

文章编号:1006-2467(2021)04-0387-07

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.317

不同温度下的乙烯-三氟氯乙烯共聚物 薄膜单轴拉伸试验

刘昶江, 赵 兵, 陈务军

(上海交通大学 空间结构研究中心, 上海 200240)

摘 要: 对厚度为 250 μm 的乙烯-三氟氯乙烯共聚物(ECTFE)薄膜进行了单轴拉伸试验, 考虑了不同的低-高温度(分别为 -50 、 -40 、 -30 、 -20 、 -10 、 0 、 10 、 20 、 30 、 40 、 50 、 60 、 70 及 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$)效应, 试件截取方向为机器方向. 得到了 ECTFE 薄膜在不同温度下的拉伸应力-应变曲线, 通过分析得到了弹性模量、屈服强度、屈服应变、冷拉应力、抗拉强度、断裂延伸率等力学参数及其随温度的变化规律. 结果表明: 随着温度的降低, 应力-应变曲线整体向上抬升, 屈服强度、拉伸强度、冷拉应力和弹性模量均增大, 断裂延伸率和韧性均减小. 在不同温度($-50\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$)下, 弹性模量的差值可达到 93%, 屈服强度的差值可达到 89%, 温度变化对 ECTFE 薄膜力学性能的影响显著. 得出了主要力学参数和温度变化的拟合公式, 可用于判断 ECTFE 薄膜在不同温度下的力学性能.

关键词: 乙烯-三氟氯乙烯共聚物薄膜; 低-高温度环境; 单轴拉伸试验; 弹性模量; 屈服强度

中图分类号: TU 502

文献标志码: A

Test of Uniaxial Tensile Mechanical Properties of ECTFE Foils at Various Temperatures

LIU Changjiang, ZHAO Bing, CHEN Wujun

(Space Structures Research Centre, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Uniaxial tensile tests of ethylene-chloro-tri-fluoro-ethylene (ECTFE) foils were conducted at a thickness of 250 μm and various low and high temperatures (-50 , -40 , -30 , -20 , -10 , 0 , 10 , 20 , 30 , 40 , 50 , 60 , 70 , and $80\text{ }^{\circ}\text{C}$). The specimens were fabricated according to the machine direction (MD). The tensile stress-strain curves of the foils at various temperatures were obtained. According to the variation discipline with temperature, several parameters such as elastic modulus, yield stress, yield strain, cold drawing stress, tensile strength, and tensile strain at break were subsequently analyzed and calculated. The results show that with the elevation of the stress-strain curves, the yield strength, tensile strength, cold drawing stress, and elastic modulus increase, but the strain at break and toughness decrease when the temperature decreases. At a wide range of temperatures from $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, the difference of elastic modulus can increase up to 93%, with a yield stress of 89%, which reflects the great sensitivity of ECTFE to temperatures. The fitting formulas of main mechanical parameters are also obtained, which can

收稿日期: 2019-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(51708345, 51778362, 51478264), 中国博士后科学基金(2017M610253)

作者简介: 刘昶江(1994-), 男, 河北省邯郸市人, 硕士生, 主要研究方向为膜结构、空间结构.

通信作者: 陈务军, 男, 教授, 博士生导师, 电话(Tel.): 021-34206708; E-mail: cwj@sjtu.edu.cn.

be used to predict the mechanical properties of ECTFE foils at various temperatures.

Key words: ethylene-chloro-tri-fluoro-ethylene (ECTFE) foils; low and high temperature environment; uniaxial tensile test; elastic modulus; yield stress

乙烯-三氟氯乙烯共聚物 (ECTFE) 是由三氟氯乙烯 ($\text{CF}_2\text{-CF-Cl}$) 与乙烯 ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$) 发生 1:1 聚合反应得到的半晶高聚物, 因具有良好的热、电、化学等性能, 被广泛应用于化工、半导体、航空航天等领域^[1]. 将 ECTFE 基材通过挤压、加工等工艺可以得到 ECTFE 薄膜, 与典型的高分子热塑性薄膜相似, 具有高透光度、耐化学渗透性、耐磨性、耐久性、各向同性及无经纬向纱线等特征, 在建筑结构的大跨空间结构领域具有广阔的应用前景^[2-3].

在众多含氟共聚物材料中, 乙烯-四氟乙烯共聚物 (ETFE) 薄膜具有与 ECTFE 薄膜相近的物理、化学、热、电和力学等性质, 自 1995 年起作为建筑与结构材料而被广泛应用于体育场、体育馆、温室和展览馆等大跨空间结构的屋面与立面^[3-5]. 因此, 针对 ETFE 薄膜已经展开的相关研究, 对 ECTFE 薄膜与结构研究工作的开展具有良好的参考意义. Moritz^[6]率先展开了对 ETFE 薄膜材料力学性能的试验研究. Galliot 等^[7-8]研究了 ETFE 薄膜的单轴拉伸力学性能. Hu 等^[9]研究了 ETFE 薄膜的循环拉伸与高温徐变等力学性能. Zhao 等^[10]对应用于双层气枕结构的 ETFE 薄膜在实际工作中的力学性能进行了试验与研究. 吴明儿等^[11]对 ETFE 薄膜材料进行了单轴拉伸试、循环与徐变等试验研究. 赵兵等^[12]研究了基于平面裁切成形 ETFE 双层气枕的结构行为.

ECTFE 薄膜应用于建筑工程领域, 其力学性能是主要的考察因素. 然而, 目前鲜有针对 ECTFE

薄膜力学性能的研究, 相关公开文献较少. 王文贵等^[1]围绕 ECTFE 材料及实验室制备薄膜的基本特性进行了研究, 陈务军等^[2]对不同拉伸速率下的 ECTFE 薄膜单轴拉伸力学性能进行了试验与分析. 由 ETFE 薄膜结构的工程应用可知, 该类材料在实际使用过程中需要经受高-低温环境变化^[13], 故亟需对 ECTFE 薄膜力学性能的温度依赖特性开展研究工作.

本文对不同温度下的 ECTFE 薄膜单轴拉伸力学性能进行系统试验研究, 为 ECTFE 工程应用提供支撑, 并为 ECTFE 应力应变行为的本构模型建立奠定试验基础.

1 不同温度下的 ECTFE 薄膜单轴拉伸试验

1.1 试验材料与试件尺寸

试验选取厚度为 250 μm 的 ECTFE 薄膜, 由于 ECTFE 材料为各向同性材料^[2], 因此在 MD 方向裁取试样. 根据标准《塑料薄膜拉伸性能试验方法: GB/T 1040.1-2006》^[14]进行试样设计和制备, 使用锋利的裁刀将材料制成哑铃形试样, 如图 1 所示, 其中 R 为夹持端的倒圆角半径.

ECTFE 薄膜和 ETFE 薄膜^[3]的主要性能对比见表 1. 可以看出, ECTFE 薄膜的灰度仅 1.2%, 透光性能胜过 ETFE 薄膜. ECTFE 薄膜与 ETFE 薄膜的基本力学性能相似, 因此作为结构材料的建筑应用前景广阔.

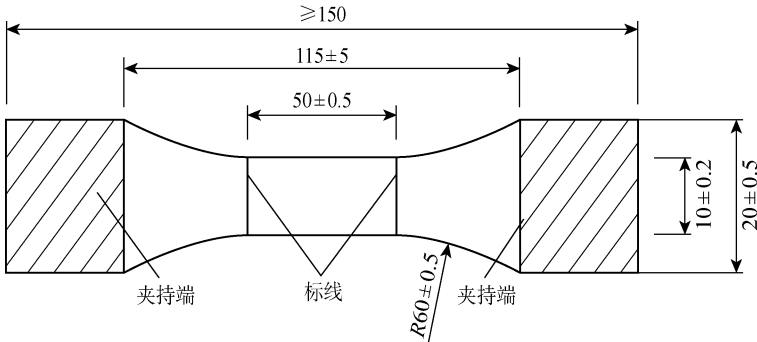


图 1 试样尺寸和裁刀 (mm)

Fig. 1 Dimensions of specimen and cutting model (mm)

表 1 ECTFE 薄膜和 ETFE 薄膜的主要性能对比

Tab.1 Comparison of main properties of ECTFE and ETFE foil

性能参数	ECTFE	ETFE
屈服强度/MPa	29	14~22
拉伸强度/MPa	52	44
断裂伸长率/%	280~330	150~360
切线弹性模量/MPa	1 150~1 380	810~900
比重/(g·mL ⁻¹)	1.68	1.7~1.77
灰度/%	1	3~10
泊松比	0.46	0.43~0.45
邵氏硬度	75	67
耐磨性	0.3	7.6
熔点/℃	220~227	253~265
最高连续使用温度/℃	150	150
热膨胀系数/℃	8×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁴
氧指数/%	52	30~36
热传导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.15	0.2
使用年限/a	>25	>25

1.2 试验分组与条件

参考文献[14],在 14 种温度条件($t = -50$,

$-40, -30, -20, -10, 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80\text{ }^{\circ}\text{C}$)下进行单轴拉伸,试验环境温度由温控箱调整,误差范围 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. 每组温度下试样各 5 根(命名为试样 1#~5#),共 70 根. 采用规范推荐的拉伸速率 $\dot{\epsilon} = 2.00\text{ min}^{-1}$ (每分钟拉长 200% 的长度).

1.3 试验方法与设备

试验在温控箱中进行,每组试验在温度达到要求并持续 10 min 后进行. 随着温度箱内部温度的变化,试样温度会相应改变. 温度箱的试验温度范围为 $-180\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$,误差为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. 考虑到试样的屈服强度较低,为准确得到试验结果,拉伸初始预紧力取为 5 N. 测试时下夹固定,移动上夹拉伸试样,通过夹具间位移计算应变. 深圳三思万能拉伸试验机的精度为 0.1%,有效拉伸距离为 900 mm. 通过基于标准 MTS(Mechanical Testing & Simulation,力学测试与模拟)测力传感器的力传感器测量力,其精度为 $\pm 1\text{ N}$,量程为 200 N.

2 拉伸应力-应变曲线和分析

图 2 所示为 ECTFE 薄膜的拉伸应力-应变曲

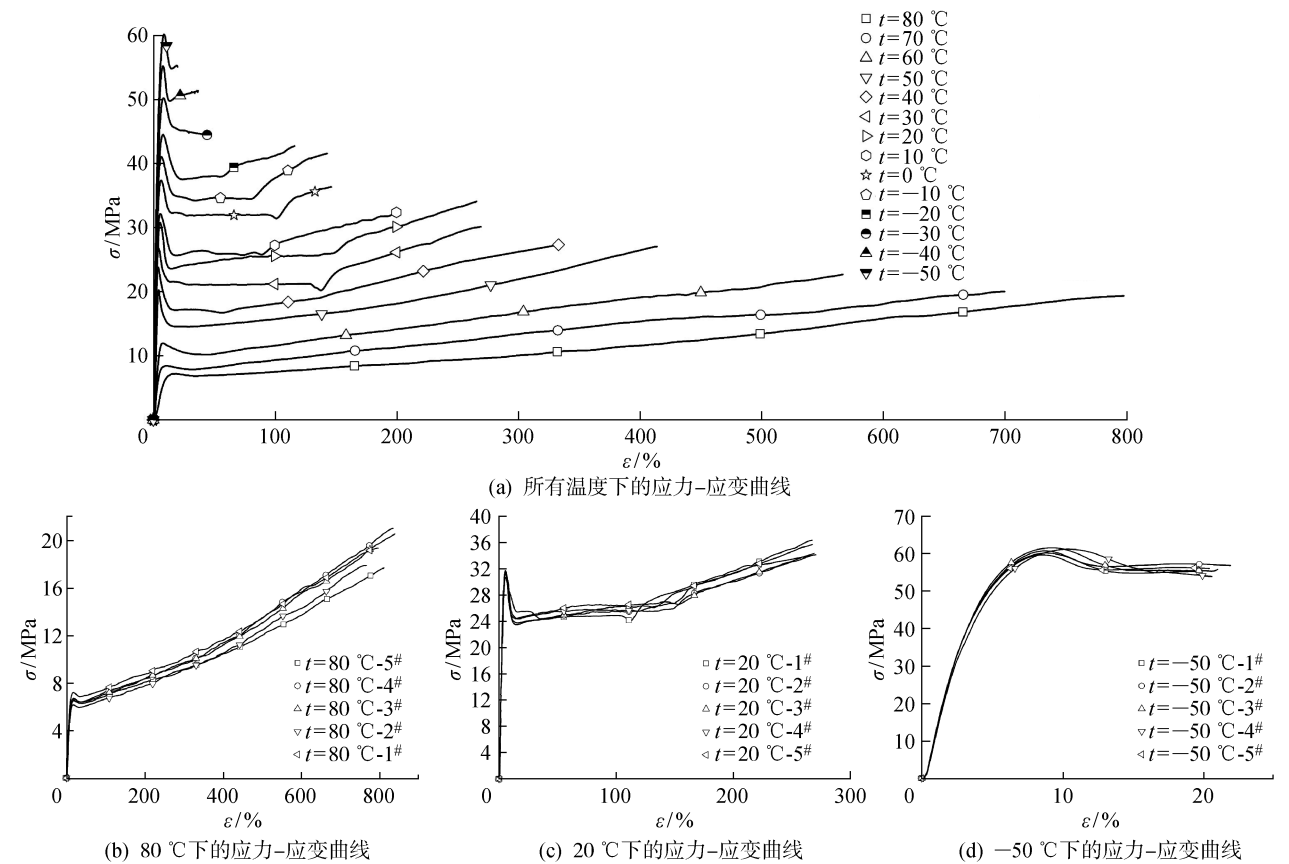


图 2 ECTFE 薄膜在不同温度下的应力-应变曲线

Fig.2 Tensile curves of ECTFE foil at various temperatures

线,其中 σ 为应力, ϵ 为应变.图 2(a)是所有温度下的应力-应变曲线,图 2(b)、2(c)、2(d)分别为 80、20、-50 °C 下的应力-应变曲线.可以看出,ECTFE 薄膜存在着明显的温度依赖性,在曲线屈服点处开始产生细颈与剪切带,这是自由体积增加的结果.拉伸曲线后期(应变硬化阶段),大应变区域出现明显的非透明白化现象.从热力学角度分析,温度对试样的结晶结构有一定程度的影响,温度的改变可引起链段松弛特征、松弛机理和重新排列特征的变化,尤其是在玻璃化转化温度(T_g 点) 45 °C 附近曲线的特征变化显著.

ECTFE 薄膜的温度依赖性主要体现在主要力学参数的变化.随着温度的降低,分子链段运动受到阻碍,曲线抬高,弹性模量、抗拉强度、冷拉平均应力和屈服强度增大,断裂延伸率减小.屈服应变和屈服时间的变化在 T_g 点附近出现极值点,因此临界流动应力等经典屈服理论不再适用,可采用将聚合物认为是高黏度应力活化流体的分子流动理论,如 Eyring 理论^[15]、Argon 双结理论^[16],这些方法精确描述了应变速率和温度的影响,但没有考虑应变软化和应变硬化效应.

通过对比可以发现:减慢拉伸速率与升高环境温度对材料拉伸行为有相似的影响,符合时温等效原理.相比较而言,ECTFE 薄膜的速率依赖性较弱,在宽广的拉伸速率内均为韧性断裂,拉伸强度远远大于屈服强度^[2].然而其温度依赖性较高,由拉伸应力-应变曲线可以发现,ECTFE 薄膜在低温硬而弱,在高温软而韧.温度升高,分子链段热运动加剧,促进松弛过程,材料模量和强度下降,伸长率变大,拉伸应力-应变曲线被拉长.温度过高时,材料可能发生黏性流动,断裂伸长率大,强度和弹性模量小.接近常温时强迫高弹形变充分表现,符合高聚物基本力学特征,拉伸应力-应变曲线符合高聚物拉伸的典型特征.当温度降低时,拉伸应力-应变曲线明显抬升,这是由于链段运动所产生的内力与外力作用无法协调,强迫高弹形变无法充分发展,材料屈服需要更大的外力,因此强度增加;温度过低时,强迫高弹形变来不及发生,膜材在冷拉阶段开始后断裂,弹性模量和强度大.

3 主要力学参数的温度依赖性分析

主要力学参数的取值方法参考文献[2],如图 3 所示.

在宽广的温度条件下,ECTFE 薄膜的抗拉强度、屈服强度、冷拉应力与温度呈线性关系.屈服应

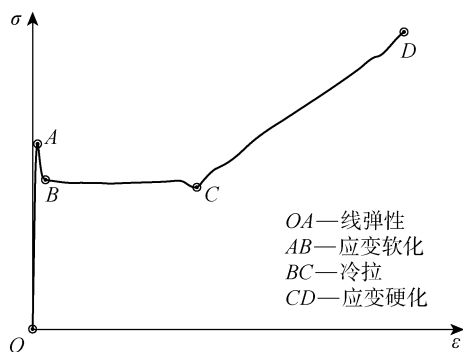


图 3 ECTFE 薄膜拉伸应力-应变曲线的 4 个阶段

Fig. 3 Four stages of tensile curves of ECTFE foil

变、断裂延伸率、弹性模量、断裂能与温度的 3 次幂函数呈较好的非线性关系.屈服时间、断裂时间与温度的逆多项式呈较好的非线性关系,在 T_g 点附近出现峰值点.

由于弹性模量、屈服强度、拉伸强度及韧性是工程材料重要的力学性能指标,温度对弹性模量的影响较为显著,因此在工程设计中考虑到 ECTFE 薄膜材料的温度相关性,可以更好确定材料在实际工程中的受力特性.此外,辅以对其他力学参数的温度相关性分析,可以确定试验的可靠性,从而通过在不同温度下的力学性能参数及其拟合公式,作为薄膜结构设计的数据支持和参考.

3.1 屈服应力和屈服应变

ECTFE 薄膜在初始段的拉伸应力-应变曲线如图 4 所示,在所研究的温度范围内,ECTFE 屈服薄膜均受单一的主链松弛所控制,次级松弛的影响较小,同时结晶程度不同,强度变化较大.

图 5 是 ECTFE 薄膜在不同温度下的屈服强度

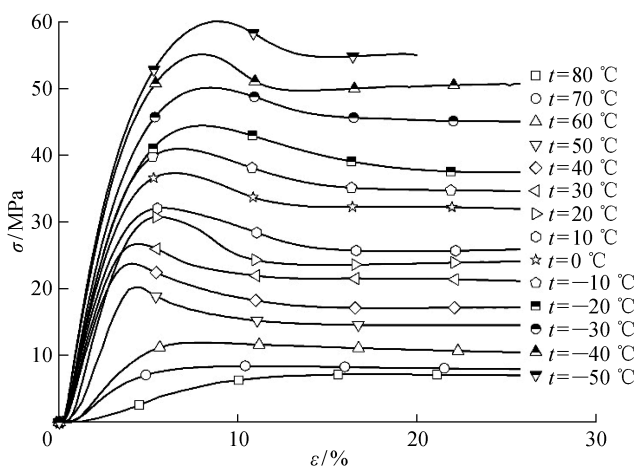


图 4 ECTFE 薄膜的拉伸应力-应变曲线初始段对比

Fig. 4 Comparison of tensile curves at initial phase of ECTFE foil

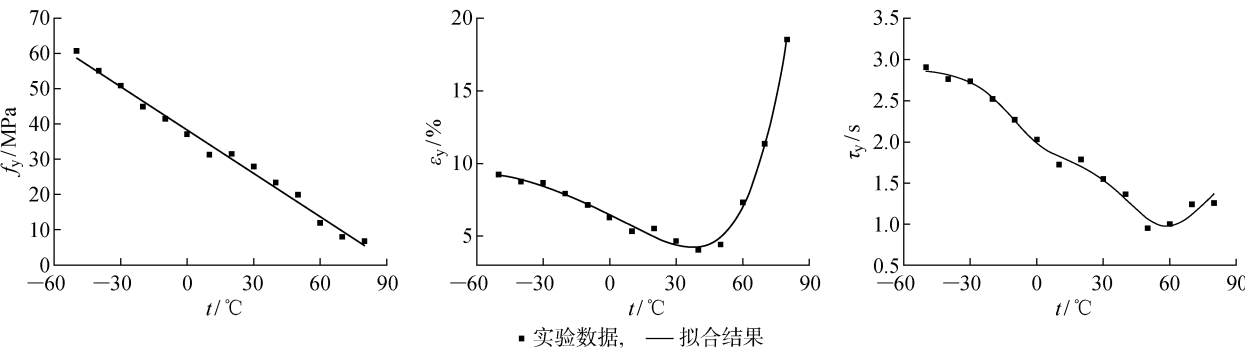


图 5 屈服强度、屈服应变、屈服时间与温度的关系

Fig. 5 Yield stress, yield strain, and strain rate versus temperature

f_y 、屈服应变 ϵ_y 和屈服时间 τ_y ,由图可知,温度从 20 °C 上升到 80 °C,屈服应力从 31.465 MPa 减小至 6.635 MPa,降幅为 78.9%. 温度下降到−50 °C,屈服强度增大至 60.684 MPa,增幅达 92.9%. 屈服应变在 40 °C 最小,为 4.035%,受 T_g 点的影响显著. 从 40 °C 升温至 80 °C,屈服应变从 359.3% 增大至 18.532%,降温至−50 °C,屈服应变从 128% 增大至 9.2%. 屈服时间在 50 °C 最小,接近 T_g 点,从 50 °C 升温至 80 °C,屈服时间从 0.947 s 延长了 32.3% 至 1.253 s,降温至−50 °C,屈服时间从 207% 增加至 2.907 s. ECTFE 薄膜的屈服强度、屈服应变和屈服时间随温度变化的拟合方程为

$$f_y = 38.297 - 0.409t \tag{1}$$

$$\epsilon_y = 416.259 - 405.146e^{\frac{t}{6.873}} + 9.924e^{\frac{t}{30.178}} - 14.637e^{\frac{t}{36.248}} \tag{2}$$

$$\tau_y = 2.909 - 1.932 \left[1 + 1.127 \left(\frac{2t - 117.54}{83.198} \right)^2 - 0.674 \left(\frac{2t - 117.54}{83.198} \right)^2 + 0.192 \left(\frac{2t - 117.54}{83.198} \right)^2 \right] \tag{3}$$

3.2 拉伸强度和断裂延伸率

ECTFE 薄膜的抗拉强度 f_u 、断裂延伸率 ϵ_u 、断裂时间 t_u 随温度变化的拟合方程为

$$f_u = 39.028 - 0.259t \tag{4}$$

$$\epsilon_u = 166.283 + 3.358t + 0.001t^2 + 5.017t^3 + 9.222t^4 - 8.161t^5 \tag{5}$$

$$t_u = -40.783 + 133.789 \left[1 + 0.636 \left(\frac{2t - 80.312}{94.294} \right)^2 - 0.029 \left(\frac{2t - 80.312}{94.294} \right)^2 - 0.002 \left(\frac{2t - 80.312}{94.294} \right)^2 \right] \tag{6}$$

图 6 是 ECTFE 薄膜在不同温度下的抗拉强度、断裂延伸率和断裂时间,由图可知,温度从 20 °C 上升到 80 °C,拉伸强度从 35.02 MPa 减小至 19.26 MPa,降幅为 45%. 温度下降到−50 °C,拉伸强度增大至 55.56 MPa,增幅为 59%. 断裂延伸率随着温度上升而增加,从 20 °C 升温至 80 °C,断裂延伸率从 267.86% 增至 811.1%,增幅为 202%,降温至−50 °C,断裂延伸率减小了 92% 至 20.8%. 断裂时间在 40 °C 最大为 98.63 s,受 T_g 点的影响显著. 从 40 °C 至 80 °C,断裂时间减小至 48.8 s,降幅为 50.5%,降

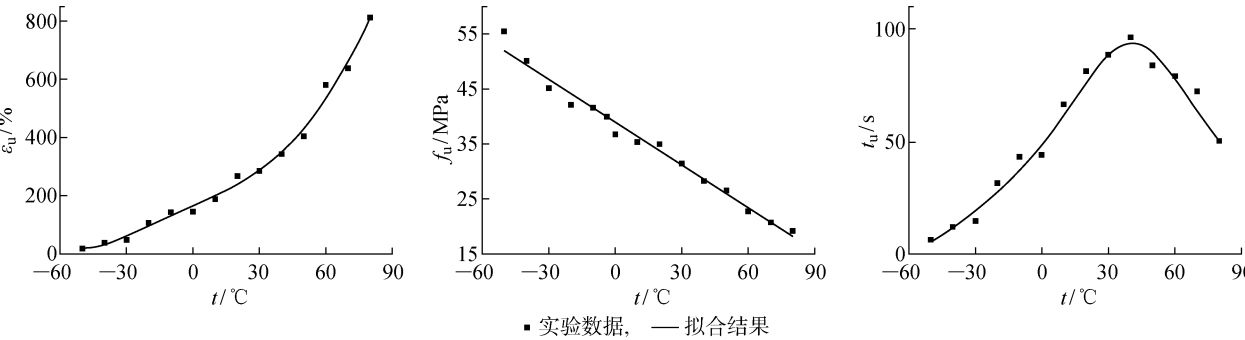


图 6 抗拉强度、断裂延伸率、断裂时间与温度的关系

Fig. 6 Tensile stress, stress at break, and break time versus temperature

温至 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 断裂时间减小至 6.4 s , 降幅为 93.5% 。

3.3 弹性模量

小载荷下材料的行为具有线性黏弹性. 温度从 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 弹性模量从 970 MPa 减小至 71 MPa , 温度下降到 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 拉伸强度增大至 $1\,427\text{ MPa}$. 图 7 所示为弹性模量 E 与温度的关系. 弹性模量与温度的关系式为

$$E = 964.68 + 0.9t + 0.126t^2 - 0.005t^3 - 3.82t^4 + 7.958t^5 \quad (7)$$

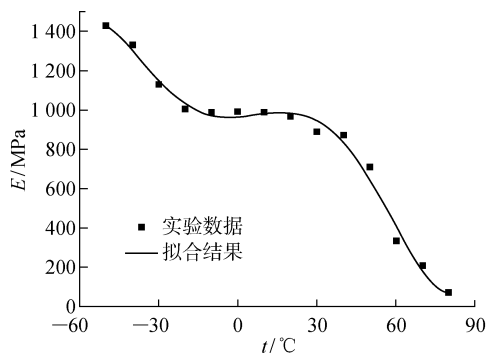


图 7 弹性模量与温度的关系

Fig. 7 Elastic module versus temperature

通过分析图 7 可以发现, ECTFE 薄膜在 $40\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间的弹性模量下降剧烈, 这主要是由于该类高聚物膜材存在一个玻璃化转化点, 试验测量为 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, 因此从常温升温至 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后, 材料便从高弹态转变为玻璃态. 在 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下, 高聚物表现出线弹性的特征, 晶区和非晶区的大分子链可以发生自由运动, 材料的弹性模量较大. 而在玻璃化温度以上, 材料的强迫高弹形变无法充分发展, 因此 ECTFE 薄膜的弹性模量会降低.

3.4 冷拉应力

温度从 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 提升到 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冷拉平均应力减小. 从 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升温至 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冷拉应力减少 6.254 MPa , 降温至 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冷拉应力增大至 56.098 MPa . 图 8 所示的冷拉应力 f_{cd} 与温度的关系为

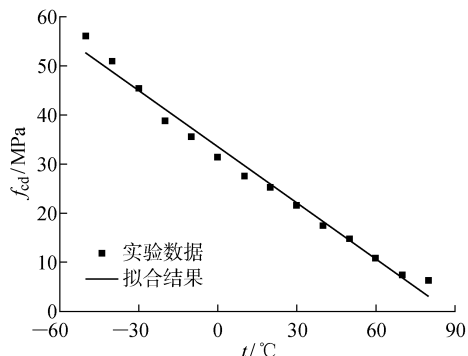


图 8 冷拉应力与温度的关系

Fig. 8 Cold drawn stress versus temperature

$$f_{cd} = 33.491 - 0.38t \quad (8)$$

3.5 断裂能

断裂能反应了拉伸试样直至断裂所消耗的能量, 可以表征材料韧性, 又称应变能. 温度从 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 提升到 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 断裂能增大, 结晶度降低, 材料黏性增加, 塑性降低, 韧度增强, 这是由于分子链排列松散, 孔隙率高, 分子间作用减弱所致. 从 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升温至 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 断裂能从 $7\,291\text{ J/m}^3$ 增大至 $10\,361\text{ J/m}^3$, 降温至 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 断裂能减小至 $1\,033\text{ J/m}^3$, 如图 9 所示, 断裂能与温度的关系为

$$W = 5\,753.977 + 57.847t - 1.684t^2 + 0.017t^3 + 4.758t^4 - 5.345t^5 \quad (9)$$

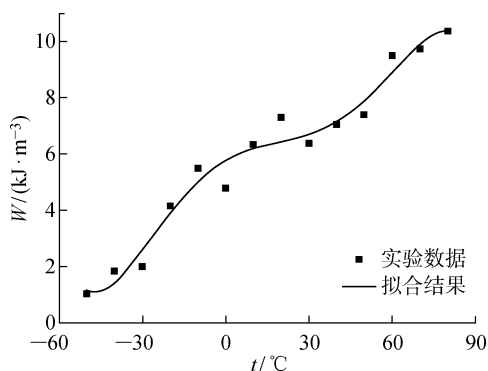


图 9 断裂能与温度的关系

Fig. 9 Fracture energy versus temperature

4 结论

(1) ECTFE 薄膜在宽广的温度范围内均表现出半晶高聚物的拉伸特性, 出现了一次屈服现象.

(2) 弹性模量在 T_g 点附近存在最大切线斜率点.

(3) 随着温度的升高, 拉伸应力-应变曲线整体下降并被拉长, 拉伸强度、屈服强度、冷拉应力和弹性模量减小; 断裂延伸率和断裂能增大; 屈服应变和屈服时间先减小, 在 T_g 点附近增加; 拉伸时间在 T_g 点附近出现最大值; 弹性模量减小. 各主要力学参数与温度的多项式均呈良好的拟合关系.

(4) 本文得到的材料在不同温度下力学性能数据及评价方法, 可以作为 ECTFE 薄膜结构设计的参考.

参考文献:

- [1] 王文贵, 徐平先, 杨涛. 乙烯-三氟氯乙烯共聚物薄膜的研究[J]. 塑料工业, 2010, 38(Sup. 1): 64-92.
WANG Wengui, XU Pingxian, YANG Tao. Researching of ethylene chlorotri fluoro ethylene foils

- [J]. **China Plastics Industry**, 2010, 38(Sup. 1): 64-92.
- [2] 陈务军, 刘昶江, 赵兵. 不同拉伸速率下的 ETFE 薄膜单轴拉伸试验[J]. **天津大学学报: 自然科学与工程技术版**, 2019, 52(A02): 16-22.
- CHEN Wujun, LIU Changjiang, ZHAO Bing. Experiment and analysis on uniaxial tensile mechanical properties of ectfe foils under different strain rates [J]. **Journal of Tianjin University (Science and Technology)**, 2019, 52(A02): 16-22.
- [3] 陈务军. 膜结构工程设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- CHEN Wujun. Design of Membrane Structure Engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [4] 赵兵. ETFE 薄膜材料性能与双层气枕结构试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- ZHAO Bing. Experimental study on material properties and double-layer of etfe foil [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [5] HU J H, CHEN W J, ZHAO B, *et al.* Buildings with ETFE foils: A review on material properties, architectural performance and structural behavior[J]. **Construction and Building Materials**, 2017, 131: 411-422.
- [6] MORITZ K. ETFE-folie als tragelement [D]. München: Technische Universität München, 2007.
- [7] GALLIOT C, LUCHSINGER R H. Uniaxial and biaxial mechanical properties of ETFE foils[J]. **Polymer Testing**, 2011, 30(4): 356-365.
- [8] HU J H, CHEN W J, 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.
- [9] HU J H, LI Y P, CHEN W J, *et al.* Effects of temperature and stress on creep properties of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foils for transparent buildings[J]. **Polymer Testing**, 2017, 59: 268-276.
- [10] ZHAO B, DONG L T, CHEN W J, *et al.* Mechanical properties and structural performance of ETFE (ethylene-tetrafluoroethylene) cushion structures at low temperatures[J]. **Engineering Structures**, 2017, 136: 420-429.
- [11] 吴明儿, 刘建明, 慕全, 等. ETFE 薄膜单向拉伸性能[J]. **建筑材料学报**, 2008, 11(2): 241-247.
- WU Ming'er, LIU Jianming, MU Tong, *et al.* Uniaxial tensile properties of ETFE foils[J]. **Journal of Building Materials**, 2008, 11(2): 241-247.
- [12] 赵兵, 陈务军, 胡建辉, 等. 基于平面裁切的三角形乙烯-四氟乙烯气枕成形试验及数值模拟[J]. **上海交通大学学报**, 2016, 50(3): 377-383.
- ZHAO Bing, CHEN Wujun, HU Jianhui, *et al.* Experimental and numerical investigations of form-development of ethylene-tetrafluoroethylene cushion based on flat-patterning[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2016, 50(3): 377-383.
- [13] ZHAO B, HU J H, CHEN W J, *et al.* Photothermal performance of an amorphous silicon photovoltaic panel integrated in a membrane structure[J]. **Journal of Physics D: Applied Physics**, 2016, 49 (39): 395601.
- [14] 中国国家标准化管理委员会. 塑料拉伸性能的测定: GB/T 1040. 1-2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Plastics-determination of tensile properties: GB/T 1040. 1-2006 [S]. Beijing: China Standard Press, 2006.
- [15] MCCRUM N G, BUCKLEY C P, BUCKNALL C B. Principles of polymer engineering[M]. New York, USA: Oxford University Press Inc., 1988.
- [16] ARGON A S. A theory for the low-temperature plastic deformation of glassy polymers[J]. **Philosophical Magazine**, 1973, 28(4): 839-865.

(本文编辑:陈晓燕)