

低温环境下动力电池热管理系统的动态传热特性及控温策略改进

马英魁

中维(河南)尼龙纤维科技有限公司, 河南省鹤壁市, 456761;

摘要: 随着电动汽车的普及和续航里程要求的提高, 动力电池的性能和安全性成为了研究的热点。在低温环境下, 动力电池的能量密度、循环寿命和安全性能都会受到严重影响, 这对动力电池热管理系统提出了更高的要求。本文旨在探讨低温环境下动力电池热管理系统的动态传热特性及控温策略改进。通过分析动力电池在低温环境下的热行为, 建立热管理系统传热模型, 揭示其动态传热机制。针对当前热管理系统存在的问题, 如加热效率低下、温度控制精度不足、能耗过高和适应性较差等, 本文提出了一系列控温策略的优化与改进措施, 并探索了新型控温技术在热管理系统中的应用前景。

关键词: 低温; 动力电池热管理; 动态传热特性; 控温策略改进

DOI: 10. 69979/3060-8767. 25. 10. 011

引言

目前随着全球对环境保护意识的增强和能源结构的转型, 电动汽车作为清洁能源的代表, 其市场占有率和应用范围正在迅速扩大。然而, 电动汽车在低温环境下的性能表现, 尤其是动力电池的性能, 成为了制约其进一步发展的关键因素。动力电池作为电动汽车的心脏, 其能量密度、循环寿命和安全性能直接影响到电动汽车的续航里程、使用寿命和行车安全。在低温条件下, 动力电池的内部化学反应速率减缓, 电解液粘度增加, 导致电池性能显著下降。这不仅影响了电动汽车的续航里程, 还可能对电池造成永久性损害, 缩短其使用寿命。

1 低温环境下动力电池热管理的重要性

1.1 低温对动力电池能量密度的影响

动力电池的能量密度直接决定了新能源设备的续航能力, 而低温环境会对这一核心指标产生显著制约。在低温条件下, 电池内部电解质的离子迁移速率会大幅降低, 电极材料的活性也会受到抑制, 导致电池在充放电过程中无法充分利用电极与电解质界面的化学反应位点, 进而使得实际可输出的电能低于额定能量值。这种能量密度的衰减并非暂时性现象, 长期处于低温环境中, 还可能引发电极材料的结构劣化, 进一步加剧能量密度的不可逆下降, 严重影响新能源设备的使用效率和用户体验。

1.2 低温对动力电池循环寿命的冲击

循环寿命是衡量动力电池经济性和可靠性的关键

参数, 低温环境会通过多种机制加速电池循环寿命的衰减。在低温充电过程中, 电池负极容易出现锂枝晶析出的问题, 这些锂枝晶会逐渐刺穿隔膜, 导致电池内部发生微短路, 不仅会降低电池的充放电效率, 还会引发安全隐患。同时, 低温下电池的充放电深度受到限制, 为满足设备的用电需求, 电池需要更频繁地进行充放电循环, 这会加速电极材料的老化和电解质的分解, 从而缩短电池的使用寿命。

1.3 低温对动力电池安全性能的威胁

安全性能是动力电池应用的首要前提, 低温环境会显著增加电池的安全风险。一方面, 低温下电池的内阻会大幅增加, 在充放电过程中会产生大量的热量, 若热量无法及时散发, 会导致电池温度急剧升高, 引发热失控现象, 造成电池起火、爆炸等严重安全事故。另一方面, 低温会降低电池的抗冲击、抗振动能力, 电池的外壳和内部结构容易在外界因素的作用下发生损坏, 导致电池内部短路或电解液泄漏, 进一步加剧安全风险。此外, 低温下电池的充电接受能力下降, 若采用常规的充电方式, 容易导致电池过充, 引发电池内部化学反应失控, 同样会对电池的安全性能造成威胁。

2 低温环境下动力电池热管理系统的动态传热特性分析

2.1 动力电池在低温环境下的热行为研究

在低温环境中, 动力电池的热行为呈现出复杂的动态变化特征。从热量产生角度来看, 电池在充放电过程

中主要通过电化学极化、欧姆极化和浓差极化产生热量，低温下这些极化现象会更加明显，导致热量产生速率加快。同时，电池内部的副反应也会产生一定的热量，虽然在正常温度下副反应程度较轻，但低温环境可能会改变副反应的反应路径和速率，使得热量产生规律更加复杂。从热量传递角度来看，低温下电池内部的传热系数会降低，热量在电池内部的传递速率减慢，容易导致电池内部出现温度梯度，不同区域的温度差异较大。此外，电池与外部环境之间的热量交换也会受到影响，低温环境下电池向外界散热的速率加快，若热管理系统无法及时补充热量，会导致电池温度持续下降，进一步恶化电池的性能。

2.2 动力电池热管理系统传热模型的建立

建立准确的动力电池热管理系统传热模型是分析系统动态传热特性的关键。在模型建立过程中，需要综合考虑电池的结构特征、材料属性以及外部环境因素的影响。首先，根据电池的几何形状和内部结构，将电池划分为不同的控制体，如正极、负极、隔膜、电解液和外壳等，每个控制体视为一个独立的传热单元。其次，确定各控制体之间的传热方式，包括传导、对流和辐射传热，并根据材料的热物理性质和实际工况，确定各传热方式的传热系数。然后，考虑电池在充放电过程中的热量产生速率，将其作为模型的内热源，结合电池的充放电电流、电压等参数，建立热量产生速率与电池工作状态之间的数学关系。最后，通过数值计算方法，如有限元法、有限差分法等，对传热模型进行求解，得到电池内部和热管理系统各部件的温度分布和热量传递规律，为热管理系统的设计和优化提供理论依据。

3 问题

3.1 热管理系统加热效率低下

在低温环境下，热管理系统的加热效率是影响电池性能恢复的关键因素，目前许多热管理系统存在加热效率低下的问题。一方面，部分加热方式存在热量损失较大的情况，如空气加热方式，热量在传递过程中容易向外界环境散失，导致实际用于加热电池的热量较少；另一方面，加热元件的布局不合理，使得电池内部的温度分布不均匀，部分区域无法得到充分加热，影响了电池整体性能的恢复。此外，加热系统的控制策略不够优化，无法根据电池的实际温度和工作状态及时调整加热功率，导致加热过程中存在能量浪费现象，进一步降低了加热效率。

3.2 热管理系统温度控制精度不足

温度控制精度是衡量热管理系统性能的重要指标，目前部分热管理系统在低温环境下的温度控制精度无法满足电池的工作要求。造成这一问题的主要原因包括：温度传感器的测量误差较大，无法准确反映电池的实际温度；控制系统的响应速度较慢，当电池温度发生变化时，控制系统无法及时调整热管理策略，导致温度波动较大；此外，热管理系统各部件之间的协同工作能力较差，如加热元件和散热元件之间的切换不够顺畅，也会影响温度控制精度。温度控制精度不足会导致电池在工作过程中温度忽高忽低，不仅会降低电池的性能和寿命，还会增加安全风险。

3.3 热管理系统能耗过高

在低温环境下，为维持电池的正常工作温度，热管理系统需要消耗大量的能量，导致系统能耗过高。一方面，部分热管理系统的加热元件能量转换效率较低，如电阻加热方式，大量的电能转换为热能的过程中以其他形式散失，造成能量浪费；另一方面，热管理系统的控制策略不够智能，在电池不需要大量热量时，系统仍然保持较高的加热功率，进一步增加了能耗。此外，热管理系统的结构设计不合理，如散热通道堵塞、隔热性能较差等，也会导致系统能耗增加，降低新能源设备的续航能力。

3.4 热管理系统适应性较差

随着新能源设备应用场景的不断拓展，对动力电池热管理系统的适应性提出了更高的要求，但目前许多热管理系统的适应性较差，无法满足不同低温环境和工作工况的需求。在不同的低温环境下，外界温度、湿度、风速等因素存在较大差异，热管理系统需要根据这些因素及时调整工作模式和参数。然而，部分热管理系统的控制逻辑较为固定，无法根据外界环境的变化进行自适应调整，导致在某些工况下系统性能不佳。同时，不同类型的动力电池具有不同的热特性，如锂离子电池、钠离子电池等，对热管理系统的要求也存在差异，但目前许多热管理系统采用通用的设计方案，无法针对不同类型电池的特性进行个性化优化，影响了系统的适应性和适用性。

4 低温环境下动力电池热管理系统的控温策略

4.1 热管理系统控温目标及原则

动力电池热管理系统的控温目标是在低温环境下，将电池温度维持在适宜的工作范围内，确保电池具有良好的性能、较长的寿命和较高的安全性能。具体而言，控温目标包括：在充电和放电过程中，将电池的工作温

度控制在 15–35℃ 之间，避免电池温度过低或过高；减小电池内部的温度梯度，确保电池各区域的温度均匀性，一般要求电池内部的最大温度差不超过 5℃；同时，在满足电池性能要求的前提下，尽量降低热管理系统的能耗，提高新能源设备的续航能力。

为实现上述控温目标，热管理系统需要遵循以下原则：首先，安全性原则，控温策略的制定必须以保证电池的安全性能为首要前提，避免因控温不当引发安全事故；其次，高效性原则，热管理系统应能够快速、有效地调节电池温度，在最短的时间内将电池温度恢复到适宜的工作范围，减少对电池性能的影响；再次，经济性原则，在满足控温要求的前提下，应尽量降低热管理系统的成本和能耗，提高系统的经济性和实用性；最后，适应性原则，控温策略应具有一定的灵活性和适应性，能够根据不同的低温环境、电池类型和工作工况进行调整，确保系统在各种情况下都能正常工作。

4.2 低温环境下热管理系统控制策略分析

在低温环境下，动力电池热管理系统的控制策略主要包括预热控制策略、保温控制策略和动态调节控制策略。预热控制策略是在电池启动前或充电前，通过加热元件对电池进行预热，将电池温度提升到适宜的工作温度范围。在预热过程中，需要根据电池的初始温度、目标温度和加热功率，合理控制预热时间和加热方式，避免过度预热造成能量浪费。保温控制策略是在电池正常工作过程中，通过隔热材料和温度控制系统，减少电池与外界环境之间的热量交换，维持电池温度的稳定。保温控制策略需要根据外界环境温度的变化，及时调整隔热措施和加热功率，确保电池温度不会因外界环境的变化而大幅波动。

动态调节控制策略是根据电池的工作状态和温度变化情况，实时调整热管理系统的工作模式和参数。例如，在电池充电过程中，随着充电电流的变化，电池的产热速率也会发生变化，动态调节控制策略可以根据充电电流的大小和电池温度的变化，实时调整加热功率和散热强度，确保电池温度始终维持在适宜的范围内。同时，动态调节控制策略还可以结合电池的 SOC (State of Charge) 状态，在不同的 SOC 阶段采用不同的控温策略，如在低 SOC 阶段，适当提高电池温度以提高充电接受能力，在高 SOC 阶段，降低电池温度以避免过充引发安全风险。

4.3 控温策略的优化与改进

为进一步提高低温环境下动力电池热管理系统的控温效果，需要对现有的控温策略进行优化与改进。从控制算法角度来看，可以引入先进的智能控制算法，如模糊控制、神经网络控制、模型预测控制等，提高系统的控制精度和响应速度。例如，模糊控制算法可以根据电池温度、温度变化率等模糊变量，制定相应的控制规则，实现对热管理系统的精准控制；神经网络控制算法可以通过对大量实验数据的学习，建立电池温度与热管理系统参数之间的非线性映射关系，提高系统的自适应能力。

从系统集成角度来看，可以将热管理系统与电池管理系统 (BMS)、整车控制系统等进行深度集成，实现信息共享和协同控制。通过 BMS 实时获取电池的温度、电压、电流等参数，整车控制系统根据车辆的行驶状态和外界环境条件，制定合理的热管理策略，实现对热管理系统的动态调节。同时，还可以将热管理系统与其他系统，如空调系统、制动能量回收系统等进行结合，实现能量的综合利用，降低系统能耗。

5 结语

综上所述，低温环境下动力电池热管理系统的研究具有重要的理论和实际意义。通过对动力电池在低温环境下的热行为进行深入分析，建立了准确的传热模型，揭示了系统动态传热特性的本质。同时，针对当前热管理系统存在的问题，提出了相应的控温策略和优化方法，为提高电池在低温环境下的性能和安全性能提供了有效的解决方案。未来，随着新型控温技术的不断涌现和应用，动力电池热管理系统的性能将进一步得到提升，为新能源设备的广泛应用和发展奠定坚实的基础。

参考文献

- [1] 付鑫, 唐雨, 侯金川, 等. 新能源汽车动力电池热失控时整车液冷策略研究[J]. 环境技术, 2025, 43 (1): 12–15.
- [2] 陈中海, 李晓宇. 新能源汽车动力电池热管理优化研究[J]. 汽车测试报告, 2024 (7): 58–60.
- [3] 黄沅辉, 解铭时, 赵正国, 等. 浅析新能源汽车动力电池热管理技术[J]. 能源与节能, 2023 (6): 20–27, 134.
- [4] 张凯. 新能源汽车动力电池热管理系统研究[J]. 专用汽车, 2022 (9): 18–20.
- [5] 张海燕. 基于新能源汽车动力电池管理系统的优化设计[J]. 汽车与新动力, 2022, 5 (2): 36–38.