

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.06.014

工艺参数对 PS/改性滑石粉 SLS 烧结件力学性能的影响^{*}杨来侠¹,周文明¹,杜珣涛²,鲁杰²,曹嘉欣²

(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: 利用硅烷偶联剂 KH560 对滑石粉进行表面改性,之后将其与聚苯乙烯 (PS) 粉机械共混,制备 PS/改性滑石粉复合粉末。在预热温度 85℃ 和 8 层网格支撑等条件下,采用选择性激光烧结 (SLS) 工艺将粉末制备成烧结件。采用扫描电子显微镜观察了滑石粉与 PS 的界面,发现通过对滑石粉进行表面改性,不仅可以使其均匀地分散于 PS 粉中,而且两者的相容性也得到了改善。通过正交实验法研究了 SLS 工艺参数对 PS/改性滑石粉烧结件力学性能的影响。利用极差分析法与综合平衡法得到了多指标下的最优工艺参数组合,即单层厚度 0.18 mm,扫描间距 0.28 mm,激光功率 27 W,扫描速度 1 200 mm/s,此时 PS/改性滑石粉烧结件的拉伸强度为 4.29 MPa,弯曲强度为 14.4 MPa,冲击强度为 4.4 kJ/m²,相比纯 PS 粉烧结件分别提高了 4.9%,10% 和 56%。

关键词: 选择性激光烧结;聚苯乙烯;滑石粉;KH560;改性;正交实验;力学性能;工艺参数优化

中图分类号: TG327.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)06-0070-05

Effects of Process Parameters on Mechanical Properties of PS/Modified Talc Powder Sintering Parts Based on SLS

Yang Laixia¹, Zhou Wenming¹, Du Xuntao², Lu Jie², Cao Jiaxin²

(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: The talc powder was modified by silane coupling agent KH560 and then was blended into polystyrene (PS) powder through mechanical mixing, and the composite powder of PS/modified talc powder was prepared. Under the conditions of preheating temperature of 85℃, grid support of 8 layers and so on, the powder was used for preparing sintering parts through selective laser sintering (SLS) process. The interface of PS and talc was observed by SEM. It is found that the modified talc powder can be evenly dispersed in PS powder and the compatibility of them are also improved. The effects of SLS process parameters on mechanical properties of PS/modified talc powder sintering parts were studied by using the orthogonal experiment method. The combination of optimal process parameters based on multi-index was obtained by using range analysis and comprehensive balance method. It shows that single layer thickness is 0.18 mm, scanning interval is 0.28 mm, laser power is 27 W and scanning speed is 1 200 mm/s, under the optimal combination, the tensile, bending and impact strength of the PS/modified talc powder sintering part is 4.29, 14.4 MPa and 4.4 kJ/m² respectively, which is increased by 4.9%, 10% and 56% separately compared with pure PS sintering part.

Keywords: selective laser sintering; polystyrene; talc powder; KH560; modify; orthogonal experiment; mechanical property; process parameter optimization

选择性激光烧结 (SLS) 工艺经过近三十年的不断发展已经成为增材制造领域的主流成型技术之一^[1]。SLS 工艺是基于“离散—堆积”^[2]的原理,在计算机的控制下激光器有选择性地烧结固体粉末材料,通过逐层累加材料,从而实现三维实体零件的制造。

聚苯乙烯 (PS) 是一种非晶态聚合物,具有收缩率小,成型温度范围宽,熔融过程中材料的流动性和热稳定性较好等优点^[3],但是其本体强度较低。滑石粉是一种应用广泛的无机填料,将滑石粉填充到树脂基体中不仅可以降低生产成本,还可以改善塑料的耐热性,减小成型收缩率,增加塑料制品的尺寸

稳定性^[4-5]。

机械混合法是制备 SLS 高分子复合材料最简单且经济的方法,也是 PS 共混改性的主要方法^[6-7]。鉴于此,将滑石粉填充到 PS 粉中,通过机械混合法制备 PS/滑石粉复合粉末。由于滑石粉与 PS 粉的界面结合能力较差,因此采用硅烷偶联剂对滑石粉进行表面改性处理,然后通过正交实验研究了

^{*} 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: 2017-04-05

SLS 成型工艺中扫描间距、单层厚度、激光功率和扫描速度对 PS/滑石粉 SLS 烧结件力学性能的影响,以便为该类烧结件的 SLS 成型工艺提供参考。

1 实验部分

1.1 实验材料

PS 粉:平均粒径 125 μm ,江苏常州荣晟新材料科技有限公司;

滑石粉:粒径约为 10 μm ,河南恒瑞化工有限公司;

无水乙醇:工业级,浓度 95%,市售;

抗静电剂:禾大 129,上海井宏实业有限公司;

硬脂酸钠:白色轻质粉末,天津市大茂化学试剂厂;

硅烷偶联剂:KH560,盖州市恒达化工有限责任公司。

1.2 主要仪器及设备

电子天平:SF-400 型,上海圣楚实业有限公司;

数显游标卡尺:精度 0.01 mm,东莞市东辉机电设备有限公司;

数显恒温水浴锅:HH-1 型,常州市金坛区环宇科学仪器厂;

高速混合机:SHR-10A 型,张家港市万凯机械有限公司;

电热鼓风干燥箱:DHG-9053A(S) 型,宁波艾德生仪器有限公司;

激光快速成型机:XJRPSLS300 型,陕西恒通智能机器有限公司;

简支梁冲击试验机:XJJ-50 型,承德金和仪器制造有限公司;

微机控制电子万能试验机:CMT4304 型,优鸿测控技术(上海)有限公司;

冷场发射扫描电子显微镜(SEM):SU8010 型,天美(中国)科学仪器有限公司。

1.3 试样制备

(1) 滑石粉的干燥。

为了更好地发挥偶联剂的效果以及去除滑石粉表面的自由水分,需要对滑石粉进行适当的干燥,故在干燥箱 110℃ 的温度下干燥 15 min^[8]。

(2) 滑石粉的表面改性。

将按比例配置好的 KH560、无水乙醇溶液与滑石粉加入四口开口反应器中,放入 90℃ 恒温水浴锅中水浴加热搅拌,10 min 后将改性的滑石粉混合物取出置于 80℃ 的烘箱中干燥 6~8 h,并球磨和筛分,

其中硅烷偶联剂的用量为滑石粉质量的 1.6%。

(3) PS/滑石粉复合粉末的制备。

将 PS 粉、改性滑石粉(两者质量比 95/5)及其它助剂在高速混合机中混合均匀,制备 PS/滑石粉复合粉末。为了使改性滑石粉能够均匀地分散于 PS 粉中以及减小铺粉辊上由于静电引起的粉末吸附问题,在制备过程中加入适量的分散剂硬脂酸钠和抗静电剂。

(4) 试样烧结。

利用激光快速成型机将制备的 PS/滑石粉复合粉末分别烧结成国家标准规定的拉伸试样、弯曲试样和冲击试样。为了减小实验误差,每组 5 个试样等间距放置同时烧结成型,其均值作为该组试样的实验结果。

1.4 测试与表征

拉伸强度按 GB/T 1040.2-2006 测试,I 型双铲形拉伸试样,拉伸速率 5 mm/min;

弯曲强度按 GB/T 9341-2008 测试,试样尺寸为 80 mm×10 mm×4 mm,测试速率为 5 mm/min;

冲击强度按 GB/T 1043.1-2008 测试,试样为 III 型,尺寸为 120 mm×15 mm×10 mm,摆锤能量 7.5 J,冲击速度 3.8 m/s;

SEM 分析:对弯曲试样断面进行干燥和喷金处理,然后用 SEM 观察断面形貌并拍照,测试电压为 10.5 kV。

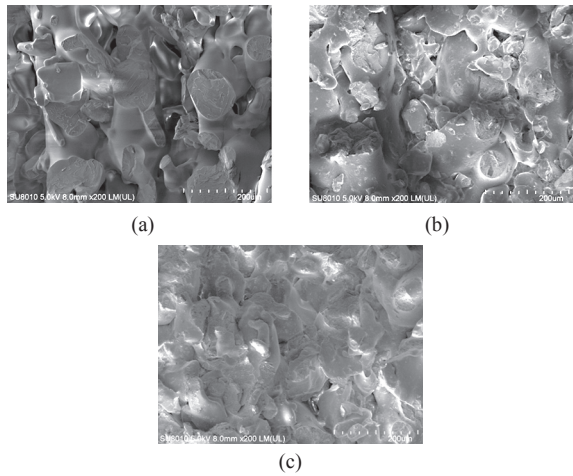
2 结果与讨论

2.1 SEM 表征

采用硅烷偶联剂 KH560 对滑石粉进行表面改性处理,其改性机理是:偶联剂易水解的极性基团与滑石粉表面发生反应,将稳定的亲有机长链基团连接在滑石粉表面,提高滑石粉表面亲有机性,且亲有机长链基团易与 PS 基体发生机械缠绕,使得滑石粉与 PS 粉有较强的界面结合力。

为了观察改性滑石粉在基体材料 PS 粉中的分散情况并简化实验,将纯 PS、PS/未改性滑石粉和 PS/改性滑石粉 3 种不同材料在同一工艺参数组合下仅烧结成型弯曲试样,基于前期已进行的大量 PS 粉的烧结实验,在预热温度 85℃,8 层网格支撑和 XYSTA 扫描方式(X,Y 方向交替扫描)下得到一组较为合理的工艺参数组合:激光功率 25 W、扫描速度 1 600 mm/s、扫描间距 0.3 mm 和单层厚度 0.2 mm。

利用 SEM 在放大 200 倍的情况下观察弯曲试样的断面形貌,如图 1 所示。



a—纯 PS ; b—PS / 未改性滑石粉 ; c—PS / KH560 改性滑石粉

图 1 纯 PS, PS / 未改性滑石粉和 PS / 改性滑石粉
烧成型弯曲试样断面的 SEM 照片

从图 1a 可以看出,纯 PS 的断面形貌相对光滑,但是存在大量的孔隙,粉末颗粒之间熔融不充分,只是靠烧结颈粘连成型,因而烧结件的致密度较低。

从图 1b 可以看出,薄片结构的未改性滑石粉粘附在 PS 粉烧结颗粒表面,未改性的滑石粉与 PS 之间仍有部分孔隙,并且滑石粉与 PS 粉之间的粘结性不高,使得断面微观形貌比较粗糙。这说明 PS 粉与未改性的滑石粉相容性较差,同时未改性滑石粉的片状结构会导致材料体系流动性变差,黏度变大。由 Frankel 烧结颈长方程^[9]可知,在激光烧结过程中烧结速率与材料的黏度呈反比,烧结速率越低,烧结件的力学性能越低,因此未改性的滑石粉若直接与 PS 粉共混会降低烧结件的力学性能。

图 1c 与图 1a 相比,经过表面改性后的滑石粉可以有效地填充烧结过程中产生的孔隙,从而提高烧结件的致密度。图 1c 与图 1b 相比,滑石粉经过硅烷偶联剂 KH560 处理后与 PS 粉的相容性与分散性均得到提高,界面粘结效果也较好。

2.2 PS / 改性滑石粉烧结实验

采用制备的 PS / 改性滑石粉复合粉末进行烧结试验,研究成型工艺参数对烧结件力学性能的影响。基于前期大量烧结实验的基础上,确定单层厚度、扫描间距、激光功率和扫描速度这 4 个参数作为试验因素。激光功率和扫描速度决定了作用在粉末表面上激光能量的大小和时间的长短。为了获得较为理想的烧结质量,两者要进行合理的匹配^[10]。扫描间距是指两条相邻激光扫描线之间的距离,它的

大小决定了两激光束重叠和分离的程度。单层厚度的选择要兼顾成型精度和成型效率。

(1) 实验方案设计。

利用快速成型机在预热温度 85℃,8 层网格支撑和 XYSTA 扫描方式下进行正交实验。正交实验确定为 4 因素 3 水平,4 个因素分别为单层厚度(A)、扫描间距(B)、激光功率(C)和扫描速度(D),每个因素分别取 3 个水平值。设计的四因素三水平正交实验表如表 1 所示。

表 1 四因素三水平正交实验表

水平	因 素			
	A / mm	B / mm	C / W	D / (mm · s ⁻¹)
1	0.18	0.28	23	1 200
2	0.20	0.30	25	1 300
3	0.22	0.32	27	1 400

(2) 实验数据与结果分析。

正交实验方案与实验结果数据如表 2 所示。利用极差分析法对拉伸强度、弯曲强度和冲击强度的实验结果数据进行计算分析,见表 3 ~ 表 5。

表 2 正交实验方案与实验结果数据

实验 组号	A / mm	B / mm	C / W	D / (mm · s ⁻¹)	实验结果		
					拉伸强度 / MPa	弯曲强度 / MPa	冲击强度 / (kJ · m ⁻²)
1 [#]	0.18	0.28	23	1 200	3.09	9.98	2.98
2 [#]	0.18	0.30	25	1 300	2.62	8.60	2.93
3 [#]	0.18	0.32	27	1 400	2.26	7.37	2.83
4 [#]	0.20	0.28	25	1 400	2.58	7.99	2.71
5 [#]	0.20	0.30	27	1 200	3.11	10.57	3.65
6 [#]	0.20	0.32	23	1 300	2.06	5.74	2.33
7 [#]	0.22	0.28	27	1 300	3.28	10.19	3.33
8 [#]	0.22	0.30	23	1 400	2.07	5.59	2.45
9 [#]	0.22	0.32	25	1 200	2.77	7.35	2.80

表 3 拉伸强度极差分析结果

项 目	单层厚度 (A)	扫描间距 (B)	激光功率 (C)	扫描速度 (D)
K1	7.97	8.95	7.22	8.97
K2	7.75	7.80	7.97	7.96
K3	8.12	7.09	8.65	6.91
R	0.37	1.86	1.43	2.06
最优水平	A3	B1	C3	D1

表 4 弯曲强度极差分析结果

项 目	单层厚度 (A)	扫描间距 (B)	激光功率 (C)	扫描速度 (D)
K1	25.95	28.16	21.31	27.90
K2	24.30	24.76	23.94	24.53
K3	23.13	20.46	28.13	20.95
R	2.82	7.70	6.82	6.95
最优水平	A1	B1	C3	D1

表 5 冲击强度极差分析结果

项 目	单层厚度 (A)	扫描间距 (B)	激光功率 (C)	扫描速度 (D)
K1	8.74	9.02	7.76	9.43
K2	8.69	9.03	8.44	8.59
K3	8.58	7.96	9.81	7.99
R	0.16	1.07	2.05	1.44
最优水平	A1	B2	C3	D1

表 2 中每一因素下同一水平实验结果的之和,即为表 3~表 5 中的 K_i 值, $i=1,2,3$ 。 R 为极差,它的大小决定实验因素影响重要程度的顺序。极差 R 越大,表示该因素对实验过程的影响也越大。以各个力学性能为实验指标时,各因素的 K_i 值最大的,即为该因素的最优水平。

由表 3 拉伸强度极差分析可知, $R_D > R_B > R_C > R_A$ 。因此在各因素对拉伸强度的影响中,扫描速度最大、单层厚度最小,而扫描间距和激光功率位于两者之间。根据表 3 各因素对应的水平值可知,拉伸强度对应的最优水平组合为 $A3B1C3D1$,则最佳工艺参数组合为:单层厚度 0.22 mm、扫描间距 0.28 mm、激光功率 27 W、扫描速度 1200 mm/s。在此工艺参数下进行烧结实验,经测试拉伸强度为 3.67 MPa。

由表 4 弯曲强度极差分析可知, $R_B > R_D > R_C > R_A$ 。因此在各因素对弯曲强度的影响中,扫描间距最大、单层厚度最小,而激光功率和扫描速度介于两者之间。根据表 4 各因素对应的水平值可知,弯曲强度对应的最优水平组合为 $A1B1C3D1$,则最佳工艺参数组合为:单层厚度 0.18 mm、扫描间距 0.28 mm、激光功率 27 W、扫描速度 1200 mm/s。在此工艺参数下进行烧结实验,经测试弯曲强度为 14.4 MPa。

由表 5 冲击强度极差分析可知, $R_C > R_D > R_B > R_A$ 。因此在各因素对冲击强度的影响中,激光功率最大、单层厚度最小,而扫描间距和扫描速度介于两者之间。根据表 5 各因素对应的水平值可知,冲击强度对应的最优水平组合为 $A1B2C3D1$,则最佳工艺参数组合为:单层厚度 0.18 mm、扫描间距 0.30 mm、激光功率 27 W、扫描速度 1200 mm/s。在此工艺参数下进行烧结实验,经测试冲击强度为 4.36 kJ/m²。

2.3 综合平衡法确定最优工艺参数组合

由表 3~表 5 单个指标极差分析可知,对应于拉伸强度的最优工艺参数组合为 $A3B1C3D1$,对应于弯曲强度的为 $A1B1C3D1$,对应于冲击强度的为 $A1B2C3D1$ 。可见单一实验指标得到的最优工艺参数组合并不一致,还需要进行多指标的同时优化分析。可以利用综合平衡法^[10]进行多指标正交实验结果的优化分析,在分析时需兼顾各个试验指标,结合 SLS 工艺的烧结理论和实践经验,确定多指标正交实验的最优工艺参数组合,从而获得较为理想的实验效果。优化分析过程如下。

(1) 单层厚度 A 。根据极差分析可知,对于所研究的 3 个指标而言,单层厚度对于烧结件力学性能

影响的重要程度均是最小的。拉伸强度对应的是 $A3$ 水平 0.22 mm,而弯曲强度和冲击强度对应的均为 $A1$ 水平 0.18 mm。当激光能量密度一定时,单层厚度越小,激光束向粉末下方的穿透能力就越强,到达每个烧结层底部的激光能量就越高,层与层之间的粘结效果也会越好,相应的强度也就越高。综合分析,单层厚度选 $A1$ 水平较好,即单层厚度选 0.18 mm,这样易于获得高强度的烧结件。

(2) 扫描间距 B 。由极差分析可知,对于 3 个实验指标,扫描间距对于拉伸强度和弯曲强度属于主要影响因素,其均对应 $B1$ 水平 0.28 mm,而对于冲击强度为次要影响因素,其对应 $B2$ 水平 0.30 mm。当激光能量一定时,扫描间距越小,每一烧结层的激光扫描次数就越多,相邻两扫描线重合部分也会越多,因而作用在单位面积上的激光能量密度就越大,发生熔融的粉末颗粒也就越多,烧结件的强度也就越高。综合分析,扫描间距选 $B1$ 水平,即扫描间距 0.28 mm,这样易于获得高强度的烧结件。

(3) 激光功率 C 和扫描速度 D 。3 个实验指标优化结果一致,均对应 $C3$ 和 $D1$ 水平,即激光功率 27 W、扫描速度 1200 mm/s。当扫描间距一定时,在较大激光功率及较低扫描速度的共同作用下,可以获得较高的激光能量,烧结件的强度也会较高。

经过综合分析后,PS/改性滑石粉烧结件在多指标下的最优工艺参数组合为 $A1B1C3D1$,该组合与弯曲强度对应的最佳工艺参数组合相同,即单层厚度 0.18 mm、扫描间距 0.28 mm、激光功率 27 W、扫描速度 1200 mm/s。此时进行烧结实验,经测试拉伸强度为 4.29 MPa,弯曲强度为 14.40 MPa,冲击强度为 4.40 kJ/m²,均高于表 2 中任一组合下的数据,同拉伸强度或冲击强度对应的最佳工艺参数下的数据相比,也相对较高或持平。这也验证了多指标优化的正确性,实现了单个指标最优的前提下,寻求整体最优的目标。

为了比较最优工艺参数 $A1B1C3D1$ 下的烧结效果,将纯 PS 粉与 PS/改性滑石粉复合材料在此工艺参数组合下进行烧结,比较了它们的力学性能,结果见表 6。

表 6 最优工艺参数下 PS 粉与 PS/改性滑石粉复合材料
烧结件的力学性能

项 目	拉伸强度 / MPa	弯曲强度 / MPa	冲击强度 / (kJ · m ⁻²)
PS 粉	4.09	13.09	2.82
PS/改性滑石粉	4.29	14.40	4.40

从表6可以看出,最优工艺参数下PS/改性滑石粉复合材料烧结件的拉伸强度、弯曲强度和冲击强度比纯PS粉分别提高了4.9%、10%和56%。相比于拉伸强度和弯曲强度,冲击强度提高最显著,其原因可能是当PS/改性滑石粉复合材料体系受到冲击应力时,复合材料体系中的滑石粉粒子会吸收一定的冲击功,同时还可以减小裂纹的扩展,使复合材料体系呈现韧性断裂^[11]。

另外,还可以看出,在获得的最优工艺参数组合下,纯PS粉的拉伸与弯曲强度均高于表2中任一组合下的数据,冲击强度亦非最低。这表明,工艺参数对PS烧结件的力学性能有非常大的影响,在利用改性滑石粉填充PS进行SLS成型时,为获得较好的力学性能,应着重考虑工艺参数的优化调整。

3 结论

(1) 在纯PS粉中添加滑石粉可以起到填充作用,与未改性的滑石粉相比,改性的滑石粉与PS的界面粘结效果和相容性更好,更易于充分混合。

(2) 利用正交实验和极差分析法研究了各工艺因素对PS/改性滑石粉烧结件力学性能的影响,发现在各因素对拉伸强度的影响中,扫描速度最大、单层厚度最小,而扫描间距和激光功率位于两者之间。在各因素对弯曲强度的影响中,扫描间距最大、单层厚度最小,而激光功率和扫描速度介于两者之间。在各因素对冲击强度的影响中,激光功率最大、单层厚度最小,而扫描间距和扫描速度介于两者之间。

(3) 在预热温度85℃,8层网格支撑和XYSTA扫描的条件下,利用极差分析和综合平衡法对多指标正交实验结果进行整体优化分析,得到PS/改性滑石粉烧结件最佳工艺参数组合为单层厚度0.18 mm,扫描间距0.28 mm,激光功率27 W和扫描速度1200 mm/s,此时拉伸强度为4.29 MPa,弯曲强度为14.4 MPa,冲击强度为4.4 kJ/m²。与纯PS粉烧结件相比,PS/改性滑石粉烧结件的拉伸强度、弯曲强度和冲击强度分别提高了4.9%、10%和56%。

参考文献

[1] 陈勃生. 增材制造(3D打印)应用领域发展现状及趋势[J]. 建设机械技术与管理,2015(12):38-41.
Chen Bosheng. Development status and trend of additive manufacturing (3D printing) application fields[J]. Technology and Management for Construction Machinery,2015(12):38-41.

[2] 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.

[3] 杨来侠,刘旭,张文明. 聚苯乙烯粉选择性激光烧结工艺参数优化[J]. 工程塑料应用,2015,43(6):44-49.
Yang Laixia, Liu Xu, Zhang Wenming. Process parameters' optimization of polystyrene powder based on selective laser sintering[J]. Engineering Plastics Application,2015,43(6):44-49.

[4] 唐梓健,杨丽庭,李彦涛,等. 聚丙烯/玻璃纤维/滑石粉复合材料的制备及性能研究[J]. 塑料工业,2017,45(1):80-83,124.
Tang Zijian, Yang Liting, Li Yantao, et al. Study on preparation and properties of polypropylene / glassfiber / talc composites[J]. China Plastics Industry,2017,45(1):80-83,124.

[5] 汪艳,史玉升. 滑石粉填充尼龙12的选择性激光烧结成型[J]. 现代塑料加工应用,2009,21(5):23-25.
Wang Yan, Shi Yusheng. Selective laser sintering of nylon12 filled by talc[J]. Modern Plastics Processing and Applications,2009,21(5):23-25.

[6] 史玉升,闫春泽,魏青松,等. 选择性激光烧结3D打印用高分子复合材料[J]. 中国科学:信息科学,2015(2):204-211.
Shi Yusheng, Yan Chunze, Wei Qingsong, et al. Selective laser sintering of polymer composites for 3D printing[J]. China Science:Scientific Information,2015(2):204-211.

[7] 姚海军,杨永青,常新林,等. 聚苯乙烯改性方法及其应用研究进展[J]. 化学工程与装备,2009(7):142-145.
Yao Haijun, Yang Yongqing, Chang Xinlin, et al. Research progress of polystyrene modification and its application[J]. Chemical Engineering and Equipment,2009(7):142-145.

[8] 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.

[9] 石琴. 选择性激光烧结用复合蜡粉的制备与成型工艺研究[D]. 太原:中北大学,2014.
Shi Qin. The preparation of composite wax powder and its study on the technology of selective laser sintering[D]. Taiyuan:North University of China,2014.

[10] 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.

[11] 邓志伟,熊雷,李佳丽,等. 滑石粉粒径对PVC/滑石粉复合材料力学性能和热膨胀系数的影响[J]. 高分子材料科学与工程,2009,25(4):77-80.
Deng Zhiwei, Xiong Lei, Li Jiali, et al. Effect of talc particle size on mechanical properties and thermal expansion coefficient of PVC/talc composites[J]. Polymer Materials Science and Engineering,2009,25(4):77-80.