

锂离子电池组聚类筛选低温混合预热系统 建模与热分析

陈思琦^{1,2}, 魏学哲^{1,2}, 张广续^{1,2}, 张少哲^{1,2}, 徐雅慧^{1,2}, 朱建功^{1,3}, 戴海峰^{1,2}

(1. 同济大学 新能源汽车工程中心, 上海 201804; 2. 同济大学 汽车学院, 上海 201804;

3. 卡尔斯鲁厄理工学院(KIT) 应用材料研究所(IAM), 艾根施泰因-利奥伯德港 76344, 德国)

摘要: 低温导致锂离子动力电池性能衰减加速、寿命缩减、形成锂枝晶, 甚至造成内短路等严重问题, 因此预热已经成为电动汽车在低温地区应用的关键问题。此外, 电池单体间一致性对电池组整体性能及老化有重大影响。采用聚类分析对锂离子电池单体进行筛选成组, 并提出一种附有 PTC 加热膜和液冷板的混合电池热管理系统, 通过计算流体力学建模和数值计算对此系统在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下的预热效率进行分析。结果表明: 对初始方案进行优化后, 经过 695 s 预热电池组最低温度可加热至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上; 此外, 与纯 PTC 加热方法相比, 电池组温度标准差可降低 $5.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。因此, 此系统可在无过多功耗增长的前提下, 短时间内高效地将电池组加热至工作状态, 预热速度为 $3.56\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 且能提升温度均匀性。

关键词: 锂离子电池; 低温预热; PTC 加热; 液体冷却剂。

中图分类号: U464.9⁺3

文献标志码: A

Clustering, Modelling and Thermal Analysis of a Hybrid Preheating System-based Lithium-ion Battery Module Under Subzero Environment

CHEN Siqi^{1,2}, WEI Xuezhe^{1,2}, ZHANG Guangxu^{1,2}, ZHANG Shaozhe^{1,2}, XU Yahui^{1,2}, ZHU Jiangong^{1,3}, DAI Haifeng^{1,2}

(1. Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Institute for Applied Materials (IAM), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Germany)

Abstract: Subzero environment results in the accelerated performance degradation, lifespan shortage, lithium planting, and even some severe problems such as internal short circuit of lithium-ion battery cells. Therefore, preheating has become a critical issue for

electric vehicle application in the low-temperature area. The consistency between the battery cells has a significant impact on the module performance and aging mechanism. In this paper, the clustering approach was utilized for battery cell selection. In addition, a hybrid battery thermal management system (BTMS) coupled with positive temperature coefficient (PTC) heating film and cooling plate is proposed, the heating efficiency of the proposed system at the ambient temperature ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) was investigated through computational fluid dynamics (CFD) modelling and numerical calculation. The results indicate that the minimum temperature of the battery module can be heated to a state higher than $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ after 695 seconds of preheating. Besides, the temperature standard deviation of the battery module gets decreased by $5.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ compared with the pure PTC heating approach. Therefore, this proposed method efficiently heat the battery module to an operational state within a short heating interval, without much energy cost. The preheating speed reaches $3.56\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Moreover, the thermal uniformity gets enhanced.

Key words: lithium-ion battery; clustering; preheating; positive temperature coefficient (PTC) heating; liquid coolant

电动汽车作为国家“十五”规划以来的重点研发方向, 近些年来得到了业界的持续探索与广泛关注。而作为电动汽车中核心的动力元件, 动力电池的技术水平已然成为电动化交通的技术瓶颈^[1]。动力电池的安全性、环境适应性严重制约了电动汽车在高纬度地区及冬季的推广应用^[2]。近年来, 不断提升的快速充电、全气候应用等技术要求为电动汽车热

收稿日期: 2021-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(U1764256, U20A20310, 52176199)

第一作者: 陈思琦(1996—), 男, 博士生, 主要研究方向为锂离子电池。E-mail: siqichen@tongji.edu.cn

通信作者: 戴海峰(1981—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为汽车电子、动力电池成组及管理、燃料电池建模与控制及车载充电机。E-mail: tongjidai@tongji.edu.cn

管理系统的设计带来了严峻的考验^[3-4]。

低温环境下锂离子动力电池负极比容量急剧下降,嵌锂困难。低温环境下充电易引发负极表面形成锂沉积甚至导致锂枝晶“生长”,从而致使寿命衰减、续航里程骤降等问题^[5]。因此,通过改性电介质/电极材料或预热等手段来改善电池低温性能是实现电动汽车全气候应用的必然选择。

预热方法按热源位置分为外部预热和内部预热^[6]。内部预热法主要分为自加热电池、交流激励加热等方法。Wang 等^[7]在电池内部植入镍箔,利用内短路消耗电池自身能量,产生短路电流实现内部加热。这款特殊的电池可实现理想的升温速率,但特制电池结构对工艺、成本要求较高,且其安全性尚未得到全生命周期实车检验,目前未实现商业量产。交流激励加热通过交流电流实现内部加热,经试验证明可实现较好的温度均匀性^[8],但此方案无法实现低温、高温及快充等综合工况环境下的全气候应用。外部预热主要采用外部热源(如空气、液体和 PTC 加热片)实现电池预热。王发成等^[9]通过电热丝加热空气实现电池组表面温度从-15℃升为0℃,结构简单易于维护,但加热速率较低(0.71℃/min),难以实现电动汽车在极寒环境下的正常使用。张承宁等^[10]采用金属加热膜对-40℃下的电池进行加热,实现相较于空气,液体作为导热介质时具有更高的导热系数,也是目前电动汽车热管理系统常用的方案。采用此设计方案可实现较高的热管理效率、温度均匀性,同时有利于系统的紧凑化,实现较高的体积能量密度。

综上所述,在目前电池材料研究未取得重大突破的情况下,为解决锂离子动力电池低温性能问题、实现电动汽车的全气候应用与推广,外部预热仍然是可行性最高的方案。

近年来,磷酸铁锂电池凭借其热稳定性而引起了人们的广泛关注。然而,低电导率、低锂离子扩散和低温环境下有限的充放电效率严重制约了其在高纬度地区的应用。如图 1 所示,本文以磷酸铁锂电池为研究对象,基于电池单体热特性、电特性测试结果进行聚类筛选,选出相似性能单体构成电池组。此方法适用于出厂前筛选近似单体成组及退役电池梯次利用分选,在现如今储能与交通电动化并行发展的环境下具有较为重要的意义。基于聚类筛选的电池模组,通过建立传热模型对极寒环境(-40℃)下的磷酸铁锂电池组在不同预热方法作用下的预热效果进行模拟,通过对温升速率、温度均匀性、热管

理系统功耗等多方面指标进行比较,为磷酸铁锂电池组低温极速升温提供理论基础与指导。

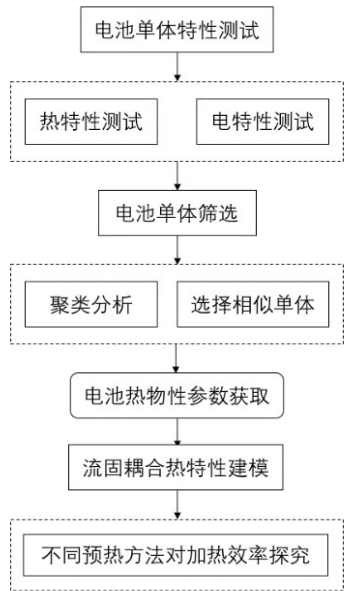


图 1 磷酸铁锂电池研究框架

Fig.1 Research framework of lithium iron phosphate battery

1 锂离子动力电池聚类筛选

本研究选用磷酸铁锂电池的基础参数如表 1 所示。考虑到电池单体间不一致性,需对电池单体进行聚类分析、筛选以获得近似电池单体,提升电池组性能。此次电池筛选采用聚类分析法,基于各电池单体热特性参数(比热容)和电特性参数(内阻)。

表 1 磷酸铁锂电池基础参数

Tab.1 Basic parameters of lithium iron phosphate battery

参数	参数值
额定容量/(A·h)	5
标称电压/V	3.2
质量/g	165
尺寸/mm	76×66×19

1.1 电池参数测试

电池参数测试通过如图 2 所示的测试平台开展,包括 Arbin、Neware 充放电设备和用于编程和数据储存的计算机。各电池单体的热、电物性参数均在 25℃恒温环境下开展。其中,针对各电池单体比热容的测定,实验步骤如表 2 所示。

锂离子电池产热数值模型如下^[11]:

$$\Phi=(\sum_i I_i E_{i,avg}-IE)-\sum_i I_i T \frac{dE_{i,avg}}{dT} \quad (1)$$



图2 电池测试平台场景

Fig.2 Battery test platform

表2 比热容参数测定实验步骤

Tab.2 Experimental procedures for determination of specific heat capacity parameters

工步	内容
1	将各电池单体充电至高电量状态(80%<SOC<100%)
2	静置各电池单体30分钟
3	将热电偶贴附于电池单体表面的正极、负极、中部和底部,并置于绝热环境下
4	将各电池单体以1C、1.2C、1.5C、1.8C和2C的电流倍率分别放电12、10、8、6.7和6分钟(保证相同的放电量)

式中: Φ 代表电池产热功率; I 代表电流(充电状态时为正值;放电状态时为负值); I_i 代表不同反应各电极的电流; E 代表电池电压; $E_{i,avg}$ 代表电池平均理论开路电压; T 代表电池温度。对于锂离子电池单体而言, $I=I_i$,因此式(1)可简化为:

$$\Phi = I[(E_0 - E) - T \frac{dE_0}{dT}] \quad (2)$$

式中: E_0 代表电池理论开路电压。电池吸热速率可定义为:

$$\Phi' = \frac{\delta Q}{dt} = \frac{mc_p dT}{dt} = mc_p \frac{dT}{dt} \quad (3)$$

式中: Φ' 代表电池吸热速率; Q 代表电池总吸热量; m 代表电池质量; c_p 代表电池等效比热容。实验过程中,各电池单体处于绝热环境下,产热量与吸热量相等,可表达为:

$$\Phi = \Phi' \quad (4)$$

电池欧姆内阻 R_z 与电压 E 间存在如式(5)所示的关系:

$$E_0 - E = IR_z \quad (5)$$

此产热模型可简化为式(6)和式(7):

$$\frac{1}{I} \frac{dT}{dt} = \frac{R_z}{mc_p} I - \frac{T}{mc_p} \frac{dE_0}{dT} \quad (6)$$

$$\Phi = I^2 R_z - IT \frac{dE_0}{dT} \quad (7)$$

式中 $T \frac{dE_0}{dT}$ 取决于电池内部化学反应,对同类锂离子电池此项视为常数,则 $\frac{1}{T} \frac{dT}{dt}$ 与电流 I 呈线性关系,由斜率 $\frac{R_z}{mc_p}$ 可计算各电池单体等效比热容。测定与计算所得一批12节磷酸铁锂电池的单体内阻和比热容如表3所示。

表3 电池单体内阻与比热容

Tab.3 Internal resistance and specific heat capacity of battery cell

电池序号	内阻 $R_z/m\Omega$	比热容 $c_p/(J/(kg \cdot K))$
1	6.7	602.3
2	6.8	696.6
3	6.2	749.5
4	8.3	864.7
5	7.6	616.5
6	6.9	786.4
7	7.3	899.8
8	6.9	628.3
9	8.2	609.4
10	7.5	553.4
11	6.7	420.4
12	7.8	455.5

1.2 电池聚类筛选

鉴于不同参数数量级间存在差异,这一差异在欧几里得空间中尤为明显,因此需通过数据标准化来消除。参数标准化常用函数Z-score描述,如下所示:

$$z(x_i) = \frac{x_i - m}{s} \quad (8)$$

式中: m 代表 x_i 的平均值; s 代表 x_i 的标准差。

K-means Clustering算法被选择用于电池单体的聚类筛选,其主要步骤如下:

(1) 任意选择 k 个数据点为相应类别的数据中心;

(2) 计算各初始类别中心与其他数据点间的距离,所有的数据点都被分类到与之最近的数据中心所在类别;

(3) 所有数据点都得以归类后,重新计算每个类别中数据点的均值,平均值所对应的数据点成为此类别新的数据中心;

(4) 迭代循环至连续两次数据类别中心均一致,标志着所有的数据点都被合理地分为了 k 类。

平方误差和是常用的聚类数值评价标准,用于计算一类中数据点到该类数据中心的欧几里得距离的平方和,具体计算方法如式(9)所示。所得函数值越小代表着类别更高的数据集中度、更好的聚类结果。

$$E(m_1, m_2, \dots, m_l) = \sum_{i=1}^k \sum_{j \in c_i} \|x_j - m_i\|^2 \quad (9)$$

式中: $\{x_j\} \subseteq \gamma$ 代表一个数据集, $\gamma \subseteq \Omega$ 代表一个数据域; k 代表类别数量; c_i 代表类别所在域, 其数据中心为 m_i 。数据中心 m_i 计算方法如下:

$$m_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j \in c_i} x_j \quad (10)$$

式中, N_i 代表该数据类别所在域中的数据点数量。

12 节电池单体聚类结果如图 3 所示。由图可见, 类别 Cluster 1 中可筛选出性能近似的 8 节电池单体构成电池组。

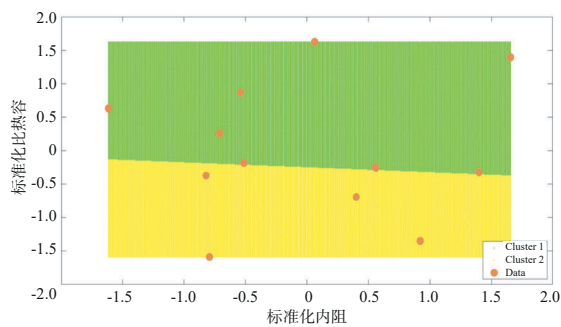


图3 基于K-means clustering的电池单体聚类效果

Fig.3 Clustering effect of battery cells based on K-means clustering

Hierarchical Clustering 算法可被选用进行进一步聚类分析, 其聚类分析过程是沿层级方向凝聚的。两类数据子集间的相似度被定义为两数据子集间的数据点最小距离, 具体计算如下:

$$\tilde{D}(c_1, c_2) = \min_{l \in c_1, j \in c_2} D(l, j) \quad (11)$$

式中: \tilde{D} 代表两数据类别 ($c_1 \subset I, c_2 \subset I$) 之间的距离; $D(l, j)$ 代表输入空间 I 内两数据点之间的距离。

典型的 Hierarchical Clustering 过程是一种树状图 (dendrogram), 是一种以数据子集中数据点距离

来构建的层级树状结构。图中的超度量空间构筑基于三角不等性, 定义如下:

$$D(l, j) \leq \max(D(l, m), D(m, j)) \quad (12)$$

所得树状图如图 4 所示, 图中的电池单体 1、8、2、6、3、7、5、10、9 及 12 可归为一类, 故可筛选为一个模组中的电池单体。

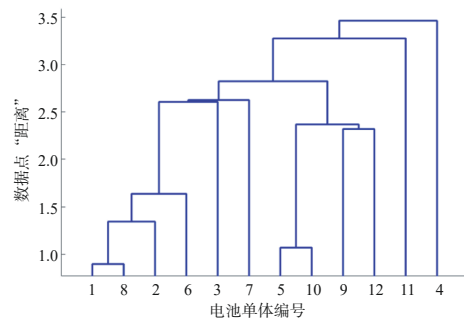


图4 基于Hierarchical Clustering的电池单体聚类树状图
Fig.4 Hierarchical clustering-based tree view of battery cell clustering

基于上述分析, 所得 8 节具有详尽性能电池单体平均电、热物性参数如表 4 所示。这些热物理参数为进一步的建模仿真工作奠定基础。

表4 电池单体平均电、热物性参数

Tab.4 Average electrical and thermal physical parameters of battery cell

参数	参数值
密度 $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	1731.3
比热容 $c_p / (\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K}))$	655.29
导热系数 $\lambda / (\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$	2.05 (大面方向, 厚度方向忽略不计)

2 数值计算模型

本研究针对超低温 (-40°C) 环境下不同预热方法加热效率展开探究, 分析比较传统 PTC 预热法与液冷-PTC 耦合预热法的预热效率。考虑到导热效果、成本等因素, 铝合金 7075 被选作此次研究中液冷板材料, 同时鉴于水-乙二醇混合液极低的冰点, 其在此次研究中被选为冷却液。相关材料热物性参数如表 5 所示。

表5 电池组组件材料热物理参数

Tab.5 Thermophysical parameters of battery pack component materials

材料	密度 $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	比热容 $c_p / (\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K}))$	导热系数 $\lambda / (\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$	粘度 $\mu / (\text{Pa}\cdot\text{s})$
液冷板	2810.00	862.0	175.000	—
冷却液	1071.11	3.3	0.384	—
PTC 加热膜	7840.00	465.0	48.000	3.39×10^{-3}

2.1 模型假设

采用商用软件FLUENT进行数值计算、流固耦合传热模型构建。为简化计算,各电池单体极耳部分被省略,所构建数值计算模型基于以下假设:流体为稳态流动状态;不可压流体;各材料组分热力学及物理性能保持稳定;流体及液冷板中无热源;由辐射导致的热损失可忽略不计;电池内温度梯度可忽略不计;重力效应可被忽略^[12]。

2.2 边界条件

冷却液流量定义为0.000 9 kg/s^[13],加热膜功率为100 W,初始温度为-40 °C (233.15 K),预热过程中无额外热量从电池中产生。流体流动状态由雷诺数决定,其计算式如下:

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta} \quad (13)$$

式中: ρ 、 v 、 d 和 η 分别代表流体密度、速度、水力直径和动力粘度。经计算,雷诺数小于2 300。

本研究采用层流模型,液冷板、电池与环境间自然对流的计算基于牛顿冷却定律,如下式所示:

$$q_a = h_a (T_s - T_e) \quad (14)$$

式中: h_a 代表热对流系数(5 W/(m²·K)); T_s 和 T_e 分别代表电池表面温度和环境温度。

2.3 控制方程

冷却液质量守恒方程如下:

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_c \vec{v}) = 0 \quad (15)$$

式中: ρ_c 代表冷却液密度; v 代表流体流速; t 代表时间。

冷却液动量守恒方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_c \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho_c \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \eta \nabla^2 \vec{v} \quad (16)$$

式中: P 代表冷却液静态压力; η 代表冷却液粘度。

冷却液能量守恒方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_c c_{pc} T_c) + \nabla \cdot (\rho_c c_{pc} T_c \vec{v}) = \nabla \cdot (k_c \nabla T_c) \quad (17)$$

式中: c_{pc} 、 T_c 、 k_c 和 ρ_c 分别代表冷却液比热容、温度、导热系数和密度。

液冷板能量守恒方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_h c_{ph} T_h) = \nabla \cdot (k_h \nabla T_h) \quad (18)$$

式中: c_{ph} 、 k_h 和 T_h 分别代表液冷板比热容、导热系数和温度。

电池能量守恒方程如式下:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_b c_{pb} T_b) = \nabla \cdot (k_b \nabla T_b) \quad (19)$$

式中: ρ_b 、 c_{pb} 、 k_b 和 T_b 分别代表电池密度、比热容、导热系数和温度。

3 低温预热模型及结果

3.1 评价指标

本研究针对锂离子动力电池组体积单元技术指标进行比较,具体参数与计算方法如下:

(1) 最低温度。电池组体积单元最低温度用于评价预热系统加热效果,衡量是否各电池单体外壳及芯部均加热至零度以上,如式(20)所示。

$$T_{\min} = \min(T_{V_1}, T_{V_2}, \dots, T_{V_i}, \dots, T_{V_N}) \quad (20)$$

式中: T_{V_i} 代表第 i 个体积单元温度值; N 代表体积单元数量。

(2) 最高温度。电池组体积单元最高温度用于评价预热系统加热效果,防止升温不均导致的局部过热等危险状况发生,如式(21)所示。

$$T_{\max} = \max(T_{V_1}, T_{V_2}, \dots, T_{V_i}, \dots, T_{V_N}) \quad (21)$$

(3) 平均温度。电池组平均温度用于评价预热系统升温速率,如式(22)所示。

$$T_a = \frac{\sum_{i=1}^N T_{V_i}}{N} \quad (22)$$

(4) 温度标准差。温度标准差用于评价电池组温度均匀性,如式(23)所示。

$$TSD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{V_i} - T_a)^2} \quad (23)$$

(5) 功耗。功耗用于评价预热过程经济性,如式(24)所示。

$$W = \int P_{\max} q dt + \int P_{PTC} dt \quad (24)$$

式中: P_{\max} 代表液冷板流道最大压力; q 代表冷却液流量; P_{PTC} 代表PTC加热功率。

3.2 预热效果比较

传统PTC加热膜预热系统与PTC-液冷混合预热系统如图5所示。其中:图5a方案传热形式为PTC加热膜与电池间热传导,电池组、加热膜与环境间自然对流;图5b方案传热形式为PTC加热膜、液冷板、电池组间热传导,液冷板中冷却液强制对流以及加热膜、液冷板、电池组与环境间自然对流。图5b方案可实现低温加热-高温/快充散热全气候热管理功能的集成,在保证了足够的换热面积的同时,实现了较高的温度均匀性与体积能量密度。

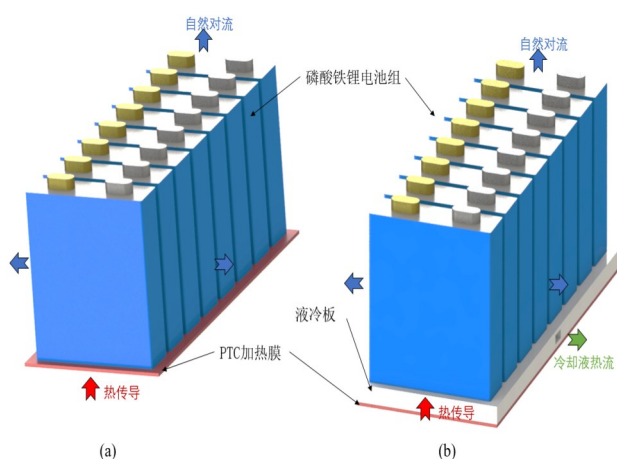


图5 预热系统方案与能流分析示意图

Fig.5 Preheating system scheme and energy flow analysis diagram

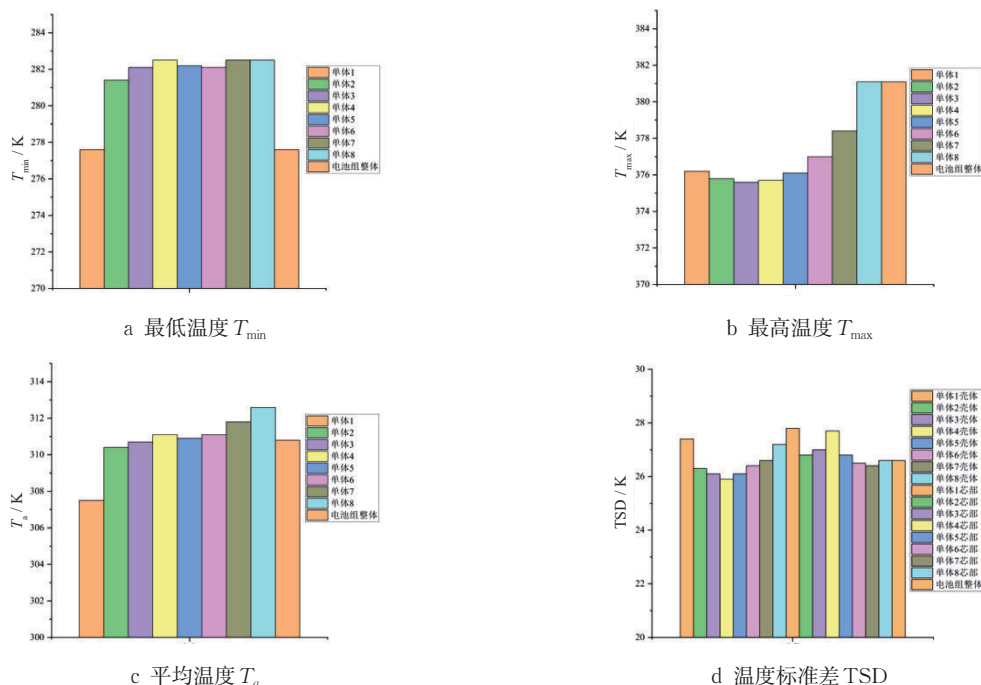


图6 PTC加热系统预热12 min温度指标

Fig.6 Temperature index of PTC heating system after preheating of 12 min

经预热时长调整,电池组最高温度、平均温度、温度标准差分别进一步降低1.8℃、1.2℃和0.2℃,且电池组最低温度仍能加热至0℃以上。经模型数值计算,不同预热时的长流道最大压力分别为1.067 Pa和1.060 Pa。由公式(23)计算可得,PTC加热系统、液冷-PTC混合预热系统12 min、695 s的预热时长功耗分别为72 000 J和69 500.7 J。即经预热系统改进及预热时长调整,预热效果和功耗均得到了改善。

上述两方案的12 min预热效果如图6、图7所示。两方案均可使整个电池组升温至零度以上,但直接用PTC加热膜加热电池组导致电池局部过热(108.0℃),存在产气鼓包甚至触发热失控的风险,且电池组温差(26.6 K)过大,会导致整个电池组老化速度不一致,影响电池组性能。而图5b方案采用PTC加热膜通过冷却液和液冷板间接加热电池组,温度标准差相较图5a方案可降低5.7 K,最高温度可降低33.9℃。

3.3 预热时长调整

由上述分析可知,图5b方案较传统加热方案预热效果有较大提升,但仍存在局部温度较高的问题。为此,进一步对预热时长进行研究,尝试将其缩短为695 s。经模型数值计算,其温度指标如图8所示。

4 结论

本文针对锂离子动力电池低温环境存在的危险性及工作性能衰退等问题,开展了锂离子动力电池组聚类筛选及系统预热建模,主要结论如下:

(1) 基于实验所得电池单体热物性参数,采用聚类分析算法可实现对相似性能电池单体的筛选成组,提升电池组单体一致性与整体性能。

(2) 通过计算流体力学建模和数值计算,计算比较了基于PTC加热膜和液冷-PTC混合热管理系

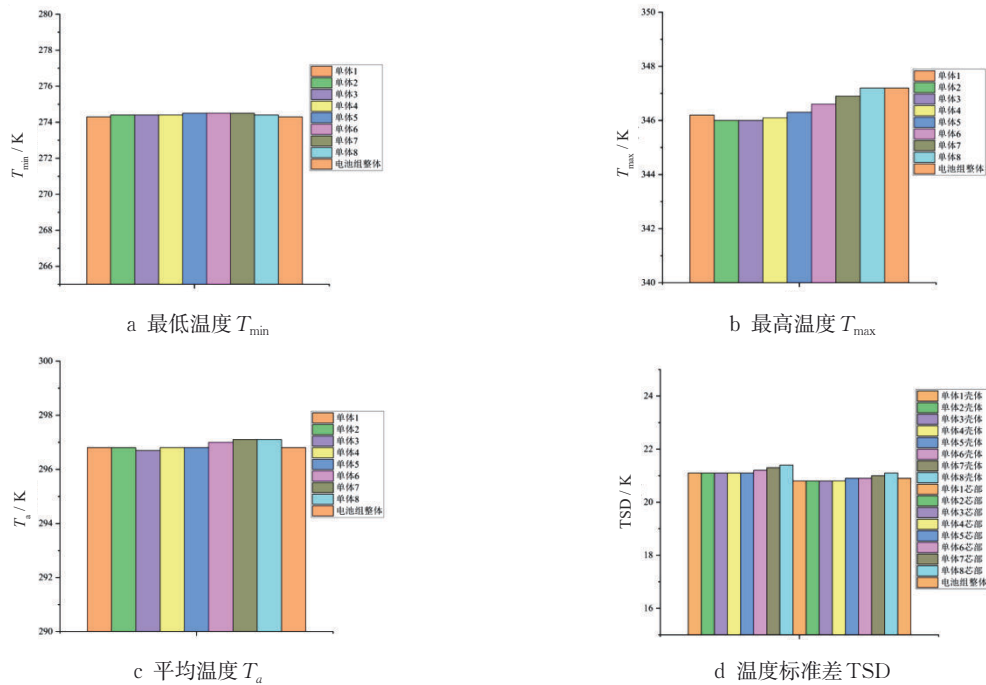


图7 液冷-PTC加热系统预热12 min时温度指标

Fig.7 Temperature index of liquid cooling-PTC heating system after preheating of 12 min

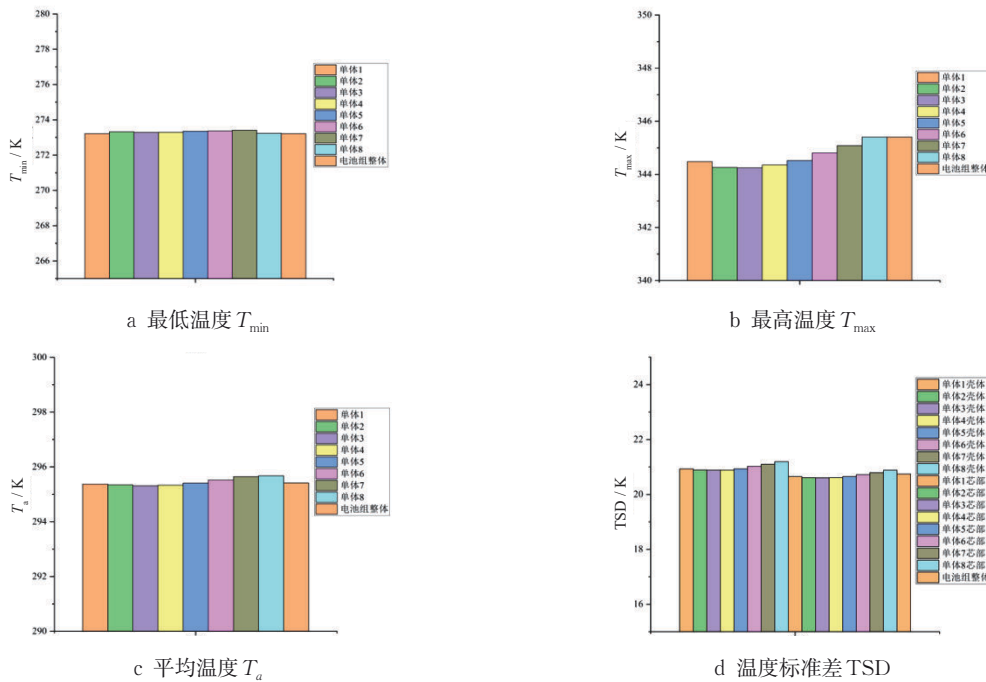


图8 液冷-PTC加热系统预热695 s时温度指标

Fig.8 Liquid cooling-PTC heating system temperature index after preheating of 695 s

统在 -40°C 超低温环境下的预热效率进行。结果表明混合热管理系统可实现更好的预热效果,具有更好的温度均匀性,同时能防止局部过热。

(3) 在无过多额外设备及功耗需求下对预热时长进行优化,经695 s预热后电池组最低温度可加热

至 0°C 以上,平均温度升温速率可达 $3.6^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。与纯PTC加热方法及初始预热时长相比,电池组温度标准差、热管理过程功耗可得到进一步改善。因此经过改进设计、优化预热过程可在短时间内高效地将电池组加热至工作状态,且能改善温度均匀性。

后续将以安全性、耐久性和经济性为目标,结合车用电池包新构型展开研究,在提升电池包能量密度的同时,进一步改善电池包的安全性、延长寿命。

参考文献:

- [1] 张亚军,王贺武,冯旭宁,等. 动力锂离子电池热失控燃烧特性研究进展[J]. 机械工程学报, 2019, 55(20):17.
ZHANG Yajun, WANG Hewu, FENG Xuning, *et al.* Research progress on thermal runaway combustion characteristics of power lithiumion batteries [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(20):17.
- [2] DAI H, JIANG B, HU X, *et al.* Advanced battery management strategies for a sustainable energy future: multilayer design concepts and research trends [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020: 110480.
- [3] CHEN S, BAO N, GARG A, *et al.*, A fast charging - cooling coupled scheduling method for a liquid cooling-based thermal management system for lithium-ion batteries [J]. Engineering, 2021, 7(8): 1165.
- [4] HU X, ZHENG Y, HOWEY D A, *et al.* Battery warm-up methodologies at subzero temperatures for automotive applications: Recent advances and perspectives[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2020, 77: 100806.
- [5] PENG X, CHEN S, GARG A, *et al.*, A review of the estimation and heating methods for lithium-ion batteries pack at the cold environment [J]. Energy Science & Engineering, 2019. 7(3): 645.
- [6] 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.
- [7] WANG C, ZHANG G, GE S, *et al.* Lithium-ion battery structure that self-heats at low temperatures [J]. Nature, 2016, 529(7587): 515.
- [8] ZHU J, SUN Z, WEI X, *et al.* Experimental investigations of an AC pulse heating method for vehicular high power lithium-ion batteries at subzero temperatures [J]. Journal of Power Sources, 2017, 367: 145.
- [9] 王发成,张俊智,王丽芳. 车载动力电池组用空气电加热装置设计[J]. 电源技术,2013,37(7):1184.
WANG Facheng, ZHANG Junzhi, WANG Lifang. Design of electric air-heated box for batteries in electric vehicles [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2013, 37(7): 1184.
- [10] 张承宁,雷治国,董玉刚. 电动汽车锂离子电池低温加热方法研究[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(9): 921.
ZHANG Chengning, LEI Zhiguo, DONG Yugang. Method for heating low-temperature lithium battery in electric vehicle [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(9): 921.
- [11] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A general energy balance for battery systems [J]. Journal of the electrochemical society, 1985, 132(1): 5.
- [12] CHEN S, PENG X, BAO N, *et al.* A comprehensive analysis and optimization process for an integrated liquid cooling plate for a prismatic lithium-ion battery module [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 156: 324.
- [13] CHEN S, BAO N, PENG X, *et al.* A thermal design and experimental investigation for the fast charging process of a lithium-ion battery module with liquid cooling [J]. Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage, 2020, 17(2): 1.