复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

第 38 卷 第 6 期 6 月 2021 年
Vol. 38 No. 6 Jun 2021

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20210302.005

木塑复合材料蠕变特性及预测方法的研究进展

分享本文

欧荣贤[1,2]，姚开泰[1]，孙理超[1,2]，刘涛[2,3]，郝笑龙[1,2]，刘珍珍[1,2]，周海洋[1,2]，王清文[*1,2]

（1. 华南农业大学 材料与能源学院 生物基材料与能源教育部重点实验室，广州 510642；2. 岭南现代农业科学与技术广东省实验室，广州 510642；3. 华南农业大学 食品学院，广州 510642）

摘 要：木塑复合材料 (WPCs) 已广泛应用于建筑外墙板、户外铺板、室内装饰、园林景观、汽车内饰等非承重结构材料领域，但由于线型或支链型热塑性聚合物固有的粘弹特性决定了 WPCs 在受到长期力载荷时易发生蠕变变形，严重影响其作为承重结构材使用。因此抗蠕变是木塑产业界面临的重大技术瓶颈，也是学术界关注的核心科学问题。为更好地了解并改善 WPCs 的蠕变现象，本文综述了 WPCs 蠕变行为的研究进展，讨论了原材料、结构和环境条件等因素对其抗蠕变性能的影响，并对 WPCs 抗蠕变的改进方法进行了总结和分析。WPCs 长期蠕变行为测试是评价其耐久性和安全性的必要手段，但传统的长期蠕变测试方法耗时且成本高昂。通过蠕变与时间、温度和外界应力等因素存在的经验关系，可以实现蠕变的加速测试。最后讨论了玻耳兹曼叠加原理、时间-温度-应力叠加原理、分步等温度法和分步等应力法等加速测试方法在 WPCs 长期蠕变预测中的应用。

关键词：木塑复合材料；蠕变特性；长期蠕变；加速测试；预测方法

中图分类号：TQ321.5 **文献标志码**： A **文章编号**： 1000-3851(2021)06-1734-20

State-of-the-art of the creep characteristics of wood-plastic composite and its prediction methods

OU Rongxian[1,2], YAO Kaitai[1], SUN Lichao[1,2], LIU Tao[2,3], HAO Xiaolong[1,2], LIU Zhenzhen[1,2], ZHOU Haiyang[1,2], WANG Qingwen[*1,2]

(1. Key Laboratory for Biobased Materials and Energy of Ministry of Education, College of Materials and Energy, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Guangdong Provincial Laboratory of Lingnan Modern Agricultural Science and Technology, Guangzhou 510642, China; 3. College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Wood-plastic composites (WPCs) have been widely utilized in exterior cladding, decking, interior decoration, landscape architecture and automobile interior decoration, etc. WPCs will undergo creep when it is subjected to long-term external forces, which restricts its popularization and application as load-bearing structural materials. This is due to the intrinsic viscoelastic properties of linear or branched macromolecular chains ascribed to their thermodynamic movement. Therefore, increasing the creep resistance of WPCs is an international technique and academic problem needed to be attacked in both industry and academia. Towards a better understanding of creep behavior of WPCs and to improve its creep resistance, this paper reviews the state-of-the-art of the creep characteristics of WPCs. The effects of raw materials, structure, and environmental conditions on the creep resistance of WPCs were discussed. The improving methods for creep resistance of WPCs were summarized and analyzed. The

收稿日期：2020-12-21；**录用日期**：2021-02-13；**网络首发时间**：2021-03-02 12:41:57
网络首发地址：https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210302.005
基金项目：国家自然科学基金 (32071698; 31870547; 31901251)；国家重点研发计划课题 (2019YFD1101203)；广东省重点领域研发计划项目 (2020B0202010008)；广州市创新平台建设计划项目 (201905010005)；广州市“林业工程”重点学科项目
通信作者：王清文，博士，教授，博士生导师，研究方向为生物质复合材料、生物基材料、木材改性功能化 E-mail: qwwang@scau.edu.cn

引用格式：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): 1734-1753.
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): 1734-1753(in Chinese).

long-term creep test of WPCs is a necessary means to evaluate its durability and safety, but the traditional testing methods are time-consuming and costly. Accelerated testing of creep can be realized by the empirical relationship between creep with time, temperature and external stress. Finally, the applications of Boltzmann superposition principle, time-temperature-stress superposition principle, stepped iso-thermal method and stepped iso-stress method in long-term creep prediction on WPCs were discussed.

Keywords：wood plastic composites；creep characteristics；long-term creep；accelerated testing；prediction method

木塑复合材料 (WPCs) 作为一种环境友好的绿色复合材料，具有可循环再生利用、耐水防潮、耐腐防蛀、综合性能突出等特点，广泛应用于汽车内饰、建筑装饰等中低荷载领域[1]。但当 WPCs 应用于梁、板、柱等主要受力结构构件时，蠕变变形对其正常使用具有很大影响，甚至会出现在使用寿命期间发生蠕变断裂的情况[2]。对于纯聚合物材料蠕变特性的研究已非常充分，从其机制到数学模型均建立了完整理论体系。由于 WPCs 是主要由木质纤维和热塑性塑料基体而组成的多相复合材料，其蠕变性能受到更多因素的影响。WPCs 蠕变具有与聚合物相似的行为特征，如温度依赖性和应力依赖性。通过对 WPCs 蠕变性能的研究，能够预测其在使用过程中的尺寸稳定性及长期承载能力，确保其使用的安全性。本文综述了近年来有关 WPCs 蠕变行为的研究进展及改善方法，并对目前常用的蠕变模型及长期蠕变测试方法进行了讨论。

1 木塑蠕变行为

蠕变被描述为材料在外力载荷下随时间变化的变形过程的黏弹性行为，并随着时间的推移，材料将继续缓慢变形，直至屈服破裂而导致失效[3]。在理想情况下，一般将恒应力荷载下的蠕变过程分为三个阶段 (图 1)，即初级阶段、稳定阶段和失效阶段[4]。在加载初级阶段，蠕变速率随时间延长而迅速降低，并达到一个蠕变速率较稳定阶段，经过一定时间后，蠕变速率会迅速增大直至失效破坏。常用如具有物理意义的弹簧-粘壶模型和仅具有数学意义的 Findley 幂律模型，来描述蠕变的初级阶段和稳定阶段，但较少有模型用于拟合和预测蠕变的失效阶段[5-8]。

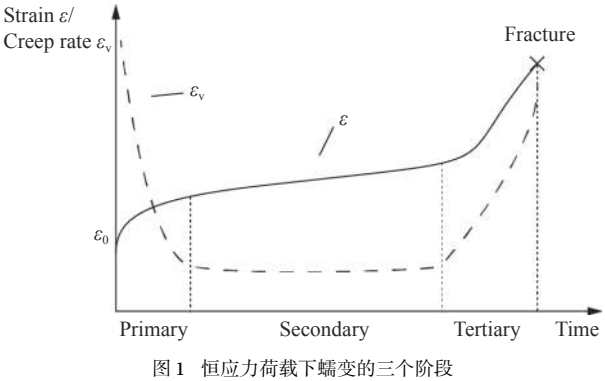


图 1 恒应力荷载下蠕变的三个阶段

Fig. 1 Three stages of creep response to a prescribed stress

如图 2 所示，纯高聚物材料在蠕变过程中主要发生了分子链段的运动。在初级阶段，由于外力作用使分子链的键长和键角发生了变动，卷曲的链段被展开。而当展开链受到约束时，蠕变进入稳定阶段，并发生不同分子链之间的滑移。失效阶段则是由于这些链的滑动或非晶区的链断裂引起的[9]。当施加的载荷在蠕变断裂前被释放，且分子链之间仍然相互作用和约束，则蠕变变形会得到一定程度的恢复。蠕变过程中分子链的运动受应力、温度、分子量和取向排布等内外因素的影响。

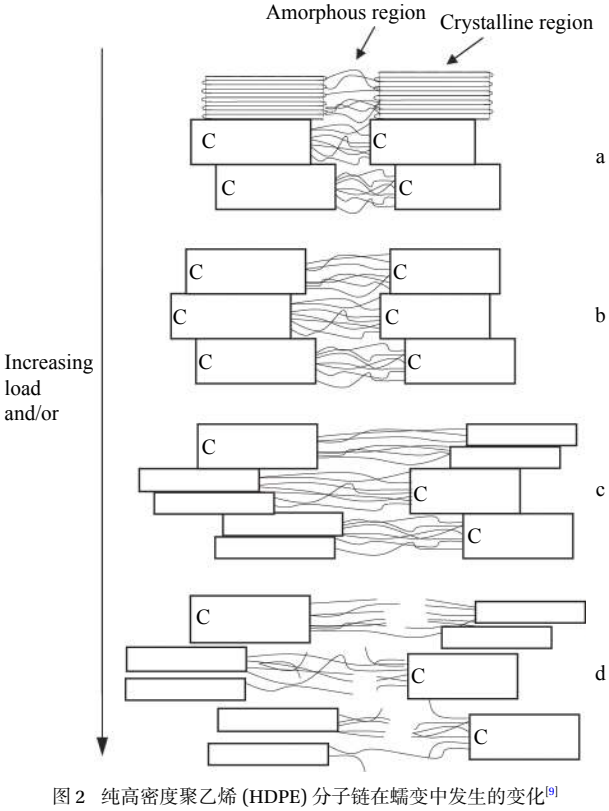


图 2 纯高密度聚乙烯 (HDPE) 分子链在蠕变中发生的变化[9]

Fig. 2 Physical molecular model of high density polyethylene (HDPE) under creep[9]

聚合物基体在 WPCs 内部起到粘结木质纤维和传递应力的作用，当存在外力作用时，木质纤维一定程度上约束了聚合物分子链运动。但由于现今 WPCs 的生产制备常采用黏弹性较大且与木质纤维相容性差的热塑性塑料作为基体，两相间界面结合以吸附结合和机械结合为主，界面结合力较弱[10]，虽然木质纤维起到一定的增强作用，但 WPCs 仍存在明显的蠕变行为。目前常添加各种助剂用以改善两相间的相容性，但这也使 WPCs 成为一种复杂的多相复合材料，在发生蠕变时其内部分子链运动情况极其复杂，各相成分间均存在着相互作用，界面间的脱粘或聚合物分子链的断裂均可能使 WPCs 蠕变加速并进入失效阶段，木质纤维和聚合物基体等各组分的性质性能都将影响 WPCs 的蠕变行为，因此更多因素将会对 WPCs 蠕变性能产生影响。

2 木塑蠕变行为的影响因素

WPCs 的蠕变性能是多种因素综合作用的结果，聚合物基体的性质，木质纤维材料的种类、含量、尺寸，木质纤维材料与聚合物基体的界面结合作用，所添加的润滑剂、增塑剂等加工助剂，加工工艺、产品形状等产品的内在因素，且在使用过程中荷载水平和历史、环境 (天气、温度、湿度、紫外线辐射) 等外在条件，均会对其蠕变性能产生影响。

2.1 原料因素

2.1.1 木质纤维

木质纤维在 WPCs 中所起作用类似于玻璃纤维、石棉纤维和陶瓷纤维等传统无机增强纤维，其可为 WPCs 提供足够的刚性和强度。但木质纤维作为一种天然刚性材料，由于其自身的复杂性，且未经处理木质纤维与基体相容性差，使木质纤维在 WPCs 的蠕变行为中所起的机制较繁多。

学者们普遍认为，减少聚合物基体的相对体积，提高木质纤维含量，使用大尺寸木质纤维，对 WPCs 抗蠕变性能起积极作用，但前提是木质纤维必须良好分散于塑料基体中[11, 12]。Wang 等[13]研究了不同木纤维尺寸 (目数分别为：120~180、180~380、380~830 和 830~1 700 μm) 对 WPCs 的影响，发现在不同测试温度下，使用较大尺寸木质纤维制备的 WPCs 具有更强的抗蠕变性能。其可归因于较大尺寸木质纤维的完整性更好，提供更高的刚度[14, 15]。徐海龙等[16]同样报道了采用大尺寸的杨木纤维有利于提高 WPCs 的抗长期蠕变性能，1 000 h 的蠕变应变仅相对 24 h 的增加了 0.75%。但 Georgiopoulos 等[17] 却报告了相反的趋势，并认为是因实验所使用的塑料基体不同以及使用热压成型工艺导致木质纤维产生更多团聚造成。

从不同种类植物中提取出的木质纤维，所制备的 WPCs 会表现出不同性能，并主要取决于其细胞结构、形态和化学成分等差异。陈冬梅等[18]研究了以四种壳类纤维 (椰子壳、榛子壳、核桃壳和稻壳) 和聚氯乙烯 (PVC) 所制备的不同 WPCs 的性能，发现稻壳纤维制备的 WPCs 具有较好的界面结合，力学性能最高，蠕变应变最小。而即使是同种植物来源的木质原料，由于其自身结构特点，也会影响 WPCs 性能，如 Tan 等[19] 发现由毛竹径向不同部位 (竹青、竹肉和竹黄) 化学成分、结晶度和纤维形态等性质不同，所制备的 WPCs，在其力学性能、加工性能、蠕变性能等均存在差异。

木质纤维原料中不同的化学成分对 WPCs 界面特性存在不同影响，半纤维素和抽提物均存在一定的消极作用。Mu 等[20] 评估了由四种类型的木质纤维 (辐射松、杨木、麦秆和毛竹) 和高密度聚乙烯 (HDPE) 制成的四种不同 WPCs 的性能，其所用纤维化学成分如表 1 所示。结果表明，杨木/HDPE 复合材料的较高抗蠕变性能主要是由于其较高结晶度和纤维素含量，而麦秆/HDPE 较差的性能则是由于其较高的蜡质和抽提物含量。Wang 等[21] 则报道去除抽提物可以有效改善纤维和基体界面之间黏附力，有利于改善 WPCs 的抗蠕变性能。Ou 等[22, 23]报道了纤维细胞壁成分对 WPCs 的影响，发现当木质纤维细胞壁中不同组分 (半纤维素和木质素) 被去除时，其制备的 WPCs 的力学性能、尺寸稳定性和流变性能存在显著差异，认为去除半纤维素能降低木质纤维表面极性，而去除木质素能提高木质纤维热塑性。

2.1.2 塑料基体

WPCs 所使用塑料基体种类较多，不同种类塑料所制备的 WPCs 具有不同的性能和应用方向。使用热固性塑料所制备的 WPCs 具有优良的抗蠕变性能，但在实际中难以回收再加工。这使研究者更愿意使用热塑性塑料或可生物降解聚合物作为 WPCs 的基体，尽管相比前者，所制备的 WPCs 可能会具有较差的抗蠕变性能[24]。

不同种类塑性基体中聚合物链的分子结构和形态不同，表现出不同的结晶性、柔韧性和黏弹

表 1 不同种类木质纤维的化学成分[20]

Table 1 Chemical components of different kinds of wood fibers[20]

Chemical component/%	Poplar	Radiata pine	Wheat straw	Moso bamboo
Polysaccharide	78.48±0.30	73.79±0.41	72.14±0.24	71.75±0.65
Hemicellulose	31.73±0.72	27.48±0.66	32.93±0.26	25.38±0.65
Cellulose	46.74± 0.89	46.31±1.06	40.10±0.13	46.37±0.41
Lignin	23.92±0.18	28.84±0.46	18.39±0.43	26.44±0.41
Hot water extracts	3.89±0.59	3.90±0.52	10.60±0.59	6.33±0.40
Ash	1.67±0.11	2.35±0.31	5.29±0.28	0.74±0.14

性行为，且决定了 WPCs 的性能。Sain 等[25] 研究了不同类型塑料基体 (PVC、PE、PP) 对 WPCs 蠕变性能的影响，发现 PVC 所制备的 WPCs 具有最好的抗蠕变性能，而 PE 所制备的 WPCs 抗蠕变性能较差。不同塑料基体还表现出对添加剂不同的响应效果。Tajvidi 等[26] 研究了麦秸增强等规聚丙烯 (PP1) 和高抗冲共聚聚丙烯 (PP2) 两种塑料基体，发现 PP2 作为基体时的抗蠕变性能较 PP1 差，但 PP2 作为基体时，使用白云母填料对 WPCs 抗蠕变性能的增强效果较 PP1 明显。

一般来说，再生塑料的流变性、结晶度、极性等性能随着降解而发生改变，但这并不意味着回收塑料所制备的 WPCs 会具有更差的性能[27]。Xu 等[28] 报道了蔗渣增强再生和非再生 PVC 和 HDPE 所制备 WPCs 的蠕变行为，其通过加速蠕变试验发现，再生塑料所制备的 WPCs 均具有更小的蠕变变形。Najafi 等[29] 报道了相似的结果，在相同条件下，再生 HDPE 制备的 WPCs 具有较高的力学性能和较低的蠕变应变，并认为是再生 HDPE 结晶度较高造成的。

2.1.3 偶联剂

通常认为含有大量亲水基团的天然纤维与非极性聚合物不相容。在 WPCs 生产中，常添加偶联剂或界面相容剂，用以形成稳定、均匀、连续及强结合的界面，改善纤维与聚合物之间的微观界面结合[10]。而 Zhou 等[30] 通过纳米压痕技术发现，经三种不同偶联剂处理后的木质纤维的纳米力学性能在 WPCs 中均有不同程度的降低，认为偶联剂对 WPCs 整体力学性能上的改善取决于界面结合的增强程度。

由于纤维和聚合物之间界面结合的改善，WPCs 内部分子链的运动将进一步被抑制，因而偶联剂对 WPCs 蠕变性能存在直接影响。Lee 等[31] 研究了 PP 基 WPCs 的拉伸蠕变性能，发现 MAPP 的加入能使 WPCs 蠕变行为得到明显的改善。Jia 等[32] 报道了使用 γ-氨丙基甲基二乙氧基硅烷 (YH-62) 对木质纤维进行预处理能有效增强 WPCs 界面结合力，并发现当使用 1.5% 的 YH-62 处理的 WPCs 比 3.5% 具有更高的刚度和抗蠕变性能，认为是过量的 YH-62 使界面过厚，增大了纤维与基体之间的滑移。王晓钦等[33] 则报道了随硅烷偶联剂含量的提升，24 h 蠕变测试结束时 PP 基 WPCs 的最大形变量和卸载后的残余应变减小。

2.1.4 润滑剂

润滑剂是 WPCs 中不可或缺的用以改善加工流动性的助剂，有利于改善木质纤维在聚合物基体中的分散性、促进聚合物熔体流动、减少挤出机筒体与 WPCs 熔体间摩擦，获得良好的产品外观。但有研究报道加入过量润滑剂会出现负面影响，反而使力学强度降低，并对 WPCs 的失效机制产生影响[34-35]。

复配润滑剂间的协同作用能减少由单一润滑剂带来的负面影响。王霞等[36] 研究了硬脂酸、石蜡的单一、复配润滑剂组分对 PP 基 WPCs 蠕变性能的影响，发现蠕变形变均随润滑剂含量的增加而增大，认为是润滑剂加剧了 WPCs 内部由于外力引起的分子间滑移，但同时发现添加复配润滑剂后 WPCs 的蠕变形变较添加单一润滑剂相对降低。Dai 等[37] 研究了硬脂酸、石蜡和硬脂酸锌三种润滑剂对 PP 基 WPCs 流变性能和力学性能的影响。同样发现润滑剂的加入对 WPCs 的力学性能存在消极作用，但复配润滑剂的影响较单一润滑剂要小。

2.2 结构因素

2.2.1 宏观结构

实木制品造型困难，对于形状特殊的制品，其生产浪费极其严重。而对于 WPCs 来说，其在生产过程中所具有的流动性，允许其获得各种形状的产品。通过合理的结构设计能使 WPCs 在性能和成本上有很大程度的优化，如空心结构、工字形结构、夹层结构等形状的 WPCs 制品已得到广泛应用。

不同结构的 WPCs 性能特点不同，并受其截

面结构影响。如空心结构 WPCs 的蠕变和疲劳行为受到其尺寸、空心芯数和加载方向的影响[38]。夹层结构具有与工字形结构相似或更好的承载能力，面板能够承受较大的弯曲和面内应力，芯层部分承受横向剪切力，能提供优良的力学性能，同时具有如降噪、隔热等特点[39]。在先进的夹层结构 WPCs 产品上存在许多不同芯层结构设计，包括如蜂窝结构[40]、实心结构[41] 和三维波浪网状[42]等。虽然与其他使用高强高刚度材料制造的复合结构材料相比，采用 WPCs 作为面板的复合结构相对具有较高的蠕变变形，但这种结构优化后 WPCs 制品仍然是一种低成本的，拥有很大的潜力作为结构承重材去替代一些常用材料。

2.2.2　微观结构

蠕变实际上是分子链在微观上发生运动，因而 WPCs 的微观结构对其蠕变行为起重要作用。由于纤维与塑料两种材料化学性质的不同，造成二者界面之间存在弱结合。在二者结合较差的情况下，导致了 WPCs 中产生微小间隙，使分子链有更大的运动空间，从而使蠕变响应更强，并出现更大的不可恢复变形。

高结晶度的原料通常具有更规则的分子排列，一定程度上限制了分子链段的运动。Nitata 等[43] 发现蠕变响应与结晶度相关，并存在一定的经验关系。同时，Mosiewicki 等[44] 的研究发现，WPCs 的结晶度随着贮存期的延长而增加，这均可能影响 WPCs 在长期蠕变的性能。

如图 3 所示，在 WPCs 的挤出过程中，由于熔体流动，纤维存在一定的取向分布，使纤维形成随机交叉排列几率减少，增大材料各向异性，一定程度上减少了分子链间的相互作用[45]。Chevali 等[46] 发现 WPCs 纵向方向的蠕变柔度高于横向的，说明纤维取向对 WPCs 蠕变性能存在影响。Hao 等[45] 通过沿着 WPCs 的挤出方向切割了从 0°到 90° 的偏轴试样，研究了纤维几何结构和取向分布对

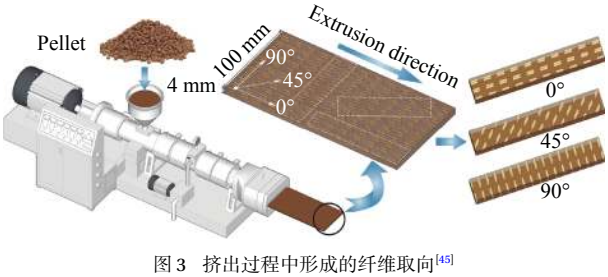


图 3　挤出过程中形成的纤维取向[45]

Fig. 3　Fiber orientation formed during extrusion[45]

WPCs 力学性能、蠕变行为和热膨胀的影响，发现轴向取向的 WPCs 具有最好的力学性能、抗蠕变性能和尺寸稳定性。

2.3　环境因素

2.3.1　温度

一般情况下，由于塑料基体的存在，WPCs 制品对温度波动的抵抗能力很弱，并直接反映在其物理力学性能的变化上。大量研究表明，蠕变会随着温度的升高而加速，其本质是温度升高引起材料内摩擦减少和分子热运动加剧。在外界条件下使用 WPCs 时，由于温度等的环境因素发生变化，其性能变化难以预测[47]。Chang 等[48] 为了验证时间-温度叠加原理 (TTSP) 在 WPCs 中的有效性，进行了 220 天的长期蠕变试验，但发现蠕变曲线受温度振幅变化的影响，难以作为 TTSP 预测结果的参照基准。Pulngern 等[49] 研究了温度对 PVC 基 WPCs 力学性能的影响，发现抗拉强度比拉伸模量对温度变化更敏感，并在高温下表现出更高的蠕变响应。

目前国内外温度对 WPCs 材料性能影响的研究主要集中在高温上，对于低温下 WPCs 力学行为研究较少。在相关研究中，WPCs 在低温下具有更高的刚度[50]。蠕变行为与力学性能有较强的联系，低温下 WPCs 的抗蠕变性能可能得到加强，但另一方面却可能会导致蠕变断裂的提前。

2.3.2　湿度

高湿度环境是大多数材料加速老化或失效的主要因素。WPCs 具有一定的耐水性，但仍然会在高湿度条件下吸收一定的水分，其主要受木质纤维种类和含量的影响。但木材与 WPCs 吸水后的表现不同，其在微观尺度上存在两种不同的过程。当木材吸收水分时，纤维素和半纤维素存在的氢键被水分填充，导致分子链滑移，进而使细胞壁层间的结构发生滑移，但当水分被去除后，木材的性能将会有一定程度恢复[51-52]。水分对 WPCs 的影响主要取决于纤维和塑料之间界面结合，当水分侵入 WPCs 内部时，主要发生了界面之间的脱粘，由于 WPCs 界面间的自恢复能力较差，其力学性能和抗蠕变性能会发生不可逆的严重削弱[53]。如 Najafi 等[54] 发现吸水后 WPCs 的弯曲强度和尺寸稳定性有均有下降，且高木粉含量和高盐度水中浸泡的 WPCs 下降得更明显。

湿度升高会使 WPCs 蠕变加速，且湿度与蠕变曲线之间存在一定经验关系，Lin 等[55] 发现 WPCs

吸收水分后将会使蠕变加剧，且可以通过平移使不同湿度下的蠕变曲线重合。

水分在具有复合结构的 WPCs 中的作用是多样的，胶粘剂或 WPCs 均有可能因水分存在而提前失效。Du 等[40] 在不同湿度下测试了 WPCs 面板蜂窝夹芯材料的蠕变性能，发现高湿度会导致蠕变形变增大，且蠕变断裂时间由 30 天提前至 7 天，并认为 WPCs 面板材料对水分敏感为主因，而由面层与芯层间间粘合剂失效带来的贡献较小。

3 木塑蠕变行为的改善方法

木质纤维与塑料的界面相互作用是影响 WPCs 蠕变特性的重要因素。当木质纤维和塑料两种不同性质的材料混合并形成 WPCs 时，需要克服巨大的界面能，容易导致弱的界面结合产生，使纤维与基体间的应力传递效率较低。通过改善界面结合来提高 WPCs 的性能为常用手段。

3.1 木质纤维改性

3.1.1 物理改性

针对木质纤维强极性的问题，研究者们通常采用对木质纤维进行物理或化学改性的方法，以除去木质材料中极性较大的物质或官能团，并使其表面结构发生改变，进而改善两者间界面相容性。常用物理改性方法如热处理、等离子处理、电晕处理、超声处理等已得到广泛使用。

热处理常用于改善木材产品如尺寸稳定性、生物腐蚀性和耐候性等的性能[56]。同样的改善效果也发现在热处理纤维制备的 WPCs 中[57]。Ayrilmis 等[58] 发现了使用热处理后纤维所制备的 WPCs 的耐水性较未经处理纤维有显著提高，但断裂模量 (MOR) 和弹性模量 (MOE) 分别下降了 5%~19% 和 7%~22%。这是由于随着热处理时间的延长，半纤维素和纤维素会发生一定程度的降解，从而影响了 WPCs 的力学性能。Yang 等[59] 研究了热处理木质纤维对 WPCs 蠕变行为的影响，结果表明对木质纤维热处理后，由于纤维极性降低，塑料包裹效果更好，WPCs 具有更好的抗蠕变性能。

如图 4 所示，等离子体处理能够在纤维表面引入自由基和官能团，并改变其微观形貌，且对材料本身性能影响较小，有助于改善 WPCs 性能[60]。

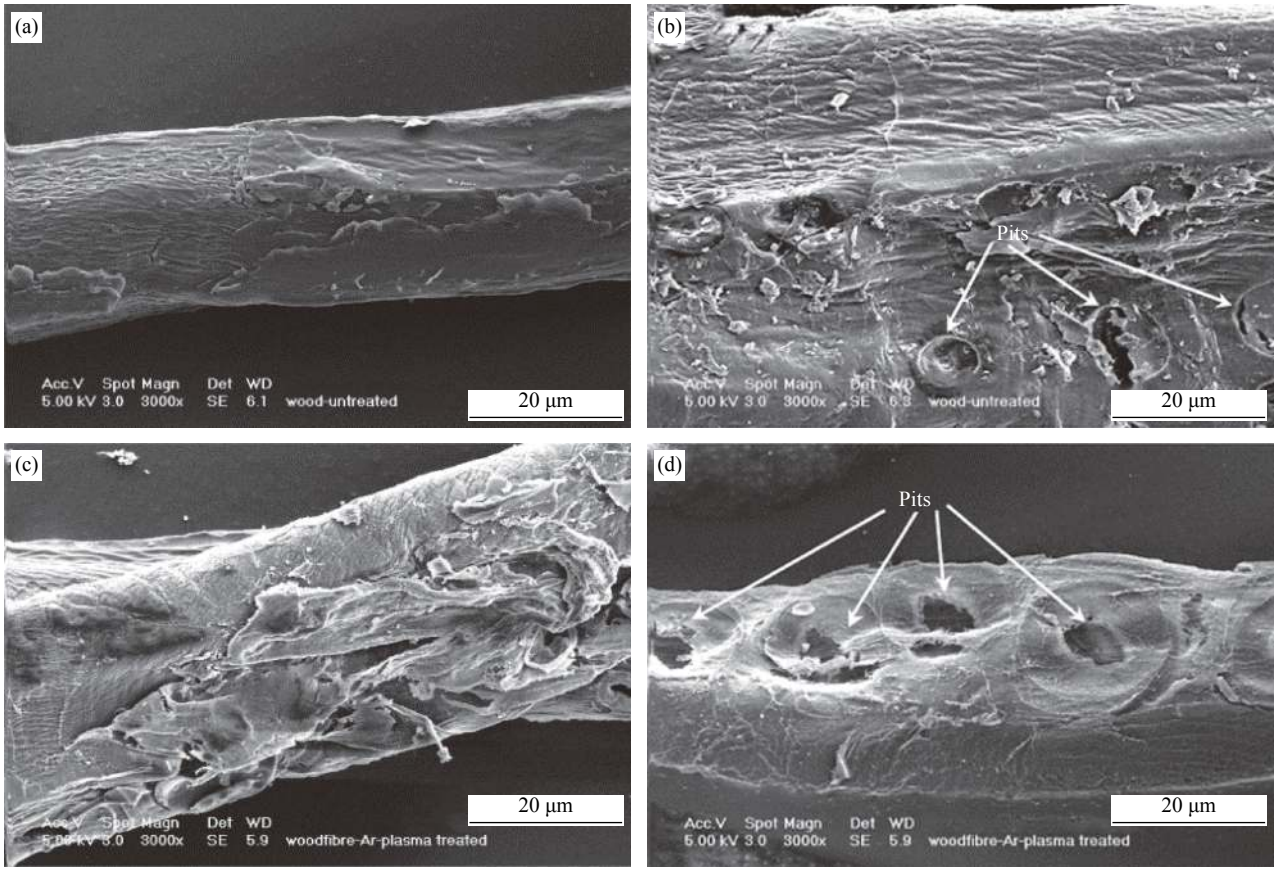


图 4 等离子体处理前后纤维表面形貌的对比：(a)、(b) 处理前；(c)、(d) 处理后[60]

Fig. 4 Changes of fiber surface after plasma treatment: (a), (b) Untreated; (c), (d) Treated[60]

Militký等[61]采用激光、臭氧、酶和等离子体四种方法对黄麻织物进行处理，并用以制备黄麻/环氧复合材料。结果表明，在不同试验温度下，经不同处理后试样的蠕变变形均明显减小，认为是由于处理后纤维表面产生了微孔，使表面变得更粗糙，增强了纤维和基体相互作用，从而限制了分子链段的运动。

3.1.2 化学改性

化学改性的主要目的是通过化学反应解决木质纤维强极性的问题，用以提高木质纤维与塑料基体的结合力。通常的化学处理，能够使纤维表面羟基发生变化，并在 WPCs 中通过化学键桥增强纤维与基体之间的相容性[62]。同时，化学处理会改变木质纤维中的成分及比例，并使微观形态改变，其内部增强机制较复杂。

碱处理常用于天然纤维的改性处理，能够增强纤维力学性能，并改变纤维表面结构[63]。Wang 等[21]研究了稻草抽提物对稻草/HDPE 复合材料的影响，发现与冷水、热水和 1% 碱溶液三种方法去除抽出物后的材料相比，未进行抽提处理的稻草/HDPE 复合材料的抗蠕变性能最差，认为抽提物对界面结合是消极的。另一方面，使用水抽提后纤维制备的稻草/HDPE 复合材料的蠕变变形略低于碱处理后的。虽然碱处理后去除了大部分抽出物，且纤维素占比提升，但碱处理后纤维表面暴露的羟基较多，使其难以在 WPCs 中分散，从而使其在性能上提升并不明显。Jabbar 等[64]研究了不同加入量 (0 wt%、1 wt%、5 wt% 和 10 wt%) 碱处理后的超细黄麻纤维 (PJF) 对黄麻-环氧复合材料蠕变性能的影响。发现 PJF 的存在能够使材料的抗蠕变性能显著提高，且随着 PJF 加入量的增加，其提高更明显。认为 PJF 在材料中起到了抑制聚合物链滑移和使其重新定向的作用。

乙酰化可将具有亲水性的羟基取代为疏水性的乙酰基，减小纤维表面的自由能，从而改善木质纤维的极性，同时由于在处理中纤维非晶态部分受损，乙酰化纤维通常具有更高的结晶度[65]。如图 5 所示，Hung 等[66]研究了木质纤维乙酰化对 WPCs 的影响。结果表明，WPCs 的抗弯强度、抗拉强度和抗蠕变性能随着乙酰化木材的增重率 (WPG) 的增加而增强，但当 WPCs 的增重率超过 13% 时，木材的抗弯强度、抗拉强度和抗蠕变性能均呈下降趋势。这是由于过度的乙酰化会使木质纤维软化，致使 WPCs 性能变差[67]。

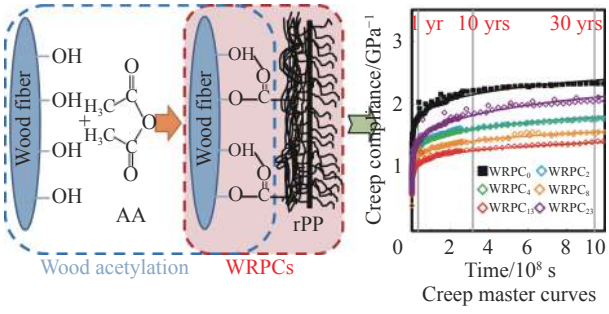


图 5 乙酰化木质纤维对木塑复合材料 (WPCs) 抗蠕变性能的增强机制及效果[66]

Fig. 5 Mechanism and effect of acetylated wood fiber on the creep resistance of wood plastic composites (WPCs)[66]

Wang 等[68]报道了亚麻纤维分别经过碱化、硅烷化和乙酰化处理后，所制备 WPCs 的蠕变性能均得到了很大改善。经过 16 天的湿热处理后，三种不同处理方式的蠕变柔量分别比未处理试样下降 31.54%、20.78%、25.73%。说明了化学处理可以有效地增强 WPCs 对外部条件变化的稳定性。

3.2 界面结合增强

3.2.1 界面相容剂

改善木质纤维与聚合物基体间存在的界面问题，能有效提高 WPCs 的抗蠕变性能。在早期研究中，苯乙烯-丁二烯嵌段共聚物 (SBS) 常被用于改善 WPCs 界面性能，但纤维与基体界面结合效率较低。低分子量有机增容剂，如异氰酸酯[69]、硅烷[70]等，属于反应型增容剂。其分子结构上具有的官能团能够提供较强的界面结合，但价格相对昂贵。采用如马来酸酐 (MAH)、丙烯酸 (AA)、甲基丙烯酸甲酯 (MMA)、甲基丙烯酸缩水甘油酯 (GMA) 等极性单体接枝聚合物作为界面相容剂在实际应用中更可行。

马来酸酐接枝聚烯烃 (如 PE、PP) 由于成本低、效率高，被广泛使用。这种相容剂能够在 WPCs 内部通过反应在纤维表面形成交联网络，并形成强的结合界面，能够有效提升 WPCs 的性能[31, 71]。然而在高 MAH 含量下，由于自由基反应而导致基体分子断裂的增加，小分子碎片的形成会加剧基体分子的运动，从而产生较大的蠕变形变和不可逆残余变形[72]。

常规接枝共聚物通常仅与单一单体进行接枝，在 WPCs 中会发生由于分散或接触问题而造成接枝单体导致的基团利用不足的现象。多单体接枝能够结合多种界面反应的机制，能有效提高不同原料间的相容性，使所接枝基团利用率提高[73]。

Hong 等[74] 报道了三元单体接枝共聚物 MAH、MMA 和丙烯酸丁酯 (BA) 在稻草/PP 复合材料中的应用效果。发现该增容剂接枝率高，接枝侧链长，含大量羰基，能够形成由 MAH、羰基和氢键间的高度接触交替排列，形成更紧密的界面 (图 6)。

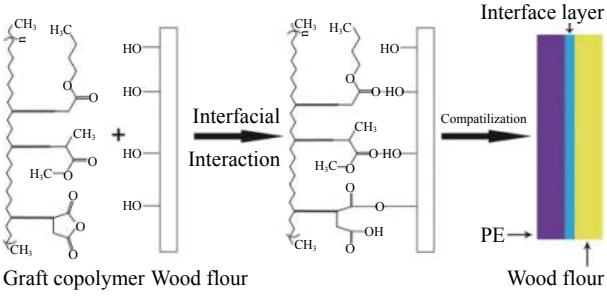


图 6　多接枝共聚物的界面相互作用机制[75]

Fig. 6　Interfacial interaction mechanism of graft copolymer[75]

高分子偶联剂难以渗透到纤维表面上的微小空穴中，而低分子偶联剂却能够有效渗透，并形成一个接触更充分的界面。Hong 等[75] 在其另一项研究中报道了两种不同分子量增容剂的协同增容应用技术，即用两种不同聚合度 PE 作为接枝载体，接枝了 MAH、MMA 和 BA 三种不同的单体。低分子量增容剂可以穿透高分子量相容剂不能穿透的空腔，达到界面相互作用面积增大的目的，使分子链段运动阻力增大。但由于低分子偶联剂热稳定性较差，其占比不宜过高。

总的来说，添加相容剂能使 WPCs 各组分结合更稳定、均匀的复合界面，操作简单有效，而使用多接枝型或复合型相容剂的效果相比使用接枝单一单体更明显，这主要是由于前者能够有效提高接枝基团利用率，并提供接触更充分的界面，对两相界面结合起协同增强作用。

3.2.2　填料

填料在 WPCs 主要起填补由纤维与塑料不完全结合而产生的微小间隙的作用。无机填料作为一种常见的填料，如滑石粉[76]、二氧化硅[77]、纳米粘土[78]、碳酸钙等，因其成本效益高、来源丰富等优点，被广泛应用于 WPCs 中。

填料的功能与它的形状、尺寸和表面性质有关。研究表明，颗粒尺寸小的填料对 WPCs 具有更好增强效果，但同时填料用量增多会容易发生团聚现象，对其增强效果产生消极影响[79]。不同类型的填料在形态上存在着差异，这对材料破坏时在微观上有显著影响。如图 7 所示，层叠片状型填料 (如高岭土和滑石粉等) 在被施加剪切应力时，其形状的稳定性比块状填料 (如硼酸锌等) 更强[80]。长径比大的针状填料可以提供优良的力学性能，但在生产过程中会存在设备磨损的问题[81]。另一方面，由于填料表面各种化学官能团的存在，其在一定程度上决定了填料在材料中的结合强度，且赋予 WPCs 的吸水性、阻燃性，以及对力学和抗蠕变性能的增强效果[82-83]。

已有研究报道常规填料对 WPCs 蠕变性能的影响。Jia 等[32] 研究了纳米碳酸钙含量对 WPCs 蠕变性能的影响，发现加入 10wt% 纳米碳酸钙时的抗蠕变性能最好。由于碳酸钙的粒径远小于木质纤维，从而在 WPCs 中起到了填补界面间的小间隙的作用。但随着填料含量的增加，可能会产生由于填料结块团聚导致应力集中，致使诱发裂纹扩展的负面作用[84]。Kord 等[85] 发现加入适当量纳米粘土可提高 WPCs 的抗蠕变性能，但高浓度纳米粘土同样出现团聚问题，反而使性能降低。

碳纳米填料是一种集高强度、高刚度、高韧性等特性于一体的材料，被广泛用于提高热塑性塑料的抗蠕变性能[86-88]。其内部增强机制与其他填料相似，但由于其本身优良的性能，力学性能的增强效果优于其他种类填料。已有文献报道碳纳米填料对 WPCs 的增强作用。Faruk 等[89] 发现，当适量碳纳米管 (CNT) 加入 WPCs 中时，其抗拉强度提高至 97.3 MPa。这意味着 CNT 在制备高强度的 WPCs 上具有巨大的潜力。王若丞等[90] 报道了 CNT 对 WPCs 抗蠕变性能的增强效果，发现适量添加 CNT 能使 24 h 最大蠕变应变较未添加减少 22.9%，且稳定阶段的蠕变速率最小。Chaharmahali 等[91] 报道了纳米石墨烯 (NG) 对蔗渣/PP 基复合材料的影响，发现当 NG 含量大于 0.1wt% 时，其抗弯强度的提升效果低于含量为 0.1wt% 时，认为存在团聚问题。Sheshmani 等[92] 在使用纳米石墨烯板 (GNPs) 增强 WPCs 时也报告了类似现象。

3.3　复合结构增强

虽然通过配方改良或原材料改性处理等方法来提高 WPCs 的抗蠕变性能更常见，但由于 WPCs 本身特性限制，其力学及抗蠕变性能很难超过如钢材、碳纤维或玻璃纤维等材料。因此，亦有学者提出类似于木-钢或木-混凝土的复合结构，用以增强 WPCs。而由于 WPCs 具有加工可塑性，这种增强方法具有较广泛的前景。

使用高强材料对 WPCs 进行结构增强在改善

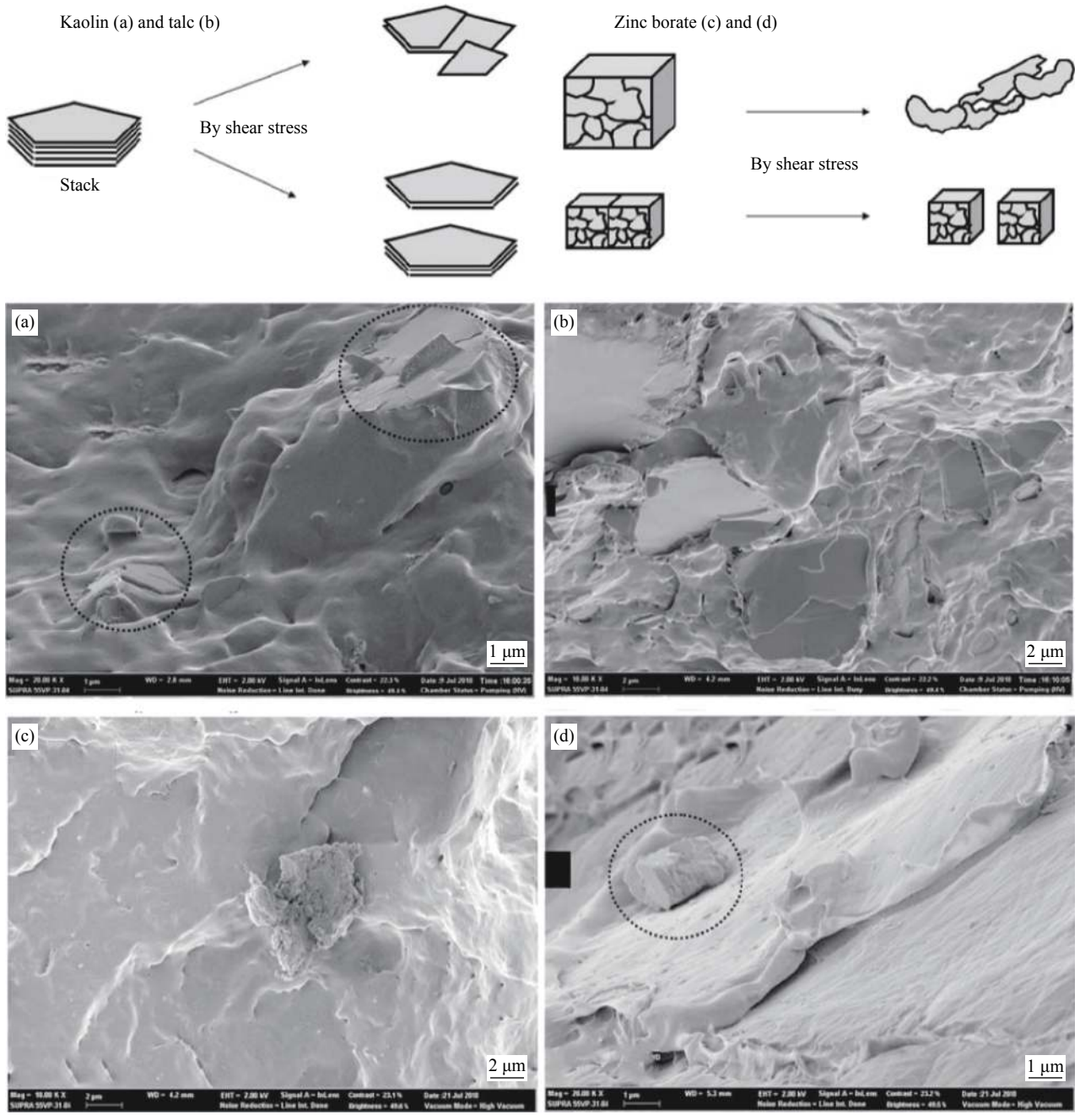


图 7　无机填料在 WPCs 中受剪切荷载时的形态变化: (a) 高岭土；(b) 滑石粉；(c)、(d) 硼酸锌[80]

Fig. 7　Schematic changes of inorganic fillers during shear stress and their morphologies in WPCs systems: (a) Kaolin; (b) Talc; (c), (d) Zinc-borate[80]

WPCs 蠕变性能方面上具有很大的潜力。Pulngern 等[93-95] 将高碳钢作为 WPCs 在弯曲荷载下受拉侧的外部加强材料，以增强其弯曲和抗蠕变性能，发现当平面和侧边加载时的蠕变变形分别降低 48% 和 11%[94]。但由于两者间力学性能的差异及胶粘剂所提供结合强度不足，高碳钢和 WPCs 之间的胶粘结合界面在高荷载下会发生剥离，这将严重影响 WPCs 长期使用的安全性稳定性[95]。虽然钢材在强度、刚度和延性等方面的性能是卓越的，但在室外环境中仍存在腐蚀风险。碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维等无机或合成纤维具有高强、耐久和耐候等特性，是更适宜的增强材料。Naghipour 等[96] 利用了碳纤维布和玻璃纤维布分别对工字梁 WPCs 外部增强，发现增强后 WPCs 抗弯强度与未加固的试样相比，分别提高了 80.3% 和 76.6%。使用加强件对 WPCs 进行增强，其产品力学性能虽有明显改善，但如何合理设计加强件于 WPCs 中的结构位置，平衡两者力学性能之间差

异，使两者间结合更充分紧密，形成一个良好荷载传递界面，却又成为一个新的难题。

WPCs 具有良好的耐水防潮、耐腐防蛀等特性，速生人工林木材及其集成材、单板层积材等重组材料的尺寸稳定性差，硬度和横纹抗压强度低不及 WPCs 的 50%，但其刚性好、拉伸、抗冲击和抗蠕变性能突出。针对 WPCs 和速生木材这两类材料的不同特点，扬长避短、优势互补，王清文等提出了以 WPCs 为壳层，以速生人工林木材及其重组材 (简称实木) 为芯材，通过共挤出成型等方法进行复合，制备了抗蠕变、不脆断、轻质高强、高性价比、耐久性优异的木塑-实木多元共挤复合材料[97-100](图 8)。Fu 等[101] 通过木塑-实木共挤技术将 HDPE 基 WPCs 壳层材料包覆于单板层积材 (LVL) 上，制备了共挤出复合材料 (WPLCs)。虽然 WPLCs 较 LVL 的力学性能较弱，其抗弯强度和模量分别降低了 6.6% 和 12.7%，且在相同应力水平下，表现出更高的瞬时弹性变形和更快进入蠕变稳态阶段，但由于 WPC 壳体的存在，WPLCs 具有较低的蠕变增长率，且对环境湿度变化具有更好耐候性，较 LVL 表现出更稳定的蠕变性能。而 Zong 等[102] 则以 PVC 基 WPCs 为壳层材料，制备了以 LVL 为芯层的 WPLCs，发现 WPLCs 较 LVL 具有更高的抗冲击性和抗弯刚度，且 WPLCs 的蠕变应变低于 LVL，并随表层 WPVCs 木粉含量的增加而减小，且经过 9 次的热水浸泡后，WPLCs 仍基本保持原有外观，具有优异的尺寸稳定性。

4 木塑长期蠕变行为测试方法

4.1 传统测试方法

传统方法是一种直接、简便的用以测量材料蠕变性能的方法，其通过记录材料在恒载条件下的变形历史来反映材料的蠕变性能，常用于短期试验。虽然传统方法更接近实际环境应用中的情形，但用作长期蠕变行为的测量方法时，其缺点亦很明显，如耗时长、成本高等。当环境状态缺乏控制时，WPCs 将受到温度、湿度、紫外线、生物腐蚀等多方面因素的作用[103]，其对蠕变实验的结果存在一定的影响。如图 9 所示，Chang 等[48] 发现 WPCs 在 220 天内的蠕变数据明显受到了温度的波动变化的影响。另一方面，随着时间的延长，WPCs 的物理老化、结晶度变化、局部变形、微裂纹产生等不同因素的积累[104]，导致了传统长期蠕变试验方法结果不准确。因而传统方法更适合于分析材料短期蠕变性能的变化。

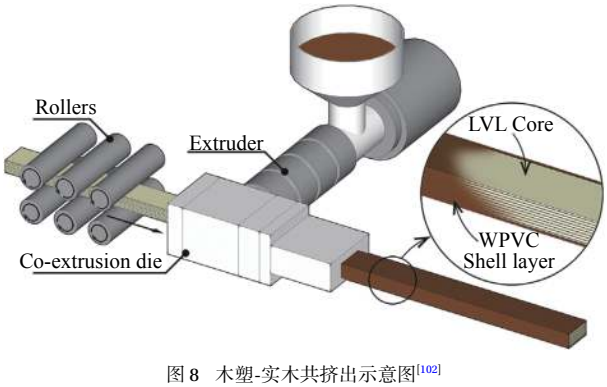


图 8 木塑-实木共挤出示意图[102]

Fig. 8 Schematic of the wood-plastic/lumber composites fabricated by co-extrusion technology[102]

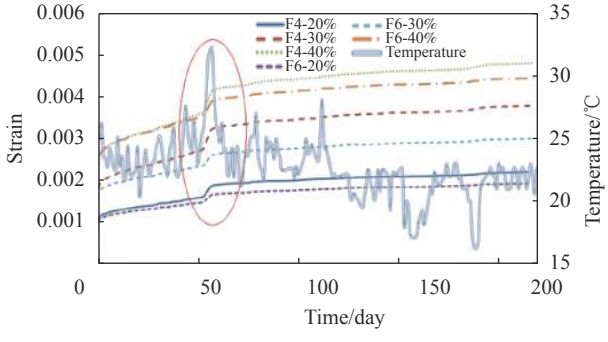


图 9 温度对长期蠕变行为的影响[48]

Fig. 9 Effect of temperature on the long-term creep[48]

4.2 加速测试方法

4.2.1 时间-温度-应力等效叠加法

通过前人大量实验研究发现，聚合物分子的运动受温度和应力的影响，且时间、温度和应力间存在一定的经验关系，并归纳为时间-温度-应力叠加原理 (Time-temperature-stress superposition principle，TTSSP)。根据这一原理，在较长时间尺度内，恒定温度或应力变化对所有随时间变化的响应函数 (如蠕变柔度和模量) 的影响，可以通过短期蠕变的试验数据来预测。

4.2.1.1 时间-温度等效叠加法

通过时间-温度叠加原理 (Time-temperature superposition principle，TTSP)，对不同温度下的短期蠕变数据进行拟合，来获得较长时间的下蠕变数据，是一种简便、常用的蠕变加速试验方法。

当材料满足热流变简单材料理论、随时间环境变化在性能上无变化和所有黏弹性参数具有相同的位移因子的三个条件时[105]。不同温度下的黏弹性数据，可以在对数时间坐标轴上通过水平横

移进行叠合。需要移动的量记为位移因子 (α_T)，如下式所示：

$$\log \alpha_T = \log \frac{\eta(T)}{\eta(T_r)} \tag{4-1}$$

其中：$\eta(T)$ 是一定温度下黏弹性参数与时间的关系函数；T 是试验温度；T_r 是参考温度。

当测试温度在 T_g 至 T_g+100℃ 时，T_g 是玻璃化转变温度，α_T应使用 Williams Landel Ferry (WLF) 法来获得。基于自由体积法，WLF 形式如下式所示：

$$\log \alpha_T = \frac{-C_1(T-T_r)}{C_2+(T-T_r)} \tag{4-2}$$

其中，C_1、C_2 是由物质本身决定的常数。

在这个范围之外，使用 Arrhenius 方程更适合，如下式所示[106]：

$$\log \alpha_T = \frac{E}{2.303R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_r}\right) \tag{4-3}$$

其中：E 是活化能；R 是气体常数。

当使用 Arrhenius 方程确定位移因子α_T时，活化能 E 可以使用 DMA 测得的 T_g 的频率 (f) 之间的关系来确定，其数学关系式如下式所示[107]：

$$E = R\frac{d\ln f}{d1/T_g} \tag{4-4}$$

在早期的研究中，Tajvidi 等[108] 以红麻纤维/HDPE 复合材料为研究对象，使用 TTSP 将 5 种不同温度下 12 min 的短期蠕变曲线拟合成 24 h 的蠕变曲线。在较长的时间尺度上，预测所得蠕变变形较实际数据高，但可以通过蠕变曲线的垂直平移调整来改善这一现象，并认为 WPCs 是一种热流变复杂的材料，其黏弹性对温度的依赖性大于对时间的依赖性。但 Chang 等[109] 则认为 WPCs 是热流变简单黏弹体，由于在其研究中，可以通过单一水平位移即可构造准确的 TTSP 蠕变预测曲线。

对于现存矛盾观点，原因主要是 WPCs 为多相复合材料，使 TTSP 在 WPCs 中的应用比纯塑料更复杂，如塑性基体的性质、所施加应力水平等因素对 TTSP 使用均存在影响。Xu 等[28] 研究了使用蔗渣和不同塑料基体制备的 WPCs 的蠕变行为，发现只有 PVC 基 WPCs 的 TTSP 预测蠕变曲线与实际相符，并认为其他基体材料较高的结晶度导致其预测曲线存在较大偏差。应力水平主要通过两个途径影响材料蠕变性能，一是较高的荷载会破坏材料结构，二是施加的应力超过材料的线性黏弹性区而导致了非线性响应。Durante 等[110] 使用 TTSP 预测了大麻纤维/PLA 复合材料在 30% 和 50% 抗弯强度两种载荷水平下的蠕变性能，发现当施加应力为 50% 抗弯强度和纤维含量为 40wt% 时，实测蠕变数据高于 TTSP 预测所得，并认为是因材料较高的纤维含量，在高载荷长期蠕变试验过程中试样内部微裂纹的发生所致。

在当前使用 TTSP 对 WPCs 蠕变预测研究中，经常出现长期蠕变预测曲线较实际曲线高估的现象[11, 59, 66]。并主要归纳为两个原因：一是在长期蠕变试验中，WPCs 随时间的物理老化不可避免，其力学性能的下降导致实际蠕变数据出现偏差；二是在 TTSP 试验过程中，不同 WPCs 制品对温度的敏感程度不同，温度对 WPCs 性能的影响不可忽视。

4.2.1.2 时间-应力等效叠加法

相比于通过温度变化的加速测试方法，通过应力变化的加速方法较少见，但相较于前者有许多优点。时间-应力叠加原理 (Time-stress superposition principle，TSSP) 适用于试样会在 TTSP 试验温度范围内发生如内部结构不稳定和非线性黏弹行为等情况，而引起错误预测的情况[111]。

与 TTSP 近似，TSSP 法亦存在与应力相关的位移因子 b_σ。基于自由体积法，Jazouli 等[112-113] 提出了一种 b_σ 的计算式，并以 WLF 修正模型表示，如下式所示：

$$\lg b_\sigma = \frac{-D_1(\sigma-\sigma_r)}{D_2+(\sigma-\sigma_r)} \tag{4-5}$$

其中：D_1 和 D_2 材料常数；σ 为试验应力；σ_r 为参考应力。

已有研究报道 TSSP 在 WPCs 长期蠕变行为中的应用。董智贤[114] 通过 TSSP 将 5 种应力水平下 WPCs 的蠕变曲线进行处理，预测了 WPCs 在 5 MPa 应力水平下约 3 年的蠕变行为。Dastoorian 等[115] 讨论了不同应力水平对木粉/HDPE 复合材料弯曲蠕变性能的影响，并使用 TSSP 加速蠕变试验数据。其曲线重构采用单一水平位移，并符合 Arrhenius 方程，认为所研究材料的流变学行为简单。并在此基础上，与 Tajvidi 等[108] 结果进行了比较，认为 TSSP 应比 TTSP 更准确。Chang 等[109] 发现对于 WPCs，通过 TSSP 重构曲线需要额外垂直平移，才能获得与 TTSP 相似的曲线，认为 TTSP 和 TSSP 两种不同的加速试验原理对预测 WPCs 长期蠕变性能存在一定偏差。Homkhiew 等[109] 对橡胶木粉/

再生 PP 复合材料的蠕变行为和蠕变数学模型进行了实验研究。在 25℃ 和 19 MPa 的参考曲线上，TTSP 和 TSSP 两种方法重构得到的曲线基本一致，但两者在曲线末端出现偏差，可能是由较高温度下得到的加速曲线部分影响了 TTSP 预测结果。

总的来说，当施加载荷选择在合适范围内时，使用 TSSP 进行加速蠕变试验更为合适，其可以避免材料在 TTSP 的高温试验下，发生结构失衡和性能不均的情况。

4.2.2 分步叠加法

分步叠加法是基于玻尔耳兹曼叠加原理 (Boltzmann superposition principle，BSP) 及 TTSSP 所形成的一种新型加速测试方法。BSP 认为黏弹性材料对于给定载荷的响应与载荷历史无关。通过 BSP 中加载历史累积效应这一概念，并结合 TTSSP 所描述等效叠加，可以对连续变化或阶跃应力变化的蠕变过程进行分段分析，分步叠加法即在此基础上逐渐形成。

4.2.2.1 分步等温度法

分步等温度法 (Stepped iso-thermal method，SIM) 是一种 TTSP 与 BSP 相结合的加速测试方法，早期应用于预测土工格栅长期蠕变行为[116]。与 TTSP 不同的是，SIM 在整个测试过程中只需使用一个样品，并由一个逐步升温控温程序控制，以获取其在恒定载荷下的应变数据。如图 10 所示，SIM 一般需要在消除其每步升温时带来的热历史后，再进行与 TTSP 相似的步骤，获得与 TTSP 等同的加速曲线。一般需要对 SIM 测得曲线进行垂直偏移，重标和水平偏移三个步骤处理[41]。

Acherener 等[117] 使用纯 PP 作为研究样本，发现不同的测试参数，如每一步停留时间和每一步的温度间隔，都会导致处理所得曲线之间产生偏差。基于前人的研究，SIM 亦可用以预测 WPCs 的长期蠕变行为。Huang 等[118] 发现 SIM 对其 WPCs 长期蠕变的预测结果虽然在一定范围内有与实际曲线均具有很好的拟合度，但与 TTSP 相似，预测曲线存在高估的问题。

SIM 虽然包含 TTSP 的缺点，但由于在所使用温度范围内只对一个样本进行测试，能够忽略个体带来的误差，并具有省时性。因此，SIM 较 TTSP 方法更具优势。但另一方面，由于 SIM 具有升温步骤，需要样品在较短时间内达到目标温度，因此对样品的选择有较严格的要求，如导热系数、样品尺寸和形状结构等参数均有要求。选择不适当的样品会导致所得重构曲线误差较大，而这一点也限制了 SIM 的推广使用。

4.2.2.2 分步等应力法

在TSSP 和SIM 的基础上，Giannopoulos 等[119-120] 首次提出了一种预测 Kevlar 49 和 Technora 两种芳纶纤维长期蠕变行为的新方法，即分步等应力法 (Stepped iso-stress method，SSM)。该方法兼有 TSSP 和 SIM 的优点，亦克服了在 SIM 和 TTSP 试验中，材料由于高温而发生物理性质变化的缺点。简单地说，SSM 的整个测试过程与 SIM 方法相似，但整个测试过程是在恒定的环境条件下，通过逐步提升应力来实现加速蠕变。如图 11 所示，由于应力加载阶段历史的缺失，需要对每个应力变化阶段进行弹性变形消除和基点修正。

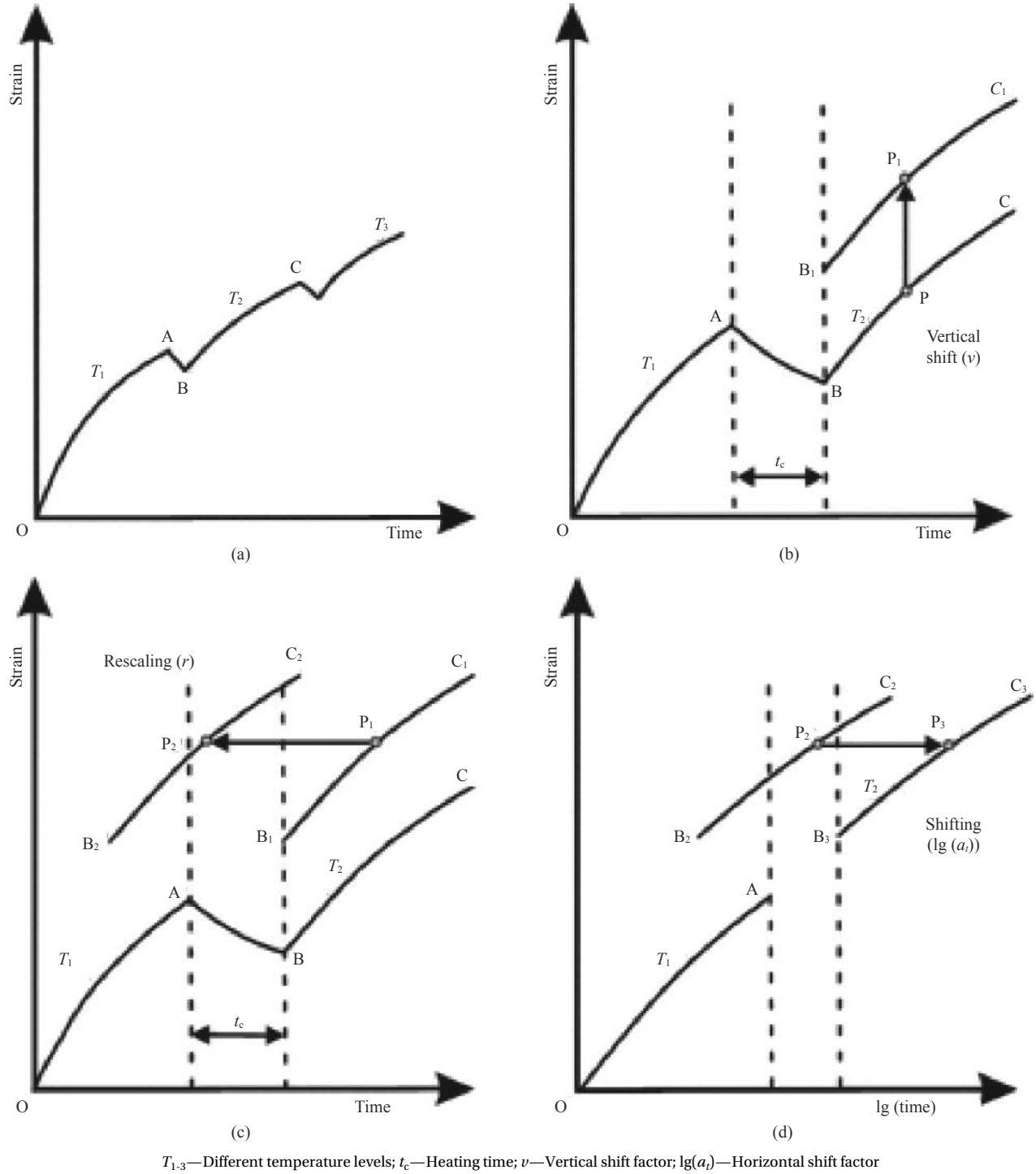
近年来已有学者将 SSM 应用于 WPCs 的长期蠕变行为预测中。Hsu 等[41] 发现，无论是单层，还是夹层结构的竹粉/PP 复合材料的长期蠕变行为，SSM 均能很好地预测。Huang 等[118] 采用 SIM 和 SSM 方法研究了 MAPP 含量对 WPCs 产品长期蠕变行为的影响。结果表明，SSM 所重构曲线较 SIM 更精确，并且对不同 MAPP 含量的 WPCs 的蠕变曲线都有较好的拟合度。

相关研究认为，由于 SSM 测试过程在恒定的温度下进行，可以避免 SIM 中由于样品的热学性质不稳定、导热系数较低或尺寸较大等，导致 SIM 的应用受到温度变化和过长或过短加热时段的影响[121]。对于大型、异形结构的 WPCs 产品，SSM 是一种合适测试手段。

虽然 SIM 和 SSM 这两种新的加速试验方法已得到广泛学者的认可，但对曲线重构的处理并不完全统一，不断有学者提出改进或修正的方法。对于 SIM 和 SSM 来说，曲线重构方法尤为重要，相关研究应着重解决曲线预测准确性的问题，并实行统一的标准[122]。

5 总结

目前对于木塑复合材料 (WPCs) 蠕变性能的研究已有一定积累，但由于 WPCs 材料本身的复杂性，影响 WPCs蠕变性能的因素较多，各因素间的耦合作用尚未被揭示，现今仍缺乏系统且统一的理论。改善 WPCs 蠕变性能已发展出多种途径，如原材料改性、添加增强填料、界面结合改善和复合结构设计等方法均已在业界得到推广应用，



$T_{1\text{-}3}$—Different temperature levels; t_c—Heating time; v—Vertical shift factor; lg(a_t)—Horizontal shift factor

图 10　分步等温度法 (SIM) 的曲线重构示意图[116]

Fig. 10　Curve reconstruction diagram of stepped iso-thermal method (SIM)[116]

相应工艺也逐渐成熟。进一步的研究可尝试新型热可逆共价交联塑料基体的开发，实现加工温度下可高效塑化，使用温度下可永久交联，从而维持结构稳定。此外，通过复合结构增强设计，并采用共挤出成型技术制备的 WPCs 产品表现出较好的增强效果和经济效益，是提高 WPCs 抗蠕变性能的另一重要发展方向。长期服役下材料的安全性一直是 WPCs 在实际应用中的焦点，预测其在许用载荷下的蠕变行为具有重要意义，但 WPCs 蠕变加速测试方法的开发、修正及相关标准制定

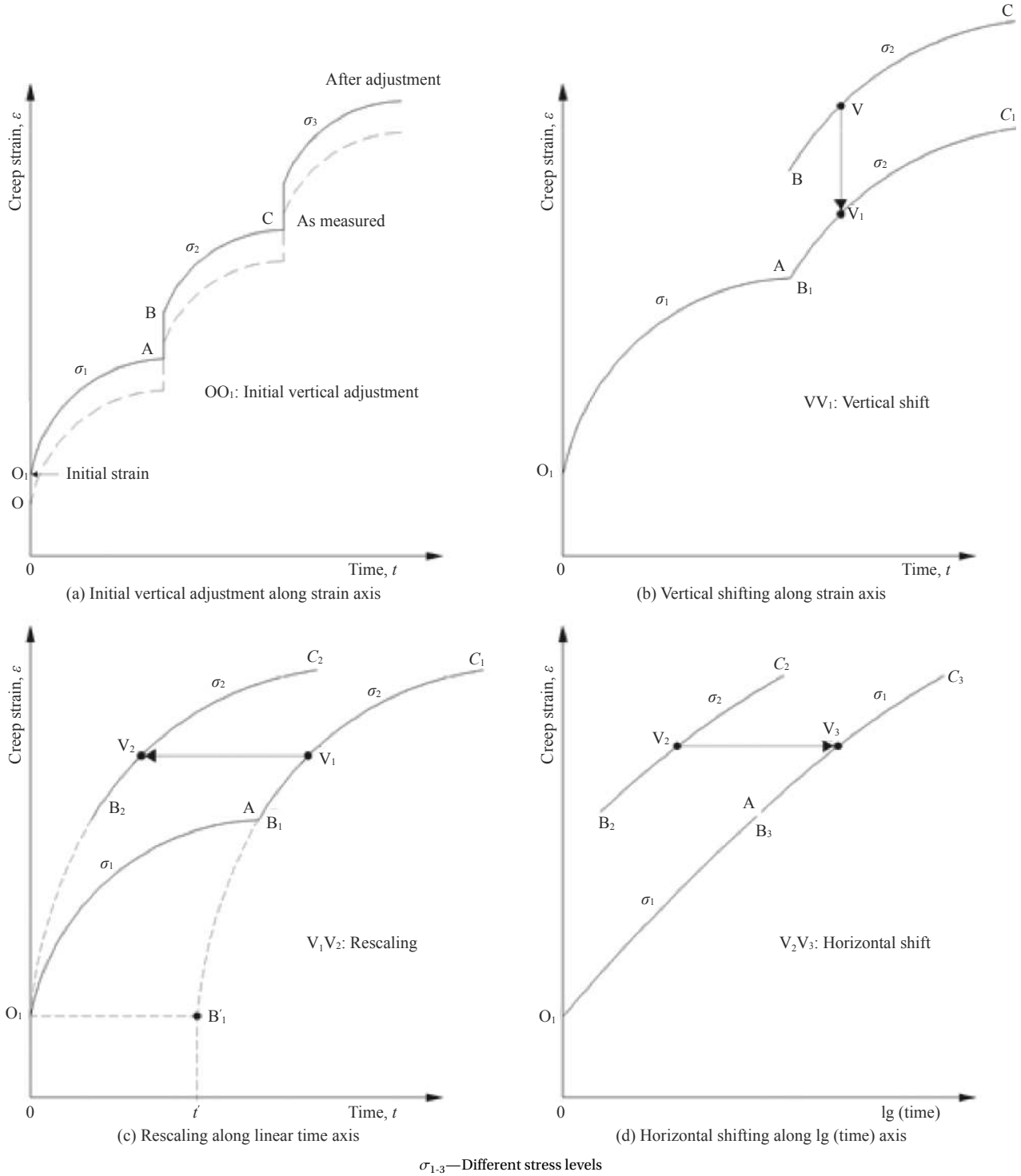


图 11　分步等应力法 (SSM) 的曲线重构示意图[119]

Fig. 11　Curve reconstruction diagram of stepped iso-stress method (SSM)[119]

工作尚未完成，为快速准确地获得长期蠕变数据，仍需要相关学者进行深入研究。总的来说，当前 WPCs 发展迅速，但在改善 WPCs 蠕变性能上仍有很大的改进空间。相信不久的将来，随着 WPCs 在性能上的改善，其应用范围将进一步扩大，并成为生活中一种常见的工程应用材料。

参考文献：

[1] KUMAR V, TYAGI L, SINHA S. Wood flour-reinforced plastic composites: A review[J]. Reviews in Chemical En-

gineering，2011，27：253-264.

[2] MITCHELL M R, LINK R E, HAMEL S E, et al. Tension and compression creep apparatus for wood-plastic composites[J]. Journal of Testing and Evaluation，2011，39(6)：103715.

[3] 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.
YIN Quanfu, DI Mingwei. Research progress for creep properties of wood-plastic composites[J]. China Plastics Industry，2011，39(7)：10-14(in Chinese).

[4] 薛菁. Hdpe/木粉复合材料抗蠕变性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2010.
XUE Jing. Research of the bending resistance HDPE/wood-polymer composites[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2010(in Chinese).

[5] CHANG F C, LAM F, KADLA J F. The effect of temperature on creep behavior of wood-plastic composites[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites，2014，33(9)：883-892.

[6] HOMKHIEW C, RATANAWILAI T, THONGRUANG W. Time-temperature and stress dependent behaviors of composites made from recycled polypropylene and rubberwood flour[J]. Construction and Building Materials，2014，66：98-104.

[7] 曹岩, 徐海龙, 王伟宏, 等. 模压成型的杨木纤维/高密度聚乙烯复合材料蠕变性能和蠕变模型[J]. 复合材料学报, 2016, 33(6)：1174-1178.
CAO Yan, XU Hailong, WANG Weihong, et al. Creep properties and creep model of poplar wood fiber/high density polyethylene composites prepared by compression molding[J]. Acta Materiae Composite Sinica，2016，33(6)：1174-1178(in Chinese).

[8] 梅生启, 唐广, 杨斌, 等. 基于分数阶黏弹性模型的木塑复合材料蠕变/回复性能分析[J]. 复合材料学报, 2020, 37(8)：2055-2064.
MEI Shengqi, TANG Guang, YANG Bin, et al. Creep/recovery behavior analysis of wood-plastic composites based on fractional order viscoelastic model[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2020，37(8)：2055-2064(in Chinese).

[9] YEO S S, HSUAN Y G. Evaluation of creep behavior of high density polyethylene and polyethylene-terephthalate geogrids[J]. Geotextiles and Geomembranes，2010，28(5)：409-421.

[10] 石恒冲, 李斌. 木塑复合材料界面相容剂的研究进展[J]. 化学与粘合, 2007, 29(1)：44-48.
SHI Hengchong, LI Bin. Progress in research of interfacial compatibilizers for wood plastics composites[J]. Chemistry and Adhesion，2007，29(1)：44-48(in Chinese).

[11] XU Y, LEE S Y, WU Q. Creep analysis of bamboo high-density polyethylene composites: Effect of interfacial treatment and fiber loading level[J]. Polymer Composites，2011，32(5)：692-699.

[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(in Chinese).

[13] WANG W H, HUANG H B, DU H H, et al. Effects of fiber size on short-term creep behavior of wood fiber/HDPE composites[J]. Polymer Engineering & Science，2015，55(3)：693-700.

[14] LI Y. Effect of coupling agent concentration, fiber content, and size on mechanical properties of wood/hdpe composites[J]. International Journal of Polymeric Materials，2012，61(11)：882-890.

[15] 曹岩, 王伟宏, 王海刚, 等. 制备方法对木塑复合材料弯曲性能的影响[J]. 复合材料学报, 2013, 30(S1)：311-314.
CAO Yan, WANG Weihong, WANG Haigang, et al. Effect of preparation method on the flexural properties of WPC[J]. Acta Materiae Composite Sinica，2013，30(S1)：311-314(in Chinese).

[16] 徐海龙, 曹岩, 王伟宏, 等. 杨木纤维尺寸对热压成型杨木纤维/高密度聚乙烯复合材料力学和蠕变性能的影响[J]. 复合材料学报, 2016, 33(6)：1168-1173.
XU Hailong, CAO Yan, WANG Weihong, et al. Effects of poplar wood fiber size on mechanical and creep properties of poplar wood fiber/high-density polyethylene composites prepared by hot-compression molding[J]. Acta Materiae Composite Sinica，2016，33(6)：1168-1173(in Chinese).

[17] GEORGIOPOULOS P, KONTOU E, CHRISTOPOULOS A. Short-term creep behavior of a biodegradable polymer reinforced with wood-fibers[J]. Composites Part B: Engineering，2015，80：134-144.

[18] 陈冬梅, 姜良朋, 刘丁宁, 等. 四种壳类纤维/聚氯乙烯木塑复合材料的蠕变及磨损性能[J]. 复合材料学报, 2018, 35(6)：1464-1471.
CHEN Dongmei, JIANG Liangpeng, LIU Dingning, et al. Creep and wear properties of four different types of husk fibers/polyvinyl choride composites[J]. Acta Materiae Composite Sinica，2018，35(6)：1464-1471(in Chinese).

[19] TAN W, HAO X L, FAN Q, et al. Bamboo particle reinforced polypropylene composites made from different fractions of bamboo culm: Fiber characterization and analysis of composite properties[J]. Polymer Composites，2019，40(12)：4619-4628.

[20] MU B S, WANG H G, HAO X L, et al. Morphology, mechanical properties and dimensional stability of biomass particles/high density polyethylene composites: Effect of species and composition[J]. Polymers, 2018, 10(3): 308.

[21] WANG H B, LIN F Z, QIU P P, et al. Effects of extractives on dimensional stability, dynamic mechanical properties, creep, and stress relaxation of rice straw/high-density polyethylene composites[J]. Polymers, 2018, 10(10): 1176.

[22] OU R X, XIE Y J, WOLCOTT M P, et al. Effect of wood cell wall composition on the rheological properties of wood particle/high density polyethylene composites[J]. Composites Science and Technology, 2014, 93: 68-75.

[23] OU R X, XIE Y J, WOLCOTT M P, et al. Morphology, mechanical properties, and dimensional stability of wood particle/high density polyethylene composites: Effect of removal of wood cell wall composition[J]. Materials & Design, 2014, 58: 339-345.

[24] CHAN C M, VANDI L, PRATT S, et al. Composites of wood and biodegradable thermoplastics: A review[J]. Polymer reviews, 2017, 58(3): 444-494.

[25] SAIN M M, BALATINECZ J, LAW S. Creep fatigue in engineered wood fiber and plastic compositions[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2000, 77(2): 260-268.

[26] TAJVIDI M, SIMON L C. High-temperature creep behavior of wheat straw isotactic/impact-modified polypropylene composites[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2013, 28(10): 1406-1422.

[27] NAJAFI K S. Use of recycled plastics in wood plastic composites-A review[J]. Waste Management, 2013, 33(9): 1898-1905.

[28] XU Y J, WU Q L, LEI Y, et al. Creep behavior of bagasse fiber reinforced polymer composites[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(9): 3280-3286.

[29] NAJAFI A, NAJAFI S K. effect of load levels and plastic type on creep behavior of wood sawdust/HDPE composites[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2008, 28(21): 2645-2653.

[30] ZHOU Y H, FAN M Z, LIN L Y. Investigation of bulk and in situ mechanical properties of coupling agents treated wood plastic composites[J]. Polymer Testing, 2017, 58: 292-299.

[31] LEE S Y, YANG H S, KIM H J, et al. Creep behavior and manufacturing parameters of wood flour filled polypropylene composites[J]. Composite Structures, 2004, 65(3-4): 459-469.

[32] JIA M Y, XUE P, ZHAO Y S, et al. Creep behaviour of wood flour/poly (vinyl chloride) composites[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2009, 24(3): 440-447.

[33] 王晓钦. 聚丙烯基木塑复合材料流变及力学性能的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
WANG Xiaoqin. Study on rheological and mechanical properties of wood-plastic composites based on polypropylene[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013(in Chinese).

[34] ADHIKARY K B, PARK C B, ISLAM M R, et al. Effects of lubricant content on extrusion processing and mechanical properties of wood flour-high-density polyethylene composites[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2010, 24(2): 155-171.

[35] LI H, LAW S, SAIN M. Process rheology and mechanical property correlationship of wood flour-polypropylene composites[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2004, 23(11): 1153-1158.

[36] 王霞. 润滑剂对pp基木塑复合材料流变性能的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
WANG Xia. Effects of lubricant on rheological properties of wood fiber/polypropylene composites[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2016(in Chinese).

[37] DAI L, WANG X, ZHANG J M, et al. Effects of lubricants on the rheological and mechanical properties of wood flour/polypropylene composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(25): 47667.

[38] PULNGERN T, CHUCHEEPSAKUL S, PADYENCHEAN C, et al. Effects of cross-section design and loading direction on the creep and fatigue properties of wood/PVC composite beams[J]. Journal of Vinyl and Additive Technology, 2010, 16(1): 42-49.

[39] BIRMAN V, KARDOMATEAS G A. Review of current trends in research and applications of sandwich structures[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 142: 221-240.

[40] DU Y C, YAN N, KORTSCHOT M T. An experimental study of creep behavior of lightweight natural fiber-reinforced polymer composite/honeycomb core sandwich panels[J]. Composite Structures, 2013, 106: 160-166.

[41] HSU C Y, YANG T C, WU T L, et al. Effects of a layered structure on the physicomechanical properties and extended creep behavior of bamboo-polypropylene composites (BPCS) determined by the stepped isostress method[J]. Holzforschung, 2018, 72(7): 589-597.

[42] MOHAMMADABADI M, YADAMA V, GENG J. Creep behavior of 3D core wood-strand sandwich panels[J]. Holzforschung, 2018, 72(6): 513-519.

[43] NITTA K H, MAEDA H. Creep behavior of high density polyethylene under a constant true stress[J]. Polymer

Testing，2010，29(1)：60-65.

[44] MOSIEWICKI M A, MARCOVICH N E, ARANGUREN M I. Creep behavior of wood flour composites made from linseed oil-based polyester thermosets[J]. Journal of Applied Polymer Science，2011，121(5)：2626-2633.

[45] HAO X L, ZHOU H Y, MU B S, et al. Effects of fiber geometry and orientation distribution on the anisotropy of mechanical properties, creep behavior, and thermal expansion of natural fiber/HDPE composites[J]. Composites Part B: Engineering，2020，185：107778.

[46] CHEVALI V S, JANOWSKI G M. Flexural creep of long fiber-reinforced thermoplastic composites: Effect of processing-dependent fiber variables on creep response[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing，2010，41(9)：1253-1262.

[47] OEVER M V D, MOLENVELD K. Creep deflection of wood polymer composite profiles at demanding conditions[J]. Case Studies in Construction Materials，2019，10：e224.

[48] CHANG F C, LAM F, KADLA J F. Using master curves based on time-temperature superposition principle to predict creep strains of wood-plastic composites[J]. Wood Science and Technology，2013，47(3)：571-584.

[49] PULNGERN T, CHITSAMRAN T, CHUCHEEPSAKUL S, et al. Effect of temperature on mechanical properties and creep responses for wood/PVC composites[J]. Construction and Building Materials，2016，111：191-198.

[50] FINI S H, ERCHIQUI F, FARZANEH M. Investigating the elastic deformation of wood-plastic composites at cold temperature using the bubble inflation technique[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials，2013，28(3)：431-441.

[51] NAVI P, PITTET V, PLUMMER C J G. Transient moisture effects on wood creep[J]. Wood Science and Technology，2002，36(6)：447-462.

[52] HSIEH T Y, CHANG F C. Effects of moisture content and temperature on wood creep[J]. Holzforschung，2018，72(12)：1071-1078.

[53] NAJAFI S K, SHARIFNIA H, TAJVIDI M. Effects of water absorption on creep behavior of wood-plastic composites[J]. Journal of Composite Materials，2008，42(10)：993-1002.

[54] KAZEMI N S, YOUNESI K H. Effect of sea water on water absorption and flexural properties of wood-polypropylene composites[J]. European Journal of Wood and Wood Products，2011，69(4)：553-556.

[55] LIN W S, PRAMANICK A K, SAIN M. Determination of material constants for nonlinear viscoelastic predictive model[J]. Journal of Composite Materials，2016，38(1)：19-29.

[56] KAMDEM D P, PIZZI A, JERMANNAUD A. Durability of heat-treated wood[J]. European Journal of Wood and Wood Products，2002，60(1)：1-6.

[57] KABOORANI A, FAEZIPOUR M, EBRAHIMI G. Feasibility of using heat treated wood in wood/thermoplastic composites[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites，2008，27(16-17)：1689-1699.

[58] AYRILMIS N, JARUSOMBUTI S, FUEANGVIVAT V, et al. Effect of thermal-treatment of wood fibres on properties of flat-pressed wood plastic composites[J]. Polymer Degradation and Stability，2011，96(5)：818-822.

[59] YANG T C, YI C C, WU T L, et al. Effects of heat-treated wood particles on the physico-mechanical properties and extended creep behavior of wood/recycled-hdpe composites using the time-temperature superposition principle[J]. Materials，2017，10(4)：365.

[60] YUAN X W, JAYARAMAN K, BHATTACHARYYA D. Effects of plasma treatment in enhancing the performance of woodfibre-polypropylene composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing，2004，35(12)：1363-1374.

[61] MILITKY J, JABBAR A. Comparative evaluation of fiber treatments on the creep behavior of jute/green epoxy composites[J]. Composites Part B: Engineering，2015，80：361-368.

[62] LI X, TABIL L G, PANIGRAHI S. Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: A review[J]. Journal of Polymers and the Environment，2007，15(1)：25-33.

[63] GODA K, SREEKALA M S, GOMES A, et al. Improvement of plant based natural fibers for toughening green composites-effect of load application during mercerization of ramie fibers[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing，2006，37(12)：2213-2220.

[64] JABBAR A, MILITKÝ J, MADHUKAR KALE B, et al. Modeling and analysis of the creep behavior of jute/green epoxy composites incorporated with chemically treated pulverized nano/micro jute fibers[J]. Industrial Crops and Products，2016，84：230-240.

[65] BLEDZKI A K, MAMUN A A, LUCKA-GABOR M, et al. The effects of acetylation on properties of flax fibre and its polypropylene composites[J]. Express Polymer Letters，2008，2(6)：413-422.

[66] HUNG K C, WU T L, CHEN Y L, et al. Assessing the effect of wood acetylation on mechanical properties and extended creep behavior of wood/recycled-polypropylene composites[J]. Construction and Building Materials，2016，108：139-145.

[67] ZAFEIROPOULOS N E, BAILLIE C A. A study of the effect

of surface treatments on the tensile strength of flax fibres: Part II. Application of weibull statistics[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007, 38(2): 629-638.

[68] WANG X, PETRŮ M, YU H. The effect of surface treatment on the creep behavior of flax fiber reinforced composites under hygrothermal aging conditions[J]. Construction and Building Materials, 2019, 208: 220-227.

[69] GUO C G, WANG Q W. Influence of m-isopropenyl-α, α-dimethylbenzyl isocyanate grafted polypropylene on the interfacial interaction of wood-flour/polypropylene composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2008, 109(5): 3080-3086.

[70] XU Y, KAWATA S, HOSOI K, et al. Thermomechanical properties of the silanized-kenaf/polystyrene composites[J]. Express Polymer Letters, 2009, 3(10): 657-664.

[71] ACHA B A, REBOREDO M M, MARCOVICH N E. Creep and dynamic mechanical behavior of PP-jute composites: Effect of the interfacial adhesion[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007, 38(6): 1507-1516.

[72] GAO H, XIE Y J, OU R X, et al. Grafting effects of polypropylene/polyethylene blends with maleic anhydride on the properties of the resulting wood-plastic composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012, 43(1): 150-157.

[73] HONG H Q, LIU T, HE H, et al. Effect of interfacial modifiers on physical properties and flammability properties of PE/wood composites[J]. Polymers and Polymer Composites, 2018, 19(8): 639-646.

[74] HONG H Q, XU H X, HE H, et al. Effect of ternary monomer graft copolymers on morphology and properties of rice chaff filled polypropylene composites[J]. Plastics, Rubber and Composites, 2013, 38(1): 21-26.

[75] HONG H, LIAO H, ZHANG H, et al. Significant improvement in performance of recycled polyethylene/wood flour composites by synergistic compatibilization at multiscale interfaces[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014, 64: 90-98.

[76] LAPCIK L, JINDROVA P, LAPCIKOVA B, et al. Effect of the talc filler content on the mechanical properties of polypropylene composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2008, 110(5): 2742-2747.

[77] DEKA B K, MAJI T K. Effect of silica nanopowder on the properties of wood flour/polymer composite[J]. Polymer Engineering & Science, 2012, 52(7): 1516-1523.

[78] FARUK O, MATUNA L. Nanoclay reinforced hdpe as a matrix for wood-plastic composites[J]. Composites Science and Technology, 2008, 68(9): 2073-2077.

[79] SMITS V, CHEVALIER P, DEHEUNYNCK D, et al. A new filler dispersion technology[J]. Reinforced Plastics, 2008, 52(11): 37-43.

[80] GWON J G, LEE S Y, CHUN S J, et al. Physical and mechanical properties of wood-plastic composites hybridized with inorganic fillers[J]. Journal of Composite Materials, 2011, 46(3): 301-309.

[81] HUUHILO T, MARTIKKA O, BUTYLINA S, et al. Mineral fillers for wood-plastic composites[J]. Wood Material Science & Engineering, 2010, 5(1): 34-40.

[82] HUUHILO T, MARTIKKA O, BUTYLINA S, et al. Impact of mineral fillers to the moisture resistance of wood-plastic composites[J]. Baltic Forestry, 2010, 16(1): 126-131.

[83] NIKOLAEVA M, KÄRKI T. Influence of mineral fillers on the fire retardant properties of wood-polypropylene composites[J]. Fire and Materials, 2013, 37(8): 612-620.

[84] GODARA A, RAABE D, BERGMANN I, et al. Influence of additives on the global mechanical behavior and the microscopic strain localization in wood reinforced polypropylene composites during tensile deformation investigated using digital image correlation[J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(2): 139-146.

[85] KORD B, SHEYKHOLESLAMI A, NAJAFI A. Effect of nanoclay on the flexural creep behavior of wood/plastic composites[J]. Mechanics of Composite Materials, 2016, 51(6): 731-736.

[86] YANG J L, ZHANG Z, FRIEDRICH K, et al. Creep resistant polymer nanocomposites reinforced with multiwalled carbon nanotubes[J]. Macromolecular Rapid Communications, 2007, 28(8): 955-961.

[87] JIA Y, PENG K, GONG X L, et al. Creep and recovery of polypropylene/carbon nanotube composites[J]. International Journal of Plasticity, 2011, 27(8): 1239-1251.

[88] STARKOVA O, BUSCHHORN S T, MANNOV E, et al. Creep and recovery of epoxy/MWCNT nanocomposites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012, 43(8): 1212-1218.

[89] FARUK O, MATUANA L M. Reinforcement of rigid PVC/wood-flour composites with multi-walled carbon nanotubes[J]. Journal of Vinyl and Additive Technology, 2008, 14(2): 60-64.

[90] 王若丞, 张云鹤, 刘烁, 等. 碳纳米管/木塑复合材料的抗蠕变性能研究[C]. 第三届中国国际复合材料科技大会. 杭州, 2017.
WANG Ruocheng, ZHANG Yunhe, LIU Shuo, et al. Creep resistance of carbon nanotubes/wood-plastic composites[C]//The 3th China International Congress on Composition Materials. Hangzhou, 2017(in Chinese).

[91] CHAHARMAHALI M, HAMZEH Y, EBRAHIMI G, et al. Ef-

fects of nano-graphene on the physico-mechanical properties of bagasse/polypropylene composites[J]. Polymer Bulletin，2014，71(2)：337-349.

[92] SHESHMANI S, ASHORI A, ARAB FASHAPOYEH M. Wood plastic composite using graphene nanoplatelets[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2013，58：1-6.

[93] PULNGERN T, KAEWKALYA P, ROSARPITAK V, et al. Experimental and computational investigations of creep responses of wood/pvc composite members[J]. International Polymer Processing，2014，29(3)：307-316.

[94] PULNGERN T, PADYENCHEAN C, ROSARPITAK V, et al. Flexural and creep strengthening for wood/PVC composite members using flat bar strips[J]. Materials & Design，2011，32(6)：3431-3439.

[95] PULNGERN T, CHIMKHLAI A, ROSARPITAK V, et al. Analytical, numerical and experimental investigations on flexural strengthening for wood/PVC composite members using flat bar strips[J]. Construction & Building Materials，2013，41：545-556.

[96] NAGHIPOUR M, NEMATZADEH M, YAHYAZADEH Q. Analytical and experimental study on flexural performance of WPC-FRP beams[J]. Construction and Building Materials，2011，25(2)：829-837.

[97] 王清文, 欧荣贤, 易欣, 等. 一种木塑包覆实木复合材料及其制备方法, 中国: ZL 201910014163.8[P]. 2019-12-17.
WANG Qingwen, OU Rongxian, YI Xin, et al. A WPCs coated solid wood composite and its preparation method, China: ZL 201910014163.8[P]. 2019-12-17(in Chinese).

[98] WANG X Y, SONG K Y, OU R X. effects of carbon black and titanium dioxide on ultraviolet weathering of wood flour-hdpe/lumber composites using multi-phase co-extrusion technology[J]. Bioresources，2017，12(3)：6173-6186.

[99] 傅海涛, 孙理超, 王海刚, 等. 单板层积材-木粉/高密度聚乙烯共挤出复合材料抗低速冲击性能[J]. 复合材料学报, 2018, 35(1)：200-207.
FU Haitao, SUN Lichao, WANG Haigang, et al. Low-velocity impact performance of laminated veneer lumber-wood/high density polyethylene co-extruded composites[J]. Acta Materiae Composite Sinica，2018，35(1)：200-207(in Chinese).

[100] 王海刚, 傅海涛, 王清文, 等. WPC-LVL共挤出复合材料的抗弯性能[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(4)：695-700.
WANG Haigang, FU Haitao, WANG Qingwen, et al. Flexural performance of composites manufactured by wood plastic composites co-extruded with laminated veneer lumber[J]. Journal of Building Materials，2018，21(4)：695-700(in Chinese).

[101] FU H T, DUN M Y, WANG H G, et al. Creep response of wood flour-high-density polyethylene/laminated veneer lumber coextruded composites[J]. Construction and Building Materials，2020，237：117499.

[102] ZONG G G, HAO X L, HAO J X, et al. High-strength, lightweight, co-extruded wood flour-polyvinyl chloride/lumber composites: effects of wood content in shell layer on mechanical properties, creep resistance, and dimensional stability[J]. Journal of Cleaner Production，2020，244：118860.

[103] 龚新怀, 陈良壁. 茶粉/聚丙烯复合材料自然老化性能[J]. 复合材料学报, 2016, 33(7)：1437-1445.
GONG Xinhuai, CHEN Liangbi. Performances of tea dust/polypropylene composites under naturel weathering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2016，33(7)：1437-1445(in Chinese).

[104] 周吓星, 林巧佳, 陈礼辉. 自然气候老化对木塑复合材料蠕变性能的影响[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2011, 39(1)：96-100.
ZHOU Xiaxing, LIN Qiaojia, CHEN Lihui. Impact of the natural weathering on the creep behavior of wood-platic composite[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)，2011，39(1)：96-100(in Chinese).

[105] FERRY J D. Viscoelastic properties of polymers[M]. New York: John Wiley & Sons, 1980.

[106] TAMRAKAR S, LOPEZ-ANIDO R A, KIZILTAS A, et al. Time and temperature dependent response of a wood-polypropylene composite[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing，2011，42(7)：834-842.

[107] LI G, LEE-SULLIVAN P, THRING R W. Determination of activation energy for glass transition of an epoxy adhesive using dynamic mechanical analysis[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry，2000，60(2)：377-390.

[108] TAJVIDI M, FALK R H, HERMANSON J C. Time-temperature superposition principle applied to a kenaf-fiber/high-density polyethylene composite[J]. Journal of Applied Polymer Science，2005，97(5)：1995-2004.

[109] CHANG F C, LAM F, KADLA J F. Application of time-temperature-stress superposition on creep of wood-plastic composites[J]. Mechanics of Time-Dependent Materials，2013，17(3)：427-437.

[110] DURANTE M, FORMISANO A, BOCCARUSSO L, et al. Creep behaviour of polylactic acid reinforced by woven hemp fabric[J]. Composites Part B: Engineering，2017，124：16-22.

[111] HADID M, RECHAK S, TATI A. Long-term bending creep behavior prediction of injection molded composite using stress-time correspondence principle[J]. Materials Science and Engineering: A，2004，385(1-2)：54-58.

[112] JAZOULI S, LUO W, BREMAND F, et al. Application of time-stress equivalence to nonlinear creep of polycarbonate[J]. Polymer Testing，2005，24(4)：463-467.

[113] QAISER A A, PRICE J. Estimation of long-term creep behavior of polycarbonate by stress-time superposition and effects of physical aging[J]. Mechanics of Time-Dependent Materials，2011，15(1)：41-50.

[114] 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.
DONG Zhixian. Modeling and prediction of creep behavior of PP/wood-flour composite[J]. Polymer Materials Science and Engineering，2010，26(5)：89-92(in Chinese).

[115] DASTOORIAN F, TAJVIDI M, EBRAHIMI G. Evaluation of time dependent behavior of a wood flour/high density polyethylene composite[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites，2008，29(1)：132-143.

[116] ALWIS K G N C, BURGOYNE C J. Accelerated creep testing for aramid fibres using the stepped isothermal method[J]. Journal of Materials Science，2008，43(14)：4789-4800.

[117] ACHEREINER F, ENGELSING K, BASTIAN M, et al. Accelerated creep testing of polymers using the stepped isothermal method[J]. Polymer Testing，2013，32(3)：447-454.

[118] HUANG C W, YANG T C, WU T L, et al. Effects of maleated polypropylene content on the extended creep behavior of wood-polypropylene composites using the stepped isothermal method and the stepped isostress method[J]. Wood Science and Technology，2018，52(5)：1313-1330.

[119] GIANNOPOULOS I P, BURGOYNE C J. Prediction of the long-term behaviour of high modulus fibres using the stepped isostress method (SSM)[J]. Journal of Materials Science，2011，46(24)：7660-7671.

[120] GIANNOPOULOS I P, BURGOYNE C J. Stress limits for aramid fibres[J]. Structures and Buildings，2009，162(4)：221-232.

[121] TANKS J, RADER K, SHARP S, et al. Accelerated creep and creep-rupture testing of transverse unidirectional carbon/epoxy lamina based on the stepped isostress method[J]. Composite Structures，2017，159：455-462.

[122] HADID M, GUERIRA B, BAHRI M, et al. Assessment of the stepped isostress method in the prediction of long term creep of thermoplastics[J]. Polymer Testing，2014，34：113-119.