

基于相变材料（PCM）的动力电池热管理系统温度波动抑制研究

翟帅琦

郑州丰元电力工程设备有限公司，河南省郑州市，450199；

摘要：随着电动汽车产业的快速发展，动力电池的热管理问题日益凸显。动力电池在工作过程中会产生大量的热量，若不能有效管理，将会导致电池性能下降，甚至引发安全问题。相变材料（PCM）因其独特的热吸收和释放特性，在动力电池热管理系统中展现出巨大的应用潜力。本研究旨在探讨基于 PCM 的动力电池热管理系统在温度波动抑制方面的效果与策略。

关键词：相变材料（PCM）；动力电池热管理系统；温度波动抑制

DOI：10.69979/3060-8767.25.10.005

引言

动力电池作为电动汽车的核心部件，其性能与安全直接关系到整车的运行效率和乘客的生命安全。然而，动力电池在工作过程中会产生大量的热量，这些热量若不能得到及时有效的管理，将会导致电池温度升高，进而影响电池的性能、寿命以及安全性。传统的动力电池热管理系统虽然在一定程度上能够缓解这一问题，但仍存在诸多不足，如散热效率低下、能耗高等。因此，探索一种更为高效、可靠的动力电池热管理方案显得尤为重要。

1 动力电池热管理系统概述

1.1 传统的动力电池热管理系统

传统动力电池热管理系统主要分为空气冷却、液体冷却与热管冷却三类，各有适用场景但均存在局限性。空气冷却系统通过风机驱动空气流经电池间隙带走热量，其结构简单、成本低、维护方便，但空气比热容小、换热系数低，散热效率有限，在高倍率充放电工况下难以快速抑制温度升高，且易受环境温度影响，导致温度波动较大。液体冷却系统以水、乙二醇溶液等为介质，通过流道与电池直接或间接接触换热，换热效率比空气冷却高 5-10 倍，控温精度更优，但系统需配备水泵、换热器等部件，增加了重量、体积与能耗，且存在漏液风险，密封要求严苛。热管冷却系统利用热管内工质的相变传热，具有导热系数高、等温性好的特点，可快速将局部热量转移至散热端，但热管的传热能力受长度、安装角度限制，且成本较高，难以在大型电池模组中大规模应用。此外，传统系统多以“被动散热”或“单一

主动调控”为主，对动态工况下的温度波动响应滞后，难以实现精细化的波动抑制。

1.2 PCM 在动力电池热管理系统中的应用优势

相变材料（PCM）凭借潜热储热特性，在动力电池热管理中展现出独特优势，成为传统系统的理想补充或替代方案。其核心优势在于高效储热与被动控温能力：PCM 在相变温度区间吸收或释放大潜热，当电池产热时，PCM 通过熔化过程吸收热量，延缓温度上升速度；当环境温度降低或电池放热减少时，PCM 凝固释放热量，抑制温度骤降，无需额外能耗即可实现温度波动的自然平抑。其次，温度控制稳定性强：PCM 在相变过程中温度基本保持恒定，可将电池温度稳定在接近相变点的区间，有效缩小温度波动幅度，同时通过填充 PCM 可填充电池模组的间隙，减少空气热阻，提升温度均匀性。此外，PCM 系统结构紧凑，可根据电池模组的形状灵活设计，不额外增加过多重量与体积，且无漏液、噪声等问题，可靠性高。与传统系统结合时，PCM 可作为“缓冲层”，减少主动冷却系统的启停频率，降低整体能耗，尤其适用于新能源汽车、储能电站等存在间歇式充放电与复杂环境工况的场景。

2 问题

2.1 PCM 热导率低导致的温度响应滞后问题

多数常用 PCM（如石蜡类、脂肪酸类）的热导率较低（ $0.2-0.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ），这一固有缺陷导致其热量传递速度缓慢，形成温度响应滞后问题。当动力电池高倍率充放电产生大量热量时，热量难以快速从电池表面传递至 PCM 内部，导致 PCM 表层先熔化，而核心区域仍处于

固态, 储热能力无法充分发挥, 电池局部温度易快速升高, 形成“热瓶颈”; 反之, 当电池温度下降时, PCM 内部的热量也难以快速释放至电池表面, 无法及时抑制温度骤降, 导致温度波动幅度增大。此外, 热导率低还会加剧 PCM 内部的温度梯度, 使靠近电池的 PCM 与远离电池的 PCM 相变进程不同步, 进一步削弱温度波动抑制效果, 尤其在大型电池模组中, 这一问题更为突出, 可能导致局部过热与整体控温不均的双重矛盾。

2.2 PCM 相变潜热衰减与泄漏问题

PCM 在长期循环相变过程中, 易出现潜热衰减与泄漏现象, 影响热管理系统的长期稳定性。潜热衰减主要源于两方面: 一是相变材料的老化, 反复的熔化-凝固循环会导致 PCM 分子结构发生变化(如石蜡的晶型转变、脂肪酸的氧化), 或因局部过热导致材料分解, 使相变潜热降低; 二是 PCM 与封装材料的相互作用, 部分 PCM 会与金属、塑料等封装材料发生物理吸附或化学反应, 导致有效相变成分减少, 储热能力下降。泄漏问题则与封装结构及 PCM 特性相关: 固态 PCM 在熔化后变为液态, 体积会膨胀 5%-15%, 若封装结构强度不足或密封性能不佳, 易因膨胀压力导致开裂, 引发 PCM 泄漏; 此外, 部分 PCM 具有一定的渗透性, 长期使用中会缓慢渗透过封装材料, 造成材料损耗, 同时污染电池模组, 影响电池性能与安全性。

3 PCM 动力电池热管理系统温度波动抑制研究方法

3.1 温度波动抑制的指标体系

构建科学的指标体系是评估 PCM 热管理系统温度波动抑制效果的基础, 需从温度稳定性、均匀性、响应性等多维度建立量化标准。核心指标包括: 温度波动幅度(电池在设定周期内最高温度与最低温度的差值, 通常要求不超过 5℃)、温度波动频率(单位时间内温度超出最优区间的次数, 反映控温稳定性)、相变响应时间(PCM 从开始相变到达到目标相变率的时间, 衡量热量传递效率)、最大温差(电池模组内单体电池间的最大温度差, 要求不超过 3℃, 避免局部波动过大)。辅助指标涵盖: PCM 潜热利用率(实际参与储热的潜热与总潜热的比值, 评估材料利用效率)、系统能耗(主动辅助冷却/加热时的能耗, 衡量经济性)、循环稳定性(经过多次充放电循环后, 温度波动指标的变化率, 评估长期可靠性)。指标的测量需结合多参数传感技术, 实时采集电池单体温度、PCM 温度、产热速率等数据, 通过数据处理与分析, 实现对温度波动抑制效果的全面、客

观评价。

3.2 温度波动抑制的仿真分析

仿真分析是研究 PCM 热管理系统温度波动抑制的高效工具, 通过构建数学模型模拟系统运行过程, 为优化设计提供理论支撑。数值建模是核心环节, 需建立多物理场耦合模型: 一是热传导-相变耦合模型, 基于焓法或等效热容法描述 PCM 的相变过程, 结合傅里叶定律计算电池与 PCM 间的热量传递; 二是电化学-热耦合模型, 通过动力电池的电化学反应方程计算产热速率, 将其作为热模型的热源输入; 三是结构-热耦合模型, 考虑 PCM 封装结构的热变形对传热的影响。仿真平台通常采用 ANSYS、COMSOL 等有限元软件, 模拟不同工况下(如不同充放电倍率、环境温度、PCM 参数)的温度场分布与温度变化曲线, 分析 PCM 的相变进程、热量传递路径对温度波动的影响。通过仿真可快速迭代优化 PCM 的类型选择、用量配比、封装结构参数, 预测系统在动态工况下的温度波动特性, 减少物理实验的成本与周期, 同时为实验方案设计提供指导。

3.3 基于机器学习的温度波动预测与优化方法

基于机器学习的研究方法为 PCM 热管理系统温度波动抑制提供了智能化手段, 通过数据驱动实现预测与优化的自动化。数据采集与预处理阶段, 需通过实验或仿真获取大量样本数据, 包括输入参数(PCM 性能参数、工况参数、系统结构参数)与输出参数(温度波动指标), 并进行数据清洗、归一化处理, 构建训练数据集。预测模型构建采用多种算法: 如 BP 神经网络、LSTM(长短期记忆网络)用于预测动态工况下的温度变化趋势, 提前识别温度波动风险; 随机森林、支持向量机用于分析各输入参数对温度波动的影响权重, 明确关键优化方向。智能优化阶段, 结合遗传算法、粒子群优化算法, 以温度波动幅度最小化为目标, 对 PCM 参数(如相变温度、潜热)、封装结构(如厚度、材质)进行多变量协同优化, 生成最优设计方案。该方法能有效处理系统的非线性、耦合特性, 提升温度波动预测的准确性与优化效率, 尤其适用于复杂动态工况下的系统设计。

3.4 温度波动抑制的实验研究

实验研究是验证 PCM 热管理系统温度波动抑制效果的最终手段, 需构建完善的实验平台与测试流程。实验平台搭建包括: 动力电池模拟模组(采用真实电芯或发热模拟件, 模拟不同充放电特性)、PCM 热管理装置(根据设计方案制作, 含 PCM 填充层、封装结构)、环境模拟舱(控制温度、湿度等环境条件)、数据采集系统(配

备热电偶、红外热像仪、功率分析仪等，实时采集温度、电压、电流等数据）。实验方案设计需覆盖静态与动态工况：静态实验（固定充放电倍率、环境温度）用于测试系统的基础控温能力与温度波动幅度；动态实验（模拟工况切换、环境温度突变）用于评估系统的动态响应性能与波动抑制效果；长期循环实验（连续数百次充放电）用于验证系统的循环稳定性。

4 PCM 动力电池热管理系统温度波动抑制策略优化

4.1 PCM 材料优化

PCM 材料优化是提升温度波动抑制能力的根本途径，通过材料改性与复合设计，改善其热性能与稳定性。热导率增强改性是核心方向：采用添加高导热填料（如石墨烯、碳纳米管、金属粉末）的方法，构建导热网络，提升 PCM 的热导率，例如添加 5% 的石墨烯可使石蜡类 PCM 的热导率提升 3-5 倍，加速热量传递，减少温度响应滞后；此外，采用多孔介质（如金属泡沫、膨胀石墨）吸附 PCM，利用多孔结构的高导热性与吸附能力，同时提升热导率与防泄漏性能。相变性能优化通过调控 PCM 的相变温度与潜热，使其匹配动力电池的工作需求：采用复合 PCM（如将不同相变温度的石蜡按比例混合），拓宽相变温度区间，增强对不同工况的适配性；通过化学修饰（如接枝共聚）改善 PCM 的分子结构，提升相变潜热与循环稳定性，减少潜热衰减。功能性改性则针对特殊需求，如添加阻燃剂提升 PCM 的防火性能，添加抗氧化剂延缓材料老化，进一步保障系统安全性与使用寿命。

4.2 PCM 封装结构优化

封装结构优化是保障 PCM 性能发挥、抑制温度波动的关键，需兼顾传热效率、结构强度与密封性能。传热增强型封装设计通过优化结构提升热量交换效率：采用蜂窝状、翅片式封装结构，增加 PCM 与电池的接触面积，缩短传热路径；设计贯通式流道，使 PCM 在相变过程中可流动，促进内部热量对流，减少温度梯度。柔性封装结构适用于异形电池模组，采用柔性高分子材料（如硅胶、聚酰亚胺）作为封装基材，结合热封工艺实现密封，既能紧密贴合电池表面，又能适应 PCM 相变时的体积膨胀，减少开裂风险；在封装内部设置缓冲层（如弹性泡沫），进一步吸收体积变化产生的应力。集成化封装设计将 PCM 封装与电池模组结构一体化，如将 PCM 填充于

电池单体之间的支架内，或制作成 PCM-散热板复合结构，简化系统结构的同时，提升空间利用率与传热效率，避免因封装与电池匹配不佳导致的温度波动问题。

4.3 冷却系统优化

通过冷却系统与 PCM 的协同优化，可提升动态工况下的温度波动抑制能力，实现主动与被动控温的高效结合。复合冷却系统设计将 PCM 与传统冷却方式结合：PCM 作为被动储热层，吸收电池常规产热，平抑日常温度波动；当 PCM 达到完全熔化状态或面临高倍率工况时，主动冷却系统（如微型液冷流道、风冷风机）自动启动，快速带走多余热量，避免温度骤升；在低温环境下，可集成加热元件（如电热膜），通过 PCM 的储热特性均匀释放热量，抑制温度骤降。智能温控策略优化基于传感器与控制器的协同，实现冷却系统的自适应调控：通过温度传感器实时监测电池与 PCM 温度，控制器根据温度变化率与相变状态，自动调整主动冷却系统的启停时机与功率（如调节液冷流量、风机转速），使冷却能力与产热速率动态匹配；结合机器学习算法，根据历史运行数据优化调控参数，提升对复杂动态工况的适配性。流场与结构匹配优化通过仿真与实验优化冷却系统的流道布局，确保冷却介质均匀流经 PCM 与电池表面，避免局部冷却不足导致的温度波动，同时减少冷却系统的能耗，实现高效与节能的统一。

5 结语

综上所述，PCM 在动力电池热管理系统中的应用展现出显著的温度波动抑制效果，为提升电池性能与安全性提供了新思路。然而，PCM 的热导率低、潜热衰减与泄漏等问题仍是制约其广泛应用的关键瓶颈。针对这些问题，本研究从材料优化、封装结构优化及冷却系统优化三个方面提出了解决方案，旨在进一步提升 PCM 动力电池热管理系统的综合性能。

参考文献

- [1] 李仁辉. 新能源微型卡车电池热管理系统优化设计研究[J]. 汽车知识, 2025, 25(08): 10-12.
- [2] 郑耀军. 新能源汽车动力电池热管理系统优化设计与性能研究[J]. 大众汽车, 2025, (07): 70-72.
- [3] 邓大成, 吴冬杰, 李阳, 郭婉晴. 新能源汽车动力电池热管理系统的故障诊断与维修技术研究[J]. 汽车维修技师, 2025, (12): 36-37.