

引文格式: 王安威, 潘利剑, 刘佳, 等. 聚丙烯自增强复合材料力学性能的温度效应研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(22): 99-105.

WANG Anwei, PAN Lijian, LIU Jia, et al. Research on temperature effect of mechanical properties of polypropylene self-reinforced composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(22): 99-105.

聚丙烯自增强复合材料力学性能的温度效应研究*

王安威^{1,2}, 潘利剑², 刘佳³, 张舒⁴, 吴佳木⁴, 岳广全², 戎笑远²

(1. 东华大学纺织学院, 上海 201620;

2. 东华大学民用航空复合材料协同创新中心, 上海 201620;

3. 中国商飞上海飞机制造有限公司, 上海 201324;

4. 苏州天翔复合材料有限公司, 苏州 215513)

[摘要] 聚丙烯自增强复合材料(All-PP)的增强体和基体为同一种聚合物聚丙烯,其力学性能对温度极为敏感,研究其力学性能的温度效应对该材料的使用和热冲压成型具有重要的指导意义。本文采用差示扫描量热仪(DSC)表征了All-PP材料的热性能,测试了-40~120℃范围内All-PP材料力学性能,并利用扫描电子显微镜(SEM)表征了不同温度条件下材料破坏界面,对其温度效应进行了综合分析。结果表明,All-PP的玻璃化转变温度(T_g)为-11.5℃,拉伸强度随着温度的上升呈现出先增后减的趋势,在-20℃时达最大值118.5 MPa,低于该温度时发生界面脱黏,导致拉伸强度下降;断裂伸长率随温度的上升而增大;玻璃态时弹性模量始终维持在4.86 GPa左右,几乎不受温度影响,温度提升至-10℃时弹性模量开始随着温度上升而减小;弯曲模量随温度的升高而降低,在-10℃时降幅突增;层间剪切强度在20~120℃温度范围内呈线性下降,但在低温环境(-40~0℃)下受温度影响不大;微观形貌显示随着温度的上升,剪切破坏模式由界面脱黏转变为以基体破坏为主。

关键词: 聚丙烯; 自增强复合材料; 力学性能; 温度效应

Research on Temperature Effect of Mechanical Properties of Polypropylene Self-Reinforced Composites

WANG Anwei^{1,2}, PAN Lijian², LIU Jia³, ZHANG Shu⁴, WU Jiamu⁴, YUE Guangquan², RONG Xiaoyuan²

(1. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Collaborative Innovation Center for Civil Aviation Composites, Donghua University, Shanghai 201620, China;

3. COMAC Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324, China;

4. Suzhou Tianyi Composite Materials Co., Ltd., Suzhou 215513, China)

[ABSTRACT] The reinforcement and matrix of polypropylene self-reinforced composites (All-PP) are the same polymer polypropylene, and its mechanical properties are extremely sensitive to temperature. Studying the temperature effect of its mechanical properties has important guiding significance for the use of this material and hot stamping. In this paper, the thermal properties of the All-PP were characterized by differential scanning calorimetry (DSC), and the mechanical properties of All-PP were tested in the range of -40-120℃, the material failure interface was characterized by scanning electron microscope (SEM) under different temperature conditions, and the temperature effect was comprehensively analyzed. The results show that the T_g of All-PP is -11.5℃, and the tensile strength shows a trend of first increase and then decrease with the increase of temperature, the maximum tensile strength reaches 118.5 MPa at -20℃, the interface debonding occurs below this temperature, leading to the decrease of tensile strength; The elongation at break increases with the increase of temperature; The elastic modulus in the glass state is always remains at about 4.86 GPa, which is

* 基金项目: 上海市科学技术委员会 2020 年度“科技创新行动计划”(20511106902)。

hardly affected by temperature, when the temperature rises to $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, the elastic modulus begins to decrease with the increase of temperature; The flexural modulus decreases with the increase of temperature, and decrease sharply at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$; The interlaminar shear strength decreases linearly in the temperature range of $20\text{--}120\text{ }^{\circ}\text{C}$, but is not greatly affected by temperature in the low temperature environment ($-40\text{--}0\text{ }^{\circ}\text{C}$); The microstructure shows that the shear failure mode changes from interface debonding to matrix failure with the increase of temperature.

Keywords: Polypropylene; Self-reinforced composites; Mechanical properties; Temperature effect

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.22.099

聚丙烯自增强复合材料 (All-PP) 是以经过定向拉伸取向后的聚丙烯纤维或织物作为增强体, 聚丙烯树脂作为基体的一种自增强热塑性复合材料^[1-3]。采用同质的高强高模纤维作为增强体, 不仅能获得优良的界面结合从而极大地提升材料的强度、抗低温冲击性以及环境友好性等性能^[4-8], 还拓宽了聚丙烯 (PP) 的应用领域。目前 All-PP 广泛应用于设备外壳、汽车零部件、人体防护产品、运动器材、低温设备、管材、民用产品等领域^[9]。

聚丙烯自增强预浸料的力学性能受到很多因素的影响, 近十几年国内外学者也进行了相关研究。从原料方面, PP 窄带与 All-PP 材料性能有着紧密联系, 已有研究对此进行了验证^[10-11], 并得到了 PP 窄带的最佳牵伸倍数; Hine^[12] 和 Jordan^[13] 等则对不同织物形态和不同分子量的 PP 窄带织物和纤维热压后的 All-PP 的力学性能进行了测试与比较, 并观察了热压前后其形态的变化; 在织物层间添加 PP 薄膜能改善 All-PP 的拉伸性能及剥离强度^[14-15]。在复合工艺参数上, Hwang 等^[16] 的研究发现, All-PP 材料的面内和层间力学性能以及冲击强度随复合温度的升高而增大, 而在 $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时拉伸强度降低; 此外, 复合压力^[17]、纤维纤度和纤维含量^[18] 等因素对 All-PP 力学性能也有显著影响。以上研究主要集中在变换织物结构或组成及复合工艺参数, 针对 All-PP 预浸料成型后力学性能影响因素, 研究结果表明材料的收缩取决于温度、应力以及松弛时间; Diaz 等^[19] 发现可以通过黏弹性蠕变和热收缩的协调来减少成型后的收缩, 并给出了 All-PP 材料的收缩预测方程; Sharan Chandran 等^[20] 则研究了 All-PP 的失效机制与其性能的相关性; Mckown^[21] 和 Múgica^[22] 等探究了应变率对 All-PP 材料力学行为的影响, 并给出了相应的本构方程进行表征, 包括屈服应力与应力应变曲线等; Alcock 等^[23] 对 All-PP 冲击性能的温度依赖性进行了研究, 结果表明温度的下降和应变率的上升都会导致冲击能量的增大。

国内对 All-PP 性能的研究较少, 基本没有其在广泛的温度范围下性能变化的研究, 而其性能随温度变化又极为敏感。在常用的热冲压成型工艺中, All-PP 材

料容易出现局部拉破、纤维堆积起皱、定形不良等缺陷, 以及回弹和热收缩等问题, 因此掌握温度对聚丙烯自增强预浸料性能, 尤其是大变形条件下的力学行为的影响显得尤为重要, 不仅能在热冲压生产中发挥规避缺陷的作用, 还能评价产品在实际应用中的可行性, 即预测不同应用条件下的强度极限等力学行为。因此, 本文在 $-40\text{--}120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内测定了 All-PP 的拉伸、弯曲和层间剪切性能, 对其热效应进行了较为全面的测试表征分析, 得到温度对其力学性能的影响规律, 为该材料在国内的有效成型应用提供参考。

1 试验部分

1.1 原料与仪器

试验所用样件是从一张 $1.0\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ All-PP 板材 (苏州天翔复合材料有限公司) 裁得。板材采用 4 层 PP 二上二下斜纹织物与 10 张 PP 薄膜, 按照每层织物上下表面各铺 2 张薄膜的铺层顺序在热压机上制成。织物铺层方向 $0^{\circ}/90^{\circ}$ 、织物面密度 151.5 g/m^2 、经/纬密度 55 根/10 cm、复合材料厚度 1.70 mm、纤维质量分数 40.2%、密度 0.91 g/cm^3 。试验仪器包括电子万能试验机 (ETM204c, 深圳万测试验设备有限公司)、差示扫描量热仪 (Q20, 美国 TA 公司)、场发射扫描电子显微镜 (SU-8010, 日本日立公司)、切割设备 (RL5565, 上海华子新材料科技有限公司) 和电子天平 (ME403/02, 瑞士梅特勒-托利多公司)。

1.2 试验过程

拉伸性能测试参考标准 ASTM D3039^[24], 将 All-PP 板材以机加工方式切割成尺寸为 $180\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 1.70\text{ mm}$ 的样条, 并在万能试验机上沿织物经向进行试验, 采用位移控制方式进行加载, 加载速度为 6.0 mm/min , 样条断裂时停止加载。其中拉伸强度 σ_t 按照式 (1) 进行计算, 断裂伸长率 ε_t 按照式 (2) 进行计算, 弹性模量 E_t 在应变范围 $0.001\text{--}0.003$ 内按照式 (3) 进行计算。

$$\sigma_t = \frac{F_{\max}}{b \cdot d} \quad (1)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

$$E_t = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \quad (3)$$

式中, F_{\max} 为破坏前最大载荷; b 为试样宽度; d 为试样厚度; ΔL 为断裂时标距的伸长量; L_0 为测量标距; $\Delta \sigma$ 为应力变化量; $\Delta \varepsilon$ 为应变变化量。

层间剪切性能测试参考标准 ASTM D 3846^[25] 并加以改进, 采用双切口拉伸剪切试验方法, 避免了试验夹具的复杂和侧挡片对试验的影响, 如图 1 所示。试样尺寸 (L (长) $\times b \times d$) 为 100 mm \times 10 mm \times 1.70 mm, 在样条两表面中央位置分别沿厚度方向开槽, 槽深 D 略大于样条厚度的一半, 槽间距 S 设置为 5 mm^[26]。沿样条长度方向以 1.0 mm/min 速度施加载荷, 这样材料将在两槽间发生层间剪切, 从而由拉伸形式得到材料的层间剪切性能。层间剪切强度 τ_s 按照式 (4) 进行计算得到。

$$\tau_s = \frac{P_b}{w \cdot S} \quad (4)$$

式中, P_b 为破坏前最大载荷; w 为试样受剪面宽度。

弯曲性能按照标准 ASTM D 7264^[27] 里的方法 A, 跨距-厚度比选用 20:1, 试样尺寸 ($L \times b \times d$) 为 80 mm \times 13 mm \times 1.70 mm, 加载速度为 1.0 mm/min。

试验温度通过环境箱进行控制, 所有试样测试前在环境箱内保温 15 min 后开始测试, 温度设置为 -40 $^{\circ}\text{C}$ 、-30 $^{\circ}\text{C}$ 、-20 $^{\circ}\text{C}$ 、-10 $^{\circ}\text{C}$ 、0 $^{\circ}\text{C}$ 、20 $^{\circ}\text{C}$ 、40 $^{\circ}\text{C}$ 、60 $^{\circ}\text{C}$ 、80 $^{\circ}\text{C}$ 、100 $^{\circ}\text{C}$ 、120 $^{\circ}\text{C}$ 共 11 组。

采用差示扫描量热仪 (DSC) 测得 All-PP 材料的特征温度, 样品重量为 8.4 mg, 测试从 -60 $^{\circ}\text{C}$ 升温至 200 $^{\circ}\text{C}$, 升温速率为 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。对测试后的拉伸以及拉伸剪切试样断面喷金, 然后在扫描电子显微镜 (SEM) 上观察微观形貌。

2 结果与讨论

2.1 DSC 分析

为了更好地探究温度对拉伸性能的影响, 采用 DSC 法确定 All-PP 的玻璃化转变温度和熔点, 得到材料的 DSC 曲线, 如图 2 所示。

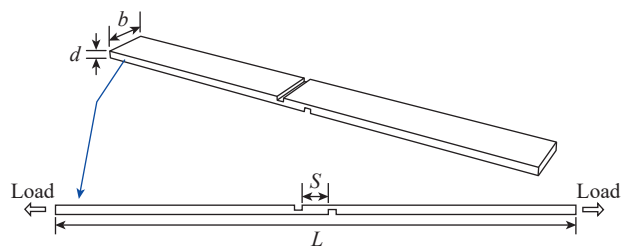


图 1 双切口拉伸剪切示意图 (mm)

Fig.1 Schematic diagram of double incision tensile shear (mm)

根据测试曲线可得 All-PP 的 T_g 为 -11.5 $^{\circ}\text{C}$ 左右, 熔融峰出现了两个, 分别在 150.16 $^{\circ}\text{C}$ 和 166.94 $^{\circ}\text{C}$ 左右, 这是因为增强体织物所用 PP 纤维是经过高度拉伸取向的^[28-29], 取向度与结晶度的提升使纤维熔点比基体高, 因此出现两个熔融峰。

2.2 温度对 All-PP 复合材料拉伸性能影响

按照 1.2 节的试验步骤分别在 11 个环境温度下至少测 6 个试样, 图 3 为各组代表试样的应力-应变曲线。

从图 3 可以看出, 11 组温度下材料都表现为脆断, 曲线中没有明显的屈服点, 温度在 20 $^{\circ}\text{C}$ 以下时应力-应变曲线较为接近, 而在 20 $^{\circ}\text{C}$ 以上时曲线差异明显, 随着温度的升高, 聚丙烯分子链的热运动与流动性越强烈, 塑性变形越显著, 力学性能越差, 但抵抗变形的能力变强; 进入玻璃态后, 分子链运动能力较差, 材料变硬变脆。

不同温度下各组试样拉伸强度、断裂伸长率及弹性模量测试结果统计如图 4 所示。

可以看到, 温度由 -40 $^{\circ}\text{C}$ 升至 20 $^{\circ}\text{C}$ 时, 材料的拉伸强度随着温度上升呈现先增后减的变化, 结合图 5 的

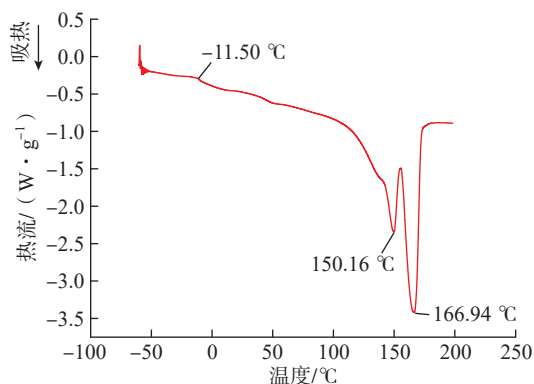


图 2 All-PP 材料的 DSC 曲线

Fig.2 DSC curve of All-PP

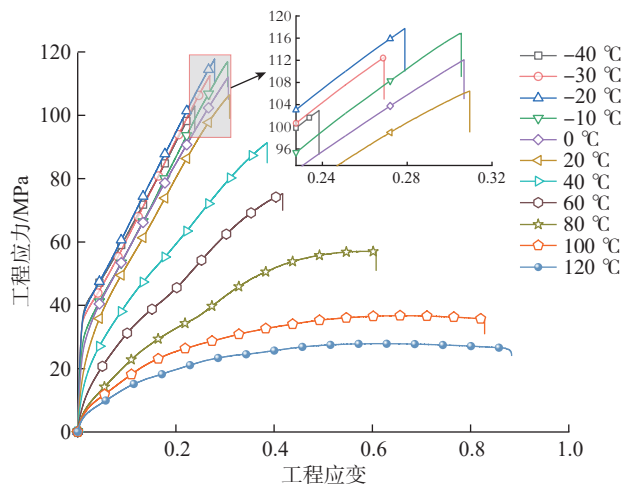


图 3 拉伸应力-应变曲线

Fig.3 Tensile stress-strain curve

SEM图进行分析,材料在进入玻璃态后,温度的降低会令基体与纤维间的黏合变弱,脱黏现象加剧,界面性能变差,从而导致拉伸强度的下降,在解除玻璃态后,温度上升促进了分子链的热运动,导致拉伸强度的降低;拉伸强度在-20℃时达到了最大值118.5MPa,比20℃时的拉伸强度高11.1%, -40℃时材料拉伸强度与20℃时几乎一致,而在20~120℃温度范围内,拉伸强度随温度的升高近乎呈线性下降至28MPa。断裂伸长率总体是随着温度的升高而增大的,温度上升分子链运动能力变强,从而获得更为充分的伸展,断裂伸长率在-40~20℃这个温度范围增长的要比20℃以上的慢,从-40℃的

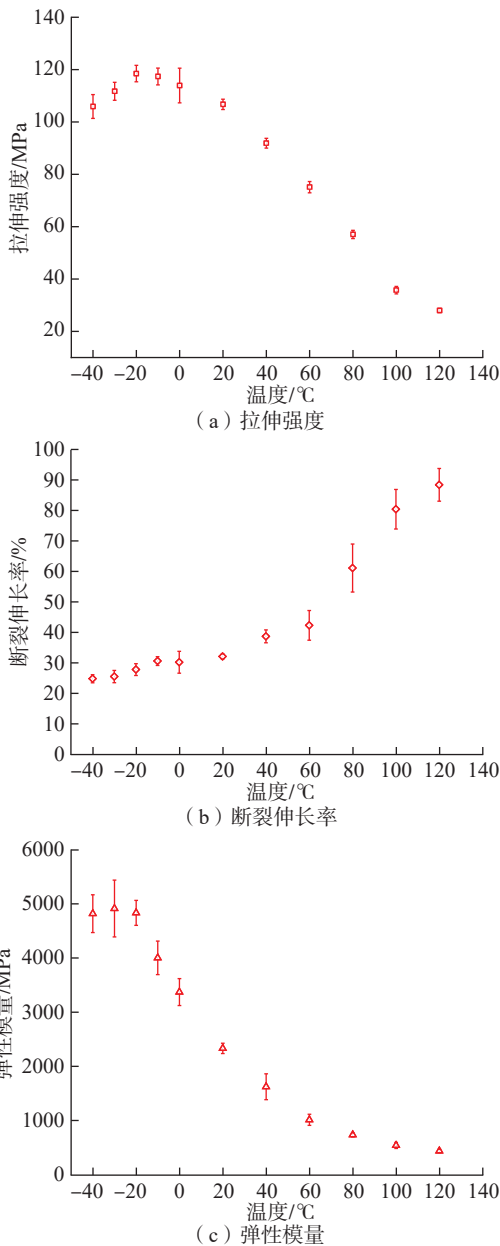


图4 拉伸性能随温度的变化

Fig.4 Variation of tensile properties with temperature

24.8%增大到20℃的32.08%,增幅为29.4%,120℃时达最大值88.39%。在-40~-20℃玻璃态时,弹性模量始终保持在4.86GPa左右,几乎不受温度影响,这得益于增强体的高度取向结构^[23],随着温度的升高分子链开始解冻,-10℃时弹性模量开始下降。

材料在不同温度下,拉伸破坏模式显著不同,如图6所示,与常温及高温时的规整断口不一样,低温下作为基体的PP树脂发生开裂,整体类似于爆炸式破坏,且这种现象随着温度的降低越来越明显,高温下材料有较大的横向收缩,样条被拉长拉细的趋势明显,不管是常温还是高低温条件,都有大量纤维从断口处拔出。

结合图5 SEM图对其拉伸断面微观形貌进行观察,可以得到PP纤维直径在22μm左右。温度低于-10℃时,PP纤维及基体发生了玻璃化转变从而变脆,基体树脂及PP纤维断面都是比较平滑的,属于脆性断裂的表现,纤维表面也比较光滑,没有树脂黏附,直到-10℃时纤维及基体断面才开始变得不光滑,并且随着温度的上升,纤维表面黏附的基体树脂和表面树脂由于拉伸形成的丝状及带状物显著增多,呈现出韧性断裂的特征,到120℃时纤维断面更是出现分束拉丝现象。低温环境断裂时,断口处的纤维与基体树脂的黏结状态有所不

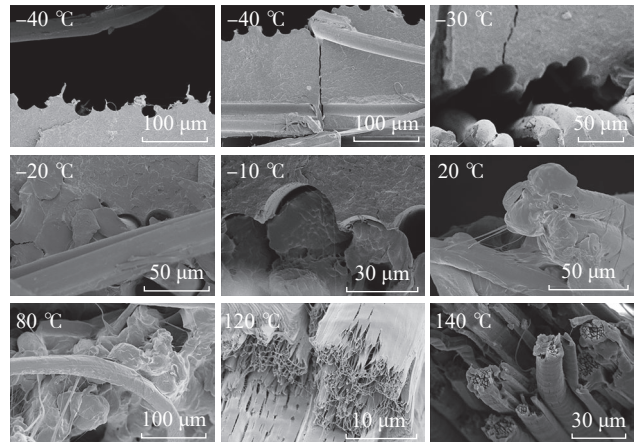


图5 不同温度下的拉伸断面 SEM 图

Fig.5 SEM images of tensile fracture at different temperatures

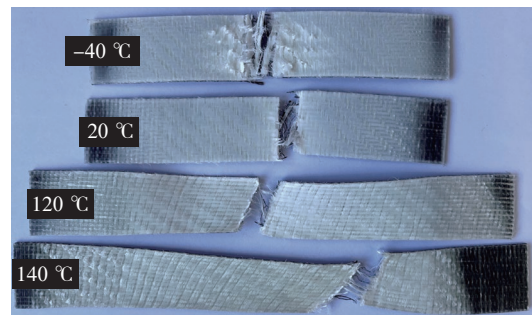


图6 试样断裂形态

Fig.6 Specimen fracture shape

同,主要是纤维与基体脱黏所形成的空隙,以及跟基体树脂脱黏的纤维数随温度的不同存在差异,-20℃至0℃温度范围内纤维与基体断在同一位置,说明二者保持着较好的协同作用,随着温度的继续降低,基体发生开裂,断口处越来越多的纤维与基体脱黏,-40℃时PP纤维束几乎全部从基体中抽出,说明试样在拉伸破坏过程中主要是界面脱黏及纤维的断裂和拔出,纤维与基体间不能形成良好的协同作用导致拉伸强度有所下降。

2.3 温度对 All-PP 复合材料弯曲性能影响

按照 1.2 节试验步骤分别在 11 个环境温度下测试 6 个试样的弯曲性能,尽管测试过程中试样发生了大量塑性形变,但没有一个样件产生断裂破坏,表现出极强的韧性。试验测得弯曲模量数据如图 7 所示。

可以看出, All-PP 的弯曲模量随着温度的升高而降低,在 120℃时降为 20℃的 12%,而在 -40℃时有最大值 4.92 GPa,约为 20℃的 2.6 倍,另外在不同温度范围降幅有所不同,低于 T_g 时降低较慢,而在 -10℃时降幅突然增大,这是因为 All-PP 材料随着温度的降低变硬变脆,材料刚性增大,抗弯能力提升,这一特性在玻璃化转变前后尤为明显。

2.4 温度对 All-PP 复合材料层间剪切性能影响

用图 1 的方法测试样条的层间剪切强度,对所测数据进行处理,如图 8 所示。

可以看出,低温环境下(-40~0℃) All-PP 的层间剪切强度受温度的影响不显著,结合图 9 电镜图片分析,在这个温度范围内, All-PP 材料的主要剪切失效模式都是界面脱黏,因此温度影响较小;而从 20℃开始层间剪切强度随温度的升高呈线性下降,这是由于剪切失效模式发生变化,转变为以基体失效为主,温度的上升使聚合物分子链流动性增加,层间剪切强度下降。

结合图 9 SEM 图观察剪切破坏面的微观形貌,能

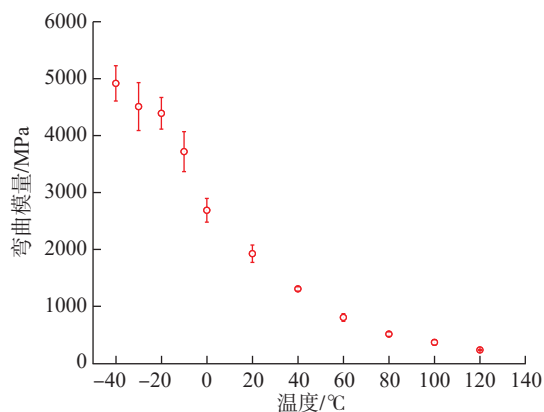


图 7 弯曲模量随温度的变化

Fig.7 Variation of bending modulus with temperature

明显看到,-40~-10℃温度范围内,整个破坏面比较平整,纤维表面很光滑,没有树脂的包覆黏结,说明此时剪切破坏模式主要是界面脱黏。纤维间基体树脂的破坏在-40~-20℃呈现的是较为光滑的不规则鱼鳞状断面,但从-10℃开始,纤维间基体树脂出现撕扯状的带状物,这是树脂在剪切力的作用下发生塑性形变产生的,也说明材料的剪切破坏形式在发生变化,开始转向以基体破坏为主,0℃时也有少量树脂黏附在纤维表面,20℃时纤维表面已被树脂包覆,随着温度的上升,剪切断面变得越来越不平整,原因是树脂形成的带状物数量增多、尺寸增大,还有部分纤维的自由端被抽出。

3 结论

(1) All-PP 的 T_g 在 -11.5℃左右, DSC 曲线显示了两个熔融峰,150.16℃左右的熔融峰对应的是基体 PP 树脂,166.94℃左右的熔融峰对应的是增强体织物。增强体熔点较高是因为其纤维经过高度拉伸取向,取向度和结晶度提升,进而使熔点比基体高。

(2) 当温度低于 All-PP 的 T_g 时(-40~-20℃),基体以及纤维断面都比较平滑,纤维表面也比较光滑没有树

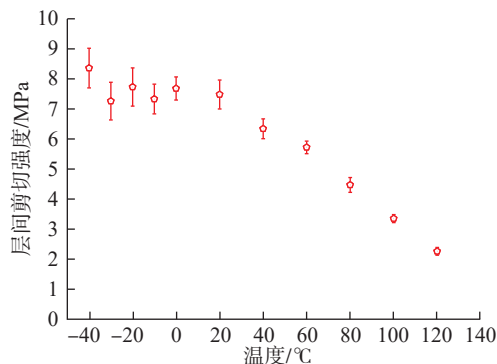


图 8 层间剪切强度随温度的变化

Fig.8 Variation of interlaminar shear strength with temperature

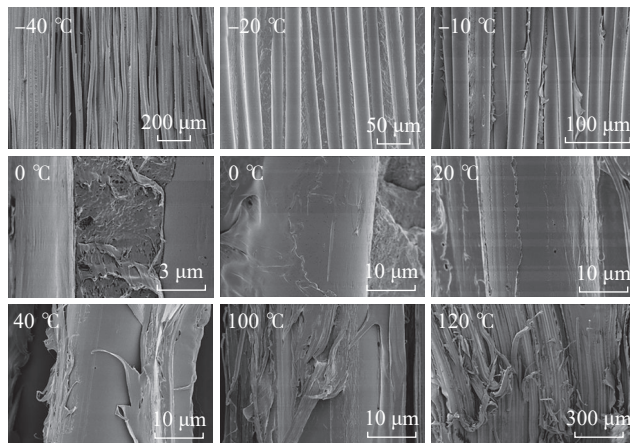


图 9 不同温度下的剪切断面 SEM 图

Fig.9 SEM images of shearing section at different temperatures

脂黏附。随着温度的上升,基体开裂区域以及纤维跟基体脱黏现象减少,纤维与基体间的协同作用变好,拉伸强度增大,断裂伸长率略有增大,而弹性模量几乎不受温度影响;当温度高于 All-PP 的 T_g 时 ($-10\sim 120\text{ }^\circ\text{C}$),随着温度的上升,纤维表面黏附的树脂和表面树脂由于拉伸形成的丝状及带状物显著增多,拉伸强度跟弹性模量都在下降,其中拉伸强度呈线性下降,相反断裂伸长率在增大。

(3) 弯曲模量随温度的升高而降低,由 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 的 4.92 GPa 降至 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 的 0.23 GPa,降幅在不同温度范围有所不同,低于 T_g 时降低较慢,而在 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 时降幅突然增大。

(4) 层间剪切强度在 $20\sim 120\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内呈线性下降,从 7.48 MPa 减小至 2.26 MPa,低温环境 ($-40\sim 0\text{ }^\circ\text{C}$) 受温度影响不大。从 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 开始有树脂黏附在纤维表面,在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时断面上的纤维已被树脂包覆,随着温度上升,纤维间树脂的塑性形变程度加剧,表明材料的剪切破坏模式由界面脱黏变为了以基体破坏为主。

参考文献

[1] LÓPEZ MANCHADO M A, TORRE L, KENNY J M. Kinetic crystallization of polypropylene in ternary composites based on fiber-reinforced PP-EPDM blends[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2001, 81(5): 1063-1074.

[2] 连荣炳,徐名智,李强,等. 玻纤增强聚丙烯复合材料性能研究[J]. 塑料科技, 2008, 36(8): 40-44.

LIAN Rongbing, XU Mingzhi, LI Qiang, et al. Study on properties of glass fiber reinforced polypropylene composite[J]. Plastics Science and Technology, 2008, 36(8): 40-44.

[3] 刘柱成. 自增强型热塑性塑料[J]. 国外塑料, 2003, 21(3): 23-24.

LIU Zhucheng. Self-reinforced thermoplastics[J]. World Plastics, 2003, 21(3): 23-24.

[4] 沈玉考,张刚翼,刘扬. 纤维增强热塑性复合材料新动向——从 GMT-LFT 到 All-PP[J]. 纤维复合材料, 2004, 21(2): 57-59.

SHEN Yukao, ZHANG Gangyi, LIU Yang. New development of fiber reinforced thermoplastics (FRTP): From GMT/LFT to All-PP[J]. Fiber Composites, 2004, 21(2): 57-59.

[5] 陈武荣,钟立松,王明军,等. 国内外增强型热塑性材料发展概况[J]. 绝缘材料, 2013, 46(6): 29-32.

CHEN Wurong, ZHONG Lisong, WANG Mingjun, et al. Development situation of reinforced thermoplastic material[J]. Insulating Materials, 2013, 46(6): 29-32.

[6] 黄淮. 自增强型聚合物开始渐露锋芒[J]. 国外塑料, 2005, 23(12): 71-72.

HUANG Huai. Self-reinforcement polymers are beginning to find use in niche applications[J]. World Plastics, 2005, 23(12): 71-72.

[7] 宋玉春. 全 PP 复合材料抢占 GMT 材料市场[J]. 国外塑料, 2003, 21(6): 28, 40.

SONG Yuchun. PP compounds occupy GMT material market[J]. World Plastics, 2003, 21(6): 28, 40.

[8] 邵帅. 聚丙烯自增强复合材料的研究进展概述[J]. 河南科技, 2014(19): 75-76.

SHAO Shuai. Overview of research progress of polypropylene self-reinforced composites[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2014(19): 75-76.

[9] 钟晓萍,许江菱,殷荣忠,等. 2009—2010 年世界塑料工业进展[J]. 塑料工业, 2011, 39(3): 1-34.

ZHONG Xiaoping, XU Jiangling, YIN Rongzhong, et al. The progress of the world plastics industry from 2009 to 2010[J]. China Plastics Industry, 2011, 39(3): 1-34.

[10] KIM Y S, JO J Y, CHOI W H, et al. Effect of draw ratio on the mechanical properties of polypropylene self-reinforced composite[J]. Composite Structures, 2021, 275: 114398.

[11] KIM D W, KIM Y S, JUNG Y C, et al. Development of a continuous manufacturing process for self-reinforced composites using multi-step highly drawn polypropylene tapes[J]. Polymer, 2020, 191: 122267.

[12] HINE P J, WARD I M, JORDAN N D, et al. The hot compaction behaviour of woven oriented polypropylene fibres and tapes. I. Mechanical properties[J]. Polymer, 2003, 44(4): 1117-1131.

[13] JORDAN N D, BASSETT D C, OLLEY R H, et al. The hot compaction behaviour of woven oriented polypropylene fibres and tapes. II. Morphology of cloths before and after compaction[J]. Polymer, 2003, 44(4): 1133-1143.

[14] SWOLFS Y, CRAUWELS L, GORBATIKH L, et al. The influence of weave architecture on the mechanical properties of self-reinforced polypropylene[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013, 53: 129-136.

[15] SWOLFS Y, VAN DEN FONTEYNE W, BAETS J, et al. Failure behaviour of self-reinforced polypropylene at and below room temperature[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014, 65: 100-107.

[16] HWANG Y T, KANG S Y, KIM D H, et al. The influence of consolidation temperature on in-plane and interlaminar mechanical properties of self-reinforced polypropylene composite[J]. Composite Structures, 2019, 210: 767-777.

[17] 万明,方立,周天睿,等. 聚丙烯自增强复合材料层压板的制备和性能研究[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(2): 40-45.

WAN Ming, FANG Li, ZHOU Tianrui, et al. Study on preparation and properties of self-reinforced polypropylene composite laminates[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(2): 40-45.

[18] 孙阳阳. 丙纶纤维自增强聚丙烯树脂的研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2011.

SUN Yangyang. Study on polypropylene fiber self-reinforced polypropylene resin[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2011.

[19] DIAZ J A, YOUNGBLOOD J P. Multivariable dependency of thermal shrinkage in highly aligned polypropylene tapes for self-reinforced polymer composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 90: 771-777.

[20] SHARAN CHANDRAN M, PADMANABHAN K. A fractographic study of PE, PP self-reinforced composites in quasi-static loading conditions[M]. Singapore: Springer, 2020: 603-618.

[21] MCKOWN S, CANTWELL W J. Investigation of strain-rate effects in self-reinforced polypropylene composites[J]. Journal of Composite Materials, 2007, 41(20): 2457-2470.

[22] MÚGICA J I, ARETXABALET A L, ULACIA I, et al. Rate-dependent phenomenological model for self-reinforced polymers[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 84:

96-102.

[23] ALCOCK B, CABRERA N O, BARKOULA N M, et al. The effect of temperature and strain rate on the impact performance of recyclable all-polypropylene composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2008, 39(3): 537-547.

[24] American Society for Testing and Materials. ASTM D3039 standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials[S]. New York: American National Standards Institute, 2008.

[25] American Society for Testing and Materials. ASTM D3846 standard test method for in-plane shear strength of reinforced plastics[S]. New York: American National Standards Institute, 2008.

[26] 王瑞, 郭兴峰, 陈海霞, 等. 复合材料层合板双切口层间剪切试验的改进研究[C]// 王玉林. 复合材料: 生命、环境与高技术——第十二届全国复合材料学术会议论文集. 天津: 天津大学出版社, 2002: 783-786.

WANG Rui, GUO Xingfeng, CHEN Haixia, et al. Improved research on double-notch interlaminar shear test of composite laminates[C]// WANG Yulin. *Composite Materials: Life, Environment and Advanced Technology—Proceedings of the 12th National Conference on Composite Materials*. Tianjin: Tianjin University Press, 2002: 783-786.

[27] American Society for Testing and Materials. ASTM D7264 standard test method for flexural properties of polymer matrix composite materials[S]. Washington: American National Standards Institute, 2007.

[28] SCHIMANSKI T, LOOS J, PEIJS T, et al. On the overdrawing of melt-spun isotactic polypropylene tapes[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2007, 103(5): 2920-2931.

[29] SCHIMANSKI T, PEIJS T, LEMSTRA P J, et al. Influence of postdrawing temperature on mechanical properties of melt-spun isotactic polypropylene[J]. *Macromolecules*, 2004, 37(5): 1810-1815.

通讯作者: 潘利剑, 博士, 副研究员, 主要从事纤维增强树脂基复合材料成型技术方面的工作。

(责编 晓意)

(上接第 91 页)

参考文献

[1] 唐见茂. 航空航天复合材料发展现状及前景[J]. *航天器环境工程*, 2013, 30(4): 352-359.

TANG Jianmao. Current status and trends of advanced composites in aerospace[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2013, 30(4): 352-359.

[2] 王妍琴. 桨叶前缘包铁制造工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

WANG Yanqin. Study of manufacturing process for leading edge of helicopter composite blade[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.

[3] 付文强, 王小兵, 王宝春, 等. 树脂基复合材料与金属材料胶接体系研究进展[J]. *复合材料科学与工程*, 2020(6): 121-128.

FU Wenqiang, WANG Xiaobing, WANG Baochun, et al. Research progress on adhesion system of resin-based composites and metal materials[J]. *Composites Science and Engineering*, 2020(6): 121-128.

[4] 李林. 大型民机复合材料整体油箱表面防护分析与设计[J]. *民用飞机设计与研究*, 2019(2): 76-79.

LI Lin. Surface protection analysis and design of composite integral fuel tank for the large civil aircraft[J]. *Civil Aircraft Design & Research*,

2019(2): 76-79.

[5] 张招贤. 钛电极工学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003: 6-7.

ZHANG Zhaoxian. *Titanium electrode engineering*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003: 6-7.

[6] SU Y B, DE ROOIJ M, GROUVE W, et al. The effect of titanium surface treatment on the interfacial strength of titanium-thermoplastic composite joints[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2017, 72: 98-108.

[7] KHAN A A, AL KHERAIF A A, ALHIJJI S M, et al. Effect of grit-blasting air pressure on adhesion strength of resin to titanium[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2016, 65: 41-46.

[8] 乔海涛, 梁滨, 张军营, 等. 先进复合材料结构胶接体系的研究与应用[J]. *材料工程*, 2018, 46(12): 38-47.

QIAO Haitao, LIANG Bin, ZHANG Junying, et al. Development and application of adhesive materials for advanced composite bonding[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2018, 46(12): 38-47.

[9] 戴京涛, 赵培仲, 董世康. 胶接结构的耐久性研究[J]. *中国胶粘剂*, 2020, 29(7): 16-20, 34.

DAI Jingtao, ZHAO Peizhong, DONG Shikang. Study on durability of adhesive bonded structure[J]. *China Adhesives*, 2020, 29(7): 16-20, 34.

[10] 陈明安. 铝薄板/塑料复合成型机理的研究—铝薄板成型及其与聚丙烯的粘接界面特性[D]. 长沙: 中南大学, 2002.

CHEN Mingan. Hybrid forming of aluminum sheet/plastics: Forming process and characterization of aluminum sheet/grafted polypropylene interface[D]. Changsha: Center South University, 2002.

[11] 李嘉禄. 三维编织技术和三维编织复合材料[J]. *新材料产业*, 2010, 12(1): 46-49.

LI Jialu. 3D braiding technology and 3D braided composites[J]. *New Material Industry*, 2010, 12(1): 46-49.

[12] 曲春艳, 李琳, 王德志. 钛合金胶接表面处理研究[J]. *材料工程*, 2010, 55(12): 82-85.

QU Chunyan, LI Lin, WANG Dezhi. Study on surface treatment of titanium alloy for adhesive bonding[J]. *Material Engineering*, 2010, 55(12): 82-85.

[13] 王树鑫, 尚新龙, 鞠苏, 等. 复合材料/金属胶接结构研究进展及发展趋势[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2017(11): 95-100.

WANG Shuxin, SHANG Xinlong, JU Su, et al. Progress on research on composite-metal adhesive joints[J]. *FRP/Composite*, 2017(11): 95-100.

[14] 乔海涛, 邹贤武. 复合材料胶接技术的研究进展[J]. *宇航材料工艺*, 2010, 40(2): 11-14.

QIAO Haitao, ZOU Xianwu. Progress of composite bonding technique[J]. *Aerospace Material Technology*, 2010, 40(2): 11-14.

[15] 张艳芳, 冷卫红, 罗辑, 等. 复材/复材二次胶接质量及强度影响因素研究[J]. *塑料工业*, 2014, 42(7): 77-80.

ZHANG Yanfang, LENG Weihong, LUO Ji, et al. Study on factors on the co-bonding quality and bonding strength of composite panels[J]. *China Plastics Industry*, 2014, 42(7): 77-80.

[16] 李龙, 胡平, 刘立忠. 刚度不平衡单搭接胶接接头剪切试验与强度分析[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(1): 213-217.

LI Long, HU Ping, LIU Lizhong. Strength of unsymmetric single-lap adhesively bonded joints[J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2011, 42(1): 213-217.

通讯作者: 苏震宇, 高级工程师, 研究领域为航空复合材料成型工艺。

(责编 晓意)