

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209121

基于储热释放的方形锂电池内部热参数测试*

侯德鑫, 多亦贤, 叶树亮

(中国计量大学工业与商贸计量技术研究所 杭州 310018)

摘要:方形锂电池是卷芯和外壳组成的非均质结构,卷芯导热系数及其与外壳换热系数是影响散热的关键参数,目前缺乏直接测试方法。提出利用电池储热构造热源,通过冷却面温度变化触发非稳态传热,使用热成像记录外壳温度沿传热方向空间分布及其时间演变,代入三维非稳态传热反演模型,同时计算卷芯面向、纵向导热系数,以及卷芯与外壳底部、最大面换热系数。搭建测试装置,对两种方形锂电池进行多次实验检验重复性,卷芯导热系数测试相对标准差在5%~10%之间,对3种非均质标准样品测试检验准确性,相对偏差小于5%。该方法提供一种适用于非均质样品传热特性实验评估的手段,修改样品模型后也可用于圆柱形锂电池等其他非均质样品。

关键词:方形锂电池;热参数测试;储热释放;热成像;传热反演

中图分类号: TH89 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 480.40

Evaluation of inner thermal properties for prismatic Li-ion battery based on the heat store and release method

Hou Dexin, Duo Yixian, Ye Shuliang

(Institute of Industry and Trade Measurement Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The prismatic Li-ion battery is a heterogeneous structure consisted of jelly-roll and aluminum shell. The thermal conductivity of the jelly-roll and the heat transfer coefficient between the jelly-roll and the shell are key parameters affecting heat dissipation. At present, there is no direct test method. It is proposed to use battery heat storage to construct a heat source, trigger unsteady heat transfer through the temperature change of the cooling surface. The thermal imaging is used to record the spatial distribution of the shell temperature along the heat transfer direction and its time evolution, and substitute it into the three-dimensional unsteady heat transfer inversion model. Meanwhile, core facing, longitudinal thermal conductivity, core and shell bottom, and maximum surface heat transfer coefficient are calculated. Experiment platform is constructed, tests carried out for two battery cells and three standard specimens. The relative standard deviation of the thermal conductivity test results of the two batteries cells is between 5%~10%. The relative deviation of the results for three standard specimens are all below 5%. The method provides a new tool for experimental evaluation of thermal parameters for various non-uniform structures, for example the cylindrical battery cells.

Keywords: prismatic battery cell; thermal parameters evaluation; heat store and release; thermography; thermal inversion

0 引 言

锂电池对温度敏感,文献[1-2]建议最佳工作温度区间15℃~35℃,文献[3]提出锂电池温度非均匀性应不超过5℃。文献[4]提出电池温度超出范围会影响容量、工作性能和循环寿命,甚至引发热失控。文献[5]提到

热仿真是锂电池热管理和热安全研究的重要手段,传热方程求解的准确性依赖于电池基本热参数,包括产热功率、比热容、导热系数、界面换热系数等。目前产热和比热容具有成熟方法和仪器,文献[6]提到通过量热仪测试;锂电池导热系数和界面换热系数则缺乏成熟方法和仪器。

收稿日期:2022-01-01 Received Date: 2022-01-01

* 基金项目:浙江省自然科学基金(LY18F030011)项目资助

锂电池封装形式主要有软包、方形和圆柱形,其中软包锂电池的外层铝塑膜很薄,对整体导热性能影响小,软包锂电池电芯可简化为均质各向异性平板,文献[7]采用稳态法测试纵向导热系数,文献[8-10]采用用三维非稳态传热反演方法同时测量软包锂电池面向和纵向导热系数。方形和圆柱形锂电池一般采用铝合金外壳封装,外壳较厚且导热系数远大于卷芯,对整体导热性能影响显著,采用均质模型等效计算温度误差较大。导热系数测试的常规方法如稳态法、瞬态平面热源法、热线法、闪光法等,都只适用于均质结构,不适合方形锂电池。

文献[5]和[11]使用串并联模型,通过各组分热物性和几何尺寸估算卷芯面向和纵向导热系数,该方法忽略层间接触热阻,忽略多孔疏松结构和固液两相传热的复杂性,估算结果误差较大。文献[12]从组分到系统详细分析方形锂电池的导热问题,考虑了外壳对传热的影响,但关注点在正向分析而不是反向参数测试。文献[13]提出一种针对圆柱形锂电池的测试方法,通过在圆柱面均匀覆盖电热膜构造径向传热来减小外壳影响,但是该方法只能测试径向导热系数,需要根据电池规格定制薄膜电热片,难以扩展用于方形锂电池。文献[14]提出可同时测量方形锂电池导热系数和比热容的非稳态方法,但需要破坏电池外壳以插入传感器测量内部温度,操作复杂且可能改变电池

特性。文献[15]针对方形锂电池使用数值仿真结合热阻等效电路法计算了方形锂电池的导热系数,但该方法得到的导热系数主要来源于仿真,对现实的指导意义有限。文献[16]提出一种基于“储热-释放-平衡”三状态切换的测试方法,采用具有卷芯和外壳的非均质模型,可同时测试卷芯导热系数及与外壳接触热阻,但测试需将电池浸泡在流水中以获得足够理想的表面散热条件,操作不便且需要两次制样分别评估面向和纵向热参数。

本文提出基于“储热-释放”原理的两状法,借鉴方形锂电池包中常用的液冷策略,将液冷板连接电池冷却面提供快速散热,依据两个状态切换引起的非稳态传热同时反演 4 个热参数。

1 测试方法

1.1 方形锂电池结构及其非均质等效模型

方形锂电池基本结构如图 1(a) 所示,主要由卷芯(或叠堆)和金属外壳组成,卷芯中集流体经汇流部件连接极耳,顶盖有防爆泄压阀,顶盖下有绝缘隔离塑料支架,卷芯外包裹绝缘塑料膜,金属壳内部可能有少量游离态电解液。方形锂电池热管理系统多采用液冷方案,将电池底部作为冷却面接触液冷板散热。

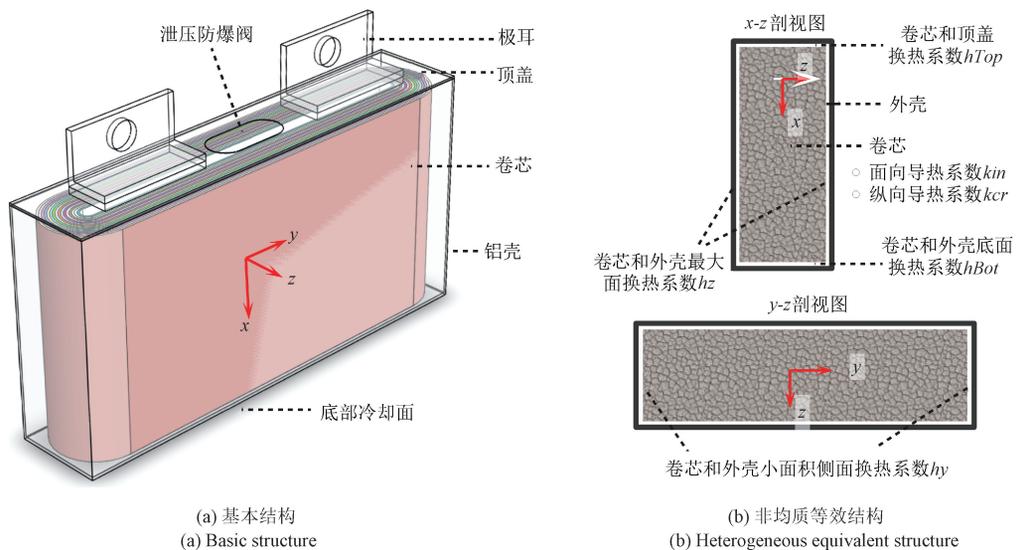


图 1 方形锂电池基本结构及其非均质等效结构

Fig. 1 Basic structure and heterogeneous equivalent structure of prismatic lithium battery

方形锂电池热仿真时,完全按照真实结构建模会导致模型复杂和计算量庞大,因此一般采用简化结构。为兼顾模型通用性、复杂性和准确性,可将方形锂电池视作由卷芯和外壳两个规则部件组成,忽略二者间隙,如图 1(b) 所示。为表述方便,定义直角坐标系各轴方向如

下: z 轴垂直于卷芯薄膜平面, x 轴在薄膜平面内且垂直于顶盖和底面。

完整描述电池传热特性需要卷芯 3 向导热系数,以及卷芯和外壳 6 个面的换热系数。根据实际电池结构特征,可简化为如下 6 个传热特性参数:卷芯忽略薄膜面内

各方向传热特性差异,使用面向导热系数 k_{in} 和纵向导热系数 k_{cr} 描述;假设电芯 y 向和 z 向接触面都有良好对称性,因此只需要4个换热系数描述,包括卷芯和外壳最大面换热系数 h_z ,卷芯和底部换热系数 h_{Bot} ,卷芯和 y 向侧面换热系数 h_y ,卷芯和顶盖换热系数 h_{Top} 。

1.2 测试原理

1) 等效参数测试的基本原则

本文测试的导热系数等参数并非某种真实材料的固有特性参数,而是将具有多种材料、多种物理效应的复杂结构简化后引出的等效参数,虽然在物理意义和量纲上都和相应名称的物理量一致,但是其定义会随着等效条件而变化。“等效”的内涵,是使用等效模型和等效参数进行模拟计算,其预测的系统响应和实际系统一致。但是等效模型毕竟和实际系统不同,模拟计算必定有偏差,并且在不同激励方式和边界约束条件下偏差也不同。因此等效参数测试应遵循如下原则:测试时的激励方式和边界约束条件尽量和系统实际运行时一致,从而减小基于等效参数预测计算的误差。

方形锂电池实际工作时,热源在卷芯中近似均匀分布,而不是集中在某个局部区域;卷芯产生的热量主要沿 x 向传播到冷却面,但同时存在明显的 z 向热流传播到金属外壳,再沿外壳 x 向传播到冷却面。测试方形锂电池的等效热参数时,热源分布和热流分布都应该尽量与此相似。

2) 基于储热释放的两状态法

导热系数测试的常规方法采用外部热激励,用于方形锂电池时热源作用于外壳,热流分布难以和工作状态一致,不符合上节所述等效参数测试原则。本文方法的核心思想是:利用电池储热构造体分布热源;在电池冷却面使用第1类边界条件(指定温度)替代常规热测试的第2类边界条件(指定热流)。

该方法测试时让电池边界条件在两个温度状态切换,如图2所示。

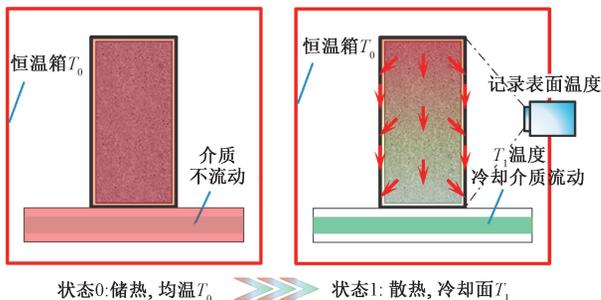


图2 方形锂电池的两状态法测试原理

Fig. 2 Testing principle of two state method for prismatic lithium battery

状态0:储热阶段,将锂电池置于温度为 T_0 的恒温箱中,电池底部液冷板中介质不流动;由于静止液体传热性能差,因此电池通过风循环与恒温箱壁面充分换热后,温度为 T_0 且分布均匀;

状态1:散热阶段,关闭恒温箱内换热风扇,底部液冷板中的冷却介质启动循环,底部边界温度下降为 T_1 ,导致电池通过底面散热,总体温度开始下降,且电芯上部 and 下部形成温度梯度;热像仪记录电池最大面温度的高度方向分布及其时间演变,记为 $T(t, x)$ 。

测试中电池在散热阶段的热流方向和分布,都与其在液冷电池包中充放电时相似;因此对电池散热影响较大的参数,在测试中也有同样重要的贡献。根据等效测试模型和记录的温度数据 $T(t, x)$,可以反演计算电池热参数。这种传热方式下,顶部换热系数 h_{Top} 和小面积侧面换热系数 h_y 都对温度影响较小;因此为改善反问题的适定性,这两个参数不作为反演变量,可代入经验值或其它实验评估值,反问题变量为4个。

1.3 系统结构

两状态法测试的关键是测试对象边界条件的准确控制,以及温度的准确测量。为实现上节所述原理测试,设计测试系统如图3所示,要点如下:

1) 电池粘接过渡板,过渡板再通过导热胶或导热脂连接液冷板,放置在恒温箱中进行测试;过渡板使用紫铜或纯铝以提高温度均匀性。

2) 恒温箱一侧有观察通道和热像仪,可测量记录电池表面和过渡板的纵向温度分布。

3) 电池前部和后部有防护板,可主动加热控温,测试过程中保持温度不变,抑制液冷板启动循环后通过对流机制和样品表面直接换热;前防护板中心有10 mm宽度观察缝,避免遮挡热像仪测温。

4) 恒温箱的6个壁面都内置管道,可连接油槽1进行控温(储热阶段温度 T_0);外部有保温隔热层,使壁面向外热损失很小,保证壁面不同区域和恒温箱内部的温度均匀性。

5) 电池底部的液冷板连接外部油槽2控温(散热阶段电池底部冷却面温度 T_1)。

1.4 测试模型

卷芯和铝壳内部固体热传导方程:

$$\rho_{core} C_{core} \frac{\partial T_{core}}{\partial \tau} = k_{in} \left(\frac{\partial^2 T_{core}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{core}}{\partial y^2} \right) + k_{cr} \frac{\partial^2 T_{core}}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$\rho_{shell} C_{shell} \frac{\partial T_{shell}}{\partial \tau} = k_{shell} \left(\frac{\partial^2 T_{shell}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{shell}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{shell}}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

式中: ρ_{core} 、 C_{core} 、 k_{in} 、 k_{cr} 分别为卷芯密度、比热容、面向导热系数、纵向导热系数; ρ_{shell} 、 C_{shell} 、 k_{shell} 分别为外壳密度、

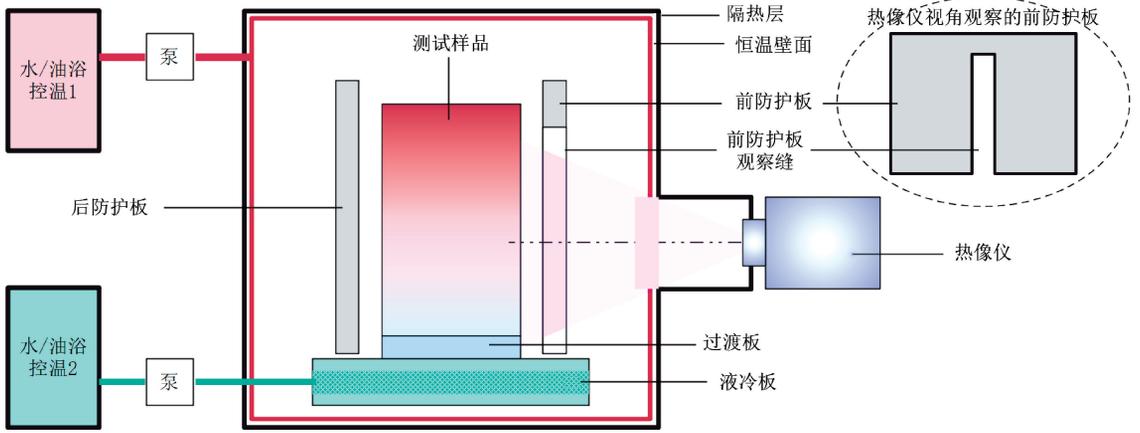


图 3 测试系统基本结构

Fig. 3 Basic structure of the test system

比热容和导热系数; T_{core} 和 T_{shell} 为卷芯和外壳温度,都与时间 τ 和位置 (x, y, z) 有关。

卷芯和铝壳的接触面换热:

$$-k_r \frac{\partial T_{\text{core}}}{\partial r} = -k_{\text{shell}} \frac{\partial T_{\text{shell}}}{\partial r} = h_r \cdot (T_{\text{core}} - T_{\text{shell}}) \quad (3)$$

式中: r 表示 6 个接触面的法线方向单位长度(指向外部),下标 r 则表示相应方向的卷芯导热系数(k_r)或界面换热系数(h_r)。

电池铝壳除底部之外的 5 个表面和环境换热采用第 3 类边界条件描述:

$$-k_{\text{shell}} \frac{\partial T_{\text{shell}}}{\partial r} = h_{\text{surf}} \cdot (T_{\text{shell}} - T_0) \quad (4)$$

式中: T_0 表示恒温箱和防护板温度; h_{surf} 为电池表面通过辐射、自然对流换热的综合等效换热系数。

电池底部铝壳使用第 1 类边界条件描述:

$$T_{\text{shell}} = T_{\text{cool}}(\tau) \quad (5)$$

式中: $T_{\text{cool}}(\tau)$ 为实测的电芯底面温度,通过电池观测面下部和过渡板温度插值计算。

电池初始状态:

$$T_{\text{shell}} = T_{\text{core}} = T_0, \text{ 当 } \tau = 0 \quad (6)$$

式中:时间 τ 的零点为底部散热冷板启动循环时刻。

式(1)~(6)定义了测试正问题,数值求解微分方程可得到系统温度分布及其演变。

1.5 热参数反演

测试模型描述的正问题可简化表示如下:

$$T_{\text{sim}}(i_\tau, i_x) = f(\mathbf{x}_{\text{inv}}, \mathbf{x}_{\text{cond}}) \quad (7)$$

式中: T_{sim} 为规范化的电池表面温度预测数据,离散变量 i_τ 和 i_x 分别表示采样时间和采样位置,其与热像仪观测时刻、观测位置一一对应; \mathbf{x}_{inv} 为待反演变量,包括卷芯面向和纵向导热系数,卷芯和外壳底部换热系数,卷芯和外壳最大面换热系数等 4 个参数; \mathbf{x}_{cond} 为电池的其他已知热

物性参数,以及电芯底面温度 $T_{\text{cool}}(\tau)$ 等热像仪实测数据,以及测试总时长等测试条件配置;函数 $f(\cdot)$ 描述从参数到系统热响应的映射。

\mathbf{x}_{cond} 涉及的参数可采用如下方法确定:

1) 外观尺寸使用直尺和游标卡尺测量,外壳厚度由厂家提供,卷芯尺寸等效为外观尺寸减去壳厚度。

2) 卷芯密度可通过精密天平称重值除以体积计算;卷芯比热容可使用总体平均比热容近似,使用量热仪或真空腔等设备采用绝热法测试。

3) 外壳材料牌号需厂家提供,据此查询确定其热物性;或者厂家提供外壳材料,使用常规方法测试。

4) 表面换热系数 h_{surf} 可实验标定或经验值设定。

5) 卷芯和顶盖换热系数 h_{top} 可凭经验设定为较小值,卷芯和 ψ 向侧面外壳换热系数可凭经验设定为较小值,这两个参数影响很小。

热参数反演可视作在参数空间中搜索,寻找使预测温度和实测温度最匹配的 \mathbf{x}_{inv} 的过程。这需要定义预测温度和实测温度的误差函数(或称为失配度函数):

$$\varepsilon(\mathbf{x}_{\text{inv}}) = \| T_{\text{view}}(i_\tau, i_x) - T_{\text{sim}}(i_\tau, i_x) \|_2 \quad (8)$$

反问题转化为如下优化问题:

$$\hat{\mathbf{x}}_{\text{inv}} = \arg \min \{ \varepsilon(\mathbf{x}_{\text{inv}}) \} \quad (9)$$

可使用任意适当数值优化算法求解,包括梯度类算法或群体优化算法;本文前期相关实验使用经典粒子群算法和简单梯度下降算法均得到不错结果,区别主要在收敛速度,不影响测试方法有效性,因此具体算法不再赘述。

2 实验及结果

2.1 测试装置

测试装置照片如图 4 所示。热像仪使用 FLIR A315,测试时采用 1 Hz 帧频记录数据,测温的空间分辨力约

0.63 mm。恒温箱通过泵连接水浴控温,测试时温度设置为室温+20℃~30℃。电池底部液冷板通过泵连接室温水箱,未进行温控,将室温作为冷却温度。测试时一般先

开启内部风扇3~4 h,然后关闭风扇约1 h,使电池和恒温箱充分热平衡;然后启动电池底部液冷板水循环泵,持续冷却5~15 min。

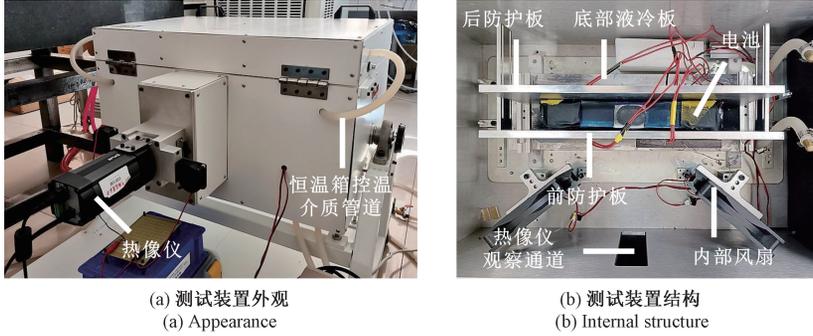


图4 v 测试装置

Fig. 4 v test device

反演程序使用 MATLAB 编写,主要包括数据预处理、正问题数值求解、优化搜索算法、分析结果显示等。优化搜索过程中通过并行计算加速,在配置 18 核处理器 i9-10980XE 的工作站上运行,单次实验的反演计算耗时约 2~4 h。

2.2 实验样品

目前缺乏方形锂电池热参数测试的权威手段,因此无法直接比对锂电池测试结果。本文对锂电池样品进行多次实验以检查重复性,同时制作模拟方形锂电池结构的非均质标准样品以检验准确性。锂电池样品来自某企业,包括 2 种不同尺寸规格,如图 5(a)所示,

分别编号为“电池 1”和“电池 2”。标准样品采用 304 不锈钢块或者 HDPE 块粘接 U 形铝片,其结构如图 5(b)所示,实物参考如图 5(c)所示。304 不锈钢导热系数与锂电池卷芯面向导热系数接近,HDPE 则与锂电池纵向导热系数接近;将标准样品的反演结果与所用材料的导热系数参考值比对,可检验测试准确性。接触热阻难以制作标准样品,但可以通过制造工艺形成相对差异。不锈钢样品粘接 U 形铝片时,底部采取两种方案,一者不锈钢块压紧底部铝片以获得低热阻界面,另一者在相应界面垫多层干燥纸条以获得高热阻界面。各样品基本参数如表 1 所示。

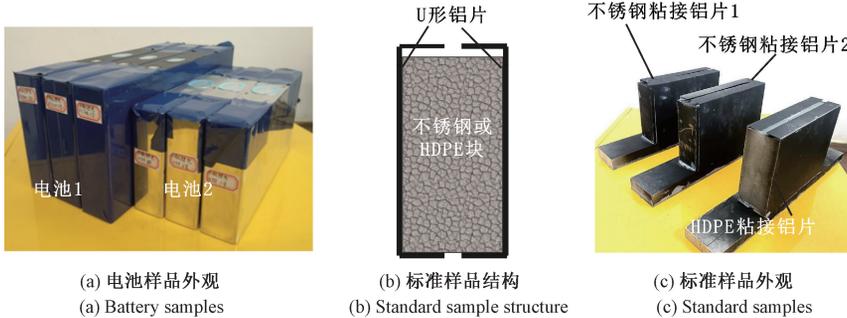


图5 测试样品

Fig. 5 Test samples

表 1 测试样品基本参数

Table 1 Basic parameters of test samples

编号	宽度 /mm	高度 /mm	厚度 /mm	卷芯密度 / (kg·m ⁻³)	卷芯比热 / (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	外壳厚度 /mm	外壳材质
电池 1	299	124	38.5	2 210	1 145	0.5	Al3003
电池 2	219	103	33.1	2 374	931	0.5	Al3003
不锈钢粘接铝片 1	155	106	41.0	7 800	500	0.5	Al6061
不锈钢粘接铝片 2	155	106	41.0	7 800	500	0.5	Al6061
HDPE 粘接铝片	155	103	43.2	961	2 050	0.5	Al6061

测试前,所有样品观测面均喷涂辐射测温用黑体漆,标称发射率 0.94。反演时样品表面换热系数设置为经验值 15,卷芯和顶盖换热系数设置为 0,卷芯和 y 向侧面换热系数设置为 50。为简化描述,本文导热系数单位均为 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,换热系数单位均为 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$,不再对每个数据重复标注单位。

2.3 结果及讨论

1) 实验数据和反演结果

以电池 1 某次实验数据为例,热像仪某帧图像如图 6(a) 所示,测试过程中几点温度变化如图 6(b) 所示。由于实际电池在边界位置和测试模型有偏差(极耳、间隙、圆角等导致),因此反演时不使用顶部和底部附近数据,仅将中间段设置为感兴趣区域(ROI),参考图 6(a) 中的 AB 线段。可看到电池底部边界温度在启动液冷板循环后快速下降,100 s 时降温幅度 25°C 左右。ROI 区域底部降温有所滞后,且呈现出明显的非线性,前 100 s 降温 13°C 左右,500 s 时降温 20°C 左右;电池顶部温度在启动冷却数 10 s 后几乎线性下降,测试中降温 8°C 左右。

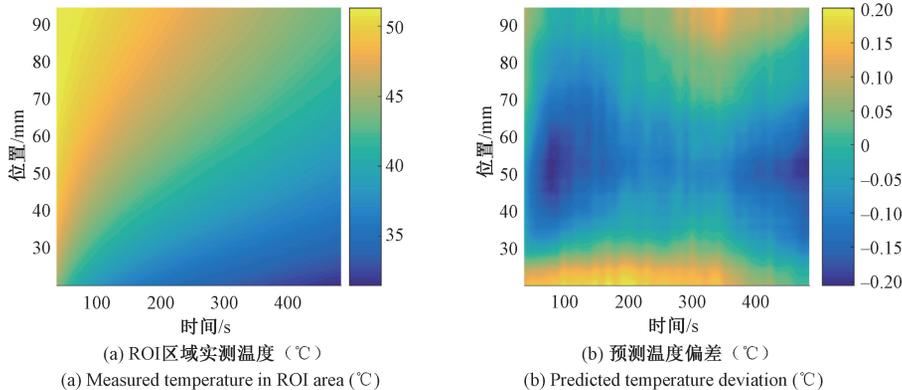


图 6 电池 1 第 2 次实验数据

Fig. 6 Experiment data for the 2nd test of cell 1

反演所用完整 ROI 区域实验数据及其与反演预测温度偏差如图 7 所示,图中横轴为采样时间,纵轴为采样点相对底部高度。电池观测面在 8 min 时间和 80 mm 跨度的 ROI 区域中,实测温度和预测温度的最大偏差约 0.2°C ;相较 ROI 区域在测试中 $8^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$ 左右的温度变化幅度,预测误差很小。

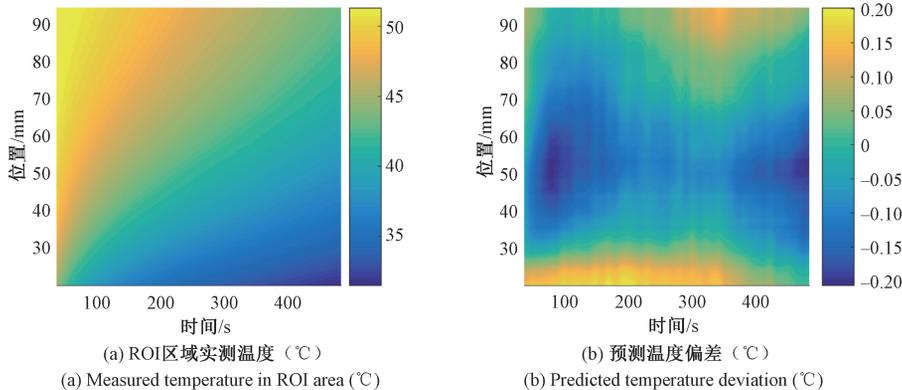


图 7 电池 1 第 2 次实验数据及预测偏差

Fig. 7 The second experimental data and prediction deviation of battery 1

优化搜索过程中各变量不同取值时的误差函数评估值如图 8 所示,其中横轴表示 4 个反演变量取值,纵轴为误差函数值,均采用对数刻度绘制;散点图中误差函数最小点对应的变量取值即为反演结果。

4 个变量的误差散点图分析如下:面向导热系数 kin 的灵敏度很高,在 22.86 处取最小值,偏离该值则误差迅速增加;纵向导热系数 kcr 灵敏度一般,在 0.90 处有最小值,偏离该值一定范围后误差会增加;底部换热系数 $hBot$ 的测试灵敏度很好,在 675 处取最小值,偏离该值会误差显著增加;最大面换热系数 hz 取值较大,达到 1 026,该变量如果减小会导致误差值显著增加,但增大则并没有带来明显变化,这意味着当 hz 大于一定范围后对温度影响较小。

2) 锂电池测试重复性

锂电池样品各重复测试 5 次,结果如表 2 和 3 所示。总体而言,卷芯导热系数测试重复性相对较好,相对标准差一般在 $5\% \sim 10\%$ 之间;底部换热系数的相对标准差在 20% 以内;最大面换热系数的相对标准差较大,这是因为其接触面积较大,换热系数大于一定值后总热阻很小,导致不再敏感。

3) 标准样品测试准确性

3 个标准样品的测试结果如表 4 所示,规律如下:

(1) HDPE 材料导热系数使用稳态法测试在 $0.44 \text{ W}/(\text{mK})$ 左右,与表 4 测试结果比较,纵向导热系数测试值相对偏差约 4.5% ,但面向导热系数测试值偏差很大;这是因为 HDPE 块的 x 向传热距离较大,且底部接

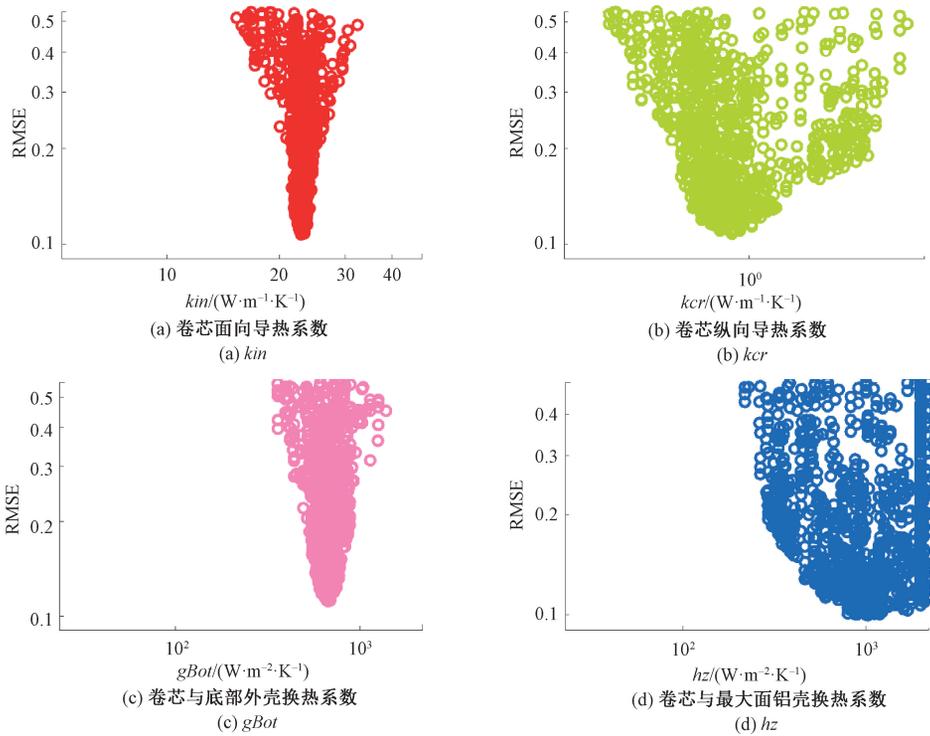


图8 电池1第2次实验的误差散点图

Fig. 8 The second experiment error scatter diagram of battery 1

表2 锂电池1重复实验结果

Table 2 Battery 1 repeat experimental results

实验编号	$kin/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$kcr/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$hBot/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	$hz/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	RMSE / °C
1	21.91	0.78	412	1 134	0.09
2	22.86	0.90	675	1 026	0.09
3	23.49	0.86	513	2 046	0.11
4	25.16	0.77	511	3 150	0.16
5	24.53	0.92	464	2 200	0.12
均值	23.59	0.85	515	1 911	0.11
标准差	1.30	0.07	99	869	0.03
相对标准差	5.5%	8.1%	19.1%	45.5%	-

表3 锂电池2重复实验结果

Table 3 Battery 2 repeat experimental results

实验编号	$kin/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$kcr/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$hBot/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	$hz/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	RMSE / °C
1	22.86	0.96	302	416	0.06
2	23.51	0.96	208	535	0.07
3	22.91	1.12	270	406	0.10
4	22.68	0.99	337	320	0.06
5	23.64	1.01	239	409	0.15
均值	23.12	1.01	271	417	0.09
标准差	0.43	0.07	51	77	0.04
相对标准差	1.8%	6.6%	18.7%	18.4%	-

触面热阻很大($hBot$ 评估值只有 89),因此 x 向热流很小,HDPE 块中以 z 向热流为主,传递到铝片后再沿铝片面向传播到底部,导致该样品对面向导热系数不敏感,测试误差较大;

(2) 304 不锈钢 25°C 附近导热系数参考值约 15;两个样品测试的面向导热系数相对偏差小于 3%;

(3) 当不锈钢块和底部铝片紧密接触时,由于不锈钢导热系数较大,块体中以面向热流为主,因此对纵向导热系数不敏感,导致纵向导热系数评估偏差较大(约

10%);当不锈钢块底部垫纸条,底部接触热阻增加,促使更多热流 z 向传播到铝片,提高了纵向导热系数测试的灵敏度,此时测试误差较小(5%左右);

(4) 不锈钢块的 2 个样品,底部换热系数 $hBot$ 评估值正确反映出相应接触面热阻相对大小差异;

(5) 所有样品的最大面换热系数评估值都很大,这是因为样品制作时采用导热胶粘接,均接触良好。

4) 测试对设定热参数敏感性

正问题求解需要设定一些参数,其中样品表面换热

表 4 标准样品实验结果
Table 4 Standard sample test results

样品编号	$k_{in}/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$k_{cr}/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$h_{Bot}/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	$h_z/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	RMSE/ °C
HDPE-Al	0.85	0.46	89	41 200	0.06
不锈钢粘接 铝片 1	15.08	13.52	2 907	2 758	0.06
不锈钢粘接 铝片 2(垫纸)	14.55	14.13	120	1 919	0.05

系数 h_{Surf} 与温度、湿度、表面状态等很多因素有关,因此不同样品、不同环境实验时有不确定性;卷芯和外壳侧面换热系数 h_y 的取值大小也和很多因素有关系,采用卷绕

工艺时该接触面一般间隙较大,但使用叠堆工艺时可能较小,经验值可能有较大误差。因此需要评估分析这两个参数不确定性的传播情况。

对电池 1 的某次实验数据进行分析,将 h_{Surf} 和 h_y 设置为不同取值,反演结果变化如表 5 所示,可见: h_y 取值在 10~320 之间变化时,未对 4 个参数的反演结果产生明显有规律影响; h_{Side} 取值在 5~25 之间变化时,对面向导热系数影响较小,对其他 3 个参数反演结果有明显影响;具体的:随着 h_{Side} 增大 5 倍,纵向导热系数 k_{cr} 从 0.85 增加到 1.11,增幅达到 30%; h_{Bot} 从 98 增加到 350,增幅达到 2.6 倍; h_z 从 718 减小到 376,减小幅度达到 50%。因此当实验条件发生显著变化,应对 h_{Side} 重新实验标定。

表 5 参数不同取值时的反演结果
Table 5 Inversion results with different values of parameters

编号	$h_{Side}/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	$h_y/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	$k_{in}/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$k_{cr}/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$h_{Bot}/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	$h_z/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	RMSE/°C
1	5	50	22.07	0.85	98	718	0.06
2	10	50	22.27	0.94	150	635	0.10
3	15	50	23.53	0.96	212	544	0.07
4	20	50	24.21	1.02	278	478	0.08
5	25	50	24.72	1.11	350	376	0.10
5	15	10	23.97	1.00	212	491	0.07
6	15	20	23.32	1.00	220	499	0.07
7	15	40	23.41	1.03	215	458	0.08
8	15	80	23.91	0.92	213	487	0.09
9	15	160	23.57	0.91	205	558	0.07
10	15	320	23.79	0.99	212	444	0.07

采用图 9 所示实验装置标定表面换热系数 h_{Side} :将紫铜块悬挂在两状态法测试装置的两个防护板之间,紫铜块先加热使升温超过 10°C,然后停止加热使其与防护板通过辐射对流换热,记录其自然冷却过程中的温度,结

合紫铜块热容和表面积可计算表面换热系数,实验评估值在 13 左右。假设前面反演中所有 h_{Side} 参数有 ±5 左右的不确定度,则其对测试结果的影响基本在可接受范围内。

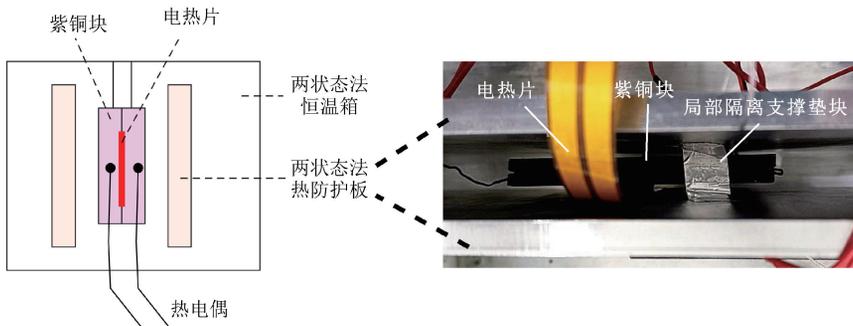


图 9 表面换热系数标定实验系统基本结构

Fig. 9 Basic structure of surface heat transfer coefficient calibration experimental system

5) 测试和使用状态差异分析

本文主张等效参数测试要点是测试和使用时样品状态应尽量相似。对于锂电池热参数测试,测试时热流分布决定了系统中卷芯、外壳、界面等不同热阻要素的贡献比例。为定量评估测试和使用状态差异,使用实验中锂电池的参数进行仿真,计算通过卷芯和外壳向下传热功率的高度分布及时间演变。工作时产热功率取 10W,持

续 30 min,样品表面绝热。计算结果如图 10 所示,图中纵轴表示考察的传热截面位置,横轴表示时间,取值为通过截面的热流总功率。可见两种工况下卷芯和外壳的热流比例基本一致,卷芯贡献都在 70%~80%左右;区别是测试时纵向热流随着时间增加会逐步减小,而工作时热流功率则会逐步变大,因此测试时应控制测试时间以免储热完全释放。

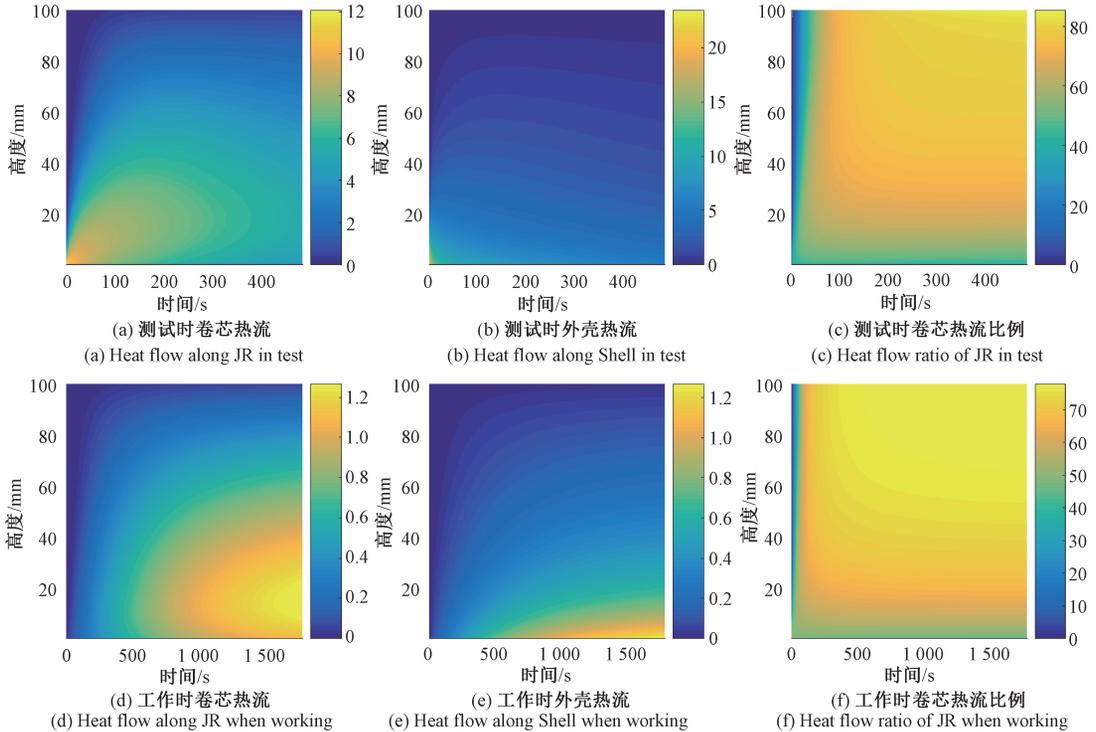


图 10 测试和工作时通过卷芯和外壳向下传热功率对比

Fig. 10 Comparison of heat flow along jelly-roll and shell in test and working condition

3 结 论

针对方形锂电池非均质等效模型内部热阻多参数测试问题,提出基于储热释放原理的两状态测试方法,可在不拆解样品的情况下,一次实验同时评估卷芯面向和纵向导热系数,卷芯和外壳底部和最大面换热系数等 4 个热参数。基于方形锂电池样品的实验表明测试重复性良好,相对标准差约 5%~10%;基于 HDPE 和不锈钢制作非均质标准样品的实验表明测试值和参考值相对偏差小于 5%。该方法可有效评估对样品底部液冷散热影响较大的参数,对其他参数不敏感。相比常规热物性测试方法,两状态法不以均质材料为测试对象,更关注系统整体传热性能评估,更适合系统集成过程中的原位测试。

参考文献

[1] MA S, JIANG M, TAO P, et al. Temperature effect and

thermal impact in lithium-ion batteries: A review [J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2018, 28(6): 653-666.

[2] 王帅林, 盛雷, 苏林, 等. 车用大尺寸软包锂离子电池在高低温工况下的生热率测定[J]. 仪器仪表学报, 2021, 41(8): 87-94.

WANG SH L, SHENG L, SU L, et al. Determination of heat generation rate for a large-size vehicle pouch lithium-ion battery under high and low temperature rise conditions[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 41(8): 87-94.

[3] YANG S T, LING C, FAN Y Q, et al. A review of lithium-ion battery thermal management system strategies and the evaluate criteria [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2019, 14: 6077-6107.

[4] 李顶根, 李竞成, 李建林. 电动汽车锂离子电池能量管理系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2007(8):

- 1522-1527.
- LI D G, LI J CH, LI J L. Research of vehicle Li-ion battery energy management system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007(8): 1522-1527.
- [5] 徐傲. 新能源汽车锂动力电池热状态仿真和热失控分析[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- XU AO. Thermal state simulation and thermal runaway analysis of new energy vehicle lithium power battery[D]. Ji'nan: Shandong University, 2021.
- [6] 单博学, 吴育新, 许启跃, 等. 差示绝热追踪的锂电池比热容测试方法研究[J]. 电源技术, 2021, 45(5): 606-610, 640.
- SHAN B X, WU Y X, XU Q Y, et al. Research on specific heat capacity test method of lithium battery based on differential adiabatic tracking[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45(5): 606-610, 640.
- [7] BAZINSKI S J, WANG X. Experimental study on the influence of temperature and state-of-charge on the thermophysical properties of an LFP pouch cell [J]. Journal of Power Sources, 2015, 293: 283-291.
- [8] ZHANG J, WU B, LI Z, et al. Simultaneous estimation of thermal parameters for large-format laminated lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2014, 259: 106-116.
- [9] 董泽文, 侯德鑫, 叶树亮. 基于热成像的软包锂电池导热系数测试方法[J]. 计量学报, 2021, 42(12): 1597-1603.
- DONG Z W, HOU D X, YE SH L. Test method of thermal conductivity of pouch lithium-ion cell based on thermography [J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(12): 1597-1603.
- [10] 刘大同, 宋宇晨, 武巍, 等. 锂离子电池组健康状态估计综述[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(11): 1-18.
- LIU D T, SONG Y CH, WEI W, et al. Review of state of health estimation for lithium-ion battery pack [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(11): 1-18.
- [11] RIZK R, LOUAHLIA H, GUALOUS H, et al. Experimental analysis and transient thermal modelling of a high capacity prismatic lithium-ion battery [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2018, 94: 115-125.
- [12] WERNER D, LOGES A, BECKER D J, et al. Thermal conductivity of Li-ion batteries and their electrode configurations-A novel combination of modelling and experimental approach [J]. Journal of Power Sources, 2017, 364: 72-83.
- [13] MURASHKO K A, PYRHENEN J, JOKINIEMI J. Determination of the through-plane thermal conductivity and specific heat capacity of a Li-ion cylindrical cell[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 162: 120330.
- [14] SHENG L, SU L, ZHANG H. Experimental determination on thermal parameters of prismatic lithium ion battery cells [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 139: 231-239.
- [15] 崔喜凤, 张红亮, 龚阳, 等. 方形硬壳锂离子动力电池的热物性参数[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(12): 2747-2756.
- CUI X F, ZHANG H L, GONG Y, et al. Thermal properties of hard case lithium-ion power battery[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(12): 2747-2756.
- [16] DUO Y X, HOU D X, DONG Z W, et al. Non-destructive evaluation method for thermal parameters of prismatic Li-ion cell using infrared thermography [J]. Quantitative InfraRed Thermography Journal, 2021: 1-11.

作者简介



侯德鑫, 2005 年于清华大学获得学士学位, 2007 年于清华大学获得硕士学位, 现为中国计量大学实验师, 主要研究方向为基于热成像的热物性测试和无损检测。

E-mail: dexin_hou@163.com

Hou Dexin received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Tsinghua University in 2005 and 2007. He is currently an experimenter at China Jiliang University. His main research interests include thermal property testing and non-destructive testing based on thermal imaging.



叶树亮 (通信作者), 1995 年于东北林业大学获得学士学位, 1999 年于东北林业大学获得硕士学位, 2005 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为中国计量大学教授, 主要研究方向为热分析与量热技术及仪器、无损检测技术与仪器、化工反应过程原位检测与表征、新型传感机理与技术。

E-mail: itmt_paper@126.com

Ye Shuliang (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Northeast Forestry University in 1995 and 1999, and received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2005. He is currently a professor at China Jiliang University. His main research interests include thermal analysis and calorimetry technology and instruments, non-destructive testing technology and instruments, in-situ detection and characterization of chemical reaction processes, novel sensing mechanisms and technologies.