

DOI: 10.16056/j.2096-7705.2023.01.011

基于波浪形液冷通道的锂离子电池热管理系统模拟分析

杜江龙¹, 夏光宇², 练成^{1,*}, 刘洪来^{1,2}

(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化学工程联合国家重点实验室, 上海 200237)

摘要: 随着电动汽车的普及, 液体冷却的电池热管理系统因其高效散热和低成本而被广泛应用。提出了一种波浪形液冷散热结构, 并利用伪二维电化学模型和三维传热模型构建了一个电池组模型, 考察了一个 5×5 的 LiFePO₄/ 石墨电池组中的产热与传热过程, 研究了放电倍率、环境温度、冷却液温度、冷却液流速和冷却管道与电池接触面积对电池组散热性能的影响。结果显示, 高放电倍率会导致电池的最高温度和最大温差上升; 低环境温度和冷却液温度可以有效降低电池组温度, 但过低的环境温度和冷却液温度会导致电池组的较大温差。当环境温度为室温时, 冷却液温度为 293.15 K 时最佳; 冷却液流速对电池组的散热性能影响较小; 电池与冷却管道接触面积越大, 电池组的最高温度和最大温差会降低, 然而考虑到经济成本, 电池与冷却管道的最佳接触角度为 90°。这项研究为锂离子电池组的热管理系统设计提供了理论指导。

关键词: 锂离子电池; 热安全; 液体冷却; 电化学模型

中图分类号: TM912

文献标志码: A

文章编号: 2096-7705 (2023) 01-0078-10

Simulation and Analysis of Lithium-Ion Battery Thermal Management System Based on Wavy Liquid Cooling Channel

DU Jianglong¹, XIA Guangyu², LIAN Cheng^{1,*}, LIU Honglai^{1,2}

(1. School of Chemistry and Molecular Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. State Key Laboratory of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, School of Chemical Engineering, Shanghai 200237, China)

Abstract: With the popularization of electric vehicles, liquid-cooled battery thermal management systems have been widely used due to their high heat dissipation efficiency and low cost. A unique wavy liquid-cooled heat dissipation structure was utilized, and a battery pack model was constructed using a pseudo-two-dimensional electrochemical model and a three-dimensional heat transfer model. The study examined the effects of discharge rate, ambient temperature, coolant

收稿日期: 2022-10-25

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资助项目 (2022ZJFH004); 国家自然科学基金项目 (22278127); 能源清洁利用国家重点实验室开放基金课题 (ZJUCEU2021005)

第一作者: 杜江龙 (1995—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为锂离子电池热管理多尺度建模。E-mail: 2294567652@qq.com

* 通信作者: 练成 (1989—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为计算电化学工程。E-mail: liancheng@ecust.edu.cn

引用格式: 杜江龙, 夏光宇, 练成, 等. 基于波浪形液冷通道的锂离子电池热管理系统模拟分析[J]. 能源研究与管理, 2023, 15(1): 78-87, 94.

temperature, coolant flow rate, and contact area between the coolant pipe and the battery on the thermal performance of a 5×5 LiFePO₄/graphite battery pack. The results showed that a high discharge rate would cause the maximum temperature and maximum temperature difference of the battery to rise. Low ambient temperature and coolant temperature can effectively reduce the temperature of the battery pack, but too low ambient temperature and coolant temperature can cause a larger temperature difference in the battery pack. When the ambient temperature is at room temperature, the optimal coolant temperature is 293.15 K. The coolant flow rate has little effect on the thermal performance of the battery pack. The larger the contact area between the battery and the coolant pipe, the lower the maximum temperature and maximum temperature difference of the battery pack. However, considering the economic cost, the optimal contact angle between the battery and the coolant pipe is 90°. This study provides theoretical guidance for the design of thermal management systems for lithium-ion battery packs.

Keywords: lithium ion battery; thermal safety; liquid cooling; electrochemical model

引言

电动汽车 (electric vehicle, EV) 的持续推广有效缓解了使用传统燃油汽车导致的环境污染问题,这也推动了汽车行业从燃油车到电动汽车的转变^[1-3]。锂离子电池 (lithium-ion battery, LIB) 由于其较低的成本和自放电率、长的循环寿命以及高的功率密度和能量密度等优势成为了电动汽车动力源的首选^[4-9]。然而, LIB 及 LIB 组由于电化学反应等因素产生的热量会引起诸多问题,例如容量下降、热失控等^[10-13]。LIB 的最佳工作温度区间为 25~40 °C,此外 LIB 组在工作过程中需要尽量减少电池组的最大温差^[14]。电池热管理系统 (battery thermal management system, BTMS) 可以有效地对锂离子电池进行散热处理,提高电池组的工作性能及安全性能。因此 BTMS 中电池组的散热介质与散热结构对电池散热性能的提升至关重要。

研究者们已经提出了许多种 BTMS 使电池组在最佳的温度区间内工作,锂离子电池热管理技术主要包括空气冷却、液体冷却、热管冷却以及相变材料冷却。空气冷却是将空气作为冷却介质调节 LIB 的温度,其优点是结构简单、成本低,但是空气与电池间的传热率低,在复杂的工作条件下电池很难保持在合理的温度范围内。相变材料冷却由于其具有独特的潜热可以吸收热量使得相变材料成为了一种高效的散热介质,但是相变材料的使用会不可避免地导致电池组的整体重量上升从而降低电池组的质量能量密度。液体的传热系数大于空气的传热系数,而且液体的可流动性可以有效减少液体作为电池组散热介质时的用量,进而减少电池组的整体重量,因此液体冷却在不过度增加电池组重量的同时可以保证电池组的散热性能。Tesla、Audi、Chevro-

let 等汽车品牌旗下许多商用电动汽车都采用了液冷冷却对电池组进行散热。

然而,液体冷却需要建立液冷通道,这会导致电池组的整体体积变大,因此设计合理的冷却通道对于增加电池组的体积能量密度、提高电池组的热安全性至关重要。JIN 等^[15]开发了一种在传统直通道中加入横切的斜切口的结构,这种结构可以以最小的压力损失增强方形电池 BTMS 的散热性能。HUO 等^[16]探究了方形电池液冷 BTMS 的通道数、流向、流速和环境温度对电池温升的影响。相比于方形电池,圆柱形电池具有卷绕工艺成熟、自动化程度高、制造成本相对较低等优势,常被用于 EVs 中。然而圆柱形电池的外形存在空间利用率低、径向温度分布不均匀等问题,因此对于圆柱形电池组更需关注整体结构^[17-18]。但是目前针对圆柱形 LIB 组进行结构优化提高电池组的散热性能的研究较少。

LIB 热管理的研究手段主要有实验与模拟 2 种。虽然实验手段较为成熟,但是实验过程难以直观描述 LIB 工作中的物理过程,而且实验成本较高,需要购买设备、器材和材料,并花费时间和人力进行测试,受环境影响较大,需要进行长时间的实验才能获得足够的实验数据。近年来,数值模拟得到了快速发展,成为了研究 LIB 热行为的重要研究手段^[19-20],模拟可在较短的时间内进行大量的数据模拟,可迅速评估不同的设计方案,可模拟不同的工作条件,可更容易地进行参数敏感性分析和优化。用于研究 LIB 热行为的模型根据描述机制不同可以分为 3 种:热模型、电-热模型以及电化学-热模型^[21-25]。热模型采用简单的传热模型,利用一个简单的发热源代替电池在 BTMS 中的位置,然后求解能量守恒方程进而得到电池组的温度分布,其优点是计算简单,易于实现,但是该模型没有考虑电化学反应的影响,

无法准确预测电池性能；电-热模型是利用经验模型或者等效电路模型来描述电池产热，并将产热作为 BTMS 中的热源，再利用能量守恒方程求解传热过程，电-热模型比锂离子电池热模型更精确，能够提供更准确的预测，但仍然没有考虑到电化学反应对电池性能的影响；电化学-热模型考虑了 LIB 工作过程中的传质、传热以及电化学反应，精确计算电池在工作过程中的实时产热，再利用热模型计算电池组的温度分布，此外电化学-热模型可以考虑电池工作过程中温升导致的电池内部的物理、化学性质的变化，因此电化学-热模型在 BTMS 的模拟仿真中具有更高的准确性。

本文针对 26650 型圆柱形 LiFePO₄/石墨电池组液冷模块，构建了一个包含 25 节电池的电池组模块的电化学-热模型，并利用低温液体对工作电池进行散热，其中液冷通道采用的是一种波浪形通道，并将通道置于电池之间。该电化学模型是基于 NEWMAN 等^[26-28]提出的伪二维 (P2D) 电化学模型建立的。通过模拟电池组放电过程，计算电池放电过程的焦耳热、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。利用 P2D 模型计算的产热功率和三维传热模型计算电池组中的温度分布，进而计算在放电过程中电池组温度对电池本身的影响，从而实现电化学模型与热模型的进一步耦合。本文利用上述的电化学-热耦合模型系统地探究了放电倍率、流体流速、流体温度、电池与冷却管道接触面积、初始温度对电池组散热性能的影响。

1 模型与方法

图 1(a)为本文设计的新型 BTMS 中的电池组散热模块。图 1(b)为该系统的俯视图，该系统主要包括 3 个主要部分：圆柱形电池、波浪形液冷通道和电池组外壳，其余部分为空气，每个部分都有各自的控制方程描述不同的过程。受 Tesla 电动汽车内电池排列的启发，此处设计了一种波浪形的液冷通道，这种结构有助于冷却液快速带走电池表面的温度，从而降低电池组的温度、提高电池组的热均匀性。冷却管道与电池的贴合程度通过贴合角度 θ 来调节。

1.1 电化学模型

图 1(c)为 P2D 模型，该模型在一维模型上分为 LIB 电池正极、负极以及隔膜，一维模型上考虑锂离子在液相中的扩散、迁移以及固/液界面处的反

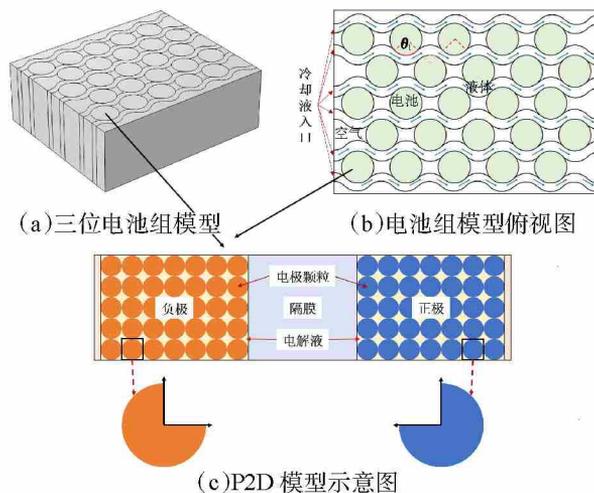


图 1 电池 (组) 模型

Fig. 1 Schematic diagram of battery pack model

应，此外 P2D 模型还存在一个衍生维度 (活性颗粒粒径方向) 用以描述锂离子在固相中的扩散，因此 P2D 模型的主要控制方程包括描述固/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。这些控制方程在研究人员之前的工作中进行了详细地描述^[29]。利用 P2D 模型可以准确计算电池在工作过程中的产热并将环境温度反馈给电池，进一步探究温度对电池性能的影响。

1.2 三维传热模型

在本研究中存在以下假设：电池产热均匀；圆柱形电池径向与轴向导热系数不同；电池其余物理性质各向同性；液体为不可压缩流体；忽略液冷管道和外壳厚度；液体的物理性质参数各向同性；忽略温度对液体与电池体积的影响。电池内部的能量守恒方程与电池的相关参数在研究人员之前的工作中进行了系统地介绍^[29]。空气与电池、电池与液体、液体与空气之间的热传递用方程(1)~(3)描述：

$$-k_{\text{bat}} \frac{\partial T_{\text{bat}}}{\partial n} = k_{\text{air}} \frac{\partial T_{\text{air}}}{\partial n} \quad (1)$$

$$-k_{\text{bat}} \frac{\partial T_{\text{bat}}}{\partial n} = k_{\text{wat}} \frac{\partial T_{\text{wat}}}{\partial n} \quad (2)$$

$$-k_{\text{wat}} \frac{\partial T_{\text{wat}}}{\partial n} = k_{\text{air}} \frac{\partial T_{\text{air}}}{\partial n} \quad (3)$$

式中： T_{bat} 、 T_{wat} 和 T_{air} 分别为电池、液体 (水) 和空气的温度； k_{bat} 、 k_{wat} 和 k_{air} 分别为电池、液体和空气的导热系数； n 为接触面的垂直方向。

冷却液的流动用层流方程描述：

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\rho_{\text{wat}} u_{\text{wat}}) = 0 \\ \rho_{\text{wat}} u_{\text{wat}} \cdot \nabla u_{\text{wat}} = -\nabla p + \mu_{\text{wat}} \nabla^2 u_{\text{wat}} \end{cases} \quad (4)$$

式中： ρ_{wat} 为水的密度； u_{wat} 为水的流速； p 为压力；

μ_{wat} 为水的黏度系数。冷却液中的能量守恒方程为：

$$\rho_{\text{wat}} C_{p,\text{wat}} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_{\text{wat}} C_{p,\text{wat}} u_{\text{wat}} \nabla T + \nabla(-k_{\text{wat}} \nabla T) = 0 \quad (5)$$

$$\mu_{\text{wat}} = [1.38 - 0.0218 \left(\frac{T}{1\text{K}}\right) + 1.368 \times 10^{-4} \left(\frac{T}{1\text{K}}\right)^2 - 4.65 \times 10^{-7} \left(\frac{T}{1\text{K}}\right)^3 + 8.90 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{1\text{K}}\right)^4 - 9.079 \times 10^{-13} \left(\frac{T}{1\text{K}}\right)^5 + 3.85 \times 10^{-16} \left(\frac{T}{1\text{K}}\right)^6] \text{Pa} \cdot \text{s} \quad (6)$$

$$\rho_{\text{wat}} = \begin{cases} [0.000063 \left(\frac{T}{1\text{K}}\right)^3 - 0.06 \left(\frac{T}{1\text{K}}\right)^2 + 18.92 \left(\frac{T}{1\text{K}}\right) - 950.7] \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} & (273.15\text{K} < T < 293.15\text{K}) \\ (0.00001 \left(\frac{T}{1\text{K}}\right)^3 - 0.0134 \left(\frac{T}{1\text{K}}\right)^2 + 4.970 \left(\frac{T}{1\text{K}}\right) + 432.257] \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} & (293.15\text{K} < T < 373.15\text{K}) \end{cases} \quad (7)$$

$$k_{\text{wat}} = (-0.869 + 0.0089 \left(\frac{T}{1\text{K}}\right) - 1.58 \times 10^{-5} \left(\frac{T}{1\text{K}}\right)^2 + 7.98 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{1\text{K}}\right)^3) \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8)$$

$$C_{p,\text{wat}} = (12010.1471 - 80.4 \left(\frac{T}{1\text{K}}\right) + 0.3 \left(\frac{T}{1\text{K}}\right)^2 - 5.38 \times 10^{-4} \left(\frac{T}{1\text{K}}\right)^3 + 3.62 \times 10^{-7} \left(\frac{T}{1\text{K}}\right)^4) \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (9)$$

1.3 数值方法

本文使用商业软件 (COMSOL Multiphysics) 对 26650 型圆柱形电池进行建模, 首先构建 LiFePO₄ 电池的 P2D 模型, 通过 P2D 模型计算电池在工作过程中的电流、电压、电势分布、浓度分布以及电池的整体产热, 并将 P2D 模型中得到的电池产热作为电池组模块中的唯一热源, 进而计算电池组在不同条件下的温度分布。这里研究人员主要通过改变电池放电倍率、环境温度 T_{env} 、冷却液温度 T_{wat} 、冷却液流速 v_{wat} 和冷却管道与电池的贴合角度 θ_1 探究电池组的热行为。

2 结果与讨论

2.1 放电倍率的影响

这里主要考察了不同放电倍率 (0.1、0.5、1 和

式中的 $C_{p,\text{wat}}$ 为冷却液的恒压热容。冷却液参数 μ_{wat} 、 ρ_{wat} 、 k_{wat} 、 $C_{p,\text{wat}}$ 均与温度有关, 用方程(6)~(9)描述:

5 C) 对电池热行为的影响。其中冷却液入口速度都为 0.1 m/s, 入口温度为 298.15 K, 环境温度为 298.15 K, θ_1 为 90°。图 2 显示了在放电过程中不同阶段的电池组的温度分布三维图, 由于放电倍率不同, 所以不同电池在同一时间的状态并不相同, 因此采用放电深度 (depth of discharge, DOD) 来表示电池的状态。由于不同倍率下电池的温度差距较大, 所以这里对每一个温度分布图单独采用了颜色图例。结果表明, 当 DOD 为 0.01 时, 电池中心温度明显高于电池周围温度, 这是因为电池的初始温度 (298.15 K) 高于冷却液的初始温度 (293.15 K), 此时热量从电池往冷却液转移导致电池中心温度较高形成温度梯度, 而且放电倍率越高温度梯度越大。当 DOD 达到 0.1 时, 采用 0.1、0.5 和 1 C 放电倍率下的电池组的温差都很小, 电池组的整体温度也保

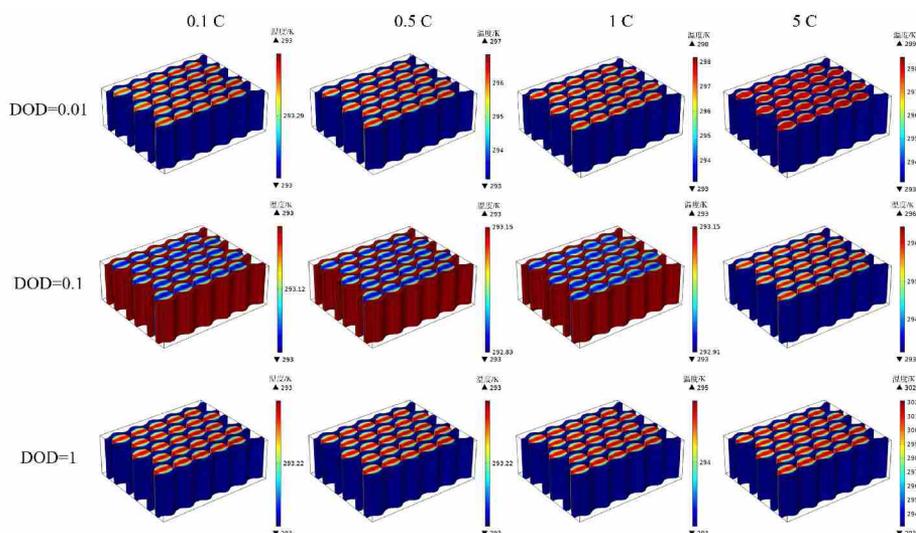


图 2 不同倍率下放电过程中电池组的温度分布

Fig. 2 Temperature distribution of battery pack during discharge at different discharge rates

持在冷却液温度 (293.15 K) 附近, 这表明在低倍率下使用低温液冷可以起到很好的冷却效果。此外, 当放电倍率为 0.1、0.5 和 1 C, DOD 为 0.1 时, 电池中心温度略低于电池边缘温度, 这是因低倍率下电池在放电初期吸热所导致的。而在高倍率 (5 C) 下, DOD 为 0.1 时, 电池组则出现了较明显的温差。当 DOD 为 1 时, 采用 0.1、0.5 和 1 C 放电倍率的电池组依然没有展现出大的电池温差, 只有 5 C 的高倍率使得电池组的温度上升, 且产生较大的温差。这表明高倍率放电会导致电池温升增加, 电池组温差变大。此外, 研究人员还发现由于冷却液的流动性, 冷却液在电池放电过程中的温度基本不变, 这也进一步表明了这种液冷方式的优势。

图 3(a)为电池组在不同的工作倍率下最大温度, 结果表明在低倍率 (0.1、0.5 和 1 C) 下, 电池在放电初期温度出现了快速下降, 这是由于电池的初始温度高于冷却液的温度且此时产生的热量较少, 电池温度快速下降至冷却液的温度 (293.15 K), 放电倍率越低电池的温降越快。低倍率下电池组的温度降低至 293.15 K 后有一段平稳期, 说明在此阶段电池组产生的热量小于冷却液带走的热量, 随着电池产热量的不断积累, 电池温度开始上升, 但是由于

低倍率电池产热较少, 电池温升较少, 尤其是放电倍率为 0.1 C 时, 放电结束时电池组的最高温度 (293.30 K) 也只是略高于冷却液温度 (293.15 K)。在 5 C 放电倍率下电池组的最高温度在放电初期虽然也出现了下降, 但当温度下降到 294.83 K 后便开始回升, 当放电结束时电池组的最大温度达到了 302.11 K, 相比于 0.1、0.5 和 1 C 下电池组的最高温度分别高了 8.81、8.14 和 7.28 K。

图 3(b)展示了电池组在放电过程中最大温差变化, 在放电最开始的时候电池组内的最大温差都出现了急速上升达到局部峰值, 这是因为电池组自身的初始温度于冷却液温度存在的温差导致电池组局部温度出现快速下降。在 0.1、0.5 和 1 C 下由于电池产热较低, 随着放电与散热的进行, 电池组的温度开始下降, 使得电池组的最大温差下降, 直至接近于 0 K。随后, 电池热量不断积累, 温度开始上升, 电池组的最大温差也开始上升, 不过在低倍率下电池组的最大温差始终保持在 2 K 以内。当放电倍率达到 5 C 时电池组的最大温差经历快速上升后也出现了下降, 直至下降至 1.68 K, 随着放电的进行电池组的最大温差开始上升, 到放电结束时电池组的最大温差达到了 8.93 K。

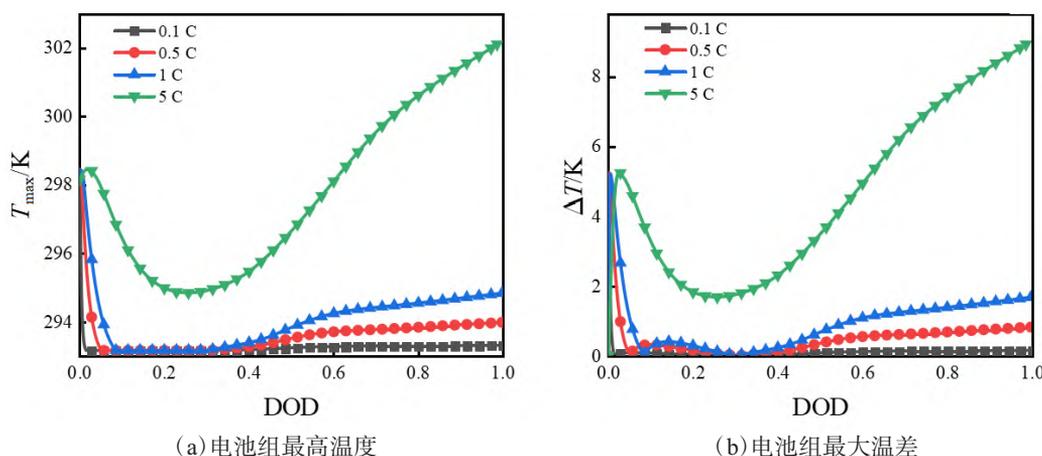


图 3 不同倍率下电池组的最高温度和最大温差

Fig. 3 Maximum temperature and maximum temperature difference of battery pack under different discharge rates

2.2 环境温度的影响

LIB 常在不同的环境下工作, 环境温度会导致电池组的初始温度不一样, 会影响电池组的温度与温差。为探究环境温度的影响, 研究人员考察了电池不同初始温度 (278.15、288.15、298.15、308.15、318.15 K) 在放电过程中的温度变化。这里冷却液入口速度都为 0.1 m/s, 入口温度为 298.15 K, θ_1 为 90° , 采用的放电倍率为 5 C。图 4 为不同环境温度下的电池组温度分布, 因为电池组的产热相近, 因

此后续采用统一颜色图例来描述。环境温度小于冷却液温度, 即环境温度为 278.15 K 和 288.15 K 时, 电池放电前期 (DOD=0.01 和 DOD=0.1) 温度低于冷却液温度, 此时冷却液并不能对电池进行降温, 随着放电的进行电池温度升高, 当 DOD 达到 1 时, 电池温度略高于冷却液温度, 这表明在低温环境下不需要对电池组进行过度的降温。当环境温度为 298.15 K, 电池初始温度略高于冷却液温度, 并且在放电的整个过程中电池组温度变化较小。当环境

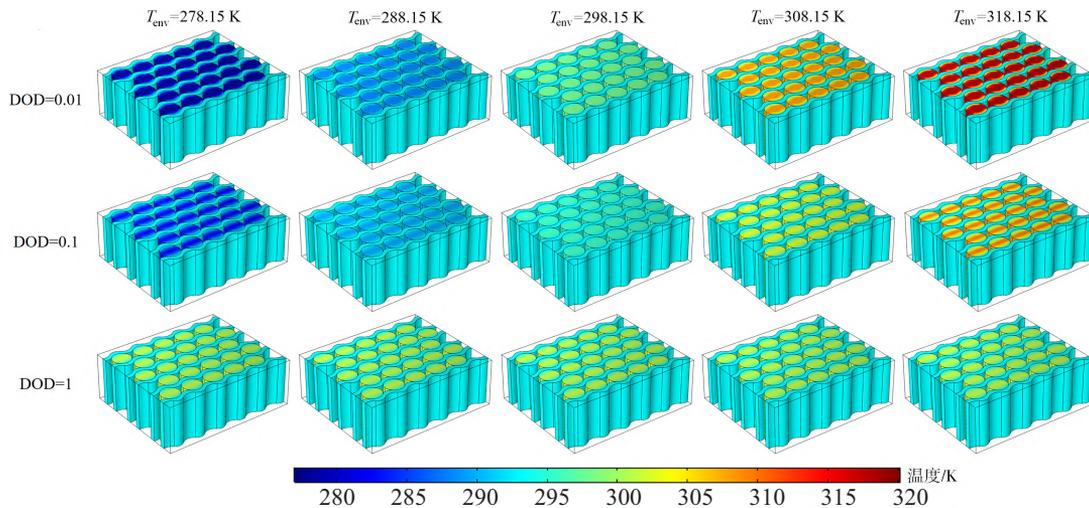


图 4 不同环境温度下放电过程中电池组的温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of battery pack during discharge at different ambient temperatures

温度达到 308.15 K 和 318.15 K 时，电池组初始温度高于冷却液，冷却液在放电开始就可以对电池组进行散热，在放电过程中电池组温度不断下降，这表明高温环境下，散热系统对电池组的安全至关重要。

图 5(a)为不同环境下电池组的最大温度。结果表明在低温环境 (278.15 K 和 288.15 K) 中，电池组在放电初期最大温度会快速上升至 293.15 K，并持续一段时间维持在 293.15 K，温度快速上升的原因除了电池组在初期的产热外还有冷却液温度高于电池初始温度，随后电池温度维持在 293.15 K 一段时间，随着热量的积累电池组的最大温度开始上升。当环境温度为 298.15、308.15 和 318.15 K 时，电池组的最大温度在放电初期出现了短暂的上升，这是因为此时电池开始产热，电池内部温度还未传递到冷却液，随后热量传递，电池组的最大温度开始下降。此外，研究人员还发现在放电结束时，电池组的最大温度相近，都接近 302 K，这是由于电池组

的放电倍率相同，电池的产热相近，而冷却液为流动液体，可以不断带走热量，最终使得各个系统趋近相同 (如图 4, DOD=1 的情况)。图 5(b)为不同环境温度下电池组的最大温差。在放电初期，电池组的最大温差都出现了较大的波动，尤其是环境温度为 318.15 K 时，电池组的最大温差达到了 26.9 K，这会严重影响电池的寿命和性能，导致此现象的主要原因是电池的初始温度与冷却液的温度相差较大。随后电池内部热量开始传递，电池组最大温差开始变小。环境温度为 278.15 K 和 288.15 K 时电池组的最大温差甚至降到了 0 K 附近，这是因为电池传热使得电池整体温度接近冷却液温度。最后电池热量积累和热量传递导致电池组最大温差不断变大，放电结束时电池组最大温差都达到了 9 K 左右。结合图 5(a)电池组最终的最高温度和图 5(b)的最终最大温差，可以发现电池组的最终最低温度接近冷却液的温度。

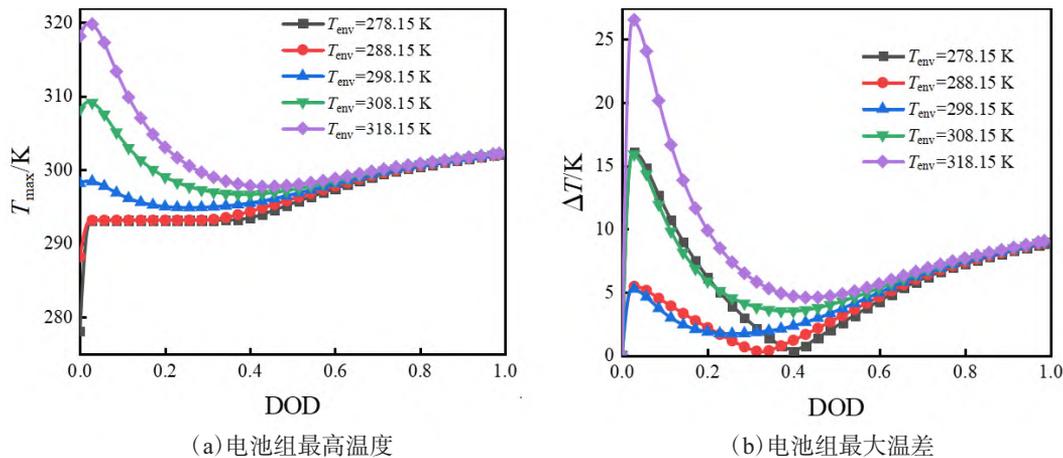


图 5 不同环境温度下电池组的最高温度和最大温差

Fig. 5 Maximum temperature and maximum temperature difference of battery pack under different ambient temperatures

2.3 冷却液温度的影响

冷却液温度是影响电池组散热的主要原因之一，不过低温冷却液需要更多的冷却成本，因此需要研究冷却液温度对电池组热性能影响。这里研究人员采用的模型参数为：冷却液入口速度都为 0.1 m/s，电池初始温度都为 298.15 K， θ_1 为 90° ，放电倍率为 5 C。由于冷却液需要对电池组进行降温，因此冷却液未采用过高温，分别采用了 278.15、283.15、288.15、293.15 和 298.15 K。图 6 为不同冷却液下电池组的温度分布，可发现无论冷却液温度是多少，在放电结束时冷却液的温度与初始阶段的冷却液温度相近，这表明流动的冷却液可以对电池组进行有效的散热。此外，在放电初期 (DOD=0.01) 不同情况下电池组的温度相近，到放电结束 (DOD=1) 时，冷却液温度越低电池组的最终温度越低。图 7 (a)为不同冷却液温度下电池组的最高温度，结果表明随着冷却液温度的升高，电池组的最高温度上升。

冷却液温度为 298.15 K 时，电池组放电结束时的最高温度接近 308 K，接近于电池组的最佳温度范围边缘。当冷却液温度为 293.15 K 时，电池组的最大温度仅达到了 302 K，而且 293.15 K 的冷却液也不需过多的冷却成本，这表明 293.15 K 是一个合适的冷却液温度。图 7(b)为不同冷却液温度下电池组的最大温差，结果表明温度过低的冷却液会导致电池组在工作初期产生较大的温差。冷却液温度为 293.15 K 时，电池组在放电初期的最大温差在 5 K 以内，这进一步说明了 293.15 K 是一个合适的冷却液温度。此外，研究人员还发现在不同冷却液温度下，电池组在放电结束时的最大温差比较接近，这说明想要达到合适的冷却效果，不需要过度追求高经济成本的低温冷却液。

2.4 冷却液流速对电池组散热的影响

冷却液流速不同会导致冷却液在相同时间内带走的热量不同，因此需要考察冷却液流速对电池组

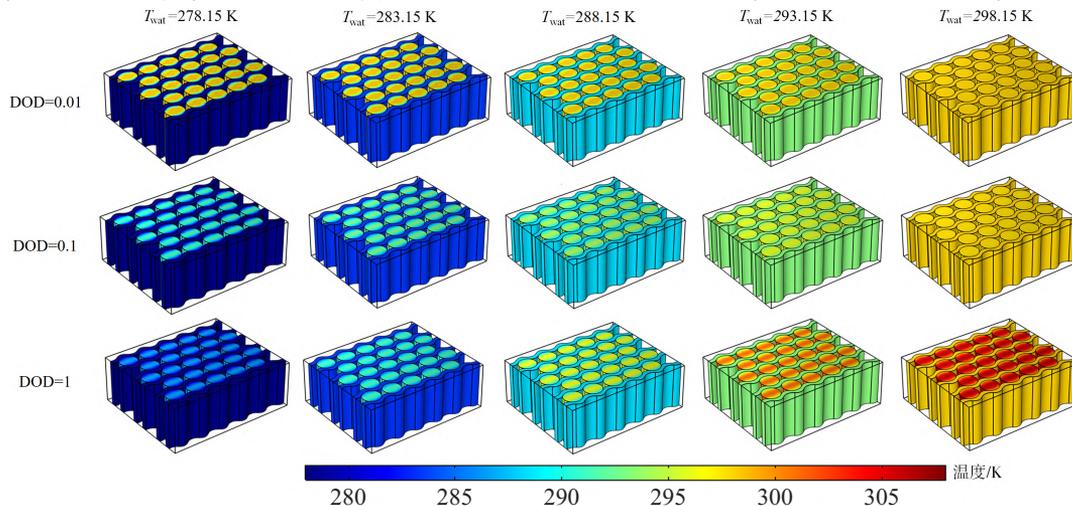
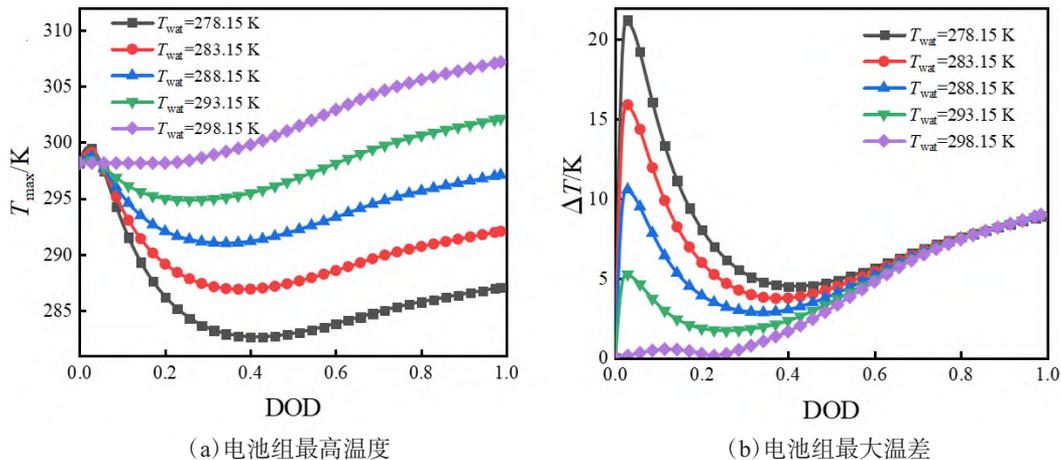


图 6 不同冷却液温度下放电过程中电池组的温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of battery pack during discharge with different coolant temperatures



(a) 电池组最高温度

(b) 电池组最大温差

图 7 不同冷却液温度下电池组的最高温度和最大温差

Fig. 7 Maximum temperature and maximum temperature difference of battery pack with different coolant temperatures

散热性能的影响。为了探究 4 种不同流速 (0.1、0.2、0.3、0.4 m/s) 的影响, 这里设置冷却液的温度为 293.15 K, 电池初始温度为 298.15 K, θ_1 为 90° , 放电倍率为 5 C。图 8 为不同冷却液流速下放电过程中电池组的温度分布, 由图可发现不同流速下冷却液对电池组的冷却效果相近。

图 9 为不同冷却液流速下电池组的最高温度与最大温差。根据图 9 中小插图可以发现, 更大的冷

却液流速可以降低电池组的最大温度与最大温差, 但是流速从 0.1 m/s 增加至 0.4 m/s 时, 电池组的最大温度仅从 302.12 K 下降至 301.96 K, 最大温差从 8.94 K 下降至 8.81 K。这表明冷却液流速对电池组的散热效果影响较小。

2.5 冷却管道与电池的接触面积的影响

LIB 组的散热是通过电池与冷却管的热交换进行的, 因此电池与冷却管的接触面积是影响电池组

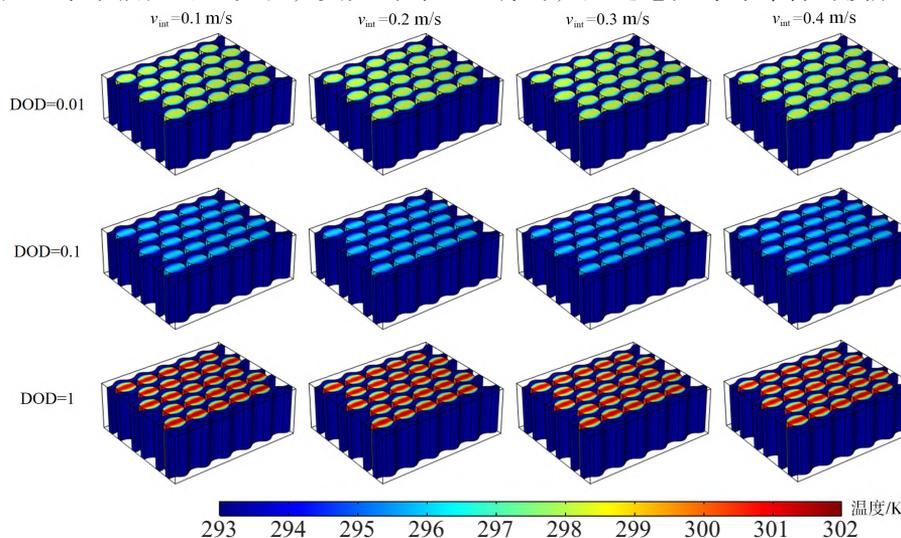


图 8 不同冷却液流速下放电过程中电池组的温度分布

Fig. 8 Temperature distribution of battery pack during discharge with different coolant flow rates

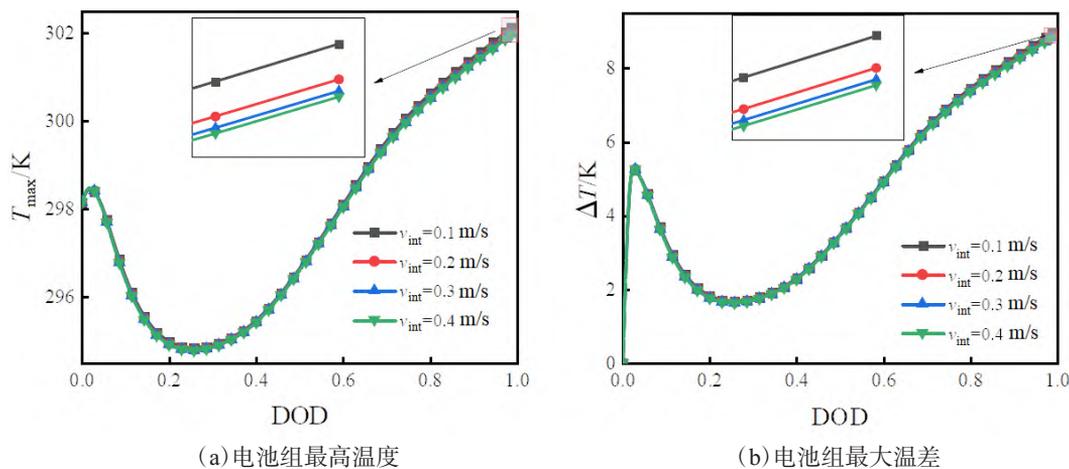


图 9 不同冷却液流速下电池组的最高温度和最大温差

Fig. 9 Maximum temperature and maximum temperature difference of battery pack with different coolant temperatures

散热性能的主要因素之一。电池组与冷却管的接触面积是通过接触角 (θ) 进行调节的, θ_1 越大, 电池与冷却管的接触面积越大。在冷却液温度为 293.15 K、电池初始温度为 298.15 K、流体流速为 0.1 m/s、放电倍率为 5 C 条件下, 研究人员分别考察了 $\theta_1=30^\circ$ 、 60° 、 90° 、 120° 和 150° 下电池组的热行为。不同接触面积下电池组的温度分布如图 10 所示, 由图可知: 当 $\theta_1=30^\circ$ 时, 冷却管道近乎为直线,

电池与冷却管的接触面积很小, 这导致在放电结束时, 电池组存在较大的温差; 当 $\theta_1=150^\circ$ 时, 电池基本被冷却管道包覆, 电池组整体温度较低。随着接触面积的增加, 电池组的整体温度下降。

不同接触面积下电池组的最高温度与最大温差如图 11 所示, 由图 11(a) 可知电池组的最高温度随着电池与冷却管接触面积的增加而减小。当 $\theta_1=30^\circ$ 时, 电池组放电结束后最高温度达到 308.22 K。当

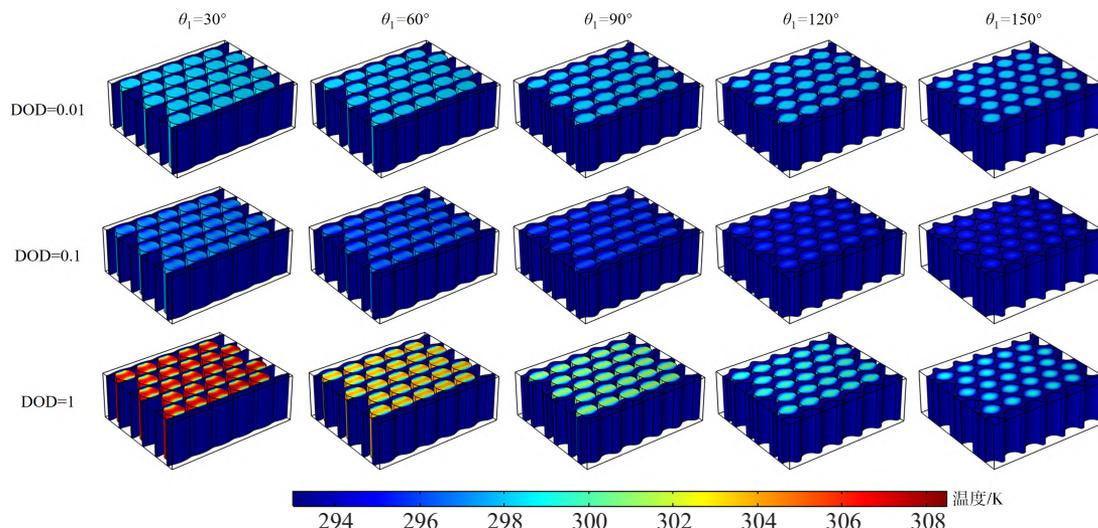
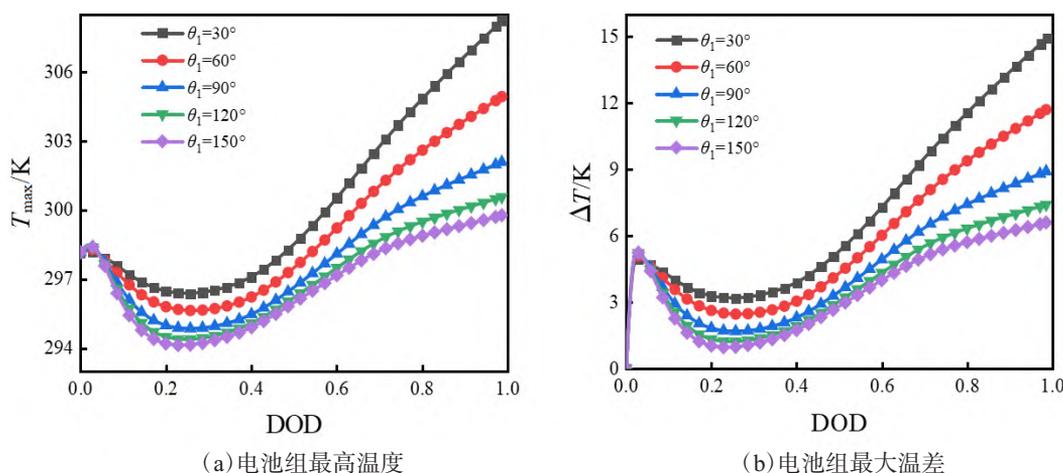


图 10 不同接触面积下电池组的温度分布

Fig. 10 Temperature distribution of battery pack under different contact areas



(a) 电池组最高温度

(b) 电池组最大温差

图 11 不同接触面积下电池组的最高温度与最大温差

Fig. 11 Maximum temperature and maximum temperature difference of battery pack under different contact areas

$\theta_1=60^\circ$ 时, 电池组放电结束最高温度达到 304.91 K, 相比于 $\theta_1=30^\circ$ 时下降了 3.31 K。当 $\theta_1=90^\circ$ 时, 电池组放电结束最高温度达到 302.07 K, 相比于 $\theta_1=60^\circ$ 时下降了 2.84 K。当 $\theta_1=120^\circ$ 时, 电池组放电结束最高温度达到了 300.55 K, 相比于 $\theta_1=90^\circ$ 时仅下降了 1.52 K。当 θ_1 从 120° 提高到 150° 时, 电池组放电结束时的最高温度仅下降了 0.79 K, 这表明随着接触面积的不断增大, 电池组的最高温度的下降趋势变缓。由图 11(b)可知, 大的接触面积可以减少电池组的最大温差, 但是最大温差的下降趋势也随着接触面积的增大而减缓。大的接触面积必然会增加冷却管道的耗材, 从而增加经济成本, 因此考虑经济成本最佳的接触角度应为 90° , 此时电池组的最大温度和最大温差都在可接受范围内, 而继续增大接触角对电池组的散热性能提升较小。

3 结论

- 1) 电池组的液体冷却系统可以有效降低电池组在工作过程中的温升, 减少电池组的最大温差。
- 2) 高的放电倍率虽然可以减少电池组的放电时间, 但是会导致电池组的温度快速上升造成热安全问题, 而且在冷却系统的作用下, 高的放电倍率会导致电池组出现较大的温差, 这会导致电池性能和循环寿命下降。
- 3) 低的环境温度与低的冷却液温度都可以有效降低电池组工作时的温度, 不过过低的冷却液温度会导致电池组产生较大的温差, 并会使电池温度过低, 而且冷却液温度越低成本越高, 因此冷却液温度不宜过低。当环境温度为室温时, 293.15 K 是冷却液的最佳温度。

4) 电池组液冷系统中冷却液的流速对电池组的散热性能影响较小。

5) 波浪形冷却管道与电池组的接触面积越大, 电池组的散热性能越好, 但是随着接触面积的增加, 散热性能的提升变小, 在本研究中, 波浪形冷却管道与电池的最佳接触角度为 90° 。

从结果可以看出, 对于电池组的热管理系统设计来说, 保持适当的环境温度和冷却液温度非常重要。此外, 增加电池与冷却管道的接触面积可以有效提高散热性能, 但要考虑经济成本, 最佳接触角为 90° 。需要注意的是, 放电倍率也会影响电池的温度, 因此在选择使用场景时应当考虑到这一点, 并选择合适的放电倍率。

在 25 节电池组的研究基础上, 可以根据实际情况将所得结论推广至更大规模的电池组, 但需要注意考虑电池组规模增大所带来的影响, 并根据实际情况进行必要的修正和调整。同时, 应该对更大规模的电池组进行充分的实验验证, 以确保所得结论的准确性和适用性。在推广应用时, 需要综合考虑电池性能、使用环境、工艺流程等因素, 以实现最佳的性能和可靠性。

基于液冷的 BTMS 在提高电池组热安全性发挥了重要作用, 但是液冷依然存在诸多问题, 为了推进液冷 BTMS 的发展, 其未来的发展方向主要是: 开发更优质的冷却液 (导热性能佳、导电性能差)、优化 BTMS 的结构, 减少电池组的体积与质量、与其他的散热手段结合, 提高散热性能。

参考文献

- [1] SOVACOO B K, ROGGE J-C, SALETA C, et al. Transformative versus conservative automotive innovation styles: Contrasting the electric vehicle manufacturing strategies for the BMW i3 and Fiat 500e[J]. Environmental Innovation and Societal Transitions, 2019, 33: 45–60.
- [2] TEECE D J. Tesla and the reshaping of the auto industry[J]. Management and Organization Review, 2018, 14(3): 501–512.
- [3] LIU Shiyong. Competition and valuation: a case study of tesla motors[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 692(2): 022103.
- [4] 黎建刚, 李琴, 唐红梅, 等. MOFs 衍生结构在新型二次电池电极材料中的应用[J]. 能源研究与管理, 2021(1): 78–82.
- [5] 谭志宣, 夏洪伟. 国内减碳现状及“双碳”目标实现途径[J]. 能源研究与管理, 2022, 14(1): 13–18.
- [6] 周建平, 艾仙斌, 石金明, 等. 锂矿石提锂工艺与锂渣资源化利用研究进展[J]. 能源研究与管理, 2022, 14(1): 71–77.
- [7] WU Weixiong, WANG Shuangfeng, WU Wei, et al. A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 182: 262–281.
- [8] LINDGREN J, LUND P D. Effect of extreme temperatures on battery charging and performance of electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2016, 328: 37–45.
- [9] ALI M U, ZAFAR A, NENGROO S H, et al. Towards a smarter battery management system for electric vehicle applications: a critical review of lithium-ion battery state of charge estimation [J]. Energies, 2019, 12(3): 446.
- [10] FENG Xuning, REN Dongsheng, HE Xiangming, et al. Mitigating thermal runaway of lithium-ion batteries[J]. Joule, 2020, 4(4): 743–770.
- [11] LIU Xiang, REN Dongsheng, HSU H, et al. Thermal runaway of lithium-ion batteries without internal short circuit[J]. Joule, 2018, 2(10): 2047–2064.
- [12] LIAO Zhenghai, ZHANG Shen, LI Kang, et al. A survey of methods for monitoring and detecting thermal runaway of lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2019, 436: 226879.
- [13] LIU Chang, WANG Yujie, CHEN Zonghai. Degradation model and cycle life prediction for lithium-ion battery used in hybrid energy storage system[J]. Energy, 2019, 166: 796–806.
- [14] HOSSAIN LIPU M S, HANNAN M A, KARIM T F, et al. Intelligent algorithms and control strategies for battery management system in electric vehicles: progress, challenges and future outlook[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 292: 126044.
- [15] JIN Liwen, LEE P S, KONG X X, et al. Ultra-thin minichannel LCP for EV battery thermal management[J]. Applied Energy, 2014, 113: 1786–1794.
- [16] HUO Yutao, RAO Zhonghao, LIU Xinjian, et al. Investigation of power battery thermal management by using mini-channel cold plate[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 89: 387–395.
- [17] WORWOOD D, KELLNER Q, WOJTLA M, et al. A new approach to the internal thermal management of cylindrical battery cells for automotive applications[J]. Journal of Power Sources, 2017, 346: 151–166.
- [18] FLECKENSTEIN M, BOHLEN O, ROSCHER M A, et al. Current density and state of charge inhomogeneities in Li-ion battery cells with LiFePO_4 as cathode material due to temperature gradients[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(10): 4769–4778.
- [19] DU Jianglong, TAO Haolan, CHEN Yuxin, et al. Thermal management of air-cooling lithium-ion battery pack [J]. Chinese Physics Letters, 2021, 38(11): 118201.
- [20] 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.

(下转第 94 页)

- 域效应期间温度涨落的统计分析[J].能源研究与管理,2022,14(4):129-136.
- [13] YUAN Yi,HU Liqun,XU Liqing,et al.Control of sawtooth via ECRH on EAST tokamak[J].Physics of Plasmas,2016,23(6):062503.
- [14] GRAVES J P,CHAPMAN I T,CODA S,et al.Experimental verification of sawtooth control by energetic particles in ion cyclotron resonance heated JET tokamak plasmas[J].Nuclear Fusion,2010,50(5):052002.
- [15] ZHANG Wei,MA Zhiwei,ZHU Jun,et al.Core-crash sawtooth associated with $m/n=2/1$ double tearing mode in Tokamak[J].Plasma Physics and Controlled Fusion,2019,61(7):075002.
- [16] ZHAO Kaijun,CHENG Jun,DIAMOND P H,et al.Sawtooth-triggered limit-cycle oscillations and I-phase in the HL-2A tokamak[J].Nuclear Fusion,2013,53(12):123015.
- [17] CREELY A J,GÖRLER T,CONWAY G D,et al.Validation study of GENE on ASDEX Upgrade using perturbative thermal diffusivity measured with partial sawtooth heat pulses[J].Nuclear Fusion,2018,58(12):126001.
- [18] FREDRICKSON E D,CALLEN J D,MCGUIRE K,et al.Heat pulse propagation studies in TFTR[J].Nuclear Fusion,1986,26(7):849.
- [19] PARAIL V V,CHERUBINI A,CORDEY J G,et al.Transport analysis of transient phenomena in JET[J].Nuclear Fusion,1997,37(4):481.
- [20] YANG Zhoujun,ZHANG Yaping,REN Xiehang,et al.Observation of the electron thermal transport and temperature fluctuations for electron cyclotron resonance heated plasmas on J-TEXT[J].Nuclear Fusion,2021,61(8):086005.
- [21] FREDRICKSON E D,MCGUIRE K,CAVALLO A,et al.Ballistic contributions to heat-pulse propagation in the TFTR tokamak[J].Physical Review Letters,1990,65(23):2869.
- [22] TUBBING B J D,CARDOZO N J L,VAN DER WIEL M J. Tokamak heat transport-a study of heat pulse propagation in JET[J].Nuclear Fusion,1987,27(11):1843.
- [23] BROWER D L,KIM S K,WENZEL K W,et al.Experimental evidence for coupling of plasma particle and heat transport in the TEXT tokamak[J].Physical Review Letters,1990,65(3):337.

(上接第 87 页)

- [21] SOMASUNDARAM K,BIRGERSSON E,MUJUMDAR A S. Thermal-electrochemical model for passive thermal management of a spiral-wound lithium-ion battery[J].Journal of Power Sources,2012,203:84-96.
- [22] FANG Weifeng,KWON O J,WANG Chaoyang.Electrochemical-thermal modeling of automotive Li-ion batteries and experimental validation using a three-electrode cell[J].International Journal of Energy Research,2009,34(2):107-115.
- [23] DEES D W,BATTAGLIA V S,BÉLANGER A.Electrochemical modeling of lithium polymer batteries[J].Journal of Power Sources,2002,110(2):310-320.
- [24] VERBRUGGE M W.Primary current distribution in a thin-film battery.Application to power-density calculations for lithium batteries[J].Journal of Electrostatics,1995,34(1):61-85.
- [25] WANG Tao,TSENG K J,ZHAO Jiyun,et al.Thermal investigation of lithium-ion battery module with different cell arrangement structures and forced air-cooling strategies[J].Applied Energy,2014,134:229-238.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 杜江龙,杨雯棋,黄凯,等.CPCM/空冷复合式锂离子电池模块散热性能[J/OL].(2022-12-28).http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1946.TQ.20221227.2017.006.html.