

吸湿对单向亚麻纤维复合材料力学性能的影响

贾云龙 FIEDLER Bodo

Influence of moisture absorption on the mechanical properties of unidirectional flax fibre composites

JIA Yunlong, FIEDLER Bodo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210526.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

改性亚麻布/不饱和聚酯复合材料的吸湿及力学性能

Moisture absorption and mechanical property of modified linen/unsaturated polyester composites

复合材料学报. 2018, 35(1): 35–43 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170421.002>

洋麻纤维-棉纤维混纺织物/环氧树脂复合材料力学及吸湿性能

Moisture absorption and mechanical properties of kenaf fiber-cotton fiber blended fabric/epoxy composite

复合材料学报. 2020, 37(7): 1581–1589 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191226.002>

连续碳纤维/尼龙6热塑性复合材料的吸湿及力学性能

Water absorption and mechanical property of continuous carbon fiber/polyamide 6 composites

复合材料学报. 2019, 36(1): 114–121 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180322.002>

基于深度信念网络的玄武岩纤维增强树脂复合材料耐久性预测

Durability prediction of basalt fiber reinforced polymer composite based on deep belief network

复合材料学报. 2020, 37(2): 390–399 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190506.002>

碳纳米管复合亚麻纤维柔性传感材料的制备

Preparation of flexible sensing material of flax fiber combined carbon nanotubes

复合材料学报. 2021, 38(7): 2244–2253 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201020.001>

加捻植物纤维增强树脂基复合材料偏轴拉伸非线性多层次角度融合建模

Modeling the off-axis tensile nonlinearity of twisted plant fiber reinforced composites fused with hierarchical angles

复合材料学报. 2018, 35(8): 2103–2109 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20171206.002>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20210526.001

吸湿对单向亚麻纤维复合材料力学性能的影响



贾云龙^{*1}, FIEDLER Bodo²

(1.常州工学院 航空与机械工程学院/飞行学院,常州 213032; 2.汉堡工业大学 聚合物与复合材料研究所,汉堡 D21073)

摘 要: 为探明亚麻纤维增强树脂复合材料 (FFRPs) 在长期潮湿环境中的力学性能变化规律, 基于真空辅助树脂模塑传递成型 (VARTM) 手段制备了的干燥状态的单向 FFRPs(纤维体积分数为 40vol%)。试验研究了 FFRPs 在 30℃、80% 相对湿度 (RH) 环境中放置 5 天、35 天、86 天后拉伸力学性能变化。结果表明, FFRPs 在湿热环境中吸水量近似符合一维情况下的 Fickian 第二定律, 饱和吸水量为 5.3% 左右。FFRPs 在垂直于纤维方向上的拉伸强度和模量随吸湿度增加递减, 断口微观分析表明吸湿降低了纤维基体界面结合性能。然而, FFRPs 在纤维方向上的拉伸强度并未因吸湿降低, 反而在吸湿过程呈现出先减小后增加的趋势, 此变化规律文献中尚未报道: 相比干燥状态, 放置 5 天后拉伸强度下降 5.7%; 放置 35 天后拉伸强度增加 18.7%; 放置 86 天时样品已处在饱和吸湿状态, 拉伸强度略微减小, 但仍比干燥状态增加 13.7%。FFRPs 在纤维取向上拉伸强度变化可解释为多因素共同作用的结果。

关键词: 植物纤维复合材料; 亚麻纤维; 吸湿; 拉伸力学性能; 耐久性

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2022)02-0608-09

Influence of moisture absorption on the mechanical properties of unidirectional flax fibre composites

JIA Yunlong^{*1}, FIEDLER Bodo²

(1. School of Aerospace and Mechanical Engineering/Aviation, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032, China; 2. Institute of Polymer and Composites, Hamburg University of Technology, Hamburg D21073, Germany)

Abstract: This paper investigated the evolution of mechanical properties of flax fibre reinforced polymer composites (FFRPs) conditioned in humid condition for a long term. Dry unidirectional FFRPs having fibre volume fraction of 40vol% were manufactured via vacuum assisted resin transfer moulding (VARTM). FFRPs were conditioned in 30℃, 80% relative humidity (RH) for different time (5 days, 35 days and 86 days) and their tensile properties were tested and analyzed. The results demonstrate that the moisture absorption of FFRPs fairly follows one dimensional Fickian's second law. The equilibrated water content is around 5.3%. Tensile strength and modulus perpendicular to fibre direction decrease with moisture absorption. Fracture morphology shows that fibre-matrix bonding strength decreases after moisture absorption. Tensile strength in fibre direction is not degraded by moisture absorption, and exhibits a trend featured by a first drop followed by an increase, which has not been reported in literatures. Tensile strength in fiber direction decreases by 5.7% after being conditioned in humid for 5 days, and increases by 18.7% after 35 days. Further absorption of moisture up to 86 days (already saturated) causes a slight decrease in tensile strength but is still 13.7% higher than that at dry state. The change trend of tensile strength in fibre direction during moisture absorption can be explained as a consequence of averaging effects of several factors.

收稿日期: 2021-02-22; 修回日期: 2021-04-23; 录用日期: 2021-05-18; 网络首发时间: 2021-05-26 17:57:48

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210526.001>

基金项目: 常州工学院高层次人才科研启动项目 (YN20075); 国家建设高水平大学公派研究生项目 (留金发 [2015]3022)

通信作者: 贾云龙, 博士研究生, 讲师, 研究方向为纤维增强复合材料、植物纤维表面改性 E-mail: jiayl@czu.cn

引用格式: 贾云龙, FIEDLER Bodo. 吸湿对单向亚麻纤维复合材料力学性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(2): 608-616.

JIA Yunlong, FIEDLER Bodo. Influence of moisture absorption on the mechanical properties of unidirectional flax fibre composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(2): 608-616(in Chinese).

Keywords: plant fibre composites; flax fibres; moisture absorption; tensile properties; durability

近年来,采用植物纤维作为增强纤维制造高性能绿色复合材料正在成为复合材料领域的一个重要发展方向^[1-2]。与传统的碳纤维、玻璃纤维及人造高分子纤维等相比,植物纤维具有环境友好、价格低廉、产量丰富、耗能低等优点。更重要的是,它们具有优异的力学性能^[2]。一些植物纤维,例如亚麻纤维具有比E级玻璃纤维更高的比模量和相当等级的比强度^[3]。采用亚麻纤维等植物纤维制作的复合材料显示出良好的静态力学性能。近年来一些汽车、体育用品、交通运输等制造商开始尝试采用亚麻纤维增强树脂复合材料(FFRPs)制造承受力学载荷的部件,以满足产品的绿色和轻量化需求^[4-5]。然而和其他植物纤维一样,亚麻纤维易吸湿,且自身力学性能对水分敏感,带来了FFRPs在实际服役过程中力学性能耐久性的担忧^[6]。因此,FFRPs在吸湿后的力学性能变化成为学者的关注焦点^[7-8]。

目前研究表明,FFRPs在吸湿后拉伸模量和弯曲模量会大幅下降^[7]。然而,关于FFRPs吸湿对纤维方向的拉伸强度变化呈现截然相反的报道。一些学者认为FFRPs吸收的水分会导致纤维基体间结合性能的下降,因此会损害复合材料的拉伸强度。M. Assarar等^[9]研究了单向FFRPs在水浴处理下吸湿后的拉伸性能变化。水浴处理1天和20天后纤维方向拉伸强度分别降低了13%和15%。造成拉伸强度降低的主要原因被解释为吸湿导致的纤维与基体界面弱化。D. Scida等^[10]将准单向纤维FFRPs放置于20℃、90%相对湿度(RH)环境下处理,3天和38天后FFRPs的拉伸强度分别降低了10%和12%。他们认为吸湿导致了纤维与基体间的早期脱粘和纤维提前断裂。Le Duigou A等^[11]则通过微脱粘法直接测量吸湿对单根亚麻纤维与环氧树脂基体间的表观界面剪切强度的影响,结果表明界面剪切强度吸湿后减小,微脱粘样品在水于放置15 min后表观剪切强度下降了15%以上,之后趋于稳定。

不同于上述学者的发现,一些学者认为吸湿可提高FFRPs的拉伸强度。M. Berges等^[12]将单向FFRPs置于70℃、85%RH环境中,发现FFRPs达到饱和吸湿状态后在纤维方向上的拉伸强度并没有因吸湿而降低,反而略微增加。E. Muñoz等^[13]研究了平纹织物增强的FFRPs在水浴处理后拉伸

力学性能变化,发现两种纤维体积分数下(40vol%和55vol%)FFRPs的拉伸强度在吸湿后分别增加了10%和35%。他们指出亚麻纤维吸湿后体积膨胀反而有助于纤维与基体间的界面结合。

分析上述研究结果的差异,吸湿影响纤维增强复合材料拉伸强度的因素除了纤维基体结合性能的变化外,纤维吸湿后自身的拉伸性能变化也是一个重要因素。Moudood A.等^[14]指出,FFRPs的拉伸强度受制造前纤维含水量影响,并且不表现出单一增加或减小趋势。然而,大部分文献中所用亚麻纤维在制造前的水分含量并无公开报道,因此难以针对现有研究结果对FFRPs吸湿后的力学性能,尤其是纤维方向上拉伸强度做出正确结论。

鉴于此,本文基于真空辅助树脂传递模塑成型(VARTM)工艺制备了干燥状态的单向FFRPs,排除复合材料制造前亚麻纤维含水量的影响。研究FFRPs在吸湿过程中垂直于纤维方向[90°]和纤维轴向[0°]上拉伸模量、拉伸强度、断裂应变、切线刚度等力学性能指标变化,研究结果有助于对FFRPs在吸湿条件下的长期力学服役性能形成正确认识。

1 实验材料及方法

1.1 亚麻纤维及树脂基体

采用无褶皱单向亚麻纤维织物(图1)制作复合材料。织物牌号为ampliTex 5009,采购于瑞士Bcomp公司,面密度为(300±15)g/m²,由105TEX的亚麻纺线制成。单根植物纤维长度有限,纱线形式的植物纤维是目前制作复合材料的常用形式^[15]。

基体采用双组分生物基环氧树脂系统(Infu-Green 810/SD 8822,法国Sicom公司)。Infu-Green 810/SD 8822的推荐混合质量比为100:31。其中,InfuGreen 810由油菜籽油提取物合成,生物能含量为38%。

1.2 纤维纱线的吸湿及拉伸性能测试

从单向纤维织物上随机裁取长度约为120 cm的纤维纱线,制作纤维纱线吸湿和拉伸性能测试样品。利用纤维的干燥和重新吸湿,获取4种不同含水量的纱线,方法及步骤如图2所示。

在Zwick/Roell 10 kN (Germany, ZwickRoell)拉伸试验机上测试纱线的拉伸力学性能。使用纸带包裹纱线两端以传递测试拉力,可有效防止夹具对纱线加持段的破坏,纸带间距控制为50 mm。

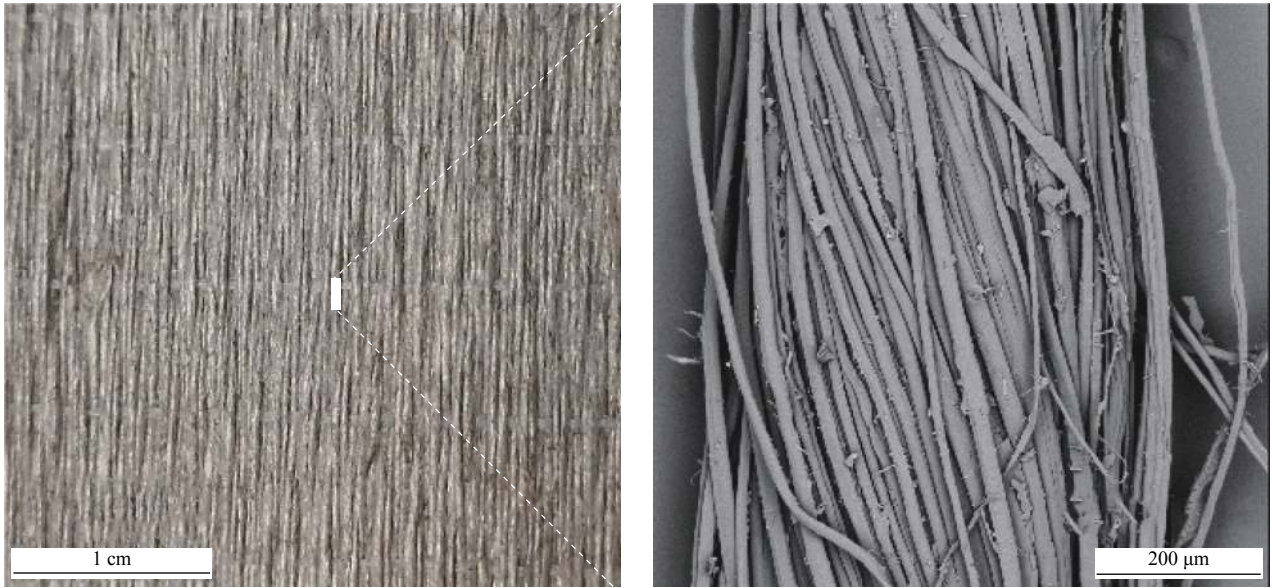


图 1 单向亚麻纤维织物 (左) 和亚麻纱线结构 (右)

Fig. 1 Unidirectional (UD) flax fiber fabric (left) and structure of flax yarn (right)

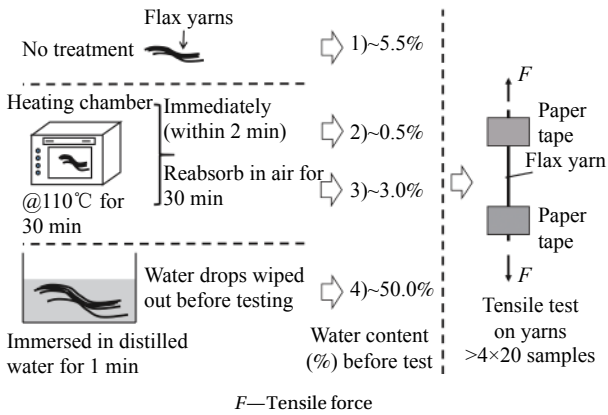


图 2 获取不同含水量亚麻纤维纱线的方法

Fig. 2 Method to obtain flax yarns with different water contents

拉伸测试加载速度设定为 2.5 mm/min，基于拉伸试验机横梁位移计算纱线伸长率。由于纱线截面形状不规则难以准确测量，且纵向上横截面积有较大差异，采用纱线平均横截面积计算拉伸强度和模量。通过线密度和纤维密度计算出的纱线平均横截面积为 $6.931 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ 。为提高数据准确性，对于每一种含水量，保证不低于 20 个有效样品数据 (断裂处在样品中间附近)。

1.3 复合材料制备

复合材料板采用 VARTM 方法制造。模板材料为铝，分上下两块，尺寸为 650 mm×340 mm×30 mm，对应的垫片 (决定复合材料厚度) 厚度为 2 mm。脱模剂为 Mikon W-64，购于 Münch Chemie International GmbH，放置纤维织物前均匀抹在模

板内表面。根据纤维密度和质量计算出的复合材料纤维体积分数为 40vol%。

1.4 纤维的模内预干燥

干燥的植物纤维在空气中极易吸收水分，因此采用模内真空干燥纤维。具体步骤是，将亚麻纤维放置于模具并闭合，抽真空并升温至 102℃ 并保持一段时间，随后冷却模具至 30℃，整个过程保持真空泵开启及时排出纤维内蒸发出的水分。复合材料制造过程模具内的温度和压力周期如图 3 所示。

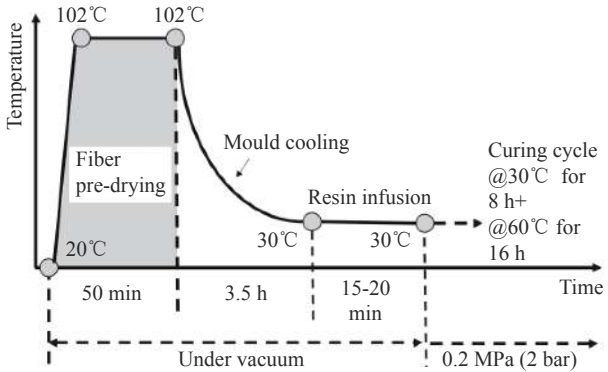


图 3 纤维预干燥及真空辅助树脂传递模塑成型 (VARTM) 过程中的温度和压力周期

Fig. 3 Temperature and pressure cycle in fiber pre-drying and vacuum assisted resin transfer moulding (VARTM) process

1.5 复合材料样品制备

样品由切割复合材料板获得。根据拉伸测试标准 ASTM3039—17^[16]，[0°] 样品尺寸为 250 mm×

15 mm×2 mm, [90°] 样品尺寸为 175 mm×25 mm×2 mm。为避免使用水性冷却液, 切割过程采用空气冷却。切割完成后样品切割面依次使用粒度为 320、600、1000 和 2500 的砂纸打磨, 以减小切割断面质量对测试力学性能的影响。所有样品在打磨完成后放置于真空干燥箱, 在 40℃ 下真空干燥 24 h, 保证样品的干燥状态。

为降低制造质量引起的误差, 增加结果可靠性, 干燥状态的 [0°] 样品来自于 5 个批次制造的复合材料板, 共计 20 个有效测试样品。其他测试条件下每组样品不少于 5 个, 来自于 3 次不同批次制造的复合材料板。

1.6 复合材料吸湿测试

吸湿测试参照 ASTM-5229—12 标准^[17]进行。将干燥样品称重后置于设定为 30℃、80%RH 恒温恒湿箱中, 每隔一定时间测试样品的质量变化。精密天平的精度为±0.01 mg。样品吸湿量 M_t 定义为

$$M_t = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100 \tag{1}$$

其中: M_t 是 t 时刻样品吸湿量; W_t 是 t 时刻样品的质量; W_0 是样品干燥状态的质量。

复合材料吸湿可看作是水分在复合材料内部的扩散吸收^[18]。因此 Fickian 扩散定律可用来描述 FFRPs 的吸湿行为。一维情况下 Fickian 第二定律的数学表达可分为 2 段, 初始阶段吸湿量与时间平方根呈线性关系:

$$\frac{M_t}{M_m} = \frac{4}{h} \times \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} \tag{2}$$

其中: M_m 为最大吸湿量; h 为扩散方向厚度; D 为扩散系数; t 为时间。

吸湿量大于 0.6 M_m 时可按 Shen 和 Springer^[19]推荐可表达为

$$\frac{M_t}{M_m} = 1 - \exp\left[-7.3\left(\frac{Dt}{\pi}\right)^{0.75}\right] \tag{3}$$

对于长方形样品, 扩散系数修正为

$$D_c = D_e \left(1 + \frac{h}{w} + \frac{h}{l}\right)^{-2} \tag{4}$$

其中: D_c 为修正后扩散系数; D_e 为根据实验计算出的扩散系数; w 为样品宽度; l 为样品长度; h 为样品厚度。 D_c 更加接近材料真实扩散系数。

1.7 拉伸力学性能测试

根据 ASTM-3039 标准^[16], 在 Zwick/Roell 100 kN (Germany, ZwickRoell) 拉伸试验机上测试拉伸

力学性能, 试验机配备夹具为液压驱动楔形夹具。应变采用精度为 0.5 等级的电驱动夹持伸长计测量。[0°] 样品的夹持长度为 80 mm, [90°] 样品的夹持长度为 50 mm。

1.8 断口微观形貌测试

采用扫面电子显微镜 (Phenom XL desktop SEM) 分析样品断裂面形貌, 样品镀金厚度约为 6.5 nm, 观察模式为 SED(Secondary electron detection) 模式。根据图像清晰度, 加速电压为 5 kV 或 10 kV。

2 结果与讨论

2.1 FFRPs 吸湿行为

图 4 为 [0°] 和 [90°] 样品在 30℃、80%RH 下吸湿量随时间平方根的变化曲线及 Fickian 扩散拟合曲线。可以看出, 吸湿量与时间的平方根初始阶段为近似线性关系, 吸湿 30 天后样品逐渐进入饱和吸湿阶段, 86 天后的饱和吸湿量在 5.3% 左右。Fickian 扩散定律能较好地表达 FFRPs 吸湿行为。表 1 为根据实验测量结果拟合的 Fickian 动力学参

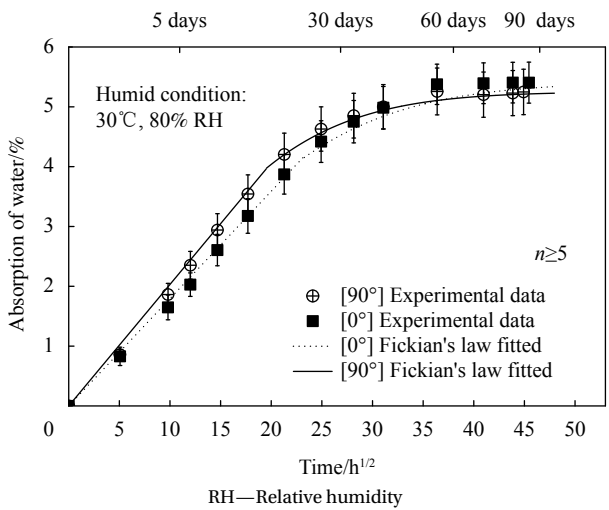


图 4 亚麻纤维增强树脂复合材料 (FFRPs) 吸湿实验数据及 Fickian 拟合吸湿曲线

Fig. 4 Experimental and Fickian'law fitted weight uptake of flax fibre reinforced polymer composites (FFRPs) in humid

表 1 [0°] 和 [90°]FFRPs 样品的计算 Fickian 扩散系数
Table 1 Calculated Fickian diffusion coefficients of [0°] and [90°] FFRPs

	$D_e^{1/2}/(10^{-7} \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$D_c^{2/2}/(10^{-7} \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$M_m^3/\%$
[0°]	2.40	1.84	5.41
[90°]	3.27	2.74	5.25

Notes: D_e —Diffusion coefficient calculated from experimental data; D_c —Corrected diffusion coefficient; M_m —Absorption of water at saturation.

数。与文献 [7] 中的报道结果相比，本文中制造的 FFRPs 扩散系数处在较低水平。

2.2 吸湿对亚麻纤维纱线拉伸性能的影响

图 5 为具有不同含水量的纤维纱线的典型伸长率-应力曲线。可以看出，不同含水量的纱线拉伸响应特性基本一致，呈现脆性断裂特性。拉伸初期存在较窄非线性段，对应于纱线对加载的适应过程。值得注意的是，高含水量纱线 (~50.0%) 的拉伸响应与低含水量下略有不同，加载后期有明显的刚度增大现象，可能意味着纤维含水量较高时在拉伸过程纤维自身的响应产生了变化，纤维拉伸过程出现钢化效应。

表 2 为不同含水量下的纱线拉伸性能。虽然纱线拉伸模量则随含水量增大而降低，纱线拉伸强度和断裂伸长率随含水量增大而增大。该趋势与 Masseteau B.等 [20] 实验研究干湿状态下亚麻纱线的拉伸性能时得出的结果一致。纱线结构不变时，其拉伸性能变化反映了组成纱线的纤维自身

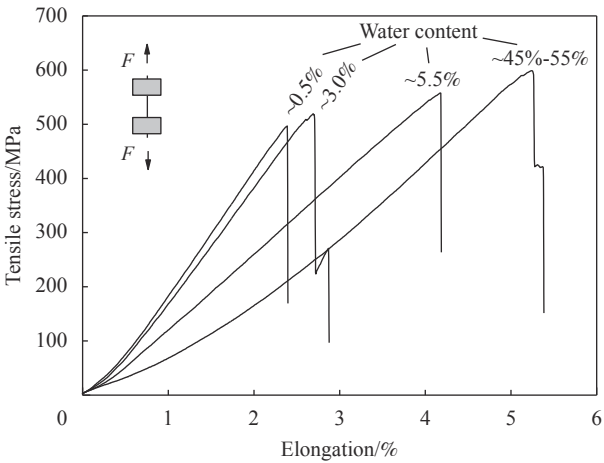


图 5 不同含水量亚麻纤维纱线的典型拉伸应力-应变曲线
Fig. 5 Representative tensile stress-strain curves of flax yarns having different water contents

拉伸性能的变化。事实上，一些学者通过单根纤维拉伸实验证实了吸湿状态的亚麻纤维比干燥状态下有更高拉伸强度和拉伸应变 [21-22]。

表 2 亚麻纤维纱线的拉伸性能 (n≥20)

Table 2 Tensile properties of tested flax yarns (n≥20)

Water content/%	Strength/MPa	Modulus ¹ /GPa	Elongation at break/%
~0.5	486.0±74.9	22.0±2.9	2.5±0.2
~3.0	517.2±92.2	16.4±2.9	3.4±0.5
~5.5	544.1±81.2	14.4±1.9	4.1±0.4
~50.0	598.8±136.4	10.7±0.9	5.6±0.9

Notes: Modulus¹ was calculated as the gradient of the regression line between 100 MPa and 200 MPa; n—Sample size of each condition.

2.3 吸湿对 FFRPs 垂直纤维方向拉伸性能的影响

图 6 比较了 [90°] 样品在干燥和不同吸湿时间下的代表性拉伸曲线。干燥状态下的 [90°] 样品表现出脆性断裂行为，拉伸过程应力-应变主要呈线性关系。接近断裂前存在较窄的非线性段，有明显的刚度下降趋势 (切线模量降低)。吸湿后样品拉伸应力-应变曲线的线性段变小，非线性段增大。吸湿 35 天和 86 天样品间的拉伸行为差别不大，可能因为 2 种条件下的样品吸湿量差异较小。吸湿后样品的拉伸强度和模量均有下降，图 7 为 [90°] 样品在不同吸湿时间下拉伸力学性能变化。相比干燥状态，吸湿 5 天后平均拉伸强度和模量分别下降了 27.3% 和 14.4%；饱和吸湿状态下 (吸湿 86 天) 平均拉伸强度和模量分别降低了 32.3% 和 28.9%。断裂应变随吸湿量增加却表现出略微降低随后小幅增加的趋势。

对于纤维增强树脂复合材料，垂直于纤维方

向上的拉伸强度与纤维与基体间的结合强度和基体本身的拉伸强度直接相关 [23]。相比植物纤维，

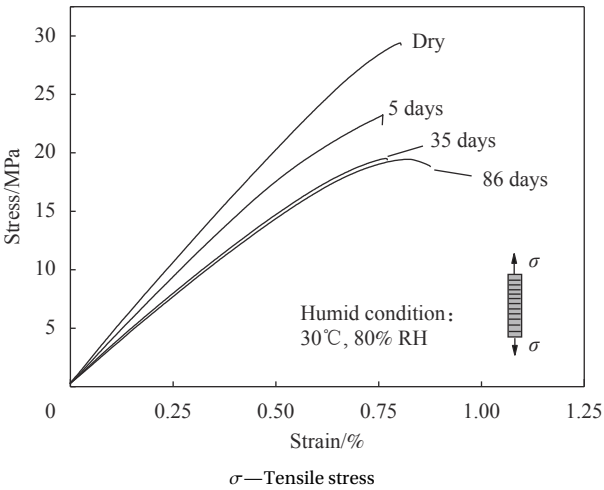


图 6 [90°]FFRPs 样品在不同吸湿时间下的典型拉伸应力-应变曲线
Fig. 6 Representative tensile stress-strain curves of [90°] FFRPs specimens at different conditioning time

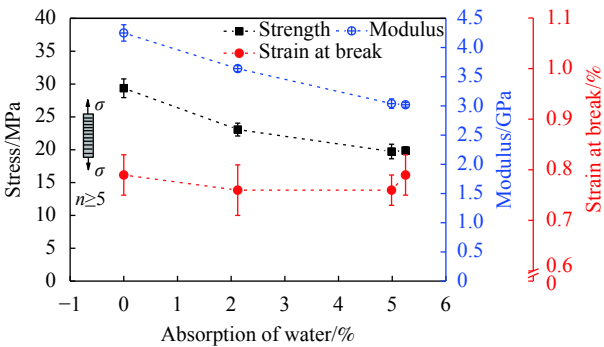


图7 [90°] FFRPs 样品在不同吸湿时间下的拉伸力学性能

Fig. 7 Evolution of tensile properties of [90°] FFRPs specimens at different conditioning time

聚合物吸水缓慢，因此吸水 5 天后拉伸强度的大幅下降的主要原因是吸湿导致的纤维与基体的结合强度降低。对断裂样品进行微观形貌分析，证明了吸湿纤维与基体的结合强度的降低。

图 8 为吸湿不同时间后 [90°] 样品断裂面微观形貌。不论吸湿与否，样品断裂面都存在单根纤维断裂、纤维脱粘、纤维纱线和纤维束的整体脱粘等典型失效特征。对比干湿样品断裂面纤维表面形貌，发现干燥样品纤维表面可见纤维内部的纤维原丝及撕裂的纤维层，显示出较好的纤维与基体结合性能。然而吸湿 5 天后纤维原丝及撕裂

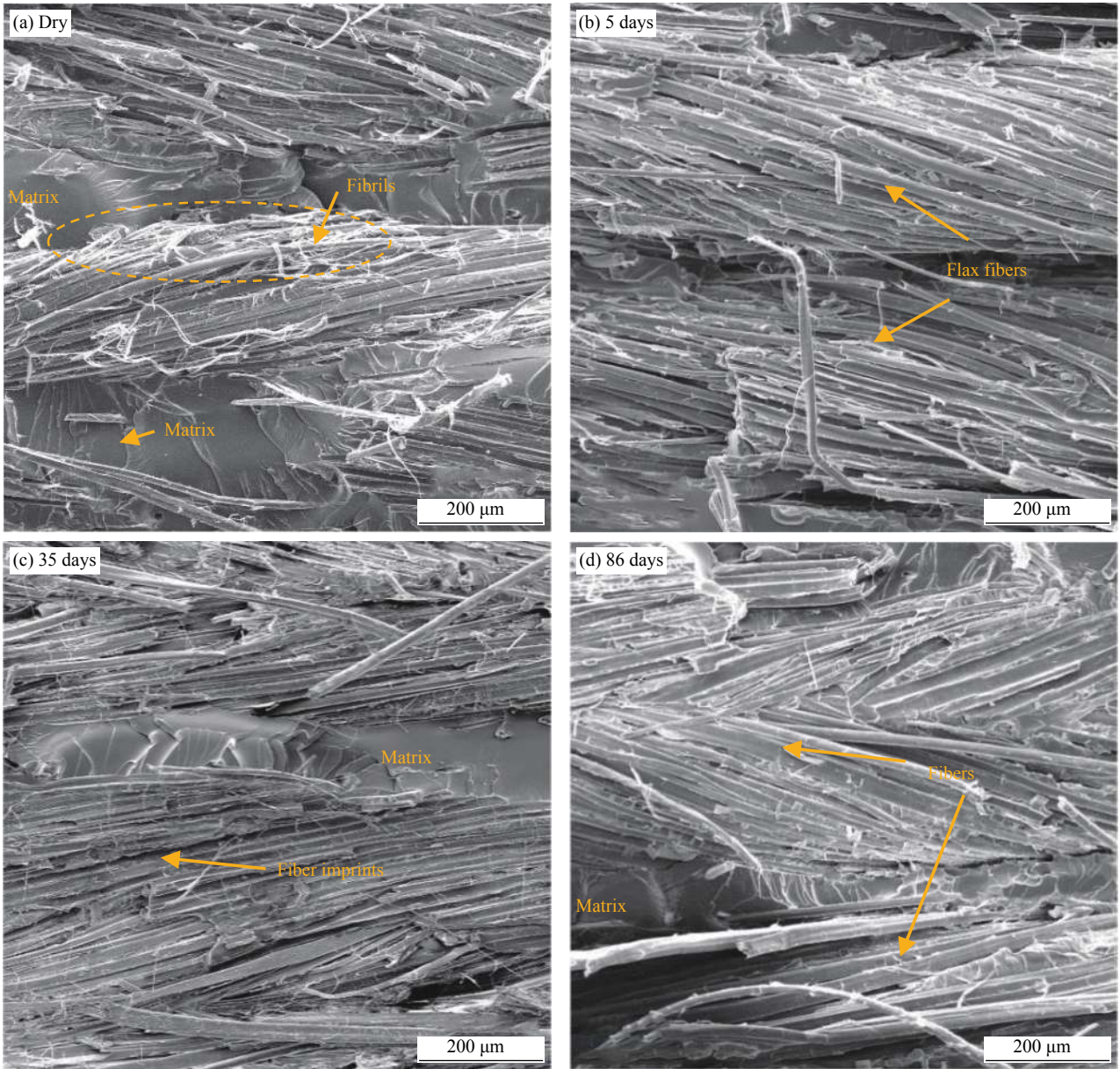


图8 [90°] FFRPs 样品不同吸湿时间下 (30℃、80%RH) 的断裂面微观形貌

Fig. 8 Fracture morphologies of [90°] FFRPs specimens conditioned in humid (30℃, 80%RH)

的纤维层数量明显减少。吸湿 35 天和 86 天的样品断裂面上大部分或纤维表面 (或纤维脱粘后基体印记) 光滑。这表明吸湿后纤维与基体间的结合强度降低。

2.4 吸湿对 FFRPs 纤维方向拉伸性能的影响

虽然吸湿导致纤维与基体间结合强度降低, 但吸湿后 FFRPs 纤维方向上的拉伸强度并没有表现出单一的降低趋势。如图 9 所示, 拉伸强度表现出先降低后增加, 随后略微下降的趋势。干燥状态拉伸强度为 (300.25±7.09) MPa; 放置 5 天平均吸水量为 1.66%, 拉伸强度下降 5.7%; 放置 35 天后平均吸水量达到 4.8%, 拉伸强度增加 18.7%; 放置 86 天时样品已处在饱和吸湿状态, 拉伸强度略微减小, 但仍比干燥状态增加 13.7%。拉伸模量和断裂应变随吸湿量增加分别表现出降低和增加趋势, 与引言中介绍的学者们的实验结果一致, 这是由于吸湿后的纤维与基体模量降低以及纤维基体结合减弱的作用。然而, 拉伸强度的变化趋势与文献报道不同。

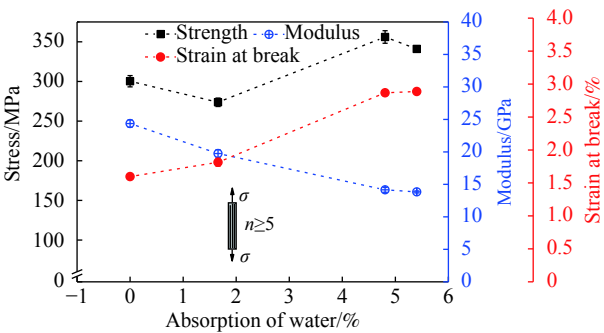


图 9 [0°] FFRPs 样品在不同吸湿时间下的拉伸力学性能
Fig. 9 Evolution of tensile properties of [0°] FFRPs specimens at different conditioning time

图 10 为不同吸湿时间下样品的拉伸过程应力-应变曲线。吸湿 5 天后样品的拉伸曲线与干燥状态下相似, 然而吸湿 35 天和 86 天后的样品拉伸曲线形状发生了变化。为找出差异, 比较了各拉伸曲线的切线模量变化趋势。如图 11 所示, 吸湿 35 天和 86 天的样品与其它两种条件下样品的刚度 (切线模量) 变化趋势显著不同, 体现在刚度在拉伸应变大于 0.5% (大约) 部分有显著增加趋势。这种钢化效应并没有在干燥样品中发现, 在吸湿 5 天后的样品中也不明显。此现象与前文发现高含水量时纤维纱线拉伸过程出现的钢化效应一致, 表明亚麻纤维吸湿后轴向拉伸力学响应发生了变化。

A. Lefevre 等^[24-25] 报道了亚麻纤维的 3 种不同

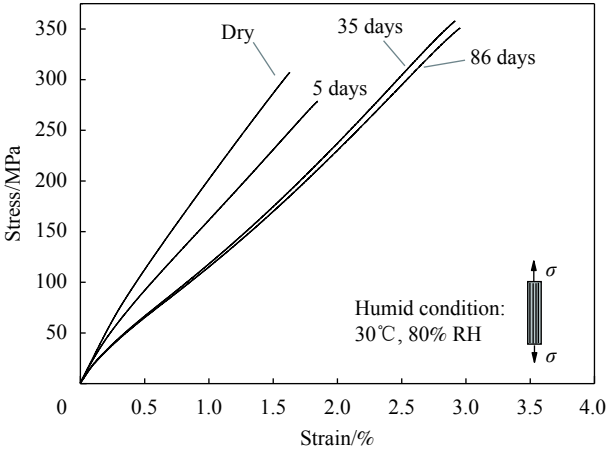


图 10 [0°] FFRPs 样品在不同吸湿时间下的典型拉伸应力-应变曲线
Fig. 10 Representative tensile stress-strain curves of [0°] FFRPs specimens at different conditioning time

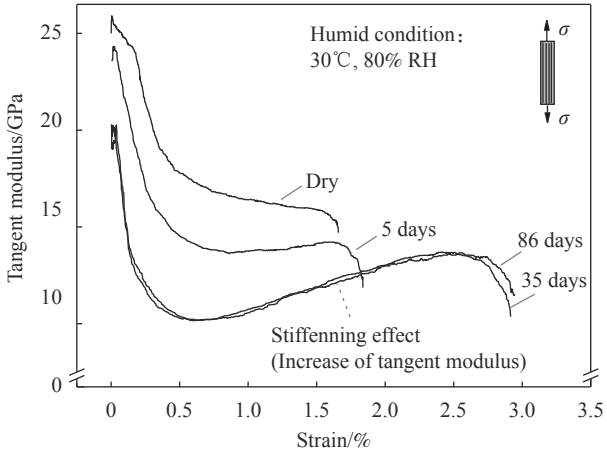


图 11 [0°] FFRPs 样品在不同吸湿时间下的刚度变化
Fig. 11 Stiffness evolution of [0°] FFRPs specimens at different conditioning time

拉伸响应类型: 线性、双线性和非线性。其中具有非线性响应的亚麻纤维表现出最高的拉伸强度和拉伸应变, 其刚度随拉伸应变先减小后增大。亚麻纤维切线模量先减小后增加被解释为亚麻纤维内部在拉伸载荷下的调节以及纤维原丝沿纤维轴向重新取向 (亚麻纤维第二层内纤维原丝与纤维轴向呈 10° 排列^[26])。对应本文中发现的吸湿后的钢化效应, 可能的解释是: 亚麻纤维吸湿后水分子被纤维原丝间果胶和半纤维素吸收, 产生塑化效应, 从而促进了纤维原丝在拉伸载荷下沿纤维轴向的重新取向, 增加了纤维刚度。

2.5 吸湿后纤维方向拉伸强度的影响因素

吸湿后影响 FFRPs 纤维方向拉伸强度的主要因素有: 纤维拉伸性能、纤维与基体间结合性能、基体性能。吸湿过程拉伸强度的变化趋势应是各

因素综合作用的结果。为便于讨论,画出各因素随吸湿量影响拉伸强度的可能趋势图,如图12所示。

吸湿初始阶段纤维拉伸强度有所升高,但纤维与基体结合强度降低占据主要作用,因此吸湿5天后样品拉伸强度呈现下降趋势。此外,样品不均匀的吸湿也可能导致拉伸强度的下降。靠近表面的纤维先吸湿导致模量下降,承受的载荷低于样品内部相对干燥的纤维。随吸湿量增大,纤维和基体模量降低,纤维与基体界面结合强度进一步下降。同时,亚麻纤维吸湿后体积膨胀,Pucci F.指出亚麻纤维吸湿后直径可增大27%以上^[27],体积膨胀率大于环氧树脂基体,因此会对基体产生正向压应力,增加纤维与基体间结合界面的摩擦力,保证纤维脱粘后的基体仍能向纤维传递应力。这在吸湿35天和86天的样品断裂处两侧明显增多变长的纵向裂纹得到体现(图13)。

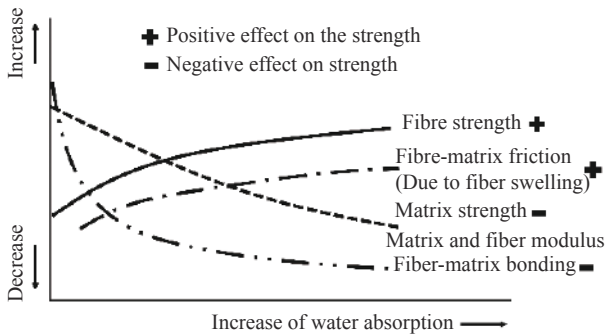


图12 影响吸湿后 [0°] FFRPs 样品拉伸强度的因素趋势线

Fig. 12 Trend lines that would influence on tensile strength of [0°] wet-conditioned FFRPs specimens

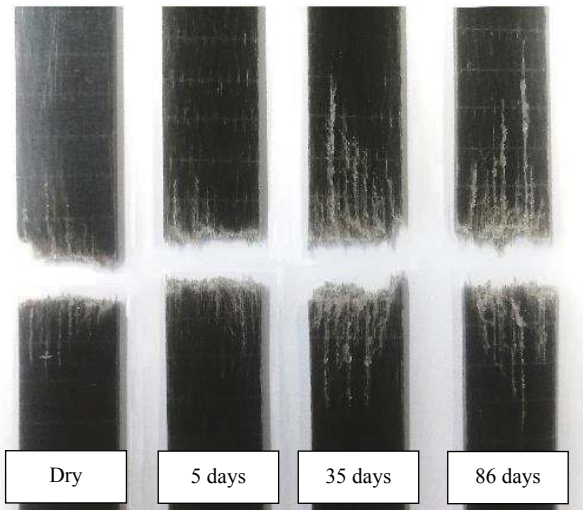


图13 干湿状态下 [0°] FFRPs 样品的断裂面形貌比较

Fig. 13 Comparison of fracture morphologies of [0°] dry and wet-conditioned FFRPs specimens

此外,纤维自身的拉伸强度也因吸湿提高,因此吸湿35天和86天时上述因素的综合效应使得样品拉伸强度较干燥状态显著增加。

3 结论

(1)干燥状态下的亚麻纤维增强树脂复合材料 (FFRPs)(纤维体积分数为40vol%)在30℃、80%相对湿度(RH)环境下的吸湿量近似服从Fickian扩散定律,放置86天后的饱和吸水量为5.3%左右。[0°]和[90°]拉伸试验样品的Fickian扩散系数分别为 $1.84\times10^{-7}\text{ mm}^2/\text{s}$ 和 $2.74\times10^{-7}\text{ mm}^2/\text{s}$ 。

(2)单向FFRPs在垂直纤维方向上的拉伸模量和拉伸强度随吸湿逐渐降低。吸湿86天后平均拉伸强度和模量分别降低了32.3%和28.9%。断裂面微观形貌分析表明亚麻纤维与生物基环氧树脂基体间的结合强度受吸湿量增加而降低。

(3)吸湿对单向FFRPs的拉伸力学性能的影响并不总是负向的。FFRPs在纤维取向向上的拉伸强度呈现出先减小后增加的趋势,此变化规律文献中尚未报道。相比干燥状态,放置5天平均吸水量为1.66%,拉伸强度下降5.7%;放置35天后平均吸水量达到4.8%,拉伸强度增加18.7%;放置86天时样品已处在饱和吸湿状态,拉伸强度略微减小,但仍比干燥状态增加13.7%。虽然吸湿后基体的拉伸性能和纤维与基体间结合强度降低,但界面摩擦力可能因纤维吸湿膨胀增大,且吸湿后纤维拉伸强度增加。因此吸湿后期FFRPs在纤维取向向上的拉伸强度较干燥状态显著增加。

参考文献:

[1] SHEKAR H S, RAMACHANDRA M. Green composites: A review[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(1): 2518-2526.

[2] PICKERING K L, EFENDY M A, LE T M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 83: 98-112.

[3] LIBO YAN, CHOUW N, JAYARAMAN K. Flax fibre and its composites-A review[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 56: 296-317.

[4] IBRAHIM M. Natural-fibre composites: An overview [EB/OL]. [2020-11-04]. <http://www.kompozit.com/post/natural-fibre-composites-an-overview>.

[5] HALLAK PANZERA T, JEANNIN T, GABRION X, et al. Static, fatigue and impact behaviour of an autoclaved flax fibre reinforced composite for aerospace engineering[J]. *Com-*

- posites Part B: Engineering, 2020, 197: 108049.
- [6] MOKHOTHU T H, JOHN M J. Review on hygroscopic aging of cellulose fibres and their biocomposites[J]. *Carbohydrate polymers*, 2015, 131: 337-354.
- [7] MOUDOOD A, RAHMAN A, CHSNER A, et al. Flax fiber and its composites: An overview of water and moisture absorption impact on their performance[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2018, 38(7): 1-17.
- [8] WANG A, XIAN G, LI H. Effects of fiber surface grafting with nano-clay on the hydrothermal ageing behaviors of flax fiber/epoxy composite plates[J]. *Polymers*, 2019, 11(8): 1278-1289.
- [9] ASSARAR M, SCIDA D, EL MAHI A, et al. Influence of water ageing on mechanical properties and damage events of two reinforced composite materials: Flax-fibres and glass-fibres[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(2): 788-795.
- [10] SCIDA D, ASSARAR M, POILÂNE C, et al. Influence of hydrothermal ageing on the damage mechanisms of flax-fibre reinforced epoxy composite[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 48: 51-58.
- [11] LE DUGOU A, DAVIES P, BAILEY C. Exploring durability of interfaces in flax fibre/epoxy micro-composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, 48: 121-128.
- [12] BERGES M, LÉGER R, PLACET V, et al. Influence of moisture uptake on the static, cyclic and dynamic behaviour of unidirectional flax fibre-reinforced epoxy laminates[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 88: 165-177.
- [13] MUNOZ E, GARCÍA-MANRIQUE J A. Water absorption behaviour and its effect on the mechanical properties of flax fibre reinforced bioepoxy composites[J]. *International Journal of Polymer Science*, 2015, 6: 1-10.
- [14] MOUDOOD A, HALL W, ÖCHSNER A, et al. Effect of moisture in flax fibres on the quality of their composites[J]. *Journal of Natural Fibers*, 2019, 16(2): 209-224.
- [15] GOUTIANOS S, PEIJS T, NYSTROM B, et al. Development of flax fibre based textile reinforcements for composite applications[J]. *Applied Composite Materials*, 2006, 13(4): 199-215.
- [16] ASTM. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials: D3039M—17[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2017.
- [17] ASTM. Standard test method for moisture absorption properties and equilibrium conditioning of polymer matrix composite materials: D5229M—12[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2012.
- [18] 边佳燕, 刘钧, 鲍铮. 聚合物基复合材料吸湿研究进展[J]. *材料导报*, 2016, 30(28): 340-344.
- BIAN Jiayan, LIU Jun, BAO Zheng. Research progress in moisture absorption of polymer matrix composites[J]. *Materials Reports*, 2016, 30(28): 340-344(in Chinese).
- [19] SHEN C H, SPRINGER G S. Moisture absorption and desorption of composite materials[J]. *Journal of Composite Materials*, 1976, 10(1): 2-20.
- [20] MASSETEAU B, MICHAUD F, IRLE M, et al. An evaluation of the effects of moisture content on the modulus of elasticity of a unidirectional flax fiber composite[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014, 60: 32-37.
- [21] STAMBOULIS A, BAILLIE C A, PEIJS T. Effects of environmental conditions on mechanical and physical properties of flax fibers[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2001, 32(8): 1105-1115.
- [22] BAILEY C, LE DUGOU A, BOURMAUD A, et al. Influence of drying on the mechanical behaviour of flax fibres and their unidirectional composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, 43(8): 1226-1233.
- [23] DEBORAH D L. Carbon composites (Second edition)[M]. Netherlands: Elsevier, 2017: 88-160.
- [24] LEFEUVRE A, BOURMAUD A, MORVAN C, et al. Elementary flax fibre tensile properties: Correlation between stress-strain behaviour and fibre composition[J]. *Industrial Crops and Products*, 2014, 52: 762-769.
- [25] LEFEUVRE A, LE DUGOU A, BOURMAUD A, et al. Analysis of the role of the main constitutive polysaccharides in the flax fibre mechanical behaviour[J]. *Industrial Crops and Products*, 2015, 76: 1039-1048.
- [26] BAILEY C. Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2002, 33(7): 939-948.
- [27] PUCCI M F, LIOTIER P J, SEVENO D, et al. Wetting and swelling property modifications of elementary flax fibres and their effects on the liquid composite molding process[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, 97: 31-40.