

车用电池热管理和储能技术研究

盛晓春¹, 颜俊峰¹, 付骏¹, 章天锋¹, 张亚舫¹, 李俊逸²

(1. 江西水利电力大学, 江西 南昌 330099; 2. 中南大学, 湖南 长沙 410083)

摘要:随着用户对电动汽车高续航里程和快速充电需求的日益增长, 车用电池相关技术面临着更高要求。文中综述了车用电池的热管理技术与储能技术, 并重点分述了热管理技术中基于相变材料的冷却技术与加热技术、储能技术中的混合储能系统, 并对车用电池相关技术的未来研究方向进行了展望。

关键词:电动汽车; 电池; 热管理; 储能

中图分类号: TM 912 文献标志码: A 文章编号: 1006-348X(2025)04-0039-04

0 引言

全球能源危机和环境污染问题的加剧, 给人类社会的发展带来了严峻挑战^[1]。为应对这一挑战, 我国制定了新能源汽车的发展规划和激励政策, 并将其列为重要战略任务^[2]。电动汽车与传统燃油车辆相比, 具有近乎零排放以及高能量转换效率等优势^[3], 其发展已成为应对传统化石燃料日益枯竭以及复杂环境污染等问题的重要途径之一。

随着电动汽车的快速发展, 其对动力电池的安全性及快速充电等技术要求也在不断提高。目前, 电动汽车的动力电池主要包括锂离子电池、镍氢电池和固态电池等^[4]。先进的电动汽车电池相关技术不仅能够自身系统的安全运行提供有力保障, 还能显著提升电动汽车的整体性能。基于对国内外车用电池技术的梳理, 文中重点阐述了热管理技术中基于相变材料的冷却技术与加热技术、车用电池储能技术中的混合储能系统等。

1 热管理技术

电动汽车电池在快速充放电过程中, 其内部会因电化学反应产生热量, 这些热量若在电池内部积聚到

一定程度, 将可能触发副反应, 释放大量的热量, 进而引发电池热失控, 导致自燃^[5-6]。而低温环境会影响电池的充电速度并缩短其续航里程, 如锂离子电池在低温环境下其电解液的黏度会显著增加, 导致锂离子在电解液中扩散速度减弱, 离子电导率明显降低^[7]。研究表明, 锂离子电池的工作温度范围应维持在-20℃至50℃之间, 开发有效的电池热管理技术对保障电动汽车的稳定运行具有重要意义^[8-10]。电池热管理技术主要包括电池冷却技术和电池加热技术。

1.1 冷却技术

车用电池热管理的冷却技术较多, 主要包括空气冷却、液体冷却、热管冷却和相变材料冷却等。不同电池冷却技术的优缺点如表1所示。

表1 不同电池冷却技术优缺点

电池冷却技术	优点	缺点
空气冷却	成本低、易于维护	难以实现快速散热、噪音大
液体冷却	冷却效率高、均温性好、噪音低	易泄漏、依赖外部机械设备、结构复杂
热管冷却	质量轻、传热能力强	维护成本高、均温性差
相变材料冷却	无需依赖外部机械设备、结构简单、能耗低	材料相变潜热有限、在复杂工况下热管理性能不足

强制对流的空气冷却和液体冷却属于主动式电池热管理技术, 其冷却效率较高, 但所需的风扇和水泵等机械设备体积较大且结构复杂, 在运行过程中会额外消耗电池能量; 热管冷却虽可实现高效热交换, 但其换热介质质量难以控制; 相比之下, 相变材料冷却

收稿日期: 2025-04-23

基金项目: 江西省大学生创新创业训练计划项目(S202411319021); 国家自然科学基金项目(22269014); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ2201505)。

作者简介: 盛晓春(1975), 女, 硕士, 实验师, 主要从事动力电池与材料等相关研究。

通过利用材料自身相变潜热吸放热量,无需依赖外部机械设备,具有结构简单、能耗低等优势。

相变材料冷却因节能、温度均匀性好等特点,得到了国内外广泛研究。Al等^[11]首次提出采用相变材料对电池进行热管理,并使用有限元方法模拟电动汽车电池热行为,在不同放电倍率下,相变材料冷却均能使电池模块具有良好的温度均匀性;Jilte等^[12]提出了一种采用双层纳米颗粒增强相变材料的新型电池热管理系统,在30~40℃的环境温度下,与外部自然空气冷却相比,该系统冷却性能显著更优,即使在40℃以上的环境温度下,电池温度也能保持在46℃以下;罗昭顺等^[13]以21700型锂离子电池为研究对象,设计了一种双层结构的相变材料冷却系统,与单层相变材料冷却系统相比,在环境温度分别为35℃、40℃时,电池最高温度分别下降了4.34℃、16.67℃。与传统空气冷却和液体冷却相比,相变材料冷却在体积紧凑性和温度均匀性等方面均具有明显优势;Chen等^[14]对相变材料和热管两种热管理系统的性能进行对比研究发现,相变材料系统的电池组内部温度差异明显更低;Ravindra等^[15]在2C、4C放电倍率和27℃、35℃和40℃的环境条件下,研究了相变材料与空气冷却耦合的热管理系统的冷却性能,发现其与单一系统相比具有明显更优的散热效率和更好的温度均匀性;Song等^[16]提出了一种相变材料冷却和液体冷却耦合的新型冷却系统。研究表明,与单一的相变材料冷却或液体冷却系统相比,耦合式冷却系统能够显著减缓电池温度上升速率,并有效降低稳态温度。

综上所述,相变材料冷却不仅能够有效降低电池温度,还能保持电池模块内的温度均匀性,对提升电池性能和延长电池寿命具有重要作用;此外,相变材料冷却技术在体积紧凑性和节能方面也表现出明显优势,将其与其他冷却技术相结合应用于电池热管理系统具有广阔的应用前景。

1.2 加热技术

车用电池的主流加热技术包括空气加热、液体加热及相变材料加热等^[17-18]。王发成等^[19]通过建立电热丝的换热模型并设计加热箱,在低温环境下进行实验,发现利用热空气加热时,电池单体表面温度以每

87 s升高1℃的速率上升,验证了热空气加热作为低温电池加热的有效性;Chen等^[20]设计了一种基于双向液体加热的电池热管理系统,该系统能够在极端低温环境(-40℃)下,在短时间内将整个电池模块预热到高于0℃的运行状态,加热速率达到6.7℃/min,且能耗不高。

相变材料加热属于被动式加热,与空气加热和液体加热相比,不仅具有更高的安全性,还能显著降低系统能耗。相变材料具有高相变潜热,在低温环境下,能够释放所储存的热量,促使电池内部温度上升且均匀分布。Luo等^[21]对导电石蜡-膨胀石墨(EG)复合相变材料加热进行了研究,通过对该复合相变材料施加20 V的电压,实现了电池组的平均温度以12.9℃/min的平均速率从-40℃快速上升到20℃,EG作为石蜡的支撑基体,不仅有效防止了液体渗漏且构建了一个高效的热传导和电传导网络,通过添加EG,石蜡的导热性能提升了960%,显著增强了其作为相变材料的热管理能力;Mo等^[22]设计了一种新型加热方法,即将电池用加热薄膜包裹放入相变材料中,这种集成的电池热管理系统在热量散发性能上几乎没有下降,但加热效率却有了显著提升。在环境温度-20℃和加热功率60 W条件下,这种直接加热结构可在384 s内将电池加热到10℃,且温差仅为3.77℃,能耗比率低至14.5%。

相变材料加热不仅能够有效解决低温环境下电池性能下降的问题,还能在保证安全性和可靠性的前提下,显著降低能耗并提升电池的使用寿命。近年来,电池的自加热技术也取得了显著进展。自加热技术通过电芯弱短路,让电池在高压回路形成的脉冲电流作用下迅速加热。这种加热方式具有加热速度快、能量利用率高等优点。

2 储能技术

电动汽车在近十年得到了大力发展与推广,但动力电池的低充电效率和续航里程限制了电动汽车的进一步发展。高效的车用电池储能技术不仅能实现快速充电,还能有效缓解现阶段电动汽车用户对续航里程的焦虑,同时提高车辆安全性。目前,国内外广泛研究的储能技术主要有电池储能等单一储能和混

合储能。

单一的电池储能系统在功率-能量密度、高温-低温性能以及工作倍率-循环寿命之间仍存在难以兼顾的问题^[23],无法满足用户对电动汽车长续航里程、高充电效率的需求。锂离子电池以高能量密度著称^[24],而超级电容则具有高功率密度和快速充放电能力^[25],二者结合形成的混合储能系统,既能利用锂离子电池的高能量密度以满足电动汽车的长续航需求,又能利用超级电容的特性以延长电池的使用寿命和充电效率。因此,通过合理的混合储能设计,能有效缓解电动汽车续航里程短、充电效率低等问题。混合储能系统在电池储能技术发展中具有很大应用潜力,其在电动汽车上的应用如图1所示。

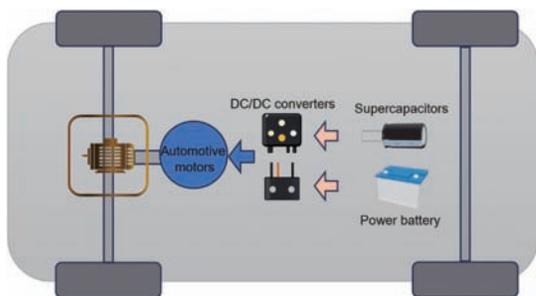


图1 电动汽车混合储能系统原理图

混合储能是一种能量与功率高效管理的储能技术,可适用于不同工况。上官玉金等^[26]采用锂离子电池与超级电容构建了混合储能系统,并对其拓扑结构进行了优化。研究表明,优化后系统的能耗降低了0.63%、锂离子电池成本损耗减少了6.09%,验证了混合储能技术在实现高能量密度和高功率密度方面的可行性;郭冠伦等^[27]对 $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{GO}$ 非对称超级电容器电动汽车动力系统进行了应用仿真。结果表明,与单一的锂离子电池储能系统相比,该混合储能系统最大电池功率减小了31.3%,续航里程提高了11.4%,起到了平衡电动汽车电池功率和提高续航里程的作用。

显然,混合储能技术在电动汽车中的成功应用,可显著提升电动汽车的相关性能,从而有效解决其续航能力不足以及充电效率低等关键问题。通过结合不同类型储能技术的优势,混合储能系统能够为电动汽车提供更加稳定、高效且持久的能量供应,极大缓解电动汽车用户在长途出行时面临的“里程焦虑”,同时也能大幅缩短充电时间,提高车辆的使用便利性。

3 结语

车用电池热管理和储能技术的快速发展为应对全球能源危机和环境污染等问题提供了重要支持。文中通过分析国内外车用电池热管理和储能技术的研究现状发现,当前车用电池在安全性、热管理和储能效率方面已取得显著进展,但仍存在一些局限。为进一步推动电动汽车发展,未来相关技术研究可集中于:开发多冷却方式耦合的热管理技术,以提高电池的热管理效率;优化设计混合储能系统,使其兼顾能量密度、功率密度和循环寿命。

高效、安全的车用电池相关技术不仅有助于推动电动汽车产业的发展,而且可为解决全球日益严峻的能源供给和复杂的环境污染等问题提供有力支撑。随着材料科学和工程技术的进步,车用电池有望在能量密度和充电效率等方面取得更大突破,助力实现“碳达峰、碳中和”的战略目标。

参考文献:

- [1] 谢和平,任世华,谢亚辰,等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J]. 煤炭学报,2021,46(07):2197-2211.
- [2] 国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知[J]. 中华人民共和国国务院公报,2021(31):48-58.
- [3] Kumar D, Nema RK, Gupta S. A comparative review on power conversion topologies and energy storage system for electric vehicles[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(10):7863-7885.
- [4] Kwade A, Haselrieder W, Leithoff R, et al. Current status and challenges for automotive battery production technologies [J]. Nature Energy, 2018, 3(04):290-300.
- [5] Sajjad K, Seyfolah S. A systematic review of thermal management techniques for electric vehicle batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 75: 109586.
- [6] Kong X D, Lu L G, Yuan Y B, et al. Foreign matter defect battery and sudden spontaneous combustion[J]. eTransportation, 2022, 12: 100170.
- [7] 熊瑞,朱宇华,张骞慧,等. 锂离子电池低温加热技术研究进展及应用综述[J/OL]. 机械工程学报, 2025: 1-24[2025-03-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.th.20250313.1623.092.html>.

- [8] Lv S, Wang X, Lu W, et al. The influence of temperature on the capacity of lithium-ion batteries with different anodes[J]. *Energies*, 2021, 15(01): 60.
- [9] Zhang S S, Xu K, Jow T R. Low temperature performance of graphite electrode in Li-ion cells[J]. *Electrochimica acta*, 2002, 48(03): 241-246.
- [10] Wu X, Wang W, Sun Y, et al. Study on the Capacity Fading Effect of Low-Rate Charging on Lithium-Ion Batteries in Low-Temperature Environment[J]. *World Electric Vehicle Journal*, 2020; 11(03): 55.
- [11] Al H S, Selman J R. A novel thermal management system for electric vehicle batteries using phase-change material[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2019, 147(09): 3231-3236.
- [12] Jilte R D, Kumar R, Ahmadi M H, et al. Battery thermal management system employing phase change material with cell-to-cell air cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 161: 114199.
- [13] 罗昭顺, 汪铭磊, 吴启超, 等. 双层相变材料结构的圆柱形锂离子电池相变冷却模块仿真分析[J]. *现代机械*, 2022(02): 14-19.
- [14] Chen K, Hou J S, Song M X, et al. Design of battery thermal management system based on phase change material and heat pipe[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 188: 116665.
- [15] Jilte R, Afzal A, Panchal S. A novel battery thermal management system using nano-enhanced phase change materials [J]. *Energy*, 2021, 219: 119564.
- [16] 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.
- [17] 及非凡, 陈子豪, 李艳君. 基于电驱系统高频注入的电动汽车电池包快速加热控制算法[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(20): 6316-6327.
- [18] Lin C, Kong W F, Tian Y, et al. Heating lithium-ion batteries at low temperatures for onboard applications: recent progress, Challenges and Prospects[J]. *Auto motive Innovation*, 2022, 5(01): 3-17.
- [19] 王发成, 张俊智, 王丽芳. 车载动力电池组用空气电加热装置设计[J]. *电源技术*, 2013, 37(07): 1184-1187.
- [20] Chen S Q, Zhang G X, Wu C J, et al. Multi-objective optimization design for a double-direction liquid heating system-based Cell-to-Chassis battery module[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 183: 122184.
- [21] 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.
- [22] Mo C M, Zhang G Q, Ma X R, et al. Integrated battery thermal management system coupling phase change material cooling and direct heating strategies[J]. *Energy & Fuels*, 2022, 36(17): 0372-0383.
- [23] 乔亮波, 张晓虎, 孙现众, 等. 电池-超级电容器混合储能系统研究进展[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(01): 98-106.
- [24] 祝国玺, 孙富, 鞠江伟, 等. 高比能高安全的柔性锂电池设计[J]. *科学通报*, 2024, 69(10): 1257-1278.
- [25] 胡林, 田庆韬, 黄晶, 等. 电动汽车锂离子电池-超级电容混合储能系统能量分配与参数匹配研究综述[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(16): 224-237.
- [26] 上官玉金, 谢长君, 刘芙蓉, 等. 锂电池与超级电容混合储能系统拓扑结构优化[J]. *电源技术*, 2022, 46(01): 83-86.
- [27] 郭冠伦, 王钊昕, 田峰, 等. NiCo₂O₄//GO 非对称超级电容器电动汽车动力系统应用仿真[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2024, 46(02): 170-182.