

Simulation Study on Thermal Management of Electric Vehicle Battery Pack under the Coupling Effect of Multiple Physical Fields

Jianhua Ge

Guizhou Light Industry Vocational and Technical College, Guiyang, Guizhou, 550025, China

Abstract

With the rapid popularization of electric vehicles, the safety and thermal management of power batteries have received increasing attention. In this context, this paper establishes a thermal management simulation model for electric vehicle battery packs based on the multi physics field coupling method, and analyzes the temperature distribution and heat dissipation performance of battery packs under different cooling methods. The model combines the coupling effects of electrochemistry, thermodynamics, and fluid mechanics, and uses numerical simulation to compare the effects of air cooling, liquid cooling, phase change material cooling (PCM), and their composite cooling. Research has found that the composite cooling method of liquid cooling and PCM performs the best in reducing battery temperature and optimizing temperature uniformity, providing reliable guarantees for the safety and efficiency of electric vehicle battery packs. The research results of this paper provide a theoretical basis for the optimization design of the thermal management structure of battery packs.

Keywords

electric vehicles; battery pack; multi physics field coupling; thermal management; numerical simulation

多物理场耦合作用下电动汽车电池包热管理仿真研究

葛建华

贵州轻工职业技术学院, 中国·贵州 贵阳 550025

摘要

随着电动汽车的快速普及, 动力电池的安全与热管理问题受到越来越多关注。在此背景下, 论文基于多物理场耦合方法, 建立了电动汽车电池包热管理仿真模型, 分析了不同冷却方式下电池包的温度分布与散热性能。模型结合了电化学、热力学和流体力学的耦合效应, 使用数值仿真对比了风冷、液冷、相变材料冷却(PCM)及其复合冷却的效果。研究发现, 液冷与PCM复合冷却方式在降低电池温度和优化温度均匀性方面表现最佳, 为电动汽车电池包的安全性及效率提供了可靠保障。论文的研究结果为电池包热管理结构的优化设计提供了理论依据。

关键词

电动汽车; 电池包; 多物理场耦合; 热管理; 数值仿真

1 引言

电动汽车以其低排放、节能环保的特性, 正在逐步替代传统燃料汽车。然而, 电动汽车的核心——动力电池, 对其工作环境温度的敏感度极高。锂离子电池的最佳工作温度区间在 25°C~40°C, 为了保证电池一致性并延长使用寿命, 建议电池包内部温差控制在 5°C 以内, 过高或不均匀的温度分布会导致电池容量下降、循环寿命缩短, 甚至可能引发电池热失控, 带来安全隐患。因此, 构建高效的电池热管理系统 (BTMS) 对于电动汽车的性能和安全性至关重要^[1]。目前,

电池热管理技术主要包括风冷、液冷和相变材料 (PCM) 冷却。风冷系统可强制对流散热, 在能耗较低的情况下具有一定的温度均匀性, 但散热效率较低。液冷系统则通过液体流动的高效换热提升散热效率, 但需要更多的能量支持, 系统复杂性也更高。PCM 冷却利用材料相变的潜热维持温度稳定, 具有无能耗的优势, 但在高产热状态下存在散热失效的风险。近年来, 研究人员提出了液冷与 PCM 的复合冷却策略, 在提升散热效率的同时实现了更佳的温度分布均匀性。

2 电池包多物理场耦合模型

多物理场耦合模型是解决电池包热管理的有效工具, 本文采用电化学—热—流体力学多物理场耦合模型, 考虑电池包内部复杂的电化学反应、产热及流体流动对温度的影

【作者简介】葛建华 (1991-), 男, 蒙古族, 中国辽宁凌源人, 博士, 从事储能材料研究。

响。基于湘潭大学马增胜教授团队提出的热电化耦合模型，并结合了经典的 P2D 模型与电化学反应热、欧姆热的耦合特性，构建了电池产热与温度变化之间的双向反馈关系。

2.1 模型假设与基本方程

为了保证仿真精度的前提下有效简化计算，论文在构建电池包多物理场耦合模型时作出以下假设，简化了模型复杂性，使计算效率更高：

①各向同性材料假设：假设电池内部材料为各向同性，即电池的热导率在各个方向上相同。这样可忽略因温度梯度引起的材料热导率变化，从而简化热传导计算^[2]。

②冷却介质不可压缩性：冷却介质（无论是液冷或风冷系统）假设为不可压缩流体，使密度变化对流体流动影响可忽略，从而可以采用稳态流动假设，简化流体计算中的连续性方程。

③ PCM 材料的理想相变特性：对于采用相变材料（PCM）的冷却系统，假设 PCM 在相变温度附近保持温度恒定，表现出理想相变特性。即在固—液相变过程中，材料可瞬间释放或吸收相变潜热，使温度更趋于稳定。这一假设适用于近似描述相变材料的温度响应，但在实际情况中，若材料导热率较低，该模型可能会引发局部温度偏差。

④忽略辐射换热：由于电池组主要采用导热和对流冷却，辐射换热对整体热流场的影响较小，因此忽略电池之间的辐射换热，使模型热传递机制更为简化。

2.2 电化学反应与热力学方程

电池在充放电过程中产生热量，其主要热源包括电化学反应热 Q_r 、欧姆热 Q_j 和极化热 Q_p 。总的生热率可表示为：

$$q = Q_r + Q_j + Q_p$$

式中， Q_j 为欧姆热。与电池内阻和电流成正比，主要由欧姆定律描述。此项热源随着电池电流密度的增大和内阻的增加而增大，对整体产热有显著影响，在高倍率放电时的影响最大^[3]。 Q_r 为电化学反应热。在电池的充放电反应过程中，锂离子嵌入和脱嵌产生的热量。反应热量对电池温度和放电倍率敏感，在高温或高放电倍率下尤其明显，对电池的热稳定性和安全性有着重要作用。 Q_p 为极化热。由于电池电极材料的极化特性，电极电势与开路电压间的差异产生的热量。极化热随电流密度增大而上升，在高放电倍率时更为明显，通常基于极化曲线获得。

这些热源相互叠加，共同形成电池在不同放电倍率和温度条件下的动态热量生成。该模型中，产热率 q 被进一步输入到热场计算中，以求解温度场的变化，为电池整体热管理提供精确的热源数据。

2.3 流体力学与温度场的耦合

在液冷仿真中，冷却剂的流动状态直接影响电池包的散热效率与温度分布，因此本文采用 $k-\epsilon$ 湍流模型描述冷却液的流动状态。此模型以湍动能 k 和湍流耗散率 ϵ 表达湍流特性，可精确地捕捉流动中的湍流特征，具体的控制方

程为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla k &= P_k - \epsilon + \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) \\ \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla \epsilon &= C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} + \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \nabla \epsilon \right) \end{aligned}$$

式中， P_k 为表示湍流动能生成项，主要由速度梯度的剪切作用产生； μ_t 为湍流粘性系数； σ_k 和 σ_ϵ 为湍流 Prandtl 数，用于表示湍流动量扩散率与湍动能和湍流耗散率间的比例关系； $C_{1\epsilon}$ 和 $C_{2\epsilon}$ 为经验模型常数，本研究取典型值 1.44 和 1.92。

在数值计算中，湍动能 k 和湍流耗散率 ϵ 的求解使得我们能够获取流场中各点的湍流特性，在模型的每次迭代中实时耦合热流和温度信息，可动态调整冷却系统的工作状态^[4]。耦合界面负责传递热场与流场间的温度、换热系数等边界条件，使仿真能实时反馈温度变化及冷却效果，实现多物理场间的协调与交互。这种耦合仿真方法有效提升了电池热管理系统的精确性和实时性，为优化冷却结构和温度控制策略提供了可靠的数值依据。

3 不同冷却方式下的热管理仿真分析

本研究针对风冷、液冷、PCM 及液冷与 PCM 复合冷却进行了仿真比较，实验环境设定为电池包的环境温度为 293.15K，各种冷却条件下电池的温度分布和冷却效果见下文分析。

3.1 风冷效果分析

在风冷条件下，电池包的最高温度和温差随风速增加而逐渐下降，但风冷的冷却能力有限，难以在高放电倍率下满足热管理要求。对风道和电池布局进行优化，使风冷系统在低放电倍率下可以实现较好的温度均匀性，但散热效率不高。

3.2 液冷效果分析

液冷系统的冷却效率明显优于风冷，在冷却液流速为 0.1m/s 时，电池包的最高温度显著降低，温度均匀性略有下降。随冷却液速度增大，冷却效果增强，但过高的流速会增加能耗，不利于电动汽车续航。垂直冷却结构对流体流速均匀性影响较小，适用于电池间温差较小的应用场景。

3.3 PCM 冷却效果分析

PCM 冷却利用相变潜热维持温度稳定，能够在低至中等放电倍率下有效工作。由于 PCM 材料在高放电倍率下相变效率不足，难以完全吸收产热，进而引发冷却失效。因此，在产热较高的情况下，PCM 需结合其他冷却方式以增强散热性能。

3.4 液冷与 PCM 复合冷却

液冷与 PCM 复合冷却通过主被动结合的方式，实现了温度调节的动态控制。当电池产热较低时，PCM 进行被动冷却，无需开启液冷系统，从而节省能耗；当产热增加且相变储热无法满足散热需求时，液冷系统启动以加强散热。仿

真结果显示,该复合冷却方式在3C放电倍率下依然能够控制电池包的最高温度和温差在合理范围内,且温度分布更为均匀。

4 冷却管道布置的优化

在确定冷却方式后,冷却管道的布置与冷却剂流向的合理性对电池包的散热效果有着至关重要的影响^[9]。对不同布置结构(a型、b型、c型)进行对比分析后发现,管道的布局形式不仅影响冷却介质的流速均匀性,也直接关系到电池包温度分布的均匀性和整体散热效率(图1)。因此,为实现最优散热效果,我们逐步优化了冷却管道的排布和流向。

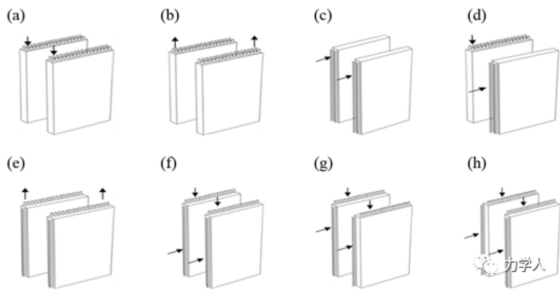


图1 不同管道布置和液体流向的散热结构

4.1 不同结构的对比与初步优化

首先,论文对a、b、c三种不同的单一结构进行了冷却性能的数值模拟和对比。其中,a型和b型分别采用从上到下和从下到上的竖管冷却方式,而c型采用了横向管道冷却。结果表明:

a型结构:冷却剂自上而下流动时,流速呈现较大不均匀性,冷却效果受重力影响较大。顶部温度较低,而底部散热不足,导致电池包温差显著增大。

b型结构:自下而上流动的设计改善了流速分布,使得散热效果优于a型结构,尤其是在高放电倍率下,散热效率有所提升。然而,这种设计仍在管道流速均匀性方面表现不佳。

c型结构:横管布置的流动方式使冷却介质的流速更均匀,温度分布较为平稳。在该结构下,电池包的最高温度和温差均小于a、b型,表现出更优的散热均匀性,尤其在中低放电倍率下效果显著。

综上,c型结构在温度分布均匀性和能耗控制方面更具优势。因此,在后续优化中,以c型结构为基础调整管道的空间布置,提高冷却系统的整体性能。

4.2 混合管道布置的优化

在进一步优化冷却系统时,我们引入了竖管与横管组合的混合管道设计,并对d、e、f、g和h五种不同混合结构进行了研究。

d型和e型结构:这两种布局方式中,横竖管交替布置,冷却剂流向交错。尽管能够实现一定程度的散热,然而由于

冷却介质流动路径较长,流速降低,散热效率有所下降。尤其是在e型结构中,温度不均匀性较大,容易在局部产生温度过高的现象。

f型结构:在f型中,冷却剂的流向通过精确调整形成均匀的流动路径,使得每个电池单体的温度接近一致,内部温差最小。仿真结果显示,f型结构的最高温度和温度分布均匀性都优于其他混合结构。

g型和h型结构:在这两种结构中,竖管和横管的布局具有一定的对称性,但在不同冷却剂流向组合的情况下,局部流速不均衡,导致某些电池单体的冷却效果不佳。仿真中观察到g型和h型结构的温差较大,且最高温度高于f型,表明在电池组中仍存在散热效率不足的问题。

4.3 f型结构的优势分析

f型混合管道布局的显著优点在于冷却剂流向的设计较为合理,该结构中,横管和竖管结合后可优化冷却剂流动路径,平衡了流速和温度分布,在高、中、低放电倍率下均能保证良好的散热性能。仿真结果表明,f型冷却管道布局在电池包中的温差控制最为出色,最高温度低于其他结构,且温度分布均匀性最佳。尤其在3C放电倍率下,f型结构依旧能够将电池包最高温度控制在40℃以下,同时温差保持在合理范围内,有效满足了热管理系统的安全要求。

经过以上对比研究,可以得出以下结论:f型冷却管道布局在温度均匀性和散热效率方面表现最优,不仅能够显著降低电池包的整体温度,还能够有效抑制温差的增大。因此,f型布局是一种适用于高性能电池包的最佳冷却管道布置方案。

5 结语

论文基于多物理场耦合模型,研究了电动汽车电池包的热管理仿真。在风冷、液冷、PCM及其复合冷却方式中,液冷与PCM复合冷却通过主被动结合的策略实现了更为优异的散热效果。此外,优化的f型管道结构在温度均匀性和散热效率方面均表现出色。该研究为电动汽车电池包的热管理设计提供了可行的优化方案。未来,结合智能调节算法的复合冷却系统有望实现电池包热管理的动态优化,从而进一步提升电池性能和安全性。

参考文献

- [1] 张立新.高寒地区纯电动汽车电池热管理系统实用技术探究[J].内燃机与配件,2024(11):114-116.
- [2] 李潇.多物理场下动力电池包结构的可靠性设计优化[D].长沙:中南林业科技大学,2020.
- [3] 范光辉.基于多物理场耦合的锂电池组散热分析与实验研究[D].长沙:湖南大学,2019.
- [4] 杨小平,何伟标,邓国兰.纯电动汽车电池热管理技术研究进展[J].东莞理工学院学报,2024,31(1):86-93.
- [5] 翁志奇,邓斌,张鑫伟,等.电动汽车电池包热制冷系统的实验研究[J].能源环境保护,2023,37(5):183-189.