

储能系统与工程

基于多尺度锂离子电池电化学及热行为仿真实验研究

张志超^{1,2,3}, 郑莉莉^{1,2,3}, 杜光超^{1,2,3}, 戴作强^{1,2,3}, 张洪生⁴

(¹青岛大学机电工程学院; ²青岛大学动力集成及储能系统工程技术中心; ³电动汽车智能化动力集成技术国家地方联合工程技术中心(青岛), 山东 青岛 260071; ⁴31620部队, 安徽 六安 237000)

摘要: 层叠式锂离子电池由许多相同的电极对单元叠加组成, 每个电极对内部的物理化学特性对电池性能有着重要影响, 然而, 这些性质很难通过实验来测量。本文通过耦合质量、电荷、能量和电动力学方程, 提出了一种三维电化学-热耦合模型, 利用该模型, 研究了层叠式锂离子电池内部电化学行为及热特性的时空分布。仿真结果表明, 在放电过程中, 极耳与极板连接区域电位分布与电流密度分布都存在明显的分布梯度, 且在正极极耳处电流密度值最大, 温升最高, 放电结束时温升达到最大值8℃。电池不同位置的温升速率不同, 放电前期, 靠近极耳区域的温升速率较大, 远离极耳处温升速率较小; 随着放电过程的深入, 远离极耳处的温升速率有增大趋势。本文建立的模型能够准确预测锂离子电池内部电化学行为及温度场分布, 为后续对电池的结构优化及热管理提供相关依据。

关键词: 锂离子电池; 三维电化学-热耦合; 电化学行为; 热特性

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2019-0185

中图分类号: TM 912

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2020) 01-124-07

Electrochemical and thermal behavior simulation experiments based on multiscale lithium ion batteries

ZHANG Zhichao^{1,2,3}, ZHENG Lili^{1,2,3}, DU Guangchao^{1,2,3}, DAI Zuoqiang^{1,2,3}, ZHANG Hongsheng⁴

(¹College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University; ²School of Electromechanic Engineering, Power & Energy Storage System Research Center, Qingdao University; ³Electric Vehicle Intelligent Power Integration Technology National and Local Joint Engineering Technology Center (Qingdao), Qingdao 260071, Shandong, China; ⁴Troops of 31620, Liu'an 237000, Anhui, China)

Abstract: The stacked lithium-ion batteries comprise many identical electrode-cell combinations. The internal physicochemical properties of each electrode significantly affect the battery performance. However, these properties are difficult to be experimentally measured. In this study, a three-dimensional electrochemical-thermal coupling model is proposed by coupling the mass, charge, energy, and electrochemical kinetic equations. The time-space distribution of the electrochemical behavior and thermal properties of a stacked lithium-ion battery is studied. The simulation results denote that during the discharge process, a significant distribution gradient can be observed between the potential distribution and the current density distribution with respect to the connection between the pole and plate; furthermore, the current density is the highest at the positive pole, the increase in temperature is the highest, and the increase in temperature is reached at the end of discharge. The maximum temperature is 8 °C. The rate of increase in temperature differs at different positions of the battery. In the early discharge stage, the rate of increase in temperature is higher near the ear area and lower away

收稿日期: 2019-08-20; 修改稿日期: 2019-09-08。

第一作者: 张志超 (1995—), 男, 从事锂电池热失控研究, E-mail:

1378389368@qq.com; 联系人: 戴作强, 教授, 研究方向为新能源汽车系统 E-mail: daizuoqiangqdu@163.com。

from the ear; as the discharge process is deeper, the rate of increase in temperature increases away from the ear. The model established in this study can accurately predict the electrochemical behavior and temperature field distribution inside a lithium-ion battery, which will help to provide a relevant basis for subsequent structural optimization and thermal management of the batteries.

Key words: lithium-ion battery; three-dimensional electrochemical-thermal coupling; electrochemical behavior; thermal characteristics

锂离子电池具有高比能量、高比功率和高电压平台等诸多优点，在储能和新能源电动汽车等方面具有良好的应用前景^[1-3]。现有锂离子电池的电芯结构可分为层叠式和卷绕式，与卷绕式相比，层叠式结构可以提高电池容量，减小电池内阻^[4-7]。但这种布置方式在大倍率放电时容易导致电池沿平面方向温度分布不均匀，为了分析电池温度不均匀分布的问题，可以建立精确的电池仿真模型，明确温度场分布特性，以给电池生产厂家提供更多优化电池结构的信息。

目前，采用有限元方法进行电池多物理场的仿真分析已经比较普遍。在建模中，研究者通常采用不分层的集总参数模型，通过耦合一维电化学模型分析电池的温度场分布^[8-9]，或者忽略电池沿厚度方向的温度梯度，仅分析电池表面温度分布^[10-11]。实际上，锂离子电池具有三维分层结构，而且不同部分热源各不相同，必然导致电池内部温度分布不均。为了对锂离子电池各层的电化学及温度场分布进行更加精准的预测，本文基于 COMSOL Multiphysics 多物理场分析软件建立了三维单层电化学-热耦合模型，并在此基础上研究了电池不同部分的电化学特性及温度场分布。本文的研究工作能够为锂离子电池的结构优化与电池热管理开发提供理论依据。

1 电池三维电化学-热耦合模型的建立

本文以威能方形 10 A·h 层叠式 LiFePO₄/Graphite 动力锂离子电池为研究对象，该电池由 60 个电极对叠加而成，每个电极对都由正极集流体、正极活性物质、隔膜、负极活性物质、负极集流体五部分组成。在放电过程中，电流经负极极耳流入，穿越隔膜及正负极，最后从正极极耳流出^[12-13]。在这个过程中会伴随着复杂的化学、电化学反应和物质传输过程，并导致电池内部温度场

发生变化^[14-15]。针对这一现象，本文通过耦合质量、电荷、能量守恒和电化学动力学，建立三维电化学-热耦合模型，研究了放电过程中电池的电化学特性和热特性。

1.1 电荷守恒

电流集流体和固相多孔电极的电荷守恒可表示为

$$\nabla \cdot (-\sigma_c \nabla \phi_c) = -J_c \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (-k_1^{\text{eff}} \nabla \phi_1) = -S_{a,i} (j_{\text{loc},i} + C_d (\frac{\partial \phi_1}{\partial t} - \frac{\partial \phi_2}{\partial t})) \quad (2)$$

$$S_{a,i} = \frac{3\epsilon_{1,i}}{r_{p,1}}; k_1^{\text{eff}} = k_1 \epsilon_1^{\gamma_1} \quad (3)$$

式中， $r_{p,1}$ 为固相颗粒半径； ϕ_c 在阳极极耳顶部边界设置为零，在阴极极耳边界设为电荷通量，即平均电流密度。在隔膜和电极交界处没有电荷流动，设置为绝缘。

$$\phi_c|_{\text{top1}} = 0; -\sigma_c \nabla \phi_c|_{\text{top2}} = -I_{\text{total}} \quad (4)$$

$$-k_1^{\text{eff}} \nabla \phi_1|_{x=L_{\text{nec}}+L_n}=0; -k_1^{\text{eff}} \nabla \phi_1|_{x=L_{\text{nec}}+L_n+L_s}=0 \quad (5)$$

液相电荷守恒的控制方程为

$$\nabla \cdot \left\{ k_2^{\text{eff}} \left[-\nabla \phi_2 + \frac{2RT}{F} \left[1 + \frac{\partial \ln f}{\partial \ln c_2} \right] (1 - t_+) \frac{\nabla c_2}{c_2} \right] \right\} = S_{a,i} j_{\text{loc},i} \quad (6)$$

$$k_2^{\text{eff}} = k_2 \epsilon_2^{\gamma_2} \quad (7)$$

式中， k_2^{eff} 为有效液相锂离子电导率； c_2 表示液相中锂离子浓度； F 为法拉第常数； t_+ 为溶液中锂离子的迁移数； k_2 为液相锂离子电导率； ϵ_2 为液相体积分； γ_2 为液相布鲁格曼常数。

液相接界电势由以下方程可得

$$K_{\text{junc}} = \frac{2RT}{F} \left[1 + \frac{\partial \ln f}{\partial \ln c_2} \right] (1 - t_+) = \frac{2RT}{F} v \quad (8)$$

其中， v 与电解液活跃度相关，是温度与电解液浓度的函数； f 为液相活化系数。外边界无电流，故在边界处设置如下

$$\nabla \phi_2|_{x=L_{\text{nec}}} = \nabla \phi_2|_{x=L_{\text{nec}}+L_n+L_s+L_p} = 0 \quad (9)$$

1.2 质量守恒

固相中锂离子在电极活性嵌入颗粒的质量平

衡方程用菲克第二定律描述（假设颗粒为球体）

$$\frac{\partial c_{1,i}}{\partial t} = \frac{D_{1,i}}{r^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial c_{1,i}}{\partial r} \right) \right] \quad (10)$$

式中, $c_{1,i}$ 为固体颗粒中锂离子浓度; $D_{1,i}$ 为锂离子在固相中的扩散速率; r_i 为径向距离变量。由于在球体颗粒中心不存在物质交换及颗粒表面产生的锂离子流动为锂离子的嵌入和脱嵌速率, 因此 $-D_{1,i} \frac{\partial c_{1,i}}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0$; $-D_{1,i} \frac{\partial c_{1,i}}{\partial r} \Big|_{r=R_{1,i}} = j_{\text{loc},i}$

液相中质量平衡方程可以表示为

$$\varepsilon_2 \frac{dc_2}{dt} + \nabla \cdot (-D_2^{\text{eff}} \nabla c_2) = \frac{S_{a,i} j_{\text{loc},i}}{F} (1 - t_+) \quad (11)$$

$$D_2^{\text{eff}} = D_2 \varepsilon_2^{\gamma_2} \quad (12)$$

式中, $j_{\text{loc},i}$ 为局部电流源; D_2 为锂离子在液相中的扩散速率; D_2^{eff} 为锂离子在液相中的有效扩散速率。在集流体/电解液界面处, 液相传质均为 0; 隔膜/电解液界面处其传质是连续的。

1.3 电化学反应速率

正、负极的电化学反应的实质是锂离子在正、负极的嵌入和脱嵌, 这一过程由巴特勒-伏尔摩 (Butler-Volmer) 方程来描述, 即

$$j_{\text{loc},i} = j_{0,i} \left\{ \exp \left[\frac{\alpha_{a,i} \eta_i F}{RT} \right] - \exp \left[\frac{-\alpha_{c,i} \eta_i F}{RT} \right] \right\} \quad (13)$$

式中, $j_{0,i}$ 为交换电流; η_i 为过电势; $j_{\text{loc},i}$ 是由过电势决定, 过电势为固相电势与液相电势之差, 减去固相的热力学平衡势; $\alpha_{a,i}$ 和 $\alpha_{c,i}$ 分别为阳极和阴极电极反应的转移系数; F 为法拉第常数, $F=96487 \text{ C/mol}$; R 为理想气体常数, $R=8.3143 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$; T 为温度;

局部固液相接触面间电化学反应的过电势定义为

$$\eta_i = \phi_{1,i} - \phi_{2,i} - U_{\text{ref},i} - j_{\text{loc},i} \cdot R_{\text{SEI}} \quad (14)$$

$$i = ne, pe \quad (15)$$

式中, ne 和 pe 分别代表负极和正极; ϕ 为电势, V; R_{SEI} 为电极活性分子表面的薄膜电阻; $U_{\text{ref},i}$ 为有效开路电势; 下标 1 和 2 分别代表液相和固相。

1.4 能量守恒

据发热的类型, 锂离子单电池的生热我们主要考虑三种生热形式, 分别为可逆热 (充放电过程中的熵变引起), 欧姆热 (欧姆内阻引起), 极化热 (活性材料颗粒表面和电解质之间的电化学反应极化引起)。

反应热可表示为

$$Q_{\text{rea}} = S_{a,i} j_{\text{loc},i} T \frac{dU_i}{dT} \quad (16)$$

欧姆生热可表示为

$$Q_{\text{ohm}} = \sigma_i^{\text{eff}} \nabla \phi_{1,i} \cdot \nabla \phi_{1,i} + k_2^{\text{eff}} \nabla \phi_{2,i} \cdot \nabla \phi_{2,i} + \sigma_{i,c} \nabla \phi_{i,c} \cdot \nabla \phi_{i,c} + \frac{2RTk_2^{\text{eff}}}{F} (t_+ - 1) \left[1 + \frac{\partial \ln f}{\partial \ln c_{2,i}} \right] \cdot \nabla (\ln c_{2,i}) \cdot \nabla \phi_{2,i} \quad (17)$$

极化生热可表示为

$$Q_{\text{act}} = S_{a,i} j_{\text{loc},i} (\phi_{1,i} - \phi_{2,i} - U_i) \quad (18)$$

锂离子电池内部能量守恒方程为

$$\rho_i C_{p,i} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k_i \nabla T) = Q_{\text{rea}} + Q_{\text{ohm}} + Q_{\text{act}} - Q_{\text{conv}} \quad (19)$$

式中, ρ_i 、 C_p 、 k_i 分别为电池的密度、比热容、导热系数。散热边界设为对流换热, 即

$$Q_{\text{conv}} = \frac{2h}{d} (T - T_{\text{amb}}) \quad (20)$$

式中, T_{amb} 为环境温度 (25 °C); h 为对流换热系数; d 是垂直于电极方向的电池厚度。

2 模型参数设置

模型固定参数设置分为几何参数设置, 电化学参数设置与热特性参数设置, 如表 1、表 2 中所示。

3 模型验证

在三维分布模型中, 我们对电化学系统内部分布特征的关注, 包括电位分布、SOC 分布、电流密度分布和锂离子浓度分布。由于电池电化学

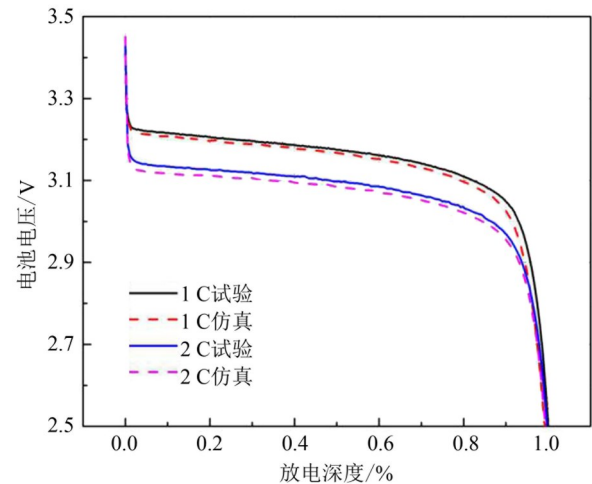


图1 1 C、2 C放电仿真与实验结果对比
Fig.1 Comparison of 1 C and 2 C discharge simulation and experimental results

表 1 电池几何参数及电化学参数

Table 1 Battery geometry and electrochemical parameters

参数	负极	正极	隔膜	电解液	铝片	铜片
厚度/ μm	32	70	25	—	6.2	10
固相体积分数	0.58	0.43	—	—	—	—
液相体积分数	0.3	0.5	0.54	—	—	—
活性颗粒半径/ μm	0.037	3.5	—	—	—	—
初始锂离子浓度/ $(\text{mol}\cdot\text{m}^{-3})$	—	—	—	2000	—	—
最大可嵌锂浓度/ $(\text{mol}\cdot\text{m}^{-3})$	31480	22000	—	—	—	—
初始锂离子浓度/ $(\text{mol}\cdot\text{m}^{-3})$	29906	21516	—	—	—	—
电化学参数						
阴阳极传递系数	0.5	0.5	—	—	—	—
电导率/ $(\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$	100	0.5	—	—	—	—
离子扩散率/ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	$9\cdot 10^{-14}[8]$	$8\cdot 10^{-18}[8]$	—	—	—	—
法拉第常数/ $\text{C}\cdot\text{mol}^{-1}$	96487	—	—	—	—	—
参考温度/K	298.15	—	—	—	—	—

分布特性难以通过实验测量，因此本文通过对比电池外部电化学特性进行验证。实验平台主要有贝尔公司的高低温箱、美凯麟公司的充放电柜和 COMSOL 多物理场仿真软件。实验前先用 1 C 电流将电池充到满电状态，静置 1 小时，然后对电池分别进行 1 C、2 C 恒流放电，记录放电过程中电池电压变化。图 1 为仿真与实验结果对比，可以看出实验与仿真结果一致性较好，该模型准确性得到了验证。

4 仿真结果及分析

本文在 COMSOL Multiphysics5.4 平台上进行了建模仿真，放电结束电压设为 2.5 V。模拟了锂离子电池的电位分布、电流密度分布及放电过程中的温度场分布。

4.1 电流密度分布

图 2（a）描述了 2 C 放电结束电池正负集流体

上的电流密度分布。箭头表示电流流动的大小和方向。放电过程中，所有电流从外部电路流入负极极耳，并分布在整个负极集流体区域。随着与负极极耳距离的增加，电流密度逐渐减小。这是因为流入极耳的部分电流流向了垂直于夹层结构方向。流过电池单元的这部分电流称为局部工作

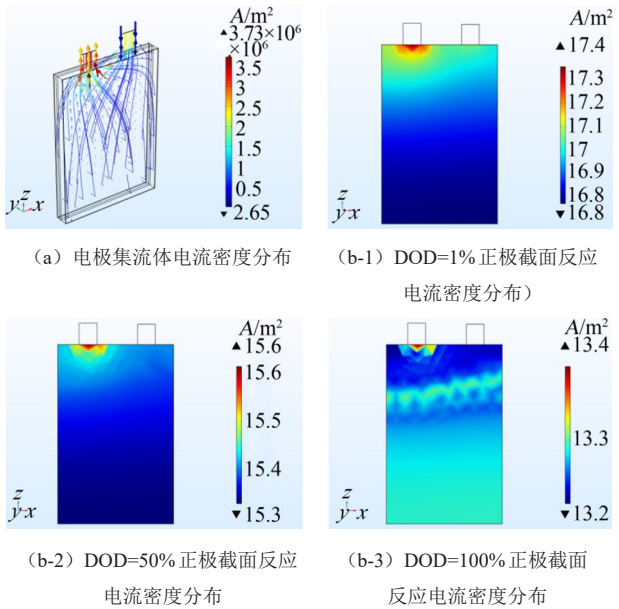


图2（a）电池正负集流体上的电流密度分布图，（b）不同放电深度正极 1/2 截面处反应电流密度分布

Fig.2 (a) current density distribution on the positive and negative current collectors of the battery, (b) reaction current density distribution at the 1/2 cross section of the positive electrode at different discharge depths

表 2 电池各部分热特性参数

Table 2 Thermal characteristics of various parts of the battery

材料	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	比热容/ $\text{J}\cdot\text{kg}\cdot\text{K}^{-1}$	热传导系数/ $\text{W}\cdot\text{m}\cdot\text{K}^{-1}$
铝	2700	900	238
正极	2300	1270	1.4
隔膜	990	2000	0.334
负极	1350	950	1.1
铜	8933	385	400

电流, 它将参与电化学反应的电荷从负极转移到正极。在电池工作过程中, 局部工作电流分布不均匀会导致电池局部过充或过放电, 从而影响电池的安全及寿命。因此, 对这一关键参数的认识极为重要。图2(b)显示了不同放电深度电池正极1/2截面处反应电流密度分布。由图可知, 在放电过程中, 正极极耳区域的反应电流密度从最大值变为最小值, 这可能是因为放电结束时, 极耳区域电解液中的锂离子几乎被耗尽, 从而降低了极耳附近的电化学反应速率。由图2(b-3)可以看出, 放电结束时电池反应电流密度出现了明显梯度, 原因可能是放电后期电池浓差极化较大, 导致反应电流密度出现了明显的梯度分布。然而, 放电过程中, 电极反应电流密度的变化梯度并不剧烈, 说明电极内部的电化学反应速率基本稳定。

4.2 电势分布

电势分布均匀程度影响着电池的性能。电池的高局部电位可能导致电池极板性能的严重不均匀性, 降低电池性能。图3显示了在2C放电期间阳极和阴极的固相电位分布, 表明放电过程中存在明显的电压梯度分布, 在放电期间电流从负极片流入电池, 然后从正极片流出。根据欧姆定律, 电势沿

着电流的方向减小。因此, 阳极的最高电位位于负极极耳上, 而阴极的最低电位位于正极极耳上。此外, 由于电流累积在极耳处流入或流出电池, 因此极耳和电极板连接区域电位变化非常不均匀, 电极板其余部分的电位分布相对均匀。

4.3 温度特性分析

锂离子电池放电是一个典型的, 有时变内热源的瞬态导热过程。图4(a)~(c)分别为2C放电条件下不同放电深度电池温度场分布。图4表明, 在放电过程中, 电池的温度不断上升。但是, 电池不同位置的温升速率并不相同, 放电前期, 靠近极耳区域的温升速率较大, 远离极耳处温升速率较小; 随着放电过程的深入, 远离极耳处的温升速率有所增加, 原因可能是放电后期极耳处的锂离子消耗殆尽, 导致极耳区域的反应电流密度减小, 欧姆产热速率有所下降。而电池底部区域由于锂离子放电前期消耗较少, 放电后期锂离子含量相对富裕, 且参与反应的锂离子数明显增多, 导致放电后期电池底部反应电流密度增大, 欧姆产热速率有所增加。通过图2(b)可以看出, 在放电过程中, 正极区域的反应电流密度从最大值变为最小值, 进一步证明了仿真结果。

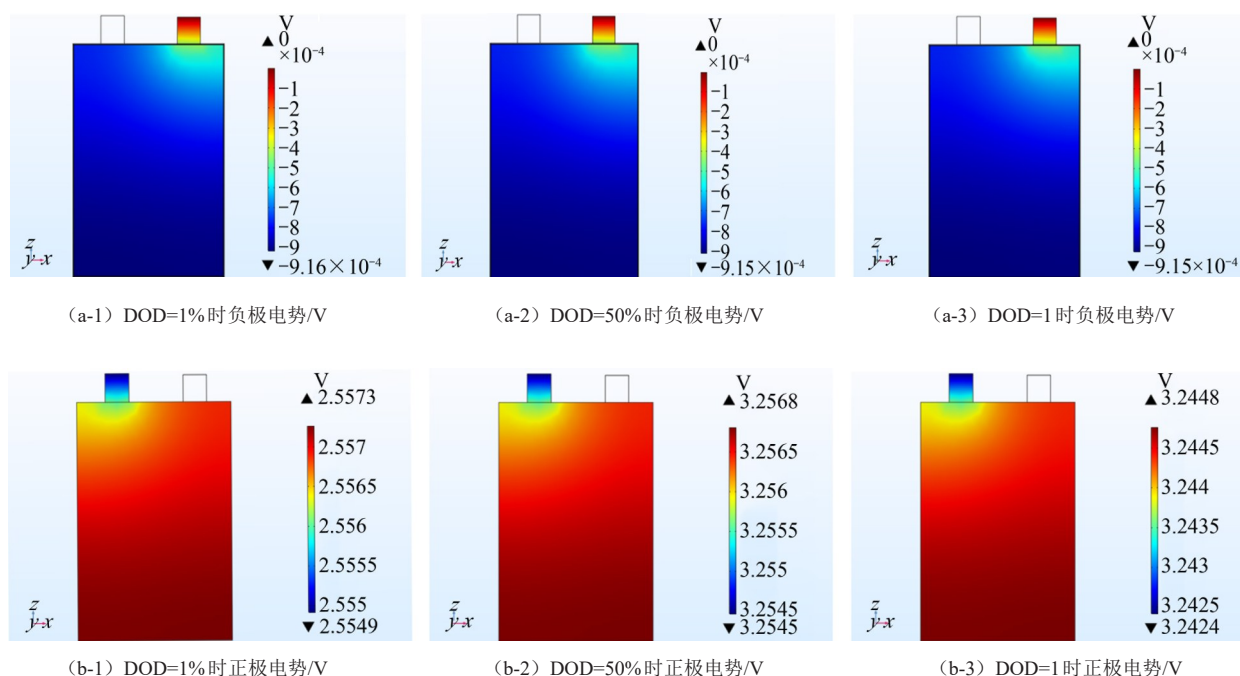


图3 不同放电深度电池电极电势分布 (a) 负极; (b) 正极

Fig.3 Battery electrode potential distribution for different depths of discharge (a): negative electrode; (b) positive electrode

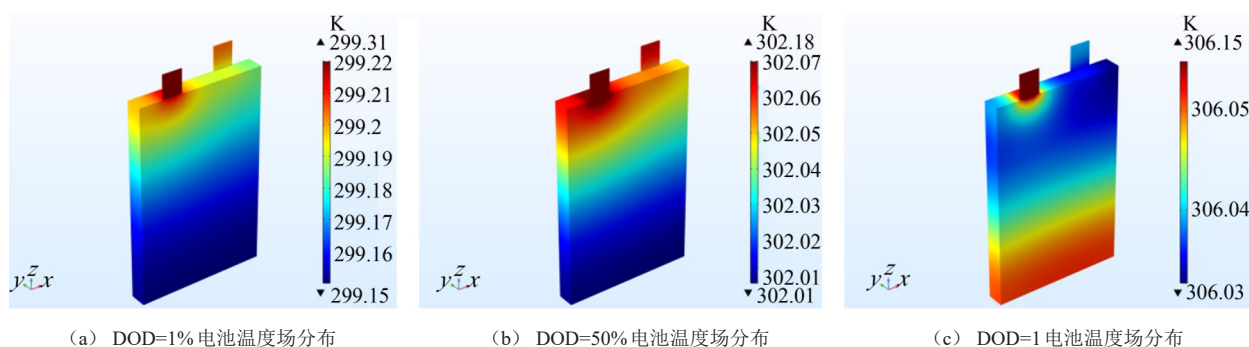


图4 不同放电深度电池温度场分布

Fig.4 Temperature field distribution of different discharge depth batteries

5 结 论

本文通过耦合质量、电荷、能量和电动力学方程，提出了一种三维电化学热耦合模型，利用该模型，研究了层叠式锂离子电池内部电化行为及热特性的时空分布，主要结论如下。

(1) 通过建立三维电化学与三维热耦合模型可以对锂离子电池的温度场变化及生热特性进行准确分析。

(2) 通过建立三维电化学热耦合模型可以得到电池局部电位分布和电流密度分布等传统实验方法难以获得的结果。

(3) 在恒流放电过程中，电池内部存在明显的温度梯度，特别是在极耳和极板的过渡区，电池温度梯度变化最大。

(4) 放电过程中电池不同位置的温升速率并不相同，放电前期，极耳区域温升速率最大，远离极耳的电池底部区域温升速率相对较小，但是，放电后期有增大趋势。本文建立的三维电化学-热模型为观察锂离子电池内部电化行为和热行为提供了一种有效的方法，并在指导锂电池单体结构优化设计方面具有良好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 刘金枝, 杨鹏, 李练兵. 一种基于能量建模的锂离子电池电量估算方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(13): 100-107.
LIU J Z, YANG P, LI L B. A method for estimating the quantity of lithium ion battery based on energy modeling[J]. Journal of Electrotechnics, 2015, 30(13): 100-107.
- [2] 王春梅. 商业用手机锂离子电池高效化成和充电方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
WANG C M. Research on high efficiency formation and charging method of commercial cell phone lithium ion battery[D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2015.

- [3] 姚雷. 电动车辆动力电池充电特性与控制基础问题研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
YAO L. Research on charging characteristics and control basic problems of electric vehicle power battery[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [4] 张剑波, 吴彬, 李哲. 车用动力锂离子电池热模拟与热设计的研发状况与展望[J]. 集成技术, 2014, 3(1): 18-26.
ZHANG J B, WU B, LI Z. Development and prospect of thermal simulation and thermal design for vehicle power lithium ion batteries [J]. Journal of Integration Technology, 2014, 3(1): 18-26.
- [5] 孙祥明. 大容量层叠结构 LiMn_2O_4 锂离子电池的制备及性能研究 [J]. 河南科技, 2014(21): 72.
SUN X M. preparation and properties of LiMn_2O_4 lithium ion battery with large capacity stacked structure[J]. Henan Science and Technology, 2014(21): 72.
- [6] 刘英. 大容量层叠结构 LiMn_2O_4 锂离子电池的制备及性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
LIU Y. Preparation and properties of LiMn_2O_4 lithium ion battery with large capacity stacked structure[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [7] CHIEW J, CHIN C S, TOH W D, et al. A pseudo three-dimensional electrochemical-thermal model of a cylindrical $\text{LiFePO}_4/\text{graphite}$ battery[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 147, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.10.108.
- [8] 刘岸晖, 甘小燕, 何佩芸, 等. 锂离子电池热模型的研究动态[J]. 电源学报, 2019, 17(1): 95-103.
LIU A H, GAN X Y, HE P Y, et al. Research trends of thermal models for lithium ion batteries[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 17 (1): 95-103.
- [9] 史玉军. 车用锂离子电池热分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
SHI Y J. Thermal analysis of lithium ion battery for vehicles[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [10] 张立军, 李文博, 程洪正. 三维锂离子电池单电池电化学-热耦合模型[J]. 电源技术, 2016, 40(7): 1362-1366+1490.
ZHANG L J, LI W B, CHENG H Z. Three-dimensional lithium ion single cell electrochemical-thermal coupling model[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(7): 1362-1366+1490.
- [11] 季迎旭, 王明旺, 孙威, 等. 动力电池建模与应用综述[J]. 电源技术, 2016, 40(3): 740-742.
JI Y X, WANG M W, SUN W, et al. Overview of power battery

- modeling and application[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(3): 740-742.
- [12] 陈萍, 姚汪兵, 周元, 等. 集流体对锂离子动力电池性能影响研究[J]. 电源技术, 2015, 39(5): 900-901+916.
- CHEN P, YAO W B, ZHOU Y, et al. Study on the influence of current collector on the performance of lithium ion power battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(5): 900-901+916.
- [13] 汤依伟, 艾亮, 程昀, 等. 锂离子动力电池高倍率充放电过程中弛豫行为的仿真[J]. 物理学报, 2016, 65(5): 340-349.
- TANG Y W, AI L, CHENG J, et al. Simulation of relaxation behavior in lithium ion power battery during high rate charge and discharge[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(5): 340-349.
- [14] 宋丽, 魏学哲, 戴海峰, 等. 锂离子电池单体热模型研究动态[J]. 汽车工程, 2013, 35(3): 285-291.
- SONG L, WEI X Z, DAI H F, et al. Research on thermal model of lithium ion battery cell[J]. Automotive Engineering, 2013, 35(3): 285-291.
- [15] MARYAM G, FARID B, GHOLAM N, et al. Electrochemical-thermal model of pouch-type lithium-ion batteries[J]. Electrochimica Acta, 2017, 247, doi: 10.1016/j.electacta.2017.06.164.