

电池包结构设计中的热管理技术与优化方案研究

彭梦龙

宁德时代新能源科技股份有限公司 福建宁德 352100

摘要: 随着电动汽车和储能设备的快速发展, 电池包的热管理问题成为影响电池性能和安全性的重要因素之一。本文通过分析电池包在工作过程中产生的热量和其对电池寿命的影响, 探讨了多种热管理技术的应用, 提出了基于优化设计的热管理方案。通过理论分析和实验验证, 本研究提出了一种适用于高功率密度电池包的高效热管理方案, 旨在为电池包的安全运行和长寿命提供技术支持。在研究过程中, 不仅关注单一散热技术的优化, 更注重多种技术的协同应用, 通过构建综合评估体系, 对热管理方案的能效、成本、可靠性等进行全面考量, 为不同场景下的电池包热管理提供多元化解决方案。

关键词: 电池包; 热管理; 优化设计; 热传导; 散热方案

引言

随着全球能源结构转型的加速, 电动汽车以及储能系统的应用日益广泛。电池包作为其核心部件之一, 在提供高效能量输出的同时也面临着热管理的挑战。电池工作时, 特别是在高负载和高功率的情况下, 会产生大量的热量。如果热量得不到有效散逸, 会导致电池温度过高, 进而影响电池性能、缩短使用寿命, 甚至发生安全事故。因此, 如何在保证电池包工作性能的同时, 进行有效的热管理成为了亟待解决的重要课题。从实际应用来看, 电动汽车在快充过程中, 电池包的温度可能在短时间内急剧上升, 若热管理不当, 轻则导致充电效率下降, 重则引发电池鼓包、起火等安全隐患。储能设备在电网调峰填谷过程中, 需要频繁充放电, 电池包长期处于动态温度变化中, 不均匀的温度分布会加速电池单体的老化差异, 降低整个电池包的循环寿命。据行业调研显示, 温度每超过最佳工作范围 5°C , 电池的使用寿命可能缩短 20% 以上, 这充分凸显了热管理的重要性。本文首先介绍了电池包在使用过程中产生热量的基本原理和影响因素, 接着分析了当前电池包热管理的常见技术, 包括空气冷却、液体冷却以及相变材料应用等。通过研究这些技术的优缺点, 本文提出了适用于不同工作环境和需求的热管理优化方案, 不仅关注技术层面的创新, 还兼顾工程应用中的可行性与经济性, 力求为电池包热管理的实际应用提供全面且实用的指导。

1 电池包热管理的理论基础

1.1 电池热管理的基本原理

电池在充放电过程中, 电池内部的化学反应会导致一定的热量产生。特别是高功率电池包, 热量产生速度较快, 温度上升也较为显著。温度过高不仅会降低电池的效率, 还可能引发电池热失控的现象。热管理的基本目标就是通过有效的散热手段将电池包内的热量及时带走, 保持电池的温度在一个合适的范围内, 避免过热现象发生。这需要结合电池的工作特性, 如充放电倍率、循环寿命等, 制定针对性的散热策略。同时, 还要考虑温度均匀性, 防止局部过热导致电池单体性能失衡, 影响整个电池包的一致性。通过建立热平衡模型, 分析热量产生与散发的动态关系, 可为热管理系统设计提供理论支撑, 确保散热效率与电池工作需求相匹配。

1.2 电池热管理的影响因素

影响电池包热管理的因素主要包括电池自身的发热特性、散热材料的性能、工作环境的温度以及电池包的结构设计等。电池的内部结构、充放电速率、工作电压等都会影响到热量的产生; 而电池包的散热方式和散热效率直接决定了温控效果的优劣。除此之外, 外部环境温度过高或过低, 也会影响电池包的散热效果。例如, 在高温环境下, 散热系统需承受更大负荷才能维持电池正常工作温度; 低温环境则可能导致电池活性下降, 间接影响热量产生与散热平衡。电池包的密封性能也会对热管理产生影响, 密封过严可能阻碍热量散发, 密封不当则可能导致灰尘、湿气侵入, 影响电池性能和散热系统运行。

2 电池包热管理技术现状

2.1 空气冷却技术

空气冷却是一种最常见且简便的热管理方法，广泛应用于低功率电池包及一般的电池散热需求中。其基本原理是通过在电池包内部或外部设置散热通道，借助空气流动来带走电池工作过程中产生的热量。空气冷却系统的结构相对简单，成本较低，易于实现和维护。常见的空气冷却方式有自然对流和强制对流两种形式，其中强制对流方式通常需要使用风扇来推动空气流动。尽管空气冷却能够有效降低电池表面温度，提升散热效果，但其散热效率相对较低。特别是在高功率密度的电池包中，空气冷却的散热能力有限，可能无法满足高功率放电时的热管理需求。此外，空气冷却技术在某些应用中可能会导致较大的噪音，这也是其应用的一大局限。因此，如何提升空气冷却的效率，降低噪音，仍是该技术面临的挑战。

2.2 液体冷却技术

液体冷却技术相比空气冷却具有更高的散热效率，尤其适用于高功率电池包的热管理。液体冷却系统通过循环流动的冷却液体（如水、乙二醇溶液等）将电池包产生的热量带走。液体的热传导能力较空气更强，能够快速有效地降低电池的温度，保证电池工作在最佳的温度范围内，避免过热现象的发生。液体冷却技术广泛应用于电动汽车和储能设备中，尤其是在高功率密度和快速充电的情况下，液体冷却能够有效缓解电池的热积累。然而，液体冷却技术也存在一定的挑战。首先，液体冷却系统的设计和安装相对复杂，涉及泵、管道、散热器等多个组件，增加了系统的重量和成本。其次，冷却液的腐蚀性和稳定性问题需要特别关注，尤其是在高温环境下，冷却液可能会导致材料腐蚀，影响系统的长期稳定性。因此，液体冷却技术需要在系统设计和材料选择上进行优化，以提高其可靠性和效率。

2.3 相变材料应用

相变材料（PCM）在电池包热管理中的应用越来越受到关注。相变材料具有在特定温度范围内吸收或释放大热量的特性，可以在电池包中有效地平衡温度波动，避免过高或过低的温度对电池性能产生负面影响。相变材料通过在相变过程中吸收热量，帮助电池包维持温度稳定，尤其在温度波动较大的工作环境中，能够起到缓冲作用。相变材料通常具有较低的热导率，但在温度变化时能提供大量的热吸收或释

放效果，因此在电池包中应用时可以有效减少温度波动，保持电池处于较为稳定的工作环境。然而，相变材料的应用也面临一定的挑战。首先，材料的选择需要考虑其相变温度范围与电池工作温度的匹配，确保在电池包工作时能够及时吸收或释放热量。其次，相变材料的体积膨胀和收缩特性可能对电池包结构产生影响，因此在设计时需要合理布局，以避免材料变形对电池包造成压力。

3 电池包热管理优化方案设计

3.1 综合冷却方案设计

针对电池包的散热需求，本文提出了一种综合冷却方案，该方案结合了液体冷却与相变材料的优势，通过优化设计冷却液流动路径和相变材料的布局，最大化提高热传导效率。在这一方案中，液体冷却系统负责大部分热量的传递，能够迅速带走电池包产生的热量，保持电池处于稳定的温度范围。液体冷却系统的核心是冷板的设计，冷板与电池单体紧密接触，通过内部的流道将热量带走。流道的设计采用蛇形或叉形结构，确保冷却液能够均匀地流过冷板的各个区域，避免局部散热不足。同时，根据电池包内不同位置的产热情况，优化流道的截面积和流速，在产热较多的区域增加冷却液流量，提高散热效率。相变材料则起到缓冲作用，将其填充在电池单体之间的空隙以及电池包的外壳内侧。当电池包温度波动较大时，相变材料可以吸收过多的热量，防止温度过高，降低对电池性能的负面影响。相变材料的布局采用分层设计，在电池单体周围填充高潜热的相变材料，在电池包外壳处填充具有一定结构支撑作用的复合相变材料，既保证散热效果，又增强电池包的结构强度。此外，相变材料在相变过程中能够释放热量，当温度下降时，再释放吸收的热量，从而实现温度的有效平衡。为了提高相变材料的利用率，在设计中还考虑了相变材料的相变次数和寿命，选择循环稳定性好的材料，确保其在电池包的使用寿命内能够持续发挥作用。这种综合冷却方案通过两种技术的协同作用，既能应对持续的热量产生，又能处理突发的温度波动，使电池包在复杂工况下仍能保持稳定运行状态。例如，在电动汽车正常行驶时，液体冷却系统高效工作，及时带走电池产生的热量；当遇到急加速等高功率工况时，相变材料快速吸热，防止温度骤升。该方案为不同场景下的电池应用提供可靠的热管理保障，尤其适用于对温度稳定性要求较高的高功率密度电池包。

3.2 热传导优化设计

冷板或散热结构之间涂抹导热硅脂, 填充接触间隙, 减少热阻, 提高热传导效率。导热硅脂具有良好的导热性能和绝缘性, 能够有效降低电池与散热部件之间的接触热阻, 使热量更顺畅地传递到散热系统。此外, 优化散热器和热管布局, 使其与电池模块紧密接触, 能够最大程度地增强热量的传导和散逸, 从而实现高效的热管理。散热器采用翅片式结构, 增加与空气或冷却液的接触面积, 提高散热效率; 热管则利用相变原理快速传递热量, 将电池局部的高热量迅速转移到散热器上。热管的布置根据电池包内的温度分布情况, 在温度较高的区域增加热管数量, 确保热量能够及时导出。同时, 在结构设计中还需考虑气流或液流通道的顺畅性, 减少热量传递过程中的阻力, 确保热量能够快速导出, 进一步提升整体热管理效能。例如, 在空气冷却系统中, 合理设计进风口和出风口的位置, 避免气流短路, 保证冷空气能够均匀流过电池表面; 在液体冷却系统中, 优化管道的弯曲角度和长度, 减少流体阻力, 降低泵的能耗。通过 CFD 仿真对气流或液流场进行模拟分析, 不断优化通道结构, 使流场分布更加合理, 提高散热的均匀性和效率。

3.3 整体热管理系统的智能化优化

随着科技的不断发展, 智能化热管理系统逐渐成为电池包热管理的研究热点。智能化热管理系统通过实时监控电池包内部的温度数据, 能够精确控制冷却系统的运行状态, 确保电池始终处于最佳的工作温度范围内。系统通过安装温度传感器, 将电池包内各个位置的温度数据传输至控制系统, 控制系统根据实时数据调整冷却液流速、风扇转速等参数, 从而实现温度的精确调节。温度传感器采用分布式布置, 在电池包的不同区域(如电池单体表面、冷板进出口、相变材料填充区等)均安装传感器, 确保能够全面、准确地监测温度分布情况。传感器的采样频率可根据实际需求调整, 在高功率工况下提高采样频率, 以便及时捕捉温度变化。此外, 智能化系统还能够根据电池的充放电状态、外部环境温度等因素, 自动优化冷却系统的工作模式, 提高能效和响应速度。例如, 当电池处于快充状态时, 系统预判到会产生大量热量, 提前提高冷却系统的功率, 做好散热准备; 当外部环境温度较低时, 适当降低冷却系统的运行强度, 甚至关闭部分冷却

设备, 减少能量消耗。通过多参数的协同分析, 使冷却系统的运行更加智能化、节能化。同时, 系统可通过历史数据分析预测温度变化趋势, 提前调整冷却策略, 实现前瞻性温控, 避免温度大幅波动对电池造成损害, 让热管理从被动应对转为主动预防, 大幅提升电池包的安全性与使用寿命。系统内置的算法能够根据历史充放电数据、温度变化曲线、环境参数等, 建立温度预测模型, 对未来一段时间内的温度变化进行预测。当预测到某一区域温度可能超过阈值时, 提前调整该区域的散热参数, 如增加冷却液流量或提高风扇转速, 将温度控制在合理范围内。智能化系统还具备故障诊断和预警功能, 通过对传感器数据、设备运行参数的实时监测, 能够及时发现冷却系统中的异常情况(如泵故障、风扇停转、管道堵塞等), 并发出预警信号, 提醒工作人员及时维修。同时, 系统可根据故障情况自动采取应急措施, 如切换至备用冷却回路, 避免因冷却系统故障导致电池温度过高。为了提高系统的智能化水平, 还可引入人工智能技术, 通过机器学习不断优化控制算法。系统在运行过程中持续积累数据, 通过深度学习分析不同工况下的最佳控制策略, 使控制更加精准、高效。例如, 通过对大量不同路况下电动汽车电池包的温度数据和控制参数进行学习, 优化在复杂路况下的冷却策略, 进一步提升热管理效果。

4 总结

电池包的热管理问题直接影响到电池的性能、安全性以及使用寿命。本文通过对现有热管理技术的分析和比较, 提出了一种优化设计方案, 结合液体冷却、相变材料和智能化控制技术, 提高了热管理系统的效率。随着技术的不断发展, 未来电池包的热管理将更加智能化、精细化, 为电动汽车及储能设备的普及提供有力支持。

参考文献:

- [1] 张建东. 电池热管理系统设计与应用研究 [J]. 电池, 2022(14):45-48.
- [2] 李志强. 电池包热管理技术的研究进展 [J]. 电气工程, 2021(12):78-81.
- [3] 王强. 高效散热技术在电池包中的应用 [J]. 新能源技术, 2023(07):56-59.