

# Kapton 薄膜低温单向拉伸性能\*

刘 岩<sup>1</sup>, 李 超<sup>1</sup>, 林国昌<sup>2</sup>, 刘俨震<sup>1</sup>

(1. 长安大学建筑工程学院 西安, 710061)

(2. 哈尔滨工业大学特种环境先进复合材料国家重点实验室 哈尔滨, 150090)

**摘要** 为考察充气天线结构反射面膜材的低温力学性能,对厚度为 25  $\mu\text{m}$  的 Kapton(聚酰亚胺)高分子膜材,沿机器展开方向(machine direction,简称 MD)和垂直方向(transverse direction,简称 TD)2 个方向按相应规范截取长条型试样,进行了 5 种温度(20, 0, -10, -40 和 -70 $^{\circ}\text{C}$ )下的单向拉伸性能实验,得到低温下该膜材应力-应变曲线,从微观层面解释随温度降低膜材拉伸曲线由非线性过渡至线性的变化机理。在低温单向拉伸实验基础上,提出 Kapton 膜材强度的温度影响系数,获取抗拉强度、断裂延伸率、等效屈服应力、屈服应变和拉伸弹性模量随温度影响系数的变化规律,同时给出各力学性能参数随温度变化的拟合公式。该实验结果为 Kapton 膜材低温使用环境下的强度设计分项系数取值提供依据,同时为充气可展天线结构在轨极端温度场效应测试提供材料性能的基础数据。

**关键词** Kapton 薄膜;单向拉伸实验;低温力学性能;充气可展天线结构;极端温度场  
**中图分类号** TH145.4

## 1 问题的引出

为适应当前国防和航空事业的发展,完成我国各项深空探测任务,对高精度大型空间可展开天线的的需求越来越迫切。如图 1 所示,充气天线结构作为一种有前景的可折叠展开结构,代表着未来深空

可展天线的发展方向之一<sup>[1-5]</sup>。它在地面发射时为折叠收纳状态,收藏在整流罩内。待航天器进入空间轨道后,再由地面控制指令使其在空间轨道上按照设计要求逐步完成展开动作,最后锁定并保持为运营工作状态。

卫星天线处于太阳不同照射位置如图 2 所示。当天线沿空间轨道运行时,其相对太阳和地球的位置和方向不断变化,周期性的经受太阳直射和进入地球阴影区<sup>[6-14]</sup>。具体表现为:在轨运行天线,从正照区(位置 1)到阴影区(位置 5)再回到正照区的过程中,其温度变化表现为先逐渐降低,再逐渐升高;进出阴影区时存在较大的温度突变,经历的高低温度变化幅度可达 -180 $^{\circ}\text{C}$ ~180 $^{\circ}\text{C}$ ,属于极端温度作用。充气可展天线结构的反射面材料 Kapton 膜是美国



(a) 1 m 充气天线结构  
(a) Inflatable antenna structure with a diameter of 1 m  
(b) 3 m 充气天线结构  
(b) Inflatable antenna structure with a diameter of 3 m



(c) 12 m 充气天线结构  
(c) Inflatable antenna structure with a diameter of 12 m

图 1 充气天线结构示意图

Fig.1 Diagram of inflatable antenna structures

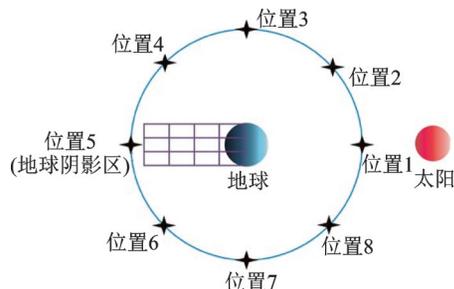


图 2 卫星天线处于太阳不同照射位置

Fig.2 Different orbit position during solar illumination

\* 国家自然科学基金资助项目(51908043);中央高校基本科研业务费资助项目(300102280201)

收稿日期:2020-12-21;修回日期:2021-02-02

杜邦公司生产的一种含有聚酰亚胺基的高分子聚合物薄膜,在结构正常工作时中常表现为受拉状态。因此,该膜材在高低温下拉伸力学性能的明晰是开展充气结构在轨实验的一个先决条件。

目前,围绕 Kapton 薄膜的研究主要集中在材料物理成型和化学制备等方面<sup>[15-20]</sup>,关于 Kapton 薄膜力学性能的研究较少,尤其是在高低温环境下的拉伸特性未见相关报道。笔者在低温环境下对 Kapton 膜材进行单向拉伸实验,考察其各项力学性能指标随低温的变化规律,为该类膜材力学性能研究以及充气可展天线结构的极端温度场实验测试提供材料本构方面的基础数据。

## 2 实验方案

### 2.1 试样制备

图 3 为膜片试样裁剪示意。图 4 为两个方向制备好的条形试样。笔者参照塑料薄膜拉伸实验国家标准<sup>[21-22]</sup>,采用切割样条法对 Kapton 膜材 MD 向(沿膜材长度方向)和 TD 向(垂直膜材长度方向)裁切矩形条状试样,进行低温下的单向拉伸实验。具体裁切时按照图 3 所示的每个方向选取试样距离整卷膜材端部大于等于 3 m,距整卷膜材侧边部大于等于 100 mm,在膜材卷上均匀取样。同时,结合低温环境箱内部空间尺寸以及拉伸器行程,该条形试样宽度为 25 mm,长为 200 mm,两夹持端距离为 100 mm。试样几何尺寸示意如图 5 所示。

试样制备时,为了使膜片拉伸破断位置发生在试样中部,其夹持端采用铝片进行双面粘贴予以加强。由于实验室设备能力有限,该实验室温度箱低

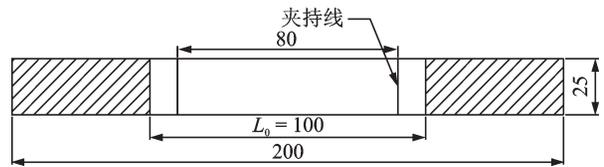


图 5 试样几何尺寸示意(单位:mm)

Fig.5 Geometric dimension for strip specimen (unit:mm)

温极值为  $-70^{\circ}\text{C}$ ,因此低温实验设计采用 20, 0,  $-10$ ,  $-40$  和  $-70^{\circ}\text{C}$  共 5 个温度。每种温度下膜片试样沿 MD 方向和 TD 方向各制备 5 个试件。

### 2.2 拉伸速率

笔者在低温实验之前先对 Kapton 膜材进行了常温( $20^{\circ}\text{C}$ )下不同速率的单向拉伸实验。实验结果表明,拉伸速率对 Kapton 膜材的抗拉强度、断裂延伸率、等效屈服应力、屈服应变以及拉伸弹性模量均有一定影响,并拟合了相应的公式。基于既有的不同拉伸速率下的实验结果并结合相关国家标准,该低温实验单向拉伸速率为 100 mm/min。

### 2.3 实验设备

如图 6 所示,实验采用 INSTRON5965 电子红外拉伸实验机,夹具采用手动楔形夹具,实验机最大载荷为 5 kN。带有高低温环境箱,如图 7 所示,该低温实验采用液氮制冷,将环境箱中的温度调节至实验预设温度。实验开始时,在夹具中央夹紧试样,使其纵向中心线通过夹持面的中心线,保证拉力中心线通过试样的中心线。将膜片试样放入环境箱,待其达到目标温度后,保持 20 min,使其恒温稳定后开启实验机进行试样的拉伸。拉伸初始时刻,首先对膜材进行预张拉,预张力约为 3 N。如图 8 所示,采用上

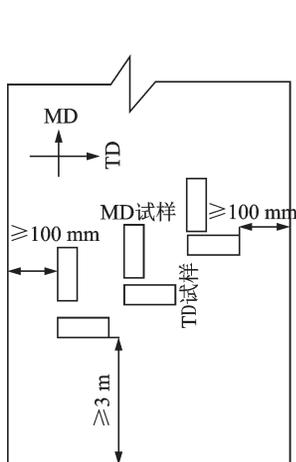


图 3 膜片试样裁剪示意  
Fig.3 Trimmed specimens for foil

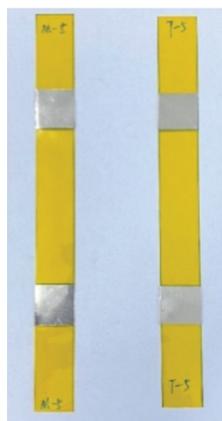


图 4 两个方向制备好的条形试样  
Fig.4 Prepared strip specimens in MD and TD



图 6 电子红外拉伸实验机 Fig.7 提供低温环境液氮罐  
Fig.6 Infrared tensile testing machine Fig.7 Liquid nitrogen providing low temperature machine



图 8 拉断后的试样  
Fig.8 Fractured specimen

述位移控制将试件常速拉伸至破坏,同步实时记录荷载-位移曲线。实验数据采集频率为20 Hz。

### 3 Kapton膜材的力学性能指标

#### 3.1 抗拉强度和断裂延伸率

计算抗拉强度时,Kapton膜材受拉直至断裂时会产生较大变形,断裂发生在其应力最大时刻,其应力-应变曲线无下降段。由于在拉伸过程中试件的宽度和厚度变化很难测量,故在本研究中不考虑拉伸过程中膜材截面收缩而导致面积变小,仍按拉伸前测得的截面面积计算Kapton膜材的应力。在开始的近似弹性阶段,膜材应变很小,其截面面积变化也很小。断裂时,Kapton膜材的应变达50%以上,此时截面面积较初始面积减小,故本研究所测得的抗拉强度值比实际断裂时应力偏小<sup>[21]</sup>。将试件断裂时刻的应力作为抗拉强度值 $f_u$ ,其计算式为

$$f_u = \frac{p}{bd} \quad (1)$$

其中: $p$ 为最大负荷; $b$ 为试件宽度; $d$ 为膜材厚度<sup>[23-25]</sup>。

断裂延伸率 $\epsilon_u$ 计算式为

$$\epsilon_u = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2)$$

其中: $L$ 为试件拉伸后的长度; $L_0$ 为隔距长度。

#### 3.2 等效屈服应力和屈服应变

Kapton薄膜属于高分子聚合材料,其拉伸曲线具有高度非线性,根据塑料拉伸薄膜规范定义属于无屈服点的韧性材料。因此,确定其屈服强度只能通过近似方法<sup>[23]</sup>。Davidow等<sup>[24]</sup>提出了一种应力-应变曲线为非线性材料的屈服强度的取值方法,如图9所示,可有效反映应力-应变曲线为非线性关系的材料屈服应力与屈服应变。具体方法如下:在测得的应力-应变曲线上选择一个点,假设在该点前材料始终处于弹性阶段,其应力-应变关系式为

$$\sigma = E\epsilon \quad (3)$$

其中: $E$ 为弹性模量。

根据式(4),可以计算加载到该点时可以估算其吸收的应变能为

$$U' = \frac{1}{2} \sigma_y \epsilon_y \quad (4)$$

其中: $\sigma_y$ 为屈服应力; $\epsilon_y$ 为屈服应变。

材料加载至该点时,其应力-应变曲线为非线性,通过数值积分可以计算加载至该点实际吸收的

应变能 $U$ 。如式(5)所示,当估算的应变能 $U'$ 和实际的应变能 $U$ 的误差控制在一定范围内(一般取5%),则可以确定该点为等效屈服点,所对应的应力为等效屈服应力,应变为等效屈服应变。

$$\frac{U - U'}{U} \leq 5\% \quad (5)$$

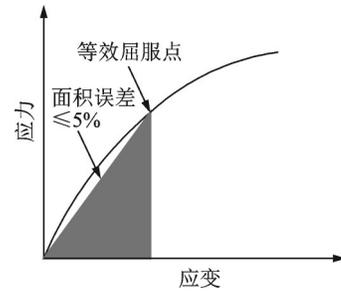


图9 根据能量法的屈服点预测

Fig.9 Yielding point estimation based on energy method

#### 3.3 弹性模量

由拉伸实验结果可以看出,Kapton应力-应变曲线在初始阶段有一小段为近似弹性段,可由该近似弹性阶段的数据来计算膜材的拉伸弹性模量。选取等效屈服点之前的曲线数据 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ ,采用最小二乘法进行线性拟合,以其直线斜率作为Kapton膜材的拉伸弹性模量。采用最小二乘法计算斜率 $K$

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

其中: $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$ ;  $\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$ 。

## 4 实验结果及分析

#### 4.1 应力-应变曲线

图10为Kapton膜材在不同温度下的应力-应变曲线。整体来看,该膜材属于无明显屈服点的韧性材料。具体来看,对于MD方向,应力-应变曲线可分为3段,即初始的近似弹性段、缓和弧线状的弹塑性阶段以及几乎直接进入的应力强化段。随着温度的降低,抗拉强度逐渐升高,断裂延伸率逐渐减小,而曲线无论在近似弹性段还是塑性流动阶段,其材料的刚度均随着温度的降低而提高,并且对应力强化段而言,随着温度的降低,该段明显线性化程度增

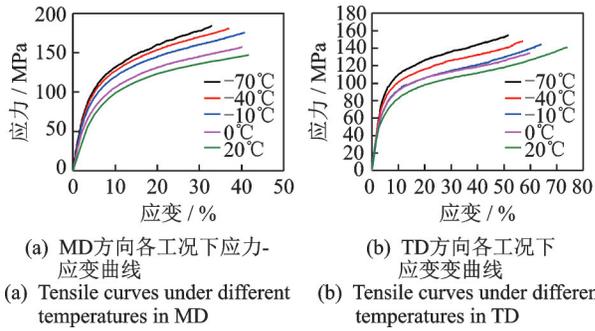


图10 Kapton膜材在不同温度下的应力-应变曲线  
Fig.10 The tensile curve for Kapton foil under low temperatures

强。对于TD方向, 相较MD方向, 其 $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$ 对应的应力-应变曲线开始有较为明显的塑性流动段, 可以认为先后历经近似弹性段、弹塑性阶段、塑性流动阶段以及应力强化段。值得注意的是,  $-10^{\circ}\text{C}$ 较为特殊, 在该温度下, 无论是MD方向还是TD方向, 其断裂延伸率比 $0^{\circ}\text{C}$ 的还要大些, 应力强化段也较 $0^{\circ}\text{C}$ 长一些。

分析发现, 温度从 $20^{\circ}\text{C}$ 降温至 $-70^{\circ}\text{C}$ 的过程中, 随着温度的降低, 近似弹性段的刚度逐渐增大。这表现为膜材逐步被低温“硬化”, 在材料受拉产生破坏时, 微观上表现为分子运动向高弹态过渡逐步进入玻璃态的剧烈转变, 伴随着温度的降低, 分子热运动大大减弱, 分子间的连接键逐渐加强, 受到外力时不易断裂。同时, 温度降低也会使材料韧性降低, 脆性增强。具体在拉伸曲线上表现为弹塑性弧线段逐渐变陡, 塑性变形占比减小, 塑性流动阶段平台段越来越短, 以至于几乎消失。因此, 最终膜材被拉断时, 断裂强度随着温度降低而逐步增大, 断裂延伸率不断减小。为了使用方便, 拟合各力学指标前, 定义温度系数为

$$\bar{T} = (T - 20) / 20 \quad (7)$$

其中:  $\bar{T}$ 为温度系数;  $T$ 为实验工况温度。

对各力学指标和温度系数进行函数拟合, 更能反映出相对 $20^{\circ}\text{C}$  (以此为参考基准), 温度每降低 $20^{\circ}\text{C}$ 时, 各力学指标的数值以及变化幅度。

#### 4.2 低温对抗拉强度和断裂延伸率的影响

图11为Kapton膜材抗拉强度与温度系数之间的关系。图12为Kapton膜材断裂延伸率与温度系数之间的关系。

可以看出, 当温度从 $20^{\circ}\text{C} \sim -70^{\circ}\text{C}$  (温度系数从 $0 \sim -4.5$ ), 随着温度降低, Kapton膜材的抗拉强度随着温度系数的减小而增大, 其中: MD方向的抗拉强度增大为 $19.82\%$ ; TD方向的抗拉强度增大为

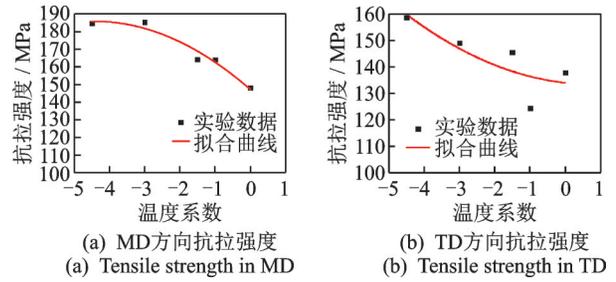


图11 Kapton膜材抗拉强度与温度系数之间的关系  
Fig.11 Relationship between tensile strength and temperature coefficient for Kapton foil

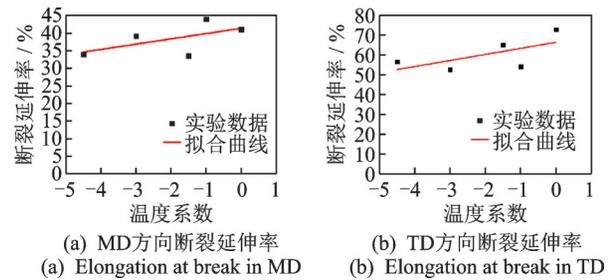


图12 Kapton膜材断裂延伸率与温度系数之间的关系  
Fig.12 Relationship between elongation at break and temperature coefficient for Kapton foil

为 $13.17\%$ 。Kapton膜材的断裂延伸率随着温度系数的减小而减小, 其中: MD方向的断裂延伸率减小约为 $20.91\%$ ; TD方向的断裂延伸率减小约为 $28.62\%$ 。抗拉强度与温度系数的关系可用二次多项式近似描述, 如式(8)~(9)所示。断裂延伸率与温度系数的关系可近似线性描述, 如式(11)所示。

$$f_{u,MD} = -1.958\bar{T}^2 - 17.395\bar{T} + 147.221 \quad (8)$$

$$f_{u,TD} = 0.956\bar{T}^2 - 1.442\bar{T} + 134.062 \quad (9)$$

$$\epsilon_{u,MD} = 1.503\bar{T} + 41.36 \quad (10)$$

$$\epsilon_{u,TD} = 3.507\bar{T} + 66.447 \quad (11)$$

#### 4.3 低温对等效屈服应力和屈服应变的影响

图13为Kapton膜材等效屈服应力与温度系数之间的关系。图14为Kapton膜材等效屈服应变与温度

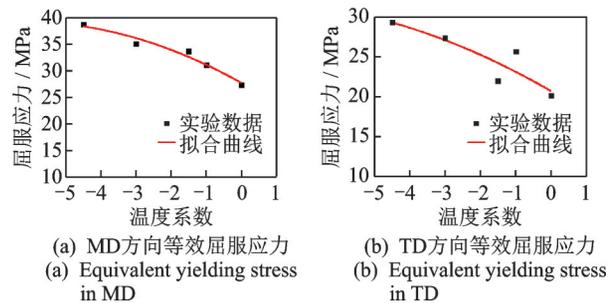


图13 Kapton膜材等效屈服应力与温度系数之间的关系  
Fig.13 Relationship between equivalent yielding stress and temperature coefficient for Kapton foil

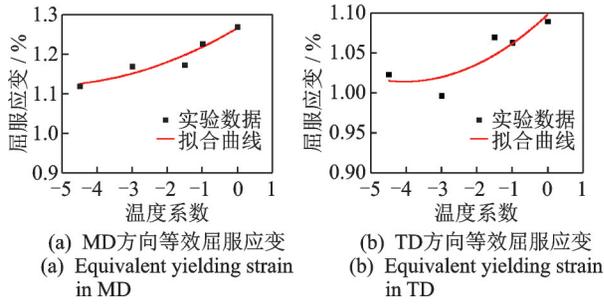


图 14 Kapton 膜材等效屈服应变与温度系数之间的关系  
Fig.14 Relationship between equivalent yielding strain and temperature coefficient for Kapton foil

系数之间的关系。可以看出,当温度从 $20^{\circ}\text{C}\sim-70^{\circ}\text{C}$ (温度系数从 $0\sim-4.5$ ),随着温度降低,Kapton 膜材的等效屈服应力随着温度降低而升高,其中:MD 方向的等效屈服应力升高约为 29.32%;TD 方向的等效屈服应力升高约为 31.31%。Kapton 膜材的等效屈服应变随着温度降低而降低,其中:MD 方向的等效屈服应变降低约为 13.39%;TD 方向的等效屈服应变降低约 6.51%。等效屈服应力和屈服应变与温度系数的关系均可用二次多项式来描述,其关系式为

$$\epsilon_{y,MD} = 0.005\bar{T}^2 + 0.052\bar{T} + 1.266 \quad (12)$$

$$\epsilon_{y,TD} = 0.005\bar{T}^2 + 0.041\bar{T} + 1.098 \quad (13)$$

$$f_{y,MD} = -0.296\bar{T}^2 - 3.7\bar{T} + 27.763 \quad (14)$$

$$f_{y,TD} = -0.146\bar{T}^2 - 2.572\bar{T} + 20.712 \quad (15)$$

#### 4.4 低温对拉伸弹性模量的影响

图 15 为 Kapton 膜材拉伸弹性模量与温度系数之间的关系。可以看出,从 $20^{\circ}\text{C}\sim-70^{\circ}\text{C}$ (温度系数从 $0\sim-4.5$ ),Kapton 膜材的拉伸弹性模量随着温度降低而增大,其中:MD 方向的拉伸弹性模量增大约为 37.82%;TD 方向的拉伸弹性模量增大约为 23.37%。拉伸弹性模量与温度系数的关系可以用三次多项式来近似描述,其关系式为

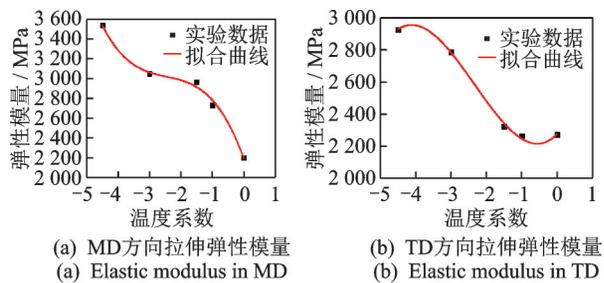


图 15 Kapton 膜材拉伸弹性模量与温度系数之间的关系  
Fig.15 Relationship between elastic modulus and temperature coefficient for Kapton foil

$$E_{MD} = -44.39\bar{T}^3 - 327.37\bar{T}^2 - 873.24\bar{T} + 2192.22 \quad (16)$$

$$E_{TD} = 33\bar{T}^3 + 231.5\bar{T}^2 + 228.52\bar{T} + 2276.5 \quad (17)$$

## 5 结 论

1) Kapton 膜材作为无明显屈服点的各向异性韧性材料,得到了不同低温下的单向拉伸应力-应变曲线。对单向拉伸受力而言,随着温度降低,材料微观上表现为分子运动向高弹态过渡逐步进入玻璃态的剧烈转变,分子热运动大大减弱,分子间的连接键逐渐加强,受到外力时不易断裂。同时,温度降低也会使材料韧性降低,脆性增强。具体在拉伸曲线上表现为弹塑性阶段弧线逐渐变陡,塑性变形所占比重减小,塑性流动阶段平台段越来越短,以至于几乎消失。

2) 定义低温下的温度系数,对各关键力学性能指标进行了 Kapton 膜材温度系数的依赖性分析。概括为:抗拉强度与等效屈服应力均随着温度的降低而增大,具体与温度系数的关系均可采用二次函数关系来表示,Kapton 膜材的断裂延伸率和等效屈服应变均随着温度降低而减小,具体表现为断裂延伸率与温度系数的关系可用近似线性关系式描述,而等效屈服应变与温度系数的关系可用二次多项式来描述。Kapton 膜材的拉伸弹性模量和温度系数之间的关系呈三次多项式关系,且随着温度系数的减小(即温度的降低)而增大。

3) 实验得到的基本数据可作为 Kapton 薄膜在结构工程设计中的常用参数,拟合得到的关系式可用于预测实际工程在不同温度工况下的拉伸力学性能,同时为下一步充气天线结构高低温环境实验提供必要的本构关系数据。

## 参 考 文 献

- [1] 柏宏武,刘博学,马小飞.一种卫星天线热变形测量系统设计[J].空间电子技术,2018(5):56-61.  
BAI Hongwu, LIU Boxue, MA Xiaofei. System design of thermal deformation measurement of satellite antennas[J]. Space Electronic Technology, 2018(5): 56-61. (in Chinese)
- [2] NABOULSI S. Investigation of geometric imperfection in inflatable aerospace structures [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2004, 17(3): 98-105.
- [3] 唐渝思,蒋金华,陈南梁.球形陆基充气天线反射面初始形态的确定[J].东华大学学报,2014,40(3):367-371.  
TANG Yusi, JIANG Jinhua, CHEN Nanliang. Determination of the initial form of spherical ground-based in-

- flatable antenna reflector [J]. Journal of Donghua University, 2014, 40(3): 367-371. (in Chinese)
- [4] 王杰, 李东旭, 蒋建平. 星载大型可展桁架式薄膜结构在轨热分布特性研究[J]. 测绘通报, 2014(S1): 9-15.  
WANG Jie, LI Dongxu, JIANG Jianping. Thermal analysis of large deployable truss support membrane structure on satellite [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(S1): 9-15. (in Chinese)
- [5] 王立超, 唐宝富, 刘明昱. 大型充气天线罩的研制[J]. 现代雷达, 2018(6): 62-69.  
WANG Lichao, TANG Baofu, LIU Minggang. Development of large air-supported radome [J]. Modern Radar, 2018(6): 62-69. (in Chinese)
- [6] 余建新, 谭惠丰, 卫剑征. 充气展开反射面天线动态特性实验研究[J]. 载人航天, 2017, 23(4): 506-511.  
YU Jianxin, TAN Huifeng, WEI Jianzheng. Experimental study on dynamic properties of inflatable deployable reflector antenna [J]. Manned Spaceflight, 2017, 23(4): 506-511. (in Chinese)
- [7] 高峰. 静电成形薄膜反射面天线形面综合优化设计及实验研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [8] 翟兴辉, 肖刚, 罗亚军, 等. 环形天线结构的振动主动控制[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(6): 1148-1154.  
ZHAI Xinghui, XIAO Gang, LUO Yajun, et al. Research on active vibration control of loop antenna structure [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(6): 1148-1154. (in Chinese)
- [9] 王朋朋, 王小亮. 大型柔性可展天线的频率优化和扰动响应预示[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(4): 699-705.  
WANG Pengpeng, WANG Xiaoliang. Frequency optimization and disturbance response prediction of a large flexible deployable antenna [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(4): 699-705. (in Chinese)
- [10] 朱一斌. 大型自适应薄膜反射面形面主动控制研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [11] DAVIDOW S A, FRIDLEY K J. Development of design values for wood-plastic composite materials [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(5): 41-45.
- [12] 赵军忠, 刘越东, 刘晓勇. 某星载天线热变形对跟踪指向精度的影响仿真分析[J]. 遥测遥控, 2013, 34(5): 1-4.  
ZHAO Junzhong, LIU Yuedong, LIU Xiaoyong. Analysis of influences of thermal distortion on tracking pointing precision of a kind of satellite antenna [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2013, 34(5): 1-4. (in Chinese)
- [13] 闫森浩, 周佐新, 胡帼杰. 大型网状天线柔性连接结构热响应分析[J]. 西北工业大学学报, 2018(5): 1013-1019.  
YAN Senhao, ZHOU Zuoxin, HU Guojie. Thermal response analysis of flexible connecting structure of large mesh antenna [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018(5): 1013-1019. (in Chinese)
- [14] 郑家健. 考虑热载荷的卡塞格伦天线机电综合优化设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [15] MATLOFF G L. The solar photon sail: history, current status and future prospects [J]. Journal of the British Interplanetary Society, 2011, 64(2): 58-71.
- [16] JOHNSON L, YOUNG R M, IV E E M. Recent advances in solar sail propulsion systems at NASA [J]. Acta Astronautica, 2007, 61(1): 376-382.
- [17] LIAW D, WANG K, HUANG Y, et al. Advanced polyimide materials: syntheses, physical properties and applications [J]. Progress in Polymer Science, 2012, 37(7): 907-974.
- [18] SAEED M B, ZHAN M S. Effects of monomer structure and imidization degree on mechanical properties and viscoelastic behavior of thermoplastic polyimide films [J]. European Polymer Journal, 2006, 42(8): 1844-1854.
- [19] SAEED M B, ZHAN M S. Adhesive strength of partially imidized thermoplastic polyimide films in bonded joints [J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2007, 27(1): 9-19.
- [20] 尼尔森. 高分子和复合材料的力学性能 [M]. 丁佳鼎, 译. 北京: 中国轻工业出版社, 1981: 45-60.
- [21] 吴明儿, 慕全, 刘建明. 拉伸速度 ETFE 薄膜力学性能的影响 [J]. 建筑材料学报, 2008, 11(5): 574-579.  
WU Minger, MU Tong, LIU Jianming. Influence of extension speed on mechanical properties of ETFE foil [J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(5): 574-579. (in Chinese)
- [22] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 1040.1—2006 塑料拉伸性能的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [23] 阴悦, 胡建辉, 李一坡, 等. 焊接工艺对 TPI 单轴拉伸力学性能的影响 [J]. 载人航天, 2017, 23(4): 546-550.  
YIN Yue, HU Jianhui, LI Yipo, et al. Effects of welding technology on uniaxial tensile mechanical properties in thermoplastic polyimide films [J]. Manned Spaceflight, 2017, 23(4): 546-550. (in Chinese)
- [24] DAVIDOW S A, FRIDLEY K J. Development of design values for wood-plastic composite materials [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(5): 41.
- [25] 崔家春, 杨联萍, 吴明儿. ETFE 薄膜低温单向拉伸性能 [J]. 建筑材料学报, 2013, 16(4): 725-729.  
CUI Jiachun, YANG Lianping, WU Minger. Uniaxial tensile properties of ETFE film at low-temperature condition [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(4): 725-729. (in Chinese)



**第一作者简介:**刘岩,男,1984年11月生,博士、副教授。主要研究方向为充气天线结构温度场效应及精度控制技术。  
E-mail: liuy@chd.edu.cn