

基于联合仿真的电池包充电瞬态热管理策略研究

刘霏霏, 邹鹏志, 任毅, 秦武, 程贤福

(华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西 南昌, 330013)

摘要: 针对锂离子电池在低温环境下充电时的瞬态温度控制和能源消耗问题, 以某方形锂离子电池为研究对象, 利用三维 Star-CCM+ 软件和一维 Amesim 软件联合对液冷动力电池包进行热管理仿真, 设计了电池包的充电瞬态热管理策略, 研究了电池包在不同的冷却启动温度、预热温度、预热功率的情况下进行充电的影响。分析表明: 预热阶段, 采用 6000W 功率的加热器将电池包从 -30°C 预热至 0°C , 充电时间缩短了 31.62%, 当电池平均温度到达 40°C 时, 启动冷却散热, 充电时间可缩短 10.19%, 电池包各模组内部温差范围在 2.01°C ~ 2.59°C 之间。研究结果可为电动汽车低温加热充电控制及散热技术提供一定的理论参考。

关键词: 动力电池包; 瞬态热管理; 联合仿真; 充电性能; 策略分析

中图分类号: U469.72

文献标志码: A

Research on Transient Thermal Management Strategy for Battery Pack Charging Based on Co-simulation

LIU Feifei, ZOU Pengzhi, REN Yi, QIN Wu, CHEN Xianfu

(School of Mechatronics & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, 330013, China)

Abstract: In order to address transient temperature control and energy consumption issues during the charging of lithium-ion batteries in cold environments, a prismatic lithium-ion battery was selected as the research subject. Using Star-CCM+ and Amesim software in combination, a thermal management simulation of the liquid-cooled power battery pack was conducted. The effect of charging the battery pack at different cooling start temperatures, preheating temperatures, and preheating powers was investigated. The results indicate that during the preheating phase, using a 6000W heating element to preheat the battery pack from -30°C to 0°C reduced the charging time by 31.62%. When the average battery temperature reached 40°C , cooling and heat dissipation were initiated, resulting in a 10.19% reduction in charging time. The temperature difference within each module of the battery pack ranges from 2.01°C to 2.59°C . The research results can provide certain theoretical references for the low-temperature heating charging control and heat dissipation technology of electric vehicles.

Key words: Power battery pack, Transient thermal management, Co-simulation, Charging performance, Strategy Analysis

近年来, 能源短缺和环境污染问题日益严重, 而电动汽车 (Electric Vehicle, EV) 无排放的特点成为了汽车行业的关键研究领域^[1-2]。锂离子电池作为电动汽车的核心部件, 因具有能量密度高和循环寿命长等优点受到车企的广泛青睐^[3]。然而, 当电池处于低温环境时, 锂离子活性下降, 充电时间增长^[4-6]。文献^[7]验证了低温下高频充电会导致电池容量快速衰退。因此, 为保持电池在低温下的充电性能, 低温预热是重中之重。

针对低温环境下电池的充电性能, 许多学者开展了低温预热策略研究。目前常用的低温加热方法分为外部预热和内部预热^[8]。相对于内部加热, 外部加热有着安全性高, 成本低的优点。外部加热中由于正温度系数材料 (Positive Temperature Coefficient, PTC) 加热存在热均匀性好, 能效比高的优势而被广泛使用

[9]。Li 等人^[10]用 PTC 电阻丝缠绕的加热铝板在 -40°C 下对电池进行 35W 恒定功率加热，1500s 后温度升高 40°C 。文献^[11]将 PTC 电阻嵌入铝板，消耗电池自身电量用于加热，结果表明 PTC 电阻加热 2880s 后，电池温度升高 16.9°C ，最大温差仅为 0.783°C 。然而，当电池温度因充电或 PTC 加热上升至较高水平时，可能会导致电池热失控风险上升^[12]。此时，高效的降温手段至关重要，而液冷技术成为了应对高温的有效方案^[13]。文献^[14]设计了一种在电池模组底部和顶部均布置液冷版的双冷板散热方案，电池模组在 2C 放电时温度最高仅为 30.9°C ，最大温差为 4.8°C 。Zhang 等人^[15]采用液冷对锂电池包进行散热，研究发现液冷在 25°C 环境温度和入口流速为 10m/s 的情况下对电池包的温控效果好。

然而，低温加热充电技术仍然面临一些挑战和待解决的问题。针对锂离子电池在充电时温度的控制和能源消耗的问题，以某锂离子动力电池包为研究对象，采用三维 Star-CCM+软件和一维 Amesim 软件联合仿真分析方法，对电池包低温加热充电策略进行优化，设计了一种新型的液冷板散热结构，并基于该设计提出了一种电池包充电瞬态热管理策略。可为电动汽车低温加热充电控制及散热技术提供一定的理论参考。

1 电池包模型

1.1 电池包几何模型

如图 1 所示，该电池包采用模块化架构，由六个并联配置的电池模组构成。每个模组集成 20 个以串联拓扑排列的方形电芯单元，相邻电芯间设有隔热层，实现物理隔离的同时增强界面密封性能与热失控防护等级。模组内部采用多层复合结构设计：顶部铺设缓冲吸能泡沫棉，泡沫棉下设有上盖，厚度为 4mm ，采用不饱和聚酯玻璃纤维增强模塑料 (Sheet、Molding、Compound, SMC) 复合材料，比热容为 $900\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，热导率为 $0.33\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ；电池模组双侧配置侧板，底部铺设导热胶，以提升电芯之间的密封性和安全性。单个模组从上至下的结构分别为泡沫棉、上盖、侧板、端板和导热胶。液冷板布置于电池包底部，与下箱体焊接，下箱体厚度为 25mm ，材料采用铝 6063，比热容为 $900\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，热导率为 $201\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ；内部的冷却液为 50% 乙二醇水溶液。

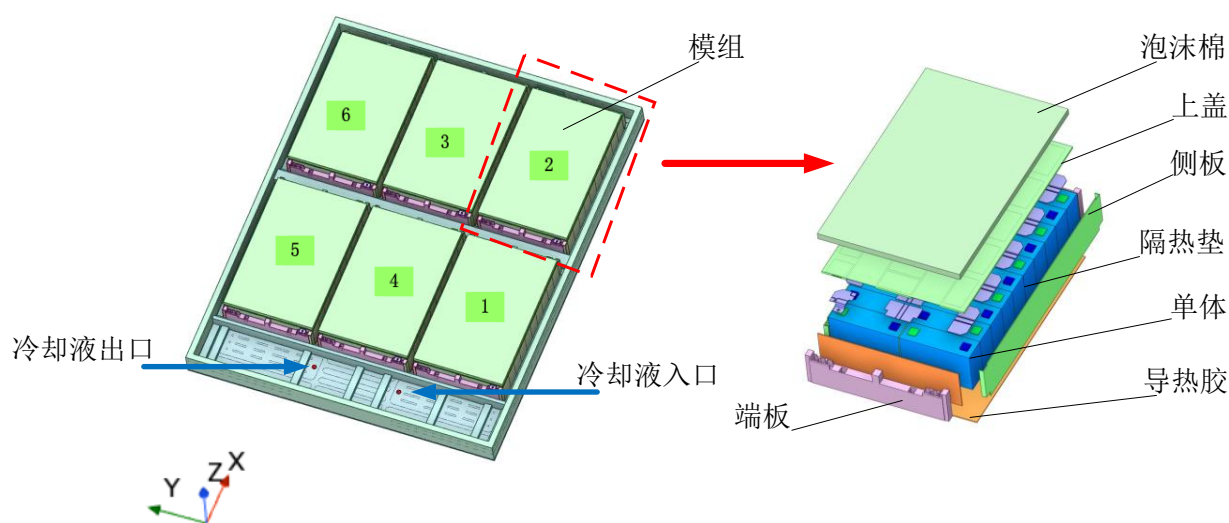


图 1 电池包几何模型

Fig.1 Geometric model of the battery pack

液冷板的几何模型如图 2 所示，尺寸为 1646mm×1306mm×5.7mm（长×宽×高），以圆形为流道截面，流道半径为 8mm。采用蛇形流道横向折叠排列，总流道为 3 条并联流道，总宽度为 111mm，前后两个部分并联，冷却介质在分流后，分别经过编号为 1、4 和 5 模组，以及编号为 2、3 和 6 模组，且两者均采用蛇形流道。模组与液冷板之间设置有导热胶，其热导率为 3 W/(m·°C)，厚度为 2mm。为方便仿真计算，把电器连接件、安装组件(压杆、螺栓等)，辅助组件（密封圈、卡扣）进行了简化处理。以某 EV 动力电池包为研究对象。

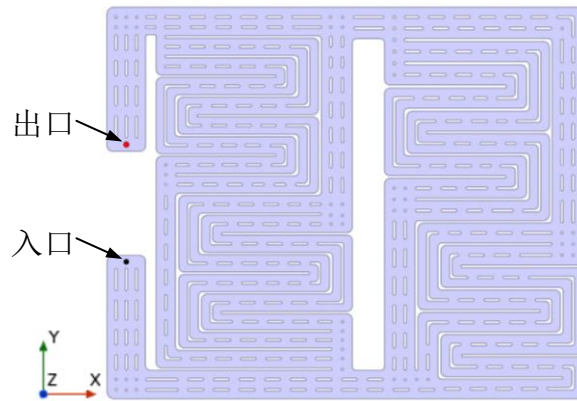


图 2 液冷板几何模型

Fig.2 Geometric model of the liquid cooling plate

1.2 网格划分

由于动力电池包结构复杂，为了便于计算需要对电池包进行简化，对发热量相对较小的零部件忽略不计，并删除电池包中的圆倒角。利用 Star-CCM+对电池包进行面网格划分。选用的网格类型为 Poly Hexcore 网格，设置网格基础尺寸为 100mm，棱柱层数为 2，棱柱层延伸率和体积增长率均为 1.2。图 3 为划分后的动力电池包网格及局部网格。图 4 为网格无关性验证结果，当网格在 4192514 到 5451173 之间变化时，设置入口流速为 15 L·min⁻¹，出入口温度和环境温度为 25°C，在 1C 倍率下恒流充电，电池模组的最高温度趋于稳定，说明仿真结果和网格数量无关。但综合考虑到计算精度和计算数量，选出网格单元数为 4192514。

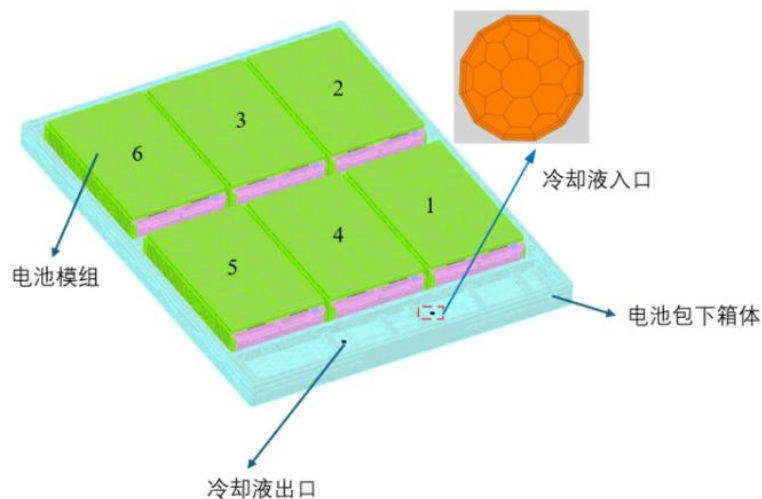


图 3 模型网格及边界层图

Fig.3 Model grid and boundary layer diagram

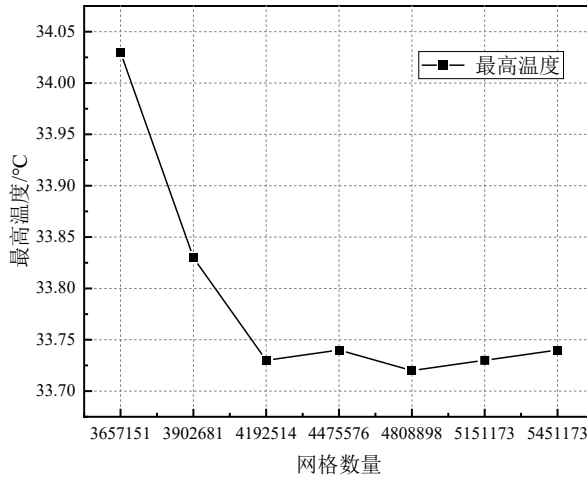


图 4 网格无关性验证结果

Fig.4 Mesh independence results

1.3 电池包联合仿真建模

利用三维 Star-CCM+和一维 Amesim 软件建立了动力电池包热管理系统加热及充电模型,如图 5 所示。由图可知,一维模型的输入包括电池的温度和冷却液的温度,输出为电池的体积热源和经过 PTC 加热的冷却液温度。在三维模型中,液冷板内的冷却液和电池之间进行热交换,导致出口冷却液温度下降。使用标准接口模块 TCP (Transmission Control Protocol) 数据信息的相互传递,将下降后的温度作为一维模型的进水口温度。冷却液流经 PTC 加热系统使其温度升高,并将其再次用作三维模型的进水口温度,循环往复,形成一个闭合的回路。

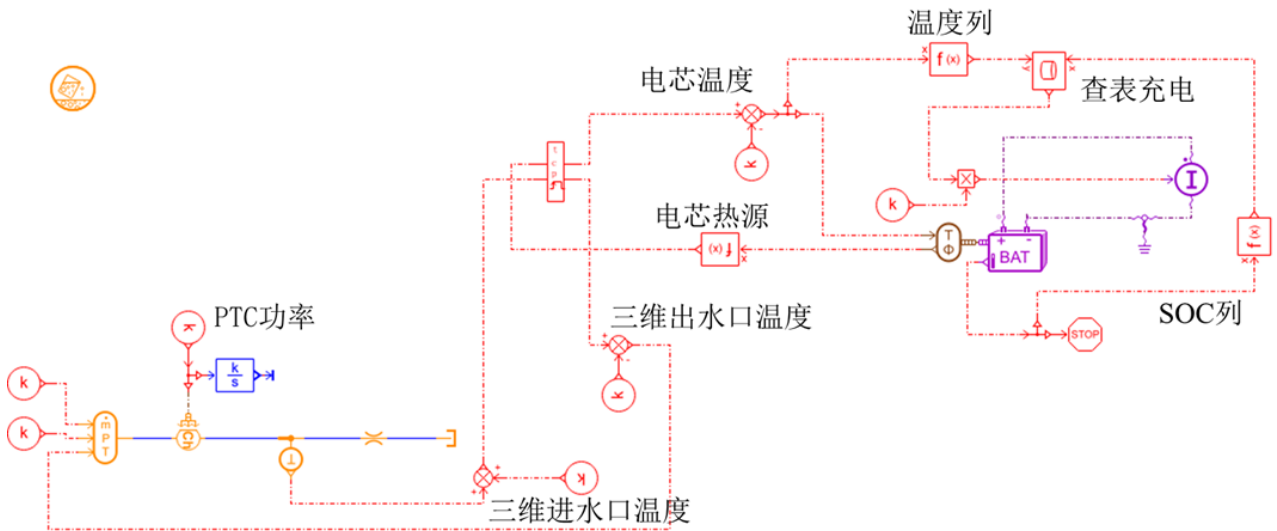


图 5 动力电池包加热及充电模型

Fig.5 Heating and charging model of the power battery pack

在充电模式下,利用表 1 中的数据(由电池厂家提供),根据动力电池的不同 SOC 和温度条件,确定相应倍率的充电电流。

表 1 动力电池充电电流限制表（单位：C）

Table.1 Charging current limits for the power battery

SOC $T/^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	100
-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.07	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.12	0.12	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
5	0.35	0.35	0.35	0.35	0.25	0.25	0.19	0.16	0.13	0.12	0.12	0.12
10	0.68	0.68	0.68	0.56	0.5	0.5	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.2
15	0.9	0.9	0.9	0.9	0.7	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.2
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.5	0.5	0.2
25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.5	0.5	0.2
30	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.5	0.5	0.2
35	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.5	0.5	0.2
40	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.2
50	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.2
60	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.2
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

1.4 电池热模型

以 Bernardi 电池热模型为依据，简化内部热源，假设电池内部的热源稳定且分布均匀，因此电池的生热速率可表示为^[16]：

$$q = \frac{1}{V_b} (I_L^2 R_T + I_L T \frac{\partial U_{oc}}{\partial T}) \quad (1)$$

其中， q 为电池的生热速率，即单位体积的内部发热量， W/m^3 ； R_T 为电池的欧姆电阻和极化电阻的总和， $\text{m}\Omega$ ； T 为电池温度， $^\circ\text{C}$ ； V_b 为电池体积， m^3 ； $\frac{\partial U_{oc}}{\partial T}$ 是熵系数； I_L 为电池的充/放电电流， A 。

电池表面与空气之间由于温差而进行对流换热，可以表示为^[17]：

$$\varphi = h(T - T_a) \quad (2)$$

其中， φ 为热流密度， W/m^2 ； h 为对流换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ； T_a 为环境温度， $^\circ\text{C}$ 。

对于一个电池单体，考虑到热量的产生，热传递由电池内部传递到表面，并与液冷板表面进行热传导。对于液冷板，不考虑其自身的发热，其内部冷却液采用 50% 乙二醇作为冷却介质，质量、动量、能量守恒方程分别为^[18-19]：

内部冷却液质量方程：

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

内部冷却液动量守恒方程为：

$$\frac{\partial \rho_l \vec{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l \vec{v} \vec{v}) = \nabla P \quad (4)$$

内部冷却液能量守恒方程为：

$$\rho_l c_l \frac{\partial T_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l c_l \vec{v} T_l) = \nabla \cdot (k_l \nabla T_l) \quad (5)$$

其中, ρ_l 为液体密度, kg/m^3 ; c_l 为液体比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; v 为速度矢量, m/s ; T_l 为液体温度, $^\circ\text{C}$; k_l 为液体导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$; P 为液体压强, Pa 。电池的热物性参数均为出厂设定, 具体数据如表 2 所示。

表 2 电池热物性参数

Table.2 Thermal physical parameters of batteries

项目	ρ_l kg/m^3	c_l $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$	k_l $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$
参数	2193	976.5	$k_y=k_z=16.5$ $k_x=1.2$

液冷系统能耗的计算如下^[20]:

$$W_c = \int P(t) Q dt \quad (6)$$

其中, W_c 为液冷系统的能耗, J ; Q 为冷却液的体积流量, m^3/s 。

1.5 边界条件

针对动力电池包的三维 Star-CCM+软件和一维 Amesim 软件联合仿真模型, 以冷却液进口为体积流量入口, 设置流量为 $15\text{L}/\text{min}$; 冷却液温度为 -30°C ; 环境温度为 -30°C ; , 出口为压力出口, 相对压力为零; 由于恒温箱内空气处于静止状态, 而自然对流传热系数一般在 $2\sim 10\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$, 因此在后续仿真过程中对流传热系数采取 $3.0\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ 计算模型采用瞬态计算模型^[21]。由于电池包内的流动主要是冷却液的自然对流, 流动状态相对简单, 标准 $k-\varepsilon$ 模型能够较好地捕捉到湍流的主要特征, 并且计算成本较低, 因此选取标准 $k-\varepsilon$ 模型作为湍流模型, 流体为恒密度不可压缩流体。在 Star-CCM+模型与 Amesim 中设置相同的采样时间为 1s 。服务器端口为 6000 。

2. 电池特性实验

2.1 实验平台

电池单体的规格参数如表 3 所示。图 6 为实验平台示意图, 包括: 电池测试仪(CE-6008n-20V150A-H)测量范围为 $0\sim 150\text{A}$, 测量精度分别为 $\pm 0.01\text{A}$; 恒温恒湿实验箱(SC-80-CB-2)测量范围为 $-20^\circ\text{C}\sim 80^\circ\text{C}$, 测试精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$; 数据记录仪(Neware CA-4008-IU-VT-TX)连接 K 型热电偶检测电池表面温度, 测量范围为 $-40^\circ\text{C}\sim 70^\circ\text{C}$, 测试精度为 0.1°C 。将电池单体静置在恒温恒湿实验箱中, 电池正负极与电池测试仪相接, 开展电池 HPPC 内阻实验和恒流充电温升实验, 相关实验数据由数据记录仪记录, 并由上位机控制电脑导出。

表 3 电池单体主要参数

Table.3 Main parameters of the battery cell

名称	参数值
额定容量/Ah	150
标称电压/V	3.2
截止电压上限/V	3.7
截止电压下限/V	2.5
平均质量/g	2940
工作温度/ $^\circ\text{C}$	$-35\sim 65$
存储温度/ $^\circ\text{C}$	$-40\sim 60$
外形尺寸/mm	$194\times 61\times 113$

(长*宽*高)

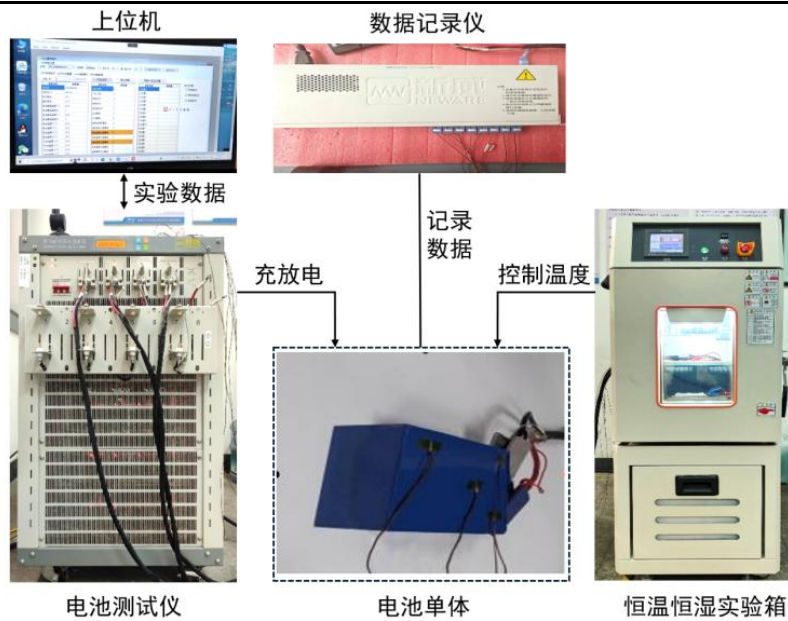


图 6 实验平台

Fig.6 Experimental platform

2.2 HPPC内阻实验

HPPC 内阻实验的具体流程如下：

- (1) 将恒温恒湿试验箱内的环境温度设置为 25℃，并将电池放置在内并搁置 3h；
- (2) 将电池以 1C 恒流充电，至电压达到 3.65V，再进行恒压充电，持续至电流下降到 0.05C；
- (3) 对电池进行 HPPC 实验，以 1C 放电 10s，静置 40s，再以 0.75C 充电 10s，后将电池放电至 SOC=0.9，并按上述流程依次使电池 SOC 达到 0.8、0.7、0.6、0.5、0.4、0.3、0.2 和 0.1，记录相关数据；
- (4) 将恒温恒湿试验箱温度依次设置为-30℃、-20℃、-10℃、25℃、40℃和 50℃，重复上述 HPPC 内阻实验步骤。

通过 HPPC 实验，得到不同 SOC 及温度下对应的电池内阻值，如表 4 所示。

表 4 不同 SOC 及温度下对应的电池内阻值（单位：mΩ）

Table.4 Internal resistance values of the battery corresponding to different SOC and temperatures.

SOC% T/°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	100
-30	52.75	23.51	10.78	8.37	5.97	3.56	1.16	1.10	1.04	0.98	0.93	52.75
-20	51.19	17.44	4.02	3.30	2.58	1.86	1.14	1.08	1.02	0.97	0.91	51.19
-10	4.93	2.75	1.85	1.75	1.64	1.54	1.44	1.32	1.20	1.08	0.95	4.93
0	4.2	2.08	1.24	1.21	1.17	1.14	1.10	1.03	0.96	0.88	0.81	4.2
10	3.38	1.57	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.83	0.80	0.76	0.73	3.38
25	2.02	1.07	0.71	0.72	0.72	0.73	0.74	0.72	0.70	0.68	0.67	2.02
40	1.08	0.71	0.60	0.63	0.67	0.71	0.74	0.69	0.64	0.58	0.53	1.08
50	0.99	0.93	0.53	0.59	0.66	0.72	0.78	0.70	0.62	0.54	0.45	0.99

2.3 电池单体充电温升实验

电池单体充电温升实验的具体流程如下：

- (1) 设置恒温恒湿箱内的温度为 25℃，并将电池静置 1h；
- (2) 以 1C 恒流充电至截止电压 3.65V，记录电池单体中心温度变化；
- (3) 以 1C 放电至截止电压 2.5V；
- (4) 重复步骤(1)~(2)，分别以 0.33C 和 1C 进行恒流充电；
- (5) 在电池表面放置 4 个热电偶，用于体现电池的温度分布，电池单体 4 个监测点的位置和温度如图 7 和表 5 所示。

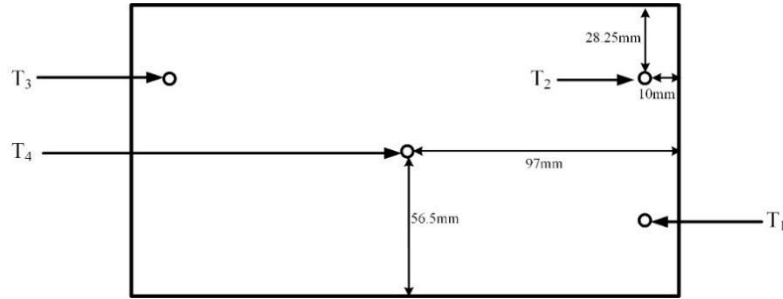


图 7 温度监测点布置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of temperature monitoring point layout

表 5 不同充电倍率下监测点的温度

Table.5 The temperature at the monitoring points under different charge rates

充电倍率	$T_1/^\circ\text{C}$	$T_2/^\circ\text{C}$	$T_3/^\circ\text{C}$	$T_4/^\circ\text{C}$
0.33C	32.65	32.34	32.36	32.69
0.5C	37.27	37.26	37.28	37.33
1C	50.75	50.78	50.77	50.87

3 仿真模型验证

通过 Space Claim 建模软件建立电池单体三维 CAE 模型，并简化电池正负极耳，导入 Star-CCM+ 软件进行网格划分后的电池单体模型如图 8 所示。



图 8 电池单体网格模型

Fig. 8 Mesh model of battery cell

图 9 为 0.33C、0.5C 和 1C 恒流充电时电池单体的温度场分布云图，由图可知，不同倍率下的电池单体温度分布差异不大，均为电池中部最高，四周最低，但温度对比显著，最高温度分别为 33.51℃、38.23℃ 和 52.45℃，与初始温度 25℃ 相比，分别提升了 8.51℃、13.23℃ 和 27.45℃。

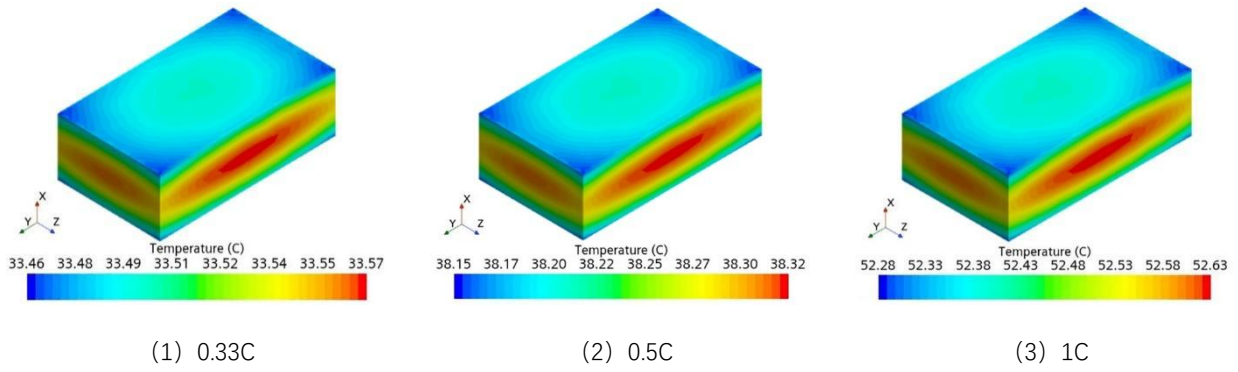


图9 不同充电倍率下电池温度分布云图

Fig. 9 Temperature distribution contour maps of battery at different charge rates

图10为0.33C、0.5C和1C恒流充电时仿真与实验的最高温度变化，由图可知，在0.33C、0.5C和1C下，电池仿真与实验的温度变化趋势一致，由于电池内阻在充电前期小，充电后期增大，因此电池温度均呈先缓慢增大，后迅速提升的趋势，仿真与实验温度的绝对误差分别为2.2%、2.5%和3.1%，温度一致性较好。

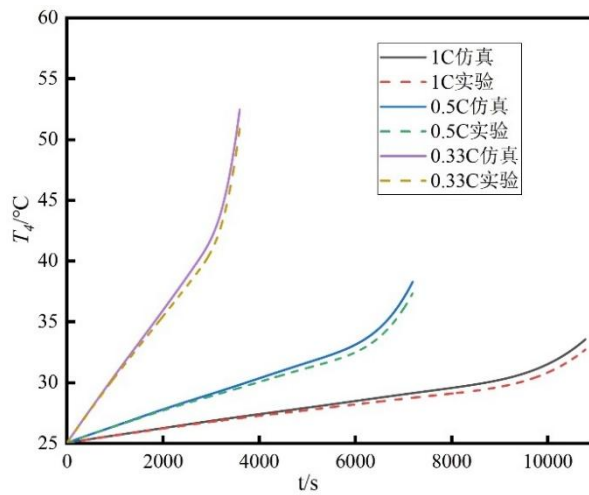


图10 不同充电倍率下实验与仿真电池温度随时间变化

Fig. 10 Experimental and simulated temperature variation of the battery over time at different discharge rates

4 充电瞬态热管理分析

4.1 充电热管理策略

锂离子电池不同温度和荷电状态会直接影响到充电倍率。因此，为了提升电池充电性能，根据表1中充电电流的约束条件挑选出合适的充电电流，并将充电过程设置为多个充电阶段，详细的多阶段充电策略如图11所示。

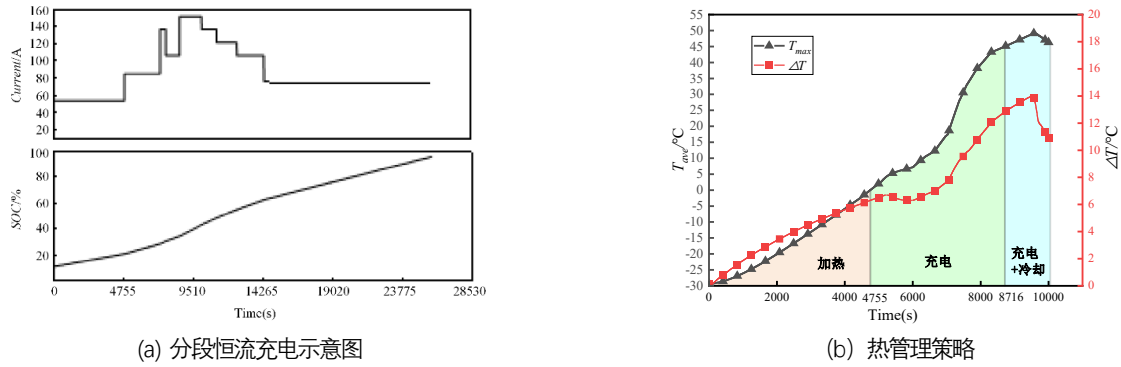


图 11 电池包充电热管理策略示意图

Fig.11 Schematic diagram of thermal management strategy

从图 11 可知当电池起始平均温度 (T_{ave}) 只有 -30°C 时, 电池较低的化学活性会导致充电速率较慢, 因此, 温度升高可提升电池的化学活性, 根据表 1 所示, 当电池 SOC=0-20%、处于低温区间内, 充电电流为 0.2C, 此阶段为提升电池化学活性, 采用低倍率充电。当电池平均温度升到 0°C 时 ($t=4755\text{s}$), 系统就会停止加热, 开始正常充电。在 SOC=20-80%、 $T_{ave}=0-35^{\circ}\text{C}$ 区间, 表 1 中充电电流为 0.2-1C, 在该阶段预热时间越长, 充电时用的电流也会慢慢调大, 电池温度也会随着升高, 最后充电电流维持在 1C 左右。不过当电池整体温度接近 45°C 时, 电池内部的化学反应会根据充电电流的加快而加快, 加速电池老化, 甚至存在安全隐患。因此, 从 $t=8716\text{s}$ 节点主动激活冷却模式, 在 SOC=80-100%、 $T_{ave}=40-50^{\circ}\text{C}$ 区间, 根据表 1 中 0.2-0.5C 的充电电流抑制过高的电池温度, 使电池保持在一个合适温度下提升充电速率, 通过对电池温度冷却可以避免过热的情况。所以在电池充电过程中, 电池不同的温度与荷电状态要采取不同模式, 例如预热、充电和冷却。这种多阶段充电策略可以在保护电池性能、避免发生安全隐患的同时, 有效提高充电倍率。

4.2 不同加热功率对电池包预热的影响

图 12 为不同加热功率下电池包的性能变化。从图 12 (a) 可知, PTC 加热器通过不同的功率 (6000W、5000W 和 4000W) 加热冷却液, 使电池包的平均温度从 -30°C 预热至 0°C 。图 12 (b) 为不同功率下电池加热性能, 由图可知, 当 PTC 功率从 4000W 增加到 6000W 时, 温升速率从 $0.24^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 增加到 $0.34^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 提高了 43.19%; 加热时间缩短了 37.87min。同时, 加热能耗 (W_h) 从 $8.37\text{kW}\cdot\text{h}$ 增加到 $8.77\text{kW}\cdot\text{h}$, 增加了 4.76%。其中, 图 12 (c) 为采用不同功率的 PTC 加热电池包温度变化曲线。图 12 (d) 为采用 PTC 的加热功率为 6000W 时的电池包温度云图。从图 12 (c) ~ (d) 可知, 随着功率的增加, 电池包最高温度 (T_{max}) 和最大温差 (ΔT) 也相应增加。当功率为 4000W 时, T_{max} 和 ΔT 分别为 2.01°C 和 5.33°C ; 而当功率增至 6000W 时, T_{max} 和 ΔT 分别达到 2.72°C 和 6.62°C 。综上所述, 通过仿真结果可知, 在预热过程中, 增加 PTC 功率能够显著提高温升速率。然而相应地, 能耗也会增加。此外, 随着功率的增加, 最高温度和最大温度差也会增大。因此, 在实际应用中, 需要根据具体情况综合考虑功率、能耗和温度控制的需求, 选择适当的预热策略。当车辆处于极寒环境且急需快速投入使用、对预热时间有严格限制时, 优先选择较高功率 (如 6000W) 的预热策略; 在对续航里程要求较高, 或能源供应较为紧张的场景下, 需要严格控制能耗, 选择较低功率 (如 4000W) 的预热策略; 对于对电池性能一致性和充电安全性要求极高的场景, 如精密的电池测试或对电池寿命要求苛刻的应用, 应该选择比 4000W 更小的加热功率, 使 ΔT 低于 5°C 。此时, 较低的

功率有助于减小温度波动，提高温度控制精度，从而更好地保证电池的充电安全和性能一致性。本研究考虑在低温环境下的快速投入使用，后续热管理策略方案中均采用 6000W 功率的 PTC 对电池包进行低温预热。

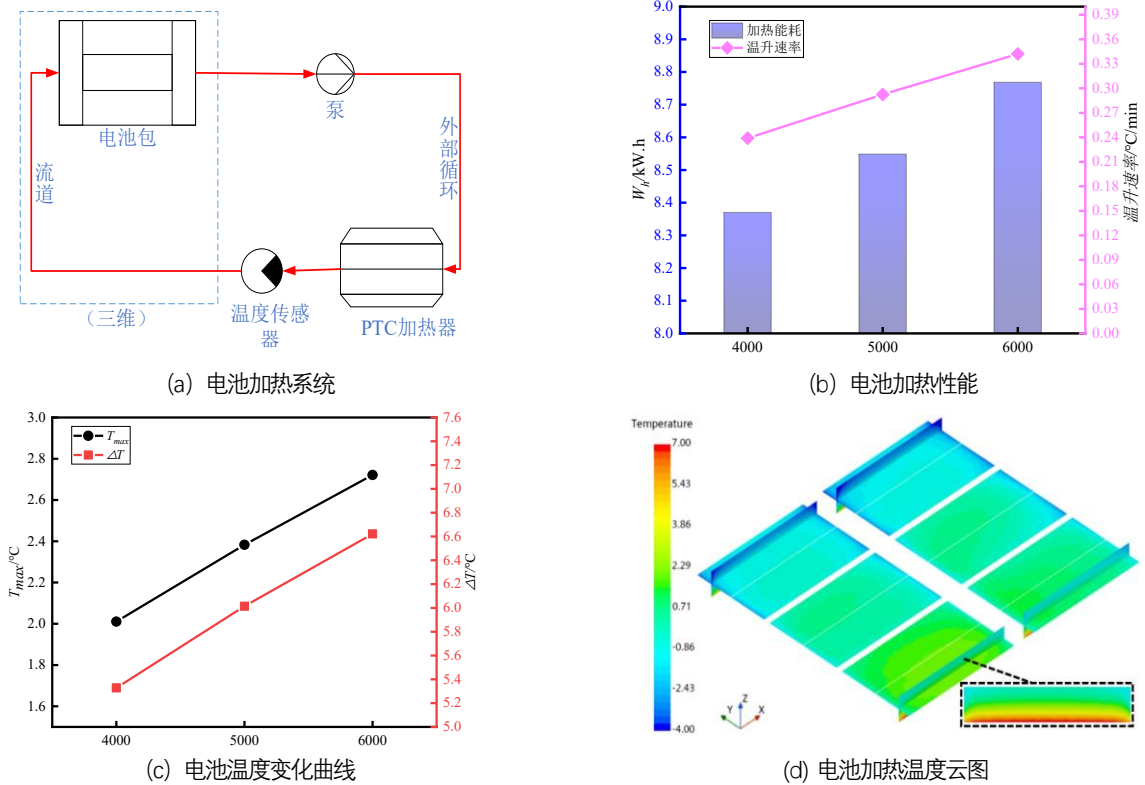


图 12 不同加热功率下电池包的性能变化

Fig.12 Performance variation of battery pack at different heating power

4.3 不同预热温度对电池包充电的影响

电池包充电速率在低温环境下受到很大影响，导致电池充电性能下降，充电时间变长。为了保持充电性能，提高充电速率，低温预热是重中之重。然而，预热温度不同，预热时间也会不同，电池的充电倍率也就不同，从而影响充电速度。为了研究不同预热温度、预热时间对电池充电倍率的影响，用大功率加热器(PTC)将电池的温度从 -30°C 分别预热到不同温度，不同预热温度 (-5°C 、 0°C 和 10°C)下电池包的性能变化如图 13 所示。由图 13 (a)可知，随着预热温度的升高， T_{max} 和 ΔT 也相应增加。当预热温度达到 T_{ave} 为 $T_w=-5^{\circ}\text{C}$ 时， T_{max} 和 ΔT 分别为 -2.42°C 和 6.05°C ，此时，虽然充电时间有所缩短，但由于温度仍然较低，电池的充电效率提升有限；当电池包温度 $T_{\text{ave}}=0^{\circ}\text{C}$ 时， T_{max} 和 ΔT 分别为 2.72°C 和 6.62°C ，充电时间进一步缩短，充电效率有了明显提升；当 $T_{\text{ave}}=10^{\circ}\text{C}$ 时， T_{max} 和 ΔT 为 12.95°C 和 7.6°C ，此时，充电时间虽然大幅缩短，但 T_{max} 和 ΔT 显著增大。过高的温度可能会加速电池的老化，降低电池的寿命，并且较大的温差也会对电池的一致性产生不利影响，增加安全隐患。从图 13 (b)可知，充电时间减少的主要原因是预热时间延长，但 PTC 加热器的加热时间变长，且 W_h 从 $7.57\text{kW}\cdot\text{h}$ 增加至 $11.22\text{kW}\cdot\text{h}$ ，相应增加了 48.29% 。同时充电时间从 116.75min 降低到 79.83min ，时间缩短了 31.62% 。这说明电池内部化学反应速率和内部阻抗受温度影响，随着温度升高，电池内部的化学反应速率增加。但电池在低温时，电解质的离子运动能力下降，增加了电池内部的电阻，从而降低了电池的充电效率，导致充电时间延长。综合上述对充电时间、能

耗、温度控制精度以及电池的安全性和寿命等因素的考虑，将 0℃作为本电池包的预热温度。

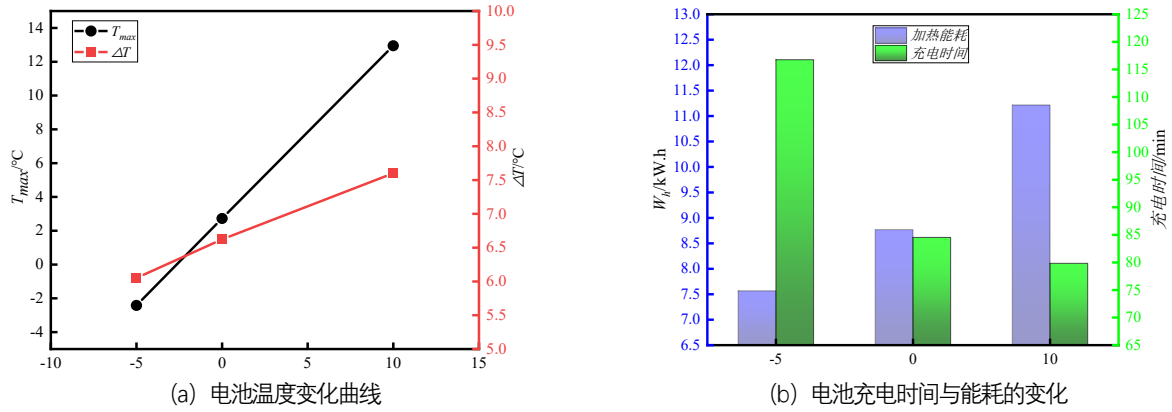


图 13 电池包在不同预热温度下的性能变化

Fig.13 Performance variation of battery pack at different preheating temperatures

4.4 不同冷却启动温度对充电时间的影响

电池包在 PTC 加热器加热，从 $T_{ave}=-35^{\circ}\text{C}$ 至 0°C 后，分析有、无冷却模式对充电过程温升变化的影响。图 14(a) 不同冷却启动温度的电池包平均温度变化曲线，其中，A 表示未启动冷却模式，B 表示在 $T_{ave}=30^{\circ}\text{C}$ 时启动冷却，C 表示在 $T_{ave}=40^{\circ}\text{C}$ 时启动冷却，D 表示在 $T_{ave}=45^{\circ}\text{C}$ 时启动冷却，入口冷却液温度保持恒定在 10°C ，入口流量为 $15\text{L}/\text{min}$ 。由图 14(b) 可知，当冷却启动时间提前， T_{max} 和 ΔT 明显下降，冷却启动时间的提前，有益于抑制电池温度，防止电池温度过高，减少高温对电池容量的影响。未启动冷却模式时，最高温度 (T_{max}) 和最大温度差 (ΔT) 分别为 51.32°C 和 9.65°C ；而当 $T_{ave}=30^{\circ}\text{C}$ 时启动冷却时， T_{max} 和 ΔT 分别下降至 38.64°C 和 6.28°C 。

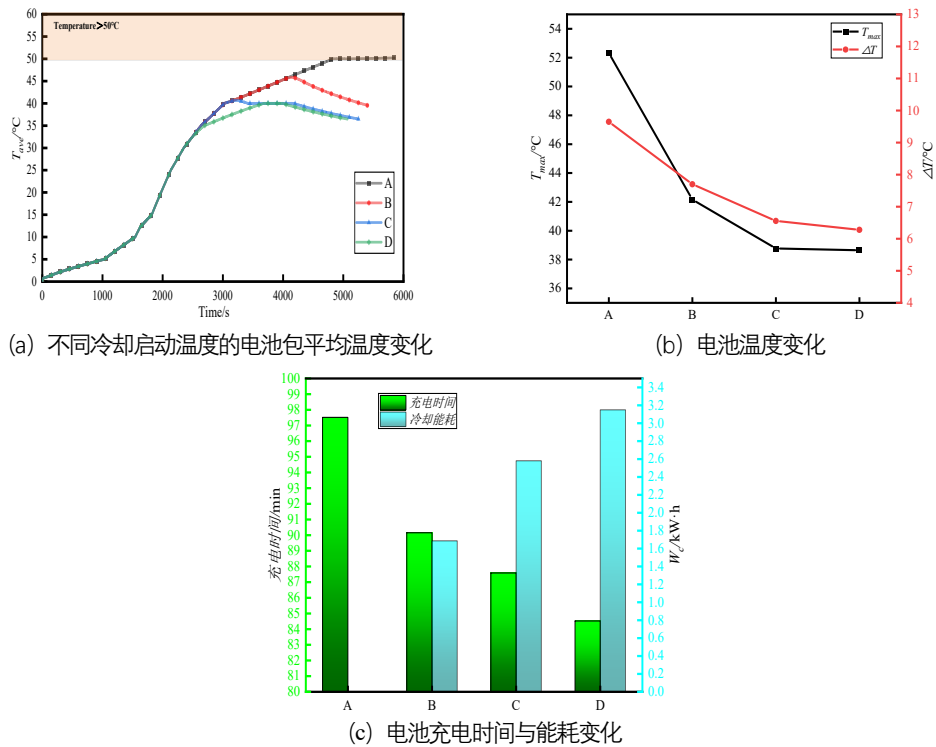


图 14 不同冷却启动温度下电池包性能变化

Fig.14 Performance variation of battery pack at different cooling start-up temperatures

此外，从图 14 (c) 可知未启动冷却模型时，充电时间为 97.52min，与未启动冷却模型相比， $T_{ave}=40^{\circ}\text{C}$ 时启动冷却的充电时间缩短至 87.58min，减少了 10.2%，但液冷系统的能耗在逐渐升高，当 $T_{ave}=45^{\circ}\text{C}$ 时启动冷却，充电时间缩短 7.6%，冷却能耗 (W_c) 增加至 1.69kW·h，而当 $T_{ave}=30^{\circ}\text{C}$ 时启动冷却，充电时间缩短 13.33%，能耗增加至 3.15kW·h。启动冷却可以抑制电池温升过高，从而实现高效的充电速率。高温会限制电池内部的电荷传输和化学反应效率，通过启动冷却可以解决这个顾虑，使充电速率上升，但如果冷却启动温度过高，如 $T_{ave}=45^{\circ}\text{C}$ ，虽然充电时间会有所缩短，但冷却能耗会显著增加，这会对电池的续航能力产生一定的影响。而相比于冷却启动温度为 $T_{ave}=40^{\circ}\text{C}$ 来说， $T_{ave}=30^{\circ}\text{C}$ 时充电效率下降显著，综上所述，综合考虑电池性能、充电效率和安全性等因素选择 $T_{ave}=40^{\circ}\text{C}$ 开始冷却降温。

4.5 热管理策略对电池温度一致性的影响

通过加热功率、预热温度和冷却启动温度的单因素分析结果得出加热功率为 6000W、预热温度为 0°C 和冷却启动温度为 40°C 的热管理策略最优，图 15 为选定的热管理策略不同阶段电池模组的温度变化，分别为预热阶段，充电阶段和冷却阶段。图 16 为电池模组充电瞬态热管理温度云图，图 16(a)~(c) 分别是电池预热至 0°C 时的温度云图、电池充电至 40°C 时的温度云图和电池冷却结束时的温度云图。

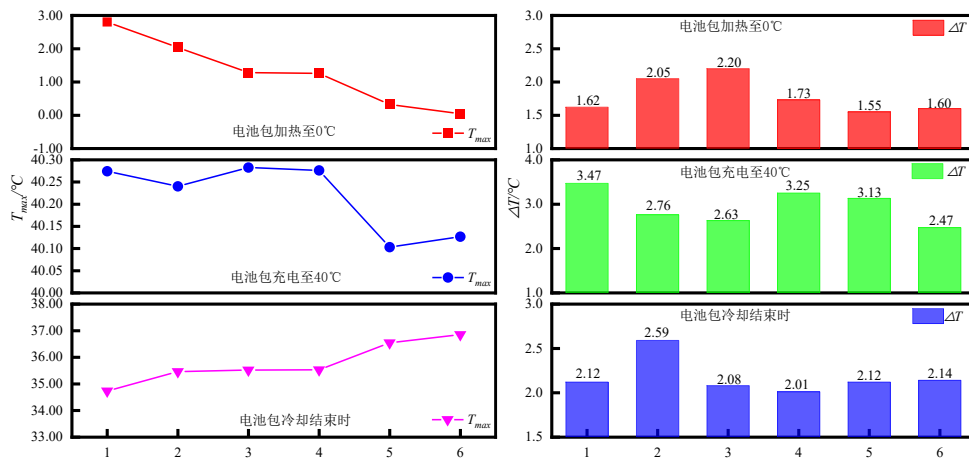


图 15 不同阶段电池模组的温度变化

Fig.15 Temperature variation of battery modules at different stages

由图 15~16 可知，在预热阶段，采用 6000W 功率将电池包从 $T_{ave}=-30^{\circ}\text{C}$ 预热至 $T_{ave}=0^{\circ}\text{C}$ ，随着距液冷板入口处的距离的增大，模组内各电池的温升速率在逐渐减缓，模组 1 内部电池最高温度为 2.8°C ，模组 5 内部电池最高温度为 0.33°C ，加热系统能够有效地预热电池，并将电池温度维持在约 0°C 左右，其中各模组内部温差在 $1.55^{\circ}\text{C}\sim 2.20^{\circ}\text{C}$ 。当 $T_{ave}=0^{\circ}\text{C}$ 时，进入充电阶段，加热系统停止工作，电池温度随着充电倍率的增加而升高，由于电池模组内单体的布局不同，导致单体散热状况的不同，因此热量在每个单体中的积累也不同，模组 1 内部电池最高温度为 40.27°C ，模组之间温差在 $2.47^{\circ}\text{C}\sim 3.47^{\circ}\text{C}$ ，当 $T_{ave}=40^{\circ}\text{C}$ 时，进入冷却阶段，液冷板内的冷却液有效地带走电池产生的热量，使得模组 5 内部电池最高温度降低至 36.54°C ，其中模组之间温差范围在 $2.01^{\circ}\text{C}\sim 2.59^{\circ}\text{C}$ ，整个充电过程中，系统内部电池温差始终保持在小于 5°C 的合理范围。

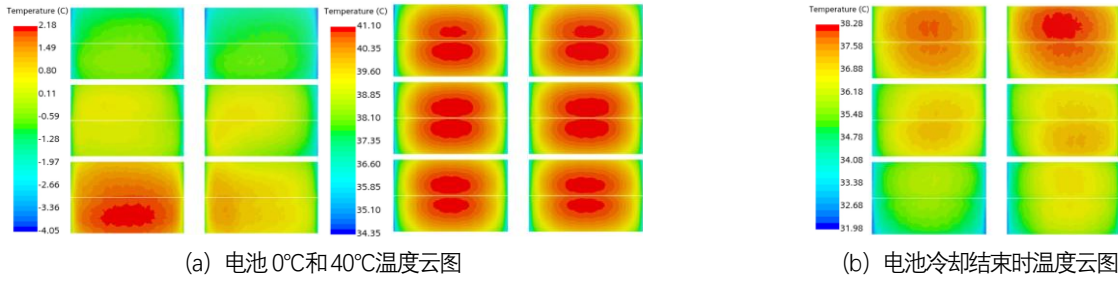


图 16 电池模组充电瞬态热管理温度云图

Fig.16 Temperature contour of transient thermal management for battery module charging

图 17 为沿电池中心 y 轴方向加热至 0°C、充电至 40°C 和冷却结束后的温度变化图，以模组 5 为分析对象，由图可知模组 5 在 0°C 时、40°C 和冷却结束时的最大温差分别为 3.79°C、4.46°C 和 2.27°C，单个模组沿电池中心 y 轴方向的温差均小于 5°C，具有一定的安全性，因此，合理的热管理策略能有效地提升电池单个模组和模组之间的温度均匀性，并降低电池的最高温度。

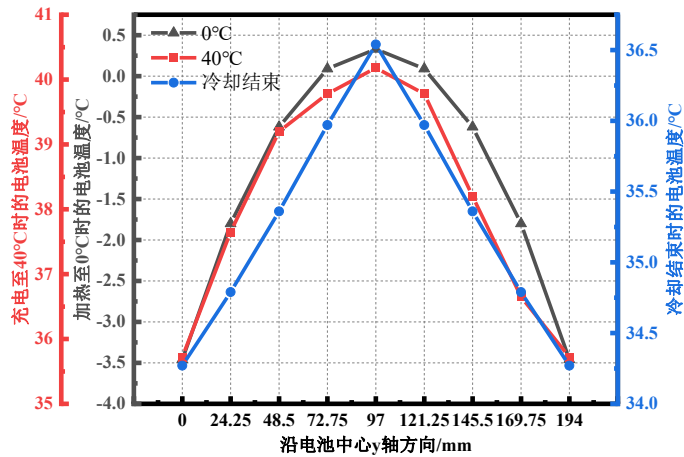


图 17 沿电池中心 y 轴方向的温度变化

Fig.17 Temperature variation along the y-axis at the center of the battery

5 结论

针对某 EV 动力电池包在低温环境下充电时的瞬态温度控制和能源消耗问题，采用三维 Star-CCM+和一维 Amesim 联合仿真的方法，分析不同影响因素（加热功率、预热温度和冷却启动）对电池包充电速率的影响。同时考虑电池包在瞬态热管理策略下的温差大小，研究一种电池包充电瞬态热管理策略。结果表明：

- 1) 当 PTC 功率从 4000W 增加到 6000W 时，温升速率从 0.24°C/min 增加到 0.34°C/min，提高了 43.19%，但能耗仅增加了 4.76%。
- 2) 预热目标温度为 -5°C 比 0°C 时充电时间增加 32.23min，电池包最大温差减小 0.57°C，加热能耗 (W_h) 减小 1.2 kW·h；预热目标温度 10°C 比 0°C 充电时间减少 4.69min，电池包最大温差增加 0.98°C， W_h 增加 2.45 kW·h。
- 3) 当电池温度升至 40°C 时，启动冷却模式对充电时间和热均衡性产生了显著影响。相对于无冷却模式，充电时间减少了 9.94min，电池包最大温差减小 3.1°C，冷却能耗 (W_c) 增加 2.58kW·h。

4) 采用 6000W 功率将电池包从-30°C预热至 0°C, 电池包各模组内部温差在 1.55°C~2.20°C之间, 启动充电模式时, 电池包各模组内部温差在 2.47°C~3.47°C之间, 在充电模式时同时启动冷却模式, 电池包各模组内部温差范围在 2.01°C~2.59°C之间, 因此, 合理的热管理策略能有效地提升电池模组的温度均匀性。

参考文献:

- [1] 程宏波,何洪,李云泉,等.电动汽车群体互动策略的随机演化博弈分析[J].华东交通大学学报,2024,41(03):74-81.
Cheng H B, He H, Li Y X, et al. Stochastic Evolutionary Game Analysis of Group Strategies for Electric Vehicles in Vehicle Network Interaction[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(03): 74-81.
- [2] Njema G G, Ouma R B O, Kibet J K. A review on the recent advances in battery development and energy storage technologies[J]. Journal of renewable energy, 2024, 23(1): 29261.
- [3] 张文俊,喜冠南,朱建新,储爱华.混合动力汽车用锂电池组温升控制策略研究[J].汽车技术,2020,No.534(03):10-14
ZHANG W J, ZHU J X, CHU A H. Research on the Temperature Rise Control Strategy for Lithium-ion Battery Pack in Hybrid Electric Vehicles[J]. Automobile Technology, 2020,No.534(03):10-14.
- [4] Wang Y, Zhang X, Chen Z. Low temperature preheating techniques for Lithium-ion batteries: Recent advances and future challenges[J]. Applied Energy, 2022, 313: 118832.
- [5] Tomaszewska A, Chu Z, Feng X, et al. Lithium-ion battery fast charging: A review[J]. ETransportation, 2019, 1: 100011.
- [6] Liu J, Zhang Y, Bai J, et al. Influence of lithium plating on lithium-ion battery aging at high temperature[J]. Electrochimica Acta, 2023, 454: 142362.
- [7] 刘刚,徐健南,陈天宇, 等.动力电池集成加热系统建模与控制仿真[J].重庆交通大学学报(自然科学版), 2025, 44(1): 120-126.
LIU G, XU J N, CHEN T Y, et al. Modeling and control simulation of power battery integrated heating system[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2025, 44(1): 120-126.
- [8] 陶政,彭纪昌,孟高军,等.锂离子电池低温预热方法研究综述[J].电源技术,2022,46(09):949-953.
TAO Z, PENG J C, MENG G J, et al. Review of low temperature preheating methods for lithium ion batteries[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2022, 46(09): 949-953.
- [9] 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.
- [10] Li J, Wu P, Tian H. Researches on heating low-temperature lithium-ion power battery in electric vehicles[C]//2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). IEEE, 2014: 1-6.
- [11] Jin X, Li J, Zhang C, et al. Researches on modeling and experiment of Li-ion battery PTC self-heating in electric vehicles[J]. Energy Procedia, 2016, 104: 62-67.
- [12] 宋来丰,郎需庆,牛鲁娜,等.磷酸铁锂单体电池热失控火灾危险性研究[J/OL].储能科学与技术,2025.0375,1-11.
Song L F, Lang X Q, Niu L N, et al. Research on the Flame Hazard of Thermal Runaway of Lithium Iron Phosphate Battery[J/OL]. Energy Storage Science and Technology, 2025. 0375, 1-11.
- [13] 朱博奇,杨文硕,赵雨晴.锂离子电池液冷散热研究综述[J]. 船电技术, 2025, 45(05): 100-104.
Zhu B Q, Yang W S, Zhao Y Q. A Review of Research on Liquid Cooling and Heat Dissipation of Lithium-Ion Batteries[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2025, 45(05): 100-104.
- [14] 刘霏霏,陈洋洋,胡建泰,等.双冷板液冷锂离子电池温升特性研究[J].汽车技术, 2022, (12): 15-22.
LIU F F, CHEN Y Y, HU J T, et al. Research on Temperature Rise Characteristics of Lithium-Ion Battery Based on Liquid Cooling with Double Cold Plates[J]. Automobile Technology, 2022, (12): 15-22.
- [15] Zhang X, Liu Y, Halbig M, et al. Development and optimization of hybrid heat dissipation system for lithium-ion battery packs[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 254: 123912.
- [16] 苏清华,周萌,李乐.FSEC 赛车动力电池生热模型及热特性分析[J].重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(12): 165-172.

- SU Q H, ZHOU M, LI L. Heat generation model and thermal characterization of FSEC racing car power battery[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2024, 38(12): 165-172.
- [17] 龚鹏. 低温环境下车载锂离子电池快速充电策略研究[D]. 重庆理工大学, 2024.001120.
Gong P. Research on Fast Charging Strategy for Automotive Lithium-ion Batteries in Low Temperature Environment[D]. Chongqing University of Technology, 2024.001120.
- [18] 冯柯敏, 张乔, 曹剑锋. 锂电池液冷通道设计与多目标优化[J]. 农业装备与车辆工程, 2025, 63(05): 76-83+118.
Feng K M, Zhang Q, Cao J F. Liquid cooling channel design and multi-objective optimization for lithium batteries[J]. AGRICULTURAL EQUIPMENT & VEHICLE ENGINEERING, 2025, 63(05): 76-83+118.
- [19] 吴成涛, 姚昕焯. 基于 STAR-CCM+ 的储能 Pack 液冷系统冷却策略制定研究[J/OL]. 电池工业, 1-12[2025-06-28].
Wu C T, Yao X H. Research on liquid cooling system formulation of energy storage battery pack based on STAR-CCM+ software[J/OL]. Chinese Battery Industry, 1-12[2025-06-28].
- [20] Chen S, Zhang G, Zhu J, et al. Multi-objective optimization design and experimental investigation for a parallel liquid cooling-based Lithium-ion battery module under fast charging[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 211: 118503.
- [21] Khalifa A J N. Natural convective heat transfer coefficient—a review: I. Isolated vertical and horizontal surfaces[J]. Energy conversion and management, 2001, 42(4): 491-504.



通讯作者: 刘霏霏 (1983—), 女, 副教授, 博士, 研究方向为动力电池热管理及环境适应性。