

An Optimization and Analysis of Frontal Dummies' Tibia Injuries in Frontal Crash Tests For A Car

Li Baoyu¹, Fang Quyu¹, Zhao Jinli¹, Shen Guangyong¹, Li Guo²

(1. Chery Automobile Co., Ltd, WuHu241009, China;

2. China Automotive Technology&Research Center, Tianjin300300, China)

Abstract: The frontal dummies' tibia got a bad score in both previous 64kph 40% offset crash test and 50kph full width rigid barrier crash test. By means of analyzing the injury curve data and high speed film, It indicates that the high value of Fz, Mx and My which cause severe injuries of the tibia must be reduced by optimizing in terms of the buffering characteristic within the driver and frontal passenger's footwell. After referring to the application situation of some BM models, the driver's footwell racket is changed into EPP foam which has a softer property than the original racket. Similarly, the frontal passenger's footwell PET felt is changed into EPP foam. Due to more score loss in 64ODB crash test, 64ODB test is prior to 50FF to get firstly validated with this scheme. It turns out that EPP foam is more effective in improving driver's tibia injury and the frontal passenger's tibia doesn't get a desired result. EVA leather with PU foam is applied to passenger's buffering cushion. Test indicates that EVA leather with PU foam can offer a best protective effect to passenger's tibia.

Key Words: Passive safety, crash test, frontal collision, dummy, tibia injury.

某车型前碰试验前排假人小腿伤害优化分析

李宝玉¹ 方取玉¹ 赵金丽¹ 沈光勇¹ 栗国²

(1. 奇瑞汽车股份有限公司, 芜湖241009, 中国;

2. 中国汽车技术研究中心, 天津300300, 中国)

摘要: 某车型在2015版C-NCAP 64kph正面40%偏置碰试验和50kph正碰试验中, 主驾假人和副驾假人小腿得分较差。通过伤害数据和高速摄像的分析, 需改善主副驾假人脚部缓冲特性, 以降低造成小腿伤害的Fz、Mx、My值大小。参考一些竞品车型的应用情况, 将主驾歇脚硬塑料支架改为EPP泡沫、副驾脚部PET毡缓冲垫改为EPP泡沫。由于偏置碰失分较多, 先进行偏置碰验证。验证试验发现, EPP泡沫材质对主驾小腿伤害的改善较为明显, 副驾小腿伤害并没有改善。后又将副驾脚部缓冲垫改为EVA+PU发泡材质进行验证, 偏置碰和正碰副驾小腿得分都有较大的提高, 说明副驾应用EVA+PU发泡材质的缓冲垫对前碰试验假人的小腿保护较为有利。

关键词: 被动安全; 碰撞试验; 前碰; 假人; 小腿伤害

2015年4月, 中国汽车技术研究中心发布了2015版C-NCAP管理规则[1], 并于2015年7月1日开始实施。2015版C-NCAP相对于2012版, 除了主动安全配置加分项由4分降为3分外, 主要的试验项目和相应的满分值没有变化。主要修改了星级得分区间, 五星的门槛值由2012版的52分增加为54分, 其他的更改细节主要包括以下内容: 增加了自愿申请评价车型配置选取的要求、取消了碰撞试验中关于假人胸部3ms加速度的考核指标、增加了碰撞试验中关于假人胸部粘性指标的考核、量化了碰撞试验中关于假人下潜的判断标准、修改了鞭打试验中对于上颈部和下颈部得分的计算方法、修改了鞭打试验中座椅靠背动态张角限值、修改了鞭打试验最终得分计算方法、取消了对驾驶员侧安全带提醒装置和ISOFIX固定装置的加分项目及分值。

第一作者: 李宝玉(1987-), 男(汉), 安徽芜湖, 工程师。E-mail: libaoyu@mychery.com

对于两个前碰试验，50kph 正面 100%重叠刚性壁障碰撞试验（以下简称 50FF）和 64kph 正面 40%重叠可变形壁障碰撞试验（以下简称 64ODB），前排假人伤害值评价项、伤害值高低性能值都相同，只是两个试验相应部位的算分方式不同。试验的相应部位评价得分取前排两个假人对应部位考察项的最低分。因此，涉及到前碰试验的伤害值优化调整，两个试验需要同时验证。2012 版 C-NCAP 实施过程中共评价了 12 批车型，而 2015 版 C-NCAP 自实施一年以来，已经评价了 4 批新车星级。统计两版 C-NCAP 前碰试验五星车前排假人各部位得分情况，如图 1 所示。不难发现，目前头部、颈部、大腿得分较容易，而失分项主要集中于假人胸部和小腿。特别是 64ODB 试验，假人小腿满分 4 分，被赋予的权重较高，一旦车型设计不合理，偏置碰假人小腿将失分较严重。

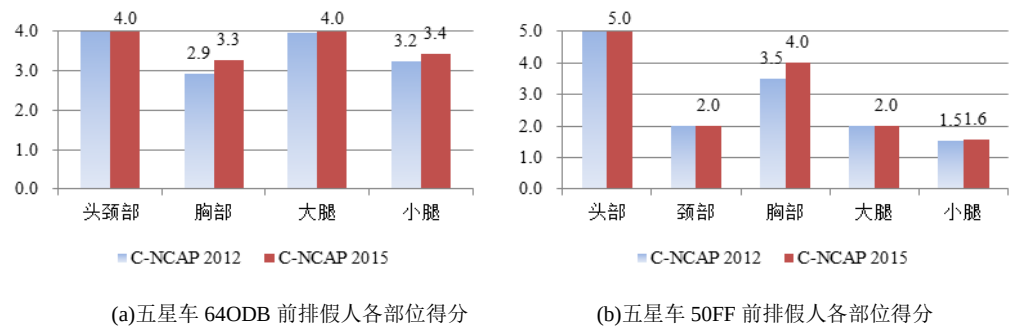


Figure 1. Each part of the C-NCAP five-star car touch test dummies
图1 C-NCAP五星车前碰试验假人各部位得分

目前针对假人小腿伤害的特性，已经有不少研究成果^[2-7]，但这些研究成果一般是基于特定车型做的优化分析。由于每个车型的车身结构和约束系统的配置、性能和匹配情况存在较大差异，因此一些结论只可供参考，不能照搬结论。本文基于某车型在 C-NCAP 前碰试验前排假人小腿得分较差的情况，首先进行了理论、试验伤害值曲线和结合高速摄像的分析，做了一些优化方案和验证，得出了 EPP 发泡对主驾假人腿部伤害改善明显、EVA+PU 发泡缓冲垫对副驾假人腿部伤害改善较为有利的结论，希望可以为后期其他的车型开发提供有益的参考。

1 问题描述

某车型在进行 C-NCAP 五星开发的过程中，64ODB 和 50FF 两个试验前排假人小腿的综合得分分别是 2.69 分（满分 4 分）和 1.3 分（满分 2 分），失分较严重，如图 1 中统计的五星车假人小腿（左侧）的得分偏低，且无法满足偏置碰小腿 3.5 分和正碰小腿 1.5 分的开发目标。

表 1 64kph 正面 40%重叠可变形壁障碰撞试验结果
Table 1. Crash test results of 64 kph positive 40% overlap deformable walls

评价项	满分	高性能值	低性能值	主驾伤害值	副驾伤害值	综合得分
小腿压缩力 Fz	4	2kN	8kN	2. 3kN	2. 8kN	2. 69
小腿 TI 值	4	0. 4	1. 3	0. 69	0. 68	

表 2 50kph 正面 100%重叠刚性壁障碰撞试验结果
Table 2. Crash test results of 50 kph positive 100% overlap rigid walls

评价项	满分	高性能值	低性能值	主驾伤害值	副驾伤害值	综合得分
小腿压缩力 Fz	2	2kN	8kN	1. 86kN	3. 42kN	1. 3
小腿 TI 值	2	0. 4	1. 3	0. 53	0. 72	

鉴于目前得分现状，有必要对前碰试验假人左侧小腿伤害进行优化。

2 原因分析

C-NCAP 假人小腿部位评分指标主要有小腿压缩力 F_z 和胫骨指数 TI 值，从目前的伤害值来看，影响得分较低的因素主要是小腿胫骨指数 TI 值较大。

小腿 TI 值的计算公式如下：

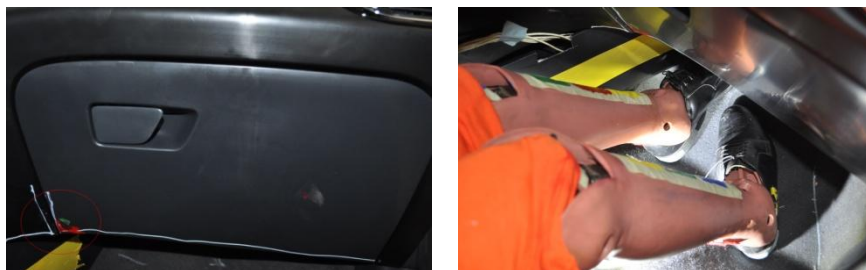
$$TI = \left| M_R / (M_C)_R \right| + \left| F_z / (F_C)_z \right|$$
$$MR = \sqrt{(M_x)^2 + (M_y)^2}$$

式中： M_x 为绕 x 轴的弯矩； M_y 为绕 y 轴的弯矩； $(M_C)_R$ 为临界弯矩，按 225Nm 计； F_z 为 z 向的轴向压缩力； $(F_C)_z$ 为 z 向临界压缩力，按 35.9kN 计。

因此，从公式中可以看出影响 TI 值大小的主要有三个因素：小腿轴向压缩力 F_z 、小腿弯矩 M_x 、 M_y 。

由于偏置碰试验小腿失分较严重，先针对偏置试验进行相关分析和优化，方案有效后，再对正碰试验进行验证。

图 2 展示了副驾假人试验后的下肢状态。副驾假人下小腿在手套箱和仪表板分界线区域有接触痕迹，且假人脚部带动两条小腿下部出现一定程度的转动。副驾假人歇脚区域受前轮罩和防火墙造型的影响前高后低，这使得假人脚部前移的过程中，腿部受到绕 Y 轴的弯矩 M_y 伤害。其次，假人左侧小腿与仪表板手套箱分界线区域接触，仪表板本体受仪表横梁支架支撑硬度较大，而手套箱背面是空箱结构材质较软，因此这个区域是变硬度区域，小腿撞击到这个区域会受到绕 X 轴的 M_x 伤害。另外，揭开副驾歇脚区域的地毯，下部仅为一层不足 20mm 的 PET 毛毡缓冲垫，这种材质的缓冲垫缓冲吸能效果较差，对小腿轴向压缩力 F_z 不利。



(a) 试验后假人小腿接触痕迹

(b) 试验后假人脚部状态

Figure 2. The passenger dummies state of lower limbs after test

图 2 副驾假人试验后下肢状态



(a) 试验后假人小腿接触痕迹

(b) 试验后假人脚部状态



(c) 试验后歇脚区域变形情况



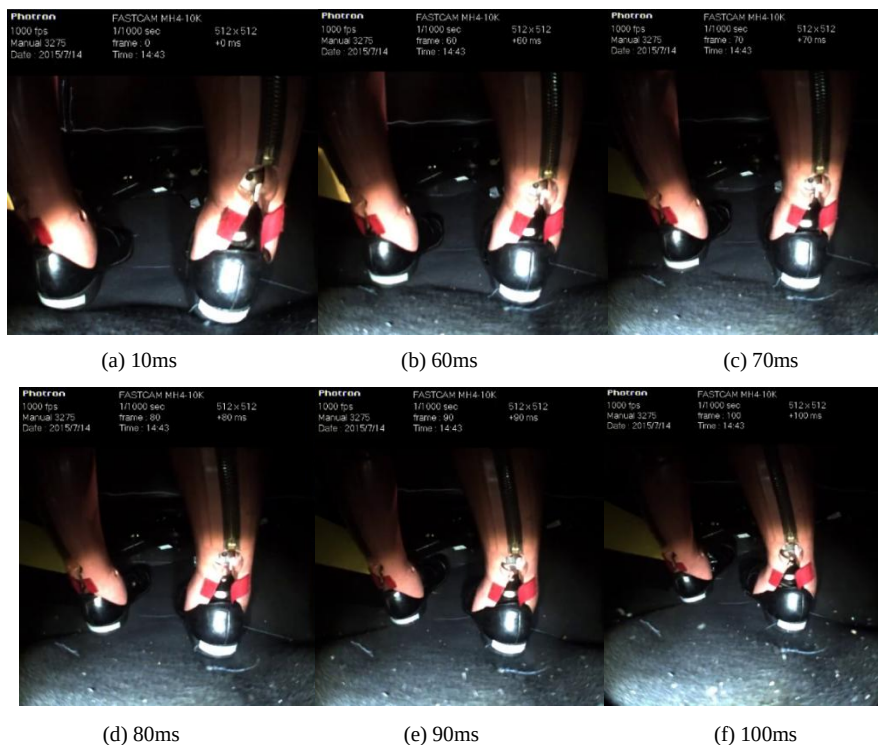
(d) 主驾歇脚踏板支架

Figure 3. The main driving state of lower limbs after the dummy test
图 3 主驾假人试验后下肢状态

图 3 为主驾假人试验后下肢状态，试验后主驾假人小腿与仪表板和管柱下护板没有明显的接触痕迹，油门踏板未断裂，主驾歇脚区域钣金无明显变形，侵入较小。揭开主驾左侧歇脚区域地毯，可以发现，左脚下部的歇脚踏板支架为硬塑料支架，材质为 PP+EPDM-T20，这种材质在碰撞中对于假人脚部和小腿吸能缓冲效果较差。

图 4 为试验过程中副驾假人的高速摄像截图，假人脚跟部画有白色原始印记。从高速摄像可以看到，副驾脚部在 60ms 左右已经开始滑动，110ms 左右脚部前移达到最大，120ms 以后在假人骨盆反弹作用的带动下，双脚有抬离地面的趋势。期间，左脚滑动速度及滑动量都较右脚大，70ms 之前双脚都是以向前平移为主，没有明显转动。80ms 以后，脚部开始出现明显的转动。这个过程的运动特征时刻，可以结合图 8 的伤害值曲线互相佐证确定。

通过试验过程的分析，可以知道，优化副驾脚部伤害需要解决以下关键的问题：1、由于歇脚区域钣金造型的不平整性，脚部滑动过程中会受钣金造型凹凸不平带来的力矩伤害；2、脚部向前滑移较大，带动左小腿撞击仪表板的强度较高；3、歇脚区域地毯下面 PET 毡缓冲吸能效果较差。而对于主驾，左脚歇脚区域的踏板支架硬度太高，几乎没有任何的缓冲吸能效果。



(a) 10ms

(b) 60ms

(c) 70ms

(d) 80ms

(e) 90ms

(f) 100ms

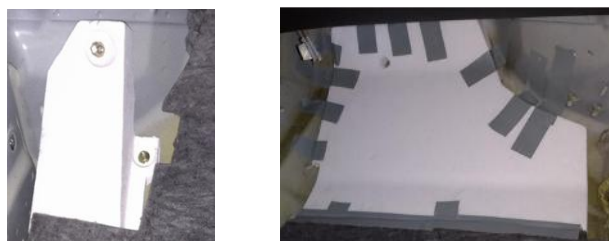


(g) 110ms (h) 120ms (i) 130ms
Figure 4. The passenger foot and leg movement in the process of collision process

图 4 碰撞过程中副驾脚部和小腿运动过程

3 优化方案

为了解决以上存在的问题，主驾和副驾歇脚区域拟采用 EPP 泡沫材质（材质：PA66-GF30）分别替换原有的歇脚踏板支架和 PET 毡材质缓冲垫，如图 5 所示。考虑到尽可能减小周边关联件的更改量，主副驾 EPP 泡沫要匹配周边的钣金造型和固定方式，并保持原始件的主要基本尺寸。同时考虑到日常可使用性，EPP 泡沫本身由于材质较脆，如果太软则日常使用会容易踩断。所以，兼顾碰撞缓冲性能和日常可使用性，针对 EPP 泡沫优化方案的验证试验搭载的 EPP 泡沫手工样件为 30 倍发泡率。



(a) 主驾 EPP 泡沫 (b) 副驾 EPP 泡沫

Figure 5. EPP foam optimization solution
图 5 EPP 泡沫优化方案

同时，结合其他车型的歇脚区域的应用情况，对副驾位置还提出了 EVA 皮革与 PU 发泡的方案，EVA 皮革黏贴在 PU 发泡之上。EVA 皮革本身柔韧性较好，可以适应歇脚区域的型面变化，PU 发泡是具有一定厚度的海绵，缓冲吸能特性较强，二者匹配使用，理论上既可以在一定程度上阻止假人下肢过多的前移偏转，又可以缓冲吸能，但 EVA+PU 发泡方案的成本较 EPP 发泡要高。

验证策略为首先针对失分较多的偏置碰试验进行搭载验证，有明显改善后，再在正碰试验上进行搭载验证。



(a) 副驾 EVA+PU 发泡方案数据 (b) 副驾 EVA+PU 发泡手工样件

Figure 6. The passenger EVA + PU foam package
图 6 副驾 EVA+PU 发泡方案

4 验证结果

对于主驾假人小腿，歇脚踏板支架材质更换为EPP泡沫后，小腿压缩力 F_z 、弯矩 M_x 、 M_y 伤害值曲线起峰变得较为缓和，特别是弯矩 M_x 、 M_y 峰值降低地非常明显，如图7。影响小腿得分的TI值从之前的0.69降为0.56，相应地，得分也由2.69分增加至3.29分，见表3。可见EPP泡沫对主驾左侧小腿伤害的改善较为明显。

表 3 EPP 发泡方案 64kph 正面 40%重叠可变形壁障碰撞试验结果
Table 3. Results of EPP foam solution in 64 kph 40% crash test

评价项	满分	高性能值	低性能值	主驾伤害值	副驾伤害值	综合得分
小腿压缩力 F_z	4	2kN	8kN	2.38kN	2.86kN	2.17
小腿 TI 值	4	0.4	1.3	0.56	0.81	

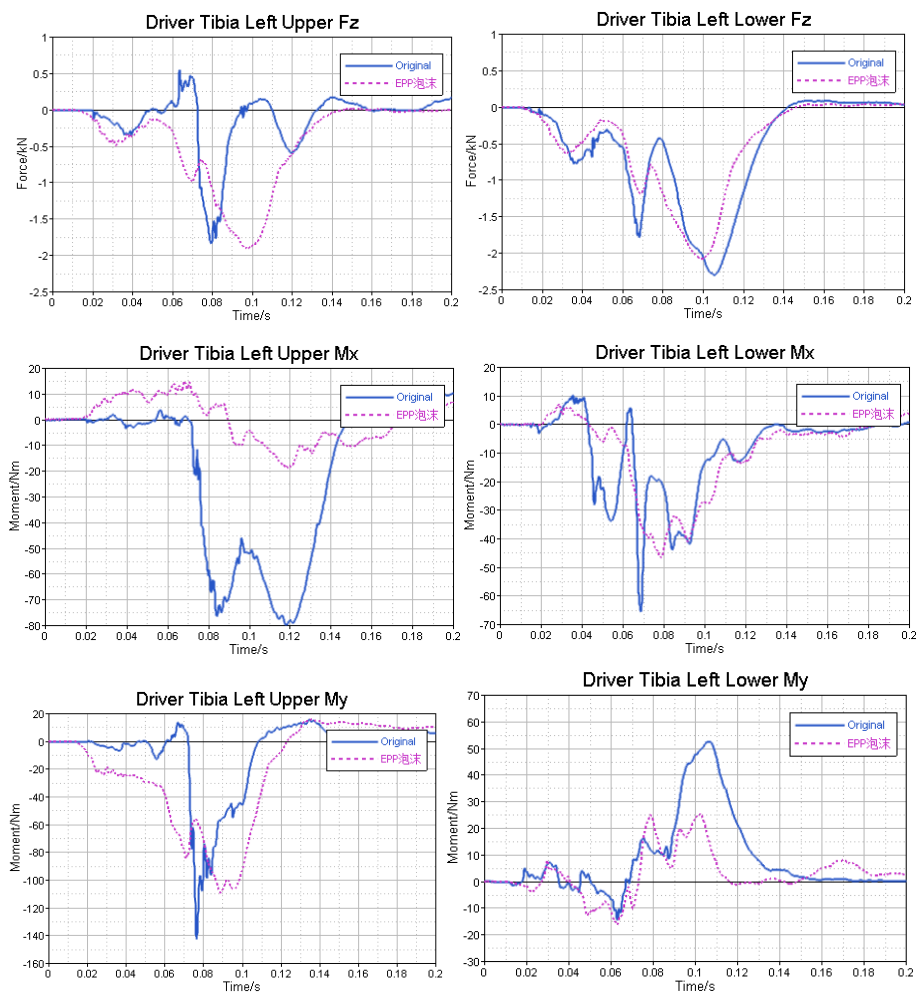


Figure 7. Main drive left leg damage curve comparison before and after optimization
图7 优化前后主驾左腿伤害值曲线对比

副驾歇脚区域采用EPP泡沫后，由于泡沫具有一定硬度，阻挡了假人脚部的滑动，减缓了假人小腿与仪表板手套箱分界线的撞击力度，因此可以从图8中看到，副驾假人小腿弯矩 M_x 有明显降低。虽然EPP泡沫对阻碍假人小腿滑动有明显的作用，但对假人小腿压缩力 F_z 、弯矩 M_y 伤害值并没有显著的改进，相反地，弯矩值 M_y 还增大了，副驾的TI值增大到0.81，得分比以前还更差，见表3。

对副驾EVA+PU发泡的方案也进行了搭载验证，主驾仍然搭载EPP泡沫歇脚板支架。从图8的对比曲线，EVA+PU的方案对假人小腿压缩力Fz、弯矩Mx、My都有显著的降低，说明EVA+PU发泡的方案既在一定程度上阻止了假人下肢的运动，又分化消解吸收掉了这部分能量，使得假人小腿的TI值由之前的0.68降至0.40，副驾小腿几乎得满分，见表4。

表 4 副驾 EVA+PU 发泡方案 64kph 正面 40%重叠可变形壁障碰撞试验结果
Table 4. Results of of Passenger side EVA + PU foaming solution in 64 kph 40% overlap crash test

评价项	满分	高性能值	低性能值	主驾伤害值	副驾伤害值	综合得分
小腿压缩力 Fz	4	2kN	8kN	2.09kN	2.11kN	3.41
小腿 TI 值	4	0.4	1.3	0.53	0.40	

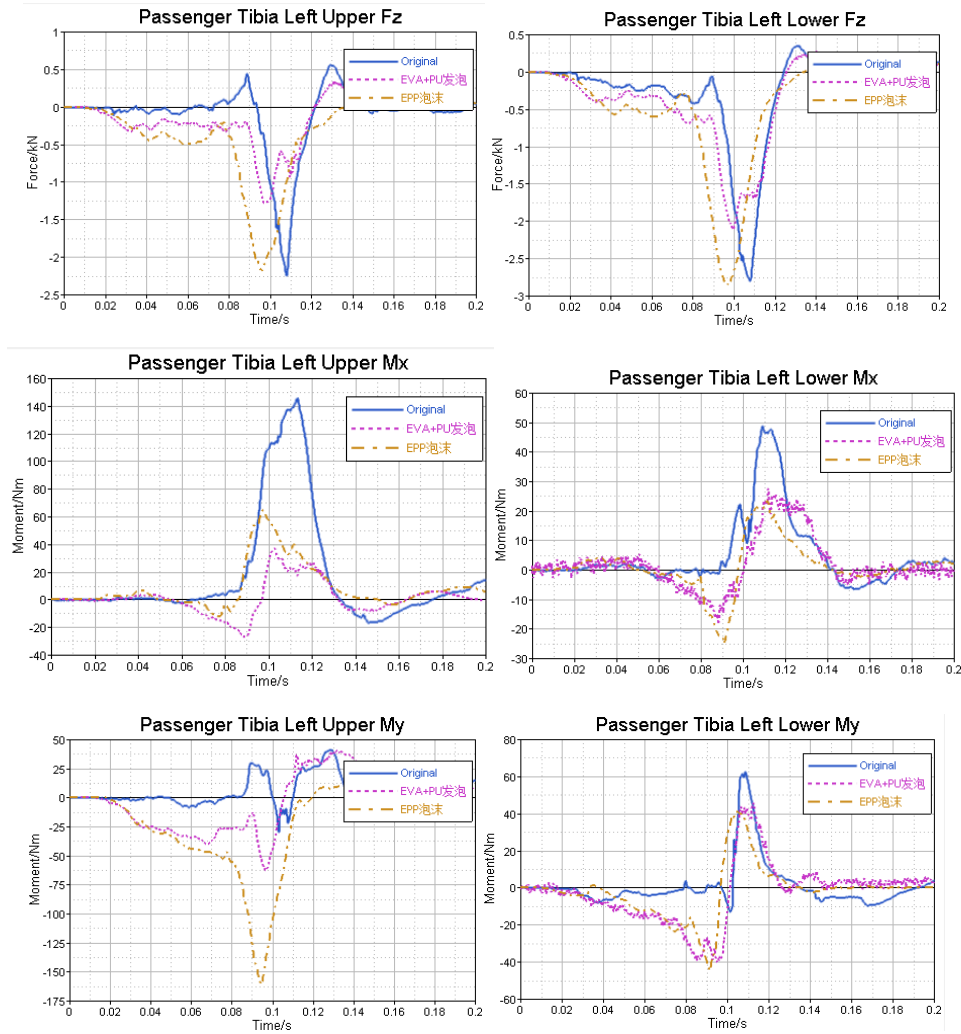


Figure 8. The passenger damage curve comparison before and after optimization

图8 优化前后副驾伤害值曲线对比

综上所述，主驾采用EPP歇脚泡沫，副驾采用EVA+PU发泡的组合方案可以有效地降低偏置碰试验的前排假人小腿伤害值。

同时，对50FF碰撞试验也搭载了上述的优化方案进行验证，主驾假人小腿TI值0.52，副驾假人小腿TI值0.44，前排假人小腿综合得分1.73分，见表5。

由此可见，主驾采用EPP歇脚泡沫，副驾采用EVA+PU发泡的组合方案也可有效地降低全正碰试验的前排假人小腿伤害值。

表 5 副驾 EVA+PU 发泡方案 50kph 正面 100%重叠刚性壁障碰撞试验结果
Table 5. Results of passenger side EVA + PU foaming solution in 50 kph 100% overlap rigid wall crash test

评价项	满分	高性能值	低性能值	主驾伤害值	副驾伤害值	综合得分
小腿压缩力 Fz	2	2kN	8kN	1.43kN	2.24kN	1.73
小腿 TI 值	2	0.4	1.3	0.52	0.44	

5 结论

本文针对某车型在C-NCAP工况64ODB和50FF试验中前排假人小腿得分较差的情况，首先进行了理论分析找到导致前排假人小腿伤害值较大的原因。针对主驾假人和副驾假人的歇脚踏板支架和缓冲垫，分别采用了EPP泡沫的方案和EVA+PU发泡的方案，结果表明：

1、EPP泡沫对偏置碰和正碰试验主驾假人的小腿伤害优化较为明显，而对副驾假人小腿伤害没有明显的改进；

2、EVA+PU发泡的组合方案对偏置碰和正碰试验副驾假人小腿伤害值优化较为明显，几乎可以使偏置碰假人小腿得分达到满分；

3、EVA+PU发泡的组合方案可以使50FF和64ODB得分提升共约1.1分，这对C-NCAP工况伤害值的优化来讲已非常可观。

参考文献

- [1] C-NCAP 2015 版评价规则[M]. 天津:中国汽车技术研究中心 C-NCAP 管理中心, 2015. 4.
- [2] 商恩义, 高劲松. A 级车正面全宽碰撞试验中假人小腿伤害研究[J]. 汽车技术. 2012 (7).
- [3] 黄荣军, 王元博, 李夕亮. C-NCAP 50 公里 100%全宽正碰试验中假人小腿伤害的研究[C]. 2011 第十四届中国汽车安全技术学术会议论文集, 2011.
- [4] 丁成, 陈伟刚, 黄荣军, 顾镭. 基于 Heel stopper 方法对偏置碰乘员小腿优化[C]. 2013 第十六届中国汽车安全技术国际研讨会, 2013.
- [5] 刘志新, 陈弘, 刘玉光, 李向荣. 基于 NCAP 规则的正面碰撞乘员小腿伤害分析[J]. 汽车工程, 2008, 30 (11).
- [6] 马立军, 张凯, 陈现玲, 岳国辉. 正面碰撞中乘员小腿伤害的分析研究[C]. 2011 第十四届中国汽车安全技术学术会议论文集.
- [7] 伍腾飞, 景旭, 顾蔚新. 正面碰撞中假人小腿伤害影响因素分析[C]. 2011 第十四届中国汽车安全技术学术会议论文集.