



货架仓储场景下锂离子电池热失控多米诺传播模拟与风险评价

刘小勇^{1,2}, 张震渝¹, 刘小杰^{2*}, 王珺楠³

(¹安徽理工大学安全科学与工程学院, 安徽 淮南 232000; ²清华大学合肥公共安全研究院, 检验检测中心, 安徽 合肥 230601; ³安徽建筑大学, 安徽 合肥 230601)

摘要: 针对货架仓储场景下锂离子电池热失控及其多米诺传播风险, 构建了一种耦合动态热辐射叠加效应、剩余失效时间修正策略及喷淋响应机制的半经验预测模型。设计并开展了高镍三元电池货架火灾实验, 设置两种热失控初始位置 (边缘起火与中间起火) 及两种洒水喷头触发温度 (68℃与93℃) 共四种工况。模型准确复现四种工况下的热失控电芯数量, 喷淋启动时间平均绝对误差9.75 s, 偏差均在实验波动范围内。基于模拟结果提出单元电芯多米诺演化风险指数 (Unit Cell-Domino Evolution Risk Index, U-DERI) 与电芯货架布局多米诺风险指数 (Cell Rack Layout-Domino Risk Evolution Index, L-DERI), 量化评价表明: 边缘起火工况的风险 (68℃洒水喷头配置 U-DERI 为 13.98, 中风险; 93℃洒水喷头配置 U-DERI 为 18.11, 高风险) 显著高于中间起火工况 (68℃洒水喷头配置 U-DERI 为 1.78, 极低风险; 93℃洒水喷头配置 U-DERI 为 2.65, 低风险)。93℃洒水喷头配置货架整体风险 (L-DERI 为 10.86, 中风险) 高于 68℃洒水喷头配置 (L-DERI 为 8.05, 低风险)。该模型及双层级指标可为锂电池的仓储消防优化设计及分级防控提供工程参考。

关键词: 锂离子电池; 货架仓储; 热失控; 多米诺传播; 风险评价

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0581

中图分类号: TM 911

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-11

Simulation and Risk Assessment of Thermal Runaway Domino Propagation for Lithium-Ion Batteries in Rack Storage Scenarios

Liu Xiaoyong^{1,2}, Zhang Zhenyu¹, Liu Xiaojie^{2*}, Wang Junnan³

(¹School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232000, Anhui, China; ²Inspection and Testing Center, Hefei Institute of Public Safety, Tsinghua University, Hefei 230601, Anhui, China; ³Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, Anhui, China)

Abstract: A semi-empirical prediction model is established for lithium-ion battery thermal runaway and its domino propagation risk in rack-warehouse scenarios, which couples the superposition effect of dynamic thermal radiation, residual failure time correction strategy and sprinkler response mechanism. Rack-scale fire experiments are performed using high-nickel ternary lithium-ion batteries. Four test conditions are designed by combining two initial thermal-runaway positions (edge-cell ignition and middle-cell ignition) and two activation

收稿日期: 2026-07-06; 修改稿日期: 2026-09-03。

基金项目: 应急部重点科技计划项目 (KT20260323002)。

第一作者: 刘小勇 (1980—), 男, 博士, 正高级工程师, 研究方向为公共安全方向, E-mail: liuxiaoyong@tsinghua-hf.edu.cn; 通信作者: 刘小杰, 研究方向为锂电池热失控, E-mail: liuxiaojie@tsinghua-hf.edu.cn。

引用本文: 刘小勇, 张震渝, 刘小杰, 等. 货架仓储场景下锂离子电池热失控多米诺传播模拟与风险评价[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-11.

Citation: Liu Xiaoyong, Zhang Zhenyu, Liu Xiaojie, et al. Simulation and Risk Assessment of Thermal Runaway Domino Propagation for Lithium-Ion Batteries in Rack Storage Scenarios[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-11.

temperatures of water sprinklers (68°C and 93°C). The model accurately reproduces the number of thermally runaway cells under all four conditions, with a mean absolute error of 9.75 s for sprinkler activation time, and all deviations fall within experimental fluctuation ranges. Based on simulation outputs, the Unit-Cell Domino Evolution Risk Index (U-DERI) and the Cell-Rack Layout Domino Risk Evolution Index (L-DERI) are proposed. Quantitative evaluation demonstrates that the risk under edge-ignition conditions is markedly higher than that under middle-ignition conditions. For edge-ignition scenarios, the U-DERI reaches 13.98 (moderate risk) for the 68°C sprinkler setup and 18.11 (high risk) for the 93°C sprinkler setup. For middle-ignition scenarios, the U-DERI is 1.78 (very-low risk) at 68°C sprinkler activation and 2.65 (low risk) at 93°C sprinkler activation. The overall rack-level risk with 93°C sprinklers (L-DERI = 10.86, moderate risk) is higher than that with 68°C sprinklers (L-DERI = 8.05, low risk). The proposed model and two-tiered risk indices can provide engineering references for optimized fire-protection design and hierarchical risk prevention-control of lithium-ion battery warehouses.

Keywords: lithium-ion batteries; rack storage; thermal runaway; domino propagation; risk assessment

0 引言

锂离子电池在货架仓储条件下排列密集、散热受限,单体热失控后易诱发相邻电芯连锁传播。全球范围内锂电池仓储、暂存环节已发生多起重大火灾事故:①韩国京畿道华城市 AriCell 工厂火灾(2024-06-24),属于成品电池包装暂存仓储场景,起火车间货架堆放约 35000 只满电锂亚硫酰氯一次电池;火灾由缺陷单体电池首先引发,短时间内即发生多米诺蔓延与连续爆炸;事故共造成 23 人死亡、8 人受伤,绝大多数遇难人员死于有毒烟气窒息,爆炸碎片飞溅至厂区建筑外部,大火历时近 5 h 才得到控制。②广东惠州力特能新能源中转仓库火灾(2024-11-07),属于锂电池货架中转仓储场景,仓库内存放约 50 万粒 18650 型锂离子电池;单电芯热失控后引发了整仓多米诺蔓延,过火面积达 2062 m²,共造成 2 人死亡,直接经济损失 911 万元。上述事故共同表明,仓储环节的电池火灾存在蔓延速度快、扑救困难、后果严重等特点。因此,开展密集货架仓储条件下热失控传播模拟与风险评价研究具有重要的工程价值。

围绕锂离子电池热失控传播问题,国内外学者已开展了大量工作,当前已系统揭示了锂电池热失控的热滥用、电滥用、机械滥用三大诱因及其阶段演变规律^[1-3]。在传播机制方面,Archibald 等^[4]发现

非接触电芯间的热辐射是推动传播的主要传热方式。Hu 等^[5]通过实验揭示了大容量高镍方形电池单体和模组的热失控行为特征。程志翔等^[6]研究了大容量磷酸铁锂电池的热失控传播特性。单体电芯热失控会引发电芯间热失控蔓延,已有综述对其作用机理、各类预测模型及抑热的电池包设计优化手段进行了系统梳理^[7-9]。现有锂电池热失控传播模型主要分为三类:第一类是精细化机理模型:基于电芯内部电-热-化学反应耦合,可复现单体热失控内部反应演化;第二类是三维 CFD 仿真模型:可精细刻画流场、温度场与烟气输运,适合局部场景复现;第三类是半经验/网络化降阶模型:通过实验标定关键传热参数,舍弃部分内部精细反应,聚焦电芯间外部传热与连锁失效逻辑,兼顾计算效率与传播趋势预测能力,适合集群货架场景参数敏感性分析。仓储方面,Hu 等^[9]模拟了不同储存规模下钴酸锂电池集群的自热过程,发现货架存储条件下临界环境温度显著降低。徐成善等^[10]研究储能电站中垂直分布的电池排列结构下的火蔓延特性及能量传递机制,定量解耦了不同路径的传热量。在热失控传播模拟方面,有大量学者使用数值模拟来研究锂电池热失控特性^[11-14]。Wang 等^[15]提出了面向储能系统火灾传播的网络化半降阶模型,通过降阶处理降低了计算复杂度,热源项采用恒定热释放速率假设。杨娟等^[16]结合试验与数值仿真探究电池间距及

簇排布对热失控蔓延的作用，发现扩大电芯间隙可推迟热失控发生、减缓连锁传播。风险评价方面，李晋等^[17]从电池本征安全、储能故障及事故统计、热失控机理及火蔓延机制等方面总结了锂离子电池储能安全评价的研究进展。Xie等^[18]基于贝叶斯网络建立了锂离子电池仓库火灾风险评价方法。陈黎明等^[19]运用层次分析法对锂电池仓库管理现状及火灾诱因进行了多尺度分析。

现有研究多聚焦模组或电池包内部传播，对货架仓储中电芯排布方式、初始起火位置与喷淋介入时机的耦合影响关注不足，风险评价方法多基于静态结果或事故概率统计，难以有效区分工程变量带来的风险差异。针对上述不足，本文构建了融合动态热辐射叠加、剩余失效时间修正与喷淋响应机制的多米诺传播半经验模型，通过四种工况的实体货架火灾实验验证了模型的有效性，在此基础上提出单元电芯多米诺演化风险指数（Unit Cell- Domino Evolution Risk Index, U-DERI）与电芯货架布局多米诺风险指数（Cell Rack Layout -Domino Risk Evolution Index, L-DERI），实现从单元到整体的量化风险分级。研究结果可为锂电池的仓储消防设计及分级防控提供工程参考。

1 热失控多米诺传播模型

1.1 模型构建思路与基本假设

以单体电芯热失控为初始事件，计算其对相邻电芯及洒水喷头的动态辐射强度，判断电芯失效、剩余时间更新及喷淋触发。本模型的基本假设如下：（1）将热失控电芯等效为点源热辐射源，辐射随距离衰减；（2）热辐射为主控传热，其他效应通过修正系数等效；（3）各电芯参数相同，忽略遮挡差异；（4）目标电芯辐射强度由所有失控电芯线性叠加；（5）当总辐射强度达到临界值时电芯进入热失控，并动态修正剩余时间；（6）洒水喷头通过辐射吸热升温至动作温度启动；（7）忽略喷淋后水雾冷却、烟气扰动等复杂过程。

1.2 热辐射计算与叠加模型

1.2.1 几何距离计算

以电芯顶部平面几何中心点作为电芯位置表征点，根据电芯行列编号计算热失控电芯与目标电芯之间的平面距离，引入洒水喷头安装高度计算空间距离，其表达式如下：

（1）电芯*i*与电芯*j*平面间距 r_{ij} ：

$$r_{ij} = \sqrt{(c_j - c_i)^2 m^2 + (r_j - r_i)^2 n^2} \quad (1)$$

式中： c_i, r_i 为热失控电池*i*列号、行号； m, n 为列间距、行间距（ m ）

（2）电池*i*至洒水喷头空间距离 $r_{i,spr}$ ：

$$r_{i,spr} = \sqrt{(c_{i,spr} - c_i)^2 m^2 + (r_{i,spr} - r_i)^2 n^2 + h_{spr}^2} \quad (2)$$

式中 $c_{i,spr}, r_{i,spr}$ 为喷淋列号、行号； h_{spr} 为洒水喷头热敏元件相对电芯顶部平面的垂直高度（ m ）；几何距离定义如图1所示。

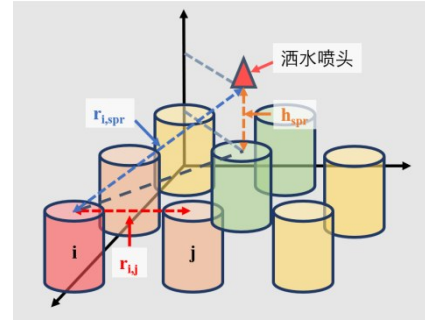


图1 模型几何空间示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Model Geometric Space

1.2.2 热辐射强度计算

$$q_{ij} = \frac{k_{cell} Q}{4\pi r_{ij}^2} \quad (3)$$

$$q_{i,spr} = \frac{k_q Q}{4\pi r_{i,spr}^2} \quad (4)$$

式中： q_{ij} 为热失控电芯*i*对电芯*j*的热辐射强度（ kW/m^2 ）； $Q = 2.3kW$ （单电池热释放速率）^[20]。 $q_{i,spr}$ 为热失控电池*i*对洒水喷头辐射强度（ kW/m^2 ）； $k_{cell} = 0.0112464$ （电池间修正系数）， $k_q = 2.563$ （喷头间修正系数），均基于单电芯热辐射预实验数据，通过参数反演标定得到。注意，本模型不用于预测热释放速率绝对值，定位为多工况之间多米诺传播趋势与相对风险对比工具，不追求热释放速率绝对数值精准。

1.2.3 多元热辐射叠加模型

多源热辐射的线性叠加法已被广泛采用^[21]，以表征目标电芯接收来自多个热失控电芯的协同递增辐射强度。定义 S_{02} 为当前处于有效热释放阶段的电芯集合，则目标电芯*j*接收的总辐射强度：

$$q_{\Sigma, cell} = \sum_{i \in S_{02}} q_{ij} \quad (5)$$

洒水喷头接收的总辐射强度：

$$q_{\Sigma, spr}(t) = \sum_{i \in S_{02}} q_{i,spr} \quad (6)$$

1.3 电芯热失控失效时间模型

当目标电芯接收的总热辐射强度达到临界引燃辐射强度 q_{cr} 时, 电芯进入热失控失效阶段。 $q_{cr} = 1.158 \text{ kW/m}^2$ [22]。目标电芯在当前辐射强度下的热失控失效时间 t_{tf_cell} 用 Logistic 拟合公式:

$$t_{tf_cell} = \frac{1}{\lambda} \left[A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + \left(\frac{q\Sigma, cell}{x_0} \right)^p} \right] \quad (7)$$

式中: $\lambda = 1.12$ (协同修正系数); $A_1 = 402.18901 \pm 20.43964$; $A_2 = 9.95909 \pm 2.96282$; $x_0 = 0.61843 \pm 0.03627$; $p = 1.51694 \pm 0.06922$; $q\Sigma, cell$ 为目标电池总辐射强度 (kW/m^2)。

热失控传播中辐射强度动态变化, 采用剩余失效时间 $RTTF$ 动态更新。

$$RTTF_{new} = \left(\frac{I_{new}}{I_{old}} \right)^c (RTTF_{old} - \Delta t) \quad (8)$$

式中: I_{new}, I_{old} 为当前、上一时刻总辐射强度 (kW/m^2); c 为修正指数, 取 1.13, Δt 为时间步长 (s)。

1.4 洒水喷头热响应模型

为便于工程快速估算, 本模型热平衡方程仅考虑热辐射吸收的主导作用, 忽略对流项及洒水喷头自身辐射冷却, 洒水喷头温度采用显式时间递推格式计算, 具体如下:

$$T_{(k)} = T_{(k-1)} + \varepsilon K q \Sigma, spr \Delta t \quad (9)$$

式中: $T_{(k)}$ 为 k 时刻洒水喷头温度 (K); ε 为 (感温元件辐射吸收系数), 取 0.9; K 为辐射热响应系数, 根据标准响应玻璃泡喷头的典型参数, 取 $K = 2.8 \times 10^{-5} K \cdot m^2 / J$; $q\Sigma, spr$ 为喷淋头接收的总辐射强度 (kW/m^2)。将洒水喷头动作温度定义为 T_{act} 。当 $T_{(k)} \geq T_{act}$ 时, 判定喷淋系统启动。

1.5 单元状态的定义

单元电池状态: 0—正常、1—热失控、2—熄灭, 固定电芯从热失控 (状态 1) 到熄灭 (状态 2) 时间 t_{tb_cell} 为 120s, 该值基于单体电池实验观测取平均值确定;

喷淋状态: 0—未启动、1—已启动; 模型通过状态向量 $Sh = [Sh_1, Sh_2, Sh_3, \dots, Sh_n]$ 记录各电芯状态, 每个时间步内依次执行辐射更新、剩余时间更新、失控判断、喷淋判断。单元状态转变示意图如图 2 所示。

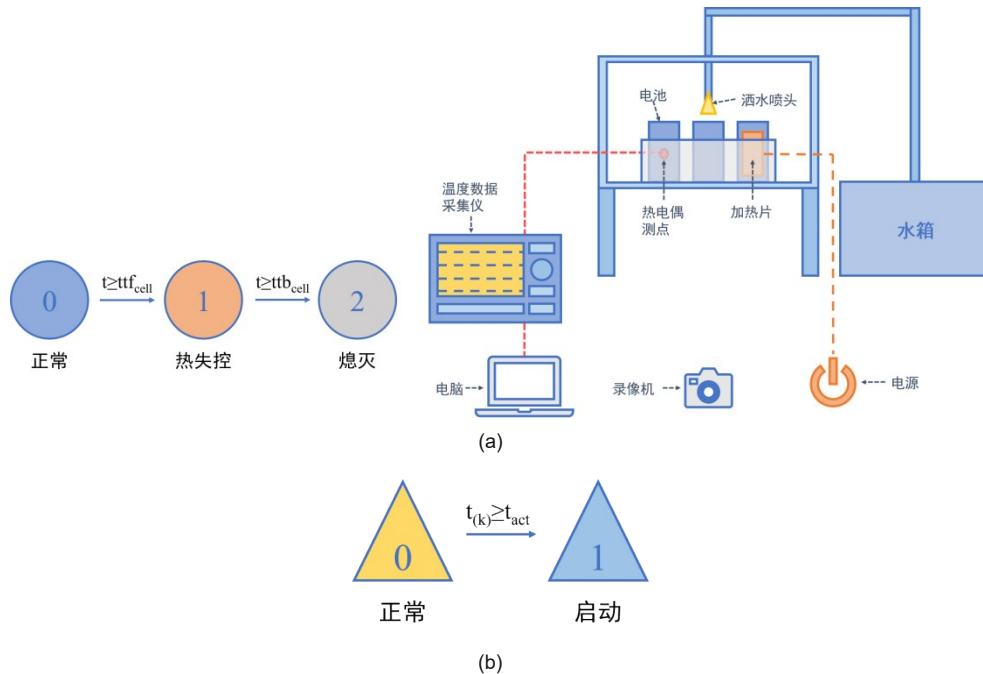


图 2 单元状态转变示意图: (a) 电池状态转变示意图; (b) 洒水喷头状态转变示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Cell State Transition: (a) Schematic of battery state transition; (b) Schematic of sprinkler state transition. Fig. 3 Experimental System Schematic

2 模型验证

2.1 实验平台与参数

实验按照实际工程场景搭建配套湿式自动喷淋系统的实体仓储货架试验台，电池托盘材质为聚丙烯 PP，电池为 HC-N102A 高镍三元方壳锂电池（21 mm×295 mm×92 mm，101.6 Ah，70% SOC）。货架层高 750 mm，电芯横向间距 20 mm、纵向间距 80 mm。喷淋系统稳压 0.6 MPa，喷头流量系数为 322L/min。加热片安装在电芯侧面，采用 500 W 加热片恒功率加热诱导热失控，加热电芯发生热失控现象时停止加热，热电偶布置于电池表面中心，热电偶与数据采集模块记录温度数据。具体布置情况如图 3 所示。

2.2 实验工况设计

以初始起火位置、洒水喷头动作温度为双变量，设 4 组对照工况，如表 1 所示。
具体工况布置情况如下图 4 所示：

表 1 各工况设置详情

工况	初始加热位置	洒水喷头动作温度	主要目的
A	内边缘电芯	68 ℃	验证低动作温度洒水喷头下边缘起火传播特征
B	中间电芯	68 ℃	验证低动作温度洒水喷头下中间起火传播特征
C	内边缘电芯	93 ℃	验证高动作温度洒水喷头下边缘起火传播特征
D	中间电芯	93 ℃	验证高动作温度洒水喷头下中间起火传播特征

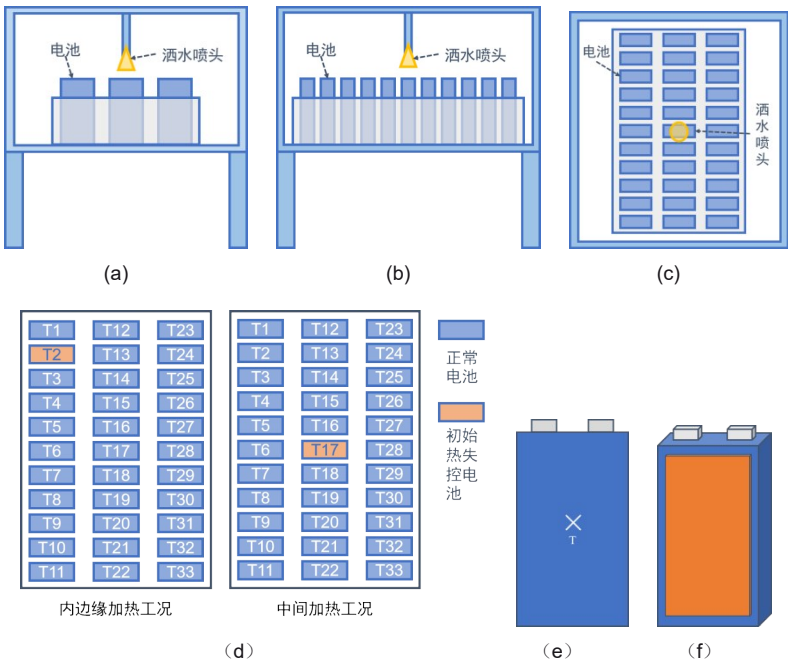


图 4 工况布置示意图：(a) 货架正视图；(b) 货架侧视图；(c) 货架俯视图；(d) 不同初始加热位置与电芯测点位置的工况布局图；(e) 电芯表面中心温度测点；(f) 加热片安装位置

Fig. 4 Schematic Layout of Working Conditions: (a) Front view of the rack; (b) Side view of the rack; (c) Top view of the rack; (d) Layout diagram of working conditions with different initial heating positions. (e) Cell surface central temperature measurement point; (f) Heating pad installation position.

2.3 模型验证与误差分析

判定标准：电芯温升速率 $> 1^{\circ}\text{C/s}$ 且持续时长 $\geq 3\text{s}$ ，判定单体热失控；洒水喷头玻璃球爆裂且连续喷水为启喷时刻。各工况实验结果如表 2 和表 3：

表 2 中喷淋启动时刻为首次喷水时刻，三次重

复实验中，各工况喷淋启动时间实验波动范围分别为：A 工况 $219\pm 18\text{s}$ 、B 工况 $41\pm 12\text{s}$ 、C 工况 $315\pm 16\text{s}$ 、D 工况 $68\pm 10\text{s}$ 。模型复现结果与实验对比见表 4。

由表 4 可知：本研究对每个工况开展了 3 次重复实验，四组工况下模型复现的热失控电芯数量与

表2 各工况实验结果汇总

Table 2 Summary of Experimental Results under Various Working Conditions

工况	首块电芯热失控时刻	喷淋启动时刻	无明火时刻	热失控电芯数	最高温度	喷淋响应间隔
A	1050±18s	1269±18s	1529±18s	4	766.3±31℃	219±18s
B	1124±12s	1165±12s	1218±12s	1	563.1±15℃	41±12s
C	1095±16s	1410±16s	1754±16s	6	766.6±33℃	315±16s
D	1447±10s	1515±10s	1658±10s	1	326.2±11℃	68±10s

表3 电芯热失控时间表

Table 3 Battery Cell Thermal Runaway Timeline

工况	初始电芯热失控时间	第二块电芯热失控时间	第三块电芯热失控时间	第四块电芯热失控时间	第五块电芯热失控时间	第六块电芯热失控时间
A	1050±18s	1106±18s	1186±18s	1201±18s	/	/
B	1124±12s	/	/	/	/	/
C	1095±16s	1128±16s	1141±16s	1371±16s	1387±16s	1388±16s
D	1447±10s	/	/	/	/	/

实验结果完全一致；喷淋启动时间在实验中存在波动，具体为：A工况 219±18s，B工况 41±12s，C工况 315±16s，D工况 68±10s。模型复现喷淋启动时间的平均绝对误差为 9.75s，最大绝对误差为 13s。所有工况的复现误差均落在重复实验的波动区间内，验证了模型的有效性。误差来源主要有三

点：（1）电池个体差异，不同电芯的表面状态、热释放存在离散性；（2）加热触发热失控的时刻存在随机偏差；（3）喷头感温本身存在固有分散性。重复试验中热失控电芯数量的结果一致，模型对热失控电芯数量的复现也与实验结果吻合。

表4 模型复现结果与实验结果对比

Table 4 Comparison Between Model Predictions and Experimental Results

实验工况	实验喷淋启动时间	模拟喷淋启动时间	实验电池热失控数	模拟电池热失控数	绝对误差	相对误差	热失控数量一致性
A	219±18 s	206 s	4	4	13s	5.94%	一致
B	41±12 s	49 s	1	1	8s	19.51%	一致
C	315±16 s	303 s	6	6	12s	3.81%	一致
D	68±10 s	74 s	1	1	6s	8.82%	一致

实验过程中，工况A和工况C出现了托盘燃烧现象，各工况温度曲线、实验现象如图5、图6所示：

3 基于多米诺传播模型的电池货架风险评价方法

3.1 风险评价指标构建

基于验证的模拟结果，构建单元电芯多米诺演化风险指数（Unit Cell- Domino Evolution Risk Index, U-DERI）和电芯货架布局多米诺风险指数（Cell Rack Layout -Domino Risk Evolution Index, L-DERI），分别用于单点起火风险分级与整体货架安全评价。

3.1.1 单元电芯多米诺演化风险指数

定义第*i*个电芯的热失控状态函数 $E_i(t)$ 用于描述第*i*个电芯在热失控传播过程中的状态变化^[23]：

$$E_i(t) = \begin{cases} 0, & t < t_{fail} \\ 1, & t \geq t_{fail} \end{cases} \quad (10)$$

式中， t_{fail} 为第*i*个电芯的动态失效时间。

用系统多米诺演化曲线函数 $N_{evo}(t)$ 描述货架内多个电芯热失控随时间的累积发展过程^[23]：

$$N_{evo}(t) = \sum_{i=1}^n E_i(t) \quad (11)$$

式中，*n*为货架内电芯总数。

为定量表征热失控传播的时间分布特征，引入系统演化时间质心 $CTrd$ 和平均上升斜率 $\tan \alpha^{[23]}$ ：

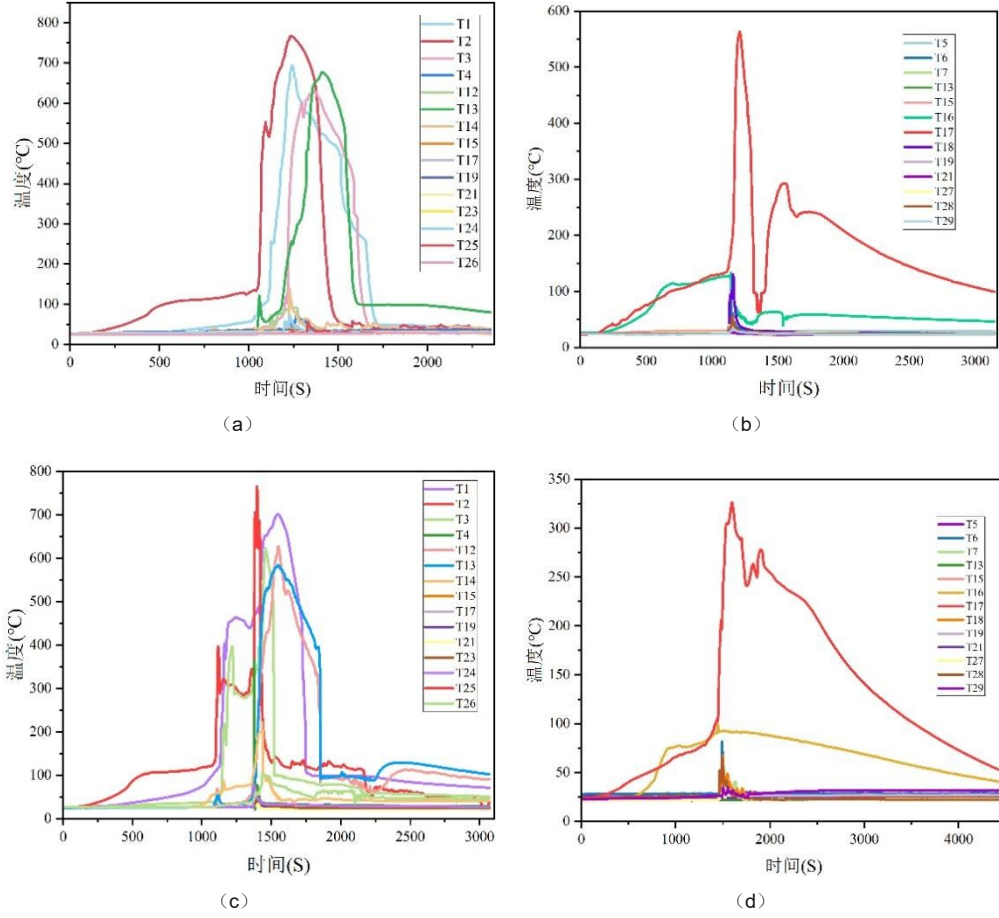


图5 各工况温度曲线图：(a) 工况A电芯温度曲线图；(b) 工况B电芯温度曲线图；(c) 工况C电芯温度曲线图；(d) 工况D电芯温度曲线图

Fig. 5 Temperature curve diagrams for various operating conditions:(a) Cell temperature curve for Operating Condition A; (b) Cell temperature curve for Operating Condition B; (c) Cell temperature curve for Operating Condition C; (d) Cell temperature curve for Operating Condition D

$$CTrd(h_i) = \frac{\sum_{j=0}^{m-1} \frac{t_j + t_{j+1}}{2} \cdot N_{evo}(\frac{t_j + t_{j+1}}{2}) \cdot (t_{j+1} - t_j)}{\sum_{j=0}^{m-1} N_{evo}(\frac{t_j + t_{j+1}}{2}) \cdot (t_{j+1} - t_j)} \quad (12)$$

$$\tan \alpha = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{N_{evo}(t_{j+1}) - N_{evo}(t_j)}{t_{j+1} - t_j} \quad (13)$$

式中， m 为热失控电芯总数； t_j 为第 j 个电芯热失控时间； n 为热失控电芯总数； $CTrd$ 越小表明热失控传播越集中于早期阶段； $\tan \alpha$ 越大表明传播速率越快。

在上述参数基础上，构建单元电芯多米诺演化风险指数，其计算式为：

$$U - DERI = F \times \frac{T_{act}}{T_{next}} \times \frac{T_{act}}{CTrd} \times \frac{n}{N - n} \times (1 + \tan \alpha) \quad (14)$$

式中： T_{act} 为喷淋启动时间； T_{next} 为喷淋启动

后下一级电芯预测失效时间， $\frac{T_{act}}{T_{next}}$ 则表征喷淋介入

后的剩余响应裕度； $\frac{T_{act}}{CTrd}$ 表征喷淋启动时刻与传播

过程整体时间质心的相对位置； n 为热失控电芯总数， N 为货架总电芯数，本文为33， $\frac{n}{N - n}$ 表征已

失控电芯与未失控电芯的比例。 $(1 + \tan \alpha)$ 为传播速率的增强因子，平均上升斜率越大，阶段风险越高。 F 为放大因子，用于将 $U - DERI$ 值映射至便于工程分级辨识的数值区间（以B工况原始值0.0356为基准，使B工况 $U - DERI \approx 1.78$ ，处于极低风险上界）。计算时各子项进行归一化处理。风险等级划分见表5。

3.1.2 电芯货架布局多米诺风险指数

基于各电芯 $U - DERI$ 的累加效应，定义电芯货



图 6 各工况实验现象

Fig. 6 Experimental phenomena under various operating conditions

表 5 U-DERI 风险等级划分

Table 5 U-DERI Risk Grade Classification

U-DERI 分数区间	风险等级	工程含义
$U-DEI \leq 2$	极低风险	安全裕度较高
$2 < U-DEI \leq 8$	低风险	可能诱发 1—2 个相邻电芯受影响
$8 < U-DEI \leq 14$	中风险	可能诱发局部连续传播
$14 < U-DEI \leq 20$	高风险	易形成小范围多电芯热失控
$U-DEI > 20$	极高风险	存在大范围蔓延风险

架布局多米诺风险指数，其物理含义为货架内各电芯位置初始起火的平均单元风险之和的归一化值，

反映货架整体在给定喷淋配置下的基础安全水平，具体计算式为：

$$L-DEI = \sum \frac{U-DEI_i}{F} \tag{15}$$

式中， $U-DEI_i$ 为第 i 个电芯的单元电芯多米诺演化风险指数。

风险等级划分见表 6。

3.2 风险评价结果

不同工况下 U-DERI 和不同货架 L-DEI 评价结果如图 7 所示：

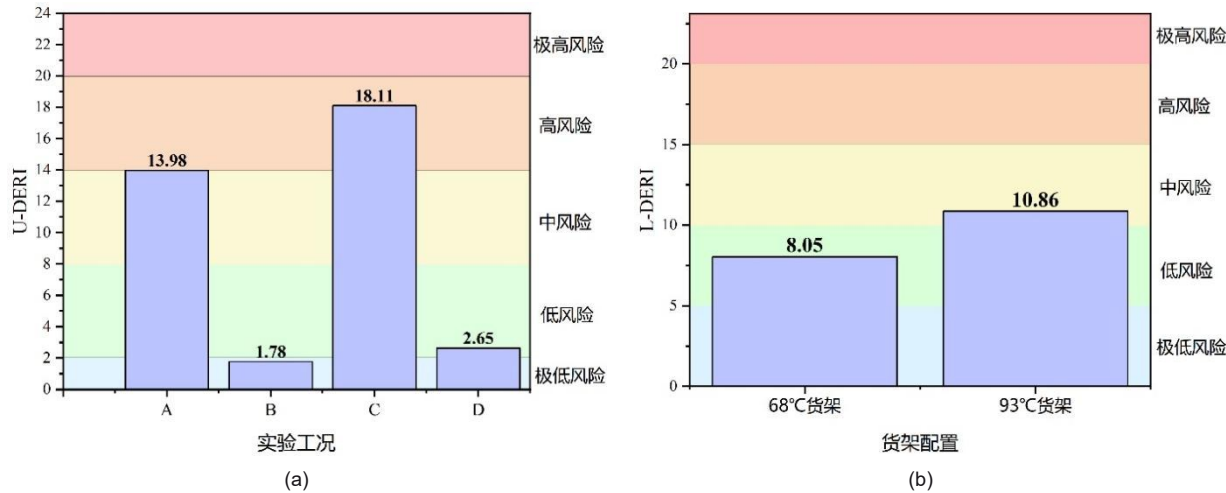


图 7 风险评价结果：(a)不同工况 U-DERI 评价结果；(b)不同货架 L-DEI 评价结果

Fig.7 Risk assessment results: (a) U-DEI evaluation results under different working conditions; (b) L-DEI evaluation results for different racks.

表6 L-DERI 安全等级划分

Table 6 L-DERI Safety Grade Classification

L-DERI 分数区间	风险等级	工程含义
$L-DERI \leq 5$	极低风险	安全裕度较高
$5 < L-DERI \leq 10$	低风险	保持监管
$10 < L-DERI \leq 15$	中风险	加强监管
$15 < L-DERI \leq 20$	高风险	必须优化
$L-DERI > 20$	极高风险	立即整改

不同工况 U-DERI 评价结果可知，工况 A (13.98) 属于中风险，工况 B (1.78) 属于极低风险，工况 C (18.11) 属于高风险，工况 D (2.65) 属于低风险。边缘起火风险显著高于中间起火，93℃洒水喷头风险高于 68℃，评价结果与实验现象一致。虽然工况 B 和工况 D 的失效电芯数量相同，但风险指数可以反映相同失效电芯数量下火灾过程安全裕度的差异。L-DERI 评价结果可知，68℃洒水喷头配置的货架整体风险等级为低风险 (8.05)，93℃配置为中风险 (10.86)，表明较低动作温度的喷淋系统在货架整体层面仍具有显著的风险抑制优势。

从量化结果可以看出，初始起火位置对多米诺风险存在显著调控效应。相同喷淋配置条件下，边缘起火的 U-DERI 较中间起火提升 7.8~6.8 倍。该差异的内在物理机制为：货架边缘位置距离喷头几何距离更远，喷淋响应时间被拉长，多米诺传播窗口增大。而中间位置的电芯距离洒水喷头较近，喷淋可在火灾初期完成干预。对应实验现象，边缘起火工况热失控电芯数量达到 4~6 个，中间起火仅初始电芯发生热失控，风险指数的计算结果与实体实验的失效规模形成相互印证。

喷头动作温度同样对风险水平产生明显影响。边缘起火条件下，93℃喷头配置相比 68℃喷头，喷淋介入时间延后 96s，U-DERI 由 13.98 升高至 18.11，风险增幅 29.6%；中间起火条件下，虽然结果都为初始电芯热失控，93℃喷头配置距离下一级电芯失控预测时间 12s，68℃喷头配置为 37s，消防干预窗口提高 3.05 倍。若仅依靠热失控电芯数量，A、C 工况电芯数仅相差 2 个，难以充分体现喷淋时序滞后带来的潜在风险。

货架整体 L-DERI 由 8.05 升高至 10.86，风险增幅 34.9%，风险等级由低风险上升至中风险，量化体现喷头动作温度对系统风险的调控效果。

4 结 论

针对锂电池货架仓储场景下热失控多米诺传播与消防风险管控难题，本文以高镍三元电池货架火灾为研究对象，构建半经验多米诺传播预测模型，开展多工况实体火灾实验，提出双层级动态风险评价指标，揭示初始起火位置、喷淋动作温度对热失控连锁蔓延的影响规律，主要创新及研究结论如下：

(1) 构建了耦合动态热辐射叠加、剩余失效时间修正及喷淋响应的半经验传播模型。经 4 组工况实体货架火灾实验校验，模型对热失控电芯数量复现与实验一致；喷淋启动时刻平均绝对误差 9.75s，全部偏差处于实验波动范围内，可用于货架场景多工况快速对比仿真。

(2) 提出单元-货架双层动态多米诺风险指数 U-DERI 与 L-DERI，实现从单点电芯到货架整体的动态风险量化分级。区别于传统风险评价手段，指数输入来源于热失控时序仿真结果，融合多维度物理信息，不只依靠最终热失控电芯数量评判风险。U-DERI 用于评价单元起火位置的多米诺演化风险，L-DERI 实现货架整体安全水平归一化评估，建立了 5 级风险分级标准，能够有效识别高风险起火点位，量化喷淋配置对仓储整体风险的调控效果。

(3) 明确初始起火位置与喷淋动作温度是货架锂电池多米诺传播的主导控制因素。相同喷淋配置条件下，边缘起火造成 4~6 只电芯发生热失控，而中间起火仅初始电芯失效；边缘起火时，93℃喷头对比 68℃喷头喷淋介入时间延迟约 96s，热失控电芯数量增大 50%。风险评价结果表明：边缘起火 U-DERI 为 13.98~18.11 (中~高风险)，中间起火 U-DERI 为 1.78~2.65 (极低~低风险)；68℃喷头货架 L-DERI=8.05 (低风险)，93℃喷头货架 L-DERI=10.86 (中风险)。货架边缘区域风险显著高于中部，采用较低动作温度洒水喷头可有效压缩多米诺传播发展窗口。

5 展 望

构建的半经验模型以热辐射传热为核心，建立多步物理方程，传播逻辑遵循热辐射传热物理规律，非纯实验数据拟合的黑箱公式。模型部分关键系数需依托单体小样本实验数据标定，修正系数等

效了模型简化忽略的次要效应。暂未考虑喷淋启动后的水雾冷却等过程,预测准确性依赖参数标定,条件改变后需重新标定,更适用于多工况间传播趋势比较与相对风险评价。此外,本模型仅能评估喷头热敏动作及时性,无法评估不同喷头选型的最终灭火效果,直接套用存在误导工程选型的风险。

参考文献

- [1] 杨明,黄旭,陆晖,等. 锂离子电池衰减机理及老化前后热失控行为研究进展[J]. 消防科学与技术,2026,45(2):39-48.
Yang Ming, Huang Xu, Lu Hui, et al. Research progress on degradation mechanism and thermal runaway behavior of lithium-ion batteries before and after aging[J]. Fire Science and Technology, 2026, 45(2): 39-48.
- [2] 李刚,张修鹏,常伟达,等. 高温条件下 NCM 锂离子电池热失控释放气体的爆炸特性[J]. 东北大学学报(自然科学版),2025,46(4):78-86.
Li Gang, Zhang Xiupeng, Chang Weida, et al. Explosion characteristics of gases released from thermal runaway of NCM lithium-ion batteries under high temperature conditions[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2025, 46(4): 78-86.
- [3] 曾垂辉,吴军,甘艳,等. 方壳磷酸铁锂锂离子电池热失控不同阶段产热产气机理[J]. 储能科学与技术,2026,15(6):2395-2404.
Zeng Chuhui, Wu Jun, Gan Yan, et al. Mechanism of heat and gas generation at different stages of thermal runaway in prismatic lithium-ion batteries with lithium iron phosphate[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(6): 2395-2404.
- [4] Archibald E, Han K S, Ezekoye O A. Thermal Runaway Propagation in a Prismatic Lithium-Ion Battery Module with Inter-Cell Air Gaps: Large-Scale Compartment Experiments[J]. Fire Technology,2026,62(4):86.
- [5] Hu J, Tang X, Zhu X, et al. Suppression of thermal runaway induced by thermal abuse in large-capacity lithium-ion batteries with water mist[J]. Energy,2024,286:129669.
- [6] 程志翔,曹伟,卢波,等. 储能用大容量磷酸铁锂电池热失控行为及燃爆传播特性[J]. 储能科学与技术,2023,12(3):923-933.
Cheng Zhixiang, Cao Wei, Hu Bo, et al. Thermal runaway behavior and explosion propagation characteristics of large-capacity lithium iron phosphate batteries for energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(3): 923-933.
- [7] Shi H, Zhang S, Li K, et al. Thermal runaway in lithium-ion batteries: a critical review of mechanisms, models, early warning systems, and safety strategies[J]. Applied Energy, 2026, 426: 128706.
- [8] Jiang Y, Jiang Y, Wang P. A review on mitigating thermal runaway propagation in battery packs: from mechanisms to modeling and design optimization[J]. Energy Advances,2026,5(6):777-809.
- [9] Hu Z, He X, Restuccia F, et al. Numerical study of scale effects on self-heating ignition of lithium-ion batteries stored in boxes, shelves and racks[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 190: 116780.
- [10] 徐成善,李涵,王炎,等. 双层储能电池火蔓延特性及触发过程能量传递机制研究[J]. 储能科学与技术,2025,14(9):3552-3563.
Xu Chengshan, Li Han, Wang Yan, et al. Research on fire spread characteristics and energy transfer mechanism during triggering process of double-layer energy storage batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(9): 3552-3563.
- [11] Xu Y, Lu J, Zhang P, et al. Thermal runaway and flame propagation of lithium-ion battery in confined spaces: Experiments and simulations[J]. Journal of Energy Storage,2025,117:116154.
- [12] Ouyang D, Huang J, Zheng Y, et al. Numerical simulation and analysis of the effect of charging and discharging on the thermal runaway of lithium-ion batteries under external heating conditions [J]. Applied Thermal Engineering,2025,274:126616.
- [13] Wang S, Wang G, Ma D, et al. Numerical simulation of initial gas-jet fire evolution under thermal runaway of lithium-ion batteries[J]. Journal of Energy Storage,2025,114:115897.
- [14] Zhang X, Yao J, Zhu L, et al. Experimental and simulation investigation of thermal runaway propagation in lithium-ion battery pack systems[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 77: 109868.
- [15] Zeng D, Gagnon L, Wang Y. Network thermal-runaway propagation model-An experimental and modeling study[J]. Fire Safety Journal,2023,140:103899.
- [16] 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/OL]. 储能科学与技术, 2026-03-31. <https://link.cnki.net/doi/10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0083>.
Yang Juan, Jia Yan, Li Wenjing, et al. Study on the influence of arrangement configuration on thermal runaway propagation in lithium-ion battery packs[J/OL]. Energy Storage Science and Technology, 2026-03-31. <https://link.cnki.net/doi/10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0083>.
- [17] 李晋,王青松,孔得朋,等. 锂离子电池储能安全评价研究进展[J]. 储能科学与技术,2023,12(7):2282-2301.
Li Jin, Wang Qingsong, Kong Depeng, et al. Research progress on safety evaluation of lithium-ion battery energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(7): 2282-2301.
- [18] Xie J, Li J, Wang J, et al. Fire risk assessment in lithium-ion battery warehouse based on the Bayesian network[J]. Process Safety and Environmental Protection,2023,176:101-114.
- [19] 陈黎明,姜海英,侯喜利,等. 新能源汽车动力锂电池仓库火灾安全风险分析与管控措施[J]. 黑龙江交通科技,2025,48(8):96-99, 103.
Chen Liming, Jiang Haiying, Hou Xili, et al. Fire safety risk analysis and control measures for power lithium-ion battery warehouse of new energy vehicles[J]. Heilongjiang Transportation Science and Technology, 2025, 48(8): 96-99, 103.
- [20] 荣路清. 18650 型锂离子电池仓库储存安全性研究[D]. 中国科学技术大学,2024.
Rong Luqing. Study on storage safety of 18650 lithium-ion batteries in warehouses[D]. University of Science and Technology of China, 2024.

[21] 李金国,高增梁,刘红,等. 双型腔模具加热系统热传导多源项反演与实验研究[J]. 轻工机械,2018,36(3):8-13.

Li Jinguo, Gao Zengliang, Liu Hong, et al. Inversion and experimental study on multi-source terms of heat conduction in heating system of double-cavity mold[J]. Light Industry Machinery, 2018, 36(3): 8-13.

[22] Ma M, Wang S, Jiang H, et al. Study on the thermal radiation

tolerance characteristics of lithium-ion batteries[J]. RSC Advances,2025,15(36):29500-29508.

[23] Chen H, Chen G, Xiong C, et al. An inherent safety assessment tool for storage tank farm layout planning based on dynamic propagation modeling simulation of fire domino effects[J]. Reliability Engineering & System Safety,2025,256:110797.