

复合相变材料/空冷复合式锂离子电池模块散热性能

杜江龙^{1,3}, 杨雯棋^{2,3}, 黄凯^{1,3}, 练成^{1,2,3}, 刘洪来^{1,2,3}

(¹华东理工大学化学与分子工程学院, 上海 200237; ²华东理工大学化工学院, 上海 200237;

³化学工程联合国家重点实验室, 上海 200237)

摘要: 锂离子电池放电过程中产生的热量无法及时消散会导致电池性能下降, 设计合理的电池组散热结构是提升电池性能的关键一环。提出一种复合相变材料(CPCM)与空冷结合的电池组散热结构。利用伪二维电化学模型与三维散热模型相结合, 将电池产热过程、电池与外界传热过程进行解析, 探究了相变材料(PCM)厚度、CPCM中膨胀石墨(EG)的含量、空冷孔道数量及空冷气体流通方向对电池组散热性能的影响。结果表明, CPCM/空冷复合式散热结构的散热性能明显优于只用CPCM的电池组, 且当PCM厚度等于电池半径、EG质量分数为20%时, 电池组散热性能最佳。此外, 双向通风管道设计可以更有效地降低电池温度。所得结论可为锂离子电池组的散热设计提供理论指导。

关键词: 锂离子电池; 复合相变材料; 热安全; 空冷; 电化学模型

中图分类号: O 646.21

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2023) 02-0674-16

Heat dissipation performance of the module combined CPCM with air cooling for lithium-ion batteries

DU Jianglong^{1,3}, YANG Wenqi^{2,3}, HUANG Kai^{1,3}, LIAN Cheng^{1,2,3}, LIU Honglai^{1,2,3}

(¹School of Chemistry and Molecular Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

²School of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; ³State Key Laboratory of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: The heat generated during the discharge of lithium-ion batteries cannot be dissipated in time, which will lead to a decrease in battery performance. Designing a reasonable heat dissipation structure of the battery pack is a key part of improving battery performance. In this paper, a cooling structure of battery pack based on the combination of composite phase change materials (CPCM) and air cooling is proposed. By combining the pseudo two-dimensional electrochemical model with the three-dimensional heat dissipation model, the heat generation process of the battery and the heat transfer process between the battery and the outside were analyzed, and the effects of the thickness of phase change material (PCM), the content of expanded graphite (EG) in the CPCM, the number of air cooling channels and the flow direction of air cooling gas on the heat dissipation performance of the battery pack were investigated. The results show that the heat dissipation performance of the CPCM/air cooling

收稿日期: 2022-08-01 修回日期: 2022-12-22

通信作者: 练成(1989—),男,教授, liancheng@ecust.edu.cn

第一作者: 杜江龙(1995—),男,博士研究生, 2294567652@qq.com; 杨雯棋(1999—),女,硕士研究生, ywq785459103@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFA1503501); 中央高校基本科研业务费专项资金(2022ZFJH004); 国家自然科学基金项目(22278127)

引用本文: 杜江龙, 杨雯棋, 黄凯, 练成, 刘洪来. 复合相变材料/空冷复合式锂离子电池模块散热性能[J]. 化工学报, 2023, 74(2): 674-689

Citation: DU Jianglong, YANG Wenqi, HUANG Kai, LIAN Cheng, LIU Honglai. Heat dissipation performance of the module combined CPCM with air cooling for lithium-ion batteries[J]. CIESC Journal, 2023, 74(2): 674-689

composite heat dissipation structure is significantly better than that of the battery pack only using CPCM. When the PCM thickness is equal to the battery radius and the EG mass fraction is 20%, the heat dissipation performance of the battery pack is the best. In addition, the two-way ventilation duct design can reduce the battery temperature more effectively. The conclusions can provide theoretical guidance for the heat dissipation design of lithium-ion battery pack.

Key words: lithium-ion battery; composite phase change material; thermal safety; air cooling; electrochemical model

引言

锂离子电池具有高比能量密度、低自放电率(小于每月10%)、无记忆效应和长循环寿命(大于500次)等优势,被认为是电动汽车(EV)和混合动力电动汽车(HEV)最有前景的动力源^[1-4]。然而,热安全问题一直限制着锂离子电池的发展。锂离子电池在工作过程中产生的热量不能及时消散,电池温度升高,会导致锂离子电池的电化学性能和循环寿命严重下降^[5-9]。因此,如何设计有效的电池热管理系统(BTMS)是提高锂离子电池性能的关键问题之一。

常见的用于降低电池或电池组温度的方式有以下两种^[10-13]:一是通过改变电池内部结构或材料来降低产热率^[14-17];另一种是外部冷却策略,例如液体冷却散热系统、空气冷却散热系统和相变材料(PCM)冷却散热系统^[18-21]。液体冷却散热系统通常使用高热导率和大比热容的液体作为冷却液提高系统的散热性能^[18,21-23]。然而,冷却液质量较大,且必须配合复杂的管道使用,导致整个电池系统的体积与质量增加^[22,24-25]。在电动汽车中,电池系统的质量增加会导致汽车里程下降。

空气冷却是最早应用于BTMS的冷却策略,具有简单且成本低的优势。风冷BTMS策略一般分为自然对流冷却(被动冷却)和强制对流冷却(主动冷却)^[26]。近年来,许多研究人员对风冷BTMS进行了研究与改善,提高了冷却性能。Yang等^[27]对圆柱形LiFePO₄电池组不同排列方式的热性能进行了比较分析,发现对于单电池排列整齐的电池组,单个电池的平均温升随着纵向间隔的增加而减小。Fan等^[28]研究比较了整齐排列、交错排列以及交叉式排列的圆柱形电池组在不同进气速度下的空气冷却性能,结果表明整齐排列的电池组的冷却性能和温度均匀性最好,其次是交错排列,最后是交叉排列。课题组^[19]先前的研究也证明了单电池整齐排列的电

池组具有最好的散热性能。但是,由于空气热导率低,在电池工作过程中若仅采用风冷散热会导致电池散热不均匀^[29-31]。

PCM具有较大的潜热且无毒性、无腐蚀性,其作为BTMS中的散热介质受到较大的关注^[32]。由于PCM相变过程中体系的温度变化较小,因此可以有效地控制电池温度在一个较小的范围内。此外,PCM具有很高的相变潜热,少量的PCM可以储存大量的热,应用PCM可以有效地减少系统的质量。在众多的PCM中,石蜡被认为是BTMS中使用的首选有机PCM,因为石蜡具有相变潜热能高、无过冷现象、化学性质稳定等优势^[32-34]。然而,石蜡本身的热导率低,导致其作为PCM使用时无法快速地储存和释放热量。为了解决这一问题,通常会在石蜡中加入高导热性的材料形成复合相变材料(CPCM),从而改善石蜡的导热性能^[35-38],膨胀石墨(EG)是常见的添加剂之一。Ling等^[39]将石蜡/EG的CPCM应用于电池热管理系统中,探究了EG的质量分数对CPCM性能的影响,结果表明增加EG质量分数可以改善电池组温度的均匀性。虽然石蜡与EG组成的CPCM可以有效降低锂离子电池的温度,但是在高倍率放电时依然无法使锂离子电池达到较低的温度(低于50℃)^[40]。

随着电池组功率的提高,电池的产热量增加,单一的散热形式已无法满足电池组的散热需求。将风冷、液冷与PCM冷却技术结合的复合式散热系统成为解决锂离子电池热安全问题的重要方法^[41-44]。Xie等^[43]结合CPCM与空气冷却技术,探究其对锂离子电池散热的影响,结果发现复合式散热系统的散热效果明显优于单一风冷系统。在相变材料发生相变的过程中,风冷可以进行辅助散热,降低电池的温升。Lazrak等^[45]结合实验与模拟发现,与单一的PCM冷却相比,复合式散热使得锂离子电池系统的温度多下降了5 K。

之前的研究都是在较小的放电倍率(小于3 C)

下进行的,然而,动力锂离子电池在工作过程中经常会需要较大的放电倍率,此时会产生大量的热,导致电池温度快速上升,锂离子电池的性能也会受到较大的影响。本工作通过商用软件 COMSOL Multiphysics 构建了一个 LiFePO₄ 电池电化学模型,模拟了锂离子电池在高倍率(5 C)下的产热,计算了电池在高倍率(5 C)下放电过程中焦耳热、极化热与反应热的产热功率,并将计算的瞬时热功率应用于三维圆柱形电池模型中。本文假设三维圆柱形电池的产热是均匀的,因此在三维单电池模型中的热源是通过电化学模型非局部耦合积分热量得到的。对于三维单电池内部,采用传热方程对内部温度进行描述。此外,三维模型中求得的温度会进一步应用于电化学模型中来影响电化学模型中的传质与反应过程,从而实现电化学模型与三维模型的进一步耦合。本文利用上述电化学-热耦合模型提出了一种针对 5 × 5 的电池组模块的 CPCM/空冷复合式热管理系统。系统讨论了工艺参数(PCM 的厚度、CPCM 中 EG 的质量分数、风冷管道数量以及结构)对锂离子电池组的平均温度、最高温度以及最大温差的影响。本文可为锂离子电池组的散热设计提供理论指导。

1 模型与方法

1.1 电化学模型

图 1(a)是 LiFePO₄ 电池的伪二维(P2D)电化学模型示意图^[46-48]。该模型主要包括了锂离子电池的负极、隔膜与正极,在这些材料的空隙中填充了电解质。该模型的基本方程包括描述固/液相中电势分布的电荷守恒方程、描述固/液相中浓度分布的质量守恒方程以及描述固/液界面上电化学反应的反应动力学方程。根据上述方程得到的电池电流与电压等信息可以进一步求解电池在放电过程中的产热。表 1 为电化学模型中涉及的物理化学参数,参数来源于 COMSOL Multiphysics 数据库^[49]与先前的研究^[50]。

1.1.1 固相中的电荷守恒 P2D 模型中的电极采用多孔电极理论,在整个电极中电势分布遵循欧姆定律:

$$\sigma^{\text{eff}} \frac{\partial^2 \phi_s}{\partial x^2} = j_v \quad (1)$$

式中,φ_s为固相中的电势;x是沿着电池厚度方向的距离;j_v是局部电流密度;σ^{eff}是电极材料的有

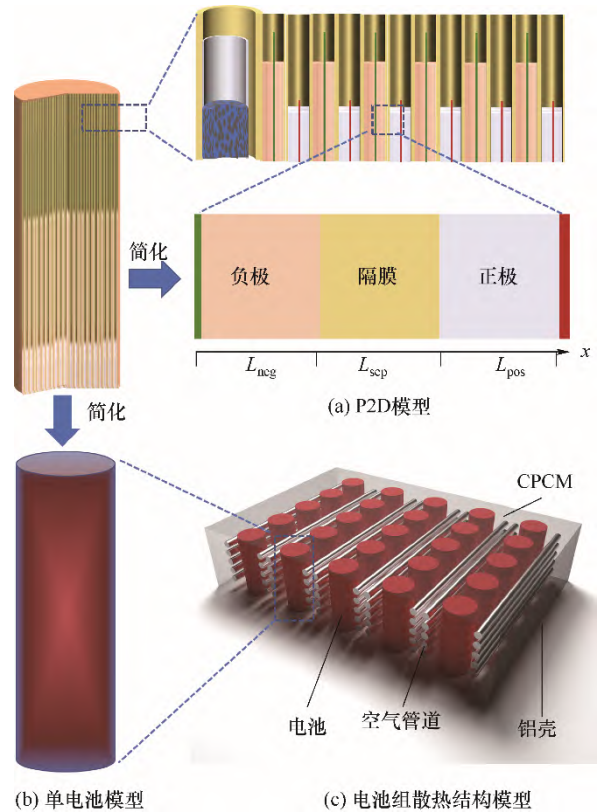


图 1 模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of the model

表 1 电化学模型参数^[49-50]

Table 1 Parameters of the electrochemical model^[49-50]

参数	数值
$F/(C \cdot \text{mol}^{-1})$	96485
$R/(J \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	8.3145
L/m	3.4×10^{-5} (负极), 2.5×10^{-5} (隔膜), 7.0×10^{-5} (正极)
r_p/m	3.65×10^{-8} (负极), 3.5×10^{-6} (正极)
ϵ_s	0.55(负极), 0.43(正极)
ϵ_e	0.33(负极), 0.54(隔膜), 0.332(正极)
$c_{s,\text{max}}/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})$	31370(负极), 22806(正极)
$c_{s,0}/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})$	26978(负极), 501.73(正极)
$\sigma_s/(S \cdot \text{m}^{-1})$	100(负极), 10(正极)
$D_s/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	3.9×10^{-14} (负极), 3.2×10^{-13} (正极)
$c_{e,0}/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})$	1200
$k_0/(S \cdot \text{m}^{-1})$	图 2(a)
$D_c/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	图 2(b)
t_+^0	图 2(c)
f_{\pm}	图 2(d)
E_{eq}/V	图 3(a)(负极), 图 3(c)(正极)
$(dE_{\text{eq}}/dT)/(V \cdot \text{K}^{-1})$	图 3(b)(负极), 图 3(d)(正极)

效电导率, $\sigma^{\text{eff}} = \epsilon_s^{1.5} \sigma$, ϵ_s 是固相的体积分数, σ 是固相的电导率。集流体处的边界条件与放电电流成正比:

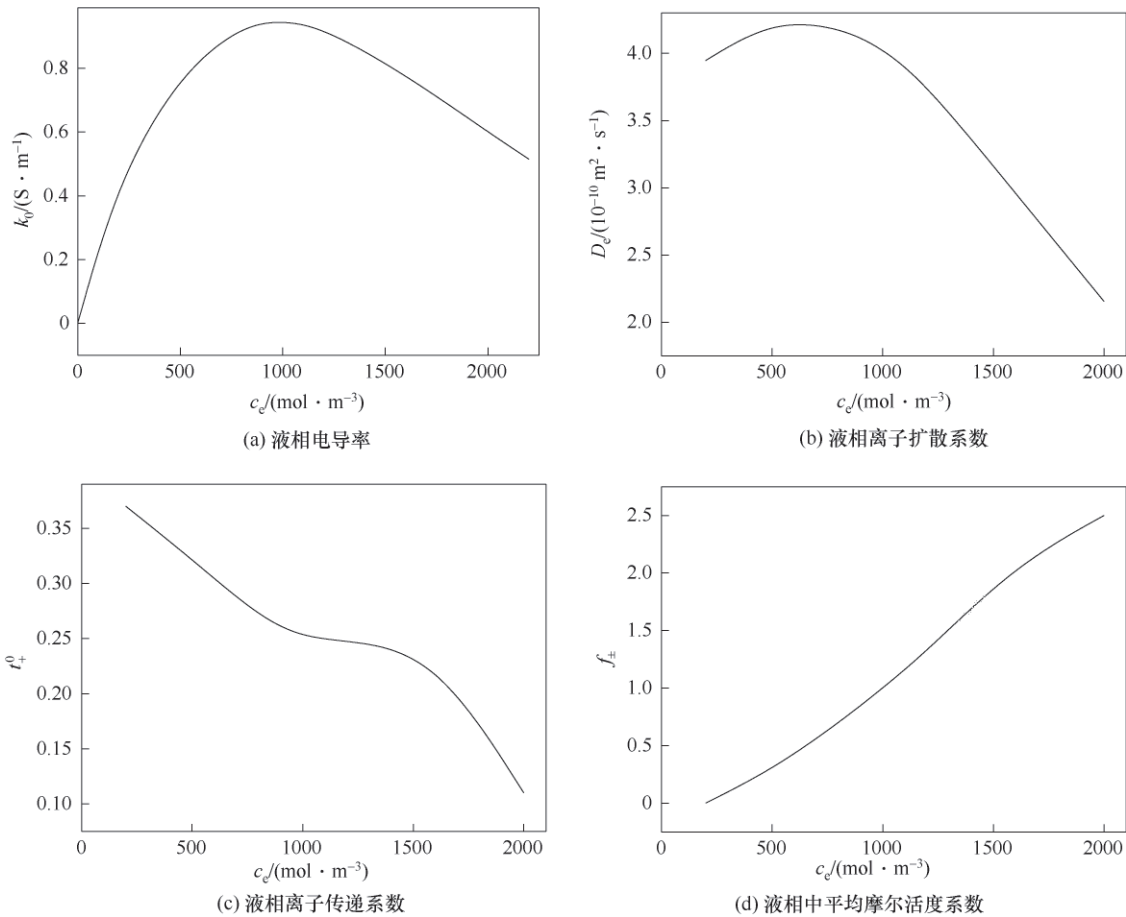


图2 液相中相关参数与浓度的关系^[49]

Fig.2 Relationship between concentration and related parameters in liquid phase^[49]

$$-\sigma^{\text{eff}} \left. \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \right|_{x=0} = -\sigma^{\text{eff}} \left. \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \right|_{x=L} = \frac{I}{A} \quad (2)$$

其中, L 是整个电池的厚度; I 是放电电流; A 是电池的横截面积。电极与隔膜界面处的边界条件为:

$$\left. \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \right|_{x=L_{\text{neg}}} = \left. \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \right|_{x=L_n + L_{\text{sep}}} = 0 \quad (3)$$

其中, L_{neg} 和 L_{sep} 分别为负极与隔膜厚度。

1.1.2 固相中的质量守恒 电极中的活性颗粒被认为是大小一致的球形, 锂离子在电极材料中的质量守恒遵循 Fick 扩散定律:

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} = \frac{D_s^{\text{eff}}}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial c_s}{\partial r} \right) \quad (4)$$

其中, c_s 是固相中的锂离子浓度; r 是球形颗粒的半径; D_s^{eff} 是锂离子在固相中的有效扩散系数, $D_s^{\text{eff}} = \varepsilon_s^{1.5} D_s$, D_s 是锂离子在固相中的扩散系数。活性颗粒的边界条件为:

$$\left. \frac{\partial c_s}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (5)$$

$$\left. \frac{\partial c_e}{\partial r} \right|_{r=r_p} = -\frac{j_v}{a_v F} \quad (6)$$

其中, r_p 是活性颗粒半径; a_v 是活性颗粒的比表面积; F 是法拉第常数。比表面积可以通过固相体积分数和活性颗粒的半径计算:

$$a_v = \frac{3\varepsilon_s}{r_p} \quad (7)$$

1.1.3 液相中的电荷守恒 液相中的电荷守恒为:

$$k^{\text{eff}} \frac{\partial^2 \phi_e}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k^{\text{eff}} \times 2RT}{F} \right) \left(1 + \frac{\partial \ln f_{\pm}}{\partial \ln c_e} \right) (1 - t_e^+) \frac{\partial \ln c_e}{\partial x} + j_v = 0 \quad (8)$$

其中, k^{eff} 是液相中的有效电导率; ϕ_e 是液相中的电势; R 是理想气体常数; f_{\pm} 是平均摩尔活度系数; c_e 是电解质在液相中的浓度。液相中的有效电导率由电解质电导系数 (k) 与液相体积分数共同决定, $k^{\text{eff}} = \varepsilon_e^{1.5} k$ 。 k 与温度 $T(\text{K})$ 相关:

$$k = k_0 \exp \left[\frac{4000}{8.3145} \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (9)$$

其中, k_0 与电解质浓度相关。在集流体处没有电势变化:

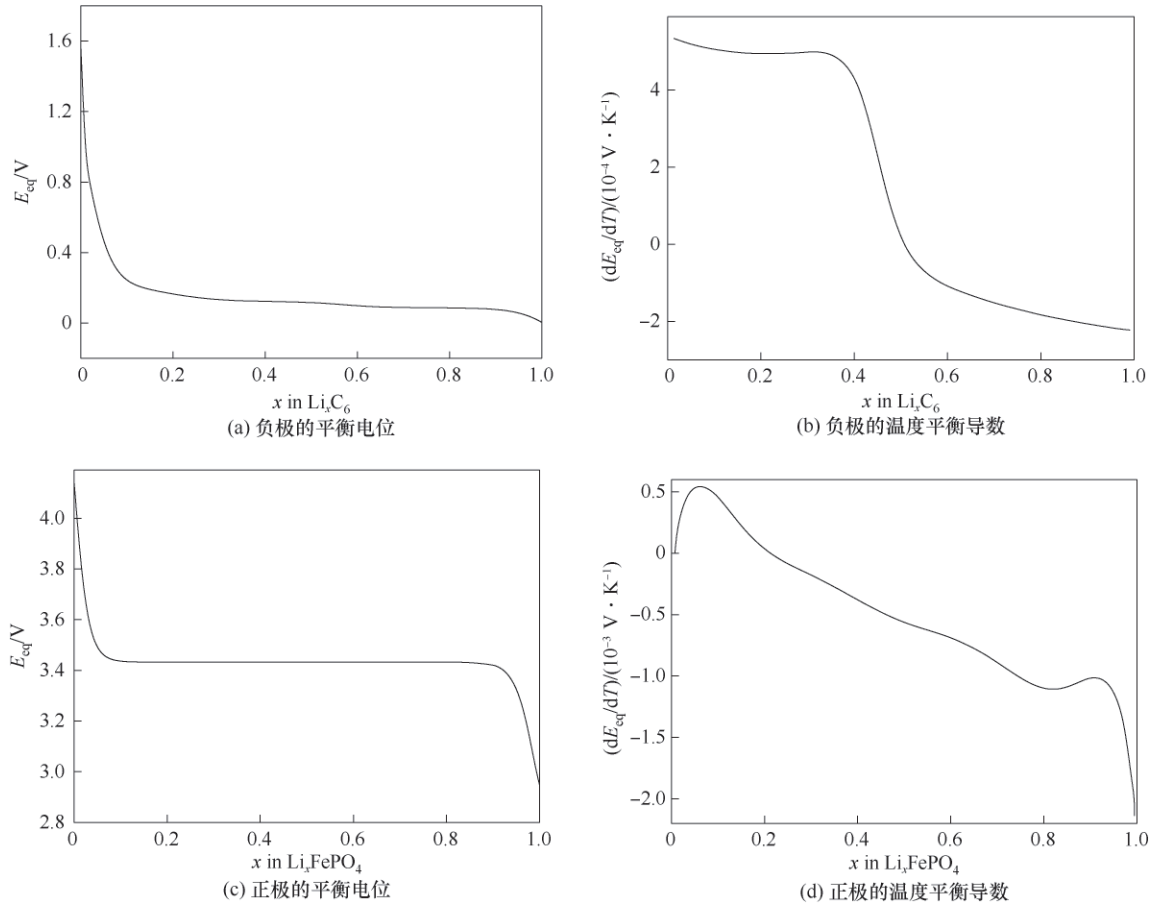


图 3 电极活性物质的平衡电位与温度平衡导数^[50]

Fig.3 Equilibrium potential and temperature equilibrium derivative of active particles in electrode^[50]

$$\left. \frac{\partial \phi_c}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial \phi_c}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \quad (10)$$

1.1.4 液相中的质量守恒 液相中的质量守恒由两部分决定,扩散与电迁移:

$$\varepsilon_c \frac{\partial c_c}{\partial t} = D_c^{\text{eff}} \frac{\partial^2 c_c}{\partial x^2} + \frac{1-t_+^0}{F} j_v \quad (11)$$

其中, D_c^{eff} 为有效扩散系数, $D_c^{\text{eff}} = \varepsilon_c^{1.5} D_c$, D_c 为扩散系数,与温度相关:

$$D_c = D_c \exp \left[\frac{16500}{8.3145} \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (12)$$

D_c 是一个浓度相关的函数。集流体处的边界条件为:

$$\left. \frac{\partial c_c}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial c_c}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \quad (13)$$

1.1.5 固/液界面上的反应动力学 锂离子在正极和负极上的插层/去插层反应由 Butler-Volmer 方程描述:

$$j_v = a_s i_0 \left[\exp \left(\frac{\alpha_a F \eta}{RT} \right) - \exp \left(- \frac{\alpha_c F \eta}{RT} \right) \right] \quad (14)$$

其中, η 是过电位; α_a 和 α_c 是氧化还原反应的电荷转移系数; i_0 是交换电流密度:

$$i_0 = k_a F (c_{s,\text{max}} - c_s)^\alpha c_s^\alpha \left(\frac{c_c}{c_{c,\text{ref}}} \right)^{\alpha_s} \quad (15)$$

其中, k_a 为反应系数; $c_{s,\text{max}}$ 为固相中最大的锂离子浓度; $c_{c,\text{ref}}$ 为参考液相浓度。

$$\eta = \phi_s - \phi_e - E_{\text{eq}} \quad (16)$$

其中, E_{eq} 为活性材料的平衡电位。

1.1.6 电化学生产热 锂离子电池的放电过程,电池内部产热主要考虑:固相产生的欧姆热(Q_{ohm})、极化热(Q_{pol})与反应热(Q_{rea})以及液相中的欧姆热。

$$Q_{\text{ohm}} = \sigma_s^{\text{eff}} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + k_c^{\text{eff}} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \frac{2k_c^{\text{eff}} RT (1-t_+^0)}{F} \left(1 + \frac{\partial \ln f_{\pm}}{\partial \ln c_c} \right) \frac{\partial \ln c_c}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (17)$$

$$Q_{\text{pol}} = j_v \eta \quad (18)$$

$$Q_{\text{rea}} = j_v T \frac{\partial E_{\text{eq}}}{\partial T} \quad (19)$$

1.2 三维传热模型

在本研究中,三维传热模型基于以下假设:在放电过程中,电池产热均匀;电池的传热系数径向/轴向异性,其余的物理性质各向同性,且忽略温度

的影响;忽略热辐射与热对流;CPCM的液相为不可压缩流体;CPCM物理性质各向同性。锂离子电池与不同材料内部的热守恒方程可以描述为:

$$\rho_i C_{p,i} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_i C_{p,i} u \nabla T + \nabla(-k_i \nabla T) = Q_{total} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} W_{neg} &= (Q_{rea,neg} L_{neg} + Q_{pol,neg} L_{neg} + Q_{ohm,neg} L_{neg}) A \\ W_{pos} &= (Q_{rea,pos} L_{pos} + Q_{pol,pos} L_{pos} + Q_{ohm,pos} L_{pos}) A \\ W_{sep} &= (Q_{ohm,sep} L_{sep}) A \end{aligned} \quad (21)$$

$$Q_{total} = \frac{W_{neg} + W_{pos} + W_{sep}}{\pi R_{batt}^2}$$

其中, ρ 是材料或电池的密度; C_p 是比定压热容; k 为热导率; i 代表了电池、铝壳、CPCM 和空气; R_{batt} 为圆柱形电池半径(13 mm)。具体参数如表2所示。

表2 材料属性^[51-52]

Table 2 Properties of materials^[51-52]

材料	密度/ (kg·m ⁻³)	比定压热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	热导率/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
电池	3000	1375	—
铝	2700	900	238
空气	1.29	1005	0.023
正极材料	—	—	1.48
负极材料	—	—	1.04
隔膜	—	—	1.0

由于电池中的活性材料是螺旋的几何堆积,因此模型中的热导率是各向异性的,其中轴向的热导率会大于径向的热导率,因此径向与轴向的热导率需要分别计算^[51,53]。其中径向的热导率($k_{battery,r}$)为:

$$k_{battery,r} = \frac{\sum L_i}{\sum L_i / k_i} \quad (22)$$

式中, L_i 为正极、负极和隔膜的厚度; k_i 为正极、负极和隔膜的热导率。轴向的热导率($k_{battery,ang}$)为:

$$k_{battery,ang} = \frac{\sum L_i k_i}{\sum L_i} \quad (23)$$

CPCM的比定压热容随着温度变化:

$$C_{p,PCM} = \begin{cases} C_{p,s} & T \leq T_s \\ C_{eff} + \frac{l}{T_l - T_s} & T_s < T < T_l \\ C_{p,l} & T \geq T_l \end{cases} \quad (24)$$

$$C_{eff} = \frac{C_{p,s} + C_{p,l}}{2}$$

其中, $C_{p,s}$ 与 $C_{p,l}$ 分别是固态PCM与液态PCM的比定压热容^[54]; l 为潜热。

电池与CPCM、CPCM与空气、CPCM与铝壳之间的边界条件分别为:

$$-k_{bat} \frac{\partial T_{bat}}{\partial n} = k_{CPCM} \frac{\partial T_{CPCM}}{\partial n} \quad (25)$$

$$-k_{CPCM} \frac{\partial T_{CPCM}}{\partial n} = k_{Al} \frac{\partial T_{Al}}{\partial n} \quad (26)$$

$$-k_{CPCM} \frac{\partial T_{CPCM}}{\partial n} = k_{air} \frac{\partial T_{air}}{\partial n} \quad (27)$$

管道内的空气流动可以描述为

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\rho_{air} u_{air}) &= 0 \\ \rho_{air} u_{air} \cdot \nabla u_{air} &= -\nabla p + \mu \nabla^2 u_{air} \end{aligned} \quad (28)$$

其中, u_{air} 为空气流动速度; p 为压力。入口处的边界条件为:

$$u = -v_n \quad (29)$$

其中, v 为空气法向流入速度。出口处的压力为 1×10^5 Pa。

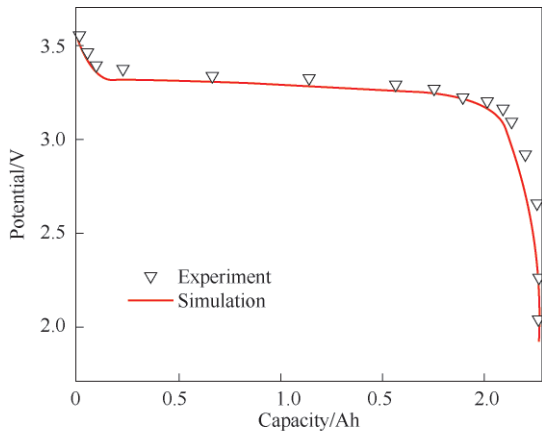
1.3 数值方法

本文使用COMSOL Multiphysics商用软件对圆柱形(26650型)LiFePO₄在CPCM中的散热模型进行数值模拟。在数值模拟中,锂离子电池作为唯一热源,可以根据式(17)~式(19)计算电池单位体积的产热率。在模拟过程中,假设电池产热是均匀的[图1(b)],将计算所得的产热率直接应用于三维传热模型中,计算不同散热条件下电池的温度,并将电池的实时温度应用于锂离子电池电化学模型。将25个锂离子电池单体、CPCM、铝壳和空气管道组成电池组散热模型[图1(c)]。对于CPCM模型,当温度高于CPCM相变温度时,CPCM发生相变,相变过程中的体积变化及流动被忽略。

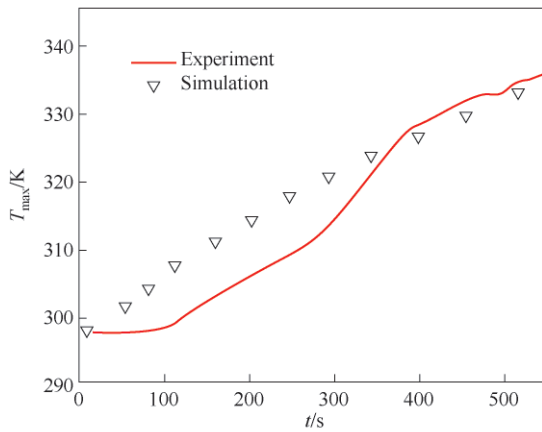
2 结果与讨论

2.1 模型验证

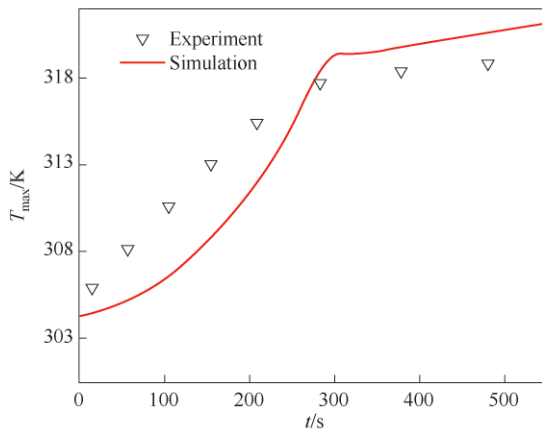
为了验证电化学模型的合理性,在25℃的环境下,对锂离子电池进行5C放电模拟,并将模拟的放电曲线与文献^[50]中的实验数据进行对比,如图4(a)所示,放电电压模拟结果与实验结果非常吻合。为了进一步验证所建立的电化学-热耦合模型的合理性,模拟了单电池在无PCM和有PCM包裹的情况下的温升情况,并与实验结果^[34]进行对比,如图4(b)、(c)所示。模拟结果表明在无PCM情况下,电池温度经历了平缓上升、快速上升、平缓上升三个阶段,而实验的温升几乎为线性。这可能是因为在实验过程中,放电前期存在放热副反应产热所导致的。当电池被PCM包裹时,温度达到PCM的相变温度后,电池温升变慢,模拟结果与实验数据相近,表明所构建的电化学-热耦合模型合理。



(a) 模拟与实验的放电曲线



(b) 无PCM包裹的电池的最高温度



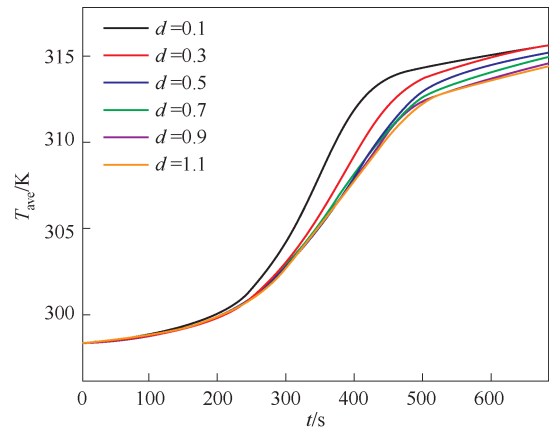
(c) PCM包裹的电池的最高温度

图 4 模拟与实验^[34,50]的对比

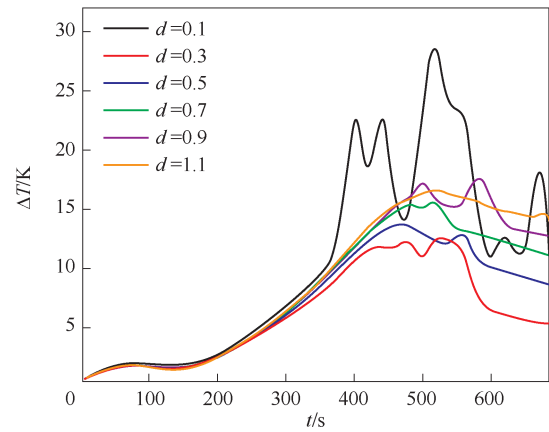
Fig.4 Comparison between simulation and experiment^[34,50]

2.2 PCM厚度对电池温度的影响

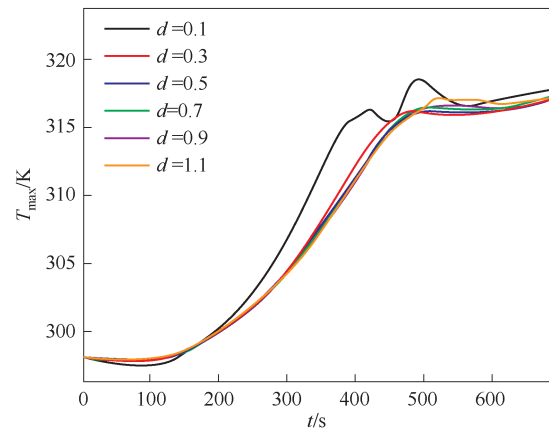
为了探究PCM厚度对电池散热性能的影响,在电池与铝壳、电池与电池之间填充了纯石蜡相变材料,电池与铝壳之间的最小距离为 $d \times R_{batt}$, 电池与电池之间的最短距离设置为 $2d \times R_{batt}$, 其中 d 为系数参数 ($d = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1$)。图 5(a) 表示在不同 PCM 厚度下,所有电池的平均温度(T_{ave})随放电



(a) 平均温度



(b) 最大温差



(c) 最高温度

图 5 不同 PCM 厚度下电池表面的温度

Fig.5 Battery surface temperature at different PCM thicknesses

时间的变化。在放电前期,由于PCM的热容较小,温度急剧上升。在第二个时间段内,温度达到PCM的相变温度,PCM由固体液化为液体,吸收电池的热量,整个系统的温度表现为缓慢上升的趋势。根据模拟的结果可以发现,随着PCM的厚度由小($d = 0.1$)到大($d = 1.1$),电池表面的平均温度呈降低的趋势。此外,当 $d \geq 0.5$,增加PCM厚度,电池平均温

度的降幅较小。

图5(b)、(c)分别表示在不同PCM厚度下,电池表面最大温差(ΔT)和最高温度(T_{max})随放电时间的变化。结果表明,随着放电的进行,电池的最大温差呈上升趋势。当 $d = 0.1$ 时,电池表面温差出现较大的波动。在 $t = 530$ s左右, $d = 0.1$ 的电池组出现了约28 K的温差,这是由于PCM厚度较小,电池距离较近容易产生局部过冷/过热的情况,这也导致图5(c) $d = 0.1$ 的电池组出现最高温度突然上升的情况。当 $d \geq 0.3$ 时,电池表面温差的波动较小,且电池表面温差较小。根据图5(c),当 $d = 0.3$ 时,电池表面的最高温度与 $d = 0.5、0.7、0.9、1.1$ 时的最高温度接近。综上, $d = 0.3 \sim 0.5$ 的PCM厚度比较合适,过大的PCM厚度不能明显降低电池的温度,反而导致电池组体积增加,降低电池组的体积能量密度。

图6为放电结束时电池表面的温度分布。从图

6中可以发现,随着PCM厚度增加,电池表面的温度出现下降。在 $d = 0.5 \sim 1.1$ 时,电池底部会出现较低的温度,这是因为电池底部接触的是铝壳,铝壳的高导热性可以有效降低局部温度。此外,当PCM厚度较小时,电池表面容易出现局部高温或低温,如图6(a)所示,当 $d = 0.1$ 时,可以明显观察到温度局部过低点与过高点。这是由于PCM的厚度较小,电池与PCM之间传热不均匀导致的,这也是导致电池表面温差在某时间点剧烈波动的主要原因。此外,采用62617个、182240个、368672个、803700个域单元四种精度的网格探究 $d = 0.1$ 时电池组的温度分布,结果如图A1(a)所示,在完整网格包含803700个域单元、186444个边界单元和4637个边单元情况下依然会存在局部温度过高或过低的情况,表明局部温度过高或过低不是因为网格过于粗糙导致的。此外,如图A1(b)所示,这些局部高温或者局部低温

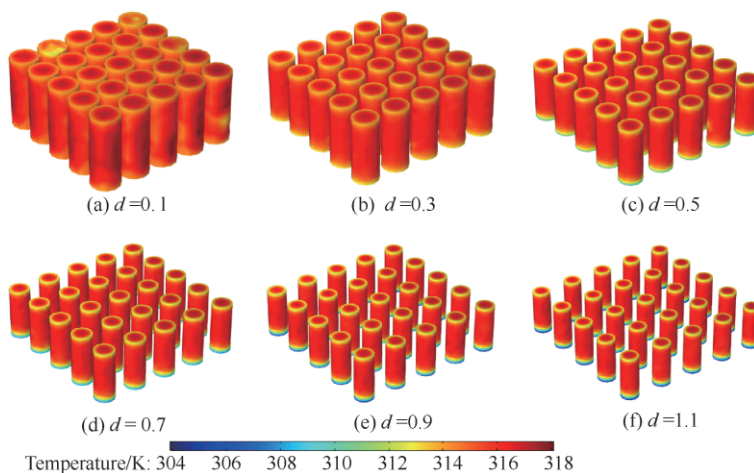


图6 放电结束时不同PCM厚度的电池表面温度分布

Fig.6 Surface temperature distribution of batteries with different PCM thicknesses at the end of discharge

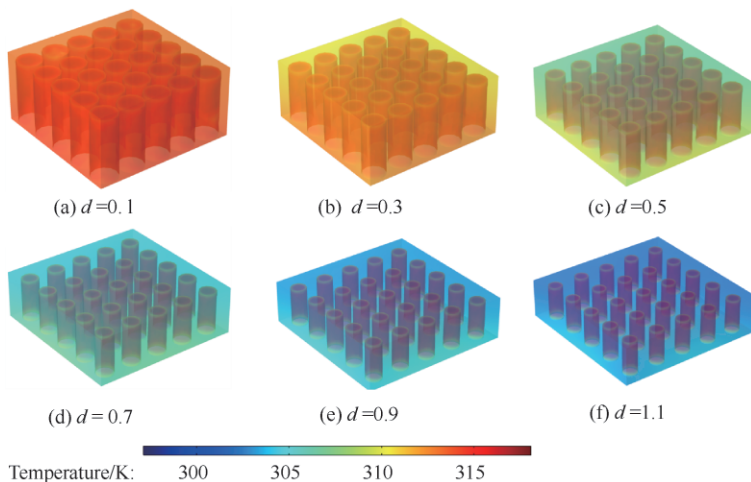


图7 放电结束时不同PCM厚度的PCM温度分布

Fig.7 Temperature distribution of PCM with different PCM thicknesses at the end of discharge

对于电池表面的平均温度影响较小。

图 7 为不同 PCM 厚度的电池放电结束时 PCM 的温度分布。随着 PCM 厚度的增大, 电池间距增大, PCM 的整体温度呈逐渐降低的趋势。PCM 与电池的接触面处, 温度处于 PCM 相变温度(314~317 K)的范围。由图 7(c)可以看出, 当 $d = 0.5$ 时大部分 PCM (PCM 与电池接触面以外) 的温度都低于 314 K, 说明此时 PCM 并未发生相变。而 $d > 0.5$ 时, 大部分 PCM 的温度较低, 表明此时 PCM 没有得到很好的利用, 且 PCM 厚度的增加会增大电池组的体积, 影响电池组的应用。因此后续数值模拟将采用 $d = 0.5$ 的 PCM 厚度。此外随着放电的进行, 电池温度的变化会影响电池内部的反应与传输(图 A2)。

2.3 EG 质量分数对电池温度的影响

在纯相变材料中添加 EG 可以提高 CPCPM 的导热性, 但会导致 CPCPM 的潜热下降。表 3 统计了不同 EG 含量的 CPCPM 的热导率、潜热和热容^[34]。不同 EG 质量分数对电池组温度的影响如图 8 所示。图 8(a) 是不同 EG 质量分数下, 所有电池的平均温度随放电时间变化的曲线。结果表明, EG 含量小于 20% 时, 随着 CPCPM 中 EG 含量不断增加, 电池的平均温度下降, 且电池平均温度达到 CPCPM 相变温度的时间变长。上述现象表明 EG 的加入可以增强 CPCPM 的导热性能, 电池散热更好。而当 EG 含量为 30% 时, 电池的平均温度高于 EG 含量为 20% 的电池, 这是由于高含量的 EG 大幅降低了 CPCPM 的潜热, 导致 CPCPM 的储热能力下降, 电池温度升高。

表 3 不同 EG 含量的 CPCPM 的物性参数^[34]

Table 3 Physical parameters of CPCPM with different EG contents^[34]

CPCPM 中 EG 的含量/ %(质量)	热导率(k_{CPCPM})/ ($\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	潜热(l)/ ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$)	相变温度/ K	有效热容 (C_{eff})/ ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
0	0.20	275	314~317	2.000
3	0.58	266.8	314~317	1.963
6	1.23	258.5	314~317	1.926
9	3.15	250.3	314~317	1.889
12	5.74	242	314~317	1.852
20	10.6	220	314~317	1.754
30	13.85	192.5	314~317	1.631

图 8(b) 为 EG 质量分数对电池表面温差的影响。结果表明, 随着 EG 质量分数的提高, 温差显著降低, 特别是 EG 质量分数为 20%、30% 时, 电池组的

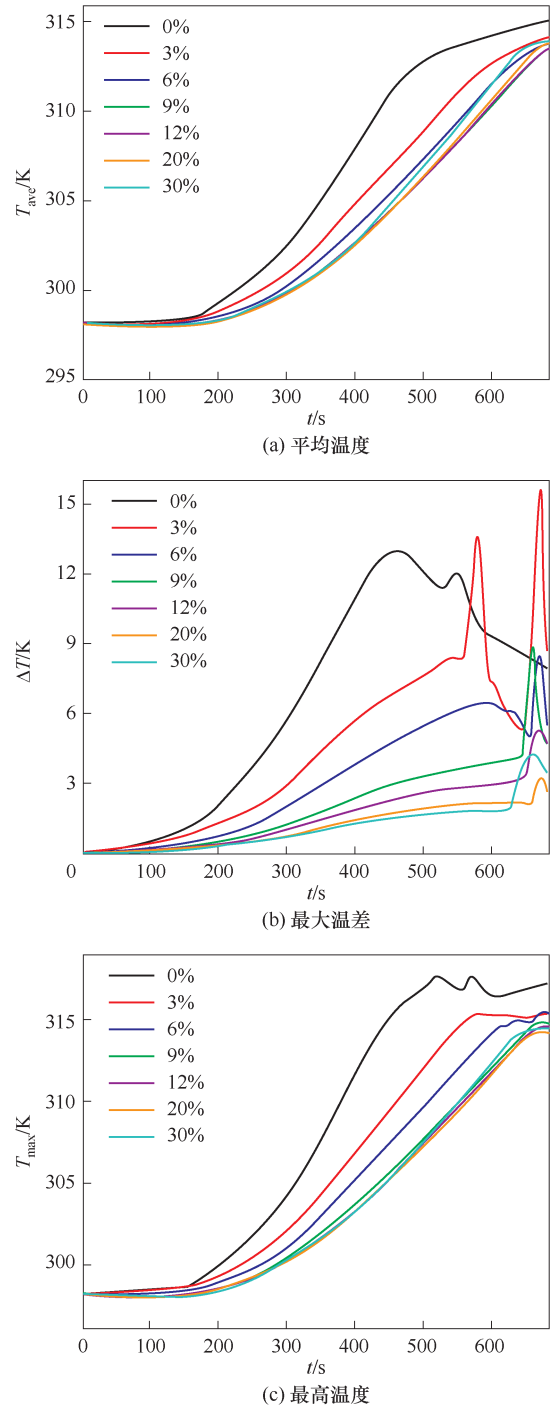


图 8 不同 EG 含量下电池的温度

Fig.8 Battery temperature under different EG contents

温差小(小于 5 K)且平稳。图 8(c) 为 EG 质量分数对电池表面最高温度的影响。结果表明 EG 为 20% 时, 电池组的最高温度最小, 锂离子电池表现出最佳的热性能。

图 9 为不同 EG 含量时电池的温度分布。结果表明, EG 含量增加, 电池组内的温差明显下降。当 EG 的质量分数为 0%、3%、6%、9% 以及 12% 时, 电

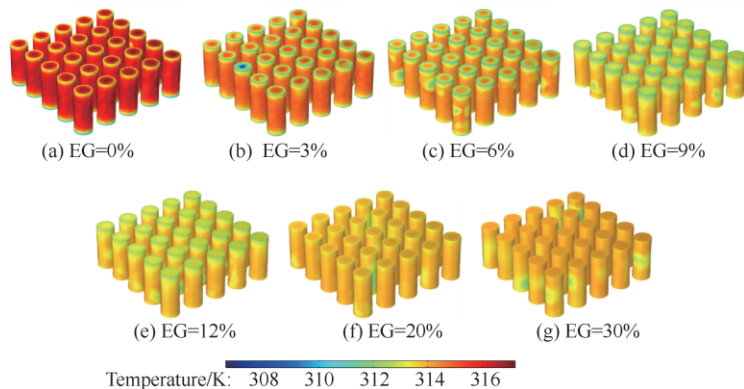


图9 放电结束时不同EG含量的电池表面温度分布

Fig.9 Distribution of battery surface temperature with different EG content at the end of discharge

池的顶部与底部会出现较低的温度,这是因为电路上部的CPCM和底部的铝壳会带走更多的热量。而中间部分的电池接触的CPCM中EG含量较少,热导率较差,无法很好地散热,表现出相对较高的温度。当EG含量增加到20%和30%时,CPCM的导热性增加,电池的中部散热增加,有效减小了不同位置的散热差距。

2.4 通风管道对电池温度的影响

为了探究通风管道数量对电池组散热性能的影响,将CPCM与风冷相结合,设计了如图10所示的电池组结构。在CPCM中加装 n 排空气冷却管装置,空气以一定的速度($0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)和初始温度(283.15 K)流入管道。为了确保不同情况下总的通风体积是相同的,在模拟过程中固定了总的通风面积,如:空气管道为2排时,单孔半径为 2.5 mm ;空气管道为3排时,单孔半径为 2.04 mm ,以此类推始

终保持总通风面积为 392.7 mm^2 。图11为冷却空气管道排数 n 对电池表面温度的影响。放电初期,电池温度下降,这是因为采用了主动冷却方法,冷却空气温度为 283.15 K ,此时,电池的初始温度为 298.15 K 且电池产热较少,电池散热量大于产热量。当空冷装置总通风面积相等时,改变空气管道的数量,电池表面的平均温度和最高温度相近,即空冷管道的数量对电池温度的影响较小。但与不加空气冷却管道的电池相比,电池表面的平均温度下降了约 11 K ,最高温度下降了约 4 K 。此外还探究了在长时间放电的情况下电池的温度变化,结果如图A3所示。

图12设计了两种通风方向的电池组结构,两种情况均采用了50个通风管道,一种情况通风方向同向,另一种则采用双向通风的设置。图13为两种情况下电池组的温度。结果表明两种情况下,电池的

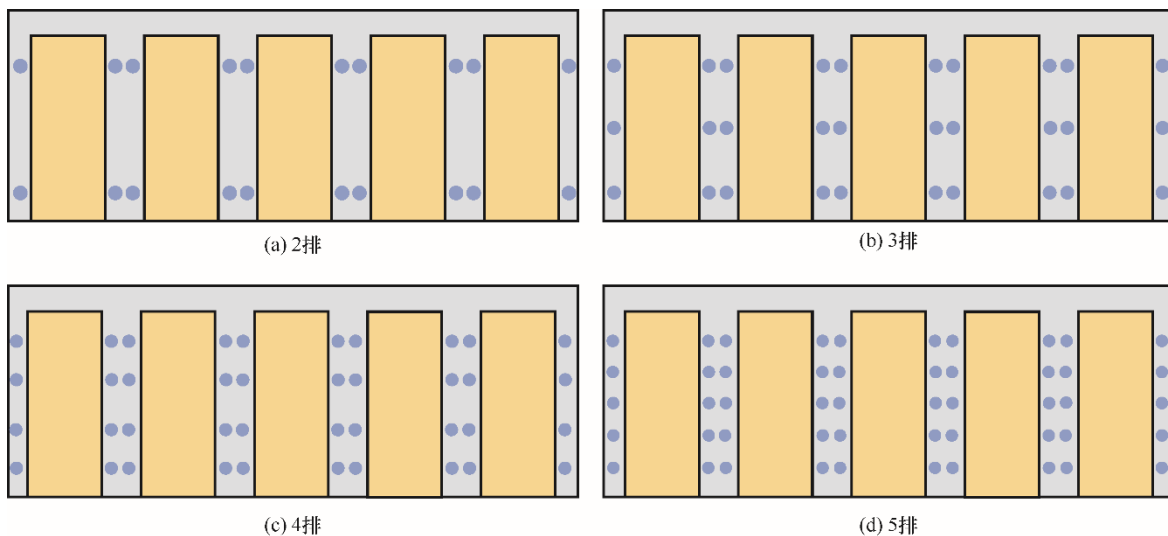


图10 不同通风管道数量时电池组结构(黄色:电池;灰色:PCM;淡蓝色:通风管道入口)

Fig.10 Battery pack structure with different number of ventilation ducts (yellow: battery; gray: PCM; light blue: ventilation duct inlet)

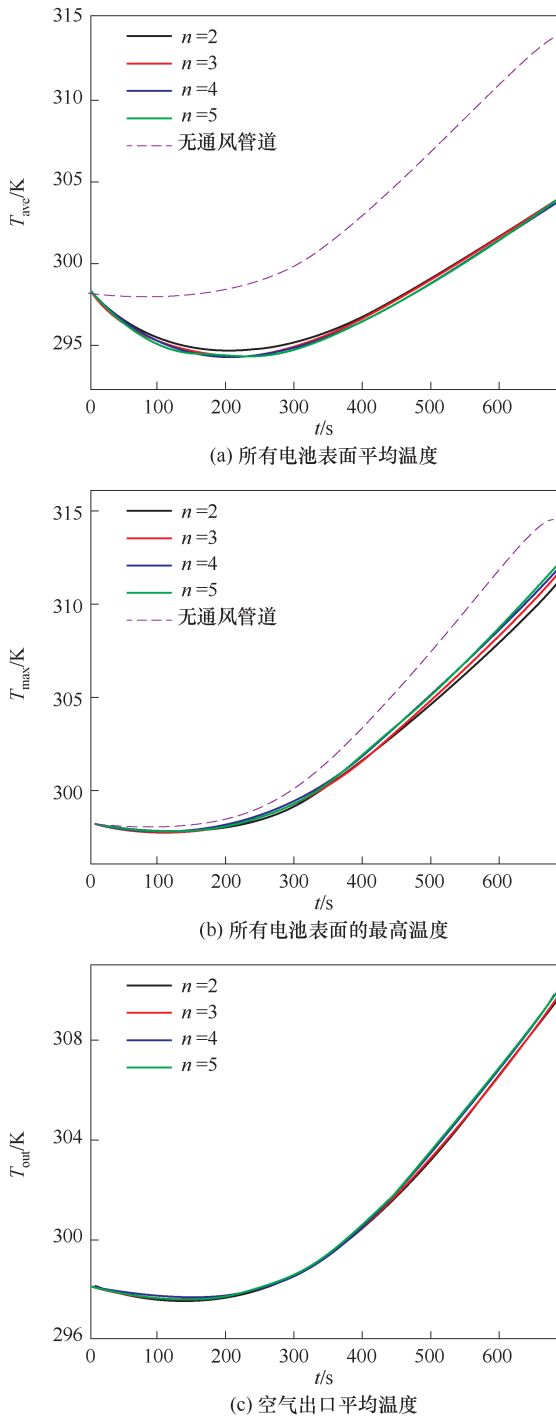


图 11 不同空气管道数量下电池温度

Fig.11 Battery temperature under different air duct quantities

平均温度均会在放电初期出现下降,而双向通风的电池温度下降幅度明显大于单向通风的电池。此外,双向通风方式可以降低电池组的平均温度与最高温度,相比于单向通风方式,电池平均温度下降了约 8 K,电池最高温度下降了约 10 K。这表明逆流的冷却空气可以获得更低的平均温度和最高温度。

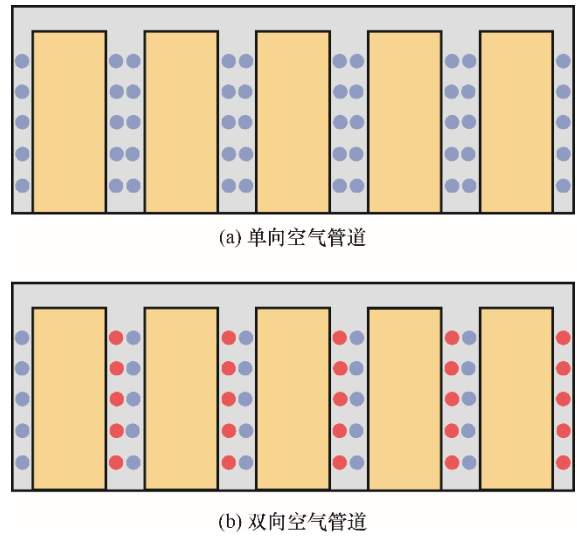


图 12 不同通风方向的电池组结构(黄色:电池;灰色:PCM;淡蓝色:通风管道入口;红色:通风管道出口)

Fig.12 Battery pack structure in different ventilation directions (yellow: battery; gray: PCM; light blue: ventilation duct inlet; red: vent pipe outlet)

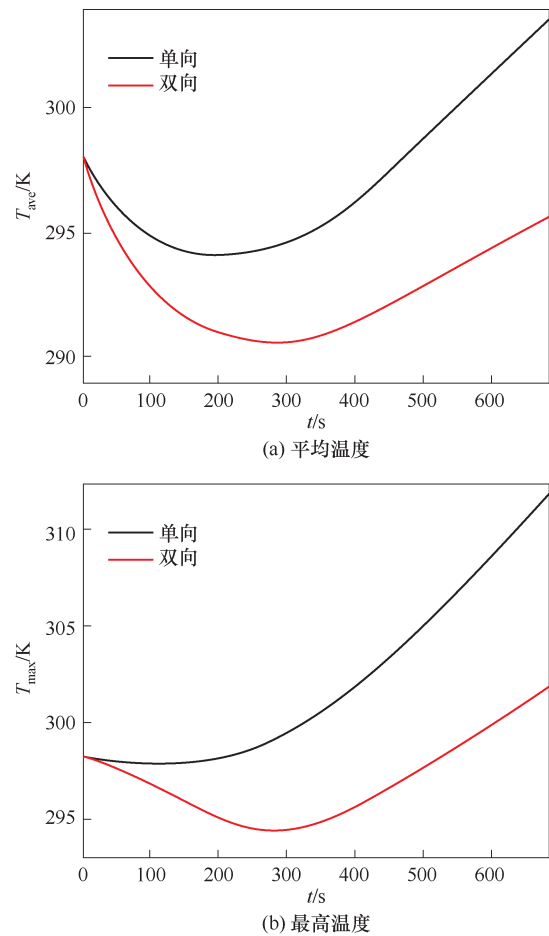


图 13 不同空气流向的电池的平均温度和最高温度

Fig.13 Average and maximum temperature of battery under different air flow direction

3 结 论

本文将电化学模型与三维热模型进行耦合,探究了圆柱形锂离子电池组中CPCM/空冷复合式散热结构的散热性能,主要结论如下。

(1) PCM可以有效提高电池的散热性能,降低电池的平均温度与最大温差。电池组的平均温度随PCM的厚度增加而降低,但是当PCM厚度超过电池半径时,PCM厚度对电池温度的影响降低。考虑到电池系统的使用以及电池组的体积能量密度,PCM厚度等于电池(26650型)的半径时散热性能最佳。

(2) PCM中加入EG可以提高CPCM的导热性能,增加电池的散热,但过高的EG含量也会导致CPCM的潜热下降,会降低电池组的散热性能。当CPCM厚度等于电池半径时,20%的EG含量表现出最佳的散热性能。

(3) CPCM/空冷复合式散热结构相比于仅使用单一CPCM散热可以更有效地提高电池组的散热性能。此外,双向通风设计可以更好地降低电池组温度,提高电池组热性能。

基于PCM的BTMS在确保电池热安全,提高电池性能方面发挥着重要作用,为了推动基于PCM的BTMS的工业应用,在此提出未来的发展方向和关键问题。

(1) 现有的PCM主要是有机PCM,但是有机PCM普遍具有可燃性,这会导致电池组在使用过程中发生热失控的风险增加,因此,研究具有阻燃效果的无机PCM成了未来的研究重点之一。

(2) 除了本文中提到的EG,为了增强PCM的传热性能,通常会在PCM中添加高导热金属、金属氧化物等,但是没有考虑这些材料的电绝缘性,为了提高电池的安全性能需要开发高导热性电绝缘的添加剂。

(3) 随着电池充放电倍率提高,电池的产热不断增加,仅靠PCM的相变潜热很难对电池组进行有效的降温,因此,开发多种散热方式组合对BTSM的发展至关重要。

(4) PCM的使用必须配合封装技术,而传统的封装方式效率低,造成电池表面PCM分布不均匀,导致散热性能降低,因此,需要开发新的高效的封装技术。

(5) 目前的研究主要集中于PCM对电池组散热的应用,但是随着电动汽车的不断普及,在低温条件下PCM的保温效果必须被考虑,因此,需对PCM低温蓄热进行更多的研究。

符 号 说 明

a_v	——活性颗粒的比表面积, m^{-1}
c_e	——液相电解质浓度, $mol \cdot m^{-3}$
$c_{e,0}$	——液相电解质初始浓度, $mol \cdot m^{-3}$
c_s	——固相锂离子浓度, $mol \cdot m^{-3}$
$c_{s,max}$	——固相锂离子最大浓度, $mol \cdot m^{-3}$
D_e	——锂离子在液相中的扩散系数, $m^2 \cdot s^{-1}$
D_s	——锂离子在固相中的扩散系数, $m^2 \cdot s^{-1}$
E_{eq}	——平衡电位, V
F	——法拉第常数, $C \cdot mol^{-1}$
f_{\pm}	——液相中的平均摩尔活度系数
I	——放电电流, A
j_v	——局部电流密度, $A \cdot m^{-2}$
k	——液相电导率, $S \cdot m^{-1}$
L	——电极或隔膜厚度, m
R	——理想气体常数, $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
r_p	——活性颗粒半径, m
T	——温度, K
ε_e	——液相体积分数
ε_s	——固相体积分数
σ_s	——固相电导率, $S \cdot m^{-1}$
ϕ_e	——液相电势, V
ϕ_s	——固相电势, V

参 考 文 献

- [1] Yang X F, Doyle-Davis K, Gao X J, et al. Recent progress and perspectives on designing high-performance thick electrodes for all-solid-state lithium batteries[J]. eTransportation, 2022, **11**: 100152.
- [2] Zhang X, Wang B Y, Zhao S, et al. Oxygen anionic redox activated high-energy cathodes: status and prospects[J]. eTransportation, 2021, **8**: 100118.
- [3] Lai X, Chen Q W, Tang X P, et al. Critical review of life cycle assessment of lithium-ion batteries for electric vehicles: a lifespan perspective[J]. eTransportation, 2022, **12**: 100169.
- [4] Lu L G, Han X B, Li J Q, et al. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2013, **226**: 272-288.
- [5] Sato N, Yagi K. Thermal behavior analysis of nickel metal hydride batteries for electric vehicles[J]. JSAE Review, 2000, **21**(2): 205-211.
- [6] Zhang X H, Li Z, Luo L G, et al. A review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles[J]. Energy, 2022,

- 238: 121652.
- [7] Chen Z Y, Xiong R, Lu J H, et al. Temperature rise prediction of lithium-ion battery suffering external short circuit for all-climate electric vehicles application[J]. *Applied Energy*, 2018, **213**: 375–383.
- [8] de Hoog J, Jaguemont J, Abdel-Monem M, et al. Combining an electrothermal and impedance aging model to investigate thermal degradation caused by fast charging[J]. *Energies*, 2018, **11**(4): 804.
- [9] 杜江龙, 林伊婷, 杨雯棋, 等. 模拟仿真在锂离子电池热安全设计中的应用[J]. *储能科学与技术*, 2022, **11**(3): 866–877.
- Du J L, Lin Y T, Yang W Q, et al. Application of simulation in thermal safety design of lithium-ion batteries[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, **11**(3): 866–877.
- [10] Bandhauer T M, Garimella S, Fuller T F. A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2011, **158**(3): R1.
- [11] Taheri P, Yazdanpour M, Bahrami M. Transient three-dimensional thermal model for batteries with thin electrodes[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, **243**: 280–289.
- [12] Du S L, Jia M, Cheng Y, et al. Study on the thermal behaviors of power lithium iron phosphate (LFP) aluminum-laminated battery with different tab configurations[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2015, **89**: 327–336.
- [13] 王建, 郭航, 叶芳, 等. 热管散热装置对车用锂离子电池组内温度分布影响数值模拟[J]. *化工学报*, 2016, **67**(S2): 340–347.
- Wang J, Guo H, Ye F, et al. Numerical simulation of effect of heat pipe cooling device on temperature distribution in lithium-ion battery pack of vehicle[J]. *CIESC Journal*, 2016, **67**(S2): 340–347.
- [14] Huang P, Tao H L, Yang J, et al. Four stages of thermal effect coupled with ion-charge transports during the charging process of porous electrodes[J]. *AIChE Journal*, 2022, **68**(10): e17790.
- [15] 黄盼, 练成, 刘洪来. 基于模拟退火算法的真实多孔电极中热-质传递的研究[J]. *化工学报*, 2022, **73**(6): 2529–2542.
- Huang P, Lian C, Liu H L. Heat-mass transfer in real porous electrode based on simulated annealing algorithm[J]. *CIESC Journal*, 2022, **73**(6): 2529–2542.
- [16] Lin Y T, Lian C, Berrueta M U, et al. Microscopic model for cyclic voltammetry of porous electrodes[J]. *Physical Review Letters*, 2022, **128**(20): 206001.
- [17] Lian C, Janssen M, Liu H L, et al. Blessing and curse: how a supercapacitor's large capacitance causes its slow charging[J]. *Physical Review Letters*, 2020, **124**(7): 076001.
- [18] Bai F F, Chen M B, Song W J, et al. Thermal management performances of PCM/water cooling-plate using for lithium-ion battery module based on non-uniform internal heat source[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, **126**: 17–27.
- [19] Du J L, Tao H L, Chen Y X, et al. Thermal management of air-cooling lithium-ion battery pack[J]. *Chinese Physics Letters*, 2021, **38**(11): 122–135.
- [20] Zou D Q, Liu X S, He R J, et al. Preparation of a novel composite phase change material (PCM) and its locally enhanced heat transfer for power battery module[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, **180**: 1196–1202.
- [21] Panchal S, Khasow R, Dincer I, et al. Thermal design and simulation of mini-channel cold plate for water cooled large sized prismatic lithium-ion battery[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, **122**: 80–90.
- [22] Qian Z, Li Y M, Rao Z H. Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system by using mini-channel cooling[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, **126**: 622–631.
- [23] 赵春荣, 曹文昊, 董缙, 等. 圆柱形锂离子电池模组微通道液冷热模型[J]. *化工学报*, 2017, **68**(8): 3232–3241.
- Zhao C R, Cao W J, Dong T, et al. Thermal modeling of cylindrical lithium-ion battery module with micro-channel liquid cooling[J]. *CIESC Journal*, 2017, **68**(8): 3232–3241.
- [24] Huo Y T, Rao Z H, Liu X J, et al. Investigation of power battery thermal management by using mini-channel cold plate[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, **89**: 387–395.
- [25] Zhao J T, Rao Z H, Li Y M. Thermal performance of mini-channel liquid cooled cylinder based battery thermal management for cylindrical lithium-ion power battery[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, **103**: 157–165.
- [26] Liu H Q, Wei Z B, He W D, et al. 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.
- [27] Yang N X, Zhang X W, Li G J, et al. Assessment of the forced air-cooling performance for cylindrical lithium-ion battery packs: a comparative analysis between aligned and staggered cell arrangements[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, **80**: 55–65.
- [28] Fan Y Q, Bao Y, Ling C, et al. Experimental study on the thermal management performance of air cooling for high energy density cylindrical lithium-ion batteries[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, **155**: 96–109.
- [29] Fan L W, 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.
- [30] Mahamud R, Park C. Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature uniformity[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, **196**(13): 5685–5696.
- [31] Chen D F, Jiang J C, Kim G H, et al. Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, **94**: 846–854.
- [32] Alrashdan A, Mayyas A T, Al-Hallaj S. Thermo-mechanical behaviors of the expanded graphite-phase change material matrix used for thermal management of Li-ion battery packs[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, **210**(1): 174–179.
- [33] Wang Z C, Zhang Z Q, Jia L, et al. Paraffin and paraffin/aluminum foam composite phase change material heat storage experimental study based on thermal management of Li-ion battery[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, **78**: 428–436.
- [34] Jiang G W, Huang J H, Fu Y S, et al. Thermal optimization of composite phase change material/expanded graphite for Li-ion battery thermal management[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, **108**: 1119–1125.
- [35] Lin C J, Xu S C, Chang G F, et al. Experiment and simulation of a LiFePO₄ battery pack with a passive thermal management system using composite phase change material and graphite sheets[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, **275**: 742–749.
- [36] Khateeb S A, Farid M M, Selman J R, et al. Design and simulation

- of a lithium-ion battery with a phase change material thermal management system for an electric scooter[J]. *Journal of Power Sources*, 2004, **128**(2): 292–307.
- [37] Attia A A, Altohamy A A, Abd Rabbo M F, et al. Comparative study on Al_2O_3 nanoparticle addition on cool storage system performance[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, **94**: 449–457.
- [38] Goli P, Legedza S, Dhar A, et al. Graphene-enhanced hybrid phase change materials for thermal management of Li-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, **248**: 37–43.
- [39] Ling Z Y, Chen J J, Fang X M, et al. Experimental and numerical investigation of the application of phase change materials in a simulative power batteries thermal management system[J]. *Applied Energy*, 2014, **121**: 104–113.
- [40] Wu W X, Yang X Q, Zhang G Q, et al. Experimental investigation on the thermal performance of heat pipe-assisted phase change material based battery thermal management system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, **138**: 486–492.
- [41] Zhang H Y, Wu X Y, Wu Q Y, et al. Experimental investigation of thermal performance of large-sized battery module using hybrid PCM and bottom liquid cooling configuration[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, **159**: 113968.
- [42] An Z G, Chen X, Zhao L, et al. Numerical investigation on integrated thermal management for a lithium-ion battery module with a composite phase change material and liquid cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, **163**: 114345.
- [43] Xie Y Q, Tang J C, Shi S, et al. Experimental and numerical investigation on integrated thermal management for lithium-ion battery pack with composite phase change materials[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, **154**: 562–575.
- [44] Lv Y F, Liu G J, Zhang G Q, et al. A novel thermal management structure using serpentine phase change material coupled with forced air convection for cylindrical battery modules[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, **468**: 228398.
- [45] Lazrak A, Fourmigué J F, Robin J F. An innovative practical battery thermal management system based on phase change materials: numerical and experimental investigations[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, **128**: 20–32.
- [46] Fuller T F, Doyle M, Newman J. Relaxation phenomena in lithium-ion - insertion cells[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 1994, **141**(4): 982–990.
- [47] 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.
- [48] 王慧艳, 陈怡沁, 周静红, 等. 锂离子电池正极涂层孔隙结构优化的数值模拟[J]. *化工学报*, 2022, **73**(1): 376–383.
- Wang H Y, Chen Y Q, Zhou J H, et al. Numerical simulation of cathode coating of lithium-ion battery for porosity optimization[J]. *CIESC Journal*, 2022, **73**(1): 376–383.
- [49] COMSOL AB. AC/DC Module User's Guide[DB]. Stockholm, 2020.
- [50] Li J, Cheng Y, Jia M, et al. An electrochemical-thermal model based on dynamic responses for lithium iron phosphate battery[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, **255**: 130–143.
- [51] Chiew J, Chin C S, Toh W D, et al. A pseudo three-dimensional electrochemical-thermal model of a cylindrical $LiFePO_4$ /graphite battery[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, **147**: 450–463.
- [52] Xin Q Q, Xiao J S, Yang T Q, et al. Thermal management of lithium-ion batteries under high ambient temperature and rapid discharging using composite PCM and liquid cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, **210**: 118230.
- [53] Chen S C, Wang Y Y, Wan C C. Thermal analysis of spirally wound lithium batteries[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2006, **153**(4): A637–A648.
- [54] Ogoh W, Groulx D. Effects of the heat transfer fluid velocity on the storage characteristics of a cylindrical latent heat energy storage system: a numerical study[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2012, **48**(3): 439–449.

附录

$d = 0.5$, 无EG的情况下电池温度分布如图A1所示。放电过程中电池内部液相扩散系数、电导率以及电极反应的变化如图A2所示。结果表明,随着放电的进行,温度升高,电池内的液相扩散系数、电导率、反应电流密度均会升高,其中正极反应电流密度为负仅代表其电流方向与负极相反。

日常锂离子电池使用过程中经常会用到小电流放电,这会使得电池的放电时间变长。采用 $d = 0.5$, EG = 20%,单向通风,通风管道为5的模型,用0.1 C的放电电流对电池进行放电,观测电池组的温度变化。

图A3(a)、(b)分别为0.1 C与5 C放电电流下电池的电流与电压随时间的变化。结果表明使用0.1 C放电电流的电池放电时间约为35000 s,5 C放电时间约为700 s。图A3(c)为两种放电电流下,电池组达到的最高温度,在两者放电量一样的情况下,高倍率(5 C)放电电流使电池组的最高温度不断上升,而低倍率(0.1 C)放电下,电池组温度不断下降直至接近冷却空气的温度。因此,在低倍率放电的情况下可以考虑较少量的冷却空气以节约成本。

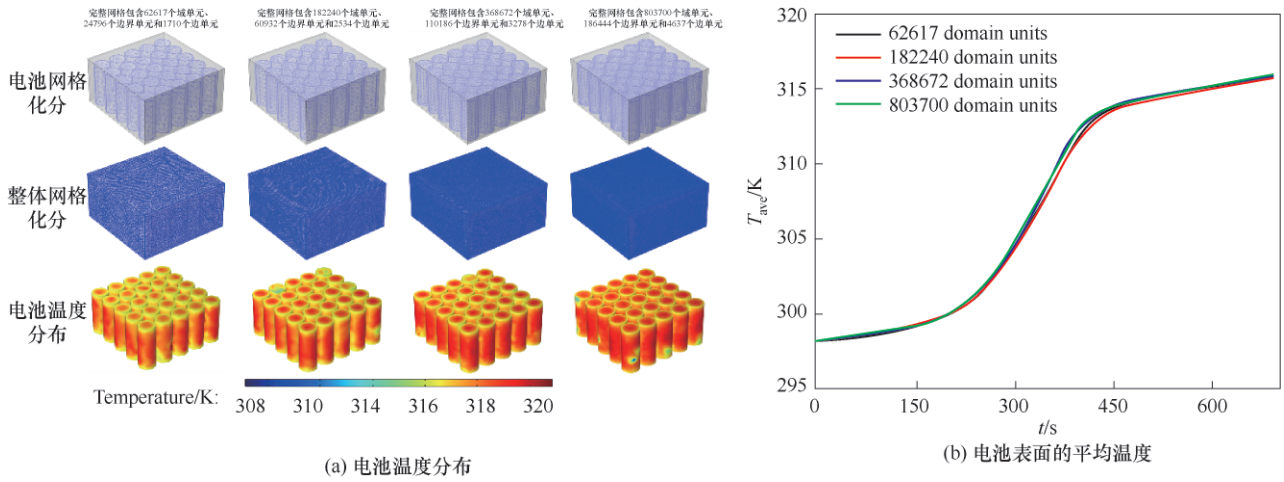


图 A1 $d=0.1, EG=0\%$ 时不同网格划分下的电池温度分布 (a) 和电池表面的平均温度 (b)

Fig.A1 Temperature distribution (a) and average temperature of battery surface (b) under different grid divisions when $d=0.1$ and $EG=0\%$

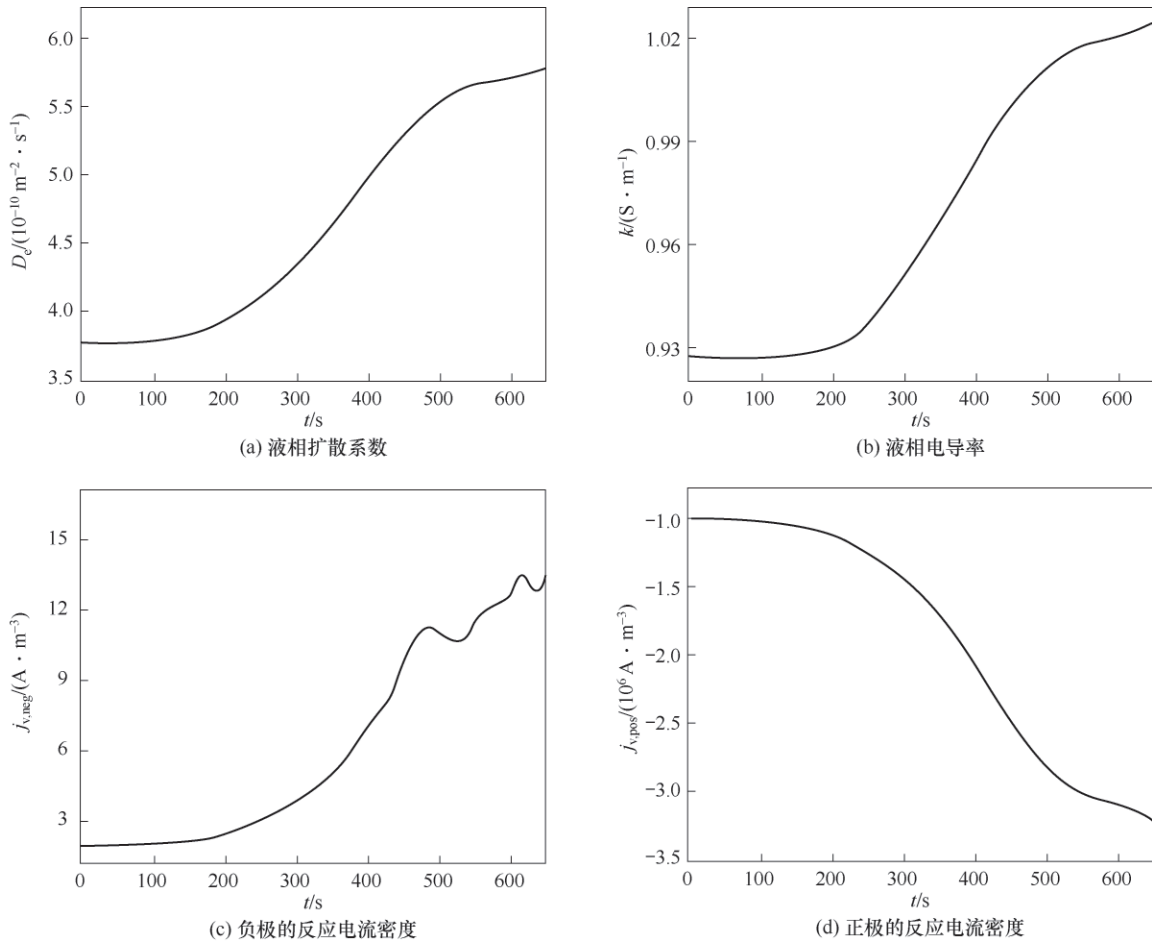
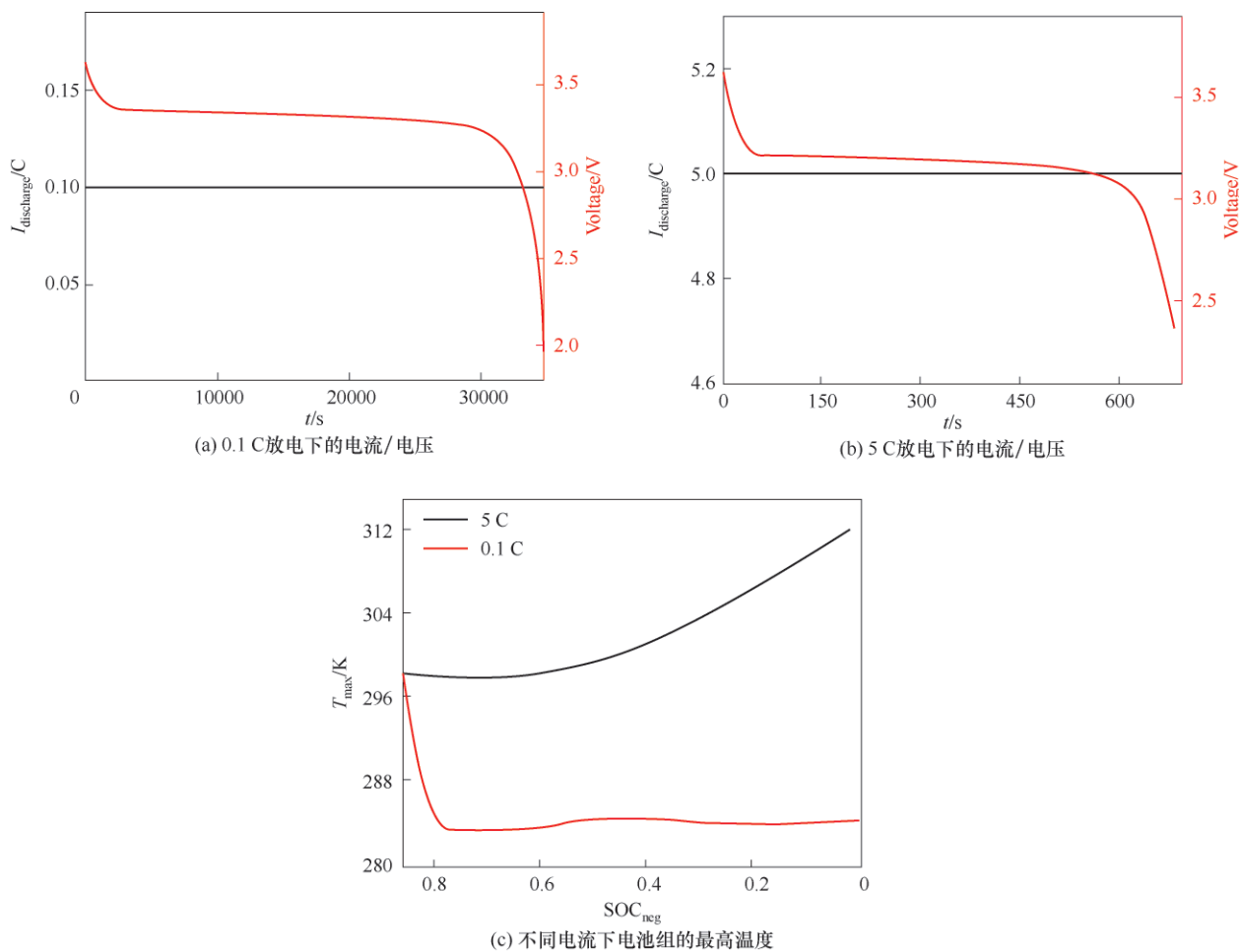


图 A2 放电过程中电池内物理/化学参数的变化

Fig.A2 Changes of physical/chemical parameters in the battery during discharge



图A3 不同放电倍率下的电池电流、电压和温度

Fig.A3 Battery current, voltage and temperature at different discharge rates