



排布构型对锂电池组热失控传播的影响研究

杨 娟¹, 贾 燕², 李文静², 杨 瑜², 张青松³

(¹中国民航大学工程技术训练中心, 天津 300300; ²中国民航大学安全科学与工程学院, 天津 300300; ³中国民航大学科技创新研究院, 天津 300300)

摘 要: 本工作深入探究了不同电池排布构型对热失控传播特性的影响, 为电池组的设计及优化提供理论依据。本工作采用实验与数值仿真相结合的方法, 系统研究了单体电池间隔及电池簇排布结构 (2×2、3×3) 对热失控抑制的影响。研究发现: 在单体层面, 1 mm 间距虽无法完全阻断热失控传播, 但显著延缓了传播速率, 使传播至相邻电池的时间延后了 227 s; 2 mm 间距则能有效阻断电池单体间的热失控传播。在电池组层面, 2 mm 间距可在 2×2 簇结构中有效阻断热失控传播; 而在 3×3 簇结构中, 由于系统热扩散路径复杂化, 即便在 1 mm 间距下, 因相邻簇未达到临界温度阈值, 热失控亦未发生蔓延。此外, 随着模组内电池间距的增加, 呈现出热失控触发时间延长、传播速率减缓以及电池组最高温度降低的典型规律。结果表明, 合理增加电池间距及优化簇结构设计是抑制热失控传播的关键措施。本研究阐明了不同构型下的热失控临界触发条件与传播机制, 可为高安全性能电池系统的热防护设计提供重要依据。

关键词: 锂离子电池; 热失控传播; 电池排布; 电池簇

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0083

中图分类号: TM 911.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 06-2296-09

Study on the effect of arrangement configuration on thermal runaway propagation characteristics of lithium battery packs

YANG Juan¹, JIA Yan², LI Wenjing², YANG Yu², ZHANG Qingsong³

(¹Civil Aviation University of China Engineering Technology Training Center, Tianjin 300300, China; ²School of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; ³Innovation Research Institute of Science and Technology, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: This paper undertakes a comprehensive investigation into the influence of different battery arrangement configurations on thermal runaway propagation characteristics, thereby providing a theoretical foundation for the design and optimization of battery packs in electric aircraft. Experiments and numerical simulations were integrated to systematically study the effects of single-cell spacing and cluster layouts (2 × 2, 3 × 3) on the initiation and propagation behavior of thermal runaway. The findings indicate that, at the single-cell level, while a 1 mm spacing does not entirely prevent propagation, it significantly delays the propagation rate by 227 s compared to direct contact. Conversely, 2 mm spacing effectively prevents thermal runaway transmission between adjacent cells. At the pack level, a 2 mm spacing effectively

收稿日期: 2026-01-28; 修改稿日期: 2026-03-11。

基金项目: 深圳市科技计划资助 (KJZD20240903100707011); 中央高校基本科研业务费自然科学基金重点项目 (3122024058)。

第一作者: 杨娟 (1983—), 女, 副教授, 主要从事锂离子电池安全领域相关研究, E-mail: j_yang@cauc.edu.cn; 通信作者: 张青松, 教授, 主要从事锂离子电池安全领域相关研究, E-mail: nkzqsong@126.com。

引用本文: 杨娟, 贾燕, 李文静, 等. 排布构型对锂电池组热失控传播的影响研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(6): 2296-2304.

Citation: YANG Juan, JIA Yan, LI Wenjing, et al. Study on the effect of arrangement configuration on thermal runaway propagation characteristics of lithium battery packs[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(6): 2296-2304.

inhibits propagation within the 2×2 cluster structure. However, in the 3×3 cluster configuration, propagation did not occur even at 1 mm spacing due to the complex heat dissipation pathways, preventing adjacent clusters from reaching the critical temperature threshold. Furthermore, increasing the spacing within the module exhibits typical trends of delayed thermal runaway triggering, reduced propagation rates, and lower peak temperatures. The findings suggest that increasing cell spacing and optimizing the structural design of clusters are pivotal measures for suppressing thermal runaway propagation. This study elucidates the critical triggering conditions and propagation mechanisms under various configurations, thereby offering significant guidance for the thermal protection design of high-safety battery systems.

Keywords: lithium-ion battery; thermal runaway propagation; cell alignment; cell clustering

锂电池凭借其卓越的能量密度特性、循环寿命长、无记忆效应等优点,已然成为新一代理想型新能源,广泛应用于各个领域^[1-2]。在实际应用中,通常需要将数百至上千个电芯通过串并联拓扑结构进行集成配置^[3]。相比于单体电池,成组出现的电池组更具危险性,存在热失控传播风险^[4]。由于电池组内部电池数量多、能量大,其发生热失控所造成的后果对电池行业来说是一个大威胁,电池安全已成为行业亟待攻克的关键技术难题^[5]。

Sabbah等^[6]以18650型电池组为研究对象,运用热模拟仿真技术,针对电池热管理系统,探究在空气自然散热以及采用相变材料进行热管理的不同工况下,对电池热失控现象实施抑制的有效方法。Larsson等^[7]运用实验研究与数值模拟相结合的综合研究手段,成功揭示了电池间热量传递的具体机制。张青松等^[8]通过实验发现,适当增大电池间距可有效减缓甚至阻断锂电池热失控的蔓延传播。这为本工作提出通过优化电池排布来抑制热失控传播提供了理论支持。此外,在方形电池模组研究方面,冯旭宁^[9]通过搭建三维模型,对热失控在电池模组中的传递过程进行了全面且细致的系统性分析,Chen等^[10]和Liu等^[11]同样采用三维建模手段对圆柱形电池组的热失控传递特性进行了深入探讨,张彦辉^[12]通过实验发现,电池间距与热失控传播时延呈显著正相关关系,且热失控剧烈程度随电池间距增大呈现非线性衰减特征。

综上可知,国内外针对大规模锂离子电池热失控传播抑制研究较少。本工作拟以100%荷电状态(state of charge, SOC)的18650型锂电池组为研究对象,通过实验与数值模拟相结合的方式,深

入研究不同电池簇间距与电池组内热失控传播特性的相关性,其结果可为动力电池组排布设计及优化提供参考。本工作首次给出电池簇临界阻断间距,在 2×2 簇结构中,2 mm间距即可有效阻断热失控传播;在 3×3 簇结构下,因未达到传播所需的临界温度阈值,即便为1 mm间距,热失控亦未蔓延至相邻簇。不同簇结构与间距组合对热失控的临界触发条件及传播特性存在显著影响,本工作量化了触发延迟、传播减速与峰值降温3种效应随间距变化的关系。

1 锂离子电池热失控传播实验设计

本工作以正极材料为钴酸锂(lithium cobalt oxide, LCO)的18650型锂电池为实验对象,在封闭容器内进行实验,实验舱形貌如图1所示。图1中,实验舱外形为圆柱体,内部容积为60 L。采用K型热电偶进行温度测量,测温量程为 $0 \sim 1100^{\circ}\text{C}$ 。在开展实验测试工作时,将要研究的电池单体(共2节,间隔0/1/2 mm)或者电池组(2×2 节电池为1簇,每簇间隔0/1/2 mm,簇内间距均为0)放置在实验舱内的特定位置,在1号电池的侧面安装加热棒并进行加热触发操作。在实验舱内部不同高度的位置分别布置了K型热电偶,采样频率均设置为1次/s,以保证采集到的温度数据拥有可靠的时间分辨率。热电偶以及压力传感器的信号线与数据记录仪实现实时数据传输。数据记录仪支持多挡电压信号和多种热电偶输入信号,最高温度分辨率为 0.01°C 。本工作热失控时刻的定义采用GB 38031—2025对锂电池热失控的判定标准,即电池表面温升速率大于 1°C/s ,持续3 s以上。

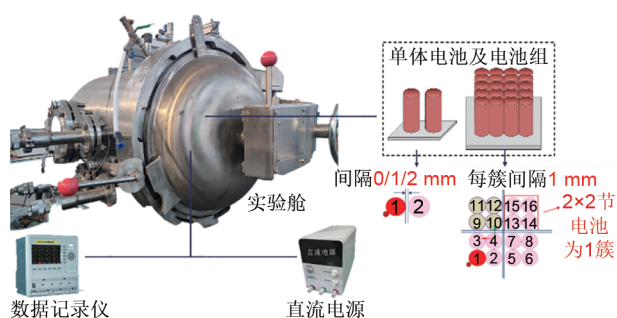


图1 实验平台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental platform

为了保证实验结果的可靠性及条件一致,采用以下实验方案来剖析热失控传播的行为特性:加热棒外接直流稳压电源,精确控制加热棒的输出功率到40 W。电池组各电池单体按照1~16进行编号,实验过程中用高精度数据记录仪全程实时监测和记录各电池温度以及环境温度。将电池的节数配置和电池间的间隔距离作为实验设置的关键变量,具体实验方案设置如表1所示。

表1 实验方案

Table 1 Experimental program

方案	电池节数	电池横向间距/mm
1	单体电池 (共2节)	0
2	单体电池 (共2节)	1
3	单体电池 (共2节)	2
4	2×2节电池为1簇 (共4簇)	0
5	2×2节电池为1簇 (共4簇)	1
6	2×2节电池为1簇 (共4簇)	2
7	3×3节电池为1簇 (共9簇)	1
8	3×3节电池为1簇 (共9簇)	2

2 锂电池热失控传播模型建立

2.1 几何模型与网格划分

本节建立了单体锂电池的热失控模型,热失控触发源包括外部加热棒与电池本体的自发热过程。模型中分别设置加热棒的体积热源功率,并通过UDF (user-defined function) 编写电池自身的热源项,实现热源输入的自定义配置。根据张青松等^[12]提出的多米诺效应热失控仿真建模方法,本工作构建了某型号电池组热失控传播的数值模型,并采用实验数据验证其可靠性。在几何建模过程中,针对18650型锂离子电池单体,本工作采用ANSYS SpaceClaim软件进行三维建模。为简化计

算复杂度,将电池结构等效为标准圆柱体,其几何尺寸设定为直径18 mm、高度65 mm。模型所需的热物性参数(如热导率、密度、比热容等)均假设为各向同性且均匀分布。

在空间布置方面,电池模型被置于长、宽、高均为500 mm的长方体开放环境中。单体电池之间的间距设置为0 mm、1 mm、2 mm共3种情况,详见图2。对于电池簇建模,将2×2/3×3节电池设计为一簇,每簇内电池间距设定为1 mm与2 mm,以考察热传播的影响。在热失控传播仿真中,考虑电池表面与周围空气环境间的自然对流热传递效应。当电池之间存在间隙(如间距为1 mm或2 mm)且未直接接触时,电池簇模块之间的热量传递方式以辐射传热为主。

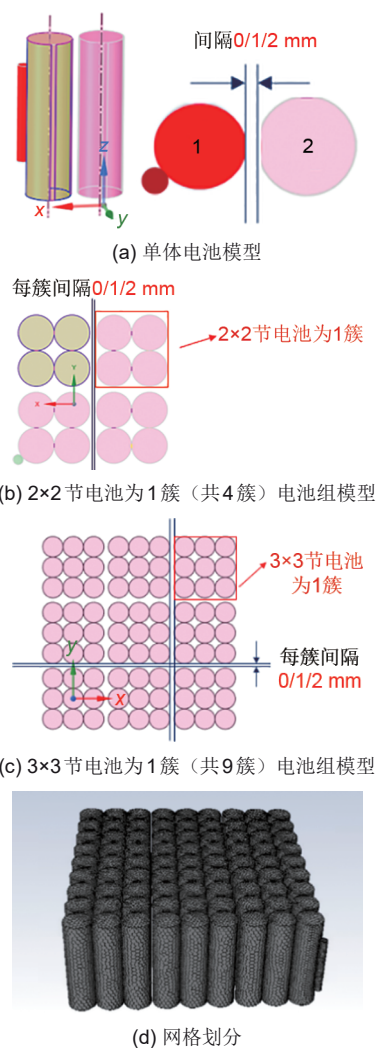


图2 几何模型及网格

Fig. 2 Geometric models and grids

2.2 锂电池热失控模型构建与边界条件定义

在锂电池发生热失控的过程中, 随着内部温度的持续升高, 将依次触发一系列剧烈的化学反应^[13], 包括固体电解质界面 (solid electrolyte interface, SEI) 膜的分解^[14]、负极活性物质与电解液的反应、正极材料分解、黏结剂分解以及电解液的热降解等。依据阿伦尼乌斯 (Arrhenius) 反应动力学模型, 可对锂电池热失控期间各类副反应所释放的热量进行定量建模^[15-16], 其通用表达式如下所示:

$$Q = - \sum_i \Delta H_i W_i \frac{dc_i}{dt} \quad (1)$$

式中, H_i 为第 i 类副反应的质量比焓变, J/kg; W_i 为单位体积反应物含量, kg/m³, c_i 为第 i 种反应物浓度, Q 为反应生热率, W/m³。

(1) SEI膜分解

$$\frac{dc_{sei}}{dt} = -A_{sei} c_{sei} \exp\left(-\frac{E_{asei}}{RT}\right) \quad (2)$$

式中, A_{sei} 为SEI膜分解的频率因子, s⁻¹; E_{asei} 为SEI膜分解的活化能, J/mol; T 为开尔文温度, K; c_{sei} 为SEI膜含量; R 为摩尔气体常数, 取值 8.314 J/(mol·K)。

(2) 负极材料与电解液反应

$$\frac{dc_n}{dt} = -A_n c_n \exp\left(-\frac{E_{asei}}{RT}\right) \exp\left(-\frac{c_{sei}}{0.15}\right) \quad (3)$$

式中, A_n 为负极与电解液反应的频率因子, s⁻¹; c_n 为负极锂离子浓度。

(3) 正极材料热分解

$$\frac{dc_{pe}}{dt} = -A_\beta (\beta - \beta^2) \exp\left(-\frac{E_{ape}}{RT}\right) \quad (4)$$

式中, A_β 为正极分解的频率因子, s⁻¹; E_{ape} 为正极分解的活化能, J/mol; β 为转换率。

(4) 黏结剂分解

$$\frac{dc_{pv}}{dt} = -A_{pv} c_{pv} \exp\left(-\frac{E_{apv}}{RT}\right) \quad (5)$$

式中, A_{pv} 为黏结剂分解的频率因子, s⁻¹; E_{apv} 为黏结剂分解的活化能, J/mol; c_{pv} 为黏结剂浓度。

(5) 电解液分解

$$\frac{dc_e}{dt} = -A_e c_e \exp\left(-\frac{E_{ae}}{RT}\right) \quad (6)$$

式中, A_e 为电解液分解的频率因子, s⁻¹; E_{ae} 为电解液分解的活化能, J/mol; c_e 为电解液浓度。

通过查阅文献, 各副反应化学参数^[17]取值见表2。

表2 锂离子电池热失控副反应热源模型参数设定

Table 2 Thermal source parameters for side reactions in thermal runaway of lithium-ion battery

热失控副反应	初始值	$A_i/(s^{-1})$	$E_{ai}/(J/mol)$	$H_i/(J/kg)$	$W_i/(kg/m^3)$
SEI膜分解	$c_{sei}=0.15$	1.7×10^{15}	1.4×10^5	2.6×10^5	610
负极与电解液反应	$c_n=0.75$	2.5×10^{13}	1.4×10^5	1.7×10^6	610
正极材料热分解	$\beta=0.04$	6.7×10^{13}	1.4×10^5	3.1×10^5	1200
黏结剂分解	$c_{pv}=1$	2.0×10^{25}	2.9×10^5	1.5×10^6	8.1×10^4
电解液分解	$c_e=1$	5.1×10^{25}	2.7×10^5	1.6×10^5	410

热量的传递主要通过3种基本机制实现, 即热传导、热对流以及热辐射^[18]。针对上述不同的传热方式, 可依据热物性原理分别构建相应的数学模型。其控制方程如下:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (7)$$

$$\frac{Q_{con}}{S} = h(T_i - T_o) \quad (8)$$

$$\frac{Q_{rad}}{S} = \varepsilon \sigma (T_i^4 - T_o^4) \quad (9)$$

式中, ρ 为电池密度, kg/m³; C_p 为比热容, J/(kg·K); λ_x 、 λ_y 、 λ_z 分别表示在 x 、 y 、 z 3个空间方向上的热导率, W/(m·K); Q 为电池内部生热的热源, W/m³; T 为温度, K; t 为时间, s; h 为对流传热系数, W/m²; T_o 为环境温度, K; T_i 为电池温度, K; Q_{con} 为总对流热量, J; S 为电池表面积, m²; ε 为热辐射系数; σ 为斯特藩-玻尔兹曼常量, 为 5.67×10^{-8} W/(m²·K⁴); Q_{rad} 为总辐射热量, J。

18650型锂离子电池作为一种内部结构相对复杂的立体装置, 包含多个功能组件。在热仿真建模中, 是否精细呈现电池内部多层结构, 对最终结果的影响并不显著。已有研究表明, 电芯内部结构的细节建模对热场分布影响有限, 仿真结果与简化模型相比差异甚微。若采用多层结构进行详细建模, 一方面将显著增加几何构建与网格划分的复杂度, 提高建模难度; 另一方面也将降低仿真计算效率, 延长模拟时间, 限制了其在多场景、多参数分析中的应用。

因此, 为兼顾建模的可行性与仿真的效率, 本工作在电池模型构建过程中对电池的几何结构进行了适当简化。具体而言, 电芯整体被简化为具有各向同性热物性的圆柱体模型, 内部各材料被视为热参数均匀分布体。同时, 相关热物性参数均通过等效计算方法确定, 下文将对所得电池热力学属性的相关定义及计算结果进行详细说明。主要热物性参数如

下：密度 $\rho=2973\text{ kg/m}^3$ ，比热容 $C_p=961\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ ，径向热导率 $\lambda_x=\lambda_z=3\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ，轴向热导率 $\lambda_y=30\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ，对流换热系数 $h=20\text{ W/m}^2$ 。

3 锂电池热失控传播特性结果分析

3.1 电池组热失控传播模型验证

在电池组仿真分析过程中，实时监控并记录电池温度的变化。同时，针对电池热失控现象，精准计算并输出其表面热流密度及在整个热失控过程中的累积热释放量。通过将仿真手段获得的结果与实验测得的数据进行全面对比分析，以验证所构建的电池组三维热失控传播模型的准确性和有效性，确保模型具备可靠的工程应用价值。该模型严格复现实验工况，采用40 W加热棒触发1号电池热失控。为了减小实验结果的随机误差，本工作所述的每组实验均独立重复3次，图3所示为其中一次典型结果。

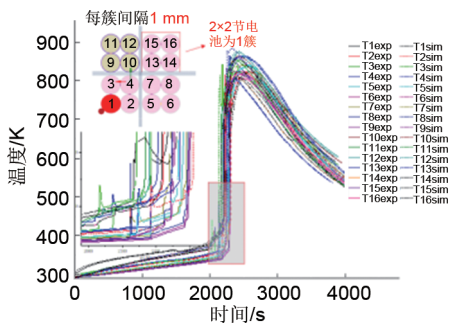


图3 不同间距下电池组（2×2节电池为1簇）热失控实验与仿真温度对比

Fig. 3 Comparison of thermal runaway experiment and simulation temperature of battery pack (2 × 2 as 1 cluster) at different spacings

图3展示了电池组热失控传播过程中仿真与实验温度结果的对比情况。表3为电池组中热失控传播的仿真与实验数据对比，表中所示数据为计算得出的3组单体电池各项典型温度特征参数的平均

值，仿真结果与实验数据基本吻合。在仿真结果中，1号电池的热失控开始于2178 s，与实验结果相差仅12 s。1号电池发生热失控时仿真所得的温度为463 K，实验测量温度为435 K，温差仅为28 K。为了评估仿真结果与实验值对比的准确性，本研究选取热失控触发时刻以及热失控过程中所达到的最高温度这2个关键指标，对仿真数据与实验数据展开误差分析工作。具体而言，计算了热失控过程中温度场仿真所得数值与实验实际测量数值之间的温度误差情况，以此确保分析结果的准确性与可靠性，为后续研究提供坚实的数据支撑。如表3所示，误差均在6%以下，验证了本工作所建立的电池簇热失控传播模型的可靠性。

表3 仿真与实验数据对比

Table 3 Comparison of simulation and experimental data

误差准则	测量点	1号电池 热失控	传播到 第二簇	传播到 第三簇	传播到最 后一簇
时间/s	实验	2190	2366	2372	2463
	仿真	2178	2319	2320	2396
	误差	0.54%	1.99%	2.1%	2.7%
热失控最高温度/K	实验	797.41	825.38	832.45	868.90
	仿真	829.83	867.95	869.21	881.72
	误差	4.06%	5.16%	4.41%	1.48%

3.2 不同间距对热失控传播行为的影响

3.2.1 不同间距对单体电池热失控传播的影响

1号电池热失控后释放大量热量，作用于邻近电池，使其温度升高。由于电池间存在特定间距，该间距阻碍了电池壳体间的直接热传导。在此情况下，热量传递主要依赖于热辐射和热对流机制。基于此传热特性，电池间热失控传播过程呈现出规律性变化。表4所示为计算得出的单体电池3组实验各项典型温度特征参数的平均值。

表4 不同间距下单体电池热失控传播典型温度特征

Table 4 Typical temperatures for thermal runaway propagation of single cell at different spacings

方案	1号电池热失控温度/K	热失控传播到2号电池时间/s	单体电池热失控最高温度/K	环境温度峰值/K
1	480	9	966	781
2	506	236	989	809
3	473	—	974	813

由表4可知，对单体电池的热失控传播行为：在0 mm间距（方案1）条件下，热失控传播至2号单体电池所需时间仅9 s；而在1 mm间距（方

案2）条件下，该时间显著延长至236 s；在2 mm间距（方案3）条件下，热失控未在相邻电池间传播。此外，1 mm间距下环境温度峰值比0 mm间

距条件高出 28 K，但传播速率显著减缓。综上可推断出，在一定范围内，增大电池间距可有效减缓单体电池间的热失控传播速率，但同时会导致电池热失控引发的环境温度峰值升高。针对 2 号单体电池的热失控过程分析表明，在初始阶段，其温度因 1 号电池辐射传热而缓慢上升；随后，随着 1 号电池发生热失控，其热解气体燃烧导致周围环境温度显著升高。此时，2 号电池不仅受到 1 号电池高温表面持续的辐射传热，还受到环境高温的对流传热，使 2 号电池升温速率跃升至 3 K/s，温度急剧攀升。

3.2.2 不同间距对电池组热失控传播的影响

不同排列方式的电池组在热失控传播模式上呈现出明显差异。电池组的排列形式直接影响热量传递路径的变化，导致温度响应过程存在显著差异，进而影响整个模组内热失控事件的发展过程。

图 4 为不同排列方式下电池簇热失控温度变化结果。由图 4 可知，对于以 2×2 形式构成单簇的电池组，当主动触发 1 号电池出现热失控现象后，模组内温度迅速升高。在无间距布置及 1 mm 间距条件下，电池簇内部均发生了热失控传播现象。然而，当电池簇间距增大至 2 mm 时，未发生电池簇之间的热失控传播现象。进一步分析表明，通过对不同间距下电池簇温度的对比记录可知，当电池簇之间的间距大于 2 mm 时，热失控传播被有效阻断。

综上所述，针对以 2×2 电池排列形式构成单簇的电池组，合理增加电池簇间距可有效抑制簇间热

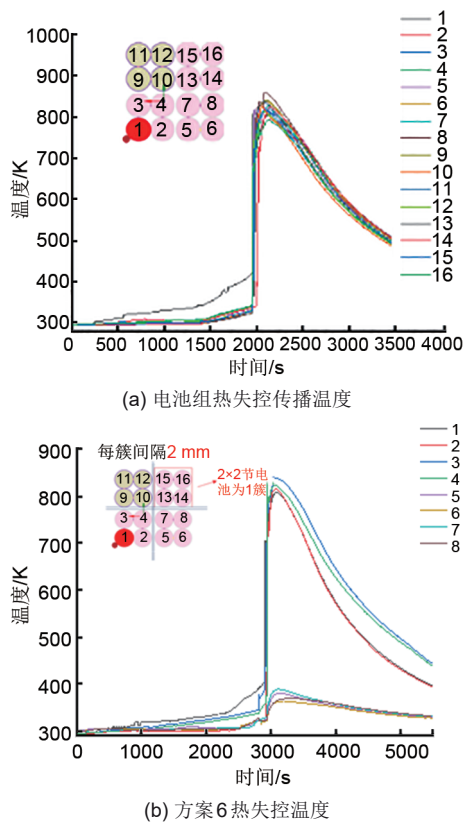


图 4 不同间距下电池组（2×2 节电池为 1 簇）热失控实验温度

Fig. 4 Thermal runaway experimental temperature of battery pack (2 × 2 as 1 cluster) at different spacings

失控传播风险。该研究结果为锂电池模组在安全布置及热失控防护设计方面提供了关键的数据支撑和理论参考。表 5 为不同间距下电池组热失控传播典型温度情况。

表 5 不同间距下电池组热失控传播典型温度情况

Table 5 Typical temperatures for thermal runaway propagation of battery packs at different spacings						
方案	1 号电池热失控温度 /K	1 号电池热失控时间 /s	传播到第二簇电池 时间/s	传播到最后一簇电池 时间/s	电池组热失控最高 温度/K	热失控传播结束时间 /s
4	423	1866	11	19	895	20
5	435	2190	176	273	869	293
6	427	2875	—	—	—	—

根据表 5 所示数据，方案 4 中加热棒加热至 1866 s 时，1 号电池首次触发热失控状态。相较于方案 5，该时间提前了 324 s，较方案 6 则提前了 1009 s。针对传播至第二簇电池的热失控过程，方案 4 仅需 11 s，相较方案 5 缩短了 165 s。对于最后一簇电池，方案 4 的传播耗时为 19 s，较方案 5 缩短了 254 s。在热失控传播过程中，方案 4 的电池

组最高温度达到 895 K，较方案 5 的峰值温度高出 26 K。综上，方案 4 不仅在热失控触发时间与传播时间上均显著短于方案 5 和方案 6，峰值温度更高，且方案 4 中热失控传播过程最快终止。

图 5 展示了不同横向间距条件下，大规模电池组（3×3 节电池为一簇，共 9 簇）的典型温度变化趋势。根据结果可知，1 号电池热失控被触发后，

热失控迅速蔓延至整个电池簇；电池簇间距为1 mm及2 mm时，热失控未能在电池簇之间发生有效传播，电池组整体的热安全性能得到显著提升。

进一步结合图6所示的温度云图分析，在

1 mm间距下，尽管1号电池经历剧烈热失控，但是其热量未对周围簇形成足够影响，邻近簇电池始终维持较低温度，未触发热失控。这说明当电池簇间距增大后，热量主要通过辐射和对流形式传递，热耦合效应显著减弱。

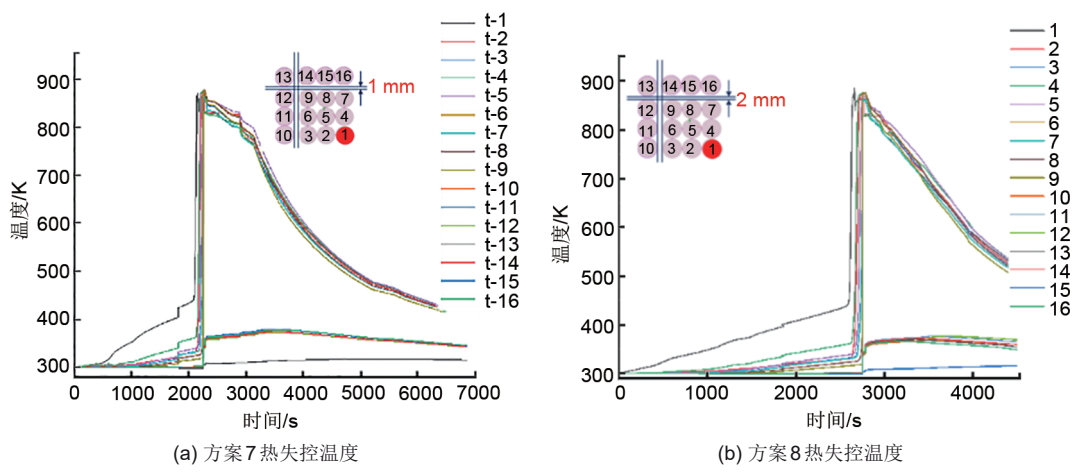


图5 不同间距下电池组（3×3节电池为1簇）热失控温度

Fig. 5 Thermal runaway temperature of battery pack (3 × 3 as 1 cluster) at different spacings

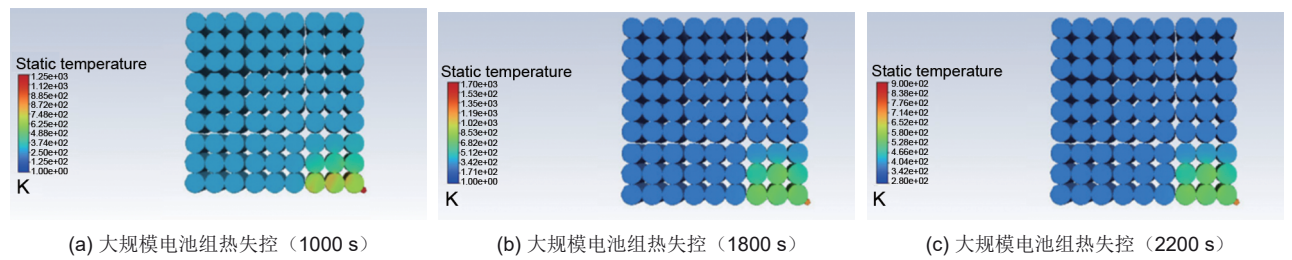


图6 1 mm间距下电池组热失控过程温度云图

Fig. 6 Temperature cloud of thermal runaway process of battery pack at 1 mm pitch

表6 不同间距下电池组（3×3节电池为1簇）典型温度情况

Table 6 Typical temperature conditions of battery packs (3 × 3 as 1 cluster) at different spacings						
方案	1号电池热失控温度/K	1号电池热失控时间/s	到第二簇电池时间/s	到最后一簇电池时间/s	电池组热失控最高温度/K	热失控传播结束时间/s
7	426	2189	—	—	875	—
8	453	2863	—	—	867	—

如表6所示，在1 mm间距（方案7）下，首节电池在2189 s触发热失控，未发生热失控传播，峰值温度达875 K。综合分析表明，电池簇间距的合理设置可有效延缓热失控触发，抑制热失控传播速度，降低温度峰值，为大规模电池组安全设计提供有力参考。

当电池之间的间距较小时，热传递效率较高，导致邻近电池温度迅速升高，从而增加热失控传播

的风险。间距较小时，热量更易在紧密排列的电池间蔓延，易使整个电池组在短时间内发生热失控传播。而较大的电池间距能够有效降低热量传递效率，因为热量传输路径更长、过程更复杂，相邻电池温升速度减缓，热失控传播速度降低，甚至可被有效阻断，抑制电池组内的热失控蔓延。由实验数据分析可知，随着电池模组内电池簇间距的逐步增大，热失控触发时间将相应后移，即触发延迟效应

越发明显。同时, 电池模组内的热失控传播速率显著减缓, 且热失控所引发的最高温度峰值也随之降低。热失控的传播风险与模组内部热量积聚程度密切相关。为有效遏制热失控在电池组内部的蔓延趋势, 需针对首个发生热失控的电池簇对相邻电池单元的热作用采取针对性抑制措施, 从而有效降低热失控触发速率与传播风险, 提升电池模组的整体安全。

4 结 论

本工作以正极材料为钴酸锂的18650型锂离子电池为研究对象, 围绕单体电池及不同排布形式的电池组, 开展了热失控传播的实验及数值仿真研究。基于仿真与实验对比验证, 建立的热失控传播模型具备良好的可靠性。通过系统性分析电池组热失控的温度变化规律, 总结得出以下主要结论:

(1) 对于单体电池, 1 mm间隔虽无法完全阻断热失控传播, 但可有效延缓热传播速率。相比无间距条件, 单体电池在1 mm间距下热失控传播至2号电池的时间延长227 s, 环境温度峰值提升, 环境温度最高可达809 K。当间距增大至2 mm时, 相邻电池未发生热失控, 这表明适当增大间距可显著抑制热失控传播, 后续研究应着重研究间距与环境温度峰值之间的变化规律与影响机制。

(2) 针对不同电池簇结构电池组的研究表明, 热失控传播特性存在明显差异。本工作首次给出电池簇临界阻断间距, 在2×2簇(共4簇)结构中, 2 mm间距即可有效阻断热失控传播; 在3×3簇(共9簇)结构下, 因未达到传播所需的临界温度阈值, 即便为1 mm间距, 热失控亦未蔓延至相邻簇。不同电池簇结构与间距组合对热失控的临界触发条件及传播特性存在显著影响。在3×3簇(共9簇)结构中, 虽然初始热失控簇释放的总热量可能更大, 但其热量需要流向周围更多电池, 导致周围电池簇表面温度上升相对缓慢, 其总热容更大, 热扩散路径更为复杂。此外, 材料的物性参数与边界条件等输入参数在实际实验中可能存在波动, 且模型本身需对复杂的物理化学过程进行一定程度的简化。因此, 仿真结果与实际数据之间可能存在一定偏差, 后续研究可深入探究不同布局下热失控传播的临界条件, 为电池组的设计优化提供更具普适性的理论依据。

(3) 综合分析表明, 随着电池模组内间距逐步增大, 热失控的触发时间明显延后, 传播速率大幅减缓, 热失控过程中产生的峰值温度也会随之降低。本工作量化了触发延迟、传播减速与峰值降温3种效应随间距变化的关系。电池热失控传播风险与模组内热量积聚程度密切相关, 合理增大电池簇间距、削弱初始热失控电池对相邻电芯的热耦合作用, 可有效延缓热失控传播过程, 降低系统热失控风险, 提升动力电池组的安全性能。

参 考 文 献

- [1] 邵凌云, 张卓然, 高华敏, 等. 电能航空动力技术发展研究[J]. 中国工程科学, 2025, 27(2): 25-38. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2024.10.014.
SHAO L Y, ZHANG Z R, GAO H M, et al. Development of electric propulsion technology in aviation[J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2025, 27(2): 25-38. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2024.10.014.
- [2] 陈素文, 孔冠杰, 张亚雷, 等. 锂离子电池储能系统火灾爆炸风险分析与防控技术研究进展[J]. 中国工程科学, 2025, 27(2): 269-286.
CHEN S W, KONG G J, ZHANG Y L, et al. Fire and explosion risk analysis and prevention and control technology of lithium-ion battery energy storage systems[J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27(2): 269-286.
- [3] 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]. 北京: 清华大学, 2016.
FENG X N. Thermal runaway initiation and propagation of lithium-ion traction battery for electric vehicle: Test, modeling and prevention[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [4] 刘大同, 周建宝, 郭力萌, 等. 锂离子电池健康评估和寿命预测综述[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(1): 1-16.
LIU D T, ZHOU J B, GUO L M, et al. Survey on lithium-ion battery health assessment and cycle life estimation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(1): 1-16.
- [5] 张青松, 刘添添, 白伟. 加热方式对锂离子电池热失控行为影响[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(9): 44-51.
ZHANG Q S, LIU T T, BAI W. Effect of heating mode on thermal runaway behavior of lithium ion battery[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(9): 44-51.
- [6] SABBAH R, KIZILEL R, SELMAN J R, et al. Active (air-cooled) vs. passive (phase change material) thermal management of high power lithium-ion packs: Limitation of temperature rise and uniformity of temperature distribution[J]. Journal of Power Sources, 2008, 182(2): 630-638. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2008.03.082.
- [7] LARSSON F, MELLANDER B E. Fire spread due to thermal runaway in a lithium-ion battery cell[C]//Fires in vehicles (FIVE) 2014, 2014: 267-270.
- [8] 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. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0177.
- ZHANG Q S, ZHAO Y, LIU T T. Effects of state of charge and battery layout on thermal runaway propagation in lithium-ion batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(8): 2519-2525. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0177.
- [9] CHEN M, SUN Q J, LI Y Q, et al. A thermal runaway simulation on a lithium titanate battery and the battery module[J]. Energies, 2015, 8(1): 490-500. DOI:10.3390/en8010490.
- [10] LIU X, WU Z B, STOLIAROV S I, et al. A thermo-kinetic model of thermally-induced failure of a lithium ion battery: Development, validation and application[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2018, 165(11): A2909-A2918. DOI:10.1149/2.0111813jes.
- [11] 张彦辉. 锂离子电池热失控抑制与防连锁[J]. 船电技术, 2018, 38(5): 16-20. DOI:10.3969/j.issn.1003-4862.2018.05.005.
- ZHANG Y H. Research on thermal runaway and chain reaction for Li-ion batteries[J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2018, 38(5): 16-20. DOI:10.3969/j.issn.1003-4862.2018.05.005.
- [12] 张青松, 曹文杰, 罗星娜, 等. 基于多米诺效应的锂离子电池热释放速率分析方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(5): 902-907. DOI:10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0383.
- ZHANG Q S, CAO W J, LUO X N, et al. Analysis method of heat release rate of lithium-ion battery based on domino effect[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(5): 902-907. DOI:10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0383.
- [13] MALEKI H, DENG G P, ANANI A, et al. Thermal stability studies of Li-ion cells and components[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1999, 146(9): 3224-3229. DOI:10.1149/1.1392458.
- [14] SMYSHLYAEV A, KRSTIC M, CHATURVEDI N, et al. PDE model for thermal dynamics of a large Li-ion battery pack[C]// Proceedings of the 2011 American Control Conference. June 29-July 1, 2011, San Francisco, CA, USA. IEEE, 2011: 959-964. DOI:10.1109/ACC.2011.5991584.
- [15] PARHIZI M, AHMED M B, JAIN A. Determination of the core temperature of a Li-ion cell during thermal runaway[J]. Journal of Power Sources, 2017, 370: 27-35. DOI:10.1016/j.jpowsour. 2017. 09.086.
- [16] SPOTNITZ R, FRANKLIN J. Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells[J]. Journal of Power Sources, 2003, 113(1): 81-100. DOI:10.1016/S0378-7753(02)00488-3.
- [17] HATCHARD T D, MACNEIL D D, BASU A, et al. Thermal model of cylindrical and prismatic lithium-ion cells[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2001, 148(7): A755. DOI: 10.1149/1.1377592.
- [18] 郭王勇, 李丽娜, 王敬伟, 等. 18650型锂离子电池一维热失控传播试验研究[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(3): 438-441, 452. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0029.2021.03.035.
- GUO W Y, LI L N, WANG J W, et al. Experimental study on thermal runaway propagation of 18650 lithium ion battery in linear horizontal arrangement[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(3): 438-441, 452. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0029.2021. 03.035.