

引用格式: 彭夏泠, 韩松, 刘勋川, 等. 考虑 V2G 的重卡换电站电池热模型 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(2): 104-115. PENG Xialing, HAN Song, LIU Xunchuan, et al. Thermal model of heavy truck swapping station battery considering V2G [J]. Southern energy construction, 2025, 12(2): 104-115. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-177.

考虑 V2G 的重卡换电站电池热模型

彭夏泠¹, 韩松^{1,✉}, 刘勋川², 贺国刚³

- (1. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025;
2. 贵州金元绿链物流开发有限公司, 贵州 贵阳 550081;
3. 贵州金元智慧能源有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要: [目的] 重卡换电站能解决换电重卡充电时间长, 续航里程短等痛点, 但其动力电池存在容量大、使用频率高、热失控风险高等问题。[方法] 为解决以上问题, 文章建立了耦合双向充电机的电池热-电耦合模型, 对电动重卡动力电池热特性进行研究, 应用 COMSOL-SIMULINK 进行联合仿真。[结果] 仿真结果表明: 所提出耦合模型, 可以有效控制电池车辆到电网 (Vehicle to Grid, V2G) 工况下的电压电流。在 V2G 工况前期, 最大电流密度在负极与负极极耳的交界处, 最小电流密度在正极与正极极耳的交界处, 正极极耳温度比负极极耳高 4.1 °C; 在 V2G 工况后期, 最大局部电流密度从极耳向电池下端转移, 底部区域因浓度的影响有利于电化学反应, 电芯温度高于极耳温度; 热滥用工况下, 副反应发生顺序为 SEI 膜分解、负极分解、正极与电解液反应, 其中, 电极副反应生热是导致电池进入无法返回的热失控的主要原因, SEI 膜的分解反应是电池开始热失控的标志。[结论] 所提外电路-热电耦合模型能有效反映在重卡换电站双向充电机激励下, 电池热电耦合模型的温度分布与热失控影响。

关键词: 重卡换电站; 双向充电机; 外电路-热电耦合模型; V2G; 热失控

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-177

文章编号: 2095-8676(2025)02-0104-12

CSTR: 32391.14.j.ceec.2024-177

中图分类号: TM911; X932



论文二维码

Thermal Model of Heavy Truck Swapping Station Battery Considering V2G

PENG Xialing¹, HAN Song^{1,✉}, LIU Xunchuan², HE Guogang³

- (1. College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China;
2. Guizhou Jinyuan Green Chain Logistics Development Co., Ltd, Guiyang 550081, Guizhou, China;
3. Guizhou Jinyuan Smart Energy Co., Ltd, Guiyang 550081, Guizhou, China)

Abstract: [Objective] The heavy-duty truck swapping station addresses challenges such as long charging times and limited driving range in electric heavy-duty trucks, the power battery faces issues of large capacity, high frequency of use, and a heightened risk of thermal runaway. [Method] To solve the above problems, a coupled bidirectional charging machine's battery thermal-electric coupling model was established to investigate the thermal characteristics of the electric heavy-duty truck's power battery, and the COMSOL-SIMULINK was used for joint simulation. [Result] The results indicate that the proposed coupling model can effectively control the voltage and current of the battery under V2G operating conditions. In the early stages of the V2G condition, the maximum current density is at the junction of the positive electrode and the positive electrode tab. The temperature of the positive electrode tab is significantly higher than the cell temperature, with a temperature difference of 4.1 °C. In the later stages of the V2G condition, the maximum local current density shifts from the electrode tab towards the bottom of the battery. The bottom region, influenced by concentration, favors electrochemical

收稿日期: 2024-05-30 修回日期: 2024-06-25

基金项目: 贵州省科技支撑计划项目“电动重卡换电站抛掷式应急消防反应系统研究”(黔科合支撑[2023]一般329); 贵州省优秀青年科技人才培养计划([2021]5645)

reactions, the cell temperature is higher than the electrode tab temperature. Under abusive thermal conditions, the sequence of secondary reactions includes the decomposition of the SEI membrane, negative electrode decomposition, and positive electrode reaction with the electrolyte. Among these reactions, the heat generated by electrode secondary reactions is the main cause leading the battery into irreversible thermal runaway. The decomposition reaction of the SEI membrane is an indicative sign of the initiation of thermal runaway in the battery. [Conclusion] The proposed external circuit thermoelectric coupling model can reflect the temperature distribution and thermal runaway effects of the battery thermoelectric coupling model under the excitation of the bidirectional charger in the heavy-duty truck exchange station.

Key words: electric heavy-duty truck swapping station; bidirectional charging machine; external circuit thermoelectric coupling model; V2G; thermal runaway

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

换电模式已经成为电动汽车能源补给的重要方式之一,能够实现车辆快速能源补给、提升补能效率。短倒运输需求增加,进而拉动电动重卡动力电池市场的增长,相对于欧美,我国的重卡换电站主要服务与各省级物流枢纽之间的物流链,在一定程度上能够解决早期动力电池购置成本高、充电时间长等问题^[1]。且电动重卡充换电站作为能量储存装置来看,考虑 V2G 的重卡换电站,相当于一个电化学储能系统。其对电网的影响也不容小觑,随着电网侧储能应用规模的迅速扩大,其在调峰调频、需求侧响应等应用场景下充分发挥电网侧电化学储能装置优势即为未来电网中储能开发的核心内容^[2-4]。但动力电池存在容量大、使用频率高、热失控风险高等问题,且电池的寿命与其充放电次数高度相关。如果电池用于 V2G,理论上会增加电池的充放电次数,从而可能影响其使用寿命。然而,实际影响还需要综合考虑充放电深度 (Depth of Discharge, DoD); 充放电速率等因素。文献 [5] 针对 V2G 工况,建立了电池循环寿命损耗模型,并给出了兼具经济性与安全性电池 V2G 控制管理方案。因此建立准确的电池模型以及热失控早期预警对换电站发展有着重要意义^[6-9]。

电池热过程实际为分布参数系统,变化产生在时间以及空间上。在目前的电池管理系统 (Battery Management System, BMS) 中,并无足够多维度的传感器数据进行电池内部温度估计,因此需要电池热模型进行推导^[10]。就电池热模型的发展而言,电池集总热模型 (Battery Lumped Thermal Model, BLTM), 是一种主要用于面向控制的电池建模方法,其主要

优势是简单快速的得到电池温度^[11-13],但 BLTM 模型仅仅预测一两个平均温度,导致其无法得到适用于电动重卡大型动力电池的温度分布;相对的,非线性分布式参数系统 (Distributed Parameter System, DPS) 可以描述电池中的详细的温度分布,如基于物理的基本扩散偏微分方程,可以对电动重卡的大型动力电池进行温度分布预测,但是其二维或者三维的热模型计算相对缓慢复杂,因此其热失控预防与控制的难度较大^[14-17]。文献 [18] 提出一种基于数据驱动的时空建模方法,不需要 DPS 的物理特性,利用从 DPS 采样的数据进行建模,因此其模型的准确性取决于数据量,但其大量的数据并不容易获得。

综上所述,为了准确根据对电动重卡动力电池的特性进行建模,需要综合考虑大型电池内部发热机制以及化学性质,电池等效模型^[19-24]考虑了电池的物理特性,但是并没有考虑电池产热过程中的副反应,即化学特性。综合电化学特性以及热特性进行建模,因此,在电池等效模型的基础上,加入三维电化学模型,然后与任意热模型进行耦合,即得出电池电化学-热耦合 (Electrochemical Thermal Coupling, ECTC) 模型^[25-26]。然而,大多数研究并未考虑电动重卡动力电池的热分布不均的特性,因此有学者提出具有三维热模型的 ECTC 模型,以探索不同放电倍率以及不同环境温度下的电池性能^[27-29]。但其没有考虑电池的电化学反应不均衡,即电流分布不均衡问题。

考虑到上述问题,文章提出了考虑电池温度梯度与不均匀的热分布的三维电池电化学-三维热模型,并与外电路,即双向充电机耦合电池热-电耦合模型,并通过 COMSOL-SIMULINK 联合仿真以控制

电池外电路的方式控制其充放电倍率模拟其在不同工况下的电池热特性。

1 电化学-热模型的建立

磷酸铁锂电池单体由正极集流体, 正极材料, 隔膜, 负极材料, 负极集流体成刀片状排列, 如图 1 所示, 定义边界 1 至边界 4 分别为正极集流体与正极材料交界处、正极材料与隔膜交界处、隔膜与负极材料交界处、负极材料与负极集流体交界处。

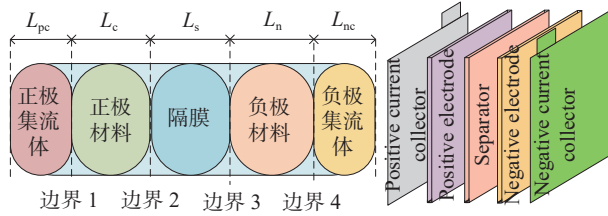


图 1 磷酸铁锂电池几何结构

Fig. 1 Geometric structure of lithium iron phosphate batteries

为了简化计算, 电化学模型预设正极与负极材料分子形状都为规则的球形; 忽略充放电过程中电极的体积变化, 忽略锂枝晶对隔膜的影响。热模型预设电流通过集流体翼片均匀流入电池, 忽略不同材料的接触热阻, 不考虑电池的热辐射。

电极动力学方程需表现电流密度与交换电流密度和过电势之间关系, 则电极动力学方程遵循 Butler-Volmer 方程:

$$j_{loc,i}(x, y, z, t) = j_{0,i}(x, y, z, t) \times \left[\exp\left(\frac{\alpha_a F \eta_i(x, y, z, t)}{RT}\right) - \exp\left(\frac{-\alpha_c F \eta_i(x, y, z, t)}{RT}\right) \right] \quad (1)$$

式中:

$j_{loc,i}(x, y, z, t)$ ——局部电流密度 (A/m^2);

$j_{0,i}(x, y, z, t)$ ——交换电流密度 (A/m^2);

α_a 、 α_c ——阳极、阴极传递系数, 均为 0.5;

F ——法拉第常数, 96 485 C/mol;

R ——通用气体常数, 8.314 J/mol/K;

T ——热力学温度 (K);

$\eta_i(x, y, z, t)$ ——过电势 (V)。

过电势 η_i 的计算过程为:

$$\eta_i(x, y, z, t) = \Phi_s(x, y, z, t) - \Phi_e(x, y, z, t) - E_{eq}(x, y, z, t) \quad (2)$$

式中:

$\Phi_s(x, y, z, t)$ ——固相电势 (V);

$\Phi_e(x, y, z, t)$ ——液相电势 (V);

$E_{eq}(x, y, z, t)$ ——平衡电势 (V)。

固液相锂离子浓度在很大程度上对电流密度 $j_{0,i}(x, y, z, t)$ 产生影响作用, 反映的是电极发生反应的难易程度:

$$j_{0,i}(x, y, z, t) = k(c_e)^{\alpha_n} (c_{s,max} - c_{s,e})^{\alpha_p} c_{s,e}^{\alpha_p} (x, t) \quad (3)$$

式中:

k ——电化学反应常数 (m/s);

c_e ——液相锂离子浓度 (mol/m^3);

α_n 、 α_p ——固、液相离子传递系数, 均为 0.5。

$c_{s,max}$ ——最大嵌锂浓度 (mol/m^3);

$c_{s,e}$ ——固液相锂离子浓度 (mol/m^3)。

对于锂电池而言, 除了电极反应动力学方程外, 运行过程中, 还要遵守电荷、能量、质量 3 大守恒规律。

对于电荷守恒而言, 电子主要在极耳, 集流体以及电极固相材料中传输, 在液相即电解液中以离子形式传输。因此, 在固相中, 电流密度与固相电势符合欧姆定律:

$$j_1 = -\sigma_s^{eff} \nabla \Phi_s \quad (4)$$

式中:

σ_s^{eff} ——固相有效电导率 (S/m);

∇ ——电极厚度方向的梯度。

其边界条件为, 在边界 1 处, 即正极集流体与正极材料接触面上电流 I 恒定, 且因为负极材料与隔膜之间为液相离子传输, 不存在电荷传输, 将负极参考电势设置为 0:

$$-\sigma_s^{eff} \frac{\partial \Phi_s}{\partial z} \Big|_{z=L_n+L_s+L_p} = I \quad (5)$$

$$-\sigma_s^{eff} \frac{\partial \Phi_s}{\partial z} \Big|_{z=L_n} = -\sigma_s^{eff} \frac{\partial \Phi_s}{\partial z} \Big|_{z=L_n+L_s} = 0 \quad (6)$$

$$\Phi_s|_{z=0} = 0 \quad (7)$$

式中:

I ——正极集流体与正极材料接触面上的电流 (A)。

L_n ——负极材料厚度 (m);

L_s ——隔膜厚度 (m);

L_p ——正极材料厚度 (m)。

在液相中, 电势由离子电流的欧姆定律与迁移电势构成:

$$j_2 = -\sigma_e^{\text{eff}} \nabla \Phi_e + E_m \quad (8)$$

$$E_m = \frac{2\sigma_e^{\text{eff}} RT}{F} \left(1 + \frac{\partial \ln f_{\pm}}{\partial \ln c_e} \right) (1 - t_+^0) \nabla \ln c_e \quad (9)$$

式中:

σ_e^{eff} ——液相有效电导率(S/m);

E_m ——迁移电势(V)。

f_{\pm} ——电解质中正负离子的平均活度系数;

t_+^0 ——液相锂离子传递系数;

在液相中只有离子能通过隔膜与电极材料界面, 因此液相边界条件为:

$$-\frac{\partial \Phi_e}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\partial \Phi_e}{\partial z} \Big|_{z=L_n+L_s+L_p} = 0 \quad (10)$$

对于质量守恒, 根据多孔电极理论, 电池单元由电极材料中的固相与电解质中的液相构成。定义锂离子扩散流量为电化学反应的离子流, 且电解液存在于正极孔隙、隔膜、负极。则如图 1 所示, 定义两级集流体边界处, 即边界 1 与边界 4 处液相离子浓度梯度为 0 且无离子流:

$$-D_s^{\text{eff}} \frac{\partial c_s}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (11)$$

式中:

D_s^{eff} ——为固相扩散系数(m²/s);

r ——固相颗粒的直径(m)。

对于边界 2、边界 3 处, 液相浓度及其梯度连续且离子流相等:

$$-D_s^{\text{eff}} \frac{\partial c_s}{\partial r} \Big|_{r=R} = \frac{j_{\text{loc},i}}{F} \quad (12)$$

锂离子在固相内, 即电极的球形活性材料颗粒中的锂离子守恒方程遵循 Fick 定律:

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} = D_s^{\text{eff}} \left(\frac{\partial^2 c_s}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial c_s}{\partial r} \right) \quad (13)$$

液相中的锂离子包含扩散与迁移效应:

$$\varepsilon_e \frac{\partial c_e}{\partial t} = \nabla (D_e^{\text{eff}} \nabla c_e) + \frac{a_s}{F} (1 - t_+^0) \cdot j_{\text{loc},i} \quad (14)$$

式中:

ε_e ——液相孔隙率;

D_e^{eff} ——液相扩散系数(m²/s);

a_s ——比表面积(m²/m³);

在液相中, 离子在边界 1 与边界 4, 即集流体出的离子通量为 0, 且在电极与隔膜接触面左右的邻域处是相等的, 离子浓度也相等, 因此液相边界条件为:

$$-D_e^{\text{eff}} \frac{\partial c_e}{\partial z} \Big|_{z=0} = -D_e^{\text{eff}} \frac{\partial c_e}{\partial z} \Big|_{z=L_n+L_s+L_p} = 0 \quad (15)$$

$$-D_e^{\text{eff}} \frac{\partial c_e}{\partial z} \Big|_{z=L_n^-} = -D_e^{\text{eff}} \frac{\partial c_e}{\partial z} \Big|_{z=L_n^+} \quad (16)$$

$$-D_e^{\text{eff}} \frac{\partial c_e}{\partial z} \Big|_{z=(L_n+L_s)^-} = -D_e^{\text{eff}} \frac{\partial c_e}{\partial z} \Big|_{z=(L_n+L_s)^+} \quad (17)$$

$$c_e \Big|_{z=L_n^-} = c_e \Big|_{z=L_n^+} \quad (18)$$

$$c_{1,s} \Big|_{z=(L_n+L_s)^-} = c_{1,p} \Big|_{z=(L_n+L_s)^+} \quad (19)$$

对于能量守恒, 电池内部无对流换热, 因此其能量守恒方程为:

$$\frac{\partial (\rho C_p T)}{\partial t} = \nabla (\lambda \nabla T) + Q \quad (20)$$

式中:

ρ ——各材料密度(kg/m³);

C_p ——恒压比热容(J/kg/K);

Q ——总生热率(W/m³)。

λ ——导热率(W/m/K);

基于串并联的三维热阻模型需要计算 3 个方向的导热率 λ_x 、 λ_y 、 λ_z :

$$\lambda_x = \lambda_y = \frac{\lambda_{Al} \times \frac{1}{2} L_{pc} + \lambda_p L_p + \lambda_s L_s + \lambda_n L_n + \lambda_{Cu} \times \frac{1}{2} L_{nc}}{\frac{1}{2} L_{pc} + L_p + L_s + L_n + \frac{1}{2} L_{nc}} \quad (21)$$

$$\lambda_z = \frac{\frac{1}{2} L_{pc} + L_p + L_s + L_n + \frac{1}{2} L_{nc}}{\frac{L_{pc}}{2\lambda_{Al}} + \frac{L_p}{\lambda_p} + \frac{L_s}{\lambda_s} + \frac{L_n}{\lambda_n} + \frac{L_{nc}}{2\lambda_{Cu}}} \quad (22)$$

式中:

λ_{Al} ——铝的导热率(W/m/K);

λ_p ——正极材料导热率(W/m/K);

λ_s ——隔膜导热率(W/m/K);

λ_n ——负极材料导热率(W/m/K);

λ_{Cu} ——铜的导热率(W/m/K)。

在热模型中, 各生热项的物性参数均与温度有关, 采用 Arrhenius 反应动力学方程即可得到各反应的反应速率:

$$\Phi = \Phi_{\text{ref}} \exp \left[\frac{-E_{\text{act},\Phi}}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (23)$$

式中:

Φ ——温度相关的参数 k_a 、 k_c , 表示阴阳极反应速率常数(m/s);

Φ_{ref} ——参考温度 T_{ref} 下的各参数(m/s);
 $E_{act,\Phi}$ ——促使参数 Φ 发生演化所需的能量 (J/mol)。

如图 2 所示, 电化学模型计算电池化学反应与生热, 反应热计算后, 在三维热模型中根据反应热进行温度分布计算。基于三维导热方程的三维热模型, 描述一个内有热源的模型在三维边界条件下的传热与温度分布。将三维热模型温度量作为反馈给电化学模型的量, 从而在电化学模型里面计算随温度变化的量。将温度信息反馈回电化学模型。三维电化学模型与三维传热模型通过此方式耦合在一起, 即为重卡动力电池热-电耦合模型。

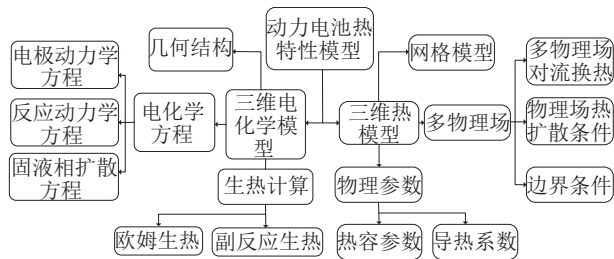


图 2 电化学-热耦合模型建模流程

Fig. 2 Electrochemical thermal coupling model modeling process

2 考虑双向充电机的电动重卡外电路-热电耦合模型

在充换电站中, 实现 V2G 就需要具有双向功能的充电机, 如图 3 所示, 双向充电机一般由双向 AC-DC 和双向 DC-DC 变换器组成, 此种结构被称为两

级式充电机, 前级由双向 AC-DC 变换器组成, 主要功能是将交流母线电压转换为稳定的直流母线电压, 并控制网侧功率因数和电流质量。后级双向 DC-DC 变换器将直流母线和电池组所需电压电流进行调控, 前级与后级由高频变压器作为分界, 这种带有高频变压器的隔离前级与后级的结构保证了安全性。

前级 VSI 型双向变换器采用空间矢量控制, 具有动态响应快, 电压利用率高等特点。后级隔离型 DC-DC 变换器适用于大功率场合, 安全性较高。在通常情况下, 采用双有源桥 (Dual Active Bridge, DAB) DC-DC 变换器是应用比较广泛的拓扑结构。单移相 (Single Phase-Shift, SPS) 即可调节 DAB 原副边驱动信号的移相角的极性以及大小, 从而控制功率流动的方向, 原边驱动信号超前于副边时, 功率由原边流向副边, 反之亦然。DAB 的传输功率会随着移相角的增大而增大。

电感 L 两端的电压为:

$$V_L(t) = V_{h1}(t) - V_{h2}(t) \quad (24)$$

式中:

$V_L(t)$ ——电感 L 两端的电压(V);

V_{h1} ——全桥 h_1 的交流电压(V);

V_{h2} ——全桥 h_2 的交流电压(V)。

则电感电流可表示为:

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{V_{h1}(t) - V_{h2}(t)}{L} \quad (25)$$

流过电感的电流在一个开关周期内为 0, 则 DAB 的传输功率为:

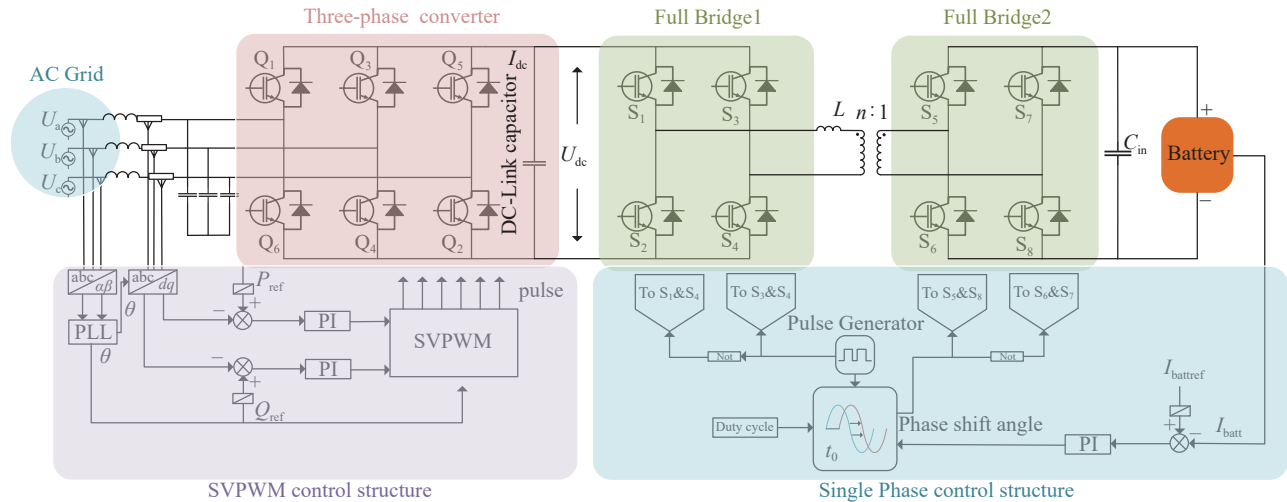


图 3 双向充电机拓扑结构

Fig. 3 Topology structure of bidirectional charger

$$P = \frac{1}{T_{hs}} \int_0^{T_{hs}} V_{h1} i_L(t) dt = \frac{nV_1 V_2}{2f_s L} D(1-D) \quad (26)$$

式中:

- t_0 —— 周期开始时刻;
- D —— 移相比;
- T_{hs} —— 半个周期(s);
- DT_{hs} —— 移相时间(s)。
- n —— 变压器变比。

在 SPS 调制策略中, 一般取 $D = 0.5$, 当 $P > 0$ 时, 代表功率传输方向为正向传输, 且 L 取值越大传输功率越小。

在功率传输过程中, 电感 L 电流与高频变压器存在相位差, 因此存在功率回流, 且与 L 值成线性关系:

$$P_R = \frac{V_{h1}^2 [2\pi(d-1) - 3d\varphi]^2}{Y(d+1)} \quad (27)$$

式中:

- $Y = 54\pi\omega L$ —— 导纳(S);
- d —— 为高频变压器变比;
- φ —— 驱动脉冲与初级相差移相角($^\circ$)。

因此, 为避免回流功率越限, 需限制 L 取值使得 $0 \leq \varphi \leq \pi/3$ 。 L 的取值需满足传输功率需求以及回流功率限制, 还需考虑电流应力以及开关管承受范围。 设定 DAB 的开关频率为 20 kHz, 变压器漏感为 $L_k = 12 \mu\text{H}$, 在电感 L 取值为 $40 \mu\text{H}$ 时, 系统全负载范围效率 95.23% 且满足上述条件。 图 4 为 V2G、G2V 双向工况下的网侧电压电流波形, 图 4(a) 表示正向 G2V 工况下对电池充电时的网侧电压电流,

其相位相差 180° , 表示电池从电网吸收功率; 相反, 图 4(b) V2G 工况下网侧电压电流同相, 表示电池向网侧发出功率, 实现了重卡换电站 V2G 功能; 图 4(c) 为正向功率流时辅助电感两侧的电压波形以及电流波形, 开关管驱动信号使得在高频变压器原边和副边分别产生占空比为 50% 的方波电压, 由于采用单移相控制其移相时间为 DT_{hs} , 进而 V_{h1} 与 V_{h2} 之间也会产生移相时间, 因此在正向功率流时, V_{h1} 与 V_{h2} 也会存在一个移相时间 DT_{hs} , 因此对于正向功率流而言, V_{h1} 超前于 V_{h2} , 功率是正向传输的。

式(7)定义负极集流体边界, 即边界 4 处固相电势为 0, 式(10)定义液相电势在边界 2 和边界 3 中连续, 变化率也连续, 则电池内部电流总密度是离子电流与电子电流密度之和, $j = j_1 + j_2$, 电池的外电流等于电池内部电流总密度与电池极板面积的乘积:

$$i_{app} = j \cdot A_{cell} \quad (28)$$

式中:

- i_{app} —— 电池的外电路激励电流(A);
- A_{cell} —— 电池极板面积(m^2)。

因此, 电池外电路与电池电化学-热模型即可通过外电路控制的电流结合起来。

3 结果分析

3.1 动力电池外电路-热电耦合模型

运用 COMSOL-SIMULINK 联合仿真建立外电路-热电耦合联合仿真模型, 在 SIMULINK 中搭建双向充电机模型, 电池组以 6s2p 连接方式如图 3 所示连接至网侧。 在 COMSOL 中搭建三维电化学模型,

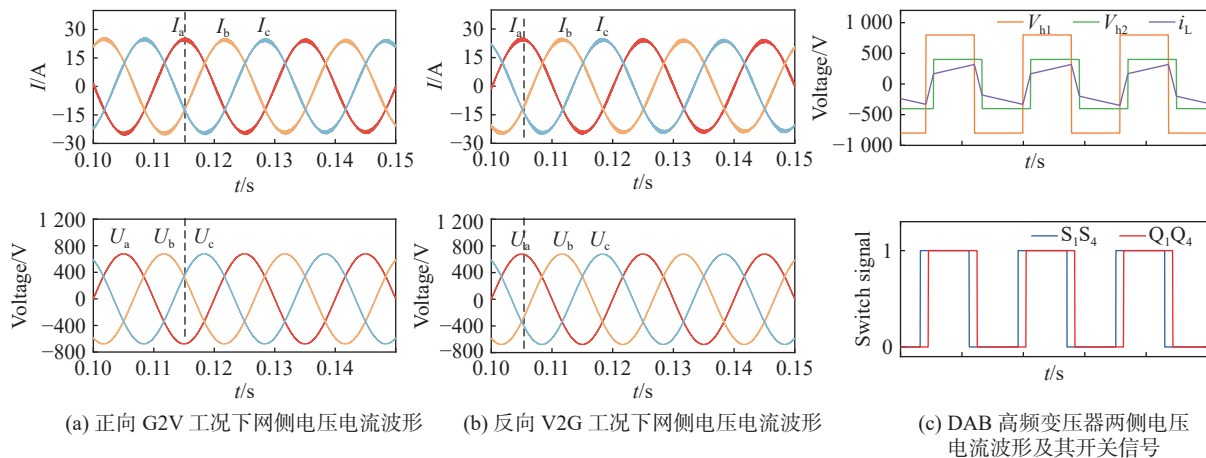


图 4 V2G、G2V 双向工况下的网侧电压电流波形

Fig. 4 Voltage and current waveforms on the grid side under forward G2V and reverse V2G working conditions

表 1 为电池参数。如图 5 所示,所提模型由三维电化学热模型以及外电路模型耦合而成,主要分为 4 个部分,即交流电网、外电路、三维电化学模型以及三维热模型组成。电池单独划分为主体和极耳 2 个部分,电池主体为包含各种材料以及反应生热的主体,极耳部分起热量传导的作用。在 COMSOL 中搭建电池单体的三维模型以及网格模型示意图,网格考虑多物理场因素以及仿真速度因素按照中心密外部稀疏的规律划分网格。

3.2 正常工况下电池温度分布

在考虑 V2G 的电动重卡充换电站中,主要工况分为充电工况, V2G 工况,以及不正常的滥用工况。对于考虑 V2G 的重卡换电站使用场景,充电倍率,环境温度,以及电池的初始 SOC 都会影响其温度。

设定环境温度 293.15 K,即 20 °C, $t=0$ 时刻电池 SOC 为 50%,对 1C 倍率放电的电池热特性进行分析,结果如图 6(a) 所示。恒流放电工况下,电池温度分布呈现相同的特点,电池温度在不包含极耳的部

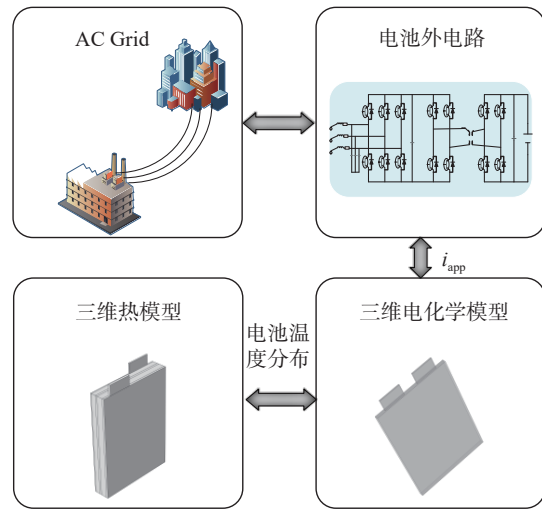


图 5 外电路-热电耦合模型结构
Fig. 5 External circuit thermoelectric coupling model structure

参数	数值
$L_{pc}/\mu\text{m}$	19
$L_p/\mu\text{m}$	59
$L_s/\mu\text{m}$	20
$L_n/\mu\text{m}$	46
$L_{nc}/\mu\text{m}$	10
$j_{0,i,ref}/(\text{A}\cdot\text{m}^{-2})$	0.7
$j_{0,i,ref}/(\text{A}\cdot\text{m}^{-2})$	0.96
$rp_{pos}/\mu\text{m}$	0.2
$rp_{neg}/\mu\text{m}$	3.5
$c_{s,max, pos}/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-3})$	22806
$c_{s,max, neg}/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-3})$	31370
SOC _{max}	0.9945
SOC _{min}	0.2
$C_{p, batt}/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	1567.4
$\rho_{batt}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	3128.1
K_{pi}	0.5
K_{ii}	5
K_{pv}	25
K_{iv}	500
L_0/H	0.005
C_0/F	3e-6
$L/\mu\text{H}$	52

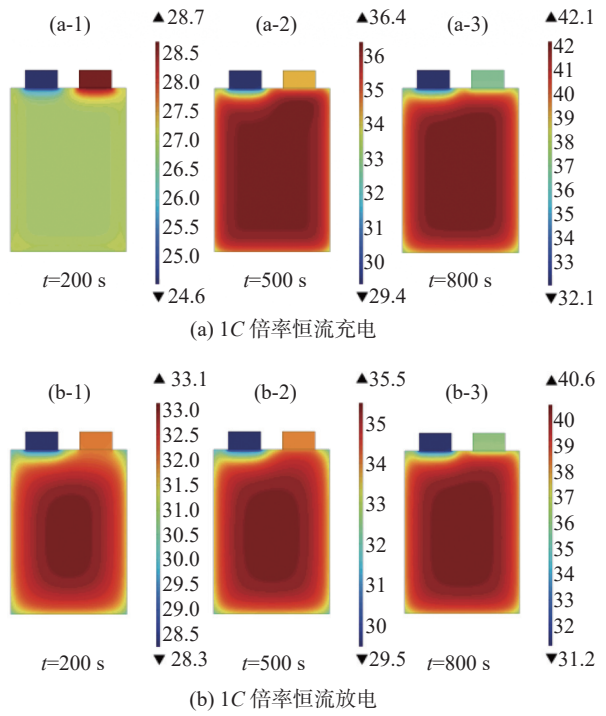


图 6 温度分布

Fig. 6 Temperature distribution

分中心高,四周低,这是由于电池中心相比电池边角的散热条件差。横向对比放电时间,选取 $t=200$ s 时,电池放电深度(DOD)为 19.71%, $t=500$ s 时,其 DOD 为 49.18%, $t=800$ s 时, DOD 为 78.12%,可以发现,在电池放电深度逐渐提高,电池温度也越高,在 $t=500$ s, DOD 为 49.18% 时,电池最高温度上升至 36.4 °C,涨幅达到 7.7 °C,在 $t=800$ s, DOD 为 78.12% 时,电池最

高温上升至 42.1 °C, 涨幅为 5.7 °C, 且由于极耳厚度远小于电芯厚度, 极耳散热条件好于电池散热条件, 但在放电初期, 如图 6(a-1) 所示, 电池最高温度出现在正极极耳部分, 其原因是正极极耳采用的铝箔电阻率大于负极极耳采用的铜箔, 产生了更多的焦耳热造成的。在放电进入中后期的稳定状态时, 电流密度增加, 电芯温度将会超过极耳温度。在图 6(b) 中, 对电池进行 1C 恒流充电, 同放电工况类似, 充电工况也有充电倍率越大, 电池温度越高的特点, 但其温度高点主要集中在电池中央部分, 这是由于充电过程中由于电池内阻产生的不可逆热占放热过程的主导地位。在 $t=200 \sim 500$ s 时电池最高温度上升至 35.5 °C, 涨幅为 2.4 °C, 相比 $t=500 \sim 800$ s 温度涨幅 5.2 °C 来说, 涨幅较为缓慢, 其原因是因为电池电压以及 SOC 上升至接近电池充满时状态造成的电池发热量增加。

因此, 对于考虑 V2G 的重卡换电站来说, 进行 V2G 工况时, 控制极耳的温度就变得极为重要, 在电池单体中极耳与电芯的温差就达到了 4.1 °C 以上, 应在电池放电阶段的前半部分对电池极耳进行降温

处理, 在电池放电阶段的后半部分对电芯进行降温处理。在充电工况时, 应在电池充电的后半部分, 或者 SOC 达到一定值时采取恒压充电方式, 并进行降温措施, 这需要 BMS 系统的配合。

图 7(a)、图 7(b) 分别表示电池 1C 放电倍率放电时的负极以及正极表面的局部电流密度, 结果表明, 负极中的局部电流密度高于正极中的电流密度。在放电开始阶段, 最大电流密度出现在负极与负极极耳的交界处, 最小电流密度出现在正极与正极极耳的交界处的位置。这是因为在负极极耳处的负电极颗粒首先脱嵌, 随着放电的进行, 最大局部电流密度从极耳处逐渐向电池下端转移。在 $t=500$ s, DOD=49.18% 后, 即电池放电的后半段, 底部区域因浓度的影响变得有利于电化学反应。这种电流密度分布不均匀现象导致电芯发热不均衡, 这与图 6 的温度不均匀分布结论一致。

因此, 对于电动重卡换电站的 V2G 工况而言, 需要对电池温度分布不均衡现象进行管理。V2G 工况不同于充电工况的是, 过放电主要对电池内部结构产生影响, 进而影响电池的容量和寿命。

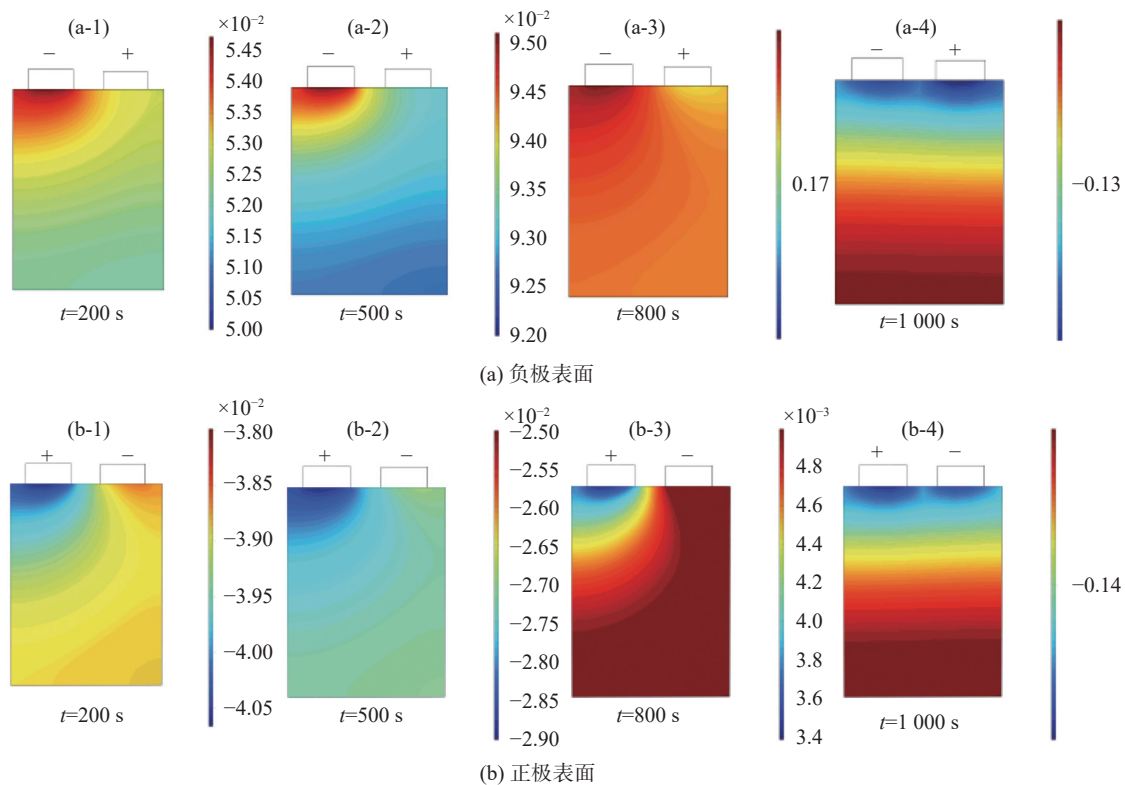


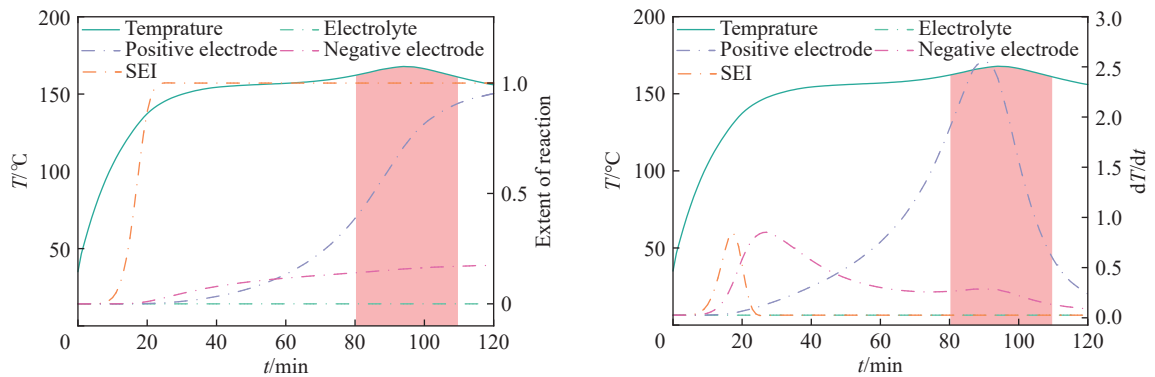
图 7 1C 倍率放电时电池局部电流密度

Fig. 7 Local current density of the battery during 1C rate discharge

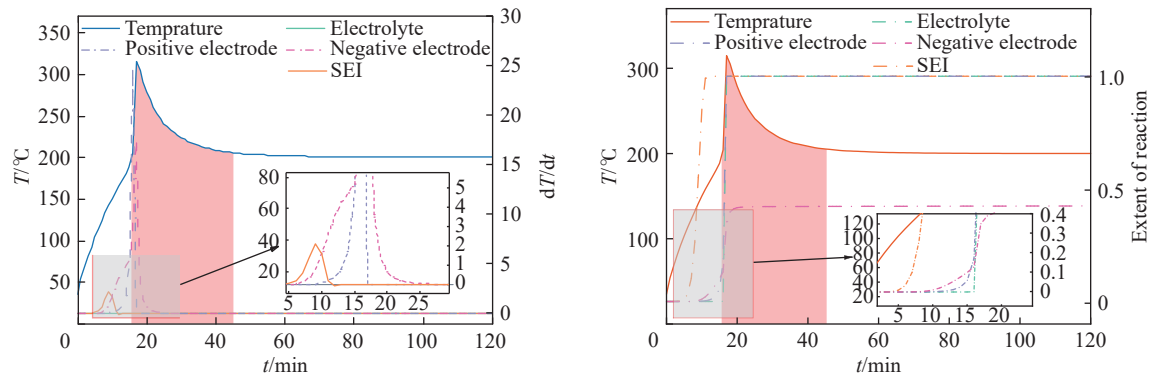
3.3 热滥用工况下的电池温度及副反应情况

不同于电池的过充热失控,在 V2G 工况下,电池热失控后造成的传播蔓延事故才是造成换电站安全事故的主要原因。在热滥用工况下,电池自身的产热主要由电池内部副反应产热,主要产热由电解液、SEI 膜、正极以及负极的分解反应构成。对初始温度 20 °C 下,不同烤箱温度来模拟电池热滥用工况。

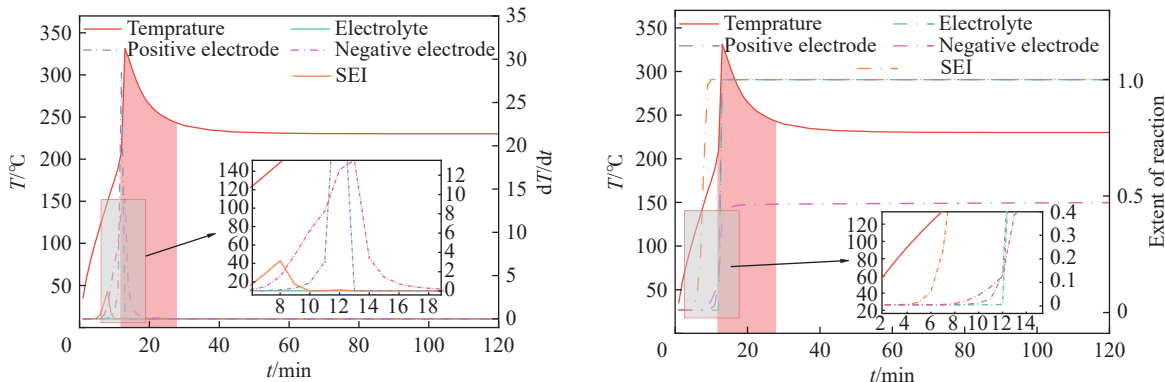
如图 8 所示,选取 150 °C、200 °C、230 °C 烤箱温度模拟电池在热传播蔓延时引发热失控的热滥用工况,在 150 °C 时,电池温度仅在 90 min 后出现小幅超过烤箱温度的现象,在 200 °C、230 °C 时均出现温度突然上升,大幅超过烤箱温度的情况,且在温度突增的情况下,均出现电压突然下降的情况,因此判断其温度超过 150 °C 时电池处于容易引发热失控的状态。



(a) 150 °C 烤箱温度下副反应程度与温升速率



(b) 200 °C 烤箱温度下副反应程度与温升速率



(c) 230 °C 烤箱温度下副反应程度与温升速率

图 8 电池副反应程度与生热速率

Fig. 8 The degree of side reactions and heat generation rate of batteries

具体来看,如图8(a)所示为烤箱温度150℃的电池副反应程度以及温升速率图,红色柱状表示超过烤箱温度的部分,设置仿真时间为120min,在150℃烤箱温度下,电池温度迅速上升到烤箱温度附近,在25min时,SEI膜反应程度达到1,表示SEI膜分解反应基本反应完全,但由于SEI膜温升速率较小,电池温度并没有触发连锁副反应。这说明SEI膜的分解是电池热失控开始的标志性事件,但其完全分解产热仍不足以引发热失控,因此,在换电站的电池早期预警中,只要能准确判断SEI膜的分解即可在电池完全热失控前实现电池早期预警。在20~30min,开始发生电池负极与电解液反应以及正极的分解反应,但由于其反应速度较慢,其温升速率也相对较小,电池的温升主要由正极反应造成的,这或许是造成热失控无法控制的主要原因,因此,继续提高烤箱温度进行实验。

设置烤箱温度为200℃,如图8(b)所示为烤箱温度200℃的电池副反应程度以及温升速率图,红色柱状表示超过烤箱温度的部分,电池在15min左右温度发生突变,在突变时间附近,正极和负极的出现温升速率的峰值,且反应程度在短时间内迅速提升,说明电池出现了热失控现象。与烤箱温度150℃相同的是,其SEI膜分解也是第一个出现,随后10min左右出现负极分解以及正极与电解液反应,温升速率分别为16℃/min,25℃/min,电极副反应使得温度在5min内上升至320℃,正极与电解液的反应还会产生大量的可燃气体,造成热失控无法返回,并蔓延至其他电池。

设置烤箱温度为230℃,图8(c)所示为烤箱温度230℃的电池副反应程度以及温升速率图,红色柱状表示超过烤箱温度的部分。在230℃烤箱温度下,电池温度峰值相比200℃烤箱温度峰值提前,热失控现象提前出现,副反应发生顺序与产热情况与200℃烤箱温度近似,同样为SEI膜分解放热反应最早发生,随后发生电极副反应反应释放大量的热造成热失控。

通过分析副反应发生顺序,SEI膜分解反应最先发生,表示在热失控未达到无法返回阶段时,SEI膜分解反应可以作为电池热失控早期预警的标志。电极参与反应是温度上升的主要来源。SEI膜的分解反应会影响电池内阻以及释放出相应的特征气体。

在SEI膜分解后,电池内阻变化可以检测并报告异常,同时特征气体检测可以形成双判断机制。阻止电池热失控进程还有温度传感器、特征声音检测、特征图像检测等技术,特征声音检测即为检测电池泄压阀打开的特征声音,特征图像检测可以检测电池隔膜熔融产生的特征白烟等。这些传感器相互协调检测可以有效检测电池热失控进程,在燃烧之前进行温度控制,达到早期预警的目的。

4 结论

本文提出一种外电路-热-电耦合模型,通过COMSOL-SIMULINK联合仿真对电池进行充放电以及热滥用测试可以得到如下结论:

1)所提出双向充电机模型能与电池热电模型相互耦合,通过调节移相比可控制电池的充放电状态以及电压电流大小,进而调节电池充放电,模型能有效反映在重卡换电站双向充电机激励下,电池热电耦合模型的温度分布与热失控影响。

2)V2G工况前期,正极极耳温度显著高于电芯温度,其温差达到了4.1℃,应在电池放电阶段的前半部分对电池极耳进行降温处理。在V2G工况后期,底部区域因浓度的影响变得有利于电化学反应,电芯温度高于极耳温度,应对电芯进行降温处理。

3)热滥用工况下,电池内部副反应是电池生热的主要来源,电池主要副反应发生顺序为SEI膜分解、负极分解、正极与电解液反应。其中,电极副反应生热是导致电池进入无法返回的热失控的主要原因,SEI膜的分解反应是电池开始热失控的标志。

参考文献:

- [1] 辛保安,单葆国,李琼慧,等.“双碳”目标下“能源三要素”再思考[J].中国电机工程学报,2022,42(9):3117-3125. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.212780.
- XIN B A, SHAN B G, LI Q H, et al. Rethinking on the "three elements of energy" toward carbon peak and carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3117-3125. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.212780.
- [2] ZHAO C Y, ANDERSEN P B, TRÆHOLT C, et al. Grid-connected battery energy storage system: a review on application and integration [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2023, 182: 113400. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113400.
- [3] 辛甜,高啸天,肖楷,等.使用工况对锂离子电池电化学性能的影响[J].南方能源建设,2024,11(2):139-145. DOI: 10.16516/

- j.ceec.2024.2.13.
- XIN T, GAO X T, XIAO K, et al. Influence of service conditions on electrochemical performance of lithium-ion batteries [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(2): 139-145. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.13.
- [4] 李军徽, 陈国航, 马腾, 等. 高风电渗透率下液流电池储能系统调峰优化控制策略 [J]. *发电技术*, 2024, 45(3): 434-447. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.23025.
- LI J H, CHEN G H, MA T, et al. Optimal control strategy of peak shaving of flow battery energy storage system under high wind power permeability [J]. *Power generation technology*, 2024, 45(3): 434-447. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.23025.
- [5] 张谦, 邓小松, 岳焕展, 等. 计及电池寿命损耗的电动汽车参与能量-调频市场协同优化策略 [J]. *电工技术学报*, 2022, 37(1): 72-81. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.211291.
- ZHANG Q, DENG X S, YUE H Z, et al. Coordinated optimization strategy of electric vehicle cluster participating in energy and frequency regulation markets considering battery lifetime degradation [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2022, 37(1): 72-81. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.211291.
- [6] LAI X, HUANG Y F, GU H H, et al. Remaining discharge energy estimation for lithium-ion batteries based on future load prediction considering temperature and ageing effects [J]. *Energy*, 2022, 238: 121754. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121754.
- [7] 肖曦, 田培根, 于璐, 等. 动力电池梯次利用储能系统电热安全研究现状及展望 [J]. *电气工程学报*, 2022, 17(1): 206-224. DOI: 10.11985/2022.01.027.
- XIAO X, TIAN P G, YU L, et al. Status and prospect of safety studies of cascade power battery energy storage system [J]. *Journal of electrical engineering*, 2022, 17(1): 206-224. DOI: 10.11985/2022.01.027.
- [8] 于仲安, 肖宏亮, 夏强威, 等. 基于 V2G 模式下电动汽车参与的微电网优化调度仿真研究 [J/OL]. *系统仿真学报*, 2014: 1-17. (2024-05-08) [2024-05-30]. DOI: 10.16182/j.issn1004731x.job.24-0183.
- YU Z A, XIAO H L, XIA Q W, et al. Simulation study on optimizing microgrid scheduling with electric vehicle participation under V2G mode [J/OL]. *Journal of system simulation*, 2024: 1-17. (2024-05-08) [2024-05-30]. DOI: 10.16182/j.issn1004731x.job.24-0183.
- [9] WANG J G, LU S, WANG Y Z, et al. Effect analysis on thermal behavior enhancement of lithium-ion battery pack with different cooling structures [J]. *Journal of energy storage*, 2020, 32: 101800. DOI: 10.1016/j.est.2020.101800.
- [10] LIU X F, LI Y C, KANG Y Z, et al. An accurate co-estimation of core temperature and state of charge for lithium-ion batteries with electrothermal model [J]. *IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics*, 2024, 12(1): 231-241. DOI: 10.1109/JESTPE.2023.3304754.
- [11] 赵建峰, 何锋, 罗卫东, 等. 基于电热耦合模型的动力电池荷电状态估计 [J]. *计算机仿真*, 2023, 40(10): 99-107. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9348.2023.10.019.
- ZHAO J F, HE F, LUO W D, et al. State of charge estimation of power batteries based on electrothermal coupling model [J]. *Computer simulation*, 2023, 40(10): 99-107. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9348.2023.10.019.
- [12] 孙丙香, 宋东林, 阮海军, 等. 基于自产热和外传热的锂离子电池热学模型参数辨识方法 [J]. *电工技术学报*, 2024, 39(1): 278-288. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.222104.
- SUN B X, SONG D L, RUAN H J, et al. Parameter identification method of thermal model of lithium-ion battery based on self-generated heat and external heat transfer [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2024, 39(1): 278-288. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.222104.
- [13] HE Y B, WANG B C, DENG H P, et al. Physics-reserved spatiotemporal modeling of battery thermal process: temperature prediction, parameter identification, and heat generation rate estimation [J]. *Journal of energy storage*, 2024, 75: 109604. DOI: 10.1016/j.est.2023.109604.
- [14] ZHOU J H, CHEN L Q, ZHANG S P, et al. Distributed thermal monitoring for large-format Li-ion battery under limited sensing [J]. *IEEE transactions on transportation electrification*, 2024, 10(2): 3206-3217. DOI: 10.1109/TTE.2023.3302153.
- [15] WEI P, LI H X. A spatio-temporal inference system for abnormality detection and localization of battery systems [J]. *IEEE transactions on industrial informatics*, 2023, 19(5): 6275-6283. DOI: 10.1109/TII.2022.3207749.
- [16] LIU J, YADAV S, SALMAN M, et al. Review of thermal coupled battery models and parameter identification for lithium-ion battery heat generation in EV battery thermal management system [J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2024, 218: 124748. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124748.
- [17] ZHU C J, XIE Y Y, YANG H D, et al. A nonlinear spatiotemporal modeling method combined with t-distributed stochastic neighbor embedding and broad learning system for the lithium-ion battery thermal process [J]. *Engineering applications of artificial intelligence*, 2024, 135: 108433. DOI: 10.1016/j.engappai.2024.108433.
- [18] LIU Z, LI H X. A spatiotemporal estimation method for temperature distribution in lithium-ion batteries [J]. *IEEE transactions on industrial informatics*, 2014, 10(4): 2300-2307. DOI: 10.1109/TII.2014.2341955.
- [19] YU Y B, HUANG T F, MIN H T, et al. Co-estimation of state of charge and internal temperature of pouch lithium battery based on multi-parameter time-varying electrothermal coupling model [J]. *Journal of energy storage*, 2023, 66: 107411. DOI: 10.1016/j.est.2023.107411.

- [20] JEON C H, LEE Y, KIM R, et al. Development of equivalent circuit model for thermal runaway in lithium-ion batteries [J]. *Journal of energy storage*, 2023, 74: 109318. DOI: [10.1016/j.est.2023.109318](https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109318).
- [21] WU Q C, HUANG R, YU X L. Measurement of thermophysical parameters and thermal modeling of 21, 700 cylindrical battery [J]. *Journal of energy storage*, 2023, 65: 107338. DOI: [10.1016/j.est.2023.107338](https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107338).
- [22] 孙潇, 蔡春荣, 罗志斌, 等. Highview Power 液化空气储能中试装置热力学分析 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(2): 112-124. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.2.11](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.2.11).
SUN X, CAI C R, LUO Z B, et al. Thermodynamic analysis of Highview Power's liquid air energy storage pilot plant [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(2): 112-124. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.2.11](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.2.11).
- [23] 牛朝露, 李泽浩, 司马文霞, 等. 用于储能电站热失控预警的热敏涂层材料研究 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(5): 106-115. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.05.014](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.05.014).
NIU C L, LI Z H, SIMA W X, et al. Research on thermosensitive coatings for thermal runaway warning in energy storage power station [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(5): 106-115. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.05.014](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.05.014).
- [24] 林浩, 张洪信, 赵清海. 锂离子电池三维电化学-热耦合模型及生热分析 [J]. *电源技术*, 2019, 43(10): 1630-1632, 1698. DOI: [10.3969/j.issn.1002-087X.2019.10.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-087X.2019.10.014).
LIN H, ZHANG H X, ZHAO Q H. Three dimensional electrochemical thermal coupling model and heat generation analysis of lithium-ion batteries [J]. *Chinese journal of power source*, 2019, 43(10): 1630-1632, 1698. DOI: [10.3969/j.issn.1002-087X.2019.10.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-087X.2019.10.014).
- [25] ZHANG X Q, LI P C, HUANG B X, et al. Numerical investigation on the thermal behavior of cylindrical lithium-ion batteries based on the electrochemical-thermal coupling model [J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2022, 199: 123449. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123449](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123449).
- [26] HUANG Y F, LAI X, REN D S, et al. Thermal and stoichiometry inhomogeneity investigation of large-format lithium-ion batteries via a three-dimensional electrochemical-thermal coupling model [J]. *Electrochimica acta*, 2023, 468: 143212. DOI: [10.1016/j.electacta.2023.143212](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.143212).
- [27] 孙建丹, 汪红辉, 储德韧, 等. 不同荷电状态三元锂离子电池热失控动力学研究 [J]. *电源技术*, 2023, 47(8): 1040-1045. DOI: [10.3969/j.issn.1002-087X.2023.08.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-087X.2023.08.016).
SUN J D, WANG H H, CHU D R, et al. Kinetic study of thermal runaway behaviors of lithium-ion batteries with different SOC's [J]. *Chinese journal of power source*, 2023, 47(8): 1040-1045. DOI: [10.3969/j.issn.1002-087X.2023.08.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-087X.2023.08.016).
- [28] HE C X, YUE Q L, WU M C, et al. A 3D electrochemical-thermal coupled model for electrochemical and thermal analysis of pouch-type lithium-ion batteries [J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2021, 181: 121855. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121855](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121855).
- [29] JIANG W J, ZHOU Q, LU F, et al. A thermal-electrochemical-mechanical coupled model based on non-equilibrium thermodynamics of Li-ion batteries [J]. *Journal of energy storage*, 2022, 55: 105655. DOI: [10.1016/j.est.2022.105655](https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105655).

作者简介:



彭夏冷

彭夏冷(第一作者)

2000-, 男, 硕士, 主要从事源网荷储互动控制与电池储能研究(e-mail) 1936924137@qq.com。



韩松

韩松(通信作者)

1978-, 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事交直流电力系统分析、新型电力电子设备以及配网规划(e-mail) shan@gzu.edu.cn。

刘勋川

1976-, 男, 工程师, 主要从事热能与动力工程研究(e-mail) 1158884148@qq.com。

贺国刚

1975-, 男, 工程师, 主要从事重卡动力与换电研究(e-mail) 15242819@qq.com。

项目简介:

本项目拟解决电池热状态分析及快速识别问题、热失控电池抽取抛掷设备的快速性、可靠性和安全性问题。

项目名称 “电动重卡换电站换电抛掷式应急消防反应系统研发”
黔科合支撑 [2023] 一般 329

承担单位 贵州金元智慧能源有限公司

项目概述 本项目拟研发换电站抛掷式应急消防反应系统, 初步形成一个面向电动重卡换电站的安全化、可靠化和智能化的换电站抛掷式应急消防反应系统。

主要创新点 一个面向新能源汽车换电站的安全化、可靠化和智能化的换电站抛掷式应急消防反应系统, 提升换电站的安全管理水平, 助推换电站换电安全、充电安全、调度安全和安全管理工作的转型升级, 助力新能源汽车行业安全快速发展。

(编辑 叶筠英)