

# 电动汽车电池热管理系统综述

王雅亮<sup>1</sup>, 俞志鹏<sup>2</sup>, 姬 鹏<sup>2</sup>, 王 波<sup>1\*</sup>, 成金东<sup>1</sup>, 沈佳飞<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

<sup>2</sup>上海船用柴油机研究所, 上海

Email: \*wangbo@usst.edu.cn, 407546417@qq.com

收稿日期: 2021年1月17日; 录用日期: 2021年5月3日; 发布日期: 2021年5月10日

## 摘 要

动力电池是电动汽车的主要部件, 电池热管理技术是动力电池发展的重要制约因素。动力电池在工作过程中会不断产生热量, 为避免热量堆积造成热失控, 需要合适的热管理系统给电池散热。高效的电池热管理系统通过对锂离子电池进行热管理而提高电池的运行效率, 并提高电池的安全性、可靠性, 减缓电池的老化率, 延长使用寿命等。本文介绍了锂离子电池的热模型, 分析了锂离子电池的生热机理、热模型以及高温对电池的影响, 讨论了空气冷却系统、液体冷却系统、相变材料及耦合冷却系统的工作原理、冷却效果及其优缺点, 展望了各种热管理系统的发展趋势, 分析指出多种冷却技术耦合的热管理系统可以达到更好的冷却效果, 有望将成为未来研究的重点方向。

## 关键词

电动汽车, 锂离子电池, 热管理, 冷却系统

# Review of Battery Thermal Management System for Electric Vehicles

Yaliang Wang<sup>1</sup>, Zhipeng Yu<sup>2</sup>, Peng Ji<sup>2</sup>, Bo Wang<sup>1\*</sup>, Jindong Cheng<sup>1</sup>, Jiafei Shen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

<sup>2</sup>Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai

Email: \*wangbo@usst.edu.cn, 407546417@qq.com

Received: Jan. 17<sup>th</sup>, 2021; accepted: May 3<sup>rd</sup>, 2021; published: May 10<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Power batteries are the main components of electric vehicles, and battery thermal management technology is an important constraint on the development of power batteries. The power battery

\*通讯作者。

will continuously generate heat during operation. In order to avoid thermal runaway caused by heat accumulation, a suitable thermal management system is required to dissipate the battery. The high-efficiency battery thermal management system improves the operating efficiency of the battery through thermal management of the lithium-ion battery, improves the safety and reliability of the battery, slows down the aging rate of the battery, and extends the service life. This article introduces the thermal model of lithium ion batteries, analyzes the heat generation mechanism, thermal model and the impact of high temperature on the battery of lithium ion batteries, discusses the working principles of air cooling systems, liquid cooling systems, phase change materials and coupled cooling systems. The cooling effect and its advantages and disadvantages are prospected for the development trend of various thermal management systems. The analysis points out that a thermal management system coupled with multiple cooling technologies can achieve better cooling effects, which is expected to become the focus of future research.

## Keywords

Electric Vehicle, Lithium Ion Battery, Thermal Management, Cooling System

Copyright © 2021 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

由于锂离子电池具有较高的能量密度,较高的放电电压,较低的自放电率,较长的循环寿命和没有记忆效应等诸多优点[1],锂离子电池被广泛应用于新能源汽车。目前,在新能源汽车领域对锂离子电池的研究越来越广泛,而锂离子电池的可靠性、安全性、使用寿命、成本等都在不同程度上决定电动汽车的发展[2]。

研究表明,锂离子电池的性能对工作环境温度非常敏感,锂离子电池可安全工作的温度范围为 $-10^{\circ}\text{C}$ ~ $50^{\circ}\text{C}$ ,最佳工作温度为 $25^{\circ}\text{C}$ ,且最大工作温差不应高于 $5^{\circ}\text{C}$ [3]。在低温环境下电池的活性会降低,导致电池容量减少;在高温环境下电池的生热反应加剧,因此增大了热失控的风险。可见极端温度都会对电池造成不可逆的损害,例如会降低电池的循环次数和寿命等。有研究称,电池工作温度范围在 $30^{\circ}\text{C}$ ~ $40^{\circ}\text{C}$ 时,每升高 $1^{\circ}\text{C}$ ,电池的寿命就会减少大约两个月[4]。

为了保证电池在合理的温度范围内工作,降低由于温度失控而导致的电池损坏或爆炸的风险,电池热管理系统(Battery Thermal Management System, BTMS)应运而生。BTMS通过调控冷却介质的流动布置或流动特性控制电池温度,保证电池温度在合理范围内波动,从而使得电池工作效率更高,性能更稳定。随着新能源汽车的不断发展,电池作为制约其发展的核心因素,对高效电池控温技术的需求也越来越迫切,BTMS也受到了国内外学者的广泛关注。本文基于当前电池热管理技术研究进展和应用实例,对当前常用的锂离子电池模型、热管理系统进行评述和探讨,对比分析现有技术模型的优缺点,旨在展望锂离子电池未来的研究方向及趋势,为锂离子电池热管理系统的优化方案提供理论依据和技术指导。

## 2. 锂离子电池生热原理及模型

### 2.1. 锂离子电池的生热机理

锂离子电池在充放电过程中会发生一系列化学反应,这些化学反应大多伴随着热量的产生,其主要生热反应包括SEI膜的分解、电解液的分解、正极的分解、负极与电解液的反应、正极与电解液的反应

以及电池内阻产生的焦耳热和极化热等[5]。

锂离子电池的负极有一层 SEI 膜, 其具有良好的化学稳定性, 不与电解液发生反应, 可以保护负极避免与电解液发生反应, 并且允许电解液中的锂离子通过[6]。当温度达到 80°C~120°C 时, SEI 膜便会发生分解反应, 此时 SEI 膜将无法保护负极, 负极材料与电解液发生反应产生热量[7]。随着温度进一步升高, SEI 膜熔断、正负极短路、正极材料分解等相继的反应都会产生大量热量, 最终导致电池的燃烧甚至爆炸[8]。

## 2.2. 锂离子电池热模型

Bernardi 等人于 1985 年根据电池内部产热均匀的假设提出了电池发热功率计算公式, 是目前用于锂离子电池生热计算使用最广泛的公式之一, 其表达式为[9]:

$$Q = I(E - U) - IT \frac{dE}{dT} + \int \sum \sum (H_{ij} - H_{ij}^{ave}) \frac{\partial c_{ij}}{\partial t} dV \quad (1)$$

式中:  $E$  为电池在平衡状态下的开路电压;  $U$  为实际工作电压;  $I$  为工作电流, 充电取正, 放电取负;  $T$  为电池温度;  $\frac{dE}{dT}$  为电池电压随温度变化的关系;  $E - U = IR$ ,  $R$  为电池总内阻。

在正常的充放电过程中, 可以忽略物质混合引起的混合热, 只需计算不可逆内阻热和可逆熵热, 因此 Bernardi 模型可以简化为:

$$Q = I \left[ (E - U) - T \frac{dE}{dT} \right] = I^2 R - IT \frac{dE}{dT} \quad (2)$$

李等人的研究表明, 锂离子电池在充放电过程中, 可逆热和不可逆热占绝大部分, 模拟温度与实验温度的误差极小, 在可接受范围内[10]。因此在正常充放电条件下, 计算锂离子电池发热功率可以直接采用简化的模型。

## 2.3. 高温对锂离子电池工作性能的影响

锂离子电池在高温环境下工作会加剧电化学反应速率, 电子转移速度比锂离子扩散速度快, 使得电池正极容纳的锂离子越来越少, 这是电池容量衰减的根本原因。在温度高于 50°C 环境下进行充放电循环会损伤电池内部结构、降低电池性能、减少电池使用寿命[11]。过高的温度将会降低电池的安全性、充放电功率, 并且会增大电池热失控的风险[12], 甚至引起电池着火或者爆炸。

此外, 从电池单体、电池模块和电池组的水平来评估电池温度的均匀性是确保电池高效工作的另一个关键问题。如果电极附近的温度高于电池其他位置的温度, 这种不均匀的温度分布将导致电化学反应速率不均匀, 最终降低电池性能并且缩短电池循环寿命[13]。

Landini 等人的研究表明在没有任何热管理措施的情况下以 4C 倍率放电不到 420 s, 锂离子电池单体的最高温度超过了 70°C, 最大温差高达 45°C [3]。在这样的温度环境下不仅电池的性能会大幅下降, 损害电池健康度, 还有极大的热失控风险, 这对行车安全带来了极大的潜在威胁, 因此需要合理的热管理系统来降低电池最高温度和最大温差, 将电池维持在合适的温度范围内。

## 3. 电池热管理系统

合理的 BTMS 可以有效地降低电池最高温度, 提高电池温度均匀性, 从而延长电池的使用寿命、提高电池的安全性。因此, 电池热管理系统的研究对于保障电动汽车的安全性具有十分重要的意义。目前国内广泛研究的热管理系统包括空气冷却系统、液体冷却系统、相变材料冷却以及复合冷却系统等, 下面将详细阐述各种热管理系统的工作原理及其优缺点。

### 3.1. 空气冷却系统

以空气为介质横掠电池组，可以带走电池产生的热量，这种冷却方式称为空气冷却系统[14]。根据空气流动的成因，可以将其分为自然冷却和强制冷却两种方式[6]。自然冷却即在车辆运行过程中，电池周围的空气与电池组对流换热实现对电池的冷却目的；强制冷却通过增设的风机让空气产生流速来冷却电池，其原理如图 1 所示。由于自然冷却的换热系数较低，无法满足电池在高放电倍率下的散热需求，因此空气冷却系统的相关研究以强制冷却为主。空气冷却系统作为一种传统的冷却技术，具有结构简单、没有漏液的风险、成本低等优点[8]，技术相对较成熟，在市场上已经得到了广泛的应用[15]。

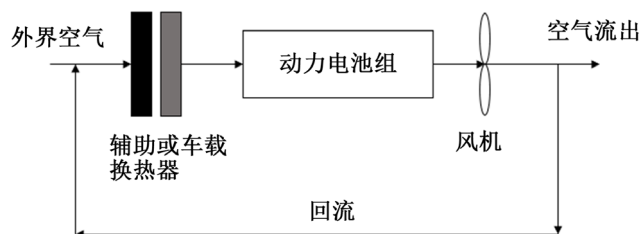


Figure 1. Schematic diagram of forced air cooling system [6]

图 1. 强制空气冷却系统原理图[6]

随着锂离子电池技术的进步，电池能量密度不断增大，不少空冷系统的研究从空气流量、电池排布和流道设计等方面进一步优化其冷却性能。Fan 等人[16]利用 32 个高能量密度锂离子电池，通过顺排、错排和叉排三种排布方式(如图 2 所示)来比较空冷系统的冷却性能，研究结果表明顺排具有最佳的冷却效果。Kim 等人[17]分别研究了 U 型和 Z 型流道的冷却性能，两种流道的结构如图 3(a)和图 3(b)所示，发现图 3(a)情况右侧的电池温度偏高，图 3(b)情况对于维持电池温度均匀性具有更显著的效果。仅对空冷系统的局部进行优化设计很难达到动力电池的散热需求，而强制空气冷却的系统核心是通过引入风机制造空气流速。高亚男等人[18]采用 Z 型流道，将无级变速风机对称布置在电池包底部进行实验，研究结果表明此装置能够将电池温度控制在 55℃ 以内，且最大温差低于 5℃。但是风机势必会增大电池的能耗，当风机转速不断提高时，电池的冷却效果逐渐减缓，因此应该合理选择风机的转速。

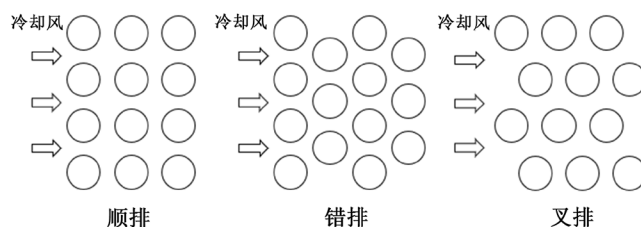


Figure 2. Three ways of battery arrangement

图 2. 电池的三种排布方式

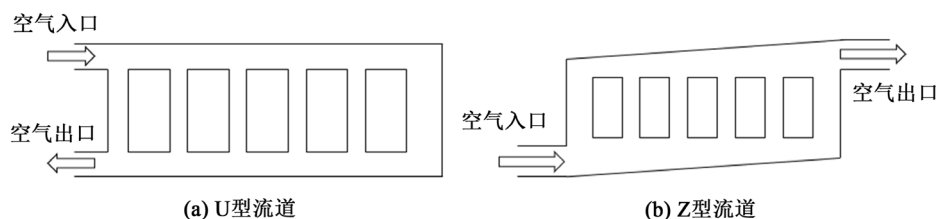


Figure 3. Two kinds of channel structure

图 3. 两种流道结构

热管(HP)具有超高的导热系数,在强制空冷系统中合理运用热管可以进一步强化其冷却性能。Behi 等人[19]介绍了电动汽车空冷系统和热管耦合的热管理技术,电池采用顺排布置,热管蒸发段延伸出来的铜片与电池接触,冷凝段置于空气中,进行放电实验。研究结果表明此冷却系统可以将电池最高温度控制在 37.1℃左右,与自然冷却相比电池最高温度降低了 27.7℃,温度均匀性提高了 73.4%。显然该冷却系统可以起到更显著的散热效果,主要原因是一方面铜片可以强化电池与热管的热交换,另一方面是热管可以强化与空气的对流换热。

空气的热容量较低,传热系数小,并且需要占用较大空间[20],空冷系统在如今的电动汽车市场已经鲜有应用,但是上述经过优化设计的空冷系统依然可以表现出不错的冷却效果,并且空冷系统所具备的优势无可替代。因此,将空冷系统合理的与其他冷却技术耦合强化冷却性能的同时依然可以发挥空冷的优势,例如在后面即将介绍的将空气冷却与液体冷却耦合的 BTMS 以及将空气与相变材料耦合的 BTMS,都可以在很大程度上提高电池散热效果。

### 3.2. 液体冷却系统

随着电池能量密度、放电倍率的增大,空气冷却已经越来越无法满足此类电池的热管理需求。相比于空气,液体具有更高的热容量,质量流量和导热系数[21]。液体冷却系统可以在更大程度上对电池进行降温,保持电池更佳的温度均匀性,因此液体冷却系统是如今大多数新能源电动汽车所采用的电池热管理系统。按照电池表面是否与冷却液接触,可分为直接接触式和间接接触式冷却系统[22]。

#### 3.2.1. 直接接触式系统

在直接接触式液冷系统中,电池组与绝缘液体(如矿物油)直接接触,其中矿物油的传热系数是空气的 4 倍[23],因此电池组具有更优越的换热条件,并且此系统具有更紧凑空间结构。由于绝缘液体黏度大,流速不高,其换热系数受到限制,而纳米颗粒具有更高的换热性能,将其作为冷却液可以进一步提高换热系数。Wu 等人[13]将圆柱形电池浸入  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -水纳米流体中,与水基系统相比,平均最高温度可降低 7%。

直接接触式面临的最大挑战是液体泄漏问题,如果电池没有严格的密封结构,很容易出现安全性问题。而间接接触式冷却系统可以很好的解决这一问题。

#### 3.2.2. 间接接触式系统

间接接触式冷却系统的冷却液不与电池直接接触,通常将冷却液在冷却板内流动的结构作为冷却系统。这种冷却方式都配备了泵给冷却液提供动力,因此势必增大了电池的能耗。冷却板通常为扁平金属板,并且其布置的位置各不相同,可以嵌入电池单体、可以夹在电池中间、可以布置在电池模组两侧、也可以布置在电池组的底部[24]。此时液冷板的材料、冷却液的流量、流道形状等都会对冷却效果造成不可忽略的影响。

二氧化硅具有高导热性,Wang 等人[25]利用二氧化硅作为冷却板材料,构造硅板-液体耦合冷却板(SLCP)进行模拟,其模型结构如图 4 所示。研究结果表明,使用该冷却板的电池最高温度为 61℃左右,比不带冷却板低 16%,并且温度均匀性也得到了提高。当添加 4 mL/s 的水流速时,电池最高温度可以降低到 48.7℃,但是流速超过 4 mL/s 时,对温度的影响并不明显。说明具有高导热的冷却板材料可以在一定程度上起到优化冷却的效果,并且适当添加冷却液流速则可以显著降低电池温度。此外,冷却流道形状对冷却性能具有类似的效果。Wang 等人[26]的研究发现并联流道比串联流道具有更好的冷却效果,两种流道结构如图 5 所示。在其他条件相同的情况下,并联流道冷却系统的电池最高温度和最大温差分别为 37.67℃和 5.76℃,比串联流道分别低 7.55℃和 6.74℃。

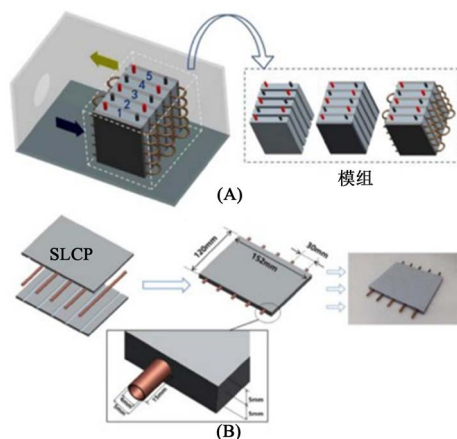


Figure 4. Structure of silicon plate liquid coupling cooling system [25]

图 4. 硅板 - 液体耦合冷却系统结构[25]

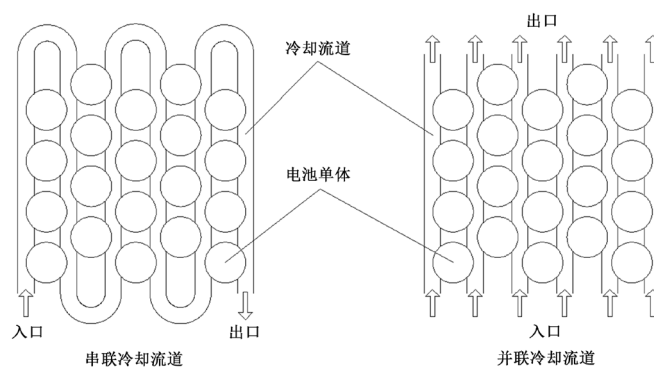


Figure 5. Series and parallel flow channel structure [26]

图 5. 串联和并联流道结构[26]

对传统液冷系统进行优化表现出了十分优越的冷却性能，随着液冷系统研究的不断推进，新型液冷系统的提出为此方向提出了更丰富的研究思路。Yang 等人[27]提出了一种集成了微通道液冷和空冷的复合冷却系统，模型结构如图 6 所示。研究表明微通道液冷板可以分别将电池最高温度和最大温差控制在  $33^{\circ}\text{C}$  和  $7^{\circ}\text{C}$  以下；添加  $4\text{ m/s}$  的空气流速可以进一步分别将电池最高温度和最大温差降低到  $30^{\circ}\text{C}$  和  $4^{\circ}\text{C}$  以内，但流速越高对降温效果越不明显。微通道冷却板具有更显著的冷却效果，并且在空冷结构的辅助下，耦合冷却系统可以将电池温度维持在更适宜的温度范围内。

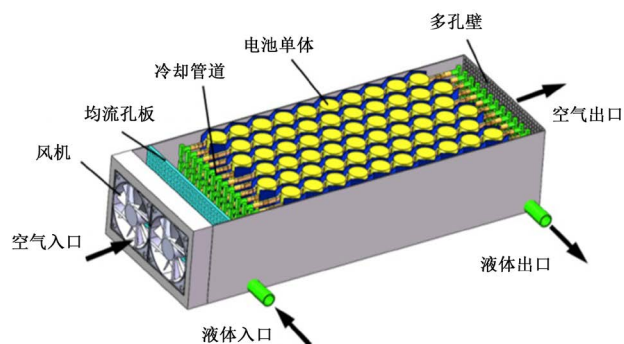


Figure 6. Air cooled liquid cooled combined cooling model [27]

图 6. 空冷液冷复合冷却模型[27]

此外, 液态金属作为一种超高导热系数的流体, 引起了研究者的注意。将液态金属应用于 BTMS, 可以增强冷却板与冷却液的对流换热, 这种新型热管理系统具有更高的热性能, 并且具有更好的防冻效果[28]。由于液态金属只能与镍或者铜混合, 价格昂贵[29], 因此在成本、重量、维护、防腐蚀和泄漏等问题还有待进一步的研究。

### 3.3. 相变材料及耦合冷却系统

相变材料(PCM)在相变过程中可以吸收大量的热量, 并且保持较小的温度变化[30], 基于 PCM 的 BTMS 具有高效的冷却性能, 可以维持电池的温度相对恒定。固-液相变的 PCM 在多种领域已经得到了广泛的应用, 例如在空间领域、电子设备和储能装置中用作保护系统[31]。在相变材料冷却系统中, 通常将电池浸入 PCM, 电池与 PCM 充分接触可以强化换热, 有效地降低电池最高温度和最大温差。相比空冷和液冷系统, PCM 冷却系统结构更简单、能耗低、适用于多种工况。

PCM 的物理性质对系统的冷却效果有着重要的影响, 因此对于 PCM 的选择具有较高的要求, 例如需要考虑以下因素[32]:

- 1) 合适的相变温度;
- 2) 材料热容量大、潜热值高;
- 3) 相变过程中体积的变化情况;
- 4) 化学性质稳定、无毒、不易燃;
- 5) 易获取、价格低廉。

根据 PCM 的使用环境, 相变温度为 30~50℃较为适宜, 石蜡具有高比热、高潜热值以及合适的相变温度等优点, 被广泛用作研究的对象。但是单纯的 PCM 存在导热系数较低的缺点[33], 其物性参数如表 1 所示。

**Table 1.** Physical parameters of general paraffin wax [34]

**表 1.** 一般石蜡的物性参数[34]

石蜡的密度(kg/m <sup>3</sup> )	比热(J/kg·K)	潜热值(J/kg)	融化温度(°C)	导热系数(W/m·K)	粘度(kg/m·s)	热膨胀系数(1/K)
880	2000	255,000	41~44	0.13	0.01	0.00091

为了克服 PCM 导热系数低这一缺点, 已经有不少研究者提出了解决的方案。在 PCM 中添加金属材料可以增强导热, 大多数金属材料都具有较高的导热系数。Mehrabi-Kermani 等人[35]提出一种将石蜡浸入泡沫铜的复合结构, 可以将电池温度维持在 60℃以下长达 33 分钟, 而同等情况下的自然对流换热系统仅可以维持 5 分钟。Weng 等人[36]提出了一种将竖直翅片和圆形翅片组合在一起的优化模块, 研究发现在电池周围合理布置翅片数量和位置, 循环实验中表现出良好的冷却性能和温度均匀性。此外, 还可以利用碳材料来强化 PCM 的导热系数, 如膨胀石墨。碳材料具有很强的耐腐蚀性和耐化学性, 具有高导热率和较低的密度。Ling 等人[37]将膨胀石墨加入 PCM 作为复合相变材料结构进行实验, 研究表明, 与风冷系统相比, 基于 PCM 的 BTMS 可以将电池的温差从 3℃降低到 0.2℃。He 等人[38]提出一种二元导热骨架, 利用多孔膨胀石墨吸附石蜡作为导热框架, 然后将热量传递到泡沫铜骨架上。实验结果表明, 在 5C 放电倍率下, 电池最高温度为 54.7℃, 比添加单一强化导热材料的冷却系统低 5℃。

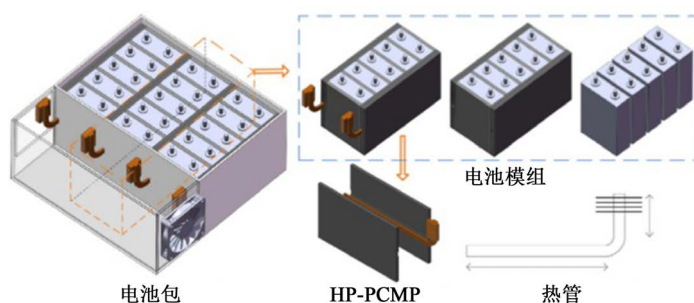
PCM 的厚度、接触面积等参数对 PCM 的冷却效果影响也很大。Jiltea 等人[39]研究了不同的 PCM 厚度对温度的影响, 发现 3 mm 厚的 PCM 状态最佳, 可以将电池最高温度降低到 32℃。如果相变材料厚度过高会导致电池的热量无法及时释放到环境中[40], 并可能由于蓄热和过热而导致热危害。一般的 PCM 冷却系统由于蓄热能力有限, 在电池长时间放电的情况下无法将电池温度维持在合适的范围内。

因此,有不少研究提出将 PCM 与其他冷却方式耦合的冷却系统方案。Wu 等人[41]利用 HP 的高导热性能,将膨胀石墨浸入石蜡中作为相变材料板(PCMP),建立如图 7 的模型,石蜡/膨胀石墨材料的物性参数如表 2 所示。HP 用作导热体,可以进一步提高复合材料的导热率。研究表明,在高放电倍率下,热管辅助相变材料板(HP-PCMP)可以表现出良好的散热性能,电池最高温度为 50.9℃,相比于无 PCM,最高温度降低了 12.2℃。加入 1 m/s 的空气流速时,最高温度降低至 49.4℃,但是进一步增加空气流速时,温度降低的不明显。Zhang 等人[42]提出了电池与 PCM 分离的结构,电池产生的热量通过热管传递到 PCM,PCM 另一端连接大量翅片,并且在侧面设有一个风机,保证产生流速的空气可以横掠翅片。当 PCM 完全融化时启动风机,强化对流换热,实验结果表明该系统可以将电池温度控制在 45℃以内。Lei 等人[43]提出一种利用热管和水喷雾装置耦合的 BTMS,热管插入电池周围的 PCM 中。该系统先利用 PCM 进行吸热,当 PCM 全部融化并且电池温度升高到 40℃时,将开始对热管进行喷雾冷却。实验结果表明,在 1.92C 的放电倍率下,电池的最高温度和最大温差分别为 47.9℃和 2.6℃。喷雾比空气具有更高的热容量和导热系数,在维持温度均匀性上具有更显著的效果。Song 等人[44]提出了一种 PCM 和液体冷却耦合的 BTMS 模型,在电池和 PCM 结构底部配备液体流道,并且通过热柱强化 PCM 和冷却液的换热。将该冷却系统与一般液冷系统进行对比研究,结果表明,在不同环境温度下,耦合冷却系统均表现出更好的冷却效果,并且环境温度越高,耦合冷却系统优势越明显。

**Table 2.** Physical properties of paraffin/expanded graphite [41]

**表 2.** 石蜡/膨胀石墨物性参数[41]

	融化温度(℃)	导热系数(W/m·K)	潜热值(J/g)
石蜡	42.02	0.628	186.4
石蜡/膨胀石墨	41.71	7.654	141.7



**Figure 7.** Model structure [41]

**图 7.** 模型结构[41]

PCM 冷却系统可以增强锂离子电池的可靠性、安全性、冷却性能,延长电池的使用寿命等[45]。相比一般的 PCM 冷却系统,耦合系统可以进一步提高其冷却性能和电池温度均匀性,并且可以更长时间将电池维持在安全温度范围内,是一种行之有效并且可以深入研究的一种冷却系统。但是,耦合系统的复杂性和生产成本比较高,在实际应用环节还有许多细节需要考虑。例如 Joshy 等人[46]研究了电动汽车震动对电池散热的影响,结果表明,震动对固相 PCM 的影响不明显;而在液相时,电动汽车震动频率和幅度都会对温升都会产生不可忽略的影响。

#### 4. 总结与展望

锂离子电池的性能对温度非常敏感,需要对锂离子电池进行合理的热管理设计才能最大程度的发挥



电池性能。电池在充放电过程中产生的热量不断堆积,当电池温度过高时需要通过热管理系统对其进行冷却降温,以保证电池在工作过程中时刻处于适宜的温度,否则会对电池的容量、性能和寿命等造成损害。在常用的电池冷却系统中,空气冷却系统具有结构简单、成本低、易于实现的优点,缺点是空气的热容量较低,传热系数较小,并且占用较大空间,无法满足大容量锂离子电池组的散热需求;液体冷却系统具有较高热容量、质量流量和导热系数,缺点是系统较复杂,自身重量较大,并存在泄漏的风险;基于 PCM 的冷却系统,可有效提高锂离子电池的可靠性、安全性和寿命等性能,缺点是 PCM 导热系数较低,但是在 PCM 中添加泡沫铜或其它高导热材料可以让 PCM 冷却系统发挥更好的冷却效果。此外,基于 PCM 的耦合冷却系统在最高温度和温度均匀性的控制上都有非常优异的表现。虽然耦合系统更复杂并且成本更高,但是基于 PCM 的耦合冷却系统仍然值得在未来进行更深入的研究。

动力电池热管理系统不仅需要考虑其冷却性能,同时还需要考虑其成本、安全性、可靠性以及易用性等,只有具有良好综合性能的热管理系统才能实现商业应用。随着大容量、大功率、高能量密度电池的发展,以及对极端气温条件下电动汽车工作性能的关注,单一的热管理系统已经很难满足动力电池的热管理需求,研究基于多种热管理方法的耦合系统有望成为未来的一种趋势。

## 参考文献

- [1] Jarrett, A. and Kim, I.Y. (2011) Design Optimization of Electric Vehicle Battery Cooling Plates for Thermal Performance. *Journal of Power Sources*, **196**, 10359-10368. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.06.090>
- [2] 郭凡, 刘卫芬, 张佳佳. 纯电动商用车电池热管理技术研究[J]. 汽车实用技术, 2020(6): 8-9, 18.
- [3] Landini, S., Leworthy, J. and O'Donovan, T.S. (2019) A Review of Phase Change Materials for the Thermal Management and Isothermalisation of Lithium-Ion Cells. *Journal of Energy Storage*, **25**, Article ID: 100887. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100887>
- [4] Bahman, S. and Manu, B. (2015) Theoretical Modelling Methods for Thermal Management of Batteries. *Energies*, **8**, 10153-10177. <https://doi.org/10.3390/en80910153>
- [5] 李斌, 常国峰, 林春景, 许思传. 车用动力锂电池产热机理研究现状[J]. 电源技术, 2014, 38(2): 378-381.
- [6] 饶中浩, 张国庆. 电池热管理[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 15-17.
- [7] 邵丹, 骆相宜, 钟灿鸣, 黄阔. 动力锂离子电池安全性研究的进展[J]. 电池, 2020, 50(1): 83-86.
- [8] 金远, 韩甜, 韩鑫, 康鑫. 锂离子电池热管理综述[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(z1): 23-30.
- [9] 王明强, 郭月明, 许淘淘, 方勇. 锂离子动力电池组发热功率试验研究[J]. 汽车零部件, 2020(5): 69-72.
- [10] 李慧芳, 李飞. 锂离子电池的可逆及不可逆产热测试[J]. 电源技术, 2016, 40(11): 2128-2131.
- [11] 张军, 张练达, 胡春姣. 纯电动汽车电池组发热及控制策略研究[J]. 电源技术, 2016, 40(9): 1845-1847.
- [12] 李恒, 涂淳, 马季军. 动力电池绝缘电阻检测系统设计[J]. 科技创新与应用, 2020(21): 83-85.
- [13] Wu, W.X., Wang, S.F., Wu, W., Chen, K., Hong, S., et al. (2019) A Critical Review of Battery Thermal Performance and Liquid Based Battery Thermal Management. *Energy Conversion and Management*, **182**, 262-281. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.051>
- [14] Al-Zareer, M., Dincer, I. and Rosen, M.A. (2018) A Review of Novel Thermal Management Systems for Batteries. *International Journal of Energy Research*, **42**, 3182-3205. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.051>
- [15] Liu, H., Wei, Z., He, W. and Zhao, J. (2017) Thermal Issues about Li-Ion Batteries and Recent Progress in Battery Thermal Management Systems: A Review. *Energy Conversion and Management*, **150**, 304-330. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.016>
- [16] Fan, Y., Bao, Y., Ling, C., Chu, Y., Tan, X. and Yang, S. (2019) Experimental Study on the Thermal Management Performance of Air Cooling for High Energy Density Cylindrical Lithium-Ion Batteries. *Applied Thermal Engineering*, **155**, 96-109. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.157>
- [17] Kim, J., Oh, J. and Lee, H. (2019) Review on Battery Thermal Management System for Electric Vehicles. *Applied Thermal Engineering*, **149**, 192-212. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.020>
- [18] 高亚男, 储爱华, 张彤. 风冷电池热管理系统控制策略研究[J]. 电源技术, 2019, 43(9): 1471-1474.
- [19] Behi, H., Karimi, D., Behi, R., Ghanbarpour, M., Jaguemont, J., Akbarzadeh Sokkeh, M., et al. (2020) A New Concept

- of Thermal Management System in Li-Ion Battery Using Air Cooling and Heat Pipe for Electric Vehicles. *Applied Thermal Engineering*, **174**, Article ID: 115280. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115280>
- [20] Lu, M., Zhang, X., Ji, J., Xu, X. and Zhang, Y. (2020) Research Progress on Power Battery Cooling Technology for Electric Vehicles. *Journal of Energy Storage*, **27**, Article ID: 101155. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101155>
- [21] Zou, D., Liu, X., He, R., Zhu, S.X., Bao, J., Guo, J., *et al.* (2019) Preparation of a Novel Composite Phase Change Material (PCM) and Its Locally Enhanced Heat Transfer for Power Battery Module. *Energy Conversion and Management*, **180**, 1196-1202. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.11.064>
- [22] 卢梦瑶, 章学来. 电动汽车动力电池冷却技术的研究进展[J]. 上海节能, 2019(10): 801-809.
- [23] 王振, 李保国, 罗权权, 赵文莉. 电动汽车锂离子电池热管理系统研究进展[J]. 包装工程, 2020, 41(15): 232-238.
- [24] Chung, Y. and Kim, M.S. (2019) Thermal Analysis and Pack Level Design of Battery Thermal Management System with Liquid Cooling for Electric Vehicles. *Energy Conversion and Management*, **196**, 105-116. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.083>
- [25] Wang, C., Zhang, G., Li, X., Huang, J., Wang, Z., Lv, Y., *et al.* (2018) Experimental Examination of Large Capacity LiFePO<sub>4</sub> Battery Pack at High Temperature and Rapid Discharge Using Novel Liquid Cooling Strategy. *International Journal of Energy Research*, **42**, 1172-1182. <https://doi.org/10.1002/er.3916>
- [26] Wang, H., Tao, T., Xu, J., Mei, X., Liu, X. and Gou, P. (2020) Cooling Capacity of a Novel Modular Liquid-Cooled Battery Thermal Management System for Cylindrical Lithium Ion Batteries. *Applied Thermal Engineering*, **178**, Article ID: 115591. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115591>
- [27] Yang, W., Zhou, F., Zhou, H., Wang, Q. and Kong, J. (2020) Thermal Performance of Cylindrical Lithium-Ion Battery Thermal Management System Integrated with Mini-Channel Liquid Cooling and Air Cooling. *Applied Thermal Engineering*, **175**, Article ID: 115331. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115331>
- [28] Verma, A., Shashidhara, S. and Rakshit, D. (2019) A Comparative Study on Battery Thermal Management Using Phase Change Material (PCM). *Thermal Science & Engineering Progress*, **11**, 74-83. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.03.003>
- [29] Wha, S. J., Xionga, R., Lib, H., Nian, V. and Ma, S. (2020) The State of the Art on Preheating Lithium-Ion Batteries in Cold Weather. *Journal of Energy Storage*, **27**, Article ID: 101059. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101059>
- [30] Baetens, R., Telle, B.P. and Gustavsen, A. (2010) Phase Change Materials for Building Applications: A State-of-the-Art Review. *Energy & Buildings*, **42**, 1361-1368. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.026>
- [31] Wang, T., Seng, K.J. and Zhao, J. (2015) Development of Efficient Air-Cooling Strategies for Lithium-Ion Battery Module Based on Empirical Heat Source Model. *Applied Thermal Engineering*, **90**, 521-529. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.033>
- [32] 郭宝会. 相变材料在动力电池热管理系统中的应用现状[J]. 中国金属通报, 2019(8): 273-274.
- [33] 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>
- [34] Chen, J., Kang, S., E, J.Q., Huang, Z., Wei, K., Zhang, B., *et al.* (2019) Effects of Different Phase Change Material Thermal Management Strategies on the Cooling Performance of the Power Lithium Ion Batteries: A Review. *Journal of Power Sources*, **442**, Article ID: 227228.
- [35] Mehrabi-Kermani, M., Houshfar, E. and Ashjaee, M. (2019) A Novel Hybrid Thermal Management for Li-Ion Batteries Using Phase Change Materials Embedded in Copper Foams Combined with Forced-Air Convection. *International Journal of Thermal Sciences*, **141**, 47-61. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.03.026>
- [36] Weng, J., Ouyang, D., Yang, X., Chen, M., Zhang, G. and Wang, J. (2020) Optimization of the Internal Fin in a Phase-Change-Material Module for Battery Thermal Management. *Applied Thermal Engineering*, **167**, Article ID: 114698. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114698>
- [37] Ling, Z., Zhang, Z., Shi, G., Fang, X., Wang, L., Gao, X., *et al.* (2014) Review on Thermal Management Systems Using Phase Change Materials for Electronic Components, Li-Ion Batteries and Photovoltaic Modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **31**, 427-438. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.017>
- [38] He, J., Yang, X. and Zhang, G. (2019) A Phase Change Material with Enhanced Thermal Conductivity and Secondary Heat Dissipation Capability by Introducing a Binary Thermal Conductive Skeleton for Battery Thermal Management. *Applied Thermal Engineering*, **148**, 984-991. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.100>
- [39] Jilte, R.D., Kumar, R., Ahmadi, M.H. and Chen, L. (2019) Battery Thermal Management System Employing Phase Change Material with Cell-to-Cell Air Cooling. *Applied Thermal Engineering*, **161**, Article ID: 114199. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114199>
- [40] Wang, J., Yang, X., Zhang, G., Ouyang, D., Chen, M. and Wang, J. (2019) Optimization of the Detailed Factors in a

- Phase-Change-Material Module for Battery Thermal Management. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **138**, 126-134. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.050>
- [41] Wu, W., Yang, X., Zhang, G., Chen, K. and Wang, S. (2017) Experimental Investigation on the Thermal Performance of Heat Pipe-Assisted Phase Change Material Based Battery Thermal Management System. *Energy Conversion & Management*, **138**, 486-492. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.022>
- [42] Zhang, W., Qiu, J., Yin, X. and Wang, D. (2020) A Novel Heat Pipe Assisted Separation Type Battery Thermal Management System Based on Phase Change Material. *Applied Thermal Engineering*, **165**, Article ID: 114571. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114571>
- [43] Lei, S., Shi, Y. and Chen, G. (2020) A Lithium-Ion Battery-Thermal-Management Design Based on Phase-Change-Material Thermal Storage and Spray Cooling. *Applied Thermal Engineering*, **168**, Article ID: 114792. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114792>
- [44] Song, L., Zhang, H. and Yang, C. (2019) Thermal Analysis of Conjugated Cooling Configurations Using Phase Change Material and Liquid Cooling Techniques for a Battery Module. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **133**, 827-841. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.157>
- [45] Ling, Z., Wang, F., Fang, X., Gao, X. and Zhang, Z. (2015) A Hybrid Thermal Management System for Lithium Ion Batteries Combining Phase Change Materials with Forced-Air Cooling. *Applied Energy*, **148**, 403-409. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.080>
- [46] Joshy, N., Hajjyan, M., Siddique, A.R.M., Tasnim, S., Simha, H. and Mahmud, S. (2020) Experimental Investigation of the Effect of Vibration on Phase Change Material (PCM) Based Battery Thermal Management System. *Journal of Power Sources*, **450**, Article ID: 227717. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.227717>