DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.7.182 **中图分类号**：TM912 **文献标志码**：A

寒区电动汽车锂离子电池脉冲加热与温升一致性分析

李泽昊，谭 睿，迟延深，陈泽宇，王明雪
(东北大学机械工程与自动化学院，沈阳 110819)

摘要：锂离子电池低温性能衰退是制约寒区电动汽车产业化发展的瓶颈，低温加热是提升电池低温性能的有效措施。研究了基于短时大电流脉冲激励的锂离子电池低温自加热方法，分析了电池脉冲作用下的自生热特性，开展了加热过程中的电热协同仿真分析并进行了实验验证。实验结果表明，所提出的方法可以实现10.90 ℃/min的平均温升速率、升温20 ℃仅消耗4.35%电池标称容量。基于仿真分析，探究了电池模组加热过程中的单体温升一致性及其影响因素。结果表明，在低温加热时适度的入口风速对一致性影响并不显著，而单体内阻差异是导致温升不一致的主因。当内阻标准差为4.3 mΩ时，电池组单体温度极差高于6 ℃。

关键词：锂离子电池；低温加热；协同仿真；COMSOL仿真；温升一致性

Pulse Heatingand Temperature Rise Consistency Analysis of Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles in Cold Regions

LI Zehao, TAN Rui, CHI Yanshen, CHEN Zeyu, WANG Mingxue
(School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The performance degradation of lithium-ion batteries at low temperature is a main bottleneck that restricts the electric vehicle development in cold regions. Low temperature heating (LTH) is an effective solution. A study is conducted on LTH method based on short-term high-current pulse excitation, and the heating characteristics are analyzed. Electric and thermal co-simulations are conducted and verified by experiments. The results show that the presented method can achieve a heating rate of 10.90 °C/min and consumes 4.35% of nominal capacity for raising 20 °C. The temperature consistency and its influencing factors of single cells during the heating process of battery module is investigated by simulation analysis. The results indicate that the difference of resistance is the main cause of inconsistent temperature rise while the inlet wind speed only has a minor impact. When the standard deviation of internal resistance is 4.3 mΩ, the maximum temperature difference can reach over 6 ℃.

Keywords: Lithium-ion battery; low temperature heating; collaborative simulation; COMSOL simulation; temperature rise consistency.

面向全球气候恶化和能源安全问题，发展新能源技术已成为我国能源与交通领域的重要战略。在此背景下，电动汽车产业快速发展，产销量呈井喷式增长。然而，电动汽车市场存在明显的区域不平衡问题，如在我国东北、西北等高寒地区电动汽车发展缓慢，其主因是锂离子电池工作性能受温度影响显著。在低温情况下，锂离子电池电解液电导率下降、电化学反应速率变缓、电荷转移阻抗增大，导致电池容量大幅衰减且充放电功率受限[1-2]。此外，低温时充电还会引起电池负极析锂，严重时会刺穿隔膜使内部短路，带来安全隐患[3]。因此，如何提高电池低温环境下的工作性能是寒区电动汽车产业化发展的关键。

收稿日期：2024-06-04；**修回日期**：2024-08-17；**录用日期**：2024-10-13；**网络首发日期**：2024-11-18
基金项目：国家自然科学基金资助项目(U24A20158)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant U24A20158

低温加热是解决这一问题的有效途径。根据热源差异，低温加热可以分为外部加热和内部加热。外部加热方面，Song 等[4]通过流体加热方法实现 50 min 从-20 ℃加热至室温的效果；罗玉涛等[5]将电池组浸泡在变压器油内，并在电池箱底面布设加热膜，实现 35 min 内从-30 ℃升至 0 ℃的加热效果。内部加热主要使用电流激励产生内部焦耳热的方法来实现电池升温[6]。Qu 等[7]通过电路设计，将电池与 MOSFET、电感三者串联，在电池内产生间歇性高电流，对电池进行加热，可以在 175 s 内将电池从-10 ℃加热至 10 ℃；Shang 等[8]提出一种高频交流激励的方法，在频率为10 kHz、电流均方根为 1.8C 的情况下，电池的温升速率可达 2.94 ℃/min。上述研究为低温加热提供了理论与技术方法，但是温升速率较低，且温升一致性问题研究欠缺。

针对上述问题，本文提出了一种基于脉冲激励的自加热方法，利用低温下电池内阻增大的特性，引入大电流自放电脉冲激励产生焦耳热，对电池进行加热，并通过金属-氧化物半导体场效应晶体管 MOSFET(metal-oxide-semiconductor field effect transistor)实现加热控制。结合系统方案，分析了电池产热机理，同时基于 COMSOL 仿真环境开展了电热协同仿真，探究了加热过程的温度分布及温升一致性影响因素，为低温加热系统设计提供理论依据。

1　低温脉冲加热方法

脉冲加热原理示意如图 1 所示，热电偶置于电池侧面实时采集电池表面温度，霍尔传感器测量加热电流，MOS 管模块在脉冲信号的控制下快速开通和关断。当脉冲信号处于低电平时，MOS 管关断，加热回路处于断路状态(OFF 阶段)；当脉冲信号切换至高电平时，MOS 管开通，加热回路处于导通状态(ON 阶段)。由于 MOS 管直接联通电池正负极，ON 阶段会产生瞬时大电流激励，该阶段电池的产热主要包括欧姆热和极化热，瞬时大电流流经欧姆内阻 R_0 时直接产生欧姆热，且在大电流作用下也伴随着少量极化热；在 OFF 阶段，极化热会继续使电池升温，但速率较慢。加热回路 ON 与 OFF 阶段高频交替运行，在瞬态大电流激励之后衔接 1 个 OFF 阶段十分重要，这不仅可以减少大电流对电池寿命的损伤，还可以为电池的均温提供 1 个有效的时间窗口。

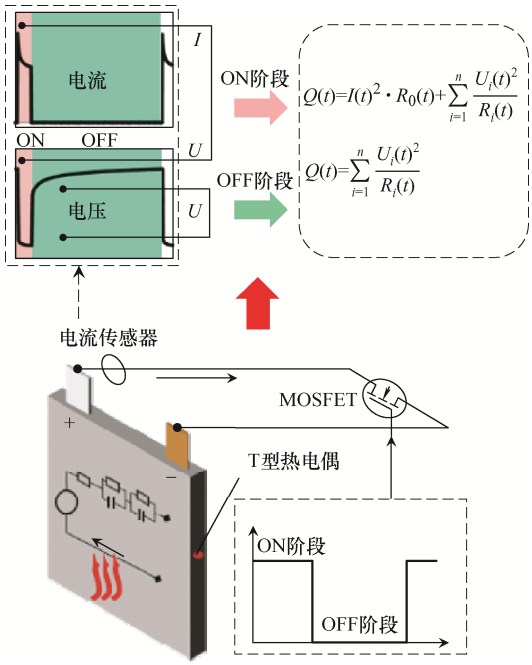


图 1　电池低温脉冲加热原理示意

Fig. 1 Schematic of low-temperature pulse heating principle for battery

结合图 2 所示的二阶 RC 等效电路模型[9]对上述方案进一步阐述。图中：U_{ocv} 为电池的开路电压；U_1 和 U_2 为极化电压；C_1、C_2 和 R_1、R_2 分别为 2 个 RC 支路的极化电容和极化电阻；R_e 为加热回路的外阻；U_t 为电池的端电压；I 为加热电流。

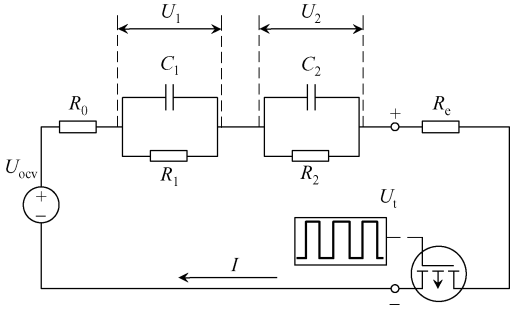


图 2　锂离子电池二阶 RC 模型

Fig. 2 Second order RC model for lithium-ion battery

根据基尔霍夫电压定律，电池的电特性行为可表示为

$$\begin{cases} U_{\mathrm{t}} = U_{\mathrm{ocv}} - \sum_{i=1}^{n} U_i - IR_0 \\ I = \dfrac{U_i}{R_i} + C_i \dfrac{\mathrm{d}U_i}{\mathrm{d}t} \end{cases} \tag{1}$$

$$I(t) = \begin{cases} \dfrac{U_{\mathrm{ocv}}(t) - \sum_{i=1}^{n} U_i(t)}{R_0(t) + R_{\mathrm{e}}} & 0 < t \leqslant \dfrac{d}{f} \\ 0 & d/f < t \leqslant 1/f \end{cases} \tag{2}$$

式中：n 为电池模型 IC 环节的个数，本文取 2；d 和 f 分别为脉冲信号的占空比和频率。

脉冲加热过程中，电池呈现电热耦合特性，电特性参数的大小影响电池的产热和温升。通过对实验数据进行辨识，得到不同温度下的欧姆内阻、极化内阻、极化电容的值。电池在脉冲加热过程的温度变化[10]可表示为

$$m_{\mathrm{b}} C_{\mathrm{b}} \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} = Q + IT \frac{\partial U_{\mathrm{ocv}}}{\partial T} - hA(T - T_{\mathrm{a}}) \tag{3}$$

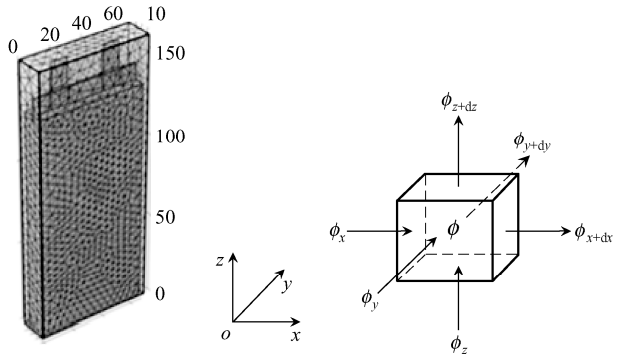
式中：m_{b} 为电池的质量；C_{b} 为电池的比热容；T 与 T_{a} 分别为电池温度与环境温度；Q 为电池的产热率；$\partial U_{\mathrm{ocv}}/\partial T$ 为电池的熵热系数；h 为电池表面换热系数；A 为电池表面积。

综上，在一个脉冲周期内的 Q 的表达式为

$$Q(t) = \begin{cases} I(t)^2 \cdot R_0(t) + \sum_{i=1}^{n} \dfrac{U_i(t)^2}{R_i(t)} & \text{ON阶段} \\ \sum_{i=1}^{n} \dfrac{U_i(t)^2}{R_i(t)} & \text{OFF阶段} \end{cases} \tag{4}$$

2 电热协同仿真研究

基于 COMSOL 仿真环境进一步开展电池加热过程的电热协同仿真，根据电池正极、负极和隔膜的卷绕结构进行建模，将电芯等效为 1 个具有各向异性导热的三维固体模型，包括固体电芯、正极极耳(铝)、负极极耳(铜)及包裹电芯的铝塑膜，如图 3 所示。



(a) 整体三维模型 (b) 微元体

图 3 电池热模型

Fig. 3 Thermal model of the lithium-ion battery

将电池沿 x、y、z 三个维度划分为 m 个微元体，图 3(b)为其中 1 个微元体。在微元体内，沿 x、y、z 方向上的热流量分别记为 ϕ_x、ϕ_y、ϕ_z，根据傅里叶热传导公式[11]进行计算，即

$$\begin{cases} \phi_x = -k_x \dfrac{\partial T}{\partial x} A_x \\ \phi_y = -k_y \dfrac{\partial T}{\partial y} A_y \\ \phi_z = -k_z \dfrac{\partial T}{\partial z} A_z \end{cases} \tag{5}$$

$$\rho C_{\mathrm{b}} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \sum \phi + q \tag{6}$$

式中：k_x、k_y、k_z 和 A_x、A_y、A_z 分别为 x、y、z 方向的导热系数和表面积；ρ 为电池密度；ϕ 为微元体在各个方向的热流量；q 为单位体积的产热量。

基于上述单体模型进一步构建电池组传热模型，同时在模型中引入了空气流场域，如图 4 所示。以模拟电池组在实际应用时面临的自然对流和冷却情况，将等效电路模型计算的产热率作为输入，模拟脉冲加热过程中电池组内各单体电池的温度变化情况与整体的温度场分布。

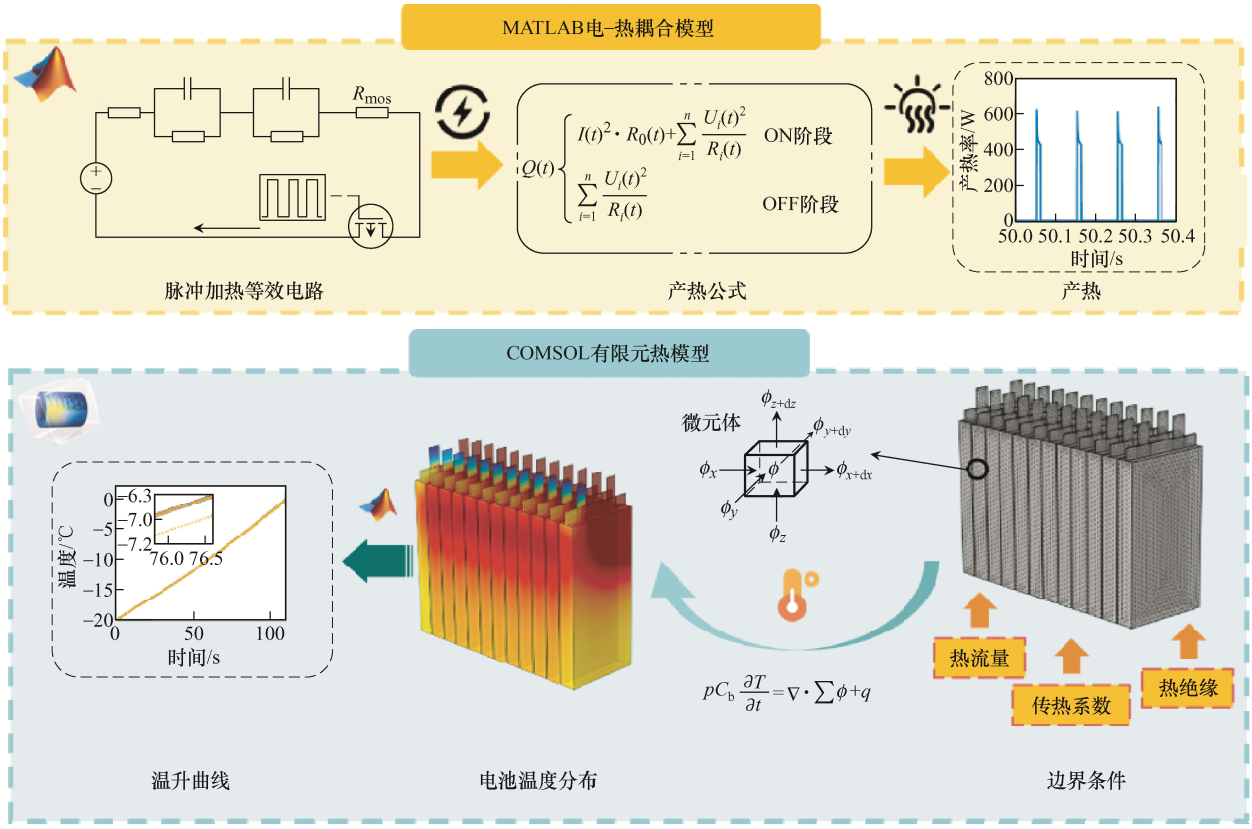


图 4　协同仿真示意

Fig. 4 Schematic of co-simulation

3　实验验证

实际情况下，占空比越大，加热速率越快，但会对电池寿命带来影响。为了兼顾速率与耐久性，本文选择 10%占空比。在占空比一定的情况下，频率对加热速率影响不大，但高频情况下会略微影响温升一致性，在前期工作中已经分析了不同占空比及频率情况下的加热效果[12]。本文重点研究随机因素带来的影响，因此设置频率为固定值 10 Hz。实验过程中，电池置于−20 ℃的恒温箱内，其静置时间>2 h，以确保电池内、外温度的均匀性，加热控制目标为电池温度升至 0 ℃。图 5 所示为电池在加热过程中的电流、电压及温度数据。在 1 个周期内，加热电流会因为极化而下降；但是在整个加热过程中，电池温度逐渐升高使得内阻减小，加热电流呈现增大的趋势。脉冲加热过程持续 110 s，将电池从−20 ℃加热至 0 ℃，平均温升速率达到 10.90 ℃/min，加热过程消耗电池标称容量为 4.35%。这表明所提出的脉冲加热方法能够在低能耗的前提下实现快速升温，与现有文献中采用的传统脉冲加热方法(温升速率 6.86 ℃/min)[7]相比，温

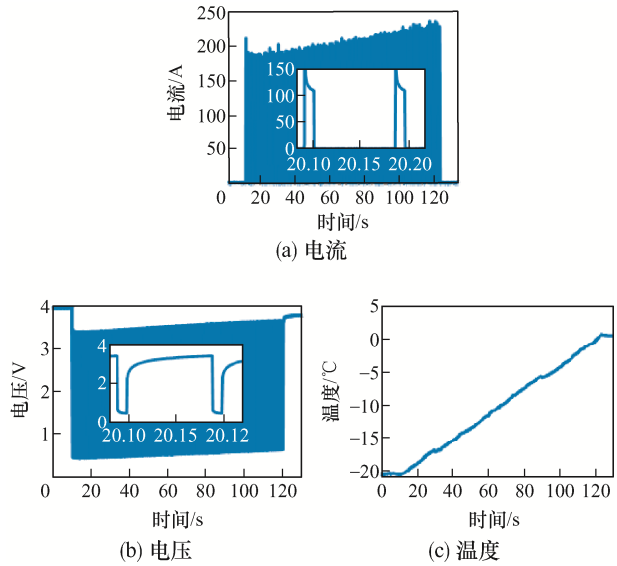
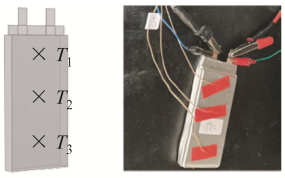


图 5　脉冲加热实验验证

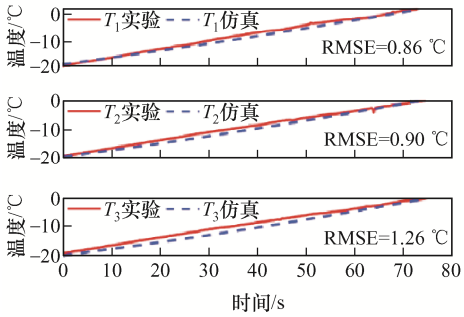
Fig. 5 Experimental Evaluation of pulse heating method

升速率提高了 58.89%。

为了进一步验证仿真结果的准确性，对应实验中 3 个不同的温度采集位置，在仿真模型中插入探针，验证仿真模型的温度分布准确性，如图 6 所示。结果显示，3 个温度点(T_1、T_2、T_3)的均方根误差 RMSE(root mean square error)分别为 0.86、0.90、1.26 ℃，满足低温加热效果分析的精度需求[13]。



(a) 实验与仿真温度点示意



(b) 温度分布实验验证结果

图 6 仿真与实验对比结果

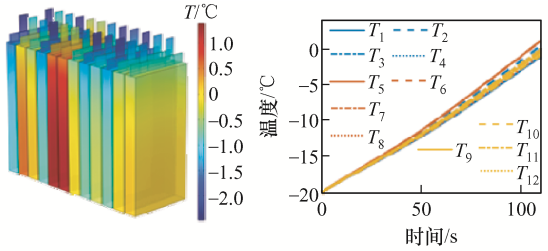
Fig. 6 Comparisons between the simulations and the experiments

4 温升一致性影响因素分析

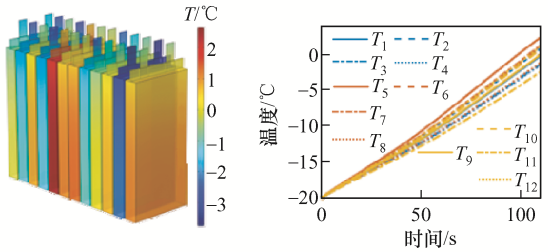
4.1 内阻差异对温升一致性的影响分析

电池加热时温升速率很高，如何保障其温升一致性是重要的技术挑战。电池成组的各单体之间存在差异，这种差异性主要可以概括为 2 个方面：一是内部因素，即电池单体自身差异性[14]；二是外部因素，即换热条件的差异性。由于脉冲加热时主要产热为欧姆热，因此内阻不一致对电池加热性能的影响最具代表性；而换热条件差异性主要体现在电池单体的成组位置。因此，本文选择不同的内阻一致性与电池箱入口风速，来探究其一致性影响程度。

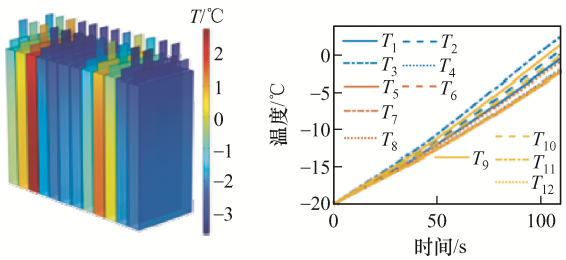
基于协同仿真分析探究内阻差异性对温升一致性的影响程度。对串联电池组中 12 块电池内阻设置服从正态分布的随机偏差来模拟其差异性，设置电池组的初始荷电状态 SOC(state of charge)为 80%，冷却风速为 0 m/s，环境温度为−20 ℃，加热时间为 110 s，仿真结果如图 7 所示。可以看出，



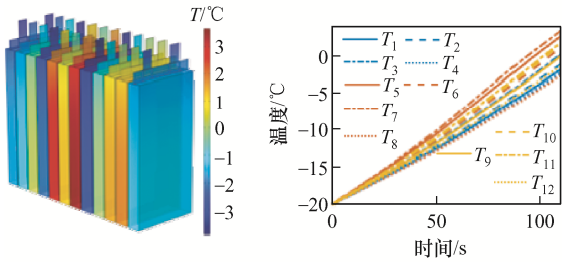
(a) 标准差1.4 mΩ



(b) 标准差2.8 mΩ



(c) 标准差3.5 mΩ



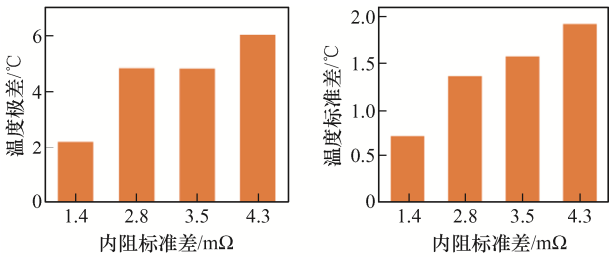
(d) 标准差4.3 mΩ

图 7 不同内阻标准差下电池组三维温度分布和温升曲线图

Fig. 7 Three-dimensional temperature distribution and temperature rise curves of battery pack under different standard deviations of internal resistance

内阻差异对温升一致性影响显著，随着内阻标准差的增大，电池组的温升一致性变差。

进一步，采用各个单体电池温度的极差与标准差来评估电池组温升一致性。温度极差是电池组内最高电池温度与最低电池温度的差值，而标准差反映各单体电池温度距离电池组平均温度的离散程度，其统计结果如图 8 所示。所采用的实验电池内阻在−20 ℃时为 15.0 mΩ，该数值通过参数辨识方法测得，具体的辨识方法见文献[15]，此处不再赘述。结果显示，当内阻的标准差增大至 4.3 mΩ 时，温度极差达到 6.06 ℃。这表明在低温脉冲加热过程中，内阻标准差的微小变化即可使电池组内温度分布的不均匀度增大。



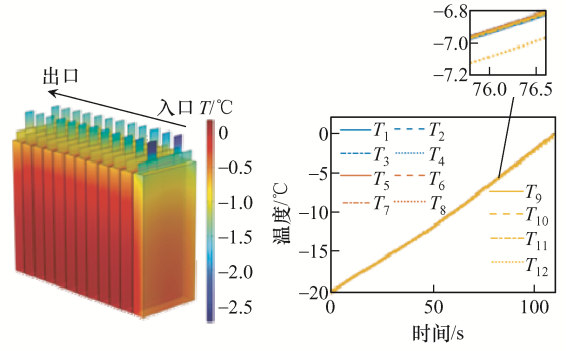
(a) 温度极差　(b) 温度标准差

图 8　电池组温度性能指标随内阻标准差变化结果

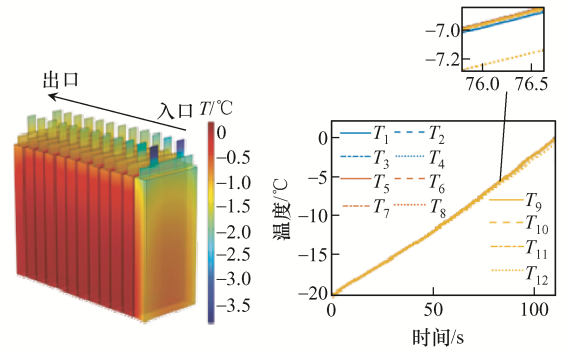
Fig. 8 The temperature performance indices of the battery pack change with the standard deviations of internal resistance

4.2　布置位置及空气流速对温升一致性的影响分析

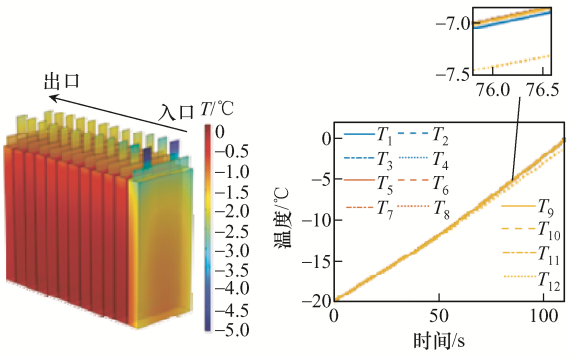
电池组中的位置差异带来的一致性影响主要源自空气对流时的热传导特性差异。低温加热过程中通常需要对电池结构进行保温处理，以避免热扩散对加热效率的影响。但是绝热密封的环境存在局部高温与热失控安全隐患，因此仍需要对电池组保有适当的通风。为了量化空气流动及电池单体位置对一致性的影响，将串联电池组设置在 1 个具有缓慢气流的箱体结构中，并沿着电池排布方向设置了不同的入口风速，分别为 0.02、0.04、0.06、0.08 m/s。加热过程的三维温度分布和温升曲线仿真结果如图 9 所示。可以看出，布置位置靠近入风口的电池单体温升速率较低，但是各个电池之间温升曲线差异性较小。



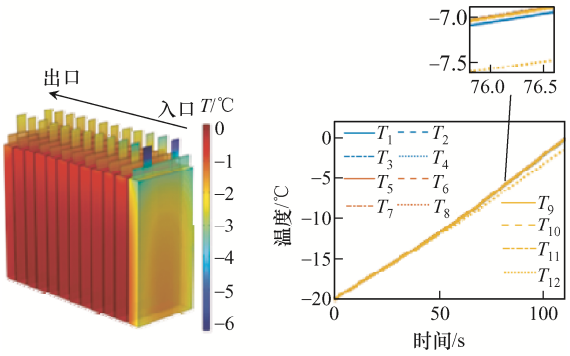
(a) 风速0.02 m/s



(b) 风速0.04 m/s



(c) 风速0.06 m/s



(d) 风速0.08 m/s

图 9　不同入口风速下电池组三维温度分布和温升曲线图

Fig. 9 Three-dimensional temperature distribution and temperature rise curves of battery pack under different inlet wind speeds

图 10 为不同入口风速下的电池组温度极差和温度标准差的统计结果。可以看出，随着入口风速的增大，电池组温度极差呈现逐渐升高的趋势，温升一致性受到了一定影响，但是与内阻差异性带来的影响相比，入口风速与电池布置位置的影响程度相对较弱。结果显示，当入口风速达到 0.08 m/s 时，电池组温度极差为 1.36 ℃、温度标准差仅为 0.37 ℃。图 10(c)给出了入口风速增加时的加热平均温升速率结果，由于脉冲加热温升迅速、加热过程持续时间较短，适当的入口风速对电池加热过程中平均温升速率影响轻微，当入口风速从 0.02 m/s 增加到 0.08 m/s 时，平均温升速率从 10.87 ℃/min 下降至 10.77 ℃/min。

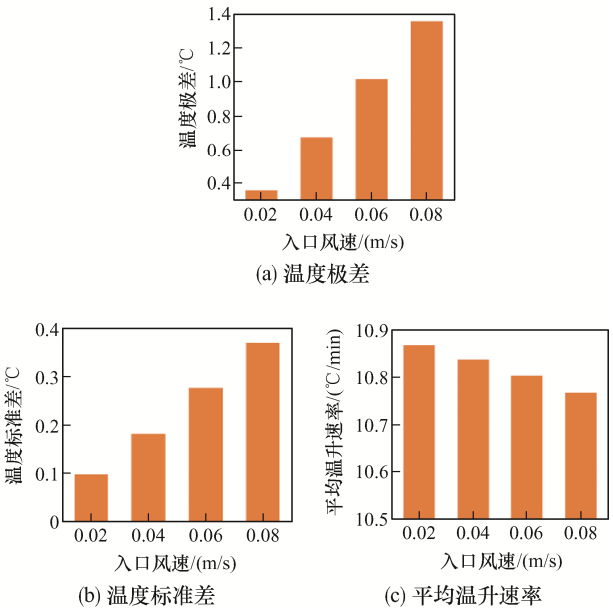


图 10 电池组温度性能指标随入口风速变化结果

Fig. 10 The temperature performance indices of the battery pack vary with the inlet wind speeds

5 结论

本文研究了一种基于大电流脉冲激励的锂离子电池低温自加热方法，结合加热原理分析了电池 MOS 管不同控制阶段的产热机制，结合 COMSOL 软件环境开展了电热协同仿真建模与分析；进一步，通过实验对加热方法进行了验证，具体研究结论如下。

(1)所提出的脉冲加热方法可以实现 10.90 ℃/min 的平均温升速率，从−20 ℃加热至 0 ℃能耗为标称容量的 4.35%，同时通过实验对模型可信度进行了验证。结果表明，模型仿真温度与实验结果的均方根误差不高于 1.26 ℃。

(2)基于电热协同仿真分析研究了电池成组加热时的温度分布及一致性影响规律，对比了电池内阻差异、电池布置位置及入口风速对一致性的影响。结果表明，内阻差异是导致脉冲加热温升不一致的主因，当内阻的标准差增大至 4.3 mΩ 时，温度极差达到 6.06 ℃。

(3)电池在成组结构中的布置位置对温升一致性也存在影响，临近进风口位置处的电池温度偏低，且温差受到入口风速的影响。但是与内阻差异的影响相比，空气流动速度对电池脉冲加热温升一致性的影响相对较弱，当入口风速达到 0.08 m/s 时，电池组温度极差仅为 1.36 ℃、温度标准差仅为 0.37 ℃。低温加热系统的设计不仅需要提高加热速率，加热时的温升一致性也是重要控制参量。

本文研究成果为寒区电动汽车及储能系统电池热管理系统设计提供了有效方案和设计依据。后续将继续探究兼顾温升一致性与加热速率的加热系统设计方案，并进一步开展电池加热速率与均温性的多目标优化加热策略，力求实现零温差的高精准加热控制系统。

参考文献：

[1] 韩京伯, 朱翀, 李佳, 等. 基于电驱逆变器重构的车用动力锂电池自加热策略[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 179-187.
Han Jingbo, Zhu Chong, Li Jia, et al. Self-heating strategy for automotive lithium-ion batteries based on traction motor and inverter reconfiguration [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 179-187. (in Chinese)

[2] Zhang Jiangyun, Yang Xiaoqing, Zhang Guoqing, et al. Investigation on the root cause of the decreased performances in the overcharged lithium iron phosphate battery [J]. International Journal of Energy Research, 2018, 42(7): 2448-2455.

[3] 顾月茹, 赵卫民, 苏长虎, 等. 锂离子电池低温性能改

善研究进展[J]. 电化学, 2018, 24(5): 488-496.
Gu Yueru, Zhao Weimin, Su Changhu, et al. Research progresses in improvement for low temperature performance of lithium-ion batteries [J]. Journal of Electrochemistry, 2018, 24(5): 488-496. (in Chinese)

[4] Song H S, Jeong J B, Lee B H, et al. Experimental study on the effects of pre-heating a battery in a low-temperature environment [C]// 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Seoul, 2013: 1198-1201.

[5] 罗玉涛, 郎春艳, 罗卜尔思. 低温环境下锂离子电池组加热系统研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(9): 100-106.
Luo Yutao, Lang Chunyan, Luo Boersi. Investigation into heating system of lithium-ion battery pack in low-temperature environment [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(9): 100-106. (in Chinese)

[6] Hu Z, Liu Furong, Chen Pan, et al. Experimental study on the mechanism of frequency-dependent heat in AC preheating of lithium-ion battery at low temperature [J]. App- lied Thermal Engineering, 2022, 214: 118860.

[7] Qu Z G, Jiang Z Y, Wang Q. Experimental study on pulse self-heating of lithium-ion battery at low temperature [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 135: 696-705.

[8] Shang Yunlong, Zhu Chong, Lu Gaopeng, et al. Modeling and analysis of high-frequency alternatingcurrent heating for lithium-ion batteries under lowtemperature operations [J]. Journal of Power Sources, 2020, 450: 227435.

[9] Wang Qian, Jiang Bin, Li Bo, et al. A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 64: 106-128.

[10] Jaguemont J, Boulon L, Dubé Y. A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures [J]. Applied Energy, 2016, 164: 99-114.

[11] 宋丽, 魏学哲, 戴海峰, 等. 锂离子电池单体热模型研究动态[J]. 汽车工程, 2013, 35(3): 285-291.
Song Li, Wei Xuezhe, Dai Haifeng, et al. A review on the research of thermal models for lithium ion battery cell [J]. Automotive Engineering, 2013, 35(3): 285-291. (in Chinese)

[12] 陈泽宇, 张渤, 熊瑞, 等. 动力电池低温极速自加热系统加热一致性及其影响因素的建模分析[J]. 机械工程学报, 2021, 57(22): 226-236.
Chen Zeyu, Zhang Bo, Xiong Rui, et al. Modeling analysis of heating consistency and influencing factors of low-temperature extreme-speed self-heating system of battery [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(22): 226-236. (in Chinese)

[13] 王春生, 孙含笑, 薛晨博. 基于电化学–热耦合的锂电池热效应分析[J]. 电源学报, 2025, 23(4): 265-273.
Wang Chunsheng, Sun Hanxiao, Xue Chenbo. Analysis of thermal effect of lithium battery based on electrochemical-thermal coupling [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(4): 265-273. (in Chinese)

[14] 于洪峰, 曹阳阳, 许成林, 等. 储能电池热管理及控制策略研究进展[J]. 电源技术, 2026, 50(1): 20-32.
Yu Hongfeng, Cao Yangyang, Xu Chenglin, et al. Advances in thermal management and control strategies for energy storage batteries [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2026, 50(1): 20-32. (in Chinese)

[15] Qin Yudi, Xu Zhoucheng, Xiao Shengran, et al. Temperature consistency-oriented rapid heating strategy combining pulsed operation and external thermal management for lithium-ion batteries [J]. Applied Energy, 2023, 335: 120659.



李泽昊

作者简介：

李泽昊(2002—)，男，本科。研究方向：新能源与电池技术。E-mail：lizehao02@stumail.neu.edu.cn。

谭睿(2003—)，男，本科。研究方向：电动汽车电源系统。E-mail：tanr707@stumail.neu.edu.cn。

迟延深(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：电池与热管理技术。E-mail：100317@mail.neu.edu.cn。

陈泽宇(1982—)，男，通信作者，博士，教授。研究方向：新能源汽车与电池管理技术。E-mail：chenzy@mail.neu.edu.cn。

王明雪(2003—)，女，本科。研究方向：新能源汽车技术。E-mail：wangmx@stumail.neu.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)