DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.4.265 **中图分类号**：TM911 **文献标志码**：A

基于电化学–热耦合的锂电池热效应分析

王春生(中国电源学会会员)，孙含笑(中国电源学会学生会员)，薛晨博
(燕山大学车辆与能源学院，秦皇岛 066004)

摘要：为了研究电池在充电过程中内部的热效应，以27 A·h锂离子电池为研究对象，建立了单体电池的三维电化学-热耦合模型，并采用坐标阵列映射的方法将电芯单元的热效应扩展到单体电池。首先考察了充电倍率对电池产热的影响规律；然后研究了不同颗粒半径下，负极活性层中的详细产热情况，分析了颗粒尺寸对发热量的影响机制；此外还研究了自然对流下，不同充电倍率的电池温度分布情况。通过阐述锂离子电池的发热机理，给出了电池整体温度分布特性，为优化电池结构设计，开发电池热管理系统提供了理论基础。

关键词：锂离子电池；电化学-热耦合；热效应

Analysis of Thermal Effect of Lithium Battery Based on Electrochemical-thermal Coupling

WANG Chunsheng, *Member*, *CPSS*, SUN Hanxiao, *Student Member*, *CPSS*, XUE Chenbo
(School of Vehicle and Energy, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: To clarify the internal thermal effect of a battery during its charging process, a lithium-ion battery of 27 A·h was taken as the research object. A three-dimensional electrochemical-thermal coupling model of one single battery was established, and the coordinate array mapping method was used to expand the thermal effect of the cell unit to that of the single battery. First, the influence of charging rate on the heat production of the battery was investigated. Then, the detailed heat production in the active layer of negative electrode with different particle radiuses was studied, and the mechanism of influence of particle size on the heat production was analyzed. In addition, the battery temperature distribution with different charging rates under natural convection was also studied. The heating mechanism of lithium-ion battery was elaborated upon, and the overall temperature distribution characteristics of the battery was given, providing a theoretical basis for optimizing the battery structure design and developing the battery thermal management system.

Keywords: Lithium-ion battery; electrochemical-thermal coupling; thermal effect

近年来，能源短缺和环境污染逐渐成为世界各国面临的重大问题，在此背景下新能源汽车将成为未来汽车的发展方向[1]。电动汽车主要采用锂离子电池作为动力源，因此锂离子电池的效率、循环寿命和安全性受到了人们广泛的关注。由于锂离子电池在工作过程中会产生大量的热量，当电池温度过高时，会加速电池的老化、加剧内部副反应，甚至可能导致热失控从而造成严重的安全问题[2]，因此，研究锂离子电池的热效应及散热方案具有重要意义。

目前，由 Fuller 和 Doyle 等提出的伪二维 P2D (pseudo two-dimensional)模型已被广泛应用于电池的电化学分析[3-4]，研究者们在此基础上开发了许多电化学-热耦合模型。Panchal 等[5]改进了电池产热方程，从而将产热方程耦合到热模型中，预测了18650圆柱形锂离子电池在不同放电倍率下的瞬态温度分布；Saw 等[6]通过将一维电化学模型耦合集总热模型，考察了锂离子电池的温度和发热率与充放电倍率之间的正相关性；Gu 等[7]提出了 1 种电化学热模型，建立热量产生和温度相关的化学参数

收稿日期：2022-05-31；**修回日期**：2022-08-08；**录用日期**：2022-08-15；**网络首发日期**：2022-09-07

之间的关系，然后将电化学方程与热能方程耦合起来，可以预测电池的平均温度和电池内部的温度分布；李夔宁等[8]基于一维电化学-热耦合模型研究了不同放电倍率下锂离子电池的产热速率，指出热效应会影响其温度和电化学性能，并极大地影响电池的安全性和使用寿命；田华等[9]建立了一维电化学-热耦合模型，分析了不同放电倍率下单体电池的放电特性及电池包的平均温升、单体电池内部生热机理及变化特性；Nie 等[10]提出了 1 种二维电化学-热耦合方法，对 3 种不同几何尺寸的电池(14650、18650 和 26650)进行了仿真，结果表明电池在放电过程中温度急剧上升，放电结束时温度达到峰值，放电倍率越高，电池尺寸越大，电池的温度就越高；Xu 等[11]建立了 $LiFePO_4$ 电池的二维电化学热模型，分析了不同放电倍率下电池的温度场和发热率。

以上研究多是基于一维、二维电化学模型来研究锂离子电池的电化学和热特性，无法揭示锂离子电池内部的空间分布特性。张立军等[12]建立了 1 个三维电化学-热耦合模型，但模型耦合过程中是将电化学模型的平均产热速率赋予到热模型中，这样便将电池视为 1 个均匀产热体，并不能真实反应电池空间上的热特性，并且热模型传递给电化学模型的平均温度并不能真实反映电池中心温度高、四周温度低的特点；Ghalkhani 等[13]开发了 1 个三维电化学-热耦合模型，对软包电池的所有电芯单元进行了建模，但由于电池中电芯单元数量较多，计算成本显著增加。因此，有必要开发一种快速的电化学-热耦合方法，以缩短计算时间并获得合理的结果。且现有研究主要集中在电池放电过程，缺少对于充电过程的产热情况的分析。

本文首先提出 1 种根据坐标阵列映射的电化学-热耦合方法，此耦合方法可以在热模型中较为真实、全面地展现电池的三维热分布，且极大缩减了计算成本。然后基于该耦合模型，对锂离子电池在不同充电倍率下，电池各部分的产热及电池整体温度进行了研究分析。

1 模型构建

本文选用的锂电池使用 $Li[Ni_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}]O_2$ 作为正极，石墨作为负极，$LiPF_6$/EC:MC=2:1 作为电解液。锂离子电池的标称容量为 27 A·h，长度 195 mm，宽度 145 mm，厚度 11 mm。

图 1 为锂离子电池的计算模型，电化学模型由 1/2 负极集流体、负极、隔膜、正极、正极集流体、正极、隔膜、负极、1/2 负极集流体组成，热模型由电芯单元、外体钢壳、正负极构成。在耦合过程中，将电化学模型中的电化学反应和传质过程中产生的热量，根据几何坐标，阵列映射到三维热模型中，在热模型中对应复原电池的产热情况。将热模型导出的多层电芯温度在厚度方向上取平均，得出的三维温度传递作为电化学模型的反应条件，从而将电化学模型和热模型很好地耦合在一起。本仿真模拟基于 P2D 模型理论，借助 COMSOL Multiphysics 软件的锂电池仿真模块实现，耦合过程中所

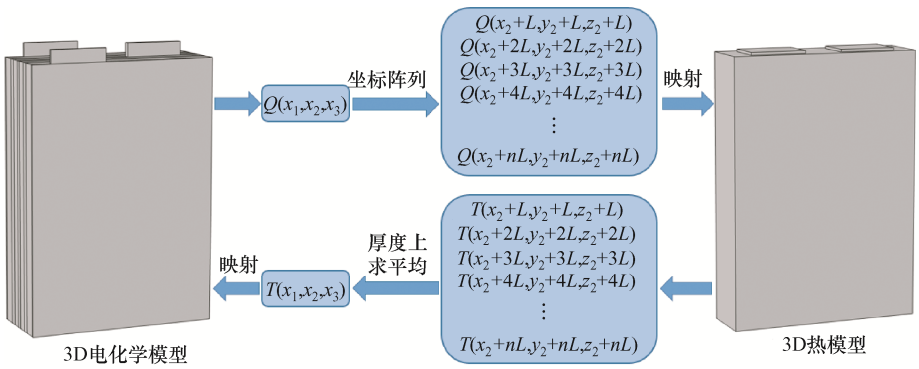


图 1 电化学模型与热模型的耦合关系

Fig. 1 Coupling relationship between electrochemical and thermal models

用到的坐标映射采用广义拉伸功能实现。

1.1 电化学模型

1.1.1 质量守恒控制方程

在固相中，锂离子在电极活性材料颗粒插层中的质量守恒一般由 Fick 第二扩散定律来描述；在液相中，电解质的锂离子扩散与迁移过程可由 Fick 第二扩散定律和浓溶液理论共同来描述[14]，即

$$\frac{\partial c_{\mathrm{s}}}{\partial t}=\frac{D_{\mathrm{s}}}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial c_{\mathrm{s}}}{\partial r}\right) \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\varepsilon_{\mathrm{e}}c_{\mathrm{e}})}{\partial t}=\nabla(D_{\mathrm{e}}^{\mathrm{eff}}\nabla c_{\mathrm{e}})+\frac{S_{\mathrm{a}}j_{\mathrm{loc}}}{F}(1-t_{+}) \tag{2}$$

$$D_{\mathrm{e}}^{\mathrm{eff}}=D_{\mathrm{e}}\varepsilon_{\mathrm{e}}^{\gamma_{\mathrm{e}}} \tag{3}$$

式中：c_{s} 和 c_{e} 分别为固相和电解质中的锂离子浓度；D_{s} 和 D_{e} 分别为锂离子在固相和电解质中的扩散系数；r 为空间坐标；$D_{\mathrm{e}}^{\mathrm{eff}}$ 为电解质中的有效扩散系数；ε_{e} 为电解质的体积分数；S_{a} 为比表面积；j_{loc} 为电极/电解质界面的局部电流密度；F 为法拉第常数；t_{+} 为锂离子在电解质中的迁移数；γ_{e} 为电解质的布鲁格曼系数。

1.1.2 电荷守恒控制方程

固相中电子传输的电荷守恒方程和电解质中锂离子传递的电荷平衡方程均由欧姆定律描述[15]，即

$$i_{\mathrm{s}}=-\sigma_{\mathrm{s}}^{\mathrm{eff}}\nabla\varphi_{\mathrm{s}} \tag{4}$$

$$\sigma_{\mathrm{s}}^{\mathrm{eff}}=\sigma_{\mathrm{s}}\varepsilon_{\mathrm{s}}^{\gamma_{\mathrm{s}}} \tag{5}$$

$$i_{\mathrm{e}}=-\sigma_{\mathrm{e}}^{\mathrm{eff}}\nabla c_{\mathrm{e}}+\frac{2RT\sigma_{\mathrm{e}}^{\mathrm{eff}}}{F}(1-t_{+})\cdot\left(1+\frac{\mathrm{d}(\ln f)}{\mathrm{d}(\ln c_{\mathrm{e}})}\right)\nabla(\ln c_{\mathrm{e}}) \tag{6}$$

$$\sigma_{\mathrm{e}}^{\mathrm{eff}}=\sigma_{\mathrm{e}}\varepsilon_{\mathrm{e}}^{\gamma_{\mathrm{e}}} \tag{7}$$

式中：i_{s} 和 i_{e} 分别为固相和电解质中的锂离子电流密度；φ_{s} 和 φ_{e} 分别为固相和电解质中的电势；σ_{s} 和 σ_{e} 分别为固相和电解质中的导电率；$\sigma_{\mathrm{s}}^{\mathrm{eff}}$ 和 $\sigma_{\mathrm{e}}^{\mathrm{eff}}$ 分别为固相和电解质中的有效导电率；ε_{s} 为电极体积分数；γ_{s} 为固相的布鲁格曼系数；R 为通用气体常数；T 为电池温度；f 为电解质的分子活度系数。

1.1.3 电极动力学控制方程

在电化学反应过程中，电极表面的局部电流密度 j_{loc} 由 Butler-Volmer 方程给出[16]，即

$$j_{\mathrm{loc}}=i_0\left\{\mathrm{e}^{\left[\frac{\alpha_{\mathrm{a}}\eta F}{RT}\right]}-\mathrm{e}^{\left[\frac{-\alpha_{\mathrm{c}}\eta F}{RT}\right]}\right\} \tag{8}$$

$$i_0=Fk_0(c_{\mathrm{e}})^{\alpha_{\mathrm{a}}}(c_{\mathrm{s,max}}-c_{\mathrm{s,surf}})^{\alpha_{\mathrm{a}}}(c_{\mathrm{s,surf}})^{\alpha_{\mathrm{c}}} \tag{9}$$

式中：i_0 为参考交换电流密度；k_0 为反应速率常数；α_{a} 和 α_{c} 分别为阳极和阴极的电荷转移系数；$c_{\mathrm{s,max}}$ 和 $c_{\mathrm{s,surf}}$ 分别为固相中锂的最大浓度和表面浓度；η 为局部过电位。

随着充放电过程中的温度变化，电化学参数中固相扩散系数、液相扩散系数、液相电导率和反应速率常数的变化是非常显著的，这些电化学参数随温度的变化情况[17]可分别表示为

$$D_{\mathrm{s,p}}=10^{-14}\times\mathrm{e}^{\left[-\frac{30\,000}{8.314}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_{\mathrm{ref}}}\right)\right]} \tag{10}$$

$$D_{\mathrm{s,n}}=1.452\,3\times10^{-13}\times\mathrm{e}^{\left[-\frac{20\,000}{8.314}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_{\mathrm{ref}}}\right)\right]} \tag{11}$$

$$D_{\mathrm{e}}=10^{\left(-4.43-\frac{54.0}{T-229.0-0.005c_{\mathrm{e}}}-0.22\times0.001c_{\mathrm{e}}\right)-4} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{\mathrm{e}}=1.254\,4c_{\mathrm{e}}\times10^{-4}\times(&-8.248\,8+0.053\,248T-\\&2.987\,1\times10^{-5}T^2+0.262\,35c_{\mathrm{e}}T^2+\\&0.220\,02c_{\mathrm{e}}{}^2-1.765\times10^{-4}c_{\mathrm{e}}{}^2T)^2\end{aligned} \tag{13}$$

本文中的电化学参数来源于 COMSOL 案例库中已录入的数据，并结合参考文献[18-20]进行适当调整得到，部分电化学参数见表 1。

1.2 热模型

锂离子电池的能量守恒方程[21]可以表示为

$$\rho C_{\mathrm{p}}\frac{\partial T}{\partial t}-\nabla\cdot\nabla(\lambda T)=\dot{q}_{\mathrm{re}}+\dot{q}_{\mathrm{act}}+\dot{q}_{\mathrm{ohm}} \tag{14}$$

$$\dot{q}_{\mathrm{re}}=S_{\mathrm{a}}j_{\mathrm{loc}}T\frac{\partial U_{\mathrm{oc}}}{\partial T} \tag{15}$$

$$\dot{q}_{\mathrm{act}}=S_{\mathrm{a}}j_{\mathrm{loc}}\eta \tag{16}$$

$$\dot{q}_{\mathrm{ohm}}=-i_{\mathrm{s}}\cdot\frac{\partial\varphi_{\mathrm{s}}}{\partial x}-i_{\mathrm{e}}\cdot\frac{\partial\varphi_{\mathrm{e}}}{\partial x} \tag{17}$$

式中：ρ 为密度；C_{p} 为恒压热容；λ 为导热系数；$\dot{q}_{\mathrm{re}}$、$\dot{q}_{\mathrm{act}}$ 和 $\dot{q}_{\mathrm{ohm}}$ 分别为电池产生的电化学反应热、极化热和欧姆热，其中 $\dot{q}_{\mathrm{re}}$ 是可逆的，$\dot{q}_{\mathrm{act}}$ 和 $\dot{q}_{\mathrm{ohm}}$ 是不可逆的。

电池采取自然散热的方式冷却，在不考虑电池热辐射的情况下，基于牛顿冷却定律的热模型的边界条件表示为

$$-\lambda\left(\frac{\partial}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial z}\right)T=h(T-T_{\text{amb}}) \tag{18}$$

式中：h 为传热系数；T_{amb} 为环境温度。

表 1 电化学参数

Tab. 1 Electrochemical parameters

参数	正极集流体	正极	隔膜	负极	负极集流体
L_{i}/μm	24	40	30	55	20
r_{p}/μm	—	0.25	—	2.5	—
ε_{s}	—	0.42	—	0.384	—
ε_{e}	—	0.41	0.37	0.444	—
$c_{\text{s,max}}/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-3})$	—	48 000	—	31 507	—
$c_0/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-3})$	—	48 000×0.987	—	31 507×0.015	—
$C_{\text{SO,max}}$	—	1	—	0.98	—
$C_{\text{SO, min}}$	—	0.25	—	0	—
α_{a}	—	0.5	—	0.5	—
α_{c}	—	0.5	—	0.5	—
γ	—	—	3.15	2.98	—
$\sigma_{\text{s}}/(\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	3.774×10^7	91	—	100	5.998×10^7
$\sigma_{\text{e}}/(\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	—	—	式(23)	—	
$D_{\text{s}}/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	—	式(20)	—	式(21)	—
$D_{\text{e}}/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	—	—	式(22)	—	—
t_+	—	—	0.363	—	—
$F/(\text{C}\cdot\text{mol}^{-1})$	—	—	96 485	—	—
T_{ref}/K	—	—	293.15	—	—

2 结果分析

2.1 恒流充电下产热分析

锂离子电池在充电过程中产生的热量包括电化学反应热、活性极化热和欧姆热，本文以 1C 充电倍率为例，分析电池各部分产热随充电时间的变化情况，图 2 给出了电极活性层、隔膜和集流体处产热率的变化情况。可以看出，无论是负极活性层还是正极活性层，电化学反应热的变化均较为剧烈，欧姆热和活性极化热则较为稳定，此时，总产热速率主要受负极活性层和正极活性层的电化学反应热影响，呈“S”型变化规律，类似于电极熵变系数随电极荷电状态 SOC(state of charge)的变化曲线。在充电过程中，负极活性层的 SOC 随充电时间增大，正极活性层的 SOC 随充电时间减小，根据式(15)可知，电极的熵变系数为正，局部电流密度为负，所以在充电初期，电化学反应热为吸热，随后负极活性层的电化学反应热迅速上升，转换成放热的形式。同理，正极活性层的电化学反应热在充电初期保持吸热状态，在充电末期才转换至放热的形式。在整个充电过程中，负极活性层和正极活性层的活性极化热始终为放热形式，负极活性层在充电过程初期活性极化热较高，随后急剧下降保持稳定，这是因为活性极化热受局部过电位的影响，在充电初期负极活性层的局部过电位变化较大。对各部分总产热速率进行分析得知，负极活性层和隔膜的产热占比较大，在充电 1 800 s 时，负极活性层产热率最高达到 23 kW/m^3，而隔膜产热率在充电初期急剧上升后，保持在 15 kW/m^3 左右，由此可见在充电情况下，电池产热主要受负极活性层和隔膜的影响。集流体的产热较小可以忽略。

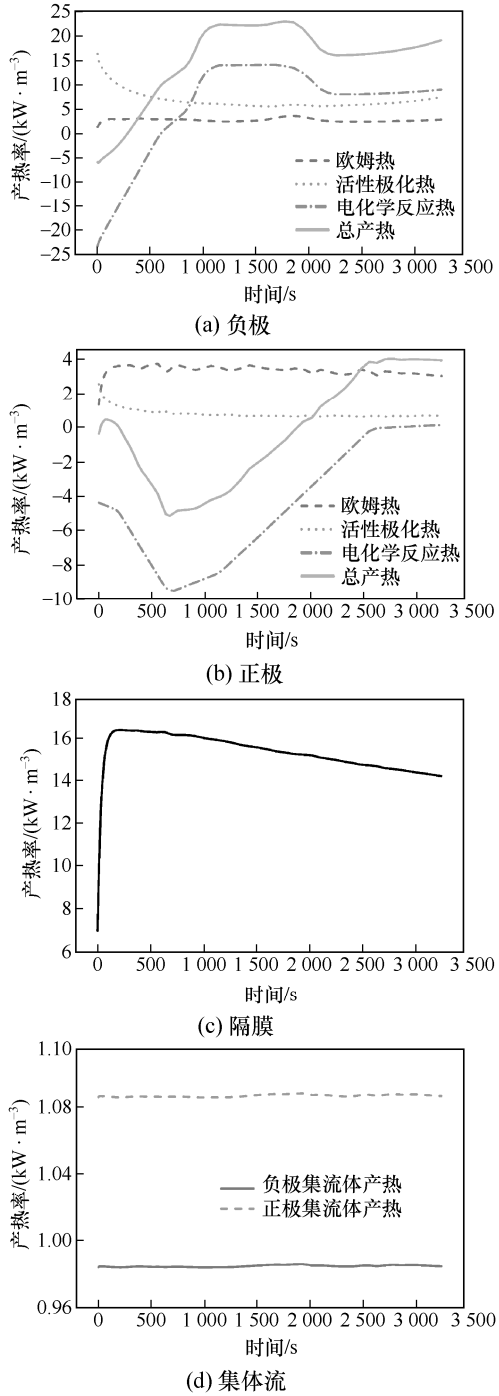


图 2　在 1C 恒流充电过程中产热速率与时间的关系

Fig. 2 Relationship between heat generation rate and time during 1C constant-current charging process

图 3 为恒流充电过程中，电池各部分的产热贡献比。可以看出，电池的主要热源产生于负极活性层和隔膜。在 1C 恒流充电过程中，负极活性层和隔膜的产热占整体产热的 98.1%，而此时正极活性层的产热贡献比仅为 0.3%，这是因为正极活性层在充电初期都是以吸热的形式存在，随着充电过程逐渐转换为放热的形式，最终因产热抵消导致贡献比较小。随着恒流充电倍率的提高，正极活性层的产热贡献比明显增大，这是因为充电倍率提升后，正极活性层后期放热急剧增大。从图中可以看出，正极活性层抢占的是负极活性层的贡献比份额，随着充电倍率的提升，隔膜、正极集流体、负极集流体的产热贡献比变化相对较小。在电池充电过程中产热分为可逆热与不可逆热，可逆热为电化学反应热，不可逆热为欧姆热和活性极化热。欧姆热是导致电池温升的重要因素，如图 4 所示，其产热贡献比占据电池产热的 1/2 以上，且随着充电倍率的提升，产热贡献比随之增大，加剧电池温升。活性极

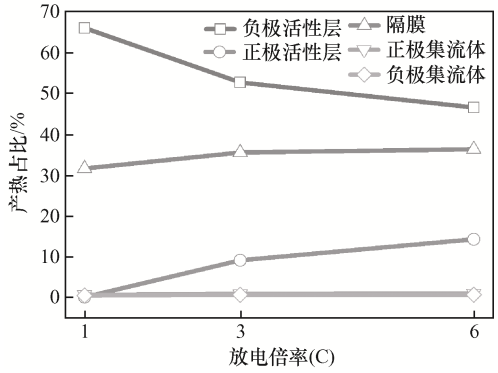


图 3　在 1C、3C 和 6C 恒流充电过程中负极、正极、隔膜和集流体的产热贡献比

Fig. 3 Heat generation contribution ratio of negative electrode, positive electrode, separator and collector during 1C, 3C and 6C constant-current charging processes

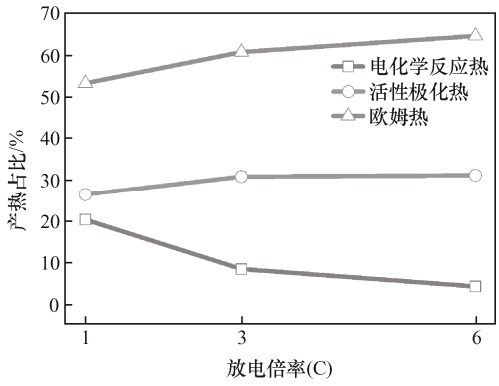
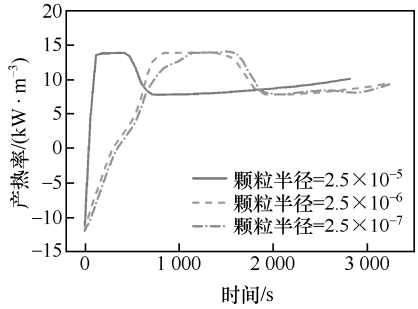


图 4　在 1C、3C 和 6C 恒流充电过程中电化学反应热、活性极化热和欧姆热的产热贡献比

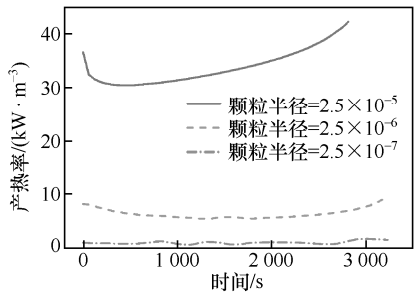
Fig. 4 Contribution ratio of electrochemical reaction heat, active polarization heat and ohmic heat during 1C, 3C and 6C constant-current charging processes

化热的产热贡献比随充电倍率提升而增大，可以看出充电倍率提升会导致电池极化加深。

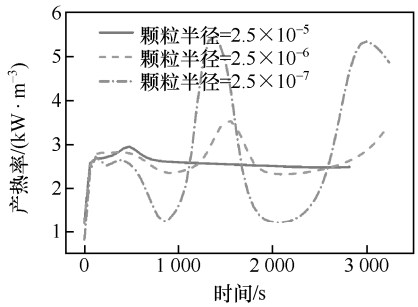
改变负极颗粒半径以进一步研究负极活性层的产热机理。如图 5(a)所示，较大的颗粒半径会使电化学反应热产热速率更快地达到峰值，且维持在峰值的时间缩短。随着颗粒半径的减小，电化学反应热的产热速率达到峰值的时间也越长，曲线相比大半径颗粒有滞后的现象。从图 5(b)可以看出，半径越大的负极颗粒还会导致活性极化热急剧增大，代表会造成电极的过电位较大。对于欧姆热，如图 5(c)所示，颗粒半径越小，欧姆热产热速率越平缓，反之产热速率则比较振荡，且半径越大振幅越大。如图 5(d)所示，对于大半径的负极颗粒，由于其活性极化热急剧增高，已经占据了总产热的绝大部分，导致负极活性层总产热也急剧升高。由此可见，活性颗粒半径增大时，导致产热增大的最主要影响因素是活性极化热的急剧增大。



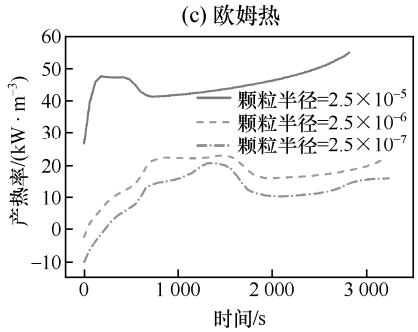
(a) 电化学反应热



(b) 活性极化热



(c) 欧姆热



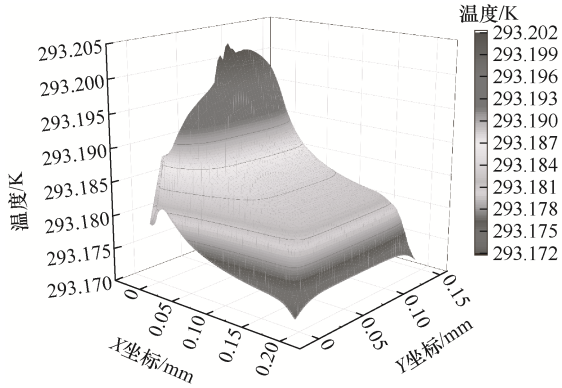
(d) 总产热

图 5 负极活性层中不同颗粒半径下产热速率与时间的关系

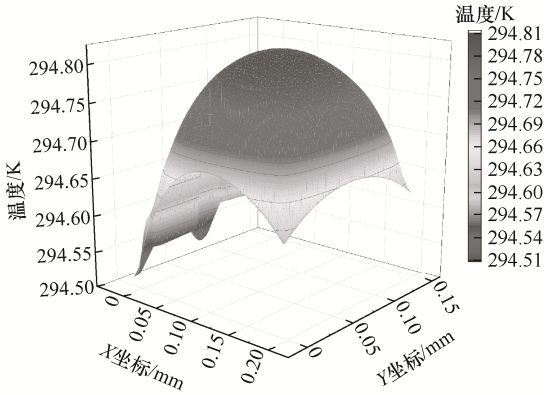
Fig. 5 Relationship between heat generation rate and time at different particle radiuses in active layer of negative electrode

2.2 恒流充电下电池温度分析

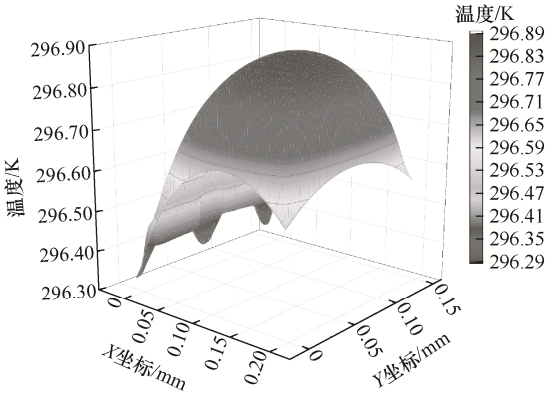
图 6 为 1C 放电倍率下电池厚度方向上中心平面的温度分布云图。可以看出在充电初期，正负极耳之间存在高温区域，这是因为在正负极耳连接处的电流密度较大，从而导致局部高温。起初高温区域靠近正极耳，位于电池右上方，随着充电时间的



(a) 60 s



(b) 1 080 s



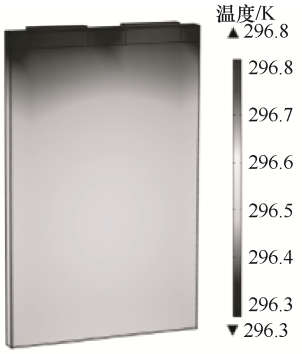
(c) 3 060 s

图 6　在 1C 恒流充电过程中电池内部横截面温度分布云图

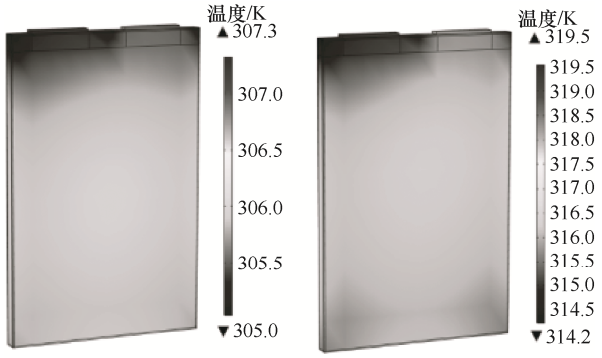
Fig. 6 Cloud diagram of temperature distribution in internal cross-section of battery during 1C constant-current charging process

增加，高温区域逐渐向下方转移，最后温度分布呈不规则的椭圆状，内部温度高，四周温度低，这是因为在自然对流情况下，极耳和四周表面的散热较快，导致高温区域逐渐向电池中心转移。且在充电过程中电池正极耳温度始终高于负极耳，这也对应正极耳的产热率大于负极耳。但是由于电池放电倍率较低，再加上自然对流的因素，电池内部温差并不大。

图 7 为电池在 1C、2C、3C 充电结束时电池表面温度分布情况。可以看出在充电结束时，电池高温区域分布在电池偏下方的中心位置。随着电池放电倍率的增加，电池整体最高温度、最大温差都有所增大。在 1C 充电结束时，电池最高温度为 296.8 K，整体最大温差仅有 0.5 K，可以发现此时电池生热率和电池与环境温度之间的换热



(a) 1C



(b) 3C　　(c) 6C

图 7　在 1C、3C 和 6C 恒流充电结束时电池表面温度分布云图

Fig. 7 Cloud diagram of battery surface temperature distribution at the end of 1C, 3C and 6C constant-current charging processes

率是相互平衡的关系，导致温度上升的现象并不明显，整体上分布较为均匀。而在 6C 充电结束时，电池整体最高温度达到 319.5 K，最大温差达到近 6 K，超过了电池允许的最大温差(5 K 左右)。电池整体温差较大会造成电池各部分电化学反应一致性变差，体积变化不一致，也会对循环寿命产生不利影响。

3　结语

本文提出了新型的电化学−热耦合方法，并在 COMSOL Multiphysics 仿真平台上建立了 27 A·h 三元电池的三维电化学−三维热耦合模型。研究了在不同充电倍率下电池内部的热特性，给出了介观尺度下电池各部分的产热速率和宏观尺度下电池的温度分布。数值分析表明，无论低倍率充电还是高倍率充电，电池产热主要受负极活性层和隔膜的影响，其中负极活性层的产热占比最大，集流体的产热较小，但随着充电倍率的提升，其他部分的产热占比会逐渐增加。分析了负极活性层颗粒半径对产热的影响，对于大半径的负极颗粒，由于其活性极化热急剧增高，占据了总产热的绝大部分，导致负极活性层总产热也急剧升高。最后，考察了自然对流下不同充电倍率的电池温度分布情况，在充电初期，正负极耳之间存在

局部高温区域，位于电池上方；随着充电时间的延长，高温区域逐渐向下方转移，最后温度分布呈不规则的椭圆状。随着电池放电倍率的增加，电池整体最高温度、最大温差都有所增大。

参考文献：

[1] 孙丙香, 宋东林, 阮海军, 等. 基于自产热和外传热的锂离子电池热学模型参数辨识方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(1): 278-288.
Sun Bingxiang, Song Donglin, Ruan Haijun, et al. Parameter identification method of thermal model of lithium-ion battery based on self-generated heat and external heat transfer [J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2024, 39(1): 278-288. (in Chinese)

[2] 金远, 韩甜, 韩鑫, 等. 锂离子电池热管理综述[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(S1): 23-30.
Jin Yuan, Han Tian, Han Xin, et al. A review on thermal management techniques for lithium-ion battery [J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(S1): 23-30. (in Chinese)

[3] 郭向伟, 王晨, 钱伟, 等. 电池储能系统均衡方法研究综述[J]. 电工技术学报, 2024, 39(13): 4204-4225.
Guo Xiangwei, Wang Chen, Qian Wei, et al. A review of equalization methods for battery energy storage system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(13): 4204-4225. (in Chinese)

[4] 李明浩, 黎桂树, 谢松. 航空运输环境中锂离子电池热失控研究[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 253-259.
Li Minghao, LI Guishu, Xie Song. Research on thermal runaway of lithium-ion battery in aviation transportation environment [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 253-259. (in Chinese)

[5] Panchal S, Mathew M, Fraser R, et al. Electrochemical thermal modeling and experimental measurements of 18650 cylindrical lithium-ion battery during discharge cycle for an EV [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 135: 123-132.

[6] Saw L H, Ye Yonghuang, Tay A A O. Electrochemical–thermal analysis of 18650 lithium iron phosphate cell [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 75: 162-174.

[7] Gu W B, Wang C Y. Thermal-electrochemical modeling of battery systems [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2000, 147(8): 2910.

[8] 李夔宁, 谢运成, 谢翌, 等. 基于电化学热耦合模型的富镍锂离子电池产热分析[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(3): 1153-1162.
Li Kuining, Xie Yuncheng, Xie Yi, et al. Analysis of heat production of nickel-rich lithium-ion battery based on electrochemical thermal coupling model [J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(3): 1153-1162. (in Chinese)

[9] 田华, 王伟光, 舒歌群, 等. 基于多尺度、电化学–热耦合模型的锂离子电池生热特性分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(7): 734-741.
Tian Hua, Wang Weiguang, Shu Gequn, et al. Analysis of heat generation in a Li-ion battery based on a multi-scale and electrochemical-thermal coupled model [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2016, 49(7): 734-741. (in Chinese)

[10] Nie Pengbo, Zhang Siwei, Ran Aihua, et al. Full-cycle electrochemical-thermal coupling analysis for commer-cial lithium-ion batteries [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 184: 116258.

[11] Xu Meng, Zhang Zhuqian, Wang Xia, et al. Two-dimensional electrochemical-thermal coupled modeling of cylindrical $LiFePO_4$ batteries [J]. Journal of Power Sources, 2014, 256: 233-243.

[12] 张立军, 李文博, 程洪正. 三维锂离子单电池电化学–热耦合模型[J]. 电源技术, 2016, 40(7): 1362-1366, 1490.
Zhang Lijun, Li Wenbo, Cheng Hongzheng. Coupled thermal-electrochemical model of 3D lithium-ion battery [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(7): 1362-1366, 1490. (in Chinese)

[13] Ghalkhani M, Bahiraei F, Nazri G A, et al. Electroche-mical-thermal model of pouch-type lithium-ion batteries [J]. Electrochimica Acta, 2017, 247: 569-587.

[14] 姚丹, 赵江平, 唐工凡, 等. 基于 WLTC 工况电化学–热耦合仿真的 NCM 锂电池极耳优化分析[J]. 电源学报, 2023, 21(2): 146-153.
Yao Dan, Zhao Jiangping, Tang Gongfan, et al. Optimiz-

ation analysis of NCM lithium battery tab based on electrochemical-thermal coupling simulation under WLTC working condition [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(2): 146-153. (in Chinese)

[15] Zhao Rui, Liu Jie, Gu Junjie. The effects of electrode thickness on the electrochemical and thermal characteristics of lithium ion battery [J]. Applied Energy, 2015, 139: 220-229.

[16] Li Huanhuan, Saini A, Liu Chengyang, et al. Electrochemical and thermal characteristics of prismatic lithium-ion battery based on a three-dimensional electrochemical-thermal coupled model [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 42: 102976.

[17] Jiang Guiwen, Zhuang Ling, Hu Qinghua, et al. An investigation of heat transfer and capacity fade in a prismatic Li-ion battery based on an electrochemical-thermal coupling model [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 171: 115080.

[18] 张文超. 锂离子电池电化学−热耦合仿真模拟研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
Zhang Wenchao. Lithium-ion battery electrochemical-thermal coupling simulation [D]. Changsha: Hunan University, 2019. (in Chinese)

[19] 陈芬放. 高能量密度 NCA 正极锂离子电池老化过程产热特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
Chen Fenfang. Study on the heat generation characteristics of high-specific-energy lithium ion batteries with NCA cathode during aging [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese)

[20] Yin Litao, Björneklett A, Söderlund E, et al. Analyzing and mitigating battery ageing by self-heating through a coupled thermal-electrochemical model of cylindrical Li-ion cells [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 39: 102648.

[21] Zhang Xiaokun, Chang Xiaohuan, Shen Yingdong, et al. Electrochemical-electrical-thermal modeling of a pouch-type lithium ion battery: An application to optimize temperature distribution [J]. Journal of Energy Storage, 2017, 11: 249-257.



王春生

作者简介：

王春生(1978—　)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，副教授。研究方向：等离子技术。E-mail：wangcs@ysu.edu.cn。

孙含笑(1997—　)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：动力电池安全及老化。E-mail：sunhanxiao@stumail.ysu.edu.cn。

薛晨博(1997—　)，男，硕士研究生。研究方向：动力电池热管理及仿真。E-mail：873712372@qq.com。

(责任编辑：郭凯凯)