

电动汽车锂离子电池热管理系统研究进展

王振, 李保国, 罗权权, 赵文莉

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: 目的 为保证电动汽车在使用过程中安全可靠, 需对车用锂离子电池进行温度控制。方法 从电池的最高温度、使用寿命以及最大温差等方面, 对空冷、液冷、相变材料冷却、微通道/微热管冷却以及加热方式的研究进行综述分析。结果 相对于常规的空冷、液冷、相变材料与热管等冷却方式以及新型的热电制冷等方式, 基于微通道、微通道冷板及微通道热管式的电池热管理系统(BTMS)具有更为卓越的换热性能, 已成为一种可行且有效的热管理解决方案; BTMS存在整体结构复杂、换热细节研究不深、实用性不强以及针对微通道的相关强化研究不足等问题。结论 在微通道液冷式BTMS的研究基础上, 对其进行强化换热与强化结构体力学强度等研究, 可以显著增强BTMS及整体系统的换热性能与结构强度, 以及对锂离子电池产生更好的温控效果, 提高了电动汽车的安全性与可靠性。

关键词: 锂离子电池; 电池热管理系统; 空冷; 液冷; 微通道; 微热管

中图分类号: TS255.36 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)15-0232-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.15.035

Research Progress in Thermal Management Systems for Li-ion Batteries in Electric Vehicles

WANG Zhen, LI Bao-guo, LUO Quan-quan, ZHAO Wen-li

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to control the temperature of Li-ion batteries for vehicles, in order to ensure the safety and reliability of EV during its use. Based on the maximum temperature, service life, and maximum temperature difference of batteries, various types of battery thermal management system (BTMS), such as air cooling, liquid cooling, phase change material cooling, micro-channel/micro-heat pipe cooling, and heating methods were reviewed and analyzed. Compared with conventional cooling methods such as air cooling, liquid cooling, phase change materials and heat pipes, and new thermoelectric cooling methods, BTMS based on micro-channels, micro-channel cold plates and micro-channel heat pipes had more excellent heat transfer performance. It had become a feasible and effective thermal management solution. However, BTMS had problems such as complex overall structure, inadequate research on heat transfer details, weak practicability, and insufficient research on related enhancements for micro-channels. Based on the research of micro-channel liquid-cooled BTMS, researches on enhanced heat transfer and mechanical strength of the structure can significantly promote the heat transfer performance and structural strength of BTMS and the overall system. It has better temperature control effect on Li-ion batteries and improves the safety and reliability of EV.

KEY WORDS: Li-ion battery; BTMS; air-cooled; liquid-cooled; micro-channel; micro-heat pipe

收稿日期: 2020-01-06

作者简介: 王振(1992—), 男, 博士, 主要研究方向为制冷与低温工程。

通信作者: 李保国(1961—), 男, 上海理工大学教授、博导, 主要研究方向为制冷与低温工程。

电动汽车 (EV) 作为新能源汽车中发展普及最为广泛的代表, 其核心技术主要包括电池、电池管理系统 (BMS) (BMS 包含电池热管理系统 (BTMS))、电机、充/放电、电控与智能驾驶等。其中 BTMS 是一种为锂离子电池提供及时热量交换与保护而设计的控温包裹系统, 通常采用包裹/贴覆于锂离子电池表面的形式, 同时也是锂离子电池表面最内层的包装结构系统^[1]。作为 EV 动力源, 锂离子电池具有能量密度高、比功率大、质量轻、自放电率低、可回收性好、循环寿命长等优点, 被认为是目前最适合的蓄电储能装置^[1-2], 已成为各国科学家研究的重要方向, 直接决定了 EV 的安全性、可靠性、续航里程、成本以及可持续发展等特性^[3]; 易受温度影响, 在温度范围 30~40 °C 时, 锂离子电池温度每升高 1 °C, 其使用寿命将缩短 60 d^[4]。由于在低温时其活性会迅速降低并失去部分电量, 高温时生热加剧且容易引发安全隐患等, 因此 BTMS 的性能是制约当前锂离子电池性能发挥的关键因素, 也是影响 EV 整体性能发挥的核心^[3], 文中拟对其进行综述。

1 BTMS 研究现状分析

BTMS 是根据温度对锂离子电池整体性能的影响, 综合锂离子电池的产热机理、最佳使用温区, 通过科学设计和验证, 建立在仿生结构材料结构学、传热学、电子电器学以及热化学等多学科领域基础之上, 为解决锂离子电池在高/低温工况下运行而产生的热不均、热失效及热失控等问题, 最终实现提升锂离子电池整体性能的表面包装结构系统^[3]。BTMS 主要包括散热、预热以及温度均衡等 3 个主要功能。散热和预热主要是针对外部环境对锂离子电池可能造成的影响而进行相应的调整; 温度均衡是用于减小锂离子电池组内部的温度差异, 防止某一部分锂离子电池过热造成的性能快速衰减^[4]。目前锂离子电池的比能量已达到 200~400 W·h/kg, 循环寿命大于 2000 次, 已基本满足现有 EV 对蓄电量的运行需求; 锂离子电池的蓄电量、安全性和使用寿命等, 均依赖于锂离子电池的工作温度^[3,5], 因此需要设计有效的热管理系统对锂离子电池进行温度管控。

2 BTMS 研究进展

BTMS 研究主要包含 2 部分内容: 从锂离子电池材料出发, 综合电化学热和欧姆热的发生机理, 研究耐温性材料 (耐高/低温电极、电解液材料), 并通过对外形设计实现增强换热结构^[6]; 再从锂离子电池外部着手, 通过对锂离子电池组的排布结构、锂离子电池单体的换热结构以及 BTMS 的综合设计等实现锂离子电池的强化换热^[7-8]。对锂离子电池材料换热性能的提升研究, 通常是以牺牲锂离子电

池容量为代价, 如: 添加铜/铝等高导材料可使锂离子电池导热系数提升 10%, 但会降低锂离子电池容量^[3-4]。采用石墨烯作为电池材料可能达到期望的性能^[5], 但相关研究仍在进行中。通过对常规 (风冷/水冷) BTMS 换热结构的热阻分析可以发现, 常规导热填充介质的热阻为 0.035 mk/W 左右, 常规换热方式的流体热阻一般均大于 10 mk/W, 是其热量交换过程中的主要热阻, 因此对换热过程中流动方式的优化设计, 可使锂离子电池换热性能成百上千倍地提高; 对 BTMS 结构的优化设计与相关技术措施的应用是现阶段研究人员相对容易实现的途径^[2]。

2.1 基于空冷式的 BTMS 研究进展

空气冷却 (BTMS, 简称 AC-BTMS) 是早年 EV 用锂离子电池换热方式中应用最广泛的一种, 其结构简单、成本最低^[4]。主要采用风扇或风道控制空气介质在锂离子电池周围流动, 从而转移锂离子电池产生的热量。Xu 等^[9]率先通过实验研究不同的锂离子电池板布局, 得到将锂离子电池水平布置的气流路径小于垂直布置, 可增强风冷锂离子电池组的散热效果。双 U 型风管布置可以进一步提高锂离子电池组的换热性能; Park 等^[10]采用数值仿真研究了不同空气流形设计对特定锂离子电池布局的影响 (在 72 个平均分成 2 排的锂离子电池之间形成 37 个直径为 3 mm 的冷却剂通道), 得到在风冷组件的通风口中加入可以减压的锥形管汇, 可实现良好的冷却效果, 风扇能耗从 47 W 下降至 27 W; Jaura 等^[11]采用双向往复气流组织形式可满足锂离子电池散热的均衡性要求; Nelson 等^[12]研究表明, 采用 AC-BTMS 已无法让 66 °C 的锂离子电池温度降到 52 °C 以下。在工况为 45 °C 与 6.67 C 放电倍率时, 采用 AC-BTMS 研究 18650 型锂离子电池发现, 无论如何改变空气流速, 都无法将温度控制在 55 °C 以下^[13]。在使用 AC-BTMS 时, 需要大体积的风机、换热器、管线等附件, 使得其散热结构体积较为庞大, 降低了锂离子电池包的体积能量密度^[14]。

2.2 基于相变材料的 BTMS 研究进展

基于相变材料的 BTMS, 简称 PCM-BTMS。其中 PCM 是一种在特定工况下可以发生相变的材料, 发生相变时伴有大量潜热的吸收/释放, 而其本身具有温度波动较小或保持不变的特性^[15], 因此可以在零能量消耗的情况下具有较强的蓄热能力。Hallaj 等^[15]通过仿真论证了 PCM 应用于锂离子电池被动式热管理系统是完全可行的。高温时, PCM 吸收锂离子电池产生的热量, 转化为潜热并将能量储存起来, 低温时, PCM 可以向锂离子电池放热从而加热锂离子电池; Sabbah 等^[16]对大功率锂离子电池在 6.7 C 放电时分别研究了主动 AC-BTMS 和 PCM-BTMS 的冷却效果, 当锂离子电池的工作温度达到 40 °C 时, 主动

AC-BTMS 已经失效,而 PCM-BTMS 可一直保障锂离子电池在 55 °C 的工作温度正常运行;Kizilel 等^[16]研究发现,在单独采用 PCM-BTMS 进行冷却时,锂离子电池产生的热量无法有效地转移到外界环境中。此外,PCM 在相变过程中会发生体积变化,在应用中必须兼顾材料属性与其力学性能,以及成本及可能存在的漏液问题,阻碍了 PCM-BTMS 在 EV 中大型尺寸动力锂离子电池组的应用与推广^[3, 17-18]。

2.3 基于液冷式的 BTMS 研究进展

基于液冷式的 BTMS,简称 LC-BTMS,是近年来 EV 用锂离子电池换热方式中应用最可靠的一种,可分为常规型和微尺度型等 2 种^[19]。常规型 LC-BTMS 可分为间冷式 LC-BTMS 和直冷式 LC-BTMS。间冷式 LC-BTMS 是将流通的液体冷却剂在液体管道/冷却护套/冷板等环绕在锂离子电池模组周围进行间接换热^[20]。常用的换热介质主要有水、去离子水、硅基油、乙二醇、聚硅酮、矿物油、丙酮等^[21]。冷却效果取决于液体的流动状态、粘度、热导率以及流速等,如聚硅酮电介质流体的冷却效果明显优于同样条件下的空气流体^[22]。直冷式 LC-BTMS 是制冷剂与锂离子电池模组直接进行换热的热管理系统^[23],常用的换热介质有矿物油与丙酮等,其中矿物油的有效传热系数是空气的 4 倍^[2];直冷式 LC-BTMS 的温度均衡性较好,温差可精准地控制在 1 °C 以内^[23]。冷却液体与外界空气直接进行热量交换的 LC-BTMS,称为被动式 LC-BTMS,与 EV 制冷装置进行换热的称为主动式 LC-BTMS^[24]。与风冷相比,液体冷却具有更高的换热系数,是一种极具吸引力的换热方式。Chen 等^[21]比较了强制空气冷却、翅片冷却、间接液体冷却和直接液体冷却等 4 种冷却策略的热工性能。得到采用空气冷却方式所需耗电是其他方式的 2~3 倍,与直接冷却相比,间接冷却是一种更好的选择。特斯拉 EV 采用 1:1 的乙二醇/水溶液作为 Model S 的车载 LC-BTMS 的冷却介质^[3],并对其进行了全新的结构设计和配套的维护保养策略以满足要求,使得特斯拉 EV 广受市场好评与消费者的青睐。

2.4 基于热电制冷的 BTMS 研究进展

通常 BTMS 需要一个驱动设备为其提供有效的传热速率,如使用风机、泵系统强制空气/液体流动或基于热电制冷器(TEC)系统等为 BTMS 提供高效的锂离子电池热去除率^[25]。TEC 是一种基于 Peltier 效应原理而开发的固态制冷设备^[25]。与其他冷却系统相比,TEC 具有无运动部件、长寿命、无毒无害、无内部化学反应、安全、可靠及成本低等优点,主要应用于高性能计算机、空调系统以及微处理器冷却等^[26-27]。随着技术的发展,TEC 已逐渐应用于人们的生活领域和医疗领域,如便携式冰箱、便携式冰

容器、汽车移动制冷、医疗器械、LED 热管理、淡水净化和工业温度控制装置等^[28]。此外,TEC 已开始应用于 BTMS 领域,越来越受重视,其中将 TEC 与 PCM 结合用于 BTMS,使有源系统成为半被动系统,提高 BTMS 的效率与可靠/安全性^[29]是有前景的研究方向。据文献报道^[30],在 PCM 主导的 BTMS 中加入 TEC 可以使锂离子电池的最高温度保持在 40 °C 以下,甚至可以低于 35 °C。

2.5 基于热管式的 BTMS 研究进展

热管(HP)式换热是一种基于无外界动力驱动的相变换热装置,在 BTMS 中已开始应用。其种类主要有:常规热管、片状热管、回路热管(LHP)、振荡热管(OHP/PHP)、热虹吸管和微小型热管(MHP)等。Swanepoel 等^[31]验证了常规热管在锂离子电池换热中应用的可行性。Burban 等^[32]测试了非回路 OHP 应用于 HEV 热管理的效果优于 AC-BTMS。Kim 等^[33]使用回路型虹吸热管结合风冷散热的方式应用于 BTMS 的设计中,并证明了其换热效果远优于 AC-BTMS。Li 等^[34]采用热管冷却板(HPCP)对锂离子电池组在快速充电状态下的热性能进行研究,得到在 8 C 充电倍率充放电工况和不同的冷却控制策略下,其设计的 BTMS 均具有良好的散热性能。Rao 等^[35]设计了液冷结合热管的 BTMS,并通过实验,研究其对某 EV 锂离子电池组的散热效果,得到在产热率小于 50 W 时,锂离子电池的最高温度能控制在 50 °C 以下。

2.6 基于微通道的 BTMS 研究进展

随着 EV 用锂离子电池的集成化与高密度化快速发展,其单位体积的产热量也随之增大,常规的换热方式与换热介质已无法满足锂离子电池的工况^[3]。受限于 EV 的小空间尺寸,更加简洁与微型的 BTMS 备受市场需求,要求动力电池的有效散热间隙降低至 2~3 mm^[3, 6]。常规直径为 5~10 mm 的圆形管与大尺寸散热组件构成的散热装置不再适应现代 BTMS 的设计要求^[3],因此,要解决 BTMS 中高换热量与占用空间等问题,必须采用换热性能更好、水力直径更小且质量更轻的微通道散热技术。

微通道热管即微尺度下加工制作的热管,简称微热管。Li 等^[34]采用微热管冷却板对锂离子电池组在快速充电状态下的热性能进行了研究,得到在 8 C 充电倍率和不同的冷却控制策略下其设计的 BTMS 均具有良好的散热性能;刘霏霏^[3]提出了采用扁平超薄微热管(UMHP,厚度为 1 mm)用于 BTMS,并对结构尺寸、材料、相变工质及其充液量进行了设计,同时对其在极端情况下的散/加热性能做了实验研究,得到在单体电池生热率小于 10 W 时,表面温度小于 40 °C,在产热率为 20~40 W 时,表面温度小于

55 °C, 最大温差不超过 3 °C, 在湿冷模式下最小, 即在 3 C 放电时也可低于 1.5 °C^[6]。

微通道和微通道冷板研究, 主要针对微通道的特征参数进行优化, 如微通道管束方向、数量、管道尺寸比例以及不同工况下的换热效果等。Jarrett 等^[36]通过改变载冷剂流量、锂离子电池产热量与冷板分布方式等研究了冷却板的性能, 优化了温度均衡性, 入口处的热流密度和冷却剂流量的分布均敏感, 而平均热流密度的优化只对入口热流密度敏感, 对压降的时间和测试边界条件均不敏感; Jin 等^[37]提出并验证了一种斜向微通道液冷板, 即将微通道斜切减少入口到出口对流换热, 结果表明, 在 220 W 和 240 W 的热负荷下, 保持 0.11 min⁻¹ 和 0.91 min⁻¹ 的低流量, 可使表面温度始终保持在 50 °C 以下, 冷却性能显著优于常规直槽板; Zhao 等^[38]通过改变微通道体积、质量流量、流动方向和进气道尺寸等, 对冷却圆柱锂离子电池的散热性能进行了数值模拟研究, 结果表明, 当微通道数量大于 4, 入口质量流量为 1 g/s 时, 锂离子电池的最高温度低于 40 °C; Qian 等^[39]通过改变冷板数量、入口质量流量、流向和通道数量, 模拟比较了含有 5 个锂离子电池组的热行为, 发现通道数量和冷板数量越多控温效果越好; Lan 等^[40]基于方形锂离子电池提出了一种新的 BTMS 设计, 采用多组微通道管贴附锂离子电池散热, 研究了锂离子电池最高温度和最大温差, 随微通道管组布置不同而变化的现象, 发现微通道组数量越多控温效果越好; Wang 等^[41]提出了一种由热硅胶板与铜管组成硅胶冷却板的 BTMS, 并通过实验和仿真研究了不同数量的硅片冷却板、通道流量等在 3C 放电倍率下的换热能力, 结果表明, 随着硅片数量和液道数量的增加, 冷却性能有所提高; Li 等^[42]研究了铝质微通道长度和冷却剂入口速度对系统热性能的影响, 得到最大温度和最大温差随着微通道长度与冷却剂流速的增加而增加; Malik 等^[43]对锂离子电池组在不同放电速率、循环形式和液体温度等特性下进行了热分析, 发现 30 °C 的液体温度最适宜于锂离子电池组的换热控温, 在放电速率为 1~4 C 时, 锂离子电池包的温度保持在 25~40 °C; Cao 等^[44]采用水冷微通道在一定的流量下分别对 22 个模块 (共 5664 个 18 650 锂离子电池) 整体进行 2 C、1 C 和 0.5 C 充放电仿真和实验, 得到二者具有很强的一致性, 验证了热模型的可靠性。Liu 等^[45]采用数值模拟研究了在微通道中添加纳米颗粒对 5 层方形锂离子电池的控温效果, 结果显示, 纳米颗粒的换热效果优于同等条件下的水和乙二醇的混合溶液; Bai 等^[46]提出了一种基于相变浆液 (PCS) 和微型通道冷却板结合的 BTMS。模拟结果表明, 当质量流量小于 0.3 g/s 时, 质量比为 8 : 2 的正十八烷微胶囊与水组成的 PCS 的冷却性能优于纯水、乙二醇溶液和矿物油; Z. An^[47]采用仿真研究发现, 在放

电速率为 2 C 的情况下, 对电池单侧的一半表面进行冷却足以使电池组的最大温差小于 3 °C; 微通道液冷换热方式可以有效地保障锂离子电池在较为合适的温区内工作, 并随着微通道和平板数量的增加以及进口流量的增加, 微通道换热器的换热性能越好, 随着管道长度与流速的增加, 温差随之增大。此外, 微通道热管和微通道的区别在于, 前者是封闭系统, 内部流通的相变制冷剂可自成循环, 需要辅助额外的散热设施, 而后者是开放系统, 需要外接导管输送载冷剂以完成整个换热循环。

对于采用制冷剂的微通道换热器, 微通道蒸发器的开发难度相比于微通道冷凝器更具有挑战性, 微通道作为蒸发器使用时各扁管中的制冷剂分配不均衡, 从而出现“干蒸”或“供液过多”等现象, 进而会对系统造成影响^[48]。同时, 由于采用的制冷剂在蒸发器中的蒸发温度过低, 会直接导致部分锂离子电池出现过冷却现象, 进而导致其性能衰减。微通道蒸发器在使用过程的冷凝水排出也是难点问题。除非研究出更为合适的中温载冷剂, 现阶段很难直接采用低温制冷剂作为微通道换热器的载冷剂用于锂离子电池换热。

3 BTMS 加热方式研究进展

在低温工况下, 电池内部的活性物质无法得到有效利用, 其内阻因锂离子极化反应的增强而增大, 电子的转移速度也受制于电解液粘度的增加而减弱。如果温度低于限值, 电解液将冻结, 直接引发 EV 无法启动, 因此, 为保证 EV 在使用过程的可靠性能与锂离子电池的正常使用, 对 BTMS 加热方式进行了综述分析, 将促进后续相关研究工作的展开。

通过对锂离子电池的换热形式设计与相关辅助设备的改进, 可用于对锂离子电池加热, 只是加热效果和速率相同, LC-BTMS 大于 PCM-BTMS, PCM 大于 AC-BTMS^[2,6]。在一定的工况下, 需要额外的辅助加热方式, 以弥补自身的加热能力的不足。

3.1 内部加热法

Hande 和 Stuart^[48-49]采用低频 (60 Hz) 和高频 (10 ~ 20 kHz) 交流电直接对铅酸电池和 Ni-MH 电池的电解液进行加热研究, 得到 2 种方式均可以在几分钟内将 -40 °C 的电池加热至 20 °C。在实验工况电阻为 0.4 Ω 时, 加热电池从 -20~20 °C 所需时间为 54 s。相比于直流电加热方式, 交流电加热方式可以有效防止气体产生。该方法可完全应用于锂离子电池的低温工况加热。

3.2 外部加热法

锂离子电池外部加热主要有: 空气加热、电加热、PCM 加热、液体加热、热管加热、帕尔贴效应加热

以及微通道平板/热管等加热方式^[50]。与内部加热法相比,外部加热比较安全且容易实现。Zhang 等^[51]研究利用车在空调系统对锂离子电池进行直接加热,得到在常规工况下可基本满足使用要求,但在温度低于 5 °C 以下后,加热能力明显不足,需要辅助增加主动加热元件。Rao 等^[52]对 PCM 进行仿真建模研究,得到在工况温度为 45 °C 的 PCM 加热电池(-30~10 °C)所需时间是相同条件下空气的 20%;但其热传导性能差,需要添加较高导热系数的介质,如碳纳米管、膨胀石墨等,促使其成本剧增。Alaoui 等^[53]基于帕尔贴效应设计了电池主动式加热系统,并在 SAMEVII 上,对车载锂离子电池进行加热测试,得到在固定环境工况(17 °C、电流 4 A、时间 20 min)时,电池的表面温度上升至 29 °C,此时消耗的电池容量仅为 5.4 kC;Wang 等^[54]通过将热管与液冷相结合的方式,在工况温度为-20 °C,时长为 14 h 的条件下对其进行研究,得到在液冷箱内温度分别为 20 °C 和 40 °C 时,可分别在 5 min 和 20 min 内将锂离子电池温度从-20 °C 加热到 0 °C。

4 结 语

目前国内外均对 BTMS 进行了大量的研究工作,并取得了一些突破和成果,但依然存在较多的不足需要完善,主要是对 BTMS 的结构强度研究不足,微通道应用于 BTMS 的强化换热的研究不够深入,BTMS 理想的加热热源研究有待进一步深化,以及当前 BTMS 仍未完善的散热与热不均衡等问题。

相对于常规的空冷、液冷、相变材料与热管等冷却方式以及新型的热电制冷等方式,基于微热管式、微通道及微通道冷板的 BTMS 具有更佳的换热性能与空间性能。许多研究均集中于微通道换热结合其他方式的应用层面,对于如何进一步强化微通道自身的换热研究相对较少。对各类型微尺度 BTMS 的研究均存在整体结构复杂、换热细节研究不深、实用性不强以及针对微通道的相关强化研究不足等问题,因此,对微通道液冷式 BTMS 进行更为深入的强化换热研究、强化结构体力学强度研究以及其换热动态特性研究势在必行。此外,由于微尺度设备制造所需的复杂加工工艺和较高的工业技术水平,微尺度的 BTMS 初期技术成本较高;这类 BTMS 具有寿命长(≥ 20 年)、耗材少与热效率高优点,使其具有较低的使用成本和极佳的环保/节约特性,市场前景非常良好。

参考文献:

[1] LI Y, DU Y, XU T, et al. Optimization of Thermal Management System for Li-ion Batteries Using Phase Change Material[J]. Applied Thermal Engineering,

2017, 131: 766—778.
 [2] PESARAN A, SANTHANAGOPALAN S, KIM G H. Addressing the Impact of Temperature Extremes on Large format Li-ion Batteries for Vehicle Applications (Presentation)[J]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2013, 38(7): 3797—3806.
 [3] 刘霏霏. 微热管在电动汽车电池热管理系统中应用关键技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017: 1—221.
 LIU Fei-fei. Research on the Application of Micro-heat Pipe in The Battery Thermal Management System of Electric Vehicles[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017: 1—221.
 [4] WU Wei-xiong. A Critical Review of Battery Thermal Performance and Liquid Based Battery Thermal Management: A review[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 182: 262—281.
 [5] WANG Z, LI S, ZHANG Y, et al. Oxocarbon-functionalized Graphene as a Lithium-ion Battery Cathode: A First-principles Investigation[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2018, 20: 33—52.
 [6] SMITH J, HINTER B, ERGER M, HABLE P. Simulative Method for Determining the Optimal Operating Conditions for a Cooling Plate for Lithium-ion Battery Cell Modules[J]. Journal of Power Sources, 2014, 267: 784—792.
 [7] RAO Z, WANG S. A Review of Power Battery Thermal Energy Management[J]. Renewable and sustainable Energy Reviews, 2011, 15(9): 4554—4571.
 [8] STUART T A, HANDE A. HEV Battery Heating Using AC Currents[J]. Journal of Power Sources, 2004, 129(2): 368—378.
 [9] XU X M, HE R. Research on the Heat Dissipation Performance of Battery Pack Based on forced Air Cooling[J]. Journal of Power Sources, 2013, 240: 33—41.
 [10] PARK H. A Design of Air Flow Configuration for Cooling Lithium-ion Battery in Hybrid Electric Vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2013, 239: 30—36.
 [11] JAURA A K, PARK C W. Battery System for Automotive Vehicle[P]. Google Patents, 2007-02-08.
 [12] PAUL NELSON, DENNIS DEES, KHALIL AMINE. Modeling Thermal Management of Lithium-ion PNGV Batteries[J]. Journal of Power Sources, 2002, 110(2): 349—356.
 [13] RAMI S, KIZILEL R. Active (Air-cooled) vs. Passive (Phase Change Material) Thermal Management of High Power Lithium-ion Packs: Limitation of Temperature Rise and Uniformity of Temperature Distribution[J]. Journal of Power Sources, 2014, 182(2): 630—638.
 [14] FAN L. KHODADADI J M. A Parametric Study on

- Thermal Management of an Air-Cooled Lithium-ion Battery Module for Plug-in Hybrid Electric Vehicles[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 238: 301—312.
- [15] HALLAJ S, SELMAN J R. Thermal Modeling of Secondary Lithium Batteries for Electric Vehicle/Hybrid Electric Vehicle Applications[J]. *Journal of Power Sources*, 2002, 110(2): 341—348.
- [16] RIZA KIZILEL, RAMI SABBAH, J. Robert SELMAN. An Alternative Cooling System to Enhance the Safety of Li-ion Battery Packs[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 194(2): 1105—1112.
- [17] DAVID R. PENDERGAST, EDWARD P. A Rechargeable Lithium-ion Battery Module for Underwater Use[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(2): 793—800.
- [18] DEES D W, BATTAGLIA V S, BELANGER A. Electrochemical Modeling of Lithium Polymer Batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2002, 110: 310—320.
- [19] MOTTARD J M, HANNAY C, WINNANDY E L. Experimental Study of the Thermal Behavior of a Water Cooled Ni-Cd Battery[J]. *Journal of Power Sources*, 2003, 117(1/2): 212—222.
- [20] 冯竞阳. 基于Ansys Workbench12.0的磷酸铁锂动力电池温度场特性研究[J]. *青岛大学学报(工程技术版)*, 2013, 28(1): 51—55.
FENG Jing-yang. Research on Temperature Field Characteristics of Lithium-iron Phosphate Power Battery Based on Ansys Workbench12.0[J]. *Journal of Qingdao University (Engineering Technology Edition)*, 2013, 28(1): 51—55.
- [21] CHEN K, LI X. Accurate Determination of Battery Discharge Characteristics-a Comparison between Two Battery Temperature Control Methods[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 247: 961—966.
- [22] WANG Q, JIANG B, LI B. A Critical Review of Thermal Management Models and Solutions of Lithium-ion Batteries for the Development of Pure Electric Vehicles[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 64: 106—128.
- [23] ZHU D, MATHEWS J, TAENAKA B. Method and System for a Vehicle Battery Temperature Control[P]. *Google Patents*, 2005-02-07.
- [24] HUANG Q, LI X, ZHANG G. Experimental Investigation of the Thermal Performance of Heat Pipe Assisted Phase Change Material for Battery Thermal Management System[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 115: 573—583.
- [25] LIANG J, GAN Y, LI Y. Investigation on The Thermal Performance of a Battery Thermal Management System Using Heat Pipe Under Different Ambient Temperatures[J]. *Energy Conversion & Management*, 2018, 155: 1—9.
- [26] HONG S, ZHANG. Design of Flow Configuration for Parallel Air-cooled Battery Thermal Management System With Secondary Vent[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 135: 507—521.
- [27] E Jia-qiang, HAN Dan-dan. Orthogonal Experimental Design of Liquid-cooling Structure on the Cooling Effect of a Liquid-cooled Battery Thermal Management System[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 132: 508—520.
- [28] XIE J, GE Z, ZANG M. Structural Optimization of Lithium-ion Battery Pack with Forced Air Cooling System[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 126: 583—593.
- [29] MATTHIEU COSINER, GILLES FRAISSE. An Experimental and Numerical Study of a Thermoelectric Air-cooling and Air-heating System[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2008, 31: 1051—1062.
- [30] YAN J, WANG Q, LI K. Numerical Study on the Thermal Performance of a Composite board in Battery Thermal Management System[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 106: 131—140.
- [31] SWANEPOEL G. Thermal Management of Hybrid Electrical Vehicles using Heat Pipes[D]. Cape Town: Stellenbosch University, 2014: 1—167.
- [32] BURBAN G. BURBAN V, AYL A. Experimental Investigation of a Pulsating Heat Pipe for Hybrid Vehicle Applications[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 50(1): 94—103.
- [33] EUGENE KIM, KANG G. SHIN LEE. Real-time Battery Thermal Management for Electric Vehicles[C]// 2014 ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPs) ACM, 2014.
- [34] LI Yi, CHEN Y, JIANG Q. Performance Assessment and Optimization of Seepage Control System: a numerical Case Study for Kala Underground Powerhouse[J]. *Computers & Geotechnics*, 2014, 55: 306—315.
- [35] RAO Z, HUO Y, LIU X. Experimental Study of an OHP-cooled Thermal Management System for Electric Vehicle Power Battery[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2014, 57: 20—26.
- [36] JARRET T, ANTHON Y, KIM II YONG. Influence of Operating Conditions on the Optimum Design of Electric Vehicle Battery Cooling Plates[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 245: 644—655.
- [37] JIN L W, LEE P S, KONG X X. Ultra-thin Minichannel LCP for EV Battery Thermal Management[J]. *Applied Energy*, 2014, 113: 1786—1794.
- [38] ZHAO J, RAO Z, LI Y. Thermal Performance of Mini-channel Liquid Cooled Cylinder Based Battery Thermal Management for Cylindrical Lithium-ion Power Battery[J]. *Energy Conversion & Management*, 2015, 103: 157—165.
- [39] ZHEN Q, YI M. Thermal Performance of Lithium-ion Battery Thermal Management System By Using

- Mini-channel Cooling[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 126: 622—631.
- [40] LAN C, XU J. Thermal Management for High Power Lithium-ion Battery By Minichannel Aluminum Tubes[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 116: 563—573.
- [41] WANG C, ZHANG G. Liquid Cooling Based on Thermal Silica Plate for Battery Thermal Management System[J]. *International Journal of Energy Research*, 2017, 126: 622—631.
- [42] LI Yimin, QIAN. Thermal Performance of Liquid cooling Based Thermal Management System for Cylindrical Lithium-ion Battery Module With Variable Contact Surface[J]. *Applied thermal engineering: Design, processes, equipment, economics*, 2017, 121: 470—481.
- [43] MALIK M, DINCER I, ROSEN Marc A. Thermal and Electrical Performance Evaluations of Series Connected Li-ion Batteries in a Pack With Liquid Cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 129: 472—481.
- [44] ZHAO C, CAO W, DONG T. Thermal Behavior Study of Discharging/Charging Cylindrical Lithium-ion Battery Module Cooled By Channeled Liquid Flow[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2018, 120: 751—762.
- [45] LIU H, EZE C, ZHAO J. Investigation Into the Effectiveness of Nanofluids on the Mini-channel Thermal Management for High Power Lithium-ion Battery[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 156: 523—533.
- [46] BAI Fan-fei. Investigation of Thermal Management for Lithium-ion Pouch Battery Module Based on Phase Change Slurry and Mini Channel Cooling Plate[J]. *Energy*, 2019, 64: 1092—1101.
- [47] AN Z, SHAH K. A Parametric Study for Optimization of Minichannel Based Battery Thermal Management System[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 154: 593—601.
- [48] HANDE A, STUART T A. AC Heating for EV/HEV Batteries[C]// *Power Electronics in Transportation*, IEEE, 2002.
- [49] STUART T A, HANDE A. HEV Battery Heating Using AC Currents[J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 129(2): 368—378.
- [50] JI Y, WANG C.Y. Heating Strategies for Lithium-ion Batteries Operated From Subzero Temperatures[J]. *Electrochimica Acta*, 2013, 107: 664—674.
- [51] ZHANG X, KONG X, LI G. Thermodynamic Assessment of Active Cooling/Heating Methods for Lithium-ion Batteries of Electric Vehicles in Extreme Conditions[J]. *Energy*, 2014, 64: 1092—1101.
- [52] RAO Z H, WANG S F, ZHANG Y L. Thermal Management With Phase Change Material for a Power Battery Under Cold Temperatures[J]. *Energy Sources Part a Recovery Utilization & Environmental Effects*, 2014, 36(20): 2287—2295.
- [53] ALAOUI C, SALAMESH Z M. A Novel Thermal Management for Electric and Hybrid Vehicles[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2005, 54(2): 468—476.
- [54] WANG Q, JIANG B, XUE Q F. Experimental Investigation on EV Battery Cooling and Heating by Heat Pipes[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 26: 43—53.