

# Simulation Analysis and Lightweight Research of Automobile Bumper

Xiongliren JIANG<sup>1</sup>, Haiming GU<sup>1</sup>, Xiao KE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>China Automotive Technology and Research Center, Tianjin, China

<sup>2</sup>Changhe Automobile Co., Ltd, Jingdezhen, China

Email: jiangxiongliren@catarc.ac.cn, guhaiming@catarc.ac.cn

**Abstract:** When a car has a frontal crash, the front bumper contacts the crash first and absorbs the impact energy to a certain extent to protect the car body. With the development of automobile industry and the large application of engineering plastics in automobile industry, as an important safety device, the bumper of automobile is also on the way of innovation. In this paper, a three-dimensional geometry model of a car bumper system is established by using CATIA, and the low-speed collision analysis is carried out by using LS-DYNA. High strength SMC instead of original Bumper, and the influence of different thickness on the impact result is studied. The lightweight design of bumper is accomplished. Finally, compared with the original high strength steel bumpers, the quality dropped by 25.9%.

**Keywords:** bumper; SMC composites; Crash simulation; Light Weighting

## 汽车保险杠碰撞仿真分析及轻量化研究

蒋熊力忍<sup>1</sup>, 顾海明<sup>1</sup>, 肖克<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国汽车技术研究中心, 天津, 中国, 300000

<sup>2</sup>江西昌河汽车有限责任公司, 景德镇, 中国, 333000

Email: jiangxiongliren@catarc.ac.cn, guhaiming@catarc.ac.cn

**摘要:**当汽车发生正面碰撞时,前保险杠首先与碰撞物接触,并且可以在一定程度上吸收碰撞能量,保护汽车车体。随着汽车工业的发展和工程塑料在汽车工业的大量应用,汽车保险杠作为一种重要的安全装置也走向了革新的道路。本文利用 CATIA 建立了某款轿车保险杠系统的三维几何模型,然后利用 LS-DYNA 进行低速碰撞计算分析。采用高强度 SMC 替代原保险杠部分零件的高强度钢材料,并研究不同的厚度对碰撞结果的影响,完成了保险杠轻量化设计。最终,与原高强度钢保险杠相比,质量下降 25.9%。

**关键词:** 保险杠; SMC 复合材料; 碰撞仿真; 轻量化

## 1 引言

世界汽车工业的发展趋势表明:安全、节能、环保的汽车已经成为 21 世纪汽车发展的主流,汽车轻量化无疑是其最佳途径,而汽车轻量化的主流材质之一就是汽车用复合材料<sup>[1]</sup>。国外对保险杠的研究和发展速度均较快,60 年代中期开始了计算机模拟碰撞技术研究<sup>[2,3]</sup>。进入 80 年代后,随着计算机软、硬件技术的快速发展以及汽车市场竞争的加剧,汽车碰撞计算机模拟技术得到了广泛的应用。我国国内对保险杠的研究较晚,但是发展速度较快,通过结合传统的碰撞试验与模拟仿真分析,取得了比较显著的成果<sup>[4-7]</sup>。

纵观当今国内外的汽车保险杠的设计与发展,开发质量小,变形吸能性能更优越,同时在低速碰撞过程中能对汽车的前、后端高成本、易损件的保护作用更加明显,在高速碰撞中能尽可能地吸收汽车动能并能有效地把碰撞冲击力快速、有效地传递给后端车身结构,以及具有更优的行人保护性能的汽车保险杠已经成为现今保险杠系统开发研究的总体趋势<sup>[8-10]</sup>。

## 2 保险杠有限元模型的建立及边界条件定义

### 2.1 保险杠几何模型建立

本章仿真分析采用的是国产某中档轿车开发前期所采用的前保险杠。由于保险杠蒙皮在碰撞过程中吸收能量很小，所以在仿真过程中不予考虑。保险杠结构采用实际的结构，而非简化形式。本文在三维绘图软件 CATIA 中绘出保险杠的几何模型，如图 1 所示。

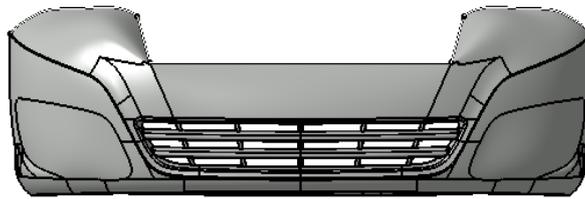


Figure 1. Bumper geometry model

图 1. 保险杠几何模型

## 2.2 保险杠有限元模型的建立

汽车的零部件很多都是由薄板冲压而成的，所以在汽车碰撞有限元仿真中，这类零件通常采用薄壳单元来离散。在汽车碰撞有限元分析中，有两类薄壳单元使用最为频繁：HL 壳单元、BT 壳单元。其中，BT 壳单元全称为 Belytschko-Tsay 壳单元，它是缺省的壳单元公式，其理论基础为局部坐标变换；它也采用面内单点积分；它的计算速度要快于 HL 单元，它对求解大变形问题要稳定有效得多。所以，本文采用 BT 壳单元进行网格的划分，以建立有限元模型<sup>[11]</sup>。本文采用材料类型 24 号材料，即分段线性塑性材料，用于钢制保险杠梁和支架的模拟，保险杠各部分材料参数如表 1 所示。

Table 1. Bumper material parameters

表 1. 保险杠各部分材料参数

	密度 ( $t/mm^3$ )	弹性模量 (MPa)	泊松比	屈服应力 (MPa)
前部加强板	7.8500E-09	215000	0.28	1006
齿状横梁	7.8500E-09	200000	0.28	370
支架	7.8500E-09	215000	0.28	1006

## 2.3 保险杠摆锤系统边界条件定义

将保险杠系统和摆锤的有限元模型导入到同一个 HyperMesh 工作环境中，根据 FMVSS 581 法规中基准高度为 445mm 的要求。图 2 为定位后的有限元模型。

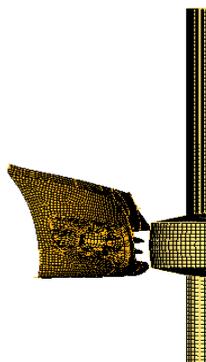


Figure 2. Positioning bumper and pendulum system

图 2. 定位后的保险杠与摆锤系统

本节接触设置选择的接触算法为对称罚函数法，接触类型为自动接触。FMVSS 581 低速碰撞法规规定，碰

撞时车辆应该处于停止状态，制动器应松开并且变速器挂空档。顾力强等人<sup>[12]</sup>在其研究文献中推导出了该两种情况下的速度转换关系，并且证实了该方法的有效性。摆锤在两种情况下的速度转换关系为：

$$v = \frac{\sqrt{2}}{2} v_1 \quad (1)$$

其中， $v_1$  为将保险杠安装到可移动支架上时摆锤的速度，其大小为 4km/h； $v$  为将保险杠系统固定在不可移动的刚性部件上时摆锤的速度。由于本文采用的单位制为 t-mm-s。所以经过换算单位后， $v$  的大小为 785.674mm/s。

### 3 高强度 SMC 保险杠轻量化设计

#### 3.1 SMC 复合材料性能特点

SMC(sheet moulding compound)即片状模塑料复合材料，是把低粘度的热固性树脂化合物浸到玻璃纤维中而制成的连续的片状预成型材料。玻璃纤维切成短纤维之后落在塑料薄膜上成为片状的垫，也可以直接用玻璃纤维毡垫。SMC 材料为片状，有利于模压成型，可以提高生产效率。SMC 材料在欧美汽车业中用量很大，美国 50% 以上的汽车用玻璃钢部件为 SMC 制品<sup>[13-15]</sup>。本文采用的是 50% 玻璃纤维增强的高强度 SMC，性能参数如表 2 所示。

Table 2. Mechanical properties of high strength SMC

表 2. 高强度 SMC 力学性能

弹性模量 (MPa)	泊松比	拉伸屈服强度 (MPa)	伸长率	弯曲强度 (MPa)	密度 (t/mm <sup>3</sup> )
14000	0.33	207	1%	345	7.8500E-09

#### 3.2 高强度 SMC 保险杠轻量化设计

##### 3.2.1 高强度 SMC 保险杠有限元模型的建立

考虑到本文采用的保险杠的车型已经固定，保险杠与车身后后之间的距离不宜发生变化，所以对保险杠的外形不能改变过大。金属型保险杠的纵梁加强板与纵梁之间通过焊接连接，若将纵梁加强板改为复合材料，它与金属纵梁之间的连接方式需要改变，与之相应结构也需要较大的改变。本文只研究将保险杠前部加强板和齿状横梁的金属材料用高强度 SMC 替代后保险杠的碰撞性能，以保持保险杠总体外形不发生较大变化。

原保险杠的形状不发生变化，用高强度 SMC 材料替代原保险杠前部加强板和齿状横梁的高强度钢材料，高强度 SMC 材料用 24 号分段线性弹塑性材料模拟。

高强度 SMC 材料的强度极限比高强度钢低，在材料替代后，厚度需要适当增加，厚度对 SMC 产品的吸能特性很大。本节对不同厚度的替代保险杠进行试算，在不超过原保险杠质量的约束条件下，以碰撞性能最优为目标，找到最佳的壁厚。原保险杠加强板和齿状横梁的厚度为 1mm，这里取 2mm、2.4mm、2.8mm、3mm、3.2mm、3.6mm 进行仿真。

##### 3.2.2 高强度 SMC 保险杠厚度的确定

原高强度钢保险杠质量为 6.37kg。对前部加强板和齿状横梁为不同厚度的复合材料保险杠进行 4km/h 低速对中碰撞仿真，以保险杠最大变形量、摆锤最大加速度、SMC 替代材料的加强板和齿状横梁的最大应力值以及保险杠最大吸能值为评价参数，如表 3 所示的结果。

Table 3. Simulation results of SMC bumper with different thickness

表 3. 不同厚度高强度 SMC 保险杠仿真结果

厚度 (mm)	质量 (kg)	轻量化 (%)	最大变形量 (mm)	最大加速度 (mm/s <sup>2</sup> )	碰撞时间 (ms)	吸能 (J)
2.0	3.857	39.4	31.6	18948	120	315.7
2.4	4.247	33.3	28.8	19233	116	314.9

2.8	4.637	27.2	26.5	19385	110	315.8
3.0	4.833	24.1	25.5	19801	103	316.8
3.2	5.029	21.1	24.7	20249	100	317.5
3.6	5.423	14.9	22.9	20274	95	319.4

### (1) 变形与吸能的影响

SMC 材料靠弹性变形吸收能量，单位质量的材料变形越大吸收能量越多，同时变形相同时质量越大吸收的能量越大。从表 3 可以看出，随着壁厚的增大，保险杠最大变形量逐渐减小，在 2.4mm 厚之前，变形减小保险杠吸能减少，但在 2.4mm 之后随着变形的减小吸能成增大趋势，这说明在 2.4mm 壁厚之后质量增大带来的吸能增大起到了主导作用。

保险杠变形越小，吸能越多，碰撞性能越好。与原高强度钢保险杠碰撞过程中最大变形量 21.8mm，吸收能量最大值 300J 相比较，高强度 SMC 保险杠最大变形量和吸能都有所增大。根据表 3 的数据分析，壁厚越大的保险杠吸能效果越好，但是壁厚的增大带来保险杠质量的增加，必须选择合适的壁厚。

### (2) 对加速度的影响

从表 3 可以看出，壁厚的增大导致了最大加速度的增大和碰撞时间的减少。从碰撞性能来说，降低最大加速度，延长碰撞时间，对车身其它部件和乘员的保护越好。从这个角度来讲，壁厚不宜太大。

原高强度钢保险杠在 4km/h 低速对中碰撞过程中，最大加速度为 22450mm/s<sup>2</sup>，碰撞时间为 62ms，高强度 SMC 保险杠碰撞过程中的最大加速度比原高强度钢保险杠小，碰撞时间大大延长。

### (3) 对等效应力的影响

Table 4. SMC bumper in different thickness corresponding to the maximum stress value

表 4. SMC 保险杠在不同壁厚对应的最大应力值

厚度 (mm)	加强板最大应力值 (MPa)	齿状横梁最大应力值 (MPa)
2.0	207	207
2.4	178.3	193.3
2.8	166.3	185.2
3.0	157.8	180.4
3.2	150.0	174.8
3.6	140.1	165.3

对保险杠是否失效除了考察最大变形量，还必须考察保险杠的最大应力值。对加强板和齿状横梁为不同厚度的高强度 SMC 保险杠仿真结果表明，支架和纵梁连接板在碰撞过程中都没有失效。加强板和齿状横梁壁厚为 2mm 时，保险杠碰撞在 70ms 应力达到最大值，其中支架最大应力为 914.2MPa，纵梁连接板最大应力值为 271MPa，两部分都没有失效。

根据以上对表 3 和表 4 的分析，只有从表 3 中可以看出加强板和齿状横梁壁厚为 2mm 的高强度 SMC 保险杠失效，其余壁厚的保险杠都能满足要求。综合考虑厚度对保险杠碰撞性能的影响，同时为了能够最大程度的实现保险杠的轻量化效果，本文最终选择加强板和齿状横梁最大应力为 180MPa 左右的壁厚，安全系数为  $n=207/180=1.15$ ，最终选择加强板厚度为 2.5mm，齿状横梁厚度为 3mm，此时保险杠的质量为 4.717kg，与原高强度钢保险杠相比，质量下降 25.9%。

## 4 保险杠系统低速碰撞仿真及分析

### 4.1 能量变化曲线

图 3 和图 4 分别为保险杠使用不同材料时，两种碰撞模型的能量曲线，其中前者的保险杠梁的材料为钢，后者的保险杠梁的材料为 SMC 复合材料。

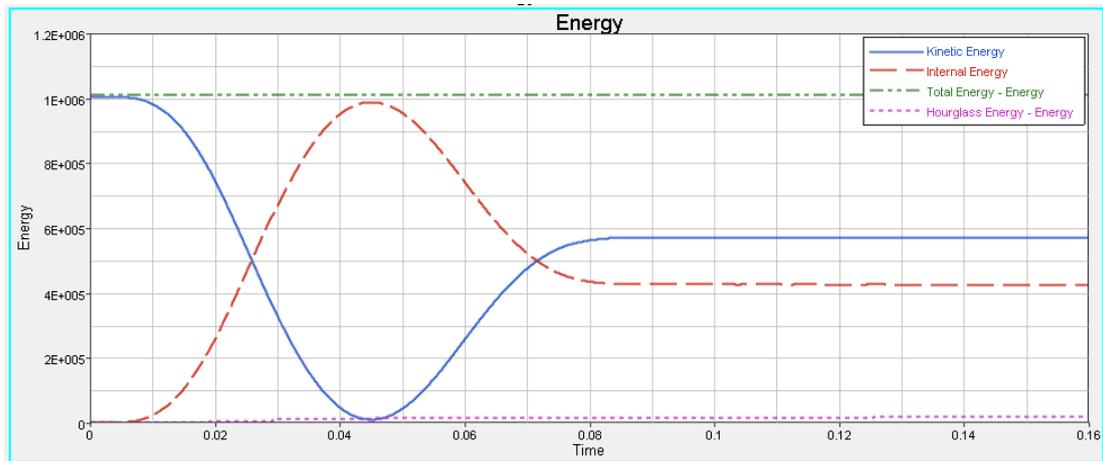


Figure 3. Energy curve of collision model of steel bumper beam

图 3. 钢制保险杠的碰撞模型的能量曲线

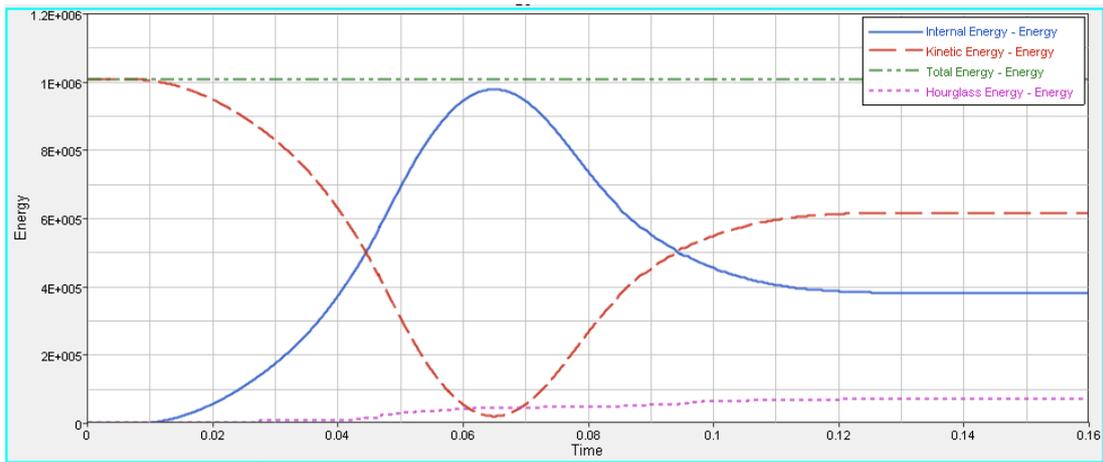


Figure 4. Energy curve of collision model of SMC bumper beam

图 4. SMC 保险杠的碰撞模型的能量曲线

由上述两图可以很容易看出，两个碰撞模型的总能量都是守恒的。图 3 中最大沙漏能为 16600，占总能量的 1.66%。图 4 中最大沙漏能为 70000，占总能量的 7%。因此，这两个碰撞模型的沙漏能对运算结果没有造成显著影响，从而碰撞的有限元模型是真实可信的。

## 4.2 保险杠的变形

本文选取节点 4210 作为参考点，来观察保险杠的变形情况。图 5 为两种碰撞情况下该点的变形—时间曲线。从该图不难看出，钢制保险杠的最大变形为 48mm，发生时刻为 0.065s；而以 SMC 复合材料为材料的梁，其最大变形为 33mm，发生时刻为 0.045s。出现这种现象的原因是，SMC 复合材料的刚度比钢的刚度大。因为保险杠系统会发生塑性变形，所以两个保险杠的最终变形量都不会是 0。

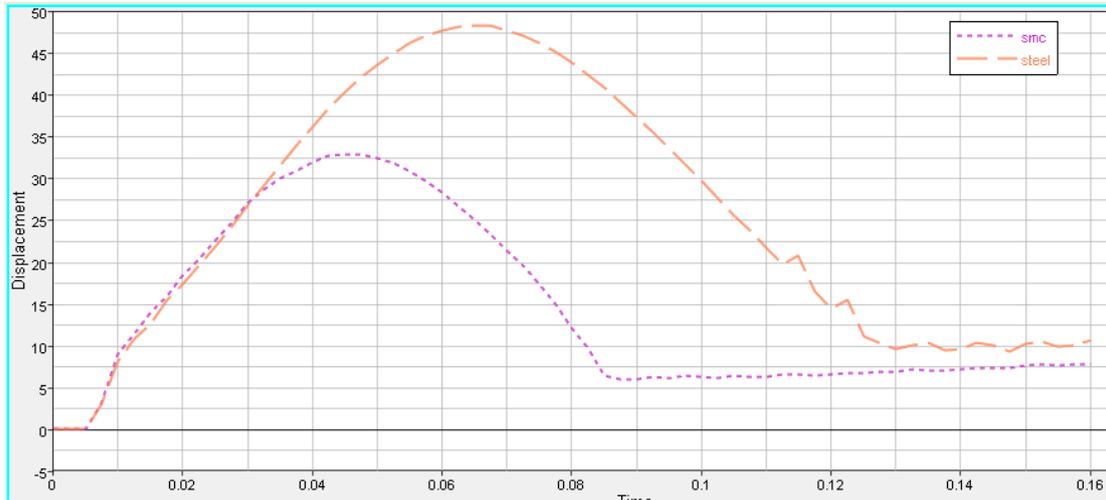


Figure 5. Deformation curves of steel and SMC composite bumper beams

图 5. 钢和 SMC 复合材料保险杠梁的变形曲线

通过对图 3, 图 4 和图 5 数据进行分析, SMC 复合材料保险杠梁的保险杠系统可以吸收与钢制保险杠梁的保险杠系统相同的能量, 但是前者的最大变形比后者小。所以, 通过使用 SMC 复合材料, 保险杠梁的性能有所改善。

#### 4.2 保险杠和摆锤间的冲击力

保险杠和摆锤之间的冲击为也是本文研究的一个重要参数, 冲击力曲线如图 6 所示。由图 6 可知, 对于钢制保险杠梁的保险杠系统而言, 其保险杠和摆锤之间的最大冲击力为 70KN, 而 SMC 复合材料保险杠梁的保险杠系统, 其保险杠和摆锤之间的最大冲击力为 67KN。

本文在阐述国内外汽车碰撞被动安全性的研究方法以及相关法规标准的基础上, 以结构碰撞仿真分析的有限元理论为基础, 对国内某车型前保险杠进行了 4km/h 对中碰撞仿真分析。降低汽车燃油消耗, 实现车身轻量化是汽车技术发展的趋势, 本文对所采用的保险杠从材料方面进行轻量化研究, 最终设计的新型保险杠相对原保险杠质量下降了 25.9%, 轻量化效果明显。

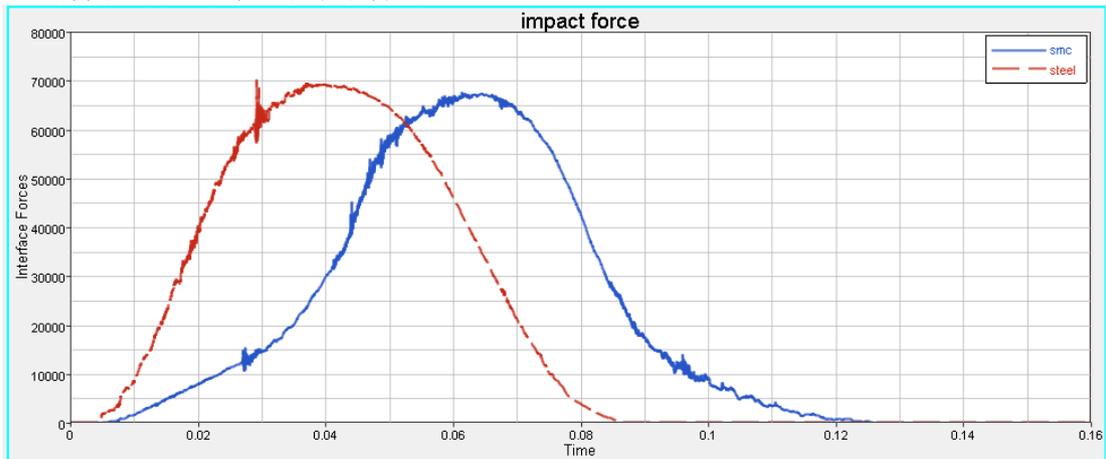


Figure 6. Impact force between bumpers and pendulums of steel and SMC Composites

图 6. 钢和 SMC 复合材料保险杠和摆锤之间的冲击力

#### 致谢 (Acknowledgement)

时光荏苒, 如白驹过隙, 在整篇论文完成的过程中得到了许多人的帮助, 在这里表示由衷的感谢。在最初

的选题中, 我的恩师杨娜老师给我指明了方向, 并在论文遇到难点时, 提供了切实有效的帮助。师兄顾海明在论文最终定稿时, 提出了宝贵的修改意见, 让整篇文章更加完善。在论文的写作过程中, 父母时常的关心, 让我更顺利的完成了这篇论文。最终, 还要感谢 INFATS 的审阅老师对本文提出的修改意见。

## 参考文献 (References)

- [1] 吴宏博, 孙丽娜. 汽车用聚合物基复合材料的新进展[J]. 纤维复合材料, 2012(1):7-12.
- [2] 李彩林, 郭少云, 陈跃. 高抗冲聚丙烯复合材料的研究[J]. 工程塑料应用, 2006:15-19.
- [3] 刘海江, 张夏, 肖丽芳. 基于 LS-DYNA 的 7075 铝合金汽车保险杠碰撞仿真分析[J]. 机械设计, 2011:18-23.
- [4] 安治国, 赵云云. 轿车防撞梁轻量化结构强度设计[J]. 计算机仿真, 2016:205-209.
- [5] 李永刚. 碳纤维复合材料汽车保险杠的研究 [D]. 沈阳:沈阳理工大学硕士学位论文, 2014:13-17.
- [6] 李贝. 纤维增强型复合材料保险杠轻量化设计与优化[D]. 长沙:湖南大学硕士学位论文, 2016:33-40.
- [7] 候智谋. 低比重汽车保险杠聚丙烯复合材料的性能研究[J]. 广东化工, 2014:61-62.
- [8] 赵勇. 新型复合材料在保险杠缓冲梁中的应用[J]. 上海汽车, 2010:41-44.
- [9] 于英华. 泡沫铝/环氧树脂复合材料力学行为及应用研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学博士学位论文, 2007:13-31.
- [10] 张鑫, 黄菊花. 汽车前保险杠碰撞性能分析[J]. 机械设计与制造, 2014, 9:22-25.
- [11] 谭鹏. 长玻纤增强聚丙烯制品成型模拟工艺优化及应用研究[D]. 长沙:湖南大学硕士学位论文, 2015:25-40.
- [12] 顾立强, 林忠钦, 赵亦希, 陈关龙, 王怀宝. 轿车保险杠低速碰撞试验研究[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(1):137-140.
- [13] 李建财. 某乘用车保险杠的碰撞安全性能研究[D]. 长春:吉林大学硕士学位论文, 2014:33-57.
- [14] 陆幸, 马永其, 冯伟. 汽车保险杠低速碰撞的数值研究[J]. 力学季刊, 2014:350-361.
- [15] 朱芝培. 国内外汽车用塑料概况及新的成型方法[J]. 化工新型材料, 1998, 26(12):3-7.