

PTFE 膜材的应力松弛性能及预测模型分析*

许珊珊¹, 张莹莹¹, 张其林²

(1. 中国矿业大学 江苏省土木工程环境灾变与结构可靠性重点实验室, 江苏 徐州 221116;
2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 对建筑用 PTFE(聚四氟乙烯)膜材进行了 5 种温度(23, 40, 50, 60, 70 °C)下的单轴应力松弛试验, 考虑了初始拉伸速度(2, 5, 10, 20 N/s)对于膜材应力松弛性能的影响, 分析得到了材料的松弛模量变化规律, 采用几种常见的粘弹性本构关系模型对试验曲线进行了拟合对比分析. 研究发现 PTFE 膜材表现出了明显的应力松弛特性, 且受温度和初始拉伸速度影响较明显; 随温度的增加, 膜材的应力松弛速度越快, 最终稳定应力值越大; 随着初始拉伸速度的增加, 最终稳定应力值越小, 应力松弛速度基本相同; 大部分粘弹性本构关系模型能够对 PTFE 膜材的应力松弛行为做出较好的预测, 少量模型预测效果较差, 这主要与本构关系模型的组成形式有关系.

关键词: PTFE 涂层织物; 应力松弛; 温度; 初始拉伸速度; 粘弹性本构关系

中图分类号: O377; TU502⁺.6 **文献标志码:** A

doi: 10.3879/j.issn.1000-0887.2016.03.005

引 言

张拉膜结构主要通过膜面张拉产生预应力提供结构刚度, 结构的预应力值及其分布与膜结构的几何外形是一一对应的^[1-3]. 张拉膜结构在拼接张拉成形后, 由于膜材料的粘性性能, 加之在风、雪等外荷载循环作用下, 结构会发生应力松弛, 从而导致膜面应力降低和重分布, 甚至会产生褶皱. 膜面预张力在施工中能否达到设计要求, 直接关系到膜结构的成形质量, 甚至会影响结构的安全性和使用性.

PTFE 膜材主要是由玻璃纤维基材和 PTFE 涂层构成, 主要应用在张拉膜结构中. PTFE 化学性质稳定, 抗湿度变化及有机物质的破坏, 防火并且不易老化, 涂覆后可提高玻璃纤维织物基层的抗拉强度及弹性系数. 作为一种典型的建筑用涂层织物, PTFE 膜材具有明显的非线性、非弹性、各向异性以及粘弹性等特性, 其力学性能受到加载历史、环境因素等影响明显, 加上织物类膜材的编织方式和涂层处理也对材料性能产生影响, 表现为各向异性粘弹性^[4-11].

影响粘弹性材料应力松弛性能的因素主要有初始应力、荷载持续时间、环境温度及初始拉伸速度等. 有学者研究了高聚物的应力松弛性能, 孟雷等^[7-10]对常见的几种织物膜材(PVC,

* 收稿日期: 2015-11-02; 修订日期: 2016-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(51308532; 90815003); 中国博士后科学基金(2013M541756); 江苏省博士后科研基金(1301034B)

作者简介: 许珊珊(1990—), 女, 硕士生(E-mail: 15996993952@163.com);
张莹莹(1985—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师(通讯作者).
E-mail: zhangyingying85@163.com).

PTFE)的粘弹性行为进行了研究,对织物膜材的应力松弛性能及徐变性能进行了曲线拟合,分析了PVC膜材马鞍形曲面的应力松弛,表明应力松弛对成形曲面应力影响显著;郭郁^[11]对柔性复合材料作了应力松弛性能的测试分析与力学模拟,张营营等^[12-13]通过实验研究提出了PTFE膜材强度的温度影响系数,为PTFE膜材强度设计分项系数的取值提供了依据,并进行不同应变速率下的单轴拉伸试验得到相应的断裂强度、断裂延伸率的变化规律,得出应针对不同的聚合物材料特性、不同的研究目的,结合现有研究条件来选择相应本构方程的结论。也有学者^[14-16]做了拉伸速度对于金属材料应力松弛性能的影响,这对膜材料性能研究起到了一定的借鉴作用。但温度及拉伸速度对PTFE膜材应力松弛性能影响的研究还很少。为此,本文通过试验研究了温度及初始拉伸速度对于PTFE膜材应力松弛性能的影响,分析得到了不同温度及初始拉伸速度下应力及松弛模量的变化规律,比较分析了几种常见粘弹性模型的拟合精度,为膜材料和膜结构的发展和應用提供参考。

1 粘弹性本构关系模型

由于材料、载荷和形变过程的复杂性,材料随时间而变化的力学性能也很复杂,不能只用普通准静态的蠕变与松弛来表达。所以要研究材料力学性能方面的物理现象需引用数学概念来表达,具体的粘弹性行为,常用数学模型来描述。这些力学模型由离散的弹性元件与粘性元件——弹簧和阻尼器,以不同方式组合而成。简单的粘弹性模型有Maxwell模型和Kelvin模型,但由于它们反映的松弛或蠕变过程都只是时间的一个指数函数,而大多数粘弹性材料的流变过程均较为缓慢,因此为了更好地描述实际材料的粘弹性质,通常用更多的基本元件组合成其他模型^[17-20],如广义三元件模型、分数阶模型及分数指数阶模型和Burgers模型等。

几种常用的粘弹性力学模型用于应力松弛时的方程形式如下:

1) 经典 Maxwell 粘弹性模型

$$\sigma(t) = E\varepsilon_0 e^{-t/\tau_r}, \quad (1)$$

其中, τ_r 称为松弛时间,且 $\tau_r = \eta/E$; η 为黏性系数; E 为弹性模量; σ 为应力; ε_0 为初始应变。

2) 广义线性粘弹性模型

$$Y(t) = E_e + \sum_{i=1}^n E_i e^{-t/\tau_i}, \quad (2)$$

其中, E_e 为平衡模量,是 $t \rightarrow \infty$ 时模量 $Y(t)$ 的稳态值; $\tau_i = \eta_i/E_i$ 是第 i 个 Maxwell 单元的松弛时间。

3) 分数阶模型

$$Y(t) \cong \frac{E}{\Gamma(1-\beta)} \left(\frac{t}{\tau}\right)^{-\beta} \quad (t \ll \tau), \quad (3)$$

$$Y(t) \cong \frac{E}{\Gamma(1-\alpha)} \left(\frac{t}{\tau}\right)^{-\alpha} \quad (t \gg \tau), \quad (4)$$

其中, α, β 为衰减指数, τ 为衰减特征时间, E 为弹性模量, $\Gamma(x)$ 为完全的 Gamma 函数。

4) 分数指数阶模型

$$Y(t) = Y_\infty + (Y_0 - Y_\infty) \exp\{-\beta[(\gamma + \alpha)t]^{1-\alpha}\}, \quad (5)$$

其中, Y_∞ 为长期松弛模量, Y_0 为瞬态松弛模量, α, β, γ 为待定系数。

5) Burgers 模型

$$Y(t) = \frac{E_1}{\alpha - \beta} \left[\left(\frac{E_2}{\eta_2} - \beta\right) e^{-\beta t} - \left(\frac{E_2}{\eta_2} - \alpha\right) e^{-\alpha t} \right], \quad (6)$$

其中

$$\alpha = \frac{p_1 + \sqrt{p_1^2 - 4p_2}}{2p_2}, \beta = \frac{p_1 - \sqrt{p_1^2 - 4p_2}}{2p_2}, p_1 = \frac{\eta_1}{E_1} + \frac{\eta_1 + \eta_2}{E_2}, p_2 = \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2}.$$

2 应力松弛试验

本试验选取圣戈班公司生产的 Sheerfill-II 膜材,厚度为 0.8 mm,采用长条形试样,试样尺寸为 300 mm×50 mm,应变标距为 200 mm.试验采用可以控制试验温度的电子控制万能拉伸试验机.

本文试验方案根据《膜结构技术规程》(CECS 158:2004)和《膜结构检测技术规程》(DG/TJ 08-2019-2007)等确定.第 1 部分研究温度对于膜材应力松弛的影响.试验时,把试件装环境箱内,然后将环境箱调到预定温度,做好密封保温,恒温 1 h 后进行试验.温度分别取 23, 40, 50, 60, 70 °C.试验时将不同温度下的 PTFE 膜材,分别按 2 N/s 的速度拉伸至初始应力 4 kN/m 进行单轴应力松弛试验,得到不同温度下的膜材在 3 d 中的应力变化情况,并计算相应的应力松弛模量.第 2 部分研究了初始拉伸速度对于材料应力松弛性能的影响.本节试验温度为 23±2 °C,相对湿度为 65%±3%,分别在 2, 5, 10, 20 N/s 这 4 种拉伸速度下将膜材拉伸至初始应力 4 kN/m 进行单轴应力松弛试验,得到不同拉伸速度膜材在 8 h 中的应力变化情况,并计算相应的应力松弛模量.

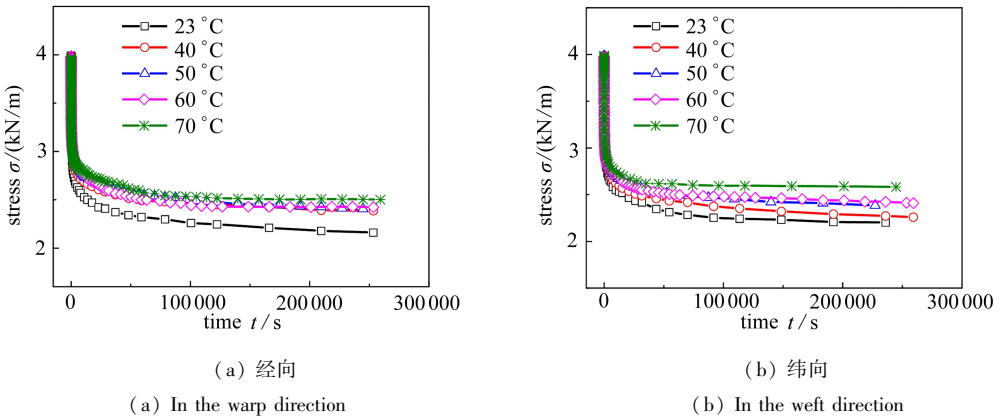


图 1 不同温度下的应力松弛曲线

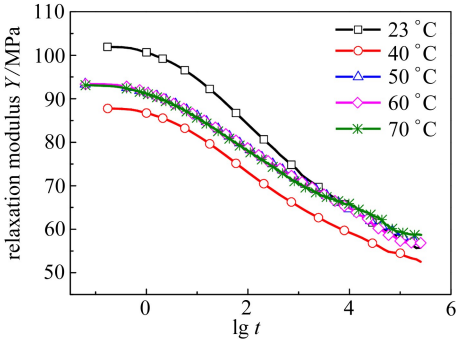
Fig. 1 Stress relaxation curves under different temperatures

从图 1 可以看出:PTFE 膜材的应力随时间呈非线性关系,3 h 完成应力松弛量约占 3 d 应力松弛量的 80%,随后应力变化趋于稳定;随着温度的增加,应力松弛的速度越慢,趋于稳定的时间越长,最终的稳定应力值越大.

从图 2 看出:松弛模量与时间的对数呈线性关系,松弛模量曲线的变化趋势与温度无关,随时间的对数递减;且随着温度的增加,松弛模量降低越慢.

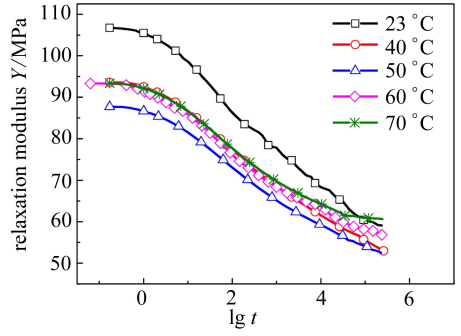
从图 3 看出:PTFE 膜材的应力随时间呈非线性关系,随拉伸速度的增加,趋于稳定时的应力值越小,且经向的应力稳定值比纬向大.

从图 4 看出:松弛模量与时间的对数呈线性关系,不同拉伸速度下应力松弛的速度基本相同,但经向的松弛模量要始终大于纬向,这主要跟材料的平织结构有关.



(a) 经向

(a) In the warp direction

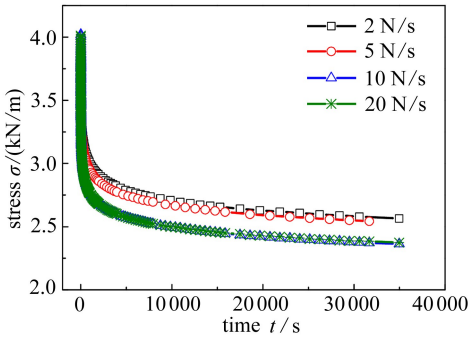


(b) 纬向

(b) In the weft direction

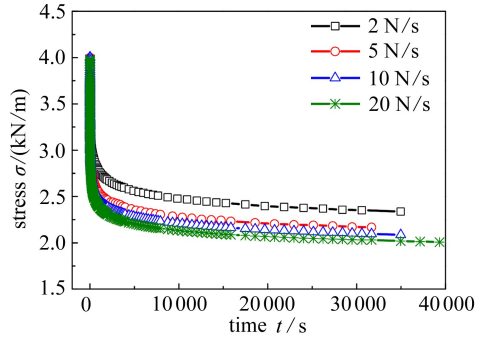
图2 不同温度下的松弛模量曲线

Fig. 2 Relaxation modulus curves under different temperatures



(a) 经向

(a) In the warp direction

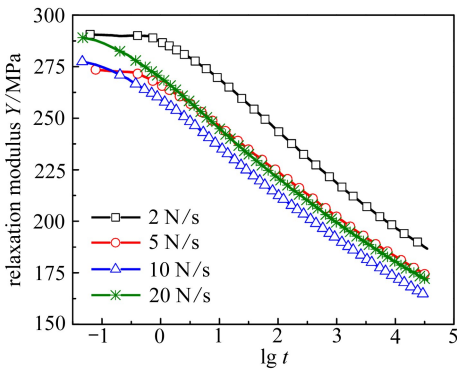


(b) 纬向

(b) In the weft direction

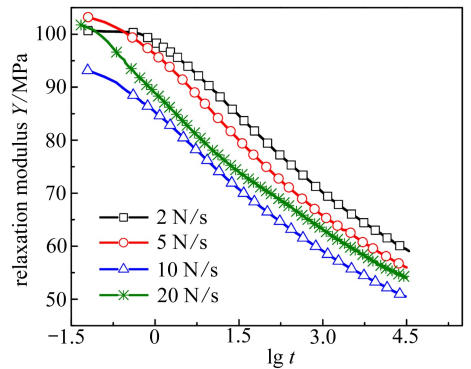
图3 不同初始拉伸速度的应力松弛曲线

Fig. 3 Stress relaxation curves at different initial tensile rates



(a) 经向

(a) In the warp direction



(b) 纬向

(b) In the weft direction

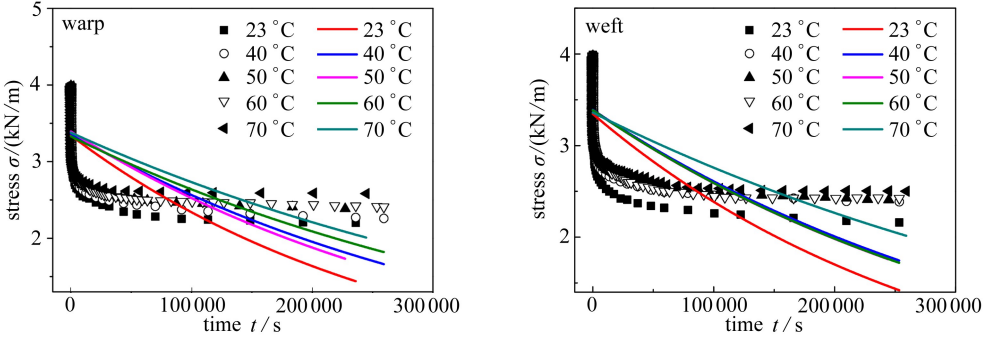
图4 不同拉伸速度的松弛模量曲线

Fig. 4 Relaxation modulus curves at different initial tensile rates

3 松弛模量的参数拟合

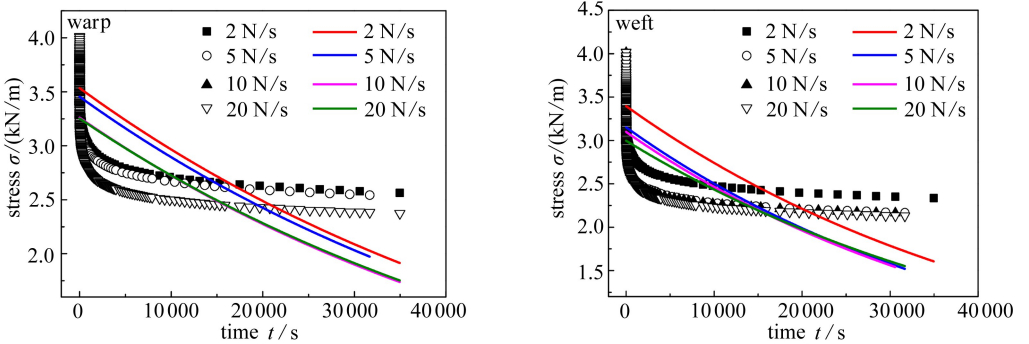
本节采用第 1 节提到的几个经典粘弹性模型,对第 2 节的试验数据进行参数拟合,并将拟合得到的数据与试验数据进行比较,从而对比分析各个模型的预测精度。(本节曲线图中,未特殊说明的散点均代表试验值,曲线均代表拟合值)

3.1 经典 Maxwell 模型拟合



(a) 不同温度

(a) Under different temperatures



(b) 不同初始拉伸速度

(b) At different initial tensile rates

图 5 经典 Maxwell 模型拟合数据和试验数据的对比

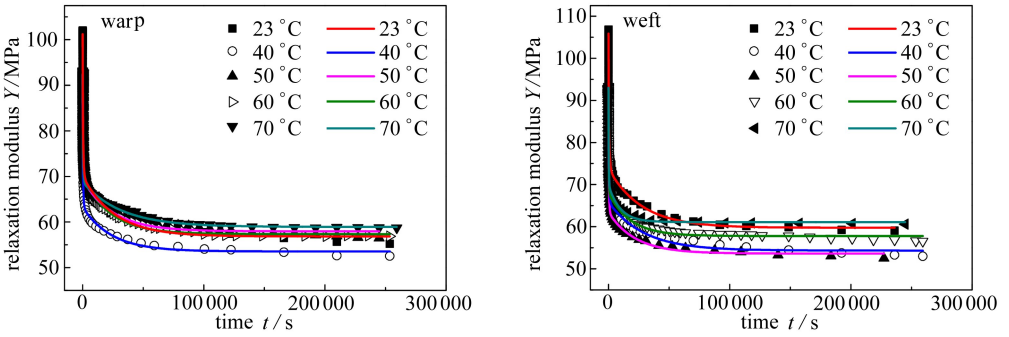
Fig. 5 Comparisons between the fitting curves and test results according to the classic Maxwell model

从图 5 看出:经典 Maxwell 模型的预测效果非常差,这主要是由于该模型只能简单地表示应力的衰减趋势,并不能给出应力松弛行为的更加准确的表达.它反映的应力松弛过程只是时间的一个指数函数,而大多数聚合物材料的流变过程均较为缓慢;故要想对应力松弛特性进行较为精确的描述需寻求其他模型.

3.2 广义 Maxwell 模型拟合

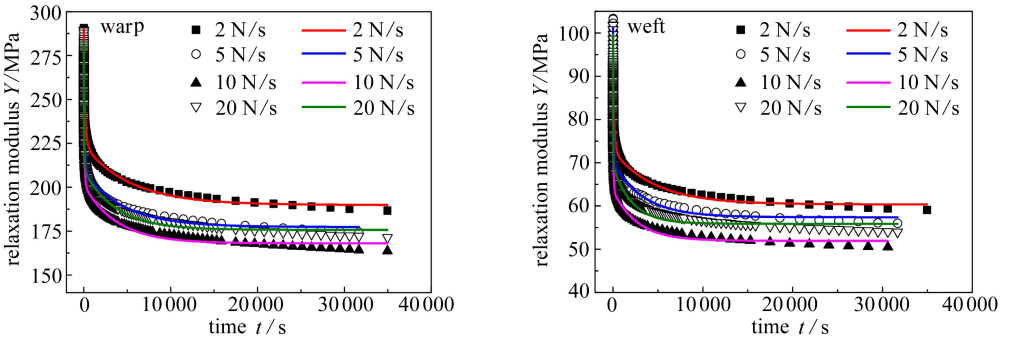
广义 Maxwell 模型采用 3 个单元的组合形式,并采用自定义函数形式对其进行拟合,拟合曲线见图 6.

从图 6 看出:广义三元件 Maxwell 模型对前期松弛模量拟合效果较好,但对后期拟合效果不太好.比起经典 Maxwell 模型它能更进一步体现材料的粘弹性特性,但由于它不能反映不可恢复的粘性流动,对于后期拟合效果不太好.



(a) 不同温度

(a) Under different temperatures



(b) 不同初始拉伸速度

(b) At different initial tensile rates

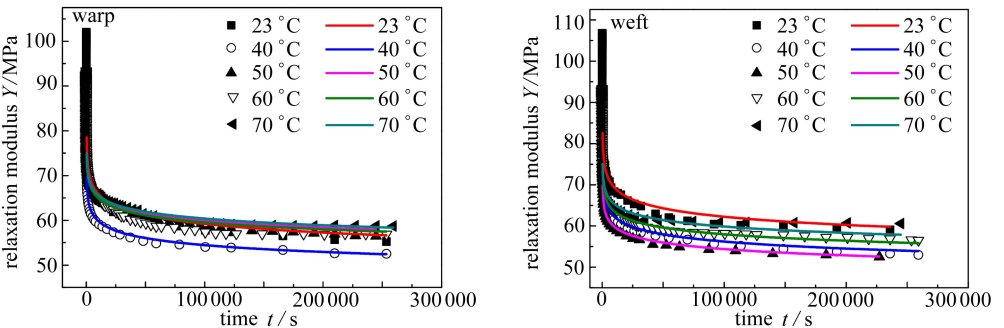
图 6 广义三元件 Maxwell 模型拟合数据和试验数据的对比

Fig. 6 Comparisons between the fitting curves and test results according to the generalized 3-component Maxwell model

3.3 分数阶 Maxwell 模型拟合

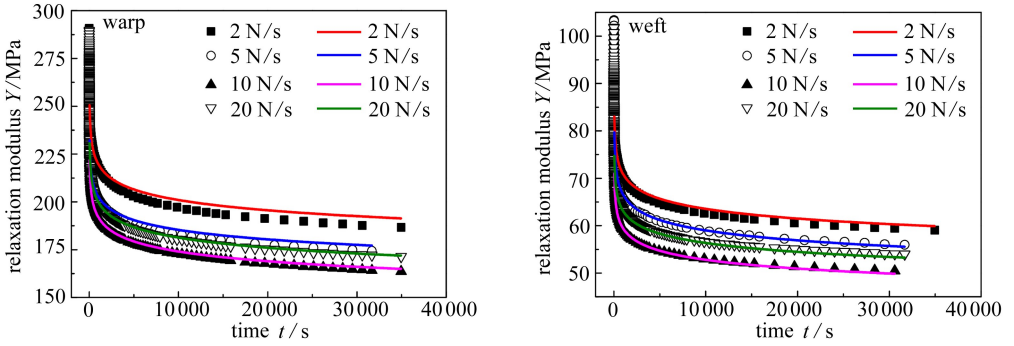
分数阶 Maxwell 模型采用自定义函数形式对其进行拟合,拟合曲线见图 7.

从图 7 看出: 分数阶 Maxwell 模型对后期松弛模量有较好的拟合效果,但对前期的拟合效果不好.这主要与材料粘弹性行为分段自相似性有关,在不同时间段,参数 α 或 β 会发生变化.



(a) 不同温度

(a) Under different temperatures



(b) 不同初始拉伸速度

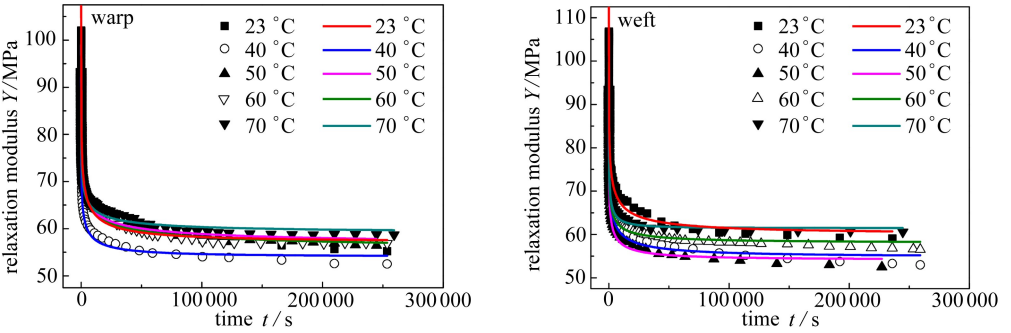
(b) At different initial tensile rates

图7 分数阶 Maxwell 模型拟合数据和试验数据的对比

Fig. 7 Comparisons between the fitting curves and test results according to the fractional model

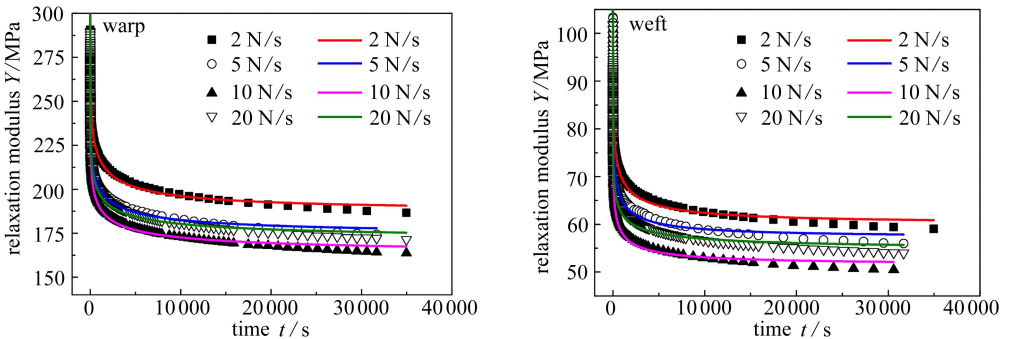
3.4 分数指数阶模型拟合

分数指数阶模型采用自定义函数形式进行拟合,拟合曲线见图 8.



(a) 不同温度

(a) Under different temperatures



(b) 不同初始拉伸速度

(b) At different initial tensile rates

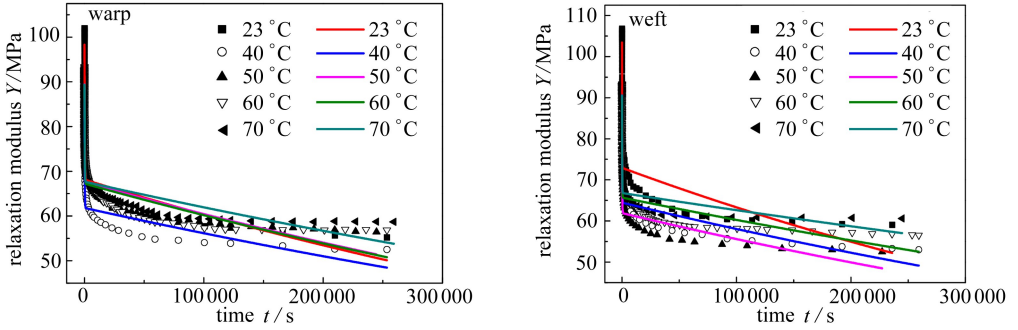
图8 分数指数阶模型拟合数据和试验数据的对比

Fig. 8 Comparisons between the fitting curves and test results according to the fractional exponential model

从图 8 看出:分数指数阶模型对于松弛模量拟合效果较好,这是因为分数阶微积分可以实现弹性行为和粘性行为之间的差值计算,能更好地描述实际材料的粘弹性性质,真正实现了非线性粘弹性本构关系与非线性弹性本构关系之间的对应。

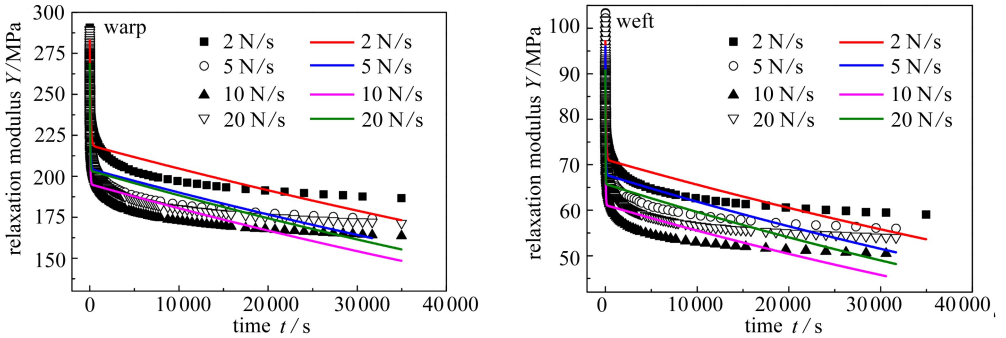
3.5 Burgers 模型拟合

Burgers 模型采用自定义函数形式,拟合曲线见图 9.可以看出:Burgers 模型能在一定程度上反映不同温度下、不同初始拉伸速度下的 PTFE 膜材应力松弛性能.这是因为 Burgers 模型是由一个 Maxwell 模型和一个 Kelvin 模型串联而成的组合模型,既能反映粘弹性材料的蠕变特性又能反映材料的应力松弛特性,但是其含有的 Maxwell 模型数量较少,参数较少,故此模型不能很精确地反映粘弹性材料的应力松弛性能.



(a) 不同温度

(a) Under different temperatures



(b) 不同初始拉伸速度

(b) At different initial tensile rates

图 9 Burgers 模型拟合数据与试验数据的对比

Fig. 9 Comparisons between the fitting curves and test results according to the Burgers model

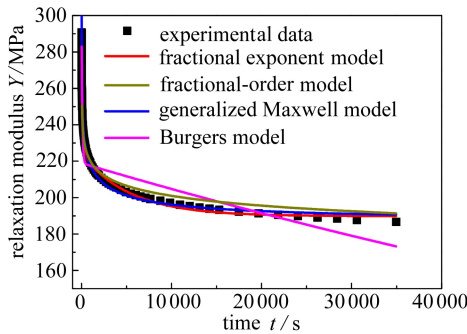


图 10 几个模型经向的预测分析对比图

Fig. 10 Comparison between the predictions of several classic viscoelastic models in the warp direction

3.6 几个模型的预测对比分析

本小节以经向拉伸速度为 2 N/s 为例,选取上述预测结果相对较好的几个模型(广义三元件 Maxwell 模型、分数阶模型、分数指数阶模型、Burgers 模型),将各自的预测结果进行对比分析。通过对比发现:对于 PTFE 膜材的应力松弛行为,分数指数阶模型的拟合效果最好;广义三元件 Maxwell 模型对于前期拟合效果较好,但是对于后期效果略差;分数阶模型对于前期预测精度不好,后期预测精度较好;Burgers 模型的拟合效果最差。通过分析得出:分数指数阶模型适用于拟合 PTFE 膜材的应力松弛行为;广义三元件 Maxwell 模型,对于预测短期应力松弛行为较为合适;Burgers 模型不适用于用来预测应力松弛行为;分数阶模型适用于长期应力松弛行为的预测。而对于经典 Maxwell 模型,可以大致描述应力松弛行为,但预测精度较差。

4 结 论

1) 在应力松弛试验中,PTFE 膜材的应力衰减比较明显,与时间的对数呈非线性关系,3 小时完成应力松弛量约占 3 天应力松弛量的 80%,随后应力逐渐趋于稳定。

2) 随温度的增加,应力松弛的速度越慢,最终的应力稳定值逐渐提高;随拉伸速度的增加,最终的应力稳定值越小,且经向值大于纬向,但是应力松弛速度变化不大,且经向的松弛模量要始终大于纬向。

3) 大部分粘弹性模型对于膜材料的应力松弛行为能够进行较好的预测,其中,广义三元件 Maxwell 模型对于应力松弛前期拟合效果较好,但是后期拟合效果略差,主要由于该模型不能反映不可恢复的粘性流动;分数阶 Maxwell 模型对后期松弛模量有较好的拟合效果,但对前期的拟合效果不好,主要是由粘弹性材料的分段自相似性引起的;分数指数阶模型对于应力松弛全过程的拟合效果较好,这主要是由于它能够实现非线性粘弹性本构关系与非线性弹性本构关系之间的对应。部分模型(经典 Maxwell 模型、Burgers 模型)的预测精度较差,这主要与该模型的组成形式有关。

参考文献(References):

- [1] 杨庆山,姜忆南.张拉索-膜结构分析与设计[M].北京:科学出版社,2004.(YANG Qing-shan, JIANG Yi-nan. *Analysis and Design of Cable Membrane Structure* [M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese))
- [2] 陈务军.膜结构工程设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.(CHEN Wu-jun. *Membrane Structure Engineering Design* [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2005. (in Chinese))
- [3] Wakefield D S. Engineering analysis of tension structures: theory and practice[J]. *Engineering Structures*, 1999, 21(8): 680-690.
- [4] 卫东,王臣,向阳,沈世钊.建筑膜材的材性试验研究[J].空间结构,2002,8(1): 37-43.(WEI Dong, WANG Chen, XIANG Yang, SHEN Shi-zhao. Experimental study on material properties of structural fabric[J]. *Spatial Structures*, 2002, 8(1): 37-43. (in Chinese))
- [5] ZHANG Ying-ying, ZHANG Qi-lin, LEI Ke, KUAI Bei-lei. Experimental analysis of tensile behaviors of polytetrafluoroethylene-coated fabrics subjected to monotonous and cyclic loading [J]. *Textile Research Journal*, 2014, 84(3): 231-245.
- [6] Minami H, Yamamoto C, Segawa S, Kono Y. A method for measurement of stress-strain curves for elastic analysis on membrane on the state after stress relaxation or creep[R]. Re-

- search Report on Membrane Structures' 97. Tokyo: The Membrane Structures Association of Japan, 1997: 23-29.
- [7] 孟雷, 吴明儿. 建筑用 PTFE 膜材应力松弛和徐变性能研究[J]. 建筑材料学报, 2012, **15**(2): 206-210. (MENG Lei, WU Ming-er. Study on stress relaxation and creep properties of PTFE membrane[J]. *Journal of Building Materials*, 2012, **15**(2): 206-210. (in Chinese))
- [8] 孟雷, 吴明儿. 建筑用 PVC 膜材应力松弛性能研究[J]. 建筑材料学报, 2013, **16**(5): 919-922. (MENG Lei, WU Ming-er. Study on stress relaxation properties of PVC membrane[J]. *Journal of Building Materials*, 2013, **16**(5): 919-922. (in Chinese))
- [9] 孟雷, 吴明儿. 张拉成形曲面的应力松弛分析[J]. 建筑结构学报, 2015, **36**(5): 81-87. (MENG Lei, WU Ming-er. Stress relaxation analysis of membrane structures in actual equilibrium state [J]. *Journal of Building Structures*, 2015, **36**(5): 81-87. (in Chinese))
- [10] 孟雷. 考虑膜材粘弹特性的膜结构成形曲面应力分析[D]. 博士学位论文. 上海: 同济大学, 2013. (MENG Lei. Stress analysis of the equilibrium surface for membrane structures by considering viscoelastic properties of coated fabrics[D]. PhD Thesis. Shanghai: Tongji University, 2013. (in Chinese))
- [11] 郭郁. 篷盖类柔性复合材料应力松弛和疲劳性能的研究[D]. 硕士学位论文. 上海: 东华大学, 2006. (GUO Yu. Study on the stress relaxation and fatigue properties of the tenting flexible composites[D]. Master Thesis. Shanghai: Donghua University, 2006. (in Chinese))
- [12] 张营营, 张其林, 周传志. 温度对 PTFE 膜材料力学性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2012, **15**(4): 478-483. (ZHANG Ying-ying, ZHANG Qi-lin, ZHOU Chuan-zhi. Effects of temperature on mechanical properties of PTFE coated fabrics[J]. *Journal of Building Materials*, 2012, **15**(4): 478-483. (in Chinese))
- [13] 张营营, 张其林, 周传志. PTFE 膜材的单向拉伸性能[J]. 建筑材料学报, 2010, **13**(4): 535-539. (ZHANG Ying-ying, ZHANG Qi-lin, ZHOU Chuan-zhi. Uniaxial tensile properties of PTFE membrane material[J]. *Journal of Building Materials*, 2010, **13**(4): 535-539. (in Chinese))
- [14] 王海鹏, 陈新文, 李骏, 马丽婷, 苏彬. 玻璃纤维复合材料不同温度条件拉伸强度统计分布[J]. 材料工程, 2008(7): 76-78. (WANG Hai-peng, CHEN Xin-wen, LI Xiao-jun, MA Li-ting, SU Bin. Tensile strength distribution of glass fiber reinforced composites at different temperatures[J]. *Materials Engineering*, 2008(7): 76-78. (in Chinese))
- [15] 毛爱菊. 常温拉伸应力松弛试验中的若干影响因素[J]. 天津冶金, 1996(2): 18-21. (MAO Ai-ju. Some influence factors on the tensile stress relaxation test in normal temperature [J]. *Tianjin Metallurgy*, 1996(2): 18-21. (in Chinese))
- [16] 蒋清华, 刘彦华, 赵永永, 黄昊, 李广路. 拉伸速度对低合金结构钢抗拉试样强度的影响[J]. 现代制造技术与装备, 2014(6): 59-60, 62. (JIANG Qing-hua, LIU Yan-hua, ZHAO Yong-yong, HUANG Hao, LI Guang-lu. Tensile speed effect on the strength low alloy structural steel tensile specimen[J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2014(6): 59-60, 62. (in Chinese))
- [17] 杨挺青. 粘弹性力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990: 10-15. (YANG Ting-qing. *Theory of Viscoelasticity* [M]. Wuhan: Huazhong University of Technology Press, 1990: 10-15. (in Chinese))
- [18] 张淳源, 张为民. 求解一类非线性粘弹性问题的弹性回复对应原理[J]. 工程力学, 2002, **19**(1): 139-146. (ZHANG Chun-yuan, ZHANG Wei-min. Elasticity recovery correspondence principle for solving a class of nonlinear viscoelastic problems[J]. *Engineering Mechanics*, 2002, **19**(1): 139-146. (in Chinese))

- [19] 龚晓南, 叶黔元, 徐日庆. 工程材料本构方程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988: 182-197. (GONG Xiao-nan, YE Qian-yuan, XU Ri-qing. *Constitutive Equations of Engineering Materials*[M]. Beijing: China Building Industry Press, 1988: 182-197.(in Chinese))
- [20] 卓家寿, 黄丹. 工程材料的本构演绎[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 89-104. (ZHUO Jia-shou, HUANG Dan. *Constitutive Deduction of Engineering Materials*[M]. Beijing: Science Press, 2009: 89-104.(in Chinese))

Stress Relaxation Properties and the Prediction Models for PTFE Membranes

XU Shan-shan¹, ZHANG Ying-ying¹, ZHANG Qi-lin²

- (1. *Jiangsu Key Laboratory of Environmental Impact and Structural Safety in Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, P.R.China;*
2. *College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P.R.China*)

Abstract: With the PTFE membranes as the research object, the uniaxial stress relaxation tests were carried out respectively under 5 temperatures (23, 40, 50, 60, 70 °C) and at 4 initial tensile rates (2, 5, 10, 20 N/s), and the effects of these 2 kinds of factors on the stress relaxation properties of the membranes were investigated. The variations of the relaxation moduli were got and several existent viscoelastic constitutive models were used to fit the experimental data. The results show that, the PTFE membranes exhibit obvious stress relaxation behaviors. Both the temperature and the initial tensile rate have significant effects on the stress relaxation characteristics. The membrane stress relaxation rate decreases while the final steady stress increases with the temperature; on the other hand, the final steady stress decreases with the initial tensile rate while the stress relaxation rate keeps almost unaffected. Most of the existent viscoelastic models, esp. the fractional exponent one, make good predictions for the stress relaxation behaviors of the PTFE membranes, while some models work ill due to their poor compositions.

Key words: PTFE membrane; stress relaxation; temperature; initial tensile rate; viscoelastic constitutive relation

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (51308532; 90815003); China Postdoctoral Science Foundation (2013M541756)

引用本文/Cite this paper:

许珊珊, 张莹莹, 张其林. PTFE 膜材的应力松弛性能及预测模型分析[J]. 应用数学和力学, 2016, 37(3): 266-276.

XU Shan-shan, ZHANG Ying-ying, ZHANG Qi-lin. Stress relaxation properties and the prediction models for PTFE membranes[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2016, 37(3): 266-276.