层叠式锂离子电池展向温度分布的分析解及基于分析解的热设计优化

吴彬, 李哲, 张剑波*

清华大学汽车工程系, 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084

* E-mail: jbzhang@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2014-06-30; 接受日期: 2014-09-18

国家自然科学基金(编号: 51207080)和科技部中日国际合作项目(批准号: 2013DFG60080)资助

摘要 大型锂离子动力电池的热相关问题是限制其在电动汽车上大规模应用的主要问题之一. 单体电池的热模型是进行电池热设计、改善电池热特性的重要工具. 根据热模型的求解方法, 可分为数值解和分析解两类. 在现有文献的研究中, 数值解占据了主要地位. 但是, 分析解因具有计算量小、可实现设计变量的全局优化等优点, 在电池热设计和电池组热管理系统中可发挥重要作用. 例如, 在电池热设计中, 分析解可全面考察多个设计参数连续变化下对电池热特性的影响, 以进行多设计参数下的全局优化. 本文首先对一款大型层叠式锂离子电池进行了数值热模拟和实验验证, 数值热模拟的结果与多枚热电偶的实验测量结果吻合良好; 然后, 基于数值热模拟的结果提取了层叠式电池温度分布和产热率分布的主要特点, 进而假设温度呈展向平面分布、产热率均匀分布; 针对简化后的电池热问题, 利用双重积分变换方法提出了分析解; 最后, 使用分析解开展了电池的热设计优化工作, 讨论了不同电芯尺寸和极耳布置方案下的电池热特性.

关键词

锂离子电池
热模拟
热设计
分析解

1 引言

在节能与减排的压力推动下, 电动汽车成为汽车产业的发展趋势之一. 制约电动汽车大规模商业应用的主要瓶颈是大型锂离子动力电池, 而大型锂离子动力电池的热相关问题是决定其性能、寿命和安全性的关键因素. 首先, 锂离子电池的温度会直接影响其使用中的功率和能量性能. 其次, 锂离子电池使用过程中如果出现局部过热, 有可能引发冒烟、起火等热失控事件; 另外, 锂离子电池的存放或使用温度都会影响其使用寿命.

与消费电子产品上广泛使用的小型锂离子电池相比, 大型锂离子动力电池所面临的热问题更加严峻: 第一, 电池大型化后温度分布更容易不均匀; 第二, 随着电池尺寸的增加, 内部产热量随电池特征尺寸的立方增加, 而表面散热量只随特征尺寸的平方增加, 因此易使充、放电过程中的温升增加; 第三, 一旦出现热失控后的后果也将更加严重.

为了改善大型锂离子动力电池的热特性, 需要在单体层次优化电池的热设计、在电池系统层次改进热管理. 电池的热模拟是研究热设计、热管理的主要手段, 可以显著地节省热设计的时间和成本. 根据电

引用格式: 吴彬, 李哲, 张剑波. 层叠式锂离子电池展向温度分布的分析解及基于分析解的热设计优化. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 1154–1172
Wu B, Li Z, Zhang J B. Thermal design optimization of laminated lithium ion battery based on the analytical solution of planar temperature distribution (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 1154–1172, doi: 10.1360/N092014-00226

池热模拟的结果,通过优化电池结构、尺度,调整局部部件设计,可以显著降低电池使用过程中的温升,并且提高温度分布的均匀性^[1].

电池的热模型是进行热模拟的主要工具.根据所关注维度的不同,电池的热模型可分为零维模型(集中质量模型),以及一维^[2,3]、二维^[4,5]和三维模型^[6-8]等.结构不同的电池,其受关注的维度方向各不相同.圆柱形电池往往采用零维模型,一维(径向)模型^[2,3,9]或二维(径向、轴向)模型^[5,10-12];方形层叠式电池往往采用二维(电极平面)模型^[11,12]或三维模型^[6-8];方形卷绕式电池往往采用三维模型^[13].

由于电池的热问题往往与内部的电化学反应、电位场分布等密切相关,因此文献中往往采用耦合模型进行研究.根据耦合模型的种类,可分为热模型^[7,14,15]、热-电耦合模型^[12,16-22]、热-电化学耦合模型^[23-31]和多物理场耦合模型^[32]等.其中,热模型不考虑内部的电流分布,不区分内部产热位置差异,仅考虑由于传热、散热因素引起的温度演变和分布;热-电耦合模型则不考虑电化学模型,而是通过简化的 Bernardi 产热模型^[33]计算产热量,以等效电阻的方法来求解电流分布和温度分布;热-电化学耦合模型一般采取简化后的多孔电极模型作为电化学模型,通过电化学模型直接计算产热率分布;多物理场模型在热-电化学耦合模型的基础上还多考虑了机械模型,将机械应力因素引入模型中.

笔者所在的课题组从电池热参数测量、电池产热率测量和电池内部温度测量等多个方面对电池热模型进行了基础性的研究,以期全面提高模型的精度.

第一,电池的热参数(比热容、导热系数等)是电池热模型的重要输入,准确的热参数测量结果是建立高效、可靠的模拟方法的基础. Zhang 等人^[34]提出了一种实验与数值解优化结合的方法,实现了对大型动力电池多个热参数的同时、原位测量,包括电芯的比热容、各向异性的导热系数等,为建立高精度单体电池热模型提供了较为可靠的参数输入,并为评价单体电池的热性能、提高单体电池的热设计水平提供参考.首先,在电池表面放置热源,测量电池单体上多点的瞬态温度变化情况;继而,在仿真软件中建立简化的反映实验过程的传热模型,以文献参考值作为初值输入模型,计算得到对应各点的温度情况;最后,在优化软件中,通过不断调整模型的热参数输入,将各点温度的数值解与实验所得的真实温度进

行对比,并最终锁定使两者差异最小的热参数取值,这一对应取值即为本方法的测量值.

第二,电池的产热率与电池的温度与荷电状态等密切相关.准确的电池产热率输入对提高电池热模拟的精度有着十分重要的作用. Zhang 等人^[35]比较了文献中常用的电压-电流曲线法^[36]、电流阶跃法^[36]、交流阻抗法^[36]、能量法等多种方法. Zhang 等人^[35]的结果表明,对于大型锂离子动力电池,电流阶跃法的实验量较少,在选择合适的电流阶跃时间(文献中提出的是 60 s)后能达到的精度最高.

第三,电池内部温度测量既能考察电池热特性,又可以直接检验模拟结果的准确度,为模型改进提供参照.温度是热模型需要验证的主要物理量.文献中的电池温度测量可分为表面温度测量和内部温度测量两部分.表面温度测量的手段包括红外热像仪^[12]、热电偶^[13]等.其中,红外成像仪可以测量温度分布,温度分辨率高,但其对应单点的测量准确度较低;热电偶的测量准确度高于红外热像仪,但不能得到表面的温度分布信息.电池表面测量得到的温度不能完全反映电池内部的温度状态,特别是在电池大型化后,由于电芯导热系数不高,电池比热容较大,内外温度差异与分布更加明显.因此,为了全面了解大型电池的内外温度分布,验证热模型的模拟结果,需要开发电池内部的温度测量方法. Li 等人^[37]在层叠式锂离子电池中预埋了多支热电偶,系统地研究了电池在不同散热环境(绝热、自然对流、强制对流)下以不同倍率放电时的内部温度分布及演化.实验结果表明,电池制作过程中预埋传感器未对电池的性能造成明显影响;对于厚度薄的层叠式锂离子电池,电极展向内的温度梯度远大于电极厚度方向的温度梯度.用热电偶预埋测量电池内部温度分布,为全面、严格验证电池热模型提供了可能.

综上所述,锂离子电池的热模拟研究在数值热模型、热参数测量、产热率测量、验证手段等方面都已经有了较多研究.但是,以数值解为基础的热模拟仍有着一些难以克服的缺陷.首先,数值解的计算量一般较大,因此难以实时应用在电动汽车的电池组热管理系统中;其次,数值解不能实现设计变量的连续变化,因此难以实现热设计的全局最优.

与采用有限差分、有限元等数值方法求解的数值热模型不同,分析解采用积分变换、变量分离等数学方法力图求出电池热问题的解析解,在无法得到解

析解时则利用无穷级数的前若干项等近似方法得到近似解. 分析解的计算量远小于数值解, 同时可以考察设计变量在连续变化下对优化目标的影响, 因此在电池热设计中有着重要作用.

由于电池内部的产热、传热机理较为复杂, 因此数值解得到了广泛的应用, 而分析解应用较少. 在仅有的几篇分析解文献中, Taheri 等人^[38]对快充过程中的镍氢电池温度分布和演变进行了分析求解, Taheri 等人^[39]对锂离子电池在放电过程中的温度分布和演变进行了分析求解. 但是, Taheri 等人^[38,39]提出的分析解仍有以下缺陷:

- 1) 没有对产热率均匀分布等一些关键假设进行验证, 使得分析解的计算结果可信度不足;
- 2) 没有考虑极耳等关键热部件对电池温度分布的影响;
- 3) 没有将分析解在热设计中进行充分应用.

本文以大型层叠式锂离子电池为研究对象, 首先使用数值方法求解热模型, 并利用表面多点分布式的温度测量验证了热模型的准确度; 基于热模型的仿真结果, 提取了层叠式锂离子电池温度分布、产热分布的主要特点, 对层叠式锂离子电池的热问题进行了合理的假设; 根据假设使用双重积分变换的数学方法提出了热模型的分析解, 计算结果与热模型的数值解吻合程度良好; 最后, 利用分析解对层叠式电池的电芯结构和极耳位置进行了优化设计.

2 数值解

本文所研究的电池是一款 25 Ah 的层叠式锂离子电池, 电池参数列于表 1 中.

表 1 电池参数列表

电池参数	取值
容量(1/3 C, 25°C)	25 Ah
额定电压	3.8 V
正极材料	LiMn _{0.8} Co _{0.2} Ni _{0.2} O ₂ 和 LiMn ₂ O ₄
负极材料	石墨
放电截止电压	3 V
充电截止电压	4.2 V
电极对数	18
厚度	7.2 mm
最高放电倍率	3 C (30 s)
最高充电倍率	1.5 C (30 min)

2.1 热电耦合模型

1) 二维电模型

25 Ah 层叠式锂离子电池内部包含 18 片正极和 19 片负极. 图 1 为放电过程中正/负极对上的电流分布示意图, 电流从负极极耳流入, 经负极集流体, 穿越隔膜到达正极集流体上后, 通过正极极耳流出. 正极集流体上的电流分布由 i_p 标示, 穿越隔膜的电流 J 标示, 负极集流体上的电流分布由 i_n 标示. 由于集流体的厚度方向(Z 方向)尺寸(约 10 μm)相对于电极平面(XY 平面)尺寸(约 20 cm)极小, 可假设集流体内的电流分布(i_n 和 i_p)是二维分布在 XY 平面上; 由于隔膜厚度(约 30 μm)相对于电极平面也很小, 可假设穿越隔膜的电流 J 垂直于电极平面.

根据上述假设和电荷守恒定律, 可推导出集流体平面上的电位分布方程^[11]:

$$\sigma_j \frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial x^2} + \sigma_j \frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial y^2} + \frac{\mathbf{J} \cdot \mathbf{n}}{\delta_j} = 0 \quad (j = p, n), \quad (1)$$

式中 σ_j 是集流体的电导率(S m^{-1}), Φ_j 是集流体上的电位分布(V), $\mathbf{J}$ 是穿越隔膜的电流密度(A m^{-2}), $\mathbf{n}$ 是垂直于 XY 平面的单位法向量, δ_j 是集流体的厚度(m). 下标 j 标示正极或负极.

正极集流体上方与正极极耳连接段的边界条件为

$$\mathbf{n} \cdot (-\sigma_j \nabla \Phi_j) = \frac{I_{\text{cell}}}{L \delta_p}, \quad (2)$$

式中 I_{cell} 是单对电极对的放电电流(A), L 是极耳的宽度(m), δ_p 是正极集流体的厚度.

图 1 热电耦合模型中的放电电流分布示意图

负极集流体上方与负极极耳连接段的边界条件为

$$\Phi_n = 0. \quad (3)$$

其他边界条件均为电流绝缘条件

$$\mathbf{n} \cdot \nabla \Phi_j = 0. \quad (4)$$

穿越隔膜的电密度通过等效电阻的假设计算, 即

$$J = \frac{U_{OC} - (\Phi_p - \Phi_n)}{R}, \quad (5)$$

式中, U_{OC} 是电池的开路电压(V), R 是单位面积电池内阻($\Omega \text{ m}^2$). 实验测得的 U_{OC} 随荷电状态的变化曲线如图 2 所示.

利用电流阶跃方法测量得到的电池直流内阻随温度和荷电状态的变化曲线如图 3 所示. 将测量得到

图 2 开路电压随荷电状态的变化曲线

图 3 电池直流内阻随温度和荷电状态的变化曲线

的电池内阻乘以电池的电极面积, 即可得到方程(5)中的 R .

2) 三维热模型

层叠式电池展向导热系数是厚度方向导热系数的近 40 倍^[34], 而电池展向尺寸也大约是厚度的数十倍, 电池的展向和厚度方向均可能存在明显的温度分布, 因此, 数值热模型采用了三维的热模型.

根据能量守恒方程, 电池的温度分布服从

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_{in} \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + k_{in} \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + k_{th} \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + Q, \quad (6)$$

式中 ρ 代表密度(kg m^{-3}), C_p 代表比热容($\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), T 代表温度(K), k_{in} 代表电芯展向导热系数($\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), k_{th} 代表穿越电芯平面的导热系数($\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), Q 代表电芯的产热率(W m^{-3}).

根据 Bernardi 产热模型^[33], 电芯产热率可写为

$$Q = q_{rev} + q_{irev} + q_{CC,p} + q_{CC,n}, \quad (7)$$

$$q_{rev} = -\frac{J/2}{(d_{PE} + d_S + d_{NE})} T \frac{\partial U_{OC}}{\partial T}, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} q_{irev} &= \frac{J/2}{(d_{PE} + d_S + d_{NE})} (U_{OC} - \Phi_p + \Phi_n) \\ &= \frac{J^2 R / 2}{(d_{PE} + d_S + d_{NE})}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$q_{CC,j} = \frac{\sigma_j (\nabla \Phi_j)^2}{d_{CC,j} / 2}, \quad (10)$$

式中 q_{rev} 代表可逆热产热率(W m^{-3}), q_{irev} 代表不可逆热产热率(W m^{-3}), $q_{CC,j}$ 代表集流体上的欧姆产热率(W m^{-3}), d_{PE} , d_S , d_{NE} 分别代表正极、隔膜和负极的厚度(m).

$\frac{\partial U_{OC}}{\partial T}$ 代表电池的熵热系数(V K^{-1}), 实验测得的熵热系数随荷电状态的变化曲线如图 4 所示.

在极耳区域, 产热由极耳的电阻和极耳与导线的接触电阻引起

$$Q = q_{tab,j}, \quad (11)$$

$$q_{tab,j} = \left(\frac{I_{tab}}{A_{tab,j}} \right)^2 \left(\frac{1}{\sigma_{tab,j}} + \frac{1}{\sigma_{c,j}} \right), \quad (12)$$

式中 I_{tab} 是通过极耳的电流(A), A_{tab} 是极耳的横截面积(m^2), $\sigma_{\text{tab},j}$ 是极耳材料的电导率(S m^{-1}), $\sigma_{\text{c},j}$ 是极耳与导线处的接触电阻的折算电导率(S m^{-1}).

电池侧面的边界条件定义为

$$q_{\text{conv}} = h(T - T_{\text{amb}}), \quad (13)$$

式中 q_{conv} 是由对流引起的热流密度(W m^{-2}), h 是对流换热系数($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$), T_{amb} 是环境温度(K).

3) 热、电模型耦合途径

综上所述, 二维电模型用于计算电极平面上的电位分布、电流密度分布和产热率分布, 而三维热模型用于计算电池温度分布. 二维电模型计算得到的产热率分布作为源项输入到三维热模型中, 三维热模型计算得到的温度分布会影响二维电模型中的电池电阻等参数, 进而影响电位分布和电流密度分布. 电模型和热模型的耦合关系如图 5 所示.

三维热模型计算得到的温度分布沿电池厚度方向(Z 方向)平均作为二维电模型的输入温度

$$T_{2\text{D}}(x, y) = \frac{1}{d} \int_0^d T_{3\text{D}}(X, Y, Z) dZ. \quad (14)$$

图 4 熵热系数随荷电状态的变化曲线

图 5 二维电模型和三维热模型的相互耦合关系

二维电模型计算得到的产热率作为三维热模型对应位置处的产热源项

$$Q_{3\text{D}}(X, Y, Z) = Q_{2\text{D}}(x, y). \quad (15)$$

方程(1)~(15)在多物理场耦合仿真软件 COMSOL v4.3 中利用有限元方法计算. 仿真中的参数列于表 2 中.

2.2 数值热模型的验证

为了验证数值热模型的精度在 25 Ah 电池表面贴布了 16 枚热电偶测量电池温度, 其中电芯表面 14 枚, 正/负极极耳各一枚, 如图 6 所示.

在自然对流的环境中, 对 25 Ah 电池进行 1.5 C 电流放电实验. 放电过程中 16 枚热电偶测量得到的温度演变如图 7 所示. 图 7 的结果表明, 正极耳、负极耳和电芯在放电过程中的温度演变规律有明显差异; 由于正极耳的电阻较大, 正极耳的温度一直高于负极耳和电芯; 在电芯上, 按照距离正极耳的远近, 可将各点的温度划分为不同组, 如#1 温度最高, #13

表 2 数值热模型所用的参数列表

集流体	正极	负极
集流体厚度(μm)	20	14
集流体电导率(S m ⁻¹)	37.8×10 ⁶	59.6×10 ⁶
高度(mm)	205	
宽度(mm)	166	
电芯		
电芯平面内的导热系数(W m ⁻¹ K ⁻¹)	21	
垂直电芯平面的导热系数(W m ⁻¹ K ⁻¹)	0.48	
电芯比热容(J kg ⁻¹ K ⁻¹)	1243	
电芯密度(kg m ⁻³)	2300	
对流换热系数(W m ⁻² K ⁻¹)	3.5	
电芯厚度(mm)	7.2	
极耳		
极耳厚度(mm)	0.3	0.3
极耳宽度(mm)	50	50
极耳高度(mm)	50	50
导热系数(W m ⁻¹ K ⁻¹)	237	401
比热容(J kg ⁻¹ K ⁻¹)	900	385
密度(kg m ⁻³)	2700	8700
电导率(S m ⁻¹)	37.8×10 ⁶	59.6×10 ⁶
接触电阻的折算电导率(S m ⁻¹)	70×10 ⁶	80×10 ⁶
对流换热系数(W m ⁻² K ⁻¹)	4

图 6 热电偶贴布位置示意图

图 7 电池放电过程中 16 枚热电偶测量得到的温度演变曲线

次之, #10 和 #12 温度最低。

在电芯上的 14 枚传感器中, #1, #8 和 #12 三枚热电偶位于电芯上的对角位置处, 可分别代表电芯上的相对高温、温度适中和相对低温的区域. Li 等人^[37]的实验结果表明, #1 和 #8 两枚热电偶所在的位置也是电池放电过程中可能出现最高温度的区域. 因此, #1, #8 和 #12 三枚热电偶被选作代表进行数值热模型的验证. 图 8 表明, 仿真结果达到了较好的预测精度。

以 0.5, 1 和 1.5 C 三种倍率进行放电实验, 实验得到的电压曲线与仿真结果吻合程度良好, 如图 9 所示。

图 8 和 9 的结果表明, 数值热模型的热特性和电

图 8 三枚热电偶位置处的仿真、实验温度结果对比

图 9 放电电压曲线的仿真、实验结果对比

特性模拟精度均达到了较好水平, 特别是多点对应的温度分布都达到了较好的吻合。

2.3 数值热模型的仿真结果

图 10 为电池在自然对流条件下 1.5 C 放电末期的温度分布. 仿真结果显示, 电池正极耳附近形成了一个热区, 电池表面的温差达到了 2.5°C, 厚度方向的温差在 1°C 以内。

为分析电池表面温度分布的主要原因, 需要对电芯的产热率分布、极耳传向电芯的热流密度等进行计算. 图 11 显示了放电过程中电芯上的最大产热率和最小产热率随时间的变化. 产热率的演变规律由电池的等效内阻和熵热系数随荷电状态的演变规律决定. 放电中段, 熵热系数从负值变为正值, 因此可逆热从放热变为吸热, 因此产热率降低; 放电末期, 电池内阻急剧增大, 因此不可逆热部分急速增大, 从

图 10 自然对流条件下 1.5 C 放电末期的电池温度分布
(a) 1.5 C 放电末期的电池表面温度分布; (b) 1.5 C 放电末期的电池内部等温面分布

图 11 电芯上最大产热率和最小产热率随放电时间的演变

而引起产热率的增加. 图 11 表明, 最大产热率和最小产热率在大部分放电阶段都相差甚小, 只在放电末期有明显差异, 但是电池的温度在整个放电过程中都存在明显分布, 因此产热率的差异不是电池温度产生分布的主要原因.

正/负极耳传向电芯的热流密度随时间的演变如图 12 所示. 放电一开始后, 由于极耳自身电阻和接触电阻的产热率较高(正极耳为 $2.55 \times 10^5 \text{ W m}^{-3}$, 负极耳为 $1.83 \times 10^5 \text{ W m}^{-3}$, 比图 11 中的电芯产热率高一个数量级), 极耳温度迅速升高, 与邻近的电芯区域形成了温度梯度, 因此极耳传向电芯的热流密度迅速增加; 之后, 随着极耳温度的升高, 极耳向环境的散热率也增加, 因此极耳传向电芯的热流密度逐渐减小. 由于正极耳的电阻高于负极耳, 因此正极耳传向电芯的热流密度始终高于负极耳.

图 12 表明, 极耳传向电芯的热流密度在整个放电过程中都维持着较高的水平, 这与图 10 中的极耳

图 12 正/负极耳传向电芯的热流密度随时间的演变

附近温度始终较高相互印证. 因此, 可以认为极耳向电芯的传热是决定层叠式锂离子电池温度分布的主要因素.

从数值热模型可以得到以下结论.

- 1) 层叠式锂离子电池的温度分布主要存在于电芯展向上, 而厚度方向上的温差较小;
- 2) 层叠式锂离子电池电芯平面上的产热率分布较为均匀, 而极耳传向电芯的热流密度是影响电芯温度分布的主要因素.

3 分析解

3.1 基本假设

基于数值热模拟得到的结论, 可以对数值热模型进行合理、适当的简化, 以推导出分析热模型. 分析热模型所用到的基本假设包括:

- 1) 电芯的温度只在展向内有分布, 而在厚度方向无分布, 因此可将热模型简化为二维;
- 2) 电芯平面内的产热率分布均匀;
- 3) 以放电过程中极耳传向电芯的热流密度的平均值替代实际的随时间变化的热流密度.

为计算 1.5 C 放电下电芯产热率随时间的变化规律, 对 30°C 下的内阻和熵热系数随 SOC 的关系曲线(图 3 和 4)进行了多项式拟合. 忽略温度对不可逆热和可逆热的影响, 则 1.5 C 放电下电芯的产热率可写成如下的多项式形式:

$$q(t) = I^2 R(t) - IT \frac{\partial U}{\partial T}(t) = \sum_{i=0}^7 a_i t^i, \quad (16)$$

式中的 a_i 通过曲线拟合得到, 取值列于表 3 中.

表 3 产热率的多项式表达式中的系数

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
2.16×10^4	-102	0.378	-5.04×10^{-4}	2.19×10^{-7}	4.62×10^{-11}	-5.86×10^{-14}	1.16×10^{-17}

多项式拟合得到的产热率随时间的变化曲线如图 13 所示.

极耳传向电芯的热流密度可以通过数值热模型确定, 如图 12 所示. 作为近似, 可以取放电过程中的热流密度的平均值作为分析热模型中的热流量边界条件

$$Q_{\text{tab}}^+ = 1100 \text{ W m}^{-2}, Q_{\text{tab}}^- = 700 \text{ W m}^{-2}, \quad (17)$$

式中的 Q_{tab}^+ 是正极耳传向电芯的热流密度(W m^{-2}), Q_{tab}^- 是负极耳传向电芯的热流密度(W m^{-2}).

3.2 求解

分析解对应热模型的示意图如图 14 所示. 需要注意该热模型只包括电芯平面, 而不包括极耳.

由于分析解对应的热模型是二维的, 因此传热方程可以写为

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q(t) - \frac{2h_c}{d} (T - T_0), \quad (18)$$

式中的 ρ 是电芯密度(kg m^{-3}), C_p 是电芯比热容($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), T 代表温度(K), k 是电芯平面内的导热系数($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$), $q(t)$ 是产热率随时间的变化曲线(W m^{-3}),

图 13 电芯产热率随时间的变化关系曲线

图 14 分析解对应热模型示意图

可以通过高次多项式函数进行拟合, h_c 是对流换热系数($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$), d 是电芯厚度(m), T_0 是环境温度(K).

边界条件定义为

$$x = 0: \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad (19)$$

$$x = w: \frac{\partial T}{\partial x} = 0; \quad (20)$$

$$y = 0: \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad (21)$$

$$y = h: \begin{cases} \frac{\partial T}{\partial y} = 0, 0 < x < e - w_t/2, \\ k \frac{\partial T}{\partial y} = Q_{\text{tab}}^+, e - w_t/2 < x < e + w_t/2, \\ \frac{\partial T}{\partial y} = 0, e + w_t/2 < x < w - e - w_t/2, \\ k \frac{\partial T}{\partial y} = Q_{\text{tab}}^-, w - e - w_t/2 < x < w - e + w_t/2, \\ \frac{\partial T}{\partial y} = 0, w - e + w_t/2 < x < w. \end{cases} \quad (22)$$

式中 e 是极耳垂直中心线距离最近的电芯边的距离(m), w_t 是极耳的宽度(m).

初始条件可定义为

$$T(x, y) = T_0 \quad \text{in } 0 \leq x \leq w, 0 \leq y \leq h, t = 0. \quad (23)$$

定义温升

$$\theta = T - T_0. \quad (24)$$

则方程(18)~(23)可改写为

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{k} q(t) - \frac{2h_c}{kd} \theta.$$

B.C.

$$x = 0: \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0,$$

$$x = w: \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0;$$

$$y = 0: \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0,$$

$$y = h: \begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0, 0 < x < e - w_t / 2, \\ k \frac{\partial \theta}{\partial y} = Q_{\text{tab}}^+, e - w_t / 2 < x < e + w_t / 2, \\ \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0, e + w_t / 2 < x < w - e - w_t / 2, \\ k \frac{\partial \theta}{\partial y} = Q_{\text{tab}}^-, w - e - w_t / 2 < x < w - e + w_t / 2, \\ \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0, w - e - w_t / 2 < x < w. \end{cases} \quad (25)$$

I.C.

$$\theta(x, y) = 0 \quad \text{in } 0 \leq x \leq w, 0 \leq y \leq h, t = 0.$$

式中

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p}, \quad (26)$$

是电芯的热扩散系数.

为了求解方程(25), 定义双重积分变换

$$\bar{\theta}(\beta_m, \nu_n, t) = \int_{x'=0}^w \int_{y'=0}^h K(\beta_m, x') \cdot K(\nu_n, y') \cdot \theta(x', y', t) \cdot dx' dy'. \quad (27)$$

在方程(27)中, 核函数 $K(\beta_m, x)$ 和 $K(\nu_n, y)$ 的定义式为

$$K(\beta_m, x) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{w}} & (\beta_m = 0), \\ \sqrt{\frac{2}{w}} \cdot \cos \beta_m x & (\beta_m \neq 0), \end{cases} \quad (28)$$

$$K(\nu_n, y) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{h}} & (\nu_n = 0), \\ \sqrt{\frac{2}{h}} \cdot \cos \nu_n y & (\nu_n \neq 0), \end{cases} \quad (29)$$

式中 β_m 是特征方程

$$\sin \beta_m w = 0 \quad (30)$$

的根; ν_n 是特征方程

$$\sin \nu_n h = 0 \quad (31)$$

的根.

对方程(25)进行双重积分变换, 可以得到

$$\begin{aligned} & \int_{x=0}^w \int_{y=0}^h K(\beta_m, x) \cdot K(\nu_n, y) \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \cdot dx dy \\ & + \frac{1}{k} \bar{q}(t) - \frac{2h_c}{kd} \bar{\theta} = \frac{1}{\alpha} \frac{d\bar{\theta}}{dt}. \end{aligned} \quad (32)$$

对方程(32)左侧的第一项应用 Green 公式, 结合方程(25)中定义的边界条件可以得到

$$\begin{aligned} & \int_{x=0}^w \int_{y=0}^h K(\beta_m, x) \cdot K(\nu_n, y) \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \cdot dx dy \\ & = -(\beta_m^2 + \nu_n^2) \bar{\theta} + \\ & \frac{K(\nu_n, y)}{k} \Big|_{y=h} \cdot \int_{x'=0}^w K(\beta_m, x') f(x') dx', \end{aligned} \quad (33)$$

式中

$$f(x) = \begin{cases} 0, 0 < x < e - w_t / 2, \\ Q_{\text{tab}}^+, e - w_t / 2 < x < e + w_t / 2, \\ 0, e + w_t / 2 < x < w - e - w_t / 2, \\ Q_{\text{tab}}^-, w - e - w_t / 2 < x < w - e + w_t / 2, \\ 0, w - e - w_t / 2 < x < w. \end{cases} \quad (34)$$

因此, 方程(32)可以重写为

$$\begin{aligned} & \frac{d\bar{\theta}}{dt} + \alpha \left(\beta_m^2 + \nu_n^2 + \frac{2h_c}{kd} \right) \bar{\theta} \\ & = \frac{\alpha}{k} \bar{q} + \alpha \frac{K(\nu_n, y)}{k} \Big|_{y=h} \cdot \int_{x'=0}^w K(\beta_m, x') f(x') dx', \end{aligned} \quad (35)$$

式中产热率的双重积分变换为

$$\begin{aligned}\bar{q} &= \int_{x=0}^w \int_{y=0}^h K(\beta_m, x') \cdot K(v_n, y') \cdot q(t) \cdot dx' dy' \\ &= \sum_{i=0}^7 a_i t^i \cdot \int_{x=0}^w \int_{y=0}^h K(\beta_m, x') \cdot K(v_n, y') \cdot dx' dy'. \quad (36)\end{aligned}$$

(35)式可看做是 $\bar{\theta}$ 的一阶常微分方程. 对(35)式求解后再进行反变换, 可以得到任意位置、任意时刻的温度表达式为

$$\begin{aligned}T(x, y, t) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\alpha(\beta_m^2 + v_n^2 + \frac{2h}{kd})t} \cdot K(\beta_m, x) \cdot K(v_n, y) \cdot [\bar{\theta}(\beta_m, v_n) \\ &+ \int_{t'=0}^t e^{\alpha(\beta_m^2 + v_n^2 + \frac{2h}{kd})t'} F(\beta_m, v_n, t') dt'] + T_0, \quad (37)\end{aligned}$$

式中

$$\begin{aligned}F(\beta_m, v_n, t) &= \frac{\alpha}{k} \bar{q}(\beta_m, v_n, t) + \alpha \frac{K(v_n, y)}{k} \Big|_{y=h} \\ &\times \int_{x'=0}^w K(\beta_m, x') f(x') dx'. \quad (38)\end{aligned}$$

3.3 验证

为验证分析解的计算精度, 图 15 比较了分别由分析解和数值解计算得到的#1, #8 和#12 位置处的温度曲线. 对比结果表明, 分析解能够基本再现数值解的温度分布和演变规律. 同时, 分析解的计算量远小于数值解, 而且分析解可以直接计算任意时刻、任意位置处的温度, 而数值解需要之前时刻和其他位置

图 15 分析解和数值解计算得到的#1, #8 和#12 位置处的温度曲线对比

处的温度才能计算下一时刻的温度.

4 基于分析解的电池热设计

为了检验方程(17)的假设在其他电芯和极耳设计方案中的合理性, 利用数值解模型计算了在不同长宽比、极耳在不同位置处的极耳向内热流密度, 如图 16 所示. 图 16 表明, 变化极耳位置、电芯长宽比甚至将极耳改为对侧放置, 极耳传向电芯的热流密度基本保持不变; 在绝热条件下, 极耳传向电芯的热流密度高于自然对流条件下的热流密度.

综上所述, 可以认为极耳向电芯的热流密度不随极耳的放置位置、电芯的长宽比等而变化, 但是与电池所处的散热环境有关. 为了研究电池在最苛刻条件下的热性能, 下面的优化设计将考虑电池在绝热条件下的温度分布情况.

4.1 极耳同侧布置的优化设计

分析解可以快速计算出在任意时刻电芯任意位置处的温度, 但却不能方便地找到电芯在某时刻的最高温度和最大温差. 为了将分析解应用于热设计中, 首先需要确定分析解模型的优化指标.

数值热模型的计算结果表明, 电芯的温度在放电过程中一直升高. 在放电末期中, 电芯上的最高温度点可能出现在 3 个位置处.

1) 当正极耳非常靠近电芯左侧(即图 14 中的 e 较小时), 电芯左上角的 A 点(图 14)一方面受正极耳的热流密度影响显著, 另一方面传热不畅, 容易成为温度最高点, 如图 17(a)所示;

2) 当正极耳的位置居中时(即图 14 中的 e 大小居中时), 受正极耳传向电芯的热流密度的影响, 正极耳与电芯连接线的中点 B 点(图 14)容易成为温度最高点, 如图 17(b)所示;

3) 当正极耳和负极耳非常接近时(即图 14 中的 e 较大时), 正/负极极耳的热流密度形成叠加效应, 使温度最高点向正极耳与电芯连接线的右端点 C 点(图 14)移动, 如图 17(c)所示.

放电末期电芯的温度最低点可能出现在 2 个位置处.

1) 一般来说, 由于正极耳向电芯的热流密度是影响电芯上温度分布的主要因素, 因此电芯上距离正极极耳最远的 E 点(图 14)是温度最低点, 如

图 16 不同电芯设计和极耳布置方案下极耳传向电芯的热流密度

(a) 原设计方案; (b) 原设计方案中, 自然对流条件下, 极耳传向电芯的热流密度; (c) 原设计方案中, 绝热条件下, 极耳传向电芯的热流密度; (d) 极耳位置变化方案; (e) 极耳位置变化后, 自然对流条件下的极耳传向电芯的热流密度; (f) 极耳位置变化后, 绝热条件下的极耳传向电芯的热流密度; (g) 电芯长宽比变化方案; (h) 电芯长宽比变化后, 自然对流条件下的极耳传向电芯的热流密度; (i) 电芯长宽比变化后, 绝热条件下的极耳传向电芯的热流密度; (j) 对置极耳方案; (k) 对置极耳后, 自然对流条件下的极耳传向电芯的热流密度; (l) 对置极耳方案, 绝热条件下的极耳传向电芯的热流密度

图 17 不同极耳位置和电芯长宽比下的最高温度、最低温度位置分布

图 17(a)~(c)所示;

2) 在一些特殊的电芯设计中, 电芯的宽度远大于高度, 两个极耳偏置在电芯的两侧, 这时 E 点(图 14)受负极耳加热的作用明显, 反而是电芯底部的中点 D 点(图 14)距离 2 个极耳都较远, 因此容易成为温度的最低点, 如图 17(d)所示.

综上所述, 可以定义

$$\begin{aligned} T_{\max} &\approx \max\{T_A^{\text{EOD}}, T_B^{\text{EOD}}, T_C^{\text{EOD}}\}, \\ T_{\min} &\approx \min\{T_D^{\text{EOD}}, T_E^{\text{EOD}}\}, \\ \Delta T &= T_{\max} - T_{\min}, \end{aligned} \quad (39)$$

式中 T_A^{EOD} , T_B^{EOD} , T_C^{EOD} , T_D^{EOD} 和 T_E^{EOD} 分别代表图 14 点 A, B, C, D 和 E 在放电末期的温度.

图 18 显示了在保持电芯的长宽比(即图 14 中的 w 和 h)不变的情况下, 电芯的最高温度和温差随无量纲化后的极耳位置(e/w)变化的关系曲线. 图 18 的结果表明, 存在最优的极耳位置, 使得电池的最高温度和温差有最小值.

图 19 显示了在保持极耳位置(即图 14 中的 e)不变的情况下, 电芯的最高温度和温差随电芯长宽比

(h/w)变化的关系曲线. 图 19 的结果表明, 存在最优的电芯长宽比, 使得电池的最高温度和温差有最小值, 但是最高温度的最优值对应的电芯长宽比约为 0.52, 而温差的最优值对应的电芯长宽比约为 0.45. 在进行热设计的工作时, 应权衡最高温度和温差 2 个指标各自的重要性, 以做出合理的选择.

分析解可以同时优化电芯长宽比和极耳位置. 图 20 显示了电芯的最高温度随电芯长宽比和极耳位置的变化关系. 在优化计算的范围内, 电芯的最高温度随长宽比减小而减小; 当极耳位置居中时, 电芯的最高温度可以取最优值.

图 21 显示了电芯的温差随电芯长宽比和极耳位置的变化关系. 电芯温差的变化规律与最高温度相类似.

图 22 是不同设计参数(h/w 和 e/w)下的电芯最高温度和温差的散点图. 在变化设计参数时, 首先确定电芯宽度 w , 再根据电芯面积($h \times w$)保持不变确定电芯高度 h , 之后调节极耳位置 e . 其中 w 的变化范围是 166~316 mm, 步长是 50 mm; e 的下限是极耳宽度(w_l)的一半(即 25 mm), 步长是 10 mm, 上限由 $(w-w_l)/2$

图 18 最高温度和温差随极耳位置的变化曲线

(a) 最高温度随极耳位置的变化曲线; (b) 温差随极耳位置的变化曲线

图 19 最高温度和温差随电芯长宽比的变化曲线

(a) 最高温度随电芯长宽比的变化曲线; (b) 温差随电芯长宽比的变化曲线

图 20 最高温度随电芯长宽比和极耳位置的变化关系

确定。

图 22 中的点以形状来区分电芯宽度(w), 以黑色方形点为例, 这些点代表电芯宽度为 316 mm, 不同极耳位置下的电芯最高温度和温差。

在最差的情况($h/w=1.23$, $e/w=0.15$)下, 电芯的最高温度达到了 41.0°C , 温差达到了 4.5°C 。通过优化设计找到的最优解($h/w=0.34$, $w=0.27$), 最高温度下降了约 1.5°C , 而温差下降了约 2°C 。

图 21 温差随电芯长宽比和极耳位置的变化关系

图 22 不同设计参数下的最高温度和温差散点图

4.2 极耳对侧布置的优化设计

极耳对侧布置方案的示意图如图 23 所示, 正极耳和负极耳分别布置在对边的中心对称位置处. 根据数值模拟的结果, 在极耳对侧布置方案中, 最高温度点可能出现在图 23 中的 A 点或 B 点, 而最低温度点可能出现在图 23 中的 C 点, D 点或 O 点, 即

$$\begin{aligned} T_{\max} &\approx \max\{T_A^{\text{EOD}}, T_B^{\text{EOD}}\}, \\ T_{\min} &\approx \min\{T_C^{\text{EOD}}, T_D^{\text{EOD}}, T_O^{\text{EOD}}\}, \\ \Delta T &= T_{\max} - T_{\min}. \end{aligned} \quad (40)$$

$$y=0: \begin{cases} \frac{\partial T}{\partial y} = 0, 0 < x < w - e - w_t/2, \\ -k \frac{\partial T}{\partial y} = Q_{\text{tab}}^-, w - e - w_t/2 < x < w - e + w_t/2, \\ \frac{\partial T}{\partial y} = 0, w - e - w_t/2 < x < w. \end{cases} \quad (41)$$

图 23 对置极耳的设计方案

在对侧布置极耳的情况下, 方程(21)和(22)需要修改为

$$y=h: \begin{cases} \frac{\partial T}{\partial y} = 0, 0 < x < e - w_t/2, \\ k \frac{\partial T}{\partial y} = Q_{\text{tab}}^+, e - w_t/2 < x < e + w_t/2, \\ \frac{\partial T}{\partial y} = 0, e + w_t/2 < x < w. \end{cases} \quad (42)$$

利用积分变换方法, 可以得到对置极耳方案下的温度分析解表达形式为

$$T(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\alpha \left(\beta_m^2 + \nu_n^2 + \frac{2h}{kad} \right) t} \cdot K(\beta_m, x) \cdot K(\nu_n, y) \times \left[\bar{\theta}(\beta_m, \nu_n) + \int_{t'=0}^t e^{\alpha \left(\beta_m^2 + \nu_n^2 + \frac{2h}{kad} \right) t'} F(\beta_m, \nu_n, t') dt' \right] + T_0, \quad (43)$$

式中

$$F(\beta_m, \nu_n, t) = \frac{\alpha}{k} \bar{q}(\beta_m, \nu_n, t) + \alpha \frac{K(\nu_n, y)}{k} \Big|_{y=0} \cdot \int_{x'=0}^w K(\beta_m, x') f_1(x') dx' + \alpha \frac{K(\nu_n, y)}{k} \Big|_{y=h} \cdot \int_{x'=0}^w K(\beta_m, x') f_2(x') dx', \quad (44)$$

$$f_1(x) = \begin{cases} 0, & 0 < x < w - e - w_t / 2, \\ Q_{\text{tab}}^-, & w - e - w_t / 2 < x < w - e + w_t / 2, \\ 0, & w - e + w_t / 2 < x < w, \end{cases} \quad (45)$$

$$f_2(x) = \begin{cases} 0, & 0 < x < e - w_t / 2, \\ Q_{\text{tab}}^+, & e - w_t / 2 < x < e + w_t / 2, \\ 0, & e + w_t / 2 < x < w. \end{cases} \quad (46)$$

在保持电芯的长、宽尺寸不变, 而仅改变极耳位置的情况下, 可以得到电芯上的最高温度和放电结束时的温差随极耳位置变化的曲线, 如图 24 所示. 计算结果表明, 当极耳放置在电芯中央位置处时(即 $e/w = 0.5$), 最高温度和温差达到最小. 因此, 对置极耳方案应当将极耳放置在对边的中央位置处.

在保持极耳放置在对边中央位置(即 $e/w = 0.5$)和电芯面积(即 $h \times w$)不变, 而仅改变电芯的长宽比(即 h/w)的情况下, 可以得到电芯上的最高温度和放电结束时的温差随极耳位置变化的曲线, 如图 25 所示. 计算结果表明, 存在最优的电芯长宽比, 使得电芯的最高温度和温差均较小.

图 24 最高温度和温差随极耳位置的变化曲线

(a) 最高温度随极耳位置的变化曲线; (b) 温差随极耳位置的变化曲线

图 25 最高温度和温差随电芯长宽比的变化曲线

(a) 最高温度随电芯长宽比的变化曲线; (b) 温差随电芯长宽比的变化曲线

图 26 显示了在不同电芯长宽比和极耳位置下的电芯最高温度. 计算结果表明, 当极耳位置为中间布置(即图中 $e/w = 0.5$), 极耳长宽比(即图中 h/w)在 0.8 左右时, 最高温度可取最优值.

温差随电芯长宽比和极耳位置的变化关系图如图 27 所示. 当温差取最小值时, 对应的极耳位置为中置(即图中 $e/w = 0.5$), 而电芯长宽比在 0.8 左右.

图 28 是不同设计参数对应的最高温度、温差的散点图. 在变化设计参数时, 首先确定电芯宽度 w , 再根据电芯面积($h \times w$)保持不变确定电芯高度 h , 之后调节极耳位置 e . 其中 w 的变化范围是 100~400 mm, 步长是 100 mm; e 的下限是极耳宽度的一半(即 25 mm), 步长是 10 mm, 上限由 $w/2$ 确定. 图 28 中的点以形状来区分电芯宽度(w), 以黑色方形点为例, 这些点代表电芯宽度为 400 mm, 不同极耳位置下的

电芯最高温度和温差.

结果表明, 通过对电芯长宽比和极耳位置进行优化设计, 可将最高温度和温差都降低约 2°C .

5 结论

本文提出了大型层叠式锂离子电池的分析解, 并基于分析解分析热模型进行了电池热设计. 根据实验结果和数值热模型的仿真结果, 层叠式锂离子电池的内外温差小于电芯展向温差, 而展向温差产生的主要原因是正/负极耳传向电芯的热流密度. 基于数值解的结果, 分析解对电芯平面上的二维温度分布进行了建模, 假设电芯平面上的产热率分布均匀, 以高次多项式拟合产热率随时间演变的规律, 假设正、负极耳传向电芯的热流密度在放电过程中保持

图 26 对置极耳方案中, 最高温度随电芯长宽比和极耳位置的变化关系

图 27 对置极耳方案中, 温差随电芯长宽比和极耳位置的变化关系

图 28 对置极耳方案中, 不同设计参数下的最高温度和温差散点图

不变. 利用双重积分变换的方法, 对分析解进行了求解, 结果与数值解吻合程度良好. 由于分析解的计算量小, 而且可以实现设计变量的连续变化, 因此在电池热设计中起到了重要的作用. 分析解可以全面考察电芯高度、电芯宽度、极耳位置等多设计参数同时变化下对电池最高温度和温差的影响, 从而实现多参数的全局优化.

本文利用分析解考察了在同侧极耳布置和对侧极耳布置两种主流布置方案下, 电芯的长宽比和极耳位置对电芯上的最高温度和温度分布的影响.

对于同侧极耳布置方案, 极耳位置和电芯长宽比均存在最优的取值. 通过同时优化极耳位置和电芯长宽比, 可使电芯的最高温度下降了约 1.5°C , 而温差下降了约 2°C .

对于对侧极耳布置方案, 极耳在中间布置时的热特性最佳. 通过同时优化极耳位置和电芯长宽比, 可使电芯的最高温度和温差均降低约 2°C .

需要注意的是, 本文所提出的电池热模型针对的是软包型层叠式锂离子电池, 在 0.5 C , 1 C , 1.5 C 三个倍率下进行了验证, 这个倍率范围与能量型电池的工作倍率范围接近. 因此, 本文得到的热设计结论, 如极耳位置、电芯长宽比的最优值等, 只适用于软包层叠式、能量型的锂离子电池. 但是, 本文所提出的以分析解指导热设计的思想, 可以在钢壳包装电池、卷绕式电池、功率型电池等其他类型的电池中加以应用. 同时, 在将热设计结论应用到实际电池的过程中, 还需要综合权衡功率、能量、寿命等多种性能指标, 以满足产品的设计要求.

参考文献

- 1 张剑波, 吴彬, 李哲. 车用锂离子动力电池热模拟与热设计的研发状况与展望. 集成技术, 2014, 3: 18–26
- 2 Al Hallaj S, Maleki H, Hong J S, et al. Thermal modeling and design considerations of lithium-ion batteries. J Power Sources, 1999, 83: 1–8
- 3 Onda K, Ohshima T, Nakayama M, et al. Thermal behavior of small lithium-ion battery during rapid charge and discharge cycles. J Power Sources, 2006, 158: 535–542
- 4 Khateeb S A, Amiruddin S, Farid M, et al. Thermal management of Li-ion battery with phase change material for electric scooters: Experimental validation. J Power Sources, 2005, 142: 345–353
- 5 Wu M S, Liu K H, Wang Y Y, et al. Heat dissipation design for lithium-ion batteries. J Power Sources, 2002, 109: 160–166
- 6 Chen Y F, Evans J W. Thermal analysis of lithium-ion batteries. J Electrochem Soc, 1996, 143: 2708–2712
- 7 Chen S C, Wan C C, Wang Y Y. Thermal analysis of lithium-ion batteries. J Power Sources, 2005, 140: 111–124
- 8 Chen Y, Evans J W. Three-dimensional thermal modeling of lithium-polymer batteries under galvanostatic discharge and dynamic power profile. J Electrochem Soc, 1994, 141: 2947–2955
- 9 Al-Hallaj S, Selman J R. Thermal modeling of secondary lithium batteries for electric vehicle/hybrid electric vehicle applications. J Power Sources, 2002, 110: 341–348
- 10 Pesaran A, Duong T. Electrothermal analysis of lithium ion batteries. In: The 32nd International Battery Seminar & Exhibit. Florida, 2006
- 11 Kwon K H, Shin C B, Kang T H, et al. A two-dimensional modeling of a lithium-polymer battery. J Power Sources, 2006, 163: 151–157
- 12 Kim U S, Shin C B, Kim C S. Modeling for the scale-up of a lithium-ion polymer battery. J Power Sources, 2009, 189: 841–846
- 13 Inui Y, Kobayashi Y, Watanabe Y, et al. Simulation of temperature distribution in cylindrical and prismatic lithium ion secondary batteries. Energ Convers Manage, 2007, 48: 2103–2109
- 14 Gomadam P M, White R E, Weidner J W. Modeling heat conduction in spiral geometries. J Electrochem Soc, 2003, 150: A1339–A1345
- 15 Nieto N, Diaz L, Gastelurrutia J, et al. Thermal modeling of large format lithium-ion cells. J Electrochem Soc, 2013, 160: A212–A217
- 16 Kwon K H, Shin C B, Kang T H, et al. A two-dimensional modeling of a lithium-polymer battery. J Power Sources, 2006, 163: 151–157

- 17 Kim U S, Shin C B, Kim C S. Effect of electrode configuration on the thermal behavior of a lithium-polymer battery. *J Power Sources*, 2008, 180: 909–916
- 18 Kim U S, Yi J, Shin C B, et al. Modeling the dependence of the discharge behavior of a lithium-ion battery on the environmental temperature. *J Electrochem Soc*, 2011, 158: A611–A618
- 19 Kim U S, Yi J, Shin C B, et al. Modelling the thermal behaviour of a lithium-ion battery during charge. *J Power Sources*, 2011, 196: 5115–5121
- 20 Inui Y, Kobayashi Y, Watanabe Y, et al. Simulation of temperature distribution in cylindrical and prismatic lithium ion secondary batteries. *Energy Convers Manage*, 2007, 48: 2103–2109
- 21 Chacko S, Chung Y. Thermal modelling of Li-ion polymer battery for electric vehicle drive cycles. *J Power Sources*, 2012, 213: 296–303
- 22 Yi J, Kim U S, Shin C B, et al. Three-dimensional thermal modeling of a lithium-ion battery considering the combined effects of the electrical and thermal contact resistances between current collecting tab and lead wire. *J Electrochem Soc*, 2013, 160: A437–A443
- 23 Ye Y H, Shi Y X, Cai N S, et al. Electro-thermal modeling and experimental validation for lithium ion battery. *J Power Sources*, 2012, 199: 227–238
- 24 Fang W F, Kwon O J, Wang C Y. Electrochemical-thermal modeling of automotive Li-ion batteries and experimental validation using a three-electrode cell. *Int J Energy Res*, 2010, 34: 107–115
- 25 Botte G G, Johnson B A, White R E. Influence of some design variables on the thermal behavior of a lithium-ion cell. *J Electrochem Soc*, 1999, 146: 914–923
- 26 Cai L, White R E. Mathematical modeling of a lithium ion battery with thermal effects in COMSOL Inc Multiphysics (MP) software. *J Power Sources*, 2011, 196: 5985–5989
- 27 Kim G H, Smith K, Lee K J, et al. Multi-domain modeling of lithium-ion batteries encompassing multi-physics in varied length scales. *J Electrochem Soc*, 2011, 158: A955–A969
- 28 Awarke A, Pischinger S, Ogrzewalla J. Pseudo 3D modeling and analysis of the SEI growth distribution in large format li-ion polymer pouch cells. *J Electrochem Soc*, 2013, 160: A172–A181
- 29 Pals C R, Newman J. Thermal modeling of the lithium/polymer battery: I. Discharge behavior of a single-cell. *J Electrochem Soc*, 1995, 142: 3274–3281
- 30 Pals C R, Newman J. Thermal modeling of the lithium/polymer battery: II. Temperature profiles in a cell stack. *J Electrochem Soc*, 1995, 142: 3282–3288
- 31 Lee K, Smith K, Pesaran A, et al. Three dimensional thermal-, electrical-, and electrochemical-coupled model for cylindrical wound large format lithium-ion batteries. *J Power Sources*, 2013, 241: 20–32
- 32 Fu R J, Xiao M, Choe S Y. Modeling, validation and analysis of mechanical stress generation and dimension changes of a pouch type high power Li-ion battery. *J Power Sources*, 2013, 224: 211–224
- 33 Bernardi D, Pawlikowski E, Newman J. A general energy-balance for battery systems. *J Electrochem Soc*, 1985, 132: 5–12
- 34 Zhang J B, Wu B, Li Z, et al. Simultaneous estimation of thermal parameters for large-format laminated lithium-ion batteries. *J Power Sources*, 2014, 259: 106–116
- 35 Zhang J, Huang J, Li Z, et al. Comparison and validation of methods for estimating heat generation rate of large-format lithium-ion batteries. *J Therm Anal Calorim*, 2014, 117: 447–461
- 36 Onda K, Kameyama H, Hanamoto T, et al. Experimental study on heat generation behavior of small lithium-ion secondary batteries. *J Electrochem Soc*, 2003, 150: A285–A291
- 37 Li Z, Zhang J B, Wu B, et al. Examining temporal and spatial variations of internal temperature in large-format laminated battery with embedded thermocouples. *J Power Sources*, 2013, 241: 536–553
- 38 Taheri P, Yazdanpour M, Bahrami M. Analytical assessment of the thermal behavior of nickel-metal hydride batteries during fast charging. *J Power Sources*, 2014, 245: 712–720
- 39 Taheri P, Yazdanpour M, Bahrami M. Transient three-dimensional thermal model for batteries with thin electrodes. *J Power Sources*, 2013, 243: 280–289

Thermal design optimization of laminated lithium ion battery based on the analytical solution of planar temperature distribution

WU Bin, LI Zhe & ZHANG JianBo

State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Thermal issues constitute a major barrier to the deployment of large-format lithium ion batteries on electrical vehicles. Thermal modeling is a powerful tool to investigate the thermal design and improve the thermal performance of the battery. There are two methods to solve thermal models, the numerical simulation and the analytical solution. Most of the thermal modeling works reported in the literature are based on the numerical simulation. However, the analytical solution is highly desirable for optimization as it allows the effects of multiple thermal parameters to be evaluated simultaneously, thanks to its low computational cost. This work firstly proposes and validates a numerical thermal model for a 25 Ah laminated lithium ion battery. The simulated temperatures agree well with the experiment results from multiple thermocouples. Secondly, an analytical solution to the planar temperature distribution is deduced using the integral transform technique, assuming that the temperature distribution is two-dimensional and the heat generation rate is uniform. These assumptions are justified from the simulation results. Finally, the analytical solution is used to optimize the battery thermal design, including the optimal core aspect ratio and the tab displacement.

lithium ion battery, thermal model, thermal design, analytical solution

doi: 10.1360/N092014-00226