

仿竹结构多孔聚醚砜基碳纤维复合材料

许培俊 韩磊 王临江 郭新良 刘荣海 高尚林

Bamboo structure like carbon fiber reinforced porous polyethersulfone matrix composites

XU Peijun, HAN Lei, WANG Linjiang, GUO Xinliang, LIU Ronghai, GAO Shanglin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220525.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

仿竹结构单丝玻璃纤维增强多孔聚醚砜基复合材料

Bamboo like porous polyethersulfone matrix monofilament glass fiber composite

复合材料学报. 2021, 38(4): 1302–1312 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200826.005>

泡沫铝填充碳纤维增强树脂复合材料薄壁管的压缩变形行为与吸能特性

Compressive deformation behavior and energy absorption of Al foam-filled carbon fiber reinforced plastic thin-walled tube

复合材料学报. 2020, 37(8): 1850–1860 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191206.002>

聚醚砜对连续碳纤维/聚醚醚酮复合材料性能的影响

Effect of polyethersulfone on the properties of continuous carbon fiber/polyetheretherketone composites

复合材料学报. 2021, 38(6): 1809–1816 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201130.001>

碳纤维增强环氧树脂复合材料圆管多胞填充结构吸能特性的准静态压缩试验

Quasi-static compression experimental study on energy absorption characteristics of multicellular structures filled with carbon fiber reinforced epoxy composite tubes

复合材料学报. 2021, 38(9): 2894–2903 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201201.003>

碳纤维增强镁基复合材料制备技术与新进展

Preparation process and new progress in carbon fiber reinforced magnesium matrix composites

复合材料学报. 2021, 38(7): 1985–2000 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210301.004>

基于导热板的碳纤维增强聚醚醚酮复合材料感应焊接温度调控

Temperature control for induction welding of carbon fiber reinforced polyetheretherketone (CF/PEEK) composite material via thermal conduction plate

复合材料学报. 2021, 38(8): 2625–2634 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201019.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220525.002

仿竹结构多孔聚醚砜基碳纤维复合材料



分享本文

许培俊^{*1}, 韩磊¹, 王临江¹, 郭新良², 刘荣海², 高尚林³

(1. 长安大学 材料科学与工程学院, 西安 710064; 2. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650217;
3. 德国 GZD 公司, 德累斯顿 01187)

摘要: 竹子是以竹纤维为增强体、木质素为基体所构成的天然复合材料, 其竹纤维赋予了竹材高强度的特点, 多孔木质素结构赋予了竹材轻质、高韧性的特点。本文通过模仿竹子的结构特征, 采用液相浸渍法和浸没沉淀相转化法在碳纤维表面沉积多孔聚醚砜聚合物, 制备出兼具轻质、高韧性、高强度特点的仿竹结构多孔聚醚砜基碳纤维复合材料 (CF/foam PES)。研究结果表明: 与传统密实结构的聚醚砜基碳纤维复合材料 (CF/condense PES) 相比, 本文制备出的聚醚砜基碳纤维复合材料的海绵状多孔聚醚砜结构降低了复合材料的表观密度, 且 CF/foam PES 的比强度相对于 CF/condense PES 提高了 234.5%, 比模量提高了 192.6%; 多孔聚醚砜使 CF/foam PES 具有优异的吸能性能。

关键词: 仿竹结构; 多孔聚醚砜; 比强度; 比模量; 吸能; 碳纤维

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2023)04-2049-07

Bamboo structure like carbon fiber reinforced porous
polyethersulfone matrix composites

XU Peijun^{*1}, HAN Lei¹, WANG Linjiang¹, GUO Xinliang², LIU Ronghai², GAO Shanglin³

(1. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid CO., LTD., Kunming 650217, China; 3. GZD, Dresden 01187, Germany)

Abstract: Bamboo is a natural composite material, which is composed of bamboo fiber as reinforcement and lignin as matrix. The bamboo fiber structure endows bamboo with the characteristics of high strength, and the porous lignin structure endows bamboo with the characteristics of light and high toughness. In this paper, carbon fiber reinforced bamboo structure porous polyethersulfone matrix composites (CF/foam PES) were prepared by imitating the structural characteristics of bamboo, and porous polyethersulfone was deposited on the surface of carbon fiber by liquid immersion method and immersion precipitation phase transformation method. The results show that: compared with traditional carbon fiber reinforced dense polyethersulfone matrix composites (CF/condense PES), CF/foam PES prepared in this paper has low apparent density; the specific strength and specific modulus of CF/foam PES are 234.5% and 192.6% higher than those of CF/condense PES. Moreover, the porous polyethersulfone matrix enhances the energy absorption properties of CF/foam PES.

Keywords: bamboo imitation structure; porous polyethersulfone; specific strength; specific modulus; energy absorption; carbon fiber

随着科学技术的发展, 人类对自然生物体的认知在不断加强, 许多研究者模仿生物系统的特
殊结构, 设计和研发出不同的仿生材料^[1-2]。其中, 以竹子为代表的天然材料有着独特的结构和优异

收稿日期: 2022-03-30; 修回日期: 2022-05-04; 录用日期: 2022-05-13; 网络首发时间: 2022-05-26 13:12:38
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220525.002>
基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51978072); 陕西省重点研发计划项目 (2022 GY-371); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助 (300102312404)
National Natural Science Foundation of China (51978072); Key Research and Development Program of Shanxi Province (2022 GY-371); Fundamental Research Funds for the Central Universities of Chang'an University (300102312404)
通信作者: 许培俊, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为聚合物基复合材料 E-mail: xupeijun@chd.edu.cn
引用格式: 许培俊, 韩磊, 王临江, 等. 仿竹结构多孔聚醚砜基碳纤维复合材料 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(4): 2049-2055.
XU Peijun, HAN Lei, WANG Linjiang, et al. Bamboo structure like carbon fiber reinforced porous polyethersulfone matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(4): 2049-2055(in Chinese).

的性能^[3]。从微观结构来看,竹子的杆茎是一种以竹纤维为增强体,梯度多孔木质素结构为基体包覆竹纤维的天然复合材料^[4-5]。其中,竹纤维是一种高强度微米级纤维材料,起到主要的承载载荷作用,提高了竹材的强度;而包覆在竹纤维外的多孔木质素结构能够有效降低竹材密度,当外加载荷较小时,还可借助自身的梯度多孔结构分散载荷,减少局部应力集中,提高竹子的韧性^[6-7]。此外,当竹材所承受的外部载荷超过其屈服应力时,多孔基体中孔径较大的区域会率先产生塑性变形以吸收外部能量,保护竹纤维,并延缓竹材断裂^[8]。因此,竹材具有轻量化、高强度、高韧性等优异的力学性能。Long等^[9]对竹子试样进行了拉伸和模拟实验,计算了竹纤维和薄壁组织沿秆壁半径的体积分数,再根据回归分析得到的线性方程,估算了竹纤维和薄壁基体组织的弹性模量,其纤维弹性模量为41.287 GPa,基体弹性模量为0.448 GPa。纤维承受了大部分载荷,决定了竹子的拉伸性能。Ray等^[10]指出竹子是目前最好的功能梯度复合材料之一,在竹纤维周围由木质素形成了具有梯度孔径的多孔结构。即多孔基体的孔径在靠近竹纤维处较小,远离竹纤维处较大,呈梯度变化趋势,其结构引起了拉伸强度的变化。梯度多孔结构不仅有助于降低竹材密度,而且能够吸收外部载荷能量,以保护竹纤维^[11]。同时,梯度多孔结构还有助于减少应力集中、提高界面粘接强度^[12]。Cui等^[13]对竹子进行了有限元模拟,其竹竿截面内纤维梯度分布在降低竹材密度的同时,显著提高了竹材的弯曲刚度。

常规的热固性碳纤维复合材料具有明显的脆性,严重影响了复合材料的强度和韧性。在树脂基碳纤维复合材料(CFRP)领域,如何更进一步实现轻量化、高强度、高韧性,是研究者们努力开展的研究工作^[14-16]。受竹子微观结构与碳纤维复合材料相似性的启发,本文探索了一种与竹子结构相似的复合材料。在碳纤维的表面制备类似于竹纤维外包裹的梯度多孔聚合物基体^[17-18],则有可能利用聚合物梯度多孔结构对制件的保护和对外部载荷的分散承载作用,提高CFRP的韧性、抗裂等力学性能。

在前期研究中^[19],采用聚醚砜在单丝碳纤维表面通过沉淀相转化法^[20-23]制备并研究了聚醚砜孔径为100~500 nm、直径为16 μm 的单丝多孔聚醚砜基碳纤维复合材料,该单丝多孔聚醚砜基碳

纤维复合材料实测力学性能高于混合定理计算得到的理论强度和模量。因此,为了尝试多孔聚醚砜基碳纤维在复合材料制件方面的实际应用^[24],有必要在前期研究的基础上,从微观到宏观制备出具有实际应用价值的轻量化、高强度、高韧性复合材料^[25]。而薄层状仿竹结构多孔聚醚砜基碳纤维复合材料可看作多个单丝纤维复合材料的聚集。因此,本文通过制备薄层状仿竹结构多孔聚醚砜基碳纤维复合材料,并对其微观形貌、表观密度、力学性能和吸能性能做了进一步研究。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

TC35R-12K碳纤维(台塑公司台丽品牌);E6020P聚醚砜(PES),德国巴斯夫公司;N,N-二甲基乙酰胺(DMAc)、异丙醇(IPA),天津富宇精细化工有限公司。

1.2 实验过程

1.2.1 PES树脂溶液的制备

称取20 g的PES和75 g的DMAc于500 mL烧杯中,用磁力搅拌器在100℃、200 r/min条件下搅拌至溶解。然后加入5 g的IPA,在同样条件下搅拌10 min至IPA溶解,制得浓度为20%PES树脂溶液。

1.2.2 CF/PES单层复合材料的制备

将一束20 cm长的碳纤维由约6 mm展宽至5 cm,将展宽后的碳纤维两端固定在聚四氟乙烯(PTFE)基板表面,滴加配制好的PES树脂溶液(溶液浓度为20%)于碳纤维展开区域,使用刮胶涂膜仪(BEVS1806,广州市盛化实业有限公司)将胶液与碳纤维涂覆均匀并控制胶液厚度为100 μm 。然后,将浸渍了树脂溶液的展纱碳纤维与PTFE模板一起浸入去离子水中浸泡6 h,从水中取出,使用80℃真空干燥箱8 h烘干,制得碳纤维含量为20wt%的CF/PES单层复合材料(CF/foam PES)。

1.2.3 传统密实结构复合材料的制备

采用烘干法制备聚醚砜基碳纤维复合材料(CF/condense PES)并作为对照组样品。将碳纤维展宽至5 cm并固定于PTFE表面,滴加PES树脂溶液(溶液浓度为20%),使用刮胶涂膜仪控制胶液厚度为100 μm 。然后将浸渍胶液的展纱碳纤维置于80℃真空烘箱中去除溶剂,制得碳纤维含量为20wt%的CF/condense PES。

1.2.4 多孔PES薄膜的制备

为研究PES薄膜的吸能特性,通过浸没沉淀

相转化法制备了多孔 PES 薄膜 (Film-PES)。将 PES 树脂溶液滴加至 PTFE 基板表面, 使用刮胶涂膜仪将树脂溶液 (溶液浓度为 20%) 均匀刮平在 PTFE 基板表面, 控制 PTFE 基板表面胶液厚度为 100 μm , 浸入去离子水中 6 h 后, 使用真空干燥箱在 80℃ 烘干至恒重, 制得 Film-PES。

1.3 测试与表征

1.3.1 微观形貌的表征

采用扫描电子显微镜 (SEM, S-4800 型, 日本 Hitachi 公司) 表征 CF/foam PES 样品的微观形貌, 测试样品均需要喷金处理。

1.3.2 表观密度的计算

采用光学显微镜 (Axio ScopeA1, 德国 Carl Zeiss 公司) 测量 CF/foam PES 的长、宽、高三维尺寸, 并计算 CF/foam PES 体积 V ; 采用万分之一电子天平 (XPR6UD5/AC) 测量 CF/foam PES 的质量 m 。根据测量结果使用公式: $\rho_{\text{sample}} = m_{\text{sample}} / V_{\text{sample}}$ 计算 CF/foam PES 的表观密度 ρ , 测量 5 组样品取平均值。采用同样的方法测量并计算 CF/condense PES 的表观密度。

1.3.3 力学性能的测试

按照《塑料拉伸性能的测定 第一部分: 总则》(GB/T 1040.1—2018^[26]) 及《塑料拉伸性能的测定 第五部分: 单向纤维增强复合材料的实验条件》(GB/T 1040.5—2008^[27]), 采用电子万能试验机 (CMT5105, 美国 MTS 系统公司) 测试 CF/foam PES 和 CF/condense PES 的拉伸力学性能。测试时, 以铝制加强片 (25 mm×25 mm×1 mm) 为端柄, 使用环氧胶 (M005 型号) 粘接端柄及样品并作为拉伸样品。测试温度 25℃, 实验速度 2 mm/min, 每组试样不少于 5 个。

1.3.4 动态热机械性能的测试

采用动态热机械分析仪 (DMA, Q800 型, 美国 TA 公司) 研究 CF/foam PES 的动态热机械性能。采用温度扫描模式, 在温度范围为 25~350℃, 升温速率 2 K/min、频率 1 Hz 的条件下, 观察动态模量曲线的变化过程。此外, 采用拉伸模式, 测量样品在 25~100℃ 内的损耗因子, 研究 CF/foam PES 的吸能特性。

2 结果与讨论

2.1 CF/PES 单层复合材料的微观形貌

CF/foam PES 在浸没沉淀相转化过程中, 形成了类似于竹子多孔木质素的梯度多孔微观结构。

在相转化成型制备过程中, 多孔 PES 结构是在浸没于非溶剂相 (H_2O) 瞬间形成的。将 PES 为溶质相溶解在 DMAc 为溶剂相中时能够很容易形成均相聚合物溶液, 即均相 PES 树脂溶液, 在浸入 H_2O 前, 均相 PES 树脂溶液处于热力学平衡状态。当 PES 树脂溶液被浸入到 H_2O 中时, 在溶液外表瞬间形成了 PES、DMAc 和 H_2O 的不稳定三相体系。在与 H_2O 接触的 PES 树脂溶液表面, DMAc 瞬间溶解在 H_2O 中, 打破了均相 PES 树脂溶液所处的热力学平衡状态; 随后, 在 PES 树脂溶液表面以内的区域, 由于表面三相体系的变化而引发内部 PES 树脂与 DMAc 体系的失稳现象, 从而出现树脂相分离, 使 PES 从 DMAc 中瞬间析出, 形成了互相贯通的多孔结构^[28]。致孔剂 IPA 的存在在这一过程中还能起到调节孔结构的作用, 控制 PES 在相转变过程中形成孔径梯度分布的海绵状多孔结构, 如图 1 所示。

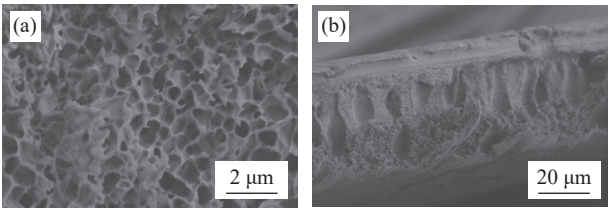


图 1 仿竹结构多孔聚醚砜基碳纤维复合材料 (CF/foam PES) 微观形貌: (a) 20 000 倍下 CF/foam PES 的断面图; (b) 2 500 倍下 CF/foam PES 的断面图

Fig. 1 Microstructure of carbon fiber reinforced bamboo structure porous polyethersulfone matrix composites (CF/foam PES): (a) Section of CF/foam PES for 20 000x; (b) Section of CF/foam PES for 2 500x

2.2 CF/PES 单层复合材料的力学性能

海绵状多孔结构的引入显著降低了 CF/foam PES 的表观密度, 赋予了 CF/foam PES 较高的比强度、比模量。如表 1 所示, CF/foam PES 的拉伸强度为 239.0 MPa, 拉伸模量为 7 009.2 MPa。相比较 CF/foam PES 而言, CF/condense PES 的拉伸强度为 240.2 MPa、拉伸模量为 8 054.9 MPa。由于 CF/foam PES 多孔结构可能起到轻量化作用, CF/foam PES 的表观密度为 0.419 g/cm³、CF/condense PES 的表观密度为 1.409 g/cm³, 从而使得 CF/foam PES 表现出显著的高比强度和高比模量特征。图 2 为材料拉伸性能空间图。可以看出, CF/condense PES 强度出现在常规 CFRP 区域内, 而 CF/foam PES 却能在具有相近拉伸强度的情况下保持很低的密度, 因此跳出了常规 CFRP 的范围, 见图 2(a)。由于二者的拉伸模量大致相同, 与 CF/condense

表 1 CF/foam PES 和 CF/condense PES 的力学性能

Table 1 Mechanical properties of CF/foam PES and CF/condense PES

Sample	Apparent density/ (g·cm ⁻³)	Tensile strength/ MPa	Tensile modulus/ MPa	Specific strength/ (m ² ·s ⁻²)	Specific modulus/ (m ² ·s ⁻²)
CF/condense PES	1.409	240.2	8 054.9	170.5	5 716.7
CF/foam PES	0.419	239.0	7 009.2	570.4(234.5% ↑)	16 728.4(192.6% ↑)

PES 相比，CF/foam PES 的拉伸模量位置同样处于常规 CFRP 的范围左侧，见图 2(b)。将表观密度与拉伸强度和拉伸模量相比，发现具有仿竹结构特征的 CF/foam PES 的高比强度、高比模量性能更加引人注目。如图 2(c)、图 2(d) 所示，具有仿竹结构的 CF/foam PES 的比强度、比模量达到 570.4 m²/s²、16 728.4 m²/s²，而传统密实基体结构

的 CF/condense PES 的比强度、比模量则仅为 170.5 m²/s²、5 716.7 m²/s² (表 1)。在材料比拉伸性能空间图中 CF/condense PES 仍然处于常规 CFRP 附近，而 CF/foam PES 的比强度和比模量性能则已经超出了几乎所有常规材料的范围，非常醒目地出现在各类材料比强度、比模量范围的左侧。由此可见，采用碳纤维和高性能热塑性树脂，通

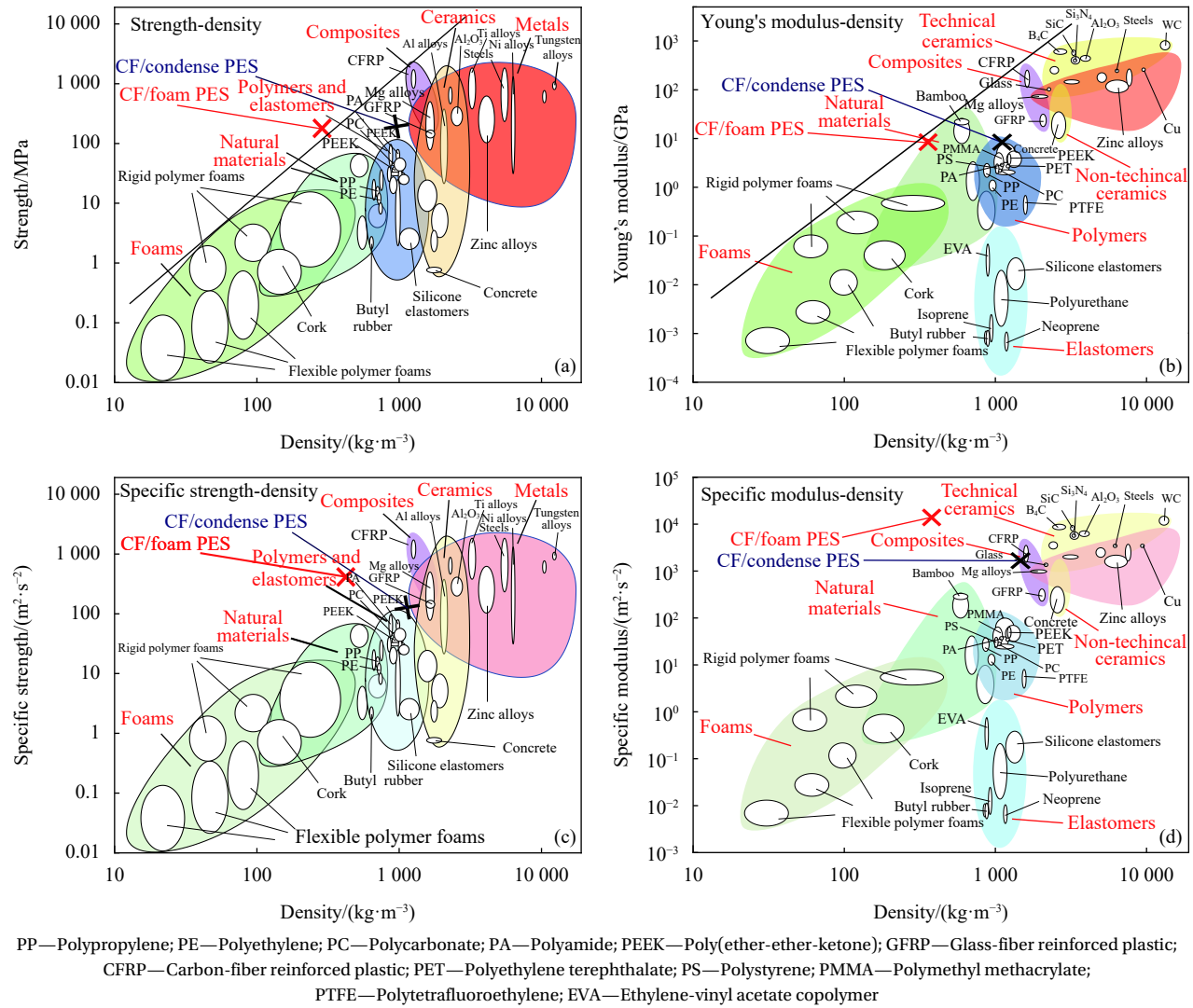


图 2 CF/foam PES 和传统密实结构的聚醚砜基碳纤维复合材料 (CF/condense PES) 在材料拉伸性能空间图中所处的位置：(a) 拉伸强度-密度；(b) 拉伸模量-密度；(c) 比强度-密度；(d) 比模量-密度

Fig. 2 Position of CF/foam PES and traditional carbon fiber reinforced dense polyethersulfone matrix composites (CF/condense PES) in the space diagram of tensile properties of materials: (a) Tensile strength-density; (b) Tensile modulus-density; (c) Specific strength-density; (d) Specific modulus-density

过仿竹子结构而制备的碳纤维增强多孔基体复合材料具有非常显著的轻量化潜力,在未来复合材料结构设计中具有重要的理论指导意义。

仿竹多孔 PES 结构使 CF/foam PES 在拉伸载荷的作用下,借助塑性变形吸收载荷能量,材料表现为较高的韧性。当外部载荷作用于材料表面时,CF/foam PES 内的仿竹多孔结构能够发生一定弹性变形以保护纤维;随着载荷的继续增加,当部分纤维增强体发生断裂时,海绵状多孔 PES 基体也会吸收部分载荷,并将裂纹尖端的应力分散于多孔孔壁上,使各个多孔孔壁产生塑性变形吸收更多载荷能量;从而在应力-应变曲线上出现屈服平台,如图 3(a) 所示,直至复合材料断裂。这一断裂过程中的断裂机制如图 3(b) 所示,断裂过程中更多微裂纹的形成也能够显著提高材料韧性。而 CF/condense PES 在受到外部载荷作用时,随着载荷的增加并未出现屈服平台,这也正好反映出 CF/condense PES 的基体为致密结构,难以在拉伸载荷下借助弹性变形吸收载荷能量,其拉伸断裂仍以脆性断裂为主,如图 3(c) 所示。因此,通过仿竹子结构而制备的多孔 PES 基碳纤维复合

材料正是利用这种 PES 多孔结构的纤维保护、可变形性和能量吸收特性,使得原本脆性的 CF/foam PES 转变为高韧性复合材料。

2.3 CF/PES 单层复合材料的动态热机械性能

随着温度的升高,多孔 PES 基体的孔结构逐渐塌缩,使 CF/foam PES 的储能模量产生不同寻常的变化趋势。图 4 是 CF/foam PES 的 DMA 图谱,通过 DMA 测试薄片状 CF/foam PES 复合材料的温度扫描曲线发现,当温度为 25℃ 时,CF/foam PES 的储能模量约为 1 700 MPa,此时 PES 基体保持初始的海绵状多孔结构。当温度处于 25~100℃ 之间时,PES 始终保持海绵状多孔结构,使 CF/foam PES 的储能模量基本稳定在 1 700~1 800 MPa。随着温度继续升高,由于 PES 多孔结构是在浸没沉淀相转化过程中瞬间形成的不稳定结构,其孔结构尤其是纳米孔结构会由于 PES 分子结构的运动逐渐产生塌缩,导致 CF/foam PES 的多孔基体结构逐渐向密实结构转变,从而导致整体复合材料的储能模量缓慢升高。在 100~210℃ 范围内,CF/foam PES 的储能模量由 1 800 MPa 升高至 3 000 MPa。当温度升高至 210~230℃ 范围内时,由于逐渐接近 PES 的玻璃化温度 (225℃),PES 多孔基体的孔壁迅速塌缩,使得 PES 基体结构变得更加致密,从而使 CF/foam PES 的储能模量急剧升高至约 10 000 MPa。然而,在超过 230℃ 之后,PES 迅速软化并逐渐进入高弹态甚至黏流态,又使 CF/foam PES 的储能模量迅速下降。因此,具有仿竹结构特征的 CF/foam PES 复合材料在动态热机械性能方面具有非常反常的变化过程,其储能模量会随温度升高而急剧增大,并在超过基体玻璃化温度后再下降,这一现象明显有别于常规材料储能模量是随温度的升高而逐渐下降的现象。这将有

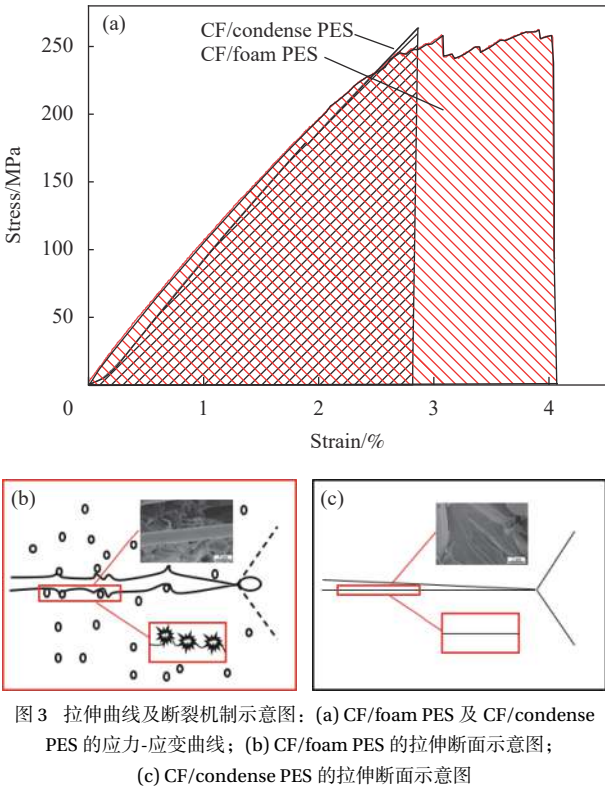


Fig. 3 Drawing curve and fracture mechanism diagram: (a) Stress-strain curves of CF/foam PES and CF/condense PES; (b) Drawing section of CF/foam PES; (c) Drawing section diagram of CF/condense PES

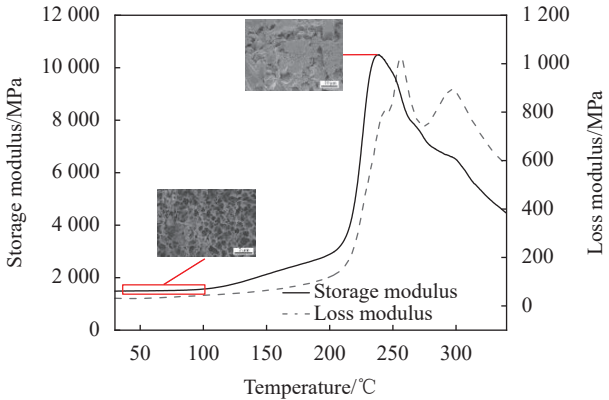


图 4 CF/foam PES 的 DMA 图谱
DMA map of CF/foam PES

助于设计一类模量随温度升高而增大的特种复合材料。

2.4 CF/PES 单层复合材料的吸能性能

在复合材料中，通常界面区域的分子运动会影响材料的界面阻尼，而研究界面阻尼，可以更容易的去分析材料的吸能性能。Sarasua 等^[29]采用 $\tan\delta_c/\tan\delta_m = 1 - bV_f$ 公式分析了界面阻尼对复合材料吸能性能的影响。其中， $\tan\delta_c$ 、 $\tan\delta_m$ 分别为复合材料、复合材料基体的损耗因子； V_f 为复合材料纤维体积分数； b 为纤维-基体界面相的黏附，即界面阻尼。通过该公式中的 b 值可以表征材料界面阻尼与吸能的关系。当 $b=1$ 时，不形成固定层，复合材料界面阻尼由复合材料中基体的阻尼给出；当 $b>1$ 时，复合材料界面阻尼较大，界面滑移难以发生，复合材料通过基体微塑性变形来吸收能量；当 $b<1$ 时，界面阻尼减小，界面易于滑移，导致外部载荷能量的耗散，复合材料通过基体微塑性变形和截面滑移来吸收能量。

针对上述公式里提出的复合材料、复合材料基体的损耗因子 ($\tan\delta_c$ 、 $\tan\delta_m$)，本研究通过采用 DMA^[30]，在不同温度的拉伸模式下测定复合材料 (CF/foam PES、CF/condense PES) 及复合材料基体 (Film-PES) 的损耗因子 ($\tan\delta$)，如图 5 所示。在 25~100℃ 范围内，随着温度的升高，CF/foam PES 的损耗因子由 0.042 下降至 0.037；而 CF/condense PES 在不同温度下的损耗因子基本低于 0.012；Film-PES 的损耗因子由 0.045 上升至 0.05。据此，对 CF/foam PES 的 b 值进行计算拟合得出，当温度小于 37.45℃ 时， $b<1$ ，CF/foam PES 吸能是多孔基体微塑性变形和界面滑移共同作用的结果；当温度大于 37.45℃ 时， $b>1$ ，界面阻尼较高，

材料的吸能主要是通过多孔基体的微塑性变形。由此可见，在室温环境下，多孔 PES 基体的存在赋予了 CF/foam PES 良好的吸能效果。

3 结论

(1) 仿竹结构多孔聚醚砜基碳纤维复合材料 (CF/foam PES) 在相转化过程中形成的海绵状多孔结构，能有效降低 CF/foam PES 的表观密度；同时，当 CF/foam PES 受到外加载荷时，多孔结构还可以阻止裂纹扩展。使 CF/foam PES 不仅具有轻质的特点，而且还具有更好的韧性。

(2) 通过传统密实结构的聚醚砜基碳纤维复合材料 (CF/condense PES) 与 CF/foam PES 拉伸性能的比较，CF/foam PES 的比拉伸强度提高了 234.5%，比拉伸模量提高了 192.6%，提升效果显著。由此可以得出多孔聚醚砜结构赋予 CF/foam PES 较高的比强度、比模量。

(3) 在室温环境下，CF/foam PES 的吸能作用主要来自于多孔基体发生微塑性变形，多孔孔壁吸收部分能量所致，因而 CF/foam PES 体现出良好的吸能性能。

参考文献：

[1] ZHAO N, WANG Z, CAI C, et al. Bioinspired materials: From low to high dimensional structure[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(41): 6994-7017.

[2] AIZENBERG J, WEAVER J C, THANAWALA M S, et al. Skeleton of *Euplectella* sp.: Structural hierarchy from the nano-scale to the macroscale[J]. *Science*, 2005, 309(5732): 275-278.

[3] 黄盛霞. 竹材的构造与力学行为的关系[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2007.

HUANG Shengxia. The relation between structural properties and mechanical behavior of bamboo[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2007(in Chinese).

[4] HABIBI M K, SAMAEI A T, GHESHLAGHI B, et al. Asymmetric flexural behavior from bamboo's functionally graded hierarchical structure: Underlying mechanisms[J]. *Acta Biomaterialia*, 2015, 16: 178-186.

[5] 于文吉, 江泽慧, 叶克林. 竹材特性研究及其进展[J]. *世界林业研究*, 2002, 15(2): 50-55.

YU Wenji, JIANG Zehui, YE Kelin. Characteristics research of bamboo and its development[J]. *World Forestry Research*, 2002, 15(2): 50-55(in Chinese).

[6] CHIU H, YOUNG W. Characteristic study of bamboo fibers in preforming[J]. *Journal of Composite Materials*, 2020, 54(25): 3871-3882.

[7] WANG X, REN H, ZHANG B, et al. Cell wall structure and formation of maturing fibres of moso bamboo (*Phyllostachys puberula* (Zenk.) Stapf)

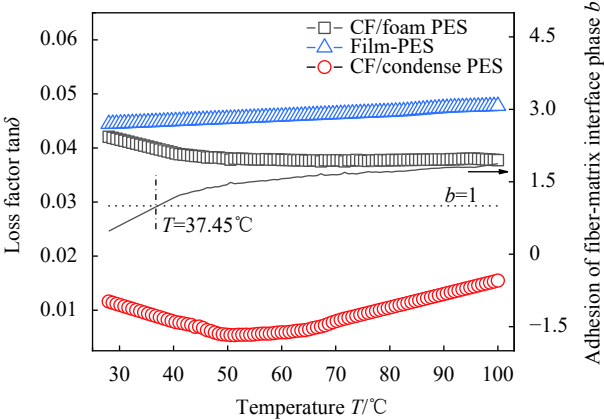


图5 CF/foam PES、CF/condense PES 及 Film-PES 的损耗因子和界面阻尼

Fig. 5 Loss factors and interface damping of CF/foam PES, CF/condense PES, Film-PES

- chrys pubescens*) increase buckling resistance[J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2012, 9(70): 988-996.
- [8] OBATAYA E, KITIN P, YAMAUCHI H. Bending characteristics of bamboo (*Phyllostachys pubescens*) with respect to its fiber-foam composite structure[J]. *Wood Science and Technology*, 2007, 41(5): 385-400.
- [9] LONG L, WANG Z, CHEN K. Analysis of the hollow structure with functionally gradient materials of moso bamboo[J]. *Journal of Wood Science*, 2015, 61(6): 569-577.
- [10] RAY A K, MONDAL S, DAS S K, et al. Bamboo—A functionally graded composite—correlation between microstructure and mechanical strength[J]. *Journal of Materials Science*, 2005, 40(19): 5249-5253.
- [11] HASSOUNE-RHABBOUR B, POUSSINES L, NASSIET V. Development of an adhesion test for characterizing the interface fiber/polymer matrix[J]. *Key Engineering Materials*, 2012, 498: 210-218.
- [12] FURUNO R, TAKATUJI Y, KUBO K, et al. Improvement of the adhesive strength of the leadframe and epoxy resin by forming organic molecules-metal composite interface[J]. *Electronics and Communications in Japan*, 2017, 100(1): 67-71.
- [13] CUI J, QIN Z, MASIC A, et al. Multiscale structural insights of load bearing bamboo: A computational modeling approach[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2020, 107: 103743.
- [14] DAS T K, GHOSH P, DAS N C. Preparation, development, outcomes, and application versatility of carbon fiber-based polymer composites: A review[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2019, 2(2): 214-233.
- [15] XIE W, CHENG H F, CHU Z Y, et al. Effect of FSS on microwave absorbing properties of hollow-porous carbon fiber composites[J]. *Materials & Design*, 2009, 30(4): 1201-1204.
- [16] XU L, LI X, NI L, et al. Ablation behavior of functional gradient ceramic coating for porous carbon-bonded carbon fibercomposites[J]. *CorrosionScience*, 2018, 142: 145-152.
- [17] 李希鹏, 王树立, 张俭. 仿生多孔膜材料研究进展[J]. *科学通报*, 2021, 66(10): 1220-1232.
- LI Xipeng, WANG Shuli, ZHANG Jian, et al. Progress in bio-inspired porous membranes[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(10): 1220-1232(in Chinese).
- [18] GOKMEN M T, PREZ F. Porous polymer particles—A comprehensive guide to synthesis, characterization, functionalization and applications[J]. *Progress in Polymer Science*, 2012, 37(3): 365-405.
- [19] 许培俊, 王临江, 张毅. 仿竹结构单丝玻璃纤维增强多孔聚醚砜基复合材料[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(4): 1302-1312.
- XU Peijun, WANG Linjiang, ZHANG Yi, et al. Bamboo like porous polyethersulfone matrix monofilament glass fiber composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(4): 1302-1312(in Chinese).
- [20] HUANG J, ZHANG K, WANG K, et al. Fabrication of polyethersulfone-mesoporous silica nanocomposite ultrafiltration membranes with antifouling properties[J]. *Journal of Membrane Science*, 2012, 423: 362-370.
- [21] ZHANG M, ZHANG A, ZHU B, et al. Polymorphism in porous poly(vinylidene fluoride) membranes formed via immersion precipitation process[J]. *Journal of Membrane Science*, 2008, 319(1-2): 169-175.
- [22] HUANG L, LI X, REN Y, et al. Preparation of conductive microfiltration membrane and its performance in a coupled configuration of membrane bioreactor with microbial fuel cell[J]. *RSC Advances*, 2017, 7(34): 20824-20832.
- [23] MATSUYAMA H, TAKIDA Y, MAKI T, et al. Preparation of porous membrane by combined use of thermally induced phase separation and immersion precipitation[J]. *Polymer*, 2002, 43(19): 5243-5248.
- [24] JUNG H S, PARK Y, NAH C W, et al. Evaluation of the mechanical properties of polyether sulfone-toughened epoxy resin for carbon fiber composites[J]. *Fibers and Polymers*, 2021, 22(1): 184-195.
- [25] CUI S, CUI C, XIE J, et al. Carbon fibers coated with graphene reinforced TiAl alloy composite with high strength and toughness[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1-8.
- [26] 中国国家标准化管理委员会. 塑料 拉伸性能的测定 第1部分: 总则: GB/T 1040.1—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- Standardization Administration of China. Plastics—Determination of tensile properties—Part 1: General principles: GB/T 1040.1—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018(in Chinese).
- [27] 中国国家标准化管理委员会. 塑料 拉伸性能的测定 第5部分: 单向纤维增强复合材料的试验条件: GB/T 1040.5—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- Standardization Administration of China. Plastics—Determination of tensile properties—Part 5: Test conditions for unidirectional fiber-reinforced plastic composites: GB/T 1040.5—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008(in Chinese).
- [28] 赵晓勇, 曾一鸣, 施艳芳, 等. 相转化法制备超滤和微滤膜的孔结构控制[J]. *功能高分子学报*, 2002, 15(4): 487-495.
- ZHAO Xiaoyong, ZENG Yiming, SHI Yanqian, et al. Control of the pore structure of ultrafiltration and microfiltration membranes produced by phase inversion method[J]. *Journal of Functional Polymers*, 2002, 15(4): 487-495(in Chinese).
- [29] SARASUA J, POUYET J. Dynamic mechanical behavior and interphase adhesion of thermoplastic (PEEK, PES) short fiber composites[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 1998, 11(1): 2-21.
- [30] DONG S, GAUVIN R. Application of dynamic mechanical analysis for the study of the interfacial region in carbon fiber/epoxy composite materials[J]. *Polymer Composites*, 1993, 14(5): 414-420.