

# 锂离子电池模组热失控传播实验研究

陈龙<sup>1</sup>, 张振东<sup>1</sup>, 盛雷<sup>1</sup>, 朱亚宁<sup>1</sup>, 朱泽华<sup>1</sup>, 呼延吉<sup>2</sup>

(1. 上海理工大学机械工程学院, 上海 200093; 2. 延擎电子科技(宁波)有限公司, 宁波 315321)

**摘要:** 为了提升电池热安全和汽车可靠性, 开展电池模组热失控传播研究。针对圆柱形 21700 锂离子电池的热失控传播特性, 通过实验研究了电池荷电状态、单体间距等因素对 21700 锂离子电池模组多维度热失控传播行为的影响。发现电池热失控轴向传播要快于径向。在电池满电状态, 间距 2.0 mm 时, 热失控轴向传播要比径向快 97 s, 并且随着电池电量的降低和间距的增大, 热失控传播速度变慢。在电池间距为 2.0 mm 时, 30% 和 50% 荷电状态分别是轴向和径向电池的安全荷电状态。在电池满电状态时, 6.0 mm 和 4.0 mm 分别是轴向和径向电池的安全距离。研究结果可为电池的存储、运输以及电动汽车的电池模组设计等提供借鉴。

**关键词:** 21700 锂离子电池模组; 热失控传播; 多维度; 荷电状态; 电池间距

**中图分类号:** TM 912; X 932 **文献标志码:** A

## Experimental study on thermal runaway propagation of lithium-ion battery modules

CHEN Long<sup>1</sup>, ZHANG Zhendong<sup>1</sup>, SHENG Lei<sup>1</sup>, ZHU Yaning<sup>1</sup>, ZHU Zehua<sup>1</sup>, HU Yanji<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;  
2. Yanqing Electronic Technology (Ningbo) Co., Ltd., Ningbo 315321, China)

**Abstract:** In order to improve battery thermal safety and vehicle reliability, the thermal runaway propagation of battery modules was carried out. Aiming at the thermal runaway propagation characteristics of cylindrical 21700 lithium-ion batteries, the effects of charging state, cell distance and other factors on the multi-dimensional thermal runaway propagation behavior of 21700 lithium-ion battery modules were investigated experimentally. It is found that the thermal runaway propagation of the battery is faster in the axial direction than it in the radial direction. When the battery is fully charged and the spacing is 2.0 mm, the thermal runaway propagation is 97 s faster in the axial direction than in

收稿日期: 2023-04-27

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(5220061363)

第一作者: 陈龙(2000-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 锂离子电池热失控安全与防护. E-mail: cl256412@163.com

通信作者: 张振东(1968-), 男, 教授. 研究方向: 汽车动力控制与新能源汽车热管理. E-mail: usstzdz@usst.edu.cn

引文格式: 陈龙, 张振东, 盛雷, 等. 锂离子电池模组热失控传播实验研究[J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(5): 525-532.

Citation: CHEN Long, ZHANG Zhendong, SHENG Lei, et al. Experimental study on thermal runaway propagation of lithium-ion battery modules[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2024, 46(5): 525-532.

the radial direction, and with the decrease of the battery power and the increase of the spacing, the thermal runaway propagation speed becomes slower. When the battery spacing is 2.0 mm, the 30% and 50% charging states are safe charging states for axial and radial batteries, respectively. When the battery is fully charged, 6.0 mm and 4.0 mm are the safe distances for axial and radial batteries, respectively. The research results can provide reference for battery storage, transportation and battery module design of electric vehicles.

**Keywords:** 21700 lithium-ion battery modules; thermal runaway propagation; multidimensional; state of charge; battery spacing

研究电池的热失控传播行为对降低电动汽车热灾害<sup>[1-2]</sup>以及保护人民的生命财产安全具有重要的意义<sup>[3-4]</sup>。电动汽车动力电池的热失控一般经历3个阶段：I阶段，单体电池热失控触发累积阶段<sup>[5]</sup>；II阶段，单体电池发生热失控阶段<sup>[6]</sup>；III阶段，电池模组热失控蔓延阶段<sup>[7]</sup>。

国内外研究人员对锂离子电池的热失控行为进行了许多研究。邓志彬等<sup>[8]</sup>、Wang等<sup>[9]</sup>和Weng等<sup>[10]</sup>研究在开放和封闭空间内18650电池的热失控传播行为，指出实验空间的密闭性越好，电池热失控的传播时间越短。对于电池间距方面，张青松等<sup>[11]</sup>、Li等<sup>[12]</sup>和Fang等<sup>[13]</sup>都进行了实验研究，指出热失控传播速度与电池间的间距成反比，且存在传播临界距离。但是，对于在同一环境下轴向和径向的传播比较暂未有人研究。Ouyang等<sup>[14]</sup>和Jia等<sup>[15]</sup>通过改变电池之间的排列方式，发现电池三角形排列时热失控传播最慢、空间利用率最高。然而，此研究只针对径向，轴向未进行研究。Wang等<sup>[16]</sup>、刘平等<sup>[17]</sup>和Ouyang等<sup>[18]</sup>研究主发电池位置对热失控传播的影响，指出主发电池越多、越靠近中心，则热失控传播越快。Lamb等<sup>[19]</sup>、Huang等<sup>[20]</sup>研究串并联电路组成的电池模组不同的热失控行为，指出并联方式的电池模组发生热蔓延的程度更加剧烈。

以往对电池模组热失控的研究，大多考虑模组侧向的传播，鲜有纵向与侧向的对比分析。本研究将采用圆柱形21700电池模组，迎合了新能源汽车市场以及部分3C电子消费市场的储能需求，所得结果将对21700圆柱形电池的工程化拓展应用提供帮助。同时，本研究也为下一代46系列圆柱形锂离子电池(4680、4695电池等)的热失控传播研究提供借鉴。在同一组实验中主发电池不同方向各放置一个电池，通过改变电池SOC、

电池间距，来比较不同方向上热失控传播行为，并研究热失控传播与电池SOC、电池间距的关系。实验结果可为电池在存储、运输以及新能源汽车电池排布方面提供理论参考。

## 1 实验方法

本文以21700电池为研究对象，实验电池主要规格参数如表1所示。

表1 实验电池主要规格参数

Tab.1 Main specification parameters of experimental batteries

参数	数值
尺寸/mm	21.0 × 70.0
额定容量/Ah	5.0
标称电压/V	3.65
充放电截止电压/V	4.2 / 2.5
重量/g	69.0

### 1.1 实验布置

自主设计并搭建热失控实验平台，如图1所示。实验平台主体是一个1200 mm×700 mm×500 mm的防爆实验箱，防爆箱由不锈钢材质制成，上方留有防爆玻璃制成的观察窗口。为避免实验时主发电池发生热失控后引发电池弹射现象，造成电池排布错落以及热电偶脱落，在实验箱体内部放置用于固定电池的实验台架。在防爆箱内部和台架上部铺设10.0 mm厚的气凝胶用作隔热层，减少实验过程时的热量散失。台架中心固定一节21700电池作为热失控主发电池，并在主发电池的正极中心轴方向(轴向)上方和垂直于中心轴的方向(径向)各固定一节电池，其电池间距为 $s$ 。实验时使用加热的方式来触发电池热失控<sup>[21]</sup>，加热源选择

直径为 0.5 mm 的镍铬电阻丝, 为了保证实验一致性, 每一次实验都在主发电池上均匀缠绕 7 圈电阻丝。通过兆信生产的稳压电源来对电阻丝进行加热, 加热功率设置为 70 W。采集温度的热电偶使用 K 型垫片式热电偶, 其最高可以承受 1000 °C 的高温, 精度为 ±0.1 °C。考虑热电偶安装的稳定性, 将热电偶固定在每节实验电池侧面, 固定位置选择靠近电池正极的一端。为了避免热失控时火焰直接接触到热电偶而对温度的测量造成较大影响, 使用绝热胶带覆盖热电偶并固定于电池表面。电池表面温度使用 HIOKI 数据采集仪进行记录, 记录周期为 1 s。使用高速摄像机实时监控电池热失控行为特征。

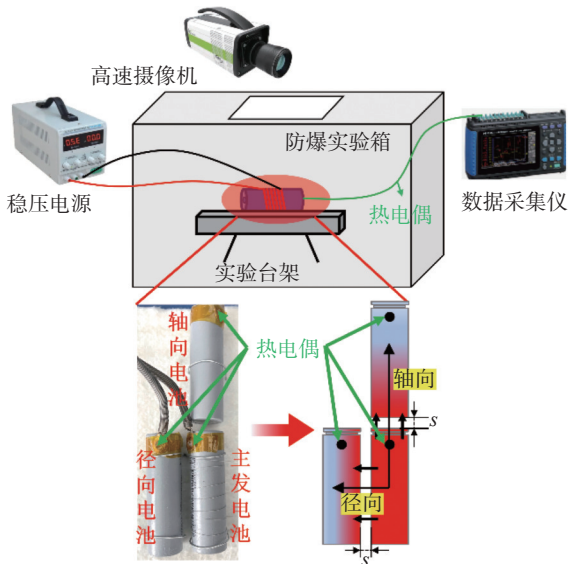


图 1 热失控实验平台

Fig.1 Thermal runaway experimental platform

实验主要研究锂离子电池热失控传播在不同方向上的行为, 考虑到电池在实际工作中 SOC 一直处于动态变化状态, 所以选择 100%, 80%, 50%, 30% 这 4 个不同阶段的电池 SOC 进行对比研究。进一步地, 在实际安装过程中, 电池在模组中的布置有所差异, 故设置不同的电池间距来模拟不同的电池布置。具体工况设置如表 2 所示。

### 1.2 实验步骤

a. 使用电池充放电测试仪(深圳新威尔 CE-6002n, 60 V, 200 A, 双通道)将电池恒压充电至 4.2 V, 充电倍率为 0.5 C, 截止电流为 100 mA, 然后以 0.5 C 倍率放电至实验所需的 SOC, 放电后静置时间不低于 1 h。

b. 在主发电池上均匀缠绕加热电阻丝并固定到实验台架上, 按照图 1 的方式, 在主发电池的

表 2 实验工况设置

Tab.2 Settings of experimental condition

工况	SOC/%	电池间距/mm
a	100	2.0
b	100	4.0
c	100	6.0
d	80	2.0
e	50	2.0
f	30	2.0

轴向和径向各固定一节电池, 同时在 3 节电池上布置热电偶, 并连接数据采集仪采集温度数据。

c. 将实验台架放到防爆箱内部并进行固定, 在防爆箱内部和台架上部铺设气凝胶进行隔热。稳压电源与电阻丝的两端相连接, 开启稳压电源, 同时打开高速摄像机记录实验现象。

d. 待热失控传播结束, 停止温度采集, 拆卸电池模组并对电池称重。

## 2 结果与讨论

### 2.1 模组热失控发展历程

实验中主发电池受到加热丝的直接加热, 温度逐渐升高直至热失控触发温度, 然后将热量传递给相邻电池, 电池模组之间发生热失控的传播。图 2 以工况 a(荷电状态 100%, 电池间距 2.0 mm) 为代表, 展示了电池热失控的传播过程。

由图 2 可以看出, 模组热失控的传播主要分为以下 4 个阶段:

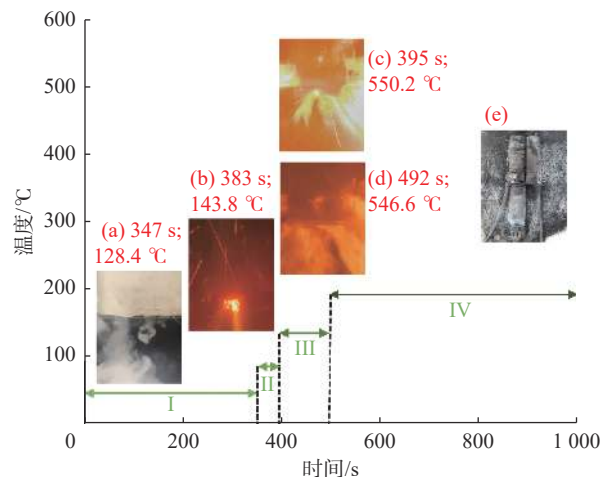


图 2 工况 a(荷电状态 100%, 电池间距 2.0 mm) 实验过程

Fig.2 Experimental process of working condition a (state of charge 100%, battery spacing 2.0 mm)

阶段 I：加热阶段。在电阻丝的持续加热下，电池的表面温度逐渐升高，电池内部发生电化学反应并产生气体，电池内部压力逐渐升高。如图 2(a)所示，当加热到 347 s 时，电池温度为 128.4 °C，电池内部压力超过了安全阀极限，电池安全阀打开，并伴有明显的声响和白烟。

阶段 II：热失控阶段。随着电池温度的进一步升高，电池释放的白烟愈加浓密，当达到电池热失控触发温度时，电池温升速率急剧加快，电池触发热失控。如图 2(b)所示，在第 383 s 时，主发电池温度达到 143.8 °C，电池正极处喷出大量高温物质并伴有爆炸声，随后电池表面温度急剧上升，主发电池开始稳定燃烧。

阶段 III：热失控传播阶段。在主发电池经历热失控并剧烈燃烧时，释放的大量热量传递给相邻电池，尤其是轴向电池受到主发电池的火焰冲击，温度急速上升。如图 2(c)所示，在主发电池热失控 12 s 后，轴向电池触发热失控，最高温度达到 550.2 °C。如图 2(d)所示，97 s 后，径向电池触发热失控，最高温度达到 546.6 °C。

阶段 IV：熄灭阶段。电池在发生爆炸并剧烈燃烧后，火焰逐渐减弱直至熄灭，热失控传播结束。图 2(e)展示了热失控传播结束后电池的残骸。

以上 4 阶段为工况 a 的热失控传播发展历程，但不同 SOC 和间距均会对热失控的传播产生影响，表 3 展示了不同工况下模组的热失控传播情况。

由表 3 可知，随着 SOC 的增加及电池间距的减小，电池模组更易发生热失控的传播，同时轴向电池相较于径向更易触发热失控。下文将具体分析 SOC 和间距对热失控传播的影响。

## 2.2 荷电状态

图 3 展示了在电池间距 2.0 mm 时，不同 SOC

表 3 不同工况下热失控传播情况

Tab.3 Thermal runaway propagation under different operating conditions

工况	SOC/%	间距/mm	是否触发热失控	
			轴向	径向
a	100	2.0	是	是
b	100	4.0	是	否
c	100	6.0	否	否
d	80	2.0	是	是
e	50	2.0	是	否
f	30	2.0	否	否

下电池模组温度随时间的变化关系，表 4 展示了轴向和径向电池热失控时的数据。其中， $\Delta t_1$ 、 $\Delta t_2$  分别代表轴向和径向电池与主发电池触发热失控的时间差； $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  分别表示主发、轴向、径向电池热失控的触发温度； $T_{1m}$ 、 $T_{2m}$ 、 $T_{3m}$  为热失控的最高温度。

从图 3 和表 4 可以看出，当 SOC 为 100% 和 80% 时，轴向和径向电池均触发热失控，轴向电池的热失控触发温度分别为 69.6 °C 和 81.5 °C，低于径向电池的 80.6 °C 和 86.8 °C。热失控轴向传播所需时间分别为 12 s 和 25 s，远小于径向传播的时间 109 s 和 145 s，两个方向上的电池热失控最高温度接近。当 SOC 为 50% 时，轴向电池在主发电池热失控 33 s 后发生热失控，而径向未发生热失控的传播，最高温度仅为 105 °C。当 SOC 为 30% 时，两个方向上的电池均未触发热失控，最高温度分别为 140.7 °C 和 70.7 °C。

图 4 展示了不同 SOC 下电池的最大温升速率。随着电池 SOC 的降低，电池的最大温升速率也随之下降。在相同 SOC 下，轴向电池的最大温升速率均大于径向电池。同时，在 3 节电池均触发热失控的情况下 (80%、100% SOC)，主发电池的最大温升速率均低于其他两节电池。

实验发现在相同 SOC 和电池间距的情况下，热失控的轴向传播速度要快于径向传播速度。在 2.0 mm 间距、不同 SOC 下，轴向电池几乎与主发电池同时发生热失控，其主要原因包括两方面。

a. 在主发电池热失控时，会从正极处喷发出大量的高温物质直接接触轴向电池，导致其负极温度急剧升高，从而触发热失控；而径向电池主要通过热对流和热辐射来吸收主发电池释放的热量，温升速率小于轴向，从而不易触发热失控。

b. 圆柱形锂离子电池的轴向导热系数远大于径向导热系数 (20 倍)，使电池的轴向热传播速度更快，这在 Sheng 等<sup>[22]</sup> 的研究中有明确说明。

随着 SOC 的增大，电池热失控触发温度降低，热失控最大温升速率增大，热失控传播速度减小。总而言之，在 2.0 mm 间距下，对于轴向电池来说，30% SOC 是一个安全的状态，不会发生热失控的传播。50% SOC 对于径向电池是一个安全的状态。

## 2.3 电池间距

图 5 展示了在电池 100% SOC，电池间距分别

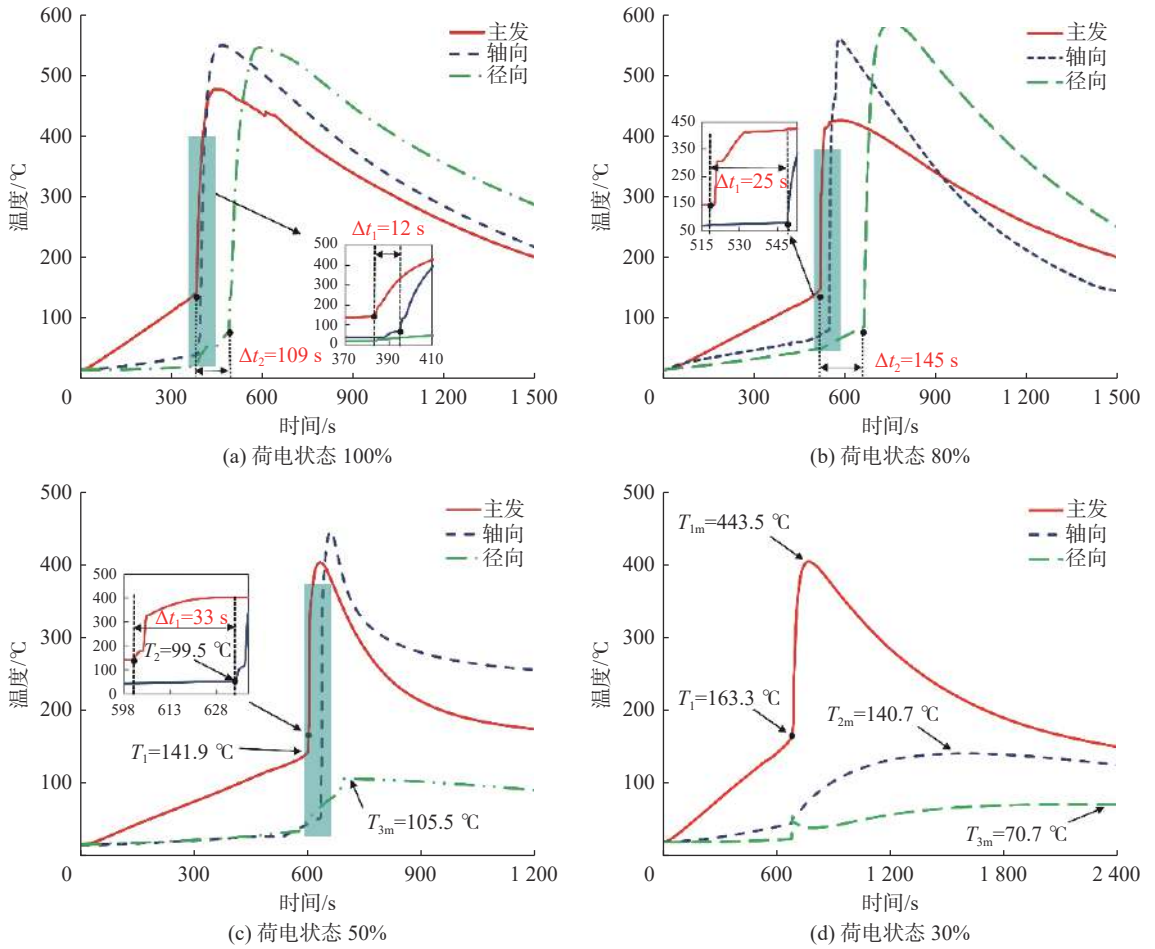


图3 不同荷电状态下电池模组热失控温度变化

Fig.3 Thermal runaway temperature changes of battery modules under different states of charge

表4 不同荷电状态下热失控传播数据对比

Tab.4 Comparison of thermal runaway propagation data under different states of charge

SOC/%	$\Delta t_1/s$	$\Delta t_2/s$	$T_2/^\circ C$	$T_3/^\circ C$	$T_{2m}/^\circ C$	$T_{3m}/^\circ C$
100	12	109	69.6	80.6	550.2	546.6
80	25	145	81.5	86.8	561.6	587.6
50	33	—	99.5	—	446.2	105.5
30	—	—	—	—	140.7	70.7

为 4.0 mm 和 6.0 mm 时模组热失控传播的温度变化。表5展示了不同电池间距下热失控传播数据对比。

从图4(a)和图5可以看出,当电池间距从2.0 mm增加到4.0 mm时,热失控轴向传播时间从12 s增加至39 s,热失控的触发温度由69.6 °C增加至89.9 °C,径向电池的热失控传播时间从109 s至无法传播,触发温度为80.6 °C。当距离为6.0 mm时,轴向和径向电池均未触发热失控。由表5可

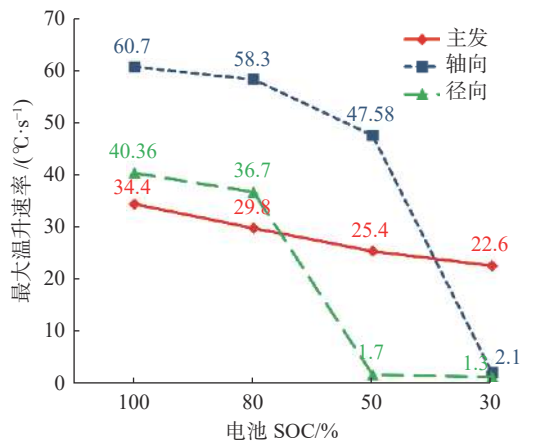


图4 不同荷电状态下电池的最大温升速率

Fig.4 The maximum temperature rise rate of batteries under different states of charge

知,热失控的触发温度以及热失控后电池的最高温度随着间距的增大而减小。

图6展示了不同电池间距下热失控的最大温升速率,随着电池间距的增大,电池的最大温升

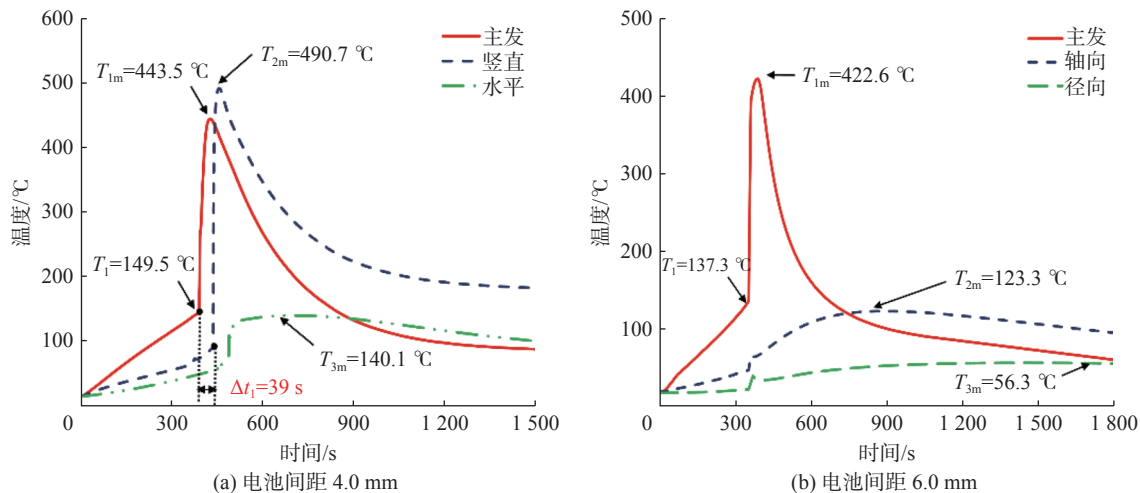


图5 不同电池间距下电池模组热失控温度变化

Fig.5 Thermal runaway temperature changes of battery modules under different battery spacing

表5 不同电池间距下热失控传播数据对比

Tab.5 Comparison of thermal runaway propagation data under different battery spacing

s/mm	$\Delta t_1/s$	$\Delta t_2/s$	$T_2/^\circ\text{C}$	$T_3/^\circ\text{C}$	$T_{2m}/^\circ\text{C}$	$T_{3m}/^\circ\text{C}$
2.0	12	109	69.6	80.6	550.2	546.6
4.0	38	—	89.9	—	490.7	140.1
6.0	—	—	—	—	123.2	56.3

速率随之降低。在相同电池间距下，轴向电池的最大温升速率均大于径向电池。同时，在3节电池都触发热失控的情况下(2.0 mm)，主发电池的最大温升速率均低于其他两节电池。

此外，在同一工况下(SOC、间距等均相同)，轴向电池的热失控传播速度要快于径向电池，最大温升速率也高于径向。当电池间距增加时，热失控的传播将变得缓慢，直至无法传播。因为当电池间距增大时，热失控之间的传热路径变长，热量损失更多，到达相邻电池的热量减少，当温度无法达到热失控触发温度时，热失控不会在模组间发生传播。对于100% SOC的电池，当轴向相邻电池距离大于6.0 mm时，不会发生热失控的轴向传播，径向相邻电池距离超过4.0 mm时，不会发生热失控的径向传播。

2.4 质量损失

图7展示了锂离子电池热失控前后的电池对比图以及热失控未传播和传播情况下的电池模组残骸图。相比于实验前，热失控后的电池外壳破裂，电池内部物质喷出，电池周围存在大量的燃烧灰烬。由于在电池发生热失控时，电池内部发

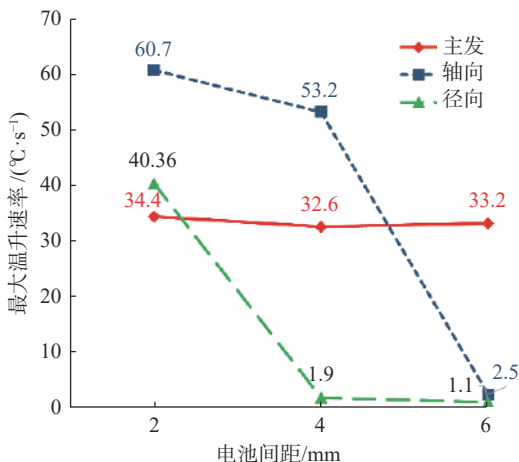


图6 不同间距下电池的最大温升速率

Fig.6 Maximum temperature rise rate of batteries at different spacing

生剧烈反应并发生爆炸，电池内部的安全阀、电芯等物质会随着电池的爆炸燃烧从电池内部喷出，所以热失控后的电池外观发生较大变化。

对电池残骸进行称重，分析其质量损失，结果如图8所示。

由图8可以看出，在发生热失控时，电池的SOC越高，电池热失控后的质量损失率越大，当电池为100% SOC时，质量损失率超过80%。而电池SOC相同，间距增大时，电池热失控后的质量损失率相差不大，所以电池间距对热失控后电池的质量损失影响较小。未发生热失控时，电池质量损失率为0%。在3节电池均触发热失控的情况下，轴向电池的质量损失率高出径向电池5%左右。所以电池SOC对热失控后电池的质量损失影



(a) 实验前电池 (b) 热失控后的电池 (c) 热失控未传播后的电池 (d) 热失控传播后的电池残骸

图 7 实验前后电池展示

Fig.7 Battery display before and after experiment

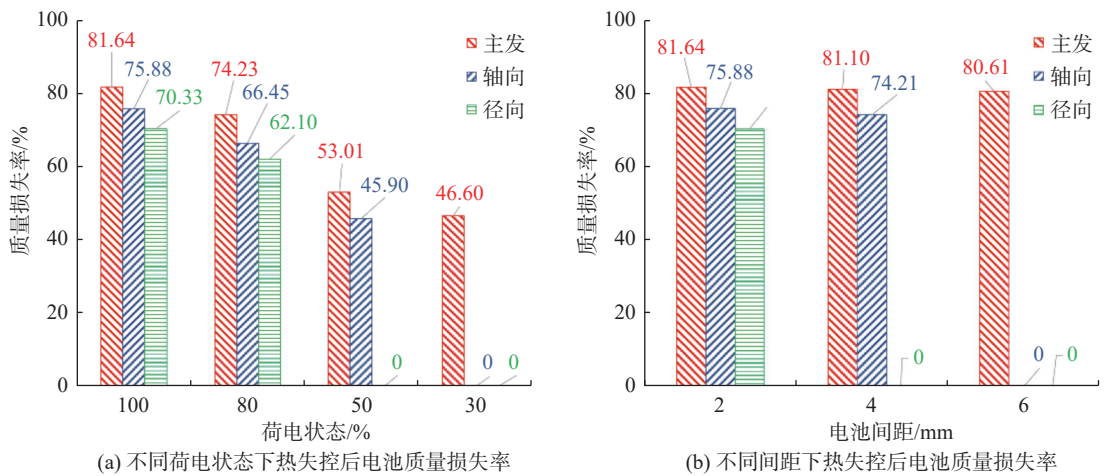


图 8 不同工况下热失控后电池质量损失率

Fig.8 Battery mass loss rate after thermal runaway under different operating conditions

响较大, 而电池排布和电池间距对质量损失影响较小。

### 3 结 论

针对 21700 电池模组的热失控传播特性开展研究, 着重对电池 SOC、单体间距等影响因素进行了探讨。得出如下结论:

a. 在同一工况条件(SOC、间距)下, 21700 电池热失控传播的速度要快于径向, 轴向热失控传播的最大温升速率也高于径向。

b. 当电池 SOC 降低到 30% 时, 21700 电池不发生热失控传播。对于满电电池, 热失控轴向传播的安全距离为 6.0 mm, 径向安全距离为 4.0 mm。

c. 当电池单体间距为 2.0 mm 时, 电池 SOC 在

50% 以下不会发生径向热失控传播。当 21700 电池 SOC 在 30% 以下时, 不会发生轴向热失控传播。

基于本研究结果, 建议在存储、运输 21700 电池时, 可将电池间距保持在 6.0 mm 以上, 电动汽车的长时间停放可以将电池 SOC 保持在 30% 以下, 降低热失控发生后的传播风险。此外, 通过合理设计电池轴向和径向间距, 采取冷却封闭措施, 降低电池模组发生热失控后的危害。

#### 参考文献:

[1] 胡学彬, 王海民, 赵越, 等. 动力电池内部温度梯度反演计算[J]. 能源研究与信息, 2023, 39(1): 56-67.  
 [2] FENG X N, ZHENG S Q, REN D S, et al. Investigating the thermal runaway mechanisms of lithium-ion batteries based on thermal analysis database[J]. Applied Energy, 2019, 246: 53-64.

- [3] 白国振, 李聪, 王双园, 等. 新能源汽车动力电池冷却系统热仿真及优化 [J]. 能源研究与信息, 2023, 39(3): 183–188, 197.
- [4] LYON R E, WALTERS R N. Energetics of lithium ion battery failure[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 318: 164–172.
- [5] 芮新宇, 冯旭宁, 韩雪冰, 等. 锂离子电池热失控蔓延问题研究综述 [J]. 电池工业, 2020, 24(4): 193–201, 205.
- [6] 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.
- [7] FENG X N, HE X M, OUYANG M G, et al. Thermal runaway propagation model for designing a safer battery pack with 25 Ah  $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$  large format lithium ion battery[J]. *Applied Energy*, 2015, 154: 74–91.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] WENG J W, OUYANG D X, LIU Y H, et al. Alleviation on battery thermal runaway propagation: Effects of oxygen level and dilution gas[J]. *Journal of Power Sources*, 2021, 509: 230340.
- [11] 张青松, 赵洋, 刘添添. 荷电状态和电池排列对锂离子电池热失控传播的影响 [J]. 储能科学与技术, 2022, 11(8): 2519–2525.
- [12] LI H, CHEN H D, ZHONG G B, et al. Experimental study on thermal runaway risk of 18650 lithium ion battery under side-heating condition[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2019, 61: 122–129.
- [13] FANG J, CAI J N, HE X Z. Experimental study on the vertical thermal runaway propagation in cylindrical Lithium-ion batteries: effects of spacing and state of charge[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 197: 117399.
- [14] OUYANG D X, LIU J H, CHEN M Y, et al. Thermal failure propagation in lithium-ion battery modules with various shapes[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(8): 1263.
- [15] JIA Y K, UDDIN M, LI Y X, et al. Thermal runaway propagation behavior within 18, 650 lithium-ion battery packs: a modeling study[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 31: 101668.
- [16] WANG Z, YANG H, LI Y, et al. Thermal runaway and fire behaviors of large-scale lithium ion batteries with different heating methods[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 379: 120730.
- [17] 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.
- [18] OUYANG D X, LIU J H, CHEN M Y, et al. An experimental study on the thermal failure propagation in lithium-ion battery pack[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2018, 165(10): A2184–A2193.
- [19] LAMB J, ORENDORFF C J, STEELE L A M, et al. Failure propagation in multi-cell lithium ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 283: 517–523.
- [20] HUANG Z H, ZHAO C P, LI H, et al. Experimental study on thermal runaway and its propagation in the large format lithium ion battery module with two electrical connection modes[J]. *Energy*, 2020, 205: 117906.
- [21] WANG H M, SHI W J, HU F, et al. Over-heating triggered thermal runaway behavior for lithium-ion battery with high nickel content in positive electrode[J]. *Energy*, 2021, 224: 120072.
- [22] SHENG L, SU L, ZHANG H Y. Experimental determination on thermal parameters of prismatic lithium ion battery cells[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 139: 231–239.

(编辑: 丁红艺)