

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.06.018

马尾松、杉木木粉增强 PE-HD 复合材料的力学和蠕变性能

伏修博¹, 徐海龙², 李利芬³, 杨小慧⁴, 高华⁴, 曹岩⁴(1. 贵州民族大学化学工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵州民族大学数据科学与信息工程学院, 贵阳 550025;
3. 贵州大学林学院, 贵阳 550025; 4. 贵州民族大学材料科学与工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 针对木塑复合材料(WPCs)在长期负载下的蠕变行为导致力学失效的问题, 为明确WPCs的力学性能和蠕变特性, 采用两步成型挤出法, 制备7种马尾松木粉和杉木木粉增强高密度聚乙烯复合材料, 分析和比较两种木粉的添加比例对WPCs的弯曲性能、动态力学性能和短期蠕变性能的影响, 采用数理模型对WPCs蠕变随时间的变化进行模拟。结果表明, 增强木粉中杉木木粉的含量越高, WPCs的弯曲性能越好, 但是蠕变性能变差。杉木木粉在增强木粉中的质量分数为83.3%时, WPCs的储能模量最大, 马尾松木粉含量逐渐减少时, WPCs的储能模量和损耗角正切值分别增大和减小。提高马尾松木粉的添加量有效地降低了WPCs在10%应力水平下的24 h应变值。Findley模型和ExpAssoc函数拟合WPCs的蠕变行为效果较好, 修正后的ExpAssoc模型模拟效果更优, 7种WPCs在10%应力水平下的拟合修正系数 R^2 均在0.99以上。

关键词: 高密度聚乙烯; 木塑复合材料; 蠕变性能; 数理模型; 杉木; 马尾松

中图分类号: TQ325.1+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)06-0122-07

Mechanical and creep properties of *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* wood flour reinforced PE-HD composites

FU Xiubo¹, XU Hailong², LI Lifen³, YANG Xiaohui⁴, GAO Hua⁴, CAO Yan⁴

(1. School of Chemical Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China; 2. Data Science and Information Engineering College, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China; 3. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 4. School of Materials Science and Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China)

Abstract : According to the problem of the degradation of mechanical properties due to the creep behavior of wood-plastic composites (WPCs) under long-term loading, in order to clarify the mechanical properties and creep characteristics of WPCs, seven *Pinus massoniana* wood flour and *Cunninghamia lanceolata* wood flour reinforced high-density polyethylene composites were prepared by a two-step molding and extrusion method, and the effects of the additive proportions of the two types of wood flour on the flexural, dynamic mechanical and short-term creep properties of the WPCs were analyzed and compared, and the changes of the WPCs' creep with time were simulated by using numerical models. The results show that the higher the content of *Cunninghamia lanceolata* in the enhanced wood flour, the better the flexural properties of WPCs, but the creep properties become worse. The energy storage modulus of WPCs is the largest when the content of *Cunninghamia lanceolata* wood flour in the enhanced wood flour is 83.3%, and when the content of *Pinus massoniana* wood flour is reduced, the energy storage modulus of WPCs increases, but the loss tangent decreases. Increasing the content of *Pinus massoniana* wood flour effectively reduces the 24 h strain value of WPCs at 10% stress level. The creep behaviors of WPCs fitted by Findley model and ExpAssoc function are good, and the modified ExpAssoc model simulation is better, and the fitting correction coefficients R^2 of 7 kinds of WPCs at 10% stress level are all above 0.99.

Keywords : high-density polyethylene ; wood-plastic composite ; creep property ; mathematical models ; *Cunninghamia lanceolata* ; *Pinus massoniana*

基金项目: 国家自然科学基金项目(32060324, 32160413), 贵州省高层次留学人才创新创业项目(2022-06), 贵州省科技计划项目(黔科合基础-ZK[2022]一般067, 黔科合基础-ZK[2021]一般161), 贵州省教育厅自然科学研究项目(黔教技[2023]034号)

通信作者: 曹岩, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为木塑复合材料制备与物理、力学性能研究

收稿日期: 2024-04-05

引用格式: 伏修博, 徐海龙, 李利芬, 等. 马尾松、杉木木粉增强 PE-HD 复合材料的力学和蠕变性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(6): 122-128.

FU Xiubo, XU Hailong, LI Lifen, et al. Mechanical and creep properties of *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* wood flour reinforced PE-HD composites[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(6): 122-128.

木塑复合材料(WPCs)由木质纤维与聚合物复合制备而成,对原料来源要求低,无天然木材易裂缝、翘曲等缺陷,有效继承了塑料的防腐、防水、防虫蛀等优良特性,并保留了天然木质材料的外观、质感和易加工特性,制备工艺简单,综合性能突出,常被用来制作室内外地地板、围栏、家具、装饰材料等,可循环利用,经济效益显著^[1-3]。随着人们环保意识的增强和对WPCs生产和检测技术的改进,WPCs的应用也越来越广泛。

作为贵州省分布广泛、森林蓄积量占比44%以上的树种,马尾松(*Pinus massoniana*)和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)具有良好的弯曲强度、压缩强度和拉伸强度等力学性能,易于加工和使用。利用马尾松和杉木加工后剩余的枝桠材及锯屑来增强常见的废弃塑料制备WPCs,不仅可以缓解日益紧缺的化石能源危机,满足新时代提倡的节能环保要求,也符合贵州省循环经济和绿色生态产业新的增长要求,为实现“双碳”目标提供支撑和帮助。

马尾松较杉木有着更为广泛的分布、更低的价格成本,但马尾松在制造、建筑等领域的使用率远不及杉木。在保证材料性能差异不大的前提下若能以成本更低、来源更广的马尾松木粉取代或部分替代成本高、资源少的杉木木粉来混合增强聚合物制备WPCs,可带来更高的经济效益。

WPCs作为一种新型环保材料,在生物质复合材料领域有良好的发展前景。但WPCs常因蠕变产生力学失效,甚至断裂,限制其进一步发展及应用,因此对于WPCs的蠕变行为的研究和蠕变特性的预测显得尤为重要^[4-7]。刘文辉等^[8]利用四参数Burgers模型推导出了描述黏弹性基体材料在时间域内有效松弛模量与有效泊松比的表达式。Zhao等^[9]对杨树木粉的WPCs蠕变曲线进行拟合,结果表明分数阶模型在高应力水平下蠕变曲线拟合程度最高。董智贤^[10]利用Maxwell模型和Kelvin模型串联起来的四元件黏弹性模型,对聚丙烯WPCs在5种不同应力水平下的蠕变曲线进行了模拟分析,结果表明四元件黏弹性模型拟合曲线与聚丙烯WPCs蠕变曲线的相关系数 R^2 达到0.98以上,证明了四元件模型对WPCs短期蠕变行为的模拟较为准确。为预测WPCs的蠕变行为,Abdollah等^[11]利用Findley指数模型对WPCs的蠕变曲线拟合分析,证明了WPCs的蠕变行为符合Findley指数定律。杜虎虎

等^[12]利用Findley指数模型和广义十参数Kelvin模型对WPCs的24 h蠕变曲线进行了模拟,结果表明广义十参数黏弹模型对WPCs蠕变曲线的拟合较好。张吉宏等^[13]通过本构五元件Kelvin模型,利用ExpAssoc函数对黄土蠕变曲线进行拟合,研究表明五元件Kelvin模型能够很好地描述黄土的蠕变特性。

在以往学者对蠕变模型的研究中可以发现,挑选、构建合适的数理模型能够更好地模拟材料的蠕变行为。笔者选用贵州省优势树种马尾松及杉木木粉增强高密度聚乙烯(PE-HD)制备WPCs^[14],围绕WPCs的弯曲性能、动态力学性能和短期蠕变性能展开分析研究,挑选对WPCs蠕变行为拟合效果较好的Findley指数模型,并进一步修正了ExpAssoc函数模型,将两者应用于马尾松和杉木木粉增强PE-HD复合材料的蠕变模拟中,对比模拟的准确度和适用性,为WPCs在负载条件下的拓展应用提供理论依据。

1 实验部分

1.1 主要原材料

马尾松木粉:粒径0.18~0.85 mm,贵阳花溪宸菱木业有限公司;

杉木木粉:粒径0.18~0.85 mm,贵阳花溪宸菱木业有限公司;

PE-HD:5000s,中国石油天然气股份有限公司;

马来酸酐接枝聚乙烯(MAPE):接枝率1.2%,天津市博迪化工有限公司;

硬脂酸(SA):1205型,中国石油大庆炼化分公司;

聚乙烯(PE)蜡:密度0.93~0.98 g/cm³,中国石油大庆炼化分公司。

1.2 主要仪器及设备

鼓风干燥箱:AG-9920A,上海一恒科学仪器有限公司;

高速混合机:SHR-10A,张家港市宏基机械有限公司;

锤式粉碎机:9FQ-300,丹东市正大农机制造有限公司;

双螺杆挤出机:SJH-30,南京杰亚挤出装备有限公司;

单螺杆挤出机:SJ-45,张家港格兰机械有限公司;

电子万能力学试验机:RGT-20A,深圳瑞格尔仪器有限公司;

动态热机械分析仪:DMA-242,德国耐驰公司;

蠕变测试仪:自制。

1.3 木粉增强 PE-HD WPCs 的制备

将杉木木粉及马尾松木粉分别投入鼓风干燥箱,105℃干燥超过 24 h,去除木粉中的水分。用天平按表 1 的质量分数称取马尾松木粉、杉木木粉、PE-HD、增容剂 MAPE、润滑剂 PE 蜡和 SA,分别放入高速混合机中混合,待混合物料充分冷却后用锤式粉碎机将其打碎成小颗粒,通过双螺杆挤出机造粒和单螺杆挤出机挤出截面尺寸为宽 40 mm、厚 4 mm 的条形 WPCs^[15]。

表 1 WPCs 各组分质量分数

Tab. 1 Mass fraction of each component of WPCs

Samples	Pinus massoniana flour	Cunninghamia lanceolata flour	PE-HD	MAPE	PE wax, SA
1 [#]	60	0	35	4	1
2 [#]	50	10	35	4	1
3 [#]	40	20	35	4	1
4 [#]	30	30	35	4	1
5 [#]	20	40	35	4	1
6 [#]	10	50	35	4	1
7 [#]	0	60	35	4	1

1.4 性能测试

1.4.1 弯曲性能测试

根据 ASTM D 790-03-2003 测试 7 种 WPCs 的弯曲强度和弯曲弹性模量。试验跨距和弯曲速度分别设置为 64 mm 和 1.9 mm/min。试件的长度为 (80±2) mm,宽度为 (13±0.2) mm,厚度为 (4±0.2) mm。每种 WPCs 试样重复测试 5 次并计算平均值作为测试结果。

1.4.2 动态力学性能测试

通过三点弯曲模式测试 7 种 WPCs 的动态热力学性能,温度范围设置为 20~120℃,加热速率设置为 5℃/min,频率设置为 1 Hz,试件的长度为 (40±2) mm,宽度为 (10±0.2) mm,厚度为 (3±0.2) mm,每组 WPCs 测试 3 个试件。

1.4.3 弯曲极限载荷测试

为研究马尾松木粉和杉木木粉含量对 WPCs 弯曲蠕变性能的影响,先要明确 7 种 WPCs 的弯曲极限载荷,需测试 7 种 WPCs 在常温下的弯曲极限载荷,试件的长度为 (100±2) mm,宽度为 (40±2) mm,厚度为 (4±0.2) mm,试验跨距和速度分别设置为 64

mm 和 1.9 mm/min。每种 WPCs 试样重复测试 5 次并计算平均值作为测试结果。

1.4.4 弯曲蠕变性能测试

按照 ASTM D 2990-01-2001 测试 7 种 WPCs 的弯曲蠕变性能。室温条件,湿度为 55%~65%,三点弯曲加载,跨距为 64 mm,对试件施加竖直向下的力,力的大小恒定为极限载荷的 10%。利用千分表测试不同时刻试件的形变。试件为矩形,尺寸与弯曲极限载荷测试试件相同。每组试验重复 3 次,计算时采用试样的实测尺寸。通过计算加载前(t_0 时刻)和特定时刻 t 的千分尺读数之差,确定材料在 t 时刻的形变量(D_t)。应力与载荷之间的关系见式(1)。

$$\sigma = 3PL/(2bd^2) \quad (1)$$

形变与应变之间的关系见式(2)。

$$\varepsilon = 6Dd/L^2 \quad (2)$$

式中: P 为施加载荷,单位 N; D 为形变,单位 mm; L 为跨距,单位 mm; σ 为应力,单位 MPa; b 为试件的宽度,单位 mm; ε 为应变,单位 mm/mm; d 为试件的厚度,单位 mm。

1.5 模拟分析

在前期的工作中发现,Findley 指数模型及两参数指数模型模拟 WPCs 的蠕变效果均较好^[16],其中 Findley 指数模型因引用了初始弹性应变参数 a ,模拟效果优于两参数指数模型。

两参数指数模型公式见式(3)。

$$\varepsilon(t) = bt^c \quad (3)$$

Findley 指数模型的公式见式(4)。

$$\varepsilon(t) = a + bt^c \quad (4)$$

式中: $\varepsilon(t)$ 是时间 t 对应的 WPCs 应变,单位 mm/mm; a 是 WPCs 的初始弹性应变,单位 mm/mm; b 是瞬时蠕变应变,单位 mm/mm; c 是时间系数。

对 WPCs 蠕变曲线进一步分析研究,探求到更符合 WPCs 蠕变曲线的 ExpAssoc 函数,修正并应用到 WPCs 的蠕变预测中,比较其和 Findley 指数模型的模拟效果。

修正后的 ExpAssoc 模型公式见式(5)。

$$\varepsilon(t) = a + d_1 * [1 - \exp(-d_3 t)] + d_2 * [1 - \exp(-d_4 t)] \quad (5)$$

式中: d_1 和 d_2 是应变系数; d_3 和 d_4 是时间系数。

2 结果与讨论

2.1 WPCs 的弯曲性能

7 种 WPCs 的弯曲性能如图 1 所示。马尾松木

粉的总表面自由能和非极性表面自由能均低于杉木木粉,与PE-HD基体的结合较弱,增强效果较差^[17-19],因此由图1看出,马尾松木粉/PE-HD复合材料的弯曲弹性模量(3.2 GPa)与弯曲强度(43.3 MPa)在7种WPCs中均最低。随着杉木木粉与马尾松木粉质量比的增加,WPCs的弯曲弹性模量和弯曲强度均呈上升趋势。7种WPCs中,杉木木粉/PE-HD复合材料的弯曲性能最好,弯曲弹性模量和弯曲强度分别为4.0 GPa和63.9 MPa,相比马尾松木粉/PE-HD复合材料分别提高了25.0%和47.6%。

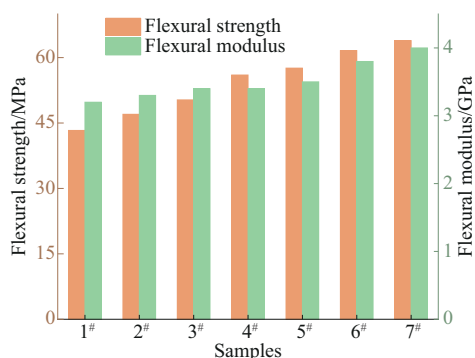


图1 WPCs的弯曲性能

Fig. 1 Flexural properties of WPCs

2.2 WPCs的动态力学性能

WPCs的储能模量代表的是材料存储弹性应变的能力,其数值大小反映了材料的刚度。随着温度的增加,7种WPCs储能模量与损耗角正切的曲线如图2和图3所示。由图2看出,随着温度的升高,7种WPCs的储能模量呈现下降趋势,这是由于温度增加会使WPCs的内部分子链运动更加活跃,从而降低了其弹性特性。当杉木木粉与马尾松木粉的质量比逐渐提高时,WPCs的储能模量总体表现出上升趋势,其中,试样6#(杉木木粉在增强木粉中的质量分数为83.3%)的储能模量总体上最大。这是因

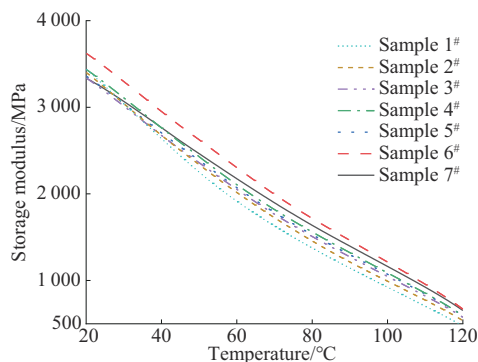


图2 WPCs储能模量与温度的关系

Fig. 2 Storage modulus of WPCs versus temperature

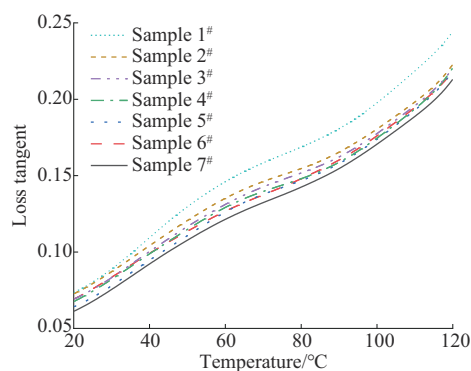


图3 WPCs损耗角正切与温度的关系

Fig. 3 Loss tangent of WPCs versus temperature

为杉木木粉的加入提升了与PE-HD基材的界面相容性,使得高分子链间的结合更加牢固,进而提高了其弹性模量和硬度,这与弯曲性能的测试结果相吻合。

损耗角的正切值反映了材料的阻尼特性和黏弹性。由图3看出,随着温度的上升,7种WPCs的损耗角正切值都随温度升高而变大,这是因为随着温度的升高,PE-HD分子链的运动幅度增大,从而导致相互之间的摩擦损耗增大。马尾松木粉/PE-HD复合材料(试样1#)的WPCs损耗角正切值最大,也说明了马尾松木粉的刚性低于杉木木粉,但韧性强于杉木木粉。杉木木粉/PE-HD复合材料(试样7#)的损耗角正切值随温度的升高提升幅度最小,能量损耗小,这进一步证明了杉木木粉与PE-HD之间具有良好的界面结合性能。

2.3 WPCs的弯曲极限载荷与10%应力水平

经过三点弯曲测试得出7种WPCs的弯曲极限载荷列于表2,而蠕变载荷 P 设定为极限载荷的10%,对应的应力按照公式(1)计算并列入表2。随杉木木粉在混合木粉中添加比例的增加,极限载荷逐渐增大,这个结果与弯曲性能测试结果一致。

表2 WPCs的弯曲极限载荷、蠕变载荷 P 与应力Tab. 2 Flexural ultimate load, creep load P and stress of WPCs

Samples	w/%	Flexural ultimate load/N	P /N	Stress/MPa
1#	0.00	317.354 6	31.60	4.446 211
2#	16.67	352.559 1	34.30	4.940 940
3#	33.33	372.164 7	36.26	5.371 586
4#	50.00	407.201 1	40.18	6.048 176
5#	66.67	424.301 9	41.16	6.201 885
6#	83.33	444.302 0	43.12	6.477 717
7#	100.00	467.540 1	46.06	6.893 541

Note: w is mass fraction of Cunninghamia lanceolata flour in compound of Cunninghamia lanceolata flour and Pinus massoniana flour.

2.4 WPCs的蠕变性能

在10%应力水平下,7种WPCs的应变随时间的变化如图4所示。由图4可以看出,WPCs的蠕变过程分为2个阶段,即初始阶段和第二阶段。WPCs在初始阶段瞬时产生弹性应变和可回复性应变,蠕变速率递减,反映出材料的稳定性;第二阶段为过渡阶段,应变速度逐渐变慢且到达平衡,产生与时间相关且可回复性应变和残余应变^[20-22],蠕变速率趋向恒定,应变和时间呈线性关系。

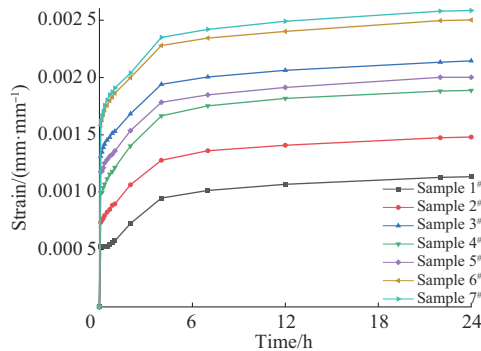


图4 WPCs在24 h下的应变-时间曲线

Fig. 4 Strain-time curves of WPCs at 24 h

7种WPCs在10%应力水平下蠕变性能最差的是杉木木粉/PE-HD 复合材料(试样7#),其24 h应变 $\varepsilon_{(24\text{ h})}$ 为0.002 585 mm/mm(见表3)。随着杉木木粉和马尾松木粉的质量比的减少,WPCs的应变整体上呈减小趋势,且减小的幅度逐渐增大。当杉木木粉添加量占混合木粉质量的83.33%时(试样6#), $\varepsilon_{(24\text{ h})}$ 与杉木木粉/PE-HD 复合材料(试样7#)相差很小(3.21%);当杉木木粉添加量继续降低(66.67%,50.00%,33.33%), $\varepsilon_{(24\text{ h})}$ 显著减小,试样5#、试样4#和

试样3#的 $\varepsilon_{(24\text{ h})}$ 分别为0.002 002, 0.001 888, 0.002 145 mm/mm;当杉木木粉添加量占混合木粉质量的比例低于16.67%, $\varepsilon_{(24\text{ h})}$ 又一次显著减小,试样2#的 $\varepsilon_{(24\text{ h})}$ 仅为试样7#(杉木木粉/PE-HD 复合材料)的57.29%;马尾松木粉/PE-HD 复合材料(试样1#)的蠕变性能最好,其 $\varepsilon_{(24\text{ h})}$ 仅为0.001 135 mm/mm,是试样7#(杉木木粉/PE-HD 复合材料)的43.91%。

表3 WPCs在1,2,4,12 h和24 h的应变(ε)

Tab. 3 Strain (ε) of WPCs at 1, 2, 4, 12 h and 24 h

Samples	ε				
	1 h	2 h	4 h	12 h	24 h
1#	0.000 577	0.000 727	0.000 949	0.001 069	0.001 135
2#	0.000 898	0.001 065	0.001 279	0.001 410	0.001 481
3#	0.001 531	0.001 684	0.001 940	0.002 063	0.002 145
4#	0.001 216	0.001 403	0.001 666	0.001 818	0.001 888
5#	0.001 360	0.001 537	0.001 784	0.001 914	0.002 002
6#	0.001 863	0.001 998	0.002 279	0.002 402	0.002 502
7#	0.001 909	0.002 038	0.002 350	0.002 491	0.002 585

杉木木粉的加入提高了WPCs力学性能,但却使其蠕变性能降低,原因在于10%应力水平偏低,载荷未能达到破坏木粉和聚合物界面结合的程度^[23-25]。马尾松木粉增强材料持续承载小载荷的能力更出色,且考虑到其价格比杉木木粉低,因此在小载荷的应用环境中,WPCs的选材可以用马尾松木粉替代常用的杉木木粉作为增强材料,降低原材料成本的同时可提高抗蠕变性能。

2.5 WPCs的蠕变性能模拟

利用Findley模型拟合WPCs的24 h蠕变曲线,所得模型参数及模拟效果见表4。表4表明Findley模型拟合效果较好, R^2 均在0.93以上,其中最高值达到0.972 3。

表4 Findley模型参数及模拟效果

Tab. 4 Findley model parameters and simulation results

Samples	Stress level/%	Value of a ($\times 10^{-4}$)	Standard error of a ($\times 10^{-4}$)	Value of b ($\times 10^{-4}$)	Standard error of b ($\times 10^{-4}$)	Value of c	Standard error of c	Residual value of χ^2 ($\times 10^{-8}$)	Adj. R^2
1#	10	2.688 2	1.874 7	3.881 4	5.551 6	0.278 9	0.110 7	5.733 3	0.933 2
2#	10	2.523 2	3.366 9	1.482 1	1.708 0	0.190 2	0.080 3	4.696 2	0.957 7
3#	10	6.939 1	4.267 4	2.306 5	2.482 7	0.165 1	0.071 2	4.473 7	0.964 9
4#	10	2.807 1	5.189 2	2.537 1	2.999 3	0.166 4	0.078 5	6.802 8	0.957 8
5#	10	6.467 4	3.524 8	1.607 8	1.776 5	0.191 6	0.077 1	5.284 1	0.961 0
6#	10	7.975 0	5.093 5	3.308 8	3.248 8	0.147 1	0.062 1	4.135 0	0.972 3
7#	10	7.846 2	5.467 0	3.468 4	3.473 3	0.147 9	0.063 5	4.860 9	0.971 1

利用基于ExpAssoc函数的修正模型拟合WPCs的24 h蠕变曲线所得模型参数及模拟效果见表5。表5表明,该模型拟合WPCs 24 h蠕变曲线的效果优于Findley模型, R^2 均在0.99以上,最高值达

到0.998 8。

通过作图对比蠕变试验曲线、Findley模型和基于ExpAssoc函数的修正模型模拟蠕变曲线(如图5所示)得出基于ExpAssoc函数的修正模型模拟7种

表5 ExpAssoc模型参数及模拟效果
Tab. 5 ExpAssoc model parameters and simulation results

Samples	Stress level/%	Value of a	Standard error of a ($\times 10^{-5}$)	Value of d_1 ($\times 10^{-4}$)	Standard error of d_1 ($\times 10^{-5}$)	Value of d_2 ($\times 10^{-4}$)	Standard error of d_2 ($\times 10^{-5}$)	Residual value of χ^2 ($\times 10^{-9}$)	Adj. R^2
1 [#]	10	$2.312\ 3 \times 10^{-13}$	3.358 3	6.598 0	2.464 5	4.733 8	3.730 4	11.278 0	0.991 8
2 [#]	10	$1.111\ 2 \times 10^{-16}$	1.745 0	7.189 1	—	7.466 7	894.000 0	3.045 0	0.998 6
3 [#]	10	$7.119\ 6 \times 10^{-7}$	2.486 2	13.200 0	2.771 2	7.990 2	1.758 3	6.181 4	0.998 4
4 [#]	10	$1.473\ 8 \times 10^{-8}$	2.015 5	8.994 6	1.429 7	9.697 0	2.283 9	4.062 1	0.998 8
5 [#]	10	$1.290\ 1 \times 10^{-22}$	2.609 5	8.238 8	1.859 6	11.600 0	2.937 7	6.809 4	0.998 1
6 [#]	10	$2.821\ 2 \times 10^{-9}$	3.334 4	16.100 0	—	8.628 2	3.136 1	11.118 0	0.997 9
7 [#]	10	$9.127\ 0 \times 10^{-6}$	3.629 3	16.300 0	4.218 4	9.177 3	2.586 1	13.172 0	0.997 6

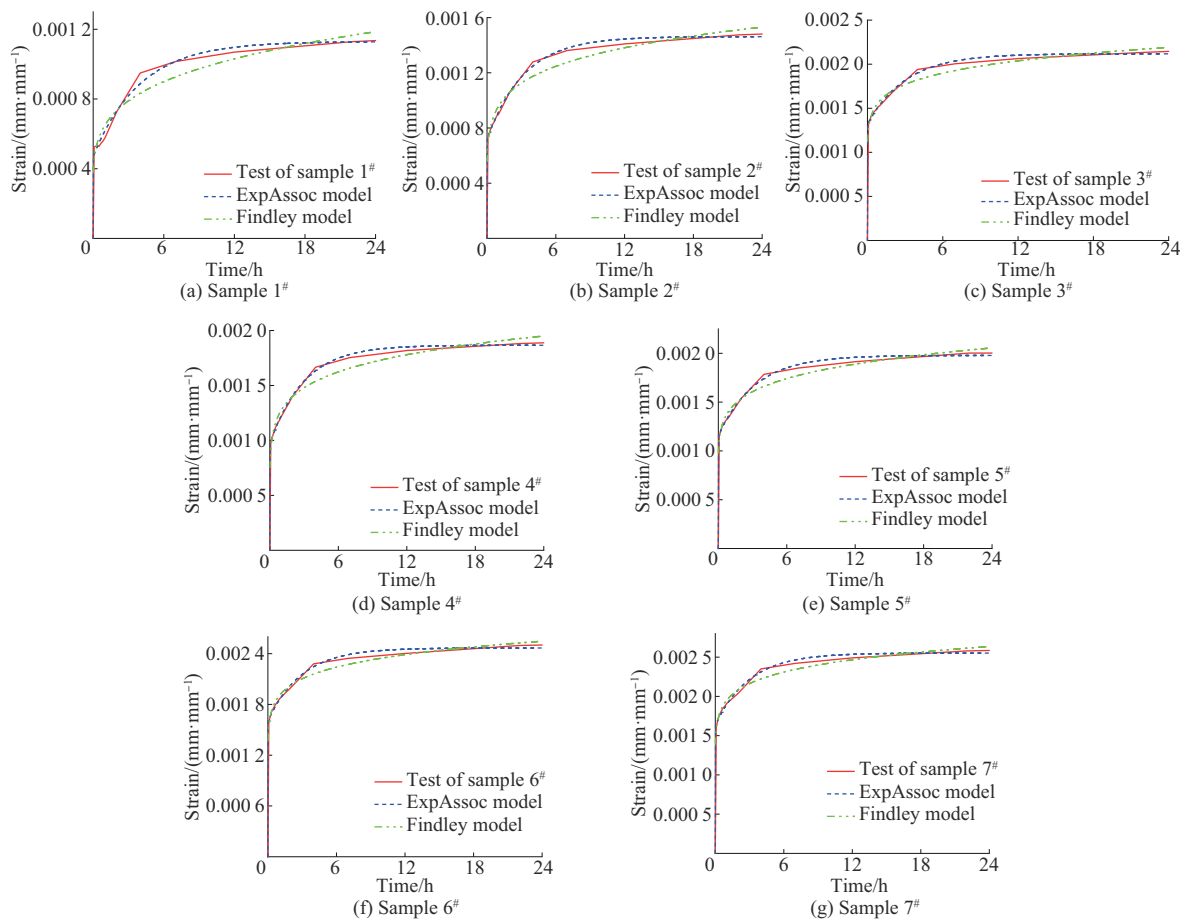


图5 WPCs 试样1[#]~7[#]的蠕变试验曲线与模拟曲线

Fig. 5 Creep testing and simulation curves of WPCs samples 1[#]~7[#]

WPCs的蠕变曲线与试验曲线的吻合度均更高,进一步验证了上述结论。

3 结论

(1)利用两步成型法挤出7种马尾松木粉和杉木木粉混合增强PE-HD复合材料,增强木粉中杉木木粉的含量越高,WPCs的弯曲性能越好,储能模量呈现上升的趋势,损耗角正切值逐渐变小。

(2)在7种马尾松木粉和杉木木粉混合增强PE-HD复合材料,增强木粉中杉木木粉的含量越高,蠕

变性能越差。马尾松木粉增强PE-HD复合材料持续承载的能力出色。在承受小载荷的使用场景中,WPCs的选材可用低价的马尾松木粉替代常用的杉木木粉作为增强材料,降低原材料成本的同时可提高抗蠕变性能。

(3) Findley模型和ExpAssoc函数拟合WPCs的蠕变行为效果均较好,修正后的ExpAssoc模型预测曲线与试验曲线的吻合度更高, R^2 均在0.99以上,模拟效果更优,且ExpAssoc函数计算方便,对指导预

估 WPCs 的短期蠕变特征具有实际意义。

参考文献

- [1] WANG H B, ZHANG X F, GUO S Y, et al. A review of coextruded wood-plastic composites[J]. *Polymer Composites*, 2021(9): 4 174–4 186.
- [2] 欧荣贤, 姚开泰, 孙理超, 等. 木塑复合材料蠕变特性及预测方法的研究进展[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(6): 1 734–1 753.
OU Rongxian, YAO Kaitai, SUN Lichao, et al. State of the art of the creep characteristics of wood-plastic composite and its prediction methods[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(6): 1 734–1 753.
- [3] 许蓉蓉, 贺雪梅. 木塑复合材料在工业产品中的应用及研究进展[J]. *合成树脂及塑料*, 2019, 36(1): 91–95.
XU Rongrong, HE Xuemei. Application and research progress of wood-plastic composite materials in industrial products[J]. *China Synthetic Resin and Plastics*, 2019, 36(1): 91–95.
- [4] 贺瑞, 康建华, 王红梅. 木塑复合材料研究及应用进展[J]. *塑料科技*, 2021, 49(5): 108–110.
HE Rui, KANG Jianhua, WANG Hongmei. Research and application progress of wood-plastic composites[J]. *Plastics Science and Technology*, 2021, 49(5): 108–110.
- [5] 谢渭仁. 木塑复合材料蠕变测试装置设计及蠕变性能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
XIE Weiren. Design and creep performance of creep testing device for wood-plastic composites[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.
- [6] 尹权福, 邸明伟. 木塑复合材料蠕变性能的研究进展[J]. *塑料工业*, 2011, 39(7): 10–14, 19.
YIN Quanfu, DI Mingwei. Research progress on creep properties of wood plastic composites[J]. *China Plastics Industry*, 2011, 39(7): 10–14, 19.
- [7] 张思成. 秸塑复合材料蠕变性能研究[D]. 昆明: 西南林业大学, 2021.
ZHANG Sicheng. Study on creep properties of straw plastic composites[D]. Kunming: Southwest Forestry University, 2021.
- [8] 刘文辉, 张淳源. 渐近均匀化方法在粘弹性复合材料的应用[J]. *湖南: 湘潭大学自然学报*, 2003, 25(4): 91–97.
LIU Wenhui, ZHANG Chunyuan. Application of asymptotic homogenization method in viscoelastic composites[J]. *Journal of Xiangtan University*, 2003, 25(4): 91–97.
- [9] ZHAO L L, YANG W, ZHANG G W, et al. Short-term creep properties and creep model of wood-plastic composites[J]. *Polymer Composites*, 2022, 43(2): 924–933.
- [10] 董智贤. 聚丙烯木塑复合材料蠕变行为的模拟与预测[J]. *高分子材料科学与工程*, 2010, 26(5): 89–92, 96.
DONG Zhixian. Modeling and prediction of creep behavior of pp/wood-flour composite[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2010, 26(5): 89–92, 96.
- [11] ABDOLLAH N, SAEED K N. Effect of load levels and plastic type on creep behavior of wood sawdust/HDPE composites[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2009, 28(21): 2 645–2 653.
- [12] 杜虎虎, 王伟宏, 王海刚, 等. 木纤维含量对木塑复合材料蠕变特性的影响[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(2): 333–339.
DU Huhu, WANG Weihong, WANG Haigang, et al. Influence of wood fiber content on the creep behavior of wood fiber-plastic composite[J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(2): 333–339.
- [13] 张吉宏, 段钊, 唐皓. 蠕变对河流侧蚀型黄土滑坡影响的数值模拟[J]. *人民黄河*, 2020, 42(2): 142–146.
ZHANG Jihong, DUAN Zhao, TANG Hao. Numerical simulation of the effect of creep on loess landslide caused by lateral river erosion[J]. *Yellow River*, 2020, 42(2): 142–146.
- [14] 徐海龙, 曹岩, 周玮, 等. 自然老化对木塑复合材料抗冲击性能的影响[J]. *合成树脂及塑料*, 2021, 38(3): 7–11, 23.
XU Hailong, CAO Yan, ZHOU Wei, et al. Effect of natural aging on impact properties of WPCs[J]. *China Synthetic Resin And Plastics*, 2021, 38(3): 7–11, 23.
- [15] 曹岩. 纤维尺寸及分布对 WPCs 力学性能的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
CAO Yan. Effect of fiber size and distribution on the mechanical properties of WPCs[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013.
- [16] 徐海龙, 曹岩, 李利芬, 等. 马尾松和杉木增强聚合物复合材料的蠕变性能[J]. *森林与环境学报*, 2019, 39(6): 654–659.
XU Hailong, CAO Yan, Li Lifan, et al. Creep-recovery properties of polymer composites reinforced by Pinus massoniana and Cunninghamia lanceolata flour[J]. *Journal of Forestry and Environment*, 2019, 39(6): 654–659.
- [17] FENG L, XIE W R. Analysis of factors affecting creep of wood-plastic composites[J]. *Forests*, 2021, 12(9). DOI: 10.3390/f12091146.
- [18] 陈亚楠, 杨洋, 张仲凤. 界面处理对木塑复合材料力学性能影响研究[J]. *林产工业*, 2020(10): 13–16, 40.
CHEN Yanan, YANG Yang, ZHANG Zhongfeng. Study on the effects of interfacial treatment on the mechanical properties of wood-plastic composites[J]. *China Forest Products Industry*, 2020 (10): 13–16, 40.
- [19] 牟彬彬. 木质纤维种类及化学成分对 HDPE 基木塑复合材料性能的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018.
MOU Binshan. Impact of lignocellulosic species and chemical component on the properties of HDPE based wood plastic composites[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018.
- [20] 王正. 木塑复合材料界面特性及其影响因子的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2001.
WANG Zheng. The interfacial characteristic and influence factors of wood-plastic composites[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2001.

(下转第 154 页)