

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2026.03.011

不同荷电状态下串联电池组热失控蔓延实验研究

徐瑞, 刘镭邦, 陈柏旭, 董晓阳, 罗利, 王娅君

(兰州陇能电力科技有限公司, 兰州 730070)

摘要:锂离子电池热失控与蔓延一直是电池安全领域的重要问题,在高能量密度串联模组中更为突出。在串联 18650-NCM 三元锂离子电池模组的基础上,外部施加热源驱动电池模组内发生单体热失控,研究了串联电池模组在不同荷电状态(state of charge, SOC)下的热失控蔓延行为。研究表明,串联电池模组的热失控蔓延行为存在明显的 SOC 阈值, $SOC \leq 50\%$ 时热失控无法蔓延至相邻电池, $SOC \geq 75\%$ 时热失控会产生瞬时蔓延,相邻电池几乎同时出现热失控的峰值温度。通过更进一步的能量平衡分析可知,在高 SOC 下热失控的蔓延是因为热失控电池喷发出高温产物冲击到相邻电池,从而引发瞬时热失控,为串联电池模组的安全设计提供了实验依据和理论基础,同时表明采用物理隔断、合理设置防爆阀位置、局部防护等方法可抑制热失控的蔓延。

关键词:锂离子电池;热失控;热蔓延;串联电池模组;电池安全设计

Experimental Study on Thermal Runaway and Propagation in Series-connected Battery Packs under Different States of Charge

XU Rui, LIU Leibang, CHEN Baixu, DONG Xiaoyang, LUO Li, WANG Yajun

(Lanzhou Longneng Power Technology Co., Ltd., Lanzhou 730070, China)

Abstract: Thermal runaway and its propagation in Lithium-ion batteries have always been a significant concern in the field of battery safety, and this issue becomes even more pronounced in series-connected modules with high energy density. Based on a series-connected 18650 NCM lithium-ion battery module, the thermal runaway of a cell within the battery module is triggered by an externally applied heat source and the propagation behavior of the series-connected battery module under different states of charge (SOC) is studied. The study shows that there is a clear SOC threshold for the thermal runaway behavior in series-connected battery modules. In case of $SOC \leq 50\%$, the thermal runaway cannot propagate to adjacent cells. In case of $SOC \geq 75\%$, the thermal runaway can generate instantaneous propagation, with neighboring cells exhibiting almost simultaneously peak temperatures of thermal runaway. It is known from further energy - balance analysis that propagation of thermal runaway at high SOC is that since the high - temperature product injected from the runaway impact adjacent battery, thereby inducing instantaneous thermal runaway. These findings provide experimental evidence and a theoretical basis for the safety design of series-connected modules and, at the same time, suggest that such measures as physical barriers, judicious placement of safety vents/rupture valves, and localized protection can suppress the propagation of thermal runaway.

Keywords: Lithium-ion batteries; thermal runaway; thermal propagation; series-connected battery module; battery safety design

0 引言

锂离子电池凭借高能量密度、长循环寿命等优点

被广泛应用于储能电站、电动汽车等多个领域^[1-5]。随着锂离子电池比能量的提升,安全问题也逐渐显现^[6]。在热滥用、电滥用、机械滥用等极端工况下,

收稿日期:2025-08-26; 修回日期:2025-09-17

基金项目:国家电网公司科学技术项目(20310057Q2025000427,SGGSLN00NYJS2500296)。

Project Supported by State Grid Science and Technology Programme(20310057Q2025000427,SGGSLN00NYJS2500296)。

电池内部会引发一系列放热副反应^[7-11]。一旦反应生成的热量快速积累并超过电池热管理系统临界值,电池的温度就会呈指数级上升,引发电池热失控,进而引发严重的安全事故发生^[12-15]。

近年来,国内外研究人员针对锂电池在过热和过充条件下触发热失控的机理进行了许多研究。Wang 等人发现,对于商用磷酸铁锂电池,高倍率过充会加剧热失控^[16]。这是由于高倍率充电不仅会加速锂枝晶生长,导致电池内部短路,也会促进电池内部气体的生成,并且高倍率过充产生的气体毒性更强。Li 等人通过实验研究了加热源分别位于电池壳体内部和外部的模组热失控传播特性,发现外部加热源会延迟首个电池热失控的发生,但会加速热失控的传播速度,增加电池的最高温度和电池质量损失,同时能够减少维持传播所需的热传导能量^[17]。这主要是因为喷流火焰的存在使热失控的传播加快,并且减轻了热传导的能量需求。刘承鑫等人通过对锂离子电池进行阶梯加热的方式,探究了在自然对流条件下高温诱发储能锂电池热失控的特性,得到的结果显示,电池的热失控行为与电池的荷电状态有关^[18]。Md Said 等人通过对绝热与非绝热环境下的实验进行了比较分析,结果表明,高荷电状态(state of charge, SOC)显著缩短了电池热失控的诱导时间,且进一步使得电池内部的温度上升剧烈,这说明,电池处于高荷电状态时其热稳定性最容易被破坏^[19]。Cai 等人主要探究了高温短期储存对电池性能的多尺度的影响,指出高温老化不仅会造成正常的容量衰减和内阻增加,更重要的是会加剧电池在以后再次发生热失控时的放热^[20]。Feng 等人系统总结了引发锂离子电池热失控的多种诱发因素,机械滥用(如挤压、穿刺)、电气滥用(如过充、过放)、高温热冲击等外部条件都可能引发电池内部短路,进而引发热失控。同时强调了在电池制造过程中引入的微小缺陷或杂质,也可能随着时间演化为内短路,从根本上增加了电池起火、爆炸等安全风险的概率^[21]。

毛斌斌系统开展了 18650 锂离子电池的绝热热失控实验,采用绝热加速量热仪精确测定了电池在不同荷电状态下的热失控特征参数,提出电池在热失控过程中产热速率与产气速率之间存在显著的正相关关系^[22]。进一步,毛斌斌结合大量实验数据与仿真结果,建立了基于荷电状态的锂离子电池燃烧特性预测方法。黄昊等人明确指出,动力电池热失控的致灾本质是电池内部产生的可燃气体释放后,遭遇点火源引发的气体火灾^[23-25]。并且将动力电池复杂的火灾危害归纳为火焰、烟气、爆炸 3 大

核心因素,并创新性构建了基于火灾动力学原理的半定量计算方法,通过计算各因素权重,将火灾危险性划分为 4 个等级,为动力电池系统的火灾风险评估提供了科学依据。

对于热失控在模组层级的蔓延问题,国内外学者已从多个维度展开了深入研究。Lopez 等人通过加热元件引发单体失控,研究了热量在单元之间的传递特性,研究结果表明,增大圆柱电池模组之间的电池间距可以显著降低热失控蔓延的可能性^[26]。Jin 等人结合实验与仿真,系统研究了加热功率和能量对热失控蔓延的影响,研究结果表明,外部加热引发热失控的根本原因在于热量的累积,高功率加热引发热失控,虽能可以缩短首个电芯热失控的触发时间,但对后续热失控蔓延的影响并不显著^[27]。Lee 等人在 5 mm 电池间距的情况下,对不锈钢、膨胀材料及陶瓷纤维隔热板对于 18650 电芯热失控蔓延的抑制作用进行了研究^[28]。对比结果表明,尽管这些隔板不能完全阻止热失控的发生,但是可以有效地延缓热失控的蔓延,其中陶瓷纤维的阻隔效果最好。Lu 等人提出了一种结合相变材料和微通道液冷的新型混合结构,并通过实验证明这种系统能够有效阻止模组内首轮热失控蔓延^[29]。高辉等人认为热管理系统的开发要从热失控的触发边界出发,建立起系统化的预防体系^[30]。在预警技术方面,刘同宇等人 and Ghiji 等人的研究显示,通过对 H₂、CO 等特征气体的精准检测,可达成对电池热失控的早期预警,部分研究提及传感器的布置形式,内嵌式氢传感器相较于外置方案,可以大幅度提升有害气体的探测效率,这种方式在过充之类的异常初期就能敏锐察觉风险,进而快速引发警报,为安全防控争取到关键的响应窗口期^[31-33]。

本文将 18650-NCM 三元锂离子电池组成电池模组,通过实验对模组的热失控蔓延行为进行分析,探究了不同 SOC 状态下模组热失控及其蔓延过程中温度和电压的变化,并详细分析了其蔓延过程的机理。基于研究成果,本文提出了电池模组的安全设计过程中需要重点关注的防护策略。

1 串联电池模组热失控蔓延行为实验设置

本研究选用 18650-NCM 三元锂离子电池作为实验对象,采用外部热激励方式触发单体电池热失控。将电阻值为 6 Ω 的加热丝卷绕于电池中部位以模拟外部热源,通过稳压电源为加热丝提供恒定功率输出,加热功率设定为 66 W,利用外部热激励诱发目标单体电池的热失控行为。

实验装置设计如图1所示,将3节单体电池以串联方式组成电池模组,各单体电池采用首尾相连的紧密排列方式,中间无预留间隙,并通过专用支架进行固定以防止实验过程中的位移。在此配置下,对其中一节电池单体(标记为 B_1)施加外部热激励以触发热失控,研究该热失控电池对相邻两节电池(B_2 和 B_3)的热失控蔓延传播行为及其影响机制。

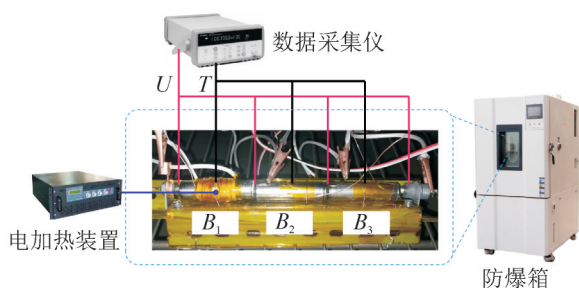


图1 热失控蔓延实验装置
Fig. 1 Experimental device for thermal runaway propagation tests

实验过程中,设定电池表面温度达到 180°C 作为停止加热的临界条件。选择此温度阈值的原因是当电池温度升至 180°C 时,隔膜材料发生完全热收缩失效,正负极直接接触形成内短路,释放大焦耳热。达到此条件后立即终止外部加热,转而依靠电池内部的副反应自维持产热过程,包括内短路焦耳热效应、电解液热分解反应、正极材料热分解、粘结剂与电解液的放热反应等多重热源的协同作用,验证电池能否在无外部热源条件下实现完全热失控状态的自维持过程。

2 多场耦合模型实验与代理模型训练

2.1 SOC都为0时,单体触发热失控后电池模组蔓延行为

图2展示了0% SOC条件下串联电池模组中单节电池热触发时的温度和电压变化情况。从图2可以看出,给目标单体电池加外部热激励后,电池表面温度呈不断上升趋势,当表面温度达到预设的 180°C 临界值时停止加热,从实验结果观察到电池表面温度也随即呈现下降现象,这两种现象存在两种可能的解释机制:第一,由于电池表面测温点与内部核心区域之间存在热阻,表面温度与内部实际温度存在梯度差异。电池内部温度达到隔膜热收缩失效温度时,隔膜材料发生相变过程,此过程伴随吸热效应,使表面测量温度暂时性下降。第二,温度响应滞后,导致停止加热后电池表面温度惯性下降,但电池内部的副反应持续放热,又将整体温

度回升至 185°C 。

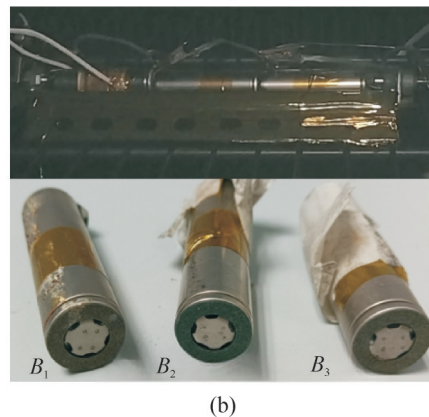
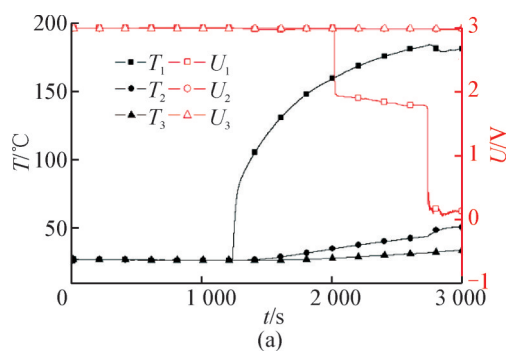


图2 0% SOC时热失控蔓延时温度和电压变化
Fig. 2 Temperature and voltage variation during thermal runaway and propagation at 0% SOC

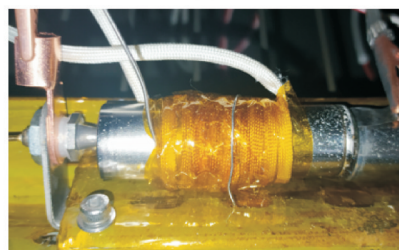
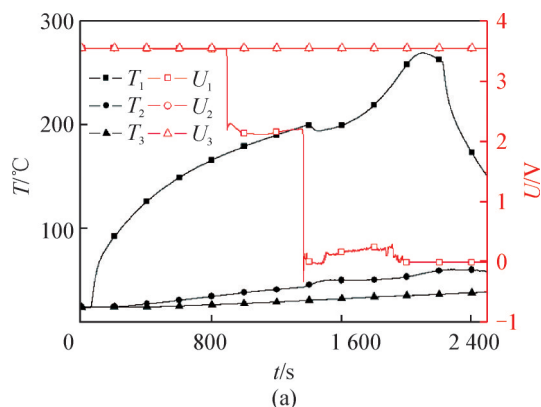
尽管表面温度下降的具体机制有待进一步验证,但后续现象表明,电池内部副反应的产热不足以维持在自然对流散热条件下的温升,最终导致连锁反应的中止,热失控的蔓延过程随之终结。若结合电压曲线变化进行分析,则第一种解释机制的可能性更大。实验数据显示,电池表面温度下降的瞬间,电池电压骤降至 0V ,说明此时电池正负极完全短路。进一步,通过观察电池电压变化可以发现,在电池温升至 150°C 时,电压开始出现下降趋势,表明隔膜材料此时已经开始发生局部热收缩,形成微小的短路通道,导致电池端电压降低。随着温度持续升高,隔膜的短路区域逐渐扩大,最终导致正负极之间完全短接,电池电压降为 0V 。

对电池温度分布特性加以分析可知,处于外侧的加热功率并不全都作用于目标电池 B_1 表面,仍有一部分热量靠着热传导的方式作用在相邻的 B_2 与 B_3 电池上。从实验数据来看, B_2 和 B_3 电池的表面温度仅表现出小幅度的提升,这就表明,在首尾连接的串联形式下,电池模组内部存在热传导现象,然而热量传递给邻接电池的热量相当有限,没有达到让邻接电池热失控的能量边界值。在电池状态变化的角度上分析,可以得知高温环境下,造成电池

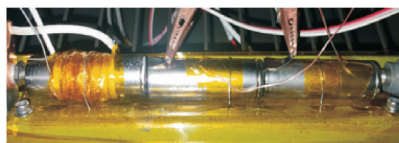
B_1 的内部结构产生不可逆的损害,端电压下降到0 V,也就是说,该电池已然完全失效。与此相比,电池 B_2 和 B_3 ,其外观形貌和结构完整性均未发生明显改变,仍维持相对稳定的工作状态,未出现显著的热损伤或结构性破坏。以上结果表明在0% SOC状态下,单节电池热失控所产生的热量虽然可以在串联模组中发生传递,但并不会引发相邻电池发生连锁的热失控反应。

2.2 SOC都为25%时,电池模组热失控蔓延行为

图3展示了串联电池模组在25% SOC情况下单节电池热触发时的温度、电压变化。图3显示,目标电池外部加热停止之后,其内部副反应进程并未随之结束,而是持续进行放热反应,促使电池内部温度不断升高,这种自维持的链式反应令电池温度出现持续上升的趋势,最终温度达到270℃。即使在开放空间自然对流散热的情况下,电池内部副反应产生的热量仍不能完全维持热失控的自持续发展,但与0% SOC工况下的温度响应相比,25% SOC状态下的单体电池展现出更趋近于完全热失控的特征。



(b)



(c)

图3 25% SOC时热失控蔓延时温度和电压变化

Fig. 3 Temperature and voltage variation during thermal runaway and propagation at 25% SOC

对比分析结果可知,电池荷电状态是决定热失

控反应剧烈程度的重要因素,在极低 SOC 条件下,电池甚至难以达到热失控的触发阈值。随着 SOC 的增加,电池内部存储的电化学能量也随之增加,这为内部副反应提供了更充足的能量来源,从而显著提高了热失控反应的强度和持续时间。

从电压变化可以看出,25% SOC 工况下的电池电压演化过程与0% SOC 条件下的变化规律基本一致,均表现为温度升高过程中电压逐步下降,最终因内短路而降至0 V 的特征。这表明不同 SOC 状态下电池的电压失效机制相似,主要受控于隔膜热收缩失效和内短路形成过程。

并且从温度分布特性来看,在电池 B_1 受到外部加热的影响后,其上的外部加热功率同样会传导到和电池 B_1 相邻的电池 B_2 以及电池 B_3 中。不过值得注意的是,当电池 B_1 出现温度下降后,同样的情况也会在电池 B_2 的表面表现出来,即温度也呈现逐渐下降的趋势,这也进一步体现了电池之间发生热量传递过程具有的热惰性,即热传导在时间上有显著滞后性,相邻电池的温度变化会出现随着热源电池温度变化而发生相应变化。

从电池工作状态角度分析,实验过程中,电池 B_1 由于热失控导致内部结构完全破坏,端电压降至0 V,电池完全失效。而电池 B_2 和 B_3 虽受到一定程度的热影响,但仍保持相对稳定的工作状态,这种电池失效模式与0% SOC 工况下的热失控触发实验结果基本一致,说明不同荷电状态下电池的电压失效特征存在一定的共性,都由于内短路引起的电压归零为主要特征。

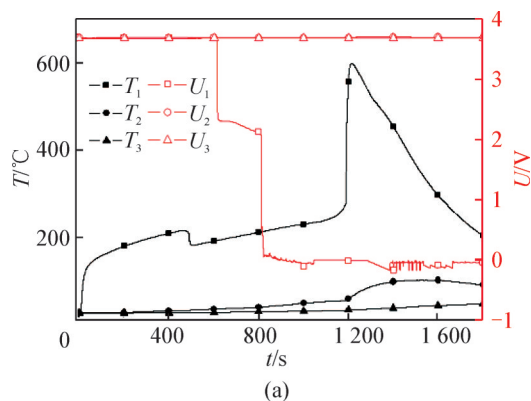
该实验结果进一步证明,在50% SOC 情况下,单节电池热失控尽管能够产生更高的峰值温度和更剧烈的反应过程,但其热量向相邻电池的传递仍然有限,无法引发邻近电池的连锁热失控反应。

2.3 SOC都为50%时,电池模组热失控蔓延行为

图4展示了串联电池模组荷电状态进一步提升至50% SOC 时,单节热触发时的温度和电压变化特性。图4表明,在此荷电状态下,外部热激励成功引发了目标电池的热失控反应。与25% SOC 工况温度形成鲜明的对比,该状态下电池表面温度峰值飙升至600℃,并且从停止外部加热(热失控触发点)至温度达到峰值,整个热失控的剧烈演化历程持续约750 s。

在实验过程中可以观察到,电池在热失控发展期间有断续的火焰喷射现象发生,但电池温度在放电产生后仍然持续上升,此期间并未出现明火燃烧。这一现象是由于电池内部正极材料分解与电

解液反应产生的氧气浓度有限,不足以维持持续的燃烧反应,因此在热失控过程中主要表现为高温分解而不是燃烧反应。此外,电池在达到完全热失控状态前产生大量白色气溶胶,该现象是由于在高温条件下,电池内部电解液发生热分解反应,分解产物由于内部压力上升而从安全阀或壳体薄弱处喷出,在环境中迅速冷凝形成可见的白色蒸汽云。这一典型的热失控特征为分析电池间热传导效应提供了重要实验基础。



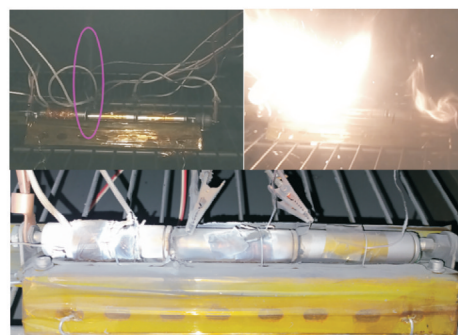
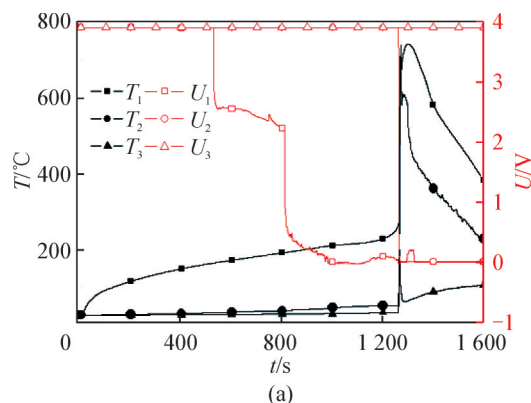
(b)

图4 50% SOC时热失控蔓延时温度和电压变化
Fig. 4 Temperature and voltage variation during thermal runaway and propagation at 50% SOC

2.4 SOC都为75%时,电池模组热失控蔓延行为

图5为串联电池模组在75% SOC条件下单节热触发时的温度和电压变化情况。图5显示,在外部热源激励下,不仅 B_1 电池发生热失控反应, B_2 电池也发生热失控反应,出现了典型的热失控蔓延现象,电池 B_1 和 B_2 几乎同步达到各自的热失控峰值温度,表现出在高SOC条件下热失控的强烈传播特性。电池 B_2 的热失控完全由电池 B_1 的热失控过程引发,其蔓延机制主要由下两个因素决定:1)电池 B_1 在热失控过程中产生高温,为相邻电池 B_2 提供了外部热源,虽然没有发生明火燃烧,但600℃以上的高温仍可通过热传导和热辐射得方式向临近电池传递大量热量,当传递的热量超过相邻电池的热失控阈值时,即可引发连锁热失控蔓延反应。2)电池之间正负极直接串联, B_1 电池防爆阀会直接面向 B_2

电池负极,在热失控剧烈反应阶段,气化的电解液裹挟着部分熔融电极物质,通过防爆阀从电池 B_1 内部直接喷射至电池 B_2 的负极端,在此区域形成局部高温热源。同时由于电池 B_2 正极端安全阀未能及时开启,内部压力持续累积,大量高温气体从负极端排出,进一步加剧了该区域的热量集中,导致热失控蔓延过程快速发展。



(b)

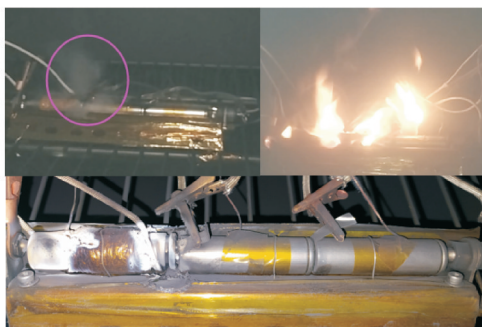
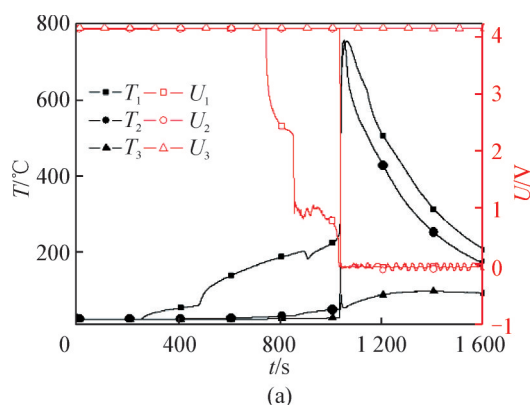
图5 75% SOC时热失控蔓延时温度和电压变化
Fig. 5 Temperature and voltage variation during thermal runaway and propagation at 75% SOC

2.5 SOC都为100%时,电池模组热失控蔓延行为

图6展示了串联电池模组在100% SOC条件下单节电池热触发时的温度和电压变化情况。针对图6展开分析,结果表明,目标电池在外部热激励下出现的热失控现象和75% SOC状态大致相同,热失控的蔓延范围仍然局限于第2节相邻电池 B_2 ,没有继续扩散到第3节电池。从电芯射流火方向及烧毁后结构可见, B_2 电池主要破坏形式与75% SOC条件下类似,其负极侧受到 B_1 电池冲击迅速破坏,从而导致 B_2 电池燃烧产物均由负极侧排出。整个过程 B_2 电池正极防爆阀未开启,因此未对 B_3 电池造成冲击。

100% SOC工况的热失控蔓延特征与75% SOC工况的热失控蔓延特征相比,热失控整体蔓延时间明显缩短, B_1 、 B_2 电芯电压跌断时间间隔由75% SOC时的710 s降低至100% SOC时的290 s。这是因

为,100% SOC 状态下,电池内部储存的电化学能量更加充足,能驱动更加剧烈的热失控反应,反应速率更快。虽然两种工况下电池表面的峰值温度相近,但反应速率明显加快。电池 B_1 和 B_2 之间的降温温差明显减小,相同的环境散热条件下,说明100% SOC 工况下热失控过程释放和传递的能量明显大于75% SOC 工况热失控释放和传递的能力,体现了高荷电状态的热失控蔓延能力更强。此外,端电压的变化规律与之前所有 SOC 工况保持高度一致,也就是随着温度的不断上升,电压逐渐衰减,最终归零。综合以上各项指标分析可知,100% SOC 下电池内部的电化学能量储备最为充足,热失控反应最为猛烈,且在模组内的蔓延速度最快。



(b)

图6 100% SOC 时热失控蔓延时温度和电压变化
Fig. 6 Temperature and voltage variation during thermal runaway and propagation at 100% SOC

3 串联电池模组热失控蔓延机制分析

影响热失控蔓延特性的因素有很多,其中最关键的是电池热失控过程中的喷射产物直接冲击效应。实验结果表明,在75% SOC 以上条件下,热失控蔓延的主导机制并非传统认为的热传导过程,而是前一个电芯防爆阀开启后产生的高温喷射产物直接作用于相邻电芯表面,这种直接的高温物质冲击能够瞬间将相邻电池加热至热失控阈值温度,导

致第2个电芯几乎与第1个电芯同时进入热失控阶段,呈现出“瞬发式”蔓延特征而非渐进式传播。其次,电池本身的热失控特性对蔓延行为具有基础性影响,如电池热失控特征温度、能量释放速率、防爆阀开启压力等参数直接决定了喷射产物的温度、速度和作用范围。电池的散热条件以及电池之间的传热条件虽然在低 SOC 状态下起主导作用,但在高 SOC 蔓延过程中其影响相对次要,主要体现在对热失控后期温度衰减过程的调节作用。

为了揭示串联电池模组热失控蔓延过程中不同能量传递路径的占比,本文进一步对热失控发生前及蔓延过程的传热过程进行研究。以3个电池(B_1 、 B_2 和 B_3)的 SOC 都处于75%为例,从能量传递角度对电池组热失控蔓延过程中的传热特性进行研究,假设 B_1 电池负极面和 B_3 电池正极面处于绝热状态,电池向周围环境的散热方式主要为辐射和对流,向周围电池的传热主要为传导。以 B_2 电池为例, B_1 电池发生热失控后, B_2 电池在发生热失控前能量平衡关系为

$$Q_{B1 \rightarrow B2} + Q_{\text{gen}} = Q_{B2 \rightarrow B3} + Q_{\text{rad}} + Q_{\text{con}} + C_b m_b \Delta T \quad (1)$$

式中: $Q_{B1 \rightarrow B2}$ 为 B_1 电池传递给 B_2 电池的热量; Q_{gen} 为 B_2 电池内部副反应热; $Q_{B2 \rightarrow B3}$ 为 B_2 电池传递给 B_3 电池的热量; Q_{rad} 和 Q_{con} 分别为电池向环境中辐射和对流的热量; C_b 为电池的比热容; m_b 为电池质量; ΔT 为该时间段内电池温升。

图7为锂电池单体在 ARC 中进行热失控时电池温度随时间变化。从图中可以看出,电池在143.42 °C 时发生自放热反应,随后在252.65 °C 时发生热失控,由此可知 B_2 电池在热失控过程中的自产热量 Q_{gen} 为 5.0×10^3 J。由 B_3 电池的温升,可得在此过程中, B_2 传递给 B_3 电池的热量 $Q_{B2 \rightarrow B3}$ 为 8.6×10^3 J。

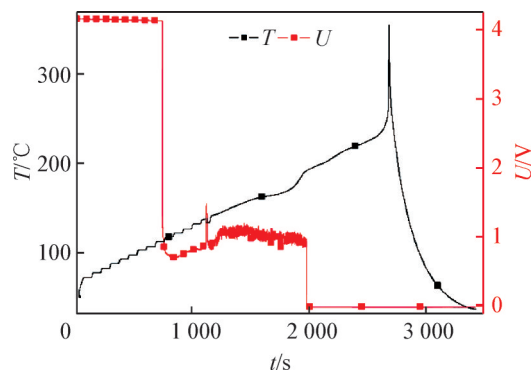


图7 单体电芯热失控时温度/电压变化
Fig. 7 Temperature and voltage variation during single-cell thermal runaway

电池 B_2 向周围环境对流热量 Q_{con} 和辐射热量 Q_{rad} 计算公式为

$$Q_{\text{con}} = \int_{t_1}^{t_2} hA(T - T_{\text{env}})dt \quad (2)$$

$$Q_{\text{rad}} = \int_{t_1}^{t_2} \varepsilon A \sigma (T^4 - T_{\text{env}}^4)dt \quad (3)$$

式中: h 为对流换热系数, 取值 $13 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$; A 为对流换热面积; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数; ε 为电池表面发射率, 当温度低于 200°C 时, 电池为 PVC 膜包裹, 取 $\varepsilon = 0.93$; 当高于 200°C 时, PVC 膜融化, 根据壳体材料取 $\varepsilon = 0.35$; 由此计算得到 $Q_{\text{con}} = 0.9 \times 10^3 \text{ J}$, $Q_{\text{rad}} = 0.55 \times 10^3 \text{ J}$ 。

整个过程中, 电池 B_2 温升所需的热量可由其温差计算, $C_b m_b \Delta T$ 为 $3.3 \times 10^4 \text{ J}$ 。结合 B_2 电池在该时段内散失的热量可计算出电池 B_2 在热失控发生前, 从 B_1 处获得的能量为 $3.8 \times 10^4 \text{ J}$ 。由此可见电池 B_2 发生热失控所需要的绝大部分热量来自电池 B_1 , 其主要传热形式不仅包括热传导, 还包括 B_1 电池喷射产物直接带来的能量。总体能量传递过程如图 8 所示, 其中, 电池 B_2 自身副反应产热仅占总接收能量的 11.6%。

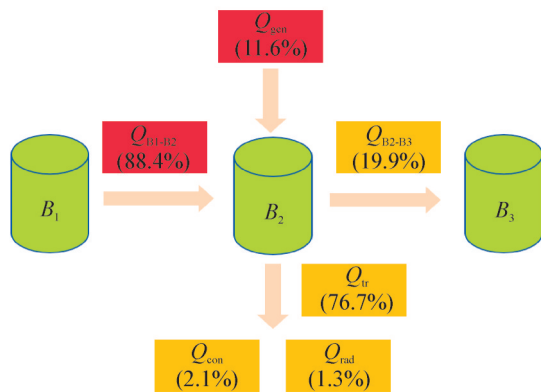


图8 热失控蔓延过程中热流分布
Fig. 8 Heat flow distribution during thermal runaway and propagation

综上所述, 驱动锂离子电池模组热失控蔓延的主要原因, 并非是以往普遍认为的电池单体之间进行热传导引发热失控蔓延, 而是由于单体电池热失控释放的高能喷射物对相邻电池的直接冲击。针对这一主要原因, 抑制电池热失控蔓延的方式应集中于构建一个多层级的防护体系: 1) 通过设置隔离屏障, 物理阻挡高温喷射产物直接冲击相邻电池, 比如在相邻电池之间安装耐高温防护隔板或偏转导流结构; 2) 优化电池防爆阀位置和开启方向, 避免电池热失控的高温喷射产物直接指向相邻电池; 3) 在关键区域增加局部防护组件, 用来阻断高温熔融集流体的定向喷射路径。并且传统的热阻隔和强化散热设计对于缓解环境热积聚和控制余热扩散仍有一定作用, 在失控演化的后期仍扮演着不可

或缺的辅助角色。

荷电状态作为影响电池热失控行为的重要参数, 不仅直接决定了热失控过程中的能量释放强度, 更关键的是控制了防爆阀内压力建立速度和喷射产物的温度、速度及冲击强度。高 SOC 状态下电池内部储能充足, 热失控反应更加剧烈, 导致防爆阀快速开启并产生高速、高温的喷射流, 这是造成 75% SOC 以上出现“瞬发式”热失控蔓延的根本原因。

4 结语

本文围绕着串联的 18650-NCM 三元锂离子电池模组, 开展了全荷电状态 (0%~100% SOC) 覆盖下的热失控蔓延情况研究。不同于以往单一维度的实验观察, 而是把实测获得的数据和能量平衡理论建模结合起来形成综合框架, 进一步去探究不同荷电状态的电池在热失控中蔓延特点, 并展现其背后的物理驱动机制。搭建了基于单点定向热诱发的测试平台, 通过多通道温度与电压的同步采集技术, 捕获电池在不同 SOC 条件下热失控蔓延的完整演化过程。

研究结果表明, 电池热失控蔓延存在明显的 SOC 临界阈值和截然不同的传播机制: 0% 和 25% SOC 条件下单节电池峰值温度仅为 185°C 和 300°C , 防爆阀未开启, 热失控无法蔓延至相邻电池; 50% SOC 状态下虽然峰值温度达 600°C 并伴随防爆阀开启, 但喷射产物温度和冲击强度不足以瞬间触发相邻电池热失控; 75% 和 100% SOC 条件下呈现出“瞬发式”热失控蔓延特征, 两节电池几乎同步达到峰值温度, 其根本原因是防爆阀开启后产生的高温喷射产物直接冲击相邻电池表面, 瞬间将其加热至热失控阈值温度。100% SOC 工况下的蔓延速度比 75% SOC 显著加快约 30%, 体现了更强的喷射冲击效应。实验观察到熔融电极材料从电池内部沿防爆阀定向喷射至相邻电池负极端的关键现象, 证实了喷射产物直接冲击是驱动高 SOC 状态下热失控蔓延的主要路径。

基于喷射产物直接冲击相邻电池导致的热失控蔓延机制, 今后电池安全设计首先要考虑在相邻电池之间设置物理隔离屏障, 优化防爆阀排气方向, 以便阻挡或偏转高温喷射产物的直接冲击路径。要寻找应对高温喷射产物的快速冷却措施, 以减小高温喷射产物的热冲击强度。未来研究可进一步探索防爆阀设计参数与喷射特性之间的联系, 给电池多元化排列配置下的安全防护给予改良策略。

参考文献

- [1] 雷博,吴越,史尤杰,等.液冷式锂电池储能系统高倍率调频应用研究[J].电力电容器与无功补偿,2024,45(3):159-166.
LEI Bo, WU Yue, SHI Youjie, et al. Research on liquid-cooling li-ion battery energy storage system in high frequency regulation application[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(3):159-166.
- [2] 赵光金,李晶晶,胡玉霞,等.锂离子电池储能电站安全风险及应对策略[J].电源技术,2024,48(12):2343-2349.
ZHAO Guangjin, LI Jingjing, HU Yuxia, et al. Safety risks and countermeasures of Lithium-ion battery energy storage power stations[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2024, 48(12):2343-2349.
- [3] 常春,王瑛琦,姜久春,等.基于主动方波激励检测锂离子电池早期短路[J].电池,2024,54(1):24-28.
CHANG Chun, WANG Yingqi, JIANG Jiuchun, et al. Detection of early internal short circuit of Li-ion battery based on active square wave excitation[J]. Dianchi (Battery Bimonthly), 2024, 54(1):24-28.
- [4] 李奕彤,许乐俊,孙均利,等.磷酸铁锂锂离子电池热滥用的热失控特性[J].电池,2025,(4):699-705.
LI Yitong, XU Lejun, SUN Junli, et al. Thermal runaway characteristics of Lithium iron phosphate Li-ion battery by thermal abuse [J]. Dianchi (Battery Bimonthly), 2025, (4):699-705.
- [5] 卢兵荣,陈莉,韩丽华,等.三电极软包装电池无析锂快充策略[J].电池,2024,54(3):344-347.
LU Bingrong, CHEN Li, HAN Lihua, et al. Non-lithium plating fast charging strategy for three electrode pouch battery[J]. Dianchi (Battery Bimonthly), 2024, 54(3):344-347.
- [6] 刘俊,郭华军,徐露露,等.电池包结构热仿真分析与优化设计[J].矿冶工程,2025,45(2):157-161.
LIU Jun, GUO Huajun, XU Lulu, et al. Thermal simulation analysis and optimal design of battery pack structure[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(2):157-161.
- [7] 马文斌,杨小钰,谢松.低温搁置对锂离子电池性能的影响[J].电池,2024,54(4):533-536.
MA Wenbin, YANG Xiaoyu, XIE Song. Effect of low-temperature storing on the performance of Li-ion battery[J]. Dianchi (Battery Bimonthly), 2024, 54(4):533-536.
- [8] 杨振印,康赛赛,何飞,等.隔膜对锂离子电池短路的影响[J].电池,2025,55(3):503-507.
YANG Zhengyin, KANG Saisai, HE Fei, et al. Effect of separator on the short circuit of Li-ion battery[J]. Dianchi (Battery Bimonthly), 2025, 55(3):503-507.
- [9] 李佩泓,张丽霞,冯武彤,等.锂离子电池失效机理综述[J].电力电容器与无功补偿,2025,46(2):153-159.
LI Peixuan, ZHANG Lixia, FENG Wutong, et al. Review on failure mechanism of Lithium-ion battery[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(2):153-159.
- [10] 阮爱国,史仰泽,王方钦,等.基于FFRLS-AIEKF的锂离子电池SOC估计[J].电池,2025,55(3):529-535.
RUAN Aiguo, SHI Yangze, WANG Fangqin, et al. SOC estimation of Li-ion battery parameters based on FFRLS-AIEKF[J]. Dianchi (Battery Bimonthly), 2025, 55(3):529-535.
- [11] KONG Depeng, LYU Hongpeng, PING Ping, et al. A review of early warning methods of thermal runaway of Lithium-ion batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 64:107073.
- [12] 金朝昆,冀杰,李晓晖.电动汽车锂离子电池状态检测方法的优化[J].电池,2025,55(3):542-547.
JIN Chaokun, JI Ji, LI Xiaohu. Optimization of state detection methods for Li-ion battery in electric vehicles[J]. Dianchi (Battery Bimonthly), 2025, 55(3):542-547.
- [13] DAI Yixin, PAN A H. Thermal runaway process in lithium-ion batteries: a review[J]. Next Energy, 2025, 6:100186.
- [14] SONG Laifeng, WANG Shuping, JIA Zhuangzhuang, et al. A comprehensive investigation of thermal runaway critical temperature and energy for Lithium iron phosphate batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 86:111162.
- [15] ZHAO J, XING K, JIANG X, et al. Thermal runaway critical threshold and gas release safety boundary of 18650 Li-ion battery in state of charge[J]. Processes, 2025, 13(7):2175-2180.
- [16] WANG Kuo, WU Dejian, CHANG Chongye, 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.
- [17] LI Zijian, ZHANG Peihong, SHANG Rongxue. Effects of heating position on the thermal runaway propagation of a Lithium-ion battery module in a battery enclosure[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 222:119830.
- [18] 刘承鑫,李梓衡,陈泽宇,等.储能锂离子电池高温诱发热失控特性研究[J].储能科学与技术,2024,13(7):2425-2431.
LIU Chengxin, LI Ziheng, CHEN Zeyu, et al. Characterization study on overheat-induced thermal runaway for Lithium-ion battery in energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(7):2425-2431.
- [19] MD SAID M S, MOHD TOHIR M Z. Characterisation of thermal runaway behaviour of cylindrical Lithium-ion battery

- using accelerating rate calorimeter and oven heating[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 28:101474.
- [20] CAI Qingsong, JI Qing, CHEN Xiaoping, et al. Comprehensive study of high-temperature calendar aging on cylindrical Li-ion battery[J]. Chemical Engineering Science, 2024, 298:120355.
- [21] FENG Xuning, OUYANG Minggao, LIU Xiang, et al. Thermal runaway mechanism of Lithium ion battery for electric vehicles: a review[J]. Energy Storage Materials, 2018, 10(2): 246-267.
- [22] 毛斌斌. 18650型三元锂离子电池热失控临界条件及火灾动力学研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2021.
- [23] 黄昊, 张磊, 张永丰. 基于高速摄影的三元锂离子电池着火机理研究[C]//2020中国消防协会科学技术年会. 2020.
- [24] 黄昊, 张磊, 张永丰, 等. 锂电池过热诱导失控及其抑制技术[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(8):1108-1111.
- HUANG Hao, ZHANG Lei, ZHANG Yongfeng, et al. Thermal runaway induced by overheating and its suppression technology of Lithium-ion batteries[J]. Fire Science and Technology, 2019, 38(8):1108-1111.
- [25] 张磊, 张永丰, 黄昊. LFP锂电池热失控特性及其爆炸危险性分析[C]//2017中国消防协会科学技术年会. 2017.
- [26] 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):1911.
- [27] JIN C, SUN Y, WANG H, et al. Heating power and heating energy effect on the thermal runaway propagation characteristics of Lithium-ion battery module: experiments and modeling[J]. Applied Energy, 2022, 312:118760.
- [28] LEE C, SAID A O, STOLIAROV S I. Passive mitigation of thermal runaway propagation in dense 18650 Lithium-ion cell assemblies[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2020, 167(9):090524.
- [29] LU Dong, CUI Naxin, ZHOU Jianwen, et al. Hybrid cooling system with phase change material and liquid micro-channels to prevent thermal runaway propagation within Lithium-ion battery packs[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 247:123118.
- [30] 高辉, 彭成薇, 李炜卓, 等. 电动汽车与充电设备充电安全预警研究综述[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(7):47-61.
- GAO Hui, PENG Chengwei, LI Weizhuo, et al. Review on early warning of charging safety for electric vehicles and charging equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7):47-61.
- [31] 刘同宇, 李师, 付卫东, 等. 大容量磷酸铁锂动力电池热失控预警策略研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(11): 120-126.
- LIU Tongyu, LI Shi, FU Weidong, et al. Study on early warning strategy of large LFP traction battery's thermal runaway[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(11): 120-126.
- [32] GHIJI M, NOVOZHILOV V, MOINUDDIN K, et al. A review of lithium-ion battery fire suppression[J]. Energies, 2020, 13(19):5117-5122.
- [33] JIN Y, ZHENG Z, WEI D, et al. Detection of micro-scale Li dendrite via H₂ gas capture for early safety warning[J]. Joule, 2020, 4(8):1714-1729.

作者简介:

徐瑞(1995—),女,工程师,长期从事新能源发电及接入技术工作。E-mail:2207383221@qq.com。

刘镭邦(1995—),男,助理工程师,从事可再生能源发电与并网技术研究工作。E-mail:2449932001@qq.com。

陈柏旭(1992—),男,工程师,从事水电及新能源场站的涉网研究工作。E-mail:2673916018@qq.com。

董晓阳(1995—),男,工程师,从事新能源涉网能力评估和并网检测工作。E-mail:119242531@qq.com。

罗利(1989—),女,高级工程师,从事电网降损节能工作。E-mail:178313848@qq.com。

王娅君(1989—),女,工程师,从事新能源检测技术工作。E-mail:239216801@qq.com。