

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.10.009

PS/化学气相沉积CF选区激光烧结 多指标正交试验参数的优化*

杨来侠¹,周文明¹,赵贞慧¹,龚林¹,鲁杰²,杜珣涛²,王勃¹

(1. 西安科技大学机械工程学院,西安 710054; 2. 西安科技大学材料科学与工程学院,西安 710054)

摘要:针对选择性激光烧结(SLS)工艺中聚苯乙烯(PS)粉末烧结件精度不高且强度不能满足实际需求的问题,将经过化学气相沉积法处理的碳纤维(CF)粉末、PS粉末、分散剂和抗静电剂进行机械混合,制备了PS/气相沉积CF复合粉末。以Z向尺寸相对误差、致密度和弯曲强度为实验指标,先采用极差分析法进行单个指标的优化,再利用综合平衡法对多指标正交试验进行整体参数优化分析。结果表明:复合粉末粒度主要分布在30.63~142.00 μm;对于PS粉末烧结件,化学气相沉积CF粉末比普通的CF粉末具有更好的改善尺寸精度、填充和增强的效果;烧结件的最佳工艺参数组合为:预热温度为80℃,激光功率为27 W,扫描速度为1800 mm/s和扫描间距为0.30 mm。此时烧结件的Z向尺寸相对误差为5.47%,致密度为0.626 g/cm³,弯曲强度为10.68 MPa。相比于纯PS粉末烧结件,分别提高了24.55%,30.42%,136.28%。

关键词:选区激光烧结;聚苯乙烯;碳纤维;化学气相沉积法;正交试验;综合平衡法;参数优化

中图分类号: TQ327.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)10-0046-06

Parameters Optimization of Multi-index Orthogonal Test for PS/Chemical Vapor Deposited CF by SLS

Yang Laixia¹, Zhou Wenming¹, Zhao Zhenhui¹, Gong Lin¹, Lu Jie², Du Xuntao², Wang Bo¹

(1. College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Aiming at the problems that polystyrene (PS) powders sintered parts forming precision is not high and the strength can't meet actual needs in selective laser sintering (SLS) process, the carbon fiber (CF) powders treated by chemical vapor deposition method, PS powders, dispersant and antistatic agent were mixed through mechanical method, the composite powder of PS/chemical vapor deposited CF powder was prepared. Considering the relative error in the Z direction, density and bending strength as experimental indexes. First, the method of range analysis was used to optimize single index, and then the comprehensive balance method was used to optimize the multi-index orthogonal test. The result show that the particle size of the composite powders is mainly distributed in 30.63~142.00 μm. For PS powders sintered parts, the chemical vapor deposited CF powders have better effect on improving the dimensional accuracy, filling and strengthening effect than ordinary CF powders. The optimum combination of process parameters of SLS parts are preheating temperature 80℃, laser power 27 W, scanning speed 1800 mm/s and scanning interval 0.30 mm. At this point, the relative error in the Z direction of sintered parts is 5.47%, the density is 0.626 g/cm³, and the bending strength is 10.68 MPa, which is increased by 24.55%, 30.42% and 136.28% respectively compared with pure PS sintered part.

Keywords: selective laser sintering; polystyrene; carbon fiber; chemical vapor deposition method; orthogonal experiment; comprehensive balance method; parameter optimization

选区激光烧结(SLS)工艺作为增材制造技术中较为成熟的一种成型方法,它是以红外激光器作为能量源,有选择性地扫描照射固体粉末实现逐层累加成型^[1]。聚苯乙烯(PS)是一种热塑性树脂,具有较小的收缩率、较好的流动性和较宽的成型温度范围等优点,非常适合SLS工艺的成型需要,其缺点

是力学性能和耐热性较差。SLS工艺由于是无压成型,制造出的PS粉末烧结件存在精度不高以及因

* 国家863计划项目(2015AA042503)

联系人: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

收稿日期:2017-07-28

致密化程度较低,导致强度较差不能满足实际需求的问题^[2]。碳纤维(CF)具有质轻、比强度高和耐热性好等一系列优点,常用来增强热塑性树脂和热固性树脂^[3]。

由于PS和CF表面之间的相容性较差,为了提高两者的相容性,需要对其进行表面改性,而化学气相沉积法(CVD)^[4]对CF进行表面处理具有较好的效果。杨华锐等^[5]对改性处理后的半晶态聚合物聚醚醚酮(PEEK)粉末与CF粉末进行机械混合并用热压机制成标准试样,研究表明,CF可以提高PEEK的力学性能和耐热性。鉴于此,笔者采用机械混合法制备PS/气相沉积CF复合粉末,为SLS工艺提供高性能的CF复合材料,拓展其应用领域奠定基础。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PS粉末:平均粒径125 μm ,江苏常州荣晟新材料科技有限公司;

CF粉末:长度75 μm ,直径7 μm ,沧州中丽新材料有限公司;

气相沉积CF粉末:长度80 μm ,直径10 μm ,沧州中丽新材料有限公司;

抗静电剂:禾大129,上海井宏实业有限公司;

硬脂酸钙:一级品,天津市大茂化学试剂厂。

1.2 主要仪器及设备

电子秤:SF-400A型,江阴市索菲电子科技有限公司;

数显游标卡尺:精度0.01 mm,深圳弘宇创仪器有限公司;

电子天平:PRACTUM224-1CN型,赛多利斯科学仪器(北京)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;

场发射扫描电子显微镜(FESEM):SU8010型,江苏万科科教仪器有限公司;

高速混合机:SHR-10A型,张家港市万凯机械有限公司;

真空干燥箱:DZF-1型,西安太康生物科技有限公司;

激光快速成型机:XJRPSLS300型,陕西恒通智能机器有限公司;

激光粒度分析仪:LS230型,贝克曼库尔特商贸(中国)有限公司;

微机控制电子万能试验机:CMT4304型,深圳市新三思计量技术有限公司。

1.3 复合粉末和烧结件的制备

(1) 复合粉末的制备。

用网眼直径为75 μm 的不锈钢筛子筛分出适量的抗静电剂和硬脂酸钙分散剂。把PS粉末、CF粉末和气相沉积CF粉末分别置于90℃下真空干燥30 min,以去除粉末表面的自由水分和易挥发分。将PS粉末和经过气相沉积处理的CF粉末按照质量比89:10在高速混合机中机械混合30 min,同时把分散剂和抗静电剂(两者质量分数均为0.5%)每间隔5 min分3次加入到复合粉末中进行混合,从而制得实验所用的PS/气相沉积CF复合粉末。采用同样的方法制备出PS/CF复合粉末。加入助剂是为了提高粉末分散均匀并解决铺粉过程中的静电吸附问题。

(2) 烧结件的制备。

选择不同的烧结参数,使用激光快速成型机,在8层网格支撑和XYSTA扫描方式(X,Y方向交替扫描)的条件下,每组等间距烧结5个80 mm×10 mm×4 mm的弯曲试样。烧结结束后,待试样冷却至室温,取出,扫去试样表面多余的浮粉,并做好试样的标号。

1.4 性能测试与表征

粒径检测:采用激光粒度分析仪测试复合粉末的平均粒径以及粒径分布;

精度测试:采用尺寸相对误差衡量尺寸精度,具体测试方法参照文献[6];

致密度测试:具体测试方法参照文献[7];

弯曲强度:按照GB/T 9341-2008测试,试验速度5 mm/min,跨度64 mm;

FESEM观察:对试样的断面先进行喷金处理,然后用FESEM观察烧结件断裂面的微观形貌,测试电压为5 kV,放大倍数为200倍。

2 结果与讨论

2.1 PS/气相沉积CF复合粉末的粒度分布图

在SLS工艺中,粉末粒度会影响烧结件的分层厚度和烧结速率等。粉末粒度太大,烧结件的“阶梯效应”会较显著,导致三维实体零件的细小结构缺失且粉床密度较低,烧结件的孔隙率较大;粉末粒径太小,铺粉过程中静电吸附铺粉辊筒的问题较严重,导致铺粉困难^[8]。因此选择合理的粒径分布来降低孔隙率,进而提高制件的致密度和强度具有

重要的意义。

PS/气相沉积CF复合粉末粒度的分布图如图1所示。

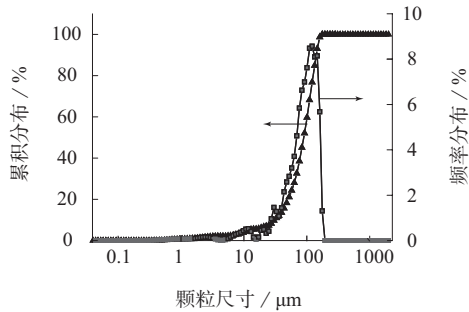


图1 复合粉末粒度分布图

由图1可以看出, $D_{10} \sim D_{90}$ 对应的粒度范围为 $30.63 \sim 142.00 \mu\text{m}$, 并且粉末的平均粒度为 $88.01 \mu\text{m}$ 。这与文献[9]研究的SLS中粉末平均粒度在 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 之间具有较好的铺粉和成型效果基本一致。总体来看, 该复合粉末粒度分布范围较宽, 这样可以使得烧结过程中粒径较小的粉末可以有效地填充到大的粉末颗粒之间的空隙中, 并且大小不一的粉末颗粒可以提高粉床的密度。因此, 复合粉末可以满足SLS成型工艺对粒径的要求。

2.2 PS/气相沉积CF复合粉末烧结实验

吴海华等^[10]研究了工艺参数对烧结件尺寸精度的影响, 得出Z向尺寸相对误差受工艺参数的影响较大的结论。王伟等^[11]针对SLS工艺烧结件孔隙率大、致密度低的现状, 采用浸蜡的后处理工艺来提高烧结件的致密度和强度, 但需要一定的装置和工序, 而且有赖于人工打磨的方式来提高原型件的表面光洁度。杨来侠等^[12]研究了工艺参数对烧结件力学性能的影响。目前针对工艺参数对多个烧结性能同时研究和优化处理的研究还不多见。故笔者采用机械混合法制备的PS/气相沉积CF复合粉末进行SLS工艺的烧结实验, 同时研究工艺参数对烧结件的Z向尺寸相对误差、致密度和弯曲强度3个实验指标的影响, 并用综合平衡法进行参数的整体优化分析。

(1) 正交试验方案设计。

影响SLS烧结件性能的工艺参数有很多, 结合实际需要, 选择预热温度(A)、激光功率(B)、扫描速度(C)和扫描间距(D)共4个参数作为实验因素。每个因素各取3个水平, 采用四因素三水平进行正交试验(见表1), 正交试验结果见表2。

(2) 正交试验结果分析。

表1 因素水平表

水平	因素			
	A/℃	B/W	C/(mm·s ⁻¹)	D/mm
1	75	23	1600	0.28
2	80	25	1800	0.30
3	85	27	2000	0.32

表2 正交试验结果

组号	A	B	C	D	Z向尺寸相对误差绝对值/%	致密度/(g·cm ⁻³)	弯曲强度/MPa
1 [#]	1	1	1	1	4.0	0.614	8.74
2 [#]	1	2	2	2	3.60	0.569	7.65
3 [#]	1	3	3	3	2.50	0.555	6.02
4 [#]	2	1	2	3	2.50	0.551	5.76
5 [#]	2	2	3	1	4.0	0.557	6.39
6 [#]	2	3	1	2	7.0	0.649	11.51
7 [#]	3	1	3	2	0.75	0.551	5.09
8 [#]	3	2	1	3	5.25	0.609	8.93
9 [#]	3	3	2	1	6.50	0.672	11.25

对于正交试验结果常用极差分析法进行分析。将表2中同一因素下每个水平的结果值相加, 即为表3~表5中的 K_i 值, $i=1, 2, 3$ 。对于多因素正交试验, 每一因素下不同水平 K_i 值的最大和最小值之差, 即为极差 R 。对于正交试验, 极差 R 越大, 说明该因素对结果的影响程度也越大。

表3 Z向尺寸相对误差绝对值极差分析表

计算值	A	B	C	D
K_1	10.10	7.25	16.25	14.50
K_2	13.50	12.85	12.60	11.35
K_3	12.50	16.00	7.25	10.25
R	3.40	8.75	9.00	4.25
最优水平	A_1	B_1	C_3	D_3

表4 致密度极差分析表

计算值	A	B	C	D
K_1	1.738	1.716	1.872	1.843
K_2	1.757	1.735	1.792	1.769
K_3	1.832	1.876	1.663	1.715
R	0.094	0.160	0.209	0.128
最优水平	A_3	B_3	C_1	D_1

表5 弯曲强度极差分析表

计算值	A	B	C	D
K_1	22.41	19.59	29.18	26.38
K_2	23.66	22.97	24.66	24.25
K_3	25.27	28.78	17.50	20.71
R	2.86	9.19	7.16	5.67
最优水平	A_3	B_3	C_1	D_1

根据表3~表5的极差大小, 进行如下单个实验指标的优化分析。

由表3中Z向尺寸相对误差绝对值的极差分析可知, $R_C > R_B > R_D > R_A$ 。因此各因素对烧结件Z向尺寸相对误差的影响程度中, 扫描速度(C)最大、预热温度(A)最小, 而激光功率(B)和扫描间距(D)位于两者之间。对于烧结件的Z向尺寸相对

误差而言,其值越小,表示尺寸精度越高。根据表3各因素对应的Z向尺寸相对误差的水平值可知,Z向尺寸相对误差的最优水平为 $A_1B_1C_3D_3$,则最佳工艺参数组合为:预热温度 75°C ,激光功率 23 W ,扫描速度 2000 mm/s 和扫描间距 0.32 mm 。

由表4中致密度的极差分析可知, $R_C > R_B > R_D > R_A$ 。因此各因素对烧结件致密度的影响程度中,扫描速度(C)最大,预热温度(A)最小,而激光功率(B)和扫描间距(D)位于两者之间。对于烧结件致密度而言,其值越大,内部的孔隙越小,烧结件也越致密。根据表4中各因素对应的烧结件致密度的水平值可知,烧结件致密度的最优水平为 $A_3B_3C_1D_1$,则最佳工艺参数组合为:预热温度 85°C ,激光功率 27 W ,扫描速度 1600 mm/s 和扫描间距 0.28 mm 。

由表5弯曲强度的极差分析可知, $R_B > R_C > R_D > R_A$ 。因此各因素对烧结件弯曲强度的影响程度中,激光功率(B)最大、预热温度(A)最小,而扫描速度(C)和扫描间距(D)位于两者之间。对于烧结件的弯曲强度而言,其值越大,烧结件的力学性能越好。根据表5中各因素对应的烧结件弯曲强度水平值可知,烧结件弯曲强度的最优水平为 $A_3B_3C_1D_1$,则最佳工艺参数组合为:预热温度 85°C ,激光功率 27 W ,扫描速度 1600 mm/s 和扫描间距 0.28 mm ,与烧结件致密度最优水平具有一致性。

2.3 综合平衡法确定最优工艺参数

对于正交试验同时研究多个实验指标,可以采用综合平衡法确定最优工艺参数组合^[13]。优化过程要兼顾各个实验指标,力求达到多个实验指标的整体最优。由表3~表5单个实验指标的极差分析可知,Z向尺寸相对误差的最优水平为 $A_1B_1C_3D_3$,烧结件致密度的最优水平为 $A_3B_3C_1D_1$,烧结件弯曲强度的最优水平为 $A_3B_3C_1D_1$ 。可见该正交试验下3个实验指标最优的参数组合并不相同,为了得到一组最优的参数组合,还需要进行整体优化分析。

具体的优化分析过程如下:

(1) 预热温度(A)。

通过极差分析可知,A对于3个实验指标的影响程度均最小。预热是SLS必不可少的环节,充分预热可降低材料成型前后上下粉层以及烧结区域与周围粉末之间的温度梯度而产生的热应力,从而达到防止翘曲和减小制件移动而导致错层的目的^[14]。实验过程中发现, A_1 为 75°C 时,由于预热不充分粉

末流动性较差,烧结件翘曲严重,同时铺粉辊会带动制件产生移动,影响烧结件的成型质量。当 A_3 为 85°C 时,粉末出现“结块”现象,随着烧结过程的进行,工作台上的粉末中会产生大量的残渣,如不及时过滤筛分,当粉末重复回收利用后会增大铺粉辊的摩擦力而不利于铺粉。当 A_2 设定为 80°C ,可以减少烧结件成型时间,铺粉较为顺利,翘曲等现象不明显,烧结过程可以顺利进行,达到预热的目的。

(2) 激光功率(B)。

B是影响弯曲强度的主要因素,是致密度和Z向尺寸相对误差的次要因素。对于Z向尺寸相对误差而言,次要因素B的极差是8.75,主要因素C的极差是9.00。相比于D的极差4.25和A的极差3.40,两者是比较接近的。因此可以近似认为,因素B和因素C对Z向尺寸相对误差的影响程度相当。又因为致密度和弯曲强度都是选 B_3 作为最优水平,所以综合分析取 B_3 水平,即激光功率(B)为 27 W 。实验过程中发现,当 $B < 20\text{ W}$ 时,在激光束的照射下粉末材料仅在相互接触的部位发生粘连,烧结件内部存在大量的孔隙,致密度较低,虽然烧结件收缩变形较小,有利于提高尺寸精度,但是弯曲强度很低,甚至无法成型。当B为 23 W 或 27 W 时,粉末吸收的能量增多,烧结件层内和层间的粘结较好,烧结件内部孔隙变少,致密度得到提高,弯曲强度也就越大。如果 $B > 30\text{ W}$,而 $C < 1600\text{ mm/s}$ 时,烧结件表层会产生汽化而出现颜色变黄,同时由于传热作用会导致烧结件周围的粉末融化并粘附在烧结件上,造成轮廓变大清粉困难,影响烧结件的成型精度。

(3) 扫描速度(C)。

C是Z向尺寸相对误差和致密度的主要因素。由表3可知,对于C,Z向尺寸相对误差的最优水平为 C_3 。由表4可知,致密度取 C_1 为最优,但是从表4可以看出, C_1 水平的 $K_1=1.872$ (此时扫描速度为 1600 mm/s),和 C_2 水平的 $K_2=1.792$ (此时扫描速度为 1800 mm/s)差别不大。实验过程中发现,当激光功率为 27 W ,扫描速度为 1600 mm/s 时,由于激光能量过高,部分烧结层有炭化现象而不利于层间联结。而激光功率为 27 W ,扫描速度为 1800 mm/s 时,烧结件成型质量较好。当激光功率为 27 W ,扫描速度 $> 2000\text{ mm/s}$ 时,激光扫描照射粉末材料的时间就越短,每层的烧结成型时间就会变短,可以提高成型效率。同时,烧结件由于

热变形和热收缩引起的尺寸误差就越小,但是由于粉末接收到的激光能量较低,粉末的熔融致密化程度越低,烧结件内部组织松散存在大量的孔洞,由于烧结不充分而造成分层缺陷,最终导致烧结件的弯曲强度越低,致使在后续清粉过程中会将烧结件表面上粘接不牢固的粉末颗粒清理掉,最终造成Z向实际尺寸值低于理论尺寸值,并且随着扫描速度的增大,Z向尺寸相对误差沿着负方向逐渐增大。综合以上分析,扫描速度取 C_2 水平,即1800 mm/s。激光功率和扫描速度作为SLS工艺中2个重要的工艺参数,只有实现合理的匹配,才能获得较为理想的烧结质量。

(4) 扫描间距(D)。

对于3个实验指标而言,D均是较次要因素。当激光能量一定时,D越大,相邻两条激光扫描线分离程度也越大,能量分布也就越不均匀,未被烧结的粉末则越多,由粉末状态变化导致的热变形就越小,烧结件收缩变形也就会越小,Z向尺寸精度会较好,但会使得单层粉末致密化程度降低,造成粉末之间的粘接性能变差,最终导致烧结件的弯曲强度降低;D越小,相邻两条激光束重叠部分会较多,粉末熔融程度会较好,可以提高致密度,但是会增加扫描次数,降低成型效率。一旦接收的能量过多,烧结件就会产生翘曲和热分解现象。考虑到本实验机器的光斑直径为0.30 mm,故选择 D_2 水平,即扫描间距为0.30 mm,此时可以保证扫描线间充分重叠粘结。

通过综合平衡法优化分析后,得出PS/气相沉积CF烧结件在3个实验指标同时作用下最优的工艺参数组合为: $A_2B_3C_2D_2$,即预热温度为80℃、激光功率为27 W、扫描速度为1800 mm/s和扫描间距为0.30 mm。此时进行烧结实验,烧结件的Z向尺寸相对误差为5.47%,致密度为0.626 g/cm³,弯曲强度为10.68 MPa。

为了说明在纯PS粉末中添加CF粉末以及表面经过气相沉积处理过的CF粉末对烧结件性能的影响,特进行如下烧结实验。表6为3种不同材料在PS/气相沉积CF最优参数组合下烧结件的性能对比。

表6 3种不同材料体系下烧结件性能的对比

项目	Z向尺寸 相对误差/%	致密度/ (g·cm ⁻³)	弯曲强度/ MPa
PS	7.25	0.480	4.52
PS/CF	5.72	0.594	7.65
PS/气相沉积CF	5.47	0.626	10.68

从表6可以看出,PS/气相沉积CF烧结件比PS/CF和纯PS烧结件的Z向尺寸精度分别提高了4.37%和24.55%。关于Z向尺寸相对误差可以得出如下结论:

(1) 3种材料体系的Z向尺寸相对误差均为正值。这是因为当激光能量过高时,多余的热量会向烧结件周围扩散,烧结件的体积增大,高度方向会变厚,导致实际尺寸大于理论尺寸,尺寸偏差也就为正偏差。

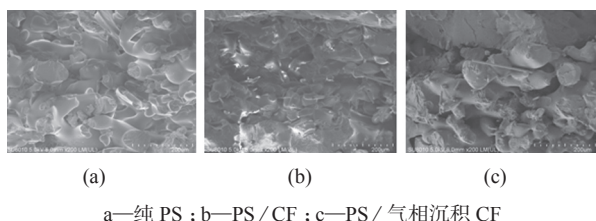
(2) 纯PS烧结件的正偏差最大,其次为PS/CF烧结件,PS/气相沉积CF烧结件的最小。不论在纯PS中加入表面是否经过处理的CF粉末,其烧结件Z向尺寸相对误差值均小于纯PS。这是由于CF粉末的熔点较高,耐热性较好,可以吸收部分作用在复合粉末表面多余的热量,从而减小烧结件的变形,也就减小了烧结件的尺寸偏差。

(3) PS/气相沉积CF烧结件的正偏差略小于PS/CF烧结件。这是因为经过表面气相沉积处理的CF与纯PS粉末的界面结合力得到了改善,可以削弱激光向粉层下传递的能量,从而减小烧结件内部产生的热变形和热应力,Z向尺寸相对误差也会相应的减小。

SLS工艺下烧结件的致密度与孔隙率是相对的。由于烧结件内部存在大量的孔隙,导致其致密度较低。从表6可以看出,PS/气相沉积CF烧结件的致密度最高,纯PS的最低。PS/气相沉积CF烧结件比PS/CF和纯PS烧结件的致密度分别提高了5.39%和30.42%。其原因可能是CF作为一种无机填料,表面经过气相沉积处理与PS树脂具有较好的界面结合,填充效果也比普通的CF好。

由表6可知,PS/气相沉积CF烧结件的弯曲强度比PS/CF和纯PS烧结件分别提高了39.61%和136.28%。对于PS粉末这类非晶态聚合物,在兼顾尺寸精度的前提下,烧结件的致密度越高,烧结件的力学性能就越好。将CF粉末混合入PS粉末中,CF的比强度高的优点被充分利用,会将作用在PS上的力传导到CF上,从而起到增强PS的作用。对于无机CF要达到较好的增强PS粉末的效果,就要从提高材料界面结合力出发,需要对CF进行表面处理。因此经过气相沉积处理的CF增强效果比普通CF好。

图2为纯PS,PS/CF和PS/气相沉积CF烧结件弯曲试样断面的SEM照片。



(a) 纯 PS ; (b) PS/CF ; (c) PS/气相沉积 CF

图2 纯 PS、PS/CF 和 PS/气相沉积 CF 烧结件弯曲试样断面的 SEM 照片

由图 2a 可看出,纯 PS 粉末烧结件的断面较为光滑,粉末颗粒只有在相互接触的地方产生烧结颈,存在大量形状不规则的孔隙,致密度较低,从而导致 SLS 烧结件的强度较低。图 2b 表明,将普通的 CF 均匀混入 PS 粉末中,CF 大部分搭接在 PS 基体的孔隙中,少部分镶嵌在 PS 基体中^[15],被 PS 基体熔融包覆的程度很低。这是因为 CF 表面光滑,缺少与树脂结合的活性基团,界面结合较弱。同时还发现 PS/CF 烧结件断面略显粗糙。这是因为当对材料施加外力时,CF 阻止材料断裂,需更大的外力来对材料造成破坏,故材料在断裂之前首先产生微小滑移,所以断面显得粗糙。图 2c 表明,经过气相沉积法处理的 CF 主要镶嵌在 PS 粉末颗粒中,少部分搭接在相邻 PS 基体之间。CF 粉末表面的沉积膜有效地增加了其与 PS 树脂基体之间的界面结合力,从而达到更好的增强效果。因此,材料熔融充分,致密程度较高,烧结件的弯曲强度得到显著的提高。

3 结论

(1) PS/气相沉积 CF 复合粉末的粒度分布在 30.63 ~ 142.00 μm 之间,可以满足实验的需要。

(2) 在 SLS 工艺中,在基体材料 PS 粉末中添加 CF 粉末,可以吸收部分多余的激光能量来提高 Z 向尺寸精度,可以起到填充作用来提高烧结件的致密度;CF 表面经过气相沉积处理与 PS 粉末共混的增强效果比未处理的 CF 好。

(3) 在 8 层网格支撑和 XYSTA 扫描方式下,由极差分析法和综合平衡法对 PS/气相沉积 CF 复合粉末多指标正交试验进行整体优化分析,得到最佳的参数组合为:预热温度 80℃、激光功率 27 W、扫描速度为 1800 mm/s 和扫描间距 0.30 mm。此时进行烧结实验,烧结件的 Z 向尺寸相对误差为 5.47%,致密度为 0.626 g/cm³,弯曲强度为 10.68 MPa。在相同工艺参数条件下,与纯 PS 粉末的烧结件相比,分别提高了 24.55%,30.42%,136.28%。

参考文献

- [1] 陈青果,韦玉堂,张君彩,等. SLS 中激光功率与扫描速度匹配的优化设计[J]. 煤矿机械,2009,30(1):117-119.
Chen Qingguo, Wei Yutang, Zhang Juncai, et al. Optimizing for laser power and scanning velocity matching in SLS[J]. Coal Mine Machinery, 2009, 30(1):117-119.
- [2] 杨来侠,周文明,王勃,等. PS/ABS 复合粉末选择性激光烧结工艺参数的实验研究[J]. 工程塑料应用,2017,45(5):57-62.
Yang Laixia, Zhou Wenming, Wang Bo, et al. Experimental study on process parameters of PS/ABS composite powders based on selective laser sintering[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(5):57-62.
- [3] 齐贵亮. 塑料改性实用技术[M]. 北京:机械工业出版社,2015:78-79.
Qi Guiliang. Practical technology of plastics modification[M]. Beijing:China Machine Press, 2015:78-79.
- [4] 孙占英. 碳纤维表面处理对树脂基复合材料力学性能影响研究进展[J]. 工程塑料应用,2015,43(5):145-148.
Sun Zhanying. Research progress on effects of carbon fiber surface treatment on mechanical properties of resin composites[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(5):145-148.
- [5] 杨华锐,汪艳. 聚醚醚酮/碳纤维复合粉末的制备及性能[J]. 工程塑料应用,2016,44(10):27-31.
Yang Huarui, Wang Yan. Preparation and performance of polyetheretherketone/carbon fiber composite powder[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(10):27-31.
- [6] 杨来侠,龚林. 碳酸钙改性聚苯乙烯的初步选择性激光烧结实验[J]. 工程塑料应用,2016,44(3):49-53.
Yang Laixia, Gong Lin. Preliminary selective laser sintering experiment of polystyrene modified by calcium carbonate[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(3):49-53.
- [7] 刘旭. 基于选区激光烧结的聚苯乙烯成型工艺及改性研究[D]. 西安:西安科技大学,2016.
Liu Xu. Research on molding process and modification of polystyrene based on selective laser sintering[D]. Xi'an:Xi'an University of Science and Technology, 2016.
- [8] 包坤. 双光源激光烧结铺粉系统的改进及成型工艺研究[D]. 西安:西安科技大学,2013.
Bao kun. The powder spread system improvement and research on molding process in selective dual-laser sintering[D]. Xi'an:Xi'an University of Science and Technology, 2013.
- [9] 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.
- [10] 吴海华,鄢俊能,李腾飞,等. 石墨/酚醛树脂混合粉末选择性

- [5] 张福增,宋磊,屠幼萍,等.500 kV 复合绝缘子运行特性分析[J]. 高电压技术,2012,38(10):2536-2541.
Zhang Fuzeng, Song Lei, Tu Youping, et al. Analysis of operating performance for the 500 kV composite insulator[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10):2536-2541.
- [6] 吴光亚.我国绝缘子的发展现状及应考虑的问题[J]. 电瓷避雷器,2010(2):7-11.
Wu Guangya. Domestic development situation of insulator and problems needing consideration[J]. Insulators and Surge Arresters, 2010(2):7-11.
- [7] 陈晓丽,史鸿威,宋晓光,等.浇注式互感器 APG 制造工艺分析[J]. 绝缘材料,2014,47(3):55-57.
Chen Xiaoli, Shi Hongwei, Song Xiaoguang, et al. APG Manufacturing process analysis of casting instrument transformers[J]. Insulating Materials, 2014, 47(3):55-57.
- [8] 焦智武,宋凌云,吕磊,等.复合支柱绝缘子成型工艺研究[J]. 纤维复合材料,2009(1):54-56.
Jiao Zhiwu, Song Lingyun, Lyu Lei, et al. Processing research on manufacturing post insulator[J]. Fiber Composites, 2009(1):54-56.
- [9] Li Zhe, Okamoto K, Ohki Y, et al. Role of nano-filler on partial discharge resistance and dielectric breakdown strength of micro- Al_2O_3 / epoxy composites[C]// IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, Harbin:IEEE, 2009:735-756.
- [10] 张赛军,袁宁,阮锋.APG 工艺用环氧树脂体系的固化及流变模型[J]. 合成树脂及塑料,2007,24(3):20-24.
Zhang Saijun, Yuan Ning, Ruan Feng. Cure kinetics and rheological model of epoxy resin mixture used in APG process[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2007, 24(3):20-24.
- [11] 吴建红,葛乐矣,王福润,等.中压固体绝缘环氧树脂 APG 制造新工艺[J]. 电工电气,2015(1):47-50.
Wu Jianhong, Ge Leyi, Wang Furun, et al. Medium-voltage solid insulation epoxy apg manufacturing new technology[J]. Electro-technics Electric, 2015(1):47-50.
- [12] 井丰喜,石兆从,张道洪,等.超支化聚酯改性环氧-酸酐浇注树脂及性能研究[J]. 粘结,2016(2):36-39.
Jing Fengxi, Shi Zhaocong, Zhang Daohong, et al. Performance of epoxy resin-anhydride pouring materials modified with hyper-branched polyester[J]. Adhesion, 2016(2):36-39.
- [13] 邱长江,李国福.环氧树脂浇注的固化收缩和浇口冷却法[J]. 高压电器,1994(2):52-54.
Qiu Changjiang, Li Guofu. Curing shrinkage and gate cooling method for epoxy resin casting[J]. High Voltage Apparatus, 1994(2):52-54.
- [14] 李志勇.APG 工艺在中压互感器制造中的应用[J]. 热固性树脂,2014,29(4):49-54.
Li Zhiyong. Application of automatic pressure gelation (APG) technology on manufacture of medium voltage instrument transformer[J]. Thermosetting Resin, 2014, 29(4):49-54.
- [15] 尹立,刘辉,张翀,等.环氧树脂基绝缘材料在悬式绝缘子上的应用[J]. 绝缘材料,2015,48(5):26-30.
Yin Li, Liu Hui, Zhang Chong, et al. Application of epoxy resin insulating material in suspension insulator[J]. Insulating Materials, 2015, 48(5):26-30.
- (上接第 51 页)
- 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):1-10.
Wu Haihua, Yan Junneng, Li Tengfei, et al. Experimental study on the precision of selective laser sintering graphite / phenolic resin mixed powders[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2017, 54(8):1-10.
- [11] 王伟,王璞璇,郭艳玲.选择性激光烧结后处理工艺技术研究现状[J]. 森林工程,2014,30(2):101-104.
Wang Wei, Wang Puxuan, Guo Yanling. The research status of post-processing technology of selective laser sintering[J]. Forest Engineering, 2014, 30(2):101-104.
- [12] 杨来侠,周文明,杜珣涛,等.工艺参数对 PS / 改性滑石粉 SLS 烧结件力学性能的影响[J]. 工程塑料应用,2017,45(6):70-74.
Yang Laixia, Zhou Wenming, Du Xuntao, et al. Effects of process parameters on mechanical properties of PS / modified talc powders sintering parts based on SLS[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(6):70-74.
- [13] 孔双祥,胥光申,巨孔亮,等.基于多指标正交试验设计的 SLS 快速成型工艺参数优化[J]. 轻工机械,2017,35(1):30-35.
Kong Shuangxiang, Xu Guangshen, Ju Kongliang, et al. Optimization of process parameters by Multi-index orthogonal experiment in selective laser sintering system[J]. Light Industry Machinery, 2017, 35(1):30-35.
- [14] 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.
Shuai Changjun. The research on warp distortion inhibition of selective laser sintering[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [15] 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.