镭射 BOPP 基膜循环拉伸力学性能的试验研究

杜子康¹,于法月²,夏家良³,何邦贵^{1*},钟灵杰⁴

(1.昆明理工大学 机电工程学院,昆明 650000; 2.红云红河烟草(集团)有限责任公司昆明卷烟厂, 昆明 650000; 3.云南九九彩印有限公司,昆明 650000; 4.云南九澳包装材料有限公司,玉溪 653100)

摘要:目的 为研究双向拉伸聚丙烯 (Biaxially Oriented Polypropylene, BOPP) 薄膜在重复拉伸使用后 的弹性模量变化以及应变变化趋势。方法 以 26 µm BOPP 薄膜为研究对象,以 1、1.5、2、2.5、3、3.5、 4 N 为最大加载力分别进行加载周期为 15 次的单轴循环拉伸试验,总结对比循环次数以及加载力对弹 性模量及棘轮应变的影响,分析薄膜性能变化趋势。结果 通过对比同一加载应力不同循环下的弹性模 量以及棘轮应变,发现在预设加载力下随着循环次数增加,薄膜弹性模量呈增大趋势,且增大幅度逐渐 减小,其棘轮应变与弹性模量变化趋势一致;通过取均值对比不同加载力下的弹性模量以及棘轮应变变 化,发现薄膜弹性模量随加载力增大而先增大后减小,最大应变以及最小应变均随加载力的增加而增大。 结论 通过试验研究得出了 BOPP 薄膜在循环拉伸中弹性模量及棘轮应变随加载力、循环次数增大的变 化趋势;对薄膜性能变化有了一定的预测,并为实际加工中的张力选择提供了指导性建议。 关键词:双向拉伸聚丙烯薄膜;单轴循环拉伸试验;弹性模量;棘轮应变 中图分类号: TB484.3 文献标志码:A 文章编号: 1001-3563(2024)01-0111-07 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.01.013

Experimental Study on Cyclic Tensile Mechanical Properties of Laser BOPP Substrate Films

DU Zikang¹, YU Fayue², XIA Jialiang³, HE Banggui¹, ZHONG Lingjie⁴

 College of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650000, China; 2. Hongyun Honghe Tobacco (Group) Co., Ltd., Kunming 650000, China; 3. Yunnan Jiujiu Color Printing Co., Ltd., Kunming 650000, China; 4. Yunnan Jiu'ao Packaging Materials Co., Ltd., Yuxi 653100, China)

ABSTRACT: The work aims to study the changes in elastic modulus and plastic deformation trend of biaxially oriented polypropylene (BOPP) films after repeated stretching use. With 26 µm BOPP films as the research object, uniaxial cyclic tensile tests were conducted with a maximum loading force of 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, and 4 N for 15 loading cycles. The effects of the cycle number and loading force on the elastic modulus were summarized and compared, and the trend of film performance changes was analyzed. By comparing the elastic modulus and ratcheting strain under different cycles under the same loading stress, it was found that under the preset loading force, the elastic modulus showed an increasing trend with the increase of the cycle number, and the increasing amplitude gradually decreased. The ratcheting strain and the change trend of the elastic modulus were consistent. By comparing the elastic modulus and ratcheting strain changes under different loading forces by taking the mean, it was found that the elastic modulus first increased and then decreased with the cycle number, while the maximum and minimum strains both increased with the number of cycles. The experiment shows that the elastic modulus and the ratcheting strain of BOPP films increase with the increase of loading

收稿日期: 2023-09-18

基金项目:云南省科技创新引导项目(202104AR040018)

force and cycle number. It provides certain predictions about the changes in film properties and provides guidance for the selection of tension in actual processing.

KEY WORDS: biaxially oriented polypropylene film; uniaxial cyclic tensile test; elastic modulus; ratcheting strain

在现代软包逐渐发展的如今,各种材料的开发应 用也愈发丰富,其中镭射膜由于其独特美观的样式以 及防伪功能越来越受广大消费者以及生产厂家的青 睐,应用十分广泛。目前市面上镭射膜生产主要使用 的是聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 薄膜, 且均以传 统生产工艺^[1]进行加工生产。传统工艺主要有涂布、 模压、镀铝、复合、剥离等工序,其中模压需要进行 镍板的制作,模压前后 PET 薄膜均需要进行涂布, 由于其工序较多以及材料损耗较大,使得生产效率相 对较低,成本也较高。目前市面上,出现了对薄膜进 行重复加工利用的工艺。如郑成赋^[2]对可重复利用的 激光全息转移膜的研制,是对复合涂料进行改性,以 PET/BOPP 复合膜为基体,使其可以重复镀铝并进行 多次转移。云南九澳包装材料有限公司开发了"冷转 印"工艺,以压印好镭射图文的 BOPP 薄膜作为基膜 进行镭射图文的转移,剥离后的 BOPP 薄膜可进行重 复利用,该工艺大大降低了生产成本,其较少的工艺 步骤也使得冷转印生产效率较传统镭射膜生产有很 大的提高。但冷转印工艺为新型工艺,现面临着基膜 利用次数不高、加工质量不稳定的问题,目前在实际 生产中也无具体的参数调整方案。

通过实际生产可知,基膜在加工产生的塑性应变 和加工中的最大应变分别影响基膜的利用次数和涂 布质量,由郭毅^[3]研究了卷到卷系统中导向辊表面薄 膜褶皱行为可知,褶皱的产生与薄膜的弹性模量相 关,冷转印工艺对薄膜而言本质上是循环拉伸的过 程,即基膜的利用次数和加工质量受薄膜循环拉伸力 学性能中弹性模量和棘轮应变的影响。欲改善工艺, 需了解薄膜循环拉伸力学性能。目前关于 BOPP 薄膜 的研究主要围绕其热收缩性能、表面性能^[4-5]以及经 过专用料改性后的性能研究[6-8],对薄膜拉伸时的性 能变化研究也只停留在对生产及初次拉伸时的状态 研究^[9-11]。关于 BOPP 薄膜循环拉伸力学性能的研究 较为缺乏。为了提升冷转印工艺中 BOPP 基膜利用次 数以及加工质量,本文参考其他薄材循环拉伸性能的 研究^[12-14],对 BOPP 薄膜进行了在7组低加载应力下 的单轴循环拉伸试验, 深入研究了 BOPP 薄膜循环拉 伸力学性能,详细分析了弹性模量、棘轮应变与循环 次数以及加载应力的关系,为实际生产中张力的设置 提供了参考指导。

1 循环拉伸试验

1.1 试样材料及设备参数

主要材料: HBn26 镭射 BOPP 基膜, 采自广东德

冠薄膜新材料股份有限公司。

主要仪器: MTS E45 电子万能试验机, 深圳三思 纵横科技股份有限公司。

1.2 方法

1.2.1 试样尺寸

BOPP 基膜试样采用哑铃型,以 GB/T 1040.3—2006-1B/10^[15]为取样标准,在纵向(MD)方向取样,取样部分均距薄膜边缘 100 mm,以确保试样的可代表性。具体试样尺寸如图 1 所示。



单位:mm

图 1 试样尺寸 Fig.1 Specimen size

1.2.2 试验参数

1.2.2.1 设备加载力

加工生产中的张力较小,考虑实际情况,设置加载力为1、1.5、2、2.5、3、3.5、4N。

1.2.2.2 试验流程

分别以 1、1.5、2、2.5、3、3.5、4 N 为最大加 载力,最小加载力为 0 N,以三角波形式加载循环 15 次,加载以及卸载力的速率为 0.15 N/s。为更接近 实际工艺加工条件,在循环拉伸中设置最大加载力 保载时间为 5 s,以模拟实际中的膜在设备中的传输; 设置 0 N 加载力的保载时间为 5 s,以模拟膜在收卷 后脱离设备受拉的状态。为保证试验数据的准确性, 每一组参数测试 5 个试样,这样可在一定程度上避 免试验误差。

2 结果与分析

2.1 试验结果

图 2 为试样在不同力下的单轴循环拉伸试验力-位移曲线。由于加载力整体较小,为方便观察曲线较 为完整的变化,选择加载力为 3.5 N 和 4 N 的曲线进 行初步观察。由于设备实际导出图较难观察不同周期 下加载段曲线的变化,现将第1、6、11、15次加载时的加载段曲线去除残余应变后进行比较,结果如图3所示。在初次加载时薄膜的非线性特征明显,通过 拟合加载段曲线各段斜率,在0.4N以前曲线增长较为平缓,而后增速变快,在2.5N后增速再次变缓,整体曲线呈"S"形;在循环过程中,前几次循环的加载曲线与第1次加载曲线差异较大,而后随着循环次数增加,加载段曲线的差异逐渐变小,且曲线逐渐贴近于线性;在循环拉伸过程中所产生的残余变形量在第1次卸载时最大,然后随着循环次数增加逐渐减小;加载段与卸载段曲线均不重合,表明BOPP薄膜黏弹性特征明显,这进一步证明了对其循环拉伸弹性模量以及塑性变形考察的必要性。

2.2 结果分析

为得到各加载段的弹性模量,现采用 origin 软件

中的直线拟合分析加载力-位移曲线斜率大小,再进 行弹性模量的转化。为更准确得到循环次数对弹性模 量的影响,现对多组试样数据求平均值来进行分析。

2.2.1 力学性能分析

为了更直观地观察力学性能的变化,将表1数据 分成1、1.5、2、2.5N和2.5、3、3.5、4N2组作弹 性模量-循环次数变化散点图,如图4所示。

观察图 4 发现在各组加载力下,弹性模量均随循 环次数的增加而增大,在前几次加载中增长较快,而 后增速变缓。为探讨不同加载力下,弹性模量增速变 化情况以及到达"稳定"的快慢,将不同加载力下的循 环次数 *n* 与弹性模量 *E* 数据拟合为函数形式以便计算 比较。拟合曲线使用 origin 软件中的非线性曲线拟合, 经过多组模型尝试,选择对数据组拟合度最高的拟合 模型,拟合模型及参数如表 2 所示。



图 2 BOPP 薄膜单轴循环拉伸力-位移曲线 Fig.2 Force displacement curve of BOPP film under uniaxial cyclic tension



图 3 不同周期下的加载段比较 Fig.3 Comparison of loading segments under different cycles

| Tab.1 Mean elastic modulus under different loading forces | | | | | MPa | | |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|
| V~ *+ | 加载力/N | | | | | | |
| 伏釵 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 |
| 1 | 904.05 | 909.79 | 936.79 | 944.93 | 924.10 | 917.78 | 914.67 |
| 2 | 960.00 | 958.56 | 986.57 | 986.59 | 990.53 | 958.56 | 952.20 |
| 3 | 935.62 | 1 002.74 | 1 006.34 | 1 025.89 | 995.52 | 980.87 | 958.17 |
| 4 | 976.15 | 983.52 | 1 017.51 | 1 031.71 | 1 019.90 | 982.39 | 947.07 |
| 5 | 964.70 | 1 002.26 | 1 017.06 | 1 028.76 | 992.83 | 1 002.74 | 950.25 |
| 6 | 1 004.62 | 1 014.07 | 1 015.33 | 1 023.92 | 1 029.70 | 985.80 | 952.47 |
| 7 | 987.61 | 1 015.07 | 1 009.53 | 1 032.48 | 1 026.05 | 996.36 | 950.75 |
| 8 | 997.80 | 1 000.61 | 1 014.74 | 1 029.48 | 1 026.43 | 995.17 | 952.70 |
| 9 | 981.77 | 1 001.36 | 1 017.40 | 1 031.39 | 1 041.02 | 1 001.84 | 945.67 |
| 10 | 985.42 | 998.82 | 1 032.53 | 1 025.07 | 1 021.06 | 998.86 | 950.90 |
| 11 | 993.56 | 1 016.56 | 1 018.09 | 1 035.15 | 1 047.55 | 999.07 | 943.30 |
| 12 | 987.94 | 1 007.17 | 1 018.47 | 1 027.22 | 1 034.50 | 1 007.39 | 953.18 |
| 13 | 1 009.75 | 1 019.29 | 1 017.84 | 1 029.95 | 1 035.07 | 996.08 | 946.44 |
| 14 | 998.07 | 1 013.15 | 1 028.45 | 1 032.77 | 1 044.10 | 1 004.08 | 950.40 |
| 15 | 1 017.91 | 1 018.20 | 1 023.24 | 1 024.44 | 1 040.45 | 1 008.17 | 944.64 |

表 1 不同加载力下的弹性模量均值





图 4 不同拉力下弹性模量-循环次数变化散点图 Fig.4 Scatter plot of changes in elastic modulus-cycle number of sunder different tensile forces

表 2 弹性模量-循环次数拟合模型 Tab.2 Elastic modulus-cycle number fitting model

| 加载力/N | 拟合模型 | \mathcal{Y}_0 | A_1 | t_1 |
|-------|---------------------------------------|-----------------|----------------|---------|
| 1 | | 1 001.2522 | -123.824 3 | 3.024 7 |
| 1.5 | | 1 010.1864 | -211.145 4 | 1.346 3 |
| 2 | | 1 019.9208 | -206.375 5 | 1.098 5 |
| 2.5 | $E = 4 \times e^{\frac{-n}{t_1}} + v$ | 1 030.1730 | -224.268 7 | 1.059 5 |
| 3 | $L = A_1 \times C^{-1} + y_0$ | 1 036.0543 | -165.390 7 | 2.106 6 |
| 3.5 | | 1 000.7712 | -152.656 3 | 1.604 0 |
| 4 | | 949.8677 | -364 915.204 4 | 0.108 1 |

由直接观察以及拟合数据可以得出,在目前加载 力下弹性模量随加载次数增大而增大,且增长幅度逐 渐减小。为确定弹性模量在增长中的"稳定点",以相 邻2次循环的弹性模量差与第2次和第1次差值的比

值为相对增长率。当相对增长率小于10%时即认为达 到稳定^[13],通过计算可知,1~4N的稳定点分别是9、 6、5、5、7、6、3次。

为讨论拉伸力对弹性模量 E 的影响,取表 1 中不

同力 F 加载下弹性模量平均值作比较。

$$E = 881.8 + 118.26 \times f - 25.19 \times f^2 \tag{1}$$

如图 5 可拟合为弹性模量与加载力的二次函数 (式(1))。可得出在加载力为 2.35 N 以下时,弹性模 量随加载应力的增大而增大,而超过 2.35 N 后则呈相 反趋势。原因为:初始状态下,薄膜中的分子链是松散





排列的,相互之间存在一定的间隙。当受到拉伸应力时,分子链开始被拉伸并逐渐排列整齐,分子链的排列使得分子间的相互作用力增强,从而增加了薄膜的刚度和强度。随着应力的进一步增加,分子链之间的相互作用力达到一定程度后,开始出现断裂和滑移现象,这导致分子链的断裂和重新排列,使得分子链的排列变得不再整齐。这种不规则排列导致了分子链之间的相互作用力减弱,从而导致了薄膜弹性模量的减小。因此在宏观上体现出弹性模量先增大后减小的态势。

薄膜产生褶皱与张力及弹性模量等因素相关^[3]。 当其他因素保持不变时,仅考虑弹性模量时,弹性模 量越大薄膜越不易产生褶皱,在加载力为 2.35 N,即 加载应力为 9.04 MPa 时其弹性模量最大,此时薄膜 最不易产生褶皱。

2.2.2 棘轮应变

棘轮应变是材料在受到循环载荷时产生的渐进 应变,对结构的形状和受力等有着影响,是实际生产 中需要考虑的一个重要问题^[16]。为观察不同加载力下 的棘轮应变,取每组试验中弹性模量最接近本组均值 的实验数据进行比较。不同加载力下应变随循环次数 变化的拟合曲线如图 6 所示,拟合模型及参数如表 3 和表 4 所示。





| | 表 3 | 最小变形-循环次数拟合模型 |
|-----------|-------|--|
| Tab.3 Min | nimum | deformation-cycle number fitting model |

| 加载力/N | 拟合模型 | ${\mathcal Y}_0$ | A_1 | t_1 |
|-------|--|------------------|-----------|----------|
| 1 | | 0.140 42 | -0.189 29 | 2.975 62 |
| 1.5 | | 0.148 23 | -0.196 84 | 3.383 6 |
| 2 | | 0.151 15 | -0.259 92 | 1.777 25 |
| 2.5 | $\epsilon = 4 \times e^{\frac{-n}{t_1}} + v_0$ | 0.245 61 | -0.344 56 | 2.979 66 |
| 3 | $c_{\min} = M \times c_{\min} + y_0$ | 0.258 26 | -0.312 18 | 3.568 16 |
| 3.5 | | 0.324 61 | -0.457 93 | 2.629 92 |
| 4 | | 0.493 61 | -0.578 1 | 5.046 03 |

表 4 最大变形-循环次数拟合模型 Tab.4 Maximum deformation-cycle number fitting model

| Table Maximum deformation-cycle number intring model | | | | |
|--|--|-----------------|--------------|----------|
| 加载力/N | 拟合模型 | \mathcal{Y}_0 | A_1 | t_1 |
| 1 | | 0.476 93 | -0.146 04 | 3.677 93 |
| 1.5 | | 0.674 | -0.142 93 | 3.372 12 |
| 2 | $\varepsilon_{\min} = A_1 \times e^{\frac{-n}{t_1}} + y_0$ | 0.814 98 | -0.207 4 | 1.464 52 |
| 2.5 | | 1.192 09 | -0.224 29 | 6.698 85 |
| 3 | | 1.341 16 | -0.207 51 | 7.286 75 |
| 3.5 | | 1.576 77 | $-0.307\ 67$ | 4.246 81 |
| 4 | | 2.015 09 | -0.382 99 | 6.134 67 |

观察可知,薄膜的最大应变以及最小应变均随 循环次数的增加而增大,且增大幅度逐渐减小。当 最小加载力为0N时,最小应变为薄膜每次拉伸后 的塑性应变,而最大应变为拉伸中薄膜的总应变。 为得到薄膜在循环拉伸中塑性应变的稳定值,参考弹性 模量稳定点的确定方式进行计算。以此可得 1~4 N 加载 力下,塑性应变的稳定点分别在循环次数为9、10、7、 9、11、9、14次时,稳定点的塑性应变分别为0.13122%、 0.137 98% 0.146 09% 0.228 8% 0.243 95% 0.309 66% 0.457 55%。在实际加工中,涂布以及复合时的薄膜 变形也会一定程度上影响薄膜的加工效果,这就与 拉伸时薄膜的总应变量相关。计算不同加载力下的 最大应变均值即可得出对加工效果造成影响的大 小。要使薄膜的利用次数增加,其产生的塑性应变 应越小越好。为了解塑性应变随加载力增大而变化 的情况,则需要计算不同加载力下最小应变均值。 不同加载力下最大及最小应变均值的计算结果如表 5 所示。由此可知,最大应变随加载力的增大而增大, 最小应变也随加载力增大而增大,且2N以前增长 幅度较小。

表 5 不同加载力下应变均值 Tab.5 Mean strain under different loading forces

| 加裁力/N | 应变均值/% | | |
|---------------|----------------------|----------------------|--|
| 川 4X / J / IN | ε_{\min} | ε_{\max} | |
| 1 | 0.109 | 0.446 2 | |
| 1.5 | 0.110 5 | 0.646 7 | |
| 2 | 0.128 2 | 0.800 8 | |
| 2.5 | 0.188 3 | 1.109 1 | |
| 3 | 0.194 8 | 1.259 1 | |
| 3.5 | 0.258 8 | 1.501 7 | |
| 4 | 0.326 7 | 1.883 3 | |

3 结语

为提升镭射 BOPP 基膜在循环加工中的利用次数,优化基膜加工质量,本文通过不同加载力下的单轴循环拉伸试验,研究了循环次数与加载力对薄膜弹

性模量与棘轮应变的影响, 拟合了加载力、加载次数 与弹性模量及棘轮应变的方程。结果表明弹性模量与 棘轮应变均随加载次数的增加而增大,且加载幅度逐 渐减小;弹性模量随加载应力的增大呈先增大后减小 的趋势,薄膜在加载应力为9.04 MPa时弹性模量最 大;棘轮应变中最大及最小应变随加载力增大而增 大,其中最小应变在加载力为2N前增幅较小,最大 应变在加载力为2.5N以及4N时增幅较大。通过数 据处理结果可知,实际加工应在应力为9.04 MPa下 进行张力调整,应力越小薄膜涂布质量越好、可利用 次数越多,增大应力则可减少薄膜褶皱。此调整方案 可对生产实际中设备张力控制有明确指导,提高了薄 膜的利用次数和加工质量。

参考文献:

- [1] 翟玉福. 激光全息镭射膜及生产工艺[J]. 广东印刷, 2018(3): 58-59.
 ZHAI Y F. Laser Holographic Laser Film and Production Process[J]. Guangdong Print, 2018(3): 58-59.
 [2] 郑成赋. 可重复利用激光全息转移膜的研制[J]. 山东
- 北工, 2021, 50(17): 69. ZHENG C F. Development of Reusable Laser Holographic Transfer Film[J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(17): 69.
- [3] 郭毅. 卷到卷系统导向辊表面的薄膜褶皱行为研究
 [D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
 GUO Y. Study on Film Wrinkling Behavior on the Surface of Guide Roller of Winding System[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [4] 方文彬. 电晕对 BOPP 薄膜表面化学组成和表面张力 的影响研究[J]. 合成材料老化与应用, 2022, 51(3): 55-56.

FANG W B. The Effect of Corona on the Surface Chemical Composition and Surface Tension of BOPP Film[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2022, 51(3): 55-56.

[5] LIN Y J, DIAS P, CHUM S, et al. Surface Roughness

and Light Transmission of Biaxially Oriented Polypropylene Films[J]. Polymer Engineering and Science, 2007, 47(10): 1658-1665.

- [6] 涂志刚, 熊立贵, 陈利伟, 等. 添加剂对 BOPP 薄膜光 学性能的影响[J]. 包装工程, 2020, 41(13): 139-144.
 TU Z G, XIONG L G, CHEN L W, et al. Effects of Additives on Optical Properties of BOPP Films[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(13): 139-144.
- [7] 董志远. 热处理及 β 成核剂对 BOPP 薄膜的力学性能 和尺寸稳定性的影响[D]. 北京: 北京化工大学, 2021. DONG Z Y. Effects of Heat Treatment and β Nucleating Agent on Mechanical Properties and Dimensional Stability of BOPP Films[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2021.
- [8] YUKSEKKALAYCI C, YILMAZER U, ORBEY N. Effects of Nucleating Agent and Processing Conditions on the Mechanical, Thermal, and Optical Properties of Biaxially Oriented Polypropylene Films[J]. Polymer Engineering & Science, 1999, 39(7): 1216-1222.
- [9] ZHANG C, DAI X Y, XING Z L, et al. Investigation on the Structure and Performance of Polypropylene Sheets and Bi-Axially Oriented Polypropylene Films for Capacitors[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2022, 40(12): 1688-1696.
- [10] BOZDOĞAN A, AKSAKAL B, KOC K, et al. Effect of Strain Level on Stress Relaxation and Recovery Behaviors of Isotactic Biaxially Oriented Polypropylene Films[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 133(5/6): 42948.
- [11] ELIAS M B, MACHADO R, CANEVAROLO S V. Thermal and Dynamic-Mechanical Characterization of Uni- and Biaxially Oriented Polypropylene Films[J].

Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2000, 59(1): 143-155.

- [12] 刘岩, 刘俨震. Kapton 薄膜高温单轴循环拉伸的力学性 能[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2022, 61(4): 731-738.
 LIU Y, LIU Y Z. Cyclic Tensile Behaviors of Kapton Foils under High Temperatures[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2022, 61(4): 731-738.
- [13] 胡建辉,陈务军,孙瑞,等. ETFE 薄膜单轴循环拉伸 力学性能[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(1): 69-75.
 HU J H, CHEN W J, SUN R, et al. Mechanical Properties of ETFE Foils under Uniaxial Cyclic Tensile Loading[J].
 Journal of Building Materials, 2015, 18(1): 69-75.
- [14] 陈建稳,陈务军,赵兵. 浮空器膜材循环拉伸力学性 能及弹性常数研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013,40(6):40-46.
 CHEN J W, CHEN W J, ZHAO B. Study of the Mechanical Properties and Elastic Constants of Aerostat Envelope Fabric under Cyclic Tensile Loading[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, 40(6): 40-46.
- [15] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.塑料拉伸性能的测定第3部分:薄膜和薄片的试验条件:GB/T 1040.3—2006[S].北京:中国标准出版社,2007.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Plastics - Determination of Tensile Properties -Part 3: Test Conditions for Films and Sheets: GB/T 1040.3—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.

[16] HUI S C. Ratcheting Behavior of PTFE under Cyclic Compression[J]. Polymer Testing, 2005, 24(7): 829-833.