

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2024.08.009

基于概率函数触发的锂电池模组热失控蔓延 建模与分析方法研究*

禹进^{1,2}, 郭川钰¹, 于佳佳³

(1. 重庆交通大学航空学院, 重庆 400074; 2. 绿色航空能源动力重庆市重点实验室, 重庆 401120;

3. 重庆大学能源与动力工程学院, 重庆 400044)

[摘要] 针对现有数值模拟方法难以准确反映锂电池热失控触发温度概率性变化的问题, 提出基于概率函数触发的锂电池模组热失控蔓延建模方法。该方法首先通过统计分析实际锂电池热失控温度区间和数量分布, 以此计算出各温度区间热失控触发概率, 然后基于提出的概率触发模拟器实现仿真过程概率触发, 采用实验数据对该方法的有效性进行验证, 最后对概率函数触发条件下的热蔓延路径及其概率进行分析。结果表明, 存在包括跳跃式热失控现象在内的多种热失控蔓延路径, 其中顺序热失控的概率最高, 而跳跃式热失控的概率最小。所提出的方法为研究锂电池模组热失控蔓延过程的概率性提供有效的研究工具和分析方法。

关键词: 锂电池模组; 跳跃式热失控; 概率; 热蔓延; 函数触发

Modeling and Analysis Method of Thermal Runaway Propagation in Lithium Battery Modules Triggered by Probability Function

Yu Jin^{1,2}, Guo Chuanyu¹ & Yu Jiajia³

1. School of Aeronautics, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074;

2. Chongqing Key Laboratory of Green Aviation Energy and Power, Chongqing 401120;

3. School of Energy and Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044

[Abstract] For the problem that existing numerical simulation methods are unable to accurately reflect the probabilistic temperature variations caused by thermal runaway in lithium batteries, a modeling method for the thermal runaway propagation of lithium battery modules based on probability function triggering is proposed. This method calculates the triggering probability of thermal runaway in each temperature range by statistical analysis of the temperature range and distribution of actual thermal runaway events in lithium batteries. Based on the proposed probabilistic trigger simulator, the simulation process is probabilistically triggered. The effectiveness of the method is verified by comparing simulation results with experimental data, showcasing a high degree of correlation. Then, the thermal spread paths and their probabilities under different triggering conditions of the probability function are analyzed, revealing multiple potential routes for thermal runaway, including the jump thermal runaway event. The sequential thermal runaway path is identified as the most probable, while the jump phenomenon is deemed least likely. The proposal of this method further improves the consistency between numerical simulation and actual process of thermal runaway in lithium batteries, providing an effective research tool and analysis method for studying the probability of thermal runaway propagation in lithium battery modules.

Keywords: lithium battery modules; jumping thermal runaway; probability; heat spread; function trigger

* 国家自然科学基金(52006020)和重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0833)资助。

原稿收到日期为2024年01月12日, 修改稿收到日期为2024年04月06日。

通信作者: 禹进, 副教授, 博士, E-mail: yjin123@yeah.net。

前言

随着新能源利用的兴起,锂电池在新能源汽车和储能电站上快速普及。然而时有发生锂电池热失控火灾爆炸事故已经成为锂电池在新能源汽车和储能电站大规模推广应用的第一障碍^[1]。绝大部分事故都涉及锂离子电池的热失控以及热失控蔓延两个过程。单体电池热失控的产热有限,造成的危害相对可控;而由于单体热失控,如果进一步导致电池系统中的热失控蔓延,短时间释放大量的能量,以及有毒和可燃气体,将导致人员和财产的重大损失,为此亟须开展深入的探索与研究^[2]。

目前已有不少学者对锂电池热蔓延过程展开了深入的研究。Chen等^[3]的实验研究结果表明,电池热失控蔓延过程中会出现传播加速的现象。常润泽等^[4]通过实验发现不同隔热材料对锂电池模组热蔓延时间的影响不同,对喷阀与热失控最高温度无明显影响。Feng等^[5]研究了锂电池模组的热失控蔓延机制,结果表明电池热失控热释放能量的12%就足以引发相邻电池发生热失控。王怀铷等^[6]研究结果指出,单个电池模组0.4C过充条件时,不会引发电池簇的热失控蔓延,而0.5C过充时,会逐级向上触发电池模组热失控,引发电池簇的热失控蔓延。Song等^[7]对280 A·h磷酸铁锂电池模组进行了热失控蔓延实验研究,分析得出热失控过程中超过75%的能量用于加热电池本身。Lai等^[8]分析了3种不同触发方式对电池模组热蔓延行为的影响,电池通过接触面传递热量向周围电池蔓延,形成多米诺效应。Sun等^[9]和Li等^[10]针对不同荷电状态对锂电池热失控行为进行了研究,结果显示电池热失控温升速率与电荷量呈正比,减小荷电量则会降低电池热蔓延风险。Jia等^[11]研究指出低压环境对模组热蔓延速度有很大影响,模组平均温度和质量损失都有不同程度降低。Jia等^[12]还观察到了锂电池两种热失控传播模式,发现局部区域过热或整体温度高决定其传播模式。

在上述关于锂电池热失控及其传播行为的研究中,为了简化研究过程,一般都假定电池的热失控温度和传播是一个相对确定性的事件。然而,在实际电池模组热失控过程中,由于电池本身的生产工艺和工作环境的差异,会导致电池热失控触发温度并非一个固定值^[13]。此外,在电池热失控蔓延过程中,

由于受到高温影响,可能导致部分电池随机出现绝缘失效而引发跳跃式热失控。这些因素都会导致电池热失控触发温度会在一个较大温度区间内波动,从而改变热失控传播路径和蔓延速度^[14-15]。因此,实际的锂电池热失控蔓延过程并非是确定的,而具有高度的概率性。然而,目前从概率角度对锂离子电池模组的热失控传播行为的相关研究极其缺乏,仅有Zhai等^[13]对电池热失控的传播过程进行了概率上的理论分析。

利用实验手段对锂电池模组热失控蔓延的概率性开展研究存在着高成本、高危险性以及高复杂性和随机性所带来的重复性低等突出问题。而采用数值模拟手段是解决上述问题的比较切实可行的方案。目前现有的热失控蔓延的数值模拟方法主要采用阿伦尼斯定律描述电池在热失控时内部一系列副反应的放热速率^[16-17]。这些副反应的阿伦尼斯定律系数需要繁琐的实验来测定。为了简化建模过程,也有不少学者将电池内部一系列副反应的放热速率作为一个整体来进行计算^[14,18-21]。这样也使得采用电池实验数据来对模型进行校准更加容易。然而,上述已有的数值模拟方法均是基于确定的热失控温度和热释放速率,无法反映出真实锂电池热失控过程的概率触发。

综上所述,实际锂电池热失控蔓延过程具有高度的概率性,然而目前已有的数值模拟方法难以真实地反映出电池热失控概率触发,严重限制对锂电池模组热失控蔓延问题的研究。为此,本文提出一种能够模拟锂电池在不同温度区间概率触发的建模及分析方法,并通过实验数据对所提出的方法进行验证。然后基于该方法,从概率的角度对锂离子电池模组的热失控传播路径进行深入的分析研究。

1 概率触发热失控传播模型建立

1.1 基本传热方程

为了模拟锂电池模组的热蔓延过程,建立锂电池的热失控三维模型。电池在触发热失控后,会释放大量的热,同时会通过导热的方式传递到其他电池,其导热微分方程^[22]如下式:

$$\rho C_p \frac{\delta T}{\delta t} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q_v(t) \quad (1)$$

式中: ρ 、 C_p 和 q_v 分别表示电池的密度、比热容和电池热生成速率; λ_x 、 λ_y 和 λ_z 分别表示电池各方向的导热

系数。

在电池热失控过程中,内部化学反应复杂,通过设定电池热释放速率 $Q(t)$ 表示 q_v ,如下式:

$$q_v = \frac{Q(t)}{V} \quad (2)$$

式中 V 代表电池体积。 $Q(t)$ 是通过实验数据优化得到,具体优化和确定过程将在下一节详细描述。

在电池热失控过程中,电池会与外界空气发生对流换热和辐射换热,电池换热过程可用下式表示:

$$q = h(T_b - T) \quad (3)$$

$$q = \delta\sigma S(T_a^4 - T_b^4) \quad (4)$$

式中: T_b 表示外界空气温度; T 为电池表面的温度; h 为电池表面和外界空气的对流换热系数; δ 为辐射率; σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数; S 为辐射面积; T_a 和 T_b 分别为辐射面a和辐射面b的温度。

1.2 电池产热模型

采用阿伦尼乌斯定律描述电池在热失控时内部一系列副反应的放热速率的方法计算量大,并且需要大量繁琐的实验来测定一系列副反应的阿伦尼乌斯系数。为此,Coman等^[22]提出了一种基于实验数据确定热释放速率的半经验热失控简化模型。该方法的核心思想是将电池内部一系列副反应的放热速率整合为一个整体进行计算。电池的热释放量通过实验测量获得,然后分析出热释放速率与时间的关系,并将其作为模拟过程的热源项输入。因此,本文参考Coman等^[22]的方法,为18650型锂离子电池构建其热失控产热模型。

Liu等^[23]对2×2的18650型电池模组进行了加热热失控实验,分别测得了4个电池热失控温度随时间的变化曲线。模型电池单体直径18 mm,高65 mm。本文首先选取张青松等^[21]提出的单个18650电池产热的热释放曲线作为模型的输入。然而模拟结果与实验存在较大差距,这主要是由于实验中燃烧释放的热量并不是全部作用于电池本身,而是一部分以热量的形式散失在空气中。为此,参考Wang等^[24]提出方法,通过迭代计算不断逼近实验电池温度,得到该温度下电池产热速率,结果如图1所示。最终的锂电池温度分布的模拟结果与实验结果的对比如图2所示。从图中可以看出仿真结果与实验结果能良好地吻合,从而证明了所构建的电池热失控模型中产热和传热参数设置的可靠性。

1.3 锂电池模组热失控概率触发模型

锂电池模组在实际热失控过程中单体电池的临

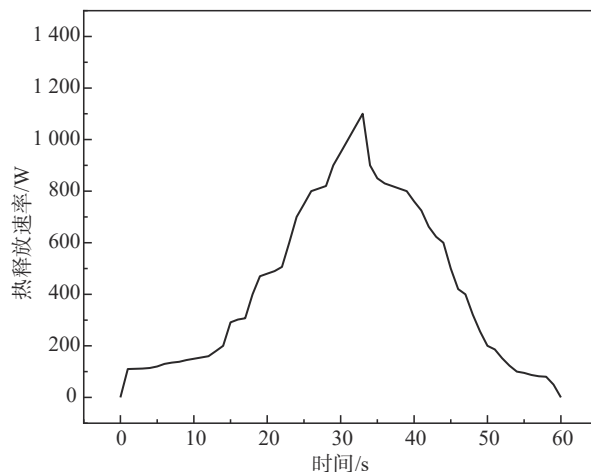


图1 热释放速率曲线

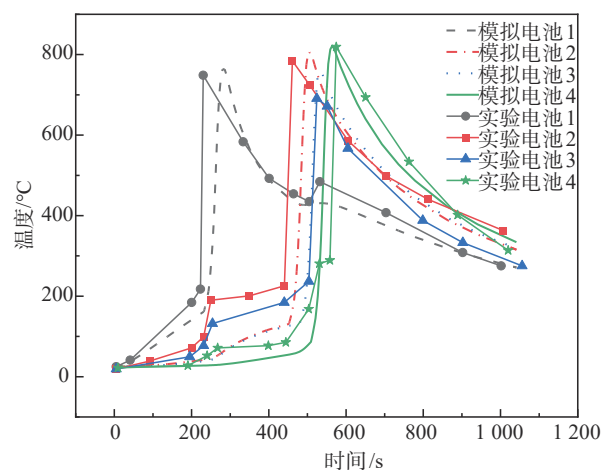


图2 模拟与实验电池温度曲线对比

界触发温度会在一定温度范围内变化。为了能够模拟现实锂电池的热失控温度概率触发,对已建立的热失控模组引入概率函数,使其临界触发温度满足概率函数分布。热失控概率触发模型流程如图3所示。首先通过对实际锂电池热失控的温度区间及其电池数量分布进行统计分析,计算得出不同温度范围下的热失控触发概率,然后基于随机数产生的分布概率来判断模拟过程中的概率触发,最终实现基于概率函数触发的锂电池模组热蔓延仿真。接下来对锂电池模组热失控概率触发模型的构建进行详细的介绍。

1.3.1 统计电池热失控温度区间及其数量分布

根据实验数据,统计锂电池总数量 X_{sum} 以及发生热失控的温度区间 $[T_{\text{min}}, T_{\text{max}}]$ 。根据实验数据中锂电池数量的多少,取合理的温度区间步长 ΔT_c ,从而

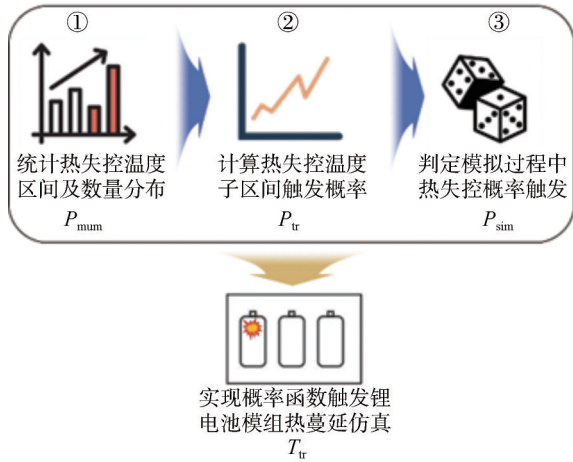


图3 热失控概率触发方法示意图

将热失控的温度区间分成 n_e 个子区间。

$$n_e = \frac{T_{trmax} - T_{trmin}}{\Delta T_e} \quad (5)$$

式中 n_e 为整数。在第 i 个温度子区间发生热失控的电池数量记为 X_i 。根据对应温度子区间热失控电池数量,确定其每组电池热失控数量分布频率分别为

$$A_i = \frac{X_i}{X_{sum}}, 1 \leq i \leq n_e \quad (6)$$

由式(6)可分别得到每个温度区间电池热失控数量分布频率 A_i , 然后将其累加可得到各个温度区间的电池累积热失控数量分布概率 $P_{mum}(i)$:

$$P_{mum}(i) = \sum A_i \quad (7)$$

得到的电池累积热失控数量分布概率 $P_{mum}(i)$ 是各个温度区间的离散函数。为了得到任意温度下的电池累积热失控数量分布概率连续函数 $P_{mum}(T)$, 将各个温度区间的 $P_{mum}(i)$ 采用连续函数拟合, 最终得到电池累积热失控数量的分布概率连续函数 $P_{mum}(T)$ 。

1.3.2 计算锂电池热失控概率曲线

$P_{mum}(T)$ 反映的是锂电池在各个温度区间热失控数量的分布概率, 而不是每个温度子区间的热失控触发概率。各个子区间的热失控触发概率需要通过 $P_{mum}(T)$ 计算获得。

由于实验测量的锂电池数量受限, 导致实验数据分组数不可能过多。而数值模拟中的分组数不受实验数据分组数的影响, 可以根据情况自由选取。在仿真过程中, 温度每升高到一个温度子区间会判断一次是否触发热失控, 因此不同温度子区间分组数的选取会有不同的总判定次数, 从而导致子区间会有不同的热失控触发概率。为了与实验数据的分

组数区分, 取仿真过程使用的温度区间步长为 ΔT_s , 由此将温度区间划分为 n_s 个子区间。仿真模拟过程所采用的温度子区间可以与实验数据的温度子区间不同。因此, 通过 $P_{mum}(T)$ 可计算出 ΔT_s 温度区间的电池热失控数量分布频率 A_j :

$$A_j = P_{mum}(T_{trmin} + j\Delta T_s) - P_{mum}(T_{trmin} + (j-1)\Delta T_s) \quad (8)$$

式中 $1 \leq j \leq n_s$ 。

第 j 个温度子区间的 A_j 等于第 1 到第 $j-1$ 个温度区间不触发热失控的概率再乘以第 j 区间热失控触发概率 $P_{tr}(j)$, 即

$$A_j = \begin{cases} P_{tr}(1), & j = 1 \\ P_{tr}(j) \prod_{i=1}^{j-1} (1 - P_{tr}(i)), & 1 < j \leq n_s \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)反算出每个温度子区间的热失控触发概率 $P_{tr}(j)$, 即

$$P_{tr}(j) = \begin{cases} A_1, & j = 1 \\ A_j / \prod_{i=1}^{j-1} (1 - P_{tr}(i)), & 1 < j \leq n_s \end{cases} \quad (10)$$

1.3.3 热失控触发的数学模型

在获得每个温度区间的热失控触发概率后, 接下来就需要通过设置热失控的判定模型来实现锂电池的概率触发。为此, 本文提出了一种由随机数生成的分布概率来判定模拟过程中锂电池的概率触发的新方法, 将其命名为概率触发模拟器, 其算法流程如图4所示。该算法的核心思想是将锂电池是否热失控的概率等效替换为生成随机数是否落在指定区域的概率, 从而实现锂电池热失控条件的概率触发。

在锂电池升温达到热失控的温度子区间时, 如果此时锂电池还未触发热失控, 则在该子区间判定一次, 决定该电池是否在此温度子区间触发热失控。在判定前, 首先利用随机函数生成一个区间范围为 $[a, b]$ 的随机正整数 $m(j)$ 。

$$m(j) = \text{random}(a, b) \quad (11)$$

式中随机数 $m(j)$ 在 a 到 b 的范围内满足均匀分布。需要指出, 概率触发模型的精度为 $1/(b-a+1)$ 。因此为了保证模拟的精度, a 到 b 的边界范围须足够大, 一般随机正整数取值范围大于 100。通过计算生成随机数的数值大小分布区间来定义出仿真模拟时的判定触发概率 $P_{sim}(j)$ 。

$$P_{sim}(j) = [m(j) - a + 1] / (b - a + 1) \quad (12)$$

为了判定仿真模拟过程中得到的判定触发概率是否大于热失控触发概率, 定义热失控触发判定

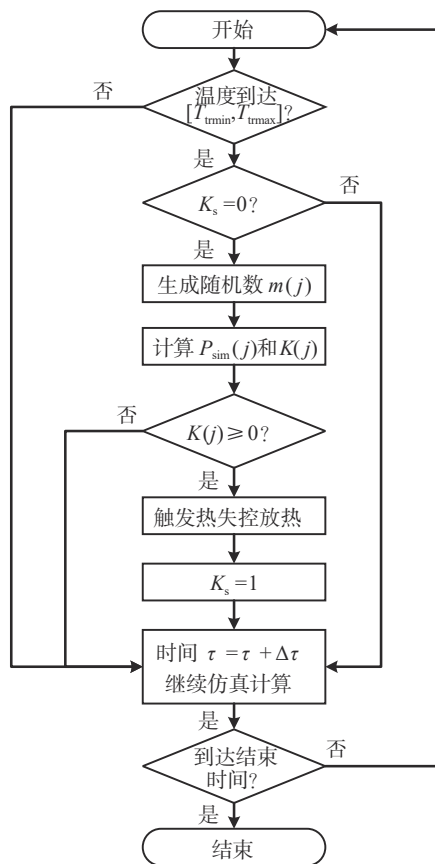


图4 热失控概率触发模拟器算法流程图

数 K :

$$K = P_{tr}(j) - P_{sim}(j) \quad (13)$$

当 $K \geq 0$ 时,表示生成随机数产生的概率落在电池热失控概率范围以内,此时电池将触发热失控;当 $K < 0$ 时,表示生成随机数产生的概率值落在电池热失控概率范围以外,此时电池不触发热失控而继续升温。

在数值模拟过程中,电池的温度每升高到一个温度子区间就会判断一次是否热失控。为了避免电池在已经触发热失控后,再次触发热失控,本文定义热失控状态数 K_s :

$$K_s = \begin{cases} 1, & K \geq 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

在计算过程中,如果 K_s 等于0,则电池进入条件判定程序,进而由概率决定是否触发热失控;若 K_s 等于1,则直接跳过条件判定程序,继续计算。

2 热失控概率模型验证

在上一节中已经给出了锂电池模组热失控概率

触发模型构建的通用方法和理论公式。本节中采用Zhai等^[13]的实验数据对所提出的方法进行验证。Zhai等测试了101个18650型号电池在相同条件下热失控触发温度区间及其电池数量分布,结果如图5所示。从图5中可以看出,锂电池主要在140–220 °C的温度区间热失控,然而仍有少量电池在80–140 °C和220–260 °C的温度区间发生热失控。整体的实验数据近似满足正态分布。

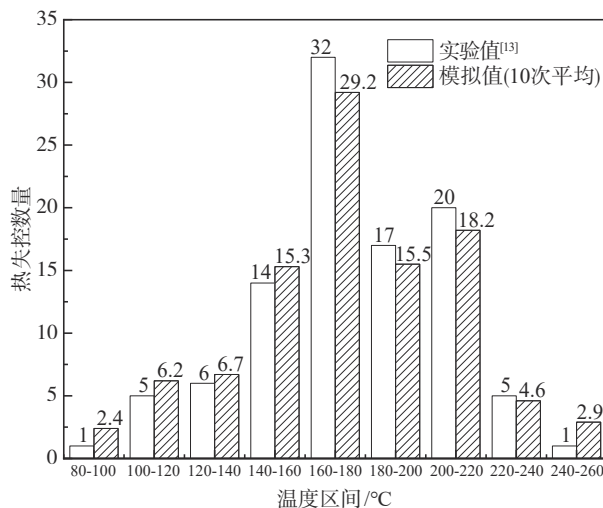


图5 模拟与实验热失控电池数量对比图

利用实验数据,采用式(6)和式(7)可获得电池累积热失控数量分布概率 $P_{num}(i)$ 。将各个温度区间的 $P_{num}(i)$ 采用连续函数拟合,得到电池累积热失控数量分布概率函数 $P_{num}(T)$,结果如图6所示。拟合电池累积热失控数量分布概率函数表达式为

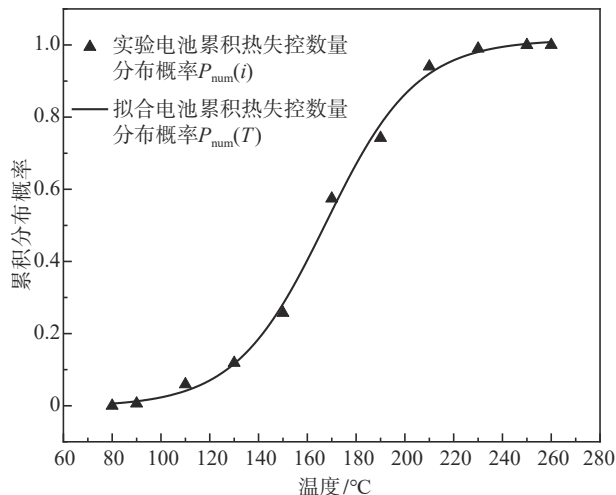


图6 电池累积热失控数量分布概率曲线

$$P_{\text{num}}(T) = 1.015 - 1.019 / [1 + \exp((T - 168) / 18.63)] \quad (15)$$

式中 $80\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 260\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

在仿真时,选取不同的温度子区间会导致子区间有不同的热失控触发概率。为了能更好地验证所提出方法的有效性,在模型中选取与实验数据相同的分组数,即温度子区间步长为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,总温度分组数为9组。然后根据电池累积热失控数量分布概率函数 $P_{\text{num}}(T)$ 计算热失控触发概率 $P_r(j)$,结果如图7所示。从图中可以看出,随着温度的增加,锂电池的热失控触发概率呈现增加的趋势。然而,在 $180\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度子区间的热失控电池数相比 $200\text{--}220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度子区间的电池数偏低,从而使得整体的实验数据在 $180\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度子区间稍微偏离了正态分布。因而,实验数据在该温度区间的分布造成了该温度区间触发概率较低。

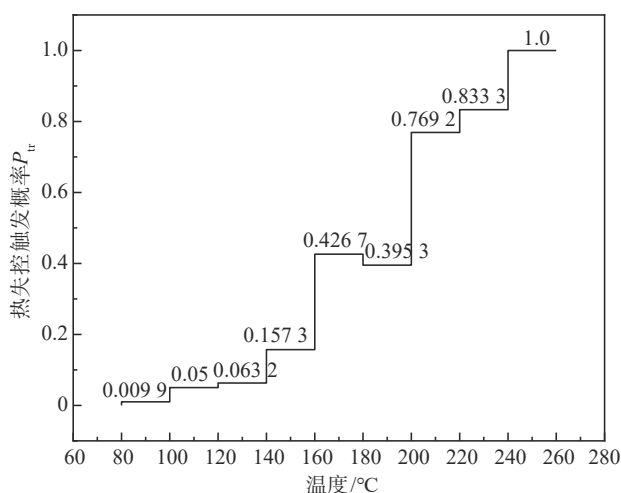


图7 温度子区间热失控触发概率曲线

为了模拟锂电池热失控过程,选用多物理场模拟软件 COMSOL 建立一个由 101 个单体电池组成的热失控概率模型。电池单体直径 18 mm ,高 65 mm ,通过 COMSOL 软件对电池模组进行网格划分,总网格数 170 169,如图 8 所示。利用 COMSOL 软件,在所建立的物理模型中加入锂电池热失控概率触发模型,模拟过程的随机数生成范围取 $[1, 1\ 000]$,从而模拟锂电池模组的热蔓延过程。

在仿真过程中,由于概率性使得仿真结果出现一定的波动性。电池数量越多,得到的概率结果及规律就越稳定。然而,增加电池数目会增加仿真模型的复杂度以及计算成本。因此,为了增加结果的

稳定性,本文对 10 次模拟的结果进行了平均化处理,其实质等价于将模拟的电池数量增加 10 倍。取 10 次模拟结果的平均值与实验值进行对比,结果如图 5 所示。通过对比,可以明显看出,本文提出的基于概率函数触发的热蔓延模型,能够精准地反映实际过程中锂电池的热失控触发温度区间以及电池数量分布趋势,模拟值与实验值吻合良好。然而,模拟结果与实验值存在一定的误差,造成误差的原因主要有两个:一是模拟的电池数量不够多,概率结果的稳定性仍不够;二是模拟过程的随机数生成范围取 $[1, 1000]$,概率触发模型的精度为 0.001,这就造成了一定的误差。总体而言,模拟结果与实验值保持了良好的一致性,进一步证明了本文所提出方法的有效性和准确性。



图8 物理模型网格划分示意图

3 锂离子电池模组热蔓延路径分析

在目前已有的电池热失控蔓延路径研究中,由于绝大多数均基于确定性假设,因而其热蔓延传播路径是确定的。而在本文的研究中引入了热失控概率触发模型,从而使得锂电池传播路径具有了概率性。因此,接下来将分析单排电池和双排电池在不同触发位置情况下的热失控蔓延路径及其概率,从而总结出基于概率函数触发条件下的热蔓延传播规律。

锂电池模组的热蔓延传播路径受到电池放热速率等因素影响。因此,本节仍然基于 COMSOL 软件,采用与上一节相同的初始条件设置,用来模拟锂电池热失控蔓延过程的传热条件。模型中的各个电池触发热失控是独立事件,因而锂电池不同路径的概率可以通过独立条件概率事件计算公式而获得。基于概率函数触发条件下,会出现多条蔓延路径,本文

将锂电池沿着已经热失控的电池依次触发热失控蔓延的现象称为顺序热失控,而将锂电池跳过旁边未热失控的电池提前触发热失控的现象,定义为跳跃式热失控。

3.1 单排电池排布

3.1.1 三电池角位置触发

首先对3个电池并列排布的热失控蔓延路径进行分析,其电池排列和编号如图9(a)所示。在非概率模型中,锂电池将沿着1号电池从左往右依次传播,即传播路径为1→2→3。而在概率触发模型中,则存在两条传播路径,分别为顺序热失控路径1→2→3和跳跃式热失控路径1→3→2。其中,当 $T_{ir2} \geq 200\text{ }^\circ\text{C}$ 时,3号电池升温至 $80\text{ }^\circ\text{C}$,达到热失控风险温度区间,随后即可出现顺序热失控路径的传播现象。要实现跳跃式热失控路径的传播,整个电池系统必须满足如下条件:2号电池热失控温度 $T_{ir2} \geq 220\text{ }^\circ\text{C}$,且3号电池热失控温度 $T_{ir3} \leq 120\text{ }^\circ\text{C}$ 。因此,通过枚举法依次列出该蔓延路径下可能出现的温度子区间组合,相乘得到该温度组合的触发概率,最后将所有计算所得温度子区间组合触发概率累加,得到该路径热失控概率。两条路径的概率如表1所示。在3个电池并排的情况下,出现跳跃式热失控的概率为0.345%。

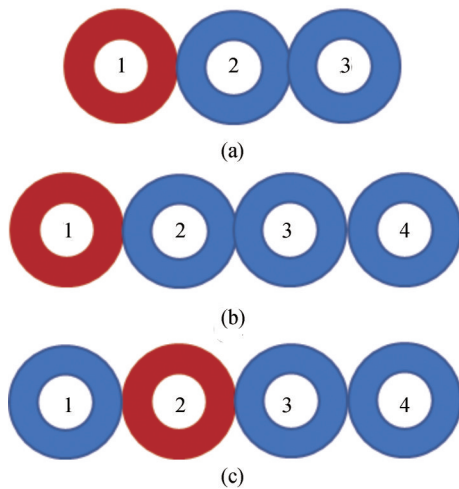


图9 锂电池不同排布及触发位置示意图

3.1.2 四电池角位置触发

当4个电池并排排布,且初始触发位置为1号电池(如图9(b)所示)时,根据排列组合可知存在以下6条可能的路径:1→2→3→4、1→2→4→3、1→3→2→4、1→3→4→2、1→4→2→3、1→4→3→2。在非概率模型中,会按照从左往右依次发生热失控,即

表1 不同类型热失控模型蔓延路径及其概率对比

类型	概率触发模型		非概率模型	
	路径	概率/%	路径	
单 层	三电池	1→2→3	99.655	1→2→3
		1→3→2	0.345	
	四电池 角触发	1→2→3→4	99.432	1→2→3→4
		1→2→4→3	0.505	
		1→3→2→4	0.063	
		1→3→4→2	0	
		1→4→2→3	0	
		1→4→3→2	0	
	四电池 中间触发	2→3→1→4	53.91	2→(1,3)→4
		2→1→3→4	43.74	
		2→3→4→1	2.195	
		2→1→4→3	0.15	
2→4→1→3		0.00061		
2→4→3→1		0.00439		
双 层	2	1→2→3→4、(1→3→2→4)	89.2	1→(2,3)→4
	×	1→2→4→3、(1→3→4→2)	9.72	
	2	1→4→2→3、(1→4→3→2)	1.08	

1→2→3→4顺序路径。而在概率触发模型中,当 $T_{ir2} \geq 210\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $T_{ir3} \geq 80\text{ }^\circ\text{C}$,或当 $T_{ir3} \geq 180\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $T_{ir4} \geq 80\text{ }^\circ\text{C}$ 时,与之相对应的顺序路径仍然为1→2→3→4,其概率为99.432%。当 $T_{ir3} \geq 200\text{ }^\circ\text{C}$ 且 $T_{ir4} \leq 100\text{ }^\circ\text{C}$ 时,会出现跳跃式热失控路径1→2→4→3,其概率为0.505%。另一条跳跃式热失控路径1→3→2→4会在满足 $T_{ir2} \geq 220\text{ }^\circ\text{C}$ 且 $T_{ir3} \leq 110\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $T_{ir4} \geq 220\text{ }^\circ\text{C}$ 时出现,其概率为0.063%。然而,受到电池产热和传热条件的限制,1→3→4→2、1→4→2→3和1→4→3→2这3条路径无法传播,因此,其概率为0。

3.1.3 四电池中间位置触发

当4个电池并排且初始触发位置为2号电池时(如图9(c)所示),由排列组合可知同样存在以下6条可能的路径:2→1→3→4、2→1→4→3、2→3→1→4、2→3→4→1、2→4→1→3、2→4→3→1。在非概率模型下,电池1和电池3受到相同的传热条件,因此同时发生热失控,其顺序热失控路径为2→(1,3)→4。而在概率模型中,当 $T_{ir3} \geq 180\text{ }^\circ\text{C}$ 且 $T_{ir4} \geq 80\text{ }^\circ\text{C}$ 时,与之对应的顺序热失控路径为2→3→1→4和2→1→3→4,概率值分别为53.91%和43.74%。此外,由于各个电池热失控是相互独立的事件,还会有另外一条顺序热失控路径2→3→4→1,其概率值为2.195%。当 $T_{ir1} \leq 220\text{ }^\circ\text{C}$ 且 $T_{ir3} \geq 220\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $T_{ir4} \leq 120\text{ }^\circ\text{C}$ 时,会出现跳跃式热失控路径2→1→4→3,其概率值为0.15%。同时,当满足 $T_{ir1} \geq 220\text{ }^\circ\text{C}$ 且 $T_{ir3} \geq$

240 °C、 $T_{tr4} \leq 100$ °C、 $T_{tr1} \geq 240$ °C、 $T_{tr3} \geq 220$ °C、 $T_{tr4} \leq 100$ °C时,会分别出现两条跳跃式热失控路径2→4→1→3和2→4→3→1,其概率值分别为0.000 61%和0.004 39%。

3.2 双层排布

实际的电池模组往往是多层电池排布,然而当电池数量过多时,其蔓延路径将会变得异常复杂。因此,本文仅以2×2的双层电池模组为例(如图10所示),来分析多层模组时的热蔓延路径及其概率。在非概率模型中,电池2和电池3的传热条件相同,因此同时热失控,呈现1→(2,3)→4顺序热失控路径。而在概率模型中,当 $T_{tr3} \geq 140$ °C或 $T_{tr2} \geq 140$ °C时, $T_{tr4} \geq 80$ °C达到热失控温度风险区间阈值下限,与之分别对应的顺序热失控路径为1→2→3→4和1→3→2→4这两条对称的路径,其概率值为89.2%。除此之外,当 $T_{tr3} \geq 160$ °C且 $T_{tr4} \leq 170$ °C时,还有另外两条对称的顺序热失控路径,即1→2→4→3和1→3→4→2,其概率值为9.72%。当 $T_{tr2} \geq 160$ °C且 $T_{tr3} \geq 180$ °C、 $T_{tr4} \leq 170$ °C时,会出现两条对称的跳跃式热失控路径1→4→2→3和1→4→3→2,其概率为1.08%。

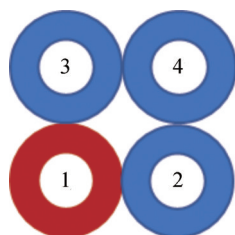


图10 2×2锂电池模组示意图

4 结论

本文首次提出了一种能够模拟锂电池在不同温度区间触发的建模方法,然后基于该方法,从概率的角度对锂离子电池模组的热失控传播路径进行了深入的分析研究,得到如下结论。

(1) 利用所提出的方法模拟了电池模组的失控触发温度区间及其电池数量分布,模拟结果与实验数据良好吻合,证明了基于概率函数触发的锂电池模组热失控蔓延建模方法的有效性。

(2) 基于概率函数触发模型的各个电池的热失控为相互独立事件,因此会出现多个可能的热失控蔓延路径,而在这些路径中发现了跳跃式热失控

现象。

(3) 通过分析出现不同路径需要的电池温度条件,计算得到了不同路径的热失控概率。结果表明,顺序热失控的概率最高,而跳跃式热失控的概率最小。此外,在跳跃式热失控中,最多只能跳跃一个电池而发生热失控。

参考文献

- [1] 禹进,郭川钰,张伟阔,等.磷酸铁锂电池在储能预制舱中的火灾模拟及其消防应急技术仿真研究[J].高电压技术,2023,49(12):5187-5195.
YU Jin, GUO Chuanyu, ZHANG Weikuo, et al. Fire accident simulation and fire emergency technology simulation of lithium iron phosphate battery in prefabricated compartment for energy storage power station [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(12): 5187-5195.
- [2] 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.
RUI Xinyu, FENG Xuning, HAN Xuebing, et al. Review on the thermal runaway propagation of lithium-ion batteries [J]. Chinese Battery Industry, 2020, 24(4): 193-201.
- [3] CHEN Mingyi, OUYANG Xudong, LIU Jiahao, et al. Investigation on thermal and fire propagation behaviors of multiple lithium-ion batteries within the package [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 157: 113750.
- [4] 常润泽,郑斌,冯旭宁,等.隔热层对锂电池模组热失控蔓延特性影响的实验研究[J].汽车工程,2021,43(10):1448-1456.
CHANG Runze, ZHENG Bin, FENG Xuning, et al. Experimental study on the effects of thermal insulation layers on the propagation characteristics of thermal runaway in lithium-ion battery module [J]. Automotive Engineering, 2021, 43(10): 1448-1456.
- [5] FENG Xunning, SUN Jing, OUYANG Minggao, et al. Characterization of penetration induced thermal runaway propagation process within a large format lithium ion battery module [J]. Journal of Power Sources, 2015: 261-273.
- [6] 王怀钊,孙宜听,金阳.磷酸铁锂储能电池簇过充热失控蔓延特性仿真研究[J].机械工程学报,2021,57(14):32-39.
WANG Huairu, SUN Yiting, JIN Yang. Simulation study on overcharge thermal runaway propagation of lithium-iron-phosphate energy storage battery clusters [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(14): 32-39.
- [7] SONG Laifeng, HUANG Zonghou, MEI Wenxin, et al. Thermal runaway propagation behavior and energy flow distribution analysis of 280 Ah LiFePO4 battery [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 170: 1066-1078.
- [8] LAI Xin, WANG Shuyu, WANG Huaibin, et al. Investigation of thermal runaway propagation characteristics of lithium-ion battery modules under different trigger modes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 171: 121080.
- [9] SUN T, WANG L, REN D, et al. Thermal runaway characteris-

- tics and modeling of LiFePO_4 power battery for electric vehicles [J]. *Automot. Innov.*, 2023, 6: 414-424.
- [10] LI Huang, DUAN Qiangling, ZHAO Chunpeng, et al. Experimental investigation on the thermal runaway and its propagation in the large format battery module with $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$ as cathode [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 375: 241-254.
- [11] JIA Zhuangzhuang, HUANG Zonghou, ZHAI Hongju, et al. Experimental investigation on thermal runaway propagation of 18650 lithium-ion battery modules with two cathode materials at low pressure[J]. *Energy*, 2022, 251: 123925.
- [12] JIA Yikai, UDDIN M, LI Yangxing, et al. Thermal runaway propagation behavior within 18650 lithium-ion battery packs: a modeling study [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 31: 101668.
- [13] ZHAI Hongju, LI Huang, PING Ping, et al. An experimental-based Domino prediction model of thermal runaway propagation in 18650 lithium-ion battery modules[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 181: 122024.
- [14] WANG Huaibin, LIU Bo, XU Chengshan, et al. Dynamic thermophysical modeling of thermal runaway propagation and parametric sensitivity analysis for large format lithium-ion battery modules[J]. *Journal of Power Sources*, 2022, 520: 230724.
- [15] WANG Huaibin, WANG Qinzhen, ZHAO Zhenyang, et al. Thermal runaway propagation behavior of the Cell-to-Pack battery system [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2023, 84: 162-172.
- [16] 董远夏, 张恒运, 朱佳俊, 等. 车用电池模组热蔓延防护结构的数值仿真研究[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(5): 1608-1616.
- DONG Yuanxia, ZHANG Hengyun, ZHU Jiajun, et al. Numerical simulation study on thermal runaway propagation mitigation structure of automotive battery module [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(5): 1608-1616.
- [17] ZHANG Yue, MEI Wenxin, QIN Peng, et al. Numerical modeling on thermal runaway triggered by local overheating for lithium iron phosphate battery [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 192: 116928.
- [18] FENG Xunning, LU Languang, OUYANG Minggao, et al. A 3D thermal runaway propagation model for a large format lithium ion battery module[J]. *Energy*, 2016, 115: 194-208.
- [19] HOELLE S, ZIMMERMANN S, et al. 3D thermal simulation of thermal runaway propagation in lithium-ion battery cell stack: review and comparison of modeling approaches[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2023, 170: 060516.
- [20] HOELLE S, DENGLER F, et al. 3D thermal simulation of lithium-ion battery thermal runaway in autoclave calorimetry: development and comparison of modeling approaches [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2023, 170: 010509.
- [21] 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.
- ZHANG Qingsong, CAO Wenjie, LUO Xingna, 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.
- [22] COMAN P T, DARCY E C, et al. Simplified thermal runaway model for assisting the design of a novel safe Li-Ion battery pack [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2022, 169: 040516.
- [23] LIU Quanyi, ZHU Qian, ZHU Wentian, et al. Influence of aerogel felt with different thickness on thermal runaway propagation of 18650 lithium-ion battery [J]. *Electrochemistry*, 2022, 90: 087003.
- [24] WANG Qingsong, QIN Peng, DUAN Qiangling, et al. A method for analyzing the heat generation rate of cylindrical lithium-ion batteries: China, 10545267. 9[P]. 2021-07-30.