

基于形状记忆开关的多功能充电宝及其低温充放电性能研究

马 硕, 张 勇, 赵 红*

大连交通大学材料科学与工程学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2024年12月20日; 录用日期: 2025年1月16日; 发布日期: 2025年1月28日

摘 要

锂离子电池是目前应用最广的二次电池, 但锂电池的低温充放电性能还不能满足市场化应用。本文利用形状记忆温控开关, 设计能够主动闭合、断开的锂离子电池低温加热管理系统; 在此基础上, 本文搭建了既能给手机电池充电又能给手机电池加热的多功能充电宝。本文设计搭建的多功能充电宝主要由壳体、电池组件、形状记忆合金上触头、形状记忆合金下触头、底座、低温加热接口、USB输出接口、充电接口、开关按钮、加热片等组成, 可在低温环境下通过开关按钮控制将手机数据线接入充电宝USB输出接口完成充电功能。低温充放电性能测试表明, 低温加热环境下锂电池循环寿命为1000小时, 是未加热条件下锂电池的10倍。本文设计搭建的多功能充电宝将为深海、极地以及高纬度极寒地区锂电池的商业化应用提供很好的借鉴。

关键词

锂离子电池, 充电宝, 低温充放电, 形状记忆开关, 放电容量

Low Temperature Charge-Discharge Study of Multi-Functional Portable Charger Based on Shape Memory Switch

Shuo Ma, Yong Zhang, Hong Zhao*

School of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian Liaoning

Received: Dec. 20th, 2024; accepted: Jan. 16th, 2025; published: Jan. 28th, 2025

Abstract

Lithium-ion batteries are the most widely used secondary batteries, but the low-temperature charging and discharging performance of lithium batteries cannot meet the market application requirements.

*通讯作者。

文章引用: 马硕, 张勇, 赵红. 基于形状记忆开关的多功能充电宝及其低温充放电性能研究[J]. 材料科学, 2025, 15(1): 97-105. DOI: 10.12677/ms.2025.151012

In this paper, a lithium-ion battery low-temperature heating management system with an active closing and opening function is designed using shape memory alloy temperature control switches. Based on this, a multi-functional portable charger that can both charge and heat the mobile phone battery is built. The multi-functional portable charger designed and built in this paper mainly consists of a shell, a battery component, a shape memory alloy upper contact, a shape memory alloy lower contact, a base, a low-temperature heating interface, a USB output interface, a charging interface, a switch button, a heating sheet, etc. It can complete the charging function by connecting the mobile phone data line to the USB output interface of the portable charger through the switch button in the low-temperature environment. The low-temperature charging and discharging performance test shows that the lithium battery cycle life is 1000 hours in the low-temperature heating environment, which is 10 times that of the lithium battery in the unheated condition. The multi-functional portable charger designed and built in this paper will provide a good reference for the commercialization application of lithium batteries in deep sea, polar regions and high-latitude extremely cold areas.

Keywords

Lithium-Ion Batteries, Portable Charger, Low-Temperature Charging and Discharging, Shape Memory Switches, Discharge Capacity

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

锂离子电池是目前开发最成熟、市场化最好、应用最广泛的二次电池,但因其低温启动差、释放容量低,不适于深海、极地等极端寒冷地区使用,锂电池低温充电容易析出锂枝晶、导致电池短路爆炸事故[1]-[3]。因此开发适用低温锂电池热管理系统是新能源电池重点研究方向。目前,将锂电池与继电器、温度传感器、温度显示器、运算放大器、电容等复杂控制电路系统相连的传统加热方式是解决电动汽车锂电池低温使用问题的常见思路,还不符合手机、电脑等便携式电子产品的使用要求。此外,压电装置目前在生活中广泛应用。如公路、机场等地,利用声波压电发电装置将噪声转换为电能,为路灯、摄像头供电;在公路两侧或路面下铺设压电材料,通过过往车辆产生的振动能量转换为电能为交通灯、指示牌等设施供电[4]-[8]。但尚未有研究探索将压电效应应用于低温环境,以实现便携式电子设备的稳定持续供电。

形状记忆效应为设计大尺度可逆变形分子开关提供了启示。镍钛合金因优异热质形状记忆效应被选用[9]-[13]。本文提出一种适用于高寒环境的小型锂电池智能低温加热系统,利用形状记忆材料设计智能分子开关和加热片,确保电池在低温下高比能量的同时能够启动和正常运行。

充电宝是便携式锂电池设备,为智能手机提供额外电量。其体积小、便携性强,用户可轻松携带并随时充电。结合热管理系统后,该充电宝能在低温环境下高效提升电池温度,保持适宜工作范围,从而更高效地充电。

因此,需设计一种加入热管理系统的多功能充电宝。本文搭建的多功能充电宝能同时充电和加热,为极寒地区锂电池应用提供借鉴。

2. 实验方法

2.1. 搭建多功能充电宝装置

图1所示充电宝在常温或温暖环境下,形状记忆开关断开,正常充电且加热电路不工作,节省能耗。

当温度降至预设低温时，形状记忆开关闭合，加热片工作，加热功能不仅有助于提升电池的性能，减少因低温导致的电量衰减，还能有效防止电池在极寒条件下受损，延长其使用寿命。

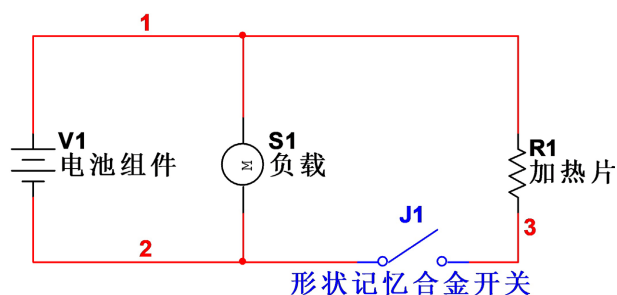


Figure 1. Circuit diagram of multi-functional portable charger based on shape memory switch

图 1. 基于形状记忆开关的多功能充电宝电路图

如图 2 所示，当温度下降到形状记忆合金的转变温度时，合金内部的微观结构变化导致其物理性质改变，特别是上触头和下触头开始缓慢伸长，这一过程持续几秒钟。随着触头的逐渐靠近并最终接触，电路被接通，进而启动加热系统。

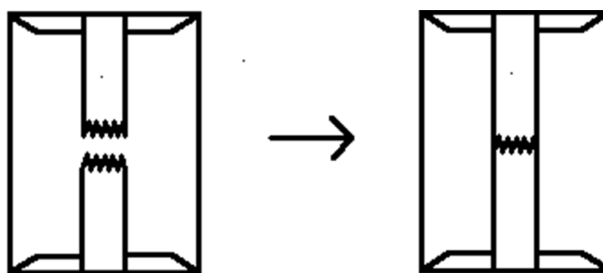


Figure 2. Diagram of shape memory switch opening and closing

图 2. 形状记忆开关断开、闭合示意图

如图 3 所示，我们成功设计了一款集成了传统充电功能与加热功能的多功能充电宝。确保在极端气候条件下仍能保持良好的耐用性和稳定性。充电宝的正面设有充电接口和加热系统指示灯，方便用户随时了解充电宝的工作状态。如图 4 所示，我们将搭建起来的充电宝，在极端环境下给电池进行加热。

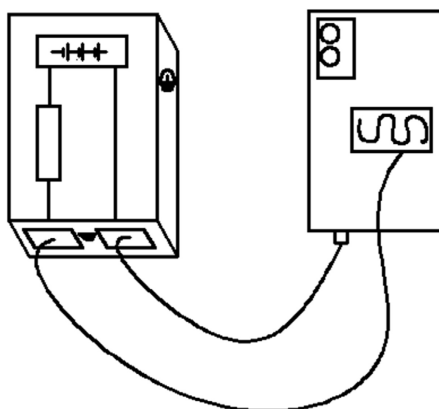


Figure 3. Schematic diagram of multifunctional portable charger

图 3. 多功能充电宝示意图



Figure 4. Physical picture of multifunctional portable charger
图 4. 多功能充电宝实物图

2.2. LANDIAN 充放电循环下的电化学测试

蓝电充放电循环测试是评估电池性能的关键方法，常用设备为 BTS2300 测试仪。通过恒电流充放电法，在设定电压范围内循环测试电池，可获取循环稳定性、倍率性能和容量信息。如图 5 所示，测试过程包括恒流 8 mA 充电至上限电压 4.2 V，再恒流放电至下限电压 2.75 V，循环至设定次数 100 次。

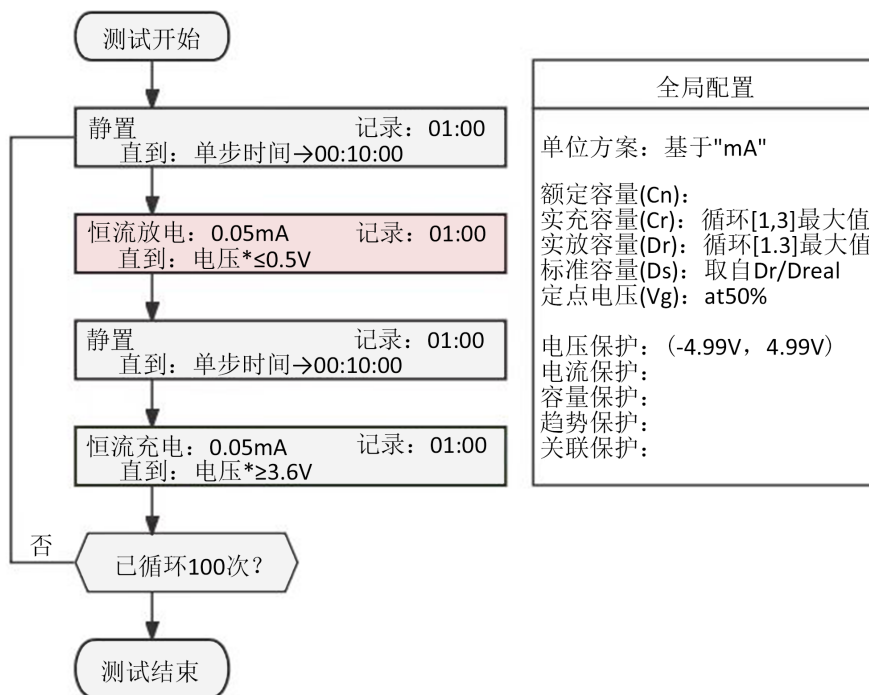


Figure 5. LANDIAN charge and discharge cycle system
图 5. LANDIAN 充放电循环系统

如图 6 所示, 将电池分别置于低温环境箱和加热设备中, 启动蓝电测试系统循环测试和温度记录仪, 如图 7 所示, 测试后, 导出蓝电测试系统和温度记录仪的数据。分析循环容量变化, 评估循环寿命, 分析原因。



Figure 6. Low temperature battery charging and discharging, low-temperature heating battery charging and discharging LANDIAN cycle testing device
图 6. 低温电池充放电、低温加热电池充放电 LANDIAN 循环测试装置



Figure 7. Temperature and humidity recorder testing
图 7. 温湿度记录仪测试

3. 实验结果分析及讨论

在本论文中通过图 8 的对比, 我们能够清晰地观察到低温电池与低温加热电池在时间 - 电压特性上的显著差异。在低温环境下, 电池内部的化学反应速率显著减慢, 导致电池的输出电压和容量在短时间内出现显著衰减, 如图 8(a)所示, 在不到 200 小时的时间内电池的容量衰减为零。这种衰减不仅影响了

电池的即时性能，还加速了电池的老化和失效过程，这直接导致了电池寿命的大幅降低。

具体来说，低温环境下电池面临的问题包括：电解质凝固。低温导致电解质变得粘稠，甚至凝固，这阻碍了离子的迁移，降低了电池的电导率；电极活性降低。低温使得电极材料的活性降低，减少了参与化学反应的离子数量，从而降低了电池的容量。

相对而言，在加热的环境下，电池的容量表现出了更高的稳定性和更长的循环寿命，如图 8(b)所示 1000 小时后电池的充放电性能无明显衰减，容量稳定在 40 mAh。这表明通过加热的方式，可以有效地改善电池的性能，使其在更长的时间内保持较高的充放电能力。这主要是因为加热可以提高电池内部的温度，从而加速化学反应速率，改善电解质的电导率，以及提高电极材料的活性。

具体来说，加热环境对电池性能的改善体现在以下几个方面：提高化学反应速率。加热可以加速电池内部的化学反应，使得更多的能量能够在短时间内被储存和释放；改善电解质电导率。加热可以降低电解质的粘度，提高离子的迁移速率，从而改善电池的电导率。

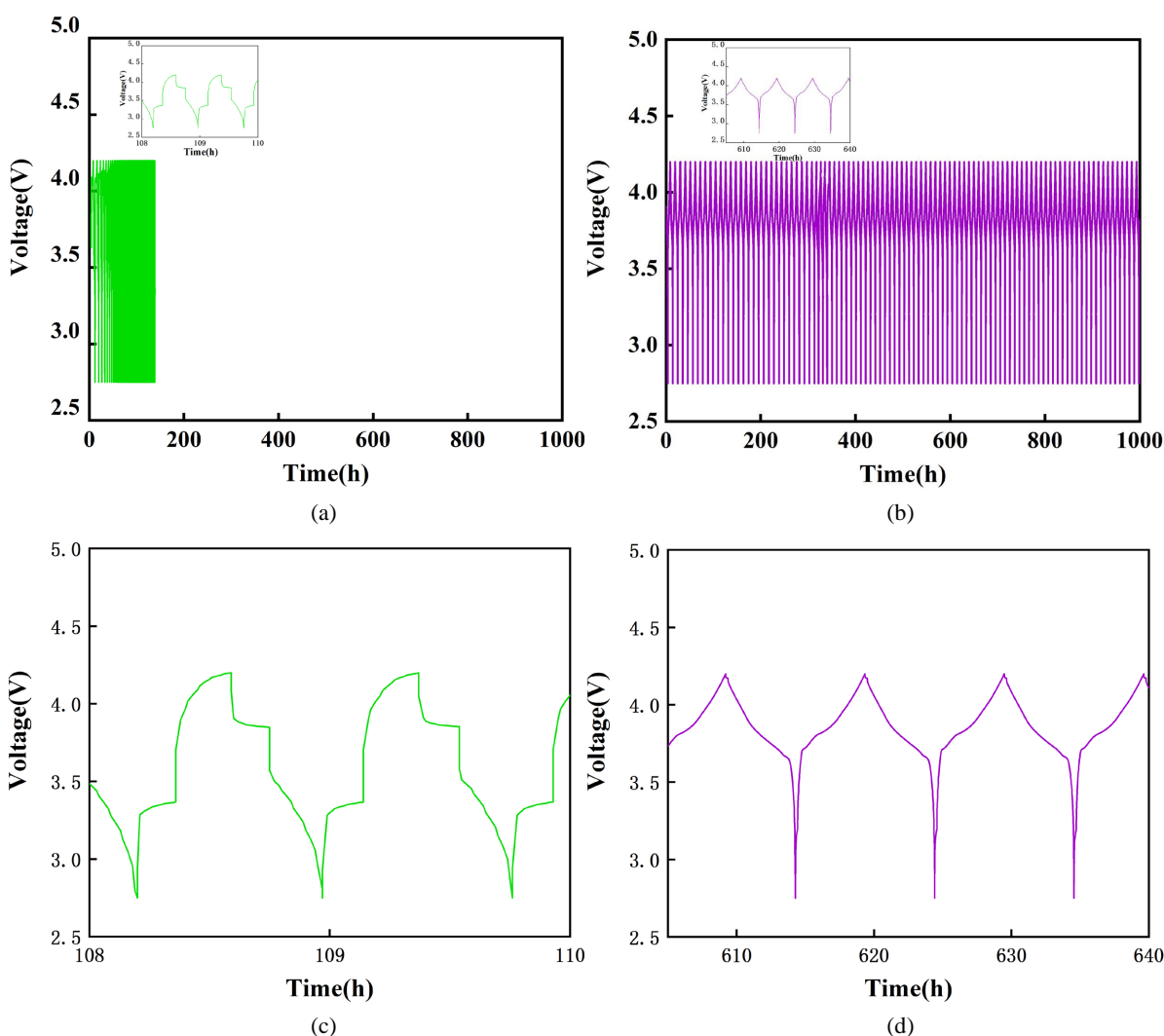


Figure 8. (a) Low temperature battery charging and discharging cycle voltage time curve; (b) Low-temperature heating battery charging and discharging cycle voltage time curve; (c) Partial voltage time curve of low-temperature battery charging and discharging cycles; (d) Partial voltage time curve of low-temperature heating battery charging and discharging cycles

图 8. (a) 低温电池充放电循环电压 - 时间曲线; (b) 低温加热电池充放电循环电压 - 时间曲线; (c) 低温电池充放电循环电压 - 时间曲线局部; (d) 低温加热电池充放电循环电压 - 时间曲线局部

通过扫描电镜对低温、低温加热和未处理三种状态下的锂电池石墨负极进行分析,我们可以观察到不同条件下石墨负极表面的形态变化,并进一步分析电池在低温环境下容量衰减、寿命减少的原因。图 9(a)、图 9(b)未处理的石墨负极表面均匀且光滑,无明显沉积物或裂纹。表明在没有特殊处理的情况下,电池未发生明显的电化学反应导致结构变化。图 9(c)、图 9(d)低温条件下的石墨负极表面出现明显的沉积物和裂纹。这些沉积物很可能是锂枝晶,它们在低温下由于电解液浸润性差而沉积在负极表面。沉积物分布不均,局部电流密度较高区域出现裂纹。图 9(e)、图 9(f)低温加热条件下的石墨负极表面沉积物减少,表面更为平整。仍存在部分沉积物,但相比低温条件有所减少。加热改善了电解液的浸润性,降低了锂枝晶形成的风险。裂纹数量显著减少,表明加热缓解了机械应力。

低温环境下电池性能衰减原因分析:电解液浸润性差。在低温环境下,电解液的流动性降低,导致其在石墨负极表面的浸润性差,这使得锂离子在负极表面的嵌入和脱出变得困难,增加了电池的内阻;锂枝晶沉积。由于电解液浸润性差,锂离子在负极表面容易形成锂枝晶,锂枝晶的形成不仅消耗了可循环的锂量,还可能刺破隔膜,导致电池内部短路,短路会进一步加剧电池的容量衰减和寿命减少;机械应力增加。锂枝晶的沉积和电解液的浸润性差都会导致石墨负极表面产生机械应力。这些机械应力会使得石墨负极的结构发生变化,如产生裂纹等,裂纹的产生会进一步影响锂离子的嵌入和脱出,从而降低电池的性能。

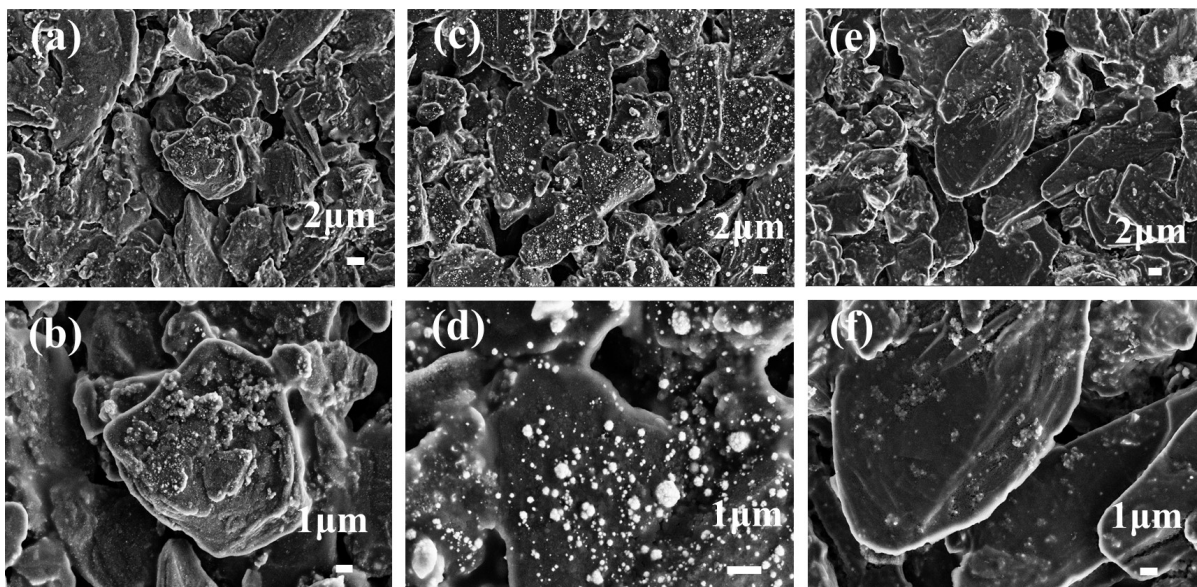


Figure 9. SEM microstructure observation of graphite negative electrode under low temperature and low temperature heating conditions. (a), (b) untreated graphite negative electrode; (c), (d) graphite negative electrode under low temperature conditions; (e), (f) graphite negative electrode under low temperature heating conditions

图 9. 低温和低温加热条件下石墨负极的 SEM 组织观察。(a)、(b) 未处理的石墨负极; (c)、(d) 低温条件下的石墨负极; (e)、(f) 低温加热条件下的石墨负极

在低温环境下电解液的流动性显著降低,这是由于电解液粘度随温度降低而增大所致。这种流动性的降低导致石墨负极表面的浸润性变差,使得锂离子在负极表面的嵌入和脱出过程变得困难。如图 10 所示,通过 COMSOL 模拟研究,我们发现低温条件下电解液的中心速度显著降低,这进一步证实了低温对电解液流动特性的显著影响。由于流动阻力的增大和速度的降低,电池内部的锂离子传输受到阻碍,从而影响电池的充放电性能。

低温环境下电解液粘度的增加不仅影响了电解液的流动特性,还直接导致了电池容量的衰减。粘度增大使得电解液中的锂离子在传输过程中需要克服更大的阻力,导致电池内部的极化现象加剧。此外,

由于石墨负极表面浸润性差，锂离子在嵌入和脱出过程中容易形成锂枝晶，这不仅会降低电池的循环稳定性，还会导致电池容量的快速衰减。因此，优化电解液配方、提高低温环境下的电解液流动性以及改善石墨负极的浸润性，是提升电池在低温条件下性能的关键。

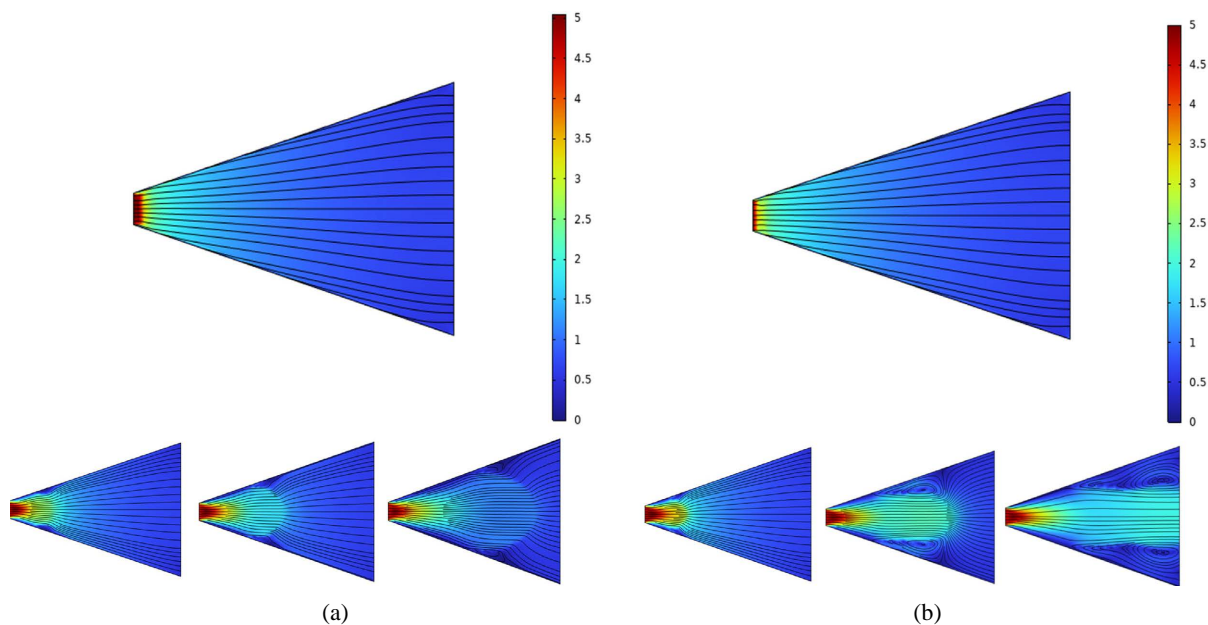


Figure 10. Simulation diagram of electrolyte flow viscosity under low temperature and low temperature heating conditions (a) Simulation of electrolyte flow under low temperature conditions, (b) Simulation of electrolyte flow under low temperature heating conditions

图 10. 低温、低温加热条件下电解液流动粘度模拟图 (a) 低温条件下电解液流动模拟、(b) 低温加热条件下电解液流动模拟

4. 结论

本文通过搭建基于形状记忆开关的智能充电宝，对低温电池进行加热，并与低温环境下的电池进行对比，可以得出以下主要结论：

1) 加热显著提升电池性能：在低温环境下，电池的性能会受到严重影响，导致容量衰减和寿命缩短。而通过智能充电宝对低温电池进行加热，可以显著提高电池的工作温度，从而提升电池的性能。低温加热环境下的电池寿命显著优于低温电池，其循环寿命长达 1000 小时，是低温环境下电池寿命的 10 倍，这种加热效果使得电池在低温条件下也能保持较高的充放电能力和循环稳定性。

2) 形状记忆开关的有效性：形状记忆开关作为一种智能控制元件，在本文中成功应用于智能充电宝中，实现了对低温电池的精准加热控制。这种开关具有响应速度快、控制精度高等优点，能够根据实际需要，对电池进行加热，避免了电路设计复杂的问题。

3) 智能充电宝的实用性：通过搭建基于形状记忆开关的智能充电宝，不仅解决了低温环境下电池性能下降的问题，还提高了充电宝的智能化水平和实用性。这种智能充电宝可以根据环境温度和电池状态自动调节加热功率，确保电池在最佳工作温度下工作，延长了电池的使用寿命。

基金项目

国家自然科学基金(22075035)，大连市科学技术基金(2022JJ11CG005)；辽宁省教育厅项目(LJKFZ20220204)。

参考文献

- [1] 肖军. 新能源汽车低温电池热管理方法研究[J]. 汽车文摘, 2020(10): 34-40.
- [2] 曹锦珠, 张润雯, 陈益奎, 等. 低温型锂离子电池循环寿命评估方法研究[J]. 信息技术与标准化, 2019(1): 32-37.
- [3] 宫闪闪, 刘洪思, 贾宁. 冬季暖车对纯电动汽车低温续航里程影响研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2018, 56(12): 95-96.
- [4] 沃特玛推低温电池提升低温续航里程[J]. 电动自行车, 2016(3): 52.
- [5] 雷治国, 张承宁, 李军求, 等. 电动车用锂离子电池低温性能研究[J]. 汽车工程, 2013, 35(10): 927-933.
- [6] 雷治国, 张承宁, 董玉刚, 等. 电动汽车用锂离子电池低温性能和加热方法[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(9): 1399-1404.
- [7] Du, Y., Shironita, S., Asakura, D., Hosono, E., Sone, Y., Miseki, Y., *et al.* (2024) Post-mortem Analysis of the Li-Ion Battery with Charge/discharge Deterioration in High- and Low-Temperature Environments. *Electrochimica Acta*, **473**, Article ID: 143421. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.143421>
- [8] Chen, M. and Li, J. (2021) Experimental Study on Heating Performance of Pure Electric Vehicle Power Battery under Low Temperature Environment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **172**, Article ID: 121191. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121191>
- [9] 成慧, 薛超, 刘渝. 探索形状记忆合金在开关元件领域中的应用[J]. 中国标准化, 2019(S1): 194-198.
- [10] 袁发鹏, 黄金. 形状记忆合金温控开关驱动特性分析及试验[J]. 现代制造工程, 2018(3): 23-27, 52.
- [11] 乔臻. 形状记忆合金温控的磁流变液自发电传动研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆理工大学, 2016.
- [12] 吴会军. 基于形状记忆合金的变形控制系统设计[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [13] Yang, Y., Wang, Y., Yao, T. and Feng, X. (2022) A Flexible and Smart Shape Memory Alloy Composite Sheet Based on Efficient and Bidirectional Thermal Management. *International Journal of Smart and Nano Materials*, **13**, 315-329. <https://doi.org/10.1080/19475411.2022.2076754>