

文章编号:1004-7220(2016)04-0340-07

眼力学研究进展

陈维毅, 李晓娜, 高志鹏

(太原理工大学 力学学院, 应用力学与生物医学工程研究所, 太原 030024)

摘要: 眼生物力学已在高度近视眼及眼球运动障碍的诊疗上得到应用,并且在青光眼与眼外伤的发生与发展等研究上取得了进展。本文从眼球的运动建模、角膜与巩膜的力学性质及其力学生物力学研究、青光眼的生物力学研究、眼外伤的发生机制研究等方面综述近年来眼力学的研究进展。

关键词: 建模; 角膜; 巩膜; 青光眼; 眼外伤; 生物力学; 力学生物学

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.3871/j.1004-7220.2016.04.340

Advances in ocular biomechanics

CHEN Wei-yi, LI Xiao-na, GAO Zhi-peng (*Institute of Applied Mechanics and Biomedical Engineering, College of Mechanics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China*)

Abstract: Ocular biomechanics are generally applied in the diagnosis treatment of high myopia and ocular movement disorder. Progress has also achieved in the development of glaucoma and ocular trauma research fields. In this paper, the advances in the modeling of eye movement, the mechanical properties and mechanobiology of the cornea and sclera, glaucoma biomechanics, and the mechanism of ocular trauma are reviewed.

Key words: Modeling; Cornea; Sclera; Glaucoma; Ocular trauma; Biomechanics; Mechanobiology

眼是人体唯一的视觉器官,重要性不言而喻。眼球的生理机能受周围组织和眼内容物的生物力学影响,例如眼外肌控制眼球的运动、眶内软组织维持眼球平衡、角膜和巩膜的力学性质在保护眼球内容物方面起主要作用、高眼内压(intraocular pressure, IOP)容易引起青光眼这类致盲性疾病等。近年来,眼生物力学已在高度近视眼及眼球运动障碍的诊疗上得到应用,并且在青光眼与眼外伤的发生与发展等研究上取得了进展。随着生物力学向力学生物学的发展,眼生物力学的研究对象也从器官与组织层次深入到了细胞及生物大分子层次,并越来越得到眼科界的重视。本文主要综述近年来眼功能疾患诊疗方面的生物力学研究进展。

1 眼球运动建模

人眼窝中有6条眼外肌(4条直肌和2条斜肌)控制眼球的运动(见图1)。4条直肌共同起于眼窝尖端的Zinn总腱环处,止于距角膜异色缘不远的巩膜处;上斜肌起于总腱环上薄骨膜处穿过眼眶壁上软骨状的滑车(trechlea)组织后止于巩膜;下斜肌是唯一起点不在眼窝尖端的眼外肌,而是起于泪腺窝的横向边缘止于巩膜^[1]。

有关人眼外肌生物力学性质的实验研究主要集中在20世纪70年代。Collins等^[2]在给局部麻醉的斜视患者行手术期间剪断外直肌测试了人眼外肌的被动力学行为。Quaia等^[3]在总结Collins等^[2]实验数据的基础上,深入对比分析了猴与人的眼外肌被

收稿日期:2016-08-05; 修回日期:2016-08-22

基金项目:国家自然科学基金项目(31271005)。

通信作者:陈维毅,教授, E-mail: chenweiyi@tyut.edu.cn。

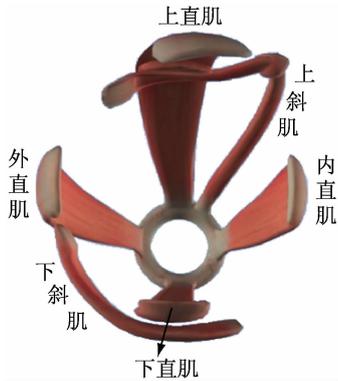


图1 眼外肌解剖结构

Fig.1 Anatomical structure of extraocular muscles

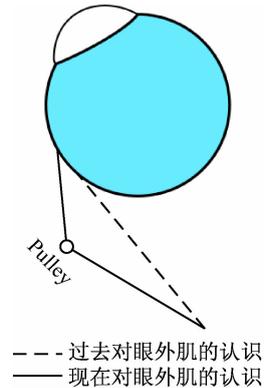


图2 单眼外肌示意图

Fig.2 Schematic of monocular pulley

动力学行为,并给出了人眼外肌被动力学行为的数学模型,为眼球运动建模研究中如何构建眼外肌的本构关系模型提供了思路。

眼科临床检测常用第1眼位作为受试患者眼球的参考坐标位置,第1眼位定义为人直立时眼睛直视前方的位置。眼球处于第1眼位时,眼外肌的初张力维持着眼球的平衡。考虑上述眼外肌力学行为的研究结果^[2-3]并利用第1眼位时各眼外肌的几何坐标^[4-5],各眼外肌在第1眼位的张力则可通过建立眼球三维运动模型、列转动平衡方程并补充眼外肌群受力优化目标函数来估算^[6]。

临床上不少眼疾(如斜视、眼外肌麻痹等)与眼球运动有关,三维眼球运动建模有助于更精准地诊断和分析该类眼疾,并能为相关的手术治疗方案提供一定的理论依据。近年来,随着医学影像学的发展,眼外肌 Pulley 的发现改变了人们对眼球运动的认识:Pulley 是眼外肌粘连在眼眶壁上的结缔组织,它的存在改变了眼外肌的施力路径(见图2),是眼外肌控制眼球运动的功能性起点^[5-7]。考虑 Demer 提出的主动 Pulley 假说^[7],可将传统的眼球运动模型^[8]改造为 Pulley 模型^[9-11],用其模拟斜视手术的操作获得了与临床经验相近的水平斜视矫正量;并发现 Pulley 的存在可使左右眼球运动所需的眼外肌群收缩力的差异降低,更有利于双眼视^[10-11]。

2 角膜、巩膜的力学性质及其力学生物力学研究

一般认为,角膜和巩膜为各向异性、非线性、黏弹性材料。角膜和巩膜的生物力学特性的离体测试

方法相同,主要是单轴拉伸实验^[12-13]和整体膨胀实验^[14-15]。目前针对角膜力学性质的在体测试方法主要有基于眼内压反应仪^[16](ocular response analyzer, ORA)和超声剪切成像^[17](supersonic shear imaging, SSI)的测试方法。

有研究对不同年龄的兔眼取角膜试件行单向拉伸实验^[18],结果表明,幼年组兔眼角膜弹性模量明显低于老年组,青年组兔眼角膜蠕变率明显低于幼年组。不同月龄(3月和7~8月)兔角膜随月龄增加会轻微变硬,松弛特性随月龄变化明显^[19]。对正常兔角膜行膨胀实验^[20]显示,在较低的压力水平(如7 mmHg以下,1 mmHg = 0.133 kPa)角膜顶点位移曲线较平缓,说明角膜在受外界压力情况下易变形;当压力大于14 mmHg时,角膜顶点位移与压力曲线变陡峭,说明角膜抵抗眼内压的能力增大。

角膜和巩膜生物力学特性可沿用常用的生物软组织的本构关系、用模型直接拟合实验数据和逆向有限元法计算来确定。描述软组织力学性质不同的本构模型一般分为两类:纯表象模型(如 Fung 模型^[21])和基于纤维结构的表象模型^[22]。一般认为,基于结构的模型能够对生物软组织生理/病理状态下的力学响应给出较合理的解释,因而目前比较流行用基于纤维结构的表象模型来描述生物软组织的力学特性,这类模型基于材料的各向异性应变能函数。如果考虑角膜和巩膜为各向同性不可压缩材料则有多种形式的简化模型,如 Neo-Hookean 模型、Mooney-Rivlin 模型、Ogden 模型等。

巩膜在维持眼球的整体形状方面起关键作用,因而巩膜的生物力学特性与高度近视眼等眼疾密切

相关。王超英等^[23]对巩膜条带试件行单轴拉伸实验,结果发现,成人高度近视患者的巩膜弹性模量和极限应力远低于正常人。

后巩膜加固术是传统的治疗病理性近视的有效方法之一(见图3)。张学锋等^[24]研究发现,在考虑巩膜组织的黏弹性特性下,人巩膜、兔巩膜、人工心包补片、脱细胞猪真皮4种加固材料中,人巩膜效果最好。Chen等^[25]采用人眼巩膜作为加固材料对模型兔眼行后巩膜加固术后,对比术后不同时期(2、3、6、9月)的兔眼巩膜的力学性能,实验结果表明,后巩膜加固术确实能增强加固条带区巩膜的抗拉刚度。

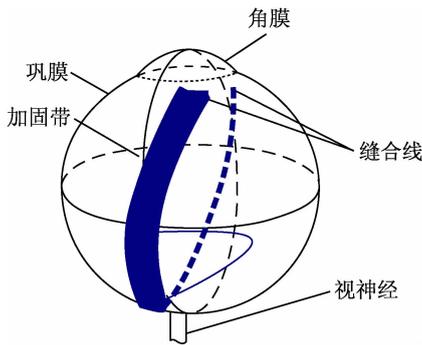


图3 后巩膜加固术示意图

Fig.3 Schematic diagram of posterior sclera reinforcement

近年来,临床医生发现,紫外线与核黄素交联术能有效改善角膜和巩膜的力学性能,提高角膜和巩膜的材料强度^[26-27],并已在眼科临床上尝试治疗相关的眼疾,例如角膜交联治疗圆锥角膜、巩膜交联治疗近视等。

作为承载组织,角膜和巩膜在眼内压的作用下处于复杂的力学环境中。角膜基质细胞和巩膜成纤维细胞与细胞外基质相互作用,能积极响应力学刺激^[28]。研究表明,细胞因子和机械牵张参与角膜和巩膜成纤维细胞基质金属蛋白酶及其抑制因子的表达调控^[29-30]。其中,肿瘤坏死因子可通过白介素-6调节圆锥角膜成纤维细胞基质金属蛋白酶-1的表达^[31]。认识角膜基质细胞对力学信号的感应和应答,有助于深入理解角膜和巩膜的一些生理/病理过程,如屈光术后角膜组织的损伤修复及重塑、圆锥角膜及病理性近视的发生发展等。

3 青光眼生物力学

青光眼是仅次于白内障的第二大致盲性疾病,其特征是眼内压间断或持续升高超过眼球的耐受程度而损伤眼内组织和视功能。降眼压是治疗青光眼的重要手段,瞳孔阻滞力被认为是原发性闭角型青光眼发病的重要病理因素之一。由此可见,生物力学问题是研究青光眼致病机理、预防和治疗的重要内容。眼压的高低取决于房水生成率、房水排出率及上巩膜静脉压三者的动态平衡,任何增加房水生成或者减少房水流出的因素都会造成眼压升高。眼压是目前唯一已知的并可被有效控制的危险因素。眼压越高视网膜神经节细胞死亡越多,昼夜眼压的大幅波动也是视野丧失的危险因素。因此,妥善控制眼压和眼压波动是青光眼治疗的首要任务。

机械学说和缺血学说^[32]是有关青光眼视神经损害机制主要的两种学说。机械学说强调眼压的作用,认为眼压升高引起筛板变形产生剪切力,影响了细胞的转运机制,导致细胞代谢受损。缺血学说重在强调眼部血流动力学的因素,主要是由于各种原因引起视网膜和脉络膜血管自身调节异常,循环灌注减少、氧运输异常导致视乳头及其周围组织营养物质供应减少,使该处组织发育不良或遭受破坏,视神经纤维由于缺血缺氧及失去周围组织的保护而发生损害。在青光眼的发病机制中,单方面强调机械学说或血管学说的作用都有失偏颇。一般认为,青光眼的发病是多因素的综合过程。除上述两种机制外,还包括其他一些机制,如免疫、遗传、应激等。

目前青光眼研究的难点在于:①除少数急性外青光眼属慢性病(少数急性情况除外),动物模型制造有难度;②受限于眼压监测方法,难以不间断连续检测患者的眼压;③生理上人的眼压在一定范围内波动,目前尚缺乏人眼完整的实时眼压曲线;④青光眼手术后易形成房水的被动引流,不能自主控制流量等。

在完整在体实验难以实现的情况下,有限元技术为研究与青光眼相关的复杂眼内容物的力学行为提供了仿真模拟的可能。在基于前后房压差的在体实验数据基础上,以眼球组织切片为几何模型素材,首都医科大学刘志成课题组^[33]建立了房水循流多

场耦合有限元模型(见图4),该模型中的虹膜、角膜、晶状体均为线弹性材料,房水为不可压缩黏性牛顿流体;角膜内表面温度 33 °C,虹膜上表面、瞳孔、后房和晶状体等处均为体温 37 °C,房角处的小梁网结构为多孔介质;考虑多种因素对眼前节房水流动的影响,对比分析了温度场、速度场、压力场和应力场的变化,从而解释瞳孔阻滞现象,为临床上青光眼房水引流装置的设计、放置最佳位置、入口形状等提供参考。

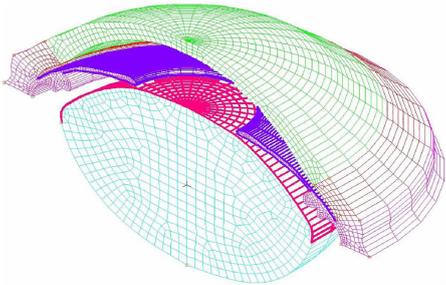


图4 基于正常兔眼切片的3D轴对称模型^[33]
Fig.4 3D axial symmetry model based on section of normal rabbit eye

为了解高眼压作用下虹膜的形态特征,他们设计了瞳孔阻滞仿真实验系统^[34],并通过前房灌注的方法^[35],建立了急性高眼压动物模型,利用小动物超声影像系统获得高眼压下虹膜形态的变化规律,发现虹膜截面积随眼内压的升高而降低,在眼内压达到 107.1 mmHg 时出现反折现象。在描述虹膜的生物力学特性时,对比研究发现 Ogden 超弹性模型比 Neo-Hookean 模型和线弹性模型的拟合效果理想^[35]。

青光眼视神经损害的原发部位在巩膜筛板,正常人的巩膜筛板存在着区域性差别,其上下方结缔组织支架较稀疏筛孔较大,鼻颞侧结缔组织较密集筛孔较小,这种结构恰与视神经纤维对高眼压易感性的分布类型相对应,为青光眼视神经损害的机械学说提供了解剖学基础。

20 世纪末的筛板生物力学模型是将筛板处理成有限厚度的圆板,根据弹性力学圆薄板弯曲理论,建立了眼压作用下的筛板变形的模型,分析眼压与筛板位移及其力学特性之间的关系^[36]。近年来,中国科学院力学研究所宋凡课题组^[37]根据横向剪切变形的 Reissner 型平板理论,建立了在眼压与颅压

共同作用下筛板受力变形的模型,定量分析了位移与眼压和颅压的压差、筛板厚度、直径及弯曲刚度、横向剪切刚度的关系。实验研究发现,筛板及筛板前组织厚度与眼压几乎呈线性降低的关系,随着眼压的升高筛板前表面的曲率有减小的趋势^[38]。

自 Quigley 等^[39]发现青光眼视神经损害最初改变的位置位于筛板及周围组织开始,国内外学者认为建立一种能够评价高眼压对视神经影响的视乳头模型,有利于对青光眼致病机理的力学分析。Qiu 等^[40]利用光学相干断层扫描技术(optical coherence tomography, OCT)获得兔在体视乳头断层图像,三维重建并组装了巩膜模型;祁昕征等^[41]在此基础上区分视网膜与脉络膜结构,基于猫在体图像建立了猫眼三维有限元模型。高眼压作用下筛板及视乳头会发生变形,变形与材料的力学特性密切相关。利用 OCT 获得的断层图像,结合有限元及优化算法,可确定在体视网膜的力学特性,该方法可用于在体视网膜力学特性的识别^[42]。

小梁网是房水流出的重要途径,小梁网结构异常将导致房水引流与排出障碍引起眼压升高,眼压升高又会进一步影响小梁网细胞的功能。机械应力对眼小梁网细胞的生物学影响得到了广泛研究。WuDunn^[43]对此进行了比较详尽的综述。

4 眼外伤

眼外伤按致伤原因可分为机械性和非机械性两类,前者是由力学因素直接导致的组织损伤;后者则包括化学烧伤、热烧伤、激光伤、辐射伤、电击伤等。冲击载荷作用是造成眼外伤的主要原因^[44],交通事故、军事行动、体育器材和日用品使用不当等是造成机械性眼外伤比较普遍的原因^[45]。

按眼球壁是否被穿透将机械性眼外伤分为开放性和闭合性伤两大类^[46]。眼球受冲击时眼内组织会产生不同程度的损伤,比如角膜磨损、前房积水、晶状体错位、视网膜脱落、眼球破裂等^[47]。使用各种不同冲击物(包括 BB 弹、冲击杆、泡沫子弹、跌落物、高压液体等)进行动态量化冲击实验,是研究外伤性眼钝伤的主要手段^[48-49]。研究发现,钝击造成的赤道部扩张会伴有晶体和虹膜向后移位或血管破裂等现象^[48],当眼球受到钝物击打时,外力造成眼球前后径缩短和横径的拉长,直接导致了前节结构

尤其是房角的撕裂^[49]。

用单变量模型(质量、速度、能量等)分析眼球抗冲击的实验数据,Duma等^[50]认为,冲击载荷造成眼角膜的损伤与子弹的动能有关而与子弹的冲量关系不大。进一步研究发现,用子弹尺寸的名义动能定量地表征眼组织受冲击载荷的损伤危害曲线,在预测角膜磨损、晶状体错位、视网膜脱落等不同程度损伤方面有不错的效果^[51]。近年对固定猪眼行弹道实验研究发现,0.68口径子弹造成不同程度眼外伤所需的能量阈值大致为:>2 J时脉络膜脱落,>4 J时晶状体前庭错位,>4.8 J时视神经盘旁视网膜脱离,>7 J时虹膜根部断裂,>7.5 J时角膜基质分离,>9.3 J时脉络膜断裂,>10 J时眼球破裂^[52]。

上述诸多的冲击实验结果表明,动能是造成钝性眼外伤最重要的参考条件,但动能作为判断眼外伤的标准存在明显的不足。如果冲击物的动能足够大,它可能冲破眼球,形成眼内异物,造成眼内组织损伤。即使冲击物没有足够的能量而造成闭合性眼外伤,也会导致如视网膜脱离这样的严重症状。例如,一个子弹和一个棒球,以相同的能量冲击眼球,造成的眼外伤不论从类型还是程度都会存在显著的差别^[53]。总结眼球受不同钝物(泡沫块、金属块、BB弹等)冲击造成的破裂伤,Duma等提出单位面积的冲击能量(冲击物动能/冲击接触面积)更能准确描述造成眼损伤的力学条件^[50]。

眼内压的变化是近年来开始关注的因素,当冲击物是射流时眼内压的因素显得尤为关键^[54]。研究发现,在眼球遭受彩弹冲击的情况下,眼内压超过2.0 MPa时,眼球破裂的可能性极大^[52]。Bisplinghoff等^[55]利用高速加压系统向眼球内施加高压研究巩膜的动态力学性能,结果发现,高速动载下巩膜能承受的最大应力为13.89 MPa(最大应变0.05)。同静态的力学测试结果相比,巩膜在高速冲击下能够承受更大的应力,但不能承受更大的应变,这个损伤标准为数值仿真评价眼损伤提供了客观依据。

北京航空航天大学樊瑜波课题组^[56]在前人研究的基础上,建立了较为完整的全眼球模型,用于分析眼球的力学响应。该模型可以模拟高速钝击和冲击下的眼组织动力学响应,并通过应力、应变等受力状态,分析眼组织的损伤情况。另外,国内学者近年

来也开展了不少眼外伤相关的实验研究,例如第三军医大学的黄秋闽课题组^[57]对眼冲击伤机理进行研究,他们采用生物激波管制造接近临床实际的眼冲击伤模型。安美霞等^[58]用冲击杆(直径112 cm,质量245 g)以自由落体方式垂直冲击兔眼,结果发现,光感受器细胞的凋亡是挫伤性视网膜病变的一个重要机制。

5 展望

眼力学研究在眼科学中的作用已越来越受到国内外研究者及临床医生的重视。随着技术的不断进步,结合生物力学建模分析,在体角膜力学特性检测装置会更加完善,不间断眼内压在体测试及房水自动引流装置有望在临床出现,通过个体医学影像分析而建立眼球运动模型将为临床眼外肌疾患手术提供个性化方案;眼力学生物学研究的开展,将有助于人们从组织、细胞及生物大分子等多个层次认识眼功能疾患的发生、发展及防治机理,这对眼科临床有着重要意义。

参考文献:

- [1] CHRISTIANSEN SP. Extraocular muscle: Extraocular muscle anatomy [M]//Dartt DA, ed. Encyclopedia of the eye [M]. Oxford: Academic Press, 2010: 89-98.
- [2] COLLINS CC, O'MEARA D, SCOTT AB. Muscle tension during unrestrained human eye movements [J]. J Physiol, 1975, 245(2): 351-369.
- [3] 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.
- [4] MILLER JM, ROBINSON DA. A model of the mechanics of binocular alignment [J]. Comput Biomed Res, 1984, 17(5): 436-470.
- [5] CLARK RA, MILLER JM, DEMER JL. Three-dimensional location of human rectus pulleys by path inflections in secondary gaze positions [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2000, 41(12): 3787-3797.
- [6] GAO Z, GUO H, CHEN W. Initial tension of the human extraocular muscles in the primary eye position [J]. J Theor Biol, 2014, 353: 78-83.
- [7] DEMER JL. Current concepts of mechanical and neural factor in ocular motility [J]. Curr Opin Neurol, 2006, 19

- (1): 4-13.
- [8] 陈维毅, 杨桂通, 吴文周. 人体眼球的运动模型及相应的动力学方程组 [J]. 中国生物医学工程学报, 2000, 19(3): 266-271.
- [9] LIU H, GONG Y, XIA L, *et al.* The finite element analysis of the pathology and treatment of high myopia esotropia [C]//Proceedings of 2014 7th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics. Dalian: IEEE, 2014: 478-482.
- [10] GUO H, GAO Z, CHEN W. Contractile force of human extraocular muscle: A theoretical analysis [J]. Appl Bionics Biomech, 2016, doi: 10.1155/2016/4091824.
- [11] 郭红梅. 基于眼外肌本构模型的眼球运动建模及临床应用研究 [D]. 太原: 太原理工大学博士学位论文, 2016.
- [12] NGUYEN T, JONES R, BOYCE B. A nonlinear anisotropic viscoelastic model for the tensile behavior of the corneal stroma [J]. J Biomech Eng, 2008, 130(4): 397-405.
- [13] BOSCHETTI F, TRIACCA V, SPINELLI V, *et al.* Mechanical characterization of porcine corneas [J]. J Biomech Eng, 2012, 134(3): 451-459.
- [14] 谢毅, 樊瑜波, 邓应平, 等. 兔眼准分子激光原位角膜磨镶术后角膜扩张的研究 [J]. 生物医学工程研究, 2008, 27(1): 19-22.
- [15] Elsheikh A, Alhasso D, Rama P. Biomechanical properties of human and porcine corneas [J]. Exp Eye Res, 2008, 86(5): 783-790.
- [16] 倪寿翔, 郁继国, 包芳军, 等. 近视 LASIK 术后角膜生物力学参数变化的相关性 [J]. 国际眼科杂志, 2010, 10(12): 2305-2307.
- [17] TANTER M, TOUBOUL D, BERCOFF J, *et al.* High resolution quantitative imaging of cornea elasticity using super-sonic shear imaging [J]. IEEE Trans Med Imaging, 2009, 28(12): 1881-1893.
- [18] 陈维毅, 王晓君, 刘春生, 等. 兔眼球生物力学特性的实验研究 [C]//第九届全国生物力学学术会议论文汇编. 天津: [s. n.], 2009.
- [19] 张海霞, 李林, 张昆亚, 等. 兔眼角膜生物力学特性的年龄相关性 [J]. 医用生物力学, 2014, 29(3): 271-275.
ZHANG HX, LI L, ZHANG KY, *et al.* Age-related changes in biomechanical properties of rabbit corneas [J]. J Med Biomech, 2014, 29(3): 271-275.
- [20] 孙太凤, 王慧枝, 穆晶, 等. 基于整体角膜膨胀实验对兔眼角膜参数的确定 [J]. 北京生物医学工程, 2016, 35(2): 191-197.
- [21] 冯元桢. 生物力学: 活组织的力学特性 [M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1986.
- [22] PANDOLFI A, HOLZAPFEL G. Three-dimensional modeling and computational analysis of the human cornea considering distributed collagen fiber orientation [J]. J Biomech Eng, 2008, 130(6): 238-240.
- [23] 王超英, 陈维毅, 郝岚, 等. 高度近视眼巩膜生物力学特性初步研究 [J]. 眼科研究, 2003, 21(2): 113-115.
- [24] 张学锋, 陈维毅, 王超英, 等. 几种后巩膜加固材料力学性能比较 [J]. 太原理工大学学报, 2004, 35(5): 530-532.
- [25] CHEN W, WANG X, WANG C, *et al.* An experimental study on collagen content and biomechanical properties of sclera after posterior sclera reinforcement [J]. Clin Biomech, 2008, 23(Suppl 1): S17-S20.
- [26] ZHANG Y, ZOU C, LIU L, *et al.* Effect of irradiation time on riboflavin-ultraviolet-A collagen crosslinking in rabbit sclera [J]. J Cataract Refract Surg, 2013, 39(8): 1184-1189.
- [27] ZHANG X, TAO X, ZHANG J, *et al.* A review of collagen cross-linking in cornea and sclera [J]. J Ophthalmol, 2015, doi: 10.1155/2015/289467.
- [28] PETROLL WM, MIRON-MENDOZA M. Mechanical interactions and crosstalk between corneal keratocytes and the extracellular matrix [J]. Exp Eye Res, 2015, 133: 49-57.
- [29] LIU C, FENG P, LI X, *et al.* Expression of MMP-2, MT1-MMP, and TIMP-2 by cultured rabbit corneal fibroblasts under mechanical stretch [J]. Exp Biol Med, 2014, 239(8): 907-912.
- [30] FENG P, LI X, CHEN W, *et al.* Combined effects of interleukin-1 β and cyclic stretching on metalloproteinase expression in corneal fibroblasts in vitro [J]. Biomed Eng Online, 2016, 15(1): 63.
- [31] DU G, LIU C, LI X, *et al.* Induction of matrix-1 by tumor necrosis factor- α is mediated by interleukin-6 in cultured fibroblasts of keratoconus [J]. Exp Bio Med, 2016, doi: 10.1177/1535370216650940.
- [32] 王宁利主译. Shields 青光眼教科书 [M]. 5 版. 北京: 人民卫生出版社, 2009.
- [33] 宋红芳. 基于在体实测前后房压强差的房水循环仿真研究 [D]. 北京: 首都医科大学博士学位论文, 2012.
- [34] 薄雪峰. 虹膜位形变化规律及本构关系的实验研究 [D]. 北京: 首都医科大学博士学位论文, 2010.
- [35] 张昆亚. 虹膜形态变化的实验研究及数值模拟 [D]. 北京: 首都医科大学博士学位论文, 2014.
- [36] HE D, REN Z. Biomathematical model for pressure-dependent lamina cribrosa behavior [J] J Biomech, 1999, 32(6): 579-584.
- [37] 田晗霄, 杜睿琪, 宋凡. 眼压作用下筛板的力学行为分析 [C]//中国力学大会-2015 论文摘要集. 上海: [s. n.], 2015.
- [38] ZHAO Q, QIAN X, LI L, *et al.* Effect of elevated intraocular pressure on the thickness changes of cat lamellar and prelaminar tissue using optical coherence tomography [J]. Biomed Mater Eng, 2014, 24(6): 2349-2360.

- [39] QUIGLEY HA, ADDICKS EM, GREEN WR, *et al.* Optic nerve damage in human glaucoma: II. The site of injury and susceptibility to damage [J]. *Arch Ophthalmol*, 1981, 99(4): 635-649.
- [40] QIU J, QIAN X, CUI Q, *et al.* Three-Dimensional reconstruction and finite element modeling analysis of the rabbit optic nerve head in acute high intraocular pressure [J]. *Jap J Appl Phys*, 2012, 51(6R): 067001.
- [41] 祁昕征, 魏超, 杨佳燕, 等. 三维有限元模型力学分析可预测视乳头的形状变化[J]. *中国组织工程研究*, 2013, 17(50): 8712-8718.
- [42] QIAN X, ZHANG K, LIU Z. A method to determine the mechanical properties of the retina based on an experiment *in vivo* [J]. *Biomed Mater Eng*, 2015, 26(s1): S287-S297.
- [43] WUDUNN D. Mechanobiology of trabecular meshwork cells [J]. *Exp Eye Res*, 2009, 88(4): 718-723.
- [44] 胡宗莉, 蒋善明, 魏欣, 等. 急诊眼外伤致伤原因及致盲因素分析[J]. *眼科新进展*, 2015, 35(2): 136-140.
- [45] WEAVER AA, LOFTIS KL, DUMA SM, *et al.* Biomechanical modeling of eye trauma for different orbit anthropometries [J]. *J Biomech*, 2011, 44(7): 1296-1303.
- [46] 张卯年译. KUHN F, PIERMICI DJ. 眼外伤—理论与实践[M]. 北京: 人民军医出版社, 2010: 3-5.
- [47] ALPHONSE VD, KEMPER AR. Literature review of eye injuries and eye injury risk from blunt objects [C]//*Brain Injuries and Biomechanics Symposium*. Washington DC: [s. n.], 2013.
- [48] CAMPBELL DG. Traumatic glaucoma [M]//SHINGLETON BJ, HERSH PS, KENYON KR, eds. *Eye Trauma*. St. Louis; Mosby-Year Book, 1991:112-125.
- [49] BLANTON FM. Anterior chamber angle recession and secondary glaucoma [J]. *Arch Ophthalmol*, 2000, 72(11): 39-43.
- [50] DUMA SM, NG TP, KENNEDY EA, *et al.* Determination of significant parameters for eye injury risk from projectiles [J]. *J Trauma*, 2005, 59(4): 960-964.
- [51] DUMA SM, KENNEDY EA, NG TP. Evaluating eye injury risk of airsoft pellet guns by parametric risk functions [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2006, 47(13): 4680-4680.
- [52] SPONSEL WE, GRAY W, SCRIBBICK FW, *et al.* Blunt eye trauma: Empirical histopathologic paintball impact thresholds in fresh mounted porcine eyes [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2011, 52(8): 5157-5166.
- [53] STITZEL JD, DUMA SM, CORMIER JM, *et al.* A nonlinear finite element model of the eye with experimental validation for the prediction of globe rupture [J]. *Stapp Car Crash J*, 2002, 46: 81-102.
- [54] DUMA SM, BISPLINGHOFF JA, SENGE DM, *et al.* Eye injury risk from water stream impact: Biomechanically based design parameters for water toy and park design [J]. *Curr Eye Res*, 2012, 37(4): 279-285.
- [55] BISPLINGHOFF JA, MCNALLY C, MANOOGIAN SJ, *et al.* Dynamic material properties of the human sclera [J]. *J Biomech*, 2009, 42(10): 1493-1497.
- [56] LIU X, WANG L, WANG C, *et al.* Mechanism of traumatic retinal detachment in blunt impact: A finite element study [J]. *J Biomech*, 2013, 46(7): 1321-1327.
- [57] 黄秋闾, 杨志焕, 王正国, 等. 冲击波对兔眼后节组织的早期损伤[J]. *中华创伤杂志*, 2000, 16(7): 401-403.
- [58] 安美霞, 张效房, 张金嵩. 挫伤性视网膜病变中光感受器细胞凋亡与氧化损伤的实验研究 [J]. *中华眼科杂志*, 2004, 40(2): 118-121.