http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0559

锂离子电池模组电热耦合灾变机制研究进展

贺元骅，梁家鑫，李子桐，黄江*

(中国民用航空飞行学院 民机火灾科学与安全工程四川省重点实验室，广汉 618307)

摘 要：锂离子电池的热灾害问题一直是其应用过程中重大安全威胁之一。锂离子电池系统热灾害存在界面热稳定性衰退、单体电池内短路热失控、模组乃至系统热扩散的灾变逻辑过程。电与热交互的耦合灾变则既是表征锂离子电池系统热灾害逻辑的重要维度，又是治理锂离子电池系统热灾害的关键突破口。针对锂离子电池系统长周期、多尺度下的电热耦合灾变问题，归纳总结了单体电池固体电解质界面(SEI)膜分解阶段、隔膜融化阶段，以及模组热扩散阶段蕴含的自产热、焦耳热及热传导等热行为对电行为的作用机制，梳理了过充、过放及老化等电行为在上述阶段的产热及传热行为，概括了单体及模组最具代表性的电-热耦合模型。从微观与宏观多角度探索电热行为的联动机制，并对未来锂离子电池模组电热耦合领域进行了展望，旨在为锂离子电池模组的设计与运维提供参考。

关 键 词：锂离子电池；电热耦合；SEI膜分解；隔膜熔化；热扩散
中图分类号：TM912; V242.2
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)10-3408-18

锂离子电池作为先进能源代表[1]，其使用仍存在较大的热灾害风险。各滥用条件下，锂离子电池极易发生一系列连锁放热反应，继而形成热失控，最终酿致锂离子电池模组热扩散[2]。2011—2023年，全球共发生700多起电动汽车起火事件及75起储能电站失火事件，在各应用领域中，运行状态占事故发生总状态的75%以上[3]。从锂离子电池模组热灾害发生发展过程来看，其有一个由单体电池固体电解质界面(solid electrolyte interphase, SEI)膜分解自产热[4]，到单体电池隔膜熔化内短路[5]，再到模组热扩散[6]的3个恶化过程，且每个阶段都有伴随的热行为和电行为。因此，国际国内锂离子电池系统安全标准也从热行为和电行为2个方面推进锂离子电池模组热灾害的治理，联合国《Global technical regulation on the electric vehicle safety》[7]、中国《电动汽车用动力蓄电池安全要求》[8]、《电力储能用锂离子电池》[9]等从温升、电压等维度界定动力、储能领域电池和系统的安全性。学者们从其每个阶段诸多电热耦合特征进行分析，以揭示锂离子电池模组灾变生成演化机制。本文拟依据锂离子电池模组各阶段电热参数动态变化特征，分析其电热灾变的作用机制及转化机理，归纳总结迄今单体及模组多尺度下所采用的电-热耦合模型，以厘清锂离子电池模组电热耦合灾变机制研究发展趋势。

1 SEI膜分解阶段电热耦合

锂离子电池模组热灾害发端于单体电池热滥用、电滥用和机械滥用[10]，最早的灾变标志为SEI膜分解自产热[11]，进而显著地影响到单体电池的电行为，一定程度上表现为电热耦合的变动情形[12]。受热滥用的锂离子电池自产热形成多路热源的叠

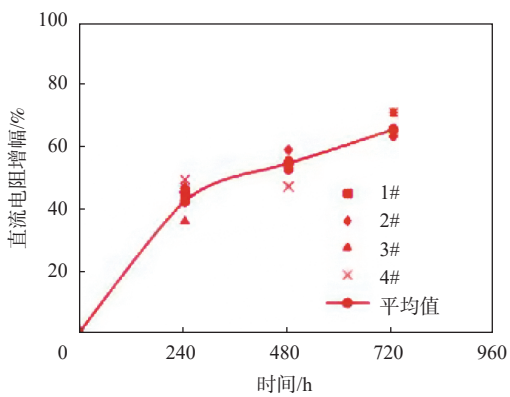
收稿日期：2024-07-26；**录用日期**：2024-08-30；**网络出版时间**：2024-09-24 12:31
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240924.1014.001
基金项目：国家自然科学基金(U2333210)；中央高校基本科研业务费专项资金(24CAFUC10161,24CAFUC03076)
* **通信作者**. E-mail：jianghuangscu@163.com

引用格式：贺元骅，梁家鑫，李子桐，等. 锂离子电池模组电热耦合灾变机制研究进展[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(10)：3408-3425. He Y H，Liang J X，Li Z T，et al. Progress in the investigation of electro-thermal coupled catastrophic mechanisms in lithium-ion battery modules[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(10)：3408-3425 (in Chinese).

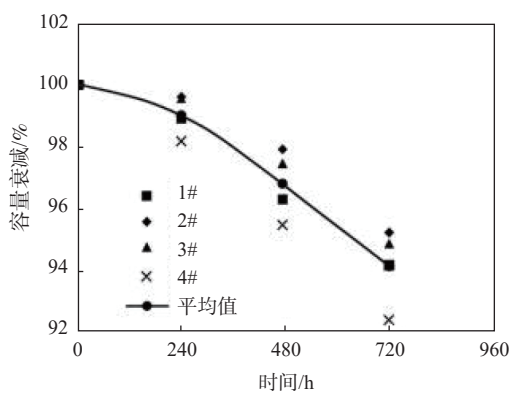
加, 进而引发电行为的恶化。而电池电行为的恶化, 又会加剧热行为的恶化。学者们聚焦于锂离子电池滥用热及自产热与电阻、电压等电行为, 以及过放、过充温升及多充放电倍率产热占比等主题, 系统地研究了其热行为和电行为的关系。

1.1　滥用热及自产热阶段电行为

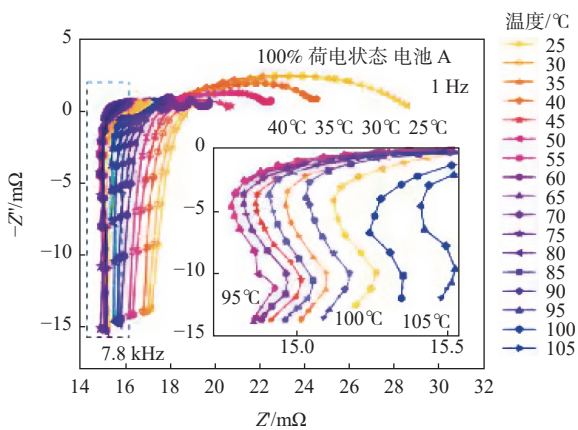
滥用热及锂离子电池的自产热会改变电池内部材料特性, 进而影响电行为, 最终造成电行为的时序性异常。Wang 等[13] 研究三元电池高温存储时长与电性能衰减的关系, 发现在 80 ℃ 环境存储 240 h、720 h 会引发石墨负极材料从铜箔上脱落, 导致电阻显著增加、正极晶格结构受损、容量大幅衰减, 如图 1(a)所示, 直流电阻分别提高 42.1%、65.6%, 如图 1(b)所示, 容量损失 0.9%、5.8%。Sun 等[14] 研究 70 ℃ 高温环境下电阻的降解机理, 指出电解液渗入负极产生的晶间裂纹使 SEI 膜厚度增加、面积扩大, 导致电阻 R_{SEI} 骤增。Ding 等[15] 结合应力-应变曲线、晶体结构表征及形貌观察等手段分析高温下电阻微观变化, 发现 90 ℃ 时隔膜大量孔隙关闭且随温度升高隔膜出现软化现象, 进而揭示高温可直接作用于隔膜使锂离子电池内阻增加及电流均一性恶化。Mendoza-Hernandez 等[16] 研究自产热阶段不同荷电状态(state of charge, SOC)下钴酸锂电池直流电阻的变化幅值, 由于自产热导致隔膜出现闭孔, 阻碍锂离子的扩散与脱嵌, 在 135 ℃ 时, 各 SOC 下的直流电阻均提高 1 000 倍左右。Li 等[17] 监测不同 SOC 三元电池滥用热造成的交流阻抗波动情况, 发现 100% SOC、50% SOC 三元电池在 25～90 ℃ 期间, 随温度增高电池界面阻抗降低导致电化学阻抗降低, 电化学阻抗呈下降趋势, 如图 1(c)所示, 图中, $-Z''$为阻抗虚部, Z'为阻抗实部。在 90 ～105 ℃ 时, 随温度进一步升高隔膜出现闭孔、电解液发生汽化, 进而导致电化学阻抗升高, 电化学阻抗呈上升趋势, 如图 1(d)所示。可见, 受滥用热和自产热影响, 三元电池电阻呈现先减小后上升的趋势。



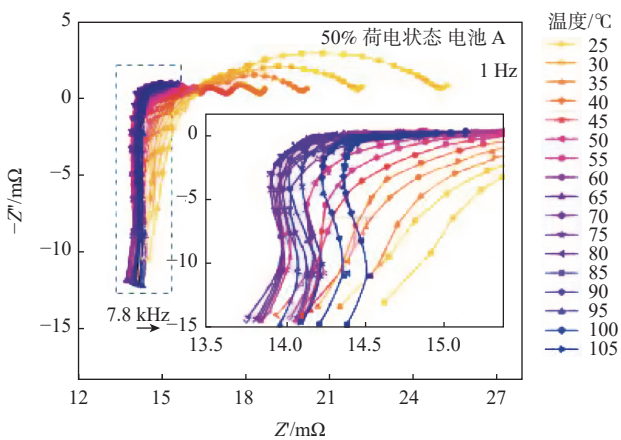
(a) 高温存储时长与电阻增幅关系曲线[13]



(b) 高温存储时长与容量衰减关系曲线[13]



(c) 100% SOC 各温度梯度下 Nyquist 曲线[17]



(d) 50% SOC 各温度梯度下 Nyquist 曲线[17]

图 1　滥用热及自产热阶段电行为变化

Fig. 1　Changes in electrical behavior during heat abuse and self-generated heat stages

学者研究发现, 滥用热及锂离子电池自产热与电压之间呈负相关。Liu 等[18] 研究了三元电池在绝热环境中温度对电压的阶段性影响, 发现因温升导致正极结构发生微观变化进而引发电压出现较小波动, 温度从 25 ℃ 升至 76.3 ℃, 电压未下降, 温度升至 137.4 ℃ 时, 电压下降 4.8% 左右, 温度升至

149.9 ℃时，电压下降10%左右。Li等[19]探究多低气压梯度下温升对电压的影响，也发现温升导致SEI分解与重塑进而诱发电压波动。Zhou等[20]分别研究滥用热及自产热作用下电压的波动幅度，滥用热导致电压下降11%，自产热导致电压下降16%，因自产热导致的锂离子活性物质减少是造成电压大幅下降的主要因素。Gao等[21]分别采用单侧加热与双侧加热的方式量化研究电压的陡降幅度，锂离子电池单侧加热因热失控周期较长不能快速引发内部热扩散，电压下降28%后出现回弹现象。而双侧加热因热失控周期缩短，电压无明显变动。Zhu等[22]研究热滥用对磷酸铁锂电池电压的影响，当温度从19.2 ℃升至75.1 ℃时，电压未发生改变。而当温度从75.1 ℃升至122.6 ℃时，因高温导致电池内阻减小、电压微幅上升，电压增长0.6%。Qi等[23]研究了绝热环境下三元电池电压的变化规律，发现锂离子电池自产热导致隔膜出现轻度熔化，造成电极层间压力不均，电压由4.051 V瞬时下降2.551 V后，再迅速恢复并维持3.972 V，直至隔膜熔化大面积短路电压骤降为0 V。可见，滥用热及锂离子电池自产热初期对锂离子电池电压影响不明显，但总体呈下降趋势。

1.2 过充、过放及充放电倍率产热行为

过充、过放是极端的电行为，耦合锂离子电池电量、电压会产生异常的热行为。过充则是通过诱发电解液发生氧化反应，导致电池表面温度开始缓慢上升[24]。随着过充程度加深，SEI膜将逐渐增厚，正极也因异常脱锂导致结构坍塌，进而加剧电池内部副反应产热[25]。同时，Ji等[26]还指出相较于小倍率过充，大倍率过充存在较大的极化现象，可诱发大量极化热，提升热失控孕育阶段风险指数。过放的产热机制与过充不同，过放可使SEI膜发生分解，进而逐步恶化电池内部的产热行为[27]。在深度过放作用下，正极表面铜沉积增厚导致离子扩散阻抗增大，进一步提高电池内部的产热速率，且产热速率与过放深度呈正相关[28]。此外，锂离子电池在充放电过程中伴随着可逆热、欧姆热和极化热，且随放电倍率增大产热加剧[29]。为定量评估各类电行为在锂离子电池产热层面的作用强度，表1总结了近几年在过充、过放及充放电倍率产热行为的研究进展。

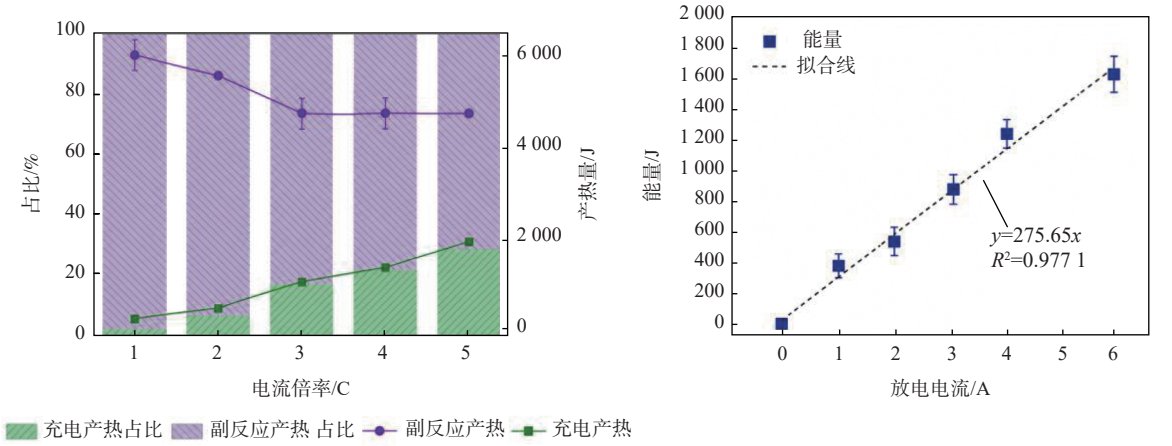
表1 过充、过放及充放电倍率产热行为的研究情况

Table 1 Research on thermal behavior of overcharging, overdischarging and charge/discharge rates

文献	型号	电行为	充放电倍率/C	截止电压/容量/V	温升/℃
Wang等[30]	NCM523	过充	0.5	5.292	19.80
Liu等[31]	$LiMn_2O_4$	过充	0.5	5.184	17.92
Zhang等[32]	LFP	过充	0.5	5.218	18.15
Ouyang等[28]	$LiCoO_2$	过放	1.0	0.200	9.30
Ouyang等[33]	NCM523	过放	1.0	0.200	6.70
Wang等[34]	NCM523	放电	0.5	2.750	3.30
Liu等[35]	$LiCoO_2$	放电	1.0	4.450	16.50
Panchal等[36]	LFP	放电	3.0	2.000	16.80
Dong等[37]	NCM523	充电	3.0	4.200	15.00

通过对比表1中各类电行为的产热数据，发现过充对锂离子电池温升的影响最为显著，其次是大倍率充放电，而过放对温升的影响相对较小，其主要是由于过充在破坏电池内部材料结构的同时，还可长时间积聚热量，大倍率充放电则可加剧欧姆热及极化热。此外，相较于单一充放电的产热行为，锂离子电池在热滥用与充放电耦合作用下，因其隔膜会在高温环境下出现闭孔现象，进而阻碍离子的迁移，加剧充放电时的产热[38]。为此，Hu等[39-40]分别量化研究热滥用耦合放电倍率的产热量及热滥用耦合充电倍率的产热量，发现放电倍率为7 C时，因欧姆热呈指数型上升，电化热占整个热失控总热量的40%。充电倍率为5 C时，因可诱发较大的极化热，电化热占比为28.1%，结果如图2(a)所示。Li等[41]还研究了18650电池在热滥用与放电电流耦合作用下的产热特征，发现当放电倍率为6 A时，电池产热1.6 kJ，池体表面温度提升34 ℃，结果如图2(b)所示。

综上所述，电能与热能的耦合灾变是锂离子电池热失控前的重要表征。滥用热及自产热诱发SEI膜的分解与重塑、负极产气正极释氧及电解液的分解等连锁放热反应，进而导致电压在一定范围内波动，电阻先减小后增大，单体电池容量损失及系统电气失衡等现象；而过充、过放及充放电倍率的变化，会恶化离子的迁移速度和电池内部电化学反应的强度，锂离子电池会伴随可逆热和极化热的大幅增加，进而加剧滥用热和自产热锂离子电池的产热行为。



(a) 各充电倍率在自产热阶段产热占比[40]　　(b) 各放电电流在自产热阶段产热量[41]

图 2　热滥用与充放电倍率耦合作用下的电化热占比

Fig. 2　Electrochemical heat share for thermal abuse coupled with charge/discharge multiplicity

2　隔膜熔化阶段电热耦合

锂离子电池模组中单体电池自产热恶化趋势若未得到有效缓解, 必然会引发电池内部结构进一步衰变, 进而引发一系列更剧烈的放热反应, 最终导致电池热失控[42]。学者们聚焦锂离子电池焦耳热及氧化还原反应热与内短路电行为、过热部位电行为, 以及动态过充与产热[43]、静态过充与产热[44]、静态过放与产热[45] 及内短路的焦耳热等主题, 较深入地研究了热行为与电行为的关系。

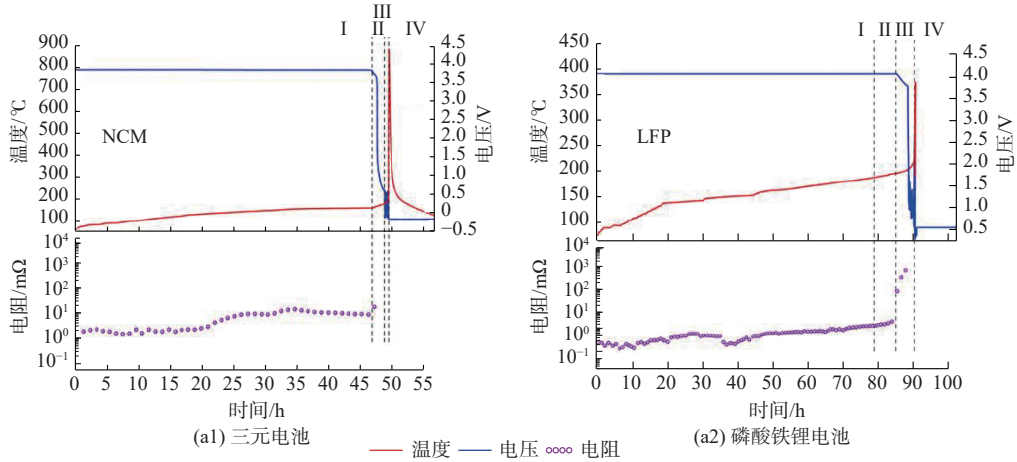
2.1　焦耳热及氧化还原热阶段电行为

锂离子电池内短路及热失控时伴随焦耳热及正负极氧化还原热, 上述 2 种热量会导致锂离子电池电行为呈现巨大变化, Ren 等[46] 量化研究了三元电池焦耳热产生后电行为的变动幅度, 发现因隔膜熔化导致正负极短接进而产生大量焦耳热, 电压瞬态陡降为 0 V、电阻增大了 700 倍。Tang 等[47] 分析了三元电池热失控时电性能的变化, 发现由于高温破坏隔膜微孔降低锂离子的传输速率, 进而导致电池内阻急剧增加。当锂离子电池温度升至 215.24 ℃时, 电池内部发生短路, 电压骤降为 0 V, 且电阻增大了 850 倍。Yang 等[48] 研究绝热环境下磷酸铁锂电池焦耳热对电阻的异常影响, 内短路导致正负极短接诱发焦耳热, 致使电阻瞬时增大 1 000 倍左右。

Tang 等[49] 利用液氮急冻热失控的磷酸铁锂电池, 拆解电池内部材料, 通过扫描电镜表征, 指出热失控时刻隔膜熔化与正极发生黏结, 电解液燃烧消耗造成电阻骤增。Zheng 等[50] 对比三元与磷酸铁锂电池热失控时电行为的异常变动如图 3(a)所示, 发现三元电池温度升至 173.4 ℃、磷酸铁锂电池温度升至 212.2 ℃时, 电压骤降为 0 V, 三元电池电阻增至 1.3 Ω, 磷酸铁锂电池电阻增至 1.2 Ω。其差异的原因在于三元电池高温导致内部化学反应剧烈, 并有大量氧气释放, 隔膜出现熔化, 低沸点溶剂蒸发, 更易诱发热失控。Huang 等[51] 研究锂离子电池受热部位差异与电行为的关系, 发现底部、侧面受热时, 其电压下降时刻与热失控触发时刻同步。电池大面受热时, 压降时刻晚于热失控触发时刻。这是因为大面受热沿厚度方向存在较大的温度梯度, 发生短路的电芯数量有限, 延缓电压的瞬时下降。此外, Liu 等[52] 研究使用聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)/陶瓷隔膜的三元电池热失控、内短路时刻温度与电行为的关系, 量化分析了 2 个时刻对应的电压、电阻的变动幅值, 表征了 PET/陶瓷隔膜电池在各温度梯度对电性能的作用机制, 发现当温度升至 231 ℃时, 电池虽发生热失控但未发生内短路, 此时电阻增长 4.3 倍、电压维持在 2 V 以上。当温度升至 700 ℃时, 电池发生内短路, 此时电压骤降至 0 V, 电阻增长 106.6 倍, 如图 3(b)所示。因为 PET/陶瓷隔膜耐热性能优异, 热失控时 231 ℃的高温仅使此隔膜出现微弱收缩, 电压电阻变动较小。当温度升至 450 ℃, PET/陶瓷降解隔膜大面积塌缩, 电性能受损严重, 如图 3(c)所示。

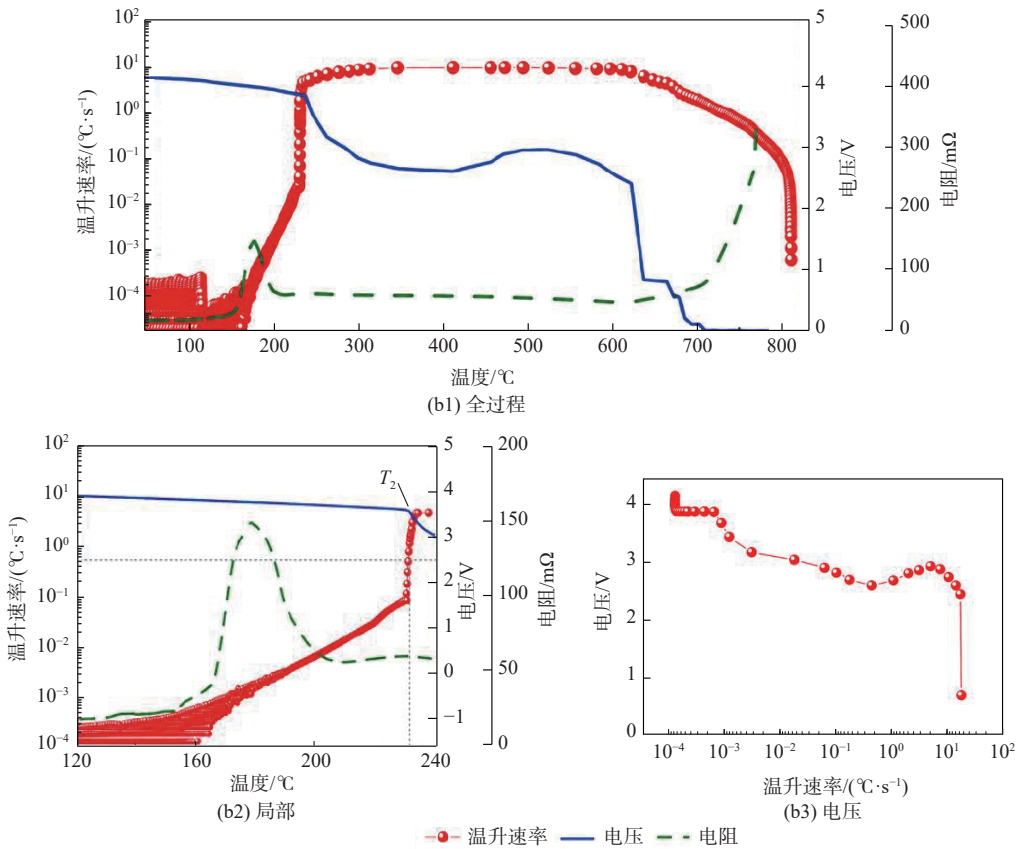
2.2　过充、过放及内短路产热行为

过充、过放电行为破坏正负极结构, 加快正极分解及正负极氧化还原反应, 进而影响热失控触发温度与峰值温度。Mao 等[53] 量化研究静态过充下正负极产热占比, 过充至 120% SOC 时, 大部分热量来自正极, 因为过充导致正极晶体结构发生改变。过充至 140% SOC 时, 大部分热量来自负极, 因为过充导致负极表面锂沉积与电解质反应。同时, Mao 等[54] 还研究了不同倍率下动态过充对三元电池热失控温度的影响, 如图 4(a)所示, 发现当充



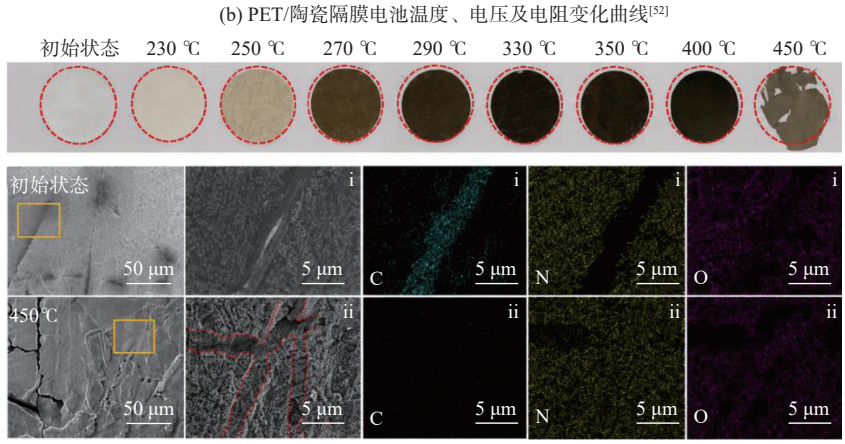
(a1) 三元电池 (a2) 磷酸铁锂电池

(a) 三元电池、磷酸铁锂电池的电压及电阻变化曲线[50]



(b1) 全过程 (b2) 局部 (b3) 电压

(b) PET/陶瓷隔膜电池温度、电压及电阻变化曲线[52]



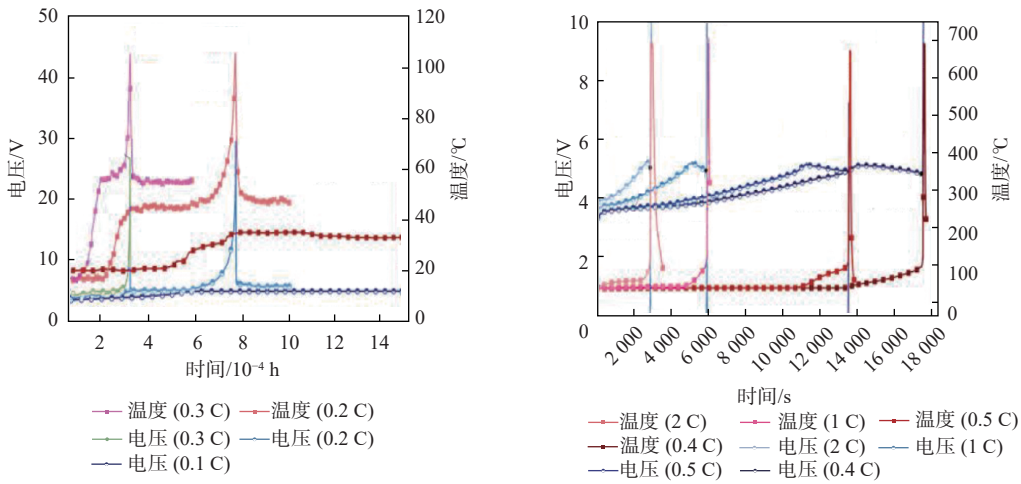
(c) PET/陶瓷隔膜各温度梯度下形貌表征[52]

图 3 焦耳热及氧化还原热阶段电行为变化

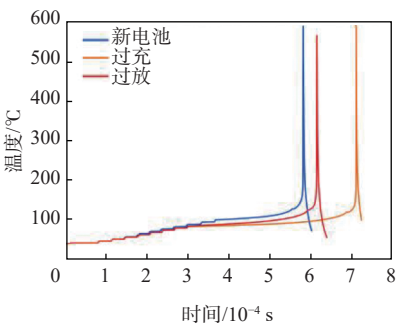
Fig. 3 Changes in electrical behavior during the Joule heat and redox heat stages

电倍率＜0.3 C 时, 电池温度最高升至 115.5 ℃, 未触发热失控。当充电倍率＞0.3 C 时, 由于大倍率充电引入大量可逆热, 进而提高电池温升速率, 触发热失控。Zhang 等[55] 对比静态过充电池和新电池的温升变化, 如图 4(b)所示, 相较于新电池, 轻微过充电池热失控触发温度降低了 1.6 ℃, 峰值温度提高了 1.7 ℃, 最大温升速率下降了 229 ℃/s, 指出轻微过充可加剧负极表面锂沉积现象, 进而加速副反应进程, 如图 4(c)所示。过放亦可破坏电池内部形貌结构, 进而作用于热失控阶段, Li 等[56] 研究过放程度对三元电池温升的影响, 发现过放至 1.5 V 比过放至 0.5 V, 热失控触发温度高出 1.4 ℃, 即深度过放更易触发热失控, 因为深度过放导致正极表面出现铜沉积现象, 如图 4(c)所示, 引发更多副反应, 从而降低结构稳定性。

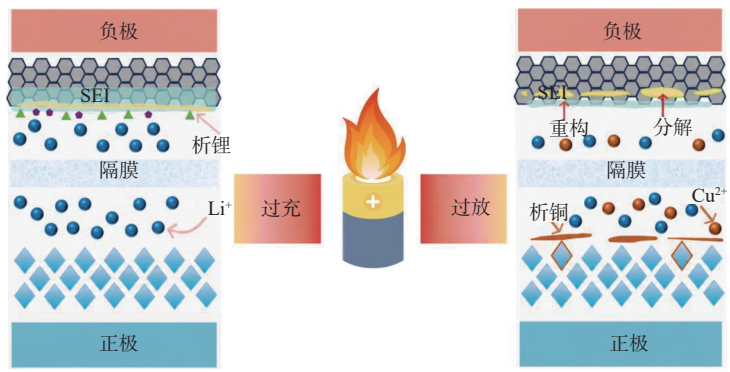
锂离子电池内短路所产生的焦耳热可直接诱发电解液与正负极、正极与负极间无障碍的放热反应, Liu 等[57] 研究由形状记忆合金触发三元电池各层级间内短路所引发的焦耳热大小, 如图 4(d)所示, 因短路热量主要为焦耳热及欧姆热, 发现在铝



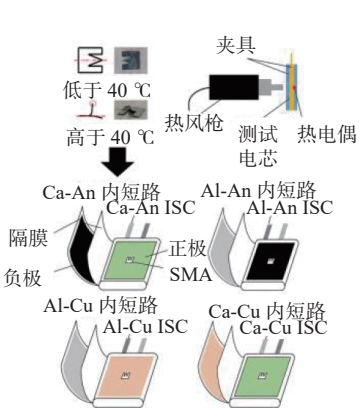
(a) 不同倍率过充下的温升曲线[54]



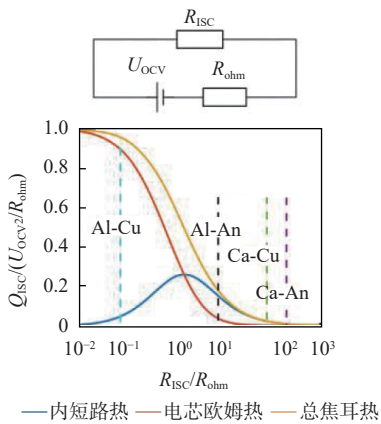
(b) 静态过充电池和新电池的温升曲线[55]



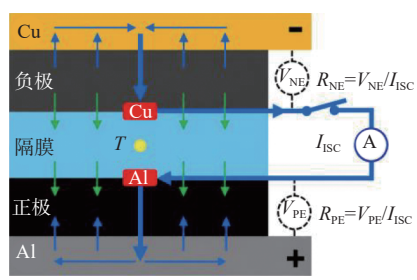
(c) 过充、过放电池内部界面反应



(d) 诱发内短路原理示意图[57]



(e) 各层级间焦耳热与欧姆热的比值[57]



(f) 基于外电路测量短路电流原理示意图[58]

图 4　过充、过放及内短路的产热行为及机理

Fig. 4　Heat generation behavior and mechanism of overcharge, overdischarge and internal short circuit

集流体和负极之间短路，该点短路电阻与欧姆电阻近似，焦耳热达到峰值，结果图4(e)所示，再因短路时良好的导电性及恶劣的导热性导致层级间焦耳热恶化，焦耳热比欧姆热更易堆积热量。同时，Long等[58]在正负极间插入铝铜垫片与外部电流构成回路，如图4(f)所示，原位测量三元电池铝集流体和负极间内短路电流及焦耳热功率大小，发现内短路电流瞬时升至70 A，且焦耳热功率为160 W。Ma等[59]基于短路电气模型分析各阶段焦耳热的成因及范围，发现当短路电阻＜初始电阻，初始电阻产生的欧姆热致电池表面温度均匀上升。当短路电阻=初始电阻，内短路处温度达到1 165 K峰值。当短路电阻＞初始电阻，短路电阻产生的焦耳热致使电池表面温度局部上升。Xin等[60]分别研究磷酸铁锂电池及三元电池焦耳热与热失控的关系，发现三元电池的焦耳热可骤升电池整体温度，随即触发热失控。磷酸铁锂电池的焦耳热只能提升短路处的温度不会立即引发热失控。

综上所述，热量主要作用于隔膜，进而触发一系列热灾害末端的放热反应，导致热失控阶段电压骤降为0 V，电阻骤升700～1 000倍。同时，电性能尽失伴随内部焦耳热的产生，且该热量与短路面积及电池容量呈正相关；过充将导致负极表面出现锂沉积，而过放将导致正极表面出现铜沉积，两者在一定程度上均可破坏正负极及隔膜结构的稳定性，直观表现为热失控触发温度降低，但两者在活性物质的增减层面存在差异，进而导致热失控峰值温度相差较大。当内短路触发位置位于铝集流体-负极层间且短路电阻等于初始电阻时，所产生的焦耳热最具威胁。

3 模组热扩散阶段电热耦合

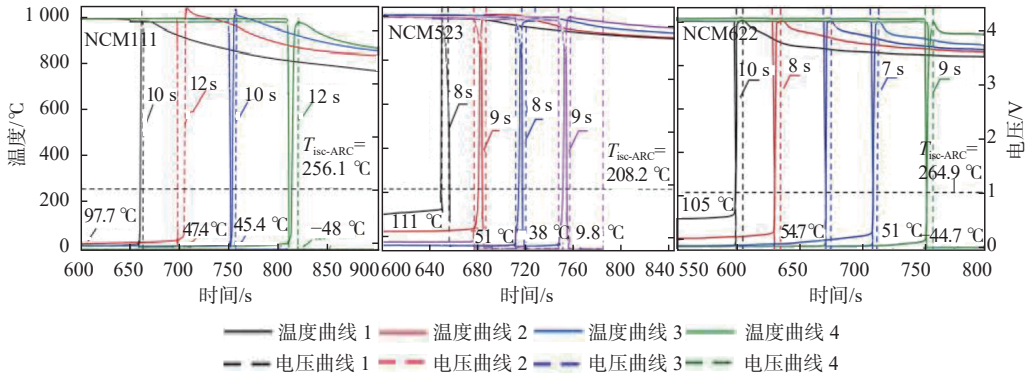
锂离子电池模组中单体电池发生热失控，所产热量若未有效处置，将引发相邻电池进入热失控状态，进而造成模组热扩散现象[61]。锂离子电池模组在工程应用中，通常以串联、并联及串并联的方式组成[62]，瞬时高温致使整个模组电性能受损。学者们聚焦于热扩散阶段各类模组电压、过热短路电流、老化梯度传热、动态过充传热及短路电流转化热等主题，从时间序列和空间尺度研究了其热行为与电行为的关系。

3.1 热扩散阶段的电行为

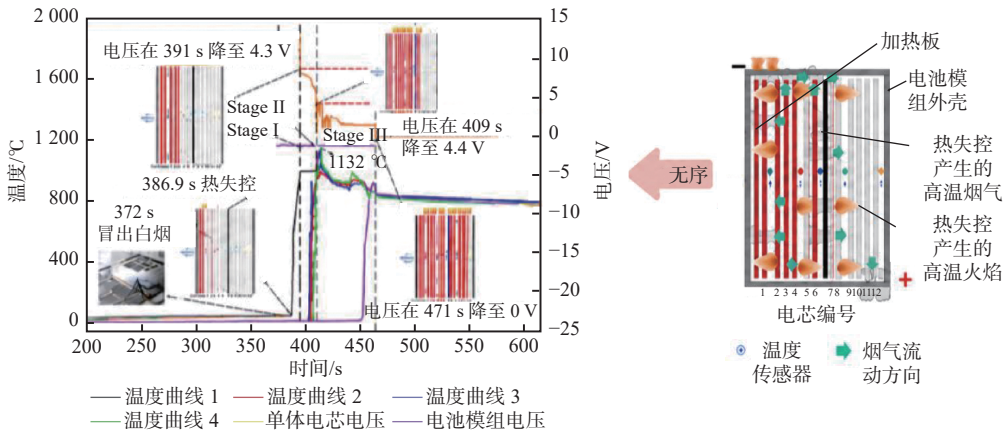
模组热扩散对电行为的影响极为显著，Wang等[63]对比研究NCM523、NCM622、NCM111这3类模组发生热扩散时内短路与热失控触发的时间间隔(t_{int1}～t_{int4})，T_{isc1}～T_{isc4}分别为其内短路温度，如图5(a)所示，发现电池正极镍含量越高，材料活性越高，正极极易分解产氧迫使隔膜熔化，同时，加剧正负极氧化还原反应的进程，致使NCM622模组和NCM523模组内短路与热失控触发的时间间隔比NCM111模组内短路与热失控触发的时间间隔缩短了3 s左右。Li等[64]将4并3串的三元电池模组发生热扩散时压降划分为3个阶段(StageⅠ～StageⅢ)，分析模组热扩散后期热量积聚引发射流火，导致扩散呈无序性，进而延长压降所需的时间，如图5(b)所示，第2阶段和第3阶段压降所需时间分别为18 s和64 s，远大于第1阶段压降所需时间。Schöberl等[65]研究未进行电连接的磷酸铁锂模组热扩散时各单体电池电压的波幅，如图5(c)所示，发现所有电池电压波幅一致，并将单体电池电性能受损过程划分为3个阶段。由于大容量磷酸铁锂电池内部由2个电芯并联而成，第1个电芯热失控时，电池内部产生较大的短路电流，导致电压由3.65 V下降至3 V。第1个电芯热失控后，电阻升高了0.1～2 Ω，内部短路电流减小，电压由3 V恢复至3.65 V。第2个电芯热失控时，电池电性能完全受损电压骤降至0 V。Li等[66]研究6串1并的NCM622模组热扩散时模组整体的压降趋势，随着热扩散的有序进行，模组共出现5个压降台阶。前4个台阶的压降幅度均为4.2 V左右，第5个台阶的压降幅度在8.3 V左右。串联模组由于存在相邻电池热传导、火焰热辐射等多种传热路径，其热扩散后期热量急剧陡升，因此，第5个台阶出现第5、6电池同时短路，不同于第1～4个电池次第短路现象。此外，Liu等[67]量化研究6并的NCM111模组热扩散时内部短路电流的大小，发现并联模组热扩散时存在环流现象，引发未热失控电池瞬时放电，已短路电池瞬时充电，模组内最大的短路电流为25.7 A，且短路电池的瞬时充电容量为11 mAh，进而得出短路电流大小与未热失控电池的数量及容量呈正相关的结论。为控制模组热扩散的作用范围，通常会在模组内设计主动隔热以阻断热失控传播，Zhou等[68]对比了有无气凝胶阻隔下4并的磷酸铁锂模组热扩散时的压降幅度，如图5(d)所示，发现无气凝胶阻隔下，模组内4块电池均触发热失控，且模组电压骤降为0 V。加入气凝胶阻隔后，仅靠近热源的电池触发热失控，因其他电池未受到损伤，且模组内短路电流持续时间也较短，最终导致模组电压可维持在3.33 V。

3.2 老化、过充及内短路传热行为

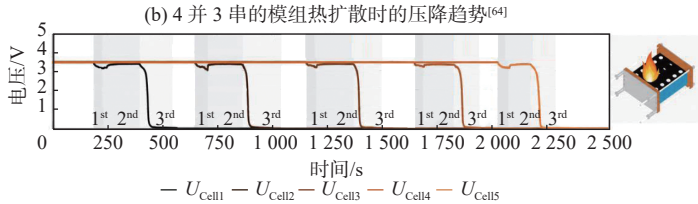
锂离子电池模组过度老化及过充，一定程度上加剧热扩散行为。Zhao等[69]量化不同老化程度下三元串联模组、并联模组及串并联模组电池间的平



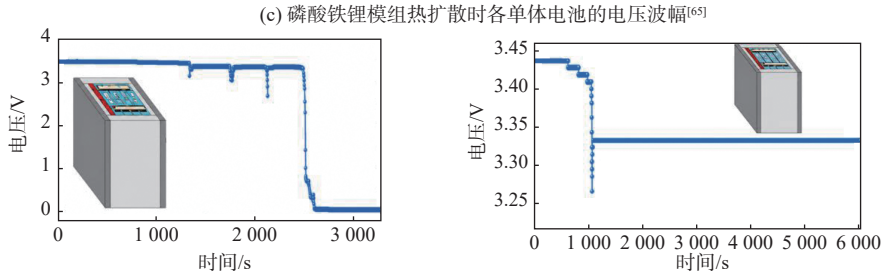
(a) NCM111、NCM523、NCM622模组内短路时刻与热失控触发时刻的时间间隔[63]



(b) 4 并 3 串的模组热扩散时的压降趋势[64]



(c) 磷酸铁锂模组热扩散时各单体电池的电压波幅[65]



(d1) 无气凝胶　　(d2) 有气凝胶

(d) 有无气凝胶阻隔的并联模组热扩散时的电压波幅[68]

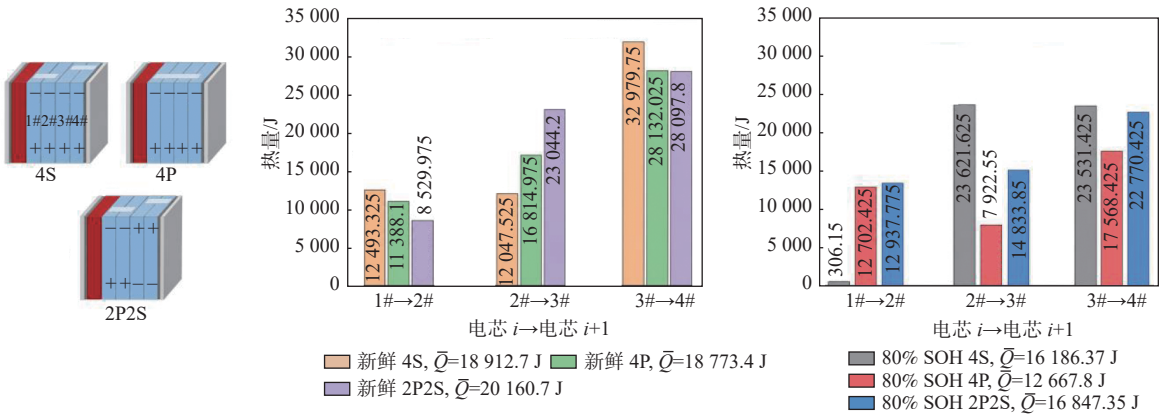
图 5　模组热扩散阶段电压变化

Fig. 5　Voltage change during the thermal runaway propagation

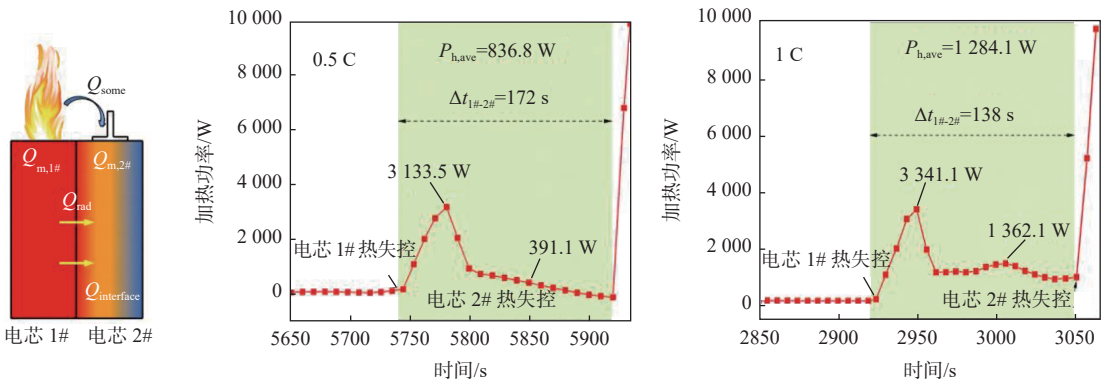
均传热, 因为老化过程所形成的锂枝晶影响电池内部结构的稳定性, 导致热失控孕育阶段温升显著, 致使触发热失控所需的能量减少, 结果如图 6(a)所示, 发现 100% 健康状态(state of health, SOH)的串联模组, 电池间热量传递的平均值为 18 912.7 J, 100% SOH 的并联模组, 电池间热量传递的平均值为 18 773.4 J, 100% SOH 的串并联模组, 电池间热量传递的平均值为 20 160.7 J。而 80% SOH 的串联模组, 电池间热量传递的平均值为 16 186.37 J, 80% SOH 的并联模组, 电池间热量传递的平均值为 12 667.8 J, 80% SOH 的串并联模组, 电池间热量传递的平均值为 16 847.35 J。同时, Han 等[70] 也量化不同老化程度下未进行电连接的三元模组电池间的平均传热, 发现 90% SOH 的模组比 100% SOH 的模组电池间热量传递的平均值提高 2 106 J, 指出老化程度是威胁模组安全性的重要因素。对比以上两位学者的研究结果, Zhao 等[69] 发现电池间热量传递的平均值与老化程度呈负相关, 而 Han 等[70] 发现电池间热量传递的平均值与老化程度呈正相关, 其主要原因是 Zhao 等[69] 所研究的对象为串并联模

组，热扩散时存在多条传热路径及短路产热，进而缩短热扩散时长，并减少电池间热量传递的功率。Huang等[71]量化研究未进行电连接的三元模组在不同倍率下过充电池间的热扩散功率，因为大倍率过充加剧正负极氧化还原反应，导致热失控峰值温度骤升，模组温均性恶化，如图6(b)所示，0.5 C过充时平均热扩散功率为836.8 W，热扩散时长为172 s，1 C过充时平均热扩散功率为1 284.1 W，热扩散时长为138 s。此外，Liu等[72]量化研究4并的磷酸铁锂模组中短路所引发的电化热大小，由于模组内的瞬时短路电流可迅速转化为焦耳热，模组内部的电化热功率维持在600～900 W。Zhou等[73]量化研究并联模组内短路时焦耳热的大小，发现单体电池短路时，焦耳热的介入可加剧负极与电解质反应及正负极氧化还原反应，并提高电池内部热量的扩散速率如图6(c)所示，当焦耳热为29.5 kJ时，短路电池极耳附近处的温度可提高50 ℃以上。

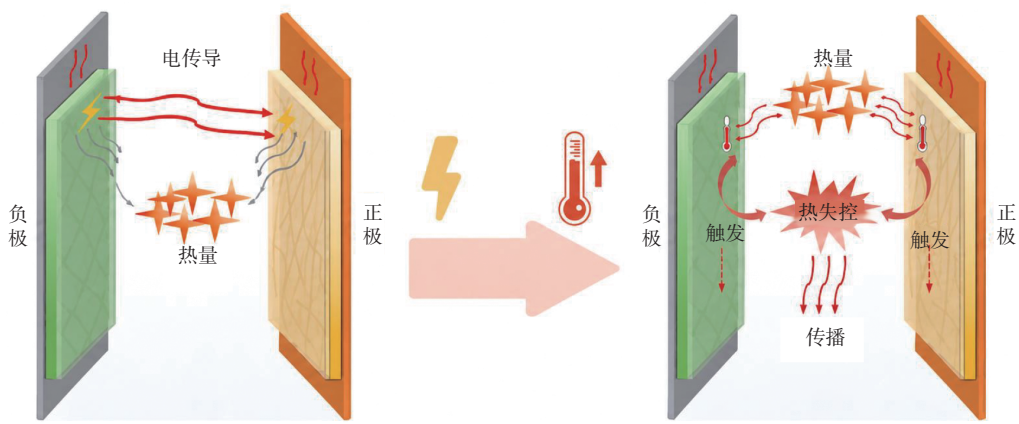
综上所述，锂离子电池模组热扩散主要通过有序或无序传播形成隔膜熔化临界温度点，锂离子电池模组整体电性能因而受到严重影响。串联模组



(a) 各类模组热失控内部传热量[69]



(b) 过充模组热失控内部热扩散功率[71]



(c) 并联模组中短路电池内部热扩散机理[73]

图6 老化、过充及内短路的传热行为

Fig. 6 Heat transfer behavior of aging, overcharging and internal short circuit

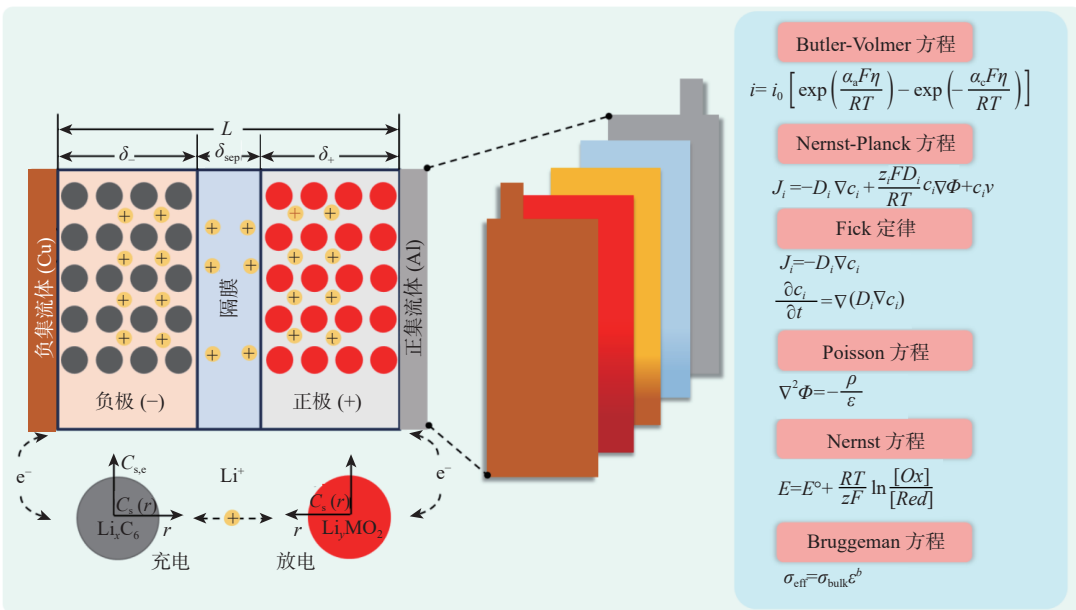
电压呈阶梯式下降, 并联模组电压呈现骤降骤升情形, 其电量、短路电流呈现整体下降趋势; 锂离子电池老化所生成的锂枝晶致使模组在运行时存在较大的温度梯度, 进而降低模组热稳定性。锂离子电池串联模组过充将诱发焦耳热[74], 并联模组内短路瞬时过充亦可诱发焦耳热。

4　多尺度电-热耦合模型

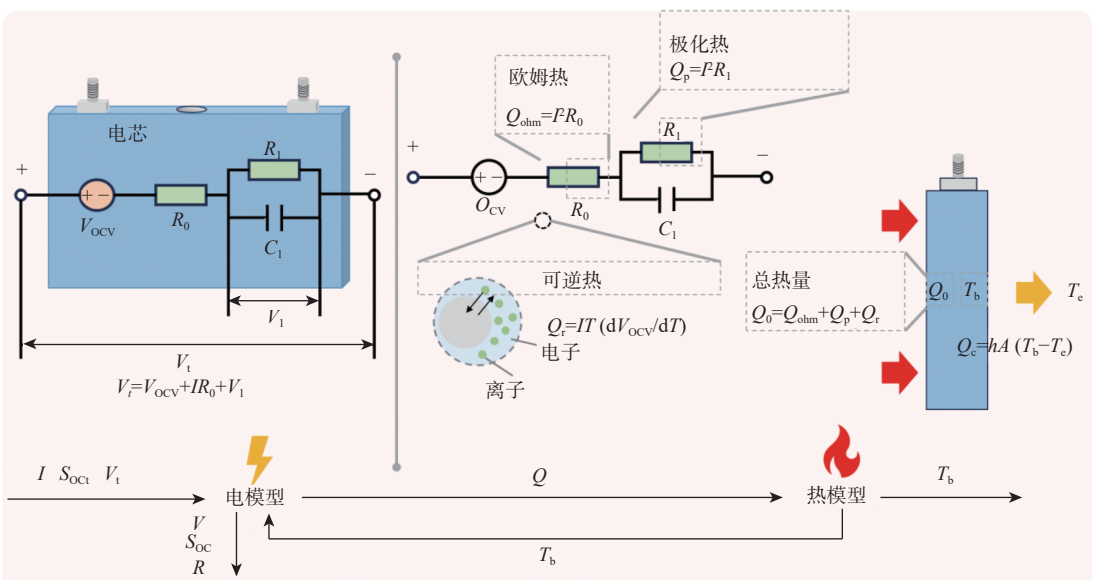
锂离子电池模组热灾害各阶段、各维度电热耦合灾变进程是近年研究重点。学者们分别从微观尺度和宏观尺度建立电行为和热行为的映射关系, 聚焦单体内部界面热源分布、单体老化诱因鉴定、全周期老化温升估算、模组短路产热量化、模组充电策略优化等, 构建有针对性的电-热耦合模型, 较全面地研究了电热耦合机理及能量转化机制。

4.1　单体电-热耦合模型

锂离子电池模组热灾害电热耦合最早发端于单体电池, 因此, 单体电池电热耦合研究是近年来的焦点之一。Newman 等[75] 基于 Butler-Volmer 方程、Nernst-Planck 方程及 Fick 定律等理论构建电化学模型, 如图 7(a)所示, 揭示锂离子的电极反应动力学、液相扩散过程及固相扩散过程等, 为探索充放电状态下电池内部产热反应奠定基础, 图中, $C_{s,e}$ 为固相锂电子浓度, r 为粒子半径。在此基础上, Doyle 等[76-77] 引入热变量改进前述的电化学模型, 建立热效应和电化学的耦合机制, 并研发了电



(a) 电化学模型



(b) Bernardi 产热模型

图 7　锂离子电池电-热耦合基础模型

Fig. 7　Basic model of electro-thermal coupling in lithium-ion battery

化学-热模型，可较好地揭示电池热源生成与分布、性能与寿命预测等问题。同时，依据电化学模型输出的SOC及终端电压，Bernardi等[78]提出了产热方程量化研究电池总产热，如图7(b)所示，图中，V_{ocv}为开路电压，R_0为欧姆内阻，R_1为极化内阻。可见，电行为与热行为之间存在相互影响、相互转化的定量模型关系[79]。

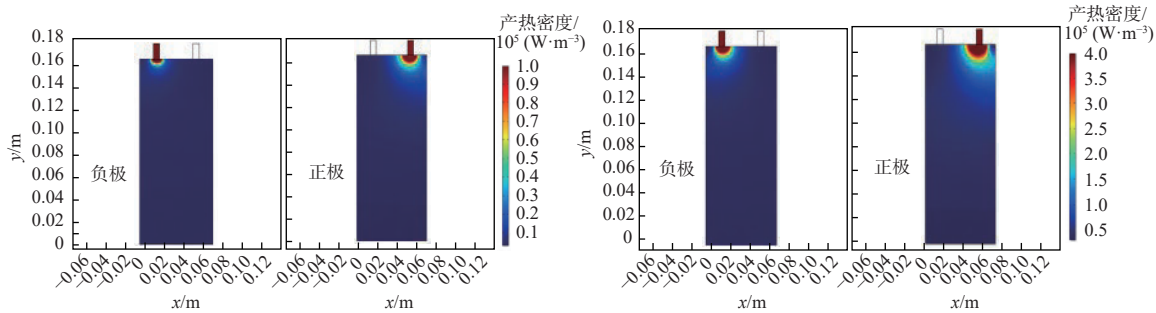
在单体电池产热分布层面，Ren等[80]基于COMSOL Multiphysics构建电化学-热模型量化研究放电正负集流体的产热密度，铝的电导率低于铜，因此，铝质正集流体聚集大量欧姆热，在1 C和3 C放电时，负集流体的最大产热密度分别为1.22×10^5 W/m^{3}和1.06×10^6 W/m^3，正集流体的最大产热密度分别为3.04×10^5 W/m^{3}和2.64×10^6 W/m^3，可见正集流体产热密度高出负集流体的2.5倍，结果如图8(a)所示。Lin等[81]构建三维电化学-热模型，如图8(b)所示，对比集总热源和非均匀热源下热量分布，发现集总热源模型下热量主要集中于电池大面中心，非均匀热源模型下热量主要集中于电池大面中心及正极极耳处。可见，集总热源模型虽具备较高的计算效率，但无法解决非均匀温度场引发的电池老化非均匀性的问题，而非均匀热源模型可对电池最高温差进行捕捉，准确反映热源分布。同时，Sarkar等[82]基于三维电化学-热模型研究不同放电倍率下电池内部的主导热源，由于放电倍率提高引发过电位陡升极化现象加剧，而且SOC降低内阻增大诱发大量欧姆热，致使极化热和欧姆热成为主要热源。在电池性能寿命研究层面，Fan等[83]构建电化学-老化-热耦合模型用于分析低温下长期循环的老化轨迹，发现低温环境所诱发的负极镀锂现象是加速电池寿命衰减的主要原因。如图8(c)所示，随着温度降低，循环圈数逐渐减小，−20 ℃低温环境下0.5 C和1 C仅能循环8圈。Xi等[84]也使用电化学-老化-热耦合的多物理场、多尺度模型，研究25 ℃和45 ℃环境下三元电池的循环寿命，发现45 ℃环境将导致极化电位增加镀锂现象加剧。因为25 ℃环境下，SOH下降至60%时循环次数大于2 500圈，因镀锂造成容量损失为44.8%，45 ℃高温环境下，SOH下降至60%时循环次数小于2 000圈，因镀锂造成容量损失为54.8 %。此外，Shen等[85]对电化学-热耦合模型进行改进，融合遗忘因子最小二乘法及平方根立方卡尔曼滤波算法构建的模型，如图8(d)所示，利用该模型对宽温域(−20～40 ℃)、全周期(80% SOH～100% SOH)的电池温度进行估算，所得结果的最大误差小于1.10 ℃，表明该模型具备一定的可行性及鲁棒性。Liu等[86]构建电化学-热耦合内短路模型，如图8(e)所示，对比研究机械滥用、电滥用及热滥用等多种内短路触发机制下的电热耦合行为，经验证，该模型不仅具备精准的内短路电压结果预测能力，而且还可有效预测内短路时的热行为。

4.2 模组电-热耦合模型

并联模组热灾害会引发短路电流现象，其电热耦合是近年来研究的重点之一。并联模组发生热扩散时，会在未短路电池与已短路电池间构成回路，进而产生强大的短路电流。由于连接组件及短路电池等存在电阻，致使短路电流转化为热量[87]，依图9所建立的电-热耦合模型，可对其产热进行量化。

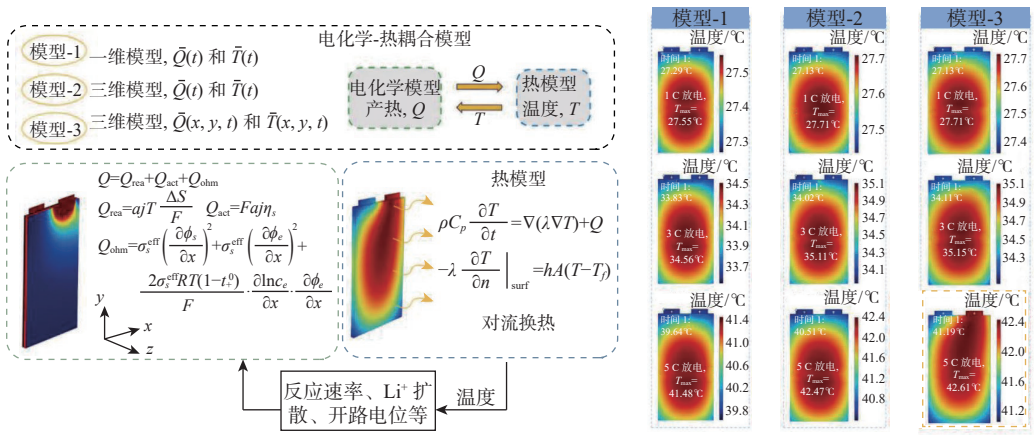
Zhou等[68]基于理想等效电路模型量化400 Ah的并联模组短路时内部焦耳热，发现未短路电池向短路电池传递1.83 Ah的电量，导致短路电池热失控时SOC为103.65%，且该电量可转化为22.43 kJ的焦耳热，致使热失控电池表面温度提高14.6 ℃。Niu等[88]量化研究并联模组发生内短路时未受损电池SOC的波动幅值及所释放的热量，发现在等效电路作用下，未受损电池SOC下降88 %，释放5.1 kJ的热量，占总电能的18%。Xu等[89]构建串并联模组的等效电路模型，如图10(a)所示，基于该模型量化研究3并4串模组热扩散时内部电化热，发现电化热致使池体表面温度提高28.2 ℃，远小于化学反应的峰值温度940 ℃，热量贡献率较小。此外，Gao等[90]以恒定短路电阻为边界条件构建瞬态等效电路模型，如图10(b)所示，基于该模型获取短路电池数量与整体电阻、短路电流及产热量间的拟合曲线，发现短路电流与正常电池SOC呈正相关，与已短路电池数量呈负相关；并联模组因电流分布不均，将滋生镀锂等副反应，威胁模组热安全。为此，Yang等[91]在电化学-热耦合模型基础上制定过电位镀锂充电策略，建立并联模组的电流闭环控制框架，如图10(c)所示，发现使用该策略过电位维持在0 V可有效减弱负极表面镀锂现象。

综上所述，单体电-热耦合模型应用较为广泛的为电化学-热模型。该模型不仅可精准捕捉单体电池内部热源分布及老化轨迹，从内部各界面反应微观揭示电热耦合机理，而且，可与最小二乘法及卡尔曼滤波算法等契合，精准获取多工况、长周期的电热耦合反应。但电化学-热模型因其复杂性及低效性限制，其在电池系统中的应用主要面向运行场景下的机理分析[92]；模组电-热耦合模型中应用较为广泛的为并联模组的等效电路模型，该模型不仅可评估并联模组内部短路产热及剩余电量，而且可分析并联模组充电电流不均衡的问题。但当前的等

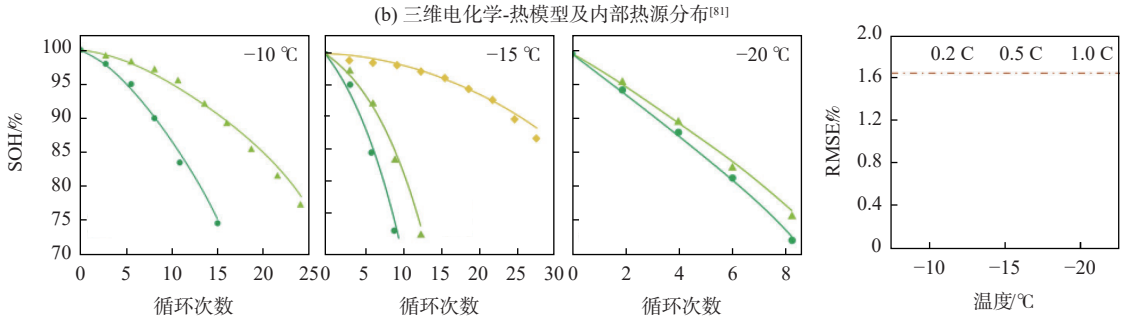


(a1) 1C　(a2) 3C

(a) 1 C 和 3 C 放电正负极流体产热密度[80]



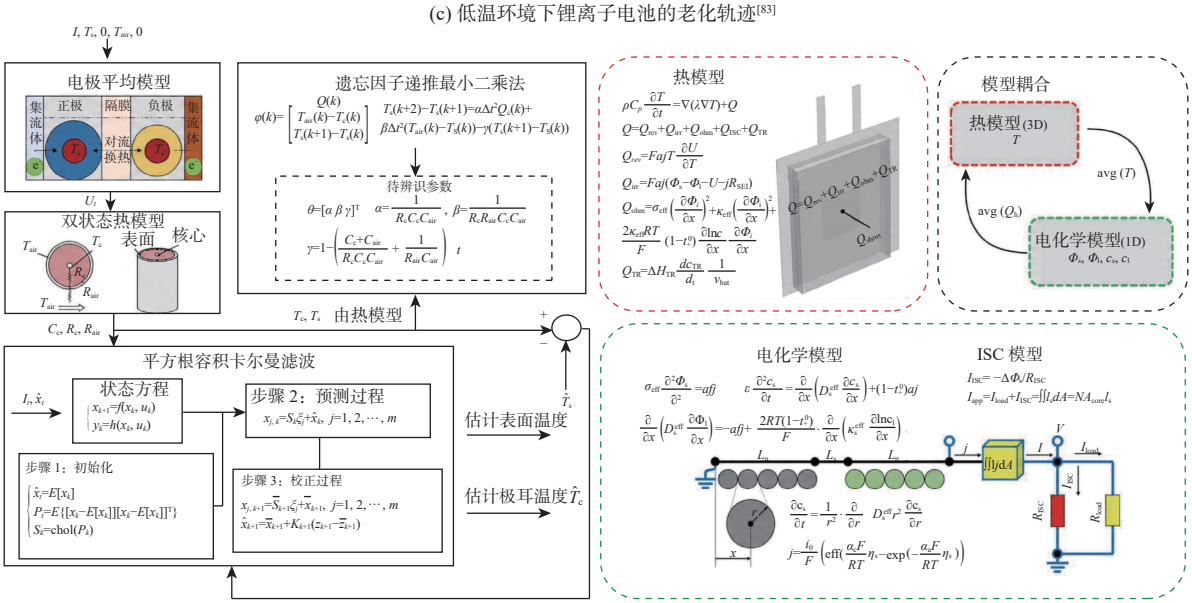
(b) 三维电化学-热模型及内部热源分布[81]



(c1) SoH　(c2) RMSE

实验−0.2 C　实验−0.5 C　实验−1.0 C
仿真−0.2 C　仿真−0.5 C　仿真−1.0 C

(c) 低温环境下锂离子电池的老化轨迹[83]



(d) 耦合 SRCKF 的电化学-热模型[85]　(e) 电化学-热耦合内短路模型[86]

图 8　电化学-热模型

Fig. 8　Electrochemical-thermal modeling

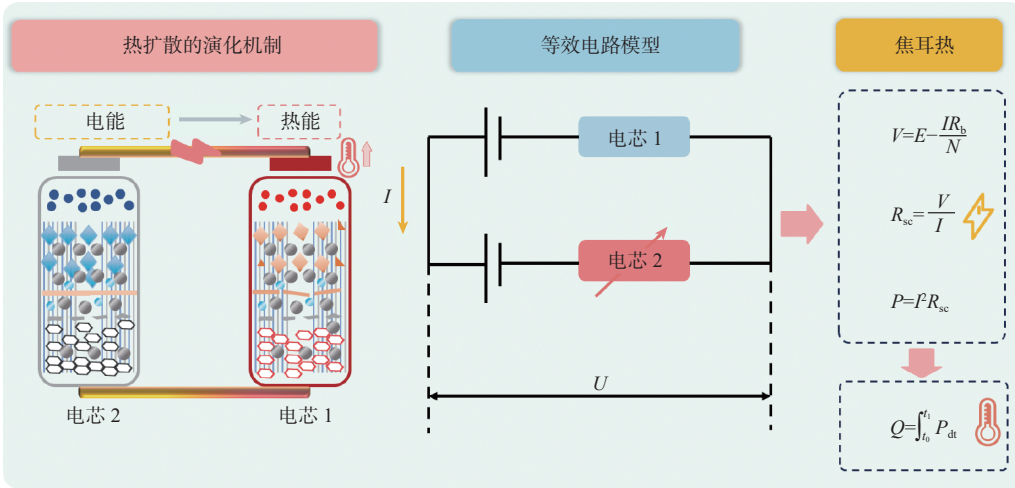
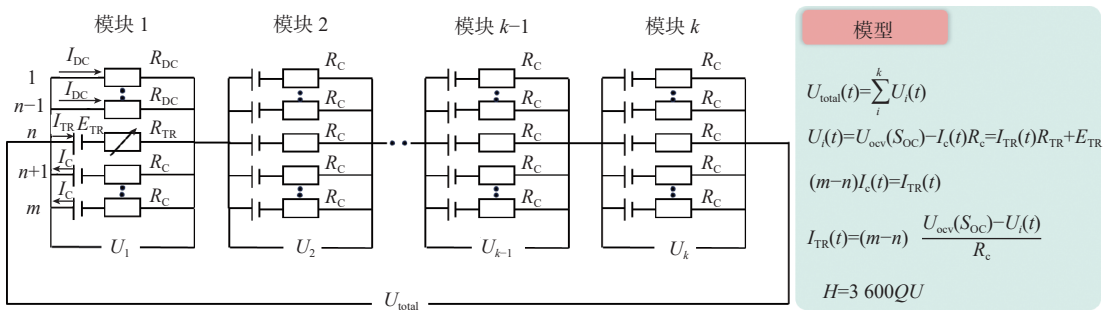
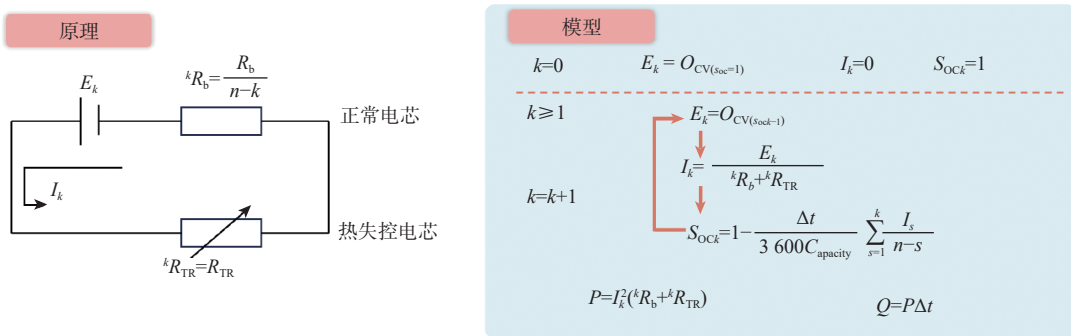


图 9 并联模组电-热耦合模型

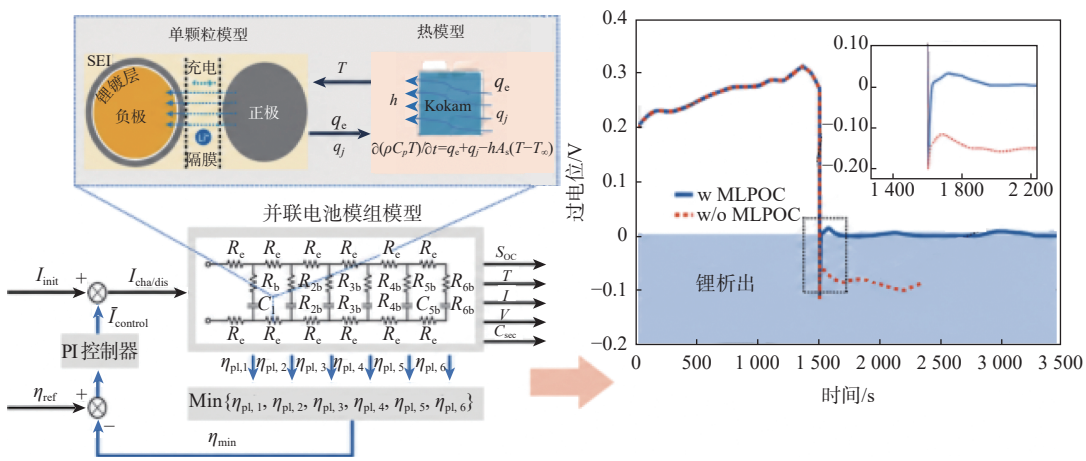
Fig. 9 Electro-thermal coupling model of the parallel module



(a) 串并联模组等效电路模型[89]



(b) 瞬态等效电路模型[90]



(c) 电化学-热耦合过电位镀锂策略的并联模组[91]

图 10 并联模组等效电路模型

Fig. 10 Equivalent circuit model of the parallel module

效电路模型过于理想化, 未能使用短路电流及模组电阻的动态数据, 导致其热量计算存在严重偏差。

5　结 束 语

综上, 锂离子电池从单体到模组各阶段、多维度的电行为与热行为耦合及多尺度电-热耦合模型研究取得了以下 4 个方面的进展:

1) SEI 膜分解使锂离子电池模组进入自产热阶段, 电压、电阻及容量等随即出现衰变, 热量对于电阻的衰变影响尤为显著; 而不同程度的过充、过放等电行为的介入将提升产热量。在此阶段, 标志着电热耦合行为呈现逐步恶化的态势。

2) 隔膜熔化使锂离子电池模组进入内短路阶段, 电压及电量骤降为 0, 电阻升至初始电阻的近 1 000 倍; 而过充、过放及内短路电阻将会降低热失控的触发温度, 提升热失控的峰值温度。在该阶段, 电热之间异常联动尤为显著。

3) 热量传递未阻断使锂离子电池模组进入热扩散阶段, 串并联模组电压总体呈下降趋势, 并联模组短路电流骤升至高达 1 000 A; 而老化、过充及内短路可降低模组内部温均性, 加速热扩散进程。在该阶段, 电热耦合灾变呈大尺度蔓延。

4) 锂离子电池单体的电化学-热模型主要是从电行为及热行为进行二维微观表征, 揭示单体电池内部电热耦合机理; 锂离子电池模组电-热耦合模型主要聚焦并联模组, 采用等效电路模型评价产热及电量, 揭示模组电热动态转换机制。

根据上述研究进展及未来的发展方向, 锂离子电池模组电热耦合行为研究还应从以下几个方面强化:

1) 强化锂离子电池模组运行状态下电热耦合行为研究。当前电热耦合研究多聚焦开路状态下锂离子电池单体及模组温度、电压及交流阻抗, 不能反映运行状态的电热耦合行为。而模组运行状态的温度、电压、电量及唯有的直流电阻才可有效表征运行状态下的电热耦合行为。因此, 亟待强化运行状态下自产热、焦耳热及热传导与电压、电阻及电量之间异常行为研究。

2) 强化热滥用诱导下内短路焦耳热的量化研究。当前焦耳热的量化研究以机械滥用为主, 无法诱导出 SEI 膜分解阶段产热。而热滥用可诱发锂离子电池自产热, 进而引发连锁放热反应, 导致隔膜熔化生成焦耳热, 更贴近锂离子电池模组运行场景。因此, 亟待强化构建热滥用下 SEI 膜分解自产热与内短路焦耳热的函数关系, 量化研究内短路阶段焦耳热的产生位置、影响因素及作用范围。

3) 优化锂离子电池并联模组电热耦合监测指标。当前并联模组的研究多聚焦于电压与温度, 而缺失直流电阻及短路电流, 致使内短路电化热量化研究存在较大的误差, 难以支撑并联模组在工程应用中的风险评估体系。因此, 亟待基于并联模组的电路结构有针对性地引入直流电阻及短路电流监测指标, 开展耦合电压、电流及温度的电热灾变机制研究。同时, 还应依据并联模组内短路电流的大小, 选取熔断装置并在电池间添加气凝胶, 切断电热间的异常联动, 阻断热失控传播。

4) 优化自产热阶段电-热耦合灾变模型研究。当前电化学-热模型、电化学-短路-热模型、理想等效电路模型等电热耦合灾变模型研究较为成熟, 但上述模型不能适用于 SEI 膜分解阶段自产热量化研究, 缺乏 SEI 膜分解阶段电热间的作用机理及两者的转换范围。因此, 亟须构建 SEI 膜分解阶段的电-热耦合模型, 分析各种电池材料在该阶段电热耦合作用下的产热机理。

参考文献（References）

[1] Dixit M, Bisht A, Essehli R, et al. Lithium-ion battery power performance assessment for the climb step of an electric vertical takeoff and landing (eVTOL) application[J]. ACS Energy Letters, 2024, 9(3): 934-940.

[2] Feng X N, Ouyang M G, Liu X, et al. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: a review[J]. Energy Storage Materials, 2018, 10: 246-267.

[3] Peng R Q, Kong D P, Ping P, et al. Thermal runaway modeling of lithium-ion batteries at different scales: recent advances and perspectives[J]. Energy Storage Materials, 2024, 69: 103417.

[4] Song L F, Wang S P, Jia Z Z, 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.

[5] Yuan C H, Wang L B, Yin S, et al. Generalized separator failure criteria for internal short circuit of lithium-ion battery[J]. Journal of Power Sources, 2020, 467: 228360.

[6] Underwrites Laboratories. Standard for safety test method for evaluating thermal runaway fire propagation in battery energy storage systems: UL 9540A—2018[S]. Northbrook: Underwriters Laboratories, 2018-01-31.

[7] UN Global Technical Regulation. Global technical regulation on the electrical vehicle safety: UN GTR No. 20[S]. Geneva: United Nations, 2018-03-14.

[8] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电动汽车用动力蓄电池安全要求: GB 38031—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020-05-12.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Electric vehicles traction battery safety requirements: GB 38031—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020-05-12(in Chinese).

[9] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电力储能用锂离子电池: GB/T 36276—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023-12-28.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Lithium ion battery for electrical energy storage: GB/T 36276—2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023-12-28(in Chinese).

[10] An Z J, Shi T L, Du X Z, et al. Experimental study on the internal short circuit and failure mechanism of lithium-ion batteries under mechanical abuse conditions[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 89: 111819.

[11] Zhang Y, Cheng S Y, Mei W X, et al. Understanding of thermal runaway mechanism of $LiFePO_4$ battery in-depth by three-level analysis[J]. Applied Energy, 2023, 336(C): 120822.

[12] Qi C, Yan H T, Yang J, et al. Study on the characteristics of thermal runaway expansion force of $LiNi_{0.5}Co_{0.2}Mn_{0.3}O_2$/graphite lithium-ion batteries with different SOCs[J]. Electrochimica Acta, 2024, 495: 144448.

[13] Wang Z, Pang P P, Ma Z, et al. Performance degradation of lithium-ion batteries with $LiNi_{0.33}Co_{0.33}Mn_{0.33}O_2$ cathodes during long-term, high-temperature storage: behaviors and mechanism[J]. ChemElectroChem, 2021, 8(2): 403-410.

[14] Sun Y Q, Zhang S T, Qi J, et al. Calendar degradation of Li-ion batteries under high storage temperature based on electrochemical impedance spectroscopy[J]. Microelectronics Reliability, 2021, 126: 114316.

[15] Ding L, Zhang C, Wu T, et al. Effect of temperature on compression behavior of polypropylene separator used for lithium-ion battery[J]. Journal of Power Sources, 2020, 466: 228300.

[16] Mendoza-Hernandez O S, Ishikawa H, Nishikawa Y, et al. Cathode material comparison of thermal runaway behavior of Li-ion cells at different state of charges including over charge[J]. Journal of Power Sources, 2015, 280: 499-504.

[17] Li Y X, Jiang L H, Zhang N J, et al. Early warning method for thermal runaway of lithium-ion batteries under thermal abuse condition based on online electrochemical impedance monitoring[J]. Journal of Energy Chemistry, 2024, 92: 74-86.

[18] Liu S Q, Ma T Y, Wei Z, et al. Study about thermal runaway behavior of high specific energy density Li-ion batteries in a low state of charge[J]. Journal of Energy Chemistry, 2021, 52: 20-27.

[19] Li Y W, Jiang L H, Huang Z H, et al. Pressure effect on the thermal runaway behaviors of lithium-ion battery in confined space[J]. Fire Technology, 2023, 59(3): 1137-1155.

[20] Zhou H W, Fear C, Parekh M, et al. The role of separator thermal stability in safety characteristics of lithium-ion batteries[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2022, 169(9): 090521.

[21] Gao F, Kai Y, Wang C J, et al. Experimental study on thermal runaway of $LiFePO_4$/C battery under heating condition[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 546(4): 042025.

[22] Zhu X Q, Sun Z W, Wang Z P, et al. Thermal runaway in commercial lithium-ion cells under overheating condition and the safety assessment method: effects of SoCs, cathode materials and packaging forms[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 68: 107768.

[23] Qi X P, Liu B X, Pang J, et al. Unveiling micro internal short circuit mechanism in a 60 Ah high-energy-density Li-ion pouch cell[J]. Nano Energy, 2021, 84: 105908.

[24] Zhu Y L, Wang C J, Gao F, et al. Rupture and combustion characteristics of lithium-ion battery under overcharge[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 38: 102571.

[25] Zhang L, Huang L W, Zhang Z S, et al. Degradation characteristics investigation for lithium-ion cells with NCA cathode during overcharging[J]. Applied Energy, 2022, 327: 120026.

[26] Ji C W, Zhang S Q, Wang B, et al. Study on thermal safety of the overcharged lithium-ion battery[J]. Fire Technology, 2023, 59(3): 1089-1114.

[27] Flügel M, Kasper M, Pfeifer C, et al. Cu dissolution during overdischarge of Li-ion cells to 0 V: a post-mortem study[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2021, 168(2): 020506.

[28] Ouyang D X, Weng J W, Chen M Y, et al. Experimental analysis on the degradation behavior of overdischarged lithium-ion battery combined with the effect of high-temperature environment[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(1): 229-241.

[29] Mei W X, Li H, Zhao C P, et al. Numerical study on thermal characteristics comparison between charge and discharge process for lithium ion battery[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 162: 120319.

[30] Wang J F, Li Y H, Liu F, et al. A comparative study of overcharge thermal runaway force-electrical-thermal characteristics and safety assessment of lithium batteries with different cathode materials[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 256: 124092.

[31] Liu J L, Wang Z R, Bai J L, et al. Heat generation and thermal runaway mechanisms induced by overcharging of aged lithium-ion battery[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 212: 118565.

[32] Zhang Y, Li S Y, Mao B B, et al. A multi-level early warning strategy for the $LiFePO_4$ battery thermal runaway induced by overcharge[J]. Applied Energy, 2023, 347: 121375.

[33] Ouyang D X, Chen M Y, Liu J H, et al. Investigation of a commercial lithium-ion battery under overcharge/over-discharge failure conditions[J]. RSC Advances, 2018, 8(58): 33414-33424.

[34] Wang X X, Zhang Y J, Ni H J, et al. Influence of different ambient temperatures on the discharge performance of square ternary lithium-ion batteries[J]. Energies, 2022, 15(15): 5348.

[35] Liu S Z, Chen J J, Zhang C, et al. Experimental study on lithium-ion cell characteristics at different discharge rates[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 45: 103418.

[36] Panchal S, Mathew M, Fraser R, et al. Electrochemical thermal modeling and experimental measurements of 18650 cylindrical lithium-ion battery during discharge cycle for an EV[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 135: 123-132.

[37] Dong T, Peng P, Jiang F M. Numerical modeling and analysis of the thermal behavior of NCM lithium-ion batteries subjected to very high C-rate discharge/charge operations[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 117: 261-272.

[38] 何春汕, 王子阳, 姚斌. 不同放电功率下的储能用磷酸铁锂电池热失控特性实验研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(3): 981-989.
He C S, Wang Z Y, Yao B. Experimental study of the thermal runaway characteristics of lithium iron phosphate batteries for energy storage under various discharge powers[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(3): 981-989(in Chinese).

[39] Hu J, Liu T, Wang X S. Effect of discharge operation on thermal runaway incubation process of lithium-ion battery: an experimental study[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 185: 25-35.

[40] Hu J, Liu T, Wang X S, et al. Investigation on thermal runaway of 18, 650 lithium ion battery under thermal abuse coupled with charging[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 51: 104482.

[41] Li L, Ju X Y, Zhou X D, et al. Experimental study on thermal runaway process of 18650 lithium-ion battery under different discharge currents[J]. Materials, 2021, 14(16): 4740.

[42] Feng X N, Ren D S, He X M, et al. Mitigating thermal runaway of lithium-ion batteries[J]. Joule, 2020, 4(4): 743-770.

[43] Wang Z P, Yuan J, Zhu X Q, 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.

[44] Xie S, Gong Y Z, Ping X K, et al. Effect of overcharge on the electrochemical and thermal safety behaviors of $LiNi_{0.5}Mn_{0.3}Co_{0.2}O_2$/graphite lithium-ion batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 46: 103829.

[45] Juarez-Robles D, Vyas A A, Fear C, et al. Overdischarge and aging analytics of Li-ion cells[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2020, 167(9): 090558.

[46] Ren D S, Feng X N, Liu L S, et al. Investigating the relationship between internal short circuit and thermal runaway of lithium-ion batteries under thermal abuse condition[J]. Energy Storage Materials, 2021, 34: 563-573.

[47] Tang X, Wei X Z, Zhang H N, et al. Experimental and modeling analysis of thermal runaway for $LiNi_{0.5}Mn_{0.3}Co_{0.2}O_2$/graphite pouch cell under adiabatic condition[J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(7): 10667-10681.

[48] Yang Z G, Gu Z J, Tao Q Y, et al. Early warning technology for common characteristic resistances of lithium-ion batteries with thermal runaway[J]. Chemical Communications, 2024, 60(1): 87-90.

[49] Tang X, Zhang G X, Wang X Y, et al. Investigating the critical characteristics of thermal runaway process for $LiFePO_4$/graphite batteries by a ceased segmented method[J]. iScience, 2021, 24(10): 103088.

[50] Zheng S Q, Wang L, Feng X N, et al. Probing the heat sources during thermal runaway process by thermal analysis of different battery chemistries[J]. Journal of Power Sources, 2018, 378: 527-536.

[51] Huang Z H, Yu Y, Duan Q L, et al. Heating position effect on internal thermal runaway propagation in large-format lithium iron phosphate battery[J]. Applied Energy, 2022, 325(C): 119778.

[52] Liu X, Ren D S, Hsu H, et al. Thermal runaway of lithium-ion batteries without internal short circuit[J]. Joule, 2018, 2(10): 2047-2064.

[53] Mao N, Zhang T, Wang Z, et al. Revealing the thermal stability and component heat contribution ratio of overcharged lithium-ion batteries during thermal runaway[J]. Energy, 2023, 263: 125786.

[54] Mao N, Zhang T, Wang Z R, et al. A systematic investigation of internal physical and chemical changes of lithium-ion batteries during overcharge[J]. Journal of Power Sources, 2022, 518: 230767.

[55] Zhang G X, Wei X Z, Chen S Q, et al. Revealing the impact of slight electrical abuse on the thermal safety characteristics for lithium-ion batteries[J]. ACS Applied Energy Materials, 2021, 4(11): 12858-12870.

[56] Li L, Zhou X D, Ju X Y, et al. Comprehensive analysis on aging behavior and safety performance of $LiNi_xCoyMn_zO_2$/graphite batteries after slight over-discharge cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 225: 120172.

[57] Liu L S, Feng X N, Rahe C, et al. Internal short circuit evaluation and corresponding failure mode analysis for lithium-ion batteries[J]. Journal of Energy Chemistry, 2021, 61: 269-280.

[58] Long M K, Liu S Y, Zhang G S. A novel method for simultaneous triggering and in situ sensing of internal short circuit in lithium-ion cells[J]. Energy Advances, 2023, 2(12): 2018-2028.

[59] Ma J, Huang P F, Bai Z H. Numerical study on the critical characteristics of internal short-circuit hot spot in lithium-ion batteries[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 185: 1373-1384.

[60] Xin Y D, Liu C C, Li N, et al. In-situ monitoring of multiple signals evolution behaviour for commercial lithium-ion batteries during internal short circuit[J]. Applied Energy, 2023, 350: 121754.

[61] Börger A, Mertens J, Wenzl H. Thermal runaway and thermal runaway propagation in batteries: what do we talk about?[J]. Journal of Energy Storage, 2019, 24: 100649.

[62] Lyu P Z, Liu X J, Liu C Z, et al. The influence of tab overheating on thermal runaway propagation of pouch-type lithium-ion battery module with different tab connections[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 211: 124279.

[63] Wang H B, Du Z M, Rui X Y, et al. A comparative analysis on thermal runaway behavior of Li (Ni Co Mn) O_2 battery with different nickel contents at cell and module level[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 393: 122361.

[64] Li H X, Gao Q, Ling J J, et al. Thermal runaway propagation and combustion characteristics of enclosed $LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O_2$ pouch battery modules in an open environment[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 85: 110877.

[65] Schöberl J, Ank M, Schreiber M, et al. Thermal runaway propagation in automotive lithium-ion batteries with NMC-811 and LFP cathodes: safety requirements and impact on system integration[J]. eTransportation, 2024, 19: 100305.

[66] Li H X, Gao Q, Wang Y. Experimental investigation of the thermal runaway propagation characteristics and thermal failure prediction parameters of six-cell lithium-ion battery modules[J]. Energies, 2023, 16(13): 5172.

[67] Liu T, Hu J, Tao C F, et al. Effect of parallel connection on 18650-type lithium ion battery thermal runaway propagation and active cooling prevention with water mist[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 184: 116291.

[68] Zhou Z Z, Zhou X D, Wang B X, et al. Experimentally exploring thermal runaway propagation and prevention in the prismatic lithium-ion battery with different connections[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 164: 517-527.

[69] Zhao L Y, Han Z X, Guo W, et al. An experimental study on thermal runaway propagation over cyclic aging lithium-ion battery modules with different electrical connections[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 89: 111823.

[70] Han Z X, Zhao L Y, Zhao J J, et al. An experimental study on the thermal runaway propagation of cycling aged lithium-ion battery modules[J]. Fire, 2024, 7(4): 119.

[71] Huang Z H, Liu J L, Zhai H J, et al. Experimental investigation on the characteristics of thermal runaway and its propagation of large-format lithium ion batteries under overcharging and overheating conditions[J]. Energy, 2021, 233: 121103.

[72] Liu L, Lin C J, Yang P X, et al. Experimental study on thermal runaway characteristic parameters of parallel battery modules[J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46(4): 4994-5005.

[73] Zhou Z Z, Li M Y, Zhou X D, et al. Investigating thermal runaway characteristics and trigger mechanism of the parallel lithium-ion battery[J]. Applied Energy, 2023, 349: 121690.

[74] Sun L, Wei C, Guo D L, et al. Comparative study on thermal runaway characteristics of lithium iron phosphate battery modules under different overcharge conditions[J]. Fire Technology, 2020, 56(4): 1555-1574.

[75] Newman J, Tiedemann W. Porous-electrode theory with battery applications[J]. AIChE Journal, 1975, 21(1): 25-41.

[76] Doyle M, Newman J. The use of mathematical modeling in the design of lithium/polymer battery systems[J]. Electrochimica Acta, 1995, 40(13-14): 2191-2196.

[77] Doyle M, Fuller T F, Newman J. Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium/polymer/insertion cell[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1993, 140(6): 1526-1533.

[78] Bernardi D, Pawlikowski E, Newman J. A general energy balance for battery systems[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1985, 132(1): 5-12.

[79] 郭佳涌. 动力电池模组电—热特性及过热触发热失控机理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
Guo J Y. Study on electro-thermal characteristics and overheat triggering thermal runaway mechanism of power battery module[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023(in Chinese).

[80] Ren H L, Jia L, Dang C, et al. An electrochemical-thermal coupling model for heat generation analysis of prismatic lithium battery[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 50: 104277.

[81] Lin X W, Zhou Z F, Zhu X G, et al. Non-uniform thermal characteristics investigation of three-dimensional electrochemical-thermal coupled model for pouch lithium-ion battery[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 417: 137912.

[82] Sarkar S, Amin M T, El-Halwagi M M, et al. Thermal behavior of $LiFePO_4$ battery at faster C-rates and lower ambient temperatures[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 186: 118-133.

[83] Fan W J, Zhu J G, Qiao D D, et al. Low-temperature charging strategy optimization based on electrochemical-aging-thermal coupling model[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2025, 11(1): 901-911.

[84] Xi R Y, Mu Z Z, Ma Z Y, et al. Lifetime prediction of rechargeable lithium-ion battery using multi-physics and multiscale model[J]. Journal of Power Sources, 2024, 608: 234622.

[85] Shen J W, Zhang Z, Chen Z, et al. Temperature estimation of multiple places for lithium-ion batteries based on improved electrochemical thermal modeling[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2025, 11(1): 382-392.

[86] Liu L S, Feng X N, Zhang M X, et al. Comparative study on substitute triggering approaches for internal short circuit in lithium-ion batteries[J]. Applied Energy, 2020, 259: 114143.

[87] 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.

[88] Niu H C, Chen C X, Ji D, et al. Thermal-runaway propagation over a linear cylindrical battery module[J]. Fire Technology, 2020, 56(6): 2491-2507.

[89] Xu C S, Zhang F S, Feng X N, et al. Experimental study on thermal runaway propagation of lithium-ion battery modules with different parallel-series hybrid connections[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 284: 124749.

[90] Gao S, Feng X N, Lu L G, et al. An experimental and analytical study of thermal runaway propagation in a large format lithium ion battery module with NCM pouch-cells in parallel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 135: 93-103.

[91] Yang S C, Gao X L, Li Y L, et al. Minimum lithium plating overpotential control based charging strategy for parallel battery module prevents side reactions[J]. Journal of Power Sources, 2021, 494: 229772.

[92] Wang G Q, Ping P, Kong D P, et al. Advances and challenges in thermal runaway modeling of lithium-ion batteries[J]. The Innovation, 2024, 5(4): 100624.

Progress in the investigation of electro-thermal coupled catastrophic mechanisms in lithium-ion battery modules

HE Yuanhua，LIANG Jiaxin，LI Zitong，HUANG Jiang*

(Civil Aircraft Fire Science and Safety Engineering Key Laboratory of Sichuan Province，Civil Aviation Flight University of China，Guanghan 618307，China)

Abstract：In the many applications of lithium-ion batteries, the problem of thermal failure presents a significant safety risk. This failure is characterized by a sequence of events: the degradation of interface thermal stability, the onset of thermal runaway triggered by internal short circuits within a cell, and the subsequent thermal propagation at both the module and system levels. The coupled electro-thermal catastrophe serves as both a critical dimension in characterizing the thermal failure logic of lithium-ion battery systems and a key breakthrough in managing these thermal failures. This paper provides a thorough analysis of the thermal behaviors, such as self-generated heat, Joule heating, and heat conduction, that affect electrical behaviors during the solid electrolyte interphase (SEI) layer decomposition of a single cell, the separator melting, and heat propagation at the module level for electro-thermal coupling catastrophe in lithium-ion battery systems over long cycles and across multiple scales. The heat generation and heat transfer behaviors associated with electrical phenomena are also analyzed, such as overcharging, overdischarging and battery aging. The paper also reviews the most prominent electro-thermal coupling models for both individual cells and modules, providing a synthesis of the mechanisms that govern the electro-thermal interactions in lithium-ion batteries. By exploring these interactions from both microscopic and macroscopic viewpoints, the study aims to shed light on the future advancements in the management of electro-thermal coupling in battery modules. The goal of this research is to improve the safety and dependability of lithium-ion battery systems through design, operation, and maintenance.

Keywords：lithium-ion battery；electro-thermal coupling；SEI layer decomposition；separator melting；thermal runaway propagation

Received：2024-07-26；**Accepted**：2024-08-30；**Published Online**：2024-09-24 12：31

URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240924.1014.001

Foundation items：National Natural Science Foundation of China (U2333210)； The Fundamental Research Funds for the Central Universities (24CAFUC10161,24CAFUC03076)

* **Corresponding author**. E-mail：jianghuangscu@163.com