



纳米流体电池热管理研究进展

吴俊杰 侯竣升 马丽 黄磊 郝南京

Research progress on nanofluids for battery thermal management

WU Junjie, HOU Junsheng, MA Li, HUANG Lei, HAO Nanjing

引用本文:

吴俊杰, 侯竣升, 马丽, 黄磊, 郝南京. 纳米流体电池热管理研究进展[J]. 北科大: 工程科学学报, 2024, 46(8): 1498–1508. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2023.11.10.003

WU Junjie, HOU Junsheng, MA Li, HUANG Lei, HAO Nanjing. Research progress on nanofluids for battery thermal management[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2024, 46(8): 1498–1508. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2023.11.10.003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2023.11.10.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

锂离子电池安全性研究进展

Research progress on safety of lithium-ion batteries

工程科学学报. 2018, 40(8): 901 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2018.08.002>

电动汽车集成热管理研究进展

Research progress in integrated thermal management of electric vehicles

工程科学学报. 2020, 42(4): 412 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.12.20.003>

三元锂离子动力电池热失控及蔓延特性实验研究

Experimental study on the thermal runaway and its propagation of a lithium-ion traction battery with NCM cathode under thermal abuse

工程科学学报. 2021, 43(5): 663 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.10.27.002>

钙钛矿太阳能电池稳定性研究进展

Research progress on the stability of perovskite solar cells

工程科学学报. 2020, 42(1): 16 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.06.24.006>

基于增强学习算法的插电式燃料电池电动汽车能量管理控制策略

Energy management control strategy for plug-in fuel cell electric vehicle based on reinforcement learning algorithm

工程科学学报. 2019, 41(10): 1332 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2018.10.15.001>

纯电动车用锂离子电池发展现状与研究进展

Development status and research progress of power battery for pure electric vehicles

工程科学学报. 2019, 41(1): 22 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.01.003>

纳米流体电池热管理研究进展

吴俊杰, 侯竣升, 马 丽, 黄 磊, 郝南京✉

西安交通大学化学工程与技术学院, 西安 710049
✉通信作者, E-mail: nanjing.hao@xjtu.edu.cn

摘 要 随着非化石能源的开发利用, 各行业电气化程度的提高以及储能技术的发展, 各种电池的应用越来越广泛, 同时电池向着高能量密度方向发展. 在充放电过程中, 电池组内能量密度的上升导致电池过热乃至爆炸, 进而影响电池组的寿命和安全. 因而, 亟待开发高效的热管理系统, 以及时带走电池内的热量. 近年来, 多种新型热管理系统被广泛研究和应用. 其中, 具有效果显著、成本低廉和无额外能耗等优势纳米流体电池热管理系统备受关注. 本文对纳米流体电池热管理系统的研究进展进行了系统综述, 首先介绍了常见的电池种类及常用的热管理技术, 随后阐述了纳米流体的分类和性质, 并详细论述了纳米流体在锂离子电池、燃料电池和太阳能电池三类电池中的热管理理论、数值模拟、实验和应用研究现状. 最后, 本文系统讨论了当前该领域面临的挑战, 并提出了未来的发展方向.

关键词 热管理; 纳米流体; 锂离子电池; 燃料电池; 太阳能电池

分类号 TB131; TK121

Research progress on nanofluids for battery thermal management

WU Junjie, HOU Junsheng, MA Li, HUANG Lei, HAO Nanjing✉
School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China
✉Corresponding author, E-mail: nanjing.hao@xjtu.edu.cn

ABSTRACT As climate change worsens, it is becoming increasingly important to effectively harness and store energy from non-fossil fuels to reduce greenhouse gas emissions. The increasing adoption of various rechargeable batteries is being driven by advancements in non-fossil energy, the development of energy storage technology, and electrification in technological fields such as electric vehicles, photovoltaic thermal energy storage, and aerospace technology. However, the compact size of batteries leads to a significant increase in their internal energy density and temperature. Elevated heat flux and temperature not only limit battery performance but also reduce lifespan and pose safety risks to battery systems. The occurrence of thermal runaway under extreme conditions is a concern as it can result in battery combustion or even explosion. Thus, the implementation of efficient battery thermal management systems is essential. Besides traditional methods such as air cooling, phase change materials, and liquid cooling, in recent years, various novel thermal management technologies, including heat pipes, nanoparticle-enhanced phase change materials, and nanofluids, have been extensively explored. Among these emerging technologies, nanofluid battery thermal management systems have garnered attention due to their significant impact, minimal additional energy consumption, and cost-effectiveness compared with alternative approaches. These systems utilize nanofluids, which are liquids with uniformly dispersed nanoparticles. Nanoparticles can contain oxides such as alumina and titanium dioxide, metals such as silver and copper, and carbon-based materials such as carbon nanotube and nanodiamond. The application of nanoparticles results in an improvement in the thermal conductivity of fluids. Moreover, nanoparticles can also supply extra nuclei, improve surface wettability, and delay bubble coalescence while boiling. Thus, nanofluids can enhance heat transfer in both single-phase and two-phase flows. Given the enhancement of heat transfer, nanofluids exhibit significant potential in battery thermal

management. Herein, a systematic review of the research progress on nanofluid battery thermal management systems is presented. First, the structure, working principle, and demands of battery thermal management are given. Afterward, the concept and classification of nanofluids are introduced. Subsequently, the fundamental properties of nanofluids, such as stability, viscosity, thermal conductivity, and electrical conductivity, are elucidated. The article further discusses the current research progress on nanofluid-based battery thermal management systems applied in lithium batteries, fuel cells, and photovoltaic batteries. Finally, some notable challenges associated with nanofluid battery thermal management systems and some future development directions on numerical and experimental research and industrial applications are outlined.

KEY WORDS thermal management; nanofluid; Li-ion battery; fuel cell; photovoltaic battery

随着技术的进步, 高能量密度是电池发展的必然趋势, 这导致电池在运行过程中积累大量的热量. 因此, 需要高效的电池热管理系统(Battery thermal management system, BTMS)以及时带走热量, 确保电池安全运行. 根据传热介质的不同, BTMS可分为相变材料(Phase change material, PCM)BTMS、风冷 BTMS、液冷 BTMS 等. 其中, PCM BTMS 在 PCM 完全熔化后失效, 使其工程应用受到一定局限; 风冷 BTMS 结构简单, 但气态工质的热导率与比热容有限, 限制了 BTMS 性能提升; 液冷 BTMS 效果可靠, 应用极为广泛. 为进一步提升液冷 BTMS 的冷却性能, 研究者采用纳米流体作为液态工质, 发展出了纳米流体 BTMS. 本文系统综述了近几年纳米流体 BTMS 实验研究与工程应用现状, 并针对当前该领域研究面临的挑战以及未来研究方向进行了探讨.

1 电池热管理系统

电池是将化学能转化为电能的装置. 目前广泛应用的电池主要有锂离子电池、燃料电池、太阳能电池等. 除此之外, 锌离子电池^[1]、钠离子电池^[2]、钾离子电池^[3]等电池类型也受到学界的关注. 电池的使用过程伴随着热量积聚, 需要高性能 BTMS, 以及时带走热量. 作为电池研究与应用的课题之一, BTMS 近年来受到了学术界的广泛关注和研究.

BTMS 的作用包括对电池的温度与温差进行控制, 以及抑制热失控现象. 现有的 BTMS 主要包括 PCM、风冷及液冷等类型. PCM BTMS 可利用工质的相变潜热, 吸收大量热量且无额外能耗. Deng 等^[4]对一种掺杂纳米颗粒的新型聚合物 PCM BTMS 研究发现, 在放电倍率为 1.5 C(C 为锂离子电池放电速率单位, 1 C 表示该电池在 1 h 内完全放电对应的电流强度)时, 同时掺有质量分数 3.0% 的 AlN 与质量分数 2.0% 的碳纳米管(Carbon nanotubes, CNT)的 PCM 可将电池最高温度控制

在 45 ℃, 温差控制在 4.3 ℃. 但是, PCM 工作时发生熔化并最终失效, 这限制了其应用. 风冷 BTMS 零部件结构简单, 价格低廉. Na 等^[5]的研究结果显示, 以层流状态的空气为介质时, 相对单层直流通道, 多层流道使电池表面最高温度下降了 0.5 ℃, 温差下降了 0.6 ℃. 然而, 风冷 BTMS 所用的气态工质比热容及热导率较低, 传热能力有限. 液态工质比热容远高于气态工质, 且正常运行时不会失效, 因而液冷 BTMS 被广泛应用. Thakur 等^[6]的 3000 次充放电实验研究表明, 相对风冷, 水冷系统可使车用锂离子电池的容量损失减少 40%; 更低的平均表面温度、最高表面温度与温差减少了电池容量损失.

液冷 BTMS 因其良好的温度均匀性^[7]、优异的系统稳定性以及简单紧凑的结构而被广泛应用. 液态工质种类繁多, 包括水、醇基工质、电子氟化液等. 工质种类是液冷 BTMS 性能的重要影响因素. 在众多液态工质中, 均匀分散有特定纳米颗粒的纳米流体因其卓越的传热性能而备受研究者关注.

2 纳米流体的性质

纳米流体是在基础工质中均匀分散有纳米颗粒的流体^[8]. 纳米流体的组分包括基础工质(水、乙二醇、乙醇等)和纳米颗粒(Cu^[9]、SiO₂^[10]、CNT^[11]等). 纳米流体的性质对于纳米流体 BTMS 实验与应用有重大影响. 本节将从对纳米流体 BTMS 实验与应用影响显著的稳定性、黏度及热导率三个指标系统论述纳米流体的性质.

2.1 纳米流体的稳定性

稳定性是纳米颗粒在基础工质中均匀稳定悬浮能力量度. 良好的稳定性是纳米流体实验与应用的先决条件^[12], 也是纳米流体传热性能的提升因素之一^[13]. 提升纳米流体稳定性的方法主要包括超声分散^[14]、调节 pH^[15]、球磨^[16]、添加表面活性剂^[17]等. 超声波通过空化作用产生微射流, 破坏颗粒团聚; 调节 pH 改变颗粒表面电荷分布情况,

减轻颗粒团聚;球磨通过机械作用减小颗粒粒径,破坏其团聚;表面活性剂增大颗粒表面斥力,减轻颗粒团聚. 通过使用上述方法,纳米颗粒团聚得到抑制,纳米流体的稳定性得到提升,为电池热管理系统长期稳定运行打下基础.

2.2 纳米流体的黏度

黏度是液体对剪切应力或纵向应力所致变形的抵抗作用的量度. 颗粒的引入导致纳米流体具有更大的黏度,增大流动阻力,从而增加 BTMS 能耗. 影响纳米流体黏度的因素有粒径^[18]、浓度^[19]、颗粒类型^[20]等. 纳米颗粒粒径影响流体内部剪切效应强弱,导致纳米流体黏度改变. 浓度影响纳米颗粒的平均间距,改变内摩擦强弱,从而影响纳米流体的黏度. 不同类型的颗粒表面能不同,影响纳米颗粒与基础工质分子间的相对作用力,进而影响纳米流体的黏度. 纳米流体的黏度影响泵功需求,充分研究纳米流体黏度的影响因素有利于降低 BTMS 能耗.

2.3 纳米流体的热导率

热导率是物质导热能力的量度. 努塞尔数 (Nusselt number, Nu) 及等效直径相同时,增大热导率可提高传热系数,从而提升 BTMS 的性能. 颗粒类型、粒径等因素均对纳米流体热导率存在影响^[21].

不同颗粒的热导率不同,进而影响纳米流体的热导率^[22]. 颗粒粒径影响分子扩散速率,较大的粒径使微湍流效应减弱,降低流体热导率^[23]. 通过研究纳米流体热导率的变化规律,可制得热导率较高的纳米流体,进而提高纳米流体 BTMS 的性能.

3 纳米流体锂离子电池热管理应用

锂离子电池由正极、负极、电解液组成. 正极为锂基材料(如 LiCoO_2), 负极通常为碳基材料(如石墨), 电解液为锂盐的有机溶液^[24](图 1(a)). 锂离子电池充放电时, Li^+ 发生定向移动. 该反应是可逆的, 但在温度过高时, 电池内部会发生不可逆的副反应, 使可参与循环的 Li^+ 减少, 从而缩短电池寿命. Hao 等^[25] 指出, 电池最高温度每上升 $13\text{ }^\circ\text{C}$, 寿命减少 50%. 此外, 高温引发的某些副反应是放热的, 这导致电池温度进一步上升, 引发电解液的分解与电池的破裂, 这种现象被称为热失控, 它会引发锂离子电池起火与爆炸. 近年来, 锂离子电池向着高能量密度的方向发展^[26], 热失控的风险也逐渐增加^[27]. Yao 等^[28] 指出, 电池工作电压的提升及体积的减小导致电池的单元产热率增大. 锂离子电池组的工作条件多变, 因而, 锂离子电池 BTMS 需确保其在各种工况下的稳定运转, 并抑制热失

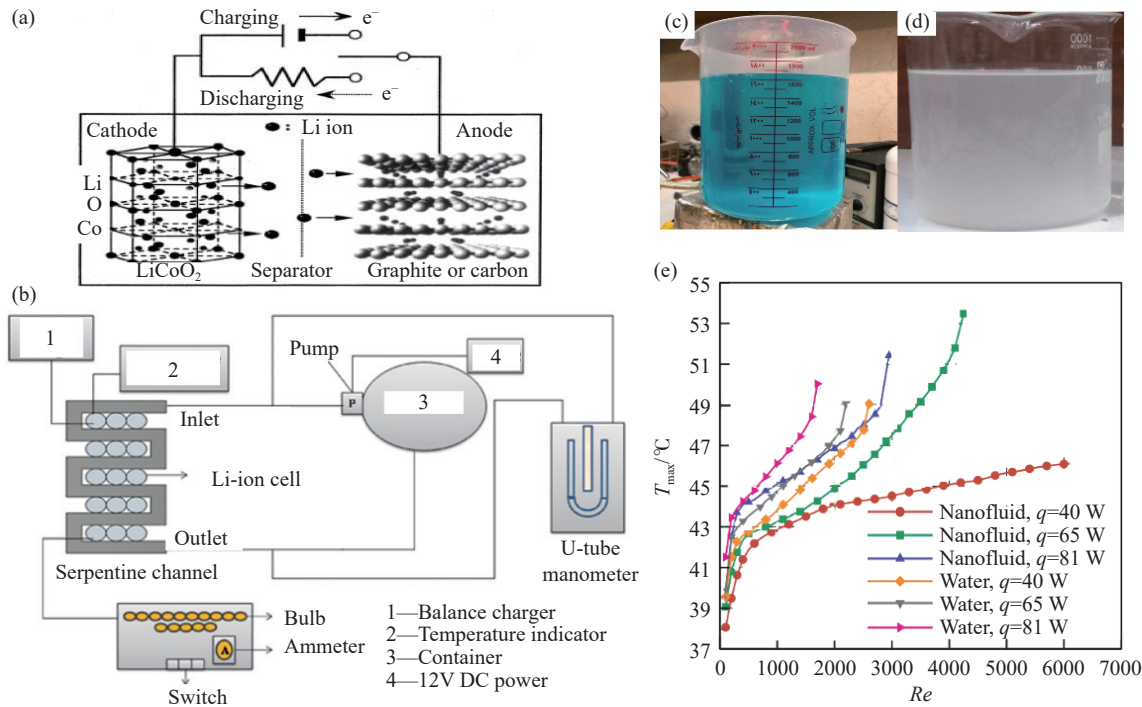


图 1 (a) 锂离子电池工作原理示意图^[24]; (b) 锂离子电池热管理实验装置结构^[30]; (c) 水基 CuO 纳米流体^[31]; (d) 水基 Al_2O_3 纳米流体^[31]; (e) 不同功率下纳米流体与纯水的温度- Re 曲线^[31]

Fig.1 (a) Principle of Li-ion batteries^[24]; (b) experimental thermal management system equipment of Li-ion batteries^[30]; (c) water-based CuO nanofluid^[31]; (d) water-based Al_2O_3 nanofluid^[31]; (e) relation between temperature and Re of water and nanofluid at different powers^[31]

控现象^[29].

由于良好的传热性能, 纳米流体在锂离子电池的热管理领域受到研究者广泛关注. 图 1(b) 所示的是一种 BTMS 实验装置^[30]. 在该装置中, 电池以固定的功率充电或放电; 液态工质(纳米流体或基础工质)由泵定量输运, 并通过流道实现对电池的热管理. 通过传感器检测电池的温度, 以衡量 BTMS 的性能. Kiani 等^[31]研究了 CuO 纳米流体(图 1(c)) BTMS、 Al_2O_3 纳米流体(图 1(d))BTMS 与 AgO 纳米流体 BTMS 的性能. 三种纳米流体 BTMS 性能均优于纯水 BTMS; 特别地, 当流动雷诺数(Reynolds number, Re)为 420 时, 体积分数 2.0% 的水基 AgO 纳米流体 BTMS 使电池表面最高温度相对使用纯水 BTMS 的电池降低了 $4.1\text{ }^\circ\text{C}$, 温差降低了 77% (图 1(e)). AgO 的热导率远高于水, AgO 纳米颗粒可显著强化水基工质的传热性能. Mitra 等^[30]的实验研究显示, 体积分数为 0.45% 的 CNT 水基纳米流体作为工质, 流速为 $1.5\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, 电池放电倍率为 2.1 C 时, 相对纯水 BTMS, 纳米流体 BTMS 使电池表面平均温度降低 $11\text{ }^\circ\text{C}$, 温差降低 $3\text{ }^\circ\text{C}$. CNT 具有高热导率, 能显著提高工质的传热性能; 相同 Re 下纳米流体的线速度大于纯水, 热边界层厚度减小, 且纳米颗粒的布朗运动可加强对流传热, 从

而提升 BTMS 性能. Ouyang 等^[32]的数值模拟研究显示, 当电池发热功率为 100 W , 持续发热时间为 700 s 时, 若无 BTMS, 则电池组发生热失控现象, 其最高温度在随后 5 s 内急剧上升至 $740\text{ }^\circ\text{C}$; 若使用体积分数 3% 的水基 Al_2O_3 BTMS, 则电池组最高温度仅为 $55\text{ }^\circ\text{C}$, 未发生热失控现象. 纳米颗粒的引入, 提升了液态工质的热导率; 纳米颗粒的布朗运动加快对流传热. 通过将纳米流体用于锂离子电池 BTMS, 电池组的最高温度、平均温度及温差显著降低, 热失控现象得到抑制, 保证电池组的寿命与安全.

液态工质流道结构优化设计是纳米流体 BTMS 的重点研究方向之一. 优化设计的流道可通过形成局部湍流, 增大传热面积等方式, 增强纳米流体 BTMS 传热性能. Sarchami 等^[33]的研究显示, 以体积分数 2.0% 的水基 Al_2O_3 纳米流体为工质时, 阶梯状通道(图 2(a)和 2(b))可使电池组在充放电工况下的温差分别减少 $0.19\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $0.22\text{ }^\circ\text{C}$. 流体在阶梯边缘形成尾流, 尾流间相互作用导致局部湍流, 增强对流传热. Srinivaas 等^[34]使用变截面锥形流道代替传统的等截面流道(图 2(c)和 2(d)). 当液态工质流速为 $0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 使用等截面通道 BTMS 的电池最大温升为 $29.2\text{ }^\circ\text{C}$, 使用锥度 0.5° 的渐缩通

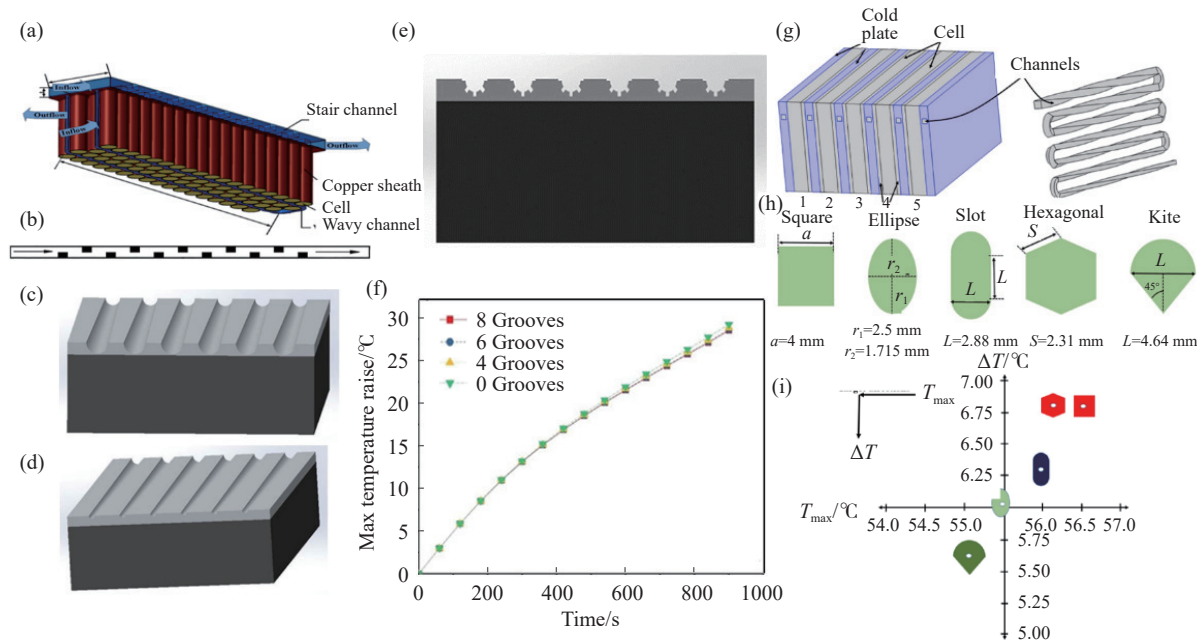


图 2 (a) 具有不同流道形状的纳米流体电池液冷结构示意图^[33]; (b) 阶梯型流道平面图^[33]; (c) 渐缩型流道^[34]; (d) 渐扩型流道^[34]; (e) 有沟槽的流道^[34]; (f) 不同沟槽数目下的温升-时间曲线^[34]; (g) 不同截面形状的流道结构图^[35]; (h) 不同流道截面形状^[35]; (i) 流道截面形状与最大温度及温差的关系^[35]

Fig.2 (a) Nanofluid liquid cooling of Li-ion batteries with differently shaped channels^[33]; (b) sketch of a stair channel^[33]; (c) sketch of a tapered channel^[34]; (d) sketch of a divergent channel^[34]; (e) sketch of a channel with grooves^[34]; (f) relation between temperature rise and time under channels with different numbers of grooves^[34]; (g) structure of channels with different section shapes^[35]; (h) different section shapes^[35]; (i) relation between the maximum temperature and temperature nonuniformity and the sectional shape of the channel^[35]

道 BTMS 的电池最大温升为 28.8 °C, 使用锥度 0.5° 的渐扩通道 BTMS 的电池最大温升则高达 30.0 °C; 三种情形下的电池温差分别为 9.60、9.94 和 9.50 °C. 在渐缩通道内, 流体流速逐渐增大, 提升了对流传热系数. 同时, 流体与壁面接触面积缩小, 导致了温差的增大; 在渐扩通道内, 流速减小导致了传热系数减小, 温升增大, 但接触面积增大使温差减小. 因而, 渐缩通道更有利于控制温升, 渐扩通道更有利于控制温差. Srinivaas 等^[34] 还使用了一种在圆周上均匀分布有沟槽的通道(图 2(e)), 并研究了沟槽数目与传热性能的关系. 在相同流体类型及流速下, 以均匀分布 8 条沟槽的等截面通道替代常规圆截面通道, 可使电池温升降低 0.7 °C(图 2(f)); 沟槽的引入增大通道表面积, 在相同传热系数下提升了传热量. Faizan 等^[35] 研究了截面形状对纳米流体 BTMS 的性能影响(图 2(g) 和 2(h)). 当 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合纳米流体体积分数为 1.0%, 流速为 $0.005 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 采用风筝形截面通道时, 电池表面最高温度为 54.90 °C(图 2(i)); 采用正方形截面通道时, 电池表面最高温度高达 56.39 °C. 在等效直径与质量流速均相同时, 方截面具有最大的截面面积, 故线速度最小, 这导致纳米颗粒的扰动作用减弱, 从而降低传热性能. 此外, 变截面管道的流道收敛效应可使得流体流动的局部速度增加, 风筝形截面流道该效应较为明显. 经过优化设计的通道结构可带来传热面积增大、局部湍流等效应, 提升 BTMS 的性能.

为更充分发挥纳米流体的优势, 将纳米流体与 PCM、热管等技术相结合也是纳米流体 BTMS 的重点研究方向之一. PCM 无额外能耗, 同时其潜热使其在临界状态下能良好地控制电池温度. PCM 的主要不足是其在熔化后失效. 通过将纳米流体液冷与 PCM 联合应用, PCM 吸收的能量可被纳米流体及时带走, 延缓甚至避免 PCM 的失效. Mashayekni 等^[36] 的研究指出, 当电池发热功率为 3.7 W 时, 相对液态工质 Re 为 340 的纯水/PCM BTMS, 使用 PCM 与体积分数 2% 的水基 Al_2O_3 纳米流体的复合 BTMS 可使电池温升降低 2.2 °C; 当电池放电倍率为 4 C 时, 纳米流体的引入可使电池温升降低 9.3 °C. 当发热功率为 3.7 W 时, 若液态工质使用纯水, 石蜡彻底熔化的时间是 2210 s; 使用体积分数 2% 的纳米流体, 熔化时间延长至 3315 s. Kiani 等^[37] 研究了液冷/PCM 复合 BTMS(图 3(a) 和 3(b)). 当环境温度为 25 °C, 发热功率为 41 W, 液态工质 Re 为 420 时, 若使用纯水工质, PCM 在 3700 s 后完全熔化; 使用体积分数 1% 的水基 Al_2O_3 纳米

流体(图 3(c))时, PCM 的熔化时间为 3900 s; 将纳米流体的体积分数增至 2%, 熔化时间进一步延长到 4600 s; 纳米流体更强的传热性能使液态工质能更迅速地带走热量, 延缓 PCM 开始熔化的时间, 并减缓 PCM 熔化速率, 从而延长 PCM 的有效工作时间. 热管能充分利用内部工质的相变潜热, 具有优异的传热性能. 将纳米流体用于热管, 工质内存在的纳米颗粒可在沸腾时提供额外的汽化核心, 从而加快内部循环速率, 提升热管的传热性能. Chen 等^[38] 使用体积分数 2.0% 的水基 TiO_2 纳米流体作热管工质(图 3(d)). 当环境温度为 25 °C, 放电倍率为 1 C 时, 使用纳米流体热管冷却的电池最高温度为 35.86 °C, 使用纯水热管冷却与无热管冷却的电池最高温度分别高达 38.78 °C 和 40.31 °C(图 3(e)); 三种工况下的电池温差分别为 1.15、2.03 和 4.67 °C. 在无热管冷却的工况下, 电池的冷却仅靠电池表面与空气的自然对流实现, 而热管能快速将热从蒸发段传递到冷凝段. TiO_2 纳米颗粒悬浮在工质当中, 与液相的相对运动促进了工质振荡与循环, 从而降低了两相流的热阻. 此外, 纳米颗粒的存在为沸腾提供了额外的汽化核心, 这使得气泡数量增大而体积减小, 从而显著增强了沸腾传热, 有效降低电池表面温度. Zhou 等^[39] 以体积分数 50% 乙醇水溶液为基础工质, 制备 CNT 纳米流体用作弯曲毛细管热管工质, 并将该热管用于锂离子电池 BTMS. 当热管充液量为 35%, 纳米流体质量分数为 0.2%, 环境温度为 25 °C, 电池发热功率为 56 W 时, 电池的最高温度为 43.1 °C, 较使用基础工质热管的情形降低了 9.8 °C. 除加快工质的振荡与循环外, CNT 纳米流体还加快热管启动. 使用基础工质的热管启动功率为 24 W, 而纳米流体热管启动功率仅为 16 W, 同时启动温度降低, 启动时间缩短, 使热管可在更低的温度下更快响应电池的温度变化, 从而及时带走热量. Nasir 等^[40] 将填充水基 Al_2O_3 纳米流体的热管用于电池热管理. 当发热功率为 30 W, 热管工质为体积分数 1.5% 纳米流体时, 电池最高温度为 56.54 °C; 使用纯水热管时, 电池最高温度达 60.98 °C. 纳米颗粒能增强沸腾传热, 加快热管工质的循环, 使纳米流体热管的热阻较纯水热管减小 15%, 从而使电池温度下降. 综上所述, 将纳米流体应用于锂离子电池 BTMS, 可有效提升其性能, 保障了锂离子电池的寿命与可靠性.

4 纳米流体燃料电池热管理应用

燃料电池是一种利用燃料与氧化剂之间化学

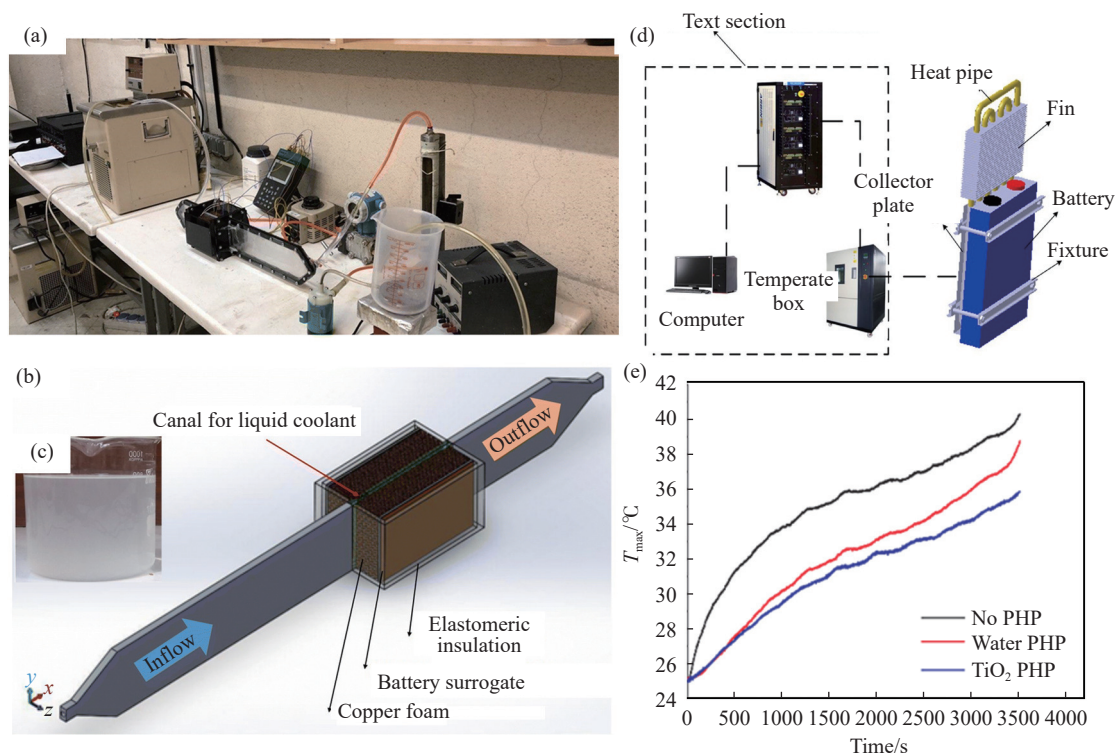


图3 (a) 液冷/PCM 复合 BTMS 实验装置图^[37]; (b) 液冷/PCM 复合 BTMS 实验原理图^[37]; (c) 水基 Al_2O_3 纳米流体^[37]; (d) 纳米流体/热管复合 BTMS 原理图^[38]; (e) 不同冷却方式下的电池温度-时间曲线^[38]

Fig.3 (a) Liquid/PCM hybrid BTMS equipment^[37]; (b) principle of the liquid/PCM hybrid BTMS^[37]; (c) water-based Al_2O_3 nanofluid^[37]; (d) principle of the nanofluid/heat pipe hybrid BTMS^[38]; (e) maximum temperature-time curves under different pipe conditions^[38]

反应产生电能的装置. 根据内部工质种类, 可将燃料电池分为固体碳酸盐燃料电池、固体氧化物燃料电池、质子交换膜燃料电池等. 以质子交换膜燃料电池为例, 该电池工作时将 H_2 (燃料) 和 O_2 (氧化剂) 分别供给阳极与阴极, 最终产物为水^[41]. H_2 中的化学能部分转化为电能, 化学能转化为电能的比例即燃料电池的发电效率. 除电能外, 燃料中的部分化学能在燃料电池工作期间转化为热能, 这些热能大部分靠 BTMS 带走. 因此, 燃料电池安全高效运转依赖于高效的 BTMS^[42].

在众多类型的 BTMS 中, 纳米流体因其优异的传热性能受到研究者青睐. Zakaria 等^[43] 将 SiO_2 与 TiO_2 纳米颗粒分散到体积分数 40% 的乙二醇水溶液, 得到体积分数 1.0% 的复合纳米流体. 将纳米流体用于燃料电池热管理实验 (实验装置如图 4(a) 示), 流速 $0.22 \sim 0.52 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 纳米流体 BTMS 的传热系数较基础工质燃料电池平均提高了 100%; 传热性能的改善使电池组的发电效率提升了 20% ~ 50%. 在复合纳米流体中, 体积相对较小的 SiO_2 颗粒填充于 TiO_2 颗粒的间隙, 减小了热阻. 同时, 纳米颗粒的布朗运动能显著增加 Nu . 随着 Re 的增加, 上述效应变得更为显著. 当 Re 从 300 增

至 700, 基础工质的热阻仅降低 40%, 纳米流体的热阻则降低了 65%; 基础工质 Nu 仅增大 2.2 倍, 纳米流体的 Nu 则增大 5 倍. Islam 等^[44] 的研究表明, 体积分数 0.05% 的 Al_2O_3 水基纳米流体, 可将散热器所需面积减小 21%, 这是由于纳米颗粒提升工质热导率, 同时颗粒布朗运动提升了 Nu , 强化了对流传热. Islam 等^[45] 的另一项研究显示, Al_2O_3 纳米流体 (图 4(c)) 与 ZnO 纳米流体均可提升 BTMS 的性能, 但 ZnO 纳米流体稳定性更佳. 掺杂体积分数 0.5% 的 ZnO 纳米颗粒的乙二醇 50% 水溶液 (图 4(d)) 用于燃料电池热管理, 可将散热器所需面积减小 27%, 使用纳米流体液冷的电池输出功率略有提升 (图 4(b)). 纳米颗粒可增大流体热导率, 且纳米颗粒具有扰动作用, 导致散热器传热系数增大了 33%, 相同传热量所需传热面积减小. Khodabandeh 等^[46] 对油基 CNT 纳米流体用于固体氧化物燃料电池 BTMS 的数值模拟研究结构显示, 体积分数为 6%, 质量流速为 $0.004 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 的纳米流体可使电池最大温升降低 6.35%; CNT 的热导率远高于机械油, 其引入提高了工质热导率. 使工质在非常低的流速下也能迅速带走电池运转产生的热, 有效控制电池温升. 纳米流体强化传热效果显著, 将其用于燃

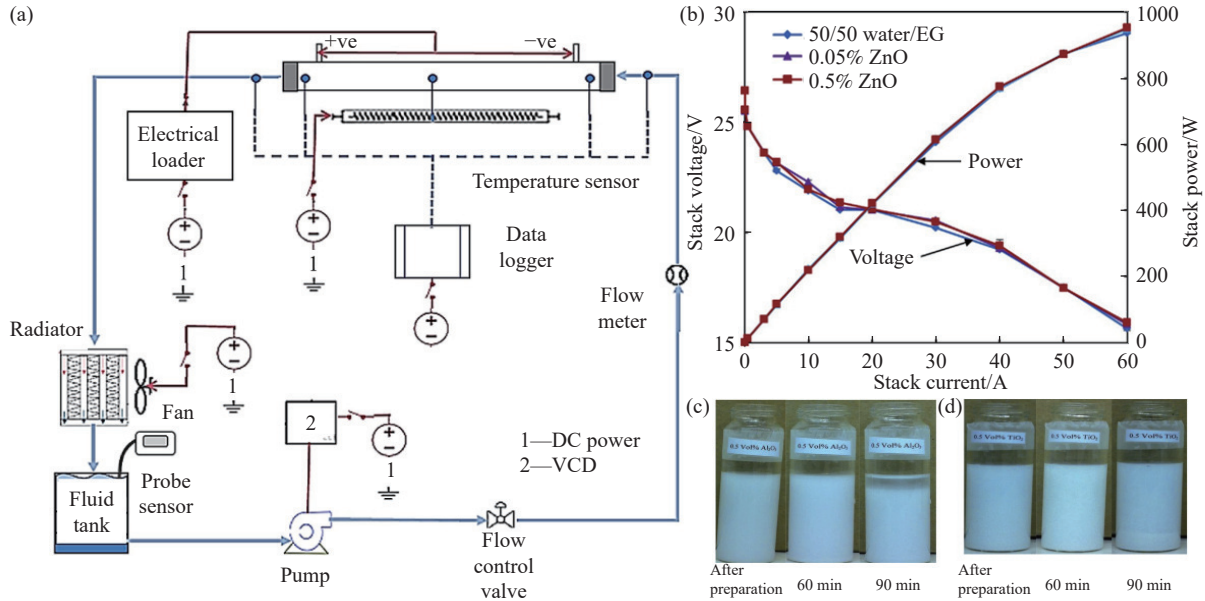


图 4 (a) 纳米流体燃料电池热管理实验装置^[43]; (b) 不同工质液冷下燃料电池的功率-电流曲线及电压-电流曲线^[45]; (c) 水基 Al_2O_3 纳米流体静置沉降结果^[45]; (d) 水基 ZnO 纳米流体静置沉降结果^[45]

Fig.4 (a) Fuel cell thermal management equipment based on nanofluid^[43]; (b) voltage-current and power-current graphs of a fuel cell with a liquid cooling system composed of different working fluids^[45]; (c) settlement of water-based Al_2O_3 nanofluid^[45]; (d) settlement of water-based ZnO nanofluid^[45]

料电池 BTMS 能有效控制电池温升, 提升电池的发电效率及安全性.

纳米流体具有优异的传热性能, 但其高黏度会带来额外的泵功需求. Zeiny 等^[47] 对水基 Al_2O_3 纳米流体 BTMS 研究发现, 体积分数 0.2% 的纳米流体 BTMS 使电池组发电效率下降 7.9%; 纳米流体的黏度带来了 6% 的额外泵功需求, 这增加电池组内部的能量耗散, 导致发电效率下降. Zakaria 等^[48] 对基于水基 SiO_2 纳米流体的燃料电池热管理实验研究表明, 当纳米流体 Re 为 750 ~ 900, 体积分数为 0.1% ~ 0.5% 时, 电池温升较使用纯水 BTMS 的电池组低 15% ~ 20%, 相应提升发电效率. 具体地, 在 Re 为 750 时, 使用体积分数 0.3% 的纳米流体 BTMS 的电池组发电效率最高; 当 Re 为 900 时, 最佳体积分数为 0.1%. 随着纳米流体浓度的进一步增加, 高黏度与较强的内摩擦带来额外泵功需求, 使得系统效率不再进一步提升. 通过将纳米流体用于燃料电池 BTMS, 可延长电池组寿命, 提高发电效率, 有利于设备的紧凑化设计及应用领域的拓展.

5 纳米流体太阳能电池热管理应用

太阳能电池是一种将光能转换为电能的装置. 根据能量转换过程, 太阳能电池可分为光电效应 (Photovoltaic, PV) 电池与光化学电池^[49]. 转换效率, 即电池面板将光能转换为电能的比值, 是评价

太阳能电池面板性能的重要指标. 当前, 太阳能电池面板平均转换效率约为 15% ~ 20%^[50], 电池面板接收到的太阳能大部分转化为热量, 导致其温度升高, 降低转换效率. 在正常工作温度的基础上, 电池面板平均温度每升高 1 °C, 其转换效率下降 0.4% ~ 0.65%^[51]. 因此, 高性能的 BTMS 对提升太阳能电池性能至关重要. 由于优异的传热性能, 研究者开始将纳米流体用于太阳能电池 BTMS. Ibrahim 和 Saeed^[52] 的研究表明, 相对纯水 BTMS, 体积分数 2.0% 的 Al_2O_3 纳米流体 BTMS 使电池转换效率提高 7%. 当 $Re=150$ 时, 纳米流体的传热系数比纯水高 83%, 从而更及时带走热量, 使电池面板平均温度降低了 4.92 °C; Ibrahim 和 Saeed^[52] 还发现, 同浓度的水基 CuO 纳米流体 BTMS 使太阳能电池组的系统效率 (太阳能电池组对外输出电能与面板接收光能之比) 有所下降. 体积分数 2.0% 的水基 CuO 纳米流体 BTMS 仅使电池面板平均温度降低 4.0 °C, 对转换效率的提升有限, 且 CuO 纳米流体较高的黏度增大了泵功, 增加系统内部能量耗散, 从而未能提升系统效率. Alktranee 等^[53] 研究了水基 ZrO_2 纳米流体用于光伏/光热联合系统的光伏部分热管理 (图 5(a)). 当一个自然日的环境温度最大值为 42.7 °C, 太阳光辐射最大强度为 $1004 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, 体积分数 0.0275% 的水基 ZrO_2 纳米流体 BTMS (图 5(b) 和 5(c)) 使电池面板平均温度较实验纯水 BTMS 的工况降低 5.1 °C, 较无液冷 BTMS 的工况低 10.2 °C;

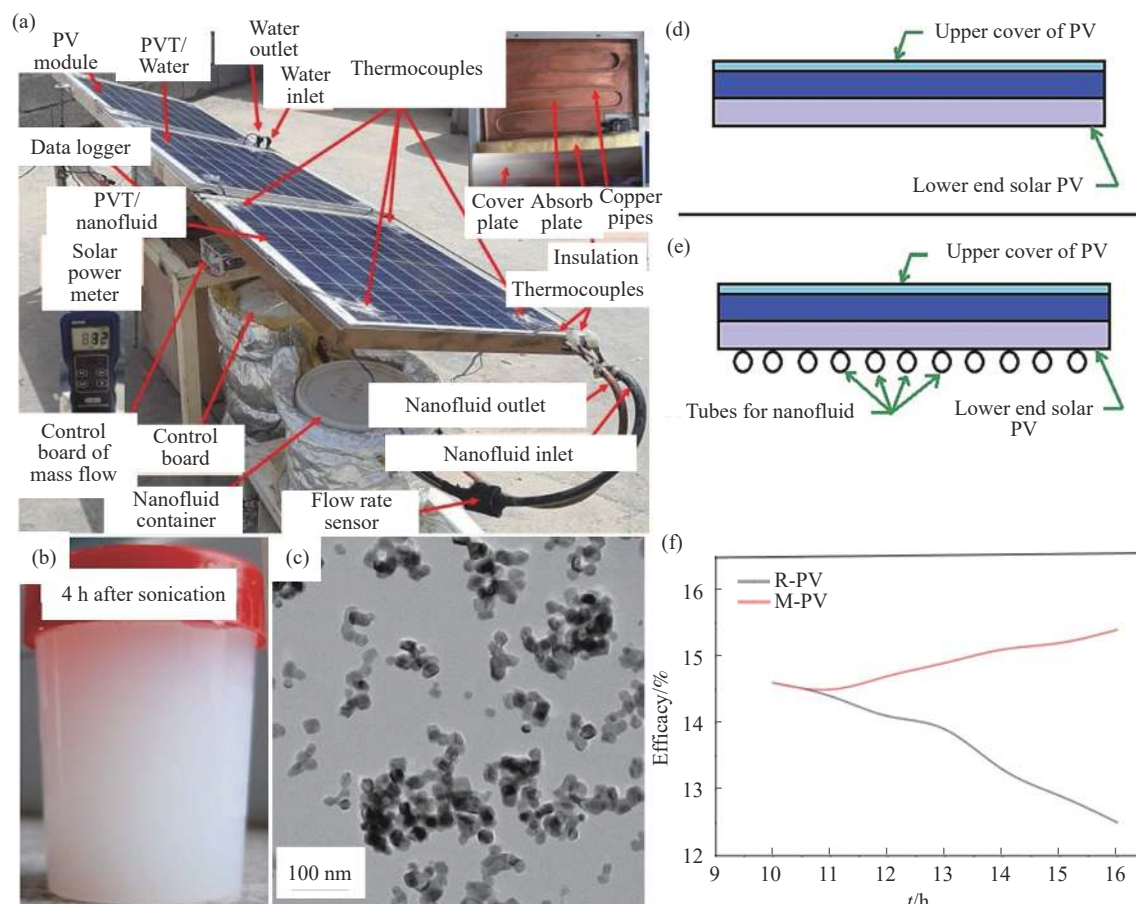


图5 (a) 纳米流体太阳能电池热管理实验装置^[53]; (b) 水基 ZrO_2 纳米流体^[53]; (c) 水基 ZrO_2 纳米流体 TEM 表征^[53]; (d) 无纳米流体热管理系统的太阳能电池板^[54]; (e) 有纳米流体热管理系统的太阳能电池板^[54]; (f) 有纳米流体热管理装置与无纳米流体热管理装置的电池板的效率-时间关系图^[54]

Fig.5 (a) Thermal management equipment for a nanofluid-based PV cell^[53]; (b) water-based ZrO_2 nanofluid^[53]; (c) TEM of the water-based ZrO_2 nanofluid^[53]; (d) solar panel without nanofluid thermal management equipment^[54]; (e) solar panel with nanofluid thermal management equipment^[54]; (f) efficacy-time graph of PV cells with/without a nanofluid-based thermal management system^[54]

电池面板温度的降低使转换效率较无液冷 BTMS 的工况提高 11.4%; 作为对照, 纯水 BTMS 的电池转换效率仅提升 7.4%。此外, 纳米流体 BTMS 使电池组系统效率提升了 24.4%。 ZrO_2 颗粒显著增加工质热导率, 增强了对流传热, 从而有效降低面板温度, 提高转换效率, 同时并未显著增大泵功需求, 故系统效率得到提升。Babavali 等^[54] 的研究表明, 相较无液冷 BTMS 的电池组(图 5(d)), 体积分数 0.3% 的水基 MgO 纳米流体 BTMS(图 5(e))使太阳能电池转换效率提升了 16.9%, 太阳能系统效率提升了 23.2%; 无液冷 BTMS 的电池面板最高温度高达 64 °C, 使用纳米流体 BTMS 的电池面板最高温度仅 43 °C。纳米 MgO 颗粒的引入可提升工质传热性能, 并辅助吸收部分具有显著热效应的红外线, 降低面板温度。从而大幅提升电池组的系统效率(图 5(f))。Emara 等^[55] 将质量分数 0.4% 的水基 Al_2O_3 纳米流体与 PCM 联合用于光伏电池的热管理。液

态工质流速为 $1.6 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 相较于纯水/PCM 复合 BTMS 的电池, 纳米流体/PCM 复合 BTMS 使电池面板最高温度降低了 12.11 °C, 平均温度降低了 8.39 °C; 电池组的系统效率提升了 25.33%。通过引入纳米颗粒, 纳米流体的热导率得到提升, 同时纳米颗粒的扰动作用加强对流传热, 从而降低了电池面板的温度, 提升太阳能电池的转换效率与系统效率。

6 结论

纳米流体 BTMS 因其优异的传热性能, 广泛的适用范围以及与其他热管理技术良好的兼容性, 受到研究者青睐。本文系统综述了纳米流体 BTMS 研究进展, 对该技术在锂离子电池、燃料电池、太阳能电池的应用进行了论述, 着重讨论了不同类型的电池的工作原理及纳米流体 BTMS 发挥的作用。尽管取得显著进展, 但目前该领域仍有一

些问题亟需解决. 下面提出几个该领域存在的挑战及未来的研究方向:

(1) 建立更为精确的模拟分析模型. 现有模拟分析研究所用两相流模型, 多是纳米颗粒与基础流体物性参数的简单叠加. 但是, 纳米流体的颗粒沉降行为需纳入考虑. 此外, 纳米流体 BTMS 工作过程伴随温度与压力的改变. 在建立模型时, 需充分考虑这些因素的影响, 以对纳米流体 BTMS 传热性能进行更精准的模拟.

(2) 探索纳米流体与其他热管理技术的协同作用. 对于包含纳米流体的复合 BTMS, 现有的实验研究已比较充分, 但针对这类系统的理论研究及模拟分析仍然较少. 包含纳米流体的复合 BTMS 工作过程涉及到 PCM 或热管内工质的物相改变, 温度与压力的改变等过程, 通过充分评估这些过程对 BTMS 的影响, 可更准确地预测包含纳米流体的复合 BTMS 性能.

(3) 开展变工况实验研究. 现有的纳米流体 BTMS 实验研究多假定电池以固定倍率放电, 产热功率不变, 但在实际应用中, 电池的放电倍率是可变的, 发热功率也会受放电倍率、环境条件及放电深度的影响而发生改变. 因而, 进行变工况实验研究, 可更全面评估纳米流体 BTMS 的性能.

(4) 丰富纳米流体 BTMS 的工质类型. 水基纳米流体 BTMS 因其可靠的性能和良好的经济性而被广泛应用, 但一些基于非水工质的纳米流体仍被用于某些有特殊要求的 BTMS, 例如基于醇类工质的纳米流体常被用于低温场合, 基于电子氟化液的纳米流体被用于有绝缘要求的场合. 针对上述基于非水工质的纳米流体 BTMS, 现有研究相对较少. 丰富 BTMS 的工质类型, 有助于拓展纳米流体 BTMS 应用空间.

参 考 文 献

- [1] Huang Q F, Pan R M, Peng H D, et al. Application of vanadium phosphate in aqueous zinc-ion batteries. *Chin J Eng*, 2023, 45(7): 1175
(黄巧锋, 潘瑞梅, 彭瀚东, 等. 磷酸钒盐在水系锌离子电池中的应用. *工程科学学报*, 2023, 45(7): 1175)
- [2] Zhang Y, Bai J, Zhao H L. Preparation of nanosized red phosphorus and its application in sodium-ion batteries. *Chin J Eng*, 2022, 44(4): 590
(张宇, 白金, 赵海雷. 红磷的纳米化及其在钠离子电池中的应用. *工程科学学报*, 2022, 44(4): 590)
- [3] Liao S Q, Dong G S, Zhao Y Y, et al. Research progress and prospect of potassium-ion batteries. *Chin J Eng*, 2023, 45(7): 1131
(廖树青, 董广生, 赵赢营, 等. 钾离子电池的研究进展及展望. *工程科学学报*, 2023, 45(7): 1131)
- [4] Deng J, Li X X, Li C B, et al. Multifunctional flexible composite phase change material with high anti-leakage and thermal conductivity performances for battery thermal management. *J Energy Storage*, 2023, 72: 108313
- [5] Na X Y, Kang H F, Wang T, et al. Reverse layered air flow for Li-ion battery thermal management. *Appl Thermal Eng*, 2018, 143: 257
- [6] Thakur A K, Prabakaran R, Elkadeem M R, et al. A state of art review and future viewpoint on advance cooling techniques for lithium-ion battery system of electric vehicles. *J Energy Storage*, 2020, 32: 101771
- [7] Yao F D, Guan X, Xu Y, et al. Research progress on thermal management system of lithium-ion battery of electric vehicles. *Low Temp Phys Lett*, 2022, 44(4): 310
(姚发达, 关欣, 徐阳, 等. 电动汽车锂离子电池热管理系统研究进展. *低温物理学报*, 2022, 44(4): 310)
- [8] S U S Choi, J A Eastman. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *ASME FED*, 1995: 99
- [9] Zhang F L, Si H N, Wang L, et al. Synthesis of Cu-water thermal conduction nanofluids using sodium citrate as dispersant by one step method. *J Funct Mater*, 2014, 45(23): 23138
(张飞龙, 佘慧娜, 王莉, 等. 以柠檬酸钠为分散剂一步法合成 Cu-水导热纳米流体. *功能材料*, 2014, 45(23): 23138)
- [10] Chen Z Z, Chen H Q, Huang L, et al. Research progress on silica nanofluids for convective heat transfer enhancement. *Chin J Eng*, 2022, 44(4): 812
(陈真真, 陈洪强, 黄磊, 等. 二氧化硅纳米流体强化对流换热研究进展. *工程科学学报*, 2022, 44(4): 812)
- [11] Sharifpur M, Ahmadi M H, Rungamornrat J, et al. Thermal management of solar photovoltaic cell by using single walled carbon nanotube (SWCNT) /water: Numerical simulation and sensitivity analysis. *Sustainability*, 2022, 14: 11523
- [12] Babar H, Ali H M. Towards hybrid nanofluids: Preparation, thermophysical properties, applications, and challenges. *J Mol Liq*, 2019, 281: 598
- [13] Wu J J, Ma L, Hou J S, et al. Research progress on hybrid nanofluids for heat transfer process intensification. *Chin J Eng*, 2024, 46(5): 937
(吴俊杰, 马丽, 侯峻升, 等. 复合纳米流体强化换热研究进展. *工程科学学报*, 2024, 46(5): 937)
- [14] Chen Z Z, Chen H Q, Huang L, et al. Research progress on the intensification of heat transfer by ultrasound. *Chin J Eng*, 2022, 44(12): 2164
(陈真真, 陈洪强, 黄磊, 等. 超声波强化换热研究进展. *工程科学学报*, 2022, 44(12): 2164)
- [15] Liu Y L, She Y H. Study on dispersion stability mechanism and influencing factors of nanoparticles. *New Chem Mater*, 2022, 50(Suppl 1): 298

- (刘宇龙, 余跃惠. 纳米粒子的分散稳定机制及影响因素研究. 化工新型材料, 2022, 50(增刊 1): 298)
- [16] Munkhbayar B, Tanshen M R, Jeoun J, et al. Surfactant-free dispersion of silver nanoparticles into MWCNT-aqueous nanofluids prepared by one-step technique and their thermal characteristics. *Ceram Int*, 2013, 39(6): 6415
- [17] Cacua K, Ordoñez F, Zapata C, et al. Surfactant concentration and pH effects on the zeta potential values of alumina nanofluids to inspect stability. *Colloids Surf A*, 2019, 583: 123960
- [18] Yalçın G, Öztuna S, Dalkılıç A S, et al. The influence of particle size on the viscosity of water based ZnO nanofluid. *Alex Eng J*, 2023, 68: 561
- [19] Samaneh S S, Amin H D, Mahmoud M M. Viscosity of Fe₂O₃-water nanofluids by molecular dynamics simulations: Effects of nanoparticle content, temperature and size. *J Mol Liq*, 2023, 382: 121859
- [20] Moldoveanu G M, Minea A A, Iacob M, et al. Experimental study on viscosity of stabilized Al₂O₃, TiO₂ nanofluids and their hybrid. *Thermochim Acta*, 2018, 659: 203
- [21] Tawfik M. Experimental studies of nanofluid thermal conductivity enhancement and applications: A review. *Renew Sust Energy Rev*, 2017, 75: 1239
- [22] Zadkhast M, Toghraie D, Karimipour A. Developing a new correlation to estimate the thermal conductivity of MWCNT-CuO/water hybrid nanofluid via an experimental investigation. *J Therm Anal Calorim*, 2017, 129(2): 859
- [23] Chopkar M, Das P K, Manna I. Synthesis and characterization of nanofluid for advanced heat transfer applications. *Scr Mater*, 2006, 55(6): 549
- [24] Can A, Selimefendigil F, Öztup H F. A review on soft computing and nanofluid applications for battery thermal management. *J Energy Storage*, 2022, 53: 105214
- [25] Hao M L, Li J, Park S, et al. Efficient thermal management of Li-ion batteries with a passive interfacial thermal regulator based on a shape memory alloy. *Nat Energy*, 2018, 3: 899
- [26] Chen G X, Sun X Z, Zhang X, et al. Progress of high-power lithium-ion batteries. *Chin J Eng*, 2022, 44(4): 612
(陈港欣, 孙现众, 张熊, 等. 高功率锂离子电池研究进展. 工程科学学报, 2022, 44(4): 612)
- [27] Wang H B, Li Y, Wang Q Z, et al. Experimental study on the thermal runaway and its propagation of a lithium-ion traction battery with NCM cathode under thermal abuse. *Chin J Eng*, 2021, 43(5): 663
(王淮斌, 李阳, 王钦正, 等. 三元锂离子电池热失控及蔓延特性实验研究. 工程科学学报, 2021, 43(5): 663)
- [28] Yao M L, Gan Y H, Liang J L, et al. Research progress in integrated thermal management of electric vehicles. *Chin J Eng*, 2020, 42(4): 412
(姚孟良, 甘云华, 梁嘉林, 等. 电动汽车集成热管理研究进展. 工程科学学报, 2020, 42(4): 412)
- [29] Chavan S, Venkateswarlu B, Prabakaran R, et al. Thermal runaway and mitigation strategies for electric vehicle lithium-ion batteries using battery cooling approach: A review of the current status and challenges. *J Energy Storage*, 2023, 72: 108569
- [30] Mitra A, Kumar R, Singh D K. Thermal management of lithium-ion batteries using carbon-based nanofluid flowing through different flow channel configurations. *J Power Sources*, 2023, 555: 232351
- [31] Kiani M, Omiddezyani S, Houshfar E, et al. Lithium-ion battery thermal management system with Al₂O₃/AgO/CuO nanofluids and phase change material. *Appl Therm Eng*, 2020, 180: 115840
- [32] Ouyang T C, Liu B L, Wang C C, et al. Novel hybrid thermal management system for preventing Li-ion battery thermal runaway using nanofluids cooling. *Int J Heat Mass Transf*, 2023, 201: 123652
- [33] Sarchami A, Tousi M, Kiani M, et al. A novel nanofluid cooling system for modular lithium-ion battery thermal management based on wavy/stair channels. *Int J Therm Sci*, 2022, 182: 107823
- [34] Srinivaas S, Li W, Garg A, et al. Battery thermal management system design: Role of influence of nanofluids, flow directions, and channels. *J Electrochem Energy*, 2020, 17(2): 021110
- [35] Faizan M, Pati S, Randive P. Effect of channel configurations on the thermal management of fast discharging Li-ion battery module with hybrid cooling. *Energy*, 2023, 267: 126358
- [36] Mashayekhi M, Houshfar E, Ashjaee M. Development of hybrid cooling method with PCM and Al₂O₃ nanofluid in aluminium minichannels using heat source model of Li-ion batteries. *Appl Therm Eng*, 2020, 178: 115543
- [37] Kiani M, Ansari M, Arshadi A A, et al. Hybrid thermal management of lithium-ion batteries using nanofluid, metal foam, and phase change material: An integrated numerical-experimental approach. *J Therm Anal Calorim*, 2020, 141(5): 1703
- [38] Chen M, Li J J. Nanofluid-based pulsating heat pipe for thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. *J Energy Storage*, 2020, 32: 101715
- [39] Zhou Z C, Lv Y J, Qu J, et al. Performance evaluation of hybrid oscillating heat pipe with carbon nanotube nanofluids for electric vehicle battery cooling. *Appl Therm Eng*, 2021, 196: 117300
- [40] Nasir F M, Abdullah M Z, Majid M A, et al. Nanofluid-filled heat pipes in managing the temperature of EV lithium-ion batteries. *J Phys: Conf Ser*, 2019, 1349(1): 012123
- [41] Rosli R E, Sulong A B, Daud W R W, et al. A review of high-temperature proton exchange membrane fuel cell (HT-PEMFC) system. *Int J Hydrogen Energy*, 2017, 42(14): 9293
- [42] Xu J, Zhang C, Wan Z, et al. Progress and perspectives of integrated thermal management systems in PEM fuel cell vehicles: A review. *Renew Sust Energy Rev*, 2022, 155: 111908
- [43] Zakaria I A, Mohamed W A N W, Azid N H A, et al. Heat transfer and electrical discharge of hybrid nanofluid coolants in a fuel cell cooling channel application. *Appl Therm Eng*, 2022, 210: 118369
- [44] Islam M R, Shabani B, Rosengarten G. Nanofluids to improve the performance of PEM fuel cell cooling systems: A theoretical

- approach. *Appl Energy*, 2016, 178: 660
- [45] Islam R, Shabani B, Andrews J, et al. Experimental investigation of using ZnO nanofluids as coolants in a PEM fuel cell. *Int J Hydrogen Energy*, 2017, 42(30): 19272
- [46] Khodabandeh E, Ali Akbari O, Akbari S, et al. The effects of oil/MWCNT nanofluids and geometries on the solid oxide fuel cell cooling systems: A CFD study. *J Therm Anal Calorim*, 2021, 144(1): 245
- [47] Zeiny A, Al-Baghdadi M A R, Arear W F, et al. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanofluids for cooling PEM fuel cells: A critical assessment. *Int J Hydrogen Energy*, 2022, 47(91): 38823
- [48] Zakaria I, Mohamed W, Zailan M, et al. Experimental analysis of SiO_2 -distilled water nanofluids in a polymer electrolyte membrane fuel cell parallel channel cooling plate. *Int J Hydrogen Energy*, 2019, 44(47): 25850
- [49] Cao S W, Zhou G Q, Cai Q L, et al. A review of solar cells: Materials, policy-driven mechanisms and application prospects. *Acta Mater Compos Sin*, 2022, 39(5): 1847
(曹邵文, 周国庆, 蔡琦琳, 等. 太阳能电池综述: 材料、政策驱动机制及应用前景. 复合材料学报, 2022, 39(5): 1847)
- [50] Rahman M M, Hasanuzzaman M, Rahim N A. Effects of various parameters on PV-module power and efficiency. *Energy Convers Manag*, 2015, 103: 348
- [51] Skoplaki E, Palyvos J A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Sol Energy*, 2009, 83(5): 614
- [52] Ibrahim M, Saeed T. Designing a new heat sink containing nanofluid flow to cool a photovoltaic solar cell equipped with reflector. *J Taiwan Inst Chem Eng*, 2021, 124: 9
- [53] Alktranee M, Shehab M A, Németh Z, et al. Effect of zirconium oxide nanofluid on the behaviour of photovoltaic-thermal system: An experimental study. *Energy Rep*, 2023, 9: 1265
- [54] Babavali S K F, Devi N L, Kaliappan S, et al. Thermal management of PV panel through the circulation of a nano-MgO/water-based nanofluid. *Mater Today Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.09.001>
- [55] Emara K, Aliwa H, Abdellatif O E, et al. Experimental investigation for a hybrid aluminum oxide nanofluid-phase change material photovoltaic thermal system based on outdoor test conditions. *J Energy Storage*, 2022, 50: 104261