



## 磷酸铁锂电池的快充耦合过热热失控行为试验研究

方乐文<sup>1</sup>, 张振东<sup>1</sup>, 朱顺良<sup>2</sup>, 宜周翔<sup>2</sup>, 郭 阳<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>上海理工大学机械工程学院, 上海 200093; <sup>2</sup>上海机动车检测认证技术研究中心有限公司, 上海 200093)

**摘要:** 针对高容量磷酸铁锂电池在快充与局部过热耦合作用下的热失控问题, 设计了一种试验装置, 以 50 Ah 方形电池为研究对象, 开展快充耦合过热的热失控试验, 同步采集电池表面温度、电压、内阻、膨胀力和防爆箱内气体压力等参数, 重点分析不同 SOC 下电池热失控行为特征并提出一种多参数融合的预警策略。结果表明, 随着初始 SOC 由 50% 增加到 100%, 3C 快充结束后电池温升提高了 7.7℃, 电池开始加热至最高温度的时间缩短了 244 s, 电压降为 0 V 的时间提前了 228 s, 密闭防爆箱内气体压力升高了 4.1 kPa, 电池膨胀力增加了 1100 N。将试验过程分为四个阶段, 快充阶段电池温度、膨胀力缓慢上升; 加热阶段电池膨胀力快速增长, 开阀时防爆箱内气体压力突升、膨胀力骤降, 同时电池表面温度短暂小幅度回落; 热失控阶段电池剧烈喷发, 电压骤降、内阻突增、温度及气体压力达到最高, 膨胀力降为负值; 冷却阶段电池温度场逐渐向热平衡状态演化。因此, 根据不同阶段的参数变化特征提出了一种三级预警策略。研究结果可为高容量磷酸铁锂电池的热失控预警及热安全设计提供参考。

**关键词:** 磷酸铁锂电池; 快充; 热失控; SOC; 热失控预警

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0674

中图分类号: TM 912

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-11

## Experimental Study on Thermal Runaway Behavior of Lithium-Iron-Phosphate Batteries under Fast-Charging-coupled Overheating Condition

FANG Yuewen<sup>1</sup>, ZHANG Zhendong<sup>1</sup>, ZHU Shunliang<sup>2</sup>, YI Zhouxiang<sup>2</sup>, GUO Yang<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Technology, Shanghai 200093, China; <sup>2</sup>Shanghai Motor Vehicle Testing and Certification Technology Research Center Co., Ltd, Shanghai 200093)

**Abstract:** To address the thermal runaway issue of high-capacity lithium iron phosphate (LFP) batteries under the coupled effects of fast charging and localized overheating, an experimental setup was designed. Using 50 Ah prismatic LFP batteries as the research subject, thermal runaway tests were conducted under fast charging coupled with overheating conditions. Parameters including battery surface temperature, voltage, internal resistance, expansion force, and gas pressure inside the explosion-proof chamber were synchronously collected. The study focused on analyzing the thermal runaway behavior characteristics of

收稿日期: 2026-08-01; 修改稿日期: 2026-09-20。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52472381), 国家自然科学基金青年基金 (52206267)。

第一作者: 方乐文 (2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电池热管理技术, E-mail: @qq.com; 通信作者: 张振东, 教授, 研究方向为汽车动力系统与热管理, E-mail: usstzdz@usst.edu.cn。

引用本文: 方乐文, 张振东, 朱顺良, 等. 磷酸铁锂电池的快充耦合过热热失控行为试验研究[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(X): 1-11.

**Citation:** FANG Yuewen, ZHANG Zhendong, ZHU Shunliang, et al. Experimental Study on Thermal Runaway Behavior of Lithium-Iron-Phosphate Batteries under Fast-Charging-coupled Overheating Condition[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(X): 1-11.

batteries at different states of charge (SOC) and proposed a multi-parameter fusion early warning strategy. The results indicate that as the initial SOC increases from 50% to 100%, the battery temperature rise after 3C fast charging increases by 7.7 °C, the time from the onset of heating to the maximum temperature shortens by 244 s, the time for voltage to drop to 0 V advances by 228 s, the gas pressure inside the explosion-proof chamber rises by 4.1 kPa, and the battery expansion force increases by 1100 N. The experimental process was divided into four stages. During the fast charging stage, battery temperature and expansion force rise slowly. In the heating stage, expansion force increases rapidly, accompanied by a sudden rise in gas pressure and a sharp drop in expansion force upon valve opening, while the battery surface temperature briefly decreases slightly. In the thermal runaway stage, the battery undergoes violent eruption, with a sharp voltage drop, a sudden increase in internal resistance, peak temperature and gas pressure, and expansion force dropping to a negative value. In the cooling stage, the battery temperature field gradually evolves toward thermal equilibrium. Accordingly, a three-level early warning strategy is proposed based on the parameter variation characteristics of different stages. The findings of this study can provide a reference for thermal runaway early warning and thermal safety design of high-capacity LFP batteries.

**Keywords:** lithium iron phosphate battery; fast charging; thermal runaway; SOC; thermal runaway early warning

随着新能源汽车和电化学储能产业的快速发展,锂离子电池因具有能量密度高、循环寿命长和环境适应性较好等优点,已成为动力电池和储能系统中的核心部件<sup>[1]</sup>。其中,磷酸铁锂电池由于正极材料热稳定性较高、循环寿命长、成本相对较低,在电动汽车、储能电站及工程机械等领域得到了广泛应用<sup>[2]</sup>。然而,随着电池单体容量和系统集成度不断提高,电池在快充、高温、局部过热及机械约束等复杂工况下的安全风险逐渐突出。电池热失控(Thermal Runaway, TR)可能导致喷射烟雾、燃烧、爆炸及热失控传播等安全事故,严重威胁人员安全和设备可靠性<sup>[3]</sup>。

锂离子电池热失控通常是由电滥用、热滥用、机械滥用等因素诱发的多阶段耦合过程。在温度升高过程中,电池内部会依次发生固体电解质界面膜(Solid Electrolyte Interphase, SEI)分解、负极与电解液反应、隔膜收缩或熔融、电解液分解、正极材料分解以及内部短路等反应,释放大热量和气体<sup>[4-6]</sup>。对于磷酸铁锂电池而言,虽然 $\text{LiFePO}_4$ 正极材料的结构较稳定,释氧能力弱于三元材料,但在高荷电状态(State of Charge, SOC)、过充、外部加热或局部热积累条件下,电池内部发生的副

反应及内短路仍会使电池进入不可逆热失控阶段<sup>[7-9]</sup>。

目前,国内外学者已围绕锂离子电池热失控机理、触发方式以及热蔓延开展了大量研究。Wang等<sup>[1]</sup>系统总结了锂离子电池失效机理和火灾防控策略,认为内部短路、热积累和可燃气体释放是热失控事故的重要诱因。Spotnitz等<sup>[4]</sup>较早分析了锂离子电池在滥用条件下的失效行为,指出温度升高会加速内部副反应并导致安全风险增加。针对磷酸铁锂电池,已有研究表明, SOC、充电倍率、电池容量和触发方式会显著影响热失控触发时间、最高温度、产气量和质量损失<sup>[8-9]</sup>。随着 SOC 升高,电池内部储存的电化学能增加,负极嵌锂程度加深,在受热或过充条件下更容易诱发剧烈副反应,导致热失控发展速度加快<sup>[10]</sup>。

除温度和电压外,气体压力、膨胀力和内阻等信号也逐渐成为热失控预警研究的重要对象。Cai等<sup>[11]</sup>指出,电池内部短路会引起快速升温、气体生成和电芯膨胀,气体和膨胀力信号可用于提升故障检测可靠性。相关研究还表明,电压突降通常对应内部短路或结构失效,虽然可作为热失控发生的重要判据,但往往出现较晚,预警提前量有限<sup>[12-13]</sup>。

相比之下，温升速率、气体压力突变和膨胀力快速增加能够更早反映电池内部产气、壳体鼓胀及安全阀开启过程，对识别热失控临近状态具有较高价值<sup>[14]</sup>。

综上，现有研究多集中于单一热失控场景，对快充耦合过热条件下磷酸铁锂电池热失控行为的研究仍不充分。实际应用中，快充会导致电池极化加剧、快速温升以及增加析锂风险，若进一步受到外部热源作用，可能形成电—热耦合诱导的复杂失效过程。尤其对于高容量磷酸铁锂电池，不同初始SOC下热失控的温度场演化、电压失效、气体释放、膨胀力响应、内阻变化等特征信号之间的关联仍需进一步明确。因此，本研究针对50 Ah方形磷酸铁锂电池，设计了快充耦合过热热失控试验系统。试验中将电池分别以3C恒流快充至50%、

80%和100%SOC，分别对应中等荷电、高荷电和满电极限状态，随后采用加热片以800 W功率对电池大面进行持续加热，触发电池热失控。通过同步采集电池表面温度、电压、内阻、膨胀力和防爆箱内气体压力，分析了不同初始SOC下的电池热失控行为特性，提出了一种多参数融合的热失控预警策略。研究结果可为热失控预警及电池系统热安全设计提供重要参考。

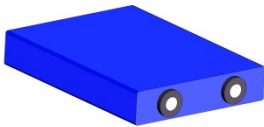
1 试验方案

1.1 试验装置

本研究所选用的锂离子电池额定容量为50 Ah，正极材料为磷酸铁锂（LiFePO<sub>4</sub>），负极材料为石墨。电池的规格参数如表1所示。

表1 50Ah磷酸铁锂电池物理参数

Table 1 Physical parameters of the 50Ah lithium iron phosphate battery

| 对象                                                                                                  | 参数                      | 数值               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|------------------|
| <div>电池样品</div>  | 长×宽×高/mm <sup>3</sup>   | 135.3×29.3×185.3 |
|                                                                                                     | 额定容量/Ah                 | 50               |
|                                                                                                     | 质量/g                    | 1395             |
|                                                                                                     | 标称电压/V                  | 3.2              |
|                                                                                                     | 充放电电压/V                 | 2.5~3.65         |
|                                                                                                     | 比热容/[J/(kg·°C)]         | 1100             |
|                                                                                                     | 密度/[kg/m <sup>3</sup> ] | 1899             |

本研究所设计的快充耦合过热热失控试验装置如图1(a)所示。为模拟实际运行中电池在快充条件下叠加局部热滥用的失效场景，试验过程中在电池一侧大面布置柔性加热片（200 mm×100 mm×2 mm）作为外部热源，并通过不锈钢夹具对电池、加热片、隔热板及压力传感器等组件进行整体紧固。试验装置中加热片紧贴电池大面居中布置，其额定功率为800 W，加热面的热流密度为40 kW/m<sup>2</sup>，试验中考虑接触热阻和热损失，实际传给电池的热流会小于理论值。电池两侧设置隔热板，其作用是降低加热过程中与外界环境或组件之间的无效散热。压力传感器正对电池另一侧大面布置，用于捕捉电池在快充、受热膨胀和热失控过程中的机械响应。

试验中共布置7个温度测点，每个测点粘贴1个K型热电偶，热电偶测量误差为±1℃。为保证测量可靠性，热电偶端部与电池表面充分接触，并采

用耐高温胶带进行固定，避免热失控喷射、壳体鼓胀导致热电偶脱落。温度测点布置如图1(b)所示。其中， $T_1$ 和 $T_2$ 分别布置于电池负极和正极附近，用于监测极柱区域温度变化。 $T_3$ 布置于安全阀顶部，用于捕捉泄压阀开启前后的温度突变。 $T_4$ 和 $T_5$ 分别布置于电池两侧大面中心位置。其中，靠近加热片一侧的测点用于反映受热面的温度响应，另一侧测点用于反映热量穿透电池厚度方向后的背面温度变化。 $T_6$ 和 $T_7$ 分别布置于电池侧面中心和底面中心，用于监测非直接受热区域的温度响应。

1.2 试验系统及过程

图2为不同SOC条件下50 Ah磷酸铁锂电池快充耦合过热热失控试验系统示意图。该系统主要由防爆箱（R2023-069，泰思泰克检测仪器科技有限公司）、充放电测试仪（CE-6002n-60 V200 A-H）、温度及电压数据采集仪（日置LR8410-30）、电池内阻测试仪（日置BT3561A）、计算机监控系统、

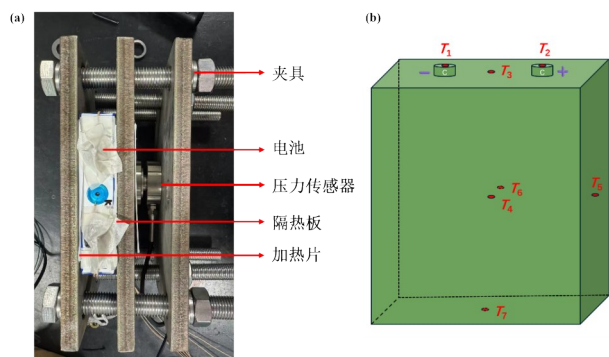


图1 试验装置和热电偶布置图

Figure 1 The test device and thermocouple layout diagram

摄像机和试验装置组成。防爆箱的设计压力为3.3 MPa, 最高允许工作压力为5 MPa, 有效容积为740 L, 该设备为电池热失效测试专用实验设备, 密封性能良好, 各连接部位无泄漏, 可满足本研究所有工况使用要求。试验过程中, 数采仪同步采集各项物理信号, 计算机用于控制充电过程并实时显示各通道数据, 摄像机用于记录试验现象。锂离子电池热失控是典型的多物理场耦合过程, 仅依靠单一温度或电压信号难以全面表征其演化行为。因此, 本研究通过多源信号同步采集, 对快充耦合过热条件下磷酸铁锂电池热失控过程中的温升特征、电压及内阻变化、机械膨胀、气体压力响应等进行综合分析, 为后续热失控阶段划分及预警特征参数提取提供数据支撑。

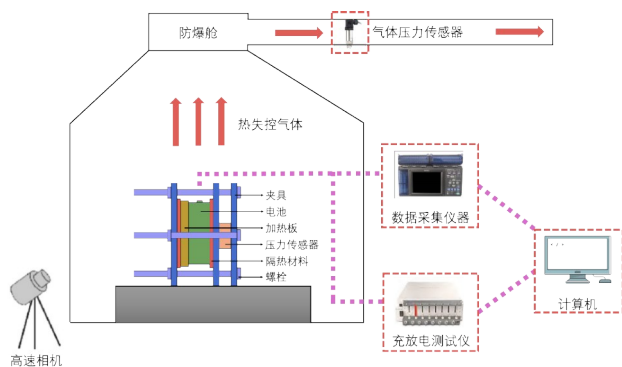


图2 试验系统示意图

Fig. 2 Experimental system diagram

在准备阶段, 对电池进行恒流恒压充电, 先以1 C充电至最大截至电压3.65 V, 随后保持恒定电压继续充电, 直到充电电流降至截至电流0.05 C, 充电结束; 静置30 min后对电池进行恒流放电,

以1 C恒流放电直至电压降到放电截至电压2.5 V, 放电结束; 对每一组试验电池进行3次上述充放电循环, 以检验电池状态是否正常同时使电池性能保持稳定, 确保一致性满足实验要求。

试验开始前, 记录电池初始电压和内阻, 并测量加热片电阻, 随后在电池表面指定位置粘贴K型热电偶, 在电池一侧大面放置加热片, 并通过不锈钢夹具固定电池、加热片和压力传感器。夹具预紧力矩设定为2.6 N·m, 以保证加热片与电池表面充分接触。将装配完成的试验装置放入防爆箱内, 连接充放电测试仪和数据采集仪, 开启摄像设备, 检查各项信号采集正常后开始试验。首先以3 C恒流充电将电池充至预设SOC, 随后启动加热, 以800 W功率对电池大面持续加热。当观察到电池发生热失控时停止加热, 待试验装置冷却后取出电池, 拍摄电池热失控后形貌并测量电压和内阻。试验结束后保存并整理数据, 每组工况均进行了2次重复试验。

## 2 结果与讨论

### 2.1 温度及电压变化

电池快充至不同SOC后加热触发热失控过程中的温度及电压变化如图3所示。开始充电后, 电池在3C电流下端电压迅速升高, 主要是由于150 A电流瞬时加载后欧姆极化、电荷转移极化及浓差极化快速建立以及极柱与导线存在一定内阻; 随着充电持续进行, 焦耳热和极化热使电池温度逐渐升高, 极化程度降低, 电压缓慢下降; 加热开始后, 电池表面温度随时间持续升高, 电压在3.3 V附近保持稳定; 当电池内部压力超过阈值后电池开阀, 此时表面温度出现明显小幅度下降; 当温度升高至热失控临界状态时, 各个测点温度快速跃升, 同时电压骤降为0 V, 表明电池内部发生短路或结构失效; 热失控结束后, 各测点温度逐渐下降。

分析数据可知, 恒流充电阶段电池温升分别为12℃、18.8℃、19.7℃, 表明充电末期的温升速率降低。50%、80%以及100%SOC工况下 $T_6$ 与 $T_4$ 测点在热失控过程中的温度响应存在明显差异,  $T_4$ 最高温度对应时间相较 $T_6$ 分别滞后119 s、103 s、90 s, 这表明热量由局部高温区域向电池整体扩散存在一定延迟, 电池SOC越高, 热蔓延速度越快<sup>[15]</sup>。电压骤降与 $T_6$ 达到最高温度的时间一致, 且

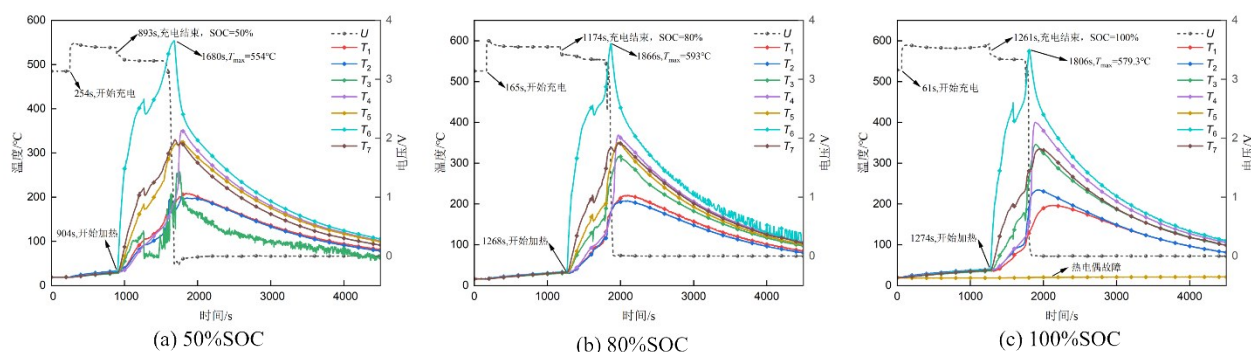


图3 快充至不同SOC加热触发热失控的温度及电压变化

Fig. 3 Temperature and voltage responses during heating-induced thermal runaway at different SOC conditions after fast charging

晚于  $T_4$  达到最高温度，这表明靠近加热片一侧的卷芯先发生热失控，电池内部各种副反应剧烈产热，在高温下隔膜熔融坍塌导致内短路，电压剧烈下降，而内短路释放的热量又再次加速了热失控向另一侧卷芯传播。

热失控试验过程中温度及电压的特征值如表2所示。分析可知，50%、80%以及100%SOC工况下，开始加热至最高温度的时间分别为776 s、598 s和532 s，并且从开始加热至电压骤降为0 V的时间由774 s缩短至546 s，表明高SOC状态下电池热稳定性降低，在外部热源作用下更易进入热失控阶段。此外，100%SOC下电池峰值温升速率达到8.8°C/s，较50%SOC增加20%，表明满电状态下电池热失控升温更快、热冲击更强。值得注意的是，100%SOC工况虽然初始储能更高，但最高温度低于80%SOC，这可能是100%SOC下热失控爆发更剧烈，电池泄压时有更多高温气体和颗粒物被喷射出去，导致测得温度偏低。表2快充至不同SOC下电池过热热失控特征值对比

Table 2 Characteristic values of overheating-induced thermal runaway for batteries at different SOC conditions after fast charging

| 特征值              | 50%SOC | 80%SOC | 100%SOC |
|------------------|--------|--------|---------|
| 开始加热至电压降为0 V时间/s | 774    | 629    | 546     |
| 开始加热至最高温度时间/s    | 776    | 598    | 532     |
| 热失控最高温度/°C       | 554    | 593    | 579     |
| 峰值温升速率/(°C/s)    | 7.3    | 7.9    | 8.8     |

## 2.2 膨胀力及气体压力变化

试验过程中防爆箱内气体压力及电池膨胀力变化曲线如图4所示，为便于对比分析，图中展示了

相对应时刻的加热侧电池大面温度。初始时刻由于预紧力导致压力传感器被压缩，其示数为正值，以此值为基准代表电池膨胀力为零，因此当压力传感器被进一步压缩，电池与压力传感器之间的压力高于预紧力时，膨胀力为正值；当电池与压力传感器之间的压力小于预紧力时，膨胀力为负值。从图中数据可知，不同工况下的三类信号均表现出相似的演化规律。在快充阶段，电池的膨胀力有小幅度的上涨，防爆箱内气体压力无变化。随着外部加热持续进行，电池温度逐渐升高，内部副反应和产气过程不断增强，电池壳体膨胀受到夹具约束后表现为膨胀力快速增加<sup>[9]</sup>。当内部压力达到安全阀开启条件后，电池开阀泄压，膨胀力迅速下降，同时密闭防爆箱内气体压力骤升，膨胀力峰值与安全阀开启时刻高度一致，表明膨胀力可有效反映内部产气和泄压前的压力积累过程。与此同时，电池温度出现小幅度下降，这是因为电池开阀时喷出的气体以及电解液带走了部分热量<sup>[17]</sup>。随着电池内部副反应的进行，电池温度继续快速升高并达到峰值，喷发的大量白色烟雾使得防爆箱内气体压力不断升高，由于电池剧烈喷发，膨胀力逐渐下降并最终为负值，这表明热失控后电池壳体塌陷，压力传感器回弹，电池与压力传感器之间的压力小于初始预紧力。

值得注意的是，50%SOC工况下试验过程中防爆箱内气体压力出现两个峰值，这是因为电池内部有两个卷芯，靠近加热片一侧卷芯先发生热失控，热量向另一侧卷芯传递，约100 s后另一侧卷芯热失控喷发，因此出现两个气压峰值。而80%SOC工况下防爆箱内气体压力图中仅有一个峰值，防爆箱内气体压力在高位持续了一段时间，

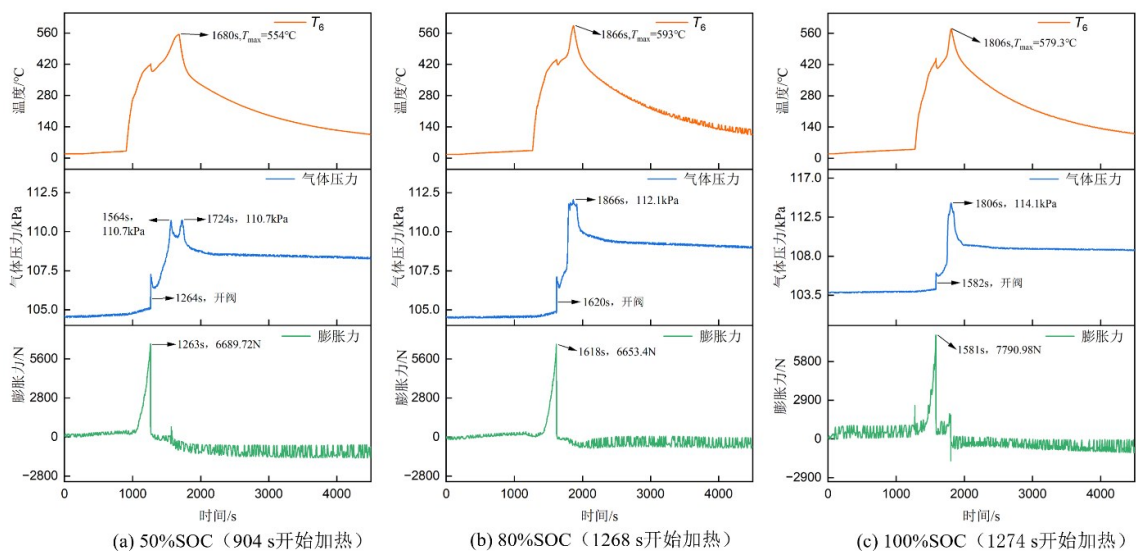


图4 快充至不同SOC电池过热热失控的温度、气体压力与膨胀力变化

Fig. 4 Thermal runaway characteristics of temperature, gas pressure, and expansion force at different SOC conditions after fast charging under overheating conditions

这表明80%SOC下电池内部两个卷芯发生热失控的间隔短于50%SOC的工况，热失控蔓延速度更快。可以更为明显地看出，100%SOC下防爆箱内气体压力图中仅有一个峰值，电池开阀后密闭系统中气体压力快速增长并达到峰值，随即开始下降，这表明100%SOC下电池内部两个卷芯几乎同时发生热失控，热蔓延速度最快。

进一步分析可知，SOC由80%提高至100%，电池开阀到热失控期间的防爆箱内气体压力涨幅由5.7 kPa增至8.4 kPa，增幅达47%，表明100%SOC下电池热失控的产气速率大幅提升，喷射时有更多高温气体和颗粒物逸出，热量来不及在热电偶测点处充分积累，因此测得的最高温度低于80% SOC。与最高温度相比，气体压力和膨胀力对SOC更敏感。最大气压变化由50%SOC的6.2 kPa增至100%SOC的10.3 kPa，增幅达到66%，最大膨胀力由6690 N增至7791 N，这表明高SOC工况下电池内部产气更剧烈，安全阀开启后的泄压排气更强，同时壳体在夹具约束下产生更大的力学响应。特别是100%SOC工况，虽然最高温度并非最大，但其气体压力和膨胀力均达到最高，说明满电状态下热失控的主要危险性表现为强产气、强泄压和强机械冲击。因此，SOC升高会显著缩短热失控发展时间，并增强电池热失控过程中的气体释放和膨胀变形。

## 2.3 内阻变化

将不同SOC工况下电池过热热失控过程中电压及内阻变化的数据汇总并处理，如图5所示。

由图5可知，电池内阻均在电压骤降时突增，但是不同SOC下内阻的增长幅度不同。具体而言，50%SOC下电压骤降时内阻由0.095  $\Omega$ 增至约0.2  $\Omega$ ，随后持续增长至0.73  $\Omega$ ；80%SOC下内阻由约0.096  $\Omega$ 增至约0.133  $\Omega$ ，随后曲折上升至0.141  $\Omega$ ，增幅约47%；100%SOC下内阻仅由约0.112  $\Omega$ 增至约0.121  $\Omega$ ，增幅约8%。因此，50%SOC工况下的内阻突增约为80%SOC的2.8倍、100%SOC的11.7倍，这表明电池不同SOC下热失控时内部极片短路导致的内阻变化存在差异。然而，内阻增长幅度小并不代表热失控危险程度低，100%SOC工况下虽然内阻变化最小，但前述气体压力和膨胀力均较高，其内阻变化较小可能与热失控后内部极片熔融、塌陷或局部短路搭接有关，使电芯残骸形成低阻导通路径。

## 2.4 热失控特征参数对比分析

由于快充至不同SOC所需时间不相同，为消除充电阶段时长对热失控过程对比的影响，以开始加热时刻作为统一零时刻，对50%、80%和100%SOC工况下电池过热热失控过程中的温度、电压、防爆箱气体压力及膨胀力变化进行对比分析，结果如图6所示。

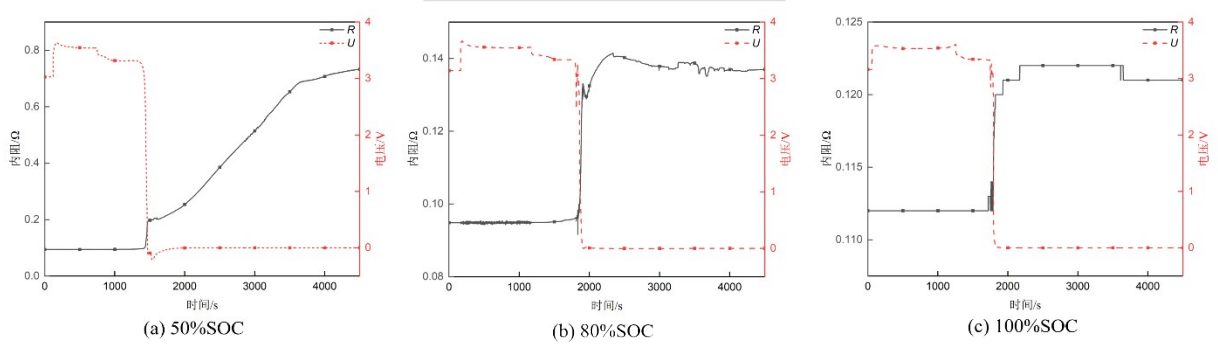


图5 快充至不同SOC工况下电池热失控过程中电压及内阻变化

Fig. 5 Voltage and internal resistance responses during thermal runaway at different SOC conditions after fast charging

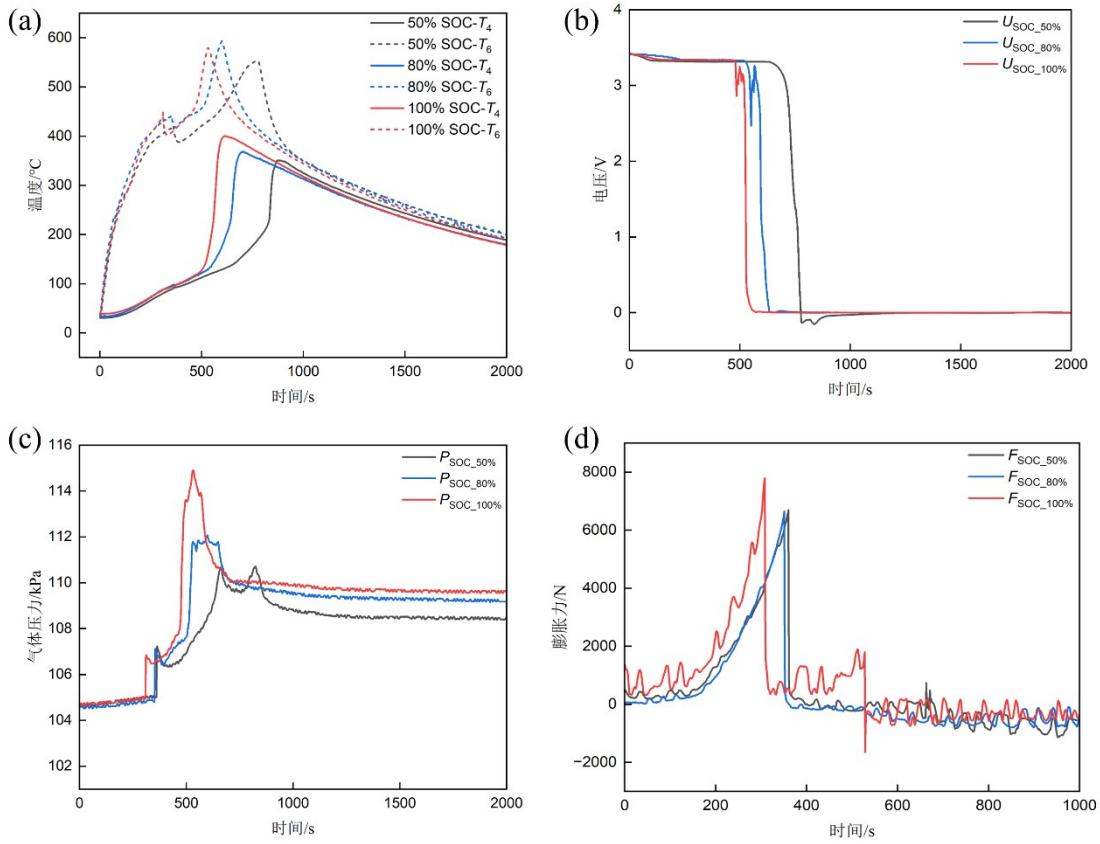


图6 不同SOC工况下的电池热失控特征参数变化: (a) 表面温度; (b) 电压; (c) 防爆箱内气体压力; (d) 电池膨胀力

Fig. 6 Variation of thermal runaway characteristic parameters under different SOC conditions: (a) surface temperature of the battery, (b) voltage, (c) gas pressure inside the explosion-proof chamber, and (d) expansion force

从图6中可以看出, 50%SOC工况下电池热失控最晚, 说明低SOC电池需要更长的外部加热时间和热量积累过程才能达到热失控条件。随着初始SOC提高, 电池大面温度突升及电压骤降时刻明显提前, 表明高SOC电池内部储存能量更多, 负

极嵌锂程度更大, 热失控副反应更易被触发。电压快速下降通常代表电极结构破坏, 说明随着SOC升高, 电池内部副反应更剧烈, 隔膜失效和内短路更早发生。对比电池两侧大面温度变化发现,  $T_4$ 达到最高温度时间始终晚于  $T_6$ , 但二者时间差随

SOC 升高逐渐缩短, 由 50%SOC 的 119 s 降至 100%SOC 的 89.5 s, 这可能是因为 SOC 越高, 负极石墨的嵌锂程度越深, 可参与副反应的活性锂储量更加充足, 单位时间的产热速率远高于低 SOC 工况, 同时高嵌锂态下负极体积膨胀更显著, SEI 膜的热力学稳定性可能变差, 导致其更早失去屏障作用使嵌锂负极与电解液发生反应。与此同时, 高 SOC 工况下电压突降与温度剧烈上升之间的时间间隔较短, 表明电池由电化学失稳向热失控发展的过程更加迅速, 预警时间窗口进一步缩短。

随着电池 SOC 从 50% 提高至 100%, 防爆箱内气体压力突升时刻提前, 膨胀力上升速率加快,

且峰值整体升高。其中, 100%SOC 工况下气体压力峰值及膨胀力峰值最高, 这是由于高 SOC 状态下电池内部储存能量较高, 活性锂含量和可参与反应的活性物质更多, 从而生成更多气体并造成更强的膨胀力响应。

## 2.5 热失控预警策略

可以看出, 试验过程中电池温度、电压、防爆箱内气体压力及电池膨胀力呈现出明显的阶段性变化特征, 各物理量之间具有较强的耦合关系。以快充至 50%SOC 工况下的过热热失控过程为例, 根据特征信号的突变节点, 将全过程划分为四个阶段, 如图 7 所示。

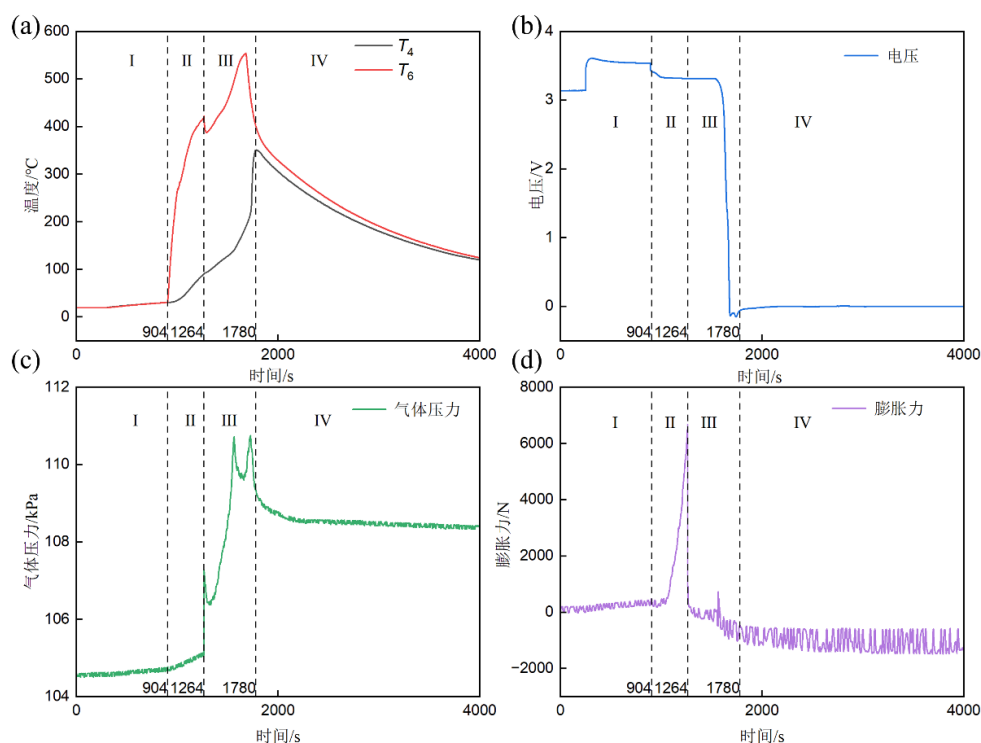


图 7 电池热失控过程的特征信号响应: (a) 大面温度; (b) 电压; (c) 防爆箱内气体压力; (d) 电池膨胀力  
Fig. 7 Characteristic signal responses during battery thermal runaway: (a) surface temperature of the large face, (b) voltage, (c) gas pressure inside the explosion-proof chamber, and (d) expansion force

第一阶段为快充至预设 SOC 阶段。该阶段电池由初始状态以 3C 倍率充电至 50%SOC, 开始充电后极化作用强电压瞬间升高, 随着充电过程中温度升高及极化作用减弱, 电压缓慢下降, 充电结束后电压跌落至 3.2 V 附近。与此同时, 电池大面温度仅小幅升高, 说明该阶段热量主要来源于欧姆热和极化热, 尚未发生明显的副反应。防爆箱内气体压力在此阶段小幅度增加, 电池膨胀力则随充电过

程缓慢增加, 这是由锂离子嵌入负极引起的电极体积变化及升温导致。

第二阶段为外部加热至电池开阀阶段。加热开始后, 受外部热源作用, 加热侧 ( $T_6$ ) 温度快速升高, 且  $T_6$  升温幅度明显高于  $T_4$ , 说明电池两个大面之间形成了温度梯度, 热量传递具有明显的空间非均匀性。随着持续加热, 电解液挥发及副反应逐渐增强, 内部气体生成速率增加, 导致电池内部压力

升高, 并进一步推动电芯壳体结构膨胀。因此, 该阶段膨胀力快速上升并达到峰值。当内部压力超过安全阀开启阈值后, 电池开阀排气, 内部高温气体和电解液蒸气释放至防爆箱中, 使防爆箱内气体压力出现突升。开阀后, 电池内部压力被释放, 膨胀力随之骤降。

第三阶段为开阀后至完全热失控阶段。开阀并未终止电池内部反应, 反而表明电池已进入严重失效前期。此时, 由于前期热积累和副反应放热的耦合作用, 电池内部温度继续升高, SEI膜分解、负极与电解液反应、隔膜收缩或熔融、内短路以及正极材料分解等反应相继发生, 使放热速率显著增加。图中  $T_6$  温度在该阶段快速升至峰值,  $T_4$  也随之急剧升高, 表明热失控由局部逐渐扩展至电池整体。电压在该阶段出现急剧跌落至 0 V, 说明电池已完全报废。膨胀力在开阀后由正值快速下降, 甚至出现负向变化, 表明电池结构在剧烈排气、材料喷出及壳体变形后发生塌陷。

第四阶段为热失控后降温阶段。完全热失控后, 电池内部反应物逐渐消耗殆尽, 放热反应强度降低, 电池大面温度均进入下降过程。冷却过程温度下降相对缓慢, 且两个大面测温点之间的温差逐步减小, 说明电池内部温度场由强非均匀状态向热平衡状态演化。电压维持在 0 V, 膨胀力在该阶段维持负向波动, 防爆箱气体压力在峰值后缓慢下降, 但仍高于初始压力, 说明热失控产生的气体仍滞留在箱体内, 压力衰减主要受箱体泄压、气体冷却及环境换热影响。

将上述试验过程中各特征信号进一步处理, 得到各参数随时间的变化率, 如图 8 所示。开启加热后, 靠近加热片一侧的温度响应最为敏感, 其对侧响应最为迟滞, 而电池底面的温度响应介于二者之间。在第一阶段, 各参数均未呈现明显异常, 仅电压在充电开始及结束瞬间出现短暂突变, 持续时间不超过 30 s。进入第二阶段后, 加热启动, 温度变化率开始出现异常, 其数值显著高于充电阶段; 伴随电池安全阀开启, 气压及膨胀力变化率均出现突变。此时距电池发生剧烈热失控尚有约 648 s, 电池表面平均温度为 174.7℃, 低于热失控触发温度<sup>[9]</sup>。若在此阶段采取有效降温措施, 则极有可能避免电池热失控的发生。第三阶段, 电池因过热发

生热失控, 电压在骤降至 0 V 之前先以约 2 mV/s 的速率缓慢下降, 随后下降速率逐渐加快, 此时热失控已不可逆转, 但距热失控喷发仍有约 120 s, 应及时远离并采取抑制措施以最大限度降低危害。

基于该 LFP 电池以 3C 快充至 50%、80% 以及 100% SOC 工况下过热热失控不同阶段各特征信号变化率的分析, 结合温度演化规律, 可针对本系统建立一种快充后加热触发热失控的三级预警机制。各信号在不同预警等级中的阈值由试验数据确定<sup>[9]</sup>: 当电池温度低于 50℃ 时, 判定为正常状态; 当电池温度超过 50℃ 且温升速率大于 0.1℃/s 或膨胀力变化率大于 40 N/s 时, 触发一级预警, 此时电池开始自产热, 内部已生成少量气体, 应通过热管理系统加强电池冷却; 当电池温度变化率超过 0.5℃/s 且气体压力变化率大于 0.04 kPa/s 或膨胀力变化率大于 100 N/s 时, 触发二级预警, 此时电池安全阀已开启但尚未发生热失控, 应立即报警、采取降温措施并提醒人员撤离; 当电池温度超过 200℃ 且电压变化率超过 2 mV/s 且温度变化率超过 0.5℃/s 时, 触发三级预警, 此时电池即将发生热失控, 应立即疏散人员并采取消防措施, 将热失控危害降至最低。受限于单一试验对象、固定加热功率、特定热失控触发方式等试验条件, 且实际应用场景中电池热失控的诱因往往更为复杂多样, 本文所提出的预警策略及其阈值的适用范围存在一定局限性, 尚不能作为适用于所有磷酸铁锂电池的通用标准, 但研究结果仍可为车用动力电池包及储能系统的热安全设计提供参考。

## 2.5 试验重复性验证

为确保试验结论可靠性, 每组工况均进行了 2 次独立重复试验, 取试验过程中开阀时间  $t_{vent}$ 、最高温度  $T_{max}$ 、最大气压变化  $\Delta P_{max}$ 、最大膨胀力  $F_{max}$ 、峰值温升速率  $(dT/dt)_{max}$ 、质量损失  $M_{loss}$  等 6 个关键特征参数进行分析, 相关误差棒分布如图 9 所示。结果表明, 热失控各特征参数的相对标准偏差均处于较低水平, 其中峰值温升速率的最大相对标准偏差为 11.3%, 其余特征参数均不超过 10%, 最高温度与质量损失的相对标准偏差仅约 1%。这说明本试验系统稳定性良好, 操作流程规范, 电池状态控制一致, 试验结果具有良好的可重复性, 热失控预警策略具有较高可行性。

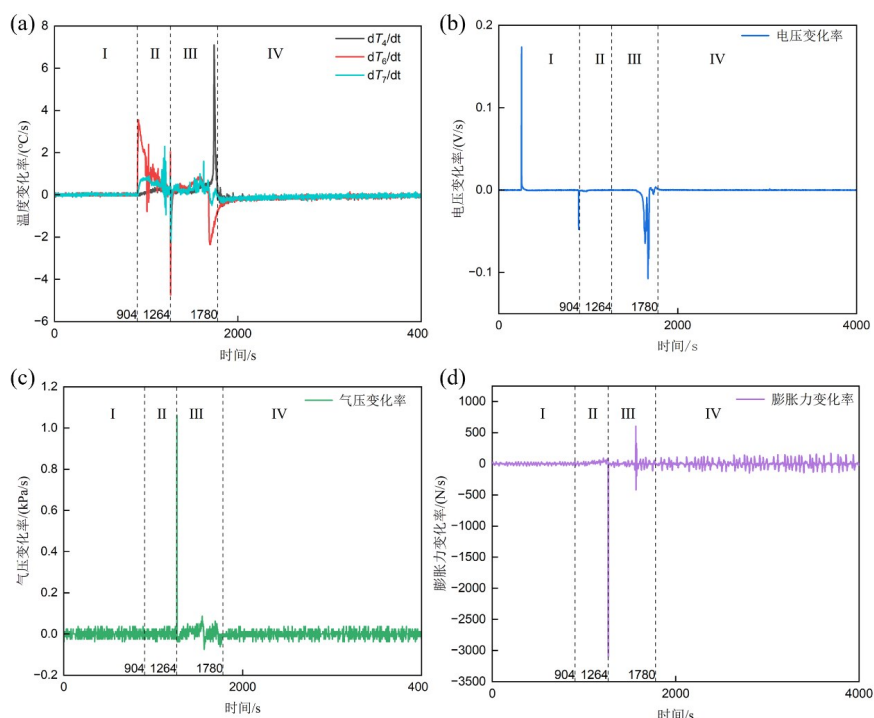


图8 电池热失控过程的特征信号变化率: (a) 温度; (b) 电压; (c) 防爆箱内气体压力; (d) 电池膨胀力  
Fig. 8 Change rates of characteristic signals during battery thermal runaway: (a) temperature, (b) voltage, (c) gas pressure inside the explosion-proof chamber, and (d) expansion force

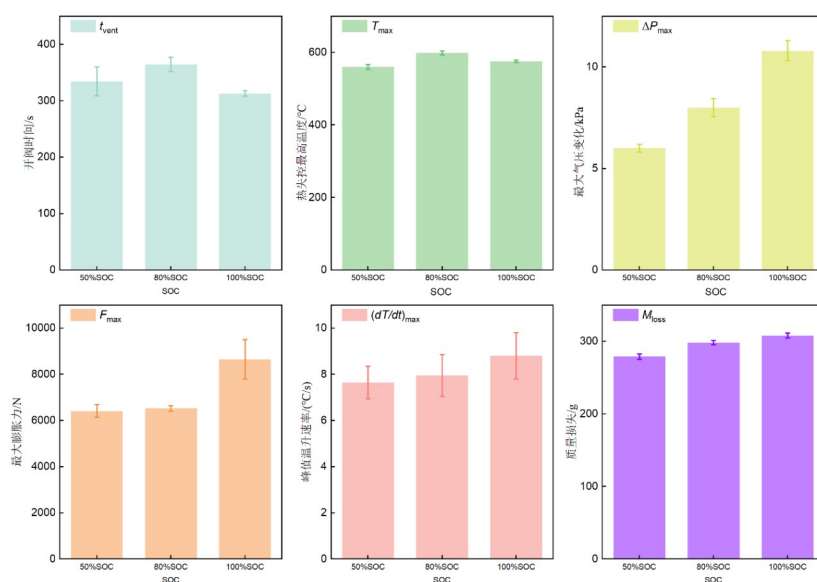


图9 电池热失控过程中特征参数的误差棒  
Fig. 9 Error bars of characteristic parameters during battery thermal runaway

### 3 结 论

本文以 50 Ah 方形磷酸铁锂电池为对象, 开展了快充至不同 SOC 后加热触发热失控试验, 分析

了温度、电压、内阻、气体压力、膨胀力等物理信号的变化规律, 主要结论如下:

(1) 电池快充耦合过热热失控过程中, 电池遵循“热积累—产气膨胀—开阀泄压—剧烈热失控—

冷却”的变化时序：快充期间电池温度、膨胀力缓升；开始加热后膨胀力快速增长并达峰；开阀时气体压力突升、膨胀力骤降、表面温度短暂小幅度回落；热失控期间电池剧烈喷发，电压骤降、内阻突增、温度及气体压力达到最高、膨胀力降为负值；热失控结束后开始自然冷却，温度及气体压力逐渐下降。

(2) 随着 SOC 由 50% 升高至 100%，电池开始加热至最高温度的时间缩短 244 s，从开始加热至电压骤降为 0 V 的时间提前 228 s，最大气压变化增幅约为 66%，峰值膨胀力增幅约为 66%，说明高 SOC 状态下电池热稳定性降低，在外部加热作用下更易快速进入热失控阶段，且电池内部产气更剧烈，壳体在夹具约束下产生更大的力学响应，具有更强的热蔓延风险。

(3) 电池快充耦合过热热失控过程可分为四个阶段，根据不同阶段各特征信号变化率，结合电池温度演化规律，按照逐渐递增的危险程度建立了适用于本试验系统的电池热失控三级预警策略，当设备检测到报警信号时，应立即采取措施抑制或推迟电池发生热失控，确保人员安全。

### 参考文献

- [1] WANG Q, MAO B, STOLIAROV S I, SUN J. A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2019, 73: 95-131.
- [2] FENG X, OUYANG M, LIU X, LU L, XIA Y, HE X. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review[J]. *Energy Storage Materials*, 2018, 10: 246-267.
- [3] 叶锦昊, 侯军辉, 张正国, 等. 100 Ah 磷酸铁锂软包电池的热失控特性及产气行为[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(02): 636 - 647.  
YE, J. H., HOU, J. H., ZHANG, Z. G., et al. Thermal runaway characteristics and gas generation behavior of 100 Ah Lithium Iron Phosphate Pouch Cell[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(2): 636 - 647.
- [4] SPOTNITZ R, FRANKLIN J. Abuse behavior of high-power lithium-ion cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2003, 113(1): 81-100.
- [5] DOUGHTY D H, ROTH E P. A general discussion of Li ion battery safety[J]. *The Electrochemical Society Interface*, 2012, 21(2): 37-44.
- [6] LARSSON F, ANDERSSON P, BLOMQVIST P, MELLANDER B E. Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 10018.
- [7] KANG R, JIA C, ZHAO J, et al. Effects of capacity on the thermal runaway and gas venting behaviors of large-format lithium iron phosphate batteries induced by overcharge[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 87: 111523.
- [8] WANG K, WU D J, CHANG C Y, et al. Charging rate effect on overcharge-induced thermal runaway characteristics and gas venting behaviors for commercial lithium iron phosphate batteries [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 434: 139992.
- [9] WANG Z, YUAN J, ZHU X, et al. Overcharge-to-thermal-runaway behavior and safety assessment of commercial lithium-ion cells with different cathode materials: A comparison study[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2021, 55: 484-498.
- [10] ZHU X, WANG Z, WANG C, et al. Overcharge investigation of large format lithium-ion pouch cells with  $\text{Li}(\text{Ni}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2})\text{O}_2$  cathode for electric vehicles: Degradation and failure mechanisms [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2018, 165(16): A3613-A3629.
- [11] CAI T, MOHTAT P, STEFANOPOULOU A G, SIEGEL J B. Li-ion battery fault detection in large packs using force and gas sensors [EB/OL]. arXiv:2010.13519, 2020.
- [12] ABADA S, MARLAIR G, LECOCQ A, et al. Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 306: 178-192.
- [13] KUMAI K, MIYASHIRO H, KOBAYASHI Y, TAKEI K, ISHIKAWA R. Gas generation mechanism due to electrolyte decomposition in commercial lithium-ion cell[J]. *Journal of Power Sources*, 1999, 81-82: 715-719.
- [14] SUN Y T, LU H F, JIN Y. Experimental and numerical study on mechanical deformation characteristics of lithium iron phosphate pouch battery modules under overcharge conditions[J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35: 15172-15184.
- [15] LIN J, CHU H N, MONROE C W, et al. Anisotropic thermal characterisation of large - format lithium - ion pouch cells[J]. *Batteries & Supercaps*, 2022, 5(5): e202100401.
- [16] ZHANG Y, CHENG S, MEI W, et al. Understanding of thermal runaway mechanism of  $\text{LiFePO}_4$  battery in-depth by three-level analysis[J]. *Applied Energy*, 2023, 336: 120695.
- [17] SHUKLA V, MISHRA A, SURE J, et al. Size - dependent failure behavior of commercially available lithium-iron phosphate battery under mechanical abuse[J]. *Process Safety Progress*, 2023, 42 (4): 674-685.
- [18] 宋来丰, 梅文昕, 贾壮壮, 等. 绝热条件下 280 Ah 大型磷酸铁锂电池热失控特性分析[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(8): 2411-2417.  
SONG L F, MEI W X, JIA Z Z, et al. Analysis of thermal runaway characteristics of 280 Ah large  $\text{LiFePO}_4$  battery under adiabatic conditions[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11 (8): 2411-2417.
- [19] WANG X, ZHU J, JIANG Y, et al. Internal multi-dimensional signals sensing enables early warning of thermal runaway for NCM523-graphite batteries[J]. *eTransportation*, 2026: 100598.