



基于三维电化学-热耦合的磷酸铁锂电池热响应特性研究

李明¹, 陈文博^{2,3}, 方永哲¹, 王杨¹, 马步云¹, 史学伟¹, 李邦毓², 牛欣旺², 汪奂伶²,
高飞³, 石奇^{3*}, 叶锋²

(¹国网冀北张家口风光储输新能源有限公司, 河北省 张家口 075000; ²华北电力大学, 北京市 昌平区 102206; ³中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192)

摘要: 针对储能系统运行过程中磷酸铁锂电池温升及温度分布不均问题, 构建三维电化学-热耦合模型。在此基础上, 研究不同充放电倍率及SOC运行区间下电池的产热行为、温度场分布及热响应特性。结果表明, 模型计算结果与实验数据吻合良好, 电压和温度平均绝对误差分别为1.32%和5.88%。随着倍率由0.5 C提高至2 C, 电池最高温度由27.81℃升高至38.17℃, 最大温差由2.31℃增至11.79℃, 温度场非均匀性显著增强。电池产热以不可逆热为主, 且其占比随倍率增加持续提高, 2 C放电结束时达到96.5%, 表明不可逆热是驱动温升的主要因素。三维温度场分析表明, 电池最高温度逐渐由极耳区域向几何中心迁移, 并在中心区域形成持续高温区。进一步研究发现, 0.1~0.9 SOC运行区间能够有效避开充放电末期高产热区域, 峰值温度较满充满放工况降低1.30℃, 累计产热量分别较0~0.8 SOC和0.2~1 SOC工况降低4.8%和6.4%。研究结果表明, 合理优化SOC运行窗口可有效抑制电池产热和温升, 为储能电池热管理策略制定及运行工况优化提供理论依据。

关键词: 磷酸铁锂电池; 三维电化学-热耦合; 倍率; 热响应特性; SOC区间

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0502

中图分类号: TM 911;

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-11

Thermal Response Characteristics of LiFePO₄ Batteries Based on a Three-Dimensional Electrochemical-Thermal Coupled Model

LI Ming¹, CHEN Wenbo^{2,3}, FANG Yongzhe¹, WANG Yang¹, MA Buyun¹, SHI Xuewei¹, LI
Bangyu², NIU Xinwang², WANG Huanling², GAO Fei³, SHI Qi^{3*}, YE Feng²

(¹State Grid Jibei Zhangjiakou Wind, Solar, Storage and Transmission New Energy Co., Ltd., Zhangjiakou
075000, Hebei Province; ²North China Electric Power University, Beijing 102206, Beijing; ³China Electric
Power Research Institute, Beijing 100192, Beijing, China)

Abstract: To address the issues of temperature rise and non-uniform temperature distribution in LiFePO₄ batteries during energy storage operation, a three-dimensional electrochemical-thermal coupled model was developed. The model was applied to investigate the heat generation behavior, temperature field distribution, and thermal response characteristics of the battery under different charge/discharge rates and SOC operating windows. The results show

收稿日期: 2026-06-13; 修改稿日期: 2026-07-15。

基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目 (520101250036-367-ZN)。

第一作者: 李明 (1988—), 男, 高级工程师, 研究方向为新能源与储能技术, 14793419038@163.com通信作者: 石奇, 男, 博士, 工程师, 研究方向为电池储能, shiqi@epri.sgcc.com.cn。

引用本文: 李明, 陈文博, 方永哲, 等. 基于三维电化学-热耦合的磷酸铁锂电池热响应特性研究[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-11.

Citation: LI Ming, CHEN Wenbo, FANG Yongzhe, et al. Thermal Response Characteristics of LiFePO₄ Batteries Based on a Three-Dimensional Electrochemical-Thermal Coupled Model[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-11.

that the simulation agrees well with experimental measurements, with average absolute errors of 1.32% for voltage and 5.88% for temperature. As the charge/discharge rate increased from 0.5 C to 2 C, the maximum temperature increased from 27.81°C to 38.17°C, while the maximum temperature difference increased from 2.31°C to 11.79°C, indicating a significant deterioration in temperature uniformity. Irreversible heat dominated the total heat generation and its proportion continuously increased with C-rate, reaching 96.5% at the end of 2 C discharge. Three-dimensional temperature field analysis revealed that the hottest region gradually migrated from the tab area to the geometric center, where a persistent high-temperature zone was formed. Furthermore, the 0.1~0.9 SOC operating window effectively avoided the high heat-generation regions at the end of charge and discharge processes, reducing the peak temperature by 1.30°C and decreasing the cumulative heat generation by 4.8% and 6.4% compared with the 0~0.8 SOC and 0.2~1 SOC windows, respectively. The results demonstrate that optimizing the SOC operating window can effectively suppress heat generation and temperature rise, providing theoretical guidance for thermal management and operational optimization of energy storage batteries.

Keywords: LiFePO₄ battery; three-dimensional electrochemical-thermal coupled; C-rate; thermal response characteristics; SOC window

在全球能源格局变革与我国“双碳”目标的持续推动下,随着新能源迅速发展,储能是有效解决其间歇性、波动性的重要手段之一。锂离子电池(Lithium-ion battery, LIB)储能是目前主要储能技术之一,对提升新能源消纳、保障能源安全与实现可持续发展具有重要意义^[1-2]。目前,我国新型储能累计装机规模已达 78.3 GW,锂离子电池储能装机规模已达 76.03 GW,占储能累计装机规模 97.1%^[3]。其中,循环寿命长、安全性能高的磷酸铁锂电池^[4-5]在充放电过程中,电池内部电化学反应加速电池产热,从而引起电池温度急剧上升且空间分布不均,可能引起电池爆炸的风险。同时,电池分布不均的温度场又影响离子传输动力学与化学反应活性,进而引发析锂、固体电解质界面膜增厚及活性物质结构退化等副反应发生,直接导致电池容量衰减甚至热失控^[6-8]。而传统实验测试只能获取电池电压、电流、表面温度等参数,无法监测电池电化学反应与产热特性,难以对电池内部瞬态、空间信息实时采集。

随着数值仿真技术的不断发展,基于有限元的多物理场仿真可有效弥补实验的不足^[9-11]。完善浓溶液理论的伪二维(Pseudo-Two-Dimensional, P2D)模型,已成为电池电化学仿真的主要方法之一^[12-13]。在电池热行为研究方面,目前工作主要集

中在 P2D 模型与三维集总热模型的耦合。高^[14]和凌^[15]等通过建立耦合模型实现电池在不同放电倍率下温度的快速估计。周等^[16]构建了基于数字孪生的热电耦合模型,提高了锂电池运行状态仿真的效率和精度。Ghalkhani 等^[17]通过耦合模型研究电池内部整体热量及分布情况,指出电流和内阻影响热量分布。研究结果发现,通过简化温度处理,难以获得电池平面方向的温度非均匀特征信息。此外,电池极耳位置、电阻等因素加剧电池空间温度非均匀分布,亟需开发三维模型,精准解析电池内部温度的空间非均匀性。

在三维电化学模型研究中,Wang 等^[18]通过改进极化热的计算方法,研究不同倍率下电池极化特性与产热关系。Zou 等^[19]研究磷酸铁锂方壳电池散热片结构对电池温度分布的影响,得出增加一定散热片厚度可降低最高温度和最大温差的结论。韦等^[20]建立了锂离子电池组三维电热模型,发现了电池组中间区域更容易出现温度聚集现象。Yang^[21]和 Li^[22]等研究发现,在高倍率和低温条件下三维模型能更准确的预测电池温度变化,表明电池的电流密度分布与总产热率分布紧密相关。韩^[23]和张^[24]等针对圆柱型电池通过三维模型准确预测了不同倍率条件下电池表面温度的变化,获得电池内部电流密度和极化电压等电化学特征。王等^[25]模

拟结果发现放电倍率和电池温度成正比，指出单向吸风的散热方式效果优于单向吹风散热。尽管三维模型在描述电池空间非均匀性方面具有一定优势，但三维模型主要集中在单一充电或者放电过程，缺乏完整循环研究，无法获取残余热量与温度梯度。此外电池在特定 SOC 窗口运行，产热行为与整个 SOC 区间的充/放电循环存在差异。

本文基于 COMSOL 多物理场仿真平台，建立了磷酸铁锂电池的三维电化学-热耦合模型，以 Newman 多孔电极理论为框架，在三维几何域内耦合求解，实现电化学反应与传热过程的协同计算，结合实验精准解析电池三维空间内的温度场演化及层间的温度非均匀性，与其他研究成果对比如表 1 所示。基于三维电化学-热耦合模型对不同倍率与不同 SOC 区间电池产热行为及温度分布情况进行仿真和实验研究，分析电池不同倍率下热响应特性与内部三维热梯度分布规律，为电池热管理系统优化设计及电池管理策略制定提供理论依据。

1 电化学热耦合模型

1.1 电池结构与参数

本研究以商用 24 Ah 的磷酸铁锂软包电池为实验对象，充放电截止电压分别为 3.65 V 和 2.5 V，标称电压为 3.2 V，在 1 C 测试条件下电池的充电比容量为 168.7 mAh/g，放电比容量为 169.5 mAh/g。电池尺寸为 11 mm×80 mm×200 mm，正负极耳位于电池顶部，负极极耳位于电池底部。电池实物及实验测试装置如图 1(a)所示，选取电池表面几何中心点作为测温点。通过恒温箱控制环境温度为 25℃，并在此环境下完成电池不同倍率下的恒流充/放电测试，为避免测试过程中残余热量对实验结果产生影响，每次循环结束之后静置

30 分钟，保证电池表面温度恢复至环境温度。磷酸铁锂电池基本参数如表 2 所示。

表 2 中电池平衡电压与活性电极颗粒表面的温度和锂离子浓度相关，如公式(1)所示。

$$Eeq_i = Eeq_{ref,i} + \frac{\Delta S_i}{F}(T - T_{ref}) = Eeq_{ref,i} + \frac{dEeq_i}{dT}(T - T_{ref}) \quad (1)$$

其中 $Eeq_{ref,i}$ 表示参考温度下的标准电极电势， ΔS_i 表示化学反应的摩尔熵变，与电池的可逆产热直接相关。

电池的扩散系数、反应速率常数等动力学参数表现出明显的温度依赖性，引入阿伦尼乌斯方程对其进行修正，公式如(2)所示。其中 K_0 为参考温度 T_{ref} 下的初始值， $E_{aD,i}$ 表示活化能(J/mol)。

$$K = K_0 \times \exp\left[\frac{E_{aD,i}}{R}\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (2)$$

1.2 三维模型构建

三维几何模型示意图如图 1(c)所示，模型 x-y 平面表示电池表面，z 轴方向代表电池厚度方向，为了方便物理场设置，模型为沿 z 轴放大 50 倍之后的效果。电池模型采用叠片式设计，由 40 个重复的电池单元组成，每个电池单元包括带正极耳的正极集流体、正极、隔膜、负极、带负极耳的负极集流体。模型电学边界条件方面，正极极耳施加恒流输入边界，负极极耳设置为接地边界，其余外边界均设置为电绝缘边界。热边界条件方面，电池外表面与环境之间采用对流换热边界。初始条件方面，电池初始温度与环境温度保持一致，均为 25℃，电池初始荷电状态设置为满放状态。

电极反应动力学通过 Butler-Volmer 方程控制，该方程(3)建立了局部电流密度与过电位之间的联系。

表 1 本研究与近年来相关研究成果对比

Table 1 Comparison between this study and recent related studies.

相关研究成果	参考文献
模型考虑极化，改进了极化热计算方法，指出高倍率和低温会加剧极化，不可逆热占比超过 92%。	[18]
模型反映电芯产热率和温度分布的时空变化，并揭示电池组中间电池温度高于两侧电池。	[20]
分析了不同放电倍率下电流密度、产热率和温度分布特征，研究了电池厚度和换热系数对温度非均匀性的影响。	[21]
分析了不同放电倍率下电流密度、极化电压、焦耳热、反应热和内部温度分布。	[23]
分析了放电倍率、散热风速、排列方式对电池散热性能的影响，并对不同散热方式进行了比较。	[25]
建立三维电化学-热耦合模型，研究了不同倍率完整充放电过程和 SOC 运行区间下的产热行为、三维温度场分布及热响应特性。优势在于全面研究了完整充/放电循环、SOC 运行窗口优化、不可逆热占比变化和三维热点迁移规律。	本研究

表2 磷酸铁锂软包电池基本参数

Table 2 Basic parameters of the LFP pouch cell

参数	负极集流体	负极	隔膜	正极	正极集流体
颗粒半径(μm)	/	3.65	/	1.15	/
电极厚度(μm)	10	97	20	114	10
固相体积分数	/	0.582	/	0.633	/
液相体积分数	/	0.344	0.40	0.32	/
电极电导率(S/m)	5.998×10^7	100	—	0.5	3.774×10^7
平衡电压	公式(1)				
最大锂浓度(mol/m^3)	/	31507	/	21190	/
初始液相浓度(mol/m^3)	/		1000		/
布鲁格曼系数	/	1.5	2	1.5	/
初始速率常数($\text{m}^{2.5}/(\text{mol}^{0.5} \cdot \text{S})$)	/	3×10^{-11}	/	1.2×10^{-12}	/
初始固相扩散系数(m^2/S)	/	1.46×10^{-13}	/	3.2×10^{-13}	/
导热系数($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)	400	1.04	0.334	1.48	160
密度(kg/m^3)	8900	2660	492	1500	2700
定压热容($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)	385	1437	1978	1260	903

$$j_{\text{loc}}(x, y, z, t) = j_0(x, y, z, t) \left[\frac{\exp\left(\frac{\alpha_a F \eta_{s,k}(x, y, z, t)}{RT}\right)}{\exp\left(-\frac{\alpha_c F \eta_{s,k}(x, y, z, t)}{RT}\right)} \right] \quad (3)$$

其中 $j_0(x, y, z, t)$ 表示初始交换电流密度, 该值计算公式如(4)所示, α_a 、 α_c 分别表示正极和负极的电荷转移系数, η 表示过电位。

$$j_0(x, y, z, t) = F k_{0,k} (c_{s,k,\text{max}} - c_{s,k,\text{surf}})^{\alpha_a} c_{s,k,\text{surf}}^{\alpha_c} c_{i,k}^{\alpha_c}(x, t) \quad (4)$$

公式(4)中 k_0 是反应速率常数, C_{max} 是电极中最大锂浓度, C_{surf} 是颗粒表面锂浓度。

电荷守恒是电池最基础的定律之一, 在固相和液相中电荷守恒方程分别如公式(5)和(6)所示。其中固相中的电荷守恒遵循欧姆定律, 液相中的电荷守恒同时遵循欧姆定律和离子浓溶液理论。 σ_1^{eff} 是电池的有效电导率, A_v 表示活性比表面积, φ_1 表示固相电势。在液相电荷守恒方程中, $f_{\pm}$ 是平均摩尔活度系数, $t_{\pm}$ 是锂离子的转移数, φ_2 表示液相电势。

$$\nabla(\sigma_1^{\text{eff}} \nabla \varphi_1) = -A_v j_{\text{loc}}; \sigma_1^{\text{eff}} = \sigma_1 \varepsilon_1^{V_1}; A_v = \frac{3\varepsilon_1}{r_p} \quad (5)$$

$$\nabla \left[-\sigma_2^{\text{eff}} \nabla \varphi_2 + \frac{2RT\sigma_2^{\text{eff}}}{F} \left(1 + \frac{\partial \ln f_{\pm}}{\partial \ln c_2} \right) (1 - t_{\pm}) \nabla (\ln c_2) \right] = A_v j_{\text{loc}}; \sigma_2^{\text{eff}} = \sigma_2 \varepsilon_2^{V_2} \quad (6)$$

活性材料和电解液中锂离子的质量守恒分别为公式(7)和(8), 公式(7)表明活性物质中锂离子质量守恒满足菲克定律, 其中 D_1 是锂离子在活性材

料中的扩散系数。公式(8)表明电解液中锂离子质量守恒定律在遵循菲克定律的同时满足电迁移效应, 其中 ε_2 表示电解液孔隙率, D_2 表示锂离子在电解液中的扩散系数。

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(-r^2 D_1 \frac{\partial c_1}{\partial r} \right) = 0 \quad (7)$$

$$\varepsilon_2 \frac{\partial c_2}{\partial t} + \nabla(-D_2^{\text{eff}} \nabla c_2) = \frac{A_v j_{\text{loc}}}{F} (1 - t_{\pm}); D_2^{\text{eff}} = D_2 \varepsilon_2^{V_2} \quad (8)$$

锂离子电池在充放电过程中能量守恒方程如式(9)所示, 产生的热量由三部分构成, 分别是可逆反应热(Q_{rea})、极化热(Q_{act})和焦耳热(Q_{ohm}), 对应的计算公式分别如(10)、(11)、(12)所示, 极化热和焦耳热统称为不可逆热。

$$\rho_b c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k_b \nabla T) + Q_{\text{rea}} + Q_{\text{act}} + Q_{\text{ohm}} \quad (9)$$

$$Q_{\text{rea}} = A_v j_{\text{loc}} T \frac{\partial U}{\partial T} = A_v j_{\text{loc}} T \frac{\Delta S}{F} \quad (10)$$

$$Q_{\text{act}} = A_v j_{\text{loc}} \eta \quad (11)$$

$$Q_{\text{ohm}} = \sigma_1^{\text{eff}} \nabla \varphi_1 \nabla \varphi_1 + \left[\sigma_2^{\text{eff}} \nabla \varphi_2 - \frac{2RT\sigma_2^{\text{eff}}}{F} \left(1 + \frac{\partial \ln f_{\pm}}{\partial \ln c_2} \right) (1 - t_{\pm}) \nabla (\ln c_2) \right] \nabla \varphi_2 \quad (12)$$

电池散热方程如公式(13)所示, 其中, k 表示电池总传热系数, h 表示等效对流换热系数, 同时考虑对流换热和辐射换热的影响。

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{battery surface}} = h(T - T_{\text{amb}}) \quad (13)$$

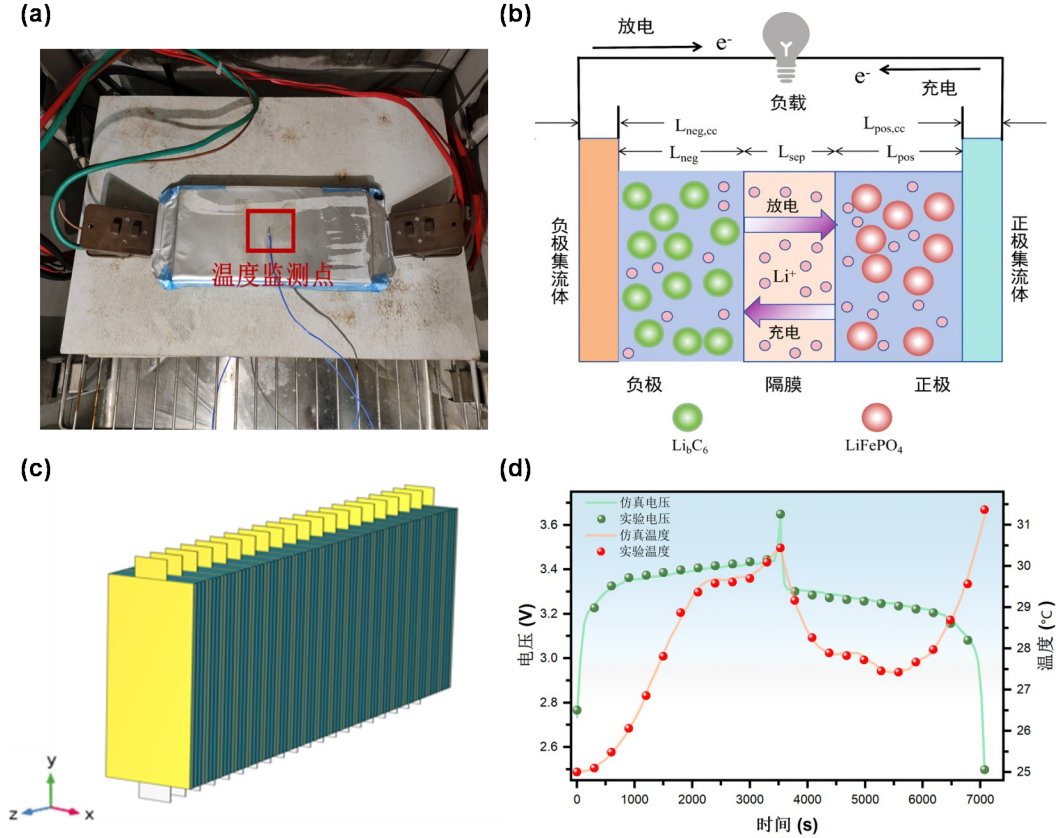


图1 (a)电池实验测试图;(b)电池机理图;(c)仿真模型图;(d)1C电压温度曲线验证

Fig. 1 (a) Battery experiment test diagram;(b) Schematic diagram of battery mechanism;(c) Simulation model diagram;(d) Validation of voltage and temperature curves at 1C rate

2 结果讨论与分析

为验证所建立的三维电化学热耦合模型的可靠性,通过图1(d)对1C下电压温度的仿真与实验数据进行对比,发现仿真数据与实验测量值吻合良好,电压平均绝对误差为1.32%,仿真电压呈现出明显的平台特征,可准确反映电池的电压特性。实验选取电池表面几何中心为温度测点,同时提取仿真模型对应表面中心的温度数据进行对比,温度平均绝对误差为5.88%。通过对放电结束阶段的温度峰值进行对比,仿真温度为31.20℃,实验温度为31.36℃,误差仅有0.16℃,结果证明所建立的三维模型可准确预测电池产热和散热的动态行为。电压误差主要源于模型对极化内阻的理想化假设,而温度误差主要来自电池模型和边界条件的简化处理。整体而言,电压和温度误差均在合理范围内,满足仿真精度要求,可为后续不同工况下电池电化学特性与传热行为提供基础支撑。

图2(a)展示了在0.5C、1C和2C下电池温度梯度随时间的响应曲线。从图2(a)可以看出,2C倍率下电池温度梯度变化最为剧烈,最高可以达到0.0135℃/s,0.5C倍率下温度梯度平缓且整体温升极低,温度梯度最高只能达到0.0044℃/s,温度梯度变化呈现出明显的倍率依赖性。在充电结束转入放电阶段初期,温度梯度呈现负值,表明放电初期电池表面温度出现下降。随着放电过程进行,温度梯度重新转为正值并在放电末期达到最大值,此时电池温度达到整个充/放电过程的峰值。图2(b)为不同倍率下电池产热密度随SOC变化情况,在充/放电过程中电池产热密度始终为正,产热密度随充/放电倍率增大而增加。在充电结束至放电初期,电池产热密度出现明显回落,与图2(a)中温度梯度负值现象互相印证,即放电初期产热密度骤降,而电池内部积累的热量仍持续向外界环境散热,导致产热速率低于散热速率,使得电池短时间内散热为主导。

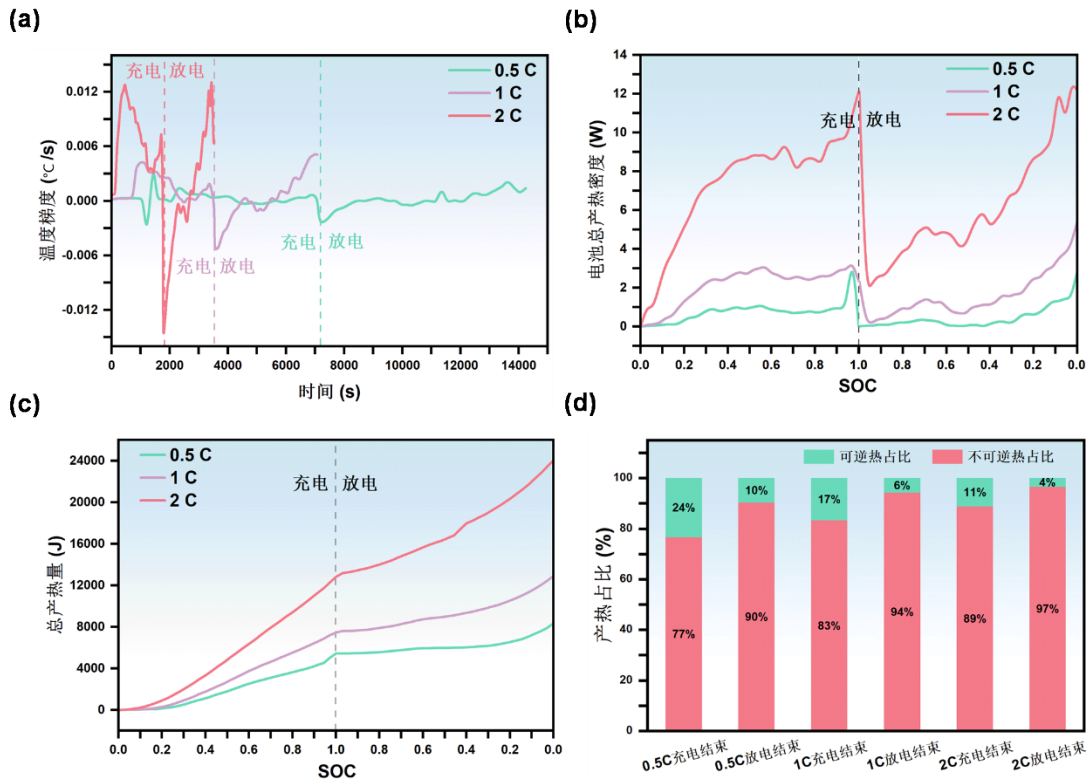


图2 0.5 C、1 C和2 C倍率下:(a)温度梯度曲线;(b)总产热密度随SOC变化曲线;(c)总产热随SOC变化曲线;(d)充电结束和放电结束产热占比

Fig. 2 At 0.5 C, 1 C, and 2 C rates:(a)Temperature gradient profiles;(b)Total heat generation density versus SOC;(c)Total heat generation versus SOC;(d)Heat generation proportion at end-of-charge and end-of-discharge

图2(c)显示了不同倍率下电池累积产热量,其中0.5 C倍率下电池总产热量仅为8326 J,1 C倍率下总产热量升至12917 J,2 C倍率下总产热量达到24033 J,约为0.5 C倍率产热量的4倍,说明大倍率充/放电会大幅加剧产热,进而提高电池温度,加剧热失控风险。图2(d)展示了电池在充电、放电结束时刻的可逆热与不可逆热占比。结果表明,电池充/放电过程的产热以不可逆热为主,其占比远高于可逆热,且放电结束时刻不可逆热占比高于充电结束时刻。同时,不可逆热占比随倍率升高持续上升,2 C倍率放电结束时不可逆热占比高达96.5%,高于1 C的94.2%和0.5 C的90.3%。这是因为不可逆热主要源于焦耳热和极化热,大电流充/放电会加剧锂离子脱嵌阻力,使得极化损耗和焦耳热大幅增加,而源于电化学反应熵变的可逆热,其数值小且对电流变化不敏感。研究得出随着倍率增大,电池不可逆热成为电池温升的主导因素。

图3显示了电池三维温度场特性。图3(a)为三

种充/放电倍率下电池内部最大温差随SOC的变化曲线。从图3(a)可以看出,倍率与温度分布均匀性呈负相关。0.5 C、1 C和2 C工况下的最大温差分别为2.31°C、5.12°C和11.79°C,2 C工况温差约为0.5 C的5.1倍,表明高倍率显著加剧电池内部温度不均匀性。温差极值均出现在充/放电结束时刻,对应产热累积峰值,此时电池内部产热与散热的矛盾最为突出。图3(b)展示了六个特征时刻的三维温度场分布。从可视化结果看出,随着倍率升高,电池整体温度逐步升高,放电末期0.5 C、1 C和2 C最高温度分别达到27.81°C、31.20°C和38.17°C。充/放电结束时温度峰值出现在电池中心区域,而非极耳连接处。这是由于双侧极耳结构电池的极耳区域基于金属集流体的高导热性形成高效的散热通道,将热量快速传导,而电池中部区域距两侧散热边界最远,热阻最大。

为研究2 C高倍率条件下电池内部热不均匀性的形成机制,基于叠片式电池结构,选取沿厚度方向的20个正极-隔膜界面(x-y平面)进行分析,

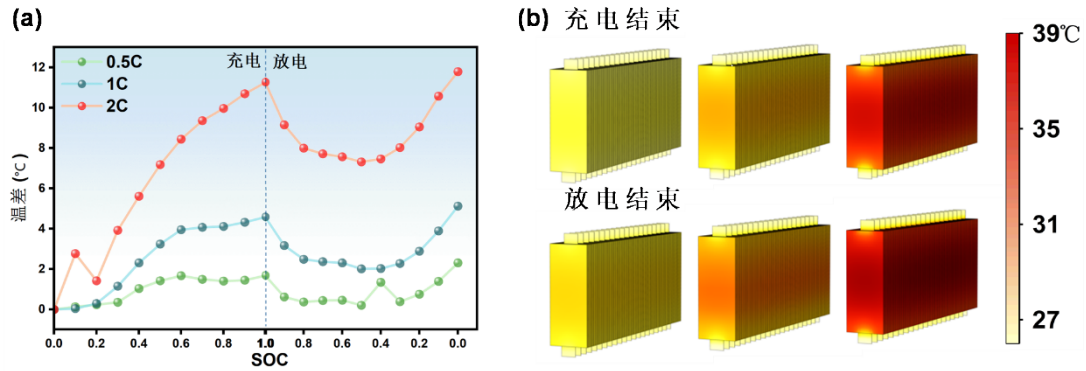


图3 电池0.5 C、1 C和2 C倍率下: (a)模型最大温差; (b)充电结束和放电结束模型温度分布

Fig. 3 At 0.5 C, 1 C, and 2 C rates: (a) Maximum temperature difference of the model; (b) Model temperature distribution at end-of-charge and end-of-discharge

并将其由表面至中心区域依次编号为1-20。截面1、10和20在充电初期、充电末期、放电末期的温度分布结果如图4(a)所示。充电初期温度较低,通过计算标准差来体现温度分布均匀性,截面1、10和20的标准差分别为0.203、0.203和0.205,说明温度分布均匀,此时温度最大值靠近正极耳侧。充电初期正极耳附近局部电流集中,欧姆热和极化热更明显,导致正极耳侧温度较高。但负极耳侧温度较低,一方面负极侧电子传导能力较好,产热相对较低,另一方面,负极耳与正极耳位于电池两侧,初期热量尚未充分扩散至负极耳区域,导致负极耳附近温度相对较低。在放电末期,温度最大值逐渐转移至截面中心位置,此时标准差分别为1.139、1.159和1.178,说明截面内部温度存在明显梯度。为了对比不同截面之间的温度差异,统计了20个截面放电结束时刻的温度最大值,结果如图4(b)所示,温度最大值沿电池厚度方向单调递增,截面1为38.20°C,截面20达38.60°C,中心较表面高0.40°C。由于中心截面距离外部散热边界更远,等效热阻更大,高倍率放电末期产生的不可逆热更容易在中心区域累积,使中心截面温度峰值升高。

图4(c)呈现了截面1、10和20最大温差随时间变化的趋势。在前1000秒内不同截面温差基本重合;在充电后期和放电后期,截面温差差异明显,尤其是放电结束时,截面1、10和20的最大温差分别为5.57°C、5.92°C和6.24°C,中心截面20散热条件较差,随着不可逆热积累温差更大,温度分布不均匀性加剧。图4(a)显示了温度最大值

出现从极耳向中心转移,图4(d)进一步明确了截面20温度峰值在y轴方向的不同区间时间占比。研究结果表明,0.09~0.10 m区间时间占比超过一半,达52.8%,而0.01~0.08 m区间占比较低,在70%的区域内,时间占比仅达到17.0%,表明温度最大值快速从极耳区域迁移至几何中心,由于几何中心区域远离散热边界,热量更难释放。因此,温度峰值更容易稳定在中心区域。通过对电池内部温度系统分析,截面内部和厚度方向温度都存在差异,因此电池温度监测需由表面向内部扩展,电池中心区域温度更集中。

图5(a)展示了电池在1 C恒流放电过程中累积产热量与电压随放电时间变化关系。从图5(a)可以看出,电池产热量随放电时间呈非线性增长,斜率逐渐增大。这一现象与电池放电电压特性密切相关,放电初期电压平台较高,极化内阻较小,不可逆产热处于较低水平。随着放电进行,锂离子在负极中的固相扩散阻力增大,浓差极化加剧,内阻显著上升,导致产热速率加快。为进一步解析这一非线性特征,图5(b)将放电过程按放电深度(depth of discharge, DOD)划分为10个等间隔区间,统计各区间的产热占比。从图5(b)可以看出,产热分布高度集中于放电末期,0~0.1 DOD区间产热占比仅1.7%,而0.9~1 DOD区间占比高达26.1%,在相同放电时间内的平均产热功率约为0~0.1 DOD的15倍,且产热量随放电深度增加而上升。

图6(a)展示了1 C工况下0~0.8、0.1~0.9及0.2~1 SOC下温度随时间的变化情况。图6(a)表明

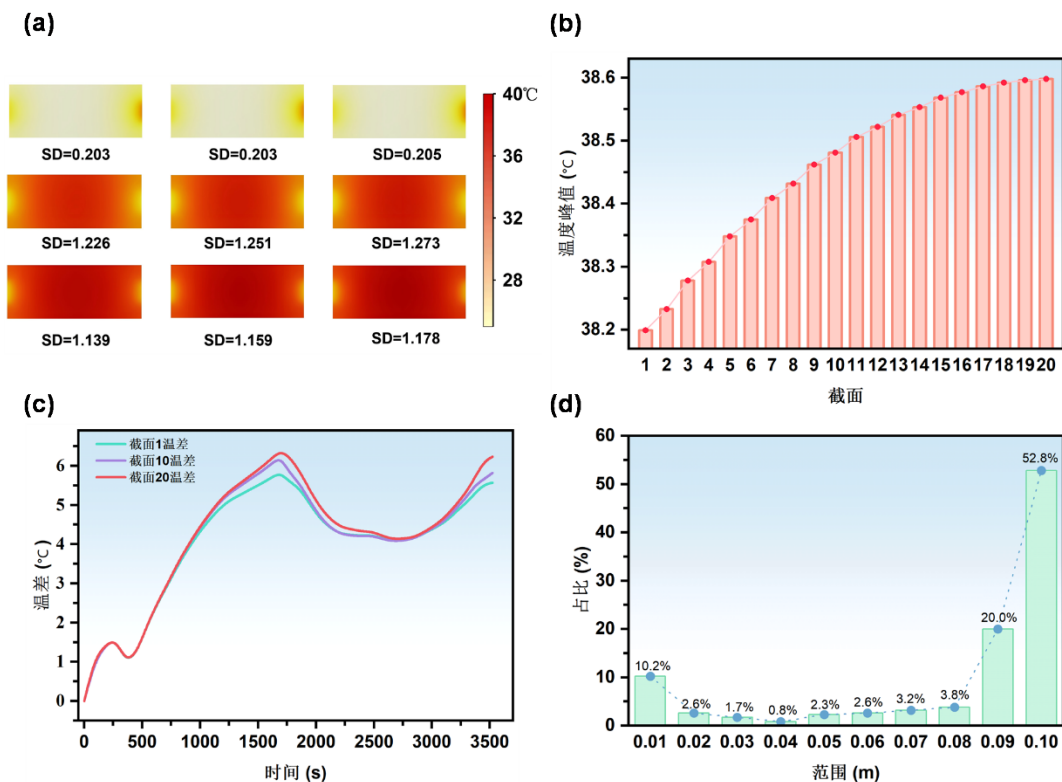


图4 2 C倍率下: (a)1、10、20截面不同时间温度分布; (b)20个截面放电结束面内温度峰值; (c)1、10、20截面面内最大温差; (d)温度峰值在y轴不同范围时间占比

Fig. 4 At 2 C rate: (a) Temperature distribution at cross-sections 1, 10, and 20 at various times; (b) Peak in-plane temperature at end-of-discharge for 20 cross-sections; (c) Maximum in-plane temperature difference at cross-sections 1, 10, and 20; (d) Proportion of time that peak temperature resides within different y-axis ranges

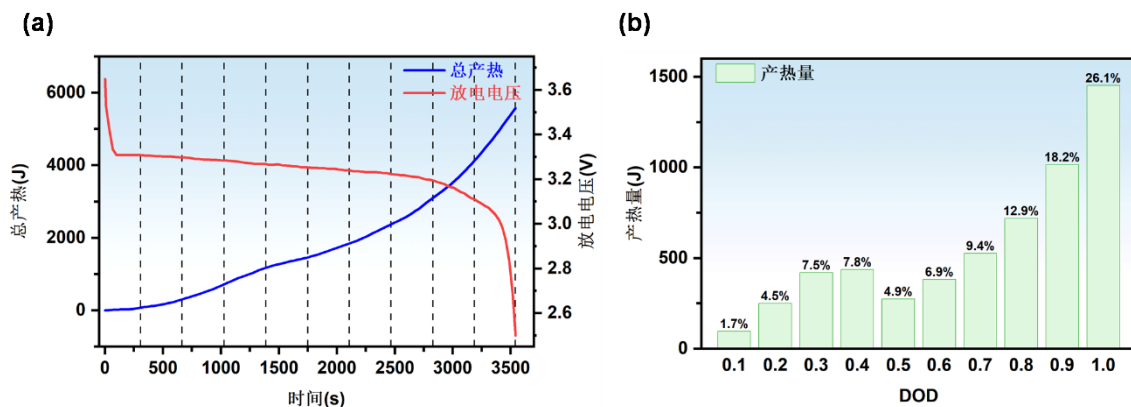


图5 (a)电池1 C放电电压和产热量随时间变化曲线; (b)不同放电深度产热量

Fig. 5 (a) Voltage and heat generation versus time during 1 C discharge; (b) Heat generation at different DOD

各区间峰值温度均低于1C满充满放工况 (31.20°C): $0\sim 0.8\text{SOC}$ 为 30.92°C , $0.2\sim 1\text{SOC}$ 为 30.51°C , 而 $0.1\sim 0.9\text{SOC}$ 为 29.90°C , 较满充满放工况降低 1.30°C , $0.1\sim 0.9\text{SOC}$ 同时避开了充电末期和放电末期两个高风险区, 电池温度最低。从图6(b)可以看出, $0.1\sim 0.9\text{SOC}$ 下电池的产热密

度曲线平缓, 没有 $0\sim 0.8\text{SOC}$ 放电末期和 $0.2\sim 1\text{SOC}$ 充电末期的产热密度峰值, 证实了通过规避高产热区间, 可有效降低电池温度。

图6(c)定量显示了电池累积产热量, $0.1\sim 0.9\text{SOC}$ 区间累积热量为 9746 J , $0\sim 0.8\text{SOC}$ 区间为 10238 J 和 $0.2\sim 1\text{SOC}$ 区间为 10412 J 。 $0.1\sim 0.9$

SOC 区间较 0~0.8 SOC 和 0.2~1 SOC 区间分别降低 4.8% 和 6.4%。进一步体现出通过对 SOC 区间调控, 明显抑制了电池的产热。图 6(d) 展示了不同 SOC 区间电池充/放电结束时刻的可逆热与不可逆热占比。从图 6(d) 可以看出, 各区间放电末期不可逆热占比均高于充电末期, 这与图 2(d) 结果一致, 表明电池放电极化大于充电极化。在 0.1~0.9 SOC 放电结束时不可逆热占比为 89%, 低于 0~0.8 SOC(92%) 和 0.2~1 SOC(93%)。通过对 0.1~0.9 SOC 区间工况调控, 明显降低了不可逆热占比, 有效抑制电池升温。调控 SOC 区间可有效避开充/放电末期, 通过降低不可逆热占比, 实现对电池温度有效调控。0.1~0.9 SOC 运行窗口虽然能够降低峰值温度和累计产热量, 但可用 SOC 范围由 100% 降至 80%, 为满足储能系统出力需求, 需进一步结合容量配置通过增配电池来弥补容量损失。

3 结 论

通过对磷酸铁锂电池三维电化学-热模型仿真和实验研究, 探究了电池在不同倍率与不同 SOC 区间的热响应特性, 对电池温升、温度分布及产热机制进行了系统分析, 主要结论如下:

(1) 电池产热和温度随着倍率升高而增加, 温度分布越来越不均匀。2 C 最高温度相比 0.5 C 高了 10.37℃, 最大温差从 2.31℃ 增加到 11.79℃。发现电池产热以不可逆热为主, 且不可逆热占比随倍率升高而增大, 2 C 放电结束时不可逆热占比高达 96.5%。

(2) 温度场分析表明, 电池中心区域热阻最大, 温度最高。2 C 下电池中心温度比表面高 0.40℃。在充/放电过程中电池最高温度从极耳位置快速迁移至几何中心, 在中心区域占比超过 50%, 形成持续的高温中心。

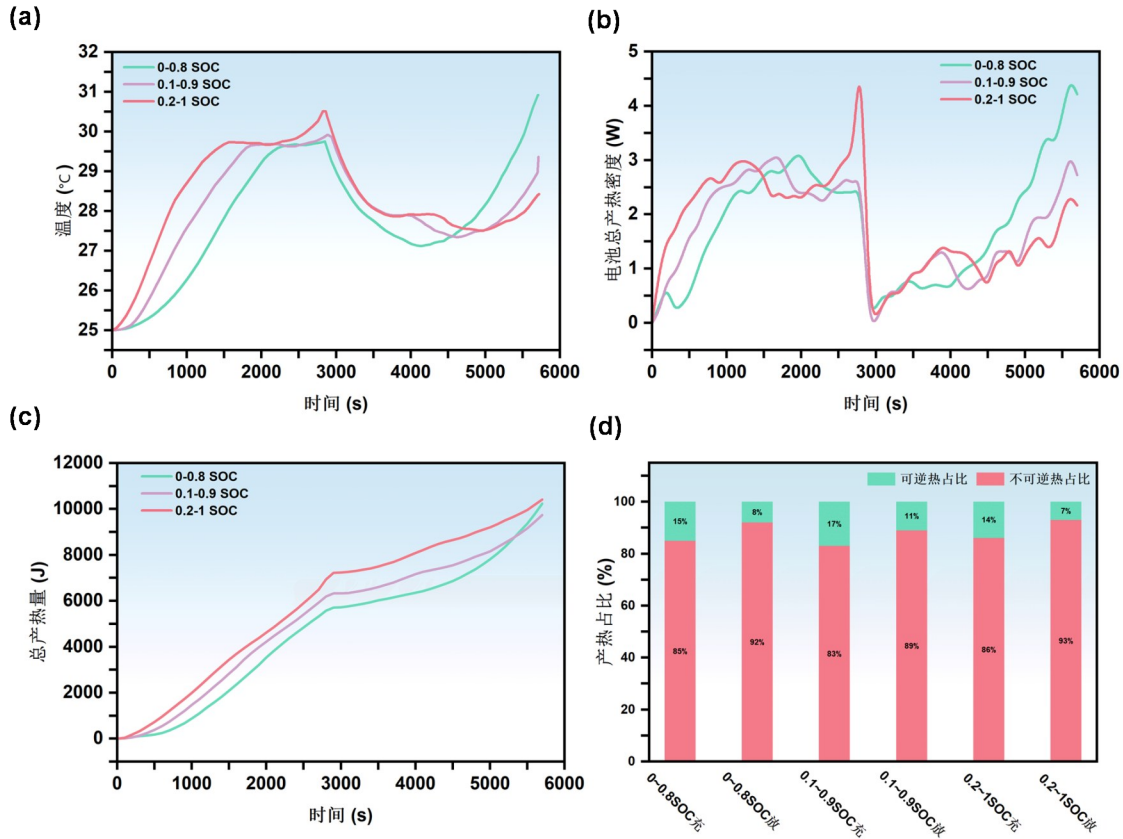


图6 电池在0~0.8 SOC、0.1~0.9 SOC和0.2~1 SOC区间: (a)温度变化曲线; (b)产热密度变化曲线; (c)产热变化曲线; (d)充电结束和放电结束产热占比

Fig. 6 The battery in the SOC ranges of 0~0.8, 0.1~0.9, and 0.2~1: (a) Temperature evolution; (b) Battery heat generation density evolution; (c) Battery heat generation evolution; (d) Heat generation proportion at end-of-charge and end-of-discharge

(3) 在相同倍率下通过调控电池不同 SOC 运行区间, 可有效抑制电池温度升高。基于电池充/放电末期产热量大, 0.1~0.9 SOC 区间可有效规避充/放电末期, 温度峰值较相同倍率满充满放工况降低了 1.30℃, 同时不可逆热占比降至 89%, 热分布更加均匀, 为储能系统热管理提供了可行的工况优化路径。

参考文献

- [1] Yan Z, Chen X, Li J, et al. Data-driven optimization of lithium battery energy storage for grid stability and renewable energy integration[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 127: 646 – 654.
- [2] 李伟航, 石千磊, 曲涛, 等. 锂离子电池储能热管理系统比较与经济性分析研究[J]. *发电技术*, 2025.
Li W H, Shi Q L, Qu T, et al. Comparison and economic analysis of lithium-ion battery energy storage thermal management systems [J]. *Power Generation Technology*, 2025, 45(1): 2096-4528.
- [3] 储能产业研究白皮书 2025[R]. 北京: 中关村储能产业技术联盟, 2025.
Energy Storage Industry Research White Paper 2025 [R]. Beijing: China Energy Storage Alliance, 2025.
- [4] Zhang S, Wang C, Guo Z. Batteries for Grid - Scale Energy Storage Applications[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(46): e16590.
- [5] 张益民, 周杨军. 国内锂离子电池储能发展现状[J]. *上海电力大学学报*, 2026, 42(1): 54 – 60.
Zhang Y M, Zhou Y J. Development status of domestic lithium-ion battery energy storage[J]. *Journal of Shanghai University of Electric Power*, 2026, 42(1): 54 – 60.
- [6] Kong L, Li Y, Feng W. Strategies to Solve Lithium Battery Thermal Runaway: From Mechanism to Modification[J]. *Electrochemical Energy Reviews*, 2021, 4(4): 633 – 679.
- [7] Wang H, Zhu Y, Kim S C, et al. Underpotential lithium plating on graphite anodes caused by temperature heterogeneity[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(47): 29453 – 29461.
- [8] 许国荣. 基于三维电化—热—老化耦合模型的锂离子电池产热特性研究[D]. 中北大学, 2025.
Xu G R. Study on heat generation characteristics of lithium-ion battery based on three-dimensional electrochemical-thermal-aging coupling model [D]. North University of China, 2025.
- [9] 李建林, 彭禹宸, 王茜, 等. 锂离子电池建模研究现状与展望[J]. *发电技术*, 2025, 46(5): 857 – 871.
Li J L, Peng Y C, Wang G Q, et al. Current status and prospect of lithium-ion battery modeling research[J]. *Power Generation Technology*, 2025, 46(5): 857 – 871.
- [10] Zhao W, Meng C, Zhao Y, et al. Research on aging-thermal characteristics coupling and aging thermal management analysis of large-capacity LiFePO₄ battery[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 114: 115675.
- [11] Zhang Q, Wang D, Yang B, et al. An electrochemical impedance model of lithium-ion battery for electric vehicle application[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 50: 104182.
- [12] Jokar A, Rajabloo B, Désilets M, et al. Review of simplified Pseudo-two-Dimensional models of lithium-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 327: 44 – 55.
- [13] Zhou Z, Zhou X, Li M, et al. Experimentally exploring prevention of thermal runaway propagation of large-format prismatic lithium-ion battery module[J]. *Applied Energy*, 2022, 327: 120119.
- [14] 高原, 黄荣杰, 秦东晨, 等. 高倍率工况下锂离子电池的建模[J]. *电池*, 2021, 51(6): 563 – 567.
Gao Y, Huang R J, Qin D C, et al. Modeling of lithium-ion battery under high rate condition [J]. *Battery Bimonthly*, 2021, 51(6): 563 – 567.
- [15] 凌海泉, 黄彦, 谢艺枫, 等. 基于一维热电耦合仿真模型的锂电池温度估计[J]. *当代化工研究*, 2023(9): 180 – 184.
Ling H Q, Huang Y, Xie Y F, et al. Lithium battery temperature estimation based on one-dimensional thermoelectric coupling simulation model[J]. *Modern Chemical Research*, 2023(9): 180 – 184.
- [16] 周宇昊, 徐楞赞, 张钟平, 等. 基于数字孪生的锂电池热电耦合模型构建与仿真分析[J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(2): 536-543.
Zhou Y H, Xu L Y, Zhang Z P, et al. Construction and simulation analysis of an electro-thermal coupling model for lithium-ion batteries based on digital twin[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(2): 536-543.
- [17] Ghalkhani M, Bahiraei F, Nazri G-A, et al. Electrochemical - Thermal Model of Pouch-type Lithium-ion Batteries[J]. *Electrochimica Acta*, 2017, 247: 569 – 587.
- [18] Wang D, Chai Y, Wang Y, et al. An electrochemical-thermal coupling model considering polarization and heat characteristics for lithium-ion batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 132: 117744.
- [19] Zou Y H, Yang X, Wei L C, et al. Effect of tab configuration on large-format battery performance based on three-dimensional electrochemical-thermal coupled model[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2025, 1500(1): 012019.
- [20] 韦雪晴, 邓海鹏, 周宇, 等. 锂离子电池组的三维电化—热耦合仿真分析[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(12): 3965-3977.
Wei X Q, Deng H P, Zhou Y, et al. Three-dimensional electrochemical-thermal coupling simulation analysis of lithium-ion battery packs[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(12): 3965-3977.
- [21] Yang L, He M, Ren Y, et al. Electrochemical and thermal analysis of square lithium-ion battery based on a multidimensional electrochemical-thermal coupled model[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 110: 115257.
- [22] Li H, Saini A, Liu C, et al. Electrochemical and thermal characteristics of prismatic lithium-ion battery based on a three-dimensional electrochemical-thermal coupled model[J]. *Journal*

- of Energy Storage, 2021, 42: 102976.
- [23] 韩甜, 时玮, 赵杨梅, 等. 圆柱型锂离子电池三维分层热耦合模型研究[J]. 电源学报, 2021, 19(5): 165 - 171.
- Han T, Shi W, Zhao Y M, et al. Research on three-dimensional layered thermal coupling model of cylindrical lithium-ion battery [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(5): 165 - 171.
- [24] 张宇, 杨文, 陈星, 等. 18650NCA型单体电池电热特性的实验与仿真研究[J]. 电源技术, 2022, 46(3): 289 - 293.
- Zhang Y, Yang W, Chen X, et al. Experimental and simulation study on electrothermal characteristics of 18650 NCA single battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2022, 46(3): 289 - 293.
- [25] 王英舜, 杨真. 新能源汽车单体锂离子电池三维散热模型仿真[J]. 计算机仿真, 2022, 39(2): 68 - 72.
- Wang Y S, Yang Z. Three-dimensional heat dissipation model simulation of single lithium-ion battery for new energy vehicles[J]. Computer Simulation, 2022, 39(2): 68 - 72.