



基于电池老化效应的电池热管理系统性能分析与优化

史文伯, 刘敏学, 刘雪涛, 闫龙超, 郭曾嘉

(青岛海信网络能源股份有限公司, 山东 青岛 266104)

摘要: 为实现电池组安全、高效与长久的运行, 本研究开发了一个电池热管理系统(BTMS)多物理场耦合数值模型, 并对液冷 BTMS 在不同运行周期下电池组温度特性与电化学特性进行了分析。研究发现: 老化电池组内部固体电解质界面膜(SEI)的形成会引发更高的电池放热率。其中, 电池内部的可逆热会因为 SEI 膜的形成与 Li^+ 的降低而逐渐减少, 但是电池组内部的不可逆热会随着电池组循环次数的增加而增加, 且不可逆热的上升幅度远大于可逆热的降低幅度。最终, 电池组的放热率会随着电池工作循环次数的增加而上升。因此, 当电池组持续运行 1000 个充放电循环后, 电池组温度与温差分别上升了 2.54 K、2.15 K、1.93 K 和 2.34 K、2.04 K、1.85 K。因电池老化效应而引起的电池组温度与温差的偏差, 势必会显著影响 BTMS 的设计。结果表明, 入口流速为 0.05 m/s 时, BTMS 即可满足未老化电池组对温度与温差的需求。然而, 此方案无法满足老化电池组对换热量的需求。因此, 本研究针对 BTMS 提出了两种优化方案, 以确保电池组的温度与温差在长期循环过程中仍然可以得到有效的控制。研究发现: 在 BTMS 冷却液中添加氧化铝(Al_2O_3)球形纳米颗粒可以显著增强 BTMS 换热性能, 并且随着纳米颗粒体积分数的增加, BTMS 的换热性能也逐渐上升。当电池组运行 1000 次充放电循环后, 采用 1% Al_2O_3 纳米流体, 电池最高温度分别降低 1.24 K、0.98 K 和 0.86 K, 最大温差分别降低 1.09 K、0.88 K 和 0.79 K; 采用 3% Al_2O_3 纳米流体时, 电池最高温度分别降低 1.92 K、1.56 K 和 1.36 K, 最大温差分别降低 1.63 K、1.52 K 和 1.27 K; 而采用 5% Al_2O_3 纳米流体时, 电池最高温度分别降低 2.64 K、2.20 K 和 1.94 K, 最大温差分别降低 2.29 K、2.02 K 和 1.83 K。此外, 基于电池产热特性的 BTMS 运行方案可以在所有工作循环条件下更加有效地控制电池热特性并减缓电池的容量衰减, 并达到降低系统压降与提升电池放电电压的效果。对于老化电池组而言, 采用此运行策略后, 电池最高温度分别降低 5.98 K、4.17 K 和 3.04 K, 最大温差分别降低 4.27 K、2.79 K 和 1.81 K。

关键词: 锂电池; 电池热管理; 电池老化; 传热; 数值模拟

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0957

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 04-1438-13

Analysis and optimization of battery thermal management system based on battery aging effect

SHI Wenbo, LIU Minxue, LIU Xuetao, YAN Longchao, GUO Zengjia

(Qingdao Hisense Network Energy Co., Ltd., Qingdao 266104, Shandong, China)

Abstract: Novel model considering electrochemistry, battery aging, and heat transfer is developed for the design and optimization of battery thermal management systems (BTMS) to ensure efficient and durable battery operation. The multiphysics behaviors of BTMSs under

收稿日期: 2025-10-24; 修改稿日期: 2025-12-05。

基金项目: 山东省博士后创新项目 (SDCX-ZG-202503144), 青岛市博士后应用项目资助 (QDBSH20240202029)

第一作者: 史文伯 (1972—), 男, 高级工程师, 研究方向为电池热管理系统, E-mail: shiwenbo@hisense.com; 通信作者: 郭曾嘉, 高级工程师, 研究方向为电池热管理系统优化设计、锂电池电化学性能与寿命优化设计, E-mail: gzj1106486578@163.com。

引用本文: 史文伯, 刘敏学, 刘雪涛, 等. 基于电池老化效应的电池热管理系统性能分析与优化[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(4): 1438-1450.

Citation: SHI Wenbo, LIU Minxue, LIU Xuetao, et al. Analysis and optimization of battery thermal management system based on battery aging effect[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(4): 1438-1450.

different working cycles are analyzed and compared. Results show that solid electrolyte interphase (SEI) formation in aged battery packs leads to high heat generation rates. The reversible heat generation rate gradually decreases during cycling owing to SEI formation and Li^+ reduction inside the battery. By contrast, the irreversible heat generation rate increases with cycling. Meanwhile, the increase in irreversible heat generation was much higher than the decrease in reversible heat generation, causing the total heat generation rate to rise continuously during cycling. Consequently, the maximum temperature and maximum temperature difference after 1000 cycles of BTMS are higher than the initial case by 2.54, 2.15, 1.93 K and 2.34, 2.04, 1.85 K, respectively. Such significant deviations in maximum temperature and maximum temperature difference caused by capacity fade will definitely affect BTMS design. Without considering battery aging, an airflow velocity of 0.05 m/s is sufficient for BTMSs to meet the requirements for maximum temperature and maximum temperature difference. However, when capacity fade is considered, BTMSs cannot maintain battery pack temperature within the required limits after 1000 cycles under the investigated inlet velocity. Thus, optimization schemes are proposed for BTMSs to ensure effective thermal management for battery packs during long-term cycling. The addition of Al_2O_3 nanoparticles at different volume fractions consistently enhances the cooling performance of BTMSs. Furthermore, increasing nanoparticle volume fraction made the nanofluid-based BTMS more effective in controlling thermal behaviors of the battery pack. After 1000 cycles, the maximum temperature and maximum temperature difference decrease by 1.24, 0.98, 0.86 K and 1.09, 0.88, 0.79 K for water-1% Al_2O_3 ; 1.92, 1.56, 1.36 K and 1.63, 1.52, 1.27 K for water-3% Al_2O_3 ; 2.64, 2.20, 1.94 K and 2.29, 2.02, 1.83 K for water-5% Al_2O_3 , respectively. For the optimized BTMS operation strategy based on battery heat generation, this method more effectively controls thermal behavior and mitigates battery capacity fade in all working cycles while significantly reducing pressure loss and increasing battery discharge potential. For the aged battery pack after 1000 cycles, the maximum temperature and maximum temperature difference decrease by 5.98, 4.17, 3.04 K and 4.27, 2.79, 1.81 K, respectively, using the optimized strategy.

Keywords: Li-ion battery; battery thermal management system; battery aging; heat transfer; numerical simulation

近年来,电动汽车凭借在减少碳排放与污染物等方面的突出优势,已逐步成为替代传统燃油汽车的重要技术路径^[1]。其中,锂离子电池凭借其高能量密度、长循环寿命等优异特性,已经被广泛地用作电动汽车的核心动力源。然而,锂离子电池的电化学性能与寿命对电池工作温度高度敏感,不适宜的电池工作温度极易诱发电极界面副反应,导致电池的容量发生不可逆衰减。并且在极端工况下,锂离子电池的局部过热可能会引发链式放热反应,最终导致锂电池出现热失控现象^[2-3]。针对此类问题,众多研究者投入大量精力,并最终发现锂电池维持安全高效

运行的最佳温度区间为25~40℃,且锂电池内部最大温差应低于5℃^[4]。因此,高效的电池热管理系统(BTMS)是确保锂电池组安全、高效与长久运行必不可少的一部分。

目前,BTMS因工作介质的差异性主要分为空气冷却、液体冷却及相变材料冷却3类。然而,由于空气^[5]与相变材料^[6]的低导热特性,空气冷却与相变材料冷却的BTMS很难满足电池组在运行过程中对高效热管理的需求。因此液体冷却方式凭借着卓越的换热性能,成为了BTMS的主流技术方案^[7]。为了提升液冷BTMS的换热性能,Panchal等^[8]、

Jarrett等^[9]与 Nieto等^[10]分别提出了锯齿形流道、涡旋式流道以及蛇形流道结构。Jahanbakhshi等^[11]通过耦合波浪形微通道与微管的方法创新性地设计了一种复合冷板,并通过实验的方法验证了此设计在抑制电池温升方面的优势。宋旭等人^[12]采用R134a冷媒作为制冷剂引入储能电池热管理系统,显著降低了电池组的平均温度与内部温差。段浩磊等^[13]则通过数值仿真方法对比研究了多种制冷剂在电池热管理系统中的应用效果,并对不同方案的热管理性能与系统特性进行了综合分析评价。此外,众多研究人员也分别针对液冷板入口速度^[14]、液冷板几何参数优化^[15]、液冷板多向出入口设计^[16]、液冷板通道形状^[17-18]等方向进行了深入的探讨。同时,袁昊等^[19]通过实验与数值模拟的方法发现对于所有单入口单出口的液冷BTMS,液冷板内部常因流阻分布不均使其压力损失过大,从而严重影响系统的能效。为解决此问题,Qian等^[20]将微通道冷板引入到液冷BTMS中,从而优化系统内部的流阻特性。Jin等^[21]与Guo等^[22-24]分别提出了肋片结构与扰流结构,在实现系统压降控制的同时,显著改善了BTMS换热性能。Huang等^[25]则设计了流线型微通道冷板,在确保冷却性能不衰减的条件下进一步降低流动阻力损失。莫文迪等^[26]则进一步使用SVR与NSGA-II算法对电池热管理系统进行全方位的参数优化,并为不同应用场景下的热管理系统提供合适的方案优化决策。

此外,Kellner^[27]指出锂电池在实际应用中不可避免地会出现老化现象,而老化电池在充放电过程中通常表现出更高的产热率,从而导致其在不同工作循环中的温度特性呈现显著差异。因此若在BTMS设计与优化过程中忽略电池老化现象的影响,BTMS可能仅在锂电池运行初期实现理想的温控效果,而在长期运行后便难以保证锂电池处于适宜的工作温度区间。目前,相关研究普遍忽视了BTMS换热性能与锂电池循环寿命及电化学性能之间的耦合关系。仅有少数研究者^[28-29]将此现象纳入BTMS的设计优化过程中,但其仅采用了简化的数值模型,忽略了电池温度、电池老化反应与电池产热率之间的耦合关系,从而影响了模型预测结果的准确性。

因此,本研究综合考虑了电化学反应、电池老化现象以及传热学与流体力学过程,构建了一个可精准预测锂电池组电化学性能、循环寿命与温度特

性的多物理场耦合数值模型,并开展了液冷BTMS的数值模拟研究。本研究系统性分析了锂电池在不同工况和不同循环阶段的温度特性、产热机制、电化学特性、电池老化反应及寿命衰减特性,并提出多项BTMS优化策略,从而确保BTMS在电池长时间运行后仍具备优异的热管理能力,同时进一步提升电池组电化学性能,抑制电池寿命衰减。

1 物理模型与数值计算方法

1.1 物理模型

本研究计算模型如图1(a)所示,电池组由6个锂电池组成,每个电池的两侧均布置微通道冷板。本研究采用商用磷酸铁锂电池,其尺寸为128 mm×78 mm×12 mm。图1(b)为锂电池电化学仿真计算域。正极与负极均视为多孔介质,其活性材料分别为磷酸铁锂(LiFePO₄)和石墨(LiC₆)。电解液选用浓度为1200 mol/m³的六氟磷酸锂溶液(LiPF₆)。本研究中锂电池充放电循环电化学反应如下:

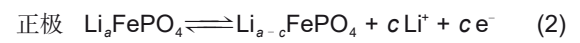
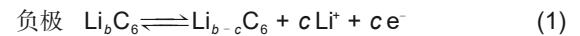


图1(c)为微通道冷板的几何示意图,微通道冷板尺寸为128 mm×78 mm×5 mm。冷板内部布置5个均匀分布的微通道,微通道的尺寸为128 mm×4 mm×4 mm。此外,冷板的材料为铝(Al),内部冷却介质为水。

1.2 控制方程

表1与表2分别展示了多物理场数值仿真计算过程中所使用的电学、传热学以及流体力学控制方程。其中, α 为电荷转移系数, J 、 f 和 H 为电池老化系数, T 为电池工作温度, K 为电池荷电状态(SOC)的膨胀系数。

此外,为了考虑电池老化现象对BTMS优化设计的影响,本研究将锂电池固态电解质界面膜(SEI)的生成引入到多物理场数值计算中,其控制方程^[30]如下:

$$\frac{dQ_{\text{SEI}}}{dt} = -I_{\text{SEI}} \quad (17)$$

$$I_{\text{SEI}} = -(1 + HK) \frac{J_{1c}}{\exp\left(\frac{\alpha\eta_{\text{SEI}}F}{RT}\right) + \frac{Q_{\text{SEI}}fJ}{I_{1c}}} \quad (18)$$

$$K = \begin{cases} -2\frac{I}{I_{1c}}, & I < 0 \text{ 且 } \text{SOC} < 0.3 \\ -\frac{I}{I_{1c}}, & I < 0 \text{ 且 } \text{SOC} > 0.7 \\ 0, & I < 0 \text{ 且 } 0.3 \leq \text{SOC} \leq 0.7 \text{ 或 } I \geq 0 \end{cases} \quad (19)$$

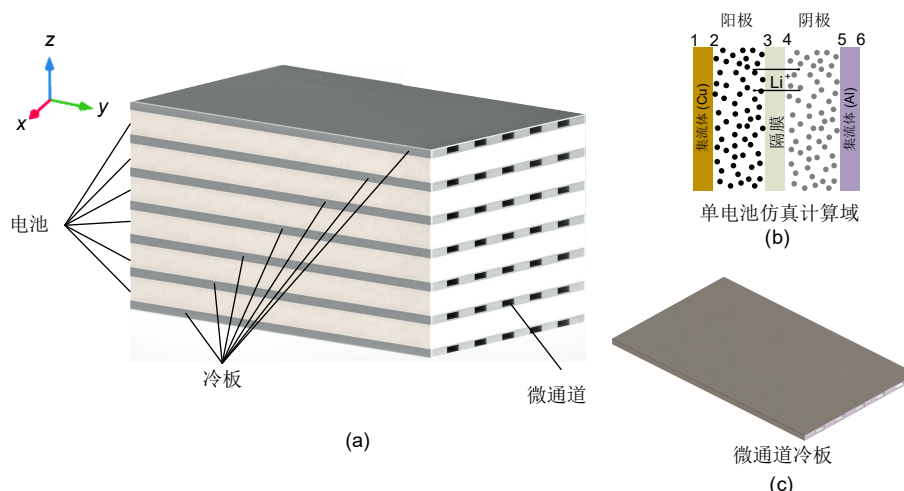


图 1 数值仿真模型示意图：(a) BTMS；(b) 单电池；(c) 微通道冷板

Fig. 1 Schematic diagram of numerical model: (a) BTMS; (b) single battery; (c) mini-channel cold plate

表 1 电化学控制方程

Table 1 The electrochemical conversation equations

方程名称	表达式	序号
固相电荷守恒方程	$\frac{\partial}{\partial x} \left(-\sigma_i^{\text{eff}} \frac{\partial \phi_{s,i}}{\partial x} \right) = -a_i F j_i$	(3)
液相电荷守恒方程	$\frac{\partial}{\partial x} \left(-\kappa_i^{\text{eff}} \frac{\partial \phi_{e,i}}{\partial x} \right) + \kappa_i^{\text{eff}} \frac{2RT}{F} (1 - t_+) \left(1 + \frac{d \ln f_{\pm}}{d \ln c_{e,i}} \right) \frac{\partial}{\partial x} (\ln c_{e,i}) = a_i F j_i$	(4)
固相质量守恒方程	$\frac{\partial c_{s,i}}{\partial t} = \frac{D_{s,i}}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial c_{s,i}}{\partial r} \right)$	(5)
液相质量守恒方程	$\varepsilon_{e,i} \frac{\partial c_{e,i}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_i^{\text{eff}} \frac{\partial c_{e,i}}{\partial x} \right) + a_i (1 - t_+) j_i$	(6)
电动力学方程	$j_i = j_0 \left[\exp \left(\frac{\alpha_a F \eta_i}{RT} \right) - \exp \left(\frac{\alpha_c F \eta_i}{RT} \right) \right]$	(7)
交换电流密度方程	$j_0 = k_i (c_{s, \max,i} - c_{s, \text{surf},i})^{\alpha_c} c_{s, \text{surf},i}^{\alpha_a} c_i^{\alpha_a}$	(8)
电化学反应表面积	$a_i = \frac{3 \varepsilon_{s,i}}{r_{\varepsilon_{s,i}}}$	(9)
过电势方程	$\eta_i = (\phi_{s,i} - \phi_{e,i} - \Delta \phi_{\text{SEL},i}) - E_i$	(10)

表 2 传热学与流体力学控制方程

Table 2 The conversation equations of heat transfer and liquid flow

方程名称	表达式	序号
能量守恒方程	$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_{\text{rea}} + Q_{\text{pol}} + Q_{\text{ohm}}$	(11)
电化学反应热	$Q_{\text{rea}} = a_i F j_i T \frac{dE_i}{T}$	(12)
极化热	$Q_{\text{pol}} = a_i F j_i \eta_i$	(13)
欧姆热	$Q_{\text{ohm}} = \sigma_i^{\text{eff}} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \phi_{s,i}}{\partial x} \right) + \kappa_i^{\text{eff}} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \phi_{e,i}}{\partial x} \right) + \frac{2 \kappa_i^{\text{eff}} RT (1 - t_+)}{F} \left(1 + \frac{d \ln f}{d \ln c_{e,i}} \right) \frac{\partial \ln c_{e,i}}{\partial x} \frac{\partial \phi_{e,i}}{\partial x} + a_i F j_i \Delta \phi_{\text{SEL},i}$	(14)
连续性方程	$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_c \vec{v}) = 0$	(15)
动量守恒方程	$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_c \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho_c \vec{v} \vec{v}) + \nabla^2 (\mu \vec{v}) = -\nabla P$	(16)

1.3 模型参数

对于锂电池电化学仿真计算, 电池的负极、隔膜与正极的厚度分别为 34 μm 、24 μm 和 70 μm , 铜箔集流体和铝箔集流体的厚度分别为 6.2 μm 和 10 μm 。锂电池与 BTMS 的热物性参数如表 3 所示^[31]。

表3 锂电池与BTMS热物性参数

Table 3 The thermal parameters of battery and BTMS

材料	密度/(kg/m ³)	恒压比热容/[J/(kg·K)]	导热率/[W/(m·K)]
负极	2223	641	1.04
正极	1500	800	1.48
隔膜	900	1883	0.5
电解液	1210	1518	0.099
铜箔集流体	8700	396	398
铝箔集流体	2700	897	237
SEI膜	1600	—	—
Al ₂ O ₃	3510	497.26	1000
水	998	4182	0.6

1.4 边界条件

本研究数值计算使用商业软件 COMSOL Multiphysics 6.3, 求解过程使用其内置的 Pardiso 直接求解器。为简化模型并降低计算复杂度, 本研究引入了以下假设: ①仅考虑电池内部的固相与液相, 忽略电池内部气体的产生; ②活性材料在电极中均匀分布, 且为球形颗粒; ③电池集流体对锂离子传输以及热传导过程无影响; ④材料的体积与孔隙率不随时间变化。

在数值计算中, 锂电池充放电倍率设定为 5 C, 放电终止电压为 2 V。BTMS 采用速度入口边界, 入口速度分别为 0.03 m/s、0.04 m/s 和 0.05 m/s, 入口温度为 300 K。冷板的出口设定为压力出口边界, 冷板内部冷却剂视为不可压缩流体。同时, 电池组外部壁面设为自然对流边界, 换热系数为 5 W/(m²·K)。

1.5 模型验证与网格无关性验证

图 2(a)展示了网格无关性的验证结果。从图中可以看出, 当网格数量超过 384 万时, 电池组的最高温度与 BTMS 压力损失的变化幅度小于 0.05 K 和 0.04 Pa。因此综合考虑网格质量、计算精度和计算时间, 本研究选择数量为 384 万的网格。

同时, 为验证多物理场耦合数值模型的准确性, 本研究开展了此模型的验证对比。其中, 数值仿真采用的电池参数、电化学参数、几何参数以及边界条件等均与文献[32]相同, 最终的对比结果如

图 2(b)~(d)所示。对于电池组温度, 仿真结果与实验结果的最大误差与平均误差分别为 0.54 K 和 0.1 K, 而电池电压与电池寿命衰减的最大误差则分别小于 0.012 V 和 0.0031。此验证结果表明, 本研究所建立的多物理场耦合数值模型可为电池组电化学特性与温度特性的评估提供高精度预测依据。

2 结果与讨论

2.1 电池老化效应对电池组温度特性与电化学特性的影响

图 3(a)~(b)分别展示了电池组在不同充放电循环过程中的最高温度(T_{max})与最大温差(dT_{max})。可以看出, 在不考虑电池容量衰减的条件下, T_{max} 与 dT_{max} 在不同工作循环中基本保持稳定。然而, 在引入电池老化效应后, 电池组在不同工作循环阶段展现出截然不同的温度特性。与未老化电池组相比, 老化电池组的 T_{max} 与 dT_{max} 分别上升了 2.54 K、2.15 K、1.93 K 和 2.34 K、2.04 K、1.85 K。这表明在锂电池长期运行过程中, 电池老化效应所导致的产热率上升以及 SEI 膜厚度变化等因素会显著削弱 BTMS 对电池组温度特性的控制效果。进一步分析发现, 在未考虑电池老化效应时, 当入口速度达到 0.05 m/s 时, BTMS 即可将电池组 T_{max} 与 dT_{max} 维持在安全范围内。然而, 在考虑电池容量衰减因素后, BTMS 仅能在电池运行初期提供较好的冷却性能, 而在电池组运行 1000 次循环后, 电池组的温度特性已无法得到有效控制。因此, 在 BTMS 的设计与优化过程中, 必须充分考虑电池老化因素的影响, 以确保电池组在全生命周期内的安全运行。

为进一步分析电池老化效应对 BTMS 工作性能的影响, 本研究对电池内部的产热机制进行了深入分析, 如图 4 所示。在电池充放电过程中, 其内部通常存在多种不同的产热机制, 具体可分为可逆热与不可逆热。当忽略电池老化效应时, 这些产热机制在所有工作循环中基本保持稳定, 产热速率变化较小。然而, 在实际运行过程中, 电池老化效应会导致电池内部的产热机制随循环次数增加而发生显著变化, 从而使电池在不同工作循环中呈现出截然不同的产热特性。在运行 1000 次循环后, 电池组内部的可逆热呈现出明显的下降趋势, 而不可逆热则持续上升, 这主要归因于 SEI 膜的不断生成以及 Li⁺浓度的降低。更为关键的是, 不可逆热的涨幅高于可逆

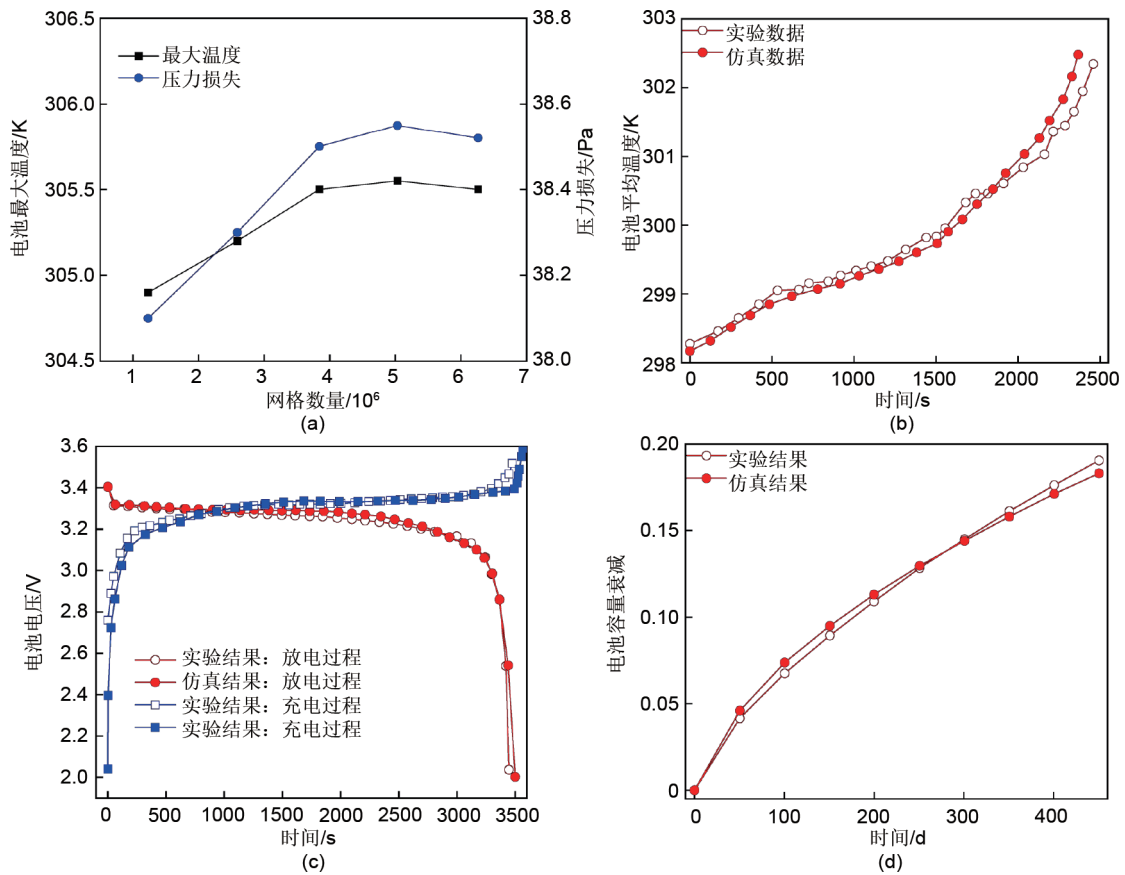


图2 (a) 网格无关性验证和 (b) 温度, (c) 电压, (d) 容量衰减模型验证

Fig. 2 (a) Grid independence verification and (b) temperature, (c) potential, (d) capacity fade model verification

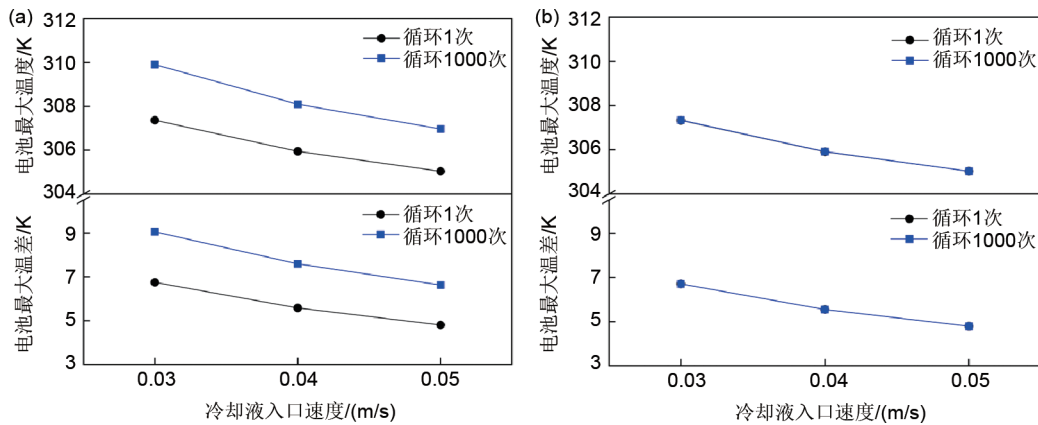


图3 电池最大温度与最大温差: (a) 考虑电池老化效应; (b) 未考虑电池老化效应

Fig. 3 The maximum temperature and temperature difference of battery pack: (a) With considering battery aging effect; (b) without considering battery aging effect

热的降幅, 导致电池组的总产热量逐渐升高, 从而使电池组温度及温差随着循环次数的增加而升高。此外, 由于电池内部电动力学过程和极化损失对温度高度敏感, 电池的产热特性与其运行温度密切相关。从图中可以看出, 运行温度较低的电池组表现

出了更高的产热量。

表 4 展示了 BTMS 在不同工况下的压降情况。可以看出, 在所有工况中, 系统内部压降均随冷却液入口流速的提高而增大。对于不考虑电池容量衰减的工况, 系统压降在整个循环过程中基本保持稳

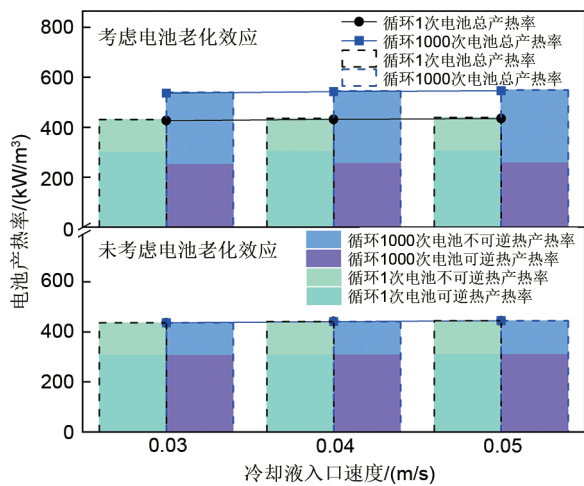


图4 电池内部产热机制

Fig. 4 The heat generation rate inside the battery pack

定。而在考虑电池老化效应的情况下，系统压降则随着循环次数的增加呈现逐步下降趋势，这主要归因于电池温度升高导致冷却液温度升高，从而降低了冷却液的黏度和流动阻力。

表4 BTMS在不同工况下的压降

Table 4 The pressure loss of BTMS under different working conditions

循环次数	入口流速/(m/s)	不同工况条件下的压强/Pa	
		考虑电池老化效应	未考虑电池老化效应
1	0.03	31.29	31.35
	0.04	42.09	42.29
	0.05	52.98	53.24
1000	0.03	29.89	31.35
	0.04	40.59	42.29
	0.05	51.17	53.24

众所周知，电化学性能是衡量电池组在实际应用中运行状态的另一项关键指标，其又与电池温度特性密切相关。因此，BTMS的优化设计不仅应以保障电池组的安全运行为目标，还应通过有效的热管理性能控制去提升电池电化学性能，从而实现电池组的高效稳定运行。图5展示了电池组在不同工况下的放电平均电压。结果表明，老化电池组的放电平均电压分别下降了0.22 V、0.216 V和0.212 V。同时，放电平均电压对电池温度表现出高度敏感性，电池温度越高，其放电平均电压越大。因此可以观察到，入口流速较低的BTMS所对应的放电平均电压均高于流速较高的BTMS。

此外，较高的电池温度还会显著加速SEI膜的生成，这主要归因于高温条件下Li⁺扩散阻力的降低

以及电池副反应速率的提升。而电池容量的衰减趋势与SEI膜的生长趋势高度一致。因此可以观察到在入口流速为0.05 m/s时，BTMS通过更有效地控制电池温度及温差，展现出更加优异的抑制SEI膜生成与延缓电池老化的能力。与0.03 m/s和0.04 m/s的工况相比，SEI膜厚度分别降低了4.38 nm和1.68 nm，电池老化程度分别减少了1.17%和0.59%。

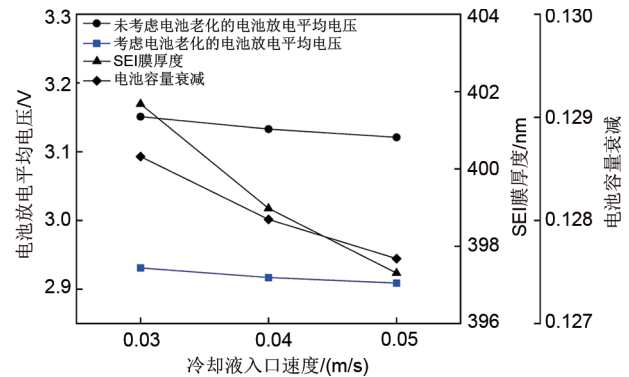


图5 电池放电平均电压、SEI膜厚度与电池容量衰减

Fig. 5 The average voltage, SEI thickness and capacity fade of the battery pack

2.2 考虑电池老化效应的电池热管理系统优化设计方案

上述分析表明，电池老化效应对电池组温度特性与电化学特性均具有显著的影响。未考虑电池组老化效应的BTMS仅能在电池组前期运行阶段提供有效的热管理性能。而随着电池运行次数的增加，BTMS的温控能力出现了明显的下降，电池组温度与温差难以得到有效的控制。因此，为实现电池组在长时间运行条件下的安全运行，本研究基于上述BTMS提出两种优化方案，旨在提升冷却性能的同时，改善电池组的放电电压与循环寿命，最终实现电池组的安全与高效的运行。

2.2.1 纳米流体冷却电池热管理系统

对于液冷系统，其冷却性能在很大程度上受限于冷却液的热物性参数。因此，本研究引入纳米流体作为冷却介质，其中水为基液，氧化铝(Al₂O₃)球形颗粒为纳米颗粒。同时，为进一步评估纳米流体的应用效果，本研究还针对不同纳米颗粒体积分数(1%、3%和5%)进行对比分析。

图6(a)和(b)分别展示了电池组在不同工况条件下的T_{max}与dT_{max}。结果表明，在加入纳米颗粒后，BTMS在所有工况中均展现出更加优异的热管理性

能,且BTMS对 T_{max} 与 dT_{max} 的调控能力随着纳米颗粒体积分数的增加而持续增强。对于未老化电池组而言, T_{max} 与 dT_{max} 在添加纳米颗粒后分别下降了1.19 K、0.93 K、0.81 K和1.02 K、0.85 K、0.77 K(1%纳米颗粒),1.75 K、1.45 K、1.25 K和1.53 K、1.32 K、1.19 K(3%纳米颗粒),2.37 K、2.01 K、1.76 K和2.11 K、1.88 K、1.68 K(5%纳米颗粒)。而在电池组运行1000次循环后, T_{max} 与 dT_{max} 分别降低了1.24 K、0.98 K、0.86 K和1.09 K、0.88 K、0.79 K(1%纳米颗粒),1.92 K、1.56 K、1.36 K和1.63 K、1.52 K、1.27 K(3%纳米颗粒),2.64 K、2.2 K、1.94 K和2.29 K、2.02 K、1.83 K(5%纳米颗粒)。同时,图中数据表明,采用5%体积分数纳米流体的BTMS,在维持原有BTMS结构且不改变BTMS运行工况条件下,其在电池组运行1000次循环后仍能满足电池组安全运行所需的温度与温差。

然而, Al_2O_3 纳米颗粒虽然可以提升BTMS的换热性能,但是也会导致系统内部流动阻力显著增加,且随体积分数增大呈现出逐渐上升的趋势,如图7(a)所示。在电池组运行1000个循环后,添加1%、3%和5%纳米颗粒的BTMS内部压降分别上升了7.2 Pa、7.9 Pa、8.5 Pa,15.8 Pa、20.1 Pa、22.2 Pa,27.8 Pa、34.4 Pa、41.1 Pa。BTMS引起的更高的压力损失通常意味着推动冷却剂流经微通道冷板所需的泵送功率更高。其中,泵送功率可通过式(20)进行计算。因此,当电池组运行1000个循环后,添加1%、3%和5%纳米颗粒的BTMS的系统功耗分别上升了221 W、339.2 W、500 W,484.9 W、862.8 W、1247.1 W,853.3 W、1476.9 W、2308.9 W。

$$P_{pump} = \nabla P \cdot V_{in} \cdot \rho \tag{20}$$

式中, ∇P 为系统压降, V_{in} 为冷板入口速度, ρ 为纳米流体密度。

此外,纳米流体的引入还改变了电池组的电化性能,如图7(b)所示。在电池组运行1000次循环后,采用纳米流体的BTMS表现出了较低的放电平均电压,但是电池老化现象却得到了明显的抑制。这是因为纳米流体BTMS更有助于维持较低电池温度,并通过抑制枝晶生长的方式,有效延缓了电池老化现象的发生。

2.2.2 电池热管理系统的优化运行方案

电池组在不同运行工况(如运行温度、生命周期等)条件下,其产热特性呈现显著差异,这是电池组长时间运行时发生热失控的重要原因之一。提高BTMS入口速度并降低冷却液温度是一种最直接、有效的解决此问题的方式。然而,此方法在电池组产热较低的情况下可能导致BTMS冷却能力冗余,从而引发不必要的能量损耗。因此,本研究提出一种基于电池组放热特性的BTMS运行策略,旨在提升换热效率的同时有效控制系统能耗,具体运行方案如式(21)。

$$\begin{cases} Q \leq 100 \text{ kW/m}^3, & V_{inlet} = 0.01 \text{ m/s} & T_{inlet} = 300 \text{ K} \\ 100 \text{ kW/m}^3 < Q \leq 200 \text{ kW/m}^3, & V_{inlet} = 0.03 \text{ m/s} & T_{inlet} = 300 \text{ K} \\ 200 \text{ kW/m}^3 < Q \leq 300 \text{ kW/m}^3, & V_{inlet} = 0.04 \text{ m/s} & T_{inlet} = 299 \text{ K} \\ 300 \text{ kW/m}^3 < Q \leq 400 \text{ kW/m}^3, & V_{inlet} = 0.05 \text{ m/s} & T_{inlet} = 299 \text{ K} \\ 400 \text{ kW/m}^3 < Q \leq 500 \text{ kW/m}^3, & V_{inlet} = 0.06 \text{ m/s} & T_{inlet} = 298 \text{ K} \\ 500 \text{ kW/m}^3 < Q, & V_{inlet} = 0.07 \text{ m/s} & T_{inlet} = 298 \text{ K} \end{cases} \tag{21}$$

图8展示了不同运行方案工况下电池组 T_{max} 与 dT_{max} 。结果表明,采用优化方案后,BTMS的换热

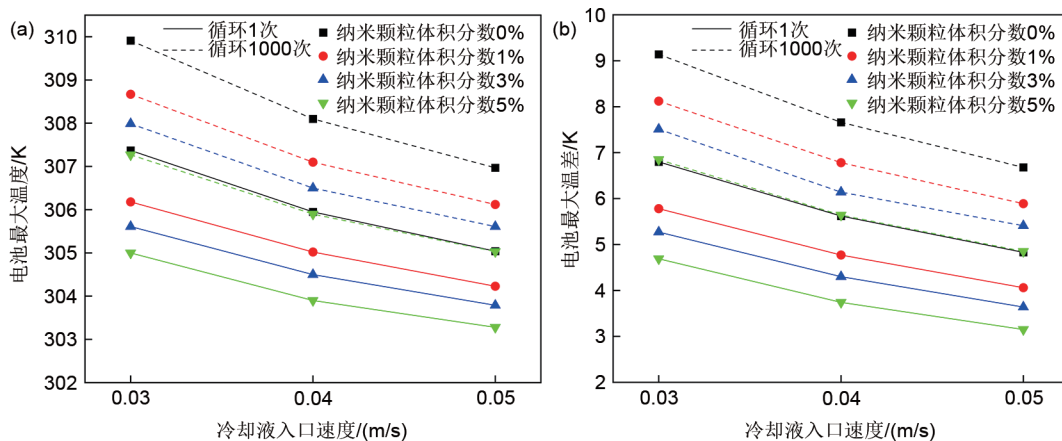


图6 (a) 电池组最大温度; (b) 电池组最大温差

Fig. 6 (a) The maximum temperature of the battery pack; (b) the maximum temperature difference of the battery pack

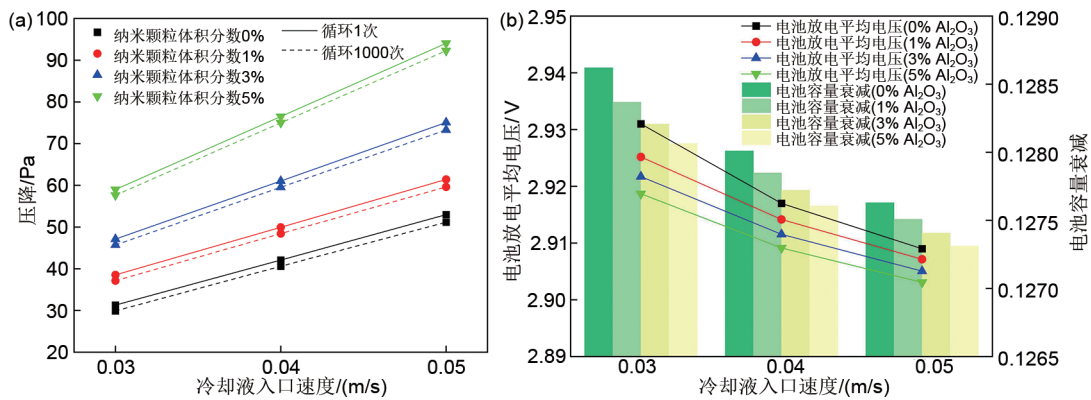


图7 (a) 压降; (b) 电池放电平均电压与电池热容量衰减
Fig. 7 (a) Pressure loss; (b) battery average potential and capacity fade

性能可以得到非常显著的提升。对于未老化电池组, T_{\max} 与 dT_{\max} 分别降低了 3.5 K、2.12 K、1.17 K 和 2.16 K、0.98 K、0.29 K。而在电池组运行 1000 次循环后, T_{\max} 与 dT_{\max} 分别降低了 5.98 K、4.17 K、3.04 K 和 4.27 K、2.79 K、1.81 K。值得注意的是, 采用优化方案时, T_{\max} 与 dT_{\max} 在电池整个运行周期内均保持较小的波动幅度。这是因为此方案能够实时调节 BTMS 的入口流速与温度, 从而动态调整 BTMS 的热管理性能。

BTMS 系统内部的压力损失与入口流速密切相关。在常规运行方案中, 即便电池组产热速率较低, 但入口流速仍维持在固定水平, 进而造成较大的系统压力损失。而本研究提出的优化运行方案则可根据电池组的实时产热特性动态调整冷却液流速, 在确保系统热管理性能的前提下, 有效降低系统内部的压力损失, 如图9所示。相比于 0.03 m/s, 采用优化方案后系统压降仅上升了 2.02 Pa 和 6.23 Pa, 而与

0.04 m/s 和 0.05 m/s 相比, 采用优化方案后系统压降却分别下降了 8.78 Pa 和 4.47 Pa, 19.67 Pa 和 15.05 Pa。此外, 值得注意的是, 采用优化运行方案后, BTMS 在第 1000 次循环时的压降反而高于第 1 次循环。这一现象主要归因于电池在长期循环后产热显著增加, 导致冷却液入口流速上升。同时, 电池组在循环过程中温度上升幅度较小, 冷却液黏度变化幅度有限。因而系统流动阻力未显著降低, 最终导致压降出现上升现象。

此外, 优化运行方案在抑制电池组老化效应方面表现出显著优势。结果表明, 电池组容量衰减分别降低了 1.8%、1.19% 和 0.81%。同时, 此方案在提升电池组放电平均电压方面同样展现出优异性能。相较于 0.03 m/s, 放电平均电压在经历 1000 次循环后仅下降了 2.7%, 而与 0.04 m/s 和 0.05 m/s 相比, 放电平均电压却分别提升了 2.05% 和 4.81%。此现象的根本原因在于此方案能够有效控制电池组温

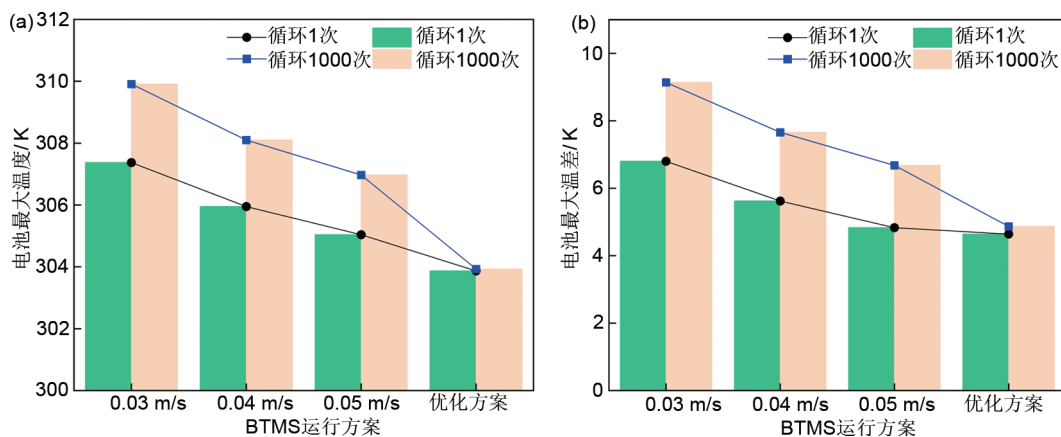


图8 (a) 电池组最大温度; (b) 电池组最大温差

Fig. 8 (a) The maximum temperature of the battery pack; (b) the maximum temperature difference of the battery pack

度，从而显著延缓电池组在长期运行过程中的电池老化效应，使得电池组内部的活性 Li^+ 浓度大幅度提升。尽管在较低温度下电池会表现出较低的放电平均电压，但电池组在长期运行过程中仍能维持较高的放电平均电压。

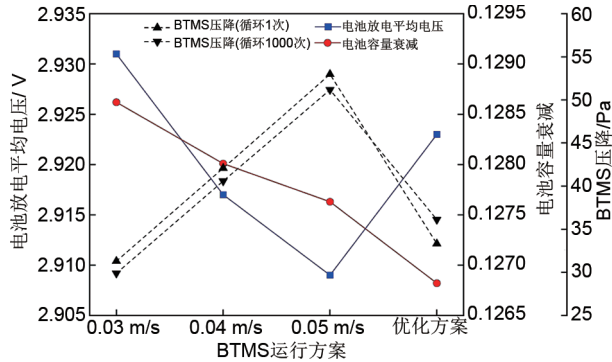


图9 不同运行方案时电池放电平均电压、电池容量衰减与系统平均压降

Fig. 9 The average potential, capacity fade and average pressure loss under different working conditions

3 结论

本研究构建了一个综合考虑电化学反应、传热学、流体力学以及电池老化效应的多物理场耦合模型。基于此模型，系统性分析了电池组在不同运行周期下的温度与电化学特性，包括最高温度、最大温差、产热特性、电压变化以及容量衰减等。进一步地，本研究提出了两种BTMS优化策略，旨在实现电池组在长期运行期间过程中安全-高效的协同优化，具体结论如下。

(1) 随着电池组运行周期的增加，其最高温度与温差呈现显著上升趋势。BTMS虽然在电池组运行初期能够有效实现热管理，但在电池组经历1000次循环后，最高温度与温差分别上升了2.54 K、2.15 K、1.93 K和2.34 K、2.04 K、1.85 K。此现象根本原因在于电池组长时间运行时，电化学反应特性因电池老化效应而发生变化，导致电池组的产热速率不断上升。

(2) 较高的电池温度会加速SEI膜的增长，进而加剧电池的老化效应。然而，在较高温度条件下，电池组却表现出更优异的放电电压性能。因此，BTMS的热管理性能应得到合理的控制，从而实现电池组的高效与稳定运行。

(3) 采用纳米流体冷却的BTMS，冷却性能得到了明显的提升。且随着纳米颗粒体积分数的增加，BTMS对电池温度特性的调控能力也愈加显著。然而，纳米颗粒的加入同样不可避免地导致系统压降的增加。此外，电池组虽然表现出较低的平均电压，但是电池老化效应却得到了很好的控制。

(4) 基于电池放热特性的BTMS运行策略能够显著提升其对电池组温度及温差的控制效果，即使在经过1000个循环后，温度及温差的上升幅度仍然保持在较低水平，并且可以有效减少系统压降。更为关键的是，此策略在抑制电池老化方面表现出色，使得电池组即使在相对较低的温度下，依然能够维持较高的放电平均电压。

参考文献

- [1] GUO G F, LONG B, CHENG B, et al. Three-dimensional thermal finite element modeling of lithium-ion battery in thermal abuse application[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(8): 2393-2398. DOI:10.1016/j.jpowsour.2009.10.090.
- [2] SHEN M, GAO Q. System simulation on refrigerant-based battery thermal management technology for electric vehicles[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 203: 112176. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.112176.
- [3] 刘邦金, 汪林威, 吴月月, 等. 锂离子电池热管理研究进展[J]. 化工学报, 2024, 75(12): 4413-4431. DOI:10.11949/0438-1157.20240376. LIU B J, WANG L W, WU Y Y, et al. Advances in thermal management of lithium-ion batteries[J]. CIESC Journal, 2024, 75(12): 4413-4431. DOI:10.11949/0438-1157.20240376.
- [4] PESARAN A A. Battery thermal models for hybrid vehicle simulations[J]. Journal of Power Sources, 2002, 110(2): 377-382. DOI:10.1016/S0378-7753(02)00200-8.
- [5] 刘顺新, 李昊阳, 张建兴, 等. 基于储能用280 Ah风冷电池包流道结构和导流板的协同优化[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(5): 1806-1817. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0005. LIU S X, LI H Y, ZHANG J X, et al. A study on the synergistic optimization of flow channel structures and guide plates in a 280 Ah air-cooled battery pack for energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(5): 1806-1817. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0005.
- [6] 张新宇, 罗声豪, 吴颖欣, 等. 复合相变材料用于锂离子电池热管理和热失控防护研究进展[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(3): 1040-1053. ZHANG X Y, LUO S H, WU Y X, et al. Research progress of composite phase change materials for thermal management and thermal runaway protection of lithium-ion batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(3): 1040-1053.
- [7] TETE P R, GUPTA M M, JOSHI S S. Developments in battery thermal management systems for electric vehicles: A technical

- review[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 35: 102255. DOI: 10.1016/j.est.2021.102255.
- [8] PANCHAL S, DINCER I, AGELIN-CHAAB M, et al. Thermal modeling and validation of temperature distributions in a prismatic lithium-ion battery at different discharge rates and varying boundary conditions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 96: 190-199. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2015.11.019.
- [9] JARRETT A, KIM I Y. Influence of operating conditions on the optimum design of electric vehicle battery cooling plates[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 245: 644-655. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.06.114.
- [10] NIETO N, DÍAZ L, GASTELURRUTIA J, et al. Novel thermal management system design methodology for power lithium-ion battery[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 272: 291-302. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.07.169.
- [11] JAHANBAKHSI A, NADOOSHAN A A, BAYAREH M. Cooling of a lithium-ion battery using microchannel heatsink with wavy microtubes in the presence of nanofluid[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 49: 104128. DOI:10.1016/j.est.2022.104128.
- [12] 宋旭, 孙楠楠, 曹恒超, 等. 基于并联蛇形流道的动力电池冷媒直冷热管理系统研究[J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(8): 2726-2736.
- SONG X, SUN N N, CAO H C, et al. Research on a power battery thermal management system using direct refrigerant cooling with parallel serpentine flow paths[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(8): 2726-2736.
- [13] 段浩磊, 陈浩远, 梁坤峰, 等. 纯电动车热管理系统低GWP工质替代方案性能分析与综合评价[J]. *化工学报*, 2025, 76(S1): 54-61. DOI: 10.11949/0438-1157.20241323.
- DUAN H L, CHEN H Y, LIANG K F, et al. Performance analysis and comprehensive evaluation of thermal management system schemes with low GWP refrigerants[J]. *CIESC Journal*, 2025, 76(S1): 54-61. DOI:10.11949/0438-1157.20241323.
- [14] DING Y Z, JI H C, WEI M X, et al. Effect of liquid cooling system structure on lithium-ion battery pack temperature fields[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 183: 122178. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122178.
- [15] SHANG Z Z, QI H Z, LIU X T, et al. Structural optimization of lithium-ion battery for improving thermal performance based on a liquid cooling system[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 130: 33-41. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.074.
- [16] 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. DOI:10.1016/j.enconman.2015.06.056.
- [17] E J Q, HAN D D, QIU A, et al. Orthogonal experimental design of liquid-cooling structure on the cooling effect of a liquid-cooled battery thermal management system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 132: 508-520. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2017.12.115.
- [18] ZHANG Y J, WANG S F, DING P X. Effects of channel shape on the cooling performance of hybrid micro-channel and slot-jet module [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 113: 295-309. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.05.092.
- [19] 袁昊, 王丽芳, 王立业. 基于液体冷却和加热的电动汽车电池热管理系统[J]. *汽车安全与节能学报*, 2012, 3(4): 371-380. DOI:10.3969/j.issn.1676-8484.2012.04.011.
- YUAN H, WANG L F, WANG L Y. Battery thermal management system with liquid cooling and heating in electric vehicles[J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2012, 3(4): 371-380. DOI:10.3969/j.issn.1676-8484.2012.04.011.
- [20] 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. DOI:10.1016/j.enconman.2016.08.063.
- [21] JIN L W, LEE P S, KONG X X, et al. Ultra-thin minichannel LCP for EV battery thermal management[J]. *Applied Energy*, 2014, 113: 1786-1794. DOI:10.1016/j.apenergy.2013.07.013.
- [22] 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. DOI:10.1016/j.est.2023.108028.
- [23] GUO Z J, WANG Y, ZHAO S Y, et al. Modeling and optimization of micro heat pipe cooling battery thermal management system via deep learning and multi-objective genetic algorithms[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 207: 124024. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124024.
- [24] GUO Z J, XU Q D, WANG Y, et al. Battery thermal management system with heat pipe considering battery aging effect[J]. *Energy*, 2023, 263: 126116. DOI:10.1016/j.energy.2022.126116.
- [25] HUANG Y Q, MEI P, LU Y J, et al. A novel approach for Lithium-ion battery thermal management with streamline shape mini channel cooling plates[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 157: 113623. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2019.04.033.
- [26] 莫文迪, 王思静, 林伊婷, 等. 基于SVR-NSGA-II算法的混合电池热仿真优化[J]. *化工进展*, 2025, 44(8): 4795-4807. DOI:10.16085/j.issn.1000-6613.2025-0666.
- MO W D, WANG S J, LIN Y T, et al. Simulation and optimization of hybrid battery thermal management based on SVR-NSGA-II algorithm[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2025, 44(8): 4795-4807. DOI:10.16085/j.issn.1000-6613.2025-0666.
- [27] KELLNER Q. High-performance electric vehicle duty cycles and their impact on lithium ion battery performance and degradation [D]. Coventry: University of Warwick, 2019.
- [28] LIANG Z, WANG R, MALT A H, et al. Systematic evaluation of a flat-heat-pipe-based thermal management: Cell-to-cell variations and battery ageing[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 192: 116934. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2021.116934.
- [29] DARCOVICH K, MACNEIL D D, RECOSKIE S, et al. Comparison of cooling plate configurations for automotive battery pack thermal management[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 155: 185-195. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2019.03.146.
- [30] EKSTRÖM H, LINDBERGH G. A model for predicting capacity

fade due to SEI formation in a commercial graphite/LiFePO₄ cell [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2015, 162(6): A1003-A1007. DOI:10.1149/2.0641506jes.

[31] 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. DOI:10.1016/j.jpowsour.2014.01.007.

[32] XIA Q, YANG D Z, WANG Z L, et al. Multiphysical modeling for life analysis of lithium-ion battery pack in electric vehicles[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 131: 109993. DOI:10.1016/j.rser.2020.109993.

[33] SAFARI M, DELACOURT C. Modeling of a commercial graphite/LiFePO₄ cell[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2011, 158 (5): A562. DOI:10.1149/1.3567007.

[34] XU M, ZHANG Z Q, WANG X, et al. Two-dimensional electrochemical-thermal coupled modeling of cylindrical LiFePO₄ batteries[J]. Journal of Power Sources, 2014, 256: 233-243. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.01.070.

附录

本工作所使用的电池参数均来自参考文献[33-34]，具体如表A1与表A2所示。

表A1 锂电池设计参数
Table A1 Critical battery parameters

参数	单位	负极	正极	隔膜
L	μm	34	70	25
ϵ_s	—	0.55	0.43	—
ϵ_e	—	0.33	0.332	0.54
r_p	μm	0.0365	3.5	—
$C_{s,0}$	mol/m^3	16361	3900	—
$C_{s,max}$	mol/m^3	31370	22806	—
$C_{e,0}$	mol/m^3	—	—	1200
α_a	—	0.5	0.5	—
α_c	—	0.5	0.5	—
γ	—	1.5	1.5	1.5
$D_{s,i}$	m^2/s	式(23)	式(22)	—
D_e	m^2/s	—	—	式(30)
E_{aD}	J/mol	20000	30000	—
E_{aR}	J/mol	35000	35000	—
σ_s	S/m	100	0.5	—
σ_e	S/m	—	—	式(32)
k_i	$\text{m}^{2.5}/(\text{mol}^{0.5}\cdot\text{s})$	式(25)	式(24)	—
$\delta_{SEI,0}$	nm	1	—	—

表A2 锂电池电化学参数
Table A2 Battery electrochemical dynamic parameters

参数	参数方程	序号
正极扩散系数	$D_{s,p} = \frac{1.18 \times 10^{-18}}{(1+y)^{1.6}} \exp\left[-\frac{E_{aD,p}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15}\right)\right]$	(22)
负极扩散系数	$D_{s,n} = 3.9 \times 10^{-14} \exp\left[-\frac{E_{aD,n}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15}\right)\right]$	(23)
正极反应速率常数	$K_{s,p} = 1.4 \times 10^{-12} \exp(-3y) \exp\left[-\frac{E_{aR,p}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15}\right)\right]$	(24)
负极反应速率常数	$K_{s,n} = 3 \times 10^{-11} \exp\left[-\frac{E_{aR,n}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15}\right)\right]$	(25)
正极参考电压	$U_{ref,p} = 3.4323 - 0.4828 \exp[-80.2493(1-y)^{1.3198}] - 3.2474 \times 10^{-6} \exp[20.2645(1-y)^{3.8003}] + 3.2482 \times 10^{-6} \exp[20.2646(1-y)^{3.7995}]$	(26)
负极参考电压	$U_{ref,n} = 0.6379 + 0.5416 \exp(-305.5309x) + 0.044 \tanh\left(-\frac{x-0.1958}{0.1088}\right) - 0.1978 \tanh\left(\frac{x-1.0571}{0.0854}\right) - 0.6878 \tanh\left(\frac{x-0.0117}{0.0529}\right) - 0.0175 \tanh\left(\frac{x-0.5692}{0.0875}\right)$	(27)
正极熵变	$\frac{dU_p}{dT} = -0.35376y^8 + 1.3902y^7 - 2.2585y^6 + 1.9635y^5 - 0.98716y^4 + 0.28857y^3 - 0.046272y^2 + 0.0032158y - 1.9186 \times 10^{-5}$	(28)
负极熵变	$\frac{dU_n}{dT} = 344.1347148 \times \frac{\exp(-32.9633287x + 8.316711484)}{1 + 749.0756003 \exp(-34.79099646x + 8.887143624)} - 0.8520278805x + 0.362299229x^2 + 0.2698001697$	(29)
电解液扩散系数	$D_e = 1 \times 10^{-4} \times 10^{-4.43 - \frac{54}{T-229-0.05C} - 2.2 \times 10^{-4C}}$	(30)
电解液热力学参数	$u = 0.601 - 0.24 \sqrt{10^{-3}C} + 0.982 \left[1 - 0.0052(T - 294) \sqrt{10^{-9}C}\right]$	(31)
电解液离子电导率	$\sigma_e = 1.12 \times 10^{-4} (-10.5 + 0.074T - 6.69 \times 10^{-5}T^2 + 6.68 \times 10^{-4}C - 1.78 \times 10^{-5}CT + 2.8 \times 10^{-8}CT^2 + 4.49 \times 10^{-7}C^2 - 8.86 \times 10^{-10}C^2T)$	(32)
Li ⁺ 离子迁移数	$t^+ = 2.67 \times 10^{-4} \exp\left(\frac{833}{T}\right) \left(\frac{C}{1000}\right) + 3.09 \times 10^{-3} \exp\left(\frac{653}{T}\right) \left(\frac{C}{1000}\right) + 0.517 \times 10^{-3} \exp\left(-\frac{49.63}{T}\right)$	(33)