

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-08

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20260804002

动力电池包在高环境温度下的快充和制冷策略研究

张芹¹ 余钰洋¹ 霍新涛²

(1 安徽三联学院智慧交通现代产业学院 合肥 230601; 2 合肥工业大学汽车与交通工程学院 合肥 230601)

摘要 本文提出了一种适用于电动汽车在高环境温度下进行充电的快充和制冷策略。通过电芯温度和SOC共同调节充电电流,旨在发挥电芯的最大充电能力。以容量为119 Ah的锂电池组成的1P108S电池包为研究对象,通过HPPC测试建立电芯的发热模型。充电过程中借助冷却系统降低电池温度,分析了不同冷却策略对充电性能的影响。研究结果表明:冷却液流量为12 L/min,冷却液温度为22 °C时,液冷系统具有最佳的传热效率。为保证电芯不超温,在48 °C时对电芯充电倍率进行了限制,优化后的策略电池最高温度为49.2 °C,充电时长为2 654 s。最后,通过电池包充电实验验证数值模型,其最高温度和最大温差的误差均在5%以内。

关键词 电池热管理;快充策略;制冷策略;传热效率

中图分类号: TB61+1; TM912; U469.72

文献标识码: A

Study on Fast Charging and Cooling Strategies for Power Battery Packs under High Ambient Temperatures

Zhang Qin¹ Yu Yuyang¹ Huo Xintao²

(1. Faculty of Intelligent Transportation, Anhui Sanlian University, Hefei 230601, China; 2. School of Automotive and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract This study proposes a fast-charging and cooling strategy suitable for charging electric vehicles under high ambient temperatures. By jointly regulating the charging current based on cell temperature and state of charge (SOC), this strategy aims to maximize the charging capacity of cells. A 1P108S battery pack composed of lithium-ion cells with a rated capacity of 119 Ah was used, and the heat generation model for the cell was established through Hybrid Pulse Power Characterization (HPPC) testing. During the charging process, the cooling system was utilized to mitigate battery temperature rise, and the effects of different cooling strategies on charging performance were systematically analyzed. The results indicate that the liquid cooling system achieved optimal heat transfer efficiency when the coolant flow rate was 12 L/min and coolant temperature was 22 °C. To prevent the cells from overheating, the charging rate was limited when the cell temperature reached 48 °C. Under the optimized strategy, the maximum battery temperature was 49.2 °C and charging duration was 2 654 s. Finally, the numerical model was validated through battery pack charging experiments, with deviations in the maximum temperature and maximum temperature difference both within 5%.

Keywords battery thermal management; fast charging strategy; cooling strategy; heat transfer efficiency

动力锂电池因其具有循环寿命长、能量密度高和宽温适应性好等优点被广泛搭载于新能源汽车中^[1]。然而,动力锂电池在夏季高环境温度下充电时间过长的的问题始终被用户抱怨。虽然电池包换电模式可以缓解电池补能的等待时间,但这种电池包型式要与换电站相匹配,无法普及。当前,动力电池包

的开发仍侧重于通过提高充电倍率缩短充电时间^[2]。电池在快充工况下峰值充电倍率一般高于3 C最大可达6 C,平均充电倍率在1 C以上^[3]。电芯在高倍率下充电温升速度快,尤其在高环境温度下极易引发热失控^[4]。因此有必要开发高环境温度下的快充和制冷策略来提升电池系统的性能。

收稿日期:2026-08-04;修回日期:2026-08-23;录用日期:2026-08-25

责任编辑:田甜

基金项目:国家自然科学基金(52305254)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52305254).)



移动阅读

电池热管理系统在电池快充过程中通过制冷策略降低电芯温度,确保电池始终处于适宜的工作温度区间内。磷酸铁锂电芯的工作温度区间为20~45℃^[5]。当前,商用的电池热管理系统主要分为风冷^[6]、液冷^[7]和空调制冷剂直冷系统^[8]。风冷系统又分为自然风冷和强制风冷,主要应用于小电流充电电池包。液冷系统则通过将低温冷却液流入冷板中进行换热,短时间内带走电芯产生的热量。Dai Yongming等^[9]在风冷和液冷的基础上结合不同热界面材料研究3C快充工况下的电池最高温度。结果显示,强制风冷下电池的最高温度比自然风冷的低20℃,仅为37.7℃;液冷的效果明显优于风冷,电池的最高温度为30.2℃。Liu Feifei等^[10]提出了一种多层相互交错的液冷管方案,研究了大圆柱锂离子电池高倍率充电工况下系统的热性能。实验数据显示,在45℃环境温度下进行4C快速充电,采用交错逆流布置方案的电池的最高温度为35.96℃。直冷系统具有极高的冷却效率,将制冷剂直接注入电池冷板中实现快速冷却。朱喜娇等^[11]设计了一种带有翅片的直冷板用于加强冷却系统纵向导热能力。在35℃环境温度下测试典型动态工况下热管理系统的温控性能。结果显示,在连续加速工况下,增加翅片后电池的最高温度从49.8℃降至40.9℃,温差降低了约69.7%。直冷板上增加翅片不仅提高了纵向导热能力同时还减小了横向温度梯度。直冷系统由于制冷剂调节算法与压降控制策略难以协同实现,存在过冷过热现象,两相流的沸腾及冷凝同样也难以控制。

快充策略主要通过提高充电倍率进而缩短充电时间。常见的恒流-恒压充电策略在目前应用中最广泛。起始充电阶段通过施加较大的恒定电流将电压达到极限,然后转为逐级减小电流保持电压恒定直至电池达到满容量^[12]。多级恒流自适应策略是上述方法的优化,基于SOC(state of charge, 荷电状态)或温度与电压协同优化电流值^[13]。Shen Kai等^[14]提出了一种最大非锂电镀充电策略,基于三元锂电芯的温度和SOC逐级递减充电电流。结果显示,与恒流恒压策略相比充电时间减少了1690s,但电池的最高温度达到了52.7℃。在目前的研究中,高环境温度下提升充电倍率一般会消耗电芯内部活性锂以及加速SEI膜生长,进而增大内阻导致电池超温^[15]。Yang Xiaoguang等^[16]通过减少电池在高温状态下的充电时长来抑制SEI(solid electrolyte interphase, 固体电解质界面)膜的生长,严格控制充完电后的放电温度。结果表明,充放电过程中的非对称温度设计可

以在电池经过1700次循环后容量损失不超过20%,有效地控制了电池老化。此外,应用前沿人工智能学习制定充电策略是当前的研究热点^[17],主要结合遗传算法和神经网络算法^[18]。这种与算法相结合的策略需要大量的数据来训练,就具体单个车型而言尚不能成熟应用^[19]。

本文在已商用的电池液冷系统的基础上提出一种基于电池SOC和温度调节的快速充电策略。首先,通过HPPC(hybrid pulse power characterization, 混合脉冲功率特性)测试获取动力锂电池的热物性参数,建立电池的发热模型。然后,基于提出的电池快速充电策略和冷却策略进行电池充电的数值模拟。通过调节入口流量和入口冷却液温度研究其对充电性能的影响。此外,在高温区间对充电倍率进行限制。最后,对提出的充电策略进行实验验证。

1 模型与方法

1.1 电池包物理模型

简化后的电池包模型如图1所示,主要由上箱盖、模组、液冷板、管路和下箱体等组成。电池包的外包络尺寸为1365mm×1165mm×145mm。液冷板的上板和流道板厚度分别为1mm和1.2mm,流道深度为4mm,最大流道宽度为28mm。电池系统由108个电芯串联组成,分成3个1P36S的大模组入箱。电芯间布置隔热片以阻挡充电过程中热量的内部传递,同时在发生热失控时可以防止热蔓延。为避免电芯发生短路,在模组两侧端板处各放置了1块绝缘片。电池包通过液冷板实现冷却液与模组的热交换,模组下方的导热垫用于提升传热效率。电池包结构的物性参数如表1所示。

1.2 控制方程

以下假设适用于本研究^[20]:

- 1) 电池包各组成结构的热物性参数保持不变;
- 2) 冷却过程中忽略热辐射;
- 3) 液体是不可压缩的。

冷却液采用质量分数为50%的乙二醇水溶液。基于以上假设,冷却液的动量方程、能量方程和连续性方程如下:

$$\rho_c(\vec{v} \cdot \nabla \cdot \vec{v}) + \nabla p = \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (1)$$

$$\rho_c c_c(\vec{v} \cdot \nabla \cdot T_c) = k_c \nabla^2 T_c \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla(\rho_c \cdot \vec{v}) = 0 \quad (3)$$

1.3 电池产热量的计算方法

本文的研究对象为额定容量为119Ah的锂离子电池,生产商为多氟多新材料股份有限公司,具体规

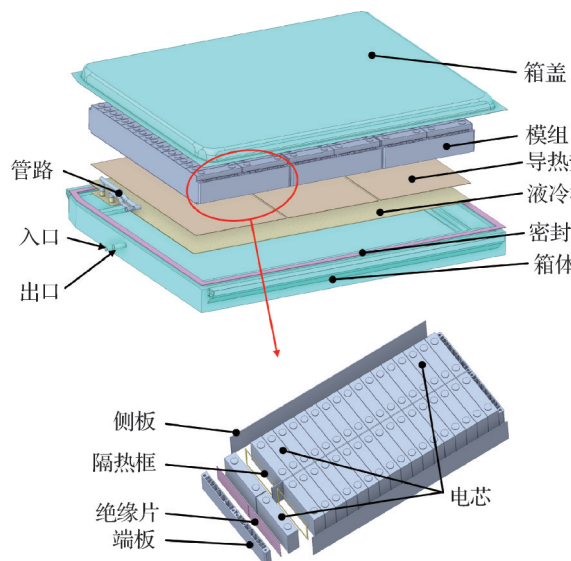


图1 电池包系统结构

Fig.1 Structural model of battery pack

表1 电池包结构的热物性参数

Tab.1 Thermal physical parameters of the battery pack structure

结构	材质	密度/(kg/m ³)	比热容/[J/(kg·K)]	导热系数/[W/(m·K)]
上箱盖	钢	7 800	480	58
导热垫	混合物	2 200	2 100	1.5
管路	尼龙	1 030	1 800	0.16
液冷板	铝	2 730	893	167
密封圈	硅胶	360	920	0.07
下箱体	铝	2 730	893	167
侧板	铝	2 730	893	167
隔热垫	硅胶	433	1 175	0.04
绝缘片	PP+PET	1 200	1 170	0.2
端板	铝	2 730	893	167

格如表2所示。

锂离子电池在高倍率充电时内部会发生化学反应,伴随着热量的产生。热量主要由电池熵变和内阻所产生的热量组成。电池发热的计算式如下^[21]:

$$Q_{\text{Li-ion}} = I^2 R_{\text{Li-ion}} + IT_{\text{Li-ion}} \frac{\partial U_{\text{ocv}}}{\partial T_{\text{Li-ion}}} \quad (4)$$

其中, $I^2 R_{\text{Li-ion}}$ 为焦耳热; $IT_{\text{Li-ion}} \frac{\partial U_{\text{ocv}}}{\partial T_{\text{Li-ion}}}$ 为熵变热。

由式(4)可知,影响电池产热的主要因素为电池内阻和开路电压。HPPC测试可获取电池的开路电压,通过电压的变化可进一步计算出电池内阻。HPPC测试主要关注10 s充电功率和10 s放电功率。实验装置如图2所示,测试设备包含充放电系统(型

表2 锂离子电池的参数

Tab.2 Parameters of lithium-ion batteries

参数	规格	备注
额定容量/Ah	119	25 °C@1/3 C
额定电压/V	3.22	25 °C@1/3 C
质量/g	2 045	
工作温度	放电: -35~60 °C; 充电: -20~55 °C	
连续充电允许的最大电流/A	380	
尺寸/mm	44.1×195.0×114.8	厚度×宽度×高度
密度/(kg/m ³)	2 165	
比热容/[J/(kg·K)]	966	
导热系数/[W/(m·K)]	12.3/3.2/10.1	x/y/z 方向

号: BAT-NEH, 额定电压1 000 V, 最大充电功率600 kW, 最大持续充电电流600 A, 福建星云电子有限公司)、数采设备(P-CAN, 德国PEAK-System公司)、高低温控制箱(型号: JW-1502, 温度范围: -60~80 °C, 精度: ±1 °C, 南京巨威仪器设备有限公司)、冷水机组(型号: LTF-03A-09 kW, 最大制冷量: 8.5 kW, 出口冷却液温度范围: 5~35 °C, 精度: ±1 °C, 昆山乐天制冷设备有限公司)和电脑等。电池充电倍率的跳转由电池SOC和最高温度共同决定, 电池SOC直接从电池管理系统中读取。电池包内部含有108颗电芯, 在充电过程中无法检测到每颗电芯的温度。因此, 本研究在电池高温和低温区域选取了12颗电芯, 在其顶面粘贴采集温感, 温感布置如图3所示。

测试步骤如下:

- 1) 放电: 电池静置至25 °C时, 以1/3 C放电至DOD(放电深度, depth of discharge)等于100%;
- 2) 静置: 放电结束后电池静置至测试温度;
- 3) 恒流脉冲测试: 对电池进行10 s恒流充电, 静置15 s后对电池进行10 s恒流放电, 电流如图4所示;

4) 充电SOC: 每次脉冲后电池以1/3 C充电至下一个SOC点, 重复步骤2)和3);

5) 结束: 以1/3 C充电至SOC到100%为止。

电池OCV曲线如图5所示, 分别记录了20、35、55 °C时电池HPPC测试所获取的开路电压数据。HPPC测试过程中对电池施加充电脉冲后, 电压从 V_a 瞬间上升至 V_b , 充电结束时电压达到 V_c , 如图6所示。根据充电脉冲阶段的电压变化计算电池内阻, 计算式如下:

$$R_{\text{Li-ion}} = (V_c - V_a)/I \quad (5)$$

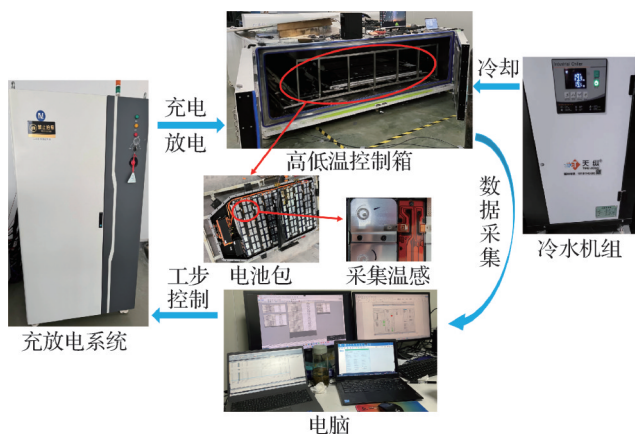


图2 充放电测试平台

Fig.2 Charging and discharging test platform

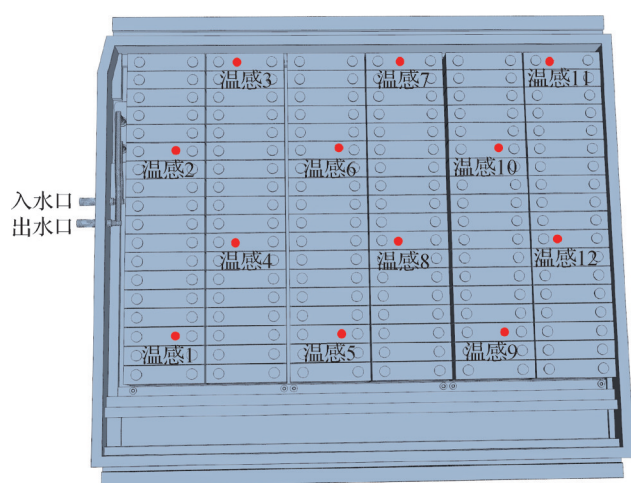


图3 电池包温感布置

Fig.3 Temperature sensor arrangement in the battery pack

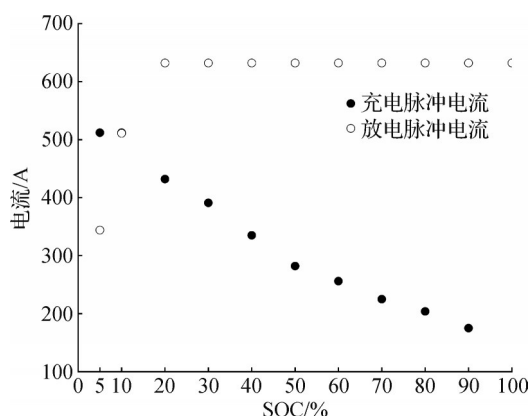


图4 充放电脉冲电流

Fig.4 Charging and discharging pulse current

1.4 数值方法

为提升计算效率,电池包采用多面体网格进行划分。其中最小网格长度为1 mm,最大网格长度为8 mm,增长率为1.2,畸变角为15°。电池包网格如图7所示,在流-固耦合区设置了2层边界层,有利于提升对流传热的精度。为减少计算成本,本研究所有

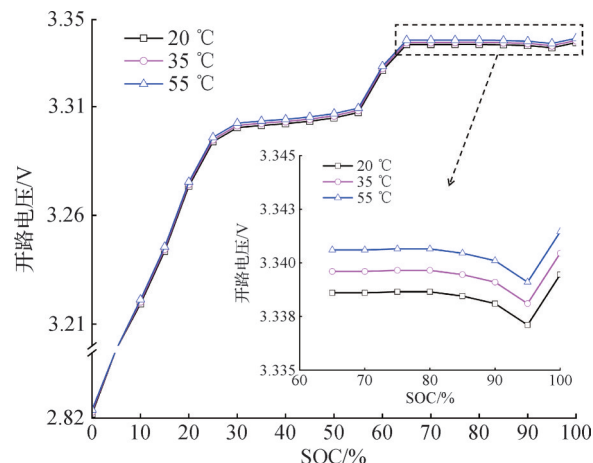


图5 电池OCV曲线

Fig.5 The OCV curves of battery

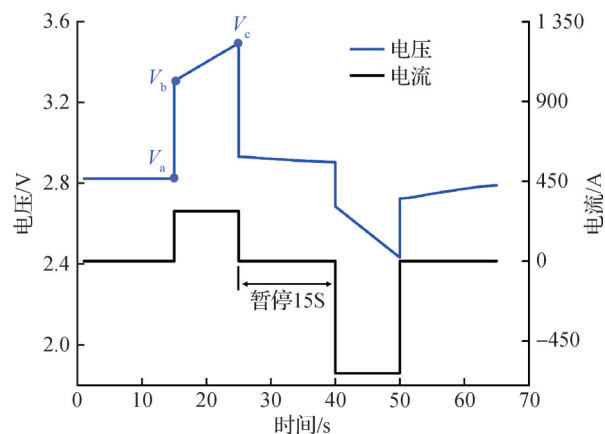


图6 HPPC循环步骤中电压和电流的变化

Fig.6 Evolution of the voltage and current in an HPPC cycle step

数值计算前期迭代频率为8 s,计算稳定后设置为2 s。数值计算采用瞬态计算方法。初始条件如下:

- 1) 质量流量入口,质量流量为12 L/min,冷却剂入口温度为22 °C;
- 2) 压力出口, $p=0$ Pa;
- 3) 环境温度为40 °C。

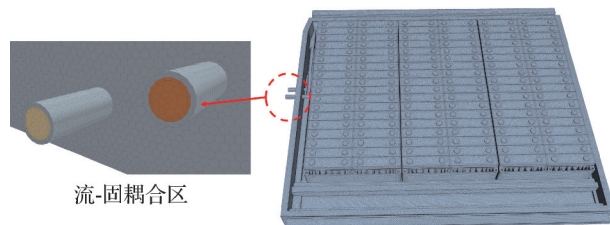


图7 电池包网格

Fig.7 The mesh of battery pack

1.5 快充策略

本研究提出的快充策略是基于电池SOC和最高温度制定的,快充策略如图8所示。其中,电池充电

能力以倍率表示,对于大倍率充电策略的制定具有指导性。电芯在每段SOC和温度区间内以恒倍率充电,最大充电倍率为3.2 C。在低SOC和低温度区间内发挥电芯的最大充电能力。随着SOC和温度的提升,电芯内阻及热应力会进一步加大,继续保持大倍率充电有发生热失控的风险。因此,在48℃时对电芯充电倍率进行了限制,由2.1 C降至1.5 C。充电倍率的降低也会改善电芯在高SOC状态下的发热量,有利于电芯在充电末端维持0.5 C充电。

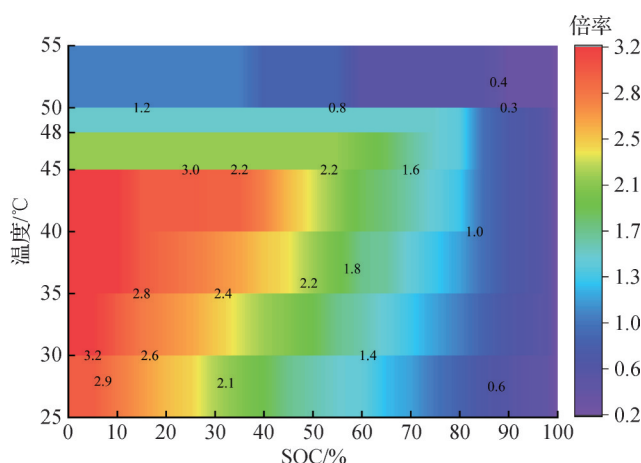


图8 快充策略

Fig.8 Fast charging strategy

1.6 冷却策略

电池大倍率充电过程中内部会持续产生大量热量,冷却系统根据电池温度变化执行开启或关闭策略。冷却策略中温度阈值是确保电池组在安全、高效的温度区间内运行的关键环节。本研究采用已成熟商用的液冷电池热管理系统,液冷系统开启与关闭的温度阈值设置如下:液冷开启,电池最高温度 $\geq 38^\circ\text{C}$;液冷关闭,电池最高温度 $\leq 33^\circ\text{C}$ 。

2 结果与讨论

2.1 充电时间

本节对电池充电过程进行了数值计算,充电过程中记录电池的最高温度、电流和SOC数据,如图9所示。电池起始阶段以最大倍率3.2 C充电,当温度超过45℃时(103 s),倍率降至2.12 C。此时,电池SOC为9%,倍率的降低为温度调节。在241 s时电池最高温度超过了48℃,倍率随即降为1.5 C充电。在241~1 745 s充电过程中倍率维持在1.5 C。电池在1.5 C充电过程中热管理系统的传热能力强于电芯的发热量,电池最高温度始终维持在50℃以下。整个快充过程耗时2 654 s。

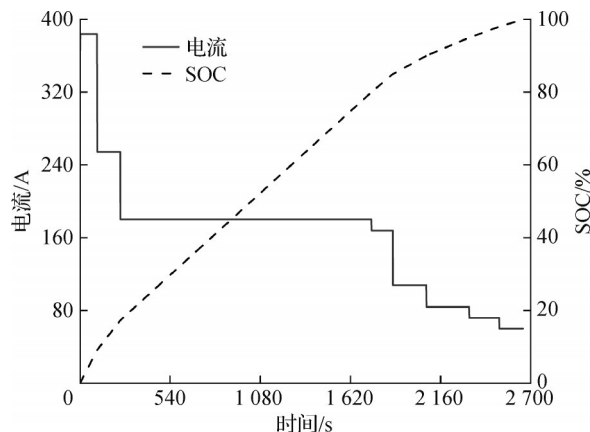


图9 快充时间

Fig.9 Fast charging time

2.2 电池温度

电池满充过程中的温度和SOC的变化如图10所示。电池起始以最大倍率3.2 C充电,在103 s时电池最高温度达到45.0℃。在3.2 C恒倍率充电过程中,电芯平均发热量为119.23 W。该阶段充电过程中液冷系统无法全部带走电芯的产热,该过程电池温升速率达到2.9℃/min。电池最高温度在241 s时达到48.0℃,随后充电倍率跳转为1.5 C。此时电芯的发热量为34.67 W,冷却系统可充分换热。由于电池系统的温度存在上升趋势,在201 s后电池最高温度达到49.2℃。随后电池温度呈现缓慢下降的趋势。电池SOC在1 746 s时达到80%,充电倍率跳转为1.4 C。此后电池最高温度下降的速率加快,主要是由于电芯的产热量变小。

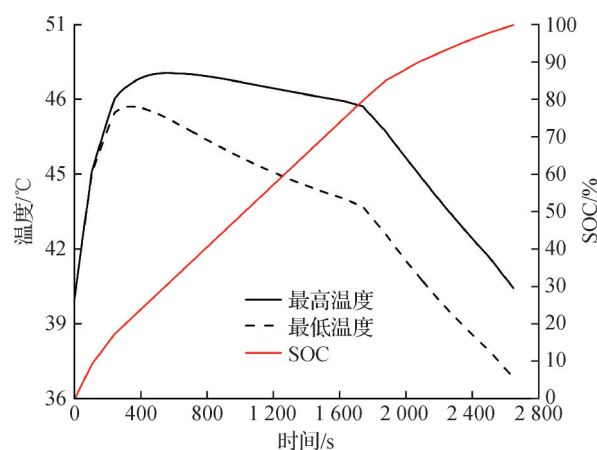


图10 快充温度

Fig.10 Fast charging temperature

2.3 冷却策略对充电性能的影响

图10所示电池满充过程中的温度数据表明电池热管理系统一直处于工作状态。本节进一步研究通过调整冷却参数对电池充电性能的影响。

2.3.1 入口流量的影响

液冷系统中入口流量的增加会提高冷却液在冷板中的流速,进而破坏壁面的热边界层,增强系统对流传热系数,提升散热能力。本节数值模拟了入口流量为 15 L/min,入口冷却液温度为 22 °C 的充电冷却过程。不同入口流量的充电性能如图 11 所示,当入口流量从 12 L/min 增至 15 L/min 时,电池最高温度降低了 0.1 °C,充电时间减少了 6 s。入口流量的提升并未明显改善电池的最高温度和充电时长,主要原因为当流量达到 12 L/min 时冷板的传热能力处于最佳状态,进一步增加流量几乎不会提高传热能力。入口流量的提升同时增加了系统的压降,最大压降上升了约 43%。

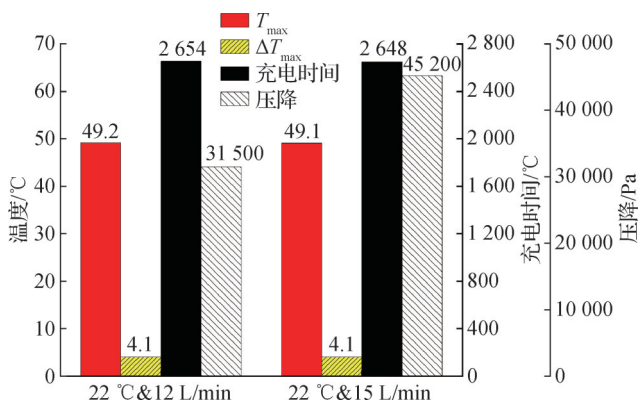


图 11 不同入口流量的充电性能对比

Fig.11 Comparison of charging performance under different inlet flow rates

2.3.2 入口冷却液温度的影响

根据牛顿冷却定律,入口冷却液温度的降低会增强冷板的热对流能力。本节数值模拟了入口流量为 12 L/min,入口冷却液温度为 20 °C 的充电冷却过程。如图 12 所示,电池充电过程中最高温度为 48.9 °C,总耗时为 2 613 s。充电时间减少的主要原因为电池高温区对应的充电时间减少,进而增加了系统的平均充电倍率。冷却液温度越低,压缩机制冷功率越大,会增加系统的能耗。对能耗而言,充电时间的减少并不具有优势。

2.4 实验验证

本节设计了电池包充电实验来验证数值模型的准确性,实验装置采用第 1.3 节中的设备。在 40 °C 环境温度下按充电策略进行满充,记录充电过程中电池系统各温感的数据。电池系统的温感位置与图 9 保持一致。实验步骤如下:

1) 电池包与充放电系统和数采仪连接,确保数据记录正常。温控箱温度设定为 25 °C;

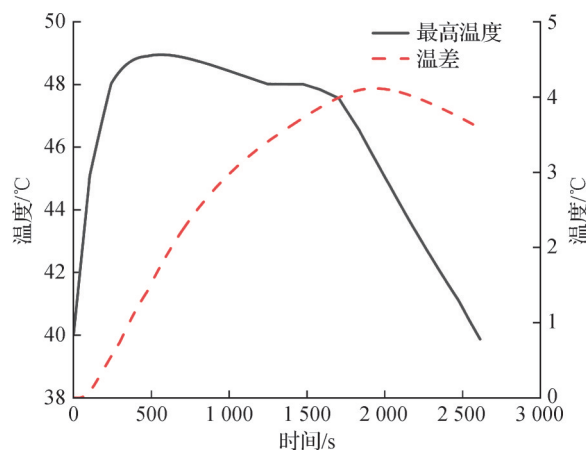


图 12 冷却液温度为 20 °C 下的系统热性能

Fig.12 System thermal performance at a coolant temperature of 20 °C

2) 电池包静置至 25 °C,以 0.33 C 放电至 SOC 为 0%;

3) 温控箱温度设定为 40 °C,电池包静置至 40 °C,按充电策略进行满充;

4) 记录充电过程中入口冷却液温度、电流、SOC 以及温感等数据。

实验采集的高温区和低温区温度数据与数值仿真数据的对比如图 13 所示。实验采用的温感精度为 ± 1 °C,温度曲线呈现阶梯状。实验与仿真的温度数据整体呈现出相同的变化趋势,在大倍率充电状态下温度先快速爬升,然后在电芯发热量与冷却能力相当的过程中波动较为平稳,最后缓慢下降。实验与仿真所显示的电池高温区主要集中在温感 1、温感 4 和温感 6 所在的区域,低温区主要集中在温感 3、温感 7、温感 9 和温感 11 所在的区域。实验与仿真最高温度的误差为 0.4%,最大温差的误差为 5%,充电时间相差 77 s。实验过程中充电策略的倍率跳转为手动设置,存在一定的时间损耗,因此在实际过程中充

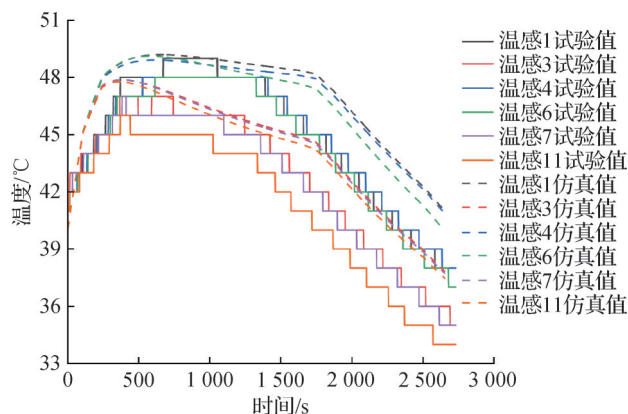


图 13 实验与仿真数据对比

Fig.13 Comparison of experimental and simulation data

电时间会增加。综上所述,本研究采用的数值模型是准确可用的。

3 结论

本文通过 HPPC 测试计算出电池的发热量,结合充电策略搭建电池的充电模型,借助热管理系统冷却电池在高环境温度下充电所产生的热量,研究了不同冷却策略下对电池充电性能的影响,得到如下结论:

1) 充电策略在 48 °C 时进行倍率限制,在充电过程中电池最高温度始终处于 50 °C 以下,将额定容量为 41.38 kW·h 的电池包满充时长控制在 45 min 内。

2) 入口流量的增加可以提高冷板的传热能力,当流量达到冷板最佳性能时,继续增加流量对传热能力的提升并不显著。

3) 当入口冷却液温度从 22 °C 降至 20 °C 时,充电时间减少了 1.5%,但系统的制冷功率也随之增加。冷却液温度的变化对最高温度和温差的改善并不显著。

符号说明

- ρ_c ——冷却液密度, kg/m³
 $\vec{v}$ ——速度矢量, m/s
 p ——静态压力, Pa
 μ ——动力黏度, Pa·s
 c_c ——冷却液比热容, J/(kg·K)
 T_c ——冷却液温度, °C
 k_c ——冷却液导热系数, W/(m·K)
 Q_{Li-ion} ——锂电池发热量, W
 I ——电流, A
 T_{Li-ion} ——锂电池温度, °C
 R_{Li-ion} ——锂电池内阻, Ω
 U_{ocv} ——开路电压, V

参考文献

- [1] 毛阳阳, 邓海鹏, 王冰川, 等. 锂离子电池快速充电策略设计研究进展[J]. 机械工程学报, 2025, 61(16): 180–203. (Mao Yangyang, Deng Haipeng, Wang Bingchuan, et al. Review of advances in designing fast charging strategies for lithium-ion batteries [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(16): 180–203.)
- [2] Lee D, Kim Y, Lee Y, et al. Development of a fast-charging strategy considering degradation in lithium-ion batteries[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2025, 74: 107013.
- [3] Liu Hao, Zhao Liyuan, et al. Extremely fast-charging batteries: principle, strategies, detection, and prediction [J]. Chemical Reviews, 2025, 125(20): 9553–9678.
- [4] Ali A O, Abdelrehim O, Saafan M M, et al. Comprehensive review of battery management systems for electric vehicles: Thermal management, charging strategies, and emerging technologies [J]. Journal of Power Sources, 2025, 658: 238269.
- [5] 李超恩, 王嘉诚, 郝新月, 等. 相变材料强化-液冷复合式锂电池热管理研究进展[J]. 复合材料学报, 2026, 43(8): 4775–4797. (Li Chao'en, Deng Haipeng, Wang Bingchuan, et al. Research progress on phase change material strengthened-liquid cooling composite lithium battery thermal management [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2026, 43(8): 4775–4797.)
- [6] Johari N H, Abdul Razak H, Hamidi M A, et al. Air-cooled thermal management of electric vehicle batteries: insights from CFD simulations on enclosure geometry configurations [J]. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, 2026, 23(1): 13307–13320.
- [7] 肖鑫, 许文强. 基于鲨鱼鱼鳞结构仿生的电池热管理优化研究[J]. 制冷学报, 2026, 47(4): 54–61. (Xiao Xin, Xu Wenqiang. Optimal investigation on the thermal management of battery based on a bionic shark scale structure [J]. Journal of Refrigeration, 2026, 47(4): 54–61.)
- [8] 王家锋, 徐象国. 电池直冷热管理系统的动态建模及模型预测控制研究[J]. 制冷学报, 2025, 46(6): 23–33. (Wang Jiafeng, Xu Xiangguo. Dynamic modeling and model predictive control study of direct cooling thermal management system for batteries [J]. Journal of Refrigeration, 2025, 46(6): 23–33.)
- [9] Dai Yongming, Ting Y C, Chang C M, et al. Thermal management analysis of fast-charging lithium-ion battery packs: Effects of cooling strategies [J]. Next Energy, 2025, 9: 100465.
- [10] Liu Feifei, Sun Yongkuan, Yang Qilong, et al. Optimization of three-layer staggered liquid cooling system for high-rate charging of large cylindrical battery module in electric vehicles [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 280: 128585.
- [11] 朱喜娇, 马肖娜, 严华夏, 等. 动态工况下电动汽车直冷电池热管理系统均温性改善[J]. 过程工程学报, 2026, 26(4): 427–436. (Zhu Xijiao, Ma Xiaona, Yan Huaxia, et al. Improvement of homogeneity for direct cooling battery thermal management system in electric vehicles under dynamic operating conditions [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2026, 26(4): 427–436.)
- [12] Duru K K, Venkatachalam P, Ali Hussain S, et al. Optimal charging of lithium-ion batteries: an electro-

- thermal model approach using maximum possible optimization [J]. *Advanced Theory and Simulations*, 2025, 8(9): 2500320.
- [13] Li Yong, Wang Hao, Wang Chenyang, et al. Electrochemical-thermal coupled modeling and lithium plating analysis of lithium-ion batteries under high-rate charging [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2026, 220: 110337.
- [14] Shen Kai, Chen Lianjie, Feng Xuning, et al. Non-destructive battery fast charging constrained by lithium plating and high temperature limit based on simulation [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 84: 110896.
- [15] Adenusi H, Chass G A, Passerini S, et al. Lithium batteries and the solid electrolyte interphase (SEI) — progress and outlook [J]. *Advanced Energy Materials*, 2023, 13(10): 2203307.
- [16] Yang Xiaoguang, Liu Teng, Gao Yue, et al. Asymmetric temperature modulation for extreme fast charging of lithium-ion batteries [J]. *Joule*, 2019, 3 (12) : 3002–3019.
- [17] Liu Beibei, Li Bingfeng. Prediction of fast-charging capabilities in $\text{LiFePO}_4/\text{graphite}$ lithium-ion batteries using internal resistance and machine learning [J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2025, 20(11): 101181.
- [18] 席椿富, 赵东鹏, 黄驰, 等. 应用深度强化学习的电池热管理系统控制策略[J]. *西安交通大学学报*, 2026, 60 (2): 24–37. (Xi Chunfu, Zhao Dongpeng, Huang Chi, et al. Control strategy for battery thermal management system using deep reinforcement learning [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2026, 60(2): 24–37.)
- [19] Cheng Fang, Liu Hui. Charging strategies optimization for lithium-ion battery: heterogeneous ensemble surrogate model-assisted advanced multi-objective optimization algorithm [J]. *Energy Conversion and Management*, 2025, 342: 120170.
- [20] 许建民, 武颂, 杨炜. 基于新型复合仿生流道的锂电池液冷系统散热分析及优化[J/OL]. *材料导报*, 2026, 40 (21) : 25100063. (2026-01-07). <https://link.cnki.net/urlid/50.1078.tb.20260106.1810.002>. (Xu Jianmin, Wu Song, Yang Wei. Heat dissipation analysis and optimization of a lithium-ion battery liquid cooling system based on novel composite bionic flow channels [J/OL]. *Materials Reports*, 2026, 40(21): 25100063. (2026-01-07). <https://link.cnki.net/urlid/50.1078.tb.20260106.1810.002>.)
- [21] He Ping, Lu Hao, Fan Yiwei, et al. Numerical investigation on a lithium-ion battery thermal management system utilizing a double-layered I-shaped channel liquid cooling plate exchanger [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2023, 187: 108200.

通信作者简介

张芹, 女, 副教授, 安徽三联学院智慧交通现代产业学院, 0551-63839386, E-mail: zq022005@mail.slu.edu.cn。研究方向: 动力电池及储能热管理技术。

About the corresponding author

Zhang Qin, female, associate professor, Faculty of Intelligent Transportation, Anhui Sanlian University, 86-551-63839386, E-mail: zq022005@mail.slu.edu.cn. Research fields: thermal management technology for power batteries and energy storage.