

南京工业大学土木工程学院2022年度科学报告会

GFRP增强PVC基木塑复合材料板 弯曲蠕变性能研究

汇报人：霍瑞丽 副教授

日期：2022.12.28



目 录

Contents



1 研究背景



2 GFRP增强设计与弯曲蠕变试验



3 主要结论



一、研究背景

国家重点研发计划课题五子课题：“生物建材评价分级与装配式建筑部品一体化设计”（2019YFD1101205）

1.1 木塑复合材料 (Wood-Plastic Composites, WPCs)

木塑复合材料是一种以低值废弃的生物质材料如植物秸秆纤维、稻壳纤维或竹木质纤维为原材料，以热塑性树脂为基体，加入发泡剂和偶联剂等热熔生产工艺的可循环加工利用的建筑材料。高效利用废弃的生物基材料，有效减少建筑垃圾和碳排放量，符合国家绿色建筑和可持续发展理念。



◆ **优点：**原料资源化、产品可塑化、应用环保化、成本经济化、回收再生化。

◆ **缺点：**力学强度指标较低；抗蠕变性能差、防火性能差。



PVC木塑



PE木塑



PP木塑



1.2 木塑复合材料的应用



应用场景

Application scenarios

目前已逐步应用于建筑装饰领域（建筑门窗、地板、墙板等）、园林工程领域（凉亭、栈道板、护栏等）、汽车装饰领域等。



木塑墙板



木塑门窗



木塑栈道板和护栏



1.3 研究意义及研究基础



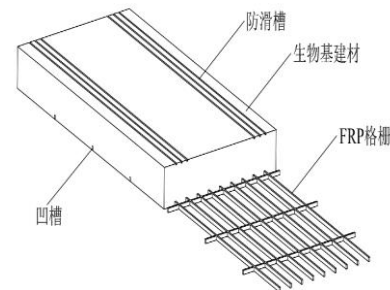
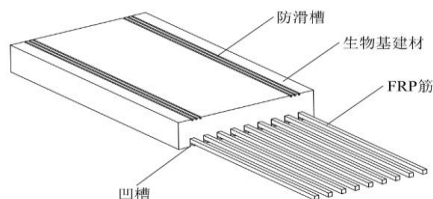
● **蠕变变形大**：木塑复合材料主要由生物质原料与热塑性聚合物组成，**由于热塑性基体固有的粘弹性**，长期荷载作用下，木塑复合材料易发生**蠕变变形**；



● **力学强度低**：**无法推广应用于承重结构构件**，为拓宽其应用领域，采用GFRP材料增强，既能**提高构件的承载能力**，又能**减小蠕变变形**。



● **发明专利**：一种FRP增强木塑栈道板及其制备方法；
一种FRP增强木塑复合材料承重板材；
一种FRP与木塑复合材料拉挤成型的复合构件

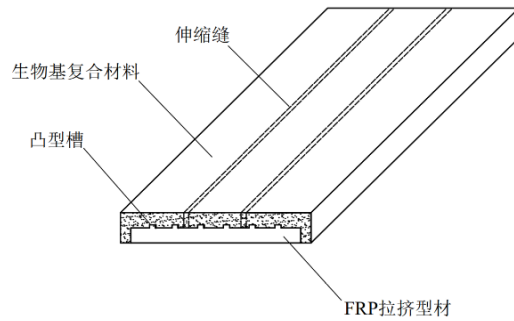
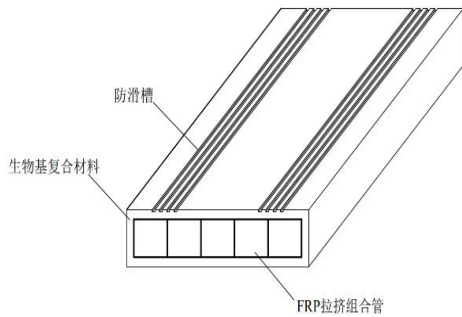




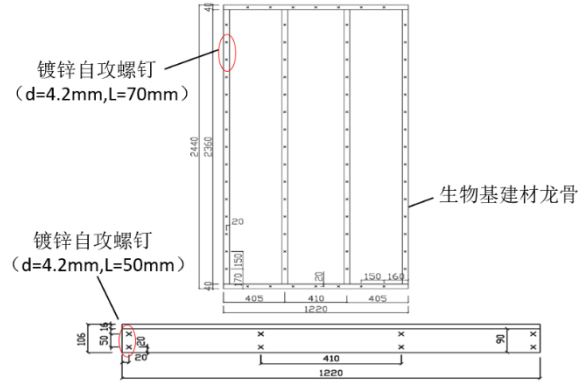
项目	$\rho=0.82\text{g/cm}^3$			$\rho=0.73\text{g/cm}^3$			$\rho=0.65\text{g/cm}^3$		
	平均值	标准差	变异系数	平均值	标准差	变异系数	平均值	标准差	变异系数
拉伸强度 (MPa)	9.70	0.20	0.021	8.43	0.46	0.054	7.01	0.27	0.039
压缩强度 (MPa)	14.89	1.04	0.03	11.14	0.39	0.035	9.10	0.40	0.044
弯曲强度 (MPa)	22.68	0.68	0.070	19.67	0.49	0.024	15.69	1.42	0.091
剪切强度 (MPa)	7.68	0.84	0.082	6.98	0.38	0.048	6.02	0.21	0.034



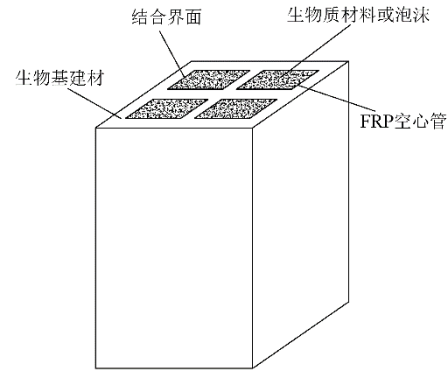
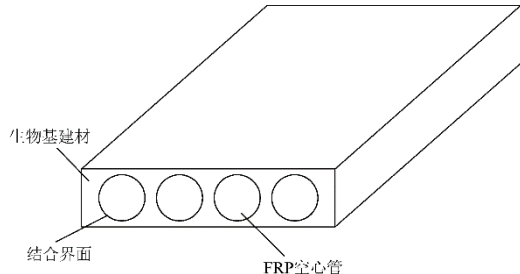
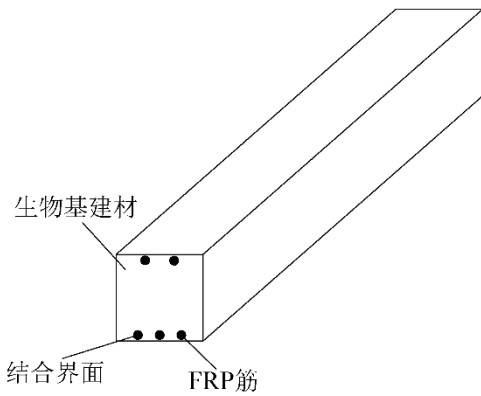
通过村镇生物基建材应用调研，首选工程应用广泛的**聚氯乙烯 (PVC) 基木塑复合材料**为研究对象，通过系统开展拉伸、压缩、弯曲和剪切力学性能试验，建立性能数据库，建立应力应变本构方程，基于数理统计方法提出生物基建材的强度标准值，为建筑部品部件的设计提供依据。



FRP拉挤型材-生物基复合材料组合截面承重板



生物基复合材料组合墙体



FRP筋/拉挤型材共挤生物基复合材料梁板柱构件



二、研究内容

2.1 研究内容：

本课题以提升木塑复合材料的力学性能和减小长期蠕变为目标，采用**GFRP筋和GFRP板**两种增强方案，充分发挥木塑复合材料的防水、防腐、延性好及纤维复合材料的轻质高强等特性，采用理论和试验相结合的研究方法，主要开展以下几方面工作：



(1) 木塑复合材料板弯曲**蠕变性能试验**研究



(2) GFRP增强木塑复合材料板**蠕变理论模型**建立

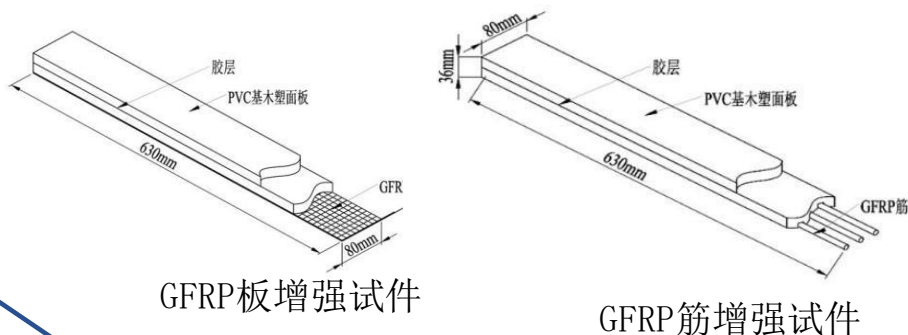


(3) GFRP增强木塑复合材料板**蠕变寿命预测**



2.2 技术路线

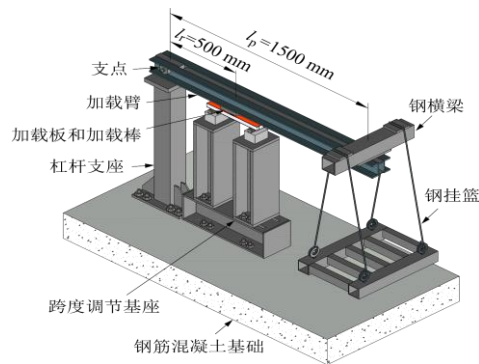
(1) 设计制备PVC基本塑板
两种GFRP增强方法



(4) 基于蠕变模型建立增强前后木塑板的蠕变寿命预测公式，绘制蠕变寿命曲线。

(2) 确定荷载等级，选择合适的弯曲蠕变试验加载装置。

(3) 建立蠕变理论模型和应变-时间变化曲线



蠕变加载装置图



2.3 试件设计及制备

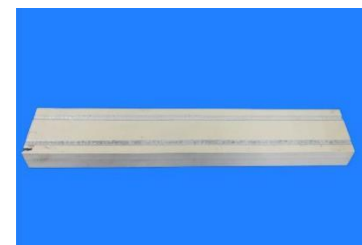
- PVC基本塑板：采用共挤成型工艺制备而成
- 密度： 0.82g/cm^3
- 尺寸：630 mm×80 mm×36 mm
- 成型三种试件：
纯木塑、GFRP板增强、GFRP筋增强试件



纯木塑试件



GFRP板增强试件



GFRP筋增强试件



2.3 试件设计及制备



(a) 木塑材料



(b) GFRP板制作



(c) 板材切割



(d) 胶合面抛光



(e) 试件胶合



(f) 试件固化

GFRP板增强木塑复合材料板试件制作流程



2.3 试件设计及制备



(a) 木塑材料



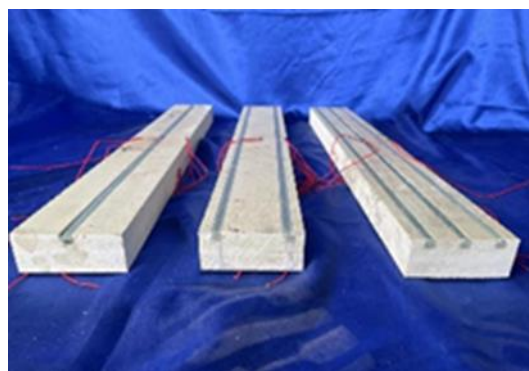
(b) GFRP筋



(c) 板材切割



(d) PVC基木塑抛光开槽



(e) 嵌入GFRP筋



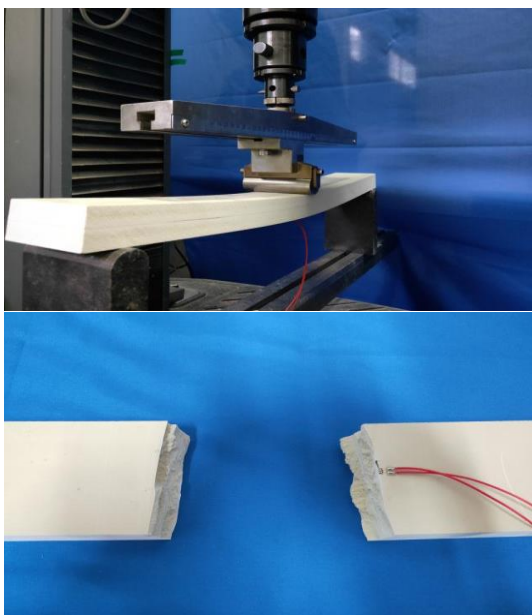
(f) 试件固化

GFRP筋增强木塑复合材料板试件制作流程

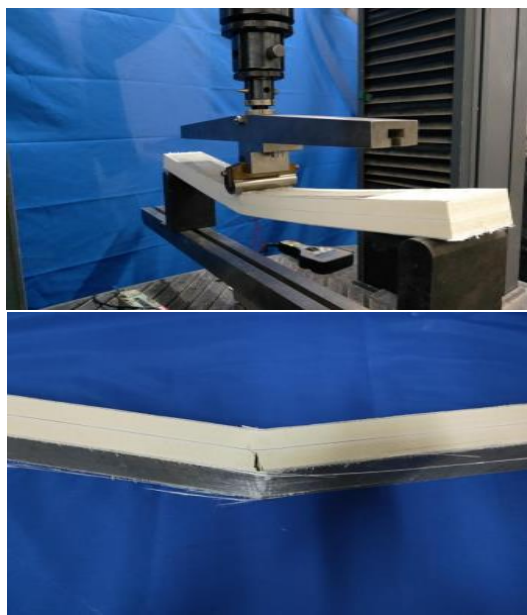


2.4 木塑复合材料板三点弯曲静载试验

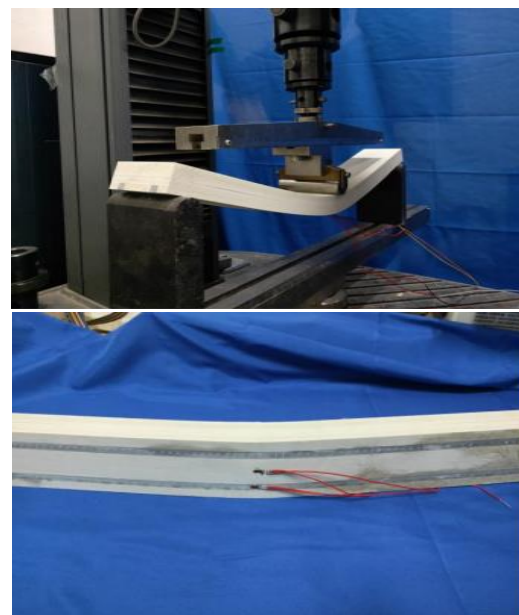
根据《木塑复合材料产品物理力学性能测试》规范对GFRP板增强木塑复合材料板开展三点弯曲静载试验，确定其**极限承载能力**，为后期弯曲蠕变性能试验确定荷载等级做准备，试验过程如下图所示。



纯木塑试件



GFRP板增强试件



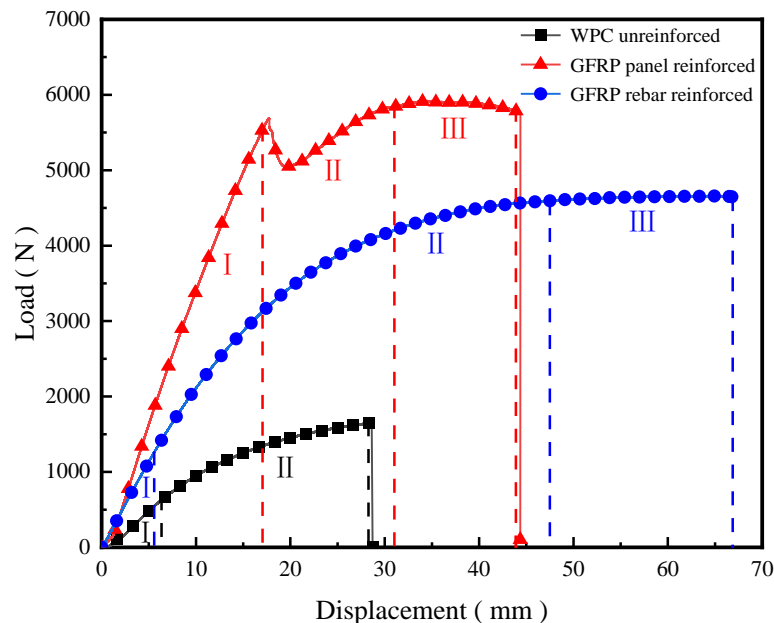
GFRP筋增强试件



2.5 木塑复合材料板三点弯曲静载试验结果分析

试件净跨576 mm，试验采用量程为200 kN的MTS试验机加载，加载速率为2 mm/min。加载过程中同步采集记录荷载-跨中位移曲线，如图所示。

从图中荷载-位移曲线可以看出，随着荷载的增加，三种试件的跨中位移呈现**三阶段变形特征**，分别为弹性阶段 I、弹塑性阶段 II 与塑性阶段 III。



静载试验跨中荷载-位移曲线



2.6 木塑复合材料板三点弯曲静载试验结果分析

三点弯曲加载试验结果如表1所示，相比纯木塑试件，两种GFRP增强试件的承载能力和延性均**大比例提升**，GFRP板增强试件平均极限承载能力**提高257%**，跨中位移提高55%；GFRP筋增强试件平均极限承载能力**提高165%**，跨中位移提高132%。

表1 PVC基木塑复合材料板三点弯曲静载试验结果

木塑试件类型	破坏模式	极限荷载 (kN)	跨中挠度 (mm)
纯木塑试件	剪切破坏	1.72	28.63
GFRP板增强试件	弯剪破坏	6.15	44.37
GFRP筋增强试件	跨中挠度变形过大	4.56	66.77



2.7 木塑复合材料板三点弯曲蠕变性能试验



弯曲蠕变试验环境：**恒温恒湿**

温度保持在 $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度为 $50\% \pm 10\%$



试验时间：每个试件的试验时间**设定为1800 h**，期间每隔12 h采集一次数据。



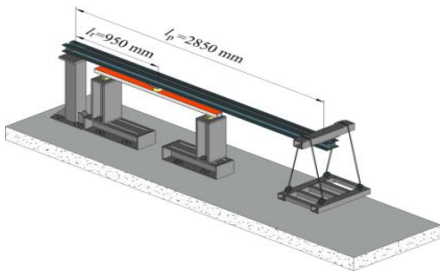
分为**6个荷载等级**：取试件极限承载力的**30%、40%、50%、60%、70%、80%**共6个荷载等级。



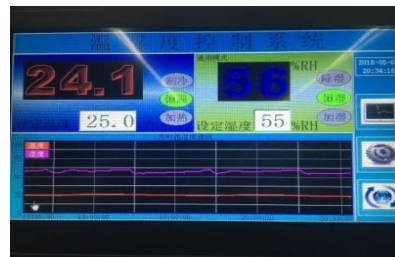
采用三点方式加载，试验装置如图所示。调整好设备与试件位置，当加载端头缓慢下降到与橡胶垫块接触的位置，记录百分表初始读数。



弯曲蠕变加载装置



蠕变加载装置效果图



温湿度控制系统

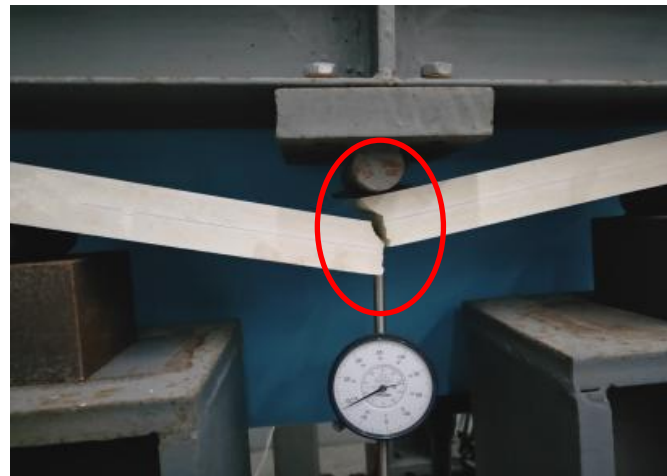


2.8 木塑复合材料板蠕变性能试验结果分析



在低荷载等级下（小于极限荷载的60%），三种木塑试件均未发生破坏。在加载瞬时跨中挠度突然增大，随着时间的增加，各试件挠度缓慢增长并趋于稳定，试件均处于典型蠕变的瞬态蠕变与减速蠕变两个阶段，均未出现加速蠕变破坏阶段。

纯木塑试件在80%高荷载等级下短时间内发生了剪切破坏。加载瞬时，试件跨中挠度迅速增加，并伴有轻微树脂断裂声，1 h后试件下表面泛白并陆续出现许多细小裂纹，裂纹不断向上扩展，经过7 h后发生断裂，属于典型的脆性破坏，如图所示。



纯木塑试件



2.9 木塑复合材料板蠕变性能试验结果分析



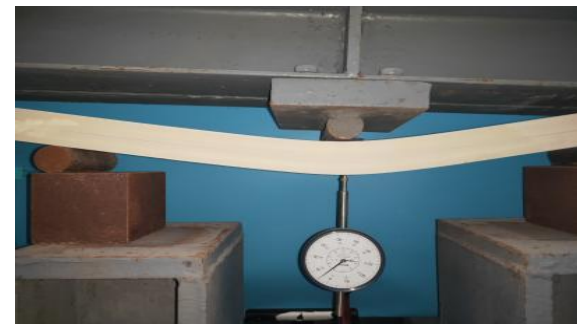
GFRP板增强试件在80%荷载等级下加载过程中发出轻微纤维断裂的声音，面板褶皱泛白，跨中挠度变形显著增加。试件在840 h后从下表面跨中开始出现一条细小的裂纹，随着时间的增加，裂纹宽度逐渐增加并沿斜上方延伸，经过960 h后GFRP面板纤维拉断破坏，试件发生弯剪破坏，裂纹出现前无明显预兆，具有明显脆性特征。



GFRP板增强试件



GFRP筋增强试件在70%与80%荷载等级下加载过程中，由于其跨中挠度变形过大超限，试件并未产生裂纹，没有断裂现象，在失效之前跨中挠度变化明显，如右图所示。

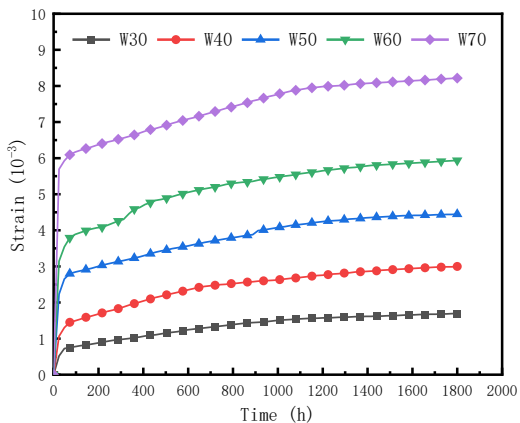


GFRP筋增强试件

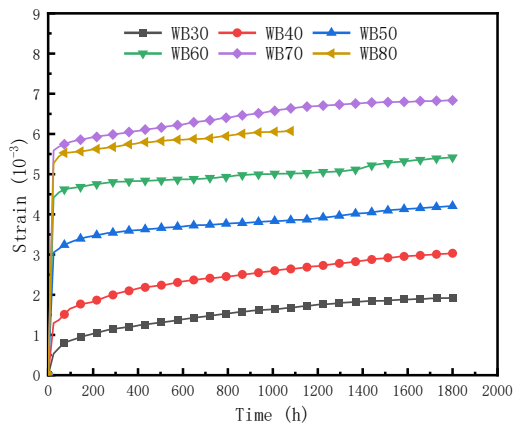


2.10 弯曲蠕变试验应变-时间曲线

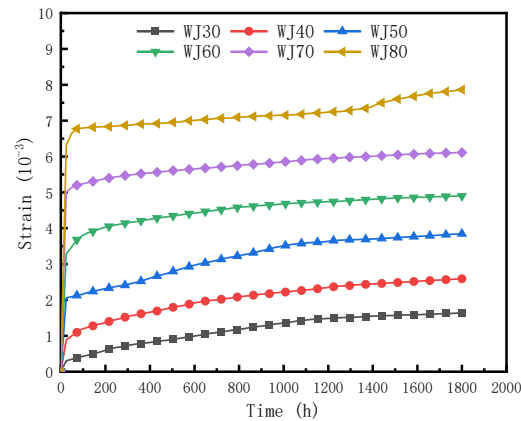
如图所示，瞬时加载后，三种类型试件的初始蠕变应变具有**瞬时性与相似性**，同种试件在不同荷载等级下加载到所需荷载时，发生瞬时变形，初始应变随着荷载等级的提高而增大；同种荷载等级下试件初始应变的变化数值具有相似的发展趋势。低荷载等级下跨中位移随时间增加而增大，变形速率较低，蠕变发展整体比较平稳。**高荷载等级下试件的应变增长迅速，变形速率明显大于在低荷载等级下加载的试件。**



纯木塑试件



GFRP板增强试件



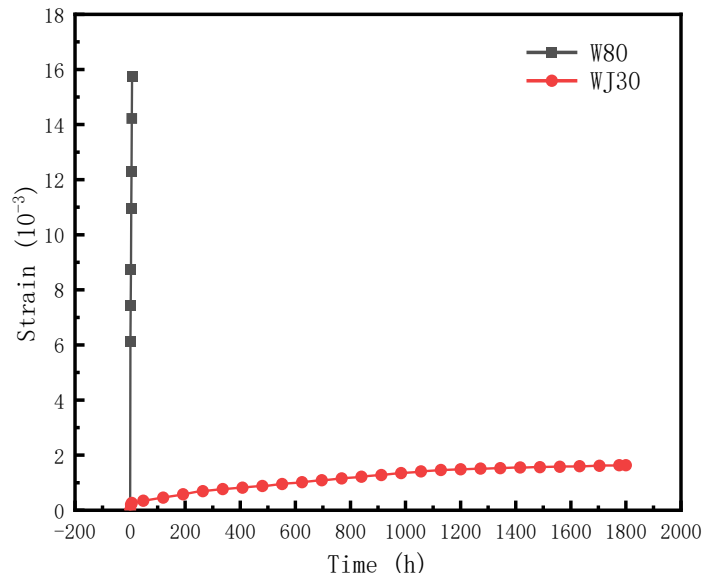
GFRP筋增强试件



2.11 相同荷载下木塑板增强前后蠕变性能对比



纯木塑试件与GFRP筋增强试件在相同荷载值下的应变-时间曲线如图所示。从图中可以看出，纯木塑与GFRP筋增强试件在相同荷载值1.4kN下的应变变化差别较大，纯木塑试件在瞬时加载时应变急剧增大，加载过程中7 h内应变速率呈非稳定性迅速增长直至破坏。



相同荷载下蠕变应变-时间曲线



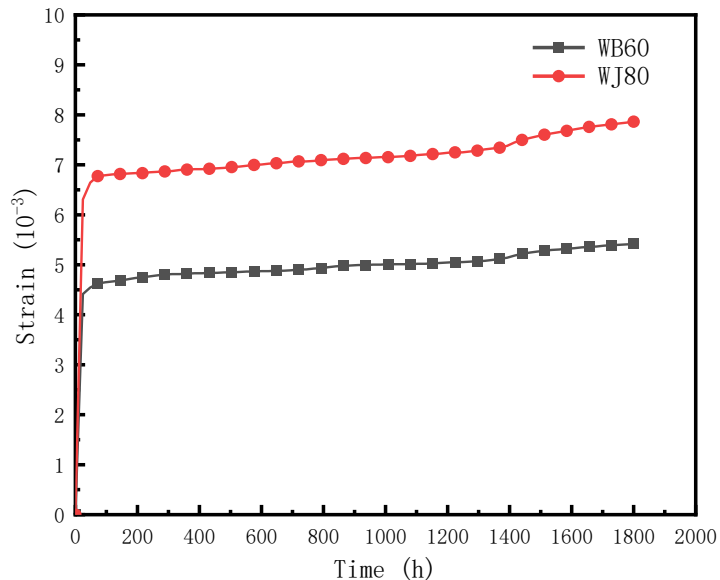
GFRP筋增强试件在加载时瞬时应变不断增加，应变增长速率逐渐减小并趋于稳定，蠕变应变发展整体比较平稳，纯木塑试件最终的应变值是GFRP筋增强试件的9.6倍，表明相同荷载下GFRP筋增强后的木塑复合材料板抗蠕变变形能力增强显著。



2.12 相同荷载不同增强方案蠕变性能对比

GFRP板与GFRP筋增强试件在相同荷载值

3.6kN下的应变-时间变化曲线形状基本相似，两者在加载时**瞬时应变迅速增大**，均经过**72 h**后进入**减速蠕变阶段**，应变速率逐渐减小，蠕变应变发展整体比较平稳。GFRP筋增强试件最终的应变值是GFRP板增强试件的**1.5倍**。随着时间的增加，GFRP板增强试件的应变值始终小于GFRP筋增强试件的应变值，说明GFRP板增强方案对控制木塑板的蠕变变形更有效。



相同荷载下弯曲蠕变应变-时间曲线

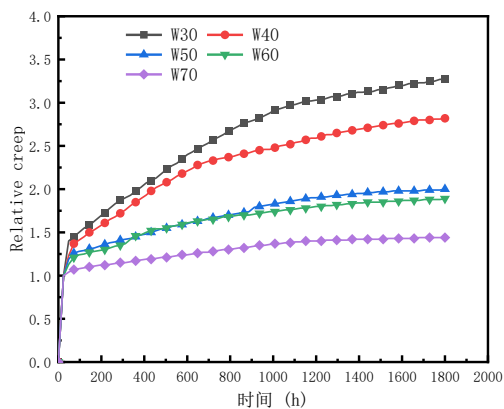
因此，GFRP板增强试件的抗蠕变性能最强，增强效果也最显著，GFRP筋增强试件的抗蠕变性能优于纯木塑试件。



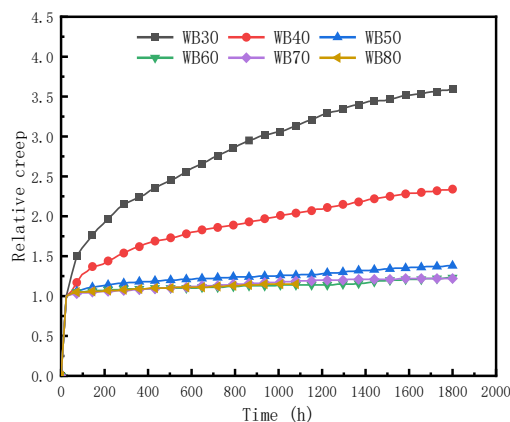
2.13 相对蠕变-时间变化曲线

为研究不同荷载等级下蠕变应变-时间变化的增长规律，更加合理地评价蠕变的变化规律，参考ASTM D6815-09[57]对**相对蠕变**的定义： $\zeta = \varepsilon_t / \varepsilon_0$

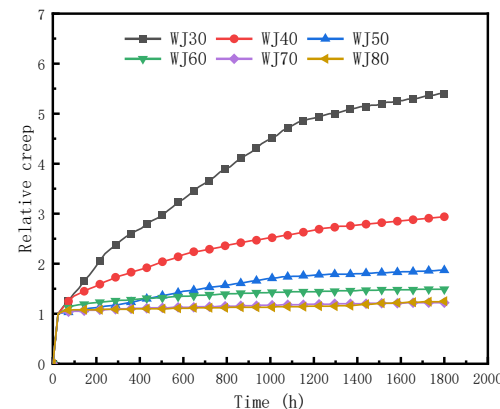
式中： ζ 为t时间应变相对于初始应变的相对蠕变； ε_t 为t时间的应变； ε_0 为初始应变。



纯木塑试件



GFRP板增强试件



GFRP筋增强试件

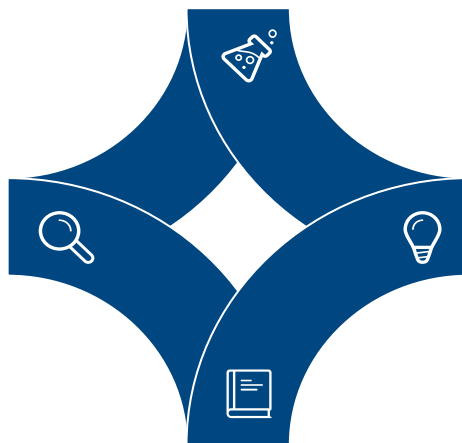
相对蠕变的数值随时间的增加而增大，瞬时加载时**荷载等级高的试件**初始应变值较大，**减速蠕变阶段**应变值变化平缓，**相对蠕变**随着荷载等级的提高而减小。



2.14 弯曲蠕变试验-相对蠕变应变趋势分析

GFRP板增强试件对应30%至80%六种应力水平的最终相对蠕变分别是初始值的3.60倍、2.34倍、1.38倍、1.23倍、1.22倍、1.21倍；

纯木塑试件对应30%至70%五种应力水平的最终相对蠕变分别是初始值的3.27倍、2.82倍、1.99倍、1.89倍、1.44倍；



GFRP筋增强试件对应30%至80%六种应力水平的最终相对蠕变分别是初始值的5.40倍、2.94倍、1.87倍、1.49倍、1.22倍、1.22倍。

三类试件的**相对蠕变增长速率**总体上则呈**减速**状态，说明木塑试件蠕变的**第二阶段为减速蠕变阶段**。不同荷载等级的试件其曲线斜率有所区别，同种类型的试件，**荷载等级越高，相对蠕变值越小，后期增长越缓慢**。荷载等级较高时，三类试件的相对蠕变变化趋势较为接近。

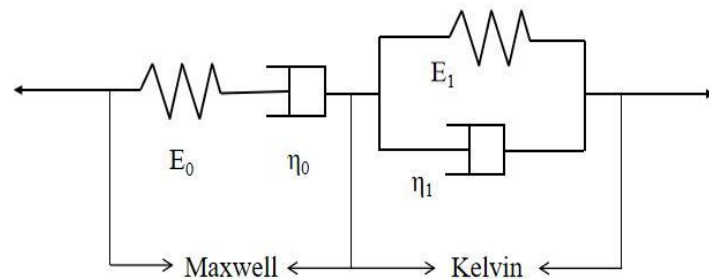


2.15 四元件理论模型

该模型由1个弹簧单元、1个Kelvin-Voigt模型和一个粘壶单元串联而成，如下图所示，分别用于描述材料的普弹变形、高弹变形和黏性流动三部分变形特征。

该模型的通用表达式为：
$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma t}{\eta_0} + \frac{\sigma}{E_1} [1 - \exp(-tE_1 / \eta_1)]$$

式中： t 为时间， $\varepsilon(t)$ 为 t 时刻材料总应变； σ 为恒定应力； E_0 为材料弹性模量； η_0 为材料的黏度系数， E_1 为弹性系数， η_1 为黏性系数。



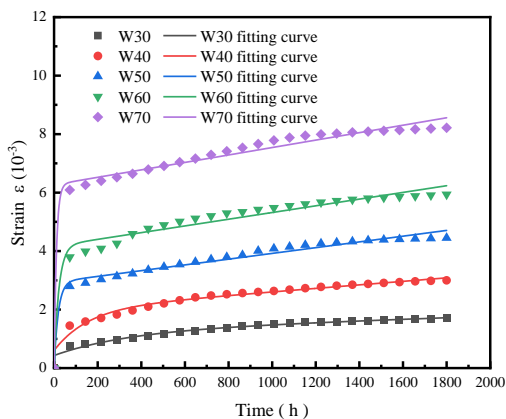
四元件模型示意图



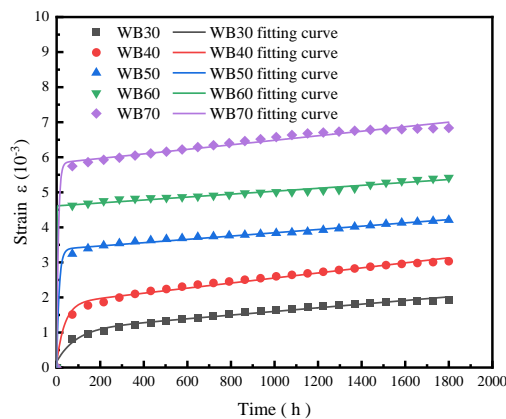
2.16 蠕变试验-四元件理论模型拟合结果对比分析

在低荷载等级下，四元件模型应变曲线与试验结果较为接近，准确度、吻合度较高。各荷载等级下的拟合曲线相关系数均较高。

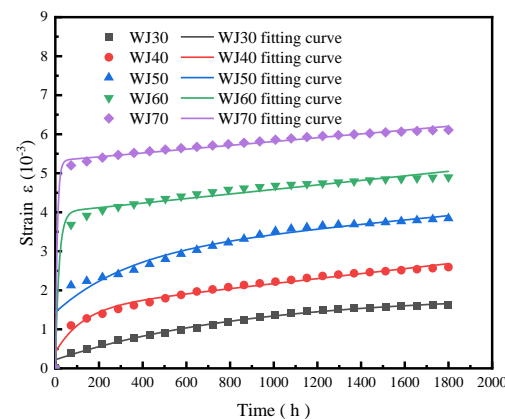
四元件模型适用于对木塑试件瞬态蠕变与减速蠕变两个阶段的蠕变应变进行预测拟合分析，可利用该模型对试件在前两个阶段进行长期的拟合分析和寿命预测。



纯木塑试件



GFRP板增强试件



GFRP筋增强试件



三、主要结论

- (1) 木塑复合材料板的破坏模式与荷载等级和增强方式密切相关。与纯木塑试件相比，GFRP板/筋增强试件的承载能力和延性均**大幅度提升**，GFRP板增强试件的极限承载能力**提高257%**，跨中位移提高55%；GFRP筋增强试件极限承载能力**提高165%**，跨中位移提高132%。
- (2) 低荷载等级下三种试件均未发生蠕变破坏。在瞬时加载时试件跨中位移显著增大，随着时间的增加，各试件跨中位移缓慢增长并趋于稳定，试件蠕变呈现**瞬态蠕变与减速蠕变两个阶段**，均未出现加速蠕变破坏阶段。
- (3) 不同荷载等级下木塑复合材料的相对蠕变应变变化趋势相同。应变值随时间的增加而增大，应变增长速率总体上则呈减速状态，试件的相对蠕变随着荷载等级的提高而减小，相对蠕变增长速率总体上则呈减速状态，说明木塑试件蠕变的第二阶段为减速蠕变阶段，符合工程实际。
- (4) 四元件模型适用于木塑板瞬态蠕变与减速蠕变两个阶段的蠕变应变进行预测拟合分析，可利用该模型对试件在前两个阶段进行长期的拟合分析和寿命预测。