

# 热固性芳纶织物/环氧树脂支撑管动态特性分析

顾莉莉<sup>1</sup> 丁海鑫<sup>1</sup> 余建新<sup>2</sup>

(1 上海卫星工程研究所, 上海 201109)

(2 哈尔滨工业大学分析测试与计算中心, 哈尔滨 150080)

**文 摘** 利用热固性树脂基体在玻璃态转变温度( $T_g$ )前后表现不同的材料特性,制备了Kevlar29芳纶织物/E51环氧树脂基复合材料和三根充气展开支撑管。给出了芳纶织物增强环氧树脂支撑管制备工艺,其中基体温度采用电阻丝加热控制,管体固化形状采用聚酰亚胺薄膜内胆充气加压方法控制。研究了支撑管的折叠和展开特性,当 $T>T_g$ 时卷曲折叠并冷却定型用于储存,然后采用二次加热 $T>T_g$ 和充气加压方法控制展开,最终支撑管形状回复率100%。采用模态分析讨论了温度、树脂含量、织物铺层厚度和充气内压等参数对悬臂状态下支撑管的固有频率影响规律。结果表明:随充气压力增加、树脂含量提高、织物铺层厚度增加、基体温度降低,芳纶织物增强环氧树脂支撑管的固有频率增大。采用曲线拟合方法获得固有频率随充气压力和温度的变化规律,结果可为充气展开支撑管设计提供参考。

**关键词** 热固性树脂,芳纶织物,充气结构,模态分析,玻璃态转变温度

中图分类号:TB33

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2023.04.013

## Dynamic Characteristics Analysis of Support Booms of Thermal Cured Aramid Fabric/Epoxy Resin

GU Lili<sup>1</sup> DING Haixin<sup>1</sup> YU Jianxin<sup>2</sup>

(1 Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109)

(2 Center of Analysis, Measurement and Computing, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080)

**Abstract** Utilizing different material properties of thermal cured epoxy matrix before and after the glass transition temperature ( $T_g$ ), Kevlar29 aramid fabric/E51 epoxy resin based composites and three inflatable unfolded support booms were prepared. The fabrication process was illustrated, electrical resistant wire was used to control temperature of thermal cured matrix, and an enclosed Kapton membrane was used for inflatable pressurization to control the final shape of booms. The folding and unfolding characteristics of the support were investigated. The boom was curled and folded when  $T>T_g$  and then cooled and shaped for storage, and the unfolding process was controlled by secondary heating  $T>T_g$  and inflatable pressurization method, and the final support tube shape recovery rate was 100%. Modal analysis was used to discuss the effect of parameters such as temperature, resin content, fabric layup thickness and internal pressure of inflation on the natural frequencies of the support boom under cantilever condition. The results show that the natural frequencies of the support tube of the aramid fabric reinforced epoxy resin increase as the inflation pressure increases, the resin content increases, the fabric layup thickness increases, and the substrate temperature decreases. A curve fitting method is used to obtain the variation law of the natural frequencies with the inflation pressure and temperature, and the results can provide reference for the design of the inflatable unfolded support boom.

**Key words** Thermal cured epoxy, Aramid Fabric, Inflatable structure, Modal analysis, Glass transition temperature

### 0 引言

充气展开结构是由聚酰亚胺薄膜及其复合材料制

收稿日期:2022-07-13

第一作者简介:顾莉莉,1989年出生,硕士,工程师,主要从事设备整体布局、设备结构与机构技术研究工作。E-mail: lilyccdm@126.com

通信作者:余建新,1984年出生,硕士,高级工程师,主要从事充气展开结构及材料力学测试方法的研究工作。E-mail: yujianxin03242@163.com

成的新型太空结构,这种结构在发射初期以折叠的形式储存在运载火箭发射舱,进入到太空后通过内部充入气体而使结构展开,达到预先设计的形状,并实现其功能要求。1996年美国宇航局成功将直径14 m的天线送入太空,进行了在轨充气展开试验<sup>[1]</sup>,此次试验代表之前十多年充气展开技术的最高水平。它验证了充气展开结构在太空中应用的可行性,也将充气展开结构技术推向了一个里程碑式的高峰。与传统的金属桁架空间结构相比,充气展开结构具有更小的存储空间、更低的成本、更轻的质量以及更高的展开可靠性等优势。

早期研究的充气展开结构通过增加封闭腔体压力来提高薄膜刚度,但过大的管内压力容易导致薄膜破裂。同时在太阳风、粒子辐射、昼夜大温差等空间环境下,难以保证薄膜结构的气密性。因此,研究人员开展了刚化技术和刚化材料研究。美国的JPL实验室通过薄膜管内壁布置4根钢卷尺提高支撑刚度<sup>[2]</sup>,为了适应国内微小卫星平台磁场环境限制,WEI等<sup>[3]</sup>采用碳纤维增强树脂基复合材料制作增强条替代钢性卷尺,加工制作了长度为3 m重力梯度杆,完成了在轨充气展开测试<sup>[4]</sup>。LIN等<sup>[5]</sup>提出了可刚化网格增强支撑管的结构形式。谢志民等<sup>[6]</sup>发明了一种复合材料绳,并研究了其在充气展开可刚化管状结构上的应用。刘宇艳<sup>[7]</sup>和曹旭<sup>[8]</sup>比较了热固性复合材料、热塑性复合材料、铝/聚合物薄膜的优缺点,对空间充气展开结构用刚化材料和刚化技术的研究现状进行总结。其中热固性复合薄膜材料由浸润过热固性聚合物树脂的纤维增强材料组成,可以通过嵌入加热系统进行化学固化或交联,从而控制和优化刚化过程,采用热固性材料制备的支撑管具有一定的刚度,能够实现独立支撑。冷劲松等<sup>[9]</sup>总结了形状记忆驱动关节和形状记忆聚合物天线的应用。刘宇艳<sup>[10]</sup>对比了碳纤维和Kevlar芳纶纤维的弯折情况,其中Kevlar芳纶纤维比碳纤维具有更好的弯折特性,更适合折叠展开的空间结构。另一方面,结构动态特性也是航空结构的关注重点,2008年3月美国NASA空军试验室通过航天飞机搭载热固性自钢化支撑管,进行在轨展开、直线度、动态特性测试<sup>[11]</sup>,发现支撑管的固有频率随时间变化。

本文加工制备热固性芳纶织物增强环氧树脂支撑管,进行折叠-展开试验,验证充气控制系统和电阻丝温度控制系统进行结构展开和固化的可行性。采用试验模态分析方法研究固化温度、充气压力、树脂含量、铺层厚度等参数对支撑管固有频率的影响规律。

## 1 环氧树脂制备

采用E51热固性环氧树脂、柔性伯胺-12胺(PA)和间苯二甲胺(MXDA)固化剂制备树脂基体,由于环氧树脂本身是一种热塑性低分子量的预聚体,加入固化剂和增韧剂后,可促进环氧树脂发生化学反应,使线型树

脂转变成三向网状立体聚合物,呈现不溶不熔状态。

胺类固化剂固化环氧树脂的反应过程如下:(1)环氧树脂具有环氧基,胺类固化剂也有氨基,两者结合生成伯氨基就成为仲氨基;(2)环氧基开环,生成羟基,并且释放热量,同时分子链生长;(3)在新生成的分子链上,仲胺和另一个环氧树脂反应就形成了叔胺侧链结构,侧链末端的环氧基和邻近分子链的氨基反应形成网络。表1为热固性树脂的制备过程,采用75%的12胺和25%的间苯二甲胺对环氧树脂E51进行固化。

表1 热固性树脂制备

Tab. 1 Fabrication of thermal cured epoxy

试剂名称	作用	状态	操作
环氧树脂E51	热固性树脂	胶状液体	90 °C恒温30 min
间苯二甲胺	固化剂	液体	无
12胺	增韧剂	固体	90 °C恒温30 min

## 2 动态热机械分析

玻璃态转变温度( $T_g$ )是非晶态树脂的重要参数,采用动态热机械分析仪(DMA Q800)测量树脂在升温过程中储能模量和 $\tan\theta$ 变化,并根据 $\tan\theta$ 峰值判断玻璃态转变温度,根据 $T_g$ 温度前后材料储能模量下降的相对程度评价材料的耐热性, $\tan\theta$ 的峰宽表示链段松弛运动的温区,温区宽分散性大,链段松弛运动过程长。图1为含固化剂的E51环氧树脂的动态机械分析图,树脂的玻璃态化转变温度为78.5 °C。当 $T < T_g$ 时材料处于玻璃态,材料的形状稳定,室温下环氧树脂的储能模量为2.45 GPa,随着温度的升高,树脂体系软化使其储能模量迅速降低,当温度超过 $T_g$ 时,储存模量值降低到0.13 GPa,随着温度继续升高,树脂体系处于稳定的高弹态。形状记忆聚合物材料在玻璃态转变温度前后表现不同的材料特性,可用于空间可展开结构。理想情况下,要想获得具有优良的形状记忆性能和折叠性能,聚合物的储能模量在玻璃化转变温度区间有两个数量级的变化,并且具有稳定高弹态。该树脂在玻璃态下的储能模量和高弹态下的储能模量相差188倍,说明树脂材料具有较好的形状记忆特性。当温度超过 $T_g$ 后,模量不再降低,高弹态下较低的储存模量有利于赋型。

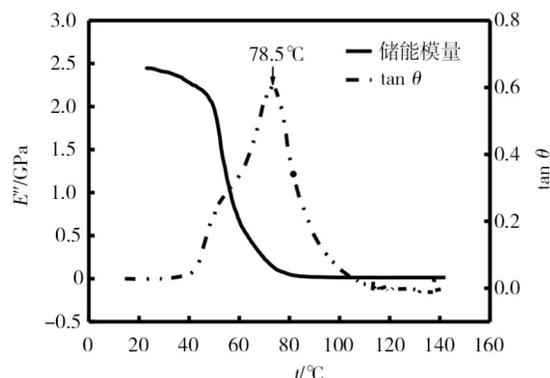


图1 E51树脂动态热机械分析

Fig. 1 DMA of E51 epoxy

### 3 芳纶织物增强环氧树脂支撑管制备工艺

热固性支撑管主要由内胆聚酰亚胺薄膜气密层、Kevlar29芳纶织物增强层、电阻丝加热层和最外面的聚酰亚胺薄膜保护层组成。下面以单层织物增强环氧树脂支撑管制备为例介绍制作芳纶织物增强环氧树脂支撑管制备工艺。

裁剪聚酰亚胺薄膜制成圆柱形内胆,两端用轻质铝合金端盖密封,并设计充气孔和气管。然后在平面工作台平铺聚酰亚胺薄膜,上方铺设Kevlar芳纶织物,将加入固化剂混合均匀的环氧树脂均匀涂抹芳纶织物,同时20 mm等间隔平铺电阻丝导线,上面覆盖聚酰亚胺薄膜,防止树脂溢出,最后卷曲在聚酰亚胺薄膜内胆。通过气泵加压,压力表监测管内压力,并通过红外测温仪测量电阻丝加热温度。在80 °C和10 kPa压力下固化1 h,然后撤去压力和温度成型(图2)。

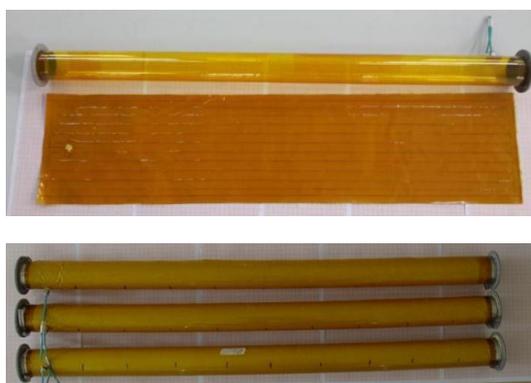


图2 热固性支撑管

Fig. 2 Thermal cured support booms

制备了三根热固性支撑管,表2为支撑管铺层参数。为了对比分析,考虑了单层和双层织物厚度,以及35%和50%两种树脂含量。

表2 支撑管铺层参数

Tab. 2 The lay-up parameters of support booms

厚度	树脂含量/(%)	铺层
双层	50	Kapton/Kevlar/电阻丝/Kevlar/Kapton
单层	50	Kapton/Kevlar/电阻丝/Kapton
单层	35	Kapton/Kevlar/电阻丝/Kapton

### 4 折叠-展开测试

当形状记忆聚合物材料被紧密折叠时,容易出现塑性褶皱变形,在形状恢复力作用下只能恢复到初始形状的90%~95%,不满足高精度要求。对支撑管进行卷曲折叠和充气展开测试,用于验证充气展开控制方式的可行性和可靠性,分析支撑管展开精度,支撑管的回复过程见图3。

折叠时先将芳纶织物增强环氧树脂支撑管两端导线接到加热电源,用电阻丝控制树脂温度,加热到100 °C使整个支撑管软化。然后将整个管卷曲折叠。

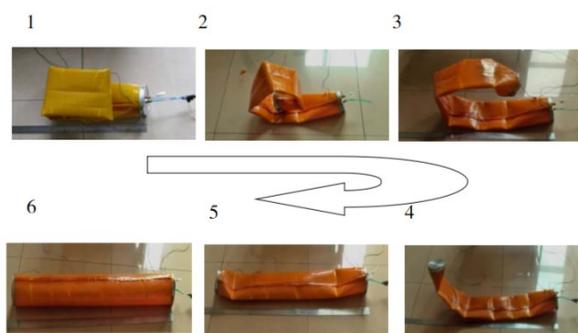


图3 支撑管形状回复过程

Fig. 3 Shape recovery process of support boom

迅速停止加热,将其放入冰箱内冷却定型。

展开时先将定型后的芳纶织物增强环氧树脂支撑管重新加热,结合内部充气逐渐恢复到折叠前的形状,最终使得形状恢复达到100%。可见通过加热树脂基体温度高于 $T_g$ ,同时对内部封闭腔体充气,可以提高芳纶织物/热固性树脂支撑管的形状回复率。

### 5 模态分析

采用DEWE-801数据采集分析系统,Kistle 9725A5000力锤、PCB-356A25三轴加速度传感器,KIMO-CP-200压力测量表、充气泵、VarioCAM红外测温仪、支架和底座等设备进行模态试验(图4)。试样采用悬臂梁形式固定,并调节支撑管为水平状态。在支撑管末端安装三轴加速度传感器测量响应。其中传感器z轴为支撑管长度方向,x、y轴分别为支撑管前后、上下方向。采用力锤进行振动激励,沿1 m管长度上间隔0.1 m均匀布置10个激励点。数字信号处理中参数设置如下:采样频率1 kHz,分析带宽500 Hz,采样点8 024,频率分辨率0.312 Hz。采用三次线性平均的方法获得每个测点的频响函数曲线,然后用导纳圆方法识别支撑管的固有频率、模态阻尼比和模态振型。

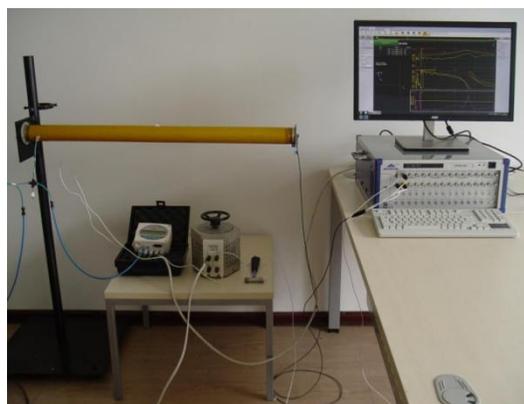


图4 模态分析系统

Fig. 4 Modal analysis system

### 6 有限元分析

采用ABAQUS 12.0软件进行有限元分析,以双层Kevlar芳纶织物增强复合材料为例,建立了Kapton/Kevlar/电阻丝/Kevlar/Kapton复合材料支撑圆

管模型,支撑管尺寸为 $\Phi 60\text{ mm}\times 1\ 000\text{ mm}$ 。Kevlar纤维、E51环氧树脂和铝合金的材料特性表3所示。根据热固化支撑圆管的铺层情况,对不同区域的单元赋予相应的材料特性。铝合金端盖采用Hex-dominant八节点的体单元。采用4层模型,铺设角度为单一 $0^\circ$ ,每一层均采用Continuum Shell单元,共9 984单元。表4为树脂含量50%的双层芳纶织物铺层环氧树脂复合材料。

采用悬臂梁边界条件,即一端固支,另一端自由。同时考虑不同内压力作用下支撑圆管动态特性的影响。最后采用Lanczos法分析,计算前两阶振动模式。

表3 支撑管材料参数

Tab. 3 Material properties for support boom

材料	$\rho/$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$E_1/$ /GPa	$E_2/$ /GPa	$G_{12}/$ /GPa	$G_{13}/$ /GPa	$G_{23}/$ /GPa	$\mu$
Kevlar29	1 440	25	25	0.18	0.18	0.03	0.23
E51	2 880	2.8	2.8	1.03	1.03	1.03	0.32
铝合金	2 700	80	80	57.1	57.1	57.1	0.3

表4 芳纶织物铺层参数

Tab. 4 The lay-up parameters for Aramid fibres

铺层	厚度/m	铺设角/ $^\circ$	材料
第1层	0.000 157	0	Kevlar29
第2层	0.000 090	0	E51
第3层	0.000 157	0	Kevlar29
第4层	0.000 090	0	E51

## 7 结果与讨论

### 7.1 充气压力对固有频率的影响

铁摩辛柯梁理论计算悬臂支撑管的固有频率:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{\sqrt{\frac{EI}{\rho A} \frac{n^2 \pi^2}{l^2}}}{2\pi} \quad (n=1,2) \quad (1)$$

式中, $E$ 为等效弹性模量, $I$ 圆截面惯性矩, $\rho$ 等效密度, $A$ 横截面, $l$ 为悬臂长度。

以双层芳纶织物增强支撑管为参考对象进行分析,树脂含量50%。图5为初始状态(0 kPa, 25 $^\circ\text{C}$ )时频响函数的幅值和频率图,第1阶固有频率为18.34 Hz,第二阶固有频率为144.34 Hz。

图6和图7分别为支撑管前两阶弯曲振动模式试验和仿真振型,红颜色表示位移最大位置,蓝颜色表示位移最小位置。一阶弯曲模式振型在自由端的位移最大,二阶模式振型存在一个节点位置。比较有限元仿真振型和试验测试得到的模式振型可知,两者结果基本相同,说明了有限元仿真分析结果的准确性。

图8表示结构的固有频率随充气压力变化曲线,

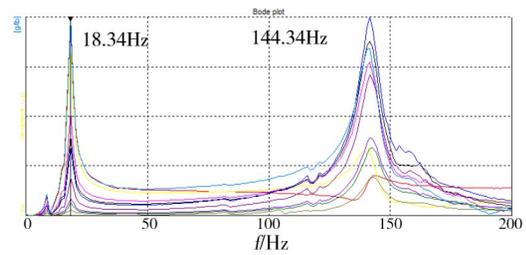
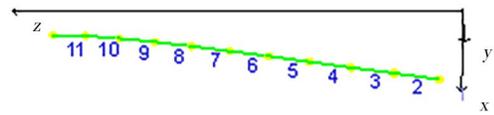
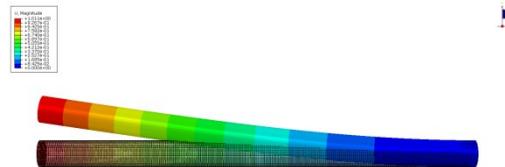


图5 频响函数曲线图

Fig. 5 The function curves of frequency response



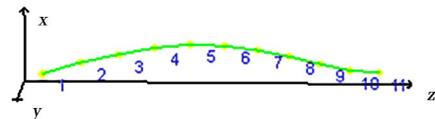
(a) 试验



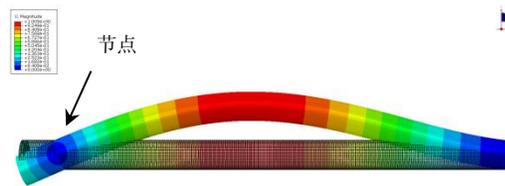
(b) 仿真

图6 一阶弯曲模式振型

Fig. 6 The 1<sup>st</sup> bending mode shape



(a) 试验



(b) 仿真

图7 二阶弯曲模式振型

Fig. 7 The 2<sup>nd</sup> bending mode shape

分别测试了0、20、40、60 kPa四种充气压力下支撑管的固有频率,随着充气压力增加,支撑管的一阶频率从18.34 Hz增加到18.96 Hz,提高3.38%。二阶频率从144.34 Hz增加到145.96 Hz,提高1.12%。采用多项式参数方程拟合图8中试验结果,获得充气支

撑管的固有频率随压力变化关系,进而预测其他压力下支撑管的动态响应,指导工程应用。支撑管的前二阶固有频率随压力( $P$ )的变化关系如下

$$f_{P1st} = 17.56 + 0.0039P + 0.0004P^2 \quad (2)$$

$$f_{P2nd} = 144.12 + 0.016P - 0.0002P^2 \quad (3)$$

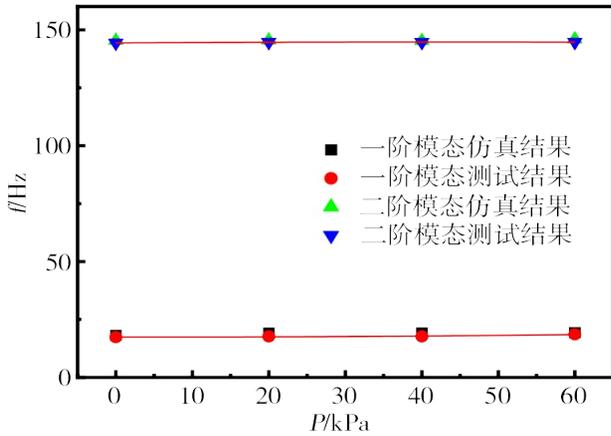


图8 充气压力对支撑管固有频率的影响

Fig. 8 Effect of inflation pressure on natural frequencies of support boom

采用薄壳的无矩理论进行分析,支撑管的环向应力计算公式如下

$$\sigma = \frac{P \times D}{2t} \quad (4)$$

式中, $P$ 为充气压力, $D$ 为直径, $t$ 为壁厚。

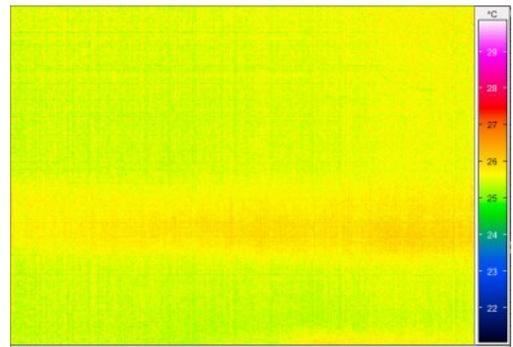
随着压力增大,支撑管的环向应力增加,从而提高支撑管的基频。但由于芳纶织物增强复合材料支撑管自身刚度较大,充气压力对支撑管刚度改变比重很小。

## 7.2 温度对固有频率的影响

采用 225 V 直流电对电阻丝加热,通过 VarioCAM 红外测温仪对温度进行监控。图 9 为管壁温度云图,蓝色表示低温度区域,可见电阻丝长度方向实现了均匀加热,电阻丝中间温度远高于树脂温度。

分析温度对支撑管固有频率的影响,当内压为 20 kPa、树脂含量 50% 的双层芳纶织物支撑管从室温加热至 85 °C 时,支撑管的一阶频率从 18.34 Hz 到 10.93 Hz,减小 40.40%。结构的第二阶频率从 144.34 Hz 降低到 89.56 Hz,减小 37.95%。当温度回到初始温度时,支撑管的动态特性也随之恢复初始状态,固有频率回复到 18.37 Hz。说明热固性支撑管具有很好的记忆性。温度循环对支撑管损伤较小,通过控制基体温度可调整结构的固有频率。

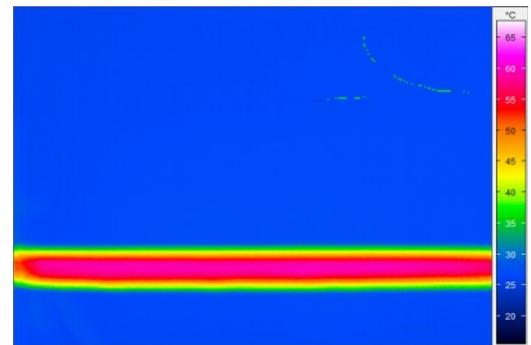
采用多项式参数方程拟合图 10 中试验结果,获得充气支撑管固有频率随温度变化关系,进而预测



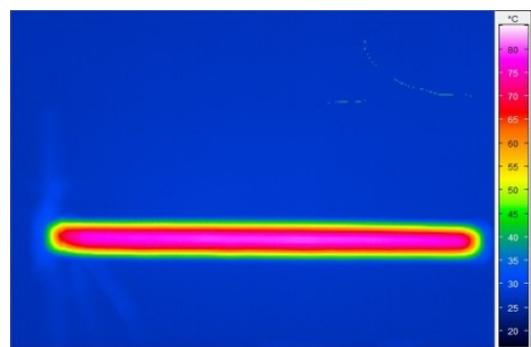
(a) 25 °C



(b) 45 °C



(c) 65 °C



(d) 85 °C

图9 温度云图

Fig. 9 Temperature contour

其他温度下支撑管的动态响应,支撑管的前二阶固有频率随温度( $T$ )的变化关系如下

$$f_{T1st} = 25.8775 - 0.3178T + 0.0017T^2 \quad (5)$$

$$f_{T2nd} = 216.7847 - 3.3182T + 0.0212T^2 \quad (6)$$

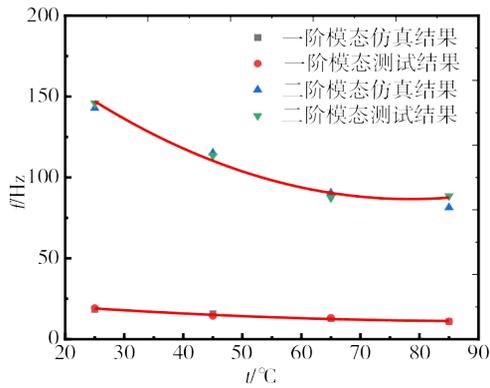


图 10 温度对支撑管固有频率的影响

Fig. 10 Effect of temperature on natural frequency of support boom

### 7.3 树脂含量对动态特性的影响

对比室温条件下,管内压力为 20 kPa 时,分析不同树脂含量对单层 Kevlar29 芳纶织物增强支撑管的动态特性影响。分别考虑树脂含量为 35% 和 50% 两种工况,对比分析支撑管前两阶频率。表 5 可知,50% 树脂含量下支撑管一阶固有频率提高了 1.8%,支撑管二阶固有频率提高了 13.7%。需要指出的是,过度增加树脂含量将增加结构自重,不利于热固性芳纶织物增强环氧树脂支撑管在空间展开结构中应用。

表 5 不同树脂含量下单层支撑管固有频率

Tab. 5 Natural frequencies of single layer support boom with different matrix proportions

树脂含量/%	一阶频率			二阶频率		
	仿真/Hz	试验/Hz	误差/%	仿真/Hz	试验/Hz	误差/%
35	13.96	14.20	1.69	123.90	136.16	9.00
50	14.03	14.50	3.24	123.46	154.83	20.26

### 7.4 铺层厚度对动态特性的影响

针对温度为 25 °C,管内压力为 20 kPa,树脂含量 50% 时单层和双层 Kevlar29 芳纶织物增强复合材料对支撑管固有频率的影响。树脂含量相同的热固化充气支撑管,增加铺层厚度,很明显地增加支撑管的刚度(表 6)。支撑管的一阶频率由 14.50 Hz 增加到 19.26 Hz,增加了 32.80%。对于相同铺层厚度的支撑管,树脂含量越高力学性能越好。对于相同树脂含量的支撑管,铺层越厚的支撑管力学性能越好。

表 6 不同铺层厚度下单层支撑管固有频率

Tab. 6 Frequencies of single layer support boom with different layup thickness

铺层	一阶频率			二阶频率/Hz		
	仿真/Hz	试验/Hz	误差/%	仿真/Hz	试验/Hz	误差/%
单层	14.03	14.50	3.60	121.46	154.83	27.4
双层	18.37	19.26	6.10	142.80	145.51	2.10

通过分析热固化芳纶织物增强环氧树脂支撑管的动态特性与影响参数之间关系,可以针对具体结构频率要求对设计参数进行调整,满足刚度的同时进行结构轻量化设计。

## 8 结论

卷曲折叠-充气展开实验表明:热固性 Kevlar29 芳纶织物增强 E51 环氧树脂基复合材料支撑管具有形状记忆效应,电阻丝温度控制系统和充气压力控制系统,实现形状回复率 100%。

试验模态分析和有限元仿真结果表明:降低树脂基体温度、增大树脂含量、增厚织物铺层、增大内部充气压力均能提高支撑管悬臂状态下的固有频率。升高树脂基体温度能促进固化反应,但超过基体玻璃态转变温度后树脂软化,将减小结构刚度和振动固有频率。

### 参考文献

- [1] FREELAND R E, BILYEU G D. IN-STEP Inflatable Antenna Experiment [C]// 43<sup>rd</sup> Congress of the International Astronautical Federation, Washington DC, 1992: 13-18.
- [2] FANG H F, LOU M, HAH J. Deployment study of a self-rigidizable inflatable boom [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2006, 43(1): 25-30.
- [3] WEI J Z, TAN H F, Wang W Z, et al. Deployable dynamic analysis and on-orbit experiment for inflatable gravity-gradient boom [J]. Advances in Space Research, 2015, 55(2): 639-646
- [4] 曹旭,王伟志,张宏伟,等. 一种新型充气式重力梯度杆的研制和在轨展开试验[J]. 航天返回与遥感, 2014, 35(3): 20-27
- [5] CAO X, WANG W Z, ZHANG H W, et al. Development and space experiment of a new inflatable gravity gradient boom [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2014, 35(3): 20-27
- [6] LIN J K, SAPNA G H. Inflatable rigidizable iso grid boom development [C]//43<sup>rd</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Denver, 2002: 1297.
- [7] 谢志民,苗常青,谭惠丰,等. 一种复合材料绳及其在空间充气展开可刚化管状结构上的应用[P]. CN102121200A.
- [8] XIE Z M, MIAO C Q, TAN H F, et al. Composite Rope and its Application in Space Inflatable Deployment of Rigidizable Tubular Structure [P]. CN102121200A
- [9] 刘宇艳,孟秋影,谭惠丰,等. 空间充气展开结构用刚化材料和刚化技术的研究现状[J]. 材料工程, 2008, 2(1): 76-80.
- [10] LIU Y Y, MENG Q Y, TAN H F, et al. The situation of the rigidizable materials and rigidization technology used in space inflatable structures [J]. Journal of Material Engineering, 2008, 2(1): 76-80
- [11] 曹旭,王伟志. 空间充气展开结构的材料成型固化宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2023 年 第 4 期

技术综述[J]. 航天返回与遥感,2009,30(4):63-68

CAO X, WANG W Z. Summary of rigidization technologies for space inflatable structures [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2009, 30(4): 63-68

[9] 冷劲松, 兰鑫, 刘彦菊, 等. 形状记忆聚合物复合材料及其在空间可展开结构中的应用[J]. 宇航学报, 2010, 31(4): 950-956.

LENG J S, LAN X, LIU Y J, et al. Shape memory polymers composites and their applications in deployable structures [J] Journal of Astronautics, 2010, 31(4): 950-956

[10] 刘宇艳, 朱琦, 万志敏, 等. 用于可充气展开结构的

热固性复合材料耐折叠性能研究[J]. 宇航材料工艺, 2005, 35(1): 31-33.

LIU Y Y, ZHU Q, WAN Z M, et al. Fold-resistant characteristics of thermosetting laminate composites for deployable structure [J] Aerospace Materials & Technology, 2005, 35(1): 31-33.

[11] COOPER B J, BLACK J T, SWENSON E D, et al. Rigidizable inflatable get-away-special experiment space flight data analysis[C]//50<sup>th</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, California, 2009.