

文章编号:1004-7220(2017)01-0027-05

# 离体狐眼外肌被动行为的超弹性分析

郭红梅, 高志鹏, 陈维毅

(太原理工大学 力学学院,应用力学与生物医学工程研究所,山西省材料强度与结构冲击重点实验室,太原 030024)

**摘要:**目的 确定眼外肌的 Ogden 超弹性模型参数剪切模量( $\mu$ )和曲率( $\alpha$ ),通过数值模拟为临床眼外肌手术提供理论依据。**方法** 通过单轴拉伸实验测试离体狐眼外肌的被动行为,并用一阶 Ogden 超弹性模型及 ABAQUS 软件对其进行超弹性分析。**结果** 实验结果表明,狐眼外肌的被动行为是非线性的。获得了相应的超弹性参数值,其中 $\mu = (16.57 \pm 3.76)$  kPa, $\alpha = 8.16 \pm 1.63$ 。当应变大于6%时,一阶 Ogden 模型的计算结果与实验结果之间没有显著性差异( $P > 0.05$ )。计算结果与数值模拟结果都能很好地拟合实验结果。**结论** 所确定的超弹性参数可作为狐眼外肌数值建模的输入量。

**关键词:** 眼外肌; 超弹性; 单轴拉伸测试; Ogden 模型; 有限元分析

**中图分类号:** R 318.01 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.16156/j.1004-7220.2017.01.005

## Hyperelastic analysis for the passive behavior of fox extraocular muscles *in vitro*

GUO Hong-mei, GAO Zhi-peng, CHEN Wei-yi (College of Mechanics, Institute of Applied Mechanics and Biomedical Engineering, Shanxi Key Laboratory of Material Strength & Structural Impact, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract: Objective** To determine the hyperelastic parameters of shear modulus ( $\mu$ ) and curvature parameter ( $\alpha$ ) of extraocular muscles (EOMs) in Ogden hyperelastic model, so as to provide theoretical basis for clinical EOM surgery by numerical modeling. **Methods** The passive behavior of fox EOMs *in vitro* was determined by the uniaxial tensile test, and the hyperelastic analysis was conducted using the first-order Ogden model and ABAQUS software. **Results** The experimental result showed that the passive behavior of fox EOMs was nonlinear. The corresponding hyperelastic parameters  $\mu = (6.57 \pm 3.76)$  kPa and  $\alpha = 8.16 \pm 1.63$  were obtained. When the strain of EOMs was larger than 6%, there were no statistical differences between the experimental result and the calculation result of the first-order Ogden hyperelastic model ( $P > 0.05$ ). Both the calculation result and the simulation result well fitted to the experimental result. **Conclusions** The hyperelastic parameters identified in this study can be used as the input for the corresponding numerical modeling of fox EOMs.

**Key words:** Extraocular muscles (EOMs); Hyperelasticity; Uniaxial tensile test; Ogden model; Finite element analysis

眼球运动由6条眼外肌控制,即外直肌(LR)、内直肌(MR)、上直肌(SR)、下直肌(IR)、上斜肌(SO)和下斜肌(IO)。因此,与眼外肌力学行为相

关的信息将有助于斜视的诊断和手术设计。生物力学建模是研究此类问题的主要方法之一<sup>[1-2]</sup>,建立眼球运动的力学模型有助于将手术量定量化。在建

收稿日期:2016-03-01; 修回日期:2016-03-22

基金项目:国家自然科学基金项目(11032008,31271005)。

通信作者:陈维毅,教授,博士研究生导师,E-mail: chenweiyi211@163.com。

模前,必须首先获得眼外肌的力学特性。

Ogden 超弹性模型经常被用来描述生物软组织的被动行为<sup>[3-8]</sup>。Ogden 超弹性模型参数剪切模量( $\mu$ )和曲率( $\alpha$ )是数值建模的主要输入量,而数值建模在临床上的应用越来越广泛<sup>[7,9-10]</sup>。单轴拉伸实验是测试生物软组织力学特性的常用方法<sup>[4-5,11-13]</sup>,软组织相应的被动行为可用单轴拉伸实验来确定。

狐的双眼在脸的前侧,与人体相似。本文通过单轴拉伸测试方法确定离体狐眼外肌的被动行为,采用一阶 Ogden 超弹性模型分析狐眼外肌条带的被动行为,并证明所得超弹性眼外肌参数作为数值建模输入量的有效性。

## 1 材料和方法

### 1.1 条带准备

对 16 条眼外肌直肌的条带进行测试。在阳泉市河底鑫运银狐养殖场获得 6 只 6 月龄的狐尸体,并保存在  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  冰箱内。在室温( $15\sim 19\text{ }^{\circ}\text{C}$ )下解冻后,将眼球从相应的尸体上取出,保存在一个充满生理盐水的塑料容器中,并将该容器保存在含冰块的泡沫盒中。从农场到实验室的转移时间大约是 2 h。在实验室,室温( $23\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ )下将每条眼外肌条带取下,并立即放入  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  含生理盐水的容器中,一直保存到测试前。

### 1.2 实验方案

采用 INSTRON 5544 电子万能材料试验机及满量程为 5 N 的传感器对试样条带进行单轴拉伸测试。将条带沿长度方向用两个锯齿形夹头夹住。每条条带的原始长度( $L_0$ )表示试样被夹持好后试验机两个夹头之间的距离,在测试前还需测量条带的质量( $m$ )和横截面积( $A_0$ )。为了避免条带变干,在可移动的上夹头上固定生理盐水缓冲溶液(见图 1)。在正式实验前,以  $2\text{ mm/min}$  速度和  $0.1\text{ N}$  阈值对条带施加 7 个加载-卸载循环,以此消除条带的迟滞效应,并使其生物力学行为趋于稳定状态<sup>[3-4]</sup>。然后以  $5\text{ mm/min}$  速度对条带进行单轴拉伸测试,当拉伸载荷达到眼外肌力的安全阈值  $1\text{ N}$ <sup>[14-16]</sup>时停止实验。在测试过程中,用电脑记录实验测试的载荷和位移。其中,眼外肌条带的长度方向是眼外肌的收缩方向。

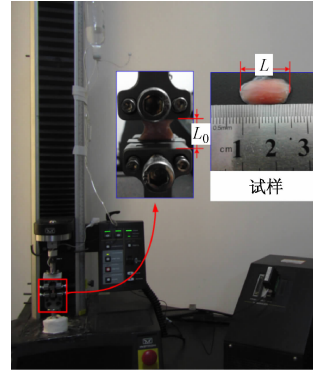


图 1 单轴拉伸测试示意图

Fig. 1 Picture of the uniaxial tensile test

### 1.3 分析方法

采用 Ogden 超弹性模型分析离体狐眼外肌的被动行为。将眼外肌定义为不可压缩材料,在单轴拉伸的情况下,由应变能方程

$$W = 2\mu\alpha^{-2}(\lambda^\alpha + 2\lambda^{-\alpha/2} - 3) \quad (1)$$

获得眼外肌的一阶 Ogden 模型。式中: $\mu$  为剪切模量; $\alpha$  为曲率参数(无量纲); $\lambda$  为沿条带拉伸方向的主伸长率; $W$  为应变能。

由一阶 Ogden 模型推导出名义应力和主伸长率之间的本构关系:

$$\sigma(\lambda) = \partial W / \partial \lambda = 2\mu\alpha^{-1}[\lambda^{\alpha-1} - \lambda^{-(1+\alpha/2)}] \quad (2)$$

使用最小二乘法拟合相应的实验数据,确定每条眼外肌条带的参数  $\mu$  和  $\alpha$  (见表 1)。

表 1 每条狐眼外肌条带的参数( $\bar{x} \pm s, n = 16$ )

Tab. 1 Parameters for each specimen of the fox EOMs

条带	眼外肌	$m/\text{mg}$	$A_0/\text{mm}^2$	$L_0/\text{mm}$	$\mu/\text{kPa}$	$\alpha$
1	LR	297.9	17.809 4	7.932 7	9.73	10.03
2	MR	328.7	18.841 9	7.393 5	20.59	5.61
3	LR	306.6	19.804 9	6.597 4	11.80	8.36
4	LR	342.6	18.818 5	7.146 0	15.02	7.14
5	MR	277.6	15.855 1	9.439 7	19.15	6.78
6	SR	227.2	13.514 5	7.020 6	17.62	9.31
7	IR	235.5	14.500 9	6.363 1	13.09	9.60
8	MR	323.9	17.750 2	7.598 5	17.52	7.28
9	MR	260.0	15.254 7	8.349 5	13.89	9.72
10	SR	281.3	16.302 4	6.893 3	16.25	7.90
11	LR	225.3	14.553 3	6.508 3	21.08	6.74
12	MR	296.8	17.075 3	7.359 3	22.93	5.42
13	LR	274.2	16.949 0	7.482 9	16.43	10.69
14	IR	251.2	14.867 4	6.214 5	21.50	7.42
15	MR	267.1	19.577 0	6.730 6	15.20	8.42
16	IR	226.0	13.666 3	7.564 7	13.43	10.12
均值		276.4	16.571 3	7.287 2	16.57	8.16
标准差		37.8	2.071 7	0.818 5	3.76	1.63

## 1.4 有限元模型

采用 ABAQUS 6.10 软件建立一个简单的眼外肌条带模型(见图 2)。该模型用实验条带的平均长度(7.29 mm)和横截面积(16.57 mm<sup>2</sup>)建成,包含 7 656 个单元和 9 450 个节点。在模拟过程中,模型下表面的自由度被固定,上表面用位移加载。通过将有限元模拟结果与实验结果和 Ogden 模型的计算结果对比,验证所得参数  $\mu$  和  $\alpha$ (见表 1)的合理性。

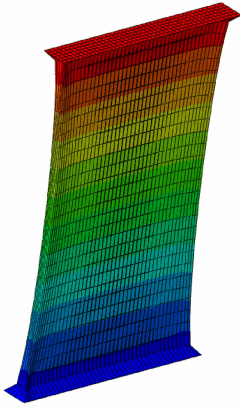


图 2 狐眼外肌的有限元模型

Fig.2 Finite element model of the fox EOMs

## 1.5 统计学分析

采用单因素方差分析(ANOVA)方法对实验结果进行统计学分析。当  $P < 0.05$  时认为差异具有统计学意义。

## 2 结果与讨论

通过实验确定出的参数  $\mu$  和  $\alpha$  如表 1 所示。在本文中不考虑狐眼外肌的类型。肌肉的密度  $\rho = 1.056 \text{ g/cm}^3$ 。

在阈值为 0.1 N 的加载-卸载循环过程中,眼外肌条带的应变范围为(13.2 ± 1.8)%。在终止载荷为 1 N 的测试中,应变最大达到了(47.6 ± 5.1)%,相应伸长率为 1.48 ± 0.05。当  $\lambda$  分别为 1.06、1.15、1.24、1.33 和 1.42 时,其对应的名义应力  $\sigma$  的实验值分别为(1.20 ± 0.44)、(8.31 ± 2.05)、(18.09 ± 3.01)、(31.18 ± 6.58)、(47.71 ± 10.43) kPa。将平均的  $\mu$  和  $\alpha$  代入一阶 Ogden 超弹性模型,得到以上 5 个伸长率所对应的名义应力分别为 3.14、9.05、17.58、30.34 和 49.32 kPa;对于有限元

模型,利用平均的  $\mu$  和  $\alpha$  计算出的相应的应力分别为 2.54、7.39、14.83、26.70 和 43.96 kPa。从实验数据得到的名义应力( $\sigma$ )和伸长率( $\lambda$ )之间的本构关系呈现非线性,Ogden 模型计算结果及有限元模拟结果均能很好地拟合实验数据(见图 3)。相应的眼外肌拉伸过程如图 4 所示。

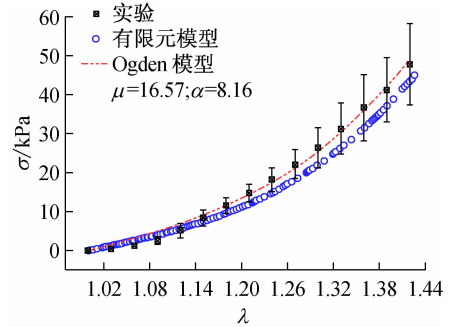
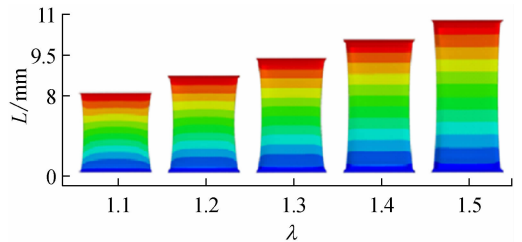


图 3 名义应力和伸长率的关系及用 Ogden 模型和有限元模型拟合的结果

Fig.3 Relationship between nominal stress and stretch ratio and the corresponding fitting results using Ogden model and finite element model



(a) 实验拉伸过程



(b) 有限元模拟过程

图 4 眼外肌条带的单轴拉伸过程示意图

Fig.4 Schematic for uniaxial tension process of EOM stripe  
(a) Experimental tension process, (b) Finite element simulation process

图 5 所示的统计学结果表明,除低应变 6% ( $P = 0.000$ )外,Ogden 模型的计算结果与实验结果之间没有统计学差异( $P > 0.05$ )。在小变形( $\varepsilon < 6\%$ )时,Ogden 模型不适用于描述狐眼外肌的被动行为;但当  $\varepsilon > 6\%$  时,Ogden 模型适用于描述狐眼外肌的被动行为。事实上,不同于骨骼肌,在生理状态

下眼外肌常常表现出大于6%的应变<sup>[17]</sup>。因此,从这种意义上来看,Ogden模型可用于描述狐眼外肌的被动行为。

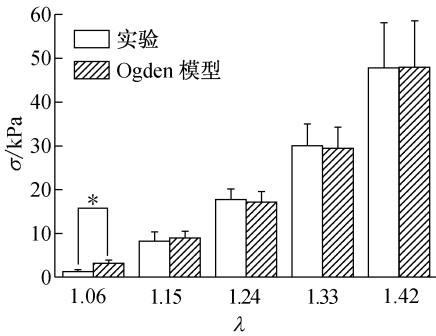


图5 狐眼外肌被动行为实验值及Ogden模型计算值对比(\* $P < 0.01$ )

Fig. 5 Comparison for passive behavior of the fox EOMs obtained by the experiment and the Ogden model

图6所示为不同肌肉和组织单轴拉伸实验数据与本文狐眼外肌的Ogden模型计算结果的对比。狐眼外肌和人胸锁乳突肌<sup>[4]</sup>  $\mu$  值分别为(16.57 ± 3.76)、(45.7 ± 32.4) kPa,  $\alpha$  值分别为8.16 ± 1.63、29.2 ± 4.5,狐眼外肌的  $\mu$  和  $\alpha$  值相对较小,两者之间有显著性差异( $P = 0.001$ )。然而,与猪左心室乳突肌<sup>[13]</sup>相比,狐眼外肌的  $\mu$  值偏大。猪左心室乳突肌  $\mu$  和  $\alpha$  值分别为(13.02 ± 1.44) kPa, 9.73 ± 0.36,狐眼外肌  $\mu$  值比猪左心室乳突肌  $\mu$  值大27%,两者之间有显著性差异( $P = 0.000$ ),而两者之间  $\alpha$  值没有统计学差异( $P > 0.05$ )。而人气管和人声襞韧带的  $\mu$  分别为(1.16 ± 0.39)、(4.63 ± 2.20) kPa,相比之下,狐眼外肌的  $\mu$  值比较大,  $\alpha$  值都在同一数量级上。

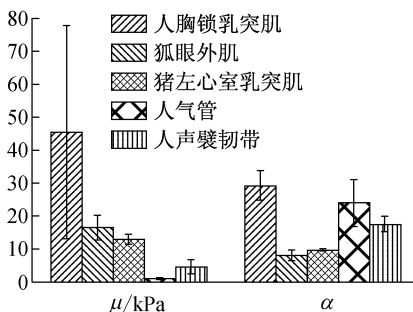


图6 不同肌肉和组织的Ogden超弹性参数的对比

Fig. 6 Comparison of the Ogden hyperelastic parameters among different muscles and tissues

### 3 结论

本文旨在通过Ogden超弹性模型对离体狐眼外肌的被动拉伸行为进行分析,获得相应的超弹性参数  $\mu$  和  $\alpha$ ,并证明其作为数值模型输入量的有效性。

本研究主要存在以下几个方面的局限性:①眼外肌有限元模型根据眼外肌条带的平均尺寸建立,而且所建模型是简单的立方体模型,这与实际的眼外肌条带在几何上有误差。②在取出眼球之前,狐的尸体被储存在-10℃的环境中。有研究表明,温度低于-15℃时肌肉纤维会被损坏<sup>[4,18-19]</sup>,而关于-10℃这一温度是否会损坏肌肉组织的文献很少。然而,与新鲜的肌肉相比,除了其断裂行为以外,解冻肌肉的其他拉伸响应不会发生改变<sup>[4,20]</sup>。在本研究中,测试前狐眼外肌的每条条带均在4℃的环境下储存了12h。③实验中采用的张力载荷与相应的眼外肌断裂载荷还相差很远<sup>[15]</sup>。④未考虑冰冻尸体产生的影响。

本文对狐眼外肌条带进行了单轴拉伸测试,采用一阶Ogden超弹性模型分析了其被动行为,并确定出Ogden超弹性参数  $\mu = (16.57 \pm 3.76)$  kPa 和  $\alpha = 8.16 \pm 1.63$  可被用来计算和模拟狐眼外肌的被动行为。Ogden模型的计算值和有限元模拟值都能很好地拟合实验结果。另外,当应变大于6%时,实验结果和计算结果之间没有统计学差异。因此,本文确定出的超弹性参数可作为数值模拟的输入量。

### 参考文献:

- [1] 高志鹏,陈维毅. 滑车组织在眼球内旋运动时维持眼外肌力学优势的模拟研究[J]. 医用生物力学, 2014, 29(6): 498-503.  
GAO ZP, CHEN WY. Pulley tissues maintain the mechanical advantage of extraocular muscles under eye adduction: A simulation study [J]. J Med Biomech, 2014, 29(6): 498-503.
- [2] 刘梦超,吴信雷,林崇翔,等. 颞下颌关节骨骼肌肉系统三维有限元模型的构建[J]. 医用生物力学, 2015, 30(2): 118-124.  
LIU MC, WU XL, LIN CX, et al. Construction of a 3D finite element model of temporomandibular joints including the musculoskeletal system [J]. J Med Biomech, 2015, 30(2): 118-124.

- [3] FLORES S, ADHIKARI S, FRISWELL MI, *et al.* Hyperelastic finite element model for single wall carbon nanotubes in tension [J]. *Comp Mater Sci*, 2011, 50(3): 1083-1087.
- [4] GRAS LL, MITTON D, VIOT P, *et al.* Hyper-elastic properties of the human sternocleidomastoideus muscle in tension [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2012, 15: 131-140.
- [5] KELLEHER JE, SIEGMUND T, CHAN RW, *et al.* Optical measurement of vocal fold tensile properties: Implications for phonatory mechanics [J]. *J Biomech*, 2011, 44(9): 1729-1734.
- [6] OGDEN RW. Non-linear elastic deformation [J]. *Eng Anal Bound Elem*, 1984, 1(2): 119.
- [7] RASHID B, DESTRADE M, GILCHRIST MD. Mechanical characterization of brain tissue in simple shear at dynamic strain rates [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2013, 28(4): 71-85.
- [8] TENG Z, OCHOA I, LI Z, *et al.* Study of tracheal collapsibility, compliance and stress by considering its asymmetric geometry [J]. *Med Eng Phys*, 2009, 31(3): 328-336.
- [9] CHEN WM, PARK JP, PARK SB, *et al.* Role of gastrocnemius-soleus muscle in forefoot force transmission at heel rise: A 3D finite element analysis [J]. *J Biomech*, 2012, 45(10): 1783-1789.
- [10] LIU XY, WANG LZ, WANG C, *et al.* Mechanism of traumatic retinal detachment in blunt impact: A finite element study [J]. *J Biomech*, 2013, 46(7): 1321-1327.
- [11] ABRAHAM AC, KAUFMAN KR, HAUT DT. Phenomenological consequences of sectioning and bathing on passive muscle mechanics of the New Zealand white rabbit tibialis anterior [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2013, 17(1): 290-295.
- [12] HASSAN MA, HAMD I, NOMA A. The nonlinear elastic and viscoelastic passive properties of left ventricular papillary muscle of a Guinea pig heart [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2012, 5(1): 99-109.
- [13] TRABELSI O, PÉREZ DEL PALOMAR A, LÓPEZ-VILLALOBOS JL, *et al.* Experimental characterization and constitutive modeling of the mechanical behavior of the human trachea [J]. *Med Eng Phys*, 2010, 32(1): 76-82.
- [14] COLLINS CC, CARLSON MR, SCOTT AB, *et al.* Extraocular muscle forces in normal human subjects [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 1981, 20(5): 652-664.
- [15] KENNEDY E, DUMA S. The effects of the extraocular muscles on eye impact force-deflection and globe rupture response [J]. *J Biomech*, 2008, 41(16): 3297-3302.
- [16] SCHUTTE S, VAN DEN BEDEM SPW, KEULEN FV, *et al.* A finite-element analysis model of orbital biomechanics [J]. *Vis Res*, 2006, 46(11): 1724-1731.
- [17] QUAIA C, YING HS, NICHOLS AM, *et al.* The viscoelastic properties of passive eye muscle in primates. I: Static forces and step responses [J]. *PLoS One*, 2009, 4(4): e4850.
- [18] GOTTSÄUNER-WOLF F, GRABOWSKI JJ, CHAO EY, *et al.* Effects of freeze/thaw conditioning on the tensile properties and failure mode of bone-muscle-bone units: A biomechanical and histological study in dogs [J]. *J Orthop Res*, 1995, 13(1): 90-95.
- [19] RALIS ZA. Freezing of orthopedic specimens before mechanical testing [J]. *J Bone Joint Surg*, 1989, 71(1): 55-57.
- [20] VAN EE CA, CHASSE AL, MYERS BS. Quantifying skeletal muscle properties in cadaveric test specimens: Effects of mechanical loading, postmortem time, and freezer storage [J]. *J Biomech Eng*, 2000, 122(1): 9-14.