

# 基于相变储能的动力电池热管理系统性能分析

俞 钊, 梁坤峰

河南科技大学车辆与交通工程学院, 河南 洛阳

收稿日期: 2023年3月28日; 录用日期: 2023年5月24日; 发布日期: 2023年5月31日

## 摘 要

良好的动力电池热管理可有效提高电动车的续航里程, 本文利用相变材料储能的特性, 设计了一种相变储能多管换热器使其与液冷系统耦合, 实现夏季多管换热器储冷用于吸收电池产热, 冬季多管换热器储热为乘员舱提供热量。通过有限元软件ANSYS对设计的相变储能多管换热器的工作过程进行瞬态仿真, 以评估储能多管换热器的有效性, 通过实验的方式测试储能多管换热器与液冷系统耦合对动力电池模组的热管理效果。仿真分析表明: 通过研究储能多管换热器夏季储冷吸热性能, 分析其的换热功率变化曲线, 可预测实际热管理系统中电池箱的温度变化趋势将呈现先降低后缓慢升高, 通过仿真分析的多管换热器冬季储热可在一小时提供1948.1 kJ热量用于乘员舱供暖。实验结果表明: 该热管理系统可有效管控设定热边界下的电池产热, 电池箱温度被有效控制在最佳工作温区以内, 且电池箱温度的变化趋势与通过仿真分析预测的趋势一致。综上所述, 本研究证明了该热管理系统具有良好的热管理效果和可靠性, 为其在电动车的应用提供了参考依据。

## 关键词

储能多管换热器, 相变材料, 热管理效果

# Performance Analysis of Power Battery Thermal Management System Based on Phase Change Energy Storage

Fan Yu, Kunfeng Liang

School of Vehicle and Traffic Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan

Received: Mar. 28<sup>th</sup>, 2023; accepted: May 24<sup>th</sup>, 2023; published: May 31<sup>st</sup>, 2023

## Abstract

Effective thermal management of power batteries can significantly improve the range of electric vehicles. In this paper, a phase change energy storage multi-tube heat exchanger is designed, com-

combined with a liquid cooling system, to realize summer and winter thermal management multi-tube heat exchanger. We evaluated the effectiveness of the phase-change energy storage multi-tube heat exchanger through transient simulations using ANSYS finite element software. We also conducted experiments to test the thermal management effectiveness of the coupled phase-change energy storage multi-tube heat exchanger and liquid cooling system on power battery modules. The simulation analysis showed that by studying the summer cooling performance of the energy storage multi-tube heat exchanger and analyzing its heat transfer power curve, we could predict the trend of temperature changes in the battery pack in an actual thermal management system, which would decrease first and then slowly rise. Additionally, the simulation analysis indicated that the multi-tube heat exchanger could provide 1948.1 kJ of heat energy for passenger compartment heating within an hour in winter. The experimental results demonstrated that the proposed thermal management system effectively controlled the heat generation of the battery pack and maintained the battery pack temperature within the optimal operating temperature range. Moreover, the trend of the battery pack temperature changes observed in the experiments was consistent with the trend predicted through simulation analysis. In summary, this study proved the proposed thermal management system's effectiveness and reliability, providing a reference for its application in electric vehicles.

## Keywords

Energy Storage Multi Tube Heat Exchanger, Transient Simulation, Thermal Management Effect

Copyright © 2023 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

电动车使用电池作为动力源, 电池性能直接影响整车的运行, 电池在快速充放电的工作过程中, 不可避免地会导致电池温度迅速升高[1], 尤其在夏季高温环境中, 热管理系统无法及时将带走电池产生的热量, 电池温度升高电池阻抗增加, 容易引发热失控, 极端情况下甚至产生燃烧或爆炸, 安全风险较高。当动力电池温度较低时, 动力电池的可用充放电容量会大幅降低, 其内阻显著上升, 锂离子动力电池的放电性能将大幅衰减, 致使电动汽车的续航里程明显下降[2] [3], 对锂离子动力电池在低温环境下进行加热和保温十分重要。因此, 必须对电池进行采用合理的热管理, 控制电池温度在最佳工作温度区间内  $25^{\circ}\text{C}\sim 45^{\circ}\text{C}$  [4], 以保证电动车的安全高效运行。

相变材料(PCM)作为储能材料近年来应用于各工业、建筑、医疗等领域, 采用 PCM 与其他冷却方式结合对动力电池热管理, 在节能与设备小型化上有着不小的商业潜力[5] [6]。目前学者对相变材料与其他冷却方式结合的热管理系统研究主要有, Mehrabi-Kermani 等[7]设计了一个强制空气冷却和石蜡 PCM 耦合冷却的软包电池组模块。实验结果发现耦合热管理系统和单一热管理系统相比, 耦合热管理系统在空气中的冷却速度加快了 4 倍。Huang 等[8]研究了热管与 PCM 耦合的热管理系统, 发现耦合热管理系统可以将电池温度保持在  $45^{\circ}\text{C}$  以内, 并且热管与 PCM 结合的耦合系统可有效提高电池温度均匀性。Javani 等[9]为了降低散热装置带来的能耗, 设计了在电池之间交替布置冷板和 PCM 的散热结构。将被动式冷却与主动式冷却相结合, 这种方式的优点在于, 可以减少液冷通道数量以及水泵的能耗, 降低使用成本。以上研究均采用将 PCM 包裹动力电池再通过其他冷却方式辅助散热以达到更好的热管理效果, 然而这些方式没有良好地利用 PCM 可储热也可储冷的特性。

结合以上研究, 本文以相变材料可储热也可储冷的特性, 设计了一种相变储能多管换热器使其与液冷系统耦合, 实现夏季换热器储冷吸收电池产热、冬季换热器储热为乘员舱提供热量。

## 2. 相变储能多管换热器的设计及仿真分析

### 2.1. 相变储能多管换热器的设计

如图 1 为相变储能多管换热器的应用原理图, 夏季储能换热器储冷, 动力电池工作时通过水泵将电池液冷系统的工质打入储能换热器内部换热, 储能换热器内部 PCM 吸收来自电池的热量, 使电池温度保持在最佳工作温区内, 当需要更好的电池热管理效果时, 打开冷却系统对储能换热器进行冷却, 由汽车空调系统通过热交换器提供为储能换热器提供冷却所需冷量, 热交换器储能换热器冷却侧采用载冷剂(水溶液)冷却, 冬季储能换热器储热, 通过冷却系统使储能换热器内热量释放用于汽车乘员舱供暖。

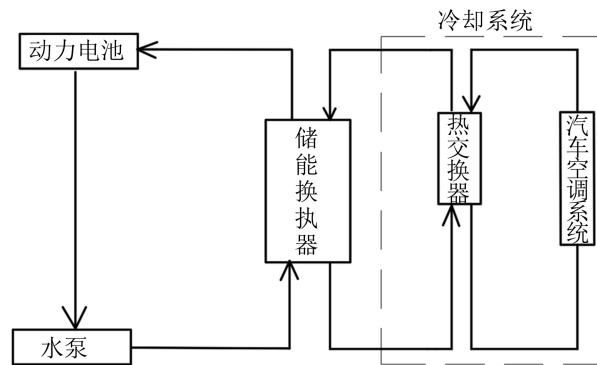


Figure 1. Application principle diagram of energy storage heat exchanger  
图 1. 储能换热器的应用原理图

本文以宁德时代(CATL)开发的 NCM 方壳电芯构成的 VDA355 (Verband Der Automobindustrie 355)模组产热为研究对象, 根据整车技术规范 VTS (Vehicle Technical Specification)中对动力电池系统 SSTS (Sub System Technical Specification)的要求电池电量为 65 kWh [10], 需要 24 个 VDA355 模组构成, CATL 供应商提供的不同倍率下和温度边界下 NCM 电芯发热功率如表 1 所示[11]。结合电动车正常使用中的实际行驶工况, 可知 0.5 C 倍率放电下, 对应电动车行驶工况为夏季高温工况下, 110~120 km/h 并开启空调系统, 故选取 45℃、0.5 C 放电为动力电池产热边界。

Table 1. Relevant thermal property parameters of capric acid-paraffin/10% expanded graphite composite phase change materials

表 1. 癸酸 - 石蜡/10%膨胀石墨复合相变材料的相关热物性参数

材料参数	数值
密度	859 kg/m <sup>3</sup>
比热	2.24 kJ/(kg·K)
导热系数	0.958 W/(m·K)
相变潜热	140 kJ/kg
凝固温度	27℃
熔化温度	29℃
热扩散系数	0.0004
黏度	0.0014

以管控与储存动力电池产热边界下一小时动力电池产热为目标, 设计相变储能换热器, 电动汽车的动力电池其最佳工作温区为  $20^{\circ}\text{C}\sim 45^{\circ}\text{C}$ , 故选取相变材料相变温区  $20^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ , 选用相变材料需满足安全可靠、稳定性强、无毒无害、获取途径简单、价格低廉等条件, Didier Haillot [12]等研究膨胀石墨与不同相变材料复合对材料导热系数与相变潜热的影响, 发现膨胀石墨与相变材料质量比超过 10%, 复合相变材料导热系数有较大的提升, 然而随着膨胀石墨的比例添加的增高复合相变材料潜热值也随之降低。故选用正葵酸 - 石蜡/膨胀石墨(8.1:1.9/1) [13], 作为多管换热器内填充的相变材料, 通过激光热导率仪(型号: 耐驰 LFA467HT)等仪器测得所制备的相变材料参数如表 1 所示。

表 2 为相变储能换热器设计参数, 其中为了方便研究, 对该车型电池产热进行 0.2 倍缩放。建立了如图所示的储能换热器的物理模型, 储能换热器尺寸(内径  $\times$  高  $\times$  壁厚):  $\Phi 160\text{ mm} \times 160\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  (包含保温层), 管路尺寸(外径  $\times$  高  $\times$  壁厚):  $\Phi 10\text{ mm} \times 160\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ , 储能换热器内填充复合相变材料, 根据文献[14]确定每根内管与储能换热器圆心的距离为 47 mm, 内管与冷却系统及动力电池热管理系统相连接, 如图 2 所示其中双环标志内管与冷却系统相连接, 单环标志内管与液冷电池热管理系统相连接, 缩放后动力电池在设定的热边界下的产热功率为 100 W, 故将储能换热器储冷吸热过程的吸热功率超过 100 W 视为动力电池有效热管理。

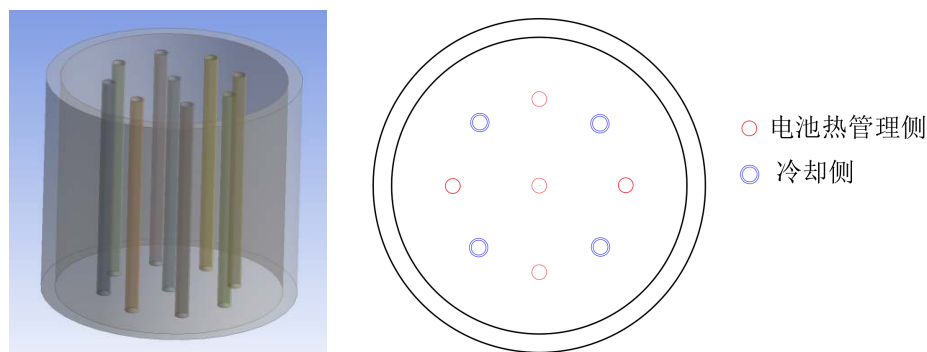


Figure 2. Storage tank heat exchanger structure drawing  
图 2. 储能换热器结构图

Table 2. Tank design parameters

表 2. 储能设计参数

名称	参数
电池容量	65 kwh
放电温度	$45^{\circ}\text{C}$
放电倍率	0.5 C
产热模型缩放倍率	0.2
单小时产热量	363.4 kJ
蓄热功率	100 W
复合相变材料密度	$0.859\text{ g/cm}^3$
材料相变潜热	140 kJ/kg
所需空间	$\geq 3.02\text{ L}$
内管数	9

## 2.2. 相变储能多管换热器仿真分析

采用 CFD 计算软件的焓法模型研究相变储能换热器内复合相变材料的熔化、凝固特性, 模拟仿真时将固液相变的糊状区域视为多孔介质[14]。因相变问题的求解是非常复杂的, 涉及液相区自然对流、容器壁与相变材料间热阻等不确定因素的影响, 故为简化模型计算, 需做如下假设: 1) 固相、液相复合相变材料各向同性; 2) 储能换热器外壳按绝热处理, 不考虑热损失; 3) 假设 PCM 的热物理性质恒定; 4) 相变材料的初始温度在加热/冷却开始时均匀设置; 5) 针对液相中的自然对流, 采用 Boussinesq 假设; 6) 换热壁面的边界条件为无滑移边界。模型计算方程可参考文献[15]。

FLUENT 设置: 在数字计算时, 选择瞬态求解器对模型进行求解, 对于罐内相变材料的熔化与凝固过程, 采用 solidification/maltin 模型; 加热/冷却管内的水为湍流流动, 采用标准  $k-\epsilon$  模型。选择 SIMPLES 算法对速度、压力进行耦合, 采用 PRESTO 方案校正压力, 采用二阶迎风方案校正动量、能量。检验网格密度对研究的影响, 模型建立后进行 3 次网格划分, 网格数分别为 772,630、1,308,668、1,848,070, 将网格数不同的模型分别导入 FLUENT 仿真软件中计算其储/释热过程, 对比 3 个不同密度的网格模型下相变液相率随时间变化曲线, 发现不同网格数的液相率随着时间的变化差距极小, 故网格数量对计算结果影响不大, 为兼顾计算精度及计算速度, 最终计算的网格数取 772,630。

针对相变储能多管换热器进行夏季工况储冷吸热的仿真分析: 设置吸热过程 PCM 初始温度为 290.15 K (17°C), 相变材料最佳传热温差为 5°C~12°C (选取相变材料相变温度为 27°C~29°C), 故电池侧内管进口水温设置为 309.15 K (36°C), 内管流量设置 1 L/min。冷却侧连接内管进口水温设置为 278.15 K (5°C), 内管流量设置 1 L/min。针对冬季储热放热的仿真分析: 设置 PCM 初始温度 312.15 K (39°C), 冷却侧连接内管进口水温设置 278.15 (5°C)。

研究以纯电动车为储能换热器应用对象, 故储能换热器是否能良好地接受设定热边界下动力电池产热(即有效热管理)及作为储热装置可为乘员舱提供多少热量是本研究探讨的, 故分别对储能换热器的夏季工况吸热性能与冬季工况放热性能进行测试。

图 3 为通过仿真获取的夏季工况下储能换热器储冷吸热, 内管与换热器内 PCM 换热功率的变化曲线图, 不开启冷却时有效热管理时间约为 1200 s, 随后换热功率由 100 W 缓慢降至 45 W, 开启冷却时有效热管理时间约为 2000 s, 随后换热功率由 100 W 缓慢降至 73 W。图 4 为 30 min、60 min、90 min、120 min 时刻两种工况下储能换热器内部相变材料液相率云图, 其中图 4 为不开启冷却的液相率云图, 可以看出随着换热的进行, 与电池侧连接的换热内管周边的 PCM 不断熔化, 液相界面不断扩张, 换热内阻也随之增加, 故换热功率呈现不断递减的趋势。图 5 为开启冷却的液相率云图, 较不开启冷却明显其与电池侧连接的内管周边的液相界面扩张较慢, 其原因是由于开启冷却后储能换热器在吸收电池侧产热的同时, 在冷却侧释热量, 从而延缓储能换热器内相变材料的熔化速率, 且在 60 min 以后液相界面几乎达到平衡状态, 结合图 3 的换热功率可看出约 4000 s 后开启冷却的换热功率变化趋于平缓, 此时冷却端与吸热端达到热平衡。进一步分析换热曲线图, 可以预测实际热管理过程中电池箱温度将呈现先降低后升高的趋势, 而虽然不开启冷却与开启冷却的有效热管理时间分别为 1200 s、2000 s, 但超过这部分的时间储能换热器依旧保持换热, 同样可以有效延缓电池箱温度的升高。

图 6 为冬季工况下储能多管换热器内 PCM 液相率及平均温度随释热时间的变化曲线, 具体放热量可通过式(1)计算获得:

$$Q_{ir} = \theta M_{PCM} \gamma + M_{PCM} C_{PCM} \Delta T \quad (1)$$

式中  $Q_{ir}$  为储能换热器放热量;  $\theta$  为 PCM 液相率;  $M_{PCM}$  为 PCM 质量;  $\gamma$  为 PCM 潜热值;  $C_{PCM}$  为 PCM 比热;  $\Delta T$  为储能换热器内 PCM 平均温度的变换量。本模型为缩放 0.2 倍模型, 原模型中储能多管换热

器在一小时内可为乘员舱提供 1948.1 kJ 热量用于乘员舱供暖, 可提供平均热负荷为 541 W, 冬季电动车启动前 15 分钟可为乘员舱提供 744.7 kJ 热量, 可提供平均热负荷为 827 W, 冬季环境温度在  $-7^{\circ}\text{C}\sim 5^{\circ}\text{C}$  下电动车正常行驶乘员舱所需热负荷约为 1200~2700 W, 储能换热器可为电动车提供约 30.6%~68.9% 热负荷需求量, 可以看出储能换热器无法完全成为冬季电动车热泵系统取热源, 但可作为热泵系统取热的补充, 作为冬季热泵系统因结霜问题导致取热困难的替代热源。

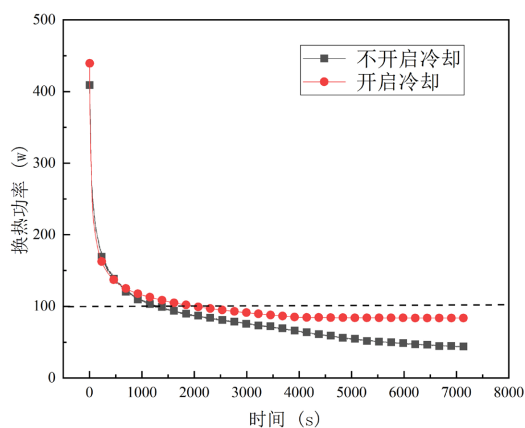


Figure 3. Variation curve of heat transfer power of multi-tube heat exchanger

图 3. 储能多管换热器换热功率变化曲线

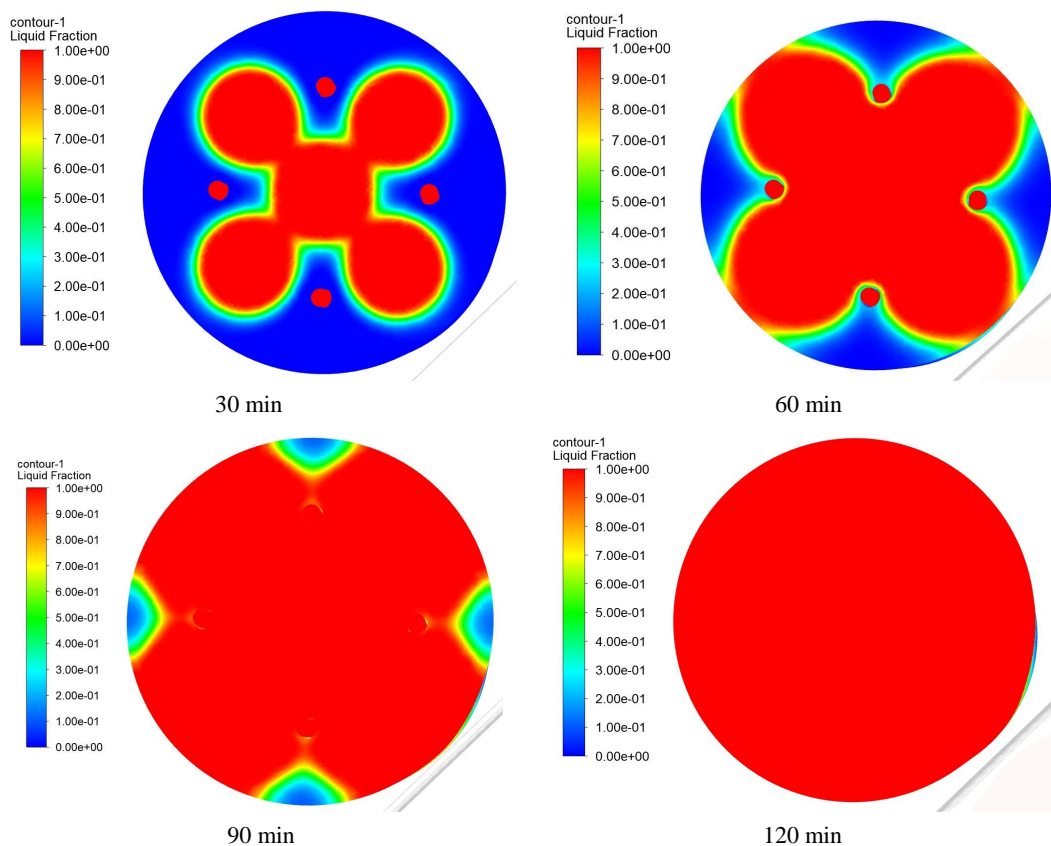


Figure 4. Rate nephogram of liquid phase without cooling

图 4. 不开启冷却液相率云图

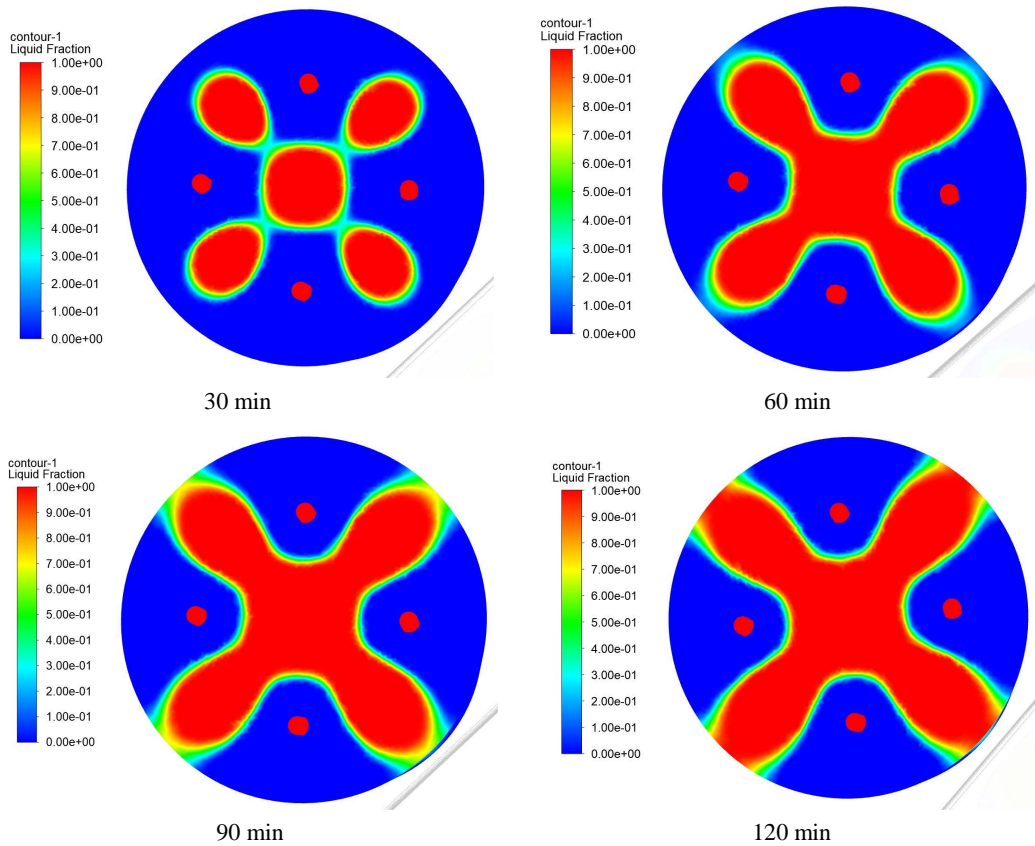


Figure 5. Open cooling liquid phase rate nephogram  
图 5. 开启冷却液相率云图

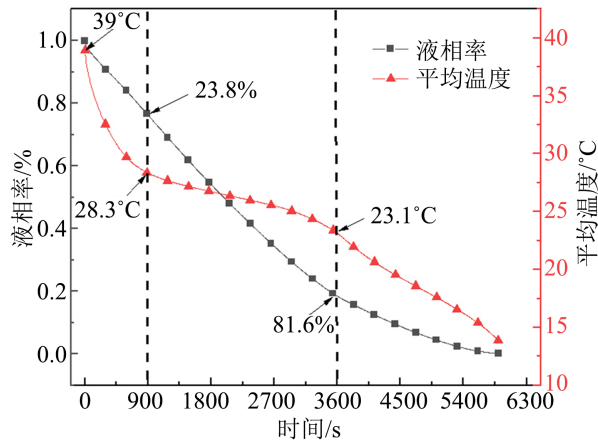


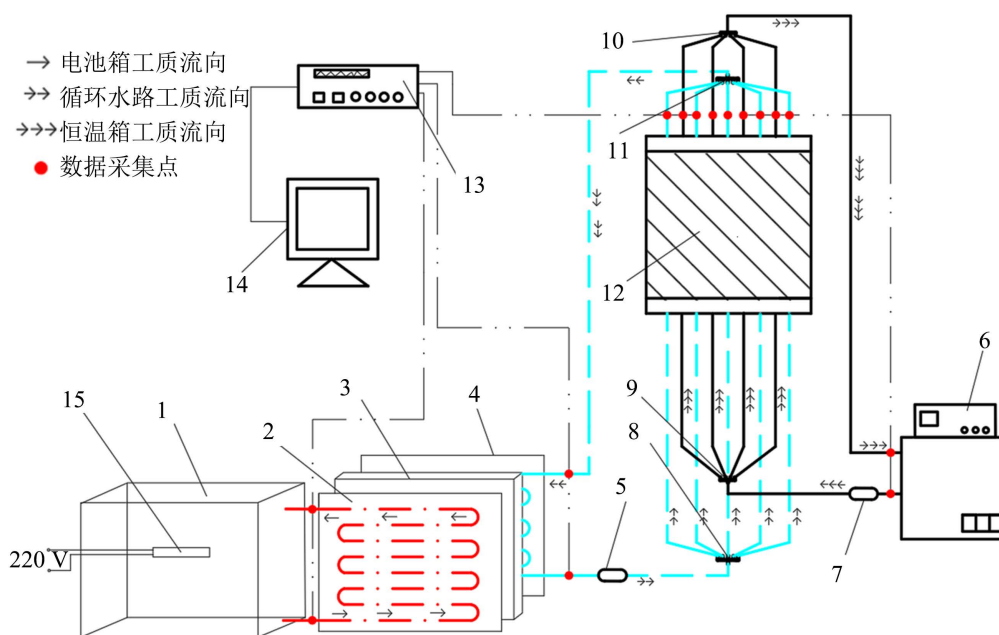
Figure 6. Curve of liquid phase rate and mean temperature during heat release  
图 6. 释热过程液相率及平均温度变化曲线

### 3. 热管理系统实验测试

#### 3.1. 实验台的工作原理

图 7 为热管理系统示意图, 由热管理模块、数据采集模块和模拟电池箱、冷却系统四部分组成。热管理模块由五口分流阀、循环水泵、相变储能换热器、软管若干、液冷板组成, 故为保证实验中测量精

度, 通过五口分流阀手动改变每根管道的流量为 1 L/min, 循环水路中的换热工质选用纯净水溶液, 连接采用软管连接在每次实验正式开始前对系统进行检漏测试确保实验正常进行。数据采集模块由安捷伦 34970A 和温度传感器组成。冷却系统由恒温箱、循环泵、四口分流阀组成, 其中恒温箱内工作工质为纯净水溶液, 恒温箱中的工质温度为 5℃。模拟电池箱由加热棒、循环水泵、溶液槽组成, 其中加热棒的额定电压为 220 V, 额定功率 100 W 功率恒定, 溶液槽中工质为水溶液。低温恒温水箱的型号为 DC-3006, 精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ; 数据采集系统采用 Agilent 34970A, 数据采集精度为 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ , 采集测试系统温度数据; 温度采集采用精度为 0.1% 的 T 型热电偶; 循环水泵的流量为 6.5 L/min。



1-模拟电池箱; 2-前换热板; 3-导热硅胶片; 4-液冷板; 5-循环水泵 1; 6-恒温水箱; 7-循环水泵 2; 8、11-五口分流阀; 9、10-四口分流阀; 12-相变储热换热器; 13-数据采集系统; 14-上位机; 15-加热棒

Figure 7. Schematic diagram of thermal management system

图 7. 热管理系统原理图

用前换热板替代动力电池, 前换热板内循环工质热量来自模拟电池箱(后文简称电池箱, 电池箱内装有 7 kg 纯净水溶液以模拟电池显热), 动力电池产热量为对应倍率放电下的产热量通过对应标定的加热棒生成。

热管理系统原理: 电池箱内放置的加热棒对应 0.5 C 倍率放电的产热工况, 当电池箱温度达到 45℃ 后开启循环水泵 1, 循环水路中的水溶液经过换热板 2 (液冷板) 带走电池箱热量, 再经液体五口分流阀分为五路后进入储能换热器内管与储能换热器内的 PCM 换热, PCM 吸收循环水路中水溶液的热量, 循环水路水温降低后再经分流器汇聚成一路后进入换热板 2, 由此完成热量由电池至储能换热器的转移。当储能换热器需要冷却时, 开启水泵 2, 低温恒温箱内低温工质经四口分流器分为四路进入储能换热器内管与储能换热器内的相变材料换热, 带走储能换热器内的热量实现储能换热器的冷却, 再经四口分流阀汇聚成一路回到低温恒温箱。

测试内容: 无热管理情况下, 电池箱的温升情况: 1) 不开启冷却情况下, 测试热管理系统通过储能换热器储冷吸收电池产热对三种产热工况下对 0.5 C 放电产热 2 小时热管理效果。2) 开启冷却情况下, 测试热管理系统对 0.5 C 放电产热 2 小时热管理效果。



试验装置实物图如图 8 所示。

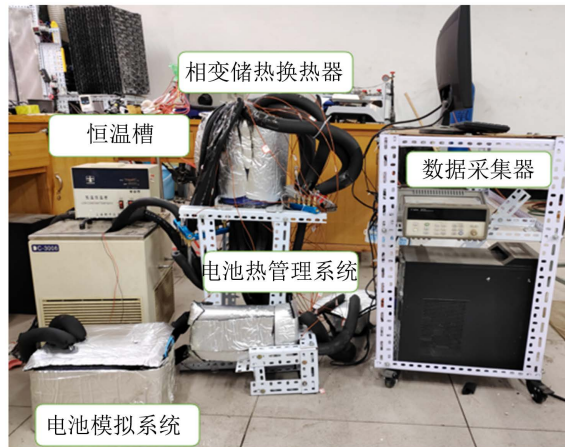


Figure 8. Test diagram of thermal management system  
图 8. 热管理系统实物图

### 3.2. 实验测试结果与分析

图 9 为三种测试条件下电池箱温度的变化曲线, 可以较为明显得看出在无热管理的情况下, 电池箱温度几乎呈直线上升, 最终温度达到  $66^{\circ}\text{C}$ , 而通过本文设计的热管理系统对电池箱实施热管理, 电池箱温度可有效保持在  $45^{\circ}\text{C}$  以内, 其中不开启冷却与开启冷却的电池箱温升与通过对储能换热器进行仿真分析预测的结果相同, 电池箱温度呈现先减小后升高的趋势, 电池箱温度开始缓慢升高, 但最终不开启冷却与开启冷却的电池箱温度分别为  $44.6^{\circ}\text{C}$ 、 $41.8^{\circ}\text{C}$ , 均在电池最佳工作温度  $20^{\circ}\text{C}\sim 45^{\circ}\text{C}$  以内。其中与仿真结果不同的是不开启冷却情况下电池箱温度在约 2000 s 降至最低温度  $41.2^{\circ}\text{C}$ 、开启冷却情况下电池箱温度在约 2500 s 降至最低温度  $41.3^{\circ}\text{C}$ , 其有效热管理时间相较仿真结果有所延长, 这是由于热管理系统采用储能换热器与液冷系统耦合的方式, 通过循环水路吸收电池箱温度传递给储能换热器, 一部分热量被循环水路吸收, 如图 10 为循环水路的温升曲线, 可以看出约 800 s 左右循环水温温升出现拐点达到  $35^{\circ}\text{C}$ 。

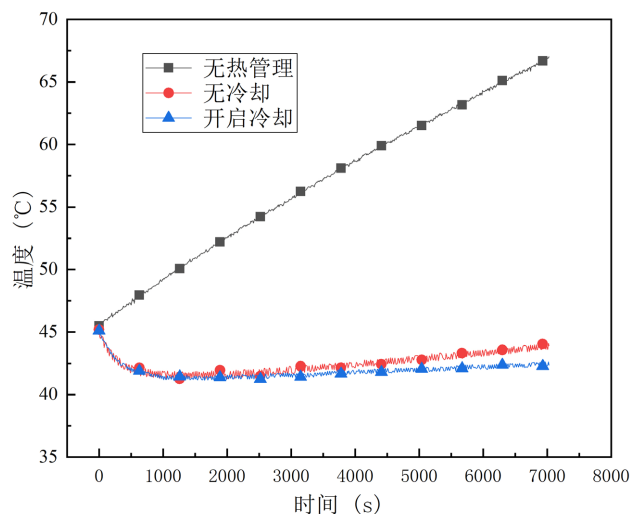


Figure 9. Temperature variation curves of battery box under three test conditions  
图 9. 三种测试工况电池箱温度变化曲线

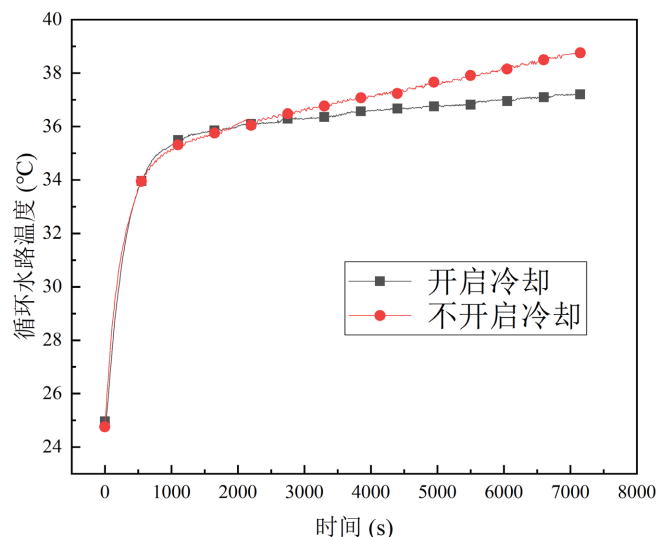


Figure 10. Temperature rise curve of circulating waterway water temperature  
图 10. 循环水路水温温升曲线

#### 4. 结论

本文利用相变材料可储热也可储冷的特性, 设计了一种相变储能多管换热器使其与液冷系统耦合, 实现夏季多管换热器储冷用于吸收电池产热, 冬季多管换热器储热为乘员舱提供热量, 通过仿真分析了储能换热器工作过程中换热功率与传热机理, 并制作出了热管理系统实物进行热管理效果的测试, 得出以下结论:

1) 通过仿真分析储能换热器在夏季储冷吸热工作中随着换热内管周围的 PCM 的融化液相界面不断扩张, 传热内阻也不断增加换热功率呈不断递减状态, 开启与不开启冷却的有效热管理时间分别为约 1200 s、2000 s。通过对仿真结果的分析可预测实际热管理系统中, 电池箱温度将呈现先降低后升高的趋势。

2) 仿真分析储能换热器在冬季储热放热工作中, 在原模型下可有效为储能多管换热器在一小时内可为乘员舱提供 1948.1 kJ 热量用于乘员舱供暖, 可提供平均热负荷为 541 W, 冬季电动车启动前 15 分钟可为乘员舱提供 744.7 kJ 热量, 可提供平均热负荷为 827 W。

3) 通过对热管理系统进行实验测试, 证明该热管理系统可有效地将电池箱温度稳定在最佳温区内, 且电池温度变化趋势与预测一致, 呈现先减小后升高趋势。其中, 通过液冷系统与储能换热器的耦合有效延长实际热管理系统的有效热管理时间。

本研究证明了采用基于 PCM 的多管换热器与液冷系统耦合的动力电池热管理系统的潜力, 证明了该热管理系统具有良好的热管理效果和可靠性, 为其在电动车的应用提供了参考依据。

#### 参考文献

- [1] Du, S., Lai, Y., Ai, L., et al. (2017) An Investigation of Irreversible Heat Generation in Lithium Ion Batteries Based on a Thermo-Electrochemical Coupling Method. *Applied Thermal Engineering*, **121**, 501-510. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.04.077>
- [2] Antti, V. and Salminen, J. (2012) Lithium Ion Battery Production. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, **46**, 80-85. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2011.09.005>
- [3] Wang, Q., Jiang, L., Yu, Y. and Sun, J.H. (2019) Progress of Enhancing the Safety of Lithium Ion Battery from the Electrolyte Aspect. *Nano Energy*, **55**, 93 -114. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.10.035>
- [4] 姜水生, 何志坚, 文华. 基于电-热耦合模型的锂离子电池组热管理系统设计与优化[J]. 中国机械工程, 2018,

- 29(15): 1847-1853.
- [5] Khateeba, S.A. and Amiruddina, S. (2005) Thermal Management of Li-Ion Battery with Phase Change Material for Electric Scooters: Experimental Validation. *Journal of Power Source*, **142**, 345-355. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.09.033>
- [6] 白焯. 两相热虹吸回路耦合相变储热的研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- [7] Mehrabi-kermani, M., Houshfar, E. and Ashjaee, M. (2019) A Novel Hybrid Thermal Management for Li-Ion Batteries Using Phase Change Materials Embedded in Copper Foams Combined with Forced-Air Convection. *International Journal of Thermal Sciences*, **141**, 47-61. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.03.026>
- [8] Huang, Q., Li, X., Zhang, G., Zhang, J.Y., et al. (2018) Experimental Investigation of the Thermal Performance of Heat Pipe Assisted Phase Change Material for Battery Thermal Management System. *Applied Thermal Engineering*, **141**, 1092-1100. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.06.048>
- [9] Du, J., Chen, Z. and Li, F. (2018) Multi-Objective Optimization Discharge Method for Heating Lithium-Ion Battery at Low Temperatures. *IEEE Access*, **6**, 44036-44049. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2837652>
- [10] Jung, J. H. (2015) C1811VTS0100 Vehicle Technical Specification. Fisker Automotive and Terchnology Group, America.
- [11] 杨林. 纯电动汽车动力电池热管理系统设计及仿真优化[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [12] Haillot, D., Py, X., Goetz, V. and Benabdelkarim, M. (2008) Storage Composites for the Optimisation of Solar Water Heating Systems. *Chemical Engineering Research and Design*, **86**, 612-617. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2008.01.007>
- [13] 顾庆军. 膨胀石墨基复合相变材料的结构、性能及其应用研究[D]: [硕士学位论文]. 赣州: 江西理工大学, 2020.
- [14] Ghalambaz, M., Doostani, A., Chamkha, A.J. and Ismael, M.A. (2017) Melting of Nanoparticles-Enhanced Phase-Change Materials in an Enclosure: Effect of Hybrid Nanoparticles. *International Journal of Mechanical Sciences*, **134**, 85-97. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.09.045>
- [15] Esapour, M., Hamzehnezhad, A., Rabienataj Darzi, A.A. and Jourabian, M. (2018) Melting and Solidification of PCM Embedded in Porous Metal Foam in Horizontal Multi-Tube Heat Storage System. *Energy Conversion and Management*, **171**, 398-410. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.086>