XXXX

基于热电制冷参数优化的混合电池热管理系统性能分析

李明宇[1]，罗 丁[2]
（[1]三峡大学电气与新能源学院，湖北 宜昌 443002；[2]长安大学能源与电气工程学院，陕西 西安 710018）

摘 要：针对锂离子电池在高产热工况下温升过高及温度分布不均的问题，提出一种集成相变材料（phase change material，PCM）、热电制冷器（thermoelectric cooler，TEC）和液体冷却的混合电池热管理系统。并建立了考虑热场、流场和电场耦合效应及相变过程的多物理场数值模型。在单体电池等效产热功率为6 W、瞬态计算时长为3000 s的条件下，对不同热管理构型进行对比，并分析TEC输入电流和热电半导体高度对系统热性能的影响。结果表明，TEC、液体冷却与翅片协同作用的构型具有最佳热管理性能，与仅采用液体冷却的构型相比，电池组最高温度和温差分别降低6.79 K和3.02 K。TEC输入电流是影响系统降温能力的主导因素，随着输入电流增大，TEC制冷功率提高，而性能系数降低；热电半导体高度通过改变TEC内部电热特性以及TEC-翅片-PCM-电池之间的传热路径，调节电池组最高温度和温度均匀性。在所研究的参数范围内，当热电半导体高度为1.6 mm、输入电流为2～3.5 A时，系统在降温性能与温度均匀性之间取得较优平衡。研究结果可为混合电池热管理系统中TEC结构设计及运行参数匹配提供参考。

关键词：电池热管理系统；热电制冷器；相变材料；数值模型；参数优化
doi：10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0660
中图分类号：TM 912　　文献标志码：A　　文章编号：2095-4239（XXXX）XX-1-10

Performance Analysis of a Hybrid Battery Thermal Management System Based on Thermoelectric Cooling Parameter Optimization

LI Mingyu[1], LUO Ding[2]
([1]College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
[2]School of Energy and Electrical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710018, China)

Abstract: To mitigate excessive temperature rise and non-uniform temperature distribution in lithium-ion batteries under high heat-generation conditions, a hybrid battery thermal management system integrating phase change material (PCM), thermoelectric coolers (TECs), and liquid cooling is proposed. A multiphysics numerical model is developed to account for the coupled thermal, flow, and electric fields as well as the phase-change process. Under an equivalent heat-generation rate of 6 W per cell and a transient simulation duration of 3000 s, different thermal management configurations are compared, and the effects of TEC input current and thermoelectric leg height on system thermal performance are investigated.

收稿日期：2026-07-28；修改稿日期：2026-08-09。
基金项目：中国自然科学基金（52306017）
第一作者：李明宇（2001—），男，研究生在读，从事电池热管理研究. E-mail：2277510633@qq.com
引用本文：李明宇, 罗丁. 基于热电制冷参数优化的混合电池热管理系统性能分析[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-10.
Citation：LI Mingyu, LUO Ding. Performance Analysis of a Hybrid Battery Thermal Management System Based on Thermoelectric Cooling Parameter Optimization[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-10.

The results show that the configuration combining TECs, liquid cooling, and fins provides the best thermal management performance among the configurations considered. Compared with liquid cooling alone, this configuration reduces the maximum battery-pack temperature and temperature difference by 6.79 K and 3.02 K, respectively. The TEC input current is the dominant factor governing the cooling capability of the system. Increasing the input current enhances the cooling capacity but decreases the coefficient of performance. The thermoelectric leg height affects the maximum temperature and temperature uniformity by altering the internal electrothermal characteristics of the TEC and the heat-transfer path among the TEC, fins, PCM, and batteries. Within the investigated parameter range, a thermoelectric leg height of 1.6 mm and an input current of 2-3.5 A provide a favorable balance between cooling performance and temperature uniformity. These findings provide guidance for TEC structural design and operating-parameter matching in hybrid battery thermal management systems.

Keywords: battery thermal management system; thermoelectric cooler; phase change material; numerical model; parameter optimization

由于具备零排放、高能量密度和长循环寿命等优势，锂离子电池驱动的电动汽车已成为实现全球碳达峰与碳中和目标的重要技术路径之一[1]。然而，锂离子电池在充放电过程中会产生大量热量，若热量不能及时有效地释放，将导致温度升高，进而影响其充放电性能、循环寿命以及运行安全，极端情况下甚至可能引发热失控和自燃等安全事故[2]。因此，为保障锂离子电池的安全与高效运行，通常需要将其工作温度控制在293.15 K至323.15 K的合理范围内，同时将电池组内部的温差限制在5 K以内[3]。在此背景下，构建高效、可靠的电池热管理系统（Battery Thermal Management System，BTMS）已成为电动汽车领域亟需解决的关键问题。

近年来，针对锂离子电池热管理问题，研究者提出了多种热管理策略，按照是否消耗额外能量，主要分为被动冷却和主动冷却两大类[4]。被动冷却技术主要包括相变材料（Phase Change Materials，PCM）冷却和热管冷却[5]，而主动冷却技术则涵盖空气冷却、液体冷却以及热电制冷（Thermoelectric Cooler，TEC）等方式[6]。在被动冷却技术中，PCM由于具备较高的潜热储存能力及近似等温的相变特性，能够在吸收电池产生热量的同时有效降低能耗并改善温度均匀性，被认为是一种具有广阔应用前景的热管理方案[7]。然而，传统PCM存在导热系数较低、热响应速度较慢等问题，尤其在高放电倍率工况下，其瞬态散热能力受到明显限制。针对上述问题，现有研究主要集中在提高PCM的导热性能或将其与其他冷却方式相结合。为提升PCM的传热性能，研究者提出了多种强化策略。例如，赵等[8]通过引入纳米增强相变材料，通过渗入高导热性的纳米粒子Al_2O_3，有效提高了电池表面与PCM之间的热传递速率，克服了传统石蜡类PCM导热性差的缺陷，从而显著提升了电池组的使用寿命和运行效率。Kumar等[9]的研究表明，与单独使用PCM相比，采用翅片强化的PCM结构能够使电池维持在安全温度范围内的时间延长约11.11%～21%，为系统采取其他安全控制措施提供了更充裕的缓冲时间。Sutheesh等[10]提出了一种结合蜂窝翅片结构和PCM的热管理系统；结果表明：在3C放电条件下，结合翅片和PCM的系统相较于无翅片设计，能够将电池的最高温度维持在313.15 K的极限温度以下。结合蜂窝翅片结构的PCM在5C放电条件下能将电池的最高温度降低2.77%。上述研究为提高PCM热导率提供了切实可行的解决方案，但引入高导热材料常常会降低PCM的潜热，在高充放电倍率和高环境温度等极端条件下，PCM可能迅速达到其温度极限，导致电池组内热量积累，从而增加热失控的风险。而加入翅片仅在PCM相变过程中有效，当大部分PCM变成液体时是有害的。因此，为了保持可靠的热性能，相变材料通常需要与主动冷却技术相结合。

在主动冷却技术中，空气冷却依靠强制对流实现电池散热，具有结构简单、成本低廉等优点，但由于空气比热容较低，其冷却能力有限[11]。液体冷却通过冷却液在冷却板中循环带走热量，能够提供更高的换热效率，但同时会引入额外的系统重量和能耗[12]。在此基础上，引入TEC被认为是进一步提升PCM/液体冷却耦合电池热管理系统热性能的有效途径[13]。热电制冷器基于帕尔贴效应工作，具备响应速度快、无机械运动部件、冷却效率高以及温度控制精度高等优势，近年来在电池热管理系统中展现出良好的应用潜力[14]。刘等[15]提出了一种集成TEC、PCM与液体冷却的混合电池热管理系统，在2C放电倍率下，当TEC输入电流由1 A增加至6 A时，电池的温控持续时间提高了87.42%。罗等[16]的研究进一步表明，TEC不仅能够有效应对高放电倍率条件下产生的大量热量，还可解决电池在极端低温环境下的启动问题。

因此，本工作提出了一种集成PCM、TEC和液体冷却的混合型电池热管理系统，并建立了考虑热场、流体场与电场相互耦合，同时包含相变行为与瞬态响应特性的多物理场数值模型，用于系统评估高热负荷下的热管理性能。此外，鉴于TEC关键结构与运行参数对系统热性能具有显著影响，分析了TEC输入电流和热电半导体高度对电池热管理系统中电池的最高温度及温差的影响，为TEC－PCM耦合型电池热管理系统的优化设计与工程应用提供了有价值的理论参考。

1　电池热管理系统仿真模型

所提出的电池热管理系统由电池组、PCM、铝翅片框架、TEC以及液体冷却板五部分组成，如图1所示。电池组由12节18650型锂离子电池组成，采用3×4排列方式布置于铝翅片框架内部。铝翅片框架由外框架、内隔板及翅片结构组成。外框架整体尺寸为96 mm×72.5 mm×65 mm，外框架与内隔板的厚度均为2 mm。外框架中心空腔通过内隔板划分为12个尺寸相同的方形腔体，每个腔体内布置一节电池。为增强电池与相变材料之间的换热能力，在每个腔体四角均设置翅片结构。其中，位于两端的翅片长度为5 mm，中部翅片长度为5.4 mm，翅片的厚度均为1 mm，以进一步提升整体传热效率。铝翅片框架与电池之间填充相变材料，用于吸收并储存电池运行过程中产生的热量。系统共布置四个TEC，均匀安装在铝翅片框架的两侧。TEC的冷端与翅片框架紧密接触，用于对电池组及相变材料进行冷却，而其热端则与液体冷却板

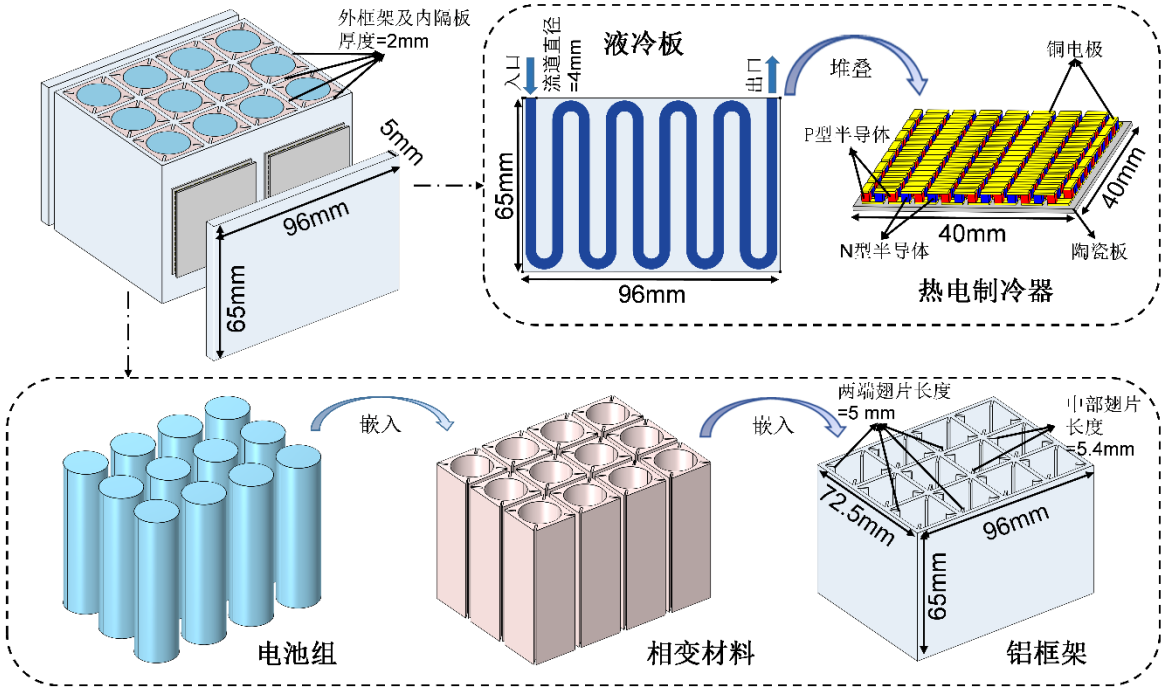


图1　电池热管理系统的三维几何结构示意图

Fig. 1　Three-dimensional geometric structure of the battery thermal management system

直接贴合，以实现高效散热。液体冷却板尺寸为96 mm×65 mm×5 mm，内部采用直径为4 mm的S形流道结构，冷却介质为水。每两个TEC共用一块液体冷却板，从而能够及时带走TEC工作过程中产生的热量，确保其稳定、高效运行。电池、铝、相变材料及冷却水的热物性参数列于表1中。本文采用传统石蜡基固－液相变材料，其相变温度区间为314.15－317.15 K[16]。TEC的几何尺寸及相关材料参数详见表2[17]。

2 模型开发

2.1 瞬态热-电-流多物理模型的基本原理

瞬态热-电-流多物理场模型的控制方程可以分解为三个主要部分：不包含TEC的固体域、TEC域和流体域。

2.1.1 TEC以外的固体域的控制方程

本工作采用18650锂离子电池，其内部产热过程可通过以下能量守恒方程表征[18]：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho_b c_{p,b} T_b\right) = \nabla \cdot (k_b \nabla T_b) + \frac{Q_b}{V_b} \tag{1}$$

其中，t表示时间，k和c_p分别表示导热系数和比热容，ρ和T分别表示密度和温度，下标b表示18650锂离子电池。本文将电池等效为具有均匀热物性的连续介质，并采用恒定体积热源表征产热过程。单体电池等效产热功率Q_b设置为6 W，其取值参考文献[19]。已有研究表明，18650锂离子电池在4C高倍率放电条件下的平均产热功率约为6 W[20]，因此，该热源功率可用于模拟高倍率运行条件下的高热负荷状态。V_b为电池单元的体积，关于18650型锂离子电池的详细信息可参见文献[21]。

翅片框架和S形液体冷却板的能量守恒方程如下所示：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \tag{2}$$

PCM吸收电池产生的热量并将其储存为潜热。当PCM温度升高其相变范围时，会发生相变（例如从固态到液态）。PCM的热传递和相变过程使用焓法建模，相应的控制方程如下所示[15]:

$$\rho_{pcm}\frac{\partial H_{pcm}}{\partial t} = \lambda_{pcm}\nabla^2 T_{pcm} \tag{3}$$

$$H_{pan} = \int_{T_0}^{T_{pcm}} c_{p.pcm} dT_{pan} + \beta\gamma \tag{4}$$

$$\beta = \begin{cases} 0 & T_{pcm} < T_s \\ \dfrac{T - T_s}{T_1 - T_s} & T_1 < T_{pcm} < T_s \\ 1 & T_{pcm} > T_1 \end{cases} \tag{5}$$

式中，H_{pcm}、λ_{pcm}、ρ_{pcm}和γ分别表示相变材料的焓值、热导率、密度和固液相变潜热。β表示PCM的液体分数。T_s和T_1分别表示PCM的初始和完全熔化温度。

2.1.2 TEC域的控制方程

TEC域的控制方程可以拆分为两部分：热传导域和电场域。在热传导区域内，陶瓷板、铜电极和p/n型热电半导体遵循以下能量守恒方程[16]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m c_{p,m} T_m) = \nabla \cdot (\lambda_m \nabla T_m) + \dot{S}_m \tag{6}$$

其中，$\dot{S}$为能量源项，下标m表示不同部件的材料。电流通过p/n型热电半导体和铜电极时会产生焦耳热，同时在p/n型热电半导体内产生珀尔帖热和汤姆逊热。$\dot{S}_m$的具体表达式如下[22]：

表1 电池等部件的材料参数

Table 1 Material parameters of battery and other components

组件	热导率/W·m^{-1}·K^{-1}	密度/kg·m^{-3}	比热容/J·kg^{-1}·K^{-1}	潜热/J·kg^{-1}
铝	238	2700	900	-
电池	x、y: 1.07 z: 19.03	2055.10	1129.95	-
相变材料	0.20	800	2000	255000
水	0.62	998.20	4180	-

表2 TEC各组成部分的尺寸和材料参数

Table 2 Dimensions and material parameters of each component of the TEC

	塞贝克系数/μV·K^{-1}	热导率/W·m^{-1}·K^{-1}	电阻率/S·m^{-1}	尺寸/L×W×H mm^3
p型半导体	$-1.593\times10^{-9}T^2+1.364\times10^{-6}T-7.062\times10^{-5}$	$1.071\times10^{-5}T^2-8.295\times10^{-3}T+2.625$	$1.311T^2-1.364\times10^3T+4.023\times10^5$	1.4×1.4×1.6
n型半导体	$7.393\times10^{-11}T^2-2.500\times10^{-7}T-8.494\times10^{-5}$	$1.870\times10^{-5}T^2-1.447\times10^{-2}T+3.680$	$0.657T^2-7.136\times10^2T+2.463\times10^5$	1.4×1.4×1.6
铜电极	-	400	5.998×10^7	3.8×1.4×0.4
陶瓷板	-	22	-	40×40×0.8

$$\dot{S}_m=\begin{cases}\sigma_p^{-1}(T)\vec{J}^2-T_p\vec{J}^{-1}\cdot\nabla\alpha_p(T)\\ \quad -\dfrac{\partial\alpha_p(T)}{\partial T}T\vec{J}\cdot\nabla T_p; & \text{p型半导体}(7-1)\\ \sigma_n^{-1}(T)\vec{J}^2-T_n\vec{J}^{-1}\cdot\nabla\alpha_n(T)\\ \quad -\dfrac{\partial\alpha_n(T)}{\partial T}T\vec{J}\cdot\nabla T_n; & \text{n型半导体}(7-2)\\ \sigma_{co}^{-1}(T)\vec{J}^2; & \text{铜电极}(7-3)\\ 0; & \text{陶瓷板}(7-4)\end{cases}\tag{7}$$

其中，$\vec{J}$,σ^{-1}和α分别表示电流密度矢量，电阻率和塞贝克系数。下标co、p和n分别表示铜电极、p型半导体和n型半导体。p/n型半导体和铜电极区域的电场守恒方程包括[16]:

$$\vec{E}=-\nabla\varphi+\alpha_{p,n}(T)\nabla T\tag{8}$$

$$\vec{J}=\sigma_m\vec{E}\tag{9}$$

$$\nabla\cdot\vec{J}=0\tag{10}$$

其中，$\vec{E}$和φ分别为电场密度矢量和电势矢量。

2.1.3 流体域的控制方程

对于流域，本文使用的流型是层流，液冷板中的水流被认为是不可压缩的。利用以下瞬态计算流体动力学方程来表征S形液体冷却板内冷却介质的流体域[22]：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T)+(\rho c_p\vec{u}T)=\nabla(\lambda\nabla T)\tag{11}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{v})+\nabla(\rho\vec{v}\vec{v})=-\nabla p+\nabla(\mu\nabla\vec{v})\tag{12}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\vec{v})=0\tag{13}$$

其中，μ、p和$\vec{v}$分别表示动态黏度、压力和速度矢量。冷却剂具体流型的确定取决于雷诺数，可以使用下面的方程来确定[22]：

$$Re=\frac{v\cdot d_h}{\mu}\tag{14}$$

其中，d和v分别是液压直径和冷却液流速。本研究中的模拟采用层流模型，原因是最大冷却剂流速不超过0.2 m/s，雷诺数低于2000。

2.2 边界条件及网格无关性验证

本文利用SolidWorks 2022软件建立了电池热管理系统的三维几何模型，并利用商用软件COMSOL对瞬态热电流体多物理模型进行了数值计算。模拟从0秒开始，初始温度设置为303.15 K，对应于环境温度。为分析系统在高热负荷条件下的瞬态热响应，单体电池等效产热功率设为6 W。瞬态计算时长设置为3000 s，以覆盖电池组快速升温、PCM相变蓄热、TEC主动制冷以及液体冷却持续排热等主要热响应阶段。对于TEC边界条件，一侧定义为电流入口，而另一侧设置为接地。进口速度边界条件应用于液体冷却板中冷却介质的进口表面，流速为0.1-0.2 m/s，进口温度为303.15 K。冷却介质的出口压力边界条件设置为标准大气压。此外，自然对流边界条件应用于与环境相互作用的BTMS表面，如下所示：

$$-k\frac{\partial T}{\partial n}=h_{am}(T-T_{am})\tag{15}$$

其中，h=5 W·m^{-2}·K^{-1}表示自然对流传热系数，am下标表示环境条件。外部环境温度T_{am}设置为303.15 K。较细的网格尺寸可以提高计算精度，但会显著增加计算时间。因此，进行网格无关性分析以平衡精度与计算效率是必要的。本研究采用212924、426068、993044和1551510四种逐级细化的网格尺寸进行网格独立性分析。在进行网格无关性检查之前，设置了以下仿真条件：电池等效产热功率为6 W，TEC工作电流为1.5 A，液冷板的流速为0.2 m/s。不同网格尺寸下最高温度随时间的变化如图2(a)所示。结果表明，在网格尺寸为993044的情况下，最高温度与1551510网格的温度非常接近，偏差很小。因此，为实现计算精度和时间效率的最佳平衡，选定993044网格方案作为后续仿真所用的标准网格。图2(b)给出了该所选网格编号处的具体网格详细信息。其中液体冷却板内部设置S形折返流道，由10段直线流道和9个180°弯道构成，流道采用圆形截面，直径为4 mm。TEC采用典型夹层结构，由上下陶瓷板、铜电极以及p/n型热电半导体组成。陶瓷板尺寸为40 mm×40 mm×0.8 mm；铜电极尺寸为3.8 mm×1.4 mm×0.4 mm；p型和n型热电半导体的截面尺寸均为1.4 mm×1.4 mm，高度为1.6 mm。p/n型热电半导体通过铜电极连接并，布置于上下陶瓷板之间。

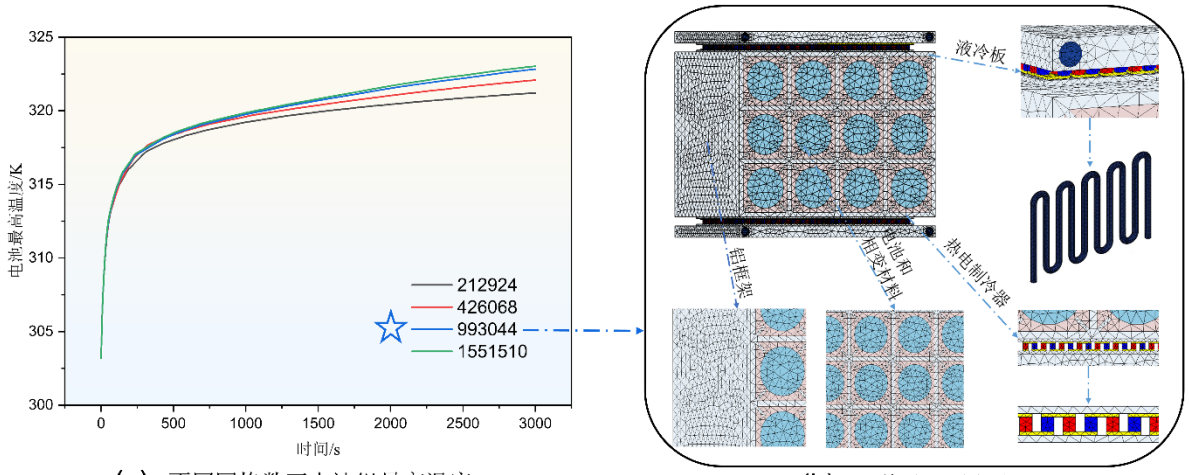
2.3 参数定义

TEC的制冷性能对电池的散热有重要影响，其制冷性能可通过制冷功率（Q_c）和性能系数（Coefficient Of Performance，COP）来表征。热电制冷器的制冷功率和制热功率的公式定义如下[15]：

$$Q_c(t)=\alpha I_{TEC}(t)T_c-\frac{1}{2}I_{TEC}^2(t)R_{TEC}-k_{TEC}[T_h(t)-T_c(t)]\tag{16}$$

$$Q_h(t)=\alpha I_{TEC}(t)T_c+\frac{1}{2}I_{TEC}^2(t)R_{TEC}-k_{TEC}[T_h(t)-T_c(t)]\tag{17}$$

其中，k_{TEC}表示热导率，T_c和T_h分别表示TEC



(a) 不同网格数下电池组最高温度　　(b) 网格分布的细节

图2　网格独立性验证。(a)不同网格方案的电池组最高温度；(b)网格分布的细节

Fig. 2　Grid independence examination results. (a) Maximum temperature of the battery pack for different grid schemes; (b) Details of the grid distribution

冷端和热端的温度，I_{TEC}和R_{TEC}分别表示TEC的输入电流和电阻。

结合式（16）和式（17），TEC的输入功率可表示为：

$$P_{TEC}(t) = Q_h(t) - Q_c(t) = I_{TEC}^2(t)R_{TEC} + \alpha I_{TEC}(t)[T_h(t) - T_c(t)] \quad (18)$$

因此，TEC的COP可定义为：

$$COP = \frac{Q_c}{P_{TEC}} \quad (19)$$

2.4　模型验证

为验证所提出的瞬态热-电-流体多物理场数值模型的准确性，本文将数值模拟结果与现有文献中的实验数据进行了对比[23]。首先，构建了一个包含热电冷却与液体冷却系统的三维电池热管理系统几何模型，并在与实验条件一致的边界条件下进行了瞬态数值仿真。随后，将仿真结果与参考文献中的实验数据进行了对比，结果如图3所示。结果表明，在7200秒内，最高温度的相对误差仅为0.23%。这些微小的差异证实了所提出的模型准确地预测了电池热管理系统的热性能，进一步验证了其可靠性和准确性。

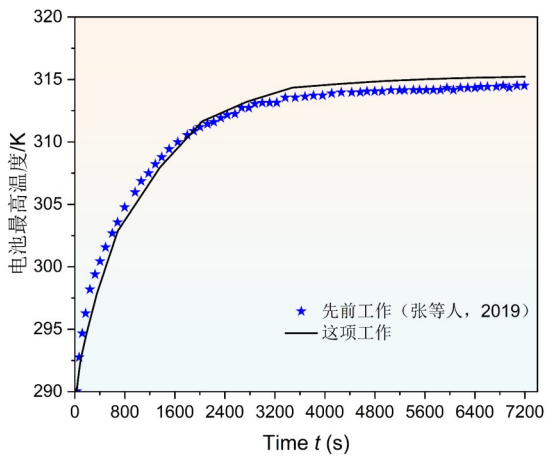


图3　数值和实验结果之间的电池最高温度比较

Fig.3　Comparison of the maximum temperature of the battery between the numerical and experimental results

3　结果与讨论

在电池放热功率为6 W的工况下，本文对所提出电池热管理系统的热性能进行了系统分析，并以电池组的最高温度及温差等关键热参数作为评价指标，对系统性能进行了综合评估。其中，在任一时刻，电池组的最高温度和最低温度分别定义为所有电池表面温度中的最大值和最小值，温差定义为同一时刻电池组的最高温度与最低温度之差。

3.1　不同配置下电池热管理系统的性能比较

为评估不同结构配置对电池热管理性能的影响，本文在相同工况条件下，对四种不同电池热管理系统配置进行了对比分析。图4为四种构型下电池热管理系统的几何示意图。具体而言，配置1集成了TEC、液体冷却与翅片结构；配置2集成了TEC与液体冷却；配置3集成了液体冷却与翅片结构；配置4仅采用液体冷却。在所有对比工况中，液体冷却板内冷却液流速均设定为0.2 m/s，TEC

的输入电流统一设为1.5 A。其他未指定参数遵循第2.2节描述的边界条件。

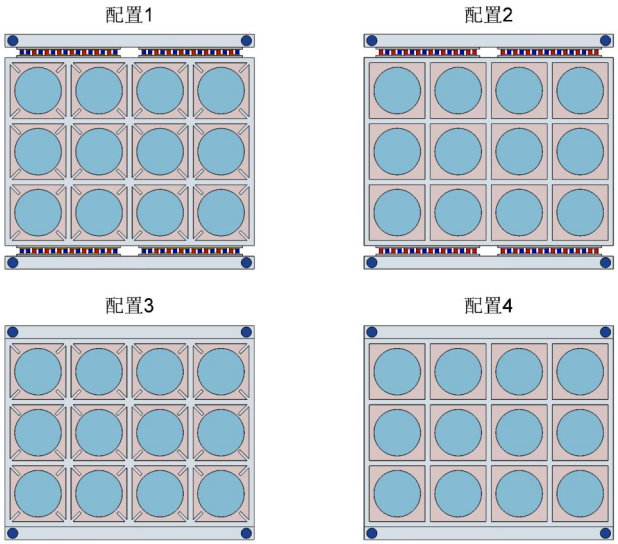
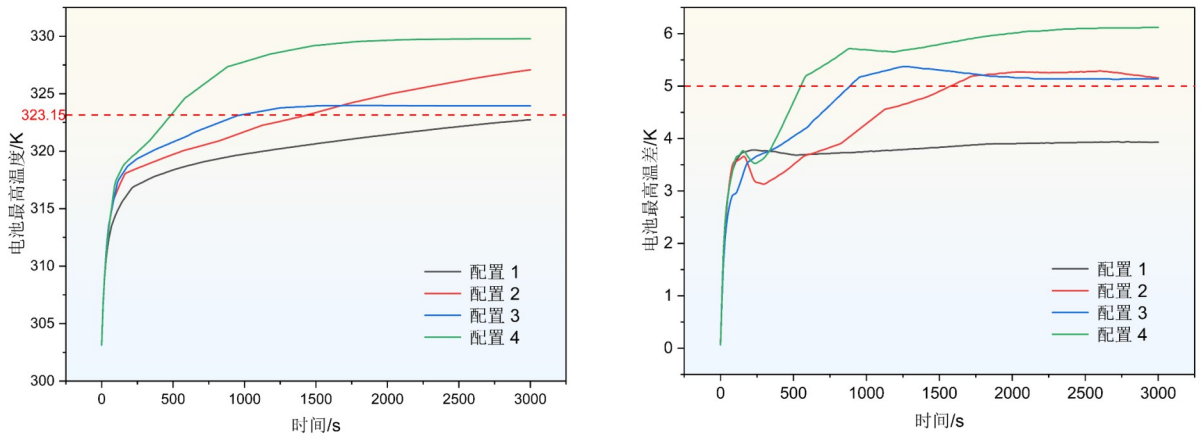


图4　电池热管理系统的不同结构配置
Fig.4　Different structure configurations of battery thermal management system

为保证不同配置之间的可比性，以下均以3000 s时的计算结果进行分析。图5展示了不同配置下电池的最高温度和温差。由图5(a)可知，各构型下电池最高温度均随运行时间增加而升高，但升温速率存在明显差异。对于配置1，其电池组最高温度和最低温度分别为322.74 K和319.35 K，对应的温差为3.39 K，均处于安全工作范围内，并表现出最优的热管理性能。相比之下，配置2由于缺少翅片强化结构，热量主要依靠PCM导热和TEC冷却作用传递，传热路径受限，其最高温度升高至327.08 K，最低温度升至321.92 K，对应温差增大至5.16 K。配置3虽引入翅片结构改善了PCM内部导热能力，但缺乏TEC的主动冷却，最高温度和最低温度分别为323.94 K和318.80 K，对应温差为5.14 K。配置4仅采用液体冷却，系统的散热能力最为有限，电池组最高温度和最低温度分别升高至329.53 K和323.12 K，对应温差高达6.41 K。对比分析表明，引入TEC能够显著提升系统的瞬态降温能力。TEC基于帕尔贴效应产生主动冷却作用，可降低冷端温度并增强热量迁移能力，从而抑制电池温升。因此，与未配置TEC的系统（配置3和配置4）相比，配置1和配置2均表现出更低的最高温度水平。

此外，翅片结构在降低电池组温差方面发挥了重要作用。翅片结构增加了铝翅片框架与相变材料之间的换热面积，并缩短了电池表面至高导热框架之间的传热路径，从而加速了热量由电池表面向外部环境的传递过程。相比不含翅片的配置2，配置1在3000 s时的最高温度由327.08 K降低至322.74 K，温差由5.16 K减小至3.39 K，充分体现了翅片结构在抑制局部热点和降低温差的优势。综上，配置1结合TEC主动冷却、PCM储热和翅片导热强化，实现了较低的最高温度和温差，表现出较好的综合热管理性能。



(a) 电池最高温度　　(b) 电池最大温差

图5　不同配置下的电池最高温度和温差的数值结果比较
Fig. 5　Comparison of the numerical results of the maximum temperature and temperature difference of the battery under different configurations

3.2 热电半导体高度和输入电流对TEC制冷性能及能效的综合影响

为排除冷热端温度变化对TEC参数对比结果的影响，将TEC冷端温度和热端温度分别固定为300.15 K和310.15 K，对应冷热端温差为10 K[24]。在此条件下，分析热电半导体高度为1.0～1.8 mm、输入电流为1～10 A时TEC制冷功率及性能系数的变化规律。

图6展示了不同热电半导体高度对TEC在不同输入电流下冷却性能的影响。图6（a）表明，TEC制冷功率随输入电流增加呈现不同变化趋势。在低电流范围内，各热电半导体高度对应的Q_c均增加；当电流进一步提高时，部分高度条件下Q_c出现下降。当热电半导体高度为1.0 mm和1.2 mm时，Q_c在1～10 A范围内持续增加；当高度分别为1.4、1.6和1.8 mm时，Q_c分别在约9.0、7.5和6.5 A时达到最大值52.89、43.49和36.59 W，随后随输入电流继续增加而下降。这说明随着热电半导体高度增加，高电流条件下焦耳热损耗的影响增大，使最大制冷功率对应的输入电流逐渐减小。图6(b)表明，在1～10 A范围内，不同热电半导体高度对应的COP均随输入电流增加而持续下降，且在相同输入电流下，COP总体随热电半导体高度增加而降低。在热电半导体高度为1.0 mm和1.8 mm时，COP分别由1 A时的4.66和1.96下降至10 A时的0.68和0.08。随着输入电流增大，TEC输入功率及焦耳热损耗增加，而高电流区制冷功率增益受到限制，从而导致COP下降。综合图6(a)和图6(b)可知，TEC制冷能力与能效之间存在明显权衡。低—中电流能够提高制冷功率，而过大的输入电流不仅会显著降低COP，在较大热电半导体高度下还可能导致制冷功率衰减。为了在Q_c以及COP之间实现平衡，建议将TEC输入电流设在5安培以下。

3.3 热电半导体高度对电池热管理系统热性能影响

上一节主要分析固定冷热端温度条件下单一TEC的制冷性能。为进一步评估TEC参数在系统层面对电池热管理性能的影响，本节在液冷板流速为0.1 m/s，其他工况保持一致的条件下，分析了热电半导体高度（1.0－1.8 mm）及输入电流（1－4 A）对电池热管理系统热性能的影响。系统性能主要通过电池组的最高温度和温差两个关键热参数进行评价。图7（a）给出了不同半导体高度和输入电流条件下电池组最高温度的变化规律。随着输入电流由1 A增加至4 A，各热电半导体高度对应的电池组最高温度均显著降低，表明输入电流是影响系统整体降温能力的主要参数。相比之下，热电半导体高度的影响较小且呈非单调变化。在1.5～3.5 A范围内，热电半导体高度为1.6 mm时电池组最高温度总体较低。例如，在3 A条件下，随着热电半导体高度增加，最高温度先降低后升高，1.6 mm时达到最低值304.17 K，说明适中的半导体高度有利于降低热阻并提升TEC制冷能力。当输入电流增大至4 A时，1.4 mm和1.6 mm对应的最高温度分别为297.49 K和297.82 K，差异较小。

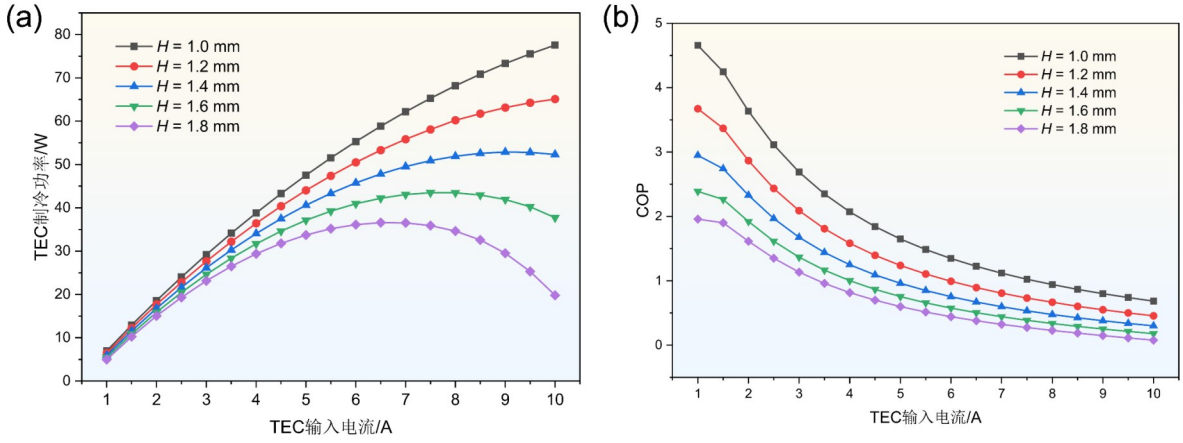
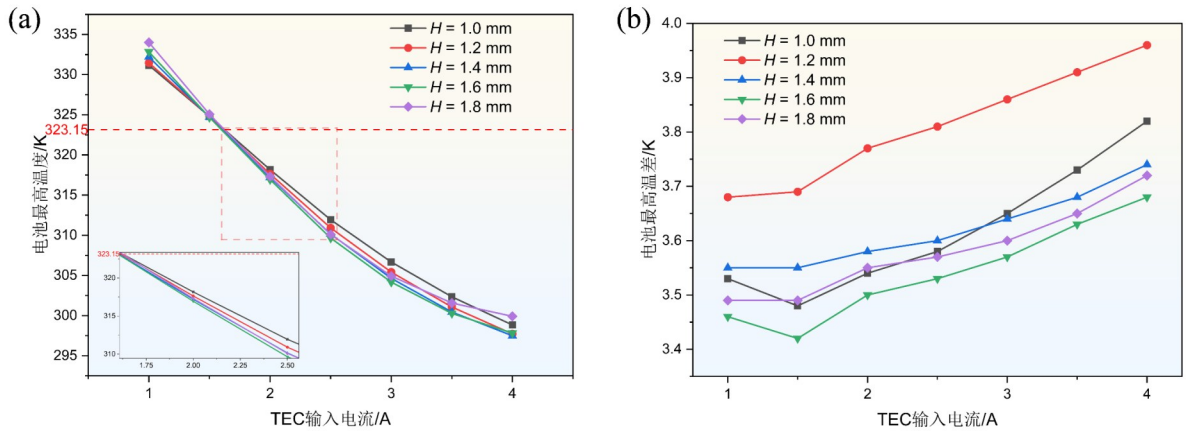


图6 热电半导体高度对不同输入电流下TEC性能的影响 （a）制冷功率Q_c；（b）制冷能效系数COP

Fig.6 Effect of thermoelectric semiconductor height on TEC performance under different input currents (a) cooling power Q_c; (b) Cooling efficiency coefficient COP

说明中等热电半导体高度在本文参数范围内具有较好的降温表现。图7(b)表明，不同工况下电池组温差均低于4 K，且其变化幅度明显小于最高温度。热电半导体高度为1.6 mm时，在所有考察电流下均获得较低的温差；以该高度为例，温差由1 A时的3.46 K略降至1.5 A时的3.42 K，随后随电流增加逐渐增大至4 A时的3.68 K。由此可见，增大输入电流能够显著降低最高温度，但并不能持续改善温度均匀性。结合图6中COP随电流增加而下降的规律，综合考虑最高温度、温度均匀性及TEC能效，在本文研究范围内，热电半导体高度为1.6 mm、输入电流约2～3.5 A可作为较优的参数范围。



(a) 电池最高温度　(b) 电池最大温差

图7　热电半导体高度在不同输入电流下热行为的影响

Fig.7　The effect of thermoelectric semiconductor height on thermal behavior under different input currents

4　结　论

本文针对6 W高产热功率下锂离子电池温升过高和温度不均匀的问题，提出了一种集成相变材料（PCM）、热电制冷器（TEC）和液体冷却的混合电池热管理系统，并建立了考虑热-流-电耦合及相变过程的瞬态多物理场耦合数值模型。在单体电池等效产热功率为6 W、瞬态计算时长为3000 s的条件下，分析了不同热管理构型以及TEC结构和运行参数对系统热性能的影响，主要得出以下结论：

（1）不同冷却配置对系统热管理性能具有显著影响。对比结果表明，集成TEC、液体冷却和翅片结构的方案在降低电池最高温度和改善温度均匀性方面表现最优。TEC的引入能够快速降低电池温度，而翅片结构通过增大与PCM的接触面积、缩短电池至散热框架的传热路径，有效强化了从电池表面向外部环境的热传递过程，从而显著降低了电池组的最高温度和温差。

（2）TEC输入电流和热电半导体高度共同影响TEC制冷性能。随着输入电流增加，TEC制冷功率整体提高，但COP持续下降；当热电半导体高度增加时，内部电阻和热损耗增加，导致高电流条件下制冷能力受到限制。因此，TEC运行参数需要综合考虑制冷能力和能量利用效率。

（3）系统最高温度主要受输入电流影响，而热电半导体高度对温度均匀性具有较明显影响。综合最高温度、温差及TEC能效，在本文参数范围内，热电半导体高度为1.6 mm时，系统具有较低的最高温度和较小的温差；输入电流为2～3.5 A时，能够在降低电池温度和保持较高温度均匀性之间实现较好平衡。

参考文献

[1] TOGUN H, BASEM A, DHABAB J M, et al. A comprehensive review of battery thermal management systems for electric vehicles: Enhancing performance, sustainability, and future trends [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 97: 1077-1107. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.11.093.

[2] LIU Z, LIU Z, LIU J, et al. Thermal management with fast temperature convergence based on optimized fuzzy PID algorithm for electric vehicle battery[J]. Applied Energy, 2023,

352: 121936. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121936.

[3] VERMA A, SAIKIA T, SAIKIA P, et al. Thermal performance analysis and experimental verification of lithium-ion batteries for electric vehicle applications through optimized inclined mini-channels[J]. Applied Energy, 2023, 335: 120743. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.120743.

[4] SUN W, LI P, CHENG W, et al. Novel hybrid thermal management system for cylindrical lithium-ion battery based on CPCM and topology-optimized liquid cooling[J]. Energy, 2025, 329: 136719. DOI: 10.1016/j.energy.2025.136719.

[5] SHRUTI G, SALUNKHE P B, SHENOY B S. Recent progress on passive cooling strategies for Li-ion battery of electric vehicles[J]. Journal of Energy Storage, 2026, 156: 121550. DOI: 10.1016/j.est.2026.121550.

[6] BAO Z, WU Z, CHEN H, et al. Advanced battery thermal management systems: Technologies, integration challenges, and future trends[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 140: 119094. DOI: 10.1016/j.est.2025.119094.

[7] CHEN M, YU Y, OUYANG D, et al. Research progress of enhancing battery safety with phase change materials[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 189: 113921. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113921.

[8] TALELE V, ZHAO P. Effect of nano-enhanced phase change material on the thermal management of a 18650 NMC battery pack[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 64: 107068. DOI: 10.1016/j.est.2023.107068.

[9] KUMAR A, SENAPATI J R, ACHARYA S. Passive cooling of a lithium-ion battery pack using PCM and longitudinal/circular fins: A numerical study with experimental validation[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 111: 115464. DOI: 10.1016/j.est.2025.115464.

[10] SUTHEESH P M, JOSE J, HOTTA T K, et al. Numerical investigations on thermal performance of PCM-based lithium-ion battery thermal management system equipped with advanced honeycomb structures[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024, 158: 107937. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107937.

[11] CHEN H, WEI G, XU L, et al. Performance study on a novel hybrid thermal management system for cylindrical lithium-ion battery pack based on liquid cooling and PCM[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 271: 126392. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.126392.

[12] YUAN X, ZHENG R, YANG J, et al. Compact thermal management for high-density lithium-ion batteries: Liquid cooling solutions[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 113: 115523. DOI: 10.1016/j.est.2025.115523.

[13] WU Z, SUN X, LUO D, et al. Optimizing the thermal and energy efficiency of a thermoelectric-based battery thermal management system via adaptive control strategies and phase change materials[J]. Energy, 2026, 344: 139845. DOI: 10.1016/j.energy.2025.139845.

[14] MAHEK M K, RAMADAN M, BIN DOL S S, et al. A comprehensive review of thermoelectric cooling technologies for enhanced thermal management in lithium-ion battery systems[J]. Heliyon, 2024, 10(24): e40649. DOI: 10.1016/j. heliyon. 2024. e40649.

[15] LIU X, ZHANG C F, ZHOU J G, et al. Thermal performance of battery thermal management system using fins to enhance the combination of thermoelectric cooler and phase change material [J]. Applied Energy, 2022, 322: 119503. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.119503.

[16] LUO D, WU Z, YAN Y, et al. Performance analysis of a battery thermal management system combining thermoelectric, composite phase change material, and liquid cooling under extreme operating conditions[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 95: 112679. DOI: 10.1016/j.est.2024.112679.

[17] LUO D, WU Z, YAN Y, et al. Performance investigation and design optimization of a battery thermal management system with thermoelectric coolers and phase change materials[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 434: 139834. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139834.

[18] ZHANG G, XIONG W, XIE J, et al. An energy-saving battery thermal management system coupling phase change material with dynamic liquid cooling[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2025, 169: 109815. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109815.

[19] WANG Z, ZHANG H, XIA X. Experimental investigation on the thermal behavior of cylindrical battery with composite paraffin and fin structure[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 109: 958-970. DOI: 10.1016/j. ijheatmasstransfer. 2017.02.057.

[20] AKULA R, MINNIKANTI A, BALAJI C. Pin fin-PCM composite heat sink solution for thermal management of cylindrical Li-ion battery[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 248: 123146. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123146.

[21] DONG F, CHENG Z, ZHU J, et al. Investigation and optimization on cooling performance of a novel double helix structure for cylindrical lithium-ion batteries[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 189: 116758. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116758.

[22] LUO D, WU Z, CHEN H, et al. Thermal performance of an active battery thermal management system combining annular thermoelectric coolers and phase change materials[J]. Renewable Energy, 2025, 249: 123278. DOI: 10.1016/j.renene. 2025.123278.

[23] JIANG L, ZHANG H, LI J, et al. Thermal performance of a cylindrical battery module impregnated with PCM composite based on thermoelectric cooling[J]. Energy, 2019, 188: 116048. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116048.

[24] LUO D, ZHAO Y, CAO J, et al. Performance analysis of a novel thermoelectric-based battery thermal management system[J]. Renewable Energy, 2024, 224: 120193. DOI: 10.1016/j. renene. 2024.120193.