



方形硬壳锂离子动力电池的热物性参数

崔喜凤^{1,2}, 张红亮¹, 龚 阳¹, 李 劼¹, 杨建红¹, 李旺兴¹

(1. 中南大学 冶金与环境学院, 长沙 410083;

2. 江苏敏安电动汽车有限公司, 淮安 223005)

摘 要: 针对现有锂离子电池热物性参数获取手段的缺陷, 以方形硬壳锂离子电池为对象, 进行热物性参数研究。基于体积平均法计算, 得到电池的等效密度 2218 kg/m^3 , 等效比热容 $1060 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$ 。通过模拟稳态平板法测试导热系数的边界条件, 计算得到 50 A·h 硬壳锂离子电池 3 个方向的等效导热系数分别为高度方向 $17.2 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$, 厚度方向 $5.3 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ 和长度方向 $23.4 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ 。将电池结构离散为独立的热阻单元, 建立热阻的热网络模型, 基于基尔霍夫节点电流法, 建立电路对应的线性方程组, 求解得到电池的等效热阻和等效导热系数, 结果表明, 热网络模型法获得的导热系数值与仿真法误差小于 2%。

关键词: 方形硬壳锂离子电池; 密度; 比热容; 导热系数; 热阻

文章编号: 1004-0609(2019)-12-2747-10

中图分类号: U464.9⁺3

文献标志码: A

动力电池是新能源汽车的主要动力来源, 在国内外政策的不断推动下, 锂离子动力电池技术形成了一套完善的开发体系^[1]。锂离子电池的性能、寿命和安全均受到温度的影响^[2-3]。随着电动汽车热失控事故频发, 热管理越来越受到重视。

目前, 锂离子动力电池热管理方式包括自然冷却、风冷、液冷和相变传热(固态到液态的相变和液态到气态的相变)^[4], 根据电池的产热特性和目标工况选择相应的热管理方式。无论哪种方式, 其研究和设计过程中, 热仿真均是主要辅助开发工具和验证手段^[5-7], 随着计算机科学的持续发展, 硬件和软件的不断提升, 经过多年的研究推进, 锂离子电池热仿真技术已日趋成熟, 在国内外得到广泛应用。

在模组和电池包级别的热仿真过程中, 将电池假定为均质体, 是普遍的处理方式^[4, 8-10], 其物性参数的获取, 经历了多种尝试。动力电池比热容的测试, 已发展成熟, BAZINSKI 等^[11]采用恒温量热仪设备测试软包磷酸铁锂电池的比热容, 发现电池比热容随温度升高而轻微升高, 但与电池荷电状态 SOC 无关, ONDA 等^[12]也得到相同的结论。SHENG 等^[13]采用改进的 ARC 量热仪测试电池的比热容。ARC 或 IHC 测试电池比热容, 已实现商业化, 但成本非常高昂。CHEN

等^[14]和 VILLANO 等^[15]分别通过测试电池各组分的密度和比热容, 由体积平均法获得电池等效比热容值。本文将参考体积平均法计算方形硬壳锂离子电池的比热容值。

电池导热系数值直接影响电池的散热特性。电芯是电池的主体, 作为由正负极材料、隔膜、正负极集流体和电解质组成的复合结构, 其导热系数的测试数据鲜有报道, 主要通过理论计算获得^[14, 16-17], 分别测试各材料的导热系数值, 根据其串并联特性分别计算电芯垂直和平行方向的导热系数值。而电池结构复杂, 其综合导热系数的获取困难, 有学者直接将电芯的导热系数作为电池的导热系数值进行散热研究^[4, 18], 也有学者通过试验测试电池综合导热系数值, BAZINSKI 等^[11]采用等温量热仪测量软包电池垂直大面方向的导热系数, 另两个方向的数值依然无法测试。方形硬壳动力电池尺寸较大, 内部结构复杂, 无法切割做出符合测试要求的样品, 又兼具安全要求, 在现有测试仪器下, 对电池整体进行导热系数测试难以实现。

电池的热物性参数, 是热仿真必不可少的输入, 直接影响计算结果的准确程度。本文针对方形硬壳电池, 提出热物性参数, 特别是导热系数的计算方法。

基金项目: 国家重点研究发展计划资助项目(2017YFC0210401); 国家自然科学基金创新群体项目(61621062); 国家自然科学基金资助项目(51874365, 51674300); 湖南省自然科学基金面上项目(2018JJ2521)

收稿日期: 2018-12-25; **修订日期:** 2019-10-25

通信作者: 张红亮, 教授, 博士; 电话: 13574831278; E-mail: csu13574831278@163.com

1 电池结构介绍

方形硬壳动力锂离子电池的外形结构如图 1 所示, 内部剖面图如图 2 所示。主要结构包括电芯和容纳电芯的金属壳体^[19-20]。其中电芯为电池的主体结构, 电芯上焊有正极极耳和负极极耳, 正负极极耳与位于顶盖的正负极极柱构成电芯与外部的电流通道。电芯的金属外壳体为电芯的承载体, 为避免电芯串并联过程中因与壳体的接触发生正负极短路, 在电芯与壳体之间增加绝缘壳体^[21]。另外, 在金属壳外覆盖一层绝缘膜, 以实现不同电池之间以及电池与其他金属组件之间的绝缘。

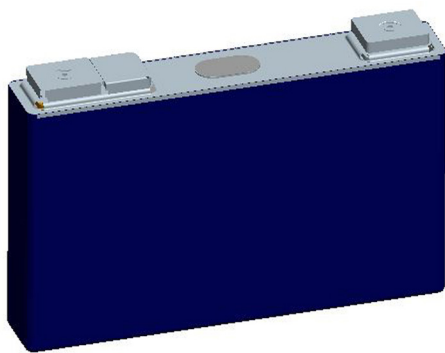


图 1 方形硬壳电池外形结构
Fig. 1 Overall figure of hard cased batteries

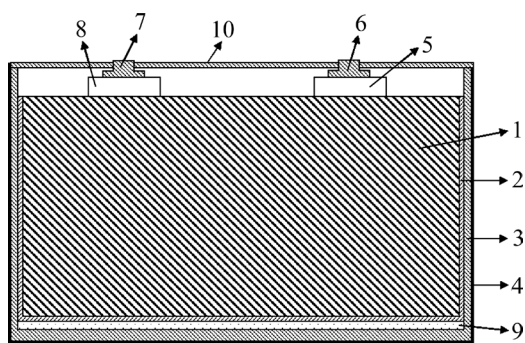


图 2 方形硬壳电池内部剖面图
Fig. 2 Sectional view of hard cased batteries: 1—Jelly roll; 2—Insulation plate; 3—Aluminium case; 4—Insulation film; 5—Positive tab; 6—Positive terminal; 7—Negative terminal; 8—Negative tab; 9—Jelly roll pallet; 10—Aluminium top cover

方形硬壳锂离子电池结构复杂, 在电池包热仿真模型中体现电池内部结构细节, 无疑给模型的网格划分带来很大难度, 且网格数目巨大, 计算周期会非常长。因此, 大多数电池包仿真工作, 将电池等效为均质体处理^[4]。获得准确的电池等效热物性参数是准确实现电池热仿真的前提。

热物性参数包括密度、比热容和导热系数。作为电池的主体结构, 电芯为正集流体、正极活性材料、隔膜、负极活性材料、负极、负极活性材料、隔膜…隔膜、正极活性材料、正集流体等重复层叠的结构, 如图 3 所示。电芯的热物性参数的测试数据, 鲜有报道, 理论计算是目前应用最广泛的数据获得方式^[14, 16-17]。

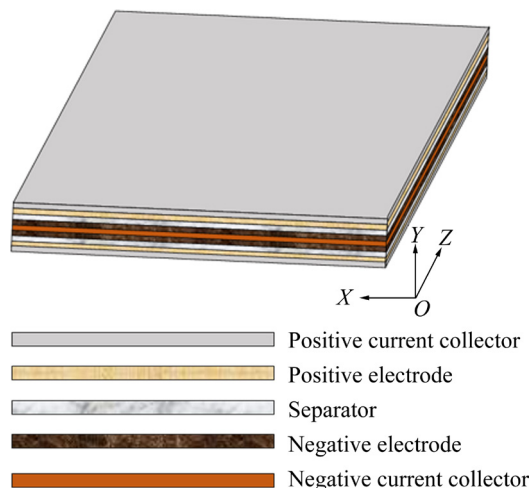


图 3 电芯层叠结构示意图
Fig. 3 Schematic diagram of layered structure of jelly roll

电芯的等效密度采用体积平均法, 即电芯单位层叠面积内, 总质量与总体积的商值。电芯的等效比热容同样采用体积平均法^[4, 14, 16], 如式(1)所示。

$$c_p \sum_i \rho_i V_i = \sum_i \rho_i V_i c_{p,i} \quad (1)$$

式中: i 分别对应正集流体、正极活性材料、隔膜、负极活性材料、负集流体; c_p 为电池等压比热容, $J/(kg \cdot K)$; ρ 为密度, kg/m^3 ; V 为体积, m^3 。

电芯为多层不同材料的重复层叠, 为典型的不同的热阻材料的串并联结构。为计算其导热系数值, 取其中一个重复单元, 即半正集流体、正极活性材料、隔膜、负极活性材料、半负集流体。平行于叠层平面方向, 即 X 、 Z 方向, 各叠层材料为并联结构。

$$k_x = k_z = \frac{\sum_i k_i d_i}{\sum_i d_i} \quad (2)$$

垂直于叠层平面方向, 即 Y 方向, 各叠层材料为串联结构。

$$k_y = \frac{\sum_i d_i}{\sum_i \frac{d_i}{k_i}} \quad (3)$$

式中: d 为各层材料厚度的一半, m ; k 为导热系数值, $W/(m \cdot K)$ 。

这种串并联结构等效导热系数的计算方法, 忽略

电解质对正负极活性材料以及隔膜热物性参数的影响,且各材料物性参数与温度和 SOC 无关的假设前提下进行的^[4]。

以上叠层电芯的密度、比热容和导热系数的计算方法已得到实验验证并在 CFD 仿真中应用^[22]。而锂离子电池整体的物性参数的计算未见报道,有研究直接采用电芯参数代表整个电池^[4, 18]。表 1 所列方形硬壳动力电池主要结构的热物性参数,其中电芯的化学体系是 NCM(622)正极+LiPF6 电解质+C 负极,电芯卷绕 34 层,双电芯。

本文中,电池整体的等效密度和等效比热容的计算仍采用体积平均法。电池质量与体积的商值作为电池的等效密度值,电池等效比热容的计算式如式(4)所示。

$$c_p \sum_j \rho_j V_j = \sum_j \rho_j V_j c_{p,j}$$

(4)

式中: j 分别对应于绝缘膜、金属壳体、绝缘壳体、电芯、正极耳、正极柱、负极耳、负极柱、底部支撑等。

表 1 材料物性参数表

Table 1 Parameter of thermal material properties

Paramter	Density/ (kg·m ⁻³)	Specific capacity/ (J·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	Thermal conductivity/ (W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹)
Insulation film	910	1883	0.19
Aluminium case	2720	900	155
Aluminium plate	1200	1256	0.19
Jelly roll ^[22]	2518	1060	X: 26.6
			Y: 1.0
			Z: 26.6
Positive tab	2700	879	281
Positive terminal	2700	879	281
Negative tab	8900	390	401
Negative terminal	8900	390	401
Jelly roll pallet	1200	1256	0.23

最终计算得 50 A·h 方形硬壳锂离子电池的等效密度和等效比热容分别 2218 kg/m³ 和 1060 J/(kg·℃)。方形硬壳电池整体结构复杂,其等效导热系数的处理不能如叠层电芯串并联处理,本文介绍仿真法和热网格模型法两种计算方法。

2 仿真法

导热系数是材料的固有特性,表征材料导热能力

的大小。它等于单位面积内,在单位温度梯度作用下物体内热流密度矢量的模^[23]。导热系数测量的基本原理为通过测量流过试样的热量和温度梯度来计算材料的导热系数。本文参考导热系数测试的稳态平板法,模拟导热系数的测试条件,获取电池的等效导热系数值。

在 STAR-CCM+软件平台上,建立 50 A·h 方形硬壳锂离子电池模型,其网格模型如图 4。做了如下的假设和简化:

- 1) 忽略内部电解液流动对内部传热的影响;
- 2) 忽略不同 SOC 状态下,正、负极活性材料物性参数的差异;
- 3) 忽略电池几何形状本身的倒角,均以直角处理;
- 4) 忽略电池内部的一些小尺寸部件,如顶盖上的泄压阀,极耳支架等。

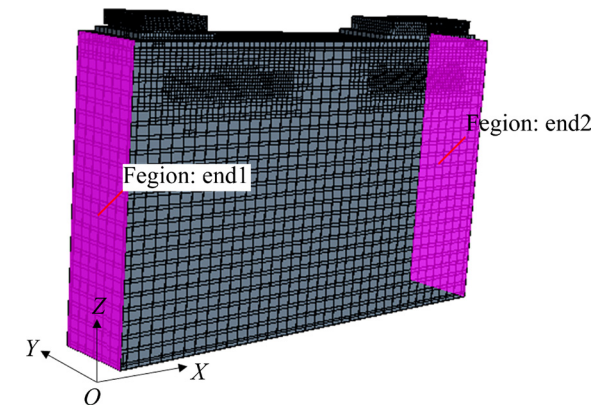


图 4 50 A·h 方形电池网格模型
Fig. 4 Grid model of 50 A·h cell

定义 X 方向为电池长度方向,垂直长度方向的两个端面; Y 方向为电池厚度方向,垂直厚度方向的两个面为侧面; Z 方向为电池高度方向,垂直高度方向的两个面分别为底面和顶面。电池尺寸长×厚×高为 148 mm×26 mm×92 mm。

定义分析类型为稳态、三维多部件实体,赋予各结构组件相应的材料属性,所有外表面默认为壁面边界,所有内部面默认为界面。

长度方向(X 方向)导热系数的计算,设置端面 END1 为恒温壁面,温度 t₁=20 ℃,设置端面 END2 为恒热源壁面,产热量 q=10 W,其他为绝热壁面。计算收敛后,提取端面 END2 的平均温度值,计算结束温度分布云图如图 5 所示。END2 平均温度 t₂=43.0 ℃。

由图 5 可看出,沿长度方向,自恒温端到热源端,呈现均匀的温度梯度,长度方向平均导热系数如式(5)所示。

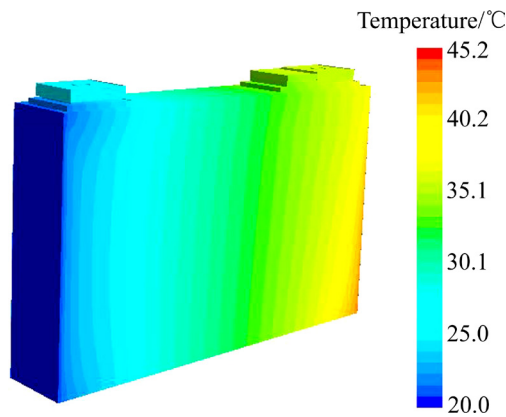


图5 长度方向导热系数计算温度分布云图
Fig. 5 Temperature distribution of length direction thermal conduction modeling

$$k_X = \frac{qd_X}{(t_2 - t_1)A_X} \tag{5}$$

式中： d_X 为电池长度； A_X 为电池端面积； q 为热流量，W。

采用同样的方式，计算电池厚度方向(Y方向)和高度方向(Z方向)的导热系数。计算结束，电池温度分布云图分别如图6所示。由图6可看出，相应方向，自恒温端至热源端，均呈现均匀的温度梯度。

厚度方向平均导热系数如式(6)所示。

$$k_Y = \frac{qd_Y}{(t_2 - t_1)A_Y} \tag{6}$$

式中： d_Y 为电池厚度； A_Y 为电池侧面积。
高度方向平均导热系数如式(7)。

$$k_Z = \frac{qd_Z}{(t_2 - t_1)A_Z} \tag{7}$$

式中： d_Z 为电池高度； A_Z 为电池底面积。

计算结果汇总如表2所列。如前所述，方形硬壳锂离子电池不易进行导热系数的实际测试，因此，后文中，将模拟实际测试边界的仿真方法获得的导热系数作为准确数据基准。

3 热网格模型法

通过仿真模拟实际测试条件，可以快速、准确的获取电池的导热系数，解决了大电池结构难以实际测试整体导热系数的问题。但需要繁杂的建模和仿真计算过程，并且无法表示电池内部的传热路径。本文将电池结构离散化，再转化为集中参数，由单独的热阻单元表示，建立表示电池内部传热路径的等效电路模型^[24]，该方法称为热网格法。

热网格法以电场表示温度场，电场与温度场的类

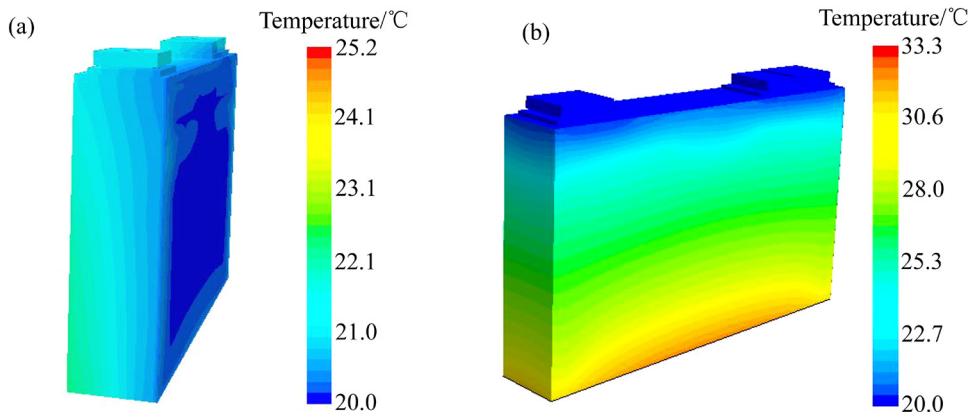


图6 厚度方向和高度方向导热系数计算温度分布云图
Fig. 6 Temperature distribution of thermal conduction modeling along thickness(a) and height(b) directions

表2 50 A·h 电池参数汇总

Direction	d/mm	A/mm^2	$t_1/^\circ\text{C}$	$t_2/^\circ\text{C}$	q/W	$k/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$
Length direction	148	2392	20.0	45.8	10	23.4
Thickness direction	26	13616	20.0	23.7	10	5.3
Height direction	92	3848	20.0	33.5	10	17.2

推关系^[24-25]为电压(V)与电流(I)分别对应温度场的温度(t)和热源(q)。本文中为稳态热分析, 忽略热容的因素。电阻(r')与热阻(r)对应, 固体热传导的热阻计算如式(8)所示。

$$r = \frac{d}{kA} \quad (8)$$

式中: r 为单元热阻值; d 为单元长度; A 为单元截面积; k 为单元的导热系数值。

基于热网格描述的温度场的等效电阻模型, 结合电路理论, 计算综合热阻值, 根据式(9)得等效导热系数。

$$k_m = \frac{d_m}{r_m A_m} \quad (9)$$

式中: m 分别代表电池的长度、厚度和高度方向。 k 为等效导热系数; d 为长度; r 为等效热阻值; A 为相应方向的截面积。

3.1 电池长度方向

电池长度方向离散化的等效电路如图 7。其中各热阻单元含义列于表 4。

该电路为复杂电路, 不能用电阻串并联等效简化。为计算传热路径的等效热阻值, 对电路施加 $+V$ 的电

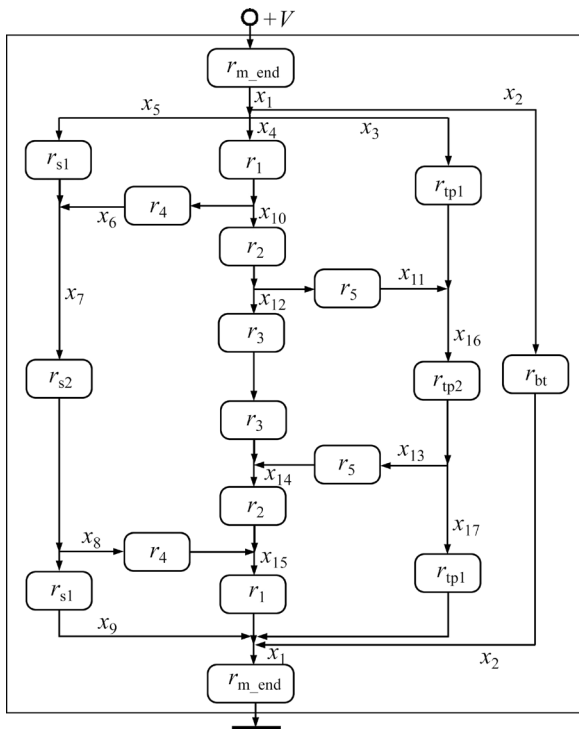


图 7 长度方向等效热阻电路

Fig. 7 Thermal network of length direction

表 3 长度方向热阻单元含义

Table 3 Thermal resistance unit of length direction

Parameter	Value/ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$)	Description
r_1	3.496	Thermal resistance of insulation and jelly roll in X direction
r_2	0.863	
r_3	0.788	
r_4	0.239	Thermal resistance from jelly roll to aluminium case in X direction
r_5	6.140	Thermal resistance from jelly roll to top cover
r_{s1}	0.097	Thermal resistance of side aluminium case in X direction
r_{s2}	8.465	
r_{tp1}	1.980	Thermal resistance of top aluminium cover in X direction
r_{tp2}	13.946	
r_{bt}	29.842	Thermal resistance of bottom aluminium case in X direction
r_{m_end}	0.214	Thermal resistance of end insulation film

压, 基于基尔霍夫支路电流法^[26], 对该电路的节点和回路列出线性方程组如式(10)。

$$\begin{cases} x_1 - x_2 - x_3 - x_4 - x_5 = 0 \\ x_4 - x_6 - x_{10} = 0 \\ x_{10} - x_{11} - x_{12} = 0 \\ x_{12} + x_{13} - x_{14} = 0 \\ x_8 + x_{14} - x_{15} = 0 \\ x_5 + x_6 - x_7 = 0 \\ x_7 - x_8 - x_9 = 0 \\ x_3 + x_{11} - x_{16} = 0 \\ -x_{13} + x_{16} - x_{17} = 0 \\ r_1 x_4 - r_{s1} x_5 + r_4 x_6 = 0 \\ r_4 x_6 + r_{s2} x_7 + r_4 x_8 - r_2 x_{14} - 2r_3 x_{12} - r_2 x_{10} = 0 \\ r_4 x_8 - r_{s1} x_9 + r_1 x_{15} = 0 \\ r_{tp1} x_3 - r_1 x_4 - r_2 x_{10} - r_5 x_{11} = 0 \\ r_5 x_{11} - 2r_3 x_{12} + r_5 x_{13} + r_{tp2} x_{16} = 0 \\ r_5 x_{13} + r_2 x_{14} + r_1 x_{15} - r_{tp1} x_{17} = 0 \\ r_{m_end} x_1 + r_{bt} x_2 + r_{m_end} x_1 = V \\ r_{m_end} x_1 + r_{s1} x_5 + r_{s2} x_7 + r_{s1} x_9 + r_{m_end} x_1 = V \end{cases} \quad (10)$$

在 MATLAB 中, 将方程组转化以向量 $\mathbf{x}$ 为未知数的向量方程。

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{A}$ 为 17 阶正方矩阵, 是线性方程组(10)的系数矩阵, 向量 $\mathbf{b}$ 为 17 维列向量, 是方程组(10)的常数项向量。未知数向量 $\mathbf{x}$ 由常数项向量 $\mathbf{b}$ 左除系数矩阵 $\mathbf{A}$

获得，如式(12)所示。

$$\mathbf{x} = \mathbf{A} \backslash \mathbf{b} \tag{12}$$

未知数向量 $\mathbf{x}$ 为图7电路图中的各支路的电流值，其中 x_1 是电路的主路电流。

将电路假定为黑匣子，电路的综合等效热阻如式(13)所示。

$$r_X = \frac{V}{x_1} \tag{13}$$

进而根据式(9)获得宽度方向的等效导热系数。

3.2 电池厚度方向

电池厚度方向离散化的传热路径等效电路如图8。其中各热阻单元含义列于表4。

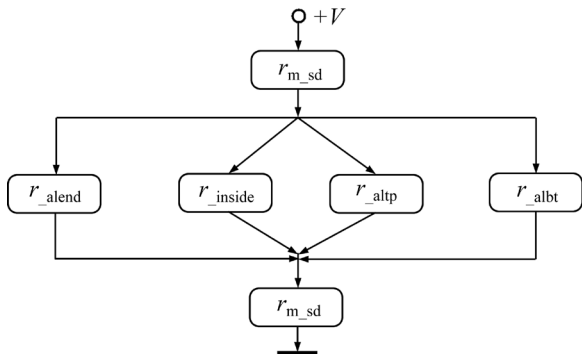


图8 厚度方向等效热阻电路
Fig. 8 Thermal network of thickness direction

表4 厚度方向热阻单元含义

Parameter	Value/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$)	Description
r_{inside}	0.690	Thermal resistance of insulation and jelly roll in X direction
r_{altp}	2.075	Thermal resistance of top aluminium cover in Y direction
r_{albt}	1.035	Thermal resistance of bottom aluminium case in Y direction
r_{alend}	3.869	Thermal resistance of end aluminium case in Y direction
$r_{\text{m_sd}}$	0.039	Thermal resistance of side insulation film

内部导热结构与金属壳体的顶部、端部和底部并联后，与侧部绝缘膜串联。等效热阻如式(14)。进而根据式(9)获得厚度方向的等效导热系数。

$$r_Y = r_{\text{msd}} + \frac{1}{\frac{1}{r_{\text{alend}}} + \frac{1}{r_{\text{inside}}} + \frac{1}{r_{\text{altp}}} + \frac{1}{r_{\text{albt}}}} + r_{\text{msd}} \tag{14}$$

3.3 电池高度方向

电池高度方向离散化的传热路径等效电路如图9所示。其中各热阻单元含义列于表5。

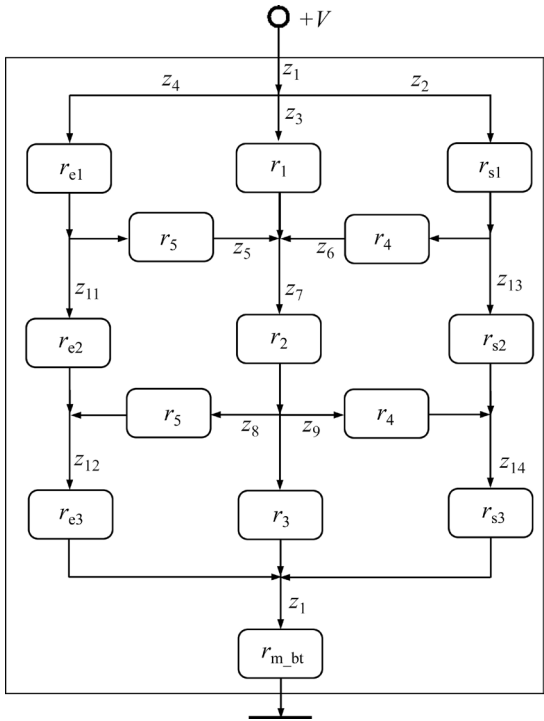


图9 高度方向等效热阻电路
Fig. 9 Thermal network of height direction

表5 高度方向热阻单元含义

Parameter	Value/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$)	Description
r_1	1.964	Thermal resistance of insulation, jelly roll and electrode tab, terminal etc. in X direction
r_2	0.780	
r_3	3.070	
r_4	0.483	Thermal resistance from jelly roll to aluminium case in Z direction
r_5	5.362	Thermal resistance from jelly roll to end aluminium case
r_{e1}	0.468	Thermal resistance of end aluminium case in Z direction
r_{e2}	11.478	
r_{e3}	1.933	
r_{s1}	0.464	Thermal resistance of side aluminium case in Z direction
r_{s2}	2.757	
r_{s3}	0.112	
$R_{\text{m_bt}}$	0.133	Thermal resistance of bottom insulation film

类似电池长度方向，该电路也为复杂电路，对电路施加 $+V$ 的电压，根据基尔霍夫支路电流法，对该电路的节点和回路列出线性方程组如式(15)所示。

$$\begin{cases}
z_1 - z_2 - z_3 - z_4 = 0 \\
z_3 + z_5 + z_6 - z_7 = 0 \\
z_7 - z_8 - z_9 - z_{10} = 0 \\
z_4 - z_5 - z_{11} = 0 \\
z_8 + z_{11} - z_{12} = 0 \\
z_2 - z_6 - z_{13} = 0 \\
z_{13} + z_9 - z_{14} = 0 \\
r_{s1}z_2 - r_1z_3 + r_4z_6 = 0 \\
r_4z_6 + r_2z_7 + r_4z_9 - r_{s2}z_{13} = 0 \\
r_4z_9 - r_3z_{10} + r_{s3}z_{14} = 0 \\
r_1z_3 - r_{e1}z_4 - r_5z_5 = 0 \\
r_5z_5 + r_2z_7 + r_5z_8 - r_{e2}z_{11} = 0 \\
r_5z_8 - r_4z_{10} - r_{e3}z_{12} = 0 \\
r_1z_3 + r_2z_7 + r_3z_{10} + r_{m_bt}z_1 = V
\end{cases} \quad (15)$$

在 MATLAB 中, 将方程组转化以向量 $\mathbf{z}$ 为未知数的向量方程。

$$\mathbf{C}\mathbf{z} = \mathbf{d} \quad (16)$$

式中: $\mathbf{C}$ 为 14 阶正方矩阵, 是线性方程组(15)的系数矩阵, 向量 $\mathbf{d}$ 为 14 维列向量, 是方程组(15)的常数项向量。未知数向量 $\mathbf{z}$ 由常数项向量 $\mathbf{d}$ 左除系数矩阵 $\mathbf{C}$ 获得, 如式(17)所示。

$$\mathbf{z} = \mathbf{C} \setminus \mathbf{d} \quad (17)$$

未知向量 $\mathbf{z}$ 为图 9 电路中各支路的电流值, 其中 z_1 是电路的主路电流。

将电路假定为黑匣子, 已知电路的电压和电流, 电路的综合等效热阻如式(18)所示。

$$r'_Z = \frac{V}{z_1} \quad (18)$$

进而根据式(9)获得高度方向的等效导热系数。

3.4 结果分析

结合使用 EXCEL 和 MATLAB 软件, 实现以上复杂的模型离散化和线性方程组的求解过程, 获得电池 3 个方向的等效导热系数。根据热网格法得到 50 A·h 电池的等效导热系数列于表 7。

为验证热网格法在硬壳电池导热系数计算中的通用性, 分别计算 70 A·h 电池(长 148 mm×厚 40 mm×高 92 mm)和 150 A·h 电池(长 148 mm×厚 80 mm×高 92 mm)各方向的等效导热系数, 结果列于表 8。3 种电池采用相同的电芯结构。

如前所述, 方形硬壳锂离子电池难以实现导热系数的实际测试, 以模拟测试环境的仿真值为准确数据

表 7 50 A·h 电池导热系数结果 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)

Table 7 Thermal conductivity results of 50 A·h cell

Direction	Thermal conductivity/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)		Error	Jelly roll
	Modeling	Thermal network		
Length	23.4	23.2	0.9%	26.6
Thickness	5.3	5.1	3.8%	1.0
Height	17.2	17.0	1.2%	26.6

表 8 70 A·h 和 150 A·h 电池导热系数

Table 8 Thermal conductivity results of 70 A·h and 150 A·h cells

Cell		Thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)		
		Length direction	Thickness direction	Height direction
70 A·h	Modeling	20.7	5.9	13.8
	Thermal network	20.5	6.0	13.8
	Error	1.0%	1.7%	0.3%
150 A·h	Modeling	16.0	7.4	9.9
	Thermal network	15.9	7.6	10.1
	Erro	0.6%	2.0%	1.6%
Jelly roll		26.6	1.0	26.6

的基准。由对比分析可见, 热网格法计算得到的数据具有较高的准确度。同时, 可以发现, 电池整体各方向的导热系数与主体结构电芯的数值有较大的差异, 可见在仿真的过程中, 以电芯物性参数来代替整个电池结构是不合适的。

虽然 50 A·h、70 A·h 和 150 A·h 电池采用了相同的电芯结构, 但因尺寸的改变, 电路中各单元的热阻值相应改变, 最终综合导热系数区别较大, 且均与电芯的物性有较大差异。电池 3 个方向各热阻单元传输热量占比于图 10。

作为电池的主体, 电芯在 3 个方向的热量传输中均占有较大比重, 约占总传热量的 40%~70%, 其他的热量通过金属壳体及顶盖传输。可见, 电芯结构不能完全带代表电池的物性参数, 还与绝缘壳体、金属壳体、绝缘膜以及顶盖有较大关系。

另外, 由表 7 和 8 可知, 热网格法所得结果基本与仿真法所得的结果一致, 差别在 2%左右, 同时, 热网络法还避免了复杂的仿真建模和计算过程, 可广泛用于方形硬壳锂离子电池等效导热系数的计算。

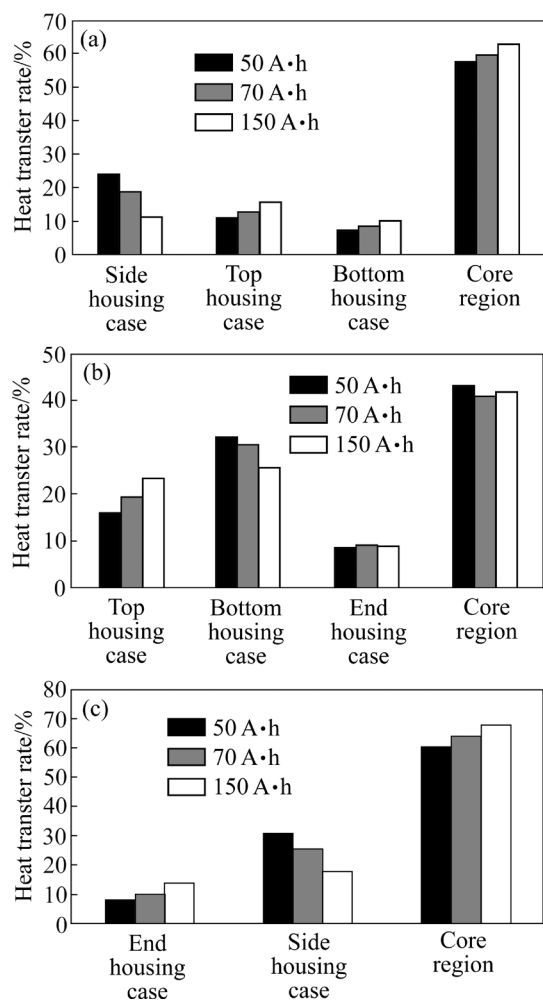


图 10 电池各热阻单元传输热量对比

Fig. 10 Comparison of heat transferred by each resistance unit: (a) Length direction; (b) Thickness direction; (c) Height direction

4 结论

1) 仿真方法是模拟稳态平板法测试导热系数的测试边界, 进行电池结构的稳态热仿真, 计算电池的等效导热系数值。解决了电池结构作为大尺寸复杂件和安全件难以做样品测试的难题。该方法获得的导热系数数据认为是准确数据基准。

2) 热网格法将电池结构离散化, 再分别集中为独立的热阻单元, 将电池结构转化为热阻的等效电路模型, 基于基尔霍夫支路电流法建立电路的线性方程组。通过 MATLAB 求解线性方程组, 计算电路的综合热阻值, 进而得到等效导热系数。热网格法所得结果基本与模拟仿真法所得的结果一致, 差别在 2% 左右, 同时避免了复杂的仿真建模和计算过程, 可广泛用于方形硬壳锂离子电池等效导热系数的计算。

REFERENCES

- [1] 刘 焱, 胡清平, 陶芝勇. 锂离子动力电池技术现状及发展趋势[J]. 中国高新科技, 2018(7): 58–64.
LIU Yan, HU Qing-ping, TAO Zhi-yong. Current status and development trend of lithium ion power battery technology[J]. China High-Tech, 2018(7): 58–64.
- [2] AN Zhou-jian, JIA Li, WEI Li-ting, YANG Cheng-liang. Numerical modeling and analysis of thermal behavior and Li⁺ transport characteristic in lithium-ion battery[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 127: 1351–1366.
- [3] SHAHABEDDIN K, MOHAMMADIAN, ZHANG Yu-wen. Improving wettability and preventing Li-ion batteries from thermal runaway using microchannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 118: 911–918.
- [4] LIU Hua-qiang, WEI Zhong-bao, HE Wei-dong, ZHAO Ji-yun. Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 150: 304–330.
- [5] YANG Xiao-long, YANG Peng-fei, ZHANG Ze-ping, DUAN Yong-kang, HU Ji-hao. Experimental and numerical study on thermal performance of Li(Ni_xCo_yMn_z)O₂ spiral-wound lithium-ion batteries[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 138: 446–455.
- [6] RIZK R, LOUAHLIA H, GUALOUS H, SCHAETZEL P. 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.
- [7] MIRANDA D, COSTA C M, ALMEIDA A M, LANCEROS-MÉNDEZ S. Computer simulation of the influence of thermal conditions on the performance of conventional and unconventional lithium-ion battery geometries[J]. Energy, 2018, 149: 262–278.
- [8] SAW Lip-huat, YE Yong-huang, TAY A A O, WEN Tong-chong, SENG How-kuan, MING Chian-yew. Computational fluid dynamic and thermal analysis of lithium-ion battery pack with air cooling[J]. Applied Energy, 2016, 177: 783–792.
- [9] CHEN Da-fen, JIANG Jiu-chun, KIM G H, YANG Chuan-bo, PESARAN A. Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells[J]. Applied Thermal

- Engineering, 2016, 94: 846–854.
- [10] JAVANI N, DINCER A I, NATERER G F, ROHRAUER G L. Modeling of passive thermal management for electric vehicle battery packs with PCM between cells[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73: 305–314.
- [11] BAZINSKI S J, WANG Xia. 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.
- [12] ONDA K, OHSHIMA T, NAKAYAMA M, FUKUDA K, ARAKI T. Thermal behavior of small lithium-ion battery during rapid charge and discharge cycles[J]. Journal of Power Sources, 2006, 158(1): 535–542.
- [13] SHENG Lei, SU Lin, ZHANG Heng-yun, FANG Yi-dong, XU Hai-feng, YE Wen. An improved calorimetric method for characterizations of the specific heat and the heat generation rate in a prismatic lithium ion battery cell[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 180: 724–732.
- [14] CHEN S C, WAN C C, WANG Y Y. Thermal analysis of lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2005, 140(1): 111–124.
- [15] VILLANO P, CAREWSKA M, PASSERINI S. Specific heat capacity of lithium polymer battery components[J]. Thermochimica Acta, 2003, 402(1): 219–224.
- [16] MALEKI H, HALLAJ S A, SELMAN J R, DINWIDDIE R B, WANG H. Thermal properties of lithium-ion battery and components[J]. Journal of The Electrochemical Society, 1999, 146(3): 947–954.
- [17] MADANI S S, SCHALTZ E, KÆR S K. Review of parameter determination for thermal modeling of lithium ion batteries[J]. Batteries, 2018, 4(2): 20.
- [18] FAN Li-wu, KHODADADI J M, PESARAN A A. A parametric study on thermal management of an air-cooled lithium-ion battery module for plug-in hybrid electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2013, 238: 301–312.
- [19] 刘金成, 葛辉明, 郑军欣, 吕正中. 一种硬壳锂离子电池及其制备方法: 中国, CN105870495A[P]. 2016–08–17.
- LIU Jin-cheng, GE Hui-ming, ZHENG Jun-xin, LÜ Zheng-zhong. Hard shell lithium ion battery and preparation method thereof: China, CN105870495A[P]. 2016–08–17.
- [20] 朱 华, 魏建良, 郭志君. 一种硬壳锂离子电池: 中国, CN202495502U[P]. 2012–10–17.
- ZHU Hua, WEI Jian-liang, GUO Zhi-jun. Hard cased lithium battery: China, CN202495502U[P]. 2012–10–17.
- [21] 向 登. 一种硬壳锂离子电池: 中国, CN102623650A[P]. 2012–08–01.
- XIANG Deng. Hard cased lithium battery: China, CN202495502U[P]. 2012–10–17.
- [22] GRECO A, CAO Dong-pu, JIANG Xi, YANG Hong. A theoretical and computational study of lithium-ion battery thermal management for electric vehicles using heat pipes[J]. Journal of Power Sources, 2014, 257: 344–355.
- [23] 杨世铭, 陶文栓. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- YANG Shi-ming, TAO Wen-shuang. Heat transfer[M]. Beijing: High Education Press, 2006.
- [24] KARAGOL S, BIKDASH M. Generation of Equivalent-circuit models from simulation data of a thermal system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(4): 820–828.
- [25] RAMOTAR L, ROHRAUER G L, FILION R, MACDONALD K. Experimental verification of a thermal equivalent circuit dynamic model on an extended range electric vehicle battery pack[J]. Journal of Power Sources, 2017, 343: 383–394.
- [26] 秦曾煌, 姜三勇. 电工学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- QIN Zeng-huang, JIANG San-yong. Electrotechnics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.

Thermal properties of hard cased lithium-ion power battery

CUI Xi-feng^{1,2}, ZHANG Hong-liang¹, GONG Yang¹, LI Jie¹, YANG Jian-hong¹, LI Wang-xing¹

(1. School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Jiangsu Min'an Electric Automotive Co., Ltd., Huai'an 223005, China)

Abstract: The thermal properties of hard cased lithium-ion power battery was investigated. Firstly, the equivalent density of 2218 kg/m^3 and equivalent specific heat of $1060 \text{ J/(kg}\cdot^\circ\text{C)}$ were got according to average volume method. Then, through modeling the boundary conditions of thermal conductivity test, the height conductivity of $17.2 \text{ W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$, the thickness conductivity of $5.3 \text{ W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$ and the length conductivity of $23.4 \text{ W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$ are obtained, respectively. Finally, the thermal network model was set up by discretizing the hard-cased lithium-ion battery structure to resistance units. The Via Kirchhoff current law, linear equations of the circuit network were established, and then were solved to get equivalent thermal resistance and equivalent thermal conductivity. The results show that the error between thermal conductivities obtained by modeling method and by thermal network method is less than 2%.

Key words: hard-cased lithium-ion battery; density; specific heat; thermal conductivity; thermal resistance

Foundation item: Project(2017YFC0210401) supported by the National Basic Research Development Program of China; Project(61621062) supported by the Innovative Research Group of National Natural Science Foundation of China; Projects(51874365, 51674300) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(2018JJ2521) supported by the Natural Science Foundation of Hunan Province, China

Received date: 2018-12-25; **Accepted date:** 2019-10-25

Corresponding author: ZHANG Hong-liang: Tel: +86-13574831278; E-mail: csu13574831278@163.com

(编辑 李艳红)