

方形锂离子电池热行为集总建模仿真与实验

林福兴^{1,2}, 吴国庆³, 陈丙三^{1,2}, 范成龙^{1,2}

(1. 福建省智能加工技术及装备重点实验室, 福建 福州 350118;

2. 福建工程学院 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118;

3. 福建云众动力科技有限公司, 福建 福州 350000)

摘要: 针对锂离子电池电化学产热机理复杂、热分析建模参数多等问题, 引入集总模型思想, 建立单体方形电池少参化产热模型。通过大量实验、数据分析, 辨识电池热物性参数, 获得基于真实物理参数的热行为仿真集总模型。对比单体电池在不同放电倍率下温度场的实验数据和仿真结果发现: 在0.2、0.5、1 C 恒流放电工况下, 集总模型对电池表面温度的预测误差均低于0.55℃, 误差率小于1.94%, 达到实际工程预测精度要求。该研究结果可为商业化锂离子电池热行为分析提供参考。

关键词: 单体方形锂离子电池; 热建模; 集总模型; 热物性参数; 有限元分析

中图分类号: U262.44

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2023)01-0049-06

Thermal behavior of square lithium-ion batteries based on lumped model

LIN Fuxing^{1,2}, WU Guoqing³, CHEN Bingsan^{1,2}, FAN Chenglong^{1,2}

(1. Fujian Key Laboratory of Intelligent Machining Technology and Equipment, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

3. Fujian Edgelion Power Technology Co., Ltd., Fuzhou 350000, China)

Abstract: To address the problems of complex electrochemical heat generation mechanism of lithium-ion batteries and multiple parameters of thermal analysis modeling, the idea of lumped model was introduced to establish a minimal parametric heat generation model for single square battery. The thermal parameters of the battery were identified through a large number of experiments and data analysis, and a lumped model of the thermal behavior based on real physical parameters was obtained. Comparing the experimental data and simulation results of the temperature field of single battery at different discharge rates, it is found that the errors of the lumped model for the prediction of the battery surface temperature are all lower than 0.55℃ and the error rate is less than 1.94% under 0.2C, 0.5C and 1C constant current discharge conditions, which meets the requirement of actual engineering prediction accuracy. This study can provide some credible references for the analysis of the thermal behavior of commercial lithium-ion batteries.

Keywords: single square lithium-ion battery; thermal modeling; lumped model; thermophysical parameter; finite element analysis

锂离子电池使用时, 过高的温度会对电池内部材料造成不可逆损伤, 并可能引发膨胀、泄露、爆炸等事故^[1]。目前, 国内外学者针对单体锂离子电池的热特性进行了大量的研究, 李夔宁^[2]等

人建立电化学热耦合模型, 通过实验测量等方式得到电化学相关复杂参数, 研究不同放电倍率下锂离子电池的产热速率。匡柯^[3]等人对电化学模型参数分为尺寸测量参数、待辨识参数、待标定

收稿日期: 2022-11-06

第一作者简介: 林福兴(1997—), 男, 福建莆田人, 硕士研究生, 研究方向: 电池热管理。

通信作者: 陈丙三(1980—), 男, 安徽宿州人, 教授, 博士, 研究方向: 智能材料及工程运用、高效精密加工技术。

参数和文献参考参数,分析各种参数获取方法并得到参数。最后对模型进行实验验证并对部分参数进行敏感性分析。Zhang^[4]等人建立一维电化学模型和三维轴对称传热模型的热耦合模型,分析了放电过程中的发热速率和散热速率。以上电化学表征均基于 Newman 模型进行描述,在实际工程应用中,由于对电池内部化学信息了解有限,且商业电池具有保密性,使得 Newman 模型难以应用于锂离子电池热耦合仿真中。

因此,本文引入集总产热建模思想对商业化(YJT19124133)24AH 方形锂离子电池(尺寸 133 mm×124 mm×19.5 mm)进行热行为研究分析,结合设计实验辨识模型所需要的热参数,建立集总产热与传热相耦合的热分析仿真模型,从而获得方形锂离子电池的动态热行为。

1 锂离子电池热建模

锂离子电池热行为包含产热行为和传热行为,产热模型影响电池内部的温度场分布,而传热模型会反作用于锂离子电池的产热,因此,热分析时需将产热模型与传热模型进行热耦合。

1.1 集总产热模型建模原理

单体电池内部由正负极材料、集流体、隔膜等不同材料堆叠组成,其微观生热和导热较为复杂,在进行热分析时涉及的内部参数多,例如电极厚度、粒径、扩散系数、锂离子浓度和其他材料参数特性,难以准确识别,且各参数的累积误差将造成热仿真数值偏差较大。为此,本文采用集总建模思想描述电池的产热行为:基于 Bernardi 均匀产热理论^[5],认为电池是一个内部产热特性均匀、导热特性各向异性的一个“黑箱”,可将电池内部难以识别的参数汇集成某种统一形式,从而使需要识别的参数大幅减少。基于集总建模思想,电池的产热速率 q 可用下式描述:

$$\begin{cases} q = \frac{I_{\text{cell}}}{V} [E_{\text{ocv}} - U - T \frac{dE_{\text{ocv}}}{dT}] \\ E_{\text{ocv}} = U + \eta \\ \eta = \eta_{1C} \frac{I_{\text{cell}}}{I_{1C}} \end{cases} \quad (1)$$

式中, I_{cell} 为锂离子电池充放电电流, A; V 为电池体积, m^3 ; E_{ocv} 为电池开路电势, V; U 为电池端电压, V; T 为热力学温度, K; dE_{ocv}/dT 为温度系数, V/K ; η 为过电势, V; η_{1C} 为 1C 电流的过电势, V;

I_{1C} 为电池 1C 倍率的电流, A。

集总建模分析时,仅需确定锂离子电池主要外部参数:温度系数 dE_{ocv}/dT 和过电势 η ; 1C 倍率电流 I_{1C} 和锂离子电池体积 V 可根据电池规格书获取;锂离子电池充放电电流 I_{cell} 和热力学温度 T 根据需求设置,过电势 η 根据电流为 1C 时的过电势 η_{1C} 求解获取。 dE_{ocv}/dT 与 η_{1C} 可通过实验获取:实验环境温度为 25 °C,且温度变化在 20 ~ 40 °C,可认为过电势 η 仅随 SOC(State of Charge)变化。通过 HPPC(Hybrid Pulse Power Characteristic)^[6] 获得 1C 电流过电势 η_{1C} 随着 SOC 的变化曲线,如图 1 所示,通过电位法^[7] 获得温度系数 dE_{ocv}/dT 随着 SOC 的变化曲线,如图 2 所示。

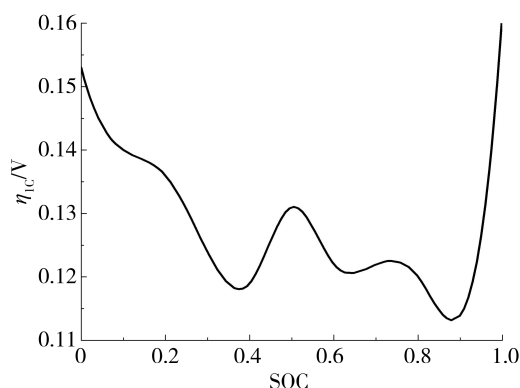


图 1 1C 过电势变化曲线

Fig.1 1C over-potential change curve

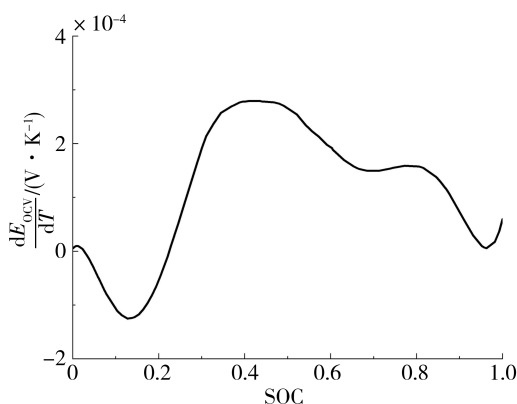


图 2 温度系数变化曲线

Fig.2 Temperature coefficient variation curve

1.2 传热模型

物质之间的传热方式主要有热传导、热对流和热辐射 3 种,热辐射对于电池热量传递的影响可忽略不计,主要通过热传导与热对流方式进行电池热量传递。电池内部材料之间表现为热传导方式,遵循 Fourier 定律;电池表面与空气之间为

热对流传递方式,遵循 Newton 冷却定律。两种传热方式的传递模型可分别表述为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q \quad (2)$$

式中, ρ 为电池密度, kg/m^3 ; C_p 为电池比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; k 为电池导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; q 为电池生热速率, $\text{W} \cdot \text{m}^3/\text{kg}$ 。

$$mC_p \frac{dT}{dt} = -hA(T - T_a) \quad (3)$$

式中, m 为电池质量, kg ; A 为有效散热面积, m^2 ; h 为换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_a 为环境温度, K ; 本文采用恒温箱模拟环境温度,故 T_a 为定值常数。

2 方型锂离子电池传热特性及参数辨识

锂离子电池为某公司新款方形磷酸铁锂电池。限于商业产品技术保密性,无法提取材料属性,同时难以通过文献对热参数进行定义,因此,本文设计了方形加热片实验、圆形加热片实验和自然散热实验,依据实验结果对定压比热容、导热系数和传热系数进行参数辨识。

2.1 方形加热片实验

在绝热条件下,采用与方形电池正面大小相同的加热片 ($133 \text{ mm} \times 124 \text{ mm}$),热电偶贴在电池边长 $133 \text{ mm} \times 124 \text{ mm}$ 面中心处,采用多路温度记录仪读取温度数据,加热功率通过直流电源获取,对电池加热取得电池温升曲线。为了提供绝热实验环境,采用导热系数小于 $0.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的玻璃纤维棉进行隔热作用,符合工程要求,分别如图 3 所示。

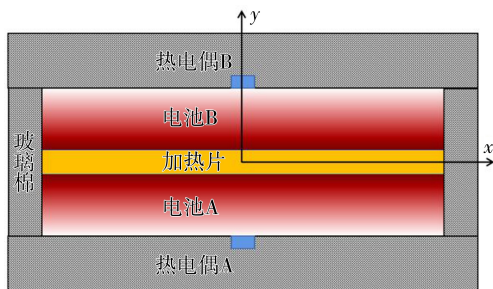


图 3 方形加热片装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of square heating device

通过预实验发现对电池加热 180 s 即得到所需线性温升曲线,也可以保证电池的局部温度在安全范围内。通过实验获取温度 T 随加热时间 t

的变化趋势,如图 4 所示。将呈现线性关系的实验数据进行拟合,得到 dT/dt 值为 0.0177 K/s 。

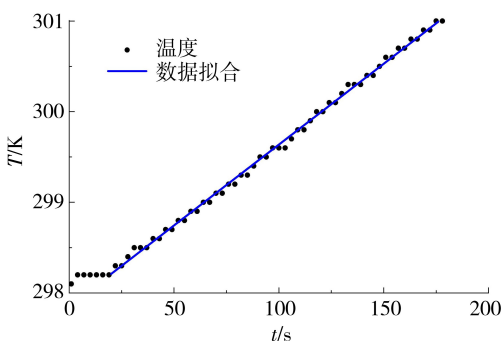


图 4 方形加热片实验温度图

Fig.4 Experimental temperature diagram of square heating device

2.1.1 定压比热容

比热容 C_p 的定义为:

$$C_p = \frac{Q}{m\Delta T} \quad (4)$$

式中, Q 为电池吸收热量, J ; ΔT 为温度变化量, K 。式(4)可进一步整理为:

$$C_p = \frac{P}{mdT/dt} \quad (5)$$

式中, P 为加热功率, W 。通过方形加热片实验得到值 dT/dt , 即可求得电池的定压比热容 $C_p = 1478.9524 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

2.1.2 纵向导热系数参数

建立坐标系如图 3 所示,电池内部的热量传递描述方程为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (6)$$

在忽略边缘效应情况下,方形加热片实验可视为只沿 y 方向的导热过程,忽略横向导热的影响。则式(6)可简化为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (7)$$

对式(7)整理成常微分方程得式(8):

$$T(y) = \frac{\rho C_p \partial T / \partial t}{k_y} y^2 + C_2 y + C_3 \quad (8)$$

式中: C_2 和 C_3 为待定常数。从加热开始到任意时刻,可认为加热片产生的热量全部用于电池加热,则可得到方程(9):

$$\left(\frac{\int_0^d T(y) dy}{d} - T_0 \right) m C_p = P t \quad (9)$$

式中, d 为电池的厚度, m ; T_0 为初始温度, K 。实验边界条件:

1) 边界 $y=d$ 处为绝热环境, 得出:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=d} = 0 \tag{10}$$

2) 边界温度已知, 得出:

$$T(y) \big|_{y=d} = T_s \tag{11}$$

式中, T_s 为表面温度, K 。

综上所述, 即可对式(8)进行求解, 辨识纵向导热系数 k_y 。由图 4 所示, 排除前期加热阶段的温度点。对其余线性温升阶段每点温度辨识, 获取纵向导热系数。为减少误差, 提高参数辨识的精确度与可靠性, 对系数 k_y 取平均。纵向导热系数 $k_y = 0.236\ 0\ W/(m \cdot K)$ 。

2.2 圆形加热片实验

为辨识横向导热系数 k_x , 实验方案设计如图 5 所示。圆形加热片直径 340 mm, 加热时间取值的条件与方形加热片相同, 截取线性温升阶段, 加热时间为 960 s。为避免边缘效应的影响, 热电偶 A2、B2 应远离边缘处, 热电偶 A2、B2 与热电偶 A1、B1 相距 3.5 cm。实验温度曲线如图 6 所示。

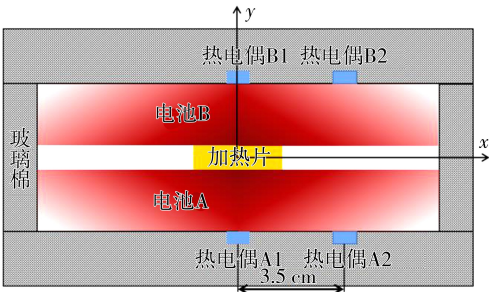


图 5 圆形加热片装置示意图

Fig.5 Schematic of circular heating device

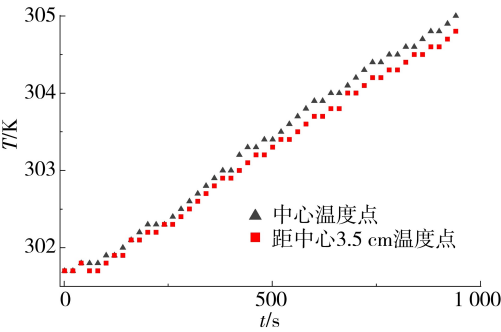


图 6 实验温度曲线

Fig.6 Experimental temperature curve

忽略纵向导热影响, 式(6)简化为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \tag{12}$$

联立式(5)、(12)整理得:

$$\frac{P}{V} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \tag{13}$$

考虑到电池表面温度趋势呈对称分布, 对称轴处于加热中心, 对式(13)整理为:

$$T(x) = \frac{P}{V \cdot k_x} x^2 + C \tag{14}$$

式中, C 为待定常数。已知功率 P 与体积 V , 结合不同位置温度数据, 可求解辨识横向导热系数 $k_x = 52.794\ 8\ W/(m \cdot K)$ 。

2.3 自然散热实验

换热系数是电池热行为分析的重要参数之一, 与电池表面结构、材料及空气流动速度等因素有关。限于文章篇幅, 自然散热实验的设计不再进行详细阐述, 可参考文献[8]。由于实验环境因素无较大变化, 故 h 可视为常数值。简化式(3)得:

$$T(t) = T_a + (T(0) - T_a) \cdot e^{-\frac{hA}{mC} \cdot t} \tag{15}$$

对式(15)两边取对数, 获得关于时间 t 的线性函数:

$$\ln \frac{T(t) - T_a}{T(0) - T_a} = -\frac{hA}{mC} \cdot t \tag{16}$$

由式(16)可知, 换热系数 h 与其斜率相关, 因此, 可通过测试锂离子电池在自然散热状态下温度随时间变换进行求解, 实验测得温度随时间变化曲线代入式(16)并进行线性拟合, 如图 7 所示, 获得换热系数 $h = 14.2\ W/(m^2 \cdot K)$ 。

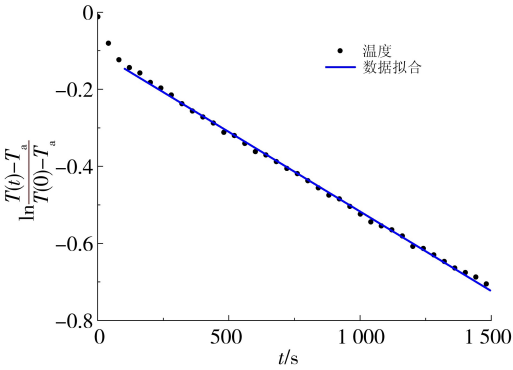


图 7 数据整理拟合图

Fig.7 Data collation and fitting diagram

3 热行为仿真分析与实验验证

3.1 单体电池热仿真

基于上述集总产热模型与传热模型耦合建立电池热模型,并代入辨识获取的相关热参数,运用 COMSOL Multiphysics 对锂离子电池进行热仿真,采用瞬态求解器并参数化扫描研究 3 种不同电流下的电池热特征。结合方形锂离子电池的结构特征,将其简化为等尺寸的标准长方体,采用正四面体网格划分,该网格划分包含四面体单元 52 270 个,三角形单元 4 822 个,边单元 240 个和顶点单元 10 个。在安全放电倍率范围内,取不同倍率

0.2、0.5、1C^[8]放电热仿真,结果如图 8 所示。在电池完全放电 24 AH 的情况下,由图 8(a)可知,1C 放电倍率时,电池最高温度 29.58℃,最低温度 28.57℃,温差 1.01℃;由图 8(b)可知,0.5C 放电倍率时,电池最高温度 26.67℃,最低温度 26.34℃,温差 0.33℃;由图 8(c)可知,0.2C 放电倍率时,电池最高温度 25.51℃,最低温度 25.44℃,温差 0.07℃。由图 8(a)(b)(c)可见:上下表面温度低于侧面温度,此现象是由电池各向异性的导热系数和电池各表面积不同引起的。当放电电流愈大,电池表面最大与最小温度之间温度差值愈大,电池温度一致性愈差。

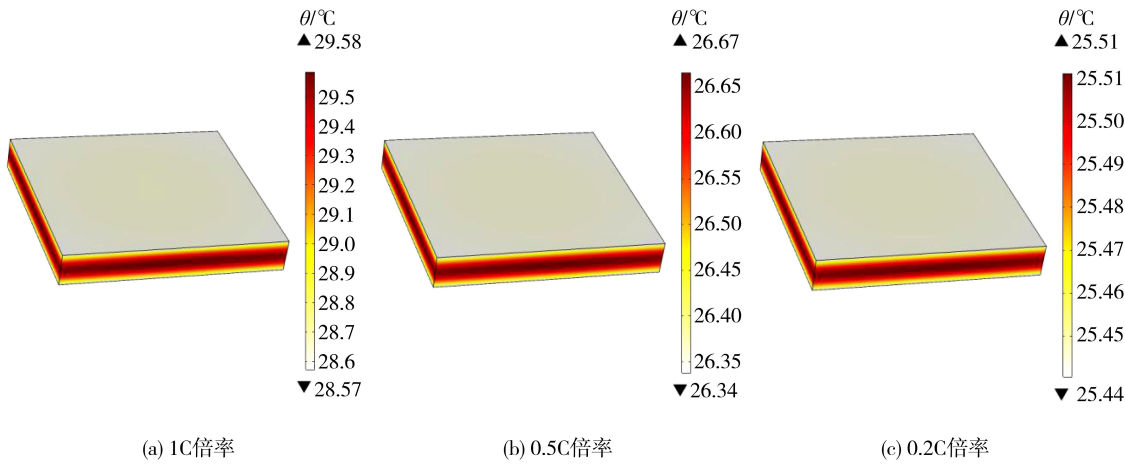


图 8 不同倍率全放电仿真温度示意图

Fig.8 Schematic diagram of full-discharge simulation temperature with different ratios

3.2 单体电池温升实验

搭建温升实验平台,结合仿真环境进行测试:将电池置于 25℃ 恒温箱内,采用 0.2、0.5、1C 放电倍率,测量锂离子电池表面温度变化,并与仿真数值比对,结果如图 9 所示。

在 0.2、0.5、1C 3 种放电倍率下的仿真建模温度与实验测量温度基本吻合。在放电深度 DOD (Depth of Discharge) 约为 0.25 时,0.2 与 0.5C 的温度曲线开始缓慢下降,1C 温度曲线趋于平缓,当 DOD 约为 0.6 时,0.2 与 0.5C 的温度曲线降到最低。导致此现象的主要原因是:在 DOD 约为 0.25 时,过电势下降和温度系数上升,过电势下降导致电池的产热量下降,温度系数上升导致电池开始吸热且吸热量逐渐变大;而散热条件不改变,散热效率不变,综合影响下,导致电流愈小,温度下降愈多。在 DOD 约为 0.75 时,温度上升,且随着放电电流的增大,温度提升的幅度也越大。

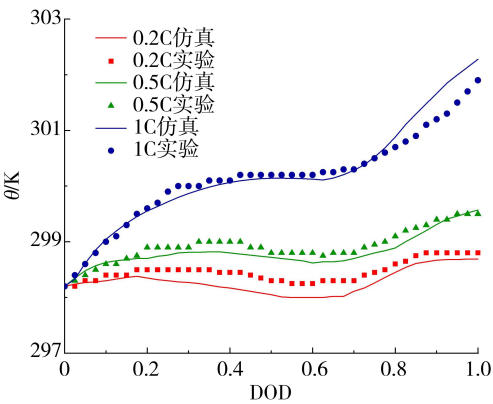


图 9 电池仿真温度与实测温度比较

Fig.9 Comparison of the simulation temperature and the measured temperature

综上所述,对于单一倍率下,电池在 DOD 为 0~0.4C 之间产热量较多,0.4~0.75C 之间产热量下降,0.75~1C 之间恢复较多的产热量。而由于环境无发生变化,电池的传热量不发生改变,而越

高倍率放电,产热量越多,温度越高。因此放电倍率 1C 温度的整体趋势为升温-保持稳定-升温,而 0.2 与 0.5C 温度整体趋势为升温-降温-升温。

表 1 仿真与实验温度误差

Tab.1 Simulation and experimental temperature errors

放电倍率/C	最大温度 误差/℃	平均温度 误差/℃	最大误差率/%
0.2	0.32	0.076	1.22
0.5	0.23	0.052	0.85
1	0.55	0.120	1.94

预测误差统计如表 1 所示。导致误差的主要原因为:仿真过程的温度系数拟合曲线与每个时刻的实际温度系数并非完全一致;恒温环境的仿

真设置与恒温室实验原理不同,恒温室为了保持温度恒定会有气流通过,气流流速会对换热系数产生影响。整体上预测误差低于 2%,因此,本文模型在一定范围内可满足工程应用热建模需求。

4 结论

1)本文建立的集总产热模型和传热模型耦合可描述电池热行为。在电池标准放电范围内,锂离子电池单体的仿真温度与实验温度的最大误差在 0.55 ℃ 以内,预测误差在 2% 以内,可有效预测电池温度变化趋势,满足工程应用热建模需求。

2)采用实验手段辨识方形单体锂离子电池热物性参数,简单有效,提高了热建模效率和减少实际工程成本。

参考文献:

[1] 胡斯航,王世杰,刘洋,等. 锂离子电池热失控风险综述[J]. 电池,2022,52(1):96-100.

[2] 李夔宁,谢运成,谢翌,等. 基于电化学热耦合模型的富镍锂离子电池产热分析[J]. 储能科学与技术,2021,10(3):1153-1162.

[3] 匡柯,孙跃东,任东生,等. 车用锂离子电池电化学-热耦合高效建模方法[J]. 机械工程学报, 2021,57(14):10-22.

[4] ZHANG X Q, PEICHAO L, BIXIONG H, et al. Numerical investigation on the thermal behavior of cylindrical lithium-ion batteries based on the electrochemical-thermal coupling model[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 199:123449.

[5] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A general energy balance for battery systems[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1985, 132(1):5-12.

[6] 朱志祥,尚丽平,屈薇薇. 基于 HPPC 的锂电池欧姆内阻最优测试条件研究[J]. 电源技术, 2020, 44(6):841-843,848.

[7] WANG C Y, LI C, WANG G, et al. Fast identification method for thermal model parameters of Lithium-ion battery based on discharge temperature rise[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 44:103362.

[8] 戴海燕,张春花,李长玉. 锂离子单体电池散热模型及其性能研究[J]. 电源技术, 2022, 46(7):729-733.

(责任编辑:陈雯)