

基于人体损伤的中低速正面碰撞气囊点火状态分析方法研究

沈富宽¹, 王焕然^{1*}, 谢书港², 李红运²

(1. 宁波大学 冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211; 2. 南京维思科汽车科技有限公司, 江苏 南京 210046)

摘要: 为降低驾驶员在中低速碰撞下受到的损伤, 利用 2010 年版丰田 Yaris 整车模型建立 100% 正面刚性壁碰撞有限元模型, 并根据驾驶员舱布置及相关法规要求建立 Madymo 约束系统仿真模型, 以验证有限元模型的准确性. 利用建立的碰撞模型, 在中低速碰撞中对不同气囊点火状态下的驾驶员所受损伤进行仿真. 结果表明, 该车型在 $35 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 及以上车速时, 点爆气囊能有效减少驾驶员损伤; $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 及以下车速时, 气囊点火会对驾驶员造成额外伤害; 中低速碰撞下, 驾驶员的胸部损伤程度较头部更容易受气囊点火时间影响.

关键词: 中低速碰撞; 人体损伤; 安全气囊; 点火时间; 仿真

中图分类号: U467.1+4

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2021) 02-0049-06

近几年随着汽车制造业的高速发展及大众对汽车需求的增加, 国内汽车保有量逐年上涨. 汽车在给大众带来便利的同时, 交通事故也不可避免. 由于交通事故的频发, 严重威胁到乘员人身财产安全, 为此我国制定了相关法律及规范来促进车企提高汽车安全性及维修经济性.

在道路交通现状中, 中低速碰撞产生的交通事故远比高速碰撞发生的频率高^[1], 而现有的法律法规及中国新车评价规程(简称 C-NCAP)对汽车发生中低速碰撞后乘员损伤的评价较为模糊. 目前低速碰撞研究多基于国标《GB 17354-1998 汽车前、后端保护装置》及欧标(Front and Rear Protective Devices)来研究车身防撞梁强度^[2-4], 且多数集中于防撞梁力学性能研究, 较少涉及乘员保护问题, 而探究中低速下的乘员保护有利于提高整车安全性, 以及为相关法律法规的制定提供借鉴, 因此研究低速碰撞下的乘员保护具有重要意义.

安全气囊(以下简称气囊)作为乘员保护系统重要的组成部分, 其点火车速阈值及点火时间不合理会对乘员造成额外伤害^[5]. 郭庆祥等^[6]确定了不同低速碰撞工况下气囊的目标点火时刻, 但并未对气囊点火的车速阈值做出探讨. 气囊点火的

车速阈值方面, 国内外一般规定在 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 下气囊不点火, $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上气囊必须点火, 而 $20 \sim 30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 未有明确规定^[7].

本文以 C-NCAP 高性能评价指标及简明创伤分级标准(Abbreviated Injury Scale, AIS)为评价标准, 考察在不同车速下的驾驶员伤害值, 确定中低速碰撞下气囊点火的车速阈值, 并在达到车速阈值后, 比较驾驶员在气囊不同点火时间下所受的伤害值, 确定正面 100%刚性壁碰撞下气囊最佳点火时间.

1 人体损伤评价标准

1.1 C-NCAP 正面碰撞评价标准

为了便于考察和评定整车碰撞试验中人体部分位置损伤情况, C-NCAP 参考欧盟新车认证程序(E-NCAP), 引用部分人体损伤用来作为评价指标. 其中, 头部引用 3 ms 合成加速度(简称头部加速度, A_R)以及头部伤害标准(Head Injury Criterion, HIC). A_R 多考察头部惯性损伤, 而 HIC 则多侧重于由接触损伤造成的颅骨骨折.

累计 3 ms 合成加速度值(A_R)计算公式如下:

$$A_R = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}, \quad (1)$$

收稿日期: 2019-11-26.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal1g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(11572164).

第一作者: 沈富宽(1994-), 男, 江苏连云港人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 整车被动安全. E-mail: 840195236@qq.com

*通信作者: 王焕然(1976-), 男, 河南睢县人, 博士/副教授, 博导, 主要研究方向: 结构动态响应. E-mail: wanghuanran@nbu.edu.cn

式中, A_X 、 A_Y 、 A_Z 为 X 、 Y 、 Z 方向上的加速度值。

头部伤害标准 HIC 计算公式如下:

$$HIC_{36} = (t_2 - t_1) \left[\int_{t_1}^{t_2} (A_R dt / (t_2 - t_1)) \right]^{2.5}, \quad (2)$$

式中, t_1 、 t_2 表示碰撞过程中任意 2 个时刻, 下标 36 表示 $t_2 - t_1 \leq 36$ ms。

此外, C-NCAP 还引入胸部压缩量(D_{chest})、胸部加速度(A_{chest})及胸部粘性指数(VC)。具体的相关 100% 正面刚性壁障碰撞头部及胸部评价标准的性能限值见表 1 所示。

表 1 C-NCAP 正碰性能限值^[9]

性能指标	性能限值
HIC_{36}	650~1 000
A_R/g	72~88
$D_{\text{chest}}/\text{mm}$	22~50
A_{chest}/g	38~60
$VC/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.5~1.0

注: A_{chest} 为 C-NCAP (2012 版)胸部评价标准。

1.2 简明创伤分级标准

为量化人体损伤严重程度, 美国医学会及美国汽车医学会结合实践经验及相关案例制定了简明创伤分级标准(AIS)。该标准按照人体损伤程度对生命威胁的大小, 将人体器官损伤划分为 0~6 共 7 个等级(表 2), 其中 4 级及以上威胁生命安全, 6 级表明该损伤致死或现有医疗技术无法救治^[10-11]。

表 2 简明创伤分级标准

AIS 等级	损伤程度	致命性/%
0	无损伤	0
1	轻微伤害	0
2	中度伤害	0~0.4
3	较严重伤害	0.8~2.1
4	非常严重伤害	7.9~10.6
5	危险伤害	53.1~58.4
6	极限伤害	100

2 仿真模型的建立及对标

2.1 整车有限元模型的介绍及对标

本文采用 2010 年版美国国家碰撞中心发布的丰田 Yaris 有限元模型。整车试验数据来源于美国新车评价规程中的第 5677 号试验, 该实验为 100%

正面刚性壁障碰撞试验, 车速为 $56 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[12]。整车碰撞试验及整车模型有限元仿真结果如图 1 和图 2 所示, 该结果均为碰撞发生后 100 ms 画面。整车脉冲如图 3 所示。对标结果显示, 整车模型的变形及整车脉冲与试验结果一致性较好, 整车有限元模型准确度较高, 有利于提取中低车速碰撞下的整车脉冲。



图 1 整车试验变形

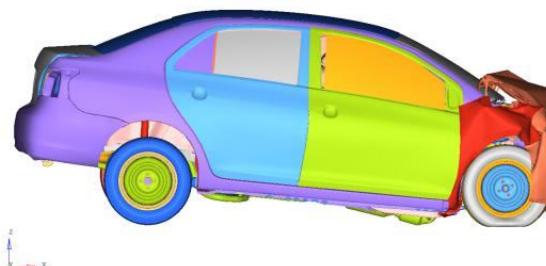


图 2 整车仿真变形

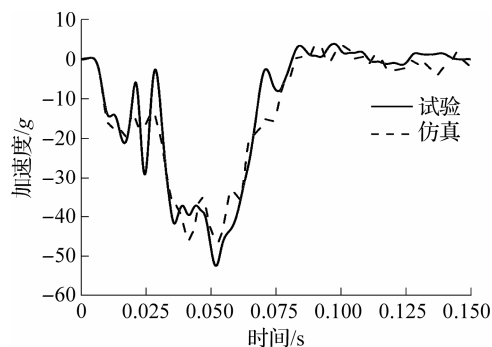


图 3 整车脉冲对比

2.2 约束系统模型的建立及对标

根据主驾空间布置及几何参数, 通过 Madymo 定义前风挡玻璃、A 柱、仪表板、地板、转向管柱、方向盘座椅安全带等车身结构及约束系统位置及造型, 并参照 C-NCAP 相关规定对驾驶员位置及姿态进行调整。考虑到整车试验中车身旋转及 Y 向、 Z 向脉冲相对较小, 因此在赋予模型 $56 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

初速度的同时, 将正碰撞 X 向整车脉冲赋予模型, 建立如图 4 所示的模型. 对正面 100% 刚性壁障碰

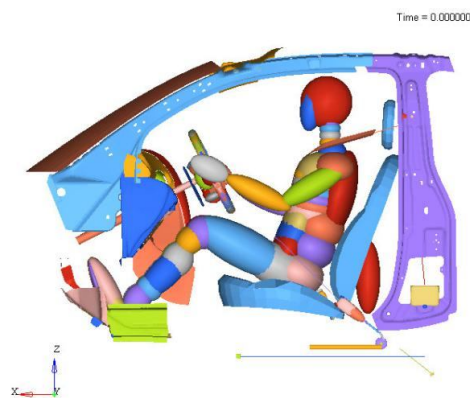
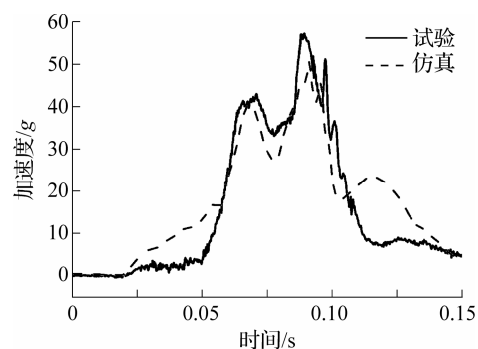
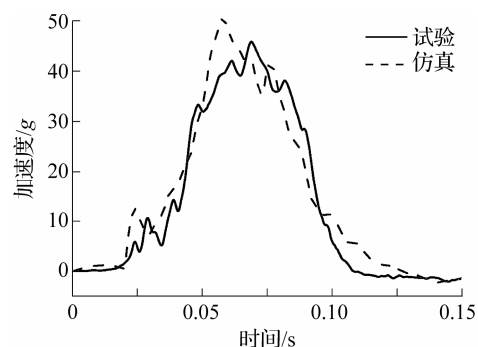


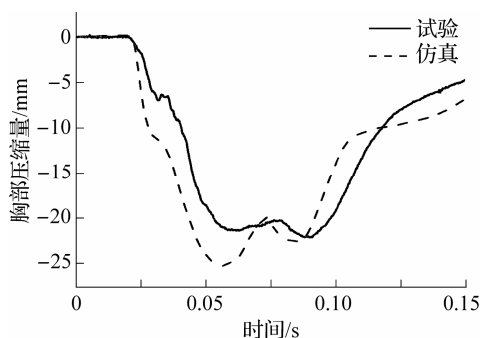
图 4 Madymo 约束系统仿真模型



(a) 头部加速度(A_R)对标



(b) 胸部加速度(A_{chest})对标



(c) 胸部压缩量(D_{chest})对标

图 5 仿真与实验结果对比

撞中驾驶员的头部加速度(A_R)、胸部加速度(A_{chest})、胸部压缩量(D_{chest})进行对标, 其最终结果如图 5 所示.

图 5 对标结果显示, 主驾约束系统模型计算结果中头部加速度(A_R)、胸部加速度(A_{chest})、胸部压缩量(D_{chest})试验结果曲线拟合度较好, 模型准确度较高, 表明该模型可用于中低速状态下的计算与分析.

3 确定气囊点火的车速阈值

气囊在不当车速下点火会对乘员造成额外伤害, 因此确定气囊点火车速阈值是低速碰撞下乘员保护的重要步骤. 本文通过对比驾驶员在不同气囊点火状态下所受伤害值来确定点火阈值. 取车速范围 $[20, 45]$ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$, 步长为 $5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. 根据文献[5]可知, 正面刚性墙碰撞工况下, 车速在 $24\sim 32 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 范围内, 气囊应在 $30\sim 50 \text{ ms}$ 点火; 车速在 $32\sim 48 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 范围内, 气囊应在 $20\sim 30 \text{ ms}$ 点火, 且取步长 2 ms 计算驾驶员伤害值.

表 3 为 $30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 下气囊点火与否造成的伤害值对比. 气囊在 $[30, 50] \text{ ms}$ 区间内点火时的 HIC_{36} 、 A_R 、 D_{chest} 、 A_{chest} 均大于气囊未点火时的伤害值, 并且 D_{chest} 为 24.3 mm , 大于 C-NCAP 评价标准中胸部压缩量高性能评价标准 22 mm . 由于气囊的重新安装也会造成不必要的财产浪费, 因此考虑到乘员安全性及维修经济性, 在 $30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 及以下车速气囊不应点火.

表 3 $30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 下气囊不同点火状态造成伤害值对比

参数	气囊不点火 伤害值	气囊点火最 小伤害值	C-NCAP 高性能 限值
HIC_{36}	246	293	650
A_R/g	42	55	72
$D_{\text{chest}}/\text{mm}$	21	24.3	22
$A_{\text{chest}}/\text{g}$	31	33	38

图 6 为 $35 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 下, 气囊未点火时的仿真结果及头部与方向盘接触力曲线. 从图中可见, 仅靠安全带不能提供足够保护, 导致驾驶员头部撞击到方向盘, 撞击力为 2300 N . 根据表 4 中颅骨各部位对冲击载荷耐受限度可知, 在撞击力达到 2300 N 时, 颅骨中的颧骨、颞骨及颌骨有骨折的风险. 并且 A_R 达到 98 g , 超出 C-NCAP 中 $72\sim 88 \text{ g}$ 的评价标

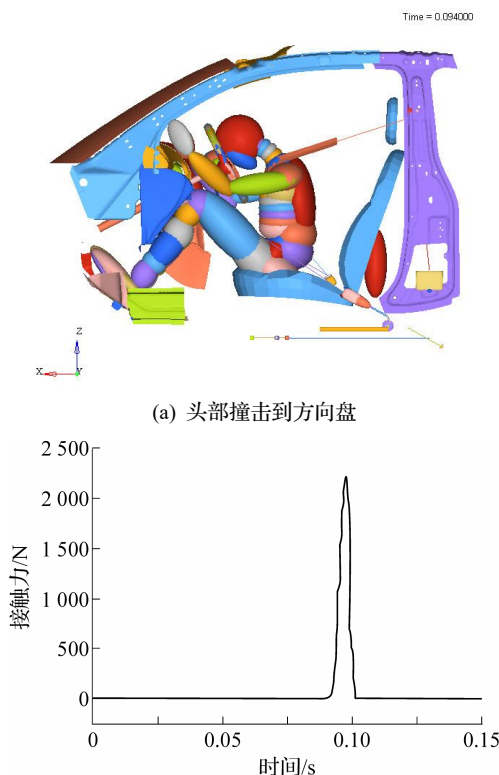


图6 头部与方向盘接触力

表4 颅骨对冲击载荷的耐受限度^[13]

颅骨部位	压缩力/kN
额骨	3.6~9.0
颞骨	0.5~2.9
颞顶叶	5.0~12.5
枕骨	6.4
颧骨	2.0~4.2
颌骨	0.8~3.4

准范围, 导致如脑震荡、脑组织等的惯性损伤对驾驶员生命安全造成严重威胁. 因此, $35 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 车速下气囊不点火会造成严重的颅脑损伤.

相对于气囊未点火时驾驶员受损伤较为严重, 而气囊在车速 $35 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 碰撞下点火, 对驾驶员头部就起到了良好的保护效果(图7). 由表5可见, 气囊在 $[20, 30] \text{ ms}$ 点火后, 驾驶员的 HIC_{36} 最大值为132, 驾驶员头部几乎无损伤. 由于气囊点火驾驶员头部得到缓冲, 气囊点火后的 A_R 也降至 30 g , 远小于气囊不点火时的 A_R 以及 C-NCAP 高性能评价标准, 降低了头部受到严重创伤的风险.

虽然气囊点火后的驾驶员头部得到了有效保



图7 驾驶员头部得到缓冲

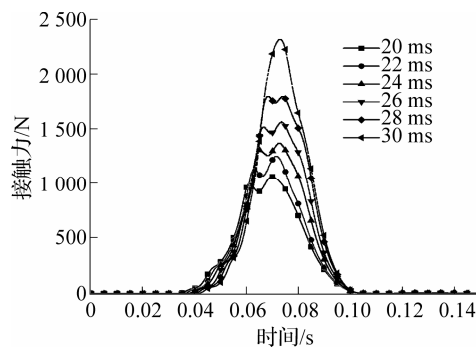
表5 $35 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 下气囊点火与否伤害值对比

参数	气囊不点火伤害值	气囊点火最大伤害值	C-NCAP 高性能限值
HIC_{36}	515	132	650
A_R/g	98	30	72
$D_{\text{chest}}/\text{mm}$	22	25.3	22
$A_{\text{chest}}/\text{g}$	32	34	38

护, 但 D_{chest} 达到 25.3 mm , 超出了 C-NCAP 高性能限值. 文献[14]根据概率关系曲线, 总结出 D_{chest} 与 $\text{AIS} \geq 3$ 间的关系, 其概率仅为 6% , 表明对人体造成的损伤较小. 综上所述, 为保证乘员安全, 此车型应在 $35 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 及以上车速下点火, 气囊才能确保驾驶员得到有效保护.

4 确定中低速下气囊最佳点火时间

在汽车碰撞过程中, 气囊点火时间对乘员伤害值影响较大. 在中低速下, 以 $35 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 车速为例, 图8为在不同点火时间下气囊和驾驶员之间接触力(简称接触力)与时间的关系曲线. 从图中可见, 点火时间的滞后造成接触力在气囊展开过程中偏

图8 车速 $35 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 下的点火时间对接触力影响

大,说明气囊点火滞后对驾驶员造成的冲击伤害越大。在头、胸部伤害评价指标中, HIC_{36} 、 A_R 以及 A_{chest} 皆是基于加速度的评价指标,因此推测上述3个评价指标与接触力正相关。 D_{chest} 则与接触力大小、接触力与胸部接触面积以及冲击位置有关^[15]。

图9、图10为 A_R 及 HIC_{36} 值随气囊点火时间变化曲线。由图可见,在 $35\sim 45\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 车速下,气囊点火时间的滞后造成头部伤害值增加。由于驾驶员头部 HIC_{36} 、 A_R 最大值分别为246、50 g,远远小于C-NCAP高性能标准,说明驾驶员头部受到损伤的概率较小,其头部伤害值的变化作为确定气囊点火时间依据的意义不大。相对于头部,胸部作为人体被气囊点火后冲击的首个部位,其伤害值接近或超过评价标准,因此,其研究意义更大。

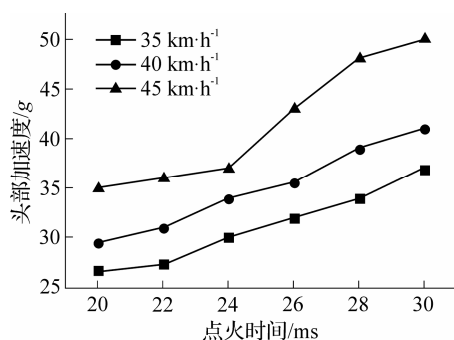


图9 头部加速度 A_R 变化趋势

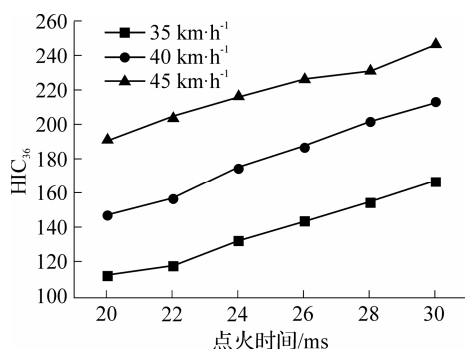


图10 头部 HIC_{36} 变化趋势

A_{chest} 以及 D_{chest} 随气囊点火时间的变化曲线如图11、图12所示。由图可见, A_{chest} 随气囊点火时间的滞后而增加,但 D_{chest} 受较多因素影响,其变化趋势与点火时间未有较强规律性。通过对比气囊不同点火时间对驾驶员胸部造成的伤害值,确定了 $35\sim 45\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 车速下100%正面刚性壁障碰撞的最佳气囊点火时间分别为28、26、24 ms,此时胸部损伤值降到最低。此外,随着气囊的点火时间

早于最佳点火时间,胸部伤害值未产生突变,说明胸部未击穿气囊撞击到方向盘;由于气囊点火时间晚于最佳点火时间,气囊展开状态产生对驾驶员的额外冲击使驾驶员的 D_{chest} 以及 A_{chest} 增加。另外通过纵向对比可知,随着车速的提高,气囊点火时间对驾驶员所受伤害影响更为明显。综上所述,根据人体损伤来确定点火时间能有效减少人体在中低速碰撞下所受的伤害值。

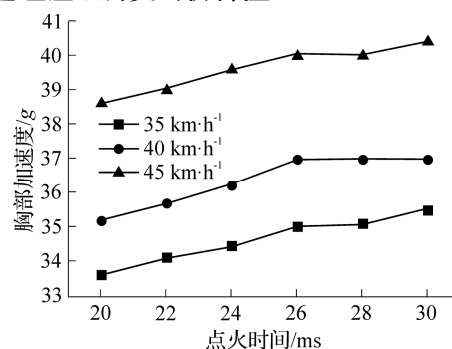


图11 胸部加速度 A_{chest} 变化趋势

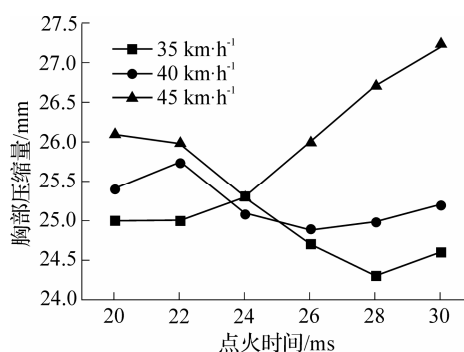


图12 胸部压缩量 D_{chest} 变化趋势

5 总结

(1)提出了一种确定气囊点火的车速阈值方法,确定该车型在 $30\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 及更低车速下,气囊不应点火,以避免产生额外伤害;在 $35\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 车速下,点火气囊则起到更好的保护效果。

(2)在正面中低速碰撞下,气囊点火主要防止头部撞击到方向盘,对头部保护作用更明显,而其点火时间的变化对保护效果的影响不大;相对于头部,胸部损伤结果受气囊点火时间变化的影响较大。后续的正面中低速碰撞研究可依据胸部损伤为主要参考项。

(3)以人体损伤为确定点火时间的主要因素,确定中低速下的气囊最佳点火时间,减少了乘

员所受损伤,对研究中低速碰撞下的乘员保护具有重要意义。

参考文献:

- [1] 中国汽车技术研究中心. 中国汽车安全发展报告(2015)[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2015.
- [2] 石锦, 邱荣英, 汪霞, 等. 汽车低速碰撞模拟中的关键因素识别[J]. 汽车技术, 2014(11):57-60.
- [3] 李旻, 夏彰阳, 李云飞, 等. 汽车前保险杠低速碰撞试验计算分析方法[J]. 振动与冲击, 2017, 36(16):248-254.
- [4] 仲伟东, 王东方, 李静. 复合材料防撞梁低速碰撞的研究与多目标优化[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2019, 41(4):463-471.
- [5] 邱少波. 汽车碰撞安全工程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2016.
- [6] 郭庆祥, 李新, 张斌, 等. 低速碰撞的安全气囊点火时刻分析方法的研究[J]. 汽车工程, 2015, 37(10):1138-1143.
- [7] 张君媛, 林逸, 张建伟. 汽车安全气囊起爆车速与乘员伤害关系的仿真研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(1): 102-105.
- [8] 韩勇. 汽车碰撞安全[M]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
- [9] 中国汽车技术研究中心. C-NCAP 管理规则(2018)[S].
- [10] Association for the Advancement of Automotive Medicine. The abbreviated injury scale-1990 revision[S].
- [11] 高继东, 祁志楠, 谢书港, 等. 基于 THUMS 人体模型的正撞乘员伤害研究[J]. 汽车工程, 2016, 38(8):947-954.
- [12] 曹立波, 张萍, 颜凌波, 等. 在车对车碰撞条件下轿车斜角碰撞及小重叠碰撞的驾驶员损伤研究[J]. 汽车工程, 2016, 38(2):174-180.
- [13] 杨济匡. 汽车与行人碰撞中的损伤生物力学研究概览[J]. 汽车工程学报, 2011, 1(3):81-93.
- [14] Mertz H J, Horsch J D, Horn G, et al. Hybrid III sternal deflection associated with thoracic injury severities of occupants restrained with force-limiting shoulder belts[C]. SAE Technical Paper Series, 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 1991.
- [15] Kent R, Lessley D, Sherwood C. Thoracic response to dynamic, non-impact loading from a hub, distributed belt, diagonal belt, and double diagonal belts[J]. Stapp Car Crash Journal, 2004, 48(1):495-519.

Human injury-based ignition state analysis of airbags in front impact at low and medium velocity

SHEN Fukuan¹, WANG Huanran^{1*}, XIE Shugang², LI Hongyun²

(1.Key Laboratory of Impact and Safety Engineering, Ministry of Education of China, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Nanjing Waythink Automotive Technology Co., Ltd., Nanjing 210046, China)

Abstract: In order to reduce the driver's injury in low and medium speed collisions, the 2010 version of the Toyota Yaris model is used to establish a 100% frontal rigid wall collision finite element model, and a Madymo restraint system simulation model is established according to the layout of the driver's cabin and relevant regulations, which is verified by test. Using the established collision model, the injury to the dummy under different ignition conditions of the airbag in the low-speed collision is simulated. The results show that the use of airbags at speeds of $35 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ and above can effectively reduce driver injury, and airbags at speeds of $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ and below can cause additional damage to driver. The driver's chest injury is more likely to be affected by the ignition time of the airbag than the head's in low and medium speed collisions.

Key words: low and medium speed collision; occupant injury; safety airbag; ignition timing; simulation

(责任编辑 章践立)