

DOI: 10.3901/JME.2022.14.252

# 新能源汽车动力电池“机械滥用-热失控”及其安全防控技术综述\*

山彤欣<sup>1</sup> 王震坡<sup>1</sup> 洪吉超<sup>2,3</sup> 曲昌辉<sup>1</sup> 张景涵<sup>1</sup> 周洋捷<sup>1</sup> 侯岩凯<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学电动车辆国家工程实验室 北京 100081;

2. 北京科技大学机械工程学院 北京 100083;

3. 北京科技大学顺德研究生院 佛山 528000)

**摘要:** 动力电池热失控是电池故障和失效的终极形式,也是制约新能源汽车大规模推广和应用的主要行业痛点。对动力电池机械滥用失效形式及其引发的热失控特性、机理与防控技术进行全面综述,并指出当前研究中存在的局限性。通过总结归纳典型车辆事故案例和机械滥用热失控防控措施,提出结合实车运行数据复现历史运行工况的研究思路,并提出“故障-冒烟-漏气-起火-爆炸”的动力电池热失控五级演化风险评估模型,通过热失控特征参数指标临界阈值的判定和识别进行机械滥用热失控的预测预警,并根据事故特征采取相应措施抑制热失控的触发和扩散。研究内容和结果对新能源汽车动力电池系统及整车安全性设计具有重要指导意义与推广应用价值。

**关键词:** 新能源汽车; 动力电池; 机械滥用; 热失控; 风险评估; 防控技术

**中图分类号:** TM912

## Overview of “Mechanical Abuse-thermal Runaway” of Electric Vehicle Power Battery and Its Safety Prevention and Control Technology

SHAN Tongxin<sup>1</sup> WANG Zhenpo<sup>1</sup> HONG Jichao<sup>2,3</sup> QU Changhui<sup>1</sup> ZHANG Jinghan<sup>1</sup>  
ZHOU Yangjie<sup>1</sup> HOU Yankai<sup>1</sup>

(1. National Engineering Laboratory for Electric Vehicles, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;

2. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083;

3. Shunde Graduate School, University of Science and Technology Beijing, Foshan 528000)

**Abstract:** Thermal runaway is the ultimate form of battery fault and failure, and it is also a major industry pain point that restricts the large-scale promotion and application of electric vehicles. A comprehensive overview of the different mechanical abuse forms of power batteries and characteristics, mechanisms and prevention technologies of thermal runaway caused by mechanical abuse is given, pointing out the limitations of current research. By summarizing typical vehicle accidents and mechanical prevention technologies, a research idea of reproducing historical operating conditions by real-world vehicle operating data is proposed, and a five-level evolutionary risk assessment model for thermal runaway of power battery of "fault-smoke-leak-fire-explosion" is put forward. This model uses the judgment and identification of critical thresholds of thermal runaway characteristic parameters to predict and give the early warning of mechanical abuse and thermal runaway. Then corresponding measures will be taken to suppress the triggering and spread of thermal runaway based on accident characteristics, which has important guiding significance and promotion application value for new energy vehicle power battery system and vehicle safety design.

**Key words:** electric vehicles; power battery; mechanical abuse; thermal runaway; risk assessment; prevention and control

## 0 前言

环境污染和能源短缺已经成为当前工业生产

和日常生活都必须面临的问题,人们一直在积极寻找各种途径来缓解这一情况并试图从根源上寻找解决对策。在这一需求的推动下,与传统燃油汽车相比具有明显节能减排效果的新能源汽车迅速发展,对其高水平研发和大众化普及的需求也日益迫切。《“十三五”国家战略性新兴产业发

\* 国家自然科学基金(52107220, 5207120585)和中国博士后科学基金(2021M690353)资助项目。20210525 收到初稿, 20220122 收到修改稿

展规划》强调,要把握全球能源变革发展趋势和我国产业绿色转型发展要求推动新能源汽车、新能源等成为支柱产业<sup>[1]</sup>。2019 年 12 月 3 日,工信部对《新能源汽车产业发展规划(2021—2035 年)》(征求意见稿)公开征求意见,提出了深化三纵三横的研发布局,将 2025 年新能源汽车的销量占比提高到 25%<sup>[2]</sup>。根据公安部统计数据显示,截至 2019 年底,全国新能源汽车保有量达 381 万辆,与 2018 年底相比,增加 120 万辆,增长 46.05%。其中,纯电动汽车保有量 310 万辆,占新能源汽车总量的 81.19%<sup>[3]</sup>,说明纯电动汽车是新能源汽车的销量主力。

锂离子电池由于其能量密度高、无记忆效应、使用寿命长、循环次数多等优点,目前已被广泛使用于电动汽车的能源系统中。但是,在车辆行驶过程中复杂多变的工况下,由于单体能量密度高、车载环境热非线性强、使用工况复杂、影响因素多变等,锂离子电池安全稳定性能较差,存在发生热失控事故的隐患。电池在某些滥用条件下,温度大幅上升,在临界温度时,会触发一系列链式反应,这些反应导致电池温度进一步升高,从而加速了反应的动力性。这种在电池内发生的灾难性自加速衰退现象即电池的热失控。热失控发生的直接原因是温度升高导致电池过热,在电池实际应用工况中,存在机械滥用、电滥用和热滥用三种诱因<sup>[4]</sup>,且不同触发形式之间存在转化关系。根据新能源汽车国家大数据联盟《新能源汽车国家监管平台大数据安全监管成果报告》公布,自 2019 年 5 月起,2019 年共发现 79 起新能源汽车安全事故,涉及车辆 96 辆。根据公开报道不完全统计,2020 上半年国内共发生电动汽车起火事故 20 起,涉及车辆数目 28 辆。电动汽车的安全性问题尚未得到有效解决,成为电动汽车推广和普及道路上的一大阻力。

针对锂离子动力电池热失控这一热点和难点问题,目前国内外学者通过开展不同层级、不同触发方式的试验与建模进行了大量研究。清华大学的 FENG 等<sup>[5-6]</sup>对锂离子动力电池的热失控特性和机理开展了大量研究,对动力电池系统热失控建模与国内外电动汽车安全技术标准的制定提供了重要技术支撑。中国科学技术大学王青松教授课题组<sup>[7-9]</sup>通过试验探究对热滥用下电池热失控产热理论、燃烧行为及火灾传播机制进行分析建模,作为热失控风险事故评估的理论基础。北京理工大学 ZHU 等<sup>[10-12]</sup>以过充电为触发方式,

提取了电池热失控过程的关键参数并建立不同材料体系电池热失控风险评价策略。美国橡树岭国家试验室的 WANG 等<sup>[13]</sup>对机械滥用导致的锂离子动力电池热失控行为特性进行了探究,表明高荷电状态(SOC > 80%)的电池更容易发生热失控。这些方法和结论为提升锂离子动力电池系统热安全性具有重要指导意义,但是现有研究都是在试验室条件下开展,对电动汽车在实际行驶过程中的潜在滥用工况模拟较少。

在电动汽车行驶过程中,车辆碰撞是引发热失控事故的主要诱因之一。新能源汽车国家大数据联盟在 2019 年发布的《新能源汽车国家监管平台大数据安全监管成果报告》显示<sup>[14]</sup>,电动汽车在行驶过程中起火概率最高,其根源除电池本身问题外,主要起源于车辆碰撞。根据特斯拉发布的车辆起火统计数据,全球范围内特斯拉 S/X 系列电动车在多个不同地区由于碰撞导致起火等热失控事故有 20 起。说明在实车行驶过程中,机械滥用是触发动力电池发生热失控并导致整车安全事故的主要形式。因此,对新能源汽车动力电池机械滥用触发的热安全问题特性和机理进行探究并提出针对性的热失控防控措施,对提高动力电池系统安全性,解决新能源汽车潜在安全隐患具有重要意义。因此,为全面地了解车辆行驶过程中由于机械碰撞导致的潜在热失控风险,并对此类问题的防控提供解决思路,本文对近年来由机械原因导致的典型电动汽车事故进行了归纳,总结出机械滥用的主要触发形式;在研究大量国内外相关文献的基础上,针对不同形式机械滥用导致热失控的机理和特性进行了详细说明。其次,详尽地讨论了现有关于动力电池机械热安全问题的研究方法和思路,并对目前取得的进展和局限性进行了分析;在此基础上,对现有实际应用中动力电池机械滥用引发的热安全问题防控技术进行了总结,并从多个角度提出对未来实际工程应用具有指导意义的防控方法。结合现有研究成果与大数据分析技术针对动力电池热失控特征演化过程,提出“故障-漏气-冒烟-起火-爆炸”五级风险评估模型,探讨了多角度融合下电池机械滥用-热失控防控策略。对新能源汽车动力电池机械滥用-热失控预测预警研究和安全性设计优化具有重要意义。

## 1 新能源汽车机械滥用事故分析

根据中国汽车技术研究中心提供数据显示<sup>[15]</sup>:2011 年至 2018 年 9 月间,我国发生的电动乘用车

车事故达 80 多例,其中 35%是由电池内部短路引发的;16%则是在充电过程中出现的,比如过度充电;18%为机械外力因素的影响,如碰撞;还有 3%为进水;剩下的则是由不明原因造成的。

如图 1 所示,对近 5 年发生的事故进行故障统计分析,在涉及电动汽车实际使用工况的交通事故中,动力电池系统受损是导致热失控事故发生的重要因素。

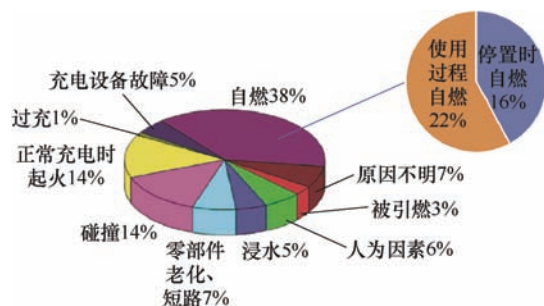


图 1 近 5 年来电动汽车热安全事故因素统计

表 1 列出了 2012 年至 2020 年上半年国内外部分电动汽车出现的碰撞事故及故障原因说明(仅列举了引起较大社会关注的严重事故,实际电动汽车碰撞引发事故数量比统计结果多)。

电动汽车的电池通常都置于底盘处,如果车辆底部电池包被硬物撞击后可能导致电池受损而漏液,或车辆发生剧烈撞击导致电池受损并短路,进而产生的高热量引燃电解液形成高温明火,最终发生起火事件;随着温度升高反应进程加剧,电池内泄漏的可燃性气体在明火的作用下还极有可能发生爆炸等现象,极大地提升了电动汽车热失控事故的危害性,将对乘员造成不可预估的损伤。

因此对机械滥用条件下车载锂离子电池的热失控特性和机理进行分析,并寻找有效的措施进行防控,对电动汽车的应用与普及具有重要价值。

表 1 2012 至 2020 上半年典型新能源汽车碰撞安全事故

序号	时间	地点	事故车型	事故描述	事故原因
1	2012.05	深圳	比亚迪 E6	某日产跑车高速撞上同向行驶的电动出租车,出租车起火	高速撞击导致电池变形起火
2	2013.10	西雅图	特斯拉 Model S	与道路上金属物体相撞,车辆着火并严重受损	金属块冲击电池模块导致起火
3	2013.11	田纳西州	特斯拉 Model S	特斯拉 Model S 底盘撞上了路上的拖杆,导致起火	路面的拖杆刺穿电池导致起火
4	2015.11	深圳	比亚迪 E6	面包车追尾撞上比亚迪电动出租车,相撞部位随即起火	碰撞挤压变形,短路起火
5	2016.10	临沂	知豆 D2	正常行驶中,汽车底盘碰到下水道口铁网	电池机械变形,短路自燃
6	2017.06	山东	特斯拉 Model S	碰撞护栏后起火	碰撞护栏后起火爆炸
7	2018.05	佛罗里达州	特斯拉 Model S	车辆高速撞墙后立即起火	高速撞击导致电池变形起火
8	2018.05	瑞士	特斯拉 Model S	车辆撞上中央隔离带,车辆翻转、起火	电池受到激烈地碰撞起火
9	2018.09	福州	比亚迪 E6	撞上路边护栏后自燃	电池受到挤压变形,短路自燃
10	2019.04	西安	蔚来新能源 ES8	停放在充电桩旁的车辆自燃	底盘遭受过严重撞击,导致动力电池包变形自燃
11	2020.05	深圳	依维柯物流车	两车发生追尾碰撞,导致追尾的电动货车着火	底盘电池包受到挤压起火,火势扩大导致浓烟

## 2 机械滥用热失控特性和机理

分析车辆碰撞导致动力电池系统受损从而引发的典型电动汽车热失控事故,可以看出在外力作用下导致破坏性变形和位移是机械滥用的两个常见特征<sup>[5]</sup>。根据机械变形的程度,即电池壳体是否因机械变形过大而破裂,将车辆碰撞过程中电池发生的

典型机械滥用分为挤压和穿刺两种。两种失效形式及其主要影响因素分别如图 2 所示。在锂离子电池的一些强制性测试标准中(SAE J2464—2009<sup>[16]</sup>, GB 38031—2020<sup>[17]</sup>等)对挤压和穿刺都有明确的规定。由于试验室条件下,对电池的穿刺热失控的研究通过不同材料和形状的刺针进行针刺的形式实现,下文会涉及“穿刺”和“针刺”两个术语,对于与试验探究相关内容将使用“针刺”来进行描述。

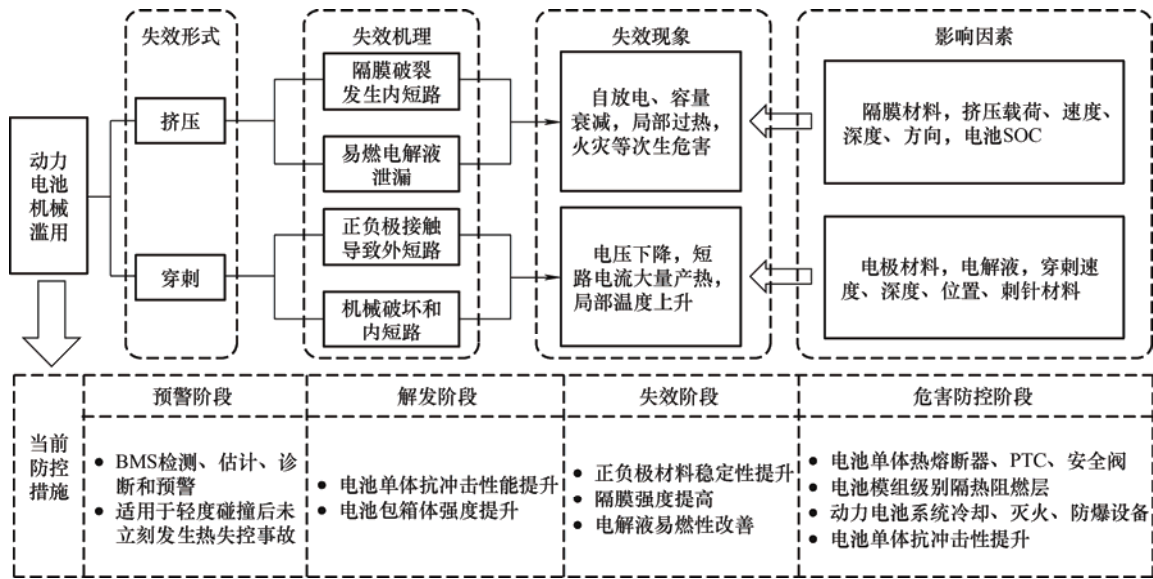


图2 机械滥用-热失控失效形式、特征、影响因素及防控方法

(注：以上所列影响因素如隔膜材料、电极材料、电解液等，并非只针对单一机械滥用形式，实际上对其他形式的失效过程也存在影响，本文只讨论对每种失效形式影响最显著的因素)

## 2.1 挤压热失控

### 2.1.1 挤压热失控发生及其影响因素

#### 2.1.1.1 挤压热失控触发特性

车辆发生碰撞时电池系统会受到机械外力造成的挤压，试验室条件下用挤压模拟此类情况下发生大规模点状微短路时动力电池的性能。

挤压分为平板挤压、圆柱形挤压和球体挤压<sup>[18]</sup>。电池热失控反应的进行遵循链式反应机制，即在机械滥用条件下会引发电池变形导致内部短路从而发生电滥用，短路释放大量的焦耳热导致电池过热发生热滥用，高温加剧了隔膜等电池组分结构破坏，同时进一步加速电池内部电化学反应速率，并导致电解液气化、内部结构分解、燃烧等一系列副反应，最终使得电池失效发生热失控，如图3所示。

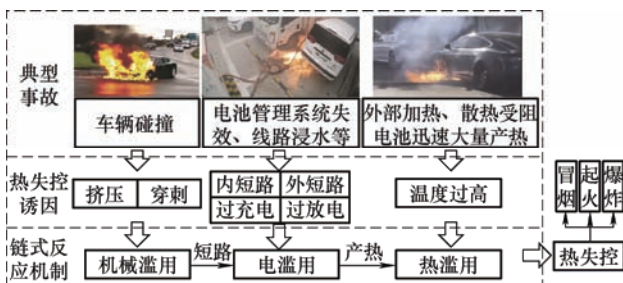


图3 热失控诱因及机械-电-热链式反应机制

动力电池受到挤压时产生机械变形导致热失控发生的原因主要有两点，一种是电池内部隔膜被挤破导致正负极接触，极板之间发生内短路<sup>[19]</sup>；另一种是电池内部的易燃电解液泄漏，并造成次生危害。

除了制造缺陷和过充滥用以外，动力电池受到外力挤压发生机械变形是导致内短路的常见原因，并且具有更大的偶然性。

锂离子电池内短路发生时，通常会导致电池发生自放电、容量衰减等失效现象，进而引发局部热失控，造成严重的安全事故。图4为18650电池在挤压测试过程中典型的电压和力随时间变化曲线，其中B点是电压开始下降的点，A、C点分别是电压开始下降之前和之后的点(如图4b所示，为便于显示该三点的电压变化，调整坐标轴对该处进行局部放大)。分别在A、B、C点处停止挤压并对三次试验后的电池电压进行测试，结果表明电压下降标志着电池内部短路的发生。载荷增大引发电池内短路，电压出现明显下降。根据电池内部的构造，内短路可分为四种模式，分别是正极集流体与负极集流体短路，负极集流体与正极材料短路，正极集流体与负极材料短路，负极材料与正极材料短路<sup>[20]</sup>。

内短路会产生大电流放电，使电池内部迅速聚集大量的热量。研究表明，对于正极材料为LiCoO<sub>2</sub>的18650电池，当电池内部温度达到90~120℃时，电极表面的SEI (Solid electrolyte interphase)开始分解产热，接下来电池的温度持续上升，嵌入负极的锂开始与电解液发生反应，温度上升到140℃后隔膜溶解开始吸热，温度出现小幅度降低，但产热反应仍在进行，当内部温度达到180℃以上时，正极材料和电解液相继发生分解并释放气体，这个过程会使得电池内部迅速鼓胀或者泄压阀打开，最终当



温度出现快速上升时引发热失控<sup>[21-22]</sup>。随着温度的上升电池内部化学反应的进程如图 5 所示。

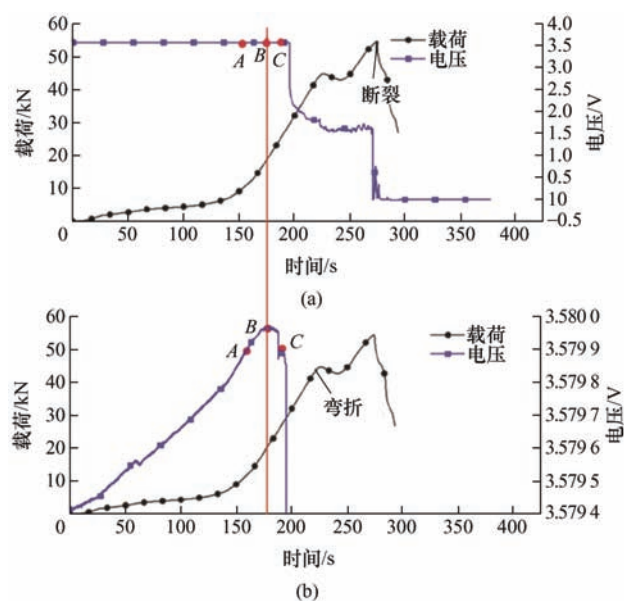


图 4 18650 锂电池挤压测试典型电压、载荷-时间曲线  
(修改自文献[19])

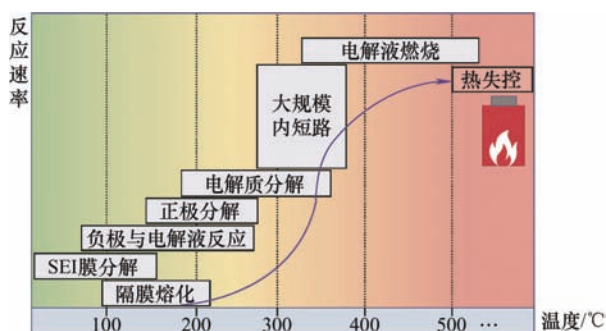


图 5 电池热失控内部反应进程

### 2.1.1.2 挤压热失控影响因素

(1) 隔膜材料。由于挤压导致隔膜破裂是引发动力电池内短路的直接原因, 因此隔膜材料对挤压时热失控发生具有重要影响。隔膜的拉伸方向分为机械拉伸方向(Machine direction, MD); 垂直于机械的方向(Transverse direction, TD); 对角方向(Diagonal direction, DD)。聚烯烃多孔隔膜的 3 个拉伸方向中, TD 方向是抗拉能力最弱的方向<sup>[18]</sup>。研究表明, 氧化铝/聚乙烯(Polyethylene, PE)/氧化铝双面陶瓷隔膜与其他隔膜相比, 在 TD 方向的抗机械应力最大, 更有利于电池安全性能提高<sup>[23]</sup>。由于氧化铝/聚乙烯(PE)/氧化铝双面陶瓷隔膜的结构为两面涂敷氧化铝陶瓷层的聚乙烯膜, 陶瓷层内氧化铝纳米粒子和黏结剂的相互作用, 使含氧化铝陶瓷层的隔膜抗形变能力更强, 抗机械应力越大, 电池安全性越高。

(2) 挤压载荷和速度。除了电池本身的材料特性外, 挤压载荷、加压速度、挤压深度、挤压方向、受力面积和电池荷电状态(State of charge, SOC)等也会对电池热失控的触发存在影响。KISTERS 等<sup>[24]</sup>通过动态压痕荷载试验对电芯局部受挤压时, 挤压速度、挤压力、电芯内短路时的特征进行研究, 结果表明挤压速度从 0.01 mm/s 升高至 5 000 mm/s 时, 电池产生内短路所需的临界挤压力是原来的 2 倍, 但内短路触发起点对应的挤压深度变化不大。当保持恒速挤压时, 随着挤压速度增加, 达到热失控临界位移的时间越短。

(3) 挤压深度。当动力电池受到撞击时, 由于电池包壳体的保护作用, 轻微的挤压不会造成严重的热安全事故, 当挤压达到一定深度时, 才可能导致电池内部发生短路。WANG 等<sup>[25]</sup>的研究表明, 当挤压深度达到一定程度时, 随着极片与隔膜不断滑动, 隔膜横向张力达到临界点, 隔膜发生大量点状破裂, 电池发生内短路, 热量积聚触发热失控。

(4) 挤压方向。在实际交通事故中, 电动汽车可能受到的碰撞形式具有极大偶然性, 动力电池也会受到来自不同方向的载荷作用, 导致隔膜、电极片不规则破裂的方式和程度不同, 不同形状的电池受到的挤压变形也会有所不同。许万等<sup>[26]</sup>研究结果表明, 垂直于极片平面方向对外部机械力的承受力最强, 平行于极片方向对外部机械力承受能力最弱, 主要破裂点是靠近电芯负极的边缘位置。这为电池包内电芯的位置排布提供了参考依据。在拉力测试中<sup>[27]</sup>, 拉伸位移相同时, 正极片需要的拉力最大, 其次是负极片, 隔膜所需拉力最小。当不同方向施压和拉伸, 极片和隔膜的断裂先后及程度不同, 对内部结构的失效机理影响很大。兰凤崇等<sup>[28]</sup>对方形磷酸铁锂电池建立了有限元模型, 对其在平面挤压和局部压痕载荷下电池的变形响应进行了数值分析, 并对结果进行了试验验证, 结果表明: 电池在两种不同载荷下的破坏机理不同导致相同电量情况下两种工况下电池的温升不同, 局部压痕工况下, 局部的挤压变形导致了内部短路, 产生的热量聚集在电池内无法得到及时释放, 所以电池的温升比平面挤压要高, 因此局部挤压载荷作用下电池发生热失控的风险更高。

(5) 电池 SOC。关于锂离子电池 SOC 对其机械完整性的影响, XU 等<sup>[29]</sup>建立了耦合应变率效应和 SOC 相关性的 18650 锂离子电池数值模型, 发现在机械加载时, 不同 SOC 的电池单体呈现出不同的机械特性, 通过对电池反作用力和最大应力值的分析, 从机械角度看, 碰撞情况下电池 SOC 值越高越不安

全。关于此类因素的探究对动力电池的设计和提升整车热安全性具有重要参考价值。

对锂离子动力电池挤压热失控的主要影响因素及其具体作用形式进行归纳总结, 如表 2 所示。

表 2 挤压热失控影响因素及其作用形式

序号	影响因素	作用形式
1	隔膜材料	氧化铝/聚乙烯(PE, Polyethylene)/氧化铝双面陶瓷材料在 TD 方向的抗机械应力最大, 有利于电池安全性能提高
2	挤压载荷和加载速度	挤压速度增大, 内短路所需的临界载荷增大, 但内短路触发起点对应的挤压深度变化不大 恒速挤压时, 挤压速度越大, 达到热失控临界位移的时间越短
3	挤压深度	挤压深度越大, 隔膜破裂越多, 越易发生热失控
4	挤压方向	垂直于极片平面方向对外部机械力的承受力最强, 反之最弱, 主要破裂点是靠近电芯负极的边缘位置 不同方向施压和拉伸, 极片和隔膜的断裂顺序及程度不同; 局部挤压更易发生热失控
5	电池 SOC	SOC 越高, 热失控风险越大

### 2.1.2 挤压热失控研究方法

根据挤压力在电池上加载方式的不同, 将现有对动力电池挤压作用与机械完整性和热安全性的研究分为准静态载荷和动态载荷这两种工况下电池的响应特性和机理两类, 图 6 为分别从不同角度、针对不同加载工况对挤压热失控进行的典型研究结果。

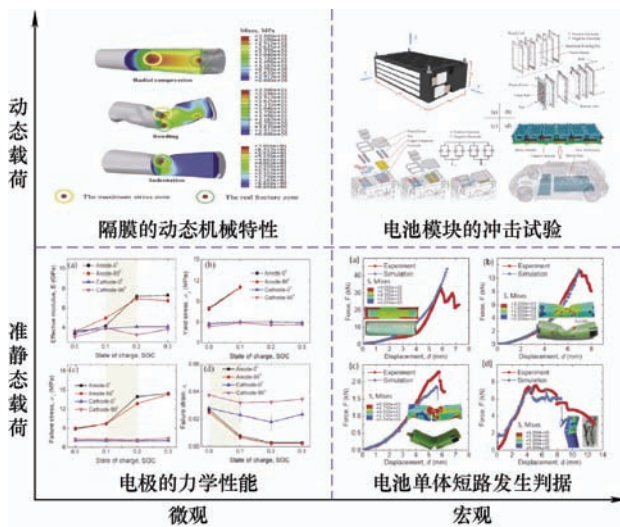


图 6 不同加载方式和层级的典型挤压热失控研究结果  
(修改自文献[35, 37, 45-47])

#### 2.1.2.1 准静态载荷研究

目前已有大量在准静态加载工况下对电池进行的试验和建模研究, 并取得了丰富的研究成果。LAI 等<sup>[30]</sup>通过对典型电池进行压缩测试研究了磷酸铁锂电池的力学性能, 发现锂离子电池可以通过各向异性泡沫或多孔材料来进行建模。SAHRAEI 和 WIERZBICKI 等<sup>[31-32]</sup>进行了多种电池单体的准静态力学试验, 并建立了电池卷芯的各向同性的均质化等效材料模型, 能够较准确地预测准静态特定加载工况下的电池破坏。考虑电池受载对内部结构的影响, 初步建立了准静态机械加载响应和电池内短路的关联性模型, 并指出机械加载条件下, 在隔膜材

料破损发生内短路之前, 锂离子动力电池能够承受较大的变形量<sup>[33-34]</sup>。XU 等<sup>[35]</sup>对三种不同类型的 18650 锂离子电池进行加载试验, 研究了荷电状态和健康状态耦合效应对锂离子电池在机械滥用下电化学失效的影响。LIU 等<sup>[36]</sup>采用试验与仿真分析相结合的方式, 研究了不同荷电状态电池在压痕试验中电压、温度、载荷三者对应的变化关系, 并描述了短路后电池发生的复杂电化学反应。WANG 等<sup>[37]</sup>在试验的基础之上, 通过数值模拟的方式建立了电池的计算模型, 该模型可以较好地描述电池的变形和短路, 并根据隔膜失效建立了电池发生短路的判据。ZHU 等<sup>[38]</sup>对 18650 锂离子单体电池在轴向压缩下的安全性能进行了研究, 发现轴向压缩试验中电池在变形量达到 4 mm 时会发生短路。范文杰等<sup>[39]</sup>以 18650 锂离子电池为研究对象, 分别从径向和轴向对不同荷电状态的单体电池进行压缩加载试验, 研究了锂离子电池在载荷作用过程中的力学响应、电压变化、温度变化以及失效破坏模式。结果表明, 荷电状态、加载速度以及加载方向的不同都会对锂离子电池的安全性能产生一定的影响。ZHANG<sup>[40-41]</sup>通过将机械应力与位移/变形耦合来模拟机械滥用, 开发了准静态挤压工况锂离子电池单体的机-电-热耦合模型, 使用有限元方法在商业软件 LS-DYNA 中计算了机械变形, 然后使用变形的网格细化电和热方程以提高精度, 其分析表明, 局部挤压变形和破裂的差异导致单体电压和温度变化有明显差异。

除了对电池单体进行的宏观试验和建模研究外, 也有学者从微观层面对电极材料以及集流体等的力学特性进行研究, 分析荷电状态对电动力学性能的影响并建立考虑应变率和各向异性效应的电极本构模型对电池可能引发的短路问题进行探究<sup>[42]</sup>。但上述建模研究仅在电池的准静态载荷下进行研究, 而与实际碰撞工况更为贴合的动态加载模型并

未涉及,且缺乏对电池及电池组的动态冲击试验验证。在机械变形与内短路关联性方面,也需要考虑机-电-热耦合作用机制,评估大变形碰撞条件下动力电池内短路甚至热失控的危害程度。

### 2.1.2.2 动态载荷研究

准静态载荷多用于试验室条件下对动力电池机械热安全问题的机理进行建模研究,而在车辆实际行驶过程中,碰撞发生时车辆和电池系统的受力是一个复杂多变的动态加载过程。因此,为了更准确地对机械滥用条件下动力电池热失控的特征和机理进行探究,应对电池在动态载荷下的失效过程进行试验和建模分析,从而使研究成果对实际工程应用具有更明确的指导意义。

XIA 等<sup>[43]</sup>首次研究了地面撞击对锂离子电池组的破坏效应,建立了整体有限元模型进行参数研究,并为下一步单个电池单元和外壳壳体级别的模型建立提供了有价值的边界和载荷条件,向设计电池组抗地面冲击的保护结构提供了重要线索。XU 等<sup>[44]</sup>提出考虑到锂离子电池复杂且相互影响的机械、电化学和热性质,可以通过力-位移曲线和电压-时间曲线来量化桥接机械行为。在先前准静态力学研究成果和机械强度理论的基础上,提出了新的电池机械完整性准则,考虑电池结构和材料的应变率和惯性效应,结合数值模拟对锂离子电池的动态力学行为进行了研究。结果表明,应力波和惯性效应主导了锂离子电池的失效模式;在冲击速度较低的情况下,失效区域和变形相似,而随着冲击速度的增加,失效区域逐渐远离碰撞点;且冲击点越远、冲击角度越大,则锂离子电池的失效就越容易。接着对不同应变率和环境溶剂耦合作用下锂离子电池隔膜的动态机械特性进行探究<sup>[45]</sup>,揭示了电池力学性能与电化学性能之间的物理关系,为未来研究提供参考。基于此利用 LS-DYNA 建立耦合应变率效应和 SOC 相关性的 18650 锂离子电池数值模型,使其能够准确预测动态机械载荷下锂离子电池的动态响应特性<sup>[28]</sup>,仿真结果表明该锂电池模型与传统模型相比,在预测高 SOC、高碰撞速度的极端情况下电池动态响应时准确率显著提升,从机械角度看,碰撞时电池 SOC 值越高越不安全,在高速碰撞时,加载速度越高,电池电芯反作用力越大。JIA 等<sup>[46]</sup>通过挤压和落锤测试研究了锂离子电池在动态载荷下的机械完整性和电耦合行为,对电池的荷电状态与负载率相关性及其耦合效应以及力响应与电池电行为之间的相互作用进行了探究。结果表明较高的 SOC 和

负载率可提高电池结构的刚度,负载率增强了电池结构的刚性 SOC 效应,较高的负载率导致更快的电压降和更严重的内部短路,这种短路放电过程反过来会影响动态负载中的力响应。该研究为锂离子电池的电气和机械耦合完整性及其碰撞安全设计提供了参考。

针对锂离子电池模组和整车,XIA 等<sup>[47]</sup>利用落锤试验台开展了不同荷电状态下电池模块的冲击试验,试验结果表明电池模组在面内加载工况下具有较高的变形容限,而面外挤压工况是最易引发电池热失控的加载模式。对“平板”型锂离子电池组底板在遭受外物冲击时的力学响应过程进行试验,发现外物入侵后装甲板发生断裂,致使电池组暴露,电池组发生变形,进而引发热失控事故<sup>[43]</sup>。密歇根大学 SUNG 等<sup>[48-50]</sup>对两个中间夹有散热器的软包电池进行了一系列准静态和动态载荷下的宏观应力应变响应测试和仿真,结果表明电池模块在动态载荷下的屈服应力要略高于准静态载荷下的。康华平等<sup>[51]</sup>根据典型汽车碰撞工况,设计了锂离子电池模组在不同加载速度和不同方向下的挤压试验,对锂离子电池模组的复杂力-电特性和失效行为进行分析。结果表明高 SOC 电池模组在发生热失控后更容易起火燃烧,高速冲击工况下电池模组发生内短路时的侵入量比低速工况时小,说明电池模组的损伤容限随着加载速度的提高而降低。电池模组在碰撞工况下的力学特性及安全性具有典型的方向性,同时电池单体堆叠热量积聚会使得模组热失控更严重。对于电池模组和整车的力学行为研究,目前需要迫切解决的问题是如何对高电压和大容量的电池模组可能引发的起火爆炸事故进行防护,而仿真方面需要考虑如何将电池单体的大量信息整合到电池模组和整车的计算模型中。电池模组和整车在机械载荷下的力学响应与电动汽车结构设计密切相关,但此类研究非常昂贵、危险且耗时,所以目前相关的研究仍比较少。

## 2.2 穿刺

### 2.2.1 穿刺热失控发生及其影响因素

#### 2.2.1.1 穿刺热失控触发特性

车辆发生碰撞时,电池系统遭受机械外力除了会发生变形和位移之外,还有可能被异物刺入电池内部而发生穿刺。

在实验室条件下利用针刺试验对穿刺进行模拟,通常是在电池极片垂直方向插入刺针,使正负极片发生内短路,电池的能量通过短路点在短时间内快速释放,导致温度在短时间内急剧升高从而引发热失控<sup>[52]</sup>。



穿刺会同时导致锂离子电池的机械破坏和内短路,与电池受到挤压时相比触发热失控的现象更为剧烈,能准确模拟电池发生内短路的极端情况。穿刺触发电池失效的过程主要是以下三个阶段<sup>[53]</sup>:异物侵入电池导致穿刺,电池电压下降,极大的短路电流使局部产生大量焦耳热;局部温度迅速上升导致热稳定性差的 SEI 膜和负极开始分解放热;温度持续上升,导致正极材料和电解液分解失效放热,从而加剧热量的累积,最终达到最高温度。该过程同样遵循热失控链式反应机制。

YAMAUCHI 等<sup>[54]</sup>解释了具有卷绕式电芯的锂离子电池的针刺试验原理,认为穿刺过程中的热失控程度取决于刺针插入电池之后大短路电流产生的电阻热,产生电阻热的过程将在电池放光电量之后停止。研究表明穿刺过程中存在一个关键温度,如果穿刺造成的放电过程在结束之前电池温度低于该温度,就不会发生进一步的热失控;而如果放电过程结束之前电池温度高于该温度,则发生进一步的热失控。ZAVALLIS 等<sup>[55]</sup>应用多物理场耦合软件 COMSOL Multiphysics 对于某方形电池的穿刺过程进行了 2D 数值模拟。结果表明,锂离子在电解液中的传导能力决定了峰值短路电流,并最终引发电池温度迅速上升。外短路与穿刺过程有所联系,外短路过程的电流约占穿刺过程电流的 3/4。

#### 2.2.1.2 穿刺热失控影响因素

(1) 电池正负极材料。采用不同正负极材料、电解液和隔膜的电池,由于其材料本身的物理和化学性质不同,在发生穿刺时电池的热特性也会存在差异。在常用正极材料中,磷酸铁锂体系与镍钴锰(NCM)、镍钴铝(NCA)等三元体系相比具有更稳定的结构、更低的能量,因此热稳定性更好,热失控相对较难触发<sup>[56]</sup>。三元锂离子电池由于正极材料满电态时热稳定性差,极易引发热失控,且随着镍含量增高,正极材料的放热反应焓变增大,理论容量增大,正极材料在热失控时释放的热量越多<sup>[57]</sup>。常用的负极材料为硅基负极材料、石墨、钛酸锂,其中钛酸锂为稳定的尖晶石结构,正常使用过程中结构应变小,作为锂离子电池负极材料,具有理论容量低和电导率低的特点,热力学稳定性最佳。由于  $\text{Li}_7\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  快速放电时形成  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  后,内阻增大,短路电流减小,产热量减少,因此能有效抑制热失控触发<sup>[58]</sup>。受晶体结构影响,不同材料放热焓变各不相同,这对材料的热力学稳定性有非常大的影响。在正负极材料体系中,正极磷酸铁锂和负极钛酸锂体系电池具有较高安全性。

(2) 电解液。此外,电解液的稳定性在电池被

穿刺时也对热安全性存在一定影响。高桂红等<sup>[59]</sup>采用常规电解液和含有安全添加剂的电解液对 18650 圆柱电池体系电解液的安全性能进行研究。研究结果显示,针刺测试时安全电解液不起火、不爆炸,最高温度为 109 °C;常规电解液起火燃烧,最高温度超过 350 °C。YAN 等<sup>[60]</sup>采用  $\text{CN}(\text{CH}_2)_2\text{Si}(\text{CH}_3)(\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OCH}_3)_2$  (BNS)作为添加剂对易燃电解液溶剂进行改性,同样使三元锂和石墨体系电池的热安全性和电化学稳定性得到很大提升。当针刺测试时,电池表面温度骤升时间延迟,热失控的最高温度大幅降低。安全电解液添加剂的使用能提高电解液闪点和热稳定性,并能降低溶剂的挥发,降低胀气的发生,对针刺触发电池热失控抑制作用明显。

(3) 穿刺速度。除了电池材料本身的特性会对穿刺发生时的热稳定性产生影响外,采用不同的穿刺方式时,由于穿刺速度、穿刺深度、穿刺位置以及穿刺物材料的差异也会热失控效应产生影响。刘仕强等<sup>[61]</sup>依次采用不同的穿刺速度对圆柱电池进行针刺试验,穿刺开始后电压迅速下降触发热失控,随着穿刺速度增大,最终电压和温度无明显变化。结果表明穿刺速度在一定范围内对穿刺触发电池热失控结果有一定影响,但速度增大到达一定范围后对结果影响不大。ICHIMURA<sup>[62]</sup>在 IEC (International Electro technical Commission, 国际电工委员会) 针刺标准范围内(0.01~0.1 mm/s),对穿刺速度的影响研究发现,随着穿刺速度增大,热失控风险降低,当穿刺速度增大到一定范围时,穿刺速度对热失控影响不大。当穿刺速度越小,钢针和极片的接触内阻越大,单位时间内产热越多,穿刺点温度越高,热失控风险更大。

(4) 穿刺深度。MAO 等<sup>[63]</sup>分别对不同穿刺深度和贯穿的工况进行测试,结果表明随着穿刺深度增加,电池发生热失控且最高温度增加,达到最高温度耗时减小。但随着穿刺深度的进一步增加,电池表面最高温度反而出现下降。穿透深度越深,导致内部短路区域越大,产生的焦耳热越多;但由于钢钉具有较高的导热系数,所以散热量也随着钉入深度的增加而增加,因此穿刺深度和表面温升程度受产热和散热两因素的共同作用。

(5) 穿刺位置。除了穿刺速度和深度,MALEKI 等<sup>[64]</sup>认为内短路效应是一个能量集中释放并引起电池温度显著升高的过程,且和电池形状与内短路或穿刺发生的位置有关。因为在电极边缘位置散热相对较差,所以此处发生的内短路/穿刺是最危险的。此外,电池在热失控过程中产生大量气体,当防



爆阀开启时,内部气体会沿一定路径向外排气泄压,并释放大热量。穿刺位置对电池的内短路形式、温升速率、泄气方向等均有很大影响<sup>[18]</sup>。FINEGAN 等<sup>[65]</sup>对典型 18650 电池进行了 4 个不同方向的针刺试验,试验发现穿刺位置选择顶部、底部垂直于电池方向时电池表面温度最高,穿刺点选择水平方向中部、中上部时测点温度较低。不同穿刺位置的失效机理不同,当水平方向中间位置穿刺时,钢针边缘与极片接触产生热量,活性物质开始分解,迅速引发热失控,接着短路面积增大,短路电流减小,单位时间产热量降低,随后材料分解反应范围扩大,最终上盖破裂,大量气体和活性物质携带巨大热量从顶盖喷出;当底部偏心位置,垂直方向穿刺时,钢针沿极片方向移动导致热失控发生,在钢针推力和内部压力的共同作用下,卷芯向电池顶盖方向移动,气体和活性物质携带大量热量从顶部喷出。从热失控速率角度分析,水平方向刺入时电池的温度较低,但热失控扩散速度很快,更容易在较短时间内引发热失控。这表明热失控扩散主要是受到热量在极片间的扩散速度的影响,

而不是短路点的温度。

(6) 刺针材料。当车辆发生碰撞使动力电池被尖锐物穿刺或者贯穿时,不同材料的穿刺物也会对随后发生的热失控效果产生影响。在试验室条件下,可以用不同材料的刺针来模拟该状况,从而对刺针材料的影响进行探究。MAO 的试验中<sup>[63]</sup>发现由于钢钉具有较高的导热系数,会导致散热量的增加,因此穿刺深度和表面温升程度受产热和散热两因素的共同作用。导体和绝缘体、以及不同材料的导体作为刺针,对穿刺触发电池热失控都将产生相应的影响。ABAZA 等<sup>[52]</sup>分别采用铜、钢、塑料刺针对三元锂离子软包电池进行了贯穿试验,结果表明当穿刺发生时,与钢刺针相比,铜刺针导通正负极片时,瞬间产生的内短路电流更大,产生热量更大,热量传导更快,热失控过程更剧烈。而塑料刺针则不能作为导体导通正负极片,因此产热量大幅减少,热失控风险大幅降低。

对锂离子动力电池穿刺热失控的主要影响因素及其具体作用形式进行归纳总结,如表 3 所示。

表 3 穿刺热失控影响因素及其作用形式

序号	影响因素	作用形式
1	电池正负极材料	正极材料中,磷酸铁锂体系比三元体系具有更稳定的结构,且镍含量越高越不稳定 在负极材料中,钛酸锂热稳定性最佳
2	电解液	安全电解液添加剂的使用能提高电解液闪点和热稳定性,对针刺触发电池热失控抑制作用明显
3	穿刺速度	穿刺速度增大,热失控风险降低;当穿刺速度增大到一定程度时,对热失控影响不大
4	穿刺深度	在一定范围内,穿刺深度增加,电池热失控最高温度增大,达到最高温度耗时减小 深度进一步增加时,若刺针导热系数较高导致散热量增加,最高温度可能下降
5	穿刺位置	电极边缘位置散热较差,穿刺时热失控风险更高;不同位置发生穿刺时电池失效机理不同
6	刺针材料	与钢刺针相比,铜刺针穿刺瞬间产生的内短路电流更大,热失控过程更剧烈 塑料刺针则不能作为导体,产热量大幅减少,热失控风险降低

### 2.2.2 穿刺作用下热失控研究方法

在动力电池安全性测试的多项标准中,都对穿刺试验有明确的规定。现有对电池穿刺热失控特性和机理的研究主要通过试验和仿真建模的方法来实现,图 7 为不同方法针对不同电池层级进行穿刺热失控的典型研究结果。

#### 2.2.2.1 试验研究

锂离子电池的穿刺现在伴随着复杂的电化学反应,实验室条件下通常采用穿刺试验对其热失控触发的现象、特征和机理进行探究,并在此基础上实现对电池的电化学热耦合建模。

CHIU 等<sup>[66]</sup>结合电化学模型和热失控方程建立了锂离子动力电池穿刺电化学模型,能够精确地预测电池发生短路时电池内部的质量和电荷输运情况,并描述了电池的温度分布特征。HATCHARD 等<sup>[67]</sup>使用尖端带有热电偶的针来进行针刺试验,进

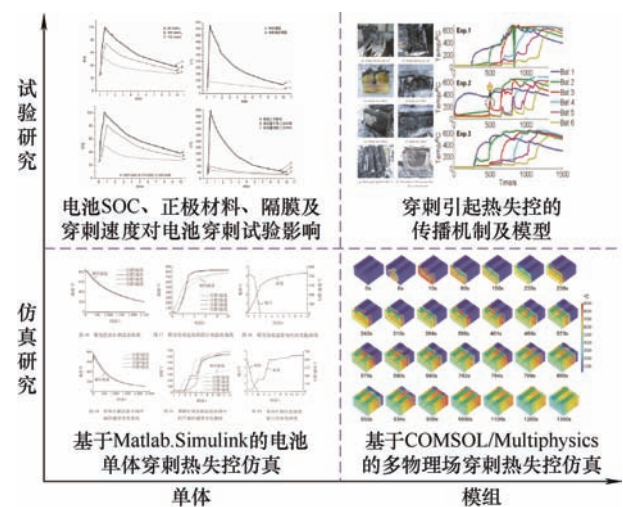


图 7 不同研究方法和层级的典型穿刺热失控研究结果  
(修改自文献[71, 73, 76, 79])

而对穿刺点温度电压变化进行了精准的探测。ZHAO 等<sup>[68]</sup>提出了一种用于探究大规模锂离子电池穿刺过程的 3D 多尺度电化学热耦合模型，参数分析的结果表明热响应和电化学反应之间存在强耦合关系，热行为在很大程度上也会受到短路电阻、针刺半径、穿刺方式和电池容量的影响。ZHAO 等<sup>[69]</sup>对锂离子电池进行了试验探究，优化了研究穿刺热滥用的电化学热耦合模型，并对穿刺过程中相关变量进行了对比研究，给出了防止穿刺发生热失控的相应方法。LIU 等<sup>[70]</sup>基于 3D 机械模型、一维电池模型和短路模型提出了一种综合计算方法，该方法考虑了电池的机械、电化学和热耦合行为，能够对穿刺问题进行更高效安全的探究。张海林等<sup>[71]</sup>搭建了锂离子动力电池的针刺试验平台，系统研究了在穿刺滥用条件下，电池的荷电状态、正极活性材料的种类、隔膜的种类以及不同的穿刺速度对电池穿刺试验的影响。FENG 等<sup>[72]</sup>对大型锂离子电池进行了一系列研究，开发了一个集总的热模型用于预测 25 A·h 三元锂离子电池组的热失控。针对热失控在电池模组中的扩散，FENG 等<sup>[73]</sup>通过测试由六个电池组成的大型锂离子电池组，并配备了热电偶和电压测量线，探究了穿刺穿透引起的热失控的传播机制。又为 6 节大型锂离子电池模块建立了 3D 热失控模型<sup>[74]</sup>，以研究由穿刺引起的电池组内部热失控传播行为，并通过经验方程式和等效热阻层对模型进行了简化。

穿刺结果常用研究表征方法主要分为 3 种：一是直接观察法，包括同步辐射技术和肉眼观察法，实时监测电池变化情况；二是间接测试，包括压降测试、电化学阻抗监测；三是热失控仿真模拟<sup>[18]</sup>。目前，同步辐射技术是被公认的较先进表征方法，该法采用超高速运行的 X 射线扫描仪，对电池内部极片、正负极材料、加热产生流体的变化状态进行高精度直接观测以及记录<sup>[75]</sup>。

#### 2.2.2.2 建模研究

除了设计试验进行测试外，为了更好地对锂离子电池热失控进行精准的数值化研究并降低试验成本，可重复性地探究锂离子电池穿刺热失控机理，可利用试验测得的电学和热学物理参数，对由于穿刺导致的电池热失控进程进行数值建模和仿真，并进行试验和模拟仿真结果对比来研究锂电池在热失控下的变化。ZHAO 等<sup>[76]</sup>基于电池内、外短路试验结果，使用 COMSOL Multiphysics 多物理场耦合仿真建模软件进行数值仿真，提出了一种修正的电化学热耦合模型，该模型结合了穿刺位置的额外热源

并成功地描述出电池的温度变化，能够估算热失控的发生和近似开始时间。谭春华等<sup>[77]</sup>对锂离子电池穿刺热失控进行仿真研究，选取针刺试验方法，并用电热模型对温升过程进行分析，将实测电池热失控温升与模型中温升进行对比，确定失控前期穿刺短路电流大小与温升速度关系。研究发现电池穿刺后未剧烈热失控情况下，温升速度较符合短路电流导致的温升，并对比三种正极材料动力电池穿刺短路电流及温升速度，电池能量密度越高，电池穿刺温升越快。FENG 等<sup>[73]</sup>基于针刺试验的内部温度场分布的测试结果，对于穿刺诱发热失控的过程进行了 3D 仿真建模。李顶根等<sup>[78]</sup>针对锂离子动力电池在穿刺滥用热失控情况下热量来源与变化规律不清楚的问题，提出了基于环形测温方法的热失控模拟方案。建立锂离子动力电池穿刺滥用热模型，通过对比研究各环形区域产热及温度变化曲线，分析其热量来源，并探究不同穿刺半径对穿刺点放热率和电池温度变化的影响。结果表明，在穿刺热滥用情况下电池发生热失控，热量主要来源于内部活性材料在高温下发生分解所释放的巨大能量；在一定范围内穿刺半径越小，穿刺点放热率越大，电池温度上升越高。除了应用 COMSOL 软件进行电池穿刺作用下热失控机理及过程的建模和数值仿真之外，张明轩等<sup>[79]</sup>通过混合脉冲能力特性试验、热箱加热热失控试验和基于已有模型，在 Matlab/Simulink 搭建了描述穿刺热失控过程的集总参数模型，并进行了试验。穿刺模型的预测结果得到了针刺试验的证实，为后续的研究和系统开发奠定了基础。

在新的国家标准 GB 38031—2020《电动汽车用动力蓄电池安全要求》<sup>[17]</sup>取消了单体电池的针刺测试，但增加了电池包的热失控扩展测试，其中触发电池热失控的方法为针刺和加热。由于穿刺是电动汽车发生碰撞时常常会出现的一种机械滥用形式，且针刺试验作为一种能快速引发电池剧烈热失控现象发生的触发方式，在未来的研究中依旧会作为探究车载动力电池模组、系统的热安全性及热失控蔓延的一种重要手段。

### 3 动力电池机械滥用安全防控措施

针对动力电池在车载环境下成组的不同层级，从电池内部、外部，以及主动和被动角度的分别出发，根据机械滥用热失控的失效形式、特性和机理，总结归纳动力电池系统机械滥用-热失控的防控技术，表 4 对现有防控措施的特点及应用进行了归纳说明。

表 4 车载动力电池机械滥用现有防控措施对比

层级	对象	具体方法	优点	缺点	参考文献	
电池单体	正极材料	材料体系	三元体系能量密度高，但磷酸铁锂体系结构和热特性更稳定	工艺复杂，为加工生产过程带来困难	文献[80]	
		表面涂层	提高容量保持率和热稳定性，简便易行		文献[82-85]	
		元素替换	保证电池比容，提高热稳定性		文献[86]	
	负极材料	原子层沉积 (ALD)	简单有效地改善材料完整性，利于电化性能稳定性	增加加工生产流程中的步骤和成本	文献[87]	
		新型材料	晶体结构更稳定、比容量更大	还处于研究阶段	文献[88-89]	
	电解质溶液	易燃溶剂、锂盐改性	经济有效，应用广泛	增加成本	文献[90-93]	
		安全添加剂	阻燃效果和氧化稳定性好	会损失电化性能	文献[85-87]	
		固体电解质	热稳定性好，有效阻碍内短路	功率密度低，离子电导率低，有待进一步研究	文献[97- 98]	
	隔膜	表面改性: 涂覆、浸涂、喷涂、复合	简单易行，效果明显，目前主流研究方向	增加工艺流程和成本	文献[101-104]	
		新型材料	从根源上有效提高动力电池安全性	尚在研究中	文献[105]	
		新加工工艺	对提升隔膜性能有一定影响		文献[106-107]	
	其他设备	熔断器	应用最为普遍	无法早期预警，热失控发生后防控效果有限，存在失效的可能性	文献[108]	
		PTC 关断层	有效防止短路		文献[109]	
		安全阀	简单易行，能有效防止爆炸		文献[110]	
模组和整包	隔热层	单体之间、电池包和客舱间隔热	简洁有效，直接抑制不同层级热失控扩展，已投入实际应用	效果有限	文献[111-114]	
		复合导热层	抑制热失控扩展的同时有效散热，实现热管理系统的基本功能	引起电池组比能量密度下降，造成电池系统设计成本上升	文献[115-117]	
	箱体设计	缓冲吸能层、加强筋结构、双层防护板	简单易实现	效果有限，存在失效可能性	文献[118-121]	
		复合材料、喷覆涂层	利于整车轻量化设计，提高电池包能量密度和整车续航里程		文献[122]	
		PUW 防爆阀、爆燃板	结构简单		文献[123-124]	
		灭火设备	有效减少二次伤害		文献[123]	
系统和整车	电池系统热管理	风冷	简单便捷、成本较低	冷却效果有限	文献[125-126]	
		液冷	冷却效果更好	存在内部漏液可能，对密封设计要求更高，重量较大，不利于系统的轻量化设计，占用体积较大，结构设计较为复杂	文献[127-128]	
		相变材料冷却	能够有效抑制电池模组的温度升高并改善温度一致性	成本增加，不利于系统的轻量化设计	文献[129-130]	
	BMS	热管冷却	导热能力超过任何已知金属	结构设计较复杂	在纯电动汽车动力电池组中应用较少	文献[131-134]
		电池外部参数检测	直观明了，保证电池在正常范围内工作	难以表明电池系统潜在故障	文献[135]	
		电池状态估计	可以对潜在故障进行分析	对系统级别内多个单体的实时估计较难实现	文献[136-140]	
		故障诊断和事故预警	实现对整个系统的高级安全管理	现有研究大多基于试验室条件下的算法或模型，未运用于工程实际中，在实车应用中的效果尚待验证	文献[141-145]	

3.1 电池单体

3.1.1 正负极材料

锂离子电池使用不同的正负极材料体系时，会

具有不同的热稳定性，因此在电池材料选择时在满足能量密度和轻量化的前提下，应尽可能保证动力电池具有更稳定的结构，使热失控相对不易触发。

在常见的锂离子电池正极材料中,磷酸铁锂体系比含镍的三元体系具有更稳定的结构和热特性<sup>[80]</sup>。但为了满足电动汽车续航里程的需求,使电池具有更高的能量密度,目前工业应用的主要发展方向是高镍的三元锂电池。因此需要对正极材料改性进行研究,来尽可能提高电池的安全性。表面涂层是提高正极材料稳定性的一个重要途径。研究表明,一些化学稳定性较好的化合物如  $\text{ZrO}_2$ <sup>[82]</sup>、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ <sup>[83]</sup>等包覆三元锂离子电池正极材料可以提高其电化学性能和热稳定性。还有研究中采用不活泼金属单质如银<sup>[84]</sup>和碳<sup>[85]</sup>对正极材料进行包覆来提高它的容量保持率和热稳定性。除此之外,元素替换能够改变晶体结构稳定性,也是提高正极材料稳定性的一个有效途径。研究表明<sup>[86]</sup>研究了用 Ni 和 Al 代替 Co 的正极材料的性能,替代后的电池显示出良好的热稳定性,并且比容与 NCM 比例为 1:1:1 的电池相似。

对电池负极材料热稳定性的研究主要集中在 SEI 膜的形成及其稳定性方面。在电化学沉积过程中,负极材料极易与液态电解液发生副反应,形成不稳定的固液电解质界面层即 SEI,从而产生枝晶,刺穿隔膜,降低电池的库伦效率和寿命。因此,稳定的 SEI 层是减缓枝晶生长,提高负极性能的关键因素之一。目前对负极材料改性的研究主要是原子层沉积(Atomic layer deposition, ALD),在电极表面包覆超薄纳米薄膜来修饰电极表面,研究表明这种方法简单、有效。通过原子层沉积包覆可有效地改善电极材料的完整性,所包覆的薄膜可作为阻挡层来抑制电极材料与电解液在充放电过程中发生的副反应,同时薄膜也作为稳定的 SEI 膜,有利于电化学性能的稳定性,并且不会对锂离子的传输产生阻挡<sup>[87]</sup>。除此之外,晶体结构更稳定、比容量更大的新型负极材料诸如  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  和合金化阳极也一直在探究之中<sup>[88-89]</sup>。

### 3.1.2 电解液

电解质溶液的化学特性在机械滥用发生时会对电池的热安全特性产生影响。电解液安全改性主要分为易燃溶剂改性、锂盐改性、安全添加剂的使用。对溶剂的改性通常是对氟代溶剂和离子液体的研究。通常使用的氟代溶剂是氟代酯和氟代醚,具有较高的闪点甚至无闪点,因此使用氟代溶剂有利于抑制电解液的燃烧。ARAI<sup>[90]</sup>研究发现三氟代碳酸丙烯酯(TFPC)分别与氯代碳酸乙烯酯(CIEC)、碳酸乙烯酯(EC)、碳酸丙烯酯(PC)组成的二元混合溶剂具有较高闪点,可以代替链型碳酸酯以获得较好的放

电容量和循环寿命。离子液体是在室温及相邻温度下完全由离子组成的有机液体物质,具有电导率高、液态范围宽、不挥发和不燃等特性,将其作为溶剂,将有希望得到理想的高安全性电解液<sup>[91]</sup>。锂盐的研究主要以硼元素为中心的阴离子基团和磺酰亚胺根离子等材料为主,如双草酸硼酸锂(LiBOB)、双氟磺酰亚胺锂(LiFSI)等<sup>[92-93]</sup>。电解质中的添加剂主要分为有机磷化物、有机氟代化合物、卤代烷基磷酸酯等<sup>[94]</sup>。在常规电解液中加入阻燃添加剂获得的阻燃电解液是目前解决锂离子电池安全性最经济有效的措施,在实际的工业生产中的得到广泛的应用。WANG 等<sup>[95]</sup>研究了含磷酸三甲酯(TMP)电解液的燃烧性能和电化学稳定性,发现 TMP 本身有很好的阻燃效果和氧化稳定性,但是在石墨负极的还原稳定性较差,因此阻燃作用会损失一定的电化学性能。YAO 等<sup>[96]</sup>研究了亚磷酸三甲基酯(TMPI)和 TMP 对电解液的阻燃作用和电化学性能的影响,试验发现对于等量的 TMPI 和 TMP,前者在提高电解液的阻燃性同时,还能改善正极半电池的电化学性能。

除了对电解质溶液成分改性进行研究,使用固体电解质代替锂离子电池电解质中易燃的有机溶剂,在具有良好的热稳定性的同时,还可以作为阻碍内短路的天然屏障,能够有效提高锂离子电池的安全性。固体电解质包括聚合物固体电解质和无机固体电解质。聚合物电解质可分为两种:凝胶型聚合物电解质现已成功用于商品化锂离子电池中,但它对电池安全性的改善非常有限;干态聚合物电解质由于不像凝胶型聚合物电解质那样包含液态易燃的有机增塑剂,所以在抑制漏液、气体蒸发压强和燃烧等方面具有更好的安全性<sup>[97]</sup>。全固态聚合物电解质的应用使锂离子电池中不再有易燃液体,目前被认为是解决电池安全问题的最终方法之一。但在批量化应用于大规模锂离子电池之前,仍然需要解决一些缺陷,包括功率密度低,离子电导率低等<sup>[98]</sup>。目前的干态聚合物电解质尚不能满足锂离子电池的应用要求,仍需要进一步的研究才有望得到广泛应用。

### 3.1.3 隔膜

机械滥用导致隔膜直接破裂或者因温度过高而熔断是引发动力电池内短路的直接原因,因此隔膜材料是影响机械热失控发生的重要因素。在锂离子电池中,隔膜在为锂离子提供通道从而实现充放电功能和倍率性能的同时,将电池的正负极隔开,避免其直接接触引发内短路,为电池提供安全保障。锂离子电池隔膜必须具有突出的绝缘性、机械强度、



化学稳定性、电化学稳定性和热稳定性。由于车载动力电池具有更高的能量密度和充放电倍率,也对隔膜的性能提出了更高的要求,具有更好的受热稳定性、电化学稳定性、抗穿刺抗短路性能;更低的收缩率;更好的一致性,包括厚度、孔径和孔径分布等;理想的孔隙率和孔隙结构;更强的吸液能力和较小的电阻等<sup>[99]</sup>。目前提升隔膜安全性的措施,主要依赖于提高热稳定性,可通过表面改性、涂覆、开发新材料体系、采用新加工工艺等方式实现<sup>[100]</sup>。在单层聚烯烃隔膜上加入或者复合具有无机粒子<sup>[101]</sup>、有机树脂<sup>[102]</sup>或有机/无机混合材料<sup>[103]</sup>等亲液性能、耐高温性能等特性的材料,以获得性能更加优异的复合隔膜,是制备高性能隔膜的一大研究方向。目前常用的工艺包括涂覆、浸涂、喷涂、复合等,如在聚烯烃类基膜上涂覆无机陶瓷颗粒而制备出聚烯烃-陶瓷复合膜,能有效提高隔膜的高温热稳定性<sup>[104]</sup>。除了目前占据主要市场份额的聚烯烃类隔膜外,对新型材料体系的隔膜也进行了大量研究,主要材料有:含氟聚合物类隔膜(PVDF)、纤维素类隔膜、聚酰亚胺(PI)类隔膜、聚酯(PET)类隔膜及其它聚合物-陶瓷复合隔膜等。此外还有超高分子量聚乙烯(UHMWPE)隔膜被认为是能提高动力电池安全性能的一类新型耐高温聚合物隔膜<sup>[105]</sup>。除了材料体系的不断探究,用于工业化生产制备隔膜的新型工艺方法对于提升隔膜的性能也有相应的影响。常规制备聚烯烃隔膜的方法是干法和湿法,此外在新型隔膜的研发中,涂布法<sup>[106]</sup>、静电纺丝技术<sup>[107]</sup>也发挥着重要作用。

### 3.1.4 热熔断器及其他

当动力电池在机械滥用条件下发生内短路时,电池内部会通过极大的电流而产生大量的热,进一步引发更严重的热安全事故。因此在电池内部设置热熔断器,当电流超过规定值时以其自身产生的热量使熔体熔化,从而使电路断开。熔断器广泛应用于高低压配电系统和控制系统以及用电设备中,作为短路和过电流的保护器,是应用最普遍的保护器件之一<sup>[108]</sup>。此外,动力电池的设计中已经整合了自复位装置,例如陶瓷 PTC(Positive temperature coefficient)/导电聚合物材料,在过流和过热的情况下,电池会切断电芯连接,并在温度降低时恢复原状<sup>[4]</sup>。MA<sup>[109]</sup>通过在电池连接之间设置 PTC 关断层,以有效防止发生短路事件。除此之外,方形电池和 18650 电池壳体上通常都设有安全阀,当电池发生热失控时,安全阀在压力达到预设值时打开实现排气泄压,以避免电池内部压力过大导致爆炸等更严

重的事故<sup>[110]</sup>。

## 3.2 电池模组和整包

### 3.2.1 隔热层

电动汽车的动力电池系统由许多个电池单体先串联或并联成为模组,再组合成电池包。在实际碰撞等机械性安全事故发生时,通常是某一个电池单体在极限条件下先发生热失控,接着传递到周围单体甚至扩展到整包,因此阻断热失控在电池包中的蔓延能够在事故发生后有效遏制其恶化,避免造成二次危害等更严重的后果。在相邻电池单体和模组之间设置隔热层,能够起到直接抑制热失控扩展的效果,固体隔热层需要具有低热导系数,且能在热失控发生时的高温条件下工作。特斯拉公司在防止热失控传播的策略上已经拥有了多项专利并已投入实际应用中,通过电池表面上的膨胀材料<sup>[111]</sup>,电池包中的隔热板<sup>[112]</sup>以及电池系统和客舱之间的多层隔热板<sup>[113]</sup>,实现不同层级的热失控阻隔措施。还通过由耐热材料制成的刚性电池箱来将电池分开,从而降低电池之间的热导率<sup>[114]</sup>。此外,通过将隔热屏障和电池包冷却方法相结合,在限制电池之间的热传递的同时将产生的热量传递到电池包之外<sup>[115]</sup>;这种将隔热层和散热措施相结合的方案,能够显著解决设置隔热层而导致的电池包散热能力下降的问题,在隔热和散热性能之间取得较好的平衡。此外对于该问题,也可通过隔热层和散热层结合组成复合导热层来解决<sup>[116]</sup>。MUNIZ<sup>[117]</sup>将绝热体和导热体组合在一起,绝热体用于隔热,抑制热失控扩展的发生,而导热体用于散热,实现热管理系统的基本功能。但增加隔热层也会引起电池组比能量密度下降,造成电池系统设计成本上升等问题,因此还需要进一步的研究。

### 3.2.2 箱体设计

电池单体成组后通过统一的边界和外界相联系,这些模组再通过同一个箱体封装成整包,构成电动汽车的核心能源系统。因此在动力电池系统的设计时,电池包箱体是将动力电池与外界直接隔开的屏障,其结构和强度也是影响整个系统机械热安全性的重要因素。为了保证电池模组及电路设备和电子电气附件的安全,要求电池包箱体具有一定的机械强度和结构设计来保证抗冲击、抗碰撞和抗挤压性能,并保证抗振动的耐久可靠性能。对动力电池包箱体的安全性设计可以从两个角度来考虑:首先,在潜在的碰撞事故发生时尽可能保护内部电池不受到更严重的伤害从而引发热失控;其次,当热失控发生后尽可能避免事故危害进一步扩大,尽量

减轻对乘员及整车的威胁。

针对电池包箱体受到撞击时的机械热安全性进行冲击和穿刺防控设计, 可以通过对箱体的设计实现碰撞过程中的缓冲吸能, 减轻危害程度。在电池包箱体易碰撞侧面上设置缓冲吸能层和加强筋结构, 使得在车辆发生碰撞时能够减小电池受到的冲击力度, 并加固电池箱体侧面, 增加了防撞系数, 提高电池在受到猛烈撞击时的安全性和可靠性<sup>[118]</sup>。RAWLINSON 等<sup>[119]</sup>开发了一种用于车辆能量吸收和分配侧面碰撞系统, 其中所述系统利用电池组外壳, 包括电池组底部防护板, 从铝合金、泡沫铝和钢构成的材料组中推荐使用双层防护板和泡沫夹层板芯, 提高电池组的耐冲击性能。ZHU 等<sup>[120]</sup>在此基础上, 提出了电池组结构的四种设计, 包括三种增强型防护板和一种增强型外壳箱, 用来评估电池组防护性能, 结果表明, 抗爆自适应板 BRAS(Blast resistant adaptive sandwich)结构设计是减少电池单体变形最有效的结构, 与传统电池箱结构相比, 它由多层板组成, 能有效吸收冲击时受到的能量, 可以避免屈曲并提供稳定的阻力, 从而提高电池包结构耐撞性。TARTAGLIA<sup>[121]</sup>发明了一种用坚固材料制成的电池箱, 并将电源接口端子和电子设备固定在箱壁内。通过优化加强电池箱的结构, 来预防潜在的机械滥用。

为了满足强度和刚度的要求, 电池包箱体的材料除了常见的钢、铝等之外, 也逐渐采用碳纤维等新型复合材料。碳纤维增强复合材料具有优异的力学性能, 具备高比强度、高模量、耐腐蚀、耐疲劳、抗蠕变、良好的设计性和可大面积整体成形等特点, 可以在保证结构和密封性能不降低的前提下, 进一步实现下壳体的轻量化设计, 提高电池包能量密度和整车续航里程<sup>[122]</sup>。除了对新型复合材料的探究, 还可通过在电池包箱体表明喷覆涂层来加强现有材料电池包箱体的安全性。使用涂层技术, 在箱体上喷覆由高分子聚合物和功能性树脂化合物高压混合而成的结构增强涂层来提高其抗冲击性能和热稳定性。结构增强涂层是一种集塑料、橡胶、涂料、玻璃钢之大成的高分子新材料, 能够实现对结构的快速强化和超强韧保护, 具有高抗冲击性、高拉伸强度、高伸长率, 以及卓越的耐磨损、抗老化、防化学腐蚀性能等特性。当热失控导致大量气体和热泄漏时, 电池箱短时间内只发生鼓包而不会迅速破裂, 为乘员争取宝贵的逃离时间。

除了改善电池包箱体的结构和材料, 也可在电池包箱体上设计排气泄压阀和灭火设施, 在热失控

发生后及时释放或扑灭密封箱体内的能量, 避免压强和温度过高造成爆炸等极端现象。电动汽车动力电池包的泄压阀, 又叫防爆阀, 安装在电池包箱体上, 当箱体内部压强发生变化时, 可以维持箱体内外压力平衡, 从而起到防爆和降低爆破损害的效果。防爆阀结构简单, 通常由钢制焊接筒体和防爆阀片组成。当系统压力大于预先设定的压力值时, 防爆阀片自行破裂, 防止系统发生爆炸, 以保证系统和人身安全。目前新能源汽车广泛使用的一种防爆阀是 PUW 防爆阀, 与传统防爆阀相比同时兼具防水透气功能。除此之外, 还可以在电池包内设置灭火措施, 当温度过高甚至出现电火花时, 及时释放灭火材料, 避免二次伤害。CATL 公司发明了一种用于电池包的灭火工具包<sup>[123]</sup>, 其中包括一个用于灭火和降低温度的水基灭火器以及一个用于防止触电事故的水容器。除了这些措施外, 在 Fluence 公司采用的 Cube 储能设计中, 如果爆炸性气体积聚, 为避免其水平向外爆炸导致人员伤亡, 使用“爆燃板”将爆炸力向上引导到电池储能系统之外<sup>[124]</sup>。目前爆燃板现在已成为储能系统电池机柜的标准配置。

### 3.3 系统和整车

#### 3.3.1 电池系统热管理设计

动力电池热管理系统, 用于通过加热或冷却措施, 使锂离子电池在适宜的温度范围内工作。此外, 在热失控事故发生的早期阶段, 通过采取相应的冷却措施抑制温度持续上升并进行有效散热, 阻止电池包内热失控进程的加剧。根据导热介质的不同, 将现有动力电池热管理系统散热分为四大类: 风冷、液冷、相变材料冷却和热管冷却。

风冷散热利用了排风扇强制空气的流通带走电池包内的热量, 是最简单便捷、成本较低的一种热管理措施。风冷散热的效果主要与电池的封装、排布及空气流速有关。为了减轻电池包内的温度不一致, MAHAMUD 和 PARK<sup>[125]</sup>提出了一种往复式空气流热管理方法, 能够在 120 s 内将温度差降低 4 °C (72%)。风冷散热避免了电池包内出现漏液的可能, 但电池壁面之间换热系数低, 冷却速度慢。PESARAN 等<sup>[126]</sup>认为风冷散热可能仅适合于并联式混合动力汽车, 而纯电动汽车和串联式混合动力汽车需要更好的传热介质。

随着乘用车 IP67 要求的落实与特斯拉有关车型的示范效应<sup>[127]</sup>, 单独的风冷已经基本不再使用, 液冷散热成为新能源汽车散热系统设计的研究重点。液冷散热方式通过在电池模块间布置管线或围绕模块布置夹套, 或者把电池沉浸在液体中, 液体

与外界进行热交换来散热。导热液体可以采用水、乙二醇、油或者制冷剂,液冷散热的效果与液体导热率、流动速度以及液冷管道在电池内部排布有关。JERRETT 和 KIM<sup>[128]</sup>基于计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)仿真和数值优化技术对蛇形通道冷却板进行了优化,通过改善通道的几何形状,提高了在通道的压降,平均温度和电池组的温度均匀性方面的冷却性能。液冷散热电池壁面之间换热系数高,冷却效果好,但存在电池系统内部漏液可能,对密封设计提出更高的要求,重量相对较大,不利于动力电池系统的轻量化设计,占用体积也较大,结构设计也较为复杂。

除了使用单一的风冷散热或液冷散热方式外,现在也出现了一些研究,通过利用相变材料(Phase change material, PCM)在液相或固相变化过程中将吸收或释放的巨大潜热来进行动力电池热管理。AL HALLAJ 和 SELMAN<sup>[129]</sup>利用相变材料设计了电池热管理系统并使用有限元模型对其效果进行测试,结果表明基于 PCM 的电池温度管理系统能够有效地抑制电池模组的温度升高并改善温度一致性。SABBAH 等<sup>[130]</sup>建立了数值模型来模拟 PCM-石墨复合基质的散热效果,仿真结果表明基于 PCM 的冷却方式在正常和压力条件下均具有更好的性能。

此外,热管散热在电池热管理系统中应用也愈发广泛。热管是一种具有高的导热率的高效散热器件,它的蒸发段和冷却段之间温度沿轴向的分布是均匀和基本相等的。热管散热充分利用了热传导原理与相变介质的快速热传递性质,透过热管将发热物体的热量迅速传递到热源外,其导热能力超过任何已知金属的导热能力。热管散热的效果由材料的导热性和体积内的有效面积决定的。

SWANEPOEL<sup>[131]</sup>提出使用脉冲热管(Pulsating heat pipe, PHP)来对混合动力汽车中的电池组进行散热,研究发现热管几何形状,流体类型,管道材料,功率输入,填充比和倾角在内的一系列参数对冷却性能有很大影响。TRAN 等<sup>[132]</sup>对用于混合动力汽车电池冷却系统的扁平热管进行了研究。目前热管散热方式已在各种电子设备中得到了广泛的应用,但在纯电动汽车动力电池组中的使用依然较少。热管通常与风冷、液冷或相变材料等冷却方式相结合,来实现及时有效的散热。WENG 等<sup>[133]</sup>和 RAO<sup>[134]</sup>将热管与 PCM 相结合,以提高热流率和热一致性,同时减少风冷风扇的功耗。

### 3.3.2 电池管理系统

除了事故发生后采取相应措施阻断热失控的蔓

延和二次危害外,在动力电池处于滥用工况下及时检测电池的异常参数,对潜在风险进行故障诊断以实现热失控的早期预警,对避免严重的热安全事故具有重要意义。电池管理系统是动力电池系统中保证电池正常工作和安全性的重要模块,一般应具有以下功能:电池组外部参数如电池电流、工作电压和温度的检测、电池状况判断和剩余电量的估计、电池组的充放电控制、电池电量均衡、提供与外部设备通信的功能<sup>[135]</sup>。通过对电池参数的实时检测保证其在正常范围内工作。通过对电池的状态,包括 SOC<sup>[136]</sup>,健康状态(State of health, SOH)<sup>[137]</sup>,能量状态(State of energy, SOE)<sup>[138]</sup>,功率状态(State of power, SOP)<sup>[139]</sup>,以及安全状态(State of safety, SOS)<sup>[140]</sup>等在线进行等状态量的估计,进行热安全管理,并对潜在故障进行分析。

在对实际运行中由于碰撞而引发热失控事故的电动汽车进行分析时,可以发现,由于纯电动汽车的动力电池系统通常布置在车辆底盘的位置,因此在道路上很容易受到外界异物的碰撞甚至穿刺,但在某些情况下,受到撞击后车辆并未立刻出现故障,而是在之后的某一时刻发生安全问题。由于动力电池系统的工况十分复杂多变,尚未立刻出现明显热失控现象特征的车辆也存在极大的风险。因此对潜在故障的诊断和事故早期预警对于电动汽车的使用和乘员的人身安全至关重要。

故障诊断和事故预警是电池管理系统的高级安全功能。故障诊断基于“均值+差异”原理<sup>[141]</sup>,当存在潜在故障的电池单体状态参量偏离平均状态时,通过可疑状态量与平均状态参数之间的差异来评估故障的严重程度。目前主要有基于逻辑和阈值准则的故障诊断和基于模型的故障诊断<sup>[142]</sup>,包括绝缘检测,内、外短路检测等功能。对电池状态参量的估计除了传统安时法、内阻法和线性模型等,更适于模拟电池动态特性的神经网络法和基于状态方程与测量方程的卡尔曼滤波算法也得到了广泛的应用。HONG 等<sup>[143]</sup>基于长短期记忆神经网络的准确电压异常预测对电池系统进行诊断。LIU 等<sup>[144]</sup>对使用自适应扩展卡尔曼滤波器的电动汽车中锂离子电池组的传感器故障检测和隔离进行了探究。LIM 等<sup>[145]</sup>研究了基于衰落卡尔曼滤波器的磷酸铁锂电池供电的电动汽车中的实时充电状态估计,由此对电池安全状态进行了评估。但目前这些研究大多基于实验室条件下的算法或模型,还未运用于工程实际中,其在实车应用中的效果尚待验证。

## 4 展望

综合以上研究途径和现状的不足, 针对电池热失控触发到风险与灾害演变的全过程, 基于“故障-漏气-冒烟-起火-爆炸”的五级特征演化规律提出多维度热失控五级风险评估模型。

新能源汽车国家大数据平台有实时监控电动汽车全生命周期下电池参数、电动汽车运行状态的优势, 利用大数据平台提供的事故车辆的真实数据, 基于实车运行监测结果, 对车辆行驶过程中的数据进行分析, 挖掘机械滥用导致热失控与各种参数的耦合关系, 提取车辆发生事故时刻及全生命周期的各项参数特征, 对实车运行工况下由碰撞诱发热失控事故的机理和特性进行探究, 为真实车载环境下动力电池系统热失控故障诊断、预警及提高整车系统的热安全性设计提供了理论基础, 并对此类事故的针对性防护具有指导意义。

在实车大数据的基础上, 结合试验和多物理场数值仿真等方法进行多个维度的探究, 针对热失控过程的行为特性和机理, 提出多维度动力电池机械滥用-热失控五级风险评估模型, 如图 8 所示。

根据实车数据获得到的参数特征, 与试验观测到的热失控行为和响应特性进行相互验证, 从而提取典型特征现象及其表征参数, 并判断其临界阈值,

作为热失控过程的特征指标。

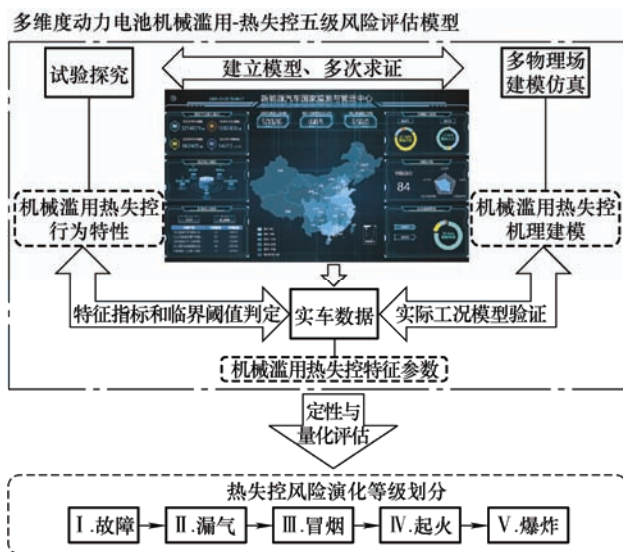


图 8 机械滥用-热失控五级风险评估模型的建立

基于试验结果, 对“故障-冒烟-漏气-起火-爆炸”每个阶段现象发生的机理、特性与特征参数变化进行提取, 提出相应的量化指标与故障检测方法, 通过实车与试验数据结合探究各个指标的临界阈值, 从而实现对热失控事故的早期预测预警; 针对每种现象伴随发生的潜在危害, 分别从热失控触发、事故抑制和危害防控三个阶段出发, 采取相应的安全措施, 尽可能减小热失控事故的危害, 如图 9 所示。

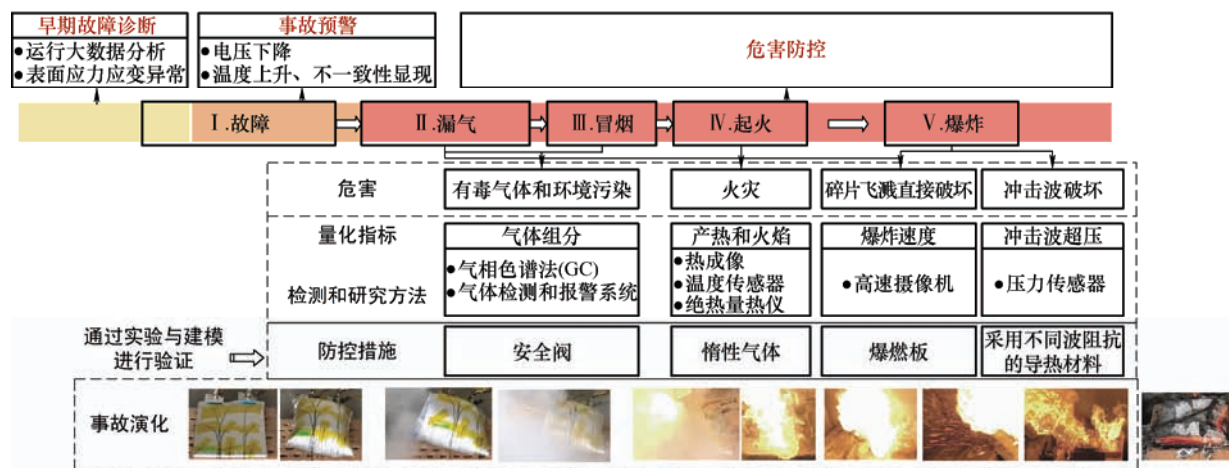


图 9 基于事故特征的机械滥用-热失控防控策略

在对爆炸这一热失控极端形式进行探究时, 基于爆炸物理学理论从能量释放速率和能量释放深度的不同角度对电池热失控事故对整车及乘员的风险与危害进行分级量化评估, 进一步指导动力电池系统热失控预警与防控系统的建立, 作为电池包热管理措施和安全防护结构设计的重要参考。

若试验结果与实车数据吻合, 则说明试验数据

的参考价值, 在研究建模时则可以在试验室条件下获得更理想的数据, 并通过控制变量法对热失控过程的影响因素进行研究, 使所得结论更加真实可靠。基于理想试验数据, 通过多物理场仿真软件进行数值模拟, 对热失控的机理进行耦合建模, 实现对机械滥用-热失控过程从响应特性到机理的定性和定量分析。数值仿真结果和试验结论以及实车数据相



互验证,实现反复多次求证,同时有效降低大规模动力电池的研究成本。

## 5 结论

动力电池系统是电动汽车的核心部件,本文对新能源汽车动力电池的机械滥用-热失控失效形式、机理、特性及其防控措施进行了全面的论述。

(1) 对近年来电动汽车出现的热安全事故进行分析,发现在车辆实际运行过程中,由于碰撞导致的机械滥用工况是触发动力电池热失控事故的主要诱因。其中,动力电池挤压或穿刺是机械滥用的两种典型触发形式。

(2) 现有对挤压热失控的研究主要为准静态载荷和动态载荷这两种不同工况下电池的响应特性和机理,且都在实验室条件下进行,与实车行驶过程中复杂多变的真实工况存在一定差距。对穿刺热失控机理和特性的研究主要通过试验探究和数值仿真来实现,通过建立多物理场耦合模型,对热失控行为及其在模组内的传播路径进行研究。

(3) 对于动力电池机械滥用-热失控的防控措施主要从电池单体、模组、整包、系统及整车多个层面展开,综合微观到宏观各个级别的影响因素,分别从加强动力电池及系统本身的热稳定性和抗冲击性、热失控早期检测和预警以及事故发生后尽可能减小热失控造成的危害这三个角度进行全面考量,保证动力电池系统和整车的机械热安全性。

目前对于动力电池机械故障触发热失控事故相关问题的研究都是在实验室条件下进行,研究结果较为理想化,难以准确复现车辆实际运行工况和碰撞事故发生时的电池响应特性,对碰撞引起电动汽车热安全性的研究缺少相应的模型和算法。因此现有的机械滥用热失控防控措施也存在局限性,其中许多防控策略仅从理论层面进行论证,由于试验周期长、成本高等因素的制约,具体防控技术在实车上的应用效果尚待进一步验证。

因此,提出结合实车运行大数据、试验分析及多物理场建模的多维度动力电池机械滥用-热失控五级风险评估模型,结合不同研究方法的优点对热失控事故触发及演化的全过程进行探究与评估,并基于各级事故特征进行针对性的检测与危害防控。这为动力电池机械滥用-热失控问题的未来研究提出了完整的解决思路。

## 参 考 文 献

- [1] “十三五”国家战略性新兴产业发展规划[J]. 中国产经, 2016(12): 95-96.  
“Thirteenth five-year” National strategic emerging industry development plan[J]. China Industry and Economics, 2016(12): 95-96.
- [2] 明星.《新能源汽车产业发展规划(2021-2035 年)》公开征求意见[J]. 中关村, 2020(1): 1.  
MING Xing. “New Energy Automobile Industry Development Plan(2021-2035)” for public comments[J]. Zhongguancun, 2020(1): 1.
- [3] 公安部: 2019 年底新能源汽车保有量达 381 万辆 [EB/OL]. [2020-01-08]. <https://www.evpartner.com/news/7/detail-49892.html>.  
Ministry of Public Security: The number of new energy vehicles reached 3.81 million by the end of 2019[EB/OL]. [2020-01-08]. <https://www.evpartner.com/news/7/detail-49892.html>.
- [4] ZHANG J, ZHANG L, SUN F, et al. An overview on thermal safety issues of lithium-ion batteries for electric vehicle application[J]. IEEE Access, 2018(6): 23848-23863.
- [5] FENG X, OUYANG M, LIU X, et al. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review[J]. Energy Storage Materials, 2018, 10: 246-267.
- [6] 冯旭宁. 车用锂离子动力电池热失控诱发与扩展机理、建模与防控[D]. 北京: 清华大学, 2016.  
FENG Xuning. Thermal runaway initiation and propagation of lithium-ion traction battery for electric vehicle: Test, modeling and prevention[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [7] PING P, WANG Q, HUANG P, et al. Thermal behaviour analysis of lithium-ion battery at elevated temperature using deconvolution method[J]. Applied Energy, 2014, 129: 261-273.
- [8] HUANG P, CHEN H, VERMA A, et al. Non-dimensional analysis of the criticality of Li-ion battery thermal runaway behavior[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 369: 268-278.
- [9] LIU P, LIU C, YANG K, et al. Thermal runaway and fire behaviors of lithium iron phosphate battery induced by over heating[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 31: 101714.
- [10] ZHU X, WANG Z, WANG C, et al. Overcharge investigation of large format lithium-ion pouch cells with

- Li(Ni<sub>0.6</sub>Co<sub>0.2</sub>Mn<sub>0.2</sub>)O<sub>2</sub> cathode for electric vehicles : Degradation and failure mechanisms[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2018, 165(16): A3613-A3629.
- [11] ZHU X, WANG Z, WANG H, et al. Overcharge investigation of large format lithium-ion pouch cells with Li (Ni<sub>0.6</sub>Co<sub>0.2</sub>Mn<sub>0.2</sub>) O<sub>2</sub> cathode for electric vehicles: Thermal runaway features and safety management method[J]. Energy, 2019(169): 868-880.
- [12] WANG Z, YUAN J, ZHU X, et al. Overcharge-to-thermal-runaway behavior and safety assessment of commercial lithium-ion cells with different cathode materials: A comparison study[J]. Journal of Energy Chemistry, 2021(55): 484-498.
- [13] WANG H, LARA-CURZIO E, et al. Mechanical abuse simulation and thermal runaway risks of large-format Li-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2017(342): 913-920.
- [14] 新能源汽车大数据联盟发布安全报告, 汽车行驶时起火概率最高[EB/OL]. [2019-08-19]. <https://www.diandong.com/news/118286.html>.  
The new energy vehicle big data alliance released a safety report, the highest probability of fire when driving[EB/OL]. [2019-08-19]. <https://www.diandong.com/news/118286.html>.
- [15] 威马起火事件真相浮出, 自燃不安全舆论不成立[EB/OL]. [2020-05-21]. [https://www.sohu.com/a/396730322\\_120432757](https://www.sohu.com/a/396730322_120432757).  
The truth about the fire in Weimar has emerged, and the public opinion on spontaneous combustion is unsafe[EB/OL]. [2020-05-21]. [https://www.sohu.com/a/396730322\\_120432757](https://www.sohu.com/a/396730322_120432757).
- [16] 美国国家标准学会, 美国汽车工程师协会. SAE J2464-2009, 电动和混合动力电动汽车充电储能安全和滥用试验[S]. 美国: 汽车工程师协会, 2009.  
American National Standards Institute, Society of Automotive Engineers. SAE J2464-2009, Electric and hybrid electric vehicle rechargeable energy storage system and safety and abuse testing [S]. USA: SAE International, 2009.
- [17] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 38031-2020 电动汽车用动力蓄电池安全要求 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.  
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 38031-2020 Safety requirements for power batteries for electric vehicles [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [18] 许辉勇, 范亚飞, 张志萍, 等. 针刺和挤压作用下动力电池热失控特性与机理综述[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(4): 1113-1126.  
XU Huiyong, FAN Yafei, ZHANG Zhiping, et al. Summary of the characteristics and mechanism of thermal runaway of power battery under acupuncture and extrusion[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(4): 1113-1126.
- [19] XU J, LIU B, HU D. State of charge dependent mechanical integrity behavior of 18650 lithium-ion batteries[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 1-11.
- [20] SANTHANAGOPALAN S, RAMADASS P, ZHANG J Z. Analysis of internal short-circuit in a lithium ion cell[J]. Journal of Power Sources, 2009, 194(1): 550-557.
- [21] JHU C Y, WANG Y W, SHU C M, et al. Thermal explosion hazards on 18650 lithium ion batteries with a VSP2 adiabatic calorimeter[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 192(1): 99-107.
- [22] JHU C Y, WANG Y W, WEN C Y, et al. Self-reactive rating of thermal runaway hazards on 18650 lithium-ion batteries[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2011, 106(1): 159-163.
- [23] ZHANG X, SAHRAEI E, WANG K. Deformation and failure characteristics of four types of lithium-ion battery separators[J]. Journal of Power Sources, 2016, 327: 693-701.
- [24] KISTERS T, SAHRAEI E, WIERZBICKI T. Dynamic impact tests on lithium-ion cells[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 108: 205-216.
- [25] WANG H, KUMAR A, SIMUNOVIC S, et al. Progressive mechanical indentation of large-format Li-ion cells[J]. Journal of Power Sources, 2017, 341: 156-164.
- [26] 许万, 周大永. 三元锂离子动力电池挤压损伤容限的试验研究[J]. 汽车安全与节能学报, 2019, 10(1): 106-111.  
XU Wan, ZHOU Dayong. Experimental research on extrusion damage tolerance of ternary li-ion power battery[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2019, 10(1): 106-111.
- [27] SAHRAEI E, BOSCO E, DIXON B, et al. Microscale failure mechanisms leading to internal short circuit in Li-ion batteries under complex loading scenarios[J]. Journal of Power Sources, 2016, 319: 56-65.
- [28] 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, 2018, 46(6): 65-72.

- LAN Fengchong, ZHENG Wenjie, LI Zhijie, et al. Squeeze load deformation response and internal short circuit failure analysis of vehicle power battery[J]. Journal of South China University of Technology, 2018, 46(6): 65-72.
- [29] XU J, LIU B, WANG X, et al. Computational model of 18650 lithium-ion battery with coupled strain rate and SOC dependencies[J]. Applied Energy, 2016, 172: 180-189.
- [30] LAI W J, ALI M Y, PAN J. Mechanical behavior of representative volume elements of lithium-ion battery cells under compressive loading conditions[J]. Journal of Power Sources, 2014, 245: 609-623.
- [31] SAHRAEI E, CAMPBELL J, WIERZBICKI T. Modeling and short circuit detection of 18650 Li-ion cells under mechanical abuse conditions[J]. Journal of Power Sources, 2012, 220: 360-372.
- [32] WIERZBICKI T, SAHRAEI E. Homogenized mechanical properties for the jellyroll of cylindrical Lithium-ion cells[J]. Journal of Power Sources, 2013, 241: 467-476.
- [33] SAHRAEI E, MEIER J, WIERZBICKI T. Characterizing and modeling mechanical properties and onset of short circuit for three types of lithium-ion pouch cells[J]. Journal of Power Sources, 2014, 247: 503-516.
- [34] GREVE L, FEHRENBACH C. Mechanical testing and macro-mechanical finite element simulation of the deformation, fracture, and short circuit initiation of cylindrical Lithium ion battery cells[J]. Journal of Power Sources, 2012, 214: 377-385.
- [35] XU J, JIA Y, LIU B, et al. Coupling effect of state-of-health and state-of-charge on the mechanical integrity of lithium-ion batteries[J]. Experimental Mechanics, 2018, 58(4): 633-643.
- [36] LIU B, JIA Y, LI J, et al. Safety issues caused by internal short circuits in lithium-ion batteries[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 6(43): 21475-21484.
- [37] WANG L, YIN S, XU J. A detailed computational model for cylindrical lithium-ion batteries under mechanical loading: From cell deformation to short-circuit onset[J]. Journal of Power Sources, 2019, 413: 284-292.
- [38] ZHU J, ZHANG X, SAHRAEI E, et al. Deformation and failure mechanisms of 18650 battery cells under axial compression[J]. Journal of Power Sources, 2016, 336: 332-340.
- [39] 范文杰, 薛鹏程, 王根伟, 等. 压缩载荷作用下锂离子电池的安全性能[J]. 高压物理学报, 2019, 33(6): 180-186.
- FAN Wenjie, XUE Pengcheng, WANG Genwei, et al. Safety performance of lithium-ion batteries under compressive load[J]. Chinese Journal of High Voltage Physics, 2019, 33(6): 180-186.
- [40] ZHANG C, SANTHANAGOPALAN S, SPRAGUE M A, et al. A representative-sandwich model for simultaneously coupled mechanical-electrical-thermal simulation of a lithium-ion cell under quasi-static indentation tests[J]. Journal of Power Sources, 2015, 298: 309-321.
- [41] ZHANG C, SANTHANAGOPALAN S, SPRAGUE M A, et al. Coupled mechanical-electrical-thermal modeling for short-circuit prediction in a lithium-ion cell under mechanical abuse[J]. Journal of Power Sources, 2015, 290: 102-113.
- [42] WANG L, YIN S, ZHANG C, et al. Mechanical characterization and modeling for anodes and cathodes in lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2018, 392: 265-273.
- [43] 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.
- [44] XU J, LIU B, WANG L, et al. Dynamic mechanical integrity of cylindrical lithium-ion battery cell upon crushing[J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 53: 97-110.
- [45] XU J, WANG L, GUAN J, et al. Coupled effect of strain rate and solvent on dynamic mechanical behaviors of separators in lithium ion batteries[J]. Materials & Design, 2016, 95: 319-328.
- [46] JIA Y, YIN S, LIU B, et al. Unlocking the coupling mechanical-electrochemical behavior of lithium-ion battery upon dynamic mechanical loading[J]. Energy, 2019, 166: 951-960.
- [47] XIA Y, CHEN G, ZHOU Q, et al. Failure behaviours of 100% SOC lithium-ion battery modules under different impact loading conditions[J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 82: 149-160.
- [48] SUNG S J, LAI W J, ALI M Y, et al. Compressive behavior of representative volume element specimens of lithium-ion battery cells under different constrained conditions[J]. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 2014, 7(2): 480-487.
- [49] ALI M Y, LAI W J, PAN J. Computational models for simulations of lithium-ion battery cells under constrained compression tests[J]. Journal of Power Sources, 2013,

- 242: 325-340.
- [50] AMODEO C M, ALI M Y, PAN J. Computational models for simulations of lithium-ion battery modules under quasi-static and dynamic constrained compression tests[J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2017, 22(1): 1-14.
- [51] 康华平, 李政. 锂离子动力电池模组碰撞失效行为试验研究[J]. *上海汽车*, 2019(8): 7-12.
- KANG Huaping, LI Zheng. Experimental research on crash failure behavior of lithium-ion power battery modules[J]. *SAIC Motor*, 2019(8): 7-12.
- [52] ABAZA A, FERRARI S, WONG H K, et al. Experimental study of internal and external short circuits of commercial automotive pouch lithium-ion cells[J]. *Journal of Energy Storage*, 2018, 16: 211-217.
- [53] FENG X, OUYANG M, LI J, et al. A 3D thermal runaway propagation model for a large format lithium ion battery module[J]. *Energy*, 2016, 115: 194-208.
- [54] YAMAUCHI T, MIZUSHIMA K, SATOH Y, et al. Development of a simulator for both property and safety of a lithium secondary battery[J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 136(1): 99-107.
- [55] ZAVALIS T G, BEHM M, LINDBERGH G. Investigation of short-circuit scenarios in a lithium-ion battery cell[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2012, 159(6): A848-A859.
- [56] DUAN J, WU C, CAO Y, et al. Enhanced electrochemical performance and thermal stability of  $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$  via nano-sized  $\text{LiMnPO}_4$  coating[J]. *Electrochimica Acta*, 2016, 221: 14-22.
- [57] 张明杰, 杨凯, 段舒宁, 等. 高能量密度镍钴铝酸锂/钛酸锂电池体系的热稳定性研究[J]. *高电压技术*, 2017, 43(7): 2221-2228.
- ZHANG Mingjie, YANG Kai, DUAN Shuning, et al. Thermal stability of high energy density nickel cobalt aluminate/lithium titanate battery system[J]. *High Voltage Technology*, 2017, 43(7): 2221-2228.
- [58] 陈鹏, 任宁, 姬学敏, 等. 负极材料对  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$  电池电化学性能的影响[J]. *新能源进展*, 2017, 5(4): 259-265.
- CHEN Peng, REN Ning, JI Xuemin, et al. The influence of anode materials on the electrochemical performance of  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$  battery[J]. *New Energy Development*, 2017, 5(4): 259-265.
- [59] 高桂红, 张红梅, 姚兰浩. 安全型电解液对锂离子电池性能的影响[J]. *电池*, 2016(2): 20.
- GAO Guihong, ZHANG Hongmei, YAO Lanhao. The influence of safe electrolyte on the performance of lithium-ion batteries[J]. *Batteries*, 2016(2): 20.
- [60] YAN X, ZHANG L, LU J. Improve safety of high energy density  $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$  /graphite battery using organosilicon electrolyte[J]. *Electrochimica Acta*, 2019, 296: 149-154.
- [61] 刘仕强, 王芳, 樊彬, 等. 针刺速度对动力锂离子电池安全性的影响[J]. *汽车安全与节能学报*, 2013(4): 82-86.
- LIU Shiqiang, WANG Fang, FAN Bin, et al. The impact of acupuncture speed on the safety of power lithium-ion batteries[J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2013(4): 82-86.
- [62] ICHIMURA M. The safety characteristics of lithium-ion batteries for mobile phones and the nail penetration test[C]// *INTELEC 07-29th International Telecommunications Energy Conference*, September 30-October 04, 2007, Rome, Italy. IEEE, 2007: 687-692.
- [63] MAO B, CHEN H, CUI Z, et al. Failure mechanism of the lithium ion battery during nail penetration[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 122: 1103-1115.
- [64] MALEKI H, HOWARD J N. Internal short circuit in li-ion cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 191(2): 568-574.
- [65] FINEGAN D P, TJADEN B, HEENAN T M M, et al. Tracking internal temperature and structural dynamics during nail penetration of lithiumion cells[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2017, 164(13): A3285-A3291.
- [66] CHIU K C, LIN C H, YEH S F, et al. An electrochemical modeling of lithium-ion battery nail penetration[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 251: 254-263.
- [67] HATCHARD T D, TRUSSLER S, DAHN J R. Building a“smart nail”for penetration tests on Li-ion cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 247: 821-823.
- [68] ZHAO W, LUO G, WANG C Y. Modeling nail penetration process in large-format Li-ion cells[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2014, 162(1): A207.
- [69] ZHAO R, LIU J, GU J. A comprehensive study on Li-ion battery nail penetrations and the possible solutions[J]. *Energy*, 2017, 123: 392-401.
- [70] LIU B, YIN S, XU J. Integrated computation model of lithium-ion battery subject to nail penetration[J]. *Applied Energy*, 2016, 183: 278-289.
- [71] 张海林, 和祥运, 李艳, 等. 锂离子电池的针刺测试[J].



- 电池工业, 2014, 19(4): 194-196.
- ZHANG Hailin, HE Xiangyun, LI Yan, et al. Acupuncture test of lithium ion batteries[J]. Battery Industry, 2014, 19(4): 194-196.
- [72] FENG X, HE X, OUYANG M, et al. Thermal runaway propagation model for designing a safer battery pack with 25 Ah  $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$  large format lithium ion battery[J]. Applied energy, 2015, 154: 74-91.
- [73] FENG X, SUN J, OUYANG M, et al. Characterization of penetration induced thermal runaway propagation process within a large format lithium ion battery module[J]. Journal of Power Sources, 2015, 275: 261-273.
- [74] FENG X, LU L, OUYANG M, et al. A 3D thermal runaway propagation model for a large format lithium ion battery module[J]. Energy, 2016, 115: 194-208.
- [75] HOU P, ZHANG H, DENG X, et al. Stabilizing the electrode/electrolyte interface of  $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$  through tailoring aluminum distribution in microspheres as long-life, high-rate, and safe cathode for lithium-ion batteries[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(35): 29643-29653.
- [76] ZHAO R, LIU J, GU J. Simulation and experimental study on lithium ion battery short circuit[J]. Applied Energy, 2016, 173: 29-39.
- [77] 谭春华, 符泽卫, 朱冠华, 等. 锂离子电池针刺热失控仿真研究[J]. 电源技术, 2018(11): 5.
- TAN Chunhua, FU Zewei, ZHU Guanhua, et al. Simulation study on acupuncture thermal runaway of lithium-ion battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2018(11): 5.
- [78] 李顶根, 邹时波, 郑军林, 等. 锂离子动力电池针刺滥用热失控仿真计算[J]. 汽车工程学报, 2018(4): 259-267.
- LI Dinggen, ZOU Shibo, ZHENG Junlin, et al. Simulation calculation of thermal runaway of acupuncture abuse of lithium-ion power battery[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2018(4): 259-267.
- [79] 张明轩, 冯旭宁, 欧阳明高, 等. 三元锂离子动力电池针刺热失控实验与建模[J]. 汽车工程, 2015, 37(7): 743-750.
- ZHANG Mingxuan, FENG Xuning, OUYANG Minggao, et al. Experiment and modeling of acupuncture thermal runaway of ternary lithium ion power battery[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(7): 743-750.
- [80] 周新文, 代忠旭, 张克立. 锂离子电池正极材料的热稳定性[J]. 武汉大学学报, 2010(3): 258-262.
- ZHOU Xinwen, DAI Zhongxu, ZHANG Keli. Thermal stability of cathode materials for lithium-ion batteries[J]. Journal of Wuhan University, 2010(3): 258-262.
- [81] 刘永光, 田卿卿, 朱靖. 锂离子电池正极材料热稳定性研究进展[J]. 化工新型材料, 2012, 40(6): 28-30.
- LIU Yongguang, TIAN Qingqing, ZHU Jing. Research progress on the thermal stability of cathode materials for lithium-ion batteries[J]. New Chemical Materials, 2012, 40(6): 28-30.
- [82] HU S K, CHENG G H, CHENG M Y, et al. Cycle life improvement of  $\text{ZrO}_2$ -coated spherical  $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$  cathode material for lithium ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2009, 188(2): 564-569.
- [83] HUANG Y, CHEN J, CHENG F, et al. A modified  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coating process to enhance the electrochemical performance of  $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$  and its comparison with traditional  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coating process[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(24): 8267-8274.
- [84] 代克化, 毛景, 翟玉春, 等. 锂离子电池正极材料  $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$  的 Ag 表面修饰[J]. 电源技术, 2011, 35(1): 22-24.
- DAI Kehua, MAO Jing, ZHAI Yuchun, et al. Surface modification of  $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$  cathode material for lithium-ion batteries with Ag[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2011, 35(1): 22-24.
- [85] KIM H S, KONG M, KIM K, et al. Effect of carbon coating on  $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$  cathode material for lithium secondary batteries[J]. Journal of Power Sources, 2007, 171(2): 917-921.
- [86] ZHOU F, ZHAO X, JIANG J, et al. Advantages of Simultaneous Substitution of Co in  $\text{Li}[\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}]\text{O}_2$  by Ni and Al[J]. Electrochemical and Solid State Letters, 2009, 12(4): A81.
- [87] JUNG Y S, CAVANAGH A S, RILEY L A, et al. Ultrathin direct atomic layer deposition on composite electrodes for highly durable and safe Li-ion batteries[J]. Advanced Materials, 2010, 22(19): 2172-2176.
- [88] YAO X L, XIE S, CHEN C H, et al. Comparisons of graphite and spinel  $\text{Li}_{1.33}\text{Ti}_{1.67}\text{O}_4$  as anode materials for rechargeable lithium-ion batteries[J]. Electrochimica acta, 2005, 50(20): 4076-4081.
- [89] CHAN C K, PENG H, LIU G, et al. High-performance lithium battery anodes using silicon nanowires[J]. Nature Nanotechnology, 2008, 3(1): 31-35.
- [90] ARAI J, KATAYAMA H, AKAHOSHI H. Binary mixed solvent electrolytes containing trifluoropropylene carbonate for lithium secondary batteries[J]. Journal of the

- Electrochemical Society, 2002, 149(2): A217.
- [91] 王力臻, 孙新科, 杨许召, 等. 离子液体在锂离子电池中的应用研究进展[J]. 电池工业, 2012, 17(3): 165-170.
- WANG Lizhen, SUN Xinke, YANG Xuzhao, et al. Research progress in the application of ionic liquids in lithium-ion batteries[J]. Battery Industry, 2012, 17(3): 165-170.
- [92] JIANG L, WANG Q, SUN J. Electrochemical performance and thermal stability analysis of  $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$  cathode based on a composite safety electrolyte[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 351: 260-269.
- [93] YAN X, ZHANG L, LU J. Improve safety of high energy density  $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2/\text{graphite}$  battery using organosilicon electrolyte[J]. Electrochimica Acta, 2019, 296: 149-154.
- [94] DAGGER T, MEIER V, HILDEBRAND S, et al. Safety performance of 5 Ah lithium ion battery cells containing the flame retardant electrolyte additive (phenoxy) pentafluorocyclotriphosphazene[J]. Energy Technology, 2018, 6(10): 2001-2010.
- [95] WANG X, YASUKAWA E, KASUYA S. Nonflammable trimethyl phosphate solvent-containing electrolytes for lithium-ion batteries: I. Fundamental properties[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2001, 148(10): A1058.
- [96] YAO X L, XIE S, CHEN C H, et al. Comparative study of trimethyl phosphite and trimethyl phosphate as electrolyte additives in lithium ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2005, 144(1): 170-175.
- [97] MANTHIRAM A, YU X, WANG S. Lithium battery chemistries enabled by solid-state electrolytes[J]. Nature Reviews Materials, 2017, 2(4): 1-16.
- [98] WAKIHARA M, KADOMA Y, KUMAGAI N, et al. Development of nonflammable lithium ion battery using a new all-solid polymer electrolyte[J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2012, 16(3): 847-855.
- [99] 王晓斌, 黄美容, 王松钊, 等. 动力锂离子电池隔膜的性能要求及发展状况[J]. 塑料制造, 2014(12): 59-64.
- WANG Xiaobin, HUANG Meirong, WANG Songzhao, et al. Performance requirements and development status of power lithium-ion battery separators[J]. Plastic Manufacturing, 2014 (12): 59-64.
- [100] 王畅, 吴大勇. 锂离子电池隔膜及技术进展[J]. 储能科学与技术, 2016, 5(2): 120-128.
- WANG Chang, WU Dayong. Lithium-ion battery separator and technology progress[J]. Energy Storage Science and Technology, 2016, 5(2): 120-128.
- [101] KIM M, PARK J H. Inorganic thin layer coated porous separator with high thermal stability for safety reinforced Li-ion battery[J]. Journal of Power Sources, 2012, 212: 22-27.
- [102] SONG K W, KIM C K. Coating with macroporous polyarylate via a nonsolvent induced phase separation process for enhancement of polyethylene separator thermal stability[J]. Journal of Membrane Science, 2010, 352(1-2): 239-246.
- [103] 尹艳红, 毛新欣, 曹朝霞, 等. 相转化法制备陶瓷涂层改性锂离子电池隔膜[J]. 功能高分子学报, 2012, 25(2): 6.
- YIN Yanhong, MAO Xinxin, CAO Zhaoxia, et al. Preparation of ceramic coating modified lithium ion battery separator by phase inversion method[J]. Acta Functional Polymers, 2012, 25(2): 6.
- [104] YOO S H, KIM C K. Enhancement of the meltdown temperature of a lithium ion battery separator via a nanocomposite coating[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2009, 48(22): 9936-9941.
- [105] MOON S, SON Y, KIM S, et al. The effect of polymer blending and extension conditions on the properties of separator prepared by wet process for Li-ion secondary battery[J]. Polymer-Korea, 2002, 26(1): 45-52.
- [106] 吴大勇, 王海燕, 操建华. 经纬双向纺丝装置专利经纬双向静电纺丝制膜设备及设备的应用方法: 中国, CN200910087706.5[P]. 2010-12-29.
- WU Dayong, WANG Haiyan, CAO Jianhua. The patented warp and weft bidirectional electrospinning device and the application method of the device: China, CN 200910087706.5[P]. 2010-12-29.
- [107] LIU Z, JIANG W, KONG Q, et al. A Core@ sheath nanofibrous separator for lithium ion batteries obtained by coaxial electrospinning[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2013, 298(7): 806-813.
- [108] 铁生武. 锂离子电池保护电路中熔断器的实现原理[J]. 今日电子, 2005(4): 71.
- TIE Shengwu. The realization principle of the fuse in the protection circuit of lithium ion battery[J]. Today Electronics, 2005(4): 71.
- [109] MA J. Safety breaker protection control system of large-capacity battery system: China, 102 157 718 B[P]. 2013-10-09.

- [110] KONG L, LI C, JIANG J, et al. Li-ion battery fire hazards and safety strategies[J]. *Energies*, 2018, 11(9): 2191.
- [111] MEHTA V H, HERMANN W A, KALAYJIAN N R. Cell thermal runaway propagation resistant battery pack: U.S., 7, 820, 319[P]. 2010-10-26.
- [112] HERMANN W A, KOHN S I, MEHTA V H, et al. Thermal barrier structure for containing thermal runaway propagation within a battery pack: U.S., 8, 541, 126[P]. 2013-09-24.
- [113] RAWLINSON P D, HERRON N H, EDWARDS B P, et al. Vehicle battery pack thermal barrier: U.S., 8, 875, 828[P]. 2014-11-04.
- [114] HERMANN W A. Cell separator for minimizing thermal runaway propagation within a battery pack: U.S., 8, 367, 239[P]. 2013-02-05.
- [115] HERMANN W A, KOHN S I, BERDICHEVSKY E M, et al. Increased resistance to thermal runaway through differential heat transfer: U.S., Application 12/333, 631[P]. 2010-06-17.
- [116] HERMANN W A, KOHN S I, MEHTA V H, et al. Thermal barrier structure for containing thermal runaway propagation within a battery pack: U.S., 8, 541, 126[P]. 2013-09-24.
- [117] MUNIZ T P. Preventing cell thermal runaway propagation within a battery: U.S., 8, 993, 145[P]. 2015-03-31.
- [118] 李旭影. 防碰撞动力电池箱及具有该防碰撞动力电池箱的电动车辆: 中国, CN201521031628.4[P]. 2016-08-31.
- LI Xuying. Anti-collision power battery box and electric vehicle with the anti-collision power battery box: China, CN201521031628.4[P]. 2016-08-31.
- [119] RAWLINSON P D, CLARKE A P, GADHIYA H L, et al. System for absorbing and distributing side impact energy utilizing an integrated battery pack: U.S., 9, 045, 030[P]. 2015-6-2.
- [120] ZHU J, ZHANG X, WIERZBICKI T, et al. Structural designs for electric vehicle battery pack against ground impact[R]. SAE Technical Paper, 2018.
- [121] TARTAGLIA S. Battery pack protection system: U.S., Application 13/038, 976[P]. 2012-09-06.
- [122] 赵传军, 张毅翔. 纯电动汽车动力电池箱体的设计研究[J]. *上海汽车*, 2019 (12): 2-6.
- ZHAO Chuanjun, ZHANG Yixiang. Design and research of power battery box for pure electric vehicles[J]. *SAIC Motor*, 2019 (12): 2-6.
- [123] YANG H J. Automobile-used battery pack fire extinguisher: CN, 202 207 410 U[P]. 2012-03-02.
- [124] 储能行业如何应对电池储能系统的起火爆炸事件?[EB/OL]. [2020-09-10]. <https://chuneng.bjx.com.cn/news/20200910/1103233.shtml>.
- How does the energy storage industry respond to the fire and explosion of battery energy storage systems?[EB/OL]. [2020-09-10]. <https://chuneng.bjx.com.cn/news/20200910/1103233.shtml>.
- [125] 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.
- [126] PESARAN A, KEYSER M, BURCH S. An approach for designing thermal management systems for electric and hybrid vehicle battery packs[R]. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO (US), 1999.
- [127] RUGH J P, PESARAN A, SMITH K. Electric vehicle battery thermal issues and thermal management techniques (presentation)[R]. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2013.
- [128] JARRETT A, KIM I Y. Design optimization of electric vehicle battery cooling plates for thermal performance[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(23): 10359-10368.
- [129] AL HALLAJ S, SELMAN J R. A novel thermal management system for electric vehicle batteries using phase - change material[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2000, 147(9): 3231.
- [130] SABBAH R, KIZILEL R, SELMAN J R, et al. Active (air-cooled) vs. passive (phase change material) thermal management of high power lithium-ion packs: Limitation of temperature rise and uniformity of temperature distribution[J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 182(2): 630-638.
- [131] SWANEPOEL G. Thermal management of hybrid electrical vehicles using heat pipes[D]. Stellenbosch: Stellenbosch University, 2001.
- [132] TRAN T H, HARMAND S, DESMET B, et al. Experimental investigation on the feasibility of heat pipe cooling for HEV/EV lithium-ion battery[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 63(2): 551-558.
- [133] WENG Y C, CHO H P, CHANG C C, et al. Heat pipe with PCM for electronic cooling[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(5): 1825-1833.
- [134] RAO Z H. Battery modules based on the air, and the phase change material heat pipe cooling coupling: CN,

- 104 393 366 B[P]. 2016-09-21.
- [135] ASUMADU J A, HAQUE M, VOGEL H, et al. Precision battery management system[C]// IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, May 16-19, 2005, Ottawa, Ont. IEEE, 2006: 1317-1320.
- [136] OUYANG M, LIU G, LU L, et al. Enhancing the estimation accuracy in low state-of-charge area: A novel onboard battery model through surface state of charge determination[J]. Journal of Power Sources, 2014, 270: 221-237.
- [137] FENG X, LI J, OUYANG M, et al. Using probability density function to evaluate the state of health of lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2013, 232: 209-218.
- [138] HE H W, ZHANG Y Z, XIONG R, et al. A novel Gaussian model based battery state estimation approach: State-of-energy[J]. Applied Energy, 2015, 151: 41-48.
- [139] XIONG R, SUN F, HE H, et al. A data-driven adaptive state of charge and power capability joint estimator of lithium-ion polymer battery used in electric vehicles[J]. Energy, 2013, 63: 295-308.
- [140] CABRERA-CASTILLO E, NIEDERMEIER F, JOSSEN A. Calculation of the state of safety (SOS) for lithium ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2016, 324: 509-520.
- [141] ZHENG Y, OUYANG M, LU L, et al. Cell state-of-charge inconsistency estimation for LiFePO<sub>4</sub> battery pack in hybrid electric vehicles using mean-difference model[J]. Applied Energy, 2013, 111: 571-580.
- [142] OFFER G J, YUFIT V, HOWEY D A, et al. Module design and fault diagnosis in electric vehicle batteries[J]. Journal of Power Sources, 2012, 206: 383-392.
- [143] HONG J, WANG Z, YAO Y. Fault prognosis of battery system based on accurate voltage abnormality prognosis using long short-term memory neural networks[J]. Applied Energy, 2019, 251: 113381.
- [144] LIU Z, HE H. Sensor fault detection and isolation for a lithium-ion battery pack in electric vehicles using adaptive extended Kalman filter[J]. Applied Energy, 2017, 185: 2033-2044.
- [145] LIM K C, BASTAWROUS H A, DUONG V H, et al. Fading Kalman filter-based real-time state of charge estimation in LiFePO<sub>4</sub> battery-powered electric vehicles[J]. Applied Energy, 2016, 169: 40-48.
- 
- 作者简介:** 山彤欣, 女, 1997 年出生, 博士研究生。主要研究方向为节能与新能源汽车储能系统安全及其防控技术。  
E-mail: shantongxin97@bit.edu.cn
- 王震坡, 男, 1976 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为动力电池成组理论与应用、充/换电站技术等。  
E-mail: wangzhenpo@bit.edu.cn
- 洪吉超(通信作者), 男, 1989 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为车辆动力系统集成、动力电池系统安全控制关键技术等。  
E-mail: hongjichao@ustb.edu.cn
- 曲昌辉, 男, 1984 年出生, 博士, 助理研究员。主要研究方向为电动车辆分布式驱动技术、动力电池安全管理技术等。  
E-mail: bquchanghui812@bit.edu.cn
- 张景涵, 男, 1993 年出生, 博士研究生。主要研究方向为节能与新能源汽车动力电池安全管理等。  
E-mail: zhangjinghanbit@outlook.com
- 周洋捷, 男, 1996 年出生, 博士研究生。主要研究方向为节能与新能源汽车技术, 储能系统安全。  
E-mail: zhouyangjie0801@bit.edu.cn
- 侯岩凯, 男, 1996 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为节能与新能源汽车大数据技术。  
E-mail: hou\_yankai@163.com