

# 眼外伤的数值仿真研究进展

刘笑宇<sup>1,2</sup>, 陈铎<sup>1,2</sup>, 耿晓琪<sup>1,2</sup>, 樊瑜波<sup>1,2,3</sup>

1. 北京航空航天大学生物与医学工程学院, 北京 100083
2. 北京航空航天大学生物医学工程高精尖创新中心, 北京 100083
3. 国家康复辅具研究中心, 北京 100176

**摘要** 眼的结构复杂, 内部组织十分脆弱, 即使是轻微的损伤, 如果处理不当往往会对患者造成严重的视力障碍甚至失明。数值仿真技术作为一种有效的研究手段, 不仅可以描绘冲击状态下眼内组织结构的动力学响应, 同时可以在虚拟环境下实现实验手段无法提供的力学条件。本文梳理近 20 年国内外相关研究文献, 综述了数值仿真技术在直接性和间接性眼外伤的应用, 分析其研究现状以及未来的发展趋势。

**关键词** 数值仿真; 眼外伤; 有限元模型

眼的结构复杂, 内部组织十分脆弱, 即使是轻微的损伤, 如果处理不当往往会对患者造成严重的视力障碍, 甚至失明。国内眼外伤的流行病学研究表明眼外伤住院患者约占眼科住院总人数的 1/3<sup>[1]</sup>, 是眼科疾病中的首位致盲因素。数值仿真技术作为一种有效的生物力学研究手段, 可定量分析造成眼损伤的力学条件及其与损伤程度之间的关系, 有助于理解眼外伤产生机制, 为眼损伤的修复与治愈提供更合理的医疗方案。眼外伤的发生是眼球在外力作用下, 眼组织间强烈的相互作用而在某些位置产生应力集中和大变形的结果。因此, 眼外伤数值仿真研究的前提是建立一套完善的全眼球模型。目前已有多种眼模型被报道应用于不同类型的眼外伤研究。本文对国内外相关文献进行综述, 根据致伤机制不同, 主要介绍数值仿真技术应用于直接性和间接性眼外伤中的研究现状。

## 1 直接性眼外伤的数值仿真

外物(或外力)直接钝击造成的眼外伤复杂多样, 较严重的就是眼球破裂<sup>[2]</sup>。另外, 即使在眼球壁完好的情况下, 眼内组织也会遭受严重的损伤, 如视网膜脱落和晶状体损伤等<sup>[3]</sup>。数值仿真技术为上述眼外伤提供了经济且有效的研究手段。

Delori 等<sup>[4]</sup>是眼外伤的数值仿真研究的开拓者, 1999 年, 他们根据人眼的解剖结构建立了第一个全眼球有限元模型, 该模型包括了角膜、巩膜、虹膜、睫状体、脉络膜及玻璃体等组织, 并且在眼球内部初始化了正常的眼内压, 首次研究了造成钝性眼外伤的力学条件; 随后, 又利用该模型模拟了汽车碰撞过程中气囊展开对屈光性角膜切削术后眼冲击伤的影响<sup>[5]</sup>。通过比较术前与术后的眼球壁应力状态, 定量分析了角膜切

收稿日期: 2018-05-10; 修回日期: 2018-05-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(11502013, 11421202); 国防基础科研计划项目(JCKY2016601B009)

作者简介: 刘笑宇, 讲师, 研究方向为生物力学、眼损伤, 电子信箱: x.y.liu@buaa.edu.cn; 樊瑜波(通信作者), 教授, 研究方向为生物力学、生物医学工程, 电子信箱: yubofan@buaa.edu.cn

引用格式: 刘笑宇, 陈铎, 耿晓琪, 等. 眼外伤的数值仿真研究进展[J]. 科技导报, 2018, 36(13): 44-49; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.13.006

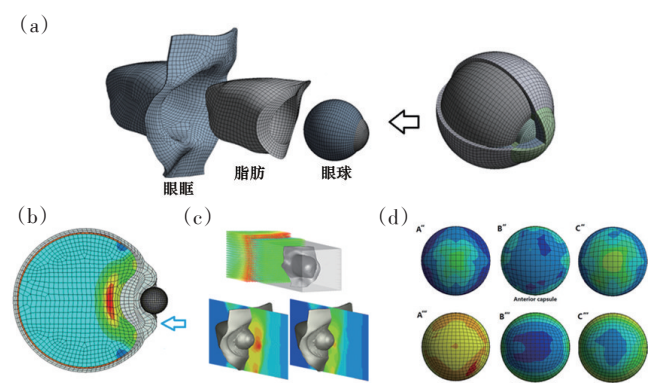
削术后眼损伤对于气囊冲击的敏感性。2002年,Stitzel等<sup>[6]</sup>改进了Uchio建立的眼球模型,建立了一套更为完善的有限元眼球模型,并将其命名为VT-WFU。该模型包括了角膜、巩膜、晶状体、睫状体、悬韧带、房水和玻璃体等结构。其中房水和玻璃体被当作具有一定黏度的液体,并通过流固耦合方法与其他眼组织相耦合。他们通过22个对照实验(与模型施加的外载相同),验证了该模型的有效性。仿真最终结果表明,在冲击状态下角膜上的应力超过23 MPa将会发生眼球破裂,该结论已经被公认为判断钝物冲击下眼球是否破裂的标准。VT-WFU眼球模型还应用于其他眼组织外伤的数值分析。Weaver等<sup>[7]</sup>将VT-WFU眼球模型植入至三维的眼眶模型,研究大尺寸钝物冲击眼球时眼眶的保护作用。与此同时,他们利用这个眼球模型与多种钝物冲击眼球实验对比,修正了Stitzel等的实验结果:钝击性眼球破裂伤还需要考虑瞬间升高的眼压,如果眼内压超过1.01 MPa,眼球破裂伤发生的可能性将大增<sup>[8]</sup>。同样利用该模型,Stitzel等<sup>[9]</sup>将眼球模型的晶状体刚度改变,分析它对于钝击伤的敏感程度。研究显示,晶状体刚度的增加将会给眼外伤带来更大的风险,老年人晶状体刚度会随年龄增长而增加,因而更容易造成眼部受损。

2006年,Cirovic等<sup>[10-11]</sup>的仿真研究将视神经考虑到眼球的模型,分析它在钝击条件下的损伤。为了简化计算,该眼球模型被简化成为一个理想的球体,并模拟了当食指以一定的速度插入眼球和眼眶交接处,视神经和眼组织的力学响应。结果显示眼球的快速转动以及眼压迅速增大导致了高速率应变的产生,它足以造成视神经的轴突损伤甚至撕裂。Kennedy等<sup>[12]</sup>将仿真结果与实验数据进行比对,研究了彩弹钝性冲击造成开放性眼外伤的力学条件。同样地,针对彩弹造成的眼外伤,2011年,Gray等<sup>[13]</sup>构建了包括多种眼组织的全眼球模型,利用有限体积法得到了造成不同眼组织损伤需要的冲击能量。他们的结果表明,彩弹造成眼球破裂所需的冲击能量为10 J,而造成角膜擦伤、晶状体易位和视网膜脱离等损伤所需能量均小于2 J。

视网膜是重要的成像组织,由于它薄而脆弱,眼外伤中几乎超过50%会累及视网膜组织<sup>[14-15]</sup>。2011年,Rossi等<sup>[16]</sup>改进了VT-WFU眼球模型,将视网膜考虑其中,用以分析BB弹丸冲击下视网膜的损伤情况。他们发现玻璃体牵拉并不会造成明显的外伤性视网膜损

伤,而冲击波造成的多轴向、高速率应变是视网膜损伤及脱落的关键因素。之后,Rossi等<sup>[17]</sup>利用该模型进一步分析了爆破波对视网膜的损伤情况。由于视网膜自身材料强度低,对于它的力学特性尚了解不够,因此用于评价视网膜损伤的视网膜应变极限也不是很准确。但是,模型可以量化分析不同载荷下视网膜动力学响应的相对值,其结果也是十分具有说服力。近年来,爆破波导致的眼外伤数值仿真研究多见报道,用于该类研究的眼模型也愈趋复杂和精细<sup>[18-22]</sup>。

北京航空航天大学刘笑宇等<sup>[23]</sup>利用人体眼球解剖的平均数据和正常男性的眼眶电子计算机断层扫描(CT)图像数据建立了包括眼眶骨和脂肪在内的全眼球模型(图1(a))。他们利用可分离的接触特征,模拟了视网膜与其基底间的黏附作用,并利用标准弹丸的冲击仿真解释了外伤性视网膜的发生机制。研究发现,钝击过程中在视网膜附近会形成明显的眼内负压(图1(b)),这很可能直接导致玻璃体对视网膜的牵拉。利用相同的模型,刘笑宇等<sup>[24]</sup>将其植入流体场,利用流固耦合技术,模拟了爆破冲击波作用下眼球的动力学响应(图1(c))。流固耦合技术可以模拟爆破冲击波的产生、传播以及和眼球模型的相互作用。研究发现,爆破波产生的瞬态高压所造成严重的眼组织损伤是切向应力波和压应力波共同作用的结果,2000 kPa的爆破高压将很可能导致眼球破裂,并最可能发生在角巩缘部位。此外,刘笑宇等<sup>[25]</sup>将该模型中的晶状体组织进一步细化,通过参数敏感性分析,评价了晶状体囊膜破裂的影响因素,包括晶状体的弹性模量、晶状体囊膜厚度及其弹性模量等(图1(d))。仿真结果表明钝性冲击造成



(a) 全眼球有限元模型;(b) 钝性冲击造成眼内压变化;  
(c) 爆破波导致角膜破裂伤;(d) 钝击造成晶状体囊膜破裂

图1 眼组织损伤的有限元分析

Fig. 1 Finite element analysis of the ocular injuries

晶状体后囊的应变几乎为前囊的2倍,且与冲击速度成正比;当晶状体的弹性模量随年龄而变化时,囊膜的应变没有显著变化。

## 2 间接性眼外伤的数值仿真研究

间接性眼外伤的致伤特点是外力(或外物)不与眼球直接作用,而是通过作用力人体内部传播到眼组织,导致其不同程度的损伤。导致间接性眼外伤的外力包括加速度和颅颌面的击打,具有典型的对冲伤特征。

瞬态加速度导致视网膜损伤和脱落,它产生的载荷并不直接作用于眼球表面,而是通过惯性作用传导至眼组织,所以对内部组织的破坏更加明显,最典型的例子是婴儿震荡综合征(shaken baby syndrome)。2009年,Hans等<sup>[26]</sup>和Rangarajan等<sup>[27]</sup>率先分别建立了有限元眼球模型来描述非间接力学作用下的视网膜损伤情况。Hans等<sup>[26]</sup>将建立的眼球模型植入到MADYMO多刚体动力学人体模型,研究了婴儿跌落和加速度载荷2种载荷作用下视网膜的力学响应。他们的仿真结果表明,单独振动可能足以导致视网膜出血,因为较跌落造成的冲击而言,振动会造成眼后段视网膜组织中更持久及更高的作用力;这种作用力会在视神经处更加集中,极易造成视网膜在其周围的损伤。Rangarajan等<sup>[27]</sup>将眼球模型简化为一个标准球体,内层附着一层薄膜代表视网膜,模拟了加速度作用下的视网膜形变;并且通过改变玻璃体的力学特征,探索了玻璃体的状态对视网膜损伤的影响。仿真结果表明,当黏弹性的玻璃体由牛顿流体代替后,反复的加速-减速的振荡载荷(等同于摇晃头外伤)将会在玻璃体和视网膜交界面附近产生累加的作用力。在玻璃体液化条件下,视网膜的最大应力出现在后极和周边处,其中最常见的是视网膜出血症状。2014年,Yoshida等<sup>[28]</sup>利用构建的有限元模型证实了玻璃体-视网膜牵引作用是由婴儿头部受到强烈的加速-减速摇晃导致的,这正是造成视网膜出血的主要原因。他们的仿真结果同与使用琼脂凝胶的物理模型的分析结果吻合得很好,并在此基础上提出了应力对时间的积分( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )这个物理量能够更好地预测视网膜出血的可能性。同样地,2015年,Nadarasa等<sup>[29]</sup>建立婴儿眼有限元模型,对跌落和摇晃造成的视网膜出血进行对比研究,并在2018年建立了一个6周龄婴儿假人模型,模拟在不同高度和不同位置的5种头部

跌落冲击载荷以及3种摇晃加速度-减速度载荷作用下的视网膜出血特征<sup>[30]</sup>。实验结果表明,4个参数(压力、等效应力、等效应变及第一主应力)同摇晃-跌落的对比相关;摇晃中的旋转加速度明显造成了视网膜的应力和应变增高。因此同跌倒相比,摇晃婴儿更能导致眼后极附近的应力集中。

随着航空技术的进步,人体组织的抗载荷能力已经越来越成为航空器设计和性能充分发挥的重要因素。战斗机在行驶过程中会遇到如加速度突然改变、翻滚、旋转及超重等极端情况,其中产生的冲击载荷会对视网膜造成不可忽略的损伤<sup>[31]</sup>。北京航空航天大学耿晓琪等<sup>[32]</sup>利用先前该团队建立的全球模型同CT扫描的成年人头骨三维重建模型相匹配,并分别加载 $G_x$ 、 $G_y$ 、 $G_z$ 的单向加速度及3个方向的复合加速度,研究航空高过载环境下的视网膜损伤状况。仿真研究结果表明,恒定的直线加速度造成的视网膜的应变会在短时间内趋于稳定,复合加速度会使双眼视网膜的瞬态应力产生不同程度的响应,其分布特征差异尤其显著。

在顿挫性眼外伤中,除了钝物直接冲击眼球而导致的眼外伤外,眶骨骨折和严重的面部骨折也有很大可能造成眼损伤。一项临床调查研究指出,20%出现面部损伤的患者都存在眼损伤<sup>[33]</sup>。有学者提出当颜面部受到钝物冲击时,产生的冲击波在眼中传播,进而累及视网膜受损,引起视网膜震荡和黄斑裂孔等<sup>[34]</sup>。2013年,Schaller等<sup>[35]</sup>建立了具有精细解剖结构的眶骨模型,并利用瞬态动态模拟来分析纯静水压、纯屈曲和合力传递作用下视神经的损伤特征。仿真结果显示,每种载荷都会导致不同的眼眶骨折模式,这将会引起视神经管变形或骨折,造成视神经肿胀形成管内嵌顿、受压或变形,导致视力受损。2015年,Huempferhieri等<sup>[36]</sup>结合临床病例,分析了视神经管内视神经束由于前颅底微骨折而导致间接外伤性视神经病变的损伤。他们的研究表明,即使在低速的拳力作用下,前额骨遭受的冲击力也会传递到视神经孔和交叉的位置,造成CT扫描或磁共振成像(MRI)未识别的微损伤,进而影响到视神经管的完整性。2018年,刘笑宇等<sup>[37]</sup>模拟了前额、眉骨、颞骨和上颌骨4个位置遭受钝性冲击会导致视网膜的损伤可能(图2(a))。仿真结果显示,钝击伤发生在前额骨时,双眼视网膜黄斑区域的应变均表现出较高的峰值,而当颞侧发生钝击时同侧眼的视网膜应变要明显高于对侧眼,这同应力波在眼眶内的传播有关(图2(b))。

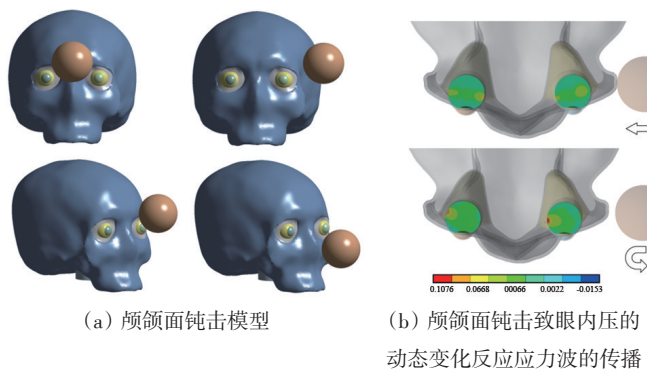


图2 颅颌面钝击致视网膜损伤的数值仿真分析

Fig. 2 Finite element analysis of retinal injuries following craniomaxillofacial trauma

### 3 讨论

随着数值仿真技术的不断进步,眼球模型从最初的简化模型一直发展到今天的结构复杂、材料多样的全眼球模型,越来越逼近于真实的眼球的解剖结构和物理属性。当然,针对于不同的眼组织损伤,模型的结构和材料也有所变化<sup>[38]</sup>。因此,眼球有限元模型并不是结构越复杂或材料越精细就越先进,结合研究内容而进行必要的简化是有限元分析的一个重要内容。将简化模型和复杂模型相结合,即提高了求解效率,又能够保证研究对象的计算准确度。例如著名的VT-WFU眼球模型主要针对于眼球壁(角膜和巩膜)进行钝击伤分析<sup>[6]</sup>,因此晶状体被简化成为一个刚体,睫状肌和悬韧带都简化为线弹性体,而视网膜完全被忽略掉。而同样的模型对于研究晶状体的损伤时<sup>[9]</sup>,晶状体模型已不再是一个刚体,而是一个材料属性随着年龄增长而改变的复杂模型。根据研究的内容进行有效的调整,也是有限元仿真技术的一大特色。

利用有限元技术进行损伤分析,最令人质疑是它的可信度<sup>[39]</sup>。通过对照实验对有限元模型进行有效验证是保证仿真结果可信度的一个最普遍的办法<sup>[40]</sup>。Gray等<sup>[13]</sup>建立的有限元眼球模型,通过实验对比结果分析了不同钝击速度造成的眼损伤类型。研究中,他们发现使用同一套眼组织材料属性模型,当施加不同的载荷条件,仿真的结果和实验数据也相距甚远。具体来说,一种组织材料属性如果应用于A问题的研究,那么它未必同样适用B问题的分析。所以即使有限元模型已经经过了实验验证,针对于不同问题的计算结果也会令人质疑。Rossi等<sup>[6]</sup>针对这一问题提出了逆向手

段求解材料属性的办法。他们将仿真结果与前人的冲击实验进行匹配,用优化的方法找到了最适合眼组织的材料属性。尽管模型中的材料属性不是直接来源于组织的力学性能实验,但是这种逆向获取材料属性的方法能够更加准确地匹配冲击状态下眼组织的动力学响应,因此能够提供更加准确地结果和更有说服力的结论,是一个值得借鉴的方法。有限元仿真技术可以提供实验手段无法满足的力学条件,是一种既经济又高效的研究方法。但是在利用该技术进行特定的眼外伤分析之前,必须对建立的有限元模型进行充分的验证。

### 4 结论

眼外伤的发生是眼球在外力的作用下,眼组织间强烈的相互作用而在某些位置产生应力集中和大变形,导致眼组织无法承受而造成自身的结构破坏。从力的相互作用和传导而言,一套完善的全眼球模型是眼外伤的数值仿真研究的前提。目前,建立的眼球模型已比较完善,包括了角膜、巩膜、晶状体、睫状体、悬韧带、视网膜、玻璃体和房水等重要的组织,其尺寸多来源于平均解剖数据。全眼球模型的所有网格采用六面体单元,并保持结构之间的网格密度一致。六面体单元具有大变形特征,特别适用于冲击和碰撞这样的动力学问题。利用实验结果的比对研究,数值仿真分析结果的真实性的已得到证实。该领域研究有望从宏观损伤的模拟逐步转移至微观损伤的预测,这有助于损伤或疾病的早期诊断,最大程度上发挥数值仿真对于损伤预测的优势。

#### 参考文献(References)

- [1] 徐建锋, 王雨生. 我国大陆地区眼外伤的流行病学状况[J]. 国际眼科杂志, 2004, 4(6): 1069-1076.  
Xu Jianfeng, Wang Yusheng. Epidemiology of eye injury in mainland of China[J]. International journal of Ophthalmology, 2004, 4(6): 1069-1076.
- [2] Kuhn F, Piermici D J. Ocular trauma: Principles and practice [M]. New York: Thieme, 2002: 3-9.
- [3] Duma S M, Ng T P, Kennedy E A. Determination of significant parameters for eye injury risks from projectiles[J]. The Journal of Trauma, 2005, 59(4): 960-964.
- [4] Uchio E, Ohno S, Kudoh J, et al. Simulation model of an eye-

- ball based on finite element analysis on a supercomputer[J]. *British Journal of Ophthalmology*, 1999, 83(10): 1106–1111.
- [5] Uchio E, Watanabe Y, Kadonosono L, et al. Simulation of air-bag impact on eyes after photorefractive keratectomy by finite element analysis method[J]. *Graefes Archive for Clinical & Experimental Ophthalmology*, 2003, 241(6): 497–504.
- [6] Stitzel J D, Duma S M, Cormier J M, et al. A nonlinear finite element model of the eye with experimental validation of the prediction of globe rupture[J]. *Stapp Car Crash Journal*, 2002, 46: 81–102.
- [7] Weaver A, Kennedy E A, Duma S M, et al. Evaluation of different projectiles in matched experimental eye impact simulations [J]. *Journal of Biomechanical Engineering*, 2011, 133(3): 031002.
- [8] Weaver A A S, Loftis L, Duma S M, et al. Biomechanical modeling of eye trauma for different orbit anthropometries[J]. *Journal of Biomechanics*, 2011, 44(7): 1296–1303.
- [9] Stitzel J D, Hansen A, Herring P, et al. Blunt trauma of the aging eye: Injury mechanisms and increasing lens stiffness[J]. *Archives of Ophthalmology*, 2005, 123(6): 789–794.
- [10] Cirovic S, Bhola R M, Hose D R, et al. A computational study of the passive mechanisms of eye restraint during head impact trauma[J]. *Computer Methods in Biomechanics & Biomedical Engineering*, 2005, 8(1): 1–6.
- [11] Cirovic S, Bhola R M, Hose D R, et al. Computer modeling study of the mechanism of optic nerve injury in blunt trauma [J]. *British Journal of Ophthalmology*, 2006, 90(6): 778–783.
- [12] Kennedy E A, Stitzel J D, Duma S M. Matched experimental and computational simulations of paintball eye impacts[J]. *Biomedical Sciences Instrumentation*, 2008, 44(44): 243–248.
- [13] Gray W, Sponsel W E, Scribbick F W, et al. Numerical modeling of paintball impact ocular trauma: Identification of progressive injury mechanisms[J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 52(10): 7506–7513.
- [14] Brinton D A, Wilkinson C P. *Retinal detachment: Principles and practice*[M]. New York: Oxford University Press, 2009: 9–39.
- [15] Hoogewoud F, Chronopoulos A, Varga Z, et al. Traumatic retinal detachment: The difficulty and importance of correct diagnosis[J]. *Survey of Ophthalmology*, 2016, 61(2): 156–163.
- [16] Rossi T, Boccassini B, Esposito L, et al. The pathogenesis of retinal damage in blunt eye trauma: Finite element modeling [J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2011, 52(7): 3994–4002.
- [17] Rossi T, Boccassini B, Esposito L, et al. Primary blast injury to the eye and orbit: Finite element modeling[J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2012, 53(13): 8057–8066.
- [18] Bhardwaj R, Ziegler K, Seo J H, et al. A computational model of blast loading on the human eye[J]. *Biomechanics & Modeling in Mechanobiology*, 2014, 13(1): 123–140.
- [19] Bonora N. Modelling human eye under blast loading[J]. *Computer Methods in Biomechanics & Biomedical Engineering*, 2015, 18(2): 107–115.
- [20] Watson R, Gray W, Sponsel W E, et al. Simulations of porcine eye exposure to primary blast insult[J]. *Translational Vision Science & Technology*, 2015, 4(4): 8.
- [21] Liu X, Wang L, Wang C, et al. Prediction of globe rupture caused by primary blast: A finite element analysis[J]. *Computer Methods in Biomechanics & Biomedical Engineering*, 2015, 18(9): 1024–1029.
- [22] Notghi B, Bhardwaj R, Bailoor S, et al. Biomechanical evaluations of injury risk for blast loading[J]. *Journal of Biomechanical Engineering*, 2017, 139(8), doi: 10.1115/1.4037072.
- [23] Liu X, Wang L, Wang C, et al. Mechanism of traumatic retinal detachment in blunt impact: A finite element study[J]. *Journal of Biomechanics*, 2013, 46(7): 1321–1327.
- [24] Liu X, Wang L, Wang C, et al. Prediction of globe rupture caused by primary blast: A finite element analysis[J]. *Computer Methods in Biomechanics & Biomedical Engineering*, 2015, 18(9): 1024–1029.
- [25] Liu X, Wang L, Du C, et al. Mechanism of lens capsular rupture following blunt trauma: A finite element study[J]. *Computer Methods in Biomechanics & Biomedical Engineering*, 2015, 18(8): 914–921.
- [26] Hans S A, Bawab S Y, Woodhouse M L. A finite element infant eye model to investigate retinal forces in shaken baby syndrome[J]. *Graefes' Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 2009, 247(4): 561–571.
- [27] Rangarajan N, Kamalakkannan S B, Hasija V, et al. Finite element model of ocular injury in abusive head trauma[J]. *Journal of American Association for Pediatric Ophthalmology & Strabismus*, 2009, 13(4): 364–369.
- [28] Yoshida M, Yamazaki J, Mizunuma H. A finite element analysis of the retinal hemorrhages accompanied by shaken baby syndrome/abusive head trauma[J]. *Journal of Biomechanics*, 2014, 47(14): 3454–3458.
- [29] Nadarasa J, Deck C, Meyer F. Infant eye finite element model to investigate retinal hemorrhages after fall and shaking events [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2015, 1(Supl 1): 2016–2017.
- [30] Nadarasa J, Deck C, Meyer F, et al. Development of a finite-element eye model to investigate retinal hemorrhages in shaken baby syndrome[J]. *Biomechanics & Modeling in Mechanobiology*, 2018, 17(2): 517–530.
- [31] 张选斌, 唐勇, 岳洪梅.  $\pm G$ 加速度对航母舰载机飞行员的影响及防护对策[J]. *人民军医*, 2013, 56(10): 1124–1125.

- Zhang Xuanbin, Tang Yong, Yue Hongmei. Influence of  $\pm G_x$  acceleration on aircraft carrier aircraft pilots and countermeasures[J]. *People's Military Surgeon*, 2013, 56(10): 1124-1125.
- [32] 耿晓琪, 刘笑宇, 柳松杨, 等. 加速度造成不对称周边视力丧失的仿真研究[J]. *生物医学工程学杂志*, 2017(2): 188-192.
- Geng Xiaoqi, Liu Xiaoyu, Liu Songyang, et al. A simulation study with finite element model on the unequal loss of peripheral vision caused by acceleration[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2017(2): 188-192.
- [33] Welman T, Shanmugarajah K, Sabah S, et al. Assessment of emergency department eye examinations in patients presenting with mid-face injury[J]. *Journal of Emergency Medicine*, 2016, 50(3): 422-426.
- [34] Malbran E, Dodds R, Hulsbus R. Traumatic retinal detachment[J]. *Modern Problems in Ophthalmology*, 1972, 10: 479-489.
- [35] Schaller A, Huempfer-Hierl H, Hemprich A, et al. Biomechanical mechanisms of orbital wall fractures: A transient finite element analysis[J]. *Journal of Cranio-maxillo Facial Surgery*, 2013, 41(8): 710-717.
- [36] Huempfer-Hierl H, Bohne A, Wollny G, et al. Blunt forehead trauma and optic canal involvement: Finite element analysis of anterior skull base and orbit on causes of vision impairment [J]. *British Journal of Ophthalmology*, 2015, 99(10): 1430-1434.
- [37] Geng X, Liu X, Wei W, et al. Mechanical evaluation of retinal damage associated with blunt craniomaxillofacial trauma: A simulation analysis[J]. *Translational Vision Science and Technology*, 2018, Accepted.
- [38] Bisplinghoff J A, McNally C, Manoojian S J. Dynamic material properties of the human sclera[J]. *Journal of Biomechanics*, 2009, 42(10): 1493-1497.
- [39] Margulies S, Coats B, Christian C, et al. What can we learn from computational model studies of the eye?[J]. *Journal of American Association for Pediatric Ophthalmology & Strabismus*, 2009, 13(4): 332-332.
- [40] Sponkel W E, Gray W, Scribbick F W, et al. Blunt eye trauma: empirical histopathologic paintball impact thresholds in fresh mounted porcine eyes[J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2011, 52(8): 5157-5166.

## Review of eye trauma research by numerical simulation

LIU Xiaoyu<sup>1,2</sup>, CHEN Duo<sup>1,2</sup>, GENG Xiaoqi<sup>1,2</sup>, FAN Yubo<sup>1,2,3</sup>

1. School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China
2. Beijing Advanced Innovation Center for Biomedical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China
3. National Research Center for Rehabilitation Technical Aids, Beijing 100176, China

**Abstract** The eye is characterized by its complex structure and fragile material. Injuries to the eye would lead to serious visual impairment or blindness. Epidemiological study indicates that one-third of the hospitalized patients are related to eye injuries. As an effective method, numerical simulation can be used to represent the dynamic response of the ocular tissues as well as provide the mechanical conditions unavailable in any experimental methods. This paper reviews and introduces the related research literatures in the past 20 years, focusing on the application of numerical simulation of direct and indirect ocular trauma, and its current and future research. In general, the numerical simulation technology has become an effective method for the study of eye trauma, which can quantitatively analyze the relationship between mechanical conditions and degree of injury so as to help understand the mechanism of ocular trauma and provide more reasonable medical treatment.

**Keywords** numerical simulation; eye trauma; finite element model ●



(责任编辑 刘志远)