

# 利用应变能衰减率确定软组织单轴拉伸预调次数

王 辉<sup>1</sup>, 乔媛慧<sup>2</sup>, 刘志成<sup>1</sup>

(1. 首都医科大学 生物医学工程学院, 北京 100069; 2. 首都医科大学附属友谊医院, 北京 100050)

**摘要:** **目的** 探讨利用应变能衰减率来确定软组织单轴拉伸的预调次数的方法。**方法** 以健康的新西兰大白兔的腹部皮肤为研究对象, 裁取与腹白线平行(0°)、垂直(90°)两个方向上的条状试样, 进行应变为 15% 的单轴拉伸预调实验。将获得的载荷-位移加载卸载实验数据转换成相应的应力-应变数据, 并利用 MATLAB 编程计算应变能衰减

率  $\eta = \frac{W_n - W_{n-1}}{W_{n-1}} \times 100\%$  ( $W_n$  表示第  $n$  次预调的应变能损失), 分别获取  $\eta \leq 5\%$  和  $10\%$  条件下的预调次数  $n$ 。

**结果** 5% 衰减率下, 0° 和 90° 方向上的预调次数均值分别为 11.11 和 13.67。10% 衰减率下, 0° 和 90° 方向上的预调次数分别为 6.67 和 7.78。**结论** 利用应变能衰减率可以量化软组织单轴拉伸预调次数, 为软组织生物力学测试的标准化提供了研究基础。

**关键词:** 软组织; 拉伸测试; 应变能; 应力; 衰减率

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

## Determining the number of preconditioning cycles by calculating the decay rate of strain energy in uniaxial tensile test on soft tissues

WANG Hui<sup>1</sup>, QIAO Yuan-hui<sup>2</sup>, LIU Zhi-cheng<sup>1</sup> (1. School of Biomedical Engineering, Capital Medical University, Beijing 100069, China; 2. Beijing Friendship Hospital, Capital Medical University, Beijing 100050, China)

**Abstract:** **Objective** To investigate a method determining the number of preconditioning cycles in uniaxial tensile test on soft tissues by calculating the decay rate of strain energy. **Methods** The abdominal skin of healthy New Zealand rabbits was selected as study object, from which strip specimens were obtained in directions parallel to linea alba (0°) and perpendicular to linea alba (90°). Then the uniaxial preconditioning tests with 15% preconditioning strain were performed on these specimens. Load-displacement preconditioning data were obtained, and transformed into the stress-strain data correspondingly. The preconditioning cycles ( $n$  values), at the decay rate of strain energy being 5% and 10%, respectively, were then calculated by MATLAB programme when  $n$  values satisfy the inequality  $\eta = \frac{W_n - W_{n-1}}{W_{n-1}} \times 100\% \leq 5\%$  or  $\leq 10\%$  ( $W_n$  signifies the strain energy loss in the  $n$ th preconditioning cycle). **Results** When the decay rate of strain energy was 5%, the number of preconditioning cycles in 0° and 90° direction was 11.11 and 13.67, respectively. When the decay rate of strain energy was 10%, the number of preconditioning cycles in 0° and 90° direction was 6.67 and 7.78, respectively. **Conclusions** By calculating the decay rate of strain energy, the number of preconditioning cycles in uniaxial tensile on soft tissues can be quantified, which could help provide the research basis for standardization of biomechanical testing on soft tissues.

**Key words:** Soft tissue; Tensile testing; Strain energy; Stress; Decay rate

软组织生物力学试验,经历了沿用普通材料力学的方法、离体生物力学方法、在体生物力学和活体生物力学方法几个阶段<sup>[1]</sup>。单轴拉伸实验作为一种测试方法,操作简单、易控制,被广泛地应用到在体和离体的生物力学性质测试中,尤其是在离体实验中。由于软组织是典型的黏弹性材料,具有滞后性,故在进行单轴拉伸前,必须进行预调实验,以消除滞后性的影响,从而使软组织达到一个稳定的、可重复操作的状态。

20 世纪以来,随着生物力学的迅速发展,力学测试的仪器设备也愈加专业化、精密化。20 世纪 70 年代冯元桢<sup>[2]</sup>指出,软组织单轴拉伸实验中预调次数为 3~5 次,这个观点已经不具有现实的应用意义。文献[3-11]中以皮肤、脊髓、盆底组织、小肠黏膜、人动脉、韧带为对象,通过单轴拉伸实验研究其生物力学特性;在进行预调实验时,其预调次数为 3~30 次不等。

由此可见,关于预调次数没有形成单轴拉伸预调实验的规范。确定生物软组织预调次数对准确评价生物组织力学参数具有重要意义。本文以新西兰大白兔的腹部皮肤为研究对象,提出以应变能衰减率计算单轴拉伸预调次数,为进一步定量确定生物组织的预调次数提供研究基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试样制备与测量

采用健康的成年新西兰大白兔,平均体重 2 kg,年龄 4~5 个月。动物由首都医科大学实验动物部提供。根据动物伦理学和动物福利学原则,采用空气栓塞法:即经实验动物耳缘静脉注射 20~40 mL 空气将其处死。处死后,去毛,标记其腹白线。用刀片取其腹部皮肤、手术刀去除残余脂肪。将皮肤平展于硬纸板之上,用剪刀沿裁取与腹白线平行(0°)、垂直(90°)两个方向上长宽为 50 mm×8 mm 的条带试样,共 240 个。用 Keyence 激光测厚仪及 LK-Navigator 软件测量试样左、中、右 3 个位置的厚度,取其平均值,并计算试样的横截面积 S。

### 1.2 单轴拉伸预调实验

采用型号为 BOSE3330 材料力学实验机,配以载荷和位移量程分别为 225 N、25.4 mm 的传感器,精度分别为 1/3 N、10 μm。并用专业的冷冻夹具对

试样进行夹持,可防止在单轴拉伸预调实验时试样滑脱。预调实验采用正弦波、位移控制,采样频率为 100 Hz,正弦波加载频率为 1 Hz。在 15% 应变水平下,将每个试样预调 50 次。

预调前,试样放置在浓度为 0.9% 的生理盐水中,室内温度保持在 25 ℃ 左右,保证一定的湿度和温度以模拟生理环境。从取样到测试完成总实验耗时控制在 3 h 内,以保证组织的生物活性。

### 1.3 数据处理

将试验机获取的载荷-位移实验数据,利用 EXCEL 中的自带函数 average 进行 5 点滑移平均后,根据

$$\sigma = \frac{F_i}{S} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} (\Delta L = L_i - L) \quad (2)$$

换算成应力-应变数据。假设在单轴拉伸预调实验中试样的横截面面积 S 的改变可以忽略。式中:σ 为应力;ε 为应变;F<sub>i</sub> 为加载力;L<sub>i</sub> 为力加载后试样长度,L 为试样原长。

### 1.4 MATLAB 编程处理获取预调次数

应变能就是物体变形过程中贮存在物体内部的势能。软组织在加载卸载过程中就会产生应变能的损失。如图 1 所示,闭合的曲线区域即为软组织加载卸载一次损失的应变能。

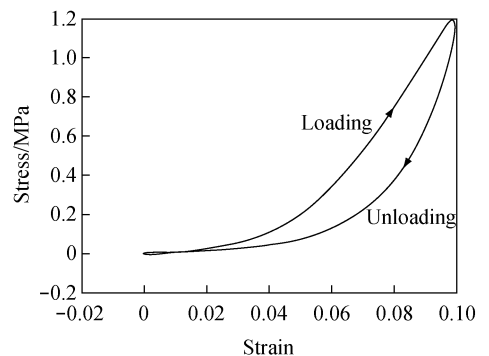


图 1 典型的软组织应力-应变关系曲线

Fig. 1 Stress-strain curve of a typical soft tissue

因此,定义第 n 次加卸载周期软组织损失的应变能为 W<sub>n</sub>,利用 MATLAB 7.0 中 polyarea(x, y)(x, y 是两个矩阵)函数计算应变能衰减率,即

$$\eta = \frac{W_n - W_{n-1}}{W_{n-1}} \times 100\%$$

输出  $\eta < 5\%$  和  $\eta < 10\%$  情况下的预调次数  $n$ 。

### 1.5 数据统计分析

将上述经 MATLAB 7.0 处理的实验结果  $n$ , 用 SPSS 13.0 进行统计学分析, 得出预调次数均值  $M$  及标准差  $SD$ 。

## 2 结果

5% 及 10% 衰减率下垂直两个方向上的预调次数结果见表 1、2。

表 1 5% 衰减率下垂直两个方向上的预调次数

Tab. 1 The number of preconditioning cycles in two directions when the decay rate of strain energy was 5%

方向/(°)	预调次数 $M$	标准差 $SD$
0	12	0.928
90	14	1.225

表 2 10% 衰减率下垂直两个方向上的预调次数

Tab. 2 The number of preconditioning cycles in two directions when the decay rate of strain energy was 10%

方向/(°)	预调次数 $M$	标准差 $SD$
0	6.67	0.886
90	7.71	1.093

## 3 讨论

目前, 对于软组织生物力学特性测试, 不管使用单轴加载还是双轴加载, 试样一般都经过预调。关于预调冯元桢<sup>[2]</sup>是这样描述的: 当实验无限重复下去, 相邻两曲线之间的差异不断减小, 最终消失, 即可认为预调好了。文献[13]中建议至少需要 5 次预调才足以消除滞后性。而无限次地对试样加、卸载会影响其软组织的结构和生物力学特性, 故无限次地预调是不可行的。因此, 必须找到一种合适的方法去量化软组织力学测试过程中的预调次数。

文献[12]中以四头肌腱和膝交叉韧带为研究对象, 通过对试样加卸载不同的周期, 观察其蠕变性; 根据试样加卸载曲线, 观察其滞后性。结果发现当预调次数  $> 150$  次时, 蠕变现象基本消失, 滞后环的面积趋于 1 个常数。由于个体差异和非均质性, 假设以滞后环的面积为预调的参考标准, 则不具有普遍适用意义。本文则是提出以应变能损失(滞后

环面积)率作为评价标准的参考量, 这样可以消除个体与个体、以及个体内部之间的差异。

类似地, 文献[13]中提出以“repeatability ratio”作为标准来评价猪大动脉瓣的应力松弛情况。Repeatability ratio 是指同一试样在不同周期的两条应力松弛曲线上的特定时间点的应力比值的最小值。当 repeatability ratio  $> 95\%$  时, 即可认为该试样处于一个稳定的、可参考的状态。

本文探讨了应变能损失率  $\eta$  对预调次数的影响, 统计分析  $\eta \leq 5\%$  和  $\eta \leq 10\%$  情况下的垂直两个方向上的预调次数。在对兔子皮肤以及与其相似的软组织件进行拉伸力学性能测试的时候, 若以 5% 作为衰减率, 单个样本  $0^\circ$  和  $90^\circ$  方向上应该分别选择至少 13 和 15 次的预调次数, 可以保证试件完全在一个可以重复、稳定的状态。如果对一定数量的相同试样进行实验, 对应的预调次数依次为 12、14 次, 可以保证实验结果的准确性和可靠性的。同样地, 若以 10% 作为衰减率, 对单一试样而言, 垂直两个方向上的预调次数依次为 8、10 次。对多样本的试样而言, 依次为 7、8 次。

参考文献[14], 本文只对 15% 应变水平下的预调次数进行对比。可能不同的应变水平其对应的预调次数会有所不同, 但本文选择的 15% 应变水平至少保证试样在预调过程中没有产生暂时性或永久性的破坏。

尽管测试对象各有不同, 与其他文献中涉及的预调次数相比, 本文以应变能衰减率能够精确计算出测试对象所需的预调次数。至于 5% 衰减率时(或 10% 时)的预调次数就满足测试要求, 后期会对这两种预调次数下的皮肤试样进行力学测试, 并对其参数通过可靠的比较进行补充。

另外, 本文只对兔子腹部皮肤进行实验研究, 后期会考察其他生物材料来进一步验证以应变能衰减率确定预调次数方法的科学性、可靠性。

## 4 结论

在单轴拉伸实验中, 预调是一个非常重要的步骤, 直接影响软组织生物力学测试结果的可靠性。本文提出的以应变能衰减率来考察预调次数的方法, 可以定量、有效地确定软组织单轴拉伸实验所需的预调次数。

## 参考文献:

- [1] 程海平. 活体生物组织力学特性研究的研究现状[J]. 国外医学生物医学工程分册, 1994, 17(6): 217-322.
- [2] 冯元桢. 生物力学: 活组织的力学特性[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [3] 吴新丰, 康国政, 钱林茂. 猪背部皮肤生物力学特性的实验研究[J]. 医用生物力学, 2009, 24(6): 252-456.  
Wu XF, Kang GZ, Qian LM, et al. Experimental study on biomechanical property of the skin in pig's back [J]. J Med Biomech, 2009, 24(6): 452-457.
- [4] Cheng S, Clarke EC, Bilston LE. The effect of preconditioning strain on measured tissue properties [J]. J Biomech, 2009, 42(9): 1360-1362.
- [5] 宋红芳, 陈胜利, 刘志成. 兔盆底组织力学特性的实验研究[J]. 医疗设备信息, 2007, 22(11): 4-6.
- [6] 牛文鑫, 冷晔, 丁祖全, 等. 小肠粘膜下层单轴拉伸参考状态的选取以及应力应变关系[J]. 中国医学工程学报, 2007, 26(2): 265-269.
- [7] 姜宗来, 何光篪. 人冠状动脉的生物力学特性研究[J]. 第三军医大学学报, 1989, 11(4): 241-246.
- [8] 赵宝林, 张忠君, 马洪颜. 人颈椎后纵韧带粘弹性实验研究[J]. 北京生物医学工程, 2005, 24(2): 120-124.
- [9] 周安国, 于涛, 陈鹏, 等. 膝关节后交叉韧带的拉伸力学性质[J]. 中国组织工程技术与临床康复, 2008, 12(6): 1085-1088.
- [10] 记祥, 张玉玲. 拇指掌指关节侧副韧带的生物力学研究[J]. 中国临床研究, 2012, 23(5): 372-373.
- [11] 杨坚, 曾衍均, 李志辉. 人角膜的生物力学特性[J]. 生物物理学报, 1999, 15(1): 208-214.
- [12] Schatzmann L, Brunner P, Staubli HU. Effect of cyclic preconditioning on the tensile properties of human quadriceps tendons and patellar ligaments [J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 1998, 11(Suppl 1): 56-61.
- [13] Carew EO, Garg A, Barber JE, et al. Stress relaxation preconditioning of porcine aortic valves [J]. Ann Biomed Eng, 2004, 32(4): 563-572.
- [14] Wagenseil JE, Wakatsuki T, Okamoto RJ, et al. One-dimensional viscoelastic behavior of fibroblast populated collagen matrices [J]. J Biomech Eng, 2003, 125(5): 719-725.

## 《医用生物力学》杂志征稿、征订启事

《医用生物力学》杂志由中华人民共和国教育部主管、上海交通大学主办,是国内唯一一本公开发行,积极反映生物力学基础研究与应用研究成果,推动国内外学术交流,促进医、生、理、工各学科相互了解和合作为目的学术性刊物。报道内容主要包括生物力学领域中有关力学生物学、器官-组织生物力学、细胞-亚细胞-分子生物力学、感觉系统生物力学、骨骼肌肉系统生物力学、航空航天生物力学、颌面口腔生物力学、呼吸系统生物力学、康复工程生物力学、心血管系统生物力学、血液流变学、医用材料生物力学、运动医学生物力学等的研究论文。本刊为中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊);美国《化学文摘》、波兰《哥白尼索引》、俄罗斯《文摘杂志》、荷兰《文摘与引文数据库》来源期刊;2010-2012年被美国《工程索引》(Ei Compendex)列为核心期刊;2012年入选北京大学图书馆《中文核心期刊要目总览》(2011年版)。

本刊为双月刊,每双月25日出版,16开本,112页,国内统一连续出版物号CN 31-1624/R,国际标准连续出版物号ISSN 1004-7220;定价每期15元,全年90元,由邮局向全国征订发行,邮发代号4-633。读者可在附近邮局订阅或拨打“11185”热线电话通过邮政“11185”客户服务中心电话订阅。欢迎广大读者、作者订阅本刊,踊跃来稿。

地址:上海市制造局路639号200011

电话:(021)23271133;传真:(021)63137020;电子信箱:shengwulixue@gmail.com

网址:www.medbiomechanics.com, www.mechanobiology.cn