

基于某车型动力电池包底部撞击试验的仿真研究

戴江梁 孟祥宇 陈 琪

(广州汽车集团股份有限公司 汽车工程研究院, 广州 511434)

摘要:【目的】动力电池在充放电过程中表现出显著的应力及形变特性,这对电池的管理与成组设计提出了更高要求。为准确评估动力电池包在底部撞击试验中的结构强度状态及电池单体的安全健康状态,需明确界定单体电池在特定场景或工况下触发起火爆炸的临界侵入量。采用仿真手段对动力电池包底部撞击试验中结构的强度状态及电池单体的安全状态进行了准确预测,并基于数值试验模型,深入分析了撞击过程中的动力学响应特性与能量分配规律。【方法】首先,基于显式动力学理论与有限元方法,利用Abaqus软件构建了动力电池包底部撞击的显式非线性有限元数值模型;然后,计算并评估了关键部件的位移响应、等效塑性应变及系统的能量分布规律。【结果】结果表明,仿真预测的被撞击部件变形形状、侵入量及强度状态与试验实测结果高度吻合,底护板、液冷板和电池壳体侵入量的仿真精度分别为94.36%、98.80%、96.78%。球头对电池包底部的最大撞击力为27 299 N。撞击总能量的80.96%转换为底护板、液冷板与电池单体外壳的应变能,且核心部件的吸能占比与被侵入量成正相关特性。研究成果可为动力电池包底部安全防护方案的力学性能设计提供数字化评估方法与理论参考。

关键词: 动力电池包; 底部撞击; 侵入量; 吸能占比; 底部安全防护

中图分类号: TH122 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.07.021

0 引言

新能源汽车底部遭受高速异物撞击时,电池单体易因挤压短路而引发自燃、起火甚至爆炸。尽管此类底盘磕碰通常不会直接损伤乘员以及造成整车剧烈减速或车身大变形,但会导致电池包局部产生严重的溃缩变形,进而引发高压回路短路、热量急剧集聚,并最终导致火灾^[1]。因此,研究如何提高电池包的底部结构安全防护设计与如何提高电池包底部撞击试验的仿真精度具有重要的意义和实用价值。目前关于电池包底部的撞击仿真研究工作较少,研究成果大多集中于钢、铝材等材料本构失效模型对仿真精度的影响。Pan等^[2]通过对电池外壳进行耐撞性仿真模拟,分析了3种不同高强度钢材及不同材料厚度对电池外壳耐撞性的影响。杨威^[3]基于应变硬化材料理论,利用有限元软件构建了电池包底部碰撞运动学模型,得出了临界失效位移和最大加载力的简单表达式,应用于电池包底部结构失效预测分析。许鑫等^[4]针对电池包底部遭受穿刺时易发生电池自燃的问题,构建了一种护栏杆冲击电池包底部的仿真模型,采用Crushable Foam材料本构与均质化建模方法,表征了锂离子电池的力学特性,通过仿真分析探究了电池包承受外部动态冲击载荷下内部结构及锂离子电池的变形情况及强度失效风险。Xia等^[5]研究开发了一种应用于电

池组底部碰撞的仿真分析方法,该分析方法从电池单体、电池模块和整车级别,多尺度研究了道路异物对电动汽车的撞击过程,系统分析了各电池组件各种结构的防护机制,为电池组的底部防护提供了指导方法。王超等^[6]提出了一种铝合金防护结构的截面-布置设计方法,运用拓扑优化技术获取了较优的截面形状为“人”字形结构,并对原方案与优化方案的吸能情况和侵入量作了综合对比,为动力电池包底部防护方案的轻量化设计提供重要参考。黄芦^[7]提取不同参数的道路异物作为动力电池包底部碰撞的冲击头,并全面研究了不同参数的道路异物对电池包冲击碰撞的影响。王国杰等^[8]针对行业对电动汽车底部碰撞工况无相关标准和法规的现状,设计了一种典型的正面刮底碰撞工况及壁障,并通过仿真分析验证了该设计工况及壁障的合理性,为降低动力电池包在正面刮底工况中的损伤,提出了2种防护优化方案。周飞^[9]通过对整车进行托底仿真分析,研制了一种电池包防护装置,大幅降低了电池包在托底工况中的损伤。王月等^[10]对电动汽车的交通事故进行统计分析研究,总结了电池包承受向上撞击与水平撞击的典型工况,并通过仿真发现,在向上撞击工况中,Z向速度冲击对电池包造成主要的损伤,在水平撞击工况中,整车离地间隙与电池包底部防护结构的设计对电池包的损伤影

收稿日期: 2024-09-29 修回日期: 2024-11-21

作者简介: 戴江梁,男,1985年生,湖南涟源人,硕士,工程师; 主要研究方向为新能源汽车动力电池系统及电驱系统的强度耐久分析、冲击与碰撞显式动力学分析及结构优化; E-mail: hnly_djl@163.com。

引用格式: 戴江梁,孟祥宇,陈琪. 基于某车型动力电池包底部撞击试验的仿真研究[J]. 机械强度,2026,48(7):183-190.

Dai Jiangliang, Meng Xiangyu, Chen Qi. Simulation research on bottom crash test of power battery pack based on a specific vehicle[J].

Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(7): 183-190.



免费获取

响重大。Nirmala 等^[11]开发了一种针对电池包底部冲击工况的轻型防护结构,该结构为纤维金属层压板(Fiber Metal Laminate, FML),通过中间复合材料薄金属层粘接组成。通过仿真对该防护结构的短路和吸能变形引起的电池着火风险进行评估,获得了最为有效的防护结构方案,即其顶层和底层为 1 mm 厚的铝、中间层为 4.8 mm 厚的碳纤维增强聚合物。Zhu 等^[12]为提高电池包的底部耐冲击力学性能,设计了 4 种底部增强防护方案,包括 1 种外壳箱体增强型与 3 种底护板增强型方案,并通过仿真分析与试样的力学测试验证,结果表明,抗爆铝制夹层(Blast Resistant Adaptive Sandwich, BRAS)结构可提供稳定的阻力和避免屈曲变形,具有很强的耐撞性。

锂离子电池是电-热-力耦合系统,三者相互关联,共同影响着电池的外在性能表现。电池在充放电中,存在着明显的应力及变形特性,这对电池的管理和成组提出新的要求。目前对于电池充放电中力学特性的研究较少,较大地限制了锂离子电池的应用性能^[13]。为准确预测动力电池系统承受实际行驶的底部磕碰或国标要求的底部撞击试验其内部电池的安全健康状态,需准确界定电池单体在指定场景或工况下触发起火爆炸的侵入量。目前电池厂商一般通过多种试验标定电池单体被侵入量的安全阈值,而电池单体的起火爆炸是多因素综合作用触发而成,利用电力热多场耦合仿真技术预测与表征电池的电热性能与力学性能的等效关系,将成为动力电池系统碰撞与撞击研究方向的挑战。

首先,本文基于显式动力学理论与有限元方法,利用 Abaqus 软件对动力电池包底部撞击试验进行仿真模拟并计算,获取结构的侵入量、应变及能量分布;其次,开展动力电池包底部撞击试验,实测了底护板、液冷板与电池单体的被侵入量,验证了动力电池包底部撞击的仿真分析具备较高的预测精度;然后,对球头撞击过程中的动态响应特性与系统的能量分布进行分析,验证了系统遵循能量守恒。最后,获取了迎击面的最大撞击力与被撞击部件的吸能占比,为电池包底部安全防护的力学性能设计提供有力的数据支撑与理论参考。

1 电池包底部撞击试验及理论分析

1.1 电池包底部撞击试验

根据国家标准 GB 38031—2020 新增的动力电池包底部撞击试验要求,其主要试验内容与要求如下:

1) 试验对象:安装在车辆底部的电池包或系统,或其对应的整车。试验对象为电池包或系统时,允许对电池包或系统起到保护作用的车身结构参与试验。

2) 试验条件:动力电池包底部撞击试验,如图 1 所

示。图 1 中撞击球头前端为半径 $R=15\text{ mm}$ 的半球形,材质为 45 钢;撞击方向为 Z 轴正方向,即同时垂直于汽车行驶方向 X 方向与侧向 Y 方向;撞击位置为制造商提供的 3 处底部防护风险点位,将其作为冲击位置;球头的撞击能量输入为 150 J。

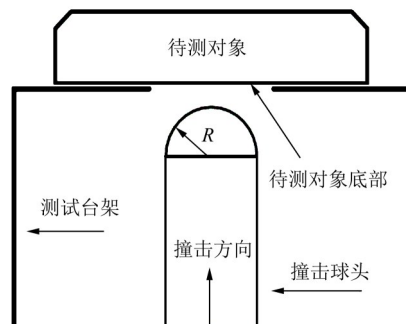


图 1 动力电池包底部撞击试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of bottom crash test for power battery pack

1.2 动力电池包底部撞击动力学数学模型

球头以 150 J 动能撞击动力电池包底部过程中,电池包的底部结构发生溃缩变形来吸收和耗散撞击力和能量。这种大位移、大变形的高度非线性问题通常采用显式动力学理论与中心差分法进行求解^{[5]78-97},其动力学方程为

$$\mathbf{F} = \mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{F}$ 为力矩阵; $\mathbf{M}$ 为结构的质量矩阵; $\mathbf{C}$ 为结构的阻尼矩阵; $\mathbf{K}$ 为结构的刚度矩阵; $\mathbf{U}$ 为结构的位移矢量。

对加速度、速度的导数,采用中心差分法代替,整理得到

$$\begin{cases} \mathbf{M}\mathbf{U}_{t+\Delta t} = \mathbf{R}_t \\ \mathbf{M} = \frac{1}{\Delta t^2}\mathbf{M} + \frac{1}{2\Delta t}\mathbf{C} \\ \mathbf{R}_t = \mathbf{F}_t - (\mathbf{K} - \frac{2}{\Delta t^2})\mathbf{U}_t - (\frac{1}{\Delta t^2} - \frac{1}{2\Delta t}\mathbf{C})\mathbf{U}_{t-\Delta t} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{R}_t$ 为载荷向量; $\mathbf{F}_t$ 为外界作用力矢量。

根据连续介质力学原理和虚功原理,可得到结构的能量平衡方程为

$$\int_V \rho \ddot{x}_i \delta x_i dV + \int_V \sigma_{ij} \delta x_{i,j} dV - \int_V \rho f_i \delta x_i dV - \int_S p_i \delta x_i dS = 0 \quad (3)$$

式中, ρ 为质量密度; x_i 为质点位移; V 为结构体积; σ_{ij} 为柯西应力; f_i 为单位质量体积力; p_i 为表面力; S 为结构表面积。各积分项分别表示单位时间内系统的惯性力、内力、体积力与表面张力所做的功。

利用中心差分法对方程组迭代求解,通过式(1)、式(2),可获取电池包结构与球头的位移、速度等,通过能量平衡方程[式(3)]可计算获取电池包结构部件的能量分布及吸能占比。

2 动力电池包有限元模型的建立

2.1 电池包结构介绍

电池包结构主要由上盖、下箱体、液冷板、纵横

梁、导热结构胶、电池模块、底板等部件通过螺栓连接、焊接、胶粘连接装配而成。本文所研究的电池包为 CTP 结构,即多个电池单体通过堆叠集成大电池模块,2 个大电池模块通过导热结构胶,胶粘装配在液冷板平面上。电池包的剖视结构如图 2 所示。

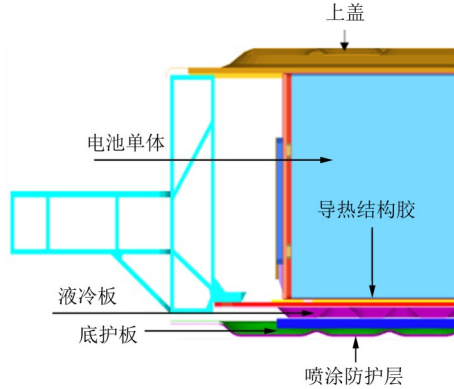


图 2 动力电池包结构示意图(剖视)

Fig. 2 Schematic diagram of power battery pack structure (sectional view)

2.2 建立有限元模型

准确规范的建模方法与高质量的网格划分是有限元分析精度的重要保证^[14]。动力电池包结构的焊接连接、螺栓连接、铆钉连接、胶粘、喷涂黏附等连接方式作为彼此传递力与能量的重要枢纽,底板与 PVC 防护层的喷涂粘接关系及电池单体、导热胶与液冷板的胶粘关系均以绑定接触的方法模拟表征;部件之间的装配接触关系以通用接触的方法模拟。针对动力电池包底部受撞击关键区域开展网格细化并严格把控网格质量;对无撞击风险的其余零部件适度粗化网格,在保证仿真精度的前提下最大限度削减整体网格规模,提升数值计算效率。经处理后,该动力电池包有限元模型总单元数约 1.05×10^6 。建立的精细化动力电池包底部撞击有限元模型如图 3 所示。

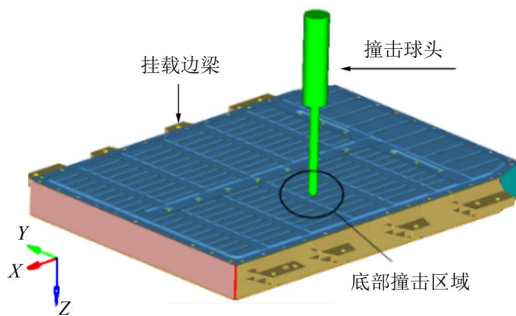


图 3 动力电池包底部撞击有限元模型

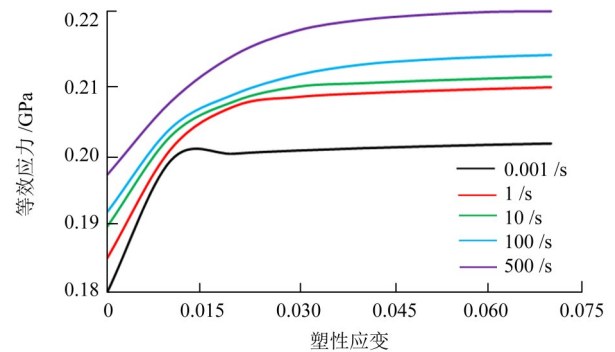
Fig. 3 Finite element model of the bottom crash on the power battery pack

3 仿真分析

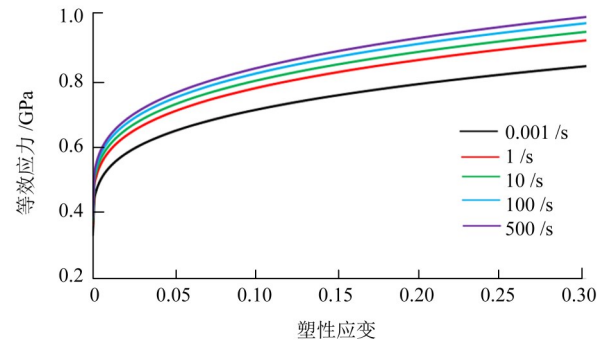
3.1 弹塑性材料本构关系

通过对材料分别进行单轴静态拉伸试验与高速单轴拉伸试验,将试验数据处理转换为仿真用的塑性应变-等效应力数据(图 4)。因为获取材料动态特性的

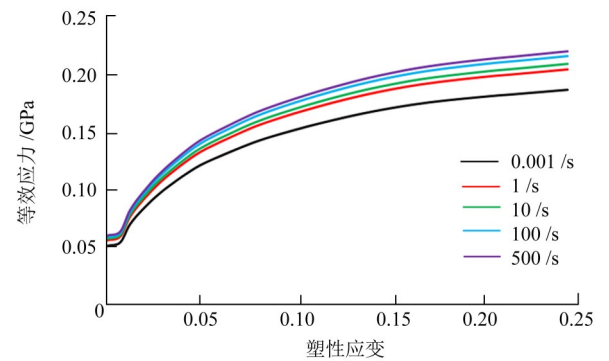
损伤失效本构参数需要较高的试验费用和时间成本,考虑到试验并非高能量的破坏性试验,故材料参数的定义仅考虑材料紧缩前的线弹性特性、塑性硬化与强化特性。



(a) AL3003-H14 不同应变率下的应力-应变曲线



(b) HC340-590DP 不同应变率下的应力-应变曲线



(c) AL3003-O 不同应变率下的应力-应变曲线

图 4 各材料在不同应变率下的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of each material at different strain rates

3.2 边界条件与加载

为与试验状态保持一致,约束电池包挂载梁安装点的所有自由度,约束球头除 Z 方向平移自由度外的其余 5 个自由度作为边界条件。为与试验中的球头能量进行等效加载,根据球头的初始动能 150 J 与球头质量 10 kg,可计算得到撞击速度为 5 477 mm/s,并以此速度作为仿真分析的初始载荷,同时输出电池包结构的位移、等效塑性应变、应变能(Strain Energy, SE)、动能(Kinetic Energy, KE)、伪应变能(Artificial Strain Energy, ASE)与球头的位移、速度与加速度。图 5 所示为动力电池包底部撞击模型的边界条件与加载示意图。

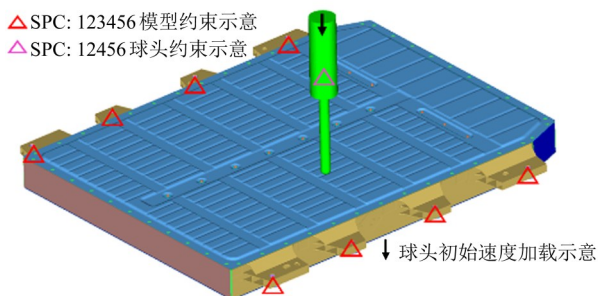


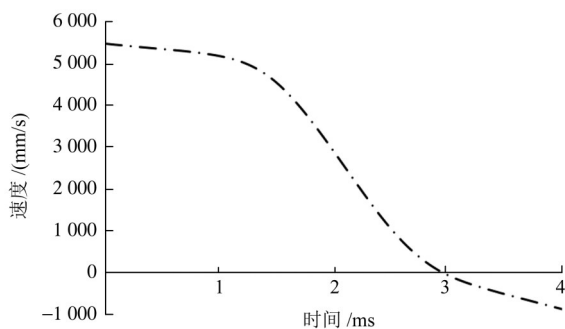
图5 有限元模型边界条件与加载示意图

Fig. 5 Boundary conditions and loading of the finite element model

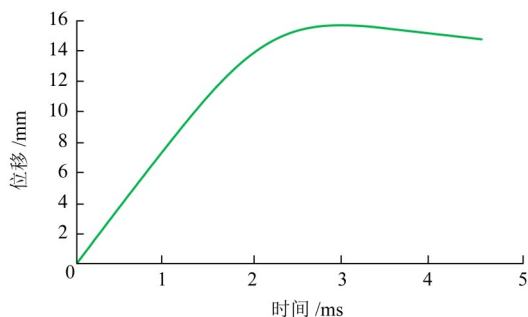
3.3 仿真结果分析

3.3.1 球头的力学响应分析

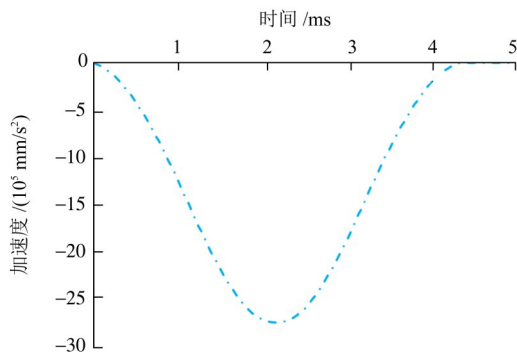
撞击过程中,球头的力学响应结果如图6所示。由图6(a)、图6(c)可知,撞击过程中,球头在2.17 ms前,作加速度增大的减速行进,在2.17~4.25 ms,作加速度减少的减速行进;在2.94 ms时刻,球头速度衰减为0。由图6可知,球头对电池包底部的撞击力在2.17 ms达到最大值27 299 N,在4.25 ms时刻撞击力衰减为0。



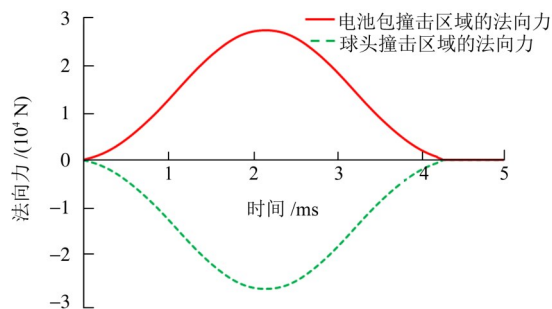
(a) 球头“速度-时间”曲线



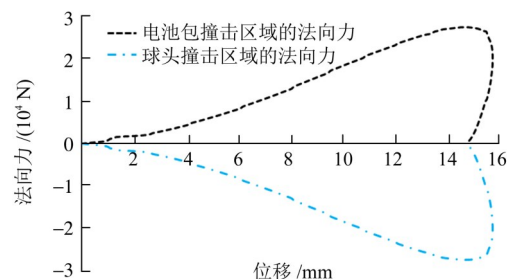
(b) 球头Z向“位移-时间”曲线



(c) 球头“加速度-时间”曲线



(d) 撞击接触区域的“法向力-时间”曲线



(e) 撞击接触区域的“法向力-位移”曲线

图6 撞击接触区域力学响应曲线

Fig. 6 Mechanical responses of impacted contact area

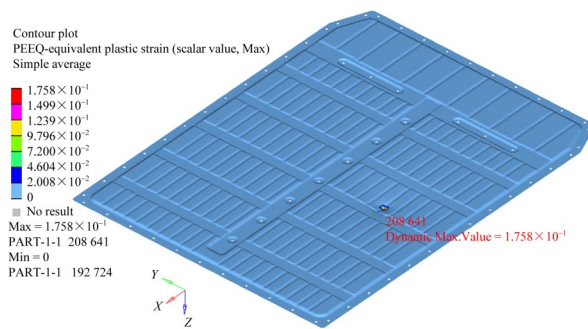
图6(e)中,“法向力-位移”曲线与坐标轴围成的面积可表征球头在撞击过程中所做的功。经HyperView软件计算该曲线的面积为150 000 N·mm,即表征球头做功为150 J,验证了球头在撞击过程中遵循能量守恒定律。

3.3.2 强度结果评估

以要求结构的等效塑性应变的最大值低于材料紧缩点的塑性应变作为偏保守的强度风险评估准则。图7所示为被撞击部件的等效塑性应变云图。由图7可知,底护板、液冷板与电池单体外壳的等效塑性应变的最大值分别低于其材料紧缩点的塑性应变0.22、0.24、0.01,具备要求的强度安全系数,结构无强度失效的风险。

3.3.3 侵入量结果

动力电池包各部件的侵入量,如图8所示。底护板、液冷板与电池单体外壳的最大侵入量分别为8.2、6.153、2.38 mm。其中,电池单体的变形程度与侵入量大小关系到电池的安全健康状态。过大的侵入量会挤压内部电芯结构,导致短路,进而引发热失控。本文所研究的电池单体规定的侵入量阈值为4.5 mm。



(a) 底护板的等效塑性应变云图

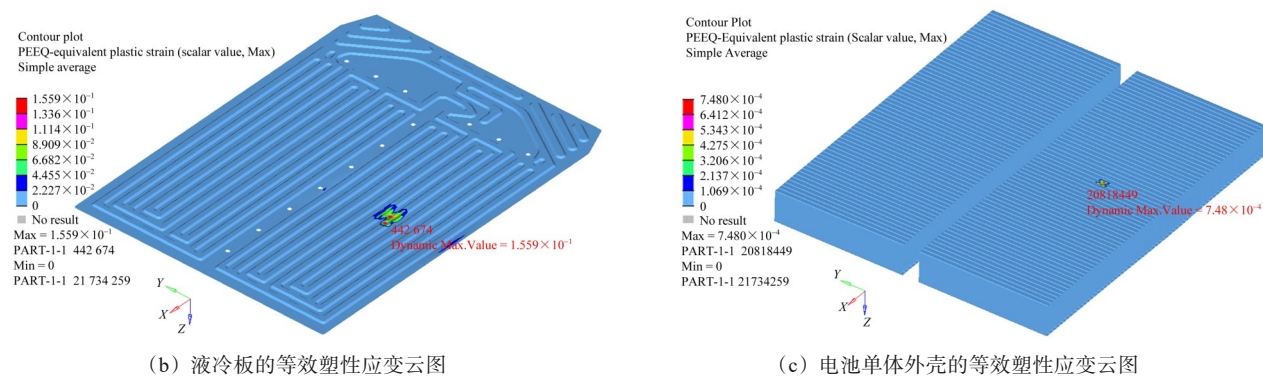


图 7 被撞击部件的等效塑性应变云图

Fig. 7 Equivalent plastic strain contour plots of the impacted components

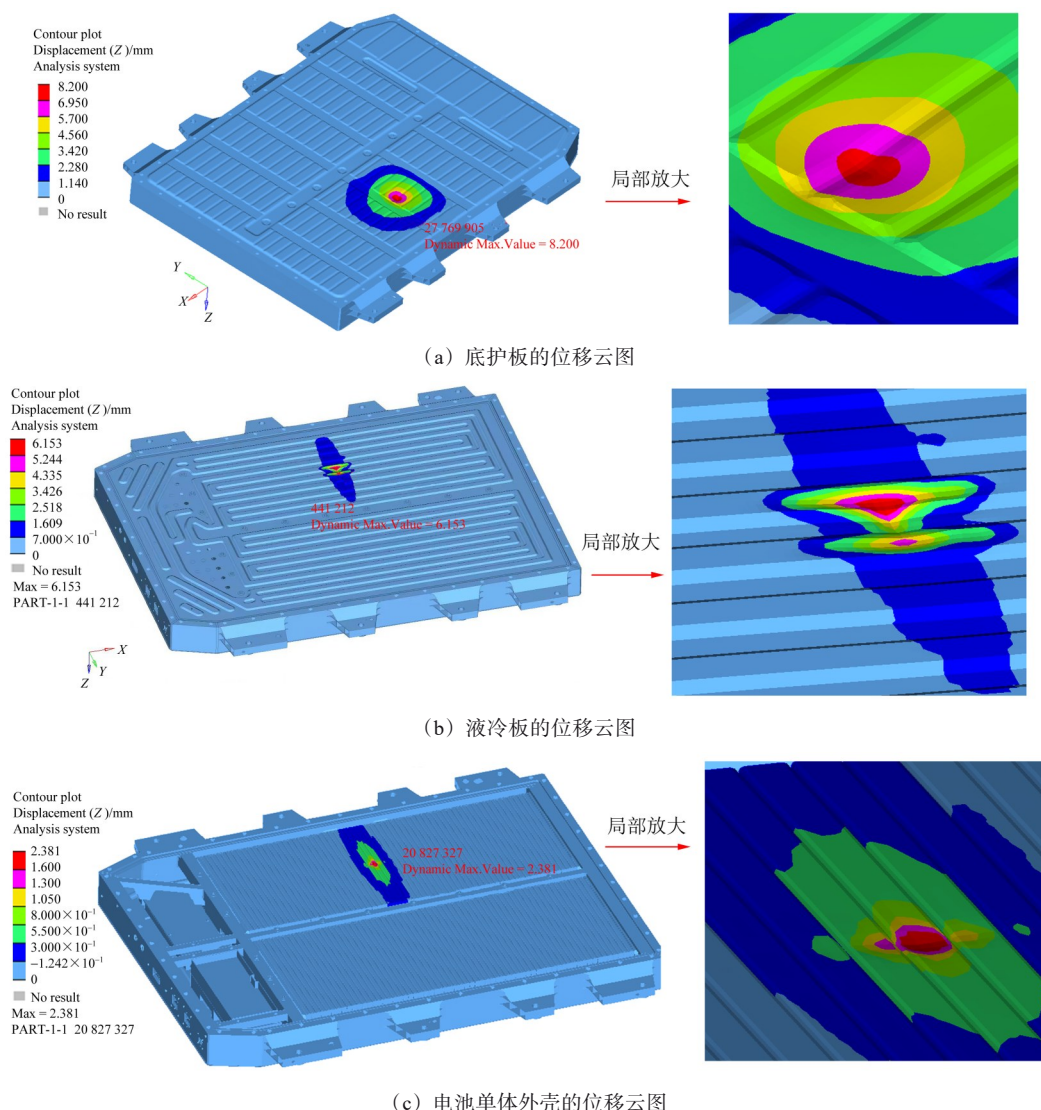


图 8 被撞击部件的位移分布云图

Fig. 8 Displacement distribution contour plots of the impacted components

3.3.4 能量结果分析

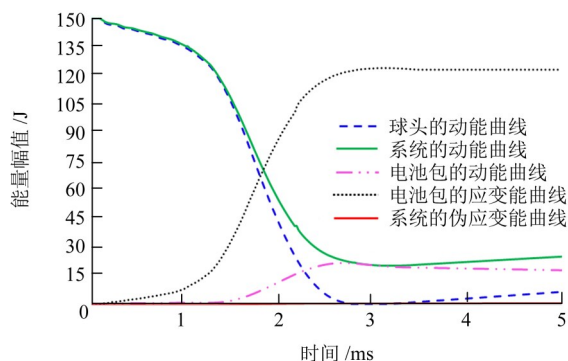
系统及部件的能量分布结果如图9所示。根据图9的能量分布曲线,对系统与部件的能量变化与分布规律做出以下分析:

1) 0~1.75 ms 阶段:球头被消耗 75 J 动能,电池包的动能增长至 3 J,增速缓慢;电池包的应变能增长至

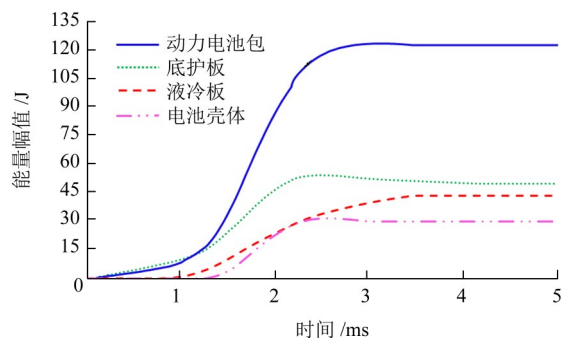
57 J,增速显著。其中,底护板的应变能增长至 35 J,液冷板与电池壳体的应变能分别增长至 11、10.5 J。由于底护板与液冷板间的 CR 泡棉被逐渐挤压,此阶段球头消耗的能量主要被撞击区域因底护板溃缩产生的塑性变形吸收。

2) 1.75~2.94 ms 阶段:球头被消耗动能 75 J,由于

CR 泡棉被压实及各部件紧密接触与挤压,球头继续侵入将导致动力电池包整体结构产生振动,其动能增长至 22 J;动力电池包的应变能增长至 125 J。其中,底护板、液冷板与电池壳体的应变能分别增长至 49.0、44.5、31.5 J。此阶段球头损耗的动能主要体现在电池包显著增长的动能及液冷板、电池壳体因 CR 泡棉被压实后进一步溃缩变形产生显著增长的应变能。



(a) 系统的能量转换



(b) 被撞击部件的应变能分布曲线

图9 能量分布曲线

Fig. 9 Curves of the energy distribution

3) 2.94~4.25 ms 阶段:球头在 2.94 ms 时其速度衰减为 0,由于球头的惯性效应,球头与撞击区域仍彼此挤压,其撞击力仍高达 19 650 N,直至 4.25 ms 时,彼此的接触力衰减为 0,即球头脱离撞击区域。此阶段系统与各部件的能量变化趋于稳定状态,由于球头的速度反向增大,其动能出现少许增大;电池包撞击区域因撞击力逐渐衰减而产生轻微的弹性应变释放,电池包与各部件的应变能波动极小。

为明晰撞击过程中系统的能量转换与各部件的吸能占比,提取能量结果,如表 1 所示。从球头接触电池包底部开始撞击到脱离电池包底部的总体过程来看,150 J 撞击能量的转换与分布如下:13.94% 转换为动力电池包的动能;82.37% 转换为动力电池包的总应变能;1.72% 以撞击过程中结构摩擦产热与结构阻尼能等形式耗散;剩余的 1.97% 为仿真计算中产生的伪应变能,即仿真计算为控制沙漏变形所消耗的能量。

沙漏模式是一种非物理的零能变形模式,产生零应变和应力。仿真计算中若存在过大的沙漏变形,则

会消耗相应的应变能去控制沙漏模式,从而导致仿真精度差甚至结果无效,所以应尽量减小和避免沙漏模式的产生。当显式动态分析使用缩减积分单元时,在有效节省数据存储量、降低运算次数的同时,也容易激起沙漏模式,导致计算结果震荡甚至计算失真,一般准则是沙漏能量不能超过应变能的 10%^[15]。通过细化整体模型的网格和使用全积分单元,可减少甚至杜绝沙漏模式的影响。

表 1 动力电池包及各部件能量分配结果

Tab. 1 Energy distribution of power battery pack and its components

能量名称	数值/J	总能量的占比/%
电池包的总应变能	123.56	82.37
电池包的动能	20.91	13.94
底护板的应变能	48.55	32.36
液冷板的应变能	42.75	28.5
电池单体壳体的应变能	30.15	20.1
电池包的伪应变能	2.95	1.97
其他形式耗散能量	2.58	1.72

由表 1 可知,底护板、液冷板与电池壳体对总撞击能量(150 J)的吸能占比之和高达 80.96%,对系统总应变能(123.56 J)的吸能占比之和高达 98.29%,且三者的吸能占比与被侵入量成正相关特性。由此揭示了可通过设计吸能比高的底护板防护方案来降低传递到电池单体的能量,以减少电池单体的侵入量,从而提高电池的安全防护性能。为提高动力电池包底部防护方案的耐撞击及吸能性能,防护方案选用高强度、高延展率的材料以及高吸能特性的三明治夹层结构,以降低传递到内部电池单体上的能量,从而提高电池包内部电池的安全性能。

4 试验验证与仿真精度分析

4.1 试验结果

试验结束静置 1 天后,对动力电池包进行拆解并仔细检查结构的损伤情况,并未发现结构出现裂纹,未发现存在冷却液与电解液泄露情况,动力电池包测试样品满足底部撞击台架试验的要求。使用钢尺与游标卡尺实测了各部件撞击区域的侵入量,如图 10 所示。各部件侵入量的试验结果应为游标卡尺的读数减去钢尺的厚度 1 mm,所以底护板、液冷板与电池单体的试验侵入量分别为 8.69、6.08、2.46 mm。

4.2 仿真精度分析

因试验未对撞击区域布置应变片传感器,故无法量化计算应变的仿真精度,试验检查结果定性地验证了仿真模拟的有效性。由图 8 与图 10 的对比可知,底护板、液冷板与电池壳体的侵入量仿真精度分别为 94.36%、98.80%、96.78%,且三者的变形形状、变形程

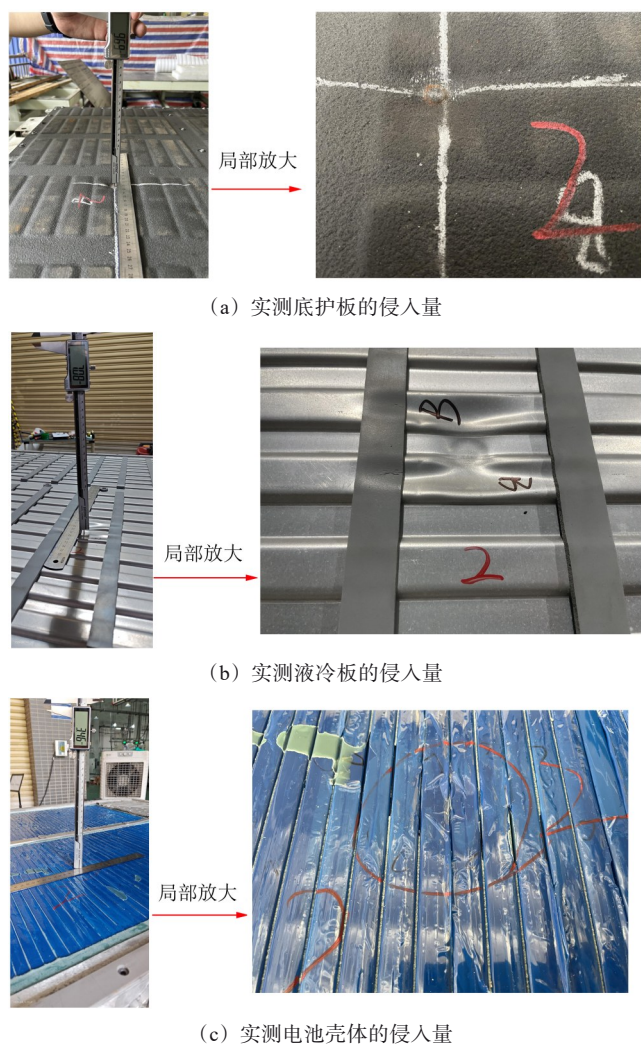


图10 各部件实测侵入量与变形形态

Fig. 10 Measured intrusions and deformation shapes of impacted components

度与试验结果高度吻合。三者中底护板的侵入量仿真误差相对较大的可能性原因为:①采用绑定接触的方法等效表征底护板与PVC防护喷涂层的粘接关系会局部强化两者的粘接刚度;②仿真以线弹性模型近似表征PVC材料的力学性能,与材料实际的力学性能存在误差。为进一步提高仿真预测精度,后续的研究工作中可开展对喷涂黏附PVC防护材料的底护板复合部件进行力学性能实测与材料本构参数的仿真拟合。

5 结论

通过仿真手段准确地预测了动力电池包底部撞击试验中结构的强度状态与电池单体的安全状态,并基于数值试验模型的动力学响应特性与能量分配情况。得出以下主要结论:

1)使用Abaqus软件进行了有限元分析,并建立了试验数值模拟模型,结合试验结果验证了仿真模型的有效性与准确性。结果表明,底护板、液冷板与电池壳体的被侵入量的仿真精度分别为94.36%、98.8%、

96.78%,结构的变形形状、变形程度及强度结果的风险评估与试验结果高度一致,为动力电池包底部结构的强度状态评估与电池的安全健康状态评估提供了有力的数据支撑。

2)通过对撞击过程中球头的力学响应与能量分布的变化规律分析可知,当球头的动能衰减91.5%时,球头的加速度与撞击力达到最大值,即动力电池包底部结构承受的最大撞击力为27 299 N,为动力电池包底部防护方案的力学性能设计提供了理论参考。

3)系统与部件的能量分配结果表明,系统遵循能量转换与守恒原理,撞击能量(150 J)的80.96%转换为底护板、液冷板与电池单体外壳的应变能,三者的吸能占比分别为32.36%、28.50%、20.10%,且吸能占比与被侵入量成正相关特性。证明可通过提高吸能占比高的底部防护方案降低电池单体的被侵入量,提高电池的安全防护性能。

参考文献(References)

- [1] 李志杰,陈吉清,兰凤崇,等. 机械外力下动力电池包的系统安全性分析与评价[J]. 机械工程学报,2019,55(12):137-148.
Li Zhijie, Chen Jiqing, Lan Fengchong, et al. Analysis and evaluation on system safety of power battery pack under mechanical loading [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55 (12): 137-148. (In Chinese)
- [2] Pan Y J, Xiong Y, Dai W, et al. Crush and crash analysis of an automotive battery-pack enclosure for lightweight design [J]. International Journal of Crashworthiness, 2022, 27(2): 500-509.
- [3] 杨威. 车用动力电池包底部碰撞安全性分析[D]. 广州:华南理工大学,2019:27-32.
Yang Wei. Safety Analysis of bottom crash of vehicle power battery pack [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019:27-32. (In Chinese)
- [4] 许鑫,郭世永. 电池包底部穿刺内部结构变形位移响应仿真分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2020,34(6):61-68.
Xu Xin, Guo Shiyong. Simulation of battery pack structure deformation and displacement due to bottom puncture [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2020, 34 (6): 61-68. (In Chinese)
- [5] Xia Y, Wierzbicki T, Sahraei E, et al. Damage of cells and battery packs due to ground impact [J]. Journal of Power Sources, 2014, 267:78-97.
- [6] 王超,成艾国,张承霖,等. 面向刮底安全的电池包防护结构轻量化设计[J]. 中国机械工程,2023,34(19):2343-2352.
Wang Chao, Cheng Aiguo, Zhang Chenglin, et al. Lightweight design of protective structures of battery packs for bottom-scraping safety [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(19): 2343-2352. (In Chinese)
- [7] 黄芦. 车用动力电池包底部冲击响应分析及安全性评价[D]. 广州:华南理工大学,2021:15-30.
Huang Lu. Impact response analysis and safety evaluation of the bottom of EV battery pack [D]. Guangzhou: South China University

- of Technology, 2021: 15-30. (In Chinese)
- [8] 王国杰, 余海龙, 何恩泽, 等. 电动汽车正面刮底工况设计及电池包防护优化分析[J]. 汽车工程学报, 2022, 12(3): 294-300.
Wang Guojie, Yu Hailong, He Enze, et al. Design of front bottom collision condition and optimization of battery pack protection for electric vehicles[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2022, 12(3): 294-300. (In Chinese)
- [9] 周飞. 纯电动汽车电池包托底分析及改善[J]. 北京汽车, 2019(5): 15-17.
Zhou Fei. Analysis and improvement of battery pack bottom impact of blade electric vehicle[J]. Beijing Automotive Engineering, 2019(5): 15-17. (In Chinese)
- [10] 王月, 辛鹏程, 周大永, 等. 基于交通事故统计的电池包底部碰撞研究[J]. 汽车工程, 2021, 43(11): 1730-1735.
Wang Yue, Xin Pengcheng, Zhou Dayong, et al. Study on the collision of battery pack bottom based on traffic accident statistics[J]. Automotive Engineering, 2021, 43(11): 1730-1735. (In Chinese)
- [11] Nirmala T, Jusuf A, Puji Santosa S, et al. Design study of battery system protection structure based on hybrid material fiber metal laminate (FML)[C]//2019 6th International Conference on Electric Vehicular Technology(ICEVT). New York: IEEE, 2019: 163-169.
- [12] Zhu J E, Zhang X W, Wierzbicki T, et al. Structural designs for electric vehicle battery pack against ground impact [J]. SAE Technical Paper Series, 2018, 1: 2018-1-1438.
- [13] 尤贺泽, 戴海峰, 于臣臣, 等. 软包锂离子电池应力特性及其建模[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 231-240.
You Heze, Dai Haifeng, Yu Chenchen, et al. Stress properties and modeling of lithiumion pouch batteries [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2020, 48(2): 231-240. (In Chinese)
- [14] 戴江梁, 熊飞, 刘静, 等. 基于某车型动力电池包的随机振动疲劳分析与结构设计改进[J]. 机械强度, 2020, 42(5): 1266-1270.
Dai Jiangliang, Xiong Fei, Liu Jing, et al. Random vibration fatigue analysis and structural design improvement of battery pack based on an vehicle [J]. Journal of Mechanical Strength, 2020, 42(5): 1266-1270. (In Chinese)
- [15] 李兢, 王桂录, 卫勇. 海缆侧压仿真中的沙漏控制研究[J]. 机械强度, 2017, 39(6): 1480-1484.
Li Jing, Wang Guilu, Wei Yong. Research of hourglass mode's control in the simulation of the squeezing of ocean cable [J]. Journal of Mechanical Strength, 2017, 39(6): 1480-1484. (In Chinese)

Simulation research on bottom crash test of power battery pack based on a specific vehicle

DAI Jiangliang MENG Xiangyu CHEN Qi

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

Abstract: [Objective] Significant stress and deformation characteristics are exhibited by power batteries during charging and discharging, and higher requirements are imposed on battery management and pack design accordingly. To accurately evaluate the structural strength state of power battery packs and the safety and health state of single cells in bottom impact tests, the critical intrusion amount that triggers fire and explosion of single cells under specific scenarios or working conditions shall be clearly defined. Accurate predictions of the structural strength state of power battery packs and the safety state of single cells in bottom impact tests were performed by means of simulation methods. Based on the numerical test model, the dynamic response characteristics and energy distribution laws during the impact process were thoroughly analyzed. [Methods] Firstly, a refined explicit dynamic finite element model for the bottom crash test of a power battery pack was established using Abaqus software. Secondly, the displacement, equivalent plastic strain, and energy distribution of the structures were calculated and evaluated. [Results] Simulation results show that the deformation shapes, intrusion amounts, and strength statuses of the impacted components are highly consistent with the test data. The simulation accuracies for the intrusion amounts of the bottom guard plate, liquid-cooled plate, and battery cell housing are 94.36%, 98.80%, and 96.78%, respectively. The maximum impact force of the ball head reaches 27 299 N. Concurrently, 80.96% of the total impact energy is converted into the strain energy of the main impacted components, and their energy absorption proportions correlate positively with the corresponding intrusion depths. These findings provide a valuable theoretical reference for the underbody safety protection design of battery packs.

Key words: Power battery pack; Bottom crash; Intrusion amount; Energy absorption proportion; Bottom safety protection

Corresponding author: DAI Jiangliang, E-mail: hnly_djl@163.com

Received: 2024-09-29

Revised: 2024-11-21

(编辑:李立)