

文章编号:1004-7220(2010)03-0182-04

基于整体膨隆实验的虹膜弹性模量求解方法

杨进, 薄雪峰, 钱秀清, 王倩, 王建霞, 卢金秋, 全海英, 刘志成

(首都医科大学 生物医学工程学院, 北京 100069)

摘要: 目的 求解虹膜材料的弹性模量。方法 采用自行研制的实验装置,对完整的离体兔眼虹膜试件进行 0 Pa 到 600 Pa 的压力加载,获取虹膜加压膨隆的数据,计算虹膜膨隆高度。然后以实测数据为基础,利用 ANSYS 12.0 进行虹膜有限元分析,反推计算虹膜线弹性区间的弹性模量。结果 虹膜在载荷为 100 Pa 时的弹性模量为 6.1 kPa。结论 虹膜在前后房压强差较小的情况下可以简化为线弹性材料。

关键词: 有限元; 压强; 虹膜; 弹性模量; 线弹性

中图分类号: R318 文献标志码: A

Measuring iris elastic modulus based on holistic iris deformation experiment

YANG Jin, BO Xue-feng, QIAN Xiu-qing, WANG Qian, WANG Jian-xia, LU Jin-qiu, QUAN Hai-ying, LIU Zhi-cheng (School of Biomedical Engineering, Capital Medical University, Beijing 100069, China)

Abstract: Objective To measure the iris elastic modulus. **Method** Using the self-designed device, the information of in vitro holistic iris deformation of rabbits were obtained with the load-pressure increasing gradually from 0 Pa to 600 Pa, and the heights of such iris were computed. The corresponding model based on experimental data was established and analyzed by ANSYS finite element software, and the iris elastic modulus was computed by a reverse method. **Results** The elastic modulus is 6.1 kPa at 100 Pa load pressure. **Conclusions** The iris material can be considered as linear elastic model when the pressure difference between the anterior chamber and posterior chamber is low.

Key words: Finite element; Pressure; Iris; Elastic modulus; Linear elastic

青光眼是位居全球第 2 位的致盲性眼病,他是由于眼内压调整功能发生障碍使眼压异常升高导致视功能障碍,并伴有视网膜形态学变化的疾病。随着病程的进展,在眼前部会出现瞳孔阻滞、晶体前移、虹膜变形、房水循环受阻、房角闭锁、房水潴留等,而在眼底会出现视觉信号接收能力改变和视觉

信号传导能力改变。我国原发型闭角性青光眼 (Primary Angle Closure Glaucoma, PACG) 的发病率较高^[1]。大多数 PACG 存在着瞳孔阻滞。瞳孔阻滞是指晶状体相对位置前移超过一定范围,导致瞳孔括约肌所在的区域晶状体的前表面超过虹膜根部附着点,造成瞳孔括约肌、瞳孔开大肌向晶状体方向的

收稿日期:2010-04-02; 修回日期:2010-04-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30600150,10802053,30670514);教育部科学技术研究重点项目(207001);北京市教育委员会科技发展计划项目(KZ200710011010, KM200710025009);北京市属市管高等学校人才强教计划资助项目;北京市科技新星培养计划(2007A076)

作者简介:杨进(1987-),男,硕士研究生;研究方向:生物力学。

通讯作者:全海英, Tel: (010)83911561, E-mail: quanhy@ccmu.edu.cn; 刘志成, Tel: (010)83911559, E-mail: zcliu@ccmu.edu.cn。

分力增加,房水从后房经瞳孔流向前房的阻力增加^[2]。根据文献报道,美国 50 岁以上人群中,PACG 患者 90% 存在瞳孔阻滞,我国 92.8% 的 PACG 患者存在瞳孔阻滞^[3]。瞳孔阻滞导致前后房压强差增大,虹膜变形向前房隆起,造成房角狭窄甚至发生房角闭锁,堵塞小梁网的滤过部分,导致房水循流受阻,而在这一系列改变中,虹膜变形有着相当重要的作用。本文应用自主设计的装置,模拟瞳孔阻滞,对离体兔眼虹膜膨隆进行定量测量,并用有限元对其弹性模量进行计算,旨在为 PACG 的研究提供一定帮助。

1 材料与方法

1.1 实验动物

选用体重 2.5 ~ 3.0 kg 的新西兰白兔为研究对象(由首都医科大学动物实验中心提供)。按特定的实验方法取出兔眼虹膜,制成试件备用^[4]。

1.2 实验装置及固定、加压模拟方法

实验装置^[4]主要包括两大部分,即图像采集装置(见图 1)和试件加压固定装置(见图 2)。制备好兔眼虹膜试件后,将其固定瞳孔阻滞仿真装置上(整个实验过程中瞳孔阻滞仿真装置浸在恒温浴槽中,液面刚好没过虹膜的上表面,以保持虹膜的活性)。

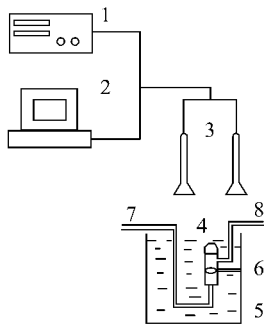


图 1 实验装置示意图 (1. 信号发生器,2. 计算机,3. 摄像机,4. 虹膜试件,5. 恒温浴槽,6. 固定支架,7. 连接负压调节装置导管,8. 连接注射泵导管)

Fig. 1 Experimental device to sample image

虹膜内边缘均匀的搭在模拟晶体上,与虹膜相连的巩膜包裹整个瞳孔阻滞仿真装置,在图 2 所示的卡具外缘细槽处用手术缝线或圆环铁扣固定。然

后轻推注射泵,排尽整个管路中的空气后即停止。此后,开启负压吸附装置,将虹膜的内边缘均匀的吸附在模拟晶体的激光小孔上。此时设定注射泵匀速加压(相当于后房压强),而虹膜的外侧压强(模拟前房压强)应为一个大气压,计算出这两个压强的差值用来模拟眼前后房压强差。压强差可以通过注射泵的调节来控制在 0 ~ 1 kPa 范围内,加压的速率也可以通过调节注射泵的推进速率来实现控制。模拟后房的压强可由连接在注射泵和瞳孔阻滞仿真装置之间的传感器实时显示。

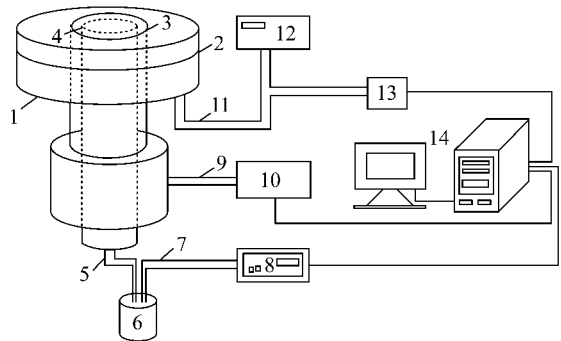


图 2 模拟瞳孔阻滞和虹膜膨隆的实验系统 (1. 瞳孔阻滞仿真装置,2. 卡具外缘细槽,3. 模拟晶体,4. 激光小孔,5. 连接卡具和收集液体装置之间的连通管,6. 模拟房水的收集装置,7. 连接负压调节装置和收集液体装置之间的连通管,8. 负压调节装置,9. 操纵杆,10. 机械控制装置,11. 连接卡具和注射泵之间的连通管,12. 注射泵,13. 传感器,14. 计算机)

Fig. 2 Experimental system to simulate the pupil-blocking phenomena and passive iris deformation

1.3 虹膜加压膨隆的数据采集及膨隆高度的信息获取

在对虹膜试件开始加压前要对图像采集系统进行标定。对虹膜试件开始加压的同时,两台摄像机开始实时记录虹膜的膨隆状态,从而获取加压过程中与各个压强差相对应的虹膜膨隆二维图像对(两台摄像机同一压强差下拍摄的虹膜膨隆图像)。然后应用 HALCON 9.0 软件对所得图像对(两台摄像机同一时刻拍下的一对图像)进行校正、图像对的匹配,获取特征点的三维空间坐标^[4],并通过曲线拟合得到虹膜膨隆曲线,图 3 为一个虹膜样本在压强分别为 50、100、200 和 300 Pa 时的虹膜膨隆轮廓曲线。然后计算出各个压强对应的虹膜膨隆高度,得到虹膜膨隆的高度与压强之间的关系(图 4)。

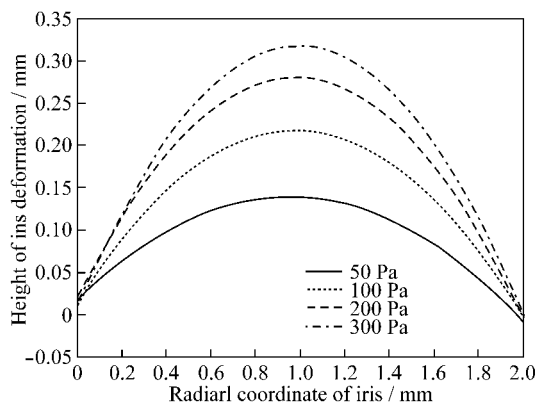


图3 不同压强下虹膜膨隆曲线
Fig.3 The curves of passive iris deformation

1.4 有限元模型的建立及虹膜弹性模量的估算

1.4.1 模型建立的前提条件及参数设定

虹膜作为一种生物软组织材料,其应力-应变关系非常复杂,弹性模量不是一个常数。但是根据压强与虹膜膨隆变形之间的关系,如图4所示,虹膜在压强小于200 Pa时,虹膜可以假设为线弹性材料。因此,本研究作如下假设:虹膜为各向同性材料,前后房压强差在一定范围内时(小于200 Pa),虹膜呈线弹性。另外,不考虑整个实验过程中虹膜的蠕变,且虹膜自身体积在实验过程中是恒定的,泊松比取为0.49。

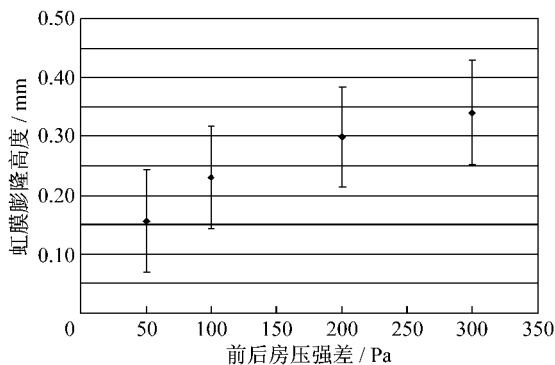


图4 虹膜膨隆高度与压强的关系
Fig.4 The relationship between pressure and height of iris deformation

1.4.2 模型的建立及边界条件和载荷的施加

虹膜几何尺寸取为:内缘的半径为1.5 mm和3.5 mm,这是由实验所采用的卡具尺寸决定。假设虹膜为厚度均匀,取为0.406 mm^[5]。当前后房压强

差为50 Pa时,虹膜的膨隆高度为0.16 mm。由于虹膜为对称结构,取1/4建立有限元模型。单元个数为177 214个如图5所示。

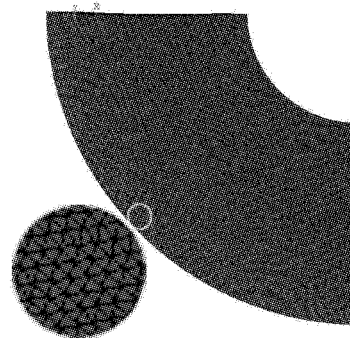


图5 1/4虹膜有限元模型
Fig.5 1/4 iris finite element model

参照具体实验中的边界约束条件,将虹膜的内外缘在x、y、z3个方向上完全约束,左右两个断面加上对称约束,其他部位不受约束。根据实验数据,对虹膜的内表面均匀加压,从而得到计算结果。

采用ANSYS12.0软件建立虹膜的有限元模型,利用实验所得到的虹膜膨隆高度,通过有限元力学分析,反推出虹膜的弹性模量^[6]。

2 结果

基于建模的前提假设,采用ANSYS12.0对模型进行分析,取前后房压强差为100 Pa,先设定一个弹性模量E,求出对应压强下的虹膜膨隆高度,如图6所示。将此结果与原始数据进行比较,当数值模拟

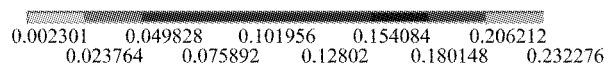
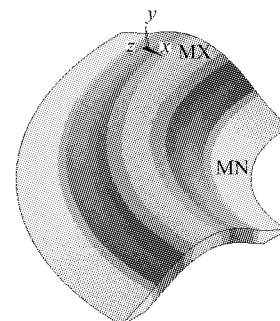


图6 计算所得100 Pa时虹膜膨隆情况
Fig.6 The calculated passive deformation of 100 Pa

所得的虹膜膨隆高度与实验结果相差大于1%时,修改弹性模量值,重新计算。当虹膜膨隆高度相差小于1%时,即确定为虹膜在此压强下的弹性模量。虹膜在100 Pa压强下的弹性模量为6.1 kPa,虹膜膨隆最大值0.232 mm。

3 讨论

PACG患者大多存在着瞳孔阻滞,瞳孔阻滞的产生与虹膜受压变形有着非常密切的关系,因此虹膜的力学特性研究对瞳孔阻滞产生以及房角闭锁的机理解释有着重要意义。临床上通过超声生物显微镜可以很容易地对虹膜进行检查获取虹膜的形态学数据,但是该方法无法描述虹膜变形与前后房压强差之间的关系。本文的研究用离体实验的方法模拟在体瞳孔阻滞的情况,对虹膜力学特性的完整表达可以为临床上PACG的诊治提供一定的帮助,尤其是判断其病程进展有非常重要的意义。

用传统的力学测试方法对虹膜的力学特性进行测量和研究,势必会对虹膜特有的结构造成破坏,无法准确地反映虹膜完整的力学特性,测量结果的说服力有待讨论。本文采用自行设计的装置,对虹膜进行加载测试,获得实验数据,在整个实验过程中,虹膜都处于生理盐水的浸泡中,最大限度的保持了虹膜的生理活性,使测量的数据更真实可靠。利用

该方法所得的虹膜加压膨隆数据,通过有限元分析反推出的虹膜弹性模量与Julie^[7]等所得的结果相近。

但是虹膜作为生物软组织,其力学特性受很多因素的影响,如初始应力、加载速率等。本文给出的虹膜线弹性区间的弹性模量,只适合于在压差较小时的虹膜膨隆状态,对于虹膜整体的非线性弹性模型的研究是我们研究小组下一阶段的课题。

参考文献:

- [1] 钟华,余敏斌. 原发性闭角型青光眼流行病学研究进展[J]. 眼科学报,2007,23(3):186-192.
- [2] Ronald EL. A History of Primary Angle Closure Glaucoma [J]. Survey Ophthal, 1995, 40(2): 163-170.
- [3] Robert R, Brian MC, Jeffrey M. Angle Closure in Younger Patients [J]. Ophthalmology, 2003, 110(10): 1880-1884.
- [4] 薄雪峰,杨进,刘敬华,等. 基于立体视觉的虹膜膨隆三维信息的实验方法探索[J]. 北京生物医学工程,2009,28(6):378-381.
- [5] 王宁利,赖莹,陈秀琦,等. 活体人眼虹膜形态实时定量测量方法的研究[J]. 中华眼科杂志,1998,34(5):369-372.
- [6] 吴凌,谢毅,樊瑜波,等. 一种测量角膜弹性模量的新方法[J]. 四川大学学报,2008,40(6):81-85.
- [7] Julie EW, Vincent AB, Timothy WO. Ex vivo porcine iris stiffening due to drug stimulation [J]. Experimental Eye Research, 2009, 89(4): 456-461.