

DOI: 10.3901/JME.2023.06.239

# 锂离子电池能量密度特性研究进展\*

杨续来<sup>1,2</sup> 袁帅帅<sup>1</sup> 杨文静<sup>1</sup> 刘 闯<sup>3</sup> 杨世春<sup>4</sup>

(1. 合肥学院先进电池关键材料与技术重点实验室 合肥 230601;

2. 北京理工大学重庆创新中心 重庆 401120;

3. 安徽易为茂电动汽车应用技术有限公司 合肥 230011;

4. 北京航空航天大学交通科学与工程学院 北京 100191)

**摘要:** 动力电池作为新能源纯电动汽车的动力源,其能量密度与整车的续驶里程及安全性等密切相关,而锂离子电池具有高能量密度和长寿命等特点,是当前新能源汽车动力电池的主流选择。基于锂离子电池发展史和我国第1~48批《免征车辆购置税的新能源汽车车型目录》中2 000余款纯电动乘用车的锂离子电池能量密度数据,系统研究了锂离子动力电池能量密度演变趋势,回顾了我国锂离子动力电池能量密度的提升历程及其对推动新能源汽车发展起到的良好作用。在此基础上,从电极材料、电池工艺和成组结构等3个方面,剖析了锂离子动力电池能量密度提升技术方案的优势与不足;并从电池能量密度和安全性的关联性出发,总结了高能量密度电池在设计、制造和使用等全生命周期中的安全技术,展望了锂离子动力电池未来的发展趋势,为新能源汽车行业未来的健康发展提供参考。

**关键词:** 锂离子电池; 能量密度; 电极材料; 结构电池; 电池安全

中图分类号: TM912

## Research Progress on Energy Density of Li-ion Batteries for EVs

YANG Xulai<sup>1,2</sup> YUAN Shuaishuai<sup>1</sup> YANG Wenjing<sup>1</sup> LIU Chuang<sup>3</sup> YANG Shichun<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Materials and Technologies for Advanced Batteries, Hefei University, Hefei 230601;

2. Beijing Institute of Technology Chongqing Innovation Center, Chongqing 401120;

3. Anhui EVmall EV Application Technology Co., Ltd., Hefei 230011;

4. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191)

**Abstract:** The power battery is the source of driving energy for electric vehicles (EVs), which is directly related to driving range and the safety of EVs. So far, lithium-ion batteries (LIBs) have been extensively used as the power sources for EVs owing to the high energy density and long cycle-life. Based on the battery history and the LIB energy density data of more than 2 000 types of passenger EVs in the 1-48 Catalogs of new energy vehicles exempted from vehicle purchase tax of China, the evolution process of the LIB energy density increasing is systematically analyzed from the data in the Catalog. Meanwhile, the improvement of LIB energy density in China and its role in promoting the development of EVs are reviewed. Then, the advantages and disadvantages of the energy density enhancement technology for lithium-ion power battery are analyzed from the aspects of electrode material, battery process engineering and battery pack structure. Finally, based on the correlation between battery energy density and safety, the safety technologies of high energy density battery in design phase, manufacture phase and use phase of the whole cycle life are summarized, and the development trend of lithium-ion power battery is prospected, which can provide a reference for the healthy development of EVs.

\* 安徽省科技重大专项(2021e03020001、2203a05020017)、安徽高校协同创新 (GXXT-2021-025)和合肥学院人才基金(20RC03)资助项目。20220628收到初稿, 20221226收到修改稿

**Key words:** lithium-ion battery; energy density; electrode materials; structural battery; battery safety

## 0 前言

电动汽车的历史与电池的发展史相当,其诞生时间比燃油汽车更早<sup>[1-2]</sup>。世界上第一辆可充电的电动汽车于1881年在法国诞生(以铅酸蓄电池为动力),到1912年巅峰时期仅美国一个国家就拥有超过3万辆注册电动汽车;然而随着石油开采提炼技术的进步以及福特T型车等技术的突破,使得长续航里程的燃油汽车在1930年前后一举超过电动汽车成为主流交通工具<sup>[3]</sup>,其原因可以归结为高能量密度燃油驱动系统比低能量密度铅酸电池更能满足用户的需求。继铅酸电池之后,镍镉电池、镍铁电池、镍氢电池等可充电电池相继被发展<sup>[4]</sup>,其中镍氢电池因其高安全和高倍率等特性成为混合动力汽车电池<sup>[5]</sup>,至今已搭载超过1000万辆;尽管如此,镍氢电池等二次电池都因能量密度较低等问题而难以在纯电动汽车上推广应用。1991年日本索尼公司推出全球首款商业锂离子电池,因其具有高能量密度、长寿命和无记忆效应等特点,逐渐成为新能源汽车的主要动力电池<sup>[6]</sup>,使得100多年前就已经出现的纯电动汽车再次进入商业化推广<sup>[7]</sup>。

我国在2001年“十五”期间的国家“863”计划中开设电动汽车重大专项,对电动汽车用能量型锂离子电池单体能量密度要求是大于 $130\text{ W}\cdot\text{h/kg}$ ;到2016年“十三五”国家新能源汽车试点专项时,其对能量型锂离子电池的要求则是单体电池能量密度大于 $300\text{ W}\cdot\text{h/kg}$ 和电池系统能量密度超过 $200\text{ W}\cdot\text{h/kg}$ ,较“十五”专项指标提高明显;与此同时,2015年发布的《中国制造2025》进一步提出到2025年动力电池的能量密度达到 $400\text{ W}\cdot\text{h/kg}$ ,2030年达到 $500\text{ W}\cdot\text{h/kg}$ 的发展目标。2009年“十城千辆”工程以来,政策与市场双轮驱动下,新能源汽车加快向电动化、智能化和网联化的方向发展<sup>[8]</sup>,高比能动力电池有效助推了新能源汽车的发展。至2020年底,我国新能源汽车累计销量超过550万辆,累计保有量达到492万辆,基本实现《节能与新能源汽车产业发展规划(2012~2020年)》提出的到2020年新能源汽车累计产销量达到500万辆的里程碑式目标。2021年我国新能源汽车销量再创新高,1~11月累计超过299万辆,销量渗透率提升至12.7%。以此发展速度,我国有望早于2025年实现《新能源汽车产业发展规划(2021~

2035年)》中20%的新能源汽车渗透率目标。

总的来看,新能源汽车为缓解我国能源危机和实现碳中和目标提供了重要的突破口,是汽车产业可持续发展的战略举措。动力电池的能量密度对电动汽车的续航里程、有用空间和有效载质量乃至汽车的牵引性、操稳性等有重要的影响<sup>[9]</sup>。本文分析了近年来我国新能源汽车动力电池应用过程中能量密度的发展历程,对动力电池能量密度提高技术进行了分析和展望,将为我国新能源汽车行业的进一步发展提供参考。

## 1 锂离子电池发展历程

作为新能源汽车核心部件,要求锂离子电池具有高安全、高比能、长寿命和低成本的特性,其发展历程如图1所示。目前商业化锂离子电池都是采用含锂正极材料与石墨匹配的电化学体系,正极材料如钴酸锂、磷酸铁锂、锰酸锂和三元正极材料(NCM、NCA)等。尽管钴酸锂电池于2008年在特斯拉Roadster上应用,但钴酸锂电池受到钴矿资源的限制及安全性不佳等影响<sup>[10]</sup>,不能满足新能源汽车大规模推广的需要;锰酸锂电池也在日产LEAF的早期车型上已得到商业化应用,但其高温环境下寿命衰减的问题仍制约其在新能源汽车上的发展<sup>[11]</sup>。从而,经过新能源汽车实际运营的市场化选择后,锂离子电池仅剩磷酸铁锂和三元材料两种主流电化学体系的产业化推广。

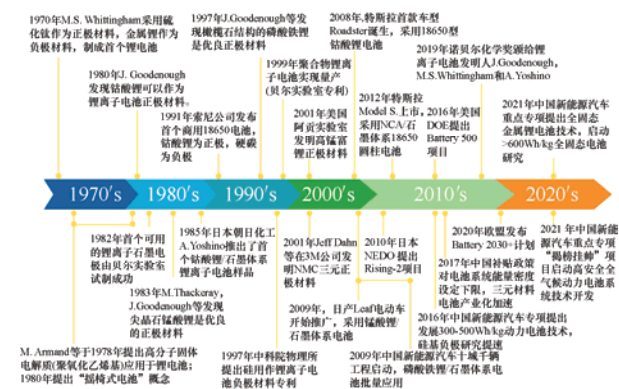


图1 锂离子电池发展历程

我国新能源汽车推广工作一直处于全球前列,新能源汽车保有量全球第一。在此过程中,2014年可谓我国新能源汽车元年,动力电池装机量首次超过 $1\text{ GW}\cdot\text{h}$ 、新能源汽车年销售量超过7万台,其发展和磷酸铁锂电池有着不可或分的关系。由于磷

酸铁锂电池的相对高安全性和电池制造过程对环境的要求相对较低的特点, 2017 年之前磷酸铁锂电池在我国动力电池市场上占据着绝对主导地位, 市场占有率超过 70%。2017 年财政补贴政策对电池系统能量密度的下限做了限定, 加上磷酸铁锂电池能量密度较低的缘故, 从 2017 年开始, 三元材料电池因其能量密度高的特点, 迎合了政策和纯电动乘用车市场的需要, 2018 年至 2020 年间三元材料电池均超过 60% 的动力电池市场占有率(图 2), 成为乘用车动力电池市场的主导电池类型。

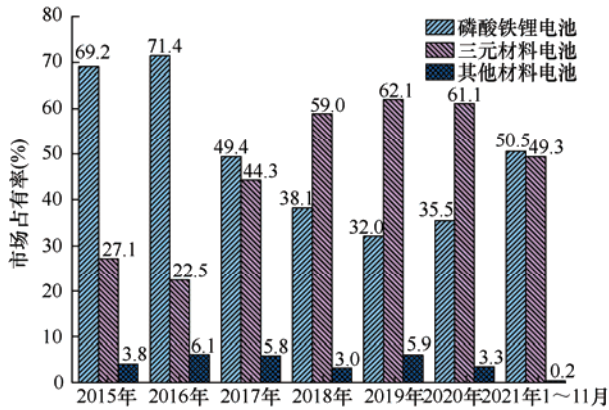


图2 我国新能源汽车不同材料动力电池市场占有率

然而, 2021 年 1~11 月我国新能源汽车动力电池装车量累计为 128.3 GW·h, 同比累计上升 153.1%, 其中三元电池装车量累计 63.3 GW·h, 占总装车量 49.3%, 同比累计上升 92.5%; 磷酸铁锂电池装车量累计 64.8 GW·h, 占总装车量 50.5%, 同比累计上升 270.3%。可见, 磷酸铁锂电池装车量再次超越三元电池装车量, 这体现出我国新能源汽车市场发展呈现出越来越理性的发展趋势。

## 2 动力电池应用中能量密度演变进程

2013 年我国正式颁布新能源汽车补贴政策, 以整车纯电动续航里程为门槛对推广的新能源汽车进行直接财政补贴; 2014 年 9 月开始在直接补贴的基础上执行新能源汽车免征购置税政策; 2017 年在续航里程的门槛的基础上进一步增加电池系统能量密度和整车百公里耗电量的门槛限定, 并在随后的 3 年中逐年提高对纯电动乘用车纯电动续航里程、百公里耗电量和电池能量密度等补贴门槛限定指标。总之, 纵观近十年新能源汽车发展历程, 长续航里程和低能耗是新能源汽车发展的方向, 同时政策更鼓励续航里程和电池系统能量密度双高的车型。事实上, 纯电动续航里程与电动汽车的整备质量及带电量密切相关<sup>[12]</sup>。基于 2014 年 8 月的第 1 批到 2021 年 11 月的

第 48 批《免征车辆购置税的新能源汽车车型目录》(以下简称“目录”)中 2 000 余款纯电动乘用车车型参数, 研究了整备质量和带电量与工况下纯电动续航里程的关联性(图 3), 表明电动汽车的整备质量越轻或者整车带电量越多, 相应的纯电动续航里程越长。

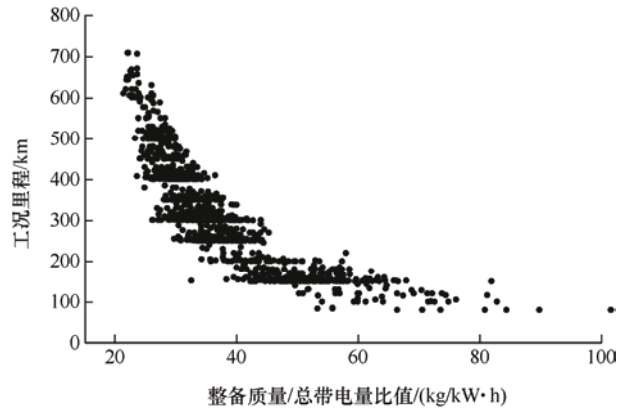


图3 纯电动乘用车整备质量、带电量及续航里程间关联性

根据图 4 给出的纯电动乘用车续航里程、带电量及电耗随时间演变历程, 可以看出我国新能源汽车长续航里程车型呈现逐年增加趋势, 该趋势与大带电量车型逐步增多的趋势基本吻合, 同时百公里电耗呈逐年下降的趋势, 因此, 当前新能源汽车续航里程的增加主要得益于整车带电量提升及电耗降低; 而整备质量没有呈现出明显轻量化趋势, 所以带电量增加又主要得益于动力电池能量密度的提

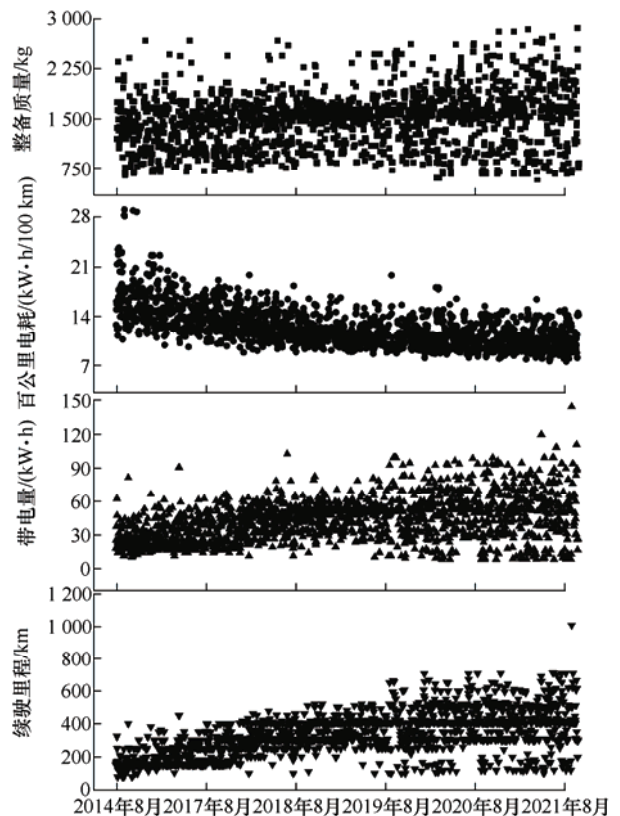


图4 纯电动乘用车续航里程、带电量及电耗演变历程



升。应用高能量密度动力电池,提升了单位电池系统的带电量的同时降低了单位电池系统的重量,进而有助于降低纯电动汽车的能耗和增加续航里程。

图5给出了前48批目录中纯电动乘用车电池系统能量密度演变进程,可以说从2014年第1批目录车型到2018年第21批目录车型,搭载电池系统能量密度实现快速提升,平均能量密度从 $82.5 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ 提高到 $141.5 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ ,提高了71.5%;从2019年起,搭载高能量密度电池系统持续增加的同时,搭载能量密度低于 $120 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ 电池系统的车型再次出现在目录车型中,电池系统能量密度呈现宽区间分布趋势,到2021年即已经出现搭载 $210 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ 电池系统和 $98.9 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ 电池系统的车型差异,从而使得电池系统在2019年至今的平均能量密度提升不明显,从第21批的 $141.5 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ 缓慢提高到平均能量密度最高的第43批 $152.4 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ ,提升仅7.7%。这一现象与补贴政策的演变密切相关,2019年起补贴政策不再对电池系统能量密度的下限做进一步提高,同时补贴资金退坡明显,部分车型开始寻求市场化发展之路,使得长续航里程的高端车型与满足用户需求续航里程的代步车型同步得到发展,更高能量密度和更实用化能量密度的动力电池也正独立但又协同的同步向前发展。

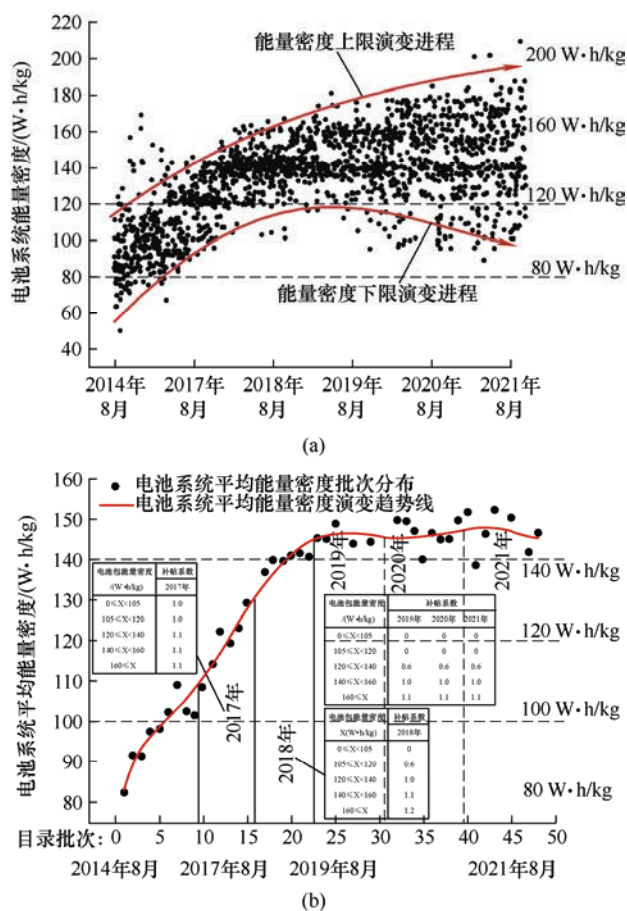


图5 纯电动乘用车电池系统能量密度演变进程

与此同时,《中国汽车产业发展年报(2021年)》统计结果表明<sup>[13]</sup>,十三五期间我国纯电动乘用车单体平均能量密度由2016年的 $169 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ 提升到2020年的 $212 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ ,纯电动商用车电池单体平均能量密度由 $124 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ 提升到 $172 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ ,如图6所示。实际上,我国纯电动商用车电池以三元电池为主,纯电动商用车电池则基本上都搭载磷酸铁锂电池,因此,图6展示的乘用车电池和商用车电池的能量密度数据可以分别直接反映出三元电池和磷酸铁锂电池的能量密度的发展历程。

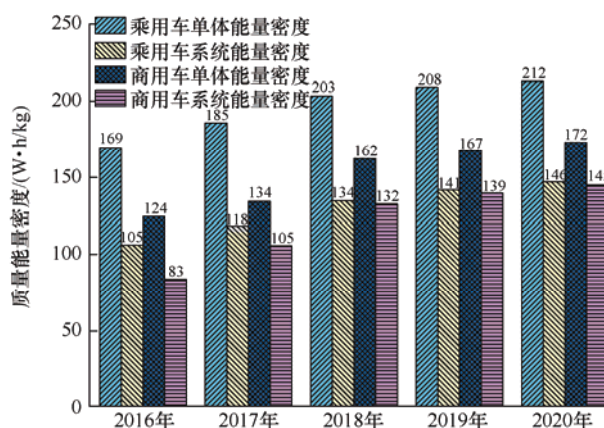


图6 新能源纯电动汽车动力电池平均能量密度

综上所述,在政策与市场的双轮驱动下,锂离子动力电池平均能量密度从 $82.5 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ 提高至 $152.4 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ ,提高了84.7%;电池能量密度的提升使得长续航里程车型数量增加,2021年目录车型的纯电动续航里程在120 km至1008 km之间(平均续航里程为412.5 km),远远高于2014年第1批目录的80 km至322 km(平均为157.3 km),进一步满足了不同新能源汽车用户的使用需求;与此同时,2020年的电池系统平均成本较2010年下降了89%<sup>[14]</sup>。因此,增加动力电池能量密度是有效提高新能源汽车续航里程且成本较低的技术方案。

### 3 提升动力电池能量密度的方法

#### 3.1 电极材料变革

锂离子电池是利用材料的氧化还原反应来储能和释放能量,因此其能量密度的理论极限由发生氧化还原反应的活性材料决定,取决于反应过程中单位活性材料能够提供的电子数量以及材料的氧化还原电压<sup>[15-16]</sup>。中科院物理所ZU等<sup>[17]</sup>通过理论计算,分析了1172个材料体系的储能机理及相应的理论能量密度,其中 $\text{Li-F}_2$ 和 $\text{Li-O}_2$ 为所有电池体系中能量密度最高的两个,理论能量密度分别达到 $6294 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ 和

5 217 W · h/kg, 但存在诸多工程化问题, Li-F<sub>2</sub> 和 Li-O<sub>2</sub> 等尚不能进入实用化。表 1 列出了相关电极材料的质量能量密度估算数据, 可见电池能量密度的跨越式提升需要电极材料的革新。

表 1 锂离子电池不同电极材料的质量能量密度估算

电极材料	实际 克容量 /(mA · h/g)	理论 克容量 /(mA · h/g)	平均电压 V vs Li/Li <sup>+</sup>	材料 能量密度 /(W · h/kg)
4.5V LCO	190	274	4.0	760
4.6V LCO	220			880
4.35V NCM622	180	273~285	3.8	684
4.2V NCM811	210		3.7	777
4.2V NCA	210		3.7	777
Li-Rich 250	250	300~450	3.8	950
Li-Rich 300	300		3.5	1 050
Li-Rich 400	400		3.4	1 360
LiNi <sub>0.5</sub> Mn <sub>1.5</sub> O <sub>4</sub>	120	147	4.7	564
S	1100	1675	2.1	2 310
LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	120	148	4.1	492
LiFePO <sub>4</sub>	140	170	3.4	476
Li <sub>4</sub> Ti <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	140	175	1.5	—
Graphite	350	372	0.2	—
Si	—	4 200	0.5	—
Li Metal	—	3 860	0	—

### 3.1.1 正极材料

自石墨替代金属锂作为锂离子电池负极材料以来, 正极材料成为锂离子电池电化学性能的决定性因素, 对电池的能量密度及安全性能起主导作用。当前提高实用化锂离子电池的能量密度, 正极材料需要从以下三个方面入手<sup>[10, 18]</sup>: 一是开发高比容量的正极材料, 如三元材料 NCM333 向高镍含量的 NCM523-NCM622-NCM712-NCM811 的演变; 二是开发高电压正极材料, 如 5 V 高电压尖晶石镍锰酸锂和高电压高容量富锂材料(Li-Rich); 三是提高充电上限电压而使得锂离子利用率增加的材料, 如 4.6 V 高电压钴酸锂、4.35 V 高电压三元材料等。富锂正极材料 LiMO<sub>2</sub>-Li<sub>2</sub>MnO<sub>3</sub> 放电比容量可以达到 400 mA · h/g 及以上<sup>[19]</sup>, 是下一代高比能正极材料的首选, 但由于材料中过渡金属阳离子和晶格氧阴离子均参与氧化还原反应<sup>[20]</sup>, 充放电循环过程中存在层状结构向尖晶石结构转变和逐渐失氧的趋势, 电解液与材料的反应又会加剧材料失氧而进一步产生严重的电压衰减等, 使得富锂材料尚不能产业化应用; 无锂正极材料如单质硫(1 675 mA·h/g)和

FeF<sub>3</sub>(712 mA·h/g)等均具有较高的理论比容量<sup>[21]</sup>, 但其除了导电性差及容量衰减快的缺点而不能商业化应用以外, 无锂正极材料必须与含锂负极材料如金属锂进行配合使用, 进一步加剧了其电化学体系开发的难度。尽管我国科学家们已研制出质量能量密度为 350~777 W · h/kg 的 Li-S 电池样品<sup>[22-23]</sup>, 但受单质硫导电性差、多硫化物穿梭效应和锂枝晶生长等问题限制<sup>[24]</sup>, Li-S 电池的寿命等特性尚不能满足商业化动力电池的使用要求。目前商业化动力电池依然会以磷酸铁锂和三元材料等两种材料体系为主。

### 3.1.2 负极材料

目前商业化负极材料则是以不含锂的碳材料为主, 如石墨、软碳和硬碳等, 其中用量最大的石墨材料比容量在 360 mA · h/g 左右, 已非常接近其理论比容量 372 mA · h/g。随着各类先进电子器件、电动汽车、无人机、机器人等领域的发展, 发展能量密度超过 300 W · h/kg 的高能量密度电池体系依然是研发的主要目标, 当前全球主流研发机构都依托新型正负极材料提出发展 500 W · h/kg 或更高能量密度电池的规划<sup>[25]</sup>, 如日本 NEDO 的 Rising-2 计划、美国 DOE 的 Battery 500 计划、欧洲 Battery 2030+计划<sup>[1]</sup>等, 都体现出高容量负极材料开发的重要性。

#### 3.1.2.1 硅基负极材料

硅基负极材料具有很高理论比容量, 如 Si 的理论比容量为 4 200 mA · h/g, SiO<sub>x</sub> 也大于 1 200 mA · h/g, 脱锂电压较低(~0.5 V vs Li/Li<sup>+</sup>), 然而硅基负极材料在嵌锂过程中存在明显的体积膨胀<sup>[26]</sup>(如单质硅约 350 %, 氧化亚硅约 120 %), 同时首次充放电效率较低, 严重影响循环寿命, 进而发展出硅-碳(C/Si)、氧化亚硅-碳(C/SiO)等纳米复合负极材料, 克服硅基负极材料的体积膨胀问题, 同时引入预锂化技术提高材料的首次充放电效率<sup>[27]</sup>, 提高该高比容量负极材料的实用性。美国 Envia 公司<sup>[28]</sup>采用 260 mA · h/g 的富锂材料与 1 000 mA · h/g 的氧化亚硅-碳(C/SiO)复合负极材料制备出 45 A · h 软包电池, C/3 倍率 1.5~4.5 V 电压区间下能量密度达到 390 W · h/kg, 80 %DOD 循环 500 次后容量保持率为 67%。当前实用化硅基材料(≤15 wt.%) -石墨复合负极可以提供 400~500 mA · h/g 的比容量, 匹配 LiNi<sub>0.8</sub>Mn<sub>0.1</sub>Co<sub>0.1</sub>O<sub>2</sub>(NCM811)等高比容量正极材料, 承担“十三五”国家重点研发计划项目的车用动力电池企业如宁德时代和国轩高科等研发的单体电池能量密度都达到了

300 W·h/kg, 循环寿命满足项目指标要求。SUNG 等<sup>[29]</sup>通过乙烯和硅烷为原料, 通过化学气相沉积的方法制备出亚纳米级(<1 nm)的 C/Si 材料, 再以 9% 的比例与石墨混合制成硅基负极材料, 并与 NCM811 制成容量为 110 A·h 的方形电池, 储能工况下循环 2 875 次后容量保持率为 91 %, 展现出亚纳米级硅材料的稳定性。

### 3.1.2.2 金属锂负极材料

金属锂具有质量轻(0.534 g/cm<sup>3</sup>)、化学势低(-3.04 V vs SHE)和比容量高(3 860 mA·h/g)等特点, 使其成为高能量密度电池负极材料发展的目标。WANG 等<sup>[21]</sup>总结了锂电池及其关键材料的发展历史, 将锂电池从 1970 年到现在历经的 50 年研究历史总结为一个起始于金属锂, 经过一个轮回又回到金属锂的过程(图 7a)。然而, 金属锂负极实用化需要克服其在安全性和循环稳定性等方面存在的挑战<sup>[30]</sup>, 如在充放电循环过程中锂不均匀沉积形成枝晶而造成电池短路安全问题(图 7b)<sup>[31]</sup>, 以及低库仑效率和逐渐增长的锂负极超电势会导致电池寿命加速衰减的问题等。目前使用液态电解液或采用固体电解质的金属锂电池均在研究开发中。

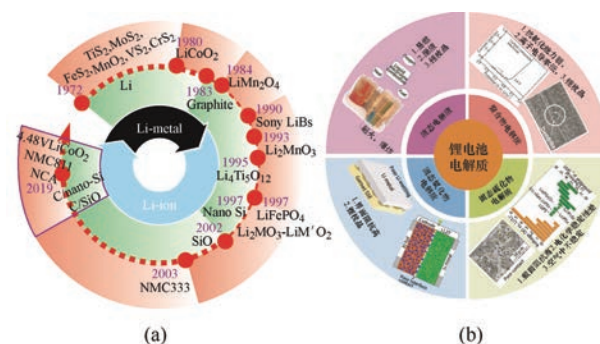


图 7 金属锂负极在锂电池发展中的地位及问题<sup>[20, 31]</sup>

(1) 液态电解液金属锂电池。用硝酸锂对锂金属负极进行预处理, 在金属锂表面形成富含 Li<sub>2</sub>O、均匀平整和强度稳定的人工 SEI<sup>[32-33]</sup>, 改善循环过程中金属锂表面的电流密度分布, 被证明是提高金属锂负极电池的循环寿命和安全性的有效方法; 此外, 开发新型非碳酸酯类电解液体系对改善锂金属负极电池性能也有帮助<sup>[34-35]</sup>。表 2 列举了近年具有代表性的大于 300 W·h/kg 的液体电解液金属锂负极软包电池设计参数, 研究成果中已出现室温下 2.7~4.4 V 电压区间内, 0.5C 充电/2C 放电条件下 500 次循环容量保持率大于 90 % 的 300 W·h/kg 金属锂电池, 该电池性能已接近实用化。

表 2 能量密度大于 300 W·h/kg 的金属锂软包电池

文献	化学体系	N/P 比值	电解液组成	注液量/(g/A·h)	容量/(A·h)	能量密度/(W·h/kg)	室温循环寿命
文献[32]	Li// NCM523	2.6	1.0 M LiPF <sub>6</sub> EC/DEC (1/1, v/v)	2.3	3.5	340	0.1C 充/放@2.8~4.3 V 60 次容量保持率 90 %
文献[33]	Li// NCM751015	7	1 M LiPF <sub>6</sub> 0.05 M LiDFOB EMC/ FEC (3/1, v/v)	20	2	300	0.5C 充/2C 放@2.7~4.4 V 500 次容量保持率 90 %
文献[34]	Li// NCM 622	2.6	1.2 M LiFSI TEP/BTFE (1:2 by molar ratio)	3	1.17	313	0.1C 充/0.33C 放@2.7~4.3 V 200 次容量保持率 86 %
文献[35]	Li// NCM811	0.39	1 M LiFSI DMTMSA	2.62	0.025	353	0.15C 充/0.5C 放@3.0~4.7 V 90 次容量保持率 88 %
文献[36]	Li// 富锂材料	2	1.0 M LiPF <sub>6</sub> EC/DMC (1/1, v/v), 2 wt.% LiPO <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	2.49	3.6	430	0.2C 充/放@2.8~4.6 V 50 次容量保持率 70 %
文献[37]	Li// NCM 811	1.445	1.0 M LiPF <sub>6</sub> EC/DMC (1/1, v/v), 2 wt.% VC, 1 wt.% FEC	2.9	0.207	371	0.2C 充/0.4C 放@2.75~4.25 V 150 次容量保持率 85 %

(2) 固体电解质金属锂电池。采用固体电解质代替液体电解液的固态电池一度被认为能够完美的克服金属锂枝晶的问题, 进而加快 Li-S 等质量能量密度在 500 W·h/kg 及以上锂金属电池的开发进程, 但是目前研究表明即便是采用全固态电解质, 仍然要面对锂枝晶的挑战。HAN 等<sup>[38]</sup>对 Li<sub>7</sub>La<sub>3</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>12</sub>(LLZO)和 Li<sub>2</sub>S-P<sub>2</sub>S<sub>5</sub> 固体电解质中金属锂枝晶的产生和生长机理进行了研究, 结果表明锂枝晶会沿着固态电解质中晶粒之间的晶界生长,

而 LLZO 等固态电解质高的电子导电率应该是导致锂枝晶产生和生长的重要原因。提高固体电解质的致密度和均匀性, 降低缺陷, 可有效阻止锂枝晶在固体电解质中的生长穿透<sup>[39]</sup>。然而与使用液体电解液的锂离子电池“固液界面”相比, 全固态电池更大的问题在于其电极与固体电解质之间的“固固界面”有更高的接触电阻, 显著影响了固态锂电池的循环寿命和倍率性能, 电极/电解质界面问题<sup>[40]</sup>成为固态电池研究亟需解决的基础科学问题之一。此外,



对全固态电池而言，尽管用固体电解质代替了液体电解液，一定程度上提高了电池的安全性，但自动化制造和质量控制技术易尚存诸多问题需要去探究<sup>[41]</sup>。因此，全固态电池的商业化尚需时日，而液体电解液-固液混合电解质-全固态电解质的逐步演变将成为高能量密度电池的发展方向<sup>[42]</sup>(图 8a)。固液混合电池中液体电解质的比例大幅下降，并引入金属锂作为负极，电池能量密度可以做到 350 W·h/kg，同时有望兼容液态电解质锂离子电池制备过程中大部分材料、设备和工艺，综合平衡电池的安全性、能量密度和循环寿命等性能。固液混合电池可先于全固态电池实现商业化，逐步替代采用液态电解液的锂离子电池。尽管如此，固液混合电池中固态电解质与液态电解液间的界面稳定性问题也需要关注，如 LIU 等研究表明固液混合电池中 1.0 M LiPF<sub>6</sub> EC/DMC (1/1, v/v) 电解液会在 Li<sub>6.5</sub>La<sub>3</sub>Zr<sub>1.5</sub>Ta<sub>0.5</sub>O<sub>12</sub>(LLZTO)表面分解产生 LiF、Li<sub>2</sub>O 和 Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 等，导致界面阻抗大幅增加而加速电池衰减(图 8b)<sup>[43]</sup>。

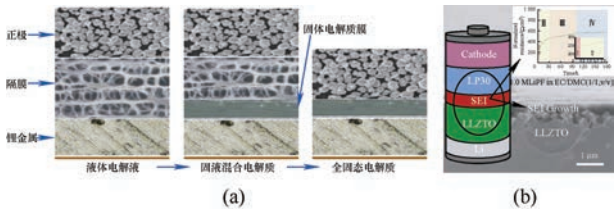


图 8 固体电解质锂离子电池示意图

综上所述，针对高比能负极材料(如硅、金属锂)的实用化研究，将会加速高能量密度电池的商业化应用进程。已有研究证明，固固界面或固液界面稳定性基础研究是高比能负极材料实用化研究中的重点领域，需要加强产学研联合攻关。

3.2 电池工艺优化

通过电池工艺调整来提高单体电池能量密度的方法，其本质是增加单位体积或重量电池系统内的电极活性物质占比，降低非活性辅材如壳体、集流体和粘结剂等用量，包括增加单体电池尺寸、增加电极面密度及压实密度、降低集流体/隔膜/壳体的厚度、降低 N/P 比值以及适当降低电解液用量等工艺措施。杨续来等<sup>[44]</sup>此前已对电池工艺优化与电池能量密度间的关联性做了详细分析与论证，以 PHEV2 尺寸的 2714891 型铝壳磷酸铁锂电芯为对象，通过相关工艺技术的叠加，其能量密度可以从 2714891 型磷酸铁锂铝壳电芯的 132 W·h/kg 提升

到 8914891 型电芯的 174 W·h/kg 或更高。

然而，通过单体电池的工艺优化来提升能量密度的方法是有天花板约束的，过犹不及，根据电池的使用场景选择合适的工艺参数非常重要。表 3 给出了工艺优化方案所依托的技术原理及可能会导致的电池失效风险，可见，提高电池能量密度的工艺优化研究对电池设计者有很高的要求，需要在多孔电极理论基础上建立机械-热-电化学多场多尺度耦合模型辅助电池设计的机制，规避潜在的失效风险。

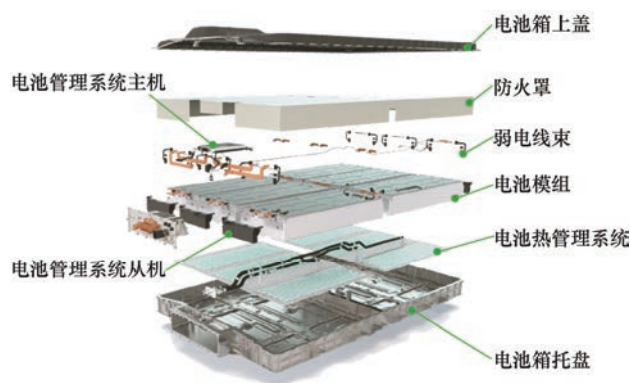
表 3 电池工艺设计对单体电池能量密度的影响

工艺方案	技术原理	潜在风险
增加单体电池尺寸	降低电池壳体重量占比	电池使用可靠性下降
降低电池壳体厚度	降低壳体重量占比，增加壳体内容积	电池使用可靠性下降
降低集流体厚度	降低集流体重量占比，增加壳体内容积	电极涂布加工性变差
使用多孔集流体	降低集流体重量占比	电极涂布加工性变差
降低隔膜厚度	降低隔膜重量占比，增加壳体内容积	电池自放电率增加
降低电解液量	降低电解液重量占比	电池安全及寿命下降
降低 N/P 比值	降低 SEI 膜对活性锂的消耗	负极析锂
增加电极涂层厚度	提高电极单位面积内的活性物质占比	电池功率及寿命下降
增加电极压实密度	提高电极单位体积内的活性物质占比	电池功率及寿命下降
增加电极活性物质比例	提高电极单位体积内的活性物质占比	电池功率及寿命下降

3.3 成组结构创新

动力电池系统一般由电池包箱体、单体电池、电池管理系统、热管理系统和线束等组成(图 9)<sup>[45]</sup>。与电池工艺优化的原理相似，电池系统的电池成组结构创新也是为了降低电池包中单体电池以外的其他组件占比，进而实现电池系统的轻量化。目前使用高强度轻量化的铝合金及高强钢<sup>[46]</sup>制成的电池箱托盘是实现电池系统轻量化的举措之一。成组效率作为评价电池系统成组技术的一个重要指标，定义为电池系统能量密度除以电池单体能量密度，即

成组效率=  $\frac{\text{电池系统能量密度}}{\text{电池单体能量密度}} \times 100\%$

图 9 纯电动乘用车用电池系统结构示意图<sup>[45]</sup>

### 3.3.1 无模组成组技术

单体电池通过串并联的成组方式来满足新能源汽车所需的电池容量和电压等级。在大尺寸高容量单体电池出现之前，动力电池系统主要通过小容量的单体电池并联，做成大容量电池模组，再将模组进行串联，实现高电压电池系统。2019 年动力电池企业 CATL 提出的无模组的 CTP(Cell to pack)成组技术，以大尺寸单体电池为基础，通过提高电池成组效率(纯电动乘用车电池平均成组效率从 2016 年的 63.5 % 提升至 2020 年的 69.3 %<sup>[13]</sup>)，实现动力电池系统能量密度的进一步提升。比亚迪刀片电池是大尺寸单体电池的代表，其长度在 600 ~ 2 500 mm，使用刀片电池的纯电动乘用车“汉”，其电池质量成组效率更是高达 85 %<sup>[47]</sup>，接近纯电动大巴车电池成组效率。同时，大众<sup>[48-49]</sup>等整车企业都进一步提出了 CTC(Cell to chassis/car)的技术方向，将动力电池与整车底盘进行集成，减少电池系统箱体等辅件的重量和体积，进一步实现整车轻量化并提高纯电动续航里程。

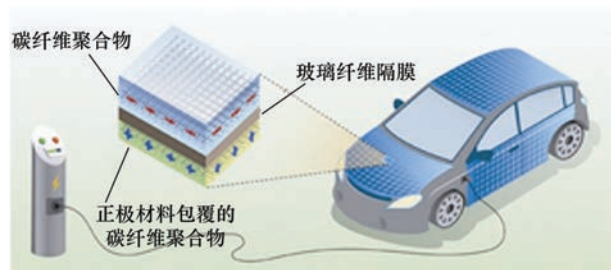
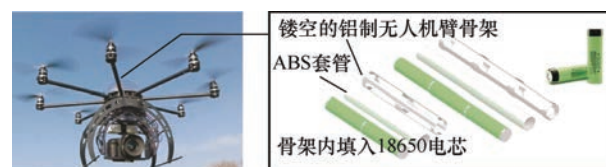
### 3.3.2 结构电池

结构电池集成了车身结构件和动力电池的双重功能，与新能源汽车使用独立的动力电池相比，承担车身外壳等功能的结构电池就成为“无质量”能量存储器件(图 10)<sup>[50]</sup>，从而进一步实现整车轻量化的目标。

为了将结构电池与 CTP 及 CTC 等结构创新技术相呼应，将结构电池创新命名为 CTS(Cell to structure)。瑞典查尔姆斯理工大学 CARLSTEDT 等<sup>[51]</sup>采用碳纤维||聚合物电解质||NCM(或 LiFePO<sub>4</sub>)叠片电池体系，基于 Tesla model S 和 BMW i3 车型的 Matlab 仿真结果表明，CTS 技术替代原有的电池、内饰、外壳等整车结构件，能有效的增加 70 % 整车续航里程。SCHNEIDER 等<sup>[52]</sup>对甲基丙烯酸酯聚合物电解质结构电池的制备及性能进行了研究，结果

表明结构电池需解决全固态电池开发过程中固固界面稳定性不佳、离子电导率低等电化学问题的同时还需要兼顾高的机械强度等力学特性。ASP 等<sup>[53]</sup>用增强碳纤维为负极，涂覆磷酸铁锂的铝箔为正极，以及填充甲基丙烯酸酯聚合物电解质的玻璃纤维平织布为隔膜，制成了厚度为 0.27 mm 的结构电池，室温 0.05C 倍率下能量密度为 24 W · h/kg，35 次循环无明显衰减，同时具备弹性模量 25 GPa 和拉升强度超过 300 MPa 的优秀力学性能。此外，常规锂离子电池同样可以作为结构电池来使用，HOLLINGER 等<sup>[54]</sup>使用 18650 电池外加支撑管的方式，制成结构电池替代多轴无人机的机臂(图 11)，能将无人机续航时间增加 41 %，新能源汽车亦可借鉴此类结构电池的开发工艺，特斯拉公司也已于 2021 年 10 月在德国柏林 Giga 举办的“Giga Fest”活动中展示了 Model Y 的基于 46800 圆柱电池的结构电池组。

概括而言，图 10 和图 11 分别代表了结构电池典型的两类设计理念，前者在设计时将电化学性能和机械性能同步考虑的，后者则是将常规锂离子电池的优秀电化学性能与特殊外壳材料良好的机械性能进行集成设计的。美国海军研究实验室 HOPKINS 等<sup>[55]</sup>分析了这两类结构电池的优缺点，认为后者综合性能优于前者，但考虑到常规离子电池的安全性问题，电池系统层级能量密度分别达到 900 W · h/kg 的铝-空气电池和 400 W · h/kg 的锌-空气电池可能是下一代结构电池的最佳选择。

图 10 碳纤维车身结构电池示意图<sup>[50]</sup>图 11 基于 18650 电池的无人机机臂结构电池<sup>[54]</sup>

综合来看，动力电池技术的更迭可以通过电池能量密度的变化来体现，电极材料体系的革新以及电池工艺结构的创新是电池能量密度提升的两条优



选技术途径,也是降低动力电池成本的必由之路。欧洲电池 2030+计划<sup>[1]</sup>进一步强调了基于材料基因组<sup>[56]</sup>研究的新材料和新化学体系开发平台的重要性,采用人工智能的高通量计算技术,从电极材料到电池设计,用大量数据构建模型,形成全新的材料开发途径,将大幅缩短新型电池材料的开发周期。然而,电池结构创新技术可能会使得电池系统的维修成本增加,要求动力电池朝着免维修的趋势发展,实现电池与整车同寿命,这对电池的一致性、稳定性和寿命特性提出了更高的要求。因此,需要进一步加强结构电池理论研究,发掘更多的电池一致性的影响因素和管控方法,强化电池系统层级安全机理和防控技术研究。此外,以保时捷 Taycan 为代表的 800 V 高压电池系统也可以看成电池系统结构的另一种创新,与常规的 400 V 动力电池系统相比,在相同功率的情况下,通过增加串联电池数量,提高电池系统电压的同时降低了工作电流,可以使用更细的铜电缆线束进行电流传输,进而以线束的减重而实现动力电池系统的轻量化<sup>[57]</sup>。

#### 4 电池能量密度与安全性的关联性

动力电池的电性能和安全可靠性能直接影响电动汽车的性能,安全是新能源汽车产业发展的底线。当前我国新能源汽车单车平均续航里程已超过 400 km,可覆盖 90% 以上用户里程需求<sup>[58]</sup>(实际上,80% 纯电动乘用车用户日均行驶里程均小于 60 km<sup>[59]</sup>)。2021 年我国新能源汽车市场磷酸铁锂电池装车量再次超越三元电池装车量(图 2),表明用户在续航里程基本满足需求的前提下,对磷酸铁锂电池在相对低成本和高安全性上的优势认可度开始超越对使用高能量密度三元电池而带来的超长续航里程的认可度。2020 年麦肯锡调研结果也已表明新能源汽车用户对动力电池品质与充电便捷性的关注度超越对续航里程的关注<sup>[60]</sup>。

2021 年我国新能源汽车重点专项对高能量密度电池提出了带有自修复功能的比能量高于 600 W·h/kg 且循环寿命不高于 500 次的全固态电池发展目标;对现有能量密度电池研究通过“揭榜挂帅”项目提出了电池系统成组效率不低于 80% 和电池系统发生热扩散 90 min 内不起火不爆炸等目标。这表明未来动力电池的发展一方面是进一步朝着更高能量密度的技术方向突破,另一方面是提高动力电池的使用安全性并满足全气候环境下的使用需求,此发展趋势与图 5a 中动力电池能量密度的演

变进程相吻合。

#### 4.1 动力电池安全性影响因素

动力电池安全事故核心原因是锂离子电池热失控,而引发锂离子动力电池热失控的原因很多,以机械滥用(碰撞、挤压、穿刺)、电滥用(过充、过放、外短路和析锂)和热滥用等三类原因为主<sup>[61-62]</sup>。

韩国汉阳大学 NOH 等<sup>[63]</sup>研究了 NCM 三元材料中镍含量对材料性能的影响,结果表明随着镍含量的增加,材料的放电比容量增加,但是 Ni 含量的增加会造成表面残碱升高、阳离子混排加剧、强氧化性的  $\text{Ni}^{3+}$  和  $\text{Ni}^{4+}$  增多等诸多问题,材料的循环寿命和热稳定性都会降低,氧析出现象会更加明显,如图 12 所示。换句话说,以高能量密度的高镍三元材料电池会因正极材料活性增加而使得电池在过充和高温等滥用情况下的安全性降低。QUINTIERE<sup>[64]</sup>研究表明电池热失控时释放的能量约是电池自身存储电化学能量的两倍,电池自身存储的能量越高或荷电态越高,其热失控时释放的能量也会越大。因此,高能量密度电池对安全防护提出了更高的要求。

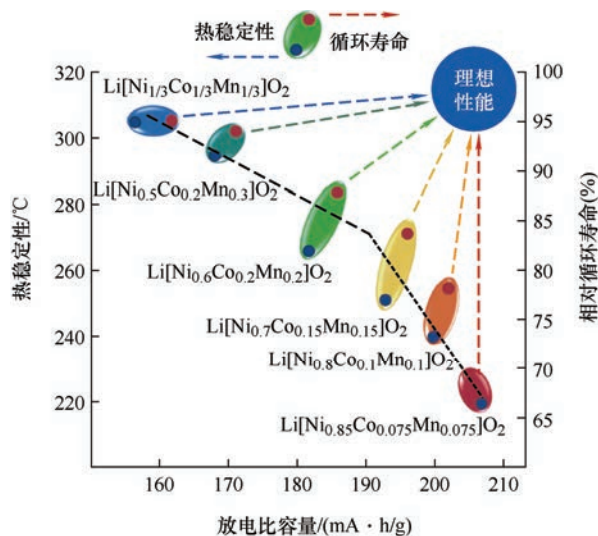


图 12 不同 Ni 含量 NCM 三元材料特性对比<sup>[63]</sup>

同时,在电池设计和制造过程中的环境粉尘、极片毛刺、极片涂布厚度不均匀<sup>[65]</sup>和电解液注液量不足<sup>[66]</sup>等因素,也会因电池的老化而引发电池热失控事故。随着电池循环使用次数的增加,电池内压增大,生产过程中混入的杂质微粒或不良副反应形成的锂枝晶等容易刺穿隔膜,导致微观内短路的发生,严重时就会产生热失控。因此,需要从源头严格控制锂离子动力电池产品质量;同时,在新能源汽车使用过程中,用户要逐步养成良好的用车习惯,共同维护新能源汽车行业的健康和可持续发展。

## 4.2 高比能兼顾高安全的动力电池

### 4.2.1 研发过程的安全设计

华中科技大学 DUAN 等<sup>[67]</sup>从电芯设计层级的正负极材料、电解液、隔膜等材料选型与匹配, 电池模组和系统层级的电池管理策略和安全防护措施等多方面的综述了高能量密度兼顾高安全特性的电池设计思路, 如: 在电极材料层级采用掺杂及包覆改性的正负极材料、功能涂层隔膜和阻燃电解液; 在电芯中设置防爆阀和安装熔断装置; 在电池系统层级使用高精度电池管理系统(BMS)和多功能安全监测传感器等, 如图 13 所示。QIU 等<sup>[68]</sup>也从电池材料的本质安全及电池管理等被动安全两个角度对提高电池安全技术进行了系统的分析。中国汽车技术研究中心王芳等<sup>[69-70]</sup>从动力电池系统的电气安全、机械安全、功能安全、化学安全 and 产品安全验证等综述了动力电池系统的安全分析与设计技术, 并从动力电池系统的总体方案设计、结构与电连接设计、BMS 设计、热管理系统设计和结构仿真分析及开发性试验验证等角度全面阐述了动力电池系统的设计与制造技术, 为动力电池系统的安全设计提供思路。

随着 2017 年我国新能源汽车补贴政策对电池系统能量密度要求的提高, 高比能三元电池市场占比快速提升, 电池安全逐步在电池单体安全的基础上转向电池系统的系统安全<sup>[71]</sup>。我国同步启动了 GB 18384—2020《电动汽车安全要求》、GB 38032—2020《电动客车安全要求》和 GB 38031—2020《电动汽车用动力蓄电池安全要求》三项强制性国家标准的制定工作, 并率先发布了《电动客车安全技术条件》, 增加了单体电池热失控和电池系统热失控扩展两个测试项, 要求电池单体发生热失控后, 电池系统在 5 min 内不起火不爆炸, 为乘员预留安全逃生时间。

与此同时, 在下一代先进电池技术上, 2020 年欧盟 Battery 2030+计划和 2021 年我国新能源汽车重点专项都提出了高能量密度电池的自修复概念, 如用海藻酸钠作为硅负极材料的粘结剂<sup>[72]</sup>, 提高粘结剂与硅颗粒表面的结合力, 使得粘结剂能随着硅材料的体积变化而变化, 进而实现电极的自修复, 改善电池的使用性能; 与自修复设计相同步的还有智能传感器如光纤传感器的应用<sup>[73-74]</sup>, 原位实时监测动力电池内部的温度、压力、电解质成分、电极膨胀度等信息, 辅助开发高精度智能电池管理系统。

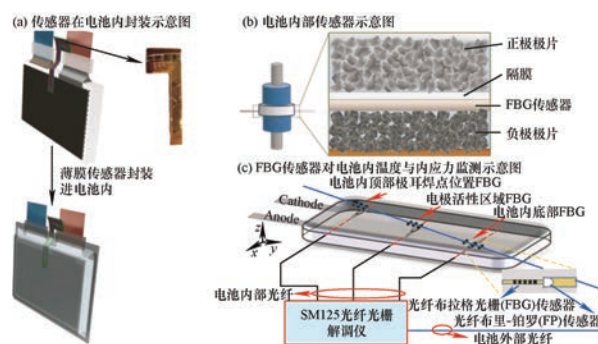


图 13 光纤传感器实时监测动力电池内部信息<sup>[67]</sup>

### 4.2.2 制造过程的品质管控

在合理设计的基础上, 动力电池制造过程中品质管控水平对电池性能有着很大的影响。当前液态电解液锂离子电池的制造工艺包括合浆、涂布、辊压、分切、制片、卷绕/叠片、入壳、烘烤、注液、化成和分容等数道工序, 环境粉尘、极片毛刺、极片涂布厚度和电极压实密度等因素都会直接关系到电池的寿命和安全性<sup>[75-78]</sup>, 如图 14 所示; 同时由于电池原材料、生产工艺等差别, 单体电池的容量、电压、内阻等性能存在一致性差异<sup>[79]</sup>, 使得成组后的电池系统寿命不及单体电池<sup>[80]</sup>, 影响电动汽车的使用。锂离子电池制造设备的精度水平、自动化程度也对电池的品质管控起到至关重要的作用, 动力电池制造企业需要结合 IATF16949 等质量管理工具加强智能工厂的建设, 引进智能化数据采集、智能过程控制、智能检测控制以及智能化仓储物流等智能化系统, 以强化锂离子动力电池的品质管理。

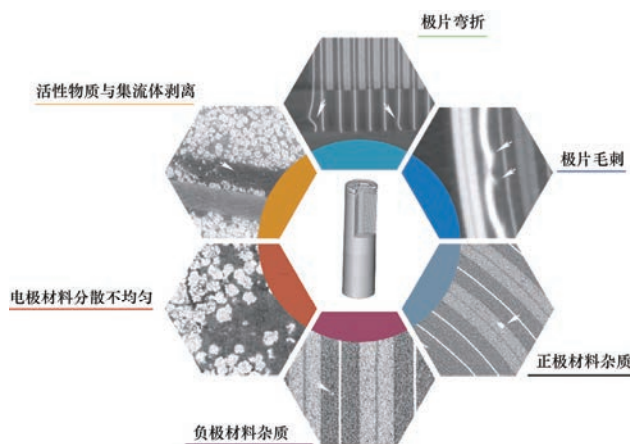


图 14 锂离子电池失效的工艺缺陷原因<sup>[77]</sup>

### 4.2.3 使用阶段的运营监管与服务

随着电动汽车产销量的急剧上升, 电动汽车电池起火事件引起了极高的公众关注度<sup>[81]</sup>。郑州大学 SU 等<sup>[82]</sup>以气体、交流阻抗、温度和声音等多个特征量为研究点, 采用试验和仿真相结合的方式, 系统研究了锂离子电池早期安全预警方法及安全防护



措施。北京航空航天大学华旻等<sup>[83]</sup>系统总结了电池管理系统中均衡管理技术作为保障动力电池一致性的有效方案。北京理工大学王震坡等<sup>[84]</sup>从大数据下动力电池系统数据融合、故障识别及故障预警三个方面,详细综述了当前对电池系统故障诊断技术的研究成果。中国科学技术大学刘昱君等<sup>[85]</sup>研究了全氟己酮等不同灭火介质对锂离子动力电池火灾灭火的有效性,为电池火灾消防规范的制定及工程应用提供了试验支撑。

自 2017 年 1 月起,工信部要求新能源汽车必须安装远程监控车载终端,实时向国家新能源汽车大数据监测平台传送 BMS 监测的动力电池的工作电压、电流、温度、SOC 状态和电池一致性等数据,强化新能源汽车安全监管,这也使得我国成为国际上第一个实现新能源汽车全国联网的国家。经过四年的发展,该平台已逐步从监管职能转向服务职能,综合动力电池数据、汽车运行数据和充电数据等信息<sup>[86]</sup>,通过建立电学特性模型、热模型、电热耦合模型和老化模型等<sup>[87-88]</sup>,对车载动力电池的健康状态进行监测和预警,并分析新能源汽车用户驾驶习惯与实时能耗间关联性<sup>[89]</sup>,为新能源汽车的安全运营提供服务。新能源汽车国家大数据联盟研究表明,截至 2020 年 3 月我国新能源年燃烧事故率约为万分之 0.918<sup>[90]</sup>,低于传统汽车的燃烧事故率。随着监管力度的加大以及企业对产品质量的重视,我国新能源汽车月平均故障率从 18 %降低到 7.7 %<sup>[90]</sup>,这过程仅用了 1 年时间(2018 年 10 月至 2019 年 10 月)。

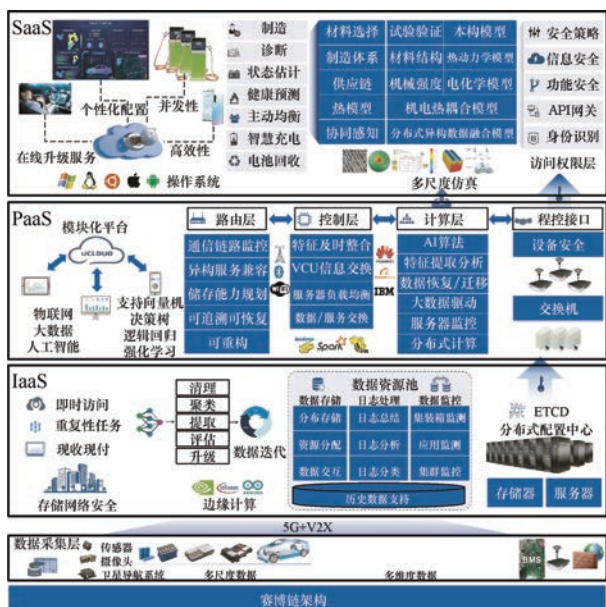


图 15 基于赛博链架构的动力电池全生命周期管理图示<sup>[91]</sup>

总而言之,从原材料到电池系统的全生命周期过程中,影响电池安全等特性的因素很多,涉及材料科学、电力电子、电化学和机械自动化等多领域交叉学科。北京航空航天大学 YANG 等<sup>[91]</sup>提出赛博链架构的动力电池全生命周期管理系统解决方案(图 5),利用赛博链独特的分层网络架构研究“单体-模组-电池包”的工艺流程中多工况、多体系和多尺度下的电池微观机理,融合微观-宏观耦合模型、智慧工厂解决方案、故障预测与健康管理、数据驱动平台等技术体系,建立“材料-电池-电动汽车-材料”动力电池全生命周期的闭环循环,实现资源利用最大化和管理效益最优化,满足电池系统精细化管理和未来能源互联网构建的需求。

## 5 结论

(1) 简析了锂离子电池发展历程,重点分析了我国新能源汽车动力电池能量密度的演变进程,表明锂离子动力电池正分别朝着更高能量密度和更实用化的两个方向进行技术突破,以推动新能源汽车能更好地满足市场需求。

(2) 从电极材料、电池工艺和成组结构三个方面,详细综述了当前锂离子动力电池能量密度提升的技术思路及研究进展,硅基负极材料和金属锂负极材料是高能量密度电池材料体系研究的重点,沿着 CTP-CTC-CTS 发展的电池结构创新也是动力电池能量密度进一步提升的重要技术方案。

(3) 分析了电池能量密度与安全性间的关系,提出高能量密度动力电池更需要加强在研发、制造和使用等环节的关键安全技术研究,以实现高比能动力电池设计安全、制造安全和车端使用安全的协同发展。

因此,开发高能量密度兼具高安全性的动力电池,保证新能源汽车高效稳定运行,仍是行业待解决的难题之一。

## 参 考 文 献

- [1] FICHTNER M, EDSTRÖM K, AYERBE E, et al. Rechargeable batteries of the future—The state of the art from a BATTERY 2030+ perspective[J]. *Advance Energy Materials*, 2021, 12(17): 2102904.
- [2] HØYER K. The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars[J].



- Utilities Policy, 2008, 16(2): 63-71.
- [3] 成业. 电动汽车的六次蜕变[J]. 中国工业评论, 2017(9): 100-106.
- CHENG Ye. Six metamorphoses of electric vehicles[J]. China Computer Users, 2017(9): 100-106.
- [4] KURZWEI P. Encyclopedia of electrochemical power sources[M]. Amsterdam: Elsevier, 2009.
- [5] VERMA S, MISHRA S, GAUR A, et al. A comprehensive review on energy storage in hybrid electric vehicle[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 8(5): 621-637.
- [6] VISHNUMURTHY K, GIRISH K. A comprehensive review of battery technology for E-mobility[J]. Journal of the Indian Chemical Society, 2021, 98: 100173.
- [7] PEREIRINHAA P, GONZÁLEZ M, CARRILERO I, et al. Main trends and challenges in road transportation electrification[J]. Transportation Research Procedia, 2018, 33: 235-242.
- [8] 王震坡, 黎小慧, 孙逢春. 产业融合背景下的新能源汽车技术发展趋势[J]. 北京理工大学学报, 2020, 40(1): 1-10.
- WANG Zhengpo, LI Xiaohui, SUN Fengchun. Development trends of new energy vehicle technology under industrial integration[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2020, 40(1): 1-10.
- [9] 周哲人. 新能源在汽车领域应用中的能量密度分析及思考[J]. 交通节能与环保, 2012, 8(1): 13-16.
- ZHOU Zheren. Analysis on energy density of new energy in automobile[J]. Energy Conservation & Environmental Protection in Transportation, 2012, 8(1): 13-16.
- [10] LI W, ERICKSON E, MANTHIRAM A. High-nickel layered oxide cathodes for lithium-based automotive batteries[J]. Nature Energy, 2020(5): 26-34.
- [11] THACKERAY M, AMINE K.  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  spinel and substituted cathodes[J]. Nature Energy, 2021(6): 566.
- [12] BERJOZA D, JURGENA I. Effects of change in the weight of electric vehicles on their performance characteristics[J]. Agronomy Research, 2017, 15(Suppl.1): 952-963.
- [13] 中华人民共和国工业和信息化部. 中国汽车产业发展年报[R]. 北京: 工业和信息化部装备工业发展中心, 2021.
- Ministry of Industry and Information Technology of China. China automotive industry development annual report[R]. Beijing: Equipment Industry Development Center of the Ministry of Industry and Information Technology, 2021.
- [14] BloombergNEF. Battery pack prices cited below \$100/kWh for the first time in 2020, while market average sits at \$137/kWh [EB/OL]//[2020-12-16]. <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh>.
- [15] 沈炎宾, 陈立桅. 高能量密度动力电池材料电化学[J]. 科学通报, 2020, 65(2-3): 117-126.
- SHEN Yanbin, CHEN Liwei. Materials electrochemistry for high energy density power batteries[J]. Chin. Sci. Bull., 2020, 65(2-3): 117-126.
- [16] MANTHIRAM A. An outlook on lithium ion battery technology[J]. ACS Central Science, 2017(3): 1063-1069.
- [17] ZU Chenxi, LI Hong. Thermodynamic analysis on energy densities of batteries[J]. Energy Environmental Science, 2011(4): 2614-2624.
- [18] 李文俊, 徐航宇, 杨琪, 等. 高能量密度锂电池开发策略[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(2): 448-478.
- LI Wenjun, XU Hangyu, YANG Qi, et al. Development of strategies for high-energy-density lithium batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(2): 448-478.
- [19] ZUO Y, LI Biao, JIANG N, et al. A high-capacity  $\text{O}^{2-}$  type Li-rich cathode material with a single-layer  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  superstructure[J]. Advanced Materials, 2018, 30(16): 1707255.
- [20] HU E, YU X, LIN R, et al. Evolution of redox couples in Li- and Mn-rich cathode materials and mitigation of voltage fade by reducing oxygen release[J]. Nature Energy, 2018(3): 690-698.
- [21] WANG L, WU Z, ZOU J, et al. Li-free cathode materials for high energy density lithium batteries[J]. Joule, 2019, 3(9): 2086.
- [22] LIU Y, LIU S, LI G, et al. High volumetric energy density sulfur cathode with heavy and catalytic metal oxide host for lithium-sulfur battery[J]. Advance Science, 2020, 7: 1903693.
- [23] LI M, LIU T, SHI Z, et al. Dense all-electrochem-active electrodes for all-solid-state lithium batteries[J]. Advance Materials, 2021, 33(26): 2008723.

- [24] ZHAO C, XU G, YU Z, et al. A high-energy and long-cycling lithium-sulfur pouch cell via a macroporous catalytic cathode with double-end binding sites[J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16: 166-173.
- [25] LU Y, RONG X, HU Y, et al. Research and development of advanced battery materials in China[J]. *Energy Storage Materials*, 2019, 23: 144-153.
- [26] CUI Yi. Silicon anodes[J]. *Nature Energy*, 2021(6): 995-996.
- [27] CHOI J, JEONG H, JANG J, et al. Weakly solvating solution enables chemical prelithiation of graphite-SiO<sub>x</sub> anodes for high-energy li-ion batteries[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2021, 143: 9169-9176.
- [28] HERMAN L, SINKULA M. Development of high energy density lithium batteries[R]. California: California Energy Commission and Envia Systems, 2019.
- [29] SUNG J, KIM N, Ma J, et al. Subnano-sized silicon anode via crystal growth inhibition mechanism and its application in a prototype battery pack[J]. *Nature Energy*, 2021, 6: 1164-1175.
- [30] LIN D, LIU Y, CUI Y. Reviving the lithium metal anode for high-energy batteries[J]. *Nature Nanotechnology*, 2017, 12: 194.
- [31] LIANG J, LUO J, SUN Q, et al. Recent progress on solid-state hybrid electrolytes for solid-state lithium batteries[J]. *Energy Storage Materials*, 2019, 21: 308-334.
- [32] ZHANG X, LI T, LI B, et al. A sustainable solid electrolyte interphase for high-energy-density lithium metal batteries under practical conditions[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, 59: 3252-3257.
- [33] HWANG J, PARK S, YOON C, et al. Customizing a Li-metal battery that survives practical operating conditions for electric vehicle applications[J]. *Energy Environmental Science*, 2019, 12: 2174-2184.
- [34] NIU C, LEE H, CHEN S, et al. High-energy lithium metal pouch cells with limited anode swelling and long stable cycles[J]. *Nature Energy*, 2019(4): 551-559.
- [35] XUE W, HUANG M, LI Y, et al. Ultra-high-voltage Ni-rich layered cathodes in practical Li metal batteries enabled by a sulfonamide-based electrolyte[J]. *Nature Energy*, 2021, 6(5): 1-11.
- [36] DENG W, DAI W, ZHOU X, et al. Competitive solvation-induced concurrent protection on the anode and cathode toward a 400 Wh kg<sup>-1</sup> lithium metal battery[J]. *ACS Energy Letters*, 2021, 6(1): 115-123.
- [37] XU Q, YANG X, RAO M, et al. High energy density lithium metal batteries enabled by a porous graphene/MgF<sub>2</sub> framework[J]. *Energy Storage Materials*, 2020, 26: 73-82.
- [38] HAN F, WESTOVER A, YUE J, et al. High electronic conductivity as the origin of lithium dendrite formation within solid electrolytes[J]. *Nature Energy*, 2019(4): 187-196.
- [39] HUANG W, ZHAO N, BI Z, et al. Can we find solution to eliminate Li penetration through solid garnet electrolytes? [J]. *Materials Today Nano*, 2020, 10: 100075.
- [40] LIANG R, LI Q, YU X, et al. Approaching Practically accessible solid-state batteries: stability issues related to solid electrolytes and interfaces[J]. *Chemical Reviews*, 2020, 120, 14: 6820-6877.
- [41] FAN L, HE L, NAN C, et al. Tailoring inorganic-polymer composites for the mass production of solid-state batteries[J]. *Nature Reviews Materials*, 2021: 1-17.
- [42] CAO W, ZHANG J, LI H. Batteries with high theoretical energy densities[J]. *Energy Storage Materials*, 2020, 26: 46-55.
- [43] LIU J, GAO X, HARTLEY G, et al. The interface between Li<sub>6.5</sub>La<sub>3</sub>Zr<sub>1.5</sub>Ta<sub>0.5</sub>O<sub>12</sub> and liquid electrolyte[J]. *Joule*, 2020(4): 101-108.
- [44] 杨续来, 张峥, 曹勇, 等. 高能量密度锂离子电池结构工程化技术探讨[J]. *储能科学与技术*, 2020, 9(4): 1127-1136.
- YANG Xulai, ZHANG Zheng, CAO Yong, et al. The structural engineering for achieving high energy density Li-ion batteries[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2020, 9(4): 1127-1136.
- [45] CHEN Y, KANG Y, ZHAO Y, et al. A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2021, 59: 83-99.
- [46] 李焱坤, 余万铨, 贺东方, 等. 纯电动汽车电池箱体结构分析与轻量化设计[J]. *塑料工业*, 2020, 48(8): 91-95.
- LI Yaokun, YU Wanquan, HE Dongfang, et al. Structural analysis and lightweight design of battery box for pure electric vehicles[J]. *China Plastics Industry*, 2020, 48(8):

- 91-95.
- [47] YANG X, LIU T, WANG C. Thermally modulated lithium iron phosphate batteries for mass-market electric vehicles[J]. *Nature Energy*, 2021, 6: 176-185.
- [48] CALISKAN A, KADIU A. US Patent 20190351750A1 Body-on-frame electric vehicle with battery pack integral to frame[S]. Dearborn: MI, 2019.
- [49] MOLGER M. Future trends on battery systems - ready for the next generation[R]. Wolfsburg: UBS Evidence Lab VW ID.3 Teardown, 2021.
- [50] ASP L, JOHANSSON M, LINDBERGH G, et al. Structural battery composites: A review[J]. *Composite Structures*, 2019(1): 042001.
- [51] CARLSTEDT D, ASP L. Performance analysis framework for structural battery composites in electric vehicles[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 186(4): 107822.
- [52] SCHNEIDER L, IHRNER N, ZENKERT D, et al. Bicontinuous electrolytes via thermally initiated polymerization for structural lithium ion batteries[J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2019(2): 4362-4369.
- [53] ASP L, BOUTON K, CARLSTEDT D, et al. A structural battery and its multifunctional performance[J]. *Advanced Energy Sustainability Research*, 2021(2): 2000093.
- [54] HOLLINGER A, MCANALLEN D, BROCKETT M, et al. Cylindrical lithium-ion structural batteries for drones[J]. *International Journal Energy Research*, 2019, 44(1): 1-7.
- [55] HOPKINS B, LONG J, ROLISON D, et al. High-performance structural batteries[J]. *Joule*, 2020, 4: 2237-2243.
- [56] 汪洪, 向勇, 项晓东, 等. 材料基因组——材料研发新模式[J]. *科技导报*, 2015, 33(10): 13-19.
- WANG Hong, XIANG Yong, XIANG Xiaodong, et al. Materials genome enables research and development revolution[J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(10): 13-19.
- [57] AGHABALI I, BAUMAN J, KOLLMAYER P, et al. 800-V Electric vehicle powertrains: review and analysis of benefits, challenges, and future trends[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, 7(3): 927-948.
- [58] SHI Y, ZHANG Q, HE A, et al. A real-world investigation into usage patterns of electric vehicles in Shanghai[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 32: 101805.
- [59] KEMPTON W. Electric vehicles: Driving range[J]. *Nature Energy*, 2016, 1: 16131.
- [60] TSCHIESNER A, HEUSS R, HENSLEY R, et al. The road ahead for e-mobility[R]. Munich: McKinsey Company, 2020.
- [61] 王其钰, 王朔, 周格, 等. 锂电池失效分析与研究进展[J]. *物理学报*, 2018, 67: 128501.
- WANG Qiyu, WANG Shuo, ZHOU Ge, et al. Progress on the failure analysis of lithium battery[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67: 128501.
- [62] 朱晓庆, 王震坡, WANG H, 等. 锂离子动力电池热失控与安全管理研究综述[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(14): 91-118.
- ZHU Xiaoqing, WANG Zhenpo, WANG H, et al. Review of thermal runaway and safety management for lithium-ion traction batteries in electric vehicles[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(14): 91-118.
- [63] NOH H, YOUN S, YOON C, et al. Comparison of the structural and electrochemical properties of layered  $\text{Li}[\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z]\text{O}_2$  ( $x=1/3, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$  and  $0.85$ ) cathode material for lithium-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 233: 121-130.
- [64] QUINTIERE J G. Packaging technique to defeat fires and explosions due to lithium-ion and related high energy density batteries[R]. Washington: Qdot LLC, 2020.
- [65] JUST P, ROST J, ECHELMEYER T, et al. A method to quantify coating thickness and porosity of electrodes for lithium-ion-batteries[J]. *Measurement*, 2016, 89: 312-315.
- [66] GÜNTHER F, BURGSTALLER C, KONWITSCHNY F, et al. Influence of the electrolyte quantity on lithium-ion cells[J]. *Journal of the Electrochemistry Society*, 2019, 166(10): A1709-A1714.
- [67] DUAN J, TANG X, DAI H, et al. Building safe lithium-ion batteries for electric vehicles: A review[J]. *Electrochemical Energy Review*, 2020(3): 1-42.
- [68] QIU Y, JIANG F. A review on passive and active strategies of enhancing the safety of lithium-ion batteries[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022(184): 122288.
- [69] 王芳, 夏军. 电动汽车动力电池系统安全分析与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2016.



- WANG Fang, XIA Jun. Safety and analysis and design of battery pack for electric vehicle[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [70] 王芳, 夏军. 电动汽车动力电池系统设计与制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- WANG Fang, XIA Jun. Design and manufacturing technology of battery pack for electric vehicle[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [71] 李志杰, 陈吉清, 兰凤崇, 等. 机械外力下动力电池系统的系统安全性分析与评价[J]. 机械工程学报, 2019, 55(12): 137-148.
- LI Zhijie, CHEN Jiqing, LAN Fengchong, et al. Analysis and evaluation on system safety of power battery pack under mechanical loading[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(12): 137-148.
- [72] KOVALENKO I, ZDYRKO B, MAGASINSKI A, et al. A major constituent of brown algae for use in high-capacity li-ion batteries[J]. Science, 2011, 334(6502): 75-79.
- [73] EE Y, TEY K, LIM K, et al. Lithium-ion battery state of charge (SoC) estimation with non-electrical parameter using uniform fiber bragg grating (FBG)[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 40: 102704.
- [74] HAN G, YAN J, GUO Z, et al. A review on various optical fibre sensing methods for batteries[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 150: 111514.
- [75] SCHMIDT O, THOMITZEK M, RÖDER F, et al. Modeling the impact of manufacturing uncertainties on lithium-ion batteries[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2020, 167: 060501.
- [76] GÜNTHER T, BILLOT N, SCHUSTER J, et al. The Manufacturing of Electrodes: Key process for the future success of lithium-ion batteries[J]. Advanced Materials Research, 2018, 1140: 304-311.
- [77] QIAN G, MONACO F, MENG D, et al. The role of structural defects in commercial lithium-ion batteries[J]. Cell Reports Physical Science, 2021, 2(9): 100554.
- [78] KUMBERG J, MÜLLER M, DIEHM R, et al. Drying of lithium-ion battery anodes for use in high-energy cells: influence of electrode thickness on drying time, adhesion, and crack formation[J]. Energy Technology, 2019(7): 1900126.
- [79] HOSSEINZADEH E, ARIAS S, KRISHN M, et al. Quantifying cell-to-cell variations of a parallel battery module for different pack configurations[J]. Applied Energy, 2021(282): 115859.
- [80] WANG X, FANG Q, DAI H, et al. Investigation on cell performance and inconsistency evolution of series and parallel lithium-ion battery modules[J]. Energy Technology, 2021(9): 2100072.
- [81] 陈泽宇, 熊瑞, 孙逢春. 电动汽车电池安全事故分析与研究现状[J]. 机械工程学报, 2019, 55(24): 93-116.
- CHEN Zeyu, XIONG Rui, SUN Fengchun. Research status and analysis for battery safety accidents in electric vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(24): 93-116.
- [82] SU T, LYU N, ZHAO Z, et al. Safety warning of lithium-ion battery energy storage station via venting acoustic signal detection for grid application[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 38: 102498.
- [83] 华旒, 周思达, 何璐, 等. 车用锂离子动力电池组均衡管理系统研究进展[J]. 机械工程学报, 2019, 55(20): 73-84.
- HUA Yang, ZHOU Sida, HE Rong, et al. Review on lithium-ion battery equilibrium technology applied for EVs[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(20): 73-84.
- [84] 王震坡, 李晓宇, 袁昌贵, 等. 大数据下电动汽车动力电池故障诊断技术挑战与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2021, 57(14): 52-63.
- WANG Zhenpo, LI Xiaoyu, YUAN Changgui, et al. Challenge and prospects for fault diagnosis of power battery system for electrical vehicles based on big-data[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(14): 52-63.
- [85] 刘昱君, 段强领, 黎可, 等. 多种灭火剂扑救大容量锂离子电池火灾的实验研究[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(6): 1105-1112.
- LIU Yujun, DUAN Qiangling, LI Ke, et al. Experimental study on fire extinguishing of large-capacity lithium-ion batteries by various fire extinguishing agents[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(6): 1105-1112.
- [86] 余承其, 张照生, 刘鹏, 等. 大数据分析技术在新能源汽车行业的应用综述——基于新能源汽车运行大数据[J]. 机械工程学报, 2019, 55(20): 3-16.
- SHE Chengqi, ZHANG Zhaosheng, LIU Peng, et al. Overview of the application of big data analysis

- technology in new energy vehicle industry: Based on operating big data of new energy vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(20): 3-16.
- [87] 胡晓松, 唐小林. 电动车辆锂离子动力电池建模方法综述[J]. 机械工程学报, 2017, 53(16): 20-31.
- HU Xiaosong, TANG Xiaolin. Review of modeling techniques for lithium-ion traction batteries in electric vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(16): 20-31.
- [88] LIPU M, HANNAN M, HUSSAIN A, et al. A review of state of health and remaining useful life estimation methods for lithium-ion battery in electric vehicles: Challenges and recommendations[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 205: 115-133.
- [89] SHI Y, ZHANG Q, HE A, et al. A real-world investigation into usage patterns of electric vehicles in Shanghai[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 32: 101805.
- [90] 刘鹏. 新能源汽车大数据与运行安全[R]. 北京: 电动车辆国家工程实验室, 2020.
- LIU Peng. Big data and operation safety of new energy vehicles[R]. Beijing: National Engineering Laboratory for Electric Vehicles, 2020.
- [91] YANG S, HE R, ZHANG Z, et al. CHAIN: Cyber hierarchy and interactional network enabling digital solution for battery full-lifespan management[J]. Matter, 2020, 3(1): 27-41.
- 
- 作者简介:** 杨续来, 男, 1983 年出生, 博士, 教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为动力电池及其关键材料与工艺。  
E-mail: yangxl@hfu.edu.cn
- 袁帅帅, 男, 1997 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为动力电池关键材料。  
E-mail: ss\_yuan007@163.com
- 杨文静, 女, 1997 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为动力电池一致性分析。  
E-mail: 1251942745@qq.com
- 刘闯, 男, 1979 年出生, 硕士, 总经理。主要研究方向为新能源汽车运营及大数据分析应用。  
E-mail: 1131583311@qq.com
- 杨世春(通信作者), 男, 1974 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为电动汽车能源动力系统安全、高效优化理论及集成控制相关科学与技术。  
E-mail: yangshichun@buaa.edu.cn