

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.027

# 车用锂离子电池散热系统设计及结构优化

朱浩冉, 盛国超, 陈梦, 张杰, 洪玮, 冯林涛

(安徽理工大学 新能源与智能网联汽车学院, 安徽 合肥 231131)

**摘 要:** 考虑到锂离子电池热特性对电池的性能有着极为重要的影响, 提出一种由多散热构件相互耦合的电池热管理系统, 对液冷板、相变材料以及热管进行优化设计, 从而将锂离子电池温度控制在合理范围。使用 SolidWorks 进行建模, 运用 Fluent 对模型进行仿真分析。研究结果表明: 对电池模组的散热结构进行合理设计, 耦合后的散热系统在不同环境温度和高倍率放电的条件下均可使得电池模组的最高温度和最大温差维持在合理范围内。

**关键词:** 锂离子电池; 电池热管理; 液冷板; 相变材料; 热管

**中图分类号:** TG156; TP391.9    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1671-5276(2026)02-0140-05

## Design and Structural Optimization of Cooling System for Automotive Lithium-ion Batteries

ZHU Haoran, SHENG Guochao, CHEN Meng, ZHANG Jie, HONG Wei, FENG Lintao

(College of New Energy and Intelligent Networked Vehicles, Anhui University of Science and Technology, Hefei 231131, China)

**Abstract:** With regard to the significant effects of thermal characteristics on the performance of batteries thermal, this paper proposes a battery thermal management system consisting of multiple heat dissipation components coupled with each other, and optimizes the design of liquid cooling plates, phase change materials and heat pipes, so as to control the temperature of lithium-ion batteries in a reasonable range. SolidWorks are applied for modeling and the model is simulated and analyzed by Fluent. The reach results show that the reasonably-designed heat dissipation structure of the battery module, along with the coupled cooling system, can maintain the highest temperature and highest temperature difference of the battery module within a reasonable range under different ambient temperatures and high rate discharge conditions.

**Keywords:** lithium-ion batteries; battery thermal management; liquid-cooled plates; phase change materials; heat pipes

### 0 引言

面对能源短缺以及环境污染等问题, 新能源汽车以其节能、环保等优势, 成为了汽车产业的发展方向。其动力电池在新能源汽车制造成本中占比 40%, 重要性不言而喻<sup>[1]</sup>。锂离子电池 (LIB) 作为储能的核心部件, 其能量密度、循环寿命和可持续性方面均表现优异且节能环保, 因此被广泛应用于电动汽车和混合动力汽车中<sup>[2]</sup>。

先进的热管理系统 (thermal management system, TMS) 可以提升锂离子电池的稳定性和安全性。TMS 可以划分为空冷、液冷、相变冷却<sup>[3]</sup>及热管冷却<sup>[4]</sup>等领域。锂离子电池的工作温度对

其工作性能影响显著, 建议在电池充放电的过程中, 将电池组的温度控制在 25 ℃ ~ 40 ℃ 的最佳范围内, 以确保电池温差不超过 5 ℃<sup>[5-7]</sup>。

新能源汽车在实际行驶的工况下会产生大于 3C 的放电情况, 这会使得电池的产热量大幅增加<sup>[8]</sup>。当环境温度较高时, 电池温度会进一步升高<sup>[9]</sup>。本文针对锂离子电池在较高的放电倍率以及不同环境温度的条件下, 设计了一种 PCM+冷板+热管相互耦合的锂离子电池热管理方法, 并进行了一系列的仿真分析, 分别对冷却液的流速、液冷板数量以及液冷板冷却液流道流向布置等影响因素进行寻优, 从而得出较为合理的散热方案。

**基金项目:** 2023 年度高等学校省级质量工程重点项目 (2023jxjy009); 安徽高校自然科学基金项目 (2022AH050837); 安徽省高等学校科学研究项目 (自然科学类) 重点项目 (2023AH051166)

**第一作者简介:** 朱浩冉 (2000—), 男, 安徽淮北人, 硕士研究生, 研究方向为新能源汽车锂离子电池热管理, 2023200583@ aust.edu.cn。

**通信作者简介:** 盛国超 (1983—), 男, 安徽滁州人, 教授, 硕士, 研究方向为内燃机性能优化、新能源汽车动力系统其控制技术, 2021337@ aust.edu.cn。

## 1 数值模拟

### 1.1 几何模型

文中所用电池为某品牌的一款方形磷酸铁锂电池,电池参数如表1所示。电池模组由4块单体电池所构成。使用 SolidWorks 软件对单体电池进行建模。因为电池极耳的内阻相对较小,所以在计算锂离子电池的总内阻时忽略极耳的影响,故在建模和仿真计算时省略电池极耳。单体电池模型如图1所示,电池以及各散热构件的物性参数如表2所示。

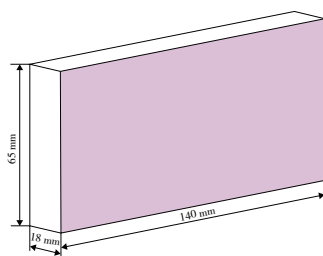


图1 单体电池模型图

表1 电池基本参数

| 参数       | 数值        |
|----------|-----------|
| 规格/Ah    | 15        |
| 额定电压/V   | 3.20      |
| 内阻/mΩ    | 3~4       |
| 质量/kg    | 0.35      |
| 尺寸/mm    | 18×140×65 |
| 放电截止电压/V | 2.25      |
| 充电上限电压/V | 3.65      |
| 持续放电电流/A | 3C        |
| 瞬间放电电流/A | 5C        |

表2 电池及散热材料的物性参数

| 电池及构件                  | 密度/<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 比热容/<br>(J/kg·K) | 导热系数/<br>(W/m·K)                          | 黏度/<br>(kg/(m·s))        | 潜热/<br>(J/kg) | 融化温度<br>范围/℃ |
|------------------------|-----------------------------|------------------|-------------------------------------------|--------------------------|---------------|--------------|
| 电池                     | 2 136.8                     | 1 633            | $\lambda_x = \lambda_y = 29\lambda_z = 1$ | —                        | —             | —            |
| 空气                     | 1.225                       | 1 006.43         | 0.024 2                                   | $1.789\ 4\times 10^{-5}$ | —             | —            |
| 水                      | 998.2                       | 4 182            | 0.6                                       | $1.003\times 10^{-3}$    | —             | —            |
| PCM <sup>[10]</sup>    | 800                         | 2 155            | 6.395                                     | $1.720\times 10^{-5}$    | 187 880       | 37~43        |
| 液冷板(Al)                | 2 719                       | 871              | 202.4                                     | —                        | —             | —            |
| 热管(Cu) <sup>[11]</sup> | 8 960                       | 385              | 8 000                                     | —                        | —             | —            |

### 1.2 热源模型

本文使用 Bernardi 电池生热速率进行相关研究,其表达式如下<sup>[12]</sup>:

$$q = \frac{1}{V} \left( E_{oc} - U - IT \frac{dE_{oc}}{dT} \right) \quad (1)$$

式中: $q$ 为产热量,W/m<sup>3</sup>; $E_{oc}$ 为电池单体的开路电压,V; $V$ 为电池体积,mm<sup>3</sup>; $T$ 为环境温度; $U$ 为电池工作电压,V; $\frac{dE_{oc}}{dT}$ 为熵热系数,取值为0.22 mV/K; $I$ 为电流,A。式(1)中 $(E_{oc} - U)$ 等于 $I^2 R$ , $R$ 为电池内阻,取值为 $4\times 10^{-3}\ \Omega$ ,则式(1)可改写为

$$q = \frac{1}{V} \left( I^2 R - IT \frac{dE_{oc}}{dT} \right) \quad (2)$$

因本文选取的电池参数与文献[13]一致,在

298.15 K下,根据文献[13]的产热结果为依据,本文又扩展了在1C、2C、3C、4C和5C的电流速率下电池的产热速率,产热速率如表3所示。

表3 产热速率

| 放电倍率/C | 放电电流/A | 产热量/(W/m <sup>3</sup> ) |
|--------|--------|-------------------------|
| 1      | 15     | 15 934.5                |
| 2      | 30     | 42 858.0                |
| 3      | 45     | 80 770.5                |
| 4      | 60     | 129 672.0               |
| 5      | 75     | 189 562.5               |

### 1.3 数值模拟描述

为了对散热系统的数值计算过程进行简化,

本文列举了以下假设<sup>[14-17]</sup>:1) 电池产热主要来源于焦耳热效应,可逆熵产热忽略不计;2) 电池的材料属性恒定;3) 冷却液和液冷板的物性参数不随温度的变化而发生改变,冷却液在液冷板中的热交换遵循能量守恒定律;4) PCM 的固相和液相为均质且为各向同性,PCM 发生相变时不考虑其密度变化以及与电池的接触热阻;5) 传热是基于三维的瞬态过程;6) 不考虑辐射传热的影响;7) 冷却液为单相、稳定且不可压缩的流体,抑制其回流,因为本文所采用的冷却液流速最高为 60 mm/s,由式(3)-式(4)可计算得到其雷诺数低于 2 300,因此判定其为层流流动;8) 仿真模拟时,自然对流换热系数设定为 5 W/(m<sup>2</sup>·K)。

$$R_e = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (3)$$

$$D = \frac{4A_c}{S} \quad (4)$$

式中: $\rho$  为冷却液的密度,kg/m<sup>3</sup>;  $\mu$  为冷却液的动力黏度,kg/(m·s);  $v$  为冷却液流速,m/s;  $A_c$  为流道横截面面积,m<sup>2</sup>;  $D$  为流道直径,m;  $S$  为流道周长,m。

#### 1.4 模型验证

为了证明仿真模型的准确性,本文使用 Fluent 软件对单体电池进行仿真模拟,设定模拟时的环境温度为 25 ℃,分别测定单体电池在 1C、1.5C 和 2C 放电速率下的平均温度,将其与文献[13]的同种工况下的实验数据进行比对,如图 2 所示。从图 2 中可以看出,3 种放电倍率下的仿真数据与实验数据误差较小,表明本文所构建的仿真模型准确性较高,可用于进一步的优化处理。

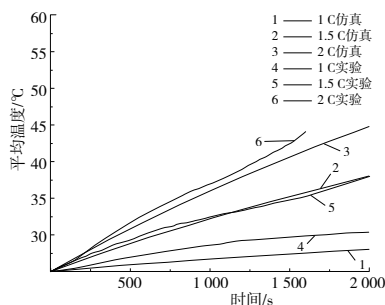


图 2 仿真与实验的平均温度变化对比图

## 2 方案设计与结果分析

### 2.1 方案设计

本文优先设计了 4 种散热结构:方案一为单

个液冷板下置+相变材料;方案二为单个液冷板下置+相变材料+热管;方案三为一对上下对齐放置的液冷板+相变材料+热管;方案四为一对上下反向对齐的液冷板+相变材料+热管。方案一与方案二相比仅缺少热管结构。方案三、方案四与方案二相比在电池组上方增设了一上置液冷板,且热管与上置液冷板的连接方式与下置液冷板相同。具体组合方式可参照方案二模型如图 3 所示。分别对其在环境温度 25 ℃,冷却液的温度 25 ℃,5C 放电,自然对流换热系数为 5 (W/m<sup>2</sup>·K),冷却液流速为 0.1 m/s,冷却介质为水的条件下进行仿真模拟,最终得到散热结构整体的温度云图如图 4 所示。

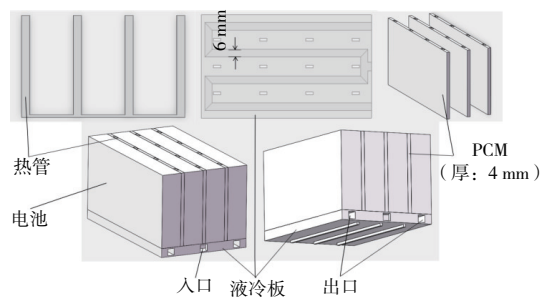


图 3 方案二模型图

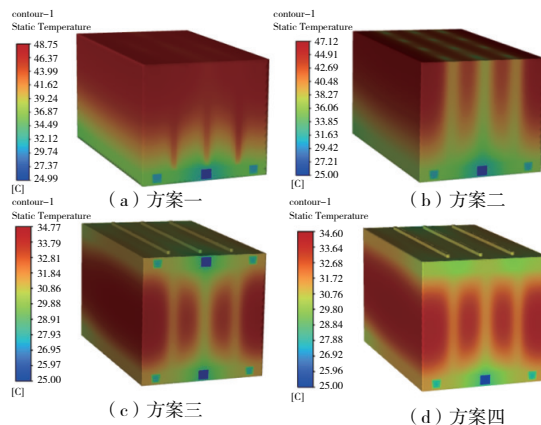


图 4 5C 4 种方案温度云图对比

由图 4 可看出方案一和方案二散热效果较差,方案三和方案四的散热效果较为理想,电池模组的最高温度分别降为 34.77 ℃和 34.60 ℃,从温度云图 4 中可初步判断方案四的均温性更为理想。

为了进一步提高电池模组的均温性,在方案四的基础上在电池模组四周包覆相变材料,并在电池模组两侧面增设热管,改进后的散热结构定为方案五,对其在以上相同工况条件下进行仿真模拟,得到电池模组整体结构及温度云图如图 5 所示。

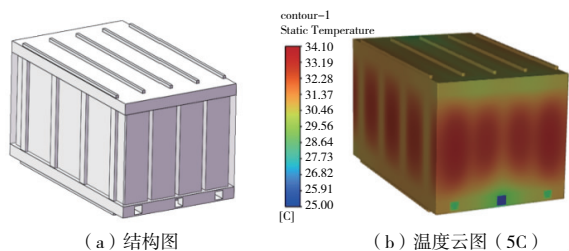


图5 方案五散热结构及温度云图

5种方案的电池模组温度数据如图6所示,方案五在5C放电工况的条件下仍可使得电池模组的最高温度以及最大温差维持在合理范围内。在5C放电的情况下方案五的电池模组的最高温度为33.54℃,最大温差为4.75℃。可以看出优化后的散热结构显著降低了电池模组的最高温度以及最大温差。

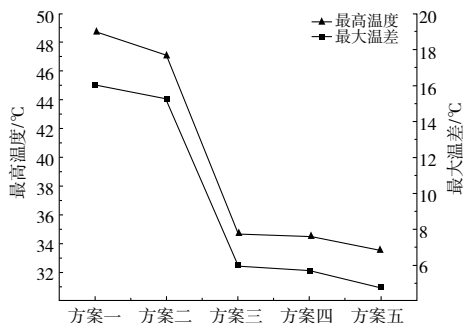
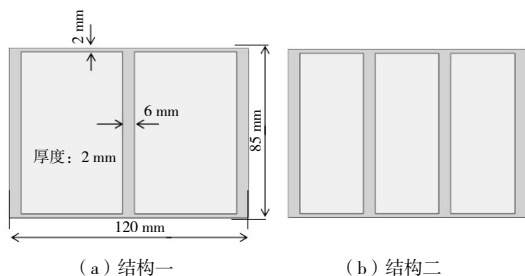


图6 5种方案电池模组温度情况对比

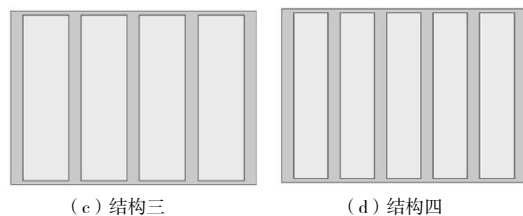
## 2.2 热管结构的影响

为了进一步优化电池模组及电池单体电池自身的温差,在方案五的基础上,改变扁平热管的结构,将扁平热管嵌入相变材料中的个数分别设为3条、4条、5条、6条,本研究设计的4种热管结构及相关尺寸参数如图7所示,分别对其在冷却液温度为25℃、环境温度为25℃、自然对流换热系数为5(W/m<sup>2</sup>·K)、5C放电、冷却液流速为0.1m/s以及冷却介质为水的条件下进行仿真模拟,得到其电池模组温度云图如图8所示,仿真后的电池模组温度数据如图9所示。



(a) 结构一

(b) 结构二



(c) 结构三

(d) 结构四

图7 方案五不同热管结构

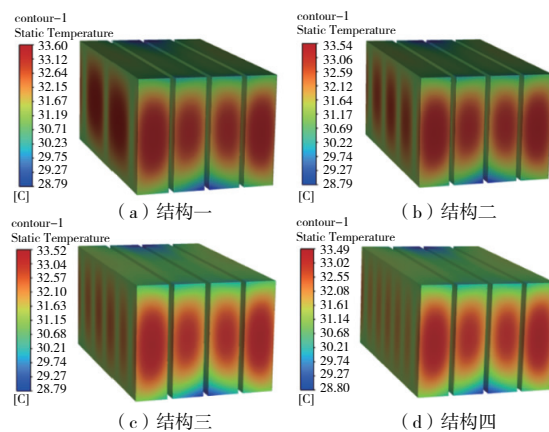


图8 方案五不同热管结构下电池模组温度云图

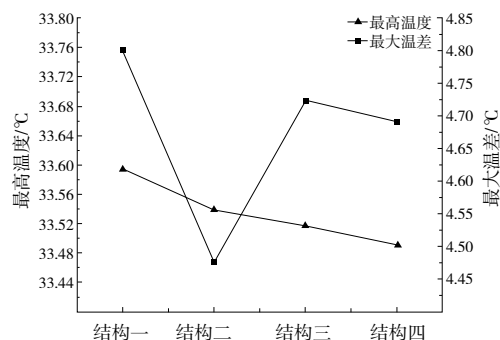


图9 方案五不同热管结构下电池模组温度情况

由图8可以看出最高温度随着热管嵌入相变材料的个数的增加而降低,但降低幅度不明显。由图9中可看出,结构二的均温性最优,根据电池模组最高温度、最大温差以及节省耗材的角度考虑,最终选用结构二做进一步研究。

## 2.3 冷却液流速的影响

对方案五使用结构二形式的热管,将冷却液流速分别设为0.1m/s、0.2m/s、0.3m/s、0.4m/s、0.5m/s、0.6m/s,对电池模组进行仿真模拟,得到其温度数据如图10所示。冷却液流速由0.1m/s上升到0.6m/s过程中,最高温度和最大温差均表现下降趋势,最高温度由33.54℃降为了30.35℃,最大温差由4.75℃降为了3.8℃。流速

为 0.3 m/s 时,电池模组的最高温度为 31.5℃,最大温差为 4.3℃。考虑到在节省能耗的前提下使其拥有较为理想的散热效果,最终选取流速为 0.3 m/s。

## 2.4 环境温度的影响

考虑到现实条件下电池模组需要应对环境温度的影响,因此对方案五使用结构二形式的热管、冷却液的温度为 25℃、自然对流换热系数为  $5(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、5C 放电、冷却液流速为 0.3 m/s 且冷却介质为水的条件下,分别在 25℃、30℃、35℃、40℃ 的环境温度下进行仿真模拟,得到其温度数据如图 11 所示。

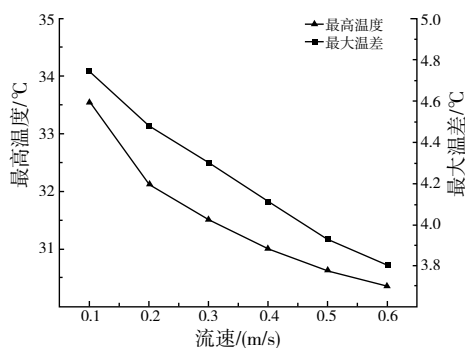


图 10 方案五不同流速下电池模组的温度情况

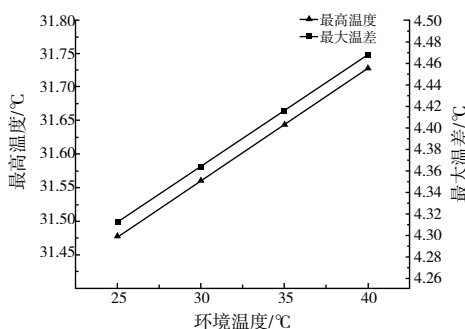


图 11 方案五不同环境温度下电池模组温度情况

由图 11 可知电池模组的最高温度以及最大温差随着环境温度的升高呈上升趋势,当环境温度为 40℃ 时,电池模组的最高温度为 31.75℃,最大温差为 4.46℃。仿真结果证明该散热结构在 4 种温度条件下均可使得电池模组的最高温度维持在合理范围之内。

## 3 结语

本研究为锂离子电池模组在高倍率放电工况下的散热研究,对其散热结构进行了优化设计,采用液冷板+相变材料+热管的组合方式,并对三者

进行合理耦合。对该结构在不同热管结构、不同流速以及不同环境温度的条件下进行了数值模拟,通过对最高温度以及最大温差这两个目标值进行逐层选优的方法,最终确定了相对较优的锂离子电池模组散热耦合结构,该耦合结构可实现结构简化的基础上减少耗材,且能维持电池模组在高倍率放电以及不同环境温度的工况下正常的运行。为了取得更好的散热效果,可采用微通道液冷板或在热管上加装翅片等方式实现。

## 参考文献:

- [1] 邓高攀,程前. 考虑城市交通环境的多模式自适应巡航控制策略[J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(4): 276-280.
- [2] VIKRAM S, VASHISHT S, RAKSHIT D, et al. Recent advancements and performance implications of hybrid battery thermal management systems for Electric Vehicles[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 90:111814.
- [3] 余兴科. 用于锂离子电池热管理的相变复合材料研究[D]. 广汉:中国民用航空飞行学院, 2022.
- [4] 夏静. 基于热管与相变材料耦合的电池热管理系统研究[D]. 长沙:湖南大学, 2021.
- [5] JILTE R, AFZAL A, PANCHAL S. A novel battery thermal management system using nano-enhanced phase change materials[J]. Energy, 2021, 219:119564.
- [6] WERAGODA D M, TIAN G H, BURKITBAYEV A, et al. A comprehensive review on heat pipe based battery thermal management systems [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 224:120070.
- [7] YANG C Y, XI H, WANG M W. Structure optimization of air cooling battery thermal management system based on lithium-ion battery[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 59:106538.
- [8] THAKUR A K, PRABAKARAN R, ELKADEEM M R, et al. A state of art review and future viewpoint on advance cooling techniques for Lithium - ion battery system of electric vehicles [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 32:101771.
- [9] 张聪哲,叶芳,郭航,等. 制冷剂冷却电池的纯电动汽车热管理系统夏季工况模拟[J]. 制冷学报, 2019, 40(2):12-19.
- [10] 易峰. 相变材料与液冷耦合的电池热管理系统散热特性研究[D]. 长沙:湖南大学, 2021.
- [11] 刘松燕,王卫良,彭世亮,等. 兼顾高/低温环境性能的动力电池热管理系统设计[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(7):2181-2191.

(下转第 259 页)

## 4 结语

本文搭建了声发射信号采集系统,进行了膜片联轴器裂纹扩展声发射信号采集试验;研究了声发射信号特征指标提取,对裂纹声发射信号敏感特征进行筛选。本文得出:裂纹扩展声发射信号中的方均根值、时域标准差与频域平均幅值同时间变化相关系数最高,在不同区间,这3个特征值突变转折明显,可用来判断识别膜片联轴器裂纹扩展情况。根据声发射信号将膜片联轴器状态划分为无裂纹扩展、裂纹萌生、裂纹快速扩展区间,试验中裂纹扩展情况符合该划分,实现了裂纹自动检测。

## 参考文献:

- [1] 赵洪波. 声发射检测技术的研究现状及发展方向[J]. 电子世界,2014(3):193-194.
- [2] 邵月. 滚动轴承声发射信号传播特性研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2020.
- [3] 田畅. 基于 LabVIEW 的声发射监测系统研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2020.
- [4] SEEMUANG N, LIM J, KAEWKONGKA T. Shaft crack monitoring by using acoustic emission technique [C]// 2018 2nd International Conference on Engineering Innovation (ICEI). Bangkok, Thailand: IEEE, 2018: 30-34.
- [5] HASE A L. Early detection and identification of fatigue damage in thrust ball bearings by an acoustic emission technique[J]. Lubricants, 2020, 8(3): 37.
- [6] SHENG M, TIAN S C, ZHANG B, et al. Frequency analysis of multi-sources acoustic emission from high-velocity waterjet rock drilling and its indicator to drilling efficiency[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 115: 137-144.
- [7] KHON H, BASHKOV O V. The study of acoustic emission waves generated from different types of sources [J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 19: 2243-2247.
- [8] 张超. 某高压涡轮盘疲劳裂纹萌生及扩展特性研究[D]. 杭州:浙江大学,2019.
- [9] 墨馨遥, 薛凤梅, 刘毅, 等. 基于 XFEM 的复杂应力状态下疲劳裂纹扩展分析[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(1): 177-182.
- [10] 李婷, 付德义, 薛扬. 基于 AE 与 STFT 的变桨轴承裂纹诊断研究[J]. 振动·测试与诊断, 2021, 41(2): 299-303, 412.
- [11] 朱永凯, 潘仁前, 陈盛票, 等. 基于声发射传感器阵列的风机叶片结构健康监测方法[J]. 无损检测, 2010, 32(10): 753-756, 761.
- [12] 李德发. 基于声发射的动车组轴箱轴承损伤检测机理及其状态感知[D]. 北京:北京交通大学,2021.
- [13] 沈国清, 姜磊, 王元, 等. 一种风力发电机叶片在线状态监测系统:CN116792265A[P]. 2023-09-22.
- [14] 郭民臣, 梅勇, 马英, 等. 基于 LabVIEW 的声发射信号小波降噪方法研究[J]. 动力工程学报, 2012, 32(6): 450-453.
- [15] 杨启新. 分析声发射技术在金属材料检测中的应用[J]. 科技资讯, 2023, 21(11): 71-74.
- [12] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A general energy balance for battery systems[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1985, 132(1): 5.
- [13] 劳永春. 液冷式锂离子电池热管理系统设计及优化研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2021.
- [14] KONG D P, PENG R Q, PING P, et al. A novel battery thermal management system coupling with PCM and optimized controllable liquid cooling for different ambient temperatures [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 204: 112280.
- [15] ZHANG F R, YI M F, WANG P W, et al. Optimization design for improving thermal performance of T-type air-cooled lithium-ion battery pack [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 44: 103464.
- [16] FAN X, MENG C, YANG Y W, et al. Numerical optimization of the cooling effect of a bionic fishbone channel liquid cooling plate for a large prismatic lithium-ion battery pack with high discharge rate[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 72: 108239.
- [17] 黄司露, 陈昊, 师欣媛, 等. 基于相变材料与液冷的锂离子电池复合热管理系统研究[J/OL]. 电气工程学报, 2025, 1-8[2025-2-20].

收稿日期:2024-03-05

收稿日期:2025-03-28

(上接第 144 页)