

极端温度情况下汽车动力锂电池热特性

金涛, 郑子锋, 闵雪, 关欣

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 动力锂电池作为电动汽车的核心部件, 其性能显著受环境温度影响。在高、低温极端条件下, 电池不仅存在效率衰减问题, 更面临严重的热安全与寿命挑战。针对动力锂电池的极端温域适应性难题展开研究, 讨论了影响电池组最高温度和最大温差的因素, 并提出了相应的控制策略。对于高温环境, 通过改变流体雷诺数, 使得电池最高温度及最大温差都在合理范围内, 并尽可能降低其冷却液压降; 对于低温环境, 提出了变雷诺数策略及延迟加热策略, 有效减少电池预热时间, 并优化电池温度均匀性。

关键词: 极端温度环境; 液体冷却; 控制策略; 电池热管理

中图分类号: TM 912

文献标志码: A

Thermal characteristics of automotive power lithium battery under extreme temperature conditions

JIN Tao, ZHENG Zifeng, MIN Xue, GUAN Xin

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Power lithium batteries, as the core components of electric vehicles, their performance is significantly influenced by ambient temperature. Under extreme high and low temperature conditions, the batteries not only suffer from performance degradation but also face severe challenges related to thermal safety and lifespan. A study was conducted on the challenge of adapting power lithium-ion batteries to extreme temperature ranges, and the factors affecting the maximum temperature and temperature difference of the battery pack were discussed, and corresponding control strategies were proposed. For high-temperature environments, by changing the fluid Reynolds number, the maximum temperature and temperature difference of the battery are kept within a reasonable range, and the cooling hydraulic pressure drop is minimized as much as possible; for low-temperature environments, variable

收稿日期: 2024-07-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21978171)

第一作者: 金涛(1999—), 男, 硕士研究生。研究方向: 电池热管理。E-mail: 18858589622@163.com

通信作者: 关欣(1971—), 女, 副教授。研究方向: 太阳能光伏、电池热管理。E-mail: 15900722038@163.com

引文格式: 金涛, 郑子锋, 闵雪, 等. 极端温度情况下汽车动力锂电池热特性[J]. 上海理工大学学报, 2025, 47(4): 392-403.

Citation: JIN Tao, ZHENG Zifeng, MIN Xue, et al. Thermal characteristics of automotive power lithium battery under extreme temperature conditions[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2025, 47(4): 392-403.

Reynolds number strategy and delayed heating strategy are proposed to effectively reduce battery preheating time and optimize battery temperature uniformity.

Keywords: *extreme temperature ambient; liquid cooling; control strategy; battery thermal management.*

作为电动汽车的关键动力组件,动力电池的电化学特性、承载能力和安全性都会因为温度变化而受到影响。无论是在工作还是静止状态下,电池系统都应维持在一个合适的温度范围内。Pesaran^[1]研究发现,锂离子电池的最佳工作温度范围为25~40℃。Sun等^[2]研究表明,固体-电解液界面(solid electrolyte interface, SEI)在高温下受到副反应的影响,这个过程与气体的析出和SEI组成的变化相耦合,消耗了活性锂离子,使得电池容量发生不可逆转的降解。Guo等^[3]研究发现,在低温环境下,由于离子传输缓慢,锂电池会出现极化严重、内阻增大、输出电压和容量急剧下降等问题,这导致能量和功率密度快速衰减,从而降低电池的输出容量和寿命。在高温环境下(达到40℃),虽然离子扩散速率会提高,但同时也会引发电解液和电极界面的副反应,容易导致热失控,影响电池的性能。

在低温电池加热领域, Ye等^[4]提出了一种利用配备高压加热器的独立液体回路的快速预热系统,在快速预热过程中,电池管理系统(battery management system, BMS)的电流会出现波动,导致电池充电和放电不受控制,并通过断开高压电路的快速充电继电器来快速加热电池系统,从而防止了动力电池的过放和过充电。Guan等^[5]通过共同优化预热时间和电池衰减,提出了一种电池荷电状态(state of charge, SOC)感知的锂离子电池内部预热策略,以解决锂离子电池在预热下的SOC变化带来的实现最佳加热的困难,同时开发了一种利用多级恒流的新型预热策略。He等^[6]研究了用于在低温环境中预热锂离子电池的过冷相变材料(supercooling phase change materials, SPCM),发现体积质量较大的SPCM块和不均匀的温度分布使锂离子电池的放电性能恶化,并基于响应面法(response surface method, RSM)对采用SPCM的锂离子电池低温预热策略进行了优化研究,获得了性能满意的轻量化设计。Chen等^[7]提出了一种将加热板(hot plate, HP)主动热管理技

术与被动相变材料(phase change materials, PCM)相结合的新型BTM(battery thermal management),并对新型BTM、独立HP和独立PCM的整体性能进行了比较研究,发现PCM显著延缓了温降,加快了电池启动。

在高温电池控温领域, Yao等^[8]在40℃高温环境下,对3C放电速率下的锂离子电池组进行了数值模拟,并设计了4种不同的冷却液流动布置方案。结果表明,合理的流量布置方案(交叉逆流)可以有效提高电池组的温度均匀性。Cao等^[9]提出了一种延迟液冷梳理PCM和液冷的新方案。延迟冷却系统较传统冷却系统表现出更好的性能,尤其是在4C的高放电电流下,延迟冷却可显著降低电池之间和电池内部的温差。Luo等^[10]提出了一种结合雪花翅片和液体冷却的混合热管理系统,比较了5种不同液体冷却板配置的冷却效率,发现Batteries-PCM Fins设计中的雪花翅片在3C放电速率下能有效降低电池温度,并将最大温差保持在3℃以下。Zheng等^[11]针对高温快速放电条件,设计了一种新型的混合电池热管理系统(battery thermal management system, BTMS),该系统结合了PCM和波浪形液体冷板,其新颖之处在于与圆柱形电池的接触面积大,显示出优异的热性能,提高了电池在高环境温度下快速放电的热安全性。

目前,在高温电池热管理研究领域,主要从冷却液以及冷却通道的设计方面出发,利用高效换热流道,或是利用PCM及翅片与液冷相结合的方法来强化换热,也有设计独特形状的液冷板来对电池组进行更高效冷却的方法。在低温研究领域,主要从提升电池组升温速率的角度出发,有通过外部预热主动提升电池组温度的策略,也有提出采用新型电池内部预热技术的方法。

本文对在高温和低温环境下的动力锂电池提出相应的热管理策略。在高温环境下,研究了不同入口雷诺数 Re 对电池组温度表现的影响,并找出了满足不同高温高放电条件下热管理要求的临

界 Re 。在低温环境下,提出了变 Re 策略及延迟加热策略,实现在有效提升电池组低温预热速率的同时,满足电池组的热管理要求。

1 研究方法

1.1 几何模型

电池组的生热情况是多因素共同作用的结果,为保证仿真结果的精度,需要建立锂离子电池的三维温度场模型。

本文研究的是容量为 15 Ah 的方形磷酸铁锂电池。电池简化模型的尺寸为 140 mm (长)×65 mm (宽)×18 mm (高)。图 1 为电池组液冷散热模型,电池组从底部往上进行排列,一共由 3 块电池组和 4 层流道进行交叠布置。电池从下至上分别编号为 1、2、3。出于简化模型以及优化冷却系统来提升其效能的目的,参考本课题组的研究^[12],

采用如图 2 所示的蛛网流道,通道截面由多个矩形和正六边形组成,冷却介质从直道的入口进入后,流入中间的规则六边形通道,然后汇聚到另一侧的直道。最后,从另一侧的出口流出,通道入口和出口之间的长度为 140 mm,宽度和高度均为 4 mm。本文便是采用该流道来进行后续的研究。

计算得到,单节锂离子电池的体积为 $V_b=1.638\times10^{-4}\text{ m}^3$,因此,3 节锂电池的总体积为 $4.914\times10^{-4}\text{ m}^3$ 。设计的微小通道入口截面尺寸为 4 mm×4 mm,则入口截面积为 $1.6\times10^{-5}\text{ m}^2$ 。

1.2 锂电池生热模型

鉴于电池内部化学成分较为复杂、化学反应变化多样,无法直接建立实际的三维热效应模型,因此,在建模之前,需要进行理想化的简化和假设:

- a. 假定电池内部热量均匀,可将其视为一个整体温度场,忽略温度梯度对材料性能的影响。

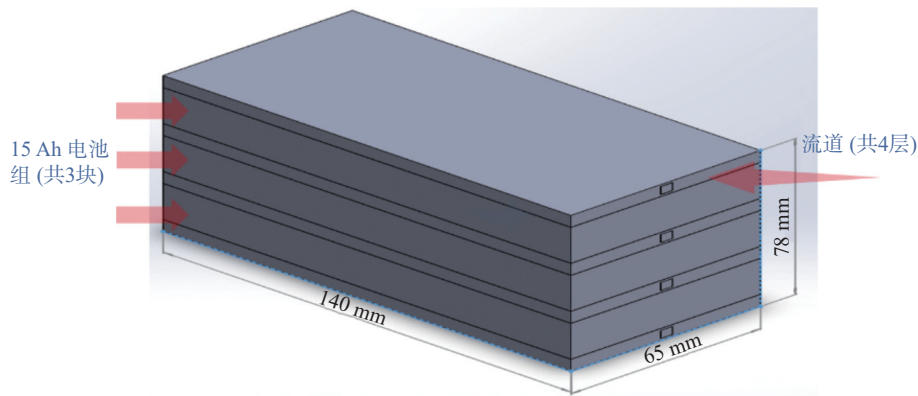


图 1 电池组液冷散热模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of pool group liquid cooling heat dissipation model

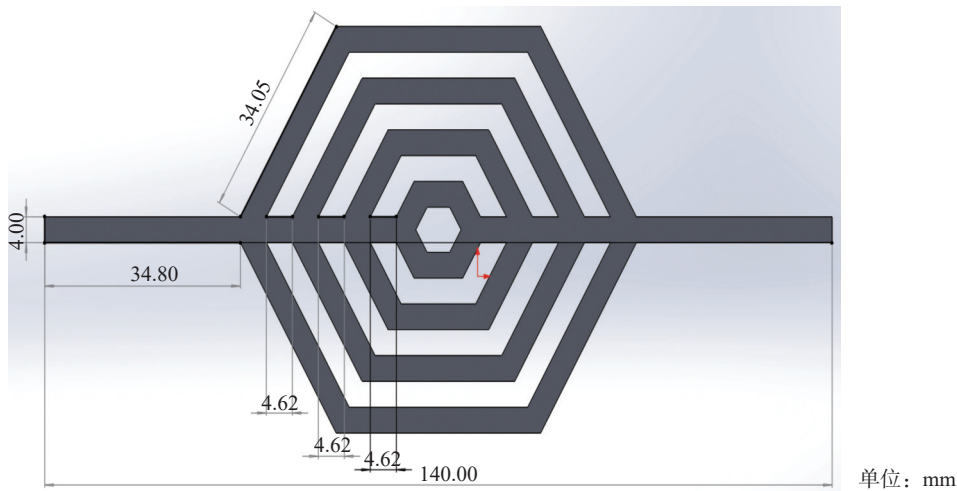


图 2 蛛网流道

Fig.2 Spider web passage

b. 电池内部忽略不同组分之间的传质、热传导等复杂耦合过程。

c. 电池导热系数存在方向性差异, 不同方向具有不同数值。

d. 对电池内部材料导热系数、比热容等参数进行简化处理, 均采用均匀参数。

基于以上简化和假设, 可以将锂离子电池的内部结构简化为一个均匀稳定、导热系数各向同性的长方体。这种简化有助于进行更为简单和高效的三维建模和热量传输分析。

电池的热效应模型最初由 Bernardi 等^[13]在 1985 年建立。表达式为

$$q = \frac{I}{V} \left[(U_{ocv} - U) + T \frac{\partial U_{ocv}}{\partial T} \right] \tag{1}$$

式中: q 为电池生热速率; V 为电池体积; I 为电池工作电流; U_{ocv} 和 U 分别为开路电压和工作电压; T 为电池温度; $\frac{\partial U_{ocv}}{\partial T}$ 为经验常数。其中, 产生的热量主要来源于两部分, 一是反应热 $IT \frac{\partial U_{ocv}}{\partial T}$, 二是内阻 R 产生的热 $I(U_{ocv} - U)$, 由于 $I(U_{ocv} - U) = I^2 R$, 式(1)也可以表示为

$$q = \frac{1}{V} \left[I^2 R + IT \frac{\partial U_{ocv}}{\partial T} \right] \tag{2}$$

与此同时, 电池产生的热量 Q 可以用以下公式来描述:

$$Q = m_b c_{pb} \frac{dT}{dt} \tag{3}$$

表 1 电池基本参数

Tab.1 Basic parameters of battery

电池规格	额定电压/V	质量/kg	内阻/mΩ	尺寸/mm	放电截止电压/V	充电上限电压/V	持续放电倍率/C	瞬间放电倍率/C
15 Ah磷酸铁锂电池	3.2	0.35	4	18×140×65	2.25	3.65	3	5

$$\lambda_x = \frac{h}{\sum_i \frac{d_{x,i}}{\lambda_{x,i}}} \tag{7}$$

式中: h 为电池在 x 轴向的厚度; $\lambda_{x,i}$ 为第 i 层材料在 x 方向上的导热系数; $d_{x,i}$ 为第 i 层材料在 x 方向上的厚度。

$$c_{pb} = \frac{1}{m_b} \sum c_i m_i \tag{8}$$

式中: c_i 为电池各材料的比热容; m_i 为电池内部各材料的质量。

$$Q = m_b c_{pb} \frac{dT}{dt} = 4 \times 10^{-3} I^2 + 0.114 I \tag{9}$$

式中: m_b 为电池质量; c_{pb} 为锂离子电池的平均比热容; $\frac{dT}{dt}$ 为温度梯度。

当锂离子电池不与外部环境进行热量交换时, 它产生的热量与电池的吸热量是一致的, 这是可以确定的, 因此可以得出结论:

$$I^2 R + IT \left(\frac{\partial U_{ocv}}{\partial T} \right) = m_b c_{pb} \frac{dT}{dt} \tag{4}$$

$$\frac{1}{I} \frac{dT}{dt} = \frac{T}{m_b c_{pb}} \frac{\partial U_{ocv}}{\partial T} + I \frac{R}{m_b c_{pb}} \tag{5}$$

当锂离子电池处于正常运行状态时, 其内阻 R 可以被认为是一个恒定值。控温同理, 随着时间的推移, 电压的变动也可以被认为是一个恒定值。通常情况下, 当电池采用恒流放电模式持续 10~20 min 时, $\frac{dT}{dt}$ 也可以被认为是一个恒定值。因此可以把 $\frac{1}{I} \frac{dT}{dt}$ 视为与电流 I 相关的函数。另外, 由于温度与电池容量之间存在着线性关系, 所以可利用这一关系来预测电池组中各单体电池间的放电情况。根据文献 [14] 中给出的实验数据, 电池在 25 ℃ 时不同倍率下的温度上升可以用特定的数学公式来描述:

$$\frac{1}{I} \frac{dT}{dt} = 7 \times 10^{-7} I + 2 \times 10^{-4} \tag{6}$$

表 1 为电池基本参数。

结合以上公式可计算得到, 电池的平均比热容 c_{pb} 为 1633 J/kg·K。

电池在 x 方向上的导热系数 λ_x 为

根据式(2), 可计算出锂离子电池 1~5 C 的单体生热速率, 如表 2 所示。

表 2 单位体积锂电池生热速率

Tab.2 Heat generation rate of lithium batteries per unit volume

放电倍率/C	放电电流/mA	生热速率/(W·m ⁻³)
1	1 500	15 935
2	3 000	42 858
3	4 500	80 771
4	6 000	129 672
5	7 500	189 563

1.3 控制方程

冷却液在流道中流动，存在着能量的传递。本文选择的冷却液为水，将其看作是不可压缩流体且物性参数不变，通过 Re 来判断液体的流动状态。

其计算公式如下：

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \tag{10}$$

$$d = \frac{4A}{p} = \frac{4ab}{2(a+b)} \tag{11}$$

式中： ρ 为流体的密度； v 为流体的速度分量； d 为流道的特征长度； μ 为流体的动力黏度； A 为管道入口截面积； p 为矩形管道横截面湿润周长； a 、 b 分别为流道入口横截面的长和宽。在后续的模拟计算中，通过计算得知 $Re < 2\,300$ ，故判断该流体的流动状态为层流。冷却液的流动过程满足连续性方程、动量守恒方程等。

其方程表达式如下：

连续性方程为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{12}$$

动量方程为

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u \frac{\partial u_i}{\partial x} + v \frac{\partial u_i}{\partial y} + w \frac{\partial u_i}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2} \right) \tag{13}$$

能量方程为

$$\rho_l c_l \left(u \frac{\partial T_l}{\partial x} + v \frac{\partial T_l}{\partial y} + w \frac{\partial T_l}{\partial z} \right) \frac{\partial T_b}{\partial t} = k_l \left(\frac{\partial^2 T_l}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_l}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_l}{\partial z^2} \right) \tag{14}$$

式中： u 、 v 、 w 分别为流体沿着 x 、 y 、 z 方向流动的速度分量； u_i 为速度矢量的分量（即 i 可以代表 x 、 y 、 z 方向，对应 u 、 v 、 w ）； t 为时间； P 为流体的压力； x_i 为位置坐标； $\frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2}$ 为拉普拉斯算子，表示扩散项（这里代表黏性力产生的动量扩散）； ρ_l 为冷却液的密度； c_l 为冷却液的比热容； k_l 为冷却液的导热率； T_b 为电池的温度； T_l 为冷却液的温度。

由表2可知， q 的范围为 $15\,935 \sim 189\,563 \text{ W/m}^3$ ，为保证设计安全可靠，本文取 q 的最大值 $189\,563 \text{ W/m}^3$ 来进行设计。结合3节锂电池的总体积 $4.914 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ ，可求出电池组产生的总热量 Q 的最大值约为 93.15 W 。

$$Q = c_w q_m \Delta T \tag{15}$$

式中： c_w 为水的比热容，值为 $4\,200 \text{ J/kg} \cdot \text{℃}$ ； q_m 为

入口水的质量流量； ΔT 为温差，因为规定动力电池液冷系统进出口水温差不超过 5 ℃ ，所以设计进出口水的温差为 5 ℃ 。由式(15)计算得出，在 Q 为极大值 93.15 W 时，对应的 q_m 为 $2.77 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ 。

入口质量流量 q_m 可用以下公式描述：

$$q_m = \rho_w v_w A \tag{16}$$

式中： ρ_w 为水的密度； v_w 为入口水的流速。

本文设计的微小通道入口截面尺寸较小，为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ ，则入口截面积 A 为 $1.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ 。由式(16)计算得出，入口水流速约为 0.017 m/s 。基于流道中的流体流动为层流， Re 应小于 $2\,300$ 。本文中流道的特征长度为 0.004 m ，由式(10)计算得出，入口水 Re 值约为 68 ，很好地满足层流入口 Re 的要求。

1.4 边界条件

本研究讨论的范围内，冷却液的 Re 小于 $2\,300$ ，实验中设定的入口水温和环境温度均为 25 ℃ ，电池组表面向外界的自然对流换热系数为 $5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ，而出口处的压力设定为 0 Pa ，仿真过程采用了瞬态分析方法。仿蜘蛛网流道使用纯铝作为构建材料，并将去离子水作为冷却流体。为了简化分析过程，本次仿真模拟基于以下假定进行：

- a. 冷却液的流动是稳定且定常的；
- b. 冷却剂是不可压缩的，在流动过程中密度保持不变；
- c. 忽略电池与流道间的接触热阻；
- d. 重力和黏性耗散的影响忽略不计。

1.5 模型验证及网格无关性验证

为确保模拟研究的精确度，建立锂离子电池的三维模型。根据锂离子电池结构特点以及工作原理，选择合适的材料参数，并确定其几何形状与尺寸。使用 SOLIWORKS 软件构建三维模型，随后将其导入到 COMSOL 软件中，并进行适当的网格划分。通过设置锂离子电池各部分材料的导热系数，分析锂离子电池内部温度场分布情况，最终确定了单体锂离子电池的网状结构，如图3所示。

本研究通过将先前计算所得的单位体积发热率导入 COMSOL 软件，以此作为锂离子电池的发热源。对于锂离子电池，其表面与环境之间的自然对流换热系数一般在 $1 \sim 10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 之间浮动，选择平均数 $5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 作为本次研究的换热系数。同时，锂离子电池的起始温度及周围环境温度均

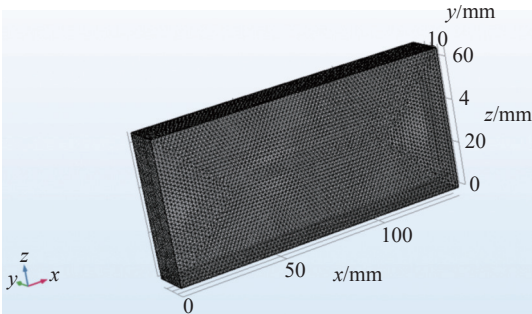


图 3 单体锂离子电池网格图

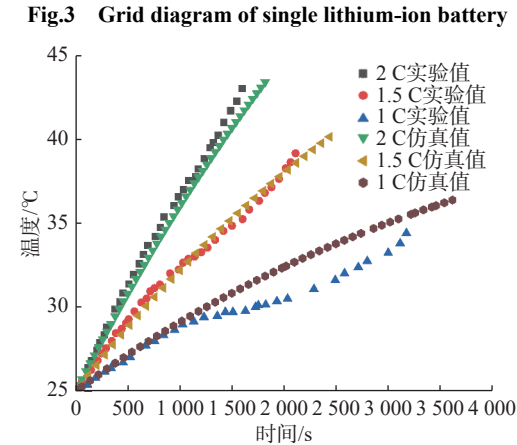


图 4 实验结果与仿真结果对比

Fig.4 Comparison between experimental and simulation results

设置为 25 ℃。

对锂离子电池在 1、1.5、2 C 的不同放电倍率下的性能进行仿真研究，并与文献 [14] 中的实验结果相对比，结果如图 4 所示。模拟仿真得出的锂离子电池的温度变化趋势与实际实验数据基本一致。因此，采用本文的数值模拟方法来预测锂离子电池在不同温度下的性能变化具有可行性。

网格独立性的验证结果如表 3 所示。在 Re 为 100，采用 3 C 的放电倍率时，为确保模拟仿真的精确度与效率，选定 1 263 014 个网格点来执行后续的模拟运算。图 5 为电池组模型网格图。

2 极端温度环境下电池性能研究

2.1 高温环境下电池热管理控制策略

适宜的电池组温度以及较低的冷却液压降值均为控制目标，且均与入口 Re 的大小有关，因此可通过改变入口 Re 来实现对电池组温度以及冷却液压降的控制。改变入口 Re ，在使得电池温度满足热管理要求的前提下，控制冷却液压降处于较低值，找出临界 Re 从而实现多目标的优化。

表 3 网格独立性验证

Tab.3 Verification of grid independence

网格方案	网格数	最高温度/℃
1	168 215	27.36
2	652 913	27.43
3	1 263 014	27.52
4	1 981 676	27.55

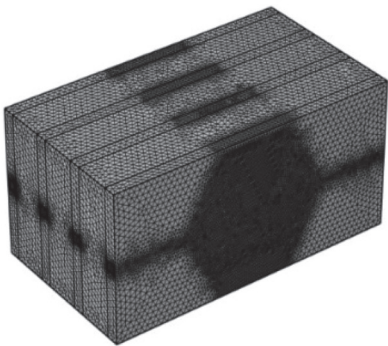


图 5 电池组模型网格图

Fig.5 Grid chart of battery pack model

2.1.1 40 ℃、4 C 放电倍率

控制其他边界条件不变，改变环境温度和电池初始温度，设定电池初始温度和环境温度均为 40 ℃，这是基于假设电池未进行放电工作，电池初始温度与环境温度之间处于热平衡状态。进行数值模拟时，其他边界条件保持不变。

取用的 Re 分别为 50、60、70、80、90 和 100。图 6 为电池组的温度变化，表 4 为不同 Re 下电池组最高温度、最大温差、及冷却液压降情况。分析可得，当 Re 为 50~60 时，电池组的最高温均超过了 40 ℃ 分别为 42.91 ℃ 和 40.85 ℃，无法满足电池热管理的要求。而当入口 Re 为 70~100，电池组的最高温度呈现不断下降的趋势，且均能控制在 40℃ 以内，对应的最大温差分别为 3.23、3.03、2.84、2.73 ℃，电池组温度均匀性较好。即 Re 为 70~100 可以保证电池组的控温性和均温性达到要求。

再结合表 4 可知，压降分别为 3.51、4.20、4.91、5.66 Pa，压降在不断增加，压降最大增幅为 61.3%。因此综合考虑电池热管理和运行功耗，对于 40 ℃、4 C 放电倍率情形，选取 70 作为临界 Re 。

2.1.2 40 ℃、5 C 放电倍率

在 5 C 放电倍率下时，设置 5 组不同的 Re ，分别为 80、90、100、110 和 120。图 7 为 40 ℃ 高温下，电池在 5 C 放电倍率时，电池组温度随时

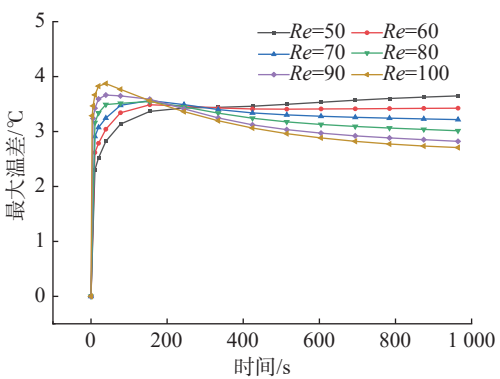
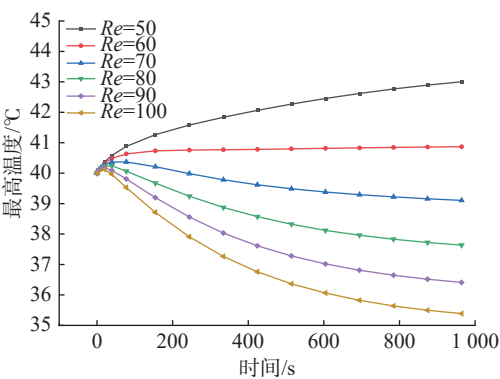


图 6 40 °C、4 C 放电倍率下电池组的温度变化

Fig.6 Temperature variation of battery pack under 40 °C and 4 C discharge rate

表 4 电池组最高温度、最大温差和冷却液压降(4 C)
Tab.4 Maximum temperature, maximum temperature difference, and cooling hydraulic drop of the battery pack (4 C)

Re	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\min}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	$\Delta P/\text{Pa}$
50	42.91	39.29	3.62	2.25
60	40.85	37.43	3.42	2.86
70	39.14	35.91	3.23	3.51
80	37.69	34.66	3.03	4.20
90	36.48	33.6	2.84	4.91
100	35.46	32.73	2.73	5.66

间的变化过程。

按照与 4 C 放电倍率下相同的策略， Re 为 80 及 90 时，电池组最高温度不符合要求。由表 5 可知，随着 Re 的增大，冷却液压降随之不断增大，为取得较低压降值，最终选取 100 作为临界 Re 。

因此，针对 40 °C 及 4 C、5 C 放电倍率情形，可通过寻找对应高放电倍率下最合适的临界 Re 值，保证在满足电池热管理要求的同时，使得冷却液压降也较低，来对高温高放电倍率下的电池

组进行较好的热管理控制。

2.2 低温环境下电池热控制策略

在低温情况下，只需考虑电池的升温速率(启动时间)与电池各部分间的最大温差即可，在保证电池的最大温差在 5 °C 以内的同时，尽可能让其快速升温，从而达到快速启动的目的。

2.2.1 不同环境温度(−30~−15 °C)下电池温度表现

控制其他边界条件不变，改变环境温度和电池初始温度，设定电池初始温度和环境温度均相同，热流体入口温度为 5 °C，电池热源初始值设为 0，因为在 0 °C 以下电池不能正常启动。设置 4 组不同的环境温度，分别为 −30、−25、−20、−15 °C，研究不同的低温环境对锂离子电池组温升的影响。

从图 8 可以看出，随着环境温度不断降低，热流体与外部环境之间的换热温差逐渐增大，因此在锂电池组开始加热时段，曲线的斜率变陡，温度上升速率增大，在加热过程结束后，电池模块的最终温度基本保持不变。随着环境温度的降低，电池初期温升速率加快，电池最高温度也更

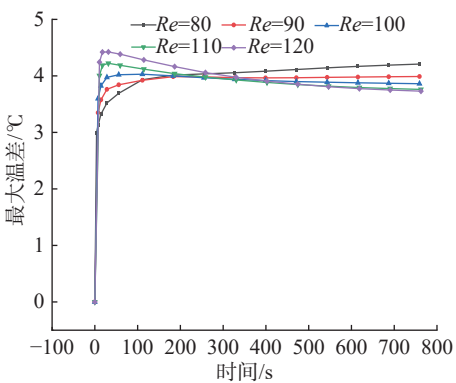
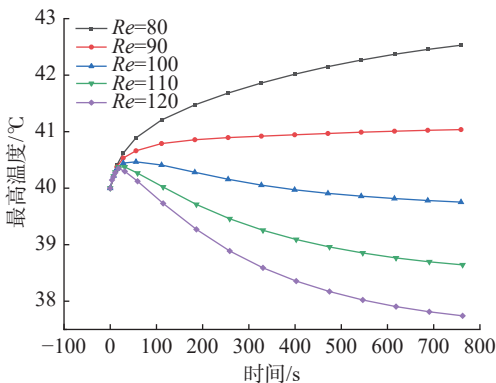


图 7 40 °C、5 C 放电倍率下电池组的温度变化

Fig.7 Temperature variation of battery pack under 40 °C and 5 C discharge rate

表5 电池组最高温度、最大温差和冷却液压降(5℃)

Tab.5 Maximum temperature, maximum temperature difference, and cooling hydraulic drop of the battery pack (5℃)

Re	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\min}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	$\Delta P/\text{Pa}$
80	42.49	38.29	4.2	4
90	41.02	37.04	3.98	4.69
100	39.76	35.89	3.87	5.42
110	38.67	34.89	3.78	6.18
120	37.78	34.03	3.75	6.97

低。从图9可以看出，在锂电池组的使用过程中，其最大温差先上升再下降，最终稳定下来。在环境温度为-15~-20℃下，电池组温差可以很好地控制在5℃以内。当环境温度为-25℃，在加热后约20~90s时，电池组最大温差会略超5℃。

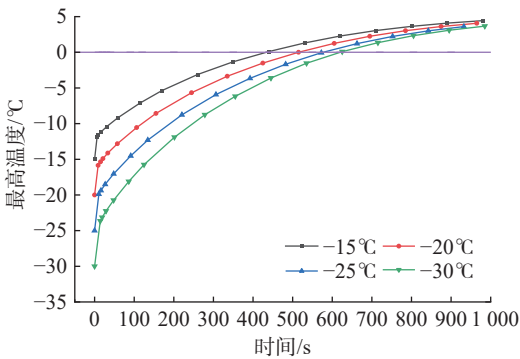


图8 电池组最高温度

Fig.8 Maximum temperature of battery pack

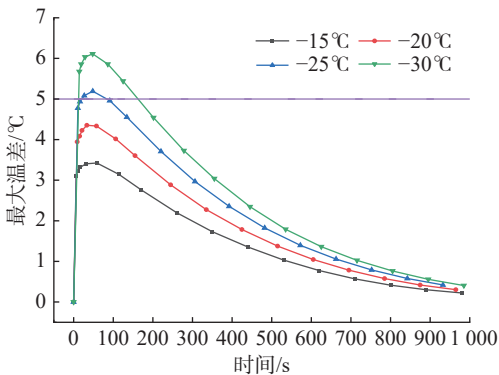


图9 电池组最大温差

Fig.9 Maximum temperature difference of battery pack

2.2.2 改变入口Re及变Re策略

在环境温度-30℃条件下，设置4组不同的恒定Re，分别为70、80、90和100。数值模拟不同入口Re对电池组温度的影响。图10和图11分别为不同Re下，电池组最高温度和最大温差随

时间的变化趋势。

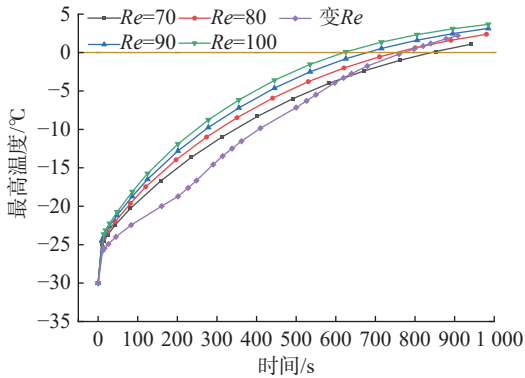


图10 电池组最高温度

Fig.10 Maximum temperature of battery pack

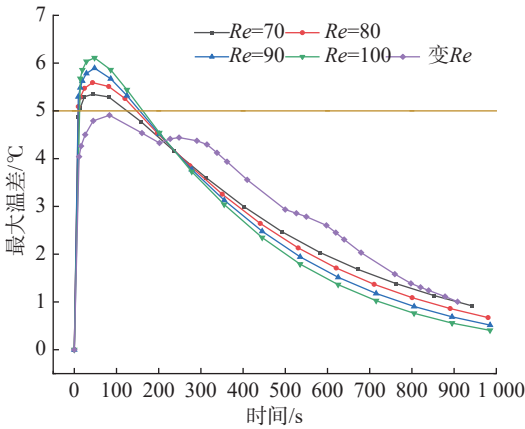


图11 电池组最大温差

Fig.11 Maximum temperature difference of battery pack

从图10可以看出，当Re为70~100时，电池组加热到0℃的时间在不断缩短，分别约为840、750、675、610s，即随着Re的增大，电池组温升速率在加快，相对应的具体速率分别为2.14、2.40、2.67、2.95℃/min。从图11可以看出，当Re从100降到70，电池组最大温差在加热初期逐渐减小，但依旧会超过5℃。即虽然降低Re可以减小电池组的温差，但是同时电池组的加热速率也在减慢，而对于低温下的电池组，升温速度极为重要，再者用恒定低Re并不能很好地将电池组温差控制在5℃以内。

因此为了同时满足电池最高温度与最大温差在合适范围内，额外设置了一组变Re，如图12所示，不同时间段入口流速变化范围是0.01~0.04m/s，对应的Re范围是40~160。在采用变Re方法后，在电池放电初期，较好地对电池组最大温差实现了控制，电池组最大温差始终低于5℃，与此同时，电池组加热到0℃的时间为770s，加热速率为2.34℃/min，升温速度也较为合适，电池组升

温至 0 ℃ 的时间也较为合理。总体来看, 在采用变 Re 调节后, 一方面电池组加热到 0 ℃ 的时间没有显著延长, 仍有较快的升温表现; 另一方面电池组在整个加热过程中的最大温差都很好地控制在 5 ℃ 以内。表明在极低温环境下(-30 ℃), 采用变 Re 调节可以较好地满足电池组的温度和温差要求, 并实现快速启动。

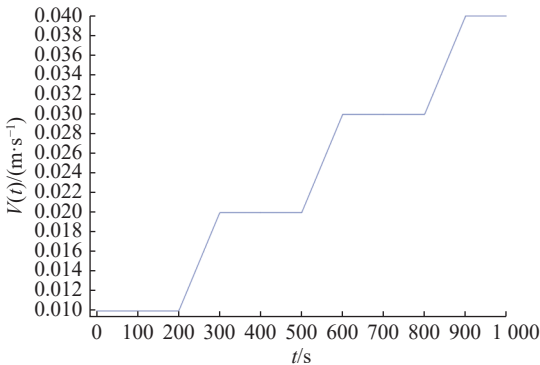


图 12 变入口 Re 下不同时间段的流速

Fig.12 Flow velocity at different time periods under variable inlet Re

2.2.3 电加热辅助流体加热及延迟加热策略

对于低温环境下电池组的运行, 其中很重要的一点就是预热时间。因为电池组处于较低环境温度中, 其初始温度较低, 所以研究目标即为在满足电池热管理要求的前提下, 缩短锂电池组在低温环境温度下的预热时间, 采用电加热部件来

辅助热流体加热。
为了方便数值模拟, 将电加热部件作为边界条件, 在整个电池组一侧单边施加一个边界热源, 施加边界热源区域如图 13 增压区所示。以-30 ℃ 的环境温度为例, 设置了 4 组不同的加热功率, 分别为 5、10、15、20 W。对应的电池升温至 0 ℃ 时刻的温度云图如图 14 所示。

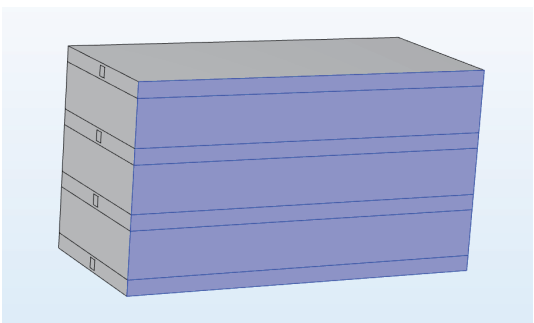


图 13 电池施加边界热源示意图

Fig.13 Schematic diagram of applying boundary heat source to battery

图 15 为不同加热功率辅助下电池组最高温度的变化趋势, 图 16 为对应加热功率下最大温差随时间的变化趋势。从图 15 可以看出, 加热功率升高时, 电池组加热到 0 ℃ 的时间不断缩短, 温升速率加快。从图 16 可以看出, 当加热功率升高时, 电池组最大温差也在逐渐增加, 尤其是在加热初期阶段, 温差增加尤为明显。这主要是因为

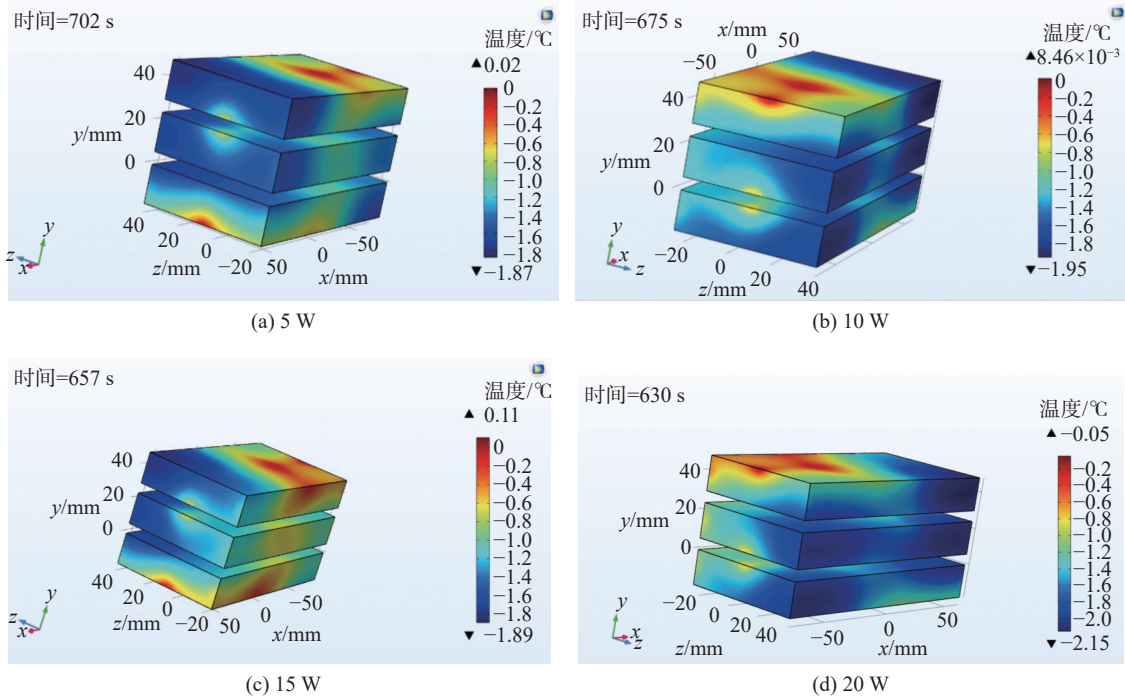


图 14 电池温度云图

Fig.14 Cloud map of battery temperature

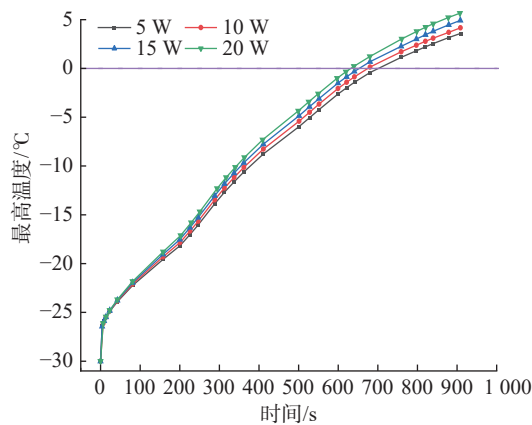


图 15 电池组最高温度

Fig.15 Maximum temperature of battery pack

在流体和电加热部件的双重加热下，换热强度增大明显。之后电池组温差不断减小，最后都趋于 1℃ 左右。

结果表明，当采用加热部件施加恒定功率辅助流体加热后，在一定程度上可以缩短电池组达到 0℃ 所需的时间，即提升其升温速率，但也导

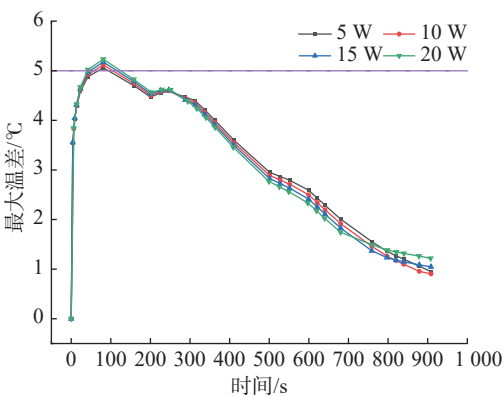


图 16 电池组最大温差

Fig.16 Maximum temperature difference of battery pack

致电池组最大温差超过了 5℃，这并不满足电池热管理要求。因此引入延迟加热的策略。

在流体加热初期，不启动加热部件，在流体加热约 120 s 后再启动电加热进行额外辅助。对应热源功率下，电池升温至 0℃ 时刻的温度云图如图 17 所示。

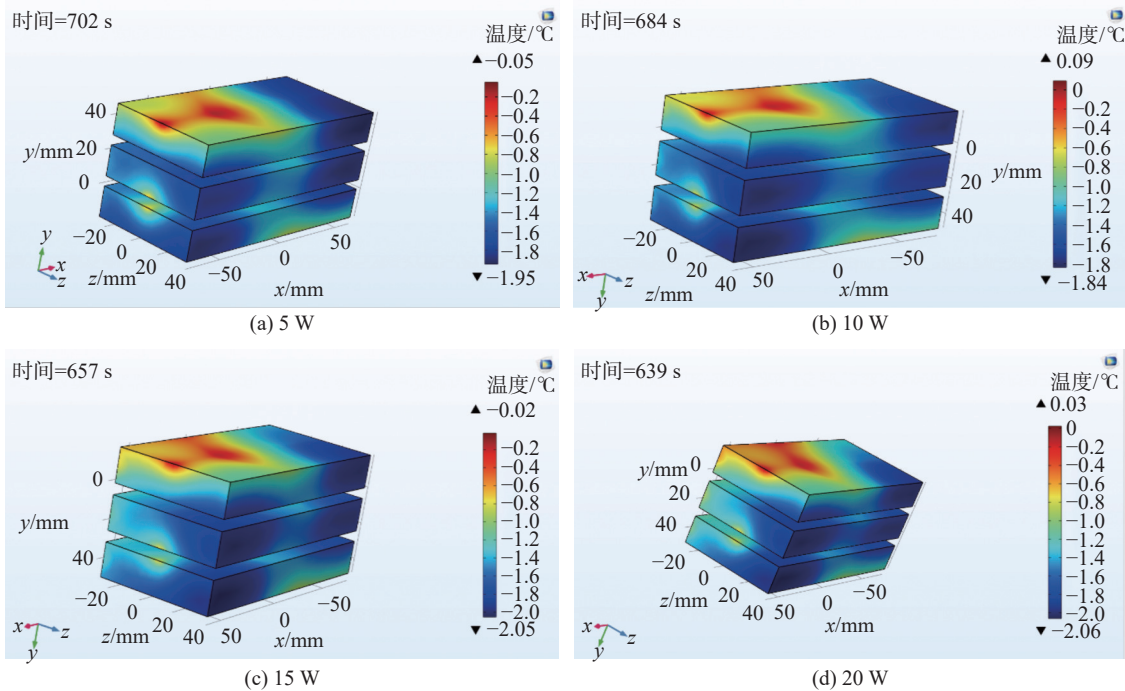


图 17 电池温度云图

Fig.17 Cloud map of battery temperature

图 18 和图 19 分别展示了在延迟电加热部件启动后电池组最高温度和最大温差随时间的变化趋势。从图 18 可以看出，当延迟 120 s 启动加热部件，加热功率为 5~20 W 时，电池组加热到 0℃ 的时间分别约为 705、680、655、635 s，即升温时间在不断缩短，升温速率在逐渐加快，具体速率

分别为 2.55、2.65、2.75、2.83℃/min，与在一开始就开启电加热作对比，加热时长也只是多了 5 s 左右，也具有较好的加热表现。从图 19 看出，当延迟加热功率为 5~20 W 时，整个电池组在流体和加热部件的双重加热过程中，电池组最大温差均能较好地控制在 5℃ 之内，只在 81 s 左右时最

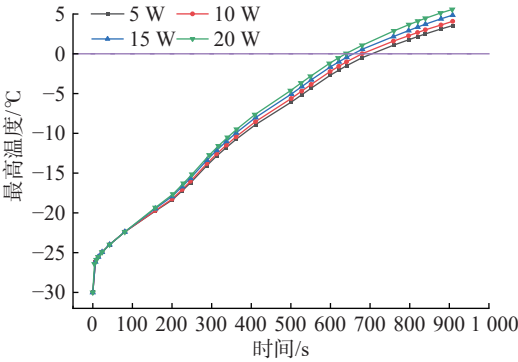


图 18 电池组最高温度

Fig.18 Maximum temperature of battery pack

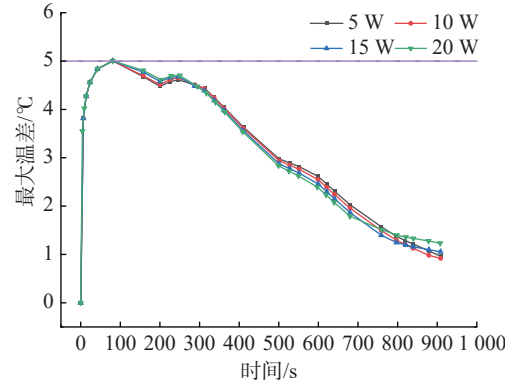


图 19 电池组最大温差

Fig.19 Maximum temperature difference of battery pack

大温差为 5℃。

因此，在采用新的延迟启动电加热策略后，电池组加热过程中的最大温差得到了改善，符合热管理要求。因此，对于低温环境下的电池组，采用延迟启动电加热策略可使其满足热管理基本要求，即同时满足温度适宜性和温度均匀性。

3 结 论

本文使用一种仿蛛网流道，研究了高低温环境温度下电池组的热特性，提出了对应的热控制策略，探讨了低温环境下电池组快速预热的方法。主要结论如下：

a. 在 40℃ 环境高温高放电倍率条件下，对电池的热控制策略为：保证电池最高温度不超过 40℃ 及电池组最大温差不超过 5℃，同时保证冷却液压降较低。本文通过改变入口 Re ，使得电池组温度满足热管理要求，并且使得冷却液压降值较低，找出合适的临界 Re 。

b. 在环境温度 -30℃ 下，随着入口 Re 的增大，在升温初期电池组的最大温差也不断增大，

且都超过了 5℃，这不符合电池热管理要求。因此引入变 Re 策略。在采用变 Re 后，不仅电池组升温速率有较好改善，且电池组在整个升温过程中的最大温差均能控制在 5℃ 之内。说明采用变 Re 调节可以较好地满足电池组的温度和温差要求，并能实现快速启动。

c. 针对低温环境情况，本文采用电加热部件来辅助热流体进行双重加热，该方法虽然可以有效提高升温速率，但是会导致电池组温差过大。因此提出了一种延迟加热策略。即在流体加热初期，在流体先加热 120 s 后再启动辅助电加热，电池升温速率得到了明显的提升，升温效果较好，且整个电池组最大温差均能较好地控制在 5℃ 内，即在实现电池快速升温的同时，也满足了电池最大温差低于 5℃ 的热管理要求。

参考文献：

[1] PESARAN A A. Battery thermal models for hybrid vehicle simulations[J]. *Journal of Power Sources*, 2002, 110(2): 377–382.

[2] SUN P Y, BISSCHOP R, NIU H C, et al. A review of battery fires in electric vehicles[J]. *Fire Technology*, 2020, 56(4): 1361–1410.

[3] GUO Z J, WANG Y, ZHAO S Y, et al. Modeling and optimization of liquid-based battery thermal management system considering battery electrochemical characteristics[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 70: 108028.

[4] YE Z B, FU X F, ZHOU S J. Research on control strategy of rapid preheating for power battery in electric vehicle at low temperatures[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 245: 122770.

[5] GUAN K F, HUANG Z W, LIU Y J, et al. A state of charge-aware internal preheating strategy for Li-ion batteries at low temperatures[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 72: 108585.

[6] HE S H, XIONG B Y, LEI H, et al. Optimization of low-temperature preheating strategy for Li-ion batteries with supercooling phase change materials using response surface method[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023, 142: 106635.

[7] CHEN Z G, ZHANG F. Numerical study of the phase change material and heating plates coupled battery thermal management in low temperature environment[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 84: 110935.

[8] YAO F D, GUAN X, YANG M Y, et al. Study on liquid

cooling heat dissipation of Li-ion battery pack based on bionic cobweb channel[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 68: 107588.

- [9] CAO J H, LING Z Y, FANG X M, et al. Delayed liquid cooling strategy with phase change material to achieve high temperature uniformity of Li-ion battery under high-rate discharge[J]. [Journal of Power Sources](#), 2020, 450: 227673.
- [10] LUO M X, ZHANG Y X, WANG Z H, et al. Thermal performance enhancement with snowflake fins and liquid cooling in PCM-based battery thermal management system at high ambient temperature and high discharge rate[J]. [Journal of Energy Storage](#), 2024, 90: 111754.
- [11] ZHENG J Q, CHANG L, MU M F, et al. A novel thermal management system combining phase change material with wavy cold plate for lithium-ion battery pack under high

ambient temperature and rapid discharging[J]. [Applied Thermal Engineering](#), 2024, 245: 122803.

- [12] YAO F D, GUAN X, CHEN Q R, et al. Research on thermal management system of lithium-ion battery with a new type of spider web liquid cooling channel and phase change materials[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 81: 110447.
- [13] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A general energy balance for battery systems[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1985, 132(1): 5-12.
- [14] 吴博. 基于微通道液冷板的动力电池散热结构的设计及优化 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.

(编辑：董伟)

(上接第 384 页)

- [26] STONE N, KENDALL C, SMITH J, et al. Raman spectroscopy for identification of epithelial cancers[J]. [Faraday Discussions](#), 2004, 126: 141–157.
- [27] CZAPLICKA M, KOWALSKA A A, NOWICKA A B, et al. Raman spectroscopy and surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) spectra of salivary glands carcinoma, tumor and healthy tissues and their homogenates analyzed by chemometry: towards development of the novel tool for clinical diagnosis[J]. [Analytica Chimica Acta](#), 2021, 1177: 338784.
- [28] LEI J, YANG D F, LI R, et al. Label-free surface-enhanced Raman spectroscopy for diagnosis and analysis of serum samples with different types lung cancer[J]. [Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy](#), 2021, 261: 120021.
- [29] ZHANG K, HAO C Y, HUO Y Y, et al. Label-free

diagnosis of lung cancer with tissue-slice surface-enhanced Raman spectroscopy and statistical analysis[J]. [Lasers in Medical Science](#). 2019, 34(9): 1849–1855.

- [30] DE GELDER J, DE GUSSEM K, VANDENABEELE P, et al. Reference database of Raman spectra of biological molecules[J]. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2007, 38(9): 1133–1147.
- [31] KRAFFT C, SOBOTTKA S B, SCHACKERT G, et al. Near infrared Raman spectroscopic mapping of native brain tissue and intracranial tumors[J]. *The Analyst*, 2005, 130(7): 1070–1077.
- [32] NARGIS H F, NAWAZ H, BHATTI H N, et al. Comparison of surface enhanced Raman spectroscopy and Raman spectroscopy for the detection of breast cancer based on serum samples[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2021, 246: 119034.

(编辑：丁红艺)