

纯电动汽车追尾碰撞安全性能优化研究*

施卢丹¹, 颜先华², 黄正军¹, 易舒²

(1.金华职业技术学院, 浙江 金华 321000; 2.众泰汽车工程研究院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 提出纯电动汽车受到追尾碰撞时乘员舱结构稳定性及电安全性能的相关要求; 针对某纯电动汽车追尾碰撞安全性能开发, 参照 GB 20072—2006 对燃油车追尾碰撞的强制性要求, 建立整车追尾碰撞模型进行有限元计算分析, 基于分析结果指导纯电动车追尾碰撞安全性能优化设计。结果表明, 针对纯电动汽车追尾碰撞, 后部车身结构的安全性能设计需遵循逐级变形压溃的原理, 充分提高变形吸能区的吸能效率; 保证动力电池包固定结构及其周围结构的稳定, 使其免受刚性结构挤压, 同时避免挤压乘员舱。实车后碰撞试验结果显示改进后的车辆可满足安全要求。

关键词: 汽车; 纯电动汽车; 追尾碰撞; 车身结构; 安全性能优化

中图分类号: U469.72

文献标志码: A

文章编号: 1671—2668(2020)01—0006—05

作为交通运输工具, 纯电动汽车与传统内燃机汽车存在着相同的碰撞安全问题, 且由于其采用电动驱动系统, 使用中还存在特有的高压电安全隐患。当前国内针对电动汽车碰撞后安全要求的法规 GB/T 31498—2015 对电动汽车在正面碰撞和侧面碰撞试验后车辆的动力系统安全作了明确规定, 但未涉及追尾碰撞。据统计, 追尾碰撞是中国城市道路交通事故的主要事故形态之一, 其事故数量及造成的伤亡人数仅次于正面和侧面碰撞, 且由追尾碰撞导致的直接财产损失比例最高; 在高速公路事故中, 追尾碰撞的事故比例高达 44.9%, 居各类事故之首。因此, 开展纯电动车追尾碰撞的安全性研究及开发非常迫切且具有重要的意义。

现阶段针对追尾碰撞安全性能的研究多集中在低速碰撞中车辆前排乘员颈部挥鞭伤、碰撞行李箱冲击安全优化、传统燃油汽车和混合动力电动汽车的碰撞结构变形控制、燃油系统完整性保护等方面, 对纯电动汽车在追尾碰撞中的车身结构耐撞性和电池安全性等的研究相对较少。该文结合某纯电动汽车追尾碰撞安全性能开发, 分析纯电动汽车追尾碰撞中结构设计思路及方法。

1 追尾碰撞试验

1.1 试验工况

参照 GB 20072—2006 对追尾碰撞中燃油系统安全的要求对纯电动汽车进行追尾碰撞安全性能开

发。试验中, 车辆处于整备质量状态静置于跑道上, 重量为 $(1\ 100 \pm 20)$ kg 的后碰移动车辆与试验车辆沿 Y 向 100% 重叠, 以 (50 ± 2) km/h 的速度撞击试验车辆尾部。

1.2 追尾碰撞开发要求

对于纯电动汽车, 除需满足传统汽车追尾碰撞时车身结构开发要求外, 还需考察动力电池包等高压装置的安全, 如电池包在碰撞试验时不得起火和爆炸、不释放有害性气体, 电池包固定装置不发生失效, 电池包不发生明显位移侵入乘员生存空间等。参照 GB/T 31467—2015 对电动汽车用锂离子动力电池包和系统的安全要求, 结合相关试验成果, 得出纯电动汽车追尾碰撞中技术开发要求如下:

(1) 碰撞过程中, 动力电池包安装固定支架纵向加速度最大值小于 25.2g。

(2) 碰撞中动力电池包外壳的最大压缩变形量 ≤ 10 mm, 压缩变形比例 $\leq 5\%$, 电池包无明显受挤压痕迹。

(3) 碰撞试验后, 动力电池包不穿入乘员舱, 高压线束区域无明显挤压痕迹。

(4) 碰撞后无电解液进入乘员舱, 也不发生电解液泄漏。

2 纯电动汽车追尾碰撞仿真模型

2.1 有限元求解的力学模型

目前, 车辆碰撞安全分析主要采用有限元仿真

* 基金项目: 浙江省 2018 年度高校访问工程师校企合作项目 (FG2018016)

分析法。对于常规碰撞工况,有限元求解模型的力学模型为:

$$\int_0^A \sigma_1 \epsilon_v dA - \int_0^S F_e u_v dS + \int_0^C F_{cf} u_r dC + \int_0^A \rho a u_v dA = 0 \quad (1)$$

式中: A 为基础系统所占空间; σ_1 为内应力; ϵ_v 为虚应变; S 为除接触摩擦力外的外力作用表面; F_e 为外作用力; u_v 为虚位移; C 为接触表面; F_{cf} 为接触摩擦力; u_r 为两接触点的相对虚位移; ρ 为质量密度; a 为接触系统的加速度。

有限元方法运用的离散概念是将连续的三维几何体分割成有限多个非常小的多边形或多面体单元,各单元仅在节点处连接,把原来无限多自由度体系简化成有限多个自由度体系,建立代数方程组进行迭代求解,得到数值解答。

式(1)经过有限元离散后,转化为式(2)所示等效方程组:

$$M \ddot{a} = F_e - F_i - F_{cf} \quad (2)$$

式中: M 为系统质量矩阵; a 为加速度矢量; F_e 为外力矢量; F_i 为内力矢量; F_{cf} 为接触摩擦力矢量。

求解式(2),利用中心差分方法得到下一时刻系统的运动规律和能量变化规律,即整车碰撞结构响应的特征关系。

2.2 材料的力学模型

纯电动汽车车身钣金材料大多为低碳钢,有限元分析中采用LS-DYNA中24号分段线性塑性材料模型(MAT 24),考虑材料应变率效应的影响,24号材料模型可通过输入材料Cowper Symonds本构模型的相关参数将材料的应变率效应考虑进去,其本构模型表达式为:

$$\sigma_y(\epsilon_{eff}^P, \dot{\epsilon}_{eff}^P) = \sigma_y(\epsilon_{eff}^P) \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}_{eff}^P}{C} \right)^P \right] \quad (3)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ 为有效应变率; C 、 P 为应变率系数,对于低碳钢, $C=40.4$, $P=5$,对车身金属材料可定义相同的应变率系数; $\sigma(\epsilon_{eff}^P)$ 为未考虑应变率时的屈服应力。

典型金属材料的应力-应变曲线见图1。

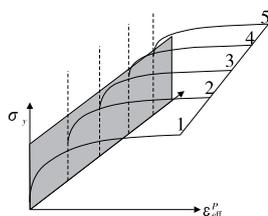


图1 典型金属材料的应力-应变曲线

2.3 整车碰撞模型

按照有限元分析理论的相关要求,将车身、底盘、动力电池、驱动电机、充电机等三维数据进行网格化离散处理,为提高模型求解精度,将车辆追尾碰撞区域内的网格调整至平均尺寸5~8 mm。根据GB 20072-2006建立图2所示纯电动汽车追尾碰撞CAE分析模型。



图2 纯电动汽车追尾碰撞模型

3 纯电动汽车追尾碰撞安全性能优化

纯电动汽车发生追尾碰撞过程中,主要依靠后防撞梁总成及后地板左右纵梁的变形吸收碰撞能量。根据碰撞能量管理原则,将后部车身结构划分为压溃吸能区、变形过渡区和不变形区域(见图3)。其中:不变形区域主要包含动力电池包周围结构和乘员舱空间,是追尾碰撞中车身结构安全的基础和核心;压溃吸能区主要包含后防撞梁总成和后地板左右纵梁结构,该区域和变形过渡区是追尾碰撞中能量吸收的重点设计关注区域。

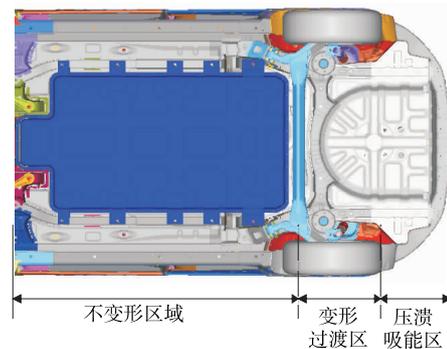


图3 纯电动汽车追尾碰撞纵向分区

3.1 基础模型碰撞结果分析

按图2所示追尾碰撞模型进行仿真计算,碰撞中后部车身骨架变形见图4。由图4可知:碰撞过程中,后部车身结构强度设计匹配不合理,未能实现逐级压溃变形。由于吸能盒X向尺寸偏小,结构相对偏硬,碰撞中变形程度较小;后部车身骨架主要变形区域位于车身后地板纵梁前段及后段搭接区域,变形形式以折弯为主,后地板纵梁后段未能有效压溃吸能,前段对动力电池包处出现轻度折弯(图4

中圆圈内所示)。

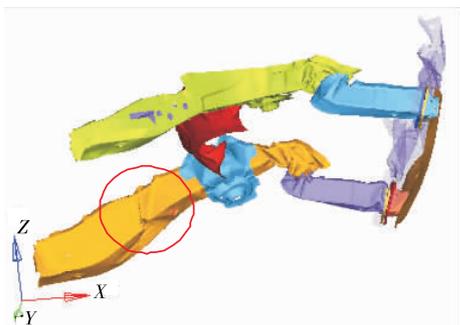


图4 优化前模型碰撞中后部车身骨架变形

受后地板纵梁后段吸能效率偏低的影响,未能充分耗散碰撞载荷,前段在碰撞过程中承受及传递给动力电池位于车辆后部的车身安装支架的力较大,不仅导致该处两个车身支架产生明显变形,也导致动力电池支架与其壳体产生挤压,壳体最大应变达 5.79% (见图 5),不满足要求。

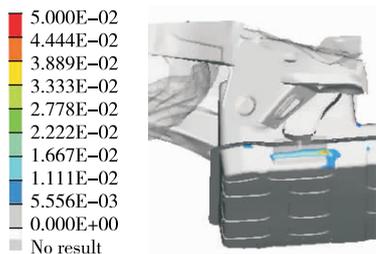


图5 优化前模型碰撞中动力电池壳体应变

如图 6 所示,碰撞过程中,车辆左右侧 B 柱下端 X 向加速度峰值分别为 22.3g 和 20.9g,均未超过 25g,满足开发要求。但根据后部车身骨架变形顺序,碰撞初始阶段,纵梁前后端搭接处的折弯和后防撞梁总成受撞击变形几乎同时发生,8~13 ms 内产生较高的加速度峰值,随后加速度急速回落,直至 38 ms 时,车体加速度上升缓慢,此时车身骨架变形吸能效率偏低;而进入碰撞中后期的 38~70 ms,加速度形成相对稳定的区间,表明在较长一段时间内动力电池要承受较高的加速度冲击。

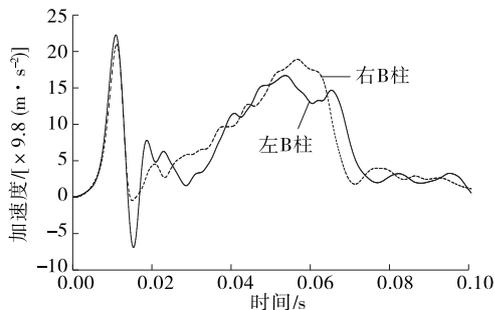


图6 优化前模型 B 柱下端 X 向加速度曲线

3.2 车身结构优化设计

针对该纯电动汽车追尾碰撞中的问题,根据碰撞中逐级变形压溃的理论和能量管理的基本原则制定车身结构优化思路。

(1) 为提高后防撞梁总成在追尾碰撞中的作用,将防撞梁材料提升至 HC340/590DP 级别,并对吸能盒沿整车 X 向加长 25 mm (见图 7)。

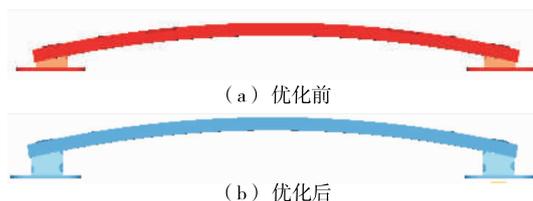


图7 后防撞梁总成优化方案

(2) 为提高碰撞 13~38 ms 内车身结构的吸能效率,使能量在碰撞早期充分耗散,在后纵梁实行变形诱导设计,取消原模型中的外凸肋条,改为内凹的小诱导槽 (见图 8)。

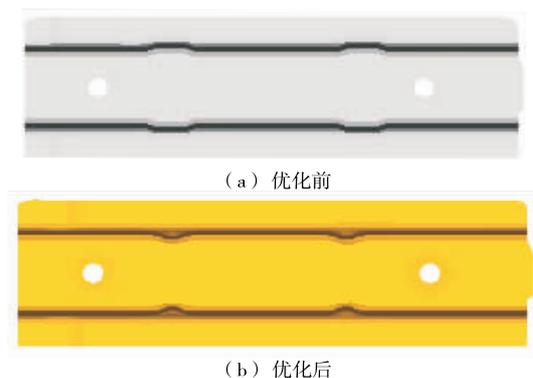


图8 后纵梁后段优化方案

(3) 为加强对动力电池后部重量的支撑,将车辆后部的车身安装支架材料由 HC250/450DP 提升为 HC340/590DP 级别。

3.3 改善效果验证

对改进方案进行追尾碰撞仿真计算,纵梁变形见图 9。由图 9 可知:优化后的后纵梁后段在碰撞

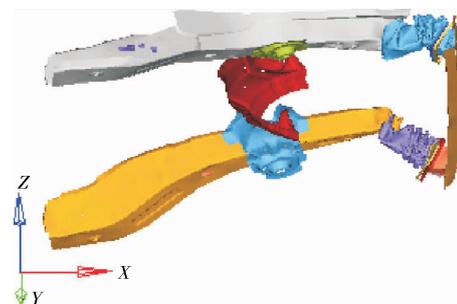


图9 优化后纵梁变形

中充分变形吸能,呈现出较理想的轴向折叠压溃;后纵梁前段与后段搭接处略有折弯,对应电池包处其形状保持良好。

优化后,整车在碰撞过程中通过结构变形所吸收的能量总和为 57.61 kJ,车辆主要吸能部件如后防撞梁总成及后纵梁后段吸收的碰撞能量明显提升,其中后纵梁后段吸能 15.94 kJ,比基础模型提升 151.8%,占整车总吸收能量的 27.67%;间接引起备胎盆吸能略有增加,后部关键结构吸能占车辆总吸收能量的 61.74%。通过合理的车身结构强度匹配,提升了变形吸能区的零部件吸能效率,显著降低了后纵梁前段的变形程度,从而有效保证了动力电池及固定点的结构稳定。优化前后各主要零件的能量吸收对比见表 1。

表 1 优化前后各零件吸能对比

零部件	吸能量/kJ		优化后吸能提升比例/%
	优化前	优化后	
后防撞梁总成	1.49	4.34	191.27
后纵梁后段	6.33	15.94	151.81
后纵梁前段	10.10	4.10	-59.41
备胎盆	10.30	11.19	8.64
合计	28.22	35.57	26.05

通过优化,后纵梁后段更合理的轴向折叠压溃模式可有效降低碰撞过程中车体加速度,加速度峰值降至 14g,碰撞过程的中后期平均加速度约 10g,表明碰撞中车体振动冲击在相对较低的水平。动力电池包外壳体的最大压缩变形量为 9.4 mm,最大应变变为 4.56%(见图 10),满足设计要求。碰撞过程中动力电池包对乘员舱无明显挤压,判定碰撞后无电解液进入乘员舱,发生电解液泄露的几率低。

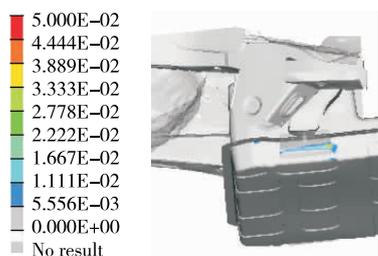


图 10 优化后模型碰撞中动力电池包最大应变

4 实车试验结果及加速度曲线相关性

优化后实车追尾碰撞试验结果见图 11。由图 11 可知:碰撞后,后部行李箱严重破坏,后保险杠总成与翼子板搭接处脱落,碰撞传感器触发安全气囊

控制器系统,高压回路断开,车身结构变形吸能区在碰撞中充分压溃,乘员舱仅有轻微变形,动力电池包无损坏。



图 11 优化后实车追尾碰撞结果

优化模型仿真加速度曲线与实车碰撞加速度曲线对比见图 12。由图 12 可知:实车和仿真的加速度曲线趋势基本一致,但由于材料曲线及网格精度等因素的影响,曲线的峰值存在一定差异,整体而言仿真模型能较准确地反映碰撞历程。

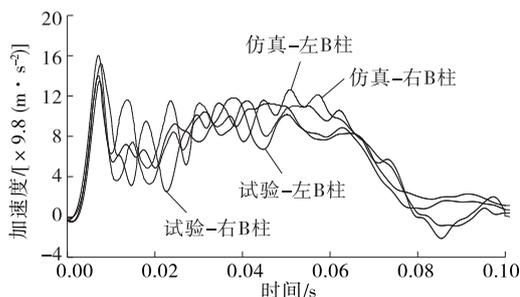


图 12 优化后碰撞加速度曲线

5 结论

该文针对某纯电动汽车追尾碰撞安全性能开发,建立整车碰撞有限元模型,基于有限元计算结果进行追尾碰撞车身结构优化设计,试验结果表明,优化设计后车辆具有良好的追尾碰撞安全性能。主要结论如下:

(1) 追尾碰撞中,后部车身骨架结构的设计要依据逐级压溃变形吸能的原则,后防撞梁及后纵梁等主要骨架结构要吸收超过 60% 的碰撞能量;碰撞吸能区不能布置高压组件,防止碰撞中因线束短路造成车内乘员高压电击伤害。

(2) 追尾碰撞安全防护设计中,碰撞过程中整车及动力电池包固定支架处的加速度峰值要小于 25g,以降低碰撞过程中动力电池所受振动和冲击。

(3) 采用有限元方法进行汽车碰撞安全性能分析和优化,可降低设计成本,缩短设计周期。

参考文献:

- [1] GB/T 31498—2015, 电动汽车碰撞后安全要求[S].
- [2] 颜先华, 施卢丹, 王纯, 等. 某微型乘用车后面碰撞结构安全优化设计[J]. 公路与汽运, 2013(6).
- [3] 叶子波, 符兴锋, 周斯加, 等. HEV 后碰撞安全性仿真和试验研究[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2011, 39(11).
- [4] 李仲奎, 宋景良, 夏卫群, 等. 插电式混合动力汽车后碰撞性能改善[A]. 2013 年中国汽车工程学会年会论文集[C]. 2013.
- [5] 苏忠根, 龙江启, 周斯加, 等. 增程式纯电动汽车后碰撞安全性仿真和试验研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(7).
- [6] 胡远志, 胡源源, 刘西, 等. 基于 LS-DYNA 的某座椅鞭打性能分析和优化[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2017, 31(6).
- [7] GB 20072—2006, 乘用车后碰撞燃油系统安全要求[S].
- [8] GB/T 31467—2015, 电动汽车用锂离子动力电池包和系统[S].
- [9] 崔萌, 杨志刚, 王大勇, 等. 基于正面 RCAR 试验的汽车结构性能改进设计研究[J]. 上海汽车, 2013(4).
- [10] 涂文兵, 何海斌, 刘乐平, 等. 诱导结构对汽车前纵梁碰撞性能的影响[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2018, 32(7).
- [11] 杨桂通. 弹塑性动力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [12] 冉清华. 中型客车驾驶室正碰结构安全性仿真研究[J]. 客车技术与研究, 2012(4).
- [13] 吴长风, 那景新, 杨佳宙, 等. 客车正面碰撞车身结构耐撞性分析与改进[J]. 客车技术与研究, 2018(4).
- [14] 王力, 吴旭, 魏然, 等. 某乘用车追尾碰撞分析及结构改进研究[J]. 轻型汽车技术, 2012(增刊 3).
- [15] 朱平, 肖国锋, 张宇, 等. 轿车追尾碰撞仿真及结构耐撞性改进研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(6).
- [16] 孔国栋. 某微型纯电动车正面碰撞安全分析与优化[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [17] 李文龙. 纯电动汽车正面碰撞安全性分析与优化[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [18] 雷正保, 刘助春, 廖卓. 纯电动汽车白车身耐撞性拓扑优化设计方法[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2016, 37(5).
- [19] 雷正保, 肖林辉, 阳彪, 等. 纯电动汽车的碰撞相容性与 NVH 多目标拓扑优化[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2016, 40(1).
- [20] 王希杰. 汽车侧面碰撞安全性能分析与优化[D]. 重庆: 重庆汽车学院, 2012.
- [21] 葛云飞. 电动汽车碰撞安全性分析[D]. 淄博: 山东理工大学, 2013.
- 收稿日期: 2019-07-01
- *****
- (上接第 5 页)
- [10] 谢晖, 陈龙, 李凡. RBF 近似模型在汽车碰撞变复杂度建模中的应用[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(10).
- [11] 李铁柱, 李光耀, 陈涛, 等. 基于 Kriging 近似模型的汽车乘员约束系统稳健性设计[J]. 机械工程学报, 2010, 46(22).
- [12] Yu Cheng Liu. Crashworthiness design of thin-walled curved beams with box and channel cross sections[J]. International Journal of Crash Worthiness, 2010, 15(4).
- [13] Forrester A I J, Keane A J. Recent advances in surrogate-based optimization [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2009, 45(1).
- [14] 潘锋. 组合近似模型方法研究及其在轿车车身轻量化设计的应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [15] 马锦. 基于组合近似模型的插秧机秧箱轻量化设计[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2017.
- [16] 孙杨. 组合近似模型预测设计方法及应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [17] 周美施, 尹怀仙, 张铁柱, 等. 考虑疲劳寿命的负载隔离式电动汽车车架轻量化研究[J]. 公路与汽运, 2016(4).
- [18] 唐锐东, 胡霞东, 吴东, 等. 某 6.6 m 纯电动客车轻量化设计[J]. 客车技术与研究, 2016(3).
- [19] 继刚, 王淑丽, 许夏. 整体前桥全承载车型轻量化设计与分析[J]. 客车技术与研究, 2014(1).
- [20] 王楠, 张洪信, 赵清海, 等. 基于 RSM 近似模型的客车车架稳健性设计[J]. 机械制造与自动化, 2019(1).
- [21] 王楠. 基于拓扑和稳健设计的客车车架轻量化研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2018.
- [22] 张勇. 基于近似模型的汽车轻量化优化设计方法[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- 收稿日期: 2019-09-26