

基于准稳态法电池热物性参数仿真研究

余 鸿

上海工程技术大学, 机械与汽车工程学院, 上海

收稿日期: 2023年2月20日; 录用日期: 2023年3月22日; 发布日期: 2023年3月29日

摘 要

本文基于准稳态法提出了一种单体电池热物性参数测量的装置及方法, 对2.5 Ah圆柱单体电池测量中的热损失进行了数值仿真研究, 通过Creo三维建模软件建立了相关的几何求解模型, 通过Ansys中的fluent模块进行了相关的数值仿真分析。仿真首先研究了单体电池在空气中直接测量所产生的热损失, 然后研究了空气中不同对流换热系数对电池测量时所产生热损失的影响程度, 结果表明随着电池直接接触的空气对流换热系数的增大, 电池测量过程外界散失的热损失越多, 表明了测量中热损失是不能忽略的。在此基础上, 通过在电池四周包裹20 mm的绝缘材料来减少测量中产生的热损失, 结果表明电池包裹了绝缘材料时向外的热损失明显低于电池暴露在空气中直接测量。

关键词

电池热参数, 数值仿真, 热损失, 导热系数, 比热

Simulation Study on Thermophysical Parameters of Battery Based on Quasi-Steady State Method

Hong Yu

School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

Received: Feb. 20th, 2023; accepted: Mar. 22nd, 2023; published: Mar. 29th, 2023

Abstract

Based on the quasi-steady state method, this paper proposes a device and method for measuring the thermophysical parameters of a single cell, carries out numerical simulation research on the heat loss in the measurement of a 2.5 Ah cylindrical single cell, establishes the relevant geometric solution model through Creo three-dimensional modeling software, and carries out the relevant

numerical simulation analysis through the fluent module in Ansys. The simulation first studied the heat loss generated by the direct measurement of the single cell in the air, and then studied the influence of different convective heat transfer coefficients in the air on the heat loss generated by the battery during the measurement. The results showed that with the increase of the convective heat transfer coefficient of the air directly contacted by the battery, the more heat loss was lost outside the battery during the measurement, indicating that the heat loss in the measurement cannot be ignored. On this basis, the heat loss generated in the measurement is reduced by wrapping 20 mm insulating material around the battery. The results show that the outward heat loss when the battery is wrapped with insulating material is significantly lower than the direct measurement when the battery is exposed to air.

Keywords

Battery Thermal Parameters, Numerical Simulation, Heat Loss, Thermal Conductivity, Specific Heat

Copyright © 2023 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

锂离子电池作为电动汽车(EV)最有前途的电源和主要的储能模块部件[1] [2], 已经在世界范围内引发了关注。其与铅酸和磷酸铁锂电池相比具有高能量密度、无记忆效应、长寿命和低自放电率的显著优势[3] [4]。然而, 锂电池的多数性能对温度很敏感[5] [6] [7], 高温时, 电池内部的热量容易堆积, 当电池模组的热量没有进行疏导散热时将会导致其温度一直上升, 容量衰减, 寿命减少, 最终发生热失控[8] [9]。低温时将会影响电池内阻、放电容量和使用寿命[10], 电池内部的内阻增大, 放电能力急剧下降, 从而影响电动汽车的驾驶性能。因此, 设计出一套高效、合理的锂离子电池热管理系统是非常重要的。而锂离子电池热管理和热设计与电池热物性参数如比热容和导热系数密切相关, 深入研究锂离子电池热物性参数及其热行为, 对于准确预测电池温度变化、进行有效的热管理和热防护有重要的指导和实际意义。Zhang 等人[11]基于传热学集总参数法建立了锂离子电池的比热容理论模型, 以方形 LiCoO₂ 电池为研究对象, 测得比热容为 $908 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ 。Drake 等[12]基于准稳态原理对 18,650 和 26,650 两种尺寸圆柱电池的导热系数和比热进行了测量。Loges 等人[13]对 6 种不同电池材料进行比热容测量, 发现比热容随温度增加而增加, 受荷电状态(SOC)影响较小, 在 25°C 时比热容取值在 $870\sim 1040 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ 之间。Maleki 团队[14]使用激光闪光技术测量了电池电极材料层的导热系数和比热。然而, 上述研究在实际测量中都未考虑热损的影响。吴青余等人[15]在考虑热损的情况下采用校准量热法对锂电池的比热和生热率进行了测量。

本文提出了一种基于准稳态法的单体电池热物性参数测量装置, 通过 Ansys 仿真软件对所提出的装置测量中的热损失进行了数值仿真。仿真研究了不同对流换热系数下电池的温度分布及向外热损失情况。

2. 基于准稳态测量的理论分析

本文针对 2.5 Ah 的圆柱单体电池进行了研究, 通过在电池表面建立恒热流边界条件来测量其轴向导热系数及比热。具体分析如下:

将恒定热流 q 输入到相对于电池负端子表面, 假设其他边界绝热, 电池的温度随着时间呈上升的趋

势。根据瞬态热传导理论[16]，电池在短时间加热后就能够达到准稳态，由能量守恒定理得：

$$qS = mc \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

式中， q 垂直于电池负极端子表面的热流， S 是圆柱形电池的端子表面面积， m 和 c 是电池的质量和平均比热， dT/dt 代表电池的平均温升率。

因此，电池的平均比热 c 可以表示为

$$c = \frac{q_H''}{\rho H \frac{dT}{dt}} \quad (2)$$

式中， ρ 和 H 分别为锂离子电池的密度和长度。

对于电池轴向加热的情况，热传导微分方程和边界条件由下式给出

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \frac{\rho c}{k_z} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3)$$

在 $Z = H$ 时

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{1}{k_z} q_H'' \quad (4)$$

在 $Z = 0$ 时

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

其中 $\theta(z, t)$ 是电池温升， k_z 是电池的轴向导热系数。

考虑电池的初始温度与环境温度相同，即 $\theta(r, 0) = 0$ ，用拉普拉斯变换法或变量分离法求解热微分方程(3)，得到温度场的时空解析解

$$\theta(z, t) = \frac{q_H''}{\rho c H} t + \frac{q_H''}{2k_z H} \left(Z^2 - \frac{H^2}{3} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} 2q_H'' H}{k_z (n\pi)^2} \cos\left(\frac{n\pi z}{H}\right) e^{-F_o(n\pi)^2} \quad (6)$$

其中 F_o 是热傅里叶数。电池轴向传导期间的热傅里叶数计算如下

$$F_o = \frac{k_z t}{\rho c H^2} \quad (7)$$

根据公式(6)，可以通过 $\theta(0, t)$ 和 $\theta(H, t)$ 之间的差值获得与电池轴向导热系数 k_z 有关的表式

$$\Delta T = -\frac{q_H'' H}{2k_z} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} 2q_H'' H}{k_z (n\pi)^2} e^{-F_o(n\pi)^2} \quad (8)$$

式中， ΔT 是锂离子电池正极和负极端子表面之间的温差。

由于时间的指数依赖性，发现当傅里叶数超过二分之一时，方程(8)中级数项的数值可以忽略。因此，电池的轴向导热系数 k_z 以简化为

$$k_z = -\frac{q_H'' H}{2\Delta T} \quad (9)$$

3. 数值仿真分析

本文以 2.5 Ah 的 18,650 圆柱单体电池为仿真研究对象，本文仿真建立的包裹绝热材料装置的三维几何模型如图 1 所示，在 Ansys 中 fluent 模块对其进行数值仿真分析，仿真设置边界条件如表 1 所示：

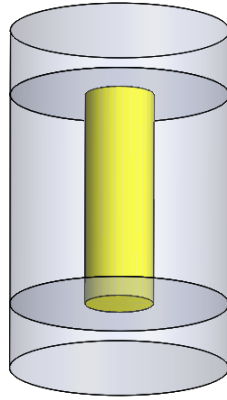


Figure 1. Device structure diagram
图 1. 装置结构图

Table 1. The parameters in simulation model
表 1. 数值仿真模型参数

参数	18,650 电池
电池直径(mm)	18.2
电池长度(mm)	65
电池密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2708
电池比热($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)	1028 [15]
电池轴向导热系数($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)	14
电池径向导热系数($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)	1.045 [17]
初始环境温度($^{\circ}\text{C}$)	25
输入热流($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	3844

仿真在 25°C 下进行, 在电池负极端面输入 $3844 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的热流, 仿真先研究了电池外部对流换热系数在 $5\sim 50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ 时的热损失情况, 此时电池直接与空气接触, 然后在电池四周裹上 20 mm 绝热材料, 在绝热材料四周输入相同的对流换热系数研究其向外热损失, 时间总步长设置为 600 s , 仿真监测电池正负端面的面平均温度, 同时监测电池正负端面及侧面的热损。

图 2 为仿真中电池直接暴露在空气中和包裹气凝胶后的仿真网格图, 所有组成均以六面体网格为主导去绘制网格, 仿真中所用绝热材料为二氧化硅气凝胶。

4. 结果与讨论

图 3 为电池暴露在空气中直接测量热参数的 600 s 温度云图, 从图中看出, 随着电池所处环境对流换热系数的增大, 电池单体温度下降, 表明对流换热系数的增大加强了测试中向外的热损失。

图 4(a)为电池暴露在空气中, 不同对流换热系数的电池热损随时间变化图, 结果表明即使在外界对流换热系数为 $5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ 时电池向外散失的热流都占输入热流的 2.9% , 且随着对流换热系数的增大电池向外散失的热流进一步增加, 在外界对流换热系数为 $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ 时向外散失的热流占输入热流的 11.5% 。图 4(b)显示随着电池所处环境对流换热系数的增大, 电池轴向导热系数测量值与输入值的相对误差也增加, 且在外界对流换热系数为 $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ 时, 电池导热系数测量值的相对偏差高达 20% , 表明测试中热损不能忽略。

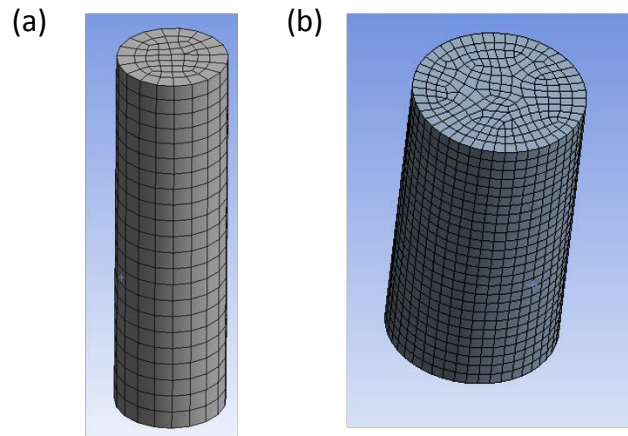


Figure 2. (a) Battery grid (b) Single battery with insulation material grid

图 2. (a) 单体电池网格 (b) 单体电池带绝热材料网格

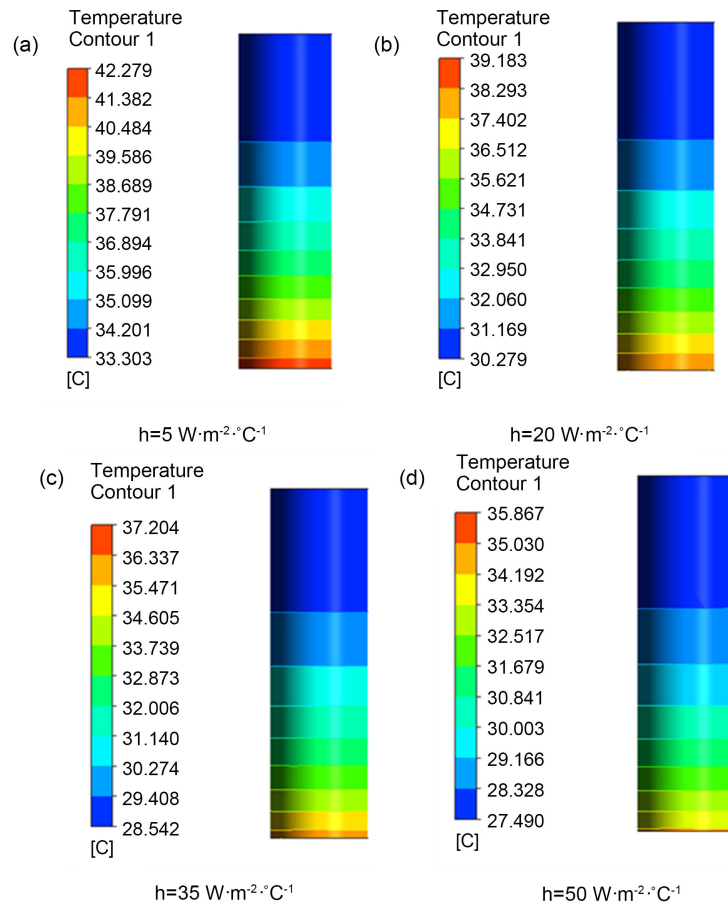


Figure 3. Temperature cloud image measured at 600 s when the battery is exposed to air (a) convective heat transfer coefficient $5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ (b) Convective heat transfer coefficient $20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ (c) Convective heat transfer coefficient $h = 35 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ (d) Convective heat transfer coefficient $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$

图 3. 600 s 时电池直接暴露在空气中测量的温度云图 (a) 对流换热系数 $h = 5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ (b) 对流换热系数 $h = 20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ (c) 对流换热系数 $h = 35 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ (d) 对流换热系数 $h = 50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$

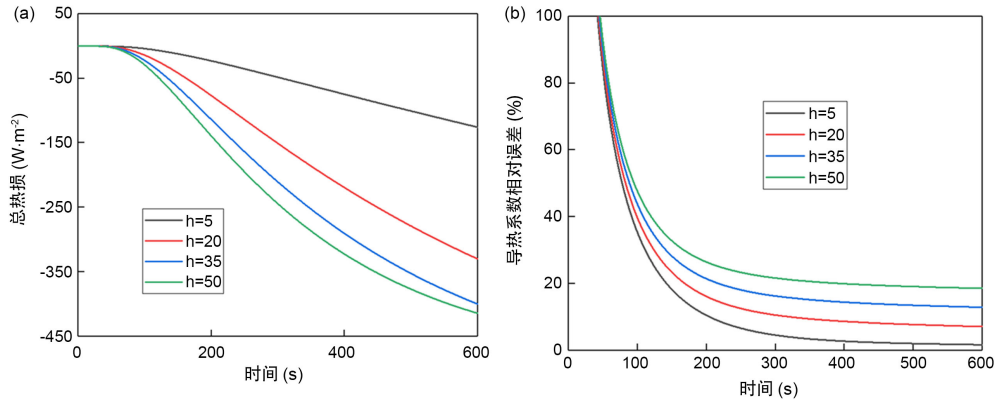


Figure 4. (a) Heat loss diagram under different convective heat transfer coefficients (b) Relative error diagram between the measured value of thermal conductivity and the simulated input value under different convective heat transfer coefficients

图 4. (a) 不同对流换热系数下热损图 (b) 不同对流换热系数导热系数测试值与仿真输入值相对误差图

图 5 为电池包裹绝热材料装置的 600 s 温度云图, 图中表明随着电池所处环境对流换热系数的增大(此时对流换热系数施加在绝热材料外部), 电池单体温度略微下降, 且在相同的对流换热系数条件下, 包裹了绝热材料装置的单体电池温度明显高于电池直接暴露在空气中的电池温度, 表明了增加绝热材料后明显降低了测试中的热损。

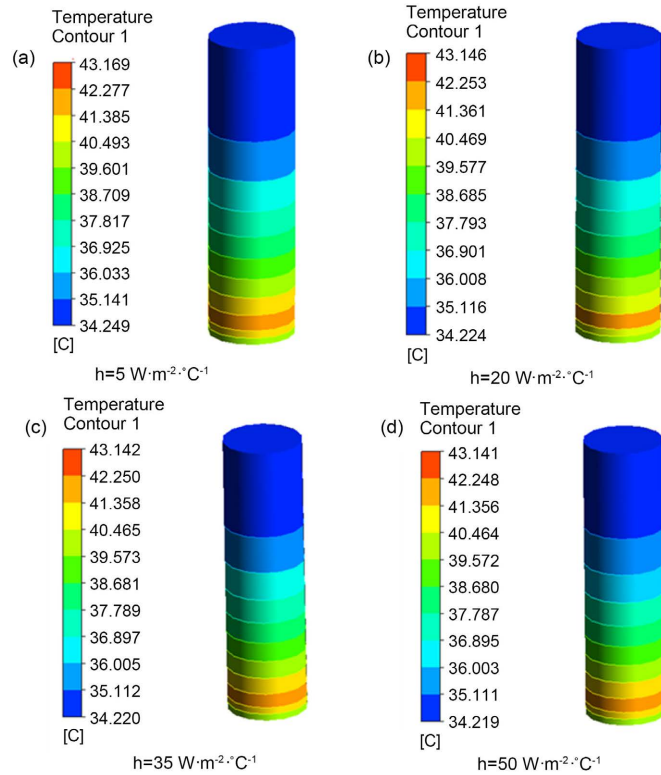


Figure 5. Temperature cloud picture of the cell coated with adiabatic material at 600 s (a) convective heat transfer coefficient $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ (b) Convective heat transfer coefficient $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ (c) Convective heat transfer coefficient $h = 35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ (d) Convective heat transfer coefficient $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$

图 5. 600 s 时裹上绝热材料电池温度云图 (a) 对流换热系数 $h = 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ (b) 对流换热系数 $h = 20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ (c) 对流换热系数 $h = 35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ (d) 对流换热系数 $h = 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$

图 6(a)为包裹绝热材料后不同对流换热系数下电池的热损图, 结果表明在电池四周裹上绝热材料, 电池向外的热损失得到了减少, 且测试热损随对流换热系数的增大几乎不增加。图 6(b)显示随着电池所处环境对流换热系数的增大, 电池轴向导热系数测量值与输入值的相对误差几乎不变, 测试中热损随着时间的增加而增加, 且在外界对流换热系数为 $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ 时, 电池导热系数测量值的相对偏差控制在 5% 以内, 表明加入绝热材料显著降低了热损。

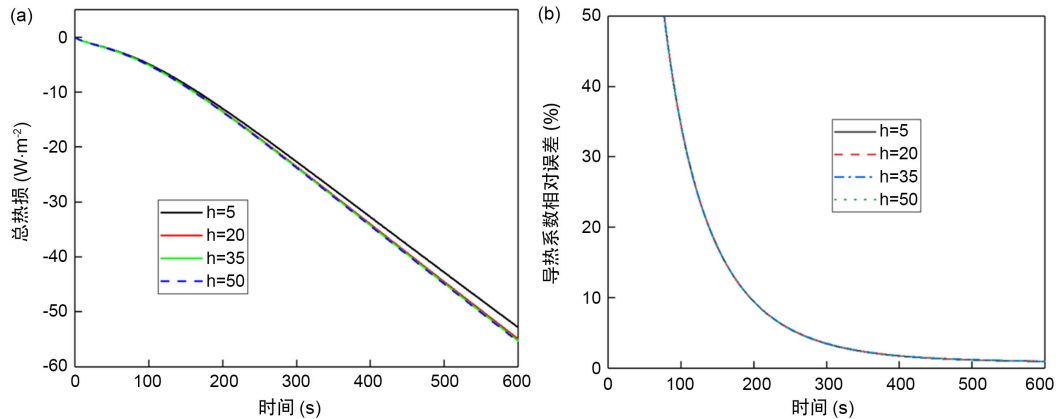


Figure 6. (a) Heat loss diagram under different convective heat transfer coefficients (b) Relative error diagram between the measured value of thermal conductivity and the simulated input value under different convective heat transfer coefficients

图 6. (a) 不同对流换热系数下热损图 (b) 不同对流换热系数导热系数测试值与仿真输入值相对误差图

5. 实验验证

针对本文提出的两种测量装置, 在 25C 采用 304 不锈钢模拟电池进行了验证, 模拟电池的尺寸与 18,650 锂电池一致, 在模拟电池负极端面采用直径为 18 mm 的薄膜加热器进行加热, 薄膜加热器与直流电源相连以恒功率提供热流, 在电池正、负极端面布置热电偶以监测温度。对单体模拟电池来说, 以 1 W 恒功率对其进行加热, 通过正负极温差采用公式计算出比热和导热系数值, 其测量值及与 304 不锈钢的标准值误差均如表 2 所示:

Table 2. Test results and error analysis of dummy batteries made of ANSI 304 stainless steel

表 2. 不锈钢模拟电池的测试结果和误差分析

	ANSI 304 不锈钢		直接暴露在空气		裹上绝热材料	
	标准值	测试值	误差	测试值	误差	
导热系数($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)	14.9 [18]	16.8	12.75%	15.6	4.70%	
比热($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)	477 [18]	617	29.35%	538	12.79%	

结果表明, 在电池测量中的热损是不能忽略的, 对于比热测量来说, 在电池四周裹上绝热材料大大提高了其测量精度。

6. 结论

本文基于准稳态法对 2.5 Ah 圆柱单体电池测量中的热损失进行了数值仿真研究, 结果表明随着电池直接接触的空气对流换热系数的增大, 电池测量过程向外散失的热损失越多, 即使在外界对流换热系数为 $5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ 时电池向外散失的热流都占输入热流的 2.9%, 在外界对流换热系数为 $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ 时

向外散失的热流占输入热流的 11.5%，电池导热系数测量值的相对偏差高达 20%。在电池四周裹上绝热材料可减少测试中产生的热损，随着电池所处环境对流换热系数的增大，电池单体温度略微下降，且在外界对流换热系数为 $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ 时，电池导热系数测量值的相对偏差控制在 5% 以内，指出了在电池热物性参数测试中，向外的热损不能忽略。同时，本文针对提出的两种装置，采用 304 不锈钢模拟电池进行了验证，结果表明在电池四周裹上气凝胶后，电池导热系数测量值的偏差从 12.75% 降至 4.70%，比热测量值的偏差从 29.35% 降至 12.79%，进一步表明了测试中热损是不容忽视的。

参考文献

- [1] Ng, S.S.Y., Xing, Y.J. and Tsui, K.L. (2014) A Naive Bayes Model for Robust Remaining Useful Life Prediction of Lithium-Ion Battery. *Applied Energy*, **118**, 114-123. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.020>
- [2] Mathew, M., Kong, Q.H., Mcgrory, J. and Fowler, M. (2017) Simulation of Lithium Ion Battery Replacement in a Battery Pack for Application in Electric Vehicles. *Journal of Power Sources*, **349**, 94-104. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.010>
- [3] Zhang, X. and Bai, X. (2017) Incentive Policies from 2006 to 2016 and New Energy Vehicle Adoption in 2010-2020 in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **70**, 24-43. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.211>
- [4] Yi, J., Kim, U.S., Shin, C.B., Han, T. and Park, S. (2013) Modeling the Temperature Dependence of the Discharge Behavior of a Lithium-Ion Battery in Low Environmental Temperature. *Journal of Power Sources*, **244**, 143-148. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.02.085>
- [5] Tan, M.X., Gan, Y.H., Liang, J.L., et al. (2020) Effect of Initial Temperature on Electrochemical and Thermal Characteristics of a Lithium-Ion Battery during Charging Process. *Applied Thermal Engineering*, **177**, Article ID: 115500. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115500>
- [6] Lu, Z., Yu, X.L., Wei, L.C., et al. (2019) A Comprehensive Experimental Study on Temperature-Dependent Performance of Lithium-Ion Battery. *Applied Thermal Engineering*, **158**, Article ID: 113800. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113800>
- [7] Ma, S.A., Jiang, M.D., Tao, P., et al. (2018) Temperature Effect and Thermal Impact in Lithium-Ion Batteries: A Review. *Progress in Natural Science: Materials International*, **28**, 653-666. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.11.002>
- [8] Feng, Z.C. and Zhang, Y.W. (2014) Safety Monitoring of Exothermic Reactions Using Time Derivatives of Temperature Sensors. *Applied Thermal Engineering*, **66**, 346-354. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.023>
- [9] Tarascon, J.-M. and Armand, M. (2001) Issues and Challenges Facing Rechargeable Lithium Battery. *Nature*, **414**, 359-367. <https://doi.org/10.1038/35104644>
- [10] Piao, N., Gao, X., Yang, H., et al. (2022) Challenges and Development of Lithium-Ion Batteries for Low Temperature Environments. *eTransportation*, **11**, Article ID: 100145. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2021.100145>
- [11] Zhang, X., Klein, R., Subbaraman, A., et al. (2019) Evaluation of Convective Heat Transfer Coefficient and Specific Heat Capacity of a Lithium-Ion Battery Using Infrared Camera and Lumped Capacitance Method. *Journal of Power Sources*, **412**, 552-558. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.11.064>
- [12] Drake, S.J., Wetz, D.A., Ostanek, J.K., et al. (2014) Measurement of Anisotropic Thermophysical Properties of Cylindrical Li-Ion Cells. *Journal of Power Sources*, **252**, 298-304. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.11.107>
- [13] Loges, A., Herberger, S., Seegert, P. and Wetz, T. (2016) A Study on Specific Heat Capacities of Li-Ion Cell Components and Their Influence on Thermal Management. *Journal of Power Sources*, **336**, 341-350. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.10.049>
- [14] Maleki, H., Wang, H., Porter, W. and Hallmark, J. (2014) Li-Ion Polymer Cells Thermal Property Changes as a Function of Cycle-Life. *Journal of Power Sources*, **263**, 223-230. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.04.033>
- [15] 吴青余, 张恒运, 李俊伟. 校准量热法测量锂离子电池比热容和生热率[J]. *汽车工程*, 2020, 42(1): 59-65.
- [16] Hu, H.-P. (2004) On the Conditions Necessary and Sufficient for Establishing Quasistationary Temperature Distribution. *Journal of Applied Sciences*, **22**, 91-93.
- [17] Sheng, L., Zhang, Z., Su, L., et al. (2021) Quasi Steady State Method to Measure Thermophysical Parameters of Cylindrical Lithium Ion Batteries. *Journal of Power Sources*, **485**, Article ID: 229342. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229342>
- [18] Incropera, F.P., DeWitt, D.P. and Bergeman, T.L. (2007) Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 6th Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.