

超级电容器热管理技术研究综述

蒙建伟^{1,2}, 金靖^{1,2}, 洪小波^{1,2}, 乔志军^{1,2}, 阮殿波^{1,2}

(1. 宁波大学机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211;

2. 宁波大学先进储能技术与装备研究院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 超级电容器凭借相对于传统电容器更高的能量密度、比锂离子电池更高的功率密度和循环寿命的特点,在储能领域中占据着重要地位。温度作为影响超级电容器性能的主要因素之一,维持其最佳工作温度范围离不开高效的热管理系统。文中首先描述了3种超级电容器的储能机理、产热特性以及不同热模型的对比评估。然后,系统梳理了空气冷却、液体冷却、热管冷却和相变材料冷却等热管理技术的当前研究进展,并重点讨论了各类技术的优势与局限性,同时对国内外工程应用中典型热管理方式的应用现状进行了概述。最后,对超级电容器热管理技术未来面临的挑战与研究趋势进行了总结与展望。

关键词: 超级电容器; 热管理; 热模型; 主动冷却; 被动冷却

Review on Thermal Management Technology for Supercapacitor

MENG Jianwei^{1,2}, JIN Jing^{1,2}, HONG Xiaobo^{1,2}, QIAO Zhijun^{1,2}, RUAN Dianbo^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Zhejiang Ningbo 315211,

China; 2. Institute of Advanced Energy Storage Technology and Equipment,

Ningbo University, Zhejiang Ningbo 315211, China)

Abstract: Supercapacitors occupy a significant position in the field of energy storage due to their characteristics of higher energy density compared to traditional capacitors, as well as superior power density and cycle life relative to lithium-ion batteries. Temperature, being one of the primary factors influencing supercapacitor performance, necessitates efficient thermal management systems (TMS) to maintain their optimal operating temperature range. This review first describes the energy storage mechanisms and heat generation characteristics of three types of supercapacitors, along with a comparative evaluation of different thermal models. Subsequently, it systematically reviews the current research progress in thermal management technologies, including air cooling, liquid cooling, heat pipe cooling, and phase change material (PCM) cooling. The advantages and limitations of each technology are critically discussed. Concurrently, it outlines the application status of typical thermal management approaches in domestic and international engineering practice. Finally, the challenges and future research trends for supercapacitor thermal management technology are summarized and prospected.

Keywords: supercapacitors; thermal management; thermal models; active cooling; passive cooling

0 引言

在全球气温持续攀升的背景下,碳排放超标已成为急需解决的环境难题。为实现可持续发展,必须探索化石燃料的替代方案,全力开发环境友好型燃料,寻求绿色可持续的储能资源。随着新能源动力电池技术的不断突破,其应用领域日益广泛,在

汽车产业与储能领域均发挥着重要作用。而锂电池凭借其突出的高能量密度优势,成为目前应用最为广泛的新能源电池之一。然而,受限于功率密度与循环寿命,现有电池难以满足火车、轻轨和卡车等高功率密度需求场景。双电层超级电容器相比锂电池具备更高比功率,兼具快速充电速率和更长循环寿命。将锂离子电池的插层型负极与双电层

电容器的电容型正极相结合形成混合型锂离子电池,可以同时实现高比能量、高比功率及长循环寿命的目标^[1]。

温度是影响电容器性能和循环寿命的关键因素,局部温度过高会导致电容器模组的一致性变差。受限于模组的空间尺寸,电容器工作产生的局部热量难以及时散出,可能引发热失控甚至爆炸,威胁人体安全。超级电容器具有较高比功率,其热管理尤为重要,需设计冷却系统使温度维持在合理范围内。目前应用于超级电容器的热管理技术主要包括空气冷却、液体冷却、热管冷却以及相变材料(phase change material, PCM)冷却^[2]。为优化冷却系统结构,需建立一维电化学模型与三维热模型,对电容器产热及热量分布进行预测与仿真。通过对比不同工况的仿真结果,分析冷却系统在散热效率、温度均匀性等方面的不足,为结构参数优化提供数据支撑。

本文首先系统回顾了电容器的基础理论,以及超级电容器一维与三维热模型的研究方法,并总结其最新研究进展。最后通过系统分析现有热管理系统(thermal management systems, TMS)的冷却方案,评估国内外企业典型热管理方式,明确超级电容器热管理方法面临的技术挑战,同时展望未来研究方向。

1 超级电容器的分类和性质

超级电容器^[3-4]根据电荷储能机理的不同可分为3类:第1类基于物理储能机制,称为双电层电容器^[5];第2类通过氧化还原反应实现储能,称为赝电容器^[6];第3类由双电层电容器正极与锂离子电池负极组合构建,通过法拉第和非法拉第过程协同储能,即混合超级电容器,也称锂离子电池^[7]。

1.1 双电层电容器

双电层电容器的储能机制源于离子在多孔碳表面的可逆静电积累,通过多孔电极和电解质之间形成双电层来储存能量^[8-9]。双电层电容器由两个多孔碳(通常是活性炭)组成,电极与集流体直接接触,并由浸有电解质溶液的多孔隔膜隔开。当电极之间施加电位差时,负极化电极中的负电荷在电极和电解质界面处被相同数量的阳离子平衡,而存储在正极化电极上的空隙则被阴离子电平衡^[10]。双电层电容器充放电过程本质上是电解质离子在电极表面的吸附和脱附,这一过程不涉及氧化还原反应,具有优异的功率密度和快速充放电

特性^[11]。

1.2 赝电容器

赝电容电极材料通过法拉第过程存储电荷,其电荷存储依赖于活性材料表面或近表面发生的快速、可逆氧化还原反应,该机制与电子转移引起的电极材料价态变化直接相关^[12]。赝电容器通过这类快速氧化还原反应可提供更高能量密度^[13]。赝电容材料能够在双电层电容器形成双电层的相同时间内,完成类似电池的氧化还原反应,故使其能量密度优于双电层电容器^[14]。然而受限于较慢的反应速率,赝电容器的功率密度与循环稳定性较低。

1.3 混合超级电容器

超级电容器兼具高功率密度与长循环寿命的优点,而锂离子电池在能量密度方面表现优异。为结合两者优势,通过将双电层电容器活性炭正极与锂离子电池预锂化石墨负极组合,构建出混合超级电容器。其充放电过程中同时发生氧化还原反应与非法拉第过程,从而实现电容与能量密度的双重提升^[15]。阴离子在高比表面积正极表面发生吸附和脱附,锂离子则在负极经历嵌入和脱嵌过程。由于吸附和脱附反应速率远超嵌入和脱嵌过程,因此锂离子电池的比功率主要取决于负极的性能表现^[16]。

2 热模型

超级电容器在充放电过程中的热行为极为复杂,其散热过程主要通过热传导、热对流及热辐射3种方式向环境传递热量。当内部因内阻与电极极化现象产生热量,致使温度高于环境温度时,热量会从器件内部向环境扩散^[17-18]。仅考虑内阻焦耳热时,产热功率遵循 $P=I^2R$ 公式,单位体积生热率 $q=P/V$,其中 V 为正极和负极核心区体积。超级电容器的内阻随温度升高而减小,电容随温度的升高而增大。升温过程加速电解液离子传输速率,进而影响充电效率。而且高温还会引发电解质降解,杂质降低离子对电极孔隙的可及性,导致容量降低与内阻增加。电动汽车采用高功率快充系统时,温升效应将加速器件老化^[19]。核心原因在于孔结构坍塌、导电炭黑颗粒团聚及碳层剥离等微观失效,这些变化直接导致离子扩散效率下降与整体内阻上升。进一步地,在老化进程中,电极与集流体界面因电化学腐蚀或分层现象,会形成高接触热阻,从而严重削弱系统的散热能力。锂离子电池高倍

率放电时存在显著温升问题,严重影响容量保持率与寿命周期,需通过实验研究其热行为特性。随着放电倍率提升,放电结束时温度曲线呈现先升后降的抛物线趋势^[20]。发热量随倍率增加而加剧,温度分布差异随之扩大,采用对角极耳布局可有效降低温差,提升温度均匀性^[21]。在柔性可穿戴电子设备普及背景下,柔性超级电容器面临新型热管理挑战。研究显示水凝胶基柔性器件在充放电时存在水分子驱动的热循环现象,该热行为与欧姆热、极化热协同作用,可通过调控电流密度实现整体温度调节。Ma 团队通过集成光纤传感器实现原位温度监测,并开发恒温充电热调控方法^[22]。在 TMS 结构设计时,采用热模型可以进行精确的温度预测。

2.1 一维热模型

基于超级电容器具有高能量密度和高充放电速率的特点,使其在大功率充放电条件下必定伴随着过大温升和局部温度过热的情况,导致电容器寿命的减小以及性能的降低。为了设计和优化高效的超级电容器 TMS,需要对超级电容器的性能参数进行预测。采用热力学第一定律推导出的瞬态热方程用于描述锂离子电容器中的热分布,其中产生的热量存储在电池内部或从电池传递到其周围^[23]。

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \left(\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q \quad (1)$$

从电池向周围传递的热流密度表示为

$$-\left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \Big|_{\text{boundaries}} = h(T - T_a) \Big|_{\text{boundaries}} \quad (2)$$

式中: C_p 为电池比热容 $J/(Kg \cdot K)$; λ 为导热系数 $W/m \cdot K$; h 为换热系数 $W/(m^2 \cdot K)$; T_a 为环境温度 K ; ρ 为电池密度 kg/m^3 ; q 为体积产热率 W/m^3 。

Soltani 等人提出一种新型电热等效电路模型具备大电流条件下宽温度范围的预测能力,其中二阶模型可显著提升电压预测精度。为探究温度对电容器性能及电化学行为的影响,通过将一维热模型与等效电路耦合,能有效预测热力学行为^[24]。通过实验验证,该模型在不同温度下 300 A 连续动态电流和 500 A 脉冲电流时,可达到误差小于 5%。Huang 等人提出一种无损估计空冷时电容器温度的方法,仅需获取输出电压、输出电流、进排气流温度及风扇转速参数,通过神经网络模型训练即可实现环境温度预测^[25]。精确建模可同步预测电容器电-

热特性,其管理系统集成一维模型与三维流体力学热模型,通过二阶等效电路提取电气参数输入热模型,实现 $-30^\circ C \sim 60^\circ C$ 宽温域特性测试^[26]。Lebrouhi 等构建的低成本零维模型,针对含 PCM 的 24 单体与 9 根铝管液冷系统进行研究,得出采用低成本集总模型是实际模拟 TMS 模组的有效工具^[27]。

2.2 三维热模型

三维热模型凭借其对器件复杂结构和热传递过程的高度还原能力,成为研究超级电容器热行为的重要工具。仿真中可采用有限元法在 COMSOL Multiphysics 软件中构建单体及模组的三维热预测模型^[28]。通过该模型综合研究了不同设计参数,仿真与实验结果误差小于 $2^\circ C$ 。最终证明风速 5 m/s、电池间距 5 mm 的侧冷拓扑结构是最佳设计。高功率应用产生的高热流密度易引发温度梯度,导致电容器模组内各电池电失衡。Niby 等人利用三维有限元模型对电容器热导率、传热系数及产热率参数进行数值研究,获得了稳态与瞬态下温度分布规律:最高温度位于电容器几何中心,呈现由中心向外递减趋势。研究同时表明核心温度随充放电倍率增加而升高,三维仿真可为高性能冷却系统设计提供理论支持^[29]。Zhao 等人提出了一种基于非平衡统计力学的电热耦合界面模型,揭示施加热浴时积分电容呈现先增后降的趋势,是源于电吸引力与玻恩斥力通过介电不均匀性的竞争作用。该模型同时预测了电容与电解质密度的非单调依赖关系^[30]。汽车在高功率脉冲工况下,温度分布直接决定器件性能与寿命,离不开热模型实现精准预测。Koo 等人开发的三维热模型通过质量分数估算各隔层密度与比热容,基于等效热阻网络法计算热导率,最终与红外热成像实验数据对比验证了模型精度的准确性^[31]。

3 超级电容器热管理系统研究现状

为了维持超级电容器在安全温度区间运行,需设计适配的 TMS。根据冷却介质传热过程是否依赖外部能量输入,TMS 可分为主动冷却系统和被动冷却系统^[32]。主动式冷却系统通过外部动力驱动冷却介质(如强制气流或液冷剂)进行强制对流换热,需消耗额外能量;被动式冷却系统利用材料本身特性或自然现象实现散热(如 PCM 通过相变潜热吸热),无外部能量需求,相变温度是其散热性能的关键因素。表 1 汇总了近年来超级电容器 TMS 的研究进展^[33-58]。

表1 超级电容器热管理系统研究进展
Table 1 Research progress on thermal management systems for supercapacitors

序号	作者	冷却方式	研究方法	结论	示意图
1	Zhang等 ^[33]	强制风冷	计算流体力学	添加导流板后的模组最高温度从52℃降低到41℃,最大温差从6.5℃降低到2.7℃	
2	Hu等 ^[34]	强制风冷	计算流体力学	进气口不对称出气口对称时,最高温度降低2.2%,最大温差降低53.2%	
3	Xu等 ^[35]	强制风冷	计算流体力学	倾斜角在40°~50°时散热效果最好,单体与壳体间隔距离从1mm到5mm时温度先减小后增加	
4	Karimi等 ^[36]	强制风冷	计算流体力学&实验	所有风扇从两侧进风、速度3 m/s、出口设计在顶部时散热效果最佳	
5	Voicu等 ^[37]	强制风冷	计算流体力学	单体之间采用交错排列布置时,三四排温度接近,最后一排温度最低	
6	Karimi等 ^[41]	液冷板冷却	实验	在入口流速为100 mL/min时可以避免更高的功耗和压降	
7	Karimi等 ^[42]	液冷板冷却	计算流体力学&实验	入口流速500 mL/min,入口温度30℃,3个入口、3个出口和3个弯弧时,最高温度和温差分别降低了11.5%和79.1%	
8	Wang等 ^[43]	沉浸式冷却	实验	沉浸式耦合直接冷却与自然对流相比安全温度分别延长了150.3%和45.7%	
9	Karimi等 ^[44]	热管冷却&PCM	实验	150 A将温度稳定维持于40℃以下达1 400 s,与自然对流相比纯热管将最高温度降低15%和14%,热管和PCM结合将最高温度降低35%和32%	
10	Karimi等 ^[45]	热管冷却&PCM	实验	PCM中加铝散热器和热管,与自然对流相比最高温度降低39.5%,最大温差是0.64℃	

体内。Zhang 等人针对逆流问题在出口处设计了倾角 30° 的导流板来阻碍外部气流,同时在每个出风口放置一个风扇增强冷却效果。优化后的结果使超级电容器模组最高温度从 52°C 降低到 41°C ,最大温差从 6.5°C 降低到 2.7°C ^[33]。Hu 等人针对超级电容器大量热量难以散发的问题,以某有轨电车超级电容器箱为研究对象,基于非线性优化方法,构建散热模型仿真分析。结果得出当进气口不对称且出风口对称时,冷却效率最好,最高温度 310.15 K ,降低了 2.2% ,最大温差 1.73 K ,降低了 53.2% ^[34],如图 1(c)所示。Xu 等人提出一种基于转角导流板和倾斜进出风口的新型风冷超级电容器 TMS,对于 4 行 3 列排列的模组,当倾斜角度在 40° 至 50° 范围内时具有较好散热效果。单体间距以及单体与模块外壳之间的距离从 1 mm 到 5 mm 时,温度呈现减小后增加的趋势,所以小间距($1\text{ mm}\sim 2\text{ mm}$)会阻碍空气流通影响散热,而大间距($3\text{ mm}\sim 5\text{ mm}$)会降低空气的平均流速降低传热效率^[35],如图 1(d)所示。Karimi 等人设计了一种强制风冷 TMS,使用轴向的

4 个风扇,一侧将空气吸入容器另一侧外将空气吸入环境。通过数值模拟对散热系统结构进行优化,得出当所有风扇都从两侧进风、速度为 3 m/s 、出口设计在顶部和单体间距 2 mm 可以使模组的温度保持在安全范围之内^[36]。为了改善超级电容器模组单体之间不同排列的传热能力,Voicu 等人提出一种混合排列布置方式,如图 1(f)所示。通过实验研究发现当风速为 0.69 m/s 、电流大于 50 A 时,模组中第 3、4 排温度非常接近,最后一行温度最低,这种结果正是由于单体之间的交错排列造成的^[37]。针对有轨电车超级电容器散热不均和散热能耗问题,Deng 等人在模组内单体之间填充导热硅胶膜,将热量从中心区域快速传导至模组边缘,增加导流板来优化风道实现温度均匀化。结果使模组最高温度由 67°C 降至 55.5°C ,并首次提出利用空调废气余冷进行辅助散热,可以有效降低能耗^[38]。空气冷却技术通过结构创新与系统优化显著提升了超级电容器的热管理效能,但其散热能力仍受限于空气的低热容。

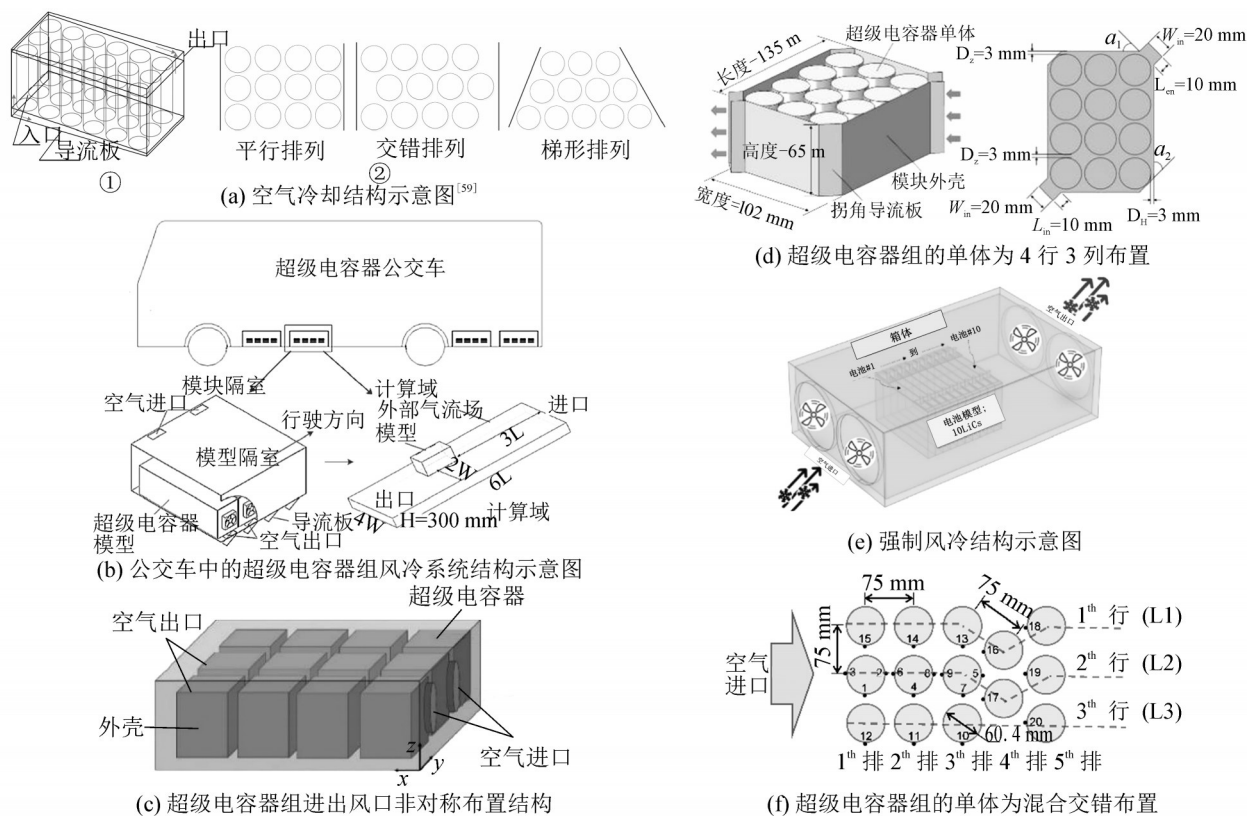


图 1 不同风冷系统结构设计
Fig. 1 Structural designs of different air-cooling systems

3.2 液体冷却

依据冷却介质与器件的接触形式,可明确划分为直接冷却与间接冷却两种模式。直接冷却是将单体或模组直接浸没在液体中实现散热,称为浸没

式冷却^[39];间接冷却是通过液冷板在单体表面进行冷却,借助微通道中的流动冷却液带走多余热量^[40]。液体冷却系统重量轻,结构紧凑,冷却时具有良好的温度均一性,相比空气冷却具有更好的导热系数,

可以实现在高倍率工况下进行快速散热。不同液冷系统结构见图2。液冷系统结构如图2(a)所示。

液冷板系统的高传热率和低功耗使其成为热管理方式的理想选择,液体冷却的紧凑性很少受到关注,紧凑性对比能有着重要影响。Karimi 等人针对紧凑性问题对大尺寸超级电容器设计了一种液冷 TMS,在单体两侧安装内部有蛇形通道的液冷板结构,如图2(b)所示。通过实验测试表明在入口流速为 100 mL/min 时可以避免更高的功耗和压降^[41]。为了设计出合适的 TMS,需要通过电气和热模型来进行模拟预测。Karimi 等^[42]人设计了一种一维和三维耦合模型,模拟不同系统参数的影响。结果表明在冷却剂入口流速 500 mL/min,入口温度 30℃,冷却剂路径设计 3 个入口、3 个出口和 3 个弯弧时,将最高温度和温差分别降低了 11.5%和 79.1%,如图 2(c)所示。浸没式冷却相比液冷板冷却具有显著的冷

却性能,但需要增加第二回路和高泵功率来冷却粘性浸没冷却液。针对该问题 Wang 等人提出了一种浸没式耦合直接冷却方法,将模组浸没在通有冷却管的浸没液中,如图 2(d)所示。与自然对流的单一浸没式冷却相比该系统将安全温度分别延长了 150.3% 和 45.7%,可以通过增加单体间隔、提高直冷液速度、降低直冷液温度和使用导热系数较高但运动粘度较小的冷却液来提高冷却性能^[43]。液冷技术通过接触模式的创新与系统参数优化,显著提升了超级电容器的热管理上限。然而要实现液冷系统的工程化应用仍面临着多重挑战,间接冷却的界面热阻导致传热效率损失、浸没式冷却的流体粘度产生高泵功率消耗以及冷却工质的热容极限制约极端工况下应用。要突破这些挑战,未来热管理研究应聚焦于开发低粘度高导热合成冷却液和探索相变微胶囊与液冷的协同控温机制,利用潜热吸收瞬态热冲击。

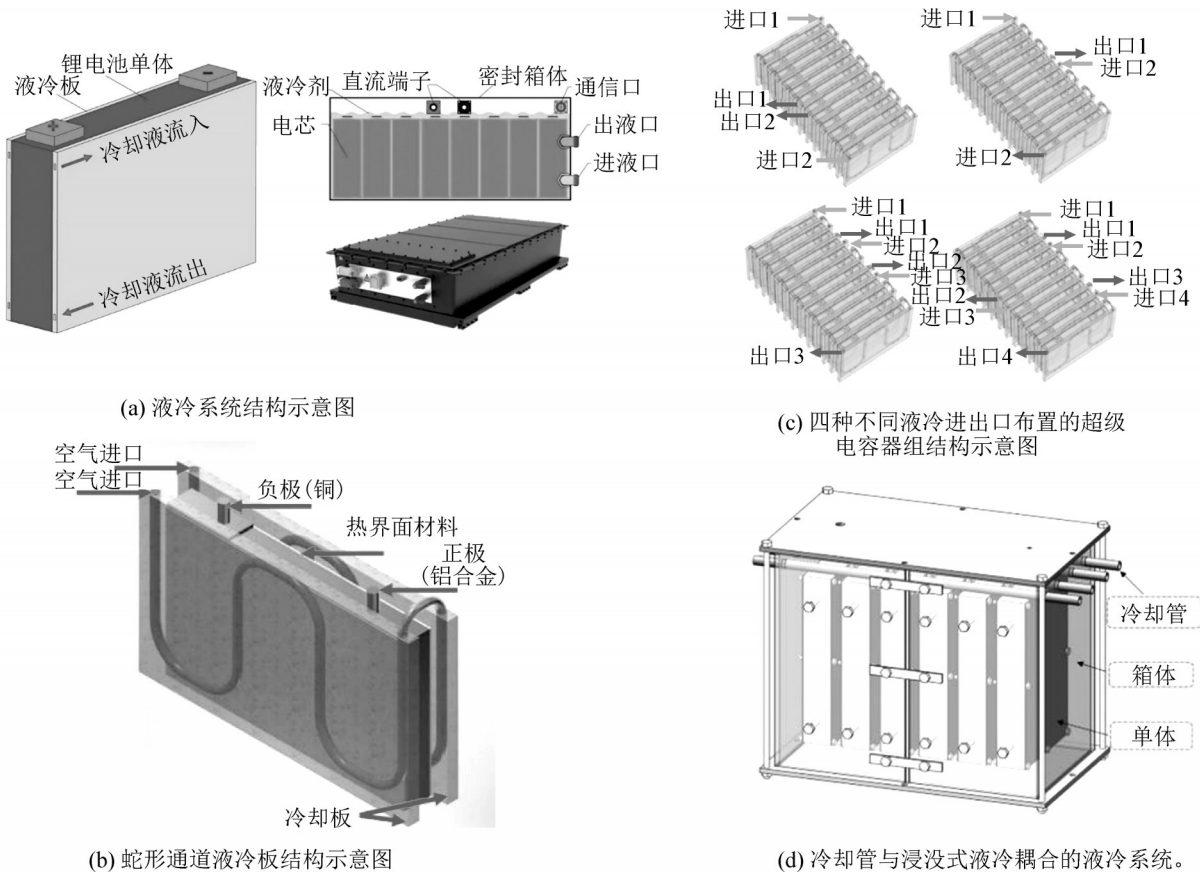


图2 不同液冷系统结构设计
Fig. 2 Structural designs of different liquid-cooling systems

3.3 热管冷却

热管冷却是利用相变传热原理进行冷却散热的热管理技术,通过工质在密封管内进行气液相往复循环的过程^[32]。散热过程中主要包含 3 个阶段:蒸发段、绝热段和冷凝段。当与热源接触时,蒸发

段内的液态工质吸收大量热量汽化为气体;产生的气体经绝热段传递,在管内压差驱动下流向冷凝段,于此处液化成液体并释放热量;最后,液态工质在重力作用下重新回流至蒸发段,由此形成持续的往复循环散热模式。不同热管冷却系统结构

见图3,图3(a)为热管原理示意图。

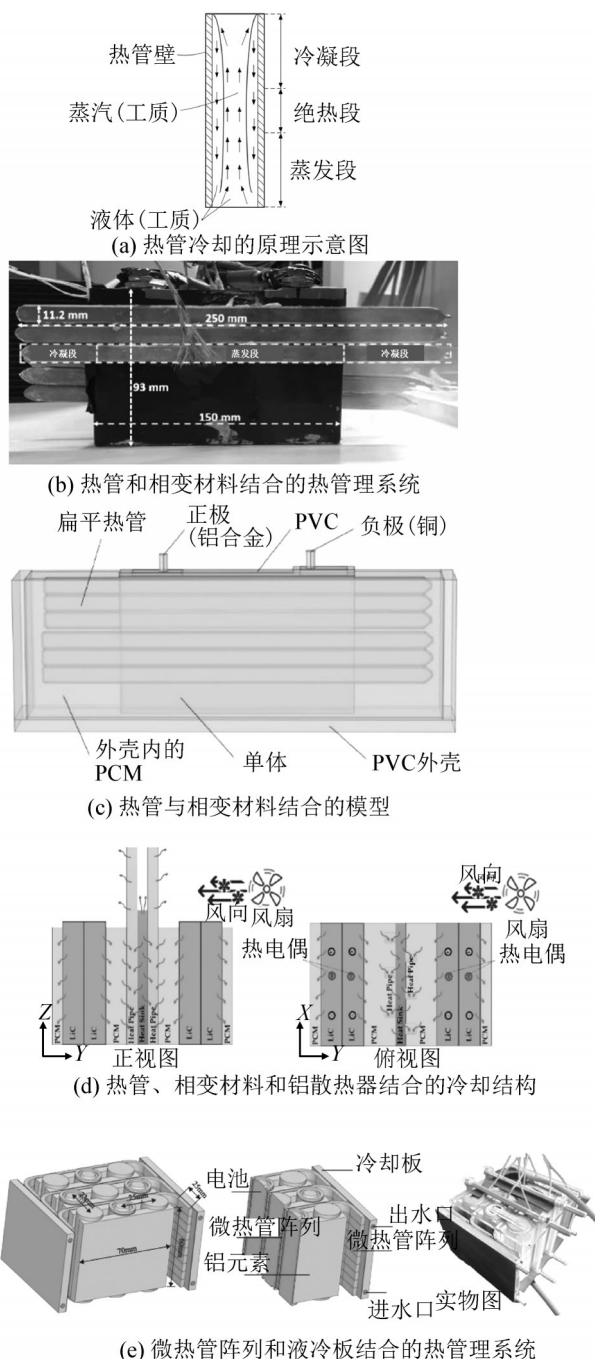


图3 不同热管冷却系统结构设计
Fig. 3 Structural designs of different heat pipe cooling systems

锂离子电容器在高功率工况下会不可避免的会产生热损失,对单体性能及寿命产生严重损害,需通过TMS散出余热。Karimi等人提出了一种PCM与6根扁平热管结合的冷却策略,如图3(c)所示,结果表明该方案在150 A电流强度下可将温度稳定维持于40℃以下达1400 s,与自然对流相比单纯热管方式将最高温度降低了15%和14%,热管和PCM结合方式将最高温度降低了35%和32%,同时提高了单体的温度均匀性^[44]。当锂离子电容器在快

速充放电时会产生过多的热量,为了确保稳定运行Karimi等人设计了一种基于风冷辅助PCM、热管和铝散热器的新型混合TMS,如图3(d)所示,PCM中添加铝散热器和热管,结果与自然对流相比将最高温度降低了39.5%,最大温差是0.64℃^[45]。为提高液体冷却系统的温度均匀性,Zeng等^[46]人提出了一种微热管阵列和液冷的混合冷却系统,如图3(e)所示,通过实验和数值研究,结果与无热管阵列方式相比,将3C倍率时最高温度和温差分别降低至41.03℃和2.16℃。热管技术凭借着高效的导热能力,成为解决超级电容器TMS问题的重要方案,尤其是在高功率脉冲工况中。但其应用仍受到限制,重力依赖型热管在车载颠簸场景中工质回流失效风险和复杂混合系统带来的空间与成本压力。未来研究需要重点开发抗重力毛细芯结构和低粘度高稳定性离子液体工质。

3.4 相变材料冷却

PCM冷却是利用相变潜热吸收热量来进行散热的技术,其中相变温度是决定其冷却性能的关键因素^[47-48]。该技术不需要外部能耗,紧凑型好,适合空间利用率高的场合。不过,由于导热系数的限制,需要在PCM中加入复合材料增加其导热性能。不同相变材料冷却系统结构见图4所示,其原理如图4(a)所示。

针对导热瓶颈的解决方案已在工程实践中得到验证,Chen等人开发的新型PCM基于有轨电车圆柱形超级电容器构建电-热耦合模型,实验表明可将42℃环境下的最大温升与温差分别控制在3℃和2℃范围内^[49]。通过在PCM中添加高导热性材料可以对其性能产生关键影响,碳纤维具有极高的轴向导热性能,可以使热量优先通过低热阻的碳纤维网络快速传输,绕开导热性能很差的PCM材料,提升了整体的导热系数。同时短碳纤维的添加对PCM的相变潜热影响较小,是一种高效的热性能改性手段。Masri等人^[50]在PCM中添加短碳纤维增加导热性,如图4(b)所示,使超级电容器最高温度降低9℃。Karimi等人提出一种PCM和石墨相结合的被动TMS,如图4(c)所示,实验测试表明纯石蜡组相比自然对流方式下将最高温度降低27.3%,石墨基复合PCM相比自然对流将最高温度降低30.4%,10 mm厚度是降低温度的最佳厚度^[51]。为了提高温度的均匀性,在PCM中加入了铝箔网栅,可以将温度保持在安全范围以下。结果表明与强制对流和单纯相变相比,该方式将模组最高温度分别降低了20%和13%,同时7 mm的铝网效果最理想^[52],

如图 4(d)所示。Zhou 等人提出了一种新型圆形蜂窝结构,采用两种不同相变温度的金刚石与扁平热管,能将每个单体的最高温度与温差控制在安全范围之内,显著提升电池的能量利用效率^[53],如图 4(e)所示。Alma 等人针对高倍率放电条件下的电池热管理优化,对比了单电池、圆翅片增强型、PCM 封装型及翅片-PCM 复合型四种配置的热性能,如图 4(f)所示。结果表明圆翅片与纯 PCM 方案均可降低表面温度,复合结构表现出最优性能。在确保温度均匀分布的同时,翅片厚度增至 4 mm,PCM 融化时间由 600 s 延至 900 s,展现出最佳综合性能。该研究揭示了翅片厚度与 PCM 的协同作用对散热性能的提升机制^[54]。在高温环境和高充放电倍率下,PCM

会迅速达到相变温度发生相变过程,之后不能继续进行降温作用,需要将热量快速散发出去,Fu 等^[55]人针对该问题将热管插入到 PCM 中,同时热管上端添加间隔排列的圆形翅片增加散热,将热管暴露在空气中增加与空气的对流换热,对单一相变冷却方式相比将最高温度降低了 36.5%,最大温差为 3℃,可以达到较高的散热能力和温度均匀性,如图 4(g)所示。PCM 技术通过填料改性、结构创新与系统耦合,显著提升了超级电容器的无源热管理能力,但在工程应用中仍面临相变循环稳定性与瞬态热冲击响应的双重挑战。未来研究需要着重开发纳米胶囊化 PCM 和构建仿生分级导热网络,解决局部热堆积难题。

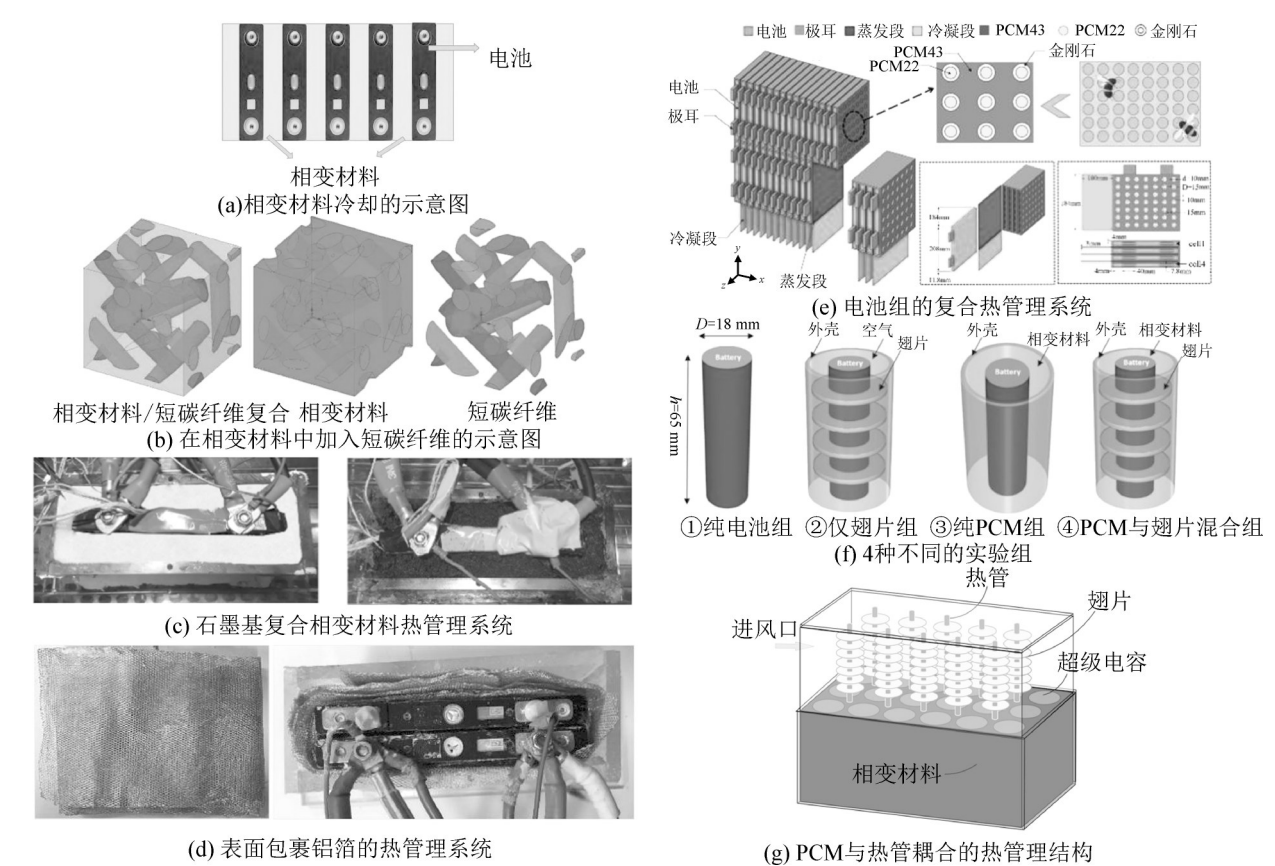


图 4 不同相变材料冷却系统结构设计
Fig. 4 Structural designs of different phase change material (PCM) cooling systems

3.5 其他冷却方式

在大功率的锂离子电容器的冷却系统中,高潜热的 PCM 冷却方法变得更受欢迎,材料性质的差异具有不同的冷却效果。将相变微胶囊集成在超级电容器电极材料中是一种新型的冷却方式,如 Hu 等人将聚吡咯加入到传统相变微胶囊的致密胺树脂壳表面,设计了一种新型电化学活性双壳相变微胶囊,与没有添加 PCM 的方式相比将到达 55℃ 的时间延长了 103 s,3 000 次循环可达到 79.8% 的电

容保持率和 98.4% 的库仑效率^[56]。为了解决在高温运行时的稳定性以及多次弯折后的电容保持率,Xu 等人将微囊化的 PCM 植入到碳纳米管薄膜表面的三维多孔石墨烯/聚苯胺骨架中,创新性的实现原位冷却控制,经过实验对比可以有效抑制温度的波动以及能够承受各种角度的弯曲变形^[57-58]。

3.6 工程应用中典型热管理方式

美国 Maxwell 公司将 ParerCache 超级电容器用于重型混合电力推进系统 Thunder Pack。该系统中

将 149 个 PC2500 超级电容器装在有风扇冷却的铝套内进行散热。并通过电池与超级电容的优势互补构建极佳储能系统。可在大电流及高低温环境下稳定工作,适用于卡车低温启动、中型和重型卡车及陆地下军事用车场景且使用寿命较长^[59];弯曲石墨烯通过褶皱、堆叠形成微尺度的多孔网络,促进了内部空气微对流,在强制风冷或自然对流场景下提升散热效率。弯曲结构在受压时产生弹性形变,增大有效接触面积,进一步降低界面热阻。欧洲爱沙尼亚 Skeleton 公司采用的弯曲石墨烯材料具有超高比表面积和优异的导热性能,可将热量快速传导至外部,导热系数是活性碳材料的 3 倍以上,可以在 240℃ 工况下保持温度稳定;宁波中车新能源公司作为专注于超级电容技术研发与产业化的高新技术企业,其 TMS 主要采用液冷和风冷为主的散热方式,通过铝制微通道液冷板、优化通道布置形式、改进风道结构设计、改变进出口流速或风速及在单体之间填充导热硅胶膜技术来提升散热效率^[60-62];上海奥威科技公司的 TMS 则以液冷技术为核心,将液冷板分布在电容模组的两端并通过内部流道调节冷却液流速可将模组温差控制在 5℃ 以内,散热效率显著优于空冷技术。目前液冷技术已广泛应用于轨道交通和储能系统中,如奥威的液冷型超级电容箱,散热效率提升显著,支持列车等高功率场景。

4 结语

超级电容器具有比电池有更高的功率密度和充放电速率,因此对其温度进行热管理是必不可少的。文中首先对超级电容器内部的热行为进行分析,根据内部产热机理建立一/三维热模型。通过热模型对冷却散热结构进行优化和温度模拟预测,最后综述了当前的空冷、液冷、PCM 和热管冷却散热方式的最新研究进展。结论如下:

1) 热模型可以对超级电容器的温度特性进行模拟,这在具有高功率密度的超级电容器冷却系统的结构优化中至关重要,进而得出最合适的冷却结构参数。

2) 风冷系统是通过自然气流或风扇带走单体表面的热量,结构简单成本低,适合在低功率工况下应用。空气导热系数低的因素限制了在高功率场景下应用,同时导致散热不均的现象。

3) 冷却液具有比空气更高的导热系数,液冷板系统可以将温度快速传导至模组周围,进行高效散热,同时液冷板的紧凑型可以实现更高的能量密

度,但存在第 2 回路泵体消耗功率和漏液风险。浸没式液冷相比液冷板和风冷具有更好的均温性和冷却效率,在高功率场景和特种领域应用广泛,但维护成本较高。

4) 热管导热系数高可以将温度快速传递到冷凝段进行循环散热,无需额外功耗空间利用率高,在应用中需要与其他冷却系统结合使用才能发挥其关键作用。

5) PCM 是利用自身潜热吸收瞬间温升,无需额外能耗,具有较好的均温性,在中低功率场景应用广泛。但温度过高超过潜热时便无法继续散热,低热导率是其主要限制因素,可以在 PCM 中添加铝片或复合材料提高其导热性,在工程应用中与其他冷却方式结合可以达到较好散热效果。

展望未来,面对未来超级电容器在高功率密度、极端工况及长寿命应用场景的迫切需求,热管理研究应聚焦于材料创新与结构优化的深度融合。在材料创新层面,开发兼具超高导热性、优异界面润湿性及电化学稳定性的先进界面材料。如石墨烯、氮化硼等二维材料,并探索其在极端温度冲击下的适应性机理;同时研发复合 PCM,利用其高潜热特性精准应对瞬态大功率冲击,并解决传统 PCM 的泄漏与体积膨胀难题;在结构优化层面,优化模块化热管理架构设计。深入研究微尺度流道拓扑优化、高效均温板集成、以及热电转换器件废热回收等创新结构,实现散热效率的阶跃式提升与系统能量流的优化管理。此外,未来研究还需强化产研转化,通过标准检测体系推动热管理技术的规模化应用。

参考文献

- [1] ZUO Wenhua, LI Ruizhi, ZHOU Cheng, et al. Battery-Supercapacitor hybrid devices: recent progress and future prospects[J]. Advanced Science Weinheim Baden Wurttemberg Germany, 2017, 4(7): 1600539.
- [2] 李军求, 吴朴恩, 张承宁. 电动汽车动力电池热管理技术的研究与实现[J]. 汽车工程, 2016, 38(1): 22-27, 35.
LI Junqiu, WU Piaoen, ZHANG Chengning. Study and implementation of thermal management technology for the power batteries of electric vehicles[J]. Automotive Engineering, 2016, 38(1): 22-27, 35.
- [3] CONWAY B E. Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications[M]. Germany: Springer Science&Business Media, 2013.
- [4] 王迪. 低温质子膜电容器设计及储荷机制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2023.
- [5] WEI Li, WU Ming, YAN Mengdi, et al. A review on electro-

- thermal modeling of supercapacitors for energy storage applications[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(3):1677-1690.
- [6] LIU Jilei, WANG Jin, XU Chaohe, et al. Advanced energy storage devices: basic principles, analytical methods, and rational materials design[J]. Advanced Science Weinheim Baden Wurttemberg Germany, 2018, 5(1):1700322.
- [7] 潘明俊, 魏阳超, 王峰, 等. 一种液冷一体储能电池管理系统的设计[J]. 浙江电力, 2023, 42(2):59-66.
- PAN Mingjun, WEI Yangchao, WANG Feng, et al. Design of a management system for liquid-cooling integrated energy storage battery[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(2):59-66.
- [8] 张森. 二维 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ 表面改性及其在超级电容器中的应用[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- [9] 杨斌斌. 具有高能量密度的生物质衍生多孔碳基水系超级电容器的电化学性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.
- [10] BÉGUIN F, PRESSER V, BALDUCCI A, et al. Carbons and electrolytes for advanced supercapacitors[J]. Advanced Materials, 2014, 26(14):2219-2251.
- [11] ZHOU W, LIU Z, CHEN W, et al. A review on thermal behaviors and thermal management systems for supercapacitors[J]. Batteries, 2023, 9(2):128.
- [12] SHAO Yuanlong, EL-KADY M F, SUN Jingyu, et al. Design and mechanisms of asymmetric supercapacitors[J]. Chemical Reviews, 2018, 118(18):9233-9280.
- [13] LUKATSKAYA M R, KOTA S, LIN Z, et al. Ultra-high-rate pseudocapacitive energy storage in two-dimensional transition metal carbides[M]. Singapore: Jenny Stanford Publishing, 2023.
- [14] SALANNE M, ROTENBERG B, NAOI K, et al. Efficient storage mechanisms for building better supercapacitors[J]. Nature Energy, 2016, 1(6):1-10.
- [15] 珠海冠宇电池股份有限公司. 一种负极片及包括该负极片的锂离子电池: CN113451581A [P]. 2021-07-12.
- [16] HE X, ZHANG X. A comprehensive review of supercapacitors: properties, electrodes, electrolytes and thermal management systems based on phase change materials[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 56:106023.
- [17] 陈化博, 戴朝华, 傅雪婷, 等. 有轨电车超级电容器新型相变材料热管理研究[J]. 电源技术, 2019, 43(9):1482-1487.
- CHEN Huabo, DAI Chaohua, FU Xueting, et al. Tram supercapacitor thermal management study using a new PCM [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(9):1482-1487.
- [18] 郑美娜, 李岩松, 刘君, 等. 超级电容器的热电化学耦合研究[J]. 电源技术, 2016, 40(7):1382-1384.
- ZHENG Meina, LI Yansong, LIU Jun, et al. Research on supercapacitor's coupling of thermology and electrochemistry[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(7):1382-1384.
- [19] PEDRAYES J F, QUINTANA M F, ORCAJO G A, et al. Thermal analysis of a fast charger for public service electric vehicles based on supercapacitors[J]. Batteries, 2024, 10(4):104.
- [20] ZHOU Wei, LIU Zhien, AN Yabin, et al. Thermal behavior analysis of Lithium-ion capacitors at transient high discharge rates[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 53:105208.
- [21] 闵凡奇, 吕桃林, 付诗意, 等. 锂离子电容器的热特性及热模型[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(8):2629-2636.
- MIN Fanqi, LYU Taolin, FU Shiyi, et al. Thermal characteristics and model of Lithium-ion capacitor[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(8):2629-2636.
- [22] MA T, LU Y, XU S, et al. Thermal self-regulation of flexible asymmetric supercapacitor assisted by fiber optic sensing system[J]. Journal of Power Sources, 2025, 629:235991.
- [23] SAMBA A, OMAR N, GUALOUS H, et al. Development of an advanced two-dimensional thermal model for large size Lithium-ion pouch cells[J]. Electrochimica Acta, 2014, 117:246-254.
- [24] SOLTANI M, DE SUTTER L, RONSMANS J, et al. A high current electro-thermal model for Lithium-ion capacitor technology in a wide temperature range[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 31:101624.
- [25] HUANG Yajie, ZHANG Donglai, WANG Tao, et al. Predicting the temperature of the electrolytic capacitor based on neural network algorithm[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(6):6068-6078.
- [26] KARIMI D, BEHI H, BERECIBAR M, et al. A comprehensive coupled 0D-ECM to 3D-CFD thermal model for heat pipe assisted-air cooling thermal management system under fast charge and discharge[J]. Applied Energy, 2023, 339:120987.
- [27] LEBROUHI B E, LAMRANI B, OUASSAID M, et al. Low-cost numerical lumped modelling of Lithium-ion battery pack with phase change material and liquid cooling thermal management system[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 54:105293.
- [28] SOLTANI M, BERCKMANS G, JAGUEMONT J, et al. Three dimensional thermal model development and validation for lithium-ion capacitor module including air-cooling system[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 153:264-274.
- [29] NIBY M A, KHANAFER K, AL-MASRI A. Three-dimensional finite-element analysis of thermal behavior of super-

- capacitors[J]. Special Topics & Reviews in Porous Media: An International Journal, 2020, 11(1):116-131.
- [30] ZHAO T, ZHAO S, ZHOU S, et al. How the thermal effect regulates cyclic voltammetry of supercapacitors[J]. ACS Energy Letters, 2023, 8(8):3365-3372.
- [31] KOO B, SHIN C B, LEE H Y, et al. Modeling of the thermal behaviors of an ultracapacitor and comparison with measurement data[C]//Electrochemical Society Meeting Abstracts 236. America: The Electrochemical Society, 2019.
- [32] KARIMI D, BEHI H, VAN MIERLO J, et al. Experimental and numerical analysis of holistic active and passive thermal management systems for electric vehicles: fast charge and discharge applications[J]. Results in Engineering, 2022, 15:100486.
- [33] ZHANG X, WANG W, HE H, et al. Optimization of the air-cooled supercapacitor module compartment for an electric bus[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 112(5):1297-1304.
- [34] HU Xing, TIAN Yupeng, YANG Kuo, et al. Design and optimization of air-cooled heat dissipation structure of an on-board supercapacitor box[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 249:123458.
- [35] XU Chaoying, LI Guofu, RUAN Dianbo. Design and optimization of air-cooled supercapacitor thermal management system based on the corner deflectors and the inclined inlet and outlet[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2024, 19(5):310-324.
- [36] KARIMI D, BEHI H, AKBARZADEH M, et al. A novel air-cooled thermal management approach towards high-power Lithium-ion capacitor module for electric vehicles[J]. Energies, 2021, 14(21):7150.
- [37] VICTOR V I, BODE F, ABBOD W, et al. Experimental and numerical study for a novel arrangement of a supercapacitors stack to improve heat transfer[J]. Applied Sciences, 2022, 12(2):662.
- [38] DENG Yibo, ZENG Sheng, LI Chushan, et al. Research on heat dissipation optimization and energy conservation of supercapacitor energy storage tram[J]. Waste Disposal & Sustainable Energy, 2024, 6(3):419-427.
- [39] WANG Z, ZHAO R, WANG S, et al. Heat transfer characteristics and influencing factors of immersion coupled direct cooling for battery thermal management[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 62:106821.
- [40] 陆飞, 曾义凯. 锂离子电池热特性及液冷散热研究[J]. 制冷与空调, 2021, 35(6):803-808.
- LU Fei, ZENG Yikai. Study on thermal characteristics and liquid cooling of Lithium-ion battery[J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2021, 35(6):803-808.
- [41] KARIMI D, BEHI H, HOSEN M S, et al. A compact and optimized liquid-cooled thermal management system for high power Lithium-ion capacitors[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 185:116449.
- [42] KARIMI D, BEHI H, AKBARZADEH M, et al. Optimization of 1D/3D electro-thermal model for liquid-cooled Lithium-ion capacitor module in high power applications[J]. Electricity, 2021, 2(4):503-523.
- [43] WANG Z, ZHAO R, WANG S, et al. Heat transfer characteristics and influencing factors of immersion coupled direct cooling for battery thermal management[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 62:106821.
- [44] KARIMI D, HOSEN M S, BEHI H, et al. A hybrid thermal management system for high power Lithium-ion capacitors combining heat pipe with phase change materials[J]. Heliyon, 2021, 7(8):07773.
- [45] KARIMI D, BEHI H, VAN M J, et al. Novel hybrid thermal management system for high-power Lithium-ion module for electric vehicles: fast charging applications[J]. World Electric Vehicle Journal, 2022, 13(5):86.
- [46] ZENG W, NIU Y, LI S, et al. Cooling performance and optimization of a new hybrid thermal management system of cylindrical battery[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 217:119171.
- [47] 郭立刚. 锂离子动力电池热分析及散热优化[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [48] 贺元骅, 余兴科, 樊榕, 等. 动力锂离子电池热管理技术研究进展[J]. 电池, 2022, 52(3):337-341.
- HE Yuanhua, YU Xingke, FAN Rong, et al. Research progress in thermal management technology of power Li-ion battery[J]. Battery Bimonthly, 2022, 52(3):337-341.
- [49] 陈化博, 戴朝华, 傅雪婷, 等. 有轨电车超级电容器新型相变材料热管理研究[J]. 电源技术, 2019, 43(9):1482-1487.
- CHEN Huabo, DAI Chaohua, FU Xueting, et al. Tram supercapacitor thermal management study using a new PCM[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(9):1482-1487.
- [50] AL-MASRI A, KHANAFER K, ABDUL-NIBY M. Enhanced thermal management strategy for supercapacitors using phase change materials: a numerical investigation[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024, 158:107856.
- [51] KARIMI D, BEHI H, VAN M J, et al. An experimental study on thermal performance of graphite-based phase-change materials for high-power batteries[J]. Energies, 2022, 15(7):2515.
- [52] KARIMI D, BEHI H, JAGUEMONT J, et al. Thermal performance enhancement of phase change material using aluminum-mesh grid foil for Lithium-capacitor modules[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 30:101508.

[53] ZHOU Yuxuan, CHEN Hao, LIU Chuang, et al. Thermal management of Lithium-ion batteries using a circular honeycomb PCM structure[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2025, 246: 127090.

[54] ALMA' ASFA S I, AZIZ M S A, KHOR C Y, et al. Impact of cooling configurations, fin thickness and phase change material on the thermal management of cylindrical Lithium-ion batteries[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2025: 103609.

[55] 傅雪婷. 有轨电车用超级电容电-热耦合建模与热管理系统优化[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.

[56] HU Yan, CHEN Haibin, LIU Meiqi, et al. Insight into thermal regulation of supercapacitors via surface-engineered phase change microcapsules[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2023, 630(Pt A): 150-160.

[57] XU Xiaoying, LIU Jiahua, OUYANG Xing, et al. In-situ temperature regulation of flexible supercapacitors by designing intelligent electrode with microencapsulated phase change materials[J]. Electrochimica Acta, 2020, 334: 135551.

[58] 张兴磊. 超级电容器温度特性及电动公交车电容舱冷却系统研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.

[59] 桂长清. 超级电容器的储能特性和应用[C]//第15届全国电源技术年会. 北京, 2003.

[60] 廖琪, 曹小林, 邓谊柏, 等. 有轨电车超级电容模组液冷散热仿真分析[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(2): 702-711.

[61] LIAO Qi, CAO Xiaolin, DENG Yibai, et al. Heat dissipation simulation of tram supercapacitor module[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(2): 702-711.

[62] 陈卫科. 基于车载超级电容热的管理系统: CN115329703A[P]. 2022-07-05.

[63] 深圳市今朝时代股份有限公司. 一种液冷超级电容器: CN117790178A[P]. 2024-01-02.

作者简介:

蒙建伟(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为锂离子电池热失控防护技术。E-mail: mengjianwei@163.com。

洪小波(1991—), 男, 助理研究员, 研究方向为电池系统。E-mail: hongxiaobo@163.com。

阮殿波(1969—), 男, 教授, 研究方向为超级电容器及先进储能技术。E-mail: ruandianbo@nbu.edu.cn。

《电力电容器与无功补偿》2025 年 4 期广告单位

1 上海思源电力电容器有限公司	封面	12 桂林明富金属股份有限公司	前插 8
2 陕西凯瑞宏星电器有限公司	封二	13 西安金叶电力科技有限公司	前插 9
3 宁国市裕华电器有限公司	封三	14 陕西泰普瑞电工技术有限公司	前插 10
4 西安高压电器研究院股份有限公司(业务) 封底		15 杭州精诚电力设备有限公司	前插 11
5 深圳市紫宸激光设备有限公司	前插 1	16 山东哈大电气有限公司	前插 12
6 新程(辽宁)电力电容器科技有限公司	前插 2	17 赛晶科技集团有限公司	前插 13
7 东莞市东和电子制程有限公司	前插 3	18 美丽中国我先行公益广告	前插 14
8 日新电机(无锡)有限公司	前插 4	19 西安高压电器研究院股份有限公司(认证中心)	
9 深圳市三和电力科技有限公司	前插 5		前插 15
10 山东海源泰和电气有限公司	前插 6	20 西安唯实输配电技术有限公司	前插 16
11 温州市凯泰特种电器有限公司	前插 7		