磷酸铁锂电池热失控及级联传播特性研究

朱国庆[1,2],崔少琦[1],胡翔宇[1],王欣宇[3,4],王　伟[5]

(1. 中国矿业大学 安全工程学院,江苏 徐州　221116; 2. 深地科学与工程云龙湖实验室,江苏 徐州　221116; 3. 中国矿业大学 物联网(感知矿山)研究中心,江苏 徐州　221008; 4. 中国矿业大学 矿山互联网应用技术国家地方联合工程实验室,江苏 徐州　221008;5. 上海市消防科学技术研究所第五实验室,上海　200032)

摘要: 锂离子电池的热失控及热失控的级联传播是制约其大规模安全应用的核心挑战. 本研究聚焦100 Ah磷酸铁锂电池,通过构建多电池模组试验平台,系统探究了磷酸铁锂电池热失控演化及动力学传播特性. 结果表明:磷酸铁锂电池热失控过程可划分为自生热与电池微膨胀、压力积累与安全阀激活、热失控爆发、热失控衰退4个阶段,其中膨胀应力突变点较温度信号至少可提前476 s,为极早期预警提供了关键判据. 此外,热失控呈现"热滞后—爆发"的层级传播特性,电池模组中的前3个电池构成热失控的基础传播单元,第3个电池因热阻累积形成首个传播屏障,而第4个电池通过预加热与瞬时热冲击转变为能量枢纽,驱动传播路径重构. 基于此,提出分级阻断策略:可在第2,3个电池间设置材料冷却层以强化热阻屏障,并在第3,4个电池间集成液冷结构以抑制能量枢纽的加速效应. 本研究揭示了热失控传播的非线性动力学机制,可为电动汽车与储能系统的本质安全设计提供理论与技术支撑.

关键词: 磷酸铁锂电池;热失控;级联传播;预警;热管理

中图分类号: TM 912　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-1964(2026)02-0537-09

Study on thermal runaway and cascade propagation characteristics of lithium iron phosphate batteries

ZHU Guoqing[1,2], CUI Shaoqi[1], HU Xiangyu[1], WANG Xinyu[3,4], WANG Wei[5]

(1. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. Yunlong Lake Laboratory of Deep Underground Science and Engineering, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. IOT (Perception Mine) Research Center, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China; 4. The National and Local Joint Engineering Laboratory of Internet Application Technology on Mine, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China; 5. The Fifth Laboratory, Shanghai Fire Science and Technology Research Institute of MEM, Shanghai 200032, China)

Abstract: Thermal runaway and the cascading propagation pose a core challenge limiting the large-scale safe application of lithium-ion batteries. Focused on 100 Ah $LiFePO_4$ batteries, their thermal runaway evolution and kinetic propagation characteristics was systematically investigated by constructing a multi-cell module experimental platform. The results show that the thermal runaway process is divided into four stages: self-heating with battery micro-expansion, pressure accumula-

收稿日期: 2025-08-06　　**修回日期:** 2025-12-06　　**DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250316

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3009900);江苏省重点研发计划项目(BE2023688);"双一流"建设提升自主创新能力项目(2022ZZCX05K05)

通信作者: 朱国庆(1968—),男,安徽省砀山县人,教授,博士生导师. E-mail: zgq119xz@126.com

引用格式: 朱国庆,崔少琦,胡翔宇,等.磷酸铁锂电池热失控及级联传播特性研究[J].中国矿业大学学报,2026,55(2):537-545.
ZHU Guoqing, CUI Shaoqi, HU Xiangyu, et al. Study on thermal runaway and cascade propagation characteristics of lithium iron phosphate batteries[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(2): 537-545.

tion and activation of the safety valve, thermal runaway explosion and recession. Notably, the mutation point of expansion force precedes the earliest detectable temperature signal by up to 476 s, providing a critical criterion for ultra-early warning. Furthermore, thermal runaway propagation exhibits a hierarchical "thermal hysteresis-burst" characteristic. The first three batteries form the basic propagation unit, while the third cell acts as the initial propagation barrier due to accumulated thermal resistance. The fourth cell transforms into an energy hub through preheating and transient thermal shock, driving the reconstruction of propagation pathways. Based on this mechanism, a graded blocking strategy is proposed: A material cooling layer can be installed between the second and third cells to reinforce the thermal resistance barrier, with an integrated liquid cooling structure between the third and fourth cells to mitigate the acceleration effect of the energy hub. This study reveals the nonlinear dynamics of thermal runaway propagation, providing theoretical and technical foundations for inherent safety design in electric vehicles and energy storage systems.

Key words: lithium iron phosphate batteries; thermal runaway; cascade propagation; early warning; thermal management

锂离子电池作为新能源时代的关键载体，凭借其高能量密度、长循环寿命等优势已广泛应用于电动汽车、储能电站及便携电子设备等领域[1-3]. 据统计，2025年全球锂电池市场规模达2 280.5 GWh，预计2030年将超过6 TWh[4]. 然而，锂离子电池被广泛应用的同时其安全问题日益凸显，尤其是热失控引发的燃烧爆炸事故，已成为制约其进一步发展的关键瓶颈[5-8].

热失控本质上是电池内部放热反应与散热失衡导致的不可控温升链式反应. 其触发诱因可分为机械完整性破坏[9-11]、电化学滥用[12-13]以及极端环境暴露[14-15]3类. 例如，针刺测试模拟的机械损伤可在数秒内引发热失控[16]，过充热失控测试电池内部副反应增多，充电倍率越高，电池热失控风险越大[17]. 从反应动力学层面，热失控遵循"链式反应—临界点突破—灾变释放"3阶段路径：第1阶段，负极固体电解质界面膜(SEI膜)与电解液发生放热分解，生成C_2H_4等气态产物并释放热量；第2阶段，隔膜在热应力下发生孔径收缩，导致正极铝箔与负极铜箔微区接触，引发焦耳热积累；第3阶段，层状正极材料发生晶格氧脱嵌，与电解液发生剧烈氧化反应，触发温度梯度飙升并可能伴随爆燃现象，此时热失控全面爆发，单个电池热失控释放的能量可达其储能容量的3～4倍. 尤其是单个电池热失控释放出的热量会通过热传导、热对流和热辐射等方式传递给相邻电池，进而引发连锁反应，最终可能导致热失控的跨尺度蔓延，造成大规模灾害，严重威胁人身和财产安全. 2024年2月23日，南京雨花台区明尚西苑6栋发生火灾，火势从较低楼层一直燃烧到21层至34层，导致15人遇难，44人受伤，该火灾由电动自行车锂电池热失控引发. 2025年3月9日，韩国全罗南道康津洞的光伏储能设施突发大火，烧毁3 852个储能模块，损失高达100亿韩元，消防部门初步认定，事故与三元锂电池热失控直接相关.

鉴于锂离子电池热失控事故的严重性及其对大规模应用的制约性，深入研究锂离子电池热失控的特性及其传播机制尤为迫切. 近年来，众多学者致力于从电池内部材料反应、电池结构设计到热管理系统的优化等方面展开探索. 例如文献[18]研究发现电池在热失控时电压降为0 V后，内部材料仍可能发生燃烧. 文献[19]认为锂离子电池热失控放热反应主要是由充电过程中积累的电化学能量的释放、正极材料表面的锂化反应、正极金属氧化物分解释放出的氧气与电解液的氧化反应3个主要放热反应决定，同时指出电池开路电压下降主要与正极材料的锂化反应有关，而非电极短路. 文献[20]通过试验研究了52 Ah磷酸铁锂电池铝塑膜外壳在高压下绝缘失效后，电池内部材料在热失控过程中的变化特征，包括正负极材料的烧蚀、氟化物的生成及其形态差异. 文献[21]基于锂离子电池安全阀排气特征，提出将电池排气声信号作为预警信号的方法. 文献[22]开展了电池产气试验，解耦出不同阶段下电池内部的产气规律，可用于判断锂离子电池状态. 文献[23]研究了105 Ah磷酸铁锂电池在过热和过充条件下的热失控产气特性，发现过充条件下电池热失控产生更多混合气体，且过充倍率越高，气体总量和最大产气速率越大. 此外，文献[24]对比了垂直和水平排列的电池热失控蔓延特征，发现垂直结构

布置的电池热失控程度更为剧烈．文献[25]研究发现电池间距至少为 2 mm，能够抑制热失控蔓延．文献[26]通过建立热失控模型，分析了磷酸铁锂电池端子过热时电池内部热量传播及热失控特性，并设计了具有倾斜管道的液冷板以提升散热效果，为锂电池的风险评估和热管理设计提供了参考．

然而，现有研究多集中于单体电池热失控特性，对电池模组中热失控的级联传播动力学及其阻断机制的系统研究仍显不足．此外，传统电池管理系统在热失控早期预警和传播阻断方面存在局限性，难以满足大规模应用的安全需求．因此，本研究聚焦 100 Ah磷酸铁锂电池模组，通过构建多电池模组试验平台，系统探究其热失控特性及级联传播机制，旨在揭示热失控传播的非线性动力学规律，并提出有效的预警与阻断策略，为磷酸铁锂电池在电动汽车和储能系统中的本质安全设计提供理论依据与技术支撑，推动锂离子电池的大规模安全应用．

1　试验设置

1.1　电池样品

本研究采用100 Ah的商用锂离子电池作为试验样品，电池基本参数如表1所示，电池正极材料为磷酸铁锂，负极材料为石墨，工作电压为2.5～3.6 V．试验开始前，使用充放电循环仪将每个电池以0.5 C恒流充电至上限电压3.6 V，再以恒压充电至截止电流0.01 C，最后以0.5 C恒流放电至下限电压2.5 V，循环充放电2次后将电池充满至100％荷电状态(SOC)．

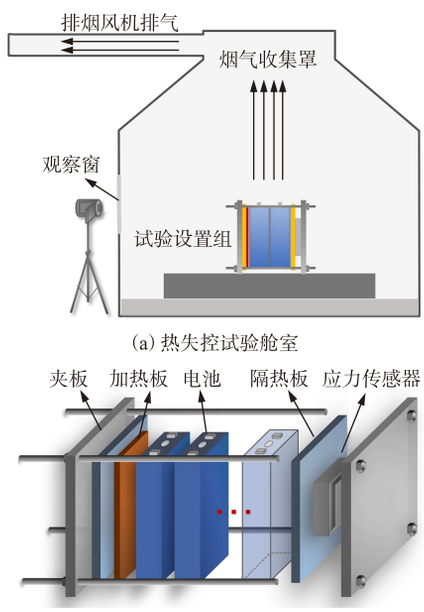
表1　样品电池基本参数

Table 1　The basic parameters of sample battery

参数	数值
尺寸(长×宽×厚)/(cm×cm×cm)	21.6×13.5×3.5
容量/Ah	100
质量/kg	1.92
标称电压/V	3.3
放电终止电压/V	2.5
充电终止电压/V	3.6

1.2　试验平台与试验工况

图1展示了锂离子电池试验测试装置．试验在图1a所示的电池热失控试验平台中开展，该平台依据ISO 9705标准缩尺度制造．试验平台主体由不锈钢板搭建，主要由燃烧室、排气管道和排烟风机组成．燃烧室是试验的核心区域，用于容纳电池试验组，排气管道则负责将试验过程中产生的废气引导至排烟风机，最后由排烟风机将热失控产生的有害废气排出至舱外，从而有效保障试验环境的安全性．此外，试验平台侧面还设有耐高温钢化玻璃观察窗，能够在不直接接触高温环境的情况下，实时、清晰地观察到试验过程中的各种现象，如电池的膨胀、起火、冒烟等情况，为试验数据的记录和分析提供直观依据．



(a) 热失控试验舱室

(b) 试验装置设置

图1　试验测试装置

Fig. 1　The experimental test device

试验共进行了6组，每组试验的工况设置如表2所示，工况1中的电池编号为1#，工况2中的电池编号为1#，2#，其余以此类推．在试验过程中，分别将电池试验组放置于燃烧室内，通过观察窗外设置的DV录像机对试验现象进行全程记录，当电池发生热失控时，开启排烟风机将热失控产生的废气排出至室外．如图1b所示，所有试验组中电池热失控由一块面积与电池侧表面积相等的加热板触发，使得电池表面均匀充分受热，加热板加热功率为500 W．热失控触发后，立即关闭加热板电源停止加热．为确保试验装置的稳定性和安全性，使用夹具将加热板、电池及应力传感器等仪器紧密夹在一起，并在应力传感器与电池之间放置云母隔热板，以防止热失控过程中应力传感器因高温而损坏．夹紧后，利用钢管和螺栓进行固定，构建出一个稳定可靠的试验结构，使得整个试验装置在热失控反应的强烈冲击下仍能保持稳定．

表 2 试验工况设置

Table 2 Experimental cases settings

试验工况	电池数量/个	加热板启闭状态
工况 1	1	首节电池热失控后关闭
工况 2	2	首节电池热失控后关闭
工况 3	3	首节电池热失控后关闭
工况 4	4	首节电池热失控后关闭
工况 5	5	首节电池热失控后关闭
工况 6	6	全程开启

2 试验结果与讨论

2.1 磷酸铁锂电池单体热失控特性与早期预警机制

2.1.1 热失控阶段划分

通过试验研究发现，磷酸铁锂电池热失控过程中，仅发生排气和气体喷射，并未观察到明显的起火或喷溅. 值得注意的是，在温度信号发生显著突变前，膨胀应力已出现明显阶跃式增长，这一特性为极早期预警提供了关键依据. 如图 2 所示，可根据温度与膨胀应力的协同演变规律将电池单体热失控过程划分为以下 4 个阶段：1)自生热反应与电池微膨胀阶段(阶段Ⅰ). 在外部加热作用下，电池温度从环境温度逐渐升高到 55 ℃(T_0)，电池壳体出现轻微鼓包膨胀. 此阶段温度升高速率较低，膨胀应力轻微缓慢上升，表明电池内部压力已开始积累，但尚未触发显著温升信号. 2)压力积累与安全阀激活阶段(阶段Ⅱ). 在加热板的持续加热下，电池内部副反应加剧，膨胀应力增长速率突然加快，温度逐渐升高，但温度升高速率仍保持平缓，此时膨胀应力突变点显著早于温度信号突变. 至第 1 099 s 时，膨胀应力达到峰值 7.69 kN，安全阀瞬间激活，释放电池内部电化学反应产生的气体，伴随剧烈爆响，内部压力骤降，膨胀应力归零. 3)热失控爆发阶段(阶段Ⅲ). 安全阀激活后，电池温度在第 1 118 s 升高到 115 ℃，并进入热失控全面爆发阶段，大量可燃气体(CO，H_2，CH_4等)、电解液蒸汽及固体颗粒通过安全阀激活后的喷射口高速喷出，形成浓密白烟，温升速率激增，电池峰值温度(T_{max})在短时间内达到 355 ℃. 此阶段膨胀应力出现短暂回升后迅速下降，此时热失控反应已不可逆. 4)热失控衰退阶段(阶段Ⅳ). 当活性物质反应耗尽后，温升速率趋近于零，排气逐渐停止，温度缓慢回落至环境水平. 膨胀应力因气体完全释放而稳定在 0 kN 附近，电池进入热力学平衡状态.

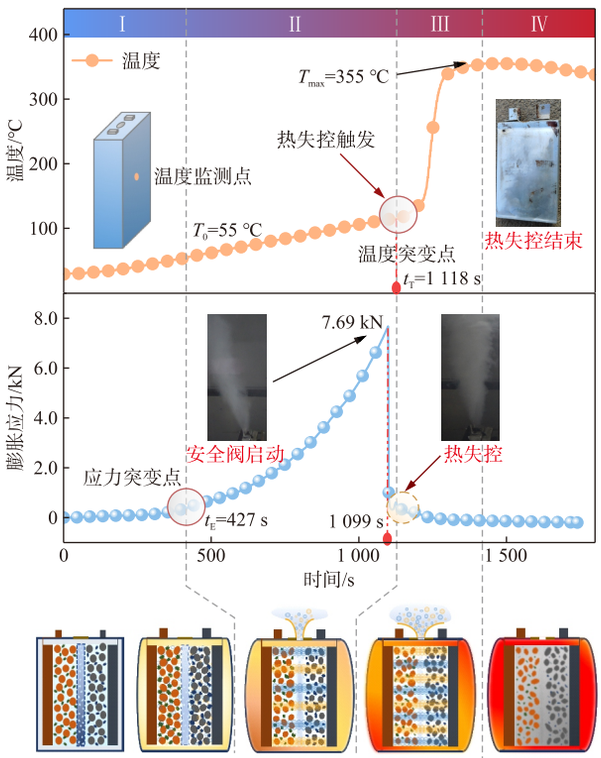


图 2 磷酸铁锂电池热失控特性及温度膨胀应力演化特征

Fig. 2 Thermal runaway temperature and expansion force evolution characteristics of $LiFePO_4$ battery

结合图 3 电池应力随时间变化速率可以看出，在电池热失控过程中，应力突变点发生时间 t_E 为 427 s，此时连续 10 s 内应力增长率为 4.8 N/s，电池温度 T_0 为 55 ℃，远提前于安全阀激活时间(t_{SV})1 099 s 和温度突变时间(t_T)1 118 s，且安全阀激活时压力达到最大值，但温度仍平稳增长，直到热失控全面爆发阶段温度才出现明显的快速式增长，此时膨胀应力仍会出现快速小规模的波动.

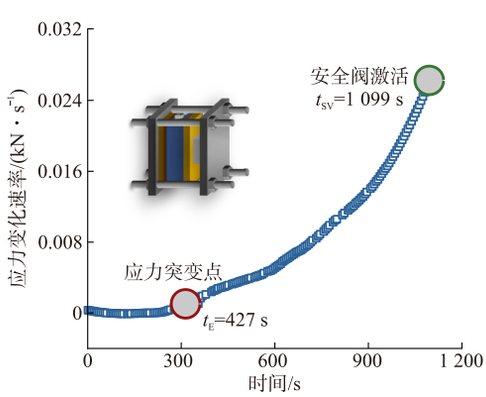


图 3 磷酸铁锂电池应力变化速率

Fig. 3 Expansion force change rate of $LiFePO_4$ battery

因此，可以得出结论，电池热失控过程中压力动力学参数的响应灵敏度显著优于单一温度指

标，且应力突变点早于温度突变点，通过实时监测膨胀应力变化，可在温度信号异常前数百秒识别压力积累风险，为热失控提供极早期预警．该策略可弥补传统温度监测的滞后性，为电池系统的本质安全设计提供新的技术路径，显著提升电池系统安全性．

2.1.2　基于应力信号的极早期预警有效性分析

电池热失控过程中应力突变点比温度突变点的提前时间(Δt)可根据式(1)计算：

$$\Delta t = t_{\mathrm{T}} - t_{\mathrm{E}}. \tag{1}$$

因为在热失控孕育阶段，电池内部副反应导致气体生成速率显著上升，从而引起壳体膨胀应力迅速增长．通过统计所有有效试验样本中的应力变化率发现，当连续 10 s内膨胀应力增长率超过 4.8 N/s时，电池均进入了压力快速积累阶段，而此时温度仍处于缓慢上升区间，尚未出现温升突变的明显信号．因此可判断 t_{E}反映了电池内部从温和产热向剧烈产气、压力积累转变的临界点，是热失控从“可逆孕育阶段”向“不可逆爆发阶段”过渡的关键前兆指标．t_{T}时刻，热失控全面爆发，可燃气体高速喷出．

图 4 为 6 组工况下初始热失控电池温度和应力的变化情况，图中标注了不同工况下以应力突变点作为早期预警信号时，要早于温度突变点的预警时间．

由图 4 可以看出，随着电池模组规模的扩大，应力突变点会发生延迟，提前预警时间呈现显著衰减趋势，从单体电池的 691 s降低至 6 电池模组的 476 s．这是由于在电池模组中，初始电池在加热板的作用下内部发生放热反应，其积累的热量会通过热传导、热对流和热辐射等方式逐步传播到相邻电池；随着电池模组中电池数量的不断增加，模组的热容也会逐渐增大，热量会被分散并吸收到更多的电池单元中，在相同的能量输入条件下，热量的温升速率会因此显著降低．在多电池模组中，电池之间界面热阻的累积效应会逐渐凸显．具体表现在每增加 1 个电池单元，热传递路径就需跨越新增的界面热阻．如热量在 6 个电池中传递时要比 5 个电池多 17% 的接触界面，这使得有效传热距离延长，从而削弱了热失控传播的热驱动力．因此，热量在传递过程中会产生显著的迟滞现象．这种迟滞现象不仅影响热量传递，还会导致电池内部电解质分解、正负极材料相变等产气反应的发生滞后．此外，模组中初始电池受热产气膨胀时，其壳体的形变会受到相邻电池的刚性约束；同时受到传热迟滞的影响，膨胀应力增长速度也会发生一定程度的迟滞，这导致更多的机械能转化为弹性势能而非传递到应力传感器．只有当累积的膨胀应力突破模组结构的承载阈值，应力传感器才会捕捉到应力突变信号．但这种由于机械作用导致的延迟时间是非常短的．综上所述，这种预警时效性退化现象是由于热-电化学-力学耦合作用下的非线性动力学响应造成的．

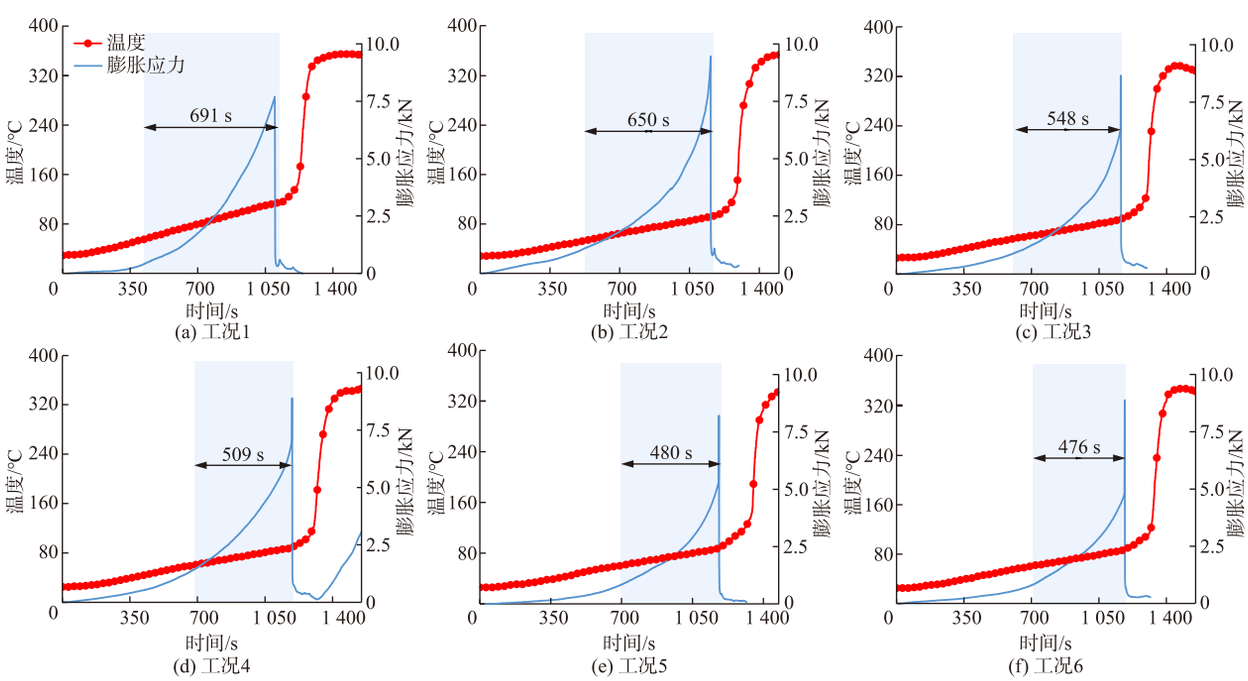
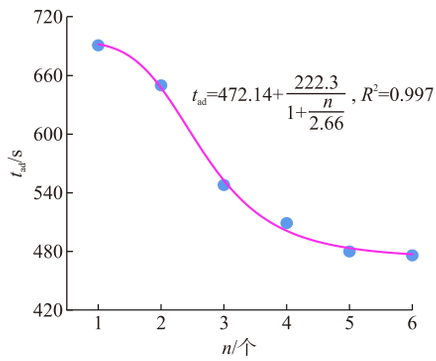


图 4　不同工况下 1#电池的温度、应力变化情况

Fig. 4　Temperature and expansion force changes of cell 1# under different cases

图 5 对不同数量电池的应力预警提前时间进行了拟合. 可以看出,随着模组中电池单体数量增多,提前预警时间的变化趋于稳定,其临界阈值为 472.14 s,这为大型电池系统的安全设计提供了重要的理论依据.



注:t_{ad}为应力预警提前时间;n为线性排列模组中电池的数量.

图 5 应力突变点相对于温度突变点的提前时间

Fig. 5 The advance time of stress mutation relative to temperature mutation

2.2 热失控传播临界条件与阻断机制分析

在热失控触发试验中,观察到工况 2~4 的热失控均蔓延至末端电池,而工况 5 的热失控在扩展至第 2 个电池后即终止传播. 工况 6 通过保持加热板全程开启的特殊设置,最终实现了热失控向第 6 个电池的完整传播,这为揭示传播阻断机制提供了关键对照.

由于工况 1 和工况 2 的电池数量较少,数据样本有限,可能无法充分反映热失控传播的完整特征,因此主要依据图 6 所示的工况 3~6 中温度随时间的变化特征,分析热失控传播阻断机制. 试验数据显示,工况 3 的热失控传播呈非线性延迟特征:1#→2#电池热失控传播仅需 437 s,而 2#→3#电池热失控传播时间 $\Delta t_{2\text{-}3}$ 显著延长至 1 068 s. 这一现象表明,可以将第 3 个电池视为初级热失控传播屏障,形成首个传播阻断临界点.

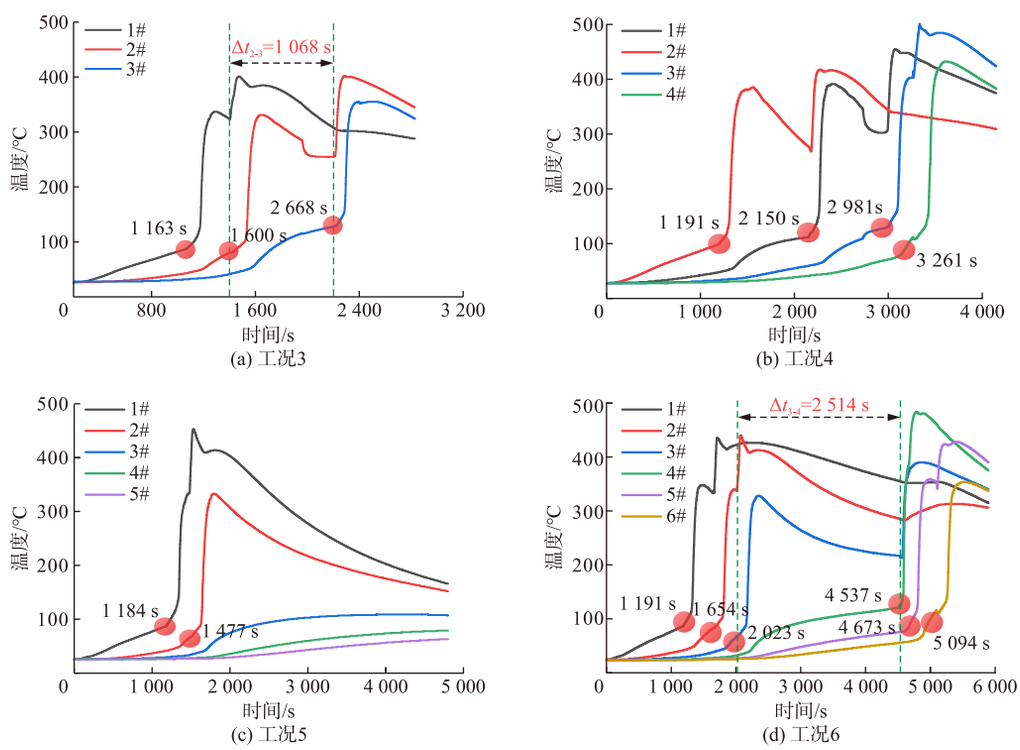


图 6 热失控蔓延过程中的温度变化特征

Fig. 6 Temperature variation characteristics during the thermal runaway propagation process

当模组扩展至 4 个电池(工况 4)时,热失控传播时序发生重构:1#→2#电池传播时间为 959 s,2#→3#电池传播时间为 831 s,热失控传播时间差缩减约 13%,而 3#→4#电池热失控传播时间仅需 280 s,热失控传播时间差缩减约 66%. 这是由于电池模组扩展至 4 个电池时,模组传热路径延长,热阻增大,导致 2#和 3#电池在相同时间内累积的热量减小,热失控传播时间延长,时间差缩短. 此时,在长时间较高温环境下末端的 4#电池在 3#电池热失控前通过热传导和热辐射持续吸收热量,已进入预加热状态,其热失控触发阈值因预存热量和化学稳定性下降而降低. 当 3#电池进入剧烈热失控时,其释放的高热量直接作用于预热的 4#电池表面,形成瞬时热冲击,热流密度大大提升,

最终导致3#→4#电池热失控传播时间大幅缩短，4#电池热失控剧烈程度大大增加.

电池模组进一步增加至5个电池(工况5)时，热失控在第3个电池节点彻底终止，进一步验证了热失控传播屏障的存在.

特别设置的工况6试验过程中，在加热板持续供能条件下，1#→2#和2#→3#电池热失控传播时间较短，分别为463，369 s. 但由于传热距离延长，受热阻增大影响，加热板的热量不足以传播至后续电池，仅靠3#电池的热失控能量促使4#电池的热失控触发，因此热失控传播时间大大延长，3#→4#电池热失控传播时间 $\Delta t_{3\text{-}4}$ 为2 514 s. 同样在长时间较高温环境下，5#电池在4#电池热失控前通过热传导和热辐射持续吸收热量并进入预加热状态，热失控触发阈值降低，热失控爆发后的剧烈程度增强，其释放的能量显著加速了后续电池热失控的传播，4#→5#电池热失控传播时间仅为186 s，5#→6#电池的热失控传播时间仅为421 s，形成“热滞后—爆发”的典型传播模式.

通过分析试验数据可知，电池模组前3个电池构成热失控的基础传播单元，第3个电池作为关键热阻节点，第4个电池则作为能量转换枢纽. 这种层级效应与规模效应的耦合作用，为动力电池系统热防护设计提供了重要理论依据：在第2，3个电池间设置冷却阻隔层，在第3，4个电池间设置强化冷却阻隔结构，可有效切断热失控传播链.

2.3　热失控蔓延逐级贡献度研究

基于以上分析，电池模组中前3个电池构成热失控的基础传播单元，其中第3个电池因热阻累积形成首个传播屏障，而第4个电池通过热传导预加热和瞬时热冲击响应转变为能量转换枢纽，驱动传播路径重构. 因此，电池模组中的前4个电池构成热失控传播的核心动力学单元. 电池热失控的逐级蔓延均是由上一级电池的热失控影响的，因此需要逐级量化热失控贡献度.

为量化热失控在电池模组中逐级传播的影响程度，本文基于试验数据，根据上级电池发生热失控后到下级电池发生热失控前下级电池的温度，对比上级电池没有发生热失控前下级电池的温度，采用线性回归模型得到上级电池发生热失控对下级电池的影响度. 其中温度为自变量，热失控是否发生为因变量，假设电池热失控发生记为“1”，热失控未发生记为“0”，旨在评估连续时间序列数据中特定变量对热失控发生的影响，计算结果如表3所示.

表3　热失控传播级联贡献度

Table 3　Cascade contribution of thermal runaway propagation

电池级别	热失控逐级影响度
1#～2#电池	0.019 3
2#～3#电池	0.011 0
3#～4#电池	0.016 3

由表3可知，1#电池对2#电池的热失控影响度为0.019 3，显著高于后续电池热失控传播的影响强度，反映出初始热失控阶段的能量传递效率最高；但值得注意的是，其比2#电池对3#电池的热失控影响度高约43.01%，仅比3#电池对4#电池的热失控影响度高约15.54%，验证了上文的结论：由于电池数量的增多，热阻增大，电池模组中3#电池为热失控传播的薄弱点，可作为热失控关键阻断节点. 尽管3#电池因热阻累积形成传播屏障，但突破该节点后，由于“热滞后—爆发”效应，3#电池热失控产生的热冲击会极大程度地影响4#电池，其对4#电池的影响度回升至0.016 3，证实了热传播路径在突破关键节点后的动态重构特性. 这种非线性传播规律表明，3#电池作为首个热阻屏障与驱动能量转换点，既是热失控传播的薄弱环节，也是实施阻断的关键节点. 在电池模组热管理的设计中，应重点强化3#电池的散热能力与隔离措施，同时建立针对“热滞后—爆发”效应的动态预警机制. 通过在该临界点实施精准干预，可以及时耗散积聚的热量、切断能量的连续传递，从而有效截断热失控传播链，抑制灾变规模的扩大，还能为系统争取关键的安全响应时间，从根本上提高电池系统的热失控耐受能力与整体安全阈值.

3　结　论

1) 温度突变点仅可作为热失控不可逆阶段的报警信号，而应力突变点可作为热失控可逆阶段的预警信号，其可将热失控预警时间提前至少476 s.

2) 热失控传播受界面热阻的影响呈现“热滞后—爆发”特性，电池模组中的3#电池因热阻累积成为关键屏障，而4#电池由于预加热与热冲击作用形成能量转换枢纽加速后续传播，驱动热失控传播路径的动态重构.

3) 结合传播贡献度量化结果，提出分级阻断策略：可在电池模组的第2，3个电池间设置材料冷却层以强化热阻节点，并在第3，4个电池间设计强化冷却结构以抑制能量枢纽的加速效应，实现对热失控传播链的高效切断.

参考文献：

[1] JIN C. Brief talk about lithium-ion batteries' safety and influencing factors [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol: IOP Publishing, 2017, 274(1): 012152.

[2] KULOVA T L, FATEEV V N, SEREGINA E A, et al. A brief review of post-lithium-ion batteries [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2020, 15(8): 7242-7259.

[3] 张江峰,周轩宇.中国锂产业长期发展趋势向好[J].中国有色金属,2024(22):40-41.
ZHANG Jiangfeng, ZHOU Xuanyu. The long-term development trend of China's lithium industry is positive [J]. China Nonferrous Metals, 2024(22): 40-41.

[4] 中国电池工业协会.中国锂离子电池行业发展白皮书(2026年)[R].北京:中国电池工业协会出版社,2026.
China Battery Industry Association. White paper on the development of China's lithium-ion battery industry (2026) [R]. Beijing: China Battery Industry Association Press, 2026.

[5] FENG X N, ZHENG S Q, REN D S, et al. Key characteristics for thermal runaway of Li-ion batteries [J]. Energy Procedia, 2019, 158: 4684-4689.

[6] ZHANG Q S, NIU J H, ZHAO Z H, 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.

[7] LYU P Z, LIU X J, QU J, et al. Recent advances of thermal safety of lithium ion battery for energy storage [J]. Energy Storage Materials, 2020, 31: 195-220.

[8] 朱 晖.锂电池火灾中的设备热失控行为分析[J].中国设备工程,2025(5):114-116.
ZHU Hui. Analysis of thermal runaway behavior of equipment in lithium battery fires [J]. China Equipment Engineering, 2025(5): 114-116.

[9] FEAR C, PARMANANDA M, KABRA V, et al. Mechanistic underpinnings of thermal gradient induced inhomogeneity in lithium plating [J]. Energy Storage Materials, 2021, 35: 500-511.

[10] MAO N, GADKARI S, WANG Z, et al. A comparative analysis of lithium-ion batteries with different cathodes under overheating and nail penetration conditions[J]. Energy, 2023, 278: 128027.

[11] 何亚飞,黄清鋆,崔 鑫.机械滥用下的锂离子电池热失控研究[J].农业装备与车辆工程,2024,62(4):124-127.
HE Yafei, HUANG Qingjun, CUI Xin. Research on thermal runaway of pouch battery under mechanical abuse [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2024, 62(4): 124-127.

[12] MAO N, GADKARI S, WANG Z, et al. A systematic investigation of thermal runaway characteristics, inflame evolution and post-mortem analysis caused by overcharging for lithium-ion batteries with different cathode materials[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 74: 109421.

[13] 乔亚军,任怡茂,谭子健,等.锂离子电池单层电芯内短路建模与热失控触发特性[J].储能科学与技术,2024,13(10):3491-3503.
QIAO Yajun, REN Yimao, TAN Zijian, et al. Modeling internal short circuit and thermal runaway triggers in single-layer lithium-ion battery cells [J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(10): 3491-3503.

[14] ZHANG G X, WEI X Z, CHEN S Q, et al. Investigation the degradation mechanisms of lithium-ion batteries under low-temperature high-rate cycling [J]. ACS Applied Energy Materials, 2022, 5(5): 6462-6471.

[15] ACHARYA T, PATHAK A D, PATI S. High-temperature electrochemical performance of lithium titanate ($Li_4Ti_5O_{12}$) anode material in secondary lithium-ion batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 67: 107529.

[16] WANG J G, MEI W X, CUI Z X, et al. Experimental and numerical study on penetration-induced internal short-circuit of lithium-ion cell [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 171: 115082.

[17] LIU J L, WANG Z R, BAI J L. Influences of multi factors on thermal runaway induced by overcharging of lithium-ion battery [J]. Journal of Energy Chemistry, 2022, 70: 531-541.

[18] 卓 萍,倪照鹏,杨 凯,等.磷酸铁锂方形单体电池受热火灾危险性[J].消防科学与技术,2019,38(2):280-283.
ZHUO Ping, NI Zhaopeng, YANG Kai, et al. Preliminary study on fire risk of lithium iron phosphate square cell under heat [J]. Fire Science and Technology, 2019, 38(2):280-283.

[19] GALUSHKIN N E, YAZVINSKAYA N N, GALUSHKIN D N. Causes and mechanism of thermal runaway in lithium-ion batteries, contradictions in the generally accepted mechanism [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 86: 111372.

[20] 黄怀宇,黄思林,赵荣超,等.磷酸铁锂电池铝塑膜壳体绝缘失效触发热失控特性实验研究[J].储能科学与技术,2025,14(2):613-623.
HUANG Huaiyu, HUANG Silin, ZHAO Rongchao, et al. Experimental study on thermal runaway characteristics triggered by insulation failure of

aluminum-plastic film shell of lithium iron phosphate battery [J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(2): 613-623.

[21] LYU N W, JIN Y, MIAO S, et al. Fault warning and location in battery energy storage systems via venting acoustic signal[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 11(1): 100-108.

[22] QIN P, SUN J H, WANG Q S. A new method to explore thermal and venting behavior of lithium-ion battery thermal runaway [J]. Journal of Power Sources, 2021, 486: 229357.

[23] 张乾钧,张明杰,杨　凯,等.不同激源条件下磷酸铁锂电池热失控产气特性研究[J].消防科学与技术,2024,43(10):1349-1354.
ZHANG Qianjun, ZHANG Mingjie, YANG Kai, et al. Characteristics of thermal runaway gas production in lithium iron phosphate batteries under different conditions [J]. Fire Science and Technology, 2024, 43(10): 1349-1354.

[24] OLONA A, CASTEJÓN L. Influence of the arrangement of the cells/modules of a traction battery on the spread of fire in case of thermal runaway [R/OL]. 1-40, [2023-12-04]. https://www.preprints.org/manuscript/202312.0101

[25] LOPEZ C F, JEEVARAJAN J A, MUKHERJEE P P. Experimental analysis of thermal runaway and propagation in lithium-ion battery modules[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2015, 162(9): A1905.

[26] 谈秀雯,李　凌.局部过热下锂电池热失控特性及其热管理研究[J/OL].储能科学与技术,1-13 [2025-04-08]. https://doi. org/10.19799/j. cnki. 2095-4239.2025.0067.
TAN Xiuwen, LI Ling. Study on the thermal runaway characteristics of lithium-ion batteries and their thermal management under local overheating conditions [J/OL]. Energy Storage Science and Technology, 1-13 [2025-04-08]. https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0067.

（责任编辑　沈春妮　宋　爽）

（上接第 446 页）

[26] 李　滔,王海瑞,朱贵富.基于统一注意力融合网络的耕地变化检测[J].计算机科学,2023,50(增 2):1005-1010.
LI Tao, WANG Hairui, ZHU Guifu. Farmland change detection based on unified attention fusion network[J]. Computer Science,2023,50(Sup 2):1005-1010.

[27] MING Y F, SHEN Q L, JUN S H, et al. STDC: Short-term dense concatenation for real-time semantic segmentation [C]//YU J. Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. 2021:12071-12080.

[28] 储岳中,石玉金,张学锋,等.基于切分通道注意力网络的图像分类算法[J].工程科学学报,2024,46(10):1856-1863.
CHU Yuezhong, SHI Yujin, ZHANG Xuefeng, et al. Image classification algorithm based on segmented channel attention network[J]. Chinese Journal of Engineering,2024,46(10):1856-1863.

[29] 刘显德,李　笑.任意大小图像的量子描述及双线性插值方法[J].计算机工程与设计,2024,45(8):2423-2432.
LIU Xiande, LI Xiao. Quantum description and bilinear interpolation method for images of arbitrary size [J]. Computer Engineering and Design,2024,45(8):2423-2432.

[30] 闫志蕊,王宏伟,耿毅德.基于改进 DeeplabV3＋和迁移学习的煤岩界面图像识别方法[J].煤炭科学技术,2023,51(增 1):429-439.
YAN Zhirui, WANG Hongwei, GENG Yide. Coal rock interfa-ce image recognition method based on improved DeeplabV3＋ and transfer learning[J]. Coal Science and Technology,2023,51(Sup 1):429-439.

[31] PENG C L, MA J Y. Domain a daptive semantic segmentation via entropy-ranking and uncertain learning-based self-training [J]. IEEE/CAAA Journal of Automatica Sinica,2022,9(8):1524-1527.

[32] DONG Z, LI Y Z, JIN H T. Augmented FCN: Rethinking context modeling for semantic segmentation [J]. Science China Information Sciences, 2023, 66(4):1-19.

[33] 贺军义,冯嘉莘,焦华喆,等.基于改进 Unet 的混凝土 CT 孔隙裂隙分割方法[J].中国矿业大学学报,2023,52(3):615-624.
HE Junyi, FENG Jiashen, JIAO Huazhe, et al. Concrete CT pore crack segmentation method based on improved Unet [J]. Journal of China University of Mining & Technology,2023,52(3):615-624.

（责任编辑　宋　爽）