DOI: 10.3901/JME.2019.18.132

基于仿真和动物试验的3岁儿童胸腹部 软组织器官损伤风险研究*

韩 勇^{1,2,3} 彭乐园^{1,3} 潘 迪^{1,3} 唐慧聪^{1,3} 黄红武^{1,3} 水野幸治⁴

(1. 厦门理工学院机械与汽车工程学院 厦门 361024;

2. 陆军军医大学(第三军医大学)交通医学研究所 重庆 400038;

3. 福建省客车及特种车辆研发协同创新中心 厦门 361024;

4. 名古屋大学机械系统工程系 名古屋 464-8603 日本)

摘要: 根据联合国欧洲经济委员会导入的 R129 法规儿童约束系统台车正面碰撞条件, 结合有限元仿真和动物试验的方法, 研究 3 岁儿童在前置护体型和五点式背带型儿童约束系统(Child restraint system, CRS)中的胸腹部软组织损伤风险。在有限元分析中, 采用 3 岁儿童假人 Q3 和 THUMS(Total human model for safety)第四代学术版 3 岁儿童(Three-year old, 3YO)人体有限元模型, 建立两款 CRS 台车正面碰撞数值分析模型, 对比 3 岁儿童乘员在两款 CRS 中的运动学响应、损伤参数及胸部软组织器官损伤参数; 为了检验动态载荷下在前置护体型和五点式背带型 CRS 中, 胸腹部内软组织器官是否有受到损伤, 使用 7 头质量在 9.7~13 kg 的西藏小猪放置在台车上进行动态加载试验, 通过解剖学处理并进行损伤严重程度评分(Injury severity score, ISS)评价小猪胸腹部内脏损伤。仿真结果表明, Q3 假人和 THUMS 3YO 有限元模型的运动学响应和胸部压缩量存在很大差异; THUMS 3YO 在前置护体型 CRS 中胸部变形压缩率为 39.25%, AIS (Abbreviated injury scale, AIS) 4 级的损伤风险为 50%; 两款 CRS 的 THUMS 3YO 儿童乘员胸腹部内脏软组织器官所受的应力应变均超出了损伤阈值。在前置护体型 CRS 中, 儿童胸腹部软组织所受应力应变在区域和数值上相对于五点式背带型 CRS 更大, 发生胸腹部软组织损伤的风险也更大。动物试验结果表明, 在前置护体型 CRS 中, 肺挫伤、冠状动脉撕裂、肝撕裂是常见的胸腹部损伤, 小猪即使不发生肋骨骨折也有内脏器官损伤。研究结果有助于儿童乘员胸部损伤机理研究和防护系统的开发。

关键词: 儿童乘员安全; CRS; 胸腹部损伤; 动物试验; 有限元分析

中图分类号: U461

Soft Tissue Injury Risk in Chest and Abdomen of 3YO Child Based on Simulation and Animal Experiments

HAN Yong^{1,2,3} PENG Leyuan^{1,3} PAN Di^{1,3} TANG Huicong^{1,3}
HUANG Hongwu^{1,3} MIZUNO Koji⁴

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024;

2. Institute for Traffic Medicine, Third Military Medical University, Chongqing 400038;

3. Fujian Collaborative Innovation Center for R&D of Coach and Special Vehicle, Xiamen 361024;

4. Department of Mechanical Science & Engineering, Nagoya University, Nagoya, 464-8603 Japan)

Abstract: The chest and abdomen soft tissue injury risk to three-year old (3YO) child occupant in a child restraint system (CRS) is investigated by using finite element (FE) simulation and animal experiments, based on the UN R129 dynamic test regulation. In which, Q3 dummy FE models and total human model for safety (THUMS) 3YO Occupant Model Academic Version 4 (THUMS 3YO VA4C) and two types of CRSs (impact shield and 5-point harness) were used. The child kinematic response, chest physical injury parameters, and the chest soft inner organs parameters are compared in two types of CRSs. To clarify whether internal organ injuries due to chest compression can occur for an impact shield and a 5-point harness CRS, seven experiments are performed using Tibetan

* 国家自然科学基金(51675454)和福建省自然科学基金(2016J01748)资助
项目。20181030 收到初稿, 20190320 收到修改稿

miniature pigs with weights ranging from 9.7 kg to 13 kg under dynamic loadings. The chest and abdomen soft tissue injury of the pigs is analyzed by autopsy and marked using Injury Severity Score (ISS). The simulation results show that significant difference of the kinematics and chest deformation observed in Q3 and THUMS 3YO FE models, the chest deformation rate of THUMS 3YO FE model is 39.25% in the impact shield CRS, which predicted a 50 percentage of Abbreviated Injury Scale (AIS) 4 injury risk. The stress and strain distribution of chest and abdomen visceral organs of THUMS 3YO in the two CRSs are larger than the injury threshold. Moreover, in the impact shield CRS, the distribution of the stress-strain and absolute value is larger than that in 5-point harness CRS, to predict a higher chest injury risk in impact shield CRS. Severe internal organ injuries (lung contusion, coronary artery laceration, liver laceration) are found for the CRS with an impact shield and the pigs' internal organ injuries without rib fractures could occur in the CRS equipped with an impact shield. The results can be benefit for investigating the chest injury mechanism of the children and development of the protection system for the children.

Key words: child occupant safety; CRS; chest and abdomen injuries; animal experiment; finite element analysis

0 前言

近几年, 交通事故频发所造成的儿童乘员伤亡事故已成为社会各界关注的热点。STOCKMAN 等^[1-2]研究表明, 儿童乘车行为并不像机械假人一样坐姿标准, 而是自由选择或随意更换乘坐姿势, 在碰撞过程中很容易造成头部和胸腹部损伤。有调查显示, 正面碰撞中儿童乘员受伤部位胸腹部损伤高达 13%, 仅次于头颈部损伤, 是造成儿童乘员死亡的重要原因之一^[3]。儿童胸廓柔软, 肋骨不易骨折, 当安全带对胸部挤压过大时, 胸腔内器官在受到剪切力和压力双重作用下更容易发生损伤, 严重的情况下会出现肺挫伤^[4-5]; 韩勇等^[6]通过小猪试验发现在前置护体型 CRS(Child restraint system)中的小猪有肝撕裂、肺挫伤、肋骨骨折等损伤。在前置护体型 CRS 中, 儿童乘员的胸部在碰撞过程中与护板直接接触而受力, 胸部变形比较大, 而对于五点式背带型 CRS, 儿童乘员的胸部和肩部由肩带约束, 骨盆由腰带约束, 胸骨不直接受力, 所以胸部变形相对较小^[7-8]。

由于受道德伦理的限制, 对儿童乘员关于胸部内脏器官的研究还很少, 也没有相关详细针对儿童乘员胸部损伤阈值的法规颁布。在 UN R129 阶段 1, Q3 假人的胸部压缩量 40 mm(仅监测)作为一个实用的阈值被提议修正。KROELL 等^[9]的研究表明, 在正面碰撞试验中, 相对于根据脊椎加速度或者胸部加载力, 利用胸部压缩量来判断其 AIS(Abbreviated injury scale)评级更为精确; VIANO 等^[10]的研究结果认为, 当胸部压缩比例达到 35%时, 人体遭受 AIS 4 级及以上损伤的可能性约为 25%, 而压缩比例达到 37.9%时, 该可能性将上升到 50%; VIANO 等^[11]在 1985 年从内脏吸收的黏性能角度第一次提出利用黏性损伤准则, 即利用胸部的变形速度(V)与压缩量(C)的乘积来预测高速碰撞下胸部内软组织的损

伤情况。其计算公式如下

$$VC = V(t) \times C(t) = \frac{d[D(t)]}{dt} \times \frac{D(t)}{b}$$

式中, $V(t)$ 由胸部变形量 $D(t)$ 微分得到; $C(t)$ 为瞬时压缩量, 即变形量 $D(t)$ 和初始胸部厚度 b 之间的比值, 其损伤容忍极限值 $VC_{\max} \leq 1.0 \text{ m/s}$ 。

1986 年, LAU 等^[12]通过进行更大范围内的相关试验数据研究提出了一种假设, 即当碰撞速度低于 3 m/s 时, 应采用压缩准则, 而当碰撞速度在 3~30 m/s 之间时, 采用黏性准则更合适, 这一假设如图 1 所示。刘宝松等^[13]通过探讨胸部准静态撞击时胸壁动力学响应过程及其损伤关系得出, 胸壁的变形运动过程是影响胸部损伤的关键, 黏性标准是预测胸部伤情的可靠参数。

图1 人体胸部压缩量准则和黏性准则适用范围图

基于以上研究成果, 为更清楚的理解运动过程中 3 岁儿童乘员胸腹部内脏软组织器官的损伤情况, 文章开展有限元仿真和动物试验的研究方法, 通过分析仿真中胸腹部内脏软组织的受力情况以及碰撞后小猪胸腹部内脏器官的尸检结果来预测 3 岁儿童乘员在碰撞过程中的胸腹部内脏软组织损伤情况。

1 方法

1.1 仿真模型的建立

在本次研究中,使用的 CRS 类型主要有前置护体型(CRS A 和 CRS B)和五点式背带型(CRS C),其中 CRS A 为 ISOFIX 软连接,CRS B 为 ISOFIX 硬连接,CRS C 是属于可正反向转换安装的儿童座椅。CRS B 与 CRS A 同属于前置护体型,有限元建模中放弃 CRS B 类型。基于 UN R129 法规动态加载试验方法,建立 CRS 台车碰撞仿真模型,使用 Q3 机械假人有限元模型与 THUMS(Total human model for safety, THUMS)第四代学术版 3 岁儿童(Three-year old, 3YO)人体有限元模型分析其在前置护体型 CRS A 与五点式背带型 CRS C 中胸腹部内脏软组织器官的损伤。CRS 几何模型通过逆向工程完成建模,之后在仿真软件中建立有限元模型;Q3 模型是欧洲最新儿童约束系统法规(UN R129)中规定的试验儿童假人有限元仿真模型;THUMS 3YO 是 2016 年由 Toyota Motor Corporation 和 Toyota Central R&D Labs 共同开发的用于 3 岁儿童乘员碰撞安全研究的儿童人体有限元模型,该模型包含了详细的胸腹部内脏软组织器官,可以模拟在动态加载过程中儿童内脏器官的损伤风险(图 2)。台车碰撞加速度波形如图 3 所示,台车碰撞仿真模型如图 4 所示。

图 2 Q3 和 THUMS 3YO VA4C

图 3 台车加速度波形

图 4 CRS A 与 CRS C 台车碰撞仿真模型

1.2 动物试验

根据联合国欧洲经济委员会导入的 R129 法规儿童约束系统台车正面碰撞条件,使用南方医科大学实验动物中心提供的 7 头西藏小猪作为本次试验对象,来分析碰撞后的小猪内脏损伤情况。小猪试验在国家卫生研究院实验动物护理和使用指南的建议下进行,动物使用方案由中国南方医科大学的实验动物管理和使用委员会审查和批准。在试验中,CRS C 是属于可正反向转换安装的儿童座椅,因此对 CRS C 进行了后向安装的测试(FF: forward-facing, 前向式; RF: rear-facing, 后向式)。西藏小猪大约在 24 个月时成熟(成熟体重为 20 kg),由于是针对 3 岁小孩的损伤,所以选择了 4 个月($24 \times \frac{3}{18} = 4$)大的小猪,体重最小 9.7 kg,最大 13 kg,用于测试的西藏小猪的身体尺寸见表 1。

表 1 西藏小猪的身体尺寸(FF: 前向式, RF: 后向式)

CRS 类型	小猪编号	体重/kg	身高/cm	腹围/cm	胸围/cm	体宽/cm	头长/cm
CRS A	1602-2	13	58	63.0	55.0	20.0	18.0
CRS A	150442	13	61	58.5	49.5	16.0	21.0
CRS B	1602-1	10.7	51	59.0	54.0	17.0	18.0
CRS B	151105	13	56	69.0	55.0	11.5	17.5
CRS C FF	150807	11	54	54.5	51.0	11.0	17.0
CRS C RF	151106	11.8	56	62.0	53.0	9.0	17.5
CRS C RF	160306	9.7	55	56.0	51.0	18.0	16.0

试验之前,使用浓度为 3%的戊巴比妥钠以 1 mL/kg 注射麻醉小猪。麻醉后,将小猪姿态调成 3 岁儿童的姿态放置在儿童座椅中。在 CRS A 和 CRS B 中,利用护板直接约束小猪胸腹部;在 CRS C 中,使用胸部夹子连接左右两边肩带来约束小猪上肢。碰撞结束后,由南方医科大学的实验动物中心工作人员将试验后的小猪从实验室中带走,然后对每头小猪进行尸体探查,并使用简化损伤准则(AIS)和损

伤严重程度评分(Injury severity score, ISS)来评判所有测试小猪的损伤程度。测试设置如图5所示, 每个小猪测试的台车加速度波形如图3所示。

图5 小猪台车碰撞测试试验

2 结果与分析

2.1 有限元仿真

2.1.1 3岁儿童乘员的运动学响应

图6、7分别为Q3和THUMS 3YO模型在CRS A和CRS C仿真中的运动学响应。在CRS A仿真试验中, Q3首先整体向前运动, 在加载过程中胸部接触到护板并持续受到护板的压力, 而后头部在惯性力的作用下绕颈部旋转直到接触到护板上表面, 此时头部前向位移和护板的变形均达到最大(图6)。在回弹阶段, Q3的骨盆在护板的约束下在大概125 ms时刻出现了向上弹起的趋势。从整体运动学响应来看, 相比于Q3, THUMS 3YO整体躯干柔性更强, 在回弹阶段, THUMS 3YO并未出现向上弹起的趋势, 而是在护板的约束下继续向前运动, 因此骨盆的前向位移相比于Q3更大且发生时刻也更晚。

图6 Q3和THUMS 3YO在CRS A中的运动学响应

在CRS C动态加载仿真中, 首先Q3也向前运动, 然后在五点式背带的约束下, 假人的头部绕颈部旋转直到头部位移达到最大(图7)。在回弹阶段, 头部在惯性力的作用下, 先继续绕颈部向下旋转而后向座椅后背方向运动。对于THUMS 3YO, 由于其躯干柔性, 假人头部一直绕颈部向下旋转直到下巴接触到假人胸部为止。

图7 Q3和THUMS 3YO在CRS C中的运动学响应

2.1.2 儿童乘员胸部损伤参数分析

图8所示为儿童乘员在前置护体型座椅CRS A中仿真得到的胸部压缩量、胸部合成加速度曲线。总体上来讲, Q3模型仿真结果和Q3机械假人测试的损伤曲线在脉冲宽度、最大值、切向斜率、走向等基本吻合^[6]。THUMS 3YO的胸部累积3 ms合成加速度为 299.0 m/s^2 , 比Q3模型 372.7 m/s^2 小。从图8b中可以看出, 胸部合成加速度大约在80 ms

(a) 胸部变形量

(b) 胸部合成加速度

图8 Q3和THUMS 3YO在CRS A中的损伤曲线

时达到峰值, 结合运动学响应, 此峰值是由于 Q3 下巴与胸部相接触产生的结果; THUMS 3YO 的胸部变形量为 47.1 mm, 达到峰值时刻晚于 Q3 假人, 且大约是 Q3 假人的 1.5 倍, 其胸部压缩率达到 39.25%(表 2), 根据 VIANO 等研究的成人压缩量损伤准则, 胸部损伤达到 AIS 4 级的损伤风险为 50%^[10]。这应该归结于两个原因: 其一是因为 THUMS 3YO 躯干柔性比 Q3 大, 故胸部压缩量峰值很大; 其二是因为 THUMS 3YO 腹部没有 Q3 大, 在运动初始 THUMS 3YO 与护板存在比较大的空隙, 在很大程度上会推迟胸部压缩量达到峰值的时刻。

表 2 Q3 和 THUMS 3YO 损伤参数

CRS 类型	仿真矩阵	胸部变形量 D/mm	压缩率 (%)	胸部累积 3 ms 合成加速度 $a/(\text{m/s}^2)$
CRS A	Q3 假人	33.6	28.00	319.4
	Q3 模型	31.3	26.08	372.7
	THUMS 3YO	47.1	39.25	299
CRS C	Q3 假人	20.2	16.83	253.4
	Q3 模型	23.4	19.50	327.1
	THUMS 3YO	34.8	29.50	410.0

图 9 所示为在 CRS C 前向加载仿真试验中所得到的胸部压缩量、胸部合成加速度曲线。从总体上

图 9 Q3 和 THUMS 3YO 在 CRS C 中的损伤曲线

来讲, Q3 仿真模型和物理假人测试的曲线在脉冲宽度、最大值、切向斜率、走向等也基本吻合^[6]。THUMS 3YO 的胸部合成加速度在达到峰值后迅速下降, 而 Q3 的胸部合成加速度曲线由于五点式背带与假人内部结构接触而呈现出多个峰值; THUMS 3YO 的胸部变形量达到了 34.8 mm, 通过计算压缩率, 低于损伤阈值。

图 10 为 THUMS 3YO 胸部黏性损伤 VC 值的时间历程曲线。根据图 10 所示, 两款座椅的 VC 最大值均小于 1.0 m/s, 可预测儿童乘员胸部不会发生黏性损伤。

图 10 THUMS 3YO 的胸部黏性准则 VC 值的时间历程曲线

2.1.3 儿童胸腹部器官应力应变分析

(1) 肋骨。THUMS 3YO 在 CRS A 与 CRS C 约束下的肋骨、胸骨及锁骨的 Von Mises 应力云图如图 11 所示。KEMPER 等^[14]通过对成人第 4~7 根肋骨进行三点弯曲试验得出其失效力为 130.8 MPa。从应力云图中可以看出, 这两种类型 CRS 约束下的肋骨的应力都很高, 最大 Von Mises 应力分别为 CRS A 132.5 MPa、CRS C 152.2 MPa, 研究表明儿童胸廓柔软, 肋骨不易骨折, 因此目前的应力变化不能预测 3 岁儿童是否会发生肋骨骨折损伤, 但可以定性分析两款 CRS 中儿童乘员肋骨的受力情况。对于 CRS A, 由于运动过程中受到护板的正向挤压力, 使得胸廓体积急剧减少, 肋骨侧向变形比较大, 导致第 5-8 根肋骨所受应力比较大; 而对于 CRS C,

图 11 CRS A 与 CRS C 约束下肋骨、胸骨、锁骨的 Von Mises 应力

结合运动学响应,在碰撞过程中,儿童乘员的躯干绕骨盆为中心的旋转角度更大,五点式安全带的约束力会分散一部分力作用于锁骨和胸骨,使得肋骨的变形较小。

(2) 肺组织。STITZEL 等^[15]利用动物(鼠)试验CT扫描和仿真的方法指出在有限元模型中,利用第一主应变能较好的预测肺部损伤,并预测肺组织发生损伤的第一主应变损伤阈值约为35%。如图12为THUMS 3YO在CRS A与CRS C约束下肺组织的第一主应变云图。从图12中可以看出,CRS A与CRS C中肺组织的最大第一主应变分别为148.8%、148.3%,且在CRS A比CRS C中的肺组织所受的应变在区域上相对较大,由此可以预测3岁儿童在动态加载过程中,肺组织会发生挫伤风险。肺组织发生损伤的部位主要分布在肋骨轮廓下方、肺动脉连接处以及支气管组织附近,在肺组织受到比较大的挤压时,这些部位附近的肺组织相比于肺动脉连接处、支气管组织比较柔软,在附近的肺部组织易形成拉扯运动,从而可能导致肺挫伤。

图12 CRS A与CRS C约束下肺组织的第一主应变云图

(3) 心脏。YAMADA 等^[16]研究表明,0~9岁儿童心肌组织的极限拉伸应变为 $62.6 \pm 6.9\%$,且心脏发生一般性挫伤的第一主应变损伤容忍极限值为30%^[17]。图13为THUMS 3YO在CRS A与CRS C约束下心脏的第一主应变云图。从应变云图中可以看出,CRS A与CRS C中心脏的最大第一主应变分别为64.18%、56.86%,仿真结果表明,在CRS A比CRS C中心脏所受到的第一主应变更大,并且在动态加载过程中,两款座椅中的儿童心脏均可能会

图13 CRS A与CRS C约束下心脏的第一主应变云图

出现挫伤风险。相比于五点式背带约束,前置护体型CRS对儿童乘员的胸部挤压力更大,从而造成胸腔体积更小,胸骨与脊柱之间的距离更短,胸骨压迫心脏,造成心脏挫伤。此外,在动态加载过程中,心脏在胸腔内的移动,也可能导致肺动脉或主动脉韧带处受到撕裂损伤。

(4) 肝脏。2002年TAMURA 等^[18]通过试验研究得出(猪)肝脏的最大压缩应力区间为0.127~0.192 MPa,超过了这个区间的最大值,肝脏就会发生撕裂出血。肝脏撕裂主要是在碰撞的过程中,肝脏向后移挤压脊柱造成的。图14所示为THUMS 3YO在CRS A和CRS C约束下肝脏的Von Mises应力云图。在CRS A与CRS C中肝脏的最大Von Mises应力分别为6.315 MPa、1.382 MPa,从应力云图中可看出,CRS C中的肝脏仅有极个别单元的应力值比较大,而CRS A中肝脏的最大应力单元区域相对更大,因TAMURA是通过使用小猪试验得出的肝脏的损伤阈值,因此并不能通过TAMURA得出的损伤阈值来准确预测有限元动态加载过程中肝脏的损伤,仅能预测在CRS A中的肝撕裂损伤风险较在CRS C中更高。

图14 CRS A与CRS C约束下肝脏的Von Mises应力

2.2 动物试验

2.2.1 小猪运动学响应

图15为前置护体型CRS A、CRS B与五点式背带型CRS C FF中小猪的运动学响应。在不同类型儿童座椅的约束下,小猪表现出不同的运动学响应。在前置护体型CRS A与CRS B中,小猪的胸部和腹部被护板所约束,在运动初始整体向前运动,当头部水平位移达到最大时,小猪躯干的旋转角度也达到最大。在回弹阶段,小猪有被弹起的趋势,此种现象的发生应该与护板的形状、小猪的身体特征以及运动过程中躯干的旋转角度有关。对于五点式背带型CRS C FF,小猪的上肢被五点式安全带的背带以及连接左右肩带的夹子约束,在运动过程中,小猪躯干最大弯曲角度也比较大,但是在回弹阶段仍然被五点式安全带约束在儿童座椅中。

图 15 CRS A、CRS B、CRS C FF 中小猪的运动学响应

2.2.2 损伤参数

表 3 列举了 7 头小猪在测试后的生理现象, 包括呼吸、角膜反射以及死亡行为。从表 3 中可以发现, 除后向安装的五点式背带型座椅中的小猪正常外, 其他小猪在碰撞后均出现不同程度的不正常生理现象, 其中前置护体型一款座椅 CRS B 的小猪在碰撞后 10 min 后死亡, 其他测试后小猪虽然没有死亡但也出现过度痉挛的行为; 前置护体型(CRS A、CRS B)中的小猪在测试后的呼吸心率急促, 且发现部分小猪无角膜反射, 而五点式背带型(CRS C RF)中的小猪的呼吸心跳均匀正常。对于测试后没有死亡现象的小猪, 两小时后通过注射过量的戊巴比妥钠对其实施安乐死。然后对测试后的每头小猪进行 X 射线透视与尸体解剖, 通过 ISS 评分来评价碰撞后小猪胸部软组织损伤程度。

表 3 小猪测试后的生理现象

编号	CRS 类型	呼吸	心率	角膜反射	行为	死亡时间
1602-2	CRS A	急促	急促	是	过度痉挛	碰撞后 2 h 安乐死
150442	CRS A	急促	急促	是	过度痉挛	碰撞后 2 h 安乐死
1602-1	CRS B	急促	急促	是	过度痉挛	碰撞后 2 h 安乐死
151105	CRS B	深大	无	是	死亡	碰撞后 10 min
150807	CRS C FF	急促	急促	是	过度痉挛	碰撞后 2 h 安乐死
151106	CRS C RF	正常	正常	是	正常	碰撞后 2 h 安乐死
160306	CRS C RF	正常	正常	是	正常	碰撞后 2 h 安乐死

表 4 显示了所有碰撞小猪的尸检结果以及 ISS 得分。通过尸体探查观察到, 前置护体型 CRS A 和 B 中的小猪发现胸腹部比较常见的损伤, 如肺挫伤、肝撕裂、冠状动脉撕裂, 此外在两款类型的 CRS 中均有发现脊髓硬膜下血肿等颈部损伤。其中, 为鉴定肺挫伤将每只小猪的肺组织切片进行 HE(Hematoxylin and

eosin)染色透视(图 16), 通过透视光镜观察到, 肺挫伤的组织切片出血量严重, 肺泡壁血管高度充血, 肺泡腔内有渗出液, 局部肺泡结构破坏。

图 16 肺组织切片 HE 染色

从表 4 中可以看出每头小猪的 ISS 评分最小为 0, 最大为 50。前置护体型 CRS 的 ISS 评分全部超过 25, 而且还伴有不同程度的胸腹部损伤。这表明对于坐在前置护体型座椅上的小猪在碰撞后, 即使不发生肋骨骨折, 但也会存在胸腹部内部器官软组织损伤的风险。五点式背带型 CRS 的 ISS 评分均不超过 25, 测试后的小猪全部存活, 仅发现了颈部椎管及硬膜下有血凝块损伤。结合视频中小猪的运动学响应, 发现在运动过程中五点式安全带的左右两肩带不能对小猪颈部的前后运动起到很好的约束, 造成头颈部的弯曲绕转角度过大而产生了颈部损伤。

表 4 尸检结果和 ISS 得分

编号	CRS 类型	部位	损伤(AIS 得分)	ISS 得分
1602-2	CRS A	颈部	脊髓硬膜下血肿(5)	34
		胸部	肺挫伤, 单侧(3)	
150442	CRS A	颈部	脊髓硬膜下血肿(5);	45
		胸部	肺挫伤, 双侧(4);	
		腹部	肝撕裂(2)	
1602-1	CRS B	颈部	脊髓硬膜下血肿(5)	38
		腹部	肝撕裂(2)	
		胸部	肺挫伤, 单侧(3)	
151105	CRS B	颈部	脊髓硬膜下血肿(5)	50
		胸部	肺挫伤, 双侧(4)	
150807	CRS C FF	胸部	冠状动脉撕裂(5)	25
		颈部	脊髓硬膜下血肿(5)	
151106	CRS C RF	颈部	非常小的脊髓硬膜下血肿(4)	16
160306	CRS C RF	无	无	0

3 讨论

通过有限元仿真和动物试验来分析前置护体型儿童座椅和五点式背带型儿童座椅中 3 岁儿童乘员的胸腹部软组织损伤。有限元仿真主要使用 Q3 模

型和 THUMS 3YO 儿童有限元模型;动物试验则通过使用 4 个月大小的西藏小猪来分析小猪的胸部和腹部损伤,猪本身作为人类的食用动物,用小猪做试验动物,在道德伦理上更容易被接受,符合当前国际上提倡试验动物的“3R”原则和动物保护及伦理要求^[19]。

在有限元仿真中, Q3 模型和 THUMS 3YO 儿童有限元模型的运动学响应和胸部压缩量存在很大的差异。造成这些差异的一个比较重要的因素可能是脊柱刚度。Q3 模型的脊柱被定义为刚体,没有变形,所以在运动的回弹阶段,骨盆会有被弹起的趋势,发生回弹阶段的时刻也会比儿童有限元模型更早。这与 HE 等^[20]关于 Q3 模型的研究具有相似的结果。因此,为了提高评价儿童约束系统防护性能准确性,修改 Q3 模型的脊柱刚度是很有必要的。

通过分析 3 岁儿童模型的 3 款假人的胸部损伤参数,胸部压缩量、胸部合成加速度以及胸腹部内脏器官的应力应变,其结果差别很大,这主要跟假人的内部结构有关。Q3 机械假人是欧洲最新的儿童安全座椅标准 UN R129 中规定使用的假人,假人内部安装有头、胸、腹部传感器,其生物逼真性和损伤评估能力更高,但目前关于碰撞假人在同一试验中反馈相同的反复性和再现性的条件值得探讨; Humanetics Innovative Solutions. Inc. 公司研发的 Q3 有限元模型作为试验假人的有限元模型,其重复性可以无限制使用; THUMS 3YO 模型是 2016 年由 Toyota Motor Corporation 和 Toyota Central R&D Labs 共同开发的。Q3 模型中没有详细的胸腹部内部软组织器官,只能通过头、胸、腹部传感器测得加速度、力等宏观参数;而 THUMS 3YO 模型内部没有传感器,但却包含了详细的胸腹部内脏软组织器官,通过应力应变分析可以得出更详细地损伤参数,此模型对探讨儿童乘员胸腹部软组织器官的损伤阈值具有指导意义。

通过分析 THUMS 3YO 在五点式背带型 CRS 和前置护体型 CRS 中胸腹部内脏软组织器官的应力应变,其肋骨、肝脏的 Von Mises 应力以及肺组织、心脏的第一主应变均超过了损伤极限,并且通过对比 THUMS 3YO 的胸部压缩率可以看出胸腹部发生挤压损伤的风险很大,但是对比 THUMS 3YO 的胸部黏性损伤 VC 值却发现胸腹部发生黏性损伤的风险几乎不存在。造成以上损伤矛盾的一个重要的原因可能是 3 岁儿童的生物力学特性与成人差异太大,而以上这些应力应变的损伤极限、胸部压缩量准则以及胸部黏性准则都是针对成人或者通过动物试验得出的阈值,所以仿真中的损伤结果仅仅只

能提供一个趋势,并不能准确预测。所以为更加准确地防止儿童乘员在碰撞过程中胸腹部内脏器官的损伤情况,制定出符合儿童乘员的胸腹部损伤容忍阈值具有重要的意义。

即使 Q3 模型的胸部压缩量小于法规值, THUMS 3YO 儿童人体有限元模型胸部压缩量还是远远超过了损伤阈值,并且在使用前置护体型座椅测试的小猪试验中,发现了肺挫伤和肝撕裂等损伤,但并没有发现骨折现象,这表明在碰撞期间,即使没有肋骨骨折,护板对胸部和腹部加载的力也可能造成胸腹部损伤。肺挫伤发生在胸腔内,产生的原因可能是由于运动加载阶段护板对胸部的压力过大,使得胸腔容积缩小,胸内压力增高,压迫肺脏,引起肺实质出血及水肿;而在回弹阶段外力消除时,变形的胸廓弹回,产生胸内负压,进而又导致原损伤区的附加损伤。肝撕裂常发生在胸骨正下方的腹部肝脏部位连接肝左叶与肝右叶的镰状韧带处,造成肝撕裂的原因可能是在动态加载过程中,儿童座椅的护板与小猪腹部直接接触的力过大产生的,还可能是因为胸部按压导致肝脏向下移动,使得镰状韧带拉力过大而产生肝撕裂。此外,在前置护体型座椅测试中,还发现了冠状动脉裂伤的损伤。而在五点式安全带型的儿童座椅中,小猪没有发现胸部和腹部损伤。

在小猪试验中,最常见的损伤还有脊髓硬膜下血肿。引起脊髓硬膜下血肿的原因有很多,主要有创伤因素、血液系统疾病、血管畸形等,结合视频中小猪碰撞过程中的运动学响应,小猪的颈椎过度弯曲,然后过度伸展,因此造成脊髓硬膜下血肿的原因可能是创伤因素,即脊柱外伤导致的局部血管破裂出血。脊髓硬膜下血肿损伤虽不会致死,但却最常见,在五点式背带型 CRS 和前置护体型 CRS 中均有发现,这也反映出 CRS 不能对儿童乘员颈部提供很好的支撑保护作用。

在评估小猪的损伤结果时,考虑儿童人体和小猪的解剖学差异性是很有必要的。小猪的头长颈粗,开始运动时脸部朝上,这使得头颈部的运动非常复杂,从表 4 中的尸检结果中可以看出大部分小猪均产生了颈部损伤。婴幼儿的头部相对身体而言又大又重,且颈部肌肉较弱,发生碰撞车祸或紧急制动时,婴儿的颈部会受到较大的剪切力,这与小猪碰撞后颈椎的状态有较大差异。在前置护体型座椅测试时,儿童假人的胸部与护板直接接触,胸骨可以约束颈部弯曲,而在小猪试验中颈部不能受到很好的约束而导致比较大的弯曲。在五点式安全带座椅测试时,由于小猪没有肩膀和锁骨,所以在测试时,

在胸部使用卡扣来夹紧左右肩带,而此时的五点式安全带并不能对小猪的头颈部提供很好的约束,同样也会导致颈部损伤。然而,因本文的主要研究对象在胸腹部,颈部差异在一定程度上会影响胸腹部损伤结果,但不会是主要影响因素,又猪的胸腔与人类的相似、血液生理生化值与人类相近^[21-22],因此利用 4 个月大小的小猪胸部损伤结果来预测 3 岁儿童乘员的损伤具有一定的参考价值。

4 结 论

通过小猪试验和有限元仿真分析 3 岁儿童乘员在前置护体型和五点式背带型儿童座椅中所受到的胸腹部软组织损伤,得出结论如下。

(1) 在有限元仿真中, Q3 模型的胸部压缩量与胸部合成加速度均在法规值范围内,但 THUMS 3YO 儿童人体有限元模型胸部压缩量更大,其中前置护体型 CRS 的压缩率达到了 39.25%,根据压缩量准则会造成 AIS 4 级损伤,同时死亡概率约为 50%。在前置护体型 CRS 中, THUMS 3YO 儿童乘员胸腹部内脏器官所受的应力应变在区域和数值上相对于五点式背带型 CRS 更大,发生胸腹部器官损伤的风险也更大。

(2) 在动物试验中,在五点式背带型 CRS 测试的小猪尸体探查结果中,未发现任何胸腹部损伤。在前置护体型 CRS 测试中,未发现肋骨骨折现象,但却发现了冠状动脉撕裂、肺挫伤、肝撕裂等胸腹部损伤,这表明 3 岁儿童在这种 CRS 约束方式下的动态加载试验中,即使没有肋骨骨折但也存在发生胸腹部损伤的风险。

参 考 文 献

- [1] STOCKMAN I. Safety for children in cars: focus on three point seatbelts in emergency events[D]. Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2016.
- [2] BOHMAN K, FREDRIKSSON R. Pretensioner loading to rear-seat occupants during static and dynamic testing[J]. Traffic Injury Prevention, 2014, 15(Supp1.): S111-S118.
- [3] 中国汽车技术研究中心. 中国儿童道路交通安全蓝皮书[M]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
China Automotive Technology Research Center. Blue book of child road safety in china[M]. Beijing: China Standard Press, 2017.
- [4] 胡佳. 基于试验和有限元仿真的儿童乘员正面和侧面碰撞安全研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
HU Jia. Research on child occupant safety in frontal and side impact based test and on the finite element simulation[D]. Chang Sha: Hunan University, 2008.
- [5] 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.
MIZUNO K, HAN Yong, CHEN Yiwei. Crash safety of passenger vehicles[M]. Beijing: China Communications Press, 2016.
- [6] HAN Y, PAN D, OUYANG J, et al. Study of chest injuries to 3yo child occupants seated in impact shield and 5-point harness CRSs[J]. Traffic Injury Prevention, 2017, 19(3): 274-279.
- [7] MIZUNO K, IWATA K, NAMIKIRI T, et al. Comparison of human FE model and crash dummy responses in various child restraint systems[J]. International journal of crashworthiness, 2009, 14(2): 139-149.
- [8] 韩勇, 卢晓萍, 谢金萍, 等. 在 ECE R129 实验条件下 Q3 和 THUMS 3YO 有限元模型的响应差异分析[J]. 汽车安全与节能学报, 2016, 7(3): 291-298.
HAN Yong, LU Xiaoping, XIE Jinping, et al. Comparison of different response between Q3 and THUMS 3YO finite element models under ECE R129 test conditions[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2016, 7(3): 291-298.
- [9] KROELL C K, SCHNEIDER D C, NAHUM A M. Impact tolerance and response of the human thorax[C]// Stapp Car Crash Conference. November 17-19, 1971, Coronado, California. Pennsylvania: SAE, 1971, 84-134.
- [10] VIANO D C, LAU I V. A viscous tolerance criterion for soft tissue injury assessment[J]. Journal of Biomechanics, 1988, 21(5): 387-399.
- [11] VIANO D C, LAU I V. Thoracic impact: a viscous tolerance criterion[C]// Proceedings of the 10th International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles (ESV). July 1-4, 1985; Oxford, England. Pennsylvania: SAE, 1985: 104-114.
- [12] LAU I V, VIANO D C. The viscous criterion-bases and applications of an injury severity index for soft tissues[C]// Stapp Car Crash Conference. October 27-29, 1986, San Diego California. Pennsylvania: SAE, 1986, 123-142.
- [13] 刘宝松, 王正国, 翁格文, 等. 胸部撞击时胸壁的动力学响应与胸部损伤[J]. 中华危重病急救医学, 1999, 11(6): 338-341.
LIU Baosong, WANG Zhengguo, WENG Gewen, et al. Dynamic response of chest wall and thoracic injuries during chest impact [J]. Chinese Critical Care Medicine, 1999, 11(6): 338-341.
- [14] KEMPER A R, MCNALLY C, PULLINS C A, et al. The biomechanics of human ribs: Material and structural properties from dynamic tension and bending tests[J].

- Stapp Car Crash Journal, 2007, 51: 235-273.
- [15] STITZEL J D, GAYZIK F S, HOTH J J, et al. Development of a finite element-based injury metric for pulmonary contusion part I: model development and validation[J]. Stapp Car Crash Journal, 2005, 49(49): 271-289.
- [16] YAMADA H. Strength of biological materials[M]. Baltimore: Williams & Wilkins, 1970.
- [17] 崔世海, 单蕾蕾, 李海岩, 等. 6 岁儿童乘员胸部有限元模型验证及损伤分析[J]. 汽车工程学报, 2016, 6(6): 418-424.
- CUI Shihai, SHAN Leilei, LI Haiyan, et al. Development and validation of a 6-year-old occupant thorax finite element model and impact injury analysis[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2016, 6(6): 418-424.
- [18] TAMURA A, OMORI K, MIKI K, et al. Mechanical characterization of porcine abdominal organs[J]. Stapp Car Crash Journal, 2002, 46(46): 55
- [19] 袁进, 吴清洪, 陈丽, 等. 西藏小型猪、小猎犬与人血液流变学指标的比较研究[J]. 南方医科大学学报, 2009, 29(7): 1428-1430.
- YUAN Jin, WU Qinghong, CHEN Li, et al. Comparative studies of hemorheological parameters in Tibet mini-pigs, Beagle dogs and human[J]. Journal of Southern Medical University, 2009, 29(7): 1428-1430.
- [20] HE J, ZHANG X, XU C. Comparison of Q-series child dummy and human model restrained in shield CRS in frontal impact[J]. International Journal of Crashworthiness, 2018, 23(5): 486-496.
- [21] 张金换, 许述财, 杨欣, 等. 汽车儿童乘员碰撞伤害与防护[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- ZHANG Jinhuan, XU Shucui, YANG Xin, et al. Child Occupant Injury and Protection in Motor Vehicle Crashes[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.
- [22] 顾为望, 曾昭智, 刘运忠, 等. F1 代西藏小型猪早期生长发育特点[J]. 中国实验动物学报, 2006, 14(4): 307-310.
- GU Weiwang, ZENG Zhaozhi, LIU Yunzhong, et al. Characterization of growth performance of young Tibet mini-pigs[J]. Acta Laboratorium Animalis Scientia Sinica, 2006, 14(4): 307-310.
-
- 作者简介: 韩勇(通信作者), 男, 1984 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为人体损伤生物力学, 汽车碰撞安全。
E-mail: Yonghan@xmut.edu.cn
彭乐园, 女, 1992 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为汽车碰撞安全。
E-mail: pengleyuan0919@foxmail.com