

· 研究论文 ·

聚碳酸亚丙酯纤维的制备及其力学性能

虞卿磊^{1,3} 张宇静^{1,3} 许震^{2,3} 张成建^{1,3*} 张兴宏^{1,3*}(浙江大学¹生物基运输燃料技术全国重点实验室²高分子合成与功能构造教育部重点实验室³高分子科学与工程学系 杭州 310058)

摘要 聚碳酸亚丙酯(PPC)是由二氧化碳(CO₂)与环氧丙烷(PO)交替共聚得到的一种可降解高分子材料, 极具应用前景. 然而, 有关纯PPC纤维的制备及其性能方面的研究仍较少. 本文工作采用湿法纺丝技术制备了PPC长丝, 优选出PPC成纤效果最佳的纺丝溶剂和凝固浴, 并通过控制不同的后处理温度和牵伸倍数, 研究了PPC长丝的纤维取向、热性能及其力学性能. 研究表明, 以 N,N -二甲基甲酰胺(DMF)为溶剂, H₂O为凝固浴制备得到的PPC原纤性能最佳. PPC原纤经过后牵伸处理后得到具有高取向结构的PPC纤维长丝. 其中, 于45 °C水浴拉伸400倍后得到的PPC长丝, 拉伸强度可达201.9 MPa, 断裂伸长率为36.4%, 弹性模量可达2.9 GPa. 本研究对拓宽PPC的应用领域具有积极的意义.

关键词 聚碳酸亚丙酯, CO₂聚合物, 湿法纺丝, 纤维取向, 力学性能

引用: 虞卿磊, 张宇静, 许震, 张成建, 张兴宏. 聚碳酸亚丙酯纤维的制备及其力学性能. 高分子学报, 2025, 56(1), 145–151

Citation: Yu, Q. L.; Zhang, Y. J.; Xu, Z.; Zhang, C. J.; Zhang, X. H. Preparation and mechanical properties of poly(propylene carbonate) fiber. *Acta Polymerica Sinica*, 2025, 56(1), 145–151

化学纤维是我国战略性新兴产业的重要组成部分. 发展具有绿色、环境友好、原料可再生以及生物降解等优良特性的化学纤维将为创制新型高附加值材料提供思路. 聚碳酸亚丙酯(PPC)是二氧化碳(CO₂)和环氧丙烷(PO)的交替共聚物, 具有良好的生物相容性、极低的氧透过率、优良的延展性和加工性能, 是极具工业化潜力的生物可降解塑料. 作为一种可生物降解的高分子, PPC固定多达42 wt%的CO₂, 有望部分替代传统石化基塑料, 因而也是一类有广阔发展前景的环境友好材料.

PPC是典型的无定形态高分子, 分子链柔性好、相互作用力小, 其玻璃化转变温度(T_g)较低, 一般为30~40 °C. PPC的力学性能随温度升高而显著降低, 极大地限制了它的应用. PPC的

力学性能与碳酸酯单元的含量密切相关. Liu等^[1]研究表明, 碳酸酯结构含量为99%的PPC弹性模量为(2100±150) MPa, 断裂伸长率为(2±1.5)%; 碳酸酯结构含量为91%的PPC弹性模量为(700±80) MPa, 断裂伸长率为(330±30)%, 类似聚乙烯(HDPE)的弹性模量为(730±60) MPa, 断裂伸长率为(510±35)%. 通过共混、掺杂等物理改性方式可以提高PPC的热学与力学性能. 如Yang等^[2]在PPC中混入单宁酸, 可在保持韧性的同时, 提高PPC的热学性能和机械性能, T_g 达到33.9 °C, 弹性模量和屈服强度分别达到1360和24 MPa. Zheng等^[3]制备了PPC质量分数30 wt%的PPC/PLA(聚乳酸)共混物, 在60 °C下拉伸2.5倍, 得到了 T_g 为32 °C、弹性模量为2433 MPa、拉伸强度为98.3 MPa的共混物. 高分子制成纤维可以进

2024-08-14收稿, 2024-09-25录用, 2024-12-12网络出版; 国家自然科学基金(基金号 U23A2083)和浙江省科技计划项目(项目号 2022C01216)资助.

* 通信联系人, E-mail: chengjian.zhang@zju.edu.cn; xhzhang@zju.edu.cn

doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2024.24213; CSTR: 32057.14.GFZXB.2024.7301

一步提高力学性能,但迄今关于纯PPC的可纺性能及其纤维力学性能的相关报道很少,多见于与其他材料共混制备纤维.金荣仙等^[4]通过静电纺丝法制备PPC纤维膜,所得PPC纤维膜 T_g 为37.5℃,可作为医用敷料使用;王丹等^[5]以乙烯-马来酸酐共聚物作为反应性相容剂,通过熔融纺丝法制备了PPC/PLA共混物纤维,其拉伸强度达到20.8 MPa,提高了12.1倍.

湿法纺丝是一种通用的量产纤维的方法,在湿纺过程中,通过强拉伸方法实现纤维的高取向、高致密度进而获得优的性能.PPC的湿法可纺性及其性能尚未见报道.本文工作研究了PPC湿法纺丝,通过温度调控超倍拉伸的方法成功制得了高取向度的PPC纤维,表征了PPC纤维的结构和性能,为研究发展基于PPC的可降解复合纤维提供了依据.

1 实验部分

1.1 实验材料

本文中所用PPC为实验室自制,由CO₂与PO交替共聚得到,碳酸酯结构的含量为96%,醚单元结构的含量为4%.采用Waters 1515凝胶渗透色谱仪(GPC,美国Waters公司),以四氢呋喃(THF)为流动相,测得PPC的数均分子量(M_n)为60.7 kDa,分散性指数(PDI)为1.60.

1.2 测试仪器

示差扫描量热仪:TA仪器公司,型号DSC 25.在氮气氛围下,PPC样品以100℃/min的速率降温,保持等温3 min,再以10℃/min的速率升温,得到PPC的玻璃化转变温度(T_g)值.

扫描电子显微镜(SEM):日本日立公司,型

号日立S-4800.在样品台上铺设一层导电胶,将PPC纤维样品平铺在导电胶表面,喷金1 min,后观察拍摄纤维表面、断面形貌照片.

偏光显微镜(POM):日本尼康株式会社,型号Nikon ECLIPSE LV100N POL.

小角X射线散射(SAXS):法国XENOCOS有限公司,仪器型号XEUS 3.0.测试功率:70 kV, 3.5 mA, 250 W;测试时间为600 s,光源为excillum METALJET液态靶,探测器为Dectris EIGER2 Si 1M.检测波长为0.135 nm,像素为75.

X射线衍射(XRD):日本理学电机株式会社,型号SmartLab, 2θ 测试角度5°~90°.

纤维强伸度仪:上海新纤仪器有限公司,型号XQ-2.夹持距离5 mm,拉伸速度2 mm/min,室温条件下测试.

1.3 PPC纤维的制备与牵伸

以DMF为溶剂,室温下溶解PPC粒子,搅拌12 h至完全溶解并超声0.5 h,保证溶液均匀;用15000目滤网过滤所得溶液,并转移到5 mL注射器中;再将注射器夹持在注射泵上,将PPC溶液以160 μ L/min的速度挤出,经过4 m长水浴后,在收丝机上收集,得到PPC初生纤维,在室温下真空干燥至恒重.将干燥后的初生纤维夹持在高精度纤维拉伸机上,在一定温度水浴中以一定速度拉伸,得到不同拉伸倍数的PPC纤维,干燥后制样进行各项测试.

PPC纺丝液在凝固浴中进行充分溶剂交换,成型得到的PPC原纤在干燥后不粘黏.在室温下、空气中长久放置(3个月以上)后仍保持良好的纤维状态,不粘黏.PPC纤维制备流程示意图、PPC原纤和牵伸后PPC纤维见图1.

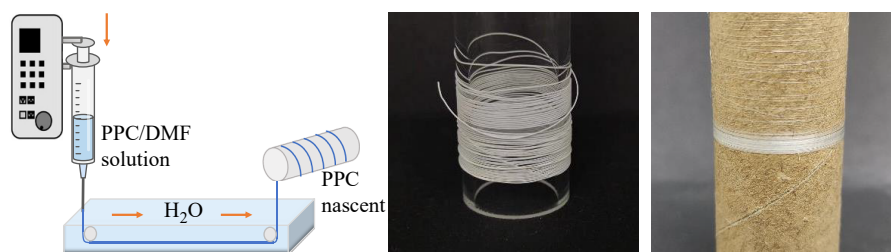


Fig. 1 Diagram of wet spinning setup and photos of nascent and highly stretched PPC fiber.

2 结果与讨论

我们研究了不同溶剂和凝固浴的组合对PPC湿法纺丝的影响.PPC在三氯甲烷(TCM)、*N,N*-

二甲基甲酰胺(DMF)、乙腈(ACN)、四氢呋喃(THF)等溶剂中都有较好的溶解性.在相同温度、相同浓度的条件下,PPC的ACN溶液黏度最小,其余溶液黏度相近.从纺丝原液的凝固速度(表1)

Table 1 Coagulation rates of PPC fiber in different solvents with coagulation baths.

Solvent/coagulation bath	Coagulation rate
TCM/EtOH	++
DMF:TCM ^a /EtOH	++
DMF:TCM ^a /H ₂ O	+
ACN/EtOH	+
ACN/H ₂ O	+
THF/H ₂ O	+
DMF/H ₂ O	+++

^a Solvent is the mixture of DMF and TCM, $V_{\text{DMF}}:V_{\text{TCM}} = 1:1$.

看, ACN/EtOH、ACN/H₂O、THF/H₂O等组合的凝固速率较慢, 不利于初生纤维的拉伸、干燥、收集等后续操作的连续开展. 而TCM沸点较低, 容易挥发造成浪费. 从凝固速率以及成本角度考虑, 本研究选择了DMF/H₂O作为PPC湿法纺丝的溶剂/凝固浴组合.

在溶液纺丝后处理过程中, 热牵伸是提高纤维机械性能的有效途径. PPC机械性能的温敏性高, 因此我们调节拉伸水浴的温度, 以调控PPC原纤的极限可拉伸性. 从表2可见, 在低于45℃的情况下, 随着拉伸温度从25℃升高至45℃, PPC纤维的极限断裂伸长率从250%逐渐增大, 当温度为45℃时, PPC最大可以拉伸为原长的1020倍. 然而当温度升到50℃时, 拉伸细化的纤维容易熔化断裂, 造成了断裂伸长率的降低, 极限值为4600%. 热牵引PPC的极限断裂伸长率随温度的变化与其链段运动、链间相互作用直接相关. 从断裂伸长率的变化来看, 45℃是PPC纤维热牵伸的最佳温度.

进一步探究了PPC纤维机械性能与纺丝热牵伸温度、拉伸倍数之间的关系. 从图2的应力-应变曲线可见, PPC纤维的拉伸经历了屈服-成颈-应力硬化过程, 符合典型的聚合物应力-应变曲线. 在所有纤维均拉伸40倍的前提下, 随着纺丝

Table 2 Ultimate elongation of PPC fiber at different temperatures.

T (°C)	Elongation at break (%)
25	250
30	1300
35	5500
40	76500
45	102000
50	4600

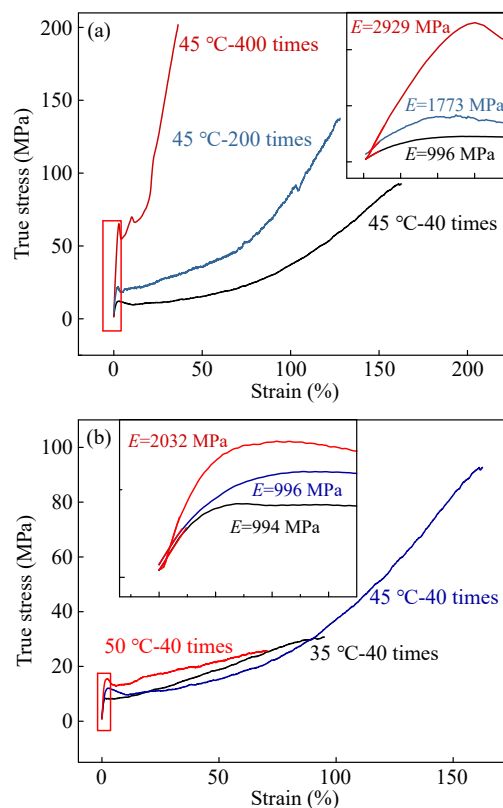


Fig. 2 Typical tensile stress curves of PPC single fibers. (a) Samples obtained at 45 °C with the stretching multiples of 40, 200 and 400 times; (b) Samples obtained at 35, 45 and 50 °C by the stretching multiple of 40 times.

热牵伸温度的升高, 拉伸强度先上升后下降, 断裂伸长率先上升后下降; 当纺丝热牵伸温度为45℃时, 拉伸强度为92.7 MPa, 断裂伸长率为

Table 3 Typical tensile stress data of PPC single fibers.

Temperature-times of stretch	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (GPa)
35 °C-40 times	30.7	94.9	0.99
45 °C-40 times	92.7	162.5	1.00
50 °C-40 times	25.7	70.5	2.03
45 °C-200 times	137.7	127.9	1.77
45 °C-400 times	201.9	36.4	2.93

162.5%, 弹性模量为 1.00 GPa (表 3). 这也与最佳纺丝热牵伸温度为 45 °C 的观察一致.

PPC 原纤的拉伸倍数对所得 PPC 长纤力学性能也有显著影响. 在 45 °C 条件下, PPC 纤维的拉伸极限达 1020 倍, 一般情况可以拉伸 600 倍左右, 所得 PPC 纤维直径约为 10 μm . 随着拉伸倍数的提高, 所得 PPC 长纤的拉伸强度和弹性模量均显著提高, 而断裂伸长率则降低. 如表 3 所示, 45 °C 下拉伸 400 倍的 PPC 纤维, 室温下的拉伸强度可达 201.9 MPa, 是 PPC 板材的 20 倍^[1], 是 PPC/PBS (聚丁烯琥珀酸) 复合纤维膜的 87 倍^[6], 是 PPC/PHB (聚(3-羟基丁酸酯)) 复合纤维的 9.2 倍^[7], 是 PPC/PLA 复合纤维的 9.7 倍^[5]; 室温弹性模量可达 2.9 GPa, 是 PPC 板材的 4.1 倍^[1].

采用示差扫描量热法(DSC)测试了 PPC 原纤和不同条件下所得 PPC 长纤的热学性能. 由图 3 可见, 与 PPC 原纤相比, 随着拉伸温度的升高(图 3(a))或拉伸倍数(图 3(b))的增大, 各样品的 DSC 升温曲线在 60 °C 附近均出现了一个吸热峰, 类似“结晶峰”的熔融. 我们推测这是因为 PPC 分子链经拉伸后高度取向, 形成了一定程度的有序聚集结构. 上述 PPC 长纤的 DSC 吸热峰所对应的焓变值约为 0.4~0.6 J/g, 远达不到弱结晶能力聚合物的典型熔点焓变值(8.9 J/g)^[8-13]. 所得 PPC 长纤的广角 X 射线散射(WAXS)图中并未出现尖锐的峰信号(图 4(a)). 因此我们认为 PPC 样品在拉伸条件下发生了显著取向, 但并未形成有序晶体. 进一步发现, 拉伸过的 PPC 长纤与原纤相比, T_g 值提高了约 2 °C. 原因可能是快速拉伸诱导 PPC 分子链取向和堆积更加紧密, 分子间相互作用力增强, 导致链段运动难和 T_g 增大. 如图 3(a), 在拉伸 40 倍的前提下, 随着拉伸温度从 40 °C 升至 50 °C, T_g 从原纤的 28.5 °C 增至 31.6 °C, 焓变在 45 °C 下达到最大值, 为 0.52 J/g. 图 3(b)中, 在 45 °C 下, 随着拉伸倍数从 40 倍增加至 400 倍, PPC 长纤的 T_g 增至 30.6 °C, 相应焓变值增加至 0.59 J/g. 说明 PPC 长纤的取向程度随拉伸倍数的增加而提高. 这与所得样品的力学性能与拉伸倍数的变化趋势一致, 表明拉伸后纤维的高度取向是其力学性能显著提升的重要原因.

PPC 长纤的 POM 照片如图 4(b)和 4(c)所示. 在控制入射光强和拍摄条件相同的情况下, PPC 长纤的偏光照片呈现亮黄色. Sun 等^[14]发现纤维

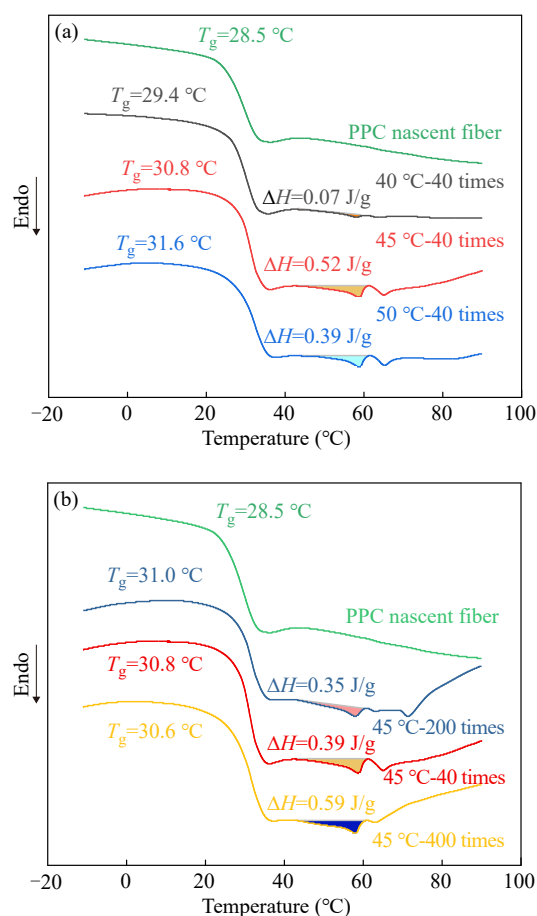


Fig. 3 DSC curves of nascent and stretched PPC fibers, ΔH stands for enthalpy. (a) Samples obtained at 40, 45 and 50 °C by the stretching multiple of 40 times; (b) Samples obtained at 45 °C with the stretching multiples of 40, 200 and 400 times.

样品在 POM 下的偏振光波长随着纤维取向程度的提高而增加. 这说明所得 PPC 长纤的取向程度相近. 根据 SAXS 数据(图 4(d))计算, PPC 长纤取向值 f 约为 0.67.

采用 SEM 观察不同条件下所得 PPC 长纤的断面和表面形貌, 如图 5 所示. PPC 长纤的截面(图 5(a)、5(c)和 5(e))呈现出由中心向外扩散的中腔, 且随拉伸温度的升高截面依然保持孔隙结构. 观察纤维的纵向表面结构发现, 35 °C 下拉伸 40 倍的 PPC 长纤(图 5(b))表面较为光滑平整且纤维分布较为均匀, 而拉伸温度为 45 °C 时, 同样拉伸 40 倍的 PPC 长纤(图 5(d))表面出现了褶皱. 而当拉伸温度升高至 50 °C 时, 同样拉伸倍数所得 PPC 长纤(图 5(f))则出现了纤维粗细不均匀的现象, 沿纤维纵向产生明显的“沟壑”. 我们认为由于 PPC 的 T_g 较低, 当拉伸温度远大于其玻

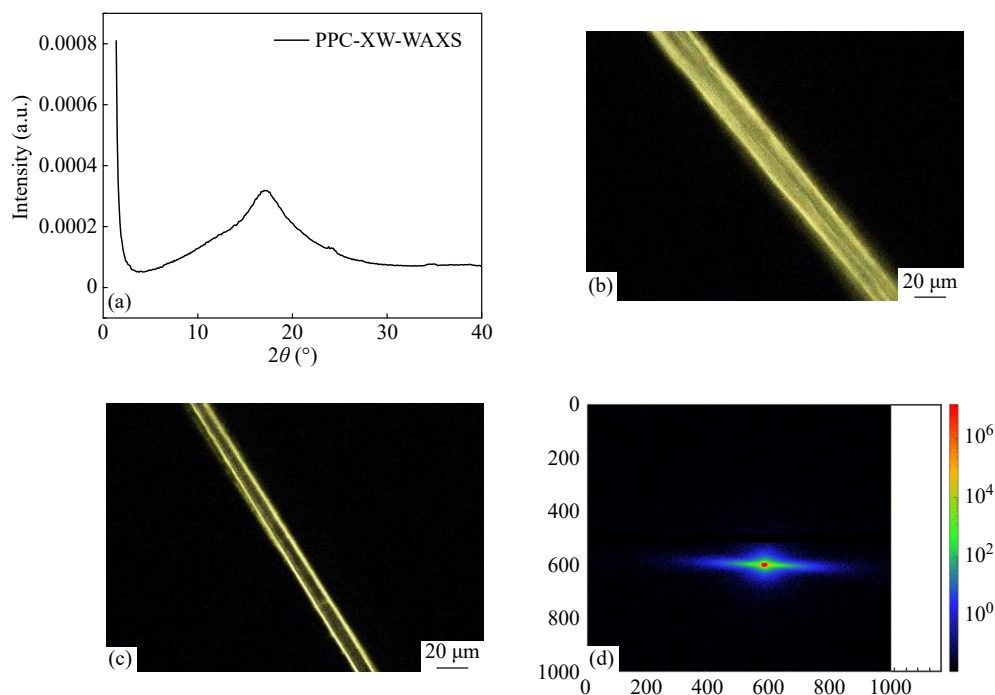


Fig. 4 Characterizations of PPC fiber: (a) 1D WAXS curves of 45 °C-400 times; POM images of (b) 45 °C-400 times and (c) 45 °C-600 times; (d) SAXS pattern of 45 °C-400 times.

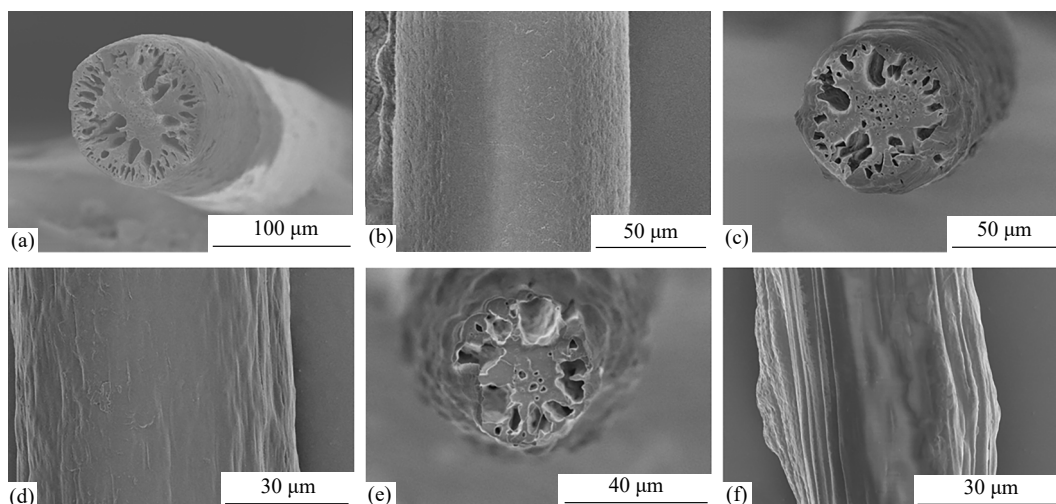


Fig. 5 SEM images of PPC fiber: (a, b) 35 °C-40 times, (c, d) 45 °C-40 times, (e, f) 50 °C-40 times.

璃化转变温度时, 其分子链运动能力强, 可能导致纤维内部产生较多大小不均一的空腔乃至纤维的粗细不均. 当后牵伸温度控制在 45 °C, 增加拉伸倍数时, 观察到纤维截面的中空逐渐减少, 孔隙降低, 纵向沟壑随着拉伸倍数增加而逐渐加深, 表现更为清晰. 牵伸有利于纤维内部结构沿纵向的排列, 提高纤维的取向.

3 结论

本文报道了 PPC(分子量为 60.7 kDa, 含 4%

聚醚结构)的湿法纺丝, 获得了高取向的 PPC 长纤. 在溶剂/凝固浴组合为 DMF/水的条件下, PPC 湿法纺丝的工艺温度为 25 °C, 后处理在 45 °C 下将 PPC 原纤拉伸 400 倍, 所得 PPC 纤维的拉伸强度达 201.9 MPa, 远高于 PPC 原料直接制得样品的拉伸强度(10 MPa)^[1], 弹性模量可达 2.9 GPa, 断裂伸长率为 36.4%, 突破了 PPC 纤维低强度的认识. 研究表明: 一方面高分子量的全交替 PPC 或立构规整的 PPC 有机会通过高倍拉伸方法实现结晶, 另一方面也为 PPC 改性或

与其他生物降解材料共混制备高性能纤维提供了基础. 在未来的研究中, 可以通过制备相容剂, 增强 PLA 与 PPC 共混物的相容性, 制备更高性能的可生物降解纤维^[15]; 或通过化学改性, 与

PLA 接枝共聚, 提高材料力学性能^[16]; 或者通过引入硫原子, 利用硫代增强结晶的特点, 提高纤维的热学性能和力学性能^[17,18].

REFERENCES

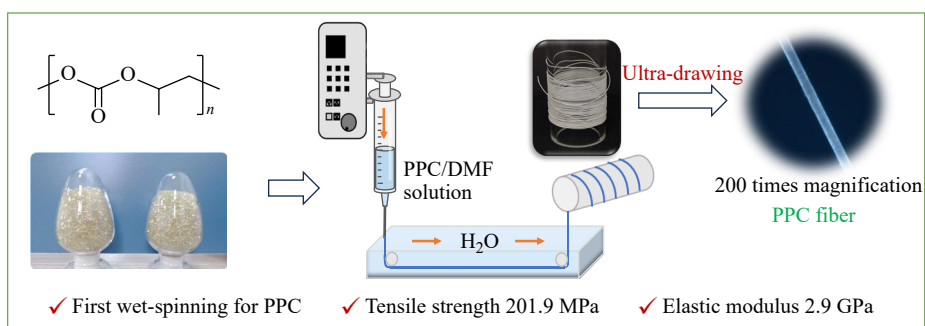
- 1 Liu, J. J.; Jia, M. C.; Gnanou, Y.; Feng, X. S. One-pot synthesis of CO₂-based polylactide-*b*-poly(ether carbonate)-*b*-polylactide triblock copolymers and their mechanical properties. *Macromolecules*, **2023**, 56(4), 1615–1624.
- 2 Yang, J. N.; Zhang, X. H.; Li, T.; Wang, Y.; Xia, B. H.; Jiang, J.; Chen, M. Q.; Dong, W. F. A novel biodegradable poly(propylene carbonate) with enhanced thermal and mechanical properties by incorporating tannic acid. *Polym. Adv. Technol.*, **2022**, 33(4), 1341–1347.
- 3 Zheng, G. F.; Han, L. J.; Zheng, B. H.; Bian, J. J.; Zhang, H. L. Biodegradable poly(lactic acid)/poly(propylene carbonate) blend with enhanced mechanical properties and heat resistance by uniaxial pre-stretching. *Polym. Adv. Technol.*, **2024**, 35(4), e6395.
- 4 金荣仙, 席曼, 赵浩淼, 杨浩艺, 吴晓, 吴静怡. 聚碳酸亚丙酯(PPC)纤维膜的制备及其热性能研究. *材料科学*, **2018**, 8(5), 567–572.
- 5 王丹, 陈月君, 许华君, 路瑶, 王依民, 王燕萍. 聚碳酸亚丙酯-聚乳酸共混熔纺纤维的制备与性能. *合成纤维*, **2014**, 43(2), 7–11.
- 6 马遥, 储顺礼, 孙悦, 马珊珊, 李雪, 张天首, 周延民. 聚丁二酸丁二醇酯/聚碳酸亚丙酯生物膜的制备及相关性能评价. *中国组织工程研究*, **2015**, 19(21), 3355–3360.
- 7 El-Hadi, A. M. Improvement of the miscibility by combination of poly(3-hydroxy butyrate) PHB and poly(propylene carbonate) PPC with additives. *J. Polym. Environ.*, **2017**, 25(3), 728–738.
- 8 Maeda, Y.; Nakayama, A.; Kawasaki, N.; Hayashi, K.; Aiba, S.; Yamamoto, N. Ring-opening copolymerization of succinic anhydride with ethylene oxide initiated by magnesium diethoxide. *Polymer*, **1997**, 38(18), 4719–4725.
- 9 Longo, J. M.; DiCiccio, A. M.; Coates, G. W. Poly(propylene succinate): a new polymer stereo complex. *J. Am. Chem. Soc.*, **2014**, 136(45), 15897–15900.
- 10 Li, J.; Liu, Y.; Ren, W. M.; Lu, X. B. Asymmetric alternating copolymerization of meso-epoxides and cyclic anhydrides: efficient access to enantiopure polyesters. *J. Am. Chem. Soc.*, **2016**, 138(36), 11493–11496.
- 11 Wu, H. L.; Yang, J. L.; Luo, M.; Wang, R. Y.; Xu, J. T.; Du, B. Y.; Zhang, X. H.; Darensbourg, D. J. Poly(trimethylene monothiocarbonate) from the alternating copolymerization of COS and oxetane: a semicrystalline copolymer. *Macromolecules*, **2016**, 49(23), 8863–8868.
- 12 Hu, L. F.; Zhang, X.; Cao, X. H.; Chen, D. J.; Sun, Y.; Zhang, C. J.; Zhang, X. H. Alternating copolymerization of isobutylene oxide and cyclic anhydrides: a new route to semicrystalline polyesters. *Macromolecules*, **2021**, 54(13), 6182–6190.
- 13 Yue, T. J.; Ren, W. M.; Liu, Y.; Wan, Z. Q.; Lu, X. B. Crystalline polythiocarbonate from stereoregular copolymerization of carbonyl sulfide and epichlorohydrin. *Macromolecules*, **2016**, 49(8), 2971–2976.
- 14 Sun, J. K.; Guo, W. J.; Mei, G. K.; Wang, S. L.; Wen, K.; Wang, M. L.; Feng, D. Y.; Qian, D.; Zhu, M. F.; Zhou, X.; Liu, Z. F. Artificial spider silk with buckled sheath by nano-pulley combing. *Adv. Mater.*, **2023**, 35(32), 2212112.
- 15 Gao, F. X.; Cai, Y.; Liu, S. J.; Wang, X. H. High-performance biodegradable PBAT/PPC composite film through reactive compatibilizer. *Chinese J. Polym. Sci.*, **2023**, 41(7), 1051–1058.
- 16 Liang, Z. Z.; Li, X.; Hu, C. Y.; Duan, R. L.; Wang, X. H.; Pang, X.; Chen, X. S. Copolymerization of PO/CO₂ and lactide by a dinuclear salen-Cr(III) complex: gradient and random copolymers with modifiable microstructure. *Chinese J. Polym. Sci.*, **2022**, 40(9), 1028–1033.
- 17 Xia, Y. N.; Sun, Y.; Liu, Z. H.; Zhang, C. J.; Zhang, X. H. Modular alcohol click chemistry enables facile synthesis of recyclable polymers with tunable structure. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2023**, 62(37), e202306731.
- 18 Cao, X. H.; Wang, H. L.; Yang, J. L.; Wang, R. Y.; Hong, X.; Zhang, X. H.; Xu, J. T.; Wang, H. Sulfur-substitution-enhanced crystallization and crystal structure of poly(trimethylene monothiocarbonate). *Chin. Chem. Lett.*, **2022**, 33(2), 1021–1024.

Research Article

Preparation and Mechanical Properties of Poly(propylene carbonate) Fiber

Qing-lei Yu^{1,3}, Yu-jing Zhang^{1,3}, Zhen Xu^{2,3}, Cheng-jian Zhang^{1,3*}, Xing-hong Zhang^{1,3*}⁽¹⁾State Key Laboratory of Biobased Transportation Fuel Technology, ⁽²⁾MOE Key Laboratory of Macromolecular Synthesis and Functionalization, ⁽³⁾Department of Polymer Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

Abstract Poly(propylene carbonate) (PPC) is a biodegradable polymer that can be produced by alternating copolymerization of carbon dioxide (CO₂) and propylene oxide (PO). It is a typical amorphous polymer with the glass transition temperature of 30–40 °C, and thus is considered to be difficult to spin. The research on the preparation and properties of neat PPC fiber is rare. In this study, we prepared PPC filaments by wet spinning method, and the spinning solvent and coagulation bath were selected as *N,N*-dimethylformamide (DMF) and water, respectively. The uniform PPC/DMF solution was transferred to the syringe and then extruded at the speed of 160 μL/min, passing through a 4 m long water coagulation bath. The obtained PPC nascent fiber (no further stretching) was collected on a wire collector and vacuum dried to constant weight at room temperature. The dried PPC nascent fibers are clamped on a high-precision fiber stretching machine and stretched at a certain speed in a water bath at set temperatures (*e. g.* 45 °C) to obtain PPC filaments with different stretching multiples. The orientation, thermal properties and mechanical properties of PPC filaments were studied by changing post-treatment drafting times and temperatures. *T_g* values of the PPC filaments achieved 31.6 °C, increased by about 2 °C after stretching. The maximum stretching limit of PPC filaments can reach 1020 times of PPC nascent fiber; generally, it can be stretched about 600 times, and the diameter of the resulting PPC filaments is about 10 μm. The tensile strength of PPC filaments stretched 400 times at 45 °C at room temperature can reach 201.9 MPa, which is 20 times that of PPC sheet, 87 times that of PPC/polybutylene succinic acid (PBS) composite fiber membrane, 9.2 times that of PPC/poly(3-hydroxybutyrate) (PHB) composite fiber, and 9.7 times that of PPC/poly(lactic acid) (PLA) composite fiber. The room temperature elastic modulus can reach 2.9 GPa, which is 4.1 times that of PPC sheet. The great improvement of its mechanical properties is attributed to a certain degree of highly ordered structure formed by the high orientation of the fibers after stretching. The DSC heating curves of PPC filaments showed an endothermic peak near 60 °C, similar to the melting of “crystallization” with very small enthalpy changes (0.4 – 0.6 J/g), suggesting the formation of ordered aggregation structure, rather than crystalline. In addition, the polarized optical microscope (POM), small-angle X-ray scattering (SAXS), wide-angle X-ray scattering (WAXS) and scanning electron microscope (SEM) characterizations also supported the formation of ordered aggregation structure in PPC filaments. This preliminary study shows the potential application of PPC in fiber materials.



Keywords Poly(propylene carbonate), CO₂-based polymer, Wet spinning, Fiber orientation, Mechanical properties

* Corresponding authors: Cheng-jian Zhang, E-mail: chengjian.zhang@zju.edu.cn

Xing-hong Zhang, E-mail: xhzhong@zju.edu.cn