第 52 卷 第 6 期：2865-2875 高电压技术 Vol.52, No.6: 2865-2875
2026 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250996

基于液冷与相变材料的电池储能系统复合热管理

周飞帆[1]，孟锦豪[1,2]，邹子涵[1]，杨智鹏[1]，宋政湘[1,2]，耿英三[1]
（1. 电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学)，西安 710049;
2. 西安交通大学国家储能技术产教融合创新平台(中心)，西安 710049）

摘　要：高效管理大容量磷酸铁锂电池在合理温度区间并保持电池间的温度一致性，是实现电化学储能系统安全稳定运行的重要前提。为提升大容量电池储能系统的热管理能力，提出了一种基于液冷结合相变材料的复合热管理系统。首先，以 280 Ah 磷酸铁锂电池为研究对象，考虑电池尺寸、汇流排产热等建立三维电池电热耦合模型，将模型扩展至 52 块电池单体串联模组并获取其温度分布特性；之后，在模组底部添加液冷板，通过改变冷却液流速，对比不同模组内电池的平均温度、最大温差及流道出入口压差等情况，综合能耗和效果选取合适的流速；最后，在液冷基础上，添加相变材料填充模组内电池间隙，实现液冷结合相变材料的复合热管理。结果表明，采用复合热管理放电期间最大温差在 1.5 ℃以内、最高平均温度为 51.93 ℃，相比单一液冷热管理最大温差和最高平均温度分别进一步降低了 1.1 ℃、3.01 ℃，证明了复合热管理系统的有效性。

关键词：磷酸铁锂电池；电池储能系统；电热耦合模型；热管理；液冷；相变材料

Composite Thermal Management of Battery Energy Storage System Based on Liquid Cooling and Phase Change Materials

ZHOU Feifan[1], MENG Jinhao[1,2], ZOU Zihan[1], YANG Zhipeng[1], SONG Zhengxiang[1,2], GENG Yingsan[1]
(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment(Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China;
2. National Innovation Platform (Center) for Industry-Education Integration of Energy Storage Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract：Efficient management of large-capacity lithium iron phosphate batteries within a reasonable temperature range and maintenance of temperature consistency among batteries are a crucial prerequisite for the safe and stable operation of electrochemical energy storage systems. To enhance the thermal management capability of large-capacity battery energy storage systems, a composite thermal management system based on liquid cooling combined with phase change materials is proposed. Firstly, taking a 280 Ah lithium iron phosphate battery as the research object, we established a three-dimensional battery electro-thermal coupling model by considering battery size, heat generation from busbar, etc. The model is then extended to a module system with 52 battery cells connected in series to obtain its temperature distribution characteristics. Subsequently, a liquid cooling plate is added at the bottom of the module, and by changing the flow rate of the cooling liquid, the average temperature, maximum temperature difference, and pressure difference at the inlet and outlet of the flow channel of different batteries within the module are compared. The appropriate flow rate is selected based on a comprehensive consideration of energy consumption and effect. Finally, on the basis of liquid cooling, phase change materials are added to fill the gaps between batteries within the module to achieve a composite thermal management method by combining liquid cooling and phase change materials. The results show that, during discharge, the maximum temperature difference is within 1.5 ℃ and the highest average temperature is 51.93 ℃ when using the composite thermal management method. Compared with the single liquid cooling thermal management, the maximum temperature difference and the highest average temperature are further reduced by 1.1 ℃ and 3.01 ℃, respectively, proving the effectiveness of the composite thermal management system.

Key words：lithium iron phosphate batteries; battery energy storage systems; electro-thermal coupling model; thermal management; liquid cooling; phase change materials

基金资助项目：国家重点研发计划(2023YFB2408200)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2023YFB2408200).

0 引言

锂离子电池具有高能量密度、长循环寿命、宽工作温度范围及低自放电率等优点，截至 2024 年底，锂离子电池储能方式的装机规模已占新型储能的 97.5%，已成为实现能源领域“双碳”战略目标的核心技术和重要支撑[1-3]。锂离子电池通常被允许工作在−20~60 ℃温度区间，在此范围外的低温或高温会使得电池产生如析锂、热失控等风险，导致不可逆损伤及性能下降[4]。储能系统中电池模组由多个单体串联成组，组间电池的温度差异过大会加剧内部参量的不一致性，影响系统的寿命及安全性。因此，电池模组内各单体温差不宜超过 5 ℃[5]。温度对电池性能具有显著影响，可通过热管理系统将电池组温度控制在合理范围内[6]。

研究电池热管理的方法很多，其中通过模型仿真的方法已成为主流[6]。仿真通过使用物理模型反映电池如电化学、电和热的行为机制来评估电池受控条件下的性能[7]。从建模维度角度，相比小容量方形或圆柱形电池，三维模型更适用于研究大容量锂离子电池。廖连生[8]认为大容量电池的三维特征，如：外形参数、尺寸和边界条件，会对电池性能产生很大的影响，三维模型可用于研究电池整体温度分布。孙祺明[9]认为电池系统中电池之间存在互连电阻会影响电池性能，三维模型可以考虑该约束条件。Inui 等[10]分别针对小型圆柱形电池、大尺寸方形电池进行了二维及三维的数值模拟，结果表明三维模型描述大尺寸电池电热特性更为准确。

根据传热介质不同，电池热管理可分为：空气式(风冷)、液体式(液冷)及相变材料(phase change materials，PCM)方式[6,11]。根据热管理系统是否有外部能源消耗，热管理可分为：主动式和被动式[12]。

风冷方式通过空气强制对流带走电池系统热量，具有设计简单、电气安全性高等优势，在较低功率场景应用广泛[13]。由于空气的比热容和热导率远低于许多其他介质，风冷方式具有很多局限性。Chen 等[14]发现将电池系统冷却至相同平均温度条件下，风冷方式相比其他主动式热管理需要多消耗 2 至 3 倍能量。

液冷热管理根据冷却液与电池的接触情况可分为：直接冷却式(浸没式)和间接冷却式[15]。直接冷却式将电池浸没于介电流体内，具有能效高、温度均匀性好等优点[16]，但液体泄漏、系统短路风险以及冷却液温度控制难等问题限制了浸没式液冷的广泛应用[14]。间接冷却式原理是将冷却液通过泵送至液冷板流道内，电池产生热量经冷却液循环流动传递至外部换热器散热[17]。Guo 等通过仿真研究了 32 串 50 Ah 电池模组的间接液冷，电池模组置于内部蛇形流道的液冷板上，研究发现流速大小是模组最高温度及温差的主要因素，流道高度对压降具有影响[18]。Zhu 等将另增散热结构的液冷板布置于 11×10 排列的圆柱形电池模组侧面及底面，可将最高温度和温差控制在 46.59 ℃和 4.47 ℃内[19]。Chung 等设计了商用软包电池模组间接液冷热管理系统，将电池模组底部与液冷板接触，电池间布置金属翅片，仿真结果表明液冷板与电池模组底部存在的热阻导致冷却效果不佳[20]。唐怀宇等对比了单串行流道与多并行流道，仿真结果表明同等条件下，单串行流道冷却效率最高，随着流道数增加电池模组的温度和温差都会增加，出入口压差则减少[21]。刘邦金等指出，液冷热管理存在设计复杂、运行成本高等问题[22]。可以预期，关注开发主被动相结合的复合热管理，能获得更好的冷却效果与温度均匀性。

PCM 热管理通过 PCM 相变过程实现热量的释放与存储，过程无需系统外部的额外能源，属于被动式热管理[23]。其具有结构简单、成本低、温度分布均匀以及可适应不同形状电池的灵活性等优点[24]。Li 等开发了基于复合 PCM 的 21700 型圆柱电池模组的热管理系统，通过从单一石蜡材料中添加膨胀石墨，4C 倍率下将最高温度从 50 ℃降低至 45.1 ℃，最大温差控制在 0.6 ℃内[25]。Verma 等对比了不同放电倍率下采用脂肪酸 PCM 热管理的动力电池温升情况，表明低倍率放电时电池升温不明显，高倍率放电下电池温度升高较快，但使用 PCM 对峰值温度仍然有一定控制作用[26]。PCM 热管理存在一些缺陷，如材料在完全相变后，会暂时失去储热能力以及由于自身较低的热导率难以适应更高充放电倍率场景[15]。

综上，目前电化学储能系统热管理设计的问题主要存在于：(1)单一液冷方式存在瓶颈；风冷方式因空气介质热导率、热容低，仅适用于较低功率场景；液冷因电池低热导率、单侧部署等原因造成均温效果一般，成本高；PCM 受限于完全相变后丧失储热能力，应用场景受限。(2)大容量储能电池发热量大、温度分布明显，温度特性不同于小容量动力电池；然而目前热管理研究多用于单体方形电池和

小容量圆柱电池模组。为解决上述问题，本研究提出了一种适用于大容量储能电池系统的复合热管理方案，旨在结合液冷方式冷却能力强与 PCM 均温效果好、成本低的优势，提升储能电池模组的热管理能力。

具体来说，以 280 Ah 锂离子电池为研究对象，建立了三维电池电热耦合模型，通过搭建电池电热特性测试平台，对比实验与仿真计算结果验证了模型的准确性。同时将单体电池模型扩展至 52 个电池串联的电池模组，在不含热管理的自然对流条件下，获取了电池模组的表面温度分布情况，表明了针对模组进行热管理设计的必要性。在单一液冷热管理模式方面，通过改变冷却液入口流速，获得了不同条件模组电池间温差、平均温度和流道出入口的最大压差，综合成本和温控效果确定了更合理的流速；最后，在液冷热管理基础上，将封装后的 PCM 引入模组电池间隙以替代原有空气介质。借助 PCM 的相变储热特性，复合热管理系统能够在不额外增加能耗的情况下进一步抑制电池模组温升并改善温度一致性，使模组更稳定地维持在适宜工作温度范围内，从而验证了所提复合热管理的有效性。

1 模型建立与实验平台搭建

1.1 电池电热耦合模型

为模拟 280 Ah 电池在不同工况下产热及传热特性，本文建立了电池的电热耦合模型。图 1 所示电气模型可被视为一种简化单颗粒模型，用于模拟电极中单个颗粒的锂离子嵌入/脱出过程。电池主要由电极中的锂离子扩散过程控制，这种简化是可行的。采用集总建模方法的优势在于无需了解电池电极的内部结构或设计以及材料的选择。

模型中与电池端电压直接关联的 4 个关键参数：欧姆过电位 η_{IR}、活化过电位 η_{act}、浓度过电位 η_{conc} 和开路电压 E_{OCV}。η_{IR} 表示由于电解质-电极系统中欧姆内阻引起的累积电压损失。η_{act} 指发生在正负电极表面电荷转移反应引起的电压损失，而 η_{conc} 反映了与浓度过电位相关的累积电压损失[27]。

电池电压可由下式描述：

$$E_{lib}=E_{OCV}\left(S_{ave}^{SOC}\right)+\eta_{IR}+\eta_{act}+\eta_{conc} \tag{1}$$

其中，与电解液和电极欧姆过程相关的集总电压损失(欧姆过电位)为：

$$\eta_{IR}=\eta_{IR,1C}\frac{I_{cell}}{I_{1C}} \tag{2}$$

式中：E_{lib} 为电池端电压；E_{OCV} 为电池颗粒的开路电压(open-circuit voltage，OCV)；S^{SOC} 表示半径为 1(无量纲)颗粒中荷电状态(state of charge，SOC)的分布；S_{ave}^{SOC} 表示颗粒平均荷电状态，$\eta_{IR,1C}$ 表示在 1C 电流速率下的欧姆损失；I_{cell} 和 I_{1C} 分别是流经电池的实际电流和标准 1C 电流。

与正负极表面电荷转移反应相关的集总电压损失(活化过电位)定义为：

$$\eta_{act}=\frac{2RT}{F}\operatorname{arcsinh}\left(\frac{I_{cell}}{2I_{1C}J_0}\right) \tag{3}$$

式中：R 是通用气体常数 8.314 J/(mol·K)；T 是电池热力学温度；F 是法拉第常数 96 485.332 89 C/mol；J_0 是无量纲电荷交换电流密度。

浓度过电位 η_{conc} 由下式表示：

$$\begin{cases}\tau\dfrac{\partial S^{SOC}}{\partial t}=-\nabla\cdot\left(-\nabla S^{SOC}\right)\\ \eta_{conc}=E_{OCV}\left(S_{surf}^{SOC}\right)-E_{OCV}\left(S_{ave}^{SOC}\right)\end{cases} \tag{4}$$

式中：S_{surf}^{SOC} 表示颗粒表面荷电状态；τ 表示扩散时间常数，表征电池内部扩散过程引起的电荷重新分布速率。

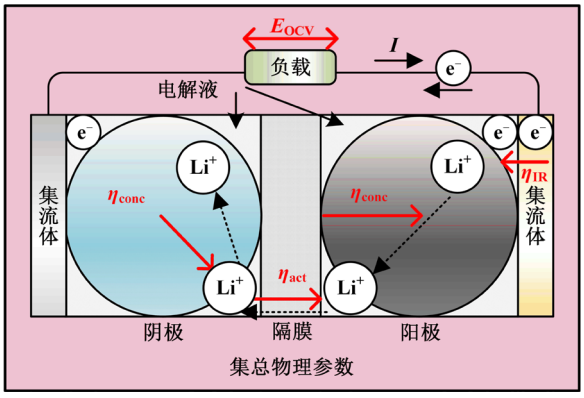


图 1 电池集总参数物理模型

Fig.1 Physical model of battery lumped parameter

电池热模型包含了一组偏微分方程用以描述电池产热及传热。其中，电池产热包括正负极柱和汇流排焊接处产生的欧姆热 Q_{ohm} 以及电池内部的电化学热 Q_{ech}。

$$\begin{cases}Q=Q_{ohm}+Q_{ech}\\ Q_{ech}=\left(\eta_{IR}+\eta_{act}+T\dfrac{\partial E_{OCV}\left(S_{surf}^{SOC}\right)}{\partial T}\right)\cdot I_{cell}\\ Q_{ohm}=-\boldsymbol{i}_s\cdot\nabla\phi_s\\ \rho_p C_p\dfrac{\partial T}{\partial t}=k_x\dfrac{\partial^2 T}{\partial x^2}+k_y\dfrac{\partial^2 T}{\partial x^2}+k_z\dfrac{\partial^2 T}{\partial x^2}+Q\end{cases} \tag{5}$$

式中：ρ_p、C_p和Q分别为电池的密度、比热容和产热；$\boldsymbol{i}_s$、ϕ_s分别为汇流排导体的电流密度和电势；k_x、k_y、k_z分别为x、y、z方向上的传热系数。

1.2 液冷传热计算

电池模组底部与液冷板直接接触，液冷板内设有蛇形流道，流道内有50%质量分数的乙二醇溶液作为冷却液，通过冷却液的循环流动带走电池模组工作时产生的热量。

根据流体力学基本原理，流体的运动形态可通过无量纲雷诺数划分为层流和湍流两种典型状态。

雷诺数计算式为：

$$R_e = \frac{\rho_l v L}{\mu} \tag{6}$$

式中：ρ_l为流体密度；v为流场特征速度；L为流场特征长度；μ为流体黏度。

工程上来说，在低雷诺数工况下(Re<2 300)，流体黏滞力大于惯性力而主导流动过程，此时流体呈现规则分层运动，表现为层流特征。而当雷诺数超出临界值(Re>4 000)时，流体惯性力显著增强，流体流动不再稳定，流体质点运动轨迹除管道轴向运动外还会发生三维随机脉动，表现为湍流特征[28]。

在20~60 ℃温度条件下，50%乙二醇水溶液物理特性如下：黏度波动范围为3.94~1.17 mPa·s，密度波动范围为1 073.35~1 052.04 kg/m^3。代入式(6)计算后雷诺数均大于4 000，乙二醇水溶液在流道内处于湍流状态。模型中液冷流道存在大曲率的壁面，因此选择k-ω湍流模型，其控制方程如下。连续方程为：

$$\nabla\cdot\left(\rho_l\boldsymbol{u}\right)=0 \tag{7}$$

雷诺平均N-S方程为：

$$\rho_l\left(\boldsymbol{u}\cdot\nabla\right)\boldsymbol{u}=\nabla\cdot\left(-\rho_l\boldsymbol{K}+\boldsymbol{R}\right)+\boldsymbol{F} \tag{8}$$

其中：

$$\begin{aligned}\boldsymbol{R}=&\left(\mu+\mu_T\right)\left(\nabla\boldsymbol{u}+\left(\nabla\boldsymbol{u}\right)^T\right)-\\&\frac{2}{3}\left(\mu+\mu_T\right)\left(\nabla\cdot\boldsymbol{u}\right)\boldsymbol{K}-\frac{2}{3}\rho_l k\boldsymbol{K}\end{aligned} \tag{9}$$

k-ω模型输送方程包括湍动能与耗散率方程，其形式如下：

$$\begin{cases}\rho_l\dfrac{\partial k}{\partial t}+\rho_l\boldsymbol{u}\cdot\nabla k=\nabla\cdot\left(\left(\mu+\dfrac{\mu_T}{\sigma_k}\right)\nabla k\right)+\\\quad P_k-\beta_0^*\rho_l\omega k\\\rho_l\dfrac{\partial\omega}{\partial t}+\rho_l\boldsymbol{u}\cdot\nabla\omega=\nabla\cdot\left(\left(\mu+\dfrac{\mu_T}{\sigma_\omega}\right)\nabla\omega\right)+\\\quad\alpha\dfrac{\omega}{k}P_k-\rho_l\beta_0\omega^2\end{cases} \tag{10}$$

式中：

$$\mu_T=\rho_l\frac{k}{\omega} \tag{11}$$

式中：$\boldsymbol{u}$为流体流速矢量；μ_T为涡黏滞系数；$\boldsymbol{K}$为单位二阶张量；$\boldsymbol{R}$为应力二阶张量；$\boldsymbol{F}$为外力矢量；k为湍动能；P_k为湍动能生成项；β_0^*，β_0分别为湍动能方程和耗散率方程对应系数；ω为湍动能比耗散率；α为生成项系数；σ_k为湍动能对应的普朗特系数；σ_ω为耗散率对应的普朗特系数。

液冷板内冷却液的热传导方式遵循能量守恒方程，表达式如下：

$$\rho_l C_l\frac{\partial T_l}{\partial t}+\rho_l C_l\boldsymbol{u}\cdot\nabla T_l=\nabla\cdot\left(k_l\nabla T_l\right) \tag{12}$$

液冷板在传热过程的能量方程为：

$$\rho_b C_b\frac{\partial T_b}{\partial t}=\nabla\cdot\left(k_b\nabla T_b\right) \tag{13}$$

式中：C_l为流体恒压比热容；k_l为冷却液传热系数；T_l为液冷液温度；ρ_b为液冷板材料密度；C_b为液冷板恒压比热容；k_b为液冷板导热系数；T_b为液冷板温度。

1.3 PCM传热计算

研究使用PCM为以石蜡为主要成分的固体-固体复合材料，石蜡材料的熔点温度在45~65 ℃范围，与锂电池工作温度具有重合区间，选用石蜡材料作为储热介质可以充分利用其潜热吸收效率。考虑到形状稳定的PCM可以假设为不存在液体流动，传热形式只有热传导，能量方程[29]为：

$$\rho_p\frac{\partial H_p}{\partial t}=\nabla\cdot\left(k_p\nabla T_p\right) \tag{14}$$

$$H_p=\beta L_p+h_p \tag{15}$$

$$h_p=\int_{T_0}^{T_p}C_p\mathrm{d}T \tag{16}$$

$$\beta=\begin{cases}0, & T_p<T_s\\\dfrac{T_p-T_s}{T_l-T_s}, & T_s<T_p<T_l\\1, & T_p>T_l\end{cases} \tag{17}$$

式中：k_p、ρ_p、H_p、L_p、C_p、T_p、h_p、β分别是PCM的导热系数、密度、比焓、单位质量相变潜热、比热容、实时温度、显热比焓和液相率(相变分数)；T_0是环境温度；T_s是固相开始转变温度；T_l是完全转变液相温度。

1.4 几何模型及网格剖分

所研究的电池模组由4列，每列13个单体，共52个280 Ah磷酸铁锂电池串联组成，每块电池

通过汇流排进行连接。所研究的复合热管理系统采用主动式液冷结合被动式 PCM 热管理。液冷板布置于电池模组底部，其中液冷流道采用串行蛇形流道设计，蛇形流道结构可以增大冷却液与液冷板的接触面积，提高传热效率；PCM 设置在电池间隙之内取代原有空气介质，PCM 可以不改变电池模组的布局，进一步增加电池模组的散热能力。当 PCM 完全相变时会丧失储热能力，由于其与底部液冷板相接触可以在电池充放电结束的静置阶段通过液冷板散热恢复固体形态。如图 2 所示。

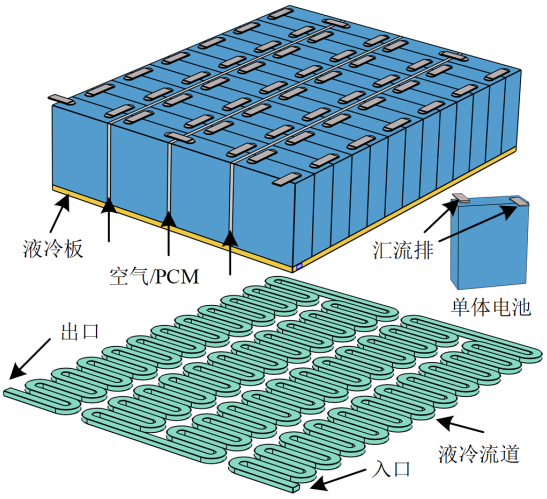


图 2 电池模组几何模型

Fig.2 Geometric model of an energy storage battery module

仿真中电池模组各部分几何参数如表 1 所示。

表 1 电池模组几何参数

Table 1 Geometric parameters of battery modules

参数	仿真设定值
电池单体尺寸/mm	174/206/72
电池间隙/mm	1
电池组间隙/mm	10
液冷板尺寸/mm	726/14/948
液冷流道入口尺寸/mm	20/10

模型仿真的边界条件设置如下：电池接口内，除首末汇流排侧表面分别设置为电流流入和接地，其余汇流排和极柱表面设置为绝缘；在固体与流体传热接口内，与空气接触表面为自然对流，对流传热系数为 9 W/(m^2·K)(电池单体仿真中电池底面为热绝缘)；在流体接口内，液冷流道入口设置为速度，出口设置为静压力。模型初始条件设置如下：电池模组温度、液冷板及流道、环境温度、PCM 为 25 ℃；液冷流道入口恒定为 18 ℃。电池模组各单体电池 SOC 为 0，电压为 2.84 V。

为了保证结果准确性及减少计算时间，本文电池模组及热管理系统模型网格剖分如图 3 所示。

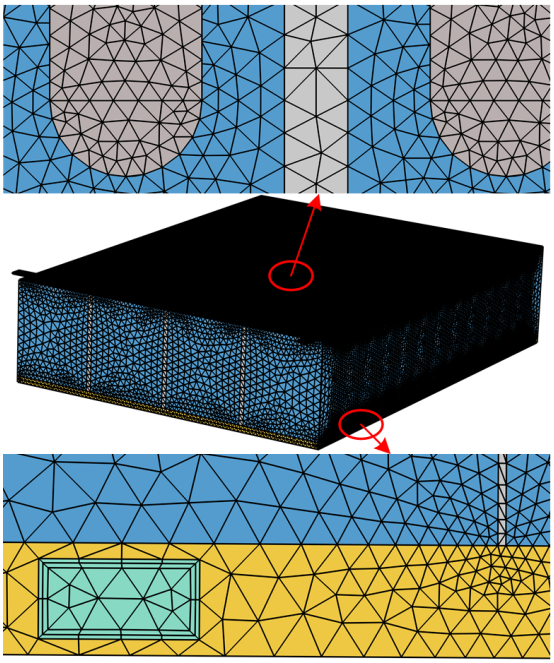


图 3 电池模组网格剖分

Fig.3 Meshing for energy storage battery module modeling

在电池极耳与汇流排连接处、电池与液冷板交界区域将网格进行局部加密，以适应几何交界处热源及导热变化复杂的情况。在液冷流道近壁面处设置了 2 层边界层用于模拟湍流在近壁面处的不同流动情况。近壁面处的湍流流动离壁面由近到远可被分为 4 个区域，分别是黏性底层、缓冲层、对数率层、自由流动层。考虑到本文需要计算流体传热，而液冷板与流体近壁面存在热量交换，需要将第 1 层网格尽可能设置在缓冲层以内，因此采用低雷诺数的近壁面处理方法。电池本体、液冷板、空气/PCM 则采用自由四面体网格结构，网格单元总数为 4 470 405。

1.5 测试平台及试验

为了获取 280 Ah 方形磷酸铁锂电池的电热特性搭建了电池测试平台，如图 4 所示，包括：电池测试仪(NEWARE，CE-6008n-40V100A-H)、高低温防爆试验箱(高格，定制)、电压温度辅助通道(NEWARE，CA-4008n-1U-T-TC)、加速量热仪(accelerating rate calorimeter，ARC)(仰仪，BAC-420A)及上位机电脑。平台可实现在恒温环境下进行电池充放电测试，并获取测试过程中电池的容量、电压、

电流、平衡电位、温度等电热参数以及比热容、热导率等热物性参数。

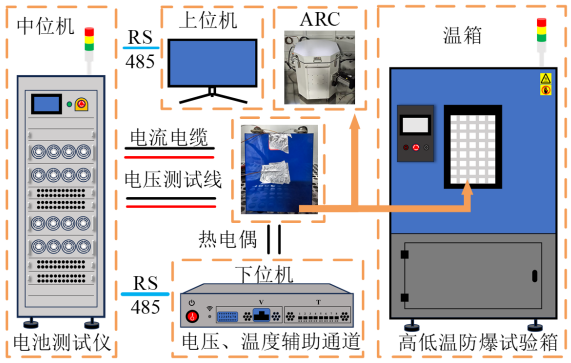


图 4 电池电热特性测试平台

Fig.4 Electro-thermal test platform for energy storage battery

测试前将电池静置在设定温度 25 ℃温箱中 1 h，电池保持在热平衡状态后，施加充电 280 A/放电 280 A 的恒电流载荷，每个载荷截止后静置 30 分钟，截止电压为 3.65 V/2.5 V。

测试电池相关物性参数如表 2 所示，所有实测值将应用于后续仿真模型。

表 2 280 Ah 电池参数

Table 2 280 Ah battery parameters

参数	标称值	实测值
容量/Ah	280	296.3
比热容/(J·(kg·K)$^{-1}$)	—	965
密度/(kg·m^{-3})	—	2 091
热导率/(W·(m·K)$^{-1}$)	—	10.63/7.74/2.55

2 结果与讨论

2.1 模型验证

首先，需要验证 280 Ah 单体电池电热耦合模型的准确性。如图 5 所示，分别展示了电池经完整 1C(280 A)充放电循环后的仿真和实验电压随时间变化曲线。充电过程中，电池实验电压曲线在第 3 811 s 时刻到达充电截至电压 3.650 1 V，此时对应电池仿真电压为 3.638 6 V；随后充电结束，在 1 800 s 的静置过程中，电池实验电压先短时间快速下降，再逐渐缓慢回落。第 5 611 s 静置结束时，实验电压为 3.349 2 V，此时对应仿真电压为 3.390 7 V；放电过程中，电池实验电压先迅速突变下降至 3.277 9 V，对应仿真电压为 3.286 3 V，实验电压经放电平台期缓慢下降后在第 9 423 s 时刻到达放电截止电压 2.499 8 V，此时对应仿真电压为 2.496 6 V。随后放电结束，在 1 800 s 静置过程中，电池实验电压先短时间突变上升，再逐渐缓慢回升；在第 11 223 s 静置结束时刻实验电压为 2.787 3 V，对应仿真电压为 2.813 9 V。仿真电压曲线与实验电压曲线较为符合，模型能较好反映电池电压随时间的变化规律。

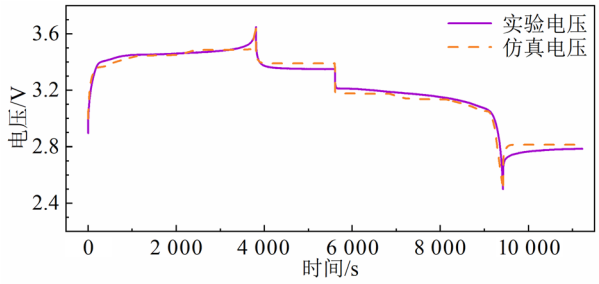
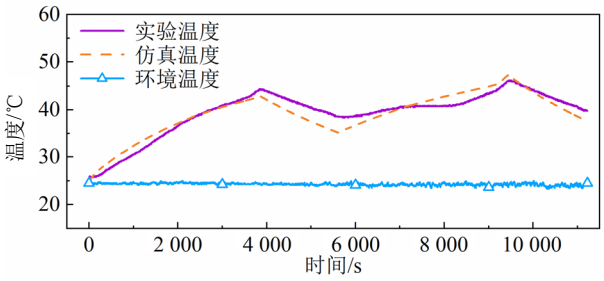


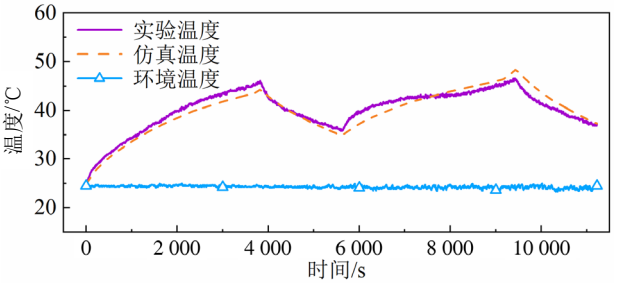
图 5 1C 倍率自然对流下电池端电压

Fig.5 Battery terminal voltage under natural convection at 1C discharge rate

图 6(a)及图 6(b)分别展示了电池 1C 充放电循环后电池在正表面中心、泄压阀区域仿真和实验表面温度随时间变化曲线以及温箱内的环境温度。



(a) 电池正表面中心温度



(b) 电池泄压阀温度

图 6 1C 自然对流下电池的表面温度

Fig.6 Battery surface temperature under natural convection at 1C discharge rate

图 6(a)中，电池在 3 831 s 时刻达到第 1 次最高温度 44.4 ℃，对应仿真温度为 43.012 ℃；在 9 440 s，达到第 2 次最高温度 46.2 ℃，对应仿真温度为 47.197 ℃。图 6(b)中，电池在 3 818 s 达到第 1 次最高温度 46.1 ℃，对应仿真温度为 44.196 ℃；在 9 425 s 时刻达到第 2 次最高温度 46.6 ℃，对应仿

真温度为 48.334 ℃。无论是在正表面中心还是泄压阀区域，电池表面温度均随着充电和放电过程不断增加，并在充放电末期小幅快速增加，但最高温度都会略微滞后于充放电最终时刻，这是由于此时电池内部温度仍然高于表面温度，电池内部的传热速率要高于电池表面的对流传热。电池在静置阶段由于直接热源消失，电池表面温度会随着空气对流冷却过程而逐渐降低。实验环境温度保持在 24.5 ℃的基线上小幅波动。仿真温度曲线与实验温度曲线较为符合，模型能较好反映电池表面温度随时间的变化规律。

上述图中曲线体现了仿真和实验之间的趋同趋势，为了进一步分析仿真模型的精度还引入了均方根误差(root mean squared error，RMSE) e_{RMSE}、平均绝对误差(mean absolute error，MAE) e_{MAE}、平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error，MAPE) e_{MAPE} 3 个误差评估指标。

$$e_{\mathrm{RMSE}}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}\left(y_t-\hat{y}_t\right)^2} \tag{18}$$

$$e_{\mathrm{MAE}}=\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}\left|y_t-\hat{y}_t\right| \tag{19}$$

$$e_{\mathrm{MAPE}}=\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}\left|\frac{y_t-\hat{y}_t}{y_t}\right|\times 100\% \tag{20}$$

式中：y_t 为实验值；$\hat{y}_t$ 为仿真值；n 为样本数量。

表 3 给出了电池电压、电池正表面中心温度、泄压阀温度的 3 种误差评估指标的值。MAPE 描述的是相对误差的平均值，上述 3 种参量的 MAPE 均在 5 %以内；MAE 描述的是仿真计算值与实验值之间的绝对误差平均值，MAE 仿真电压在 0.05 V 以内、温度在 2 ℃以内；RMSE 对较大误差或者说离群值表现出更大的敏感性，上述 3 种参量的 RMSE 与 MAE 较为接近，说明误差相对均匀。

表 3 误差评估指标

Table 3 Error evaluation index

误差	电池电压/V	正表面中心温度/℃	泄压阀温度/℃
RMSE	0.033 54	1.632 69	1.360 35
MAE	0.027 68	1.375 06	1.192 67
MAPE	0.890%	3.556%	2.948%

综合仿真与实验曲线的较为直观的趋同趋势和 3 种误差评估指标的定量分析，所建立的 280 Ah 单体电池电热耦合模型能够准确反映电池的电热特性，并可用于后续电池模组的仿真计算。

2.2 自然对流下的工况

基于上述单体仿真模型，将模型扩展至共 52 块电池串联的 PACK 模组，仿真停止条件设置为模组内部的电池电压最小值小于等于 3.65 V，研究模组在不采取热管理完整放电过程的升温特性。

图 7 展示的是模组在自然对流条件下，1C 放电结束时刻的表面温度分布云图。整个模组中，越靠近中间内部的电池温度越高，且明显高于 2.1 节中单体电池温度，这是由于靠近内部的电池空气接触面更少，热量难以及时散出而引起热量积聚造成的。

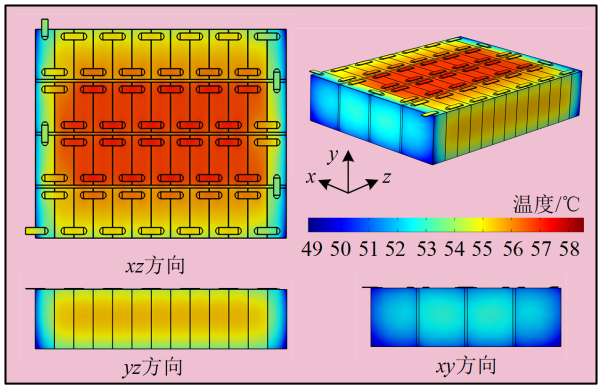


图 7 1C 放电结束时刻模组表面温度分布云图

Fig.7 Contour map of battery module surface temperature distribution at 1C discharge termination

图 8 展示的是 1C 和 1.5C(420 A)恒流放电下，模组内电池的电压、温差及最小电压。随着模组放电的逐渐深入，模组内电池温度逐渐增加，电池间最大温差也逐渐增大。在 1C 放电条件下，放电结束时刻最小温度、平均温度、最高温度以及最大温差分别为 48.83 ℃、56.63 ℃、58.59 ℃，9.76 ℃，1.5C 放电条件下分别对应为 62.68 ℃、73.36 ℃、75.66 ℃、12.98 ℃。在 1C 倍率下，虽然模组内电池最高温度未达到热失控临界温度，但较大的温差会导致模组电池出现长期运行在不一致性状况下，电池寿命将会受到影响。在更高倍率下，模组电池的温度以及最大温差都会大幅增加，特别是经过持续的充放电，模组的热量将不断累积，严重时甚至会面临发生热失控的风险。针对模组运行时的温度不一致性和高温状态，需要采取合理的热管理。

2.3 液冷下的工况

本节研究采用液冷板与电池模组底部直接接触的单一液冷热管理，冷却液为 50%乙二醇水溶液，液冷流速设置为 0.1 m/s、1 m/s 和 2 m/s。

1.5C 高倍率放电情况如图 9 所示。

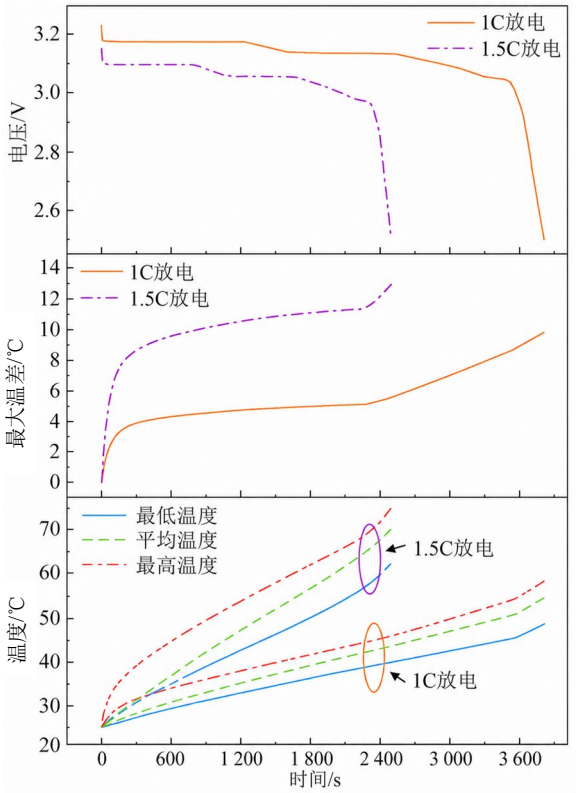


图 8 不同放电载荷下模组内电池本体温度及最小电压

Fig.8 Temperature and minimum voltage of the batteries inside the module under different discharge loads

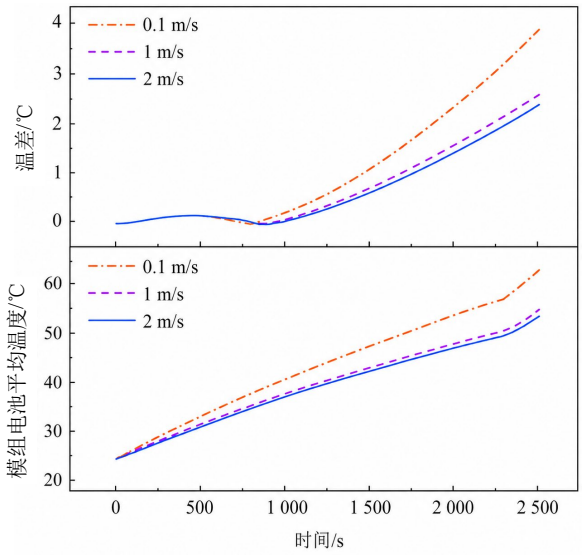


图 9 不同入口流速下模组电池温度及温差

Fig.9 Temperature and temperature difference of module battery under different inlet flow rates

在放电最后时刻 0.1 m/s、1 m/s、2 m/s 的模组电池平均温度分别为 63.15 ℃、54.94 ℃、54.13 ℃，泄压阀温度的最大温差分别为 3.97 ℃、2.64 ℃、2.45 ℃。放电最后时刻平均温度相比自然对流工况分别下降了 10.21 ℃、18.42 ℃、19.23 ℃，最大温差分别下降了 9.01 ℃、10.34 ℃、10.53 ℃。冷却液流经液冷板内蛇形流道带走电池模组热量，流速越快带走的热量也越多，针对电池模组的高温及温差控制效果显著，但可以发现入口流速 2 m/s 相比 1 m/s 温度控制效果提升不明显，说明在不改变冷却液材料或者入口温度的情况下，单纯提高入口流速存在瓶颈。

图 10 展示了不同冷却液流速下 1.5C 恒流放电最后时刻的流道温度分布云图。入口流速 0.1 m/s，由于冷却液不能及时带走热量，流道内温度存在着明显宽范围的温度分布，出入口温差达 27.7 ℃。入口流速 2 m/s 和 1 m/s 的流道温度分布很均匀，出入口温差分别为 3.0 ℃和 2.3 ℃，说明在更高流速下，冷却液的导热效果存在上限，这受限于介质材料的本征特性。

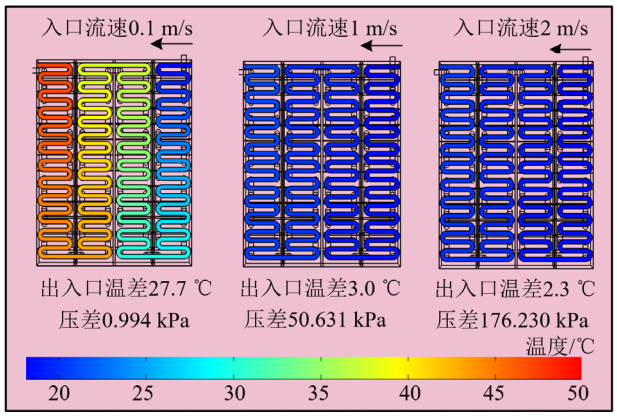


图 10 不同入口流速下流道的温度分布云图

Fig.10 Temperature distribution contour maps in flow channels under varying inlet velocity conditions

入口流速 2 m/s 相较于 1 m/s 的冷却效果略有提升，而 2 m/s 的出入口压强差却是 1 m/s 的 3 倍多，需要更高的水泵压力及功率输送冷却液，这意味着更高的能耗成本，在模组实际运行中可以综合考虑选定合适的冷却液流速。

2.4 复合冷却方式验证

基于上述单一液冷热管理模型，将封装好的石蜡 PCM 填充于模组电池间隙以取代空气介质，采用液冷结合相变材料的复合热管理系统进一步提高电池模组散热能力。

如图 11 所示，1.5C 放电下，添加 PCM 后模组内电池平均温度在放电最后时刻为 51.93 ℃，泄压

阀最大温差为 1.4 ℃，相比纯液冷的热管理，平均温度和最大温差分别下降了 3.01 ℃、1.1 ℃，并且在放电过程中最大温差控制在 1.5 ℃以内。采用 PCM 取代模组电池间空气能进一步提升模组电池运行的温度一致性并限制模组电池温度。

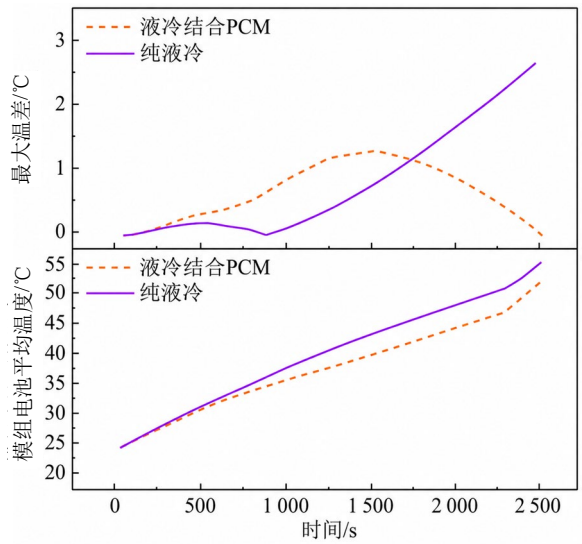


图 11 复合热管理与单一液冷热管理温度控制效果对比

Fig.11 Comparison of temperature control effects between composite thermal management and single liquid thermal management

在整个电池模组的中心区域(PCM 域)的高度轴(y 轴)上共取 3 个域点温度探针，研究 PCM 随着电池放电过程的温度响应曲线，探针以米为单位的坐标分别为(0.363,0.083,0.474)、(0.363,0.103,0.474)、(0.363,0.123,0.474)，如图 12 所示。

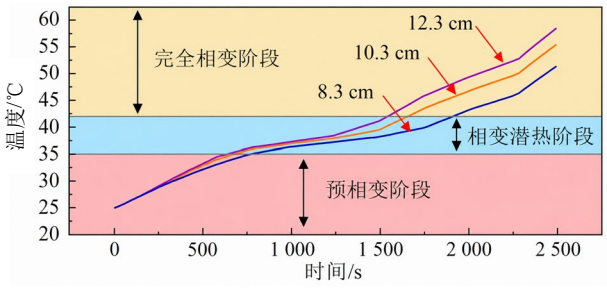


图 12 PCM 随电池模组放电过程的温度变化

Fig.12 The temperature variation of PCM during the discharging process of the battery module

图中 3 条曲线完全相变阶段的温度值与所在位置有关，在失去储热能力后，越远离液冷板区域的温度越高。储热材料石蜡在模组放电过程中会历经 3 个阶段，刚开始处于保持固体形态的预相变阶段，以显热的形式不断吸收热量，温度逐渐上升。在达到相变温度点后，PCM 从固态逐渐向液态转变，此时温度变化会相对缓慢，模组电池的热量有一部分会被 PCM 以潜热的形式逐渐吸收。在所有 PCM 完全转变为液态后，相变阶段结束，PCM 无法再继续吸收模组电池热量，电池的升温速率也就会快速提升。相变潜热阶段对于电池工作过程的升温限制具有显著影响，可以采用具有更宽潜热区间的相变材料以适配储能电池温度工作区间，达到更好的热管理效果。

3 结论

本文研究了一种应用于电池储能系统的复合热管理系统，并得出如下结论：

1）所建立的三维电池电热耦合模型可准确反映电池电热特性并支持扩展，在模组仿真中发现，模组相对内部的电池因热量积聚与散热条件恶化成为发热核心区域，模型为高倍率下的模组温度分布提供了数据支撑，明确了电池模组热管理的必要性。

2）在单一液冷方式下，通过控制冷却液入口流速加快，发现电池模组的最大温差和平均温度都会随之下降，但由于受冷却液材料本征特性制约，导热能力存在上限，流速提高至 1 m/s 后继续加快流动的效果不明显，单纯提高流速对于温度控制存在瓶颈，还会增加水泵压力，导致成本提高。

3）采用 PCM 结合液冷的复合热管理，在放电全程能将温差控制在 1.5 ℃以内，放电末期的最大温差和平均温度相比单一液冷方式能继续降低 1.1 ℃、3.01 ℃。PCM 的相变储热特性使得复合热管理能够在不额外增加能耗且不改变电池模组空间结构的条件下，进一步降低模组平均温度并改善电池间温度一致性；同时由于存在液冷散热，液冷系统能够在电池静置阶段持续带走 PCM 吸收的热量，促进 PCM 储热能力的恢复，从而在一定程度上弥补其自身导热率较低所带来的散热局限。复合热管理相比单一热管理更具有优势。

本文的研究结果验证了液冷结合 PCM 的复合热管理对于电池模组高倍率工况下的温度控制能力，所建立的三维电池模组多物理场耦合模型能够为热管理设计提供理论和数据支撑，通过采取复合热管理能够更好地保障电化学储能系统运行时的安全性、提高经济性。在未来，考虑研究相变潜热区间更宽泛的材料以便更好地覆盖电池工作温度区

间，充分发挥 PCM 的储热能力；同时在结构上可以考虑增加散热翅片，增强远离液冷区域 PCM 的固相恢复速率，以适应更多复杂工况。

参考文献 References

[1] 陈海生，余振华，刘为. 储能产业研究白皮书 2025[R]. 北京：中关村储能产业技术联盟，2025.
CHEN Haisheng, YU Zhenhua, LIU Wei. Energy storage industry research white paper 2025[R]. Beijing, China: China Energy Storage Alliance (CNESA), 2025.

[2] 刘文超，孟锦豪，张涛，等. 基于动态电化学阻抗谱的锂电池荷电状态估计[J]. 高电压技术，2026，52(1)：450-459.
LIU Wenchao, MENG Jinhao, ZHANG Tao, et al. State of charge estimation of lithium battery based on dynamic electrochemical impedance spectroscopy[J]. High Voltage Engineering, 2026, 52(1): 450-459.

[3] 孟国栋，李雨珮，唐佳，等. 锂离子电池储能电站的热失控状态检测与安全防控技术研究进展[J]. 高电压技术，2024，50(7)：3105-3127.
MENG Guodong, LI Yupei, TANG Jia, et al. Research progress of thermal runaway detection and safety control technology for lithium-ion battery energy storage power stations[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 3105-3127.

[4] MA S, JIANG M D, TAO P, et al. Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: a review[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2018, 28(6): 653-666.

[5] DING Y H, ZHENG Y D, LI S Y, et al. A Review of battery thermal management methods for electric vehicles[J]. Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage, 2023, 20(2): 021002.

[6] WU W X, WANG S F, WU W, et al. A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 182: 262-281.

[7] ABADA S, MARLAIR G, LECOCQ A, et al. Safety focused modeling of lithium-ion batteries: a review[J]. Journal of Power Sources, 2016, 306: 178-192.

[8] 廖连生. 磷酸铁锂电池放电过程的电化学—热全耦合模型数值模拟研究[D]. 南昌：华东交通大学，2018.
LIAO Liansheng. Numerical simulation of lithium iron phosphate battery discharge process by electrochemical-thermal full coupling model[D]. Nanchang, China: East China Jiaotong University, 2018.

[9] 孙祺明. 基于电化学-热耦合模型的大容量磷酸铁锂电池热特性分析[D]. 武汉：武汉理工大学，2021.
SUN Qiming. Analysis of thermal characteristics of lithium iron phosphate batteries with large capacity based on electrochemical-thermal coupling model[D]. Wuhan, China: Wuhan University of Technology, 2021.

[10] INUI Y, KOBAYASHI Y, WATANABE Y, et al. Simulation of temperature distribution in cylindrical and prismatic lithium ion secondary batteries[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(7): 2103-2109.

[11] 李君浩，任晓龙，杨炯，等. 锂电池冷板新波形微流道传热特性研究及结构优化[J]. 西安交通大学学报，2024，58(11)：14-26.
LI Junhao, REN Xiaolong, YANG Jiong, et al. Research on heat transfer characteristics and structural optimization of new waveform microchannels for lithium-ion batteries cooling plates[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(11): 14-26.

[12] 刘小杰，张英，刘洋，等. 锂离子电池热管理系统综述[J]. 电池，2022，52(2)：208-212.
LIU Xiaojie, ZHANG Ying, LIU Yang, et al. A review on thermal management system for Li-ion battery[J]. Battery Bimonthly, 2022, 52(2): 208-212.

[13] 贺元骅，苏星辰，赵梁. 动力锂离子电池主动热管理研究进展[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2025，65(9)：1805-1820.
HE Yuanhua, SU Xingchen, ZHAO Liang. Research progress on active thermal management of power battery[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2025, 65(9): 1805-1820.

[14] CHEN D F, JIANG J C, KIM G H, et al. Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 94: 846-854.

[15] WANG Z C, DU C Q. A comprehensive review on thermal management systems for power lithium-ion batteries[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 139: 110685.

[16] 曾少鸿，吴伟雄，刘吉臻，等. 锂离子电池浸没式冷却技术研究综述[J]. 储能科学与技术，2023，12(9)：2888-2903.
ZENG Shaohong, WU Weixiong, LIU Jizhen, et al. A review of research on immersion cooling technology for lithium-ion batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(9): 2888-2903.

[17] 章正哲，张恒运. 基于高效液冷技术的锂离子电池热管理研究进展[J]. 电源技术，2025，49(1)：14-25.
ZHANG Zhengzhe, ZHANG Hengyun. Review on the thermal management of lithium ion batteries based on energy-efficient liquid cooling techniques[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2025, 49(1): 14-25.

[18] GUO R, LI L. Heat dissipation analysis and optimization of lithium-ion batteries with a novel parallel-spiral serpentine channel liquid cooling plate[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 189: 122706.

[19] ZHU Z H, WU X Y, ZHANG H Y, et al. Multi-objective optimization of a liquid cooled battery module with collaborative heat dissipation in both axial and radial directions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 155: 119701.

[20] CHUNG Y, KIM M S. Thermal analysis and pack level design of battery thermal management system with liquid cooling for electric vehicles[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 196: 105-116.

[21] 唐怀宇，邓纪辰，韩亮，等. 混合动力机车电池组液冷板流道结构选型研究[J]. 电力机车与城轨车辆，2024，47(3)：38-44.
TANG Huaiyu, DENG Jichen, HAN Liang, et al. Selection of flow channel structure of liquid cooling plate for hybrid locomotive battery pack[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2024, 47(3): 38-44.

[22] 刘邦金，汪林威，吴月月，等. 锂离子电池热管理研究进展[J]. 化工学报，2024，75(12)：4413-4431.
LIU Bangjin, WANG Linwei, WU Yueyue, et al. Advances in thermal management of lithium-ion batteries[J]. CIESC Journal, 2024, 75(12): 4413-4431.

[23] MOHAMMED A G, ELFEKY K E, WANG Q W. Thermal management evaluation of li-ion battery employing multiple phase change materials integrated thin heat sinks for hybrid electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2021, 516: 230680.

[24] JAGUEMONT J, OMAR N, VAN DEN BOSSCHE P, et al. Phase-change materials (PCM) for automotive applications: a review[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 132: 308-320.

[25] LI C Q, DING Y, ZHOU Z Y, et al. Parameter optimization and sensitivity analysis of a lithium-ion battery thermal management system integrated with composite phase change material[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 228: 120530.

[26] VERMA A, SHASHIDHARA S, RAKSHIT D. A comparative study on battery thermal management using phase change material (PCM)[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2019, 11: 74-83.

[27] EKSTRÖM H, FRIDHOLM B, LINDBERGH G. Comparison of lumped diffusion models for voltage prediction of a lithium-ion battery cell during dynamic loads[J]. Journal of Power Sources, 2018, 402: 296-300.

[28] 刘鹤年. 流体力学[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2021：118-120.
LIU Henian. Fluid mechanics[M]. Beijing, China: China Architecture & Building Press, 2021: 118-120.

[29] WU W X, WU W, WANG S F. Thermal management optimization of a prismatic battery with shape-stabilized phase change material[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 121: 967-977.



周飞帆
1997—，男，博士生
主要从事电力储能系统设计，电池热安全及状态估计方面的研究工作
E-mail: ffzhou@stu.xjtu.edu.cn

ZHOU Feifan
Ph.D. candidate



宋政湘(通信作者)
1970—，男，博士，教授，博导
主要从事电力储能理论与技术，储能配置优化与协调控制方面的研究工作
E-mail: zxsong@mail.xjtu.edu.cn

SONG Zhengxiang
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2025-07-03 在线出版日期 2025-10-11 编辑 陈 蔓