电动汽车锂离子电池热管理系统研究进展

姚发达,关欣†,徐阳,牛擎宇

上海理工大学能源与动力工程学院,上海 200093

收稿日期:2022-05-23;接收日期:2022-07-12

【摘要】 锂离子电池作为电动汽车最广泛使用的动力源,对工作温度高度敏感.为保证其高性能和安全运行,电池热管理系统必不可少.本文综述了近年来锂离子电池热管理系统的研究进展.首先讨论了由高低温环境和电池温度不均匀引起的临界热问题.在此基础上,对设计原则和现有的电池热管理系统进行了广泛的介绍和阐述.然后进一步分析了用于未来电池热管理系统的热电器件和内部加热方法等新兴技术.分析表明,被动和主动冷却/加热方法的组合有望满足苛刻的热要求,特别是在功率波动剧烈的动态条件下.此外,电池在变工况下所输出的电流、电压等均不相同,因此建议对电动汽车动力电池进行动态性能实时管理,从而延长电池使用寿命.

关键词: 电池热管理,电动汽车,温度均匀性,相变材料

PACS: 7460,7490,0290

DOI: 10.13380/j.ltpl.2022.04.008

Research Progress on Thermal Management System of Lithium-Ion Battery of Electric Vehicles

YAO Fada, GUAN Xin†, XU Yang, NIU Qingyu

College of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China

Received date: 2022-05-23; accepted date: 2022-07-12

【Abstract】 As the most widely used power source for electric vehicles, lithium-ion batteries are highly sensitive to operating temperatures. To ensure its high performance and safe operation, a battery thermal management system is indispensable. In this paper, we review the research progress of thermal management systems for lithium-ion batteries in recent years. First, the critical thermal problem caused by the high and low temperature environment and the uneven battery temperature is discussed. On this basis, the design principles and existing battery thermal management systems are extensively introduced and elaborated. Emerging technologies such as thermoelectric devices and internal heating methods for future battery thermal management systems were further analyzed. The analysis shows that a combination of passive and active cooling/heating methods is expected to meet demanding thermal requirements, especially under dynamic conditions with sharp power fluctuations. In addition, the current and voltage output of the battery under variable working conditions are not the same, so it is recommended to manage the dynamic performance of the electric vehicle power battery in real time to extend the battery life.

Keywords: Battery thermal management, Electric vehicles, Temperature uniformity, Phase change materials

PACS: 7460,7490,0290

DOI: 10.13380/j.ltpl.2022.04.008

Reference method: YAO Fada, GUAN Xin, XU Yang, NIU Qingyu, Low. Temp. Phys. Lett. **43**, 0310 (2022)

† 15900722038@163.com

1 引　　言

电池为电动汽车提供动力，对电动汽车的性能、续航里程起着决定作用. 锂电池凭借能量密度大、自放电率低等优势成为最有希望推动电动汽车发展的候选电池[1]. 然而，锂离子电池对工作温度响应很灵敏. 一方面，当锂电池在较高的温度（大于 35 ℃）下工作时，会加剧电池内的副反应，导致电池温度失控，进而造成电池容量衰减和寿命缩短，甚至电动汽车可能因电池过热而引发火灾. 因此，人们越来越关注电动汽车的安全问题[2]. 另一方面，当锂电池在较低的温度（小于 15 ℃）下工作时，由于内阻增加和反应动力学抑制，其放电容量大大降低，导致电动汽车的驱动范围大大缩短. 此外，锂电池温度分布的不均匀会导致电化学过程不一致，进一步降低电池组的容量和缩短循环寿命[3]. 因此，为了保证电动汽车锂电池运作时的安全和性能，高效的电池热管理系统（BTMS）是十分必要的. 随着锂电池技术的不断提升，持续存在的热问题和安全问题变得更加严重，这对电池热管理系统提出了更高的要求. 为了给今后 BTMS 设计提供指导，本文首先讨论了高低温环境及电池均匀度对锂离子电池性能的影响. 接着介绍了 BTMS 的设计原则. 此外，对主要三种锂离子电池热管理系统进行了分析，讨论了未来可能的发展方向. 在此基础上，归纳了 BTMS 的一些新兴技术. 如设计冷却/加热能力可调控的智能 BTMS 以及热电制冷和内部加热等新方法. 所提及的 BTMS 新兴技术对锂离子电池在续航和安全等方面都具有重要意义，为相关领域的研究人员提供一定程度的参考.

2 高低温环境对锂电池的性能和寿命的影响

工作温度影响锂电池的性能和安全性. 现有电动车技术使用的锂离子电池主要以磷酸铁锂、三元材料和锰系这三种电池为主. 温度对电池的内阻、容量、功率等性能都有较大影响. 虽然电动汽车一般运行在 −30～60 ℃之间，然而锂电池的最佳工作温度范围是 15～35 ℃[4]. 锂电池充放电工作温度超过允许范围时，电池的正常运行将受到威胁. 图 1、图 2 分别表示温度对电池电量、电压的影响.

高温对锂离子电池的性能和寿命有相当大的影响. 研究表明，固体-电解液界面（SEI）受到高温下副反应的影响，这个过程与气体的析出和 SEI 组成的变化相耦合，活性锂离子被消耗，导致不可逆转的降解[5]. 此外，锂电池暴露在高温下会加速金属在阴极侧的溶解和吸氧，导致不可逆转的性能退化和容量衰减. San Thanagopalan 等人[6]研究了锂电池在不同温度（5 ℃、15 ℃、25 ℃、35 ℃和 45 ℃）下的循环性能，研究结果证明，锂电池在较高温度下，活性物质的损失是主要部分. 高温运行不仅会导致电池容量衰减和电池老化，还会威胁到整个电动汽车的电力系统的安全. 动力电池在低温下运行时，电解液电阻值增加和电化学反应活化能降低，导致其放电速率降低，使得电池性能下降，造成电动汽车无法启动.

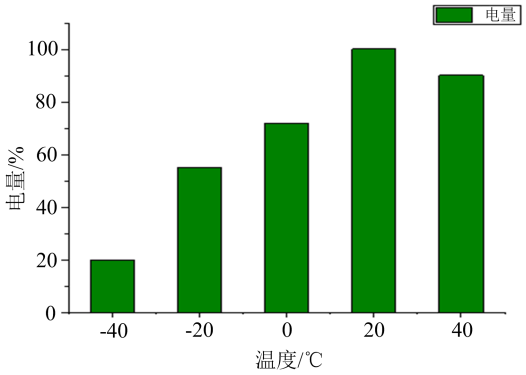

图 1　温度对电量的影响

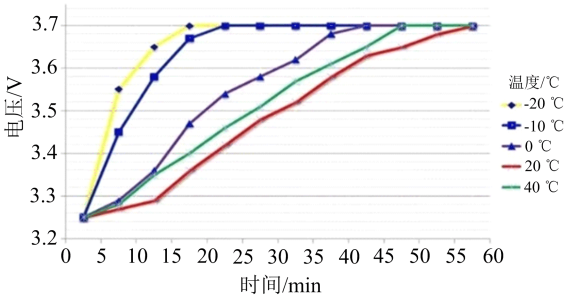

图 2　温度对电压的影响

3 电池模块温度均匀度对锂电池性能的影响

温度均匀度是影响电池性能和耐用性的另一个关键因素，需要从单个电池和整个模块 2 个方面将其保持在所需的范围内. 电池内部产生的热量是不均匀的，并随充放电过程而波动[7-8]. 对于单个电池来说，由于锂离子电池是由数十个集电体、电极和隔板缠绕或堆叠在一起的，导致电池内部散热不均匀，进而引起温度梯度变化，加速电池老化受损. Feng 等人[9]研究表明，温差每升高 5 ℃，电池组的容量损

失可达 1.5%～2%. 因此，电池模块温度均匀度被视为 BTMS 的关键指标之一. 一般情况下，电池模块的温度均匀度应保持在 5 ℃以内.

4 电池热管理系统(BTMS)

4.1 设计原则

如前所述，高/低工作温度和温差都会对锂离子电池造成不利影响. 因此，BTMS 的基本目标是将整个动力电池组保持在适当的温度范围. 虽然换热性能是主要指标，但也应考虑其他因素，包括系统的实用性、兼容性、能耗和成本. 一般来说，BTMS 的重量比例不应超过整个电池组的 20%[10]. 此外，热管理结构不应与母线、组件外壳和电线等其他设备冲突. 正常情况下，有效的冷却应将最高温度 T_{max} 控制在 35 ℃以下，而在低温条件下，最低温度 T_{min} 建议高于 15 ℃. 同时，描述电池模块和电池组温度均匀度的温差 ΔT 应保持在 5 ℃以内[11].

4.2 电池热管理系统 BTMS 分类

动力电池组由单电池串联和并联组成. 通过设计合理的 BTMS，不仅可以保证电动汽车的安全性，而且限制动力电池的工作温度适用范围，因而增长了动力电池应用的生命周期[12]. 为限制电池温度上升，常采用的冷却方式有空冷、液冷、相变材料冷却. 对这三种主流电池热管理系统进行分析，结果如表 1 所示.

表 1 不同 BTMS 的优缺点分析

类别	空气冷却	液体冷却	相变材料冷却
优点	(a)结构构成简单，产品重量相对较轻 (b)几乎没有发生漏液的可能性	(a)产热更有效，温度均匀性好(b)电池壁面与液体之间的换热系数高	(a)产热更有效，温度均匀性好 (b)电池壁面与液体之间的换热系数高
缺点	(a)冷却速度和效率低，吸入空气需要经过过滤处理 (b)受环境温度影响较大	(a)重量相对较大，存在漏液可能性 (b)可能需要水套、热交换器等部件	(a)相变材料导热率低 (b)可能需要耦合其他冷却系统

4.2.1 空气冷却

冷媒利用自然空气本身作为冷却介质，单靠空气流动来给电池降温. 风冷式是电池组容量最简单的冷却方式，分为自由对流和强迫对流二类，流程设计如图 3 所示. 借助电池箱体内的空气与电池模组间的对流换热来冷却锂离子电池.

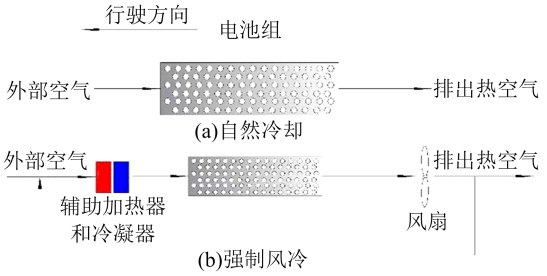

图 3 空气冷却流程设计

Li 等人[13]分析了电池单元间的不一致性，对不同并联拓扑的风冷电池模块的综合性能进行了评估，研究了三种连接拓扑的同时还引入了多物理模型来描述组件的电化学、老化、电和热特性，在单电池和多电池水平上对该模型进行了深入的验证. 结果表明，顶部交叉在放电期间提供了最一致的电流分布，并且由于远离端子的正温度梯度，顶部入口在这方面优于顶部出口. 不一致的放电导致顶部入口、顶部出口和顶部交叉的最大 SOC 偏差分别为 8.26%、11.13%和 3.07%. Saechan 等人[14]对风冷电池热管理系统进行了数值研究，建立了圆柱形锂离子电池组的三维瞬态传热模型，研究了入口速度、放电率和电池布置结构对冷却性能的影响. 研究结果表明，电池在 0.5C 的放电速率下，自然对流模式可以将电池的最高温度保持在电池所需的工作范围以下. 在 1C 放电速率下，1 m/s 的入口速度足以冷却电池. Chen 等人[15]提出了一种简单方法来构建一个对称的风冷 BTMS，数值研究了电池单元的数量对平行风冷 BTMS 冷却性能的影响. 结果表明，对称系统的 T_{max} 值均在 3 K 以下，与非对称系统相比，改进后系统的 T_{max} 值至少降低了 43%，能耗至少降低了 33%. 近年来基于风冷的 BTMS 研究进展如表 2 所示.

表 2　基于风冷的 BTMS 研究进展

年份	研究者	研究成果	研究方法	不足
2018	Hong[16]	采用二次通风口来改善并联风冷 BTMS 冷却性能	数值模拟	离散后方程用 SIMPLE 算法求解，不够精确
2019	Chen[17]	对风冷 BTMS 流型进行设计，提出了一种优化策略，优化了进出区位置	数值模拟	对二维 CFD 计算进行了网格划分，不如三维精确
2020	Li[18]	优化 U 型风冷 BTMS 的气流配置和布局	数值模拟	假设在冷却剂通道壁上使用恒定热流边界条件
2021	Wang[19]	提出了一种新型的降低温度和体积的空冷 BTMS	数值模拟	模型假设材料各向同性，热物性参数不变
2021	Wang[20]	构建了一个电池单元间距分布不均匀的空冷系统	数值模拟	粒子群算法局部搜索能力较弱，不能得到最优解
2022	Gocmen[21]	研究了一种新型 BTMS 在不同放电条件下的性能	数值模拟＋实验	未考虑因时间相关热产生而可能产生的流量波动

以上综述了基于空冷的 BTMS 的研究现状，包括电池布局、气流结构设计和控制策略等方面的优化技术. 研究表明，在一般情况下，可以对电池配置和气流通道进行初步优化，然后采用控制策略根据电池的实时状态智能调整气流场. 另外，风冷系统需要大量的空气来冷却电池单元，导致管道和阀体尺寸较大，风机能耗较大，导致 BTMS 结构紧凑度低和功耗高. 基于空冷的 BTMS 需要足够的空间和流量来提高散热能力，这可能会限制风冷系统在更大容量、更长的续航里程电动汽车中的应用.

4.2.2　*液冷*

液冷方式不仅高效，而且应用广泛，形式也比较多样，可将电池单体或模块沉浸在液体中，也可在电池模块间设置冷却通道. 到目前为止，大多数电动汽车都选择该冷却方式，以特斯拉的 modelS 为例，采用的是蛇形串联液冷. 示意图如图 4.

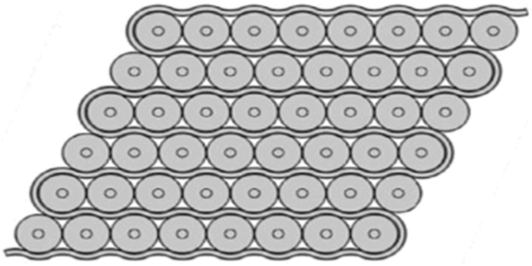

图 4　特斯拉 modelS 蛇形串联液冷

Chung 等人[22]建立了液冷电池组的传热模型. 以典型的翅片冷却结构电池组为参考设计，数值模拟表明，电池组底部至散热板的导热性能差是阻碍电池组高效散热的主要障碍之一，而电池组双层结构布置的不对称设计方式对电池组的温度均匀性有不利影响. Ke 等人[23]研究了锂离子电池组的热失控现象. 实验电池组由 10 个 18650 型锂离子电池并联组成，并配有蛇形通道液冷 BTMS. 分析了不同冷却液流量的液冷 BTMS 对电池组内 TR(热失控)传播的影响，结果表明，液冷 BTMS 能够有效地防止 TR 传播. 当冷却液流量较低时，电池内的 TR 速率几乎是随机的，但当冷却液流量为 96 L/h 时，可以有效地防止 TR 的扩展. Lai 等[24]制备了一种氧化石墨烯(GO)改性硅胶(GO-SG)，并填充在圆柱形电池和管道之间的空间. GO 的加入增强了 GO-SG 的导热性，有效地将产生的热量传递到管子，从而使电池模块具有优异的冷却效果和温度均匀性. 研究结果表明，对于具有并联 TCS 的液冷系统，可以通过设计系统的入口和出口方向来均匀化并联通道之间的流量. Yang 等人[25]提出了一种新型蜂窝 BTMS，该系统集成了仿生液体微通道和相变材料的六边形散热板. 结果表明，与矩形冷却板相比，在 0.001 kg/s 的入口流速下，具有六边形冷却板的电池模块中的 T_{max} 和压降的值分别降低了 0.36 K 和 4.37 Pa. 近几年基于液冷的 BTMS 研究进展如表 3

所示.

表 3　基于液冷的 BTMS 研究进展

年份	研究者	研究成果	研究方法	不足
2018	Jiaqiang [26]	采用正交表设计了 16 个模型,找出了主次因素的最优组合模型	数值模拟	假定冷却板为均匀各向同性,存在一定误差
2019	Zhou[27]	提出了一种基于半螺旋管道的液体冷却方法	数值模拟	忽略了铝管与电池之间的接触热阻
2020	Wang[28]	提出了一种新颖的模块化电池液冷系统,研究了冷却流量和冷却方式对电池组件热行为的影响	数值模拟+实验	将电池的热物性参数假定为内部材料组成均匀的集总参数模型
2021	Ding[29]	以流道数及其高宽比为变量,研究了结构参数对液冷系统冷却能力的影响	数值模拟	假定冷却板为均匀各向同性,与实际不符,存在一定误差
2022	Gao[30]	开发了一种新的基于沿流动方向的梯形通道 BTMS 设计	数值模拟+实验	冷却系统的外壁被视为绝热条件,有一定误差
2022	Chen[31]	提出了一种基于神经网络的回归模型	数值模拟	模型没有将环境温度变化考虑到研究中

综上所述,液冷多采用间接冷却方式.液体管道被布置在电池周围,将热量带走.冷却剂通常通过热交换器将热量传递到外界,然后再循环到单元内散热.热交换器等附加部件使系统比风冷系统更加复杂,这些因素导致系统重量和维护成本增加.在基于液冷的 BTMS 中,流道数、流道高宽比、流道进口布局和流量被认为是主要的影响因素,对电池的热管理具有重要影响.平行流道和蛇形流道在基于液冷的 BTMS 中都有广泛的应用.由于电池模块的结构各不相同,因此没有统一的标准来评估这两种流动路径的优劣,应根据具体结构进行分析.在流道中可增加折流板来提高换热效率,但会增加工质的压降.不同工况下采用正交试验法、遗传算法和人工神经网络对液冷系统进行参数优化以提高冷却效果.

4.2.3　相变材料冷却

相变材料电池热管理系统利用相变潜热吸收电池所产生的热能. Zhuang 等人[32]提出了一种采用蜂窝状排列相变材料(PCM)耦合冷却板的混合 BTMS.数值结果表明,从散热效果来看,有冷却板的系统明显优于无冷却板的系统,相变材料的液相分数远低于无冷却板的系统.随着质量流量的增加,散热效果变得更加显著.因此,质量流率应小于 5×10^{6} kg/s. Wang 等[33]设计了一种由锂离子电池和相变材料单元组成的无源、低成本电池热管理系统.数值结果表明,增加相变材料的导热系数和潜热可以改善相变材料单元的热管理性能.在 0.001～0.006 kg/(m·s)范围内,PCM 粘度越小,PCM 单元的热管理性能越好. Ping 等人[34]给出了一个全新的相变材料与液冷耦合体的热管理系统模型.数值模拟表明,电池组的 T_{max} 在 PLPS 的情况下被抑制在 47 ℃,而在 40 ℃的环境温度和 3C 放电情况下自然对流的情况下被抑制在 70 ℃.与 CPCM 的情况相比,在放电结束时,具有 PLPS 的 PCM 的液体部分从大约 100%减少到 27%.近几年基于相变材料的 BTMS 研究进展如表 4 所示.

综上所述,在基于 PCM 的 BTMS 中,PCM 的最佳相变温度与电池的最佳工作温度相关,材质的导热特性直接关系着动力电池组模块的均温性.而经过材质的改良,相变材料的换热特性可以获得不同程度的提高.大多数纯固液相变材料的导热系数都很低,这导致在恶劣的操作环境下大量的热量积累.碳材料和金属的加入可以显著提高相变材料的导热系数和强度.显著减少液体 PCM 的泄漏.而碳材料的加入使相变潜热降低.采用碳材料增强相变材料时,应考虑潜热和传导热的平衡.导热材料在复合相变材料中的比例是一个需要优化的重要参数.

表 4　基于相变材料的 BTMS 研究进展

年份	研究者	研究成果	研究方法	不足
2018	Lazrak [35]	提出了一种利用铜栅强化相变材料内热传递的新方法	数值模拟＋实验	忽略了电池与相变材料之间的接触热阻
2019	Jilte[36]	提出了组合式主动和被动冷却电池热管理系统的瞬态行为	数值模拟	设置了 PCM 的热物理性质是恒定的，与实际不符
2020	Zhao[37]	研究了一种基于薄散热片嵌入 PCM 的热管理方法	数值模拟	未考虑相变引起 PCM 的体积变化
2021	Pakrouh[38]	研究了 MEPCM 浆料对圆柱形电池热管理性能影响	数值模拟	忽略流体和颗粒之间的速度差
2021	Wang[39]	设计了一种由锂电池和相变材料单元组成低成本电池热管理系统	数值模拟	电芯的平均比热容用加权平均法确定，不够精确
2022	Rajan[40]	研究了十四醇作为相变材料(PCM)在电池热管理系统(BTMS)中的应用	数值模拟	PCM 的厚度仅为 5 mm，忽略了液态 PCM 的对流，有一定误差
2022	Huang[41]	制备了一种新型阻燃柔性复合相变材料，并设计了电池模组	实验	用加热棒代替电池研究 TR 的传播程度

大量研究表明，相变材料在控制电池温度均匀性方面具有突出的优势. 但目前还面临着有待攻克的技术难题，比如相变材料液化泄露后对电池结构将产生危害、相变材料的相变潜热性在转变过程的不稳定性等. 而怎样减少相变材料的泄露也是一项工作重点. 材质在动力电池热管理中的布置与设计也对有效传热能力将产生很大作用，为此需要对包含 PCM 的电池热管理系统做合理的数据优化. 此外，在锂离子电池发生热失控后，一些有机相变材料并不能有效地阻止锂电池的热失控传播. 采用阻燃技术提高有机相变材料的防火安全性是十分必要的.

4.3　BTMS 的新兴技术

4.3.1　面向电动汽车动态运行的 BTMS 设计

目前，大多数 BTMS 都是基于恒流放电曲线设计的. 然而，在现实的驾驶场景中，在道路运行状态下，功率输出是动态的，随峰值和上升而波动. 因此，BTMS 需要具有可调的冷却/加热能力，以应对剧烈波动的动态电池状态. 为此，Wu 等人[42]设计了 HPPCM 耦合冷却系统，并对其在动态循环条件下的热性能进行了实验研究. 结果表明，纯无源 BTMS 的制冷能力是有限的，采用主动方式可以提高大功率运行时的制冷功率. Yue 等人[43]开发了一种混合 BTMS，它结合了微型热管阵列、对流空气和间歇喷水用于锂离子电池的动态工作条件. 结果表明锂电池在较低功率运行状态下，风冷能保证电池正常散热. 在高功率输出时，喷雾冷却可以被激活以带走大量的热量，从而大大提高冷却功率和能源利用效率. 这些研究为设计冷却/加热能力可调的智能 BTMS 提供了新的思路，以解决电池组在动态和苛刻条件下的热问题.

4.3.2　热电制冷

除上述冷却策略外，基于热电制冷的热管理系统由于其结构紧凑、无噪音等优势，推动了人们对 BTMS 的研究. 此外热电系统的工作模式可以通过改变电流的方向来切换，以实现冷热环境下的冷却或加热功能. 例如，Lyu 等人[44]开发了基于热电效应的 BTMS. 实验结果表明，电池表面温度降低了约 43 ℃，验证了热电系统的良好冷却效果. 进一步优化了该系统的空气和液体流速，与仅使用液体冷却相比，优化的混合冷却系统能够降低约 20 ℃的温度. 同样，Suh 等人[45]将热电装置应用于电池组表面，并对其夏季的冷却效果、冬季的预热和废热回收性能进行了定量研究. 结果表明热电器件有效地对电池进行冷却和预热，输入电能较小，提高了电池的运行效率和可靠性. 虽然已经有尝试将热电制冷用于电池热管理，但其在 BTMS 中的广泛应用仍然受

到 Seebeck 效应效率低的阻碍[46]. 近年来研究者们一直致力于寻找新型高性能热电材料. 机器学习作为一种具有强大数据分析能力的方法,其在新型功能材料的高通量筛选和结构优化设计方面展现出巨大的优势,能够根据预先筛选已知材料来推荐新型高性能热电材料,进一步提升热管理系统的热电制冷效率. 刘江辉等人[47]总结了热电材料研究领域常用的机器学习方法,系统地介绍了它们在材料结构、电子和热电输运等性质上的应用案例和相关研究进展,并对该领域的发展前景进行了展望. 随着 Seebeck 系数更高的热电材料的发展,这是一种很有前景的 BTMS.

4.3.3 内部预热

除了冷却,随着电动汽车越来越多地在寒冷的气候下使用,电动汽车中的电池预热正成为一个热门话题. 与传统的以空气或液体为传热介质的外部加热方法不同,Wang 等人[48]设计了一种新颖的锂离子电池结构,在电池内部嵌入金属箔作为低温加热源. 这种内部加热策略可以在 20 s 内将电池单元从 −20 ℃升到 0 ℃,电池的容量消耗为 3.8%. Lin 等人[49]综述了动力电池加热方法的最新进展. 将现有方法分为两类,即外部加热方法和内部加热方法. 对每种方法的机理、优点和局限性进行了系统评价. 然后定量总结了不同方法的温升速率、能耗和最大温度梯度,比较了各方法的加热性能. 最后给出了外热和内热方法的前景. Hao 等人[50]提出了一种无源被动热调节器,可以在高温和低温的极端环境中稳定电池模块的温度. 这种热调节器无需任何电源,仅通过保持电池自身产生的热量可自由切换其热导率,即便在极其寒冷的天气状况下也能将电池的使用容量提高到平常的三倍以上. 但是,而当电池需要快速加热时,则需要较高的充放电速率. 应注意避免锂析出造成容量衰减. 减小接触电阻是非常重要的,但这一点还没有得到很好的考虑. 另外,内部加热方式也可能导致较高的安全风险,加速电池寿命老化. 不同的预热方式对电化学反应的影响还需要进一步研究,以深入了解热效应的机理. 当前对预热系统的研究少于冷却系统. 一种高效、经济、安全的电池快速预热系统有待进一步开发. 如果预热系统和冷却系统能够共享部件,将更符合轻量化、节能化的发展趋势.

5 结论与展望

电池热管理系统保障电池的高性能、长寿命和安全性. 本文总结了电动汽车锂电池热管理系统的最新进展. 对动力电池中的关键热问题以及新兴技术进行了全面的阐述. 通过回顾电池热管理系统发展的最新进展,总结了以下关键结论.

(1)基于空冷的 BTMS 性价比高,易于实施. 然而,该系统只能满足低功率运行时的冷却要求,由于空气的导热系数和比热容较低,在电池组温度均匀性和高功率运行方面无法满足要求. 为了在不牺牲电动汽车能量和空间的情况下提高基于空冷的 BTMS 的性能,需要在电池组布局、气流模式和控制策略方面进行更多的创新设计. 采用数值模拟方法可以对电池配置和气流通道进行初步优化,然后采用合适的控制策略,根据电池的实时状态智能调整气流场.

(2)基于液冷的 BTMS 具有较高的换热特性,是目前商用电动汽车中使用最广泛的冷却方式. 在过去的几十年里,基于液冷的 BTMS 取得了显著的进步,包括冷板布局、流型的设计和优化. 液体的流动路径和电池与通道的接触面积直接影响温度场,而通道的形状和面积则影响液体与电池之间的热交换容量. 其中,平行流道和蛇形流道在液冷的 BTMS 中都有广泛应用. 因电池模块结构各不相同,应根据具体的冷却结构进行分析. 近年来,微通道冷板已成为一个研究热点. 建议采用基于仿生蛛网流道的液冷板,拓扑学已发现能均匀一致密布于任意形状平面的正多边形仅剩正三角形、正四边形和正六边形. 尤其在密布相同面积的前提下,正六边形赋予了最小的网络总周长,这一独有特点有利于大大减少流体在管网中流动时的压降,还可避免流体在正四边形直角转弯处形成局部性内部流动死区而降低换热效率. 此外,在流道中可以增加折流板或分流板来提高换热效率,但会增加冷却剂的压降,应合理兼顾二者,在提升换热效果的同时尽可能减少降压损失. 此外在不同工况下采用正交试验法、遗传算法和人工神经网络对液冷系统进行参数优化,以提高冷却效果.

(3)相变技术应用于电动汽车中的蓄电池热控制,具有能耗低、体积变化小、噪声低、冷却能力大等优点. 然而纯固液相变材料导热系数较低,阻碍了其

应用.适当比例的碳材料和金属的加入可以显著提高相变材料的导热系数和强度.与单一 BTMS 相比,混合 BTMS 可以进一步降低电池的温升,提高电池的温度均匀性.因此,混合型 BTMS 更适合于大功率电池组.提高基于 PCM 的 BTMS 效率,降低能耗,减少系统体积和重量,筛选价格低、导热系数高、使用寿命长的 PCM 是未来基于 PCM 的 BTMS 的研究热点.此外,当温度超过其熔点时,会出现相变材料液化泄漏问题,对电池会造成污染以及导致相变材料的潜热性在相变过程中不稳定.因此建议将相变材料与液冷相结合,液冷为主,相变为辅.建议采用相变微胶囊悬浮液或者纳米流体作为冷却介质,其具有较高的导热系数和比热容,可合理发挥二者的优势,提高电池的冷却效果和改善均温性.相变材料主要用于抑制电池温升,而强制冷却系统则加强了相变材料向外界的传热,可优化相变材料电池的热管理系统的结构设计,使之与主动冷却相结合,来保障其长期运行的散热性能.

(4)为了提高电动汽车的续航里程和安全性,动力电池需要具有更大的容量和更快的充电能力,这要求 BTMS 能够对关键热问题做出快速响应.同时,由于环境温度的变化和电池运行的波动,对具有可调冷/热容量的智能 BTMS 提出了很高的要求.建议采用被动和主动制冷/加热、热电制冷器和内加热相结合的新兴技术,这样有望满足苛刻的热要求,特别是在功率波动剧烈的动态条件下.

(5)电动汽车在现实运行工作过程中,电机所需要的能源转化不是固定不变的,随着不同路况的改变而不停地发生变化,若仅仅考虑对动力电池做静态性能测试,那么很难反映电池的实际工作性能,锂电池在高速行驶、爬坡及刹车时所输出的电流、电压、功率均不相同,故而更要对电动汽车动力电池进行动态性能实时管理,这样才能最为全面地评价电池的耐用度.建议采用遗传算法和多目标优化算法(NSGA-II)结合,选取增加合理优化输入变量以实现对电池的优化结构设计,延长锂电池的使用寿命.

参 考 文 献

[1] M. T. F. Rodrigues, G. Babu, H. Gullapalli, K. Kalaga, F. N. Sayed, K. Kato, J. Joyner, P. M. Ajayan, *Nat. Energy*, **2**(2017), 1

[2] P. Sun, R. Bisschop, H. Niu, X. Huang, *Fire Technol.*, **56**(2020), 1361

[3] Y. Zhu, J. Xie, A. Pei, B. Liu, Y. Wu, D. Lin, J. Li, H. Wang, H. Chen, J. Xu, A. Yang, C. L. Wu, H. Wang, W. Chen, Y. Cui, *Nat. Commun.*, **10**(2019), 1

[4] Q. L. Yue, C. X. He, M. C. Wu, T. S. Zhao, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **181**(2021), 121853

[5] B. Li, M. H. Parekh, R. A. Adams, T. E. Adams, C. T. Love, V. G. Pol, V. Tomar, *Sci. Rep-UK.*, **9**(2019), 1

[6] S. Santhanagopalan, Q. Zhang, K. Kumaresan, R. White, *J. Electrochem. Soc.*, **155**(2008), A345

[7] X. Hu, Y. Zheng, D. A. Howey, H. Perez, A. Foley, M. Pecht, *Prog. Energy Combust.*, **77**(2020), 100806.

[8] D. C. Lee, J. J. Lee, J. S. Kim, S. Cho, C. W. Kim, *Appl. Therm. Eng.*, 175(2020), 115422.

[9] X. Feng, C. Xu, X. He, L. Wang, G. Zhang, M. Ouyang, *J. Clean. Prod.*, **205**(2018), 447

[10] S. K. Pal, S. Singh, H. Singh, L. Phung, S. Yooyen, S. Sleesongsom, *J. Energy Storage*, **2**(2020), e148

[11] K. Monika, C. Chakraborty, S. Roy, S. Dinda, S. A. Singh, S. P. Datta, *Int. J. Heat. Mass Transf.*, **164**(2021), 120568

[12] 曾凡帅, 魏学哲, 机电一体化, **20**(2014), 31

[13] C. Li, N. Cui, L. Chang, Z. Cui, H. Yuan, C. Zhang, *Appl. Energy*, **313**(2022), 118758

[14] P. Saechan, I. Dhuchakallaya, *Energy Rep.*, **8**(2022), 1264

[15] K. Chen, Y. Chen, Y. She, M. Song, S. Wang, L. Chen, *Appl. Therm. Eng.*, **166**(2020), 114679

[16] S. Hong, X. Zhang, K. Chen, S. Wang, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **116**(2018), 1204

[17] K. Chen, W. Wu, F. Yuan, L. Chen, *Energy*, **167**(2019), 781

[18] X. Li, J. Zhao, J. Yuan, J. Duan, C. Liang, *J. Energy Storage*, **35**(2021), 102270

[19] N. Wang, C. Li, W. Li, M. Huang, D. Qi, *Appl. Therm. Eng.*, **192**(2021), 116932

[20] Y. Wang, B. Liu, P. Han, C. Hao, S. Li, Z. You, M. Wang, *J. Energy Storage*, **44**(2021), 103314

[21] S. Gocmen, E. Cetkin, *J. Energy Storage*, **45**(2022), 103516

[22] Y. Chung, M. S. Kim, *Energy Convers. Manag.*, **196**(2019), 105

[23] Q. Ke, X. Li, J. Guo, W. Cao, Y. Wang, F. Jiang, *J. Energy Storage*, **48**(2022), 104063

[24] Y. Lai, W. Wu, K. Chen, S. Wang, C. Xin, *Int. J. Heat. Mass Transf.*, **144**(2019), 118581

[25] W. Yang, F. Zhou, Y. Liu, S. Xu, X. Chen, *Appl. Therm. Eng.*, **188**(2021), 116649

[26] E. Jiaqiang, D. Han, A. Qiu, H. Zhu, Y. Deng, J. Chen, X. Zhao, W. Zuo, H. Wang, Q. Peng, *Appl. Therm. Eng.*, **132**(2018), 508

[27] H. Zhou, F. Zhou, Q. Zhang, Q. Wang, Z. Song, *Appl. Therm. Eng.*, **162**(2019), 114257

[28] H. Wang, T. Tao, J. Xu, X. Mei, P. Gou, *Appl. Therm. Eng.*, **178**(2020), 115591

[29] Y. Ding, M. Wei, R. Liu, *Appl. Therm. Eng.*, **186**(2021), 116494

[30] R. Gao, Z. Fan, S. Liu, *J. Energy Storage*, **48**(2022), 104014

[31] S. Chen, N. Bao, A. Garg, X. Peng, L. GaO, *Engineering*, **7**(2021), 1165

[32] Y. Zhuang, T. Chen, J. Chen, J. Li, M. Guan, *Therm. Sci. Eng. Prog.*, **26**(2021), 101094

[33] Y. Wang, Z. Wang, H. Min, H. Li, Q. Li, *J. Energy Storage*, **35**(2021), 102279

[34] P. Ping, Y. Zhang, D. Kong, J. Du, *J. Energy Storage*, **36**(2021), 102448

[35] A. Lazrak, J. F. Fourmigué, J. F. Robin, *Appl. Therm. Eng.*, **128**(2018), 20

[36] R. D. Jilte, R. Kumar, M. H. Ahmadi, L. Chen, *Appl. Therm. Eng.*, **161**(2019), 114199

[37] J. Zhao, C. Wu, Z. Rao, *Appl. Therm. Eng.*, **174**(2020), 115304

[38] R. Pakrouh, M. J. Hosseini, R. Bahrampoury, A. A. Ranjbar, S. M. Borhani, *J. Energy Storage*, **40**(2021), 102602

[39] Y. Wang, Z. Wang, H. Min, H. Li, Q. Li, *J. Energy Storage*, **35**(2021), 102279

[40] J. T. Rajan, V. S. Jayapal, M. J. Krishna, M. Firose, S. Vaisakh, A. K. John, *Sustain. Energy. Technol.*, **51**(2022), 101943

[41] Q. Huang, X. Li, G. Zhang, J. Weng, Y. Wang, J. Deng, *J. Clean. Prod.*, **330**(2022), 129718

[42] W. Wu, X. Yang, G. Zhang, K. Chen, S. Wang, *Energy Convers. Manag.*, **138**(2017), 486

[43] Q. L. Yue, C. X. He, H. R. Jiang, M. Wu, *Int. J. Heat. Mass Transf.*, **164**(2021), 120528

[44] Y. Lyu, A. R. M. Siddique, S. H. Majid, S. A. Gadsden, S. Mahmud, *Energy Rep.*, **5**(2019), 822

[45] I. S. Suh, H. Cho, M. Lee, *Energy*, **76**(2014), 436

[46] S. Arora, *J. Power. Sources*, **400**(2018), 621

[47] 刘江辉,刘惠军,低温物理学报, **41**(2019), 373

[48] C. Y. Wang, G. Zhang, S. Ge, T. Xu, Y. Ji, X. G. Yang, Y. Leng, *Nature*, **529**(2016), 515

[49] C. Lin, W. Kong, Y. Tian, W. Wang, M. Zhao, *Automot. Innov.*, **1**(2022), 15

[50] M. Hao, J. Li, S. Park, S. Moura, C. Dames, *Nat. Energy*, **3**(2018), 899