

具有详细解剖学结构的1岁学步儿童头部有限元模型构建及验证

贺丽娟¹, 毋乃卿¹, 阮世捷¹, 李海岩¹, 王春祥², 崔世海¹

(1. 天津科技大学机械工程学院, 天津 300222; 2. 天津市儿童医院影像科, 天津 300074)

摘要:目的 构建详细的1岁学步儿童头部有限元模型,探究其颅脑损伤机制,完善人体有限元生物力学模型数据库。方法 基于我国1岁儿童真实详细的头部CT数据,借助医学软件Mimics获得头部几何结构数据,利用逆向工程软件划分NURBS曲面片和构建工程模型,利用有限元前处理软件划分网格,参照解剖学和尸体实验等数据,验证1岁学步儿童头部有限元模型的有效性并初步分析其损伤机制。结果 构建了我国男性1岁儿童头部有限元模型,模型包括并区分了大脑及小脑的灰质和白质、海马体、囟门、矢状骨缝、冠状骨缝、脑干、脑室等,几何尺寸符合解剖学统计数据。利用头部模型重构了儿童头部静态压缩尸体实验和跌落尸体实验,结果表明,该头部模型与尸体实验表现了相近的力学特征,验证了模型的有效性。计算表明不同压缩速率下颅骨刚度不同,会导致不同损伤结果。结论 所构建的包含详细解剖学结构的1岁儿童头部有限元模型具有较高的生物仿真度,借助构建的模型可分析深部脑组织各部位的详细损伤情况,特别是闭合性颅脑损伤,为相关研究及临床应用提供有效的工具和手段。

关键词: 1岁学步儿童; 头部; 有限元模型; 损伤生物力学; 跌落事故; 显式动力学分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2017.04.002

Development and validation for finite element model of one-year-old toddler head with detailed anatomical structures

HE Li-juan¹, WU Nai-qing¹, RUAN Shi-jie¹, LI Hai-Yan¹, WANG Chun-xiang², CUI Shi-hai¹

(1. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China; 2. Department of Radiology, Tianjin Children's Hospital, Tianjin 300074, China)

Abstract: Objective To explore the brain injury mechanism and enrich the database of human finite element (FE) biomechanical model by developing the FE model of one-year-old toddler head. **Methods** Based on CT data from Chinese one-year-old toddler head with substantial and detailed information, the head model with detailed anatomical structure was constructed by using the medical software Mimics to get the head geometry data, as well as the reverse engineering software to divide NURBS surface and build the geometric model. Finally, the FE pre-processing software was used mesh the model. The FE model of one-year-old toddler head was validated by data from anatomic and cadaver experiments, and was used for preliminary analysis on damage mechanism of one-year-old toddler head. **Results** The FE model of Chinese one-year-old male toddler head was developed, which included and distinguished the gray matter and white matter of brain and cerebellum, hippocampus, fontanel, sagittal suture, coronal suture, brainstem and ventricles. The cadaver head static compression experiments and drop experiments were reconstructed by using this head model, and the results showed that the FE model of

head had similar mechanical properties with the cadaver, which proved the validity of the FE model. Simulation results showed that skull stiffness and skull injury severity varied with different compression rates. **Conclusions** The FE model of one-year-old toddler head with detailed anatomical structures is of great biofidelity. The FE head model can be used to further investigate the detailed injury mechanism of deep brain tissues, especially for the closed craniocerebral injury, which provides an effective way and tool for the related research and clinical application.

Key words: One-year-old toddler; Head; Finite element model; Injury biomechanics; Drop accident; Explicit dynamics analysis

在儿童解剖学上1岁被认为是固有儿童期的起点,大部分儿童在1岁左右开始学习走路或刚刚学会走路^[1]。此时学步儿童活动较多,但缺乏自我保护意识和防范能力,同时由于其颅骨尚未完全地发育好,并且重心点较高,因此更容易发生意外跌落事故,造成创伤性颅脑损伤^[2]。儿童头部损伤是导致其死亡与伤残的重要原因,造成头部伤害发生频率最高的是跌落事故、交通事故和虐待^[3-4]。其中,跌落、坠落伤是儿童意外伤害的首位原因,学步年龄段儿童是意外伤害发生的主要人群。

目前儿童颅脑生物力学研究受到越来越多的关注。Loyd^[5]使用不同年龄儿童尸体样本进行尸体头部静态压缩和跌落实验,获得不同年龄儿童头部基本属性。Wang等^[6]采用7具1~2岁尸体进行实验,获得顶骨、额骨、矢状骨缝、冠状骨缝的材料属性差异。然而儿童尸体的获取非常困难,研究1岁儿童头部生物力学特性相关的尸体实验甚少。在现有实验研究方法受限的情况下,为了进一步研究儿童颅脑损伤机制,崔世海等^[7]利用有限元方法建立并验证3岁儿童头部的有限元模型。儿童生长和发育过程的对比研究表明,1岁儿童解剖学结构与其他年龄段儿童相比具有较大差异。例如,1岁儿童的囟门尚未闭合,颅骨厚度较薄。目前,国内外还没有建立较为完善的1岁儿童头部有限元模型,针对1岁儿童头部损伤机制的相关研究亟待完善。因此,构建具有高仿真度的1岁儿童头部有限元模型,对完善人类有限元生物力学模型数据库具有重大意义。同时,将儿童头部有限元模型与现实生活中的事故相结合,从而更好地应用有限元方法研究儿童头部损伤机制,可为后期的应用性研究奠定基础^[8]。

本研究依据中国儿童真实CT数据,构建了具有详细解剖学结构特征的1岁学步儿童头部有限元模型,并通过对比解剖学统计数据、尸体实验等验证其有效性,开展其头部损伤机制的相关研究。

1 材料与方法

1.1 1岁儿童头部有限元模型构建

选取无明显脑损伤的中国男性1岁学步儿童头部螺旋CT扫描影像,扫描层厚10 mm,重建层厚1 mm,总层数198层,数据来自天津市儿童医院某患者的临床诊断资料,不涉及个人隐私,研究内容已通过天津科技大学伦理委员会批准。利用医学图像软件Mimics 10.01,依据儿童解剖学结构,采用阈值分割算法,测量并提取样本不同组织结构的尺寸数据,初步得到了头部几何模型。利用逆向工程软件Geomagic 12.0对提取的几何模型进行光滑等处理,然后根据其结构特点进行NURBS曲面片划分,构建儿童头部的三维几何模型。

1岁儿童头部结构复杂并具有特殊性,故先划分脑深部组织,再由内向外,划分颅骨、囟门、骨缝、面骨等外部组织器官。首先用Truegrid 2.1.0软件对端脑、小脑、海马体等脑组织结构进行网格划分,特别是对大曲率变化的脑组织进行碟形网格的划分。然后将划分好的网格模型导入Hypermesh 12.0软件中检验网格质量,并对不合格的网格单元进行网格调整和组织结构细化。

图1所示为所构建的1岁儿童头部主要解剖学结构的有限元模型,包括并区分了大脑及小脑的灰质和白质、海马体、囟门、矢状骨缝、冠状骨缝、脑干、脑室等,具有较高的生物仿真度。

该模型的总质量为2.1 kg,模型的大部分组织器官采用8节点六面体单元构建,只有在脑膜等膜状结构处使用了壳单元,整个模型共计123 335个六面体单元和20 517个四边形2D单元。所有单元雅可比均大于0.4,仅有约0.4%的单元翘曲量大于60°,约2.6%的单元最大内角大于150°,少于9%的单元最小内角小于25°。

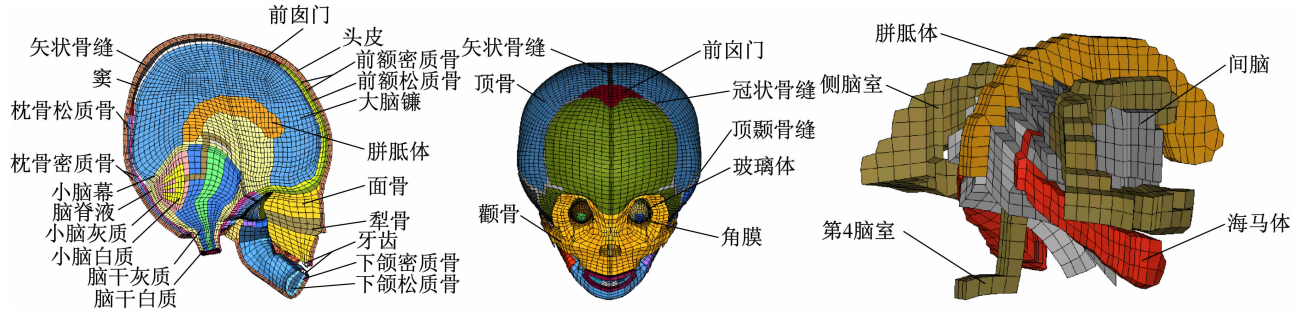


图1 1岁学步儿童头部有限元模型
 Fig.1 Finite element model of 1-year-old toddler head

1.2 1岁儿童头部有限元模型的材料参数

根据头部各组织结构的力学特性,不同的组织结构采用弹性、弹塑性、线黏弹性等多种力学本构模型^[9],同时针对同种本构模型材料的颅脑各组织器官进行细分,将颅骨区分为顶骨、额骨,将骨缝分为

矢状骨缝和冠状骨缝,参考国内外关于1岁儿童头部组织器官材料与力学属性的相关研究,将材料属性细分,对不同结构分别赋予不同的力学属性(见表1、2)。

表1 部分组织材料参数^[6, 10-13]

Tab.1 Material properties of different components

材料	类型	E/MPa	ν	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	剪切模量	体积模量
颅骨密质骨、牙齿等	线弹性	1 134.750	0.220	2 150	465.000	675.44
囟门等	线弹性	8.300	0.490	1 130	2.780	138.33
头皮	弹塑性	16.700	0.420	1 200	5.880	34.79
玻璃体、房水等	弹塑性	0.042	0.490	999	—	—
脑脊液、脑室、窦沟等	弹塑性	0.012	0.499	1 040	0.004	2.00
硬脑膜、大脑镰、小脑幕等	壳单元	31.500	0.450	1 130	10.860	105.00
软脑膜等	壳单元	11.500	0.450	1 130	3.960	38.33
矢状骨缝	线弹性	408.120	0.220	1 130	167.260	242.92
冠状骨缝	线弹性	354.830	0.220	1 130	145.420	211.20
颅骨松质骨、面骨等	线弹性	1 000.000	0.220	2 150	409.830	595.23

表2 脑组织的黏弹性材料参数^[9,15]

Tab.2 Viscoelastic material parameters for brain tissues

材料	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	K/MPa	G_0/kPa	G_∞/KPa	β/s^{-1}
大脑灰质、小脑灰质	1 040	2 190	10.00	2.00	80
大脑白质、小脑白质、海马体、胼胝体等深部脑组织	1 040	2 190	12.50	2.50	80

1.3 1岁儿童头部有限元模型的验证

1.3.1 基于静态压缩尸体实验的模型验证 利用所构建的1岁儿童有限元模型,参考Lloyd^[5]的静态压缩尸体实验设置,将样本放置于两光滑刚性面之间,设置两侧灰色的压缩平面为刚体,红色实线为法兰克福平面,即压缩平面的公法线。固定左侧平面,

定义右侧平面以0.3/s和0.1/s恒定应变率沿法兰克福平面法向方向压缩头部前额。静态压缩应变率0.3/s和0.1/s对应压缩平面的相对压缩速率分别为43.59 mm/s和14.53 mm/s,压缩量为头长(145.3 mm)的5%(见图2)。运用有限元仿真软件PAM-CRASH的显式动力学模块进行求解分析。

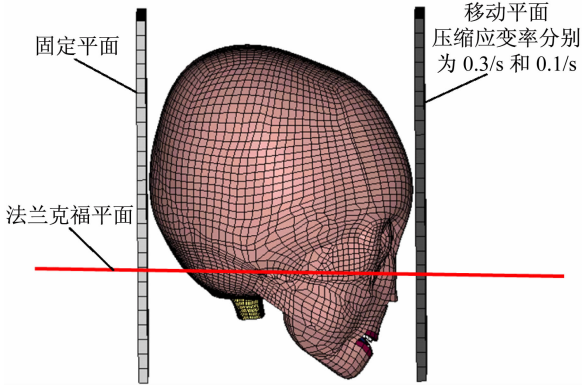


图2 静态压缩实验的仿真分析

Fig. 2 Simulation analysis on static head compression experiment

1.3.2 基于跌落尸体实验的模型有效性验证 参考 Loyd^[5] 的 11 月龄儿童尸体头部跌落实验, 进行 2 组高度、4 种不同跌落部位的模型有效性的验证仿真, 仿真设置与尸体实验保持一致 (见图 3)。仿真实验将所构建的头部有限元模型分别从 15 cm 和 30 cm 高度自由下落至刚性光滑平面, 约束刚性平面的 6 个自由度, 冲击位置分别为侧顶骨、后额、前额、顶部。刚性表面的材料采用铝合金, 密度为 2700 kg/m^3 , 弹性模量为 72 GPa , 泊松比为 0.3。样本下落时无初始转动, 根据运动学原理, 将不同下落高度对应的速度加载到头部模型, 使用 PAM-CRASH 仿真软件的显式动力学模块进行求解分析, 开展模型有效性验证仿真。

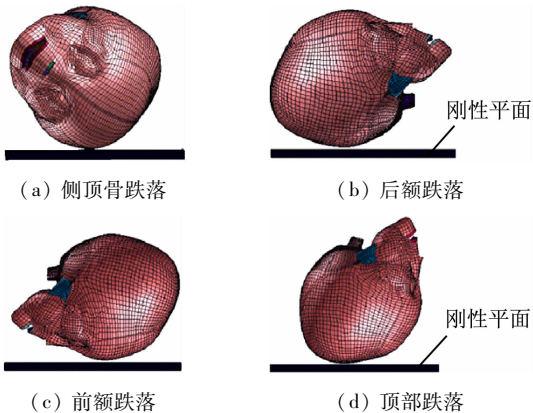


图3 1岁儿童头部跌落实验的仿真分析

Fig. 3 Simulation analysis on 1-year-old toddler head drop impact experiment (a) Parietal drop impact, (b) Occipital drop impact, (c) Frontal drop impact, (d) Vertex drop impact

2 结果与讨论

2.1 模型几何尺寸的验证

解剖学统计数据表明, 新生儿(0~1岁)前囟的几何尺寸约为 $2.5 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$, 本模型的前囟为 $2.65 \text{ cm} \times 2.45 \text{ cm}$; 12 月龄儿童头围约为 46.4 cm , 本模型为 47.7 cm , 与标准值较为接近^[16]。由此可见, 所构建的 1 岁学步儿童头部有限元模型的基本几何形状、位置尺寸和解剖学结构, 包括头长、头宽、头围以及前囟门大小等与统计学数据相似, 符合 1 岁儿童的生理状况。

2.2 头部静态压缩实验

参照 Loyd^[5] 的 11 月龄儿童尸体实验, 利用有限元法进行不同应变率(0.3/s, 0.1/s)下的静态压缩验证仿真计算。两个应变率下头部静态压缩接触力与压缩位移的曲线如图 4 所示。

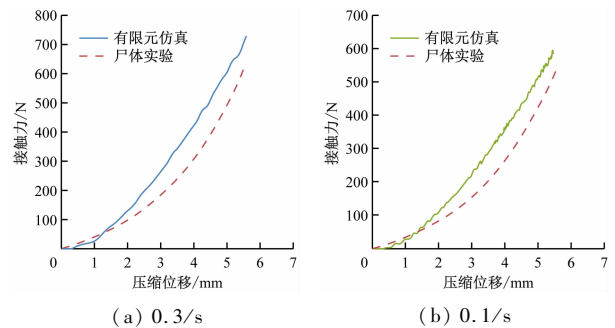


图4 不同应变率下的头部静态压缩仿真

Fig. 4 Static compression simulation result of the head at different strain rates (a) 0.3/s strain rate, (b) 0.1/s strain rate

计算结果表明: 接触力与压缩量曲线趋势完全吻合, 均为单调增函数且为凹函数; 与 11 月龄儿童尸体实验^[5] 相比, 所构建的 1 岁有限元模型仿真数值略大。上述差异主要体现在接触力上升的速度上, 在压缩量达到 5 mm 时, 本实验与尸体实验接触力的误差小于 5%。

两种压缩速率对比所反映的颅骨刚度有所不同。压缩速率越小, 接触力越小, 表明在实际生活中, 1 岁学步儿童发生头部挤压或其他类似创伤性脑损伤事故时, 不同的载荷情况等效于不同的压缩速率。当儿童遭到碰撞挤压时的压缩量相同而压缩速率不同时, 很有可能引起学步儿童不同程度的颅脑损伤。

2.3 头部跌落碰撞实验

图5(a)所示为有限元模型与尸体实验^[5]在15 cm跌落实验中前额的加速度-时间曲线。跌落过程中,前额以一定的跌落速度接触静止平面,继而有减速和反弹过程,加速度随跌落碰撞的接触首先快速上升,在达到约90 g最大加速度峰值时开始反弹,直至6 ms末离开刚性平面。

图5(b)所示为有限元模型与尸体实验^[5]在30 cm跌落实验从接触瞬间到发生回弹过程中枕骨的接触力-位移曲线。本模型有限元仿真与尸体实验对比,接触力-位移曲线较为吻合,都是单调函数曲线,其接触力都呈现出随压缩量逐渐变大而增大的趋势,且峰值与时间历程差异不大,误差在5%左右。

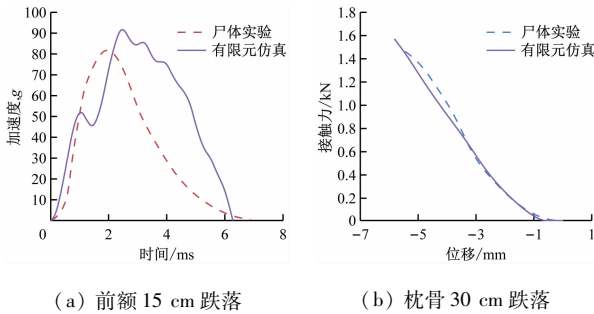


图5 不同高度跌落仿真与尸体实验数据的力学响应变化对比
Fig. 5 Comparison of the mechanical response changes between drop simulation and cadaveric experiment from different height

(a) Frontal drop from 15 cm height, (b) Occipital drop from 30 cm height

进行前额、顶部、侧顶骨、枕骨4个不同部位从15、30 cm两组不同高度跌落的8组仿真分析。图6所示为头部各部位跌落仿真与尸体30 cm跌落实验对比结果。在同样的跌落高度下,除头部顶骨外,不同冲击位置与尸体实验的峰值加速度较为接近。与使用相同样本进行15 cm尸体跌落实验的数据对比,30 cm跌落实验中顶部跌落的峰值加速度同样略微偏小。随着跌落高度的变化,头部峰值加速显著增加,与尸体实验结论一致。

根据生物力学工程与临床问题的不同,仿真模型的有效性要求也不同。对于一般研究性问题来说,模型的可信度达到85%,就可以认为模型是普

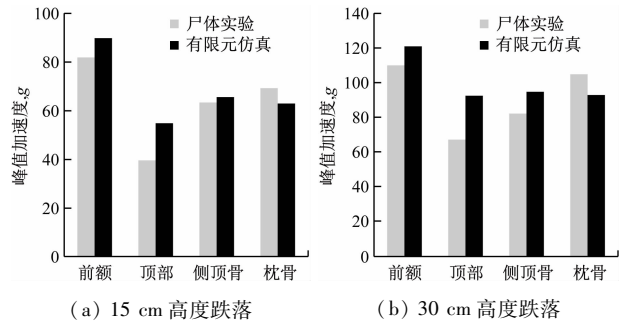


图6 各部位不同高度跌落仿真结果与尸体实验数据的对比
Fig. 6 Comparison of the simulation results of different height drop and the data of the cadavers
(a) 15 cm height drop, (b) 30 cm height drop

遍有效的^[17]。通过两组高度、不同部位跌落仿真与尸体实验的对比,进一步验证了所构建的1岁儿童头部有限元模型的有效性,为下一步进行儿童头部损伤研究提供了有效工具。

本研究构建的模型与尸体实验数据对比,力学响应与属性基本一致,仅在部分对照仿真中存在轻微差异,推测导致这种差异的主要原因是:尸体实验对象为接近11月龄的女孩,而本研究所采用的CT数据来自一名1岁男孩,年龄和性别上的差异可能会导致解剖学及损伤生物力学响应上的差异。但是由于获取儿童尸体样本困难,这也客观反映了构建和完善人体生物力学有限元模型的科研需求。同时,尸体实验对象均为冷冻尸体需要解冻,实验前会进行预处理,并且在加载前会进行预紧力加载,可能造成头部属性特别是刚度的细微变化,进而引起实验结果的不同。

3 结论

针对我国1岁左右学步年龄段儿童普遍存在安全问题的威胁(包括儿童跌落事故和交通事故),开展对该年龄段儿童头部损伤的研究具有较大应用价值。从临床角度来看,1岁儿童颅骨薄且有较大弹性,对暴力冲击有一定的缓冲,存在较为特殊的凹陷性骨折(又称乒乓球样骨折)。虽然颅骨表面未发生明显的断裂损伤,但是由于颅骨特殊的闭合性结构,在造成凹陷性骨折的撞击过程中有复杂的应力波传递过程,很可能已经造成脑部组织的损伤。这种损伤通常不易被察觉因而被忽视,进而造成治疗延误使病情恶化。借助本研究构建的有限元力学模

型,可以分析深部脑组织各个部位的详细损伤情况,为相关研究及临床应用提供一定的工具和研究手段。

本文基于我国儿童真实 CT 数据,构建了具有较高生物仿真度和模型精确性的 1 岁儿童头部有限元力学模型。利用该模型重构了头部静态压缩和跌落实验,模型仿真结果与尸体实验表现了相似的力学特征。不同压缩速率下 1 岁儿童的颅骨刚度不同,压缩速率越大,接触力峰值越大。当儿童遭到挤压时的速率不同,动能不同,会导致不同的损伤结果。

目前国内外还没有建立较为完善的 1 岁学步年龄段儿童头部有限元模型。国内学者也尚未开展针对我国学步年龄段儿童较为完整头部的尸体实验,相关研究亟待完善。这也客观反映了儿童尸体样本获取的困难性,构建并利用学步儿童头部有限元模型研究其生物力学响应具有较大的研究价值和应用前景。本研究构建的 1 岁儿童头部有限元模型可以为学步儿童头部损伤研究提供有效工具和手段。今后需要结合我国儿童的实际情况,进一步开展针对其损伤机制的深入研究。

参考文献:

- [1] 廖亚平, 儿童解剖学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987: 154-195.
- [2] DOSHI BS, MEEKS SL, HENDRICKSON JE, *et al.* Coagulopathy predicts mortality in pediatric patients with traumatic brain injury [J]. *Blood*, 2014, 124(21): 2891-2891.
- [3] HU CF, FAN HC, CHANG CF, *et al.* Current approaches to the treatment of head injury in children [J]. *Pediatr Neonatol*, 2013, 54(2): 73-81.
- [4] VIANO D, HOLST HV, GORDON E. Serious brain injury from traffic-related causes: Priorities for primary prevention [J]. *Accid Anal Prev*, 1997, 29(6): 811-816.
- [5] LOYD AM. Studies of the human head from neonate to adult: An inertial, geometrical and structural analysis with comparisons to the ATD head [D]. Durham; Duke University, 2011.
- [6] WANG JW, ZOU DH, LI ZD. Mechanical properties of cranial bones and sutures in 1-2-year-old infants [J]. *Med Sci Monit*, 2014, 20: 1808-1813.
- [7] 崔世海, 陈越, 李海岩, 等. 儿童头部有限元模型的构建及验证[J]. 医用生物力学, 2015, 30(5): 452-457.
CUI SH, CHEN Y, LI HY, *et al.* Development and validation for the finite element model of child head [J]. *J Med Biomech*, 2015, 30(5): 452-457.
- [8] 羊玲, 曹立波, 陈宁. 颅脑有限元模型演化规律及其生物力学研究进展[J]. 医用生物力学, 2014, 29(6): 576-581.
YANG B, CAO LB, CHEN N. Advance in evolution and biomechanical mechanism for finite element model of human brain [J]. *J Med Biomech*, 2014, 29(6): 576-581.
- [9] 赵玮, 阮世捷, 李海岩, 等. 脑组织本构模型及其生物力学特性分析[J]. 医用生物力学, 2014, 29(1): 85-92.
ZHAO W, RUAN SJ, LI HY, *et al.* Analysis on constitutive models and biomechanical properties of brain [J]. *J Med Biomech*, 2014, 29(1): 85-92.
- [10] COATS B, MARGULIES SS. Material properties of human infant skull and suture at high rates [J]. *J Neurosurg*, 2006, 23(8): 1222-1232.
- [11] ROTH R, RAUL JS, WILLINGER R. Biofidelic child head FE model to simulate real world trauma [J]. *Comput Meth Prog Bio*, 2008, 90(3): 262-274.
- [12] WILLINGER R, TALEB L. Modal temporal analysis of head mathematical models [J]. *J Neurosurg*, 1995, 12(4): 743-754.
- [13] ZHANG L, YANG KH, DWARAMPUDI R, *et al.* Recent advances in brain injury research: A new human head model development and validation [J]. *Stapp Car Crash J*, 2001, 45: 369-394
- [14] 阮世捷, 赵玮, 李海岩, 等. 基于有限元模型的关于头部材料参数对颅内响应影响的研究[C]//第8届国际汽车交通安全学术会议论文集. 长沙: [s. n.], 2009: 366-370.
- [15] ZHANG L, YANG KH, KING AI. Comparison of brain responses between frontal and lateral impacts by finite element modeling [J]. *J Neurosurg*, 2001, 18(1): 21-30.
- [16] 卫生部妇幼保健与社区卫生司. 中国 7 岁以下儿童生长发育参考标准[S]. 2009.
- [17] 王维平. 仿真模型有效性确认与验证[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998: 65-89.