

不同正极材料18650型锂离子电池混合排布下的热失控传播特性研究

杨瑞乔¹, 杨洪宇^{2,4}, 钱伟佳³, 玄铁民¹, 何志霞³, 刘磊^{4,5}

(¹ 江苏大学能源与动力工程学院, 江苏 镇江 212013; ² 中汽研汽车检验中心(常州)有限公司, 江苏 常州 213000; ³ 江苏大学能源研究院, 江苏 镇江 212013; ⁴ 江苏省光储充检一体化研发应用工程技术研究中心, 江苏 常州 213000; ⁵ 中汽研新能源汽车检验中心(天津)有限公司, 天津 300300)

摘要: 面向三元镍钴锰酸锂($\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z)\text{O}_2$, NCM)与磷酸铁锂(LiFePO_4 , LFP)电芯互补应用需求, 针对不同正极材料电芯相邻布置条件下热失控传播规律缺乏实验数据的问题, 选取商用18650圆柱电芯NCM与LFP搭建1×3紧密线性热耦合平台。在100%荷电状态(state of charge, SOC)下以40W恒功率触发首节热失控, 结合温度、质量与视频对比6种排布的传播行为。结果显示, 同质NCM模组发生连续热失控, 三节峰值温度超过630℃且质量损失大于35%; 同质LFP模组热失控多局限于首节, 邻近电芯温升与质量损失较小。混合排布中, LFP置于中间仅升温并有限排气, 表现出明显的隔热作用并抑制向下游NCM的传热; LFP置于末端时, 在两节NCM连续失控产生的热负荷叠加作用下可被诱发热失控(峰值约320℃、质量损失约8%), 但未引起进一步传播。本研究为混合正极材料模组的布置优化与被动防护设计提供实验依据。

关键词: 锂离子电池; 热失控; 热失控传播; NCM; LFP; 混合排布

中图分类号: TM 912

文献标志码: AA

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-12

Thermal runaway propagation characteristics of 18650-type lithium-ion cells with different cathode materials under homogeneous and mixed arrangements

YANG Ruiqiao¹, YANG Hongyu^{2,4}, QIAN Weijia³, XUAN Tiemin¹, HE Zhixia³, LIU Lei^{4,5}

(¹ School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China; ² CATARC Automotive Test Center (Changzhou) Company Limited, Changzhou 213000, Jiangsu, China; ³ Institute of Energy Research, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China; ⁴ Jiangsu Province Engineering Technology Research Center of Optical Storage, Charging and Testing Integrated R&D and Application, Changzhou 213000, Jiangsu, China; ⁵ CATARC New Energy Vehicle Research and Inspection Center (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300300, China)

Abstract: To meet the complementary application needs of nickel-cobalt-manganese ($\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z)\text{O}_2$, NCM) and lithium iron phosphate (LiFePO_4 , LFP) cells, this study addresses the lack of experimental data on thermal runaway propagation in adjacent arrangements of cells with different cathode materials. Commercial 18650 cylindrical NCM and LFP cells were assembled into a 1×3 tightly packed, linearly thermally coupled platform. At 100% state of

收稿日期: 2026-01-07 修回日期: 2026-04-30

通信作者: 玄铁民(1986—),男,博士,教授, xuan723@ujs.edu.cn

第一作者: 杨瑞乔(2000—),男,硕士研究生, 1124229779@qq.com

基金项目: 常州市国际合作项目(CZ20240007); 锂电池储能系统热安全危害评估和火灾处置技术联合研发; 国家重点研发计划“新能源汽车”重点专项(2024YFB2505000); 本征安全高比能锂离子动力电池系统关键技术及应用

引用本文: 杨瑞乔, 杨洪宇, 钱伟佳, 玄铁民, 何志霞, 刘磊. 不同正极材料18650型锂离子电池混合排布下的热失控传播特性研究[J]. 化工学报, DOI: 10.11949/0438-1157.20260025

Citation: YANG Ruiqiao, YANG Hongyu, QIAN Weijia, XUAN Tiemin, HE Zhixia, LIU Lei. Thermal runaway propagation characteristics of 18650-type lithium-ion cells with different cathode materials under homogeneous and mixed arrangements[J]. CIESC Journal, DOI: 10.11949/0438-1157.20260025

charge (SOC), thermal runaway was initiated in the first cell using a constant heating power of 40 W. Temperature evolution, mass loss, and video recordings were jointly analyzed to compare propagation behaviors under six configurations. The results show that the homogeneous NCM module underwent successive thermal runaway, with peak temperatures exceeding 630°C and mass loss greater than 35% for all three cells. In contrast, the homogeneous LFP module exhibited thermal runaway largely confined to the first cell, with limited temperature rise and mass loss in neighboring cells. For mixed configurations, when the LFP cell was placed in the middle position, it only heated up with limited venting, providing an evident thermal insulation effect and suppressing heat transfer to the downstream NCM cell. When the LFP cell was placed at the end position, it could be triggered into thermal runaway by the superposed thermal load generated by successive thermal runaway of two upstream NCM cells ($T_{\max} \approx 320^\circ\text{C}$; mass loss of about 8%), but no further propagation occurred. These findings provide experimental evidence for layout optimization and passive protection design of modules incorporating mixed cathode materials.

Keywords: lithium-ion battery; thermal runaway; thermal runaway propagation; NCM; LFP; hybrid arrangement

引 言

锂离子电池凭借高能量密度、长循环寿命和低自放电率等优势,已广泛应用于电动汽车和电化学储能等领域^[1-4]。然而,电解液普遍采用可燃有机溶剂,并与高比能电极材料相结合,使得电池在热滥用、过充、短路或机械冲击等极端工况下极易诱发热失控(Thermal runaway),伴随大量可燃气体的喷射、剧烈燃烧甚至爆炸,构成严重安全隐患^[1, 5-9]。围绕热失控触发机理、多尺度产热与传热过程以及早期预警特征,国内外已开展了系统的实验和仿真研究,为认识电池全生命周期安全性演化奠定了基础^[2, 3, 5-8]。在“碳达峰、碳中和”目标推动下,2024年我国锂电池总产量已超过1170GWh,电动汽车和储能装置的装机规模持续攀升,这使得单体热失控在模组内蔓延的风险愈发凸显,其蔓延机理与阻断控制已成为亟待解决的关键问题。

围绕锂离子电池模组热失控传播,已有大量关于触发方式和排布形式的实验与数值研究。针对18650圆柱电芯,有学者在敞开与封闭体系中对热失控传播过程进行了对比研究,发现封闭空间会显著提高电池组峰值温度并加快传播^[10-16]。在一维直线紧密排布条件下,研究者揭示了触发电池数量、单体间距以及热传导路径对传播临界条件和阻断机制的影响^[10, 11, 15, 17, 18]。在此基础上,研究者系统比较了不同荷电状态(State of charge)、电池间距、模组连接方式和电芯形态(圆柱/软包)对传播速度、峰值温度和失效范围的耦合作用,结果表明SOC升高、间距减小以及并联连接方式更易导致模组内形成剧烈的链式热失控传播^[13, 18-23]。除结构与工况外,正

极材料体系亦会显著影响单体热失控的触发阈值、放热速率、产气与失效形态等特征^[17, 24-28]。

从应用需求看,三元镍钴锰酸锂($\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z)\text{O}_2$, NCM)电芯在能量密度与容量方面具有优势,磷酸铁锂(LiFePO_4 , LFP)电芯在倍率、循环寿命与热稳定性方面更具优势,二者存在互补关系。基于这种互补性,已有学者提出并研究了在同一电池系统内对NCM与LFP电芯进行空间混合排布的方案,并围绕其热特性与散热结构优化开展实验与分析^[29]。陈峥^[29]等指出,蔚来ET7已搭载由三元锂与磷酸铁锂混合组成的电池组,表明双体系混装方案已具有明确的工程应用背景。然而,针对三元NCM与磷酸铁锂LFP电芯在紧凑空间内混合排布时的热失控传播规律,尤其是LFP在传播链路中所处位置对传播是否发生、传播强度以及阻断效果的影响,目前仍缺乏在统一结构与触发条件下的系统定量对照研究。

针对上述问题,本文构建了3节直线排布的18650圆柱电池模组,选取NCM和LFP两种典型正极体系,在100%荷电状态下采用40W外部电加热方式触发单节电池热失控,系统对比不同材料组合及排布顺序下模组热失控传播行为的差异。通过记录电芯表面温度、热失控时间、质量损失及燃烧形态等特征量,分析单体热失控向相邻电池传播过程中的能量释放与热量传递规律,并界定完全蔓延、部分蔓延与蔓延阻断等典型工况。研究结果旨在揭示NCM/LFP混合排布模组热失控传播机理,为在兼顾能量密度与热安全性的前提下开展模组结构优化与被动热安全防护设计提供实验依据。

1 实验装置及工况设置

1.1 电池类型

本文选取两种典型正极材料体系的商用 18650 型圆柱锂离子电池作为研究对象,分别为镍钴锰酸锂 NCM 体系与磷酸铁锂 LFP 体系,旨在对比分析两者在热失控及传播过程中的热特性差异。实验选用的 NCM 电池型号为 Samsung INR18650-20R,标称容量为 2.0Ah,标称电压为 3.6V;LFP 电池型号为 Samsung IFR18650-11Q,标称容量 1.1Ah,标称电压为 3.2V。两款电池均符合标准 18650 封装规格,外形尺寸约为直径 18mm、高度 65mm,便于在实验模组中实现统一排布。表 1 列出了两类锂离子电池的主要参数。

表 1 锂离子电池主要参数

Table 1 Main parameters of lithium-ion batteries

电池样品名称	Samsung INR18650 20R	Samsung IFR18650 11Q
正极材料	NCM	LFP
额定容量	2.0 Ah	1.1 Ah
标称电压	3.6 V	3.2 V
满充截止电压	4.2 V	3.6 V
满放截止电压	2.5 V	2.0 V
最大充电电流	4.0 A	1.5 A
最大放电电流	6.0 A	5.0 A
质量	42.5 g	40.5 g
电池尺寸	高度:64.85±0.15 mm	高度:64.80±0.15 mm
	直径:18.33±0.07 mm	直径:18.15±0.10 mm

1.2 实验装置

实验在容积为 180L 的密闭防爆舱内进行,如图 1 所示。实验期间舱门保持关闭,以确保内部环境稳定。实验结束后开启舱门并启动排风系统进行冷却。舱体前端配有直径 10cm 的观察窗,用于实验过程的可视化观测。通过高清摄像机对整个热失控过程进行视频记录,帧率设置为 60fps。

试验电池采用水平放置,如图 2 所示三节电池与加热棒沿轴向 1×3 线性排布。首节电池与外部加热棒、各电池之间均保持紧密接触,轴向间距约为 0mm。为保证排布间距和接触条件的一致性,先使用耐高温胶带将加热棒与三节电池捆扎固定,再置于专用夹具中夹紧。三节电池正极统一朝上,单体之间无任何电气连接。热失控通过外部加热棒触发,加热棒贴紧首节电池侧面进行局部加热。实验中,参考已有 18650 型锂离子电池外部加热热失控实验^[30,31],调节可变电源使加热棒持续输出 40 W

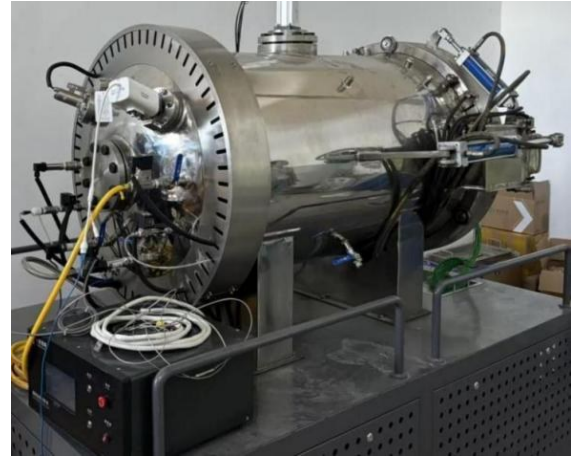


图 1 锂离子电池热失控分析舱

Fig. 1 Thermal runaway analysis chamber for lithium-ion batteries

恒定功率,该电池触发热失控后立即停止加热。加热棒直径约 18 mm,高度约 65 mm,尺寸与电池一致。

为实时监测热失控蔓延过程中的温度变化,在每节电池侧面布置一根直径 1 mm 的 K 型铠装热电偶。热电偶固定于电池圆柱轴向中心线处,距底部 32.5 mm,用于精确记录热失控过程中各个电池的温度变化。温度数据通过数据采集仪(型号:HIOKILR8450)同步记录,采样频率设为 1Hz。

1.3 实验工况

本研究共设置 6 组实验工况,电池排列顺序详见表 2。表中"首个电池"为外部加热触发的电池,"中间电池"与"末端电池"依次沿传播路径排布。例如"N-L-N"表示首节为 NCM、中间为 LFP、末端为 NCM 的混合排布方式。各工况名称中 N 代表 NCM 电池,L 代表 LFP 电池。实验前,所有电池均在 25℃ 环境下采用标准恒流恒压(CC-CV)程序充电至 100%SOC。工况 1 与工况 2 分别为 NCM 材料与 LFP 材料模组,作为同种材料体系的基准对照组;工况 3 至工况 6 采用 NCM 和 LFP 混合排布策略,通过改变两种电池在传播路径中的位置(如中间位或末端位),旨在探究 LFP 电池对热失控链式传播的阻断效应及异种电池间的热耦合机制。实验中仅对模组中首个电池施加外部加热以触发热失控,下游电池无热源输入,处于被动受热状态(依赖传导、对流及辐射传热)。通过对比不同排布下相邻电池的热响应特征,定量揭示热失控在混合材料体系中的蔓延机制。实验结束后,开启通风系统排出烟气。

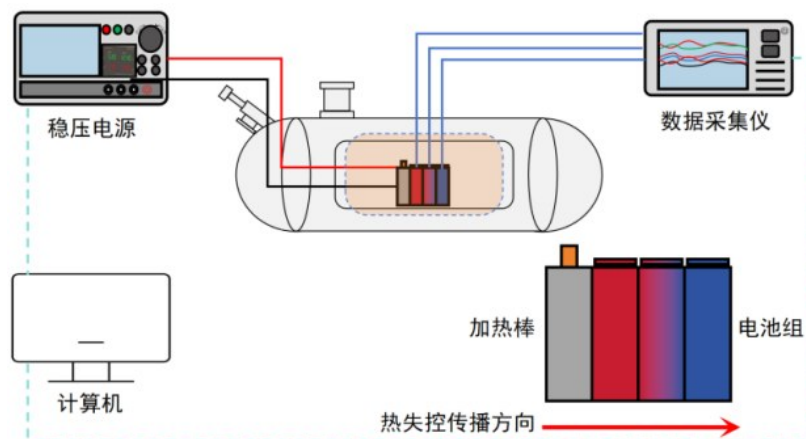


图2 锂离子电池热失控实验平台示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the lithium-ion battery thermal runaway test platform

表2 实验工况

Table 2 Experimental conditions

序号	实验组名称	首个电池	中间电池	末端电池
1	N-N-N	N-N-N-1	N-N-N-2	N-N-N-3
2	L-L-L	L-L-L-1	L-L-L-2	L-L-L-3
3	N-L-N	N-L-N-1	N-L-N-2	N-L-N-3
4	L-N-L	L-N-L-1	L-N-L-2	L-N-L-3
5	N-N-L	N-N-L-1	N-N-L-2	N-N-L-3
6	L-L-N	L-L-N-1	L-L-N-2	L-L-N-3

2 实验结果分析及讨论

2.1 相同材料锂离子电池组热失控传播分析

为确立不同化学体系在模组层面的热安全基准,本节首先对比分析了NCM与LFP两类同质电池模组在相同热滥用触发条件下的热响应行为。实验数据表明,NCM模组表现出较高的反应活性和显著的传播风险,呈现出连锁失效特征。

如图3所示,首节电池N-N-N-1在40W恒功率下持续加热,电芯内部副反应被逐步激活。随后,电池内部SEI膜分解、负极与电解液反应以及NCM层状正极的热分解相继发生,热量不断累积,于 $t=826\text{s}$ 时达到热失控起始温度(T_{onset}),约为 231.3°C 。达到该阈值后,电池内部不可逆的链式放热反应被激活,产热速率迅速超过散热速率,温升速率明显增大。随后在 $t=849\text{s}$ 达到峰值温度(T_{max}) 646.0°C ,标志着电池进入剧烈热失控阶段。

首节电池剧烈热失控后,其释放的大量热量和高温气体通过壳体导热、火焰辐射及高温气体对流作用于相邻电池,使模组整体及局部温度迅速升高。相邻的N-N-N-2与N-N-N-3电池分别在 $t=$

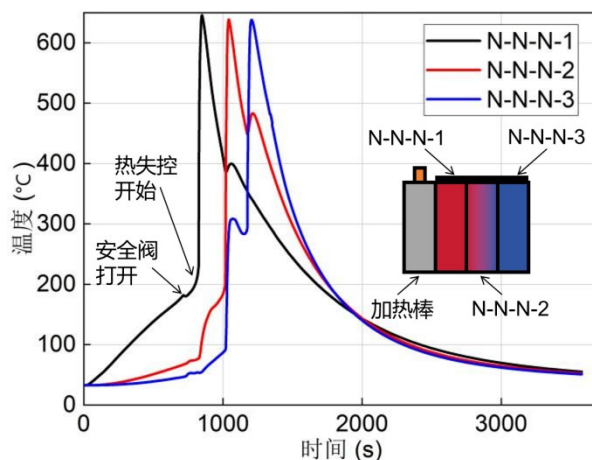


图3 NCM-NCM-NCM电池组各电池热失控传播温度曲线
Fig. 3 Temperature profiles of thermal runaway propagation for individual cells within the NCM-NCM-NCM battery pack

1018s和1175s相继被触发热失控,峰值温度均维持在约 638°C 。由传播时间可见,热失控从首节传导至第二节的时间间隔为192s,而从第二节传导至第三节的时间仅为157s,表现出明显的加速传播特征。这表明,在紧密排布且防爆舱封闭的条件下,首节电池释放的反应热难以及时逸散,模组内部热量和可燃气体逐渐积聚。下游电池在更高环境温度和更强热流下,其内部副反应动力学过程被加速,从而缩短热失控传播所需时间。此外,图3中部分温度曲线呈现双峰特征。N-N-N-1的第一个局部峰值出现在安全阀开启后,泄压喷射伴随的物质排出导致表面温度短暂回落,第二个峰值对应热失控阶段的最高温度。N-N-N-2的第一个峰值为其自身热失控峰值温度,第二个峰值来源于N-N-N-3热失控时射流火焰和高温气体对N-N-N-2表面测点的再加热作用。N-N-N-3温度曲线的双峰成因

与首节电池类似。

如图4所示的视频影像和表3汇总的质量损失数据进一步印证了上述剧烈反应过程。在恒功率加热早期,N-N-N-1内部电解液挥发和副反应使壳体内压力逐渐升高,约在 $t=716\text{s}$ 时安全阀开启,伴随白色烟雾缓慢逸出;随着温度接近热失控起始温度 T_{onset} ,电池内部放热反应急剧增强,在 $t=826\text{s}$ 时发生剧烈爆燃,形成高速喷射的火焰射流及熔融金属颗粒,说明电芯内活性物质已发生剧烈分解放热。强烈的对流和辐射热冲击在短时间内将大量能量传递至下游电池,N-N-N-2和N-N-N-3分别在 1018s 和 1175s 时发生热失控爆燃。此后,火焰强度快速衰减,至 $t=1250\text{s}$ 时火焰基本熄灭。质量分析显示,三节电池的质量损失率均超过35%(分别为37.6%、37.6%和35.3%),且后两节被动触发电池的质量损耗与首节主动触发电池几乎相当,说明每一节电池在被触发后内部反应已基本完全进行,绝大部分可释放的化学能量都已以热和气体形式释放出来。

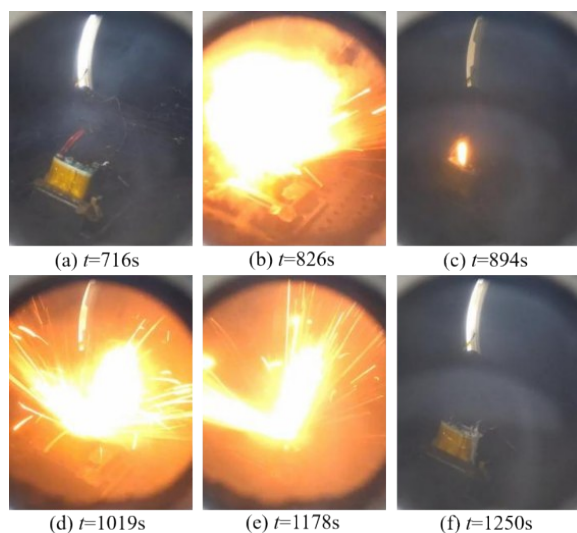


图4 锂离子电池组热失控传播过程

Fig. 4 The propagation process of thermal runaway in lithium-ion battery packs

综合温度演化与质量损失特征可知,热失控在NCM模组内部实现了完全传播,且传播过程中未出现明显的能量衰减,表现出典型的链式热失控特征。其根本原因在于NCM材料具有较低的热分解温度和较高的体积能量密度,使单体一旦进入失控状态即可向相邻电池提供足够大的热量,从而维持热失控传播。

与NCM电池组表现出的剧烈链式热失控相比,

表3 NCM-NCM-NCM锂电池组试验前后质量对比

Table 3 Mass comparison of NCM-NCM-NCM lithium-ion battery pack before and after testing

电池序号	热失控前质量/g	热失控后质量/g	质量损失/g	损失率/%
1	42.5	26.5	16	37.6
2	42.5	26.5	16	37.6
3	42.5	27.5	15	35.3

LFP-LFP-LFP电池组在相同40W恒功率加热条件下呈现出明显温和的热失控行为。如图5所示,随着局部加热持续进行,首节电池L-L-L-1表面温度缓慢升高,SEI膜逐步分解、负极与电解液之间的放热反应被激活,热量在电芯内部缓慢累积,于 $t=1162\text{s}$ 达到热失控起始温度 $T_{\text{onset}}=256.3^{\circ}\text{C}$ 。与N-N-N-1相比,该触发时刻明显延迟,表明LFP体系具有更高的热失控触发阈值。研究表明,这一差异主要源于LFP橄榄石结构中 PO_4 四面体内较强的P-O共价键,使正极晶格在高温下更难发生结构塌陷和释氧,从而抑制早期剧烈放热反应的启动^[32,33]。

达到 T_{onset} 后,L-L-L-1同样进入不可逆放热阶段,但由于LFP正极反应焓较低且释氧能力较弱,正极与电解液之间的强放热氧化反应被显著削弱,单位时间放热能力明显低于NCM电池。实验上表现为温升速率仅小幅增加,最终仅上升至峰值温度 $T_{\text{max}}=331.8^{\circ}\text{C}$,远低于NCM电池的热失控峰值温度。如表5所示,LFP触发电池的最大温升速率 $(dT/dt)_{\text{max}}$ 仅为 3.6°C/s ,而N-N-N-1高达 112.1°C/s ,两者相差近30倍。这些结果表明,LFP电池不仅需要更高温度才会进入热失控状态,而且在热失控阶段的总释热量和热释放速率均明显更低。

在首节L-L-L-1发生热失控后,其释放的热量 and 高温气体同样通过壳体接触传热、对流与辐射等途径向相邻电池传递。但由于本身释热量有限,传递到下游电池的热流密度明显低于NCM模组。由温度曲线可见,相邻的L-L-L-2与L-L-L-3仅表现为缓慢的被动升温:L-L-L-2的峰值温度约为 131.5°C ,L-L-L-3仅为 76.7°C ,且两者在整个过程中未出现类似NCM模组的急剧升温特征。这是由于L-L-L-1释放的热量有限,不足以触发下游电池SEI完全破坏和正极剧烈分解,下游电池始终处于被动受热状态,未发生热失控。

实验宏观现象与质量损失数据进一步印证了上述分析。除电池L-L-L-1在热失控前出现安全

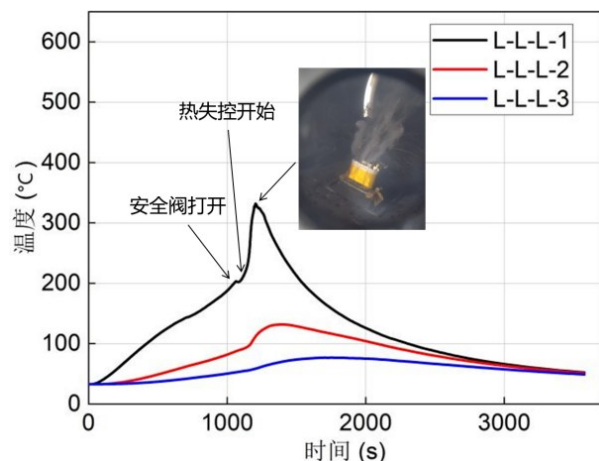


图5 LFP-LFP-LFP电池组各电池热失控传播温度曲线

Fig. 5 Temperature profiles of thermal runaway propagation for individual cells within the LFP-LFP-LFP battery pack

阀开启并伴随少量白色烟雾逸出外,未观察到火焰喷射或爆燃现象,体现出LFP体系在热滥用条件下的高安全性。结合表4可以看出,仅电池L-L-L-1发生了约9.9%的质量损失,而电池L-L-L-2与电池L-L-L-3的质量变化均小于5%,结构保持完整。这表明,可燃电解液与活性物质的大规模分解主要局限在首节触发电池内部,未导致相邻电池发生不可逆热失控,体现出LFP电池组优异的热稳定性以及阻断热失控传播的能力。尽管N-N-N-1和L-L-L-1均已发生热失控,但两者质量损失差异显著,主要

由于两种电池的热失控强度不同。NCM电池热失控过程中伴随明亮火焰、熔融金属颗粒喷射以及电解液、隔膜和部分电极材料的大规模分解排出;而LFP电池主要表现为安全阀开启和浓烟释放,无持续明火和强烈喷射,排出的物质总量明显较少。

表4 LFP-LFP-LFP锂电池组试验前后质量对比

Table 4 Mass comparison of LFP-LFP-LFP lithium-ion battery pack before and after testing

电池序号	热失控前质量/g	热失控后质量/g	质量损失/g	损失率/%
1	40.5	36.5	4	9.9
2	40.5	39	1.5	3.7
3	40.5	40.5	0	0

综合温度演化与表5中的关键参数可知,LFP电池组在热滥用条件下未发生热失控传播。其根本原因在于:一方面,LFP橄榄石结构及较强P-O键显著提高了热分解起始温度、削弱了正极释氧与二次氧化放热;另一方面,较低的工作电压和较小的能量密度使该体系在热失控状态下可释放的化学能量显著降低,使首节电池即便发生失控也难以向相邻电池提供足够大的热流密度。这一结果证实,在紧密排布模组中,LFP体系自身具备阻断热失控传播的能力。

表5 相同材料电池组热失控关键参数

Table 5 Critical thermal runaway parameters of battery packs with identical materials

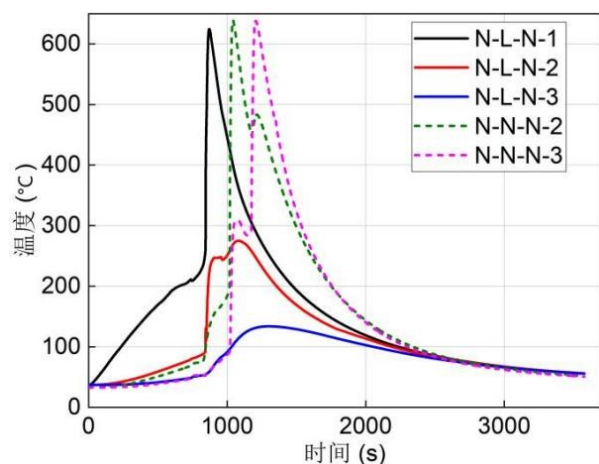
组别	电池编号	触发时刻 t_{TR}/s	峰值温度 $T_{max}/^{\circ}C$	峰值时刻 T_{max}/s	最大温升速率 $(dT/dt)_{max}/^{\circ}C \cdot s^{-1}$	邻位传播延迟 $\Delta t/s$
NCM-NCM-NCM	1	826	646.0	849	112.1	192
	2	1018	638.7	1042	70.0	157
	3	1175	638.0	1205	57.1	—
LFP-LFP-LFP	1	1162	331.8	1205	3.6	—
	2	—	131.5	1374	0.4	—
	3	—	76.7	1696	0.2	—

2.2 不同材料锂离子电池在中间位置热失控传播分析

图6为NCM-LFP-NCM混合模组的热失控传播温度曲线。首节电池N-L-N-1在 $t=843s$ 时温度升至约 $257.1^{\circ}C$,触发热失控。随后温度迅速上升并于 $t=870s$ 达到峰值 $624.6^{\circ}C$,最大温升速率为 $59.9^{\circ}C/s$ 。该热响应过程与NCM基准组N-N-N-1的热失控特征高度一致,表明在紧密排布结构中,首节电池的热失控行为主要取决于其自身材料属性与加热条

件,相邻电池类型对其热失控过程的影响较小。

首节电池失控后释放的热量沿横向传递至N-L-N-2,其温度迅速升高。如图6所示,该电池在 $t=1078s$ 达到峰值 $274.9^{\circ}C$,但随后呈现缓慢下降趋势,未出现二次剧烈温升。NCM基准组中N-N-N-2在受到上游电池热量后迅速进入热失控, T_{max} 接近 $630^{\circ}C$ 。与此相比,N-L-N-2仅表现为温度升高并伴有少量排气,只发生有限程度的热失控。如表6所示,其质量损失约9.9%,主要由安全阀开启后电



(a) NCM-LFP-NCM 电池组各电池热失控传播温度曲线



(b) N-L-N-2 热失控现象 (c) N-N-N-2 热失控现象

图6 N-L-N 与 N-N-N 电池组热失控温度曲线及实验现象
Fig. 6 The temperature curves and experimental phenomena of the N-L-N and N-N-N battery packs during thermal runaway

解液和气体逸出所致,正负极活性物质并未发生大规模分解。由此可见,中间 LFP 电池在承受上游 NCM 失控热冲击的同时,依靠较高的热分解温度和有限放热,将相当一部分能量以温升和排气的形式在本单体内耗散,从而显著削弱向下游传递的热量。

由于中间 LFP 电池未发生剧烈热失控,末端 NCM 电池 N-L-N-3 的温度响应被明显抑制。图 6 显示,N-L-N-3 的峰值温度为 133.7°C,远低于热失控起始温度,最大温升速率仅为 1.0°C/s。整个过程中未出现安全阀开启和明显燃烧现象,试验结束时电芯结构基本完好。与 NCM 基准组中 N-N-N-2 和 N-N-N-3 先后完全热失控并持续向末端扩展的行为相比,可以认为,在 NCM-LFP-NCM 模组中,LFP 电池在传播路径上形成了有效的热屏障。上游 NCM 电池仍会发生剧烈热失控,但其释放的能量在传递至 LFP 单体过程中被显著衰减,最终无法触发末端 NCM 电池的热失控,从而将热失控控制在局部区域。

表6 NCM-LFP-NCM 锂电池组试验前后质量对比

Table 6 Mass comparison of NCM-LFP-NCM lithium-ion battery pack before and after testing

电池序号	热失控前质量/g	热失控后质量/g	质量损失/g	损失率/%
1	42.5	26.5	16.0	37.6
2	40.5	36.5	4.0	9.9
3	42.5	42.5	0	0

图 7 展示了 LFP-NCM-LFP 电池组的热失控传播温度曲线。首节电池 L-N-L-1 在 $t=1240\text{s}$ 达到热失控起始温度 272.4°C 后进入热失控阶段,峰值温度 $T_{\max}$ 为 305.4°C。表 8 数据显示,该电池最大温升速率仅为 2.3°C/s。与 LFP 基准组首节电池相比,L-N-L-1 的峰值温度和质量损失率处于同一量级,说明该电池已经历完整热失控过程;但受正极材料反应焓和释氧能力限制,其热释放强度仍远低于 NCM 电池热失控,未形成足以触发相邻电池的高强度放热。

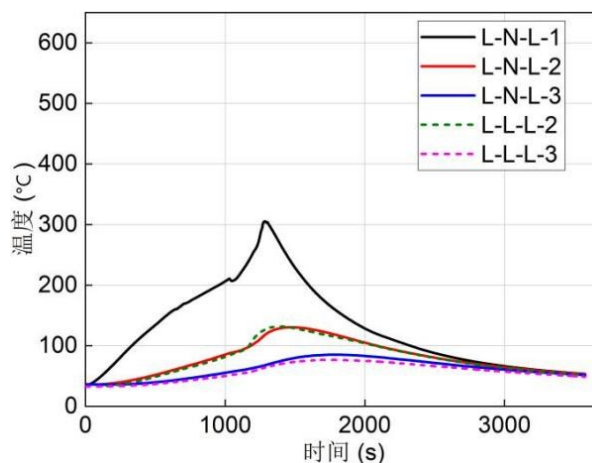


图7 LFP-NCM-LFP 电池组各电池热失控传播温度曲线
Fig. 7 Temperature profiles of thermal runaway propagation for individual cells within the LFP-NCM-LFP battery pack

在 L-N-L-1 热失控释放热量的作用下,L-N-L-2 仅表现出缓慢的被动升温特征。如图 7 所示,L-N-L-2 的温度演化轨迹与 LFP 基准组中的中间位电池(L-L-L-2)高度重合,两者峰值温度均维持在 130°C 左右。表 8 数据显示,L-N-L-2 的最大温升速率仅为 0.3°C/s,且未记录到热失控触发时刻。这表明,尽管中间电池为热稳定性相对较差的 NCM 材料,但在上游热源强度不足(LFP 触发)的条件下,其并未达到发生剧烈放热反应的临界条件,其热响应行为与 LFP 电池基本一致。

热量经过中间电池传递后进一步衰减,末端 LFP 电池(L-N-L-3)的峰值温度仅为 85.3°C,最大

表7 LFP-NCM-LFP锂电池组试验前后质量对比

Table 7 Mass comparison of LFP-NCM-LFP lithium-ion battery pack before and after testing

电池序号	热失控前 质量/g	热失控后 质量/g	质量损失/g	损失率/%
1	40.5	37	3.5	8.6
2	42.5	42.5	0	0
3	40.5	40.5	0	0

表8 不同材料锂离子电池在中间位置热失控关键参数

Table 8 Critical thermal runaway parameters of lithium-ion batteries with different electrode materials at the middle position

组别	电池编号	触发时刻 t_{TR}/s	峰值温度 $T_{max}/^{\circ}C$	峰值时刻 T_{max}/s	最大温升速率 $(dT/dt)_{max}/^{\circ}C \cdot s^{-1}$
NCM-LFP-NCM	1	843	624.6	870	59.9
	2	—	274.9	1078	26.7
	3	—	133.7	1284	1.0
LFP-NCM-LFP	1	1240	305.4	1283	2.3
	2	—	130.4	1464	0.3
	3	—	85.3	1764	0.1

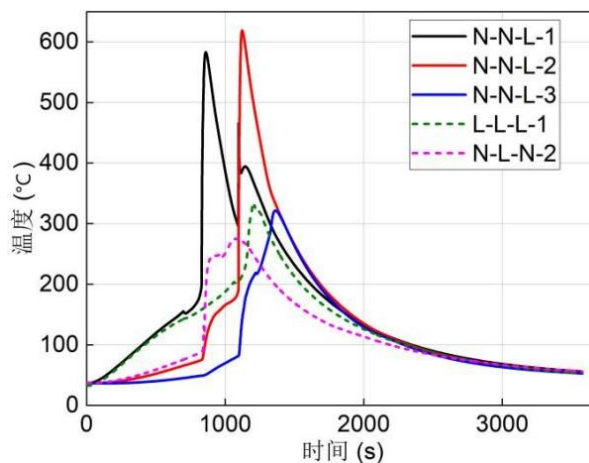
本节的对比实验表明,异种电池材料的排布会显著改变模组内的失效模式。在NCM模组中间引入一节LFP电池(N-L-N排布)时,LFP凭借较高的热稳定性吸收来自上游电池的热量,导致下游的NCM电池获得的能量不足以维持热失控的传播。相反,当LFP作为触发源(L-N-L排布)时,表8数据显示,由于LFP的热释放速率较低,无法提供足够的活化能使相邻的NCM电池突破发生热失控所需的能量阈值。上述两种情况下,热失控的传播最终都被阻断在不同材料的界面处。

2.3 不同材料锂离子电池在末端位置热失控传播分析

图8展示了NCM-NCM-LFP模组的温度变化曲线。首节电池N-N-L-1于 $t=830s$ 时率先触发热失控,峰值温度为 $582.8^{\circ}C$,最大温升速率 $81.9^{\circ}C/s$ 。随后,热失控沿路径向后传播。高能量热流迅速诱发第二节电池N-N-L-2在 $t=1096s$ 触发热失控,其峰值温度进一步上升至 $618.9^{\circ}C$ 。该传播路径的传播时间约为 $266s$,虽略长于NCM基准组中N-N-N-1至N-N-N-2的传播时间(约 $192s$),但两者温度变化和热失控特征高度一致,表明末端电池材料的改变并未显著影响上游两节NCM电池之间的传热过程。

在承受前两节NCM电池叠加的剧烈热冲击后,

温升速率为 $0.1^{\circ}C/s$ 。这表明热失控传播在首节电池之后即已终止。表7中的质量损失数据同样印证了这一点:只有L-N-L-1出现了8.6%的质量损失,而后续两节电池(NCM和LFP)的质量损失均为0%,保持了完整的物理结构。实验结果说明,当触发源为低能量密度的LFP电池时,即使相邻电池为高活性的NCM,由于能量传递不足,热失控传播也难以建立。



(a) NCM-NCM-LFP电池组各电池热失控传播温度曲线

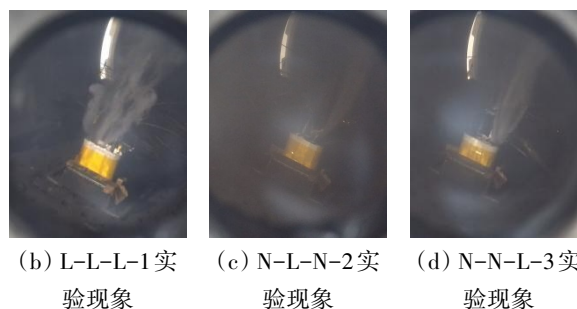


图8 NCM-NCM-LFP电池组热失控温度曲线及实验现象
Fig. 8 Thermal runaway temperature curve and experimental phenomena of NCM-NCM-LFP battery pack

末端电池 N-N-L-3 在 $t=1362\text{s}$ 达到 321.5°C 的峰值温度。表 9 数据显示,该电池的质量损失率为 8.6%,与基准组中发生完全热失控的 LFP 电池(L-L-L-1)的质量损失率(9.9%)处于同一量级。结合实验过程中观察到的安全阀开启及明显的烟气喷射现象,可以判断 N-N-L-3 内部已发生剧烈放热反应并排出大量气体。综合温度峰值、质量损失数据及宏观现象判断,末端 LFP 电池在外部热量的持续作用下,已经发生完全热失控。

为进一步解析末端电池的反应程度及传播机理,图 8 中将其温度曲线与 N-L-N-2(中间位 LFP)及 L-L-L-1(基准触发位 LFP)进行了对比:

(1)通过对比末端电池 N-N-L-3 与基准组 L-L-L-1 的温度数据发现,二者的峰值温度接近,分别为 321.5°C 和 331.8°C ,且都对应明显的温度峰值和安全阀开启行为。这一热特征的一致性表明,N-N-L-3 并非仅处于被动温升状态,而是已经跨越 LFP 的热失控起始温度并经历了完整的热失控过程。

(2)通过与 N-L-N-2 对比发现,N-N-L-3 的峰值温度显著高于 N-L-N-2(274.9°C)。这反映了不同热负荷对电池热失控行为的显著影响。N-L-N-2 仅承受单节 NCM 电池的热传递,热负荷相对较低,使其停留于热失控的临界边缘;而处于传播末端的 N-N-L-3 受到两节 NCM 电池连续失控释放的热量叠加,导致其内部温度迅速升高并超过反应临界阈值,从而进入不可逆的完全热失控状态。

实验结果表明,处于模组末端的 LFP 电池在上下游热量累积作用下发生完全热失控,但受限材料自身较低的反应焓值和有限的热释放速率,其热失控期间的温升速率明显低于前两节 NCM 电池。这种有限程度的热失控在释放自身储能的同时,有效消耗了传播路径上的剩余热量,难以再向外提供维持链式传播所需的高能量热流,因此热失控传播在末端 LFP 电池处终止。

图 9 展示了 LFP-LFP-NCM 电池组在热滥用条

表 9 NCM-NCM-LFP 锂电池组试验前后质量对比
Table 9 Mass comparison of NCM-NCM-LFP lithium-ion battery pack before and after testing

电池序号	热失控前质量/g	热失控后质量/g	质量损失/g	损失率/%
1	42.5	27.0	15.5	36.5
2	42.5	27.0	15.5	36.5
3	40.5	37.0	3.5	8.6

件下的温度变化特征。首节电池 L-L-N-1 在 $t=1092\text{s}$ 率先发生热失控,热失控起始温度为 257.6°C ,峰值温度达到 326.1°C ,热释放过程与 L-L-L-1 基准组一致,表现出一次完整的 LFP 热失控事件。在 L-L-N-1 热释放作用下,L-L-N-2 温度缓慢上升,并于 $t=1292\text{s}$ 达到 143.9°C 的峰值,随后迅速冷却,未出现热失控迹象。L-L-N-2 的峰值温度为 143.9°C ,高于碳酸酯电解液溶剂(如 EC、DMC)的沸点,因此可能发生少量电解液挥发或缓慢泄漏,这与 3.7% 的质量损失相符;但该温度仍低于 LFP 电池的热失控起始温度,且最大温升速率仅 0.5°C/s ,实验中也未观察到安全阀瞬时开启、火焰或大量泄压喷射现象,因此该质量损失主要归因于低沸点电解液溶剂的挥发,而非热失控导致的物质排出。处于末端的 NCM 电池(L-L-N-3)受到的热影响微乎其微,峰值温度仅为 81.8°C ,且质量损失为 0%。实验过程中未观察到泄压或燃烧现象,表明其结构保持完整,未发生热失控行为,模组内的热失控传播被有效抑制在首节电池附近。

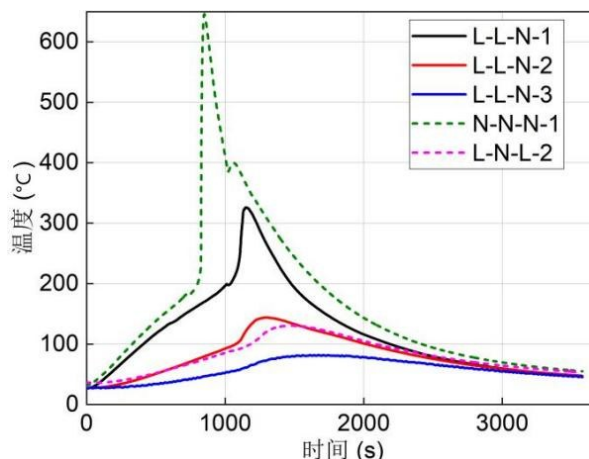


图 9 LFP-LFP-NCM 电池组各电池热失控传播温度曲线
Fig. 9 Temperature profiles of thermal runaway propagation for individual cells within the LFP-LFP-NCM battery pack

结合图 9 中不同工况下的温度曲线,对受热电池的热响应行为进行深入对比分析:

(1)不同热负荷下电池的热失控临界行为分析(与 N-N-N-1 对比):将本组末端电池(L-L-N-3)及前述实验的中间位电池(L-N-L-2)与 NCM 基准组首节电池(N-N-N-1)进行对比。N-N-N-1 的热失控起始温度为 231.3°C ,峰值温度超过 640°C ,表征电池发生完全热失控的状态。相比之下,L-L-N-3 与 L-N-L-2 的峰值温度分别仅为 81.8°C 和 130.4°C ,远低于 NCM 的热失控起始阈值。结合质量损失数据

可知,这两节受热电池内部压力均未达到安全阀开启阈值,未发生结构性破坏,处于热安全范围内。

(2)低能量触发源下的被动热响应特征(L-N-L-2与L-L-N-2对比):对比L-N-L组的中间位NCM电池与本组的中间位LFP电池。尽管两者的化学体系不同,但在同样承受上游单节LFP电池的热冲击时,两者的峰值温度高度接近(130.4℃和143.9℃)。这一现象说明,在触发源为LFP、热释放速率较低条件下,相邻电池的温升主要来源于上游电池的热传导与热辐射,电池内部的自产热占比极小。由于外部输入能量不足,两类电池均未被诱发剧烈的自热反应,始终处于热滥用的可逆阶段。

(3)LFP电池的热缓冲与能量衰减特性(L-N-L-2与L-L-N-3对比):进一步对比不同位置的NCM电池。L-N-L-2位于第一级传热路径上(前方仅隔1节LFP),其峰值温度为130.4℃;而L-L-N-3位于第二级传热路径上(前方隔2节LFP),其峰值温度进一步降低至81.8℃。这种显著的温降表明,随着

前方LFP阻隔层数的增加,热量在模组内的传递呈现明显的衰减趋势。相比于L-N-L-2,L-L-N-3所处环境的热冲击更温和,具有更高的热安全裕度。

表 10 LFP-LFP-NCM 锂电池组试验前后质量对比

Table 10 Mass comparison of LFP-LFP-NCM lithium-ion battery pack before and after testing

电池序号	热失控前质量/g	热失控后质量/g	质量损失/g	损失率/%
1	40.5	36.5	4.0	9.9
2	40.5	39	1.5	3.7
3	42.5	42.5	0	0

本节实验证实,以LFP电池作为触发源时,由于其固有放热强度较低,产生的热流不足以开启相邻电池的安全阀。在低能热源驱动下,受热电池的温升主要由外部物理传热主导,而非内部化学反应。此外,增加LFP电池作为中间缓冲层的数量,可进一步利用其吸热特性大幅衰减热流,使位于更后端的NCM电池获得更大的热安全裕度。

表 11 不同材料锂离子电池在末端位置热失控关键参数

Table 11 Critical thermal runaway parameters of lithium-ion batteries with different electrode materials at the terminal position

组别	电池编号	触发时刻 t_{TR}/s	峰值温度 $T_{max}/^{\circ}C$	峰值时刻 T_{max}/s	最大温升速率 $(dT/dt)_{max}/^{\circ}C \cdot s^{-1}$
NCM-NCM-LFP	1	830	582.8	860	81.9
	2	1096	618.9	1123	90.9
	3	1263	321.5	1362	3.2
LFP-LFP-NCM	1	1092	326.1	1154	3.9
	2	—	143.9	1292	0.5
	3	—	81.8	1671	0.2

3 结论与展望

通过对NCM/LFP电池在1×3线性紧密排列下的热失控传播对比实验,系统研究了电池材料体系对传播特性的影响。研究表明:

(1)在相同热滥用触发条件下,NCM模组表现出较高的反应活性,热失控伴随剧烈的链式传播,单体最高温升速率超过110℃/s,并伴随严重的质量损失(>35%);相比之下,LFP模组表现出优异的热安全性,其较高的热失控起始温度与较低的反应放热量使热失控被有效限制在触发电池内部,未在模组内形成链式传播。

(2)当LFP置于NCM模组中间(N-L-N)时,LFP电池有效缓冲了上游的高能量热流冲击,导致下游

NCM电池受到的热量不足以维持链式热失控传播;当LFP作为首节电池(L-N-L)时,其较低的热释放速率不足以诱发相邻NCM电池发生热失控。这两种机制均在异种材料接触面处成功阻断了热失控的传播路径。

(3)LFP电池对热冲击的响应存在明显的阈值特征:单节NCM电池热失控的热流仅能诱发LFP发生安全阀打开及有限放热副反应,未达到完全热失控状态;上游两节NCM电池造成的热量积聚叠加效应则能驱动LFP突破临界点,进入不可逆的完全热失控阶段。

(4)无论上游热源为单节还是两节LFP电池,传递到下游NCM电池的热流均被大幅衰减。在此类

工况下,下游NCM电池的温度上升几乎完全由外部热传递所驱动,内部化学反应产生的热量所占比例极小。因此,该电池始终处于热滥用条件下的可逆升温阶段,未发生不可逆热失控。

本文采用的1×3线性紧密排布是二维圆柱电池模组中单一传播路径的简化构型。上述结果表明,LFP电池凭借较高的热稳定性和有限的热释放强度,能够在一维传播路径上有效衰减热流并阻断热失控蔓延,为混合正极材料模组的布置优化与被动防护设计提供了实验依据。在实际二维紧密排布模组中,受热电池周围的相邻单体数量增加,LFP电池可能承受多方向热量输入,其阻断效果需结合具体排布方案进一步验证。后续工作将围绕二维紧密排布条件下NCM和LFP混合模组的热失控传播与阻断特性开展实验与仿真研究。

参考文献

- [1] Wang Q S, Ping P, Zhao X J, et al. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery[J]. Journal of Power Sources, 2012, **208**: 210–224.
- [2] Feng X N, Ouyang M G, Liu X, et al. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: a review[J]. Energy Storage Materials, 2018, **10**: 246–267.
- [3] 任东生, 冯旭宁, 韩雪冰, 等. 锂离子电池全生命周期安全性演变研究进展[J]. 储能科学与技术, 2018, **7**(6): 957–966.
Ren D S, Feng X N, Han X B, et al. Recent progress on evolution of safety performance of lithium-ion battery during aging process [J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, **7**(6): 957–966.
- [4] 徐俊, 郭皓晨, 谢延敏, 等. 储能锂电池系统综合管理研究进展[J]. 西安交通大学学报, 2024, **58**(10): 1–23.
Xu J, Guo Z C, Xie Y M, et al. Review of research progress in integrated management for energy storage lithium battery systems [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, **58**(10): 1–23.
- [5] Finegan D P, Darcy E, Keyser M, et al. Characterising thermal runaway within lithium-ion cells by inducing and monitoring internal short circuits[J]. Energy & Environmental Science, 2017, **10**(6): 1377–1388.
- [6] 陈素华, 白莹. 锂离子动力电池热失控机理及热管理技术研究进展[J]. 中国科学基金, 2023, **37**(2): 187–198.
Chen S H, Bai Y. Thermal runaway mechanism and research progress on thermal management of lithium-ion power batteries [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2023, **37**(2): 187–198.
- [7] 李奎杰, 楼平, 管敏渊, 等. 锂离子电池热失控多维信号演化及耦合机制研究综述[J]. 储能科学与技术, 2023, **12**(3): 899–912.
Li K J, Lou P, Guan M Y, et al. A review of multi-dimensional signal evolution and coupling mechanism of lithium-ion battery thermal runaway[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, **12**(3): 899–912.
- [8] 陈国贺, 吕培召, 李孟涵, 等. 锂离子电池热失控传播特性及其抑制策略研究进展[J]. 储能科学与技术, 2024, **13**(7): 2470–2482.
- [9] 刘邦金, 汪林威, 吴月月, 等. 锂离子电池热管理研究进展[J]. 化工学报, 2024, **75**(12): 4413–4431.
Liu B J, Wang L W, Wu Y Y, et al. Advances in thermal management of lithium-ion batteries[J]. CIESC Journal, 2024, **75**(12): 4413–4431.
- [10] 邓志彬, 韩旭, 刘全义, 等. 不同体系中18650型锂离子电池热失控传播过程研究[J]. 消防科学与技术, 2018, **37**(2): 246–249.
Deng Z B, Han X, Liu Q Y, et al. Thermal runaway extension of 18650 Lithiumion battery under different systems[J]. Fire Science and Technology, 2018, **37**(2): 246–249.
- [11] 邓志彬, 孙强, 贺元骅. 18650型锂离子电池热失控火灾扩展触发条件研究[J]. 消防科学与技术, 2018, **37**(5): 690–693.
Deng Z B, Sun Q, He Y H. Experimental study on the trigger conditions of 18650 type lithium-ion battery thermal runaway fire extension[J]. Fire Science and Technology, 2018, **37**(5): 690–693.
- [12] 郭王勇, 李丽娜, 王敬伟, 等. 18650型锂离子电池一维热失控传播试验研究[J]. 消防科学与技术, 2021, **40**(3): 438–441, 452.
Guo W Y, Li L N, Wang J W, et al. Experimental study on thermal runaway propagation of 18650 lithium ion battery in linear horizontal arrangement[J]. Fire Science and Technology, 2021, **40**(3): 438–441, 452.
- [13] 刘平, 崔伦, 湛瑞宇, 等. 18650三元锂电池组热失控蔓延规律研究[J]. 消防科学与技术, 2021, **40**(3): 429–433.
Liu P, Cui L, Chen R Y, et al. Study on thermal runaway propagation of 18650 ternary lithium battery pack[J]. Fire Science and Technology, 2021, **40**(3): 429–433.
- [14] 周天念, 吴传平, 陈宝辉. 加热引发三元18650型锂离子电池组的燃烧特性[J]. 储能科学与技术, 2021, **10**(2): 558–564.
Zhou T N, Wu C P, Chen B H. Burning characteristics of the 18650-type lithium-ion ternary battery pack induced by heating [J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, **10**(2): 558–564.
- [15] Niu H C, Chen C X, Ji D, et al. Thermal-runaway propagation over a linear cylindrical battery module[J]. Fire Technology, 2020, **56**(6): 2491–2507.
- [16] 彭鹏, 孙忆琼, 蒋方明. 钴酸锂电池烤箱热滥用模拟及热行为分析[J]. 化工学报, 2014, **65**(2): 647–657.
Peng P, Sun Y Q, Jiang F M. Numerical simulations and thermal behavior analysis for oven thermal abusing of LiCoO₂ lithium-ion battery[J]. CIESC Journal, 2014, **65**(2): 647–657.
- [17] 李磊, 李钊, 姬丹, 等. 过充电触发的LFP和NCM锂离子电池的热失控行为: 差异与原因[J]. 储能科学与技术, 2022, **11**(5): 1419–1427.
Li L, Li Z, Ji D, et al. Overcharge induced thermal runaway behaviors of pouch-type lithium-ion batteries with LFP and NCM cathodes: the differences and reasons[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, **11**(5): 1419–1427.
- [18] 陈晖, 李晋, 赵瑞兰, 等. 不同荷电状态下电池模组热失控传播对比试验[J]. 储能科学与技术, 2025, **14**(9): 3402–3413.
Chen Y, Li J, Zhao R L, et al. Comparative experimental study on thermal runaway propagation of battery modules under different states of charge[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025,

- 14(9): 3402–3413.
- [19] Wang Z R, Mao N, Jiang F W. Study on the effect of spacing on thermal runaway propagation for lithium-ion batteries[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, **140**(6): 2849–2863.
- [20] Kim S J, Yu Y S, Jeong C S, et al. Thermal runaway propagation in pouch-type lithium-ion battery modules: effects of state of charge and initiation location[J]. *Batteries*, 2025, **11**(11): 398.
- [21] Song L F, Huang Z H, Mei W X, et al. Thermal runaway propagation behavior and energy flow distribution analysis of 280 Ah LiFePO₄ battery[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, **170**: 1066–1078.
- [22] Zhu M H, Yao J J, Qian F Y, et al. Study on thermal runaway propagation characteristics of lithium iron phosphate battery pack under different SOC[J]. *Electronics*, 2023, **12**(1): 200.
- [23] 苟飘, 徐俊, 刘晓艳, 等. 电动汽车锂电池模块化热管理系统的设计及实验研究[J]. *西安交通大学学报*, 2019, **53**(12): 104–110. Gou P, Xu J, Liu X Y, et al. Experimental research on modular thermal management system of lithium batteries for electric vehicles[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, **53**(12): 104–110.
- [24] Schöberl J, Ank M, Schreiber M, et al. Thermal runaway propagation in automotive lithium-ion batteries with NMC-811 and LFP cathodes: Safety requirements and impact on system integration[J]. *eTransportation*, 2024, **19**: 100305.
- [25] 王淮斌, 李阳, 王钦正, 等. 三元锂离子动力电池热失控及蔓延特性实验研究[J]. *工程科学学报*, 2021, **43**(5): 663–675. Wang H B, Li Y, Wang Q Z, et al. Experimental study on the thermal runaway and its propagation of a lithium-ion traction battery with NCM cathode under thermal abuse[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2021, **43**(5): 663–675.
- [26] Huang Z H, Liu J L, Zhai H J, 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.
- [27] Zhao L, Zhu M T, Xu X M, et al. Thermal runaway characteristics on NCM lithium-ion batteries triggered by local heating under different heat dissipation conditions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, **159**: 113847.
- [28] Chen B W, Wang J F, Li Y H, et al. Multi-parameter analysis and safety assessment of thermal runaway triggered by side heating of batteries with different cathode materials[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2025, **203**: 107879.
- [29] 陈峥, 胡竞元, 赵志刚, 等. 双体系混装电池组热特性研究及风冷散热结构优化[J]. *储能科学与技术*, 2025, **14**(9): 3463–3475. Chen Z, Hu J Y, Zhao Z G, et al. Thermal characteristics study and optimization of air-cooling structures for dual-system battery packs[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, **14**(9): 3463–3475.
- [30] Liu J J, Wang Z R, Gong J H, et al. Experimental study of thermal runaway process of 18650 lithium-ion battery[J]. *Materials*, 2017, **10**(3): 230.
- [31] 张青松, 刘添添, 郝朝龙, 等. 锂离子电池热失控气体快速检测及危险性分析方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2023, **49**(9): 2227–2233. Zhang Q S, Liu T T, Hao C L, et al. Rapid detection analysis method of thermal runaway gas composition and risk of lithium ion battery[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2023, **49**(9): 2227–2233.
- [32] Tang X, Zhang G X, Wang X Y, et al. Investigating the critical characteristics of thermal runaway process for LiFePO₄/graphite batteries by a ceased segmented method[J]. *iScience*, 2021, **24**(10): 103088.
- [33] Zhang Y, Cheng S Y, Mei W X, et al. Understanding of thermal runaway mechanism of LiFePO₄ battery in-depth by three-level analysis[J]. *Applied Energy*, 2023, **336**: 120695.