

## 圆柱形锂离子电池径向导热系数测试 —— 传热模型的有限元仿真和验证

Measurement of Radial Thermal Conductivity of Cylindrical Lithium Ion Batteries  
—— Finite Element Simulation and Verification of Heat Transfer Model



摘要：本文特别针对圆柱形锂离子电池的径向导热系数，开展了测试方法研究。在不破坏电池和只有电池圆周外表面的边界条件下，分别采用了恒温和恒流两种测试方法建立了相应的测试模型和解析表达式，并通过有限元仿真来验证了测试模型和解析表达式的准确性，为测试仪器的设计提供了有效指导，为在其他规格锂电池热性能测试中的推广有重大意义。

## 1. 问题的提出

锂离子电池有多种规格和外形尺寸，所以锂电池的热性能参数测量会涉及多种测试方法和测试仪器设备。我们首先选择圆柱形锂离子电池的热性能测试开展研究，特别是针对圆柱形锂离子电池径向导热系数测试技术开展研究，主要出于以下几方面的考虑：

(1) 圆柱形锂离子电池是目前最常见的电池类型之一，应用十分广泛，而圆柱形锂电池径向导热系数测试技术并未成熟，国内外都还处于阶段，所报道的各种测试方法误差较大，无法满足电池热模型和热管理的需求。

(2) 锂电池的圆柱形结构非常特殊，特别在径向方向上只有一个圆周面，在不破坏电池条件下进行热性能测试，则只有一个圆周外表面能用来进行产生相应的测试边界条件，这往往是热性能参数测试技术中难度最大的测试。如果能够在圆柱形电池径向方向实现热性能参数测试，并能够达到满足的测量精度，则可以将测试技术很容易推广应用到棱柱形和袋装电池。

(3) 圆柱形锂离子电池中的自热热量通常是最低的，要低于棱柱形和袋装电池中的热量。同样，所研究的测试方法如果能够在热量较低的圆柱形锂电池上获得满意的测量精度，则可以在棱柱形和袋装电池的高热量测量中得到更高的测量精度。

(4) 另外，通过圆柱形锂离子电池径向导热系数测试技术的研究，可以尝试实现锂电池热性能测试仪器的多功能化、模块化、快速化和低造价。

本文将特别针对圆柱形锂离子电池的径向导热系数，开展测试方法研究。在无

损电池和只有电池圆周外表面的边界条件下，建立相应恒温 and 恒流两种测试模型和解析表达式，并通过有限元仿真来验证测试模型和解释表达式的准确性，预期为测试仪器的设计提供有效指导。

## 2. 圆柱形锂电池径向导热系数测试解析模型

根据圆柱形锂电池的内部结构和传热方向，圆柱形锂电池的径向传热方式都是一个典型的径向圆周四散方式，因此采用柱坐标形式来描述圆柱形锂电池的测试模型，如图 2-1 所示，而其他形式的测试模型都无法准确描述圆柱形锂电池的传热方式。对于一个半径为  $R$ 、高度为  $H$  的圆柱形锂电池，其径向导热系数测试的边界条件只能产生在  $r = R$  处的圆周外表面上。

如果假设圆柱形锂电池的上下两个端面为绝热面，那么锂电池外表面上的边界条件无外乎传热学中的三类边界条件，即恒定温度、线性升温 and 交变温度。由于被测锂电池尺寸相对较大，而且交变温度这种第三类边界条件的较难实现和解析模型非常复杂，因此我们只针对恒定温度和线性升温这第一和第二类边界条件开展相应的测试方法研究。

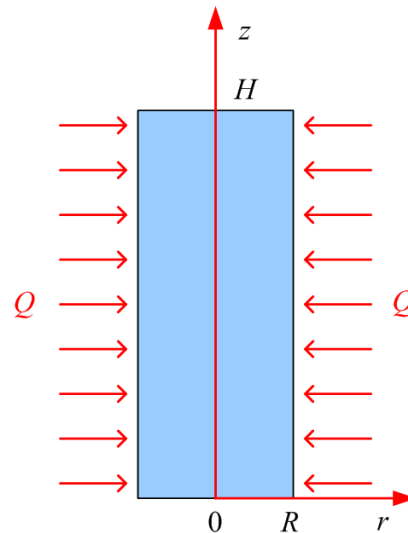


图 2-1 圆柱形锂电池径向导热系数测试模型

对于图 2-1 所示的柱坐标径向加热情况，热量仅沿径向流动。因此，温度分布在空间上是一维的，热流也是一维热流，并假设径向导热系数是均匀的，并且在较小的温度区间内与温度无关。

### 2.1. 第一类边界条件：恒温测试解析模型

第一类边界条件是表面温度恒定，也就是在测试过程中，起始温度为  $T_0$  的锂电池突然放置在温度  $T_s$  的环境中，而且此环境温度要高于起始温度  $T_0$ ，并保持恒定不变，

由此热量通过电池径向进行传递，而在电池两个端部处于绝热状态。

以第一类边界条件进行的恒温测试，这里假设圆柱形电池是一个无限长棒传热模型，电池内的热传导方程为：

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) &= \frac{\rho C_p}{k_r} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{at } 0 \leq r \leq R \\ T(r,t) &= T_0 \quad \text{at } r \leq R \quad \text{and } t < 0 \\ T(r,t) &= T_s \quad \text{at } r = R \quad \text{and } t \geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $T(r,t)$ 是电池内坐标 $r$ 处在 $t$ 时刻的温度， $\rho$ 、 $k_r$ 和 $C_p$ 分别是电池的密度、径向导热系数和比热容。那么方程(1)的解为：

$$\frac{T(r,t) - T_s}{(T_0 - T_s)} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0 \left( \lambda_n \frac{r}{R} \right)}{\lambda_n^2 J_0(\lambda_n)} \exp \left( -\frac{k_r \lambda_n^2}{\rho C_p R^2} t \right) \quad (2)$$

特征值 $\lambda_n$ 由方程 $J_0'(\lambda_n) = 0$ 的根获得， $J_0$ 表示第一类0阶贝塞尔函数。

当加热时间足够长之后，方程(2)可以简化为：

$$\frac{T(r,t) - T_s}{(T_0 - T_s)} = A_1 \exp \left( -\frac{\alpha_r \lambda_1^2 t}{R^2} \right) \quad (3)$$

其中  $\alpha_r$  为径向热扩散系数。对方程(3)两端去对数后，得：

$$\ln \left( \frac{T(r,t) - T_s}{(T_0 - T_s)} \right) = \ln(A_1) - \left( \lambda_1^2 \frac{\alpha_r}{R^2} \right) t \quad (4)$$

由此可见，方程(4)是一个随时间变化的线性方程，通过其斜率 $m$ 中包含着感兴趣的径向热扩散系数。对于圆柱形电池这种柱状坐标内的热传递，此时 $A_1 = 1.6021$ ， $\lambda_1 = 2.4048$ ，那么方程(4)的斜率为：

$$m = -5.7831 \times \frac{\alpha_r}{R^2} \quad (5)$$

由此，可以通过测量获得内部温升变化数据，经过对数转换后得到一条直线，由此直线的斜率就可以通过方程(5)计算得到电池的径向热扩散系数。

在测试过程中不允许破坏圆柱形锂电池，因此在实际测试中并不能在电池内部上插入温度传感器获得  $T(r,t)$  测量值，但可以采用热流传感器在电池外表面获得热流随时间变化曲线。同样，通过对此恒温加热过程中的热流密度变化曲线取对数，其对数随时间的变化曲线也是一条斜率为方程(5)的直线。具体推导过程不再详述。

在此恒温测试过程中，电池比热容随温度的变化为：

$$m \cdot C_p(T) \cdot dT/dt = A \cdot q(t) \quad (6)$$

其中  $A$  代表电池圆周侧面受热面积， $q(t)$  代表热流计检测的热流密度， $m$  代表圆柱形电池的质量， $dT/dt$  代表升温速率。

假设在此温度变化范围内比热容是一个与温度无关的常数，那么在圆柱形电池从起始温度  $T_0$  投入到环境温度  $T_s$  中并最终达到稳定，则有：

$$C_p(T) = \frac{A}{m(T_s - T_0)} \int_0^\infty q(t) dt \quad (7)$$

这样，通过得到的径向热扩散系数和比热容，结合圆柱形电池密度  $\rho$  的单独测量值，则可以计算得到径向导热系数：

$$k_r = \alpha_r \cdot C_p \cdot \rho \quad (8)$$

## 2.2. 第二类边界条件：线性升温测试解析模型

第二类边界条件是表面温度线性升温，也就是在测试过程中，电池外表面加载恒定热量来加热电池，并假设在整个加热过程中恒定热量不会随时间发生损失。另外由于圆柱形电池是轴心对称结构，电池四周侧面加热形式会使得电池轴心线上是一个绝热状态。由此，电池内的热传导方程和相应的边界条件为：

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) &= \frac{\rho C_p}{k_r} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad \text{at } 0 \leq r \leq R \\ \theta(r, 0) &= 0 \quad \text{at } t < 0 \\ \frac{\partial \theta}{\partial r} &= \frac{1}{k_r} Q \quad \text{at } r = R, t \geq 0 \\ \frac{\partial \theta}{\partial r} &= 0 \quad \text{at } r = 0 \end{aligned} \quad (9)$$



其中 $\theta(r,t)$ 是高于起始温度 $T_0$ 的温升 $\theta(r,t) = T(r,t) - T_0$ ， $T(r,t)$ 是电池内坐标 $r$ 处在 $t$ 时刻的温度， $\rho$ 、 $k_r$ 和 $C_p$ 分别是电池的密度、径向导热系数和比热容。

由于只有恒定热流进入系统，没有任何热损失，这个测试模型并没有一个稳定的解，从理论上讲，电池温度会随着时间不断上升。实际上，随着加热时间的增大，辐射等效应会限制电池温度的无限升高，而电池的热性能测试只在相对较低的温度范围内进行，辐射等效应可以忽略不计。因此， $\theta(r,t)$ 的表达式可以通过电池的平均温度（用 $\theta_m(t)$ 表示）必须随时间线性上升而导出。已经证明，对于这种表面温度线性变化的瞬态问题，由 $\theta(r,t)$ 减去 $\theta_m(t)$ 得到的子问题有一个解，该解包括稳态分量 $s(r)$ 和指数衰减瞬态分量 $w(r,t)$ 。

平均温升 $\theta_m(t)$ 可通过考虑电池质量的总比热容来确定。通过使用线性叠加和特征函数展开来解决剩余的子问题，最终的解被导出为：

$$\theta(r,t) = \theta_m(t) + s(r) + w(r,t) = \frac{2Q}{\rho C_p R} t + \frac{Q}{k_r R} \left( \frac{r^2}{2} - \frac{R^2}{4} \right) - \frac{2QR}{k_r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0 \left( \lambda_n \frac{r}{R} \right)}{\lambda_n^2 J_0(\lambda_n)} \exp \left( -\frac{k_r \lambda_n^2}{\rho C_p R^2} t \right) \quad (10)$$

方程(10)表明，在电池中任意处的温升有三个分量：第一即随时间线性增加的分量，其斜率与比热容成反比；第二是一个随时间不变的空间变化项，与径向导热系数成反比；第三是指数衰减项，其时间常数与径向热扩散系数成反比，当时间常数足够大之后，也就是说加热时间足够长，第三项的指数衰减项可以忽略不计，也就是说此时电池内部温度变化进入了准稳态过程。一般来说，对于第二类边界条件的传热问题，基本上都是一个准稳态问题。

在测试过程中探测的是电池表面（ $r = R$ ）温度，在进入准稳态过程后，那么方程(10)可以改写为：

$$\theta(R,t) = \frac{2Q}{\rho C_p R} t + \frac{QR}{4k_r} \quad (11)$$

由此可见，在进入准稳态过程后，电池表面的温升随时间变化将是一个以时间

为变量的线性函数。对于这种恒定热流径向加热的测量方法，如果电池密度可以单独测量，并假设在小的温度范围内密度不随温度发生变化，那么就可以利用此线性温升函数的斜率和截距同时测定电池的比热容和径向导热系数。

### 3. 有限元仿真模拟

从上述获得的不同边界条件时的表面温度解析表达式，可以采用恒温 and 恒流两种不同测试方法来实现对电池径向导热系数和比热容的测量。依据测试方法进行测试仪器设计和实施具体测试试验前，还需进行有限元仿真模拟计算，一方面是验证测试模型的准确性，另一方面是确定被测电池样品之外其他辅助测量部件对测试模型的影响，由此对测试仪器设计、具体试验方法和校准修正进行指导。

在有限元仿真模拟中，选择了与电池热性能相近的各向同性塑料类材料。这样做的目的的一方面是有准确和可溯源的材料，另一方面是可以采用其他测试方法（如瞬态平面热源法和热流计法等）对这些材料进行准确测量以便于对比。所选材料为 ABS 塑料，其密度为  $1020\text{kg/m}^3$ ，导热系数为  $0.2256\text{W/mK}$ ，比热容为  $1386\text{J/kgK}$ 。有限元仿真为随时间变化的瞬态形式，起始温度为  $20^\circ\text{C}$ ，总加热时间为  $600\text{s}$ 。

#### 3.1. 恒温加热测试方法的模拟

在恒温加热测试的仿真模拟中，为缩小瞬态仿真的计算量，根据圆柱形电池的轴对称性取圆柱形电池的四分之一进行仿真。仿真对象完全按照 18650 圆柱形电池尺寸设计（直径  $26\text{mm}$ ，高度  $65\text{mm}$ ），考虑到要在电池表面安装薄膜热流计，设计了一个厚度为  $0.1\text{mm}$  的纯铜圆筒来代表实际测试中紧贴电池表面的绝缘膜和薄膜热流计等，最终设计的测试仿真模型如图 3-1 所示。

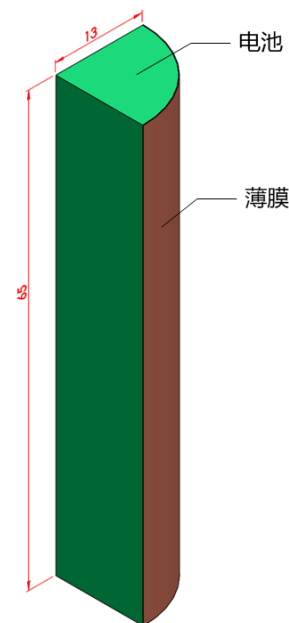


图 3-1 有限元仿真模型

当圆柱形电池从起始温度  $20^{\circ}\text{C}$  开始在表面温度突然提升至  $25^{\circ}\text{C}$  后，在电池整体达到温度稳定后降温至  $20^{\circ}\text{C}$ 。对于这个完整的加热过程，仿真结果如图 3-2 所示，显示了仿真计算得到的电池轴心温度和电池表面热流密度随时间变化曲线。图 3-3 显示了表面热流密度变化曲线及其对数形式的对比。

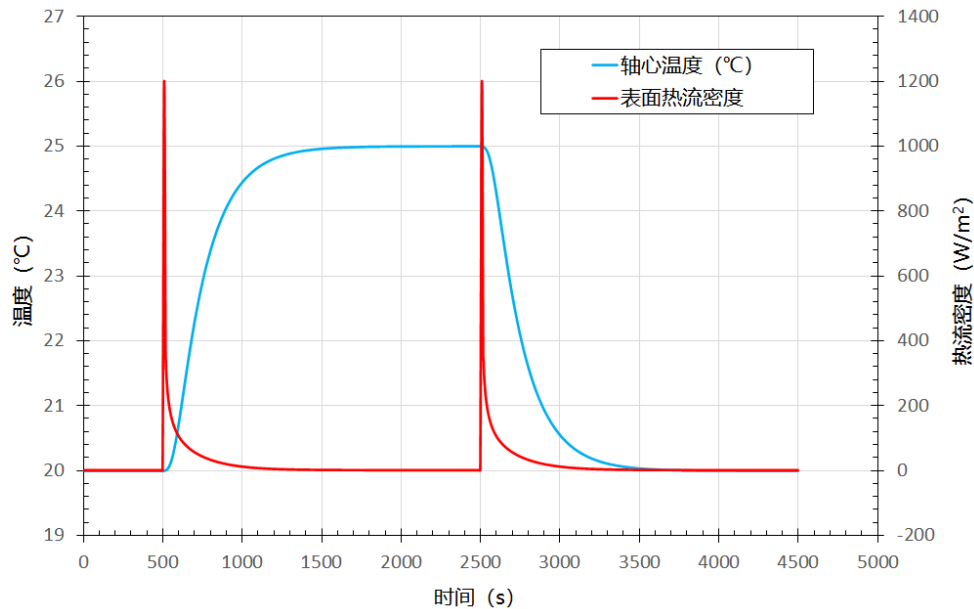


图 3-2 恒温加热方法有限元仿真结果：电池轴心温度和表面热流密度变化曲线

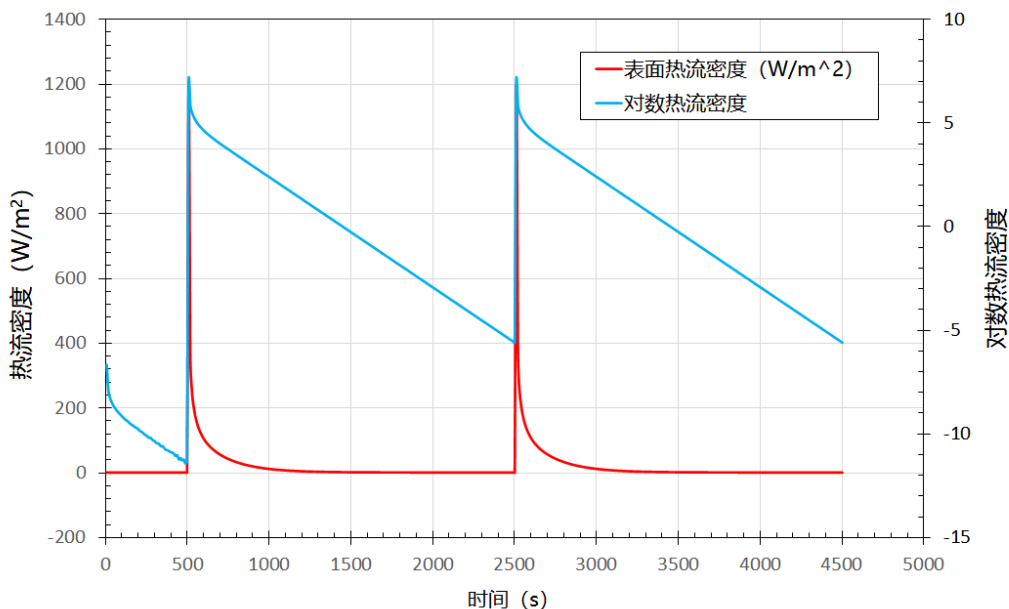


图 3-3 恒温加热方法有限元仿真结果：表面热流密度变化曲线及其对数形式

从图 3-3 可以看出，电池表面热流密度曲线的对数形式是一条直线，其斜率为  $0.005323$ 。根据方程(5)，则可以计算得到径向热扩散系数为  $1.556 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{ s}$ ，与仿真计算的理论值  $1.596 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{ s}$  相差了  $2.5\%$ 。同样，对获得的表面热流密度按照时



间进行积分，根据方程(7)，则可以计算得到比热容为  $1378\text{J/kgK}$ ，与仿真计算的理论值  $1386\text{J/kgK}$  相差了  $0.6\%$ 。根据仿真得到的热扩散系数和比热容，则可以计算的电池径向导热系数为  $0.2186\text{W/mK}$ ，与理论值  $0.2256\text{W/mK}$  相差了  $3.1\%$ 。

从上述仿真结果可以明显看出，电池径向导热系数测量结果的误差主要来自径向热扩散系数，这是因为在仿真计算的测试模型中考虑了铜制薄膜所带来的影响。如果不考虑铜制薄膜而只对电池本身进行仿真，径向热扩散系数的相对误差为  $1.3\%$ ，比热容的相对误差为  $0.1\%$ ，径向导热系数的相对误差为  $1.3\%$ 。

通过以上恒定温度测试方法的仿真模拟，可以得到以下结论：

(1) 证明了恒定温度测试方法的有效性，证明了用方程(5)可测量径向热扩散系数，用方程(7)可测量比热容，以及最终准确得到径向导热系数，并具有很高精度。由此可以实现只需检测圆柱形电池表面热流变化就可以同时测量电池的径向热扩散系数、径向导热系数和比热容。

(2) 恒定温度测试方法的一个显著特点是加热温度可以任意设定，即可以在一个较窄的温度区间内（如  $1^\circ\text{C}$  范围）测试相应的导热系数和比热容，并通过温度的台阶式不断升高来覆盖较大温度范围导热系数和比热容的测量。另外，这个能力一方面可以用来测量整个被测样品内部相变过程中的热性能，另一方面可用来代替绝热量热计进行电池热失控测量。

(3) 通过仿真发现，在测试仪器设计和实际测试过程中，要考虑除电池之外的其他部件（如薄膜热流计、加热膜、均热膜和绝缘膜等）对测量的影响。因此，在实际测试过程中，要进行修正和校准，以最大限度消除这些影响。

(4) 恒定温度测试方法中，测量径向热扩散系数的误差较比热容的误差略大，虽然都可以获得较高的测量精度，而比热容的测量精度更高。

(5) 这种恒定温度测试方法的另一个特点是测试时间较长，一个温度步长的测量就需要近  $40$  分钟，如果采用多温度步长来覆盖较宽的温度区间，则需要更长测试时间。

### 3.2. 恒流加热测试方法的模拟

在恒流加热测试方法的仿真模拟中，同样采用图 3-1 所示的仿真模型，但边界条件是恒流加热方式。当设定加热功率为 0.3W 时，仿真结果如图 3-4 所示。

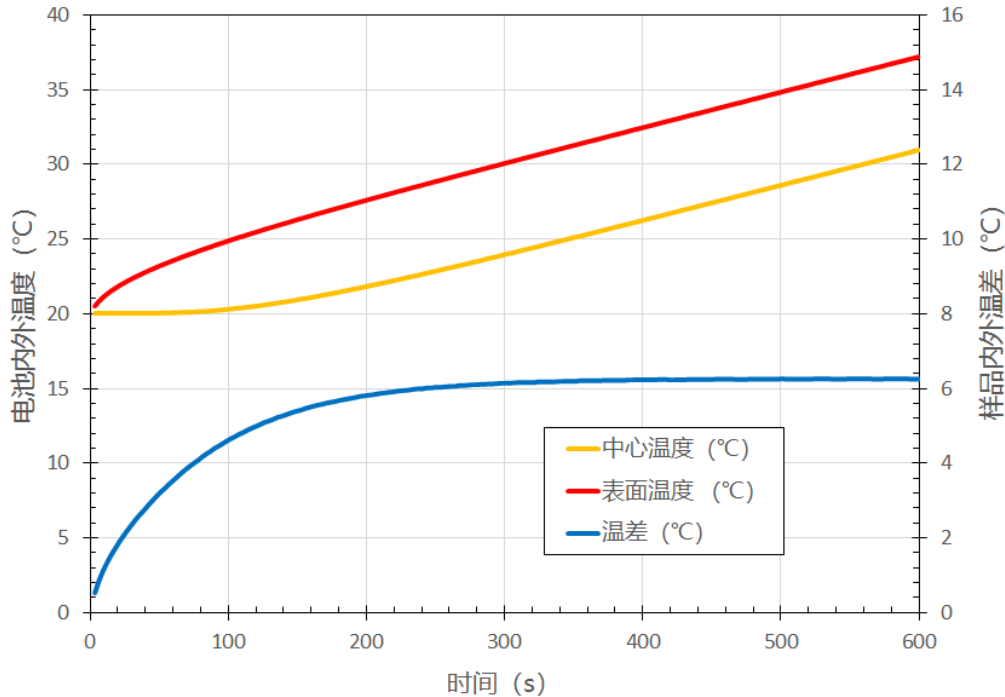


图 3-4 恒流加热方式有限元仿真结果

图 3-4 所示的仿真结果显示了电池中心轴线和外表面温度随时间的变化，为了便于观察还显示了内外温度差。从内外温差曲线可以看出，在开始加热的 400s 后，温差曲线开始保持恒定不再变化，完全进入了准稳态过程，400s 以后的外表面温度随时间变化呈现出线性状态。线性拟合 400s 后的表面温升曲线，得到一个标准的线性方程  $\theta(R,t) = 0.0237t + 3.0094$ 。由方程(11)可以得到：

$$\frac{2Q}{\rho C_p R} = 0.0237; \quad \frac{QR}{4k_r} = 3.0094 \quad (12)$$

根据已知的热流密度  $Q$ 、电池半径  $R$  和密度，则可以同时获得电池的径向导热系数和比热容，分别为 0.2376W/mK 和 1400J/kgK。

将仿真模拟的计算结果与设定值比较可以发现，仿真结果得到的导热系数偏差约 5%，比热容则偏差约 1%。这种偏差主要是由于代入计算的 0.3W 加热功率并没有完全用来加热电池，部分功率用于加热了铜膜。

对仿真测试模型进行更改，去掉铜膜，使 0.3W 加热功率完全作用在电池上，此时得到的径向导热系数和比热容分别为 0.2269W/mK 和 1380J/kgK，与设定值相比误差在 0.5%左右，完全与设定值吻合。

通过上述恒定热流测试方法的仿真模拟，可以得到以下结论：

(1) 证明了用解析式(11)描述准稳态过程中电池表面温升是合理的，由此实现了只需检测电池表面温度变化就可以同时测量电池的径向导热系数和比热容。

(2) 需要注意的是，用解析式(11)得到的径向导热系数和比热容，是整个温升范围内的平均导热系数和平均比热容，并不是某一个温度点下的热性能数值。由于整个温升区间较小，认为在此温度区间内导热系数和比热容是常数。

(3) 测试仪器设计和实际测试过程中，要考虑除电池之外的其他部件（如加热膜、均热膜和绝缘膜等）对测量的影响，这些部件因自身热容会损耗掉一部分加热功率。因此，在实际测试过程中，要进行修正和校准，以最大限度消除这些影响。

(4) 径向导热系数测试对上述其他部件的影响最为敏感，比热容测试则并不敏感，这就是径向导热系数准确测量的难度所在。

## 4. 结论

特别针对圆柱形锂离子电池径向导热系数测试技术开展了研究，建立了简单易操作的测试方法，并用有限元仿真对测试方法进行了验证，整个研究工作得出以下结论：

(1) 针对圆柱形锂离子电池径向导热系数，建立了恒温和恒流两种测试时模型和相应的测试方法。有限元仿真模拟证明了这两种测试方法都具有很高的测量精度，完全可以应用在实际测试中，这对锂离子电池的热性能测试有着重要意义。

(2) 建立的两种测试方法，都可以通过一次升温试验就可以获得径向导热系数、径向热扩散系数和比热容数值。特别是恒温测试方法还可以进行宽温区范围的热性能参数随温度变化的测量，甚至可进行整个相变过程中的热性能测量。

(3) 建立的等温测试方法, 已经基本具有了常用的加速绝热量热仪的功能, 可代替和补充加速绝热量热仪进行电池的热失控检测。

(4) 建立的两种测试方法简单且易于实现, 试验操作方便, 非常适合电池性能考核中其他变量的加载, 如电池充放电过程中的热性能检测。

(5) 圆柱形锂电池径向导热系数测试方法上的突破, 可将恒温和恒流两种测试方法推广应用到其它规格锂离子电池的热性能测试中, 可进行各种加载条件和各个方向上的锂电池热性能测试。

(6) 所研究的恒温和恒流两种测试方法原理简单, 边界条件易于实现, 非常有利于低价仪器化和模块化, 以及与其他测试仪器的集成。