

# 基于电化学-热耦合模型的21700型锂离子电池充放电过程热行为分析

徐文军, 胡 芑

(中国科学技术大学热科学和能源工程系, 安徽合肥 230027)

**摘要:** 锂离子电池具有比能量高、循环寿命长、输出功率大、可承受较宽充放电倍率等特点, 已成为电动汽车领域电池开发的研究热点。锂离子电池在循环过程中的热行为对其性能、循环寿命和安全性有着较大的影响。本文基于21700圆柱形锂离子电池建立电化学-热耦合模型, 并通过实验验证模型的精确性, 分析了充电过程中的热行为, 包含温度和产热分布。结果表明, 充电过程中的温升主要受恒流充电过程的影响, 电池平均温度和总产热均呈先上升后下降的趋势, 且电池不可逆热占比高于可逆热。通过对比充放电过程的温度分布和产热变化可知, 恒流充电过程中的产热和温度均大于恒流放电过程, 充电过程具有温度提升时间短、变化速度快、产热峰值高等特点。

**关键词:** 锂离子电池; 热行为; 电化学-热耦合模型; 充放电循环

**中图分类号:** TM912      **文献标识码:** A      doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2020.05.012

**引用格式:** 徐文军, 胡芑. 基于电化学-热耦合模型的21700型锂离子电池充放电过程热行为分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2020, 50(5): 645-653.

XU Wenjun, HU Peng. Thermal behavior analysis of 21700 type lithium ion battery during charge-discharge cycles based on electrochemical-thermal model[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2020, 50(5): 645-653.

## Thermal behavior analysis of 21700 type lithium ion battery during charge-discharge cycles based on electrochemical-thermal model

XU Wenjun, HU Peng

(Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** Lithium ion batteries have become a hotspot in the field of electric vehicles due to their excellent performance of high specific energy, long lifespan, high output power, and wide range of charge-discharge rates. The thermal behavior of the batteries during the charge-discharge cycle has a large impact on their performance, life cycle and safety. In this work, an electrochemical-thermal model is established based on a 21700 type cylindrical lithium ion battery, and corresponding experiments are conducted to validate the model. The thermal behavior during the charge process is analyzed, including the temperature and heat generation distribution. The results show that temperature rise in the charging process is mainly affected by the constant current charging process, the average temperature and heat generation of the battery both exhibit a trend of ascending first and descending later, and the irreversible heat shares a larger proportion

收稿日期: 2019-05-06; 修回日期: 2019-06-26

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(WK2090130016)资助。

作者简介: 徐文军, 男, 1994年生, 硕士。研究方向: 锂离子电池热管理及数值模拟。E-mail: megaxu@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 胡芑, 博士/教授。E-mail: hupeng@ustc.edu.cn

of the total heat generation. The thermal behavior is contrasted between the charge and discharge process, and it is found that compared with the discharge process, the thermal behavior at the charge process has the characteristics of quick temperature change and high heat generation peaks.

**Key words:** lithium ion battery; thermal behavior; electrochemical-thermal model; charge-discharge cycle

## 0 引言

二十一世纪以来,新能源汽车得到广泛关注,动力电池及电池管理作为发展核心,亦是目前其大范围推广的掣肘所在,探究并开发高比能量、循环性能优异的电池极具现实意义和战略意义<sup>[1]</sup>.作为一种新型绿色环保电池,锂离子电池具有比能量高、循环寿命长、输出功率大、可承受较宽充放电倍率等特点,已成为电动汽车领域电池开发的研究热点<sup>[2]</sup>.锂离子电池工作时的热行为对其性能和安全问题有很大的影响<sup>[3]</sup>,因此研究不同环境和工况下的锂离子电池热行为十分必要.

数值模拟方法具有资源消耗少、实验周期短、精确控制变量、可测试极端运行工况等优势,现已广泛应用于锂离子电池放电过程的热行为探究. Yun 等<sup>[4]</sup>以镍钴锰酸锂电池作为研究对象,探究放电过程中温度变化的相关因素,结果表明锂离子电池的放电最大温度及温差与放电倍率呈线性变化关系,产热速率与熵热系数  $dU_0/dT$  存在一定关系. Xu 等<sup>[5]</sup>建立二维电化学-热耦合磷酸铁锂电池模型,在模型正确性得到验证的基础上,探究集流体分布对放电过程温度分布均匀性的影响,结果表明集流体的不同分布形态将会影响内部电势分布,进而决定局部的热量生成,造成温度分布不均匀. Du 等<sup>[6]</sup>探究放电倍率、电极材料颗粒粒径与电化学反应不可逆产热的关系,结果表明:放电倍率增大,不可逆产热占总产热比例下降;颗粒粒径减小,不可逆产热占比进一步下降,且主要受不可逆极化产热的下降影响. Peng 等<sup>[7]</sup>利用热滥用模型对五种阴极材料进行模拟测试,发现  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  材料的热稳定性最高,  $\text{LiPeO}_4$  材料的产热速率最低、安全性最高,并给出了五种材料的热失控临界温度.

目前对于锂离子电池热行为的模拟研究多集中于放电过程<sup>[3-6]</sup>,而由于恒压充电过程的存在,对充电过程中的热行为模拟研究较少,也少有研究者对充放电过程中的热行为进行对比.本文选取额定容量为 4Ah 的 21700 圆柱形锂离子电池作为研究对象,建立该电池的电化学-热耦合模型,并以电池电

压电流和温度曲线为指标,在多个充电倍率下进行模型验证.主要分析电池在充电过程中的热行为,包括温度场分布、温度均匀性分析以及产热机理等,并对比充电过程和放电过程中电池产热和温度的异同.

## 1 模型简介

锂离子电池温度预测模型包括电化学-热耦合模型、电-热耦合模型和热滥用模型<sup>[8]</sup>.一维电化学-三维热耦合模型将电池内部空间化学反应简化为沿厚度方向上的一维反应,不仅可以综合考虑电化学反应的影响,还可节省计算资源,已有大量学者对此模型的精确度做出了验证<sup>[9-10]</sup>.

### 1.1 物理模型

电化学-热耦合模型示意图如图 1(a)所示.电池电芯作为锂离子电池的核心工作单元,可视为若干基本电芯单元的组合.一个基本电芯单元包括正极集流体(铝箔)、正极材料、隔膜、负极材料、负极集流体(铜箔),对应一维电化学模型中的间隔长度  $\delta$ .三维热模型简化为底部直径 21 mm,高 70 mm 的圆柱体,整体由内芯和外壳组成,忽略内部的分层结构.采用非结构四面体网格对计算域进行划分,网格总数 4386,如图 1(b)所示,经网格独立性检验可知,该方案符合计算精度需求.

### 1.2 数学模型

在电化学-热耦合模型中,将正负极材料视为大小一致的多孔球形颗粒,假定全场无化学副反应发生,且仅有固液两项参与反应,无气体产生.对于电化学模型,遵守质量守恒、电荷守恒以及电动力学方程<sup>[11-12]</sup>.对于热模型,遵循能量守恒方程<sup>[13]</sup>:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + Q - Q_d \quad (1)$$

式中,  $Q$ 、 $Q_d$  分别表示电化学反应产热和热耗散项;  $\lambda$  为热导率,对于圆柱形锂离子电池来说,热导率呈各向异性<sup>[14]</sup>,可分为径向热导率  $\lambda_r$  和轴向热导率  $\lambda_a$ ,其计算公式分别为:

$$\lambda_r = \frac{\sum \delta_i}{\sum \delta_i / \lambda_i} \quad (2)$$

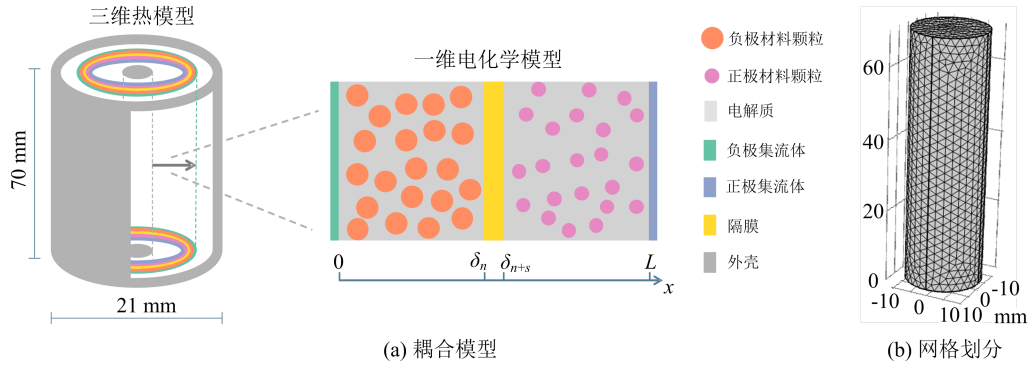


图 1 电化学-热耦合模型及网格划分示意图

Fig. 1 The diagram of the electrochemical-thermal coupling model and mesh

$$\lambda_a = \frac{\sum \delta_i \lambda_i}{\sum \delta_i} \quad (3)$$

对于电化学产热  $Q$ ，可分为不可逆产热  $Q_{irrev}$  和可逆产热  $Q_{rev}$ ，不可逆产热  $Q_{irrev}$  又可分为极化热  $Q_{act}$  和欧姆热  $Q_{ohm}$ ，有

$$Q = Q_{rev} + Q_{irrev} = Q_{rev} + Q_{act} + Q_{ohm} \quad (4)$$

$$Q_{rev} = S_a J_n T \frac{\partial U_0}{\partial T} \quad (5)$$

$$Q_{act} = S_a J_n \eta \quad (6)$$

$$Q_{ohm} = -i_1 \nabla \phi_1 - i_2 \nabla \phi_2 \quad (7)$$

式(5)~(7)分别为可逆产热、极化热、欧姆热的计算表达式。其中  $i$ 、 $\phi$  分别表示电流密度矢量和电位；下标 1、2 用以区分固液两相； $S_a$  表示电极材料比表面积； $J_n$  称电极表面局部电流密度； $\eta$  表示过电位： $\eta = \phi_1 - \phi_2 - U_0$ ，即工作电位差与开路电压  $U_0$  之差； $\partial U_0 / \partial T$  表示开路电压温度系数，也称熵热系数。对于热耗散项  $Q_d$ ，遵循传热定律，即

$$Q_d = hA(T_\infty - T) \quad (8)$$

式中  $h$  表示对流换热系数，本文取  $7.17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ <sup>[15-16]</sup>， $T_\infty$  为环境温度。

### 1.3 模型参数

合理的模型参数可以保证数值模拟的可靠性与正确性，电化学-热耦合模型参数可分为四个类型：①基本参数：电池基础参数，包括额定容量、额定电压、设计尺寸等；②材料物性参数：电池材料的物理参数，包括密度、比热、热导率等；③电化学设计参数：实验测量或经验参数，包括电极材料厚度、锂离子浓度、孔隙率等；④温度-浓度相关参数：与温度、浓度相关的输运性能参数，包括电解质电导率、锂离子的液相扩散系数、正负极开路电压以及熵热系数，它们均是锂离子浓度或电池温度的函数，即随着锂

离子浓度和电池温度的改变也会随之发生变化，是实现电化学-热耦合过程的基础，其公式已被前人文献<sup>[18]</sup>引用，具有较高的准确性。四类模型参数分别由表 1~表 4 给出。

表 1 21700 型锂离子电池基本参数

Tab. 1 The basic parameters of the 21700 type lithium ion battery

21700 型锂离子电池参数	参数值
尺寸(直径×高度)	21mm×70mm
额定容量	4Ah
正极材料	LiNi <sub>1/3</sub> Co <sub>1/3</sub> Mn <sub>1/3</sub> (NCM)
负极材料	石墨

表 2 电池材料物性参数<sup>[17-18]</sup>

Tab. 2 The physical parameters of the electrode materials<sup>[17-18]</sup>

组成	密度 $\rho$ /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	比热 $C_p$ / ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	热导率 $K_T$ / ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
正极集流体	2702	881	238
正极材料	1500	700	1
隔膜	1008.98	1978.16	0.344
负极材料	1347.33	1437.4	1.04
负极集流体	8933	385	398
电解液	1210	1578.16	1.48

## 2 结果分析

### 2.1 模型验证

本文利用 21700 型单体锂离子电池充电过程中在不同倍率下的电压、电流和温度曲线进行模型验证。充电过程分为恒流充电和恒压充电两个过程，以 1C 充电倍率为例，首先以 4A 电流恒流充电，直至

电压达到 4.2V,接着以 4.2V 进行恒压充电,直至 电流变化.实验过程中,利用热电偶记录电池表面的  
电流降到 0.01C (0.04A),视充电完成,并记录电压 温度变化.

表 3 电化学设计参数<sup>[18,20]</sup>Tab. 3 The electrochemical design parameters<sup>[18,20]</sup>

设计参数	正极材料	负极材料	隔膜	设计参数	正极材料	负极材料	隔膜
Li <sup>+</sup> 固相扩散系数 $D_s/(m^2 \cdot s^{-1})$	1.45E-13	2E-13	—	最大锂浓度 $c_{max}/(mol \cdot m^{-3})$	17507	16600	—
Li <sup>+</sup> 液相扩散系数 $D_l/(m^2 \cdot s^{-1})$	—	—	8e-12	最大荷电状态 SOC <sub>max</sub>	0.99	0.975	—
厚度 $\delta_i/\mu m$	30	42	25	最小荷电状态 SOC <sub>min</sub>	0	0	—
体积分数 $\epsilon_s$	0.391	0.383	—	Li <sup>+</sup> 迁移数 $t^+$	—	—	0.363
孔隙率 $\epsilon_l$	0.35	0.444	0.370	电导率 $\sigma/(S \cdot m^{-1})$	100	100	0.344
颗粒半径 $r/\mu m$	1.3	8	—	表面反应传递系数 $\alpha$	0.5	0.5	—
反应速率常数 $k_i/(m \cdot s^{-1})$	5E-12	7E-12	—	法拉第常数 $F/(C \cdot mol^{-1})$	—	96487	—
初始锂浓度 $c_0/(mol \cdot m^{-3})$	14600	3275	1000	理想气体常数 $R/(J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1})$	—	8.3145	—

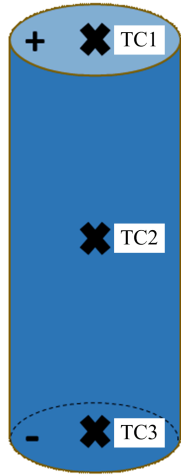
表 4 温度—浓度相关参数<sup>[17,19]</sup>Tab. 4 The temperature-concentration dependent parameters<sup>[17,19]</sup>

参数	方程
电解质电导率 $\sigma_l$	$\sigma_l = 4.1253 \times 10^{-4} + 5.007 \times 10^{-3} c_l - 4.7212 \times 10^{-3} c_l^2 + 1.5094 \times 10^{-3} c_l^3 - 1.6018 \times 10^{-4} c_l^4$
Li <sup>+</sup> 液相扩散系数 $D_l$	$D_l = 10 \exp(-4.43 - (\frac{54}{T - 229 - 0.005 c_2})) - 0.22 \times 0.001 c_2) - 4$
开路电压 $U_0$	$U_0 = U_{0,ref} + \frac{\partial U_{eq}}{\partial T} (T - T_{ref})$ $U_{0,n} = 0.6379 + 0.5416 \exp(-305.5309x) + 0.044 \tanh(-\frac{x - 0.1958}{0.1088}) - 0.1978 \tanh(\frac{x - 1.0571}{0.0854})$ $- 0.6875 \tanh(\frac{x - 0.0117}{0.0529}) - 0.0175 \tanh(\frac{x - 0.5692}{0.0875})$ $U_{0,p} = -10.27y^4 + 23.88y^3 - 16.77y^2 + 2.595y + 4.563$
荷电状态 $x$ (负极), $y$ (正极)	$x, y = \frac{c_s}{c_{s,max}}$ (其中 $c_s$ 为固相锂浓度)
熵热系数 $dU_0/dT$	$\frac{dU_{0,n}}{dT} = -1.25571 \times 10^{-4} + 4.66239 \times 10^{-5} / (\sqrt{2\pi} \times 0.98567x) \times \exp(-(\ln(\frac{x}{0.08017}))^2 / (2 \times 0.98567^2))$ $\frac{dU_{0,p}}{dT} = -0.64816 + 4.34612y - 8.05595y^2 + 4.44722y^3$

分别在电池正极、负极和表面 1/2 处放置三个热电偶进行测温,热电偶布置位置示意图见图 2,实验结束后取平均值与模拟中该三个位置处的温度平均值进行对比.图 3(a)、(b)、(c)分别为实验和模拟在 1C、1.5C、2C 三个充电倍率下的电压、电流和平均温度随时间的变化曲线,可以看出模拟结果与实

验结果吻合良好,证明了本文电化学—热耦合模型的可靠性.值得说明的是,模拟过程中三个倍率下初始温度设置相同,以方便后续对比不同倍率下电池的热行为,而实验过程中由于环境条件及热电偶布置等因素的限制,三个倍率下电池初始温度并不完全一致,这导致在 1.5C 倍率恒流充电过程中实验

温度较模拟数据偏高,但是在恒压阶段温度降低过程中曲线依然吻合良好,因此认为该误差可忽略不计,模型的准确性和可靠性依然适用。



TC1~TC3 分别为电池正极、中心部位以及负极处热电偶测点

图 2 实验热电偶布置位置示意图

Fig. 2 The schematic diagram of the thermocouple location

## 2.2 充电过程中电池热行为分析

### 2.2.1 温度分布

图 4 为 1C、1.5C、2C 三个充电倍率下,电池轴向截面 ( $x = 0$  截面) 位置的温度分布随荷电状态 (SOC) 变化云图,从中可以看出,对于同一 SOC,随着充电倍率的增大,电池内部整体温度呈现先增大后减小的变化规律,温度的升高对应恒流充电过程,而恒压充电过程由于电流的减小导致温度的降低。另外,在充电过程中,电池呈现中心温度高、沿径向和轴向逐渐降低趋势。图 5 为 50% SOC 下温差  $\Delta T$  沿轴向和径向的变化曲线,与轴向相比,径向温度梯度更大,这与径向、轴向热导率(分别见式(2)和式(3))的差别较大有关<sup>[21-22]</sup>。

由图 5 可知,随着充电倍率的增大,轴向及径向温差呈递增趋势,且径向递增更为明显。图 6 给出了充电过程中电池整体温差的变化曲线,可以看出倍率越大,温差越大,电池内部温度分布越不均匀。我们可以预测在更高倍率下,电池温度分布不均匀性将增大,会导致电池内部活性材料利用率不均匀,局部活性区域容易出现过充或过放,造成锂枝晶生成,内部短路或电解液分解,最终导致电池性能衰减和循环寿命的下降,因此,高倍率下充电过程中的电池热管理问题值得关注。另一方面,充电过程可分为恒流充电和恒压充电两个过程,各倍率下恒流充电过

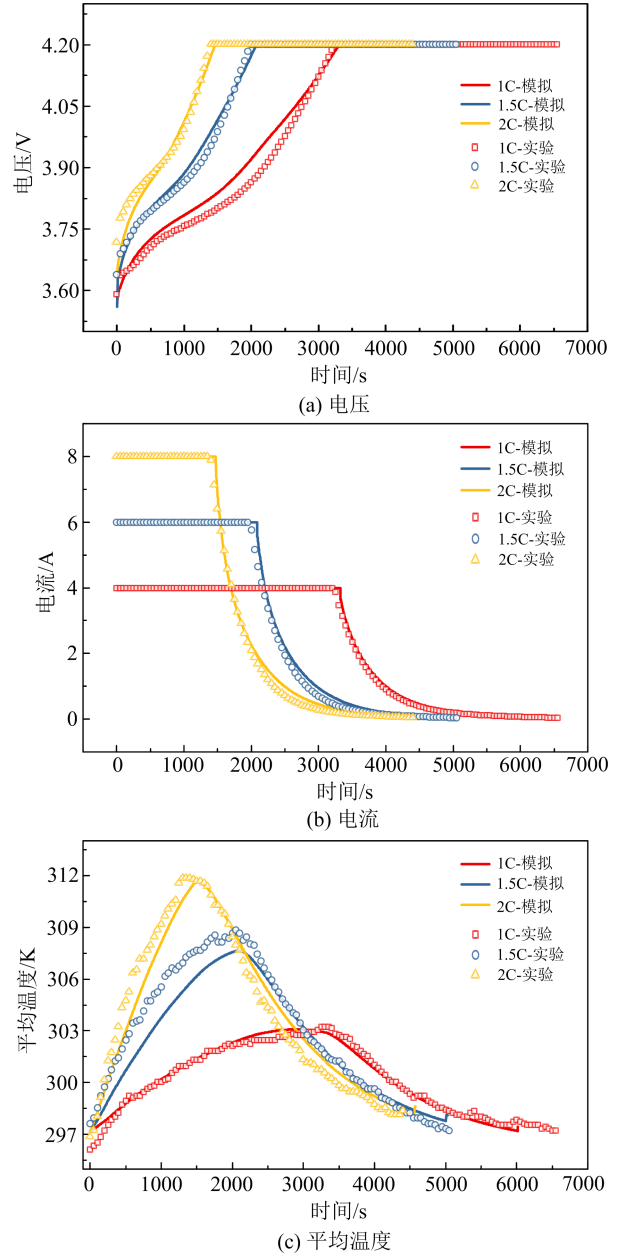


图 3 1C、1.5C、2C 三个充电倍率下模拟与实验的电压电流和平均温度随时间变化曲线对比

Fig. 3 The comparison of the voltage, current and temperature at three charge rate with 1C, 1.5C and 2C between simulation and experiment

程截止 SOC 分别为 1C 倍率:87.4%;1.5C 倍率:82.0%;2C 倍率:76.9%。因此,由图 6 可知,温差的增大主要体现于恒流充电过程,恒压充电过程温差逐渐减小,并最终趋于一致,这是恒压过程中电流逐渐减小所致。

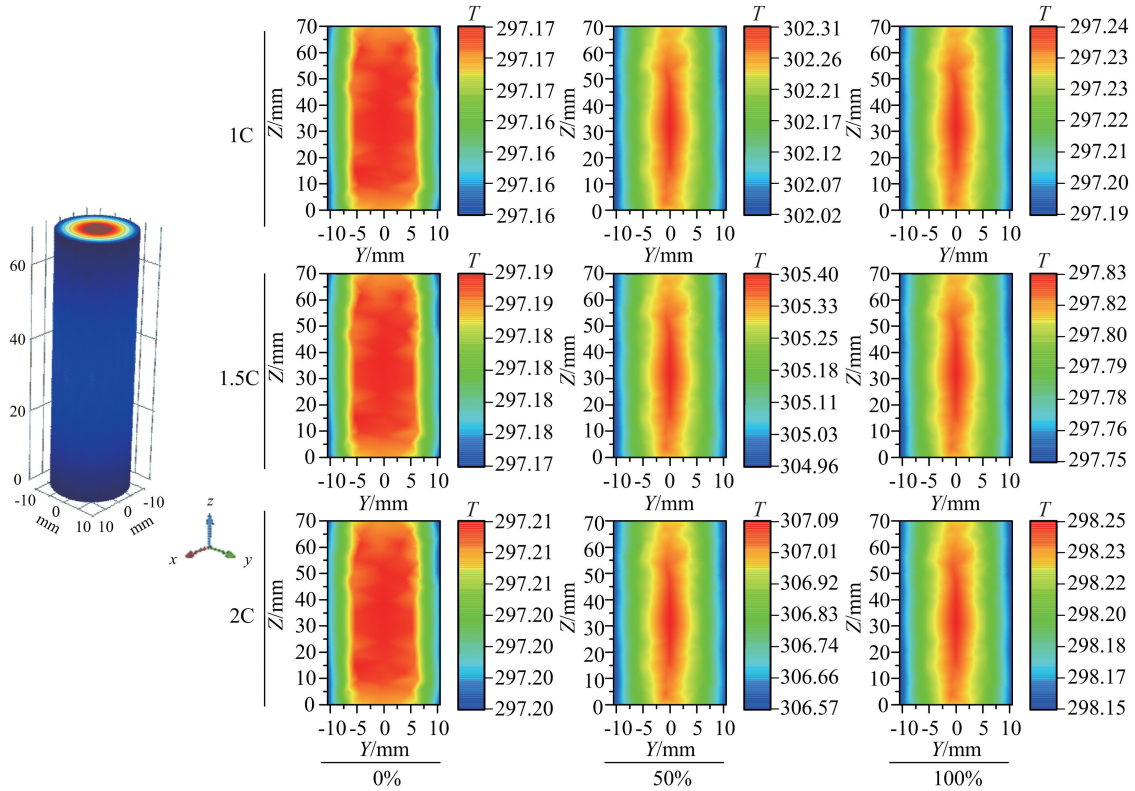


图 4 1C、1.5C、2C 倍率下 YZ 截面温度云图随 SOC 变化 (0%、50%、100%) 示意

Fig. 4 The temperature distribution of the YZ cross section varies with the state of charge (SOC) at three rates of 1C, 1.5C and 2C

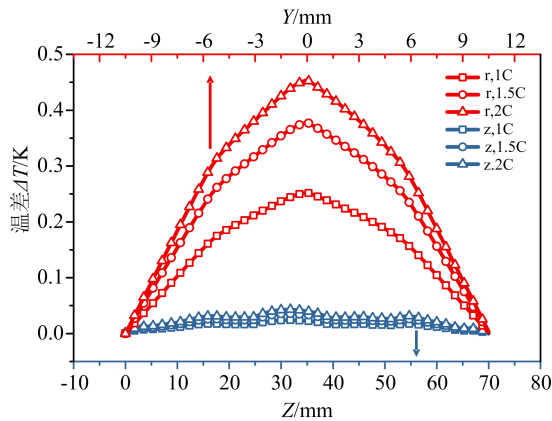


图 5 轴向 ( $x=0, y=0, z$ ) 及径向 ( $z=35\text{mm}, r$ ) 温差分布

Fig. 5 The temperature difference of the  $z$  direction ( $x=0, y=0, z$ ) and radial direction ( $z=35\text{mm}, r$ )

### 2.2.2 产热机理分析

对于充电过程, 温度变化和均匀性与充电倍率具有很大的相关性, 其内在关系需要通过产热机理做进一步的探究. 根据图 3(c) 可知, 在同一充电倍率下, 电池平均温度呈先上升、后下降的变化趋势, 并由式(4)可知, 充放电过程中的电池产热主要

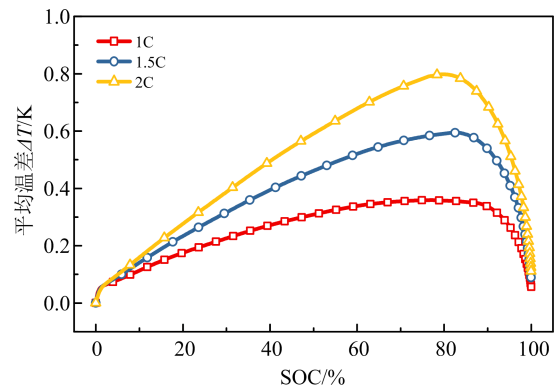


图 6 充电过程中三个充电倍率 (1C, 1.5C 和 2C) 下温差随 SOC 变化曲线

Fig. 6 The temperature difference profiles vary with SOC during the charge process at three charge rates with 1C, 1.5C and 2C

由可逆热和不可逆热组成. 图 7 给出了三个倍率下的总产热  $Q_{\text{all}}$ 、可逆热  $Q_{\text{rev}}$  以及不可逆热  $Q_{\text{irrev}}$  的对比曲线, 可以发现, 三个倍率下的产热曲线均呈相同规律. 恒流充电阶段, 可逆热整体呈先增大后减小的变化趋势, 可逆热出现的三个小峰值是由于电极

材料的放热,而在SOC>80%时,可逆热为负值,即吸热过程;不可逆热先减小后增大,但整体变化较为平缓,在三个倍率下,不可逆热占比均大于可逆热;在二者的共同作用下,总产热曲线呈“峰状”形式,峰值点对应恒流充电截止时间,因此平均温度随时间呈斜抛曲线式上升,见图7.恒压充电阶段:可逆

热、不可逆热和总产热均快速降低而后趋于平稳,这是由于恒压充电过程中电流的降低,与图3(b)中电流变化趋势一致,可以看出恒压充电过程产热明显小于恒流充电过程,这也是充电后期温度降低的主要原因.

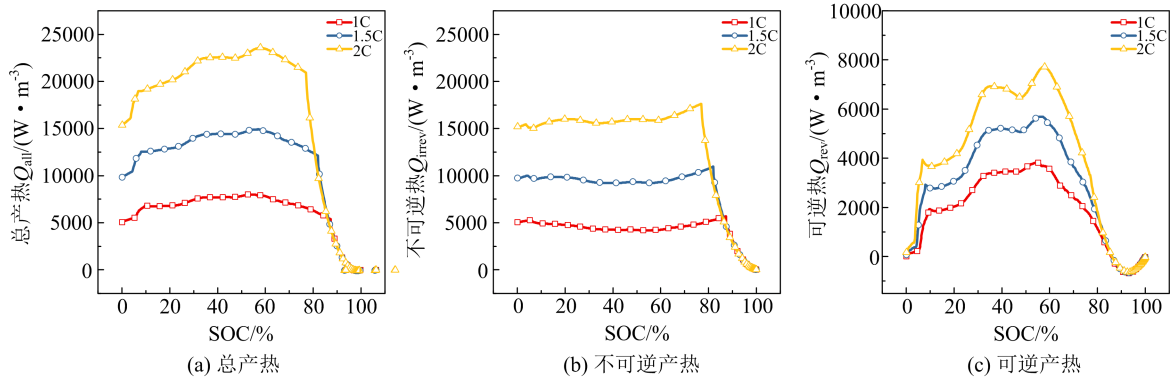


图7 1C、1.5C、2C倍率下充电过程中的产热对比

Fig. 7 The heat generation comparison of the three charge rates with 1C, 1.5C and 2C

另一方面,随着倍率的增大,对于恒流充电过程,不可逆热、可逆热以及总产热的峰值和产热总量均进一步增大,很好地解释了平均温度及温差随倍率增大而增大的原因.而对于恒压过程,三者差别不大,温度曲线表现出相同的递减规律,更充分说明了与恒压过程相比,恒流过程的产热更大,电池温升更大.

### 2.3 充放电过程比较

由节2.2可知,充电过程中电池温度上升主要与恒流充电过程有关,对比充电过程和放电过程可以更好地发现充放电过程温度变化特点.图8给出了充放电过程不同倍率下电池的平均温度对比,图9为两个过程总产热的对比曲线.由图8和图9可知,对于放电过程,三个倍率下的温度均呈不断上升趋势,总产热先减小后上升,使得温度曲线存在一段平缓上升期.随着倍率的增大,这种平缓段愈发不明显,在2C倍率放电后期,总产热存在一段快速上升期,导致温度上升速率进一步增大.可以预测,当倍率进一步增大时,产热累积效果将会引发电池内部温度飙升,从而产生安全隐患,因此,高倍率下的锂离子电池放电过程同样需要得到进一步的关注.

对比充放电过程的温度曲线可知,在较低倍率下,充电过程中电池平均温度峰值高于放电过程:1C倍率下,充电过程平均最高温度为303.1K,放电过程为301.4K;1.5C倍率下,充电过程平均最

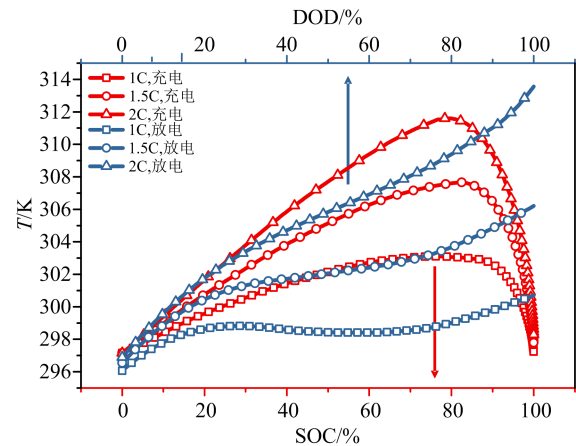


图8 1C、1.5C、2C倍率下充放电电池平均温度对比

Fig. 8 The average temperature comparison between the charge and discharge process at the rates of 1C, 1.5C and 2C

高温为307.7K,放电过程为306.6K;而在高倍率2C下,充电过程平均最高温度为311.6K,放电过程为313.6K,放电过程温度峰值高于充电过程.另外,在相同倍率下,恒流充电过程的温升速率均大于放电过程,且根据图9,虽然在恒流充电初始阶段总产热略低于恒流放电过程,但是随着充放电的进行,恒流充电过程下的总产热升高明显,而恒流放电过程中的产热有所降低,这是可逆热和不可逆热综合作用的结果,因此认为恒流充电过程中的产热要高于放电过程,所以电池温度和温升也高于放电过

程,然而由于后期恒压充电过程的存在,导致产热和温度均降低.因此,与放电过程相比,充电过程,尤其是恒流充电过程,呈现出时间短、产热大、温度上升速度快的特点,应当进行有效的温度控制以确保充电过程的稳定与安全.

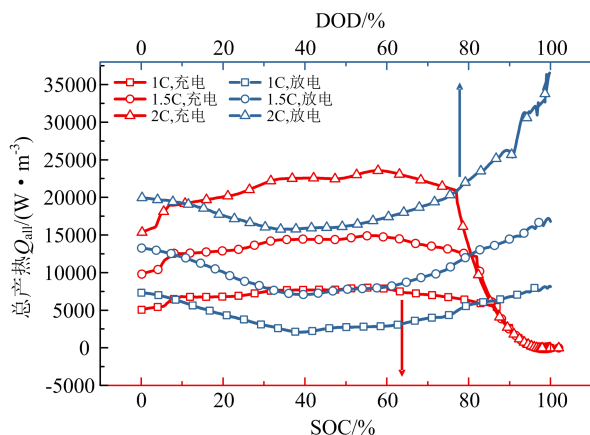


图 9 1C、1.5C、2C 倍率下充放电总产热对比

Fig. 9 The total heat generation comparison between the charge and discharge process at the rates of 1C, 1.5C and 2C

### 3 结论

本文对 21700 型锂离子电池建立了电化学-热耦合模型,研究电池在充放电过程中的热行为,通过实验验证了模型的精确度.首先分析了电池充电过程中的热行为,包括温度场分布、温度均匀性以及产热机理等,随后对比了充电过程和放电过程中电池产热和温度的异同,研究结论如下:

(I) 锂离子电池充放电过程中,中心温度较高,并沿径向和轴向逐渐降低,且径向温度梯度较大.随着充电倍率的提高,内部径向温差以及整体平均温差均进一步增大,内部温度分布更加不均匀.

(II) 充电过程平均温度呈先上升后下降的趋势:上升过程的主要原因在于恒流充电过程中产热的增大,且倍率越大,温度峰值以及上升速率越大;下降过程对应恒压充电过程,倍率对产热的影响较小,温度呈现出相同的递减规律.

(III) 与放电过程相比,恒流充电过程的产热和温度高于恒流放电过程,尤其在低倍率下,充电过程具有更高的平均温度峰值和更大的产热,其主要受恒流充电过程的影响,具有温度提升时间短、上升速度快、产热大的特点.

### 参考文献 (References)

- [1] BRESSER D, HOSOI K, HOWELL D, et al. Perspectives of automotive battery R&D in China, Germany, Japan, and the USA[J]. *J. Power Sources*, 2018, 382: 176-178.
- [2] 程涛,王欣媛,王向阳,等. 轻质、高稳定石墨纸锂离子电池负极集流体[J]. *中国科学技术大学学报*, 2017, 47(12): 971-977.  
CHENG Tao, WANG Xinyuan, WANG Xiangyang, et al. Light weight and highly stable graphite paper as anode current collectors for lithium ion batteries[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2017, 47(12): 971-977.
- [3] WANG Q, PING P, ZHAO X, et al. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery[J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 208: 210-224.
- [4] YUN F L, TANG L, LI W C, et al. Thermal behavior analysis of a pouch type Li[Ni<sub>0.7</sub>Co<sub>0.15</sub>Mn<sub>0.15</sub>]O<sub>2</sub>-based lithium-ion battery[J]. *Rare Metals*, 2016, 35(4): 309-319.
- [5] XU M, ZHANG Z, WANG X, et al. Two-dimensional electrochemical-thermal coupled modeling of cylindrical LiFePO<sub>4</sub> batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 256: 233-243.
- [6] DU S, LAI Y, AI L, et al. An investigation of irreversible heat generation in lithium ion batteries based on a thermo-electrochemical coupling method [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 121: 501-510.
- [7] PENG P, JIANG F. Thermal safety of lithium-ion batteries with various cathode materials: A numerical study[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 103: 1008-1016.
- [8] 李腾,林成涛,陈全世. 锂离子电池热模型研究进展[J]. *电源技术*, 2009, 33(10): 927-932.  
LI Teng, LIN Chengtao, CHEN Quanshi. Research development on lithium-ion battery thermal model[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2009, 33(10): 927-932.
- [9] AL-HALLAJ S, SELMAN J R. Thermal modeling of secondary lithium batteries for electric vehicle/hybrid electric vehicle applications [J]. *Journal of Power Sources*, 2002, 110(2): 341-348.
- [10] ONDA K, OHSHIMA T, NAKAYAMA M, et al.



- Thermal behavior of small lithium-ion battery during rapid charge and discharge cycles[J]. *Journal of Power sources*, 2006, 158(1): 535-542.
- [11] DOYLE M, NEWMAN J, GOZDZ A S, et al. Comparison of modeling predictions with experimental data from plastic lithium ion cells[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1996, 143(6): 1890-1903.
- [12] DOYLE M, FULLER T F, NEWMAN J. Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium/polymer/insertion cell [ J ]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1993, 140(6): 1526-1533.
- [13] GU W B, WANG C Y. Thermal-electrochemical modeling of battery systems [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2000, 147(8): 2910-2922.
- [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] KIM G H, PESARAN A, SPOTNITZ R. A three-dimensional thermal abuse model for lithium-ion cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 170 (2): 476-489.
- [16] LAI Y, DU S, AI L, et al. Insight into heat generation of lithium ion batteries based on the electrochemical-thermal model at high discharge rates [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(38): 13039-13049.
- [17] DONG T, PENG P, JIANG F. Numerical modeling and analysis of the thermal behavior of NCM lithium-ion batteries subjected to very high C-rate discharge/charge operations [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 117: 261-272.
- [18] MEI W, CHEN H, SUN J, et al. Numerical study on tab dimension optimization of lithium-ion battery from the thermal safety perspective [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 142: 148-165.
- [19] MEI W, CHEN H, SUN J, et al. The effect of electrode design parameters on battery performance and optimization of electrode thickness based on the electrochemical-thermal coupling model [ J ]. *Sustainable Energy & Fuels*, 2019, 3: 148-165.
- [20] EDDAHECH A, BRIAT O, VINASSA J M. Thermal characterization of a high-power lithium-ion battery: Potentiometric and calorimetric measurement of entropy changes[J]. *Energy*, 2013, 61: 432-439.
- [21] WU M S, WANG Y Y, WAN C C. Thermal behaviour of nickel/metal hydride batteries during charge and discharge[J]. *Journal of Power Sources*, 1998, 74(2): 202-210.
- [22] CHEN Y, EVANS J W. Thermal analysis of lithium polymer electrolyte batteries by a two dimensional model-thermal behaviour and design optimization[J]. *Electrochimica Acta*, 1994, 39(4): 517-526.