•汽车被动安全技术专题•

面向美国标准的新能源汽车后碰撞电安全改进研究

刘衡　李伟　曾繁波　赵帅　杨志添

（广州汽车集团股份有限公司汽车工程研究院，广州 511434）

【摘要】为降低新能源汽车在后碰撞中的高压电安全风险，针对某混合动力SUV车型在FMVSS 305规定的80 km/h车速工况下的后碰撞高压电安全风险问题，在零部件层面，通过设计准静态挤压和动态冲击零部件试验，获得智能电力系统（IPS）模块不同载荷类型下的极限承载力，在整车结构优化层面，通过后碰撞传力路径优化、IPS模块碰撞模式改进，设计了后纵梁结构向上折弯诱导策略使IPS模块受平面挤压，仿真结果表明，优化后IPS模块碰撞力由137 kN下降至49 kN，降低64%，低于其极限承载力。

关键词：后碰撞　电安全　美国标准　智能电力系统　极限承载力

中图分类号：U467.1+4　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.20104/j.cnki.1674-6546.20250030

Research on the Improvement of Electrical Safety in Rear Impacts of New Energy Vehicles for American Collision Standards

Liu Heng, Li Wei, Zeng Fanbo, Zhao Shuai, Yang Zhitian

(Automotive Engineering Institute, Guangzhou Automobile Group Co., Ltd., Guangzhou 511434)

【Abstract】To address the high-voltage electrical safety risk of a hybrid SUV during 80 km/h rear impacts as specified by FMVSS 305, component-level investigations are conducted, and vehicle collision structure optimization is performed. At the component level, through designing two types of component tests, quasi-static extrusion and dynamic impact, the ultimate bearing capacity of Intelligent Power System (IPS) is obtained. At the level of vehicle collision structure optimization, by optimizing the rear impact force transmission path and improving the IPS collision mode, designing the rear longitudinal beam structure to bend upward makes IPS be subjected to planar extrusion. The simulated IPS collision force decreases by 64% from 137 kN to 49 kN, which is less than its ultimate bearing capacity.

Key words: Rear impact, Electrical safety, American standard, Intelligent Power System (IPS), Ultimate bearing capacity

【引用格式】刘衡, 李伟, 曾繁波, 等. 面向美国标准的新能源汽车后碰撞电安全改进研究[J]. 汽车工程师, 2026(7): 9-15.

LIU H, LI W, ZENG F B, et al. Research on the Improvement of Electrical Safety in Rear Impacts of New Energy Vehicles for American Collision Standards[J]. Automotive Engineer, 2026(7): 9-15.

1　前言

车辆碰撞后高压系统的电安全风险和锂电池起火风险等是消费者对新能源汽车安全性担忧的主要因素之一。插电式混合动力汽车（Plug-in Hybrid Electric Vehicle，PHEV）、增程式电动汽车（Range-Extended Electric Vehicle，REV）等新能源车型通常将蓄电池、智能电力系统（Intelligent Power System，IPS）模块等布置在车辆尾部，这也对汽车后碰撞工况下的电安全防护提出了更高的要求[1-2]。

当前，国内外关于新能源汽车后碰撞电安全的研究主要集中于50 km/h工况下的防护策略。曾泽江等[3]基于50 km/h后碰撞工况，通过调整高压部件布局和优化断电控制策略实现电安全防护，结果表明，该车速下纵梁轴向压溃模式即可满足防护需求。张沈生[4]在混合动力车型开发中采

用B级电压电路优化布置方法，在50 km/h后碰撞时通过空间规避策略有效避免了高压部件受挤压。Lian等[5]提出了“变形空间预留+主动断电”组合策略，在50 km/h工况下可使高压部件的碰撞力不超过70 kN。以上研究表明，在中等速度碰撞中，通过优化结构布置和采用传统吸能设计方案可实现电安全防护。

然而，在面对FMVSS 305《电动汽车 电解液溢出及电击保护》中的80 km/h高速后碰撞工况时，现有研究暴露出3个方面的局限性：一是碰撞能量大幅提升，导致传统吸能结构过早失效、纵梁压溃位移增大等，引发多路径传力需求；二是高压部件动态冲击载荷显著增大，超出50 km/h后碰撞工况的高压部件承载能力；三是碰撞变形模式复杂化，高压部件受到三维挤压，突破了现有二维防护策略的有效范围。

为此，本文建立80 km/h工况下的高压部件动态极限承载力测试体系，通过准静态挤压与动态冲击组合试验，对IPS模块在极端载荷下的失效阈值进行量化，并提出“多路径传力+可控折弯”复合防护方案，开发后纵梁向上折弯诱导策略，将IPS模块受力模式从三维集中冲击转化为平面分布挤压，从而有效降低IPS模块的碰撞力。

2 新能源汽车后碰撞电安全法规和标准要求

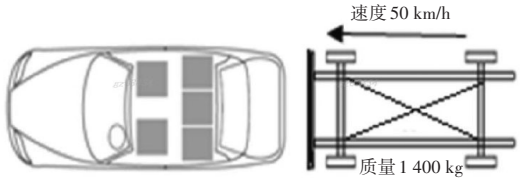
随着国产新能源汽车逐渐走向全球市场，其安全性能需要满足更严苛的全球法规和标准。早期的后碰撞相关法规和标准普遍缺乏新能源汽车后碰撞测试要求，因为传统汽车的后碰撞测试主要考察油箱的保护性能，而新能源汽车后碰撞过程中的动力电池及高压系统承受巨大冲击载荷，易产生变形和位移，引起电池等储能装置漏电、起火、爆炸或侵入乘员舱等，因此，传统汽车后碰撞标准无法直接应用于新能源汽车。2021年，联合国欧洲经济委员会（United Nations Economic Commission for Europe，UNECE）发布的UN ECE R153增加了电动汽车后碰撞的安全要求。现阶段全球与后碰撞有关的电安全相关法规和标准要求如表1所示。

表1 新能源汽车后碰撞电安全法规和标准要求

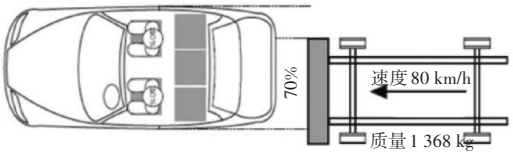
法规（标准）	碰撞速度/km·h^{-1}	电安全相关要求			
		绝缘电阻	乘员保护	第三方保护	过流保护
GB 31498—2021《电动汽车碰撞后安全要求》	50	碰撞结束后第5~60 s，高压母线的电压小于30 V（交流）或60 V（直流）	碰撞测试中和测试后，电池泄漏的电解液不超过5 L； 电池电解液未漏至乘员舱，所有电池包及转换系统固定牢固； 固定在乘员舱外的电源系统未侵入乘员舱	碰撞结束后30 min内，可充电电能存储系统（Rechargeable Electrical Energy Storage System，REESS）无爆炸、起火	电池组和电源电路系统由接触器和保险丝保护。当高压电路电流过大时，接触器和保险丝能够自动断电
UN ECE R153《就后碰撞事故中燃油系统的完好性和电动系统的安全性对车辆的统一规定》	50	直流绝缘电阻>100 Ω/V；交流绝缘电阻>500 Ω/V		冲击试验时，无电源电路短路	
FMVSS 305《电动汽车 电解液溢出及电击保护》	80				

由表1可知，新能源汽车后碰撞安全设计除需保护车内乘员外，还要兼顾第三方保护，保证车辆在碰撞过程中、碰撞后的高压电安全。

全球主要法规和标准体系的后碰撞试验条件如图1所示。美国标准FMVSS 305规定的80 km/h后碰撞工况具有以下特征：碰撞能量更大，且主要依靠单侧后纵梁进行碰撞传力和吸能，导致传统吸能结构过早失效、纵梁压溃位移增大等；碰撞导致整车后部变形量更大，可能对车身后部的高压部件造成严重撞击，超出50 km/h后碰撞工况的高压部件承载能力；碰撞变形模式复杂，高压部件受到三维挤压，突破了现有二维防护策略的有效范围。当前，国内新能源汽车后碰撞安全设计仍以应对50 km/h工况下的后碰撞为主，需要进行更恶劣后碰撞条件下的高压电安全碰撞防护设计。



（a）50 km/h



（b）80 km/h

图1　后碰撞法规和标准试验条件

3　某新能源汽车后碰撞电安全风险分析

3.1　后碰撞有限元模型的建立

3.1.1　高压部件及周边结构

某插电式混合动力SUV车型在后行李箱区域的高压部件有IPS、电机、高压线束，周边布置有空气弹簧储气罐、蓄电池、第三排座椅等结构，如图2所示。

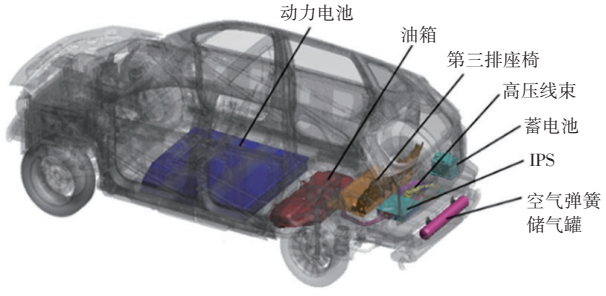
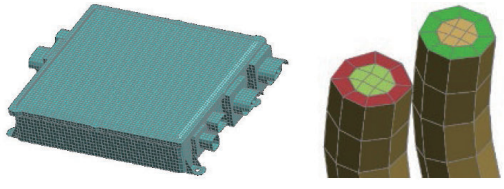


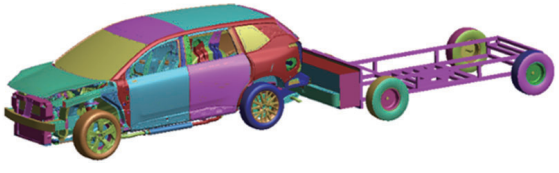
图2　某混合动力汽车高压部件及周边结构

3.1.2　仿真建模

IPS模块的外壳采用铝合金铸造成型工艺，内部结构较为复杂，其整体具有较强的抵抗变形能力，故采用在表面建立壳单元的方式进行模拟，并设置力传感器监测其碰撞力。高压线束屏蔽层采用壳单元模拟，绝缘层和内芯均采用实体网格建模，屏蔽层和绝缘层通过共节点方式连接，如图3a所示。



（a）IPS模块及高压线束

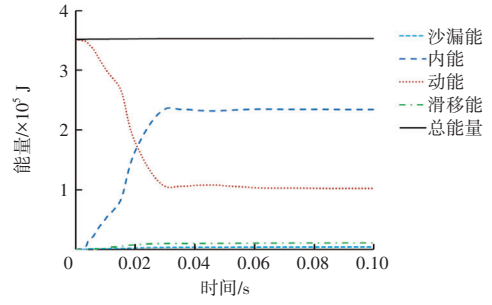


（b）80 km/h后碰撞工况

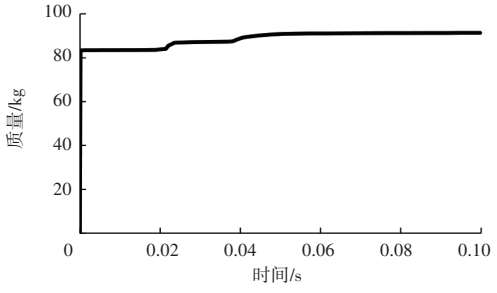
图3　某新能源汽车有限元模型

将车身、开闭件、底盘、电驱动机构、电池、电控系统等分总成组装获得整车有限元模型，并按照FMVSS 305的要求建立后碰撞模型，如图3b所示。台车与整车的重叠率为车宽的70%，以80 km/h的初速度从尾部撞击车辆。

该模型的能量曲线和质量增加情况如图4所示，模型总能量平稳、能量基本守恒，沙漏能约占总能量的0.5%，小于5%，仿真模型的质量增加为93 kg，为整备质量的3.1%，小于5%，计算结果可信。



（a）模型能量曲线



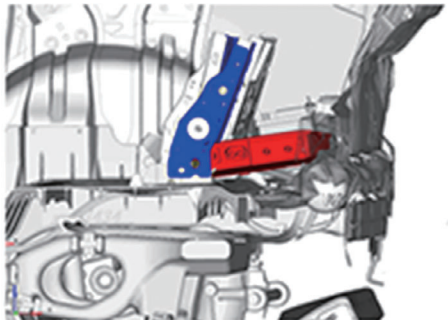
（b）仿真模型的质量增加

图4　仿真能量曲线和模型质量增加情况

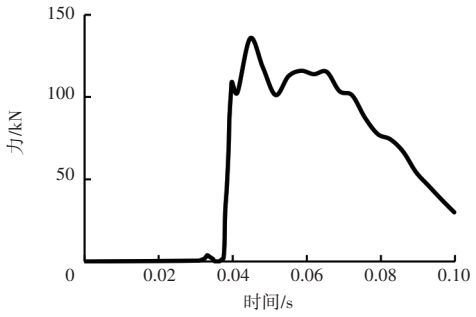
3.2　IPS模块碰撞风险

常见的PHEV、REV的后部区域通常布置有IPS模块等高压部件，车辆高速后碰撞测试中的整车后部区域变形较大，高压部件极易受到撞击。

该混合动力SUV车型在80 km/h后碰撞工况下的仿真结果如图5所示，车体纵向溃缩变形严重，IPS模块在压溃后的车体结构与第三排座椅之间受到前、后向挤压，碰撞力峰值达137 kN，存在高压电路短路、起火的风险。



（a）IPS模块受到周边结构碰撞挤压



（b）IPS模块碰撞受力

图5　整车80 km/h后碰撞工况IPS模块受挤压情况

3.3　整车碰撞高压断电控制原理

碰撞保护系统对碰撞事故的响应时间是高压电安全设计需考虑的重要因素。图6所示为该车型在碰撞工况下的高压断电控制逻辑。当传感器检测到碰撞时，即向辅助约束系统电子控制单元（Supplemental Restraint System Electronic Control Unit，SRS ECU）发送碰撞信号，SRS ECU若判断碰撞信号达到阈值，则向电池管理系统（Battery Management System，BMS）和电机控制器发送断电指令，电池模组、配电箱、电机控制器收到信号后切断高压。该过程所需时间为220 ms，在大多数碰撞结束前已完成高压切断，因此，为保证后碰撞过程中的高压电安全，高压部件不允许发生损坏。

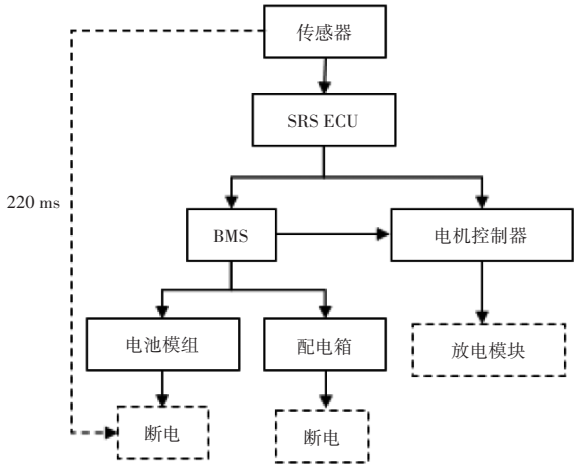


图6　高压断电控制原理

3.4　高压部件碰撞防护策略

参考新能源汽车电池结构碰撞防护设计方案[6-7]，在碰撞中无法规避高压部件受到碰撞、挤压的情况下，需从零部件和整车层级考虑：

a. 在零部件研究层面，需明确高压电结构的极限承载力；

b. 在整车碰撞结构设计层面，需通过车体结构传力路径优化、结构变形模式优化、安装结构优化等方法，合理控制整车结构变形和高压部件碰撞受力，使其碰撞载荷低于极限承载力。

4　后碰撞电安全防护方案改进

4.1　IPS模块试验

本文混合动力SUV车型采用的IPS模块及其内部结构如图7所示。为获得其极限承载力，设计了准静态挤压和动态落锤试验。

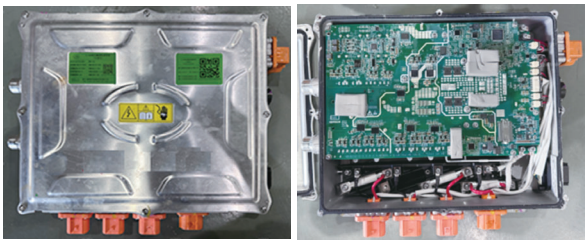
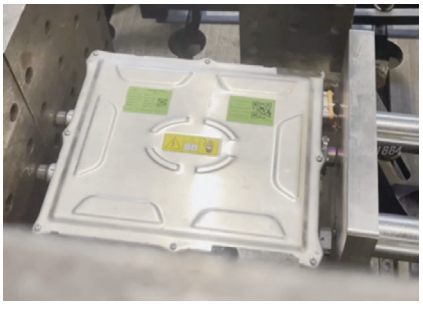


图7　IPS模块及其内部结构

4.1.1　准静态挤压试验

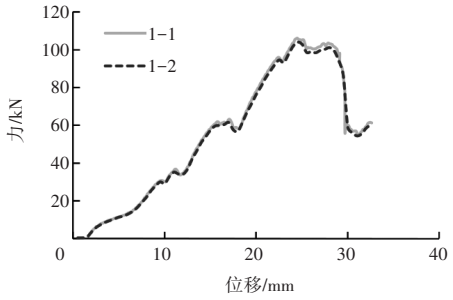
IPS模块准静态挤压试验基于MTS Testline试验平台进行，其液压机可施加载荷范围为0~250 kN，位移行程为±250 mm，试验装置如图8a所示，IPS模块一端采用刚性平板支撑，另一端的加载板与液压机连接，以0.5 mm/s的速度进行挤压试验，记录试验加载力-位移响应数据，准静态挤压试验结果及加载力-位移响应如图8、表2所示。



（a）试验装置



（b）试验结果



（c）加载力-位移响应

图8　IPS模块准静态挤压试验

表2　IPS模块准静态挤压试验结果

试验编号	试验类型	试验速度/mm·s^{-1}	加载力峰值/kN	试验结果
1-1	准静态全宽挤压	0.5	106	IPS模块壳体开裂
1-2		0.5	106	IPS模块壳体开裂

4.1.2　动态落锤试验

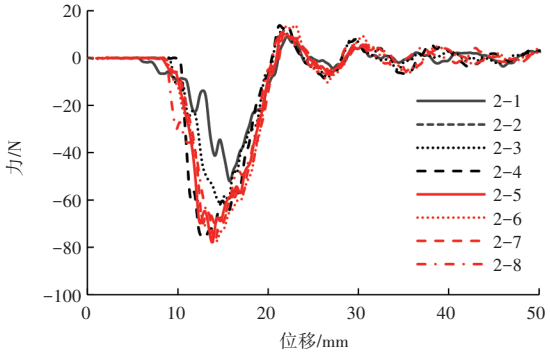
动态落锤试验采用跌落试验塔进行，如图9a所示，试验塔最大高度为3 m，锤头尺寸为200 mm×200 mm，厚度为10 mm，可按需配重。为获得IPS模块的动态极限承载力，根据初次试验结果，逐步增加锤头配重质量，记录试验撞击力-时间响应数据。同时，考虑较小重叠率撞击工况，减小锤头尺寸，设计了50%重叠率平板冲击。动态落锤试验结果及撞击力-时间响应如图9、表3所示。



（a）试验装置



（b）试验锤头



（c）撞击力-时间响应曲线

图9　IPS模块动态落锤试验

表3　IPS模块动态落锤试验矩阵及结果

试验编号	试验类型	锤头长度×宽度/mm×mm	高度/mm	锤头质量/kg	冲击力峰值/kN	试验结果
2-1	全宽平板冲击	200×200	1 100	40.5	53	无开裂
2-2			1 100	40.5	64	连接器根部出现裂纹
2-3			1 100	45.5	62	连接器根部出现裂纹
2-4			1 100	70.5	76	连接器根部出现裂纹
2-5			1 100	80.5	84	连接器根部出现裂纹
2-6			1 100	80.5	78	连接器根部出现裂纹
2-7	50%重叠率平板冲击	100×100	1 100	80.5	79	连接器根部出现裂纹
2-8			1 100	80.5	74	IPS模块本体局部开裂

4.1.3　IPS模块极限承载力

根据上述试验结果，得到各工况下IPS模块试验最大承载力。结合工程经验，考虑实车电安全防护设计余量，以0.8的安全因子确定IPS模块的极限承载力，如表4所示。后续将根据IPS模块受挤压情况，利用极限承载力评估碰撞风险。

表4　IPS模块极限承载力

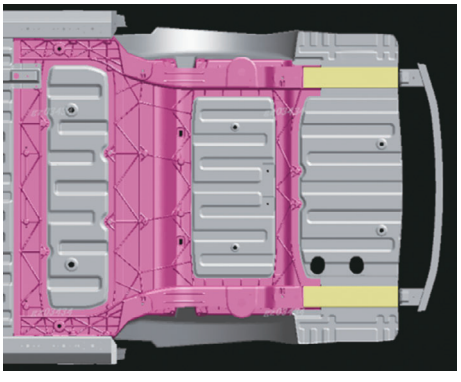
序号	试验类型	最大承载力/kN	安全因子	IPS极限承载力/kN
1	准静态全宽挤压	106	0.8	84.8
2	全宽平板冲击	84~106	0.8	67.2
3	50%重叠率平板冲击	74	0.8	59.2

4.2　整车后碰撞传力路径优化

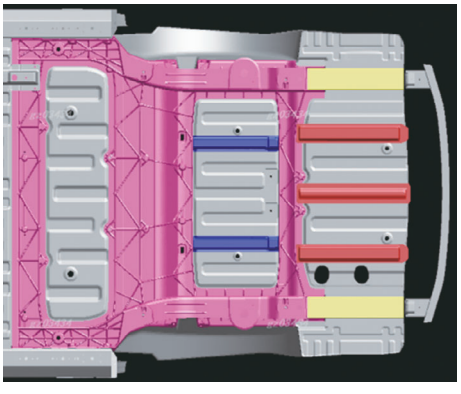
针对汽车后碰撞工况，车身结构可划分为溃缩吸能区、变形过渡区和非变形区域。其中：非变形

区域主要包含动力电池、油箱周围结构及乘员舱；溃缩吸能区主要包含后防撞梁、吸能盒和后纵梁后部结构；变形过渡区为非变形区与溃缩吸能区之间的过渡区域。溃缩吸能区和变形过渡区是后碰撞能量吸收和分配的重点关注区域[8]。由于后防撞梁及吸能盒结构主要依据汽车维修委员会（Research Council for Automobile Repairs，RCAR）提出的碰撞测试规程进行刚度和强度匹配设计，因此，高速后碰撞的优化重点为后防撞梁及吸能盒以外的车体后部传力结构。

结合一体式铸造后桥结构特征以及碰撞分散传力设计思路，针对车型后碰撞工况设计了包含5条纵向传力通道的结构优化方案，如图10所示。



（a）基础结构



（b）优化方案

图10　后碰撞传力路径优化

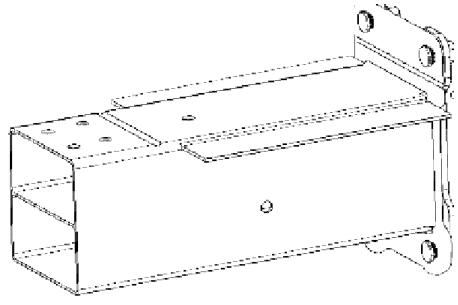
4.3　IPS模块碰撞模式优化

在高速后碰撞工况下，为提升后纵梁碰撞吸能效率并降低车体变形量，在将后防撞梁、吸能盒设计为充分溃缩吸能的情况下，挤压铝后纵梁通常设计为轴向压溃的变形模式，而钢制后纵梁通常设计为三段折弯模式[9-10]。本文车辆后碰撞过程中，在挤压铝后纵梁轴向压溃的情况下，IPS模块受力远超其极限承载力。

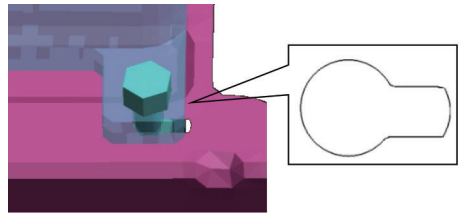
为降低IPS模块的碰撞力，降低电安全风险，结合车型后部结构及布置特征，考虑从后纵梁变形模式、可溃式安装结构等方面进行改进：

a. 通过设计诱导槽（见图11a），诱导后纵梁在与一体式铸造后桥结构连接位置发生向上折弯，使IPS模块以受平面挤压的姿态接触第三排座椅骨架，从而降低IPS模块的碰撞受力；

b. 在IPS模块安装点设计可溃式螺栓安装孔（见图11b），在保证安装点刚度的前提下，使IPS模块在受到碰撞时能沿受力方向产生约15 mm的位移，以降低其所受碰撞力。



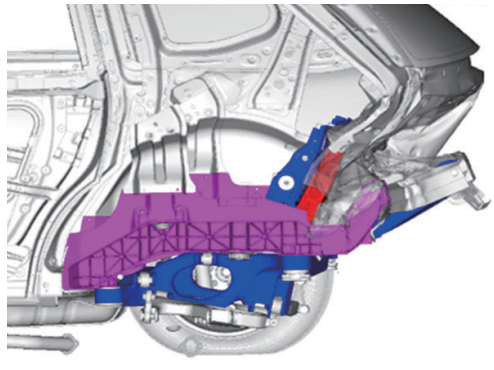
（a）后纵梁诱导槽



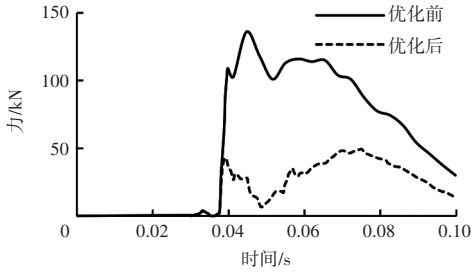
（b）IPS模块安装点可溃式螺栓安装孔

图11　后纵梁、IPS模块安装点结构优化方案

改进后的碰撞仿真结果如图12所示：后纵梁向上折弯，IPS模块以平面挤压的姿态接触第三排座椅骨架，见图12a；IPS模块碰撞受力由137 kN下降至49 kN，降幅达64%，见图12b。结合4.1节中IPS模块的分析结果可知，优化后的IPS模块碰撞受力处于安全载荷范围内，且高压线束未受周边结构挤压或切割，优化后的高压电安全风险可控。



（a）后纵梁优化方案



（b）优化前、后IPS模块碰撞力对比

图12　优化方案后纵梁变形模式及IPS模块碰撞力

5　结束语

本文针对汽车后碰撞电安全相关法规和标准进行了梳理，明确了新能源汽车后碰撞电安全设计要求。针对某新能源汽车在80 km/h后碰撞性能开发中面临的高压电安全风险问题，结合其高压断电控制原理，设计了IPS模块准静态挤压、动态落锤试验，获得了不同载荷类型下IPS模块的极限承载力，并设计了纵向5条传力通道的传力路径优化方案和后纵梁向上折弯变形模式，使IPS模块受力由137 kN下降至49 kN，处于安全载荷范围内。

相较于现有研究多聚焦于单一防护层级的改进，本文构建了零部件耐撞极限-整车传力路径优化-结构模式创新的多层级防护体系，解决了传统电安全防护策略在80 km/h后碰撞工况下失效的问题，可为新能源汽车的全球市场准入提供参考。

参　考　文　献

[1] 胡星星, 张丹, 邸曙升, 等. 基于后碰工况的纵梁抗弯性能优化方法[C]// 中国汽车工程学会. 2020中国汽车工程学会年会论文集. 上海: 机械工业出版社, 2020: 594-597.
HU X X, ZHANG D, DI S S, et al. Optimization Method for Anti-Bending Performance of Longitudinal Beam Based on Rear Impact Condition[C]// SAE-China. Proceedings of 2020 SAE-China Annual Conference. Shanghai: China Machine Press, 2020: 594-597.

[2] 闫晓晓, 于光旭, 黄森仁. 后防撞梁对于后碰车辆安全性能的影响分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2015, 29(5): 18-21.
YAN X X, YU G X, HUANG S R. Impact Analysis of Rear Anti-Collision Beam on Vehicle Safety in Rear Impact[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2015, 29(5): 18-21.

[3] 曾泽江, 王丽娟, 陈宗渝, 等. 微型纯电动汽车后部碰撞电安全分析与设计[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(6): 948-953.
ZENG Z J, WANG L J, CHEN Z Y, et al. Electrical Safety Analysis and Design for Rear Impact of Miniature Pure Electric Vehicles[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39(6): 948-953.

[4] 张沈生. 基于某国产混合动力SUV汽车碰撞电安全研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
ZHANG S S. Research on Electrical Safety of Collision in a Domestic Hybrid SUV[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.

[5] LIAN Y B, ZENG D, YE S, et al. High-Voltage Safety Improvement Design for Electric Vehicle in Rear Impact[J]. Automotive Innovation, 2018(3): 211-225.

[6] 郑颢, 欧阳俊, 王玉超, 等. 面向小偏置碰的轮毂断裂模拟研究[J]. 中国机械工程, 2021, 32(13): 1571-1576+1583.
ZHENG H, OUYANG J, WANG Y C, et al. Simulation Study on Wheel Hub Fracture in Small Overlap Impact[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(13): 1571-1576+1583.

[7] BERGWALL M, DAHLSTROM S, LINDBLAD O. The New Volvo XC60 Car Body[R]. Bad Nauheim: Volvo Car Corporation, 2017.

[8] 耿国超, 孙乐, 乔军平, 等. 某混合动力汽车车身结构设计改进研究[C]// 中国汽车工程学会. 2021中国汽车工程学会年会论文集. 上海: 机械工业出版社, 2021: 272-277.
GENG G C, SUN L, QIAO J P, et al. Structural Design Improvement of a Hybrid Electric Vehicle Body[C]// SAE-China. Proceedings of 2021 SAE-China Annual Conference. Shanghai: China Machine Press, 2021: 272-277.

[9] REICHERT R, MOHAN P, MARZOUGUI D, et al. Validation of a Toyota Camry Finite Element Model for Multiple Impact Configurations[C]// SAE Technical Paper, 2016-01-1534, 2016.

[10] 孙喜龙, 王登峰, 卢放, 等. 基于提高轿车后面抗撞性能的后纵梁结构优化[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(增刊2): 87-91.
SUN X L, WANG D F, LU F, et al. Structural Optimization of Rear Longitudinal Beam for Improving Crashworthiness of Sedan Rear[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2011, 41(S2): 87-91.

（责任编辑　弦　歌）

修改稿收到日期为2025年4月8日。