

Crash performances comparison and selection of bumper beam with different lightweight methods

Zhang Jingwen^{1,2}, Fan Tiqiang^{1,2}, Zhao Qingjiang^{1,2}, Li Yang^{1,2}

¹China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd. Chongqing, China, 401122

²Chongqing Automotive Lightweight Engineering Research Center. Chongqing, China, 401122

Email: mymoneyold@163.com

Abstract: With global trends of energy saving and emission reduction, lightweight requirements of automobile and parts are become higher and higher. Bumper beam is one of major crash safety structures in the front and end of automobile, which has attracted a widespread attention in the auto parts lightweight. In this paper, the effects of bumper beam in the automobile crashes and three conditions for its performance evaluation were studied. Base on this, a normal steel bumper beam was replacement with four lightweight methods including cold stamping of high-strength steel, roll high-strength steel, hot forming steel and aluminum alloy respectively. The lightweight degree and crash performance of four lightweight methods were compared, which could provide a reference for the design of bumper beam as well as a method for bumper beam performance evaluation.

Keywords: bumper beam; lightweight; performance analysis

不同轻量化方式防撞梁的碰撞性能对比和选用

张敬文^{1,2}, 范体强^{1,2}, 赵清江^{1,2}, 李 阳^{1,2}

¹中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆, 中国, 401122

²重庆市汽车轻量化工程技术研究中心, 重庆, 中国, 401122

Email: mymoneyold@163.com

摘 要: 在全球节能减排的趋势下, 汽车整车及零部件的轻量化要求越来越高。防撞梁是汽车前端主要的碰撞安全结构件之一, 在汽车零部件轻量化中得到了广泛关注。本文研究了防撞梁在实际整车碰撞中的作用, 并分析了用于防撞梁性能评价的三种工况。采用该工况对某车型普通钢制防撞梁分别采用冷冲压高强钢、辊压成形高强钢、热成形钢以及铝合金四种轻量化方式进行替换, 对比研究了四种轻量化方式的轻量化程度和零件性能, 为该车型防撞的设计提供了参考, 同时也为防撞梁的性能评价提供了一种方法。

关键词: 防撞梁; 轻量化; 性能分析

1 引言

保险杠系统是大多数汽车事故中首先受到撞击的部分, 它主要包括保险杠蒙皮、缓冲泡沫和防撞梁总成三个部分^[1]。其中防撞梁总成作为保险杠系统中的主要碰撞安全结构件, 在碰撞中发挥着极其重要的作用, 其性能优劣直接影响对车身和乘员的保护效果^[2]。

随着人们对汽车碰撞安全性能的要求越来越高, 各国的汽车强制性法规和星级评定标准也日益严格。同时, 在全球节能减排以及汽车轻量化的趋势下, 国内外对防撞梁的研究重点主要集中在保证其碰撞性能的基础上实现

零件的轻量化^[3-4]。目前防撞梁轻量化设计主要通过使用轻量化材料、结构优化以及先进成形工艺得以实现^[5-6]。但如何根据实际需要,综合考虑防撞梁的轻量化程度、生产制造因素以及碰撞性能来选择合适的轻量化方式是各大汽车厂商在防撞梁正向开发和优化设计上所面临的问题。此外,由于行业内还没有比较健全和统一的防撞梁性能评价方法,因借助于仿真软件模拟实际工况进行分析是其性能开发和改进的主要手段。本文对某车型普通钢制防撞梁分别采用高强钢、铝合金、辊压成形件以及热成形件四种轻量化方式进行替换,对比研究了四种轻量化方式的轻量化程度和零件性能,可为该车型防撞梁的轻量化设计提供一定依据。

2 防撞梁轻量化方案

2.1 方案描述

图1为原车型普通钢制防撞梁总成以及四种通过工艺验证可行的轻量化防撞梁总成的CAD模型以及相关的材料、厚度信息。其中原车型普通钢制防撞梁和高强钢防撞梁总成外形保持一致,且防撞梁由内外板通过点焊而成。其余轻量化防撞梁均为单个成形件。防撞梁总成的吸能盒均为矩形方管,并且根据实际的装车空间进行长度匹配。吸能盒前后端分别与防撞梁以及安装板通过缝合焊进行连接。

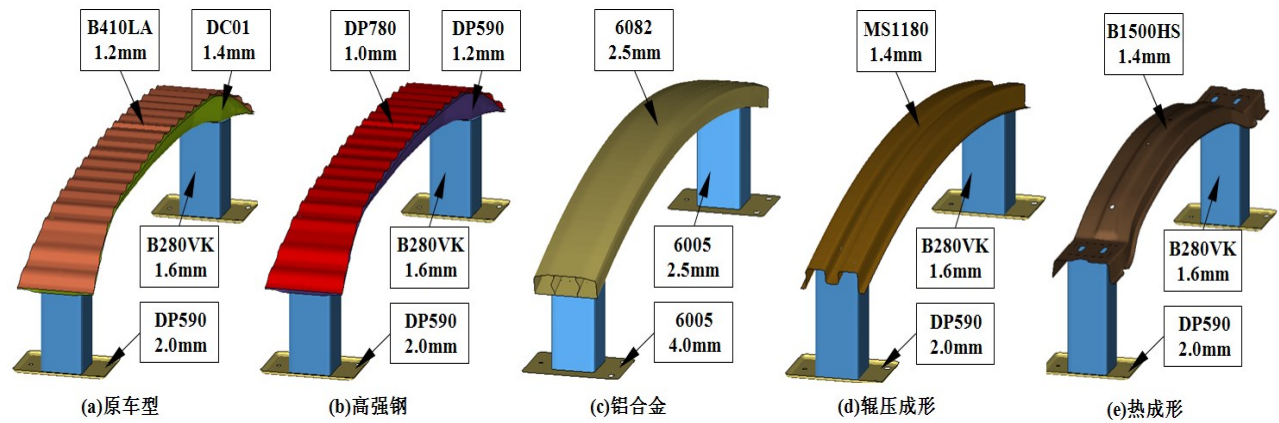


Figure 1 Lightweight program of bumper beam

图 1 防撞梁轻量化方案

2.2 轻量化程度对比

不同防撞梁总成的质量对比如表1所示。可以看出,采用高强钢方案进行替换,减重仅为9.8%。而采用其他三种轻量化方式,均可实现15%以上的减重。其中采用辊压成形防撞梁可实现减重18.5%,采用热成形防撞梁可实现减重22.3%,而采用铝合金防撞梁可实现减重26.8%。

Table 1. Mass of different bumper beam assemblies

表 1 不同防撞梁总成的质量

防撞梁总成类型	质量 (kg)	相对原车型变化
原车型	5.79	—
高强钢	5.22	-9.8%
铝合金	4.24	-26.8%
辊压成形	4.72	-18.5%
热成形	4.50	-22.3%

3 防撞梁碰撞性能对比

3.1 工况研究

当汽车在正面行驶过程中，正面局部撞击到可变形障碍物，如树木、电线杆等。防撞梁的静态刚度不足便会发生折弯，并对后端汽车部件造成较大伤害，如图 2 所示。



Figure 2 Deformation of a bumper beam after local frontal crash

图 2 某车型前端局部碰撞防撞梁变形



Figure 3 Deformation of a bumper beam after low speed crash

图 3 某车型低速碰撞防撞梁变形

当汽车在停车、起步、倒车或拥堵路况等低速(通常小于 10km/h)行驶状态下，车辆前后端发生碰撞时，防撞梁良好的低速碰撞性能可以减小翼子板、散热器、发动机罩等汽车部件的损坏程度从而降低车辆的维修成本^[7]，如图 3 所示。



Figure 4 Deformation of a bumper beam after frontal crash

图 4 某车型正面碰撞防撞梁变形

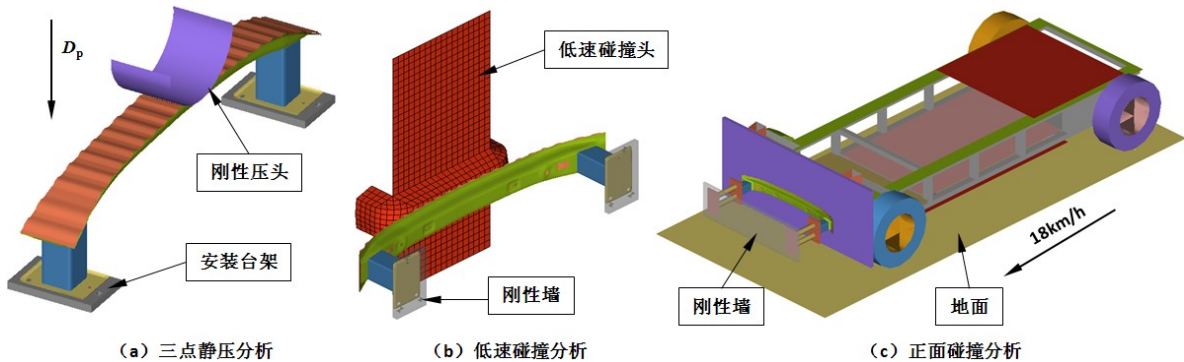


Figure 5 Simulation model of bumper beam performance analysis

图 5 防撞梁碰撞性能分析仿真模型

当汽车在中低速发生正面碰撞（10~20km/s）时，一般希望防撞梁总成可以吸收全部的碰撞能量，从而最大限度减小车身损害；当在高速正面碰撞时（通常大于 20km/h），吸能盒被完全压溃，而防撞梁提供稳定的力传导作用以保证发动机舱的连续变形^[8]，如图 4 所示。

因此，根据实际的碰撞工况，防撞梁的碰撞性能主要包括静态刚度、低速碰撞性能以及正面碰撞性能三个方面。

3.2 分析模型

根据防撞梁的碰撞性能要求建立如图 5 所示的三种仿真分析模型，包括三点静压仿真模型、低速碰撞仿真模型以及正面碰撞仿真模型。三点静压分析时，安装板固定在安装台架上，并采用刚性压头对防撞梁中部进行恒位移加载，加载距离为 100mm^[9]。防撞梁采用弹塑性材料模型，并以静态拉伸曲线作为材料的硬化曲线，如图 5（a）所示。由于仿真过程中未考虑材料的应变率硬化效应，因此加载速度设置为 1m/s 以节约计算时间。低速碰撞分析时，参考 GB17354-1998 汽车前后端保护装置的实验评价方法^[10]，将防撞梁固定在刚性墙上，并采用配重为 1200kg 的低速碰撞头以 4km/h 的碰撞速度对其进行纵向中心碰撞，如图 5（b）所示。正面碰撞分析时，参考《乘用车正面碰撞的成员保护》中的实验方法^[11]，将防撞梁固定在刚性墙上，并采用配重为 1000kg 的台车对其进行撞击，如图 5（c）所示。通过多次预仿真分析最终确定防撞梁正面碰撞的撞击速度为 18km/h，此时吸能盒将呈现出明显的压溃状态。在防撞梁低速碰撞和正面碰撞模型中，防撞梁采用高速拉伸曲线作为其材料的硬化模型以考虑应变率硬化效应，如图 6 所示。

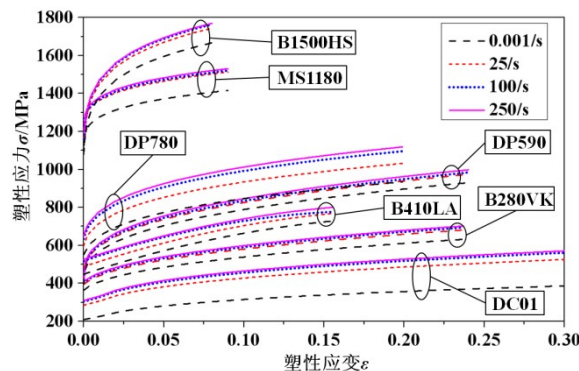


Figure 6 High speed tensile curve of different materials

图 6 不同材料的高速拉伸曲线

3.3 结果对比

3.3.1 静压分析结果

在静压过程中，一般希望防撞梁的抗压能力应不足以使吸能盒发生明显的大变形以保证防撞梁在碰撞中发挥应有的支撑作用。从图 7 中原车型及不同轻量化防撞梁的静压变形仿真结果可以看出，防撞梁中部在静压过程中均发生了折弯，而吸能盒未发生明显变形，因此防撞梁的刚度满足结构的有效性。

图 8 为原车型及轻量化防撞梁的静压力 F 随静压距离 D_p 的变形曲线。可以看出，在静压初期当 D_p 逐渐增大时， F 随之增大并达到静压力峰值 F_{max} 。此时防撞梁结构稳定性遭到破坏，并发生折弯，同时 F 随 D_p 的增大而逐渐减小。当 D_p 相同时，四种轻量化防撞梁的 F 均大于原车型防撞梁，静压性能均有所提升。

表 2 和表 3 分别为轻量化防撞梁与原车型防撞梁的 F_{max} 和静压结构稳定距离 D_s 及对应的塑性应变 ϵ_s 对比。可以看出：相对于原车型防撞梁，辊压成形和热成形防撞梁的静压性能提升最为明显，其中辊压成形防撞梁的 F_{max} 和 D_s 分别提高 61.6% 和 10.3%，热成形防撞梁的 F_{max} 和 D_s 分别提高 52.1% 和 19.0%。高强钢防撞梁的静压性能提升效果次之， F_{max} 和 D_s 分别提高 47.9% 和 6.9%。而铝合金防撞梁虽然 F_{max} 提高了 50.7%，但 D_s 却下降了 15.5%，因此静压性能提升效果最小。同时，四种轻量化防撞梁在达到静压结构稳定极限时的应变均小于各自材料的断裂应变，因此在产生 F_{max} 之前均不会发生断裂，保证了防撞梁结构的可靠性。

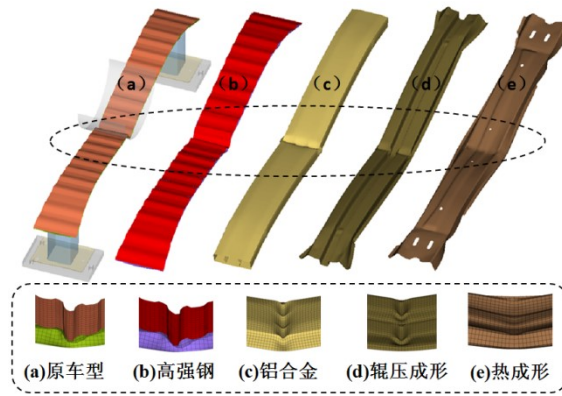


Figure 7 Deformation of different bumper beams after static press

图 7 不同防撞梁静压仿真变形结果

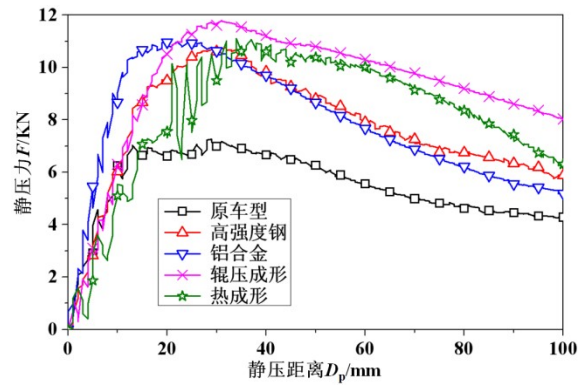


Figure 8 Static press force curve of different bumper beams

图 8 不同防撞梁的静压力曲线

3.3.2 低速碰撞分析结果

图 9 为原车型及轻量化防撞梁在低速碰撞后的位移云图对比。其中原车型和高强钢防撞梁发生了较大的塑性变形，防撞梁中部发生了明显弯曲，最大位移 $D_{\max}$ 分别为 85.3mm 和 64.0mm。铝合金防撞梁塑性变形较小，仅防撞梁中部具有塌陷的趋势， $D_{\max}=31.2\text{mm}$ 。而辊压防撞梁和热成形防撞梁在低速碰撞中主要发生弹性变形，

Table 2. $F_{\max}$ of different bumper beams

表 2 不同防撞梁 $F_{\max}$ 对比

防撞梁类型	$F_{\max}$ (KN)	相对原车型变化
原车型	7.3	—
高强钢	10.8	+47.9%
铝合金	11.0	+50.7%
辊压成形	11.8	+61.6%
热成形	11.1	+52.1%

碰撞结束后防撞梁发生弹性恢复，因此外形保持完好，其中辊压防撞梁的 $D_{\max}$ 仅为 10.9mm，热成形防撞梁的 $D_{\max}$ 仅为 23.0mm。由于辊压防撞梁和热成形防撞梁的不具有明显的塑性变形，因此在发生低速碰撞后无须更换，可对车身起到良好的保护作用，并节约大量的维修成本。

Table 3. D_s and ε_s of different bumper beams表 3 不同防撞梁 D_s 及对应的塑性应变 ε_s 对比

防撞梁类型	D_s/mm	相对原车型变化	ε_s
原车型	29.0	—	0.079
高强钢	31.0	+6.9%	0.073
铝合金	24.5	-15.5%	0.108
辊压成形	32.0	+10.3%	0.064
热成形	34.5	+19.0%	0.052

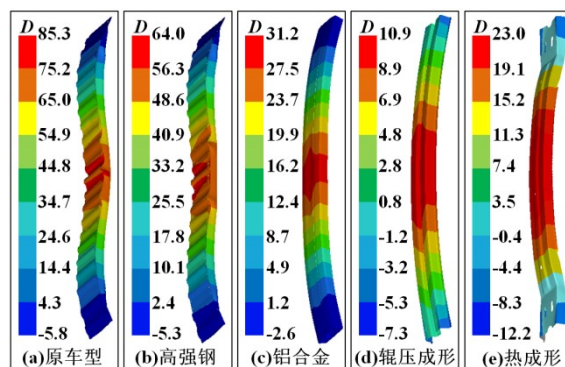


Figure 9 Displacement contours of different bumper beams after low speed crash

图 9 不同防撞梁低速碰撞后的位移云图

3.3.3 正面碰撞分析结果

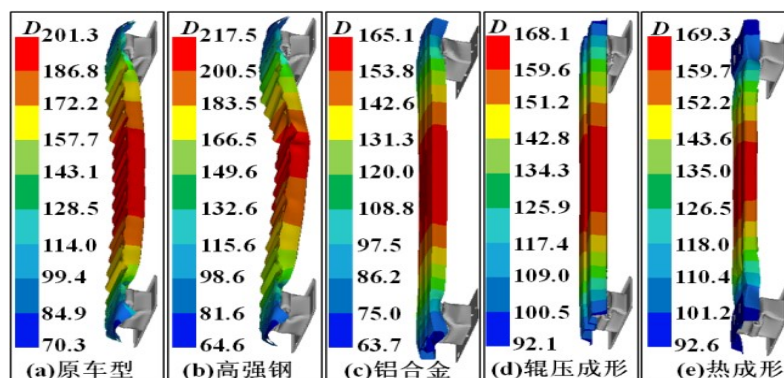


Figure 10 Displacement contours of different bumper beams when trolley speed is zero in the frontal crash

图 10 正面碰撞中台车速度为 0 时不同防撞梁的位移云图

图 10 为原车型及轻量化防撞梁在正面碰撞过程中当台车速度为 0 时的位移云图。可以看出，五种防撞梁的吸能盒均已发生明显的压溃。原车型和高强钢防撞梁中部发生明显的内侵，最大位移分别为 201.3mm 和 217.5mm，此时碰撞支反力主要由两端的吸能盒提供，防撞梁需要得到后方部件的支撑才能发挥有效的支撑作用。铝合金、辊压成形和热成形防撞梁未发生内侵现象，防撞梁在碰撞中被压平后可将碰撞力分布到两端吸能盒及后方部件上，起到了有效的支撑作用，三种防撞梁的最大位移均在 168mm 左右。

图 11 为原车型及轻量化防撞梁在正面碰撞过程中的台车加速度曲线。其中铝合金防撞梁的加速度曲线波动幅度最大， $A_{\max}=17.1g$ ，力传导稳定性相对较差。原车型、高强钢和热成形防撞梁的加速度曲线波动幅度次之， $A_{\max}$ 分别为 $13.9g$ 、 $13.9g$ 和 $14.3g$ ，力传导稳定性相对较好。而辊压成形防撞梁的加速度曲线波动幅度最小， $A_{\max}=12.3g$ ，因此可以在碰撞过程中提供最为稳定的力传导作用。

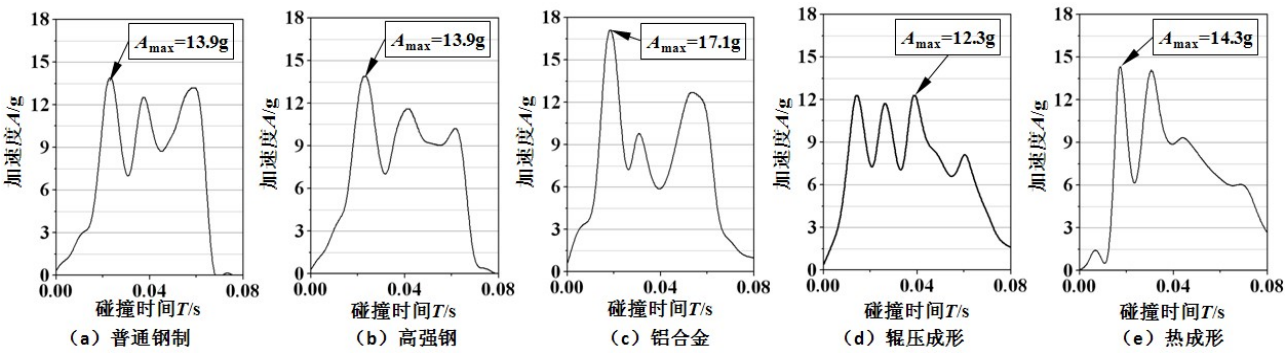


Figure 11 Acceleration curve of different bumper beams in the frontal crash

图 11 不同防撞梁在正面碰撞的台车加速度曲线

4 防撞梁选用

通过不同防撞梁的碰撞性能对比发现：四种轻量化防撞梁均能够在实现轻量化的同时保证零件性能。其中铝合金防撞梁的轻量化程度最高，但对零件碰撞性能的提升不足。冷冲压高强钢在轻量化程度和性能提升上均不具有明显优势。辊压成形和热成形钢具有较好的轻量化程度，同时也助于提升零件性能。由于该防撞梁配套车型为量产中低档乘用车，因此结合表 4 中该车型不同防撞梁的生产制造因素对比发现，辊压防撞梁在材料成本、生产成本以及生产效率上都具有比较明显的优势，可以作为参考的轻量化方式用于该车型防撞梁的后期设计。

Table 4 Manufacturing factors of different bumper beams

表 4 不同防撞梁的生产制造因素对比

因素	排序
材料成本	铝合金>热成形>辊压成形≈高强钢≈原车型
模具投入	热成形>辊压成形>铝合金>高强钢=原车型
生产成本	热成形>铝合金>高强钢≈原车型>辊压成形
生产效率	辊压成形>高强钢≈原车型>铝合金>热成形

5 结论

采用防撞梁静压、低速碰撞、正面碰撞三种简化工况可以有效的分析防撞梁在整车碰撞中的性能，可用于为防撞梁正向开发和改进设计，大幅度节约研发时间和试验成本。论文以某车型防撞梁的轻量化设计为例，对比了目前常用的四种防撞梁轻量化程度及性能提升效果，并结合防撞梁的生产制造因素为该车型防撞梁的轻量化设计提供了参考。

参考文献 (References)

[1] M.M. Davoodi, S.M. Sapuan, A. Aidy, etal. *Development process of new bumper beam for passenger car: A review*[J]. Materials and Design, 2012, (40):304-313.

-
- [2] Alghamdi A. *Smart frictional impact energy absorber*[J]. Int J Crashworthiness 2000,(5):169–78.
- [3] Brian C, Petrinic G, Colin J. *Automotive Engineering: Lightweight, Functional, and Novel Materials* [M]. New York, Taylor & Francis Group, 2008.
- [4] Zhiwen Wang. *The development of automotive lightweight technology*. Automobile Technol Mater, 2009(2):1–6.
- [5] Mingtu Ma, Luxia Ma. *The application and advanced technology of the aluminium alloy in automotive lightweight*. Adv Mater Indus, 2008(9):43–50.
- [6] Han Fei, Shi Lei, Xiao Hua, et al. *Development and key technologies on roll-formed automobile profiles with AHSS*[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013,20(3):65-69.
韩飞,石磊,肖华,等. 应用先进高强钢的典型汽车零件辊压成形关键技术及开发[J].塑性工程学报, 2013,20(3):65-69.
- [7] Javad Marzbanrad, Masoud Alijanpour, Mahdi Saeid Kiasat. *Design and analysis of an automotive bumper beam in low-speed frontal crashes* [J]. Thin-Walled Structures ,2009,(47):902–911.
- [8] Cheng Xiusheng, Liu Weihai, Hao Yumin, et al. *Optimization of a Passenger Car's Bumper Beam for Crashworthiness*[J]. Automobile technology, 2011, (10):5-9.
程秀生,刘维海,郝玉敏.某轿车防撞梁结构抗撞性优化[J]. 汽车实用技术, 2011, (10):5-9.
- [9] Wei Xiankun, Yang Jingjing, Mi Lin. *The quasi-static collapse research of an aluminum alloy bumper based on simulation and experiment*[J]. Journal of Chongqing University of Technology, 2013, 27(8):14-17.
魏显坤, 杨晶晶, 米林. 铝合金保险杠准静态压溃仿真与实验[J]. 重庆理工大学学报, 2013, 27(8):14-17.
- [10] GB 17354-1998. *Front and rear protective devices for passenger cars*[S]. Beijing, standards press of china, 1998.
GB 17354-1998. 汽车前后端保护装置[S].北京,中国标准出版社, 1998.
- [11] GB 11551-2003. *The protection of the occupants in frontal collision for passenger car*[S]. Beijing, standards press of china, 2003.
GB 11551-2003. 乘用车正面碰撞的乘员保护[S].北京,中国标准出版社, 2003.