

# 大容量磷酸铁锂电池热蔓延抑制的实验与建模研究

尹帮盛

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2025年3月2日; 录用日期: 2025年3月25日; 发布日期: 2025年4月3日

## 摘要

在储能电池系统中, 电池若遭遇热危险或机械危险, 很容易诱发热失控现象。此时, 电池会在短时间内迅速释放大量热量, 进而引发系统内其他电池相继出现热失控。热失控过程中释放的高温气体在电池系统内部蕴蓄, 可能引发爆燃, 从而对电池系统的安全性构成严重威胁。本研究引入了一种砖砌式模组的隔热结构, 使电池之间呈交错排列, 降低了电池间的传热功率, 达到隔断电池热蔓延的目的。针对大容量方形磷酸铁锂电池, 开展模组密闭箱体实验以及建模研究。实验结果证实, 在未使用隔热材料的前提下, 砖砌式模组在抑制电池系统热失控蔓延方面具有显著的有效性。相邻电池的温度得到明显降低, 热失控电池的热量被成功隔绝, 有效阻止热失控热量向相邻电池传播。在密闭箱体内出现电池热失控后, 为降低热灾害风险, 喷发的高温气体需被排出, 探讨高温环境对电池模组的影响。本研究建立了密闭箱体内部的电池热失控高温气体喷发流动三维模型。该模型能模拟单节电池热失控后, 高温气体在密闭箱体内部的流动情况, 为以后的储能系统安全结构设计提供重要的理论依据与设计思路, 有助于进一步提升储能电池系统的整体安全性能。

## 关键词

磷酸铁锂电池, 电池模组结构, 热蔓延抑制, 热失控喷发模型

# Experimental and Modeling Study on Thermal Runaway Propagation Inhibition of Large-Capacity Lithium Iron Phosphate Batteries

Bangsheng Yin

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Mar. 2<sup>nd</sup>, 2025; accepted: Mar. 25<sup>th</sup>, 2025; published: Apr. 3<sup>rd</sup>, 2025

文章引用: 尹帮盛. 大容量磷酸铁锂电池热蔓延抑制的实验与建模研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(4): 30-39.  
DOI: 10.12677/mos.2025.144262

## Abstract

In energy storage battery systems, when batteries are subjected to thermal or mechanical hazards, they are highly susceptible to thermal runaway. During this process, batteries can rapidly release a large amount of heat within a short period, triggering subsequent thermal runaway in other batteries within the system. The high-temperature gases released during thermal runaway accumulate inside the battery system, which may lead to deflagration, posing a severe threat to the safety of the battery system. This study introduces a bricklaying-style module with an insulating structure, where batteries are arranged in a staggered manner. This arrangement reduces the heat transfer power between batteries, effectively interrupting the thermal propagation. Focusing on large-capacity prismatic lithium iron phosphate batteries, experiments and modeling studies were conducted using a closed-box module. The experimental results demonstrate that, even without the use of insulating materials, the bricklaying-style module is highly effective in suppressing thermal runaway propagation in the battery system. The temperature of adjacent batteries is significantly reduced, and the heat from the thermally runaway battery is successfully isolated, effectively preventing the spread of thermal runaway heat to neighboring batteries. After a thermal runaway event occurs in a closed box, to reduce the risk of thermal hazards, the high-temperature gases that are emitted need to be vented. The study investigates the impact of high-temperature environments on battery modules. A three-dimensional model of high-temperature gas ejection and flow inside a closed box during battery thermal runaway has been established. This model can simulate the flow of high-temperature gases inside the closed box following a single-cell thermal runaway event. It provides important theoretical basis and design ideas for future safety structure design of energy storage systems, and helps to further enhance the overall safety performance of energy storage battery systems.

## Keywords

Lithium Iron Phosphate Battery, Battery Module Structure, Thermal Runaway Propagation Suppression, Thermal Runaway Ejection Model

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在碳中和与可持续发展的大趋势下，储能电站正以惊人的增长速度深刻改变着我们的生活方式。凭借高能量密度、长循环寿命、低自放电率和低环境污染等优势，锂离子电池已成为储能电站的核心组件[1]。锂电池主要由正负极和电解质等部件组成[2]。但是，因为其特殊的结构和化学性质，在热危险、机械危险或电危险等极端条件下，电池大概率会发生热失控现象，即在短时间内快速释放大热量[3]。在储能电站中，由于单个电池的能量有限，通常要将很多块电池利用串并联的方式结合起来，以便可以达到更高的功率和能量要求[4][5]。这种组合方式虽然提升了电池系统的整体性能，但也给电池系统的安全性带来了巨大挑战[6]。在储能电站中，为了可以在一定空间的集装箱里实现比较高的能量存储，储能系统一般情况下由很多电池模组构成，在每一个模组里由很多块锂离子电池紧凑并按顺序排列构成。一旦储能系统其中一块电池发生热失控，因为电池间的温度相差很大，会促使热量逐步向周围电池移动，甚至可能导致很多块或全部电池的热失控。这种连锁反应释放的能量非常大，不仅会对设备造成严重损坏，

还会对人员安全构成重大危害。因此,减少相邻电池间的传热功率,降低热量的传递,是确保储能电站安全运行的关键。

为了有效提升储能电站的安全性并遏制热失控蔓延带来的潜在危害,研究人员针对锂离子电池的热安全性能展开了一系列深入且系统的研究工作。杨等人[7]研究了顶部受限空间对 18,650 锂离子电池热失控及传播的影响。通过实验分析了不同顶板高度下热失控引发的顶棚射流火行为,并提出了基于射流火长度预测热释放率的新方法。研究发现,顶板高度显著影响热失控传播时间与强度,较低的顶板高度会延长传播时间并改变热失控特性。党等人[8]研究了钠离子电池在不同荷电状态下的热失控行为及其传播特性。通过加速量热仪和恒容压力测试,分析了在过热条件下的热失控触发温度、最大温度、气体释放量以及爆炸极限的变化规律。研究发现,随着电池容量的增加,热失控的危险性显著提高,气体释放量增加,爆炸范围扩大。提出了一种通过降低相邻电池容量来释放能量的策略,成功阻断了热失控的传播。彭等人[9]通过实验研究锂离子电池热失控过程中释放的气体对其传播的影响。对比了磷酸铁锂电池模块在正常包装和隔离排气包装下的热失控行为,分析不同荷电状态和加热位置下的温度、质量损失和热失控传播特征。正常包装中热失控气体的热量显著加速了热失控传播,而隔离排气设计能有效延缓甚至阻止热失控传播。黄等人[10]通过实验和数值模拟研究加热功率对磷酸铁锂电池内部热失控传播特性的影响机制,对磷酸铁锂电池进行不同加热功率下的热失控实验,揭示了喷射速度与内部热失控传播速度之间的关系。结果表明,加热功率增加会缩短安全泄压时间和热失控时间,但延长内部热失控传播时间,且低加热功率下电池内部的预热效果更好,加速了热失控传播。张等人[11]研究圆柱形锂离子电池在针刺实验中内部热失控传播的特性。通过改变针刺深度和速度,分析了热失控传播速度、温度特征以及最大温升率等参数。针刺深度对热失控传播速度影响显著,当针刺深度为 10 mm 时,传播速度最快(约 100 mm/s),而进一步增加深度则因金属钉的冷却效应导致速度显著降低。此外,针刺速度的增加会使传播速度从热传递控制转变为结构损伤控制。目前,中国发表了 GB/T36276 安全标准,该标准要求单个电池发生热失控后,电池模组设计要有效抑制热失控的蔓延。在进行测试时,电池模组不应起火、爆炸,且不应在防爆阀或泄压点之外的位置发生破裂。

刘等人[12]研究多孔金属泡沫在集成式电池热管理系统中的作用,控制电池温度并抑制热失控传播。建立考虑热生成、热失控、相变和液体冷却的数值模型,采用高导热和低导热相变材料的夹层结构,并在相变材料中嵌入填充多孔金属泡沫的微通道液体冷却管。该系统在 5 次 3C 放电和 1C 充电循环中可将电池温度控制在 40.67℃ 以下,并有效抑制热失控传播。张等人[13]通过多维度实验研究软包与方形、堆叠与卷绕的锂离子电池在过充条件下的热失控行为及其传播特性。分析不同电池在热失控过程中的温度、膨胀力、冲击波压力等参数变化,并记录燃烧现象。高能量和高能量密度的电池更容易发生热失控传播,且方形电池虽然燃烧强度较低,但爆炸能量更大。董等人[14]通过实验测量锂离子电池在热失控时的内部压力和质量损失,并基于实验数据开发从电池单体到电池模块的变形模型。发现热失控产生的内部压力会导致电池壳体膨胀变形,最大应力集中在泄压阀处。李等人[15]研究钠离子、磷酸铁锂和三元锂电池的热失控特性,通过在不同加热功率下对比三种电池的热失控行为,加热功率增加会显著提高钠离子电池的热危害,但减少气体生成和热失控传播风险。王等人[16]研究不同充放电倍率和不同荷电状态下磷酸铁锂电池的热失控行为,高倍率充放电会显著加剧电池的热失控行为,降低热失控触发温度,缩短安全阀破裂时间,并增加热失控的严重性。电池容量对热失控风险影响显著,高容量电池在热失控时火焰温度更高,质量损失更严重。陈等人[17]基于正交实验设计,系统分析了充电倍率、环境温度、预加载力和初始荷电状态对电池过充过程中电压、温度和膨胀力等多维信号演变的影响。膨胀力是最早出现异常的信号,可作为热失控预警的指标。张等人[18]研究电弧故障对锂离子电池安全阀的影响及其引发的热失控行为。发现电弧功率在 110 到 441 W 之间即可破坏安全阀。电弧作用下,电池表面温度迅速升高,电解液

泄漏, 导致电池容量显著下降、内阻增加, 并加速老化。故障电池在热失控时无安全阀开启现象, 且点火时间比正常电池提前约 400 s, 火焰持续时间和释放热量显著增加, 火灾风险更高。平等[19]研究加热位置对大尺寸半固态锂离子电池热失控特性的影响。不同加热位置(正极端、负极端和中部)会导致不同程度的热失控现象。正极端加热时, 电池整体发生热失控; 负极端加热时, 热失控仅在局部发生; 中部加热时, 电池仅出现排气现象, 未发生热失控。研究表明, 正极端加热由于散热能力较差, 更容易导致热失控, 且热失控传播范围更广, 电压和质量损失更显著。娄等人[20]研究通风条件对储能舱内锂离子电池包热失控的影响。模拟储能舱内锂离子电池簇的火灾动态, 分析不同舱门开启角度和通风口位置对温度传播和烟气浓度的影响。研究发现, 舱门开启角度在一定范围内增加时, 火灾强度和温度先上升后下降; 通风口靠近火源时, 温度峰值更高, 烟气浓度峰值出现更早。程等人[21]针对大尺寸磷酸铁锂电池热失控过程中的内部压力增长和气体生成问题, 提出一种分布式热-压力耦合模型。模型利用加速量热仪实验, 通过分布式结构仿真热失控前的压力积累、喷发过程以及热失控后的冷却阶段, 模型能准确预测不同压力值下的热失控特性和气体组成变化。本研究运用实验与仿真紧密配合的方式, 深入探究新构型电池模组在储能系统中抑制热蔓延的可行性。利用创建电池热失控后高温气体在密闭箱体內的流动仿真模型, 深入详细分析其流动性及对热失控传播的影响机制, 为推进储能电池系统的安全保护设计进步, 提供了新的思路和理论依据。

## 2. 实验与建模

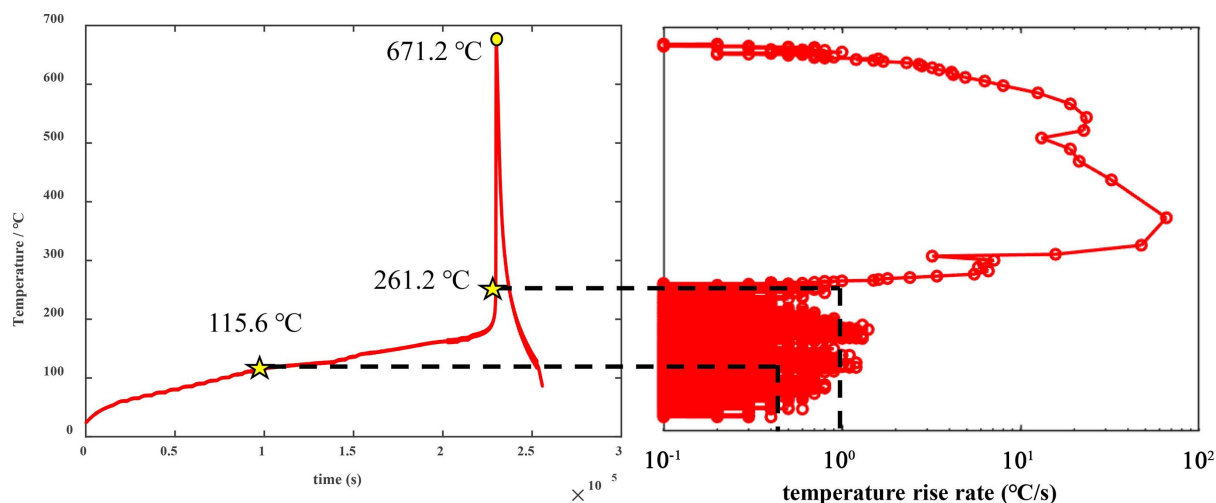
### 2.1. 电池样品

在本文中, 所应用的锂离子电池为 240 Ah 磷酸铁锂电池。电池尺寸为 400.5 mm × 145.8 mm × 36.8 mm, 质量是 4735 g。磷酸铁锂电池的里面是由两个卷芯构成, 工作电压范围为 2.5~3.65 V, 其能量约为 768 Wh (25℃条件下)。为获得实验过程中电池的温度响应, 实验中将直径为 0.5 mm 的 K 型热电偶置于电池前后表面, 电压线连接电池正负极, 温度和电压数据通过数据采集系统记录。

### 2.2. 磷酸铁锂电池绝热加速量热及密闭箱体内模组热蔓延抑制实验

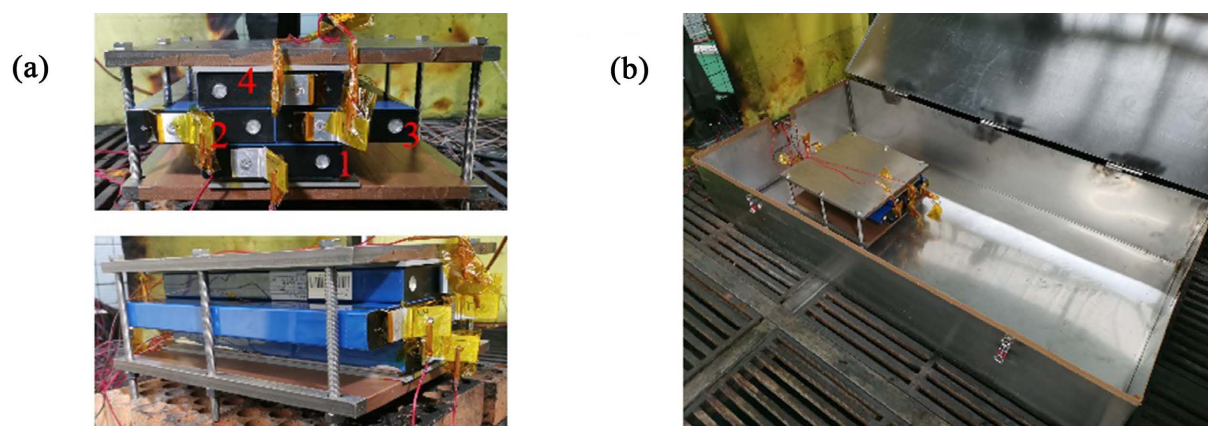
开展磷酸铁锂电池绝热加速量热实验主要是获得电池的产热性质, 图 1 表示了磷酸铁锂电池的绝热加速量热仪的实验数据, 其中自产热温度  $T_1$  为 115.65℃、热失控开始的温度  $T_2$  为 261.2℃、热失控最高温度  $T_3$  是 671.2℃。上面实验得出的特征温度, 可以得出产热速率和产热量, 在后面搭建仿真模型时会用到。本文的砖砌式新构型模组选用四节电池组成, 热蔓延抑制实验的目的是验证新构型模组在密闭箱体中的热抑制能力。在密闭箱体内砖砌式模组热蔓延抑制实验中, 采用加热功率为 2000 W 的加热片侧向加热引发电池发生热失控。在本文中, 采用薄片式加热片。并且, 不锈钢夹具给电池模组添加的预紧力扭矩是 5 N·m, 以确保电池模组在实验中的稳定性。参与实验的四节电池均处于 100% 的荷电状态。

图 2(a)和图 2(b)分别展示了新构型电池模组的布置示意图和密闭箱体內的热抑制实验的实物图。图 3(a)中表示密闭箱体內储能电池的前后表面温度和电压,  $T_n$ 、f 表示电池前表面中心点的温度,  $T_n$ 、b 表示电池后表面中心点的温度,  $V_n$  表示电池电压。图 3(b)展示了新构型模组热蔓延抑制实验之后的现象。从图中可得出, 在密闭箱体內, 电池模组应用新构型模组之后, 在第一块电池发生热失控之后, 相邻电池都没有发生热失控。可以看到相邻电池 2 和 3 的前表面温度最高不超过 244℃, 后表面温度最高不超过 108℃。相邻电池 4 的前表面温度最高不超过 115℃, 后表面温度最高不超过 90℃, 三块相邻电池的膨胀阀没有遭到破坏, 并且都没有打开, 相邻电池都处于安全范围之内。随后在箱体环境冷却的作用下, 相邻电池的前后表面温度缓慢下降到箱体內的温度, 相邻电池符合安全标准, 新构型电池模组抑制热蔓延效果出色。



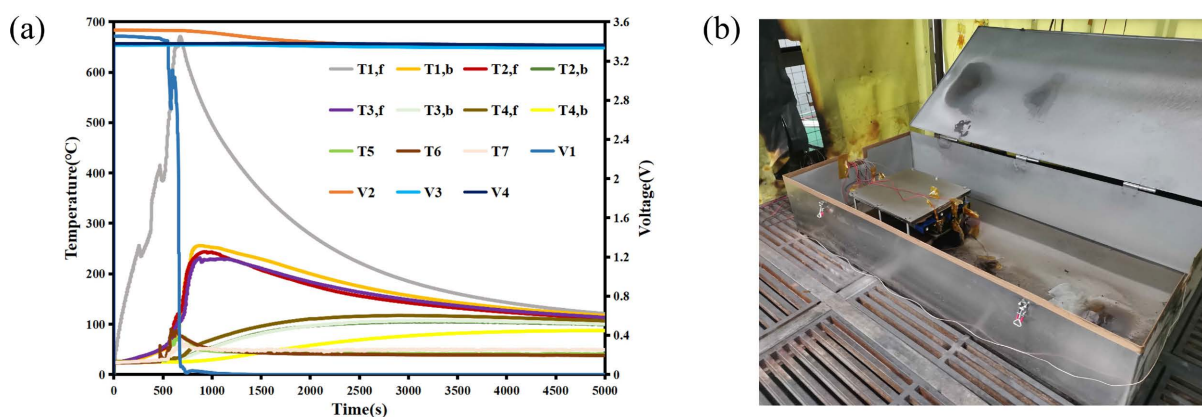
**Figure 1.** The experimental results of accelerated adiabatic thermal runaway for single-cell batteries

**图 1.** 单体电池加速绝热热失控实验结果



**Figure 2.** Experimental study on thermal propagation suppression of battery modules: (a) Schematic diagram of the brick-style battery module layout; (b) Photograph of the thermal suppression experiment inside a sealed enclosure

**图 2.** 电池模组热蔓延抑制实验：(a) 砖砌式电池模组的布置示意图；(b) 密闭箱体内的热抑制实验的实物图



**Figure 3.** Experimental study on thermal propagation suppression of battery modules: (a) Schematic diagram of the brick-style battery module layout; (b) The phenomena observed after the thermal propagation suppression experiment of the battery module

**图 3.** 电池模组热蔓延抑制实验：(a) 电池的 surface 温度和电压；(b) 电池模组热蔓延抑制实验之后的现象

## 2.3. 密闭箱体内热失控气体喷发流动建模

在本研究中,使用仿真软件 Starccm + 对应用砖砌式新构型电池模组之后,电池发生热失控引发的膨胀阀打开释放高温气体现象的过程开展模拟计算。

### 2.3.1. 仿真模型公式

通过上面的磷酸铁锂电池绝热加速量热实验与密闭箱体内砖砌式模组热蔓延抑制实验得到搭建模型的关键数据,具体为以下关键温度数据:大容量磷酸铁锂电池的  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  (自产热温度、热失控开始温度、热失控最高温度)与砖砌式新构型电池模组抑制热蔓延过程中全部电池前后表面的温度数据。利用仿真模拟软件 Star-ccm + 开展模拟研究,对应用新构型模组后相邻电池之间的接触热阻进行多次合理运算,得出符合条件的数值。仿真模拟中的几何模型主要是由加热片、新构型电池模组构成,模型的能量平衡方程可以利用公式(1)得出,其中,  $\Delta E$  是单元格,  $Q$  是产热总量,  $\Phi_{ht}$  是传热项。

$$\Delta E = Q + \Phi_{ht} \quad (1)$$

利用公式(2)得出第一节电池在热失控阶段内所放出的总能量  $H_{total}$ 。在公式里,  $T_3$  表示电池热失控达到的最高温度,  $T_1$  表示电池自产热的起始温度,  $M_{core}$  为单节电池的质量,  $C_p$  为单节电池的比热容。当相邻电池之间利用固体界面进行传热时,可依据公式(3)来表达。在公式里,  $T$  代表温度场,即模型中不同位置的温度分布;  $\nabla$  为梯度算子,用于表达模型坐标上各个方向的偏导数;  $K$  为热导率张量,反映了固体在不同方向的导热性质;  $q$  表示单位时间内通过单位体积的热量。如果想要通过仿真模拟,得出两个固体界面间的接触热阻,可以依据公式(4)计算得到。在公式当中,  $R$  为接触热阻,  $q$  为单位时间内通过单位体积的热量,  $\Delta T$  为接触面间的温度差。

$$H_{total} = M_{core} \cdot C_p \cdot (T_3 - T_1) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = q \quad (3)$$

$$R = q \cdot \Delta T \quad (4)$$

模型在第一节电池热失控发生的时间、热失控电池大面前后表面温度、相邻电池大面前后表面温度都需要和实验数据有一个好的契合,因此,模型需要多次计算调整。

### 2.3.2. 几何模型和划分网格模型

几何模型如图 4(a)所示,为了计算结果准确,本研究的仿真模型与实验进行 1:1 还原。搭建的模型里大约有 500 多万个网格,模型设置的最大的网格尺寸是 20 mm,最小的尺寸是 1 mm。如图 4(b)为网格模型,在电池膨胀阀处和气体域出口边界上进行了网格加密,以确保仿真计算的收敛性能。

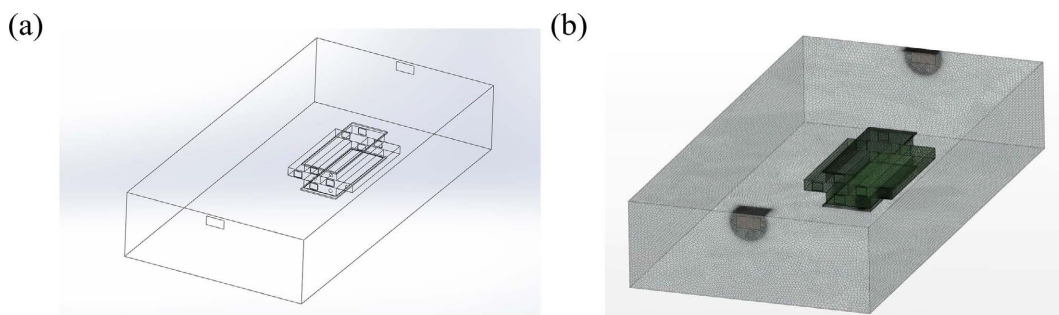


Figure 4. Model for heat propagation inhibition: (a) Geometric model; (b) Mesh partitioning model

图 4. 热蔓延抑制模型: (a) 几何模型; (b) 划分网格模型

### 2.3.3. 模型边界条件设置

在电池热失控过程中，高温气体喷发流动现象可通过纳维 - 斯托克斯方程进行有效描述，该方程涵盖了质量守恒、能量守恒以及动量守恒三大基本原理。

质量守恒：

$$\partial \rho + \nabla(\rho u) = 0 \quad (5)$$

其中， $\nabla$  是梯度算子、 $\rho$  是热失控喷发气体的密度、 $u$  是气体速度。

能量守恒：

$$\rho C(\partial T / \partial t + u \cdot \nabla T) = \nabla(k \nabla T) \quad (6)$$

其中， $\rho$  是热失控喷发气体密度、 $T$  是温度、 $C$  是比热容、 $u$  是速度、 $k$  是导热率。

动量守恒：

$$\rho(\partial u / \partial t + u \cdot \nabla u) = -\nabla P + \mu \nabla^2 u + \rho g \quad (7)$$

其中， $\rho$  是热失控喷发气体密度、 $P$  是气体压力、 $u$  是速度、 $\mu$  是动力粘度、 $t$  是时间、 $g$  是重力加速度。

$$T_{\text{vent}} = \begin{cases} T_{TR} & (t_{TR} < t < t_{TR} + t_s) \\ \text{environment} & (\text{else}) \end{cases} \quad (8)$$

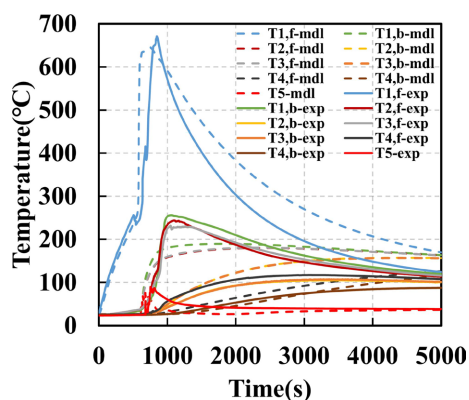
$$q_{\text{vent}} = \begin{cases} q_{TR} & (t_{TR} < t < t_{TR} + t_s) \\ 0 & (\text{else}) \end{cases} \quad (9)$$

本研究通过数值模拟对电池系统中单节电池发生热失控时的高温气体喷发过程进行了详细分析。在模拟场景中，热失控电池的喷发气体流量平均为 1.3 g/s，喷发持续时间为 100 s。为了更准确地反映实际情况，密闭箱体内部的气体域的初始温度被设定为 26℃，而电池喷发的气体温度则高达 500℃，深入探究高温气体在电池系统内的传播特性及其对系统整体热安全的影响。

### 2.3.4. 密闭箱体内热蔓延抑制模型模拟结果

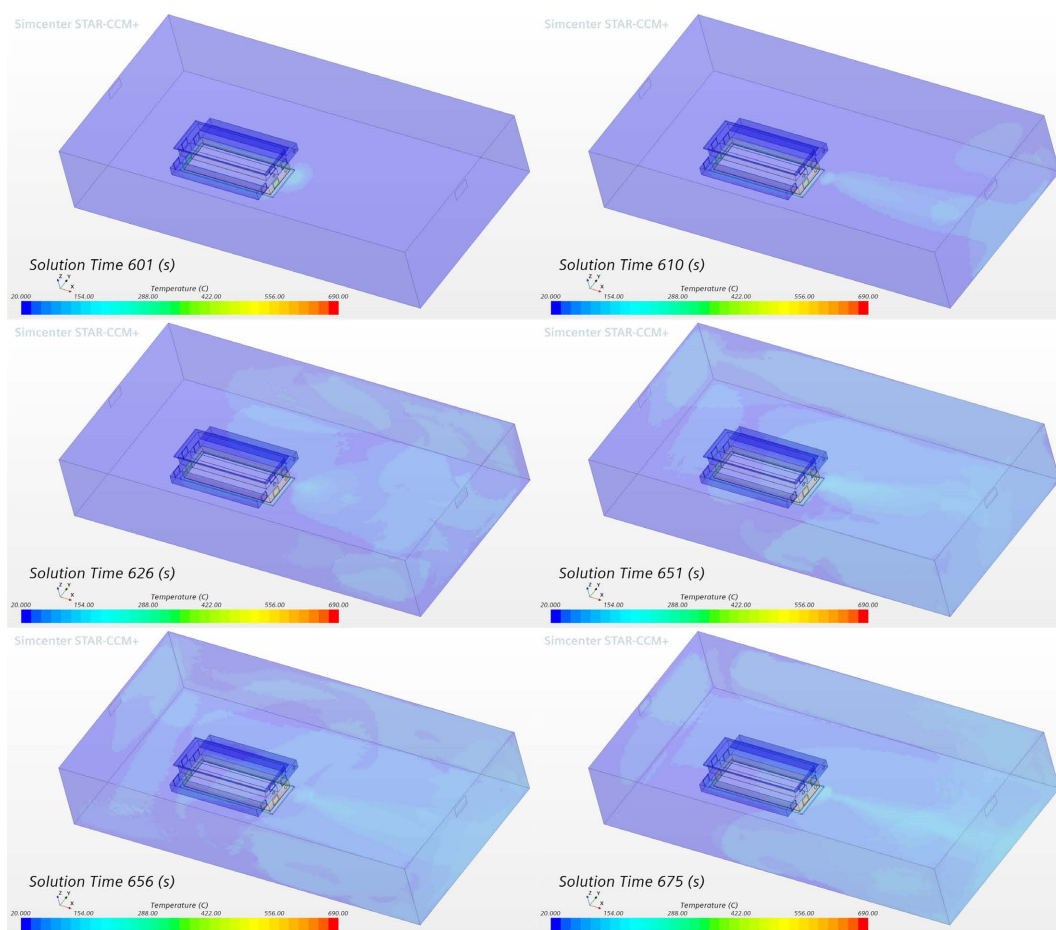
如图 5 所示，展示了密闭箱体内新构型电池模组热蔓延抑制仿真与实验数据对比，模型比较合理地还原实验过程，误差控制在 15% 以内。仿真结果表明，在热失控发生后，高温气体在箱体内部的扩散过程呈现出比较明显的时空演变特征。在第 626 s 左右时，高温气体已扩散并覆盖了箱体内约一半的区域；到第 651 s 左右时，高温气体进一步扩散，几乎完全覆盖了整个箱体内部的空气域，导致箱体内部的温度急剧上升，最高温度超过 100℃。这一过程中，高温烟气对相邻电池造成持续的对流换热作用，增加相邻电池发生热失控的风险。然而，尽管高温气体扩散比较快，但相邻电池的膨胀阀并未打开，且未发生热失控现象。整个密闭箱体内部的气体域温度仍在上升，反映出热失控对系统整体热环境的深远影响。

如图 6 所示，表示密闭箱体内砖砌式新构型模组中单个磷酸铁锂电池出现热失控后高温气体的喷发与演化过程。高温气体主要汇集在电池膨胀阀附近，并在箱体内逐渐扩散。这一现象表明，高温气体对电池模组的热安全构成了显著威胁，因此，密闭箱体内电池模组的热安全能力需要达到很高的标准，需要充分考虑高温气体对电池模组的影响。在模拟过程中，第一节电池在加热片开启后约 600 s 时发生热失控。相邻电池的膨胀阀并未打开，且未出现热失控现象。新构型模组在一定程度上能够有效抑制热失控的传播。综上，在密闭箱体内部发生电池模组热失控时，深入探究高温气体在箱体里的流动特性及其对相邻电池的影响，对优化储能系统的热安全保护设计具有至关重要的意义。这不仅有助于提高电池系统的安全性，还能为未来电池模组的结构设计提供科学依据。这一结果验证了模型的可靠性和适用性，为其在其他类似场景中的推广提供了有力支持。



**Figure 5.** Comparison of simulation and experimental data on thermal runaway propagation suppression of new configuration battery modules in a sealed enclosure

**图 5.** 密闭箱体新构型电池模组热蔓延抑制仿真与实验数据对比



**Figure 6.** The evolution of high-temperature gases from thermal runaway in a sealed enclosure

**图 6.** 密闭箱体热失控高温气体的演变

### 3. 结论

本研究以 240 Ah 大容量磷酸铁锂电池为研究对象，为了深入探究其在密闭箱体内部的热蔓延特性，进

行了新型构型电池模组的热蔓延抑制实验与建模研究。实验中采用加热片侧向加热的方式，模拟热失控的触发条件，研究新构型电池模组的热蔓延抑制效果。此外，创建密闭箱体新构型电池模组的热蔓延抑制模型以及热失控喷发高温气体模型。通过实验与建模相结合的研究方法，本文得出以下结论：

首先，利用磷酸铁锂电池绝热加速量热实验，精确测定了电池在热失控阶段的三个重要特征温度。随后，采用砖砌式新型构型电池模组开展抑制热蔓延实验，得到了模组在热失控阶段的温度数值。利用热抑制实验得到的数据导入到抑制热蔓延模型里进行多次计算，得到合理数值，仿真结果显示，模型在第一节电池热失控发生的时间、热失控电池大面前后表面温度、热抑制效果以及相邻电池温度的预测精度上，误差均控制在 15% 以内。

利用新构型模组抑制热蔓延实验，建立密闭箱体热失控喷发高温气体模型。仿真模型说明电池在密闭箱体热失控时高温气体喷发的特征。在模拟单块电池热失控喷发高温气体的阶段里，仿真结果表明，当第一块电池发生热失控后，密闭箱体内气体平均温度迅速上升并超过 100℃。热蔓延获得理想的控制，防止热失控进一步传播。对储能电池热失控产生的高温气体喷发特性进行深入探索，本文为储能系统的热安全保护设计提供了重要的理论数据和参考标准。

## 参考文献

- [1] Ouyang, D., Chung, Y., Liu, J., Bai, J., Zhou, Y., Chen, S., *et al.* (2025) Characteristics and Mechanisms of as Well as Evaluation Methods and Countermeasures for Thermal Runaway Propagation in Lithium-Ion Batteries. *Progress in Energy and Combustion Science*, **108**, Article ID: 101209. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2025.101209>
- [2] Gao, P., Song, L., Jia, Z., Li, J., Sun, J., Qin, P., *et al.* (2025) Revealing the Contribution of Flame Spread to Vertical Thermal Runaway Propagation for Energy Storage Systems. *Journal of Power Sources*, **628**, Article ID: 235897. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.235897>
- [3] Zuo, K., Li, Z., Liang, H., Wang, Z. and Ouyang, T. (2025) An Integrated Scheme to Prevent the Propagation of Li-Ion Battery Thermal Runaway. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **241**, Article ID: 126725. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.126725>
- [4] Chen, L., Pereira, C., Pannala, S., Munjurulimana, D. and Goossens, H. (2025) Mitigation of Cylindrical Lithium Ion Battery Thermal Runaway Propagation with a Flame Retardant Polypropylene Thermal Barrier. *Journal of Energy Storage*, **108**, Article ID: 115042. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.115042>
- [5] Mao, B., Lu, J., Zhang, Y., Chen, N., Lai, Z., Zhu, L., *et al.* (2025) Mitigating the Cascading Effects of Thermal Runaway and Fire Propagation in Enclosed Clusters of 18,650-Type Lithium-Ion Batteries. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **239**, Article ID: 126577. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126577>
- [6] Han, X., Li, C., Lyu, P., Li, M., Wen, C. and Rao, Z. (2025) Research on Thermal Runaway Propagation of Lithium-Ion Batteries Based on Cold Plate Cooling and Flame-Retardant Materials. *Journal of Energy Storage*, **110**, Article ID: 115271. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.115271>
- [7] Yang, J., Tong, J., Yang, Y., Zhang, Q. and Niu, J. (2025) Characteristics of Thermal Runaway and Propagation for 18650 Lithium Batteries in Top-Confined Space. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **241**, Article ID: 126663. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.126663>
- [8] Dang, Y., Yu, Y., Wang, Z., Liu, P., Zhou, X., Zhao, Y., *et al.* (2025) Blocking Thermal Runaway Propagation in Large-Format Sodium-Ion Battery System through Localized Energy Release. *Journal of Energy Chemistry*, **104**, 514-526. <https://doi.org/10.1016/j.jchem.2025.01.008>
- [9] Peng, R., Kong, D., Ping, P., Gao, W., Wang, G., Gong, S., *et al.* (2025) Experimental Investigation of the Influence of Venting Gases on Thermal Runaway Propagation in Lithium-Ion Batteries with Enclosed Packaging. *eTransportation*, **23**, Article ID: 100388. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2024.100388>
- [10] Huang, Z., Duan, Q., Li, J., Yang, F., Sun, J. and Wang, Q. (2025) Experimental and Numerical Investigation of Heating Power Effect on Thermal Runaway Propagation within Large-Format Lithium Iron Phosphate Battery. *Journal of Energy Storage*, **109**, Article ID: 115098. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.115098>
- [11] Zhang, L., Liu, Y., Huang, X. and Huang, X. (2025) Intra-cell Thermal Runaway Propagation within a Cylindrical Battery Induced by Nail Penetration. *International Journal of Thermal Sciences*, **210**, Article ID: 109633. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2024.109633>
- [12] Liu, Y., Chen, Y., Chang, Z., Wu, X., Jiang, Z. and Tang, S. (2025) Role of Porous Metal Foam on Temperature Control

- 
- and Thermal Runaway Propagation of Integrated Battery Thermal Management Systems. *Applied Thermal Engineering*, **267**, Article ID: 125712. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125712>
- [13] Zhang, J., Wang, Z., Jiang, T., Liu, P., Sun, Z., Shan, T., *et al.* (2025) Investigation of Battery Safety States Based on Thermal Propagation and Expansion Analysis: Experimental Studies on Different Packaging Forms. *Applied Thermal Engineering*, **258**, Article ID: 124800. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124800>
  - [14] Dong, W., Xu, C., Huang, W., Peng, Y., Zhang, M., Wang, H., *et al.* (2025) Dynamic Simulation on the Deformation of the Battery Module under Thermal Runaway Propagation Based on Internal Pressure. *Process Safety and Environmental Protection*, **195**, Article ID: 106733. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.12.114>
  - [15] Li, Z., Cheng, Z., Yu, Y., Wang, J., Wang, L., Mei, W., *et al.* (2025) Thermal Runaway Comparison and Assessment between Sodium-Ion and Lithium-Ion Batteries. *Process Safety and Environmental Protection*, **193**, 842-855. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.11.118>
  - [16] Wang, J., Yang, J., Bai, W., Wang, Z., Yu, K., Lu, Y., *et al.* (2025) Thermal Runaway and Jet Flame Features of Libs Undergone High-Rate Charge/discharge: An Investigation. *Journal of Energy Chemistry*, **103**, 826-837. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2024.12.004>
  - [17] Chen, L., Li, K., Cao, Y., Feng, X. and Wu, W. (2025) Multidimensional Signal Fusion Strategy for Battery Thermal Runaway Warning towards Multiple Application Scenarios. *Applied Energy*, **377**, Article ID: 124512. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124512>
  - [18] Zhang, Y., Ping, P., Dai, X., Li, C., Li, Z., Zhuo, P., *et al.* (2025) Failure Mechanism and Thermal Runaway Behavior of Lithium-Ion Battery Induced by Arc Faults. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **207**, Article ID: 114914. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114914>
  - [19] Ping, P., Li, C., Zhang, Y., Zhuo, P., Tang, L. and Kong, D. (2025) Experimental Study on the Effect of Heating Position on Thermal Runaway Behavior of Semi-Solid Li-Ion Batteries. *Journal of Energy Storage*, **105**, Article ID: 114701. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114701>
  - [20] Lou, Z., Huang, J., Su, Z., Zhang, D., Wei, X. and Yao, H. (2025) Effects of Ventilation Conditions on Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries Packs in an Energy-Storage Cabin. *Process Safety and Environmental Protection*, **196**, Article ID: 106899. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.106899>
  - [21] Cheng, Z., Min, Y., Qin, P., Zhang, Y., Li, J., Mei, W., *et al.* (2025) A Distributed Thermal-Pressure Coupling Model of Large-Format Lithium Iron Phosphate Battery Thermal Runaway. *Applied Energy*, **378**, Article ID: 124875. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124875>