

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2024.01.015

动力电池热失控特征及防控技术研究分析*

李致远¹, 鲁锐华², 余庆华¹, 颜伏伍¹

(1. 武汉理工大学, 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北省新能源与智能网联车工程技术研究中心, 武汉 430070;

2. 湖北航天化学技术研究所, 应急救援与安全防护湖北省重点实验室, 襄阳 441003)

[摘要] 近年来, 锂离子电池热失控问题已成为抑制新能源汽车动力电池发展的主要瓶颈。本文针对新能源汽车动力电池热失控问题的研究展开了全面综述, 阐述了锂离子电池热失控的诱因, 介绍了锂离子电池热失控过程以及不同变量条件下锂离子电池的热失控特征。基于锂离子电池的热失控特征参数综述了适用于锂离子电池火灾的早期预警方法和火灾抑制方法, 总结了目前新能源汽车动力电池热失控问题研究的不足和发展趋势, 为新能源汽车动力电池领域的发展提供一定的参考。

关键词: 动力电池; 热失控; 火灾预警; 火灾抑制

Research and Analysis of Thermal Runaway Characteristics and Prevention and Control Technology of Power Battery

Li Zhiyuan¹, Lu Ruihua², Yu Qinghua¹ & Yan Fuwu¹

1. Wuhan University of Technology, Hubei Research Center for New Energy & Intelligent Connected Vehicle,

Hubei Key Laboratory of Modern Automobile Parts Technology, Wuhan 430070;

2. Hubei Institute of Aerospace Chemical Technology, Laboratory of Emergency Safety and Rescue Technology, Xiangyang 441003

[Abstract] In recent years, the thermal runaway problem of lithium-ion battery has become the main bottleneck restraining the development of power battery of new energy vehicles. In this paper, a comprehensive review of the research on the thermal runaway problem of the power battery of new energy vehicles is carried out, with the inducement of the thermal runaway of lithium-ion battery expounded and the thermal runaway process of lithium-ion battery and the characteristics of the thermal runaway of lithium-ion battery under different variable conditions introduced. Based on the characteristic parameters of thermal runaway of lithium-ion battery, the early warning methods and fire suppression methods applicable to lithium-ion battery fire are reviewed, and the shortcomings and development trend of the current research on thermal runaway of power battery of new energy vehicles are summarized, providing certain reference for the development of power battery of new energy vehicles.

Keywords: power battery; thermal runaway; fire warning; fire suppression

前言

近年来, 全球能源短缺和环境污染问题日益显著, 世界各国都在努力研发和推广有利于减少碳排放和环境污染的可再生能源^[1]。随着人们环保意识的增强, 在国家政策的大力推动下, 新能源汽车行业得

到了快速的发展。相比于传统内燃机汽车, 新能源汽车是一种采用新型动力系统、完全或主要依靠新型能源驱动的汽车, 分为纯电动汽车、插电式混合动力汽车和燃料电池汽车3类。相较于铅酸电池、镍氢电池等其他动力电池体系, 锂离子电池虽已成为新能源汽车动力电池的首选, 但其较差的安全性能、散热不佳的密封设计和在充放电过程中的本征发热特征容

* 湖北省重点研发计划(2021BAA016)和中央高校基本科研业务费专项资金(2022IVA024)资助。

原稿收到日期为2023年05月10日, 修改稿收到日期为2023年06月29日。

通信作者: 余庆华, 教授, 博士生导师, E-mail: qhyu@whut.edu.cn。

易诱发动力电池热失控火灾事故,严重威胁生命与财产安全^[2-3]。由于锂离子电池热失控过程复杂多变,难以预见和控制,新能源汽车动力电池的热失控问题已成为新能源汽车发展和普及的主要挑战。

锂离子电池的热失控是指电池单体放热连锁反应引起电池温度不可控上升的现象,主要是由3种滥用条件触发的,分别是以碰撞、挤压和针刺为代表的机械滥用,以过充电、过放电和短路为代表的电滥用和以高温过热为代表的热滥用。机械滥用一般是由电池受力发生机械变形造成的,会导致电池内部机械应力下降、电压下降和温度升高。电滥用是由电压管理不当、电气元件故障或制作不良等引起的,过充电时金属锂沉积在负极表面形成锂枝晶,过放电时 Cu^{2+} 在正极沉积形成铜枝晶,枝晶的生长会穿透隔膜,同时影响锂离子电池的安全性能和电化学性能。热滥用则一般由锂电池温度管理不当导致过热而触发,锂电池的隔膜会在高温下收缩熔化而塌陷。

针对锂离子电池的热失控问题,国内外已有大量学者进行了文献综述。Lyu等^[4]综述了宽温度范围内锂电池热失控的触发机制,Duh等^[5]总结了新能源汽车用商用18650型锂离子电池的热失控特性。Liu等^[6]基于机械滥用下的锂离子电池热失控问题,综述了锂离子电池热失控机制,周洋捷等^[7]概述了电滥用下新能源汽车动力电池“过充电-热失控”内部机理和外部特征。Liao等^[8]总结归纳了锂离子电池热失控特征参数检测和预警的方法,Chen等^[9]综述了锂离子电池热失控参数的测试标准。Shahid^[10]、Feng^[11]和Xu^[12]等则对锂离子电池热失控火灾的防治、缓解和抑制策略进行了综述。然而,现有文献存在对不同种类锂离子电池热失控特征的对比分析欠缺、热失控预警和抑制技术总结单一等问题。

鉴于此,本文拟介绍锂离子电池热失控机理,以及在不同变量条件下锂离子电池的热失控特征,基于锂离子电池的热失控特征参数系统综述适用于锂离子电池火灾的早期预警方法和火灾抑制技术,并从多个角度对不同的火灾抑制技术进行对比分析,总结目前新能源汽车动力电池热失控问题研究的不足和发展趋势,以期对新能源汽车动力电池领域的发展提供一定的参考。

1 热失控过程

1.1 热失控机理

锂离子电池的热失控是由其内部温度的异常升

高直接触发的。如图1所示,锂离子电池的热失控伴随着一系列的链式反应,当发生机械滥用后,由于外部结构变形导致内部隔膜破裂,电池正极与负极直接接触发生内部短路使得电池电滥用,内部短路产生的热量会使电池温度急剧升高。在未发生严重内部短路时,正负极串扰也是导致高比能量锂离子电池温度异常升高的原因之一。在串扰过程中,正极材料相变释放的氧气与负极还原性 LiC_x 发生反应,产生大量热量^[13]。除此之外,在低温快充工况下,电池负极析锂会使电池容量衰减,加速电池老化,析出的锂也能与电解液剧烈反应释放热量。

热量的累积会诱发热滥用,进而导致一系列放热副反应的发生,热滥用往往是导致锂电池热失控的直接原因。电池温度达到自生热起始温度 T_1 时,电池内部反应较为缓慢,SEI膜和电解液开始分解并伴随着轻微产气,隔膜形貌未发生明显变化,正极表面界面膜增厚,此时的电池处于热失控临界状态。电池温度达到热失控引发温度 T_2 时,副反应加剧,正极表面膜进一步增厚,电池内部材料发生不可逆变化,极片上生成副反应产物,温度快速升高。随着内部反应产气导致泄压阀打开,含 LiF 和可燃有机物的气体喷射出电池外部,正极表面含碳材料开始碳化,隔膜呈熔融态,副反应产物均匀附着在隔膜上。电池温度达到热失控最高温度 T_3 时,电池隔膜完全破坏,正、负极粉末大面积脱落^[14]。

1.2 热失控特征

根据不同的分类方式,锂离子电池被分为不同的种类,锂离子电池的分类如表1所示。锂离子电池热失控过程复杂多变,不同种类的锂离子电池热失控过程主要都伴随着(a)排气阀打开,气体排出;(b)开始发生热失控,产生明火;(c)剧烈热失控,发生爆炸;(d)火焰熄灭,热失控结束4个阶段。本节基于不同正负极材料的动力锂离子电池对其在不同种类、不同滥用条件下的热失控特征展开综述。

1.2.1 钴酸锂电池

钴酸锂作为第一代锂离子电池正极材料曾在部分动力电池中获得应用,但其能量密度和循环寿命一般,电化学性能和热稳定性较差,热失控产物主要为石墨、 LiCO_3 、 LiN_3 ,以及部分含钴化合物,现已逐渐被其他锂离子电池取代。Zhang的团队^[19-20]分析了不同荷电状态下钴酸锂电池过充电导致的热失控气体的组分爆炸上下限的变化,并通过加热棒和加热环分别对其进行过热实验,实验发现相同荷电状

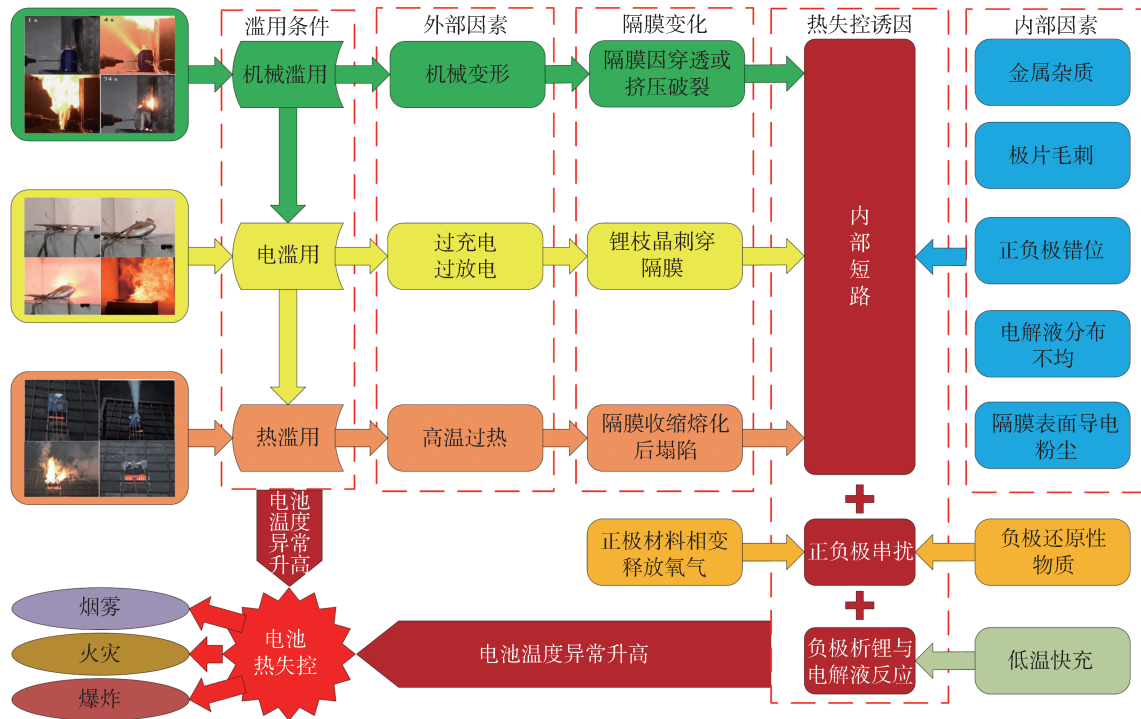


图1 锂离子电池热失控链式反应图

表1 锂离子电池分类表

文献	分类依据	锂电池分类
[15]	电解质材质不同	液态锂电池、聚合物锂电池
[16]	锂电池外形不同	棱柱型锂电池、圆柱型锂电池、扣式锂电池
[17]	负极材料不同	碳基锂电池、硅基锂电池、钛酸锂电池
[18]	正极材料不同	钴酸锂电池、锰酸锂电池、磷酸铁锂电池、三元锂电池

态下加热棒加热的电池不易发生热失控且50%荷电状态的钴酸锂电池爆炸危险性最低。

1.2.2 锰酸锂电池

目前针对锰酸锂动力电池的热失控特性研究主要集中在其过充电特性和过热特性,研究对象和方法较为单一,缺乏更加系统的研究。锰酸锂电池极耳及表面的温度大于 80°C 、温升速率大于 1°C/s 且持续3 s以上时认为其发生了热失控^[21]。Yuan等^[22-23]采用不同充电倍率过充电18650型锰酸锂电池,实验表明3C充电倍率下的热失控平均时间比1.5C倍率下缩短了69.6%,同时,锰酸锂电池的老化效应对热失控有延缓作用。高温高压环境下锰酸锂电池的热失控特性更为剧烈,温升速率、放热量和质量损失更大^[24]。

1.2.3 磷酸铁锂电池

由于磷酸铁锂分子内的P=O强共价键和 $(\text{PO}_4)^{3-}$ 的八面体结构,磷酸铁锂电池相较于其他正极材料

的锂离子电池具有更好的热稳定性。在机械载荷作用下,小容量磷酸铁锂电池的抗内部短路失效特性较好,机械载荷达到8 MPa时,电池内部发生局部短路^[25]。在不同过充电条件下,86 A·h的磷酸铁锂电池的热失控剧烈程度随充电倍率、排气阀打开后停止充电时间等参数的变化而变化,并且,电池模组的散热性远低于电池单体,过充电条件下更容易发生热失控^[26]。Liu等^[27]和Mao等^[28]分别研究了热滥用时243和300 A·h大容量磷酸铁锂电池单体在露天环境下的热失控行为,发现磷酸铁锂电池单体在该过程中不能自燃,只能喷射出大量气体和烟雾。为进一步了解气体和烟雾的成分,Fernandes等^[29]对26650型圆柱型磷酸铁锂电池进行过充,并定量分析了不同阶段的气体组分,如图2所示,生成气体的主要成分为 CO_2 、 H_2 、 C_2H_4 ,次要成分为 CO 、 $\text{C}_2\text{H}_3\text{F}$ 、 CH_3OCH_3 、 CH_3OCHO 等,研究发现挥发性有机溶剂是影响产气的重要因素。虽然不同容量的磷酸铁锂电池由于其较好的热稳定性,已获得了广泛的商业化应用,但中等容量的磷酸铁锂电池在不同滥用条件下的热失控特性仍需要进一步探讨。

1.2.4 三元锂电池

三元锂电池具有广泛的应用性,其热失控特性也获得了大量的研究。在轻微过充条件下,当电压低于4.6 V时,三元锂电池内阻增大,产热增加,当

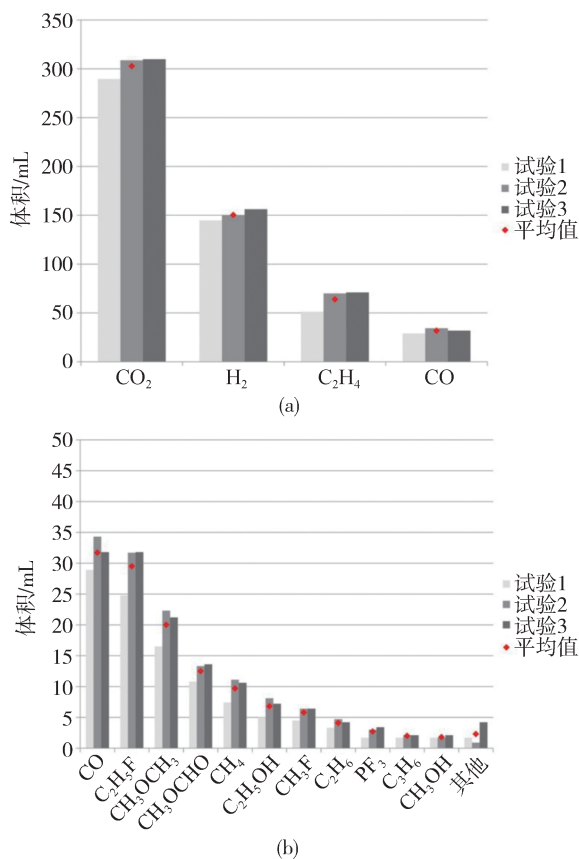


图2 磷酸铁锂电池热失控气体主要成分(a)和次要成分(b)^[29]

电压高于4.6 V时,产生的锂枝晶导致三元锂电池热稳定性降低,荷电状态高的三元锂电池更易发生热失控^[30-31]。随着过充电次数的增加,三元锂电池的热稳定性降低,放热量增加,高压环境下热失控程

度更为剧烈。在高电流率过充条件下,三元锂电池会发生两次热失控爆炸,随着充电倍率的增加,热失控发生的时间提前,热失控反应更加剧烈^[32]。牛慧昌等^[33]通过电池过热和针刺试验也发现随着电池荷电状态的增加,热失控反应强度增加,电池表面最高温度、温升速率和质量损失率均增大。与电滥用和机械滥用相比,大功率外部加热是最易重复触发三元锂电池热失控的方法^[34]。

1.2.5 钛酸锂电池

钛酸锂为稳定的尖晶石结构,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,热稳定性佳,抗机械滥用和热滥用能力良好,抗电滥用能力较差,已在部分混合动力汽车中应用。然而,钛酸锂电池较低的能量密度仍是限制其进一步发展的主要因素。现有研究表明,在轻微电滥用情况下钛酸锂电池的热安全性良好,负极表面生成的不均匀SEI膜是导致钛酸锂电池热失控的主要原因^[35]。钛酸锂电池过充电后电极材料活性会显著增强,热稳定性迅速下降,相同热滥用条件下,过充电至120%荷电状态的电池比100%荷电状态的电池热失控开始时间缩短约1/3^[36]。

1.3 热失控特征对比分析

表2总结了不同类型锂离子电池在不同滥用条件下的热失控特征参数。机械滥用是造成锂电池热失控的外部因素,通常不能直接接触锂离子电池的热失控,因此本节对滥用条件的归纳主要集中在电滥用和热滥用上。

表2 锂离子电池热失控特征表

文献	研究对象	容量/(A·h)	滥用条件	起火时间/s	热失控持续时间/s	热失控最高温度/°C	温升速率/(°C·s ⁻¹)
[19]	钴酸锂电池	2.2	电滥用	1 462	488	777.7	14.88
[20]	钴酸锂电池	2.6	热滥用	1 274	583	800.0	10.17
[21]	锰酸锂电池	17	电滥用	2 744	136	155.7	22.00
[21]	锰酸锂电池	17	热滥用			411.5	4.70
[37]	磷酸铁锂电池	86	电滥用	3 040	186	423.0	0.12
[37]	磷酸铁锂电池	86	热滥用	916	181	372.1	0.32
[38]	三元锂电池	30	电滥用	810	670	736.8	2.33
[34]	三元锂电池	25	热滥用	431	400	1 180.0	29.50
[36]	钛酸锂电池	40	电滥用	4 100	415	520.0	2.25
[36]	钛酸锂电池	40	热滥用			581.0	0.53
[36]	钛酸锂电池	40	电滥用+热滥用	281	639	541.0	2.59

从表2中可以看出,在未发生明显热失控现象时,电池表面最高温度和电池的温升速率均较低。除了磷酸铁锂电池,其他同种发生明显热失控的电池,在热滥用条件下的最高温度一般略高于电滥用

条件下的最高温度,这与热滥用发生时的高温外界条件有关。不同类型的锂离子电池由于正极材料不同,热失控过程中电池内部发生的化学反应不同,不同的化学反应热导致电池热失控最高温度不同。磷

酸铁锂电池的抗过充特性优于抗过热特性,锰酸锂电池与之相反,这也是由于二者正极材料化学结构和电解液成分存在较大差异。钴酸锂电池和三元锂电池相对而言更易发生热失控,而钛酸锂电池是热稳定性最好的锂离子电池。虽然不同种类锂离子电池在不同滥用条件下的热失控特征不同,但对热失控特征参数进行采集分析,有利于根据特征参数合理地预警和抑制锂离子电池热失控火灾。

2 热失控预警

锂离子电池热失控的早期预警可以分为两个层级:锂离子电池热失控特征参数检测和锂离子电池早期火灾预警。分级检测预警机制协同工作,能够较大程度地降低锂离子电池热失控的风险,提高电池安全性。

2.1 锂离子电池热失控特征参数检测

锂离子电池系统运行环境多变,电池特征参数具有非线性、时变性等特点,对电池热失控特征参数的检测主要通过判断可测量参数的一致性来实

现^[39]。锂离子电池热失控特征参数的检测主要可以分为基于阈值的方法、基于模型的方法和基于数据驱动的方法。

2.1.1 基于阈值的方法

基于阈值的方法是将动力电池的热失控特征参数与预设的热失控阈值参数进行比较,当这个参数不超过阈值时,认为动力电池状态正常,否则,电池管理系统采取相应的措施降低电池热失控的风险。王兵^[40]研究了不同滥用条件下的三元锂电池热失控特征,并基于热失控特征参数提出了一种适用于三元锂电池的热失控阈值3级预警模型,如图3所示。但该模型并未考虑电池老化的因素,且固定的阈值设定对动力电池实时多变的故障检测能力较差,在实际应用过程中,阈值的设置需要与电池模型、数据驱动等方法结合,根据动力电池所处工况进行实时的改变。

2.1.2 基于模型的方法

基于模型的方法是借助电池的相关模型进行状态估计和参数估计,通过比较生成的残差值与预设的阈值进行故障预测,常用的模型有电化学模型、等

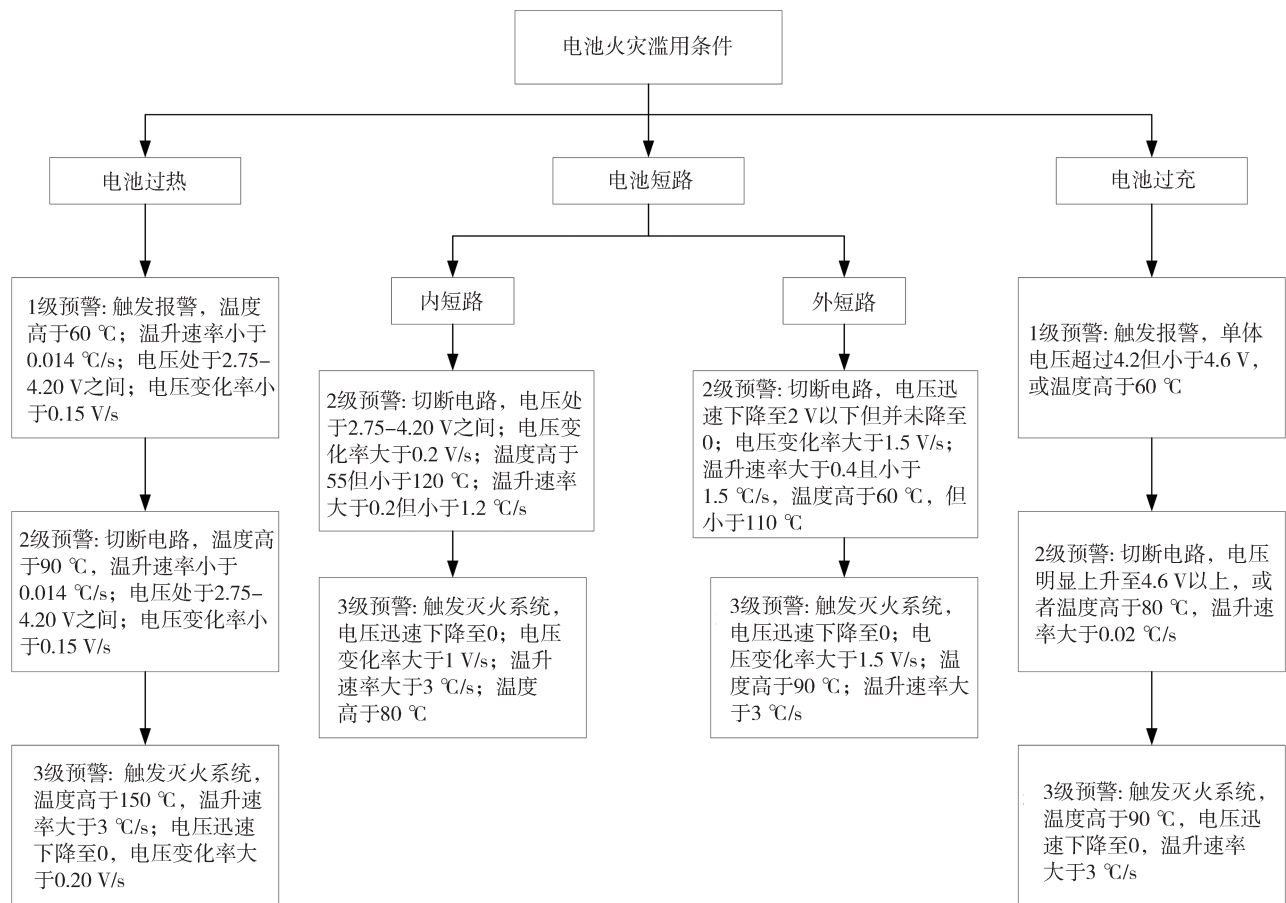


图3 三元锂电池热失控阈值3级预警模型^[40]

效电路模型、电热耦合模型等,其中电热耦合模型对热失控特征参数的识别精度更高。Ji等^[41]基于三测点建立了一种可以实时计算三元锂电池模块内温度分布的电化学-热耦合模型,仿真模拟了三元锂电池热失控时的温度分布,如图4所示,实现了对电池组温度的精确预警。Feng等^[42]建立了三维电化学-热-内部短路耦合模型,采用带遗忘因子的递归最小二乘法算法估计导致内部短路的关键参数,实现了内部短路的故障诊断,有效降低电池热失控风险。

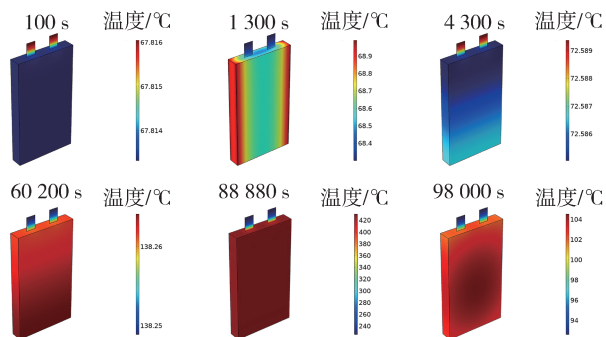


图4 三元锂电池热失控时的温度分布^[41]

2.1.3 基于数据驱动的方法

基于数据驱动的方法主要是依赖人工智能、大数据分析等方法实现的,不需要系统精确的解析数学模型,主要对动力电池运行过程中的数据进行分析处理来完成电池故障的检测和预警^[43]。通过香农熵算法进行信号处理是一类典型的数据驱动方法。Hong等^[44]基于实车运行产生的大量原始温度数据,采用香农熵算法和Z分数结合的热失控安全管理策略,实现了热失控异常温度的实时预警。另一类数据驱动方法主要是依靠人工智能实现的,包括模糊逻辑、机器学习聚类和神经网络等。左付山等^[45]利用模糊逻辑算法,结合纯电动公交车动力电池组的总电压、温度和绝缘阻值等特征参数建立模糊评判模型,达到实时监控和故障预警的效果。李高巨^[39]基于动态时间规整距离的密度聚类算法建立综合动力电池电压、温度、电阻、能量等多参数一致性的热失控风险离线识别算法,实现了提前较长时间对动力电池热失控的风险识别和预警。Li等^[46]通过遗传算法优化的反向传播人工神经网络提出一种锂离子电池安全预警模型,该模型在机械滥用条件下的仿真数据与实验数据的相关系数大于0.99,能够有效预警机械滥用条件下电池的失效情况。

2.2 锂离子电池早期火灾预警

锂离子电池早期火灾发生时,通常伴随特征气

体的产生,采用相应的气体传感器监测特征气体的浓度可以有效预警锂离子电池热失控,避免火灾程度加剧。锂离子电池热失控特征气体的成分主要有 CO_2 、 H_2 、挥发性有机物等^[47]。 CO_2 主要产生于锂电池热失控的初期和后期。Cai等^[48]研究发现 CO_2 在不同滥用条件下的热失控产气中占比较高,利用传感器监测 CO_2 浓度可以实现热失控的早期识别。 H_2 主要来自锂枝晶与负极材料粘接剂的反应。相对于其他气体和传统温度监测方式, H_2 作为动力电池安全预警信号具有更快的检测速度,一旦检测到 H_2 的产生,就应对电池组进行早期安全预警,但该方法可能不适用于热滥用或机械滥用等非锂枝晶产生的热失控机制^[49]。挥发性有机物主要来源于有机电解质的受热分解。杨启帆等^[50]对不同荷电状态条件下的锂离子电池进行加热实验,监测对比了挥发性有机物、 CO_2 、 H_2 等气体浓度的变化情况,实验结果如图5所示,在热滥用条件下,挥发性有机物是析出最快的的气体,且浓度大小仅次于 CO_2 ,具有良好的监测价值。此外,由于电池发生热失控时无论是否发生火灾都会伴随大量HF气体的产生,当气体传感器检测到HF气体时同样可以实现热失控火灾的早期预警^[51]。

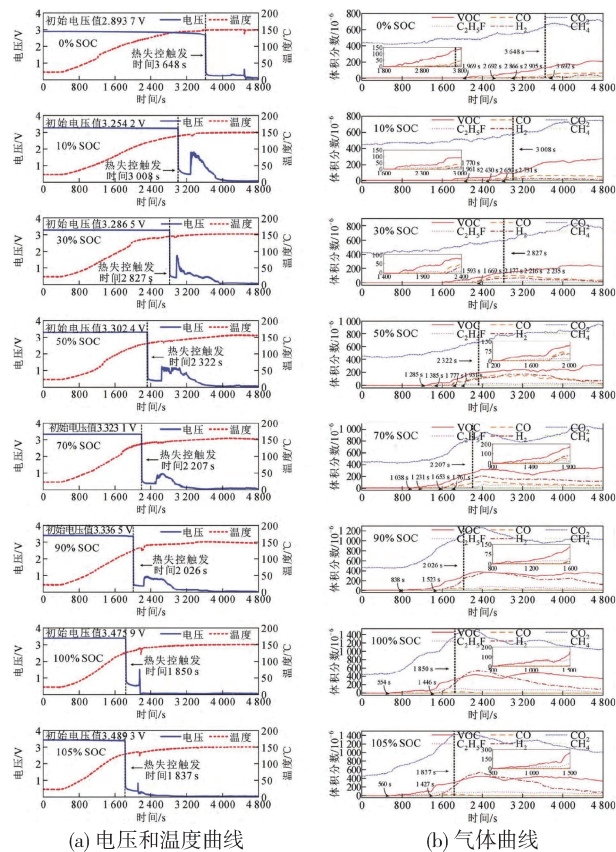


图5 不同荷电状态下电池的电电压和温度曲线(a)及气体曲线(b)^[50]

3 热失控抑制

抑制锂离子电池热失控的本质是抑制锂离子电池内部活性反应物质的热失控。目前,很多热失控抑制方法侧重于提高锂离子电池的本质安全性,例如在电解液中添加含磷阻燃剂^[52]、制备高安全性的有机耐热隔膜^[53]等。然而,本质安全性的提升并不能完全抑制锂离子电池的热失控,而且在电池内部加入非活性物质会在一定程度上影响电池的容量、性能和循环寿命等。因此,高效的电池热管理系统和电池火灾灭火技术对于抑制热失控火灾具有重要作用。

3.1 锂离子电池热管理系统

性能优良的锂离子电池热管理系统应能够保证电池内部温度的均匀性,使锂电池始终处于安全的工作温度范围,避免因温度过高而导致电池热失控的发生。国内外研究人员提出的各种热管理系统设计方案主要集中在风冷、液冷、相变材料冷却以及复合冷却系统。风冷系统由于空气的导热性能较差,对热失控的蔓延防控效果不佳,且风冷系统对电池组结构排列、间距等的要求较高,这也在一定程度上限制了风冷系统的应用。

液冷系统相对于风冷的散热效果更好,是动力电池最常用的冷却方法之一,一般可分为直接冷却和间接冷却。直接冷却是将电池模组直接浸没在冷却介质中,该方法能够极大地提高锂离子电池的温度均匀性,在电池处于热失控状态下仍具有良好的冷却性能,但该方法对电池系统的密封性要求较高且不适用于低温环境,因此仍未得到广泛的应用^[54]。对直接冷却的研究主要集中在冷却介质的选择上,经典的冷却介质为水、油和乙二醇水溶液,其中水的冷却效果最好^[55-56]。为了增强液冷系统的冷却效率,国内外研究人员进一步研究了新型液体冷却介质的冷却效果。Yang等^[57]提出一种采用PCM乳化液作为冷却介质的新型液冷系统,该系统相比水冷系统能够显著提高电池内部的温度均匀性。液态金属因其优秀的导热性能,近年来也逐步成为冷却介质材料的研究热点。在相同的流动条件下,液态金属冷却系统相比水冷系统的冷却效果更好,能耗更少,且在高放电倍率和高环境温度等极端工况下具有更好的冷却能力^[58]。

在间接冷却方面,液冷系统的布置方式、流量设

置和流道设计能够直接影响间接冷却的冷却效果。在一定的流速范围内,液冷板垂直布置时的散热性能相较于水平布置时更优异^[59]。Guo等^[60]研究发现在0-0.01 kg/s的范围内,增加冷却介质的质量流量可以显著降低电池模组的最高温度,但质量流量的增加会破坏电池模组的温度均匀性。在冷却液流速较低时,热失控蔓延的抑制效果与流速之间呈现弱相关^[61]。优良的流道设计能够有效提高间接冷却的冷却性能。Mohammed等^[62]设计分析了单通道和多通道蛇形冷板的冷却效果,研究结果表明,两种冷却板冷却效果相似,且在电池正常工作和热失控状态下均具有良好的冷却效果。Monika等^[63]研究了蛇形、U形弯曲、直形、南瓜形、螺旋形和六角形微通道设计的冷却能力。结果表明,蛇形和六角形微通道具有更好的冷却性能,而南瓜模型有较低的压降。

相变材料由于其高汽化潜热、无毒、应用温度广泛等优点近年来被广泛应用于锂离子电池热管理系统中。采用含相变材料冷却系统的电池组能将相邻电池表面温度峰值从189℃降低到109℃以下,电池安全性显著提高^[64]。将高导热性的材料添加到有机相变材料中制备新型复合相变材料是提高相变材料冷却系统热失控抑制能力的有效方法。Liu等^[65]在石蜡中添加石墨增加相变材料的导热性,在过充电条件下,该种材料能够较大程度地降低电池表面的温度和电池热失控的风险。Huang等^[66]制备了一种以石蜡为主体材料的新型阻燃柔性复合相变材料。该种材料中添加的膨胀石墨和阻燃剂能够及时吸收和传递电池产生的热量,具有避免电池热失控所必需的阻燃效果。

复合冷却方式是将风冷、液冷和相变材料冷却等多种方式相结合,结合各种方式的优点,能够更好地抑制热失控传播,例如可以使用集成相变材料和微通道板的复合冷却系统防止锂离子电池的热蔓延,如图6所示,该系统将相邻电池表面温度峰值降低至90℃以下,进一步提升了电池热管理系统的性能^[67]。Yang等^[68]在使用液冷板和气凝胶绝缘层后,使两个电池单体间的平均热失控传播时间由84.6 s延长至386 s,有效抑制了热失控蔓延。现阶段对单一的电池热管理系统的应用较为广泛,但复合冷却系统的研究和应用较少,复合冷却系统对大容量锂离子电池热失控后的蔓延抑制性能仍有很多方面值得研究。

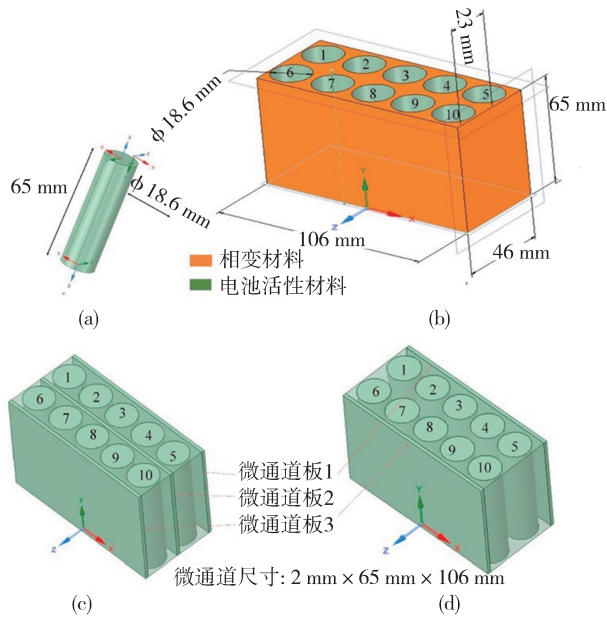


图6 集成相变材料和微通道板复合冷却系统示意图^[67]

除了上述4种典型的锂离子电池热管理系统

外,一些新型的锂离子电池热管理技术也具有良好的热失控抑制效果。Bausch等^[69]基于纤维增强水凝胶研发的新型天然热障能够完全抑制两块锂离子电池单体间由于机械滥用和电滥用造成的热蔓延,同时将热滥用引起的电池热蔓延延缓16 min。新型锂离子电池热管理技术还可结合人工智能技术,基于锂离子电池异常发热和深度学习算法对热失控进行预测,该技术可以提前27 min准确预测热失控的发生并对锂离子电池包进行有效降温^[70]。虽然新型锂离子电池热管理技术的性能相比于传统电池热管理系统有一定提升,但这些新型技术大多只适用于实验研究的特定对象和滥用条件,且部分热管理技术的使用和维护成本较高,缺乏经济性和实用性,因此尚未投入商业化使用。

3.2 锂离子电池火灾灭火技术

用于抑制锂离子电池火灾的典型灭火剂主要有气体灭火剂、干粉灭火剂、水基型灭火剂和气溶胶灭火剂,典型灭火剂的灭火性能对比如表3所示。

表3 典型灭火剂的灭火性能对比

灭火剂种类		灭火原理	优点	缺点
气体灭火剂	CO ₂ 灭火剂	隔绝、稀释氧浓度	可扑灭明火,降低燃烧温度,缓解热失控爆炸	无法抑制电池内部链式反应和传播,灭火不彻底,易发生复燃
	七氟丙烷灭火剂	受热分解吸收热量且产生的含氟自由基可以阻断链式燃烧反应	能够快速扑灭电池外部明火,灭火残留物少	成本较高,且灭火过程中会产生大量有毒有害气体,易发生复燃
	全氟己酮灭火剂	快速汽化吸收热量,快速分解成氟化烷自由基阻断链式燃烧反应	绝缘性能好,有效抑制锂离子电池火灾,不易发生复燃	成本较高,且灭火过程中会产生有毒物质
干粉灭火剂	ABC粉灭火剂	冷却、隔绝、稀释和化学抑制	可以抑制电池明火的链式燃烧反应	降温效果不明显,存在极高的复燃风险
水基型灭火剂	水	隔绝、吸热、降温	环境友好、冷却性能好	剂量消耗大、存在短路风险
	泡沫灭火剂	泡沫层析出的水在锂电池表面形成一层水膜,隔绝空气	能够有效包覆电池模组	难以渗透到模组内部,无法有效抑制电池组内热失控传播
	细水雾灭火剂	冷却、隔绝、稀释氧浓度	环境友好、冷却性能好、剂量消耗小	灭火剂覆盖均匀性差,易产生有毒有害气体
气溶胶灭火剂	热气溶胶灭火剂	化学抑制,惰性气体稀释氧浓度	密闭空间内灭火迅速	降温效果不明显,易发生复燃
	冷气溶胶灭火剂	超细灭火微粒化学抑制作用	密闭空间内灭火迅速	降温效果不明显,高温烟雾污染电池

现有的大量研究已经表明^[71-72],以细水雾为代表的水基型灭火剂和以全氟己酮为代表的气体灭火剂具有更好的灭火性能和应用前景。但细水雾灭火剂和全氟己酮灭火剂也分别存在可能导致电池短路和反应产生有害气体等性能缺陷。为了进一步提升细水雾灭火剂的灭火性能,在其中添加不同种类的添加剂逐渐成为首选方法,例如含F-500添加剂^[73]和含烷基糖苷表面活性剂^[74]的细水雾灭火剂,相比纯细水雾具有更快的降温效果。张青松等^[75]配置的

含FC-4、烷基酚聚氧乙醚和尿素等复合添加剂的细水雾灭火剂比含单一添加剂的细水雾灭火剂具有更好的火灾抑制能力。在灭火剂中加入液氮也对锂离子电池火灾具有显著的快速抑制作用^[76]。与单独加入液氮相比,采用氮气双流体全氟己酮雾化技术和氮气双流体细水雾技术分别能够将灭火效率和电池表面降温速率提高51.2%和20%以上^[77]。虽然全氟己酮灭火剂可以与细水雾结合达到快速高效的电池火灾抑制效果,但随着全氟己酮使用剂量的增加,

反应生成的有毒物质也会快速增加。目前,缺乏适用于全氟己酮灭火剂的添加剂是制约其灭火性能的一个瓶颈。

灭火装置的布置方式以及灭火剂的释放策略对灭火剂的火灾抑制能力也有较大的影响。张俐恒等^[78]将2-BTP灭火剂喷淋装置放置在试验舱外,从外部一次性施放灭火剂,电池热失控火焰得到遏制,然而喷射的灭火剂大量耗散,难以快速降低电池表面温度,无法完全解除电池热失控火灾的安全隐患。Zhang等^[79]采用喷嘴式细水雾灭火剂喷淋装置抑制电池火灾,将喷淋装置布置在试验舱内电池的斜上方并间歇式喷射灭火剂,该种喷射方式显著降低了电池表面及内部的温度,且灭火效率更高。韩路豪等^[80]将灭火剂喷淋装置布置在电池的正上方,试验采用的细水雾灭火剂脉冲释放策略的灭火效果与冷却效果优于相同耗水量的连续释放策略,并有效抑制了电池的复燃。

4 结论与展望

(1)在热失控过程方面,介绍了锂离子电池热失控机理,较为详细地总结了不同种类锂离子电池在不同滥用条件下的热失控特征。

(2)在热失控预警方面,总结了锂离子电池热失控特征参数检测方法,以及热失控早期火灾的预警方法。

(3)在热失控抑制方面,归纳了典型的锂离子电池热管理系统的热失控抑制性能,从多个角度对比了不同灭火剂的灭火性能,分析了适用于锂离子电池火灾的灭火剂。

锂离子电池的热失控问题是新能源汽车进一步发展和普及的主要挑战,基于当前研究现状分析,未来还需在以下几方面开展深入研究:

(1)深入研究不同种类新型动力电池的热失控机理及热失控特征,结合已有的锂离子电池热失控研究,建立动力电池热失控特征参数大数据平台。

(2)着力探究电池热失控参数与热失控阶段的对应关系,并结合大数据平台制定锂离子电池热失控预警标准,建成更加数字化、智能化的锂离子电池热失控预警系统。

(3)对电池冷却系统的研究应结合新型冷却介质、新型阻燃材料和智能控制技术,在提高冷却效率和温度均匀性的同时降低整车热管理系统的复杂

性,提升电池冷却系统的实用性和经济性。

(4)应建立灭火剂用量与电池容量的对应关系,研发全氟己酮灭火剂添加剂和适宜的灭火剂释放策略,开发更适用于整车的扁平化非储压式车载锂电池自动灭火装置,实现灭火技术自动化,提高新能源汽车动力电池的安全性。

参考文献

- [1] HUANG Z, LIU J, ZHAI H, et al. Experimental investigation on the characteristics of thermal runaway and its propagation of large-format lithium ion batteries under overcharging and overheating conditions [J]. *Energy*, 2021, 233: 121103.
- [2] 贾子润,王震坡,王秋诗,等. 新能源汽车动力电池热失控机理和安全风险管控方法的研究 [J]. *汽车工程*, 2022, 44(11): 1689-1705.
- [3] JIA Z R, WANG Z P, WANG Q S, et al. Research on thermal runaway mechanism and safety risk control method of power battery in new-energy vehicles [J]. *Automotive Engineering*, 2022, 44(11): 1689-1705.
- [4] JI C, WANG B, WANG S, et al. Optimization on uniformity of lithium-ion cylindrical battery module by different arrangement strategy [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 157: 113683.
- [5] LYU P, LIU X, QU J, et al. Recent advances of thermal safety of lithium ion battery for energy storage [J]. *Energy Storage Materials*, 2020, 31: 195-220.
- [6] DUH Y, SUN Y, LIN X, et al. Characterization on thermal runaway of commercial 18650 lithium-ion batteries used in electric vehicles: a review [J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 41: 102888.
- [7] LIU B, JIA Y, YUAN C, et al. Safety issues and mechanisms of lithium-ion battery cell upon mechanical abusive loading: a review [J]. *Energy Storage Materials*, 2020, 24: 85-112.
- [8] 周洋捷,王震坡,洪吉超,等. 新能源汽车动力电池“过充电-热失控”安全防控技术研究综述 [J]. *机械工程学报*, 2022, 58(10): 112-135.
- [9] ZHOU Y J, WANG Z P, HONG J C, et al. Review on safety prevention and control technology of new energy vehicle power battery "overcharging - thermal runaway" [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(10): 112-135.
- [10] LIAO Z, ZHANG S, LI K, et al. A survey of methods for monitoring and detecting thermal runaway of lithium-ion batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 436: 226879.
- [11] 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.
- [12] SHAHID S, AGELIN-CHAAB M. A review of thermal runaway prevention and mitigation strategies for lithium-ion batteries [J]. *Energy Conversion and Management*: X, 2022, 16: 100310.
- [13] FENG X, REN D, HE X, et al. Mitigating thermal runaway of lithium-ion batteries [J]. *Joule*, 2020, 4(4): 743-770.

- [12] XU B, LEE J, KWON D, et al. Mitigation strategies for Li-ion battery thermal runaway: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 150: 111437.
- [13] LIU X, REN D, HSU H, et al. Thermal runaway of lithium-ion batteries without internal short circuit [J]. *Joule*, 2018, 2(10): 2047-2064.
- [14] 刘洋, 陶风波, 孙磊, 等. 磷酸铁锂储能电池热失控及其内部演变机制研究 [J]. *高电压技术*, 2021, 47(4): 1333-1343.
LIU Y, TAO F B, SUN L, et al. Study on thermal runaway of lithium iron phosphate energy storage battery and its internal evolution mechanism [J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(4): 1333-1343.
- [15] GRLJ C G, KRZYNAR N, PRANJIC M. A decade of UAV docking stations: a brief overview of mobile and fixed landing platforms [J]. *Drones*, 2022, 6(1): 17.
- [16] LIN C, XU S, LIU J. Measurement of heat generation in a 40 Ah LiFePO₄ prismatic battery using accelerating rate calorimetry [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(17): 8375-8384.
- [17] LIU Z, YU Q, ZHAO Y, et al. Silicon oxides: a promising family of anode materials for lithium-ion batteries [J]. *Chem Soc Rev*, 2019, 48(1): 285-309.
- [18] MENG F, XIONG X, TAN L, et al. Strategies for improving electrochemical reaction kinetics of cathode materials for subzero-temperature Li-ion batteries: a review [J]. *Energy Storage Materials*, 2022, 44: 390-407.
- [19] ZHANG Q, NIU J, ZHAO Z, et al. Research on the effect of thermal runaway gas components and explosion limits of lithium-ion batteries under different charge states [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 45: 103759.
- [20] ZHANG Q, LIU T, WANG Q. Experimental study on the influence of different heating methods on thermal runaway of lithium-ion battery [J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 42: 103063.
- [21] 董海斌, 姜学磊, 马建琴, 等. 锰酸锂电池热失控特性研究 [J]. *消防科学与技术*, 2022, 41(1): 21-25.
DONG H B, XIAN X L, MA J Q, et al. Study on thermal runaway characteristics of lithium manganate batteries [J]. *Fire Science and Technology*, 2022, 41(1): 21-25.
- [22] YUAN W, LIANG D, CHU Y, et al. Aging effect delays overcharge-induced thermal runaway of lithium-ion batteries [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2022, 79: 104830.
- [23] 袁威, 梁栋, 褚燕燕, 等. 过充电诱发电动车用锂电池热失控行为分析 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2022, 61(6): 136-143.
YUAN W, LIANG D, CHU Y Y, et al. Thermal runaway behavior analysis of lithium battery for electric vehicle induced by overcharging [J]. *Journal of Sun Yat-sen University (Natural Science Edition)*, 2022, 61(6): 136-143.
- [24] 邹晓龙. 不同环境压力和温度下锰酸锂电池热失控特性研究 [D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2022.
ZOU X L. Thermal runaway characteristics of lithium manganate batteries under different ambient pressures and temperatures [D]. Guanghan: Civil Aviation Flight Academy of China, 2022.
- [25] 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(自然科学版)*, 2018, 46(6): 65-72.
LAN F C, ZHENG W J, LI Z J, et al. Deformation response and internal short-circuit failure analysis of vehicle power battery under compression load [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 46(6): 65-72.
- [26] SUN L, WEI C, GUO D, et al. Comparative study on thermal runaway characteristics of lithium iron phosphate battery modules under different overcharge conditions [J]. *Fire Technology*, 2020, 56(4): 1555-1574.
- [27] LIU P, LI Y, MAO B, et al. Experimental study on thermal runaway and fire behaviors of large format lithium iron phosphate battery [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 192: 116949.
- [28] MAO B, LIU C, YANG K, et al. Thermal runaway and fire behaviors of a 300 Ah lithium ion battery with LiFePO₄ as cathode [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 139: 110717.
- [29] FERNANDES Y, BRY A, DE PERSIS S. Identification and quantification of gases emitted during abuse tests by overcharge of a commercial Li-ion battery [J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 389: 106-119.
- [30] LIU J, HUANG Z, SUN J, et al. Heat generation and thermal runaway of lithium-ion battery induced by slight overcharging cycling [J]. *Journal of Power Sources*, 2022, 526: 231136.
- [31] 潘公宇, 薛磊. 不同荷电状态下锂电池的热失控实验研究 [J]. *电源技术*, 2022, 46(10): 1132-1135.
PAN G Y, XUE L. Experimental study on thermal runaway of lithium battery under different state of charge [J]. *Power Supply Technology*, 2022, 46(10): 1132-1135.
- [32] LIU Z, GUO X, MENG N, et al. Study of thermal runaway and the combustion behavior of lithium-ion batteries overcharged with high current rates [J]. *Thermochimica Acta*, 2022, 715: 179276.
- [33] 牛慧晶, 伍靖怡, 李钊, 等. 不同诱发条件下 NCM 三元锂离子电池热失控和燃烧特性 [J]. *装备环境工程*, 2022, 19(7): 83-92.
NIU H C, WU J Y, LI Z, et al. Thermal runaway and combustion characteristics of NCM ternary lithium ion batteries under different induced conditions [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2022, 19(7): 83-92.
- [34] JIN C, SUN Y, WANG H, et al. Heating power and heating energy effect on the thermal runaway propagation characteristics of lithium-ion battery module: experiments and modeling [J]. *Applied Energy*, 2022, 312: 118760.
- [35] 汪红辉, 吴泽钦, 储德韧. 轻度过放模式下钛酸锂电池性能及热安全性 [J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(5): 1305-1313.
WANG H H, WU Z Q, CHU D R. Performance and thermal safety of lithium titanate batteries in mild overdischarge mode [J].

- Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(5): 1305–1313.
- [36] 邢学彬, 袁德强, 王占国, 等. 不同触发条件下的钛酸锂电池热失控特性研究 [J]. 消防科学与技术, 2021, 40(6): 787–792.
- XING X B, YUAN D Q, WANG Z G, et al. Study on thermal runaway characteristics of lithium titanate battery under different trigger conditions [J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(6): 787–792.
- [37] JIA Z, WANG S, QIN P, et al. Comparative investigation of the thermal runaway and gas venting behaviors of large-format LiFePO₄ batteries caused by overcharging and overheating [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 61: 106791.
- [38] ZHU X, WANG Z, WANG Y, et al. Overcharge investigation of large format lithium-ion pouch cells with Li(Ni_{0.6}Co_{0.2}Mn_{0.2})O₂ cathode for electric vehicles: thermal runaway features and safety management method [J]. Energy, 2019, 169: 868–880.
- [39] 李高巨. 基于数据驱动的电动汽车动力电池风险评估方法研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2022.
- LI G J. Research on risk assessment method of electric vehicle power battery using data-driven approach [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2022.
- [40] 王兵. 车用锂离子电池热失控规律及预警方法研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2021.
- WANG B. Study on thermal runaway law and warning method of vehicle lithium ion battery [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2021.
- [41] JI C, ZHANG Z, WANG B, et al. Study on thermal runaway warning method of lithium-ion battery [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2022, 78: 104785.
- [42] FENG X, WENG C, OUYANG M, et al. Online internal short circuit detection for a large format lithium ion battery [J]. Applied Energy, 2016, 161(1): 168–180.
- [43] 孙振宇, 王震坡, 刘鹏, 等. 新能源汽车动力电池系统故障诊断研究综述 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(14): 87–104.
- SUN Z Y, WANG Z P, LIU P, et al. A review of fault diagnosis of new energy vehicle power battery system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(14): 87–104.
- [44] HONG J, WANG Z, LIU P. Big-data-based thermal runaway prognosis of battery systems for electric vehicles [J]. Energies, 2017, 10(7): 919.
- [45] 左付山, 李政原, 周天, 等. 基于模糊逻辑的纯电动公交车动力电池工作状态评价 [J]. 森林工程, 2020, 36(3): 86–91, 97.
- ZUO F S, LI Z Y, ZHOU T, et al. Evaluation of the working state of pure electric bus power battery based on fuzzy logic [J]. Forest Engineering, 2020, 36(3): 86–91, 97.
- [46] LI Y, WANG W, LIN C, et al. Safety modeling and protection for lithium-ion batteries based on artificial neural networks method under mechanical abuse [J]. Science China (Technological Sciences), 2021, 64(11): 2373–2388.
- [47] 刘同宇, 李师, 付卫东, 等. 大容量磷酸铁锂动力电池热失控预警策略研究 [J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(11): 120–126.
- LIU T Y, LI S, FU W D, et al. Study on thermal runaway warning strategy of large capacity lithium iron phosphate power battery [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(11): 120–126.
- [48] CAI T, PUNEET V, VIVIAN T, et al. Detection of Li-ion battery failure and venting with carbon dioxide sensors [J]. eTransportation, 2020, 7: 100100.
- [49] YANG J, ZHENG Z, WEI D, et al. Detection of micro-scale Li dendrite via H₂ gas capture for early safety warning [J]. Joule, 2020, 4(8): 1714–1729.
- [50] 杨启帆, 马宏忠, 段大卫, 等. 基于气体特性的锂离子电池热失控在线预警方法 [J]. 高电压技术, 2022, 48(3): 1202–1211.
- YANG Q F, MA H Z, DUAN D W, et al. Online warning method of thermal runaway of lithium ion battery based on gas characteristics [J]. High Voltage Technology, 2022, 48(3): 1202–1211.
- [51] LARSSON F, BERTILSSON S, FURLANI M, et al. Gas explosions and thermal runaways during external heating abuse of commercial lithium-ion graphite-LiCoO₂ cells at different levels of ageing [J]. Journal of Power Sources, 2018, 373: 220–231.
- [52] 王伟. 锂离子电池含磷阻燃电解液及复合隔膜的设计与安全性能的研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- WANG W. Design and safety performance of flame retardant electrolyte containing phosphorus and composite diaphragm for lithium ion batteries [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [53] WANG J, CAI W, MU X, et al. Designing of multifunctional and flame retardant separator towards safer high-performance lithium-sulfur batteries [J]. Nano Research, 2021, 14(12): 4865–4877.
- [54] PATIL M, SEO J, LEE M. A novel dielectric fluid immersion cooling technology for Li-ion battery thermal management [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 229: 113715.
- [55] ZHANG T, GAO Q, GU Y, et al. Studies on thermal management of lithium-ion battery using non-metallic heat exchanger [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 182: 116095.
- [56] MONIKA K, CHAKRABORTY C, ROY S, et al. An improved mini-channel based liquid cooling strategy of prismatic LiFePO₄ batteries for electric or hybrid vehicles [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 35: 102301.
- [57] YANG N, WANG J, XU S, et al. A comparative assessment of the battery liquid-cooling system employing two coolants: phase change material emulsion and water [J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46(5): 6498–6516.
- [58] YANG X, TAN S, LIU J. Thermal management of Li-ion battery with liquid metal [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 117: 577–585.
- [59] LIU Z, LIU X, MENG H, et al. Numerical analysis of the thermal performance of a liquid cooling battery module based on the gradient ratio flow velocity and gradient increment tube diameter [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021,

- 175: 121338.
- [60] GUO J, LIU F, XU Y, et al. Optimization design and numerical study of liquid-cooling structure for cylindrical lithium-ion battery pack [J]. *Journal of Energy Engineering*, 2021, 147(4): 04021017.
- [61] 柯巧敏. 液冷热管理对锂离子动力电池组热失控传播的抑制和阻断作用研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2022.
KE Q M. Research on retarding and obstruction effect of liquid-cooling thermal management on thermal runaway propagation of power lithium-ion battery pack [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2022.
- [62] MOHAMMED A H, ESMAEELI R, ALINIAGERDROUDBARI H, et al. Dual-purpose cooling plate for thermal management of prismatic lithium-ion batteries during normal operation and thermal runaway [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 160: 114106.
- [63] MONIKA K, DATTA S P. Comparative assessment among several channel designs with constant volume for cooling of pouch-type battery module [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 251: 114936.
- [64] WILKE S, SCHWEITZER B, KHATEEB S, et al. Preventing thermal runaway propagation in lithium ion battery packs using a phase change composite material: an experimental study [J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 340: 51-59.
- [65] LIU J, FAN Y, XIE Q. Temperature mitigation effect of phase change material on overcharging lithium-ion batteries: an experimental study [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2022, 147(8): 5153-5163.
- [66] HUANG Q, LI X, ZHANG G, et al. Innovative thermal management and thermal runaway suppression for battery module with flame retardant flexible composite phase change material [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 330: 129718.
- [67] KSHETRIMAYUM K S, YOON Y, GYE H, et al. Preventing heat propagation and thermal runaway in electric vehicle battery modules using integrated PCM and micro-channel plate cooling system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 159: 113797
- [68] YANG X, DUAN Y, ZHANG Z, et al. An experimental study on preventing thermal runaway propagation in lithium-ion battery module using aerogel and liquid cooling plate together [J]. *Fire Technology*, 2020, 56(6): 2579-2602.
- [69] BAUSCH B, FRANKL S, BECHER D, et al. Naturally-derived thermal barrier based on fiber-reinforced hydrogel for the prevention of thermal runaway propagation in high-energetic lithium-ion battery packs [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 61: 106841.
- [70] LI D, LIU P, ZHANG Z, et al. Sauer, battery thermal runaway fault prognosis in electric vehicles based on abnormal heat generation and deep learning algorithms [J]. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, 2022, 37(7): 8513-8525.
- [71] GHIJI M, NOVOZHILOV V, MOINUDDIN K, et al. A review of lithium-ion battery fire suppression [J]. *Energies*, 2020, 13(19): 5117.
- [72] 张乃平, 马永飞, 杨孟霖, 等. 锂电池火灾灭火技术研究综述 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2022, 18(7): 47-53.
ZHANG N P, MA Y F, YANG M F, et al. Review on fire extinguishing technology of lithium battery [J]. *China Safety Production Science and Technology*, 2022, 18(7): 47-53.
- [73] LUO W, ZHU S, GONG J, et al. Research and development of fire extinguishing technology for power lithium batteries [J]. *Procedia Engineering*, 2018, 211: 531-537.
- [74] ZHU M, ZHU S, GONG J, et al. Experimental study on fire and explosion characteristics of power lithium batteries with surfactant water mist [J]. *Procedia Engineering*, 2018, 211: 1083-1090.
- [75] 张青松, 程相静, 白伟. 含复合添加剂细水雾抑制锂电池火灾效果分析 [J]. *消防科学与技术*, 2018, 37(9): 1211-1214.
ZHANG Q S, CHENG X J, BAI W. Analysis of fire control effect of water mist containing compound additive on lithium battery [J]. *Fire Science and Technology*, 2018, 37(9): 1211-1214.
- [76] WANG Z, WANG K, WANG J, et al. Inhibition effect of liquid nitrogen on thermal runaway propagation of lithium ion batteries in confined space [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2022, 79: 104853.
- [77] TIANWEI Z, HAO L, JIWEI S, et al. Synergistic inhibition effect on lithium-ion batteries during thermal runaway by N₂-twin-fluid liquid mist [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 37: 102269.
- [78] 张俐恒, 张迪, 贺元骅. 抑制三元锂离子电池热失控火灾研究 [J]. *消防科学与技术*, 2023, 41(2): 153-158.
ZHANG L H, ZHANG D, HE Y H. Research on suppression of thermal runaway fire of ternary lithium-ion batteries [J]. *Fire Science and Technology*, 2023, 41(2): 153-158.
- [79] ZHANG L, DUAN Q, MENG X, et al. Experimental investigation on intermittent spray cooling and toxic hazards of lithium-ion battery thermal runaway [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 252(15): 115091.
- [80] 韩路豪, 王子阳, 何骁龙, 等. 细水雾释放策略对大容量三元锂离子电池热失控火灾抑制效果的实验研究 [J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(5): 1664-1674.
HAN L H, WANG Z Y, HE X L, et al. The effect of water mist strategies on thermal runaway fire suppression of large-capacity NCM lithium-ion battery [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(5): 1664-1674.