



## 工质和流量对浸没冷却抑制电池热失控影响的数值模拟研究

付美娅, 徐一峰, 王海民

(上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 介电流体具有高的比热容和稳定的绝缘性质, 因此浸没式冷却技术广泛用于高性能锂离子电池热管理系统。然而, 浸没冷却抑制电池热失控的研究仍较为有限。本文在考虑电化学基础上, 建立了一个新颖的热失控-热-流动多物理场耦合的数值模型, 用于探究冷却工质和流量对热失控传播抑制的关键作用。通过电池组热失控实测数据验证了模型的可靠性。此外, 提出一种评估方法, 将热安全性和热管理性能相结合, 为系统优化提供了量化依据。评价指标包括热失控触发时间( $t_{TR}$ )、泵送功耗( $P$ )、流动阻力( $f$ )、努塞尔数( $Nu$ )和综合性能指数( $PEC$ )。最后建立了雷诺数( $Re$ )与各评价指标的函数拟合关系, 以探究流动换热的一般性规律。结果表明, 尽管浸没冷却无法避免已经局部短路(针刺)电芯发生热失控, 但有效抑制了热失控的传播。与强制空气对流相比, 采用聚 $\alpha$ 烯烃(PAO)油能够显著延迟热失控在电池模组中的传播。沿热失控传播方向, 电芯#2的 $t_{TR}$ 延长了94.9%, 电芯#3的 $t_{TR}$ 延长了45.3%, 电芯#4的 $t_{TR}$ 延长了42.8%。当 $Re$ 超过9.88时, 热失控传播得到有效抑制; 在 $Re = 23.04(0.7 \text{ g/s})$ 条件下, PAO油实现了显著的温度降低。本研究结果可为浸没式热管理系统设计提供有价值的参考依据。

**关键词:** 锂离子电池; 热失控; 浸没冷却; 冷却工质; 进口流量

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0058

中图分类号: TM 911

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-09

## Numerical study on the effects of working fluid and flow rate on thermal runaway suppression in immersion cooling for batteries

FU Meiya, XU Yifeng, WANG Haimin

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China.)

**Abstract:** Dielectric fluids possess high specific heat capacity and stable electrical insulation properties, making immersion cooling technology widely used in thermal management systems for high-performance lithium-ion batteries. However, research on the suppression of battery thermal runaway (TR) by immersion cooling remains limited. In this work, a novel multi-physics coupled numerical model integrating TR, thermal, and flow behaviors is developed based on electrochemical fundamentals to investigate the key effects of cooling working fluid and flow rate on TR propagation mitigation. The reliability of the model is validated using experimental data from TR tests on battery packs. Furthermore, an evaluation methodology is

收稿日期: 2026-01-20; 修改稿日期: 2026-04-27。

基金项目: 汽车零部件先进制造技术教育部重点实验室开放基金 (No. 2023KLMT01)。

第一作者: 付美娅 (2002—), 女, 硕士研究生, 电池热管理, E-mail: fumeiya494@163.com; 通信作者: 王海民, 教授, 动力电池热管理系统评价技术, E-mail: hmwang@usst.edu.cn。

引用本文: 付美娅, 徐一峰, 王海民. 工质和流量对浸没冷却抑制电池热失控影响的数值模拟研究[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-9.

**Citation:** FU Meiya, XU Yifeng, WANG Haimin. Numerical study on the effects of working fluid and flow rate on thermal runaway suppression in immersion cooling for batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-9.

proposed that combines thermal safety and thermal management performance, providing a quantitative basis for system optimization. The evaluation metrics include TR trigger time ( $t_{TR}$ ), pumping power ( $P$ ), flow resistance ( $f$ ), Nusselt number ( $Nu$ ), and comprehensive performance index (PEC). Finally, functional fitting relationships between the Reynolds number ( $Re$ ) and each evaluation metric are established to explore general principles of flow and heat transfer. The results indicate that although immersion cooling cannot prevent TR in cells already subjected to local short-circuit (nail penetration), it effectively suppresses TR propagation. Compared with forced air convection, the use of polyalphaolefin (PAO) oil significantly delays the propagation of TR within the battery module. Along the direction of TR propagation, the  $t_{TR}$  of Cell #2 is extended by 94.9%, that of Cell #3 by 45.3%, and that of Cell #4 by 42.8%. When  $Re$  exceeds 9.88, TR propagation is effectively suppressed. At  $Re = 23.04$  (0.7 g/s), PAO oil achieves a notable temperature reduction. The findings of this study can provide valuable references for the design of immersion cooling thermal management systems.

**Keywords:** lithium-ion battery; thermal runaway; immersion cooling; working fluid; inlet flow rate

锂离子电池(LIB)作为一种电化学储能装置,已被广泛应用于新能源汽车(NEV)<sup>[1]</sup>。目前,NEV趋向快充、快放和超远续航里程发展,给热管理系统带来了新的挑战。在实际运行条件下,机械、电气和热滥用均可能诱发LIB热失控<sup>[2]</sup>。尤其在高能量密度电池包中,热失控常伴随着剧烈的火焰喷射和爆炸危害,严重影响了人员安全<sup>[3,4]</sup>。因此探索有效的热失控传播抑制策略对于保障新能源汽车的安全运行和可持续发展具有重要意义。

开发电池热管理系统(BTMS)抑制锂离子电池热失控传播是一种具有前景的方案,能够同时兼顾热管理和热安全的需求。与传统BTMS相比,液冷具备更高的散热性能<sup>[5]</sup>。Fu等<sup>[6]</sup>开发了一种带有微通道结构的液冷板用于抑制锂离子电池的热失控传播;数值结果表明,当通道宽度为5 mm、流速为0.3 m/s时,可有效阻止热失控的蔓延。为了进一步提升抑制效果,液冷系统常与被动冷却策略相结合。Xiao等<sup>[7]</sup>设计了一种复合相变材料(CPCM)与液冷板耦合的混合系统。结果表明,增加冷却液流量与电芯间距可显著延迟热失控传播,而液冷板中通道数量对其影响较小。虽然混合冷却策略显著增强了抑制热失控传播的能力,但也不可避免地带来了更高的使用成本和系统复杂性。

浸没式冷却(IC)作为一种新兴的液冷热管理技术,通过冷却液直接与电池表面接触,从而实现更

优的散热性能与更简单的系统结构<sup>[7,8]</sup>。Ye等<sup>[9]</sup>利用硅油对18650圆柱电芯进行热失控传播抑制实验;实验结果表明,当浸没深度为70 mm时,热失控起始时间延长至312s,验证了IC技术在减缓热失控传播方面的有效性。然而,该研究受限于电池容量较小、硅油黏度较高以及静态浸没条件。Liu等<sup>[10]</sup>采用两相氟液体对由12节方形电芯组成的电池包进行热失控传播抑制研究;数值模拟结果表明,沸腾换热可将2-12号电芯的平均温度维持在34℃以下。然而,现有研究主要聚焦于IC技术对单体电芯热失控的抑制效果,而对系统级设计优化与热管理性能的研究仍不足。

针对上述问题,本研究建立了一个新型的热失控-热-流动的数值模型。此外,采用量化依据评估浸没系统的关键因素对热失控抑制作用。首先分析了大容量电池组热失控演化过程。其次探究不同工质对热失控传播的缓解效果。最后通过设计两个阶段的进口流量,分析了流量对热失控传播的阻断作用。

## 1 几何模型

本文选择27 Ah的三元(NCM)锂离子电池作为研究对象<sup>[11]</sup>。如图1所示,详细描述了电池、针刺部位、浸没系统和液边距等尺寸信息。四个电芯沿Z轴正方向紧密排列,依次编号为#1-#4,第一个

电芯被直径为 8 mm 的钉子穿透触发热失控，并逐步向后蔓延。电池组完全浸没在冷却介质中，IC 系统的进出口直径( $D$ )设置为 9 mm，进口位于侧面几何中心，出口相对于进口位置下方 6 mm 处。并且浸没系统从进口到出口沿  $z$  轴正方向流动。电池和钉子的热物性参数如表 1 所示，这些参数在模拟电芯之间传热时起到关键作用。

## 2 数值模型

本研究建立的浸没冷却锂离子电池耦合传热模型由三个子模型组成，分别为热失控模型、冷却液流动模型以及热传递模型。

### 2.1 热失控模型

锂离子电池的热失控是一个复杂的、多阶段的放热反应过程。在本文中，通过考虑主要的产热因素，将其简化为三种主要热源，分别为短路热源( $Q_{nail}$ )、电能释放( $Q_{ele}$ )和化学能释放( $Q_{chem}$ )。 $Q_{nail}$  实质是部分电能转化而来。这些热源经验公式中的系

表 1 电芯和钉子的热物性参数

Table 1 Thermal physical properties of battery cells and nails

参数	单位	值
电芯容量	Ah	27
电芯密度	kg/m <sup>3</sup>	2000
钉子密度	kg/m <sup>3</sup>	7850
电芯正极密度	kg/m <sup>3</sup>	8522
电芯负极密度	kg/m <sup>3</sup>	2700
电芯导热率	W/(m·K)	$\lambda_x=\lambda_y=21, \lambda_z=1$
电芯正极导热率	W/(m·K)	385
电芯负极导热率	W/(m·K)	146
钉子导热率	W/(m·K)	44.5

数通过实验测量进行校准。在整个热失控过程中，总发热量按公式(1)和(2)计算。

$$Q_{ele} = \begin{cases} \iiint_{V_{nail}} q_{nail} dV + \iiint_{V_{ele}} q_{ele} dV & (\text{电芯 \#1}) \\ \iiint_{V_{cell}} q_{ele} dV & (\text{电芯 \#2 - \#4}) \end{cases} \quad (1)$$

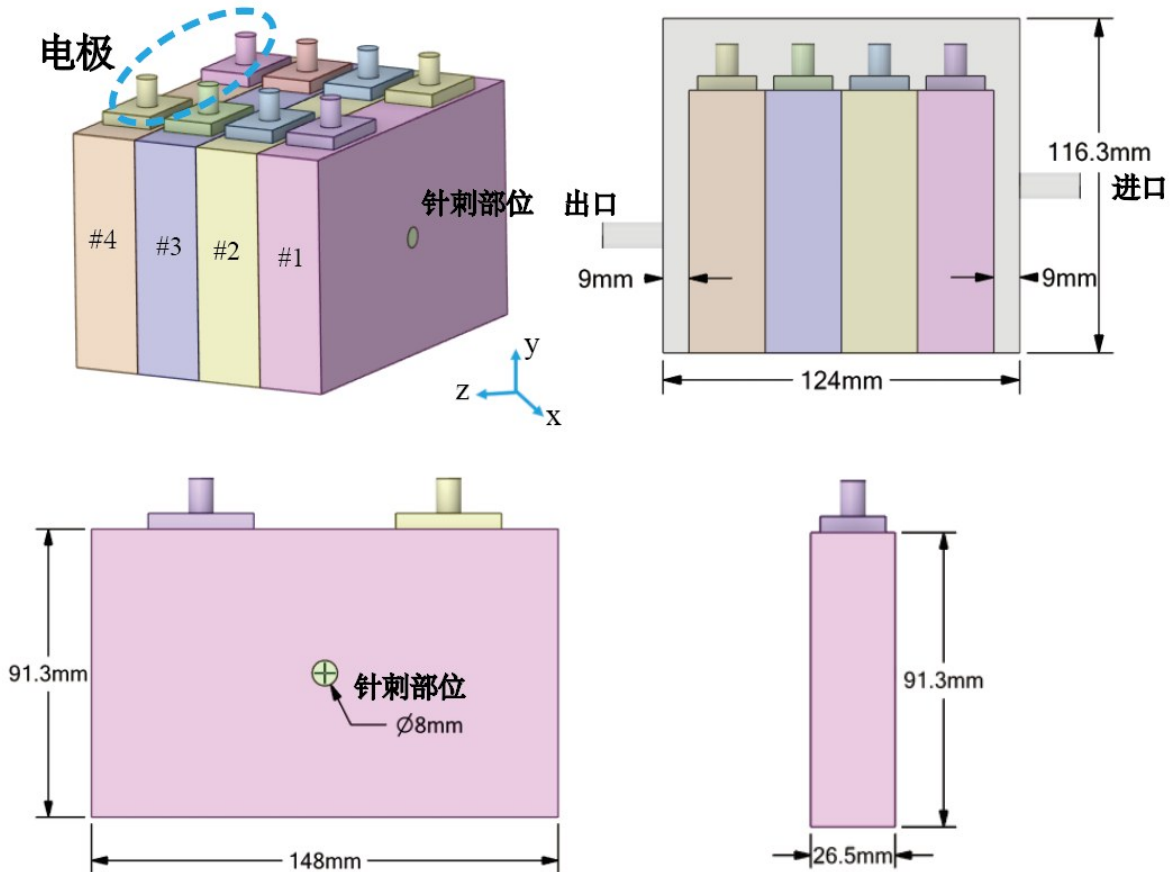


图 1 电池组与浸没系统模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of the battery pack and immersion system model

$$Q_{chem} = \iiint_{V_{cell}} q_{chem} dV \quad (\text{电芯\#1 - \#4}) \quad (2)$$

$q_{naile}$ 、 $q_{ele}$ 、 $q_{chem}$  被用来表征特定条件下锂离子电池在不同热失控阶段的热释放速率。各热释放速率在 ANSYS Fluent 中通过用户自定义函数 UDF 实现，相应的计算公式见(3)、(4)和(5)。

$$q_{naile} = \frac{\Delta H_{ele}}{V_{naile}} \cdot \alpha_{naile} \cdot f(t) \quad (\text{电芯\#1}) \quad (3)$$

$$q_{ele} = \begin{cases} \left( \frac{1 - \alpha_{naile}}{V_{Bat}} \right) \cdot \Delta H_{ele} \cdot \left| \frac{dc_{ele}}{dt} \right| & (\text{电芯} 1) \\ \frac{\Delta H_{ele}}{V_{Bat}} \cdot \left| \frac{dc_{ele}}{dt} \right| & (\text{电芯} 2 - 4) \end{cases} \quad (4)$$

$$q_{chem} = \frac{\Delta H_{chem}}{V_{Bat}} \cdot \left| \frac{dc_{chem}}{dt} \right| \quad (\text{电芯} 1 - 4) \quad (5)$$

式中， $f(t)$ 表示阶段函数控制短路部位的热释放速率<sup>[12]</sup>。 $\alpha_{naile}$ 表示校准系数，以减少实验与模拟之间的偏差<sup>[13]</sup>。 $\Delta H_{ele}$ 表示热失控过程释放的电能， $\Delta H_{chem}$ 表示热失控过程释放的化学能<sup>[14]</sup>。

表2 上述表达式计算所需参数

Table 2 Parameters required for the calculation of the above expressions

参数	单位	值
$\alpha_{naile}$	-	0.012
$V_{naile}$	m <sup>3</sup>	1.06×10 <sup>-6</sup>
$V_{cell}$	m <sup>3</sup>	3.58×10 <sup>-4</sup>
$\Delta H_{ele}$	KJ	380
$\Delta H_{chem}$	KJ	254

此外， $c_{ele}$ 和 $c_{chem}$ 分别代表电能和化学能释放的无量纲浓度，并用于调节相应的释放速率。在整个热失控过程中，两者都从1降低到0，表明随着反应的进行，热释放逐渐衰减直到完成。在本文中，使用 ANSYS Fluent 中的用户自定义标量(UDS)输运方程实现了热释放速率的控制。式(6)给出了输运控制方程。此外，无量纲浓度仅为时间的函数，因此忽略了对流项和扩散项。

$$\frac{\partial(\rho\phi_k)}{\partial t} = S_{\phi_k} \cdot \phi_k = c_{ele} \cdot c_{chem} \quad (6)$$

## 2.2 流动模型

本文假设冷却剂的热参数恒定，并且各种冷却剂都是不可压缩流体。此外，冷却剂的密度较小和浸没系统高度仅为116.3 mm，导致了重力对浸没系统压降和流动换热影响非常小，因此数值模拟时忽略了重力项。冷却剂流动和能量控制方程如(7)、(8)和(9)所示。

$$\nabla \cdot \vec{u}_{cl} = 0 \quad (7)$$

$$\rho_{cl} \frac{\partial \vec{u}_{cl}}{\partial t} + \rho_{cl} (\partial \vec{u}_{cl} \cdot \nabla) \vec{u}_{cl} = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_{cl} \nabla \vec{u}_{cl}) \quad (8)$$

$$\rho_{cl} C_{p,cl} \frac{\partial T_{cl}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{cl} C_{p,cl} \vec{u}_{cl} T_{cl}) = \nabla \cdot (k_{cl} \nabla T_{cl}) \quad (9)$$

式中， $\rho_{cl}$ 、 $u_{cl}$ 、 $\mu_{cl}$ 和 $p$ 分别表示冷却剂的密度、速度、动力黏度和压力； $C_{p,cl}$ 、 $T_{cl}$ 、和 $k_{cl}$ 分别表示冷却剂的比热容、温度和导热率。

当考虑不同冷却液和入口流量时，采用雷诺数(Re)判断流动状态。当 $Re < 2300$ 时，流动被定义为层流，否则为湍流。雷诺数计算见公式(10)。此外，采用k-ε模型<sup>[15]</sup>来模拟湍流流动。

$$Re = \frac{\rho_{cl} \vec{u}_{cl} D}{\mu_{cl}} \quad (10)$$

本文探究了不同工质和入口流量对电池热失控的抑制作用。不同冷却工质的热物性参数如表3所示<sup>[16]</sup>。浸没系统入口边界为质量流量进口，范围为0.06~0.1 g/s。出口边界条件为压力出口，设置为0 Pa。浸没系统外壁面边界条件为绝热壁面，并且进行了无滑移的处理。

表3 各工质的热物性参数

Table 3 Thermophysical Properties of Various Working Fluids

类型	聚阿尔烯烷(PAO)油	变压器油	硅油
$\rho(\text{kg/m}^3)$	781.2	895	920
$C_p(\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}))$	2183.6	1971	1370
$\lambda(\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}))$	0.141	0.106	0.15

## 2.3 数据评估

在本文中定量分析了浸没系统在抑制电池组热失控传播的有效性。建立了两类评估指标，第一类是电芯的热失控触发时间( $t_{TR}$ )。此外，本研究将电芯温度垂直上升过程的起始点作为热失控触发时间，电池的最高温度不超过电能和化学能释放的阈值(260°C)作为阻断热失控的依据。第二类评估指标包括努赛尔数(Nu)、泵送功率(P)、流动阻力<sup>[17]</sup>(f)和性能评估系数<sup>[18]</sup>(PEC)。计算公式如(11)、(12)、(13)和(14)。

$$Nu = \frac{h_{cl} D}{k_{cl}} = \frac{D Q_v}{A_{cell,wall} \left( T_{wall,cell} - \frac{T_{in,cl} + T_{out,cl}}{2} \right) k_{cl}} \quad (11)$$

$$P = \Delta p \cdot A_{cl,in} \cdot u_{cl,in} \quad (12)$$

$$f = \frac{2\Delta p D}{\rho_{cl} u_{cl,in}^2 L} \quad (13)$$

$$PEC = \frac{(Nu/Nu_0)}{(ff_0)^{1/3}} \quad (14)$$

式中,  $Q_v$ 、 $A_{cell,wall}$  和  $A_{cl,in}$  分别表示进口流量、电池表面积和进口截面积。 $u_{cl,in}$ 、 $L$  分别表示进口流速和浸没系统长度。

## 2.4 模型验证

本文采用 PISO 算法求解数值模型, 可以提高瞬态仿真的收敛速度。为了提高仿真的精度, 将二阶迎风方案应用于能量方程和动量方程。此外, 将能量方程的亚松弛因子设置为 0.96, 提高数值模拟的稳定性。

本文对数值模型进行了无关性验证。如图 2 所示, 以第一个电芯的温度演变为例, 随着时间步长的减少, 平均温度曲线的差距也在逐渐变小。在 0.002 s 至 0.005 s 的范围内, 平均相对误差保持在 2% 以下。考虑到计算效率和数值精度, 后续仿真采用了 0.003 s 的时间步长。

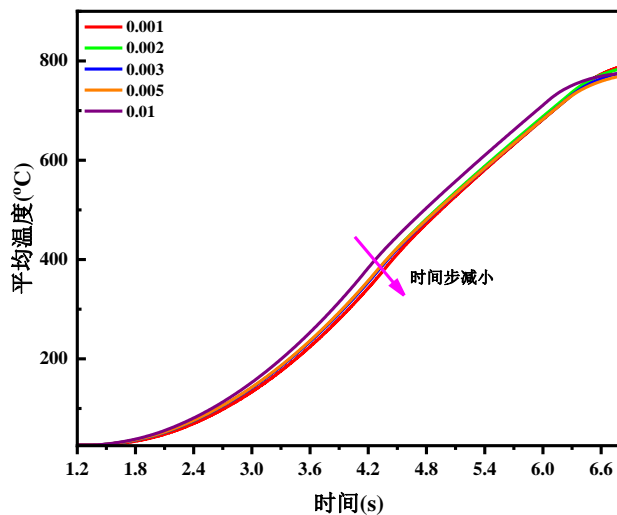


图2 时间步长无关性验证

Fig.2 Verification of time-step independence

为了评估网格的独立性, 选择了 6 种网格, 范围从 958,705 到 2,526,254 个单元。如图 3 所示, 电池最高温度随着网格细化而升高, 并逐渐达到稳定, 同时整个浸没系统的压降也不断减小后趋于稳定。当网格数量超过 2,078,578 个时, 最高温度和压降的相对误差均在可接受范围内, 分别小于 5°C 和 0.001 Pa。因此, 本文选择了 2,361,012 个的网格。

本文将电池的中心温度曲线与实验数据<sup>[4]</sup>进行了比较。如图 4 所示, ‘sim’ 表示模拟, ‘exp’ 表

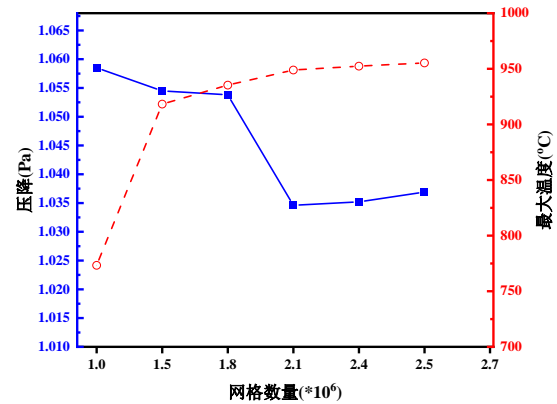


图3 网格无关性验证

Fig.3 Verification of grid independence

示实验。模拟和实验结果都表现出相似的趋势, 所有电池的 TR 触发时间非常匹配。然而, 模拟峰值温度和实验峰值温度之间存在轻微差异。这种差异可能是由于峰值温度出现的时间极短, 时间步长的限制, 数值模拟很难准确捕捉到这一点的温度造成的。然而, 由于本研究主要关注 TR 触发时间, 峰值温度不作为评估浸没系统的性能指标, 因此峰值温度的这种偏差不会影响研究结果。

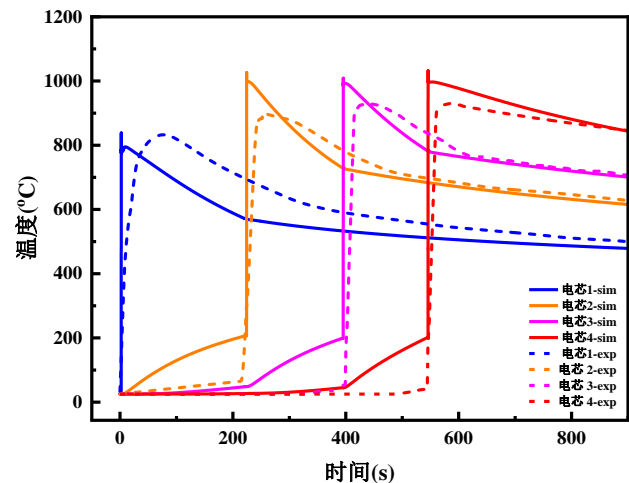


图4 数值模拟与实验对比

Fig.4 Comparison between numerical simulation and experimental results

## 3 结果分析

### 3.1 电池组的热失控演化

图 5(a) 所示, 将整个热失控过程划分为三个不同的反应阶段。在第一阶段, 锂离子从负极释放, 导致电池容量衰减; 同时固体电解质膜 (SEI) 失去保护, 负极与电解液之间发生放热反应, 电池温度

缓慢上升。在第二阶段，正极逐渐与电解液接触并发生反应，温升速度相比第一阶段显著加快。在最后阶段，当温度超过临界阈值后，电芯内部压力显著增加，温度上升速率呈指数级加快。

另外可以从图5观察到，当电池组浸没在冷却

液中时，其热失控行为与以往研究结果一致，表明所建立的模型具有较高的可靠性。然而，首个电芯发生热失控的时间几乎没有变化。这种现象可能是由于局部短路区域产生的热量极为迅速，使得浸没冷却系统尚未来得及有效响应所致。

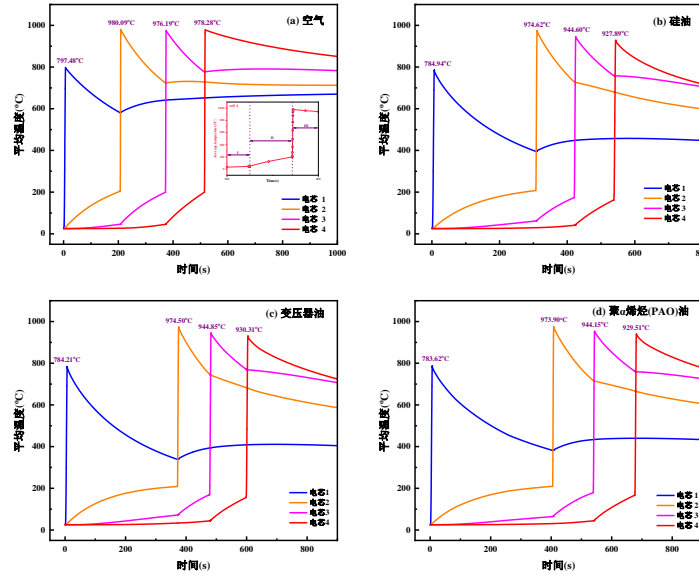


图5 各电芯在不同工质下的温度变化

Fig.5 Temperature variations of individual cells under different working fluids

### 3.2 不同工质影响

本研究还深入分析了冷却剂类型对电池组热失控传播和热管理性能的影响。不同冷却液在抑制电池热失控(TR)传播方面表现出明显差异。从图6可以观察到，在高流速强制风冷下， $Nu$ 仅为0.4，而功耗最大。然而采用PAO油浸没冷却时， $Nu$ 为2.88，功耗最小。

此外，从图7可以观察到，相比空气，电池组浸没在PAO油中各电池TR触发时间有最大的延迟。各电芯的TR触发时间分别延迟了94.9%（电芯#2）、45.3%（电芯#3）、42.8%（电芯#4）。PAO油与电池组完全接触，并且PAO油具备黏度低和高比热容的特点，使得传热能力大幅提升，清楚解释了上述结果产生的原因。

### 3.3 进口流量设计

本研究设计了2个阶段的进口流量变化，第1阶段流量变化范围为0.06g/s-0.1g/s，第2阶段流量变化范围为0.1g/s-1.1g/s。引入无量纲雷诺数( $Re$ )反映PAO油流动状态，第1阶段 $Re$ 缓慢增大，

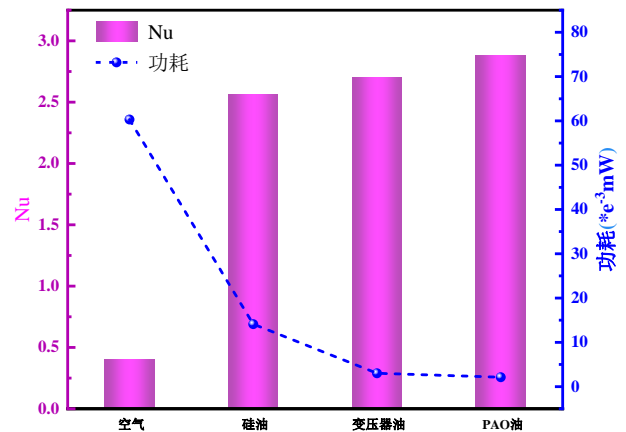


图6 不同工质下的性能指标

Fig.6 Performance indicators under different working fluids

第2阶段 $Re$ 快速增大。

为了得到普适性规律，建立了各性能评价指标与 $Re$ 拟合函数关系。在图8(a)(c)中， $Nu$ 在前期快速增大， $Re$ 超过20后， $Nu$ 逐渐稳定，同时在 $Re$ 增大过程中， $PEC$ 逐渐增大，但增量在逐步下降。

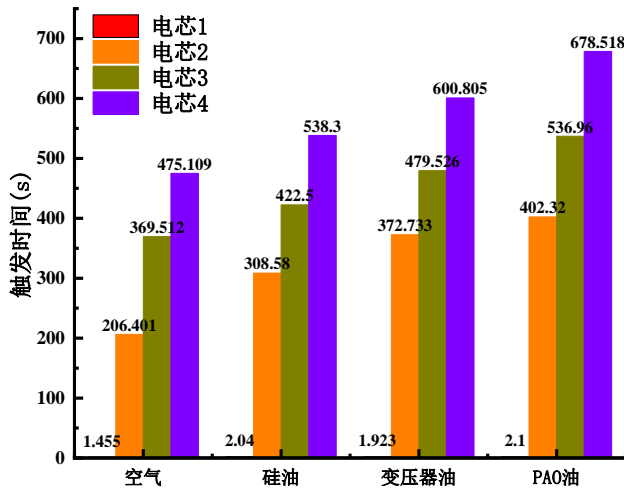


图7 各电芯在不同工质下的热失控触发时间

Fig.7 Thermal runaway initiation times of individual cells under different working fluids

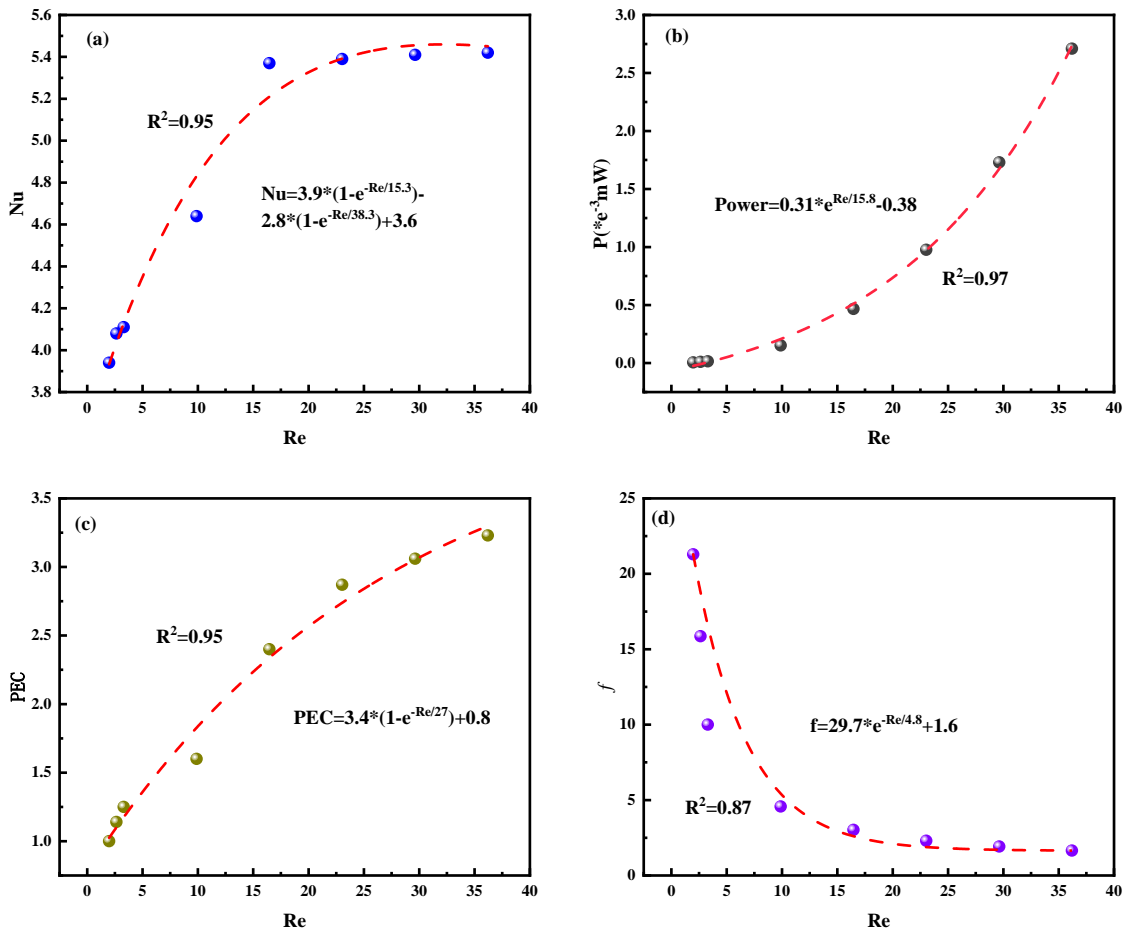
在  $Re$  逐渐增大过程中，浸没系统中的PAO油流态在不断的改变。当  $Re$  超过20时，流动达到了充分

发展的状态，浸没系统的传热能力也逐渐趋于稳定，但内部流动损失仍有小幅增加，清楚解释了上述结果的原因。此外从图8(b)(d)可以观察到，随着  $Re$  的增大，功耗快速增加，并且没有变缓的趋势。然而  $f$  随  $Re$  的增大，开始快速下降，当  $Re$  超过20后缓慢下降。这种现象应该是  $Re$  的增大，消耗外部的能量在不断增加，而流动状态逐步稳定引起的。

### 3.4 进口流量影响

从图9可以观察到，当  $Re$  在1.98-3.29范围内，浸没系统对电池TR传播影响较小。然而随着  $Re$  的增大，各电池TR触发时间获得较大的延迟， $Re$  超过9.88后，TR的传播被有效阻断。

在图10中反映了热失控未发生蔓延时电芯#2温度变化，可以观察到在300s以前， $Re$  在16.5-36.2范围内电芯#2的温度保持一致，超过300s后，温度曲线出现显著差异。这种现象应该是电芯

图8 评估指标与  $Re$  的函数拟合关系Fig.8 Function fitting relationship between the evaluation indicators and  $Re$

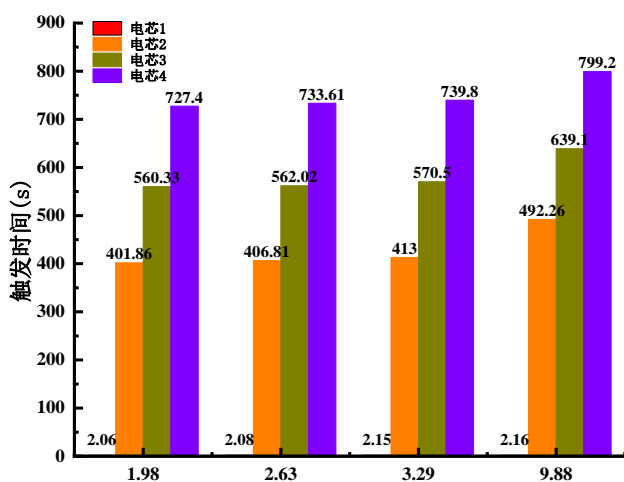


图9 各电芯热失控触发时间

Fig.9 Thermal runaway initiation times of individual cells

#1发生热失控，前期浸没系统无法在短时间带走热量，后期热失控反应结束，浸没系统迅速带走热量引起的。并且电芯2的最高温低于化学能和电能释放产热的阈值(260°C)，这也解释了 $Re$ 超过9.88后能阻断TR传播的原因。

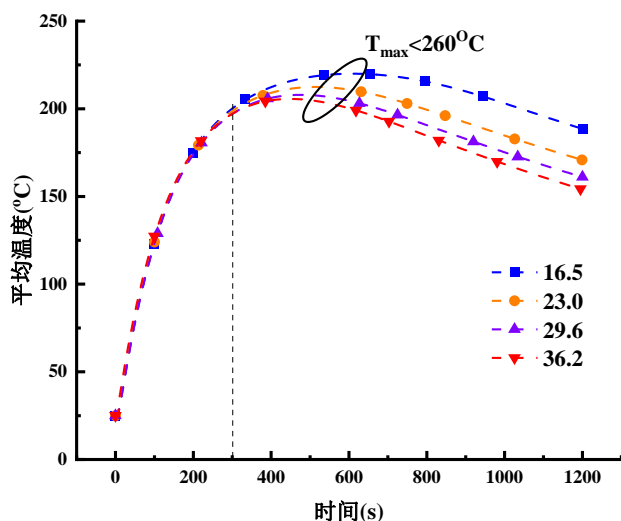


图10 电芯2的温度变化

Fig.10 Temperature variation of cell2

如图11中油温的变化，与电芯#2温度变化有相同的规律，并且最大的油温小于自身的闪点，不会带来二次热失控。此外 $Re$ 从16.5增加到23.04，最大油温降幅最大为11%。同时考虑到 $Re$ 在9.88-23.04范围内具有最佳的缓解热失控传播性能，因此浸没冷却的最佳的进口流量为0.7g/s( $Re=23.04$ )。

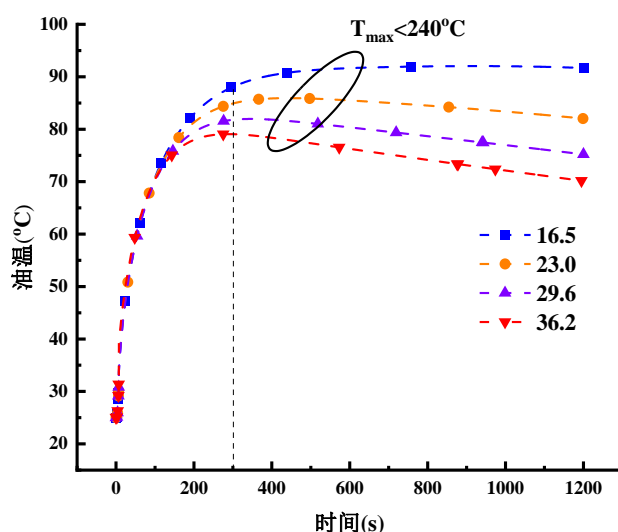


图11 PAO油温变化

Fig.11 Temperature variation of PAO oil

此外，图12中浸没系统温度场变化也验证了上述的结果， $Re$ 在1.98-9.88范围内，电芯#1-电芯#4依次发生热失控。电池组热失控结束后，表面普遍高温。 $Re$ 从16.46增加到36.2过程中，电池的高温区域逐渐消失，浸没系统带走的热量在不断增大。电池热失控未蔓延到电芯#2。

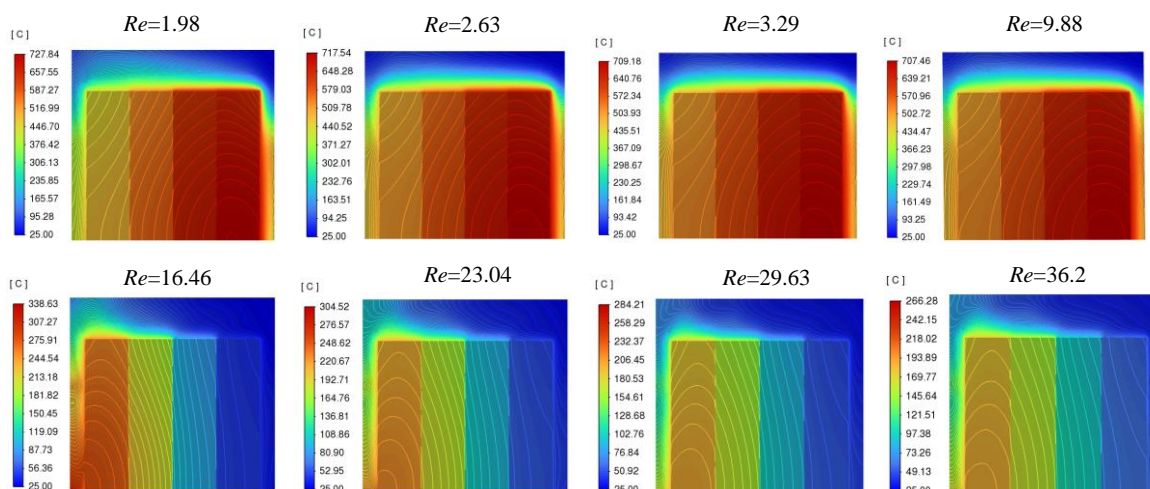
### 3 结论

本文建立了一个新型的热失控-热-流动耦合模型。在此基础上分析了不同工质和流量在浸没冷却抑制电池热失控的关键作用。

(1) 电池在各类冷却液中的热失控呈现三个阶段变化，并且第一个电芯的热失控触发时间没有显著区别。

(2) 本研究使用了4种不同冷却介质减轻电池组TR传播，发现PAO油的性能指标最佳。相比于强制空气对流，各电池TR触发时间分别延长了94.9%(电芯#2)，45.3%(电芯#3)，42.8%(电芯#4)。总体而言，冷却介质缓解电池组TR传播能力的排序为聚α烯烃油>变压器油>硅油>强制对流空气。

(3) 本研究还分析了进口流量对热失控传播的影响。为了得到一般规律，建立了各评价指标与 $Re$ 的拟合函数关系。在低 $Re$ 区， $Nu$ 和 $PEC$ 有大幅提升，后逐渐趋于稳定。虽然进口流量的增大会降低系统内的流动摩擦阻力，但也会不断地增加系统的功耗。 $Re$ 超过9.88，TR的传播被阻断，继续

图 12 不同  $Re$  对应的温度场Fig.12 Temperature fields corresponding to different  $Re$ 

增加到 23.04 (0.7g/s), PAO 油温有最大的降幅。

### 参考文献

- [1] HU X J, GAO F F, XIAO Y, et al. Advancements in the safety of Lithium-Ion Battery: The Trigger, consequence and mitigation method of thermal runaway [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 481.
- [2] NIE B S, DONG Y S, CHANG L. The evolution of thermal runaway parameters of lithium-ion batteries under different abuse conditions: A review [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 96.
- [3] CHANG C-H, GORIN C, ZHU B, et al. Lithium-Ion Battery Thermal Event and Protection: A Review [J]. Sae International Journal of Electrified Vehicles, 2024, 13(3).
- [4] 党彦宝,王佩佩,陈中军,姜豫皖. 储能锂电池热安全研究综述 [J]. 电源技术, 2025.
- [5] FU H, WANG J L, LI L, et al. Numerical study of mini-channel liquid cooling for suppressing thermal runaway propagation in a lithium-ion battery pack [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 234.
- [6] XIAO H X, E J Q, TIAN S C, et al. Effect of composite cooling strategy including phase change material and liquid cooling on the thermal safety performance of a lithium-ion battery pack under thermal runaway propagation [J]. Energy, 2024, 295.
- [7] 范文强 史, 杨代铭, 梁惠施, 陈焯. 不同冷却工质对电池热失控抑制的效果 [J]. 储能科学与技术, 2025.
- [8] 张晓军 张, 盛雷, 等. 大规模锂电储能模组浸没式热失控管理 [J]. 内燃机工程, 2025.
- [9] YE Y L, MAO Y K, ZHAO L Y, et al. Experimental investigation of thermal runaway behavior and propagation inhibition of lithium-ion battery by immersion cooling [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 256.
- [10] LIU X Y, ZHOU Z F, WU W T, et al. Modelling for the mitigation of lithium ion battery thermal runaway propagation by using phase change material or liquid immersion cooling [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 52.
- [11] LUO P, GAO K, HU L, et al. Adaptive hybrid cooling strategy to mitigate battery thermal runaway considering natural convection in phase change material [J]. Applied Energy, 2024, 361.
- [12] ZAVALIS T G, BEHM M, LINDBERGH G. Investigation of Short-Circuit Scenarios in a Lithium-Ion Battery Cell [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2012, 159(6): A848-A859.
- [13] JIN C, SUN Y, YAO J, et al. No thermal runaway propagation optimization design of battery arrangement for cell-to-chassis technology [J]. Etransportation, 2022, 14.
- [14] FENG X, LU L, OUYANG M, et al. A 3D thermal runaway propagation model for a large format lithium ion battery module [J]. Energy, 2016, 115: 194-208.
- [15] PATIL M S, SEO J-H, LEE M-Y. A novel dielectric fluid immersion cooling technology for Li-ion battery thermal management [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 229.
- [16] BAI P X, XU R C, LIU M Y, et al. Thermal Runaway Characteristics of LFP Batteries by Immersion Cooling [J]. Acs Applied Energy Materials, 2023, 6(13): 7205-11.
- [17] DAI H, YANG C, ZHANG F, et al. Transient heat dissipation performance investigation on the battery thermal management system based on S-CO<sub>2</sub> immersion cooling [J]. Energy, 2025, 318.
- [18] GAO Q, LU Y, LIU X, et al. A novel pulse liquid immersion cooling strategy for Lithium-ion battery pack [J]. Energy, 2024, 310.