



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 115290447 B

(45) 授权公告日 2024. 08. 02

(21) 申请号 202210956693.6

(22) 申请日 2022.08.10

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 115290447 A

(43) 申请公布日 2022.11.04

(73) 专利权人 香港理工大学深圳研究院  
地址 518057 广东省深圳市南山区粤海街  
道高新技术产业园南区粤兴一道18号  
香港理工大学产学研大楼205室  
专利权人 香港理工大学

(72) 发明人 张子恒 朱波 陈韦 陶肖明

(74) 专利代理机构 深圳市君胜知识产权代理事  
务所(普通合伙) 44268  
专利代理师 徐凯凯

(51) Int. Cl.

G01N 3/08 (2006.01)

G01N 3/24 (2006.01)

G06F 30/20 (2020.01)

G06F 111/10 (2020.01)

G06F 113/26 (2020.01)

G06F 119/14 (2020.01)

(56) 对比文件

CN 110387620 A, 2019.10.29

CN 113836724 A, 2021.12.24

审查员 林梦娜

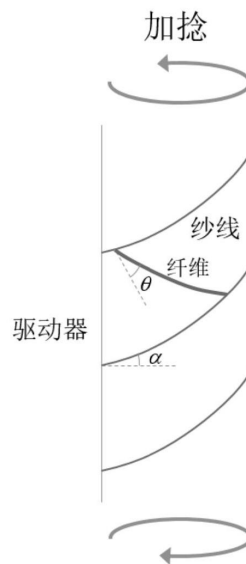
权利要求书1页 说明书5页 附图2页

(54) 发明名称

一种超螺旋状复合纤维驱动器的模量分析测试方法

(57) 摘要

本发明公开了一种超螺旋状复合纤维驱动器的模量分析测试方法,其包括步骤:将由纤维基体和聚合物基质构成的纱线加捻成一阶超螺旋结构,形成所述复合纤维驱动器;基于所述复合纤维驱动器的一阶超螺旋结构,构建模量数学模型;根据所述模量数学模型获取所述复合纤维驱动器在动态温度下的模量。本发明提供的复合纤维驱动器的模量分析测试方法可以通过直接拍摄或观察这样的非接触测试,来完成对超螺旋状复合纤维驱动器的模量分析测试,从而为超螺旋状复合纤维驱动器的设计和优化提供指引;本发明方法可在较宽的温度范围内对复合纤维驱动器的模量进行分析测试,还可以选择纤维基体和聚合物基质材料的最佳热力学性质和比例的组合,以最大化各向异性。



1. 一种复合纤维驱动器的模量分析测试方法,其特征在于,包括步骤:

将由纤维基体和聚合物基质构成的纱线加捻,当捻度达到一定程度时,所述纱线维持圆柱表面的扭转所对应的变形能超过纱线轴线的扭曲所消耗的能量,所述纤维基体停止在所述纱线内的扭转,纱线轴线沿着加捻方向产生的扭曲形成一阶超螺旋结构,形成所述复合纤维驱动器;

基于所述复合纤维驱动器的一阶超螺旋结构,构建模量数学模型:

$$K = \frac{[\sin 2(\alpha + \theta)]^2 \left[ 1 - a_1 \left( \frac{T}{T_{1r}} \right) \right] E_{1r} A_1 + \left[ 1 - a_2 \left( \frac{T}{T_{2r}} \right) \right] G_{2r} A_2}{(\sin \alpha)^2}, \text{ 其中, } E_r \text{ 和 } G_r \text{ 分别为参考温}$$

度下的拉伸模量和剪切模量, $T_r$ 为参考温度, $a$ 为晶体材料拉伸模量随温度变化的热力学表征系数, $A$ 为纱线的横截面积,公式中的下标1代表纤维基体,下标2代表聚合物基质, $\alpha$ 为一阶超螺旋结构状态下纱线与复合纤维驱动器横截面的夹角, $\theta$ 为一阶超螺旋结构状态下纤维基体与纱线横截面的夹角;

根据所述模量数学模型获取所述复合纤维驱动器在动态温度下的模量。

2. 根据权利要求1所述复合纤维驱动器的模量分析测试方法,其特征在于,所述纤维基体为具有导电性或具有导电涂层的尼龙纤维、涤纶纤维和碳纤维中的一种。

3. 根据权利要求1所述复合纤维驱动器的模量分析测试方法,其特征在于,所述聚合物基质为聚二甲基硅氧烷、环氧树脂和天然橡胶中的一种。

4. 根据权利要求3所述复合纤维驱动器的模量分析测试方法,其特征在于,所述聚合物基质的杨氏模量为0.1MPa-100MPa。

## 一种超螺旋状复合纤维驱动器的模量分析测试方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及柔性驱动器技术领域,特别涉及一种超螺旋状复合纤维驱动器的模量分析测试方法。

### 背景技术

[0002] 现有纤维的超螺旋线性驱动器因其广泛的应用,近年来已成为重要的研究领域,例如人造肌肉、智能机器人、假肢医疗、可变形的纺织品和能量收集等。与传统的电磁驱动器和气动驱动器相比,该驱动器柔软、轻巧、灵活,兼容性高,适用于多种尺度和广泛的应用环境。在其核心的驱动功能方面,目前已针对不同的纤维和基体材料及其体积比做了系列的实验,在等长、等重、等温的条件下得到了大量的测试数据,并由此进行改进和优化。另一方面,以弹簧刚度模型为代表的螺旋状空间结构的力学分析不适用于超螺旋各向异性的纤维复合材料。

[0003] 因此,现有技术还有待于改进和发展。

### 发明内容

[0004] 鉴于上述现有技术的不足,本发明的目的在于提供一种超螺旋状复合纤维驱动器的模量分析测试方法,旨在解决现有技术无法对超螺旋各向异形的纤维驱动器的模量进行准确测试和优化的问题。

[0005] 本发明的技术方案如下:

[0006] 一种复合纤维驱动器的模量分析测试方法,其中,包括步骤:

[0007] 将由纤维基体和聚合物基质构成的纱线加捻成一阶超螺旋结构,形成所述复合纤维驱动器;

[0008] 基于所述复合纤维驱动器的一阶超螺旋结构,构建模量数学模型:

$$K = \frac{\frac{[\sin 2(\alpha + \theta)]^2}{4} \left[ 1 - a_1 \left( \frac{T}{T_{1r}} \right) \right] E_{1r} A_1 + \left[ 1 - a_2 \left( \frac{T}{T_{2r}} \right) \right] G_{2r} A_2}{(\sin \alpha)^2}, \text{ 其中, } E_r \text{ 和 } G_r \text{ 分别为参}$$

考温度下的拉伸模量和剪切模量, $T_r$ 为参考温度, $a$ 为晶体材料的热力学表征系数, $A$ 为纱线的横截面积,公式中的下标1代表纤维基体,下标2代表聚合物基质, $\alpha$ 为一阶超螺旋结构状态下纱线与复合纤维驱动器横截面的夹角, $\theta$ 为一阶超螺旋结构状态下纤维基体与纱线横截面的夹角。

[0009] 根据所述模量数学模型获取所述复合纤维驱动器在动态温度下的模量。

[0010] 所述复合纤维驱动器的模量分析测试方法,其中,所述纤维基体为具有导电性或具有导电涂层的尼龙纤维、涤纶纤维和碳纤维中的一种。

[0011] 所述复合纤维驱动器的模量分析测试方法,其中,所述聚合物基质为聚二甲基硅氧烷、环氧树脂和天然橡胶中的一种。

[0012] 所述复合纤维驱动器的模量分析测试方法,其中,所述聚合物基质的杨氏模量为

0.1MPa-100MPa。

[0013] 有益效果:本发明提供的复合纤维驱动器的模量分析测试方法可以通过直接拍摄或观察这样的非接触测试,来完成对超螺旋状复合纤维驱动器的模量分析测试,从而为超螺旋状复合纤维驱动器的设计和优化提供指引;本发明方法可在较宽的温度范围内对复合纤维驱动器的模量进行分析测试,还可以选择纤维基体和聚合物基质材料的最佳热力学性质和比例的组合,以最大化各向异性。

### 附图说明

[0014] 图1为纤维基体和聚合物基质加捻前形成的平直的圆柱状的纱线示意图。

[0015] 图2为纤维基体和聚合物基质加捻后形成的单螺旋构型示意图。

[0016] 图3为纤维基体和聚合物基质形成单螺旋构型后继续加捻形成一阶超螺旋构型的示意图。

[0017] 图4为本发明实施例中超螺旋状复合纤维驱动器轴向拉力示意图。

[0018] 图5为本发明超螺旋状复合纤维驱动器中纱线剪切应力示意图。

### 具体实施方式

[0019] 本发明提供一种超螺旋状复合纤维驱动器的模量分析测试方法,为使本发明的目的、技术方案及效果更加清楚、明确,以下对本发明进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。

[0020] 本发明提供了一种超螺旋状复合纤维驱动器的模量分析测试方法,其包括步骤:

[0021] 将由纤维基体和聚合物基质构成的纱线加捻成一阶超螺旋结构,形成所述复合纤维驱动器;

[0022] 基于所述复合纤维驱动器的一阶超螺旋结构,构建模量数学模型:

$$K = \frac{\frac{[\sin 2(\alpha + \theta)]^2}{4} \left[ 1 - a_1 \left( \frac{T}{T_r} \right) \right] E_{1r} A_1 + \left[ 1 - a_2 \left( \frac{T}{T_r} \right) \right] G_{2r} A_2}{(\sin \alpha)^2}, \text{ 其中, } E_r \text{ 和 } G_r \text{ 分别为参}$$

考温度下的拉伸模量和剪切模量, $T_r$ 为参考温度, $a$ 为晶体材料的热力学表征系数, $A$ 为纱线的横截面积,公式中的下标1代表纤维基体,下标2代表聚合物基质, $\alpha$ 为一阶超螺旋结构状态下纱线与复合纤维驱动器横截面的夹角, $\theta$ 为一阶超螺旋结构状态下纤维基体与纱线横截面的夹角。

[0023] 根据所述模量数学模型获取所述复合纤维驱动器在动态温度下的模量。

[0024] 本发明提供的方法可以通过直接拍摄或观察这样的非接触测试,来完成对超螺旋状复合纤维驱动器的模量分析测试,从而为超螺旋状复合纤维驱动器的设计和优化提供指引;本发明方法可在较宽的温度范围内对复合纤维驱动器的模量进行分析测试,还可以选择纤维基体和聚合物基质材料的最佳热力学性质和比例的组合,以最大化各向异性。

[0025] 具体来讲,组成热驱动单元的纤维基体和聚合物基质均属于高分子材料,其机械模量随温度的升高而降低,并满足以下关系: $\frac{E}{E_r} = 1 - a \left( \frac{T}{T_r} \right)$ ,其中, $E$ 代表当前温度下的模

量,  $E_r$  为参考温度下的模量,  $T_r$  为参考温度,  $a$  为晶体材料的热力学表征系数。然而, 如果选取适合的纤维基体和聚合物基质材料按一定比例组合, 加捻后形成的超螺旋结构由于热加载下的各向异性以及空间几何的制约, 会出现与单一材料相反的热强化现象。

[0026] 下面通过具体实施例对本发明做进一步的解释说明:

[0027] 首先将纤维基体和聚合物基质按一定体积比结合, 形成如图1所示平直的圆柱状的纱线; 将该纱线加捻, 原先的平直纤维基体发生扭转, 形成单螺旋结构(如图2所示), 其中  $\theta$  为一阶超螺旋结构状态下纤维基体与纱线横截面的夹角,  $(\pi/2-\theta)$  为纱线的扭转角; 随着捻度增加, 扭转角增大,  $\theta$  减小, 且扭转应变能增加, 但纱线表面仍为圆柱状。当捻度达到一定程度时, 纱线维持圆柱表面的扭转所对应的变形能将超过纱线轴线的扭曲所消耗的能量。按最小能量原理, 纤维基体将停止在纱线内的扭转, 取而代之的是纱线轴线沿着加捻方向产生的扭曲, 形成一阶超螺旋结构(如图3所示), 即形成驱动器。此后, 纤维基体与纱线横截面的夹角  $\theta$  不再变化, 而纱线轴线的螺旋扭曲角继续增加, 与驱动器横截面的角度  $\alpha$  减小。这里略去了当捻度无限增加时驱动器轴线的扭曲可能产生的二阶超螺旋结构。从单螺旋到一阶超螺旋的转变取决于两者对应的变形能的大小, 当纱线的剪切刚度较大时, 临界  $\theta$  角也较大。

[0028] 实验显示, 当一阶超螺旋状的驱动器继续加捻时, 直径无明显增加, 纱线长度无明显变化, 但  $\alpha$  角减小, 且驱动器轴向长度收缩。由此可见, 在一阶超螺旋几何构型中, 纱线主要发生剪切变形而非伸缩变形, 并忽略弯曲变形的影响。

[0029] 基于此, 本发明截取表征纱线的直角三角形单元(如图4所示), 在沿驱动器轴向的拉力  $P$  作用下, 该直角三角形单元发生剪切变形, 对应的剪应力为:  $\tau = \frac{P \sin \alpha}{A/\tan \alpha}$ , 其中  $A$  为纱线的横截面积。

[0030] 由此产生的沿驱动器轴向的拉伸长度为:  $\Delta = \left( \frac{l}{\sin \alpha} \right) \gamma (\sin \alpha)^2 \cos \alpha$ , 其中,  $g$  为纱线剪应变,  $l$  为三角形单元沿驱动器轴向的长度分量。

[0031] 根据胡克定律, 驱动器的轴向拉应变为  $\varepsilon = \frac{\Delta}{l} = \gamma \sin \alpha \cos \alpha = \frac{\tau}{G} \sin \alpha \cos \alpha$ , 其中  $G$  为纱线剪切模量。

[0032] 结合上述三个关系, 驱动器的轴向拉伸模量可表达为:

$$K = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{P}{A/\sin \alpha}}{\frac{\tau}{G} \sin \alpha \cos \alpha} = \frac{G}{(\sin \alpha)^2}, \text{ 结果显示, 驱动器的机械模量取决于纱线的剪切}$$

模量  $G$  和超螺旋扭曲角度  $\alpha$ 。

[0033] 进一步考虑填充了基体材料的纱线正方形单元(如图5所示),  $\beta$  为纤维基体的倾斜角, 其剪切变形能主要来自纤维的拉伸和基体的剪切。由几何关系可得纤维的拉应变为:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l/\sin \beta} = \frac{\left( \frac{l}{\sin \beta} \right) \gamma (\sin \beta)^2 / \tan \beta}{l/\sin \beta} = \gamma \sin \beta \cos \beta。$$

[0034] 根据能量叠加法则,正方形纱线单元的剪切总能量为:

$$W = \frac{1}{2} G \gamma^2 V = \frac{1}{2} E_1 \varepsilon_1^2 V_1 + \frac{1}{2} G_2 \gamma^2 V_2, \text{ 其中下标1代表纤维基体,下标2代表聚合物基质, } V \text{ 为纱线单元总体积。}$$

[0035] 考虑到组分体积同比于横截面积,纱线单元的剪切模量可表征为:

$$G = (\sin\beta\cos\beta)^2 E_1 A_1 + G_2 A_2$$

[0037] 几何上, $\alpha$ 和 $\beta$ 的角度差即超螺旋状临界角度 $\theta$ ,将 $\beta = \alpha + \theta$ 代入,得到驱动器的轴向

$$\text{拉伸模量: } K = \frac{\frac{[\sin 2(\alpha + \theta)]^2}{4} E_1 A_1 + G_2 A_2}{(\sin \alpha)^2};$$

[0038] 最后代入各组分材料的模量随温度的变化,得到驱动器模量的完整表达式:

$$K = \frac{\frac{[\sin 2(\alpha + \theta)]^2}{4} \left[ 1 - a_1 \left( \frac{T}{T_{1r}} \right) \right] E_{1r} A_1 + \left[ 1 - a_2 \left( \frac{T}{T_{2r}} \right) \right] G_{2r} A_2}{(\sin \alpha)^2}。 \text{ 该模型定量地反映了组}$$

成驱动器的纤维基体和聚合物基质材料的机械性质及温度的影响,组分的体积比,和超螺旋扭曲角在空间几何上对驱动器宏观模量的影响。可以清楚地看到,随着捻度的增加,角度 $\alpha$ 的减小,宏观模量有增强的趋势。

[0039] 当温度上升时,如果纤维基体的热膨胀系数远低于聚合物基质材料,纱线将主要沿径向膨胀,令超螺旋结构在空间上更致密,导致 $\alpha$ 角减小,等效于机械加捻。当由这种各向异性的效果大于材料本身模量的降低时,驱动器的宏观模量就会增大,这就是热强化的原理。

[0040] 在一些实施方式中,所述纤维基体为具有导电性或具有导电涂层的尼龙纤维、涤纶纤维和碳纤维中的一种,但不限于此;所述聚合物基质为聚二甲基硅氧烷、环氧树脂和天然橡胶中的一种,但不限于此。

[0041] 在一些实施方式中,所述聚合物基质的杨氏模量为0.1MPa-100MPa。

[0042] 作为举例,选取PI纤维和PDMS基质材料,体积占比分别为32.2% (A1) 和67.8% (A2)。PI纤维的拉伸模量从-50℃时的7787MPa下降到150℃时的1151MPa,而PDMS基质的拉伸模量从20℃时的2MPa下降到180℃时的0.2MPa,推算出两种材料对应的系数 $a_1$ 和 $a_2$ 。考虑PDMS的泊松比约0.35,可估算出PDMS的剪切模量。另外,超螺旋对应的临界 $\theta$ 角和热加载下由于各向异性产生的 $\alpha$ 角可通过实验照片观测。不同温度对应的关键参数如表1所示。

[0043] 表1不同温度对应的关键参数

	$T$	$\alpha$ (deg)	$\theta$ (deg)	$E_1$ (MPa)	$G_2$ (MPa)	$A_1$	$A_2$	$K$ (N/100%)
[0044]	20℃	58.5 ± 1.5	30	5398	0.732	0.32	0.67	0.67 ~ 5.67
					4			
	100℃	54.5 ± 1.5		2810	0.407	2	8	5.33 ~ 16.7
					4			

[0045] 代入理论模型得到该驱动器在20℃和100℃时的拉力与应变的变化范围。考虑到关键参数的估计误差,尤其是通过图片进行角度测量的误差,理论范围的上下限虽有较大的差异,但与实验结果比较,仍合理地预测了机械模量随温度变化的趋势,且涵盖了实验曲线的范围。在合理的误差范围内,该分析测试方法能有效地设计并优化超螺旋状纤维复合材料的机械模量以及基于此原理的热驱动器的性能。

[0046] 应当理解的是,本发明的应用不限于上述的举例,对本领域普通技术人员来说,可以根据上述说明加以改进或变换,所有这些改进和变换都应属于本发明所附权利要求的保护范围。



图1

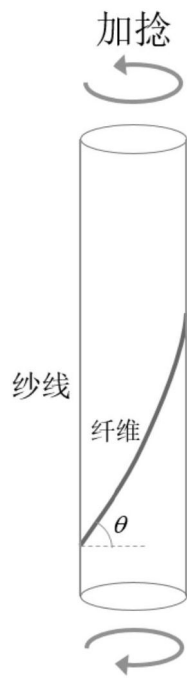


图2



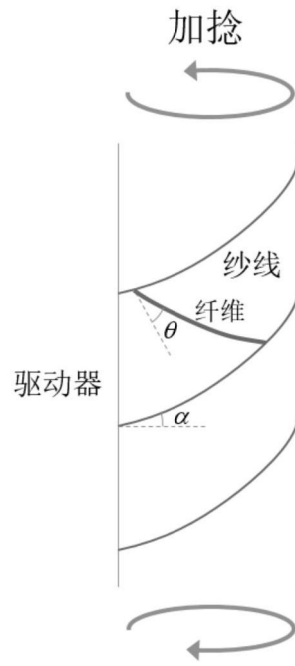


图3

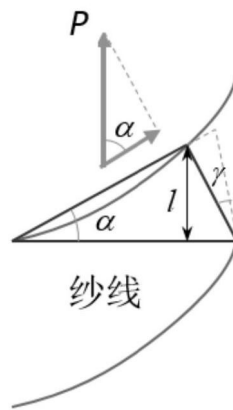


图4

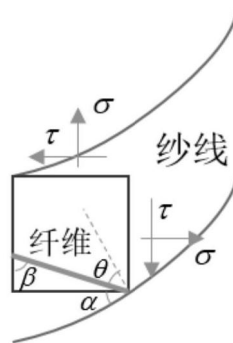


图5