

引用格式: 杨浩邈. 亚麻植物纤维与树脂动态润湿及其表面浸润粗糙水平分析[J]. 中国材料进展, 2024, 43(7): 666-672.

YANG H M. Analysis of Dynamic Wetting of Flax Plant Fiber/Resin and the Roughness Level of Fiber by Surface Wetting[J]. Materials China, 2024, 43(7): 666-672.

亚麻植物纤维与树脂动态润湿 及其表面浸润粗糙水平分析

杨浩邈^{1,2}

(1. 贵州民族大学机电工程学院, 贵州 贵阳 550025)

(2. 重庆文理学院机电工程学院, 重庆 402160)

摘要: 分析了作为复合材料增强体使用的天然亚麻植物纤维的动态润湿过程, 观测了植物纤维及其预浸渍纤维纱线表面形貌, 探讨植物纤维与不同液体体系(去离子水, 环氧树脂)的润湿特征, 并与使用广泛的玻璃纤维动态润湿过程进行比较。基于 Wilhelmy 法, 通过在极低速率下建立纤维与树脂动态润湿系统及浸润力学模型, 结合流场函数和表面轮廓中线平均算术偏差粗糙度理论方法, 运用方差分析技术提出了定量判断增强体纤维表面固有粗糙水平的新方法。分析探讨了亚麻植物纤维和玻璃纤维与浸润液体的粘附功。结果表明: 作为复合材料增强体, 亚麻植物纤维表面粗糙因子更大, 亚麻植物纤维动态润湿过程润湿力、粘附功较小, 同等条件下, 相比玻璃纤维具有较差的润湿性能。

关键词: 复合材料; 亚麻纤维; 动态润湿; 粗糙水平; 粘附功

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2024)07-0666-07

Analysis of Dynamic Wetting of Flax Plant Fiber/Resin and the Roughness Level of Fiber by Surface Wetting

YANG Haomiao^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronics Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China)

(2. College of Mechanical and Electronics Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences,
Chongqing 402160, China)

Abstract: In this paper, the dynamic wetting process of natural flax plant fiber used as composite reinforcement is analyzed, the surface morphology of plant fiber and its preimpregnated fiber yarn is observed. The wetting characteristics of plant fiber with different liquid systems (DI water, epoxy resin) are discussed, and compared with the dynamic wetting process of widely used glass fiber. Based on Wilhelmy method, a new quantitative judgment method to identify the inherent roughness level of fiber reinforcement surface is proposed by establishing the dynamic wetting system and wetting mechanic model of fiber and resin at very low rate, combined with the stream function and the roughness theory of arithmetical mean deviation of the surface profile midline, and using the variance analysis technology. The adhesion work of flax plant fiber and glass fiber with wetting liquids was analyzed and discussed. The results show that, as composite reinforcements, the surface roughness factor of flax plant fiber is bigger and the wetting force/adhesion work of flax plant fiber in the dynamic wetting process are smaller. At the same condition, flax plant fiber has poor wetting performance compared with glass fiber.

Key words: composite; flax fiber; dynamic wetting; roughness level; adhesion work

收稿日期: 2022-06-22 修回日期: 2022-10-17

基金项目: 重庆市教育委员会科学技术研究计划 2018 科技
项目 (KJQN201801338)

作者简介: 杨浩邈, 男, 1983 年生, 博士,

Email: yyhhmm1@outlook.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202206014

1 前言

麻纤维可循环再生, 其复合材料具有质轻、环保、隔热、降噪、耐冲击等特点, 是轻量化材料研究和工程应用的重点之一^[1-4]。相对于更难以回收的玻璃纤维复合材料, 可再生的亚麻植物纤维具有更低的密度和碳排放, 亚麻、苧麻、剑麻、大麻等植物纤维比模量甚至超

过无碱玻璃纤维^[2, 5], 可制备出具有高比强度和比刚度的生物基复合材料。在包装行业、家具行业、汽车工业、一次性辅料、运动器材、建筑和绝缘材料等领域应用广泛。尤其从环境友好的角度来看, 植物纤维具有替代玻璃纤维/碳纤维的潜力^[6, 7]。而采用麻纤维与液态树脂复合成型, 麻/树脂界面动态润湿、浸润缺陷、分散不均等问题引起的复合材料力学性能差、复杂形状和结构承载部件成型难等技术难题, 限制了麻纤维复合材料的应用。同时, 植物纤维及其复合材料具有复杂的粘弹塑性行为^[8, 9]。研究显示, 通过改变植物纤维的表面能、浸润性能, 可提高植物纤维复合材料的弯曲和拉伸模量^[10]。对麻纤维进行表面改性处理, 增大捻度可提高冲击强度^[11]。在动态润湿过程中, Guan 等^[12]认为纤维表面的物理粗糙程度不同和化学成分不均匀可影响三相接触线移动速率和毛细力, 同时表面形貌对静态润湿性能也有显著的影响^[13, 14]。目前, 纤维表面粗糙水平的定量衡量方式鲜有报道, 本文率先提出基于 Wilhelmy 法, 通过在极低速率下建立纤维与树脂动态润湿系统及浸润力学模型定量衡量纤维表面粗糙程度的方法, 对分析动植物纤维或其他纤维等表面特性具有积极意义。主要通过接触角和粘附功来评价复合材料增强体与浸润液体之间的润湿性能和粘附作用。目前对作为复合材料增强体使用的单一柔软的长亚麻植物纤维的动态润湿性能分析较少, 难度较大。针对纤维/浸润液体的动态润湿体系, 本文对比分析了相关润湿回线及不同工艺处理的亚麻植物纤维和玻璃纤维增强体与环氧树脂和去离子水的润湿性和粘附作用, 研究结果对控制相关动植物纤维/基体润湿粘附过程、优化界面性能具有指导意义。

2 实验

2.1 实验材料

亚麻茎经沤麻、打麻、栉梳、成条后通过水雾激活果胶制成单向亚麻植物长纤维——亚麻纤维 (UD flax, UD), 亦称亚麻单纤维; 通过预浸渍环氧树脂制成加捻纱线——亚麻纱线 (Yarn)。无碱玻璃纤维 E-玻璃是应用最广泛的一种玻璃纤维 (glass fiber, GF)。扫描电镜 (SEM) 用来观测纤维形貌。浸润液体包括去离子水 (DI water) 和 760E 环氧树脂。清洗液采用丙酮。

2.2 测试方法

液体在固体表面的接触角有多种测量方法^[15-17], 本文采用 Wilhelmy 法研究极低速率下固液气三相接触与动态润湿。Wilhelmy 法计算原理为:

$$F_s = L \cos \theta_D \sigma_{LV} \quad (1)$$

$$\theta_D = \arccos (F_s / (L \cdot \sigma_{LV})) \quad (2)$$

式中, F_s 为润湿力, $L = 2\pi R$ 为三相接触线长度、 R 为纤维半径, θ_D 为动态接触角, σ_{LV} 为气液界面张力。

本文采用的亚麻植物纤维/玻璃纤维与浸润液体的动态润湿分析方式如图 1 所示。图 1b 和 1c 示意出了纤维浸入和离开液体的情况 & 纤维受力情况。纤维匀速前进 (后退) 时, 天平拉力 F 、粘滞力 $F_v = C\eta hU$ 、浮力 $F_b = \rho gSh$ 和 F_s 受力平衡, 有如下关系:

$$F = F_s + F_v - F_b \quad (3)$$

$$F = L \cos \theta_D \sigma_{LV} + C\eta hU - \rho gSh \quad (4)$$

将式 (4) 转换成 $y = kx + b$ 直线形式 ($y = F$, $x = h$):

$$k = (C\eta U - \rho gS) \quad (5)$$

$$b = L \cos \theta_D \sigma_{LV} = F_s \quad (6)$$

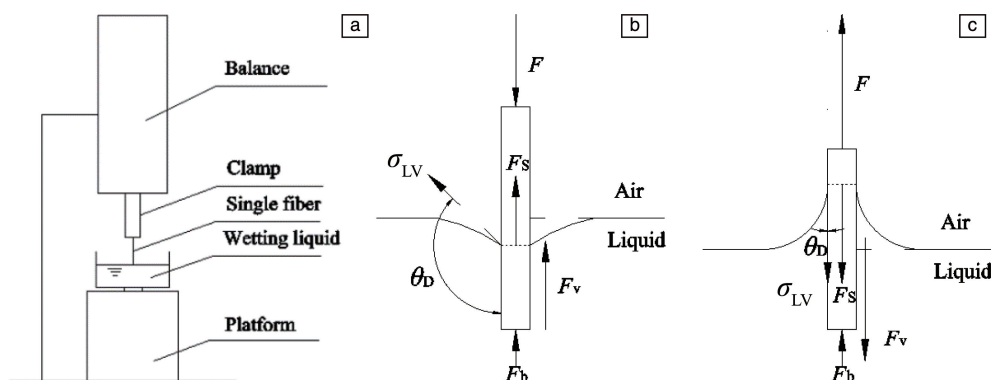


图 1 Wilhelmy 法单纤维动态润湿测量系统示意图: (a) 润湿测试系统单元, (b) 纤维浸入液体受力情况, (c) 纤维离开液体受力情况

Fig. 1 Sketch of the dynamic wettability measuring system by Wilhelmy method for single fiber: (a) test system unit for wetting, (b) immerse fiber in liquid and schematic drawing of the force conditions of advancing wetting (fiber pushed downward), (c) immerse fiber in liquid and schematic drawing of the force conditions of receding wetting (fiber pulled upward)

其中, U 为纤维相对于液体的运动速度, η 为液体粘滞系数, C 为形状作用力系数, ρ 为液体密度, S 为纤维横截面积, h 为纤维浸入液体深度, g 为重力加速度。本文采用 Wilhelmy 法在 0.03 mm/s 的速率下研究固液气三相接触与动态润湿。实际测量时, 借助高精度天平, 重力清零, 通过测量在恒定三相接触线移动速率下不同 h 处对应的 F 值分析浸润特性。

3 结果与讨论

3.1 植物纤维润湿回线分析

亚麻单纤维、亚麻纱线纤维和玻璃纤维与相应液体的浸润至少做 3 次以上的实验。动态润湿过程涉及纤维浸入液体和离开液体过程, 即前进润湿和后退润湿。根据润湿力的正负, 浸润液体润湿纤维时可表现出不同的特征: 可润湿时润湿力为正值, 不可润湿时润湿力为负

值。本文支撑材料中, 图 S1 中 UD-DI water1 代表亚麻单纤维与去离子水的第一次实验, UD-760E2 代表亚麻单纤维与 760E 环氧树脂的第二次实验, 以此类推, 支撑材料中图 S2 亚麻纱线纤维和图 S3 玻璃纤维同理。总体上, 纤维与液体浸润过程中都有不同程度的受力变化, 3 种类型纤维的润湿回线在受力数量级上表现有所不同, 但也有相似的地方。首先, 纤维浸入液体时涉及到纤维穿透液膜, 产生的瞬时作用力急速增大; 之后随着线度增加, 纤维被液体浸润。动态润湿由前进接触转为后退接触时, 作用力反向增加, 且随着线度减少粘滞力会减小。3 种类型纤维中 Yarn 受力变化最大, GF 最小。为进一步具体描述和分析 UD、Yarn 和 GF 在动态润湿过程的特点, 图 2 分别给出了 UD、Yarn 和 GF 与去离子水和 760E 环氧树脂的润湿回线。

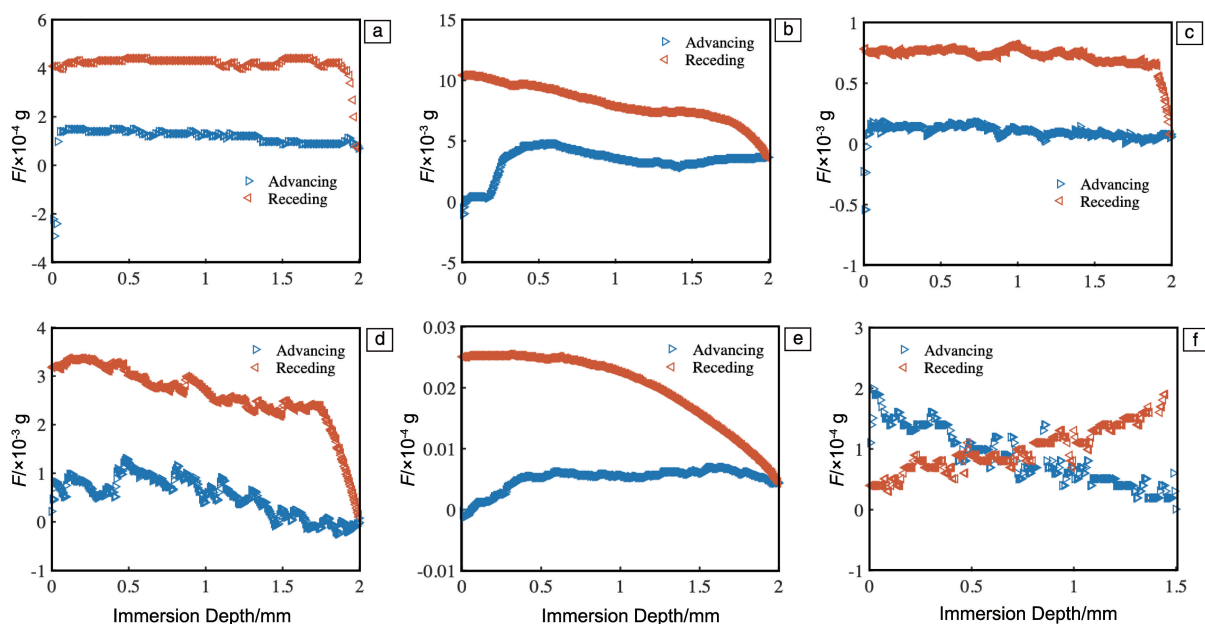


图 2 纤维-浸润液体的润湿回线: (a) UD-760E 环氧树脂, (b) Yarn-760E 环氧树脂, (c) GF-760E 环氧树脂, (d) UD-去离子水, (e) Yarn-去离子水, (f) GF-去离子水

Fig. 2 Wetting loop lines of fiber-liquid system: (a) UD-760E epoxy, (b) Yarn-760E epoxy, (c) GF-760E epoxy, (d) UD-DI water, (e) Yarn-DI water, (f) GF-DI water

如图 2b 所示, 纤维与树脂润湿时, Yarn 受力波动较大。UD 和 GF 的润湿回线表现更为近似(图 2a 和 2c)。前进润湿过程中, 随着浸入树脂的深度增加, 纤维受力相对平稳或有减小趋势, 前进润湿回线显示斜率为负值倾向, 说明此时润湿力可大于粘滞力。在后退润湿过程中, UD 和 GF 所受综合作用力窄幅波动(图 2a 和 2c), 而 Yarn 纤维综合受力增加较多(图 2b), 这是因为相比 UD 和 GF, Yarn 纤维离开树脂液面时, 粘性的树脂更多

地粘附在 Yarn 表面, 虽然固液气三相接触中, 固液相之间的粘滞力在减少, 但整体作用力仍呈增大趋势。

纤维与去离子水润湿时, UD 和 GF 在前进过程综合作用力小于 Yarn, 且表现出相比于其与树脂润湿时更明显的减小趋势(图 2d 和 2f)。在后退过程接触时, 亚麻植物纤维(UD 和 Yarn)受力逐渐增大, 但 GF 表现出综合作用力减小的特征(图 2f), 这是因为尽管植物纤维表面具有果胶或预浸渍树脂, 但亚麻纤维主要由纤维素、半纤

纤维素构成,具有亲水性,溶胀倾向大,且内部具有的中空结构^[18, 19]易被小分子量的去离子水浸润,故而亚麻植物纤维综合受力较大。

总体上,无论纤维与树脂还是去离子水动态润湿,前进润湿过程中,受力是纤维所受粘滞力、浮力以及润湿力综合作用的结果。后退过程中亚麻植物纤维有更明显的受力增加,这是因为植物纤维离开浸润液体过程中粘附了更多树脂或去离子水的缘故。考虑到要避免亚麻单纤维亲水性和纤维后退过程粘附树脂在分析表面特性时的影响,可将图2中纤维与树脂浸润前进润湿数据应用于纤维表面粗糙因子水平的确定。

3.2 纤维表面动力学粗糙因子的确定

在纤维/树脂动态润湿系统的前进润湿和后退润湿过程中,树脂粘度对润湿过程受力影响很大^[20],尤其是粘度高的环氧树脂。纤维所受浮力很微小,图3所示为纤维在粘性液体中形成的粘性边界层,粘滞力变化对纤维综合受力的波动有很大影响。故有:

$$F \simeq L \cos \theta_D \sigma_{LV} + F_v \quad (7)$$

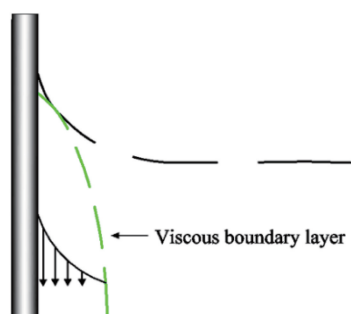


图3 粘性边界层示意图

Fig. 3 Sketch of the formed viscous boundary

图4示意出了纤维浸入液体时的极坐标系,其中径向的速度为 u_r , θ 方向速度用 u_θ 表示。无论液体是无旋还是涡旋运动,根据流体力学有:

$$u_r = U, u_\theta = 0, \theta = -\alpha = -\frac{\pi}{2} \quad (8)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{\eta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} = 0, \theta = 0 \quad (9)$$

$$u_\theta = 0, \theta = 0 \quad (10)$$

$$\psi = Ur(\sin \alpha \cdot \cos \alpha - \alpha)^{-1} [\sin \alpha (\theta \cos \theta) - (\alpha \cos \alpha) \sin \theta] \quad (11)$$

其中, $\tau_{r\theta}$ 和 ψ 分别为极坐标系中的剪切应力和流函数。基于流函数,半径方向的速度为:

$$u_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \quad (12)$$

固液界面的剪切应力为:

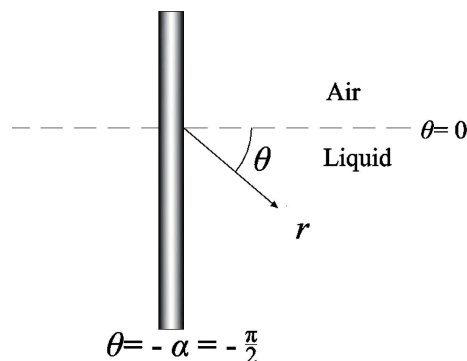


图4 纤维浸入液体时的极坐标系

Fig. 4 Polar coordinate system for the fiber immersion into liquid

$$(\tau_{r\theta})_{\alpha=\frac{\pi}{2}, \theta=-\frac{\pi}{2}} = \left[\frac{\eta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right]_{\alpha=\frac{\pi}{2}, \theta=-\frac{\pi}{2}} = -\frac{4\eta U}{r\pi} \quad (13)$$

粘性液体的切应力作用于固液界面上的粘滞力为:

$$F_v = 2\pi R \int_{\chi}^{\epsilon} (\tau_{r\theta})_{\alpha=\frac{\pi}{2}, \theta=-\frac{\pi}{2}} dr = -\frac{8\pi R\eta U}{\pi} \ln \left(\frac{\chi}{\epsilon} \right) = -8R\eta U \lambda \quad (14)$$

其中 $\lambda = \ln \left(\frac{\chi}{\epsilon} \right)$,由液体毛细长度 χ 和液体在纤维表面流动的极微小界限长度 ϵ 决定^[21]。针对纤维树脂体系动态润湿系统,在恒定速率下,理想光滑纤维表面粘滞力仅与纤维浸入液体深度成正比。纤维所受浮力十分微小,不考虑纤维所受微小浮力和直径变化导致的微小浮力的影响。在动态润湿系统中,由粘滞力公式 $F_v = C\eta hU$ 可知:

$$F_v = -8R\eta U \lambda = C\eta hU \quad (15)$$

$$\lambda = \frac{C\eta hU}{-8R\eta U}, C = \frac{k}{\eta U} \quad (16)$$

实际环境中,纤维表面粗糙因子不同将直接导致动态润湿过程中润湿回线波动不同,系统中纤维受力观测值变化体现了纤维表面粗糙水平状态。在同一深度纤维直径长度的变化导致粘滞力的变化可表示为:

$$F_v - \hat{F}_v = -8R_1 \eta U \lambda + 8R_0 \eta U \lambda \quad (17)$$

同时考虑纤维直径变化导致的润湿力波动:

$$F - \hat{F} = -8R_1 \eta U \lambda + 8R_0 \eta U \lambda + 2\pi R_1 \cos \theta_D \sigma_{LV} - 2\pi R_0 \cos \theta_D \sigma_{LV} \quad (18)$$

则:

$$R_1 = R_1 - R_0 = (F - \hat{F}) / (-8\eta U \lambda + 2\pi \cos \theta_D \sigma_{LV}) = (F - \hat{F}) R_0 / \hat{F} \quad (19)$$

式中: R_1 为实际纤维的直径; R_0 为理想光滑表面的纤维直径; R_1 为实际直径与理想光滑直径之差; F 和 F_v 为实际天平拉力和粘滞力, \hat{F} 和 \hat{F}_v 为纤维理想光滑表面理论拉力和粘滞力,且只取决于纤维浸入液体深度。根据粗糙度轮廓平均算术偏差理论,在一定长度 l 范围内,轮廓

上各点至中线距离绝对值的平均算术偏差用式(20)计算:

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y| \, dx \text{ 或 } Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \tag{20}$$

式中: Ra 代表材料表面粗糙度程度; l 为截面轮廓计算面积长度。

在动态润湿过程中, 粘滞力的波动与纤维表面粗糙状态因子、纤维半径、粘度和速度等相关。复合材料增强体纤维材料在浸入液体 h 深度的范围内, 根据粗糙度轮廓平均算术偏差计算式有:

$$R_{af} = \frac{1}{h} \int_0^h |(F - \hat{F})R_0/\hat{F}| \, dx \tag{21}$$

式中: R_{af} 代表纤维表面粗糙状态因子。

对于 UD, Yarn 和 GF 的表面粗糙因子水平, 在 95% 置信水平条件下即显著性水平 0.05 时, 3 种纤维总体粗糙因子水平分别如表 1 和图 5 所示。

表 1 纤维表面粗糙因子水平

Table 1 Roughness level of the fibers(mm)

| UD R_{af} | Yarn R_{af} | GF R_{af} |
|-----------------|------------------|-----------------------|
| 0.003±0.000 056 | 0.0216±0.000 085 | 0.000 982±0.0 000 186 |

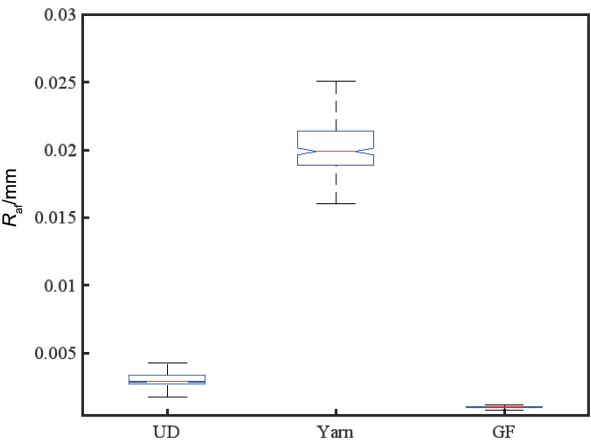


图 5 亚麻纤维、亚麻纱线和玻璃纤维粗糙因子水平盒图

Fig. 5 Box plot for roughness level of UD, Yarn and GF

对 UD、Yarn 和 GF 表面粗糙因子水平进行方差分析, 可见 3 种纤维表面粗糙程度具有明显不同的特征。由图 5 可知, Yarn 整体上四分位距 (interquartile range, IQR) 且晶须最大, 表面粗糙程度离散最大, UD 次之, GF 最小, 3 种纤维表面粗糙因子水平分布偏向程度较为均匀, 稍有向低分位数集中的趋势。由图 6 可知, 3 种纤维表面粗糙因子水平显著不同, 程度大小依次为 Yarn、UD 和 GF。根据 Wenzel 理论^[22], 在热力学稳定的状态下, 纤维可被润湿时, 粗糙因子的存在有利于浸润。

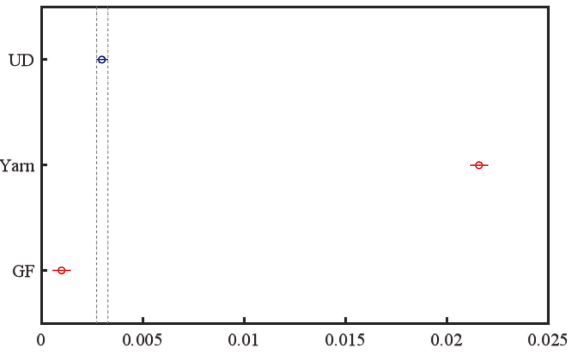


图 6 3 种纤维的粗糙因子水平均值多重比较

Fig. 6 Multiple comparison for roughness level means of three kinds of fibers

3.3 亚麻植物纤维和玻璃纤维形貌分析

3 种增强体纤维的 SEM 照片如图 7 所示。纤维表面粗糙因子水平状态与多种因素有关。图 7a 的 Yarn 复合材料增强体在制备过程中预浸渍树脂, 一方面可以阻断植物纤维与外界的水分交换, 同时浸入纱线内部有利于后续复合材料界面成型, 另一方面难以保证在纱线表面形成十分均匀的涂层, 影响了纤维表面粗糙状态。加捻的纱线本身也造成了纤维在其表面的不均衡。在复合材料成型制备过程中, UD 除内部具有中空结构外, 外部并非完美的圆柱形貌 (图 7b), 此外, UD 纤维增强体之间可以通过果胶连接, 这对其表面均一性构成一定影响。图 7c 显示 GF 通常经过浸润剂 (成膜剂、润湿剂、偶联剂) 等涂覆在纤维表面形成一层薄膜, 表面均一性最好,

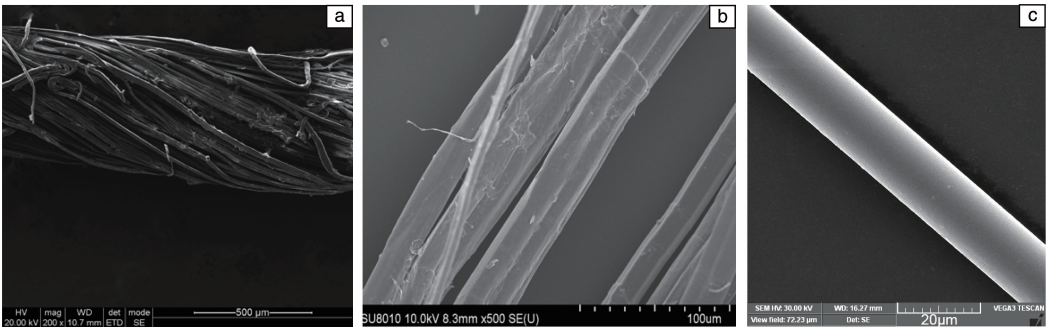


图 7 复合材料增强体纤维 SEM 照片: (a) 亚麻纱线, (b) 亚麻纤维, (c) 玻璃纤维

Fig. 7 SEM images of composite reinforcement fibers: (a) Yarn, (b) UD, (c) GF

但加工制备玻璃纤维时也可能出现润湿剂等铺展能力不同以及涂油辊上的高浓度乳液在拉丝涂油过程中不均匀地粘附在 GF 表面, 构成粗糙状态略不均一的纤维表面。

3.4 亚麻植物纤维和玻璃纤维表面动态润湿和粘附作用

纤维与浸润液体的动态接触角由式 (6) 给出。纤维与浸润液体的粘附功采用 Young-Dupré 方程计算^[23], 如式 (22):

$$W_a = \sigma_{SV} + \sigma_{LV} - \sigma_{SL} \quad (22)$$

结合 Young 方程:

$$\sigma_{SV} = \sigma_{SL} + \sigma_{LV} \cos \theta_D \quad (23)$$

得:

$$W_a = \sigma_{LV} (1 + \cos \theta_D) \quad (24)$$

其中, W_a 为粘附功, σ_{SV} 为固气界面张力, σ_{SL} 为固液界面张力。在复合材料成型中, 纤维与浸润液体的动态润湿性能越好, 粘附功越大。

表 2 和图 8 给出了亚麻植物纤维和玻璃纤维与去离子水和 760E 环氧树脂的前进动态接触角 (advancing dynamic contact angle, ADC) 和粘附功 (adhesion work), 每种纤维至少测试 3 次以上。三相接触中, 润湿现象与固液两相的相容性、物理和化学性质有关。去离子水相比

环氧树脂具有更高的表面能和极性分量^[24, 25], 这有利于纤维与它润湿 (粘附功较大)。天然亚麻纤维表面能略大于玻璃纤维^[24, 26], 亚麻植物纤维本身具有亲水性, 尤其是未经表面处理的 UD, 可直接被水浸湿。预浸渍 Yarn 与去离子水表现出可润湿性。玻璃纤维原丝具有亲水性, 经浸润剂处理后, 与 760E 树脂表现出较好的润湿性。作为复合材料增强体, 与 760E 环氧树脂浸润时, 亚麻植物纤维动态润湿变异系数 (CV 值) 较大, 表现出更大的系统不稳定性。玻璃纤维比亚麻植物纤维具有更高的粘附功和较大的润湿力 (接触角小), GF、UD 和 Yarn 的粘附功依次减弱。粗糙的纤维表面的机械互锁通常有利于增加复合材料的界面剪切强度^[27]。纤维表面粗糙水平与动态润湿过程是否具有定量的关系? 尚未有满意的模型对动态润湿做充分的解释, 从热力学角度, 表面粗糙程度的增加确有可能增大表面能, 进而减弱静态接触角, 增加粘附功; 而从动力学角度, 表面粗糙程度的增加确有可能增加滞后角和前进接触角, 减弱粘附功。定性来看, 在动态润湿过程中, 纤维的表面能、与浸润液体的前进接触角和后退接触角均与表面粗糙程度有关^[28]。

表 2 亚麻植物纤维和玻璃纤维的前进动态接触角和粘附功

Table 2 Advancing dynamic contact angle (ADC) and adhesion work of flax/glass fiber

| Reinforcement | Wetting liquid | | | | | | | |
|---------------|------------------|-----------------|------------------------------------|-------|---------|-----------------|------------------------------------|-------|
| | DI water | | | | 760E | | | |
| | ADC/(°) | CV ^a | Adhesion work/(mJ/m ²) | CV | ADC/(°) | CV ^a | Adhesion work/(mJ/m ²) | CV |
| UD | 0/Not applicable | | 147.8/Not applicable | | 70.21 | 0.040 | 63.12 | 0.034 |
| Yarn | 78.17 | 0.036 | 81.62 | 0.020 | 71.36 | 0.056 | 62.24 | 0.050 |
| GF | 69.51 | 0.042 | 99.74 | 0.036 | 64.35 | 0.019 | 68.08 | 0.012 |

Note: a means ratio of standard deviation to mean

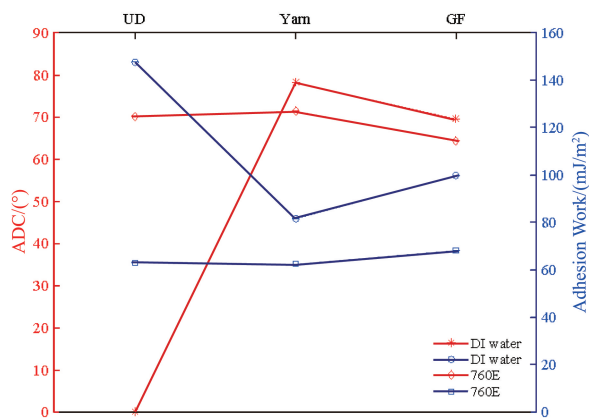


图 8 不同纤维在浸润液体中的前进动态接触角和粘附功

Fig. 8 Advancing dynamic contact angle (ADC) and adhesion work of the fibers in immersion liquids

4 结 论

植物纤维相比人工玻璃纤维拥有复杂的结构性质, 针对亚麻植物纤维的特点, 设计润湿实验并与传统玻璃纤维进行比较, 分析动态润湿特点, 同时结合力学分析提出判断纤维表面粗糙程度的方法。对纤维表面形貌进行了电镜扫描, 对不同类型的纤维与相关浸润液体的润湿性能和粘附功进行了研究。

(1) 固液气三相动态润湿接触中, 润湿回线显示, 相比玻璃纤维, 亚麻植物纤维与去离子水和环氧树脂浸润过程所受作用力较大; Yarn 受力变化较大。

(2) 通过在极低速率下建立纤维与树脂动态润湿系统及浸润力学模型, 提出了判断增强体纤维表面固有粗糙水平的新方法。相较于玻璃纤维, 植物纤维表面粗糙

因子水平更大。不同纤维粗糙因子水平由大至小依次为: Yarn、UD 和 GF。亚麻植物纤维的动态润湿行为更为复杂。

(3) 基于 Wilhelmy 法表征了纤维与浸润液体动态接触角。亚麻植物纤维(UD)可与树脂润湿,具有亲水性。作为复合材料增强体(Yarn)被树脂浸润,受表面形貌,化学性质等影响,亚麻植物纤维动态润湿具有更大的离散值,粘附功比玻璃纤维小,润湿性能比玻璃纤维差。

参考文献 References

- [1] MORE A P. Advanced Composites and Hybrid Materials[J], 2022, 5 (3): 1-20.
- [2] PICKERING K L, ARUAN EFENDY M G, LE T M. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing[J], 2016, 83: 98-112.
- [3] KOLLIA A, KONTAXIS L C, PAPANICOLAOU G C, *et al.* Journal of Applied Polymer Science[J], 2020, 137(14): 1-11.
- [4] 崔广朋. 亚麻纤维热塑性复合材料热压工艺优化[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
CUI G P. Optimization of the Hot Pressing Process for Preparing Flax Fiber/PE Thermoplastic Composite[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [5] ANWAR M, MUSTAPHA F, SULTAN M, *et al.* Frontiers in Materials[J], 2021, 8: 1-11.
- [6] FARIS M A, SAPUAN S M, ANWER T, *et al.* Synthetic Metals[J], 2015, 206: 42-54.
- [7] 钱伯章. 合成纤维[J], 2021, 50(1): 57.
QIAN B Z. Synthetic Fiber in China[J], 2021, 50(1): 57.
- [8] RICHARD F, POILÂNE C, YANG H M, *et al.* Composites Science and Technology[J], 2018, 167: 396-403.
- [9] 郝建群. 亚麻纤维复合材料的粘弹性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
HAO J Q. Study on Viscoelastic Property of Flax Fiber Reinforced Polymer Composite[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [10] CANTERO G, ARBELAIZ A, LLANOPONTE R, *et al.* Composites Science and Technology[J], 2003, 63(9): 1247-1254.
- [11] 刘雪强, 李志刚, 潘国立. 中国材料进展[J], 2024, 43(5): 448-456.
LIU X Q, LI Z G, PAN G L. Materials China[J], 2024, 43(5): 448-456.
- [12] GUAN D S, CHARLAIX E, TONG P G. Physical Review Letters[J], 2020, 124(18): 5.
- [13] 刘斌, 谢兰生, 陈明和. 表面技术[J], 2021, 51(6): 382-389.
LIU B, XIE L S, CHEN M H. Surface Technology[J], 2021, 51 (6): 382-389.
- [14] 黄学武. 超浸润聚氨酯纤维复合材料的制备及其在油水分离中的应用研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
HUANG X W. Preparation of Superwetting Polyurethane Nanofiber Composites and Their Application in Oil/Water Separation[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021.
- [15] 杨浩邈, 刘娜, 孙静, 等. 玻璃钢/复合材料[J], 2014(1): 17-23.
YANG H M, LIU N, SUN J, *et al.* Fiber Reinforced Plastics and Composites[J], 2014(1): 17-23.
- [16] 宋碧海, 宋少佩. 测量液体在固体表面的前进接触角、后退接触角以及滞留力的方法及其装置: CN105352856A[P]. 2016-02-24.
SONG B H, SONG S P. Method and Device for Measuring Advancing Contact Angle, Receding Contact Angle and Retention Force of Liquid on Solid Surface: CN105352856A[P]. 2016-02-24.
- [17] 曹炳阳, 杨敏. 一种测量极低毛细数下动态接触角的方法及系统: CN107314952A[P]. 2019-06-18.
CAO B Y, YANG M. A Method and System for Measuring Dynamic Contact Angle under Very Low Capillary Number: CN107314952A[P]. 2019-06-18.
- [18] KOKSHAROV S, ALEEVA S, LEPILOVA O. Autex Research Journal[J], 2015, 15(3): 215-225.
- [19] GIBSON L J. Journal of the Royal Society Interface[J], 2012, 9: 2749-2766.
- [20] 杨浩邈, 曾庆文, 张南夷, 等. 复合材料学报[J], 2014, 31(2): 6.
YANG H M, ZENG Q W, ZHANG N Y, *et al.* Acta Materiae Compositae Sinica[J], 2014, 31(2): 6.
- [21] KARIM A M, KAVEHPOUR H P. Colloids and Surfaces A: Physicochemical & Engineering Aspects[J], 2018, 548: 54-60.
- [22] WENZEL R N. Industrial and Engineering Chemistry[J], 1936, 28 (8): 988-994.
- [23] POCIUS A V. Adhesion and Adhesives Technology: An Introduction [M]. Munich: Carl Hanser Verlag, 2012: 104-105.
- [24] 杨浩邈, 黄鹏, 吴鹏, 等. 机械工程材料[J], 2014, 38(10): 50-53.
YANG H M, HUANG P, WU P, *et al.* Materials for Mechanical Engineering[J], 2014, 38(10): 50-53.
- [25] 曹芳维, 李敏, 王绍凯, 等. 复合材料学报[J], 2011, 28(4): 23-28.
CAO F W, LI M, WANG S K, *et al.* Acta Materiae Compositae Sinica [J], 2011, 28(4): 23-28.
- [26] 孙向玲. 天然纤维素纤维对油液介质的吸附性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2010.
SUN X L. Study on the Surface Adsorption Characteristics of Natural Cellulose Fiber to Oil[D]. Shanghai: Donghua University, 2010.
- [27] ISLAM M S. The Influence of Fibre Processing and Treatments on Hemp Fibre/Epoxy and Hemp Fibre/Pla Composites[D]. Hamilton, New Zealand: The University of Waikato, 2008.
- [28] 曹晓平. 流体在粗糙固体表面的浸润及其滞后现象[D]. 长沙: 中南大学, 2005.
CAO X P. Wetting and Hysteresis of Fluid on Rough Solid Surface [D]. Changsha: Central South University, 2005.

(编辑 吴 锐)

纤维与液体浸润支撑材料:

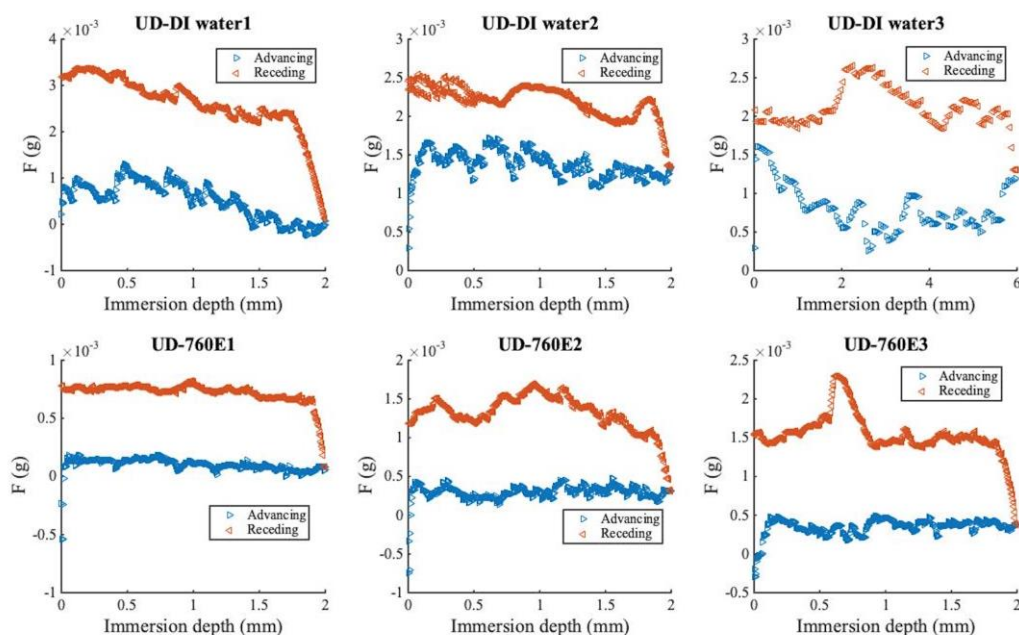


图 S1 亚麻纤维与去离子水和 760E 环氧树脂润湿回线

Fig. S1 Wetting loops of UD-DI water/760E epoxy system

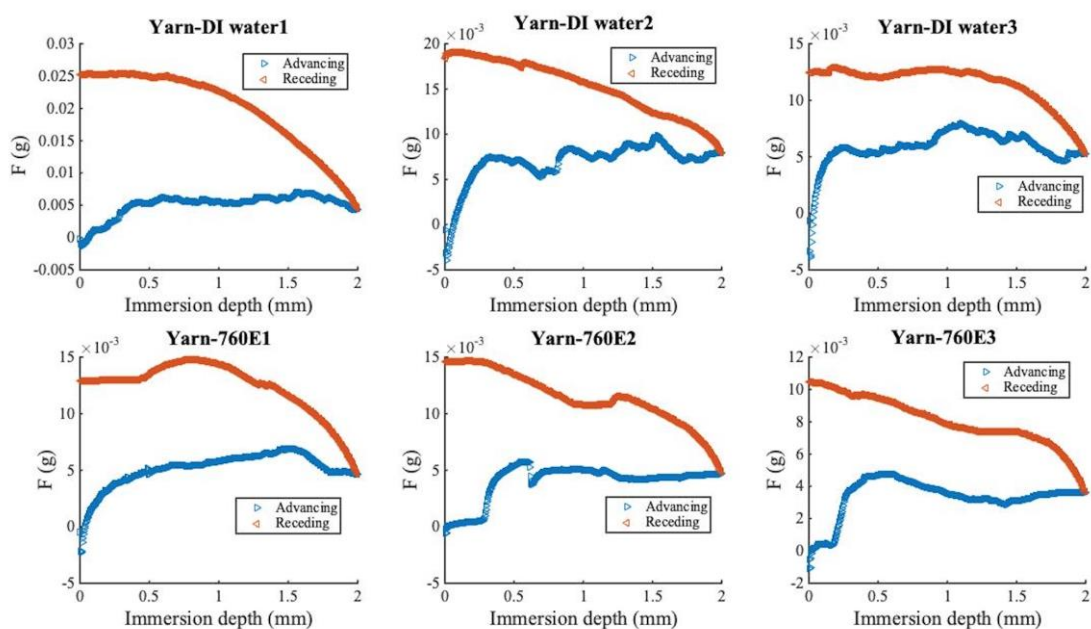


图 S2 亚麻纱线与去离子水和 760E 环氧树脂润湿回线

Fig. S2 Wetting loops of Yarn-DI water/760E epoxy system

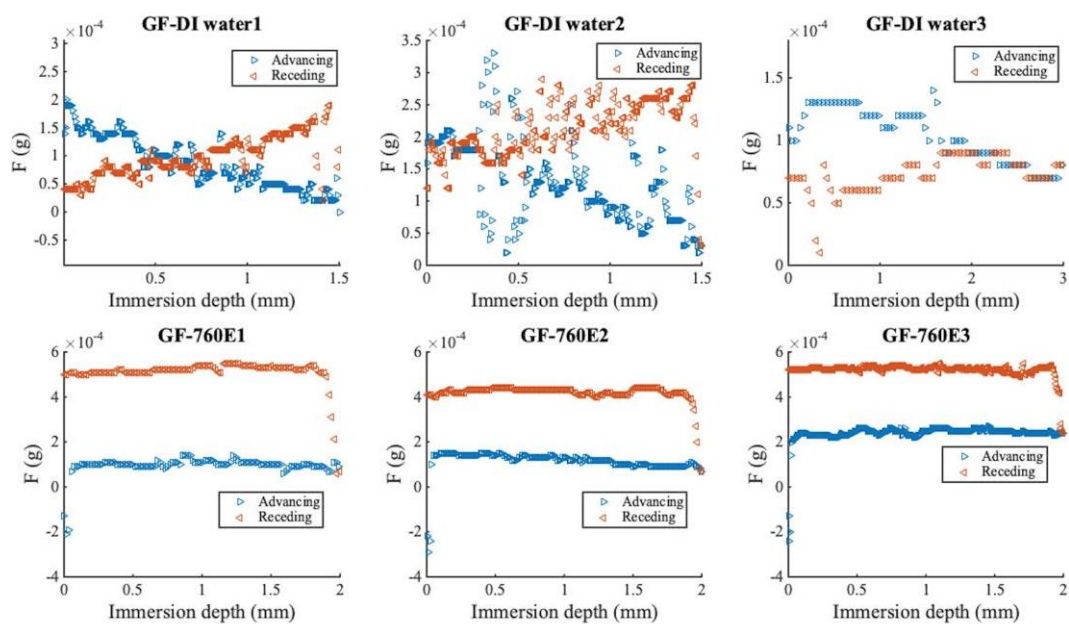


图 S3 玻璃纤维与去离子水和 760E 环氧树脂润湿回线
Fig. S3 Wetting loops of GF-DI water/760E epoxy system