

文章编号: 1004-7220(2019)05-0548-07

肥胖对乘员碰撞损伤影响机制的研究进展

崔世海^{1,2}, 段海彤^{1,2}, 李海岩^{1,2}, 贺丽娟^{1,2}, 吕文乐^{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:现有汽车安全设计和法规主要是基于标准体型的50百分位人群,在肥胖人群不断增长的趋势下,研究肥胖乘员的碰撞损伤和防护越来越重要。现有研究中多采用事故统计分析、尸体实验、多刚体模型和有限元模型等方法探讨肥胖乘员的损伤机制,肥胖对乘员的碰撞损伤主要有泡沫效应假说、躯干几何形状变化假说和质量效应假说等多种提法,可见肥胖乘员的损伤机制尚不明确。在全面总结肥胖乘员的碰撞损伤机制基础上,阐述当前肥胖乘员碰撞损伤研究所面临的问题及未来研究的发展方向。

关键词:肥胖乘员; 损伤机制; 泡沫效应; 质量效应

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2019.05.015

Research Progress about the Effect of Obesity on Occupant Impact Injury Mechanism

CUI Shihai^{1,2}, DUAN Haitong^{1,2}, LI Haiyan^{1,2}, HE Lijuan^{1,2}, LÜ Wenle^{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: Modern vehicle safety design and safety regulations are mostly based on 50th percentile populations. However, with the increase of obese populations, it is very important to investigate the injury mechanism and protection of obese occupant. Methods such as traffic accidents statistics, cadaver experiments, multi-body modeling and finite element modeling, are currently used to study the injury mechanism of obese occupants. Different hypotheses including cushion effect, body geometrical effect and mass increasing effect have been put forward to explain the effect of obesity on occupant injury mechanism, which means that its mechanism is still uncertain. The impact injury mechanisms of obese occupant were comprehensively summarized. Furthermore, the problems confronted by the research of current obese occupant impact injury and future investigations were proposed in this study.

Key words: obese occupant; injury mechanism; cushion effect; mass increasing effect

国内外相关研究人员一直致力于不断提高汽车碰撞安全性能。近年来,在全球范围内肥胖人群不断增长的趋势下,尤其随着肥胖儿童乘员数量的增多,肥胖乘员的碰撞损伤安全逐渐受到越来越多的关注^[1-4]。目前乘员损伤机制研究及损伤评价的

工具主要包括有限元模型^[5-7]、尸体样本^[8]以及假人模型^[9]等。在汽车安全领域,汽车碰撞安全法规中采用的乘员碰撞损伤准则主要基于50百分位假人模型制定,乘员保护装置也是针对标准体型乘员开发。而由于肥胖乘员体型的不同,现有基于标准

收稿日期:2018-04-04; 修回日期:2018-08-30

基金项目:国家自然科学基金项目(81471274,81371360)

通信作者:崔世海,教授, E-mail: shihaicui@tust.edu.cn

体型的乘员损伤准则和保护装置是否适合肥胖乘员,是一个值得探讨的问题。

肥胖对乘员损伤风险的影响存在诸多争议。已有统计研究表明,交通事故中乘员损伤风险与身体质量指数(body mass index, BMI)具有一定相关性^[10-12]。同时也有部分研究指出,交通事故中肥胖乘员死亡率明显增加^[13-17]。Brown等^[18]综述了肥胖对交通安全的影响,指出目前仍无法明确两者之间的关系,尚需更多深入研究明确两者的内在联系。与标准体型乘员相比,肥胖乘员在汽车碰撞中的损伤机制尚不明确,存在多种不同的假说。Zhang等^[19]认为,BMI及体质量对男性与女性胸部撞击峰值力的影响相反,在评估乘员损伤风险时需要考虑群体特征变化带来的影响。

本文对近10年内研究肥胖对乘员损伤影响的相关文献进行总结,旨在阐述肥胖对乘员损伤的影响,综述其损伤机制,为肥胖乘员损伤机制的研究以及乘员保护装置的开发提供参考,同时对当前肥胖乘员碰撞损伤研究面临的问题及未来的发展方向给出建议。

1 肥胖对乘员碰撞损伤影响机制

1.1 泡沫效应假说

泡沫效应假说认为肥胖乘员增加的脂肪组织像泡沫一样,能够在碰撞过程中起到缓冲效果,具有一定保护作用,降低乘员损伤风险。

1.1.1 软组织缓冲效应 Arbabi等^[20]认为,乘员BMI会影响碰撞损伤模式及损伤风险。189例详细交通事故数据的统计分析结果表明,偏瘦、超重和肥胖3组人群的上肢、头部和胸部最高损伤评分(MAIS)无显著统计学差异;与正常及过低体质量成员相比,超重乘员的损伤严重度(ISS)评分和腹部MAIS评分显著降低,肥胖乘员的死亡风险更高。这可能是由于超重与肥胖乘员增加的脂肪组织类似于气垫起到缓冲效果,而质量和动量没有显著增加。而在肥胖乘员中,与身体质量成正比的能量转移和动量增加带来的损伤可能会超过缓冲效果。肥胖乘员死亡率更高,这可能是由于伤后并发症及护理困难造成。该研究中的超重组包括肌肉质量增加的乘员,而不是典型的脂肪质量增加导致的“超重”,故无法明确超重乘员的缓冲效应来自脂肪还是肌肉。

1.1.2 皮下脂肪厚度增加对乘员保护影响 Wang等^[21]研究发现,在车辆碰撞过程中,皮下脂肪的厚度会影响腹部损伤容限,增加的皮下脂肪组织可以缓冲腹部区域受到的冲击力,对乘员起到一定保护作用,与Arbabi等^[20]统计分析结果相一致。该研究基于美国碰撞伤害及工程研究网络中心(Injury Research and Engineering Network, CIREN)年龄19~65岁的67名伤者CT数据,分析皮下脂肪厚度与年龄、身高、身体质量、BMI、ISS以及头部、颈部、胸部、腹部、上肢、下肢MAIS等的相关性。结果表明,脂肪厚度增加与身体质量及BMI增加显著相关,与ISS呈显著负相关;随着脂肪厚度增加,头、腹部损伤严重程度降低,下肢损伤严重程度升高。皮下脂肪的保护作用与性别、人体结构有关。但该研究的统计样本量较小,可能会对统计分析结果准确性有一定影响,且没有考虑皮下脂肪厚度对不同内脏器官的损伤风险影响。

Harbaugh等^[22]利用2003~2015年119名年龄在1~18岁机动车前碰撞中受伤患者的计算机断层扫描数据,采用分析形态学技术定量评估皮下脂肪横切面积和腹部损伤的关系,发现皮下脂肪组织面积百分比与腹部MAIS 2+损伤无显著,认为儿童乘员在前碰撞中的“缓冲效应”并不明显。

1.2 躯干几何形状变化假说

躯干几何形状变化假说(即体型假说)认为,肥胖乘员体型上的改变,使其安全带佩戴路径发生变化,在碰撞过程中腰带的作用位置由骨盆两侧髂前上棘变为柔软的腹部,同时与骨骼距离更远,增加了安全带松弛量,进而导致其损伤风险更高。

Reed等^[23-24]通过量化安全带的上边缘在骨盆左右两侧髂前上棘(anterior superior iliac spine, ASIS)的横向位置以及从门锁板到外锚固间腰带的长度(见图1),对志愿者佩戴安全带位置进行研究。测量结果显示,肥胖乘员的安全带佩戴路径与骨骼距离较远,引起安全带松弛,增加乘员偏移量及其与车内部接触的可能性及严重程度。肥胖乘员具有较差的安全带佩戴路径,且与肩带佩戴位置相比,BMI对腰带佩戴位置影响显著。另外,腰带相对于骨盆佩戴位置较高增加了“下潜”风险。该研究适用于静态安全带佩戴评估,未考虑乘员的运动学响应带来的影响。

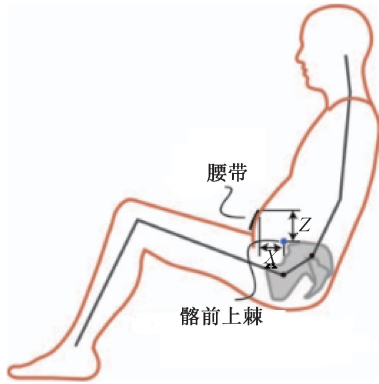
图1 腰带佩戴位置测量方法^[23]

Fig.1 Measurement of fit location for lap belt

Wang 等^[25]提出,能够适应乘员大小和体型的安全带系统可提高对后排座椅上肥胖乘员的保护。BMI 较高与头部和臀部偏移量增大有关。安全带佩戴路径的升高增加了臀部向前偏移量和躯干前倾角,使乘员具有更高的下潜风险。该研究基于 Shi 等^[26]构建的四水平 BMI (25、30、35 和 40 kg/m²) 有限元模型,采用全因子实验设计进行 48 次正面碰撞仿真。当 $P < 0.05$ 时,表示变量与腰带位置显著相关。分析结果显示,腰带位置对除胸部倾斜量以外的其他因变量具有显著影响,腰带佩戴位置较高会导致膝盖 ($P = 0.000$) 和骨盆 ($P = 0.000$) 偏移量增大、躯干角 ($P = 0.000$) 增大以及头部前倾量 ($P = 0.001$) 减小,使乘员下潜风险更高。该研究采用有限元模型主要从运动学响应进行分析,未提供可参考的力学响应数据。

1.3 质量影响假说

质量假说认为肥胖乘员的身体质量更大,在碰撞过程中自身动能更大,需要约束系统提供更大的约束力阻止其运动。由身体质量带来的惯性效应比脂肪组织带来的缓冲效应更显著,惯性效应引发身体前倾量增大,使其损伤风险更高。

1.3.1 肥胖乘员损伤模型概念 Viano 等^[27]研究认为,肥胖乘员身体质量的增加使碰撞过程中自身动能增大,在身体结构刚度不变的情况下,压缩量增大使损伤风险增大。同时,肥胖驾驶员、乘员较标准体型驾驶员、乘员具有更高的损伤风险。该研究基于 1993~2004 年美国国家汽车取样系统/耐撞性数据库 (NASS-CDS) 数据,对同一车祸中的驾驶员与右前方乘员损伤风险进行配对分析,包括 4 组,

分别为肥胖驾驶员与正常乘员、肥胖乘员与正常驾驶员、正常驾驶员与正常乘员、正常乘员与正常驾驶员。分析结果表明,在机动车碰撞中,肥胖会增加乘员严重及致命损伤的风险。乘员身体的动能受安全带、气囊或者内部接触约束,质量增加使动能增大,进而需要约束系统提供的约束力越大。碰撞时肥胖乘员的动能:

$$E = \frac{1}{2}(m + \Delta m)v^2 \quad (1)$$

式中: m 为乘员平均质量; Δm 为某一 BMI 下所增加的体质量; v 为碰撞过程中的速度。乘员身体的压缩量与损伤相关,压缩量越大损伤风险越高。碰撞动能与压缩量及身体结构刚度的关系如下:

$$E = \frac{1}{2}kx^2 \quad (2)$$

式中: x 为压缩量; k 为身体结构刚度。动能随增加的质量 Δm 增大,身体结构刚度 k 不变,从而导致相同程度碰撞时肥胖乘员的身体压缩量更大,其压缩量与平均质量乘员压缩量关系如下:

$$x = \sqrt{\left(1 + \frac{m}{\Delta m}\right)} x_{\text{avg}} \quad (3)$$

$$x_{\text{avg}} = v \sqrt{\frac{m}{k}}$$

式中: x_{avg} 为平均质量乘员的压缩量。肥胖乘员身体压缩量的增加直接导致了其损伤风险的增加:

$$r = \sqrt{1 + \frac{\Delta m}{m}} \quad (4)$$

式中: r 为损伤风险。

Kim 等^[28]认为,身体质量及脂肪分布影响其损伤严重程度与损伤模式,身体质量增大带来的惯性效应比脂肪组织带来的“缓冲效应”更显著。该研究以 MADYMO 中标准 50 百分位男性 (BMI = 25 kg/m²) 和 5 百分位女性 (BMI = 22 kg/m²) 多刚体假人模型为基准模型,将躯干脂肪组织模型与增加的质量及肢体尺寸一起整合到多刚体模型中,分别构建 BMI 为 30、35 kg/m² 男女超重驾驶员,并参考 Forman 等^[29]的后排乘员滑车实验进行仿真。研究发现,超重乘员的躯干脂肪组织有助于减轻腹部损伤,但身体质量带来的惯性效应比脂肪组织带来的缓冲效应更显著,增加了除腹部之外的其他区域 (如头部、胸部和下肢) 的损伤风险。另外,由于男

性与女性在身高、身体质量与脂肪组织分布上的不同,导致男性的躯干偏移量更大。该研究构建了具有真实脂肪组织几何形状的超重男女驾驶员假人模型,指出男女驾驶员在不同脂肪分布上引发的损伤差异。但该研究采用的是多刚体模型,其生物仿真度还需进一步提高。

1.3.2 肥胖乘员的运动学响应 Michaelson 等^[30]研究发现,肥胖乘员肋骨、下颈椎、膝盖的损伤风险比标准体型乘员更高。该研究采用 BMI 分别为 17.9、40.0、18.4 kg/m² 的 3 具尸体样本进行台车实验,发现碰撞中肥胖乘员骨盆前倾量较大,导致躯干相对向后倾,增加了膝盖损伤风险。由于软组织和肌肉的变形,使乘员的皮下软组织与骨结构之间可能存在一些相对运动,与非肥胖乘员相比,肥胖乘员皮下组织厚度的增加使这个相对运动增大。3 组试验均观测到下潜现象,但未检查到腹部损伤,这与 Kallieris 等^[31]的研究结果一致。

Forman 等^[29]采用 3 具标准体型尸体样本和 2 具肥胖尸体样本 (BMI > 30 kg/m²) 进行正面碰撞台车实验,发现肥胖乘员承受更大的安全带峰值力,且头部、膝盖和骨盆的前倾量更大,这主要是由惯性效应带来的影响,该结果与 Jakobsson 等^[32]的研究结论一致。

Kent 等^[33]的研究支持了 Viano 等^[27]提出的损伤模型概念,指出与非肥胖乘员相比,肥胖乘员较大的身体质量使得碰撞过程中的动能更大,需要约束系统提供更大的约束力阻止其运动。该研究采用 3 具肥胖尸体与 5 具非肥胖尸体进行台车实验,尸体样本的运动学响应如图 2 所示。肥胖组发生类似下潜现象,具有更大的臀部前倾量和较小的躯干前倾量。腰带从髌骨上滑移到较软的腹部,无法及时约束乘员及腰带,以及髌前上棘间皮下组织厚度的增加,均导致了臀部前倾量的增大。这从运动学上降低了头部损伤风险,但也导致肩带载荷主要集中在比较柔软的下胸部,增加了肋骨和肺部的损伤风险。但该研究中没有提供详细的实验设置,头部、肩部、臀部和膝盖的峰值偏移量是唯一的可参考值,不利于参考该研究进行肥胖乘员仿真试验的标定。

1.3.3 肥胖对乘员的腹部侵入量影响 Untaroiu 等^[8]在 BMI 为 5.6~31.2 kg/m² 的 4 具尸体实验中观察到两种不同模式的腹部侵入率和损伤响应时

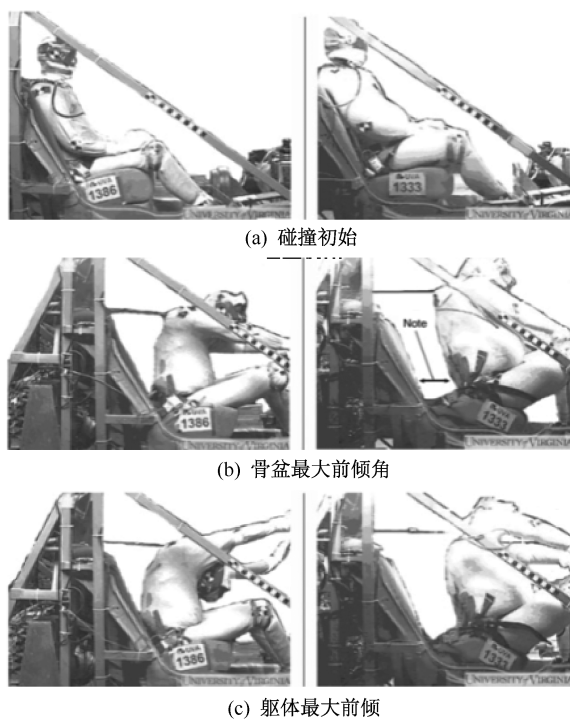


图 2 非肥胖样本与肥胖样本的运动学响应^[33]

Fig.2 Kinematics of a non-obese and an obese cadavers

(a) Initial impact, (b) The maximum pelvic anteversion angle, (c) The maximum body anteversion

间历程。在 BMI 较低的尸体实验中,腹部侵入率增加到 1 个峰值后降低到 0;在 BMI 较高的尸体实验中检测到腹部损伤,其腹部侵入率在第 1 峰值后迅速降低至接近零值后到达第 2 个峰值。该研究认为,较高 BMI 组出现腹部损伤是由于肥胖尸体样本被压缩的腹部质量更大,需要更长的时间间隔达到平衡。另外,实验中检测到的脾脏损伤可能与内部器官的“挤压”或在压缩过程中通过腹部传播的压力波有关。

1.3.4 质量与体型对乘员损伤影响对比 Turkovich 等^[34]认为,肥胖乘员的身体质量是影响其损伤风险最重要的因素,仅由 BMI 增加导致的乘员躯干与安全带相互作用的变化,对损伤风险影响不显著。躯干与安全带相互作用的变化与质量增加的叠加,改变了乘员的整体运动学特性,增加了其下肢的损伤风险。该研究建立了质量、修正躯干和组合 3 个系列的多刚体模型。修正躯干模型由 Reed 等^[35]开发的 BMI 分别为 25、30 和 39 kg/m² 的统计学躯干表面几何模型整合到 BMI 为 25 kg/m² 的多

刚体模型中得到。组合模型基于 Lee 等^[36]开发的腹部有限元模型,结合躯干几何表面添加脂肪组织,构建了 BMI 为 30、35 和 40 kg/m² 的腹部有限元模型(见图 3),其中内脏采用 Ruan 等^[37]的线性黏弹性材料,采用 Foster 等^[38]的安全带加载条件,将各个有限元模型输出的腹部受力与变形数据导入到相应 BMI 的修正躯干多刚体模型中。采用部分因子实验设计(design of experiments, DOE)分析肥胖对乘员损伤的影响(见图 4)。

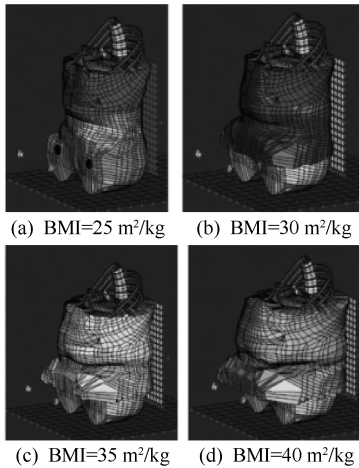


图 3 不同 BMI 值腹部有限元模型^[34]

Fig.3 Finite element models of abdomen with different BMIs (a) BMI = 25 m²/kg, (b) BMI = 30 m²/kg, (c) BMI = 35 m²/kg, (d) BMI = 40 m²/kg

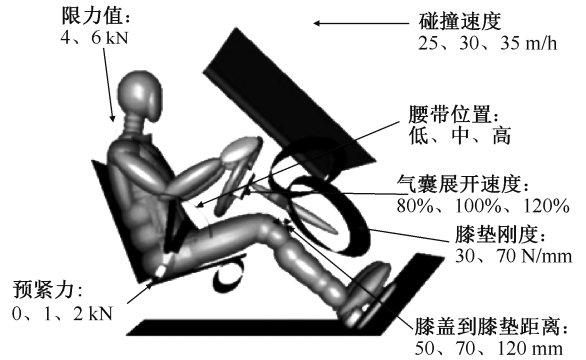


图 4 DOE 分析的因素及其水平^[34]

Fig.4 Factors used in the DOE and their corresponding levels

使用多刚体假人模型可以将质量与躯干几何形状两种的混淆的损伤机制分离并进行独立研究,这是使用尸体实验无法完成的。多刚体模型主要体现了乘员的运动学特性,无法反映内部器官力学响应情况。修正躯干模型中添加的脂肪组织没有给出详细材料参数,这使后续研究难以使用其进行标定。表 1 总结了文献中肥胖人群损伤机制及评价工具的研究现状。这些研究中存在的差异,可能来自于研究设计的差异、BMI 分类标准、纳入排除标准、协变量的调整、创伤数据的来源和样本量的大小,所有这些都限制了研究结果的普遍性。

表 1 肥胖乘员损伤机制研究汇总

Tab.1 Summary of injury mechanism of obese occupant

作者	研究手段	主要结论	评价参数
Untarou 等 ^[8]	尸体实验	具有不同的腹部损伤模式,出现脾脏损伤	安全带力、腹部侵入率与压缩比、AIS 评分
Arbabi 等 ^[20]	事故数据	增加的脂肪具有一定保护作用	ISS, MAIS 评分
Wang 等 ^[21]	CT 数据	增加的皮下脂肪可降低腹部损伤	ISS, MAIS 评分
Harbaugh 等 ^[22]	CT 数据	儿童乘员的“缓冲效应”并不明显	MAIS 评分
Reed 等 ^[23]	志愿者测量	肥胖乘员的安全带佩戴路径增加了其损伤风险及严重程度	佩戴位置
Wang 等 ^[25]	有限元模型	安全带佩戴路径升高将增大下潜风险	运动学响应
Viano 等 ^[27]	NASS-CDS 数据	提出肥胖乘员损伤模型,质量的增加使肥胖乘员损伤风险更高	MAIS 评分
Kim 等 ^[28]	多刚体模型	增加的身体质量引发的惯性效应比脂肪组织带来的缓冲效应影响更显著	HIC、胸部压缩量与加速度、VC 值、股骨力
Forman 等 ^[29]	尸体实验	肥胖乘员安全带峰值力更大,头部、膝盖和骨盆的前倾量更大	运动学响应、AIS 评分、安全带力
Michaelson 等 ^[30]	尸体实验	肥胖乘员肋骨、下颈椎、膝盖的损伤风险更高	运动学响应、AIS 评分
Kent 等 ^[33]	尸体实验	身体质量增大使碰撞中的动能更大	运动学响应
Turkovich 等 ^[34]	多刚体模型	身体质量对其损伤风险影响最显著	HIC、胸部变形、股骨力标准值

2 结语与展望

与标准体型乘员相比,肥胖乘员损伤机制的研究仍较少,其损伤机制尚不明确。目前十分缺少可用于肥胖乘员损伤机制研究及损伤评价的工具,包括有限元模型、尸体样本以及假人模型等,今后开展该方面研究可从以下几方面进行:

(1) 构建具有真实解剖学结构的成人肥胖乘员及行人有限元模型。肥胖尸体样本获取困难,导致可用于研究的尸体实验数据十分有限,多刚体模型多用于研究其运动学响应,有限元模型能够反应碰撞过程中的力学响应,可用来研究损伤机制、确定损伤阈值及评价损伤。

(2) 明确儿童肥胖分级,着手研究肥胖儿童乘员的损伤机制。已有研究表明,儿童与成人在生理结构上的不同会导致其具有不同的损伤模式,肥胖儿童数量与日俱增,有必要细化儿童肥胖分级,研究其损伤机制以便更好对肥胖儿童乘员实施保护。

(3) 目前研究肥胖乘员损伤的尸体实验、仿真试验均以正面碰撞为主,在侧面碰撞方面的空白有待填补。应结合尸体实验与有限元模型和多刚体模型等研究手段,致力于得到具有普遍性的结论,明确肥胖乘员损伤机制,开发防护装置。

(4) 研究皮下脂肪组织力学性能。对于肥胖乘员而言,无论是缓冲效应假说、质量变化假说以及体型变化假说,其根本原因都是皮下脂肪组织的增加。因此,明确皮下脂肪组织力学性能及材料参数,是研究肥胖乘员损伤机制及开发护具的基础。

参考文献:

[1] HALES CM, FRYAR CD, CARROLL MD, *et al.* Trends in obesity and severe obesity prevalence in US youth and adults by sex and age, 2007-2008 to 2015-2016 [J]. JAMA, 2018, 319(16): 1723-1725.

[2] ABARCA-GÓMEZ L, ABDEEN ZA, HAMID ZA, *et al.* Worldwide trends in body-mass index, underweight, overweight, and obesity from 1975 to 2016: A pooled analysis of 2416 population-based measurement studies in 128.9 million children, adolescents, and adults [J]. Lancet, 2017, 390(10113): 2627-2642.

[3] FAN JG, KIM SU, WONG VW. New trends on obesity and NAFLD in Asia [J]. J Hepatol, 2017, 67(4): 862-873.

[4] 王烁,董彦会,王政和,等. 1985-2014年中国7~18岁学生

超重与肥胖流行趋势[J]. 中华预防医学杂志, 2017, 51(4): 300-305.

[5] 李海岩,潘云凤,阮世捷,等. 生长板材料属性对6岁儿童乘员膝关节损伤影响分析[J]. 医用生物力学, 2017, 32(3): 213-219.

LI HY, PAN YF, RUAN SJ, *et al.* Analysis of growth plate material property effect on knee injury of six-year-old child occupant [J]. J Med Biomech, 2017, 32(3): 213-219.

[6] 贺丽娟,毋乃卿,阮世捷,等. 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[J]. 医用生物力学, 2017, 32(4): 307-312.

HE LJ, WU NQ, RUAN SJ, *et al.* Development and validation for finite element model of one-year-old toddler head with detailed anatomical structures [J]. J Med Biomech, 2017, 32(4): 307-312.

[7] 应龙,葛如海,张学荣,等. 6岁儿童胸部改进人体模型的建立与验证[J]. 医用生物力学, 2017, 32(2): 103-108.

YING L, GE RH, ZHANG XR, *et al.* Establishment and validation of improved six-year-old pediatric thorax human model [J]. J Med Biomech, 2017, 32(2): 103-108.

[8] UNTAROIU CD, BOSE D, LU YC, *et al.* Effect of seat belt pretensioners on human abdomen and thorax: Biomechanical response and risk of injuries [J]. J Trauma Acute Care Surg, 2012, 72(5): 1304-1315.

[9] AMIRI S, NASERKHAKI S, PARNIANPOUR M. Modeling and validation of a detailed FE viscoelastic lumbar spine model for vehicle occupant dummies [J]. Comput Biol Med, 2018, 99: 191-200.

[10] HARTKA TR, CARR HM, SMITH BR, *et al.* Does obesity affect the position of seat belt loading in occupants involved in real-world motor vehicle collisions? [J]. Traffic Inj Prev, 2018, 19(s1): S70-S75.

[11] JEHL D, GEMME S, JEHL C. Influence of obesity on mortality of drivers in severe motor vehicle crashes [J]. Am J Emerg Med, 2012, 30(1): 191-195.

[12] ZHANG K, CAO L, WANG Y, *et al.* Impact response comparison between parametric human models and postmortem human subjects with a wide range of obesity levels [J]. Obesity, 2017, 25(10): 1786-1794.

[13] CHOBAN PS, WEIRETER LJ, MAYNES C. Obesity and increased mortality in blunt trauma [J]. J Trauma, 1991, 31(9): 1253-1257.

[14] MOCK CN, GROSSMAN DC, KAUFMAN P, *et al.* The relationship between body weight and risk of death and serious injury in motor vehicle crashes [J]. Accid Anal Prev, 2002, 34(2): 221-228.

[15] VIANO DC, PARENTEAU CS. Crash injury risks for obese occupants [C]// Proceedings of ASME International Design Engineering Technical Conferences. USA: SAE, 2008.

- [16] JOSEPH B, HADEED S, HAIDER AA, *et al.* Obesity and trauma mortality: Sizing up the risks in motor vehicle crashes [J]. *Obes Res Clin Pract*, 2017, 11(1): 72-78.
- [17] BHATTI JA, NATHENS AB, REDELMEIER DA. Driver's obesity and road crash risks in the United States [J]. *Traffic Inj Prev*, 2016, 17(6): 604-609.
- [18] BROWN V, MOODIE M, CARTER R. Evidence for associations between traffic calming and safety and active transport or obesity: A scoping review [J]. *J Transp Health*, 2017, 7(Part A): 23-37.
- [19] ZHANG K, CAO L, FANTA A, *et al.* An automated method to morph finite element whole-body human models with a wide range of stature and body shape for both men and women [J]. *J Biomech*, 2017, 60: 253-260.
- [20] ARBABI S, WAHL WL, HEMMILA MR, *et al.* The cushion effect [J]. *J Trauma Acute Care*, 2003, 54(6): 1090-1093.
- [21] WANG SC, BEDNARSKI B, PATEL S, *et al.* Increased depth of subcutaneous fat is protective against abdominal injuries in motor vehicle collisions [J]. *Annu Proc Assoc Adv Automot Med*, 2003, 47: 545-559.
- [22] HARBAUGH CM, ZHANG P, HENDERSON B, *et al.* Evaluating the "cushion effect" among children in frontal motor vehicle crashes [J]. *J Pediatr Surg*, 2018, 53(5): 1033-1036.
- [23] REED MP, EBERT-HAMILTON SM, RUPP JD. Effects of obesity on seat belt fit [J]. *Traffic Inj Prev*, 2012, 13(4): 364-372.
- [24] REED MP, EBERT SM, HALLMAN JJ. Effects of driver characteristics on seat belt fit [J]. *Stapp Car Crash J*, 2013, 57: 43-57.
- [25] WANG Y, BAI Z, CAO L, *et al.* A simulation study on the efficacy of advanced belt restraints to mitigate the effects of obesity for rear-seat occupant protection in frontal crashes [J]. *Traffic Inj Prev*, 2015, 16(Suppl 1): S75-S83.
- [26] SHI X, CAO L, REED MP, *et al.* Effects of obesity on occupant responses in frontal crashes: A simulation analysis using human body models [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2015, 18(12): 1280-1292.
- [27] VIANO DC, PARENTEAU CS, EDWARDS ML. Crash injury risks for obese occupants using a matched-pair analysis [J]. *Traffic Inj Prev*, 2008, 9(1): 59-64.
- [28] KIM JE, KIM IH, SHUM PC, *et al.* A computational study of injury severity and pattern sustained by overweight drivers in frontal motor vehicle crashes [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2014, 17(9): 965-977.
- [29] FORMAN J, LOPEZ-VALDES FJ, LESSLEY D, *et al.* The effect of obesity on the restraint of automobile occupants [J]. *Stapp Car Crash J*, 2009, 53: 25-40.
- [30] MICHAELSON J, FORMAN J, KENT R, *et al.* Rear seat occupant safety: Kinematics and injury of PMHS restrained by a standard 3-point belt in frontal crashes [J]. *Stapp Car Crash J*, 2008, 52: 295-325.
- [31] KALLIERIS D, MELLANDER H, SCHMIDT G, *et al.* Comparison between frontal impact tests with cadavers and dummies in a simulated true car restrained environment [J]. *Stapp Car Crash J*, 1982, 26: 353-367.
- [32] JAKOBSSON L, LINDMAN M. Does BMI (body mass index) influence the occupant injury risk pattern in car crashes [C]//Proceedings of the International Research Council on the Biomechanics of Impact. Prague: IRCOBI, 2005: 427-430.
- [33] KENT RW, FORMAN JL, BOSTROM O. Is there really a "cushion effect"? A biomechanical investigation of crash injury mechanisms in the obese [J]. *Obesity*, 2010, 18(4): 749-753.
- [34] TURKOVICH M, HU J, ROOSMALEN L, *et al.* Computer simulations of obesity effects on occupant injury in frontal impacts [J]. *Int J Crashworthines*, 2013, 18(5): 502-515.
- [35] REED MP, PARKINSON MB. Modeling variability in torso shape for chair and seat design [C]//Proceedings of ASME 2008 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. USA: ASME, 2008: 561-569.
- [36] LEE JB, YANG KH. Development of a finite element model of the human abdomen [J]. *Stapp Car Crash J*, 2001, 45: 79-100.
- [37] RUAN JS, EL-JAWAHRI R, BARBAT S, *et al.* Biomechanical analysis of human abdominal impact responses and injuries through finite element simulations of a full human body model [J]. *Stapp Car Crash J*, 2005, 49: 343-366.
- [38] FOSTER CD, HARDY WN, YANG KH, *et al.* High-speed seatbelt pretensioner loading of the abdomen [J]. *Stapp Car Crash J*, 2006, 50: 27-51.