

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.02.004

3D 打印用 PA6 / PA12 复合粉末的制备与性能

方亮¹, 汪艳^{1,2}, 陈震¹

(1. 武汉工程大学材料科学与工程学院, 武汉 430073; 2. 广东银禧科技股份有限公司, 广东东莞 523000)

摘要: 采用溶剂沉淀法制备了用于 3D 打印的尼龙 (PA)6 / PA12 复合粉末, 使用扫描电子显微镜和 X 射线衍射对复合粉末微观形貌与结构进行分析, 使用差示扫描量热测试了复合粉末的熔融和结晶温度, 同时测试了不同 PA12 含量下复合粉末的表观密度、粒径分布、熔体流动速率 (MFR) 和注射成型件的力学性能。结果表明, 复合粉末颗粒近球形, 其结晶度明显低于纯 PA6 粉末的结晶度, 当 PA12 的质量分数增加至 20% 时, 复合粉末的结晶度由纯 PA6 的 66.48% 降至 42.66%; 随着 PA12 含量的增加, 复合粉末的表观密度减小, 粒径大于 150 μm 的粉末含量增加, 当 PA12 质量分数为 20% 时, 复合粉末的表观密度仍大于 0.35 g/cm^3 , 粒径在 75~100 μm 的粉末含量虽有所减少, 但仍在 70% 以上, 且加入成核剂可明显减少大粒径粉末的含量; MFR 及注射成型件的韧性随 PA12 含量增加而提高, 但成型件强度和模量下降; PA12 使复合粉末的烧结温度有明显的降低, 烧结温度窗口增大, 有利于选择性激光烧结。

关键词: 尼龙 6; 尼龙 12; 复合粉末; 溶剂沉淀法; 选择性激光烧结; 3D 打印

中图分类号: TQ327 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)02-0020-05

Preparation and Performance of Polyamide 6 / Polyamide 12 Composite Powder for 3D Printing

Fang Liang¹, Wang Yan^{1,2}, Chen Zhen¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China;

2. Guangdong Silver Age Sci & Tech Co. Ltd., Dongguan 523000, China)

Abstract: The composite powder of polyamide (PA) 6 and PA12 used for 3D printing was prepared by solvent deposition method. The morphology and structure of the composite powder were analyzed by SEM and XRD, the melting and crystallization temperature of the composite powder were measured by DSC, the apparent density, particle size distribution, melt flow rate (MFR) of the composite powder and mechanical properties of injection parts molded with the powder under different PA12 content were tested. The results show that, the powder particles were nearly spherical, and the crystallinity of composite powder was lower than that of pure PA6 powder. When the mass fraction of PA12 increases to 20%, the crystallinity of composite powder decreases from 66.48% to 42.66%. With the increase of PA12 content, the apparent density of the composite powder decreases, the proportion of powder with particle size larger than 150 μm increases, when the mass fraction of PA12 is 20%, the apparent density is still higher than 0.35 g/cm^3 , although the proportion of powder with particle size 75~100 μm reduces, it is still above 70%, and adding nucleating agent can reduce the proportion of powder with larger particle size obviously. The MFR of the powder and the toughness of the molding parts increase significantly with the increase of PA12 content, but the strength and modulus decrease. The sintering temperature of the composite powder decreases obviously and the sintering temperature window range increases with the addition of PA12, which is conducive to selective laser sintering.

Keywords: polyamide 6; polyamide 12; composite powder; solvent deposition method; selective laser sintering; 3D printing

选择性激光烧结 (SLS) 是一种重要的 3D 打印技术, 可以使用多种材料成型, 包括高分子、金属和陶瓷等粉末材料^[1-2]。高分子材料具有成型温度低,

所需激光功率小的优点, 成为应用最早、最广泛的 SLS 成型材料^[3-4]。受加工性能与市场应用等条件的限制, 95% 的商业化 SLS 用高分子粉末市场被尼

基金项目: 广东省引进创新创业团队计划项目 (2013C071)

通讯作者: 汪艳, 博士, 教授, 主要从事 3D 打印高分子材料研究 Email: wangyan.wict@163.com

收稿日期: 2018-10-08

引用格式: 方亮, 汪艳, 陈震. 3D 打印用 PA6 / PA12 复合粉末的制备与性能 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(2): 20-24, 51.

Fang Liang, Wang Yan, Chen Zhen. Preparation and performance of polyamide 6 / polyamide 12 composite powder for 3D printing[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(2): 20-24, 51.

龙(PA)材料占据^[5],其中由于PA12兼具韧性与强度的优异性能,使其在市场中占据统治性地位^[6]。

许多文献对应用于SLS成型的PA12及其复合材料进行了研究^[7-10],与PA12相比,PA6有更好的力学性能和更廉价的成本^[11],但国内对用于SLS成型的PA6的研究处于初步阶段。汤教佳等^[12]和杨旭生等^[13]分别用深冷粉碎法与溶剂沉淀法制备了PA6粉末;陈震等^[14]研究了PA6在SLS工艺中的老化机理与抗老化工艺。

PA6的熔点高,成型收缩率大,烧结温度窗口窄^[12],对设备要求苛刻,使其难以应用于SLS工艺。SLS工艺需要材料承受长时间的高温预热过程,PA6分子链中的酰胺基比PA12多,而且预热温度更高,在烧结过程中容易发生老化变黄现象^[15-17]。因此,解决这些问题,使PA6能够更好地应用于SLS成型,具有重要的实用意义。

笔者在溶剂沉淀法制备PA6粉末过程中,加入少量的PA12,能够抑制PA6分子链的缩合反应,缓解了制备的粉末分子量变大,熔体流动速率(MFR)变小的现象,使烧结过程更加容易。而且PA12本身熔点低,在高压釜中能与PA6充分混合均匀,使制备所得的复合粉末熔点降低,从而使烧结过程中加工温度降低,减缓了老化变黄现象,并降低了烧结工艺难度。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PA6:1013B,日本UBE公司;

PA12:L1670,德国赢创工业集团;

无水乙醇:分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;

金红石型钛白粉:工业级,上海华染化工集团公司。

1.2 主要仪器及设备

10 L 高压釜:CJ(k)-10型,威海新元化工机械有限公司;

离心机:P200型,张家港市乐余机电设备厂;

球磨机:湘科KNM型,湘潭市仪器仪表有限公司;

振筛机:RK/ZS-Φ200型,武汉洛克粉磨设备制造有限公司;

标准分样筛:上虞市龙翔精密仪器厂;

微型注塑机:M1200型,武汉启恩科技发展有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):JSM-5510LV型,日本JEOL公司;

X射线衍射(XRD)仪:D8 ADVANCE型,德国Bruker公司;

表观密度测定仪:XBM-100型,承德精密试验机有限公司;

粉体综合特性测试仪:JL-A3型,成都精新粉体测试设备有限公司;

MFR仪:PZ1720型,上海品重检测设备有限公司;

差示扫描量热仪(DSC):DSC200F3型,德国Netzsch公司;

电子式万能试验机:GP-TS2000S型,深圳高品检测设备有限公司;

悬臂梁冲击试验机:XJU-22型,承德试验机有限公司。

1.3 复合粉末的制备

将PA6和PA12原料按照一定的比例混合,加入10 L 高压釜,加入8.5 L 的无水乙醇,设定搅拌速度为300 r/min,釜内温度升至160℃时停止升温,保温30 min后降至室温,将产物进行抽滤、烘干、研磨,得到复合PA粉末。

1.4 性能测试

(1) 复合粉末的SEM表征。

利用SEM观察复合粉末的表观形貌、粒径、球形度等,测试前需对粉末进行喷金处理,操作电压为10 kV。

(2) 复合粉末的XRD表征。

使用XRD仪对复合粉末进行衍射,扫描速度为2 (°)/min,2θ取10°~35°,用XRD图谱分析复合粉末的结晶度。

(3) 复合粉末的表观密度测试。

使用表观密度测定仪按照GB/T 1636-2008测试复合粉末的表观密度。

(4) 复合粉末的粒径分布测试。

将制备的粉末通过振筛机在100目(孔径150 μm),150目(孔径100 μm),200目(孔径74 μm),250目(孔径65 μm)和300目(孔径54 μm)的标准分样筛中进行逐级筛分,分别称量在各级目数下得到的粉末并按质量计算相应含量。

(5) 复合粉末的熔体流动性能测试。

按GB/T 3682-2000测试复合粉末的MFR,测试条件为2.16 kg,230℃。

(6) 复合粉末的 DSC 表征。

使用 DSC 仪分析复合粉末的熔融与结晶温度,升温与降温速率均为 $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

(7) 复合粉末的力学性能测试。

使用微型注塑机将复合粉末制备成标准试样,温度为 220°C ,试样放置 24 h。

拉伸强度按 GB/T 1040—2006 测试,拉伸速率 $50\text{ mm}/\text{min}$;

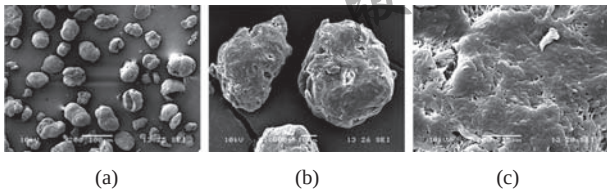
弯曲性能按 GB/T 9341—2008 测试,测试速率 $2\text{ mm}/\text{min}$;

缺口冲击强度按 GB/T 1043—2008 测试,用缺口制样机在试样中部侧边制作 2 mm 的缺口。

2 结果与讨论

2.1 复合粉末的微观形貌

图 1 为复合粉末在没有进行筛分前的 SEM 照片,PA12 质量分数为 20%。如图 1a 所示,粉末形貌整体接近球形,大部分粉末的粒径为 $75\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ 。在图 1b 中可以看到粉末表面凹凸不平,在图 1c 中观察到微球表面存在空隙。在 PA 结晶成粉末后的降温过程中,因体积变小内部产生应力,会使微粒中 PA6 部分与 PA12 部分产生的应力不一致,导致球形粉末微粒出现扭曲变形。PA 结晶过程中残留在内部的溶剂等小分子会逸出,导致微粒表面有少量的空隙。



放大倍数: a—200 倍; b—1 000 倍; c—5 000 倍

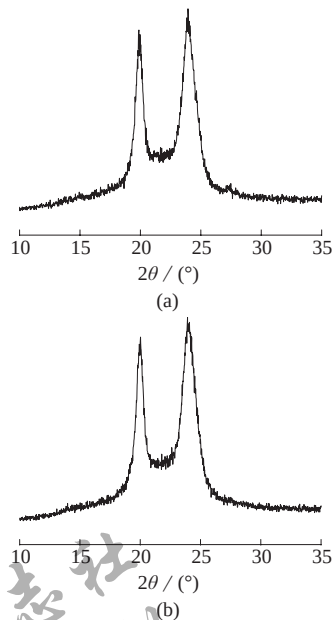
图 1 复合粉末在不同放大倍数下的形貌特征

2.2 复合粉末的 XRD 分析

高结晶度的粉末在结晶成型时会有较高的收缩率,导致成型件的翘曲变形,影响制件的精度及抗冲击性。因此,适度地降低 PA 粉末的结晶度有利于 PA 粉末在 SLS 工艺上的应用。图 2 为纯 PA6 粉末和复合粉末 (PA12 质量分数为 20%) 的 XRD 衍射图谱。在图 2 中, 2θ 为 20.3° 和 23.9° 处有两个尖锐的结晶峰,而 11.0° 处没有明显的结晶峰,可判断两种 PA 粉末都是 α 晶型的单斜晶系。

使用 jade 软件计算 PA 粉末的结晶度,所得结果见表 1。由表 1 可知,纯 PA6 的结晶度为 66.48%,随着 PA12 质量分数的增加,复合粉末的结

晶度明显降低,当 PA12 的质量分数增加至 20% 时,结晶度降低到 42.66%。



a—纯 PA6 粉末; b—PA12 质量分数为 20% 的复合粉末

图 2 PA 粉末的 XRD 图谱

表 1 不同 PA12 含量的复合粉末结晶度计算结果

PA12 质量分数 / %	拟合残差 / %	总面积	结晶度 / %
0	14.50	103 005	66.48
5	13.90	103 295	66.21
10	14.03	104 359	53.35
15	12.99	109 833	51.80
20	13.85	55 730	42.66

2.3 复合粉末的表观密度

表观密度是 SLS 用 PA 粉末的一个重要性能指标,表观密度越大,粉末在 SLS 成型过程中的传热性能越好,成型件的致密度越高。复合粉末的表观密度的测定结果如图 3 所示。

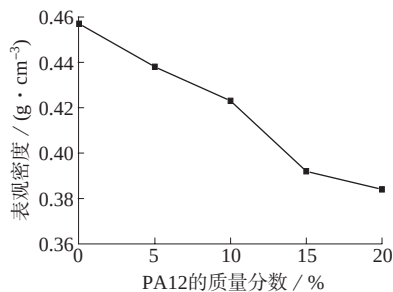


图 3 复合粉末的表观密度与 PA12 质量分数的关系

图 3 显示复合粉末的表观密度随着 PA12 的质量分数的增加而减小,当 PA12 的质量分数增加到 20% 时,粉末的表观密度为 $0.386\text{ g}/\text{cm}^3$ 。随着 PA12 的加入,复合 PA 粉末的球形度变低,形状变得不规则,而且粉末的结晶度也随之降低,这些因素

导致粉末的表观密度降低。SLS 工艺要求 PA 粉末表观密度大于 0.35 g/cm^3 , 总体上看, 在 PA12 质量分数为 5%~20% 时, 制备的复合 PA 粉末在表观密度方面可满足 SLS 的要求。

2.4 复合粉末的粒径分布

粉末的粒径大小是影响 SLS 成型件性能的一项重要因素。当粉末粒径偏大时, 成型精度会变小; 当粉末粒径偏小时, 粉末的流动性能会变差, 表观密度会减小, 会影响铺粉效果和成型件的性能。SLS 工艺要求粉末的粒径范围为 $10 \sim 100 \mu\text{m}$, 在此粒径范围内的粉末质量分数即是制得的 PA 粉末的合格使用率。复合粉末的粒径分布情况如图 4 所示。

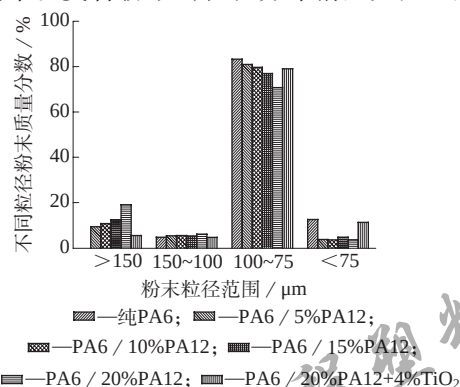


图4 不同 PA12 含量的复合粉末的粒径分布

由图 4 可知, 每组实验所得的复合粉末粒径主要分布在 $75 \sim 100 \mu\text{m}$, 在该粒径范围内的粉末质量分数在 70% 以上。随着 PA12 含量增加, 粒径大于 $150 \mu\text{m}$ 的大颗粒逐渐增多, 小于 $75 \mu\text{m}$ 的粉末减少。当加入的 PA12 质量分数增加到 20% 时, $150 \mu\text{m}$ 以上的粉末质量分数增加至接近 20%, 复合 PA 粉末的合格使用率随着 PA12 含量的增加而降低。为解决这个问题, 向 PA12 质量分数为 20% 的复合粉末加入质量分数为 4% 的钛白粉作为成核剂, 可以发现其能够明显地减少大粒径粉末的质量分数, 粒径大于 $150 \mu\text{m}$ 的粉末含量减少了约 2/3, 小于 $100 \mu\text{m}$ 的粉末含量相应增加。这表明加入成核剂能够缓解 PA12 含量较高时复合粉末合格使用率降低的问题。

2.5 复合粉末的 MFR

在 SLS 工艺中, 粉末的熔体黏度越小, 烧结速率越大, 粉末之间粘结的效果越好。复合粉末的 MFR 测定结果如图 5 所示。PA6 原料的 MFR 是 $23.4 \text{ g}/10 \text{ min}$, 由图 5 可以得知, 制备的纯 PA6 粉末的 MFR 是 $14.5 \text{ g}/10 \text{ min}$ 。由于反应釜的高温高压的环境, PA6 的分子链之间发生缩合反应, 导致平均分子量

增加, 粒料制备成粉末, MFR 减小, 熔体黏度增大, 不利于烧结成型。图 5 显示, 随着 PA12 质量分数的增加, 制得的复合粉末的 MFR 逐渐变大, 当加入的 PA12 质量分数为 20% 时, 复合粉末的 MFR 增加至 $19.8 \text{ g}/10 \text{ min}$ 。表明加入 PA12 可以增大复合粉末的 MFR, 改善粉末材料的激光烧结工艺性能。

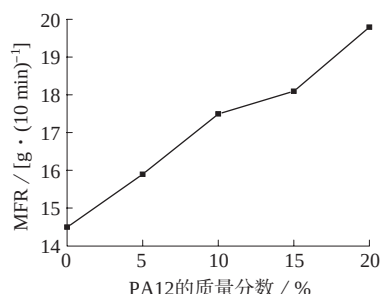
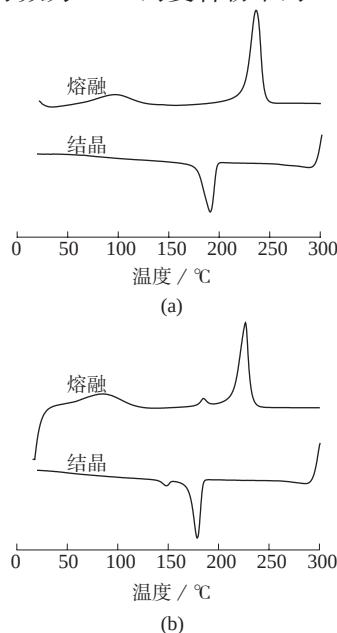


图5 复合粉末的 MFR 与 PA12 质量分数的关系

2.6 复合粉末的 DSC 分析

PA 粉末在 SLS 工艺中的预热温度范围, 称为烧结温度窗口, 该窗口位于起始结晶温度和起始熔融温度之间, 若处于起始熔融温度以上, 粉末会熔化结块, 若处于起始结晶温度以下, 会导致烧结件提前结晶收缩产生翘曲变形。图 6 是纯 PA6 粉末和 PA12 质量分数为 20% 的复合粉末的 DSC 曲线。



a—纯 PA6 粉末; b—PA12 质量分数为 20% 的复合粉末

图6 PA 粉末的 DSC 曲线

从图 6 可以看出, 复合粉末的熔融温度与结晶温度都比纯 PA6 低。图 6b 中, 两个尖锐的峰是 PA6 的熔融和结晶峰, 其中 PA6 的熔融温度范围是 $216.4 \sim 226.7^\circ\text{C}$, 结晶温度范围是 $179.5 \sim 184.1^\circ\text{C}$; 左侧的小峰是 PA12 的熔融和结晶峰, PA12 熔融温

度范围是 180.9 ~ 185.0℃, 结晶温度范围是 149.6 ~ 152.5℃。可以发现, 复合粉末中 PA12 的熔融温度和结晶温度均较 PA6 的低。在预热过程中, 当温度超过 PA12 的熔融温度但尚未达到 PA6 熔融温度时, 每颗复合 PA 微粒中的 PA12 已经处于熔融状态, 但由于此时 PA6 尚未熔融且 PA12 含量相对较低, 其对粉末熔化结块的影响程度较小, 熔融状态的 PA12 反而有利于增加烧结的速度。由于 PA12 起始结晶温度较低, 当预热温度在 PA6 的起始结晶温度之上时, PA12 也没有结晶。所以复合粉末烧结温度窗口的选择主要参考 PA6 的结晶与熔融温度。

表 2 是含不同质量分数 PA12 的复合粉末的 DSC 测试结果。由表 2 可以看出, 随着 PA12 含量增加, 复合粉末的结晶温度和熔融温度都会变低, 烧结温度窗口范围变宽。当 PA12 质量分数增加至 20% 时, 烧结温度窗口范围明显增大, 且所需的烧结温度有所降低, 有利于烧结成型。

表 2 不同 PA12 含量的复合粉末 DSC 测试结果

PA12 质量 分数 / %	复合粉末中 PA6 结 晶温度范围 / °C	复合粉末中 PA6 熔 融温度范围 / °C	烧结温度 窗口 / °C
0	193.3 ~ 197.6	220.7 ~ 233.1	197.6 ~ 220.7
5	193.4 ~ 196.9	220.1 ~ 233.5	196.9 ~ 220.1
10	189.0 ~ 191.4	216.8 ~ 230.7	191.4 ~ 216.8
15	185.1 ~ 190.5	216.1 ~ 230.5	190.5 ~ 216.1
20	179.5 ~ 184.1	216.4 ~ 226.7	184.1 ~ 216.4

2.7 复合粉末注射成型件的力学性能

通过注射成型考察了 PA12 对复合粉末成型件力学性能的影响, 以便为后续的 SLS 成型提供参考。表 3 为不同 PA12 含量的复合粉末注射成型件力学性能。

表 3 不同 PA12 含量的复合粉末注射成型件力学性能

PA12 质量 分数 / %	拉伸强度 / MPa	缺口冲击强度 / (kJ · m ⁻²)	弯曲强度 / MPa	弯曲弹性模 量 / MPa
0	74.2	6.48	121.0	2 765
5	63.9	6.92	87.4	2 325
10	57.7	7.03	67.5	1 867
15	55.5	8.24	63.8	1 811
20	53.1	8.67	54.2	1 657

从表 3 可以得知, 随着 PA12 质量分数增加, 注射成型件的拉伸强度、弯曲强度和弯曲弹性模量明显降低, 而冲击强度变大。当 PA12 的质量分数增加至 20% 时, 成型件的拉伸强度、弯曲强度和弯曲弹性模量分别比纯 PA6 成型件减小了 29.3%, 54.0% 和 40.4%, 冲击强度比纯 PA6 增大了 33.5%。这是因为 PA12 的加入降低了复合粉末的结晶度, 从而使注射成型件的强度和模量降低, 而韧性得到增强。

3 结论

(1) 当 PA12 质量分数为 5%~20% 时, PA6/PA12 复合粉末的粒径基本分布在 75~100 μm, 表观密度高于 0.35 g/cm³, 筛分后的粉末有着较好流动性能。与纯 PA 粉末相比, 复合粉末的球形度有所降低。

(2) 随着 PA12 含量的增加, 复合粉末的结晶度降低, MFR 增加, 有利于复合粉末在 SLS 工艺的应用。但是当 PA12 质量分数为 20% 时, 粒径在 75~100 μm 的粉末含量下降明显, 加入质量分数为 4% 的成核剂能提高粉末的合格使用率。

(3) 随着 PA12 含量的增加, 复合粉末的熔融温度与结晶温度降低, 所需的烧结温度降低, 烧结温度窗口变宽。综合各方面的因素, 20% 可视为复合粉末中 PA12 最佳的质量分数。

(4) 随着 PA12 含量的增加, 复合粉末的注射成型件强度和模量降低, 但韧性增强。

参考文献

- [1] 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, 45(2):204-211.
Shi Yusheng, Yan Chunzhe, Wei Qingsong, et al. Polymer based composites for selective laser sintering 3D printing technology[J]. Science China: Information Sciences, 2015, 45(2):204-211.
- [2] Kumar S. Selective laser sintering: A qualitative and objective approach[J]. The Journal of The Minerals, 2003, 55(10):43-47.
- [3] 王延庆, 沈竞兴, 吴海全. 3D 打印材料应用和研究现状[J]. 航空材料学报, 2016, 36(4):89-98.
Wang Yanqing, Shen Jingxing, Wu Haiquan. Application and research status of alternative materials for 3D-printing technology[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(4):89-98.
- [4] Shi Y, Wang Y, Chen J, et al. Experimental investigation into the selective laser sintering of high-impact polystyrene[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2008, 108(1):535-540.
- [5] Franco A, Lanzetta M, Romoli L. Experimental analysis of selective laser sintering of polyamide powders: an energy perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2010, 18(16):1 722-1 730.
- [6] Zhao M, Wudy K, Drummer D. Crystallization Kinetics of Polyamide 12 during selective laser sintering[J/OL]. Polymers, 2018, 10(2):[2018-12-09]. <https://doi.org/10.3390/polym10020168>.
- [7] Zarringhalam H, Hopkinson N, Kamperman N F, et al. Effects of processing on microstructure and properties of SLS nylon 12[J]. Materials Science & Engineering A, 2006, 435(4):172-180.
- [8] Neugebauer F, Ploshikhin V, Ambrosy J, et al. Isothermal and non-isothermal crystallization kinetics of polyamide 12 used in laser sintering[J]. Journal of Thermal Analysis & Calorimetry, 2016, 124(2):925-933.

- 共混体系性能研究[J]. 河南化工, 2016, 33(3):19-22.
- Sun Huiling, Jiao Yuchun, Xu Li, et al. Preparation of bicyclic benzoxazine and properties research of its blends with epoxy resin[J]. Henan Chemical Industry, 2016, 33(3):19-22.
- [5] 吴唯, 姜晨晨, 朱送伟, 等. 苯并噁嗪对环氧树脂体系热稳定性的影响及其作用机理[J]. 固体火箭技术, 2016, 39(2):242-246.
- Wu Wei, Jiang Chenchen, Zhu Songwei, et al. Effect of benzoxazine on the epoxy resin systems' thermal stability and its mechanism[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2016, 39(2):242-246.
- [6] 古武, 杨坡, 孟凡盛, 等. MA 型苯并噁嗪/酚醛型氰酸酯共混体系的研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(3):18-22.
- Gu Wu, Yang Po, Meng Fansheng, et al. Study on the MA-benzoxazine/phenolic-cyanate resin blends[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2016(3):18-22.
- [7] 张凤翻. 苯并噁嗪树脂及其在宇航复合材料中的应用[J]. 高科技纤维与应用, 2016, 41(1):10-23.
- Zhang Fengfan. Benzoxazine resins and its application in the aerospace composites[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2016, 41(1):10-23.
- [8] 牟海艳, 谢广超, 周克来, 等. 新型苯并噁嗪/环氧树脂/酚醛树脂模塑料及其耐热性研究[J]. 功能材料, 2017, 48(3):3154-3158.
- Mou Haiyan, Xie Guangchao, Zhou Kelai, et al. Novel benzoxazine/epoxy/phenolic molding compound and its thermal stability[J]. Journal of Functional Materials, 2017, 48(3):3154-3158.
- [9] 徐淑权, 蔡建, 胡秉飞, 等. 湿法缠绕用树脂体系黏度及固化动力学研究[J]. 化工新型材料, 2016, 44(3):199-201.
- Xu Shuquan, Cai Jian, Hu Bingfei, et al. Study on viscosity and curing kinetics of resin system for wet winding[J]. New Chemical Materials, 2016, 44(3):199-201.
- [10] 包睿, 仇振安, 徐淑权. 发射箱湿法缠绕用树脂体系黏度及固化动力学研究[J]. 包装工程, 2015, 36(17):139-143.
- Bao Rui, Qiu Zhenan, Xu Shuquan. Viscosity and curing kinetics of resin system for wet winding of launch box[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(17):139-143.
- [11] 吕钧伟, 王斌, 李辉. 基于环氧树脂/双酚 A 型苯并噁嗪树脂 IPN 体系的力学性能及固化动力学研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(11):31-36.
- Lyu Junwei, Wang Bin, Li Hui. Study of mechanical properties and curing kinetics of IPN system based on epoxy resin/bisphenol a-based benzoxazine resin[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2018(11):31-36.
- [12] 兰总金, 祖磊, 惠鹏, 等. 基于 NOL 环的高性能纤维与环氧树脂的匹配性研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(3):45-51.
- Lan Zongjin, Zu Lei, Hui Peng, et al. Study on interface compatibility of high-performance fiber and epoxy resin based on test of NOL rings[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2018(3):45-51.
- [13] 陈小平, 王喜占. T800 碳纤维在复合材料压力容器上的应用研究[J]. 高科技纤维与应用, 2017, 42(3):45-49.
- Chen Xiaoping, Wang Xizhan. T800 carbon fiber in the application of composite pressure vessel research[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2017, 42(3):45-49.
- [14] 魏虹, 刘义华, 张志斌, 等. 耐 160℃ 环氧树脂及其在缠绕壳体上的应用技术研究[J]. 航天制造技术, 2014(5):22-25.
- Wei Hong, Liu Yihua, Zhang Zhibin, et al. Resistant 160℃ epoxy resin and its application on filament winding shell[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2014(5):22-25.
- [13] 杨旭生, 汪艳, 陈亚武. 选择性激光烧结对尼龙 6 粉末的性能研究[J]. 塑料工业, 2018, 46(3):135-138.
- Yang Xusheng, Wang Yan, Chen Yawu. Study on properties of nylon 6 powder for selective laser sintering[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(3):135-138.
- [14] 陈震, 汪艳. 抗氧化剂对选择性激光烧结对 PA6 粉末热氧稳定性影响[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(6):126-130.
- Chen Zhen, Wang Yan. Effect of antioxidants on thermal oxygen stability of pa6 powder for selective laser sintering[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(6):126-130.
- [15] Drummer D, Drexler M, Wudy K. Impact of heating rate during exposure of laser molten parts on the processing window of PA12 powder[J]. Physics Procedia, 2014, 56:184-192.
- [16] 蔡净, 易国斌, 陈旭东. 尼龙老化机理研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 2013, 42(4):42-47.
- Cai Zheng, Yi Guobin, Chen Xudong. The development of study on nylon ageing mechanism[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2013, 42(4):42-47.
- [17] Wudy K, Drummer D. Aging effects of polyamide 12 in selective laser sintering: Molecular weight distribution and thermal properties[J]. Additive Manufacturing, 2019, 25:1-9.
- (上接第 24 页)
- [9] 郑立. 选择性激光烧结尼龙 12 复合粉末的制备及中试化[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2016.
- Zheng Li. Synthesis of nylon 12 composite powder for selective laser sintering and pilot scale production[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2016.
- [10] 彭梦飞, 汪艳. 尼龙 12/OMMT 纳米复合粉末的制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(3):50-53.
- Peng Mengfei, Wang Yan. Preparation and performance of PA12/OMMT nanocomposites[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(3):50-53.
- [11] 袁绍彦, 刘奇祥, 叶南飙, 等. 耐高温聚酰胺的性能及应用[J]. 中国塑料, 2009, 23(10):6-9.
- Yuan Shaoyan, Liu Qixiang, Ye Nanbiao, et al. Properties and application of high-temperature resistant polyamides[J]. China Plastics, 2009, 23(10):6-9.
- [12] 汤教佳, 葛舒婷, 张佩瑶, 等. 深冷粉碎制备尼龙粉末流动性的改善及选择性激光烧结性能[J]. 塑料工业, 2018, 46(7):26-31.
- Tang Jiaojia, Xi Shuting, Zhang Peiyao, et al. Improvement of fluidity and selective laser sintering of nylon powder prepared by cryogenic crushing[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(7):26-31.