

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.03.006

木粉含量对连续固态挤出自增强 PP 性能的影响^{*}

蔡建臣¹, 蒋金云¹, 周兆忠¹, 帅仁明¹, 薛平², 庄俭²

(1. 衢州学院机械工程学院, 衢州 324000; 2. 北京化工大学塑料机械及塑料工程研究所, 北京 100029)

摘要: 采用单螺杆挤出机连续固态挤出制备自增强聚丙烯 (PP) 复合材料试样, 对不同木粉含量的试样性能进行表征和综合分析。结果表明, PP 复合材料试样密度随着木粉含量的增加呈线性上升趋势; 拉伸强度和弯曲强度呈现先上升后下降的趋势, 而在木粉含量为 50% 时达到最大; 拉伸弹性模量和弯曲弹性模量随着木粉含量的增加一直增大, 但断裂伸长率下降; 木粉含量的增加能够提高试样的耐热性, 但结晶度有所下降; 木粉含量过多会造成复合材料界面结合减弱, 影响最终复合材料的性能。

关键词: 聚丙烯; 复合材料; 木粉含量; 连续固态挤出; 自增强

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)03-0026-05

The Effect of Wood Powder Content on the Performance of Continuous Solid-State Extrusion Self-Reinforced PP Composites

Cai Jianchen¹, Jiang Jinyun¹, Zhou Zhaozhong¹, Shuai Renming¹, Xue Ping², Zhuang Jian²

(1. College of Mechanical Engineering, Quzhou University, Quzhou 324000, China; 2. Institute of Plastics Machinery and Plastics Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The self-reinforced polypropylene (PP) composites were made by solid-state extrusion using single screw extruder. The performance of composites under different wood powder content were tested and systematically analysed. The result shows that the density appeared liner rising trend with the increase of wood powder content. The tensile strength and bending strength increase firstly and then decrease with the maximum on 50% of wood powder, the tensile and bending modulus increase and elongation at break decreases. The heat resistance significantly improves and crystallinity decreases because of the increasing amount of wood powder. The interface bonding of composite abates with the increasing addition of wood powder and finally the performance is affected.

Keywords: polypropylene; composite; wood powder content; continuous solid-state extrusion; self-reinforcement

中国是农业大国, 农林废弃物 (如废弃木材、农作物秸秆等) 资源丰富, 但一直未得到充分合理的利用, 任意丢弃、掩埋、焚烧等处理方法对环境的污染和资源的浪费不容忽视^[1-3], 而利用天然资源材料开发出复合材料成为国内外研究的热点之一^[4-8]。生物质复合材料则是以低附加值植物纤维材料 (木/竹废料、农作物秸秆等) 和分子聚合物 (包括回收料) 作为主要原料^[9-11], 添加一定比例的无机填料及化学助剂, 经过成套专业设备加工成一种可循环利用的基础性材料, 是目前最能够体现绿色环保、循环经济、资源利用、节能减排等可持续发展先进理念的新材料之一^[12-17], 其具有木质外观以及耐腐蚀、不吸水、耐老化、尺寸稳定性好等优点, 有着十分广阔的应用和发展前景^[18]。但生物质复合材料本身也存在着冲击强度低、易碎、韧性差等缺点^[19-21], 无法满足每年数以亿吨计的建筑业市场对材

料功能性、高强度、高模量的需求。因此, 如何高质、高效、低成本地提高生物质复合材料自身强度与功能特性等已经成为高分子成型加工领域的一项热点研究课题^[22]。

不少研究学者对如何提高生物质复合材料的性能进行了大量研究, 主要通过两种途径^[23], 一种为添加剂增强, 又称为外增强, 即采用添加纤维或无机纳米粒子等方法来提高材料的强度和模量, 尽管该方法已成为生产高性能聚合物制品的重要方法, 但却始终避免不了界面结合问题和材料回收问题,

^{*} 浙江省自然科学基金项目 (LQ16E030008), 国家级大学生创新创业训练计划项目 (201611488004), 浙江省教育厅项目 (Y201534120)

联系人: 薛平, 教授, 博士生导师, 长期从事塑料工程、聚合物成型加工及工程技术方面的研究工作

收稿日期: 2016-12-26

因而制约着其加工应用及资源的可持续发展^[24]。另一种为自增强,即通过特殊的加工成型方法在外力场作用下使材料内部形成排列有序的晶体结构作为增强相来提高产品性能,该方法中增强相与材料基体本身属于同一体系,界面问题得到很好解决,能适应更加广阔的应用领域^[25-26],逐渐成为高分子材料科学与工程领域实现增强的一个重要方法^[27]。

笔者主要利用自制的单螺杆挤出机,采用锥形口模拉伸方法,使物料在冷却段定型后在挤压力和牵引力的共同作用下,通过二次加热使其在固态状态下(玻璃态转变温度以上,熔融温度以下)连续通过锥形口模产生塑性变形,从而提高制品的性能,其工作原理如图1所示。采用该方法制得不同木粉含量下的生物质复合材料试样,研究木粉含量在连续固态挤出自增强过程中对生物质复合材料性能的影响规律。

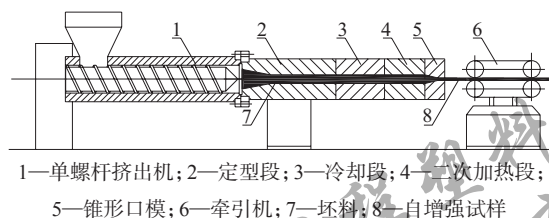


图1 生物质复合材料连续固态挤出自增强原理图

1 实验部分

1.1 实验原材料

聚丙烯(PP):熔体流动速率(MFR)为2.4 g/10 min,加拿大巴塞尔公司;

木粉:178 μm ,浙江省江山市贺昌木业有限公司;

相容剂、偶联剂、聚乙烯蜡、无机填料、空心微珠、抗氧化剂:市售。

1.2 主要仪器及设备

锥形双螺杆挤出机:KS20型,昆山科信橡塑机械有限公司;

高速混合机:SHR-50A型,张家港市三兴江帆机械厂;

单螺杆挤出机:SJ-45型,上海三垒塑料机械制造有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:SFG-02.400型,黄石市恒丰医疗器械有限公司;

牵引机:500型,皮带式,海瑞嘉精密挤出机械有限公司;

电子秤:JA5003型,上海恒平科学仪器有限公司;

司;

万能材料试验机:MODEL 1185型,英国Instron公司;

热性能测试仪:CEAST HDT6 MCAT型,意大利CEAST公司;

差示扫描量热(DSC)仪:Pyris I型,美国PE公司;

扫描电子显微镜(SEM):Hitachi 510型,日本Hitachi公司。

1.3 试样制备

试样的制备采用造粒和固态挤出两个步骤。造粒前,将木粉放置在105℃的干燥箱中烘干,使木粉的水分含量低于3%,进而采用偶联剂对其表面进行改性处理;然后将所有实验原料置于高速混合机中充分混合10 min,最后采用双螺杆挤出机将混合均匀的物料进行挤出造粒,造粒温度设置如表1所示。

表1 造粒温度

造粒温度				℃
一区	二区	三区	四区	机头段
160	165	190	180	165

制粒后,利用单螺杆挤出机进行连续固态挤出自增强成型,锥形口模加热温度设定为130℃,口模锥角为20°,在锥形口模的作用下,试样直径由20 mm渐变为11.5 mm,挤压比为3,木粉含量分别选取20%,30%,40%,50%,60%,70%。

1.4 性能及表征

密度采用电子秤,利用质量和体积的比值进行分析。

拉伸性能按照GB/T 1040-2006测试,拉伸速度为10 mm/min。

弯曲性能按照GB/T 1449-2006测试,试样长度比为16,每组试样5根,结果取平均值。

耐热性能测试:负载为50 N,升温速率为50℃/h。

DSC测试:将试样沿着垂直于棒材轴向制成0.5 mm厚度薄片,以10℃/min的速度从30℃升到200℃。

形貌表征:将试样在液氮中沿挤出方向淬断,断裂表面经喷金处理后用SEM观察,并拍照。

2 结果与分析

2.1 试样的密度

图2为不同木粉含量下试样的密度变化曲线。随着木粉含量从20%增加到70%,试样的密度呈

现上升趋势。当木粉含量为 70% 时,试样密度为 1.28 g/cm^3 。与木粉的密度 ($1.30 \sim 1.50 \text{ g/cm}^3$) 比较接近。

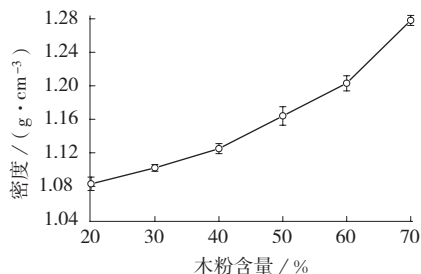


图2 不同木粉含量下试样的密度

2.2 力学性能

图3为不同木粉含量下试样的拉伸性能。由图3可以看出,随着木粉含量的逐渐增加,试样的拉伸强度先增加后降低,在木粉含量为 50% 时达到最大值 45.8 MPa ,上升幅度达 21%,但随着木粉含量增加到 70% 时,降低至 36.5 MPa 。拉伸弹性模量却随着木粉含量的增加呈现逐步上升的趋势,由 1040 MPa 上升到 1390 MPa ,增长了约 34%。

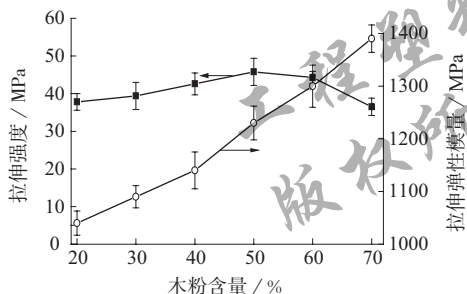


图3 不同木粉含量下试样的拉伸性能

图4为不同木粉含量下试样的弯曲性能。由图4可看出,试样的弯曲强度随木粉含量的增加呈现缓慢上升后下降的趋势,在木粉含量为 50% 时达到最大值 44.7 MPa ,增幅达 16%,但木粉含量为 70% 时,降低为 35.2 MPa 。弯曲弹性模量随着木粉含量的增加呈现不断上升的趋势,提高了将近 70%。

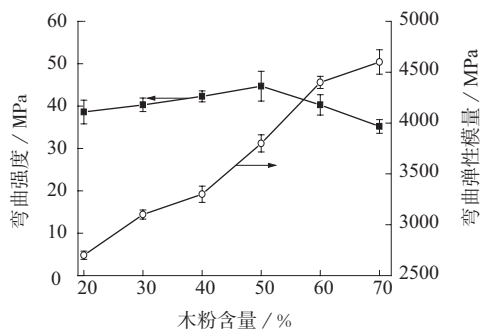


图4 不同木粉含量下试样的弯曲性能

图5为不同木粉含量下试样的弯曲应变、断裂

伸长率。由图5可以看出,随着木粉含量的增加,试样的弯曲应变和断裂伸长率均呈现下降的趋势,其中断裂伸长率下降幅度超过 66%,弯曲应变下降幅度达到 64%。

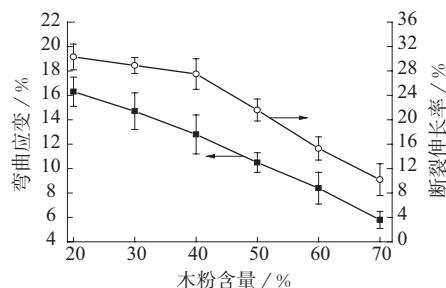


图5 不同木粉含量下试样的弯曲应变、断裂伸长率

综合分析图2~图5可以发现,当木粉含量低于 50% 时,试样的拉伸强度和弯曲强度随木粉含量的增加有一定程度的上升,这是由于木粉具有一定长径比,同时还含有较高强度的纤维束,可对聚合物基体起到增强作用;但当木粉含量进一步提高时,拉伸强度和弯曲强度随木粉含量的增加而下降,这是因为木粉表面羟基与 PP 基体极性不相容,所形成的分子内氢键作用会使得木粉之间的相互作用逐渐增强,进而会使木粉产生团聚现象,分散效果降低,同时木粉与 PP 界面相容性较差,从而造成试样拉伸强度和弯曲强度的下降。木粉是刚性材料,其具有较大的比表面积,同时存在一定的孔隙率,连续固态挤出过程中在挤压力的作用下,聚合物基体部分渗透到木粉细胞腔中,从而使试样的刚度得到进一步增大,因此该复合材料的拉伸弹性模量和弯曲弹性模量在所研究范围内随着木粉添加量的增加而不断增大。而试样断裂伸长率下降的原因是由于木粉的添加使聚合物基体的连续性受到影响,同时木粉作为刚性材料不利于能量的传递与分散,因此降低了聚合物基体发生变形的能力。木粉含量越高,木粉团聚现象越剧烈,试样产生应力集中等缺陷的概率越大^[28],从而进一步降低了试样的变形能力,这些因素使得试样的韧性变得较差,最终直接导致了断裂伸长率的下降。

2.3 耐热性能

图6为试样的维卡软化温度。从图6可以看出,随着木粉含量的增加,维卡软化温度不断上升,因此木粉含量的增加能有效地提高生物质复合材料试样的耐热性。这主要是由于木粉含量的增加使试样中聚合物的含量减少,因此木粉的刚性大分子与聚合物的接触界面增加,试样受热变形能力提

高,当聚合物基体因温度上升出现软化时,试样形状可基本保持不变,所以其耐热性能得到了加强。

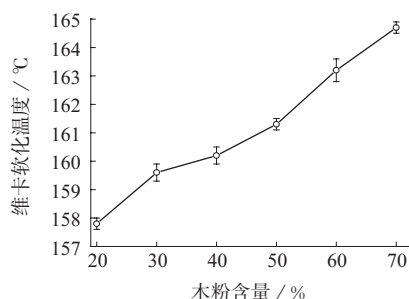


图6 不同木粉含量下试样的维卡软化温度

2.4 结晶性能

图7为不同木粉含量下试样DSC分析得到的熔融曲线。利用公式(1)进行结晶度计算,如表2所示。

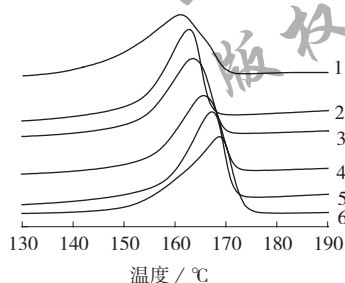
$$X_c = \frac{\Delta H_f}{\lambda \Delta H_u} \times 100\% \quad (1)$$

式中: X_c ——试样结晶度;

ΔH_f ——结晶熔融热焓;

λ ——生物质复合材料中聚合物基体的质量分数;

ΔH_u ——结晶度为100%的相同高聚物的标准熔融热焓。



木粉含量: 1—20%; 2—30%; 3—40%; 4—50%; 5—60%; 6—70%

图7 不同木粉含量下试样的DSC曲线

表2 不同木粉含量下试样的DSC测试结果

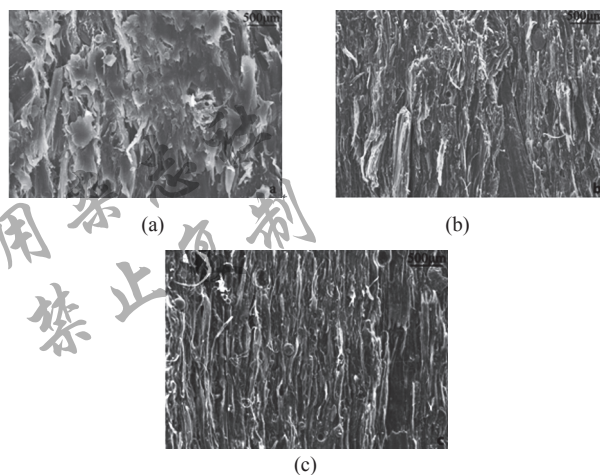
项目	木粉含量 / %					
	20	30	40	50	60	70
熔融峰 / °C	161.2	162.8	163.3	165.4	167.3	168.8
熔融热焓 / (J · g ⁻¹)	71.2	66.7	58.7	43.0	33.0	24.1
结晶度 / %	42.3	45.6	46.8	41.1	39.5	38.2

由图7和表2可看出,随着木粉含量的增加,试样的熔融峰向高温方向偏移,而熔融热焓值不断下降,结晶度呈现先小幅上升后下降的现象。由于木粉和聚合物产生了异相成核效应^[29],木粉较大的比表面积促进了异相成核,能加快结晶速度,提高材料的熔融温度^[30]。同时,木粉和聚合物基体之间的作用力降低了聚合物分子链本身的活动性,阻碍分子

链生长为完整的晶体,因此试样的熔融热焓和结晶度降低。总体来讲,异相成核提高了结晶温度,缩短了融程,在很大程度上改善了试样的力学性能^[31]。

2.5 试样的形态学特征

选取木粉含量分别为20%,40%和70%进行形貌分析,其试样的SEM照片如图8所示。随着木粉含量的增加,试样断面呈现的木粉纤维增多,同时材料孔隙以及表面不平整也逐渐增多,表明木粉与聚合物基体之间存在相容性问题。因此在较低木粉含量下,较高含量的聚合物基体为复合材料在宏观上提供了较好的韧性,这与木粉和聚合物基体的界面相容性改善与否没有关系。



木粉含量: a—20%; b—40%; c—70%

图8 不同木粉含量下试样SEM照片

3 结论

(1) 连续固态挤出增强PP/木粉复合材料试样的密度随着木粉添加量的增加而升高;

(2) 试样的拉伸强度和弯曲强度随着木粉含量的增加呈现出先上升后下降的趋势,模量一直随着木粉含量的增加而增加,但断裂伸长率呈现大幅度下降;

(3) 木粉添加量的增加能明显提高复合材料的耐热性,试样的熔融峰向高温方向漂移,结晶度有所下降;

(4) 从SEM照片看出,由于木粉与聚合物基体较差的相容性,在加工成型过程中,当木粉含量较大时难以与聚合物均匀分散,容易产生一定的孔隙和空洞以及应力集中现象,最终影响复合材料的性能。

参考文献

- [1] Thamae T, Marien R. Development and characterizing new materials based on waste plastic and agro-fiber[J]. Journal of Materials Science, 2008, 43(12):4 057-4 068.

- [2] Borysiak S, Doczekalska B. Influence of chemical modification of wood on the crystallization of polypropylene[J]. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 2006, 64(6):967-975.
- [3] 李飞跃, 汪建飞. 中国粮食作物秸秆焚烧碳排放量及转化生物炭固碳量的估算[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(4):1-7.
Li Feiyue, Wang Jianfei. Estimation of carbon emission from burning and carbon sequestration from biochar producing using crop wood power in China[J]. *Transaction of the Chinese Society of Agriculture Engineering*, 2013, 29(4):1-7.
- [4] 张东辉, 何春霞, 刘军军. 稻秸秆粉 / 聚丙烯复合材料力学性能[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(7):380-384.
Zhang Donghui, He Chunxia, Liu Junjun. Mechanical properties of straw-power / PP composites[J]. *Transaction of the Chinese Society of Agriculture Engineering*, 2010, 26(7):380-384.
- [5] 何春霞, 侯人鸾, 薛娇, 等. 不同模压成型条件下聚丙烯木塑复合材料性能[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(15):145-150.
He Chunxia, Hou Renluan, Xue Jiao, et al. Performance of PP wood-plastic composites with different processing methods[J]. *Transaction of the Chinese Society of Agriculture Engineering*, 2012, 28(15):145-150.
- [6] 张冰, 江波, 许澍华, 等. 废旧塑料 / 木质纤维复合材料的一步法生产技术与装备[J]. *塑料*, 2002, 31(4):15-19.
Zhang Bing, Jiang Bo, Xu Shuhua, et al. One step processing technology and equipment of waste plastic-wood fiber composite[J]. *Plastics*, 2002, 31(4):15-19.
- [7] 何春霞, 顾红艳, 薛盘芳. 四种植物纤维粉 / 聚丙烯复合材料应用性能[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(2):381-384.
He Chunxia, Gu Hongyan, Xue Panfang. Performances of polypropylene composite material filled with four kinds of plant fiber powders[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(2):381-384.
- [8] Yang H S, Kim D J, Lee Y K. Possibility of using waste tire composites reinforced with rice straw as construction materials[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95:61-65.
- [9] 贺金梅, 李斌. 热塑性聚合物-木纤维复合材料的研究进展[J]. *高分子材料科学与工程*, 2004, 20(1):27-30.
He Jinmei, Li Bin. Thermoplastic polymer / wood fiber composite[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2004, 20(1):27-30.
- [10] Hou Xiuying, Huang Zutai, Yang Wenbin. The approach to improve mechanical performance of the wood plastic composites by hot-press molding[J]. *Forest Engineering*, 2005, 25(2):46-48.
- [11] 应宗荣, 戚裕, 王志高, 等. 聚乳酸 / 木粉复合材料的结构与性能研究[J]. *塑料工业*, 2008, 36(1):21-24.
Ying Zongrong, Qi Yu, Wang Zhi-gao, et al. Structure and property of poly(lactic acid) / wood power composite[J]. *China Plastic Industry*, 2008, 36(1):21-24.
- [12] Lei Bingrong, Zhang Yaru, He Yanjin. Preparation and characterization of wood-plastic composite reinforced by graphitic carbon nitride[J]. *Materials and Design*, 2015, 66(15):103-109.
- [13] 李坚. 生物质复合材料学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
Li Jian. Biomass composite materials science[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [14] 薛平, 王哲, 贾明印, 等. 木塑复合材料加工工艺与设备的研究[J]. *人造板通讯*, 2004(11):9-13.
Xue Ping, Wang Zhe, Jia Mingyin, et al. Study on processing technology and equipments of wood plastic composites[J]. *China Wood-based Panels*, 2004(11):9-13.
- [15] 于旻, 何春霞, 刘军军, 等. 不同表面处理麦秸秆对木塑复合材料性能的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(9):171-177.
Yu Min, He Chunxia, Liu Junjun, et al. Effects of different surface treatment for wheat wood power on performances of wood-plastic composites[J]. *Transaction of the Chinese Society of Agriculture Engineering*, 2012, 28(9):171-177.
- [16] Liu Chuanjiang, Feng Ya. Low-carbon economy: Theoretical study and development path choice in China[J]. *Energy Procedia*, 2011, 5:487-493.
- [17] 于旻, 何春霞. 国内外木塑复合材料研究进展[J]. *工程塑料应用*, 2011, 39(8):92-95.
Yu Min, He Chunxia. Domestic and foreign research process of wood-plastic composite[J]. *Engineering Plastics Application*, 2011, 39(8):92-95.
- [18] 许民, 高延明, 王克奇. 改性剂对木塑复合材料力学性能影响的研究[J]. *林业科技*, 2006, 31(1):32-34.
Xu Min, Gao Yanming, Wang Keqi. Research of modifiers' effect on the properties of wood-polymer composites[J]. *Forestry Science & Technology*, 2006, 31(1):32-34.
- [19] Pilarski J M, Matuana L M. Durability of wood-flour plastic composites exposed to accelerated freeze-thaw cycling. Part I: Rigid PVC matrix[J]. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 2005, 11(1):1-8.
- [20] 崔益华, Noruziaan Bahman, Lee Stephen, 等. 再生型木塑复合材料的研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2005, 37(5):587-592.
Cui Yihua, Noruziaan Bahman, Lee Stephen, et al. Research on recycled plastic wood composites[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2005, 37(5):587-592.
- [21] Pilarski J M, Matuana L M. Durability of wood-flour plastic composites exposed to accelerated freeze-thaw cycling. Part I: Rigid PVC matrix[J]. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 2005, 11(1):1-8.
- [22] Prox M, Pornnimit B, Varga J, et al. Thermoanalytical investigations of self-reinforced polyethylene[J]. *Journal of Thermal Analysis Calorimetry*, 1990, 36(5):1 675-1 684.
- [23] 席军. 动态剪切应力下高分子量组分诱导聚烯烃的结构与性能[D]. 成都: 四川大学, 2006.
Xi Jun. The structure and performance of polyolefin resins under dynamic shearing and high molecular weight component[D].

- Wang Jing. Study on properties and application of super PBO fiber in the 21 st century[J]. Modern Textile Technology, 2010, 18(3):57–60.
- [2] 汪家铭. 聚对苯撑苯并二恶唑纤维发展概况与应用前景 [J]. 高科技纤维与应用, 2009, 34(2):42–47.
- Wang Jiaming. Development survey and application prospect of poly-p-phenylene benzobisoxazole fiber [J]. High –Technology Fiber and Application, 2009, 34(2):42–47.
- [3] Sayre J R, McGinniss V, Tolbert C B, et al. PBO fibers with improved mechanical properties when exposed to high temperatures and high relative humidity:US, 9279214[P].2016-03-08.
- [4] 郭玲, 赵亮, 胡娟, 等. 国产 PBO 纤维研究现状及发展趋势 [J]. 高科技纤维与应用, 2014, 39(2):11–15.
- Guo Ling, Zhao Liang, Hu Juan, et al. Present status and development trend of domestic PBO fiber[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2014, 39 (2):11–15.
- [5] Kitagawa T, Yabuki K, Wright A C, et al. An investigation into the relationship between processing, structure and properties for high-modulus PBO fibres:part 3:analysis of fibre microstructure using transmission electron microscopy[J]. Journal of Materials Science, 2014, 49(18):6 467–6 474.
- [6] Vázquez-Santos M B, Martínez-Alonso A, Tascón J M D, et al. Nanostructure evolution in heat-treated porous carbons derived from PBO polymer[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 536(13):S464–S468.
- [7] 冉茂强, 范新年, 黄治川, 等. 热处理对 PBO 纤维性能的影响研究 [J]. 科技创新与应用, 2016, 1(1):122–123.
- Ran Maoqiang, Fan Xinnian, Huang Zhichuan, et al. Study on the effect of heat treatment on the properties of PBO fibers [J]. Science and Technology Innovation and Application, 2016, 1(1):122–123.
- [8] Mills M E, Teramoto Y, Faley T L, et al. Method for stable rapid spinning of a polybenzoxazole or polybenzothiazole fiber:US, 5385702[P].1995-01-31.
- [9] Sayre J R, McGinniss V, Tolbert C B, et al. PBO fibers with improved mechanical properties when exposed to high temperatures and high relative humidity:US, 9279214[P].2016-03-08.
- [10] 时代. 热处理对 PBO 纤维的结构和性能的影响 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2013.
- Shi Dai. Effect of Heat Treatment on the Structure and Properties of PBO Fiber[D]. Harbin:Harbin University of Science and Technology, 2013.
- [11] Kitagawa T, Kiriyaama K, Shimizu Y. A novel random preferential orientation of the crystal a - axis along the radial direction confirmed on the poly - p - phenylenebenzobisoxazole (PBO) fiber made with a water[J]. Journal of the Society of Fiber Science and Technology, 2015, 71(7):224–231.
- [12] Tamargo-Martínez K, Villar-Rodil S, Paredes J I, et al. Thermal decomposition of poly(p-phenylene benzobisoxazole) fibres:monitoring the chemical and nanostructural changes by Raman spectroscopy and scanning probe microscopy[J]. Polymer Degradation & Stability, 2004, 86(2):263–268.
- [13] Cohen Y, Gartstein E, Arndt K F, et al. The effect of heat treatment on the microfibrillar network of poly(p-phenylene benzobisthiazole)[J]. Society of Plastics Engineers Inc, 1996, 36(10):1 355–1 359.
- [14] Kitagawa T, Sugihara H, Tsutsumi M. The Effect of non-aqueous coagulation in the structure of poly-p -phenylenebenzobisoxazole (PBO) fibers[J]. Fiber, 2015, 71(2):105–111.
- (上接第 30 页)
- Chengdu:Sichuan University, 2006.
- [24] 杨智韬, 殷小春, 瞿金平. 成型加工过程中聚合物的连续自增强 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2013, 41(6):140–146.
- Yang Zhitao, Yin Xiaochun, Qu Jinping. Continuous self-reinforcement of polymer during molding processing[J]. Journal of South China University of Technology :Natural Science Edition, 2013, 41(6):140–146.
- [25] 刘益, 吴世见, 申开智, 等. 聚烯烃材料的自增强研究及其现状 [J]. 中国塑料, 2001, 15(6):14–20.
- Liu Yi, Wu Shijian, Shen Kaizhi, et al. Self-reinforced polyolefine material and its present research situation[J]. China Plastics, 2001, 15(6):14–20.
- [26] 张杰. 聚合物熔体在振动场中注塑行为和试样性能与凝聚态结构的研究 [D]. 成都: 四川大学, 2002.
- Zhang Jie. Study of injection behavior of polymer melt and properties and morphology of specimen under vibration injection molding[D]. Chengdu:Sichuan University, 2002.
- [27] 瞿金平, 秦雪梅. 高分子材料成型加工过程的自增强 [J]. 广东化工, 2005(11):18–23.
- Qu Jinping, Qin Xuemei. The polymer self-reinforcement during molding processing[J]. Guangdong Chemical Industry, 2005(11):18–23.
- [28] Oksman K, Lindberg H. Interaction between wood and synthetic polymers[J]. Holzforschung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood, 1995, 49(3):249–254.
- [29] Binsbergen F. Heterogeneous nucleation in the crystallization of polyolefins:Part 1.Chemical and physical nature of nucleating agents[J]. Polymer, 1970, 11(5):253–267.
- [30] Nakamura K, Nagai M, Kanamoto T, et al. Development of oriented structure and properties on drawing of poly(vinylidene fluoride) by solid-state coextrusion[J]. Journal of Polymer Science Part B:Polymer Physics, 2001, 39(12):1 371–1 380.
- [31] Ichazo M, Albano C, Gonzalez J, et al. Polypropylene / wood flour composites:Treatments and properties[J]. Composite Structures, 2001, 54(2):207–214.