的影响程度依次降低。就 Y 向尺寸精度而言,扫描速度、激光功率、预热温度和分层厚度对其的影响程度依次降低。就 Z 向尺寸精度而言,分层厚度、激光功率、扫描速度和预热温度对其的影响程度依次降低。

(2) 根据综合平衡法原则,通过正交试验和极差分析可得到最佳工艺参数组合为:预热温度 85°C ,扫描速度 1800 mm/s ,激光功率 30 W ,分层厚度 0.22 mm ,此时PS/CF烧结件的 X 向、 Y 向及 Z 向的尺寸精度分别为 1.15% 、 0.21% 和 2.55% 。

(3) 对比烧结实验结果表明,在同种工艺参数下,PS/CF烧结件 X 向、 Y 向及 Z 向尺寸精度较纯PS烧结件相比,可分别提高 18.44% 、 30% 和 40.84% ,成型质量优于纯PS。

参考文献

- [1] 张敏华. 快速铸造和快速精密铸造技术的研究与发展[J]. 热加工工艺, 2009, 38(3):36-44.
Zhang Minhua. Research and development of rapid casting and rapid precision casting[J]. Hot Working Technology, 2009, 38(3):36-44.
- [2] 吕乐华, 张智源, 郭亚辉, 等. 选择性激光烧结技术在铸造生产中的应用[J]. 铸造, 2016, 65(5):428-430.
Lyu Lehua, Zhang Zhiyuan, Guo Yahui, et al. Application of SLS technology to casting production[J]. Foundry, 2016, 65(5):428-430.
- [3] 龚林. 选择性激光烧结聚苯乙烯/玻璃纤维复合材料及成型工艺研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2017.
Gong Lin. Research on selective laser sintering of polystyrene / glass fiber composites and molding process[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017.
- [4] 杨家懿, 朱伟, 史云松, 等. 激光选区烧结高分子纳米复合材料研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2017, 33(6):184-190.
Yang Jiayi, Zhu Wei, Shi Yunsong, et al. Selective laser sintering of polymer based nanocomposites[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2017, 33(6):184-190.
- [5] Wang Kun, Pang Yongyan, Liu Wei, et al. A new approach designed for improving in situ compatibilization of polypropylene / polystyrene blends via reactive extrusion with supercritical CO_2 as the processing medium[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2016, 118:203-209.
- [6] 宫玉玺. 铸造用模具快速成型工艺及性能研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2016.
Gong Yuxi. Research on rapid prototyping technology and performance of mold for casting[D]. Shenyang: Shenyang University, 2016.
- [7] 杨来侠, 刘旭. 选区激光烧结聚苯乙烯粉的基础实验研究[J]. 激光技术, 2016, 40(5):767-771.
Yang Laixia, Liu Xu. Experimental study about polystyrene powder based on selective laser sintering[J]. Laser Technology, 2016, 40(5):767-771.
- [8] 孙胜伟, 张坚, 郑海忠, 等. 激光选区烧结PS制件的精度研究[J]. 现代塑料加工应用, 2007(1):26-28.
Sun Shengwei, Zhang Jian, Zheng Haizhong, et al. Precision of polystyrene parts by selective laser sintering[J]. Modern Plastics Processing and Application, 2007(1):26-28.
- [9] 方鲲, 向正桐, 张骥, 等. 3D打印碳纤维增强塑料及复合材料的增材制造与应用[J]. 新材料产业, 2017(1):31-37.
Fang Kun, Xiang Zhengtong, Zhang Jian, et al. 3D printed carbon fiber reinforced plastics and composite materials for the manufacture and application of materials[J]. Advanced Materials Industry, 2017(1):31-37.
- [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] 赵贞慧. 基于选区激光烧结的碳纤维/聚苯乙烯材料增强工艺研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2017.
Zhao Zhenhui. Study on the process of polystyrene / carbon fiber reinforced composites based on selective laser sintering[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017.
- [12] 薄夫祥, 何冰, 蹇雪梅. 覆膜砂选择性激光烧结工艺[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9):247-253.
Bo Fuxiang, He Bing, Zong Xuemei. Selective laser sintering process of coated sands[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9):247-253.
- [13] 姜乐涛, 白培康, 赵娜, 等. PS粉末SLS快速成型收缩率实验研究[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(4):41-45.
Jiang Letao, Bai Peikang, Zhao Na, et al. Study on shrinkage rate of ps powders with selective laser sintering rapid prototyping experiment[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(4):41-45.
- [14] 吴海华, 鄢俊能, 李腾飞, 等. 石墨/酚醛树脂混合粉末选择性激光烧结成型精度实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(8):210-216.
Wu Haihua, Yan Junneng, Li Tengfei, et al. Experimental study on molding precision for graphite/phenolic resin mixed powders processed by selective laser sintering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(8):210-216.
- [15] 董渠, 王传洋, 钱秋波. 选择性激光烧结聚苯乙烯制件尺寸精度影响因素研究[J]. 塑料工业, 2010, 38(S1):93-95.
Dong Qu, Wang Chuanyang, Qian Qiubo. Investigation on impact factors of polystyrene parts dimension accuracy made by selective laser sintering[J]. China Plastics Industry, 2010, 38(S1):93-95.