

飞艇用织物膜材单轴拉伸蠕变强度试验与模型

宋寅搏 陈务军 高成军 陈龙龙 王晓情 闫勇升

Uniaxial tensile creep experiment and creep model of fabric for airship structures

SONG Yinbo, CHEN Wujun, GAO Chengjun, CHEN Longlong, WANG Xiaoping, YAN Yongsheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211116.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

Creep/recovery behavior analysis of wood-plastic composites based on fractional order viscoelastic model

复合材料学报. 2020, 37(8): 2055–2064 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191230.002>

考虑界面效应的GFRP复合材料蠕变模型

Creep model of GFRP composites considering interface effect

复合材料学报. 2021, 38(11): 3682–3692 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210119.001>

复合固体推进剂黏弹性微裂纹损伤本构模型

A viscoelastic constitutive model of solid composite propellants with micro-cracking damage

复合材料学报. 2018, 35(5): 1203–1210 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170829.001>

重组竹顺纹受压蠕变性能及预测模型

Creep performance and prediction model of bamboo scrimber under compression

复合材料学报. 2021, 38(3): 944–952 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200615.002>

应力水平和纤维角度对CGF/PP复合材料蠕变行为的影响及其Burgers模型参数的数值预测

Effects of stress levels and fiber orientations on creep behavior of CGF/PP composite and numerical prediction of Burgers model parameters

复合材料学报. 2019, 36(5): 1216–1225 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180725.003>

织物纤维干湿态压缩成型特性

Compression properties of fabric fibers under dry and wet conditions

复合材料学报. 2019, 36(4): 826–836 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180516.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20211116.001

飞艇用织物膜材单轴拉伸蠕变强度
试验与模型



分享本文

宋寅搏, 陈务军*, 高成军, 陈龙龙, 王晓情, 闫勇升

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 聚酯纤维织物类膜材因其轻质高强、耐候性好等特点常被用于飞艇结构的蒙皮材料, 其在高应力水平下的蠕变失效行为决定飞艇结构长期安全性能, 但目前尚未有相关的性能测试标准及研究。为研究此类膜材的蠕变性能, 选用以 Vectran 纤维为基布材料的膜材在极限应力的 85%、80%、75%、70% 四组应力水平下进行单轴拉伸蠕变试验, 分析了蠕变过程中膜材应变、模量及蠕变破坏时间等参数随应力水平的变化规律, 并给出基于应力水平的蠕变强度包络线拟合公式; 通过牛顿迭代法建立了参数化的四单元蠕变模型及蠕变破坏准则, 可以较准确地反映材料在高应力水平下的蠕变破坏规律。

关键词: 织物膜材; 蠕变强度; 蠕变模型; 黏弹性; 非线性

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2022)10-5041-08

Uniaxial tensile creep experiment and creep model of fabric for airship structures

SONG Yinbo, CHEN Wujun*, GAO Chengjun, CHEN Longlong, WANG Xiaoqing, YAN Yongsheng

(School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Polyester fabrics are often used for airship structures because of their light-weight, high-strength and environmental resistance properties, their creep failure behavior under high stress levels determines the long-term safety performance of airship structures, but there is no relevant test standard or research at present. In order to study the creep properties of polyester fabrics, a membrane material composed of Vectran fibers was selected to carry out uniaxial tensile creep tests at 4 high stress levels: 85%, 80%, 75% and 70% of ultimate stress. The variation laws of creep strain, creep modulus and creep failure time with respect to stress level were summarized, and the fitting formulas of creep rupture envelopes were given through Newton iterative calculation. When the stress level is lower than 63% of the ultimate stress, the fabrics will not reach the creep rupture point. Based on the experimental data, the parametric four element creep model and creep failure criterions are established. It is found that the fitting model can generally reflect the creep failure reactions under high stress levels.

Keywords: fabric membrane material; creep strength; creep model; viscoelasticity; nonlinearity

飞艇通过气囊内大量氦气来获得升力, 因驻空时间长、航行成本低等优势被视为一种优良的浮空器, 能承受复杂空间环境的平流层飞艇更是当前世界各国临近空间资源开发装备研究的热点^[1-4]。飞艇的主要结构是蒙皮, 蒙皮材料的破坏可能直接导致飞艇结构整体失效^[1-3], 因此蒙皮材料的力学性能研究和长期荷载作用下极限强度的确定对

飞艇强度设计起着至关重要的作用。目前飞艇结构中一般采用质量轻、比强度高、耐久性好的聚酯纤维织物类膜材作为蒙皮材料^[4-6]。大多数材料在长期荷载作用下都会发生蠕变现象^[7-9], 出现强度和刚度退化^[2], 对结构物长期安全性能产生不利影响。针对聚酯纤维类工程膜材, 目前缺乏广泛认可的蠕变失效性能测试标准, 实际工程中多

收稿日期: 2021-09-14; 修回日期: 2021-10-26; 录用日期: 2021-11-08; 网络首发时间: 2021-11-16 15:42:26

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211116.001>

基金项目: 国家自然科学基金 (51778362)

通信作者: 陈务军, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为超轻航空、宇航、近空间结构构造物分析理论与设计技术 E-mail: cwj@sztu.edu.cn

引用格式: 宋寅搏, 陈务军, 高成军, 等. 飞艇用织物膜材单轴拉伸蠕变强度试验与模型 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(10): 5041-5048.

SONG Yinbo, CHEN Wujun, GAO Chengjun, et al. Uniaxial tensile creep experiment and creep model of fabric for airship structures[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(10): 5041-5048(in Chinese).

根据单双轴拉伸试验强度指标和工程经验来估算膜材的蠕变强度，难以为结构安全提供可靠的理论支持。

目前关于工程膜材蠕变的试验研究多集中于聚合物类膜材，Hu 等^[7]通过进行乙烯-四氟乙烯共聚物 (Ethylene-tetra-fluoro-ethylene, ETFE) 在不同应力水平下的蠕变试验，并利用时温等效原理预测膜材在长期荷载作用下的蠕变力学行为，得到了蠕变应变随时间变化的拟合曲线；类似地，Li 等^[10]基于黏-弹-塑性模型描述 ETFE 的蠕变特征；Fairhurst 等^[11]利用时温等效原理预测 ETFE 在低应力水平下的长期蠕变特性，但是缺少对其在高应力水平下蠕变现象的关注，尤其是蠕变失效问题。此外，对材料蠕变性能的描述多采用唯象理论模型，依据材料试验的力学响应确定蠕变本构模型中各材料参数，Duan 等^[12]利用 Larson-Miller 失效时间的预测理论建立了颗粒增强复合材料的压缩蠕变模型；Zhang 等^[13]通过替换 Nishihara 模型中的牛顿黏壶单元建立了沥青混合料的黏-弹-塑性压缩蠕变模型；Liu 等^[14]在 Nishihara 模型中引入与时间和应力状态相关的损伤参量，能够准确描述砂岩在加速蠕变阶段曲线。可以看出，目前基于唯象理论蠕变模型的研究多集中于混凝土、岩石、沥青等典型黏-弹-塑性的受压蠕变材料，尚未有类似的蠕变模型及失效判据来描述织物膜材在高应力水平下的拉伸蠕变失效行为。

本文以平纹编织的 Vectran 纤维织物膜材为研究对象，在材料极限应力的 85%、80%、75%、70% 四组高应力水平下进行短期单轴拉伸蠕变试验；详细对比了各应力水平下材料蠕变应变、蠕变模量及破坏时间的差异性，根据试验结果拟合得到膜材蠕变强度包络线，发现当应力水平低于极限应力的 63% 时材料不发生蠕变破坏。分析织物类膜材蠕变破坏机制，使用简化的四单元蠕变模型描述其蠕变破坏现象并验证准确性；根据试验中蠕变应变的统计规律和蠕变强度包络线建立模型的蠕变破坏准则，可为织物类膜材工作状态下极限应力水平的确定与长期性能研究提供参考。

表 1 Vectran-PVF 膜材蠕变试验设备及参数

Table 1 Instruments parameters of Vectran-PVF fabric creep testing

Test equipment	Measuring range	Accuracy	Error
Electronic universal testing machine	0-5 000 N	0.1 N	±0.5%
Displacement meter	0-800 mm	0.008 mm	±1%
Thickness gauge	0-12.7 mm	0.001 mm	±1%

1 材料与试验方案

1.1 材料及试样尺寸

Vectran 纤维是一种高强度的芳香族聚酯纤维，其分子结构呈现伸直链状态，其性能特点有拉伸强度高、耐高低温性能好、耐紫外线辐射等。试验样本为一种应用于平流层飞艇艇身的蒙皮材料，基布由高强度 Vectran 纤维集结成束，采用平纹编织方法编织成型，外层覆有以聚氟乙烯 (PVF) 为主的功能膜层，可以承受飞艇运行期间高真空、强辐射、高低温及复杂电磁环境因素的共同作用。

材料厚度为 0.2 mm，面密度为 150 g/m²，经纬向纱线编织密度分别为 10 根/cm 和 8 根/cm，织物的组成结构如图 1 所示。由于编织方向对材料性质产生的影响，裁切试样时统一采用膜材经向作为标准矩形试样的长轴方向。

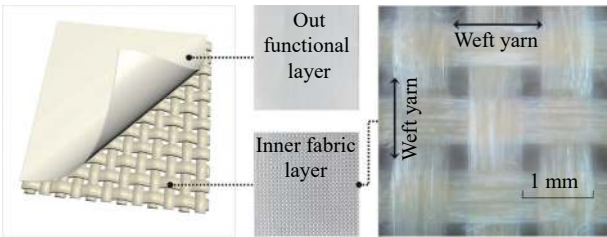


图 1 Vectran-聚氟乙烯 (PVF) 织物膜材的细观结构

Fig. 1 Mesostructure of Vectran-polyvinyl fluoride (PVF) fabric material

1.2 蠕变试验方案

试验采用三思纵横 UTM5000 系列电子万能试验机装配缠绕式夹具施加荷载，使用夹持式位移计获取试样测量区的变形数据，各设备的测量参数如表 1 所示。根据《纺织品 织物拉伸性能 第 1 部分：断裂强力 and 断裂伸长率的测定 (条样法)》(GB/T 3923.1—2013)^[15]，试样拉伸速度为 20 mm/min，重复测量 5 次，计算得到标准矩形试样的平均极限应力 σ_u 和极限应变 ε_u 分别为 368 MPa 和 2.30%。

参考《膜结构用涂层织物拉伸蠕变性能试验方法》(FZ/T 60037—2013)^[16]，蠕变加载同样采用 20 mm/min 的位移控制方式，以保证系统加载至规定负荷的时间不超过 60 s，加载曲线如图 2 所示；选择 85% σ_u 、80% σ_u 、75% σ_u 和 70% σ_u 四组

应力水平进行拉伸试验直至试样断裂,最大拉伸时限设为 $t_{\max}=48\text{ h}=172\,800\text{ s}$,在各应力水平下进行 12 次重复试验,并记录力-变形-时间数据。

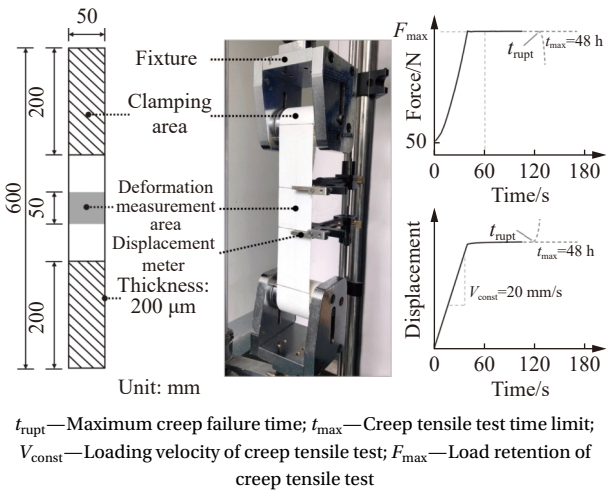


图 2 Vectran-PVF 膜材试样尺寸及试验方案
Fig. 2 Configuration of Vectran-PVF fabric specimens and experimental scheme

2 试验结果与分析

试样宽度在蠕变过程中几乎不发生变化,采用原始尺寸计算保载应力值 σ_c 。试验中观察到所有试样在时限 $t_{\max}=48\text{ h}$ 内均发生蠕变破坏现象,最大蠕变破坏时间为 $t_{\text{rupt}}=46.25\text{ h}=166\,501\text{ s}$,应力水平 $\sigma_c=70\%\sigma_u$ 。下面分别对各应力水平下蠕变应变、蠕变模量、蠕变破坏时间的变化特征进行分析。

2.1 Vectran-PVF 膜材蠕变应变曲线

试样在单轴拉伸蠕变试验中变形阶段的划分如图 3 所示,总应变 $\varepsilon_{\text{total}}$ 为加载阶段产生的初始应变 ε_0 和保载阶段产生的蠕变应变 ε_c 组成。参考聚合物膜材蠕变破坏的测试标准^[17],膜材在保载

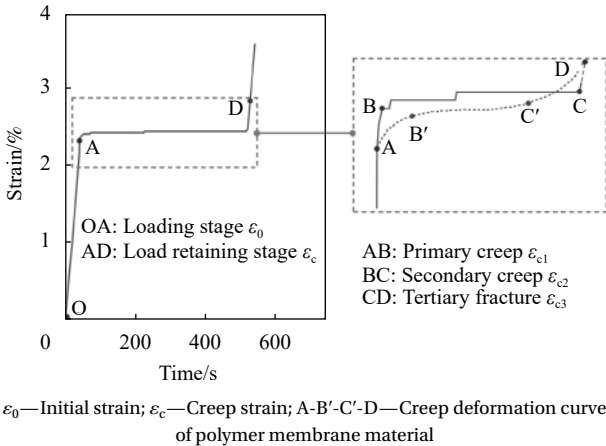


图 3 Vectran-PVF 膜材蠕变应变曲线阶段划分

阶段发生的蠕变行为可以划分为三部分^[18-19]:AB 段为保载初期产生较大蠕变应变的初步蠕变阶段,产生蠕变应变 ε_{c1} ;BC 段为保载中期蠕变应变增长速度较慢的稳态蠕变阶段,产生蠕变应变 ε_{c2} ;CD 段为纤维束大量断裂引起试样破坏的蠕变破坏阶段,产生蠕变应变 ε_{c3} 。

不同于聚合物类膜材的蠕变变形曲线特征 (A-B'-C'-D)^[17],试样蠕变破坏 (CD) 阶段持续时间极短,呈现脆性破坏的特征,在分析时忽略 ε_{c3} 的大小,即试样在保载阶段产生的应变值 $\varepsilon_c=\varepsilon_{c1}+\varepsilon_{c2}$ 。各应力水平下试样的蠕变应变 ε_c 与初始应变 ε_0 如图 4(a) 所示, ε_c 约占总应变的 3.8%~11.4%,然而 ε_c 量值较小,试验中测得 ε_c 平均值最大为 0.24%。根据图 4(b), ε_c 平均值随应力水平的降低呈非线性递增趋势; ε_0 随应力水平的降低而降低,呈现出线性关系,通过拟合分别得到二者关于应力水平的关系式:

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_c - 5}{13400} \tag{1}$$

$$\varepsilon_c = \left(2458 - 58e^{\frac{\sigma_c - 254}{18}} \right) \times 10^{-6} \tag{2}$$

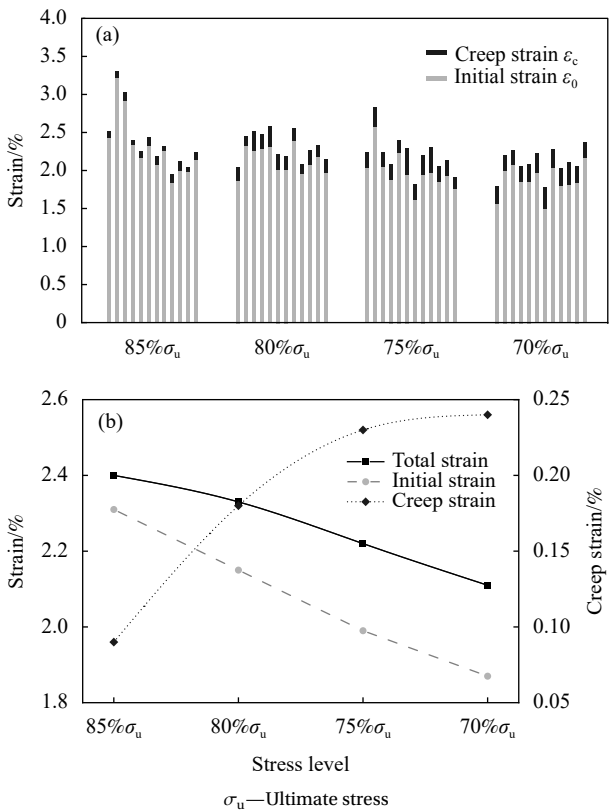


图 4 各应力水平下的 Vectran-PVF 膜材试样应变值
Fig. 4 Strain comparison of Vectran-PVF fabric specimens under various stress levels

由此可以得到总应变 $\varepsilon_{\text{total}}$ 关于应力水平的关系式:

$$\varepsilon_{\text{total}} = \varepsilon_u(\sigma_c) = \varepsilon_0 + \varepsilon_c =$$
$$\left(75\sigma_c - 58e^{\frac{\sigma_c - 254}{18}} + 2\,034\right) \times 10^{-6} \quad (3)$$

ε_c 平均值随应力水平的降低而增加 (0.09%~

0.24%), 选择各应力水平下 ε_c 最接近平均值的试样, 绘制其保载阶段的曲线如图 5 所示。可以观察到, 稳态蠕变阶段应变呈现阶梯状递增的变化趋势, 持续时间较长, 但 ε_{c2} 远小于 ε_{c1} , 即保载阶段的主要变形发生于初步蠕变阶段。

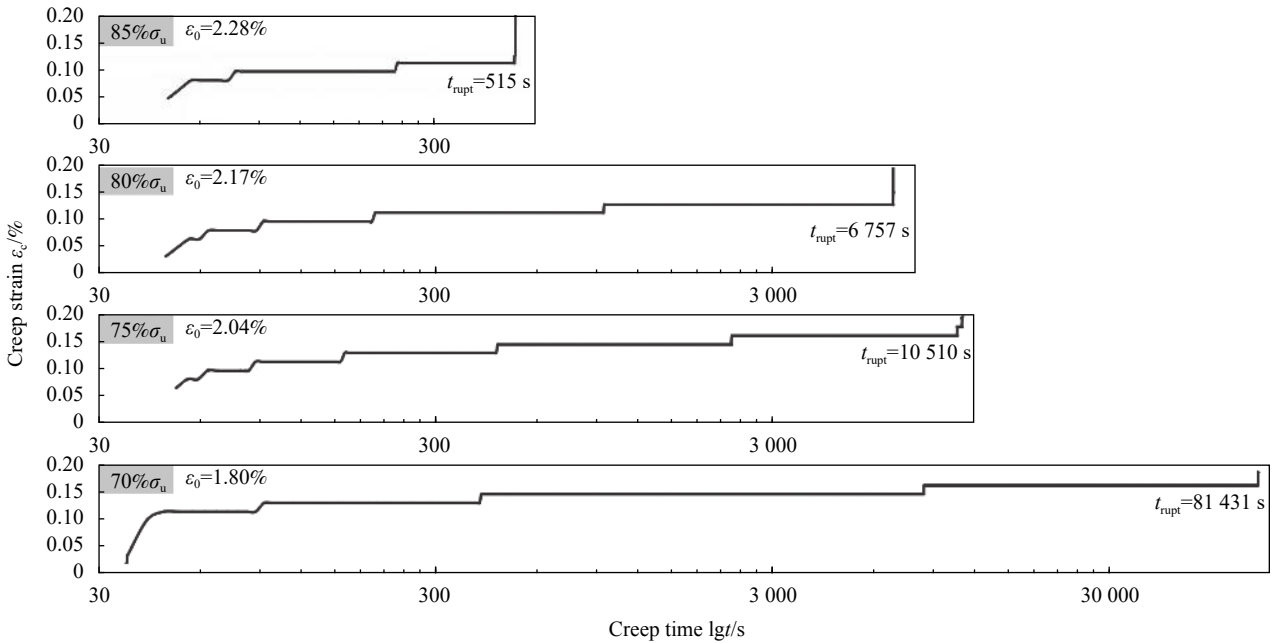


图 5 各应力水平下 Vectran-PVF 膜材试样的蠕变应变曲线

Fig. 5 Creep strain curves of Vectran-PVF fabric specimens under various stress levels

2.2 Vectran-PVF 膜材蠕变模量曲线

蠕变模量作为膜材重要的力学参数之一, 可以反映材料长期服役的变形稳定性。参考图 3 和图 5 可知, 划分 0~40 s 为初步蠕变阶段, 40 s~ t_{rupt} 为稳态蠕变阶段。计算各试样的割线模量, 选择各应力水平下稳态蠕变阶段模量 E_{c2} 最接近平均值的试样, 绘制其保载阶段的曲线如图 6 所示。与聚合物类膜材相似^[17], 蠕变模量在初步蠕变阶段急剧降低, 而后在稳态蠕变阶段趋于平稳变化, 且 E_{c2} 随应力水平的降低呈现非线性降低趋势。然而相较于常温下聚合物类膜材的割线模量为 600~800 MPa, 试样 E_{c2} 数值约为其 20 倍, 表明织物类膜材相较于聚合物类膜材的小变形特性。

2.3 Vectran-PVF 膜材蠕变强度包络线

由图 4(b) 可知, 试样的极限应变 ε_u 平均值与应力水平 σ_c 呈近似线性关系, 但同一应力水平下不同试样之间 ε_u 相差较大, 因此基于应力水平 σ_c 来研究试样的蠕变破坏时间 t_{rupt} 。如图 7 所示,

t_{rupt} 整体随 σ_c 的降低而增加, 各应力水平下 t_{rupt} 的差异性随 σ_c 的降低而增大, 以 $\sigma_c=70\%\sigma_u$ 时最为显著, 此时试样最大 $t_{\text{rupt}}=46.25\text{ h}$, 最小 $t_{\text{rupt}}=1.62\text{ h}$ 。考虑 $t_{\text{rupt}}\rightarrow 0$ 的极限状态, 即蠕变时间为 0 时应力水平对应极限应力 σ_u ; $t_{\text{rupt}}\rightarrow \infty$ 时, 蠕变时间为无穷大, 试样不发生破坏, 即蠕变强度包络线平行于水平线。根据包络线特征选用公式: $\sigma_c = a + be^{-\frac{t_{\text{rupt}}}{c}}$, 拟合得到试样的蠕变强度包络线, 各参数在 90% 预测带内的取值范围为

$$\sigma_c = a + be^{-\frac{t_{\text{rupt}}}{c}} \quad (a \in [231, 259]; b \in [64, 101]; c \in [1, 7]) \quad (4)$$

考虑 $t_{\text{rupt}}\rightarrow \infty$ 的极限状态, 此时 $\sigma_c=231\text{ MPa}\approx 63\%\sigma_u$, 即保载应力不超过 63% σ_u 时, 试样有 90% 的概率不发生蠕变破坏。提取式 (4) 中 t_{rupt} , 即可得到试样蠕变破坏时间预测带:

$$t_{\text{rupt}} = c \ln b - c \ln(\sigma_c - a) \quad (a \in [231, 259]; b \in [64, 101]; c \in [1, 7]) \quad (5)$$

$(\sigma_c > 63\%\sigma_u)$

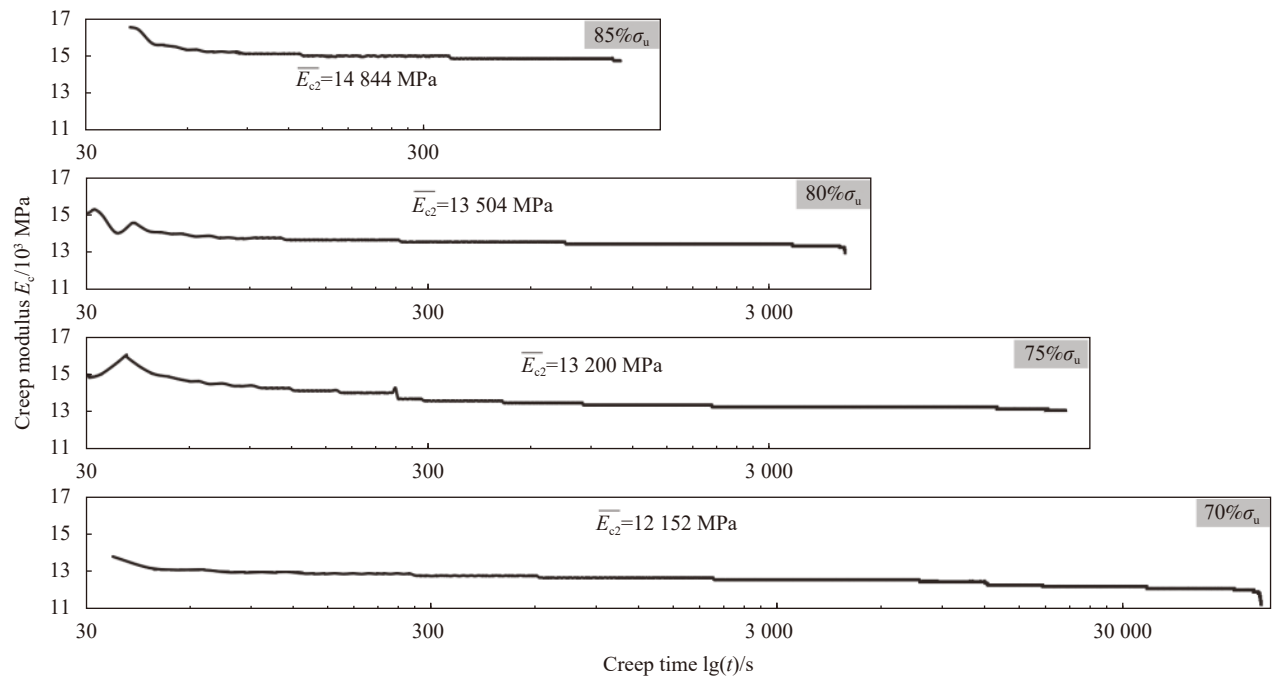


图 6 各应力水平下 Vectran-PVF 膜材试样的蠕变模量曲线

Fig. 6 Creep modulus curves of Vectran-PVF fabric specimens under various stress levels

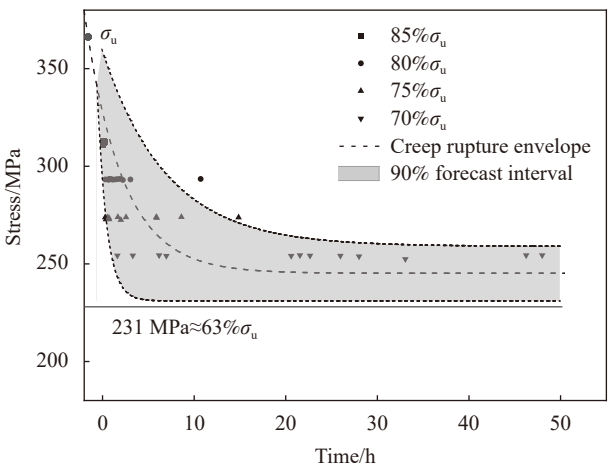


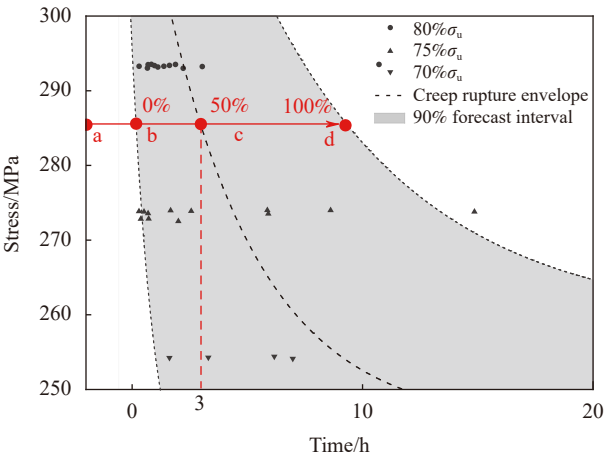
图 7 基于应力水平的 Vectran-PVF 膜材蠕变强度包络线

Fig. 7 Envelope of Vectran-PVF fabric creep strength based on stress levels

以 $\sigma_c=287\text{ MPa}\approx 78\%\sigma_u$ 应力水平为例，根据式 (5) 得到试样可能发生蠕变破坏的时间区间为

$$\min(t_{\text{rupt}})=\ln 64-\ln (287-231)=0.13\text{ h}$$
$$\max(t_{\text{rupt}})=7 \ln 101-7 \ln (287-259)=8.98\text{ h}$$
$$0.13\text{ h}=\min(t_{\text{rupt}}) \leq t_{\text{rupt}} \leq \max(t_{\text{rupt}})=8.98\text{ h}$$

以试验中试样蠕变破坏时间的平均值作为 50% 概率破坏点，则可以得到 $78\%\sigma_u$ 应力水平下的蠕变路径为 a-b-c-d，如图 8 所示，b 点 (0.13 h) 前试样发生蠕变破坏的概率为 0%，至 d 点 (8.98 h)



a-b-c-d—Creep path at stress level $78\%\sigma_u$

图 8 基于蠕变强度包络线的 Vectran-PVF 膜材试样寿命预测

Fig. 8 Life prediction based on Vectran-PVF fabric creep strength envelope

试样发生蠕变破坏的概率为 100%，以此类推。

3 Vectran-PVF 膜材蠕变机制与强度模型

3.1 Vectran-PVF 膜材蠕变破坏机制

图 9 为试样宏观尺度和细观尺度的断裂形貌。宏观尺度下观察到各试样断口纤维抽出，纤维束断裂不平齐，无明显主断裂面；细观尺度下观察到同一纤维束中各纤维的断裂长度不一致，说明断裂发生的最小单位是单根纤维而不是纤维束。对于单根 Vectran 纤维，分析采用以下假设条件：

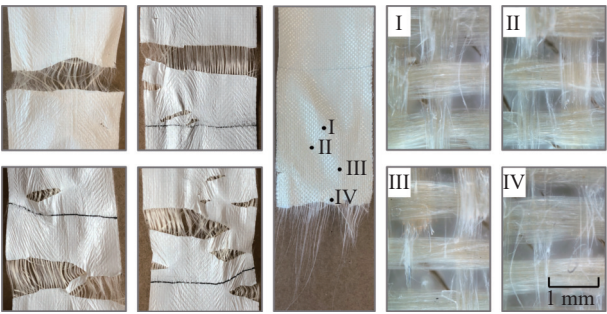


图9 宏观和细观尺度的Vectran-PVF膜材试样破坏形态

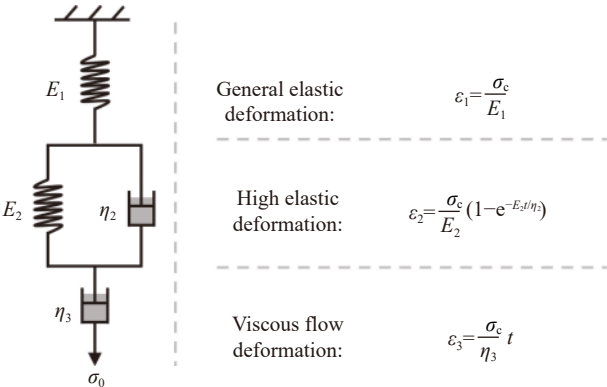
Fig. 9 Macroscopic and mesoscopic views of Vectran-PVF fabric specimen failure

(1) 织物中所有单根纤维的性质完全相同，但在集结成束和编织成型时不同纤维长度具有差异性，在试样达到保载应力时各纤维具有不同的初始应力状态；(2) 单根纤维的蠕变力学特性参考聚合物典型黏弹性性质，即恒定荷载下产生弹性初始应变，蠕变应变随时长而增加，蠕变过程中单根纤维受到的轴向拉应力视为恒定；(3) 单根纤维的破坏判据参考第二强度理论—最大伸长拉应变理论，即单根纤维在恒定荷载下发生蠕变，总应变达到极限应变时发生破坏；(4) 试验采用位移控制方式加载，假设拉伸过程中所有纤维变形量相同。

根据以上假设条件，在蠕变初始时刻，织物中较短的单根纤维初始应变较大，蠕变应变随时间增加，两者之和达到极限应变时单根纤维发生断裂。当应力水平较高时，单根纤维断裂引起施加于试样整体的荷载在剩余纤维中重新分配，不同于聚合物内部大分子持续滑移产生的长期失效现象，刚性较强的Vectran纤维断裂时间极短，某时段内较多数量纤维的断裂引起荷载重新分配，会使试样蠕变应变值 ε_{c2} 呈现阶梯状递增的变化趋势(图5)；当剩余纤维数量低于一定阈值后，试样会在极短时间内发生类脆性特征的蠕变破坏(图3)。当应力水平较低时，剩余纤维数量较多，蠕变持续时间长，因此蠕变应变 ε_c 会随着应力水平的降低而增加(图4)，同时总应变 ε_{total} 降低，剩余纤维不产生断裂，试样不发生破坏。

3.2 Vectran-PVF膜材四单元蠕变模型

结合以上分析，除了稳态蠕变阶段的微小应变曲线形态和蠕变破坏阶段的持续时长外，试样的蠕变变形及失效行为特征基本符合聚合物类膜材的典型四单元蠕变模型。如图10所示，模型由1个弹簧单元、1个Kelvin-Voigt模型和1个牛



ε_1 —Universal elastic strain; ε_2 —High elastic strain; ε_3 —Viscosity strain;
 E_1, E_2 —Elastic modulus of different spring elements in the model; η_2 ,
 η_3 —Viscosity coefficient of different sticky pot units in the model;
 σ_c —Load holding stress value; t —Time

图10 聚合物的四单元蠕变模型

Fig. 10 Common creep model of polymers based on combination of spring elements and dashpot elements

顿黏壶单元串联形成，分别用于描述材料中普弹变形、高弹变形和黏性流动三部分变形特征。试样受到恒定荷载作用时以上3种变形同时发生，即

$\varepsilon_{total} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 =$

$$\frac{\sigma_c}{E_1} + \frac{\sigma_c}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2(t-t_0)}{\eta_2}} \right) + \frac{\sigma_c}{\eta_3} (t - t_0) \quad (6)$$

式中： ε_1 代表普弹性应变； ε_2 代表高弹应变； ε_3 代表黏性流动产生的应变； $E_1、E_2$ 代表模型中不同弹簧单元的弹性模量； $\eta_2、\eta_3$ 则代表模型中不同黏壶单元的黏滞系数。

3种形变分别在加载和保载的不同阶段起主导作用： $t=t_0$ 时，如图3中A点，此时试样开始进入保载阶段，尚未发生蠕变变形， $\varepsilon_{total}=\varepsilon_1=\sigma_c/E_1$ 。类似地， ε_2 主要代表初始蠕变阶段产生的应变 ε_{c1} ， ε_3 则主要代表稳态蠕变阶段产生的应变 ε_{c2} 。考虑到试样在稳态蠕变阶段的微小应变(图5)，模型中将 ε_3 部分产生的应变视为高阶小量，同样选择各应力水平下 ε_c 最接近平均值的试样数据，利用牛顿迭代法求解非线性方程组，计算模型中各弹性参数变化范围为

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + o(\varepsilon_3) \approx \frac{\sigma_c}{E_1} + \frac{\sigma_c}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2(t-t_0)}{\eta_2}} \right)$$

$(E_1 \in [251, 280]; E_2 \in [249, 279];$
 $t_0 \in [18, 24]; \eta_2 \in [5807, 7788]) \quad (7)$

3.3 Vectran-PVF膜材蠕变破坏准则

式(7)表述了在应力水平 σ_c 下，单轴拉伸蠕变的试样经历时间 t 后总应变 ε_{total} 所处的区间值。相应地，每个试样的 t 和 ε_{total} 都具有实际上限值，

基于对以上 48 组试验结果分析,可以得到相应的 4 档应力水平下试样发生破坏的规律性判据,可为其他应力水平下试样的蠕变力学行为预测提供参考。

根据图 4 和式 (3),得到基于应力水平的最大拉应变破坏判据为

$$\xi_{total} < \varepsilon_u(\sigma_c) = \varepsilon_0 + \varepsilon_c = \left(75\sigma_c - 58e^{\frac{\sigma_c - 254}{18}} + 987\right) \times 10^{-4}$$
$$(\sigma_c > 63\% \sigma_u)$$
 (8)

根据图 7 和式 (5),得到基于应力水平的最大蠕变时间破坏判据为

$$t < \min\{t_{rupt}(\sigma_c)\} = 4 - 7\ln(\sigma_c - 231)(\sigma_c > 63\% \sigma_u)$$
 (9)

不满足以上两种其中任一种判据条件,试样即发生蠕变破坏。选择各应力水平下蠕变破坏时间 t_{rupt} 最接近平均值的试样,试验 ε_{total} 值与模型结果对比如图 11 所示。在 $\sigma_c=85\% \sigma_u$ 时, ε_{total} 变化范围较广(图 4),模型预测带宽度最大。各应力水平下模型预测带内极限应变 ε_u 范围与试验结果平均值对比如表 2 所示,在应力水平 $\sigma_c=85\% \sigma_u$

和 $\sigma_c=80\% \sigma_u$ 时预测效果较好,试验结果中极限应变值平均值处于预测带之内;应力水平 $\sigma_c=75\% \sigma_u$ 和 $\sigma_c=70\% \sigma_u$ 时预测误差分别为 5.4% 和 10.4%,误差随应力水平降低呈现增加趋势。根据 Norton 蠕变损伤理论分析^[20-21],当应力较大时,可以忽略损伤,变形是控制材料蠕变失效时间的主要因素;当应力较小时,可忽略变形,损伤是引起材料力学性能变化的主要因素。应力水平较低时,损伤造成试样中单根纤维相同力学性质的假设不再成立,适用于黏-弹-塑性材料的四单元蠕变模型不能准确描述含损伤聚合物类膜材的变形特征,故使预测误差随应力水平的降低而增加。

4 结论

在 $85\% \sigma_u$ 、 $80\% \sigma_u$ 、 $75\% \sigma_u$ 、 $70\% \sigma_u$ 四阶极限应力 σ_u 水平下分别进行了 12 次聚酯纤维织物类膜材的单轴拉伸蠕变试验,使用蠕变应变 ε_c 、蠕变模量 E_c 和蠕变破坏时间 t_{rupt} 等指标来表征其非线性力学行为,基于试验数据建立参数化的四单元蠕变模型及蠕变破坏准则,能够较准确地反映材料在高应力水平下的蠕变破坏规律。通过试验结果与模型分析得到的结论如下:

- (1) 织物膜材试样的蠕变应变各阶段与聚合物类膜材相似,但其蠕变阶段整体变形量较小,平均值低于 0.25%,试样发生蠕变破坏时的极限应变随应力水平降低而降低,且呈近似线性关系。
- (2) 织物膜材试样蠕变破坏阶段持续时间极短,偏于脆性破坏,蠕变破坏时间随应力水平的降低呈非线性增长,当应力水平低于 $63\% \sigma_u$ 时不发生蠕变破坏。
- (3) 参数化的四单元蠕变模型能够较准确地描述此织物膜材在高应力水平下的蠕变破坏行为,但随着应力水平的降低,试验数据与模型预测之间的误差呈增长趋势。

参考文献:

[1] CHEN Y, LI S, DING K, et al. Investigation of tear strength of an airship envelope fabric by theoretical method and uniaxial tear test[J]. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2019, 14: 1-11.

[2] SHI T, HU J, CHEN W, et al. A refined numerical model for determining inflation-burst behavior of composite membrane structures[J]. *Polymer Testing*, 2020, 81: 106123.

[3] SHI T, CHEN W, GAO C, et al. Investigation of mechanical behavior of weld seams of composite envelopes in airship

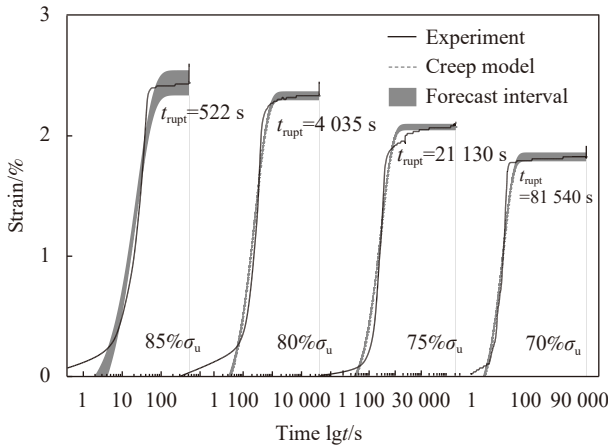


图 11 蠕变模型与 Vectran-PVF 膜材蠕变试验结果对比

Fig. 11 Comparison between Vectran-PVF fabric creep model and experimental results

表 2 Vectran-PVF 膜材模型预测带与试验结果的极限应变值对比

Table 2 Comparison of ultimate strain values of Vectran-PVF fabric between model prediction zone and test results

Stress	Ultimate strain/%		Error/%
	Experiment	Creep model	
85%σ _u	2.40	2.33-2.55	0.0
80%σ _u	2.33	2.29-2.37	0.0
75%σ _u	2.22	2.04-2.10	5.4
70%σ _u	2.11	1.78-1.89	10.4

- structures[J]. *Composite Structures*, 2018, 201: 1-12.
- [4] QIU Z, CHEN W, GAO C, et al. Initial configuration and nonlinear mechanical analysis of stratospheric nonrigid airship envelope[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2019, 32(2): 04018155.
- [5] SUN G, LI L, XUE S, et al. Mechanical properties of polyester-coated fabric membrane material subjected to uniaxial loading at elevated temperatures[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2021, 33(7): 04021169.
- [6] ZHAO B, CHEN W. Rate-dependent mechanical properties and elastic modulus of ETFE foils used in inflated forming of transparency air-inflated cushion membrane structures[J]. *Engineering Structures*, 2021, 227: 111404.
- [7] HU J, LI Y, CHEN W, et al. A combined loading-creep model of ETFE foils for flat-patterning structures[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 157: 106976.
- [8] CHEN B, GUO L, ZHANG W, et al. Compressive creep behavior of cellulose fiber reinforced concrete[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 825(1): 012022.
- [9] 宋彦琦, 李小龙, 马宏发, 等. 基于有损伤体元件的广义Kelvin模型蠕变全过程探究[J]. *应用数学和力学*, 2021, 42(6): 637-644.
- SONG Yanqi, LI Xiaolong, MA Hongfa, et al. Research on the whole creep process of the generalized kelvin model based on damaged body elements[J]. *Applied Mathematics & Mechanics*, 2021, 42(6): 637-644(in Chinese).
- [10] LI Y, WU M. Uniaxial creep property and viscoelastic-plastic modelling of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foil[J]. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2015, 19(1): 21-34.
- [11] FAIRHURST A, THOMMEN M, RYTKA C. Comparison of short and long term creep testing in high performance polymers[J]. *Polymer Testing*, 2019, 78: 105979.
- [12] DUAN X, YUAN H, TANG W, et al. A phenomenological primary-secondary-tertiary creep model for polymer-bonded composite materials[J]. *Polymers*, 2021, 13(14): 2353.
- [13] ZHANG Y, LIU X, YIN B, et al. A nonlinear fractional viscoelastic-plastic creep model of asphalt mixture[J]. *Polymers*, 2021, 13(8): 1278.
- [14] LIU W, ZHANG S. An improved unsteady creep model based on the time dependent mechanical parameters[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2021, 28(17): 1838-1848.
- [15] 全国纺织品标准化技术委员会基础标准分技术委员会. 纺织品种物拉伸性能 第1部分: 断裂强度和断裂伸长率的测定(条样法): GB/T 3923.1—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- Basic Standards Sub Technical Committee of National Textile Standardization Technical Committee. Textiles—Tensile properties of fabrics—Part 1: Determination of maximum force and elongation at maximum force using the strip method: GB/T 3923.1—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013(in Chinese).
- [16] 中华人民共和国工业和信息化部. 膜结构用涂层织物拉伸蠕变性能试验方法: FZ/T 60037—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Coated fabrics for membrane structures—Test method for tensile creep: FZ/T 60037—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013(in Chinese).
- [17] American Society for Testing and Materials Committee. Test methods for tensile, compressive, and flexural creep and creep-rupture of plastics: ANSI/ASTM D2990—2009[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2009.
- [18] DANG H, ZHAO Z, LIU P, et al. A new analytical method for progressive failure analysis of two-dimensional triaxially braided composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 186: 107936.
- [19] HU J, CHEN W, ZHAO B, et al. Uniaxial tensile mechanical properties and model parameters determination of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foils[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 75: 200-207.
- [20] WANG X Y, WANG X, ZHANG X C, et al. Creep damage characterization of UNS N10003 alloy based on a numerical simulation using the Norton creep law and Kachanov-Rabotnov creep damage model[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2019, 30(4): 1-9.
- [21] SAMADI S, JIN S, HARMUTH H. Combined damaged elasticity and creep modeling of ceramics with wedge splitting tests[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(18): 25846-25853.