

# 装载机用动力电池包机械冲击及随机振动仿真与试验研究

杨乐乐 李永旺 钱丽佳  
天津中电新能源研究院有限公司 天津 300000

**摘要:** 电动装载机作业条件相对恶劣, 锂离子电池包作为其核心部件, 电池包体积及重量较大, 工作中承载较强颠簸。为确保装载机能稳定可靠地工作, 急迫需要研究电池包结构的可靠性。本文以装载机的电池包为研究对象, 通过Abaqus有限元分析软件, 进行机械冲击和随机振动的仿真分析, 仿真结果表明电池包主要结构件应力均小于材料疲劳强度, 电池包具备超强的抗冲击、抗振动能力。并利用工装将电池箱垫高固定在振动台上, 模拟装车的实际情况, 进行随机振动试验, 无结构件破坏, 验证了仿真结果的准确性。

**关键词:** 锂离子电池包; 机械冲击; 随机振动

## 0 引言

随着“双碳”战略纵深推进及新基建投资持续落地, 电动装载机作为工程机械绿色转型的核心载体, 而电池包是其唯一动力, 需要满足严苛的安全测试, 具备超强的抗冲击、抗振动能力。

本文通过电池包随机振动分析, 来考核电池包是否满足GB31467.3-2015《电动汽车用锂离子动力蓄电池包和系统第3部分》中的振动要求; 进行电池包的随机振动试验, 验证其可靠性, 并与仿真结果对比, 验证仿真结果的准确性。

## 1 电池包结构设计

电池包作为一个独立的部件安装在装载机车辆上, 为车辆行驶提供动力。

### 1.1 电池包组成

某磷酸铁锂电池包结构主要包括下箱体、上盖、电池模组、电压温度采集模块、热管理系统、正负极接插件、箱体密封圈、防爆阀及其它辅件, 如图1所示。

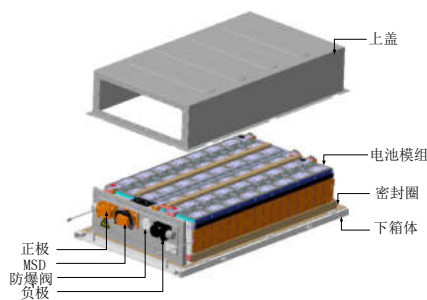


图1 电池系统结构示意图

### 通讯作者简介:

姓名:钱丽佳, 出生年月:1991年1月,性别:女, 民族:汉族, 籍贯:天津, 学历:硕士研究生, 职称:工程师, 研究方向:动力及储能电池系统。

## 1.2 主要结构部件材质

为了满足重量要求, 各结构件进行轻量化设计, 下箱体采用铝型材挤出形式集成底部液冷, 实现功能集成, 满足承载电池重量与热管理功能, 材质为AL6061-T6; 上盖选用钣金冲压形式, 顶部冲压筋条, 上盖材料为DC51D+Z, 厚度为1.2 mm; 电池模组端板采用型材结构, 材料为AL6063-T6, 厚度为2.5mm; 该电池系统模组采用3个1P16S的模组组成, 串联为1P48S的电池系统, 系统总质量约为235kg。电池模组与下箱体采用导热结构胶粘接, 模组通过长螺栓将其固定在下箱体的底部横梁上。

表1 主要结构件材质特性

零部件名称	材料名称	弹性模量(N/mm <sup>2</sup> )	密度(g/mm <sup>3</sup> )	泊松比	疲劳强度(Mpa)	屈服强度(Mpa)
上盖、模组连接片	DC51D+Z	210000	7.85	0.3	165	230
下箱体	AL6061-T6	70000	2.7	0.33	97	255
模组端板	AL6063-T6	70000	2.7	0.33	69	214
导热结构胶	/	2000	1.4	0.3	5	15

## 1.3 网格划分

为便于计算需要对电池系统进行简化, 对质量相对较小的零部件忽略不计, 删除系统中对应力影响较小的圆角和倒角。箱体、模组连接片采用2D网格划分, 导热结构胶、模组和元器件采用3D网格划分, 划分后模型网格总数为416651。

## 1.4 边界条件的定义

为了便于计算需要对电池系统进行简化, 这里对质量较小的零部件忽略不计, 删除系统中对应力影响较小

的圆角和倒角,保留箱体、模组、导热结构胶、模组连接片和前面板上质量较大的元器件。实际装车情况下,电池箱通过两侧栓接孔栓接固定于车架上,在仿真分析时,电池箱底部进行全约束。

## 2 锂离子电池包有限元分析

国内外主要的动力电池振动测试标准,从标准目的、方法来源、方法特征、适用性等方面均有分析和比较,为相关产品的验证提供指导建议<sup>[1]</sup>。

### 2.1 载荷条件

通过ANSYS软件对某动力电池包进行了仿真分析计算与随机振动试验的对比,确定仿真计算结果的可靠性,以及基于仿真的优化设计方法<sup>[2-3]</sup>。

本文依据GB/T 31467.3-2015,随机振动PSD谱如表2所示,其中整机前进方向为X轴方向,另一垂直于行驶方向的水平方向为Y轴方向。

表2 随机振动PSD谱

随机振动 (每个方向测试时间为21h)			
频 Hz	X轴功率谱密度 (PSD) g <sup>2</sup> /Hz	Y轴功率谱密度 (PSD) g <sup>2</sup> /Hz	Z轴功率谱密度 (PSD) g <sup>2</sup> /Hz
5	0.0125	0.04	0.05
10	0.03	/	0.06
20	0.03	0.04	0.06
200	0.00025	0.0008	0.0008
RMS	X轴	Y轴	Z轴
	0.96g	1.23g	1.44g

依据GB/T 31467.3-2015,机械冲击载荷条件如表3所示,其中竖直方向为Z轴方向。

表3 机械冲击载荷条件

测试程序	参数要求
冲击波形	半正弦波
测试方向	+Z
加速度值	25g
脉冲时间	15ms

### 3.2 随机振动计算结果与分析

针对频域法和时域法在随机振动疲劳计算中的适用性问题,已有专家研究了2种方法的计算精度和计算效率。结果表明,在结构危险位置振动疲劳的精确计算时域法计算精度更高,在结构危险位置的快速预测时频域法计算效率更高<sup>[4]</sup>。

本文随机振动计算完成后,提取锂离子电池包结构中关键结构件的应力结果。不同方向对应的关键结构件的应力分布情况分别如图2~图4所示。

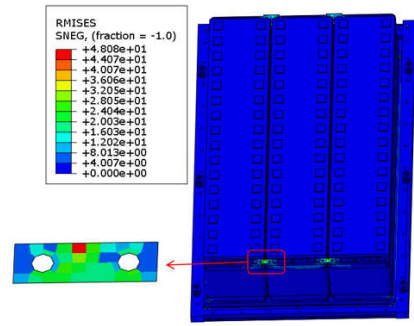


图2 Z方向关键结构件应力云图

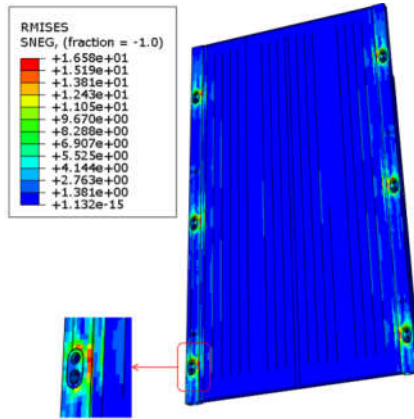


图3 Y方向关键结构件应力云图

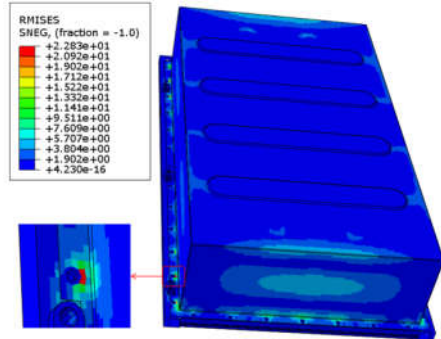


图4 X方向关键结构件应力云图

采用“3 $\sigma$ ”原则,分析图2~图4的应力结果可知:箱体Z方向的最大应力为48.08Mpa,位于模组连接片上,3 $\sigma$ 为144.24Mpa,小于材料的疲劳强度(DC51D+Z: 165Mpa);箱体Y方向的最大应力为16.58Mpa,位于箱体底部栓接孔附近的折弯处,3 $\sigma$ 为49.74Mpa,小于材料的疲劳强度(AL6061-T6: 97Mpa);箱体X方向的最大应力为22.83Mpa,位于箱体上盖栓接孔附近,3 $\sigma$ 为68.49Mpa,小于材料的疲劳强度(DC51D+Z: 165Mpa)。综上,该电池包关键结构件的应力值均小于相应材料的疲劳强度,满足实际使用要求。

### 2.3 机械冲击计算结果与分析

机械冲击计算完成后,提取整个冲击过程中,箱体

的最大应力与最大位移，箱体机械冲击中的应力与位移结果如图5~图6所示。

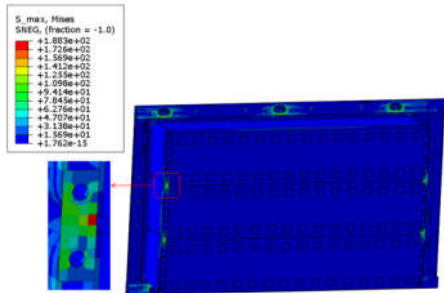


图5 机械冲击中关键结构件应力云图

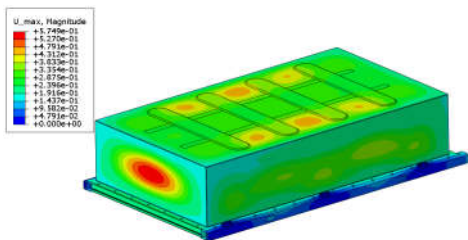


图6 机械冲击中关键结构件位移云图

由图5~图6可以看出：机械冲击过程中，箱体的最大应力为188.30Mpa，位于模组连接片上，小于材料的屈服强度（DC51D+Z：230Mpa）；箱体最大位移为0.58mm，位于箱盖后端面。综上，箱体关键结构件未发生屈服，箱体各部分连接完好，变形较小，满足实际使用要求。

### 3 锂离子电池包试验验证

按照实际装车的方式，通过工装将电池包固定在20t的大型振动试验台架上，如图7所示。按照随机振动工况自功率谱密度控制试验系统电机对振动台进行激励，从而将激励传递到整个电池箱体进行振动。按照试验测试相关标准，分别在电池箱体工装底座、电池包本体区域位置粘贴加速度传感器。图8为试验时功率谱的控制曲线具体参数。



图7 随机振动台上的电池包

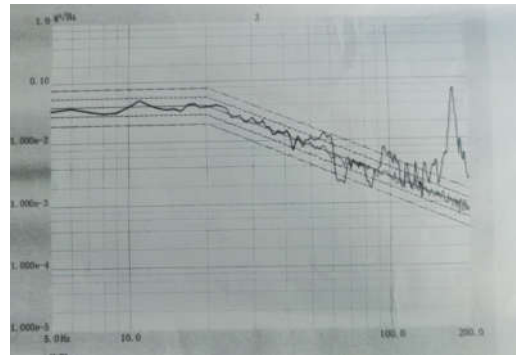


图8 电池包的振动测试功率谱密度曲线

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。

### 4 结论

本文介绍了该电池包的结构组成，并建立精确的仿真模型，对该电池包进行仿真分析。基于有限元软件对该电池包进行了随机振动与机械冲击分析，并对其进行了随机振动试验验证。分析结果表明：该电池系统在Z方向随机振动中应力最大，为48.08MPa， $3\sigma$ 为144.24Mpa，小于材料的疲劳强度（DC51D+Z：165Mpa）满足设计要求；机械冲击过程中，箱体的最大应力为188.30Mpa，小于材料的屈服强度（DC51D+Z：230Mpa），箱体最大位移为0.58mm，箱体各部分连接完好，变形较小，满足设计要求。该结果不但验证了有限元仿真分析的准确性和设计方案的可行性、合理性，也为后续相关电池包的的进一步研究提供了重要的参考价值。

### 参考文献

- [1]樊彬,刘磊,孔治国,等.电动汽车用动力电池包振动试验标准分析[J].电源技术,2020,44(11):1705-1708.
- [2]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.
- [3]乔红娇,戴道成,涂家富,等.某动力电池包箱体结构安全性分析及优化[J].电源技术,2023,47(8):1064-1068.
- [4]吴光强,李超,丁丰,等.基于频域和时域法的电池包随机振动疲劳计算对比研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2024,51(2):208-218.