

# 锂电池叉流流道液冷结构设计及散热特性分析

王学章 李科群<sup>†</sup>

(上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093)

(2022 年 1 月 29 日收到; 2022 年 3 月 5 日收到修改稿)

为使锂离子电池组的散热达到更高的安全性, 设计了锂离子电池组的一种液冷冷却模型, 该模型采用两种流体进行冷却. 对模型中不同雷诺数、不同微通道个数、不同微通道半径等条件下的电池温度分布进行了模拟研究. 模拟结果表明: 雷诺数对锂离子电池组的散热影响存在临界值; 对各条件进行优化分析, 优化后的液冷冷却模型在理论上能有效降低锂离子电池组的最高温度, 与单体电池在 2C 放电倍率的工况下相比, 锂电池最高温度下降了 26.24 K, 并改善了锂离子电池组的温度分布均匀性.

**关键词:** 锂离子电池组, 温度分布, 数值模拟, 正交试验

**PACS:** 47.27.te

**DOI:** 10.7498/aps.71.20220212

## 1 前言

目前, 新能源汽车因具有环保、节能、低污染等优势, 正逐渐取代传统燃油汽车<sup>[1]</sup>. 在诸多动力电池中, 锂电池以其能量密度高、循环寿命长、自放电速率低等特点在新能源汽车中得到了广泛的应用<sup>[2-4]</sup>. 但是, 锂电池同时也存在着很多缺点. 如锂电池在低温下使用时, 其容量会大大降低; 而在高温下使用时, 高温会导致电池内部生成的热量积聚, 电池温度会随之迅速升高, 使得电极材料发生分解, 与电解液发生强烈的化学反应, 化学反应会生成大量热量, 导致电池温度进一步升高, 电池性能开始恶化, 电池的循环寿命降低, 甚至会出现热失控现象<sup>[5]</sup>. 锂离子电池组的最佳工作温度范围一般在 20—45 °C 之间, 电池组内的理想最高温度与最低温度之差应小于 5 °C<sup>[6,7]</sup>. 锂离子电池现有的较为成熟的冷却方式有风冷、液冷、相变冷却和热管冷却等<sup>[8-12]</sup>. Pesaran 等<sup>[13,14]</sup>认为, 虽然液冷系统与空冷系统相比, 结构更为复杂, 但液冷系统的热交换效率更高. Jarrett 和 Kim<sup>[15]</sup>设计了一

种蛇形通道冷却板, 通过实验和数值模拟对通道的位置和宽度进行了优化. Han 等<sup>[16]</sup>探讨了冷却通道宽度、高度、通道数和冷却剂流量等因素对锂电池组散热特性的影响, 并优化了冷却结构, 使锂电池组在 2C 放电倍率下能满足最佳工作温度要求. 本文以锂离子电池液冷系统为研究对象, 探讨了一种新型液冷结构下锂电池组的散热情况, 为未来的车用锂离子电池散热通道设计提供了参考价值.

## 2 模型简介

### 2.1 几何模型

本文采用型号为 18650 的锂离子圆柱形电池进行研究. 锂离子电池组由 24 个单体电池组成, 每节电池各自编号, 4 条平行的蛇形流道从左至右覆盖在每个单体电池的侧面, 蛇形通道中的冷却流体 1 从左至右流动. 每条蛇形流道中另添加设计了微通道, 冷却流体 2 从上方进口经过集流板后流过微通道, 冷却流体 2 通过微通道壁与冷却流体 1 换热后到达电池组下方的集流板, 最后经下方集流板出口流出. 电池组整体模型如图 1 所示, 集流板上

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: kequn\_li@126.com

方的圆柱体为微通道内的冷却液 (冷却流体 2) 入口, 集流板下方的圆柱为微通道的冷却液 (冷却流体 2) 出口. 上、下集流板均为边长 160 mm、宽 145 mm、高 3 mm 的长方体, 微通道内的冷却流体 2 的进口与出口均为半径 6 mm 的圆柱体. 蛇形通道及微通道的几何模型如图 2 所示, 左侧是蛇形通道内冷却液 (冷却流体 1) 的 4 个进口, 右侧是与左侧进口对应的 4 个冷却液出口. 蛇形通道的进、出口宽均为 6 mm, 高均为 65 mm. 每个电池侧面的蛇形流道中包含 3 个微通道, 电池组中微通道共计 72 个, 半径均为 0.8 mm, 高均为 65 mm.

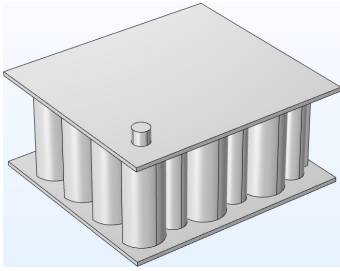


图 1 芯体模型正视图

Fig. 1. Core body front view model diagram.

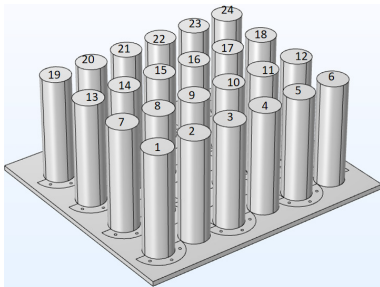


图 2 芯体模型俯视图

Fig. 2. Top view of core body model.

## 2.2 数学模型

### 2.2.1 热源计算

在计算锂电池所产生的热源时, 电池生成热的描述如下: 正反应时,  $\text{Li}^+$  会从正极材料中脱出, 透过隔膜和电解液镶嵌到负极, 逆反应时,  $\text{Li}^+$  会从负极脱出, 再次通过隔膜和电解液嵌入正极, 从而产生电位差, 形成电压. 在循环的过程中会产生各种热量. 1985 年, Bernardi 和 Pawlikowski<sup>[17]</sup> 提出了一个电池生热速率模型, 是目前应用最为广泛的计算模型, 该模型的表达式为

$$q = \frac{I}{V_b} \left[ E_{\text{OCV}} - U + T \frac{dE}{dT} \right] \\ = \frac{I}{V_b} \left[ I(R_{\text{Ohm}} + R_p) + T \frac{dE}{dT} \right], \quad (1)$$

其中,  $I$  表示充放电电流,  $V_b$  表示电池体积,  $E_{\text{OCV}}$  表示电池的开路电压,  $U$  表示工作电压,  $T$  表示电池温度,  $IT \frac{dE}{dT}$  表示可逆反应热,  $R_{\text{Ohm}}$  表示电池欧姆内阻,  $R_p$  表示电池极化内阻.

由生热速率公式可知, 电池产热主要跟电流和电池内阻有关. 内阻取决于温度和 SOC 的值. 以下给出内阻关于温度和电池的荷电状态 (SOC) 的函数关系式.

放电欧姆内阻五阶多项式和放电极化内阻四阶多项式表达式如下:

$$R_{\text{Ohm-d}}(T, \text{SOC}) = \sum_i^4 \sum_j^5 A_{ij} T^i \text{SOC}^j, \quad (2)$$

$$R_{\text{p-d}}(T, \text{SOC}) = \sum_i^4 \sum_j^4 B_{ij} T^i \text{SOC}^j, \quad (3)$$

$$\frac{dE}{dT} = \frac{(5.973 \times \text{SOC}^4 - 12.88 \times \text{SOC}^3 - 7.137 \times \text{SOC}^2 - 0.08741 \times \text{SOC} - 0.3497)}{1000}, \quad (4)$$

其中,  $R_{\text{Ohm-d}}$  表示放电欧姆内阻, SOC 表示电池的荷电状态,  $R_{\text{p-d}}$  表示放电极化内阻,  $\frac{dE}{dT}$  表示开路电压温度系数. 式中多项式各项系数  $A_{ij}$  和  $B_{ij}$  均取自参考文献 [18], 函数拟合后复相关系数  $R^2$  为 0.9928, 修正复相关系数  $R_{\text{adj}}^2$  为 0.9837, 此拟合效果较好.

采用 MATLAB 拟合 (2) 式和 (3) 式的内阻函数, 拟合结果如图 3 和图 4 所示. 根据 Bernardi 产

热公式, 电池内热源可写为

$$q = \frac{I}{V_b} \left[ I(R_{\text{Ohm}}(T, \text{SOC}) + R_p(T, \text{SOC})) \right. \\ \left. + T \frac{dE}{dT}(\text{SOC}) \right]. \quad (5)$$

该函数图像如图 5 所示. 由传热学知识可知, 把锂离子电池看成多个微小单元, 可得锂离子电池在直角坐标系下的运输方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q, \quad (6)$$

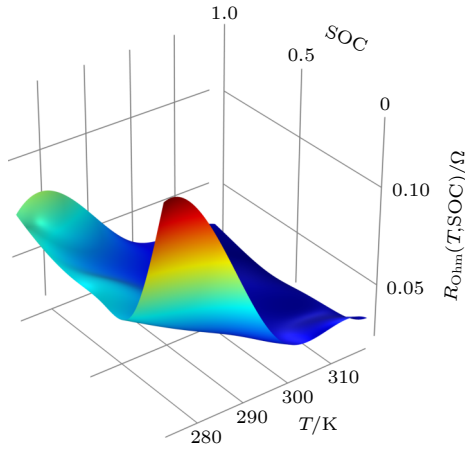


图3 放电欧姆内阻拟合函数  
Fig. 3. Discharge Ohm resistance fitting function.

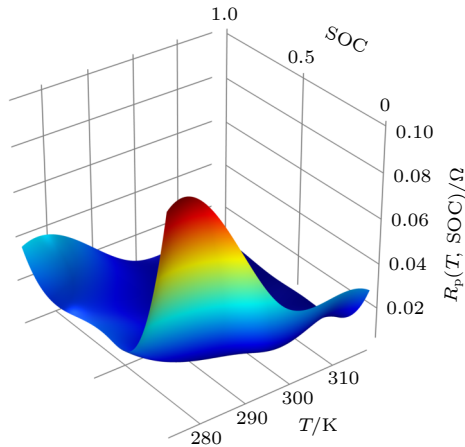


图4 放电极化内阻拟合函数  
Fig. 4. Fitting function of internal resistance of discharge polarization.

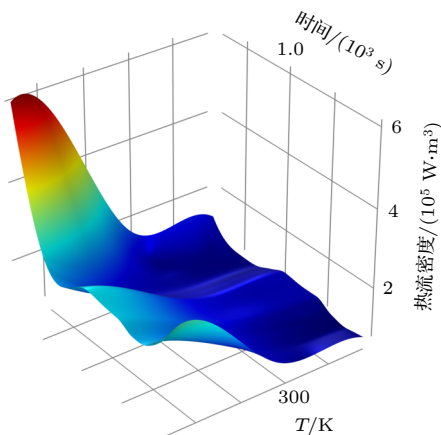


图5 电池内热源函数  
Fig. 5. Heat source function in the battery.

其中,  $\rho$  表示电池密度, 单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c$  表示电池的比热容, 单位为  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $\lambda$  表示导热系数, 单位为  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;  $q$  表示为内热源, 单位为  $\text{W}/\text{m}^3$ .

### 2.2.2 热物性参数

使用 (5) 式的热源函数作为电池数值模拟时的内热源. 本文采用两种不同的流体作为冷却剂进行研究, 其中冷却效果较好的 50% 乙二醇溶液 (冷却流体 1) 被用作蛇形通道内的冷却剂, 而热物性随温度变化的水 (冷却流体 2) 被用作微通道内的冷却剂. 除进口边界与出口边界外, 所有的边界材料均为铝质. 不同材料的热物性参数如表 1 所列. 电池的导热系数为各向异性值, 轴向取值为  $1.473 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 径向取值为  $29.853 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .

表 1 三维传热模型参数

Table 1. Three-dimensional heat transfer model parameters.

参数	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$C_p/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$M/(\text{Pa}\cdot\text{s})$
锂电池	2776	1075	各向异性	—
乙二醇	1068	3319	0.387	—
水	$\rho(T)$	$C_p(T)$	$\lambda(T)$	$\mu(T)$
铝	2702	237	903	—

### 2.2.3 初始和边界条件

运用商用数值模拟软件 COMSOL Multiphysics 进行研究, 仿真采用湍流  $k-\epsilon$  与固体和流体传热的耦合模型. 在数值模拟过程中设置了以下条件: 设环境温度为  $298.15 \text{ K}$ , 设电池的初始温度等于环境温度, 设冷却液入口温度为  $293.15 \text{ K}$ . 设电池表面与冷却通道表面为自然对流表面, 自然对流换热系数设为  $9 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . 该模型为管槽内强制对流流动与换热, 雷诺数在  $2300-10000$  为过渡区, 大于  $10000$  为紊流区, 雷诺数可取过渡区或紊流区的数值, 故设雷诺数取值分别为  $2500, 7500, 12500, 15500$ . 出口边界为压力 (大气压) 出口边界, 两种冷却液流过的壁面均为无滑移壁面, 两种冷却液的进出口条件均相同.

### 2.3 模型验证

为了确保数值模拟过程的准确性, 在进行电池组数值模拟之前, 进行了单体电池的模拟验证. 单体电池数值模拟亦采用 18650 圆柱形锂电池, 电池外表面均设为自然对流条件, 自然对流换热系数

为  $9 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 验证该热源函数作为数值模拟内热源的可可靠性. 数值模拟结果与实验结果<sup>[18]</sup>的对比关系如图 6 所示. 可以看出, 偏差在合理的范围内, 故数值模拟结果是可信的.

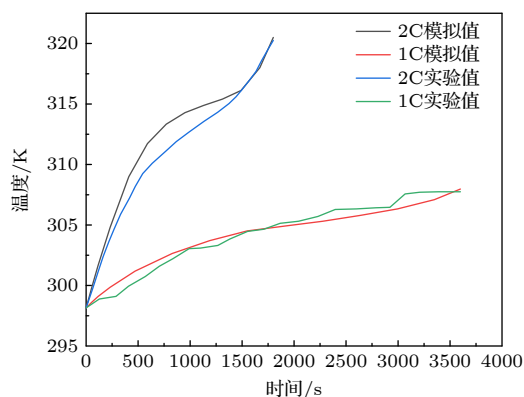


图 6 单体电池热性能的实验验证

Fig. 6. Experimental verification of thermal performance of single battery.

本研究采用自由四面体网格对模型进行划分, 一般情况下, 当模型网格数量增加到一定程度时, 计算精度不再继续明显提高, 或者说提高的速度变得较慢, 故验证网格无关性对瞬态仿真结果具有重要意义. 为此, 本文生成了 4 种数量不同的网格, 并进行了数值模拟. 利用电池组件的最高温度作参考, 对网格无关性进行评价, 结果如图 7 所示. 可以看出, 当网格数量从 62396 增加到 368072 时, 最高温度变化幅度在 0.5% 以内. 所以, 采用数量较为适中的网格, 就能在确保结果准确性的前提下提高数值模拟的收敛速度, 故本文采用网格数量为 147992 的自由四面体网格, 总体网格平均质量为 0.9.

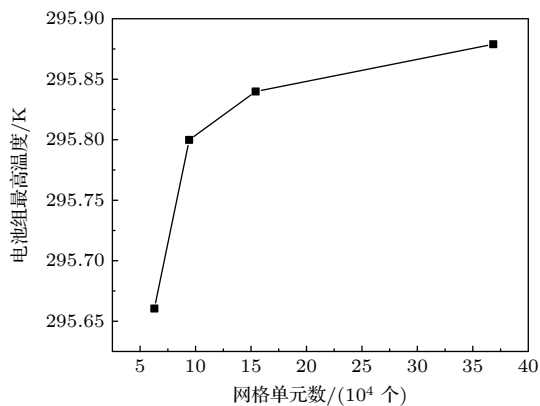


图 7 网格的无关性验证

Fig. 7. Grid independence verification.

在数值模拟过程中, 求解器迭代时的时间步长也会对数值模拟结果产生影响, 故本文进行了时间步长无关性验证, 时间步长取值分别为 0.5, 1, 1.5 和 2 s, 验证结果如图 8 所示. 可以看出: 随着时间步长的增大, 电池组最高温度随时间的变化几乎是一致的. 时间步长取值越小, 得到的数据点越密集, 对于描述电池在放电过程中的温度随时间变化的趋势也更加精确, 故以下模拟的时间步长均取 1 s.

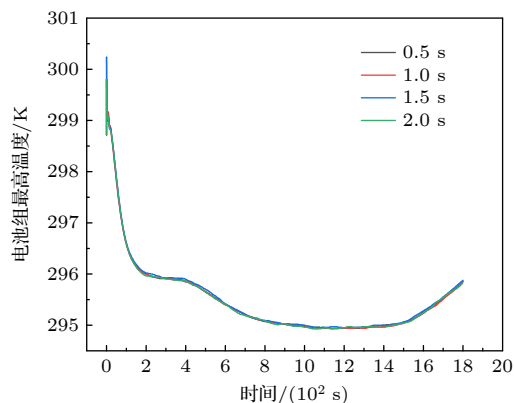


图 8 时间步长无关性验证

Fig. 8. Time step independence verification.

### 3 模拟结果分析

#### 3.1 电池组温度分布

在本节中, 设雷诺数为 2500、放电倍率为 2C. 图 9 和图 10 给出了 1800 s 时电池组的温度分布云图和电池的温度分布云图. 可以看出, 电池组的温度在冷却液进口处的区域比冷却液出口处的区域要低, 这是由于入口效应导致的入口处换热最显著. 锂电池经过 1800 s 的冷却时长后 (此时锂电池放电结束), 表面最高温度为 295.84 K, 最低温度

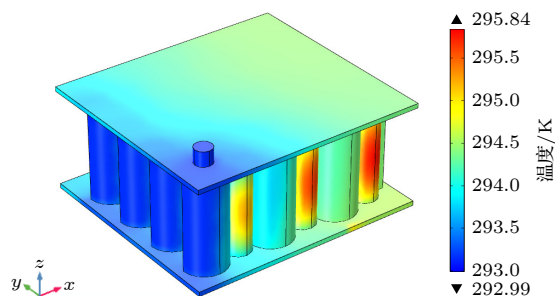


图 9 电池组温度分布云图 (2C)

Fig. 9. Cloud map of battery pack temperature distribution (2C).



为 293.14 K, 温差为 2.7 K. 锂离子电池的合理最高温度范围应在 293.15—318.15 K 之间, 合理最大温差应小于 5 K, 因此, 该模型下电池的最高温度与最大温差均符合锂离子电池组的合理工作温度范围.

如图 2 所示, 电池分别编号为 1—24 号. 以与冷却液进、出口的距离作为电池的取样标准, 选取具有代表性的几节电池进行具体分析. 电池取样依次为 1 号、4 号、6 号、9 号、15 号、19 号、24 号. 如图 11 所示, 1 号电池与 19 号电池在 3 s 左右出现温度快速下降的现象, 这是由于电池离蛇形通道入口处距离最短所致, 此处电池最先与冷却液发生换热, 故温度最先下降. 6 号电池与 24 号电池均位于蛇形通道入口处的最远端, 但两者的最高温度在下降至 298 K 以下的时间上却存在差异. 这是由于: 相比于 24 号电池, 6 号电池与微通道入口处的距离更短, 故 6 号电池的最高温度比 24 号电池的最高温度更早地下降至 298 K 以下.

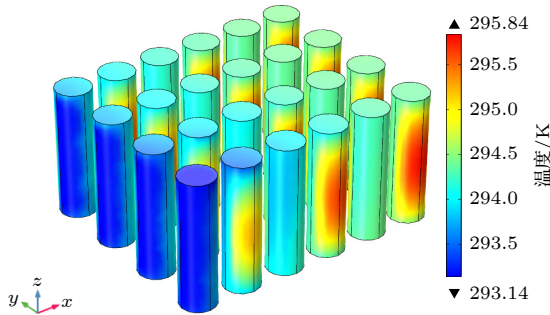


图 10 电池温度分布云图 (2C)

Fig. 10. Cloud map of battery temperature distribution (2C).

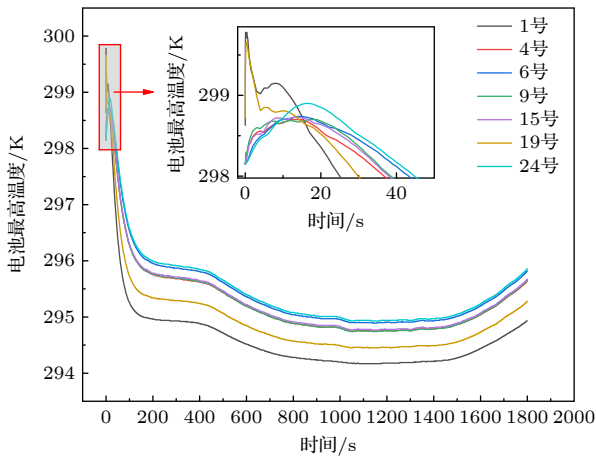


图 11 放电过程中不同电池的最高温度 (2C)

Fig. 11. The maximum temperature of different batteries during discharge (2C).

不同电池的最大温差随时间的变化趋势如图 12 所示, 可以看出, 1 号电池与 19 号电池在电池放电初期的温差明显高于其他取样电池. 这是由于这两个电池处于冷却液入口处, 换热最剧烈. 所有取样电池在放电结束后, 最大温差均平稳在 2 K 左右, 并且从局部放大图可以看出, 在 100 s 之后, 电池的最大温差一直处于小幅度的振荡状态中, 振荡幅度大约为 0.05 K 左右, 这是电池与冷却液一直处于热交换状态的表现.

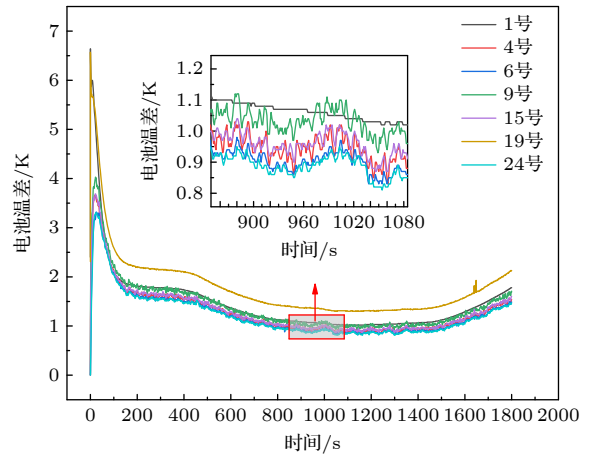


图 12 放电过程中不同电池的最大温差 (2C)

Fig. 12. The maximum temperature difference of different batteries during discharge (2C).

图 13 给出了 1 号—6 号电池的截面温度分布云图, 可以看出, 电池温度与流道冷却液温度呈正相关性, 电池温度越高的位置, 冷却流体的温度也越高, 这是因为在管道末端, 冷却液流速降低, 换热效果减弱. 电池中心温度较电池表面温度更高, 是因为热源条件设定为内热源条件, 且电池内部生热后通过固体电池的导热效果, 传导至外表面与流体发生换热. 故而电池内部温度高于外部温度.

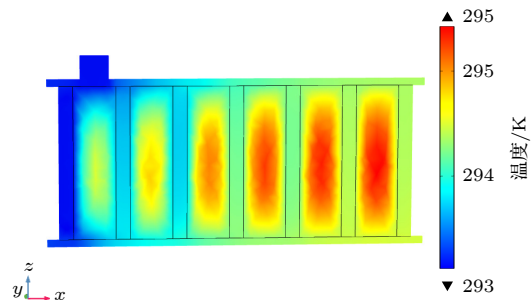


图 13 电池截面温度云图

Fig. 13. Temperature cloud of battery section.

### 3.2 雷诺数的影响

本节设定了 4 个不同的雷诺数, 分别为 2500, 7500, 12500, 15500. 探究雷诺数对电池组温度变化的影响. 图 14 对比了 2C 放电倍率工况下, 不同雷诺数的电池组的最高温度随时间变化的趋势. 在 2C 工况下, 电池组的最高温度均呈现一种先小幅度上升紧接着迅速下降至平稳, 平稳后又有小幅度上升的趋势. 雷诺数为 2500 条件下, 0—1 s 时, 电池组最高温度上升为 299.83 K; 1—1175 s 时, 电池组的最高温度下降为 294.97 K; 1175—1800 s 时, 电池组最高温度小幅度上升至 295.84 K. 雷诺数为 7500 条件下, 0—1 s 时, 电池组最高温度上升为 300.02 K; 1—1095 s 时, 电池组最高温度下降为 294.35 K; 1095—1800 s 时, 电池组最高温度小幅度上升至 295.14 K. 雷诺数为 12500 条件下, 0—0.5 s 时, 电池组最高温度上升为 300.03 K; 0.5—1219 s 时, 电池组最高温度下降为 294.19 K; 1219—1800 s 时, 电池组最高温度小幅度上升至 294.96 K. 雷诺数为 15500 条件下, 0—1 s 时, 电池组的最高温度上升为 300.6 K; 1—1186 s 时, 电池组最高温度下降为 294.14 K; 1186—1800 s 时, 电池组最高温度小幅度上升至 294.92 K. 当雷诺数由 2500 增大到 7500, 雷诺数扩大了 3 倍, 放电结束时的电池组最高温度值下降了 0.7 K; 当雷诺数由 7500 增大到 12500, 雷诺数扩大约 1.7 倍, 放电结束时的电池组最高温度值下降了 0.14 K; 当雷诺数由 12500 增大到 15500, 雷诺数扩大了 1.24 倍, 放电结束时的电池组最高温度值下降了 0.04 K.

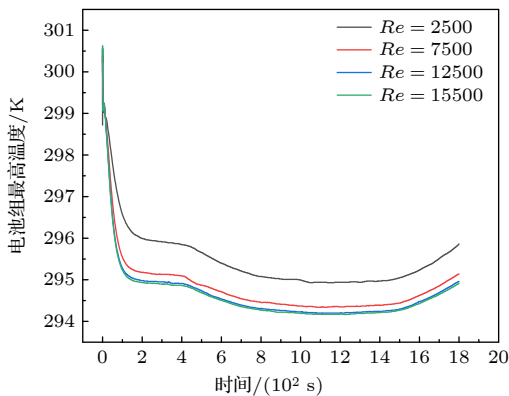


图 14 在不同雷诺数条件下电池组的最高温度 (2C)

Fig. 14. Compare the maximum temperature of different Reynolds number battery packs (2C).

显然, 在 2C 工况下, 电池组的最高温度随着雷诺数的增大而减小, 但随着雷诺数的进一步增

大, 所产生的电池组温降也随之不再显著. 这表明在 2C 工况下, 通过增大雷诺数降低电池组的最高温度的方法, 其效果是有限的.

图 15 对比了在 2C 放电倍率工况下, 不同雷诺数的电池组的最大温差随时间的变化. 可以看出: 电池组的最大温差总体变化趋势与电池组的最高温度变化趋势总体相似. 当雷诺数为 2500 条件下, 0—0.5 s 之间, 电池组的最大温差达到 6.73 K; 1—4 s 之间, 电池组最大温差下降为 5.89 K; 4—8 s 之间, 电池组的最大温差又略微上升至 6.01 K; 8—1355 s 之间, 电池组的最大温差持续下降至 1.78 K; 而在 1355 s 之后直至放电结束, 电池组的最大温差最终平稳至 2.71 K. 当雷诺数为 7500 时, 放电前期, 电池组最大温差为 7.49 K, 并最后平稳于 1.99 K. 当雷诺数为 12500 时, 电池组的最大温差在放电结束时平稳至 1.81 K. 当雷诺数为 15500 时, 电池组的最大温差在放电结束时平稳至 1.77 K. 随着雷诺数的增大, 电池组放电结束时的温差逐渐减小, 这说明增大雷诺数有利于改善电池组的温度均匀性.

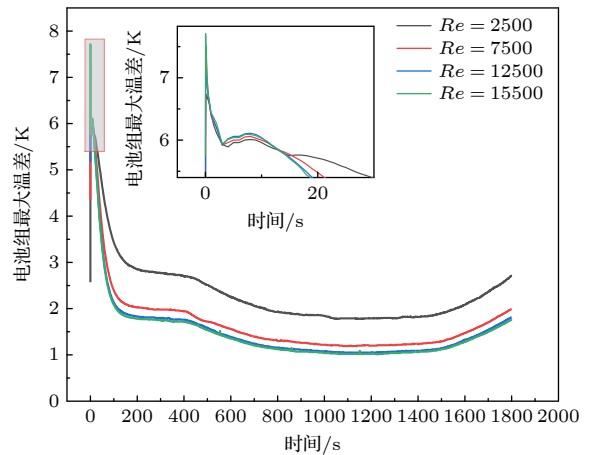


图 15 在不同雷诺数条件下电池组的最大温差 (2C)

Fig. 15. Comparison of the maximum temperature difference of battery packs with different Reynolds numbers (2C).

图 16 对比了在 1C 放电倍率工况下, 不同雷诺数下的电池组最高温度随时间变化的趋势. 可以看出: 电池组最高温度的变化趋势与 2C 放电倍率工况下的电池最高温度变化趋势相似. 电池组温度下降幅度最大的区间多为放电前期, 这是因为在电池放电前期, 其温度与冷却液温度存在较大温差, 电池与冷却液换热更剧烈; 在放电中期, 电池组最高温度下降幅度并不大, 这是因为电池与冷却液的温差减小, 换热量减小, 在此区间里, 换热量与电

池内部生热量基本持平, 故温度基本保持不变; 而在放电后期, 由于电池与冷却液之间的温差进一步减小, 换热量也随之继续减小, 在此区间, 换热量小于电池内部的生热量, 故电池在放电后期有小幅度的温度上升. 通过局部放大图可以看出, 在放电前期, 电池组最高温度开始出现下降时, 雷诺数为 15500 的工况的电池组最高温度最先达到 298.5 K 以下, 紧接着是雷诺数为 12500 的工况, 其次是雷诺数为 7500 的工况, 下降速度最慢的是雷诺数为 2500 的工况. 这反映了雷诺数对换热速度快慢的影响. 当雷诺数越大, 流速也越大, 电池组中最高温度的电池 (一般是冷却液出口端的电池) 也能更快被冷却. 该现象在电池冷却模组的设计中具有重要参考价值, 当电池模组中电池数量过大时, 仍要快速使电池最高温度下降, 应设计更为紧凑的电池组结构, 以此减少流道长度. 或者增大冷却液入口速度, 这样也能缩短电池组被冷却的时间. 图 17 对比了在 1 C 放电倍率工况下, 不同雷诺数下的电池组最大温差随时间变化的趋势.

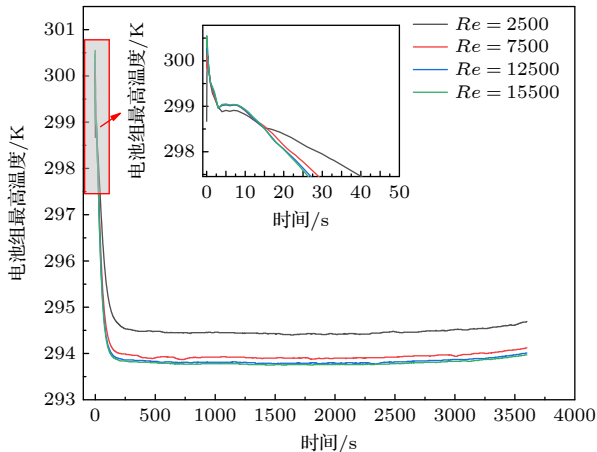


图 16 在不同雷诺数条件下电池组的最高温度 (1C)

Fig. 16. Comparison of the maximum temperature of different Reynolds number battery packs (1C).

### 3.3 微通道个数的影响

为了研究微通道个数对电池组液冷系统冷却性能的影响, 本节设置了几种不同个数的微通道, 分别为: 每节电池中不添加微通道 (即只存在蛇形通道); 每节电池添加 2 个微通道 (即电池组总计 48 个微通道); 每节电池添加 3 个微通道 (即电池组总计 72 个微通道); 每节电池添加 4 个微通道 (即电池组总计 96 个微通道); 每节电池添加 5 个微通道 (即电池组总计 120 个微通道).

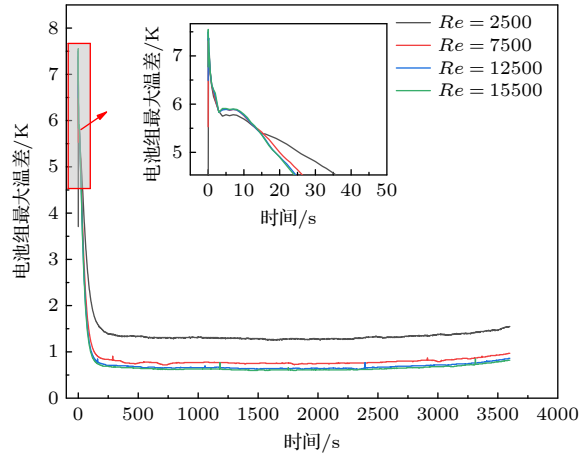


图 17 在不同雷诺数条件下电池组的最大温差 (1C)

Fig. 17. Compare the maximum temperature difference of different Reynolds number battery packs (1C).

图 18 给出了不同微通道个数情况下的电池组的最高温度. 电池组中不存在微通道时, 电池组的最高温度为 304.98 K; 电池组中微通道个数为 2 个时, 电池组最高温度为 296.05 K; 电池组中微通道个数为 3 个时, 电池组最高温度为 295.84 K; 电池组中微通道个数为 4 个时, 电池组最高温度为 295.6 K; 电池组中微通道个数为 5 个时, 电池组最高温度为 295.54 K. 由此可见, 随着微通道个数的增多, 电池组的最高温度随之减小, 但是微通道个数进一步增大到一定数值时, 电池组的最高温度下降幅度减缓. 这是叉流所产生的影响所致, 微通道在蛇形管道中具有肋片的作用, 扰乱了蛇形管道中的冷却液流体, 故增大了冷却液的换热效果, 但随着微通道个数的增多, 扰流的作用渐渐转换为了阻碍流动的作用, 故此电池组的最高温度下降幅度逐渐减缓.

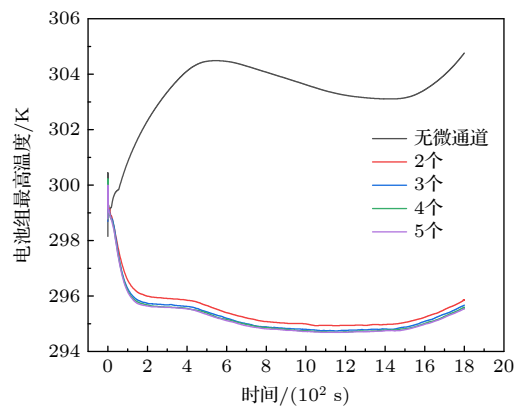


图 18 微通道个数对电池组最高温度的影响 (2C)

Fig. 18. Influence of the number of micro-channels on the maximum temperature of the battery pack (2C).

### 3.4 微通道半径的影响

设置 0.3, 0.5, 0.8, 1.0, 1.3, 1.6 和 2.0 mm 等 7 种不同的微通道半径, 来研究微通道半径对电池组的影响.

图 19 和图 20 对比了不同微通道半径条件下电池组最高温度与最大温差值随时间的变化. 图中部分信息如表 2 所列.

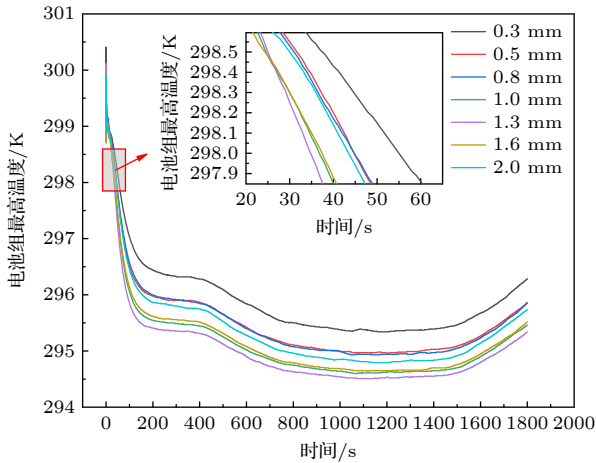


图 19 微通道半径对电池组最高温度的影响 (2C)

Fig. 19. Influence of the micro-channel radius on the maximum temperature of the battery pack (2C).

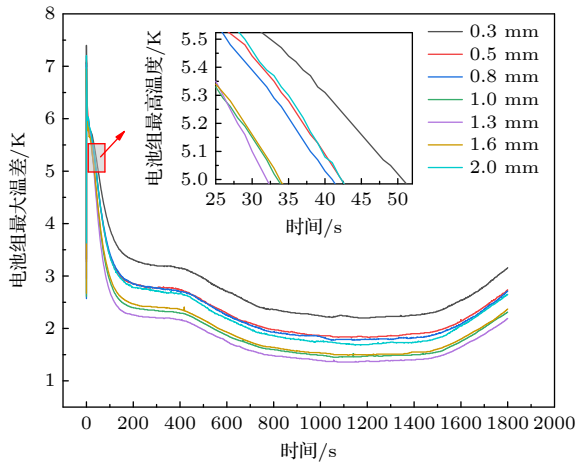


图 20 微通道半径对电池组最大温差的影响 (2C)

Fig. 20. Influence of the micro-channel radius on the maximum temperature difference of the battery pack (2C).

由表 2 可知, 电池组的最高温度并没有随着微通道半径的增大而减小, 但在微通道半径为 1.3 mm 时, 电池组的最高温度值与最大温差值均最小. 其中的原因可以通过 (7) 式与 (8) 式来做出合理解释:

$$Re = \frac{\mu l}{v}, \quad (7)$$

其中,  $Re$  表示雷诺数,  $\mu$  表示流速,  $l$  表示当量直径,  $v$  表示动力黏度.

$$q_{\text{换热量}} = hA(T_{\text{liquid}} - T_{\text{wall}}), \quad (8)$$

其中,  $h$  表示对流换热系数,  $A$  表示换热面积,  $T$  表示温度. 冷却液与电池之间的换热量受换热系数与换热面积影响, 换热系数与流速呈正相关性, 换热面积与换热量呈正相关性. 在雷诺数不变的情况下, 微通道半径超过 1.3 mm 时, 当量直径变大, 流速变小. 虽然换热面积变大了, 但冷却液流速降低所导致的换热量减小的量大于由于换热面积增大而导致的换热量增大量, 故而总体的换热量呈现下降趋势. 因此, 此时再继续增大微通道半径, 电池组的最高温度并不会继续下降, 反而会有所上升. 故在设计叉流式电池冷却模型时, 应注意流道半径大小. 本研究表明, 在叉流结构中, 上述因素 (雷诺数、微通道个数、微通道半径) 均对电池组最高温度存在不容忽视的影响, 因此需做正交试验, 以找出 3 个因素的组合所对应的最高温度的最低值.

表 2 具体信息表

Table 2. Specific information.

微通道半径/mm	电池组最高温度/K	电池组最大温差/K
0.3	296.26	3.16
0.5	295.86	2.73
0.8	295.84	2.70
1.0	295.46	2.31
1.3	295.34	2.19
1.6	295.52	2.37
2.0	295.74	2.65

## 4 优化分析

上述研究表明, 电池组的最高温度和最大温差与雷诺数、微通道半径、微通道个数等因素相关, 为使锂电池达到更好的工作状态, 需进一步优化该冷却模型.

正交设计又称为正交试验设计或者多因素优选设计, 是一种基于正交表来安排和分析多因素试验的一种设计方法. 它通过在试验因素全部的水平组合中, 挑选部分具有代表性的水平来进行科学的组合试验. 通过对这部分正交试验的结果进行分析、综合比较, 可以了解全因素试验的情况, 探求各个因素水平的最佳组合, 进而找出最优的水平组



合的一种试验设计方法<sup>[19]</sup>. 该正交试验为三因素四水平, 但因不存在三因素四水平的正交表, 考虑用 L16(45) 正交表作替代. 本文正交试验采用极差分析法分析各因素对电池组最高温度的影响大小. 计算结果分析分别如表 3 和表 4 所列.

表 3 正交试验表  
Table 3. Orthogonal test.

序号	雷诺数 (因素A)	微通道半径 /mm(因素B)	微通道个数 /个(因素C)	锂电池组的 温度/K
1	2500	0.3	3	296.33
2	2500	0.5	4	296.35
3	2500	0.8	5	295.54
4	2500	1.3	7	295.47
5	7500	0.3	4	295.57
6	7500	0.5	3	295.18
7	7500	0.8	7	295.13
8	7500	1.3	5	294.96
9	12500	0.3	5	295.03
10	12500	0.5	7	294.50
11	12500	0.8	4	294.91
12	12500	1.3	3	294.84
13	15500	0.3	4	294.91
14	15500	0.5	3	294.83
15	15500	0.8	7	294.87
16	15500	1.3	5	294.71

表 4 极差分析表  
Table 4. Range analysis.

名称	因素A	因素B	因素C
Z1	1183.74	1181.84	1181.18
Z2	1180.84	1180.86	1181.74
Z3	1179.28	1180.50	1180.29
Z4	1179.32	1179.98	1179.97
Z1算术平均值	295.935	295.46	295.295
Z2算术平均值	295.21	295.215	295.435
Z3算术平均值	294.82	295.125	295.0725
Z4算术平均值	294.83	294.995	294.9925
极差	0.725	0.465	0.4425
主次顺序		A>B>C	
优水平	A4	B4	C3
优组合		A4 B4 C3	

极差分析结果表明雷诺数大小对该模型冷却效果影响最大, 其次为微通道半径大小, 影响最小的是微通道的个数. 对优选出的最优组合进行建模计算, 最终得到在 2C 放电倍率、环境温度为

298.15 K、冷却液入口温度为 293.15 K 的工况下, 该模型电池组的最高温度降为 294.02 K、有效降低温度值为 26.24 K. 单体电池放电结束时的温度为 320.26 K, 采用该模型进行冷却, 与单体电池放电结束时的温度相比, 电池最高温度降低了 26.24 K.

## 5 结 论

本文设计了一种由两种冷却液组成的电池液冷系统模型, 并研究了在该模型下不同雷诺数、不同微通道的数量和不同微通道的半径等变量条件下的冷却效果. 得到的结论如下:

1) 该叉流流道液冷模型能有效降低电池最高温度, 在 2C 放电倍率下, 与单体电池放电结束时的温度相比, 可使电池最高温度下降 26.24 K.

2) 目前针对锂离子电池的液冷冷却模型, 大多为顺流或逆流的冷却流道设计, 叉流的冷却通道研究较少, 本文在数值分析上证明了叉流流道模型的可靠性, 并且叉流流道对流体流动的扰流增益或阻碍流动降效作用之间存在平衡点.

3) 通过提高雷诺数来改善锂电池模组温度场是可行的, 但提高雷诺数改善电池组温度场的方法存在临界值.

4) 锂离子电池组的散热效果与微通道个数和微通道半径相关, 但并非是单一的正相关性, 合理地增大微通道的数量和尺寸可以有效地增强电池组的散热效果.

## 参考文献

- [1] Saw L H, Tay A, Zhang L W 2015 *Thermal Measurement Modeling and Management Symposium* San Francisco, USA, March 28, 2015 p298
- [2] Nitta N, Wu F, Lee J T, Yushin G 2015 *Mater. Today Phys.* **18** 5
- [3] Chen S C, Wan C C, Wang Y Y 2005 *J. Power Sources* **140** 111
- [4] Jagemont J, Boulon L, Dubé Y 2016 *Appl. Energy* **164** 99
- [5] Jung D Y, Lee B H, Sun W K 2002 *J. Power Sources* **109** 1
- [6] Rao Z, Wang S, Zhang G 2011 *Energy Convers. Manage.* **52** 3408
- [7] Pesaran A A 2002 *J. Power Sources* **110** 377
- [8] Menale C, D'Annibale F, Mazzarotta B, Bubbico R 2019 *Energy* **182** 57
- [9] Liu H, Wei Z, He W, Zhao J 2017 *Energy Convers. Manage.* **150** 304
- [10] Sardari P T, Giddings D, Gillott M, Walker G S, Grant D 2019 *Energy Convers. Manage.* **201** 112

- [11] Mahdi J M, Mohammed H I, Hashim E T, Talebizadehsardari P, Nsofor E C 2020 *Appl. Energy* **257** 113
- [12] Shah K, McKee C, Chalise D, Jain A 2016 *Energy* **113** 852
- [13] Pesaran A A 2001 *Advanced Automotive Battery Conference Las Vegas, USA, February 6-8, 2001* p2
- [14] Pesaran A A, Keyser M, Burch S 1999 *Proceedings of the 4th Vehicle Thermal Management Systems* London, UK, May 24-27, 1999 p1
- [15] Jarrett A, Kim I Y 2011 *J. Power Sources* **196** 10359
- [16] Han J Q, Qiu D D, Zhu A 2018 *Appl. Therm. Eng.* **132** 508
- [17] Bernadi D, Pawlikowski E 1985 *J. Electrochem. Soc.* **132** 5
- [18] Wang Y Y 2020 *M. S. Thesis* (Qingdao: Qingdao University of Science and Technology) (in Chinese) [王一宇 2020 硕士学位论文 (青岛: 青岛科技大学)]
- [19] Liao Y P 1984 *Application of Orthogonal Test Method in Mechanical Industry* (Beijing: China Agricultural Machinery Press) pp39-45 (in Chinese) [廖永平 1984 正交试验法在机械工业中的应用 (北京: 中国农业机械出版) 第39—45页]

# Liquid-cooled structure design and heat dissipation characteristics analysis of cross-flow channels for lithium batteries

Wang Xue-Zhang    Li Ke-Qun<sup>†</sup>

(Energy and Power Engineering College, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

( Received 29 January 2022; revised manuscript received 5 March 2022 )

## Abstract

A detailed three-dimensional thermal model is developed to examine the thermal behaviour of a lithium-ion battery. This model is a cross-flow liquid cooling model, which can make the heat dissipation of lithium-ion battery pack achieve higher safety. Two kinds of fluids are used for cooling, and the polynomial fitting function is used as the heat source term of lithium battery pack. The battery temperature distribution under the conditions of different Reynolds numbers, different numbers of micro-channel and different micro-channel radii are studied for this model. The simulation results show that the maximum battery temperature is 295.84 K, the minimum battery temperature is 293.14 K, and the maximum temperature difference of the battery pack is 2.7 K. The maximum temperature and temperature difference of the battery under the model are in line with the reasonable operating temperature range of lithium-ion battery pack. The maximum temperature of battery pack decreases with the increase of Reynolds number, but the effect of Reynolds number on heat dissipation of lithium-ion battery pack has a critical value. As the number of micro-channels increases, the maximum temperature of the battery string decreases. However, when the number of micro-channels increases to a certain value, the maximum temperature of the battery pack decreases slowly. The maximum temperature of the battery pack does not decrease monotonically as the radius of the micro-channel increases. Orthogonal analysis results show that the Reynolds number has the greatest influence on the cooling effect of the model, followed by the size of the micro-channel radius, and the number of micro-channels has the least influence. The optimized liquid cooling model can effectively reduce the maximum temperature of lithium-ion battery in theory, and the maximum temperature of lithium-ion battery decreases by 26.24 K in comparison with that of single battery at 2C discharge rate. The reliability of the cross-flow channel model is proved by numerical analysis, and it is also proved that the cross-flow channel has an equilibrium point between the perturbation gain and the flow retarding effect. The heat dissipation effect of lithium-ion battery pack is correlated with the number and radius of micro-channels, but not a single positive correlation. Reasonably increasing the number and size of micro-channels can effectively enhance the heat dissipation effect of battery pack.

**Keywords:** lithium-ion battery pack, temperature distribution, numerical simulation, orthogonal text

**PACS:** 47.27.te

**DOI:** 10.7498/aps.71.20220212

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: kequn\_li@126.com

## 锂电池叉流流道液冷结构设计及散热特性分析

王学章 李科群

## Liquid-cooled structure design and heat dissipation characteristics analysis of cross-flow channels for lithium batteries

Wang Xue-Zhang Li Ke-Qun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 184702 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220212

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220212>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 基于双包层光纤布拉格光栅传感器的锂电池组温度场监控

Temperature field monitoring of lithium battery pack based on double-clad fiber Bragg grating sensor

物理学报. 2022, 71(10): 104207 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212302>

#### 高重复频率水冷Nd:YAG激活镜放大器的温度特性

Temperature characteristics of high repetition rate water-cooled Nd:YAG active mirror amplifier

物理学报. 2021, 70(3): 034203 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201042>

#### “嫦娥5号”登陆候选地Mons R ü mker的光照与温度特征分析

Illumination and temperature analysis for CE-5 candidate landing site Mons R ü mker

物理学报. 2020, 69(11): 119601 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200114>

#### 基于电化学-热耦合模型研究隔膜孔隙结构对锂离子电池性能的影响机制

Mechanism of influence of separator microstructure on performance of lithium-ion battery based on electrochemical-thermal coupling model

物理学报. 2019, 68(1): 018201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181726>

#### 锂离子电池电化学降阶模型性能对比

Comparative study of reduced-order electrochemical models of the lithium-ion battery

物理学报. 2021, 70(13): 138801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201894>

#### 基于电化学-应力耦合模型的锂离子电池硅/碳核壳结构的模拟与优化

Simulation and optimization of silicon/carbon core-shell structures in lithium-ion batteries based on electrochemical-mechanical coupling model

物理学报. 2021, 70(17): 178201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210455>