•汽车被动安全技术专题•

面向载货汽车侧面碰撞工况的纯电SUV车身耐撞性研究

王聪[1]　李申振[2]

（1.浙江极氪汽车研究开发有限公司，宁波 315336；2.吉利汽车集团中央研究院，宁波 315336）

【摘要】为提高某纯电SUV在极限工况下的车体耐撞性，基于碰撞能量管理方法，对该车型在中国保险汽车安全指数（C-IASI）侧面碰撞与载货汽车侧面碰撞两种工况下进行仿真，对比分析了车体传递路径、关键结构承载目标设定、结构变形与失效模式等，并针对载货汽车侧面碰撞极限工况进行车身结构优化，仿真与实车验证结果表明，优化后极限工况下的车体耐撞性显著提升。

关键词：侧面碰撞　车身结构　耐撞性　碰撞能量管理

中图分类号：U461.91；U463.82　　**文献标志码：**A　　**DOI：** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20260005

Research on the Body Crashworthiness of Battery Electric SUV under Side Impact Condition of Truck

Wang Cong[1], Li Shenzhen[2]

(1. Zhejiang ZEEKR Automotive Research and Development Co., Ltd., Ningbo 315336; 2. Geely Auto Group Central Research Institute, Ningbo 315336)

【Abstract】 To improve the body crashworthiness of a battery electric SUV under extreme conditions, the research employs a collision energy management method to conduct simulation under two side impact conditions of the China Insurance Automotive Safety Index (C-IASI) and truck. The body transmission path, load-bearing target definitions for critical structures, structural deformation and failure modes are compared and analyzed. Furthermore, the body structure is optimized targeting the extreme truck side impact condition. Simulation results and physical vehicle test results demonstrate that the body crashworthiness under extreme condition is significantly improved after optimization.

Key words: Side impact, Body structure, Crashworthiness, Collision energy management

【引用格式】 王聪，李申振. 面向载货汽车侧面碰撞工况的纯电SUV车身耐撞性研究[J]. 汽车工程师，2026(7)：23-28

WANG C, LI S Z. Research on the Body Crashworthiness of Battery Electric SUV under Side Impact Condition of Truck[J]. Automotive Engineer, 2026(7): 23-28.

1　前言

基于中国交通事故深度调查（China In-Depth Accident Study，CIDAS）项目数据的统计结果表明，载货汽车造成的乘用车乘员死亡人数占乘用车乘员死亡总人数的37.6%[1]。相对于前/后碰撞，侧面碰撞中乘用车防护空间有限，极易在与载货汽车的碰撞中对乘员造成严重伤害，故提升乘用车的侧面碰撞耐撞性具有重要的现实意义。

目前，中国新车评价规程[2]与中国保险汽车安全指数（China Insurance Automotive Safety Index，C-IASI）[3]均推出了适合中国的侧面碰撞移动可变形壁障（Side Impact Moving Deformable Barrier，SC-MDB）和先进侧面碰撞移动可变形壁障（Advanced Chinese Mobile Deformable Barrier，AC-MDB），分别模拟轿车和SUV。李学言等[4]分析了不同碰撞壁障对车身侧面结构耐撞性设计的影响，李卓等[5]研究了微型客车与SUV之间的侧面碰撞兼容性。上述研究表明，侧面碰撞工况下被撞车辆的乘员伤亡率偏高，不同车型间的碰撞兼容性问题突出。然而，

现有研究大多围绕轿车和SUV的侧面碰撞工况展开，缺乏以载货汽车作为碰撞车辆的侧面碰撞耐撞性研究。

本文依托碰撞能量管理方法，针对某纯电SUV，在满足C-IASI侧面碰撞工况车身结构性能要求的基础上，针对载货汽车侧面碰撞高危极限场景，分析车身结构的碰撞兼容性，通过对比C-IASI侧面碰撞与载货汽车侧面碰撞两种工况的仿真结果，重新定义关键结构承载要求，并据此优化车身结构设计与材料参数，最后，通过CAE仿真与实车试验验证优化措施的有效性。

2 分析方案设计

2.1 碰撞场景模拟

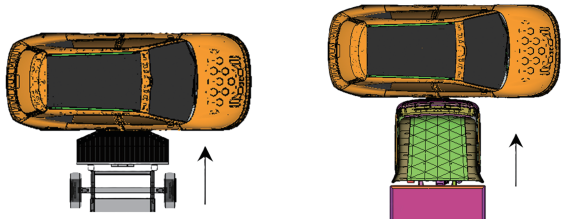
结合碰撞统计结果与案例信息，杨震等通过分析事故场景特征，归纳出乘用车乘员死亡人数占比超过5%的7种高危场景类型，如表1所示[1]。

表1 7种高危碰撞场景及乘用车乘员死亡人数占比 %

高危碰撞场景	乘用车乘员死亡人数占比
乘用车正面与载货汽车相撞	25.1
乘用车翻滚	18.6
乘用车侧面被载货汽车碰撞	10.4
乘用车正面碰撞护栏	9.3
乘用车侧面（不区分左右侧）被乘用车碰撞	8.9
乘用车正面碰撞柱状固定物	8.2
乘用车侧面（不区分左右侧）碰撞柱状固定物	6.5

其中，乘用车侧面（含左、右侧）与载货汽车、乘用车、固定柱状物碰撞造成的乘用车乘员死亡人数在乘用车乘员死亡总人数中的占比合计达25.8%。本文针对其中占比最高的乘用车被载货汽车侧面碰撞工况进行研究。由于多数中型载货汽车的自身质量集中在6.0~8.8 t范围内，本文选取8.0 t的载货汽车作为研究对象。

在ANSA平台上分别建立了C-IASI台车和真实载货汽车与SUV侧面碰撞的整车模型，如图1所示，两种侧面碰撞模型的碰撞速度均为50 km/h±1 km/h，碰撞角度均为90°，台车质量为1 650 kg，载货汽车质量为8 000 kg。载货汽车前防护装置的离地高度为400 mm，符合GB 26511—2011《商用车前下部防护要求》的规定。设定材料、属性、接触参数等，包括密度、弹性模量、泊松比等弹性参数，屈服强度、应力-应变曲线等塑性参数，最大塑性应变、最大应力等失效参数，精准表征每个零件的材料力学行为；采用壳单元构建车身钣金模型，依据实际钣金厚度定义单元几何尺寸，并配置合理的全积分方案与沙漏控制参数；通过定义接触类型与摩擦因数，规避部件网格穿透问题，保障结构间作用力的有效传递。将模型导入LS-DYNA求解得到节点位移、速度、加速度及单元的应力、应变等，从而获得结构变形量、结构是否失效等结果，最后参照汽车侧面碰撞相关安全标准进行评价。



（a）C-IASI侧面碰撞模型　（b）载货汽车侧面碰撞模型

图1 侧面碰撞仿真模型对比

2.2 评价方式

依据C-IASI规程中关于车辆结构评级的相关标准，对车身结构进行评价，标准如表2所示：

a. 侵入量评估：对B柱与驾驶员座椅中线之间的距离进行定级评价。

b. 当承载的车身结构件存在失效时，车辆结构评级降一级，例如：变形模式不符合预期，焊点、螺栓等连接方式失效，结构失效等。

表2 C-IASI评价指标 cm

评价指标	优秀	良好	一般	较差
B柱与驾驶员座椅中线之间的距离	≥18.0	≥14.0	≥10.0	<10.0
结构件失效（例如B柱完全断裂等）	车辆结构评级降一级			

3 侧面碰撞条件下车身结构耐撞性分析

3.1 基于碰撞能量管理的侧面碰撞策略

简化的侧面碰撞力学模型如图2所示[6-7]。

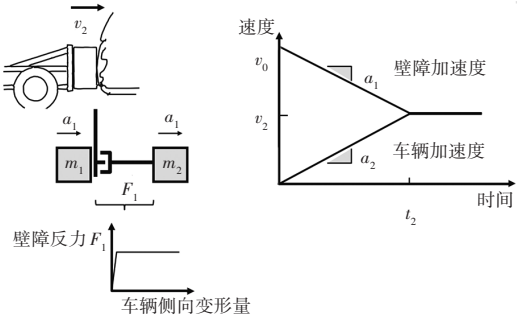


图2 简化的侧面碰撞力学模型

根据动量守恒及能量守恒定律可得：

$$m_1v_0=(m_1+m_2)v_2 \tag{1}$$

$$m_1v_0^2/2-(m_1+m_2)v_2^2/2=F_1\Delta_{crush}+E \tag{2}$$

式中：m_1=1 650 kg为壁障台车质量；m_2=2 450 kg为自车质量；v_0=50 km/h为碰撞台车初始速度；v_2为最终共同速度；t_2为两车从碰撞接触开始至速度达到一致所经历的时间（一般为50~60 ms）；F_1为壁障反力；Δ_{crush}为碰撞过程壁障与车辆的相对运动距离；E为沙漏能或其他能量损失（占比为1%~2%），本文取1.5%。

由式（2）计算可得系统总体变形能量约为94 kJ。在系统总体变形能量中，碰撞能量约有一半由车辆整体结构变形吸收，而车身侧围变形吸能约占该部分能量的70%[8]。

车门与乘员间作用力的简化模型如图3所示。在碰撞过程中，在车身结构承载力F_2的作用下，车身侧面结构首先发生压缩变形，车身侧面与假人之间的初始自由间隙Δ_0完全消除后，假人与车门接触，门板与假人间的接触作用力F施加于假人并使其产生加速度，进一步压缩结构可变形空间Δ，直至假人与碰撞壁障达到相同的运动速度。

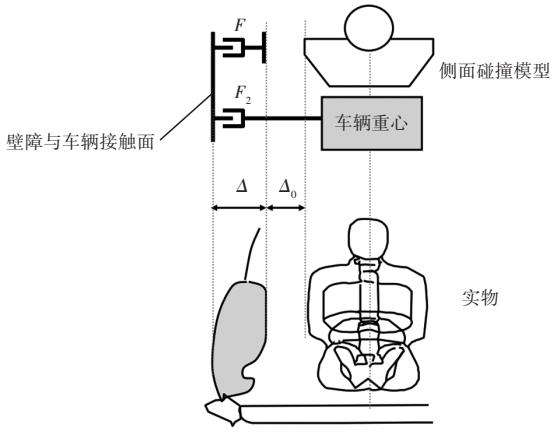


图3　车门与乘员间作用力简化模型

由力学平衡方程可得出[5]：

$$F=F_1-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(m_{door}v_{door})-F_2 \tag{3}$$

式中：m_{door}为车门质量，v_{door}为车门与假人的接触速度。

乘员伤害指标与车门侵入速度及侵入量直接相关，在壁障冲击力一定的情况下，增加车身结构承载力，可使壁障台车作用于车门内板的冲击速度在接触假人之前快速衰减，进而降低接触到假人时的瞬时速度，减小与假人间的接触力。

B柱与驾驶员座椅中线的初始间隙为380 mm，车身结构侵入量目标设定为Δ_0=160 mm，对应变形后B柱与座椅中线间的距离为220 mm（相对于C-IASI车辆结构优秀评级≥180 mm，有40 mm余量），此时可计算得出F_2≈205 kN。

车身侧围结构的承载能力及变形趋势对于车身耐撞性至关重要。针对本文研究的SUV车型，车身侧面碰撞策略定义如图4所示：在保证结构侵入量目标达成的前提下，侧面碰撞车身主要承载结构（B柱、车门防撞梁、门槛等）需具备足够的强度，能够承受较大的侧向冲击力而不失效，同时通过预期的塑性变形充分吸能，以降低加速度和乘员伤害值；后部支撑与力传递结构（顶盖横梁、上边梁、座椅横梁等）应能传递峰值力，且不发生较大变形、折弯或连接失效等现象。

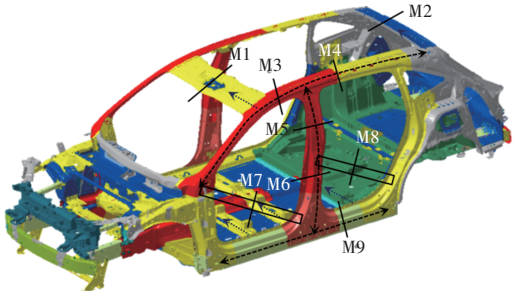


图4　侧面碰撞的关键结构及传递路径

依据上述车身结构承载力目标的传递分解，结合CAE仿真分析得出各结构区域承载力的分布情况，在C-IASI侧面碰撞工况下，车身关键结构承载目标如表3所示。

表3　车身侧面关键结构承载目标　　kN·m

序号	关键零部件	力矩限制	位置
M1	顶盖前横梁	≥5	前横梁中部
M2	顶盖后横梁	≥3	后横梁中部
M3	上边梁	≥10.5	B柱前部
M4	上边梁	≥13.5	B柱后部
M5	B柱上部	≥30	B柱上部
M6	B柱下部	≥25	变形最大处
M7	前车门防撞梁	≥12.5	车门防撞梁折弯处
M8	后车门防撞梁	≥10.8	车门防撞梁折弯处
M9	门槛后端	≥35	座椅后横梁与后地板横梁间

3.2　基于C-IASI侧面碰撞工况的车身结构设计

依据C-IASI侧面碰撞工况分解的车身结构承载要求，并平衡工程其他方面的需求，车身侧面关键结构设计示意如图5所示：

a. B柱内/外板采用热成型激光拼焊板，上/下材料强度分段，加强板应用1 500 MPa热成型加强板，

使B柱下部能够变形吸能，上部支撑承载不失效。

b. 车门防撞梁采用W型截面与1 500 MPa热成型材料。

c. 防撞梁前后两端与车门框架采用点焊连接，且与门洞支撑区域重合度大。

d. A柱外板采用热成型板并增加补强板，延伸至B柱接头后端，B柱外板和加强板的上部翻边与其搭接、点焊连接。

e. 门槛采用多腔体的7XXX系挤压铝型材，B柱下端采用双排流钻螺钉与其连接。

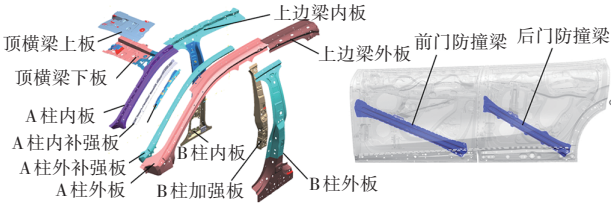
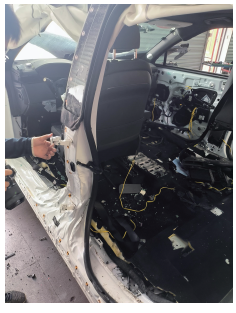


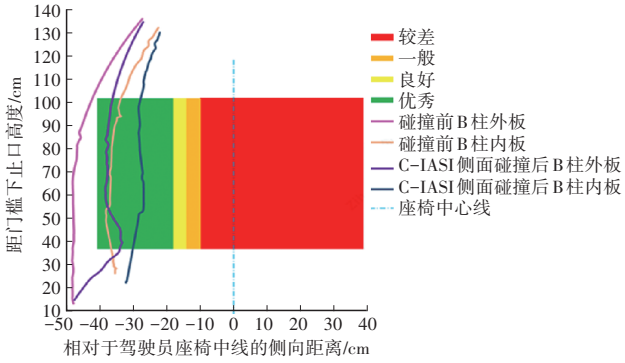
图5　车身侧面关键结构设计示意

3.3　车身结构侧面碰撞工况验证

在C-IASI侧面碰撞工况下进行实车试验验证，结果如图6所示：碰撞后结构完整无失效，B柱变形趋势符合设计预期，B柱外板、内板下端最大变形量分别约为140 mm、113 mm，达成车身结构优秀评价目标，且内板侵入量尚有约87 mm余量。试验结果表明，原有车身结构在C-IASI侧面碰撞工况下表现出优秀的碰撞性能，符合前期制定的侧面碰撞策略要求。



（a）实车碰撞后B柱变形趋势



（b）碰撞前/后B柱与驾驶员座椅中线的距离对比

图6　C-IASI侧面碰撞工况下实车试验B柱变形趋势及侵入量

4　载货汽车侧面碰撞极限工况下车体耐撞性分析

4.1　载货汽车侧面碰撞工况仿真分析

载货汽车侧面碰撞工况下，台车质量从1 650 kg增加到8 000 kg，v_0=50 km/h不变，由式（1）、式（2）可得，初始碰撞能量约为C-IASI壁障台车碰撞能量的4.8倍，系统总体变形能量约为C-IASI工况下的1.9倍（约180 kJ）。假设车身结构承载力保持不变且不失效，按照C-IASI侧面碰撞工况，预测实车侵入量约为230 mm，对应B柱与驾驶员座椅中线的距离约为150 mm，可以达到车辆结构良好评级。

由于碰撞过程中接触瞬间冲量增大，吸收功率增大，结构峰值力增大，会导致部分结构失效。同时，CAE仿真也验证了车身侧向强度不足、侵入量增大，如图7所示，存在以下结构失效点：

a. 顶盖前横梁存在折弯、失稳风险。

b. 顶盖上边梁后端发生折弯失效。

c. B柱下端与门槛流钻螺钉连接失效并脱离，导致B柱侵入量过大。

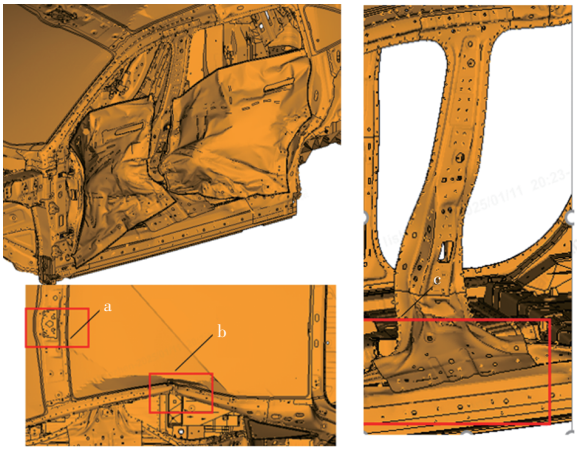


图7　载货汽车侧面碰撞工况车身结构失效模式

4.2　车身结构耐撞性优化设计

基于上述分析，车身侧面关键结构承载力矩相对于原有要求需明显提高，如表4所示。

根据仿真分析输出的承载力对比结果，极限工况下，车身侧面承载结构（B柱、门槛、后防撞梁等）的承载力需大幅增加，采用整体式挤压铝工艺的门槛结构可满足承载要求，但车身其余侧向承载区域仍无法达标。为此，本文针对上述结构失效点开展了车身结构优化设计，如图8所示：

a. 针对直接承载结构，A柱内补强板、B柱加强板和防撞梁均升级为2 GPa级材料，从而提升结构强度。

b. 针对传递路径与结构失效，在门槛挤压铝腔体内增加钢制螺母背板，利用螺栓+流钻螺钉连接增加B柱下端连接强度。

c. 侧围结构上端采用热气胀成形封闭一体式管梁（2 GPa），从A柱贯通至C柱，以取代补强板与复合材料车身加强件（Composite Body Solutions，CBS）加强结构，确保B柱上端承载及上边梁不折弯。

d. 提升前横梁材料强度，以防止在结构弱点（激光雷达安装位置）处折弯失效，进而减小侵入量。

表4　结构关键承载力矩对比　　kN·m

序号	关键零部件	承载弯矩	
		C-IASI侧面碰撞工况	载货汽车侧面碰撞工况
M1	顶盖前横梁	≥5	≥24
M2	顶盖后横梁	≥3	≥3
M3	上边梁	≥10.5	≥17.0
M4	上边梁	≥13.5	≥21.5
M5	B柱上部	≥30	≥50
M6	B柱下部	≥25	≥43
M7	前车门防撞梁	≥12.5	≥12.5
M8	后车门防撞梁	≥10.8	≥11.5
M9	门槛后端	≥35	≥60

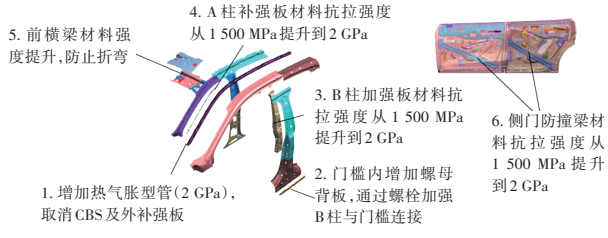
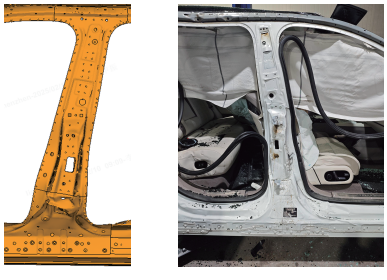


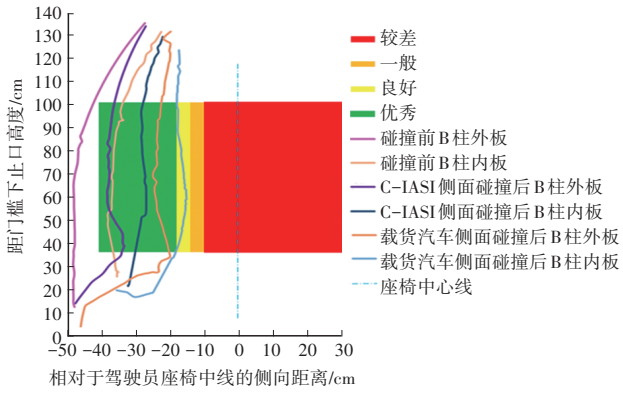
图8　基于载货汽车侧面碰撞工况的车身结构优化

4.3　优化后车身结构载货汽车侧面碰撞工况验证

车身结构优化后，重新对载货汽车侧面碰撞工况进行CAE仿真及实车验证。结果如图9所示：碰撞后结构未失效，乘员生存空间得到保障，尽管侵入量较C-IASI侧面碰撞工况有所增加，但车辆仍能达到优秀评级。



（a）仿真与实车验证中B柱变形趋势



（b）B柱与驾驶员座椅中线的距离对比

图9　优化后车身结构的仿真及实车验证结果

5　结束语

本文基于某纯电SUV，采用碰撞能量管理方法将吸能目标分解至车身各关键结构零部件，明确其具体承载要求，进而优化了侧面碰撞策略与车身结构设计，并通过仿真验证达成C-IASI侧面碰撞工况车身结构优秀评级。在此基础上，进一步针对载货汽车侧面碰撞工况进行仿真分析对比，明确车身结构的承载要求及失效模式，优化车身侧面关键结构，提升车身耐撞性，并通过仿真与实车试验验证了优化措施的有效性。可以得到以下结论：

a. 依托碰撞能量管理方法，结合车身结构变形占比、承载区域分布等指标，将承载力、力矩约束分解至各关键零部件，能够在设计前期指导车身结构方案制定与材料选型工作。

b. 载货汽车侧面碰撞等极限工况下，碰撞能量与瞬时冲量的大幅增加对整车结构耐撞性提出了更高的设计要求，故需显著提高车身侧向承载能力的设计阈值。

c. 提升传递路径上关键接头的承载性能可有效提高极限工况下的车身耐撞性，同时也要求传递路径上各类支撑横梁结构在极限承载工况下不发生折弯失效等情况。

参　考　文　献

[1] 杨震, 王兴昌, 管立君, 等. 中国乘用车乘员高危事故场景研究[J]. 汽车安全与节能学报, 2022, 13(4): 659-666.
YANG Z, WANG X C, GUAN L J, et al. Research on Occupant High-Risk Accident Scenarios of Passenger Cars in China[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2022, 13(4): 659-666.

[2] 中国汽车技术研究中心有限公司. C-NCAP管理规则（2024年版）[S]. (2023-09-28)[2026-01-15]. https://www.

c-ncap.org.cn/cncap-guicheng-detail?id=8.
China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd. (CATARC). C-NCAP Management Regulation (2024 Edition) [S]. (2023-09-28) [2026-01-15]. https://www.c-ncap.org.cn/cncap-guicheng-detail?id=8.

[3] 中保研汽车技术研究试验中心（北京）有限公司. 中国保险汽车安全指数管理办法（2023版2024年修订）: CIASI-GM. MM. RL-C1[S]. (2025-02-28) [2026-01-15]. https://www.ciasi.org.cn/download/list-540.html.
China Insurance Automotive Technology Research and Testing Center (Beijing) Co., Ltd.. China Insurance Automotive Safety Index Management Regulation (2023 Edition Revised in 2024): CIASI-GM.MM.RL-C1[S]. (2025-02-28) [2026-01-15]. https://www.ciasi.org.cn/download/list-540.html.

[4] 李学言, 祁志楠, 崔东, 等. 整车侧碰壁障性能分析与结构耐撞性设计[J]. 汽车实用技术, 2024, 49(11): 86-91.
LI X Y, QI Z N, CUI D, et al. Performance Analysis and Structural Crashworthiness Design of Vehicle Side Barrier[J]. Automobile Applied Technology, 2024, 49(11): 86-91.

[5] 李卓, 陈涛, 王国强, 等. 微型客车与SUV之间的侧面碰撞兼容性[J]. 汽车安全与节能学报, 2015, 6(4): 333-340.
LI Z, CHEN T, WANG G Q, et al. Side Impact Compatibility between Minivan and SUV[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2015, 6(4): 333-340.

[6] MALEN D E. Fundamentals of Automobile Body Structure Design[M]. Warrendale: SAE International, 2020.

[7] DU BOIS P, CHOU C C, FILETA B B, et al. Vehicle Crashworthiness and Occupant Protection[M]. Southfield, Michigan, USA: Automotive Applications Committee, American Iron and Steel Institute, 2004.

[8] 苏成谦, 吕振华, 张群. 轿车车身结构侧向耐撞性的有限元分析[J]. 汽车工程, 2007, 29(11): 964-969.
SU C Q, LÜ Z H, ZHANG Q. Finite Element Analysis on the Lateral Crashworthiness of Car Body Structure[J]. Automotive Engineering, 2007, 29(11): 964-969.

（责任编辑　南　杉）

修改稿收到日期为2026年2月7日。

（上接第22页）

LIU J Y, PENG H W, CU G R. Crash Simulation Optimization of Automotive Sill Beams Based on Machine Learning[J]. Automotive Engineer, 2025(6): 41-48.

[29] 李仲奎, 李都, 李炽. 纯电动汽车车身设计关键技术综述[J]. 汽车文摘, 2023(3): 21-27.
LI Z K, LI D, LI Z. A Review on the Key Technologies of Pure Electric Vehicle Body Design[J]. Automotive Digest 2023(3): 21-27.

[30] 高伟钊, 邓清源, 杨军, 等. 基于等效静载荷法的挤压铝门槛梁非线性结构优化[J]. 汽车工艺与材料, 2024(1): 1-6.
GAO W Z, DENG Q Y, YANG J, et al. Nonlinear Optimization Design of Extruded Aluminum Sill Based on ESL Method[J]. Automotive Technology & Material, 2024 (1): 1-6.

[31] 毕思刚, 范凯, 唐明理. 基于MPDB和25%偏置碰的白车身设计研究[J]. 汽车文摘, 2023(4): 47-50.
BI S G, FAN K, TANG M L. Research on BIW Design Based on MPDB and 25% Offset Collision[J]. Automotive Di-gest, 2023(4): 47-50

[32] ELLIOTT E S, ROCHE C, REDDY J, et al. Small Overlap Impact Countermeasure-Front Door Hinge Pillar Dual Box [C]// SAE 2016 World Congress and Exhibition. Detroit, MI, USA: SAE International, 2016.

（责任编辑　弦　歌）

修改稿收到日期为2026年1月6日。