

人眼晶状体前囊膜的非线性有限元仿真分析^{*}

刘卓^{1,2}, 王博亮², 戴培山^{1,3}, 刘希顺¹, 刘安芝¹, 鞠颖², 谢杰镇², 黄晓阳²

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院, 长沙 410073;

2. 厦门大学计算机科学系, 厦门 361005; 3. 中南大学信息物理工程学院, 长沙 410083)

摘要: 在临床试验获得的形态数据和物理数据的基础上, 建立了连续环形撕囊后前囊膜的物理模型, 利用非线性有限元分析法对撕开口大小与囊膜最大拉伸长度之间的关系进行了仿真计算。结果表明, 随撕开口的增大, 囊膜所能承受的最大拉伸长度显著增加, 最大拉伸状态下的撕开口周长 C_r 与撕开口初始周长 C_c 的比值 (C_r/C_c) 也增大。该结论与实验研究的结论一致, 表明前囊膜的可拉伸性能随着撕开口的增大而增大。进一步分析指出, 拉伸时, 撕开口边缘处外力作用的范围会显著影响最大拉伸长度: 外力作用范围越大, 囊膜所能承受的最大拉伸长度也就越大; 增大幅度随作用范围的增加而减小。研究结果表明, 仿真分析取得的结果与实验研究结果相符。

关键词: 前囊膜; 撕开口; 拉伸长度; 非线性有限元; 连续环形撕囊

中图分类号: R318 文献标识码: A 文章编号: 1672-6278 (2006)02-0079-06

Study for the Anterior Capsule of Human Crystalline Lens with Nonlinear Finite Element Analysis

LIU Zhuo^{1,2}, WANG Bo-liang², DAI Pei-shan^{1,3}, LIU Xi-shun¹,
LIU AN-zhi¹, JU Ying², XIE Jie-zhen², HUANG Xiao-yang²

(1. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Department of Computer Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

3. Department of Ophthalmology, Hospital of Xiamen University, Xiamen 361005)

Abstract: Based on experimental data, a nonlinear finite element model of the anterior capsule was constructed to study the relationship between the diameter of continuous circular capsulorhexis (CCC) and the maximum extend of the anterior capsule by finite element analysis. Calculating results showed that the capsule could be extended larger by an external force as the diameter of CCC aperture increasing. This result is accord with the results of experimental studies on lens capsules of human body. Furthermore, simulation indicates that the contact area of the external force has a great influence on the max extend length: giving the same diameter of CCC, the capsule's extend length increasing as the contact area of the external force become larger. This result remains undiscovered in experimental studies. The current work demonstrates that simulation analysis is believed to be a promising, powerful tool in the field of biology medical engineering.

Key words: Anterior capsule; Circular aperture; Nonlinear finite element; Extend length; Continuous circular capsulorhexis

1 引言

连续环形撕囊 (continuous circular capsulorhexis,

CCC) 是超声乳化白内障吸除联合人工晶体植入术的重要步骤之一, 其目的是撕除前囊膜的正中部分, 形成边缘光滑的前囊膜圆形缺损, 避免术中对其进行

它操作时前囊膜出现放射状撕裂,以保证后续步骤特别是人工晶体植入顺利完成^[1,2]。撕开口的大小对连续环形撕囊后前囊膜乃至整个囊袋的弹性均非常重要,较小的撕开口保留更多的囊膜,能更好地实现人工晶体在囊袋内的固定,但在核乳化吸除和植入时可能造成囊膜放射状破裂;而撕开口过大,则有可能伤及附着在囊膜上的悬韧带,影响人工晶体在囊袋内的固定,导致屈光异常,造成手术失败。因此,研究囊膜撕开口大小与弹性的关系对降低连续环形撕囊后囊膜撕裂的风险具有重要的指导意义,同时也为白内障手术仿真中撕囊动作的模型设计提供理论分析和参考。

关于连续环形撕囊后前囊膜弹性的研究国内外报道不多。南加州医科大学眼科学系的 Assia^[3,4] 等人研究了人眼连续环形撕囊后前囊膜的弹性和最大可拉伸状态。其研究结果为,撕口边缘裂开时囊膜的撕开口周长 C_r 为连续环形撕囊后撕口初始周长 C_c 的 1.6 倍左右,或者说为撕开口初始直径的 5 倍左右。国内广西医科大学第一附属医院的梁皓^[5] 对 51 名不同年龄的成年患者死后捐献的 102 只眼的晶状体进行显微解剖研究,其研究结果为:在进行试验的年龄段内,前囊撕开口直径和 C_r 有明显的直线正相关关系,表明撕开口直径越大,则囊膜开口被拉伸的越大,即边缘裂开时囊膜的周长也会越大。临床试验研究真实直观,可获得第一手资料,但由于连续环形撕囊的研究方法具有破坏性,标本不可重复使用,因而所得的实验结果是多个标本的综合分析,无法对一个标本进行不同撕开口大小的试验研究。

随着生物医学工程技术的发展,建模和仿真法越来越多地用于生物医学的研究中,特别是有限元分析方法在生物组织形变的研究中应用越来越广泛,目前已有大量的研究报道采用此法研究骨^[6,7]、心脏^[8]、血液循环^[9]、牙齿修复^[10]、耳^[11] 和人眼^[12-14] 等。本研究将仿真建模研究方法引入成年人眼连续环形撕囊后前囊膜弹性的研究中,根据已有的临床数据建立连续环形撕囊后前囊膜的参数化非线性有限元仿真模型,实现弹性研究的计算机仿真。在模型基础上研究连续环形撕囊后前囊膜的弹性和应力分布,研究囊膜撕开口大小和所能承受的最大拉伸长度之间的关系。

2 方法

2.1 连续环形撕囊后前囊膜的几何特征

撕去前囊膜中央部分后暴露出晶状体核,彻底

清除晶状体内容物后晶状体囊袋向玻璃体腔凹陷,呈“碟”状。囊袋赤道部边缘与睫状体直接接触,其直径明显大于完整状态下晶状体的直径。关于囊袋直径的研究较多,测量值集中在 10~11 mm 范围内,且随年龄变化的趋势不明显。

为了建立前囊膜在拉伸过程的参数化形态模型,我们根据已有的实验研究设定如下前提:

(1)前囊膜外径和撕开口是圆形的,可以由其直径来确定;

(2)在拉伸前囊撕开口的过程中,受外力作用的只是前囊膜,后囊膜不参与其中,因此只需对前囊膜进行建模;

(3)清除内容物后,囊袋直接与睫状体接触而导致悬韧带处于完全松弛状态,他们在拉伸过程中不会对前囊产生影响;

(4)囊膜的重力与拉伸产生的张力相比小得多,因而设前囊膜在初始状态时展开位于一个平面内,且在拉伸过程中不考虑重力影响。

依据上述假设,我们将连续环形撕囊后的前囊膜用圆环来建模,并采用 Fisher 等^[15] 测量的 47 岁年龄晶状体的囊膜形态数据,计算得到展开后囊膜的直径及囊膜厚度的分布状态,见表 1。

表 1 囊膜的几何形态数据

Table 1 Geometric data of anterior capsule

前囊膜外径(mm)	9.9942
前囊膜内径(mm)	4.0~7.0

图 1 是外径为 10 mm、内径为 5 mm 时情形。若保持外径和囊膜物理参数不变,而改变内径参数,便可研究不同撕开口大小与囊膜弹性之间的关系。

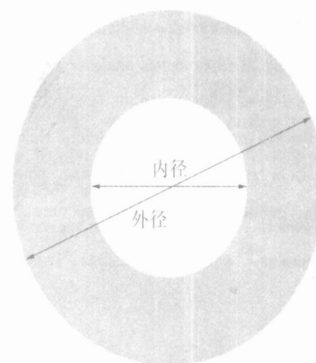


图 1 囊膜形态建模示意图

Fig 1 Anterior capsule model

2.2 前囊膜的物理属性

据 Krag 等人的研究^[16],囊膜在大形变时会表现

出非线性的材料特性,在连续环形撕囊和人工晶体植入时前囊膜将发生大变形。在这种情况下囊膜将表现出高度非线性的材料特性,不适合再用线性应变—应力关系来模拟。我们首先讨论非线性有限元分析和囊膜的非线性材料特性。

Krag 等人测量了不同年龄晶状体前囊膜的正应力和正应变之间的关系曲线,见图2。由于其测量

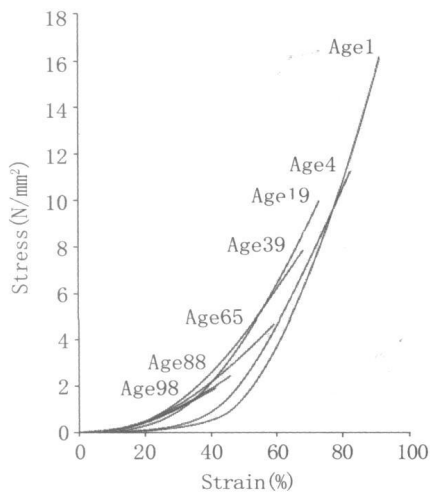


图2 实验获得的囊膜应力—应变数据

Fig 2 Stress—strain curves of various capsules

样本未包括 45 岁年龄的晶状体,为此我们采用线性插值的方法根据测量数据计算材料特性。计算方法如下。设年龄为 A_c 的囊膜的应力—应变曲线未知,最接近年龄 A_c 的囊膜的年龄为 A_i, A_r , 即 $A_i \leq A_c < A_r$, 他们的应力—应变曲线已知,分别为

A_i 的应力—应变关系为

$$\epsilon = f_i(\sigma), 0 \leq \sigma \leq \sigma_i \quad (1)$$

A_r 的应力—应变关系为

$$\epsilon = f_r(\sigma), 0 \leq \sigma \leq \sigma_r \quad (2)$$

其中 ϵ 是囊膜的应力, σ 为囊膜的应变, σ_i, σ_r 分别是年龄 A_i, A_r 的囊膜所能达到的最大应变。根据 σ_i, σ_r 计算得到年龄 A_c 囊膜的最大应变为

$$\sigma_c = \frac{A_c - A_i}{A_r - A_i} \sigma_r + \frac{A_r - A_c}{A_r - A_i} \sigma_i \quad (3)$$

则年龄为 A_c 的囊膜的应力—应变关系为

$$\epsilon = f_c(\sigma) = \begin{cases} \frac{A_c - A_i}{A_r - A_i} f_r(\sigma) + \frac{A_r - A_c}{A_r - A_i} f_i(\sigma), & \text{当 } 0 \leq \sigma \leq \sigma_i \\ f'_i(\sigma_i)(\sigma - \sigma_i) + f_i(\sigma_i), & \text{当 } \sigma_i \leq \sigma \leq \sigma_c \end{cases} \quad (4)$$

对于 45 岁晶状体,可根据 Krag 所测量的 39 岁和 65 岁晶状体囊膜的应力—应变曲线数据代入公

式(4),计算得到 45 岁晶状体囊膜的应力—应变曲线,见图3。其最大正应力为 7.0 N/mm^2 ,最大应变为 0.6554。前囊膜的 Poisson 比采用数据 0.47。

2.3 有限元模型及计算简化

我们使用有限元软件 ANSYS 8.0^[7] 建立 CCC 后前囊膜的有限元模型:单元采用非线性 3D 壳单元 SHELL143,靠近撕开口内径处由于是拉伸的着力点,因此在附近使用高密度网格,而其余部分则使用低密度网格,并为单元赋予厚度,得到的划分单元后模型见图4。

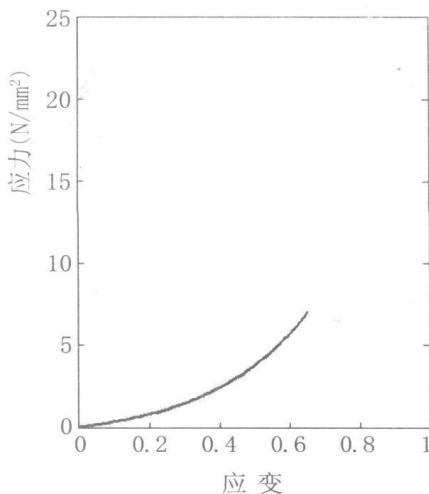


图3 插值产生的 45 岁晶状体囊膜的应力—应变数据

Fig 3 Stress—strain curves of 45 years old capsule generated by interpolation

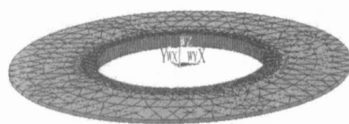


图4 有限元网格模型(厚度放大 35 倍)

Fig 4 Mesh model of the anterior capsule

撕开口拉伸的仿真过程为:在撕开口边缘上对于圆心对称的两点施加背向圆中心的同样大小的位移,直到前囊膜内出现最大应力为止,将此时的前囊膜所处状态作为最大拉伸状态。

非线性计算问题需要大量的 cpu 计算时间,单元越多,时间开销越大。进一步分析模型发现,模型和施加其上的载荷存在对称性,利用其可对求解过程进行简化。如图5所示,取四分之一圆环,施加位移载荷时(如箭头所示),约束位于 x 轴上的节点 y 方向位移改变量为 0,约束位于 y 轴上节点 y 方向位移改变量为 0。这样单元节点的数量减少近 3/4,

求解问题的规模仅为原模型的 $1/4$, 明显减少计算量。

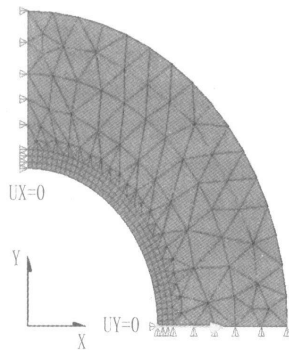


图 5 利用对称性进行简化后的网格模型

Fig 5 Simplified mesh model

3 结果分析

利用第 2 节中建立的非线性有限元模型对连续环形撕囊后前囊膜的拉伸过程进行仿真, 通过在囊膜的撕开口边缘赤道部分的单元节点上施加向外的位移以模拟外力的作用, 当囊膜达到最大正应力(应变)时认为其处于最大拉伸状态, 即相当于实验研究中的囊膜刚出现撕裂的情况。通过改变模型中内径的大小以模拟实验研究中的不同撕开口。

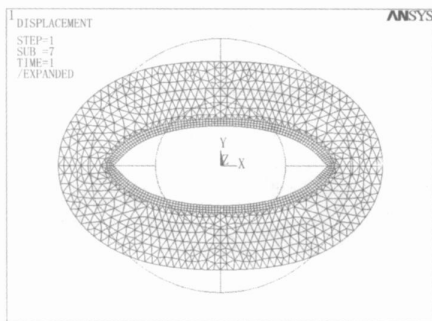


图 6 撕开口直径为 5mm 的 45 岁前囊膜最大拉伸状态

Fig 6 Maximum extending state of 45 years old capsule with aperture diameter equal to 5mm

3.1 基本的应力—应变

首先在囊膜的撕开口边缘赤道部分的单个节点上施加向外的位移。令 C_c 为拉伸前囊膜撕开口周长, C_r 表示拉伸后的撕开口周长, 其比值 C_r/C_c 用以衡量囊膜的可拉伸程度。图 6 显示的是撕开口直径为 5mm 的 45 岁前囊膜达到最大正应力时的拉伸状态, 此时外部作用的位移为 1.75 mm。图 7 是其最大拉伸状态下的正应力分布。

由图 7 可看出, 最大正应力和正应变产生在撕开口边缘施加位移的地方。最大正应力值达到 7.0

N/mm^2 , 而最大正应变为 0.6338。

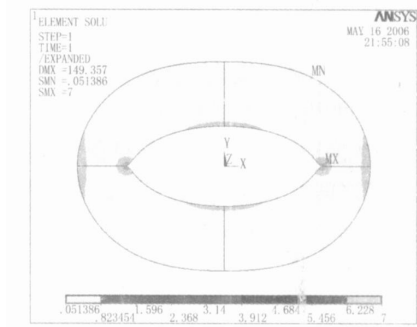


图 7 撕开口直径为 5mm 的 45 岁前囊膜在最大拉伸状态下的正应力分布

Fig 7 Strain distribution of the maximum extending state of 45 years old capsule with aperture diameter equal to 5mm

为求出输出撕开口边缘的周长, 我们采用如下近似计算方法。将囊膜撕开口边缘处节点依照其横坐标从小到大的顺序排列, 得到节点集合 $I = \{P(i) = (x_i, y_i), i = 1, \Delta, N\}$, 其中 N 为节点的个数, 则曲线长度近似为

$$S = \sum_{i=1}^{N-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (5)$$

为估计计算误差, 使用(4)计算得到初始状态撕开口边缘的周长 C_c 为 15.707 mm, 真实值为 $5\pi = 15.708$ mm, 绝对误差为 0.001 mm, 相对误差为 0.006%, 计算精度令人满意。据此计算得到, 本节中的 45 岁晶状体前囊膜达到最大状态时撕开口边缘周长 C_r 为 18.564 mm, $C_r/C_c = 1.182$ 。

3.2 撕开口直径对应力—应变分布的影响

应用 3.1 的模型分析最大拉伸长度与撕开口直径之间的关系。通过改变模型撕开口直径的大小, 计算其达到边缘撕裂时的最大拉伸长度。图 8 和图 9 分别绘出了最大拉伸长度和 C_r/C_c 与撕开口直径的关系。

仿真结果表明, 随着撕开口的增大, 囊膜所能承受的最大拉伸长度显著增加, C_r/C_c 值也增大。与实验研究的结论一致, 表明前囊膜的可拉伸性能随撕开口的增大而增大。

3.3 外力与前囊膜接触范围大小对囊膜最大拉伸的影响

3.2 中外力载荷是施加在囊膜的单个节点上, 相当于接触点是一个理想化的无大小的点。本节分析外力与前囊膜进行非理想点接触时, 外力与前囊膜接触范围的大小对囊膜最大拉伸的影响。通过将

载荷施加在一定范围的单元节点上以模拟外力与前囊膜的不同接触范围,考察此时囊膜撕开口的直径与最大张力的关系。

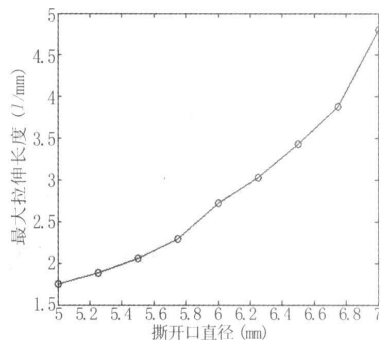


图8 撕开口直径与最大拉伸长度的关系

Fig 8 Variation of the maximum extend length with aperture diameter

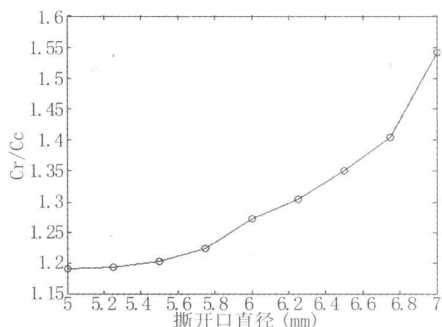


图9 撕开口直径与 Cr/Cc 的关系

Fig 9 Variation of the Cr/Cc with aperture diameter

首先设定接触范围半径为 0.1 mm,则此时需在撕开口赤道部 3 个节点上施加位移载荷。仿真计算的结果见表 2。与单点接触相比,3 点接触所得到的拉伸长度更大,且此时的拉伸长度和 Cr/Cc 值显著增加, Cr/Cc 平均值达到 1.745。

表2 3 节点位移载荷时前囊膜不同撕开口直径对应的最大拉伸状态(mm)

Table 2 Maximum extend of the anterior capsule with different diameter as 3- node displacement load applied

撕开口直径(mm)	最大拉伸长度(l/mm)	Cc	Cr	Cr/Cc
5.00	3.65	15.708	25.039	1.594
5.50	4.13	17.279	27.980	1.619
6.00	4.92	18.850	32.280	1.712
6.50	5.72	20.420	36.796	1.802
7.00	7.08	21.991	43.995	2.000

度随接触范围的变化。仍以 45 岁晶状体前囊膜模型为基础,固定撕开口直径为 5 mm,此时撕开口周长 $C_c=15.708$ mm,分别计算在外力与囊膜撕开口赤道部不同接触节点数与最大拉伸长度的关系。结果见表 3。

表3 不同接触节点数与最大拉伸长度的关系(mm)

Table 3 Variation of the maximum extend with numbers of different contact node

接触节点个数(n)	最大拉伸长度(l/mm)	Cr	Cr/Cc
1	1.75	18.704	1.191
2	3.13	22.900	1.458
3	3.65	25.039	1.594
4	3.82	25.796	1.642
5	3.90	26.200	1.668

比较仿真结果可知,随受外力载荷作用节点个数的增加,前囊膜的最大拉伸长度和 Cr/Cc 值也越来越大,但增加的幅度有减少的趋势。表明外力接触范围对囊膜撕开口的最大拉伸长度具有直接影响,且接触范围大,最大拉伸长度和 Cr/Cc 值也增大。

4 讨论

本研究利用有限元方法研究了进行连续环形撕囊前后,前囊膜的撕开口大小对其最大拉伸长度的影响。仿真计算结果表明,随着撕开口直径的增大,囊膜所能承受的最大拉伸长度也越大, Cr/Cc 值增大。这一结果与现有的实验研究所得结论相一致。不仅如此,仿真结果还表明,进行拉伸时,撕开口边缘处外力作用的范围会显著影响最大拉伸长度:外力作用范围越大,则囊膜所能承受的最大拉伸长度也就越大;增大的幅度随外力作用范围的增加而减小。

本研究初步实现了晶状体囊膜的非线性有限元分析,而仿真研究取得了与实验研究相符的结果。这在一定程度上证实了仿真研究的有效性。但与实验研究相比较,本研究的初步建模仿真研究还较简单,研究结果受到囊膜的真实几何形态、囊膜的材料属性、边界条件、有限元方法的具体实现等因素的影响。因而在未细致研究各种因素对结果的影响下,尚不能与实验研究结果进行详尽的对比分析。在囊膜非线性模型的基础上可进行的后续工作有:提高建模仿真的真实度,缩小与实验研究环境的差距,从

分析在撕开口直径相同的情况下,最大拉伸长

而深入研究囊膜在外力作用下的形变,使仿真结果在更大程度上与实验研究进行对比分析;研究晶状体核娩出时与囊膜的相互作用;研究人工晶体植入时囊膜的形变等,为白内障手术治疗提供重要依据,并为进行手术仿真作准备。这些结果涉及更真实的三维实体建模和更复杂的非线性形变计算问题,研究难度也大。

参考文献:

- [1] 何守志. 超声乳化白内障手术学[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2000.
- [2] 杨军, 李跃杰, 李穗, 等. 超声乳化原理在眼科的应用[J]. 生物医学工程研究, 2005, 24(2): 110-112.
- [3] Assia E, Apple D, Morgan R. The relationship between the stretching capability of the anterior capsule and zonules[J]. Investigative Ophthalmology and Visual Science, 1991, 32(10): 2835-2839.
- [4] Assia E, Apple D, Tsai J, et al. The elastic properties of the lens capsule in capsulorhexis[J]. American Journal of Ophthalmology, 1991, 111: 628-632.
- [5] 梁皓. 正常成人晶状体的显微解剖学研究[J]. 广西医科大学学报, 1999, 35.
- [6] 刘海, 谢力勤, 徐孝根, 等. 给定荷载下的骨骼重建的有限元分析

- [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(8): 1079-1082.
- [7] 左艳萍, 王洁, 丛斌, 等. 下颌前伸时下颌骨应力分布的三维有限元分析[J]. 医用生物力学, 2003, 18(2): 97-100.
- [8] 张立峰, 刘锋, 吕维雪. 虚拟心脏的研究与应用[J]. 中国生物医学工程学报, 2000, 24(2): 93-96.
- [9] 白净. 血液循环系统仿真[M]. 长春: 吉林省科技出版社, 1996.
- [10] 张富强, 魏斌, 李玲. 牙颌组织及修复体三维几何学、有限元模型的设计[J]. 上海口腔医学, 2002, 11(3): 240-242.
- [11] Sun Q. Computer-integrated finite element modeling and simulation of human middle ear[C]. University of Oklahoma; Norman, Oklahoma, 2001. 146.
- [12] 王博亮. 中国人虚拟眼形态和功能的建模研究[C]. 中华医学会第九届全国眼科年会论文集, 2005.
- [13] Burd H, Judge S, Cross J. Numerical modeling of the accommodating lens[J]. Vision Research, 2002, 42: 2235-2251.
- [14] Shung V W. An analysis of a crystalline lens subjected to equatorial periodic pulls[C]. University of Texas; Arlington, 2002. 155.
- [15] Fisher R, Pettit B. The postnatal growth of the capsule of the human crystalline lens[J]. Journal of Anatomy, 1972, 112(2): 207-214.
- [16] Krag S, Andreassen T. Mechanical properties of the human lens capsule[J]. Progress in Retinal and Eye Research, 2003, 22: 749-767.
- [17] 刘坤, 吴磊. ANSYS 有限元方法精解[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005. 349.

(收稿日期: 2006-03-10)

新型电子鼻问世 医生将可通过嗅闻诊断患者疾病

未来医生将使用“电子鼻”有效诊断患者的疾病。这项电子技术是基于人类和其他动物嗅觉系统而成功研制的,该研究在近日欧联盟信息社会技术项目会议上公布。

电子鼻研制的最初灵感来自于人类的鼻子,但目前这个电子鼻不仅超出了人类的嗅觉,甚至还比某些动物的鼻子更加灵敏。从事此项研究的西班牙巴塞罗纳大学电子系教授奥斯卡·鲁兹说,“人类的鼻子与狗或老鼠相比,并不是很适合于气味辨别。目前,全球一些研究小组培训狗对患者进行嗅闻,进而确定其患有何种疾病。如:狗通过嗅闻识别恶性皮肤瘤,或通过嗅尿液样本确诊是否患有前列腺炎。”他接受《探索》杂志记者采访时称,电子鼻的原理与以上动物嗅觉诊断方法有相似之处,只不过电子鼻使用了生物电传感器。

据了解,电子鼻中有一个2毫米长的电脑芯片,芯片上装配着一个金制微电极,在微电极上放置着一层蛋白质分子,它的作用是用于模拟人类或动物的生理嗅觉接受体。电脑芯片的末端放入容纳其他微电极的液槽。以上这些组件都与一个可测量电气化学改变的测量装置相连接。

目前,研究人员诊断时,将所测试的样本放在电子鼻的液槽中,当电子鼻接受体探测分析之后,测量装置将频谱变化值记录下来。例如,将皮肤癌细胞作为测试样本,电子鼻会显示出特殊的电气化学频谱变化,此外,电子鼻也能灵敏探测出细菌感染、器官和组织细胞受损。

迄今为止,在电子鼻中所使用的蛋白质接受体是从老鼠或人体中提取的,研究人员认为今后应采用由数百种蛋白质组成的接受体,进一步探测多样化的样本气味。