

文章编号: 1004-7220(2023)06-1235-06

利用一维 Fung 模型探讨长宽比对兔腹部皮肤单轴拉伸力学特性的影响

王辉^{1,2}, 陈婉婷¹, 孙旭君³, 李林^{1,2}, 刘志成^{1,2}

(1. 首都医科大学 生物医学工程学院, 北京 100069; 2. 首都医科大学临床生物力学应用基础研究北京市重点实验室, 北京 100069; 3. 首都医科大学附属北京儿童医院 影像中心, 北京 100045)

摘要:目的 从实验方法学角度研究不同的长宽比对皮肤条状试样单轴拉伸力学特性的影响。方法 以新西兰大白兔腹部皮肤为研究对象, 取其从头到脚(0°)和与之垂直(90°)的两个方向, 获取长宽比从2:1~6:1的多个条状试样, 进行单轴拉伸测试至试样破坏。经过实验数据处理, 得到兔腹部皮肤单轴拉伸的 Kirchhoff 应力-Green 应变数据, 利用一维 Fung 模型 $S=cE\exp(\alpha E^2)$ 对其进行拟合, 从而得到相应的材料参数 c, α , 并对参数进行统计学分析。结果 两个方向上 c 值差异不明显 ($P=0.151$), α 值差异比较大 ($P=0.001$)。两个方向上不同长宽比兔腹部试样参数 c, α 无显著性差异 ($P>0.05$)。结论 在2:1~6:1长宽比范围内, 兔腹部皮肤试样不同长宽比对单轴拉伸力学特性无影响。

关键词: 长宽比; 单轴拉伸; 软组织; 皮肤; 力学特性

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.06.027

The Effect of Aspect Ratio on Uniaxial Tensile Mechanical Properties of Rabbit Abdominal Skin Using One-Dimensional Fung Model

WANG Hui^{1,2}, CHEN Wanting¹, SUN Xujun³, LI Lin^{1,2}, LIU Zhicheng^{1,2}

(1. School of Biomedical Engineering, Capital Medical University, Beijing 100069, China; 2. Beijing Key Laboratory of Fundamental Research on Biomechanics in Clinical Application, Capital Medical University, Beijing 100069, China; 3. Imaging Center, Beijing Children Hospital, Capital Medical University, Beijing 100045, China)

Abstract: Objective To investigate the effect of different aspect ratios on uniaxial tensile mechanical properties of skin strip specimens from the perspective of experimental methodology. **Methods** The abdominal skin of New Zealand rabbits was taken as the research object. Strip specimens with aspect ratios ranging from 2:1 to 6:1 were obtained in the direction from the head to the foot (0°) and in the direction perpendicular to it (90°), and uniaxial tensile tests were performed until the specimens were damaged. After experimental data processing, Kirchhoff stress-Green strain data from uniaxial stretch on the abdominal skin of rabbits were obtained and fitted using a one-dimensional Fung model $S=cE\exp(\alpha E^2)$, so as to obtain the corresponding material parameters c and α , and statistical analysis of the parameters was performed. **Results** The differences in c values in two

收稿日期: 2022-10-12; 修回日期: 2022-11-05

通信作者: 王辉, 实验师, E-mail: davidwh@ccmu.edu.cn

directions were not significant ($P=0.151$), and the differences in α values were relatively large ($P=0.001$). There was no significant difference in parameters c and α between rabbit abdominal specimens with different aspect ratios in both directions ($P>0.05$). **Conclusions** Different aspect ratios of rabbit abdominal skin specimens in the range from 2:1 to 6:1 had no effects on their uniaxial tensile mechanical properties.

Key words: aspect ratio; uniaxial stretch; soft tissues; skin; mechanical properties

为了使身体能够自由移动,皮肤必须能够扭曲和拉伸,但也要具有足够的力学强度和韧性来抵抗物理损伤或撕裂。其中,皮肤许多功能的实现依赖于其生物力学特性,如黏弹性、张力、抗压力等。皮肤的生物力学特性已在广泛的领域进行了研究,例如生物医学工程、法医、美容、骨科手术、外科以及组织工程支架的开发等。因此,皮肤的力学本构关系即应力-应变关系显得尤为重要。尽管应力-应变关系与试样尺寸无关,是皮肤本身的物理特性,但获取这种本构关系最直接有效的手段是离体实验。

为了保证测试方法对实验结果没有影响,离体实验通常在材料形状方面应用某些固定的设置^[1]。由于个体差异、自身尺寸、实验操作等原因,生物材料测试样本的几何形状没有相应的标准。在以皮肤等软组织为研究对象的单轴拉伸力学实验中,试样选取各异,大小杂乱,尺度不一,长宽比从 1.6:1~10:1不等,尤以较小的长宽比居多^[2-8]。研究表明,试样的长宽比越大,对夹持两端应力分布的影响越小^[9]。由于材料的尺寸、剪裁方法和实验条件受限,皮肤试样多数无法取到较大长宽比。

考虑到皮肤的各向异性,本文选取 2 个互相垂直的方向获得多个条状试样,进行单轴拉伸,利用经典的一维 Fung 模型^[10]对实验获取的应力、应变数据进行拟合,对拟合后的参数进行统计学分析,比较不同长宽比(2:1~6:1)条状试样在单轴拉伸时力学特性的差异。通过了解条状试样长宽比对皮肤单轴拉伸力学特性的影响,为皮肤生物力学单轴拉伸试验样本的制作提供参考,也为制定软组织生物力学实验的标准提供依据。

1 材料与方法

1.1 试样制备与测量

随机挑选体质量 1.8~2.2 kg 健康成年纯种新西兰白兔 10 只。根据动物伦理学和动物福利学原则,采用空气栓塞法将其处死。处死后,去毛,标记

其腹白线[见图 1(a)],将整个腹部皮肤切下来,去除脂肪等多余组织。本研究已获得首都医科大学实验动物伦理委员会的批准。

设从头到脚的方向为 0°方向,垂直于它的方向为 90°方向。在坐标纸上用手术刀切取皮肤样本,每个方向按 2:1,3:1,4:1,5:1,6:1 范围取 5 个整数长宽比,每个长宽比至少取 3 条试样[见图 1(b)]。取得的试样依次放入装有生理盐水的培养皿。用游标卡尺测量试样中间区域不同位置的宽度 3 次,用 Keyence 激光测厚仪(Keyence 公司,日本)测量试样中间区域不同位置的厚度 3 次[见图 1(c)]。整个过程中试样保持平铺状态不变。

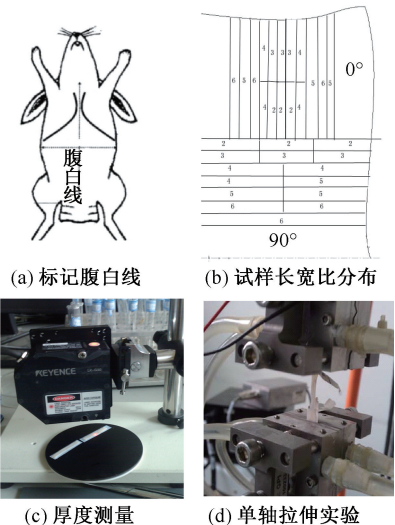


图 1 实验兔腹部皮肤条状试样单轴拉伸实验

Fig. 1 Uniaxial tensile test on skin strip specimens of experimental rabbits (a) Marker of abdominal linea alba, (b) Aspect ratio distribution of the specimens, (c) Thickness measurement, (d) Uniaxial tensile test

1.2 单轴拉伸试验

采用型号为 ElectroForce 3330 材料力学实验机(TA 仪器公司,美国),配以载荷量程 225 N(精度 1/3 N)、位移量程 25.4 mm(精度 0.1 mm)传感器。并用专业的冷冻夹具对试样进行夹持,可防止在单

轴拉伸实验时,试样脱落[见图 1(d)].参考有关文献[11-13],以所测试样长度的 15% 为最大位移,对皮肤试样进行 10 次预调。接着,以 1 mm/min 速率进行单轴拉伸测试,直至试样被拉断。

1.3 数据处理

将单轴拉伸实验获得的载荷-位移数据转换为应力-应变数据。试样的应力、应变公式如下:

$$\begin{cases} T = F / (L_{20} h_0) \\ \lambda = L_1 / L_{10} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} S = T / \lambda \\ E = (\lambda^2 - 1) / 2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: T 为 Lagrange 和 Piola 定义下的应力; λ 为主伸长比来描述的变形; S 为 Kirchhoff 定义下的应力; E 为按 Green 和 St. Venant 定义的应变^[14]; L_{10} 、 L_{20} 分别为试样原始尺寸的长和宽; L_1 为试样受力后长度; h_0 为试样初始厚度。

按照上述公式,对每只实验兔同一角度、同一长宽比用于平均的 3 条试样的位移-载荷数据取平均值。将平均值换算为拟合所需要的 Kirchhoff 应力-Green 应变数据。使用 $S = c \exp(\alpha E^2)$ ^[10] 拟合 2 个方向所有试样的应力、应变数据,求得两个材料参数 c 与 α (见图 2)。整个过程在 Mathematica 软件中进行。

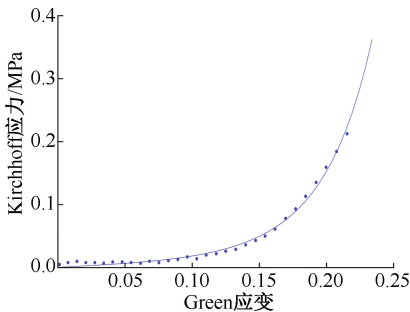


图 2 实验数据与拟合曲线

Fig. 2 Experiment data and fitting curve

1.4 统计学分析

将参数分组,利用 SPSS 软件进行统计学分析,检验同一方向、不同长宽比参数组之间是否有显著性差异。设显著性水平为 0.05, $P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。

2 结果

10 只实验兔腹部皮肤 0° 和 90° 方向上不同长

宽比试样的参数 c 、 α 拟合结果如图 3 所示。

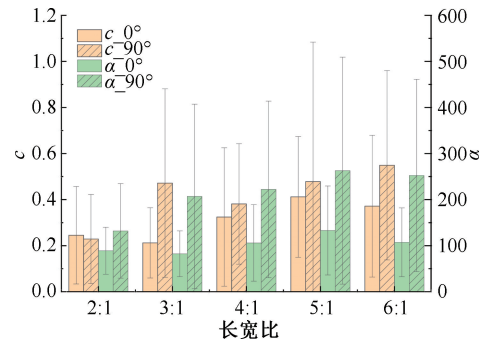


图 3 不同长宽比试样材料参数 c 、 α 对比 ($n=10$)

Fig. 3 Material parameters c and α of samples with different aspect ratios

首先,对两个材料参数进行正态性检验,结果不符合正态分布 ($P < 0.05$)。选择配对样本非参数检验,结果表明,水平与垂直方向的 c 无显著性差异 ($P = 0.151$),水平与垂直方向的 α 具有显著性差异 ($P = 0.001$)。两个方向上 c 值差异不明显, α 值差异比较大,和皮肤是各向异性的力学特性相符(见图 4)。

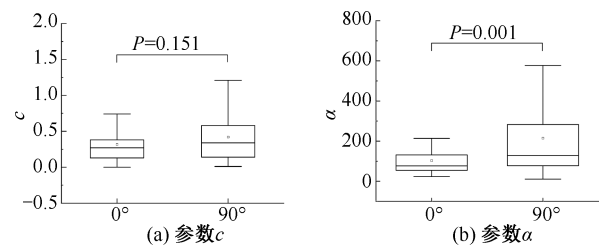


图 4 参数 c 、 α 统计学结果

Fig. 4 Statistical results of parameters c and α

(a) Parameter c , (b) Parameter α

然后,对不同长宽比的 c 、 α 进行比较。按照长宽比,将数据分成 5 组,检验 5 组之间两个方向的 c 、 α ,结果无统计学意义 ($P > 0.05$),说明皮肤试样具有不同长宽比对兔腹部皮肤单轴拉伸力学特性的影响不大。

3 讨论

本文利用一维 Fung 模型拟合兔腹部皮肤条状试样单轴拉伸获取的应力-应变曲线,结果发现,长宽比的改变对一维 Fung 模型的参数影响不大,即不同长宽比的兔腹部皮肤条状试样对单轴拉伸力学特性的影响不大。

对于软组织拉伸实验力学性能的结果分析大部分基于本构关系。皮肤的各向异性特性与真皮层中胶原纤维的结构有关。通常,皮肤的应力-应变曲线会呈现出3段不同的区域:脚趾区、线性区和屈服区。在脚趾区,胶原纤维仍然是波浪形,主要是弹性纤维的拉伸变形承受应力;而线性区因为胶原纤维内的胶原蛋白分子拉伸和滑移,导致胶原纤维已经失去了它的纹理性,此时的应力随着应变呈线性增加;最后的屈服区是胶原纤维结构破坏的表现^[15]。很多研究通过对这3个区域进行相应分析,得出力学性能规律。范雨田等^[2]在研究巩膜的区域性力学性能研究中,考察了材料的弹性模量和刚度;Carew等^[16]研究猪主动脉瓣组织不同长宽比试样拉伸特性的影响,参考量为刚度和延展性;Lewis等^[17]探究年龄对人体跟腱的拉伸特性影响,讨论刚度、应变率和应力最大的变化规律;Chow等^[18]将脚趾区的切线(称为 initial slope^[19-21])和刚度等物理量进行对比,分析冷冻因素对主动脉在生理学和力学性质引起的变化。由于皮肤的力学特性取决于真皮内胶原、弹性纤维的形状和长短,故离体实验时皮肤试样尺寸对单轴拉伸的力学特性产生影响,试样过窄或者过短有可能导致不同的应力-应变关系。

类似于孟鑫等^[5]通过单轴拉伸测试对猪胸主动脉和颈总动脉力学非线性数据开展的拟合分析中只包含了生理区,本文利用一维 Fung 模型拟合兔腹部皮肤单轴拉伸试验获取的应力-应变关系曲线,也只涵盖了脚趾区。而这个区域是软组织具有生理活性的区域,是研究和应用皮肤力学特性最聚焦的区域。在图2所示的拟合曲线中,末端显示出所取实验数据范围外的预测值。之后的实验数据能否达到预测值,这与实验数据选取的曲线生理区截止点有关^[22]。不同的截止点对拟合优度的影响很大,使得对应的参数值波动很大。为了达到较好的拟合效果,本研究选取的目标函数数量级为 10^{-5} ,保证了算出参数之间的一致性。

本实验的样本量较少($n=10$),不同实验兔腹部皮肤试样存在的差异较大。比较 0° 方向下长宽比为6:1所有兔腹部皮肤试样平均后的应力-应变曲线发现,同一个长宽比时不同实验兔的皮肤力学特性差异较大[见图5(a)]。本文认为,极有可能

个体差异对试样力学特性测量的影响比长宽比的影响要大得多,从而出现不同长宽比无差异的结果。

为了消除结果中样本差异的影响,将 0° 方向相同长宽比的10只实验兔皮肤试样应力-应变曲线平均。结果表明,生理区范围内,在低于0.05 MPa的应力水平,不同长宽比的曲线基本重合在一起;在应力水平为0.10 MPa时,长宽比为5:1、6:1、4:1、3:1、2:1实验兔皮肤试样两两之间应变误差依次为8.8%、5.6%、3.6%和4.3%,差异不明显;在较高应力水平,曲线收敛性一致[见图5(b)]。该结果从不同角度说明不同长宽比的兔皮肤试样力学特性无差异。

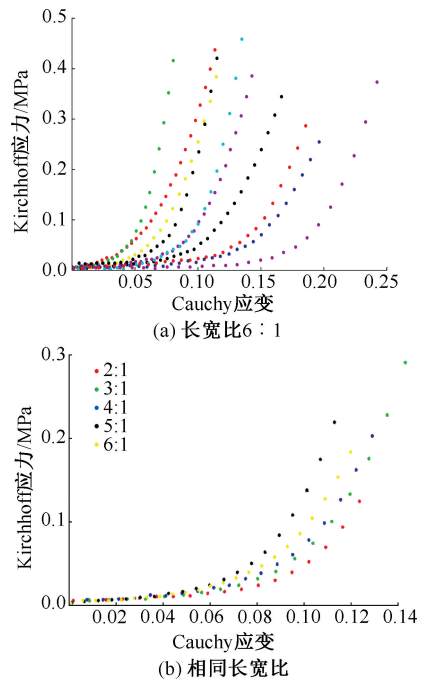


图5 0° 方向兔皮肤试样应力-应变曲线($n=10$)

Fig. 5 Stress-strain curves of rabbit skin samples in 0° direction (a) With the length-width ratio of 6:1, (b) With the same length-width ratio

注:图5(a)中不同颜色表示不同的实验兔皮肤样本。

试样在生理盐水中的浸泡时间直接影响皮肤的生理活性,进而影响其力学特性^[23-24]。因此,本研究中测量时间对实验结果产生影响。在预实验中发现,试样拉伸前的浸泡时间越长,试样拉伸至破坏的时间越短,生理区也相应缩短。本文通过完全随机抽样来决定试样上试验机的顺序,减小由不

同浸泡时间造成的测试结果误差。

本研究的局限性如下: ① 预调过程都使用 10 次加载卸载, 可能有些试样没达到预期稳定状态; ② 只考虑了软组织单轴拉伸时应力-应变曲线的生理区的拟合, 并没有对线性区域进行拟合, 即弹性模量以及极限应力与试样的长宽比之间的关系进行评估。在本实验的基础上, 增大样本量和长宽比范围, 使用多种其他平面软组织, 借助细观力学解释宏观实验现象, 可指导设计平面软组织单轴拉伸实验的几何尺寸。

4 结论

在从头到脚和与之垂直的两个方向上, 2:1~6:1 范围内不同长宽比的兔腹部皮肤条状试样的单轴拉伸力学特性差异没有统计学意义。根据本研究结果, 某些特殊平面软组织试样在单轴拉伸实验中, 可以不使用大长宽比试样。其他软组织也可以根据具体实验情况裁剪。

参考文献:

- [1] WALDMAN SD, LEE JM. Effect of sample geometry on the apparent biaxial mechanical behaviour of planar connective tissues [J]. *Biomaterials*, 2005, 26 (35): 7504-7513.
- [2] 范雨田, 陈凌峰, 高志鹏, 等. 巩膜的区域性力学性能研究 [J]. *医用生物力学*, 2020, 35(2): 178-183.
FAN YT, CHEN LF, GAO ZP, *et al.* Regional mechanical properties of the sclera [J]. *J Med Biomech*, 2020, 35(2): 178-183.
- [3] 张迪, 张海霞, 曾正, 等. 基于快、慢速加载单轴拉伸数据识别的角膜生物力学特性比较 [J]. *医用生物力学*, 2022, 37 (4): 669-675.
ZHANG D, ZHANG HX, ZENG Z, *et al.* Comparison of corneal biomechanical properties based on data from uniaxial tensile test under fast and slow loading [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(4): 669-675.
- [4] 成海平, 刘策力, 张立楚. 人股前区全厚、中厚和刃厚皮片垂直轴向本构关系及其意义 [J]. *医用生物力学*, 1998, 13 (2): 86-90.
CHENG HP, LIU CL, ZHANG LC. The vertical axial constitutive equation and its clinical signification on full thickness, middle thickness and epidermic graft-skin at anterior ares of the human thigh [J]. *J Med Biomech*, 1998, 13(2): 86-90.
- [5] 孟鑫, 王小峰, 黄敏杰, 等. 猪动脉血管的力学性能分析 [J]. *医用生物力学*, 2019, 34(4): 411-416.
MENG X, WANG XF, HUANG MJ, *et al.* Analysis on mechanical properties of porcine artery [J]. *J Med Biomech*, 2019, 34(4): 411-416.
- [6] SOKOLIS DP, KEFALOYANNIS EM, KOULOUKOUSSA M, *et al.* A structural basis for the aortic stress-strain relation in uniaxial tension [J]. *J Biomech*, 2006, 39(9): 1651-1662.
- [7] SANG C, MAITI S, FORTUNATO RN, *et al.* A uniaxial testing approach for consistent failure in vascular tissues [J]. *J Biomech Eng*, 2018, 140(6): 0610101-06101010.
- [8] PEI M, ZOU D, GAO Y, *et al.* The influence of sample geometry and size on porcine aortic material properties from uniaxial tensile tests using custom-designed tissue cutters, clamps and molds [J]. *PLoS One*, 2021, 16(2): e244390.
- [9] 王润富. 弹性力学简明教程学习指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 18-20.
- [10] LI L, QIAN X, WANG H, *et al.* Power type strain energy function model and prediction of the anisotropic mechanical properties of skin using uniaxial extension data [J]. *Med Biol Eng Comput*, 2013, 51(10): 1147-1156.
- [11] LABUS KM, KUIPER JP, RAWLINSON J, *et al.* Mechanical characterization and viscoelastic model of the ovine temporomandibular joint disc in indentation, uniaxial tension, and biaxial tension [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2021, 116: 104300.
- [12] BIANCO G, LEVY AM, GRITZ R, *et al.* Effect of different preconditioning protocols on the viscoelastic inflation response of the posterior sclera [J]. *Acta Biomaterialia*, 2021, 128: 332-345.
- [13] 王辉, 乔媛慧, 刘志成. 利用应变能衰减率确定软组织单轴拉伸预调次数 [J]. *医用生物力学*, 2013, 28(6): 602-605.
WANG H, QIAO YH, LIU ZC. Determining the number of preconditioning cycles by calculating the decay rate of strain energy in uniaxial tensile test on soft tissue [J]. *J Med Biomech*, 2013, 28(6): 602-605.
- [14] 冯元桢. 生物力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1983: 124-160.
- [15] 卢天健, 徐峰. 皮肤的力学性能概述 [J]. *力学进展*, 2008, 38(4): 393-426.
- [16] CAREW EO, PATEL J, GARG A, *et al.* Effect of specimen size and aspect ratio on the tensile properties of porcine aortic valve tissues [J]. *Ann Biomed Eng*, 2003, 31(5): 526-535.
- [17] LEWIS G, SHAW KM. Tensile properties of human tendo Achillis: Effect of donor age and strain rate [J]. *J Foot Ankle Surg*, 1997, 36(6): 435-445.
- [18] CHOW MJ, ZHANG Y. Changes in the mechanical and biochemical properties of aortic tissue due to cold storage

- [J]. *J Surg Res*, 2011, 171(2): 434-442.
- [19] STEMPER BD, YOGANANDAN N, STINEMAN MR, *et al*. Mechanics of fresh, refrigerated, and frozen arterial tissue [J]. *J Surg Res*, 2007, 139(2): 236-242.
- [20] EDWARDS MB, DRAPER ER, HAND JW, *et al*. Mechanical testing of human cardiac tissue: Some implications for MRI safety [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2005, 7(5): 835-840.
- [21] ROEDER BA, KOKINI K, STURGIS JE, *et al*. Tensile mechanical properties of three-dimensional type I collagen extracellular matrices with varied microstructure [J]. *J Biomech Eng*, 2002, 124(2): 214-222.
- [22] XIANG Y, SHEN M, XUE C, *et al*. Tensile biomechanical properties and constitutive parameters of human corneal stroma extracted by SMILE procedure [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2018, 85: 102-108.
- [23] CUNNANE CV, CROGHAN SM, WALSH MT, *et al*. Cryopreservation of porcine urethral tissue: Storage at -20 °C preserves the mechanical, failure and geometrical properties [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2021, 119: 104516.
- [24] 刘力夫, 尹梦虹, 齐志明, 等. 保存时间对兔髌韧带压缩力学性能的影响[J]. *医用生物力学*, 2022, 37(2): 225-230.
LIU LF, YIN MH, QI ZM, *et al*. Effects of storage duration on compressive mechanical properties of rabbit patellar ligament [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(2): 225-230.