纸浆纤维–聚碳酸酯复合材料

王旷，邓巧云，卜香婷，韩雨潼，李大纲
（南京林业大学 材料科学与工程 南京 210037）

摘要：目的 采用可再生的纸浆纤维和功能塑料聚碳酸酯（PC）制备功能木塑复合材料，探究硼酸处理对复合材料相关性能的影响，进一步拓展材料在工程领域的应用。**方法** 配制质量分数为 5%的硼酸溶液，将部分纸浆纤维放入硼酸溶液中浸渍 2 h，将纸浆纤维与 PC 混合后，用双螺旋挤出机进行熔融加工，再用微型注塑机注塑成型，制备出复合材料。**结果** 经硼酸处理后的复合材料，在添加质量分数为 30%的纸浆纤维时，复合材料的弹性模量达到 4.31 GPa，比添加同样纤维含量的未经过硼酸处理的复合材料高 16%；同时，与纯 PC 的弹性模量相比提高了 90%。**结论** 采用硼酸处理可以提高纸浆纤维的热稳定性，可进一步提高复合材料的力学强度。PC 是一种生活中常见的功能塑料，其本身具有优良的力学性能，硼酸的处理和纸浆纤维的加入使其力学性能进一步提升，有望作为结构材料应用于集装箱、托盘等方面，在包装领域有较好的应用前景。

关键词： 功能塑料；聚碳酸酯；硼酸处理；力学性能
中图分类号： TB332 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3563(2022)17-0029-07
DOI： 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.17.004

Pulp Fiber-Polycarbonate Composite

WANG Kuang, *DENG Qiao-yun*, *BU Xiang-ting*, *HAN Yu-tong*, *LI Da-gang*

(School of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

ABSTRACT: The work aims to prepare functional wood-plastic composite by renewable pulp fiber and functional plastic polycarbonate (PC) and investigate the effects of boric acid treatment on the properties of the composite to further expand the application of composite in the field of engineering. 5% (mass fraction) boric acid solution was prepared, and part of the pulp fibers were immersed in boric acid solution for 2 h. After mixed with PC, the pulp fibers were fused by a double spiral extruder and then subject to injection molding by a miniature injection molding machine to prepare the composite. The elastic modulus of the composite treated with boric acid reached 4.31 GPa when 30% pulp fiber was added, which was 16% higher than that of the composite without boric acid treatment but with the same fiber content. At the same time, compared with pure PC, the elastic modulus increased by 90%. The thermal stability of pulp fiber is improved by boric acid treatment, and the mechanical strength of the composite is further enhanced. PC is a common functional plastic in life, which has excellent mechanical properties. The treatment by boric acid and the addition of pulp fiber further improve the mechanical properties of the composite, which is expected to be used as a structural material for containers, pallets, etc., and has a good prospect in the field of packaging application.

KEY WORDS: functional plastics; polycarbonate; boric acid treatment; mechanical properties

收稿日期： 2021−12−30
基金项目： 国家自然科学基金（031020151）
作者简介： 王旷（1996—），男，硕士，主要研究方向为生物质复合材料。
通信作者： 李大纲（1959—），男，博士，教授，主要研究方向为生物质复合材料。

生物质纤维作为增强材料，用来增强热塑性塑料已成为材料领域新的研究热点。生物质纤维具有密度低、强度较高、价格低廉、来源丰富、可降解性好、环保等诸多优点[1-2]，因此生物质纤维热塑性复合材料已广泛用于柔性电子器件、包装、汽车、户外建筑装饰材料等领域[3-6]。纤维的形态、纤维的表面改性及材料的复合过程对聚合物的形成和最终材料的性能[7-8]都有显著的影响，因此生物质纤维还存在一些需要改进的缺点，如纤维的耐热性[9]。

日常生活中常见的几种塑料如聚乙烯、聚丙烯及可完全降解的聚乳酸等，相较于这些通用塑料，聚碳酸酯（PC）作为一种工程塑料，具有优异的力学性能[10]、化学耐久性和耐热性，因此 PC 被广泛应用于医疗器械、机械部件、电子产品、建筑产品和汽车产品[11]等方面。

在木塑复合材料的研究领域中，关于纸浆纤维、PP、PE 等通用塑料复合方面的研究[12-15]较多。纸浆纤维具有比强度高、价格低廉、环保可再生等优点[16]，因此纸浆纤维与 PC 木塑的复合材料具有很大的潜在应用价值[17]。然而，利用纸浆纤维填充 PC 制备复合材料，特别是熔融共混挤压工艺方面的相关报道较少。因为纸浆纤维的热降解温度低于 PC 的加工温度，导致复合材料加工困难[18]，因此提出通过提高纸浆纸纤维的热稳定性的方法来解决这一问题。

目前，硼酸广泛应用于医药、农药、核工业、木材防腐及阻燃[19]等领域。此外，硼酸还作为中子吸收器被用于核工业领域。硼酸可以与核糖、蛋白质、多糖和维生素等物质复合，对人类的健康[20]有着重大意义。在一些化学应用中，硼酸被添加到酚醛树脂中，以提高其热稳定性[21-22]。文中通过纸浆纤维制备 PC 基树脂复合材料，探究硼酸处理对纸浆热稳定性的影响，并通过纸浆纤维制备 PC 树脂复合材料。

1　实验

1.1　材料

主要材料：针叶木纸浆纤维，含水率低于 10%，杨润聚合物贸易有限公司；聚碳酸酯颗粒，Makrolon 6485，德国拜耳公司；分析纯级硼酸颗粒，Sigma-aldrich，加拿大默克公司。

1.2　仪器

主要仪器：微型螺杆挤出机，HAAKE，德国希而科公司；微型注射成型机，上海新硕精密机械有限公司；万能力学试验机，深圳市新三思材料检测有限公司。

1.3　方法

1.3.1　纸浆纤维改性

将纸浆纤维浸入质量分数为 5%的硼酸溶液中，水浴加热 2 h。将过滤后的纸浆纤维经 90 ℃烘干机烘干 24 h，使其最终的含水率（质量分数）小于 2%。纸浆纤维与硼酸发生了酯化和络合反应，接入了键能更高的 B—O 键，见图 1。

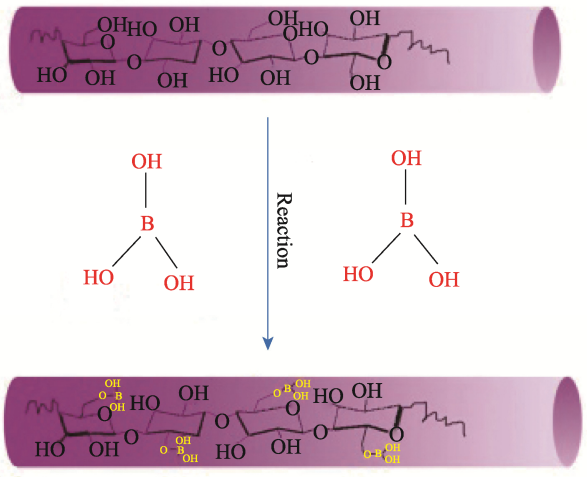

图 1　硼酸处理机理

Fig.1 Boric acid treatment mechanism

1.3.2　纸浆纤维/PC 复合材料的制备

称取 PC 颗粒在 80 ℃下干燥 10 h，用螺旋桨搅拌机将浆纤维和 PC 颗粒搅拌 5 min，转速为 5 000 r/min。然后，将 PC 颗粒通过双螺杆挤出机挤压造粒，挤出机温度为 220 ℃，转速为 30 r/min。最后，将标准测试样品按注射成型的方法进行注塑，注射温度为 240 ℃，模具温度为 80 ℃，注射压力为 6~8 kPa，样品规格为长度 80 mm、宽度 10 mm、厚度 4 mm，样品被用来进行弯曲测试。

1.4　测试与表征

1.4.1　红外光谱

采用 Nicolet IS10 光谱仪在 600~4 000 cm^{-1} 内以 3 cm^{-1} 的分辨率扫描纤维样品，每个样本扫描 5 次。

1.4.2　力学性能的测定

采用万能试验机，根据 ASTM D-790，对纸浆纤维/PC 复合材料的三点弯曲性能进行测试。曲线试样的支撑跨度与试样厚度之比为 16∶1，试验速度为 2 mm/min，试样的长度为 80 mm，宽度为 10 mm，厚度为 4 mm。每组试样重复试验 5 次，计算平均值。

1.4.3　热膨胀系数的测定

采用热机械分析仪测量复合材料的热膨胀系数。试件的长度为 22 mm，宽度为 4 mm，厚度为 1 mm，跨度为 18 mm。样品的测试温度为-20~ 80 ℃，升温

速率为 5 ℃/min。

1.4.4　动态力学性能的测定

采用动态力学分析仪测量复合材料的动态黏弹性。采用单悬臂模式，在 1、2、5 Hz 等 3 种不同频率下进行，升温速率为 2 ℃/min。将试样切割成尺寸为 16 mm×4 mm×1 mm 的试样，测量温度为 −120~120 ℃，动态负荷为 2 N，保护气体为氮气。

1.4.5　热重分析

采用 SDT Q600 热重分析仪对纸浆纤维/PC 木塑复合材料在氮气环境下的热稳定性进行研究，样品质量为 10~15 mg，氮气流量为 60 mL/min。将样品从室温加热至 600 ℃，升温速率为 5 ℃/min。

2　结果与分析

2.1　硼酸处理前后纤维的红外光谱

观察经硼酸处理后的纸浆纤维和未处理纸浆纤维的典型 FTIR 光谱，见图 2。在 3 339、2 906、1 030 cm^{-1} 处为纤维素的典型吸收峰。在 3 339 cm^{-1} 处的宽峰与纤维素分子链自由羟基及羟基形成的氢键有关，在 2 906 和 1 030 cm^{-1} 处的典型谱带分别对应亚甲基和醚键的伸缩振动。这些峰在改性和未改性纸浆纤维的 FTIR 红外光谱中都存在。除此之外，2 种纤维在 1 653 cm^{-1} 处的吸收峰为 C=O 的伸缩振动。经过硼酸处理后纸浆纤维中出现了一些新的吸收峰，例如 2 250、1 377、810 cm^{-1} 等，在 2 250、1 377 cm^{-1} 处的吸收峰可归因于 B—O—B 和 B—O—C 键的伸缩振动。在 810 cm^{-1} 处为 B—O 键的弯曲振动。这意味着在使用硼酸处理纸浆的过程中，纸浆纤维与硼酸成功地进行了酯化和络合反应，从而提高了纤维的交联程度。B—O 的键能（561 kJ/mol）大于 C—O 的键能（384 kJ/mol）。由于接入了键能高的官能团，因此对纸浆纤维热稳定性的提高起到了一定的作用。

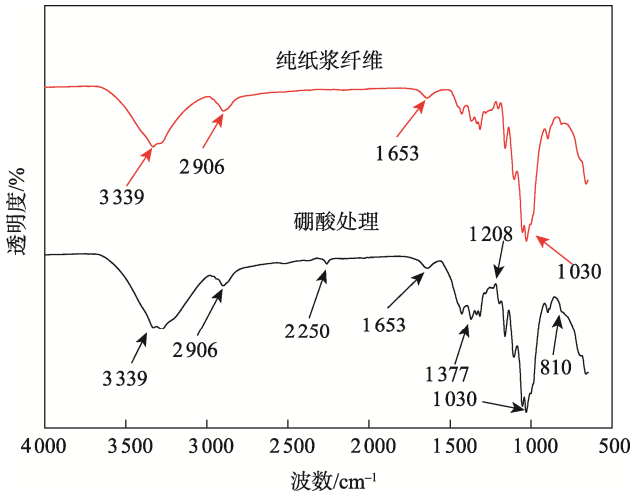

图 2　硼酸处理后的纸浆纤维和未处理的纸浆纤维的红外光谱

Fig.2 FT-IR spectra of borated pulp fiber and untreated pulp fiber

2.2　硼酸处理对纸浆/PC 复合材料力学性能的影响

从图 3 可以看出，在 PC 塑料基体中添加纸浆纤维，无论是否使用硼酸处理纸浆纤维，复合材料的力学性能都会发生明显的变化。

随着纤维含量的不断增加，复合材料的刚性不断提高，在力学抗弯试验中断裂。在添加质量分数为 30%的纸浆纤维后，未经硼酸处理的纸浆纤维/PC 材料的弹性模量由纯 PC 的 2.27 GPa 提升到 3.62 GPa，提高了约 59%（图 3b）。相比之下，经过硼酸处理的纸浆纤维/PC 复合材料的弹性模量由纯 PC 的 2.27 GPa 提升到 4.31 GPa，提高了约 90%（图 3d）。复合材料弹性模量的提高是因为纸浆纤维的力学强度大于纯 PC。在红外测试中可知，硼酸可以提高纸浆的热稳定性，在复合材料熔融加工过程中，经过硼酸处理后纤维的破坏程度减小，因此经过处理的纤维对复合材料的力学强度的提升大于未经过处理的纤维。

复合材料的弹性强度随着纤维的含量的增加呈先增加后减少的趋势，经过硼酸处理的复合材料，在纤维的质量分数为 20%时复合材料的弹性强度相对最大，由纯 PC 的 98.1 GPa 提升到了 104.5 GPa，增加了约 6.5%（图 3c）。在木塑复合材料中，随着纤维素含量的提高，纤维之间的团聚现象越来越明显，纤维的桥接作用被减弱，导致材料力学强度降低。通过比较经硼酸处理和未处理的纸浆纤维/PC 复合材料在添加相同含量纸浆纤维的情况下，经硼酸处理后复合材料的弹性强度大于未处理复合材料的弹性强度。随着纤维含量的增加，2 种复合材料的弹性强度的差距越来越明显，可见采用硼酸处理能更好地提高复合材料的力学性能。

2.3　硼酸处理对纸浆/PC 复合材料热膨胀系数的影响

塑料的热膨胀系数远大于金属的热膨胀系数，这在一定程度上限制了塑料的应用。特别是在工程材料领域，复合材料的热膨胀系数是一个重要指标。图 4 是经硼酸处理和未处理的复合材料的热膨胀系数，温度为−30~80 ℃，符合功能塑料在日常生活中应用的温度范围。无论采用何种方式，复合材料的热膨胀系数均随着纸浆纤维的增加而逐渐降低，纯 PC 的热膨胀系数为 $71.4\times10^{-6}\ K^{-1}$，低于通用塑料（例如 HDPE、PP）的热膨胀系数，这符合 PC 作为一种功能塑料的

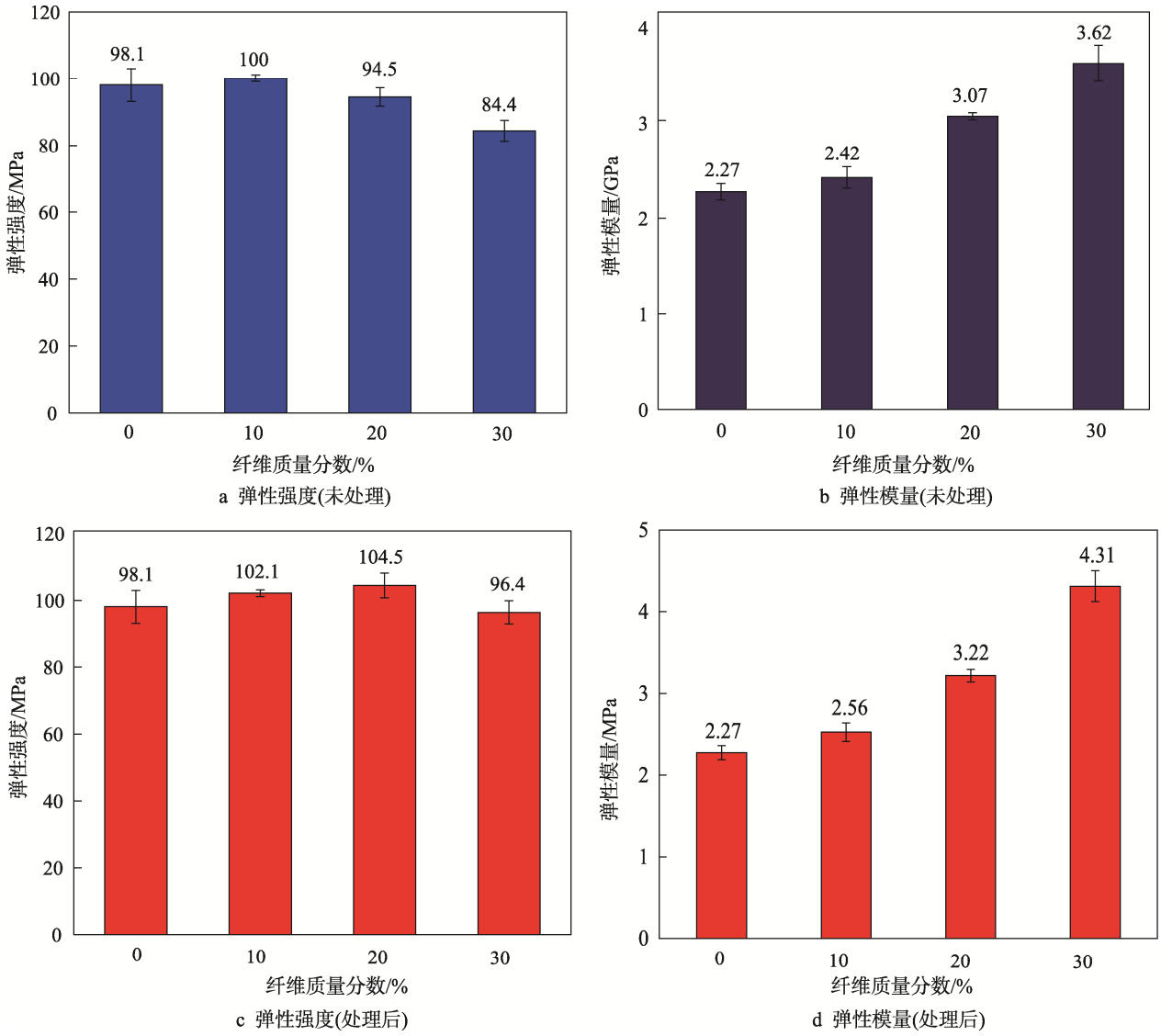

图 3　纸浆纤维/PC 复合材料的力学数据
Fig.3 Mechanical data of pulp fiber/PC composites

特性（图 4b）。造成这种现象的原因有 2 点：纤维素的热膨胀系数低于纯 PC 的，纤维素作为自然中最常见的高分子聚合物之一，其热膨胀系数为 10×10^{-6}~20×10^{-6} K^{-1}，这个热膨胀系数低于一些金属的热膨胀系数。根据材料的共混原理，纤维素的加入可以降低复合材料的热膨胀系数。在复合材料中，添加的纤维素与纯 PC 纠缠在一起，由于纤维的桥接作用，当塑料分子受热时，与之纠缠在一起的纤维能很好地抑制塑料分子的变形，从而降低了复合材料的热膨胀系数。

经过硼酸处理的纸浆纤维/PC 复合材料，当纤维的质量分数为 30%时，复合材料的热膨胀系数为 32.1×10^{-6} K^{-1}，比纯 PC 的热膨胀系数降低了约 55%（图 4b）。再比较未经过硼酸处理的复合材料的热膨胀系数，在添加质量分数为 10%的纤维时，2 种复合材料的热膨胀系数没有明显差异。当添加质量分数为 20%和 30%的纤维时，经过硼酸处理的复合材料的热膨胀系数分别为 40.3×10^{-6} K^{-1} 和 32.1×10^{-6} K^{-1}，小于未经过硼酸处理的复合材料的 50.2×10^{-6} K^{-1} 和 39.9×10^{-6} K^{-1}（图 4a）。当纤维含量增加时，复合材料在熔融流动加工过程中，流动性会降低，纤维置于高温环境条件下的时间越长，纤维形态遭到破坏的程度也越大。未经硼酸处理的纤维遭受的破坏程度大于经过硼酸处理的纤维，从而影响了纤维素与 PC 之间的桥接作用。当复合材料受热，处理后的纤维抑制 PC 分子变形的能力强于未经过处理的纤维，从而使复合材料具有较低的热膨胀系数。总之，纤维的加入和硼酸处理，不仅提高了复合材料的力学强度，同时也降低了这种材料的热膨胀系数，意味着材料在工程材料领域的应用范围大大提高。

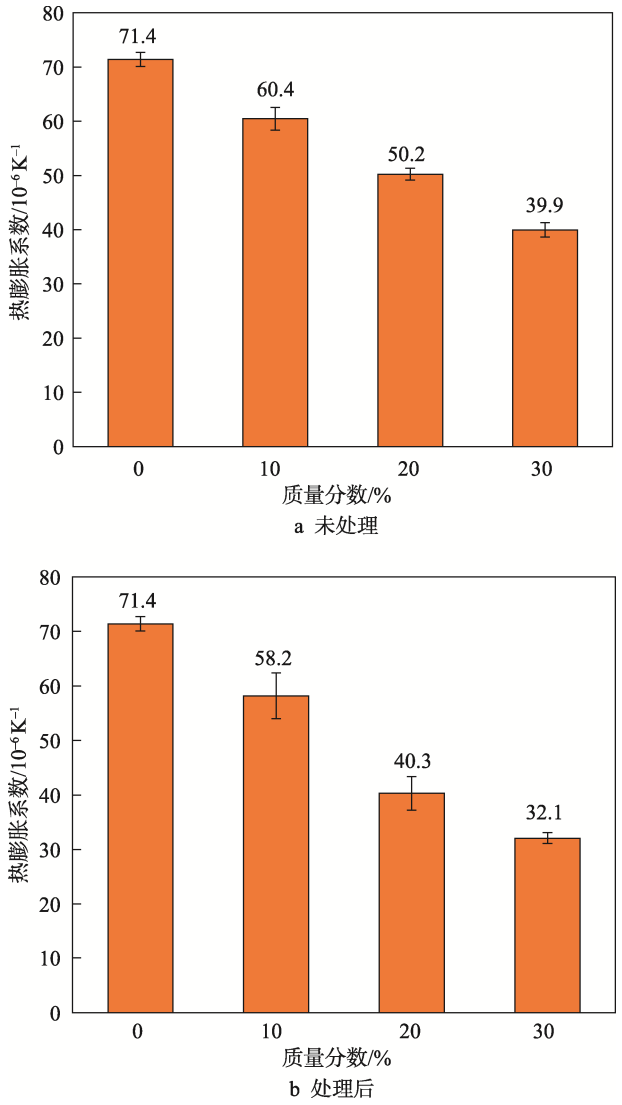

图 4 纸浆纤维/PC 复合材料的热膨胀系数
Fig.4 Thermal expansion coefficient of pulp fiber/PC composites

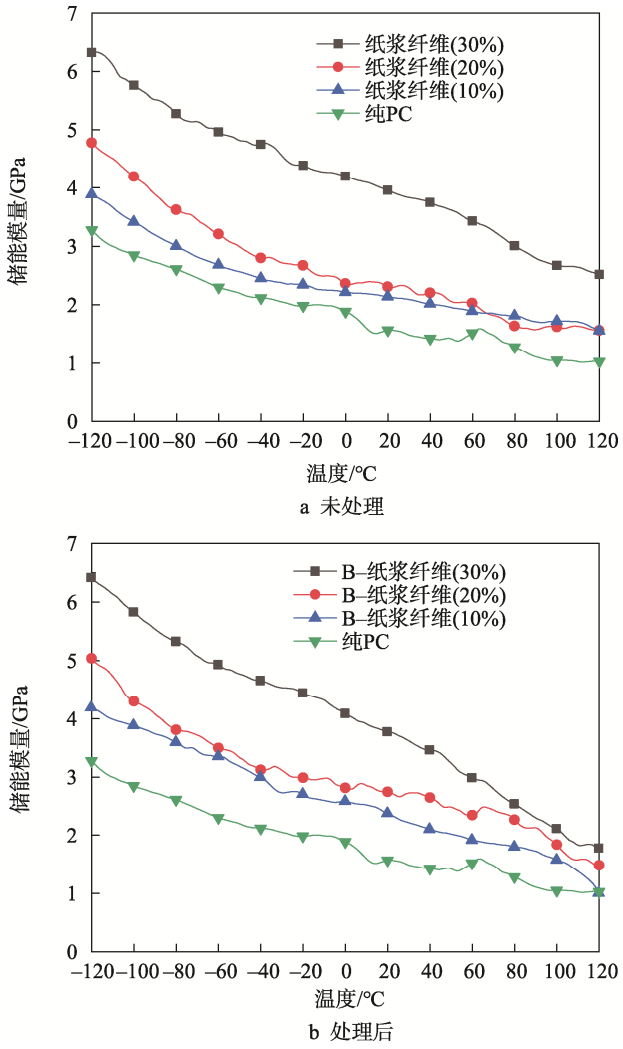

图 5 纸浆纤维/PC 复合材料的储存模量
Fig.5 Storage modulus of pulp fiber/PC composites

2.4 硼酸处理对纸浆/PC 复合材料的动态热机械分析值的影响

动态热机械分析（DMA）可以综合表征材料的力学性能和热性能，参数包括储能模量 E'、损耗模量 E''和阻尼系数等。高分子复合材料有 2 个重要的温度节点：玻璃化转变温度（T_g）和熔点，它们决定了材料在日常生活中的应用范围，当温度达到 T_g 后，高分子材料从玻璃态转变为高弹态。随着温度的升高，材料的分子链间也会随之产生更多的运动。经硼酸改性和未改性的不同纤维含量下纸浆纤维/PC 复合材料的储能模量 E'如图 5 所示，温度为−120~120 ℃，随着温度的升高，纯 PC 和复合材料的储能模量均不断降低，表明材料的刚性也不断降低。

材料的储能模量越大，表明材料的刚性越好。与纯 PC 相比，无论是处理后还是未处理的复合材料，在相同的温度下，纸浆纤维的加入均明显提高了复合材料的储能模量。随着纤维含量的增加，储能模量提高的幅度越大。说明纸浆纤维的加入提高了复合材料的刚度，纤维含量越高，刚度的提高幅度越大，这与宏观力学性能测试结果一致。纤维的加入使纤维分散在 PC 基体中，当复合材料遭到破坏时，可以更有效地将应力从基体物质转移到纸浆纤维，阻止材料的破坏。对比添加相同纤维含量情况下的硼酸改性和未改性的复合材料，例如在−120 ℃情况下，添加质量分数为 10%或 20%的纤维含量的复合材料的储能模量分别为 4 170 MPa 和 5 050 MPa（图 5b），均大于同等条件下未处理的复合材料的储能模量（3 810 MPa 和 4 740 MPa，图 5a）。其他一些重要的温度节点也能观察到类似结论，说明复合材料在添加相同的纤维含量时，经硼酸改性后的复合材料的刚度大于未改性的复合材料的刚

度，进一步佐证了复合材料宏观力学试验的结论。采用硼酸处理可以提高纤维的热稳定性，减小复合材料在熔融流动过程中的破坏程度，从而提高复合材料的力学性能。

2.5　硼酸处理对纸浆/PC 复合材料的玻璃化转变温度的影响

经硼酸处理和未处理的纸浆纤维、纸浆纤维/PC 复合材料及纯 PC 的 TGA 曲线见图 6，温度为 25~800 ℃。纸浆纤维/PC 复合材料的热稳定性低于纯 PC 的热稳定性，但高于纸浆纤维的热稳定性。纤维的降解温度为 320~400 ℃，而 PC 的初始温度明显大于 400 ℃，PC 中含有大量的苯环、酯基等官能团。DTG 曲线可以证明，当温度达到纸浆纤维和 PC 的降解温度时，TGA 曲线有一个很明显的下降趋势，直到 800 ℃分解结束时。从 DTG 曲线可以看出，纸浆纤维/PC 复合材料的热降解可以分为纸浆纤维的热降解和 PC 的热降解等 2 个部分。随着纤维素的质量分数由 10%提升到 30%时，复合材料的热降解温度随着纤维素含量的增加逐渐降低。PC 作为一种功能塑料，本身具有较低的导热性，在一定程度上阻止了纸浆纤维的降解。另外，纸浆纤维热降解产生的一些有机挥发物被包覆在塑料基体中无法逸出，PC 在一定程度上对纸浆纤维起到了保护作用。纸浆纤维的炭残留率为 10.70%，经过硼酸处理后，纸浆纤维的炭残留率上升到 14.60%（见图 6）。经硼酸处理后，纸浆纤维的炭残留率升高，表明硼酸促进了纸浆纤维的成炭。例如，经质量分数为 10%的硼酸处理后纸浆纤维的炭残留率为 18.71%，大于未经硼酸处理的复合材料（17.37%）。添加 20%和 30%的纸浆纤维的复合材料，经过硼酸处理的复合材料的炭残留率大于未经硼酸处理的复合材料的炭残留率。纸浆纤维/PC 复合材料的炭残留率随着纸浆纤维含量的增加而降低，纯 PC 的炭残留率相对最高，未经硼酸处理的纸浆纤维炭残留率相对最低。以上结果表明，硼酸的加入提高了纸浆纤维的热稳定性，从而提高了复合材料的热稳定性。材料热稳定的提高，使材料应用于一些更苛刻环境条件的概率增大。

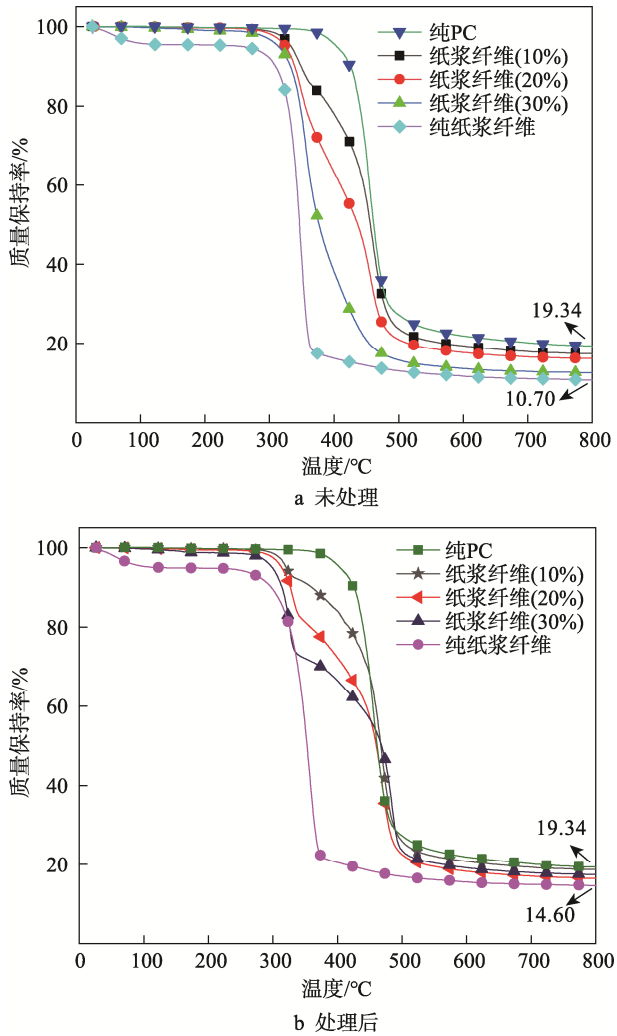

图 6　纸浆纤维复合材料的 TGA 曲线
Fig.6 TGA value of pulp fiber composites

3　结语

文中提出将纸浆纤维与功能塑料 PC 进行复合，通过挤出和注塑的方式制备复合材料，并研究了硼酸处理对复合材料性能的影响。对制备的纸浆纤维/PC 复合材料的工艺进行了初步探索，研究了硼酸处理和纤维含量对复合材料的力学性能、热稳定性、动态热力学性能和热膨胀系数等的影响，所制备的复合材料具有优良的性能。

工业上制备木塑复合材料大多使用木质纤维增强 PP、HDPE 等通用塑料，文中用功能塑料 PC 制备复合材料的研究为纤维素与功能塑料的复合提供了新思路，为未来生物质材料的高值化利用提供了可能。该研究不仅为包装材料的环保利用做出了贡献，同时在包装结构材料领域有着广阔的应用前景。

参考文献：

[1] OU Rong-xian, XIE Yan-jun, WOLCOTT M P, et al. Morphology, Mechanical Properties, and Dimensional Stability of Wood Particle/High Density Polyethylene Composites: Effect of Removal of Wood Cell Wall Composition[J]. Materials & Design, 2014, 58: 339-345.

[2] ASHORI A. Wood-Plastic Composites as Promising Green-Composites for Automotive Industries![J]. Bioresource Technology, 2008, 99(11): 4661-4667.

[3] ZHOU Ning-jing, JIANG Bo-fan, HE Xin, et al. A Superstretchable and Ultrastable Liquid Metal-Elastomer Wire for Soft Electronic Devices[J]. ACS Applied Mate-

rials & Interfaces, 2021, 13(16): 19254-19262.

[4] MORENO D D P, SARON C. Low-Density Polyethylene Waste/Recycled Wood Composites[J]. Composite Structures, 2017, 176: 1152-1157.

[5] LEE J M, MIN B J, PARK J H, et al. Design of Light-weight CFRP Automotive Part as an Alternative for Steel Part by Thickness and Lay-up Optimization[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2019, 12(14): 2309.

[6] LIM D, JEONG J, HONG K, et al. Semi-Transparent Plastic Solar Cell Based on Oxide-Metal-Oxide Multi-layer Electrodes[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2017, 23(1): 27-52.

[7] AKINYEMI B A, ADESINA A. Utilization of Polymer Chemical Admixtures for Surface Treatment and Modification of Cellulose Fibres in Cement-Based Composites: A Review[J]. Cellulose, 2021, 28(3): 1241-1266.

[8] 王戈. 浅谈以科技进步促进中国竹产业发展[J]. 国家林业局管理干部学院学报, 2011, 10(4): 8-11.
WANG Ge. Promoting the Development of China's Bamboo Industry by the Progress of Science and Technology[J]. State Academy of Forestry Administration Journal, 2011, 10(4): 8-11.

[9] MOHIT H, SRISUK R, SANJAY M R, et al. Nanoparticles Addition in Coir-Basalt-Innegra Fibers Reinforced Bio-Synthetic Epoxy Composites[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2021, 29(11): 3561-3573.

[10] ZHENG You-bin, WU Jie-yun, QU Shi-wei, et al. Photo-Bleaching of Optical Waveguide Polymers with Dipolar Chromophores to Improve Their Sensitivity for Explosive Vapor Detection[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2020, 8(37): 13010-13018.

[11] CHOI Y H, LYU M Y. Comparison of Rheological Characteristics and Mechanical Properties of Fossil-Based and Bio-Based Polycarbonate[J]. Macromolecular Research, 2020, 28(4): 299-309.

[12] SUZUKI K, SATO A, OKUMURA H, et al. Novel High-Strength, Micro Fibrillated Cellulose-Reinforced Polypropylene Composites Using a Cationic Polymer as Compatibilizer[J]. Cellulose, 2014, 21(1): 507-518.

[13] HO T T T, ABE K, ZIMMERMANN T, et al. Nanofibrillation of Pulp Fibers by Twin-Screw Extrusion[J]. Cellulose, 2015, 22(1): 421-433.

[14] SUZUKI K, HOMMA Y, IGARASHI Y, et al. Investigation of the Mechanism and Effectiveness of Cationic Polymer as a Compatibilizer in Microfibrillated Cellulose-Reinforced Polyolefins[J]. Cellulose, 2016, 23(1): 623-635.

[15] SUZUKI K, HOMMA Y, IGARASHI Y, et al. Effect of Preparation Process of Microfibrillated Cellulose-Reinforced Polypropylene Upon Dispersion and Mechanical Properties[J]. Cellulose, 2017, 24(9): 3789-3801.

[16] MARIANO M, EL KISSI N, DUFRESNE A. Melt Processing of Cellulose Nanocrystal Reinforced Polycarbonate from a Masterbatch Process[J]. European Polymer Journal, 2015, 69: 208-223.

[17] LEVCHIK S V, WEIL E D. Overview of Recent Developments in the Flame Retardancy of Polycarbonates[J]. Polymer International, 2005, 54(7): 981-998.

[18] CHANG Xue-song, DING Tong-mei, TIAN Heng-shui, et al. Antisolvent Crystallization and Solid-State Polymerization of Bisphenol-a Polycarbonate[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2016, 33(27): 17-23.

[19] GALLARDO-WILLIAMS M T, MARONPOT R R, WINE R N, et al. Inhibition of the Enzymatic Activity of Prostate-Specific Antigen by Boric Acid and 3-Nitrophenyl Boric Acid[J]. The Prostate, 2003, 54(1): 44-49.

[20] ZHANG Wei-jiang, LIU Tian-yu, XU Jiao. Preparation and Characterization of (10) Boric Acid with High Purity for Nuclear Industry[J]. SpringerPlus, 2016, 5(1): 1202.

[21] JZA B, AK B, DAN X B, et al. Improving Lignocellulose Thermal Stability by Chemical Modification with Boric Acid for Incorporating into Polyamide[J]. Materials & Design, 2019, 191(1): 253-261.

[22] ZHANG Jing-fa, KOUBAA A, XING Dan, et al. Improving Lignocellulose Thermal Stability by Chemical Modification with Boric Acid for Incorporating into Polyamide[J]. Materials & Design, 2020, 191: 1085-1089.

责任编辑：彭颋