

基于交通事故案例的3岁儿童乘员损伤机制研究

李海岩^{1,2}, 王一达^{1,2}, 贺丽娟^{1,2}, 吕文乐^{1,2}, 崔世海^{1,2}, 阮世捷^{1,2}

(1. 天津科技大学 机械工程学院, 天津 300222; 2. 现代汽车安全技术国际联合研究中心, 天津 300222)

摘要:目的 通过再现真实交通事故案例探究3岁儿童乘员碰撞损伤机制。方法 应用车辆有限元模型和图斯特3岁儿童乘员损伤仿生模型(TUST IBMs 3YO-O),再现CIREN数据库中的交通事故案例,通过综合分析 Δv 、车辆质量和变形能反求碰撞前车辆的速度,设置碰撞仿真试验再现案例所描述的儿童乘员损伤,分析损伤机制。结果 TUST IBMs 3YO-O模型完整地再现出碰撞事故中儿童乘员的损伤。儿童乘员头部运动学响应与生物力学响应表现出差异性,儿童乘员胸腔内部组织器官生物力学响应表明其没有出现损伤,但是胸部3ms合成加速度达到54g,超出阈值。结论 未来乘员安全评价需要引入生物力学参数。应用高生物逼真度的人体生物力学模型再现交通事故中乘员损伤,不仅更加清晰观察事故中乘员的运动学响应,深度分析碰撞损伤机制,还为数字化评估提供参考依据,也将为儿童乘员保护装置研发和安全法规制定提供参考。

关键词: 事故再现; 儿童乘员; 损伤机制; 人体生物力学模型; 交通事故

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.05.026

Injury Mechanism of Three-year-old Child Occupants Based on Traffic Accident Case

LI Haiyan^{1,2}, WANG Yida^{1,2}, HE Lijuan^{1,2}, LÜ Wenle^{1,2}, CUI Shihai^{1,2}, RUAN Shijie^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China;

2. International Research Association on Emerging Automotive Safety Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: Objective To investigate the injury mechanisms of three-year-old child occupants by reconstructing a real traffic accident. **Methods** A traffic accident case from the CIREN database was reconstructed using a vehicle finite element model and a three-year-old child occupant injury bionic model (TUST IBMs 3YO-O). The Δv , mass of the vehicle, and deformation energy were comprehensively analyzed to calculate the collision velocity of the vehicle. This accident was simulated to present injuries to a child occupant, and the injury mechanisms were analyzed in depth. **Results** The TUST IBMs 3YO-O fully reconstructed the injuries of the child occupant in this case. The kinematic and biomechanical responses of the children's heads differed. The biomechanical response of the internal tissues and organs in the chest cavity showed no injury, however, the result ant chest acceleration at 3 ms reached 54 g, which exceeded the threshold. **Conclusions** In the future, it will be necessary to adopt biomechanical parameters for occupant safety evaluations. The application of human biomechanical models with high biofidelity to reconstruct occupant injuries in traffic accidents can not only be used to observe the kinematic responses of the occupant in the accident and analyze the injury mechanisms in depth, but also to provide references for virtual testing, as well as for the research and development of child occupant protection devices and the formulation of safety regulations.

Key words: accident reconstruction; child occupant; injury mechanism; human body biomechanical model; traffic accident

世界卫生组织(WHO)最新的报告指出,世界上每年大约有119万人死于道路交通事故,每天有数以千万计的人受伤或致残。报告中还强调,道路交通伤害现已成为5~29岁儿童和青壮年死亡的首要原因,且道路交通伤害造成的死亡人数占有伤害死亡人数的29%^[1-2]。与成年人相比,儿童在面对突发状况的应对能力不足,儿童属于道路交通的弱势群体,在交通事故中受到伤害的风险系数较高^[3]。儿童处于身体快速生长发育期,一旦受伤可能会影响后期的健康,给个人和家庭带来巨大的影响。因此,一些学者对于儿童乘员在汽车碰撞事故中的损伤情况展开研究。韩勇等^[4]建立了两款儿童约束系统(child restraint system, CRS)的正面碰撞台车数值分析模型,厘清了儿童乘员胸部在动态载荷条件下的运动学方程及不同加载方式下胸部软组织损伤风险;崔世海等^[5]应用具有详细解剖学头部结构的6岁儿童混合有限元模型,对公交车有、无AEB制动工况下儿童乘员头部损伤进行仿真,结果表明,AEB能有效降低公交车内儿童乘员头部碰撞损伤。儿童乘员由于其特殊的身体结构,碰撞中损伤风险较大,应该给予更多的关注。

通过对交通事故进行深度分析,有助于理解人体碰撞损伤机制,进而制订更优的防护策略。邹铁方等^[6]重构电动两轮车碰撞事故和人-车碰撞事故,用PC-Crash进行事故再现,结果表明,同等条件时骑车人头部损伤风险低于行人,下肢损伤风险高于行人。范颖等^[7]研究不同优化算法对收敛速度与最优近似解的影响,认为通过优化算法和多刚体、有限元方法结合,可以完成交通事故精确化重

建。PC-Crash在国内外重构交通事故中应用较广泛,车和多刚体人体模型的有效性已经得到一定程度的验证^[8-9]。随着计算机计算速度及其各种性能的提升,不少学者开始探究将有限元应用到交通事故分析中。裴玉龙等^[10]对一起两车碰撞事故进行有限元仿真分析,通过将仿真结果与实际车辆的变形位置和变形方式进行对比,证明了有限元方法可以应用于交通事故的研究中。李海岩等^[11]根据CIREN数据库中的事故描述,使用有限元方法重构了一起车辆与树横向碰撞事故,结果表明,有限元模拟有助于事故再现和儿童损伤调查。同时,人体有限元模型(TUST人体有限元模型、THUMS人体有限元模型等)的快速发展,也为使用有限元法深入研究事故提供了保障。

本文基于事故案例数据,应用人体生物力学模型,通过碰撞仿真模拟再现事故场景,并分析后排中座3岁儿童乘员组织器官损伤程度,探究事故案例中的人体损伤机制及规律,为进一步改善车辆内部空间结构、道路交通环境提供思路和参考方法,以及汽车数字化测评方法中乘员损伤标准的制定提供数据支撑。

1 方法

1.1 事故案例简介

碰撞伤害研究与工程网络(crash injury research and engineering network, CIREN)是深入调查事故数据并进行人体碰撞损伤数据收集的平台^[12]。通过对CIREN数据库中有关3岁儿童乘员交通事故损伤信息的分析,选取编号128062的汽车碰撞事故进行再现及乘员损伤研究。事故案例如图1(a)所示,

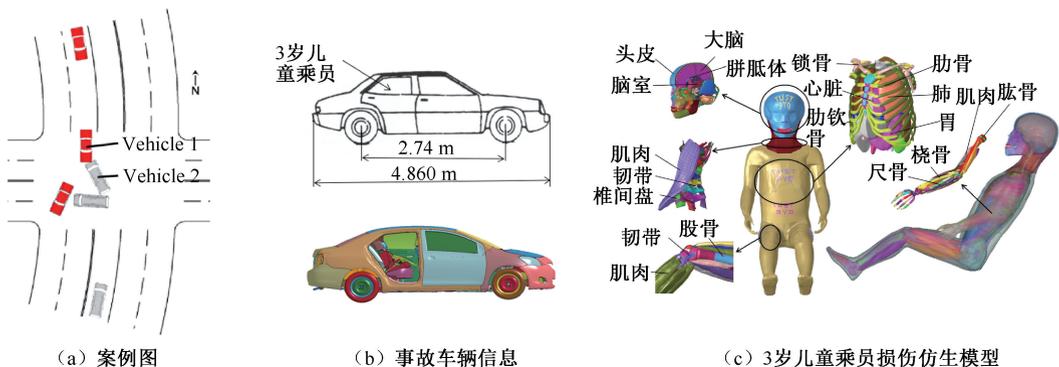


图1 事故车辆基本信息和儿童乘员损伤模型

Fig. 1 Basic information of the accident vehicle and child occupant injury model (a) Case map,

(b) Accidental vehicle information, (c) 3-year-old child bionic model of occupant injury

一辆直行的克莱斯勒 Sebring 轿车 (Vehicle 1) 与转向的雪佛兰乘用车 (Vehicle 2) 前部发生斜向、偏置的正面碰撞, 案例中描述两车碰撞方向夹角为 30° 。Vehicle 1 全长 4.86 m, 轴距 2.74 m, 整备质量 1 479 kg; Vehicle 2 全长 5.12 m, 轴距 3.05 m, 整备质量 1 760 kg [见图 1(b)]。Vehicle 1 上共有 3 名乘员, 分别为 30 岁女驾驶员、26 岁男性右前座乘员以及 3 岁儿童乘员。案例描述儿童乘员第 2 颈椎 (C2) 齿状突骨折、棘间韧带撕裂以及右锁骨骨折。

1.2 事故再现模型参数设置

用于事故再现的人体模型选用具有高生物逼真度的图斯特 3 岁儿童乘员损伤仿生模型 (TUST IBMs 3YO-O)。该模型准确地表达了复杂的人体生理结构, 并经过有效性验证^[13-16]。模型身高 101.6 cm, 坐姿高 58 cm, 体质量 15.8 kg, 节点数 58.8×10^4 , 单元数 73.2×10^4 , 组织结构主要以共节点方式连接 [见图 1(c)]。本文主要讨论事故案例中 3 岁儿童乘员损伤状况, 故在事故再现时对事故案例中驾驶员 (体质量 104 kg) 和副驾座乘员 (体质量 136 kg) 仅做配重处理。

由于事故中涉及车辆的有限元模型很难获取, 因此, 需要对公开发表的汽车有限元模型根据事故车辆的长度、宽度、轴距和质量进行调整, 最大程度还原事故车辆的基本信息。仿真试验中整车基础模型取自美国国家事故分析中心 (national crash analysis center, NCAC) 汽车模型数据库, 该模型通过重构新车评估程序 (new car assessment program, NCAP) 正面碰撞验证了可靠性^[17]。基于该基础模型, 依据事故描述进行二次开发, 得到事故车辆的有限元模型。在 ANSA (BETA CAE Systems 公司, 希腊) 中根据事故描述将 3 岁儿童乘员模型置于儿童座椅中, 并使用车载三点式安全带约束在 Vehicle 1 后排中间位置 (见图 2), 将用来进行事故重构的车辆有限元模型根据事故中描述的碰撞角度进行摆放, 用 LS-DYNA 软件进行仿真计算。

2 结果

2.1 事故车辆碰撞速度反求及验证

事故案例描述两碰撞车辆的车身均发生了变形, 故会有吸能作用, 此时单一的通过等效壁障速度或者 Δv 作为碰撞时刻的速度必然存在一定的误

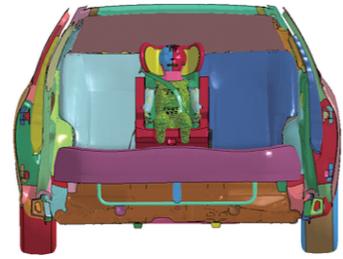


图 2 仿真初始位置

Fig. 2 Simulation initial position

差。为了确定案例中车辆碰撞瞬间的速度, 需要采用 Δv 与车辆的变形能相结合进行计算。根据案例中的描述, Vehicle 1 的 $\Delta v = 37$ km/h, 碰撞吸能 $E = 88.076$ kJ; Vehicle 2 的 $\Delta v = 36$ km/h, 碰撞吸能 $E = 120.97$ kJ, 通过

$$|v_c - v_1| = \sqrt{\frac{2m_2 E}{m_1(m_1 + m_2)}} \quad (1)$$

$$|v_c - v_2| = \sqrt{\frac{2m_1 E}{m_2(m_1 + m_2)}} \quad (2)$$

计算出两车碰撞初速度和速度, 然后设计几组不同初速度的车辆侵入量验证试验, 根据案例车辆的侵入量数据来验证出案例车辆碰撞前的初速度。式中: v_c 为两车碰撞时达到的共同速度; m_1 和 m_2 分别为两车的质量; v_1 、 v_2 为两车发生碰撞时的初速度; E 为碰撞过程中车辆吸收的总能量^[18]。

两车碰撞是首先从接触开始, 经过碰撞变形阶段、回弹阶段, 最后车辆开始旋转打滑。根据计算得出 $v_1 + v_2$ 的总速度为 57 km/h, 由于碰撞时刻 Vehicle 1 初速度的 Δv 更大, 故设置侵入量验证试验时 Vehicle 1 最小的初速度为 37 km/h。因为两车碰撞角度为 30° , 故 Vehicle 2 的初速度 ($v_{2初}$) 需要对碰撞角度进行考虑:

$$v_{2初} = \frac{v_2}{\cos 30^\circ} \quad (3)$$

根据式 (3) 计算, 分别设置 3 组不同的案例车辆侵入点验证试验: ① $v_1 = 37$ km/h, $v_{2初} = 23$ km/h; ② $v_1 = 40$ km/h, $v_{2初} = 20$ km/h; ③ $v_1 = 43$ km/h, $v_{2初} = 17$ km/h。事故中两车发生斜向正面碰撞, 碰撞开始后 Vehicle 2 中部与 Vehicle 1 左前部发生碰撞, 两车前部都发生了变形, 随着碰撞持续均出现了偏转, 与事故现场图描述相符 [见图 3(a)、(b)]。仿真试验中对案例车 Vehicle 1 前部侵入量按

CIREN 数据库所述进行测量。

结果表明,仿真3的侵入量数据与事故车的速度最为接近,但也有一定的差别(见表1)。因此,设计仿真4,即考虑碰撞位置,在仿真3的基础上改变两车碰撞接触位置。综合4组车辆侵入量验证仿真试验的数据看,仿真4的C1~C6点侵入量数据与事故中的案例车C1~C6的侵入量数据

最为接近[见图3(c)]。综合考虑,选取仿真4的速度进行本次事故重构模拟仿真试验。从碰撞过程的能量变化曲线可以看出,动能随着碰撞的发生减小,内能逐渐增加,总能量几乎恒定,沙漏能量仅占总能量的2.6%[见图3(d)]。因此,该仿真结果为本次仿真车辆模型提供了较高的可信度。

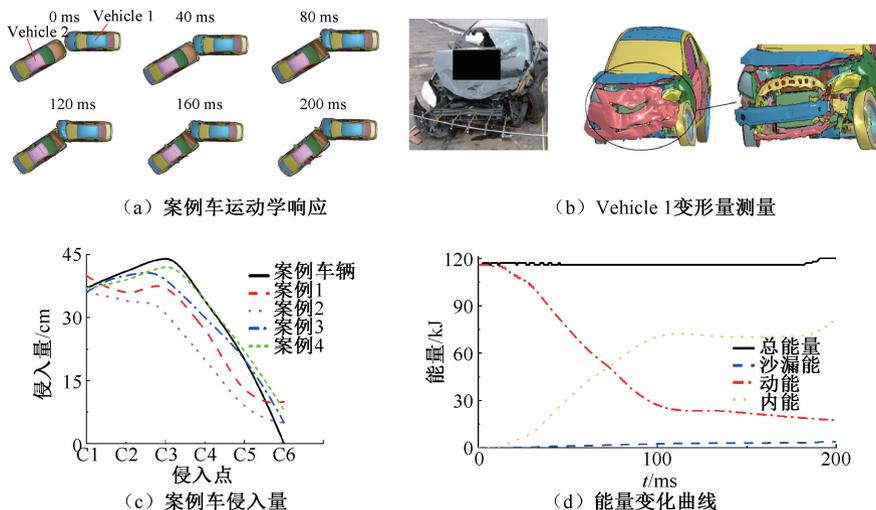


图3 仿真试验案例车响应参数

Fig.3 Simulation test case vehicle response parameters

(a) Case vehicle kinematics response, (b) Vehicle 1 deformation measurement, (c) Case vehicle intrusion, (d) Energy change curve

表1 Vehicle 1 车辆侵入量对比

模型	测量点						单位: cm
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	
事故车	37	41	44	34	20	0	
仿真1	40	36	37	27	13	10	
仿真2	36	34	31	20	9	5	
仿真3	35	40	39	30	20	5	
仿真4	37	39	42	34	22	8	

注:仿真1中 $v_1=37$ km/h, $v_2=23$ km/h; 仿真2中 $v_1=40$ km/h, $v_2=20$ km/h; 仿真3中 $v_1=43$ km/h, $v_2=17$ km/h; 仿真4中 $v_1=43$ km/h, $v_2=17$ km/h; 仿真4改变仿真3的碰撞接触位置。

2.2 儿童乘员运动学响应

由图4可见,碰撞发生后儿童乘员受到惯性力的作用向前运动,受到三点式安全带约束后,儿童乘员躯干逐渐停止运动,但三点式安全带的肩带只能约束右侧肩部,由于车辆以碰撞点为中心发生了一定程度的横摆运动,导致儿童乘员头颈部带动胸部向左前方运动,至最大位移处回弹,儿童乘员的

足部与车内饰发生了碰撞,与案例中描述一致。

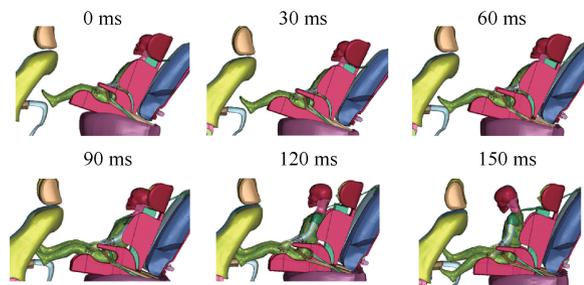


图4 事故重构中儿童乘员运动学响应

Fig.4 Dynamic response of child occupant in accident reconstruction

2.3 儿童乘员损伤分析

2.3.1 事故描述损伤再现 图5(a)所示为仿真试验中观测到医生所描述的儿童乘员伤情部位情况,相应的损伤评估参数值见表2。仿真试验再现了儿童乘员颈椎C2处齿状突骨折、棘间韧带撕裂伤以及右锁骨骨折。图5(b)为TUST IBMs 3YO-O模型的皮肤 von Mises 应力云图,也再现出事故中所描述

的胸腹部、下肢以及踝关节处皮肤挫伤,该位置为胸腹部与安全带接触的位置也是最大应力出现的位置。本文认为,儿童乘员的下肢与儿童座椅以及汽车座椅发生挤压造成皮肤应力过大,足部与汽车内饰发生碰撞是导致儿童乘员足部皮肤应力集中的原因,与事故描述的一致。

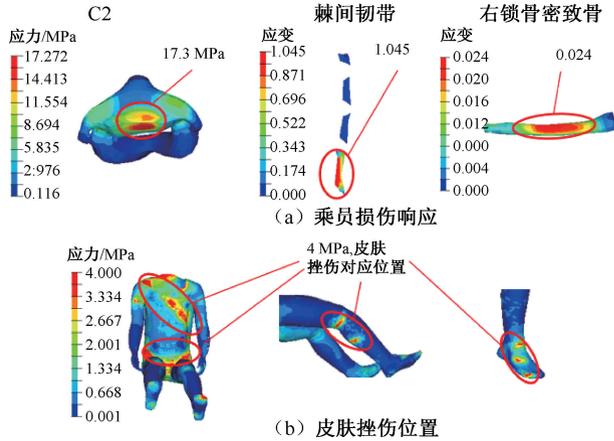
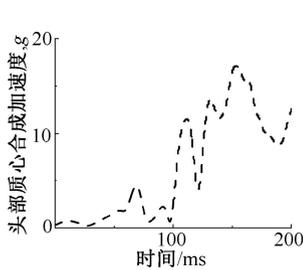


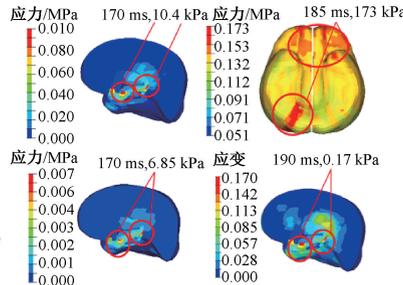
图 5 儿童乘员损伤再现

Fig. 5 Reconstruction of child occupant injuries (a) Occupant injury response, (b) Location of skin contusion

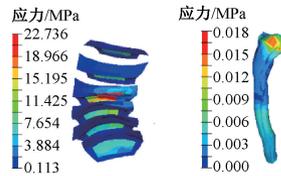
2.3.2 头部损伤分析 由事故重构试验中儿童乘员(TUST IBMs 3YO-O)的头部质心合成加速度可以看出,在 155 ms 时达到 18 g,其头部 3 ms 合成加速



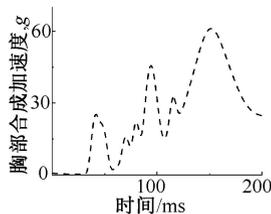
(a) 头部质心合成加速度



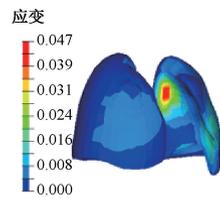
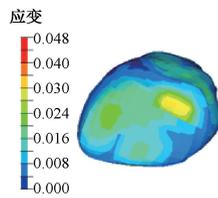
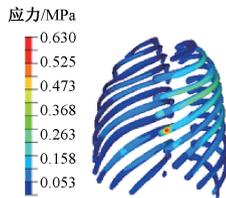
(b) 头部生物力学响应



(c) 颈部生物力学响应



(d) 胸部合成加速度



(e) 胸部生物力学响应

图 6 事故重构试验 TUST IBMs 3YO-O 损伤响应

Fig. 6 Damage response of TUST IBMs 3YO-O in accident reconstruction (a) Resultant head acceleration, (b) Biomechanical Response of the head, (c) Biomechanical response of the neck, (d) Chest synthetic acceleration, (e) Biomechanical response of the chest

表 2 实际损伤与事故重构数值对比

Tab. 2 Comparison of the injuries form the accident report and reconstruction

案例乘员损伤	TUST IBMs 3YO-O 模型	试验值	阈值
C2 齿状突骨折	C2 最大弯矩	204 N·m	190 N·m ^[19]
棘间韧带撕裂伤	棘间韧带最大伸长量	2.27 倍	1.87 倍 ^[20]
右锁骨骨折	锁骨最大应变	0.024	0.02~0.03 ^[21]
胸腹部皮肤挫伤	胸腹部最大 von Mises 应力	4 MPa	—
下肢皮肤挫伤	下肢最大 von Mises 应力	—	—
踝关节皮肤挫伤	踝关节最大 von Mises 应力	—	—

度最大达到 17 g, HIC₁₅ 和 BrIC 分别达到 85 和 1.02[见图 6(a)]。脑组织最大 von Mises 应力达到 10.4 kPa, 脑组织最大剪切应力达到 6.85 kPa, 在 170 ms 时同时出现在大脑灰质内部, 脑组织最大主应变在 190 ms 达到 0.17, 脑组织颅内压在 185 ms 出现在大脑灰质底部前后位置, 达到 173 kPa[见图 6(b)]。这些参数表明, 儿童乘员存在轻度脑损伤风险^[22-23]。

2.3.3 颈部损伤分析 由事故重构试验中儿童乘员(TUST IBMs 3YO-O)颈部生物力学响应可见, 其椎间盘最大 von Mises 应力在 100 ms 时达到 23 MPa

[见图 6(c)]。根据案例中的描述,儿童乘员的颈部损伤较大,结合椎间盘的最大 von Mises 应力来看,其椎间盘的最大 von Mises 应力已经超过儿童失效应力^[25],儿童乘员颈部椎间盘发生了严重损伤。脊髓最大 von Mises 应力达到 18 kPa,在 160 ms 时出现在脊髓上部位置。

2.3.4 胸部损伤分析 由事故重构试验中儿童乘员(TUST IBMs 3YO-O)胸部合成加速度随时间变化的曲线可见,在 150 ms 时达到最大值 62 g,胸部 3 ms 合成加速度达到 54 g[见图 6(d)]。根据儿童乘员胸部运动学响应分析,胸部有一定的损伤风险,但是不能判断胸腔内部组织器官的损伤情况,需要结合内部组织器官的生物力学响应进行判断。分析本次仿真试验中儿童乘员(TUST IBMs 3YO-O)胸部生物力学响应发现,肋骨最大 von Mises 应力在 145 ms 达到 630 kPa,出现在左侧肋骨,推测是由于安全带挤压造成[见图 6(e)];肺和心脏的最大主应变同时在 145 ms 达到最大值 0.047、0.048,均没

有超出其损伤阈值 0.284 和 0.3^[27-28]。结合试验中儿童乘员的胸部生物力学响应来看,儿童乘员胸部内脏器官的损伤较轻,与案例中描述的损伤情况一致。

3 讨论和分析

在重现事故中描述的儿童乘员损伤的基础上,本文对目前儿童乘员损伤评估及生物力学研究中关注的评价参数进行观测(见表 3)。一方面,用来评估事故中儿童乘员有无潜在的损伤风险;另一方面,用来探究基于生物力学模型的 3 岁儿童乘员数字化评价参数及损伤阈值。就本案例中儿童乘员的头部损伤评价参数而言,仿真计算所得 HIC₁₅ 并未超出目前使用的评价阈值,但计算所得脑组织最大 von Mises 应力、最大剪切应力、最大主应变以及颅内压的值表明存在轻度脑损伤风险,这些轻度脑损伤风险可能会在伤者刚入院时被重伤掩盖而忽略。

表 3 事故重构试验中儿童乘员头部、颈部和胸部响应参数

Tab. 3 The head, neck and chest response parameters of child occupant in accident reconstruction

项目	损伤评价指标	模型	阈值
头部损伤评价	HIC ₁₅	85	500/700
	BrIC	1.02	1,45% 概率 AIS4 级脑损伤 ^[18]
	头部累计 3 ms 加速度, g	17	60/80
	脑组织 von Mises 应力/kPa	10.4	6~11 kPa, 脑挫伤; 15 kPa, 轻微脑震荡; 38 kPa, 重度脑损伤 ^[22]
	脑组织颅内压/kPa	173	173kPa, 轻度脑损伤; 235kPa, 致命脑损伤 ^[23]
	剪切应力/kPa	6.8	6 kPa, 25% 概率轻度脑损伤; 7.8kPa, 50% 概率轻度脑损伤; 10kPa, 80% 概率轻度脑损伤; 25 kPa, 100% 概率中度脑损伤 ^[24]
	脑组织 MPS	0.17	0.15, 可逆伤害; 0.2, 大脑神经系统功能缺陷 ^[26]
颈部损伤评价	颈部最大张力, F _z /N	1 120	1 555/2 840
	颈部椎间盘最大应力/MPa	23	10 ^[25]
胸部损伤评价	胸部累计 3 ms 加速度, g	54	41/55
	胸部最大变形量/mm	15	40
	肺部最大主应变	0.047	0.284, 肺挫伤 ^[27]
	心脏最大主应变	0.048	0.3, 心脏挫伤 ^[28]

基于案例所得的头部旋转损伤指标 (brain injury criteria, BrIC)^[18] 为 1.02, 根据 BrIC 可预测脑组织发生 AIS 4 级损伤的概率公式

$$P(\text{AIS } 4) = 1 - \exp[-(\text{BrIC}/1.204)^{2.84}] \quad (4)$$

可得发生 AIS 4 级脑损伤的概率为 46.5%, 头部 AIS 4 是指头部受到严重损伤, 可能危及生命。分析案例再现中儿童乘员的运动学响应可以看出儿

童乘员的头部的确绕颈部发生了剧烈的转动, 但医生并未给出儿童乘员因头部旋转造成的脑损伤, 因此, 应用头部旋转指标评估头儿童乘员部严重损伤概率的阈值还应通过更多的案例再现进一步深入探究。

结合事故重构试验及案例中所描述的颈部的损伤情况来看, C2 齿突骨折是移动载荷导致上颈椎

损伤的最常见形式之一, Pan 等^[29]研究发现, 不同类型 CRS 约束下儿童乘员在偏置碰撞中的上颈部轴向力均超过了损伤阈值, 表明儿童乘员在事故中容易造成上颈部损伤, 从生理学角度看, 仅由相对薄弱的寰枕关节连接质量较大的头部和整个颈椎, 导致儿童乘员的上颈部在运动过程中会承受较大的载荷。由于儿童乘员的躯干被约束, 乘员的头部因惯性力向前方运动, 造成颈部的过度屈曲。由事故重构试验中儿童乘员颈椎 C1~7 运动学响应可见, 儿童乘员颈椎运动的支点在 C2、C3 椎体水平上, 从而容易导致儿童乘员的上颈部损伤(见图7)。该结果清楚地解析了案例中儿童颈部受到损伤的机制。

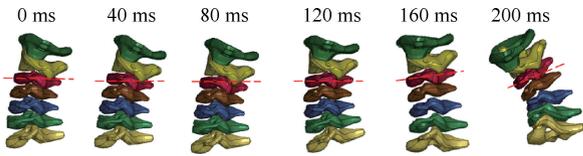


图7 事故重构试验 TUST IBMs 3YO-O 颈椎运动学响应

Fig.7 Cervical spine kinematic responses of TUST IBMs 3YO-O in accident reconstruction

分析事故重构试验中胸部的损伤, 儿童乘员的胸部累计 3 ms 加速度已超出目前假人试验采用的损伤阈值, 但是其内部组织器官的生物力学响应均没有超出阈值, 这也与案例中医生只给出儿童乘员胸部受安全带挤压造成皮肤挫伤, 而并未给出其他损伤的描述一致。因此, 未来关于 3 岁儿童乘员胸部虚拟测评参数及阈值的确定还需进一步深入探讨。

事故重构过程的影响因素很多, 例如事故发生时儿童乘员的坐姿以及上下肢的具体摆放位置、儿童乘员生物力学模型材料参数的本构方程可靠性, 这些因素对损伤再现的影响, 需要通过更多的案例重构分析进一步探究。在当前无法开展儿童尸体试验的情况下, 通过事故重构不断优化提高生物力学模型逼真度也是有效的途径之一。本文通过有限元法再现事故, 分析得出本次事故中儿童乘员的受伤来源及损伤机制, 后续会继续通过事故再现, 深入研究儿童乘员最易受伤的部位及损伤机制。

4 结论

本文应用车辆有限元模型和具有详细解剖学

结构的 3 岁儿童乘员损伤仿生模型 (TUST IBMs 3YO-O), 依据真实的交通事故案例, 反求事故中案例车辆碰撞速度, 通过案例再现进行仿真试验, 分析在事故中乘坐于后排中间位置的 3 岁儿童乘员损伤风险, 得出以下结论:

(1) 采用有限元法进行碰撞事故再现仿真分析, 需要综合 Δv 、车辆质量和变形能反求碰撞前车辆速度。

(2) 应用高生物逼真度的人体生物力学模型 (TUST IBMs 3YO-O) 可再现乘员损伤, 且可以直观分析事故发生过程中乘员的运动学响应和事故过程中的运动姿态, 为深入分析儿童乘员碰撞损伤机制提供了可靠的工具, 为制定更优的儿童防护策略提供科学的参考依据。

(3) 由于人体结构十分复杂, 其在碰撞中的运动姿态和损伤机制受到多方面因素的影响, 因此, 未来汽车虚拟测评应考虑人体的生物力学响应参数。

本文使用已经过验证的 3 岁儿童乘员损伤仿生模型 (TUST IBMs 3YO-O) 具有详细的解剖学结构特征, 并且通过再现事故案例验证模型具有较高的生物逼真度, 能为儿童乘员安全防护装置的研发和数字测评技术的开发提供基础数据和技术支撑。

利益冲突声明: 无。

作者贡献声明: 李海岩提供研究思路, 对仿真试验和文章提出指导性意见, 并对论文进行修改定稿; 王一达查阅文献资料, 进行仿真试验, 提取数据结果进行分析, 并撰写论文; 贺丽娟、吕文乐、崔世海、阮世捷对仿真试验以及论文提出指导性建议。

参考文献:

- [1] World Health Organization. Global status report on road safety 2018: Summary [R/OL]. <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-NMH-NVI-18.20>.
- [2] World Health Organization. World health statistics 2023: Monitoring health for the SDGs, sustainable development goals [R/OL]. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240074323>.
- [3] SHESTEROV E, MIKHAILOV A. Accident rates at signalized intersections [J]. Transport Rese Proced, 2017 (20): 613-617.
- [4] 韩勇, 唐慧聪, 田丰翼, 等. 不同约束载荷下三儿童乘员胸部运动方程与损伤风险研究 [J]. 振动与冲击, 2020, 39

- (1): 216-222.
- [5] 崔世海, 高伟, 李海岩, 等. 自动紧急制动对公交车内儿童乘员颅脑损伤影响[J]. 医用生物力学, 2023, 38(6): 1241-1247.
CUI SH, GAO W, LI HY, et al. Effects of autonomous emergency braking on brain injury of pediatric occupants in buses [J]. J Med Biomech, 2023, 38(6): 1241-1247.
- [6] 邹铁方, 易亮, 肖璟, 等. 基于事故再现的骑车人与行人各部位损伤的对比研究[J]. 汽车工程, 2018, 40(3): 271-276.
- [7] 范颖, 王成铭, 王金明, 等. 基于多种优化算法的交通事故精准化重建与颅脑损伤风险评估[J]. 医用生物力学, 2023, 38(2): 346-352.
FAN Y, WANG CM, WANG JM, et al. Accurate reconstruction of traffic accident based on multiple optimization algorithms and evaluation of craniocerebral injury risk [J]. J Med Biomech, 2023, 38(2): 346-352.
- [8] MOSER A, STEFFAN H, KASANICKY G. The pedestrian model in PC-crash—The introduction of a multi body system and its validation [J]. SAE Transactions, 1999 (108): 794-802.
- [9] MOSER A, HOSCHOPF H, STEFFAN H, et al. Validation of the PC-crash pedestrian model [J]. SAE Transactions, 2000(109): 1316-1339.
- [10] 裴玉龙, 李晓辉. 两车正面碰撞事故的有限元法仿真研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(11): 53-57.
- [11] LI H, JIN X, ZHAO H, et al. Reconstruction of pediatric occupant kinematic responses using finite element method in a real-world lateral impact [R/OL]. <https://doi.org/10.4271/2000-01-0847>.
- [12] SCHAFMAN MA, MEITZNER M, BAKER D, et al. Field data study of the effect of knee airbags on lower extremity injury in frontal crashes [J]. SAE Int J Adv Curr Pract Mob, 2021(5): 3.
- [13] 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.
- [14] 杜治青. 三岁儿童颈部有限元模型的构建及损伤分析[D]. 天津: 天津科技大学, 2016.
- [15] 梁云飞. 三岁儿童乘员胸部有限元模型的构建及损伤分析[D]. 天津: 天津科技大学, 2016.
- [16] LU DD, LI HY. The comparison of simulation research based on the 3-year-old child abdomen finite element model [C]// Proceedings of the 12th International Forum of Automotive Traffic Safety. Xiamen: [s. n.], 2015.
- [17] MARZOUGUI D, SAMAHA RR, NIX L, et al. Extended validation of the finite element model for the 2010 Toyota Yaris passenger sedan (MASH 1100kg vehicle) [R]. 2013.
- [18] 水野幸治, 韩勇, 陈一唯. 汽车碰撞安全[M]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
- [19] MERTZ HJ, PATRICK LM. Strength and response of the human neck [C]//Proceedings of 15th Stapp Car Crash. Coronado: ASE, 1971.
- [20] CHAZAL J, TANGUY A, BOURGES M, et al. Biomechanical properties of spinal ligaments and a histological study of the supraspinal ligament in traction [J]. J Biomech, 1985, 18(3): 167-176.
- [21] ZHANG Q, KERRIGAN J, KINDIG M, et al. Axial injury tolerance of the clavicle and the effect of age and gender [C]//Proceedings of the 9th Ohio State University Injury Biomechanics Symposium. Columbus, Ohio: [s. n.], 2013.
- [22] BAUMGARTNER D, WILLINGER R, SHEWCHENKO N, et al. Tolerance limits for mild traumatic brain injury derived from numerical head impact replication [C]//Proceedings of the IRCOBI Conference. Sanya: [s. n.], 2001: 10-12.
- [23] WARD CC, THOMPSON RB. The development of a detailed finite element brain model [C]//Proceedings of 19th Stapp Car Crash Conference. San Diego: SAE, 1975.
- [24] ZHANG L, YANG KH, KING AI. A proposed injury threshold for mild traumatic brain injury [J]. J Biomech Eng, 2004, 126(2): 226-236.
- [25] DONG L, LI G, MAO H, et al. Development and validation of a 10-year-old child ligamentous cervical spine finite element model [J]. Ann Biomed Eng, 2013, 41(12): 2538-2552.
- [26] MORRISON B, CATER HL, WANG CB, et al. A tissue level tolerance criterion for living brain developed with an *in vitro* model of traumatic mechanical loading [J]. Stapp Car Crash J, 2003(47): 93-105.
- [27] GAYZIK FS. Development of a finite element based injury metric for pulmonary contusion [D]. Winston-Salem: Wake Forest University, 2008.
- [28] SHIGETA K, KITAGAWA Y, YASUKI T. Development of next generation human FE model capable of organ injury prediction [C]//Proceedings of the 21st (ESV) international technical conference on the enhanced safety of vehicles. Stuttgart: [s. n.], 2009: 15-18.
- [29] PAN D, HAN Y, TIAN FY, et al. Research on the injury risk of child occupant in frontal 40% offset impact [C]// Proceedings of the 14th International Forum of Automotive Traffic Safety. Changsha: [s. n.], 2017.