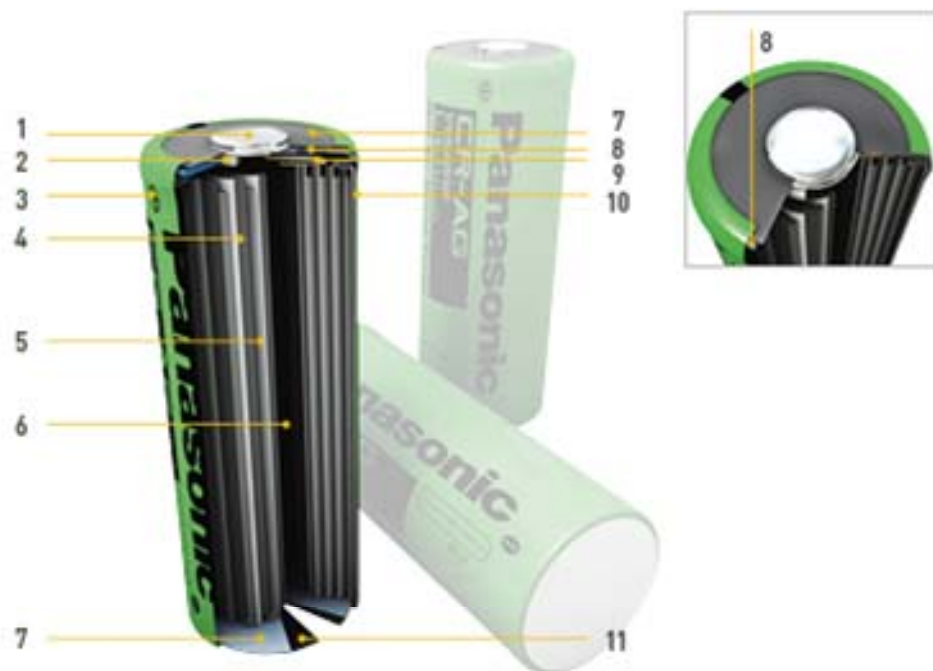


文献综述和评论

—— 圆柱形锂电池各向异性导热系数测试技术

Literature Review and Comments of Measurement Technology for
Anisotropic Thermal Conductivity of Cylindrical Lithium Battery

- 1 Positive pole
- 2 Vent diaphragm
- 3 Tube
- 4 Anode (Lithium)
- 5 Separator
- 6 Cathode (Manganese Dioxide)
- 7 Insulator
- 8 PTC (Positive Temperature Coefficient Device)
- 9 Collector
- 10 Cell can
- 11 Negative pole



摘要：本文针对圆柱形锂离子电池整体导热系数测试方法，评论性概述了近些年的文献报道，研究分析了导热系数测试方法的特点，总结了圆柱形锂电池各向异性导热系数测试中存在的问题和面临的挑战，从热分析仪器市场化角度提出了迎接这些挑战的技术途径和新方法。

1. 问题的提出

圆柱形锂离子电池是所有类型锂离子电池中功率密度最高的，在设计、制造、应用和质量及安全性管理中，圆柱形锂电池会涉及到多种规格形式，如图 1-1 所示。



图 1-1 各种规格的圆柱形锂电池

圆柱形锂电池通常采用螺旋电极组件，由于在径向传导路径中电极和电解质层之间存在大量轴向上没有的界面，这使得圆柱形锂离子电池导热系数在径向和轴向之间存在着近两个数量级的差异。导热系数作为锂离子电池重要的热物理性能参数之一，测试就需要覆盖上述不同规格电池和不同方向的导热系数，这使得准确测试评价圆柱形锂离子电池导热系数面临着以下几方面的严峻挑战：

(1) 导热系数测试方法众多，但针对圆柱形锂离子电池的特殊外形特征，首先要需要找出合理的测试方法，以保证测量结果的准确性，这对锂离子电池的设计和热管理尤为重要。

(2) 圆柱形锂离子电池一个显著特点就是明显的各向异性特征，这就要求导热系数测试方法和仪器还需具备各向异性的测试能力。同时，由于圆柱形锂电池一

一般都是密封结构，不允许在电池内插入温度传感器等探测器，测试只能采用无损形式。由此可见，圆柱形锂电池的各向异性和无损检测，明显增大了测试技术的复杂程度和技术难度，甚至还需开发有些新型测试技术，如圆柱形锂离子电池径向导热系数测试技术。

(3) 由于圆柱形锂电池导热系数测试涉及到不同形状和方向，这就要涉及不同的导热系数测试方法和设备。但在实际工程应用中，还是希望能对测试方法进行优化和开发测试新技术，从而实现用尽可能少的测试方法和仪器设备以尽可能多的满足其他规格锂电池的导热系数测试需求。

(4) 由于锂离子电池还涉及其他热性能参数和表征参数，如比热容和热失控等，这样就要求导热系数测试方法和仪器能与其他热性能参数测试仪器集成在一起，使得测试仪器具备多功能性，在一台测试仪器上可实现多个参数的测试。

本文将针对上述存在的问题和挑战，首先对近几年圆柱形锂离子电池导热系数测试技术进行评论性综述，然后在对这些技术进行分析研究的基础上，提出更适合圆柱形锂离子电池导热系数测量的实用方法。

2. 圆柱形锂电池导热系数测试方法综述

尽管有些文献针对圆柱形锂电池导热系数测试进行了研究和报道，但出于适用性和实用性等方面的考虑，我们只关注那些对整体圆柱形锂电池进行的非破坏性导热系数测试方法。

圆柱形锂电池是标准的圆柱形结构，对于径向和轴向导热系数，目前比较有效的测试方法基本采用的都是圆柱形结构的准稳态法，测试模型如图 2-1 所示。

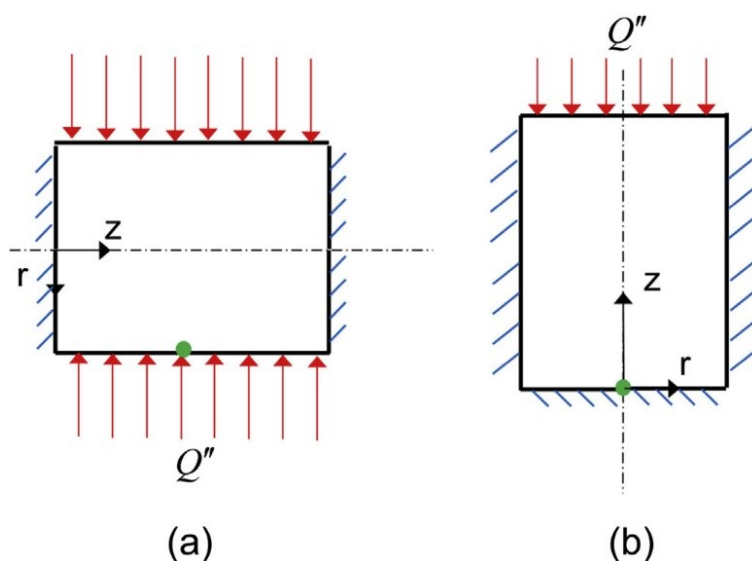


图 2-1 (a) 径向加热和 (b) 轴向加热情况的几何模型

在上述测试模型中，假设圆柱形锂电池的成分均一，以简化操作和计算。径向测试模型是在圆柱形电池外表面加载恒定热流或加热电池使外表面温度呈线性变化，如图 2-1 (a) 所示，在圆柱形电池的轴线上 (z 向) 呈绝热状态。

同样，对于轴向导热系数测试，如图 2-1 (b) 所示，只在圆柱形电池的顶部加载恒定热流或使顶部表面温度呈线性变化，而电池底部采取绝热措施，由此可以形成与图 2-1 (a) 相同测试模型，而这个测试模型则是典型的一维准稳态测试模型。

为了实现图 2-1 所示的准稳态测试模型，径向导热系数测试装置的基本结构设计为如图 2-2 所示形式，并且整个装置放置在真空器皿中以减少热损失。

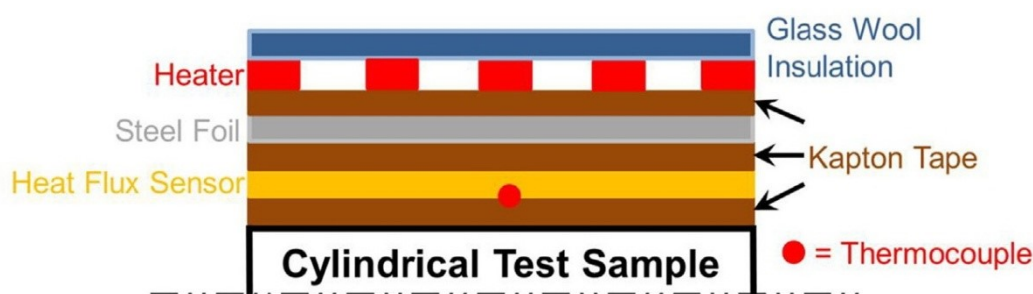


图 2-2 带柔性加热器、薄膜热流计和测温热电偶的径向导热系数测量装置示意图

为了减少附加热容的影响，加热器、热流计以及绝缘层尽可能采用薄膜形式，由此所有温度和热流测量都在电池外表面进行。无论是径向还是轴向导热系数测量，用低导热隔热材料包裹整个测量装置以避免热量散失，以尽可能满足测试模型无热损的假设。

实际上，图 2-1 所示的准稳态测试模型是一种传统的测试方法，常被用于测量柔性和颗粒状隔热材料的高温导热系数。在标准的准稳态法测试过程中，需要测试绝热面的温度（如圆柱形样品的轴心温度）。在恒定热流加热情况下，经过一段时间后，样品的加热面和绝热面温度将达到相同的升温速率，传热方向上样品内外温度差将趋于相同，这种状态称之为准稳态。通过温差测量，很容易获得不同温度下的导热系数。

但对于圆柱形锂电池，不允许在电池中心插入测温传感器，只能在电池的外表面进行各种测量，这就为测量带来了难题。

2.1. Jain 团队的研究工作

为了解决上述难题，美国德克萨斯大学 Jain 团队的 Drake 在读博期间开展了专项研究[1]，开发了一种新颖的测试技术并进行了报道，测量装置与图 2-2 结构基本相同，只是少了薄膜热流计。测试过程中，通电控制加热膜温度线性升温，经过一段时间后，整个电池的温度变化进入准稳态过程，热电偶测量的电池表面温度也逐渐呈线性升温，希望通过此升温曲线来测定相关热性能参数。

另外，Drake 等人针对测试模型建立了相应的数学表达式，并采用有限元方法进行仿真模拟，报道了数学表达式与有限元模拟结果有很好的吻合，如图 2-3 所示，计算了电池外表面、轴心线和径向不同位置处的温度变化。

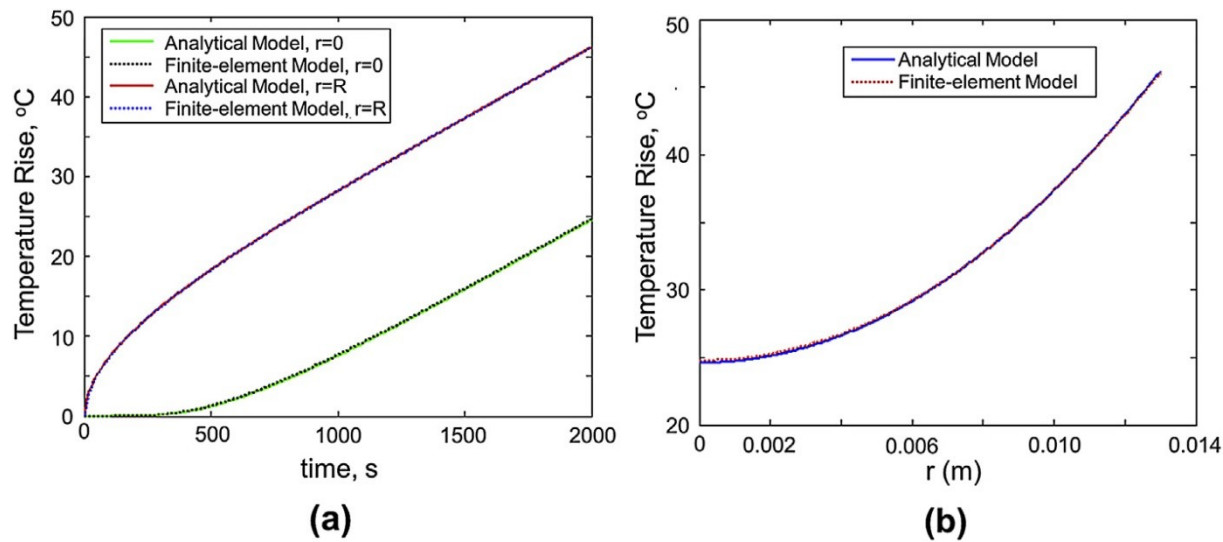


图 2-3 径向数学模型与有限元热模拟的比较

通过对数学模型的分析，Drake 等人认为在进入准稳态后，通过测量圆柱形电池外表面温度变化直线段的截距和斜率，来分别得到电池的导热系数和比热容。由此分别对 26650 和 18650 电池的径向和轴向导热系数以及比热容进行了测量，测试曲线如图 2-4 和图 2-5 所示，锂电池的导热系数和比热容测试结果如表 2-1 所示。

表 2-1 26650 和 18650 电池的测量热物理特性

	k_r (W m ⁻¹ K ⁻¹)	k_z (W m ⁻¹ K ⁻¹)	C_p (J kg ⁻¹ K ⁻¹)
26650	0.15 ± 0.01	32 ± 1.6	1605 ± 80
18650	0.20 ± 0.01	30.4 ± 1.5	1720 ± 86

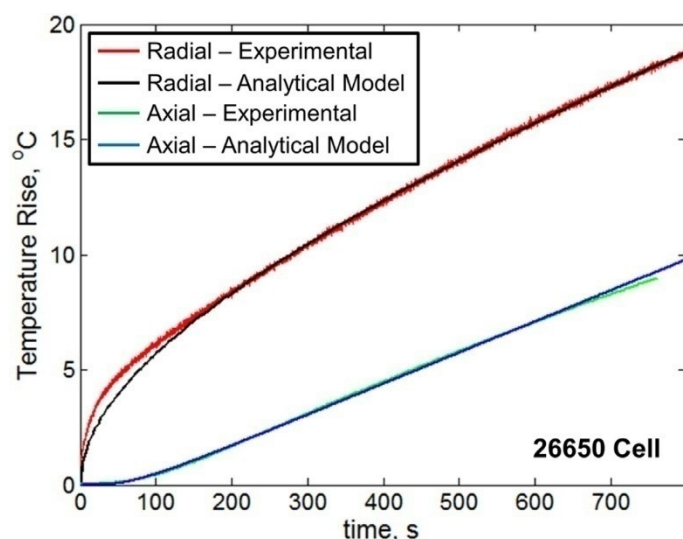


图 2-4 26650 锂电池径向和轴向热物理性能测量的实验数据和分析模型比较

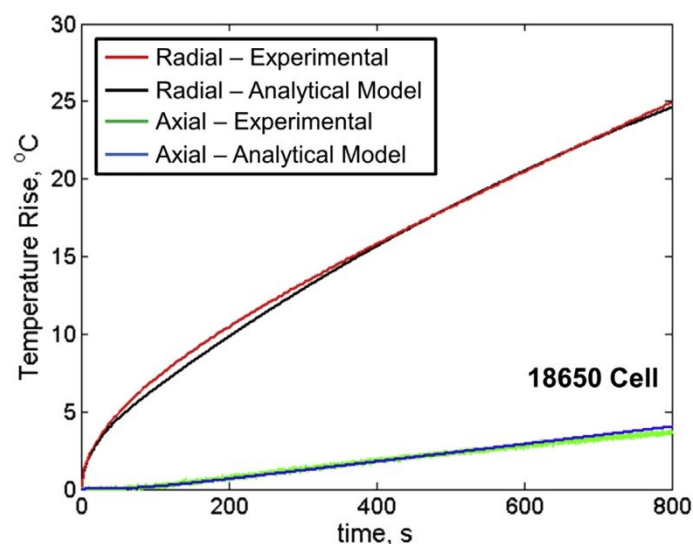


图 2-5 18650 锂电池径向和轴向热物理性能测量的实验数据和分析模型比较

按照 Drake 等人提出的测试方法，圆柱形锂电池的不同方向测量可以得到不同的导热系数和比热容。因为比热容没有方向性，所以不同方向测试得到的比热容应该相同，由此可以检验测试方法的准确性。而 Drake 等人报道了对于 26650 锂电池的测试结果，轴向试验测得的比热容为 1605J/kgK ，径向试验测定的比热容为 1895J/kgK ，相差将近 15%。

Drake 等人的报道称这一“微小”差异归因于这样一个事实，即由于径向实验中的温度测量是在电池的中心位置进行，因此它没有考虑电池端部存在的金属接线片。当在轴向测试中考虑金属突片时，由于与构成电池电解质的有机溶剂相比，金属的比热容较低，所以测得的比热容稍低。所以报道认为轴向测量的比热容被认为更准确，因为考虑了翼片。

另外，Drake 等人的报道还进行了简单的不确定度分析，结论是导热系数和比热容的总测量不确定度估计为 5% 左右。

在 Drake 博士的研究工作基础上，Jain 团队又开展了研究改进工作[2]。Drake 博士的圆柱形锂电池径向导热系数测试模型是进入电池的是不随时间变化恒定热流，但由于包裹的隔热材料以及薄膜形式的加热器等对热量吸收，使得真正进入电池的热流实际上可能会随时间发生变化，因此新的研究修改了解析模型以解决这些

热量损失，得出了更广义的可变加热热流条件下的电池表面温升表达式，并重新定义的径向导热系数测试方法，以提高径向导热系数测量准确性。

此次研究分别对两种均质材料 delrin 和丙烯酸树脂和 26650 锂离子电池进行了测试，重新定义的导热系数测试方法并未沿用前期 Drake 博士报道的测试方法，而是采用试验得到的样品表面温升曲线，并结合灵敏度分析和参数估计方法来计算得到导热系数。

此次研究采用了如图 2-2 所示的测量装置，即在 Drake 博士的测试装置中加入了薄膜热流计，以检测加载恒定热流后真正进入圆柱形锂电池中的热流大小，测试结果如图 2-6 所示，从测试结果可以看出有随时间变化的明显热损。

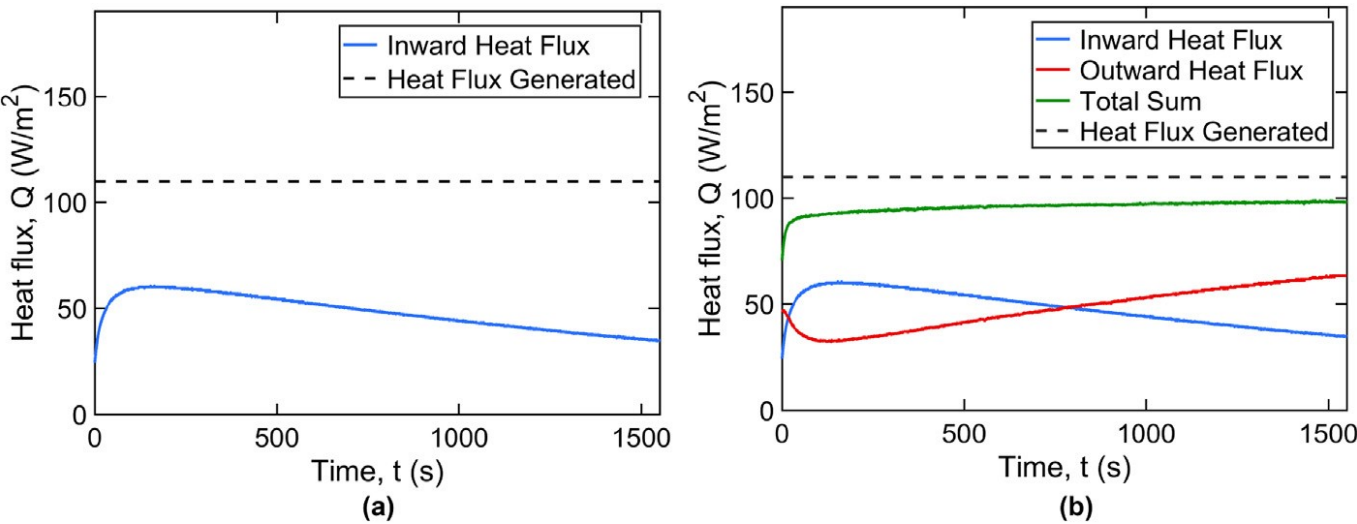


图 2-6 (a) 输入电池热流随时间的变化；(b) 输入电池热流、热损及其总和随时间的变化，虚线表示加载给薄膜加热器的恒定热流

为了真正有效的评价改进后的测试方法，采用了瞬态平面热源法对 delrin 和丙烯酸样品的导热系数进行单独测量并进行的对比测试，测试结果如表 2-2 所示。

表 2-2 两种测量方法的结果比较

	Thermal Conductivity: Variable Heat Flux Method (W/mK)	Thermal Conductivity: Transient Plane Source Method (W/mK)	Heat Capacity (determined separately) J/kgK
Delrin	0.38	0.42	1496
Acrylic	0.22	0.26	1367
Li-ion cell	0.39	—	800

在 Jain 团队的这次改进性研究中，参数估计计算中只估计了导热系数这一个参数，并未对比热容进行参数估计，理由是参数估计过程中要先计算出比热容，然后再根据此比热容来估计导热系数，而比热容的误差会对导热系数带来较大影响。因此，此次研究中电池比热容数据采用了量热计独立测量结果，delrin 和丙烯酸树脂比热容则由瞬态平面热源法测得。

Jain 团队的这次改进性研究报道了径向导热系数测量的不确定度为 7%，从表 2-2 所示测量结果来看，两种方法相差了 9~15%，导热系数越小则测量误差越大。

2.2. Spinner 等人的研究工作

为了对圆柱形锂电池做更深入的研究，美国海军研究实验室的 Spinner 等人分别采用了解析、量热测量、数值和试验四种方法对商用 18650 锂离子电池的热物理性能进行了测试研究[3]：

(1) 第一种方法是根据随时间变化的导热方程式得出的径向导热系数的解析表达式，然后依据自然对流加热和冷却锂电池的实验测量值，采用参数估计方法得到锂电池径向导热系数和比热容。

(2) 第二种方法是采用自制的简易量热仪测试出锂电池的比热容。

(3) 第三种方法是采用径向导热方程解析表达式，结合图 2-2 所示的恒定热流试验测量结果，采用数值差分和参考估计方法得到径向导热系数和比热容。

(4) 第四种方法完全采用了 Drake 等人的轴向导热系数测试方法[1]。根据电池表面温度准稳态变化曲线，通过截距和斜率计算得到轴向导热系数和比热容。

在第一种径向导热系数测试中，将一个表面粘贴有热电偶的锂电池放置在一个具有初始温度的密闭腔室内，等锂电池和腔室初始温度都达到稳定后，使腔室温度阶跃升高或降低到一个新的温度，通过表面对流传热形式对锂电池进行加热或冷却，测温热电偶在整个过程中检测电池表面温度随时间的变化。这是一个典型的圆柱形样品侧面对流热交换模型，Spinner 等人根据此传热模型建立了电池表面温度变化解析表达式，然后采用参数估计技术并结合试验测试得到的表面温度变化数据，计算

得到锂电池径向导热系数和比热容，分别为 $0.55\pm0.23\text{W/mK}$ 和 $972\pm92\text{J/kgK}$ 。

为了评估测量准确性，在第二种方法中采用了量热法分别测量 18650 锂电池、铝和特氟隆的比热容作为对比，每次测量都将选取四个样品捆绑在一起以增加总热容来提高测量精度，测量结果如表 2-3 所示。

表 2-3 通过量热法获得的比热容与文献报道的铝（6061 型）、特富龙和 18650 LiCoO₂ 电池的比热容值进行比较

	C _p (J/kg-K) of Material		
	Aluminum	Teflon	18650 LiCoO ₂ Battery
Calorimetry	860 ± 8	1073 ± 17	896 ± 31
Literature	860–890	1000–1200	800–1700

在第三种径向导热系数测试中，首先对照测试了具有与 18650 电池相似几何形状的特富龙圆柱体，导热系数和比热容分别为 $0.232\pm0.003\text{W/mK}$ 和 $1203\pm8\text{J/kgK}$ 。然后对 18650 电池进行了九次不同恒定热流测试，九次测量结果有较好的一致性，导热系数和比热容的平均值分别为 $0.300\pm0.015\text{W/mK}$ 和 $814\pm19\text{J/kgK}$ 。

从第三种技术得到的结果可以看出，得到的比热容数据 $814\pm19\text{J/kgK}$ 要比量热计测量结果 $896\pm31\text{J/kgK}$ 低了近 9%。因此，Spinner 等人放弃了比热容测量，直接采用量热计的比热容测量结果，而直接参数估计径向导热系数这一个参数，这样得到的导热系数为 $0.219\pm0.020\text{W/mK}$ ，认为此结果是最佳估计。但对于这个结论是否正确，并没有进行进一步的考核，如采用其他方法准确测量特富龙的导热系数，然后再进行比较。

在第四种轴向导热系数测试中，测得的轴向导热系数为 $21.9\pm1.7\text{W/mK}$ ，但并未给出比热容测量结果。

将 Spinner 等人的结果与 Drake 等人的结果相比可以看出，除径向导热系数测量结果相近之外，轴向导热系数和比热容测量结果相差巨大。

2.3. Murashko 团队的研究工作

为了对运行期间圆柱形锂电池的热性能（热扩散系数和发热量）实现在线测量，Murashko 团队提出了另外一种测试方法并开展了研究[4][5]。

测试模型如图 2-7(b)所示，圆柱形电池应视为无限长圆柱。为了这个目的，如图 2-7(a)所示在圆柱形电池的两个端部都使用了纤维棉进行隔热。分别通过使用 PT100 温度传感器和热流传感器（GHFS）对电池表面的温度和热流进行测量。

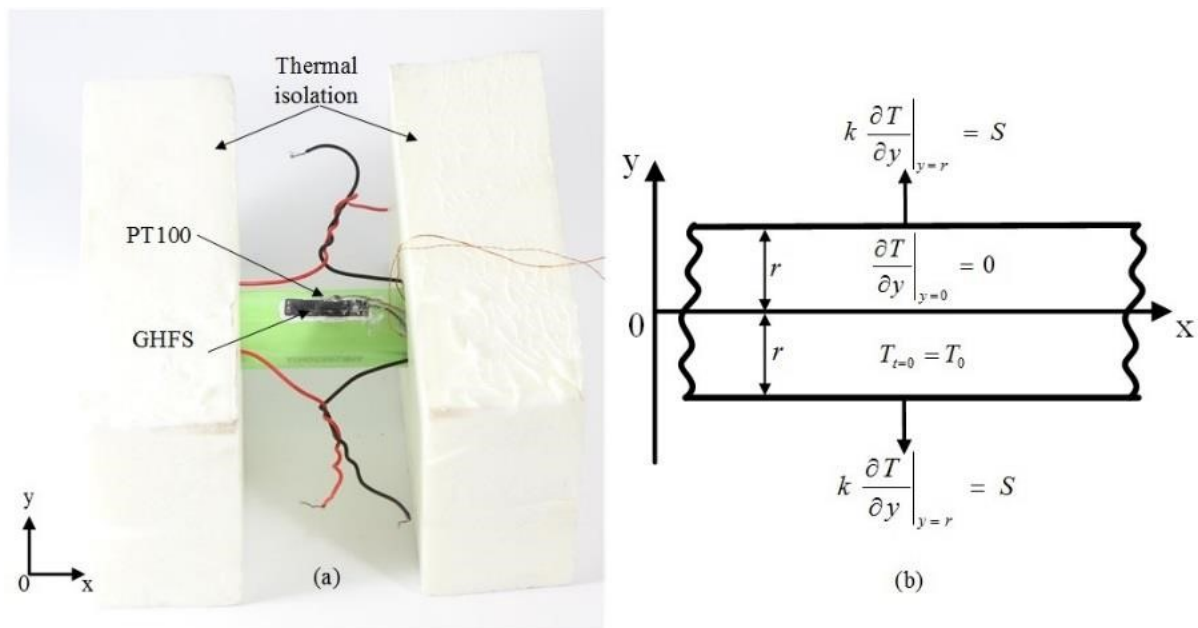


图 2-7 (a) 具有隔热、GHFS 和 PT100 传感器的圆柱形电池；(b) 无限长的圆柱体

对于圆柱形锂电池的热性能的测量，是将圆柱形电池当作有内热源的圆柱体样品来对待，针对内热源圆柱体传热模型，建立了表面温度和表面热流的解析表达式，通过测试获得的电池表面温度和热流，采用参数估计的方法逆向求解出径向导热系数、径向热扩散系数、比热容和电池发热量。分别进行了两次不同的测试，连个测试结果如表 2-4 和表 2-5 所示：

表 2-4 首次测试后的热参数计算结果

Parameters	Thermal diffusivity a	Through-plane thermal conductivity k	Heat capacity c_{th}
Calculated value (k and a are unknown parameters)	$2.7979 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	$0.51 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$0.895 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$
Uncertainty (k and a are unknown parameters)	135.6 %	135.5 %	191.6 %
Calculated value (c_{th} and a are unknown parameters)	$2.7919 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	$0.51 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$0.895 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$
Uncertainty (c_{th} and a are unknown parameters)	135.7 %	135.8 %	3.0 %

表 2-5 第二次测试后的热参数计算结果

Parameters	Thermal diffusivity, a	Through-plane thermal conductivity, k	Heat capacity, c_{th}
Calculated value (k and a are unknown parameters)	$2.4165 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	$0.437 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$0.883 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$
Uncertainty (k and a are unknown parameters)	497.4 %	497.8 %	703.7 %
Calculated value (c_{th} and a are unknown parameters)	$2.4165 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	$0.437 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$0.883 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$
Uncertainty (c_{th} and a are unknown parameters)	507.1 %	507.5 %	21.8 %

从上述两次测试结果可以看出，所采用的方法很难同时测定比热容和径向导热系数，径向导热系数和热扩散率的误差巨大，但可以用于测量圆柱型电池的比热容。

2.4. 其他研究工作

厦门大学的黄键等人在 2020 年报道了他们针对 18650 圆柱形锂离子电池导热系数各向异性测试的研究工作[6]，测试方法是 ASTM D5470 稳态恒定热流法和 CFD 仿真模拟相结合，通过不同尺寸和形状的上下热流计来测试夹持在上下热流计之间不同摆放形式的圆柱形锂电池。对于圆柱形锂电池的轴向导热系数测试，如图 2-8 所示，采用了小直径的铜棒热流计，上下结构的铜棒热流计将直立放置的圆柱形锂电池夹持在中间，电池上下顶面分别控制在不同温度以在电池轴向形成稳定的温度梯度，由此来测量轴向导热系数。

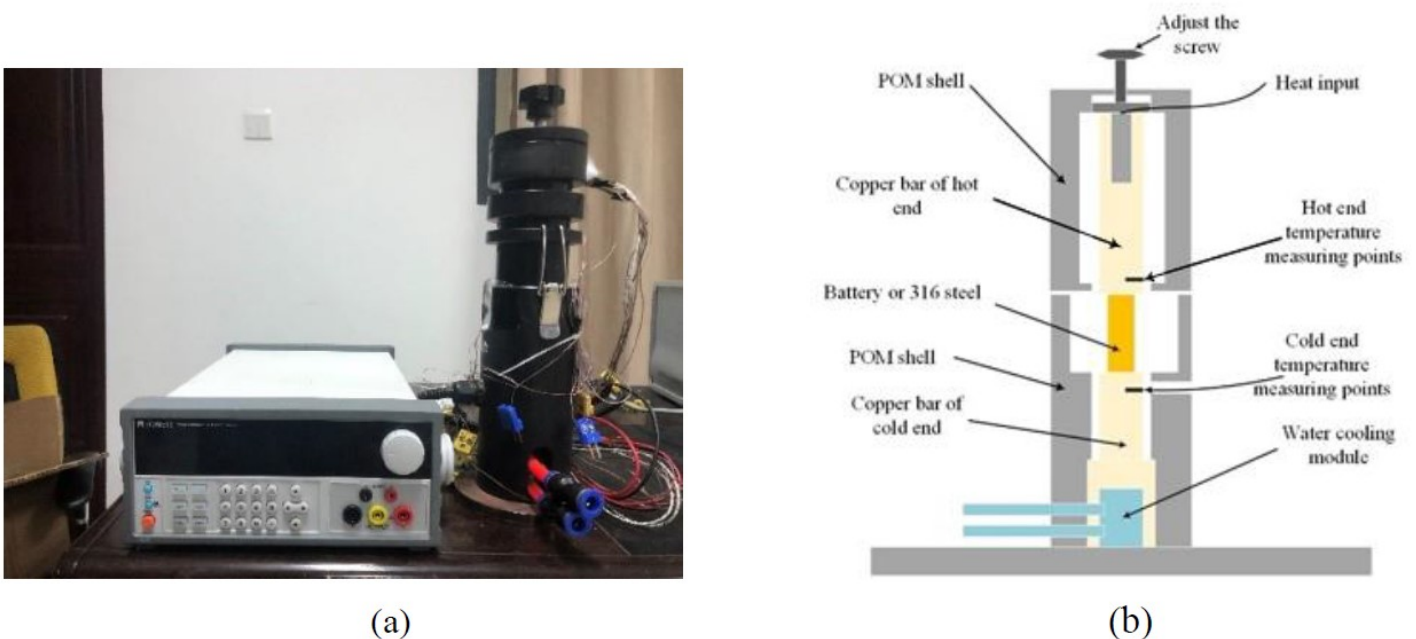


图 2-8 轴向导热系数测试；(a) 测量装置，(b) 装置结构示意图

如图 2-9 所示，对于电池径向导热系数测量，还是采用稳态法，只是加大了上下铜棒热流计的尺寸，并是上下热流计的端面形状与圆弧形电池外表面贴合，以保证在电池的直径方向上性能稳定的温度梯度。从图 2-9 可以看出，这种仪器结构测试的并不是真正意义上的径向导热系数。

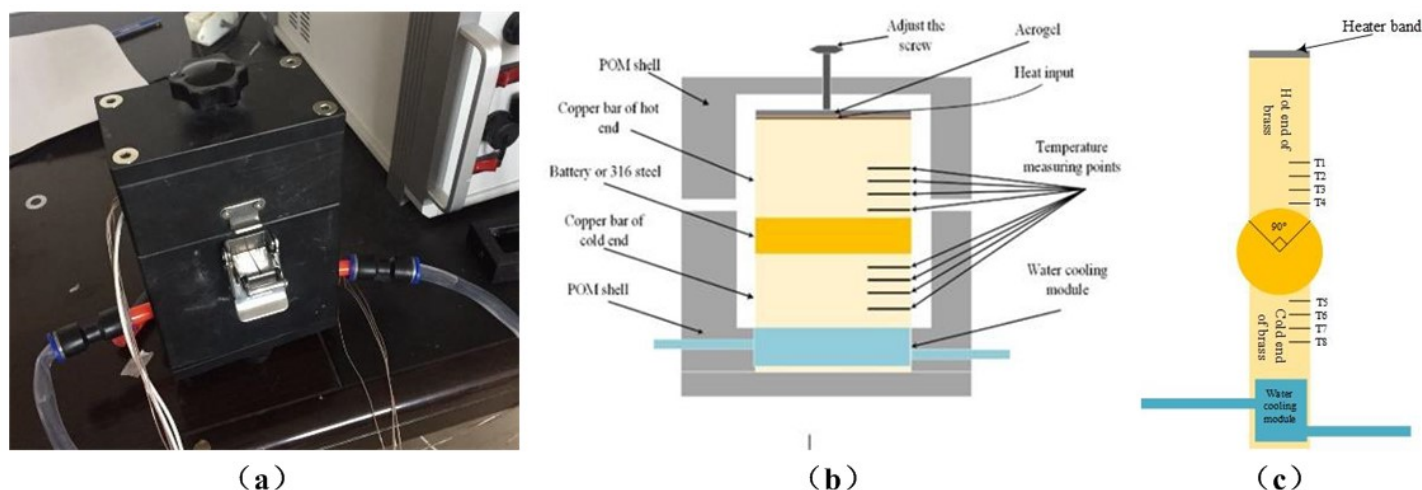


图 2-9 径向导热系数测试；(a) 测量装置，(b) 装置结构正视图，(c) 侧视图

采用瞬态平面热源法测量了 316 不锈钢导热系数 (14.494W/mK)，然后将 316 不锈钢制成 18650 圆柱形锂离子电池形状，再放置到上述两台测试仪器进行测试以考核测量精度。轴向测试结果偏差为 -0.649% ，径向测试结果偏差为 2.394% 。

在随后的 18650 圆柱形锂离子电池轴向导热系数测试中，电池顶部温度控制在 125.7°C ，底部温度控制在 31.3°C ，在温差近 94.4°C 情况下测得的轴向导热系数为 11.5W/mK 。在径向导热系数测试中，测得结果为 4.324W/mK 。

这种测试方法能否准确测量圆柱形锂电池的各向异性导热系数非常值得商榷，主要问题是在测试径向导热系数过程中，上下铜热流计和圆柱状电池的布置结构非常容易使热量寻找最短路径进行传递，如从电池外壳传热，这势必一方面增大了传热量，另一方面缩短了热传递路径，这两方面的作用都会使得导热系数测试增大。而且，这种上下形式的传热结构，并不是真正的电池径向传热，所得到的导热系数也不是真正的点尺寸径向导热系数。

加州理工学院的 Bhundiya 等人针对 18650 和 26650 圆柱形锂离子电池也开展了测试研究[7]。测试前先将被测电池拆解，使用镍铬合金线通电加热柱状电池中心轴

线来测量锂电池的径向导热系数，对于 18650 锂电池导热系数的测量结果为 $0.43 \pm 0.07 \text{ W/mK}$ ，对于 22650 锂电池导热系数的测量结果为 $0.20 \pm 0.04 \text{ W/mK}$ 。明显可以看出他们的两个测量结果均远大于 Drake 等人的报告值 ($0.20 \pm 0.01 \text{ W/mK}$ 和 $0.15 \pm 0.01 \text{ W/mK}$) [1]，而且整个测试装置非常简陋，被测电池外围并没有采取热防护而存在对流热损，测量结果的重复性基本在 10% 以上，最重要的一是测量接触压力与实际不符而带来较大热阻，二是没有采用已知导热系数材料进行考核验证。尽管测试结果对比相差较大，但至少又一次证明了圆柱形锂离子电池中层间接触热阻的影响非常明显，也可能证明了不同厂家锂电池因不同制造工艺不同而使得径向导热系数出现较大差别。

3. 分析和评论

纵观上述国内外对圆柱形锂离子电池各向异性导热系数的测试研究，呈现出十分混乱的局面，研究思路不是十分清晰和有效，存在的诸多问题主要表现为：

(1) 最直观的表现是导热系数各向异性测量结果非常差，稍微有点作用的是对比热容的测量，由此反而说明了比热容测量对各种误差影响因素并不敏感。

(2) 对圆柱形锂离子电池的径向导热系数测试，已经建立了恒定热流法测试模型，也推导出了非常漂亮的相应数学表达式，但在具体试验中并没有很好的应用。可能是各种边界条件的影响太大，使得无法直接使用相应的数学表达式来获得准确的测量结果，采用的各种参数估计方法并没有提高测量精度。

(3) 在热性能测试过程中，数学模型并不能准确描述实际测量装置的各种变化和边界条件，因此在热性能测试中最要的一个环境就是对测试方法进行仿真模拟计算，验证测试模型的准确性和量化各种边界条件的影响，并建立相应的校准方法。这是保证测量准确性的关键，而上述国内外的研究都没有涉及，由此使得现有的国内外研究对提高测量精度显着无能为力，从而盲目的采取了更多的其他方法做着努力，但基本没有效果。

(4) 在上述国外的测试研究中，出现了很多常识性错误。最典型的错误就是热性能参数测量绝对不能在真空环境下进行，企图用真空条件来降低对流和辐射热

损的影响，其效果往往会被真空下空隙型接触热阻同时增大的负面影响给覆盖掉，真空下测试势必会增加加热膜、薄膜热流计和热电偶之间的接触热阻，这也是上述国外研究中测量误差巨大的主要原因之一。另外，如果真空度控制不稳定或者不控制，孔隙型接触热阻的变化也会给测量带来较大的波动。

综上所述，尽管国内外研究还存在很多问题，但总体有以下两点收获：

(1) 针对圆柱形锂离子电池各向异性热性能的测试，做了有效的尝试。特别是针对非破坏式的测试方法方面，证明了只测量电池表面温度变化来确定各向异性导热系数和比热容的可能性，这种证明对后续研究工作的开展和解决锂离子电池热性能测试难题有着重大意义。

(2) 通过近些年的努力，针对电池热性能的测试，基本形成了一个共识，就是不管使用什么测试方法和技术手段，最终都需要一是符合工程要求进行非破坏性检测，二是最终测量的准确性都需要采用可比较的测试方法和手段进行对比考核。

4. 新方法的提出和研究

通过上述针对圆柱形锂离子电池径向导热系数各种测试方法的综述和分析，可以看出真正有实际工程意义的测试方法具有以下几方面的特征：

(1) 非破坏式测量，即不能拆解锂电池来进行测量，否则会改变电池的各种性能特征和边界条件。

(2) 表面测量方式，即所有测试加载都发生在圆柱形电池的外表面，目前报道相对成功的是在电池表面加载恒定热流。

在材料热物理性能测试中，边界条件分为三类，即第一类边界条件是恒定温度，第二类边界条件是恒定热流，第三类边界条件是交变温度或热流。由此可见，对于不能拆解的圆柱形锂离子电池，完全可以采用这三种边界条件测试模型进行径向导热系数测量。上述综述中常用的方式是第二类边界条件，这也就是说还可以采用第一和第三类边界条件对锂电池径向导热系数进行测量。

由此，上海依阳实业有限公司采用第一类边界条件的测试方法对径向导热系数

测试技术开展了研究，建立恒温测试模型，推导了相应的表面温度解析表达式，并用有限元仿真模拟验证了测试模型的准确性，同时也验证了恒定热流测试模型的准确性。

通过研究发现，采用第一类边界条件的恒温测试方法能更准确的测量锂电池径向导热系数，并同时能测量得到比热容和径向热扩散系数。更重要的是恒温测量方法可以很容易的推广应用到棱柱形和袋装锂离子电池的热性能和热失控测试，可以作为目前常用的加速量热计测试技术的一种重要补充。

5. 参考文献

- [1] Drake, S. J., et al. “Measurement of Anisotropic Thermophysical Properties of Cylindrical Li-Ion Cells.” *Journal of Power Sources*, vol. 252, 2014, pp. 298–304.
- [2] Ahmed M B , Shaik S , Jain A . Measurement of radial thermal conductivity of a cylinder using a time-varying heat flux method[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2018, 129:301-308.
- [3] Spinner, Neil S., Ryan Mazurick, Andrew Brandon, Susan L. Rose-Pehrsson, and Steven G. Tuttle. 2015. “Analytical, Numerical and Experimental Determination of Thermophysical Properties of Commercial 18650 LiCoO₂ Lithium-Ion Battery.” *Journal of The Electrochemical Society* 162 (14).
- [4] Murashko K A , Mityakov A V , Mityakov V Y , et al. Determination of the entropy change profile of a cylindrical lithium-ion battery by heat flux measurements[J]. *Journal of power sources*, 2016, 330(oct.31):61-69.
- [5] Murashko K , Mityakov A V , Mityakov V Y , et al. Heat flux based method for determination of thermal parameters of the cylindrical Li-ion battery: Uncertainty analysis[C]// *Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe)*, 2017 19th European Conference on. 2017.
- [6] Huang, Jian, et al. “Experimental Measurement of Anisotropic Thermal Conductivity of 18650 Lithium Battery.” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1509, 2020, p. 12013.
- [7] Harsh Bhundiya, Melany Hunt, and Bruce Drolen, “ Measurement of the Effective Radial Thermal Conductivities of 18650 and 26650 Lithium-Ion Battery Cells”, *The Thermal and Fluids Analysis Workshop (TFAWS) 2018 Proceedings*.