DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.3.354 **中图分类号**：TM912 **文献标志码**：A

新能源汽车动力电池安全问题分析及改进趋势综述

舒俊豪，武小花，杨佳珞，徐 鑫
(西华大学汽车测控与安全四川省重点实验室，成都 610039)

摘要：新能源汽车是我国汽车行业转型发展的主要方向，它们的安全性问题引起了全社会的高度关注。为了研究新能源汽车动力电池安全问题，对近6年内公开的新能源汽车事故进行统计，分析了起火车型和起火原因。对电池过充、过放、内外部短路、挤压碰撞、热失控等安全事故机理进行了描述，综述了电池热失控时的特征参数，基于运行数据分析了某事故车在起火时的特征参数变化，最后对新能源汽车存在的问题提出了一些解决方法，并重点描述了基于大数据建立的电池模型和智能算法，为今后的动力电池故障诊断工作提供了一定的基础。

关键词：新能源汽车；事故分析；电池安全；热失控；大数据；智能算法

Review of Analysis and Improvement Trend of New Energy Vehicle Power Battery Safety Issues

SHU Junhao, WU Xiaohua, YANG Jialuo, XU Xin
(Vehicle Measurement, Control and Safety Key Laboratory of Sichuan Province, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: New energy vehicles are the main direction for the transformation and development of automobile industry in China, and their safety issues have also attracted the attention from the whole society. To study the safety issues of new energy vehicle power battery, statistics of new energy vehicle accidents which have been publicly disclosed over the past six years are collected in this paper, and the corresponding vehicle models and fire causes are analyzed. The mechanisms of safety accidents such as battery overcharge, overdischarge, internal and external short-circuit faults, extrusion and collision, and thermal runaway are described. The characteristic parameters of battery thermal runaway are summarized. Based on the operating data, the variation in the characteristic parameters of one accident car when it was on fire is analyzed. Finally, some solutions to the existing issues of new energy vehicles are given, and the battery models and intelligent algorithms which are established on the basis of big data are introduced in detail, providing a basis for power battery fault diagnosis in the future.

Keywords: New energy vehicle; accident analysis; battery safety; thermal runaway; big data; intelligent algorithm

收稿日期：2022-05-11；**修回日期**：2022-08-01；**录用日期**：2022-08-19；**网络首发日期**：2022-10-09
基金项目：四川省科技计划资助项目(2020YFQ0037，2021-YFG0071，2021YFQ0052，2019ZDZX0002)；四川省西华大学研究生创新基金资助项目(YCJJ20201150)
This work is supported by the Science and Technology Project of Sichuan Province under the grant 2020YFQ0037，2021YFG 0071，2021YFQ0052 and 2019ZDZX0002；the Innovation Fund of Postgraduate，Xihua University in Sichuan Province under the grant YCJJ20201150

近年来，随着中国新能源汽车数量的不断增长，新能源汽车火灾事故的频率也逐年增加，严重危害着驾驶人员的生命和财产安全。新能源汽车的起火原因是多种因素的，其中动力电池的过充、挤压、碰撞、涉水等恶劣条件及制造工艺的问题均可能引起电池的热失控，并造成新能源汽车起火甚至爆炸。新能源汽车在火灾事故中，尽管其锂离子电池燃烧时的火焰温度较低，但起火被完全扑灭后

电池的温度并没有很快降低至安全水平，还会产生大量有毒气体。即使将电池浸泡在水中，其温度下降至安全水平也需较长的时间，也极易发生复燃，而且蔓延速度极快[1]。

本文统计近 6 年内 150 余起新能源汽车起火事故，归纳总结其起火原因，对起火机理进行阐述，综述热失控时特征参数的变化，并基于某事故车辆的运行数据分析热失控时主要特征参数的变化。最后对未来新能源汽车动力电池安全的发展提供一些建议，并重点描述基于智能算法的故障诊断方法。本文旨在为动力电池故障诊断研究工作提供必要的依据。

1　起火事故统计

基于公开的新闻报道和文献，本文收集了从 2015 年 4 月到 2021 年 10 月 150 余例新能源汽车起火事故数据，详细的事故原因如图 1 所示。充电站/桩起火事故位居第一，约占26%，包括直接起火、充电设备故障、过充等原因造成的充电时起火。近几年来，由充电问题引起的起火事故尤为频繁，引起了政府部门和相关专家的高度重视，对于充电设备的监管和充电方式的规范使用，以及对充电时特征参数检测和充电车辆的安全评估都是应该值得重视的方面。

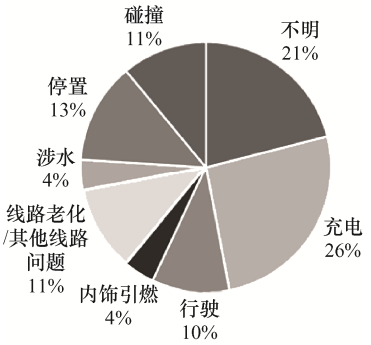


图 1　起火原因分析

Fig. 1 Analysis of causes of fire

除充电引起的事故之外，停置时起火也占据了很高的比例，约为 13%。当车辆处在断电停置状态时，汽车起火大多是由电池内短路引起的。内短路发生时并不一定立刻产生热失控，可能电池温度还没有到达热失控的临界阈值，但当车辆驶离充电点或者运行停止以后，随着内短路的加剧且持续地产热，电池工作温度不断提高，一旦电池温度超过热失控阈值，就会产生热失控。因此这为在停置断电状态下对电池的有效监管与防护提出了更高的要求。但是，目前大部分新能源汽车停置时的状态数据并没有上传至国家或者地方数据平台，并且停置起火前后的相关信息很难获取，所以此类事故原因难以鉴定。此外，碰撞、涉水和线路老化等问题引发的事故概率分别为11%、4%和11%，这些故障都会引起电池热失控。

2　起火原因机理分析

2.1　内部短路机理

车载动力电池的工作条件十分复杂，大电流的充放电、高低温的运行环境、雨水浸泡、振动、过充过放电等情况均极易诱发内短路[2]。内短路是指由于内部隔膜受到破坏，电池正、负极相互接触的情况，同时伴随着产热现象的发生。从电池的整个生命周期来看，内短路具有隐蔽性和较长的潜伏期，其预测和检测都相对较复杂，被认为是导致动力电池自燃的主要因素。机械滥用、热滥用、电滥用等都是内短路主要的触发形式[3]。机械滥用主要是由外力引起的，通常在事故中出现，包括电池的撞击、挤压、杂质的流入、针刺等导致电解液泄漏，或隔膜破裂导致正负极产生机械接触形变，进而导致内部短路[4]。热滥用[5]是指电池在高热状态下因电池的隔膜大规模热收缩而崩溃，造成电池正、负两极直接接触的内短路。电池的过热[5-6]可能是由机械滥用、电气滥用和连接器连接点失效造成的，连接器的接触损耗会导致电池组内电阻增大，进而导致局部过热；预紧力不足也会导致接触电阻显著增加，在界面处产生热量，并造成大量电池能量损失；而逐步的热失控也伴随着热的产生。电滥用是由电池的过充或过放引起的电池内部金属枝晶，这并不是一个短期的过程，在长时间的枝晶生长下会

导致枝晶穿透隔膜空隙以致正负极连接，造成内短路。在电池生产的过程中，由于金属杂质、分切毛刺、叠片、卷绕错位以及电解质溶解浸润不均等情况，也可能造成电池内短路。在内短路的演变过程中，因电池内部温度升高导致电极、电解质和隔板之间发生的复杂化学反应大多以放热反应为主，进一步加重了内短路的严重程度。当电池发生大面积内短路时，电能以很高的速率释放出来，温度急剧上升，引发热失控。

2.2 外部短路机理

外短路可能是在意外漏水或油渍进入电池包、电池因外力变形、汽车振动引起的连接板连接线松动等情况下触发的。外短路的机理类似于在电池正、负极两端直接并联一个较小的电阻，引起快速放电的现象。因为连接的电阻很小，所以会导致放电时电流极大，电池温度迅速升高，可能造成电池端子熔断，进而引发热失控[7]。

2.3 过充电机理

在充电工况下，某些电池单体会发生在超过充电的截止电压后仍继续充电，造成过充现象。正常充电状况下，电池中的锂是以离子的形式存在，而在过充电过程中，由于电池的负极隔膜内会形成枝晶，电解液与电极之间造成了电池的内部微短路，对电池内的放热反应产生了加速的影响。隔膜间枝晶的不断生长将加剧电池内的微短路，造成电芯温度迅速上升，并且会催生一系列的副反应，触发失控阈值，导致电池出现热失控[8]。

2.4 过放电机理

电池的不一致性是不可避免的。当某个电池单体的电压低于规定的放电截止电压时仍持续放电，会导致电池过放电。电池组中电压最低的电池单体在过放电时会被一起串联的其他电池单体强行放电，在此过程中可能出现电极倒转，电池的电压变为负压，过放电单体会发生异常产热现象。过放电会导致电池的容量下降，负极的固体电解质界面 SEI(solid electrolyte interface)膜分解，产生 CO 或 CO_2 等气体并导致电池膨胀。当故障单体再次充电时[9]，锂离子流通时的阻力将会增大，而 SEI 膜则在其负极再次形成，同时也将损耗大量的锂离子，使在碳层微孔内的锂离子数量受到了限制，而且这些损耗是不可逆的，会严重影响电池的健康状态。另外，在过放电的状态下，负极电势持续上升，在高电势状态下负极集流体铜箔会出现氧化物侵蚀，负极的表面会出现集流体的沉积，而活性物质和集流体之间的结合力及负极集流体传递电子的能力会发生破坏，进而造成电池损坏。

2.5 热失控

电池热失控中往往伴随着大量的物理化学反应发生，比如 SEI 膜分解、负极活性物质与电解液反应、正极活性物质与电解液反应、电解液分解、负极活性物质与粘合剂反应等。上述反应并没有根据规定的先后顺序分别发生，也可能是多个化学反应一起发生[10]。在高温下，锂离子电池的容量衰减，电池内阻增大，且电池负极内阻增加值高于正极。温度超过 80 ℃时，锂离子内部将出现热分解反应。大概在 80~120 ℃，SEI 膜首先进行反应，SEI 膜的分解会使得负极活性物质失去保护层，电解质将会和负极的锂发生反应。电池的隔膜耐高温性不强，聚乙烯隔膜在130 ℃左右、聚丙烯在170 ℃左右时隔膜孔将会关闭，能阻断短路电流，对电芯起到一定保护作用。温度在 190 ℃左右时电阻隔膜将会溶解，此时正、负电极将直接接触，引发电池内短路，并且释放大量的电能使得温度迅速升高。电池正极和电解液会衍生一系列的化学反应，生成大量的气体[11-12]。产生的气体迅速聚集膨胀，使得电池内部压力迅速上升，当内部压力超过安全阀的阈值时会产成喷射。

3 热失控表征参数

国内外学者通过研究动力电池热失控行为，将实时检测的动力电池电压、电流、温度及产生的气体作为电池热失控故障特征参数，通过对其中一种或几种特征参数引入热失控早期预警技术，能有效地对动力电池热失控进行预警，避免造成较大的损失。详细试验与特征参数[13-21]见表 1。

表 1　动力电池热失控特征参数分析

Tab. 1 Analysis of characteristic parameters of power battery thermal runaway

文献	试验	失控阶段	特征参数变化及结论
[13]	2 A·h 18650 动力电池热失控试验	—	将温度、电池荷电状态 SOC(state of charge)作为特征参数，探究了 SOC 与边界阈值的关系
[14]	18650 锂电池过充热失控试验	6 个阶段	将电压、表面温度、爆燃时间作为特征参数并总结了热失控试验中特征参数的阈值
[15]	磷酸铁锂电池热失控试验	6 个阶段	将电压、放热率、温度等作为特征参数，对副反应和热累积进行描述，并对特征参数阈值进行了定义
[16]	40 A·h 锂电池过充试验	5 个阶段	将电压、温度等作为特征参数，并将电压急剧上升与热失控时温度急剧上升之间的延迟时间作为预警时间
[17]	25 A·h 三元锂电池热失控试验	—	将内部温度、温差、电压、内阻等作为特征参数，并提出了三级保护的概念
[18]	300 A·h 磷酸铁锂电池加热试验	4 个阶段	将电压、温度和温升速率等作为特征参数，通过表面的温度速率曲线，清楚地观察到电池的热失控过程
[19]	2 A·h 18650 锂电池加热试验	3 个阶段	对电池表面温度、温升速率、平均温度等特征参数都进行了分析，通过实验发现，当热失控发生时，电池表面最高温度和内部压力随着 SOC 的增加而增加
[20]	18650 锂电池热滥用试验	—	对热失控电池内、外部的温度、温升速率、峰值温度、热失控边界温度等特征参数进行了统计和分析
[21]	不同材料 40 A·h 锂电池过充试验	5 个阶段	定义电压拐点、电压平台期、峰值电压、热失控起始温度关键参数，对电池热失控风险和耐受性进行评估

4　基于大数据平台的案例分析

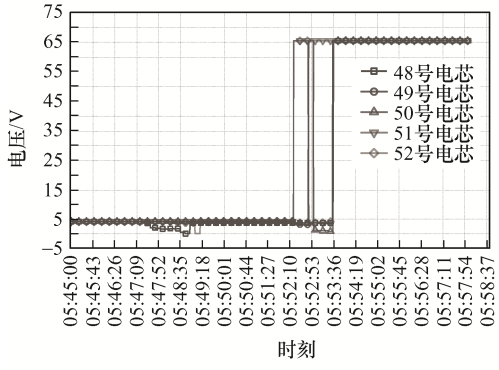
事故概况 1：2019 年 10 月，某新能源汽车在充电站发生自燃。该事故车辆于某日上午进入充电站采用直流快充的方式进行充电，1 h 后发生充电故障并且停止充电；过 10 min 后车辆出现冒烟现象，车主尝试扑救未果；再过 30 min 后消防员到达现场，灭火后将事故车辆带回服务站进行拆解。该车处于直流快速充电状态时发生自燃，外接充电电源枪及其线路完好。该事故车整体基本完好，前机舱盖靠近前风挡位置、后轮两侧及后部有明显烧蚀痕迹，驾驶室内基本完好但有明显的烟熏痕迹，座椅有明显的表面高温炙烤熔融及变黄。事故车辆如图 2 所示。



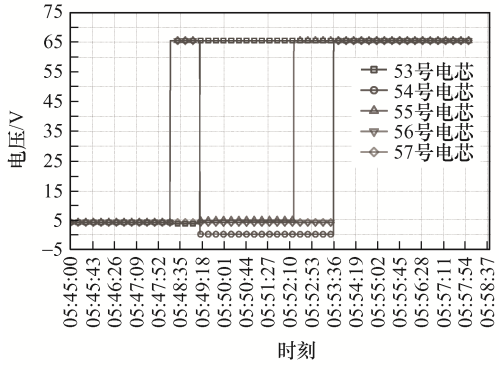
图 2　事故车辆

Fig. 2 Accident vehicle

该事故车辆搭载的是 CATL 45.3 kW·h(126 A·h)三元材料锂离子电池。通过分析该事故车辆传至国家大数据平台的电芯电压、温度等数据以及在热失控时特征参数的变化，可以得出：当发生热失控时，故障电芯的温度和电压发生异常变化。48 号电芯从 05:47:17 时刻开始出现电压下降，05:47:24 时刻停止充电；05:48:15 时刻 49 号电芯开始出现电压下降；51、52、53 号电芯在 05:48:16 时刻出现电压下降；54、55、56 号电芯采样失效；57 号电芯电压异常上升。各电芯电压数据如图 3 所示。



(a) 48~52号电芯



(b) 53~57号电芯

图 3 电压历史数据

Fig. 3 History data of voltage

分析各探针温度发现，探针 16、17、18、19 的温度最先出现异常，如图 4 所示。05:47:19 时刻，探针17 温度采样点出现温度升高；05:47:22 时刻，探针 16、18、19、20 温度采样点出现温度集体升高，且持续上升直至超过传感器测量范围。

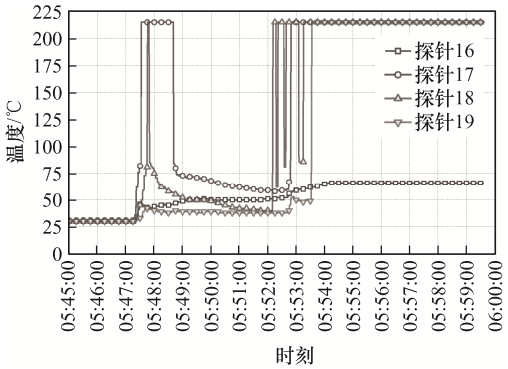


图 4 探针 16~19 温度历史数据

Fig. 4 History data of temperature for probes No.16–No.19

综上，当新能源汽车起火时，故障电芯的电压和温度将会迅速上升并且热传递的时间极短，短时间内会引起电芯大面积的热失控。如果能准确捕捉到故障单体电芯的特征参数变化，并为驾驶员提供警示，将会减少事故的发生。

5 动力电池改进措施及趋势

5.1 改进电池材料

电池的正负极材料、隔膜、电解液等都是电池安全性的影响因素。电池隔膜的功能是关闭或阻断通道，防止电池正、负极接触。当电池内温度出现异常上升迹象时，就会引起隔膜收缩并熔解，导致电解液泄漏，从而发生内短路现象，并造成电池的热失控。电池隔膜的一般材料为聚丙烯或聚乙烯等，其耐高温性能都比较差。聚酰亚胺材料的耐热性能较强，可以用作电芯隔膜基材，又或者在隔膜中添加无机纳米涂层，都可以有效地提高隔膜的耐高温性和稳定性。文献[22]制备了三聚氰胺基多孔有机聚合物复合隔膜，其具有很强的阻燃性，火灾时在正负极之间形成良好的膨胀保护炭，增加内阻，防止热失控。电解液燃烧将会产生极大的危害和风险，可以在电解液中添加相应的阻燃添加剂来降低燃烧的风险。如今，常用的高阻燃、低污染、电化学稳定的阻燃添加剂包括磷酸三甲酯、氟化亚磷酸盐/磷酸盐等[23]，自由基的清除反应是阻燃添加剂的基本原理。当电池发生热失控时，会伴随着大量的副反应，产生大量的氢和氢氧活性自由基，阻燃添加剂在高温时会分解出含磷自由基，与其发生反应进而提高电池的安全性。

5.2 改善电池包壳体

当电动汽车发生机械碰撞，电池受到挤压碰撞或电动汽车着火时，电池包壳体对电池组的机械防护至关重要。①增强外壳的阻燃性能，当电池发生热失控时，高阻燃外壳具有抑制火势扩散的功能；②改善电池的密封性能，对防止电池包浸水、热失控时产出的气体泄漏和燃烧扩散具有重大的影响；③在壳体表层采用耐阻燃涂层，增强了电池包外壳的抗火焰能力；④模组、电芯和电池包壳体之间可以加装防火毡材料，在电池发生热失控时，防火毡材料能够有效阻隔热量传播以及限制火势走向，起到了阻隔单体电芯之间发生连锁反应的作用，改善

了电池防火性能的能力；⑤在电池箱的结构上也可以采用高强度材料，采用加强筋或者设置缓冲装置等，设置缓冲结构来缓冲吸收部分碰撞的力，保护电池组受到损坏，降低由于机械碰撞造成短路的风险[24]。

5.3 改进散热系统

动力电池包是由若干个单体电池串并联组成，同一规格型号单体电池在组成电池组后可能存在不一致性，所以电池产生的热量也有差异性。在实际的工作条件下，由于各电池单体散热条件不一致，这将会加剧电池组的不一致性，会影响电池单体的充放电速率和容量衰减，所以改进散热系统对提高电池性能有很大帮助。①采用相变散热材料[25]，相变材料形态会随温度改变而发生变化，并且在相变过程中会吸收或释放大量能量，来保证电池包的温度恒定；②当电池发生热失控时，合理的气体泄压阀结构能及时排出内部产生的气体，控制电池包内的气压；③设计易燃气体的快速扩散通道，使易燃气体更能有效地排出电池包，减少了气体和产生的热量殃及相邻电池引起的连锁反应[26]。

5.4 基于大数据的安全预警

大数据分析技术在各个领域的发展中呈现出了很好的应用前景，新能源汽车行业与大数据的融合不仅是未来发展的趋势，而且也被看作中国新能源汽车行业转型升级的重要战略方向。当前，新能源汽车运行大数据分析技术广泛应用于动力电池等领域，2016 年在北京建立了新能源汽车国家监测与管理平台，新能源国家大数据平台的建设加强了政府部门对新能源企业的监管，并对新能源汽车安全运行提供了保障。海量的运行数据和完善的监管制度为解决我国新能源汽车安全问题[27]、促进新能源汽车产业发展打下了坚实的基础。利用上传到平台的车辆历史数据对新能源汽车进行故障诊断，并及时向车主警示和提供处理方案，能大大降低新能源汽车事故发生的概率。

基于数据驱动的安全智能算法是目前学者们研究的热点。文献[7]提出了一种基于人工神经网络的方法，仅通过电压数据来估计短路电池单元的电流，再通过三维电热耦合模型，利用估计的电流预测外短路单元的最高温度及其在内部和表面的温度变化分布。文献[28]提出了一种新的耦合自适应粒子群模拟退火算法，将其应用到了 3 种常见的等效电路模型中，并对 3 种商用电池进行了试验，为算法的合理性作出了证明。文献[29]提出了一种基于支持向量机的故障诊断算法，该算法根据电池电压曲线的波动程度，将其电池状态分为 4 个级别。文献[30]提出了一种基于双温度测量和双态热模型的总产热估算方法，并通过实验校准该模型进行计算研究，在设计的快速充电实例中，充分验证了该算法的精度和有效性。文献[31]提出了一种基于经验模态分解和样本熵的电池故障检测方法，首先对电池电压信号进行分析，消除电压采集过程中的噪声干扰，使用模态分解方法获得有效的故障信息，通过实验定量地说明提取的故障特征；然后根据这些提取的故障特征计算样本熵值，帮助准确检测和定位电池故障。文献[32]利用粒子群算法和 3σ 准则筛选策略设计了一种故障诊断方法，对电池单体的一致性相对位置演化进行定量评分，通过该评分结果，对故障电芯进行识别和定位，最后利用收集到的实际故障车辆的数据验证了该方法的有效性，并分析了不同电池对该算法的影响。文献[33]结合北京电动汽车服务和管理中心获取大量的电动出租车的实际操作数据，提出了长短记忆型递归神经网络。通过对不同参数和季节进行 10 倍交叉实验，验证了该方法的准确性和鲁棒性，并结合阈值和实际运行数据验证了所建模型对各种电压异常预测的可行性、稳定性和可靠性。文献[34]提出了一种基于模型的绝缘故障诊断方法，首先建立了绝缘故障诊断电池模型，然后采用递推最小二乘法对模型参数进行识别，并且考虑到系统的非线性特性、测量噪声和未知干扰，采用无迹卡尔曼滤波进行绝缘状态估计。文献[35]提出了一种将长、短期记忆网络与等效电路模型相结合的电池故障诊断方法，并从中国国家新能源汽车监控管理中心获取大量真实运行数据进行验证。验证结果表明，该方法能够实现电池潜在故障的准确诊断和热失控电池的精

确定位。文献[36]提出了一种基于改进样本熵的电池早期多故障实时诊断方法，该诊断方法可以诊断和预测不同的电池早期故障，包括短路和开路故障，以及预测故障发生的具体时间。

6 结论

(1)基于文献和新闻报道，本文统计了近6年内150余起新能源汽车起火事故，并对其起火原因进行了归纳总结。

(2)对起火原因进行了分析，重点描述了内短路、外短路、过充过放、热失控等的机理。对于机械滥用、电滥用、热滥用等触发形式进行了详细阐述。

(3)在发生热失控时特征参数方面，以电池的电压、电流、温度作为电池热失控的特征参数，归纳总结了国内外文献基于电池热失控试验时特征参数的变化和定义。

(4)在实例方面，基于国家大数据平台的历史数据，分析了某新能源汽车起火前特征参数的变化，结果表明：在发生热失控前电池电压和温度会迅速上升且热扩散时间极短。

(5)在安全建议方面，从改进电池材料、电池包壳体、散热系统、基于大数据的安全预警方面进行了详细的阐述，重点总结了数学模型和智能算法的故障诊断方法。

目前，由于电池热失控机理还未完全清晰，故障模型众多且各故障模式之间互相耦合的特点，使其故障诊断难度较大，电池安全依然是未来的研究热点。随着大数据平台的建立和数据挖掘技术的逐渐完善和成熟，基于大数据建立的精准电池模型和智能算法将会成为下一代智能电池系统故障诊断技术，未来将会向着监控、诊断、预测的电池管理方向发展。

参考文献：

[1] 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): 93-104, 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): 93-104, 116. (in Chinese)

[2] Lai Xin, Jin Changyong, Yi Wei, et al. Mechanism, modeling, detection, and prevention of the internal short circuit in lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives [J]. Energy Storage Materials, 2021, 35: 470-499.

[3] 纪常伟, 王兵, 汪硕峰, 等. 车用锂离子电池热安全问题研究综述[J]. 北京工业大学学报, 2020, 46(6): 630-644.
Ji Changwei, Wang Bing, Wang Shuofeng, et al. Review of thermal safety issues for lithium ion battery used in electric vehicles [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2020, 46(6): 630-644. (in Chinese)

[4] Lü Peizhao, Liu Xinjian, Qu Jie, et al. Recent advances of thermal safety of lithium ion battery for energy storage [J]. Energy Storage Materials, 2020, 31: 195-220.

[5] 刘岸晖, 甘小燕, 何佩芸, 等. 锂离子电池热模型的研究动态[J]. 电源学报, 2019, 17(1): 95-103.
Liu Anhui, Gan Xiaoyan, He Peiyun, et al. Progress of research on thermal models of lithium-ion battery [J]. Journal of Power Supply, 2019, 17(1): 95-103. (in Chinese)

[6] Maleki H, Howard J N. Internal short circuit in Li-ion cells [J]. Journal of Power Sources, 2009, 191(2): 568-574.

[7] Yang Ruixin, Xiong Rui, Ma Suxiao, et al. Characterization of external short circuit faults in electric vehicle Li-ion battery packs and prediction using artificial neural networks [J]. Applied Energy, 2020, 260: 114253.

[8] 朱晓庆, 王震坡, WANG Hsin, 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 Hsin, 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. (in Chinese)

[9] Feng Xuning, Ouyang Minggao, Liu Xiang, et al. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: a review [J]. Energy Storage Materials, 2018, 10: 246-267.

[10] Wang Qingsong, Ping Ping, Zhao Xuejuan, et al. Thermal

runaway caused fire and explosion of lithium ion battery [J]. Journal of Power Sources, 2012, 208: 210-224.

[11] 李明浩, 黎桂树, 谢松. 航空运输环境中锂离子电池热失控研究[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 253-259.
Li Minghao, LI Guishu, Xie Song. Research on thermal runaway of lithium-ion battery in aviation transportation environment [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 253-259. (in Chinese)

[12] 杨梦洁, 杨爱军, 叶奕君, 等. 基于气体分析的锂离子电池热失控早期预警研究进展[J]. 电工技术学报, 2023, 38(17): 4507-4538.
Yang Mengjie, Yang Aijun, Ye Yijun, et al. Research progress on early warning of thermal runaway of Li-ion batteries based on gas analysis [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(17): 4507-4538. (in Chinese)

[13] Huang Peifeng, Yao Caixia, Mao Binbin, et al. The critical characteristics and transition process of lithium-ion battery thermal runaway [J]. Energy, 2020, 213: 119082.

[14] Ping Ping, Kong Depeng, Zhang Jiaqing, et al. Characterization of behaviour and hazards of fire and deflagration for high-energy Li-ion cells by over-heating [J]. Journal of Power Sources, 2018, 398: 55-66.

[15] Ye Jiana, Chen Haodong, Wang Qingsong, et al. Thermal behavior and failure mechanism of lithium ion cells during overcharge under adiabatic conditions [J]. Applied Energy, 2016, 182: 464-474.

[16] Huang Lüwei, Zhang Zhaosheng, Wang Zhenpo, et al. Thermal runaway behavior during overcharge for large-format lithium-ion batteries with different packaging patterns [J]. Journal of Energy Storage, 2019, 25: 100811.

[17] Feng Xuning, Fang Mou, He Xiangming, et al. Thermal runaway features of large format prismatic lithium ion battery using extended volume accelerating rate calorimetry [J]. Journal of Power Sources, 2014, 255: 294-301.

[18] Mao Binbin, Liu Chaoqun, Yang Kai, et al. Thermal runaway and fire behaviors of a 300 Ah lithium ion battery with $LiFePO_4$ as cathode [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 139: 110717.

[19] Zhao Chunpeng, Sun Jinhua, Wang Qingsong. Thermal runaway hazards investigation on 18650 lithium-ion battery using extended volume accelerating rate calorimeter [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 28: 101232.

[20] Hu Jian, Liu Tong, Wang Xishi, et al. Investigation on thermal runaway of 18, 650 lithium ion battery under thermal abuse coupled with charging [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 51: 104482.

[21] Wang Zhenpo, Yuan Jin, Zhu Xiaoqing, et al. Numerical and experimental characterisation of high energy density 21700 lithium-ion battery fires [J]. Journal of Energy Chemistry, 2021, 55(4): 484-498.

[22] Mu Xiaowei, Zhou Xia, Wang Wei, et al. Design of compressible flame retardant grafted porous organic polymer based separator with high fire safety and good electrochemical properties [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 405: 126946.

[23] 陈晓霞, 刘凯, 王保国. 高安全性锂电池电解液研究与应用[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(2): 583-592.
Chen Xiaoxia, Liu Kai, Wang Baoguo. Research on high-safety electrolytes and their application in lithiumion batteries [J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(2): 583-592. (in Chinese)

[24] 俞骏威, 杨小波, 张晓云. 电动汽车碰撞事故特征与电池约束安全设计探讨[J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(4): 63-65.
Yu Junwei, Yang Xiaobo, Zhang Xiaoyun. Investigation of electric vehicle's traffic accident characteristics and its battery pack protection device development [J]. Machine Building & Automation, 2016, 45(4): 63-65. (in Chinese)

[25] Wu Weixiong, Wu Wei, Wang Shuangfeng. Thermal optimization of composite PCM based large-format lithium-ion battery modules under extreme operating conditions [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 153: 22-33.

[26] 任可美, 戴作强, 郑莉莉, 等. 锂离子电池热失效机理和致爆时间研究综述[J]. 电源学报, 2018, 16(6): 186-193.
Ren Kemei, Dai Zuoqiang, Zheng Lili, et al. Review on thermal failure mechanism and explosion time of lithium-ion batteries [J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(6): 186-193. (in Chinese)

[27] 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 techno- logy in new energy vehicle industry: based on operating big data of new energy vehicle [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(20): 3-16. (in Chinese)

[28] Zhou Sida, Liu Xinhua, Hua Yang, et al. Adaptive model parameter identification for lithium-ion batteries based on improved coupling hybrid adaptive particle swarm optimization-simulated annealing method [J]. Journal of Power Sources, 2021, 482: 228951.

[29] Yao Lei, Fang Zhanpeng, Xiao Yanqiu, et al. An intelligent fault diagnosis method for lithium battery systems based on grid search support vector machine [J]. Energy, 2021, 214: 118866.

[30] Zhang Jianan, Yang Xiaoguang, Sun Fengchun, et al. An online heat generation estimation method for lithium-ion batteries using dual-temperature measurements [J]. Applied Energy, 2020, 272: 115262.

[31] Li Xiaoyu, Dai Kangwei, Wang Zhenpo, et al. Lithium-ion batteries fault diagnostic for electric vehicles using sample entropy analysis method [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 27: 101121.

[32] Chang Chun, Zhou Xiaping, Jiang Jiuchun, et al. Micro-fault diagnosis of electric vehicle batteries based on the evolution of battery consistency relative position [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 52: 104746.

[33] Hong Jichao, Wang Zhenpo, Yao Yongtao. Fault prognosis of battery system based on accurate voltage abnormity prognosis using long short-term memory neural networks [J]. Applied Energy, 2019, 251: 113381.

[34] Wang Yujie, Tian Jiaqiang, Chen Zonghai, et al. Model based insulation fault diagnosis for lithium-ion battery pack in electric vehicles [J]. Measurement, 2019, 131: 443-451.

[35] Li Da, Zhang Zhaosheng, Liu Peng, et al. Battery fault diagnosis for electric vehicles based on voltage abnormality by combining the long short-term memory neural network and the equivalent circuit model [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(2): 1303-1315.

[36] Shang Yunlong, Lu Gaopeng, Kang Yongzhe, et al. A multi-fault diagnosis method based on modified sample entropy for lithium-ion battery strings [J]. Journal of Power Sources, 2020, 446: 227275.



舒俊豪

作者简介：

舒俊豪(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：动力电池状态估计及安全管理。E-mail：1356655853@qq.com。

武小花(1984—)，女，通信作者，博士，副教授。研究方向：新能源汽车控制技术。E-mail：xiaohuawu13@163.com。

杨佳珞(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：燃料电池汽车能量管理策略。E-mail：799810316@qq.com。

徐鑫(1995—)，男，硕士研究生。研究方向:燃料电池汽车能量管理策略。E-mail：1483986994@qq.com。

(责任编辑：陈国珍)