

重载矿用锂离子电池包随机振动可靠性研究^①

张明军, 李睿鑫, 段 维

(长沙理工大学 机械装备高性能智能制造关键技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为了评价重载矿用锂离子电池包的振动可靠性, 采用有限元软件 ANSYS 对某重载矿用锂离子电池包进行了模态仿真分析以及随机振动仿真计算, 并对电池包进行了随机振动试验。结果表明, 电池包结构第 1 阶模态频率为 33.85 Hz(对应电池包结构的上盖), 大于车架传递的外激励频率(30 Hz), 可以避开低频共振, 提高结构振动可靠性; 电池包箱体加强筋、下箱体、上盖和电池安装支架等关键零部件的随机振动计算应力均小于材料屈服强度, 电池包结构件满足强度可靠性要求; 电池包总成结构件在随机振动试验中均未出现永久变形、损伤等现象, 验证了仿真计算结果的可靠性。

关键词: 模态分析; 随机振动; 有限元模拟分析; 电池包

中图分类号: TH164

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.04.038

文章编号: 0253-6099(2023)04-0178-04

Reliability Analysis for Random Vibration of Lithium-Ion Battery Packs in Heavy-Duty Mining Vehicles

ZHANG Mingjun, LI Ruixin, DUAN Wei

(Hunan Provincial Key Laboratory of Key Technologies for High-Performance Intelligent Manufacturing of Mechanical Equipment, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: For evaluating vibration reliability of Li-ion battery packs used in heavy-duty mining vehicles, ANSYS, finite element software, was adopted to simulate Li-ion battery packs in a heavy-duty mining vehicle and calculate its stochastic vibration. Based on the test performed about random vibration of battery packs, it is found that the first modal frequency of the battery packs is 33.85 Hz, corresponding to the frequency of upper cover of battery packs, which is greater than the external excitation frequency transmitted by frame (30 Hz), thus low-order frequency resonance can be avoided and vibration reliability of the structure can be improved. The calculated stresses in the random vibration of key parts of battery packs, including stiffener, lower box, upper cover and battery brackets, are all lower than the yield strength of the corresponding materials, indicating the structural parts of battery packs meet the requirements for strength reliability. Permanent deformation and damage have not been found in the assembly of battery packs in the random vibration test, verifying the reliability of this simulative computation results.

Key words: modal analysis; random vibration; finite element simulation analysis; battery packs

实现“双碳”目标是我国应对全球变暖的一项重大战略决策。以新能源汽车替代传统燃油汽车是减少碳排放的重要举措。动力电池是新能源汽车的核心部件,其结构件的可靠性直接影响新能源汽车整车安全性和使用可靠性,其中结构刚度和强度是保证安全的核心要素^[1-9]。

本文利用仿真分析软件 ANSYS,对某重载矿用

用锂离子电池包进行模态仿真分析与随机振动仿真分析,从电池包固有模态和随机振动应力两个方面来考核该电池包是否满足 GB/T 31467.3—2015《电动汽车用锂离子动力蓄电池包和系统第 3 部分:安全性要求与测试方法》中给出的振动测试要求^[10];结合上述国标对该电池包进行随机振动试验,测试其可靠性,对仿真计算结果进行相应验证。

① 收稿日期: 2023-02-23

基金项目: 长沙市自然科学基金(kq2202197)

作者简介: 张明军(1985—),男,湖南沅陵人,博士,副教授,主要从事机械工程和激光加工方面的研究。

1 锂离子电池包随机振动仿真分析

1.1 锂离子电池包模态仿真

1.1.1 电池包有限元仿真分析模型建立

使用 CATIA 软件建立重载矿用锂离子电池包三维模型。该电池包由安装支架、盖板、底座、高低压连接器、MSD(电器控制件)以及电池模组等部分构成。采用 Hypermesh 建立有限元模型,进行网格划分、材料属性及物理属性定义,设置加载施加节点集。采用 ANSYS 进行模态仿真计算。采用线性单元建立电池包有限元模型,其中采用壳单元(shell181)建立箱体结构及压条有限元模型;采用 Rbe2(刚性单元)进行螺栓连接模拟;通过实体焊接单元与 RBE3 建立钣金件之间的焊接模型;采用点焊单元模拟焊点模型;采用缝焊单元模拟焊缝模型。在满足计算结果精度的前提下,尽量缩短仿真计算时间,减少计算成本。

本次仿真分析中对该电池包作如下简化:采用各项同性的实体块模型来模拟电池模组,调整实体密度,通过等质量相匹配的形式来作等效配重处理;电池模组与电池包箱体下底板之间采用结构胶黏接固定,建立有限元模型时,采用绑定连接模拟;采用集中质量点单元(mass21 单元)模拟 MSD 等非关键部件。电池包结构仿真模型总共单元数为 239 738,所建立的网格模型如图 1 所示,材料属性见表 1。

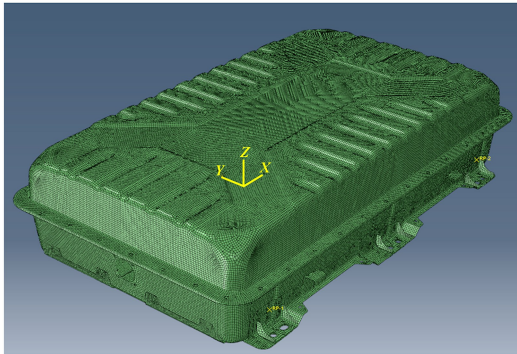


图 1 锂离子电池包有限元网格模型

表 1 材料属性

构件	弹性模量/ GPa	泊松 比	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
HC420LA	210	0.29	7.8	420	470
电池模组	1.25	0.32	1.62		

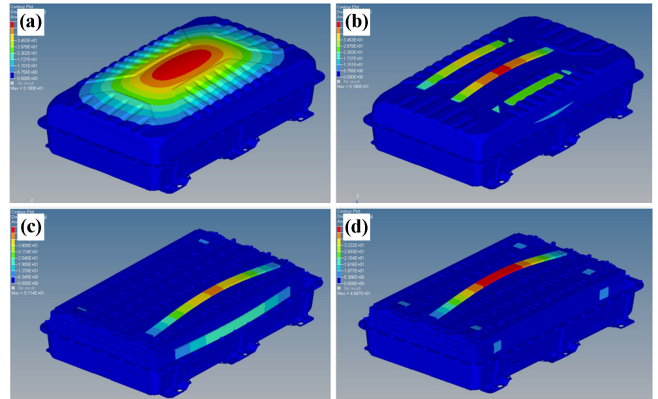
1.1.2 电池包模态分析

将有限元计算模型导入 ANSYS 软件中,选择并设置模态计算模块。为提高模态计算精度与求解效率,

采用 Block Lanczos 模态提取方法,其中模态仿真分析中的阻尼因子取软件默认值。求解锂离子电池包结构模型的前 10 阶固有模态频率和振型,如表 2 所示,其中前 4 阶模态振型如图 2 所示。

表 2 电池包前 10 阶模态固有频率

阶数	频率/Hz
1	33.85
2	37.9
3	39.1
4	40.2
5	55.6
6	62.7
7	70.8
8	82.1
9	103.5
10	145.7



(a) 第 1 阶; (b) 第 2 阶; (c) 第 3 阶; (d) 第 4 阶

图 2 电池包前 4 阶模态振型

由模态仿真结果可知,该电池包结构第 1 阶模态频率为 33.85 Hz,对应电池包上盖。上盖非关键承重结构,且其本身质量较轻,当第 1 阶频率大于 30 Hz(车架传递的外激励频率)时,即可认为满足电池包可靠性要求。该电池包结构的第 2、3、4 阶模态对应电池包的压条,虽然其模态频率均大于 30 Hz,但考虑到压条振动会对电芯造成一定程度的撞击损伤,在设计上需要优化。现有的优化策略是使用强力黏结剂(如结构胶),将压条与电芯接触的区域黏接为一体,能有效提高电池包整体刚度和振动可靠性。

1.2 锂离子电池包随机振动仿真分析

采用随机振动分析方法对锂离子电池包进行仿真分析。随机振动分析主要包含以下几个步骤:① 有限元建模;② 模态分析;③ 谱分析设置;④ PSD 组合;⑤ 后处理。

根据 GB/T 31467.3—2015《电动汽车用锂离子动

力蓄电池包和系统第3部分:安全性要求与测试方法》,按照测试对象车辆的安装固定位置和 GB/T 2423.43—2008 要求,将测试对象(电池包结构)安装在振动台上,使用固定螺栓固定。振动测试从 Z 轴开始,然后是 Y 轴,最后是 X 轴。测试过程参照 GB/T 2423.56—2018 进行。

1.2.1 随机振动 PSD 载荷设定

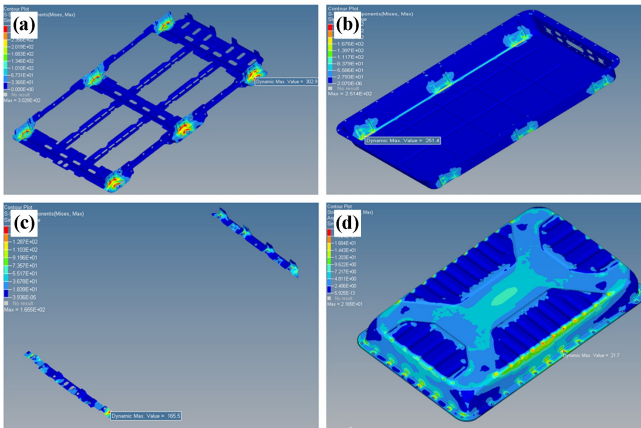
完成模态分析后,点击完成,即可完成模态数据的提取。然后启动随机振动分析模块。在前述电池包安装位置处创建的载荷施加节点集上施加载荷,Z 轴、Y 轴、X 轴 3 个方向上的加速度功率谱密度(PSD)如表 3 所示。

表 3 加速度功率谱密度

频率/Hz	加速度功率谱密度(PSD)/[(m·s ⁻²) ² ·Hz ⁻¹]		
	Z 轴	Y 轴	X 轴
5	0.05	0.04	0.012 5
10	0.06	—	0.03
20	0.06	0.04	0.03
200	0.000 8	0.000 8	0.000 25

1.2.2 随机振动分析结果

计算完成后,采用后处理软件 hyperview,提取锂离子电池包结构中关键结构件的随机振动仿真分析所获得的应力结果。不同方向对应的关键结构件的应力分布情况分别如图 3~5 和表 4 所示。

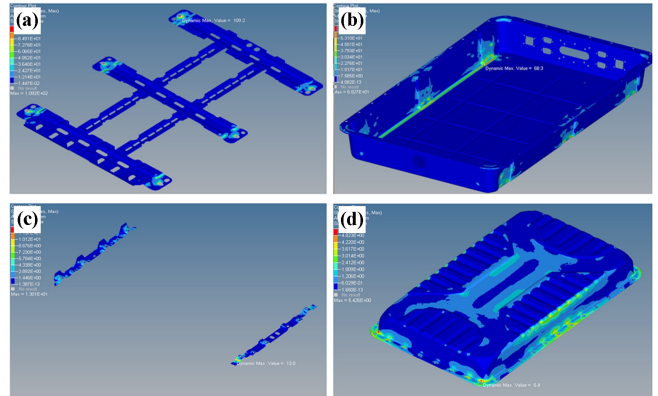


(a) 电池包箱体加强筋; (b) 电池包下箱体;
(c) 电芯安装支架; (d) 电池包上箱体
图 3 Z 方向关键结构件应力云图

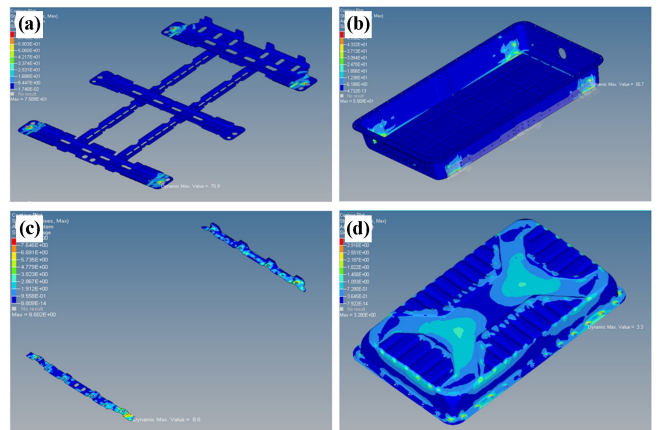
分析图 3~5 和表 4 可知,该电池包关键结构件的应力值均小于材料屈服强度,满足实际使用要求。

2 锂离子电池包随机振动试验

将重载矿用电池动力系统按照实际装车的方



(a) 电池包箱体加强筋; (b) 电池包下箱体;
(c) 电芯安装支架; (d) 电池包上箱体
图 4 Y 方向关键结构件应力云图



(a) 电池包箱体加强筋; (b) 电池包下箱体;
(c) 电芯安装支架; (d) 电池包上箱体
图 5 X 方向关键结构件应力云图

表 4 电池包关键结构件应力结果

关键结构件	最大应力/MPa			屈服强度/MPa		
	Z 方向	Y 方向	X 方向	Z 方向	Y 方向	X 方向
电池包安装架	302.9	109.2	8.5	420	420	420
电池包下箱体	251.4	68.3	75.9	420	420	420
电池包加强筋	165.5	13.0	56.7	420	420	420
电池包箱盖	21.7	5.4	3.3	420	420	420

式,通过安装螺栓固定于电机驱动随机振动试验台架上。按照随机振动加速度功率谱密度设定振动实验台,以此作为随机振动激励。按照试验测试要求,在电池箱体工装底座和部分重点关注处布置加速度传感器,按图 6 所示的振动激励标准^[10]进行测试。

电池包随机振动试验测试完成后,对电池包所有结构件及电池包的电力性能参数进行相应检查和测试。通过检查发现,所有结构件均未出现永久变形、损伤等异常现象,可以判定该电池包通过了振动测试。

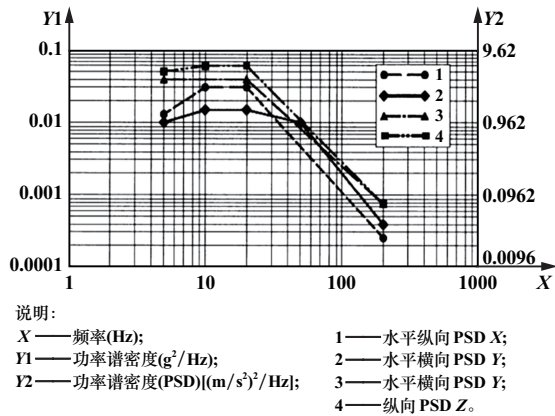


图6 电池包或系统的振动测试功率谱密度曲线

根据试验测试结果可以判定,基于有限元仿真分析方法可保证电池包在规定工况下随机振动的可靠性,该有限元仿真分析结果可以直接指导电池包结构件的设计。

3 结 论

针对车用电池包总成振动损伤频发的现象,对某重载矿用电池包总成进行了模态仿真分析、随机振动仿真分析以及试验验证,主要结论如下:

1) 电池包总成的第1阶模态频率为33.85 Hz,大于车架传递的外激励频率(30 Hz),可以避免低阶频率的共振,从而提高结构的振动可靠性。

2) 电池包箱体加强筋、下箱体、上盖和电池安装支架等关键零部件的随机振动仿真计算应力最大值为302.9 MPa,小于对应材料的屈服强度(420 MPa),电池包结构件满足强度可靠性要求。

(上接第177页)

- [10] 王朵朵,荆乾坤,张家靓,等. 磷酸铁锂正极废料选择性提锂制备电池级碳酸锂[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(9):63-70.
- [11] YANG Y, MENG X, CAO H, et al. Selective recovery of lithium from spent lithium iron phosphate batteries: a sustainable process[J]. Green Chemistry, 2018,20:3121-3133.
- [12] Mahandra H, Ghahreman A. A sustainable process for selective recovery of lithium as lithium phosphate from spent LiFePO₄ batteries[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021,175:105883.
- [13] CHEN J, LI Q, SONG J, et al. Environmentally friendly recycling and effective repairing of cathode powders from spent LiFePO₄ batteries[J].

3) 随机振动试验中,电池包总成结构件均未出现永久变形、损伤等现象,验证了仿真计算结果的可靠性。

参考文献:

- [1] 胡旭. 电动汽车动力电池箱有限元仿真及模态分析[D]. 长沙:湖南大学机械与运载工程学院, 2015.
- [2] PENG H G, ZHANG M. Numerical simulation of material wear of an automotive brake device based on finite element simulation[J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2022,64(3/4):242-253.
- [3] 邓旭辉,郭法良,史浩浩,等. 不同构形扬矿软管的流固耦合模态分析[J]. 矿冶工程, 2018,38(6):6-11.
- [4] 李达耀,金成国,黄伟新. 太阳能电池钙矿材料模拟计算研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(2):120-124.
- [5] 韩锋钢,张思泉,林有淮,等. 某车用电池箱随机振动仿真分析[J]. 机电技术, 2016(4):9-12.
- [6] Azadi S, Azadi M, Zahedi F. NVH analysis and improvement of a vehicle body structure using DOE method. J Mech Sci Technol, 2009, 23:2980-2989.
- [7] LI Junqiu, Helei Tan, Puen Wu. Analysis of random vibration of power battery box in electric vehicles[C]//2014 IEEE Conference and Expo, Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2014.
- [8] 王鹏利,郭瑞峰,袁文康. 基于数值模拟载荷谱的车辆前桥随机振动疲劳寿命分析[J]. 工程机械, 2013,44(10):39-42.
- [9] 马瑞雪,王欣,张科峰,等. 客车骨架结构的随机振动疲劳分析[J]. 机械研究与应用, 2011,24(1):54-57.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 电动汽车用锂离子动力电池包和系统第3部分:安全性要求与测试方法;GB/T 31467.3—2015[S]. 北京:中国标准出版社, 2015.

引用本文:张明军,李睿鑫,段维. 重载矿用锂离子电池包随机振动可靠性研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):178-181.

Green Chemistry, 2016,18:2500-2506.

- [14] SUN Q, LI X, ZHANG H, et al. Resynthesizing LiFePO₄/C materials from the recycled cathode via a green full-solid route[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019,818:153292.
- [15] SONG X, HU T, LIANG C, et al. Direct regeneration of cathode materials from spent lithium iron phosphate batteries using a solid phase sintering method[J]. RSC Advances, 2017,7:4783-4790.

引用本文:颜群轩,罗碧云,陈嘉鑫,等. 废旧磷酸铁锂电池可持续回收技术研究进展[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):174-177.