

# 锂离子动力电池TMS研究

郑金奎, 何 川, 李茂德

同济大学机械与能源工程学院, 上海

Email: limaoe@tongji.edu.cn

收稿日期: 2021年3月2日; 录用日期: 2021年4月5日; 发布日期: 2021年4月12日

## 摘 要

锂离子电池的高比能量、大输出功率以及低自放电率等一系列独有优势使其迅速成为电动汽车的重要核心。但是锂电池具有较高的温度敏感性, 电池热管理系统对提高电池的效率、可靠性和安全性有着重要的作用。本文综述了近年来国内外主流的电池包热管理形式, 包括自然冷却、强制风冷、液冷和相变冷却等。阐述了各种冷却散热方式的优缺点, 针对电池热管理提出初步的分析讨论, 为电池热管理系统的完善提出优化意见。

## 关键词

锂离子, 动力电池, 散热方式, 热管理

# Review on TMS of Lithium-Ion Power Battery

Jinkui Zheng, Chuan He, Maode Li

School of Mechanical and Power Engineering Tongji University, Shanghai

Email: limaoe@tongji.edu.cn

Received: Mar. 2<sup>nd</sup>, 2021; accepted: Apr. 5<sup>th</sup>, 2021; published: Apr. 12<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Lithium-ion battery has a series of unique advantages such as high specific energy, large output power and low self-discharge rate, which makes it become an important core of electric vehicles. However, because of the high temperature sensitivity of lithium batteries, the battery thermal management system plays an important role in improving the efficiency, reliability and safety of batteries. In this paper, the main thermal management methods of battery pack in recent years, including natural cooling, forced air cooling, liquid cooling and phase change cooling, are re-

viewed. The advantages and disadvantages of various cooling methods are expounded, and the preliminary analysis and discussion are put forward for the battery thermal management system, and the optimization opinions are put forward for the improvement of the battery thermal management system.

## Keywords

Lithium Ions, Power Battery, Heat Dissipation, Thermal Management

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. 前言

电动汽车发展如火如荼，动力电池作为最重要的部分之一，它的发展对电动车的续航和安全有着决定性的作用。电池续航主要从电芯的能量密度和电池包系统的能量密度等方面提升。电池采用的镍 55 三元电芯，是能量密度提升的重要因素。它的正极材料是一种高电压的单晶材料，在不改变电池包外壳尺寸和几乎不增重的前提下，可以提升能量密度，增加续航里程。“掺硅补锂电芯”技术，电池将通过电芯材料配方的优化、成组技术隔热阻燃，以及全铸铝电池包壳体封装技术保证电池安全。

在提高电池能量密度的同时，电池的安全性是不得不考虑的问题。从根本上消除锂离子电池的安全隐患仍在于电池材料安全性的提高。锂离子电池的性能、寿命和安全性对温度非常敏感。因此，温度是影响锂离子电池性能最重要的因素之一[1]。由于锂离子电池本身的特性，适合的工作温度范围相对较窄。最佳工作温度为 20℃~40℃，电池之间的温度差应小于 5℃ [2]。温度对锂离子动力电池的性能具有很大的影响，高温储存和充放电实验揭示了持续的高温工况严重降低了电芯的储存寿命和充放电容量，并且有热失控的风险[3]。低温工况下，电芯电化学性能衰减主要体现在电芯内阻值增加和容量衰退，放电过程中电池模组内部的产热量能充当自加热功能，电压曲线在放电瞬间压降剧降后持续回升[4]。当环境温度低于-15℃时，电芯的自我恢复能力较低，放电性能急剧下降[5]。电池内部产热主要归结为不可逆阻抗热和可逆反应热，不可逆阻抗产热量与放电倍率正相关，可逆反应热在放电中期是电池温度的主要影响因素，特别是在小倍率放电时会导致电池表面温度下降。热管理系统主要是保证动力电池绝对温度在高效和长寿命之间，并保证电池内和电池间温度均衡，动力电池系统热管理就是通过冷却或加热方式对动力电池进行温度控制，热管理系统的任务重点是冷却，而加热和保温是在高寒地区运用锂离子电池需要考虑的问题。

## 2. 常见电池组热管理方式

目前动力电池的热管理方式主要可以分为气体冷却、液体冷却、热管冷却和相变材料(PCM)冷却、内部加热五种方式。下面从冷却效果、工质介质类型、模块结构、重量等多个方面对使用不同传热介质的动力电池冷却系统进行梳理和分析。

### 2.1. 空气冷却

空气冷却可以分为自然风冷和强制风冷，随着市场对电动汽车动力性能的要求越来越高，车载动力电池的数量更多、能量更大、排列更加紧密，自然风冷已不能满足使用要求[6]。强制风冷在控制电池组

最高温度方面优势明显,但如果缺少对电池包和气体流道结构的科学设计,则极易造成各单体电池温差过大的现象,因此目前对于风冷技术的研究主要集中在改善空气流场方面[7]。冷却空气的流道结构一般可以分为串行和并行两种,典型的空气冷却布置形式如图1所示。

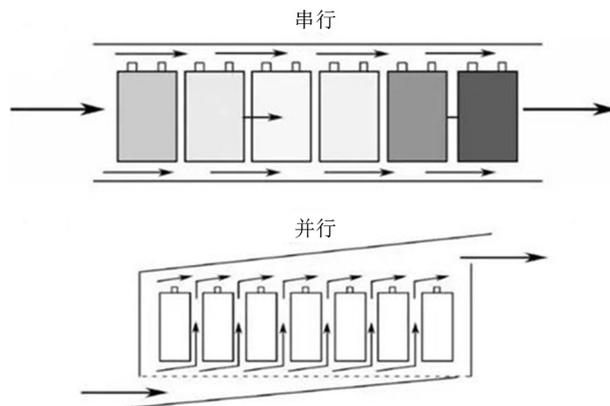


Figure 1. Typical air cooling  
图1. 典型空气冷却方式

在串行通风结构中,冷却空气从一端进入电池包内,依次经过所有电池外表面后从出风口流出。由于冷却空气在箱内流动的过程中温度逐渐上升,与电池的温差不断缩小,从而导致越后排的电池散热效果越差,造成电池组的温度分布较为不均匀,并且流道越长,这种差异愈加明显。而并行散热结构有效地改善了这一问题,在并行流道中,冷却空气从电池包一侧底部进入,在导流板的作用下均匀流入各排电池进行热量交换,每排电池的冷却空气温度相同,因而大幅改善了电池组的温度分布均匀性。许多学者对并行散热结构进行了更深入的研究,探究了电池间距、导流板倾角[8]、空气流速及温度[9]、出风口数量及位置等多个因素对系统散热效果的影响,发现带有倾角的进出风方式有利于降低电池组最高温度。Chen [10]改变了电池之间的间距,提出了一种在恒定热速率下电池结构的最佳解决方案,从而提高了并联空气冷却的性能。优化后的 BTMS 冷却性能得到显著改善,优化后电池组的最高温度略有降低,并且最高温差降低了 42%。Z. Lu [11]对高密度电池组进行强制风冷,探讨了在不同流量和不同风量下电池组的风冷能力。发现随着冷却通道尺寸的增加,最高温度逐渐降低,但是冷却度逐渐降低。Wei [12]通过优化气流入口和出口的宽度,显著提高了 U 型流并联空冷 BTMS 的冷却效率。

## 2.2. 液体冷却

动力电池液冷技术可以按冷却液与电池接触方式分为直接与非直接接触两种[13]。直接接触式液冷技术是将整个电池组浸没在绝缘、高导热系数的冷却液(如乙二醇、矿物油等[14])中,该技术的关键在于做好电池与液体间的绝缘以防短路。非直接接触式液冷技术目前应用较多,即在电池包内嵌入与单体电池相接触的水套,以外部水泵作为动力装置驱动水套内的冷却液流动并将大量的热带出电池包进入换热器,高温液体在冷却风扇的作用下恢复低温后重新进入电池包对电池进行散热,如此往复循环以达到电池降温的目的。典型的液体冷却布置形式如图2所示。

经过研究发现[15],同一冷却液进口流量下,锂离子电池组的放电倍率越大,其内部温升及温差越大;同一放电倍率下,电池组内部温升及温差随着冷却液进口流量的增加不断下降,但当流量达到一定程度后,温度则不再随着流量的增加而变化。不同温度冷却液进行冷却,冷却液温度越低锂离子电池组内部温度下降越快,但温度下降过程中温差也越大;同一放电倍率下,以不同温度冷却液进行冷却,锂离子电池组内部温差会逐渐趋于一致。冷却液进口流量恒定时,冷管截面宽度越大,锂离子电池组内部最高

温度相对越低；在放电过程中，冷管截面宽度越大，锂离子电池组内部的前半段时间温差越大，后半段时间温差越小。K. Li [16]设计了一种高效的微通道冷却系统，并从四个目标对其进行了优化，包括最小化温度差、最小化标准温度差、最小化冷板上的压降、最小化电池组尺寸。实验结果表明，优化的电池组温差降低了 5.07%，标准温差降低了 0.82%，压降降低了 44.53%。

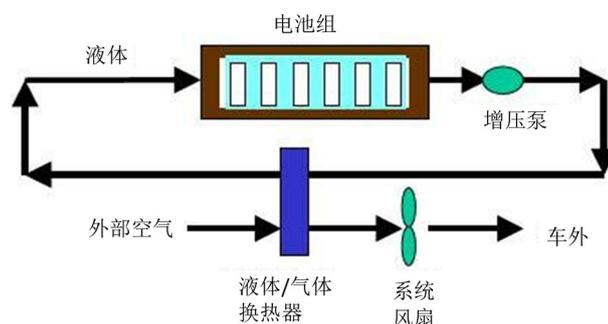


Figure 2. Typical liquid cooling  
图 2. 典型液体冷却方式

特斯拉和通用汽车的电池模块中均采用的是间接水冷技术。水和乙二醇的混合液被选为冷却工质。液体间接冷却一般可分为管道冷却、冷板冷却和水套冷却等。根据电池形状不同，电池模块的冷却布置方式有很大差异。由于汽车在行驶中的颠簸和震动，液体工质的良好密封是该项冷却技术的关键。Tesla 采用的是具有微通道的蛇形扁管间接冷却方式，蛇形扁管和电池仅部分接触，而且属于串联的冷却布置方式，从传热角度看似乎不是高效传热的设计。与 360 度接触水套式冷却布置方式相比，牺牲了接触面积，但是焊点数量也大大减少，降低了液体泄漏的风险，从结构强度和电绝缘角度来看，前者更优。而且，前者的紧凑性有所提高，重量更轻。而后者的电池温度均匀性更好，而且属于串并联冷却布置，压力损失更低。

### 2.3. 相变材料冷却

PCM 是一种通过在一定温度条件下从一种状态转换到另一种状态的过程来积累和释放能量的材料。由于它可以在不消化能量的情况下通过相变过程吸收和释放大量热量，因此被广泛应用于土木、能源工程等行业。近年来，随着电池能力密度和电池容量需求的增加，电池的散热量相应提升，电池热管理系统一直使用强大的冷却系统，例如通道较多的液冷系统，但是这种热管理系统复杂，消耗的能耗增加，PCM 冷却方式就可以缓解这方面的缺点。Sabbah 等人[17]首次提出在动力锂电池组中使用相变材料进行热管理。该系统基本原理是将所有单体电池全部浸于相变材料中，通过相变材料在特定温度范围内自身物理形态的改变所伴随的吸热或放热，从而达到对电池组冷却或加热的目的。常见的相变材料冷却方式如图 3 所示。

单体电池直接贴着 PCM 上，PCM 是经过加工的固体材料，以便于电池可以直接插入。在 PCM 的顶部和底部或左右两侧有两个板传递 PCM 吸收的热量。当电池充放电时，电池内部产生热量，并将热量传递给 PCM，PCM 吸收大量的热量，直到恒温相变过程结束，随着温度逐渐升高，最终达到 PCM 材料的熔点。Rao [18]发现熔点低于 45°C 的 PCM 在降低电池温度方面更有效。Javani [19]研究了不同体积热量产生速率下电池中 PCM 的冷却性能。他们发现 PCM 可以降低峰值温度并获得更好的温度性能。这意味着它能够应对电池剧烈的热负荷，不会出现明显的温升温降以及温度不均匀现象。另外，选择合适的 PCM 材料至关重要，其应具有高潜热、高热容量、高导热系数和电池运行范围内相变温度等特点，并且化学性能稳定、无毒。目前石蜡被热为是最合适的材料，但它同样具有一个导热系数较低的缺点。提高 PCM 导热系数方法主要有添加碳纳米粉、添加金属翅片、添加多孔材料等。尽管有多种方法可以改善导热系数低的问题，但因为泄漏、响应时间长等问题导致 PCM 仍然难以在实际中应用。

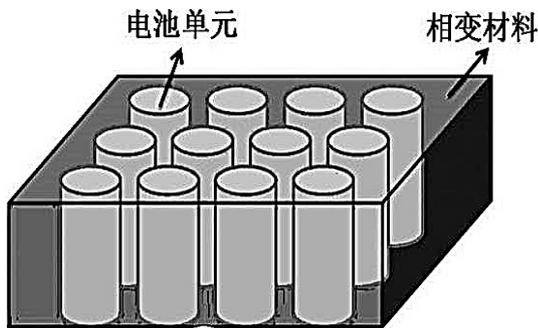


Figure 3. Typical phase change materials cooling  
图 3. 典型相变材料冷却方式

### 2.4. 热管冷却

热管冷却技术最早应用在航天业和军工业[20]，其传热的本质是管内工质的相变反应。通过热管可以将热量迅速地从热源传递出去，这种导热能力超过了所有已知金属。热管的基本结构如图 4 所示，其一般由一个蒸发部分、一个绝热部分和一个冷凝器部分组成。蒸发器部分与需要冷却的热源部分相连，热管中的流体通过吸收热源的热量蒸发，然而由于容器内部的压力不同，通过绝热段移动到冷凝器段。在冷凝器部分，流体通过与外部热量交换进行冷凝变成液体，并在吸液芯毛细力的作用下，液体再次流回蒸发端。如此循环往复，热量便会快速的发生转移[21]。

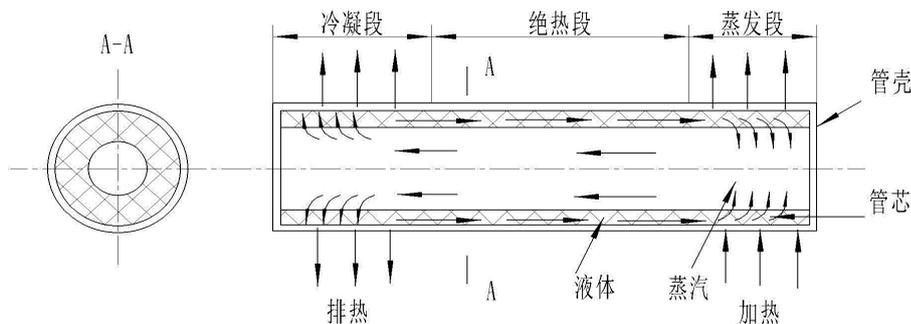


Figure 4. Typical heat pipe cooling  
图 4. 典型热管冷却方式

Smith [22]提出了一种基于热管的大功率 BTMS，与传统的液体冷却系统相比，该系统可提供更好的温度均匀性和系统安全性。当用入口温度为 25℃、流速为 1 升/分钟的水冷却时，系统会散发约 50 w 的热量，并使温度保持在 55℃ 以下。Gan [23]提出了一种基于热管的 BTMS，以圆柱形电池模块为研究对象。结果发现，与自然风冷的 BTMS 相比，在 5C 的放电速率下，电池温度可以显著降低 14℃。

### 2.5. 内部加热

对大型汽车锂离子电池组长期存在的低温性能不佳的问题，提出了一种不降低使用寿命的内部自热策略。为了防止锂离子沉积，提出了一种将放电电流叠加在交流自热电池上的新方法，既避免了阳极电极电位和阻抗测量的困难，又解决了电池组不一致的问题。Jiangong Zhu 等[24]实验研究了交流脉冲加热方式对低温下大型叠层动力锂离子电池 SOH 健康状态的影响。首先，研究了激励电流频率、振幅和电压对电池温度演化的限制。大电流振幅有利于热量的积累和温度的上升。低频区由于阻抗大，为电池加热提供了一个很好的创新。由于较小的电流调制，宽电压限制也有更好的温度演化，但各种电压限制产生的温度差

由于温升引起的阻抗减小而衰减。热电偶嵌入电池的实验表明,在交流加热过程中,电池表面和内部具有良好的温度均匀性。在正常电压保护限制下,交流加热方式即使在低频范围也不会加剧电池退化。

研究发现[25],磷酸铁锂电池在室温下最快可实现 20 分钟(3C)充电,而在低温(0℃)下,只能实现 80 分钟(0.7C)充电。相反,如果在充电之前先将电池加热至 60℃,磷酸铁锂电池在 6C 的倍率下充电也没有观察到析锂现象,而且充电时间可降至 10 分钟以内。这也意味着,只要加热速度足够快,热调控电池在任何环境温度下都可以实现 10 分钟快速充电。这就是王朝阳院士团队早期研究的热刺激技术即自加热技术,并提出了热调控磷酸铁锂电池(TM-LFP battery)的概念,其核心在于在电动汽车充电之前将电池快速加热至 60℃左右进行快充,停止充电后电池会迅速冷却至环境温度,攻克了锂电池快速充电和电池寿命难以兼得的关键问题。

## 2.6. 整车实际应用

图 5 一条模组的电池模块上,一个电池模块共 46 个电芯。相邻的电池模块之间是彼此相反的电极。每节 21700 电池都有三个散热小孔,可以在高压状态下释放热量,以免发生爆炸,起到了进一步保护作用,布置形式如图 5 所示。

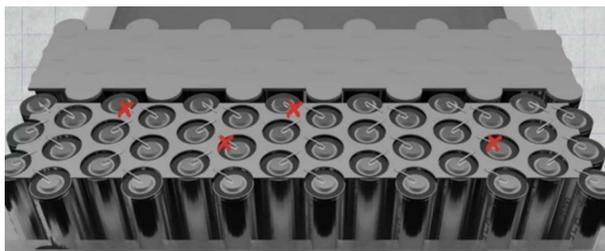


Figure 5. Tesla battery cooling method-1  
图 5. 特斯拉电池布置方式-1

特斯拉采用了带状的热界面材料,冷却带的表面可以接触到每一节电芯,如图 6 所示。乙二醇冷却液从冷却带中流过。冷却带采用了特别的波浪形设计,这可以最大限度地与这些圆柱形电芯的表面积接触,同时也减少了流动阻力。

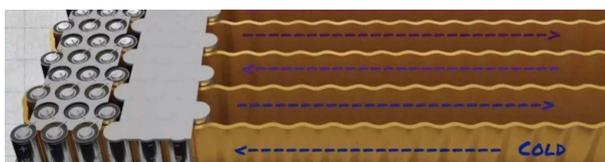


Figure 6. Tesla battery cooling method-2  
图 6. 特斯拉电池冷却方式-2

Tesla Roadster 车载电池由 6831 节 18650 型电池,电池组采用液冷式电池热管理系统,其电池热管理系统内保持单体电池温度差异控制在 2℃内。Model S、Roadster 等采用夹套式液冷散热系统,其冷却液为 50%的乙二醇和 50%的水组成,能将箱体内的温度差控制在 5℃之内。

通用汽车公司 Volt 插电式混合动力汽车使用了液冷式设计,刻有流道的金属散热片布置在单体电池间,其冷却介质和 Tesla 相同,单体间布置了金属散热片,其上设有流道槽,冷却介质在内部流动带走热量。

上汽荣威 E50 纯电动汽车电池采用了液冷式电池热管理系统,电池模块具有温控系统能够有效防止电池过热的现象。

宝马 i3 采用制冷剂(R134a)直接冷却方案,将汽车空调系统蒸发器安装在电池系统中,制冷剂在蒸发器中蒸发并快速将电池系统热量带走。

日产 leaf 采用被动式电池热管理系统,在温度比较低的环境下,有加热元件,其电池组经过电极优化设计,降低了内阻,减小了生热速率。

比亚迪的刀片电池通过去模组的方式,使用叠片工艺生产出来的电芯相比绕组工艺更薄,所以做成了长且薄的形状,“刀片”的长边对应外框的宽边竖直排列在一起,取消了电池包内部的所有骨架。磷酸铁锂正极材料本身的热稳定性好(优于三元锂),对比同样材料的传统电池,刀片电池的长条结构散热面积大,整个电路的回路长,产热能力低、散热好,所以温度升高幅度小,热失控或者说自燃的概率也就小了很多。并且比亚迪给“刀片”增加了蜂窝铝板进行防护,最内层是刀片电芯,中层的吸能方面是长项的蜂窝结构,以及最外面的高强度铝板,经过高温高压复合成型,还带有隔热、防火的涂层。铝材质加蜂窝结构的组合,既满足了安全防护的强度标准,又保证轻量化水平。刀片电池热管理如图 7 所示。

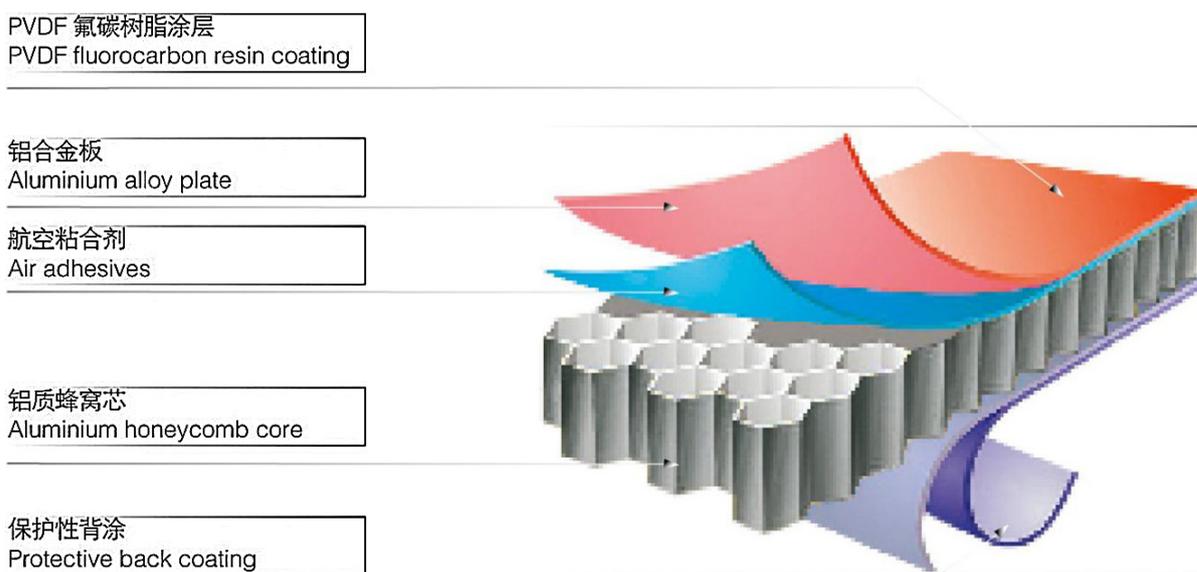


Figure 7. Blade battery thermal management  
图 7. 刀片电池热管理

### 3. 电池散热的分析研究及未来的发展方向

#### 3.1. 散热分析

不同电池散热形式有不同的散热效果,如何选择合适的散热方式来匹配电池包的散热需求是一个重要的问题。表 1 中根据不同的散热方式对比分析了各自的优点和缺点:

#### 3.2. 未来发展方向研究

目前电池的能量密度一直是客户和各大整车厂最为关心的问题,随着电池容量的增加,电池的热负荷也会同步加大,加上不同的电池类型,电池容量和每个单体电池之间的差异,每种散热形式不具备直接可比性。我们同时需要结合电池使用的环境和工况,根据实际的充放电倍率情况选择合适的散热方式。

对于电池热负荷较低并稳定的短程电动汽车,例如垃圾车、洒水车等环卫车,以及广告宣传车,可以使用空气冷却的方式,因为空气冷却结构简单,成本、维护和可靠性方面具有优势,虽然空气的传热系数较低,但这些车辆热负荷较低,空气冷却可以满足其正常的散热需求。

**Table 1.** Comparison of different cooling methods of batteries  
**表 1.** 不同电池散热方式对比

散热形式	优点	缺点
空气冷却	成本最低、最易实现的动力电池冷却手段，流动的空气在带走电池热量的同时，不会对电池反应造成任何不良影响。基于空气的电池热管理系统结构简单，可以适应各种电池，没有漏液等问题。	空气的比热容和导热系数较低，在电池大功率发热情况下，散热效果较差，电池间的温差较大，温度均匀性无法保证。空气冷却系统配备了风扇，以增加热传递，但成本增加，产生大量噪音并影响汽车舒适性。
液体冷却	液体具有更高的比热容、更快的传热速率。常用的冷却介质，例如水，乙二醇，油和丙酮，具有更好的冷却效果，并且可以实现均匀的温度分布。	需要水泵、换热器等外接部件，液冷系统整体结构比较复杂，生产、保养和维修成本都比较高，而且存在因冷却液泄露或低温冻结膨胀而导致冷却系统失效进而损坏电池的风险。
相变冷却	PCM 体积小，成本低，储能密度高，具有明显的节能效果。被动冷却，能够节约电池能量。由于材料的相变潜热很大，能够有效吸收电池释放的热量，而且在低温环境下，能够释放潜热，在电池停止工作后起到保温作用。	长时间处于炎热高温环境下时，其相变潜热无法被利用，在极端情况下材料完全融化后可能存在失效的问题。在极低温长时间放置后，电动汽车启动时相变材料导致电池热惯性非常大，需要的加热量增大，延长了加热时间。
热管冷却	具有很高的导热性、良好的等温性、热流密度可变、热流方向可逆等优点，不仅如此，热管还十分易于和其它冷却方式耦合使用，如热管-空气冷却、热管-相变材料冷却和热管-液体冷却等。	由于在管材、生产设备、生产标准等方面还不成熟，目前的热管产品寿命较短，在动力电池热管理方面的应用也大多处于研究阶段，尚未得以推广。

对于一些家庭使用的城市乘用车、长期行使在郊区的物流车，因为其工况相对稳定，电池的充电倍率中等并且相对稳定，电池的热负荷适中，对于散热的需求不是很大，可以考虑使用液冷的冷却方式或者 PCM 冷却。

对于热负荷较大的商用车以及长期在高速上运行的乘用车等，可以考虑使用和液冷和 PCM 耦合的冷却方式，用冷却液冷却电池，并在散热器的外部构造 PCM 的材料，该组合具有较大的冷却功率能耗，可以实现快速降温并保持温度的均匀性的同时降低散热的能耗。

#### 4. 总结

理想的电池热管理系统应当具有结构紧凑、质量轻、易组装、可靠、耐用、低成本和功耗小等优点。在电池热管理系统的设计中，系统优化，如工质的选择、热管理系统大小的确定等也是非常重要的部分，这意味着需要在热管理系统的各项指标之间进行权衡。由于行驶状况的不确定，电动汽车的热负荷变化特性无法确定，这也对热管理系统的设计提出了挑战。

为了满足苛刻的汽车环境中的技术要求，必须开发和实施高效的电池热管理系统，实现以支持最佳车辆性能和保护电池的状态。由于热管理系统与工质类型直接相关，尚未有文献探讨如何有针对性地选择合适的工质，以及比较基于不同的应用工况下不同工质的热管理系统的性能差别。另外电池热管理系统的动态热特性研究相对较少。综上，这些问题均为 BTMS 发展需要重点研究的方向。

#### 参考文献

- [1] Li, W., Chen, S., Peng, X., *et al.* (2019) A Comprehensive Approach for the Clustering of Similar-Performance Cells for the Design of a Lithium-Ion Battery Module for Electric Vehicles. *Engineering*, **5**, 795-802. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.07.005>
- [2] Huang, Y., Mei, P., Lu, Y., *et al.* (2019) A Novel Approach for Lithium-Ion Battery Thermal Management with Streamline Shape Mini Channel Cooling Plates. *Applied Thermal Engineering*, **157**, 113623. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.033>
- [3] Malik, M., Dincer, I., Rosen, M.A., *et al.* (2018) Thermal and Electrical Performance Evaluations of Series Connected Li-Ion Batteries in a Pack with Liquid Cooling. *Applied Thermal Engineering*, **129**, 472-481.

- <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.029>
- [4] 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>
- [5] Yan, J., Wang, Q., Li, K. and Sun, J. (2016) Numerical Study on the Thermal Performance of a Composite Board in Battery Thermal Management System. *Applied Thermal Engineering*, **106**, 131-140. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.187>
- [6] 叶贞. 锂离子电池模型的建立及电池管理系统的研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [7] 齐晓霞, 王文, 邵力清. 混合动力电动车用电源热管理的技术现状[J]. 电源技术, 2005, 29(3): 178-181.
- [8] 杨志刚, 黄慎, 赵兰萍. 电动汽车锂离子电池组散热优化设计[J]. 计算机辅助工程, 2011, 20(3): 1-5.
- [9] 洪思慧, 张新强, 双凤, 等. 基于热管技术的锂离子动力电池热管理系统研究进展[J]. 化工进展, 2014, 11(11): 2923-2927.
- [10] Chen, K., Wang, S., Song, M. and Chen, L. (2017) Configuration Optimization of Battery Pack in Parallel Air-Cooled Battery Thermal Management System Using an Optimization Strategy. *Applied Thermal Engineering*, **123**, 177-186. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.060>
- [11] Lu, Z., Meng, X.Z., Wei, L.C., et al. (2016) Thermal Management of Densely-Packed EV Battery with Forced Air Cooling Strategies. *Energy Procedia*, **88**, 682-688. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.098>
- [12] Chen, K., Song, M., Wei, W. and Wang, S. (2018) Structure Optimization of Parallel Air-Cooled Battery Thermal Management System with U-Type Flow for Cooling Efficiency Improvement. *Energy*, **145**, 603-613. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.110>
- [13] An, Z., Shah, K., Jia, L. and Ma, Y. (2019) A Parametric Study for Optimization of Minichannel Based Battery Thermal Management System. *Applied Thermal Engineering*, **154**, 593-601. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.088>
- [14] 邓磊. 基于改进 PNGV 模型的动力锂电池 SOC 估计和充电优化[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [15] Rao, Z., Wang, Q. and Huang C. (2016) Investigation of the Thermal Performance of Phase Change Material/Mini-Channel Coupled Battery Thermal Management System. *Applied Energy*, **164**, 659-669. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.021>
- [16] Li, W., Peng, X., Xiao, M., Garg, A. and Gao, L. (2019) Multi-Objective Design Optimization for Mini-Channel Cooling Battery Thermal Management System in an Electric Vehicle. *International Journal of Energy Research*, **43**, 3668-3680. <https://doi.org/10.1002/er.4518>
- [17] Sabbah, R., Kizilel, R., Selman, J.R. and Al-Hallaj, S. (2008) 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. *Journal of Power Sources*, **182**, 630-638. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.03.082>
- [18] Rao, Z., Wang, S. and Zhang, G. (2011) Simulation and Experiment of Thermal Energy Management with Phase Change Material for Ageing LiFePO<sub>4</sub> Power Battery. *Energy Conversion and Management*, **52**, 3408-3414. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.07.009>
- [19] Javani, N., Dincer, I. and Naterer, G.F. (2015) Numerical Modeling of Submodule Heat Transfer with Phase Change Material for Thermal Management of Electric Vehicle Battery Packs. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, **7**, 031005. <https://doi.org/10.1115/1.4029053>
- [20] Peterson, G.P. (1994) An Introduction to Modelling, Testing and Application. John Wiley and Sons, New York.
- [21] 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>
- [22] Smith, J., Singh, R., Hinterberger, M. and Mochizuki, M. (2018) Battery Thermal Management System for Electric Vehicle Using Heat Pipes. *International Journal of Thermal Sciences*, **134**, 517-529. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.08.022>
- [23] Gan, Y., Wang, J., Liang, J., et al. (2020) Development of Thermal Equivalent Circuit Model of Heat Pipe-Based Thermal Management System for a Battery Module with Cylindrical Cells. *Applied Thermal Engineering*, **164**, 114523. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114523>
- [24] Zhu, J., Sun, Z., Wei, X., Dai, H. and Gu, W. (2017) Experimental Investigations of an AC Pulse Heating Method for Vehicular High Power Lithium-Ion Batteries at Subzero Temperatures. *Journal of Power Sources*, **367**, 145-157. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.09.063>
- [25] Yang, X.G., Liu, T. and Wang, C.Y. (2021) Thermally Modulated Lithium Iron Phosphate Batteries for Mass-Market Electric Vehicles. *Nature Energy*, **6**, 176-185. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-00757-7>