

文章编号 1004-924X(2017)02-0385-09

碳纤维带状弹簧的特性计算及实验

左玉弟^{1,2*}, 李宗轩¹, 谢晓光¹, 金光¹, 解鹏¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100059)

摘要:针对空间展开机构轻量化、小型化、简单化等的发展需求,通过理论分析实例设计了碳纤维带状弹簧,并结合有限元模拟及实验对其屈曲特性进行了研究。首先,根据薄壳弯曲理论推导了各向异性材料下碳纤维带状弹簧的弯矩计算公式,并分析了影响其屈曲特性的敏感参数;然后,针对工程需要进行了单根碳纤维带状弹簧的实例设计,并建立了其有限元分析模型,得出了其弯矩-转角曲线;最后,加工出了碳纤维带状弹簧实物并对其屈曲过程进行了实验研究。结果表明:实验测得的该碳纤维带状弹簧的临界弯矩值为 1 237.6 Nmm,与理论分析及有限元模拟结果符合的较好,最大误差为 8.7%,验证了理论分析及有限元模拟的准确性及一致性,为之后碳纤维带状弹簧的设计及应用提供了理论依据及技术支持。

关键词:空间展开机构;带状弹簧;碳纤维;屈曲;有限元模型;弯矩

中图分类号:TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172402.0385

Characteristic calculation and experiment of CFRP lenticular tape spring

ZUO Yu-di^{1,2*}, LI Zong-xuan¹, XIE Xiao-guang¹, JIN Guang¹, XIE Peng¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100059, China*)

** Corresponding author, E-mail: zuoyd1809@163.com*

Abstract: Subject to space development requirements such as lightweight, miniaturization and simplification, the carbon fibre reinforced plastic (CFRP) lenticular tape spring (LTS) was practically designed through theoretical analysis, and its buckling characteristics was studied by combining finite element analysis and experiments. The bending moment computing formula for CFRP LTS under different anisotropic materials was deduced according to bending theory of thin shells, and the sensitive parameters that affect LTS's buckling characteristics were analyzed. Secondly, subject to engineering needs, a practical design on single CFRP LTS was performed and the finite element model was established to obtain the bending moment-rotation angle curves. Finally, the real object of CFRP LTS was fabricated and an experiment was conducted to study its buckling process. The results show that the

收稿日期:2016-05-09;修订日期:2016-07-21.

基金项目:国家高技术研究发展计划资助项目(No. 2015AA7015090)

critical bending moment of such CFRP LTS is 1 237.6 Nmm and the maximum error is 8.7%, which is much corresponding to theoretical analysis and the results of finite element simulation, such results verifies the accuracy and compliance of the theoretical analysis and finite element simulation, provides theoretical foundations and technical supports for subsequent design and application of CFRP LTS.

Key words: Space deployable structures; lenticular tape springs; carbon fibrereinforced plastic; buckling; finite element model; bending moment;

1 引言

带状弹簧因具有良好的工程特性而被广泛关注,带状弹簧作为一种单层开口柱面壳构件,外形呈现具有弧形横截面的薄壁直带状。基于带状弹簧的展开机构质量轻,构造简单,折叠效率高,没有机械关节,能可靠展开并自行锁定^[1,2]。传统的金属带状弹簧一般由铍-铜合金或奥氏不锈钢带加工成型并配合特殊的热处理工艺而达到最终的使用要求,已被广泛应用于航天器的各种展开机构中^[3,4,5],但随着现代空间展开机构的轻量化、简单化、批量化等要求,基于碳纤维材料的带状弹簧因具有属性可控、质量轻、线胀系数低等优点^[6,7]而逐渐取代金属带状弹簧并成为国内外研究的热点。

英国 DSL 实验室 S. Pellegrino 等人设计了一种基于带状弹簧的旋转铰链(TSR),结合实验对其展开特性进行了研究^[8];美国 Kentucky 大学 Jonathan T. Black 等人提出了采用 3 根碳纤维复合材料带状弹簧对卡塞格林型望远镜的次镜进行支撑的方案^[9],证明了碳纤维带状弹簧能够较好地提供结构展开时所需的驱动力;土耳其 Omer Soykasap 等人研究了金属带状弹簧的不同角度对展开力矩的影响^[10],并提供了一种测量带状弹簧弯矩的方法;英国南安普顿大学 Walker 等人对金属材料带状弹簧成角度弯曲特性进行了分析^[11],研究了带状弹簧在沿其长度方向发生屈曲及扭转变形时的弯矩变化情况;国内方面,浙江大学王俊等人分析了单根卷尺弹簧的展开特性,并在此基础上设计了新型铰链^[12];南京电子技术研究所魏玉卿,尚仰宏对等人单根卷尺带状弹簧的弯曲过程进行了有限元分析,研究了弹簧正向折叠和反向折叠的弯曲过程,分析了厚度和横截面圆心角对应变能和弯矩的影响规律^[13]。

上述大都是分析研究各向同性材料下金属带

状弹簧的屈曲特性,对各向异性材料下碳纤维带状弹簧的屈曲特性并不完全适用。

本文采用薄壳弯曲理论推导了各向异性材料下碳纤维带状弹簧的弯矩计算公式,并进行了实例设计,通过有限元分析和实验测量的方法研究了碳纤维带状弹簧的屈曲特性,验证了分析与设计过程的准确性。

2 带状弹簧屈曲特性的理论分析

2.1 碳纤维带状弹簧的材料属性

碳纤维带状弹簧在屈曲过程中会产生沿其长度方向的大屈曲变形,还会伴随小幅度的横向变形,导致其主要承受的是沿长度方向的轴向拉伸或压缩载荷,并伴随有一定的横向载荷,而碳纤维材料铺层的设计方向一般依据其承受的载荷来确定。通常,0°铺层用来承受轴向载荷,正负 45°铺层用于承受剪切载荷,90°铺层则承受横向载荷和控制泊松比,其不同铺层方式的示意图如图 1 所示。因此碳纤维带状弹簧采用(即图 1(a)与图 1(c)结

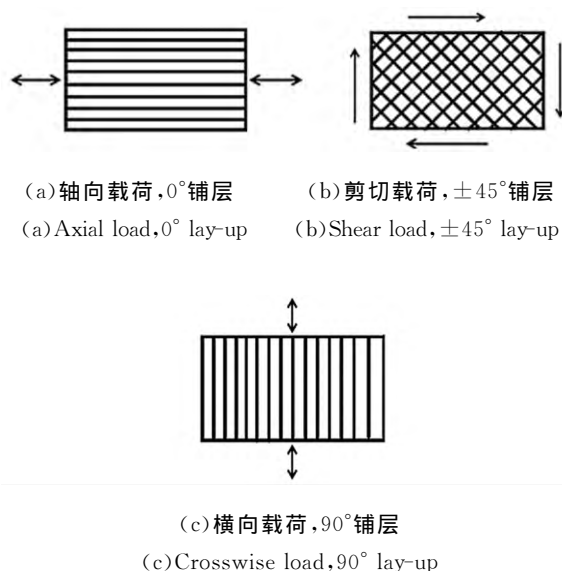


图 1 碳纤维材料的铺层方式
Fig. 1 Ply lay-up styles of CFRP

合)的铺层方式,以使其更有效的承受屈曲过程中所产生的轴向及横向载荷。

碳纤维带状弹簧由 M40 碳纤维布及环氧胶通过模具缠绕固化而成型。M40 碳纤维布的夸张视图如图 2 所示,其纤维体积含量高达 60%,它是由多根纤维束配合环氧胶相互正交穿插而成,这种纤维铺层方式不仅使得碳纤维材料的属性匀称,而且使其具有合理的多孔结构及较好的稳定性,能更好的承受碳纤维带状弹簧屈曲过程中所产生的载荷,且以此加工出的带状弹簧不但重量轻、比刚度高,还可以通过不同的环氧胶来调节其线胀系数及弹性模量,加工工艺可控^[14],相对于其他材料具有较大的优势。

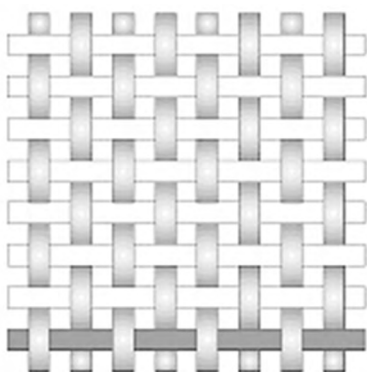


图 2 M40 碳纤维布示意图

Fig. 2 Schematic of M40 plain-weave style

与碳纤维带状弹簧力学特性相关的材料属性包括其弹性模量 E 和泊松比 μ ,碳纤维带状弹簧为二维正交 $[0^\circ, 90^\circ]$ 铺层方式,其材料属性如表 1 所示。

表 1 材料属性
Tab. 1 Material properties

材料	弹性模量 (Gpa)	剪切模量 (Gpa)	泊松比	延伸率 /%	密度 (g/cm)
M40JB	60	6.2	0.3	2.0	1.78

2.2 带状弹簧的几何参数

带状弹簧的几何形状为具有一定长度的开口柱面壳构件,其各项几何参数包括其铺层厚度 t ,截面圆半径 R ,圆心角 θ 以及长度 L ,这些几何参数都会影响带状弹簧的力学性能,其尺寸参数及折叠形式如图 3 所示。

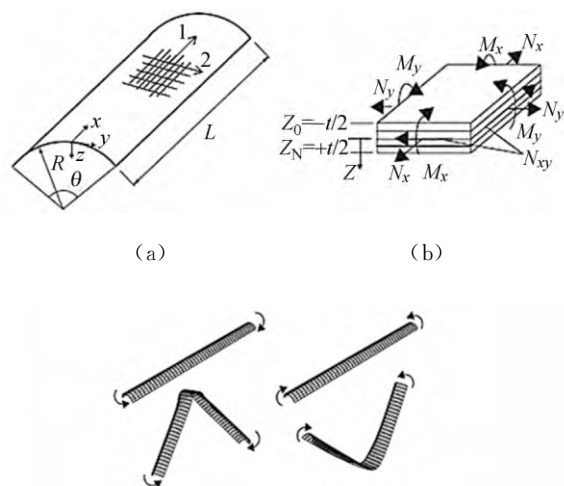


图 3 带状弹簧的几何参数及正向(图 c 左)、反向(图 c 右)折叠形式

Fig. 3 Geometrical parameters of lenticular tape spring and its folding types

2.3 理论分析

带状弹簧的正向屈曲与反向屈曲特性具有较大差异。当带状弹簧受到反向弯矩作用时,它在最初阶段会表现出较高的刚度,当外界弯矩达到临界弯矩 $M_+^{\max}$ 后,其刚度会急剧降低并发生屈曲变形,且弯矩会最终稳定到其稳态弯矩值 M_+^* ;当带状弹簧受到正向弯矩作用时,只需较小的弯矩就可以使其发生屈曲变形,支撑刚度较低,并最终达到其稳态弯矩值 M_-^* ,其弯矩-转角示意如图 4 所示。因此带状弹簧在反向屈曲过程中表现出的性能更加符合空间展开机构所需的展开动力学特性^[10],着重对带状弹簧的反向屈曲特性进行研究。

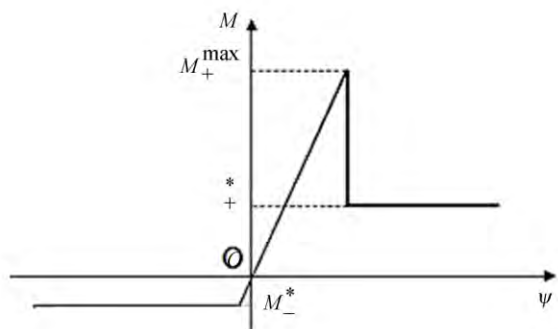


图 4 单根带状弹簧弯矩-转角示意图

Fig. 4 Schematic moment-rotation behavior of a tape spring

Wuest 通过测量带状弹簧的反向屈曲力矩,

得出了各向同性材料时单根带状弹簧的反向弯曲曲率与弯矩之间的曲线关系,并经过积分最终得出了相应的弯矩公式^[15],但碳纤维带状弹簧是由多层碳布按照一定的排布方向缠绕而成,它是各向异性材料,其材料的分层定义如图 3(b)所示,因此 Wuest 所得出的弯矩公式对于本文中的碳纤维带状弹簧并不适用,需要做进一步的推导。

根据薄壳弯曲理论^[16-18]可知壳体在压力与张力共同作用下的本构方程为:

$$\begin{Bmatrix} N \\ \dots \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & \vdots & b \\ \dots & & \dots \\ B & \vdots & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon^0 \\ \dots \\ k \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

其中: A 为延展刚度矩阵, D 为弯曲刚度矩阵。为简化起见,忽略矩阵 A 中的非对角线元素并假设矩阵 B 为 0,则可得出带状弹簧在反向二维屈曲过程中单位长度上弯矩随曲率 k_x, k_y (其中 $k_{xy} = 0$) 的变化关系为:

$$M_x = D_{11}k_x + D_{12}k_y, \quad (2)$$

$$M_y = D_{12}k_x + D_{22}k_y, \quad (3)$$

其中: k_x, k_y 分别为带状弹簧在屈曲过程中沿两个方向的曲率变化,假设壳体弯曲后其沿长度方向的曲率从 0 变化为 $1/r$,则有:

$$k_x = \frac{1}{r}, \quad (4)$$

$$k_y = \frac{1}{R} - \frac{d^2 w}{dy^2}, \quad (5)$$

其中: w 为带状弹簧沿 z 方向的平面外挠曲,将(4)和(5)分别代入式(2)和(3),可得:

$$M_x = D_{11} \frac{1}{r} + D_{12} \left(\frac{1}{R} - \frac{d^2 w}{dy^2} \right), \quad (6)$$

$$M_y = D_{12} \frac{1}{r} + D_{22} \left(\frac{1}{R} - \frac{d^2 w}{dy^2} \right), \quad (7)$$

由微分平衡方程可得:

$$\frac{d^2 M_y}{dy^2} - \frac{N_x}{r} = 0, \quad (8)$$

$$N_x = \frac{-A_{11} w}{r}, \quad (9)$$

其中: N_x 为带状弹簧单位长度上的法向力,将式(8)和(9)代入式(7),则可得出一个四阶常微分方程:

$$\frac{d^4 w}{dy^4} + \frac{r n^4 w}{r^4} = 0, \quad (10)$$

其中: $n = \sqrt[4]{A_{11}/(4D_{22}r^2)}$,通过使用双曲线函数与三角函数相乘可以得到式(10)的解:

$$w = c_1 \cosh \frac{ny}{r} \cos \frac{ny}{r} + c_2 \sinh \frac{ny}{r} \sin \frac{ny}{r}, \quad (11)$$

其中: $y = \pm s/2$, $s = 2R \sin(\theta/2)$ 为带状弹簧的宽度,且 c_1 和 c_2 是常量:

$$c_{1,2} = \mp \frac{r^2}{2n^2} \left(\frac{1}{R} + \mu k_x \right) \frac{\cosh \frac{ns}{2r} \sin \frac{ns}{2r} \mp \sinh \frac{ns}{2r} \cos \frac{ns}{2r}}{\cosh \frac{ns}{2r} \sinh \frac{ns}{2r} + \cos \frac{ns}{2r} \sin \frac{ns}{2r}}, \quad (12)$$

其中: $\mu = D_{12}/D_{22}$,则单根带状弹簧在反向屈曲过程中的弯矩 M 可通过积分得出:

$$M = \int_{-s/2}^{s/2} (M_x - N_x w) dy = s D_{11}$$

$$\left(k_x + \frac{\mu}{R} - \mu \left(\frac{1}{R} + \mu k_x \right) F_1 + \frac{1}{k_x} \left(\frac{1}{R} + \mu k_x \right)^2 F_2 \right), \quad (13)$$

其中: M_x 和 N_x 分别对应单位长度的弯矩和法向力; w 为平面外挠曲, y 为带状弹簧的纵向长度; k_x 为纵向弯曲曲率; F_1 和 F_2 可从式(14)计算得到:

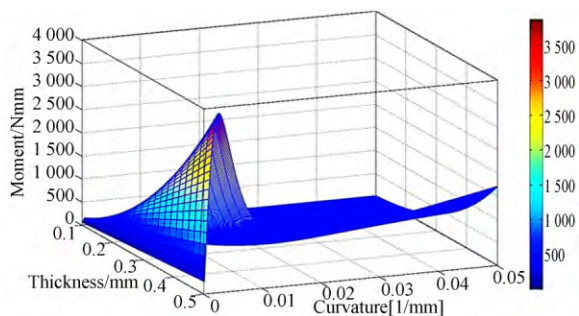
$$F_1 = \frac{2 \cosh \lambda - \cos \lambda}{\lambda \lambda \sinh \lambda + \sin \lambda}, F_2 = \frac{F_1}{4} - \frac{\sin h \lambda \sin \lambda}{(\sin h \lambda + \sin \lambda)^2}, \quad (14)$$

其中: $\lambda = ns/r = \sqrt[4]{3(1-\mu^2)} s / \sqrt{t/k_x}$, $M_+^{\max}$ 为式(13)的最大值,也是单根带状弹簧的临界弯矩,它体现了单根带状弹簧展开并自锁后抗干扰的能力(即支撑刚度), $M_+^{\max}$ 值越大,抗干扰的能力就越强,其支撑刚度就越大^[19]。

式(13)为单根带状弹簧在反向屈曲过程中的弯矩计算公式,它反映了带状弹簧在整个屈曲过程中的弯矩变化趋势。由式(13)可以看出,带状弹簧的屈曲特性取决于它所用的材料及其几何参数。由于碳纤维带状弹簧采用二维正交铺层方式,它是由多层碳布相互叠加缠绕而成,且 $E_1 = E_2$,因此所有铺层的延伸刚度及弯曲刚度等都相同,即 $A_{11} = A_{22}$, $D_{11} = D_{22}$,其部分材料属性如表 1 所示。而带状弹簧的重要几何参数为其铺层厚度与截面圆心角 θ ,为了分别研究这两个参数对碳纤维带状弹簧屈曲特性的影响及其敏感程度,下文采用单变量法进行分析。

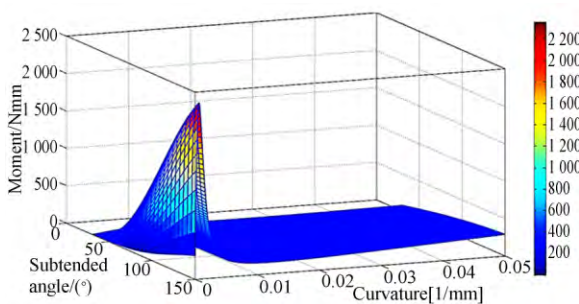
分析时设定碳纤维带状弹簧的截面半径 $R = 20$ mm,则在其截面圆心角 θ 为 90° 时,不同铺层厚度下其弯矩与弯曲曲率的关系曲线如图 5(a)所示;同样地,在碳纤维带状弹簧的铺层厚度 t 为

0.25 mm 时,不同圆心角 θ 下其弯矩与弯曲曲率的关系曲线如图 5(b) 所示。



(a) 不同厚度下弯矩-曲率曲线

(a) Moment-curvature graph under different thickness



(b) 不同圆心角下弯矩-曲率曲线

(b) Moment-curvature graph under different subtended angles

图5 带状弹簧弯矩-曲率曲线

Fig. 5 Lenticular tape spring's moment-curvature graphs

由图 5 可知:(1)在截面圆心角 θ (或铺层厚度 t) 为定量的情况下,随着碳纤维带状弹簧铺层厚度 t (或截面圆心角 θ) 的增加,其临界弯矩 $M_+^{\max}$ 明显变大,即支撑刚度增加,其最终的稳态弯矩值 M_+^* 也随之增大,铺层厚度 t 对带状弹簧的弯矩影响更明显;(2)对于单根碳纤维带状弹簧,随着弯曲曲率的增大,在起始阶段,其弯矩剧烈增加,在达到临界弯矩 $M_+^{\max}$ 后,其弯矩逐渐稳定在稳态弯矩值 M_+^* 左右。

为了验证上述理论推导的正确性,并结合实际工程应用中某空间展开机构的需求,进行了单根碳纤维带状弹簧的实例设计,并对其屈曲特性进行了有限元分析及实验研究。

其中,某空间展开机构要求单根碳纤维带状弹簧的长度为 180 mm,能够重复实现反向 180° 屈曲且其支撑刚度即临界弯矩值大于 1 000 Nmm。则根据上述理论分析结果可确定实例设

计中单根碳纤维带状弹簧的尺寸参数,其参数如表 2 所示。

表2 带状弹簧的几何尺寸

Tab. 2 Geometry of the lenticular tape spring

参数	数据
长度 L/mm	180
截面圆半径 R/mm	20
截面圆心角 $\theta/(\circ)$	90
铺层厚度 t/mm	0.3

根据理论分析可得出该碳纤维带状弹簧的弯矩-曲率曲线如图 6 所示,其临界弯矩值 $M_+^{\max}$ 为 1 356 Nmm,具有较高的支撑刚度,且它在达到临界弯矩前近似于锁定状态,在达到临界弯矩后发生屈曲变形,刚度迅速下降,并最终达到其稳态弯矩值,有利于某空间展开机构中所需的动力学特性。

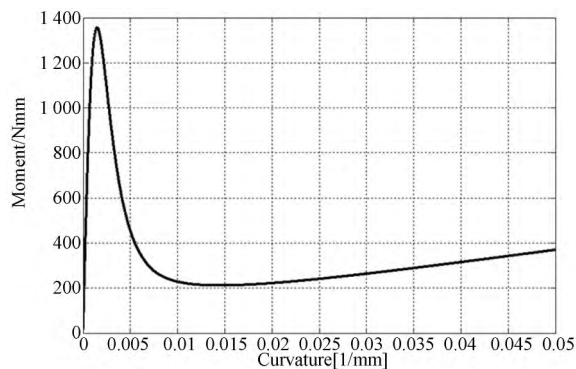


图6 实例设计的碳纤维带状弹簧弯矩-曲率曲线

Fig. 6 Moment-curvature graph of the designed CFRP lenticular tape spring

3 有限元分析

在确定了单根碳纤维带状弹簧的材料属性及尺寸参数后,使用 ABAQUS 软件建立了其有限元模型并对其反向屈曲过程进行模拟,整个模型采用壳单元 S4R5,该单元为 4 节点缩减积分单元,单元上的每个节点处有 5 个自由度,适用于分析小应变大变形问题。为了方便施加载荷和约束,带状弹簧两端面的形心节点分别用 MPC 连接,MPC 类型选用 RBE2 刚性单元,可限制节点的 6 个自由度^[21],其模型如图 7 所示。

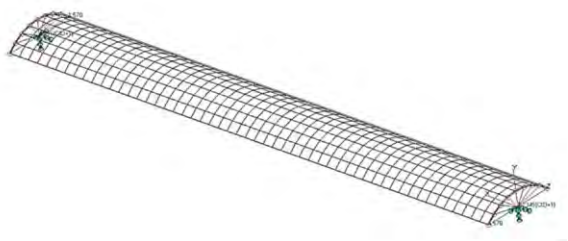


图 7 单根碳纤维带状弹簧的有限元模型

Fig. 7 CFRP lenticular tape spring's finite element model

参照碳纤维带状弹簧的各项材料参数及几何尺寸,在有限元模型中定义其材料属性及铺层方式,并模拟其在铺层厚度为 0.3 mm,截面圆心角为 90° 时的反向屈曲过程,得出其弯矩-转角曲线如图 8 所示。

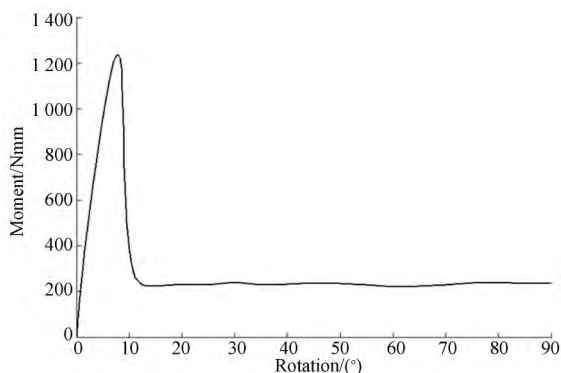


图 8 碳纤维带状弹簧弯矩-转角曲线

Fig. 8 Moment-rotation graph of CFRP lenticular tape spring through FEA

由图 8 可知,该碳纤维带状弹簧在转角为 7.9° 时达到最大弯矩 $M_+^{\max} = 1276.5 \text{ Nmm}$ 。由图 6 可知,该带状弹簧在弯曲曲率为 0.002 mm^{-1} 时达到最大弯矩 $M_+^{\max} = 1356 \text{ Nmm}$ 。对比两条曲线可以看出,该碳纤维带状弹簧在整个反向屈曲过程中的弯矩变化趋势一致,且有限元模拟出的最大弯矩值 $M_+^{\max}$ 与理论分析出的结果相符,其误差约为 5.9%。

4 单根带状弹簧的试验研究

4.1 带状弹簧的弯矩测量

为进一步验证有限元仿真与理论分析的准确性及一致性,加工了相应的碳纤维带状弹簧实物并对其进行实验研究。该碳纤维带状弹簧是由两层 M40 碳布及环氧胶通过模具缠绕固化而成,

它采用 $[0^\circ, 90^\circ]$ 2 铺层方式,如图 9 所示。

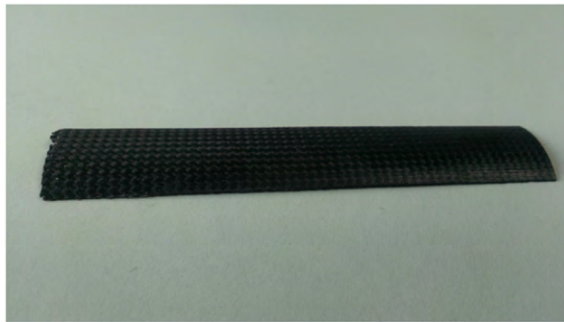
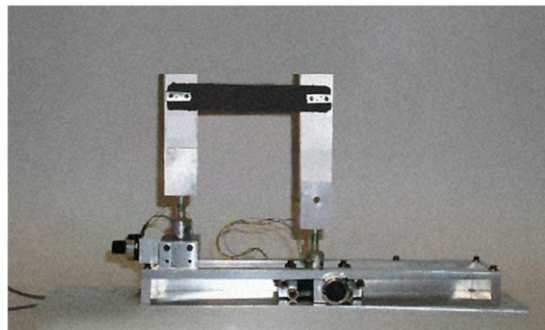


图 9 基于 CFRP 材料的带状弹簧

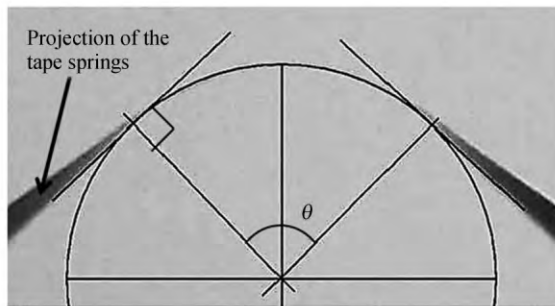
Fig. 9 Lenticular tape spring made of the CFRP material

在进行实验研究时,采用实验室常用的扭矩测量仪(图 10(a))来测量该碳纤维带状弹簧在反向屈曲过程中的弯矩随转角变化情况,并用投影法(图 10(b))来测量其在反向屈曲过程中的曲率随转角变化情况。



(a) 扭矩测量仪

(a) Moment test rig



(b) 带状弹簧弯曲曲率与转角测量

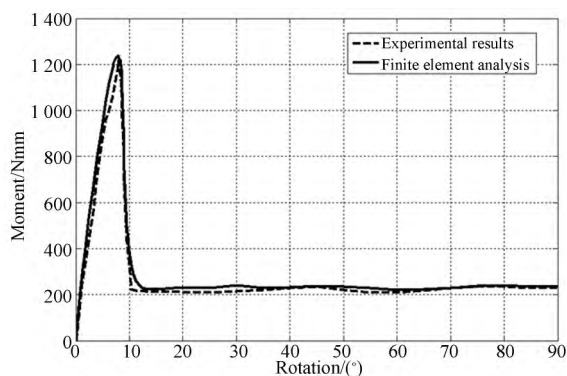
(b) Measurement of bend curvature and rotation

图 10 曲率随转角变化情况

Fig. 10 Measurement of curvature and rotation

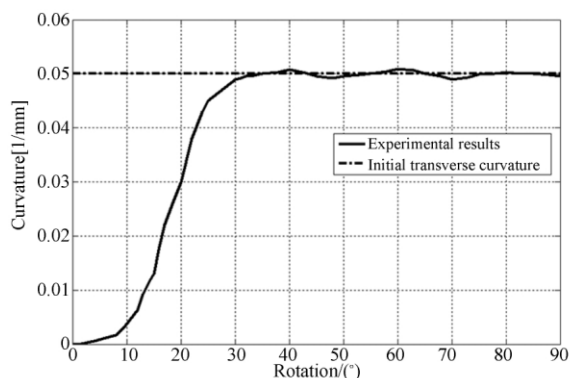
实验过程中,记录扭矩测量仪所测得的扭矩及转角数据并将其输入到 Matlab 中进行拟合,则

可得到该碳纤维带状弹簧在反向屈曲过程中的弯矩-转角曲线(图 11(a));同样地,通过投影法多次测量该碳纤维带状弹簧的转角并计算其对应的曲率,将所得到的数据求均值后进行拟合,则可得到其弯曲曲率与转角之间的关系曲线(图 11(b))。



(a)碳纤维带状弹簧的弯矩-转角曲线

(a) CFRP lenticular tape spring's moment-rotation graph



(b)碳纤维带状弹簧的弯曲曲率-转角曲线

(b) CFRP lenticular tape spring's curvature-rotation graph

图 11 测试结果

Fig. 11 Measurement result

通过图 11 所示曲线可知:(1)实验测得的弯矩-转角曲线(图 11(a))与有限元模拟出的弯矩-转角曲线一致,且实验测量当碳纤维带状弹簧的转角为 8° 左右时,其弯矩达到最大值 $1\,237.6\text{ Nmm}$,与理论分析及有限元模拟结果相符,体现了带状弹簧展开后的支撑刚度及抗外界干扰的能力。(2)当带状弹簧的转角逐渐增大时,在初始阶段,其弯曲曲率变化明显,即当带状弹簧的转角逐渐达到 8° (其曲率约为 0.002 mm^{-1}) 之后,其弯曲曲率开始显著增加,最终稳定在其初始截面曲

率值 $1/R=0.05\text{ mm}^{-1}$ 附近。

将图 11(b)中的弯曲曲率-转角曲线与图 11(a)中的弯矩-转角曲线拟合,可以得出该碳纤维带状弹簧在实验条件下的弯矩-曲率曲线,如图 12 所示。

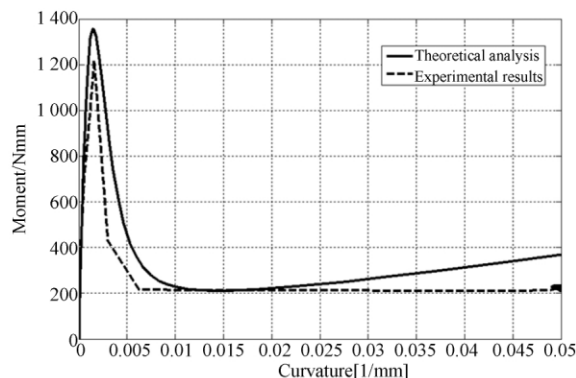


图 12 碳纤维带状弹簧弯矩-曲率曲线

Fig. 12 CFRP lenticular tape spring's moment-curvature graph

由图 12 可知:实验条件下该碳纤维带状弹簧的弯矩-曲率曲线与理论分析出的弯矩-曲率曲线一致,且当其弯曲曲率达到 0.002 mm^{-1} 左右时,其弯矩值达到最大值 $M_{+}^{\max}=1\,237.6\text{ Nmm}$,与理论分析及有限元模拟的结果符合较好,其最大相对误差为 8.7% 。通过上述实验研究进一步验证了之前理论分析及有限元模拟的正确性及一致性。

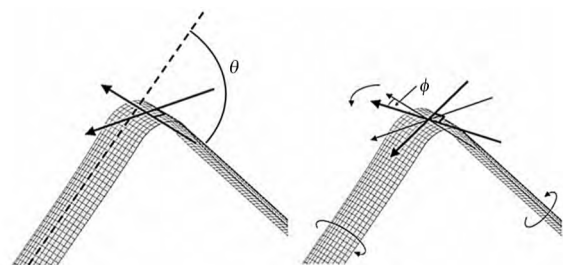
4.2 误差分析

由上述研究可知:理论设计值、有限元模拟值与实验测量的临界弯矩值之间的最大相对误差为 8.7% 。有必要对理论分析、有限元模拟与实验测量过程中的误差源进行分析。

(1)有限元模拟过程中的误差主要有:有限元计算程序是通过对连续体的离散近似来求解的,求解精度受有限元网格的质量、程序算法等因素影响;在建立有限元模型时,设定的边界条件、施加的外界载荷与输入的材料物理参数等因素的不准确性会对求解精度造成影响^[22]。

(2)实验测量过程中的误差为:实验测量过程中的误差主要有仪器误差及操作者人为误差。在实验测量过程中,带状弹簧在沿其长度方向发生屈曲变形的同时,也会产生沿该方向的扭转变形(图 13(b)),这就会导致扭矩测量仪测出的数值不是纯弯矩值,而在理论分析及有限元仿真时带

状弹簧则为理想状态下的屈曲变形即未产生沿长度方向的扭转变形(图 13(a)),因此实验测量值比理论分析及有限元模拟出的纯弯矩数值小,进而产生误差;且在进行弯曲曲率与转角的测量时,由于操作者肉眼判断、投影制图及近似计算等因素的影响,也会导致不可避免的误差。



(a)理论分析及有限元仿真 (b)实验过程中的屈曲行为时的屈曲行为

(a)Buckling behavior of simulation (b)Buckling behavior of experiment

图 13 碳纤维带状弹簧的屈曲行为

Fig. 13 Buckling behavior of CFRP lenticular tape spring

参考文献:

- [1] SEFFEN K A, PELLEGRINO S. Deployment dynamics of tape springs[C]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1999, 455: 1003-1048.
- [2] 李闯, 王伟, 樊学武. 基于带状弹簧的空间望远镜精密展开技术进展[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(2): 86-90.
LI CH, WANG W, FAN X W. Advance in precision deployment techniques for space telescopes based on tape springs[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(2): 86-90.
- [3] EIGENMANN M, SCHMALBACH M, SCHILLER M, et al.. Ultra-Light deployment Mechanism (UDM) for sectioned large deployable antenna reflectors[C]. *14th European Space Mechanisms & Tribology Symposium-ESMATS 2011, Constance, Germany*, 2011.
- [4] KWAK M K, HEO S. Development of multi-purpose satellite II with deployable solar arrays: Part I. Dynamic modeling[J]. *Korean Soc. Aeronaut. Space Sci.*, 2003, 31(9): 38-45.
- [5] HEO S, KWAK M K, et al.. Development of multi-purpose satellite II with deployable solar arrays: Part II. Ground deployment experiments[J]. *Korean Soc. Aeronaut. Space Sci.*, 2003, 31(9): 82-87.
- [6] 安源, 贾学志, 张雷, 等. 基于碳纤维复合材料的空间相机高比刚度主承力板优化设计[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(2): 416-422.
AN Y, JIA X ZH, ZHANG L, et al.. Optimizing design of CFRP based main backbone with high stiffness ratio for space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 416-422.
- [7] 张雷, 姚劲松, 贾学志, 等. 同轴空间相机碳纤维复合材料桁架结构的研制[J]. *光学 精密工程*, 2012, 20(9): 1968-1973.
ZHANG L, YAO J S, JIA X ZH, et al.. Development of trusses made of Carbon fiber composites for coaxial space remote sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 1968-1973.
- [8] PELLEGRINO S, GREEN C, GUEST, et al.. SAR Advanced Deployable Structure [D]. Department of Engineering, University of Cambridge, 2000: 26-39.
- [9] BLACK J T, WHETZAL J A, DEBLONK B J, et al.. Deployment repeatability testing of composite tapesprings for space optics applications[C]. *Collection of Technical Papers-AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and-*

5 结 论

本文根据薄壳弯曲理论推导了各向异性材料下碳纤维带状弹簧的弯矩计算公式,通过公式可以得出影响碳纤维带状弹簧屈曲特性的敏感参数并预估其在反向屈曲过程中的弯矩变化趋势及临界弯矩值;之后,根据实际工程应用中某空间展开机构的要求进行了碳纤维带状弹簧的实例设计,并对实例设计出的带状弹簧进行了有限元分析;最后,加工了碳纤维带状弹簧实物,并对其屈曲过程进行了实验研究。结果表明:实例设计的碳纤维带状弹簧的临界弯矩值为 1 237.6 Nmm,能够达到设计要求,与有限元模拟、理论分析结果符合的较好,其最大相对误差为 8.7%,并对有限元模拟及实验测量过程中的误差产生原因进行了分析讨论。通过实验研究验证了理论分析与有限元建模的正确性及一致性,对碳纤维带状弹簧的设计及应用具有参考价值。

- Materials Conference*, 2006.
- [10] OMER S. Analysis of tape spring hinges[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2007, 49: 853-860.
- [11] WALKER S J I, AGLIETTI G S. A study of tape spring fold curvature for space deployable structures [J]. *Proc. IMechE*, 2007, 221: 313-325.
- [12] 王俊, 关富玲, 周志刚. 空间可展结构卷尺铰链的设计与分析[J]. *宇航学报*, 2007, 28(3): 821-726.
- WANG J, GUAN F L, ZHOU ZH G. Design and analysis of tape hinge for deployable structures[J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(3): 721-726.
- [13] 魏玉卿, 尚仰宏. 空间铰链用卷尺弹簧弯曲过程的有限元分析[J]. *电子机械工程*, 2011, 27(1): 29-32.
- WEI Y Q, SHANG Y H. Finite element analysis on bending processes of the tape spring used in space hinges [J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2011, 27(1): 29-32.
- [14] 林再文, 刘永琪, 梁岩, 等. 碳纤维增强复合材料在空间光学结构中的应用[J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(8): 1181-1185.
- LIN Z W, LIU Y Q, LIANG Y, *et al.*. Application of carbon fibre reinforced composite to space optical structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1181-1185.
- [15] WUEST W. Einige anwendungen der theorie der zylinderschale [J]. *Zeitschrift fur Angewandte Mathematik and Mechanik*, 1954, 34: 444-454.
- [16] 姚小虎, 陈达, 孙玉刚, 等. 耦合场中小尺寸碳纳米管的组合扭转屈曲行为[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(8): 2031-2037.
- YAO X H, CHEN D, SUN Y G, *et al.*. Combined torsional buckling of small size carbon nanotubes in multi-field coupling [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(8): 2031-2037.
- [17] 翁智远, 王远功. 弹性薄壳理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1986.
- WONG ZH Y, WANG Y G. *Elastic Theory on Thin Shell* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1986.
- [18] 李红, 叶全红, 韩邦成. 磁悬浮反作用飞轮密封罩结构的优化设计[J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(10): 1571-1576.
- LI H, YE Q H, HAN B CH, *et al.*. Optimization design of sealed cowling structure for magnetic bearing reaction flywheel [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1571-1576.
- [19] 郭金生. 敏捷小卫星太阳帆板支撑结构优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士论文, 2014.
- GUO J SH. *Optimized Design of Auxiliary Support For Agile Satellite Solar Panel* [D]. Harbin: Graduate of Harbin Institute of technology, 2014.
- [20] BRYAN D. Estvanko. *Numerical Analysis of A Tape Spring Hinge Folded about Two Axes* [D]. The University of New Mexico Albuquerque, New Mexico, 2011: 33-37.
- [21] 李宗轩, 张雷, 姚劲松, 等. Cartwheel 型双轴柔性铰链设计[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(9): 2317-2324.
- LI Z X, ZHANG L, YAO J S, *et al.*. Design of Cartwheel Bi-axial flexural hinge [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9): 2317-2324.

作者简介:



左玉弟(1990—),男,河南南阳人,博士研究生,2013年于吉林大学获得学士学位,主要从事空间反射镜及支撑结构设计与分析方面的研究。E-mail: zuoyd1809@163.com



李宗轩(1986—),男,河北衡水人,助理研究员,2009年于中国科学技术大学获得学士学位,2014年于中国科学院长春光机所获得博士学位,主要从事精密光学仪器设计及分析方面的研究。E-mail: lizongx@126.com