

# 电动汽车动力电池包结构设计分析研究进展

陈南, 李兵兵

(东南大学 机械工程学院, 江苏 南京 211189)

**摘要:**动力电池包是电动汽车的核心模块之一,有严格的安全性和轻量化的要求,必须通过规范的结构分析和优化来实现。简述动力电池包发展现状、总装结构设计要点以及结构设计流程,总结其结构动力学分析和温度场仿真模拟的研究进展,明确指出建立精细化有限元模型、进行温度场模拟的电池包动力学性能分析与结构优化是进一步提高电池包研发水平的重要方向。

**关键词:**动力电池包;结构设计;动力学分析;温度场仿真

**中图分类号:**U469.72 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)01-0001-06

## Progress in Research and Analysis of Structural Design of Electric Vehicle Power Battery Pack

CHEN Nan, LI Bingbing

(School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** As one of the core modules of electric vehicle, power battery pack has strict requirements for safety and lightweight, which must be realized through standardized structural analysis and optimization. By briefing the development status of power battery pack, the key points of its assembly structure design and the structural design process are elaborated, and the progress of its structural dynamic analysis and temperature field simulation are summarised. It is explicated clearly that establishing a refined finite element model and conducting the dynamic performance analysis and structure optimization of battery pack including temperature field simulation is an important direction to higher level research and development of battery pack.

**Keywords:** power battery pack; structural design; dynamic analysis; temperature field simulation

## 0 引言

电动汽车的关键总成之一是动力电池,目前最常用的一类动力电池是由单体锂离子电池电芯适当成组后集成于箱体内的车载动力电池包。往往车辆行驶的路面随机激励且可能有碰撞等事故发生,要求动力电池包的结构设计必需严格规范,以满足结构强度、碰撞安全性、疲劳可靠性、通风与散热、绝缘和防水、电磁兼容等方面的性能要求,其基本需求是:在有限的空间容积内,在满足需要的电量储存能力的基础上,最大限度地减少交通事故对驾乘人员伤害并尽可能地轻量化。

目前,对电池包结构设计的研究文献大部分集中在电池包结构的动力学分析<sup>[1-4]</sup>、温度场仿真<sup>[5-11]</sup>以及结构优化设计<sup>[12-13]</sup>方面。这些研究为电池包的批量生产提供了可靠的技术支撑,并研制出了多款高性能动力电池包。

在商业化方面,顺应全球新能源汽车发展潮流,全球动力电池包产业链发展迅速。直到2021年,国际主流车载动力电池包都是以美、德、日、韩主力车企为代表,采用

三元锂电池电芯为单体的高端纯电动车型,NEDC续航里程超过600公里。国内以比亚迪、宁德时代等为代表的一大批企业,在动力电池方面作出了重要贡献,使国产动力电池的市场占有率全球领先。但国内车企的动力电池包在整车续航和安全性仍有提升空间,其影响因素很大程度上在于从单体到系统的电池包集成结构设计以及动力电池包的热管理设计。因此,要真正实现我国新能源汽车产业技术上的“弯道超车”,在选用适当的高能量比单体电芯基础上,从电池包结构设计角度进行研究及优化,以开发更高续航里程、更高安全性及更宽的环境温度适用范围的动力电池包,也是当前的迫切需求。

本文总结了现有电动汽车动力电池包结构设计,分析其研究进展,在介绍动力电池包的基本总装结构的基础上,说明电池包机械设计流程,综述目前电池包的力学分析和温度场仿真进展,并提出电池包的分析仿真需要更加精细的计算模型,且温度场仿真应该同时考虑其结构力学性能。限于篇幅,有关电池包碰撞安全性等方面内容不在本文赘述。

**第一作者简介:**陈南(1953—),男,重庆人,教授,博士生导师,博士后,德国柏林工业大学高级访问学者。近年来获省、部级科技进步二等奖6项、省级科技进步三等奖1项、市级科技进步三等奖2项,另外还获得中国机械工业科技进步奖、中国汽车工业科技进步奖等奖项。在国内外专业杂志发表论文350余篇,其中SCI收录论文50多篇,EI收录论文80多篇。主编或主审国家级规划教材3部。获专利10余项。近年来完成或承担国家科技重大专项3项、国家自然科学基金Ford重点基金项目及面上项目7项、国家863高技术计划项目及江苏省重大工业攻关项目、江苏省成果转化以及江苏省国际合作重点项目等30余项。

## 1 国内外企业的动力电池包发展现状

当前,世界各大车企都在大力发展新能源电动汽车,动力电池的续航能力成为影响此类汽车市场竞争力的决定性因素之一。松下、LG、三星等日、韩电池企业的产品成为主流车企首选。动力电池的电芯曾经推崇采用三元锂电池,而磷酸铁锂电池,由于其安全和成本的优点,近期又重获青睐。目前,一般电动乘用车的续航里程超过400公里。电动车明星企业特斯拉的Model系统更是可达600公里以上。国内主流车企使用的电池单体是趋于高端车型逐步向三元锂电池转型,中、低端车型以磷酸铁锂单体电芯为主,但整体来说续航里程低于国际先进水平。这可能是由电池单体电芯能量密度较低、电池包结构设计缺陷以及电池热管理系统效能不足等因素所致。

早期电动汽车大多数是在传统车辆基础上改装而来,即在原燃油车辆底盘上加装动力电池、电机和传动系统。目前新一代的纯电驱动轿车大多采用“滑板式”设计的专用电动车底盘,布局特点是将“类平板型”的电池包直接安装于前后轴间的底盘中部位置。这种布局有利于动力电池包、底盘和车身一体化的集成设计,提升了汽车的空间利用率,还可降低车辆质心,提高车辆高速行驶的稳定性;同时动力电池包位于底盘中部,底盘外部结构有效保护了电池包,对碰撞的冲击强度有所缓冲,减少了发生起火、爆炸的危险。这种布局由特斯拉Model系列及日产“Leaf”等车型率先采用,目前正在成为趋势。

特斯拉电动车的动力电池包早期采用松下18650圆柱电芯单体,数量高达7000多节,依靠先进的电池管理系统及合理的结构设计,保证了其续航里程和安全性,达到了当时国际领先的水平,这在当时也是一个较大的创新。特斯拉目前已经在按照扩大单体电芯容量、减少数量的趋势升级电池包,采用21700电芯的动力电池包已经量产,近期又推出了基于46800单体电芯的电池包,单体电芯的个数已经降至960个,电池包整体的能量密度有较大幅度的提高,据称已达到300Wh/kg。中国企业在动力电池包方面也有出色的成果,比亚迪发布了基于磷酸铁锂的“刀片电池”,通过减薄电芯厚度,增大电芯长度,实现电芯扁长化并结合电池包结构和底盘一体化设计。这种设计有利于串、并联组合,增加了电池模组成型的便利性,较大程度地提高了电池包的空间利用率。国内外车企电芯电池的状况如表1所示。

## 2 电池包的基本总装结构设计

动力电池包是电动汽车的关键装置<sup>[14]</sup>,目前普遍采用箱体装载式固定于底盘,其设计内容包含电池单体选型、机械结构设计、电池管理系统(BMS)设计、高压电气系统设计、热管理系统设计以及IP防护设计等。

### 2.1 机械结构设计

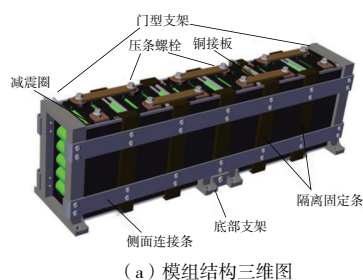
机械结构设计主要是模组设计,就是将众多电池单体电芯用支撑结构固定联结于一体,目的是通过电池单体的

表1 国内外车企电芯电池使用情况

电池企业	配套车企	典型车型	电池类型
松下	特斯拉	Model系列	三元锂电池
	奥迪	A3 e-tron	
	福特	C Max-Energi	
	丰田	普锐斯	
三星	大众	帕萨特	三元锂电池
	宝马	i3, i8, X5	
	奔驰	C350eL	
LG	现代	索纳塔 PHEV	三元锂电池
	通用	Velite5	
	奔驰	GLE 500e	
比亚迪	比亚迪	唐、宋	磷酸铁锂电池
宁德时代	长安	新逸动 EV	三元锂电池
	吉利	帝豪 EV	
	上汽	EU300	
国轩高科	江淮	iEV7	三元锂电池
	奇瑞	eQ	

串联和并联来保证电池包的额定工作电压和系统总能量。模组要求结构稳定性高,强度和刚度满足车载环境激励及电池包安全要求,并且模组尺寸要限定在电池箱体尺寸内,并能够安装相关电气元件。

查新宇<sup>[15]</sup>针对某公司一款老式方形电池模组进行了改进设计,开发了一种适应防电芯膨胀的电池模组,优化了电池包的端侧板结构,并通过仿真分析证实了其环境激励下的响应最大应力小于材料许用值,满足了模组设计的国家标准。刘元强<sup>[16]</sup>选用松下NCR18650电池单体,设计了一款18并24串的电池模组结构,并对其散热效果和动力学特性进行了仿真和实验分析,具体模组结构如图1<sup>[16]</sup>所示。



(a) 模组结构三维图



(b) 电池包实物图

图1 电池包模组结构

上述两款电池包都是平板式设计,实际电池包结构设计受安装位置和整车布局包络空间尺寸的约束。目前推崇的是结合底盘和车身的一体化集成设计。现阶段电池包主要安装在车辆 6 个位置:后备箱(牺牲后备箱空间)、后备箱地板下区域、前地板下区域、前排座椅下区域、后排座椅下区域及中央通道内。针对限定的空间要求,电池包机械结构还有“土”字型、“L”型,如图 2 所示。这种结构可以依据车型结构适当调整,可一定程度地减轻电池包本体受挤压冲击力而减少发生碰撞安全事故的概率,但它所能提供的空间容积相对有限,不利于电池包整体能量密度的提高。

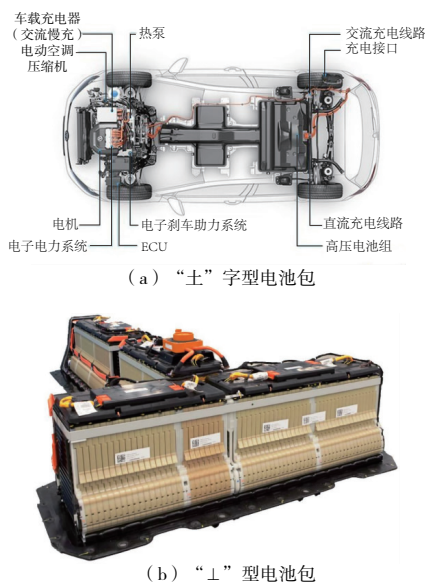


图 2 “土”字型、“L”型电池包结构

### 2.2 高压电气设计

高压电气设计与电池包机械结构设计的关系密切。电气安全设计主要由 4 部分组成,分别为过流下的系统保护部分、高压互锁安全部分、预充电路系统及防碰撞设计,如图 3 所示。图中的传感器元件、熔断器、通信线束及它们的固定方式都将影响电池包内部结构形式,所以在机械结构设计前期要合理规划电气系统架构。目前电动车电气系统正在向高压化发展,推崇使用额定工作电压达 800 V 的高压电气系统。这对电气系统的器件、装置和结构以及安装连接都提出安全性方面的更严酷挑战。

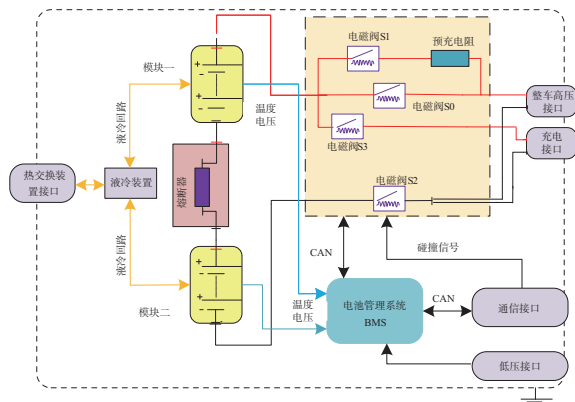
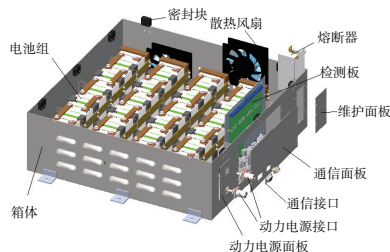


图 3 电池包的电气设计架构

### 2.3 热管理设计

热管理设计是电池包设计最重要的任务之一,主要任务是使电池温度保持在 10 ℃ ~ 40 ℃ 的适宜工作范围,特别是要控制或者反映局部过热。电动汽车工作环境温度多变且较宽,设计考虑在 -30 ℃ ~ 50 ℃ 内。这就需要设计合理的热管理系统来及时调节电池包内部温度,当温度较高时散热,反之加热。

从目前文献来看,热管理系统主要有强制风冷、液冷和相变冷却,实例如图 4 所示。风冷方式的成本较低,但散热效果一般,极端条件下难以满足要求;而相变冷却价格昂贵,不太适合目前市场需求;液冷方式散热效果好,同时可以很好地实现散热和供热转换,是目前的主要应用方式。



(a) 某型强制风冷电池包



(b) 某电池包液冷系统

图 4 不同冷却形式电池包

### 2.4 IP 防护设计

电池包属于高能量电子产品,对导电液体敏感性强,在结构设计过程中必须进行 IP 防护设计,即接触防护和防水防尘。

在接触防护方面,主要是防止模组内带电部分对人体的伤害。设计时要考虑将带电部分使用绝缘胶带缠裹起来,在相关正负极输出、输入部分设置保护套,以保证足够的安全间隙。在防水防尘方面,GB/T 31467.3.<sup>[17]</sup> 中规定电池包的防护等级为 IP67,即被测试产品需耐受浸泡在 1 m 深、水压约 10.3 kPa 水中 0.5 h。要满足如此严格的防护等级,可通过弹性单元设计、限位设计和平衡防爆。弹性单元设计一般采用压力密封,通过电池包的上、下箱盖压缩发泡类的硅胶或者橡胶等弹性单元,弹性单元的反弹力即可使接触面充分接触。限位设计是保证弹性单元在其压缩范围内,确保弹性单元的压缩率。常见的限位设计通过较大的金属垫来实现,如图 5 所示。平衡防爆是当电池发生爆炸时,使其能量集中定向泄放,避免进入客户舱,一般在箱体上安装平衡防爆阀。

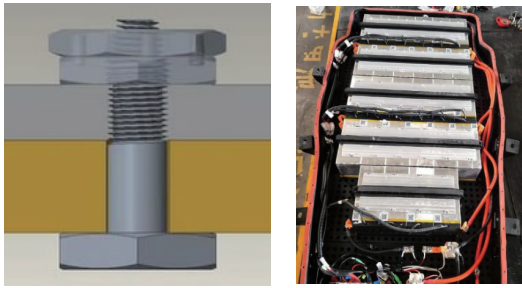


图5 常见限位设计

## 2.5 电池包的集成

上述机械及电气结构模组完成以后,都将集中总装于电池包箱体,实例如图6所示。电池包箱体主要承受车载环境激励和冲击,其结构强度、循环耐久性和冲击激励条件下的安全性,对于整体车辆是否稳定安全运行至关重要;而过分保守的设计可能会提高安全性,但肯定有损于电池包整体能量密度的提高。由此着眼于轻量化的电池包设计优化是一贯的追求。

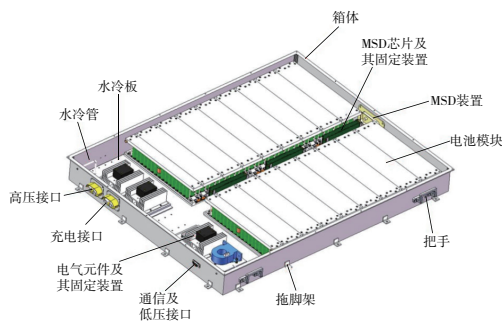


图6 某型液冷式平板电池包总装结构

兰凤崇等<sup>[18]</sup>在试验设计的基础上利用数理统计方法对箱体实现多材料并用,通过遗传算法优化箱体结构,实现了较大的减重率。李垚坤等<sup>[19]</sup>利用有限元软件,对电池包结构力学特性进行分析,从静力学和动力学分析结果出发,对电池箱体改进设计,实现了大幅度的箱体减质量和整体减质量。电池包箱体在底盘上的安装有弹性支承,特别有使用负泊松比特征的结构设计支撑联接件,目的是有效改善电池包的碰撞安全性。

## 3 电池包的机械结构设计流程

动力电池包的设计目标是满足整车开发设定的性能和功能要求。电池包的机械结构设计流程如图7所示,主要包含4部分:参数确定、结构初始设计、仿真分析优化和实物搭建实验分析。参数确定包括基本性能参数确定、参数匹配性能分析和电池单体选型。基本性能参数主要指整车性能要求,如行驶里程需求、电机工作电压等;参数匹配性能分析是要求电池额定电压与电机额定电压相匹配,保证整车系统可靠运行;电池单体选型主要依据性能参数,从软包、方形和圆柱体3种单体结构中选择合适单体电芯,并确定电池单体的串、并联。

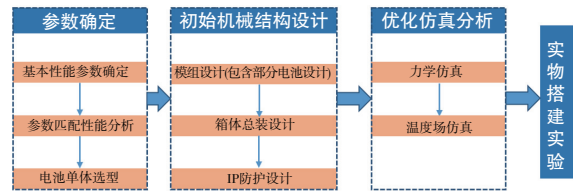


图7 电池包的机械结构设计流程

结构初始设计包括模组设计(包含部分电气设计)以及箱体总装设计;仿真优化分析包括力学仿真和温度场仿真;实物搭建实验分析主要是在前述仿真优化基础上进行实物设计及样品试制,并在相关实验台架上模拟真实车载工况试验,验证所设计的电池包是否满足系统功能、可靠性、安全性等方面要求。

## 4 电池包的结构力学仿真分析

电池包的结构力学仿真是利用有限元软件对电池包的结构强度和可靠性进行验证分析,通过计算机将真实物理实验虚拟化,实现实际工况的近似模拟。合理有效的有限元分析,可以极大地缩减产品开发时间,节省开发成本,所以电池包有限元分析已经成为电池包开发的必需环节。

电池包结构仿真分析的基础是建立合适的有限元计算模型,这就需要统筹协调出贴合实际工况的、有序简化的计算模型,确定材料本构模型、单元网格划分方法以及外部激励载荷及各构件联结间力传递方法,为电池包结构有限元仿真提供具有适当精确程度的模型基础。目前,常用的电池包结构动力学仿真分析主要包括模态分析、静力学分析以及动力学分析。

### 4.1 模态分析

电池包的模态分析是其初期结构设计合理性的简单且有效的判断依据,可以合理避免因设计缺陷导致的系统共振,以免产生过大的噪声和振动。

模态是结构的固有特性,任何一个线性系统的自由振动均可解耦为 $N$ 个单自由度振动系统,每个单自由度振动系统对应一个模态<sup>[20]</sup>。而模态分析就是求解方程式(1),一般模态分析中不计阻尼效应。

$$(\mathbf{K}-\lambda\mathbf{M})\mathbf{X}=0 \quad (1)$$

$$f_i = \frac{\sqrt{\lambda_i}}{2\pi} \quad i=1,2,\dots,N \quad (2)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为结构的质量矩阵; $\mathbf{K}$ 为刚度矩阵; $\lambda$ 为特征值,它与固有频率 $f_i$ 的关系如式(2)所示。求得特征值,可以得到对应的特征向量,组成一个 $N$ 维线性空间的一组正交基,可以通过这组正交基的线性叠加表示有限元模型所代表结构的受载振动变形。

由电池包模态分析得到其模态频率和振型后进行结果评价,一般要求是避免电池包一阶模态频率低于路面激励频率。路面激励频率主要与车速和路面不平度波长有关,计算公式如下:

$$f = \frac{u}{3.6 \cdot l} \quad (3)$$

式中: $f$ 是路面激励频率; $u$ 是车速; $l$ 为路面不平度波长,

与路面情况有关,一般平坦路在 1.0~6.3,搓板路是 0.74~5.6,碎石路是 0.32~6.3,未铺装路为 0.77~2.5。

## 4.2 静力学分析

电池包静力学分析主要是为了验证电池包结构的强度特性。虽说是静力学分析,但计算模型的实质是把车辆行驶时 3 个运动方向极限工况下,加速度惯性力的最大幅值作为静态载荷加载于结构上,来计算变形及应力分布。从车辆坐标系方向来看,电池包主要有 3 种极限工况, $x$  轴方向的急停、 $y$  轴方向的急转弯以及  $z$  轴方向的上下颠簸。不同工况电池包加速度不同,导致的惯性力也不同,只有详细分析得到结构在极限工况下的惯性力响应是否超过结构的许用应力,才能确定电池包的内部模组和电气元件是否满足强度要求以保证必要的安全性。目前不同文献定义各极限工况惯性加速度存在一定差异,不同的车企有不同的内部标准规范要求,如某集团的资料<sup>[21]</sup>中规定的各工况的极限加速度如表 2 所示。

表 2 各工况的极限加速度

工况	极限加速度
急停( $x$ 方向)	5g
急转弯( $y$ 方向)	3g
上下颠簸( $z$ 方向)	3g

## 4.3 动力学分析

电池包的力学分析是其结构的疲劳分析。静力学分析只是静载极限工况下的结构强度分析,而电池包被承载于车架或底盘,受车辆交变载荷反复作用,这种交变载荷强度远远未达到静力学极限工况下的许用应力,但随着激励过程的持续,电池包内局部结构可能会由于高周疲劳现象而产生疲劳破坏。

由于电池包是车载工作环境和载荷条件,与车载的其他总成一样,电池包动力学响应特征要通过随机振动方法,以路面不平度随机过程加载方式来仿真模拟分析。电池包所承受的这种随机振动路谱激励,一般需要采集电池包支撑位置处时间历程路谱样本函数,再通过统计学方法转化为适当形式的加载函数(时域和频域的都有)。目前比较常用的有用路谱的频域形式:功率谱密度函数(PSD)。可将功率谱密度函数路谱定为电池包载荷工况,实施规范的疲劳寿命分析过程;根据疲劳分析结果,对比 GB/T 31567.3<sup>[19]</sup>即可确定电池包是否满足车规要求。目前主流的有限元分析软件都有组织好的疲劳寿命分析模块,遵循其过程即可获得结果,但是建模的精确程度和对电池包激励谱的准确获得,是决定计算结果是否准确的关键,也是比较困难的问题,还有大量工作要做。

因电池包内部结构精细复杂,有限元结构模型简化处理难度大,目前大多数采用以质量点均布于电池包箱体底部的简化方法来代表电池模组,结果基本可用。如孙海明<sup>[22]</sup>对一款铝合金电池箱进行了模态和静力学分析,发现箱体在较大载荷下  $y$  方向的应力处于形变危险区域,针对此问题对箱体的托架进行了优化,得到了改进结构形式。刘元强<sup>[16]</sup>对自己设计的一款风冷式电池包箱体进行了模态分析,在简化其内部模组细节结构的条件下,得到

了其内部模组对箱体动力学影响,得到表 3<sup>[16]</sup>所示的前 5 阶模态,验证了箱体 1 阶固有频率符合设计要求。姜高松<sup>[23]</sup>对某集团某款电池包进行了动力学和静力学仿真分析,并根据仿真分析进行了结构优化,实现了轻量化的效果。季鑫盛等<sup>[24]</sup>对动力电池箱进行有限元建模与模态分析,并提出了 3 种优化方案,既实现了箱体轻量化又解决了共振问题。HARTMANN M 等<sup>[25]</sup>对电池包箱体顶板进行优化,但忽略了其内部结构影响,设计了中间凹陷两侧有两个对称三角形的凸包上盖,力学性能得到明显改善。

表 3 电池包自由模态及振型

阶数	频率/Hz	振动部位
1	58.125	箱体上盖
2	63.858	箱体底部
3	64.681	箱体底部
4	74.420	箱体上盖
5	97.598	箱体上盖

以上的这些建模分析方法直接且方便,但模型简化程度比较大,忽略了内部模组大部分细节结构的影响,对整个电池包结构动力学响应特征的把握不够充分。为提高计算仿真精度以及结果可靠性,部分学者建立了精确电池包模型。陈雨等<sup>[26]</sup>分别建立电池包的精确模型和简化模型,计算了两种模型的约束模态,对电池包进行了振动实验,证实精确模型的固有频率更接近实验值,也说明了内部模型精确化的必要性。黄培鑫等<sup>[27]</sup>建立了电池包精细化模型,并通过模态实验验证了模型的有效性,分析了电池包在稳态随机振动和瞬态冲击下的结构损伤和电接触可靠性,发现不同触点在同一工况下的应力和加速度差距明显,为电池包的安全设计提供了有价值的参考。刘家员<sup>[28]</sup>基于有限元理论,建立了精细化模型,并对电池包进行了碰撞、挤压、跌落、冲击和振动的 5 工况分析,根据分析结果进行了拓扑优化和尺寸优化,实现了电池包的轻量化,可靠性得到了提高。KUKREJA J 等<sup>[29]</sup>设计了一种电池间隙排布空心金属管的蜂窝结构并建立精细化模型仿真,证明了其改进结构可以明显减少应力集中现象。

## 5 电池包的温度场仿真分析

车辆在行驶过程中,电池包内的电池单体会产生大量热量,如果不及时进行散热,就会导致电池效率下降,严重情况下会产生火灾;另外在低温环境下,电芯需要尽快升温才可正常工作。目前电池包低温性能如何是使用者非常关注的。电池包需要有满足车规要求的热管理系统。热管理系统设计是建立在对电池包内部的各种工作条件下的温度场状态良好把握的基础上的,因此对电池包内部动态温度场进行计算仿真分析不可或缺。

分析过程是根据电池单体的产热性能,建立电池单体、动力电池模组与外界散热模型,通过 CFD 软件基于所建立的模型对设计的热温度场状态进行仿真分析,在验证仿真结果可用的基础上改进和优化设计。因注意到电池包的温度控制执行装置(主要有泵、阀、管路、冷却件及紧固支撑件等)比较精密,容易受到环境动力学激励的影

响,如冷却板与电芯的接触紧密程度在长期随机激励条件下容易放松,会导致界面热传导率下降,将导致系统冷却效率的下降。这方面的研究目前看到的不多。

孙健<sup>[30]</sup>设计了如图8<sup>[30]</sup>所示的电池散热结构,并对散热结构设计前后内部温度场进行了CFD模拟,改进结构使其内部温度相对原设计的最高温度有大幅度降低,满足了电池的温度要求。万长东等<sup>[31]</sup>对某款锂离子液冷电池包进行了CFD仿真分析,对该电池包在自然冷却、单层液冷板以及双层液冷板冷却下的温度场进行模拟,并发现双层液冷板散热效果明显,受冷却介质流量影响较大。闵小滕等<sup>[32]</sup>对圆柱形电池模组建立了一种基于微小通道波形扁管冷却结构,如图9<sup>[32]</sup>所示。电芯采用电化学热模型,通过分析发现,改变波形扁管的通道数和接触角可以明显改善电池组的温度分布。设计了一款多通道波形扁管,经过实验验证,证明了所设计散热结构的有效性。这个研究说明,接触状况对冷却效果影响很大。

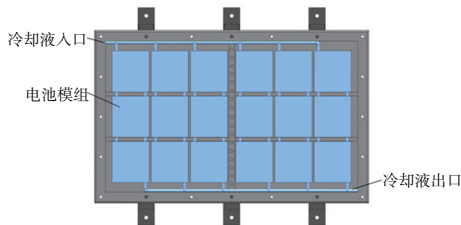


图8 液冷管道分布

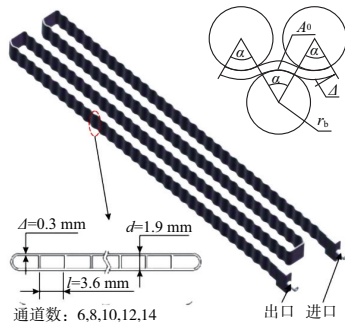


图9 微小通道波形扁管结构

在风冷方面,李秋芬<sup>[33]</sup>剖析了电池的生热机理,建立了某款动力电池包的三维实体热效应模型,研究了侧面进出风对电池包温度分布的影响,并进行了结构优化,散热效果改善明显。MAHAMUD R<sup>[34]</sup>等巧妙地设计了一种循环式风冷系统,仿真表明其相对单向风冷温度有降低。

## 6 结语

本文总结了目前电池包结构设计流程和结构力学、温度场仿真研究现状。电池包受载工况复杂,而当前其机械结构力学分析与温度场仿真分析普遍是相互独立的,实则不同的冷却方式和管路布局,对动力电池包动力学性能影响较大。此外,目前大多数电池包仿真采用质量点代替电池模组结构形式,忽略了内部细小原件的动力学影响。因此,电池包的结构优化设计未来研究要综合考虑温度场和应力场,建立更加精细化的有限元模型,联合力学仿真和

温度场仿真,才能更加贴合电池包工作实况,为动力电池包的研发提供改进指导意见。

### 参考文献:

- [1] 王文伟,程雨婷,姜卫远,等. 电动汽车电池箱结构随机振动疲劳分析[J]. 汽车工程学报,2016,6(1):10-14.
- [2] 储毅,刘华锋,赵明宇,等. 基于FEM的电动汽车快换电池箱模态分析与优化[J]. 制造业自动化,2012,34(24):104-107.
- [3] ZHU J E, WIERZBICKI T, LI W. A review of safety-focused mechanical modeling of commercial lithium-ion batteries [J]. Journal of Power Sources,2018,378:153-168.
- [4] 赵冠宇,徐丹,冯富春. 一款纯电动乘用车电池箱体的设计[J]. 电源世界,2015(8):42-44.
- [5] ZHAO R, GU J J, LIU J. Optimization of a phase change material based internal cooling system for cylindrical Li-ion battery pack and a hybrid cooling design[J]. Energy,2017,135:811-822.
- [6] MAO L I, LIU Y, WANG X, et al. Modeling and optimization of an enhanced battery thermal management system in electric vehicles[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2019,14(1):65-75.
- [7] LIANG J L, GAN Y H, LI Y. Investigation on the thermal performance of a battery thermal management system using heat pipe under different ambient temperatures[J]. Energy Conversion and Management,2018,155:1-9.
- [8] CHEN K, WANG S F, SONG M X, et al. Configuration optimization of battery pack in parallel air-cooled battery thermal management system using an optimization strategy [J]. Applied Thermal Engineering,2017,123:177-186.
- [9] WANG Q, JIANG B, LI B, et al. A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2016,64:106-128.
- [10] ALRASHDAN A, MAYYAS A T, AL-HALLAJ S. Thermo-mechanical behaviors of the expanded graphite-phase change material matrix used for thermal management of Li-ion battery packs [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(1):174-179.
- [11] MEHRALI M, LATIBARI S T, MEHRALI M, et al. Shape-stabilized phase change materials with high thermal conductivity based on paraffin/graphene oxide composite [J]. Energy Conversion and Management,2013,67:275-282.
- [12] 张海滨. 基于动静态特性的电动汽车电池箱体加强筋结构优化研究[D]. 长沙:湖南大学,2013.
- [13] ZHOU M, PAGALDIPTI N, THOMAS H L, et al. An integrated approach to topology, sizing, and shape optimization[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2004,26(5):308-317.
- [14] 李东峰. 小型纯电动汽车动力电池箱体设计[J]. 汽车工程, 2012(5):23-24.
- [15] 查新宇. 某款电池包模组结构设计与分析[D]. 厦门:厦门理工学院,2020.
- [16] 刘元强. 纯电动汽车电池包结构设计及特性研究[D]. 南京:东南大学,2016.
- [17] 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. GB/T 31467.3—2015 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 [S]. 北京:中国标准出版社,2015.

(下转第10页)

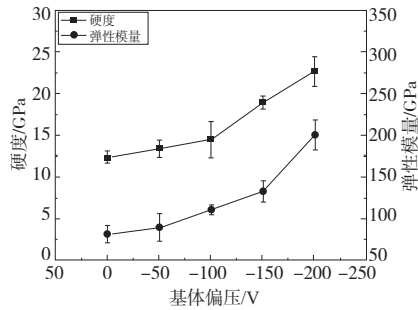


图5 基体偏压对 DLC 薄膜硬度和弹性模量影响曲线

膜内应力增大,不利于薄膜与基体结合性能的提升<sup>[9]</sup>。

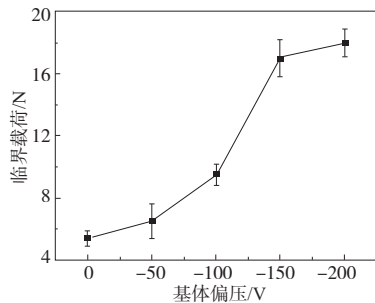


图6 基体偏压对 DLC 薄膜临界载荷影响曲线

### 3 结语

1)随着基体偏压的增大,DLC 薄膜表面缺陷减少,结构更加致密,表面愈发平整,表面粗糙度逐渐降低。

2)不同基体偏压下,DLC 薄膜截面形貌完好,界面结合紧密,无缺陷,沉积速率随基体偏压的升高先上升后降低。

3) Raman 光谱拟合结果表明,随着基体偏压的增大,DLC 薄膜  $I_D/I_G$  值持续下降,G 峰向低波数方向移动,并逐渐宽化, $sp^2$  杂化键键角紊乱程度增加,薄膜中  $sp^3$  键含量上升。

4) DLC 薄膜硬度和弹性模量均随基体偏压的上升而增大,相应薄膜临界载荷也呈上升趋势,但当基体偏压为  $-200\text{ V}$  时,上升趋势明显下降,说明基体偏压过高时不利于膜基结合性能的提升。

#### 参考文献:

- [1] 严彬. 镍铬铁合金 UNS N06600 材料换热器腐蚀原因分析[J]. 机械制造与自动化,2019,48(6):78-81.
- [2] ROBERTSON J. Diamond-like amorphous carbon[J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2002, 37(4/5/6):129-281.
- [3] NIE C Y, ZHENG D Z, GU L, et al. Comparison of interface mechanics characteristics of DLC coating deposited on bearing steel and ceramics[J]. Applied Surface Science, 2014, 317:188-197.
- [4] 苟成学,王顺花,尚伦霖,等. 类金刚石薄膜在腐蚀介质中的摩擦磨损行为研究[J]. 表面技术,2019,48(10):172-179.
- [5] 刘长鑫,李璐璐,王少峰,等. 偏压对 DLC 薄膜结构及摩擦学性能的影响[J]. 表面技术,2020,49(3):141-147,161.
- [6] CAI J B, WANG X L, BAI W Q, et al. Bias-graded deposition and tribological properties of Ti - contained a - C gradient composite film on Ti6Al4V alloy[J]. Applied Surface Science, 2013, 279:450-457.
- [7] 郑晓华,刘涛,杨烁妍,等. 磁控溅射 WS<sub>2</sub>/W/DLC/W 多层膜的微观结构及摩擦学性能[J]. 稀有金属材料与工程,2020,49(4):1295-1300.
- [8] 左潇,孙丽丽,汪爱英,等. 高功率脉冲磁控溅射制备非晶碳薄膜研究进展[J]. 表面技术,2019,48(9):53-63.
- [9] 陈青云,施凯敏,苏敏华,等. 类金刚石膜研究进展[J]. 材料工程,2017,45(3):119-128.

收稿日期:2020-12-10

#### (上接第6页)

- [18] 兰凤崇,陈元,周云郊,等. 轻质多材料动力电池箱体选材与优化[J]. 吉林大学学报(工学版),2020,50(4):1227-1234.
- [19] 李奎坤,余万铨,贺东方,等. 纯电动汽车动力电池箱体结构与轻量化设计[J]. 塑料工业,2020,48(8):91-95.
- [20] 曹妍妍,赵登峰. 有限元模态分析理论及其应用[J]. 机械工程与自动化,2007(1):73-74.
- [21] 上海汽车集团. 电池包力学仿真分析要求[Z]. 上海:上海汽车集团,2017.
- [22] 孙海明. 纯电动汽车铝合金电池箱结构优化设计[J]. 电源技术,2020,44(6):891-895.
- [23] 姜高松. 某纯电动汽车电池箱结构设计分析及优化[D]. 长沙:湖南大学,2016.
- [24] 季鑫盛,刘宁宁,杨超,等. 电动汽车动力电池箱模态分析及结构优化[J]. 轻工机械,2020,38(3):83-86,91.
- [25] HARTMANN M, ROSCHITZ M, KHALIL Z. Enhanced battery pack for electric vehicle: noise reduction and increased stiffness[J]. Materials Science Forum, 2013, 765:818-822.
- [26] 陈雨,陈南,张宁,等. 考虑精确电池单元体动力学建模的电动汽车动力电池包振动分析[J]. 噪声与振动控制,2018,38(增刊1):19-23.

- [27] 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.
- [28] 刘家员. 某新能源车电池包有限元分析与优化[D]. 锦州:辽宁工业大学,2018.
- [29] KUKREJA J, NGUYEN T, SIEGMUND T, et al. Crash analysis of a conceptual electric vehicle with a damage tolerant battery pack[J]. Extreme Mechanics Letters, 2016, 9:371-378.
- [30] 孙健. 基于 CFD 热分析的动力电池包结构优化设计[D]. 长沙:湖南大学,2020.
- [31] 万长东,任慧中,鲁春艳,等. 锂离子动力电池包液冷散热分析与优化[J]. 机床与液压,2021,49(4):160-163.
- [32] 闵小滕,唐志国,高钦,等. 基于微小通道波形扁管的圆柱电池液冷模组散热特性[J]. 浙江大学学报(工学版),2019,53(3):463-469.
- [33] 李秋芬. 车用动力电池包的散热仿真分析[D]. 广州:华南理工大学,2016.
- [34] MAHAMUD R, PARK C. Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature uniformity[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(13):5685-5696.

收稿日期:2021-11-29