

Deform - X 柔性铰链设计与分析

邱丽芳 王 栋 印思琪 杨德斌

(北京科技大学机械工程学院, 北京 100083)

摘要: 设计了一种 Deform - X 柔性铰链,利用微积分的思想分析了其等效刚度,推导了 Deform - X 柔性铰链弯扭耦合等效刚度的理论计算公式。通过一组实例的理论分析和 ABAQUS 仿真分析,验证了 Deform - X 柔性铰链等效刚度理论计算公式的正确性。选取外形尺寸相同的 X 型柔性铰链与 Deform - X 柔性铰链进行了性能比较分析,在相同转矩作用下,Deform - X 柔性铰链弯曲变形转角约为 X 型柔性铰链的 3 倍。分别对 X 型柔性铰链和 Deform - X 柔性铰链进行了弯曲失效分析,结果表明 Deform - X 柔性铰链的可使用范围大于 X 型柔性铰链。设计了基于 Deform - X 柔性铰链的平面折展四杆机构的实物模型,通过实物测试和仿真分析表明 Deform - X 柔性铰链能够实现预期变形。最后,对尺寸相同的基于 X 型柔性铰链的四杆机构和基于 Deform - X 柔性铰链的四杆机构在相同力矩作用下的变形进行了分析,结果表明基于 Deform - X 柔性铰链的四杆机构变形更大。

关键词: 柔性铰链; 弯扭耦合; 等效刚度; 失效分析; 四杆机构

中图分类号: TH122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)04-0370-07

Design and Analysis of Deform - X Flexure Hinge

QIU Lifang WANG Dong YIN Siqi YANG Debin

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Deform - X flexure hinge was designed, and its equivalent stiffness was analyzed by using differential methods, and the theoretical calculation formula of the equivalent stiffness of Deform - X flexure hinge was derived. Through theoretical analysis and ABAQUS simulation analysis of Deform - X flexure hinge in a size, the correctness of calculation formula of the equivalent stiffness of Deform - X flexure hinge was verified. By comparing the performance of X-shaped flexure hinge with the same shape and size as the Deform - X flexure hinge, the bending deflection angle of the Deform - X flexure hinge was about three times of that of the X-shaped flexible hinge under the same torque. Bending failure analysis of X-shaped flexure hinge and Deform - X flexure hinge was carried out, and the results showed that the available using range of Deform - X flexure hinge was wider than that of X-shaped flexure hinge. The four-bar mechanism model based on Deform - X flexure hinge was manufactured. The test and simulation analysis showed that the Deform - X flexure hinge can realize the expected deformation. In addition, the four-bar mechanism model based on X-shaped flexure hinge was established in ABAQUS. Through the comparative simulation analysis, in the case of the same size, the bend deformation performance of four-bar mechanism based on Deform - X flexure hinge was better than that of four-bar mechanism based on X-shaped flexure hinge.

Key words: flexure hinge; bending-torsional coupling; equivalent stiffness; failure analysis; four-bar mechanism

引言

柔性机构是通过柔性构件的弹性变形来输出力或运动的机构^[1]。柔性机构的应用领域十分广

泛^[2-6],尽管柔性机构具有很多优势,但其变形运动范围经常受到限制,而且相比刚性机构,设计难度更大^[7-8]。

平面折展机构(Lamina emergent mechanisms,

收稿日期: 2016-07-25 修回日期: 2016-09-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51475037)

作者简介: 邱丽芳(1966—),女,教授,主要从事机械设计及理论和柔顺机构研究,E-mail: qlf@ustb.edu.cn

通信作者: 杨德斌(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事机械设备状态评价及无线传感器研究,E-mail: ydb@ustb.edu.cn

LEMs)最大的优势是机构由二维薄板平面加工生成而能实现三维运动^[9],可以实现如四杆机构、滑块机构^[10-11]等简单的运动,还能实现如球面四杆机构、斯蒂芬森机构^[12]等复杂的运动。同时,LEMs 集合了正交机构、变胞机构和柔性机构的特性。LEMs 实现特性和发挥优势的关键在于柔性铰链,几何尺寸、边界条件、材料特性等是影响其功能特性的关键因素^[13]。JACOBSEN 等^[14]提出了关于 LET 柔性铰链等效刚度的理论计算公式;MAGLEBY 等^[15]设计了2种柔性铰链——RUFF 柔性铰链和 TUFF 柔性铰链;DELIMONT 等^[16]总结概括了部分柔性铰链等效刚度的理论计算公式;DELIMONT 等^[17]设计提出了一系列双片段的柔性铰链,并推导了其等效刚度计算公式;文献[18]提出了用于平面折展机构的 S 型柔性铰链,分析了其等效刚度;文献[19]设计了一种 S-LET 复合型柔性铰链,并对其进行了性能分析;文献[20]设计了串联式 Triple-LET,并应用于 LEMs 滑块机构中。本文设计一种 Deform-X 柔性铰链,对弯扭耦合的柔性片段进行分析,推导其弯扭耦合等效刚度理论计算公式,并对其进行弯曲性能分析和失效分析,并设计基于 Deform-X 柔性铰链的平面折展四杆机构实物模型,通过仿真分析和实物测试来验证铰链的有效性和适用性。

1 Deform-X 柔性铰链设计

基于文献[17]提出的混合抗拉型(Mixed tension resistant, MTR)柔性铰链^[17]设计了 Deform-X 柔性铰链,Deform-X 柔性铰链宽度为 w_0 ,长度为 l_0 ,厚度为 t_0 ,其三维结构如图1所示。

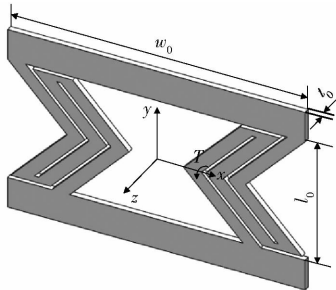


图1 Deform-X 柔性铰链三维模型图

Fig.1 3D model diagram of Deform-X flexure hinge

由于 Deform-X 柔性铰链关于 y 轴对称,取铰链 1/2 作为研究对象。根据产生的变形类型不同,Deform-X 柔性铰链中的片段可以分为弯扭耦合片段、扭转片段。在图2中,片段 A、B、C、D、E、F 均为弯扭耦合片段,片段 G、H 为扭转片段,其中片段 A、F 的几何尺寸相同,片段 B、C、D、E 的几何尺寸相同,片段 G、H 几何尺寸相同。Deform-X 柔性铰链的尺寸示意图如图2所示。

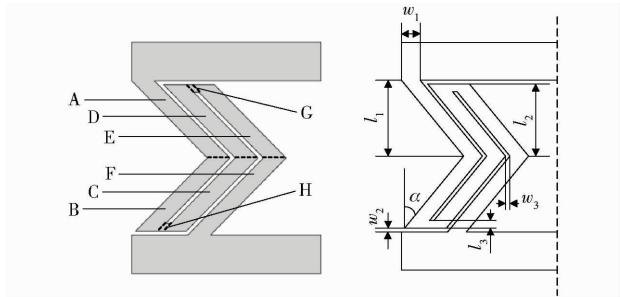


图2 Deform-X 柔性铰链片段尺寸示意图

Fig.2 Dimension labels of Deform-X flexure hinge

2 Deform-X 柔性铰链等效刚度分析

根据柔性铰链的弹簧等效法,可以将 Deform-X 柔性铰链中的弯扭耦合片段等效为弯扭弹簧,将扭转片段等效为扭转弹簧,根据弹簧的串并联关系,即可得 Deform-X 柔性铰链的等效弹簧模型如图3所示,弯扭耦合片段有两种类型,即片段 A、F 的等效刚度为 k_{BT1} ,片段 B、C、D、E 的等效刚度为 k_{BT2} ,扭转片段只有一种类型,即片段 G、H 的等效刚度为 k_T 。

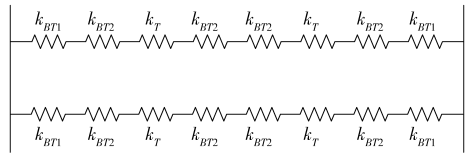


图3 Deform-X 铰链等效弹簧模型图

Fig.3 Equivalent spring model diagram of Deform-X flexure hinge

根据弹簧等效的串并联关系,即可得到 Deform-X 柔性铰链的等效刚度为

$$k_{eq} = \frac{k_{BT1} k_{BT2} k_T}{k_{BT1} k_T + 2k_{BT1} k_T + k_{BT1} k_{BT2}} \quad (1)$$

对于弯扭耦合片段等效刚度的求解,可用微积分的思想分别求解弯曲等效刚度和扭转等效刚度,再将其进行耦合,即可得到弯扭耦合片段的等效刚度。选取片段 A 计算其等效刚度,设材料的弹性模量为 E ,剪切模量为 G ,泊松比为 ν 。

计算弯曲刚度,设片段 A 在转矩 T 作用下弯曲变形转角为 θ_B ,其微分示意图如图4所示。公式推导过程为

$$\Delta y = w_1 \quad (2)$$

$$d\theta_B = \frac{T dx}{EI_B} \quad (3)$$

$$I_B = \frac{\Delta y l_0^3}{12} \quad (4)$$

$$\theta_B = \int_0^{l_1} d\theta_B \quad (5)$$

$$k_{B1} = \frac{T}{\theta_B} = \frac{E w_1 t_0^3}{12 l_1} \quad (6)$$

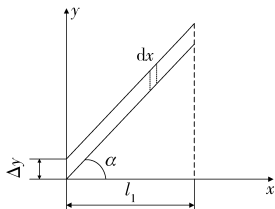


图4 片段A弯曲变形转角的微分示意图
Fig.4 Differential diagram of bending angle in part A

式中 k_{B1} ——片段A的弯曲等效刚度
 I_B ——片段A的转动惯量
计算扭转等效刚度,设弯扭耦合片段在转矩 T 作用下扭转变形转角为 θ_T ,其微分示意如图5所示。

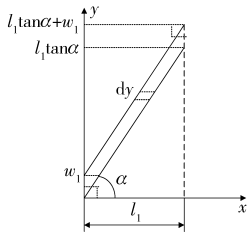


图5 片段A扭转变形转角的微分示意图
Fig.5 Differential diagram of torsional angle in part A

由于弯扭耦合片段的结构特殊性,扭转等效刚度需要分为3个区间进行计算。

(1)当 $0 < y < w_1$ 时

由于在 $0 < y < w_1$ 区间内, Δx 长度小于铰链的厚度 t_0 ,弹簧扭转等效刚度计算精度降低,所以将 $0 < y < w_1$ 区间片段等效为图5所示虚线长方形部分,则铰链的扭转等效刚度为

$$k_{t1} = \frac{2K_i G}{w_1} \tag{7}$$

(2)当 $w_1 < y < l_1 \tan \alpha$ 时, Δx 长度不小于铰链厚度 t_0 ,则铰链扭转等效刚度为

$$k_{t2} = \frac{T}{\theta_{T2}} = \frac{t_0^3 (w_1 \cot \alpha - 0.63 t_0) G}{3 (l_1 \tan \alpha - w_1)} \tag{8}$$

其中 $\theta_{T2} = \int_{w_1}^{l_1 \tan \alpha} d\theta_{T2}$ (9)

$$d\theta_{T2} = \frac{T dy}{G I_t} \tag{10}$$

$$I_t = \frac{\Delta x t_0^3}{3} - 0.21 t_0^4 \tag{11}$$

$$\Delta x = w_1 \cot \alpha \tag{12}$$

(3)当 $l_1 \tan \alpha < y < l_1 \tan \alpha + w_1$ 时

由于在 $l_1 \tan \alpha < y < l_1 \tan \alpha + w_1$ 区间内, Δx 长度小于铰链的厚度 t_0 ,弹簧扭转等效刚度计算精度降低,所以将 $l_1 \tan \alpha < y < l_1 \tan \alpha + w_1$ 区间片段等效为图5所示虚线长方形部分,则铰链的扭转等效刚度为

$$k_{t3} = \frac{2K_i G}{w_1} \tag{13}$$

文献[21]给出了 K_i 的近似公式

$$K_i = L_{Tw} t^3 \left[\frac{1}{3} - 0.21 \frac{t}{L_{Tw}} \left(1 - \frac{t^4}{12 L_{Tw}^4} \right) \right] \tag{14}$$

LOBONTIU 等^[22]忽略了高次项,将式(14)简化为

$$K_i = L_{Tw} t^3 \left(\frac{1}{3} - 0.21 \frac{t}{L_{Tw}} \right) \tag{15}$$

式中 L_{Tw} ——扭转片段宽度 t ——铰链厚度
在本文中 $L_{Tw} = w_1 \cot \alpha, t = t_0$,则

$$K_i = w_1 \cot \alpha t_0^3 \left(\frac{1}{3} - 0.21 \frac{t_0}{w_1 \cot \alpha} \right) \tag{16}$$

$$k_{t1} = k_{t3} = \cot \alpha t_0^3 \left(\frac{2}{3} - 0.42 \frac{t_0}{w_1 \cot \alpha} \right) G \tag{17}$$

其中 $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ (18)

根据弹簧等效耦合关系有

$$\frac{1}{k_{T1}} = \frac{1}{k_{t1}} + \frac{1}{k_{t2}} + \frac{1}{k_{t3}} \tag{19}$$

$$\frac{1}{k_{BT1}} = \frac{1}{k_{B1}} + \frac{1}{k_{T1}} \tag{20}$$

$$k_{T1} = \frac{G t_0^3 (2 \cot^2 \alpha w_1^2 - 2.52 w_1 t_0 \cot \alpha + 0.79 t_0^2)}{3 l_1 \tan \alpha (2 w_1 \cot \alpha - 1.26 t_0)} \tag{21}$$

由式(20)即可得出片段A的等效刚度

$$k_{BT1} = \frac{E w_1 G t_0^3 (2 \cot^2 \alpha w_1^2 - 2.52 w_1 t_0 \cot \alpha + 0.79 t_0^2)}{12 l_1 G (2 \cot^2 \alpha w_1^2 - 2.52 w_1 t_0 \cot \alpha + 0.79 t_0^2) + 3 l_1 \tan \alpha E w_1 (2 w_1 \cot \alpha - 1.26 t_0)} \tag{22}$$

同理可以得到

$$k_{BT2} = \frac{E w_1 G t_0^3 (2 \cot^2 \alpha w_1^2 - 2.52 w_1 t_0 \cot \alpha + 0.79 t_0^2)}{12 l_2 G (2 \cot^2 \alpha w_1^2 - 2.52 w_1 t_0 \cot \alpha + 0.79 t_0^2) + 3 l_2 \tan \alpha E w_1 (2 w_1 \cot \alpha - 1.26 t_0)} \tag{23}$$

利用等效法计算 k_T ,根据片段G、H等效刚度实例分析,可得 k_T 的计算公式为

$$k_T = \cos^2 \alpha \sin \alpha \frac{l_3 t^3 \left(\frac{1}{3} - 0.21 \frac{t}{l_3} \right) G}{w_3} \tag{24}$$

其中 $\cos^2 \alpha \sin \alpha$ 为修正系数。

3 Deform - X 柔性铰链实例计算与分析

选取铍青铜和聚丙烯作为 Deform - X 柔性铰链的材料,铍青铜和聚丙烯性能参数如表1所示。

表1 铰链材料的性能参数
Tab.1 Performance parameters of materials

材料	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	屈服强度 σ_s/MPa
铍青铜	128	0.29	1 170
聚丙烯	1.4	0.42	34

设计 Deform - X 柔性铰链的实例,选取实例的

α 为 45° , 其余尺寸参数如表 2 所示。

表 2 Deform - X 柔性铰链实例尺寸参数

Tab.2 Size of Deform - X flexure hinge examples

参数	w_0	w_1	w_2	w_3	l_0	l_1	l_2	l_3	t_0
数值	50	3	0.5	0.5	20	10	9.5	1	1

根据表 1 和表 2 中参数由式(1)、(22) ~ (24) 计算可得, 铍青铜材料的 Deform - X 柔性铰链实例的等效刚度为 $k_{eq} = 532.27 \text{ N}\cdot\text{mm}/\text{rad}$, 聚丙烯材料的 Deform - X 柔性铰链实例的等效刚度为 $k_{eq} = 5.5 \text{ N}\cdot\text{mm}/\text{rad}$ 。Deform - X 柔性铰链受到如图 1 所示的转矩 T 时, 根据理论推导的等效刚度可以计算得到其弯曲变形转角 θ_i , 计算公式为

$$\theta_i = \frac{T}{k_{eq}} \tag{25}$$

为验证理论推导的等效刚度计算公式的正确性, 在 ABAQUS 中建立 Deform - X 柔性铰链设计实例的有限元仿真分析模型, 施加相应的转矩 T 即可得到仿真分析的弯曲变形转角 θ_s , 将 θ_i 和 θ_s 对比分析, 理论转角 θ_i 和仿真转角 θ_s 的相对误差为

$$\delta = \left| \frac{\theta_i - \theta_s}{\theta_s} \right| \times 100\% \tag{26}$$

当转矩 T 取不同值时, 计算可以得到理论转角 θ_i 、仿真转角 θ_s 和相对误差 δ 如表 3 所示。从表 3 可以看出, 随着转矩 T 的变化, Deform - X 柔性铰链的理论转角 θ_i 和仿真转角 θ_s 的相对误差均在 1.4% 内, 这证明了理论等效刚度计算公式的正确性。

表 3 Deform - X 柔性铰链设计实例 (铍青铜) 的理论转角、仿真转角及相对误差

Tab.3 Theoretical and simulation values of bending angle of Deform - X flexure hinge (beryllium bronze) and its relative error

参数	$T/(\text{N}\cdot\text{mm})$									
	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280
θ_i/rad	0.186 1	0.227 3	0.260 2	0.298 1	0.335 4	0.372 7	0.410 0	0.447 3	0.481 6	0.521 8
θ_s/rad	0.187 8	0.225 4	0.268 3	0.300 5	0.338 1	0.375 7	0.413 3	0.450 8	0.488 4	0.526 0
$\delta/\%$	0.905 2	0.931 6	1.364 0	0.798 6	0.798 5	0.798 5	0.798 4	0.776 3	1.392 0	0.798 4

4 Deform - X 与 X 型柔性铰链的性能比较

为说明 Deform - X 柔性铰链的性能, 选取相同外形的 X 型柔性铰链, 即铰链宽度为 w_0 , 长度为 l_0 , 厚度为 t_0 , 铰链角度 α 为 45° , 其尺寸示意图如图 6 所示, 尺寸参数如表 4 所示。

其中

$$\frac{2Ew_1Gt_0^3(2\cot^2\alpha w_1^2 - 2.52w_1t_0\cot\alpha + 0.79t_0^2)}{12l_0G(2\cot^2\alpha w_1^2 - 2.52w_1t_0\cot\alpha + 0.79t_0^2) + 3l_0\tan\alpha Ew_1(2w_1\cot\alpha - 1.26t_0)} \tag{28}$$

$$k'_B = (\sin\alpha\cos\alpha)^3 \frac{E(l_2 - 2w_1)t_0^3}{12w_1\cot\alpha} \tag{29}$$

选取铍青铜作为 X 型柔性铰链材料, 根据式(27) ~ (29) 和表 1、4 中的数据, 可计算得 X 型柔性铰链实例的等效刚度为 $k_{eq} = 1\,512 \text{ N}\cdot\text{mm}/\text{rad}$ 。

同样, 在 ABAQUS 中建立 X 型柔性铰链实例的有限元仿真分析模型, 施加相应的转矩 T 即可得到仿真分析的弯曲变形转角 θ_s , 分别计算可以得到其弯曲变形的理论转角 θ_i 和相对误差 δ 。

根据计算得到的数据可以绘制出 Deform - X 柔性铰链和 X 型柔性铰链弯曲转角对比变化趋势如图 7 所示, 同理可以得到铰链材料为聚丙烯时 Deform - X 柔性铰链和 X 型柔性铰链弯曲仿真转角对比变化趋势如图 8 所示。从图中可以看出, 相同材料和外形尺寸的 Deform - X 柔性铰链和 X 型柔性铰链的弯曲性能差异很大, 在相同转矩作用下, Deform - X 柔性铰链的弯曲变形转角约为 X 型柔性铰链的 3 倍, 即 Deform - X 柔性铰链可以在较小的转矩作用下产生较大的弯曲变形, 其弯曲性能得到很大提升。

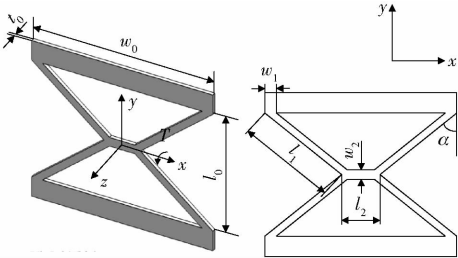


图 6 X 型柔性铰链的尺寸示意图

Fig.6 Dimension labels of X-shaped flexure hinge

表 4 X 型柔性铰链实例尺寸参数

Tab.4 Size of X-shaped flexure hinge examples

参数	w_0	l_0	t_0	w_1	l_1	w_2
数值	50	20	1	3	30	3

同样利用微分的思想可以推导得到 X 型柔性铰链等效刚度理论计算公式为

$$k_{eq} = \frac{k'_{BT}k'_B}{k'_{BT} + k'_B} \tag{27}$$

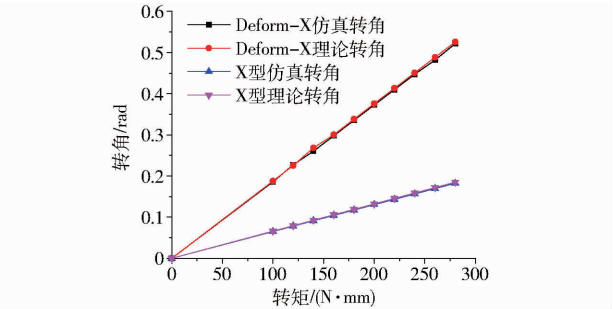


图7 铍青铜 Deform - X 和 X 型柔性铰链弯曲转角对比
Fig. 7 Comparison of bending angle of beryllium bronze Deform - X flexure hinge and X-shaped flexure hinge

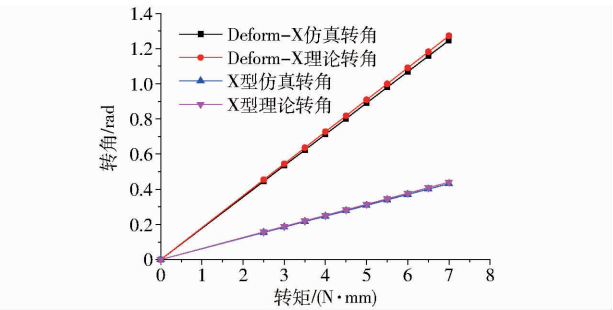


图8 聚丙烯 Deform - X 和 X 型柔性铰链弯曲转角对比
Fig. 8 Comparison of bending angle of polypropylene Deform - X flexure hinge and X-shaped flexure hinge

5 Deform - X 与 X 型柔性铰链的失效分析

为确定铰链的变形范围,对 Deform - X 柔性铰

表 5 Deform - X 柔性铰链和 X 型柔性铰链失效分析数据对比

Tab. 5 Failure analysis data comparison of Deform - X flexure hinge and X-shaped flexure hinge					
材料	铰链	转矩/(N·mm)	最大转角/rad	最大应力/MPa	使用范围/(°)
铍青铜	Deform - X	360	0.670 9	1 135	0 ~ 38.43
	X 型	700	0.456 2	1 164	0 ~ 26.13
聚丙烯	Deform - X	10.5	1.871	33.70	0 ~ 107.20
	X 型	19.5	1.204	33.38	0 ~ 68.98

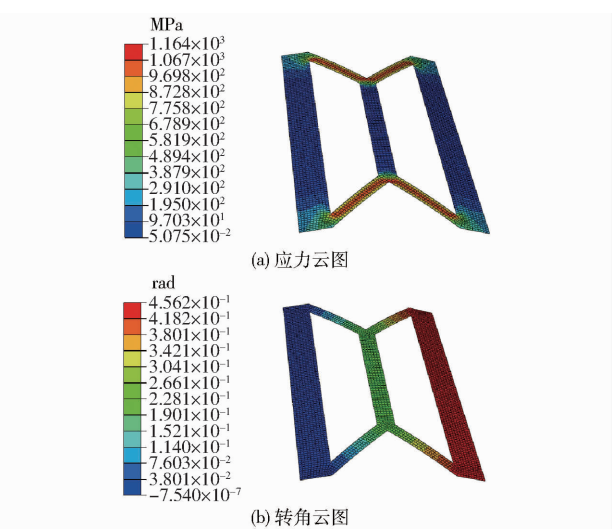


图10 铍青铜 X 型柔性铰链失效分析
Fig. 10 Failure analysis of beryllium bronze X-shaped flexure hinge

链和 X 型柔性铰链进行失效分析,在 ABAQUS 中建立 2 种柔性铰链实例的有限元仿真分析模型,尺寸参数同前。

材料为铍青铜,对 Deform - X 柔性铰链施加转矩 $T_{\max} = 360 \text{ N} \cdot \text{mm}$,其应力云图如图 9a 所示,转角云图如图 9b 所示,分析数据见表 5。

对铍青铜 X 型柔性铰链施加转矩 $T_{\max} = 700 \text{ N} \cdot \text{mm}$,其应力云图如图 10a 所示,转角云图如图 10b 所示,分析数据见表 5。

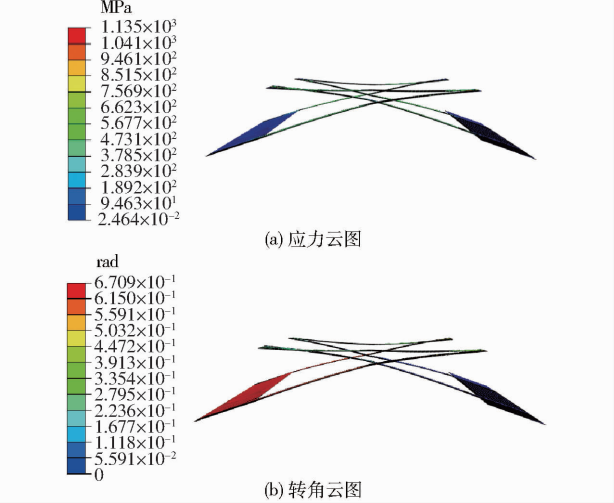


图9 铍青铜 Deform - X 柔性铰链失效分析
Fig. 9 Failure analysis of beryllium bronze Deform - X flexure hinge

同理可得材料为聚丙烯的 Deform - X 柔性铰链和 X 型柔性铰链弯曲失效分析结果,失效分析数据见表 5。

6 基于 Deform - X 与 X 型柔性铰链的四杆机构

设计基于 Deform - X 柔性铰链实例的平面折展四杆机构,材料为铍青铜,采用线切割加工,该机构实物初始状态如图 11a 所示,机构展开状态如图 12 所示。摇杆 B 末端位移 s 为 37 mm 时,测得角度 α_1 为 23°、 α_2 为 30°。同时,在 ABAQUS 中建立机构的仿真分析模型如图 13 所示,仿真分析得到摇杆 B 末端位移 s 为 37.87 mm 时角度 α_1 为 23.17°、 α_2 为 30.81°,仿真结果与实测结果基本一致,说明基于 Deform - X 柔性铰链的四杆机构可以实现预期运动功能。

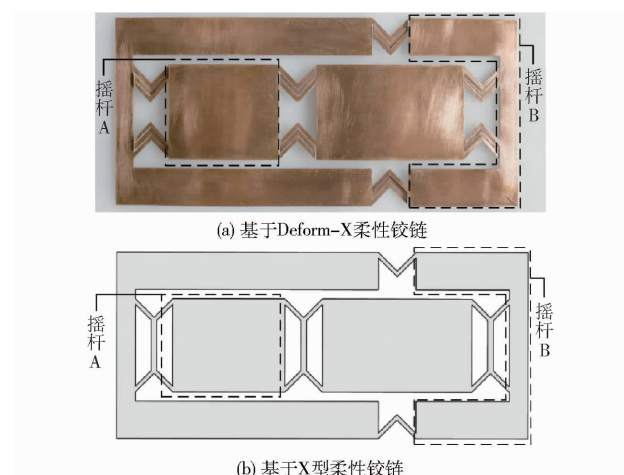


图 11 平面折展四杆机构初始状态图

Fig. 11 Four-bar LEMs models in original state



图 12 平面折展四杆机构运动状态实物图

Fig. 12 Four-bar LEMs of Deform - X flexure hinge in working state

同理,在 ABAQUS 中建立相同外形尺寸的基于 X 型柔性铰链平面折展四杆机构仿真模型如图 11b 所示,分析结果如图 13b 所示,在同样力矩作用下,该四杆机构摇杆 B 末端位移 s 为 23.40 mm,角度 α_1 为 15.21° 、 α_2 为 19.29° ,因此,基于 Deform - X 柔性铰链的平面折展四杆机构变形性能优于基于 X 型柔性铰链的平面折展四杆机构。

7 结论

(1)设计了一种 Deform - X 柔性铰链,分析了

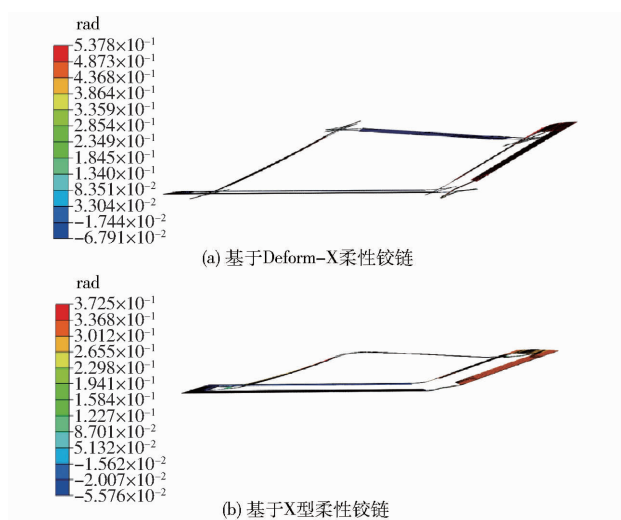


图 13 平面折展四杆机构运动仿真分析转角云图

Fig. 13 Deformation nephograms of four-bar LEMs

其弯扭耦合等效刚度,用微分法推导出 Deform - X 柔性铰链等效刚度的理论计算公式,通过设计实例的有限元仿真分析和理论分析结果的对比,验证了理论推导公式的正确性。

(2)通过将 Deform - X 柔性铰链与具有相同外形尺寸 X 型柔性铰链的对比,表明在相同转矩作用下,Deform - X 柔性铰链可以实现更大的弯曲变形。

(3)对 Deform - X 柔性铰链和 X 型柔性铰链进行了失效分析,在相同尺寸和材料条件下,Deform - X 柔性铰链的使用范围均大于 X 型的柔性铰链。

(4)设计了基于 Deform - X 柔性铰链的平面折展四杆机构的实物模型,通过实物测试和仿真分析表明 Deform - X 柔性铰链能够实现预期的变形,机构能够实现预期的运动。

参 考 文 献

- 1 HOWELL L L. Compliant mechanisms[M]. New York: Wiley-Interscience,2001: 2 - 47.
- 2 于靖军,郝广波,陈贵敏,等. 柔性机构及其应用研究进展[J]. 机械工程学报, 2015,51(13):53 - 68.
YU Jingjun,HAO Guangbo,CHEN Guimin, et al. State-of-art of compliant mechanisms and their applications [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015,51(13):53 - 68. (in Chinese)
- 3 达选祥,勾燕洁,陈贵敏. 一种基于变胞变换的柔顺剥线钳[J]. 机械工程学报, 2015,51(1):69 - 75.
DA Xuanxiang, GOU Yanjie, CHEN Guimin. Compliant wire stripper based on metamorphic transformation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015,51(1):69 - 75. (in Chinese)
- 4 余跃庆,崔忠炜,赵鑫,等. 柔顺关节并联机器人设计与实验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(7):274 - 278. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130747&journal_id=jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2013. 07. 047.
YU Yueqing,CUI Zhongwei,ZHAO Xin,et al. Design and experiment of parallel robot with compliant joints[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7):274 - 278. (in Chinese)
- 5 余跃庆,马兰,崔忠炜,等. 并联机器人开槽薄壁柔顺关节设计与实验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(5):284 - 290. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140544&journal_id=jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2014. 05. 044.
YU Yueqing,MA Lan,CUI Zhongwei, et al. Design and experiment of open thin-walled flexure joints of parallel robot[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5):284 - 290. (in Chinese)

- 6 MAGLEBY S P, ALBRECHTSEN N B, HOWELL L L. Using lamina emergent mechanisms to develop credit-card sized products [C]//ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2011;223 – 231.
- 7 SMITH S T. Flexures; elements of elastic mechanisms[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2000.
- 8 LOBONTIU N. Compliant mechanisms; design of flexure hinges[J]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2003;93.
- 9 JACOBSEN J O, WINDER B G, HOWELL L L, et al. Lamina emergent mechanisms and their basic elements[J]. Journal of Mechanisms & Robotics, 2010, 2(1):298 – 320.
- 10 MAGLEBY S P, HOWELL L L, GOLLNICK P S, et al. A preliminary study of actuation approaches for lamina emergent mechanisms[C]//ASME International Design Engineering Technical Conferences, 2011;191 – 202.
- 11 ATEN Q T, ZIRBEL S A, JENSEN B D, et al. A numerical method for position analysis of compliant mechanisms with more degrees of freedom than inputs[J]. Journal of Mechanical Design, 2010, 133(6):491 – 502.
- 12 WILDING S E, HOWELL L L, MAGLEBY S P. Spherical lamina emergent mechanisms[J]. Mechanism & Machine Theory, 2011, 49(3):187 – 197.
- 13 JACOBSEN J O, HOWELL L L, Magleby S P, et al. Components for the design of lamina emergent mechanisms[C]//ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2007;165 – 174.
- 14 JACOBSEN J O, CHEN G, HOWELL L L, et al. Lamina emergent torsional (LET) joint[J]. Mechanism & Machine Theory, 2009, 44(11):2098 – 2109.
- 15 MAGLEBY S P, FERRELL D B, ISAAC Y F, et al. Development of criteria for lamina emergent mechanism flexures with specific application to metals[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2011, 133(3):586 – 599.
- 16 DELIMONT I L, MAGLEBY S P, HOWELL L L. Evaluating compliant hinge geometries for origami-inspired mechanisms[J]. Journal of Mechanisms & Robotics, 2015, 7(1):331 – 341.
- 17 DELIMONT I L, MAGLEBY S P, HOWELL L L. A family of dual-segment compliant joints suitable for use as surrogate folds [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2015, 137(9):092302 – 092302 – 9.
- 18 邱丽芳,孟天祥,张九俏,等. 平面折展机构 S 形柔性铰链设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(9):324 – 328. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140952&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.052.
- QIU Lifang, MENG Tianxiang, ZHANG Jiuliao, et al. Design and test of lamina emergent mechanisms S-shaped flexure hinge [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9):324 – 328. (in Chinese)
- 19 邱丽芳,庞大千,陈家兴,等. S – LET 复合型柔性铰链设计与性能研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(2):408 – 412. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160255&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.055.
- QIU Lifang, PANG Daqian, CHEN Jiaying, et al. Design and performance analysis of lamina emergent mechanisms S – LET-shaped flexure hinge[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2):408 – 412. (in Chinese)
- 20 邱丽芳,印思琪,谢仲添,等. 基于串联式 Triple – LET 的 LEMs 滑块机构分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(6):381 – 386. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160650&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.050.
- QIU Lifang, YIN Siqi, XIE Zhongtian, et al. Analysis of lamina emergent slider mechanisms based on series Triple – LET[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6):381 – 386. (in Chinese)
- 21 PORTER L E, TRZASKA W H. Formulas for stress and strain[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
- 22 LOBONTIU N, GARCIA E, CANFIELD S. Torsional stiffness of several variable rectangular cross-section flexure hinges for macro-scale and MEMS applications[J]. Smart Materials & Structures, 2004, 13(13):12 – 19.