

储能测试与评价



储能锂电池充放电特性和热管理研究

熊 杰¹, 于海波¹, 李 响¹, 朱 建², 王万纯¹, 李 创¹

(¹南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 210094; ²西安交通大学机械工程学院, 陕西 西安 710049)

摘 要: 锂电池储能在辅助可再生能源并网、电网调频和调峰等方面发挥重要作用, 精准的电池模型描述是储能电池系统状态估计和能量管理的基础。本文对储能锂电池在充放电过程中的电特性和热特性进行了研究, 采用多物理场耦合建立储能液冷电池模块的有限元仿真计算模型, 并求解得到充放电全过程电池模块的电特性、温度场分布和流场分布。搭建充放电测试平台对某液冷电池模块进行了试验测量, 得到充放电过程中电压、电流、荷电状态等电特性参数和产热功率、冷却功率、温度等热特性参数随时间的变化, 实验测试结果和仿真计算结果匹配良好。最后通过仿真计算模型对比分析了冷却液流量和电池初始温度对电池模块的电特性、热特性和流场特性的影响。该仿真计算方法和所获结果能为储能锂电池的状态估计、热管理参数优化提供依据。

关键词: 储能; 锂电池; 充放电特性; 热管理; 有限元

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0788

中图分类号: TH 12

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 02-616-12

Research on charge-discharge characteristics and thermal management of lithium battery for energy storage

XIONG Jie¹, YU Haibo¹, LI Xiang¹, ZHU Jian², WANG Wanchun¹, LI Chuang¹

(¹NR Electric Co., Ltd, Nanjing 210094, Jiangsu, China; ²School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiao Tong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

Abstract: Lithium-ion batteries play an important role in supporting grid-connected renewable energy systems and enhancing grid frequency modulation and peak shaving. Accurate battery model descriptions are essential for state estimation and energy management of battery-based energy storage systems. The objective of this study is to investigate the electrical and thermal characteristics of lithium-ion batteries during charging and discharging. A finite-element model of a liquid-cooled battery module is constructed based on multiphysical field coupling, and its electrical characteristics, temperature field distribution, and flow field distribution are calculated. Moreover, experimental measurements are performed to test the liquid-cooled battery module and determine the electrical characteristic parameters, such as voltage, current, and state of charge, as well as the thermal characteristic parameters, such as heat generation, cooling power, and temperature, during the charging-discharging cycle. The numerical and experimental results are in good agreement, confirming the effectiveness of the numerical simulation method. In addition, parametric studies were conducted to analyze

收稿日期: 2025-09-04; 修改稿日期: 2025-10-18。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12472091)。

第一作者及通信联系人: 熊杰 (1991—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为快速机械开关、储能电池模块等新型电力设备, E-mail: xiongjie@nrec.com。

引用本文: 熊杰, 于海波, 李响, 等. 储能锂电池充放电特性和热管理研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(2): 616-627.

Citation: XIONG Jie, YU Haibo, LI Xiang, et al. Research on charge-discharge characteristics and thermal management of lithium battery for energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(2): 616-627.

the effects of coolant flow rate and initial battery temperature on the electrical, thermal, and flow-field characteristics of the battery module. The numerical and experimental results obtained in this study can provide a basis for state estimation, thermal management, and parameter optimization of lithium-ion batteries.

Keywords: energy storage; lithium battery; charge-discharge characteristics; thermal management; finite-element

发展新型储能技术是新型电力系统建设的重要举措,是实现能源领域碳达峰碳中和的关键支撑之一^[1-2]。锂离子电池储能作为新型储能的一种,因较好的电化学稳定性、较长的循环寿命、较高的能量密度等优点已被广泛应用于光伏发电、风力发电和电网调频调峰等诸多领域^[3-4]。储能锂离子电池单体作为电池储能系统能量的主要来源,在充放电过程中伴随着电化学、电学、结构力学及热力学等多个物理场,各物理场之间高度耦合且非线性。因此,建立描述电池内外特性的低复杂度、高精度电池模型已成为研究热点^[5-12]。而储能电池模块作为储能系统的基本单元,其采用串联、并联或串并联连接方式将电池单体组合起来并通过一对正负极端子对外进行电能传递,提供系统所需的电压和容量。作为电池单体的集合体,储能电池模块在充放电过程中的电特性、热特性及相互耦合关系受到广泛的关注和研究^[13-16]。

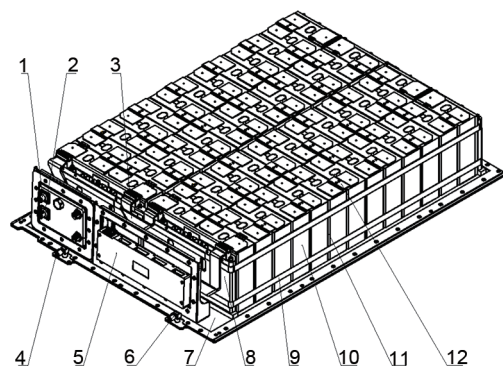
文献[17-20]对锂离子电池模块的热特性及其参数优化进行了研究,但缺乏对电池模组电特性的描述。文献[21]建立了风冷并联电池模组的多物理场耦合模型并对各特性参数的不一致性进行了研究,但其对风冷冷却条件和18650电池的过度简化,导致该方法很难推广应用到三维方形铝壳电池的温度场计算。文献[22]构建电热耦合模型实现了电池模组的多状态协同估计,但未考虑电池连接排的发热和外部冷却方式对电池温度的影响。

针对储能锂电池在充放电过程中电特性和热特性难以被同时准确描述的问题,本工作采用多物理场耦合建立储能液冷电池模块的有限元仿真计算模型,并求解得到充放电全过程电池模块的电压、电流、荷电状态等电特性参数和电池产热、冷却功率、温度等热特性参数以及压力、流速等流场特性参数随时间的变化。搭建充放电测试平台对某液冷电池模块进行了试验测量,得到液冷电池模块的电特性和热特性。实验测试数据和仿真计算结果匹配

良好,证明了仿真计算方法的有效性。最后开展参数化研究,对比分析冷却液流量和电池初始温度对电池模块的电特性、温度场和流场分布的影响。该仿真计算方法和所获结果能为储能锂电池的状态估计、热管理参数优化提供依据,有利于储能锂电池及其系统的改进优化和降本增效。

1 基本结构和工作原理

储能1P52S液冷电池模块的结构如图1所示。其主要由液冷底板、1P26S电池模组、电池管理单元(BMU)构成。1P26S电池模组包括电池、隔热垫、端板、钢带以及电芯连接组件。电芯连接组件包含连接排和采样线束。电池通过连接排实现串并联,液冷底板置于电池底部给电池进行热管理,BMU则通过电芯连接组件的电压和温度采样来监控电池的工作状态。



注: 1—正极电流端子; 2—负极电流端子; 3—串联铜排; 4—进液口; 5—电池管理单元(BMU); 6—出液口; 7—液冷底板; 8—端板; 9—钢带; 10—电池(电芯); 11—隔热垫; 12—电芯连接组件

图1 储能液冷电池模块基本结构

Fig. 1 Structure of battery module

2 充放电特性和热管理

2.1 理论模型

连接排的材质通常为纯铝或者纯铜,在这种均匀导电介质中,恒定电场的控制方程为:

$$\nabla \cdot \mathbf{j}_s = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi_s \quad (2)$$

$$\mathbf{i}_s = \sigma_s \mathbf{E} \quad (3)$$

此即电流连续性方程、电位方程和欧姆定律^[23]。

式中： $\mathbf{i}_s$ 为电流密度； $\mathbf{E}$ 为电场强度； ϕ_s 为电位； σ_s 为介质电导率。

采用集总参数模型^[24]来描述锂电池单体，如式(4)。

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{OCV}}(\text{SOC}, T) + \eta_{\text{IR}} + \eta_{\text{act}} + \eta_{\text{conc}} \quad (4)$$

式中： E_{cell} 为电池电压； E_{OCV} 为电池开路电压； η_{IR} 为欧姆过电压； η_{act} 为活化过电压； η_{conc} 为浓差过电压。

充放电过程中各部件的温度分布随时间变化，采用导热微分方程^[25]进行描述，如式(5)。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_{\text{bat}} + Q_s \quad (5)$$

此即有内热源的三维非稳态导热微分方程。其中： ρ 为介质密度； C_p 为介质比热容； k 为介质导热系数； T 为温度； $\mathbf{u}$ 为速度矢量； Q_{bat} 为电池产热； Q_s 为连接排的焦耳热。

电池产热如式(6)。

$$Q_{\text{bat}} = \left[\eta_{\text{IR}} + \eta_{\text{act}} + T \frac{\partial E_{\text{OCV}}(\text{SOC}, T)}{\partial T} \right] I_{\text{cell}} + Q_{\text{mix}}$$

$$Q_{\text{mix}} = \frac{3Q_{\text{cell}}}{\tau} \int_0^1 \frac{\partial E_{\text{OCV,therm}}}{\partial \text{SOC}} \frac{\partial \text{SOC}}{\partial X} \frac{\partial \text{SOC}}{\partial X} X^2 dX \quad (6)$$

$$E_{\text{OCV,therm}} = E_{\text{OCV,ref}}(\text{SOC}) - T_{\text{ref}} \frac{E_{\text{OCV}}(\text{SOC})}{\partial T}$$

其中： I_{cell} 为电芯充放电电流； Q_{mix} 为电芯混合热； $E_{\text{OCV,therm}}$ 为电芯热平衡电压。

连接排产热

$$Q_s = -\mathbf{i}_s \cdot \nabla \phi_s \quad (7)$$

在均质不可压缩黏性流体中，描述流体运动的控制方程^[26]为：

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F} \quad (8)$$

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (9)$$

此即动量方程和连续性方程。其中： ρ 为介质密度； $\mathbf{u}$ 为速度矢量； p 为压力； $\mathbf{K}$ 为黏性应力张量； $\mathbf{F}$ 为体积力矢量。

给定初始条件和边界条件，对以上九个方程在 COMSOL Multiphysics 进行求解即可得到液冷电池模块在充放电过程中电压、电流、荷电状态、电芯压差等电特性参数和温度分布、产热功率、冷却功率、电池温差等热特性参数以及压力、流速等流场特性参数。

2.2 仿真模型

为了控制网格数量和计算时长，对仿真计算模型进行了简化，删除了部分小孔、细槽、圆角、倒角等特征，得到了如图2所示的有限元网格计算模型。各部件被赋予了表1所示的材料属性，采用线弹性模型来描述固体传热，采用不可压缩流体来描述冷却液的流动和传热。

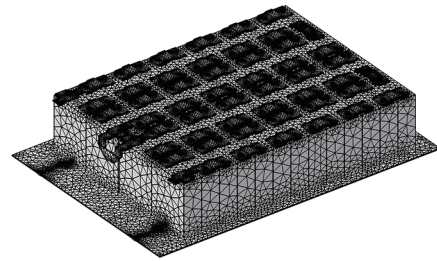


图2 液冷电池模块仿真计算模型
Fig. 2 Numerical simulation model

表1 仿真模型材料参数
Table 1 Material parameters

部件	密度/(kg/m ³)	比热容/[J/(kg·K)]	导热系数/[W/(m·K)]	电导率/(S/m)	动力黏度/(Pa·s)
电芯	2.16×10 ³	964	3.56/11.0/11.0(x/y/z)	—	—
电芯极柱	2.7×10 ³	900	238	3.774×10 ⁷	—
连接铝排	2.7×10 ³	900	238	3.774×10 ⁷	—
连接铜排	8.96×10 ³	385	385	5.998×10 ⁷	—
液冷底板	2.73×10 ³	893	155	—	—
冷却液	9.98×10 ²	4187	0.5942	—	0.001

用实测电芯的开路电压(OCV)-荷电状态(SOC)曲线作为输入，将液冷电池模块容量设置为52*280 Ah，初始SOC为0。电池模块0.5 P恒功率充满放，充放之间静置30 min。不同物理场的边界

条件设置如下：在电流导体方面，总正铝排设置为电流输入，总负铝排设置为电流接地点，并设置电芯的正负极极柱；在热传递方面，液冷底板进液温度设置为20℃；在流体流动方面，设置进液口流

体流量为5 L/min, 并将出液口设置为恒定零压力。之后设定总计算时间为18000 s, 时间步长为20 s。

2.3 结果分析

2.3.1 电特性

基于前述仿真计算模型得到液冷电池模块的电压、电流、SOC和电芯压差的变化曲线分别如图3(a)、图3(b)和图3(c)所示。

在0~7679 s的充电过程中, 电压从157.799 V先快速上升到170 V, 再逐渐上升并稳定在175.77 V, 然后缓慢上升并稳定在177.35 V, 最后快速上升到181.76 V。电流从147.72 A先快速下降到137 A, 再缓慢下降到132.7 A, 最后逐步下降到128.3 A。SOC则从0线性上升到100%。而电芯压差作为电芯单体电压的最大值和最小值的差值, 是表征电池模块充放电一致性的重要指标。电芯压差在充电过程中从0逐渐增加到3.64 mV。

在7679~9483 s的静置过程中, 电压则先从181.76 V快速下降并稳定在177.35 V, SOC维持在100%, 电流为0, 电芯压差先从3.64 mV快速下降到0并维持稳定。

在9483~16789 s的放电过程中, 电压从176.33 V先快速下降并稳定在169.55 V上下, 再缓慢下降并稳定在167.84 V, 然后逐渐下降到161.32 V, 最后快速下降到143.09 V。电流先稳定在137.25 A上下, 再逐渐上升到144.28 A, 最后快速上升到121.61 A。SOC从100%线性下降到0。电芯压差从0.01 mV快速增加到3.17 mV之后迅速下降并稳定在2.67 mV, 再逐渐上升到3.49 mV, 最后快速上升到7.87 mV。

在充电初期、充电末期、放电初期以及放电末期这些SOC达到满状态或者空状态的阶段, 电压和电流都会出现快速上升或者快速下降的剧烈变化。电芯压差则在充电末期和放电末期都会达到一个区域极大值。在实际应用中, 可以考虑借用上述仿真数据构建电压和电芯压差随SOC的变化曲线, 进行数据处理和挖掘(电压和电芯压差对SOC的二阶导), 找出电压、电芯压差和SOC三者的唯一性对应矩阵, 从而实现SOC或者SOH参数的准确估计。

2.3.2 热特性

对于方形铝壳电芯, 通过铝排、铜排等将电芯进行串并联构成一个电气连接的整体。液冷电池模块由两个1P26S电池模组通过铜排搭接串联成

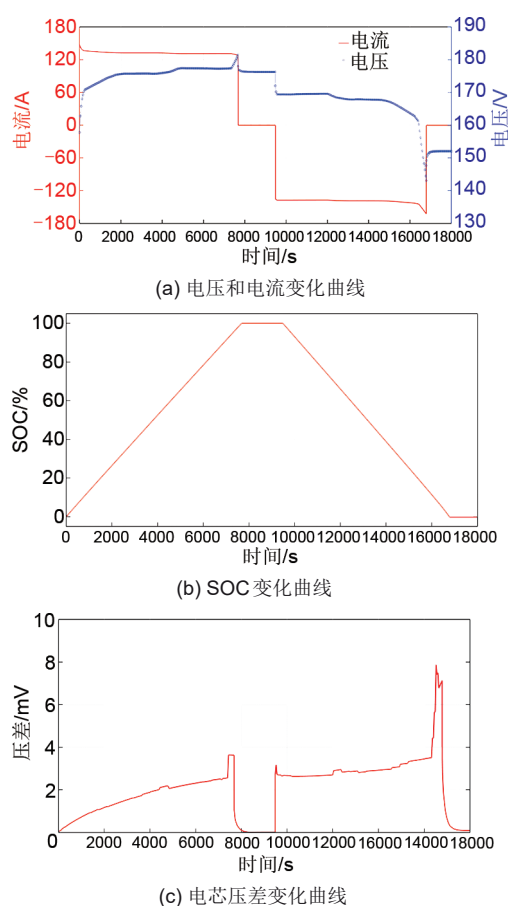


图3 液冷电池模块的电特性参数变化曲线
Fig. 3 Electrical properties of the battery module

1P52S, 1P26S 电池模组则通过27个铝排与26节电芯焊接串联而成。电芯的电压和温度采样点设置在铝排上, 用来监测电压、压差、温度和温差等数据。

液冷电池模块不同部件的温度分布情况如图4所示。在充电末期的7679 s时刻, 电芯连接排的最高温度为28.8℃(出现在1#电芯的负极连接铝排), 最低温度为27.6℃(出现在52#电芯的负极连接铝排)。电芯本体的最高温度为28.6℃(出现在1#电芯的正极极柱), 最低温度为20℃(出现在52#电芯底部)。液冷板的最高温度为22.1℃(出现在出液口侧边区域), 最低温度为20℃(出现在进液口区域)。冷却液最高温度为21.9℃(出现在出液口), 最低温度为20℃(出现在进液口)。冷板流道为串联流道, 在对电芯和CCS进行冷却之后, 冷却液出口温度会显著高于进口, 从而导致冷却液出口区域的冷板、电芯和铝排的温度出现最大值, 而冷却液入

口区域的冷板、电芯和铝排的温度会出现最小值。

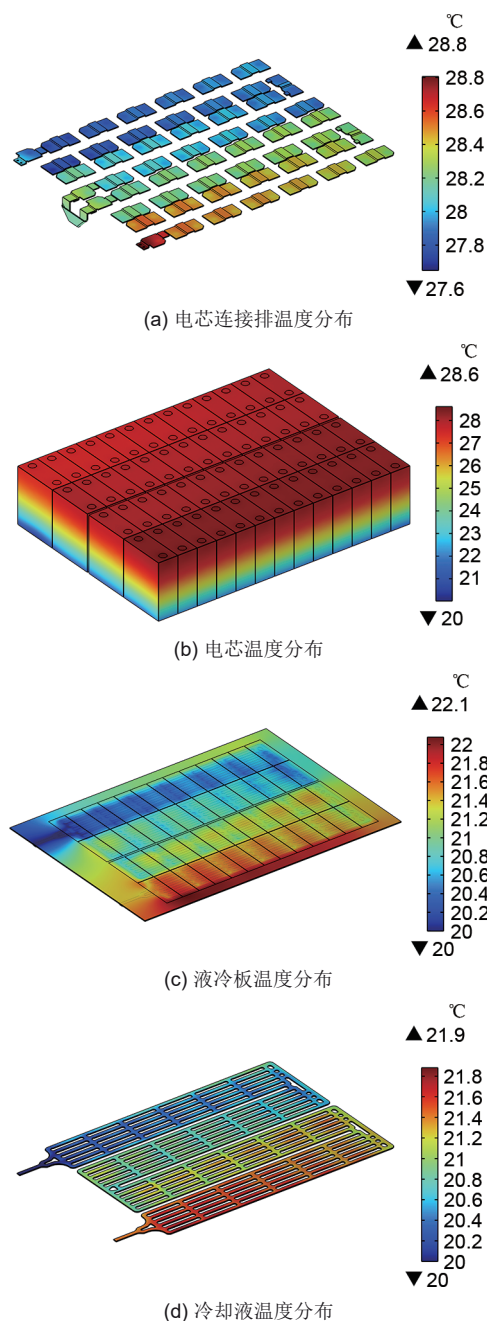


图4 时间节点 $t=7679$ s 零部件温度分布
Fig. 4 Temperature distribution in parts at 7679 s

以电芯单体的平均温度作为电芯本体温度,以铝排上的温度作为电芯采样温度。根据图4的温度分布可以得到电芯采样最高温度(1#电芯负极连接铝排)、电芯采样最低温度(52#电芯负极连接铝排)、电芯本体最高温度(1#电芯单体平均温度)、电芯本体最低温度(52#电芯单体平均温度)、电芯采样温差

(电芯采样最高温度与最低温度的差值)、电芯本体温差(电芯本体最高温度与最低温度的差值)的变化曲线如图5所示。

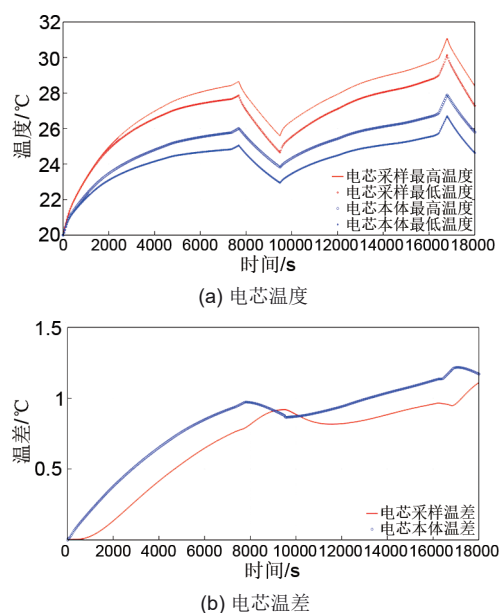


图5 电池模块电芯温度和温差变化曲线
Fig. 5 Cell temperature and temperature difference

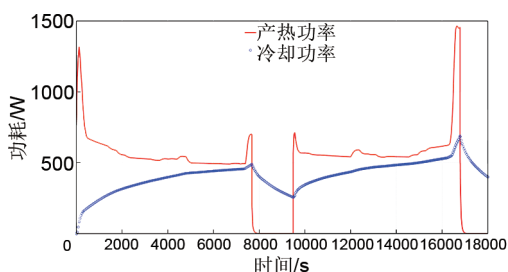
在充电阶段,电芯采样的最高和最低温度、电芯本体的最高和最低温度均从 20°C 逐渐上升,在充电结束时刻 7679 s,四种温度分别为 28.7°C 、 27.9°C 、 26.1°C 、 25.0°C 。在第一个静置阶段,四种温度逐渐下降,在静置结束时刻,四种温度分别为 25.6°C 、 24.7°C 、 23.8°C 、 22.94°C 。在放电阶段,四种温度则逐渐上升,在放电结束时刻,四种温度分别为 31.1°C 、 30.1°C 、 27.9°C 、 26.7°C 。在第二个静置阶段,四种温度逐渐下降。

电池模块的电芯采样温差和电芯本体温差在整个充放电过程中呈现出先上升后下降再上升再下降的趋势。电芯本体温差的第一个极值 0.97°C 充电结束时刻延迟了 161 s;第二个极值 1.22°C 相较于放电结束时刻延迟了 331 s。电芯采样温差的第一个极值 0.92°C 相较于充电结束时刻延迟了 1804 s;第二个极值 1.18°C 相较于放电结束时刻延迟了 1811 s。

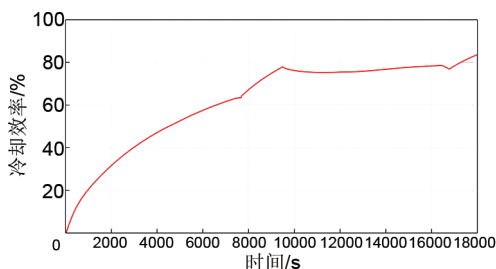
在充放电过程中随着电芯温度的升高,电芯与冷板冷却液之间的温差也越来越高,对流换热效率也越高,从而导致电芯本体温度和电芯采样温度的上升速率逐渐降低。在实际工程中可以考虑延迟启

动冷水机来保证电芯和冷板冷却液的高效换热。

电池模块的产热功率包括电芯的产热功率和连接排的产热功率。产热功率在充放电过程中的变化曲线如图6(a)所示。在充电阶段, 产热功率从761.3 W快速上升到1318.2 W再快速回落到686.8 W, 之后产热功率逐渐减小并稳定在495 W, 然后快速升高至701 W。在静置阶段, 产热功率从701 W快速下降到0。在放电阶段, 产热功率从0快速上升到713.6 W再迅速下降到593.1 W, 之后产热功率缓慢减小到540.8 W再逐渐上升到644.6 W, 最后快速上升到1465 W。在第二个静置阶段, 产热功率从1465 W迅速下降到0 W。



(a) 产热功率和冷却功率



(b) 电池模块冷却效率

图6 电池模块热功率和冷却效率变化曲线
Fig. 6 Thermal power and efficiency

图6(a)中在充放电初期和末期出现产热功率的区域极大值, 和图4(a)中电芯温度在对应时刻出现的显著变化完全一致, 二者之间具备因果对应关系。

电池模块的冷却功率可以通过监测进液口和出液口的液体温差计算得到, 在充电末期和放电末期会出现冷却功率的区域最大值。在充电阶段, 冷却功率从0逐渐上升到充电结束时刻的488.7 W。在静置阶段, 冷却功率逐渐下降到256.2 W。在放电阶段, 冷却功率逐渐上升到放电末期的687.6 W。在第二个静置阶段, 产热功率逐渐下降到399.5 W。

在整个充放电期间, 产热功率的数值均大于冷

却功率。为了进一步研究液冷散热的冷却效率, 对产热功率和冷却功率分别进行积分, 令冷却效率

$$\eta_{\text{cold}} = \frac{\int P_{\text{cold}} dt}{\int P_{\text{prod}} dt} \times 100\% \quad (10)$$

其中, P_{cold} 为冷却功率, P_{prod} 为产热功率。计算得到冷却效率的变化曲线如图6(b)所示。可以看到冷却效率在整个充放电过程中呈现出先上升后平稳再上升的趋势。在充电阶段, 冷却效率从0开始逐渐上升到63.5%; 在静置阶段, 冷却效率逐渐上升到78.1%; 在放电阶段, 冷却效率先缓慢下降到75.3%再逐渐上升到78.5%再下降到76.8%; 在第二个静置阶段, 冷却效率逐渐上升到83.7%。在实际工程中, 可以将电芯的产热功率变化作为输入, 优化冷水机的控制策略, 在保证电芯温升和冷水机寿命的情况下提高换热效率并降低冷水机额定制冷功率, 实现冷水机的降本增效。

2.3.3 流场特性

液冷底板通过内部冷却液的流动带走电池模块产生的热量, 冷却液的流动特性可以由压力和速度来表征, 其分布和数值如图7所示。液冷板的流阻可以用进液口和出液口的压力差来描述, 其数值为24.2 kPa。冷却液在冷板的流速分布主要集中在0.2~0.5 m/s的区间, 在该流速区间内的流动为层流。在进液口和出液口的地方, 流体流速较高, 其流动为层流和湍流的过渡状态。

3 试验验证

仿真模型得到的计算结果需要进行试验验证。搭建液冷电池模块的充放电测试平台如图8所示。将某280 Ah电芯构成的1P52S液冷电池模块放置于烤箱中, 电池模块的正、负极端子通过电缆接到充放电仪, 液冷底板的进出液口通过管路接到冷水机。电池模块的CCS总成上设置有电压采样和温度采样传感器(NTC), 通过电池模块内部的BMU将电压和温度采样上送到BCMU, 再通过电脑上的信息采集与分析软件读取BCMU的数据。

将烤箱温度设置为25℃, 先将电池模块的电量放空, 等到将电芯平均温度控制在20℃且电芯温差在1℃以内时, 将冷水机进水温度调整为20℃、流量5 L/min, 开始按照以下步骤对液冷电池模块进行充放电测试:

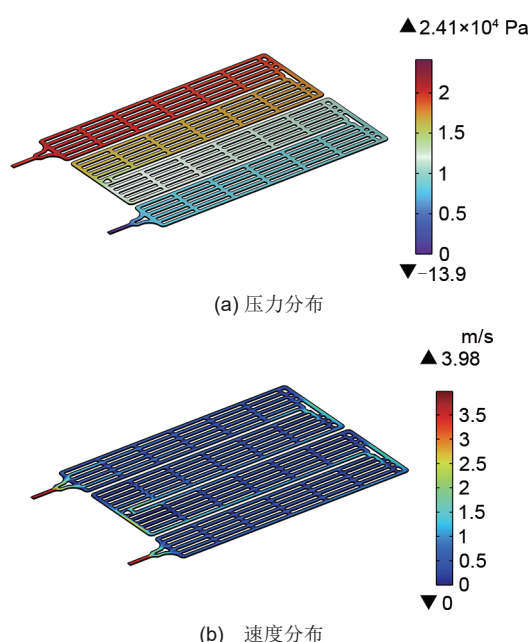


图7 时间节点 $t=7679\text{ s}$ 的流场分布
Fig. 7 Flow field at 7679 s

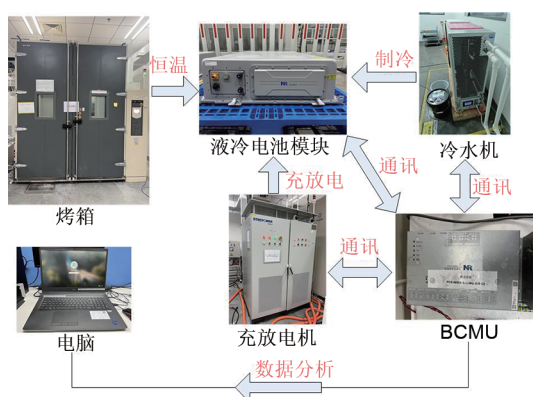


图8 液冷电池模块充放电测试平台
Fig. 8 Test platform of the battery module

- ① 0.5 P 恒功率充电至截止电压；
- ② 静置 30 min ；
- ③ 0.5 P 恒功率至截止电压。

电池模块电压和电流的仿真结果和实测数据对比分别如图9(a)和图9(b)所示。从电流来看，仿真结果和试验数据几乎重合，证明了仿真模拟的有效性和准确性；从电压来看，仿真结果和试验数据基本匹配但存在差异。进一步优化与电压测试数据匹配度更高的仿真计算模型，将是后续研究工作的重点。

电池模块的电芯压差的仿真结果和实测数据对比如图9(c)所示。在充放电过程中，电芯压差实测

值从充电初期的 110 mV 先快速下降到 8 mV ，平稳较长时间后在充电末期快速上升到 80 mV ，在静置阶段又快速下降到 5 mV ，之后在放电过程中压差一直在 6 mV ，在放电末期则快速上升到 245 mV 。仿真结果和实测数据的变化趋势基本相同，在 SOC 充满或放空的状态下都存在压差的极值变化；但仿真结果和实测数据的数值差异较大，究其原因在于仿真模型并未考虑 52 颗电芯在初始状态的不一致性。后续研究可以考虑构建基于概率分布的初始不一致性的仿真计算模型来精准描述压差的动态变化，在实施步骤上首先对初始电芯电压矩阵乘以一个概率分布矩阵，之后在变化趋势[压差变化曲线，图3(c)]的基础上再乘以另外一个概率分布矩阵，即可得到全过程的压差变化。而以上两个概率分布矩阵均需要通过电芯实测大数据获得。

电池模块的电芯采样温度的仿真结果和实测结果对比如图10(a)所示。在变化趋势上，仿真值和

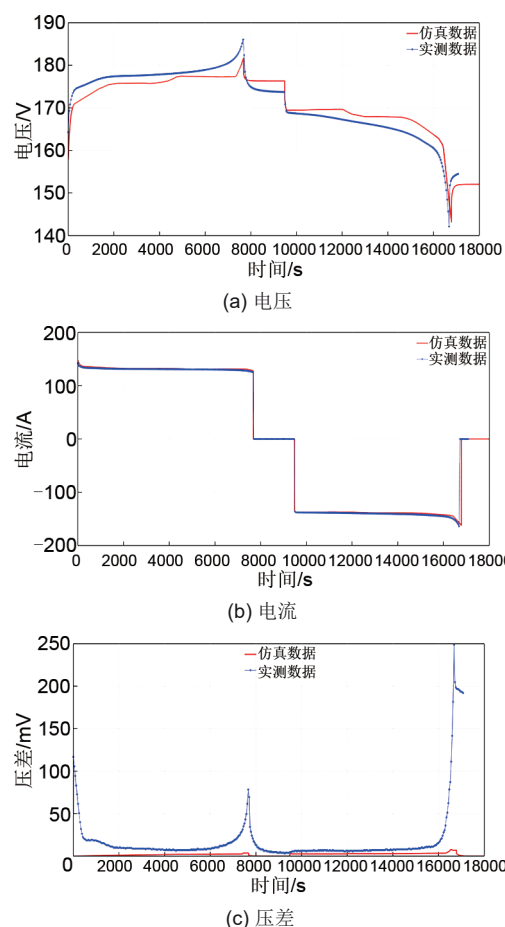


图9 电池模块的电特性参数的实测数据及仿真数据对比
Fig. 9 Electrical properties between simulation and experiment

实测值的一致性较高, 均存在先上升后下降再上升再下降的变化过程, 且在充电初期、充电末期、放电初期和放电末期都存在温度变化幅度更大的情况。在数值上, 温度实测值要比仿真值偏高一些。在充电末期, 电芯采样的实测最高温度为 31.5°C , 高于仿真值的 28.8°C , 电芯采样的实测最低温度为 30.0°C , 高于仿真值的 27.9°C 。在放电末期, 电芯采样的实测最高温度为 32.7°C , 高于仿真值的 31.2°C , 电芯采样的实测最低温度为 31.5°C , 高于仿真值的 30.2°C 。可以看到, 仿真模型能较好地刻画电池模块在充放电过程中的温度变化。而仿真值和实测值在数值上的差异可能源于电芯厂家提供的电芯热参数不精准以及NTC测量精度偏低等因素。

电池模块电芯采样温差的仿真数据和实测数据对比如图10(b)所示。在变化趋势上, 仿真值和实测值较为相似, 总体上存在先上升后平稳的变化。在数值上, 实测值要比仿真值高 1°C 左右。将实测值的初始温差的干扰去除后, 实测值和仿真值非常接近, 说明仿真模型在描述电芯温差时具备较高的准确度。

电池模块冷却功率的仿真数据和实测数据的对比如图11(a)所示。在充电初期由于电芯的产热功率较小, 冷水机的进出水温差跳变较大, 导致实测

的冷却功率上下跳动。对初始跳动进行平均值处理后得到如图11(b)的冷却功率随时间的变化曲线。仿真值和实测值的变化趋势和数值的匹配度较高, 说明了仿真模型能较好地刻画冷却功率。

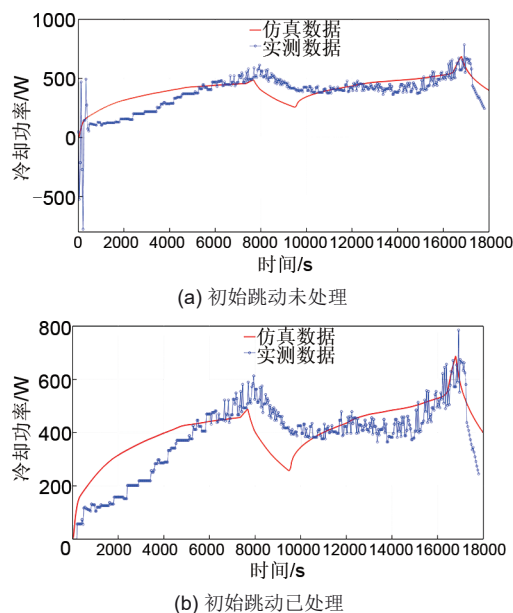


图11 电池模块冷却功率仿真数据和实测数据对比

Fig. 11 Cell temperature and temperature difference between simulation and experiment

4 参数化研究

储能锂电池在充放电过程中的各项特性会受到各种因素的影响, 比如充放电倍率、初始荷电状态、冷却液流量、进液温度、初始电芯温度和环境温度等。因此有必要调整仿真模型的部分参数来保证储能锂电池和储能系统处于适宜的运行状态。

4.1 冷却液流量对电池模块特性的影响

在保证环境温度、进液温度、电芯初始温度、初始SOC和充放电倍率不变的情况下, 液冷电池模块在2、3、5、8 L/min四种不同冷却液流量下的各项特性参数的仿真计算结果如表2所示。在电特性方面, 最大充电电流、最大放电电流、充电最高电压和放电最低电压相对稳定, 几乎不随流量的变化而变化; 电芯最大压差则随着流量的增加而降低。在热特性参数方面, 产热总量、冷却总量、冷却效率、最高采样温度、最高本体温度、最大采样温差和最大本体温差均随流量的增加而降低。在流场特性方面, 液冷板流阻和冷却液最大流速则随流量的增加而增加。

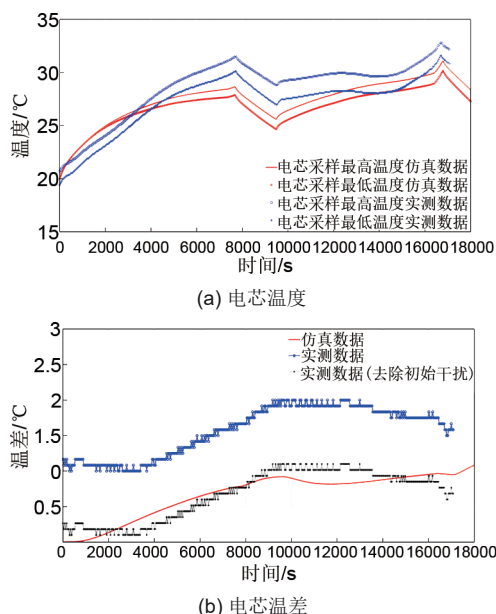


图10 电池模块电芯温度和温差的仿真数据和实测数据对比

Fig. 10 Cell temperature and temperature difference between simulation and experiment

特性参数	流量/(L/min)			
	2	3	5	8
最大充电电流/V	147.742	147.750	147.753	147.755
最大放电电流/A	-162.248	-162.583	-162.607	-162.638
充电最高电压/V	180.628	180.609	181.004	180.701
放电最低电压/V	143.415	143.118	143.098	143.066
电芯最大压差/mV	16.91	12.36	7.92	5.22
产热总量/J	2.1618×10^5	2.1914×10^5	2.2145×10^5	2.2307×10^5
冷却总量/J	1.5605×10^5	1.6359×10^5	1.6944×10^5	1.7382×10^5
冷却效率/%	72.2	74.4	76.5	77.9
最高采样温度/℃	32.52	31.86	31.17	30.81
最高本体温度/℃	29.53	28.70	27.87	27.41
最大采样温差/℃	2.41	1.72	1.15	0.84
最大本体温差/℃	2.68	1.91	1.19	0.78
液冷板流阻/kPa	5.08	9.86	24.2	57.8
冷却液最大流速/(m/s)	1.68	2.47	3.99	6.17

冷却液流量对电池模块热特性参数的影响比电特性参数更为显著，究其原因在于电化场、温度场和流场的耦合程度不一样，温度场和流场是直接耦合的，电化场则通过温度场间接和流场耦合。电池模块产热热特性参数的数值均随流量的增加而降低的原因在于，流量越大则对流系数越大导致带走的热量越多，电芯的温度就越低，相对温差也小。此外，温度越低导致电芯的活性降低，电芯产热会增加。

选择电芯最大压差、最大本体温差、冷却效率、最大流速和液冷板流阻作为代表性参数，其随冷却液流量的变化如图 12 所示。图 12(a)中，电芯最大压差随流量的变化趋势和最大本体温差随流量的变化趋势非常相近，电芯最大压差和最大本体温差之间几乎呈现正线性变化。图 12(b)中，冷却效率随着流量的增加而增加，但增加的幅度却越来越低。图 12(c)中，冷却液在液冷板中的最大流速和流量之间为正线性变化，液冷板流阻则和流量的二次方呈现出正相关的变化。综合来看，冷却液流量越大，电池模块的控温效果越好，但控温效果的增加幅度越来越低，与此同时流阻则会以几何级数增加，将会对冷水机组的设计带来较大压力。因此在当前的冷板设计下，单个电池模块的流量选择 5 L/min 左右是相对适宜的。

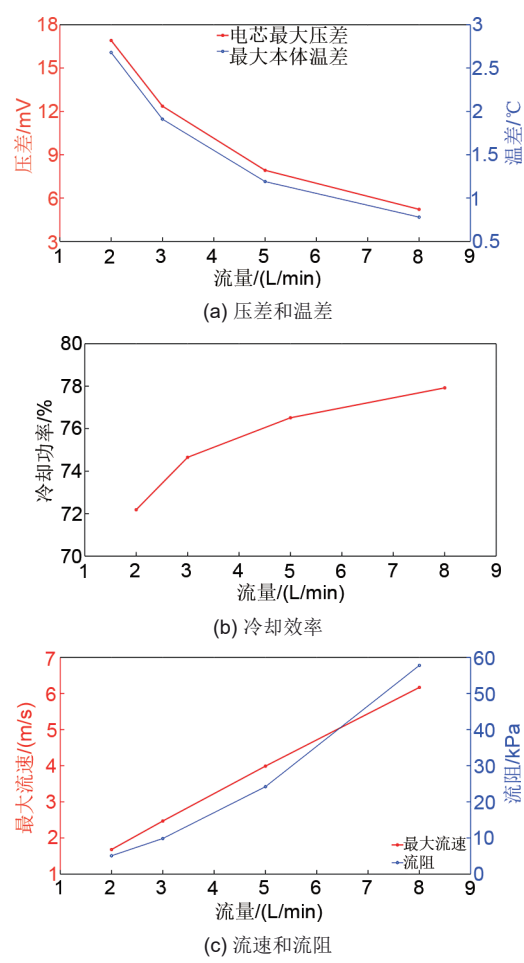


图 12 不同冷却液流量下的电池模块特性参数对比
Fig. 12 Characteristics of the coolant flow rate

4.2 初始温度对电池模块特性的影响

在保证环境温度、进液温度、冷却液流量、初始 SOC 和充放电倍率不变的情况下，液冷电池模块在 20、25、30℃ 三种不同初始温度的充放电过程中的各项特性参数的仿真计算结果如表 3 所示。在电特性方面，最大充电电流、最大放电电流、充电最高电压和放电最低电压相对稳定，几乎不随初始温度的变化而变化；电芯最大压差则随着初始温度增加而增加。

在热特性参数方面，产热总量、温度和温差随初始温度的变化趋势各不相同，其时域上的变化曲线如图 13 所示。

在充电阶段，三种初始温度的电芯最大采样温度差异较大。30℃ 初始温度的电芯采样温度从 0 s 的 30℃ 先快速上升到 1480 s 的 32.6℃ 再缓慢下降到充电末期的 30.9℃。25℃ 初始温度的电芯采样温度

表3 不同电芯初始温度的电池模块特性参数对比
Table 3 Characteristics of the initial cell temperature

特性参数	电芯初始温度/℃		
	20	25	30
最大充电电流/V	147.753	148.295	149.229
最大放电电流/A	-162.607	-162.576	-162.237
充电最高电压/V	181.004	181.641	181.564
放电最低电压/V	143.098	143.125	143.424
电芯最大压差/mV	7.92	12.46	12.98
产热总量/J	2.2145×10^5	2.1026×10^5	2.0404×10^5
冷却总量/J	1.6944×10^5	1.9207×10^5	2.1980×10^5
冷却效率/%	76.5	91.3	107.7
最高采样温度/℃	31.17	31.93	32.43
最高本体温度/℃	27.87	28.75	29.90
最大采样温差/℃	1.15	1.81	2.04
最大本体温差/℃	1.19	1.93	2.08
液冷板流阻/kPa	24.2	24.2	24.2
冷却液最大流速/(m/s)	3.99	3.99	3.99

从0 s的25℃逐渐上升到充电末期的30.0℃。20℃初始温度的电芯采样温度从0 s的20℃逐渐上升到充电末期的28.8℃。在静置状态和放电阶段，三种初始温度的电芯采样温度的变化趋势和数值大小的差别逐渐减小，放电末期30℃、25℃和20℃初始温度的电芯采样温度分别为32.1℃、32.0℃以及31.2℃。

电池模块的产热功率在充电阶段的数值差异较为明显。30℃初始温度的产热功率最低，25℃初始温度的产热功率居中，20℃初始温度的产热功率最高。产热功率呈现出和初始温度负相关的变化，这个可能是温度越高电芯活性越好导致产热功率越小。而在静置和放电阶段，三种初始温度的产热功率的差异逐渐缩小，变化趋势和电芯采样温度的趋势几乎完全一致。

电池模块的冷却功率在充电阶段的数值差异较为明显。30℃初始温度的冷却功率从充电初期的1446 W快速下降到1480 s的656 W再逐渐下降到充电末期的530 W。25℃初始温度冷却功率从充电初期的749 W快速下降到1480 s的457 W再缓慢上升到充电末期的505 W。20℃初始温度的冷却功率则从0 W逐渐上升到充电末期的489 W。在静置和放电阶段，三种初始温度的冷却功率的变化基本趋于一致。

电池模块在三种初始温度下的冷却效率在整个充放电阶段呈现出较大的差别。相较于20℃初始温度的冷却效率最大值的77%，25℃和30℃初始

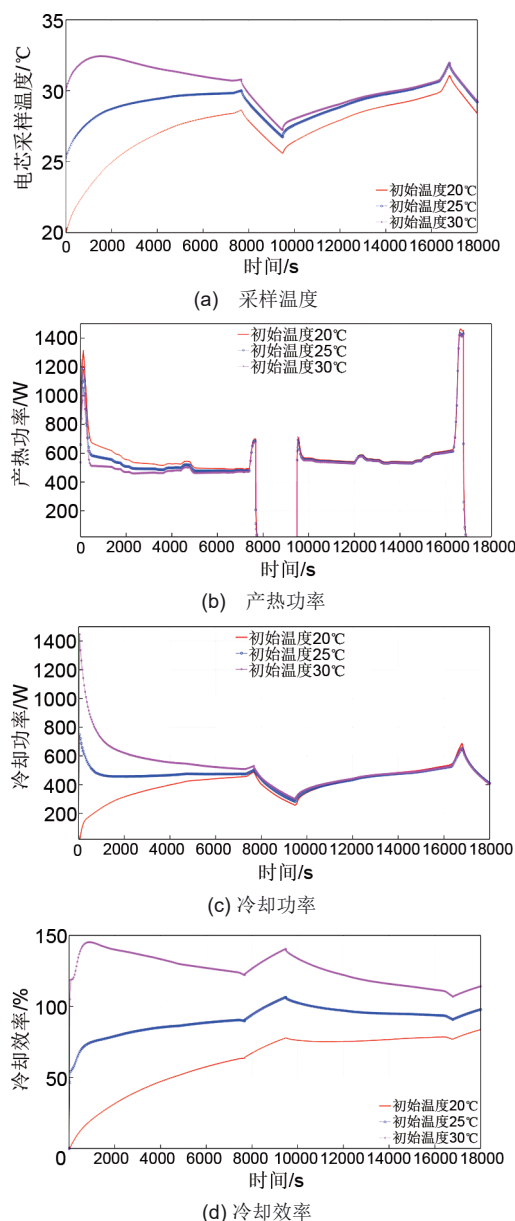


图13 不同初始温度的热特性参数对比
Fig. 13 Thermal characteristics with the initial cell temperature

温度的冷却效率值的最大值分别能达到107%以及145%。因此，在冷水机处于制冷模式时，适当提高电池模块的初始温度能保证冷却功率和冷却效率处于合适区间，从而保证冷水机的压缩机能持续工作，避免因压缩机频繁启停导致的寿命衰减。

5 结论

本工作采用多物理场耦合建立储能电池模块的有限元仿真计算模型，求解得到充放电全过程各零部件的电特性、温度场和流场分布。搭建充放电测

试平台对某液冷电池模块进行了试验测量,得到充放电循环过程的电压、电流、荷电状态等电特性参数和电池产热、冷却功率、温度等热特性参数随时间的变化。最后开展参数化研究,分析冷却液流量和电池初始温度对电池模块的电特性和热特性的影响,得出结论如下。

(1) 在充电初期、充电末期、放电初期和放电末期,电池模块的电压、电流、产热功率、冷却功率和电芯温度会快速变化,出现区域极值。

(2) 冷却液出口区域的冷板、电芯和铝排的温度出现最大值,而冷却液入口区域的冷板、电芯和铝排的温度则出现最小值。

(3) 电池模块初始温度对充电过程的热特性参数影响较大,对静置和放电过程的热特性参数影响较小。可以适当提升初始温度来保证冷却功率处于合适区间,避免冷水机的压缩机频繁启停。

(4) 仿真计算结果和实验测量数据基本匹配,证明了仿真分析方法的正确性和有效性。该仿真分析方法能对电池模块的充放电特性分析、热管理参数优化提供仿真依据。

参考文献

- [1] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.220467.
ZHANG Z G, KANG C Q. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.220467.
- [2] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于加快推动新型储能发展的指导意见 [EB/OL]. (2021-07-15) [2025-09-04]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/24/content_5627088.htm.
- [3] 贺鸿杰, 张宁, 杜尔顺, 等. 电网侧大规模电化学储能运行效率及寿命衰减建模方法综述[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 193-207. DOI:10.7500/AEPS20190820005.
HE H J, ZHANG N, DU E S, et al. Review on modeling method for operation efficiency and lifespan decay of large-scale electrochemical energy storage on power grid side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 193-207. DOI:10.7500/AEPS20190820005.
- [4] 徐俊, 郭喆晨, 谢延敏, 等. 储能锂电池系统综合管理研究进展[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(10): 1-23. DOI:10.7652/xjtub202410001.
XU J, GUO Z C, XIE Y M, et al. Review of research progress in integrated management for energy storage lithium battery systems[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(10): 1-23. DOI:10.7652/xjtub202410001.
- [5] 匡柯, 孙跃东, 任东生, 等. 车用锂离子电池电化学-热耦合高效建模方法[J]. 机械工程学报, 2021, 57(14): 10-22. DOI: 10.3901/JME.2021.14.010.
KUANG K, SUN Y D, REN D S, et al. Efficient approach for electrochemical-thermal coupled modeling of large-format lithium-ion power battery[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(14): 10-22. DOI:10.3901/JME.2021.14.010.
- [6] 严康为, 龙鑫林, 鲁军勇, 等. 高倍率磷酸铁锂电池简化机理建模与放电特性分析[J]. 电工技术学报, 2022, 37(3): 599-609. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.201206.
YAN K W, LONG X L, LU J Y, et al. Simplified mechanism modeling and discharge characteristic analysis of high C-rate LiFePO₄ battery[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(3): 599-609. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.201206.
- [7] RAYIT N S, CHOWDHURY J I, BALTA-OZKAN N. Techno-economic optimisation of battery storage for grid-level energy services using curtailed energy from wind[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 39: 102641. DOI:10.1016/j.est.2021.102641.
- [8] MAYYAS A, CHADLY A, AMER S T, et al. Economics of the Li-ion batteries and reversible fuel cells as energy storage systems when coupled with dynamic electricity pricing schemes[J]. Energy, 2022, 239: 121941. DOI:10.1016/j.energy.2021.121941.
- [9] MALLARAPU A, KIM J, CARNEY K, et al. Modeling extreme deformations in lithium ion batteries[J]. eTransportation, 2020, 4: 100065. DOI:10.1016/j.etrans.2020.100065.
- [10] AL-ZAREER M, DA SILVA C, AMON C H. Predicting anisotropic thermophysical properties and spatially distributed heat generation rates in pouch lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2021, 510: 230362. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2021.230362.
- [11] LIN X F, PEREZ H E, SIEGEL J B, et al. Online parameterization of lumped thermal dynamics in cylindrical lithium ion batteries for core temperature estimation and health monitoring[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(5): 1745-1755. DOI:10.1109/tcst.2012.2217143.
- [12] WILKE S, SCHWEITZER B, KHATEEB S, et al. Preventing thermal runaway propagation in lithium ion battery packs using a phase change composite material: An experimental study[J]. Journal of Power Sources, 2017, 340: 51-59. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.11.018.
- [13] 龙潘, 耿光超, 江全元, 等. 储能系统锂电池电热耦合建模及参数辨识方法研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(4): 318-327. DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-1860.
LONG P, GENG G C, JIANG Q Y, et al. Study on electrothermal coupling modeling and parameter identification of lithium battery energy storage system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(4): 318-327. DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-1860.
- [14] 李航洋, 阳同光. 计及动态非均匀热特性的储能软包锂电池充放电热路模型[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 104-113. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230547.
LI H Y, YANG T G. A charging/discharging thermal circuit model for energy storage pouch lithium batteries considering dynamic

- and non-uniform characteristics[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(19): 104-113. DOI:10.19783/j.cnki.pspc.230547.
- [15] 刘莹, 孙丙香, 赵鑫泽, 等. 基于电热耦合模型的宽温域锂离子电池SOC/SOP联合估计[J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(9): 3030-3041. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0659.
- LIU Y, SUN B X, ZHAO X Z, et al. Joint estimation of SOC/SOP for lithium-ion batteries across a wide temperature range using an electro-thermal coupling model[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(9): 3030-3041. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0659.
- [16] 宋梦琼, 彭宇, 廖自强. 基于电化学热耦合模型的电池热管理研究[J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(2): 578-585. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0620.
- SONG M Q, PENG Y, LIAO Z Q. Research on battery thermal management based on electrochemical model[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(2): 578-585. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0620.
- [17] 杜江龙, 杨雯棋, 黄凯, 等. 复合相变材料/空冷复合式锂离子电池模块散热性能[J]. *化工学报*, 2023, 74(2): 674-689. DOI:10.11949/0438-1157.20221068.
- DU J L, YANG W Q, HUANG K, et al. Heat dissipation performance of the module combined CPCM with air cooling for lithium-ion batteries[J]. *CIESC Journal*, 2023, 74(2): 674-689. DOI:10.11949/0438-1157.20221068.
- [18] 郭喆晨, 徐俊, 王行早, 等. 基于一维/三维热模型的平板热管/液冷电池热管理系统优化设计[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(22): 79-88. DOI:10.3901/JME.2023.22.079.
- GUO Z C, XU J, WANG X Z, et al. Optimal design of flat heat pipe-liquid cooling battery thermal management system based on 1D/3D thermal model[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(22): 79-88. DOI:10.3901/JME.2023.22.079.
- [19] 汪朝晖, 熊肖, 高全杰, 等. 基于仿蜘蛛网流道结构设计的圆柱形锂电池热管理系统性能研究[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(22): 150-162. DOI:10.3901/JME.2023.22.150.
- WANG C H, XIONG X, GAO Q J, et al. Performance study of cylindrical lithium battery thermal management system based on the design of spider web-like flow channel structure[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(22): 150-162. DOI: 10.3901/JME.2023.22.150.
- [20] 马菁, 段志勇, 孙勇飞, 等. 基于热管的储能锂电池散热特性数值模拟研究[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(17): 6737-6746. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.222840.
- MA J, DUAN Z Y, SUN Y F, et al. Numerical simulation on the heat dissipation characteristics of lithium battery for energy storage based on heat pipe[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(17): 6737-6746. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.222840.
- [21] 李长龙, 崔纳新, 常龙, 等. 风冷并联电池模组的建模方法与不一致性研究[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(12): 168-179. DOI:10.3901/JME.2022.12.168.
- LI C L, CUI N X, CHANG L, et al. Modeling and inconsistency analysis of parallel-connected battery module with forced-air cooling[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(12): 168-179. DOI:10.3901/JME.2022.12.168.
- [22] 颜宁, 李吉洋, 李相俊, 等. 考虑电热耦合特性的电池模组多状态协同估计方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(16): 6340-6354. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.241242.
- YAN N, LI J Y, LI X J, et al. Research on multi-state cooperative estimation method of battery modules considering electro-thermal coupling characteristics[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(16): 6340-6354. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.241242.
- [23] 张洪欣, 沈远茂, 韩宇南. 电磁场与电磁波[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- ZHANG H X, SHEN Y M, HAN Y N. *Field and wave electromagnetics*[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.
- [24] EKSTRÖM H, FRIDHOLM B, LINDBERGH G. Comparison of lumped diffusion models for voltage prediction of a lithium-ion battery cell during dynamic loads[J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 402: 296-300. DOI:10.1016/j.jpowsour.2018.09.020.
- [25] 陶文铨. 传热学[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- TAO W Q. *Heat transfer*[M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2019.
- [26] 张鸣远. 高等工程流体力学——少学时[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2008.