

汽车整车结构侧面耐撞性有限元数值模拟

郑何妍, 卢耀辉, 赵智堂, 张德文

(西南交通大学 机械工程学院, 成都 610031)

摘要: 目的 研究汽车结构侧面主要承载部件的耐撞性, 参考我国碰撞法规和 ECE R95, 根据国内某 SUV 汽车的参数和相关标准建立整车有限元模型和移动可变形壁障模型(MDB), 对其进行数值模拟, 为结构的优化设计提供参考。方法 利用 HyperMesh 前处理将 CAD 模型转化为 CAE 有限元模型, 输出 k 文件, 并通过 LS-DYNA 大变形有限元仿真软件对其耐撞性进行计算。结果 仿真结果显示, 在汽车侧面碰撞过程中, B 柱和车门等主要承载部件发生了较大的变形, B 柱变形量为 116.6 mm, 车门的变形量为 190 mm, 其值符合标准要求, 在碰撞结束后保证了足够的乘员空间。结论 该车有较好的侧面耐撞性, 且得出的碰撞数值模拟结果可为该车的结构设计提供参考。

关键词: 侧面碰撞; 大变形数值模拟; 移动变形壁障; B 柱

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.12.009

中图分类号: TJ07; U462.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2017)12-0045-06

FEM Numerical Simulation of Side Crashworthiness for Vehicle Structure

ZHENG He-yan, LU Yao-hui, ZHAO Zhi-tang, ZHANG De-wen

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

ABSTRACT: Objective To study the crashworthiness of the main bearing parts on the side of the car structure, establish finite element model of the vehicle and the moving deformable barrier model (MDB) according to parameters and related standards of a domestic SUV by referring to China's collision regulation and ECE R95. **Methods** The HyperMesh pre-processing was used to convert the CAD model into CAE finite element model to output the k file, and put it in LS-DYNA (large deformation finite element simulation software) to calculate side crashworthiness of the vehicle. **Result** The main bearing parts such as the B-pillar and the door had large deformation in vehicle side impact. The deformation of the B-pillar was 116.6mm, and the deformation of the door was 190mm. It was in line with the requirement of China's regulations and ensured sufficient occupant space after impact. **Conclusion** The vehicle has better side crashworthiness, and the numerical simulation results can provide a reference for the structural design of the vehicle.

KEY WORDS: side impact; large deformation numerical simulation; moving deformation barrier; B-pillar

随着汽车保有量的不断增加, 引发越来越多的交通事故, 造成大量的人员伤亡和财产损失。汽车引发的交通事故主要可以分为正面碰撞、侧面碰撞和追尾。数据显示, 某年汽车侧面碰撞的发生比例仅为 27%, 却造成全年事故总财产损失的 42%^[1]。因此,

每一款被设计的车型, 都必须先进行侧面碰撞试验, 以保证其安全性。

我国在 1988 年左右开展对车辆碰撞进行仿真, 现已逐步建立了完整的法规体系。2001 年, 孙宏图等将有限元法与动力学方法相结合, 模拟计算了不同

收稿日期: 2017-07-20; 修订日期: 2017-08-12

基金项目: 国家自然科学基金 (51275428); 西南交通大学科研训练国创项目 (201610613033)

作者简介: 郑何妍 (1993—), 女, 四川内江人, 硕士生, 主要研究方向为车辆结构疲劳强度可靠性与动力学。

通讯作者: 卢耀辉 (1973—), 男, 甘肃民勤人, 博士, 副教授, 从事车辆结构疲劳强度可靠性与动力学研究。

车型的汽车碰撞大变形过程^[2]。2005年,游国忠等用 LS-DYNA 及 ETA/VPG 对有限元整车模型的性能进行数值模拟分析,并同实车模型碰撞试验的结论一致,说明该建模方法有效且准确^[3]。2008年,Mei L、Thole C A 等发现在使用 LS-DYNA 或 PAMCRASH 来模拟计算同一模型时,一个节点位置选择的改变将会获得有差异的仿真结果,根据此种不确定性,他们提出使用数据挖掘的算法来获取稳定的汽车有限元模型参数^[4]。2010年,杨艳庆、田晋跃详细阐述了提高薄壁梁吸能特性的优化方案,再用 ANSYS/LS-DYNA 对经过改进的薄壁梁做大变形仿真分析来评价其优化方案,从而选出最优方案^[5]。文中主要利用 HyperMesh 前处理将 CAD 模型转化为 CAE 有限元模型,输出 k 文件,并通过 LS-DYNA 仿真求解,重点研究分析车门与 B 柱的变形,为结构优化方案提出参考建议。

1 侧面碰撞标准

1990年,美国机动车安全法规 FMVSS(Federal

Motor Vehicle Safety Standards) 214 于 10 月份在美国正式颁布执行。1995年,欧洲也制定了相应的汽车侧面碰撞法规 ECE(Economic Commission for Europe) R95,欧美这两种侧碰法规的主要不同体现在碰撞形式上。1998年,日本正式将汽车侧面碰撞法规纳入安保基准,其内容与欧洲 ECE R95 基本相同^[6]。欧洲 ECE 法规至今已颁布实施了 99 项,其中安全性法规 81 项,包括 26 项被动安全法规和 55 项动安全法规^[7]。ECE 法规制定了一套便于理解和操作的试验方法及各项安全性能指标,在保证汽车安全性能的基础上,重点关注法规的协调、可操作和适应性。

我国碰撞安全法规体系也采用 ECE 标准。我国以 ECE R95/02 法规为蓝本制定侧碰标准,又参考日本的相关法规以适应亚洲人体型标准,建立了一套我国自有的汽车合格评定制度——《汽车侧面碰撞的乘员保护》(GB 20071—2006)。该标准规定了汽车侧面碰撞的试验程序要求,另外还详细规定了三维 H 点装置、车辆型式变更、碰撞假人及移动变形壁障^[6]。中美欧碰撞法规对比见表 1。

表 1 中美欧侧面碰撞法规对比

标准编号	GB 20071	ECE R95	FMVSS 214
假人	类型	EUROSIDI或EUROSIDII 50%	BIO SID
	位置	驾驶员座椅处	驾驶员、碰撞前排乘员、后排乘员
	数量	1个	3个
壁障	尺寸	长: (1500±10) mm; 宽: (500±10) mm	长: 1676.7 mm; 宽: 558.8 mm
	质量	(950±20) kg	1356 kg
	离地高度	(300±5) mm	11英寸 (279.4 mm)
车辆状态	受检车辆应保持静止	受检车辆固定	
实验	碰撞形式	90°垂直侧面, 壁障纵向垂直平面与过前排座椅“R”车辆横向平面一致, 误差: ±25 mm	移动壁障以27°碰撞实验车辆, 变形壁障垂直接触实验车辆
	碰撞速度	(50±1) km/h	53.9 km/h
	实验车质量	受检车辆应保持静止 基准质量	受检车辆固定 整备质量+136 kg

2 建立有限元模型

2.1 整车

参考某 SUV 车型参数,用 Catia 建立了含底盘的

整车模型,再将 CAD 模型导入 HyperMesh 中进行碰撞前处理。建立整车有限元模型时,对于汽车发动机与动力传动系中的变速箱、传动轴等刚度较大的构件用 SOLID164 实体单元建模,行驶系中的轮毂选用壳单元建模。其中发动机和轮毂在碰撞过程中几乎不发

生变形,可作为刚体处理,采用 MAT20 材料模型。对于车身的有限元建模,首先车身由薄钢板和车身梁柱框架焊接而成,选用 SHELL163 壳单元,车窗玻璃也选用壳单元建模;其次,车身主体结构如前纵梁、门槛及乘员仓框架均大量使用高强度钢板。整车模型还包括 B 柱、门槛梁、车门防撞杆、前后车门、车顶、地板等影响汽车侧面碰撞安全性的主要部件,均采用板壳单元建模。一些线路及管路的连接由于质量较小,建模时将其省略。模型简化可通过将体积和刚度均较大,且在变形过程中不明显的部件用刚性单元模拟,并且对变形可忽略的小构件用点质量单元模拟。网格划分时,可能发生大变形区域的单元长度控制在约 10 mm,而最小单元长度应控制在 4 mm 以上。最终建立的 SUV 整车有限元模型包含 478 624 个节点,494 117 个单元,如图 1 所示。



图 1 整车有限元模型

2.2 移动变形壁障

根据国内碰撞法规相关规定,参考 ECE R95 法规,建立移动可变形壁障(MDB)有限元模型。根据 GB 20071—2006《汽车侧面碰撞的乘员保护》的要求,碰撞试验的移动变形壁障由一个台车和一个渐变性的蜂窝状的碰撞壁组成,台车选择刚性 MAT20 材料模型,碰撞壁模型材料选择 MAT26 蜂窝材料。最终 MDB 有限元模型包含 70 228 个单元,其质心 R 点的坐标为(1358,-2915,169),如图 2 所示。

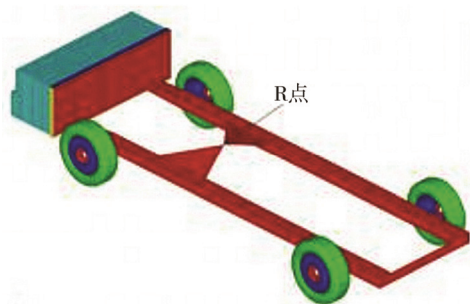


图 2 移动变形壁障有限元模型

3 碰撞参数设置

在整车碰撞分析中,采用“Contact_Automatic_Si-

ngle_Surface”来定义车身的接触方式。此外,还需定义局部接触,其中包括整车与移动壁障的接触、MDB 的自身接触、Beam 焊点单元接触、车轮与地面的接触等。根据国内碰撞法规规定,赋予 MDB 以 50 km/h 的初速度,即 13 889 mm/s。采用 LS-DYNA 中的 *CONTROL_HOURGLASS(黏性阻尼法),设置沙漏系数 QH 为 0.05,默认沙漏控制类型为类型 3 基于黏性的沙漏控制,其仿真时间设为 120 ms。在 HyperMesh 中将设置完毕的模型写入 k 文件并输出,将 k 文件导入 ANSYS/LS-DYNA 中计算。侧面碰撞有限元模型如图 3 所示。

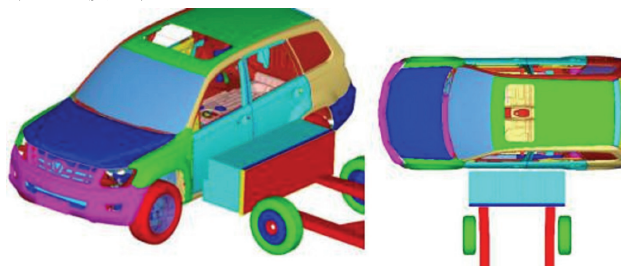


图 3 侧面碰撞有限元模型

4 汽车结构侧面碰撞结果分析

碰撞中整车结构的变形云图如图 4 所示,色调越暖表示变形越大。20 ms 车体开始大变形,从图 4 中可以看出,前车门侵入量很大;70 ms 后,车体变形基本不变,只是整体发生位移,部分变形量到达峰值的节点已经开始回弹;100~120 ms 期间,可以看到变形量较大的结构都有明显的回弹过程。还可以看出,车体的总体位移为 546.3 mm,节点最大位移为 736.3 mm,可计算出实际侵入最大位移为 190.0 mm。由此可得出,在 MDB 垂直碰撞汽车左侧,B 柱变形严重,A 柱和 C 柱没有太大变化;车体其他部位没有发生明显的变形;左侧前、后车门都发生明显的凹陷,但加强杆位置变形较小,吸收了大部分的碰撞能量,所以变形主要集中在前车门的中部和后车门的下部。由于该模型在车门中装有防撞梁,起到一定支撑作用,故车门槛的变形相对良好。

4.1 能量分析

该次侧面碰撞模拟中,系统的能量变化曲线如图 5 所示。可以看出,在整个仿真过程中,系统能量守恒。在侧面碰撞初始时刻,即 $t=0$ 时,系统的内能为 0,动能最大,为 130 000 kJ,系统能量全部来源于移动变形壁障的初动能。随着时间的推移,系统内能逐渐增加,动能逐渐减小。当 $80 \text{ ms} \leq t \leq 120 \text{ ms}$ 时,动能和内能保持稳定,系统总能量仍然守恒。从图 5 可知,沙漏能约占总能量的 7%,认为此分析结果是有效的。

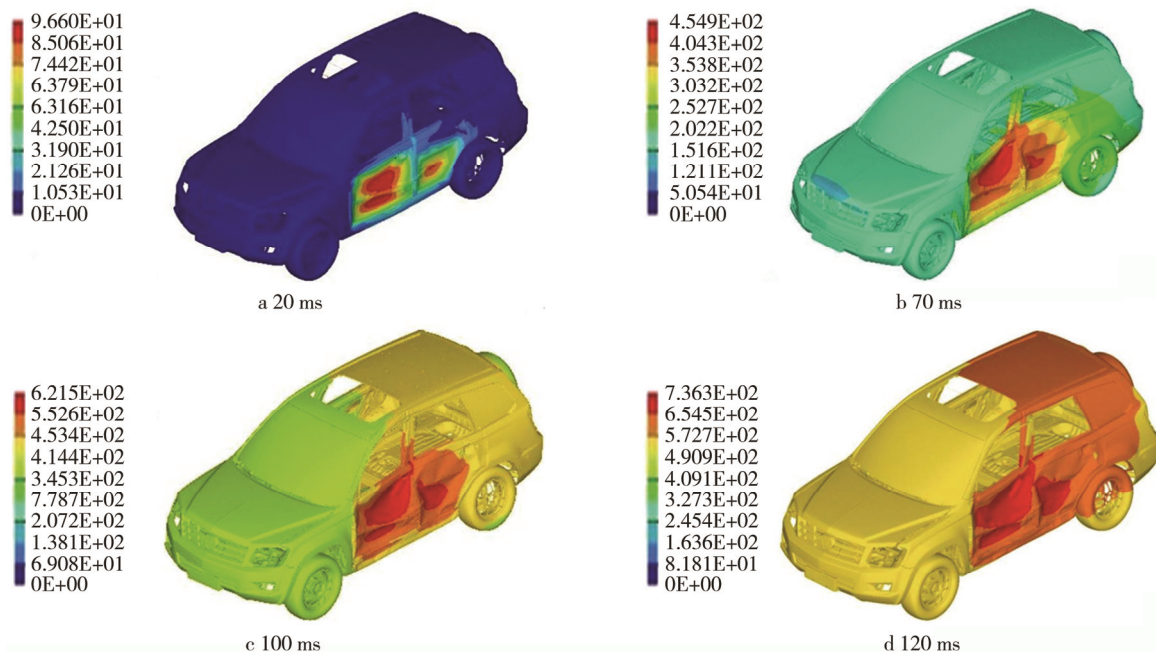


图4 侧面碰撞变形

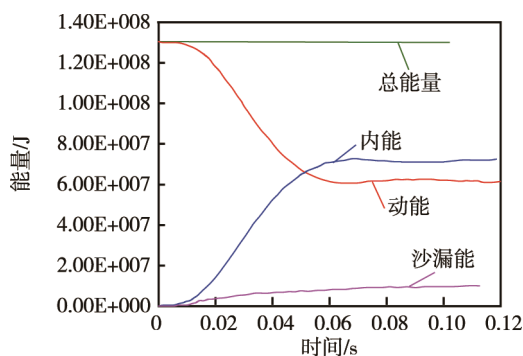


图5 系统能量变化曲线

4.2 车门与B柱变形分析

由图6可知,车前门相对于后门侵入量更大,影响范围更广,因此车内前排乘员相对较危险。变形量最大节点为 NODE 692648,上文得到车体总体位移为 546.3 mm,所以此处变形量稳定在 190.0 mm,可看出车前门的十字交叉加强杆起到了较好的抗冲击作用。

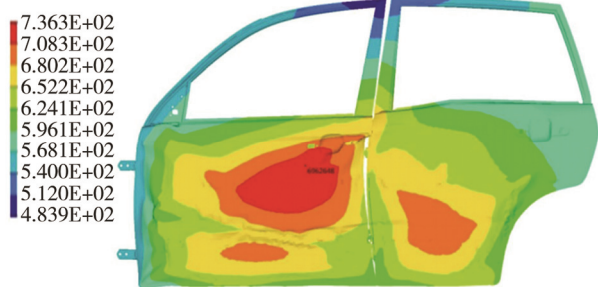


图6 车门变形

图7表示B柱变形云图。由于B柱是侧面碰撞

的主要承载件,其变形量较大。从图7中可以看出,B柱的变形主要在中下部,尤其中部变形量最大,上端靠近顶盖的位置没有明显变形。变形量最大节点为 NODE 235590,根据车体总体位移为 546.3 mm,得出其变形量为 116.6 mm,可看出碰撞中B柱中部变形量为最大。

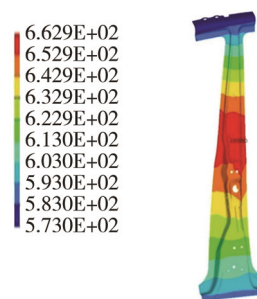


图7 B柱变形

4.3 B柱侵入量分析

B柱作为侧面碰撞中的主要承载部件对于侧面碰撞安全性有至关重要的作用,其侵入量与乘员头部、肋骨和盆骨损伤都密切相关。因此将B柱的侵入量作为在侧面碰撞仿真分析中一个重要的侧碰安全评价指标,在B柱从上到下设置7个传感器,其相对应的节点编号如图8a所示。

利用 HyperGraph 绘图输出测点的侵入量变化,得图8b为B柱侵入量曲线图,可明显看到大体分为上、中、下三部分。由图8可知,B柱中部侵入量明显大于上、下部位,且在70 ms时中部侵入量达到峰值,在最大测点 NODE 982336处侵入量达到 170.2 mm。70 ms后B柱结构发生回弹,侵入量减小。最

终在 120 ms 时刻最大测点侵入量仅为 86.3 mm, 证明其在 70~120 ms 的回弹量相当大, 材料的弹性较好。

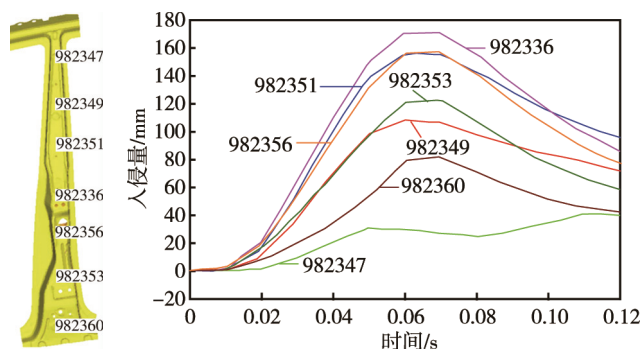


图 8 B 柱传感器测点分布及侵入量变化

4.4 B 柱侵入速度及加速度分析

B 柱中部的三个测点 (NODE 982336, NODE 982351, NODE 982356) 分别与假人胸部上、中、下肋骨位置大致对应, 能直观地评价假人胸部损伤, 因此选择这三点的数据整理并评价, 利用 HyperGraph 读取节点速度和加速度数据, 并进行滤波处理, 得到图 9 的侵入速度变化曲线和图 10 侵入加速度变化曲线。

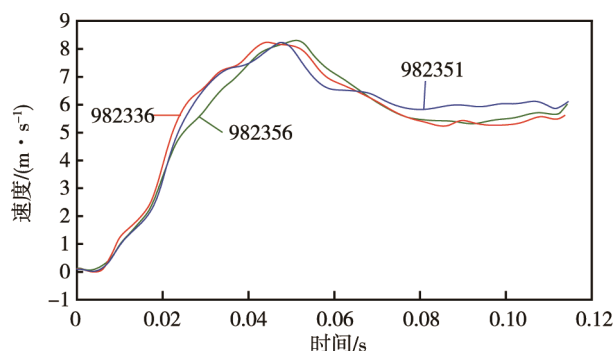


图 9 B 柱中部侵入速度变化曲线

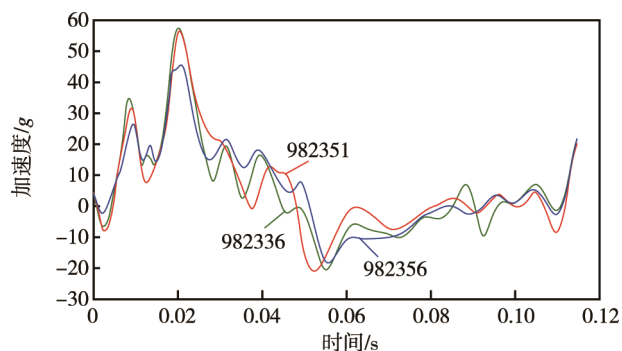


图 10 B 柱中部侵入加速度变化曲线

由图 9 可知, 7.1 ms 以前 B 柱侵入速度保持在 0 左右, MDB 与车体正式接触后, B 柱碰撞速度剧增。50 ms 左右三个测点的侵入速度均达到峰值, 其最大速度为 8.4 m/s, 之后速度逐渐减小; 80 ms 后速度基本稳定。从图 10 可以看出, B 柱的碰撞加速度值从 7.1 ms 开始接触到 20 ms 之间变化最大, 且在 20 ms 处三测

点均达到峰值, 最大加速度为 59g, 需将其性能进一步优化。在侵入量最大时, 即 70 ms 时刻, B 柱中部侵入速度均降到 6.4 m/s 以下, 侵入加速度为 $-8g$ 以下。

4.5 碰撞评价

碰撞试验在驾驶员一侧进行, 符合我国法规的规定, 且碰撞模型中整车和移动变形壁障的质量和尺寸均符合标准。碰撞过程中 B 柱最大侵入量为 170.2 mm, 在 B 柱中部, 所以驾驶员的胸部即肋骨受到伤害最大, 但是不会造成致命伤害。碰撞后, 车身最大侵入量为 190 mm, 侧围结构均发生一定量的回弹, 造成永久性损伤。对碰撞过程结束后车门的最终变形进行对比分析, 其结果如图 11 所示。可以看出, 最终左侧前门横向变形量为 -25.6 mm, 左侧后门横向变形量可以忽略不计, 因此, 在碰撞后车门间隙足够, 车门可以正常打开。

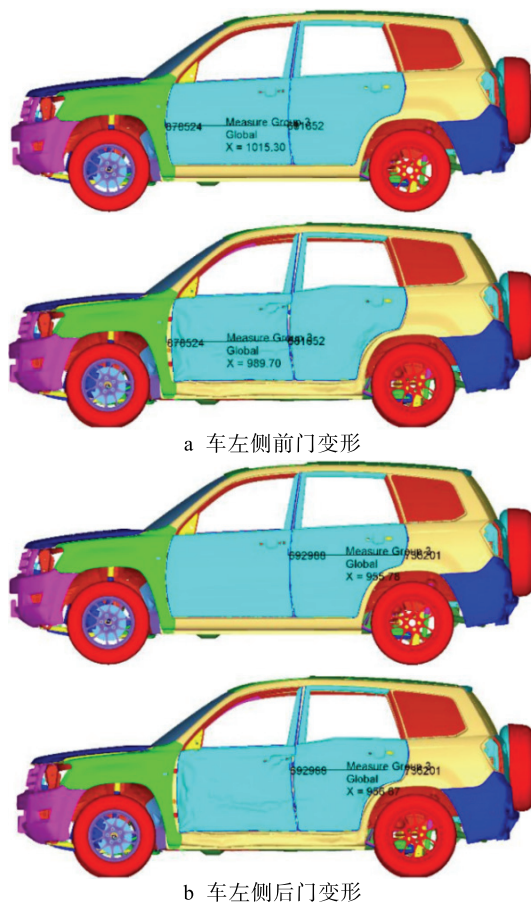


图 11 车左侧门变形

4.6 优化建议

由以上分析结果可知 B 柱需要加强, 对改进 B 柱的结构设计尤为重要。在其方案设计时, 需同时考虑到材料、结构等对整体系统的影响, 以此来确定最优的设计方案。首先, 考虑到分散碰撞力方面, 可以增加 B 柱与车内的连接强度, 使其在碰撞时将碰撞能

传到其他部件共同承受,以减小B柱的变形量。比如通过将B柱铰链加强板向下方加长与门槛连接起来,使其在碰撞时将碰撞力从B柱铰链加强板传到地板上,以此来分散碰撞力。其次,B柱材料的选取对汽车的安全性至关重要,可以将原B柱结构件用泡沫铝金属等吸能结构件来取代,提高其抗冲击性,减小碰撞时的加速度,以此优化B柱。

在碰撞过程中,车门通过吸收碰撞产生的能量和提供较好的传力路径来实现对乘员的保护,因此车门结构优化设计也很重要。由于车门的结构、厚度及材料对车门性能有重要的影响,因此可通过以下两个方面来进行优化。

1) 考虑到车门吸能量方面,改变车门防撞梁的几何形状可以明显增大车门的吸能量,从而减小车门变形。由于凹凸板状结构增加了吸收冲击的凸台,所以可将车门防撞梁中间部分制作为有凹凸的板状结构,进而来提高防撞梁吸收能量的能力。

2) 在提高车门耐撞性方面,可通过在碰撞过程中车门的主要接触区域选用大厚度或者高强度材料的母板来提高其碰撞性能,比如采用高强度钢板或者抗凹陷钢板来进一步提高车门的耐撞性。

5 结语

通过在汽车整车结构的侧面碰撞大变形有限元数值模拟,对整车变形、车门变形、B柱变形及入侵量的研究,得到的结论如下。

1) 根据我国侧面碰撞法规标准,该车在侧面碰撞过程中,B柱碰撞的最大加速度为59g,其性能需要加强。

2) 侧面碰撞大变形数值模拟结果显示,前车门最大变形量为190 mm, B柱最大变形量为116.6 mm,且该车的变形主要集中于前车门和B柱中部,B柱上下部和后车门相对变形量不大,故可说明垂直中心的侧面碰撞过程中,前车乘员将受到更大伤害,车内乘员的胸部损伤将比头部和腹部盆骨更大。

3) 该究结果为汽车结构耐碰撞性设计提供参考建议,对结构优化设计提供了参考方法。

参考文献:

- [1] 刘卫民,刘卫国,管立君.某微型汽车侧面碰撞安全性能优化[J].汽车技术,2011,37(10):24-27.
- [2] 孙宏图,刘学术,宋振寰,等.汽车碰撞变形计算机模拟研究[J].大连理工大学学报,2002,42(6):680-683.
- [3] 游国忠,陈晓东,程勇,等.汽车侧面碰撞有限元仿真建模[J].江苏大学学报自然科学版,2005,26(6):484-487.
- [4] 杨艳庆,田晋跃.基于ANSYS/LS-DYNA的车辆缓冲吸能结构的特性分析[J].拖拉机与农用运输车,2010,37(2):48-49.
- [5] GB 20071—2006,汽车侧面碰撞的乘员保护[S].
- [6] C-NCAP,中国汽车碰撞标准[S].
- [7] 曹华奇.汽车侧面碰撞有限元模型的建立[J].中国高新技术企业,2010,160(25):20-21.
- [8] 武和全,毛鸿锋,曹立波.汽车侧面碰撞车门可靠性优化设计[J].公路交通科技,2016,33(8):146-151.
- [9] 陈克,高洁,何浩然,等.基于虚拟试验场技术的汽车侧面碰撞仿真分析[J].中国工程机械学报,2010,8(4):449-454.
- [10] 栾文哲,尉庆国.某轿车侧门碰撞性能的安全性改进[J].机械,2013,40(2):19-23.
- [11] 许翔,张众杰,凤蕴,等.汽车环境适应性试验综述[J].装备环境工程,2013,10(1):61-65.
- [12] GHADIANLOU A, ABDULLAH S B. Crashworthiness Design of Vehicle Side Door Beams under Low-speed Pole Side Impacts[J]. Thin-Walled Structures, 2013, 67(2): 25-33.
- [13] SRINIVAS G R, DEB A, SANKETH R, et al. An Enhanced Methodology for Lightweighting a Vehicle Design Considering Front Crashworthiness and Pedestrian Impact Safety Requirements[J]. Procedia Engineering, 2017, 173(11): 623-630.
- [14] JIGA G, ȘTEFAN STAMINB, DINUA G, et al. Material and Shape Crash-box Influence on the Evaluation of the Impact Energy Absorption Capacity during a Vehicle Collision[J]. Ciència & Tecnologia dos Materiais, 2016, 28(1): 67-72.
- [15] MEI L, THOLE C A. Data Analysis for Parallel Car-crash Simulation Results and Model Optimization[J]. Simulation Modelling Practice & Theory, 2008, 16(3): 329-337.