

基于均质化模型的电池包精细化建模与多工况仿真分析

姚 旺 周 仪

重庆工贸职业技术学院 重庆 408000

基金项目：重庆工贸职业技术学院校级科研项目“基于均质化模型的新能源汽车电池包结构仿真分析与优化设计”（ZR202438）

【摘 要】：针对电池包安全考核周期长、成本高、工况复杂的问题，以某纯电动汽车电池包为对象，建立多尺度有限元模型。依据 GB 38031—2020 开展随机振动、机械冲击、挤压与跌落仿真，各工况最大应力均低于屈服强度，挤压工况应力水平最高，上盖与挂耳为主要薄弱部位。该方法可评估电池包结构安全水平。

【关键词】：动力电池包；均质化模型；有限元分析；多工况仿真；结构安全；新能源汽车

DOI:10.12417/2705-0998.26.13.048

引言

电池包作为整车能量存储与安全防护核心部件，其结构可靠性直接关系行车安全。我国颁布实施 GB 38031—2020《电动汽车用动力蓄电池安全要求》并对振动、冲击、挤压、跌落提出强制性考核指标，GB 38031—2025 亦于 2026 年 7 月实施^[1]。

有限元仿真以成本低、周期短的优势广泛用于电池包结构设计。王阳等^[2]开展了纯电动汽车电池包结构设计研究，夏雪等^[3]考察了车用圆柱锂电池及模组的机械完整性，李红刚等^[4]梳理了碰撞安全仿真进展，黄培鑫等^[6]、许鑫等^[7]分别研究了随机振动与冲击、底部穿刺工况的结构响应。

电池包构件几何尺度差异显著，真实细节建模会使模型规模急剧膨胀，集中质量简化又损失局部响应精度^[10]。本文依托校级科研项目完成多工况仿真。

1 电池包有限元模型的建立

电池包建模遵循模组均质化与整包精细化相结合的技术路线。研究对象为某纯电动汽车地板下的动力电池包，外形尺寸 1420 mm×1020 mm×140 mm，内置 8 个方形电芯模组。

1.1 电池模组均质化建模

模组内含电芯、端板、绝缘片、缓冲垫与汇流排等构件，细观建模会产生大量接触对与微小单元，难以承受。本文采用均质化方法，将模组视为力学等效连续介质，按体积加权混合律标定等效参数，等效密度与弹性模量按下式确定^[4-5]

$$\rho_{eq} = \frac{\sum \rho_i V_i}{\sum V_i} \quad (1)$$

$$E_{eq} = \frac{\sum E_i V_i}{\sum V_i} \quad (2)$$

式中， ρ_i 与 E_i 分别为模组中第 i 种组分的密度与弹性模量， V_i 为对应组分体积。结合压缩试验与文献取值标定等效参数，

见表 2。均质化模组以 LS-DYNA 的 MAT24 卡片描述，以屈服强度、切线模量与失效应变控制塑性响应。

表 2 电池模组均质化等效材料参数（MAT24）

参数	数值	说明
等效密度	1900 kg·m ⁻³	体积加权平均
弹性模量	2.8 GPa	含电芯与结构件贡献
泊松比	0.30	压缩状态标定
屈服强度	12 MPa	弹塑性平台起点
切线模量	0.5 GPa	应变强化斜率
失效应变	0.30	短路失效判据

1.2 电池包精细化建模

整包模型中，上盖、下箱体、横梁及挂耳等承载件按真实几何以壳单元与实体单元离散，均质化模组以实体单元表征，螺栓以刚性单元模拟。主要结构件材料参数见表 1。承载件与模组单元尺寸分别控制在 5 mm 与 8 mm，高应力部位细化，单元总数约 86 万，模型如图 1 所示。

表 1 电池包主要结构件材料参数

部件	材料	密度/（kg·m ⁻³ ）	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa
箱体与上盖	6061-T6 铝合金	2700	69	0.33	240
模组端板	6061-T6 铝合金	2700	69	0.33	240
横梁与支架	6061-T6 铝合金	2700	69	0.33	240
挂耳	Q235B 钢	7850	210	0.30	235

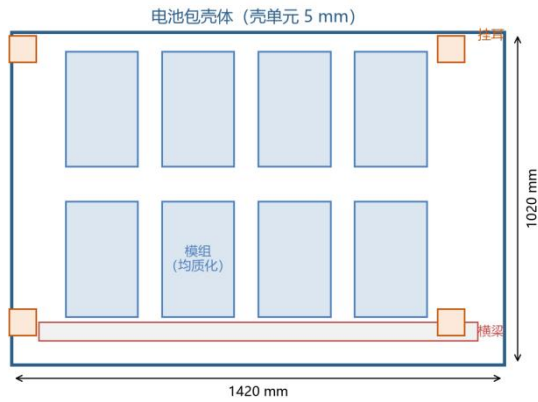


图 1 电池包精细化有限元模型示意图

1.3 模型有效性验证

建立 42 万、86 万与 128 万单元三种网格方案，以约束模态一阶频率与计算时间验证网格无关性，结果见表 3 与图 2。单元数由 42 万增至 86 万，一阶频率由 27.9 Hz 变为 27.5 Hz，变化 1.4%，加密至 128 万仅再变化 0.4%，计算时间却由 6.8 h 增至 12.3 h。故选方案二模型，其一阶约束模态频率 27.5 Hz 与文献报道的 28~35 Hz 同量级^[3,6,9]，刚度特性合理。

表 3 网格无关性验证结果

网格方案	单元数量/万	一阶约束模态频率/Hz	单工况计算时间/h
方案一	42	27.9	2.4
方案二	86	27.5	6.8
方案三	128	27.4	12.3

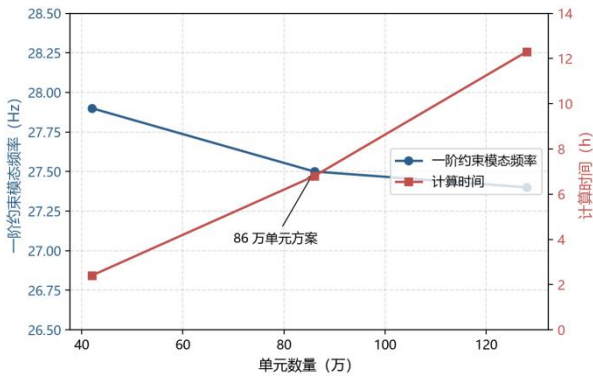


图 2 网格无关性验证曲线

2 多工况仿真与结果分析

2.1 工况设置与边界条件

依据 GB 38031—2020 开展随机振动、机械冲击、挤压与跌落四类工况仿真。随机振动采用标准附录 ZVW 谱，如图 3 所示；机械冲击施加 25g、15 ms 半正弦脉冲；挤压以半径 75 mm 的半圆柱压头、2 mm/s 速度压入侧向，至挤压力 250 kN 或变形量 30%；跌落自 1 m 高度自由释放，各工况以安装吊耳为约

束。

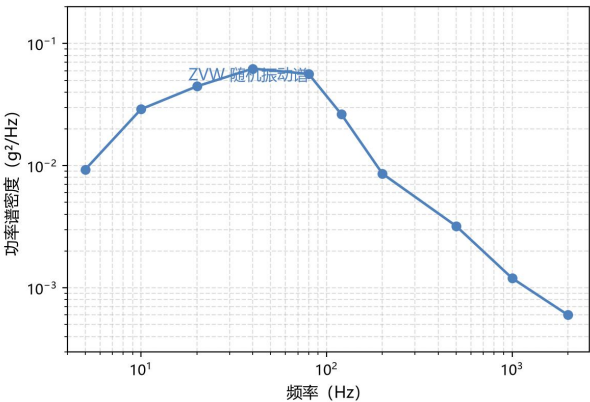


图 3 随机振动工况 ZVW 载荷谱

2.2 随机振动工况仿真分析

随机振动按 3σ 准则在频域内采用模态叠加法求解，运动方程表示为

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t) \quad (3)$$

式中，M、C、K 分别为质量矩阵、阻尼矩阵与刚度矩阵，u 为节点位移向量，F(t) 为外载荷向量，3σ 应力由应力响应功率谱密度全频段积分获得

$$\sigma_{3\sigma} = 3\sigma_{rms}, \quad \sigma_{rms} = \sqrt{\int_0^{\infty} G(f) df} \quad (4)$$

式中，σ_{3σ} 为三倍均方根应力，σ_{rms} 为应力均方根值，G(f) 为应力响应功率谱密度函数。结果表明，垂向载荷影响最显著，挂耳与上盖连接区最大 3σ 应力 42.8 MPa，上盖中部最大 3σ 位移 1.9 mm，均低于 6061-T6 铝合金 240 MPa 屈服强度，上盖位移响应突出，刚度偏弱，是优化重点。

2.3 机械冲击与挤压工况仿真分析

机械冲击工况下，25g 半正弦加速度脉冲作用于安装点，挂耳应力迅速上升，约在激励结束后 18 ms 达峰值 89.6 MPa，随后逐渐衰减，历程如图 4 所示。峰值约为屈服强度的 37%，挂耳相对位移峰值约 2.3 mm。

挤压工况中，随压头位移增加，侧壁与模组端板承受的挤压力上升，当挤压力达 250 kN 时，模组端板与侧壁连接区出现最大应力 231.5 MPa，已接近 6061-T6 铝合金屈服强度，模组等效塑性应变峰值约 0.021，远小于 0.30 失效应变。挤压工况考核最为严苛，模组端板承载能力决定抗挤压性能。

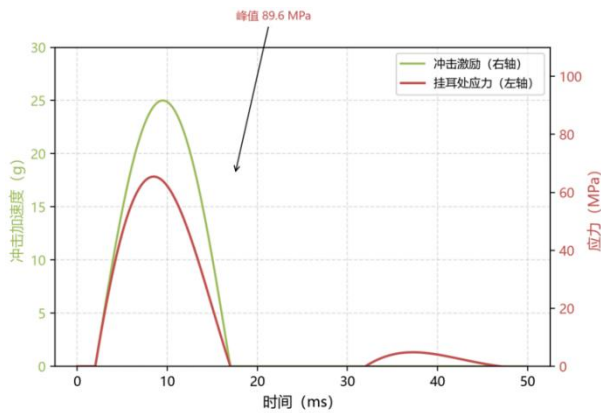


图 4 机械冲击工况挂耳处应力时间历程

2.4 跌落工况仿真分析

跌落工况模拟电池包自 1 m 高度自由跌落, 最大应力出现在上盖边缘与挂耳根部, 为 152.4 MPa, 上盖最大残余变形 4.8 mm, 箱体未穿透, 模组相对箱体位移 0.9 mm。上盖再次成为变形集中区域, 提升刚度是改善整包安全裕度的关键。

2.5 结果综合评价与薄弱部位识别

各工况仿真结果汇总于表 4, 应力对比见图 5。各工况最大应力均低于材料屈服强度, 结构满足 GB 38031—2020 安全要求。其中挤压工况应力水平最高、考核最为苛刻, 随机振动与跌落工况暴露上盖刚度不足及挂耳应力集中。识别出上盖、挂耳与模组端板三个薄弱部位, 可引入多目标优化设计方法^[8]协同优化。

表 4 多工况仿真结果汇总

工况	考核载荷	最大应力 /MPa	最大变形 /mm	评价
随机振动	ZVW 谱三轴	42.8	1.9	满足

参考文献:

- [1] GB 38031-2020.电动汽车用动力蓄电池安全要求[S].
- [2] 王阳,宁国宝,郑辉.集中电机驱动纯电动汽车电池包设计[J].汽车技术,2011(7):32-35.
- [3] 夏雪,赵震,张晋杰,等.车用圆柱锂电池及模组的机械完整性[J].浙江大学学报(工学版),2021,55(11):2134-2141.
- [4] 李红刚,张超,曹俊超,等.锂离子电池碰撞安全仿真方法的研究进展与展望[J].机械工程学报,2022,58(24):121-144.
- [5] 兰凤崇,郑文杰,李志杰,等.车用动力电池的挤压载荷变形响应及内部短路失效分析[J].华南理工大学学报(自然科学版),2018,46(6):65-72.
- [6] 黄培鑫,兰凤崇,陈吉清.随机振动与冲击条件下电动车电池包结构响应分析[J].汽车工程,2017,39(9):1087-1093,1099.
- [7] 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.
- [8] 周会峰,王光耀,李碧浩,等.多目标优化设计方法在车身轻量化设计中的应用[J].机械设计与研究,2014,30(4):151-155.
- [9] 赵闵清,鲁宇明,涂传明,等.某矿用自卸车电池包支架强度试验研究与结构改进设计[J].现代制造工程,2021(8):1-7.
- [10] KULKARNI S S,VYSOUDIL F,VIETOR T.Evaluation of modelling and simulation strategies for the structural integrity of lithium-ion battery packs[J].Energies,2021,14(11):2976.

机械冲击	25g、15 ms 半正弦	89.6	2.3	满足
挤压	250 kN 侧向	231.5	11.2	满足 (接近屈服)
跌落	1 m 底面朝下	152.4	4.8	满足

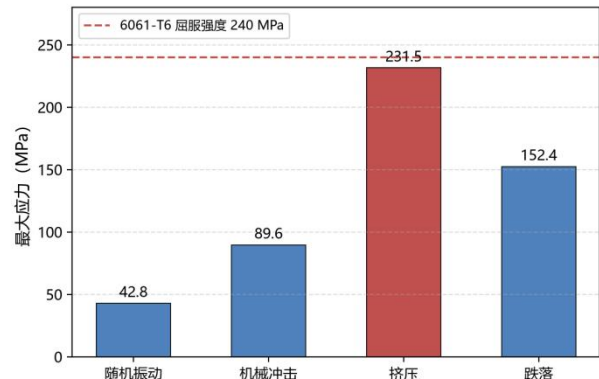


图 5 各工况最大应力对比

3 结论

本文建立均质化与精细化相结合的电池包多尺度有限元模型, 依据 GB 38031—2020 完成四类工况仿真, 得到以下结论。

- (1) 体积加权混合律标定的模组等效参数能表征模组宏观力学行为, 86 万单元网格下整包一阶模态频率 27.5 Hz 与文献量级一致, 验证了建模方法的合理性。
- (2) 电池包在随机振动、机械冲击、挤压与跌落工况下最大应力分别为 42.8、89.6、231.5 与 152.4 MPa, 均低于相应屈服强度, 满足现行国标要求。
- (3) 挤压工况考核最为严苛, 模组端板为高应力区域; 随机振动与跌落工况下上盖变形突出, 挂耳存在应力集中, 构成主要薄弱部位。
- (4) 多尺度建模与多工况仿真方法可在设计阶段评估电池包结构安全水平, 支撑结构优化。