



锂离子电池可穿戴式柔性温度传感薄膜研究

迟贵东, 马仕豪, 安柏嘉, 何志祝, 周 全
(中国农业大学工学院机械工程系, 北京 100083)

摘 要: 多电池系统中各电池单元状态的精准监测是保障电池组整体性能与运行安全的关键前提。针对锂离子电池实际应用中国局部发热引发的安全隐患及性能衰退问题, 本研究设计了一种低成本、高灵敏度、超薄可穿戴柔性温度传感薄膜。该传感器采用银基导电墨水作为温敏材料, 通过丝网印刷技术在聚酰亚胺基底上制备电极图案, 经低温烧结和聚二甲基硅氧烷封装后形成厚度仅 41 μm 的超薄柔性结构。利用恒温恒湿试验箱和精密源表搭建的标定平台测试表明, 该传感薄膜在 $-20\sim 80^\circ\text{C}$ 工作范围内灵敏度达 $S=0.035\ \Omega/^\circ\text{C}$, 室温下线性拟合相关系数 $R^2=0.998$, 且具备优异的温度-电阻稳定性和制备重复性。本研究进一步建立了 3×3 电池模组的电化学-热耦合仿真模型, 揭示了模组内部的温度梯度分布规律, 发现中心电池温升始终高于周围电池, 且温升与电流倍率呈显著正相关。基于仿真结果, 将传感薄膜应用于方形单体电池和圆柱形模组的实时温度监测试验中。测试数据显示, 传感器输出温度与电池端电压曲线呈现高度同步性, 能够准确表征充放电过程、电流倍率变化以及不同运行阶段的产热特性, 有效验证了其在多种电池构型中实施原位温度监测的可行性与可靠性。与传统热电偶相比, 该传感薄膜在柔性适配、监测精度、成本控制及阵列化多点传感方面具有显著优势。本研究成果为锂离子电池系统的精细化热管理与安全预警提供了一种新的技术路径。

关键词: 智能电池; 柔性传感; 温度监测; 电池安全; 电池管理

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1055

中图分类号: TM 912

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 06-2079-10

Study on flexible temperature-sensing film for wearable monitoring of lithium-ion batteries

CHI Guidong, MA Shihao, AN Bojia, HE Zhizhu, ZHOU Quan

(China Agricultural University College of Engineering Department of Mechanical Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: A precise monitoring of individual cells in a multibattery system is essential for stable performance and operational safety. In this study, we develop a low-cost, high-sensitivity, ultrathin flexible temperature-sensing film to address local heating, safety risks, and performance degradation in lithium-ion batteries (LIBs). The sensor uses a silver-based conductive ink as the temperature-sensitive material. Electrodes are printed on a polyimide substrate via screen printing, followed by low-temperature sintering and polydimethylsiloxane encapsulation, producing a flexible structure with a 41- μm thickness. Calibration tests in a temperature-humidity chamber with a precision source meter demonstrate a sensitivity of

收稿日期: 2025-11-21; 修改稿日期: 2025-12-17。

基金项目: 北京市自然科学基金项目 (L244041)。

第一作者: 迟贵东 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能传感与装备, E-mail: 19862512980@163.com; 通信作者: 周全, 副教授, 研究方向为清洁能源技术、热管理、智能传感等, E-mail: zhouquan@cau.edu.cn。

引用本文: 迟贵东, 马仕豪, 安柏嘉, 等. 锂离子电池可穿戴式柔性温度传感薄膜研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(6): 2079-2088.

Citation: CHI Guidong, MA Shihao, AN Bojia, et al. Study on flexible temperature-sensing film for wearable monitoring of lithium-ion batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(6): 2079-2088.

0.035 $\Omega/^{\circ}\text{C}$ over -20°C to 80°C . The linear fitting at room temperature gives an R^2 of 0.998. The sensor also exhibits stable temperature-resistance characteristics and good fabrication repeatability. A coupled electrochemical-thermal model of a 3×3 battery module reveals the internal temperature gradient distribution. The central cells show a higher temperature increase than the peripheral cells, and the increase accelerates with discharge rate. Based on these results, the sensing film is applied to a prismatic cell and a cylindrical module for real-time temperature monitoring. The measured temperature follows the battery voltage curve with high consistency. The sensor captures the heat-generation behavior during charging and discharging, changes in current rate, and transitions between operating stages. Compared with traditional thermocouples, the sensing film has considerable advantages in terms of flexible adaptation, monitoring accuracy, cost control, and array deployment. These results confirm its feasibility and reliability for in situ temperature monitoring in various battery configurations. This study provides a new approach for refined thermal management and safety warning in LIB systems.

Keywords: smart battery; flexible sensing; temperature monitoring; battery safety; battery management

作为新能源储能领域新质生产力的发展焦点，锂离子电池因具备高能量密度、高效率、长寿命、低自放电率、无记忆效应和相对环保等优点^[1]，是当前应用最为广泛的电池技术之一，在电子设备、电动交通工具和可再生能源储能系统的高速发展进程中发挥着关键作用^[2]。然而，由于过充过放、内部短路、高温老化、长时间大电流滥用或物理损坏引起的锂电池热失控安全问题屡见不鲜，伴随发生的火灾和爆炸、化学灼伤、有毒气体泄漏、电气设备损坏和环境污染等危害，对人身财产安全和社会稳定造成了重大威胁^[3]。

电池管理系统（BMS）逐渐成为当前锂电池模组的标准配置，可通过集成的多位点传感器和复杂算法模型，实现电池电压、温度、电流及充放电状态的实时监测，并同步评估电池的荷电状态（SOC）和健康状态（SOH），对电池性能和寿命进行优化管理^[4-5]。然而，基于这种模组层级的间接测量方式，因无法在电池失控过程中提供准确的原位检测信息，在早期有效预警方面存在不足，其测量和预测的准确度与稳定性存在显著偏差。Xiong等^[6]发现模组级监测将单体电池在故障早期的显著电压波动（ $>100\text{ mV}$ ）抑制为模组端的微小波动（ $<5\text{ mV}$ ），这一信号常被淹没在系统测量噪声之中。Gu等^[7]提出由于电池产热源位于电芯内部，热量传导至模组外部传感器需克服巨大的热阻与热

容，从而致使模组层级的早期热失控预警严重滞后。此外，由于制造工艺差异、充放电能力不一致以及热分布不均匀等原因，多电池系统中充放电不平衡是一个非常普遍的问题，这也是导致电池疲劳甚至热失控失效的重要原因之一^[8-12]。因此，对电池组内单个电池单元的监测对于确保电池组系统的整体性能和安全具有至关重要的作用。

近年来，面向锂电池单体层级的感知技术得到了广泛研究。Ladpli等^[13]采用频率为200 kHz的超声波对充放电过程中的软包锂离子电池进行原位透射测试。发现慢波的幅值和到达时间与电池的SOC正相关。Gold等^[14]和Meng等^[15]将一对压电换能器通过黏合剂安装在电池表面两侧，并采用不同频率（0.9 MHz、1.8 MHz和2.7 MHz）的时谐波捕捉电池在不同SOC下的动态响应。Pinto团队^[16-19]开发了光纤传感器用于电池性能测试，用于对电池表面温度分布的实时多点监测，实现了电池表面的热空间映射以及热梯度识别，并提出了使用光纤复合信号作为电池热失控的预警指标。Hu等^[20]利用压电传感器（PVDF-TrFE）和薄膜晶体管阵列制备了一种电池健康监测传感器阵列，能够实现对动态机械损伤和热损伤的实时响应。Bree等^[21]研制了一种表面安装的柔性压力传感器，其可以通过检测电极材料在充放电过程中的膨胀和收缩所带来的电池体积的微小变化以简单快速地监测锂离子

电池的SOC和SOH。

尽管目前大多数学者能够实现对电池状态的准确感知,但同时面临着传感器贴附性差、可重复性低以及制作成本高等问题,难以实际应用于商用电池模组中数以百计的电池单体。基于以上原因,本研究设计了一种低成本、高传感性能、超薄的可穿戴式柔性温度传感薄膜。由于其具有高柔性、保形性以及制备过程的高可重复性,传感薄膜可应用于不同的电池类型(例如方形单体与圆柱形模组)。所研制的传感薄膜的温度输出能够与电池的实时电压曲线实现准确对应,并与电池的实时运行行为相关联,展现出传感薄膜的优异性能。

1 可穿戴式柔性温度传感薄膜研制

1.1 制备流程

可穿戴式柔性温度传感薄膜(AgTF)由银基导电墨水[MSC-R001,迈思成(北京)科技有限公司]作为温敏材料,经聚酰亚胺(PI)基底及聚二甲基硅氧烷(PDMS)封装而成。为保证AgTF对温度单因素传感的可靠性,其制备流程主要包括以下五个步骤:①在光滑玻璃板上旋涂热固性PI溶液(900 r/min, 25 s),均质后加热至290℃以挥发溶剂并热处理固化;②等离子表面处理固化后的PI膜3 min,提高其表面活性;③将预处理后的PI膜进行丝网印刷(200目),得到图案化电极;④对印刷良好的图案化电极进行低温烧结(240℃烘烤6 h);⑤将烧结后的电极使用PDMS再次旋涂(1000 r/min, 25 s),并预留传感器引线位置,待PDMS加热固化后AgTF制作完成。其主要制作流程如图1所示。

通过该流程制作出的AgTF厚度仅有41 μm(螺旋测微器测量)。制作出的9组AgTF的电阻阻值如图2所示,可以看出该制作方案具有较高的可重复性,能够实现多点阵列化传感。由于AgTF的温敏材料、基底和封装层均具有高柔性和保形性,且本身厚度极薄,因此AgTF可作为适用于各种电池应用的可穿戴式温度传感器。

1.2 温度-电阻标定

所研制的AgTF为一种电阻式温度传感器,在外界温度变化时其电导率产生相应变化,因此表现为对温度的敏感性。为测试AgTF对温度的敏感程度,搭建温度-电阻标定平台进行测试标定,其中主要包括程式恒温恒湿试验箱(BE-TH-

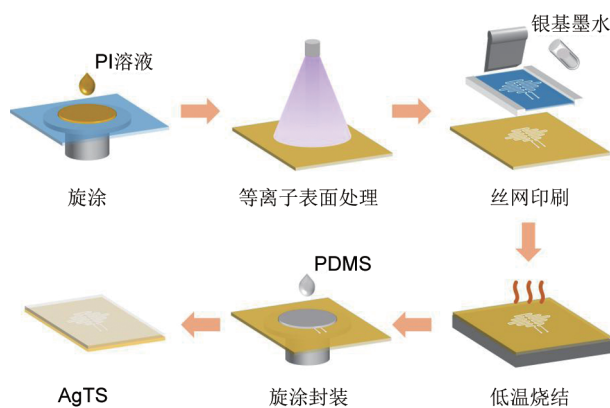


图1 柔性印刷式温度传感器(AgTF)制备流程
Fig. 1 Process flow for producing the AgTF flexible printed temperature sensor

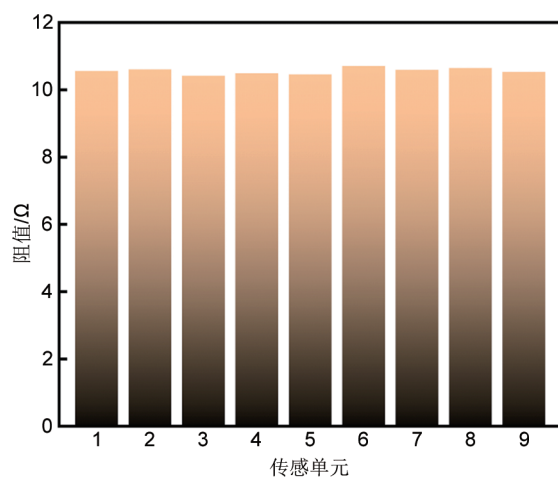


图2 9组AgTF的电阻重复性
Fig. 2 Resistance repeatability of 9 sets of AgTF

150)、Keysight 34420A精密源表以及上位机等,平台搭建如图3所示。试验箱温度循环设定如表1所示。

图4展示出AgTF在-20~80℃的阶梯性温度-电阻循环,该五次循环下电阻曲线形貌基本保持不变,且在长时间下AgTF在不同温度阶段下均能实现高电阻稳定性和快温度响应,展示出其优异的温度传感特性。将五次温度循环下各温度-电阻的平均值作为AgTF的标定电阻,并对其进行线性拟合,结果如图5所示。经公式(1)计算可得在-20~80℃温度范围内,AgTF的灵敏度 S 为0.035 Ω/℃,且线性度高达 $R^2=0.998$ 。通过与其他温度传感器的性能参数进行对比(表2),可看出AgTF具有显著的优势。

定义温敏电极的灵敏度 S 为公式(1):

$$S = -\frac{\Delta R}{\Delta T} \quad (1)$$

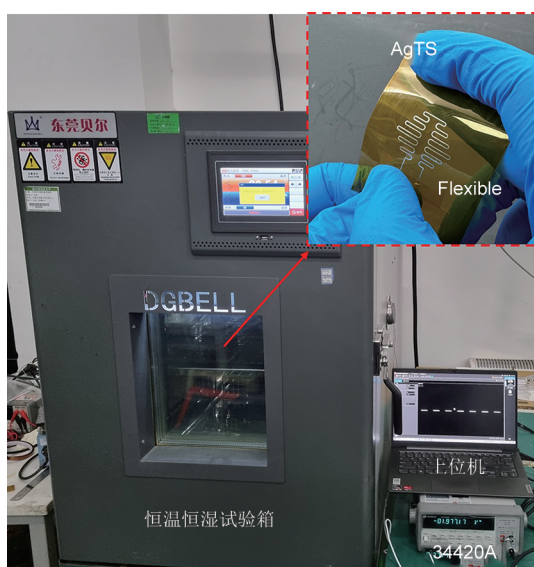


图3 AgTF温度-电阻标定平台
Fig. 3 AgTF temperature-resistance calibration platform

表1 恒温恒湿试验箱温度循环设定

Table 1 Temperature cycling settings for constant temperature and humidity test chamber

设定温度/℃	-20	0	20	40	60	80
变化时长/min	10	10	10	10	10	10
持续时长/min	50	50	50	50	50	50

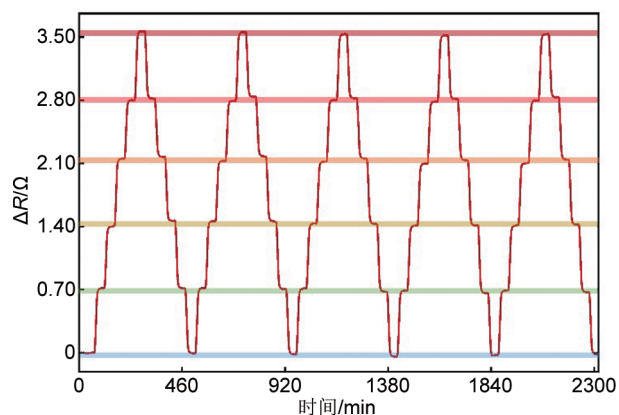


图4 AgTF在五次温度循环下的电阻变化
Fig. 4 Resistance change of AgTF under five temperature cycles

式中, $\Delta R = R - R_0$ 为温敏电极受温度变化造成的电阻阻值变化, 单位为 Ω ; R_0 为温敏电极的初始电阻, 单位为 Ω , 这里指温度为 -20°C 下的阻值; ΔT 为温敏电极受到的温度变化量, 单位为 $^\circ\text{C}$, 这里取5次温度循环的平均值计算。

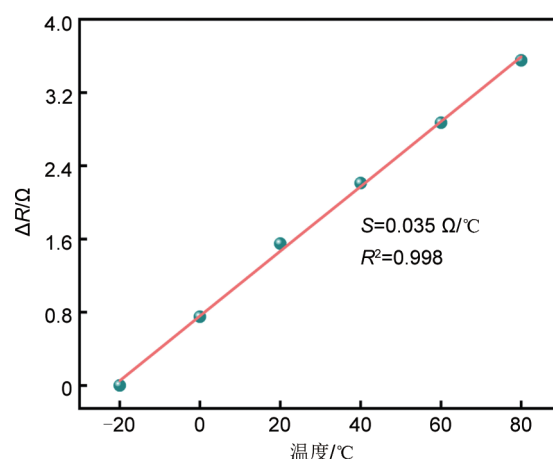


图5 AgTF温度-电阻标定值
Fig. 5 AgTF temperature-resistance calibration values

表2 不同温度传感器性能参数对比

Table 2 Comparison of performance parameters of different temperature sensors

参考文献	灵敏度 S	R^2 /线性度	传感范围/℃	循环稳定性
[22]	0.22%/℃	0.9998/高	20~60	NA
[23]	0.234%/℃	0.9874/高	25~42	强
[24]	0.094%/℃	NA/低	25~45	强
[25]	0.214%/℃	NA/低	35~45	强
[26]	0.215%/℃	NA/低	10~30	NA
[27]	0.25%/℃	NA/高	20~80	NA
[28]	-0.48%/℃	NA/低	25~85	弱
本研究	0.035 Ω/℃ (0.261%/℃)	0.998/高	-20~80	强

2 电池模组数值仿真模型

锂离子电池作为一种高效的可充电二次电池, 其工作原理本质上是电能与化学能之间的可逆转化过程, 其中难免伴随着热量的交换。锂电池的产热机制是一个复杂的多物理场耦合过程, 主要涉及三种热源: 欧姆热 (Q_j , 焦耳热)、极化热 (Q_p , 电化学不可逆热) 和可逆热 (Q_r , 熵热) [29-30]。其中, 欧姆热主要由电池内部电阻产生, 符合焦耳定律; 极化热源于电化学极化、浓差极化和活化极化等不可逆过程; 而可逆热则与电池反应的可逆熵变相关, 具体取决于电极材料的熵变特性 (dE/dT)。其数学描述如下:

$$Q_j = \sigma_{\text{eff}} |\nabla \phi_s|^2 + K_{\text{eff}} |\nabla \phi_e|^2 + K_D \nabla \text{Inc}_e \cdot \nabla \phi_e \quad (2)$$

$$Q_p = j(\phi_s - \phi_e - U_{\text{ocv}}) \quad (3)$$

$$Q_r = j \cdot T \frac{\partial U_{ocv}}{\partial T} \quad (4)$$

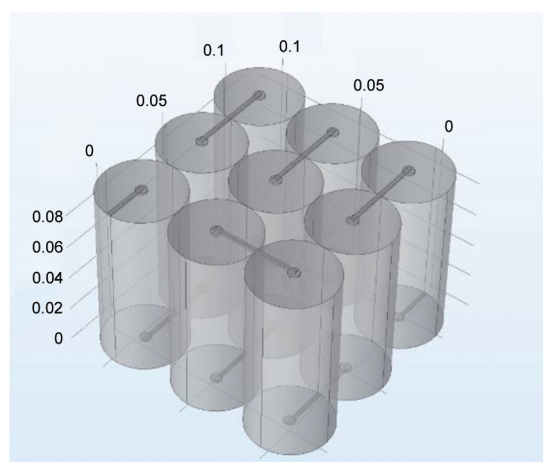
式中, σ_{eff} 为电极有效电子电导率, 单位为 S/m ; κ_{eff} 为电解质有效离子电导率, 单位为 S/m ; κ_0 为扩散热导率, 单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; c_0 为锂离子浓度, 单位为 mol/m^3 ; ϕ_s 为电极电势, 单位为 V ; ϕ_e 为电解液电势, 单位为 V ; j 为电流密度, 单位为 A/m^2 ; η 为过电势, 单位为 V ; U_{ocv} 为平衡电位, 单位为 V ; T 为温度, 单位为 K 。

基于以上单个锂电池的产热机理, 在商用有限元软件 COMSOL 中建立电池模组电化学-热耦合模型, 采用“集总电池”与“固体传热”模块耦合为“电磁热”多物理场端口建立数值模型。仿真中只考虑电池单元之间的传热, 并忽略与外界的热交换。仿真几何模型采用图 9(c) 中实际电池尺寸以及 3×3 排列方式。采用自由四面体网格对其进行有限元网格划分, 对几何特异区域进行加密处理。为在保证计算精度的同时有效控制网格总量, 对网格尺寸进行了无关性验证, 如表 3 所示。最终选择 88542 个四面体网格数量进行以下仿真研究。为验证所研究机理的共性, 仿真所用电池材料属性选用标准 4 Ah 电池属性 (正极: LiMn_2O_4 ; 负极: Graphite, Li_xC_6 MCMB; 电解液: LiPF_6 in 3:7 EC:EMC)。所建立数值仿真模型如图 6 所示。

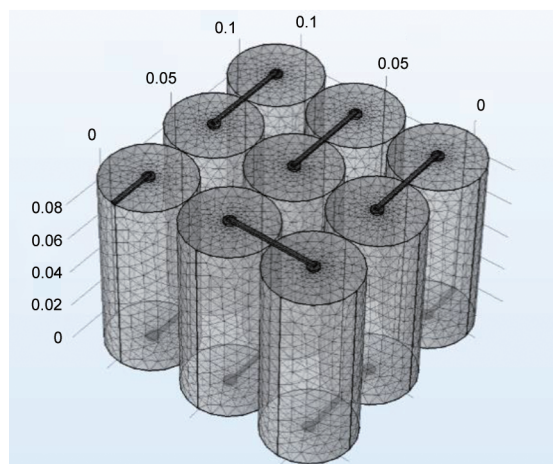
对电池仿真模型在初始 100% SOC 下的恒流 4 C 放电工况进行计算分析, 发现电池模组中各电池的温度场分布存在一定的差异。图 7(a) 和 (b) 展示出电池放电终止时的温度和等温线云图。在放电过程中, 中心电池的温度变化比周围电池更高, 模组的整体温度分布具有从中心向周围扩散的趋势。这说明以此排列的电池模组的中心点热阻最大, 形成热量集中点, 因此造成了沿中心向四周的温度梯度。

图 7(c) 和 (d) 展示了仿真过程中电池 SOC、电流以及温度随时间变化的过程。电池从 100% SOC 恒流 16 A 放电至 20% SOC, 在此过程中电池温度处于近线性增长状态。值得注意的是, 电池在 0.1 h 前中心电池与周围电池的温度近似, 而在 0.1 h 后二者之间才出现明显区别。

进一步对电池模组在多种电流倍率下进行仿真计算, 发现电池温度与其电流倍率存在明显的正相关关系。如图 8 所示, 在 1/2/3/4 C 的电流倍率下, 中心电池温度分别为 26.13/29.69/32.59/35.01℃,



(a)



(b)

图 6 电池模组仿真模型 (a) 几何模型; (b) 网格划分(单位: m)

Fig. 6 Battery module simulation model (a) Geometric model; (b) Grid Partitioning (Unit: m)

表 3 数值仿真模型网格无关性验证

Table 3 Verification of numerical simulation model grid independence

网格数量	最高温度/℃
20997	35.2
44334	35.3
88542	35.3
267612	35.3

且中心电池温度总是大于周围电池温度。

从以上数值仿真结果可以看出, 电池在电流载荷下工作时难以避免地会出现温度场变化, 且温度变化量与电流倍率呈正相关, 这说明电池温度与其充放电行为存在一定的关联性, 因此可通过实际监测温度的变化来一定程度地反映电池的充放电行为。

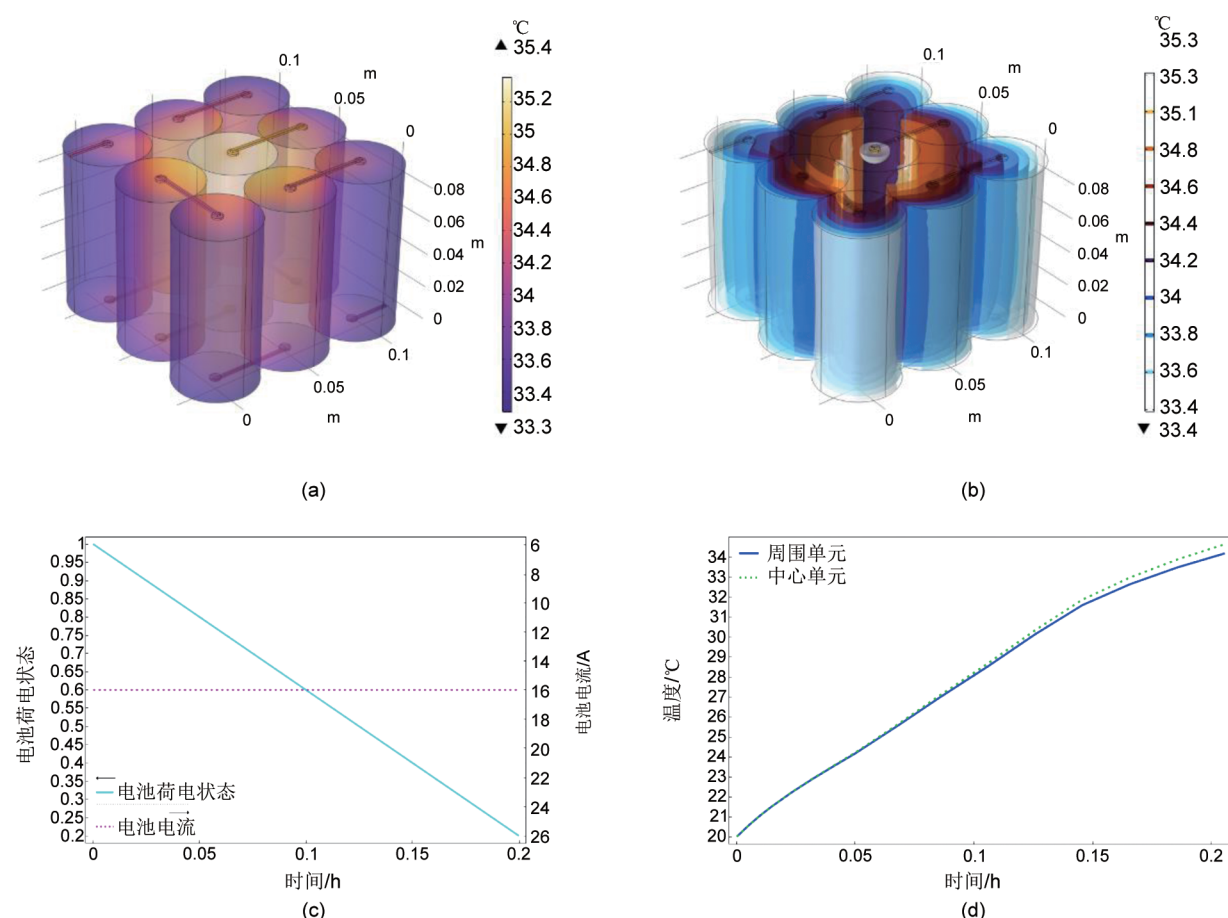


图7 电池模组数值仿真结果 (a) 温度分布; (b) 等温面; (c) 电池 SOC-电流曲线; (d) 温度-时间变化曲线

Fig. 7 Battery module numerical simulation results (a) Temperature distribution; (b) Isotherm; (c) Battery SOC-current curve; (d) Temperature-time variation curve

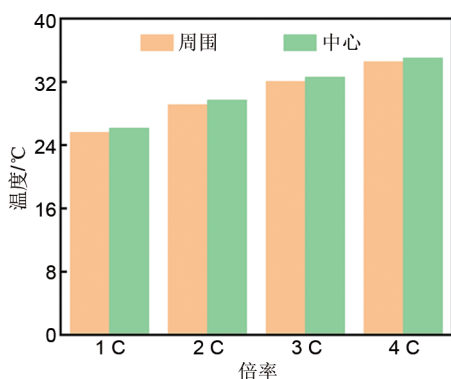


图8 1/2/3/4 C 倍率下周围与中心电池温度值

Fig. 8 Surrounding and center cell temperature values at 1/2/3/4 C rates

3 电池传感试验与分析

3.1 试验平台搭建

由上文可知, 锂电池在充放电运行时难以避免地会产生温度场变化, 且由于电池模组的排列方

式, 会使电池模组内部产生相应的温度梯度。监测并识别模组内单体电池的温度异常能够有效预防电池的极端热失控问题。在此, 本节利用第1部分中具有高线性度和灵敏度的AgTF对两种磷酸铁锂电池[方形LF280A单体和圆柱形46950模组(串联)]进行了温度监测试验, 以验证所研制AgTF的普适性; 由于AgTF具有极高的线性度, 因此只需要简易的ADC数据采集即可实现高精度信号获取(采样频率50 Hz, 分辨率16 bit, FFT数字带阻滤波); 并使用电池测试平台CT-4001对电池进行不同工况的充放电测试。AgTF采用粘贴的方式穿戴于电池表面, 因其具有优异的柔性和适形性, 能够有效降低电池与AgTF之间的接触热阻以加强传感效果。所搭建电池试验平台如图9所示。

3.2 方形电池传感试验

采用上小节搭建的电池测试平台对方型电池进行充放电-温度测试。由于电池本身处于满SOC状

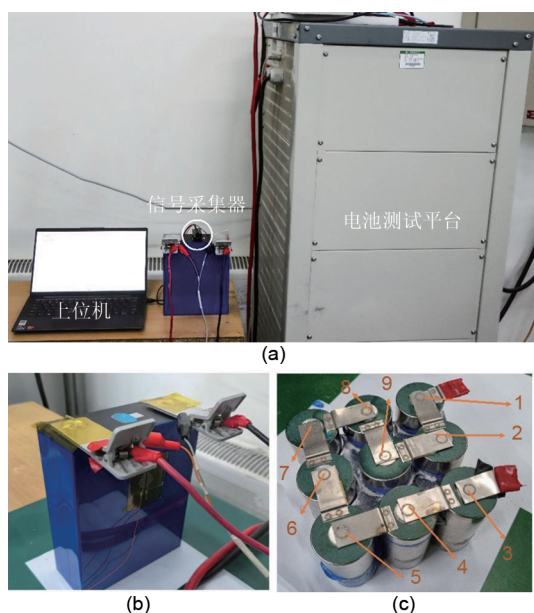


图9 电池试验平台 (a) 总试验平台; (b) 方形电池; (c) 圆柱形电池模组

Fig. 9 Battery test platform (a) General test platform; (b) Square battery; (c) Cylindrical battery module

态, 因此对电池采用恒流放电-静置-恒流充电的测试策略。测试结果如图 10 所示, 在不同电流倍率下, AgTF 所监测的温度曲线能够与电池的电压曲

线实现准确对应。且电池工作的电流倍率越大, 其最高温升越大, 在 0.225/0.25/0.275/0.3 C 下的电池最高温升分别为 18.2/20.9/24.9/29.3℃, 这与上文中数值仿真结论相同。值得注意的是, 该方形电池在初始放电/充电工况下具有较高的温升速率, 而在其后大部分时间内的温升速率较低 (曲线斜率)。这说明电池在初始阶段出现大量产热, 而经过一段时间电化学反应稳定后逐渐与外界自然对流形成了热平衡。而且, 电池放电过程的温升比充电时更高。例如, 0.225/0.25/0.275/0.3 C 电流倍率下电池放电前后的温升分别为 17.6/20.9/24.6/28.6℃, 而在其充电过程的前后温升分别为 11.74/11.21/14.46/16.96℃。这说明电池充电和放电过程中的电化-热效应有所差异, 放电过程比充电过程在相同倍率下的热效应更剧烈。以上结果反映出, 通过监测电池的温度反应可以有效反映电池的充电-放电过程、所加载电流倍率的大小以及电池运行阶段的产热速率, 从而一定程度地反映出电池的运行行为。

3.3 圆柱形电池模组传感试验

进一步对圆柱形电池模组进行不同倍率下的恒流放电测试, 采用 9 组 AgTF 同时监测模组中各电池的温度变化。测试结果如图 11 所示, 其中 9 组

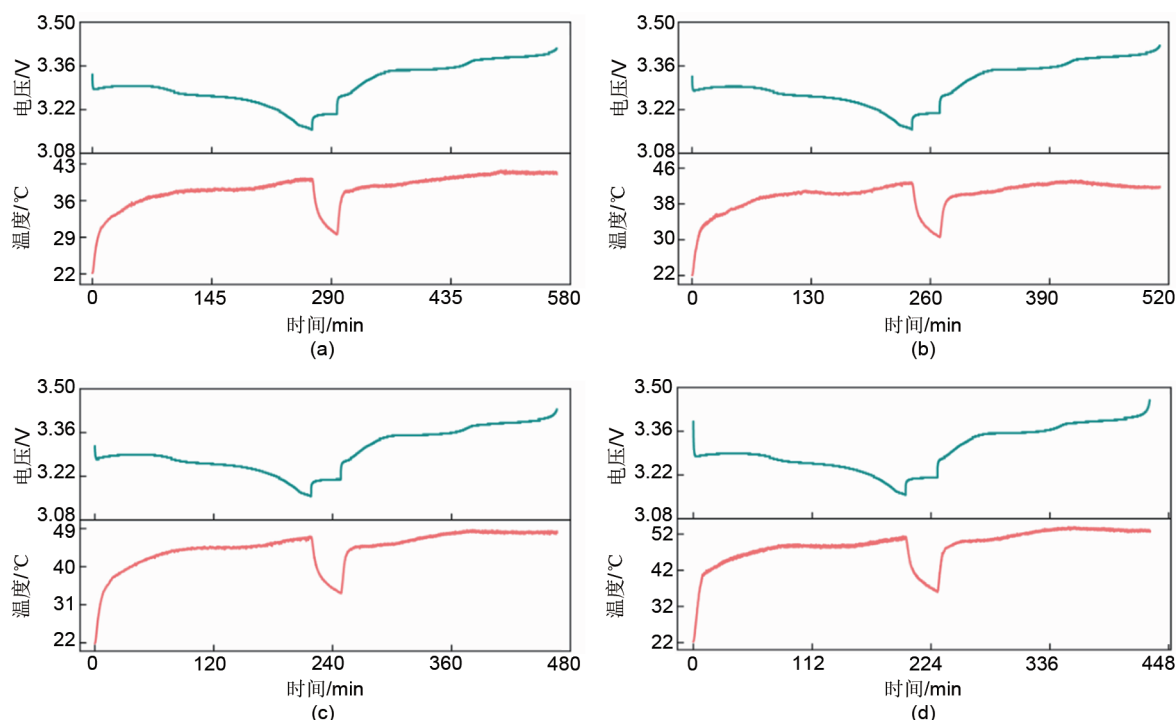


图 10 不同倍率下方型电池电压-温度曲线 (a) 0.225C; (b) 0.25C; (c) 0.275C; (d) 0.3C

Fig. 10 Voltage-temperature curves of bottom-type batteries at different magnifications (a) 0.225C; (b) 0.25C; (c) 0.275C; (d) 0.3C

AgTF采用图9(c)中的顺序编号。

在1.5/2.0/2.5 C的电流倍率下,实际测试的中心电池的温升更高(传感9),此测试结果验证了上节数值仿真模型。值得注意的是,更大的电流倍率会使中心电池与周围电池之间的温差更高,在1.5/2.0/2.5 C电流倍率下二者之间的温差分别为2.15/

3.24/4.14℃。这说明大电流倍率会加剧电池模组中温度场分布的不均匀性。而且,周围电池的各条温度曲线并非完全重合,存在一定的温差(传感1~8)。这是各单体电池之间的电学连接差异以及各电池单体之间存在一定的性能差异性所导致的。

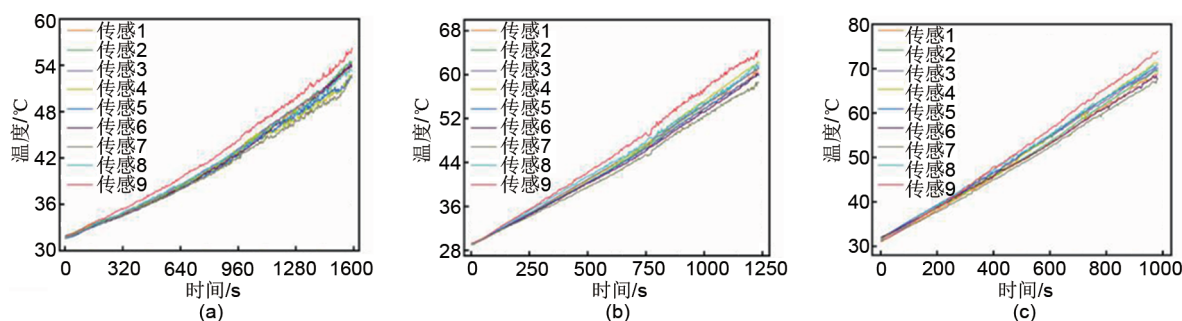


图11 不同放电倍率下圆柱电池模组温度变化 (a) 1.5 C; (b) 2.0 C; (c) 2.5 C

Fig. 11 Temperature changes in cylindrical battery modules at different discharge rates (a) 1.5C; (b) 2.0C; (c) 2.5C

通过以上测试结果可以看出,所研制的AgTF能够有效监测不同类型电池的实时温度,并能够与电池的充放电行为相关联,展现出所研制AgTF在电池温度监测方面的优异性能。

4 结 论

电动汽车动力电池模组多采用高密度排列方式,充放电过程中易产生局部热点,是热失控事故的高发场景。本研究围绕锂离子电池原位温度监测与安全预警需求,设计了一种低成本、高可重复性、超薄可穿戴式柔性温度传感薄膜AgTF,可紧密贴合方形、圆柱形等不同构型的动力电池表面,实现单体电池的分布式温度监测,精准捕捉中心电池等热点区域的温升变化,主要结论如下:

为BMS提供实时原位温度数据,辅助优化热管理策略,降低热失控风险。其低成本与阵列化优势可满足动力电池模组数百个单体的同步监测需求,适配新能源汽车的规模化生产场景。

(1) 研制的超薄可穿戴式柔性温度传感薄膜(AgTF),其厚度仅41 μm,在-20~80℃宽温度范围内展现出0.035 Ω/℃的高灵敏度与 $R^2=0.998$ 的优异线性度,且具备长时间稳定的温度-电阻响应特性。

(2) 建立了电池模组电化学-热耦合仿真模型,仿真结果揭示了模组内电池沿中心向四周的温度梯

度分布规律,证实中心电池温升始终高于周围电池,且温升与电流倍率呈显著正相关,该仿真结论经试验测试得到有效验证。

(3) 将AgTF应用于方形单体电池与圆柱形模组的实时温度监测,结果表明其温度输出曲线与电池电压曲线高度同步,可精准表征充放电过程、电流倍率变化及不同运行阶段的产热速率,为电池运行状态评估提供可靠依据。

综上所述,该超薄可穿戴式柔性温度传感薄膜与传统热电偶相比在柔性适配、监测精度、成本控制及阵列化传感方面优势显著,其通过丝网印刷技术可实现批量制备,不仅成本可控、制备重复性高,还能支持阵列化多点传感,适配多电池模组的密集化布局;同时采用粘贴式穿戴设计,安装便捷且不会对电池造成额外损伤,有效规避了传统热电偶依赖焊接或机械固定的繁琐操作,以及可能对电池散热产生的不利影响。未来,可进一步借助微纳加工技术减小传感单元尺寸,实现更高密度的阵列化监测,从而精准捕捉电池微观区域的温度场变化,为锂离子电池系统的精细化热管理与安全预警提供更有力的技术支撑。

参 考 文 献

- [1] ZHANG X Q, ZHAO C Z, HUANG J Q, et al. Recent advances in energy chemical engineering of next-generation lithium batteries

- [J]. Engineering, 2018, 4(6): 831-847. DOI: 10.1016/j.eng.2018.10.008.
- [2] 杨续来, 袁帅帅, 杨文静, 等. 锂离子动力电池能量密度特性研究进展[J]. 机械工程学报, 2023, 59(6): 239-254.
YANG X L, YUAN S S, YANG W J, et al. Research progress on energy density of Li-ion batteries for EVs[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(6): 239-254.
- [3] 来鑫, 陈权威, 顾黄辉, 等. 面向“双碳”战略目标的锂离子电池生命周期评价: 框架、方法与进展[J]. 机械工程学报, 2022, 58(22): 3-18. DOI:10.3901/JME.2022.22.003.
LAI X, CHEN Q W, GU H H, et al. Life cycle assessment of lithium-ion batteries for carbon-peaking and carbon-neutrality: Framework, methods, and progress[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(22): 3-18. DOI:10.3901/JME.2022.22.003.
- [4] WANG G W, GUO X F, CHEN J Y, et al. Safety performance and failure criteria of lithium-ion batteries under mechanical abuse[J]. Energies, 2023, 16(17): DOI:10.3390/en16176346.
- [5] NIE B S, DONG Y S, CHANG L. The evolution of thermal runaway parameters of lithium-ion batteries under different abuse conditions: A review[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 96: 112624. DOI:10.1016/j.est.2024.112624.
- [6] XIONG R, SUN W Z, YU Q Q, et al. Research progress, challenges and prospects of fault diagnosis on battery system of electric vehicles[J]. Applied Energy, 2020, 279: 115855. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115855.
- [7] GU X, SHANG Y L, LI J L, et al. Early warning of thermal runaway based on state of safety for lithium-ion batteries[J]. Communications Engineering, 2025, 4: 106. DOI: 10.1038/s44172-025-00442-1.
- [8] HOSSAIN LIPU M S, HANNAN M A, KARIM T F, et al. Intelligent algorithms and control strategies for battery management system in electric vehicles: Progress, challenges and future outlook[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 292: 126044. DOI:10.1016/j.jclepro.2021.126044.
- [9] WASEEM M, AHMAD M, PARVEEN A, et al. Battery technologies and functionality of battery management system for EVs: Current status, key challenges, and future perspectives[J]. Journal of Power Sources, 2023, 580: 233349. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2023.233349.
- [10] KONG D P, LV H P, PING P, et al. A review of early warning methods of thermal runaway of lithium ion batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 64: 107073. DOI: 10.1016/j.est.2023.107073.
- [11] KIM J, SHIN J, CHUN C, et al. Stable configuration of a Li-ion series battery pack based on a screening process for improved voltage/SOC balancing[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(1): 411-424. DOI: 10.1109/TPEL.2011.2158553.
- [12] LIU S Y, LI K, YU J. Battery pack condition monitoring and characteristic state estimation: Challenges, techniques, and future perspectives[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 105: 114446. DOI:10.1016/j.est.2024.114446.
- [13] LADPLI P, KOPSAFTOPOULOS F, CHANG F K. Estimating state of charge and health of lithium-ion batteries with guided waves using built-in piezoelectric sensors/actuators[J]. Journal of Power Sources, 2018, 384: 342-354. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.02.056.
- [14] GOLD L, BACH T, VIRSIK W, et al. Probing lithium-ion batteries' state-of-charge using ultrasonic transmission-concept and laboratory testing[J]. Journal of Power Sources, 2017, 343: 536-544. DOI:10.1016/j.jpowsour.2017.01.090.
- [15] MENG K P, CHEN X P, ZHANG W, et al. A robust ultrasonic characterization methodology for lithium-ion batteries on frequency-domain damping analysis[J]. Journal of Power Sources, 2022, 547: 232003. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2022.232003.
- [16] YANG G, LEITÃO C, LI Y H, et al. Real-time temperature measurement with fiber Bragg sensors in lithium batteries for safety usage[J]. Measurement, 2013, 46(9): 3166-3172. DOI: 10.1016/j.measurement.2013.05.027.
- [17] NASCIMENTO M, FERREIRA M S, PINTO J L. Real time thermal monitoring of lithium batteries with fiber sensors and thermocouples: A comparative study[J]. Measurement, 2017, 111: 260-263. DOI:10.1016/j.measurement.2017.07.049.
- [18] NASCIMENTO M, FERREIRA M S, PINTO J L. Temperature fiber sensing of Li-ion batteries under different environmental and operating conditions[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 149: 1236-1243. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2018.12.135.
- [19] JIA T, ZHANG Y, MA C Y, et al. The early warning for overcharge thermal runaway of lithium-ion batteries based on a composite parameter[J]. Journal of Power Sources, 2023, 555: 232393. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2022.232393.
- [20] HU X R, JIANG Z L, YAN L Q, et al. Real-time visualized battery health monitoring sensor with piezoelectric/pyroelectric poly (vinylidene fluoride-trifluoroethylene) and thin film transistor array by *in-situ* poling[J]. Journal of Power Sources, 2020, 467: 228367. DOI:10.1016/j.jpowsour.2020.228367.
- [21] BREE G, HAO H Q, STOEVA Z, et al. Monitoring state of charge and volume expansion in lithium-ion batteries: An approach using surface mounted thin-film graphene sensors[J]. RSC Advances, 2023, 13(10): 7045-7054.
- [22] DANKOCO M D, TESFAY G Y, BENEVENT E, et al. Temperature sensor realized by inkjet printing process on flexible substrate[J]. Materials Science and Engineering: B, 2016, 205: 1-5. DOI: 10.1016/j.mseb.2015.11.003.
- [23] YAN Z Y, LIU J Y, NIU J R. Research of a novel Ag temperature sensor based on fabric substrate fabricated by magnetron sputtering[J]. Materials, 2021, 14(20): DOI:10.3390/ma14206014.
- [24] BARMPAKOS D, TSAMIS C, KALTSAS G. Multi-parameter paper sensor fabricated by inkjet-printed silver nanoparticle ink and PEDOT: PSS[J]. Microelectronic Engineering, 2020, 225: 111266. DOI:10.1016/j.mee.2020.111266.
- [25] YANG J, WEI D P, TANG L L, et al. Wearable temperature sensor based on graphene nanowalls[J]. RSC Advances, 2015, 5(32):

- 25609-25615.
- [26] DAVAJI B, CHO H D, MALAKOUTIAN M, et al. A patterned single layer graphene resistance temperature sensor[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 8811. DOI:10.1038/s41598-017-08967-y.
- [27] HARADA S, KANAO K, YAMAMOTO Y, et al. Fully printed flexible fingerprint-like three-axis tactile and slip force and temperature sensors for artificial skin[J]. ACS Nano, 2014, 8(12): 12851-12857.
- [28] KONG D, LE L T, LI Y, et al. Temperature-dependent electrical properties of graphene inkjet-printed on flexible materials[J]. Langmuir, 2012, 28(37): 13467-13472. DOI:10.1021/la301775d.
- [29] 董晨晖, 杨斌, 乔志军, 等. 功率型锂离子电池的热特性分析与优化[J]. 电工电能新技术, 2025, 44(4): 60-69. DOI: 10.12067/ATEEE2309009.
- DONG C H, YANG B, QIAO Z J, et al. Thermal characteristics analysis and optimization of power lithium-ion battery[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2025, 44(4): 60-69. DOI:10.12067/ATEEE2309009.
- [30] 刘辉, 王佳, 赵晶, 等. 大容量储能电池产热行为特性及容量衰减研究[J]. 化工学报, 2025, 76(9): 4903-4912. DOI: 10.11949/0438-1157.20250076.
- LIU H, WANG J, ZHAO J, et al. Research on heat generation behavior and capacity attenuation of large capacity energy storage battery[J]. CIESC Journal, 2025, 76(9): 4903-4912. DOI: 10.11949/0438-1157.20250076.

广 告 索 引

封一 中储国能(北京)技术有限公司

封二 惠州亿纬锂能股份有限公司

封三 «储能科学与技术»期刊

封四 北京清能互联科技有限公司

后插1 南方电网电力科技股份有限公司

后插2 鄂尔多斯实验室

后插3 国家电网公司电力科学研究院电池储能技术实验室

后插4 浙江南都电源动力股份有限公司

后插5 中关村储能产业技术联盟

后插6 厦门宇电自动化科技有限公司

后插7 广西电化学能源材料与器件科技成果转化中试研究基地

后插8 北京卫蓝新能源科技有限公司

后插9 上海交通大学中英国际低碳学院

后插10 天目湖先进储能技术研究院有限公司