



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2506365

引用格式:王瑜,顾俊龙. 储能系统热管理技术综述[J]. 科学技术与工程, 2026, 26(27): 11554-11579.

Wang Yu, Gu Junlong. Overview of thermal management technology for energy storage systems[J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(27): 11554-11579.

能源与动力工程

储能系统热管理技术综述

王瑜, 顾俊龙

(南京工业大学城市建设学院, 南京 211816)

摘要 热管理是保障储能系统可靠性与安全性的核心,也是提升储能系统能效、延长其使用寿命的关键环节。采用文献综述法,对当前主流的储能系统热管理技术开展了系统梳理,探讨了各类冷却技术的优缺点,以及提升传热性能的优化路径,可为高效稳定储能热管理系统的设计,以及热管理相关课程教学提供参考。研究表明:风冷技术结构简单,但散热能力有限;液冷技术换热容量更高,却存在泄漏与腐蚀风险;相变材料冷却可以维持系统温度稳定,但自身导热性能通常不足;热管冷却换热效率优异,但成本相对更高。当前储能系统热管理技术仍面临多方面的综合挑战,包括高热流密度场景下温控难度大、长期运行后材料与系统性能发生衰减、局部过热易引发安全风险,以及设计与控制环节智能化水平不足等。未来热管理技术的发展将趋向于复合冷却技术开发与配套材料创新,需要结合系统运行需求与经济性开展优化设计,从而为储能系统热管理提供更可靠的理论支撑与工程解决方案。

关键词 储能系统; 运行热量; 热管理技术; 换热方式; 发展方向

中图分类号 TK172; **文献标志码** A

Overview of Thermal Management Technology for Energy Storage Systems

WANG Yu, GU Jun-long

(College of Urban Construction, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

[Abstract] Thermal management is regarded as a core guarantee for the reliability and safety of energy storage systems, as well as a key approach to improving energy efficiency and extending service life. The major thermal management technologies currently applied to energy storage systems were systematically reviewed through a literature review method. The advantages and disadvantages of different cooling technologies, along with methods for enhancing heat transfer performance, were analyzed to provide references for the design of efficient and stable thermal management systems and for thermal management education. The results indicate that air cooling is characterized by a simple structure but limited heat dissipation capability; liquid cooling exhibits high heat capacity while facing potential risks of leakage and corrosion; phase change material cooling enables temperature stabilization but generally suffers from low thermal conductivity; and heat pipe cooling demonstrates excellent heat transfer efficiency at a relatively high cost. The thermal management of energy storage systems is challenged by difficult temperature control under high heat flux conditions, performance degradation during long-term operation, safety risks caused by local overheating, and insufficient intelligence in system design and control. In the future, thermal management technologies are expected to evolve toward composite cooling strategies and material innovations. Optimized designs should be developed by considering system operational requirements and economic efficiency, thereby providing more reliable theoretical support and engineering solutions for energy storage system thermal management.

[Keywords] energy storage system; operating heat; thermal management technology; heat exchange method; development direction

在“碳达峰”“碳中和”国家战略的推动下,中国能源结构正加速向绿色、低碳、智能化方向转型^[1]。与此同时,以太阳能、风能为代表的可再生能源产业发展迅猛,但其发电的间歇性和波动性给电网稳定运行带来了新的挑战^[2]。在此背景下,储能技术作为支

撑新型电力系统安全稳定运行的核心手段,受到了行业的广泛关注^[3]。目前中国新型储能行业持续保持高速增长态势,截至 2024 年底,累计装机规模已达到 7 376 万 kW,能量容量达到 1.68 亿 kW,已经成为中国构建新型电力系统的重要支撑^[4]。

收稿日期: 2025-09-03 修订日期: 2026-02-28

基金项目: 教育部产学合作协同育人项目(230702002311658)

第一作者: 王瑜(1988—),男,汉族,江苏南京人,博士,副教授。研究方向:制冷系统设计与优化。E-mail:yu-wang@njtech.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

储能技术是一类通过物理或化学手段,在能源供需不匹配时,将能量以不同形式暂时储存起来,并在需要时释放以满足负载需求的关键技术。它可以实现能源从生产、传输到最终使用全环节的能量再分配,提升能源系统的运行效率与灵活性^[5]。当前储能方式种类丰富,按存储的能量形式可分为机械储能,如抽水蓄能、压缩空气储能;电磁储能,如超级电容器、超导储能;电化学储能,如锂离子电池、钠离子电池、氢燃料电池;此外还有热储能等^[6]不同类别。

然而,储能系统在运行过程中会产生大量热量,若热管理措施不当,会导致系统温度过高或温度分布不均,进而引发性能衰退,留下安全隐患,甚至造成热失控事故^[7]。因此,热管理技术作为储能系统设计与运维中的核心组成部分,核心目标就是在不同环境和工况下维持系统的热稳定性,保障储能装置能够长期可靠运行。热管理技术作为《传热学》课程的应用教学内容,其授课内容也需要紧跟储能领域发展,在储能热管理方向做到与时俱进,及时吸纳储能系统热管理的最新技术成果与未来发展方向。

当前储能系统主流热管理方式主要包括风冷、液冷、相变材料冷却以及热管冷却等技术^[8]路线。风冷系统结构简单、成本偏低,更适配中小规模储能项目。液冷系统凭借更高的换热效率与更均匀的温度分布,已经成为大型储能系统的主流选择。相变材料冷却可以在电池发热过程中吸收大量潜热,能够有效缓解温升,但受限于自身相变储热容量的瓶颈,通常需要搭配其他冷却方式共同使用。热管冷却则依托热管的高效传热特性,可以实现电池局部热点的快速散热^[9]。

尽管储能系统在新型电力系统中发挥着重要作用,但其运行过程中的热效应问题仍然十分突出,尤其是在高倍率充放电以及长周期运行的条件下,热失控、效率衰减等风险会显著提升。当前,热管理技术仍面临传热效率偏低、缺乏智能化调控能力等挑战。因此,构建高效智能的热管理系统,已经成为储能技术发展的关键环节。

系统综述储能系统中热管理技术的研究现状与发展趋势如图1所示,结构安排如下:第1节简要分析当前主流储能技术,重点介绍电磁储能与电化学储能两大类;第2节梳理四种主流热管理方式,分别从换热机理、传热能力、实际应用以及强化换热策略等方面展开详细阐述,旨在为不同储能场景选择适配的热管理技术提供理论基础与工程参考;第3节总结当前储能系统热管理技术在工程实践中面临

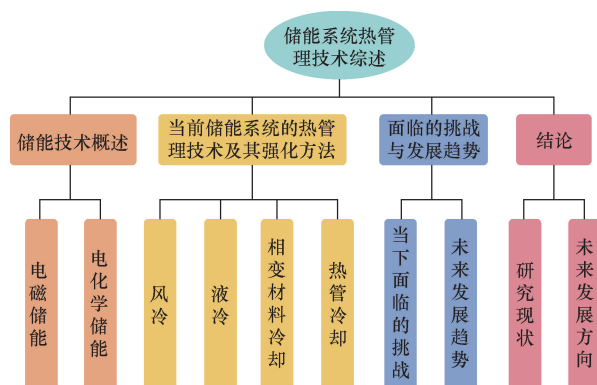


Fig. 1 Flowchart of the review process

的主要挑战,并提出未来热管理技术的发展趋势;最后为全文结论部分,对储能系统热管理技术的研究现状与未来发展方向进行总结。

1 储能技术概述

几十年来,全球电网高度依赖化石燃料进行发电。随着化石能源日益枯竭以及环境污染问题的加剧,越来越多的国家将其发电方式转向可再生能源。然而,随着可再生能源的间歇性特征逐渐凸显,化石燃料发电的退役以及消费者需求的变化,维持发电量和用电量之间的平衡变得愈发困难。储能系统因其能够随时随地灵活地储存和调度能源,是克服这一挑战的关键组成部分^[10]。

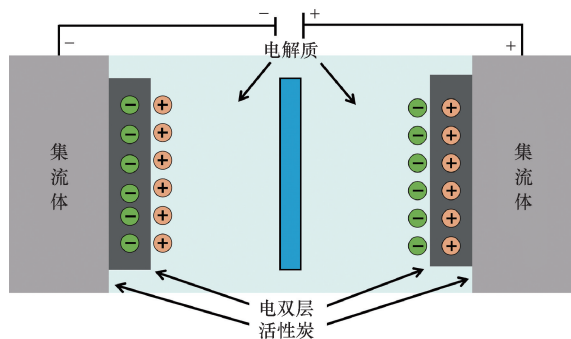
根据能量存储方式的不同,储能技术可大致分为电磁储能、电化学储能、热储能、机械储能等类型^[11]。本节将重点介绍其中应用较为广泛的电磁储能与电化学储能技术。

1.1 电磁储能

电磁储能技术通过电场或磁场来实现能量的存储与释放,具有响应速度快、功率密度高、循环寿命长等优点,尤其适用于瞬时功率调节及短时能量补偿场景。典型的电磁储能技术包括超级电容器储能和超导磁储能等,其中超级电容器凭借其良好的充放电性能和高频率响应,受到越来越多研究和工程应用的关注^[12]。

超级电容器主要由正负电极、电解质、隔膜和集流体组成。电极通常采用具有高比表面积和良好导电性的碳基材料,如活性炭、碳纳米管、石墨烯等,用于提供充足的电荷存储空间;电解质则作为离子传导介质,常见类型包括水系和离子液体电解质;隔膜用于防止电极短路,同时允许离子自由通过;集流体用于传导电流。

超级电容器的储能原理基于电极与电解质界面形成的电双层结构,其结构及工作原理如图2所

图2 超级电容器结构及工作原理图^[13]Fig. 2 Schematic diagram of the structure and working principle of supercapacitors^[13]

示^[13]。当外加电压时,电解质中的离子在电极表面形成稳定的空间电荷层,实现电荷的物理吸附与释放,这一过程称为电双层电容机制,具有响应快、效率高、不涉及化学反应等特点。此外,一些超级电容器还利用电极材料表面的可逆氧化还原反应进行储能,称为赝电容效应,可进一步提升能量密度。该充放电过程具有快速、高效、循环寿命长等优势,特别适用于短时高功率输出需求场景^[14]。

超级电容器在运行过程中会产生大量热量,主要来自电流通过内部电阻产生的焦耳热以及充放电过程中的可逆热效应^[15]。在高温下,这些热量会加剧电解质的分解和蒸发,释放可燃或有毒气体,导致内部压力升高、电极孔隙堵塞和电容下降。同时,集流体氧化和电阻上升也会进一步增加产热,严重影响装置性能和使用寿命,甚至带来安全隐患^[16]。因此,必须通过有效热管理确保其稳定运行。

1.2 电化学储能

电化学储能是当前发展最为迅速且应用最广泛的储能技术之一,主要通过可逆的氧化还原反应实现电能与化学能的相互转换,具有能量密度高、效率高和响应速度快等优点。当前应用最广的是锂离子电池,广泛用于便携设备、电动车和电网储能;氢燃料电池则具备清洁高效的特性,适用于长时、大功率储能场景^[17]。两者分别在便携化和长时储能场景中展现出显著优势,因此对其结构原理与应用的深入了解对于推动储能技术的多元发展具有重要意义。

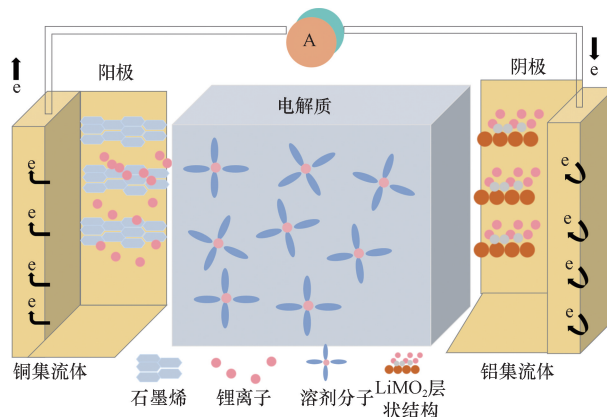
1.2.1 锂离子电池储能

锂离子电池的储能结构主要由正极、负极、电解液、隔膜、集流体组成。正极通常采用含锂的层状金属氧化物(如 LiMO_2),负极多为石墨等层状碳材料,两者分别嵌锂与脱锂以实现电能与化学能的转化;电解液作为锂离子在正负极间迁移的载体,

通常由有机溶剂与锂盐组成;隔膜置于正负极之间,既防止短路,又允许锂离子通过;集流体则用于收集电子并引导其进入外电路^[18]。各结构协同作用,实现了锂离子在电池内部的可逆迁移过程,是其实现高能量密度和长循环寿命的关键基础。

锂离子电池的储能原理如图3所示(以层状正极材料 LiMO_2 ,负极材料石墨为例)。充电时,在外电路作用下, Li^+ 从含有锂的层状金属氧化物 LiMO_2 中脱出,通过电解液与隔膜,嵌入到层状碳材料负极中。放电时,过程刚好相反, Li^+ 从层状碳材料负极中脱出,嵌入到正极中,同时在外电路形成电流^[19]。

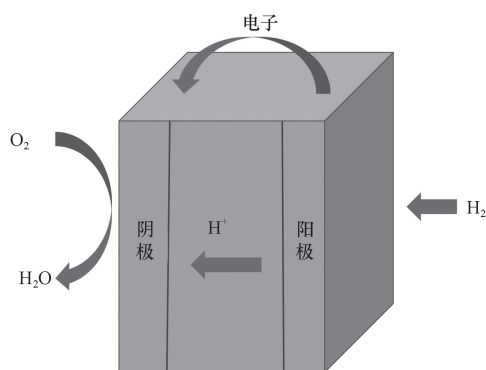
在锂离子电池储能系统中,温度是影响其性能和安全性关键因素。锂离子电池的工作温度范围一般为 $-20 \sim 45\text{ }^\circ\text{C}$ ^[20],而最佳工作温度区间则为 $10 \sim 35\text{ }^\circ\text{C}$ ^[21]。温度过低时,负极容易发生锂枝晶析出,增加安全风险;温度过高则会导致电池内阻上升,性能下降,寿命缩短^[22-23],同时显著提高热失控和热扩散的风险^[24]。因此,合理的热管理系统设计对于保障锂离子电池储能系统的安全性和稳定运行具有关键作用。

图3 锂离子电池储能结构及工作原理图^[19]Fig. 3 Schematic diagram of the structure and working principle of lithium-ion batteries for energy storage^[19]

1.2.2 氢燃料电池储能

氢燃料电池主要由阳极、阴极、电解质膜、双极板和密封层等组成。其中,阳极用于引入氢气,在催化剂作用下将氢气分解为质子和电子;质子通过电解质膜迁移至阴极,而电子则经外电路形成电流输出;阴极则引入氧气,与质子和电子反应生成水。电解质膜起到选择性传导质子的作用,阻止气体混合;双极板则负责气体分布、电流收集及散热管理^[25]。

氢燃料电池因其工作温度低、体积小的优势被广泛应用于储能系统。其结构和原理图如图4所示,PEMFC(proton exchange membrane fuel cell)实质

图4 氢燃料电池储能结构及工作原理图^[26]Fig.4 Schematic diagram of the structure and working principle of hydrogen fuel cells for energy storage^[26]

上是完成电解水“逆”过程的装置。氢气和空气分别进入 PEMFC 的阳极和阴极,氢在阳极发生氧化反应生成氢离子和电子,氢离子穿过质子交换膜到达阴极,电子通过负载在外部回路到达阴极发电^[26]。

氢燃料电池储能系统在运行过程中会产生大量热量,温度过高会导致饱和蒸气压上升、电解质膜含水量下降,从而增加膜的内阻,进而影响电池性能。反之,温度过低则会降低电化学反应速率和饱和蒸气压,导致阴极内水分以液态形式积聚,增加“水淹”风险,从而同样削弱电池性能^[27]。此外,低温会引发启动困难,而高温则会降低电堆的效率与输出功率^[28-29]。上述现象表明,电堆的温度变化对燃料电池的性能具有显著影响。因此,为确保电堆在最佳温度区间内稳定运行,提升系统效率与寿命,氢燃料储能系统必须配备有效的热管理系统。

1.3 储能系统发热情况分析

随着储能系统在电力调节、可再生能源并网以及电动交通等领域的广泛应用,系统运行过程中的热安全性问题愈发突出。不同类型的储能装置在运行过程中会产生热量,若不加以有效控制,可能导致热积聚、性能退化甚至热失控等问题^[30]。根据储能系统类型的不同,热源产生机制和热管理需求存在显著差异。

1.3.1 超级电容器储能系统产热分析

超级电容器储能系统在高倍率充放电及频繁功率调节工况下会持续产生热量,其产热水平与器件内部电阻特性、电化学反应以及运行温度密切相关。从机理上看,系统产热主要由两部分构成:一是由等效串联电阻引起的欧姆损耗,该部分热量随电流增大而迅速增加,在大功率输出和快速充放电条件下占据主要地位。二是电双层形成与消失过程中由于熵变产生的可逆热,其大小与充放电方向

及电极表面离子分布状态有关^[31]。随着温度升高,超级电容器内阻呈下降趋势,短时间内有利于降低电阻损耗,但同时离子迁移速率明显提高,自放电加剧,副反应活性增强,可能导致电解液分解、气体生成以及电极、电解液界面沉积物增加。这些过程不仅会引入额外热源,还会造成电极孔道堵塞和有效活性面积减小,从而引起容量衰减和内阻演化。从系统层面看,长期或局部过热将显著缩短超级电容器的使用寿命,研究表明,当工作温度高于 25 ℃ 时,温度每升高 10 ℃,其寿命可能下降约 50%。因此,在超级电容器储能系统中,产热水平不仅决定瞬时热安全状态,也直接影响系统的可靠性和全生命周期性能。尽管传统超级电容器在热安全性方面优于锂离子电池,通常不发生明显的自加热和热失控,但在高功率密度、模块化密集布置或散热条件受限的储能系统中,局部过热现象仍然可能出现,因此有必要开展合理的热管理设计^[32]。

1.3.2 锂离子电池储能系统产热分析

系统在充放电过程中,锂离子电池产生的热量可划分为反应热、欧姆热、极化热以及副反应热^[33]。这些热量通常可分为不可逆热和可逆热两类。不可逆热主要由电池内部电阻和副反应产生,包括欧姆热和副反应热。电池内部的电解液、电极材料以及 SEI(solid electrolyte interface)膜等会对电流形成阻抗,从而产生欧姆热,使电池温度升高^[34]。

Du 等^[35]提出了一个热-电耦合模型,该模型用于模拟锂离子电池内部的不可逆热量及其演化过程,并对极化热和欧姆热的贡献进行了详细研究。在高倍率放电条件下,极化热表现为主要部分,而欧姆热则主要由电解质内部产生。不同倍率下的热行为对比结果显示,随着倍率的升高,极化热的比例有所减少,而欧姆热的比例明显增加。同时还分析了正极与负极活性材料粒径对不可逆热量的影响,结果表明负极粒径对热量产生的作用更为突出。

此外,电池在运行过程中可能发生副反应,例如 SEI 膜分解、电解液分解以及正极材料分解等,这些反应不仅影响电池性能,也会进一步释放热量,是不可逆热的重要来源。可逆热则与电池内部的电化学反应直接相关。在锂离子嵌入或脱嵌过程中,伴随能量的释放或吸收,从而产生或吸收热量。这部分热量在一定程度上可通过热管理系统进行调控,从而避免过高温度对电池性能和安全性的影响^[36]。

总之,锂离子电池储能系统在运行过程中会产生多种类型的热量,其来源涵盖欧姆热、极化热、副

反应热以及电化学反应过程中的可逆热。不同热源在不同工作条件下的占比和作用各不相同,体现出复杂的热生成机制。这些热量若不能通过合理的热管理策略及时调控,将会导致电池性能下降并增加安全风险,因此深入理解热产生机理并构建高效的热管理系统是保障锂离子电池储能系统长期稳定运行的关键。

1.3.3 氢燃料电池储能系统产热分析

在氢燃料电池储能系统的运行过程中,燃料电池堆会持续释放大量热量。若系统的热量不能及时散出,将导致局部温度过高,进而加速关键材料的老化,并可能引发热应力损伤^[37]。因此,热管理对于氢燃料电池储能系统的安全性、稳定性以及长寿命运行具有重要意义。系统温度若过低,会降低反应速率和电化学效率。若过高,则会导致质子交换膜发生“脱水”现象,使离子电导率迅速下降,从而显著削弱燃料电池的输出性能^[38]。在长期高温条件下,质子交换膜的强度会降低,甚至可能出现局部热点、热应力集中以及膜穿孔现象,严重威胁氢燃料电池储能系统的安全性和耐久性^[39]。

氢燃料电池储能系统中的主要热源包括电化学反应热、欧姆极化热和活化极化热。其中,电化学反应热源于氢氧反应生成水的过程,其释放的热量与电流密度直接相关,是电堆运行时的主要热源。依据热力学第二定律,即使在可逆反应中也不可避免地存在部分能量损失,这部分能量会以热量的形式释放。此外,电化学反应过程中由于阴极和阳极的激活过电位等不可逆因素,也会导致额外废热产生。欧姆极化热则主要来自电堆内部电解质膜、双极板及导电部件的电阻。活化极化热则与催化剂表面的电化学反应活化能垒相关。与此同时,在膜电极的水合/脱水过程中,水在不同相态之间的转化同样伴随热量的吸收或释放^[40]。

值得注意的是,氢燃料电池储能系统的产热分布往往呈现非均匀性:电化学反应热集中于催化剂层,而欧姆热主要分布在膜电极及导电组件中。这种非均匀产热会导致局部温度过高,进一步引发膜脱水、材料老化及热应力损伤,最终影响储能系统的效率、寿命与安全性。

综上所述,不同类型的储能系统在运行过程中均会不可避免地产生热量,其热源机制和热行为特征各不相同:超级电容器主要受离子迁移和材料结构影响,锂离子电池的热量则涉及欧姆热、极化热及副反应热,而氢燃料电池则以电化学反应热和欧姆极化热为主。若这些热量不能得到有效管理,将导致器件性能劣化、循环寿命缩短,甚至引发严重

的热失控风险。因此,有必要对储能系统的热管理技术进行系统研究,以探讨如何通过结构优化、材料改进与主动冷却手段来有效抑制温升,从而保障储能系统的高效与安全运行。如表1所示为200 MWh 储能系统在1C(C 为放电倍率)放电条件下的最大发热量估算值。

表1 200 MWh 储能系统在1C 放电条件下的最大发热量估算

Table 1 Estimation of the maximum heat generation of a 200 MWh energy storage system under 1C

discharge conditions				
系统类型	容量/ (MW·h)	放电 倍率	单位能量发热率/ [W·(kW·h) ⁻¹]	最大瞬时发热 功率/MW
超级电容器储能	200	1C	15 000	3 000
锂离子电池储能	200	1C	150 ~ 300	30 ~ 60
氢燃料电池储能	200	1C	10 ~ 50	2 ~ 10

2 储能系统的热管理技术及其强化方法

目前,应用于储能系统的热管理技术主要包括风冷、液冷、相变材料冷却与热管冷却等^[41]。每种技术具有不同的机理与适用场景,且在传热能力与工程应用上各有优劣。本节将对这些主流热管理技术及其强化换热方法进行系统阐述。

风冷技术作为储能领域应用较早且最为成熟的方案,凭借其结构简单、成本低廉及高可靠性,在早期的共享储能及分布式项目中占据重要地位。如华能北方上都百万千瓦级风电基地、京能萧山共享储能项目等,均采用了风冷散热设计。通过模块化控制与智能温控监测,风冷系统能够有效克服高温高寒。然而,由于空气比热容较低,单靠风冷在处理超高能量密度电池组的温升均匀性方面仍面临巨大压力。如图5所示,为典型的风冷储能系统形式。

针对更高能量密度的需求,液冷技术作为一种新型、高效的热管理方案正逐渐成为行业主流。相



图5 传统风冷式储能电站

Fig. 5 Conventional air-cooled energy storage power station

比于风冷,液冷系统通过换热介质直接或间接与电池接触,具有更高的换热系数。例如,在新疆华电天山北麓 610 万 kW 新能源项目、中核新源 100 万 kW 风电项目等国家级能源工程中,液冷已得到广泛应用。此外,风冷-液冷耦合、相变材料-液冷耦合等多种冷却方式耦合的技术也越来越广泛,旨在通过优势互补,在极端复杂的运行工况下进一步提升储能系统的热安全防护水平。如图 6 所示为采用液冷等新型热管理方法的储能系统形式。



(a)液冷式储能电站



(b)风冷-液冷耦合式储能电站

图 6 使用新型热管理技术的储能系统

Fig. 6 Energy storage system with advanced thermal management technologies

2.1 风冷

2.1.1 风冷机理

风冷是以空气为传热介质的一种热管理技术,它是将低温介质送入储能系统内部,介质流过储能单元表面,通过热传导和热对流两种传热方式带走系统产生的热量,从而达到冷却的目的。根据冷却形式的不同,可以分为被动式冷却和主动式冷却。被动式冷却是指不借助任何辅助能量,利用自然风压、空气温差、空气密度差等对储能系统进行散热处理。其结构简单,成本低,但是冷却效果差,受限于自然环境且散热性能无法控制。主动式冷却采用强制对流进行换热,借助风扇将低温空气送至储能单元,进行热量交换后从出风口排出^[42]。因其具有体积小、结构简单、设计灵活性高、成本低和可靠性高的优点,在工程实践中得到了较为广泛的应用。

储能系统中采用的风冷技术一般为主动式风冷换热,但由于空气比热容及导热性较差的原因,风冷技术已不能满足高功率密度和高能量密度的储能系统散热需求,且风冷储能系统整体的温度均匀性较差,在大规模储能热管理系统中所占比例逐渐减少^[43]。

2.1.2 风冷传热能力及应用

风冷作为储能系统热管理的传统手段,在早期电池系统、储能集装箱、轨道交通动力系统等广泛使用,其核心优势在于结构简单、成本低廉、维护方便^[44]。因此,在中低热密度设备、对热管理响应速度要求不高的应用中,风冷依然具有较强的工程实用性。风冷系统的换热能力主要受到空气流速、流动状态、散热表面积以及热源布置方式等因素影响^[45]。由于空气作为传热介质在热物性方面存在先天限制,其对流换热能力在无外部驱动条件下较为有限,难以在高发热工况下实现均匀而有效的温度控制,因此更适合用于热产生强度较低、散热需求相对温和的储能应用,如小规模分布式储能单元或轻量化电池系统。通过引入主动送风方式构建受控气流场后,系统的对流换热水平得到明显提升,使风冷方案能够扩展应用于 UPS (uninterruptible power system) 设备、电动汽车动力电池以及通信基站储能等中等功率等级的工程场景^[46]。然而,风冷系统在面对高能量密度、大功率输出的新一代储能设备时,面临传热性能不足、环境适应性差的问题。尤其在密闭、高海拔或高温环境下,其冷却效率显著下降。因此,提升风冷系统的散热效率,成为储能热管理研究的重要方向之一。

2.1.3 强化换热方法

为了提升风冷系统的换热能力,研究者提出了多种强化换热方法,主要包括:冷却通道结构优化、电池组布局调整以及气流组织改进,从根本上解决风冷系统换热性能受限的问题。

(1)冷却通道结构优化。冷却通道的设计优化在风冷系统的性能提升中具有关键作用。Xu 等^[47]构建了 U 形空气冷却通道模型,分析送风口的位置和送风速度对电池组冷却效果的影响。结果显示,通过合理的搭配送风口位置和送风速度,可在电池尾部形成明显的绕流区域,从而增强局部对流换热效果,有效改善电池组的冷却性能。形成高对流换热,从而改善冷却性能。Sun 等^[48]提出了一种 Z 形气流通道结构,该结构将入口和出口处设计为锥形,以提升冷却效果。研究表明,锥形管道有助于减缓气流波动并降低系统的整体压降。此外,在主气流通道中引入附加孔口,可使部分气流进入冷却

通道中的副管道,从而进一步改善温度分布,电池组的最高温度下降了约 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在此基础上,通过在管道内部适当插入铝制波纹片以扩大换热面积,系统冷却效率提升至约 93% ,并将电池最高温度降低约 0.4% 。Zhou 等^[49]提出了一种基于空气分布管的新颖冷却通道。如图 7 所示,气流通道上沿纵向均匀布置多个分配孔,这些孔作为子流道,将进入的冷空气均匀输送至电池单元的不同区域,冷气流随后通过电池之间的间隙,将热量带向电池组的四周边缘,实现有效冷却。Na 等^[50]则设计了一种双向双层冷却结构,在该结构中,通过横向隔板将冷却流场划分为多个层级的通道,相邻通道内的冷空气呈反向流动,并借助隔板实现热量传递。与传统的单向流动设计相比,该双向双层气流结构使电池组的最大平均温差下降了 1.1 K ,降幅达 47.6% 。杨凯杰等^[51]在冷却通道内增设导流板,并分析了导

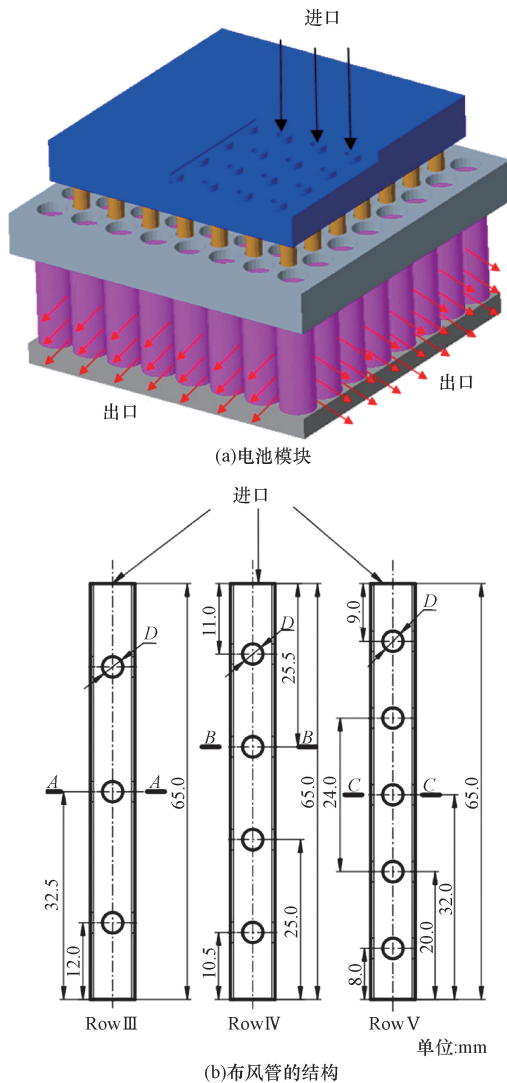


图 7 使用空气分配管的电池模块示意图^[49]

Fig. 7 Schematic diagram of a battery module using an air distribution duct^[49]

流板宽度和布置角度对散热性能的影响。结果表明,随着导流板宽度和角度的增加,电池表面的最高温度降低了 $32.98\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均温度降低了 $8.47\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。其中导流板与电池模块壁面垂直时散热效果最佳,可使电池最高温度降低至 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。

(2) 电池组布局调整。电池组布局调整主要包括电池排列方式与电池间距两个方面的研究。宫云飞等^[52]研究了多模组储能箱风冷系统中电池模组排列方式对散热性能的影响。结果表明,在顺排、交替排和首尾交错排三种布局中,交替排散热效果最佳,可使电池最高温度由 $39.49\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低至 $37.80\text{ }^{\circ}\text{C}$,并改善气流分布,使电池表面温度更加均匀。Wang 等^[53]对多种电池组排列结构的热管理性能进行了分析,所研究的排列形式包括 1×24 、 3×8 和 5×5 的矩形阵列,19 个单元的六边形排列,以及 28 个单元的圆形排列。研究发现,在这些结构中, 5×5 的立方排列展现出更优的冷却效果。同时,进风口和出风口的相对位置对冷却性能也具有显著影响。实验显示,当进风口设置在电池模块的顶部位置时,整体的冷却效率最为理想。如图 8 所示, Zhang 等^[54]通过实验研究进一步探讨了电池的排列结构与间距对热性能的影响。研究中对比了环形、线状等不同的布置方式。结果指出,在相同放电倍率条件下,线状排列比环形排列具有更优的散热性能。随着电池间距逐步增加,整体热管理效果得到改善,温度差异和最高温度逐渐降低。Yang 等^[55]采用交错排列的方式建立了一个三维的电池组模型,分别考察了电池之间的间距、电池与壁面之间的间距以及电池双辊结构之间的间距对冷却效果的影响,并对采用反向交错排列方式的电池结构进行了设计优化。研究结果表明,随着电池之间间距的增大,电池组内的最高温度和温度差也随之增大。为了控制温升并优化热分布,应在结构设计中优先采用较小的电池间距,以提升整体能量密度。

(3) 气流组织改进。气流的组织方式直接影响风冷的冷却效果,相关研究围绕送风方式、进出口位置及风口结构等方面展开,旨在提升冷却效率与温度均匀性。Lu 等^[56]研究了不同送风方式对交错布置电池组热性能的影响。结果显示,在相同布置条件下,采用 U 形送风方式时,电池单体的最高温度与最大温差相比于 Z 形送风方式均降低了 3.0 K ,说明 U 形送风方式在降低热峰值与温度不均方面具有更优的冷却效果。如图 9 所示, Chen 等^[57]通过 CFD (computational fluid dynamics) 模拟比较了不同风冷电池热管理系统的进出口位置,结果表明:当进出口均位于电池组宽度侧的中部时,冷却效

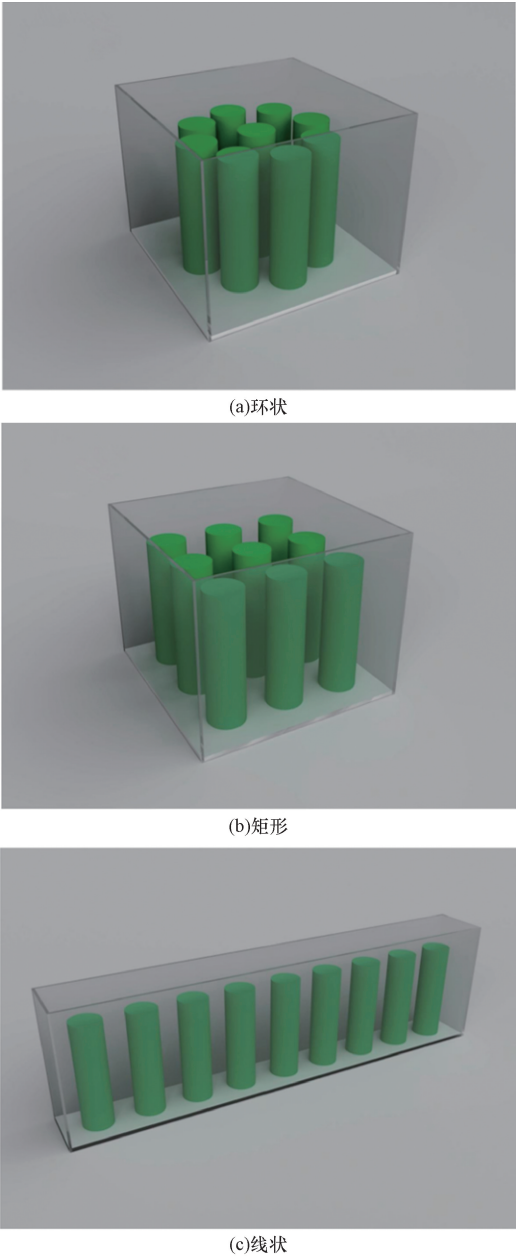


图 8 电池排列结构^[54]
Fig. 8 Battery arrangement structure^[54]

果最佳。与原始 Z 形通道设计相比,该布局将电池组的最高温度降低了 4.3 K,最大温差减少了 6.0 K。汪鹏伟^[58]对风口的数量、位置和尺寸进行了优化研究,结果表明:适当增加进风口数量可显著改善箱体内部气流分布,提高冷却效率。其中,进风口设置于左右两侧、出风口设置于底部的布置方式效果最佳。

2.2 液冷

2.2.1 液冷机理

液冷是一种以液体为传热介质的主动式热管理技术,主要通过冷却剂在系统内的循环流动,将储能单元在运行过程中产生的热量带走,从而实现

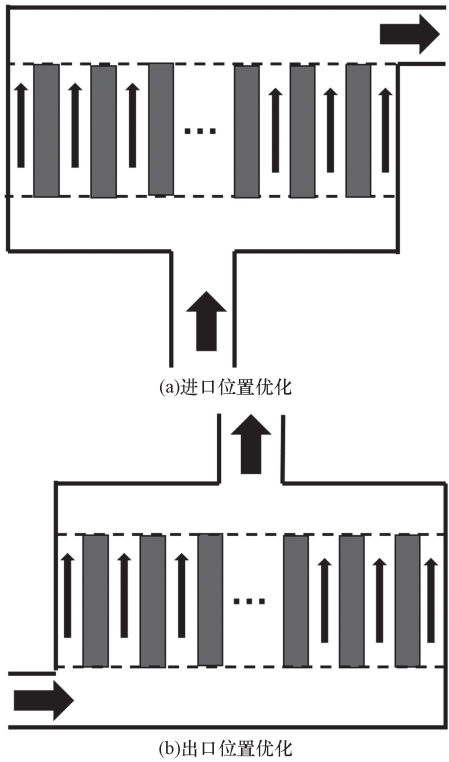


图 9 进、出口位置优化示意图^[57]
Fig. 9 Schematic diagram of optimized inlet and outlet positions^[57]

有效冷却。液体与储能单元表面之间的热量传递过程主要包括热传导和热对流两个环节,热量由储能单元内部传导至壳体表面,再通过与冷却剂之间的热对流完成换热过程^[59]。

常见的液冷系统由冷板、冷却剂通道、循环泵、换热器和储液罐等组成,冷却剂在泵的驱动下流经冷板或冷却通道,实现热量的转移。与风冷相比,冷却剂具有更高的比热容和热导率,因此在相同换热面积和流速下,液冷系统的冷却效率远高于风冷系统。冷却剂通常采用水、乙二醇水溶液、纯乙二醇、空调制冷剂以及电绝缘硅油等^[60]。液冷方式一般可分为直接冷却(液体与储能单元直接接触)和间接冷却(通过冷板等结构实现热量中转),间接液冷由于安全性更高而广泛用于实际工程中。

2.2.2 液冷传热能力及应用

液冷系统因其优异的散热性能,被广泛应用于高热负荷的储能场景中,如电动汽车动力电池系统、大型储能电站、数据中心等。与风冷系统相比,液冷系统可更有效地降低储能系统中电池的峰值温度,控制电池间温差,提高温度均匀性,从而延长电池寿命并提高整体运行安全性。

液冷系统的传热能力受到冷却剂种类、冷却剂流速、流道设计等多个因素的影响。通常情况下,

液冷换热系数可达数百至上千 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 远高于自然风冷或强制风冷水平。此外, 液冷系统适用于封闭式结构或高功率密度设备, 可与电池管理系统 (battery management system, BMS) 实现精确温控, 具备良好的工程适应性与智能化发展潜力^[61]。

2.2.3 强化换热方法

液冷技术的研究主要专注于新型冷却介质、增加冷却剂流量、优化冷板设计。

(1) 新型冷却介质。研究表明, 水作为冷却剂能够有效提高电池热管理系统的冷却性能, 并保持电池温度分布的均匀性。Wang 等^[62] 对空气、水和硅油三种冷却介质进行了对比研究, 分析其在电池热管理系统中的性能。结果显示, 使用水作为冷却剂不仅能够将电池温度控制在合理范围内, 还具有更低的能耗。与空气相比, 水具有更高的导热系数和比热容; 与硅油相比, 水的黏度更低。这些物性优势使水具备更强的传热能力, 同时有助于减少系统的额外能耗。Yang 等^[63] 提出了一种新型的冷却剂——液态金属, 用于电池组的热管理。通过数学分析和数值模拟, 对液态金属冷却系统的冷却能力、泵功耗和模块温度均匀性进行了评估, 并与以水作为冷却剂的液冷系统进行了比较。结果表明, 在相同的流量条件下, 采用液态金属作为冷却剂的液冷系统可以获得更低和更均匀的模块温度, 并且泵功率的消耗更少。如图 10 所示, Zhang 等^[64] 提出了一种基于水基聚丙烯酸钠 (PAAS) 水凝胶的热管理系统, 用于缓解锂离子电池在运行过程中的热涌问题。研究采用恒定产热率热模型对电池组在大电流放电条件下的热行为进行了数值模拟。结果表明, 该水凝胶热管理系统能够在不同放电倍率下有效降低电池组温度的升高速率, 并减小操作过程中的温差, 有助于提升电池在连续充放电过程中的

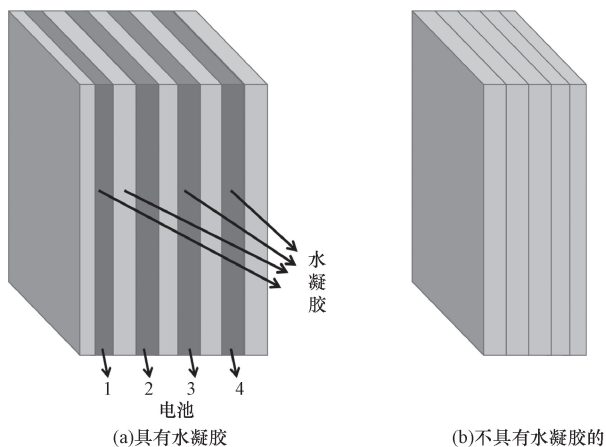


图 10 有无水凝胶电池组结构对比^[64]

Fig. 10 Comparison of battery pack structure with hydrogel and without hydrogel^[64]

运行稳定性与安全性, 同时减缓了寿命周期测试中的容量衰减。Soleymani 等^[65] 研究了纳米流体在液冷系统中的应用, 考察了不同类型纳米颗粒 (氧化铜和氧化铝)、不同体积分数 (0.5%、2%、3% 和 5%) 以及不同流速条件下对液冷系统性能的影响。研究发现, 引入 5% 体积分数的纳米流体能够显著改善电池的热管理效果, 其中氧化铝纳米流体的降温性能优于氧化铜, 可将电池温度降低约 7.89%, 而氧化铜可降低约 4.73%。此外, 在高功率瞬态运行条件下, 使用纳米流体的液冷系统能够有效维持电池温度在安全范围内, 显示出其在提高系统热管理效率和温度均匀性方面的潜力。侯竣升等^[66] 制备了具有较高热导率和稳定性的氧化铝纳米流体, 并通过电池热管理实验研究其对系统传热性能的影响。结果表明, 纳米流体的加入能够在压降无明显增加的情况下有效降低热源温升。当入口流量为 100 mL/min、发热功率为 150 W 时, 热源最高温度降低 1.6 $^{\circ}\text{C}$, 且氧化铝纳米流体的综合性能指标较去离子水提升 10.4%。

(2) 增加冷却剂流量。田少鹏等^[67] 设计了一种微通道液冷板并研究了不同冷却剂流量对液冷板散热、均温及能耗性能的影响。结果表明, 质量流量为 4 g/s 时, 电池组最高温度和最大温差分别减小为 28.6 $^{\circ}\text{C}$ 和 2.1 $^{\circ}\text{C}$ 。当质量流量高于 4 g/s 时, 液冷板散热性能改善不明显, 且能耗较高。Wang 等^[68] 研究了冷却剂流量对电池冷却性能的影响, 并进一步分析了串联冷却、并联冷却等冷却方式的效果。结果表明, 适当增加冷却剂流量有助于降低电池的最高温度并提升温度分布的均匀性, 最高温度为 35.74 $^{\circ}\text{C}$, 温差为 4.17 $^{\circ}\text{C}$ 。当冷却剂流量增加到一定值时, 对提高冷却效果没有明显作用; 与串联冷却相比, 并联冷却可以明显提高电池模块的温度均匀性。如图 11 所示, Lai 等^[69] 通过研究发现, 当电池在 5C 放电条件下运行, 且冷却剂质量流量超过 $1 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ 时, 电池温度处于相对稳定的状态, 这意味着冷却剂可以有效地带走电池的热量, 此时系统最高温度可维持在 40 $^{\circ}\text{C}$ 以内。

(3) 冷板的设计优化。液冷板的几何形状对冷却液在流道中流过的面积、流速以及冷却液分配起关键作用, 进而影响整体散热性能。虽然传统的直通道冷却板结构简单、制造方便, 但其冷却效果往往难以满足高热流密度工况下的需求。因此, 越来越多的研究集中于探索非传统结构的冷却板形式, 提出了多种新型设计以提升热管理效率。Jin 等^[70] 设计了一种超薄型微通道液冷板 (microchannel liquid cold plate, MLCP), 旨在改善传统直通道液冷结

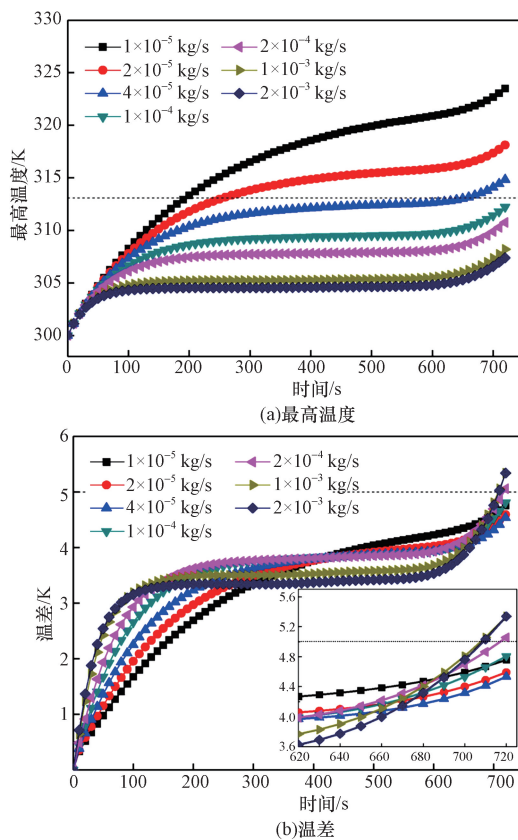


图 11 不同质量流量下 5C 放电速率过程中的最高温度和温差随时间的变化^[69]

Fig. 11 Changes in maximum temperature and temperature difference over time during the 5C discharge rate process at different mass flow rates^[69]

构的散热性能。实验结果表明,当冷却液流量小于 0.9 L/min 时,该微通道结构能够有效控制电池表面温度,使其维持在 50 °C 以下,表现出良好的冷却效果。Li 等^[71]为验证波形冷板相较于传统直行冷板在冷却性能上的优势,开展了数值模拟研究。结果显示,在 5 °C 高倍率放电条件下,采用波形通道设计的冷却板可使电池组的最高温度降低 12.8 °C,温差减少 5.3 °C,显著提升了散热效果与温度均匀性。Yang 等^[72]受到蜘蛛网和蜂窝结构的启发,提出了一种仿生液体微通道散热系统,用于优化电池模块的热管理性能。在放电电流为 32.2 A、冷却液入口流量为 0.001 kg/s、环境温度为 298.15 K 的条件下,该系统能够有效地将电池模块的最高温度控制在 309.15 K,温差为 3.8 K,同时将系统压降低至 11.95 Pa,表现出良好的散热效果和较低的流动阻力。如图 12 所示,黄浩等^[73]设计了一种新型仿生叶脉形冷却流道,并将其与传统的平行冷却流道和蛇形冷却流道进行了对比研究。结果表明,仿生叶脉形流道在三种结构中表现出最优的温度均匀性,其冷却性能显著优于蛇形和平行流道。同

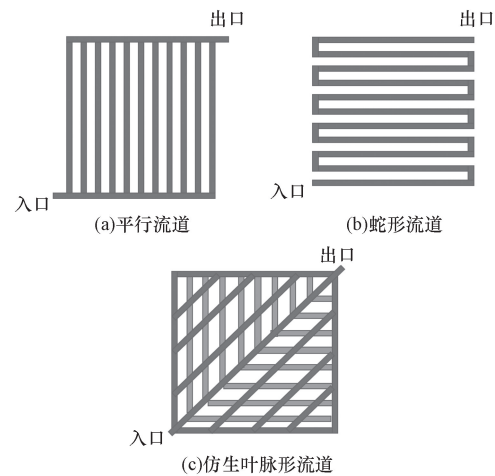


图 12 冷却流道的几何形状^[73]

Fig. 12 Geometric shape of cooling channel^[73]

时,该结构在保证良好散热效果的前提下,压力损失也较小,表现出更高的综合性能优势。刘增鹏等^[74]设计了一种 N 形扰流冷却流道,并将其与常规直流流道进行了对比分析。研究表明,采用扰流冷却流道的燃料电池具有更优的热管理性能。在相同冷却水流量条件下,扰流流道内的冷却水能够达到更低的温度和更小的温差,显示出更强的热量吸收能力和更高的传热效率。此外,该结构在保持体积不变的前提下,具有更为优异的换热性能,同时结构设计也较为简洁,有利于工程实现。

2.3 相变材料冷却

2.3.1 相变冷却机理

相变冷却作为热管理系统中的一种被动冷却方法,因其独特的热储存机制而受到广泛关注。相变材料在工作过程中通过相变,从固态转变为液态或者从液态转化为固态,实现热能的吸收与释放。在相变过程中,相变材料能够吸收大量潜热,同时保持温度稳定,从而有效抑制电池温度的快速上升,使电池维持在安全且适宜的工作温度范围内,并延长电池使用寿命。相变材料的热管理性能主要依赖其相变潜热,该参数表征材料在相变过程中可交换的热能量,是决定相变材料热储存能力的关键指标。在实际应用中,相变材料的选择需要考虑电池的理想工作温度以及材料的相变温度,通常要求相变材料的熔点位于电池最佳温度范围内(15 ~ 35 °C),并具有较高的潜热以最大化热缓冲效果。常用的相变材料包括有机材料,如石蜡和脂肪酸,以及无机盐合物等^[75-76]。在设备温度升高过程中,相变材料会在相变温度点发生熔化,吸收环境中的热量,但自身温度保持基本不变,从而起到抑制温升、平衡温差的作用。当环境温度降低时,材

料释放所吸收的潜热,以维持系统的热稳定性。这种“温度调节-热缓冲”的特性,使相变材料成为高热流密度设备热管理中非常有前景的材料^[77],如图13所示为相变材料冷却原理。

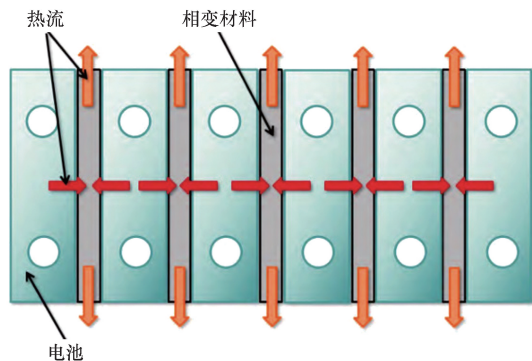


图13 相变材料冷却原理图

Fig. 13 Schematic diagram of phase change material cooling mechanism

相变冷却过程主要包括三个阶段:首先,在未达到相变温度前,相变材料以固态形式通过热传导缓慢吸热;其次,在达到相变温度后,材料进入熔化阶段,大量潜热被吸收而温度变化极小;最后,在外界温度下降时,材料重新凝固,释放潜热并回馈给系统。整个过程中温度波动小、热容大,特别适用于峰值热负荷的“削峰填谷”^[78]。

为确保相变过程的安全性及可控性,相变材料通常采用封装形式进行应用,常见方式包括微胶囊封装、金属壳封装或将其嵌入导热结构中^[79]。这不仅防止相变液体泄漏,还可以提升系统整体的导热性能与结构强度。

2.3.2 相变冷却传热能力及应用

相变冷却的核心特点是利用相变材料在吸热或放热过程中发生物态变化,从而在温度几乎恒定的状态下实现大规模热量的吸收或释放。与风冷、液冷等传统手段相比,相变冷却无需额外能源输入,结构简单、运行安静、重量轻,尤其适用于便携式储能、电池模组封装等对能耗与空间有较高要求的场景^[80]。相变材料的热传导能力取决于其固有特性和使用条件,包括材料的潜热大小、导热系数、相变温度范围以及对外界温度变化的响应速度。潜热较大的材料能够在相同质量条件下储存更多的热量,从而延缓电池温度上升。导热系数较高的材料可以更快地将热量从电池内部传递至相变材料,使温度调节更迅速。相变温度范围较窄的材料有助于维持温度稳定,而快速的热响应则能适应电池在不同工况下的动态热负荷^[81]。

在实际应用中,相变冷却常通过将材料嵌入电池单元之间或者覆盖于电池外壳表面,实现局部或

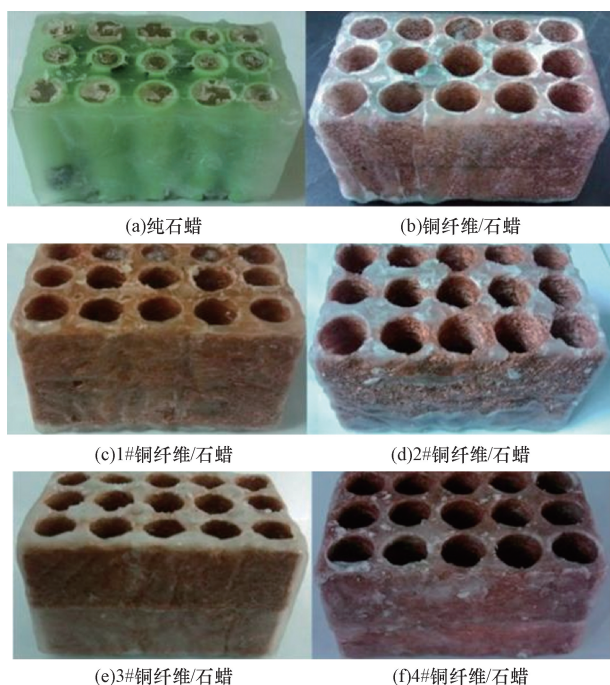
整体的热调节功能。这种布局能够有效减缓电池温度变化速率,并改善不同单体之间的温度均匀性。在中等功率的储能系统、电动汽车电池包以及户外储能装置中,采用石蜡或脂肪酸类相变材料能够降低电池表面和内部温度峰值,增强电池安全性,同时延长电池循环寿命^[82-83]。

尽管如此,相变冷却技术在工程应用中仍面临响应速度慢、相变过程不完全、热导率偏低等技术瓶颈。在高能量密度、长时间运行的储能场景中,其单独使用难以满足持续冷却需求。因此,未来发展方向将集中在新型高导热复合相变材料的开发以及多尺度耦合模型的建立,以推动该技术在大型智能储能系统中的深入应用^[84]。

2.3.3 强化换热方法

尽管相变材料有很多优点,但限制其应用在储能热管理系统的最大阻碍因素之一是其低导热性,因此,当前对于相变冷却系统的研究方向大多为制备高导热性的复合相变材料或借助金属翅片、金属泡沫来构建传热网络进行加强传热,从而达到对电池组高效散热的目的。

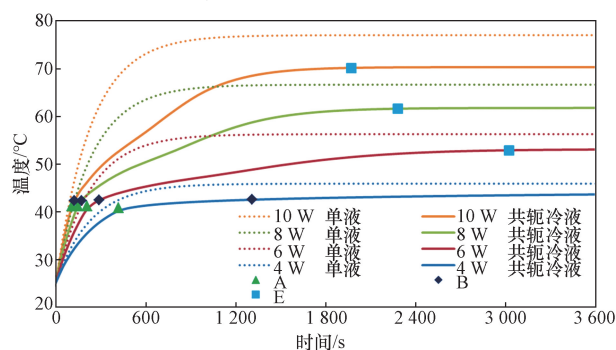
(1)材料创新。Alipanah 等^[85]采用数值模拟方法,研究了不同类型相变材料(phase change material, PCM)对电池热管理性能的影响。结果表明,复合相变材料相比于传统的纯相变材料在导热性能和热响应方面具有更优表现。Xu 等^[86]研究了基于生物质的复合相变材料在电池模组热管理中的应用,发现通过在相变材料中引入石墨烯导热添加剂,可以显著提升材料的热导率和潜热。其中,含石墨烯的复合相变材料的潜热达到 116.8 J/g,热导率为 1.203 W/(m·K),远高于纯聚乙二醇的 0.299 W/(m·K)和未添加石墨烯材料的 0.553 W/(m·K)。在高倍率 2C 放电循环中可将电池模组最高温度保持在 60℃下,并延长达到最高温度的时间。Goli 等^[87]研究表明,在石蜡中掺入石墨可以显著提升其导热性能,实验结果显示复合材料的导热系数最高可达 40 W/(m·K),相比纯石蜡的低导热率有大幅提升。Li 等^[88]通过实验研究了一种基于石蜡/泡沫铜复合相变材料的电池热管理系统,研究结果表明,与使用纯相变材料的冷却方式相比,该复合材料系统能够更有效地降低电池工作温度,并在电池组内部实现更均匀的温度分布,从而改善系统的热安全性与稳定性。如图14所示, Pan 等^[89]制备了一种以铜纤维为支撑材料的石蜡基复合相变材料(composite phase change material, CPCM)。该研究通过对比实验,分别测试了自然空气冷却、纯石蜡、泡沫铜/石蜡 CPCM 以及铜纤维/石蜡 CPCM 四种工

图 14 铜纤维/石蜡 CPCM 示意图^[89]Fig. 14 Schematic diagram of copper fiber/paraffin CPCM^[89]

况下的电池热管理性能 (battery thermal management system, BTMS)。实验结果显示,与其他工况相比,铜纤维/石蜡 CPCM 在热导性能和温度均匀性方面表现最佳。铜纤维的引入显著提升了材料的整体热导率,能够更快速地将电池产生的热量导出,同时改善热分布,减少电池内部的温差,有助于延长电池寿命并提升系统安全性。郜昆伦^[90]以石蜡作为相变基体,并采用烯烃嵌段共聚物作为柔性支撑材料,并引入膨胀石墨以提升导热性能,通过定向冷冻法成功制备了定向导热碳气凝胶,并通过熔融吸附法制备了具有定向导热性能的复合相变材料。同时,分析了相变材料的热物性对电池热管理性能的影响。结果表明,当碳气凝胶含量为 12% 时,材料表现出明显的热导率各向异性,在石蜡质量分数为 60% 条件下,相变潜热约为 122.67 J/g。与传统各向同性复合相变材料相比,该定向导热相变材料可使电池表面温度降低 9.83 °C,有效热管理时间延长 713 s,并显著改善电池温度分布均匀性。

(2)与液冷技术耦合。在高强度运行工况下,单独依赖相变材料进行热管理往往难以满足系统的持续散热需求,尤其是在相变完成后材料失去热缓冲能力时,其冷却性能将显著下降。为解决这一问题,当前研究与工程应用中常将相变材料与液冷系统相结合,构建复合冷却方案。姜鑫鑫等^[91]设计了相变材料和冷却板混合的电池热管理方式并对其进行数值模拟,分析了电池间距、冷却液入口速

度对电池最高温度以及相变材料液化率的影响,并对充放电循环过程进行了探究。结果表明,在高温和高放电工况下,液冷的引入解决了因相变材料完全液化导致的电池温度恶化和中间电池热量累积的问题。相比于纯相变冷却,当冷却液速度为 0.5 m/s 时,混合冷却可将电池的间距减小至 3 mm,继续增大冷却液的速度对热管理性能提升较小。同时,液冷板的加入可以减少首次充放电循环对后续循环过程的影响,增加电池的使用寿命。Zhang 等^[92]将相变材料 (PCM) 与液冷技术相结合,构建了一种弹性温控系统,用以应对电池或电子设备在高热负荷条件下的散热需求。研究表明,该复合冷却系统在极端工况下表现出良好的热管理性能。液冷系统具备持续、高效的传热能力,能够在相变材料熔化并吸热饱和后继续有效导出热量,从而弥补了 PCM 在高温条件下热容饱和、散热能力减弱的不足。Rao 等^[93]则进一步将 PCM 与微通道液冷系统相结合,提出了一种新型复合冷却 BTMS。仿真结果显示,单独使用 PCM 时系统最高温度为 335.4 K,而在引入微通道液冷后,最高温度降至 320.6 K,有效增强了冷却能力并缓解了热积累问题。如图 15 所示,Song 等^[94]提出了一种融合相变材料 (PCM) 与液冷技术的新型复合冷却系统,并对其在电池模块中的热管理性能进行了系统分析。通过调节冷却剂流量,对电池在高热流密度条件下的温升过程、稳态温度和 PCM 熔化行为进行了分析。结果表明,与仅采用 PCM 或单一液冷系统相比,该复合冷却系统能显著降低电池温度上升速率,并使稳态电池温度明显下降,表现出更优异的热管理性能。

图 15 在不同的电池功率下,液体冷却与复合冷却的电池温度变化^[94]Fig. 15 Battery temperature variations under different power levels for liquid cooling and hybrid cooling systems^[94]

2.4 热管冷却

2.4.1 热管冷却机理

热管冷却是一种利用工质液-气相变过程来实现高效热量转移的被动式制冷技术。其基本原理

是在封闭的热管内充入易挥发、沸点较低的液态工质,并依托毛细结构引导工质流动^[95-96]。如图 16 所示,热管由蒸发器段、绝热段和冷凝器段三部分组成^[97]。在储能系统应用中,热管蒸发段通常与电池表面紧密贴合。当电池工作产生热量时,蒸发段内的液态工质吸热并发生汽化,从而带走电池表面的热量。随后,汽化后的工质在热管内由于压力梯度作用自发流动至冷凝段,并释放潜热冷凝成液体。冷凝后的液体则在毛细结构作用下回流至蒸发段,形成一个连续的相变循环过程,实现高效换热^[98]。

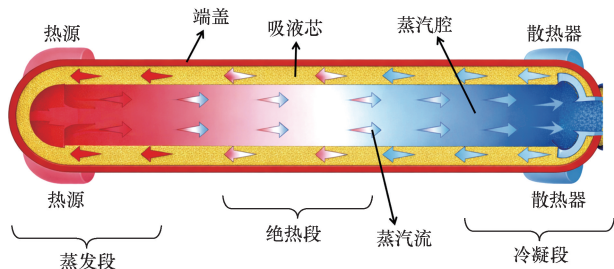


图 16 热管工作原理图^[97]

Fig. 16 Working principle diagram of heat pipe^[97]

2.4.2 热管冷却传热能力及应用

热管冷却系统具有结构简单、质量轻、成本低、无运动部件、免维护及导热性能优异等特点,特别适合用于结构紧凑、热流密度高的储能系统热管理中^[99]。此外,热管还可灵活集成于模块化电池包、与风冷或液冷系统协同使用,进一步提升热管理系统的整体性能^[100]。热管的形式和种类多种多样,根据吸液芯结构、材质、填充工质等的差异,可以分为多种类型,根据工作温度的不同,用于电池热管理的热管属于常温热管。按结构形式分,可分为回路热管、烧结热管、重力热管、扁平热管等几种^[101]。近年来,随着对高能量密度电池热安全问题的关注,热管冷却作为一种绿色、被动、高效的热控制手段,已成为中外研究的重点方向之一。

热管技术近年来在工程上的应用日益普及,因其高效的传热效率、均温性质、启动快速以及非能动等优点,在电器器件散热、余热回收、航空航天、空间核反应堆等领域都有所应用^[102]。陈维^[103]分析了温度对锂离子电池充放电特性,安全性,寿命等性能的影响。对 16 块方形锂电池组成的电池组,在 2.5C (C 为放电倍率) 下进行了散热研究。通过实验与数值模拟的方法,将热管散热系统与风冷传热系统做对比,发现使用热管散热系统的电池组温度更低,温差更小。

尽管热管冷却技术在储能系统中展现出优异的被动散热能力和可靠性,但其在高热流密度、长周期运行的复杂工况下仍存在一定的技术限制。

例如,热管冷凝段的散热能力常成为限制整体传热效率的瓶颈,特别是在自然对流或有限风冷条件下,热量难以及时释放,导致循环效率下降。此外,热管内部工质的选择、回流路径设计以及毛细结构性能也直接影响其热响应速度与启动性能^[104]。因此,为了保障热管冷却系统在高能量密度储能装置中的可靠运行,应采用多种措施提升传热效果,例如改进冷却介质类型、与液体冷却形成协同冷却路径,并对系统结构进行合理优化^[105]。这些手段可显著提升热管的整体传热能力与动态响应水平,为满足储能系统复杂热管理需求提供关键技术支撑。

2.4.3 强化换热方法

(1) 工质优化。热管作为一种闭环热交换器,其主要运行原理依靠工作流体的相变,因此工质的物理性质在很大程度上决定了热管的传热性能。选择合适的工作流体是热管设计中的关键环节之一,对系统的启动性能、传热效率及运行稳定性均具有重要影响^[106-107]。近年来,纳米流体因其优异的热物理特性,如较高的热导率和良好的分散稳定性,成为提升热管传热性能的一类潜力工质^[108]。纳米流体通常由将各种纳米颗粒均匀分散在基础液体中制备而成,常用液体包括乙醇、蒸馏水和乙二醇等^[109-111]。这些纳米颗粒可以是金属元素或金属、非金属氧化物,也可以是有机纳米材料。通过在流体中添加这些微小颗粒,可以显著提高流体的热导率和比热,从而增强热管在蒸发区和冷凝区的传热能力^[112]。如图 17 和图 18 所示,Vijayakumar 等^[113]研究了不含表面活性剂的氧化铜和铝纳米流体对热管性能的影响。结果显示,当纳米颗粒质量分数为 1.0%、热管倾角为 45° 时,热管的传热效率达到 30.42%。Esmailzadeh 等^[114]采用 1-萘磺酸官能

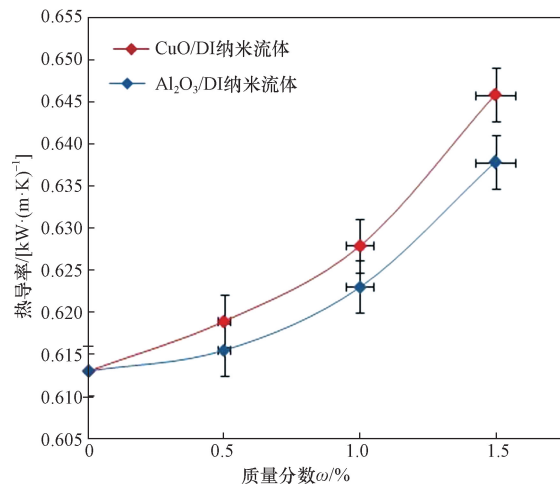


图 17 具有不同浓度的氧化铜和纳米流体的热导率^[113]

Fig. 17 Thermal conductivity of copper oxide and nanofluids with different concentrations^[113]

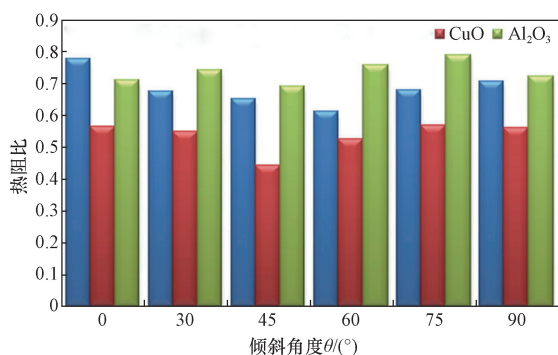


图 18 热管倾斜角度与填充率下纳米流体对热阻比的影响^[113]

Fig. 18 Effect of nanofluids on thermal resistance ratio under different heat pipe inclination angles and filling ratios^[113]

化石墨烯纳米流体对烧结芯热管进行了实验研究。结果表明,在质量浓度为 0.06%、输入功率为 120 W、倾角为 90°的条件下,热管表现出最佳的传热性能。Aly 等^[115]则针对螺旋微槽结构热管,研究了不同倾角与填充率下纳米流体对其传热性能的影响。研究结果表明,与使用去离子水相比,纳米流体在蒸发段和冷凝段的平均换热系数分别提高了 30.4% 和 11.1%,而总热阻降低了约 18.2%。此外,随着工质填充率的增加,热管的换热能力进一步提升,最佳传热性能出现在倾角为 60°时。这些研究结果共同验证了纳米流体在不同类型热管中的强化传热效果及其在热管理系统中的应用潜力。

(2)复合式热管理策略。Wu 等^[116]设计了一种将热管与相变材料(PCM)相结合的电池热管理(BTM)系统。该系统充分利用相变材料良好的蓄热能力与热管高效的传热性能,实现了被动蓄热与主动热导的协同作用。实验结果表明,该耦合系统在缓解电池温度波动、延长电池运行时间以及维持较为稳定的工作温度方面表现出显著优势,验证了热管-PCM 复合冷却策略在电池热管理中的可行性与有效性。苏丽蓉^[117]在其研究中提出了一种结合平板型微热管与强迫风冷技术的锂离子电池热管理系统。该系统利用微热管高效的传热能力与风冷的增强对流散热机制协同作用,有效提升了整体散热效率。实验结果表明,当对流风速为 30 m/s 时,热源温度可降低至约 77 °C;同时,随着热管数量增至 7 根,系统能够实现更均匀的温度分布,从而有效延迟甚至抑制热失控现象的发生。如图 19 所示,Zhao 等^[118]对三种基于热管的电池冷却技术进行了对比研究,分别为单纯热管冷却、热管结合风扇冷却以及热管结合湿式冷却系统。在 3C 放电倍率条件下,实验结果显示,三种冷却方式在控制电池温度方面表现出显著差异:单独采用热管时,

电池的最高温度为 41.1 °C;引入风扇辅助散热后,最高温度降至 31.8 °C;而将热管与湿式冷却方式耦合后,电池最高温度进一步降低至 21.5 °C。该研究表明,采用多机制耦合冷却方法可显著增强热管系统的换热能力,有效提升电池热管理系统的温控效果与运行稳定性。

(3)结构设计优化。Rahimi 等^[119]对常规热虹吸管与改性热虹吸管的散热性能进行了研究。结果显示,通过增强蒸发端的亲水性以及提高冷凝端的疏水性,热管的整体热性能可提升约 15.27%,同时其总热阻降低了约 42.6%。如图 20 所示,杨少坤^[120]制备了一种内部具有亲疏水间隔通道结构的微热管。研究结果表明,该热管在启动时间、热传输速率以及结构性能方面均优于传统热管,且采用条形通道亲疏水间隔结构的传输能力表现最为优越。为便于对比分析,常见冷却方式及其对应的强化换热方法归纳于表 2^[121-124]中。

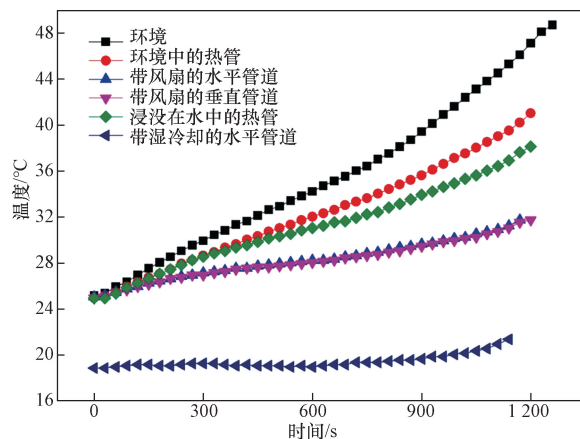
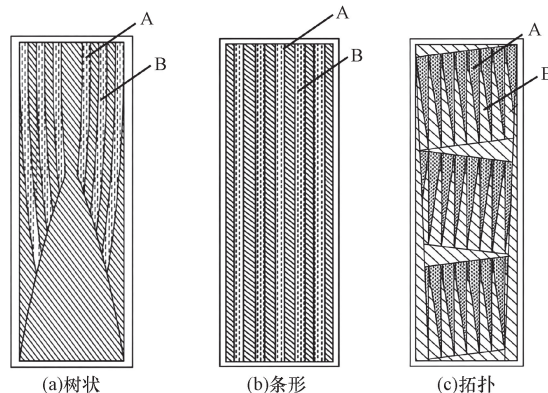


图 19 配备不同 BTM 系统的 3 Ah 电池组在 3C 放电速率下的最高温度曲线^[118]

Fig. 19 Maximum temperature profiles of 3 Ah battery packs with different BTM systems under 3C discharge rate^[118]



A 为亲水区域;B 为疏水区域

图 20 不同形状的亲、疏水通道^[120]

Fig. 20 Hydrophilic and hydrophobic channels with different geometries^[120]

表 2 常见冷却方式及其对应的强化换热方法

冷却方式	优点	缺点	最大换热热流密度 ^[121-124] / (kW·m ⁻²)	强化换热的方法
风冷	结构简单,成本低,维护方便	换热效率低,受环境温度影响大	10	①优化气流通道几何形状(如U形、Z形); ②改进电池排列方式(如交错、间距调整); ③改进送风方式、调整进出口位置以及优化风口数量与布局
液冷	换热能力强,温度控制精度高	系统复杂,成本高,存在漏液风险	500	①开发高比热、高导热的新型冷却液(如液态金属、纳米流体); ②增加冷却液流量或优化流速分布; ③引入微通道、波形通道、仿生结构以及扰流结构
相变冷却	能量密度高,可实现无源控温,温度波动小	导热率低,冷却速率受限,蓄热后需再生	4	①制备高导热复合相变材料; ②采用液冷-相变等复合冷却方式
热管冷却	高效、被动、可靠性高,适应性强	热通量密度受限,适用范围有限	150	①研发新型工质(如铝纳米流体、石墨烯纳米流体); ②调控热管表面的润湿性分布; ③将热管与风冷或相变材料耦合

2.5 新型冷却方式

2.5.1 半导体热电冷却

热电冷却是一种基于热电效应的制冷技术,通过电流在热电材料中产生的 Peltier 效应,将电能直接转化为温差,实现局部降温或加热。该技术具有结构紧凑、无机械运动部件、运行安静、无振动、环保可靠、维护成本低以及对复杂环境适应性强等特点。在储能系统中,热电制冷器可以用于电池模块或储能单元的局部温控,精确调节温度以维持电池在安全且高效的工作范围内,从而延长使用寿命并提升系统稳定性。此外,热电制冷能够快速响应温度变化,适合应对储能系统在充放电过程中的瞬态热负荷波动。随着新型热电材料的不断发展,其热电效率和功率密度逐步提升,使得热电制冷在高能量密度储能单元、模块化电池包及新能源汽车储能系统中的应用前景日益广阔^[125]。

如图 21 所示,热电制冷器是一种利用 Peltier 效应将电能转化为温度梯度的器件^[126]。传统的热电制冷器通常由多个 N 形半导体元件与 P 形半导体元件组成,这些元件通过金属导电条串联实现电连

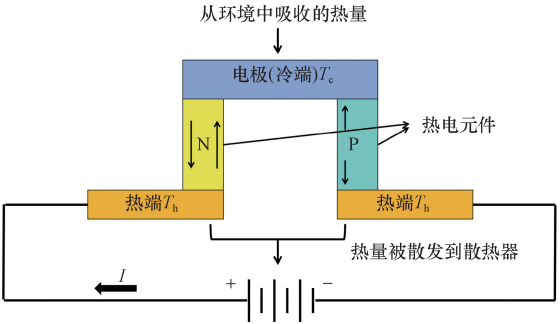


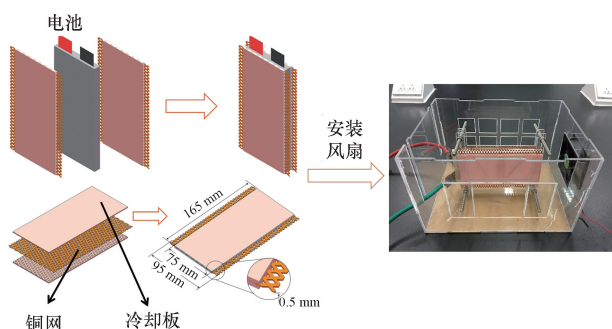
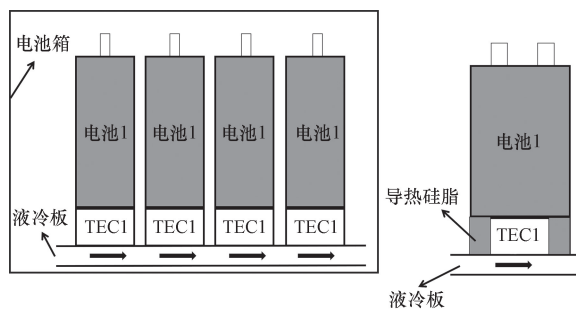
图 21 热电冷却原理图^[126]

Fig. 21 Schematic diagram of thermoelectric cooling^[126]

接,并在热传导上形成并联结构,金属导电条多采用铜材料制造,这种结构构成了单级冷却模器^[127]。当低压直流电源加在热电制冷器上时,热量会从器件的一侧传向另一侧,一侧表面温度降低,另一侧表面温度升高。

其工作原理为电流由 N 型半导体元件流向 P 型半导体元件。在这一过程中,冷端结点温度 T_c 降低,热量由环境传递至温度较低的冷端结点。当传输电子自 P 型元件内部的低能级跨越至 N 型元件内部的高能级时,会吸收来自冷端的热量,并将其传递至温度为 T_h 的热端结点。这部分热量经由散热器向外释放,随后电子在 P 型半导体内部以较低能级返回^[128]。热电冷却技术具有多方面优势,包括无制冷剂污染、驱动电压要求低、启动速度快、运行稳定性高、噪声水平低、无机械运动部件以及无内部化学反应等^[129]。

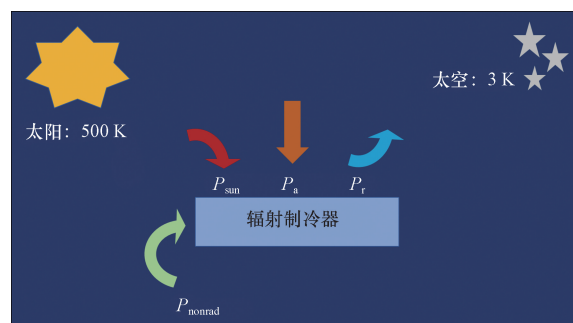
然而,该技术仍存在制冷效率偏低以及半导体材料难以加工成大面积器件等局限性。为推动热电制冷技术在锂离子电池热管理系统中的应用,研究人员开展了多种探索。如图 22 所示,Li 等^[130]提出了一种将铜网双二氧化硅冷却板与风冷相结合的复合冷却系统,通过实验与数值模拟发现,在电池放电过程中,增大二氧化硅冷却板厚度可降低电池最高温度,并确定最佳厚度为 1.5 mm。如图 23 所示,单春贤等^[131]采用热电冷却与液冷耦合的方式,将热电制冷器安装于电池底部并与液冷组件相连,在各接触面粘贴导热硅胶垫片,利用磷酸铁锂电池验证系统可行性,结果显示,增加冷却液流速或降低冷却液温度均可提升热电元件制冷性能。在不同放电倍率下,该复合冷却方式均能显著改善动力电池组的工作状态。

图 22 NCM 软包电芯双面半导体铜网复合散热系统^[130]Fig. 22 Double-sided thermoelectric copper mesh composite cooling system for NCM pouch cells^[130]图 23 TEC 制冷与液冷板复合热管理示意图^[131]Fig. 23 Schematic diagram of TEC refrigeration and liquid cooled plate composite thermal management^[131]

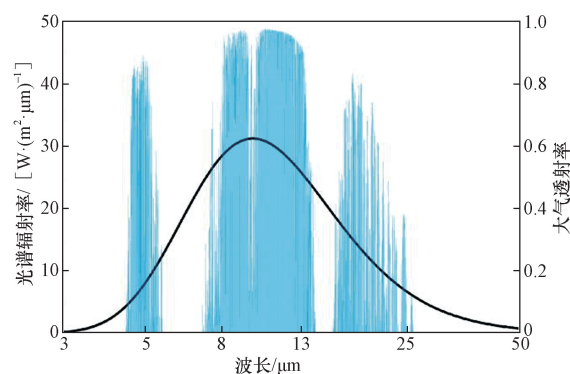
2.5.2 辐射冷却

与太阳表面极高的温度相比,外太空温度仅约 3 K,可作为天然低温冷源。如图 24 所示,地球表面的物体能够以电磁波形式将自身热量向外太空辐射,从而实现热量交换。这种依靠热辐射实现的被动冷却方式被称为辐射冷却^[132]。辐射冷却利用外太空的低温环境进行温度调节,无需额外能量消耗,因而相比传统冷却技术具有较高吸引力^[133]。辐射冷却技术在大型电化学储能系统中具有实际应用价值。叶满山^[134]在格尔木光伏产业园的储能集装箱中应用辐射制冷涂层进行连续测试,结果表明该涂层可将基材表面温度降低约 15 °C,日均制冷耗电降低约 10%。有效提升系统热管理效率并降低运行能耗,为大规模储能系统的安全、经济运行提供了技术支撑。

如图 25 所示,地球表面的物体向外太空发射的电磁波会受到大气中二氧化碳(CO₂)、水蒸气等成分的反射作用,使部分辐射返回地表。然而,在波长 8 ~ 13 μm 范围内,大气层对辐射几乎透明,其自身辐射发射极低;而在该范围之外,大气辐射发射率显著升高。因此,8 ~ 13 μm 的红外波段被称为“大气第一窗口”。物体在该波段发射的辐射能够通过大气窗口直接逃逸至外太空,从而实现与外太



P_{sun} 为太阳辐射吸收率; P_a 为大气辐射吸收率; P_r 为辐射制冷器自身的热辐射功率; P_{nonrad} 为非辐射换热功率

图 24 地表辐射热流示意图^[132]Fig. 24 Schematic diagram of surface radiation heat flow^[132]图 25 中红外和远红外区域的大气透射率^[135]Fig. 25 Atmospheric transmittance in the mid infrared and far-infrared regions^[135]

空的热量交换,使其温度被动降低至环境温度以下^[135]。

然而,辐射冷却受到环境条件限制,如昼夜温差、云层遮挡以及大气湿度变化等因素,会影响冷却效率,使其冷却能力在实际应用中相对有限。为提升辐射冷却性能,研究者提出了多种强化措施: Zhai 等^[136]将二氧化硅微球随机嵌入聚甲基丙烯酸酯中,制备出一种在大气窗口波段红外发射率超过 0.93 的薄膜材料。该材料在太阳光谱范围内表现出较低的吸收率,有效抑制了因吸收太阳辐射而引起的温升效应。在正午条件下,其辐射冷却功率可达到 93 W/m²。Li 等^[137]采用简易喷涂工艺在铝合金散热器表面制备了仿生辐射制冷涂层。该涂层由多壁碳纳米管(MWCNTs)、改性二氧化硅以及氟硅树脂构成,并形成多级孔隙结构,使冷却性能提升约 25%。

2.5.3 电卡效应冷却

电卡效应冷却是一种近年来受到广泛关注的新型固态冷却技术。如图 26 所示,其基本原理是利用外加电场调控极性介电材料中电偶极子的取向状

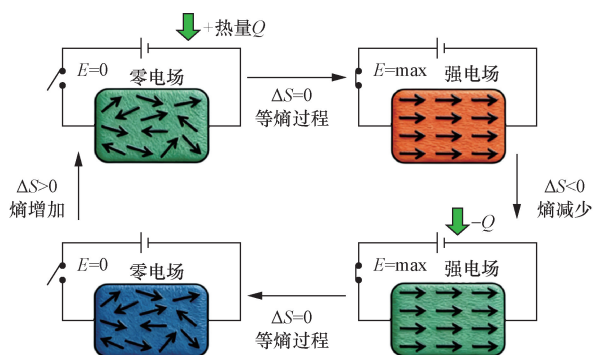


图 26 电卡效应冷却原理图

Fig. 26 Schematic diagram of electrocaloric cooling principle

态,从而引发体系熵值 S 与温度的变化。在绝热条件下施加电场 E 时,原本处于无序分布的电偶极子会沿电场方向重新排列,体系自由度降低,熵值显著减小。为了维持总熵不变,材料温度随之升高并向环境释放热量。当电场撤去后,电偶极子重新回到无序状态,体系熵值升高,在绝热条件下温度降低,并从冷源吸收热量。通过反复加载与卸载电场,电卡材料能够完成一个类似卡诺循环的热力学过程,实现制冷功能^[138]。

与传统蒸汽压缩制冷方式相比,电卡效应冷却在储能系统热管理中展现出独特优势。其在运行过程中不产生直接碳排放,因而能够满足绿色低碳的发展需求。此外,由于其直接采用电能作为驱动力,无需依赖压缩机或永磁体等装置完成二次能量转换,相较于其他固态制冷技术,电卡效应展现出更加突出的潜在技术优势与应用前景,因而被认为极有可能成为未来实现大规模应用的新型固态制冷途径^[139]。

然而,电卡效应冷却技术在实际应用中面临温度跨度变化较小的问题,这使得可适用的工况条件受到限制。这一现象在很大程度上源于电卡材料的制冷温变不足。复合材料策略被证明是一种有效的改进方法。通过在聚合物基体中引入不同功能的纳米颗粒,可以改善材料对电场的响应能力并优化其他关键物理性能。这种方式不仅有助于增大绝热温变,还能提升热导率,从而有效提高传热效率,进一步增强电卡制冷技术的应用前景。

Chen 等^[140]首次证明可以通过偏氟乙烯(vinylidene fluoride)、三氟乙烯(trifluoroethylene)、氯氟乙烯(chlorofluoroethylene)等单体的共聚物 P[VDF-TrFE-CFE] 的电卡效应。与未改性的三元共聚物相比,当在聚合物基体中掺杂 3% 体积分数的 ZrO_2 纳米颗粒时,复合材料所表现出的电卡制冷温变达到纯三元共聚物的 120%。如图 27 所示,Zhang 等^[141]系统制备了具有不同形貌的纳米级钛酸锶钽,并将

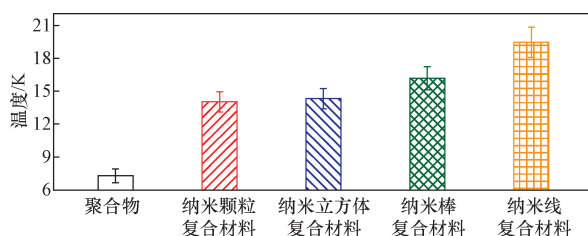


图 27 聚合物纳米复合材料电卡温变结果^[141]

Fig. 27 Electrocaloric temperature change results of polymer nanocomposites^[141]

其与铁电聚合物基体形成聚合物纳米复合材料。通过溶液处理方法,复合材料充分利用了铁电聚合物基体的高电击穿强度以及陶瓷纳米填料在电场变化下的显著极化响应,从而表现出优异的室温电卡性能。研究表明,在中等电场和高电场条件下,掺杂 BST 纳米线的聚合物均可产生较大的电卡效应温变。在电场强度为 100 MV/m 时,复合材料的温差约为 20 K,是单一聚合物基体的 2.5 倍。Chen 等^[142]采用无基质策略制备了一种纳米复合材料,该材料同时具备高介电强度和显著的电能存储能力。研究中,作者通过化学吸附方法将含氨基聚合物制备的电子阻挡层固定于氮化硼纳米颗粒表面。实验结果显示,该方法显著提升了材料的击穿强度,由原来的 340 MV/m 提高至 742 MV/m,同时有效增强了材料的热导率,从而有助于提高电卡器件的工作效率和冷却性能。

3 面临的挑战与发展趋势

3.1 当前面临的挑战

3.1.1 电池热流密度的持续升高

储能设备的能量密度和功率密度持续上升,使得单体电芯在充放电过程中的热量显著增加。如图 28 所示,未来 10 年储能系统电池的热流密度将呈持续增长趋势,反映出局部热量生成速率逐步加快。在持续运行或环境温度偏高的情况下,局部热流密度急剧上升,热量传导过程受到结构和材料限制,

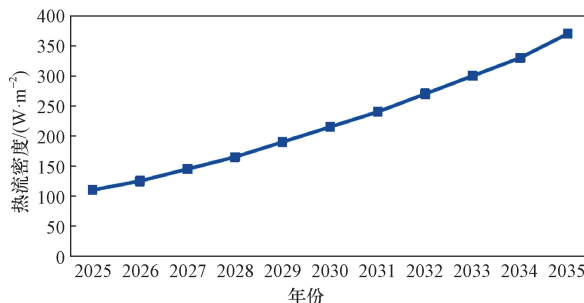


图 28 储能系统电池热流密度预测图

Fig. 28 Prediction of thermal flow density of energy storage system battery

导致系统内部产生温度不均现象^[143]。在现有热管理技术中,常用的风冷技术在气流组织、换热效率等方面存在固有局限。难以实现对高热流区域的快速响应,特别是在模块间隙较小、排列密集时,热量积聚现象更为严重^[144]。液冷方式虽然具备较高换热能力,在许多场景下已成为主流方案,但在瞬时热突增、高速热扰动或内部冷板结构不匹配时,仍会面临响应滞后与温差过大的问题。此外,液冷系统在冷却分布均匀性和系统响应速率方面仍存在不足,无法有效抑制局部高温风险^[145]。

为弥补传统冷却方式的不足,相变冷却和热管冷却技术逐步被引入储能热管理系统。相变材料在热流突变时可缓冲热冲击,在功率波动较大场景中可有效抑制峰值温度。但其热导率普遍较低,需结合高导热增强介质或热传导网络辅助应用,方可实现较好的冷却性能^[146]。热管冷却作为另一种被动传热手段,利用工质蒸发-冷凝循环将热量从局部高温区高效转移至低温端,具备良好的启动响应与方向适应性,适合狭小空间内实现快速散热^[147]。热管的高轴向导热性能对缓解储能模块内部温差、提升温度均匀性具有明显效果,常与液冷或风冷系统形成复合冷却结构。

尽管新型冷却手段具有较强潜力,但在工程应用中仍面临材料匹配、结构封装等实际问题。热场分布的不均匀性、电芯温升的非线性变化、散热路径复杂交错等因素,使得传统冷却技术在高热流密度场景下难以保障系统的热安全与运行可靠性。

3.1.2 运行持续性挑战

储能系统的应用场景不断扩展,其连续运行时间显著延长,这对热管理系统提出了更高的可靠性与稳定性要求。系统在高负载持续运行或频繁启停的工况下,冷却组件需要始终保持良好性能,确保长时间内散热效率不出现明显下降。然而,在实际运行中,各类冷却系统常面临性能随时间劣化的问题。例如,风冷系统中的风机和滤网容易受到尘埃沉积、振动疲劳及电机老化等因素影响,使其送风能力和冷却效果随运行时间减弱^[148]。液冷系统中冷却液可能因长时间循环出现结垢、气泡聚集或微泄漏现象,从而引起局部流动阻力增加,导致换热效率降低^[149]。

相变冷却系统尽管具备被动散热和高热缓冲能力的优点,但在多次相变循环后,相变材料可能出现热性能衰退、材料迁移或相分离现象,进而降低其吸热能力^[150]。相变材料的体积膨胀与收缩还可能引发结构应力累积,造成封装破损或热接触性能下降。类似地,热管冷却装置在长期运行中也存

在内部工质蒸发损失、毛细结构退化或启动温度上升等问题^[151],这些变化会逐步削弱其传热效率,尤其在复杂工况和温度波动剧烈的场景中表现更为显著。

因此,为保障储能系统的热稳定性,热管理系统必须具备良好的抗衰减能力和动态适应性。

3.1.3 运行可靠性和安全

以锂离子电池为代表的电化学储能技术近年来发展迅速,已成为新型电力系统的重要组成部分^[152]。然而,在大规模储能系统中,大量电池单元往往在有限空间内紧密排列,极易造成热量快速积聚,进而引发局部过热和电池间温差过大等问题^[153]。温度不一致会导致电池容量和电压差异不断累积,造成部分电芯提前老化,进而影响整个系统的运行稳定性。

在高温条件下,电池内部副反应速率显著加快,包括固体电解质界面(SEI)膜分解、锂金属与电解液及黏结剂的反应、正负极活性物质与电解液的化学反应等,这些过程均伴随大量热量释放。当热量无法及时导出时,可能进一步诱发电池热失控,造成连锁反应并危及系统安全^[154]。据高工产研锂电研究所统计,2014—2023年全球储能安全事故超过90起,仅2023年就有十余起事故,其中大多数与锂离子电池热失控密切相关^[155]。

因此,储能系统的运行可靠性与安全性不仅关系到电池性能和寿命,更直接影响整个电力系统的稳定性与经济性。随着储能规模的不断扩大和能量密度的持续提升,热管理不足所带来的风险将进一步放大。

3.1.4 系统设计跟不上智能化需求的发展

当前储能系统热管理的结构设计普遍存在独立分割的问题,与电池结构、电控系统及热源分布的协同优化不足。由于电芯间冷却路径缺乏系统热流模拟分析,散热器常出现布置不合理、热阻路径延长等问题,导致整体换热效率下降。在空间紧凑的储能设备中,冷板、管路及换热器等冷却组件需要在有限体积内实现最优布局,其选型与集成方案对系统性能具有决定性影响。

然而,在设计初期若未能充分考虑热控与模组布局的耦合关系,往往会造成系统运行效率低下。若设计初期采用风冷系统,模块间空气流通路径和散热器布置均以风冷特性为基础,其风道尺寸、风机位置和空气流动方向固定。若后续需要改用液冷系统或液冷与相变材料复合方案,原有风冷布局可能无法满足液冷板、冷却管路及相变模块的空间与流体流动要求,需重新布置冷板位置、管路走向

及出入口接口。相变材料冷却或热管耦合风冷/液冷方案同样面临类似挑战,如热管布局、毛细结构方向、相变材料接触面积等均需与电池模组和冷却组件协调。若在初期未充分考虑这些耦合关系,系统改造难度大、局部热阻增加或出现冷却死角,可能导致整体换热效率下降和运行性能受限。因此,储能系统的热管理布局设计应综合考虑风冷、液冷、相变材料冷却、热管冷却及多种复合方式的可扩展性和耦合优化,以确保系统在高功率密度和智能化需求下的热控可靠性与性能稳定性。

大多数储能热管理系统仍以固定阈值策略为主,调控手段相对简单,缺乏对电池状态变化的实时响应能力。在电池负载快速变化或外界环境波动较大时,传统热管理系统往往存在调节延迟与响应误差,难以满足动态运行的散热需求。同时,由于传感器部署密度有限,热管理系统对温度分布信息的采集分辨率不足,不能全面反映热场动态变化,导致调控误差与能耗增加。部分系统采用的控制算法缺乏对电池热行为与外部环境交互机制的建模能力,无法根据负载趋势和温度预测结果提前调节冷却强度。此外,当前热控系统多与电池管理系统独立运行,未能实现运行策略联动与数据互通,从而限制了整个系统在寿命管理、效率调度与风险预警等方面的协同调控能力。为提升储能系统热管理水平,有必要构建基于状态感知的智能控制模型,结合电池实际工况实现动态、精准的散热策略^[156]。

3.2 未来发展趋势

3.2.1 新型材料

新型材料的开发是储能系统热管理技术发展的关键方向。随着电池能量密度不断提升,传统金属散热件和单一冷却介质已难以满足高效换热和长期稳定运行的需求。

新材料的发展可以分为如下几点。

(1)液冷介质的高性能化与安全化。发展高比热容、低黏度的纳米流体、液态金属复合冷却剂以及凝胶化冷却材料,以进一步提升液冷系统的传热效率与温度均匀性。同时,重点优化冷却介质的电绝缘性和阻燃性能,降低因泄漏导致短路或火灾的风险,从而增强液冷系统的安全性与可靠性。

(2)高导热复合相变材料。通过引入石墨烯、金属泡沫、碳纤维等高导热骨架制备复合相变材料,解决传统 PCM 导热率低、相变速率慢的问题,实现快速吸热与均温。同时在相变基体中添加阻燃剂或耐高温聚合物,以避免材料在热失控情况下的二次燃烧,提升热缓冲过程中的安全保障能力。

(3)热管工质改进。采用纳米流体力工质或新型非燃工质,配合高毛细力的多孔芯材(如石墨烯涂层、烧结粉体或仿生微槽),提升热管的传热能力与启动速度。在安全性方面,优化工质配方以减少挥发和可燃性,同时在电池舱内部署热管阵列快速抽运热量,降低局部过热引发的热失效风险。

(4)辐射制冷涂层与薄膜材料的应用。开发兼具高太阳反射率与中红外高发射率的功能涂层(如 SiO_2 、 TiO_2 微球嵌入聚合物基体),可实现对太阳辐射的有效反射与热量向外太空的辐射散失。将其应用于储能电池舱外表面,可在无需额外能耗的情况下降低外壳温度,减少冷却系统负荷,提升系统在高温环境下的运行安全性与可靠性。

(5)电卡效应复合材料的优化。通过将铁电陶瓷纳米线(如 BaSrTiO_3)、聚合物基体[如 $\text{P}(\text{VDF-TrFE-CFE})$]与高导热绝缘材料(如氮化硼)复合,制备出兼具高电卡温变与高击穿强度的新型电卡效应材料。该类材料可构建固态制冷系统,具备无制冷剂、无运动部件的优势,从根本上消除传统冷却方式可能带来的漏液、燃烧等安全隐患,展现出绿色、安全和可持续的发展潜力。

3.2.2 复合冷却技术

在未来储能系统面临的高热流、高集成、高可靠需求下,单一冷却技术已无法满足复杂运行条件下的热管理要求。新型热管理架构将采用多种冷却方式组合形成复合冷却系统,以实现热传导、对流和相变等多种机制的协同作用。

未来发展方向如下。

(1)相变材料与液冷耦合系统。相变材料(PCM)能够在电池发热高峰阶段吸收大量潜热,延缓温升,但其导热性能较差,持续散热能力有限。将其与液冷系统耦合,可由 PCM 应对瞬时大功率产热,液冷系统则负责将蓄积的热量持续稳定地带走,并在 PCM 完全相变后继续提供冷却能力。该复合系统特别适用于频繁充放电、负荷波动大的场景,显著提高系统热缓冲能力和运行可靠性。

(2)风冷与热管复合冷却系统。在部分对成本敏感或空间受限的中小型储能应用中,可采用风冷与热管协同的方案。热管负责将电池产生的热量高效传递至散热鳍片或特定风道区域,再利用强制风冷加强对流换热。这一组合在不过多增加系统复杂度的前提下,显著提升了传统风冷系统的散热能力和响应速度,适用于通信基站储能、小型分布式储能等场景。

(3)液冷与热管复合冷却系统。液冷系统具有较强的持续散热能力和温度均匀性,而热管则具备

高效定向传热和快速响应局部热点的优势。将两者结合,可利用热管快速导出电池模组内部热量并传递至液冷冷板,再由液冷系统将热量最终散发至环境。这种组合尤其适用于高能量密度电池包,可在保证整体散热效率的同时,有效抑制局部温升,提升系统热安全性和温度一致性。

(4)相变材料与热管复合冷却系统。相变材料(PCM)与热管均属被动式热管理手段,但作用机制不同。将PCM填充于电池间隙吸收热量,同时嵌入热管网络快速将热量从PCM中导出并扩散至更大散热面或外部环境,可解决PCM导热差、热饱和后的散热瓶颈问题。这种全被动复合系统结构紧凑、可靠性高,非常适用于无需外部动力的场合或作为安全备份冷却方案。

(5)热电冷却与液冷/风冷复合冷却系统。热电制冷器(thermoelectric cooler, TEC)可实现精准的温度控制和快速制冷,但其散热侧需高效冷却以防止热端积热。将TEC与液冷或风冷系统集成,TEC负责对关键电池单元或局部热点进行主动控温,液冷或风冷系统则为TEC热端提供持续高效的散热。这种主动-被动复合冷却模式可用于对温度极其敏感或环境温度变化剧烈的应用,增强系统在极端工况下的热管理冗余性和安全性。

3.2.3 热管理智能化与数字化

随着储能系统规模化与运行工况复杂性的提升,传统基于经验和固定策略的热管理已难以满足对快速响应、精细控制与安全预警的要求。未来热管理系统将向自感知、自调节与自学习方向演进,依托分布式传感网络与先进算法构建闭环决策体系,从而在保障热安全的同时优化能耗与运行寿命。

未来发展方向如下。

(1)传感器体系与高分辨率热场感知。在单体、模组及舱/箱体关键位置布设温度、热通量、电流、电压及环境参数传感器,形成覆盖单体-模组-舱室的多尺度观测网络。通过简单的数据融合与定期校准,实时生成高分辨率热场与工况图,用于识别热点、热累积与异常行为。传感器布置应考虑冗余与抗干扰设计,并在节点侧做初步滤波和聚合(边缘计算),以降低通信量并保证响应时效。该系统为温控执行单元与后端模型提供可靠的输入,有助于早期预警与快速定位故障。

(2)数据驱动算法、数字孪生与自适应控制。基于传感器数据建立简单稳健的预测模型,采用物理模型与数据模型相结合的方法,进行短期温升预测与异常识别。用轻量级深度模型或传统时间序列方法识别热失控前兆,采用优化或强化学习策略

在线调整泵速、风机转速和冷液分配等控制量以平衡能耗与温差。构建数字孪生作为运行态的虚拟镜像,用于方案验证与故障演练。将热管理控制与能源管理和运维平台对接,实现远程诊断、策略下发与协同优化,从而把被动防护转为主动调控。

3.2.4 高效低碳化与环境友好发展

在“双碳”目标背景下,储能热管理系统不仅需满足性能需求,还应具备低能耗、低排放与环境兼容特性。系统运行能耗控制成为优化重点,具体优化方式如下。

(1)余热回收再利用(如余热回收发电为冷却系统供能)。通过集成热电转换模块(如TEG)或吸收式热泵系统,将电池充放电过程中产生的废热转化为电能或冷量,用于驱动冷却系统(如风机、水泵),实现能源的梯级利用与系统自供能。例如,在大型储能电站中,可将余热发电与液冷系统耦合,降低外部电网供电需求,提升系统整体能效与运行经济性。

(2)全生命周期碳排放评估。建立涵盖材料生产、制造、运行与回收处置的全生命周期碳排放模型,对热管理系统的碳足迹进行量化分析。通过选择低碳材料(如再生铝冷板、生物基相变材料)、优化系统运行策略(如智能启停、负荷匹配)以及推动模块化设计与易拆解结构,从源头降低系统隐含碳排放与运行碳排放,实现真正意义上的绿色热管理。

(3)材料和部件的低碳化发展。研发和应用低全球变暖潜能值(low global warming potential, Low-GWP)的环保冷却工质(如天然工质CO₂、氢氟烯烃HFOs等),替代传统高GWP制冷剂。推广使用可降解或可回收的相变材料、生物基隔热材料及再生金属材料,减少对不可再生资源的依赖与环境污染。同时,通过材料轻量化与结构优化降低系统质量,间接减少运输与安装过程中的能源消耗与碳排放。

4 结论

储能系统热管理技术的发展对提升系统运行效率和保障安全运行具有重要意义。当前,传统冷却方式已难以满足高热流密度、高集成度以及复杂运行条件下的热管理需求,如何实现高效、安全、经济的热管理成为当前储能技术研究的热点。得到主要结论如下。

(1)储能系统的热管理面临多重挑战,包括高功率密度下的热堆积问题、运行持续性下降、结构集成受限以及智能化水平不足,若缺乏有效管控,将导致性能退化与安全风险叠加。

(2)风冷与液冷作为当前应用最广泛的技术路径,风冷方案结构简单、成本较低,但换热能力有限且依赖气流均匀性;液冷方案具备更高换热效率和适用性,但存在管路布置复杂、泄漏风险与泵能耗增加等问题。相变冷却与热管冷却技术在提升局部热流密度管理和被动散热性能方面具有明显优势,但其长期热性能衰退、材料稳定性以及与系统的可靠集成仍存在瓶颈。

(3)储能系统热管理仍面临多重挑战:高热流密度与大规模化应用之间的矛盾、热管理组件在有限空间内的布置与耦合问题、材料与冷却介质在极端环境下的稳定性不足、系统能效与低碳目标之间的权衡,以及缺乏智能化、数字化的动态调控手段。

(4)未来发展方向主要集中在三个方面:一是开发高热复合相变材料、纳米流体、电卡效应材料与辐射冷却涂层等新型材料,以提升热管理效率与安全性;二是推进系统智能化与数字化,利用传感器网络与数据驱动算法实现自感知、自调节与预测性维护;三是践行高效低碳化与环境友好发展,重点加强余热回收利用、全生命周期碳排放评估及低碳材料与部件的应用,从而实现储能系统热管理的高效、安全与可持续发展。

参 考 文 献

- [1] 舒印彪, 张丽英, 张运洲, 等. 我国电力碳达峰, 碳中和路径研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 1-14.
Shu Yinbiao, Zhang Liying, Zhang Yunzhou, et al. Study on the pathways of carbon peaking and carbon neutrality in China's power industry[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 1-14.
- [2] Lopes J A P, Madureira A G, Matos M, et al. The future of power systems: challenges, trends, and upcoming paradigms[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, 2020, 9(3): e368.
- [3] Yao L, Yang B, Cui H, et al. Challenges and progresses of energy storage technology and its application in power systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(4): 519-528.
- [4] 李明, 郑云平, 亚夏尔, 等. 新型储能政策分析与建议[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(6): 2022-2031.
Li Ming, Zheng Yunping, Ya Xia'er, et al. Analysis and suggestions on new energy storage policies[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(6): 2022-2031.
- [5] Aneke M, Wang M. Energy storage technologies and real life applications-a state of the art review[J]. Applied Energy, 2016, 179: 350-377.
- [6] 唐文虎, 聂欣昊, 钱瞳, 等. 面向新型电力系统安全稳定的储能应用技术研究综述与展望[J]. 广东电力, 2024, 37(12): 3-15.
Tang Wenhui, Nie Xinhao, Qian Tong, et al. Review and prospect of energy storage application technology for safety and stability of new power systems[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(12): 3-15.
- [7] Shahjalal M, Shams T, Islam M E, et al. A review of thermal management for Li-ion batteries: prospects, challenges, and issues[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 39: 102518.
- [8] Olabi A G, Maghrabie H M, Adhari O H K, et al. Battery thermal management systems: recent progress and challenges[J]. International Journal of Thermofluids, 2022, 15: 100171.
- [9] 冯杰, 武卫东. 储能液冷热管理技术研究进展[J]. 制冷与空调, 2024, 24(11): 1-11, 16.
Feng Jie, Wu Weidong. Research progress of liquid cooling thermal management technology for energy storage[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2024, 24(11): 1-11, 16.
- [10] Tan K M, Babu T S, Ramachandaramurthy V K, et al. Empowering smart grid: a comprehensive review of energy storage technology and application with renewable energy integration[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 39: 102591.
- [11] 李俊, 陈煜. 储能技术分类及液态空气储能系统概述[J]. 制冷技术, 2024, 44(5): 79-86.
Li Jun, Chen Yu. Classification of energy storage technologies and overview of liquid air energy storage systems[J]. Refrigeration Technology, 2024, 44(5): 79-86.
- [12] 袁新焯. 新型电力系统特征与储能技术应用分析[J]. 集成电路应用, 2022, 39(12): 110-111.
Yuan Xinye. Characteristics of new power systems and analysis of energy storage technology applications[J]. Application of Integrated Circuits, 2022, 39(12): 110-111.
- [13] Şahin M E, Blaabjerg F, Sangwongwanich A. A comprehensive review on supercapacitor applications and developments[J]. Energies, 2022, 15(3): 674.
- [14] 李项. 超级电容储能技术在电力系统中的应用探索[J]. 中国设备工程, 2025(8): 206-208.
Li Xiang. Exploration of the application of supercapacitor energy storage technology in power systems[J]. China Plant Engineering, 2025(8): 206-208.
- [15] Xiong G, Kundu A, Fisher T S. Thermal effects in supercapacitors[M]. Cambridge: Springer International Publishing, 2015.
- [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] 郑步高, 陈前, 崔宇, 等. 新型储能技术进展及未来展望[J]. 科技中国, 2025(5): 67-74.
Zheng Bugao, Chen Qian, Cui Yu, et al. Progress and future prospects of new energy storage technologies[J]. Science & Technology China, 2025(5): 67-74.
- [18] 索鉴敏, 李泓. 锂离子电池过往与未来[J]. 物理, 2020, 49(1): 17-23.
Suo Liumin, Li Hong. Past and future of lithium-ion batteries[J]. Physics, 2020, 49(1): 17-23.
- [19] 孟祥飞, 庞秀岚, 崇锋, 等. 电化学储能在电网中的应用分析及展望[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(S1): 38-42.
Meng Xiangfei, Pang Xiulan, Chong Feng, et al. Analysis and prospect of electrochemical energy storage applications in power grids[J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(S1): 38-42.
- [20] Liu Y, Zhang J. Self-adapting J-type air-based battery thermal

- management system via model predictive control [J]. *Applied Energy*, 2020, 263: 114640.
- [21] Sun Q, Peng H, Meng Q, et al. Thermal adaptability of energy storage battery pack in extreme conditions[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(6): 2039.
- [22] Zhang F, Lin A, Wang P, et al. Optimization design of a parallel air-cooled battery thermal management system with spoilers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 182: 116062.
- [23] Gan Y, He L, Liang J, et al. A numerical study on the performance of a thermal management system for a battery pack with cylindrical cells based on heat pipes[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 179: 115740.
- [24] 李斌, 刘斌, 李超. 新型电力系统下锂离子储能电站热安全管理技术综述[J]. *新型电力系统*, 2024, 2(2): 126-139.
- Li Bin, Liu Bin, Li Chao. Review of thermal safety management technologies for lithium-ion energy storage power plants in new power systems[J]. *New Power Systems*, 2024, 2(2): 126-139.
- [25] Singla M K, Nijhawan P, Oberoi A S. Hydrogen fuel and fuel cell technology for cleaner future: a review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(13): 15607-15626.
- [26] 高候畅. 户式氢燃料电池冷热电联供系统的设计和优化[D]. 无锡: 东南大学, 2023.
- Gao Houchang. Design and optimization of household hydrogen fuel cell combined cooling, heating and power system [D]. Wuxi: Southeast University, 2023.
- [27] Werner C, Preiß G, Gores F, et al. A comparison of low-pressure and supercharged operation of polymer electrolyte membrane fuel cell systems for aircraft applications[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2016, 85: 51-64.
- [28] Wen C Y, Lin Y S, Lu C H, et al. Thermal management of a proton exchange membrane fuel cell stack with pyrolytic graphite sheets and fans combined[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(10): 6082-6089.
- [29] Yang L, Nik-Ghazali N N, Ali M A H, et al. A review on thermal management in proton exchange membrane fuel cells: temperature distribution and control[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 187: 113737.
- [30] Lin J, Liu X, Li S, et al. A review on recent progress, challenges and perspective of battery thermal management system[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 167: 120834.
- [31] 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.
- [32] 顾帅, 韦莉, 张逸成, 等. 超级电容器老化特征与寿命测试研究展望[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(21): 145-153.
- Gu Shuai, Wei Li, Zhang Yicheng, et al. Research prospect on aging characteristics and life testing of supercapacitors[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2013, 33(21): 145-153.
- [33] Khan H A, Tawalbeh M, Aljawrneh B, et al. A comprehensive review on supercapacitors: their promise to flexibility, high temperature, materials, design, and challenges[J]. *Energy*, 2024, 295: 131043.
- [34] Pang H, Liu J, Yan X, et al. Parameterization and heat generation investigation of cylindrical lithium batteries based on a reconstructed electrochemical-thermal coupling model [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 257: 124328.
- [35] Du S, Lai Y, Ai L, et al. An investigation of irreversible heat generation in lithium ion batteries based on a thermo-electrochemical coupling method [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 121: 501-510.
- [36] 林坚. 面向热管理的锂离子电池多尺度电热耦合模型研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2025.
- Lin Jian. Research on multiscale electrothermal coupling model of lithium-ion batteries for thermal management [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2025.
- [37] Shao H, Qiu D, Peng L, et al. *In-situ* measurement of temperature and humidity distribution in gas channels for commercial-size proton exchange membrane fuel cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 412: 717-724.
- [38] 郑文杰, 杨径, 朱林培, 等. 车用燃料电池热管理性能仿真与试验研究[J]. *汽车工程*, 2021, 43(3): 381-386.
- Zheng Wenjie, Yang Jing, Zhu Linpei, et al. Simulation and experimental study on thermal management performance of automotive fuel cells[J]. *Automotive Engineering*, 2021, 43(3): 381-386.
- [39] Wang Y, Sun Z Y, Yang L. Optimizing temperature distribution in a PEMFC stack: a computational study on cooling plate and coolant dynamics[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 97: 88-103.
- [40] 周彩婷, 赵晶, 马永康, 等. 质子交换膜燃料电池热管理技术的研究进展与展望[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2025, 22(6): 101-109.
- Zhou Caiting, Zhao Jing, Ma Yongkang, et al. Research progress and prospect of thermal management technology for proton exchange membrane fuel cells[J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2025, 22(6): 101-109.
- [41] Wu W, Wang S, Wu W, et al. A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 182: 262-281.
- [42] Peng X, Garg A, Zhang J, et al. Thermal management system design for batteries packs of electric vehicles: a survey [C]//2017 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT). New York: IEEE, 2017: 1-5.
- [43] Lin Y, Chen Y W, Yang J T. Optimized thermal management of a battery energy-storage system (BESS) inspired by air-cooling inefficiency factor of data centers[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 200: 123388.
- [44] Gocmen S, Cetkin E. Emergence of elevated battery positioning in air cooled battery packs for temperature uniformity in ultra-fast dis/charging applications [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 45: 103516.
- [45] 李岳峰, 黄文强, 王杭烽, 等. 储能锂电池包强制风冷系统散热设计及热仿真分析[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(33): 14248-14255.
- Li Yuefeng, Huang Wenqiang, Wang Hangfeng, et al. Design and thermal simulation analysis of forced air cooling system for energy storage lithium battery packs[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(33): 14248-14255.
- [46] Luo L, Liu Y, Liao Z, et al. Optimal structure design and heat transfer characteristic analysis of X-type air-cooled battery thermal management system [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023,

- 67: 107681.
- [47] Xu Z, Yu G, Zhang T, et al. Cooling performance of battery pack as affected by inlet position and inlet air velocity in electric vehicle [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 39: 102382.
- [48] Sun H, Dixon R. Development of cooling strategy for an air cooled lithium-ion battery pack [J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 272: 404-414.
- [49] Zhou H, Zhou F, Xu L, et al. Thermal performance of cylindrical lithium-ion battery thermal management system based on air distribution pipe[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 131: 984-998.
- [50] Na X, Kang H, Wang T, et al. Reverse layered air flow for Li-ion battery thermal management [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 143: 257-262.
- [51] 杨凯杰, 裴后举, 朱信龙, 等. 某型集装箱储能电池模块的热设计研究及优化 [J]. *储能科学与技术*, 2020, 9(6): 1858-1863.
Yang Kaijie, Pei Houju, Zhu Xinlong, et al. Thermal design and optimization of a containerized energy storage battery module[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2020, 9(6): 1858-1863.
- [52] 宫云飞, 李国富. 储能箱风冷热管理系统仿真分析及优化设计[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2025, 61(4): 556-561.
Gong Yunfei, Li Guofu. Simulation analysis and optimization design of air cooling thermal management system for energy storage box[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2025, 61(4): 556-561.
- [53] Wang T, Tseng K J, Zhao J, et al. Thermal investigation of lithium-ion battery module with different cell arrangement structures and forced air-cooling strategies[J]. *Applied Energy*, 2014, 134: 229-238.
- [54] Zhang Y, Song X, Ma C, et al. Effects of the structure arrangement and spacing on the thermal characteristics of Li-ion battery pack at various discharge rates[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 165: 114610.
- [55] Yang W, Wang Y, Guo F, et al. Optimization study of air-cooled stagger-arranged battery pack with reverse-layered airflow [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55: 105524.
- [56] Lu Z, Yu X, Wei L, et al. Parametric study of forced air cooling strategy for lithium-ion battery pack with staggered arrangement [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 136: 28-40.
- [57] Chen K, Li Z, Chen Y, et al. Design of parallel air-cooled battery thermal management system through numerical study[J]. *Energies*, 2017, 10(10): 1677.
- [58] 汪鹏伟. 锂离子电池强制风冷热管理系统结构优化[J]. *内燃机与配件*, 2021(1): 197-198.
Wang Pengwei. Structural optimization of forced air-liquid thermal management system for lithium-ion batteries[J]. *Internal Combustion Engine and Parts*, 2021(1): 197-198.
- [59] 谢丽娜, 郭亮. 对液冷技术及其发展的探讨[J]. *信息通信技术与政策*, 2019, 45(2): 22-25.
Xie Lina, Guo Liang. Discussion on liquid cooling technology and its development[J]. *Information Communication Technology and Policy*, 2019, 45(2): 22-25.
- [60] 王圣, 李新, 蒋维, 等. 锂离子电池液冷热管理系统研究进展[J]. *消防科学与技术*, 2024, 43(5): 620-624.
Wang Sheng, Li Xin, Jiang Wei, et al. Research progress on liquid and liquid-air thermal management systems for lithium-ion batteries[J]. *Fire Science and Technology*, 2024, 43(5): 620-624.
- [61] Longchamps R S, Yang X G, Wang C Y. Fundamental insights into battery thermal management and safety[J]. *ACS Energy Letters*, 2022, 7(3): 1103-1111.
- [62] Wang C, Zhang G, Li X, et al. Experimental examination of large capacity LiFePO₄ battery pack at high temperature and rapid discharge using novel liquid cooling strategy[J]. *International Journal of Energy Research*, 2018, 42(3): 1172-1182.
- [63] Yang X H, Tan S C, Liu J. Thermal management of Li-ion battery with liquid metal[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 117: 577-585.
- [64] Zhang S, Zhao R, Liu J, et al. Investigation on a hydrogel based passive thermal management system for lithium ion batteries[J]. *Energy*, 2014, 68: 854-861.
- [65] Soleymani P, Saffarifar E, Jahanpanah J, et al. Enhancement of an air-cooled battery thermal management system using liquid cooling with CuO and Al₂O₃ nanofluids under steady-state and transient conditions[J]. *Fluids*, 2023, 8(10): 261.
- [66] 侯峻升, 李栋宇, 黄磊, 等. 氧化铝纳米流体液冷电池热管理性能研究[J]. *化工学报*, 2026, 77(4): 2116-2123.
Hou Junsheng, Li Dongyu, Huang Lei, et al. Study on thermal management performance of liquid-cooled battery with alumina nanofluid[J]. *CIESC Journal*, 2026, 77(4): 2116-2123.
- [67] 田少鹏, 唐豪, 龚振. 锂电池微通道液冷板散热性能分析[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2023, 37(3): 297-304.
Tian Shaopeng, Tang Hao, Gong Zhen. Analysis of heat dissipation performance of microchannel liquid cooling plate for lithium batteries [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2023, 37(3): 297-304.
- [68] Wang H, Tao T, Xu J, et al. Cooling capacity of a novel modular liquid-cooled battery thermal management system for cylindrical lithium ion batteries [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 178: 115591.
- [69] Lai Y, Wu W, 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: 118581.
- [70] Jin L W, Lee P S, Kong X X, et al. Ultra-thin minichannel LCP for EV battery thermal management[J]. *Applied Energy*, 2014, 113: 1786-1794.
- [71] Li B, Mao Z, Song B, et al. Study on battery thermal management of autonomous underwater vehicle by bionic wave channels with liquid cooling [J]. *International Journal of Energy Research*, 2021, 45(9): 13269-13283.
- [72] Yang W, Zhou F, Liu Y, et al. Thermal performance of honeycomb-like battery thermal management system with bionic liquid mini-channel and phase change materials for cylindrical lithium-ion battery[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 188: 116649.
- [73] 黄浩, 鞠洪玲. PEMFC 新型冷流道的数值模拟[J]. *电源技术*, 2024, 48(1): 150-155.
Huang Hao, Ju Hongling. Numerical simulation of novel cooling channels for PEMFC [J]. *Power Supply Technology*, 2024, 48(1): 150-155.
- [74] 刘增鹏, 刘祯. 燃料电池 N 型扰流式冷却流道设计及传热分析[J]. *电源技术*, 2023, 47(9): 1188-1192.

- Liu Zengpeng, Liu Zhen. Design and heat transfer analysis of N-type baffled cooling channels for fuel cells[J]. *Power Supply Technology*, 2023, 47(9): 1188-1192.
- [75] Nasiri M, Hadim H. Advances in battery thermal management: current landscape and future directions[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 200: 114611.
- [76] Wang F, Pang D, Liu X, et al. Progress in application of phase-change materials to cooling clothing[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 60: 106606.
- [77] 吴晓昱, 陈明毅, 李海航, 等. 基于石墨烯相变材料的锂离子电池热管理技术研究[J]. *中国测试*, 2023, 49(5): 1-8.
Wu Xiaoyu, Chen Mingyi, Li Haihang, et al. Research on thermal management technology of lithium-ion batteries based on graphene phase change materials[J]. *China Measurement*, 2023, 49(5): 1-8.
- [78] Ushak S, Song W, Marín P E, et al. A review on phase change materials employed in Li-ion batteries for thermal management systems[J]. *Applied Materials Today*, 2024, 37: 102021.
- [79] Liu C, Rao Z, Zhao J, et al. Review on nanoencapsulated phase change materials: preparation, characterization and heat transfer enhancement[J]. *Nano Energy*, 2015, 13: 814-826.
- [80] Farid M, Khudhair A M, Razack S A K, et al. A review on phase change energy storage: materials and applications[J]. *Thermal Energy Conversion and Management*, 2004, 45(9/10): 1597-1615.
- [81] Yu Z, Zhang J, Pan W. A review of battery thermal management systems about heat pipe and phase change materials[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 62: 106827.
- [82] Simonsen G, Ravotti R, O'Neill P, et al. Biobased phase change materials in energy storage and thermal management technologies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 184: 113546.
- [83] Nasajpour-Esfahani N, Garmestani H, Rozati M, et al. The role of phase change materials in lithium-ion batteries: a brief review on current materials, thermal management systems, numerical methods, and experimental models[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 63: 107061.
- [84] Luo J, Zou D, Wang Y, et al. Battery thermal management systems (BTMs) based on phase change material (PCM): a comprehensive review[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 430: 132741.
- [85] Alipanah M, Li X. Numerical studies of lithium-ion battery thermal management systems using phase change materials and metal foams[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 102: 1159-1168.
- [86] Xu W, Yang W, Su J, et al. Diatom-based biomass composites phase change materials with high thermal conductivity for battery thermal management[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 96: 112737.
- [87] Goli P, Legedza S, Dhar A, et al. Graphene-enhanced hybrid phase change materials for thermal management of Li-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 248: 37-43.
- [88] Li W Q, Qu Z G, He Y L, et al. Experimental study of a passive thermal management system for high-powered lithium ion batteries using porous metal foam saturated with phase change materials[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 255: 9-15.
- [89] Pan M, Lai W. Cutting copper fiber/paraffin composite phase change material discharging experimental study based on heat dissipation capability of Li-ion battery[J]. *Renewable Energy*, 2017, 114: 408-422.
- [90] 郜昆伦. 定向导热复合相变材料的制备及其热管理性能研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2025.
Gao Kunlun. Preparation of directional thermal conductive composite phase change materials and their thermal management performance[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2025.
- [91] 姜鑫鑫, 李凌. 相变材料和液冷结合的锂离子电池热管理性能优化[J]. *上海理工大学学报*, 2024, 46(1): 36-43.
Jiang Xinxin, Li Ling. Optimization of thermal management performance of lithium-ion batteries based on the combination of phase change materials and liquid cooling[J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2024, 46(1): 36-43.
- [92] Zhang W, Liang Z, Yin X, et al. Avoiding thermal runaway propagation of lithium-ion battery modules by using hybrid phase change material and liquid cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 184: 116380.
- [93] Rao Z, Wang Q, Huang C. Investigation of the thermal performance of phase change material/mini-channel coupled battery thermal management system[J]. *Applied Energy*, 2016, 164: 659-669.
- [94] Song L, Zhang H, Yang C. Thermal analysis of conjugated cooling configurations using phase change material and liquid cooling techniques for a battery module[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 133: 827-841.
- [95] Xu Y, Xue Y, Qi H, et al. Experimental study on heat transfer performance of pulsating heat pipes with hybrid working fluids[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 157: 119727.
- [96] Chan C W, Siqueiros E, Ling-Chin J, et al. Heat utilisation technologies: a critical review of heat pipes[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 50: 615-627.
- [97] Yang X, Yan Y Y, Mullen D. Recent developments of lightweight, high performance heat pipes[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 33: 1-14.
- [98] Zheng M, Liu Y, Ma Z, et al. Numerical study on power battery thermal management system based on heat pipe technology[J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 350-361.
- [99] 农增耀, 苏庆宗, 王亚雄. 基于热管的储能型热管理系统的实验探究[J]. *现代化工*, 2022, 42(8): 220-224, 228.
Nong Zengyao, Su Qingzong, Wang Yaxiong. Experimental investigation of heat pipe-based energy storage thermal management system[J]. *Modern Chemical Industry*, 2022, 42(8): 220-224, 228.
- [100] 袁奇. 基于热管-液冷复合的锂电池冷却系统传热性能研究[D]. 沈阳: 沈阳化工大学, 2023.
Yuan Qi. Study on heat transfer performance of heat pipe-liquid cooling hybrid system for lithium batteries[D]. Shenyang: Shenyang University of Chemical Technology, 2023.
- [101] Mochizuki M, Nguyen T, Mashiko K, et al. A review of heat pipe application including new opportunities[J]. *Frontiers in Heat Pipes (FHP)*, 2011, 2(1): 013001.
- [102] 张磊, 戴叶, 陈兴伟, 等. 折弯异型对铜-水热管传热性能影响的实验研究[J]. *化工学报*, 2021, 72(10): 5132.

- Zhang Lei, Dai Ye, Chen Xingwei, et al. Experimental study on the effect of bending shapes on the heat transfer performance of copper-water heat pipes[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 72(10): 5132.
- [103] 陈维. 基于热管技术的汽车动力电池组热控系统研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
Chen Wei. Study on thermal control system of automotive power battery pack based on heat pipe technology [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [104] Mahdavi M, Tiari S, De Schampheleire S, et al. Experimental study of the thermal characteristics of a heat pipe[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 93: 292-304.
- [105] Wang J, Yu Y, Song L, et al. Thermal management performance and optimization of a novel system combining heat pipe and composite fin for prismatic lithium-ion batteries[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 302: 118106.
- [106] Liu Z H, Li Y Y, Bao R. Thermal performance of inclined grooved heat pipes using nanofluids[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2010, 49(9): 1680-1687.
- [107] Spinato G, Borhani N, Thome J R. Understanding the self-sustained oscillating two-phase flow motion in a closed loop pulsating heat pipe[J]. Energy, 2015, 90: 889-899.
- [108] Qu J, Wu H. Thermal performance comparison of oscillating heat pipes with $\text{SiO}_2/\text{water}$ and $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{water}$ nanofluids[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2011, 50(10): 1954-1962.
- [109] Dong J, Zheng Q, Xiong C, et al. Experimental investigation and application of stability and thermal characteristics of SiO_2 -ethylene-glycol/water nanofluids [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 176: 107533.
- [110] Gao Y, Hu Q, Ren Y, et al. Application of nanofluids in heat pipes[J]. Journal of Thermal Analysis & Calorimetry, 2023, 148(12): 5149-5177.
- [111] Chaurasia S R, Sarviya R M. Thermal performance analysis of CuO/water nanofluid flow in a pipe with single and double strip helical screw tape [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 166: 114631.
- [112] Putra N, Iskandar F N. Application of nanofluids to a heat pipe liquid-block and the thermoelectric cooling of electronic equipment[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2011, 35(7): 1274-1281.
- [113] Vijayakumar M, Navaneethakrishnan P, Kumaresan G. Thermal characteristics studies on sintered wick heat pipe using CuO and Al_2O_3 nanofluids[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, 79: 25-35.
- [114] Esmaeilzadeh A, Nik-Ghazali N, Metselaar H S C, et al. Thermal performance evaluation of the heat pipe by using 1-pyrene carboxylic-acid functionalized graphene nanofluid [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021, 129: 105669.
- [115] Aly W I A, Elbalshouny M A, Abd El-Hameed H M, et al. Thermal performance evaluation of a helically-micro-grooved heat pipe working with water and aqueous Al_2O_3 nanofluid at different inclination angle and filling ratio[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110: 1294-1304.
- [116] Wu W, Yang X, Zhang G, et al. Experimental investigation on the thermal performance of heat pipe-assisted phase change material based battery thermal management system[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 138: 486-492.
- [117] 苏丽蓉. 微型热管散热器在动力电池热控制的性能研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2021.
Su Lirong. Performance study of micro heat pipe radiators in thermal management of power batteries [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2021.
- [118] Zhao R, Gu J, Liu J. An experimental study of heat pipe thermal management system with wet cooling method for lithium ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2015, 273: 1089-1097.
- [119] Rahimi M, Asgary K, Jesri S. Thermal characteristics of a resurfaced condenser and evaporator closed two-phase thermosyphon [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2010, 37(6): 703-710.
- [120] 杨少坤. 激光微织构亲、疏水通道对微热管散热影响[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.
Yang Shaokun. Influence of laser micro-textured hydrophilic and hydrophobic channels on micro heat pipe heat dissipation [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020.
- [121] Wang M, Teng S, Xi H, et al. Cooling performance optimization of air-cooled battery thermal management system[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 195: 117242.
- [122] Shang Z, Qi H, Liu X, et al. Structural optimization of lithium-ion battery for improving thermal performance based on a liquid cooling system[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 130: 33-41.
- [123] Sudhakaran S, Terese M, Mohan Y, et al. Influence of various parameters on the cooling performance of battery thermal management systems based on phase change materials [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 222: 119936.
- [124] Sudhan A L S, Ramachandran K, Solomon A B, et al. Research progress on performance enhancement of heat pipes; a review [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2022, 147(4): 2847-2883.
- [125] Zhang W, Dong C, Mao Y, et al. Performance analysis of a thermoelectric cooler based on thermal management [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 265: 125655.
- [126] Enescu D, Virjoghe E O. A review on thermoelectric cooling parameters and performance[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 38: 903-916.
- [127] Rahmani A, Dibaj M, Akrami M. A study on a battery pack in a hybrid battery thermal management system integrating with thermoelectric cooling [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 61: 104856.
- [128] Mahak M K, Ramadan M, bin Dol S S, et al. A comprehensive review of thermoelectric cooling technologies for enhanced thermal management in lithium-ion battery systems[J]. Heliyon, 2024, 10(24): e40649.
- [129] 张锦扬, 曹丽莉, 缪旻. 用于手机非均匀分布热点的热电冷却系统设计[J]. 制冷学报, 2022, 43(5): 49-55.
Zhang Jinyang, Cao Lili, Miao Min. Design of thermoelectric cooling system for non-uniformly distributed hotspots in mobile phones[J]. Journal of Refrigeration, 2022, 43(5): 49-55.
- [130] Li X, He F, Zhang G, et al. Experiment and simulation for pouch battery with silica cooling plates and copper mesh based air cooling thermal management system[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 265: 125655.

- neering, 2019, 146: 866-880.
- [131] 单春贤, 夏灯富, 刘朝阳, 等. 基于热电耦合液体冷却的动力电池热管理系统的实验研究[J]. 汽车安全与节能学报, 2022, 13(3): 535-540.
- Shan Chunxian, Xia Dengfu, Liu Chaoyang, et al. Experimental study on thermoelectric-coupled liquid cooling thermal management system for power batteries[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2022, 13(3): 535-540.
- [132] Raman A P, Li W, Fan S. Generating light from darkness[J]. Joule, 2019, 3(11): 2679-2686.
- [133] Yin X, Yang R, Tan G, et al. Terrestrial radiative cooling: using the cold universe as a renewable and sustainable energy source[J]. Science, 2020, 370(6518): 786-791.
- [134] 叶满山. 辐射制冷涂层应用于大规模电化学储能电站[N]. 中国科学报, 2024-10-16(003).
- Ye Manshan. Application of radiative cooling coatings in large-scale electrochemical energy storage power stations [N]. China Science Daily, 2024-10-16(003).
- [135] Zhao D, Aili A, Zhai Y, et al. Radiative sky cooling: fundamental principles, materials, and applications [J]. Applied Physics Reviews, 2019, 6(2): 021306.
- [136] Zhai Y, Ma Y, David S N, et al. Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling[J]. Science, 2017, 355(6329): 1062-1066.
- [137] Li Y, Song Y, Zu H, et al. Bioinspired radiative cooling coating with high emittance and robust self-cleaning for sustainably efficient heat dissipation[J]. Exploration, 2024, 4(3): 20230085.
- [138] Valant M. Electrocaloric materials for future solid-state refrigeration technologies[J]. Progress in Materials Science, 2012, 57(6): 980-1009.
- [139] 冯嘉旺, 蔡玉, 施骏业, 等. 面向零碳制冷与热泵的电卡复合材料及柔性制冷器件[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2022, 58(6): 925-943.
- Feng Jiawang, Cai Yu, Shi Junye, et al. Electrocaloric composites and flexible cooling devices for zero-carbon refrigeration and heat pumps[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science Edition), 2022, 58(6): 925-943.
- [140] Chen X Z, Li X, Qian X S, et al. A nanocomposite approach to tailor electrocaloric effect in ferroelectric polymer[J]. Polymer, 2013, 54(20): 5299-5302.
- [141] Zhang G, Zhang X, Yang T, et al. Colossal room-temperature electrocaloric effect in ferroelectric polymer nanocomposites using nanostructured barium strontium titanates[J]. ACS Nano, 2015, 9(7): 7164-7174.
- [142] Chen J, Shen Z, Kang Q, et al. Chemical adsorption on 2D dielectric nanosheets for matrix free nanocomposites with ultrahigh electrical energy storage [J]. Science Bulletin, 2022, 67(6): 609-618.
- [143] Bashir T, Ismail S A, Song Y, et al. A review of the energy storage aspects of chemical elements for lithium-ion based batteries [J]. Energy Materials, 2021, 1(2): 100019.
- [144] Saechan P, Dhuchakallaya I. Numerical investigation of air cooling system for a densely packed battery to enhance the cooling performance through cell arrangement strategy[J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46(14): 20670-20684.
- [145] Zhao G, Wang X, Negnevitsky M, et al. An up-to-date review on the design improvement and optimization of the liquid-cooling battery thermal management system for electric vehicles[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 219: 119626.
- [146] Zhou L, Yang C, Jain A, et al. A review of recent research on phase change cooling for lithium-ion batteries[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2026, 261: 128407.
- [147] Jouhara H, Serey N, Khordehgh N, et al. Investigation, development and experimental analyses of a heat pipe based battery thermal management system[J]. International Journal of Thermofluids, 2020, 1: 100004.
- [148] Liu J, Hu Y, Zeng D, et al. Optimization of an air-cooling system and its application to grid stability[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 61(2): 206-212.
- [149] Deng Y, Feng C, Zhu H, et al. Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithium ion battery system: a review[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 142: 10-29.
- [150] He R, Song K W, Wu X, et al. Effectiveness analysis of novel battery thermal management systems combining phase change material and air-cooled technologies[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 264: 125499.
- [151] Jiang W, Tang A, Fan G, et al. Heat transfer characteristics of non-uniform channels flat heat pipe with micro pillar arrays and its application in power battery cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 249: 123422.
- [152] Tasneem O, Tasneem H, Xian X. Lithium-ion battery technologies for grid-scale renewable energy storage[J]. Next Research, 2025, 2(2): 100297.
- [153] Wang X, Wei X, Zhu J, et al. A review of modeling, acquisition, and application of lithium-ion battery impedance for onboard battery management[J]. ETransportation, 2021, 7: 100093.
- [154] Chen Y, Xia D. Systematic density functional theory investigations on cubic lithium-rich iron-based Li_2FeO_3 : a multiple electrons cationic and anionic redox cathode material[J]. ETransportation, 2021, 10: 100141.
- [155] He D, Wang J, Peng Y, et al. Research advances on thermal runaway mechanism of lithium-ion batteries and safety improvement [J]. Sustainable Materials and Technologies, 2024, 41: e01017.
- [156] Feng Z, Ye H, Lu Y, et al. Flexible intelligent thermal management systems: sensing devices, signals, and applications[J]. Nano Energy, 2025, 137: 110842.