

锂离子动力电池液体热管理技术综述

何顺泉 查云飞

(福建理工大学,福州 350118)

【欢迎引用】何顺泉,查云飞. 锂离子动力电池热管理技术综述[J]. 汽车文摘,2024(10): 1-8.

【Cite this paper】HE S Q, ZHA Y F. A Review on Liquid Thermal Management Technologies for Lithium-ion Power Batteries[J]. Automotive Digest (Chinese), 2024(10): 1-8.

【摘要】由于锂离子动力电池对环境温度敏感,电池液体热管理技术对温度的控制效果良好,针对液体热管理技术在电池热管理中的应用及其效果进行综述。以液体冷却技术和液体加热技术为研究切入点,通过综述这两种技术在锂离子动力电池热管理中的应用现状,深入分析其对电池温度控制的效果。研究表明,液冷板式冷却效果好但系统复杂,未来需优化轻量化和安全性设计;液冷管道冷却轻量但应用受限,需进一步探索;浸没式液体冷却能显著降低电池温度并提升均匀性,但需解决密封及动态行驶中的散热问题;滴落式液体散热精度高、质量轻,是未来研究热点;液体加热可快速预热电池包,一体化设计可提升效率并降低成本。

关键词:锂离子动力电池;热管理;液体冷却;液体加热

中图分类号:U469.72 文献标志码:A DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20230032

A Review on Liquid Thermal Management Technologies for Lithium-ion Power Batteries

He Shunquan, Zha Yunfei

(Fujian University of Technology, Fuzhou 350118)

【Abstract】Since lithium-ion power batteries are sensitive to environmental temperature, and the battery liquid thermal management technology has a good effect on temperature control, this paper aims to review the application of liquid thermal management technology in battery thermal management and its effect. Taking liquid cooling technology and liquid heating technology as the research starting point, by reviewing the current status of the application of these two technologies in the thermal management of lithium-ion power batteries, in-depth analysis of its effect on battery temperature control. The study shows that liquid cooling plate cooling is effective, but the system is complex, and needs to optimize the lightweight and safety design in the future; liquid cooling pipe cooling is lightweight, but the application is limited, and needs to be further explored; Submerged liquid cooling can significantly reduce the battery temperature and improve the uniformity, but it needs to solve the sealing and heat dissipation in dynamic driving; drop liquid cooling is highly accurate and lightweight, and is a hotspot of future research; liquid heating can quickly preheat the liquid heating can quickly warm up the battery pack, and the integrated design can improve the efficiency and reduce the cost.

Key words: Lithium-ion power batteries, Thermal management, Liquid cooling, Liquid heating

0 引言

动力电池作为电动汽车技术发展的核心关键,具有巨大的发展潜力。锂离子动力电池由于其比能量高、无记忆效应、循环寿命长而被广泛应用^[1,2]。锂离子动力电池的工作温度范围为-30~60℃,其最佳工作温度为20~40℃^[3]。锂离子动力电池在高温工作时会

降低电池的循环寿命,可能引发安全问题;在低温工作时会造成电池内阻增大、容量衰减。电池包内各个单体电池的温度不一致会导致单体电池的容量和老化程度产生差异,产生“木桶效应”,降低电池包的使用寿命。因此,锂离子动力电池包的最大温差一般要求在5℃以下^[4-5]。锂离子动力电池热管理技术不仅要考虑电池的温度区间,还要考虑电池包的温差,

其可以分为电池冷却技术和电池加热技术。国内外研究中常见的电池冷却技术主要有空气冷却、相变冷却、液体冷却等。空气冷却技术在过去的电动汽车中使用最为广泛,例如日产 e-EV、丰田普锐斯和本田 Insight^[6],但是由于空气较低的比热容和热导率^[7],不再适用于需要超级快充和功率大的新型电动汽车。相变材料由于其高储热能力和相变过程中的温度保持能力吸引研究人员将其应用到电池热管理方面,但是由于相变材料的低导热性限制了其商业化应用^[8]。由于液体冷却技术冷却效果好、冷却速度快、便于制造和布置,在电动汽车领域被广泛应用^[9,10],如特斯拉 Model 3、比亚迪汉 EV、广汽 AION S、蔚来 ES6 等车型均采用液体冷却技术。

国内外研究中常见电池加热方法分为电池外部加热和电池内部加热^[11]:电池外部加热方法主要包括基于空气介质的电池加热、基于液体介质的电池加热和基于电热板的电池加热。电池内部加热方法主要包括基于电池内部短路的自加热方法和基于电池内部安装加热元件的自加热方法。基于空气介质的电池加热方法可满足大部分的使用场景,但是空气较低的比热容和热导率导致了加热时间长、能量损失大。基于电热板的电池加热方法的应用比较广泛,如日产 LEAF,但是电热板的体积较大,影响电池组的整体布置,电池加热的时间长,还可能出现电池组温度分布不均匀的问题。由于基于液体介质的电池加热技术能够与液体冷却结合在一起,因此基于液体介质的电池加热技术正逐渐成为研究重点。国内外已有的液体热管理技术的综述仅从液体冷却技术进行阐述,没有将液体冷却技术和液体加热技术进行整合。

本文对液体热管理技术进行综述,将其分为液体冷却技术和液体加热技术,主要对当前的技术进展和当前技术存在的问题进行梳理,并对液体冷却、加热一体化设计的未来发展进行展望。

1 液体冷却技术

1.1 间接接触式液体冷却

间接接触式液体冷却可以分为液冷板式和液冷管式,其原理是使冷却液在液冷板内或者液冷管内流动,从而实现冷却液与电池换热,采用的冷却液一般为水或者水和乙二醇的混合物^[12]。

1.1.1 液冷板式

液冷板式一般将液冷板放在电池的侧面或者底

部进行冷却,布置起来比较简单。目前液冷板式的主要研究方向是液冷板冷却液流速和液冷板与电池的接触面积对电池散热效果的影响以及液冷板内部流道的设计与优化。

万长东等^[13]针对电池包设计了一种双层液冷板冷却系统。研究了双层液冷板进口流量对整包散热效果的影响,结果表明,双层液冷板冷却系统的散热效果良好,系统的温升及温差相对较小。当冷却液进口流量 $<5\text{ L/min}$ 时,随着冷却液进口流量的增大,模组的整体温度下降较为明显。当冷却液进口流量 $>5\text{ L/min}$ 时,电池包平均温度下降较慢,说明进口流量的继续增加不会大幅度减小电池包平均温度,不断增加冷却液的流量会增加系统的能耗,因此根据电池包平均温度随冷却液进口流量的变化情况可以得到一个最优的流量值。Zhao 等^[14]设计了适用于圆柱形电池波浪形通道的液冷板。研究表明,通过增加电池与波浪形通道液冷板外壁的接触面积,可以显著降低电池模组内的最高温度,但是恶化了模块的温度均匀性。长波状单通道靠近液冷系统出口处电池温度相对较低,使电池包内温度不均匀性风险增加,提出了使用多组短波形通道代替长波状单通道来增强换热的方法,结果显示,短波形通道可以明显地改善温度均匀性差的问题。冯能莲等^[15]提出一种新型蜂巢式液冷动力电池模块,该结构内部设有进/出口导流板且电池呈蜂巢式分布,冷却液体与电池呈 360° 间接接触,相比波浪形通道来说增加了电池与冷却液的接触面积,极大强化了换热效果。余剑武等^[16]设计了9个并行流道的液冷板,如图1所示,探究了流道宽度对液冷板性能的影响规律,其中流道宽度从最中间流道开始向两边呈等差数列分布。结果表明,在系统初始温度为 25°C 时,当中间流道宽度为 6 mm 时,平均温度为 44.5°C ,当中间流道为 15 mm 时,平均温度达到峰值 45.49°C ,增长了2.2%。因此液冷板采用中间流道窄、两侧流道逐渐变宽的不等流道宽度分布设计,有利于增强液冷板的散热均温和能耗性能。液冷板在抑制电池热失控蔓延也有良好的效果,张越等^[17]通过数值方法研究了液冷板抑制锂离子电池热失控蔓延的能力,分析对比了传统直流道液冷板与采用变密度法拓扑优化后液冷板的性能。结果表明,当针刺电池发生热失控后,直流道液冷板在流速为 0.05 m/s 时流体最高温度超过沸点,在流速为 0.1 m/s 时流体最高温度则低于沸点,可以有效抑制电池组热失控蔓延。优化后的液冷板抑制效果更优秀,且流体温度及液冷功耗均

低于传统直流通液冷板。当流速为0.05 m/s和0.1 m/s时,流体最高温度相较直流通液冷板分别降低33 °C和48 °C,功耗分别降低17%和26%。

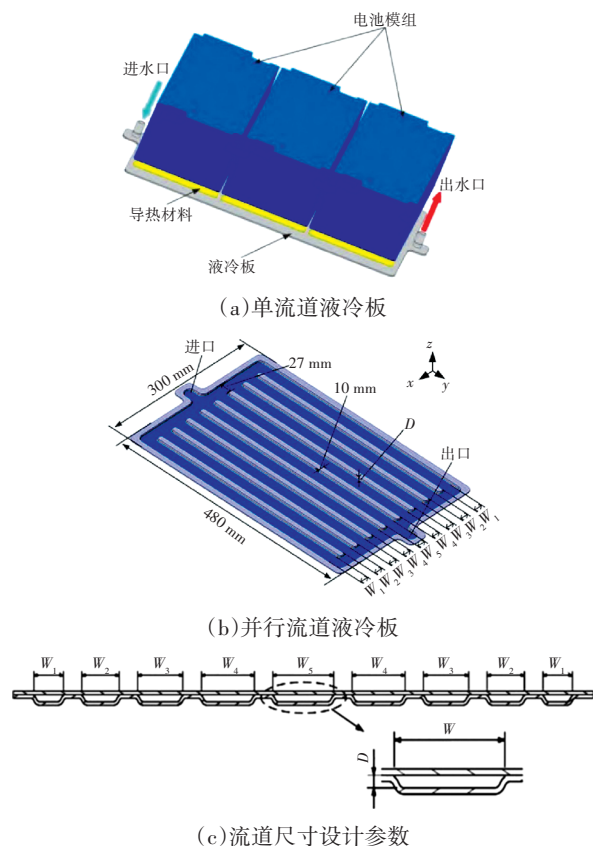


图1 不同类型的液冷板^[16]

1.1.2 液冷管式

由于液冷板的平板形状,这种方法在方形电池中容易实现布置,而在圆柱形电池中则需要进行贴合圆柱形电池外表面的液冷板。虽然液冷板的冷却效果良好,但是液冷板体积和质量较大,为了进行液冷系统的轻量化研究,有些研究者开展了液冷管道的设计。

Lai^[18]等开发了一种具有3个弯曲接触面的液冷管来冷却圆柱形电池,通过数值计算,研究了该导热管的流量、内径、接触面高度以及接触面角对散热性能和质量的影响。研究发现,内径是最重要的因素,接触面高度是次要因素,接触面角是影响最小的因素。在保证液冷管冷却性能的同时需要减轻其质量,因此需要对液冷管结构进行优化,结果表明优化后的液冷管结构能够将电池的最高温度控制在40 °C以下,满足电池的散热要求。Zhou等^[19]提出了一种基于半螺旋管的液体冷却方式,具体的结构如图2所示。通过数值分析,分析了进口流量、螺旋管螺距、螺旋管直径对电池热性能的影响。结果表明,在25 °C的温度条

件下,随着进口流量的增加,最高温度和温度差逐渐减小。在进口流量为 3×10^{-4} kg/s时,改变螺距和螺旋管数,冷却性能无明显改善。当半螺旋管的直径在2.0~3.8 mm范围内时,温差保持在4.3 °C以内,但最高温度接近30.9 °C,略高于30.5 °C,该方案有良好的散热效果。

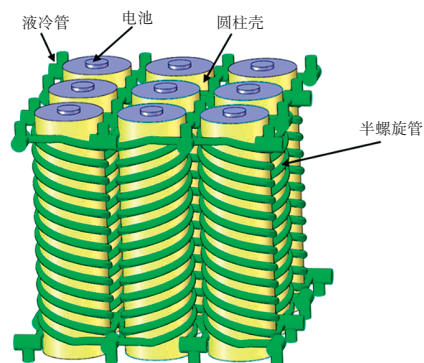


图2 半螺旋液冷管冷却^[19]

将各类间接接触式液体冷却的优缺点进行总结,见表1。

表1 各类间接接触式液体冷却对比

类型	优点	缺点	适用范围
液冷板	冷却效果良好,形式多样,成本较低	系统结构较复杂、质量大	均适用
液冷管道	系统质量小	系统结构不够紧凑	圆柱形电池

1.2 直接接触式液体冷却

直接接触式液体冷却是电池与冷却液直接接触,这样使得电池和冷却液的接触面积比较大,电池和冷却液的传热更充分^[20]。直接接触式液体冷却需要具有绝缘性质的冷却剂,比如硅油、矿物油、变压器油、R134a、氟化液等。

1.2.1 浸没式

直接接触式液体冷却中最常见的是浸没式液体冷却,将电池组部分或者全部浸没在由冷却液组成的密封性良好的箱体内,浸没式液体冷却技术因为散热效率高、温度均匀性好、布置灵活等特点^[21,22],在互联网数据中心领域已经有了大规模应用。国内外针对浸没式液体冷却已有了很多的研究,其中在研究初期主要是以单体电池研究为主,研究冷却液浸没高度、流速对电池散热性能的影响。随着研究的深入,许多研究人员开展了模组水平的浸没式液体冷却仿真和试验研究,主要是研究模组电池冷却液流速、进出口位置以及浸没高度对电池组温升的影响。除此之外还开展了与间接接触式液体冷却的散热性能对比的研究。

在单体电池研究方面,Al-Zareer等^[23]通过CFD仿真研究了以R134a为冷却液的浸没式液体冷却电池包在不同液面高度下的散热能力。结果显示,电池的散热能力与冷却液的液面高度之间存在正相关的关系。Liu等^[24]开发了一个浸没式电池管理系统,针对单体电池设计了一个可拆卸的长方体槽,如图3所示。研究了在3~50 mL/min的变压器油体积流量下该系统的冷却效果。结果表明,随着变压器油体积流量的增加,电池温度持续降低,但当超过15 mL/min时,这种效果逐渐减弱,说明15 mL/min对于该系统来说是一个比较理想的体积流量值。该研究为开发利用高效的浸没式液体冷却系统提供了新的思路。Pulugundla等^[25]通过CFD仿真手段研究了单节21700电池在3 C高放电倍率工况下,采用浸没式液体冷却和间接式液体冷却的散热性能。与间接式液体冷却相比,在3 C高放电倍率下,浸没式液体冷却能有效降低21700圆柱形电池上的电池最高温度和改善电池温度梯度情况。

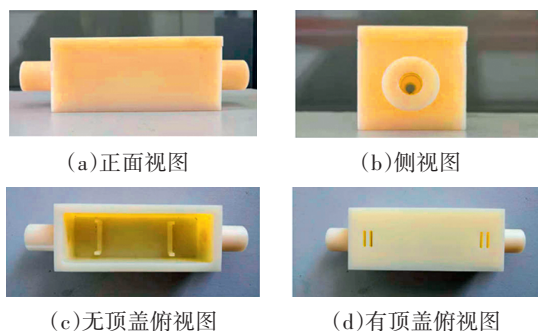


图3 可拆卸长方体浸没槽^[24]

在电池模组研究方面,张进强等^[26]建立了由4个21700电池组成的电池模组,采用试验方法研究了在不同充放电倍率下,浸没式冷却系统在静态冷却条件下的浸没量、环境温度以及动态冷却条件下浸没量、流量和进出口位置变化对于电池组温升特性的影响。结果表明,浸没式冷却系统的应用对于降低电池组最高温度及改善电池组温度均匀性的效果明显。Dubey^[27]等建立了分别由196个21700型电池组成的浸没式液体冷却电池模组和间接式液冷板冷却电池模组,研究两种电池模组在0.5 C、1 C、2 C、3 C倍率下电池组的最高电池温度,温度均匀性和系统压降方面的差异。研究结果表明,在低放电倍率下,两种冷却方式表现出相似的热性能。在高放电倍率下,浸没式液体冷却电池模组的最高电池温度更低,冷板式冷却模组的压降水平比浸没式液体冷却电池模组系统高15~25倍,这意味着浸没式液体冷却消耗更少的能量,

总的来说,浸没式液体冷却在高倍率放电下对于间接式液体冷却有着明显的优势。颜艺等^[28]对12个方形电池组成的模组进行研究,设计了顶部平行式“U”型流道、底部平行式“U”型流道和高低交错式“U”型流道3种不同形式的流道结构,如图4所示。利用CFD仿真对3种流道结构的散热效果进行分析,结果表明,在25 °C的温度环境下,高低交错式“U”型流道结构散热效果最佳,在3 C倍率放电、冷却液流速为1 m/s时,电池组的最高温度和最大温差分别为39.85 °C和3.5 °C,说明该系统能满足散热要求。Wang等^[29]建立了一个由60节18650锂离子电池组成的浸没式液体冷却电池模组,如图5所示。采用的是介电、不可燃、低沸点的HFE-7000制冷剂,通过仿真与试验的方法研究了该系统的热性能。由于制冷剂在电池壁表面上流动并沸腾,这降低了接触热阻并增强了热传递过程。因此,提高了电池模组的热性能。在入口流速为0.1 m/s时,此时HFE-7000蒸汽以饱和沸腾换热为主,在这种情况下,环境温度为25 °C,在1 C放电倍率下电池组的最高温度和温差分别为37.20 °C和3.71 °C,说明了该系统能满足散热要求。郭豪文^[30]对60节电池组成的浸没式液体冷却电池包进行建模和试验验证,研究了不同冷却液流量,不同电池排布和不同位置的超温电池对电池包散热性能和温度场均匀性的影响规律。结果表明,为了满足电池包内温度不均匀性小于5 K的要求,建议冷却液流量不低于0.5 L/min,在此流量下,3种不同的电池排布下电池包内的温度场分布差异不大,散热性能也比较相近。此外,在不同冷却液流量下,不同位置的超温电池引起的电池包内温度场波动均小于0.6 K,这一结果从侧面说明了浸没式液体冷却电池包具有较好的安全性。

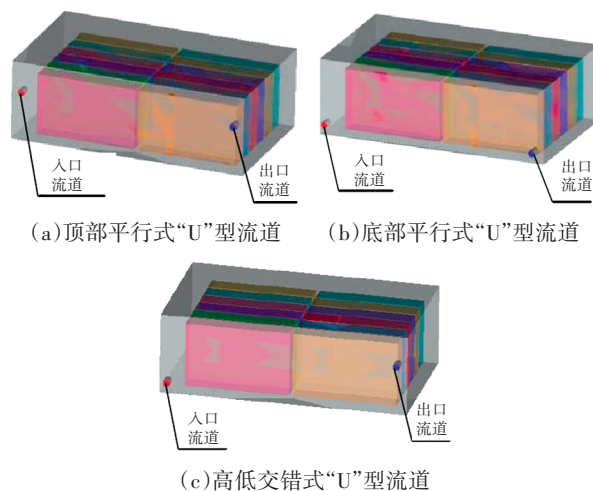
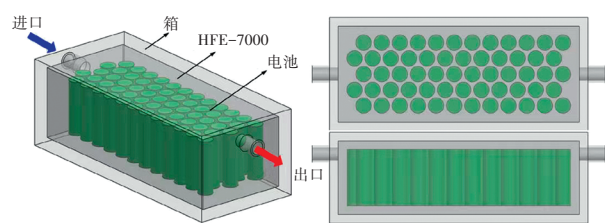
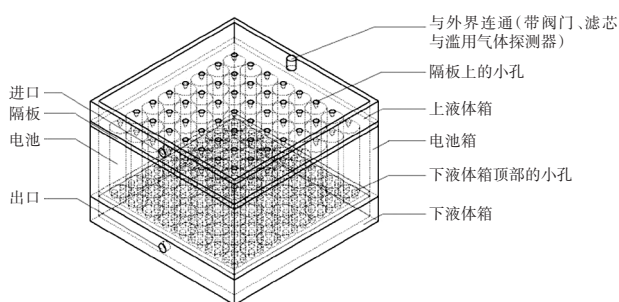


图4 浸没式流道设计^[28]

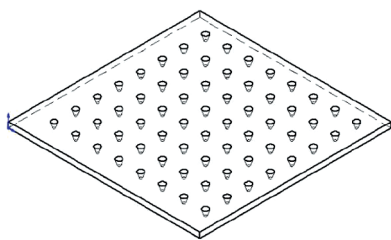
图5 浸没式液体冷却电池模组^[29]

1.2.2 非浸没式

浸没式液体冷却系统结构相对比较简单,但是冷却液的质量过大是焦点问题。同时将电池组浸没在冷却液中,虽然可以通过改变进口位置改变内部液体的流动,但是还是会存在内部流体流动死区的问题,这会造成电池模组温度的一致性变差。因此根据存在的问题进行相关的优化设计,从滴灌技术中得到启发,侯乃仁^[31]设计了一种新型的滴落接触式冷却系统,如图6所示。该系统利用液体与电池的直接接触加快换热效率,系统的结构较简单、单体电池间距小、换热效率高,与电池的全方位接触使得该散热系统具有较好的温度一致性。通过试验分析了4节电池并联组成的电池组在25℃下以1C恒流放电至截止电压时,在不同液体流速下的散热性能,以及25℃下液体流速为5.5 mL/min时,电池组在1C、1.5C、2C倍率放电的散热性能。试验结果表明,在25℃下,电池组以1C恒流放电时,液体滴落流速为3.16 mL/min、5.5 mL/min和7.2 mL/min时,电池组的最高温度分别为39.5℃、36.63℃、32.16℃,均不超过40℃,3种流速下的电池组的最大温差均不超过2℃,说明该系统的散热性能达到设计要求。



(a) 系统三维模型



(b) 隔板

图6 滴落接触式冷却系统的设计^[31]

将各类直接接触式液体冷却的优缺点进行总结,见表2。

表2 各类直接接触式液体冷却对比

类型	优点	缺点	适用范围
浸没式	冷却效果良好,结构简单,传热效率高	系统质量大	均适用
非浸没式	冷却效果良好,传热充分,系统质量小	系统较复杂	圆柱形电池

2 液体加热技术

随着电池能量密度的提高和对电池安全性的愈加重视,电池加热与电池冷却一体化集成设计成为各车企的主要设计思路,因此基于液体介质的间接接触式电池加热方法正在成为汽车企业量产车型的主流应用技术^[11],基于液体介质的直接接触式电池加热方法目前还处于试验研究阶段。常用的液体加热电池温度管理系统主要由加热器、换热器、泵和循环管组成,热交换器与蓄电池直接接触。当液体介质通过热交换器时,热量从液体传递到蓄电池。

3.1 间接接触式液体加热方法

Fan等^[32]建立了由6个方形电池组成的电池模组,在模组的底部放置一块具有7个矩形通道的液热/冷板,如图7所示。通过数值分析研究环境温度为-20℃时,不同放电倍率、加热介质入口流量和入口水温对电池加热性能的影响。研究表明,电池的自放电不能将电池加热到适宜的工作温度范围,需要采取外部加热的方法。采用外部热源加热时,增加介质入口流量可以实现良好的加热性能,但是当流量达到0.065 kg/s之后,电池温升速率提升效果不明显。通过提高加热介质入口温度可以更快地对电池进行加热,但是当入口温度过高时会导致电池最高温度超过40℃,因此需要选择一个适宜的入口温度。陈通等^[33]设计了基于液体的电动汽车动力电池热管理系统,如图8所示。通过CFD软件对所设计的系统进行仿真分析并进行了试验验证。结果显示,设定环境温度为-20℃,冷却液流量为12 L/min,进水温度为35℃,当最低温度达到15℃后停止加热时,继续充电至充满。在整个过程电池温度先升高后降低,充电结束时,电池最高温度为30℃,试验结果与模拟结果的模拟精度为2.1%,可以满足电池热管理设计要求。

3.2 直接接触式电池加热方法

颜艺等^[34]设计的浸没式热管理系统,使用500 W的加热器可以将初始温度为-30℃的电池在30 min内加热至10℃。在1.0 m/s的流速下,该系统可以将加

热后的电池组最大温差控制在 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。罗玉涛等^[35]设计了由16个方形电池组成的电池模组,设计了一套加热系统,该系统主要包括加热源电加热膜、传热介质变压器油和保温隔热层二氧化硅气凝胶板等,如图9所示。通过模拟分析了该系统对电池组的加热效果,并通过试验验证了该加热方式的有效性。结果表明,不同低温环境下,预加热到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的时间呈线性变化趋势,在极限低温 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下预加热时间为35 min,在一般低温 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下预加热时间为12 min,加热效果明显。通过油液循环或静置方式可将电池之间的温度均匀性保持在 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。Wang等^[36]建立了由12个方形电池组成的浸没式预热系统,如图10所示。通过仿真和试验研究了绝缘油入口流量、入口温度、进出口位置对预热性能的影响,结果表明,该系统可实现高达 $4.18\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率,其中入口流速是影响温度升高速率的最重要参数。

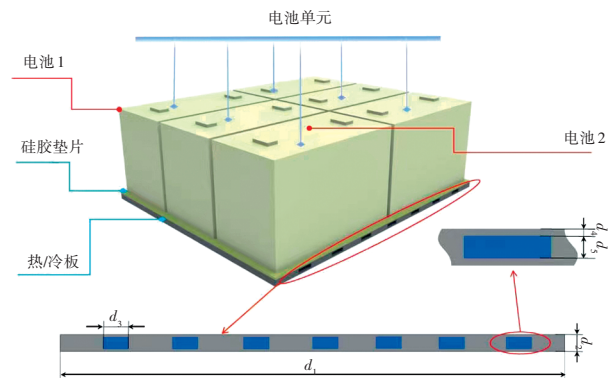


图7 7通道液热/冷板^[32]

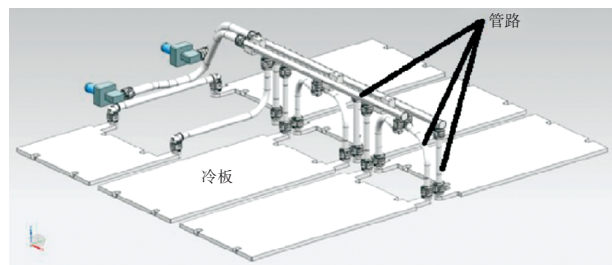


图8 液体热管理系统^[33]

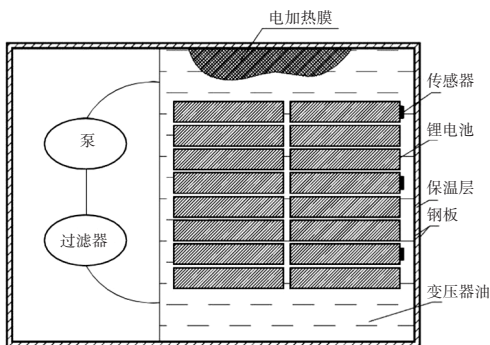


图9 浸没式加热系统^[35]

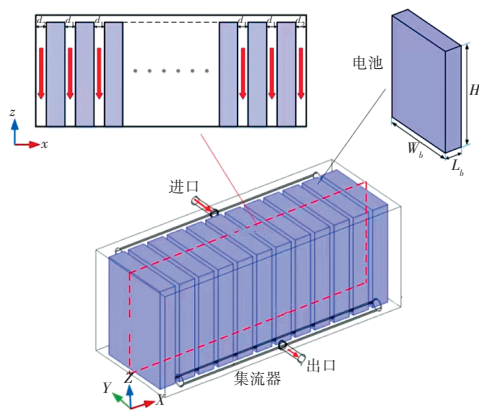


图10 浸没式预热系统^[36]

4 总结与展望

本文结合国内外研究现状从液体冷却和液体加热对锂离子电池的热管理技术进行总结得出以下结论。

液冷板式冷却散热效果好、冷却速度快、便于制造和布置,但是其系统复杂、质量大,难以兼顾汽车轻量化目标,而且对冷却液的密封性要求很高,若出现泄露会造成严重的安全事故。因此液冷板式冷却的未来研究方向是系统的轻量化设计以及安全性设计。液冷管道冷却目前还处于理论和实验室研究中,液冷管式相比液冷板式更轻量化,但是液冷管适用范围比较窄,而且由于液冷管的存在会造成电池布置不够紧凑,未来可以继续开展相关的研究。

浸没式液体冷却能够很好地降低电池的最高温度以及有比较好的温度均匀性,但是对电池包的密封性要求较严格。浸没式冷却在在电动汽车领域还没实现广泛应用,主要是因为汽车在道路上的行驶工况比较复杂,若在电动汽车上应用,浸没式液体冷却需要考虑汽车行驶过程中加速、制动、转弯、爬坡带来的惯性力和振动问题。未来可以开展相关的动态散热性能的研究。滴落式液体冷却方式目前仅存在于理论研究阶段,这种冷却方式相对于浸没式冷却,其冷却精度比较高,能够实现为目标电池的精准冷却,同时还可以减轻系统的质量,因此未来可以开展相关系统的试验研究。

电池包加热应用方面,采用液体加热可以快速完成对电池包的加热,可以满足在恶劣低温环境中电池包的预热。将电池加热与电池冷却一体化集成设计,可以减少系统的体积和复杂度以及降低成本。

未来,用户对汽车的舒适性和高效性要求越来越高,可以将电池热管理、电驱系统热管理以及乘员舱

热管理相结合形成整车热管理系统。

参 考 文 献

- [1] LIU Z, LIU X, MENG H, et al. Numerical Analysis of the Thermal Performance of a Liquid Cooling Battery Module Based on the Gradient Ratio Flow Velocity and Gradient Increment Tube Diameter[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 175: 121338.
- [2] ZHANG X, LI Z, LUO L, et al. A Review on Thermal Management of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles[J/OL]. *Energy*, 2022, 238. <https://hal.science/hal-03334356/document>.
- [3] 刘念, 张世义. 车用锂离子电池散热技术综述[J]. *汽车文摘*, 2023(2):15-19.
- [4] JILTE R, AFZAL A, PANCHAL S. A Novel Battery Thermal Management System Using Nano-Enhanced Phase Change Materials[J]. *Energy*, 2020, 219(3): 119564.
- [5] SONG W J, CHEN M B, BAI F F, et al. Non-Uniform Effect on the Thermal/Aging Performance of Lithium-ion Pouch Battery[J]. *Applied Thermal Engineering: Design, Processes, Equipment, Economics*, 2018, 128: 1165-1174.
- [6] ROE C, FENG X N, WHITE G, et al. Immersion Cooling for Lithium-ion Batteries - A Review[J]. *Journal of Power Sources*, 2022, 525: 231094.
- [7] YANG W, ZHOU F, ZHOU H B, et al. Thermal Performance of Cylindrical Lithium-ion Battery Thermal Management System Integrated with Mini-Channel Liquid Cooling and Air Cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 175: 115331.
- [8] MURALI G, SRAVYA G, JAYA J, et al. A Review on Hybrid Thermal Management of Battery Packs and It's Cooling Performance by Enhanced PCM[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2021, 150(2): 111513.
- [9] FAN Y, WANG Z, FU T, et al. Numerical Investigation on Lithium-Ion Battery Thermal Management Utilizing a Novel Tree-Like Channel Liquid Cooling Plate Exchanger[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 183: 122143.
- [10] LI Y, GUO H, QI F, GUO Z P, et al. Investigation on Liquid Cold Plate Thermal Management System with Heat Pipes for LiFePO₄ Battery Pack in Electric Vehicles[J]. *Applied Thermal Engineering: Design, Processes, Equipment, Economics*, 2021, 185(1): 116382.
- [11] 肖军. 新能源汽车低温电池热管理方法研究[J]. *汽车文摘*, 2020(10): 34-40.
- [12] YATES M, AKRAMI M, JAVADI A A. Analysing the Performance of Liquid Cooling Designs in Cylindrical Lithium-ion Batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 33(1): 100913.
- [13] 万长东, 任慧中, 鲁春艳, 等. 锂离子动力电池包液冷散热分析与优化[J]. *机床与液压*, 2021, 49(4): 160-163.
- [14] ZHAO C, CAO W, DONG T, et al. 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(5): 751-762.
- [15] 冯能莲, 董士康, 李德壮, 等. 蜂巢式液冷电池模块传热特性的试验研究[J]. *汽车工程*, 2020, 42(5): 658-664.
- [16] 余剑武, 陈亚玲, 范光辉, 等. 锂电池并行流道液冷板结构设计和散热性能分析[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2022, 52(12): 2788-2795.
- [17] 张越, 孔得朋, 平平. 液冷板抑制锂离子电池组热失控蔓延性能及优化设计[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(8): 2432-2441.
- [18] LAI Y X, WU W X, CHEN K, et al. A compact and Lightweight Liquid-Cooled Thermal Management Solution for Cylindrical Lithium-Ion Power Battery Pack[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 144(10): 11858.
- [19] ZHOU H B, ZHOU F, ZHANG Q, et al. Thermal Management of Cylindrical Lithium-Ion Battery Based on a Liquid Cooling Method with Half-Helical Duct[J]. *Applied Thermal Engineering: Design, Processes, Equipment, Economics*, 2019, 162: 114257.
- [20] Lionello M, Rampazzo M, Beghi A, et al. Graph-Based Modelling and Simulation of Liquid Immersion Cooling Systems[J]. *Energy*, 2020, 207(1): 118238.
- [21] CHENG C C, CHANG P C, LI H C, et al. Design of a Single-Phase Immersion Cooling System through Experimental and Numerical Analysis[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 160(10): 120203.
- [22] KANBUR B B, WU C L, FAN S, et al. Two-Phase Liquid-Immersion Data Center Cooling System: Experimental Performance and Thermoeconomic Analysis[J/OL]. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 118: 10.1016/j.ijrefrig.2020.05.026.
- [23] AL-ZAREER M, DINCER I, ROSEN M A. Heat and Mass Transfer Modeling and Assessment of a New Battery Cooling System[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 126: 765-778.
- [24] LIU J, FAN Y, XIE Q. Feasibility Study of a Novel Oil-Immersed Battery Cooling System: Experiments and Theoretical Analysis[J]. *Applied Thermal Engineering: Design, Processes, Equipment, Economics*, 2022, 208(4): 119564.

- 118251.
- [25] PULUGUNDLA G, DUBEY P, WU Z, et al. Thermal Management of Lithium Ion Cells at High Discharge Rate Using Submerged-Cell Cooling[C]//2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC). IEEE, 2020.
- [26] 张进强, 王海民, 鲁南. 绝缘油浸没式冷却小型NCM811动力电池模组的温度场特性实验[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(8): 2612-2619.
- [27] DUBEY P, PULUGUNDLA G, SROUJI A K. Direct Comparison of Immersion and Cold-Plate Based Cooling for Automotive Li-Ion Battery Modules[J]. Energies, 2021, 14(5): 1259.
- [28] 颜艺, 罗玉涛. 液体接触式电池热管理系统流道设计流速优化[J]. 电源技术, 2019, 43(11): 1801-1804+1816.
- [29] WANG Y F, WU J T. Thermal Performance Predictions for an HFE-7000 Direct Flow Boiling Cooled Battery Thermal Management System for Electric Vehicles[J]. Energy Conversion & Management, 2020, 207(3): 112569.1-112569.12.
- [30] 郭豪文. 纯电动汽车浸没式液体冷却电池包的模拟与实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [31] 侯乃仁. 锂离子动力电池液体散热系统设计与优化[D]. 福州: 福建理工大学, 2022.
- [32] FAN R, ZHANG C, WANG Y, et al. Numerical Study on the Effects of Battery Heating in Cold Climate[J]. The Journal of Energy Storage, 2019, 26: 100969.
- [33] 陈通, 孙国华, 王明强, 等. 基于液体的动力电池热管理系统性能研究[J]. 电源技术, 2019, 43(4): 658-661.
- [34] 颜艺. 基于液体直接接触式电动汽车电池热管理系统研究与设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [35] 罗玉涛, 郎春艳, 罗卜尔思. 低温环境下锂离子电池组加热系统研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(9): 100-106.
- [36] WANG Y, RAO Z, LIU S, et al. Evaluating the Performance of Liquid Immersing Preheating System for Lithium-ion Battery Pack[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 190: 116811.

(责任编辑 明慧)