

快速充电条件下的电池热管理研究进展

张世恒, 王波*, 孙聪聪, 陈相煜

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2023年9月14日; 录用日期: 2023年11月9日; 发布日期: 2023年11月16日

摘要

为促进生态环境的可持续发展, 发展新能源汽车已成为各国的共识。与传统汽车相比, 较长的充电时间制约了新能源汽车的进一步推广。快速充电是解决这一问题的关键技术, 但大倍率地充放电会使电池在短时间内产生大量热量, 对电池热管理系统提出了更高的要求。本文介绍了锂电池产热机理和模型, 总结了新能源汽车快速充电条件下电池热管理研究现状, 比较了空气冷却系统、液体冷却系统、相变冷却系统和热管冷却系统在大倍率充放电时的优缺点, 讨论了各种热管理系统的发展趋势, 分析指出了快速充电条件下动力电池热管理中有待进一步研究的问题。提出使用多种散热方式相耦合的热管理系统, 在提高系统散热速率的同时维持电池模组的温度均匀性。

关键词

电动汽车, 锂离子电池, 快速充电, 热管理

Research Progress of Battery Thermal Management under Fast Charging Conditions

Shiheng Zhang, Bo Wang*, Congcong Sun, Xiangyu Chen

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Sep. 14th, 2023; accepted: Nov. 9th, 2023; published: Nov. 16th, 2023

Abstract

In order to promote the sustainable development of the ecological environment, the development of new energy vehicles has become the consensus of all countries. Compared with traditional vehicles,

*通讯作者。

the longer charging time restricts the further promotion of new energy vehicles. Fast charging is the key technology to solve this problem, but the large rate of charging and discharging will make the battery generate a lot of heat in a short time, which puts forward higher requirements for the battery thermal management system. This paper introduces the heat generation mechanism and model of lithium batteries, summarizes the research status of battery thermal management under the condition of fast charging of new energy vehicles, compares the advantages and disadvantages of air cooling system, liquid cooling system, phase change cooling system and heat pipe cooling system in large rate charging and discharging, discusses the development trend of various thermal management systems, and analyzes and points out the problems that need further research in thermal management of power batteries under fast charging conditions. A thermal management system coupled with multiple heat dissipation methods is proposed to improve the heat dissipation rate of the system while maintaining the temperature uniformity of the battery module.

Keywords

Electric Vehicle, Lithium-Ion Battery, Fast Charging, Thermal Management

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国在十二五规划中提出推动绿色发展，建设资源节约型、环境友好型社会，新能源汽车行业得到政府的大力支持。如图 1 所示，我国新能源汽车销量在近十年得到爆发式增长[1] [2] [3]。在销量增长的背后，新能源汽车的一些问题逐渐显现，如充电时间长、续航里程短等。为了更好地替代传统能源汽车，解决充电焦虑、续航焦虑成为行业面临的关键技术问题，而快速充电是解决该问题的最佳手段[4] [5]。

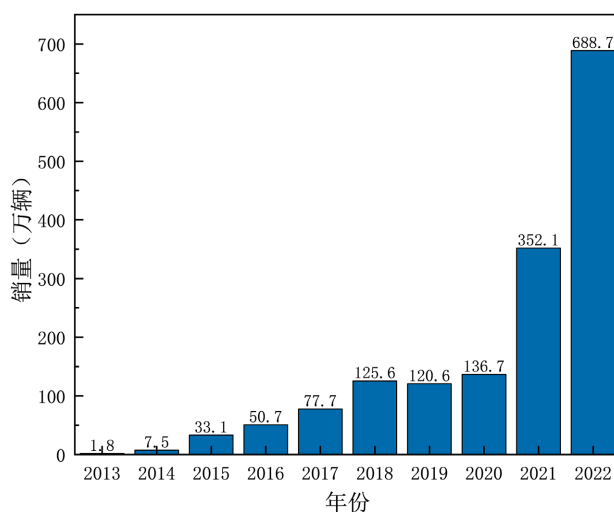


Figure 1. Sales of new energy vehicles in China from 2013 to 2022

图 1. 2013~2022 年我国新能源汽车销量

锂电池与其他动力电池相比具有能量密度高、循环寿命长、自放电率低等优点，成为车用电池的热门选择，但是锂离子电池对温度十分敏感[6] [7]。Zhao 等人[8]研究发现，在 30°C~40°C 的工作温度范围

内, 电池温度每增加 1°C, 寿命就减少 2 个月。索尼公司的 18650 电池在 45°C 下循环 800 次后容量损失了 37%, 在 55°C 下循环 491 次后, 容量损失超过 71% [9]。电池在快速充电时电池会在短时间释放大量的热量, 若不能及时冷却, 会造成电池温度迅速攀升, 影响电池使用寿命, 当温度超过一定临界温度后, 将会发生严重的副反应, 最终导致火灾发生[10] [11] [12]。这就对电池热管理系统提出了新的要求, 确保电池在快充时的温度和温差保持在安全范围内, 避免安全事故发生。

当前电池热管理综述所进行的研究大多集中在较低倍率的充放电, 很少有介绍快充条件下各种热管理方式的优缺点。本文从快速充电角度出发, 介绍了锂电池的产热机理及产热特性, 对主流的电池热管理技术在快充条件下的应用进行总结, 对比分析现有技术的优点和局限性, 为研究人员提供参考。

2. 锂电池的产热机理

2.1. 锂电池的产热机理

锂电池的内部结构和工作原理分别如图 2、图 3 所示, 锂离子电池由正极、电解质和负极组成, 常见的正极材料有磷酸铁锂、锰酸锂和钴酸锂, 负极的常用材料是石墨[13]。电池在充电过程中, Li^+ 从正极材料中脱嵌, 流经电解液、穿过隔膜嵌入到负极材料中, 为保证正、负极间电荷平衡, 外电路中会有等量电子从正极移动到负极, 放电过程则与之相反。伴随着 Li^+ 的嵌入和脱嵌, 电池在充放电过程中会产生大量热量[14], 热量来源主要包括四个方面: 伴随着电池充放电时化学反应产生的热量, 反应热 Q_r ; 电极电位偏移使电池极化产生的极化热 Q_p ; 电流通过电池内部时焦耳效应产生的热量, 焦耳热 Q_j ; 电池运行过程中电解液自身放电产生的热量, 副反应热 Q_s [15]。锂离子电池的总生热量 Q 可用式(1)计算:

$$Q = Q_r + Q_p + Q_j + Q_s \quad (1)$$

其中, 副反应热由于占比较少, 一般忽略不计。但在快速充电过程中, 高电压大电流会使得电池在短时间内急剧温升, 若不能及时散出热量, 就会引发一系列连锁副反应, 如 SEI 膜分解, 电解液分解反应, 正极材料分解, 正、负极材料与电解液反应, 负极材料与粘合剂的反应等, 影响锂电池的使用安全性[16]。

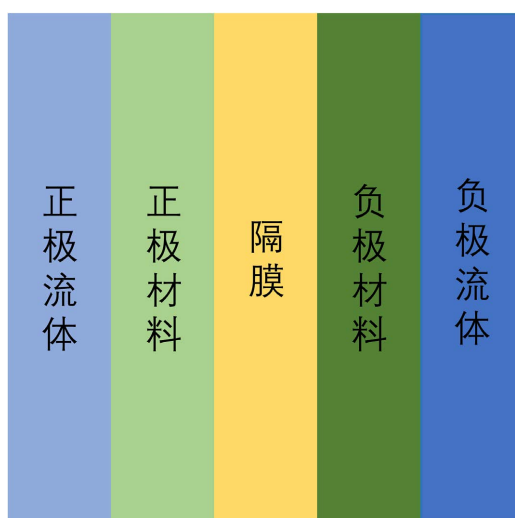


Figure 2. Internal structure diagram of lithium-ion batteries
图 2. 锂离子电池内部结构图

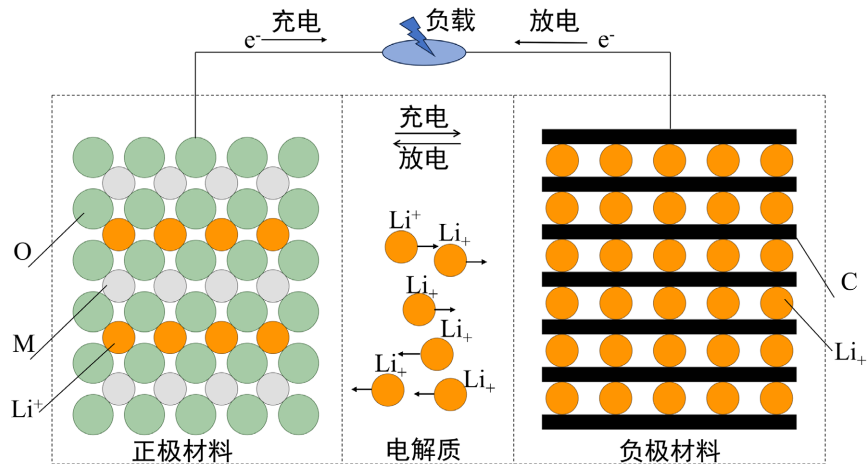


Figure 3. Internal lithium ion migration diagram of lithium batteries
图 3. 锂电池内部锂离子迁移图

2.2. 锂电池热模型

Bernardi 等人于 1985 年提出了电池发热功率计算公式，目前广泛用于锂电池生热速率的计算[17]。该公式假设电池是一个稳定且均匀的热源，在充放电过程中，忽略物质混合引起的混合热，只计算不可逆内阻热和可逆熵热，用式(2)计算：

$$Q = I \left[(U_{oc} - U) + T \frac{\partial U_{oc}}{\partial T} \right] \quad (2)$$

式中： I 为工作电流，A； U_{oc} 为电池开路电压，V； U 为电池工作电压，V； T 为电池温度，K； $\frac{\partial U_{oc}}{\partial T}$ 为温度影响系数。

为了简化计算，式中 $(U_{oc} - U)$ 部分可以用充放电电流与内阻乘积替代即式(3)：

$$Q = I \left[IR + T \frac{\partial U_{oc}}{\partial T} \right] \quad (3)$$

式中： R 为锂电池的极化内阻和欧姆内阻之和， Ω 。

3. 锂电池快充时的产热特性

过去新能源汽车完成充电需要 8~10 小时，为了缓解“充电焦虑”，很多汽车企业都在研发自己的快充技术。目前我国尚未出台新能源汽车快速充电的统一标准，美国汽车工程师协会(The Society of Automotive Engineers, SAE)将直流充电速度划为三个等级[18]，如表 1 所示，其中第三级标准规定，在十分钟内将电池剩余容量(State of Charge, SOC)从 20% 充电至 80%，因此需要充电速率达到 3C 以上，但大倍率充放电会使电池组在短时间内产生大量热量。Mei 等人[19]指出，在 2C 和 4C 的快速放电倍率下，锂电池可分别产生高达 0.18 MW/m³ 和 0.4 MW/m³ 的热量。Lai 等人[20]也对某囊袋电池进行了研究，发现在 5C 放电倍率下，最大产热可达 0.35 MW/m³。Ye 等人[21]研究了一种柱状锂电池在 8C 倍率充电时的产热，发现其产热速率可达到 0.80 MW/m³，若以 8C 倍率将电池充电至 100% 而不能及时冷却，电池温度将从 20℃ 升至 154.4℃，在快速充电时将电池温度维持在安全范围内对新能源汽车的安全运行至关重要。

在适度工作条件下，一般将表面温度上限 50℃，模块内温差低于 5℃ 作为电池热管理系统的设计标准，以促进再生期间电池平衡和均匀充电[22]。现阶段研究中，大多高效散热系统仅提升了电池冷却速率，

对电池内部温度均匀性的兼顾能力较差，而过高的温度梯度会加速电极和电池的老化。因此，本文在进行热管理系统散热能力分析时，将这两个因素作为主要考量指标。

Table 1. Classification of DC charging levels

表 1. 直流充电等级划分

充电等级	需求电压/V	最大功率/kW	SOC 从 20% 充至 80% 用时
等级 1	200~450	36	1.2 小时
等级 2	200~450	90	20 分钟
等级 3	200~600	240	<10 分钟

4. 快充电池热管理系统

目前主流的热管理系统包括空气冷却系统、液体冷却系统、相变冷却系统和热管冷却系统。空气冷却和液体冷却已经广泛应用在市售车辆上，相变冷却和热管冷却目前仍处在研究阶段，并未大规模投入市场[23]。

4.1. 空气冷却系统

空气冷却系统由于结构简单、易于维护低等优点，在新能源汽车中得到了广泛应用，如日产聆风、起亚 Soul EV 等[5] [24]。它以空气作为冷却媒介，通过自然对流或强制对流方式带走热量。根据不同的，空冷流道结构可以分为串联流道和并联流道，其中，并联流道结构又有 U 型和 Z 型之分，二者结构如图 4 所示。

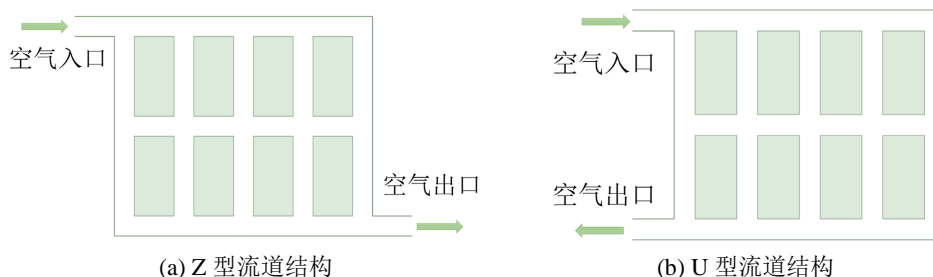


Figure 4. Two flow channel structures for air cooling

图 4. 空气冷却的两种流道结构

Sun [25]研究了图 4 中所示 Z 型风道和 U 型风道的冷却性能，结果表明，与 U 型风道相比，使用 Z 型风道可以降低风道中空气流量变化，减小电池模块的整体压力降和电池温度差异。Wu [26]使用多目标优化方法，改进 U 型电池热管理系统，以电池间距、进气流道分布、风速为设计变量。在 2C 放电的情况下，将整个系统最高温度降至 38.2℃，温差从 4.53℃降低了 0.3℃实现了良好的冷却性能。Xie [27]等通过实验仿真研究了 U 型热管理系统的进、出口角度和风道宽度对电池散热效果的影响。通过正交试验和单因素分析对结构参数进行了优化，得出进、出口角度为 2.5°时，散热性能最佳，优化后电池最高温度和系统温差分别降低了 12.82%和 29.72%。风冷系统因空气热容量低，通常系统所占体积过大，Wang 等[28]采用 Z 型管道，如图 5 所示在管道中设置扰流板，研究扰流板的形状、数量和长度对电池模块的影响。结果表明，改进后的模块与原方案相比，体积减少了 4.87%，最高温度从 36.67℃降至 34.43℃，但模组间温差仍高于 5℃。张甫仁等[29]在 U 型和 Z 型管的基础上，提出了 I 型结构管道，如图 6 所示。

这种管道结构对称, 可使内部气流分布更加均匀, 在和一组液冷板耦合后, 可在 2.5C 放电倍率下将电池最高温度由 42.62℃ 降至 38.75℃ 的安全温度, 温度均匀性提高了 70.19%。

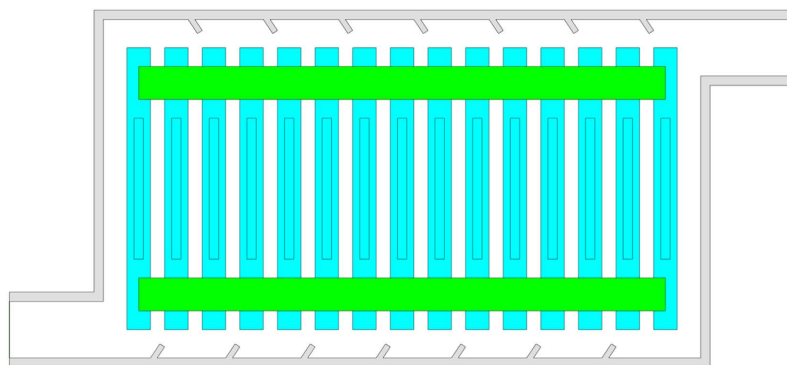


Figure 5. Z-shaped air duct structure with added spoiler

图 5. 添加扰流板的 Z 型风道结构

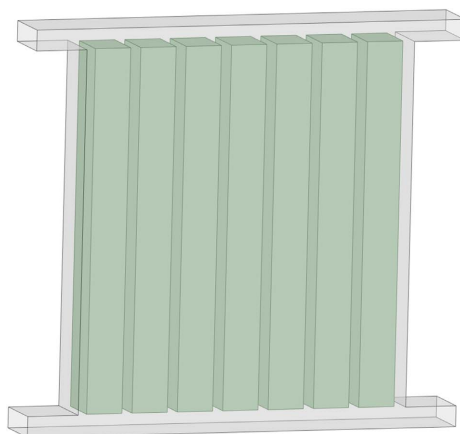


Figure 6. I type air-cooled battery thermal management system

图 6. I 型风冷电池热管理系统

电池组低功率运行时, 空气冷却系统可以有效进行热管理。但由于空气热容量低, 其冷却效果有一定局限性, 当电池组以高倍率充放电时, 空冷系统难以保证电池组的安全运行[21]。文献 24 的研究表明, 要达到相同散热效果, 强制风冷所消耗的能量是其他冷却方式的 2~3 倍, 故风冷与其他方法耦合的散热系统在高倍率充放电中得到应用[30]。Zhang 等[31]提出了一种将喷雾式湿冷与热管相结合的电池热管理系统——翅片湿冷, 如图 7 所示。研究发现, 在 3C 放电条件下, 该系统与不带翅片的风冷和带翅片的风冷系统相比, 分别将电池模块的温度降低了 20.97℃ 和 12.67℃, 最高温度为 36.27℃, 但最大温差仍未达到低于 5℃ 的要求。可见, 空气冷却系统在大倍率充放电条件下的应用还需进一步优化。

4.2. 液体冷却系统

液体冷却是另一种广泛应用的电池冷却方式, 目前市售车中如吉利帝豪 EV、比亚迪宋 DM、特斯拉 Roadster 等都在使用液冷系统[32]。与空气相比, 常见的液体冷却剂如水、乙二醇-水混合溶液等具有更高的导热系数和比热容。因此液体冷却可以更大程度降低电池温度, 保持系统温度均匀性。根据液体是否与电池直接接触, 液冷技术有直接液冷和间接液冷之分。

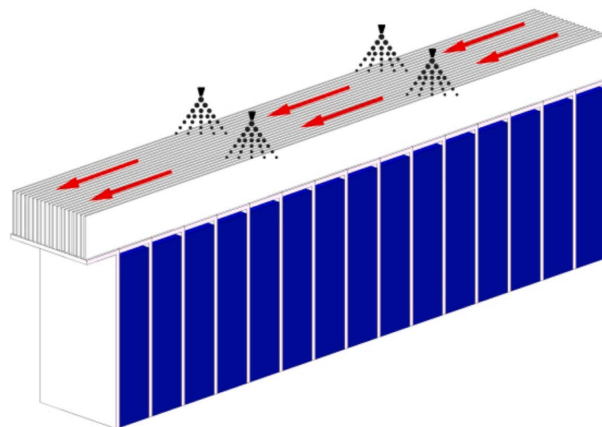


Figure 7. Fin wet, cold, and hot management system
图 7. 翅片湿冷热管理系统

直接液冷是将电池组浸泡在冷却液中，冷却效率较高，系统介质一般使用绝缘液体如矿物质油。直接液冷面临的最大问题是液体泄漏所带来的电池组短路、电化学反应等安全隐患，因此对电池系统的封装工艺与防水性有极高的要求，出于以上考虑，直接液冷还没有广泛用于新能源汽车的电池热管理，而间接液冷因其具有安全性得到了更多的研究[33] [34]。

间接液冷系统是指电池不与冷却液直接接触的冷却系统，其结构如图 8 所示，通过泵将冷却液输送至冷板或冷却管道内。间接液冷在大功率充放电下的热管理研究主要集中在冷却液种类、冷却液流量、冷却板结构等方面。Jin 等[35]开发了一种带斜肋的微通道液体冷却系统，其散热能力优于传统直通冷却板系统，实验结果表明在热负荷为 1240 W 时，0.1 L/min 的冷却液流量使电池温度不超过 50℃。Siruvuri 等[36]设计了一种以水为冷却剂的环形矩形通道冷却系统，通过改变管道内的液体流速来控制电池组运行时的温度，分析 5C 放电倍率下冷却液流量、流向等参数对电池组温度分布的影响，系统优化后将模组最高温度降低了 19.69℃。Amalesh [37]对比了 7 种冷板在电池以 3C 速率放电时的冷却效果，如图 9 所示。结果表明，水流为 0.1 m/s 时环形冷板和之字形冷板能够在放电结束时将温度控制在 38℃，系统温差保持在 5℃ 以下，而环形冷板的压降仅为之字形通道中的三分之一。Li 等[38]研究了单体电池在 5C 快充和短路条件下的微通道热管理系统冷却效果。在 0.1 m/s 冷却液流速下，5C 快速充电时最高电池温度和最大温差被限制在 30℃ 和 5℃ 以下。外部短路情况下，电池温度可以被控制在 60℃ 以下，从而防止了热失控发生。基于单个电池的热性能，孙悦等[39]研究了不同比例的乙二醇 - 水混合物在 5C 放电工况下的冷却效果，结果表明电池组温度随冷却液中乙二醇含量的增加而上升，在混合比为 1:4 时冷却效果最好。

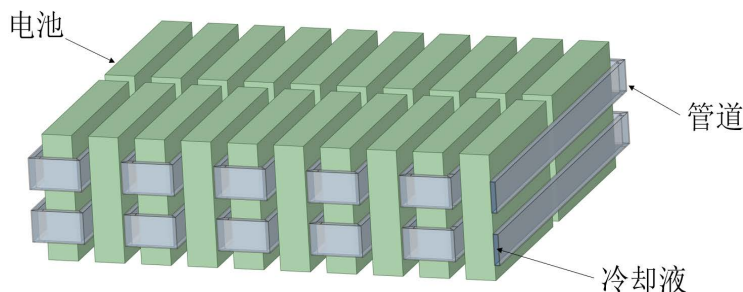


Figure 8. Design structure of indirect liquid cooling
图 8. 间接液冷的设计结构

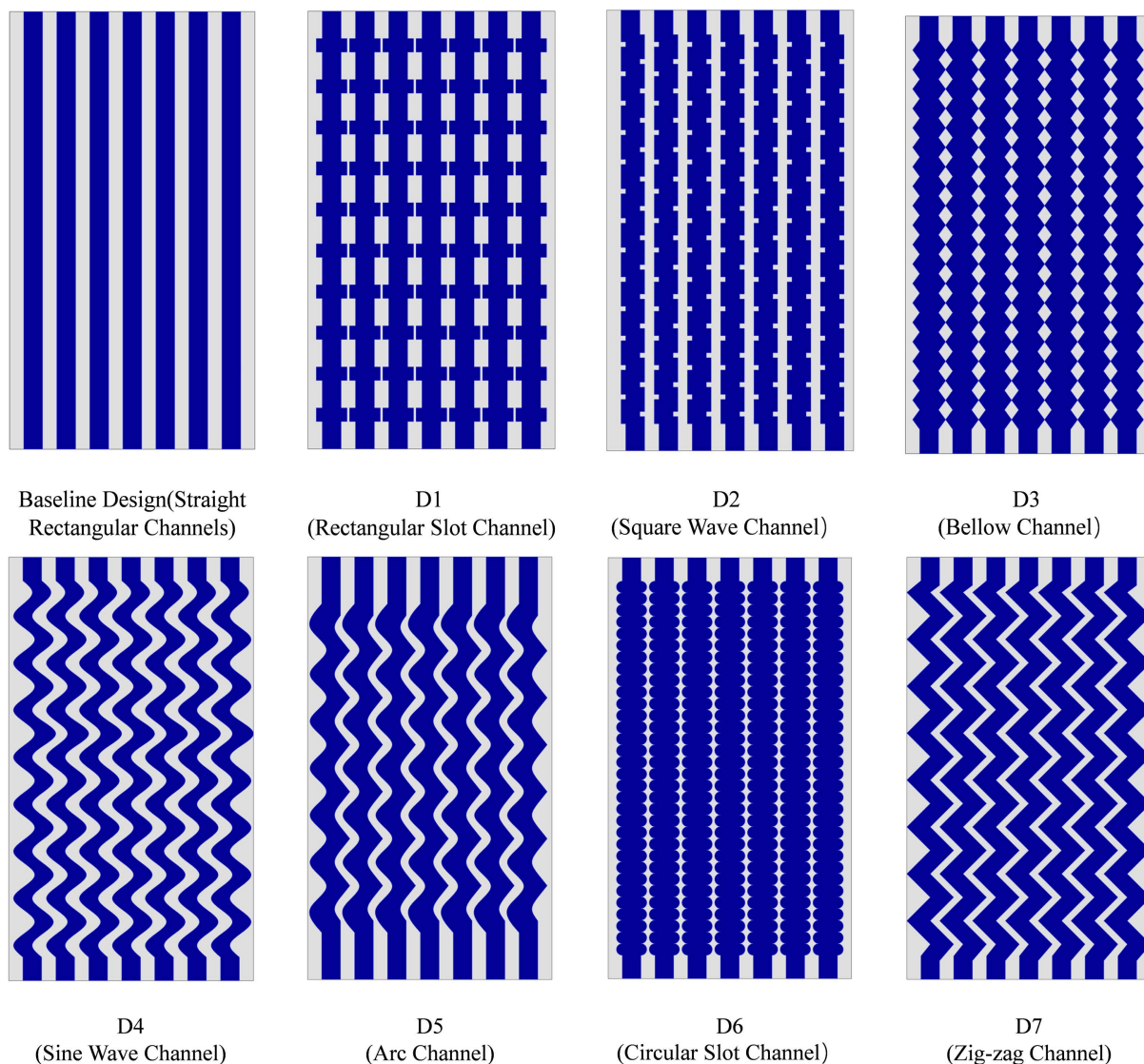


Figure 9. Cold plates with different design structures

图 9. 不同设计结构的冷板

为了使整个散热系统的温度分布更加均匀，研究人员通常会把管道内的冷却液流向设置为交替变化的，但会导致出口管道流体将不必要热量传给进口管道流体，Zheng 等[40]通过在冷却管之间插入绝热夹层来解决，消除了管道间不必要的热传递，并保持了系统的冷却性能和温度均匀性，其结构如图 10 所示。结果表明，优化后的系统在 8C 倍率充电时的最高温度为 38.69℃，最大温差为 2.23℃。Huo 等[41]设计了一种基于微通道冷板的电池热管理系统，如图 11 所示，在 5C 放电倍率下研究了通道数、流动方向、入口质量流量和环境温度对模组冷却性能的影响。结果表明，增加通道进口流量可以更有效地冷却电池，但存在一个最佳质量流量，超过这个流量系统冷却效率就会下降，质量流量的增加也会减弱流动方向对热管理系统的影响。

以往的研究很少关注液冷系统的紧凑度和重量比，而控制系统重量也对热管理系统设计至关重要。Lai 等[42]对圆柱形锂离子电池进行研究，提出了一种新型的三曲面接触面导热结构来冷却电池芯，如图 12 所示。这种新型设计结构紧凑，有效减轻了液冷系统的总质量。经过结构参数优化，与原系统相比，在 5C

放电倍率下冷却液压降、电池单体间温差、模组结构质量分别降低了 80%、14% 和 46%，电池最高温度可以控制在 40℃ 以下，冷却效果较好。

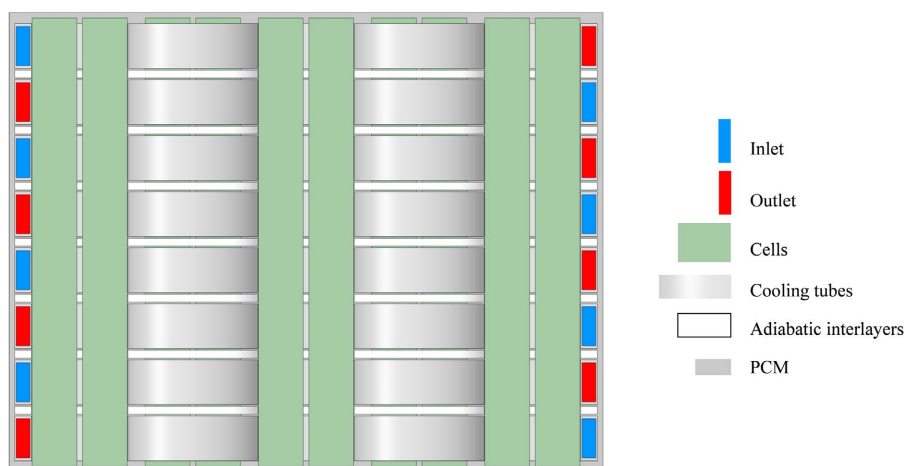


Figure 10. Thermal management system with inserted insulation interlayer

图 10. 插入绝热夹层的热管理系统

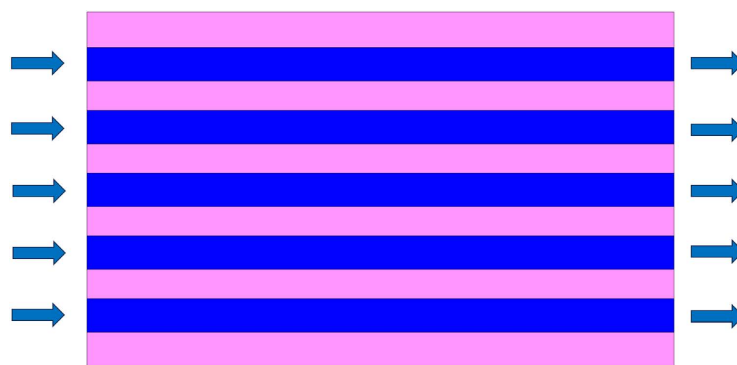


Figure 11. Microchannel liquid cooling system

图 11. 微通道液冷系统

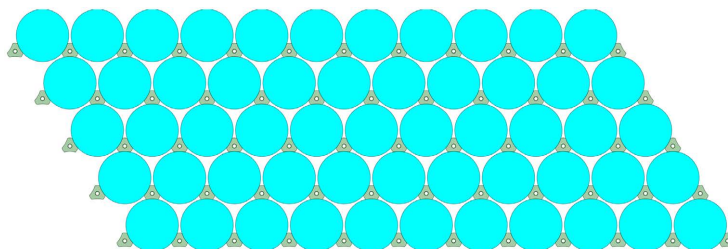


Figure 12. Microchannel liquid cooling system

图 12. 微通道液冷系统

目前间接液体冷却系统已广泛应用于中高端新能源汽车热管理，但是在高温环境下使用单一液冷作为散热方式可能存在设备故障隐患。因此，在极端环境中使用两种或以上的散热方式可极大增强系统安全性。

4.3. 相变冷却

相变材料冷却是一种被动的冷却方法，相变材料会在特定温度发生相变，吸收或放出大量潜热后自

身温度基本不变, 可将其用于电池热管理技术, 一段时间内维持电池模组温度恒定, 其结构图如图 13 所示, 相变材料也可在低温环境下保温电池模组[43]。根据相变方式的不同, 相变材料可分为固-气、固-液、固-固和液-气[44]四类, 其中, 固-液相变材料在电池热管理中应用较多[45]。石蜡因具有化学性质稳定、无毒不易燃、热容量和潜热值高等优点, 成为电池热管理的主要研究材料[46], 但其导热系数较低[47], 为解决这一问题, 通常在相变材料中加入高导热系数材料, 如碳纤维[48]、石墨烯[49]、金属泡沫[50]或膨胀石墨[51]等, 组成具有更高导热系数的复合相变材料。但也会增加热管理系统的重量, 降低复合相变材料的潜热, 因此结合根据实际情况进行考虑。

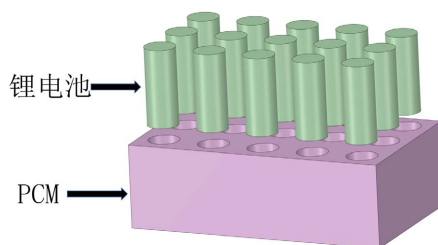


Figure 13. Structure diagram of phase change material cooling system
图 13. 相变材料冷却系统结构图

Zhang 等[52]将石蜡与泡沫铜结合, 提高相变材料导热系数。结果表明, 泡沫铜-石蜡相变材料组成的系统可以显著降低电池组在快速充电下的温度, 5C 充电倍率下, 电池模组的最高温度为 47.56℃, 而应用单一相变材料的电池模组最高温度为 54.12℃。刘军等[53]测量了不同质量比的石蜡/泡沫铜复合材料在 30℃和 35℃的散热性能。结果表明, 与热管耦合的热管理系统在泡沫铜含量占比为 56.4%时散热性能最佳。Hussain 等[54]研究了泡沫镍与相变材料结合的散热效率, 研究结果表明, 与纯相变材料相比, 使用石蜡复合镍泡沫热管理系统使电池表面温度降低 31%。针对石蜡相变后泄漏的问题, 一些文献提出向纯石蜡中添加膨胀石墨、热塑性材料作为支撑材料, 以避免液态石蜡泄漏。Zhao 等[55]将石蜡与膨胀石墨混合, 利用正交试验得出合适的混合质量比。结果表明膨胀石墨质量含量为 16%时, 复合相变材料无泄露现象, 且在 20℃时复合相变材料的导热系数为 3.41 W/(m·K), 与纯石蜡的导热系数相比提高了约 12 倍。Luo 等[56]设计了一种由双相变范围(33.9℃和 47.6℃左右)的石蜡、膨胀石墨和环氧树脂按照质量比为 5:2:3 组成的新型相变材料。石墨薄膜和膨胀石墨形成了优良的导热结构。结果表明, 电池在 4C 倍率下放电时最高温度是 33℃, 电池之间的最大温差只有 1.4℃。

将相变材料与其他散热方法结合起来, 可以有效地提升系统安全性。Gu 等[57]在复合相变材料中添加翅片风冷的锂离子电池热管理系统, 在满足散热性能要求的情况下, 减轻了锂离子电池热管理系统的重量, 其结构图如图 14 所示。Faizan 等[58]将复合相变材料和冷板进行结合, 如图 15 所示, 可以实现电池模块在 8C 放电倍率下的混合热管理。根据复合相变材料的位置提出了两种新的设计方案, 一种是复合相变材料和带有通道的冷却板被夹在电池之间, 另一种设计将复合相变材料包裹在电池周围。结果表明两种混合冷却系统都可以将电池温度降低到 50℃的安全范围内。

4.4. 热管冷却

热管冷却技术近年来被用于电池热管理中, 热管由蒸发部、绝热部和凝结部组成, 具有传热效率高、维护成本小、结构紧凑、易于制造、寿命长等优点, 在航天、电子、化工、能源等领域有诸多的应用[59]。Mullet 等[60]通过热管技术, 改进了胶囊型核反应堆的热设计; Wang 等[61]设计出一种基于平板热管的天太阳能空气加热系统, 可有效对空气进行加热。热管使散热和热源分离, 从而可以更充分地利用传热面

积, 使电池在合适温度内工作, 并将系统内部温差保持在正常数值, 其结构如图 16 所示[62]。在快速充电的条件下, 基于热管的热管理系统可以实现高传热率和电池组紧凑性之间的平衡。

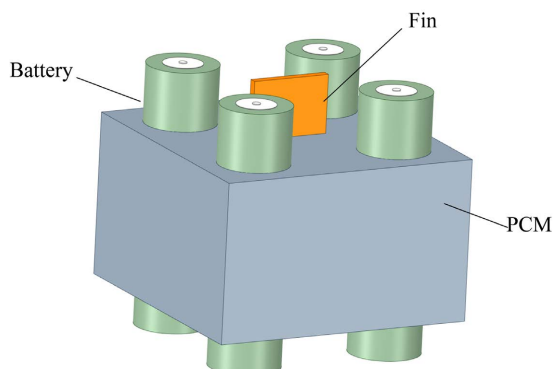


Figure 14. A battery thermal management system combining phase change cooling and air cooling
图 14. 相变冷却与风冷结合的电池热管理系统

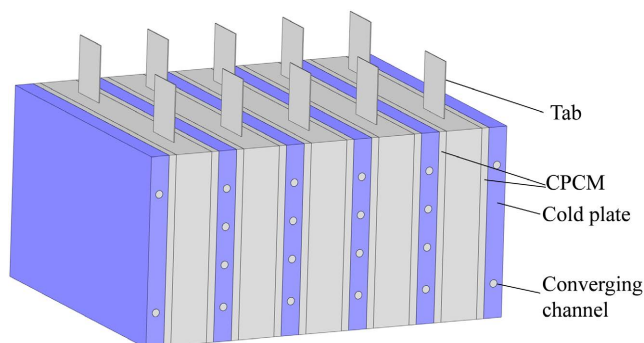


Figure 15. Thermal management system for phase change materials and liquid cooled coupled batteries
图 15. 相变材料与液冷耦合电池热管理系统

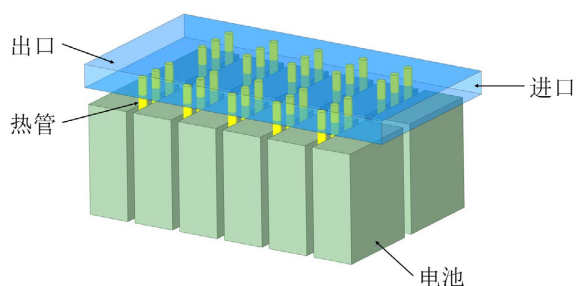


Figure 16. Structure diagram of heat pipe cooling system
图 16. 热管冷却系统结构图

Behi 等[63]对比了单体电池在 22℃, 8C 放电倍率下空气冷却、液体冷却和热管冷却的最高温度, 结果表明液体冷却系统和热管冷却系统与自然空气冷却相比表现出更好的冷却性能, 将模组温度分别降低了 29.9%和 32.6%。目前由热管组成的热管理系统研究主要集中在增强热管与电池间的热量传递, 研究人员将相变材料和金属翅片结合起来, 组成复合热管理系统。Ye 等[21]研究发现, 在热管散热系统中使用铜散热器和冷却翅片, 可以大大提高热管理系统的性能并改善散热系统的温度均匀性。改进后的结果表明, 热管冷却可以满足电池包以 8C 倍率充电时所需的散热。Wei 等[64]采用了“三明治”式热管理系统, 在电池间布置脉动热管, 如图 17 所示。研究了不同比例水 - 乙醇混合介质的散热性能, 液体填充率分别

为 30%、40%、50%。结果表明水 - 乙醇按 1:1 或 1:2 混合, 填充率为 30% 时, 电池平均温度可以控制在 46.2℃ 以下, 系统具有较好的温度均匀性, 系统温差为 1℃~2℃。丹聘等[65]采用铝制平板热管对电池组进行冷却, 其传热原理图如图 18 所示, 这种热管相较于传统热管可有效提高系统温度均匀性, 降低系统总质量。Zhao 等[66]设计了一种热管与相变材料耦合的热管理系统, 在相同条件下耦合热管理系统将最大温度保持在 50℃ 以下的时间比相变热管理系统更长。与空气自然对流相比, 相变散热使温差降低 33.6%, 而将热管嵌入相变材料进一步使温差降低了 28.9%。Liang 等[67]从冷却策略方面入手, 研究了不同环境温度、不同冷却剂流速、冷却剂温度和发热率下的电池温度响应。讨论了非同步冷却的散热效果, 即在电池的早期运行阶段热管不运行, 当电池最高温度超过设定值后, 热管冷却系统开始运行。通过减少系统的启动时间, 降低冷却系统能耗。

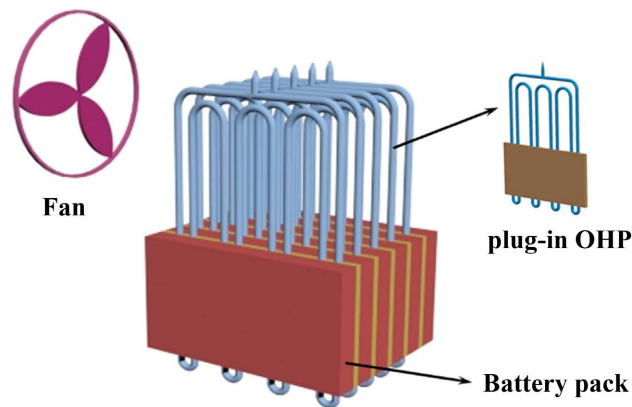


Figure 17. Schematic diagram of plug-in pulsating heat pipe thermal management system
图 17. 插入式脉动热管热管理系统示意图

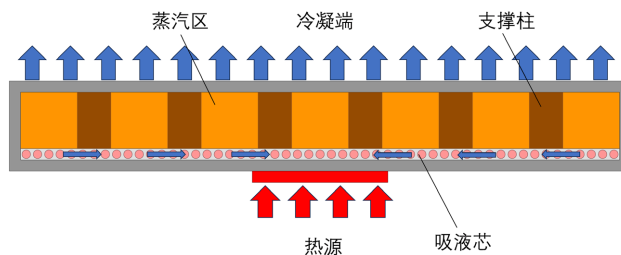


Figure 18. Schematic diagram of heat transfer principle for flat heat pipes
图 18. 平板热管传热原理示意图

目前热管冷却在电池热管理方面的应用仍处在初步开发阶段, 没有在市场上大规模使用。近年来, 有将热管插入圆筒电池芯内[68] [69], 进行内部冷却的研究, 其结构过于复杂, 仍需进一步的研究。

Table 2. Comparison of battery thermal management methods
表 2. 电池热管理方式比较

参考文献	冷却方式	电池类型	充放电倍率	研究方法	冷却结果	技术特点
Wu [26]	风冷	棱柱型锂电池 43 Ah	2C	数值模拟	最高温度 38.2℃, 系统温差 4.23℃	由于空气热容量低, 该热管理模型只能解决较低倍率的充放电热管理。

Continued

Wang [28]	风冷	囊袋电池 TLP80A5E6-50AH	模拟产热率 23,045 W/mm ³	实验模拟	最高温度 34.43℃, 最大 温差降低至 9.4℃	通过增设扰流板、改变气流路径等方法将温度将至最佳工作温度区间, 但无法保证温度分布均匀
孙悦[39]	间接液冷	棱柱型磷酸铁锂电池 10 Ah	5C	数值模拟	最高温度由 59.1℃下降到 31.37℃, 最大 温差小于 5℃	液冷系统相较空气冷却系统, 空间需求更小
Lai [42]	间接液冷	18650 锂电池	5C	数值模拟	将温度控制在 40℃, 最大温 差小于 5℃	在控制温度的同时, 将结构质量降低了 46%
Zhang [52]	相变冷却	棱柱型磷酸铁锂电池 13.5 Ah	5C	实验模拟	最高温度从 54.12℃降至 47.56℃, 温差 小于 5℃	由泡沫铜 - 石蜡组成的复合相变材料散热效果优于纯石蜡材料
Luo [56]	相变冷却	18650 锂电池 2.6 Ah	4C	实验	最高温度 33℃, 最大温 差 1.4℃	设计了一种有双相变温度范围的石蜡, 增强了热管理系统在极端条件下的稳定性
Ye [21]	热管冷却	棱柱形电池	模拟 3C、 5C、8C 平均 产热率	实验模拟	输入功率为 100 W 时将最 高温度控制在 37℃, 温差小 于 5℃	在热管理系统中加入了铜制散热片, 使系统散热性能大大提升

5. 总结展望

动力电池容量上升和充电倍率增加是其发展的必然趋势, 大倍率充放电工况下, 电池模组将在短时间内产生大量热量, 对散热系统的要求更高。为评价不同冷却方式在大倍率充放电条件下的冷却效果, 从电池类型、充放电倍率、研究方法等方面进行比较, 见表 2。目前主流的动力电池热管理系统中, 风冷系统具有结构简单、易于维护、成本低等优点, 但受空气低导热系数的影响, 空冷系统难以在高倍率充放电时将电池温度控制在合理范围内; 与空冷系统相比, 液体冷却的换热效率更高, 能将快充时电池模组的最高温度和温差均维持在安全范围内, 但系统结构复杂, 要防止液体泄漏带来的危害, 对于封装工艺要求高, 不能很好地控制系统重量; 相变冷却基于相变材料出色的蓄热能力, 具有结构简单, 无需额外功耗的优点, 但导热系数较低, 发生相变后存在泄漏风险; 热管冷却导热性高、等温性好, 已在航天、电子等领域广泛应用, 但是在锂电池热管理领域尚处于起步阶段。综上所述, 使用两种或以上散热方式耦合的复合冷却系统能有效降低快充条件下电池模组的最高温度和系统温差, 应用前景良好。

为克服现有散热技术在快充电池热管理中的不足, 提高热管理系统的综合性能, 进一步改善电动汽车的用户体验, 还存在一些值得研究的问题:

(1) 快充电池热管理系统强化换热技术。发热功率显著增大是动力电池快充过程中的显著特点, 如何

强化散热是控制电池温度的关键。

(2) 极端气候环境下电池快充过程的热管理。例如, 在 -20°C 低温或 40°C 高温环境中进行快速充电, 如何将电池的最高温度保持在 $30^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 安全运行范围内并使电池的最大温差保持在 5°C 以下;

(3) 热管理系统自身的质量与能耗控制。目前热管理系统设计侧重于电池组温度的控制, 而对热管理系统自身的质量与能耗考虑较少, 未来的研究有必要综合考虑热管理系统的控温效果和使用成本;

(4) 热管理系统的智能化。随着新能源汽车逐步趋向智能化管理, 如何将电池热管理纳入整车综合管理系统之中, 在电池组和其他系统之间实现能量的合理流动和梯级利用, 进一步降低整车能耗。

参考文献

- [1] 林维奇, 陈启杰. 关于新能源汽车的文献综述[J]. 特区经济, 2012(11): 287-290.
- [2] 姚兰. 2021年新能源汽车产销同超350万辆[J]. 汽车纵横, 2022(2): 107-108.
- [3] 姚兰. 2022年新能源汽车销量超过680万辆[J]. 汽车纵横, 2023(2): 106-107.
- [4] Ceder, G. (2010) Opportunities and Challenges for First-Principles Materials Design and Applications to Li Battery Materials. *MRS Bulletin*, **35**, 693-701. <https://doi.org/10.1557/mrs2010.681>
- [5] 汤爱华, 龚鹏, 姚疆, 等. 电动汽车用锂离子动力电池大功率快充方法研究[J]. 南京理工大学学报, 2021, 45(6): 761-772.
- [6] Aneke, M. and Wang, M. (2016) Energy Storage Technologies and Real Life Applications—A State of the Art Review. *Applied Energy*, **179**, 350-377. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.097>
- [7] Zhao, R., Gu, J. and Liu, J. (2018) Performance Assessment of a Passive Core Cooling Design for Cylindrical Lithium-Ion Batteries. *International Journal of Energy Research*, **42**, 2728-2740. <https://doi.org/10.1002/er.4061>
- [8] Zhao, R., Gu, J. and Liu, J. (2015) An Experimental Study of Heat Pipe Thermal Management System with Wet Cooling Method for Lithium Ion Batteries. *Journal of Power Sources*, **273**, 1089-1097. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.10.007>
- [9] Anthony, B., Benjamin, D., Sebastien, G., Mathias, G., Frederic, S. and Delphine, R. (2013) A Review on Lithium-Ion Battery Ageing Mechanisms and Estimations for Automotive Applications. *Power Sources*, **241**, 680-689. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.05.040>
- [10] Gu, L., Gui, J.Y., Wang, J.V., Zhu, G. and Kang, J. (2019) Parameterized Evaluation of Thermal Characteristics for a Lithium-Ion Battery. *Energy*, **178**, 21-32. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.119>
- [11] Wang, Q., Ping, P., Zhao, X., Chu, G., Sun, J. and Chen, C. (2012) Thermal Runaway Caused Fire and Explosion of Lithium Ion Battery. *Journal of Power Sources*, **208**, 210-224. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.02.038>
- [12] 陈风月, 王金生, 江城城, 等. 纯电动汽车自燃原因分析及预防[J]. 农机使用与维修, 2021(12): 13-15.
- [13] Kumar, R. and Goel, V. (2023) A Study on Thermal Management System of Lithium-Ion Batteries for Electrical Vehicles: A Critical Review. *Journal of Energy Storage*, **71**, Article ID: 108025. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108025>
- [14] He, L., Jing, H., Zhang, Y., Li, P. and Gu, Z. (2023) Review of Thermal Management System for Battery Electric Vehicle. *Journal of Energy Storage*, **59**, Article ID: 106443. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106443>
- [15] 王青松, 孙金华, 陈思凝, 等. 锂离子电池热安全性的研究进展[J]. 电池, 2005, 35(3): 240-241.
- [16] Tomaszewska, A., Chu, Z., Feng, X., O'Kane, S., Liu, X., et al. (2019) Lithium-Ion Battery Fast Charging: A Review. *eTransportation*, **1**, Article ID: 100011. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.100011>
- [17] 杨晨, Gross U. 基于热传导逆问题方法预测材料热物性参数[J]. 化工学报, 2005(12): 2415-2420.
- [18] Chen, C., Shang, F., Salameh, M. and Krishnamurthy, M. (2018) In Challenges and Advancements in Fast Charging Solutions for EVs: A Technological Review. 2018 *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Long Beach, 13-15 June 2018, 695-701. <https://doi.org/10.1109/ITEC.2018.8450139>
- [19] Mei, W., Chen, H., Sun, J. and Wang, Q. (2018) Numerical Study on Tab Dimension Optimization of Lithium-Ion Battery from the Thermal Safety Perspective. *Applied Thermal Engineering*, **142**, 148-165. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.06.075>
- [20] Lai, Y., Du, S., Ai, L., Cheng, Y., Tang, Y. and Jia, M. (2015) Insight into Heat Generation of Lithium Ion Batteries Based on the Electrochemical-Thermal Model at High Discharge Rates. *International Journal of Hydrogen Energy*, **40**, 13039-13049. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.07.079>

- [21] Ye, Y., Saw, L.H., Shi, Y. and Tay, A.A.O. (2015) Numerical Analyses on Optimizing a Heat Pipe Thermal Management System for Lithium-Ion Batteries during Fast Charging. *Applied Thermal Engineering*, **86**, 281-291. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.066>
- [22] Zeng, Y., Chalise, D., Lubner, S.D., Kaur, S. and Prasher, R.S. (2021) A Review of Thermal Physics and Management inside Lithium-Ion Batteries for High Energy Density and Fast Charging. *Energy Storage Materials*, **41**, 264-288. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2021.06.008>
- [23] 蔡飞龙, 许思传, 常国峰. 纯电动汽车用锂离子电池热管理综述[J]. 电源技术, 2012, 36(9): 1410-1413.
- [24] 安周建, 赵亚兵, 敏政, 等. 基于风冷散热的锂离子电池外部冷却模式与内部热物性特征的耦合分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2022, 50(2): 121-128.
- [25] Hong, S. and Regan, D. (2014) Development of Cooling Strategy for an Air-Cooled Lithium-Ion Battery Pack. *Power Sources*, **272**, 404-414. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.08.107>
- [26] Wu, M. (2022) Multi-Objective Optimization of U-Type Air-Cooled Thermal Management System for Enhanced Cooling Behavior of Lithium-Ion Battery Pack. *Journal of Energy Storage*, **56**, Article ID: 106004. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106004>
- [27] Xie, J., Ge, Z., Zang, M. and Wang, S. (2017) Structural Optimization of Lithium-Ion Battery Pack with Forced Air Cooling System. *Applied Thermal Engineering*, **126**, 583-593. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.143>
- [28] Wang, N., Li, C., Li, W., Huang, M. and Qi, D. (2021) Effect Analysis on Performance Enhancement of a Novel Air Cooling Battery Thermal Management System with Spoilers. *Applied Thermal Engineering*, **192**, Article ID: 116932. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116932>
- [29] 张甫仁, 易孟斐, 汪鹏伟, 等. 锂离子电池复合热管理系统的多目标优化[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(9): 147-154.
- [30] Chen, D., Jiang, J., Kim, G. H., Yang, C. and Pesaran, A. (2016) Comparison of Different Cooling Methods for Lithium Ion Battery Cells. *Applied Thermal Engineering*, **94**, 846-854. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.015>
- [31] Zhang, Q., Cao, G. and Zhang, X. (2023) Study of Wet Cooling Flat Heat Pipe for Battery Thermal Management Application. *Applied Thermal Engineering*, **219**, Article ID: 119407. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119407>
- [32] 李志扬, 鲁文凡, 吕帅帅, 等. 电动汽车动力电池组热管理系统研究进展[J]. 化工新型材料, 2017, 45(8): 29-31.
- [33] Xia, G., Cao, L. and Bi, G. (2017) A Review on Battery Thermal Management in Electric Vehicle Application. *Journal of Power Sources*, **367**, 90-105. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.09.046>
- [34] Zhang, X., Li, Z., Luo, L., Fan, Y. and Du, Z. (2022) A Review on Thermal Management of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles. *Energy*, **238**, Article ID: 121652. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121652>
- [35] Jin, L., Lee, P., Kong, X., Fan, Y. and Chou, S. (2014) Ultra-Thin Minichannel LCP for EV Battery Thermal Management. *Applied Energy*, **113**, 1786-1794. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.013>
- [36] Siruvuri, S. and Budarapu, P. (2020) Studies on Thermal Management of Lithium-Ion Battery Pack Using Water as the Cooling Fluid. *Journal of Energy Storage*, **29**, Article ID: 101377. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101377>
- [37] Amalesh, T. and Narasimhan, N.L. (2020) Introducing New Designs of Minichannel Cold Plates for the Cooling of Lithium-Ion Batteries. *Power Sources*, **479**, Article ID: 228775. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228775>
- [38] Li, Y., Zhou, Z. and Wu, W. (2019) Three-Dimensional Thermal Modeling of Li-Ion Battery Cell and 50 V Li-Ion Battery Pack Cooled by Mini-Channel Cold Plate. *Applied Thermal Engineering*, **147**, 829-840. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.009>
- [39] 孙悦, 陶乐仁, 雷良新, 等. 并联液冷电池热管理系统仿真分析[J]. 农业装备与车辆工程, 2021, 59(6): 19-24.
- [40] Zheng, Y., Shi, Y. and Huang, Y. (2019) Optimisation with Adiabatic Interlayers for Liquid-Dominated Cooling System on Fast Charging Battery Packs. *Applied Thermal Engineering*, **147**, 636-646. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.090>
- [41] Huo, Y., Rao, Z., Liu, X. and Zhao, J. (2015) Investigation of Power Battery Thermal Management by Using Mini-Channel Cold Plate. *Energy Conversion and Management*, **89**, 387-395. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.015>
- [42] Lai, Y., Wu, W., Chen, K., Wang, S. and Xin, C. (2019) A Compact and Lightweight Liquid-Cooled Thermal Management Solution for Cylindrical Lithium-Ion Power Battery Pack. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **144**, Article ID: 118581. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118581>
- [43] 王波, 孙聪聪, 王雅亮, 等. 基于 PCM 的锂电池保温及预热性能研究[J]. 化学工程, 2022, 50(6): 23-28.

- [44] 许卓新. 相变储能材料的分类及应用探究[J]. 中国设备工程, 2019(2): 116-117.
- [45] 张浩文, 秦永法, 翁佳昊, 等. 车用锂离子电池相变冷却技术研究综述[J]. 汽车工艺与材料, 2021(2): 43-48.
- [46] Ai, U. and Selman, J. (2000) A Novel Thermal Management System for Electric Vehicle Batteries Using Phase-Change Material. *Journal of the Electrochemical Society*, **147**, 3231-3236. <https://doi.org/10.1149/1.1393888>
- [47] Wang, Z., Zhang, Z., Jia, L. and Yang, L. (2015) Paraffin and Paraffin/Aluminum Foam Composite Phase Change Material Heat Storage Experimental Study Based on Thermal Management of Li-Ion Battery. *Applied Thermal Engineering*, **78**, 428-436. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.01.009>
- [48] Samimi, F., Babapoor, A., Azizi M. and Karimi, G. (2016) Thermal Management Analysis of a Li-Ion Battery Cell Using Phase Change Material Loaded with Carbon Fibers. *Energy*, **96**, 355-371. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.064>
- [49] Zou, D., Ma, X., Liu, X., Zheng, P. and Hu, Y. (2018) Thermal Performance Enhancement of Composite Phase Change Materials (PCM) Using Graphene and Carbon Nanotubes as Additives for the Potential Application in Lithium-Ion Power Battery. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **120**, 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.024>
- [50] Li, W.Q., Qu, Z.G., He, Y.L. and Tao, Y.B. (2014) Experimental Study of a Passive Thermal Management System for High-Powered Lithium Ion Batteries Using Porous Metal Foam Saturated with Phase Change Materials. *Journal of Power Sources*, **255**, 9-15. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.01.006>
- [51] Zhang, X., Liu, C. and Rao, Z. (2018) Experimental Investigation on Thermal Management Performance of Electric Vehicle Power Battery Using Composite Phase Change Material. *Journal of Cleaner Production*, **201**, 916-924. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.076>
- [52] Zhang, Z. and Li, Y. (2017) Experimental Study of a Passive Thermal Management System Using Copper Foam-Paraffin Composite for Lithium Ion Batteries. *Energy Procedia*, **142**, 2403-2408. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.174>
- [53] 刘军, 卓威, 张文灿, 托尼, 等. 基于 PCM/泡沫铜/多孔热管复合相变材料的动力电池热管理研究[J]. 功能材料, 2018, 49(7): 7070-7075.
- [54] Abid, H., Irfan, H., Abidi, Chi, Y., Ka, C. and Luo, Z. (2018) Thermal Management of LIBs Using Graphene Coated Nickel Foam Saturated with Phase Change Materials. *International Journal of Thermal Sciences*, **124**, 23-35. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.09.019>
- [55] Zhao, J., Lv, P. and Rao, Z. (2017) Experimental Study on the Thermal Management Performance of Phase Change Material Coupled with Heat Pipe for Cylindrical Power Battery Pack. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **82**, 182-188. <https://doi.org/10.1016/j.exptthermflusci.2016.11.017>
- [56] Luo, X., Guo, Q., Li, X., Tao, Z., Lei, S., Liu, J., et al. (2020) Experimental Investigation on a Novel Phase Change Material Composites Coupled with Graphite Film Used for Thermal Management of Lithium-Ion Batteries. *Renewable Energy*, **145**, 2046-2055. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.112>
- [57] Gu, Q., Li, G. and Wu, Z. (2022) The Analysis on the Battery Thermal Management System with Composite Phase Change Materials Coupled Air Cooling and Fins. *Journal of Energy Storage*, **56**, Article ID: 105977. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105977>
- [58] Faizan, M., Pati, S. and Randive, P. (2022) Implications of Novel Cold Plate Design with Hybrid Cooling on Thermal Management of Fast Discharging Lithium-Ion Battery. *Journal of Energy Storage*, **53**, Article ID: 105051. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105051>
- [59] 张晨阳, 张晓明. 热管换热器的研究现状与应用[J]. 建筑与预算, 2020(11): 38-40.
- [60] 刘叶, 周磊, 咎元峰, 等. 热管技术在先进反应堆中的应用现状[J]. 核动力工程, 2016, 37(6): 121-124.
- [61] Wang, Z.Y., Diao, Y.H., Liang, L., Zhao, Y.H., Zhu, T.T. and Bai, F.W. (2017) Experimental Study on an Integrated Collector Storage Solar Air Heater Based on Flat Micro-Heat Pipe Arrays. *Energy and Buildings*, **152**, 615-628. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.069>
- [62] Jaguemont, J. and Van Joeri, M. (2020) A Comprehensive Review of Future Thermal Management Systems for Battery-Electrified Vehicles. *Journal of Energy Storage*, **31**, Article ID: 101551. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101551>
- [63] Behi, H., Karimi, D., Behi, M., Jaguemont, J., Ghanbarpour, M., Behnia, M., et al. (2020) Thermal Management Analysis Using Heat Pipe in the High Current Discharging of Lithium-Ion Battery in Electric Vehicles. *Journal of Energy Storage*, **32**, Article ID: 101893. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101893>
- [64] Wei, A., Qu, J. and Qiu, H. (2019) Heat Transfer Characteristics of Plug-In Oscillating Heat Pipe with Binary-Fluid Mixtures for Electric Vehicle Battery Thermal Management. *Heat and Mass Transfer*, **135**, 746-760. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.02.021>

-
- [65] 丹聃, 连红奎, 张扬军, 等. 基于平板热管技术的电池热管理系统实验研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(9): 1023-1030.
- [66] Zhao, J., Lv, P. and Rao, Z. (2017) Experimental Study on the Thermal Management Performance of Phase Change Material Coupled with Heat Pipe for Cylindrical Power Battery Pack. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **82**, 182-188. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.11.017>
- [67] Liang, J., Gan, Y. and Li, Y. (2018) Investigation on the Thermal Performance of a Battery Thermal Management System Using Heat Pipe under Different Ambient Temperatures. *Energy Conversion and Management*, **155**, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.063>
- [68] Shah, K., Mckee, C., Chalise, D. and Jain, A. (2016) Experimental and Numerical Investigation of Core Cooling of Li-Ion Cells Using Heat Pipes. *Energy*, **113**, 852-860. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.076>
- [69] Worwood, D., Kellner, Q., Wojtala, M., Widanage, W. D., Mglan, R., Greenwood, D., *et al.* (2017) A New Approach to the Internal Thermal Management of Cylindrical Battery Cells for Automotive Applications. *Journal of Power Sources*, **346**, 151-166. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.02.023>