

文章编号: 1004-7220(2014)06-0576-06

# 颅脑有限元模型演化规律及其生物力学研究进展

羊 玢<sup>1,2,3</sup>, 曹立波<sup>1</sup>, 陈 宁<sup>2</sup>, Tse Kwong Ming<sup>3</sup>, Lee Heow Pueh<sup>3</sup>(1. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082; 2. 南京林业大学 汽车与交通工程学院, 南京 210037;  
3. 新加坡国立大学 机械工程系, 新加坡 117576)

**摘要:** 交通事故中头颈部损伤因其较高的致命性, 已成为最严重的损伤类型。有限元模型在创伤性脑损伤生物力学机理研究中得到日益广泛应用。回顾头颈部有限元模型的生物力学研究历史和现状, 并阐述车辆碰撞交通事故中人体颅脑典型交通伤演化规律和生物力学研究进展, 探索头颈部损伤安全防护的方法, 以期为车辆碰撞事故中人体颅脑损伤生物力学研究和相应的汽车安全防护装置研制提供理论依据。

**关键词:** 有限元模型; 颅脑损伤; 生物力学; 演化规律; 损伤防护

**中图分类号:** R 318.01      **文献标志码:** A

## Advance in evolution and biomechanical mechanism for finite element model of human brain

YANG Bin<sup>1,2,3</sup>, CAO Li-bo<sup>1</sup>, CHEN Ning<sup>2</sup>, TSE Kwong-ming<sup>3</sup>, LEE Heow-pueh<sup>3</sup> (1. *State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China*; 2. *College of Automobile and Traffic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China*; 3. *Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore, Singapore 117576, Singapore*)

**Abstract:** Brain and neck injury has become the most severe injury during vehicle collision accident due to its high fatality rate. Finite element (FE) model has been widely used in the study on biomechanical mechanism of traumatic brain injury (TBI). In this paper, recent literatures on biomechanics of skull-brain-neck FE model were reviewed, advance in the evolution and biomechanical studies of TBI in road traffic accidents was elaborated, and protection methods of head and neck injury were explored, so as to provide a theoretical basis for biomechanical research and development of appropriate car safety devices for TBI in the event of vehicle collision accident.

**Key words:** Finite element model; Traumatic head injury; Biomechanics; Evolution; Injury protection

交通事故中头颈部损伤因其较高的致命性, 已成为最严重的损伤类型。在美国, 头部损伤在所有损伤造成的死亡中占到 68%, 占损伤总数的 34%, 并占到所有交通损伤的 50%, 大部分头颈部损伤的受害者年龄在 16 ~ 45 岁<sup>[1]</sup>。随着我国高速公路里程的增加和汽车保有量的不断扩大, 头颈部损伤在

交通事故伤害中也呈上升的趋势。由于中国混合的交通模式, 易受伤害人群遭受车祸构成交通事故死亡的主体, 头部交通伤害则是导致死亡的主要原因。尽管儿童在交通事故中不是死亡的主体, 但他们是道路交通安全中的弱势群体, 儿童乘员和行人的安全保护逐渐得到科研人员和政府部门的高度重视。

收稿日期: 2014-06-13; 修回日期: 2014-08-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11272159, 11172099), 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室开放基金资助项目 (31415008), 江苏省高校骨干教师境外研修计划资助 (苏教师[2013]8 号)。

通信作者: 曹立波, 教授, Tel: (0731) 8823715; E-mail: hclb@163.com。

目前,研究头颈部生物力学响应的主要手段包括动物模型实验、物理模型实验、尸体模型实验<sup>[2]</sup>。物理实验可以观察到结构受到载荷时的物理现象,但是在生物逼真度及材料选用方面具有一定的局限性;动物模型可以观察到由于受到载荷引起的组织破坏和生理病理学变化,但是从中所得到的数据一般通过外推法换算到人体,在数学意义和实验技术上显示出一定的局限性;尸体可以提供与活人相同的解剖学特征和几何结构,但存在个体差异、标本少且难获取等问题,其组织降解,致使该方法缺少生理或病理反应的直接观察,同时采用尸体或者动物实验也会遇到日益提升的公众伦理意识影响和限制。

由于动物实验、物理实验和尸体实验存在上述局限性,随着计算机技术的不断发展,数学模型逐渐成为研究头颈部损伤生物力学的重要工具<sup>[3]</sup>。有限元模型在创伤性脑损伤生物力学机理研究中得到日益广泛应用。本文主要从人体头颈部有限元分析研究、有限元模型关键参数研究和有效性验证、创伤性脑损伤演化规律研究及工程应用等方面进行阐述。

## 1 人体头颈部有限元分析研究

### 1.1 人体头部解剖学结构

头部包括重要的中枢神经系统和众多感觉器官,以及对它们起保护和支撑作用的头颅结构和皮肤。人体头部解剖学结构如图 1 所示,按照从外到内的组织结构划分,依次是头皮、头颅、脑膜和脑;按照形态和功能划分,可分为头颅、脑和颅脑间的介质。

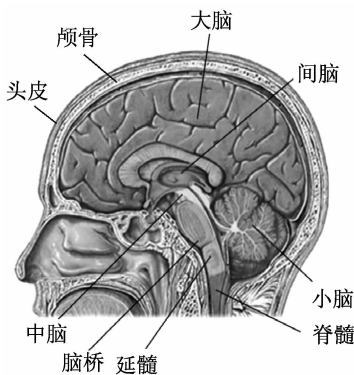


图 1 人体头部解剖学结构  
Fig.1 Anatomy of the human head

颅骨是人体头部的支撑结构,由 23 块形状不同的骨连接而成,主要分为面颅和脑颅两大部分,容纳并保护脑、眼、耳、鼻及口等器官。其中,容纳脑的部分叫脑颅,大致呈卵圆形,位居头部的上后部;前下部为面颅,包括眼眶、鼻腔和口腔等主要结构。

### 1.2 头部损伤评价标准

作用于人体头部的载荷通常有直接碰撞、静态加载和惯性加速度冲击载荷 3 种形式。这些载荷作用导致颅脑结构变形,同时引起脑的不同类型应力;当应力值超过一定限度,就会引起各种类型的损伤。损伤评价标准是通过与损伤强度相关的物理参数组成的函数来定义,用来衡量载荷是否超过导致某种损伤的程度。耐受限度是对应的物理参数或者函数的阈值,超过它就会导致某种损伤。损伤的严重程度可以根据不同的损伤评价方法来定义。从医学的角度来看,目前常用的是简明损伤定级法、格拉斯哥昏迷分级等;从工程学的评价方法来看,最常用的有美国韦恩州立大学头部损伤评价标准(head injury criteria, HIC)、头部耐受限度曲线(Wayne State tolerance curve, WSTC)、头部冲击剧烈程度指数(severity index, SI)等。

### 1.3 头部有限元分析研究

用于头部碰撞损伤研究的有限元模型构建始于 20 世纪 70 年代。目前构建头部有限元模型的数据来源主要有 3 种:①头颅被简化为包含核心的球壳结构。随着研究的深入,有限元模型的几何结构逐渐接近解剖学形态,模拟结构的种类也在逐渐增加;②依据人体测量学数据构建模型,这类模型具有基本的头部特征;③依据人体正常医学影像学资料构建几何模型,如 Willinger 等<sup>[4]</sup>根据成人 18 层头颅 MRI 图像构建三维颅脑有限元模型,Bandak 等<sup>[5]</sup>依据正常人头颅 CT 图像构建颅骨有限元模型。

在过去的 30 年中,更多的研究人员应用有限元方法建立人体头部模型,在模型几何复杂程度、界面定义、材料参数研究领域都取得巨大的进步。Nahum 等<sup>[6]</sup>建立第 1 个头部三维有限元模型,通过尸体实验得到人体颅内压数据,被广泛用于头部模型验证;Kleiven<sup>[7]</sup>构建结构详尽的三维颅脑有限元模型,探讨上矢状窦旁桥静脉在冲击中承受张力与冲击方向之间的关系;Zhang 等<sup>[8]</sup>建立的头部模型可以进行非直接冲击模拟,该模型考虑 50 百分位男

性颅脑的所有解剖结构,但未考虑面部软组织结构,故无法模拟面部结构损伤对创伤性脑损伤的影响。

基于CT和MRI图像技术建立人体有限元模型的发展,近年来也取得显著进步,如Mao等<sup>[9]</sup>建立美国成年人头部平均尺寸有限元模型,该模型具备详细解剖学几何特征,针对颅内压力、颅脑相对位移、颅骨和面骨动力学响应进行验证,模拟35种头部碰撞事故。

#### 1.4 颈部有限元分析研究

颈椎的有限元模型研究分为静力学研究和动力学研究,前者更注重表达颈椎的几何形状,虽然这些模型也用于计算各种载荷条件下颈椎内部应力、应变和其他生物力学响应;后者一般给出完整的颈椎结构,同时模型中也包含韧带和椎间盘等软组织。Myers等<sup>[10]</sup>综述300多篇有关颈椎方面的论文,在这之后的研究大多基于该文献;Yang等<sup>[11]</sup>构建几何和解剖结构较为全面的颈椎有限元模型,但是该模型部分材料参数是根据各结构的力学承载特点缩放得到,故不能用于颈椎应力分布研究;Eggers等<sup>[12]</sup>修改Yang的模型,包括头部、颈椎C1~7、胸椎T1、韧带和椎间盘,模拟头颈部的侧向冲击响应,取得较好的效果。

近年来,模态分析研究也取得较大进展,如Kumaresan等<sup>[13]</sup>的研究显示,颈部存在可降低头颅的固有频率,从而改变颅内压力和脑组织剪应力的分布大小及分布规律;Meyer等<sup>[14]</sup>根据CT图像建立一个复杂结构有限元模型,考虑颈部肌肉,模拟头颈部后碰撞挥鞭伤,并进行模态分析和优化,该方法明确揭示颈椎受到冲击时的变化机制,但其模态分析是在小变形的线性域内进行,因而受到一定应用限制;Tse等<sup>[15]</sup>建立一个包含面部特征的头颈有限元模型,并考虑振动频率和振型的影响,获得一些高频模态,从不同研究视角为脑损伤机理研究提供新的思路。这些结论充分说明建立详细解剖学结构人体有限元模型,是交通伤演化规律研究的关键因素。

#### 1.5 国内头颈部有限元研究

我国在头颈部有限元生物力学模型方面的研究起步较晚,但在近几年也得到了极大的发展,以高校为主体的研究机构积极开展相关方面的研究工作。第三军医大学尹志勇教授带领的研究团队<sup>[16]</sup>一直在开展人体生物力学实验方面的研究,取得大量研

究成果。同时,包括湖南大学<sup>[17-18]</sup>、天津科技大学<sup>[2,20-21,23-24]</sup>、清华大学<sup>[19,22]</sup>、吉林大学、华南理工大学、上海交通大学、司法部司法鉴定科学技术研究所内的高校和研究所都有相关研究人员从事损伤生物力学研究工作。

理论方面,较多学者建立数学模型进行数值分析,探讨有限元模型构建、材料本构属性及碰撞损伤机理等,如杨济匡等<sup>[17]</sup>采用美国人体测量数据建立国内第1个用于汽车安全领域的颈部有限元生物力学模型,各组织材料特性采用弹性、黏弹性材料来描述,进行前后碰撞事故的模拟和验证;曹立波等<sup>[18]</sup>针对目前在颈部损伤机理研究中尚未有适合中国人体型特点的全颈椎有限元模型的情况,采用CT技术获取50百分位中国人体颈椎数据,建立全颈椎有限元模型;周双珍等<sup>[19]</sup>采用中国人体CT数据研究头部有限元模型的构建和碰撞动态响应。基于CT图像的颅骨测量与分析方面,李海岩等<sup>[20]</sup>通过对图像进行分割与二值化、图像纠偏、边缘提取等处理后,实现颅骨对称性的定量测量,得出人体颅骨的对称性比例和分布。在有限元模型材料特性研究方面,阮世捷等<sup>[21]</sup>应用试验设计技术对因撞击引起的颅骨、脑脊液和脑髓材料性质的压力敏感性进行分析。国内在下颌骨三维有限元模型方面的研究较多,如马春生等<sup>[22]</sup>建立人体下颌骨三维有限元模型,并将其与Hybrid III假人头颈部模型相连接,研究钝物撞击颌面时伤害机制。

以上代表性文献的研究过程和成果,基于不同的研究视角和目标,为头颈复杂有限元模型的建立提供不同的思路。

## 2 有限元模型关键参数研究和有效性验证

### 2.1 颅骨-脑相对位移模拟

颅骨与脑组织的相对运动描述一直是颅脑有限元模型研究的重点。既往有限元模型在模拟颅脑交界面时主要有3种方式,较多模型用相同节点代表颅骨和脑两种结构,能较好地模拟压力梯度分布,但难以描述颅脑界面的相对运动;大部分有限元模型将脑脊液层定义为低剪切模量的薄层材料,但易出现计算不能收敛的情况;第3种方式采用接触算法模拟颅骨与脑之间的运动,使得碰撞侧的正压力比共享节点法获得的压力值小,且碰撞对侧无法模拟

负压力形成效果。李海岩等<sup>[23]</sup>利用二维弹簧-质量系统模拟颅脑在受到撞击时所产生的相对位移,对颅骨-脑相对位移模拟的研究有相当借鉴意义。

## 2.2 寰枕关节模拟及其单元参数研究

头颅在受到冲击时,人的躯体通过颈部限制头颅运动,在冲击时程中颈部对头颅的约束作用主要通过寰枕关节的韧带完成,故需要考虑这种边界条件。如 Meyer 等<sup>[14]</sup>采用六面体网格重构头部与颈部的寰枕关节,韧带用弹簧单元模拟;杨济匡等<sup>[17]</sup>采用滑移接触面和一维弹簧单元模拟颈部模型中的小关节以及寰枕连接关节,验证模型的整体响应;周蕊<sup>[24]</sup>采用杆单元模拟的韧带将头部和颈部模型连接在一起,模拟人体的寰椎关节,头部可以相对寰椎作曲伸运动;Jost 等<sup>[25]</sup>采用弹簧-阻尼单元模拟头颈复杂模型寰枕关节的韧带。这些方法和结论非常有助于人体颈部有限元建模及参数研究。

## 2.3 有限元模型有效性验证

有限元模型必须验证其生物逼真度,才能够用于车辆碰撞事故中人体动力学响应和致伤机制的研究。国外较早开始使用尸体进行头部损伤方面的实验研究,如 Nahum 等<sup>[6]</sup>进行尸体头部碰撞实验测量颅内压力,但没有给出样本头部质量、质心等参数;Trosseille 等<sup>[26]</sup>为验证开发的有限元模型,通过尸体碰撞实验测量颅内动力学响应,但脑室的结构过于简化。越来越多的证据表明,旋转加速度和平移加速度引起的颅脑相对运动在脑损伤机理研究中具有重要的意义,Hardy 等<sup>[27]</sup>使用先进的高速 X 光摄影系统和微型传感器,获得头部冲击过程中颅脑相对运动的位移量。这 3 组经典实验被广泛用于人体头部有限元模型的验证。除上述将模拟计算结果与传统尸体实验结果对比的方法外,作者认为还可采用将数值结果与临床医学病理进行对比研究的方法,如果有限元模拟计算结果与临床致伤规律相符合,亦可验证模型的有效性。

## 3 创伤性脑损伤演化规律及工程应用

### 3.1 有限元模型用于典型脑损伤演化规律研究

目前,有限元模型用于脑损伤演化规律研究的应用可归纳为组织材料特性和边界条件研究、脑损伤理论论证、颅脑损伤准则、典型颅脑损伤发生机制 4 个主要方面。King 等<sup>[28]</sup>研究发现,不同颅骨和脑

组织的参数可影响颅内压力分布;Miller<sup>[29]</sup>研究发现,脑组织具有超黏弹性材料特性,提出用非线性模型描述脑组织变形更为合适。在边界条件方面,Kuijpers 等<sup>[30]</sup>研究颅脑之间不同的边界条件,认为在自由界面的前提下,计算结果与尸体实验结果更符合。

利用颅脑有限元模型的预测性计算结果来确定脑损伤准则则是有限元模型的一个重要作用。当拉伸破坏应力为 5.107 MPa 时,Wood 等<sup>[31]</sup>计算头颅侧方颅骨载荷为 6.227 kN,额部颅骨的受载极限为 15.568 kN;Hardy 等<sup>[27]</sup>构建 3 层颅骨的有限元模型,计算额部颅骨的失效能量为 135.6 N·m,失效位移为 12.2 mm;Dimasi 等<sup>[32]</sup>研究显示,现有的 HIC 准则对平移运动较敏感,而积累应变破坏测量只对平移和旋转的组合运动产生响应。

有限元模型也被用于研究颅脑损伤发生机制。颅脑损伤机理有平移和旋转加速度两种,前者一般导致局灶性脑损伤,而后者还会产生弥漫性脑损伤(diffuse axonal injury, DAI)。羊玢等<sup>[33]</sup>通过行人头部碰撞致伤方式重构研究发现,平移和旋转加速度在多数碰撞过程中同时存在,并且共同作用引起脑损伤。脑震荡是一种常见的脑部创伤病症,指头部遭受外力打击后发生短暂的脑功能障碍,如 Duma 等<sup>[34]</sup>对运动中的头部加速度进行测量和研究,基于脑组织响应结果,分析损伤的预测指标和损伤水平。急性硬膜下血肿也是常见的颅脑损伤病变,血肿来源之一是脑表面和硬膜静脉窦之间桥静脉的破裂出血,如 Huang 等<sup>[35]</sup>和 Kleiven<sup>[7]</sup>都针对急性硬膜下血肿构建有限元模型,其中前者研究发现旋转加速度比平移加速度对桥静脉产生的应力更显著,后者指出长度最短、走行方向与冲击方向相同的桥静脉所受应力最大,这些发现对明确急性硬膜下血肿致伤机制提供了实验依据。弥漫性轴索损伤也一直是有限元模型研究的重点,其伤害机理尚未完全阐明,如 Zhang 等<sup>[8]</sup>构建的三维颅脑有限元模型为非直接冲击所导致的 DAI 损伤提供研究平台;Willinger 等<sup>[36]</sup>基于志愿者的振动模态分析表明,振动频率低于头部整体固有频率时,表现出 DAI 等损伤,反之呈现脑挫裂伤等损伤形式。

从国内外的研究情况来看,针对颅脑损伤的理论和实验研究已有较多文献报道,但多集中在基础

理论和防护措施方面,极少与临床诊断和治疗相结合。临床上有关颅脑损伤的伤情主要通过病例影像获得,结合临床病例医学影像资料,可以更好揭示颅脑典型损伤伤害机理与功能紊乱的生物力学机制。

### 3.2 头颈部损伤安全防护的工程应用研究

中国行人法规的颁布和实施,标志着中国汽车工业对车外道路使用者的保护进入实质阶段。对于骑自行车和骑摩托车者来说,使用安全头盔是最有效的防护措施。我国对自行车使用者不要求佩戴头盔,摩托车肇事者常不按规定佩戴头盔,因头部受伤导致的交通事故死亡占到75%以上,远远高于其他部位受伤导致的死亡。近年来,许多研究人员从事头盔安全防护系统碰撞性能测试的研究,主要有两个发展趋势:头盔碰撞评估的实验系统和新型头盔设计的数值模拟。前者侧重于头盔功能的性能实验,如 Mcintosh 等<sup>[37]</sup>评估头盔测试结果,提出更有效的性能标准以改善颅脑损伤。更多的研究通过建立数学模型进行碰撞检测模拟和分析,如 Mills<sup>[38]</sup>建立头盔有限元模型来评估头部碰撞的平移和旋转加速度,并研究摩擦系数对冲击响应的影响;新加坡国立大学 Lee Heow Pueh 教授研究团队<sup>[15,39]</sup>构建两种不同缓冲系统的头盔有限元模型,从正碰和侧碰角度进行数值模拟和实验测试,分析头部受撞击产生的响应特性。因此,可采用计算机断层扫描的方法快速建立头盔、缓冲系统和头部三维有限元装配模型,同时结合有限元模型,评估头盔各种物理参数对创伤性脑损伤的风险。

## 4 结语与展望

有限元模型提供了对汽车和人体在碰撞过程中的动态响应进行详细分析的可能。国内外有许多研究者开发了头部或颈部有限元模型,但是根据研究方法和目的不同,模型的复杂程度、有效性和精确度都存在较大的区别,目前经过广泛有效性验证的模型并不多。国内头颈部有限元的生物力学仿真尚处于起步阶段,研究中所应用的几何模型大多是从欧美人种的数据中得到,其尺寸是否适合中国人尺寸分布尚需科学论证。

因此,对于头颈有限元模型和颅脑碰撞交通伤演化规律的研究,今后可从以下方面开展:

(1) 建立和完善符合中国人体详细解剖学结构

的头部和颈部结合有限元模型;

(2) 已有模型的面部结构基本都是被简化的,若要提高模型的生物逼真度,获得更精确的计算结果,还需要综合考虑面颅骨骼和面部软组织;

(3) 需要进一步完善模型的结构,优化模型网格质量,探讨组织材料的本构属性,开展一系列参数化研究;

(4) 构建其他不同百分位头颈部有限元模型,特别是开展儿童有限元模型和实验研究,为儿童颅脑损伤机理及安全防护领域的研究提供可靠基础数据。

### 参考文献:

- [1] Carl RS, Brian I, Karen AS. Traumatic brain injury in the United States: An epidemiologic overview [J]. Mt Sinai J, 2009, 76(2): 105-110.
- [2] 赵玮,阮世捷,李海岩. 应用于头部损伤生物力学研究的三维有限元模型发展概况[J]. 中国生物医学工程学报, 2011, 30(1): 110-119.
- [3] Schmitt KU, Niederer PF, Muser MH, et al. Trauma biomechanics accidental injury in traffic and sports [M]//曹立波等译. 北京:机械工业出版社, 2012: 44-48.
- [4] Willinger R, Taleb L, Kopp CM. Modal and temporal analysis of head mathematical models [J]. J Neurotraum, 1995, 12(4): 743-754.
- [5] Bandak FA, Vander Vorst MJ, Stuhmiller LM, et al. An imaging-based computational and experimental study of skull fracture: Finite element model development [J]. J Neurotraum, 1995, 12(4): 679-688.
- [6] Nahum AM, Smith R, Ward CC. Intracranial pressure dynamics during head impact [C] // Proceedings of 21st Stapp Car Crash Conference. Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, 1977.
- [7] Kleiven S. Influence of impact direction on the human head in prediction of subdural hematoma [J]. J Neurotraum, 2003, 20(4): 365-379.
- [8] Zhang L, Yang KH, Dwarampudi R, et al. Recent advances in brain injury research: A new model and new experimental data [J]. Stapp Car Crash J, 2001, 45: 369-394.
- [9] Mao HJ, Zhang LY, Jiang BH, et al. Development of a finite element human head model partially validated with thirty five experimental cases [J]. J Biomech Eng, 2013, 135(11): 1-15.
- [10] Myers BS, Winkelstein BA. Epidemiology, classification,

- mechanism and tolerance of human cervical spine injuries [J]. *Crit Rev Biomed Eng*, 1995, 23(5-6): 307-409.
- [11] Yang KY, Zhu FH, Luan F, *et al.* Development of a finite element model of the human neck [C] // *Proceedings of the 42th Stapp Car Crash Conference*. USA: Society of Automotive Engineers, 1998: 195-205.
- [12] Eggers A, Zhu FC, Yang KH, *et al.* Predictions of neck load due to combined compression and lateral bending [J]. *Int J Veh Saf*, 2005, 1(1/2/3): 118-128.
- [13] Kumaresan S, Radhakrishnan S. Importance of partitioning membranes of the brain and the influence of the neck in head injury modeling [J]. *Med Biol Eng Comput*, 1996, 34(1): 27-32.
- [14] Meyer F, Bourdet N, Gunzel K, *et al.* Development and validation of a coupled head-neck FEM-Application to whiplash injury criteria investigation [J]. *Int J Crash*, 2013, 18(1): 40-63.
- [15] Tse KM, Tan LB, Lee SJ, *et al.* Development and validation of two subject-specific finite element models of human head against three cadaveric experiments [J]. *Int J Numer Meth Eng*, 2013, 30(3): 397-415.
- [16] 刘盛雄, 尹志勇, 赵辉, 等. 颅脑模型减速撞击过程中脑组织受力特点的研究[J]. *医用生物力学*, 2009, 24(6): 458-461.
- Liu SX, Yin ZY, Zhao H, *et al.* Research on brain tissue mechanical style in brain model deceleration impact [J]. *J Med Biomech*, 2009, 24(6): 458-461.
- [17] 杨匡匡, 许伟, 万鑫铭. 研究汽车碰撞中头颈部动态响应的有限元模型的建立和验证[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2005, 32(2): 6-12.
- [18] 曹立波, 莫波, 卢畅. 基于 CT 图像颈椎有限元模型的建立与验证[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2009, 36(1): 24-29.
- [19] 周双珍, 张雄, 马红磊. 利用物质点法研究不同头部模型对头部碰撞动态响应的影响 [J]. *医用生物力学*, 2013, 28(1): 74-79.
- Zhou SZ, Zhang X, Ma HL. Effects from different head models on dynamic response of the head impact using material point method [J]. *J Med Biomech*, 2013, 28(1): 74-79.
- [20] 李海岩, 谢中华, 阮世捷, 等. 基于 CT 图像的人体颅骨对称性测量与分析 [J]. *生物医学工程学杂志*, 2009, 26(1): 34-37.
- [21] 阮世捷, 王学魁, 刘文岭, 等. 关于头部组织材料性能敏感性对颅内压力响应的研究 [J]. *中国生物医学工程学报*, 2004, 23(3): 252-258.
- [22] 马春生, 张海钟, 杜汇良, 等. 具有解剖基下颌的人体头部有限元模型的建立 [J]. *生物医学工程学杂志*, 2005, 22(1): 53-56.
- [23] 李海岩, 赵玮, 阮世捷, 等. 第 95 百分位中国人头部颅脑相对位移的有限元评估 [J]. *医用生物力学*, 2012, 27(2): 198-206.
- Li HY, Zhao W, Ruan SJ, *et al.* Finite element evaluation on skull-brain relative displacement of the 95th percentile Chinese human head [J]. *J Med Biomech*, 2012, 27(2): 198-206.
- [24] 周蕊. 高速前碰撞冲击下人体颈部生物力学响应的有限元分析和研究 [D]. 天津: 天津科技大学硕士学位论文, 2008.
- [25] Jost R, Nurick GN. Development of a finite element modal of the human neck subjected to high g-level lateral deceleration [J]. *Int J Crash*, 2010, 5(3): 259-270.
- [26] Trosseille X, Tarriere C, Lavaste F, *et al.* Development of a FEM of the human head according to a specific test protocol [C] // *Proceedings of 36th Stapp Car Crash Conference*. Seattle, USA: Society of Automotive Engineers, 1992: 235-253.
- [27] Hardy WN, Foster CD, King AI, *et al.* Investigation of brain injury kinematics; Introduction of a new technique [C] // *Proceedings of Crashworthiness, Occupant protection and Biomechanics in Transportation Systems*. New York, USA: ASME, 1997: 241-254.
- [28] King AI, Ruan JS, Zhou C, *et al.* Recent advances in biomechanics of brain injury research; A review [J]. *J Neurotraum*, 1995, 12(4): 651-658.
- [29] Miller K. Non-linear computer simulation of brain deformation [J]. *Biomed Sci Instrum*, 2001, 37: 179-184.
- [30] Kuijpers AH, Claessens MH, Sauren AA. The influence of different boundary conditions on the response of the head to impact; A two dimensional finite element study [J]. *J Neurotraum*, 1995, 12(4): 715-724.
- [31] Wood RL, Yurdakul LK. Change in relationship status following traumatic brain injury [J]. *Brain Injury*, 1997, 11(7): 491-501.
- [32] Dimasi F, Tong P, Marcus JH, *et al.* Simulated head impacts with upper interior structures using rigid and anatomic brain models. Finite elements in the 90's [M]. Spain: Springer, 1991: 333-345.
- [33] 羊玢, 王玉, 王哲, 等. 汽车与行人碰撞事故再现仿真研究 [J]. *森林工程*, 2012, 28(3): 42-46.
- [34] Duma SM, Manoogian SJ, Bussone WR, *et al.* Analysis of real-time head accelerations in collegiate football players [J]. *Clin J Sport Med*, 2005, 15(1): 3-8.
- [35] Huang HM, Lee MC, Chiu WT, *et al.* Three-dimensional finite element analysis of subdural hematoma [J]. *J Trauma*, 1999, 47(3): 538-544.