

# 电池包结构热仿真分析与优化设计<sup>①</sup>

刘俊<sup>1,2</sup>, 郭华军<sup>1</sup>, 徐露露<sup>2</sup>, 徐宁<sup>1,2</sup>, 颜果春<sup>1</sup>

(1.中南大学 冶金与环境学院, 湖南 长沙 410083; 2.广东博力威科技股份有限公司, 广东 东莞 523000)

**摘要:** 通过热仿真技术对某款电池包进行散热性能优化研究,旨在提升电池安全性与使用寿命。利用 ANSYS 软件构建电池包热仿真模型,并在 1C 倍率放电条件下开展温度分布分析。结果表明,仿真结果与实际测量数据误差在 0.5 °C 以内,仿真模型具有较高的准确性。提出了工字形散热板和导热胶填充两种散热优化方案,结果表明,两种方案均能有效提升电池包的散热性能,电芯最高温度分别下降 6.0 °C 和 5.9 °C;工字形散热板方案在降低电芯温度的同时显著减小温差,提升了温度均匀性。

**关键词:** 锂电池; 电池包; 电芯; 热仿真; 散热; 电芯温度; 电芯温差; 21700 圆柱电池; 电池热管理

中图分类号: TM911

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.02.028

文章编号: 0253-6099(2025)02-0157-05

## Thermal Simulation Analysis and Optimal Design of Battery Pack Structure

LIU Jun<sup>1,2</sup>, GUO Huajun<sup>1</sup>, XU Lulu<sup>2</sup>, XU Ning<sup>1,2</sup>, YAN Guochun<sup>1</sup>

(1.School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2.Guangdong Greenway Technology Co., Ltd., Dongguan 523000, Guangdong, China)

**Abstract:** The thermal dissipation performance of a battery pack was optimized by thermal simulation, aiming to enhance safety and service life of batteries. A thermal simulation model of the battery pack was established with ANSYS software, and temperature distribution was analyzed for the battery discharged at 1C rate. It is found that the simulation results deviate from actual measurements by less than 0.5 °C, confirming the high accuracy of the model. Two optimized thermal dissemination schemes were proposed, including I-shaped heatsink and thermally conductive adhesive filling. Study shows that both schemes can effectively improve the thermal dissipation performance, leading to the maximum temperature of cells reduced by 6.0 °C and 5.9 °C, respectively. The scheme of I-shaped heatsink can not only reduce cell temperatures but also significantly reduce temperature differences, resulting in better thermal uniformity.

**Key words:** lithium battery; battery pack; battery cell; thermal simulation; heat dissipation; cell temperature; cell temperature difference; 21700 battery; thermal management of battery

随着“碳达峰”和“碳中和”战略目标的提出,推动汽车节能技术发展、减少交通能源对石化能源的依赖并降低空气污染,已成为重要研究方向之一<sup>[1]</sup>。新能源汽车在能量转换效率和碳排放方面相较传统燃油汽车具有显著优势<sup>[2]</sup>,因此,新能源汽车替代燃油车的趋势已不可逆转<sup>[3]</sup>。锂离子电池凭借其较高的能量密度,广泛应用于新能源汽车动力系统<sup>[4]</sup>。然而,锂离子电池的热安全问题较为突出,提升其散热性能、确保其安全性并延长使用寿命,已成为当前科研工作的

重点<sup>[5]</sup>。热仿真技术在电动汽车热管理方面具有重要作用,如整车级、系统级及电芯级的热管理优化,涉及不同散热方式与电池产热模型的复杂分析。尤其是在电芯级别的热管理中,必须综合考虑电池内部的热传导、放热和热失控等关键因素<sup>[6]</sup>。电池模型算法如基于物理原理的热传导模型和经验公式模型等,被广泛用于描述电池的热特性<sup>[7]</sup>。通过热仿真能够模拟电芯在充放电过程中的温度分布<sup>[8]</sup>,有效预测潜在的热失控风险,为电池系统的安全设计提供科学依

① 收稿日期: 2024-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(51974370)

作者简介: 刘俊(1986—),男,湖南浏阳人,博士,高级工程师,主要从事电池及储能系统设计与仿真研究。E-mail: ljun05@163.com

通信作者: 郭华军(1972—),男,湖南新宁人,教授,博士研究生导师,主要从事锂电池材料研究与开发。E-mail: ghj.csu@163.com

据<sup>[9]</sup>,这有助于优化电池的散热结构,提高其循环寿命和安全性,从而增强整车系统的可靠性和安全性<sup>[10]</sup>。

电池热仿真技术<sup>[11-15]</sup>通过构建电池的热传导模型,并采用有限元等数值计算方法,已广泛应用于模拟电池充放电过程中的传热规律<sup>[16]</sup>。随着计算技术的持续进步,特别是其在多物理场耦合仿真和多尺度建模方面的发展,为电池的热分析提供了更加全面的理论支持<sup>[17]</sup>。本文基于某款电池包,借助 ANSYS 软件进行了热仿真分析,评估了电池包内间距和散热装置对散热性能的影响。

## 1 电池包材料及结构

### 1.1 电池包的选材

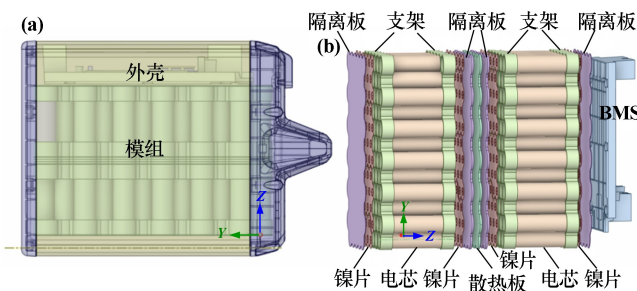
电池包由电芯、镍片、外壳和电池管理系统(BMS)板组成,电池包在设计时不仅要满足功率和容量等性能指标,还需满足电芯使用安全指标。本文选用某 21700 型号电芯,电芯容量 5.00 Ah,标准电压为 3.63 V,最高电压 4.30 V,截止电压 2.50 V。电池包使用的主要材料物性参数如表 1 所示。

表 1 电池包使用的主要材料属性  
Table 1 Material properties of battery pack

材料名称	导热系数/ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	导电率/ ( $S \cdot m^{-1}$ )	比热容/ ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )	密度/ ( $kg \cdot m^{-3}$ )
电芯(21700)	0.99/13.30/25.80	—	1 282.00	2 829.00
纯镍	90.52	$1.50 \times 10^7$	443.00	8 900.00
塑胶	0.24	—	1 600.00	1 220.00
散热铝片	237.00	—	903.00	2 702.00
导热胶	0.46	—	1 006.43	1 200.00

### 1.2 电池包结构设计

电池包由 130 颗 21700 圆柱电池采用串并联方式组成,其中串联电芯数量为 13,并联电芯数量为 10。初始设计中电芯分为上、下两层,电池包结构如图 1 所示,上、下两层通过导线连接。电芯通过支架固定,并



(a) 电池包外形结构; (b) 电池包模组结构

图 1 电池包几何结构

Fig. 1 Battery pack geometry

与多块镍片通过电焊连接形成导电网络,隔离板布置在镍片上方起绝缘作用。

## 2 有限元模型的建立

本次仿真中利用 ANSYS 软件构建锂离子电池包的热仿真模型,电池包总单元数为 29 622 391,所建立的网格模型如图 2 所示。在仿真过程中设置电池以恒定的 1C 倍率进行放电。在模拟过程中,电池的内阻及电压随温度和荷电状态(SOC)的变化而动态调整。此次仿真忽略了电芯内部反应热的影响,以简化模型的计算复杂度。



图 2 锂离子电池包网格模型

Fig. 2 Grid model of lithium-ion battery pack

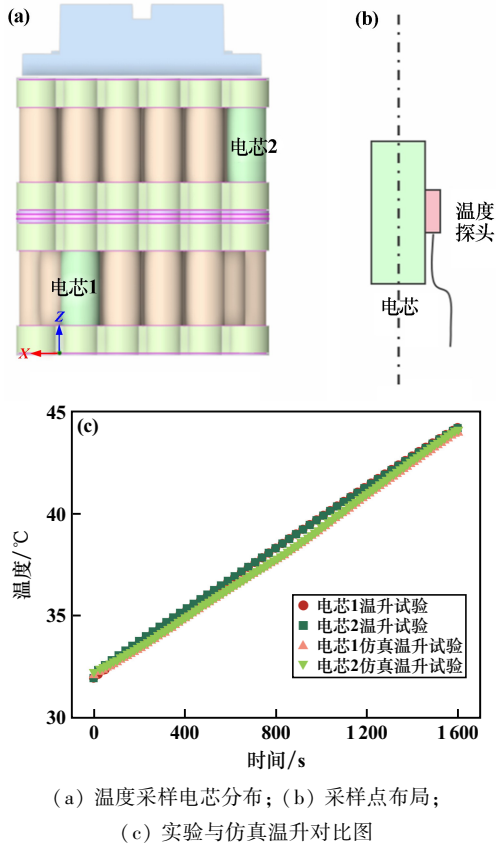
## 3 实验结果与讨论

### 3.1 实验验证

通过电池包设计图纸制作电池包样品,如图 3(a)所示。在电池包中选取电芯 1 和电芯 2 布置 NTC 采样点(如图 3(b)所示),NTC 采用热电偶温度传感器利用塞贝克效应直接测量电芯温度,并通过数据采集仪放大和转换热电偶的输出信号。实验初始温度为 32 °C,进行 1C 放电,因实际设计中 BMS 策略控制,1 600 s 后电池包电流随 BMS 温度超限而变化,所以只对比前 1 600 s 内两颗电芯温升变化。实验中测得电芯 1 和电芯 2 温度分别为 44.0 °C 和 44.1 °C。使用 ANSYS 软件建立的电池包热仿真模型模拟 1C 放电 1 600 s,仿真结果如图 3(c)所示,电芯 1 和电芯 2 温度分别为 43.9 °C 和 44.3 °C。可知电芯 1 和电芯 2 仿真模拟结果与实验测量值误差在 0.5 °C 以内,因此本案例中建立的电池包热仿真模型与实际实验结果具有较好的一致性。

### 3.2 1C 常温仿真工况分析

该款 21700 型号电芯工作温度范围为 -20 ~ 60 °C,因此在实际使用过程中,需要确保电芯的最高温度不

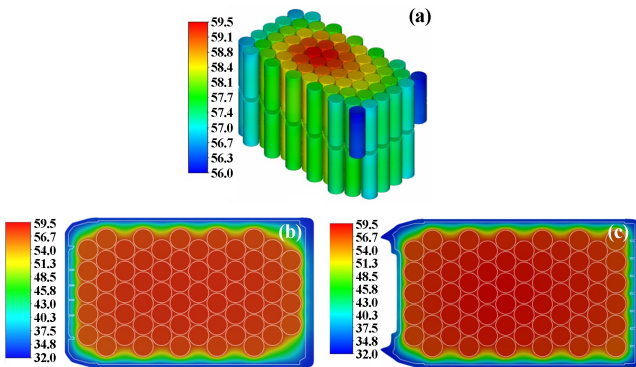


(a) 温度采样电芯分布; (b) 采样点布局;  
(c) 实验与仿真温升对比图

图 3 电芯以及实验验证结果

Fig.3 Cell and experimental verification results

超过这一上限。如图 4 所示,在初始温度 32 °C 条件下,进行 1C 放电时,电池放电 3 600 s 后,电芯温度分布云图呈现出以下特点:中心区域温度较高,周边区域温度较低。图 4(b)和图 4(c)则显示,上层电芯的温度高于下层电芯的温度;其中电芯的最低温度为 55.9 °C,位于上层电芯的外沿;电芯的平均温度为 58.1 °C;电池包内温差为 3.6 °C,温度分布较均匀。



(a) 电芯整体温度分布云图; (b) 下层电芯 XY 截面温度分布云图;  
(c) 上层电芯 XY 截面温度分布云图

图 4 初始设计电池包温度分布特性

Fig.4 Distribution characteristics of temperature in initial battery pack design

## 4 电池包优化设计

由初始仿真结果可知,初始温度 32 °C 时,电芯最终时刻最高温度 59.5 °C,电池包处于夏季高温环境下,电芯温度可能超过使用上限温度 60 °C,存在较大风险,为拓展电池包使用范围,需要优化散热。考虑增加散热加强板和在电池内部增加导热胶对电池进行优化。

### 4.1 散热板优化设计

在两层电芯连接处加入工字形隔离板,延伸散热铝板至电池外壳(散热板优化设计,优化方案 1),如图 5 所示。

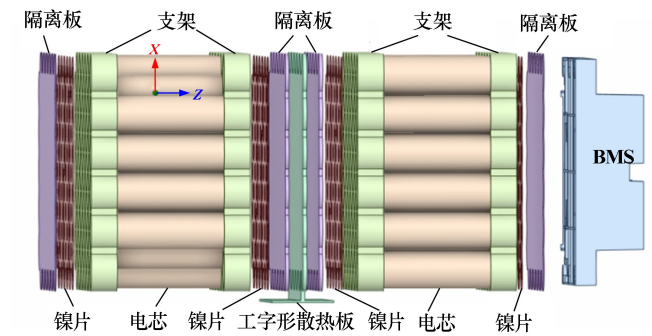
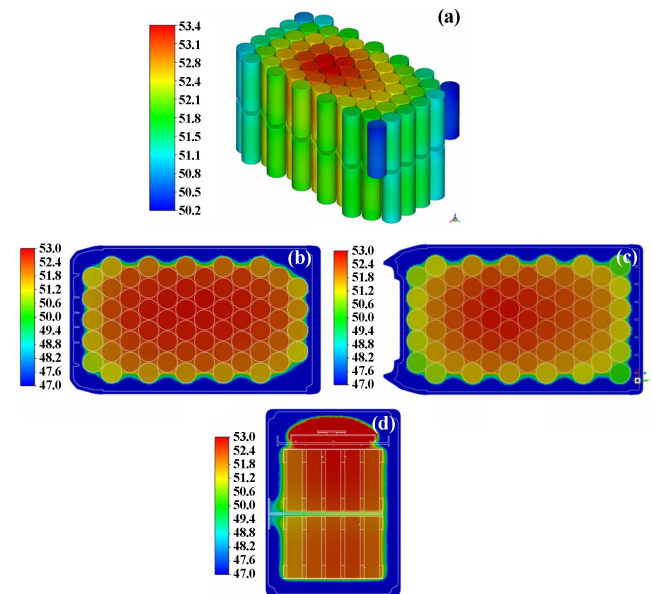


图 5 散热板优化设计结构图

Fig.5 Diagram of optimized heatsink structure

图 6 展示了优化方案 1 在 1C 倍率下电芯温度分布云图。与初始工况温度分布对比可知,上层电芯温度显著降低,外圈温度低于下层电芯温度,工字形散热板



(a) 电芯整体温度分布云图; (b) 下层电芯 XY 截面温度分布云图;  
(c) 上层电芯 XY 截面温度分布云图; (d) YZ 截面温度分布云图

图 6 优化方案 1 电芯温度分布云图

Fig.6 Temperature distribution contour plot of cells for optimization scheme 1

有利于将电芯产生的热量向外导出,外壳温度上升。电池包内电芯最高温度为 53.5 ℃,最低温度为 50.8 ℃,电芯平均温度为 52.8 ℃,温差为 2.7 ℃,可知工字形散热板具有较好的均衡温差,且有效降低电芯温度。

#### 4.2 灌胶优化设计

在电池包内部填充导热胶能够降低电池温升,因此在 BMS 以下填充导热胶(填充区域如图 7 粗线框区域所示),形成优化方案 2。图 8 为优化方案 2 在 1C 倍率下放电 3 600 s 后的电芯温度分布云图。如图 8 可知,电芯温度大幅度降低,其中最高电芯温度 53.6 ℃,最低温度为 47.4 ℃。与初始方案温度分布云图对比可知,下层电芯温度显著降低,电芯通过空间内填充的导热胶将热量传递至外壳,空间温度上升。

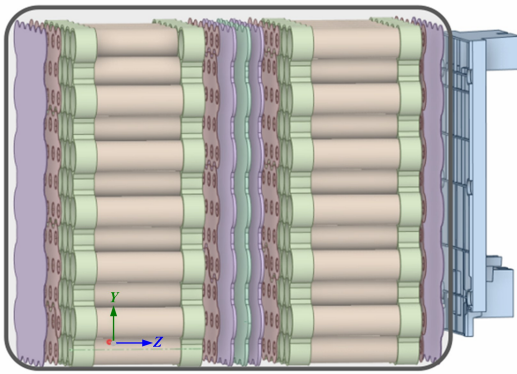
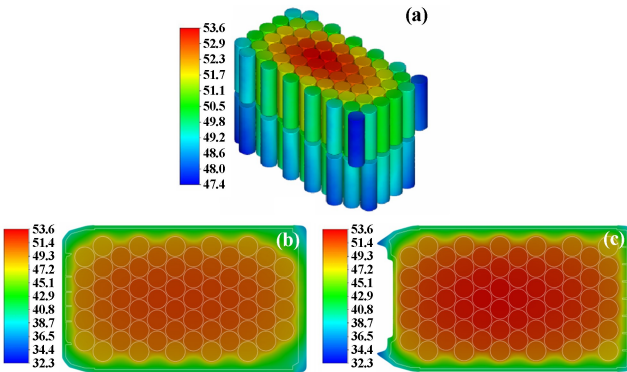


图 7 灌胶方案示意图

Fig.7 Schematic diagram of encapsulation scheme



(a) 电芯整体温度分布云图; (b) 下层电芯 XY 截面温度分布云图;

(c) 上层电芯 XY 截面温度分布云图

图 8 优化方案 2 电芯温度分布云图

Fig.8 Temperature distribution contour plot of cells for optimization scheme 2

#### 4.3 优化方案对比分析

对 2 种优化方案的模型以及原始模型的温度进行分析,如图 9 所示。在 1C 倍率下放电,相比初始工况,优化方案 1 和 2 的电芯最高温度分别下降 6.0 ℃ 和

5.9 ℃,电芯平均温度分别下降 5.3 ℃ 和 7.3 ℃。优化方案 1 温差为 2.7 ℃,优化方案 2 温差为 6.2 ℃。方案 2 平均温度下降更多,但方案 1 温差更小、均温性更好。电池寿命与温差密切相关,推荐使用优化方案 1。

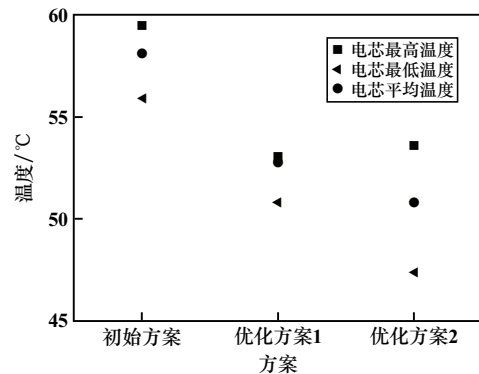


图 9 优化前后结果对比

Fig.9 Comparison of results before and after optimization

## 5 结论

1) 数值模拟结果与实验数据较好吻合,验证了本文热仿真分析方法的合理性;该模型可用于指导电池包前期设计,减少工程制造成本。

2) 该电池包采用工字形散热板方案和灌胶方案都能够降低电芯最高温度,但工字形散热板优化方案能够降低电芯温差,因电池寿命与温差相关,从电池包使用寿命出发,推荐使用工字形散热板优化方案。

#### 参考文献(References):

- [1] 范益伟. 锂离子电池产热特性及主被动热管理系统控温性能研究[D]. 武汉:武汉科技大学, 2023.  
FAN Yiwei. Study on the heat generation characteristics of lithium-ion batteries and the temperature control performance of active and passive thermal management systems[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2023.
- [2] 郑舒允. 高质量绿色发展下中国新能源汽车产业发展现状及其问题分析[J]. 科技和产业, 2022, 22(3): 132-137.  
ZHENG Shuyun. Analysis of the current situation and issues of China's new energy vehicle industry under high-quality green development[J]. Science & Technology and Industry, 2022, 22(3): 132-137.
- [3] 李新建. 新能源汽车电气系统发展趋势与挑战[J]. 汽车知识, 2024, 24(7): 174-176.  
LI Xinjian. Development trends and challenges of new energy vehicle electrical systems[J]. Automotive Knowledge, 2024, 24(7): 174-176.
- [4] ABADA S, MARLAIR G, LECOCQ A, et al. Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review[J]. Journal of Power Sources, 2016, 306: 178-192.
- [5] 谢琪兵. 车用锂离子电池热管理结构设计及其优化[D]. 大连:大

- 连交通大学, 2023.
- XIE Qibing. Vehicle lithium-ion battery thermal management structure design and optimization [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2023.
- [6] 王晓慧, 吴锋, 杨向前, 等. 三元锂电池模块热仿真风冷优化设计[J]. 机械设计与制造, 2021(6):15-19.
- WANG Xiaohui, WU Feng, YANG Xiangqian, et al. Thermal simulation and air-cooling optimization design of ternary lithium battery module[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2021(6):15-19.
- [7] 陆新. 基于分数阶模型的锂离子电池电极的电荷分布及传热特性研究[D]. 南京:南京林业大学, 2021.
- LU Xin. Study on charge distribution and heat transfer characteristics of lithium-ion battery electrodes based on fractional order model[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2021.
- [8] 张小帆, 王粤. 基于CFD的电池散热模型仿真和分析[J]. 汽车实用技术, 2023,48(9):29-34.
- ZHANG Xiaofan, WANG Yue. CFD-based simulation and analysis of battery cooling models[J]. Automotive Practical Technology, 2023, 48(9):29-34.
- [9] 钟泽星. 锂离子电池热特性仿真分析与电池组散热结构优选[D]. 北京:中国石油大学(北京), 2023.
- ZHONG Zexing. Simulation analysis of thermal characteristics of lithium-ion batteries and optimal selection of battery pack cooling structures[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023.
- [10] 陈瑞可. 基于复合相变材料的锂电池热管理结构及其控温性能研究[D]. 南昌:南昌大学, 2023.
- CHEN Ruike. Study on thermal management structure and temperature control performance of lithium battery based on composite phase change materials[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.
- [11] 李斌, 常国峰, 林春景, 等. 车用动力锂电池产热机理研究现状[J]. 电源技术, 2014,38(2):378-381.
- LI Bin, CHANG Guofeng, LIN Chunjing, et al. Research status of heat generation mechanism of vehicle power lithium batteries[J]. Power Supply Technology, 2014,38(2):378-381.
- [12] PANCHAL S, MATHEW M, FRASER R, et al. Electrochemical thermal modeling and experimental measurements of 18650 cylindrical lithium-ion battery during discharge cycle for an EV[J]. Applied Thermal Engineering, 2018,135:123-132.
- [13] JI C, WANG B, WANG S, et al. Optimization on uniformity of lithium-ion cylindrical battery module by different arrangement strategy[J]. Applied Thermal Engineering, 2019,157:1136-1148.
- [14] LIU G C, ZHANG L J. Research on the thermal characteristics of an 18650 lithium-ion battery based on an electrochemical-thermal flow coupling model[J]. World Electric Vehicle Journal, 2021,12(4):156-172.
- [15] 胡言庆, 杨斌, 王宇作, 等. 不同工况下功率型锂离子电池的热特性与仿真研究[J]. 电工电能新技术, 2023,42(1):21-28.
- HU Yanqing, YANG Bin, WANG Yuzuo, et al. Thermal characteristics and simulation study of power-type lithium-ion batteries under different operating conditions [J]. Electrical Engineering & New Technology, 2023,42(1):21-28.
- [16] 梁宇帆. 新能源汽车电池热管理系统研究与优化[D]. 郑州:华北水利水电大学, 2023.
- LIANG Yufan. Research and optimization of thermal management system for new energy vehicle batteries[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2023.
- [17] 胡翀. 质子交换膜燃料电池多物理场耦合仿真研究与流场结构优化设计[D]. 镇江:江苏科技大学, 2023.
- HU Chong. Multi-physics field coupling simulation study and flow field structure optimization design of proton exchange membrane fuel cells[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2023.
- 引用本文: 刘俊, 郭华军, 徐露露, 等. [J]. 电池包结构热仿真分析与优化设计矿冶工程, 2025,45(2):157-161.
- LIU Jun, GUO Huajun, XU Lulu, et al. Thermal simulation analysis and optimal design of battery pack structure [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):157-161.

(上接第156页)

- [9] 李方喆, 柯华, 张洪军, 等. 多铁性铁酸铋陶瓷研究进展[J]. 现代技术陶瓷, 2022,43(3):151-172.
- LI Fangzhe, KE Hua, ZHANG Hongjun, et al. Advances in multiferroic bismuth ferrite ceramics[J]. Advanced Ceramics, 2022,43(3):151-172.
- [10] AGARWAL R, SHARMA Y, HONG S, et al. Modulation of oxygen vacancies assisted ferroelectric and photovoltaic properties of (Nd, V) co-doped BiFeO<sub>3</sub> thin films [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018,51(27):275306.
- [11] ISLAM M A, SATO T, ARA F, et al. Sol-gel based synthesis to explore structure, magnetic and optical properties of double perovskite Y<sub>2</sub>FeCrO<sub>6</sub> nanoparticles [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023,944:169066.
- [12] KATHIRVEL A, INDU K.N, GANGA R, et al. Enhanced magnetic, dielectric and photoconductive properties of Zr doped BiFeO<sub>3</sub> nanostructures[J]. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 2022,142:115306.
- 引用本文: 雷鹏涛, 周炜, 杨济源, 等. Ba-Ti 共掺杂铁酸铋陶瓷的多铁性研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):152-156.
- LEI Pengtao, ZHOU Wei, YANG Jiyuan, et al. Multiferroic properties of Ba-Ti Co-doped BiFeO<sub>3</sub> ceramics[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):152-156.