

# 软包锂离子电池热失控多维特征参数演变研究

吕敏, 黄燕

西南交通大学机械工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2024年5月14日; 录用日期: 2024年6月7日; 发布日期: 2024年6月13日

## 摘要

锂离子电池的安全性问题严重阻碍了新能源汽车的普及和发展, 本文以软包三元锂电池为研究对象, 通过高温加热热失控实验, 分析研究了高温热失控期间软包电池温度、电压、电阻、产气膨胀四个多维参数的演变规律和耦合机制。结果表明: 1) T1是电池早期温度最高的测点, 可以作为热失控早期的温度监测点, 而热失控时温度最高的T3测点能更好地反映整个热失控期间的电池温度变化。2) 电压随着温度升高缓慢降低, 在190°C时突降0.27 V, 随后骤降为0; 而电阻随着温度的升高呈小幅度减小后增大再迅速减小的变化趋势。3) 电池中心是出现膨胀最早且膨胀量最大的位置, 膨胀量能表征电池的产气、破裂排气、热失控喷射等现象, 膨胀信号的首次出现和下跌比温度骤增分别早了约3500 s和1700 s。膨胀是比电压和温度更快、更准确的热失控早期预警信号。

## 关键词

软包三元锂电池, 热失控, 多维特征参数演变

# Study on Multi-Dimensional Characteristic Parameters Evolution of the Pouch-Type Lithium-Ion Battery Thermal Runaway

Min Lv, Yan Huang

School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Received: May 14<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jun. 7<sup>th</sup>, 2024; published: Jun. 13<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

The safety of lithium-ion batteries has seriously hindered the popularity and development of new energy vehicles. This paper takes the pouch-type ternary lithium battery as the research object,

and through the high-temperature heating thermal runaway experiment, analyses and researches the evolution law and coupled mechanism of the four multi-dimensional parameters of battery temperature, voltage, resistance, and gas-producing expansion during the high-temperature thermal runaway. The results indicate: 1) T1 is the highest temperature measurement point in the early stage of heating battery and can be taken as the temperature monitoring point in the early stage of thermal runaway. While temperature measurement point T3 with the highest temperature in thermal runaway can better reflect the battery temperature change during the whole thermal runaway process. 2) The voltage decreases slowly with rising temperature, drops suddenly by 0.27 V at 190°C, and then plummets to 0. While the resistance shows a trend of slight decrease and then increase and then decrease with the temperature rises. 3) The battery center is the earliest and largest expansion position, and the expansion can characterize the gas production, rupture and venting, and injection phenomena of TR; the first occurrence and the decline of the expansion signal are earlier than the sudden rise in temperature by about 3500 s and 1700 s, respectively. Expansion is a faster and more accurate early warning signal of thermal runaway than voltage and temperature.

## Keywords

Pouch-Type Ternary Lithium-Ion Battery, Thermal Runaway, Multi-Dimensional Parameters Evolution

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在能源和环境的双重压力下,节能环保、绿色低碳且低成本的新能源汽车得到了大众关注和追捧,特别是纯电动汽车。而在电动汽车高速发展的同时,由电池系统热稳定性失控导致的电动汽车起火、燃烧等事故频发,阻碍了电动汽车的普及和发展,也打击了消费者的信心。

锂离子电池热失控时伴随着电压、电流、温度、产气、膨胀等多维参数的变化。目前已有不少文献报道了锂电池热失控期间电压、温度两个维度参数的演变规律。冯等人[1]对 25 Ah 的方形锂电池进行了绝热热失控测试,获得了热失控时温度和电压的演变曲线,并提出了锂电池热失控期间存在三个共性特征温度,即自产热起始温度 T1、热失控触发温度 T2、热失控峰值温度 T3,揭示了电压下降的机理,并解释了电压骤降和温度骤升之间存在 15 s 时间差( $\Delta t_{v,T}$ )的原因。何骁龙等人[2]对方形铝壳 NCM 电池进行了过充、过热热失控实验,发现过充热失控时 $\Delta t_{v,T}$ 为 35 s,而过热-过充耦合失控时, $\Delta t_{v,T}$ 缩短至 17 s。Dong 等人[3]发现热失控时电压骤降的特征温度并不一定离热失控临界温度很近,NCM 压降温度与热失控临界温度相差 10°C 左右,而 NCA 压降温度与热失控临界温度相差 90°C 左右。Li 等人[4] [5]阐明了在电池自产热之前电压随温度升高缓慢下降的规律,发现电压在达到电池内短路起始温度时突然骤降为 0;并分析了不同荷电状态(SOC)下方形三元锂离子电池热失控时电池特征温度的演变规律,结果表明电池的 SOC 越低,电池的自产热起始温度、电压降温度、热失控起始温度以及峰值温度就越高。

近年来,电池热失控时产气组分及浓度变化、产气压力等力学参数的演变引起了学者们的关注。Wang 等人[6]对 NCM111、NCM523、NCM622、NCM811、LFP 五类方形锂离子电池开展了热失控产气的定性和定量分析,获得了不同体系电池的产气组成和产气量,其中 NCM 体系电池的归一化产气量约为

2.74~3.38 L/Ah, LFP 电池为 0.67 L/Ah。Chen 等[7] [8]对三款大容量方形锂离子电池开展了单体热失控的实验研究,除了电压、温度外,对电池端面应变和压力进行研究,解析了热失控过程中方形电池热-力的共性耦合机制,将热失控期间电池的膨胀分为早期热膨胀和产热-热耦合膨胀两个阶段。此外,他们还发现电池压力达到最大时,排气阀打开,电池的首喷排出电解液蒸汽和少许副反应气体,热失控时主喷排出气体、烟雾和颗粒物。

目前已有不少学者研究了锂电池热失控时多维特征参数的演变,大多数研究集中在电压、温度等电化学-热参数的演变,尽管学者们开始关注电池产气、膨胀等力学参数的演变研究,但是目前大多学者关注的对象是方形电池或圆柱电池等硬壳电池。这得益于硬壳电池坚硬的外壳和独特的泄压阀设计,电池热失控的产气膨胀不明显,当内部气压超过阈值时,电池泄压阀打开并喷出大量气体[9]。相比之下,铝塑膜封装的软包电池无泄压阀,且产气极易导致铝塑膜膨胀。随着软包电池在新能源汽车和储能领域的大规模应用,厘清软包电池热失控期间多维特征参数的演变规律,可以帮助从业人员开发电池热安全的多维参数联合预警技术,为锂电池热失控的早期监测预警提供可靠的指导。

因此本文以某款车用 10 Ah 软包三元锂电池为研究对象,通过高温加热热失控实验,分析研究高温热失控期间软包电池温度、电压、电阻、产气膨胀四个多维参数的演变规律和耦合机制,为电池热失控的早期监测预警提供可靠的指导。

## 2. 实验

### 2.1. 实验对象及平台

样品软包电池的额定容量为 10 Ah,标称电压为 3.7 V,其高度为 130 mm,宽度为 65 mm,厚度约为 12 mm,正负极极耳的宽度为 10 mm,外露长度为 20 mm。

为了研究软包电池热失控时多维参数的演变,本文搭建了如图 1 所示的高温热失控实验系统。实验系统的主体是高低温针刺一体机(JD-6012C-D,东莞捷东),其内部的实验舱是近似绝热的,在触摸屏上设置好加热温度,温控系统会向热箱内通风将其加热至设置温度值,以此来模拟电池的高温加热下的热失控过程。热箱侧边设有带软塞的通孔,方便排烟管道的连接以及数据采集线路的布置,而通过舱门上的钢化玻璃窗可以观察记录电池的热失控过程。实验过程中,温度、电压、产气膨胀数据由东华数据采集仪(DH9522N)采集,其中温度由 K 型热电偶测量,膨胀由位移传感器测量;电阻通过 GAMRY 电化学工作站测量;所有实验数据通过数据采集仪对应的软件记录至计算机中,并进行后续处理。

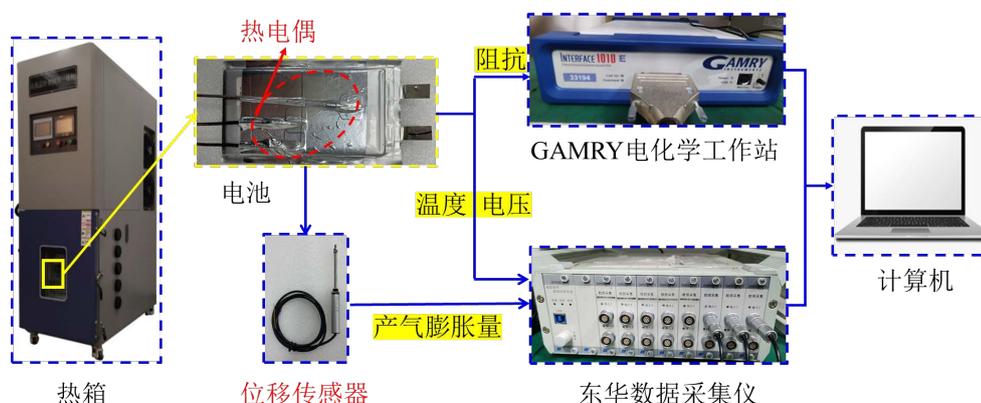


Figure 1. High and low temperature squeezing and needling integrated machine for batteries  
图 1. 电池高低温挤压针刺一体机

## 2.2. 实验方案

在实验前, 根据 GB/T 38031-2020 规定对电池进行预处理, 并将其充电至 100% SOC, 随后将电池放入恒温箱中静置 1 h。静置完成后将电池固定在夹具上, 按照图 2 布置好热电偶和位移传感器, 其中 K 型热电偶通过热电偶胶水或者耐高温的胶带紧紧粘接到电池表面, 以防止实验过程中热电偶因电池鼓包而导致的脱落; 弹簧位移传感器以螺纹连接的方式固定到固定板上, 调整电池固定板与位移传感器固定板的距离使得位移传感器处于零位移状态。电池热失控是电池导热、散热、产热三者综合作用的结果, 电池的产气膨胀是副反应产热产气导致的, 而极耳的导热系数大于铝塑膜, 根据电池热失控的机理[1], 图 2 所示的传感器布置能够准确地表征电池的热失控过程, 并且传感器紧贴电池表面确保了实验数据的准确性, 总的来说, 图 2 的传感器布置的科学性较好。然后将电压测量线和电化学阻抗测量线头部的鳄鱼夹连接对应的电极极耳, 并将布置好的电池夹具放入热箱中, 关闭舱门并在舱体外布置摄像装置以记录热失控实验的过程。在计算机上的数集软件中设置好采样频率、采样时间、各数采通道的数据类型、量程等参数, 检测各传感器的初始数据, 按照实际情况进行数据补偿或者平衡清零。最后, 启动热箱, 定制加热实验, 箱内温度达到设定值(160℃)后将继续保持至软包电池热失控。

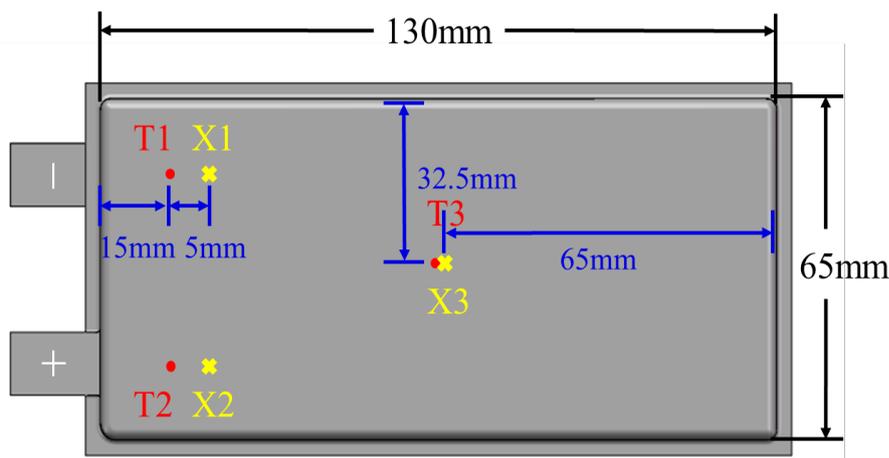


Figure 2. Measurement points for temperature (T) and expansion (X)  
图 2. 温度(T)和膨胀量(X)的测量点位

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 实验现象分析

图 3 为软包锂电池热失控实验期间的拍摄图像, 可以看出, 软包电池在热箱中一次经历了: (a) 受热膨胀; (b) 破裂排气; (c) 电池内部出现火星; (d) 电池内部喷射大量火星, 且喷射烟雾; (e) 持续喷射, 火星减少; (f) 喷射结束, 电池降温。电池受热温度不断升高, 随后内部发生副反应并产热产气, 电池内部的产气累积使得铝塑膜外壳不断膨胀。当电池膨胀到一定程度时, 电池外壳破裂并排出气体, 从图 3(b) 可知, 电池外壳破裂的位置在正负极极耳之间的密封边处。电池的破裂将部分电池内部活性材料暴露在空气中, 空气中的氧气加剧了电池内部活性材料的氧化分解过程, 导致电池温度进一步升高, 并且内部的剧烈反应向外喷射活性物质和气体, 热箱内部逐渐被喷射的白烟笼罩, 肉眼只能观电池反应喷射的火星, 火星的喷射程度也直接反映了电池热失控的剧烈程度。随着电池内部活性材料的分解结束, 电池不再产生新的烟雾, 火星也逐渐消散, 电池开始冷却降温。



**Figure 3.** Experimental process for thermal runaway of pouch-type ternary lithium-ion battery  
**图 3.** 软包锂电池热失控实验过程

## 3.2. 多维参数演变分析

### 3.2.1. 温度分析

图 4 展示了软包电池热失控过程中不同测点的电池温度变化。可以看出, 刚开始加热时, 测点 T1、T2、T3 所监测到的温度大致相等。随着电池温度升高, 三个测点之间的温差开始增大, 在电池温度超过  $80^{\circ}\text{C}$  以后这个差距明显增大, 且三个测点的温度从大到小依次是 T1、T2、T3; 其中 T1 和 T2 的温差较小, 同一时刻下二者的最大温差约为  $3^{\circ}\text{C}$ , 而 T3 要比 T1 和 T2 小得多, T3 与 T1 之间的最大温差约为  $10^{\circ}\text{C}$ 。这可能是由于电池通过铝塑膜和极耳与热箱中的空气交换热量, 负极极耳的导热系数大于正极极耳, 正负极极耳的导热系数均大于铝塑膜, 因此在热传导的作用下, 靠近负极极耳一侧的 T1 测点升温最快, 其次是 T2, 最慢的是几何中心 T3; 并且随着电池温度升高, 电池负极表面的 SEI 膜发生分解和电解液蒸发产生的气体, 导致电池表面形成气体热阻, 不同位置的气体热阻大小不同, 导致三个测点之间的温差进一步增大。电池温度超过  $80^{\circ}\text{C}$  之后, 电池在极短的时间内迅速膨胀, 当 T1 的温度达到  $120^{\circ}\text{C}$ 、T3 达到  $113.53^{\circ}\text{C}$  时, 电池外壳鼓包至最大并且破裂, 说明该款电池破裂的温度大约在  $110^{\circ}\text{C}\sim 120^{\circ}\text{C}$  之间, 这与文献[10]的实验结果一致。铝塑膜的密封界面是粘接层在高温下粘接而成, 具有力学结构上的薄弱性, 铝塑膜的膨胀使得电池的密封界面受到拉伸力的作用, 又由于在热失控的早期阶段电池正负极极耳之间的密封边温度高于其他密封边, 导致极耳处密封边受到的拉力更容易超过铝塑膜的热封强度, 因此如图 3(b) 所示, 该款电池更容易在极耳侧的密封处破裂。

软包电池破裂排气产生的焦耳 - 汤姆孙效应导致电池整体温度略微下降, 三个测点降温幅度约  $1^{\circ}\text{C}\sim 2^{\circ}\text{C}$ , 图 5 表明 T3 下降了  $1.42^{\circ}\text{C}$ 。电池破裂后, 由部分活性材料与空气中的氧气接触后被氧化, 加剧了副反应的进行, 电池温升速率迅速增大, 如图 4 所示。随着电池内部的分解反应加剧, 三个测点的温差又逐渐缩小, 在图 4 中局部放大图所示的 A 点(接近热箱温度), 三个测点的温度再次相等, 随后 T3

测点温度开始高于 T1 和 T2, T2 测点温度也慢慢高于 T1。这可能是因为电池更多的组分开始分解产热, 这些热量传递至中心位置的速度要快于传递至电池边缘侧, 而随着正极材料分解的加入, 正极极耳侧的温度 T2 也开始超过 T1。在热失控阶段, T3 测点所测的峰值温度最高, 约为 800.23°C, 其温升速率超过 100°C/s; T2 测点的峰值温度约为 434.81°C; T1 测点的峰值温度最低, 约为 425.39°C。电池降温阶段 T2 的降温速率大于 T1, 可能是热失控的峰值温度高于铝箔熔化温度(660°C)导致正极集流体铝箔的融化吸收了部分热量。

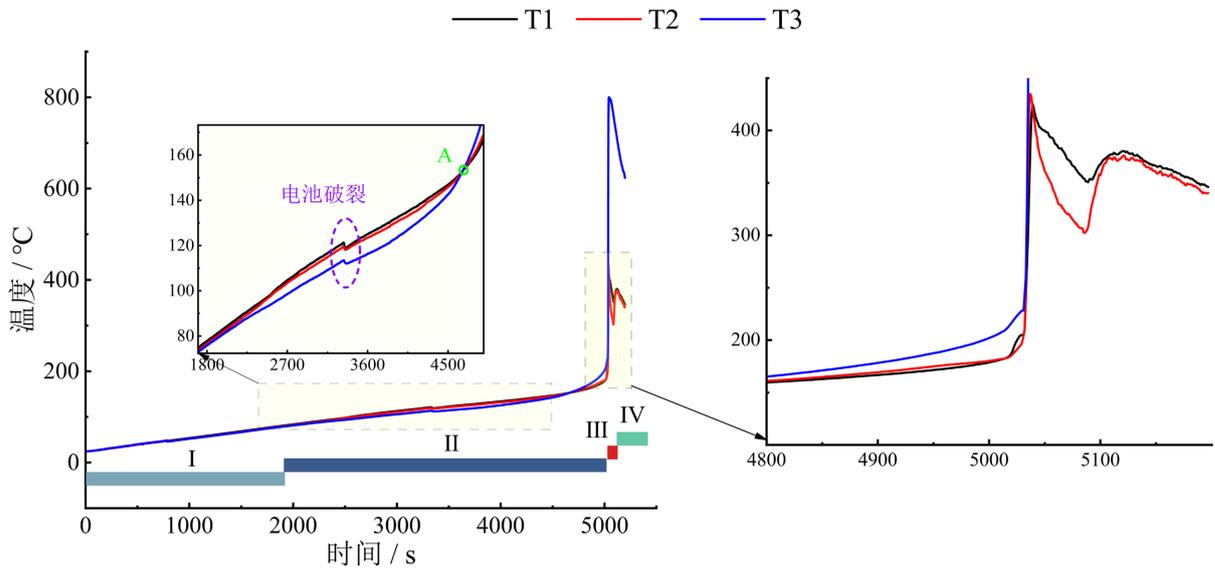


Figure 4. Battery temperature changes during thermal runaway at different measurement points  
图 4. 软包电池热失控期间不同测点的温度变化

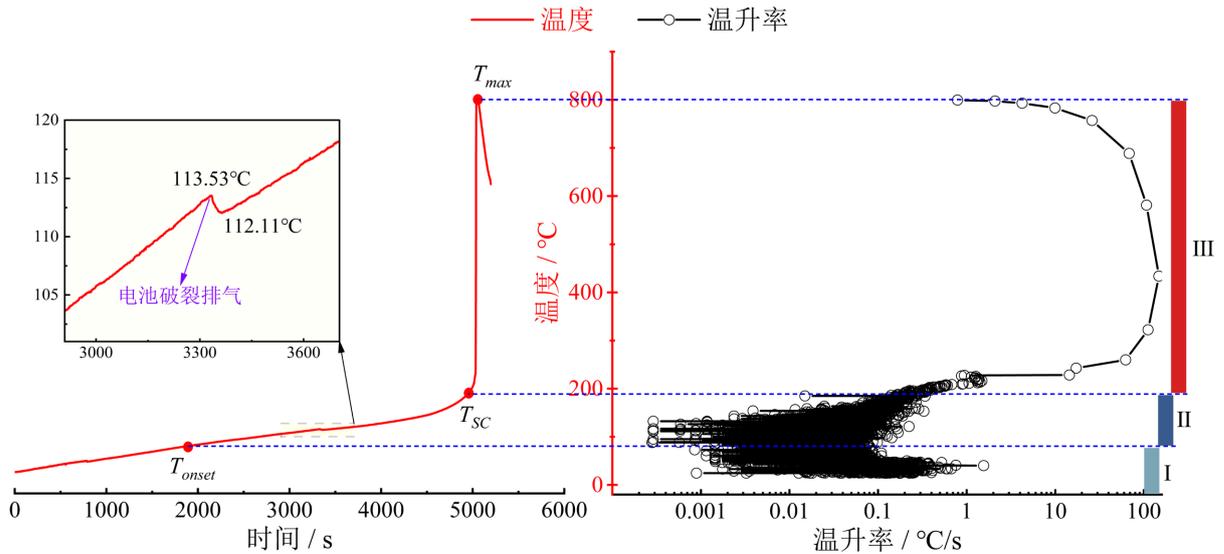


Figure 5. Change curves of temperature and temperature rise rate of T3 measurement point for lithium battery  
图 5. 锂电池 T3 测点的温度以及温升率变化曲线

综上所述, 在热失控过程中, T1 是电池早期温度最高的测点, 有利于电池的早期预警; 而 T3 测点能更好地反映电池热失控的整个过程。为了方便结果分析, 后续均以 T3 的温度代指电池温度。根据 T3 可

将软包电池热失控过程划分为四个阶段:

阶段 I: 电池受热升温, 电池的温升率较小, 内部无副反应产生;

阶段 II: 电池温度达到自产热起始温度( $T_{onset}$ ), 内部开始产生化学分解反应, 释放大量的热和气体。产气导致铝塑膜外壳膨胀, 随后破裂, 电池破裂使得空气中的氧气与电池部分材料发生氧化反应, 加速分解过程。

阶段 III: 电池隔膜达到解体温度( $T_{sc}$ )逐渐融化解体, 导致电池大规模内短路, 释放出大量的电能, 加速电池内部活性材料的分解过程, 电池迅速达到热失控, 温度急剧升高。这个阶段电池温升速率开始超过  $1^{\circ}\text{C}/\text{s}$ , 且极为短暂, 只持续几十秒, 过程中还包括大量的火星溅射和烟雾喷射。

阶段 IV: 电池达到热失控的峰值温度  $T_{max}$  后开始降温冷却。

### 3.2.2. 电压、电阻分析

图 6 显示了软包电池热失控过程中电压和温度随时间的变化。可以看出, 实验进行了 4962 s, 电池达到隔膜解体温度( $190^{\circ}\text{C}$ ), 电池电压从 4.1762 V 缓慢降低至 4.11 V, 这个时间段电压降较小, 为 0.0662 V。随后, 电池电压发生小幅度的突降, 从 4.11 V 降低到 3.84 V, 此时电池温度达到  $200^{\circ}\text{C}$ , 电池温升速率也逼近  $1^{\circ}\text{C}/\text{s}$ , 首次电压突降持续了 34.25 s。这可能是因为电池隔膜融化解体过程中, 电池内部形成多个局部内短路通道, 局部短路放电导致了电压降低。

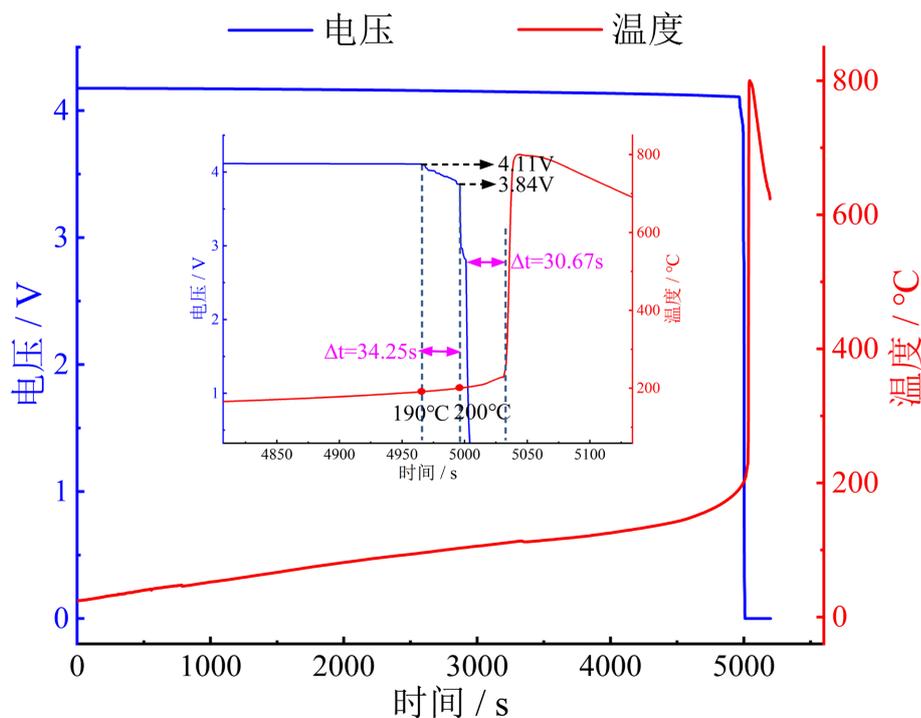


Figure 6. Change curve of battery voltage during thermal runaway process

图 6. 软包电池热失控电压变化曲线

随着电池温度进一步升高, 电压直接骤降为 0, 二次骤降的起始时间约为 5000.58 s, 电池温度约为  $202^{\circ}\text{C}$ , 而温度骤增的时间点约为 5031.25 s, 电压二次骤降与温度骤增时间差约为 30.67 s。电压骤降为 0 是因为电池内部结构的破坏造成内短路放电而导致的, 而温度的骤增来自于电池内部产热的积累效应, 电池短路释放出大量的电能并转化为热量, 这个过程并不是瞬发的, 因此电池温度的骤增晚于电压骤降。

图7显示了热失控过程中电阻随温度的变化。随着电池温度的升高, 电池内部的锂离子变得活跃, 锂离子在电池内部传递扩散的能力变强, 电池的电阻会降低。当电池开始自产热, 电池的电阻开始随温度的升高而增大。这是因为一方面副反应产生的气体逐渐占据电极表面以及孔隙, 造成电池膨胀, 使得电极之间的距离增大, 导致电池的电阻率增大; 另一方面副反应消耗部分电解液和活性锂离子, 同时电解液的蒸发以及电池破裂排气加剧了电解液的流失, 这使得锂离子的传输扩散能力大大减弱。当电池温度升高引起隔膜闭孔融化时, 电池正负极之间的隔断减弱, 电池内部形成了多个内短路通道, 电池电阻开始减小。电解液的大量分解和流失, 加上隔膜的融化解体造成了大规模的内短路, 使得电池的电阻迅速减小。

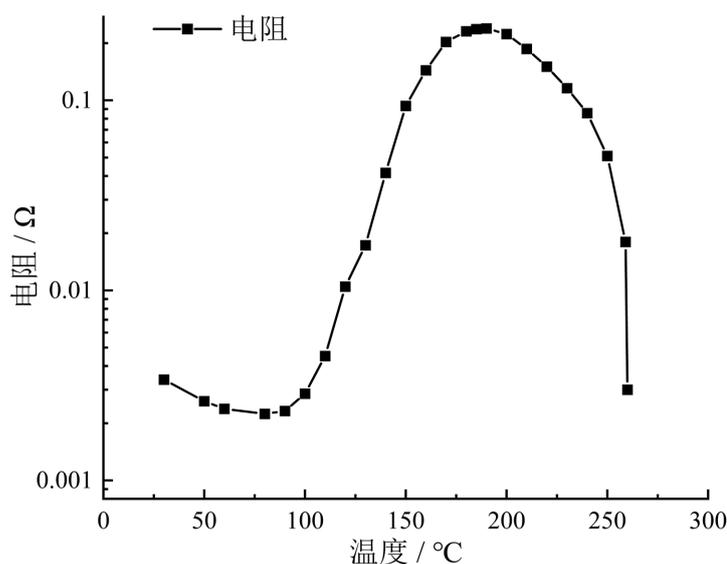


Figure 7. Battery resistance change with temperature during thermal runaway process  
图7. 热失控过程中电池电阻随温度的变化情况

### 3.2.3. 产气膨胀分析

图8为铝塑膜外壳热失控过程中的膨胀位移变化。可以看出三个测点铝塑膜的膨胀位移变化趋势大体一致。从图8(a)可知, 在1500 s时, 电池温度增大到66.71°C, 此时电池表面中心测点X3已经开始检测到铝塑膜的膨胀位移。这说明该款电池的副反应产气早于通常文献中介绍的80°C左右, Wang等人[11]认为SEI膜的分解产热开始于57°C, 当某些电池化成后负极表面SEI膜生成得不规则时, 这种可能性是存在的。靠近极耳的测点X1和X2在2200 s(电池温度已超过80°C)之后才开始检测到铝塑膜的膨胀, 这可能是由于极耳侧的测点比几何中心的测点更靠近铝塑膜密封侧, 该处的铝塑膜膨胀需要克服密封边的粘合力。

随着电池温度的增大, 三个测点的位移迅速增大, X3的位移最大, X1的位移先是大于X2, 随后小于X2。在3332.94 s时, 电池温度增大至113.53°C, 三个测点的膨胀位移达到最大值后骤降, 最大位移量从大到小依次是10.511 mm、7.001 mm、6.04 mm。铝塑膜位移的骤降是因为电池外壳破裂, 这个现象比电池温度骤增早了1700多秒。电池破裂后, 产气和排气同时进行且保持平衡, 铝塑膜的膨胀位移基本保持不变。在4460 s时, 电池温度达到141°C, 三个测点的位移的减小速率增大。这可能是隔膜的融化使得电池内部正负极接触产生的火星溅射逐渐融化了电池侧边的铝塑膜, 导致电池表面铝塑膜下跌, 对应图3(c)和图3(d)的过程, 随后铝塑膜的位移仍基本保持不变。

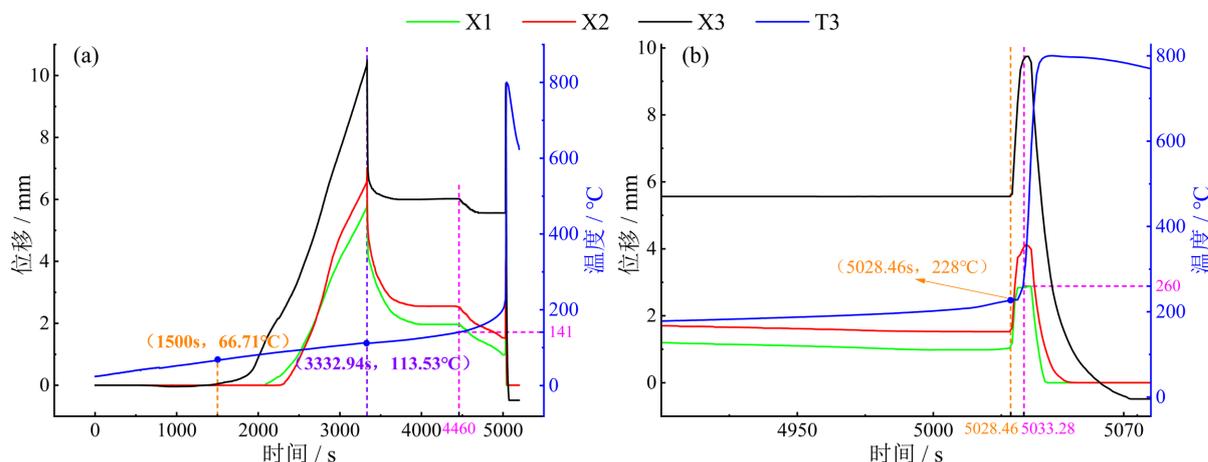


Figure 8. Expansion displacement curves of aluminum-plastic film shell during thermal runaway process

图 8. 热失控过程中铝塑膜外壳的膨胀位移曲线

由图 8(b)可知, 在 5028.46 s 时, 电池温度达到 228°C, 此时电池的温升率逐渐超过 1°C/s, 铝塑膜的位移在短时间内骤增; 在 5033.28 s (电池温度为 260.1°C) 时, 三个测点的膨胀位移达到最大并稳定持续了一段极短的时间, 之后迅速减小。这是因为电池此时接近热失控, 大量的副反应产气和活性物质的喷射导致电池外壳再次产生巨大的膨胀位移, 持续几十秒的位移平台对应着电池短暂而剧烈的热失控。随着电池内部的反应结束, 电池不再产生新的气体, 铝塑膜的位移迅速减小, 电池达到峰值温度后开始冷却降温。

综上所述, 在热失控过程中, 电池外壳的异常膨胀信号远早于电压和温度信号, 并且电池膨胀量变化可以更直观地表征软包电池的热失控过程, 因此膨胀信号能够更快、更准确地对电池热失控进行监测预警。

#### 4. 结论

本文通过高温加热实验, 分析研究了软包电池热失控期间多维参数的演变规律, 主要的结论如下:

1) T1 是电池早期温度最高的测点, 可以作为热失控早期的温度监测点, 而热失控时温度最高的 T3 测点能更好地反映整个热失控期间的电池温度变化。此外, 软包电池达到 110°C~120°C 时在极耳间的密封位置破裂排气, 并且排气后电池的温升速率增大并超过 1°C/s。

2) 电压随着温度升高缓慢降低, 在 190°C 时突降 0.27 V, 随后骤降为 0; 而电阻随着温度的升高呈小幅度减小后增大再迅速减小的变化趋势。

3) 电池中心是出现膨胀最早且膨胀量最大的位置, 膨胀量能表征电池的产气、破裂排气、热失控喷射等现象, 膨胀信号的首次出现和下跌比温度骤增分别早了约 3500 s 和 1700 s。膨胀是比电压和温度更快、更准确的热失控早期预警信号。

#### 参考文献

- [1] 冯旭宁. 车用锂离子动力电池热失控诱发与扩展机理、建模与防控[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2016.
- [2] 何骁龙, 石晓龙, 王子阳, 韩路豪, 姚斌. 过充、过热及其共同作用下车用三元锂离子电池热失控特性实验研究[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(1): 218-226. <https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0391>
- [3] Dong, P., Liu, Z.X., Wu, P., Li, Z., et al. (2021) Reliable and Early Warning of Lithium-Ion Battery Thermal Runaway Based on Electrochemical Impedance Spectrum. *Journal of the Electrochemical Society*, **168**, Article 090529. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac239b>

- 
- [4] 李煌. 三元锂离子电池热失控传播及阻隔机制研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- [5] Li, H., Duan, Q., Zhao, C., *et al.* (2019) Experimental Investigation on the Thermal Runaway and Its Propagation in the Large Format Battery Module with  $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$  as Cathode. *Journal of Hazardous Materials*, **375**, 241-254. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.03.116>
- [6] Wang, H.B., Xu, H., Zhang, Z.L., *et al.* (2022) Fire and Explosion Characteristics of Vent Gas from Lithium-Ion Batteries after Thermal Runaway: A Comparative Study. *eTransportation*, **13**, Article ID: 100190. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2022.100190>
- [7] Chen, S.Q., Wei, X.Z., Zhang, G.X., *et al.* (2023) Mechanical Strain Signal Based Early Warning for Failure of Different Prismatic Lithium-Ion Batteries. *Journal of Power Sources*, **580**, Article ID: 233397. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233397>
- [8] Chen, S.Q., Wei, X.Z., Zhang, G.X., *et al.* (2023) Active and Passive Safety Enhancement for Batteries from Force Perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **187**, Article ID: 113740. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113740>
- [9] 黄志亮, 王怀兴, 阳同光, 等. 储能锂离子电池包单体内部温度压力模拟[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(15): 138-146.
- [10] 邹凯予. 大幅面软包 811 三元锂电池热失控行为及特性研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
- [11] Wang, Q., Sun, J., Yao, X., *et al.* (2005) Thermal Stability of  $\text{LiPF}_6/\text{EC} + \text{DEC}$  Electrolyte with Charged Electrodes for Lithium Ion Batteries. *Thermochimica Acta*, **437**, 12-16. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2005.06.010>