



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20150014

基于颈椎动力学响应的座椅被动安全性研究

张帆, 薛强, 程大伟, 刘建明, 云月胜

(天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室, 天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

摘要: 为研究汽车后碰撞中不同的座椅靠背结构对颈部损伤的影响, 基于人体解剖学和实际座椅测量数据构建了人-座椅系统有限元模型. 通过后碰撞仿真模拟, 得到采用不同座椅靠背时人体颈椎的应力应变响应数据, 以此数据为依据进行对比分析, 找出了发生事故时对汽车乘员保护性能较好的一款座椅靠背骨架结构, 或可为座椅的被动安全性设计提供一种行之有效的新思路.

关键词: 后碰撞; 有限元; 汽车座椅; 被动安全性

中图分类号: TP399; R318.01

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2016)01-0068-05

A Study on the Passive Safety of Car Seat Based on Centrum Dynamic Response

ZHANG Fan, XUE Qiang, CHENG Dawei, LIU Jianming, YUN Yuesheng

(Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and On-line Monitoring for the Light Industry and Food Engineering Machinery and Equipment, College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: In order to study the influence of different backrest structure on neck injury in car rear collisions, a human-seat system finite element model was built based on the anthropotomy and the basic dimensions of an actual seat. The stress and strain response values of the human cervical vertebrae, with different type of backrest, were calculated after rear collision simulations. A backrest frame structure with the best occupant protection performance during a car accident was found based on the stress and strain values of the cervical vertebrae, which can possibly offer a new way of thinking about the design of seat passive safety.

Key words: rear collision; finite element; car seat; passive safety

2012年, 中国新车评价规程(China-New Car Assessment Program, C-NCAP)将后碰撞鞭打实验和评价方法加入到了新的管理规程中, 对各汽车生产企业的汽车座椅安全性能提出了更高的要求^[1]. 因此, 深入开展碰撞过程中汽车乘员的动力学响应研究, 提高汽车座椅的被动安全性, 减轻事故中汽车乘员的脊柱损伤是汽车乘员保护领域一个亟待解决的重点问题.

目前应用于汽车碰撞仿真研究中最常见的人体模型有假人模型、多刚体模型及有限元模型. 假人模型一般由 400 多个零部件和 60 个左右的传感器组成, 用于模拟人体组织结构和采集碰撞时重点部位的响应数据. 虽然其在体态特征以及伤害指标方面已

尽可能地接近人体真实情况, 但是与人体生物力学响应还是存在着差距. 多刚体模型的结构简单, 运算速度快, 但是无法精确反映人体组织内部结构和受力情况. 有限元模型的生物逼真度高, 计算精度高, 数据信息量大, 能准确反映各部位的受力情况, 可以重复计算. 近年来有限元法被广泛应用于汽车被动安全性研究之中, 通过模拟碰撞事故中人体运动情况, 利用人体的冲击动力学响应来研究座椅被动安全性的想法已逐渐引起人们关注^[2-5], 但是现有的人体模型多利用部分颈部模型或者胸部模型, 不能很好地用于后碰撞损伤研究.

汽车座椅靠背骨架大致可以分为 3 种基本形式:

收稿日期: 2015-01-21; 修回日期: 2015-05-19

作者简介: 张帆(1988—), 男, 内蒙古人, 硕士研究生; 通信作者: 薛强, 教授, qxue@tust.edu.cn.

管类结构、管类与钣金混合结构、钣金结构。管类结构强度高,结构稳定,容易加工,成本较低,但是吸能性一般;钣金结构制作工艺复杂,吸能性好,能利用自身变形消耗冲击能量;管类与钣金混合结构的性能介于管类结构和钣金结构二者之间^[6]。

本文基于人体解剖学和医学影像数据建立1个较完整的人体上身有限元模型,并利用夏利汽车公司生产的座椅按实际尺寸建立3种不同靠背结构的座椅有限元模型,通过对3组人-座椅系统有限元模型进行碰撞模拟分析,得到颈椎的应力应变变化趋势和分布情况,以此为依据判断不同靠背结构下颈部损伤风险的大小,从而确定座椅颈部保护能力的强弱,为颈部的后碰撞损伤预测以及座椅的被动安全性研究提供一种可行的新思路。

1 模型的建立

人体几何模型采用1名身高175 cm、体重65 kg的中国成年男子为样本,利用含原始数据的医学CT图像生成。在交互式的医学影像控制系统软件Mimics和逆向设计软件Geomagic中进行初步处理,得到人体上身几何模型^[7]。在网格映射前处理软件TrueGrid中根据几何模型的曲面片布局建立块体,并利用投影方式构建有限元网格,网格单元采用应力应变为一次线性变化的六面体单元,使得计算效率和精度更高。在具有网格划分前处理功能的Hypermesh软件中进行各部分网格的组装,并进行网格检查,最终生成人体上身有限元网格模型。在仿真分析时,将以颈椎为重点部位进行研究,颈椎部位C3、C4、C5的局部网格如图1所示。

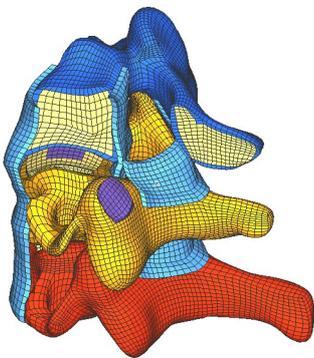
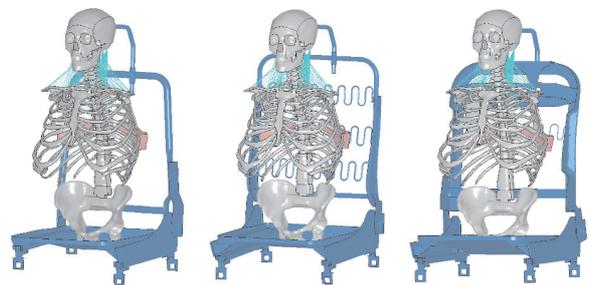


图1 C3、C4、C5颈椎的有限元模型

Fig. 1 Finite element model of cervical vertebrae C3, C4, C5

根据夏利汽车公司生产的汽车驾驶座椅建立了3组座椅模型,座椅模型由头枕、靠背、调角器、支

架、滑轨等构件构成,3组人-座椅有限元模型中的靠背依次为管类结构、管类与钣金混合结构和钣金结构。在Hypermesh软件中进行四边形面网格划分后,将3组座椅模型与人体上身模型结合在一起,组成人-座椅系统有限元模型,如图2所示。构建的3组人-座椅系统有限元模型的节点数(图2从左至右)依次为156 042、167 609、167 485个,单元数分别为117 638、121 295、127 831个。人-座椅系统有限元模型中的材料属性和本构关系主要根据文献[8-10]设置。模型的有效性在文献[7]中进行了验证,可以用于后碰撞冲击动力学响应研究。



(a) 管类结构 (b) 管类与钣金混合结构 (c) 钣金结构

图2 人-座椅系统有限元模型

Fig. 2 Finite element model of human-seat system

2 仿真分析

2.1 模型加载

本文有限元模型仿真分析中的冲击载荷采用日本机动车研究所的后碰撞实验数据^[11],碰撞加速度曲线作为模型的载荷,施加在整个座椅y方向上,同时对模型的x、z方向进行约束,模型接触方式采用自动单面接触,时间历程为300 ms。

发生后碰撞之后,人体有限元模型在座椅加速度以及本身惯性力的影响下开始相对座椅向后移动,人体头部与座椅头枕相互碰撞之后,使座椅头枕向后倾斜,然后发生反弹,人体开始相对座椅向前运动直至回到初始位置,响应过程如图3所示。

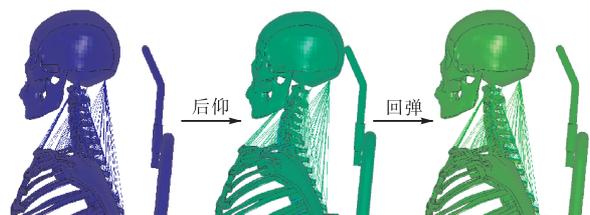


图3 后碰撞冲击响应过程

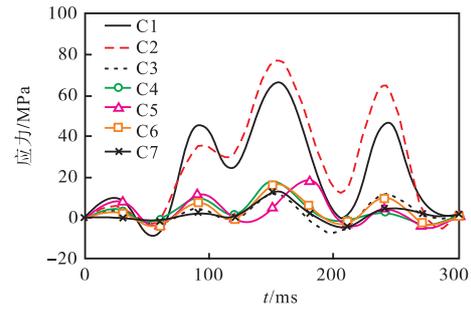
Fig. 3 Rear-end collision process of shock response

2.2 颈椎响应分析

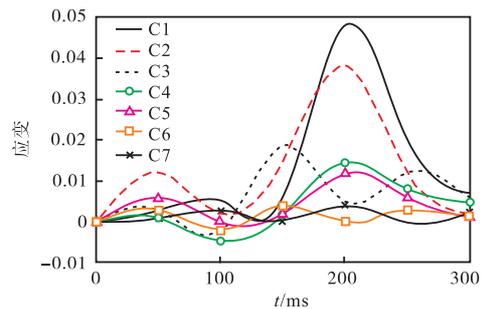
后碰撞时人体颈部由于过度后伸会产生颈部损伤,经过分析发现3组模拟的应力应变变化趋势基本一致,所以本文仅以管类结构座椅模拟的数据为例,说明应力和应变的变化趋势.颈椎 C1—C7 的应力和应变曲线如图 4 所示.

由图 4 可知:颈椎 C1 和 C2 的应力明显大于其他颈椎椎骨,颈椎 C1 在 160 ms 时达到峰值,同时颈椎 C2 在 162 ms 左右时达到峰值;C1、C2 的应变较大,应变从高到低依次是 C1、C2、C3、C4、C5、C7、C6.

在整个冲击过程中颈椎 C2 受力最大,颈椎 C1 受力产生的变形最大,C1、C2 是最容易产生损伤的部位. C1、C2 的应力和应变分布如图 5 所示,C1 的应力和应变集中在前弓内侧,其应力峰值为 68.11 MPa, C2 的应力和应变集中在齿突上,其应力峰值为 87.11 MPa,当受力超过各自的耐受极限时,椎体就会产生严重损伤,甚至骨折. 颈部椎骨骨折是非常严重的人体损伤,如果骨片挤进椎间孔,可引起脊髓和神经根损伤,造成人的瘫痪等问题.



(a) 应力曲线



(b) 应变曲线

图 4 颈椎的应力和应变曲线

Fig. 4 Stress and strain curves of cervical vertebrae

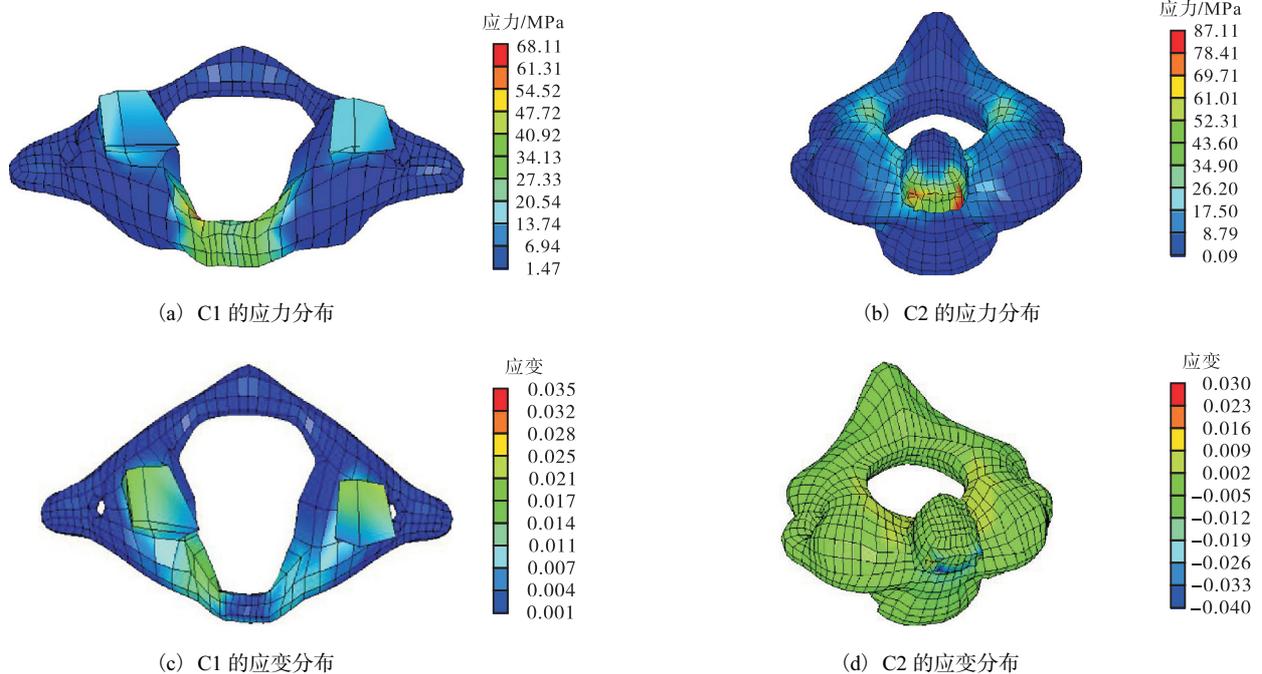


图 5 颈椎 C1、C2 的应力和应变分布

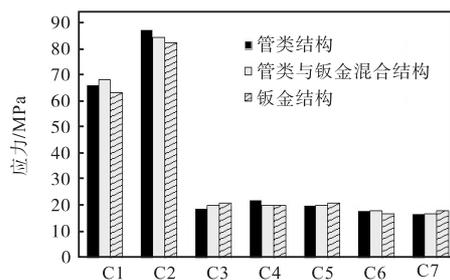
Fig. 5 Stress and strain distribution diagrams of cervical vertebrae C1 and C2

2.3 3组人-座椅模型的数据对比

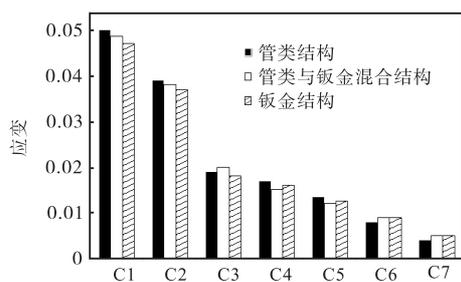
利用 3 组人-座椅有限元模型进行仿真模拟分析时,颈椎 C1—C7 的应力和应变峰值如图 6 所示.

3 组人-座椅模型的计算数据对比表明:颈椎 C1、C2 的受力均较大,其中采用钣金结构座椅时的应力峰值均小于其他两组模型,相比 3 组数据中的最

大值分别降低了 3.4% 和 6.6%。颈椎 C1、C2 相对于其他椎骨表现出较大的应变,应变峰值约为其他椎骨的 2 倍;采用钣金结构座椅时颈椎 C1 的应变峰值最小,比 3 组数据中的最大值低 4.2%;采用钣金结构座椅时颈椎 C3 的应变峰值与采用管类结构模型相近,比采用混合结构模型的数值低 3.2%。综合对比说明,钣金结构的座椅靠背对减少颈椎的应力和应变有一定的帮助。



(a) 应力峰值对比



(b) 应变峰值对比

图 6 颈椎 C1—C7 的应力和应变峰值对比

Fig. 6 Maximum stress and strain contrast of cervical vertebrae C1-C7

3 结 语

本文通过对 3 组人-座椅系统有限元模型进行后碰撞仿真模拟,利用计算得出的颈椎应力应变数据来判定颈部损伤风险,分析比较了不同座椅对颈部保护能力,为颈部的后碰撞损伤预测以及座椅的被动安全性研究提供了一种新思路。

根据本文的仿真计算结果可知:颈椎 C1、C2 是后碰撞事故中最容易损伤的部位,承受的应力和应变均高于其他颈椎;颈椎 C1 的应力峰值和应变峰值集中在前弓内侧,易造成严重损伤或骨折,颈椎 C2 的应力峰值和应变峰值集中在齿突上,容易造成枢椎齿突损伤或骨折,这与实际事故中颈部损伤部位基本相同。使用钣金结构的座椅时,颈椎在后碰撞中的应力

和应变最大值较小,可以降低颈椎的损伤风险,在座椅骨架设计时采用钣金结构可以提高座椅的被动安全性。

本文建立的人-座椅系统有限元模型的仿真计算结果与实验数据^[11]相比还有一些差别,主要是座椅骨架模型进行了相应的简化,忽略了靠垫和头枕软垫的影响,导致座椅模型整体刚度比实际偏大,对仿真分析造成了一定的影响。在今后的工作中,可以对座椅的吸能特性加以考虑,如添加靠垫、座垫等。利用更加逼真的有限元模型模拟碰撞过程,得到更加完善的冲击动力学响应,从而用更加全面的数据来解决座椅开发过程中的难题。

参考文献:

- [1] 刘玉光,刘志新. 各国新车评价规程(NCAP)测试评价技术的现状与发展[J]. 汽车安全与节能学报, 2013, 4(1): 16-22.
- [2] 刘维海. 轿车正面碰撞被动安全性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [3] Stemper B D, Yoganandan N, Pintar F A. Effect of head restraint backset on head-neck kinematics in whiplash [J]. Accident Analysis & Prevention, 2006, 38(2): 317-323.
- [4] DeWit J A, Cronin D S. Cervical spine segment finite element model for traumatic injury prediction [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2012, 10: 138-150.
- [5] 张恩凤,薛强,张帆,等. 后冲击下人体胸部动力学响应分析[J]. 天津科技大学学报, 2014, 29(5): 69-72, 77.
- [6] 姚为民. 汽车座椅结构安全性与空气悬挂式座椅减振性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- [7] 丁梅. 后冲击下人体上身有限元模型的建立及其应用研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2013.
- [8] Teo E C, Zhang Q H, Huang R C. Finite element analysis of head-neck kinematics during motor vehicle accidents: Analysis in multiple planes [J]. Medical Engineering & Physics, 2007, 29(1): 54-60.
- [9] Dickey B T, Tyndyk M A, Doman D A, et al. In silico evaluation of stress distribution after vertebral body augmentation with conventional acrylics, composites and glass polyalkenoate cements [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2012, 5(1): 283-290.

- [10] Hussain M, Natarajan R N, An H S, et al. Progressive disc degeneration at C5-C6 segment affects the mechanics between disc heights and posterior facets above and below the degenerated segment: A flexion-extension investigation using a poroelastic C3-T1 finite element model[J]. *Medical Engineering & Physics*, 2012, 34(5): 552-558.
- [11] Ono K, Inami S, Kaneoka K, et al. Relationship between Localized Spine Deformation and Cervical Vertebral Motions for Low Speed Rear Impacts Using Human Volunteers[C]//Proceedings of International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impacts. Zurich, Switzerland: IRCOBI, 1999: 149-164.

责任编辑:常涛

(上接第63页)

含量较高),虽然发生了龟裂,但 AY 二次涂布结合了涂布剂 A 和涂布剂 Y 的抗液体渗透性能的共同特点,使得纸板的抗水及抗油性能都得到了较大幅度的提高。通过龟裂的痕迹可以看出,此时 Y 涂布剂在 A 涂布剂所成膜的表面再成的膜较脆且较硬,这将直接影响纸板的力学性能。综合分析,当 AY 采用 3/2.3 的固含量配比进行二次涂布时可以取得最佳的效果。

3 结 论

与涂布原纸及使用 30% 固含量的涂布剂 A 一次涂布相比,涂布剂 A 固含量为 30%、涂布剂 Y 固含量为 23% 的 AY 二次涂布其纸板的抗水性能较高,抗油性能也达到了最高防油级别 12 级,纸板的强度性能较好,可满足石油包装纸板的要求。

参考文献:

- [1] 李梅. 我国进口石油运输中存在的问题分析研究[J]. *物流科技*, 2005, 28(8): 95-97.
- [2] 侯建卫. 中国石油对外贸易发展战略研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2006.
- [3] 潘志坚, 胡杰. 中国能源发展战略问题研究[J]. *石油科技论坛*, 2004(4): 32-40.
- [4] Duan J Y, Jiang Y, Cherian G, et al. Effect of combined chitosan-krill oil coating and modified atmosphere packaging on the storability of cold-stored lingcod (*Ophiodon elongates*) fillets[J]. *Food Chemistry*, 2010, 122(4): 1035-1042.
- [5] 张美云. 加工纸与特种纸[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2002.
- [6] Sothornvit R. Effect of hydroxypropyl methylcellulose and lipid on mechanical properties and water vapor permeability of coated paper[J]. *Food Research International*, 2009, 42(2): 307-311.
- [7] 李斯, 韩卿, 陈建斌. 防油纸表面施胶剂配方的优化[J]. *纸和造纸*, 2014, 33(10): 3-5.
- [8] 何志鹏. 具有防油功能纸张涂层组分及性能优化[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [9] 王钦雯. 涂布白板纸的吸塑包装性能及其剥离强度研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.

责任编辑:周建军