

文章编号:1007-9629(2023)03-0275-08

水环境下纱线结构对苧麻/聚乳酸复合 材料老化的影响

姜 宁^{1,*}, 张 儒¹, 徐家川¹, 李 迪¹, 陈朝中²

(1. 山东理工大学 交通与车辆工程学院, 山东 淄博 255000;

2. 中车工业研究院有限公司, 北京 100160)

摘要:研究了单股苧麻纤维(R1)和3股苧麻纤维(R3)这2种纱线结构对苧麻/聚乳酸(PLA)复合材料吸水老化的影响.结果表明:R1/PLA复合材料中,苧麻纤维分布较为均匀;老化前期,R1/PLA与R3/PLA复合材料的吸水行为大致相同,老化后期,R3/PLA复合材料的吸水率高于R1/PLA复合材料;随着老化的进行,2种复合材料中的纤维与基体界面处出现微裂纹,基体结晶度先升后降,R3/PLA复合材料的老化速率较快,其力学性能在老化后期低于R1/PLA复合材料.R1/PLA复合材料由于纤维具有良好的分散性,其耐久性能较好,可应用于建筑工程中.

关键词:苧麻纱线;聚乳酸;复合材料;吸水老化;力学性能

中图分类号:TU599;TB332

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.03.008

Effect of Yarn Structure on Aging of Ramie/Poly Lactic Acid Composites in Water

JIANG Ning^{1,*}, ZHANG Ru¹, XU Jiachuan¹, LI Di¹, CHEN Chaozhong²

(1. School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. CRRC Academy Co., Ltd., Beijing 100160, China)

Abstract: Effect of yarn structure on the aging of ramie fiber reinforced poly lactic acid (PLA) composites in water was investigated. The results show that ramie fibers have better dispersibility in R1/PLA composites than R3/PLA composites. There are more water absorption of R3/PLA composites compared with R1/PLA composites after aging. For both kinds of ramie/PLA composites, the interface between fiber and matrix became worse and the crystallinity of PLA is first increased and then decreased with the prolonged aging time. The R3/PLA composites has a faster aging rate, which leads to the lower mechanical properties than R1/PLA composite in late aging stage. The R1/PLA composites has better durability due to the good dispersion of the fibers, and can be used in construction work.

Key words: ramie yarn; poly lactic acid(PLA); composite; water absorption aging; mechanical property

建筑内饰材料如内墙材料通常有吸声降噪及无毒、无刺激性的要求^[1].植物纤维/聚乳酸(PLA)复合材料结合了PLA和植物纤维的优良特点.其中PLA具有良好的生物可降解性和力学性能,易于加工成型,且无毒无味^[2-4];植物纤维相比于传统合成纤维具

有价格低、密度小、易降解等优点^[5].随着大众环保意识的增强,作为复合材料增强相的植物纤维越来越受到重视,其应用范围也不断扩大.目前,用作增强相的植物纤维主要为麻纤维、木纤维、竹纤维及棉纤维等.其中,苧麻纤维具有与玻璃纤维相近的比强

收稿日期:2022-02-25; 修订日期:2022-05-26

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2020QA040);中国博士后科学基金资助项目(2021M691853)

第一作者(通讯作者):姜 宁(1989—),女,山东青岛人,山东理工大学讲师,硕士生导师,博士. E-mail: jiangning@sdu.edu.cn

度,表现出良好的力学性能,因此本文采用苧麻纤维与PLA来制备可完全降解的绿色天然复合材料.此类复合材料具有良好的力学和吸声吸能特点,且天然绿色、无污染,目前已用于室内外装修(饰)及建筑保温材料等领域^[6].但此类材料通常要求有5~10 a甚至更长的使用寿命,因此植物纤维/PLA复合材料的耐久性研究正在积极展开^[7].

由于建筑内饰材料在使用时会受到湿度的影响,因此采用吸水老化试验来加速模拟材料的老化,可以准确预测材料的耐久性.在复合材料制备过程中,相同植物纤维含量的复合材料由于纱线结构的不同会带来纤维分布不同,从而影响复合材料内部结构、吸水性及力学性能,进而影响复合材料的老化性能.本文对比了不同纱线结构的苧麻纤维复合材料的吸水老化行为,研究了水环境下纱线结构对苧麻/PLA复合材料老化的影响,以期为此类材料在建筑中的应用提供依据.

1 试验

1.1 原材料

2种苧麻纤维:单股打捻苧麻纤维(R1)和3股打捻苧麻纤维(R3),湖南洞庭麻业有限公司产.聚乳酸(PLA,4032D)颗粒,重均分子量为150 000 Da,苏州优利材料有限公司产.

1.2 苧麻/PLA复合材料制备

苧麻/PLA复合材料的制备步骤如下:首先,将PLA颗粒与苧麻纤维在80℃下真空干燥8 h,将两者在双螺杆挤出机(SHJ-20,南京杰亚设备有限公司)中混合,其中料筒温度为160℃,主机频率为25 Hz、喂料频率为20 Hz,制得苧麻含量(质量分数)为10%的苧麻/PLA复合材料;然后,将挤出的复合材

料切粒,在80℃下真空干燥4 h;最后,将复合材料颗粒用注塑机(PL550/150,无锡海天机械有限公司)成型,制备得到苧麻/PLA复合材料试件,其中注塑机一区温度175℃、二区温度180℃、三区温度180℃、射嘴温度175℃,射嘴压力和流量分别为55 Pa和45 cm³/s.苧麻/PLA复合材料试件制备流程示意如图1所示.

1.3 吸水老化试验

将不同股数的苧麻纤维制得的苧麻/PLA复合材料试件浸泡在湿热老化箱(DK-600,上海精宏实验设备有限公司)中的去离子水中.老化箱温度设置为23℃,温控精度为0.1℃.定期取样进行测试和表征.

1.4 表征和测试

1.4.1 表征

苧麻/PLA复合材料试件尺寸为30 mm×20 mm×4 mm,将其在真空干燥箱60℃下真空干燥4 h后,用电子天平(精度为0.000 1 g)称量其初始质量(m_0)和不同老化时间(t)下的质量(m_t).每组测量5个试件并取其平均值.

苧麻/PLA复合材料的增重率(M_t ,%)为:

$$M_t = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

水的扩散规律主要分为Fickian扩散、non-Fickian扩散和介于两者之间的不定型扩散^[8].由于聚合物基复合材料对水分的吸收是由扩散控制的,因此可以通过水传输动力方程^[9]描述材料的水分扩散规律.水传输动力方程为:

$$\frac{M_t}{M_m} = kt^n \quad (2)$$

式中: M_m 饱和吸水量; k 和 n 为扩散动力参数.

式(2)中,当 n 值为0.5左右时,判定水分子在材料内部的扩散行为符合Fickian扩散定律.若遵循

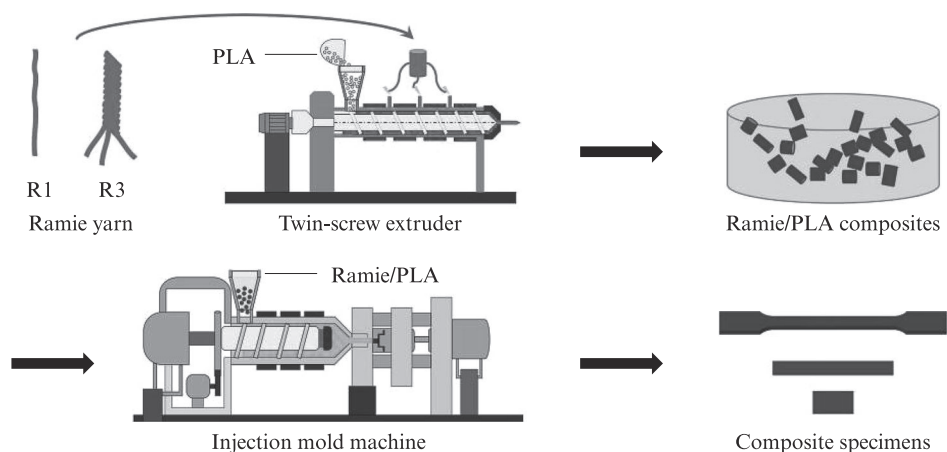


图1 苧麻/PLA复合材料试件制备流程示意图

Fig. 1 Preparation process sheet of ramie/PLA composites specimen

Fickian 扩散行为,则材料的 M_t 可以用扩散系数 (D) 和 M_m 来描述,其计算式为:

$$\frac{M_t}{M_m} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[- \left(\frac{Dt}{h^2} \right) \pi^2 (2n+1)^2 \right] \quad (3)$$

式中: h 为试件厚度.

D 的计算式为:

$$D = \pi \left(\frac{hk'}{4M_m} \right)^2 \quad (4)$$

式中: k' 为曲线 $M_t = f(\sqrt{t}/h)$ 线性部分的斜率.

在吸水初期,当 $M_t/M_m \leq 0.6$ 时,式(3)可简化为式(5).

$$\frac{M_t}{M_m} = \frac{4}{h} \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} \quad (5)$$

随着吸水率的增加,当 $M_t/M_m \geq 0.6$ 时,式(3)可表示为(6).

$$\frac{M_t}{M_m} = 1 - \exp \left[- 7.3 \left(\frac{Dt}{h^2} \right)^{0.75} \right] \quad (6)$$

1.4.2 测试

苧麻/PLA 复合材料试件的拉伸性能依照 GB/T 1040.2—2006《塑料 拉伸性能的测定 第2部分:模塑和挤塑塑料的试验条件》,在万能试验机(WHY-W,承德大华试验机有限公司)上测试,并通过引伸计测出材料断裂过程中的应变,标距为 50 mm. 测试采用位移控制方式,加载速率为 2 mm/min.

苧麻/PLA 复合材料试件的冲击性能依照 GB/T 1451—2005《纤维增强塑料筒支梁式冲击韧性试验方法》,在液晶式摆锤冲击试验机(XCJ-50,承德市

材料试验机厂)上测试,跨距为 60 mm. 冲击锤头用摆锤能量为 2 J,进行无缺口冲击.

采用美国 TA 公司 Q20 差示扫描量热仪进行差示扫描量热法(DSC)测试. 取 4~5 mg R1/PLA 或 R3/PLA 复合材料试样,以 10 °C/min 的加热速率,由 20 °C 加热到 200 °C. 根据 DSC 曲线得到 R1/PLA 或 R3/PLA 复合材料老化前后的玻璃化转变温度(T_g)和熔融温度(T_m);同时根据式(7)计算 PLA 的结晶度(χ , %).

$$\chi = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \times 100\% \quad (7)$$

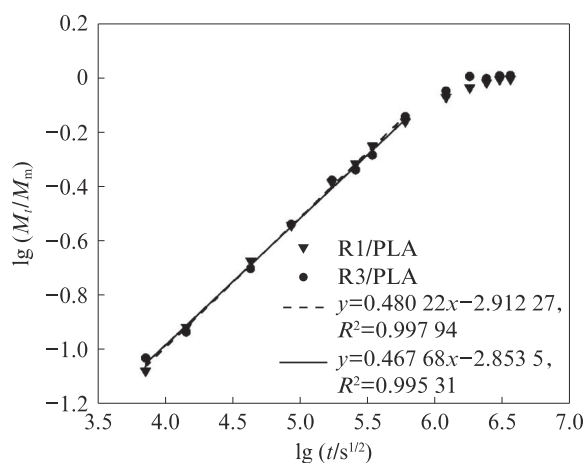
式中: ΔH_m 为未完全结晶的 PLA 的熔融焓, J/g; ΔH_m^0 为完全结晶的 PLA 的熔融焓, 为 93.1 J/g^[10].

采用 FEI 公司 Quanta 250 型扫描电子显微镜(SEM)分析冲击试件断裂冲击表面形貌. 将试件高度控制在 5 mm 左右,在镀金之后采用 SEM 进行观察.

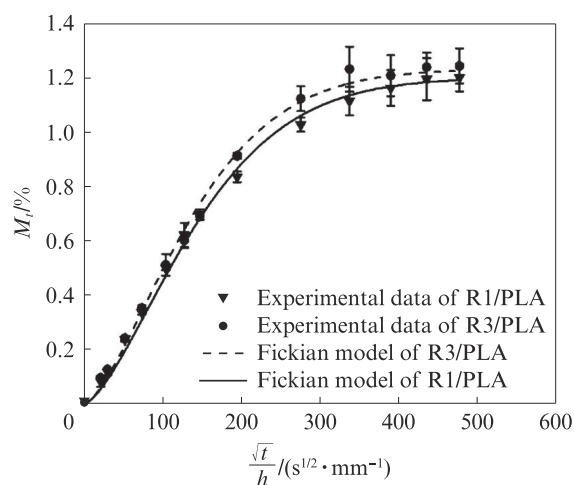
2 结果与分析

2.1 吸水行为分析

图 2 为苧麻/PLA 复合材料老化前期吸水数据对数拟合及其与 Fickian 模型的对比. 表 1 为由图 2(a)拟合得到的苧麻/PLA 复合材料吸水动力学参数. 由表 1 可见: R1/PLA 和 R3/PLA 复合材料的扩散动力学参数 n 值均在 0.5 附近,说明苧麻/PLA 复合材料在老化前期的吸水行为可以通过 Fickian 吸水模型进行描述. 图 2(b)显示苧麻/PLA 复合材料老化前期的吸水近似满足 Fickian 模型^[11-12],说明该复合材料在此过程中未发生不可逆的物理或化学反应,水分只是单纯地由低浓度向高浓度扩散^[13].



(a) Diffusion curve fitting



(b) Experimental data vs. Fickian model

图 2 苧麻/PLA 复合材料老化前期吸水数据对数拟合及其与 Fickian 模型的对比

Fig. 2 Diffusion curve fitting and experimental data on water absorption of ramie/PLA composites compared with Fickian model

表1 苎麻/PLA复合材料吸水动力学参数
Table 1 Water absorption kinetic parameters of ramie/PLA composites

Type	n	k	R^2
R1/PLA	0.480 22	0.001 224	0.997 94
R3/PLA	0.467 68	0.001 400	0.995 31

由图2(b)可见:老化前4 d, R1/PLA与R3/PLA复合材料的增重率大致相同,此阶段水分沿着纤维、基体和界面的扩散较为均匀;老化7 d后, R1/PLA与R3/PLA复合材料的吸水量逐渐增加直至饱和,其中R3/PLA复合材料的增重率大于R1/PLA复合材料。这是因为3股纱线打捻的纤维束会沿着纤维的整体长度方向产生摩擦力,纤维与纤维之间相互抱合、缠结而不易松散或滑脱,使得复合材料中的3股打捻纱线不易于均匀分布在PLA基体内部,从而导致试件中出现空隙和微裂纹等缺陷。这些缺陷引起复合材料吸水量增加,较高的吸水量又使得纤维与基体间的界面变得更差,进一步加剧复合材料对水分的吸收^[14]。

2.2 SEM分析

为观察苎麻/PLA复合材料老化后内部结构的变化,对试件冲击断面进行SEM测试。图3为不同老化时间下R1/PLA和R3/PLA复合材料冲击断面的SEM照片。由图3可见:R1/PLA复合材料中苎麻纤维在复合材料内部分布比较均匀,基本未出现团聚现象,苎麻纤维呈现单根分布状态;R3/PLA复合材料中苎麻纤维出现明显的团聚现象。这是由于单股纤维较3股纤维细且没有多股打捻,在复合材料的加工过程中单股纤维更易于分散。由图3还可见:老化前,2种苎麻/PLA复合材料的界面良好,基体表面较为光滑;老化21 d后,2种苎麻/PLA复合材料的界面开始变差,基体有纤维拔出后留下的空洞;老化105 d时,2种苎麻/PLA复合材料的界面变得更差,基体出现了明显的裂纹和孔隙;R3/PLA复合材料由于纤维分布不均匀带来的吸水率增加导致其界面差于R1/PLA复合材料,同时R3/PLA复合材料基体中的孔隙和裂纹也多于R1/PLA复合材料。

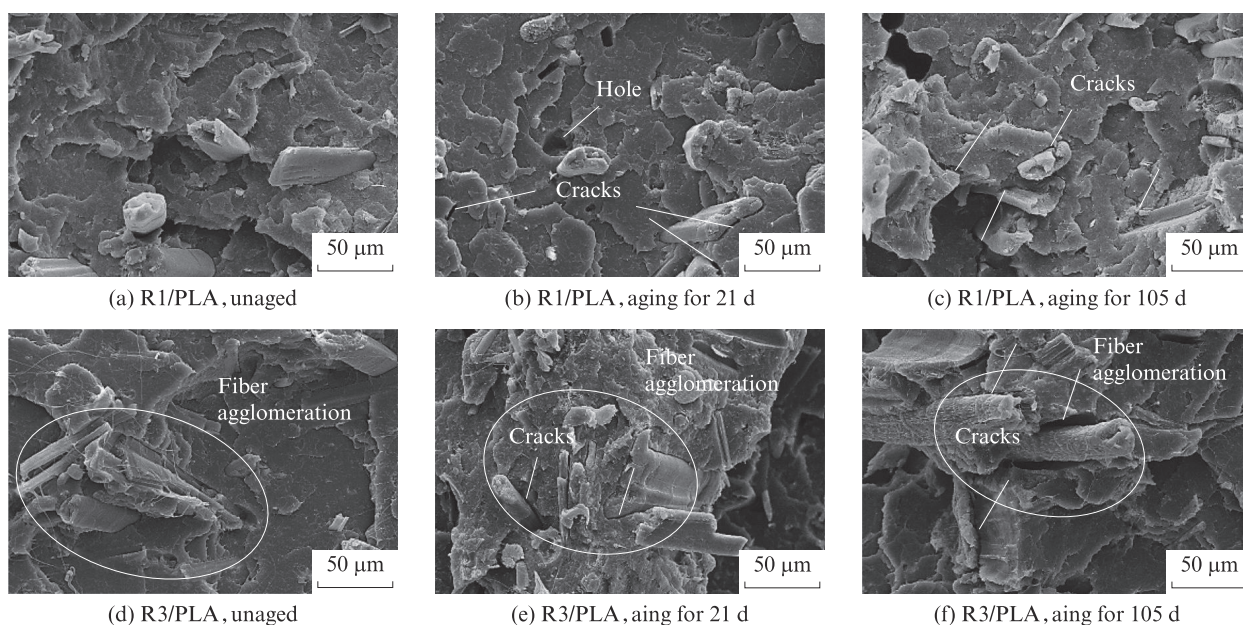


图3 不同老化时间下2种苎麻/PLA复合材料冲击断面的SEM照片

Fig. 3 SEM images of impact section of two kinds of ramie/PLA composites at different aging time

2.3 DSC分析

为研究苎麻/PLA复合材料老化之后的热力学性能,进行了DSC测试。图4为2种苎麻/PLA复合材料的DSC曲线。由图4可见:2种苎麻/PLA复合材料老化21 d时,其DSC曲线未发生明显变化,说明复合材料在前期未发生水解反应;老化105 d时,复合材料的 T_m 出现下降,这是因为老化后期复合材料中的PLA基体发生水解,结晶度下降所致。

为更加清晰地说明苎麻股数对苎麻/PLA复合

材料老化的影响,图4中还列出了R1/PLA和R3/PLA复合材料的 T_g 、 T_m 和 χ 。由图4可见:(1)R1/PLA和R3/PLA复合材料老化21 d后,其 T_g 均有所下降,且后者降幅大于前者。这是因为在老化初期,水分子作为增塑剂进入复合材料内部,促进了材料内部分子的运动,使得复合材料的 T_g 下降;另外由于R3/PLA复合材料吸水量较高,其 T_g 降幅大于R1/PLA复合材料。(2)R1/PLA和R3/PLA复合材料老化105 d时,其 T_g 有所升高,这是因为在老化后期,PLA

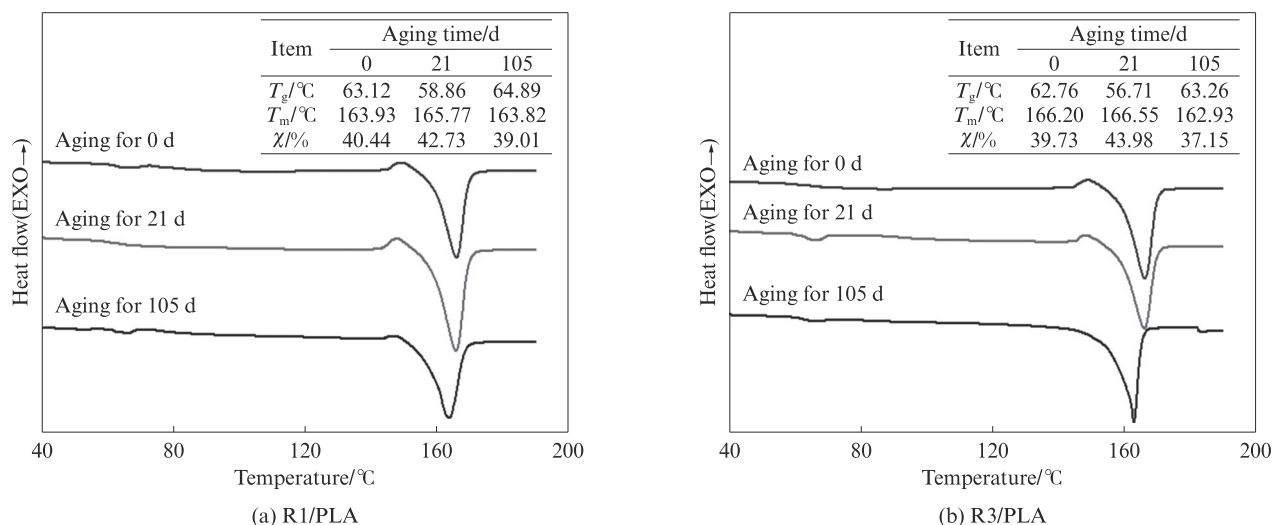


图4 不同老化时间下2种苧麻/PLA复合材料的DSC曲线

Fig. 4 DSC curves of two kinds of ramie/PLA composites at different aging time

无定型区发生水解,结晶区相对增加,材料变脆,韧性变差^[15]。(3)R1/PLA和R3/PLA复合材料老化21 d后,其 T_m 变化并不明显;但老化105 d后,2种复合材料的 T_m 均有所下降,且R3/PLA复合材料的 T_m 降幅大于R1/PLA复合材料。这是因为在老化后期R3/PLA复合材料具有较多的吸水量,使得其PLA基体水解程度大于R1/PLA复合材料的PLA基体。(4)老化21 d时,R1/PLA和R3/PLA复合材料的结晶度均有上升,且R3/PLA复合材料的结晶度升幅大于R1/PLA复合材料。这是因为较多的水分子在R3/PLA复合材料中作为增塑剂,在温度作用下,促进了PLA基体分子链重排,使得一些无定型区转变为结晶区,PLA结晶度变高,与Jiang等^[16]研究结果一致。PLA的结晶度提高有2个原因:一方面,水的塑化作用促进了非晶态结构的再结晶,增加了结晶度;另一方面,PLA无定形区的水解也导致结晶度增加。(5)老化105 d时,2种复合材料的结晶度均有下降,但R3/PLA的结晶度降幅高于R1/PLA,这是因为在老化后期R3/PLA中较多的水分开始与PLA基体发生水解,部分结晶区参与了水解。

2.4 力学性能分析

2.4.1 拉伸强度

图5为不同老化时间下2种苧麻/PLA复合材料的拉伸强度。由图5可见,2种复合材料老化后拉伸强度均显著下降。复合材料前期拉伸性能的下降是其老化后界面变差所致(图3)。复合材料的拉伸强度一部分取决于纤维与基体之间的界面,界面结合力越强,拉伸强度就越大。前期苧麻/PLA复合材料吸水之后,由于苧麻纤维含有大量亲水羟基,以及筛管、导管等通道,其吸水性能远大于PLA基体,进而使得

纤维吸水后的溶胀程度大于PLA基体,该溶胀程度上的差异使复合材料产生内应力,最终导致纤维与基体之间的界面变差^[17];后期由于水的作用,PLA发生水解,基体开始产生裂纹(图3),导致复合材料力学性能进一步下降。

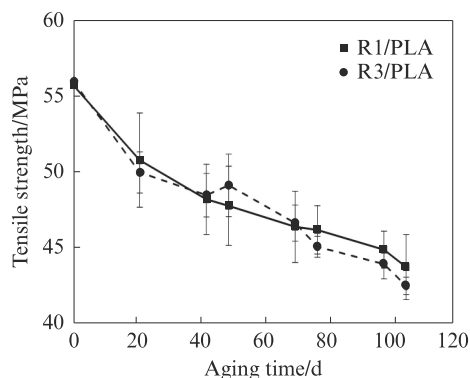


图5 不同老化时间下2种苧麻/PLA复合材料的拉伸强度

Fig. 5 Tensile strength of two kinds of ramie/PLA composites at different aging time

由图5还可见:老化0~20 d时,R1/PLA复合材料的拉伸强度大于R3/PLA复合材料,这是因为R3/PLA复合材料较高的吸水量使得纤维与基体的界面差于R1/PLA复合材料;老化20~70 d时,R3/PLA复合材料的拉伸强度大于R1/PLA复合材料,这是因为较多的水分进入R3/PLA复合材料后,相当于增塑剂的水分促进了PLA分子的运动,在温度和水分子的作用下,部分PLA的无定型区转变为结晶区,使得R3/PLA复合材料的结晶度要高于R1/PLA复合材料(图4);老化77 d后,相比于R1/PLA复合材料,由于R3/PLA复合材料较高的吸水,其界面变得更差,PLA水解后基体产生较多的裂纹,因

此R3/PLA复合材料的拉伸强度在老化后期低于R1/PLA.

图6为不同老化时间下2种苧麻/PLA复合材料的应力-应变曲线.由图6可见:R1/PLA和R3/PLA复合材料的杨氏模量变化情况在老化过程中基本一

致,均先下降后上升;老化77 d时,由于水分的增塑作用,2种复合材料的杨氏模量降低,且断裂伸长率增加;老化105 d时,PLA发生水解反应引起分子链断裂,大分子聚乳酸生成小分子乳酸,导致2种复合材料断裂伸长率下降.

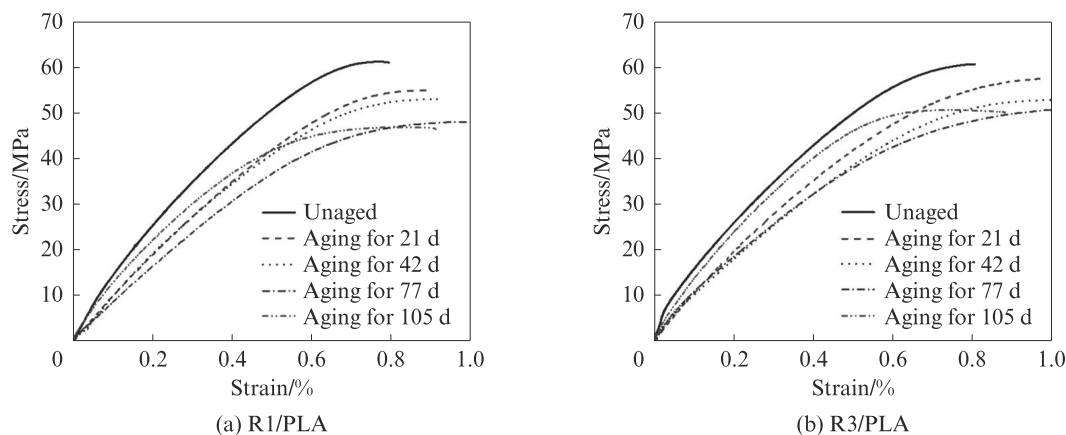


图6 不同老化时间下2种苧麻/PLA复合材料的应力-应变曲线
Fig. 6 Stress-strain curves of two kinds of ramie/PLA composites at different aging time

2.4.2 冲击强度

图7为不同老化时间下2种苧麻/PLA复合材料的冲击强度.由图7可见:R1/PLA和R3/PLA复合材料的冲击强度在老化初期均有小幅上升.这是因为在这一阶段复合材料的吸水符合Fickian模型,材料内部未发生不可逆的物理和化学反应,水分子在复合材料内部作为增塑剂,提高了材料的韧性,并且起到吸能作用;之后,由于复合材料内部界面变差和PLA基体水解,材料的冲击性能随着老化时间的延长而不断下降.Yu等^[18]研究发现,在短期老化或低含水率时,水分的增塑作用提高了基体的结晶度,使冲击强度增加;而在长期老化或高含水率时,PLA降解导致冲击强度降低.

在老化初期R1/PLA复合材料由于良好的分

散,材料内部缺陷较少,使得其冲击强度高于R3/PLA复合材料;老化21~42 d时,由于吸水饱和且R3/PLA复合材料内部较多的含水量,使得R3/PLA复合材料冲击强度大于R1/PLA复合材料;老化后期由于R3/PLA复合材料基体的严重水解,导致其冲击强度低于R1/PLA复合材料.

2.5 吸水老化机理

图8为2种苧麻/PLA复合材料的吸水老化机理.由图8可见:(1)第1阶段(前7 d),水分子通过自由扩散进入复合材料内部,此阶段符合Fickian扩散定律,材料内部未发生不可逆的物理或化学变化.(2)第2阶段(7~21 d),复合材料吸水率缓慢增加,由于基体与纤维的溶胀程度不匹配,导致两者吸水后界面处出现裂缝,导致界面性能下降;同时由于水分的塑性效应,复合材料的结晶度增加,R3/PLA复合材料的裂纹数量和结晶度均高于R1/PLA复合材料,这是由于3股打捻纱线发生团聚现象,不易均匀分布在PLA基体内部,进而在试件中产生空隙和微裂纹等缺陷,从而增加了复合材料的吸水量所致.(3)第3阶段(21~105 d),裂纹的产生进一步促进了水分吸收,进而引起基体水解,由于R3/PLA复合材料吸收更多的水分,老化后期R3/PLA中较多的水分开始与PLA基体发生水解,部分结晶区参与水解,导致结晶度下降程度大于R1/PLA复合材料.

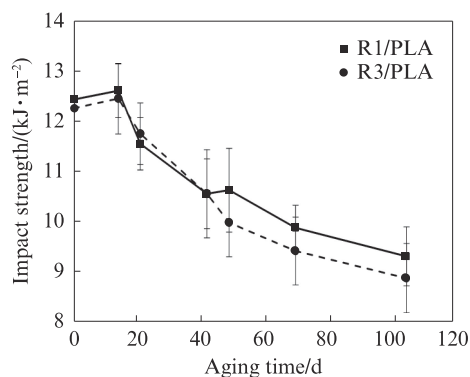


图7 不同老化时间下2种苧麻/PLA复合材料的冲击强度
Fig. 7 Impact strength of two kinds of ramie/PLA composites at different aging time

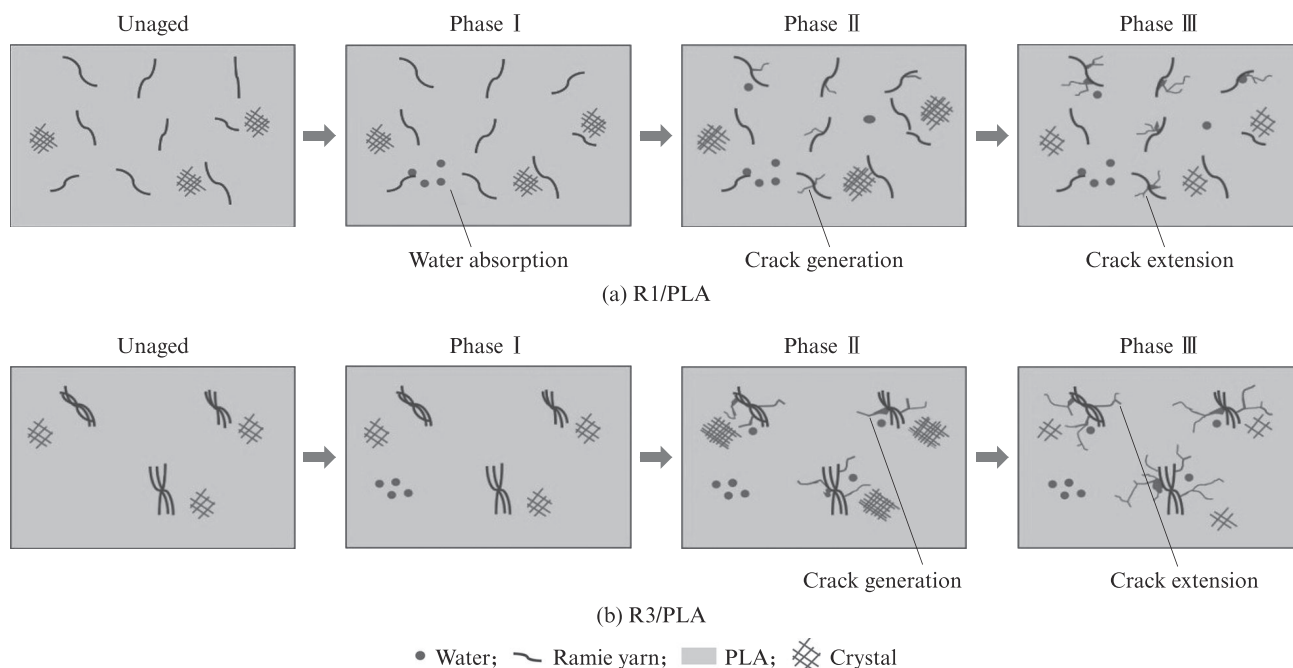


图8 2种苧麻/PLA复合材料的吸水老化机理

Fig. 8 Hygrothermal aging mechanism of two kinds of ramie/PLA composites

3 结论

(1)相比于3股苧麻纱线制得的R3/PLA复合材料,单股苧麻纱线制得的R1/PLA复合材料中的苧麻纤维分散得更为均匀。

(2)2种苧麻/PLA复合材料在吸水老化初期的吸水行为相近,水分子只是单纯地沿着浓度梯度由高浓度向低浓度扩散,复合材料内部未发生不可逆的物理或化学变化;老化中期,由于水分子的增塑作用,复合材料的结晶度增加,其中的纤维与基体因吸水溶胀程度不同产生膨胀应力,使得界面变差,基体出现微裂纹,导致材料力学性能下降,且由于R3/PLA复合材料中苧麻纤维团聚的缺陷,使其有较多的吸水量;老化后期,由于PLA的水解,基体裂纹开始扩展,复合材料的熔融温度和结晶度均出现下降,力学性能出现显著降低,且由于R3/PLA复合材料较多的吸水量,导致PLA基体出现更为严重的水解,使得R3/PLA复合材料的力学性能在老化后期低于R1/PLA复合材料。

(3)R1/PLA复合材料由于纤维具有良好的分散性,其耐久性能较好,可应用于建筑工程中。

参考文献:

- [1] 徐洛屹, 杨再银. 我国墙体材料评价体系研究[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(1): 77-85.
XU Luoyi, YANG Zaiyin. Estimating system on the wall materials of China[J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(1):

77-85. (in Chinese)

- [2] LI G, ZHAO M H, XU F, et al. Synthesis and biological application of polylactic acid[J]. Molecules, 2020, 25(21):5023.
- [3] ILYAS R A, SAPUAN S M, HARUSSANI M M, et al. Polylactic acid (PLA) biocomposite: Processing, additive manufacturing and advanced applications[J]. Polymers, 2021, 13(8):1326.
- [4] 任杰, 王秦峰. 生物可降解聚乳酸及其共聚物的制备[J]. 建筑材料学报, 2003, 6(4):397-403.
REN Jie, WANG Qinfeng. Synthesis research of biodegradable polylactide and co-polylactide[J]. Journal of Building Materials, 2003, 6(4):397-403. (in Chinese)
- [5] SIAKENG R, JAWAID M, ARIFFIN H, et al. Natural fiber reinforced polylactic acid composites: A review[J]. Polymer Composites, 2019, 40(2):446-463.
- [6] YU T, JIANG N, LI Y, et al. Functionalized multi-walled carbon nanotube for improving the flame retardancy of ramie/poly (lactic acid) composite[J]. Composites Science and Technology, 2014, 104:26-33.
- [7] ZHANG K Q, CHEN Z H, BOUKHIR M, et al. Bioinspired polydopamine deposition and silane grafting modification of bamboo fiber for improved interface compatibility of poly (lactic acid) composites [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 201:121-132.
- [8] SCIDA D, ASSARAR M, POILANE C, et al. Influence of hygrothermal ageing on the damage mechanisms of flax-fibre reinforced epoxy composite[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 48:51-58.
- [9] ABABILLA M A, LI Y, KARBHARI V M. Durability characterization of wet layup graphite/epoxy composites used in external strengthening [J]. Composites Part B: Engineering,

- 2005, 37(2/3):200-212.
- [10] HU R H, SUN M, LIM J K. Moisture absorption, tensile strength and microstructure evolution of short jute fiber/poly lactide composite in hygrothermal environment[J]. *Materials & Design*, 2010, 31(7):3167-3173.
- [11] SAIKIA D. Studies of water absorption behavior of plant fibers at different temperatures [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2010, 31(4):1020-1026.
- [12] JIANG N, LI Y, LI D, et al. 3D finite element modeling of water diffusion behavior of jute/PLA composite based on X-ray computed tomography[J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 199:108313.
- [13] 成志强, 张晓燕, 孔繁盛. 水分在沥青膜中的扩散特征[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(2):399-404.
CHENG Zhiqiang, ZHANG Xiaoyan, KONG Fansheng. Moisture diffusion property into asphalt film [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(2):399-404. (in Chinese)
- [14] AZWA Z N, YOUSIF B F, MANALO A C, et al. A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres [J]. *Materials & Design*, 2013, 47:424-442.
- [15] ZUO Y F, GU J Y, QIAO Z B, et al. Effects of dry method esterification of starch on the degradation characteristics of starch/poly lactic acid composites[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2015, 72:391-402.
- [16] JIANG N, LI Y M, LI Y, et al. Effect of short jute fibers on the hydrolytic degradation behavior of poly (lactic acid)[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2020, 178:109214.
- [17] LEE C H, KHALINA A, LEE S H. Importance of interfacial adhesion condition on characterization of plant-fiber-reinforced polymer composites: A review[J]. *Polymers*, 2021, 13(3):438.
- [18] YU T, SUN F, LU M Y, et al. Water absorption and hygrothermal aging behavior of short ramie fiber-reinforced poly (lactic acid) composites[J]. *Polymer Composites*, 2018, 39(4): 1098-1104.