

# 基于正面耐撞性仿真的轿车车身材料轻量化研究

朱 平 张 宇 葛 龙 林忠钦

(上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200030)

摘要:以某轿车为研究对象,运用显式有限元理论,建立整车有限元模型,基于“汽车正面碰撞乘员保护设计规则(CMVDR294)”的耐撞安全性仿真,从满足整车正面耐撞安全性能的角度,分别采用高强钢和铝合金对车身主要覆盖件进行轻量化研究,使车身减质量分别达 9.31 kg 和 53.10 kg,减质量效果达到 11.30%和 64.50%。对整车变形、整车与刚性墙的碰撞力、运动速度和加速度、主要零部件吸能等方面进行分析、评价,数值仿真验证了轻量化方案的可行性。

关键词:车身轻量化 有限元法 耐撞性 铝合金 高强钢

中图分类号:U462.2

## 0 前言

近年来,随着世界汽车保有量与日俱增以及人们对汽车安全性、舒适性和环保性能要求的提高,节约资源、减少环境污染成为世界汽车工业亟待解决的两大问题。着眼于长远的可持续发展,减轻汽车质量、降低燃油消耗和减少排放污染的任务就显得尤为迫切,节能成为汽车工业发展的核心问题,汽车轻量化成为 21 世纪汽车技术的前沿和热点<sup>[1-5]</sup>。

减轻汽车自重是节约能源和提高燃料经济性的最基本途径之一,据统计,汽车每减质量 10%,油耗可降低 6%~8%<sup>[6]</sup>。车身质量占汽车总质量的 30%~40%,因此车身的轻量化对于整车的轻量化起着举足轻重的作用。我国 2003 年汽车保有量约 2 400 万辆,2010 年预计将达到 7 100 万辆,可见汽车减重对节能、改善环境的意义十分巨大。

世界主要汽车制造商非常重视汽车的轻量化,工业发达国家在汽车轻量化研究方面发展较快,预计 21 世纪的轿车平均自重约为 20 世纪 80 年代初的一半。我国在汽车轻量化研究方面处于起步阶段,必须大力开展汽车轻量化研究,以缩小与发达国家的差距。目前汽车轻量化研究方面的定性研究报道较多,很少有关于定量研究的文献报道。定量研究并提出了某轿车轻量化的可行性方案,对开展汽车

轻量化研究提供了可借鉴的方法。以某轿车为对象,从汽车安全性的角度,分别采用高强钢和铝合金对车身主要覆盖件进行减薄厚度、替换材料的轻量化研究,对两种轻量化方案进行对比分析、评价。采用显式有限元理论建立整车有限元模型,基于整车结构的正面耐撞安全性数值仿真,从整车变形、整车与刚性墙的碰撞力、运动速度和加速度、主要零部件的吸能等方面进行分析,以验证车身轻量化方案的可行性。

## 1 轻量化材料的选择

目前轿车车身轻量化材料最常采用的便是高强钢和铝合金。铝合金的强度与钢的强度相似,但是密度大幅度减小,轻量化效果显著。在铝合金系列中,用于车身板的铝合金主要为 Al-Cu-Mg 系列(2000 系列)、Al-Mg 系列(5000 系列)、Al-Mg-Si 系列(6000 系列)和 Al-Mg-Zn-Cu 系列<sup>[7]</sup>。其中,2000 系列是热处理可强化合金,可用于外板等重视强度、刚性的部位的车身零件。结合各型号铝合金特点和加工工艺,选用 2017-T4 型号的铝合金材料对原车身零件的普通低碳钢板材料进行替换的轻量化研究。在 2000 系列材料的选择上,选用与原车身的普通低碳钢板材料参数相近的 BH260/370 型号的高强钢材料,对原车身零件的普通低碳钢板材料进行替换并减薄厚度(零件厚度分别减薄 0.1 mm)的轻量化研究。选用的高强钢、铝合金与原车身的普通低碳钢板材料性能比较如表 1 所示。

表1 选用材料与原车身材料的性能比较

材料	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\mu$	屈服点 $s_s/\text{MPa}$
低碳钢	7.80	210	0.30	170
BH260/370	7.80	210	0.30	260
2017-T4	2.77	71	0.33	296

## 2 车身零部件的轻量化研究

### 2.1 整车有限元建模

通过IGES图形数据交换格式将CAD模型转入有限元分析软件HYPERMESH/LS-DYNA中。在整车有限元模型建立过程中,针对正面碰撞,采用前密后疏,合理布置单元网格密度,分析、研究了有限元模型简化或误差对于碰撞仿真结果的影响,以及零件的圆角大小、冲击变形、材料模型参数精度、冲撞方向偏差以及障碍壁摩擦因数设置精度对于零件吸能的影响。为了保证精度的前提下提高计算效率,严格控制最小单元特征长度在5 mm左右。整车低速碰撞有限元模型如图1所示,共有129 285个单元,131 649个节点,模型中的单元类型包括六面体实体单元、板壳单元、梁单元、杆单元、边界单元、弹簧单元和阻尼单元等,节点为常规节点和模拟部分焊点情况的带失效的固连。在计算过程当中采用了质量缩放、沙漏控制并考虑了应变率效应。采用这些方法提高了仿真计算的效率和精度。根据“汽车正面碰撞乘员保护设计规则(CMVDR294)”,以48.3 km/h的速度对正面碰撞刚性墙进行了数值仿真。2001年12月在清华大学安全与节能国家重点实验室,按照CMVDR294的要求对该车进行了整车正面碰撞试验,仿真与试验的条件相同。通过仿真与实车正面碰撞试验进行比较,仿真结果与试验结果吻合较好,说明整车有限元模型是可靠的,能够较好地反应实车试验的结果。



图1 整车有限元模型

### 2.2 正面耐撞性数值仿真及分析

对车身11个主要覆盖件分别采用BH260/370型号的高强钢和2017-T4型号的铝合金板进行减薄厚度、替换材料,这11个零件名称如表2所示。根据CMVDR294的要求,以48.3 km/h的速度对整车

正面碰撞刚性墙进行数值仿真。从变形形态、整车与刚性墙的碰撞力关键零部件上点的速度、加速度以及关键零部件吸能时间序列等方面研究材料轻量化后对车辆耐撞安全性能的影响。

表2 进行轻量化的11个主要车身覆盖件

序号	零件名称	序号	零件名称
1	左前车门外板	7	左后车门内板
2	右前车门外板	8	右后车门内板
3	左后车门外板	9	顶盖
4	右后车门外板	10	发动机罩内板
5	左前车门内板	11	发动机罩外板
6	右前车门内板		

整车碰撞仿真在 $t=90$  ms时的变形情况如图2所示。由图2可见,车身11个零件分别采用BH260/370型号的高强钢和2017-T4型号的铝合金板进行轻量化后,整车碰撞变形主要集中在前部且变形较小,车身A柱以后基本上不发生变形,发动机罩盖未发生断裂脱落并且不会侵入驾驶室,从而保证了驾驶员或乘员的安全以及整车的性能。



(a) 高强度钢



(b) 铝合金

图2 整车碰撞在 $t=90$  ms时的变形图

图3、4显示了车身11个零件轻量化后碰撞仿真的保险杠和前纵梁的位移曲线。由图3、4可见,车身11个零部件轻量化后,保险杠的位移量与原低碳钢材料的车身时基本保持不变,前纵梁的位移量还有所减少,这说明车身吸收碰撞能量的能力与原低碳钢车身相当并略有增加。

图5为车身11个零件轻量化后的整车与刚性墙的碰撞力时间历程曲线。由图5可见,采用低碳钢车身的最大碰撞力为477.98 kN,采用高强钢板车身的最大碰撞力为497.02 kN,增幅为3.98%,采用铝

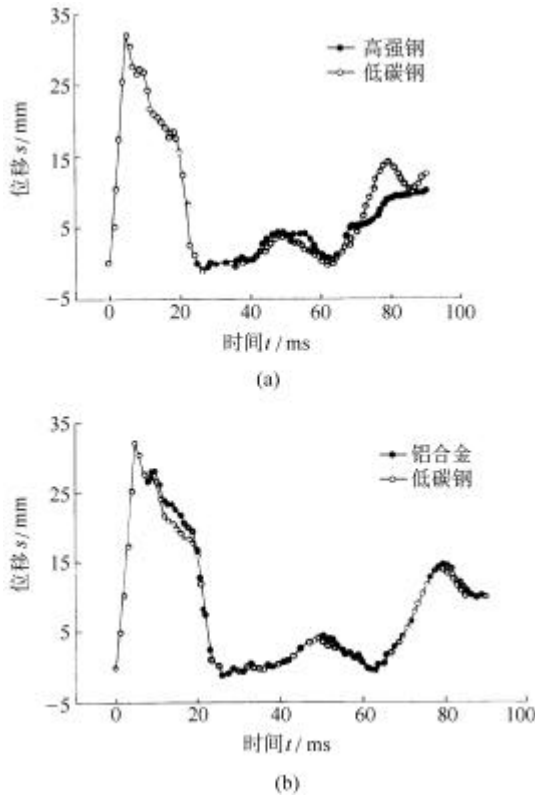


图3 采用高强度和铝合金板后的保险杠位移曲线

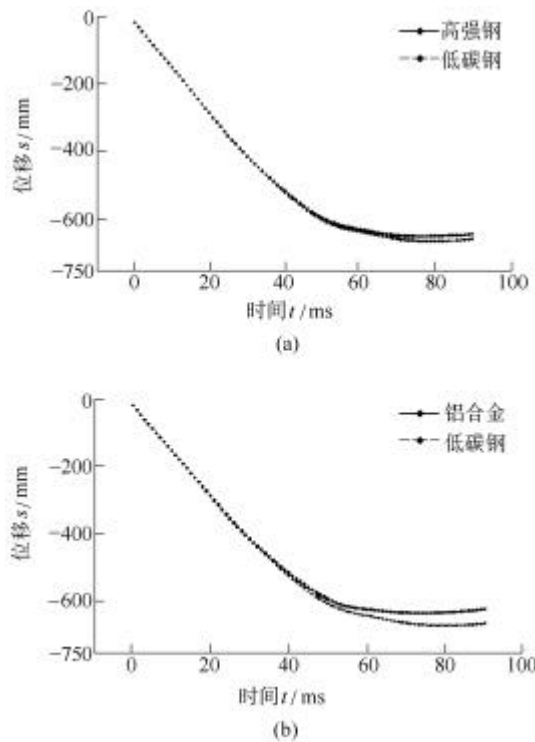


图4 采用高强度和铝合金板后的前纵梁位移曲线

合金材料车身的最大碰撞力为 507.20 kN，增幅为 6.10%，由此可见三种材料的整车与刚性墙碰撞力的最大值差异不大，这说明部分零件轻量化后的车身强度能够吸收足够的碰撞能量，整车的安全性能可以得到保证，能够满足法规的要求。

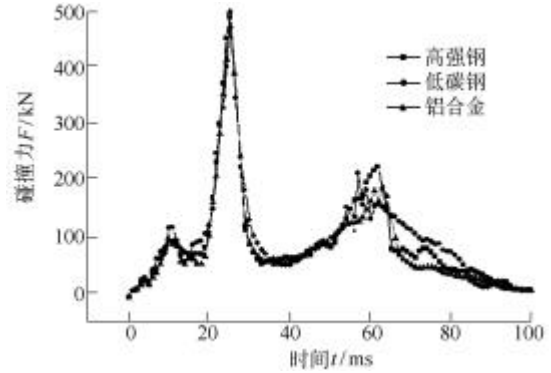


图5 采用高强度材料和铝合金板后的整车与刚性墙的碰撞力时间历程曲线

图6、7分别显示了车身11个零件轻量化后碰撞仿真的座椅下地板速度和加速度的时间历程曲线。从图6可以看出：车身11个零件轻量化后，速度的变化波动和低碳钢相似，没有剧烈波动。从图7可以看出：三种材料下加速度的波动相似，最大值几乎相同，说明对车身11个零件采用高强度和铝合金进行材料轻量化后，可以保证驾驶室的安全性，对乘员影响不大。

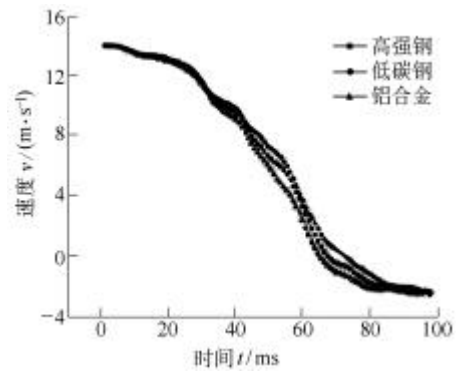


图6 座椅下地板速度的时间历程曲线

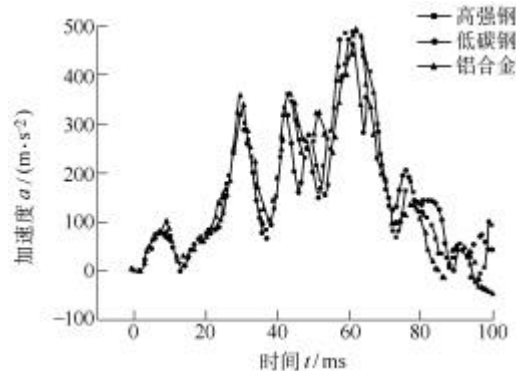


图7 座椅下地板加速度的时间历程曲线

图8、9分别显示了车身11个零件轻量化后碰撞仿真的保险杠速度和加速度曲线。可以看出，采用高强度和铝合金时的速度变化波动不大，加速度峰值与普通低碳钢车身上同样坐标位置点处的加速度峰值基本相同。可见车身11个零件轻量化后相对

于原低碳钢车身的碰撞指标基本相同。

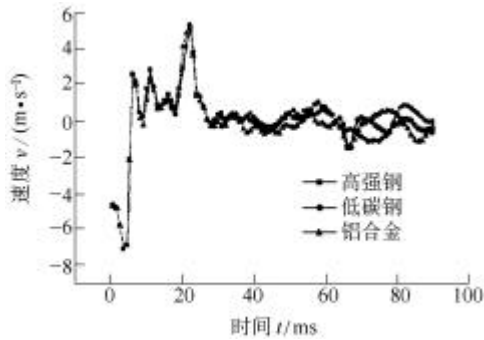


图8 保险杠速度时间历程曲线

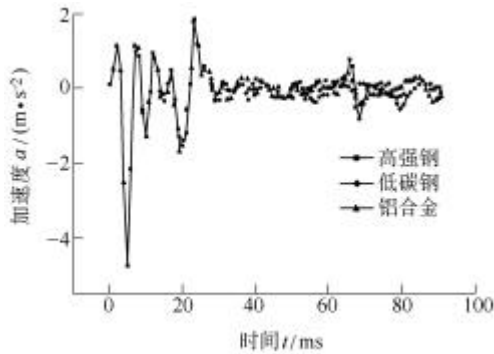


图9 保险杠加速度时间历程曲线

保险杠、前纵梁、散热器和散热器上横梁内板等零件是整车碰撞过程中的主要吸能零件。图10~13分别显示了这些零件轻量化后碰撞仿真的吸能时间历程曲线。从这些图线可以看出零件轻量化后与原低碳钢车身的碰撞指标基本相同，前纵梁和散热器上横梁内板的吸能甚至有所增加，这说明车身采用高强钢和铝合金与原低碳钢车身相比，结构强度相当并略有增加，整车在碰撞过程中的安全性能能够得到保证。

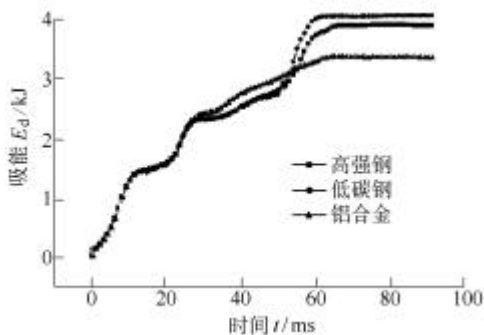


图10 保险杠吸能时间历程曲线

### 2.3 轻量化减重效果评价

车身11个零件轻量化前以及分别采用BH260/370型号的高强钢和2017-T4型号的铝合金板进行轻量化后的质量计算、比较，如表3所示。可见采用BH260/370高强钢板的轻量化方案可以减质量9.31 kg，减质量效果为11.31%；采用2017-T4

铝合金材料的轻量化方案，可以减质量53.10 kg，减质量效果为64.50%。

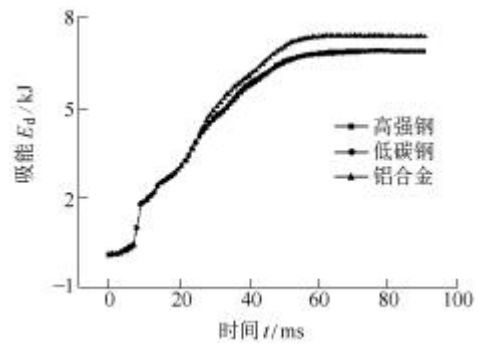


图11 前纵梁吸能时间历程曲线

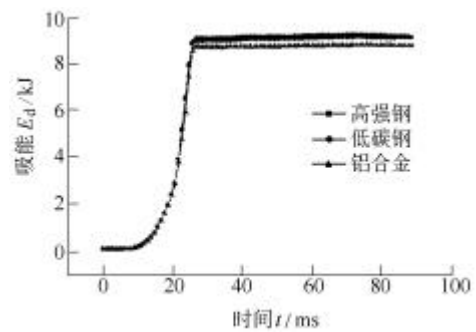


图12 散热器吸能时间历程曲线

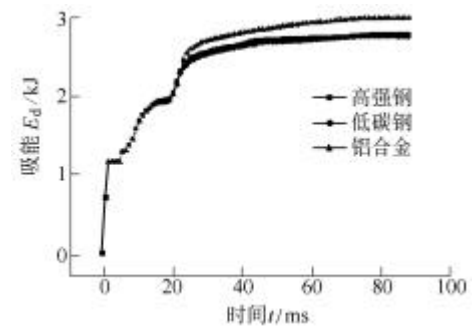


图13 散热器上横梁内板吸能时间历程曲线

## 3 结论

通过选用高强钢和铝合金对车身11个主要覆盖件进行减薄厚度、替换材料的轻量化研究，从整车变形、整车与刚性墙的碰撞力、关键零件上点的速度和加速度以及关键零件吸能时间序列等方面进行耐撞安全性能的分析、比较，得出可行的轻量化方案，对开展汽车轻量化研究提供了可借鉴的方法，得出如下主要结论。

(1) 采用2017-T4铝合金材料对车身11个主要覆盖件进行材料替换，从满足正面耐撞安全性得出可行轻量化方案，该方案可以减质量53.10 kg，减重效果为64.50%。

表3 车身11个零件轻量化前后的质量比较

序号	零件名称	原低碳钢 质量 $m/kg$	采用高强度			采用铝合金		
			零件质量	减少质量	减重效果	零件质量	减少质量	减重效果
			$m/kg$	$m/kg$	%	$m/kg$	$m/kg$	%
1	左前车门外板	5.18	4.53	0.65	12.55	1.84	3.34	64.48
2	右前车门外板	5.18	4.53	0.65	12.55	1.84	3.34	64.48
3	左后车门外板	5.50	4.81	0.69	12.55	1.95	3.55	64.55
4	右后车门外板	5.50	4.81	0.69	12.55	1.95	3.55	64.55
5	左前车门内板	7.30	6.57	0.73	10.00	2.59	4.71	64.52
6	右前车门内板	7.30	6.57	0.73	10.00	2.59	4.71	64.52
7	左后车门内板	7.36	6.62	0.74	10.05	2.61	4.75	64.54
8	右后车门内板	7.36	6.62	0.74	10.05	2.61	4.75	64.54
9	顶盖	15.08	13.18	1.90	11.59	5.35	9.73	64.52
10	发动机罩内板	5.52	4.83	0.69	11.96	1.96	3.56	64.49
11	发动机罩外板	11.04	9.94	1.10	9.96	3.93	7.11	64.40
总计		82.32	73.01	9.31	11.31	29.22	53.10	64.50

(2) 采用BH260/370高强度钢板对车身11个主要覆盖件进行材料替换并减薄厚度,从满足正面碰撞安全性得出可行轻量化方案,该方案可以减质量9.31 kg,减质量效果为11.31%。

(3) 采用铝合金与高强度钢板均可以实现车身的轻量化,铝合金的轻量化效果更好,但是根据我国目前的加工工艺、生产成本等方面分析,采用高强度钢板实用价值更大。

### 参 考 文 献

- 1 大须贺龙治. 自动车的燃费动向と轻量化. 自动车技术, 2001(4): 4~8
- 2 Tamaki Y. Research into achieving a lightweight vehicle body utilizing structure optimizing analysis: aim for a lightweight and high and rigid vehicle body. JSAE Review, 1999(20): 555~561
- 3 Merklein M, Geiger M. New materials and production technologies for innovative lightweight constructions. Journal of Materials Processing Technology, 2002(126): 532~536
- 4 Schubert E, Klassen M, Zerner I, et al. Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry. Journal of Materials Processing Technology, 2001(115): 2~8
- 5 Asnafi N, Langstedt G. A new lightweight metal-composite-metal panel for applications in the automotive and other industries. Thin Walled Structures, 2000(36): 289~310
- 6 Joseph C, Benedyk. Light metals in automotive applications. Light Metal Age, 2000(10): 34~35

- 7 赵鸿. 铝在汽车上的应用. 汽车工艺与材料, 1997(1): 19~24

### RESEARCH ON LIGHTWEIGHT OF AUTO-BODY MATERIAL BASED ON CRASHWORTHINESS SIMULATION

Zhu Ping Zhang Yu Ge Long Lin Zhongqin  
(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

**Abstract:** Finite element theory is applied and the new style passenger car is used as the prototype, when using high strength steel and aluminum alloy to lighten auto-body, the total weight can be reduced 9.31 kg, 53.10 kg and the lightweight effect is 11.31%, 64.50%. Based on crashworthiness simulation according to CMVDR294, compared the deformation of entire car, the crash force to the rigid wall, velocities, accelerations, and energy-absorbing ability of main parts, the results of crashworthiness simulation verified the feasibility of the proposed method.

**Key words:** Auto-body lightweight

Finite element method Crashworthiness

Aluminum alloy High strength steel

作者简介:朱平,男,1966年出生,工学博士,教授。主要研究方向为汽车结构性能数值仿真、车身轻量化设计制造以及制造质量控制技术。获得国家科技进步二等奖1项,上海市科技进步一等奖1项,发表论文40余篇。

E-mail: pzhu@sjtu.edu.cn