

# 车对车侧面碰撞兼容性影响因素分析\*

唐友名<sup>1,2</sup> 讲师

(1 厦门理工学院 汽车安全与保险技术研究中心 福建 厦门 361024

2 厦门大学 物理与机电工程学院 福建 厦门 361005)

学科分类与代码:6202740(安全模拟与安全仿真学)

中图分类号:X951

文献标志码:A

资助项目:福建省教育厅 A 类科技项目(JA11239);厦门理工学院科学技术研究项目(JKY10023R)。

**【摘要】** 汽车碰撞兼容性由于能更好地反映真实交通事故,已发展成为被动安全研究领域中最具安全技术潜力的新技术。针对侧面冲击载荷作用下车对车的碰撞兼容性问题,从理论分析和仿真分析角度出发,研究了主要影响因素:两车质量比、汽车前端刚度特性、汽车几何特征对两车碰撞兼容性的影响。结果表明:质量比是影响两车兼容性好坏的关键因素,通过降低汽车前端变形吸能刚度和主吸能位置、提高两车碰撞接触面积等可以提高被撞击车的耐撞性和降低撞击车的攻击性,从而降低所有涉案人员损伤,提高车对车侧面碰撞兼容性。

**【关键词】** 侧面碰撞; 碰撞兼容性; 变形侵入量; 汽车安全; 质量比; 刚度; 几何特征

## Study on Influencing Factors of Crash Compatibility in Passenger Vehicle Front-to-side Impacts

TANG You-ming

(1 Research Center of Technology for Vehicle Safety & Insurance, Xiamen University of Technology,

Xiamen Fujian 361024, China 2 School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering,

Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China)

**Abstract:** Crash compatibility has been developed as the most potential safety technology in the field of passive safety, for it can describe the crash accidents better than other technologies in real world. This paper, taking the front-to-side crash compatibility as the studying objective, conducted front-to-side impact simulation tests and used crash mechanics to evaluate crash compatibility for passenger vehicles. Meanwhile, main factors affecting self-protection and aggressivity were studied, which includes mass ratio, front-end rigidity of vehicle crush, and vehicle geometry characteristic. The research indicates that the key factor affecting crash compatibility is the mass ratio; decreasing the front-end crush rigidity and the primary energy-absorbing structure position of striking vehicle and increasing the contact area of vehicle crashing can improve the crash compatibility (including crashworthiness and aggressivity), and thus the injury risk of occupants could be reduced.

**Key words:** front-to-side impact; crash compatibility; crush intrusion; vehicle safety; mass ratio; rigidity; geometry characteristic

## 0 引 言

汽车碰撞兼容性属于被动安全的研究范畴,由

于它能够真实地反映实际交通事故,已发展为汽车碰撞安全研究新方向。侧面碰撞条件下汽车兼容性问题为碰撞安全性研究的一个难点,一是因为兼容

\* 文章编号:1003-3033(2011)10-0023-06; 收稿日期:2011-08-11; 修稿日期:2011-09-20

性问题直接关系到被撞击车辆侧面结构的安全性和耐撞性;二是因为兼容性问题关系到撞击车辆前端结构的吸能特性和侵略性。而车辆的侧面变形侵入空间有限,使其耐撞性能与材质、质量、高度、吸能位置等因素有很大关系。因此,对它的研究也越来越受到重视。

雷诺<sup>[1]</sup>于1971年发布了关于侧面碰撞中汽车侵略性影响的研究成果。20世纪80年代,Monk和Willke<sup>[2]</sup>通过对大众Rabbit改低保险杠、降低刚度等方法进行一系列的可变形移动壁障(MDB)侧面碰撞试验。美国国家高速公路交通安全管理局<sup>[3]</sup>于2003年2月成立集成项目小组,促使汽车生产厂商深入分析汽车碰撞兼容性。从2002年至今,我国陆续有学者开始研究汽车兼容性问题<sup>[4-11]</sup>。如:探讨汽车碰撞兼容性在轿车对轿车正面碰撞中所起的重要作用<sup>[4]</sup>;利用简单模型进行理论分析,提出改善兼容性的相关措施<sup>[5-6]</sup>;基于车辆碰撞兼容性因素构建北京市追尾事故数据的分析模型<sup>[7]</sup>;针对典型的轿车追尾碰撞货车案例进行货车与轿车兼容性分析<sup>[8]</sup>;介绍长城某轿车在碰撞仿真分析及实车试验中进行碰撞兼容性研究情况<sup>[9]</sup>;基于乘用车两车侧面碰撞兼容性仿真研究,分析兼容性的影响因素对目标车变形侵入量和乘员损伤指标的影响<sup>[10-11]</sup>,但是对影响汽车碰撞兼容性的因素缺乏系统分析和描述,对如何提高汽车兼容性的相关方法论述不够。

基于此,笔者将结合之前研究成果,从理论研究和仿真研究角度对侧面冲击载荷作用下两车的碰撞兼容性影响因素进行定性分析,并提出相关措施。

## 1 侧撞兼容性理论研究影响因素

研究汽车碰撞兼容性的目的就是为了使碰撞事故中所有乘员的损伤风险降到最小。当前,汽车的研究和开发旨在为本车的乘员安全性提供更好的保护措施,而忽略于保护其他碰撞车辆的乘员,并使之损伤风险系数降至最低。在两车侧面碰撞过程中,影响汽车兼容性问题的主要因素有3个:两车质量比、汽车前端刚度特性和汽车几何特征<sup>[9,12]</sup>。

### 1.1 两车质量比

在车对车碰撞中,质量因素直接影响两车的速度改变量。由两车的碰撞试验可知,速度的改变大小和两车的质量比有关,与每个车的绝对质量无关<sup>[12]</sup>。在此结论基础上,利用数学工具就可以建立速度改变量与两车质量比的数学表达式。

根据动量守恒定律,对车辆1的质量 $m_1$ 和初始速度 $v_1$ ,车辆2的质量 $m_2$ 和初始速度 $v_2$ 在完全弹性碰撞之后,车辆1的速度改变量 $\Delta v_1$ 如下(速度差 $v_c = v_2 - v_1$ )

$$\Delta v_1 = \frac{v_c}{1 + \frac{m_1}{m_2}} = v_c \times \frac{m_2}{m_1 + m_2} \quad (1)$$

在质量比 $m_1/m_2$ 小于1的情况下,车辆1获得的速度改变量大于车辆2,如果两车的碰撞持续时间一致的话,那么根据牛顿定律可知车辆1获得的加速度将超过车辆2的加速度。在实车侧面碰撞试验中,车辆2的初始速度为零,将该限制条件代入式(1)中,得到

$$\Delta v_1 = \frac{v_1}{1 + \frac{m_2}{m_1}} - v_1 = \frac{-\frac{m_2}{m_1}}{1 + \frac{m_2}{m_1}} \times v_1 \quad (2)$$

由式(2)可知,在质量比 $m_1/m_2$ 大于1的情况下,车辆1的速度改变量 $\Delta v_1$ 为负值,车辆2的速度改变量 $\Delta v_2$ 为正值,如乘用车两车侧面碰撞仿真分析<sup>[10]</sup>;在质量比 $m_1/m_2$ 小于1的情况下,车辆1的速度改变量 $\Delta v_1$ 为正值,车辆2的速度改变量 $\Delta v_2$ 为正值,如:可变形移动壁障碰撞试验。

假设汽车碰撞过程是完全塑性碰撞,则汽车结构变形吸收的能量为碰撞前后动能之差 $\Delta E$ ,设 $m_1 = k \cdot m_2$ ,有

$$\Delta E = \frac{1}{2} \times \frac{k \cdot m_2}{1 + k} \times (v_2 - v_1)^2 \quad (3)$$

根据式(3)可知:当 $k$ 大于1时,随着两车质量比 $k$ 不断增大,在两车初始速度差不变的情况下,汽车结构吸收的能量不断增大;当 $k$ 小于1时,随着 $k$ 值不断减少,汽车结构吸收的能量不断减少。

### 1.2 汽车刚度

在车对车侧面碰撞中,车辆的前部刚度是最可能进行改进的因素<sup>[13]</sup>。其研究方法有集中参数模型和变形能量计算。

#### 1.2.1 简单集中参数模型研究

基于多体动力学系统理论建立的集中参数理论模型,作为一种数值分析方法,被广泛应用于汽车工程领域、海洋工程领域、振动与噪声工程领域等。集中参数模型一般由集中质量、非线性弹簧和阻尼组成。下面利用简单集中参数模型来分析车对车侧面碰撞中刚度与变形之间的关系,如图1所示。



图 1 简单集中参数侧面碰撞模型

Fig.1 Simply lumped parameters side impact model

对于车辆 1 质量  $m_1$ 、前端刚度  $K_1$ 、前端变形量  $Y_1$ 、变形能  $E_1$  和车辆 2 质量  $m_2$ 、侧面刚度  $K_2$ 、侧面变形量  $Y_2$ 、变形能  $E_2$  根据牛顿定律,有

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{Y_2}{Y_1} = \frac{E_2}{E_1} \quad (4)$$

当两车刚度比  $K_1/K_2$  大于 1 时,则有车辆 1 的前端变形小于车辆 2 的侧面变形,这表示在实车碰撞中,被撞车辆 2 的侧面变形侵入量大于撞击车辆 1 的前端变形量,结果造成车辆 2 的乘员受到很大的损伤。从碰撞变形角度来分析,车辆 2 的侧面碰撞耐撞性不高,侧面刚度需要进一步提高。在可变形移动壁障试验中,两车刚度比  $K_1/K_2$  小于 1 是正常的,反之,则表明被试验车辆的侧面碰撞耐撞性不好。

### 1.2.2 汽车变形能量刚度计算

根据能量守恒定律,求解得到变形能量刚度  $k_w$  表达式如下<sup>[11,14]</sup>:

$$k_w = \frac{2F(X_f - X_i)}{X_f^2 - X_i^2} \quad (5)$$

式中:  $X_i$  表示可变形壁障位移初始值,mm;  $X_f$  表示可变形壁障位移最终值,mm;  $F$  表示可变形壁障位移过程作用力,N;  $X$  表示可变形壁障变形,通过对其加速度 2 次积分得到。

变形能量刚度 3 种求解方法如下:

1) 计算变形能量刚度 400,即  $K_w400$ ,如图 2 所示:  $X_i = 25 \text{ mm}$ ,  $X_f = 400 \text{ mm}$ ,也就是

$$K_w400 = \frac{2F}{425}$$

2) 计算最后变形能量刚度,即  $K_wFinal$ ,如图 2 所示:  $X_i = 400 \text{ mm}$ ,  $X_f = \text{max}$ 。

3) 计算所有变形能量刚度,即  $K_wTotal$ :  $X_i = 25 \text{ mm}$ ,  $X_f = \text{max}$ 。

### 1.3 汽车前端几何特征

不同于汽车的质量和刚度,汽车几何特性很难有明确的定义。几何特性既可以被理解为汽车的形状,也可以被理解为汽车的外部特征。从兼容性的角度,需要优先考虑汽车几何特性,因为吸能结构部

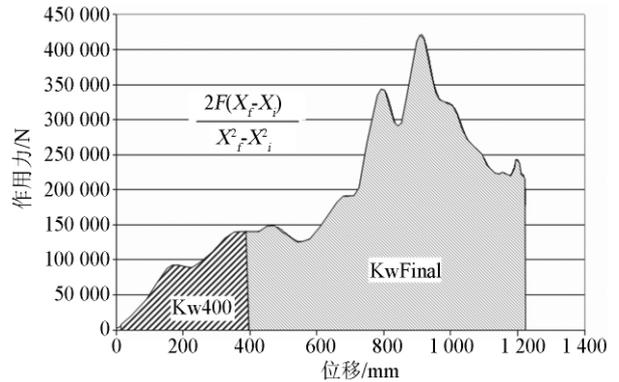


图 2 可变形壁障作用力与位移关系

Fig.2 Relationship between force and displacement for mobile deformation barrier

件不同的位置有不同的吸能效果,因此,需要了解其吸能结构对其他车辆吸能结构的能量响应,并进行控制。目前广泛使用的是采用三轴加载单元墙来测量每个单元的三轴受力值和三轴受力矩值,通过真实平均作用力高度值 (TrueAHOF, True Average Height of Force) 计算出其吸能位置 (Z 方向的高度)。

为了便于计算出汽车前端结构的吸能位置,根据力矩理论,首先计算出作用力高度值 (HOF, Height of Force) 值,如图 3 所示,然后加权平均得到要求解的 TrueAHOF,该值就是吸能结构的位置点,被用来描述汽车前端几何特征。

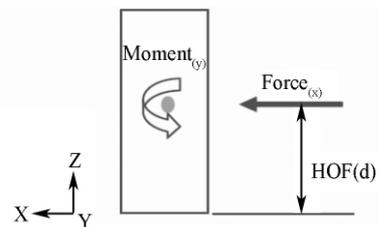


图 3 多轴加载单元 HOF 图

Fig.3 Height of force using multi-axle load cell

通过式 (6) 求解 HOF<sup>[13]</sup>,

$$HOF(d) = \frac{M_y(d)}{F_x(d)} \quad (6)$$

式中:  $d$  表示动态变形量,mm;  $F_x(d)$  表示碰撞方向加载单元测的作用力,N;  $M_y(d)$  表示绕 y 轴的力矩,Nmm; HOF 表示力矩  $M_y(d)$  的力臂,mm。

变形为 400 的 TrueAHOF400 通过式 (7) 求解<sup>[14]</sup>,

$$TrueAHOF400 = \frac{\sum_{d=25}^{400} HOF(d) \times F_x(d)}{\sum_{d=25}^{400} F_x(d)} \quad (7)$$

根据式 (7),计算出福特 Explorer、道奇 Caravan

和道奇 Neon 的 TrueAHOF400 值,分别为 548 mm、523 mm 和 448 mm。通过研究发现, TrueAHOF400 值基本上位于各车纵梁偏上的位置。

## 2 侧撞兼容性仿真研究影响因素

侧面碰撞过程中影响乘员安全的主要因素是车辆侧面结构侵入量、侵入速度、侵入区域、车门内饰系统的刚度(包括内饰板结构刚度、内饰板与车门内板间填充的吸能泡沫材料刚度特性)和侧面乘员约束系统(安全气囊、气帘和乘员座椅)等。而影响车辆侧面结构侵入量的主要因素是目标车和撞击车的质量、撞击车的接近速度、撞击车主要吸能结构位置、撞击车接触面积和撞击车的撞击角度。在实车碰撞中,撞击车的撞击角度和接近速度是固定的。因此,本节重点分析 3 个影响因素:撞击车主要吸能结构位置、撞击车的接触面积和目标车侧面变形侵入量。

### 2.1 中性变形侵入量

在两车侧面碰撞仿真过程中,不同的水平级和不同的测量位置点,它的变形侵入量值不一样。为了总体衡量目标车侧面的变形侵入程度,引入中性变形侵入量。其计算方法如式(8) [10,11]

$$\bar{C} = \sum_{i=1}^5 w_i \int_{a_i}^{b_i} f_i(x) dx \quad (8)$$

式中:  $\bar{C}$  表示中性变形侵入量;  $i$  表示水平级别;  $w_i$  表示加权系数;  $a_i$  表示测量位置起点值;  $b_i$  表示测量位置终点值;  $f_i(x)$  表示目标车侧面第  $i$  水平级的变形侵入函数。

根据式(8),文献[10]计算得到:在 SUV 与 CAR 的 3 次侧面碰撞仿真中,目标车中性变形侵入量分别为 482 mm、447 mm 和 431 mm。

### 2.2 碰撞接触面积

在侧面碰撞中,撞击车的前端会接触到目标车的侧面结构(包括车门、B 柱等),从而产生一个接触面积,该接触面积不是指撞击车的所有前端几何面积,也不是指目标车的所有侧围几何面积,而是指在该仿真中撞击车前端与目标车侧围接触的有效面积。如:撞击车前端接触到目标车车窗的面积不计算在内,具体计算方法和计算区域如图 4 所示。

图 4 中,  $A_0$  表示撞击轻型卡车 LTV(包括 SUV 和卡车等乘用车)前端几何特征面积;  $A_1$  表示撞击车 LTV 与目标车前后车门的接触面积;  $A_2$  表示撞击

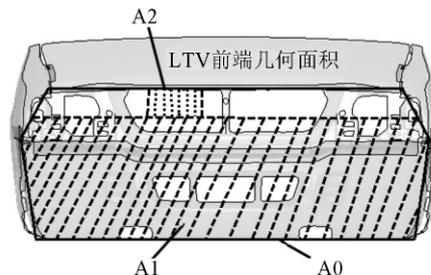


图 4 接触面积示意图

Fig. 4 Contact area to light truck vehicle  
车 LTV 前端与目标车 B 柱的接触面积。

撞击车前端与目标车侧面结构的有效接触面积通过式(9)求得

$$A_c = A_1 + A_2 \quad (9)$$

通过式(9),文献[10]计算得到: SUV 与 CAR 的 3 次侧面碰撞仿真中有效接触面积分别为  $9.1 \times 10^5 \text{ mm}^2$ 、 $11.9 \times 10^5 \text{ mm}^2$ 、 $12.8 \times 10^5 \text{ mm}^2$ 。

### 2.3 保险杠相对高度

在汽车前端结构部件中,保险杠及前纵梁是主要的吸能部件。汽车保险杠骨架作为吸收缓和外界冲击力的安全装置,对防护车身前后部和保护驾乘人员起着极其重要的作用。特别是前保险杠骨架,在高速碰撞发生时,必须保证自身不会断裂并能有效连结车身的两根纵梁,把碰撞的大量动能传递给 2 根纵梁,由纵梁将碰撞能量分成若干小的能量流被各种钣金件吸收,从而确保驾乘人员的生存空间。

在侧面碰撞兼容性仿真研究中,不仅需要考察撞击车的前端吸能特性,也要考察目标车的侧面吸能和乘员保护特性。因此,为了研究撞击车前保险杠高度对目标车乘员损伤的影响,引入变量保险杠相对高度,定义为撞击车的前保险杠相对于目标车车门门槛梁的相对高度,其测量方法如图 5 所示。

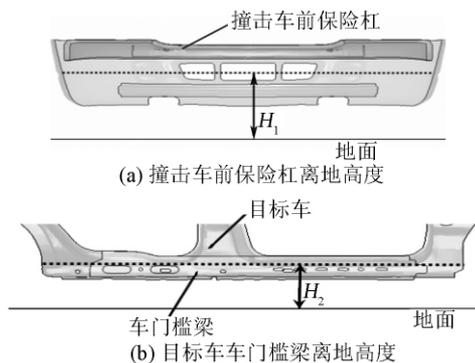


图 5 保险杠相对高度

Fig. 5 Relative height of front bumper

图 5 中,  $H_1$  表示为撞击车前保险杠中部离地高度;  $H_2$  表示为目标车车门门槛梁中部离地高度。

保险杠相对高度计算如式 (10)。

$$H_b = H_1 - H_2 \quad (10)$$

通过式 (10), 文献 [10] 计算得出: 在 SUV 与 CAR 的 3 次侧面碰撞仿真中保险杠的相对高度分别为 305 mm、254 mm、203 mm。

### 2.4 侵入量影响因素分析

在乘用车两车侧面碰撞仿真试验中, 当目标车侧向速度变化为定值(事故统计分析为 28 km/h)时, 研究两车的质量比、撞击车保险杠相对高度、撞击车接触面积和接近速度对目标车中性变形侵入量(或乘员损伤指标)的影响, 可以得到<sup>[10]</sup>: ①撞击车与目标车的质量比是影响目标车中性变形侵入量的首要因素, 当质量比为 1.6 时, SUV-CAR 的碰撞兼容性最好; 其次是撞击车的接近速度。②一般情况下, 目标车车门中部(第 3 水平级)变形侵入量最大, 车门门槛梁(第一水平级)的变形侵入量最小。当两车主要吸能结构位置发生变化时, 目标车的侧面变形侵入量也会发生变化, 随着撞击车保险杠相对高度的降低, 第 3 水平级和车门顶端(第 5 水平级)的变形侵入量逐渐减小, 第一水平级的变形侵入量值先增大后减小。

## 3 兼容性评价方法

### 3.1 对方保护变形评估 PPAD

为了评估两车碰撞中某一车辆对其他车辆乘员的保护性能, 欧洲汽车实验委员会(EEVC, European Experiment Vehicle Committee)开发了渐进型变形壁障(PDB, Progressive Deformation Barrier)测试程序, 该测试方法已被选为汽车安全法规候选方法之一。

PDB 设计来源于汽车前端的刚度变化, 为了更真实地模拟汽车前端结构刚度的变化和保证测试程序的规范性, 通过分析一系列实车碰撞结果, 把 PDB 设计成前后 2 部分和上下 2 部分, 其前部变形强度为 0.34 MPa, 后部的上部变形强度从 0.34 MPa 渐进至 0.68 MPa, 下部变形强度则从 0.68 MPa 渐进至 1.02 MPa, 各部分的变形强度如图 6 所示。

渐进型变形壁障 PDB 的评估方法主要考察 3 个参数: ①变形深度: X 方向的刚度描述; ②变形高度: Z 方向的几何特征描述; ③变形表面积。

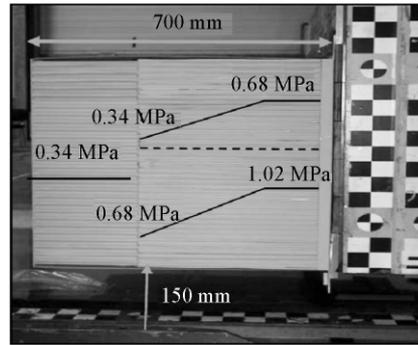


图 6 渐进型变形壁障 PDB 各部分变形强度  
Fig. 6 Progressive deformation barrier (PDB) test configuration

基于上面 3 个独立参数, PDB 的变形保护评价公式表示为

$$PPAD = \frac{0.52}{10} R^{0.55} \quad (11)$$

$$其中, R = \sum_{i=1}^{14} \left( \frac{Z_i}{Z_{lim}} \right)^4 \left( \frac{X_i}{X_{lim}} \right)^2 S_i$$

式中:  $i$  表示变形深度层数;  $Z_i$  表示变形深度上的平均变形高度, mm;  $X_i$  表示变形深度上的平均变形量, mm;  $S_i$  表示变形深度上的表面积,  $mm^2$ ;  $Z_{lim}$  表示变形深度上的最小变形高度, mm;  $X_{lim}$  表示变形深度上的最小变形量, mm。根据欧洲实车碰撞试验结果<sup>[14]</sup>, 设定  $Z_{lim} = 400$  mm,  $X_{lim} = 300$  mm。

如果对方保护变形评估(PPAD, Partner Protection Assessment of Deformation)值越小, 表示该试验车辆的兼容性越好, 碰撞事故中保护其他车辆乘员的效果越好。以中级轿车 Taurus 为例<sup>[14]</sup>, 其整车质量为 1 630 kg, 平均作用力高度值 AHOF 为 226.8 mm, 平均作用力高度变形量为 334.3 mm, 最大作用力高度值为 456.6 mm, 最大作用力高度变形量为 312.4 mm, 总变形体积 134.3  $dm^3$ , 壁障总吸收能量 52.4 kJ。通过式 (11) 可计算得到 Taurus 轿车的 PPAD 值为 5.56。

### 3.2 提高两车侧碰兼容性相关措施

从理论研究和仿真研究角度对车对车侧面碰撞兼容性影响参数进行分析, 得出提高侧面碰撞兼容性可采取的方法:

1) 控制两车质量比在一个合理的范围之内( SUV-CAR 侧面碰撞为 1.6 左右)。

2) 提高被撞车辆侧面结构的变形能量刚度  $K_w400$  和降低撞击车辆前端主要吸能位置参数 TrueAHOF400。

- 3) 降低撞击车的前端保险杠相对高度和降低目标车的侧面中性变形侵入量。
- 4) 增大碰撞中车对车的有效接触面积;
- 5) 降低车辆的 PPAD 值。

## 4 结 论

- 1) 影响车对车侧碰兼容性的关键因素是两车质量比,对质量比的控制涉及汽车消费者、汽车生产

厂家、汽车法规等各方面,需政府相关部门成立工作小组统筹安排;

- 2) 侧面冲击载荷作用下汽车碰撞兼容性研究是基于汽车前部几何特征和前部变形刚度特征进行,因而对两车前碰兼容性的研究显得尤为重要;

- 3) 模拟汽车前部刚度和几何特征的变形壁障试验评价方法(如 PDB 法)是研究两车碰撞兼容性的有效手段。

## 参 考 文 献

- [1] Chillon. The importance of vehicle aggressiveness in the case of a transversal impact [A]. 1<sup>th</sup> International ESV Conference [C]. Paris, 1971:21-31.
- [2] Monk M. W, Willke D. T. Side impact aggressivity attributes [A]. 10<sup>th</sup> International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles [C]. Washington D. C, 1985:158-167.
- [3] Summers S. M, Hollowell W. T, Prasad A. NHTSA's research program for vehicle aggressivity and fleet compatibility [A]. 17<sup>th</sup> International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles [C]. Amsterdam, 2000:254-262.
- [4] 刘新宇, 华慕文. 基于 CAR to CAR 正面偏置碰撞的车辆碰撞相容性探讨 [J]. 城市车辆, 2002, 20(6): 23-26.  
LIU Xin-yu, HUA Mu-wen. On crash compatibility of CAR to CAR front offset collision [J]. Urban Vehicles, 2002, 20(6):23-26.
- [5] 雷雨成, 严斌, 程昆. 汽车的碰撞相容性研究 [J]. 汽车科技, 2004, 32(1): 15-17.  
LEI Yu-cheng, YAN Bin, CHENG Kun. Research on crash compatibility of vehicle [J]. Vehicle Technology and Science, 2004, 32(1):15-17
- [6] 张云. 汽车碰撞相容性的探讨 [A]. 2009 中国汽车安全技术国际研讨会 [C]. 武汉, 2009:101-103.  
ZHANG Yun. Discussion on crash compatibility of vehicle [A]. 2009 International forum of China vehicle safety [C]. Wuhan, 2009:101-103.
- [7] 袁泉, 李一兵. 基于碰撞相容性因素的车辆追尾事故深入数据分析 [J]. 汽车技术, 2006, 37(S1): 72-75.  
YUAN Quan, LI Yi-bing. The in-depth data analysis of vehicle rear-end accidents based on crash compatibility factors [J]. Vehicle Technology, 2006, 37(S1):72-75.
- [8] 张易红, 周廷萱. 轿车追尾碰撞货车事故分析及预防措施 [J]. 西华大学学报:自然科学版, 2006, 25(4): 8-10.  
ZHANG Yi-hong, ZHOU Ting-xuan. Analysis and precaution measures of traffic accident caused by rear-end collision between car and truck [J]. Journal of Xihua University: Natural Science, 2006, 25(4):8-10.
- [9] 陈现岭, 张凯, 崔伟. 长城某车辆碰撞相容性研究 [J]. 技术与市场, 2008, 29(14): 26-28.  
CHEN Xian-ling, ZHANG Kai, CUI Wei. Research on crash compatibility of one GWM car [J]. Technology and Market, 2008, 29(14): 26-28.
- [10] 唐友名, 曹立波, Mohan P, 等. 乘用车两车侧面碰撞变形侵入量影响因素研究 [J]. 中国机械工程, 2009, 20(24): 3 013-3 019.  
TANG You-ming, CAO Li-bo, Mohan P, et al. Study influence factors for crush intrusion in passenger vehicle front-to-side impact [J]. Chinese Mechanical Engineering, 2009, 20(24): 3 013-3 019.
- [11] 唐友名. 乘用车两车侧面碰撞的兼容性研究 [D]. 长沙:湖南大学, 2010.  
TANG You-ming. Research on the Crash Compatibility for Passenger Vehicle in Front-to-side Impact [D]. Changsha: Hunan University, 2010
- [12] 唐友名, 黄红武, 梅丽芳. 美国侧面碰撞规程下轿车变形侵入仿真研究 [J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(5): 29-34.  
TANG You-ming, HUANG Hong-wu, MEI Li-fang. Simulation study for sedan in side impact based on regulation FMVSS214 [J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(5): 29-34.
- [13] Richter B. Evolution and current state of development of the computer-controlled composite test procedure [A]. 13<sup>th</sup> International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles [C]. Washington D. C, 1991: 621-634.
- [14] Park C. K, Hong S. W, Mohan P, et al. Simulation of progressive deformable barrier (PDB) tests [A]. 10<sup>th</sup> International LS-DYNA Users Conference [C]. Dearborn, Michigan 2008:61-76.

作者简介: 唐友名 (1981-) 男, 湖南衡阳人, 讲师。湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室和美国乔治华盛顿大学国家碰撞分析中心联合培养博士, 厦门大学与厦门金龙联合汽车工业有限公司联合培养博士后。研究方向为汽车被动安全(耐撞性及兼容性)、乘员损伤、事故统计、结构 CAE 分析。E-mail: tangyouming@xmut.edu.cn.