

# 基于液冷的锂离子动力电池散热结构优化设计

刘霏霏,袁康<sup>†</sup>,李骏,洪显华,龚阳  
(华东交通大学 机电与车辆工程学院,江西 南昌 330013)

**摘要:**针对锂离子电池单体成组后温度场的非均匀性导致的热不一致性问题,以及高温下电池单体间的热交互引发的热安全性问题,采用仿真与试验相结合的方式,基于锂离子电池生-传热机理,设计了电池单体单独成组、电池单体之间夹隔泡沫棉、电池模组底部布置液冷板 3 种递进式散热方案,并对液冷板进行了优化设计.采用有限元软件 STAR-CCM+,仿真分析了 3 种方案下电池模组在不同放电倍率时的温度分布.结果表明:增加泡沫棉可减少电池间的热交互,进而提高电池单体间的热均衡性.在结合泡沫棉、导热板以及优化后(采用液冷管道串-并联组合方式)的液冷系统散热条件下,电池模组以 2C 倍率放电时最高温度为 35.08 °C,最大温差仅为 4.85 °C. 研究结果可为电池热管理散热系统结构设计提供一定的理论基础.

**关键词:**锂离子电池;液冷;散热;STAR-CCM+;结构优化

**中图分类号:**U469.72

**文献标志码:**A

## Optimal Design of Heat Dissipation Structure of Lithium-ion Power Batteries Based on Liquid Cooling

LIU Feifei, YUAN Kang<sup>†</sup>, LI Jun, HONG Xianhua, GONG Yang

(School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Aiming at solving the thermal inconsistency problem caused by non-uniformity of temperature field after lithium-ion battery cells are grouped, and the thermal safety problem caused by the thermal interaction between the battery cells at high temperature. The combined method with simulation and test is adopted. Three progressive heat dissipation schemes are designed based on the heat generation-transfer mechanism of lithium-ion batteries. including individual battery cells in groups, foam cotton between the battery cells, and liquid cooling plate arranged at the bottom of the battery module respectively. Also the liquid cooling plate is optimized. The finite element software STAR-CCM+ is used to simulate the temperature distribution of the battery modules at different discharge rates for the three schemes. The results show that the increase of foam cotton can reduce the thermal interaction between the batteries, thereby improving the thermal uniformity between the battery cells. Under the heat dissipation condition of the combination with foam cotton, heat conducting plate and optimized (using liquid cooled pipeline series parallel combination) liquid cooling system, the maximum temperature of the battery module is 35.08 °C at 2C discharge rate, and the maximum temperature difference is only 4.85 °C. The research results can provide a theoretical basis for the

\* 收稿日期:2020-11-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51806066), National Natural Science Foundation of China (51806066); 江西省自然科学基金资助项目(20181BAB216023), Natural Science Foundation of Jiangxi Province(20181BAB216023)

作者简介:刘霏霏(1983—),女,江西南康人,华东交通大学机电与车辆工程学院讲师,博士

<sup>†</sup> 通信联系人, E-mail: 1076139525@qq.com

structure design of cooling system for battery thermal management.

**Key words:** lithium-ion batteries; liquid cooling; heat dissipation; STAR-CCM+; structural optimization

纯电动汽车未来是人类的主流交通工具之一,动力电池是其唯一的动力源<sup>[1]</sup>.而温度是制约动力电池性能的最关键因素之一,其中最高温度和温度一致性左右着电池寿命和续航里程<sup>[2]</sup>.因此,动力电池热管理研究是当下的主要热点之一.锂离子动力电池理想的工作温度范围在 25 ~ 40 °C,且电芯单体之间温差不宜超过 5 °C<sup>[3]</sup>.在电池的充放电过程中,模组本身由于化学反应会产生大量的热,如果热量不及时散出而积累在电芯内,会导致模组内部产生较大的温升及单体电芯的温度一致性较差,并由此会引发一系列后果,轻则影响电池的循环次数,重则导致电池热失控甚至引发火灾<sup>[4]</sup>.Liu 等人<sup>[5]</sup>的实验研究发现,选取一个锂离子电池,并且使用 NCM523 作为该电池的正极材料,在 53 °C 的环境下做 100 次循环后发现,该电池的寿命比之正常的减少了 52.8%.Guo 等人<sup>[6]</sup>使用磷酸铁锂电池做了相关的实验并且对数据进行了对比发现,在 30 °C、50 °C 的环境下分别做 50 次的循环,处于 50 °C 条件下的电池寿命及容量衰减得更多.李龙飞<sup>[7]</sup>研究发现电池成组后以同倍率放电,2C 时最高温度比单体放电时高 22.68 °C;电芯温差也达到了 9.82 °C,远高于单体放电时的 4.98 °C.Yuksel 等人<sup>[8]</sup>研究了磷酸铁锂电池的温度环境对寿命及容量的影响发现,采用强制风冷进行冷却散热后,电池的寿命能提升 6% 左右.

根据介质的不同电池热管理可区分为空气冷却、液体冷却、相变材料冷却等<sup>[9]</sup>.但随着电池功率性能的要求,单纯的空气冷却已经满足不了高倍率充放电电池系统的散热要求,尽管相变冷却性能良好,但其颇高的成本限制了其在生产中的应用<sup>[10]</sup>.因此,对于高充放电率、高产热率的电池组而言,液体冷却具有明显的优势.邱焕尧<sup>[11]</sup>设计了一种 W 形冷却管道,布置在 18 650 圆形电池的周围,模组以 2C 倍率放电,最高温度控制在 38 °C,温差控制在 5 °C 之下;许时杰<sup>[12]</sup>设置了一种蛇形液冷管道,布置于方形电池模组的底部位置,模组以 2C 倍率放电,温度最高为 39.2 °C,温差为 4.26 °C;

电池液冷散热研究主要是通过改变电池的排布结构以及液冷管道的结构实现散热优化等,然而对

于电池成组后引发的热交互对液冷散热影响的研究尚较缺乏.针对电池成组后的热不一致性及热安全性问题,设计了一种新的电池散热结构,即在电池单体之间夹隔泡沫棉,隔绝单体之间的热交互,同时当电池在行驶路况时起到一定的减震保护作用,并且在模组底部加入导热垫和液冷板,加快散热速度.在单体电芯的内阻测试实验及电芯放电温升实验的基础上准确建立了电池的热仿真模型,并进行模组递进式散热设计:方案一采用自然散热、方案二采用在电池单体之间夹隔泡沫棉,方案三采用液冷系统散热并且对液冷散热结构进行了优化设计.应用 STAR-CCM+ 软件,对电池模组在不同放电倍率下的温度场进行热仿真分析,对比电池的散热效率,得出电池模组的最优散热方案.

## 1 数学模型的建立

### 1.1 锂离子电池产热机理

锂离子电池产生的热量包括反应热、副反应热、极化热和焦耳热<sup>[13]</sup>.由于过充和过放、电解质分解及自放电产生的副反应热几乎为零,故只考虑反应热  $Q_r$ 、焦耳热  $Q_j$  和极化热  $Q_p$ .

在进行充放电时,锂离子和电子发生嵌入和脱嵌,两者遵循电荷守恒定律.运动过程中产生的总热量  $Q$  可由下式得出:

$$Q = Q_r + Q_j + Q_p = IT \frac{dE}{dT} + I^2(R_j + R_p) \quad (1)$$

式中: $T$  为电池温度, K;  $E$  为电池电动势, V;  $I$  是充放电电流, A;  $R_j + R_p$  为电池总内阻,  $m\Omega$ .

### 1.2 电芯热物性参数获取

#### 1.2.1 电芯导热系数

锂离子动力电池的内部组成材料多种多样,每种材料的导热系数都不尽相同,并且其内部材料的排布排列形式也有所差异.因此锂离子电池的导热系数在各个方向是不同的,即具有各向异性.本文采用串并联热阻的方式计算电池的导热系数,假设电池的厚度方向为  $Z$  方向,宽度方向为  $X$  方向,高度方向为  $Y$  方向<sup>[14]</sup>.

电池在  $Z$  方向上的导热值由下式可得:

$$K_z = \frac{L}{\sum_i \frac{L_i}{K_i}} = \frac{L_z}{\frac{L_{z1}}{K_1} + \frac{L_{z2}}{K_2} + \frac{L_{z3}}{K_3} + \frac{L_{z4}}{K_4} + \frac{L_{z5}}{K_5}} \quad (2)$$

式中:  $K_z$  为电池在  $Z$  方向的导热系数 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $L_z$  为电池在  $Z$  方向上的数值大小 (m);  $L_{z1}, L_{z2}, L_{z3}, L_{z4}, L_{z5}$ , 分别为电池正极、电池正极集流板、隔膜、电池负极、电池负极集流板在  $Z$  方向上的数值大小 (m).

电池在  $X, Y$  方向上的导热系数可由下式计算得出:

$$K_x = K_y = \sum_i \frac{K_i L_i}{L} = \frac{K_1 L_{x1} + K_2 L_{x2} + K_3 L_{x3} + K_4 L_{x4} + K_5 L_{x5}}{L_x} \quad (3)$$

式中:  $K_x, K_y$  分别为电池在  $X$  方向以及  $Y$  方向上的导热系数 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ).

### 1.2.2 电芯密度

电芯密度采用平均密度概念, 可由下式计算得出:

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M_c - M_p - M_n - M_s}{V_c - V_p - V_n - V_s} \quad (4)$$

式中:  $M_c, M_p, M_n, M_s$  分别表示电池、电池正极、电池负极、电池外包装的质量 (kg);  $V_c, V_p, V_n, V_s$  分别代表电池、电池正极、电池负极、电池外壳体积 ( $\text{m}^3$ ).

### 1.2.3 电芯比热容计算

采用加权法计算锂离子电池的比热容, 计算公式如下:

$$\rho c = \frac{\sum_i \rho_i c_i V_i}{\sum_i V_i} \quad (5)$$

式中:  $\rho, \rho_i$  分别为电池的平均密度、各种材料的密度 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $c, c_i$  表示电池的平均热容及材料的平均热容 ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $V_i$  为各种材料的体积 ( $\text{m}^3$ ).

根据理论计算获得的锂离子电池热物性参数: 密度  $\rho$  为  $2588 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 比热容  $c$  为  $940 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 热导率  $\lambda_x = \lambda_y = 22.302 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $\lambda_z = 1.4396 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

## 1.3 锂电池单体生热速率模型及热边界条件建立

### 1.3.1 电池生热速率模型

根据 Bernardi 提出的电池生热速率模型, 假设电池内部热源均匀且稳定.

$$q = \frac{1}{v} [I^2(R_j + R_p) + IT \frac{\partial E}{\partial T}] \quad (6)$$

式中:  $IT \frac{\partial E}{\partial T}$  表示可逆反应热, 由于数值较小, 可以忽略不计.  $R_j + R_p$  为电池的内阻值. 由式(6)知, 电池的产热主要与电池内阻有关. 而电池的内阻通常不是常数, 需要通过电池内阻的测试实验得出.

### 1.3.2 热边界条件

#### 1) 电池表面与空气之间的对流边界

根据牛顿冷却定律, 锂离子电池表面与空气之间由于温差而进行对流换热, 边界条件用下式来描述:

$$\varphi = h(T - T_a) \quad (7)$$

式中:  $\varphi$  为热流密度 ( $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $h$  为对流换热系数 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $T_a$  为环境温度 (K).

#### 2) 电池与液冷板之间的换热边界

液冷板内部采用水作为散热介质时, 电池与液冷板壳体之间存在导热, 而液冷板与冷却水之间存在对流换热. 其中水的能量守恒方程如下<sup>[15]</sup>:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho c v T) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (8)$$

式中:  $\rho, c, v, T, k$  分别代表液态水的密度 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ), 比热容 ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ), 速度矢量 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 温度 (K), 和导热系数 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ).

液态水的运动由质量守恒方程及动量守恒方程控制:

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (9)$$

$$\rho \left[ \frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v \right] = -\nabla P + \mu \nabla^2 v \quad (10)$$

式(9)-(10)中:  $P$  代表压强 (Pa);  $\mu$  为动力粘度 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ).

## 1.4 流场与温度场协同原理介绍

在对流换热的过程中, 其换热能力的体现受热流场特性的影响, 文献[16]从流场与温度场配合的角度提出对流换热强化的场协同理论. 换热性能不仅由流体速度决定, 还取决于流体速度与流体热场之间的协同数. 协同度可以由下式表示.

$$F_c = \int_0^1 (\bar{U} \cdot \nabla \bar{T}) d\bar{y} = \int_0^1 (|\bar{U}| |\nabla \bar{T}| \cos \beta) d\bar{y} \quad (11)$$

式中:  $T$  代表温度, K;  $U$  代表速度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\beta$  代表的是温度  $T$  与速度  $U$  之间的夹角.

当  $U, T$  以及  $\cos \beta$  互相协同配合时, 才能使得  $F_c$  增大, 提高换热性能.

## 2 电池内阻的测定及温升实验

本文选用的电芯为某三元锂电池. 如图 1 所示. 其参数为: 电池厚度 12 mm, 宽度 85 mm, 长度为 310 mm (不包括极耳), 极耳长度 25 mm, 宽度 50 mm, 厚度 6 mm, 标准电压 3.7 V, 标准容量 43 Ah.

### 2.1 电池内阻测试

测试原理: 给某一荷电状态的电池加载一个脉

冲功率,电池的电压会立刻产生一个阶跃的变化,根据欧姆定律通过加载的电流与阶跃电压的变化量可以计算出某一荷电状态下电池的直流内阻.一个 HPPC 测试中小的循环基本是由 60 s 构成的,10 s 脉冲放电,40 s 静止,10 s 脉冲充电<sup>[7]</sup>.

实验器材:电芯,如图 1 所示;FT8309 型 HEF 动力电池测试系统(杭州产,0~250 A,电流精度达到 0.1%RD±0.1%FS);W 型泰斯特高低温试验箱(温州产,可测温度为-40~150 °C,温度误差范围±0.2 °C);普瑞电子有限公司生产的 TP720 型数据采集器.



图 1 实验用电芯

Fig.1 Cells used in the experiment

实验步骤:

1)将电池恒流恒压充电至 100%,并冷却至与室温一致.

2)将电池放于温度为 25 °C 的恒温箱内做一次 HPPC 实验,对电池进行 1C 电流放电 10 s,静止 40 s,然后以 0.75C 充电 10 s,并记录脉冲的电流与电压变化量.

3)通过恒流放电 12 min 的方法将电池 SOC 分别调至 0.8、0.6、0.4、0.2、0,然后再在各 SOC 下进行 HPPC 实验,测试并记录好数据.整理得出在 25 °C 自然条件下,内阻  $R$  随 SOC 变化,如图 2 所示.

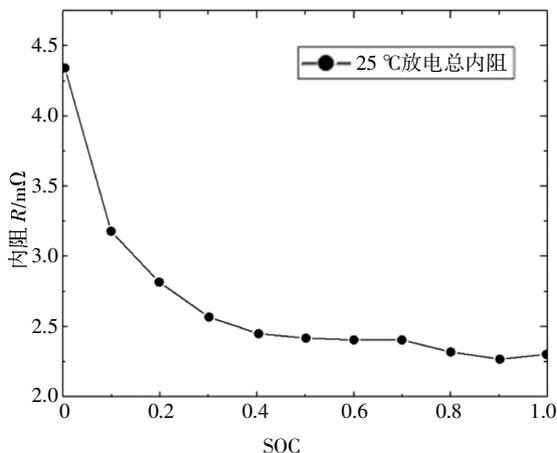


图 2 内阻随 SOC 变化图

Fig.2 Internal resistance varying with SOC

2.2 单体电芯温升实验

使用上述所用的实验设备以及单体电芯在 25 °C 的环境温度下,进行电池的放电实验,分别对电池进行 1C、2C 倍率进行放电,当达到放电截止电压时,放电结束,记录并保存电芯在此条件下的温升数据.图 3 为锂离子单体电池在 25 °C 的环境温度下 1C、2C 倍率放电完结时测点 1(电芯靠近正极处末端)、2(大面中间)、3(电芯靠近负极处末端)数据整理所得实验温升图.

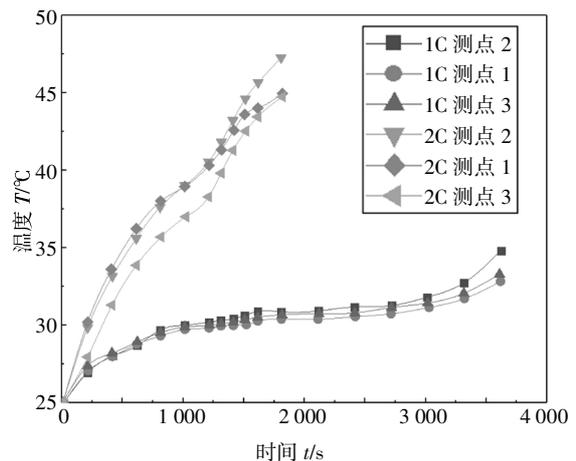


图 3 不同放电倍率下电池的实验温升图

Fig.3 Experimental temperature rise at different discharge rates

3 电池建模仿真及验证

图 4 为锂离子单体电池在 25 °C 的环境温度下 2C 倍率放电结束时的仿真温升图.图 5 为在 1C 和 2C 放电倍率条件下,电池温度的实验数据与仿真数据的对比图.

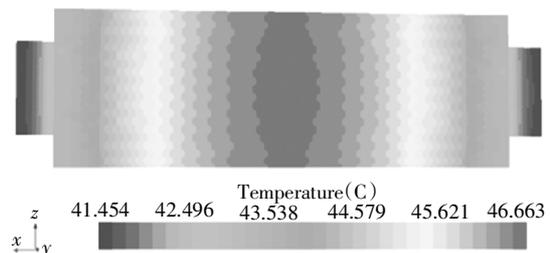


图 4 电池单体 2C 倍率放电时的温度云图

Fig.4 Temperature distribution of battery cell at 2C discharge rate

根据图 5,电池在以 1C 放电时,放电时间 1 000 s 之前的温升速率很快,在温度接近 30 °C 后开始趋于平缓,待热量慢慢的堆积,在放电接近尾声的时候,温升速率呈现增加的趋势,直至放电结束温度上升到了 34.9 °C;2C 放电时,因为电流增加了一倍,根据

图5温升图趋势就可以看出温升速率非常快,到放电结束时,最高温度达到了47.4℃.基于图3和图5,仿真数据和实验数据拟合度较好,误差在5%以内,因此本文建立的电池仿真模型准确,可用于后续仿真分析.

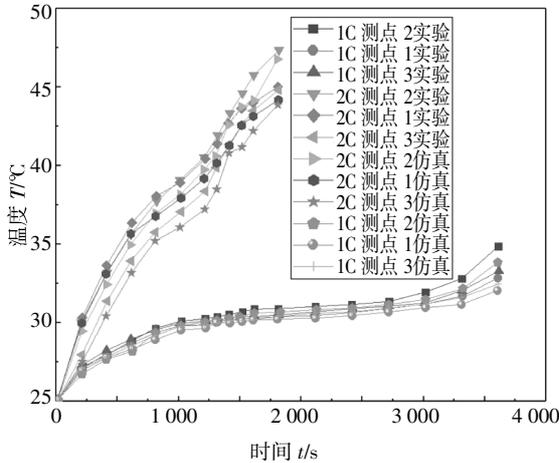


图5 实验与仿真对比

Fig.5 Comparison of experiment and simulation

### 4 电池模组的建立及仿真分析

#### 4.1 方案一 自然散热模组设计及热仿真分析

方案一采用10个电池单体并联组成1个模组,编号从1至10.如图6所示.图7为方案一模组在自然对流条件下2C倍率放电结束时的温度云图.图8为方案一模组中电池单体在2C放电结束时的最高温度、最低温度和温差数据图.

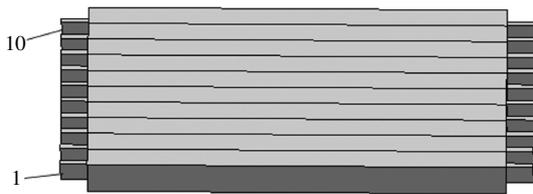


图6 方案一电池模组三维模型图

Fig.6 Three-dimensional model of Scheme 1

由图7和图8可知,当模组2C放电时,整个模组内部的温度明显高于外壁面与极耳部分.这是由于在对流的条件下,外壁面和极耳部分能充分的对流散热,而模组内部由于空气流通的限制,产生的热量很难通过对流换热传出,并且电池单体之间产生热交互的作用,随着热量积累导致温度升高.2C放电时最高温度达到了56.48℃,已经超过了电池最合适的温度范围;且模组以2C倍率放电时,单体电池的温差较大,达到了7℃以上,此时的单体电池温度

一致性较差.若电池长期处于此温度环境中,则会损伤电池的使用寿命,并且还会带来一定的安全隐患.故锂离子电池单体不能直接大量成组使用,必须设计合理的散热方案.

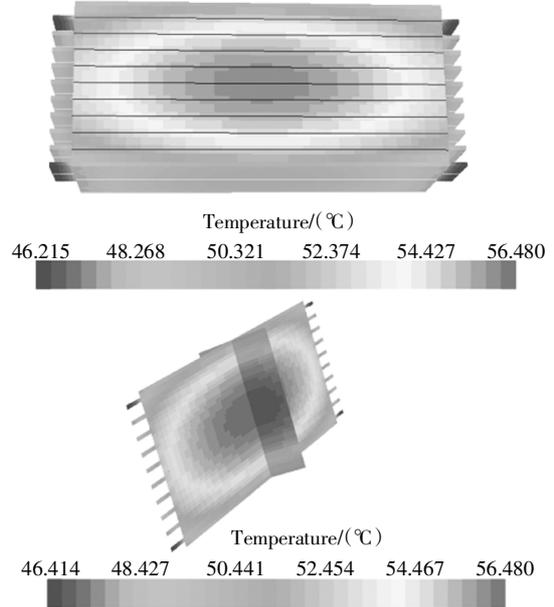


图7 方案一模组2C放电时的温度云图

Fig.7 Temperature distribution of battery module of Scheme 1 at 2C discharge rate

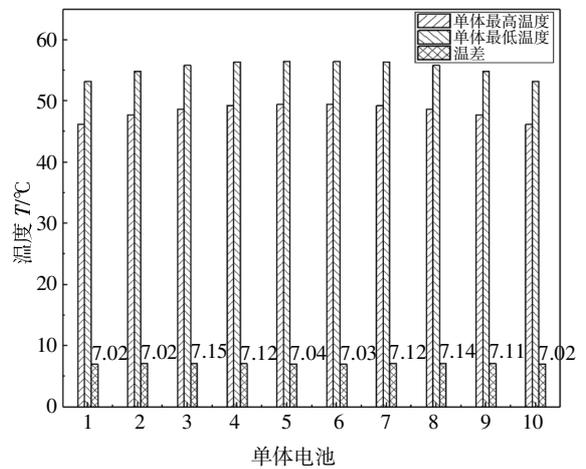


图8 方案一模组2C放电时的温度数据图

Fig.8 Temperature data of battery module of Scheme 1 at 2C discharge rate

#### 4.2 方案二 单体电池夹隔泡沫棉的模组设计及热仿真分析

基于方案一可知电池成组时高温区域主要集中在内部,一部分原因是由于电池放电时产热过多没能及时的散出,另一部分原因在于电池与电池单体之间紧密接触,它们之间发生的热交互作用,因此温

度聚集在内部区域. 为此进行模组散热设计的改进. 如图 9 所示, 方案二所使用的是在电芯单体之间夹隔泡沫棉, 由于泡沫棉的导热系数很低, 这样可以阻止电芯单体之间的热传递, 防止热量堆积在一起.

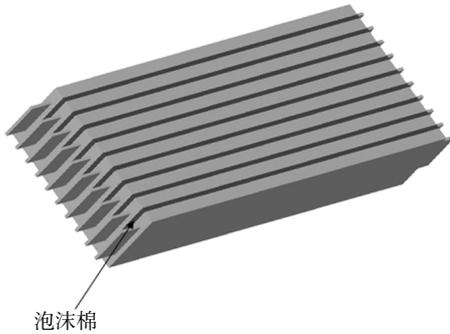


图 9 方案二电池模组三维模型图  
Fig.9 Three-dimensional model of Scheme 2

泡沫棉热物性相关参数: 比热容  $C$  为  $2380 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ; 密度  $\rho$  为  $320 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ; 导热率  $\lambda$  为  $0.023 \text{ W} \cdot \text{k}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ;

图 10 为方案二模组在 2C 放电结束时的温度云图. 图 11 为方案二模组中电池单体在 2C 放电结束时的最高温度、最低温度和温差数据图.

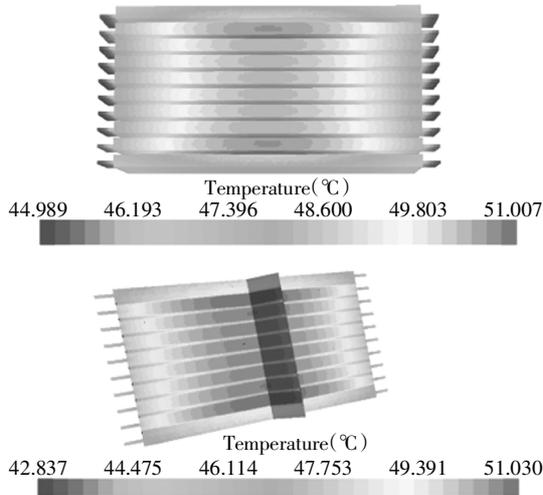


图 10 方案二模组在 2C 放电时的温度云图  
Fig.10 Temperature distribution of battery module of Scheme 2 at 2C discharge rate

由图 10 和图 11 可知, 电池单体之间夹隔泡沫棉之后, 由于泡沫棉的低导热性, 使得电池的热量沿平行于泡沫棉方向传导, 从而达到热均衡性, 模组最大温差为  $5.32 \text{ }^\circ\text{C}$ . 由于单体成组放电, 电池产热量大, 单纯的自然冷却以及采取热源之间相互隔离的方法显然还是不能将温度控制在合适范围内, 仍然处于  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  以上的高温条件.

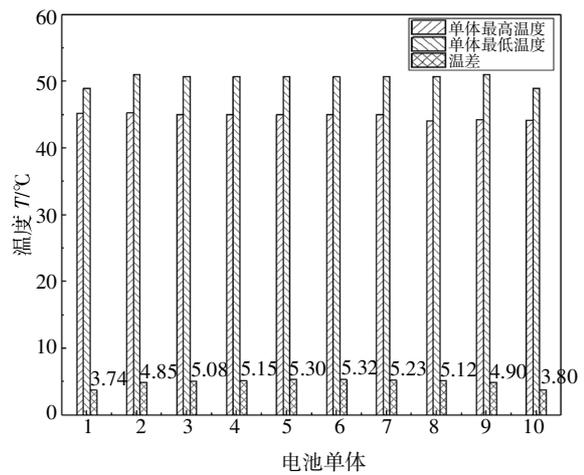


图 11 方案二模组 2C 放电时的温度数据图  
Fig.11 Temperature data of battery module of Scheme 2 at 2C discharge rate

### 4.3 方案三采用液冷系统的模组设计及热仿真分析

针对方案二中模组在放电情况下温度仍然较高的问题, 本方案采用液冷系统给电池模组进行强制散热, 液冷板流道结构及电池模组如图 12 所示, 电池模组下面垫有导热垫, 在导热垫下面装有液冷板, 液冷板采用铝制, 流量进口采用质量流量, 设置为  $2 \text{ L/min}$ .

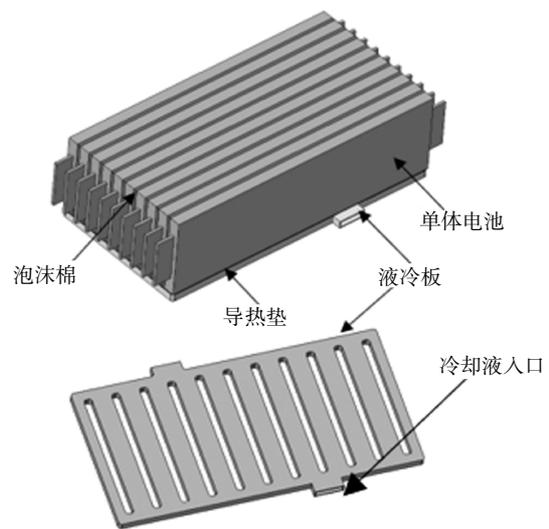


图 12 电池模组及液冷板三维模型图  
Fig.12 Three dimensional model of battery module and liquid cooling plate

上述元件的材料热物性如下: 铝板: 密度  $\rho$  为  $2710 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ; 导热系数为  $159 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ; 比热容  $C$  为  $900 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ; 导热垫: 密度  $\rho$  为  $2500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ; 导热系数为  $1.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ; 比热容  $C$  为  $903 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;

图 13 为方案三模组在 2C 放电结束时的温度云图、流道压力分布图以及速度矢量图. 根据图 13(a)可知, 采用了液冷系统进行强制散热后, 模组高温问题得到明显的改善. 2C 倍率放电时最高温度为 38.39 °C, 整个模组的高低温区域较为明显. 单体电池的温差较大, 这是因为流道内冷却液的分配不均匀所导致的. 从压力分布图 13(b)也可以看出, 右边的压力整体都是高于左边的, 压降为 192 Pa. 速度矢量图 13(c)中的速度分布也是右边更加的均匀, 左边的流量分配得很少, 导致散热协同效果差. 从而造成了模组的温度场差异化较明显, 右边温度低左边温度高的现象. 需要优化液冷板的流道结构来改变模组温度分布不均匀, 单体电池温差较大这一现象.

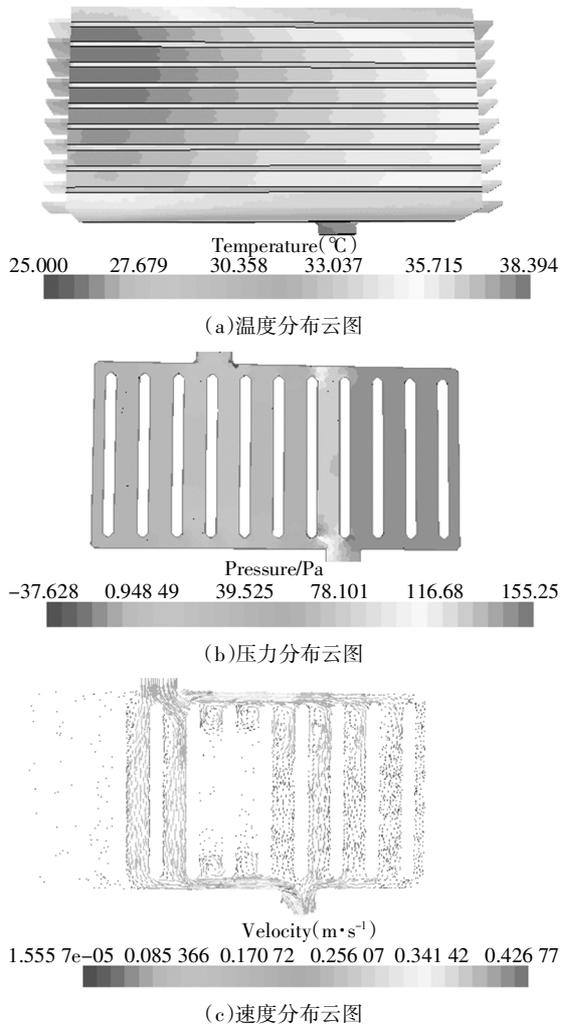


图 13 模组 2C 放电温度、压力、速度分布云图

Fig.13 Contours of temperature, pressure and velocity distribution at 2C discharge of module

针对模组温度场高低温区域化明显、单体电池

温差较大现象, 对液冷板进行了优化设计, 液冷板结构示意如图 14 所示. 流道的数量减少, 流量可以分配更加均匀. 图 15 是方案三液冷板优化后模组在 2C 放电结束时温度、压力以及速度云图.

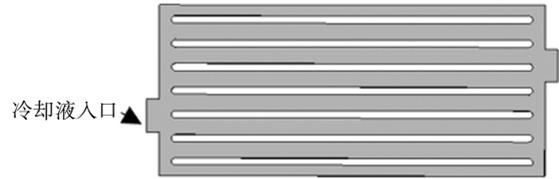


图 14 方案三液冷板优化结构

Fig.14 Optimal structure of liquid cooling plate of Scheme 3

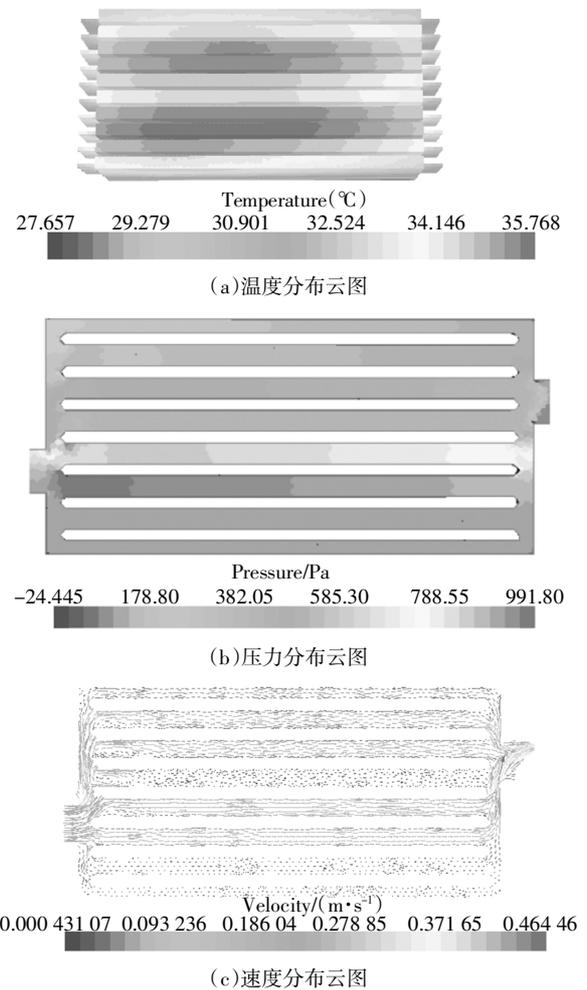


图 15 方案三液冷板优化后模组在 2C 放电时的温度、压力、速度云图

Fig.15 Contours of temperature, pressure and velocity of the module with optimized liquid cooling plate of Scheme 3 at 2C discharge

对比图 13 和图 15 可知: 在对液冷板进行优化之后, 可以看到模组两侧的温度一致性得到了改善, 且最高温度下降了 2.6 °C. 但是管内的压降增加了

823 Pa 达到 1 000 Pa 以上,这对水泵以及管道的要求都比较高.从速度矢量图中可以看到,流速以及流量的分配也得到了较大改善,但是还是有不足之处.

为此,本文对液冷管道结构再做优化设计,结构示意图为图 16,流道结构采取 2 并 3 串的串-并联相结合的形式,能使流量在管道内分配得更加均匀,散热协同效果更优,相反管道内的各处压力还能下降.仿真结束后云图如图 17 所示.

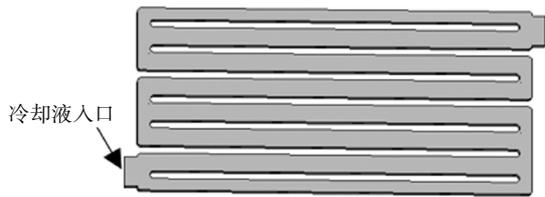
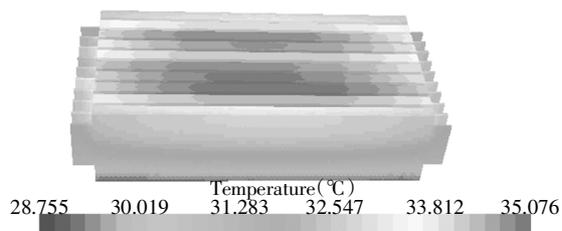
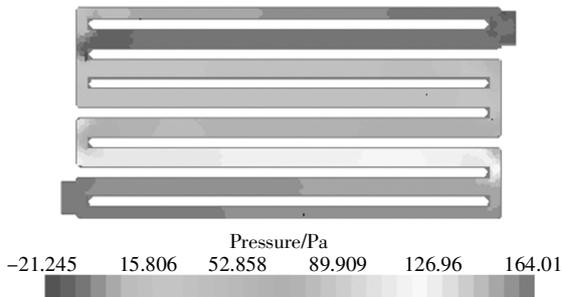


图 16 串-并联结合的液冷板结构

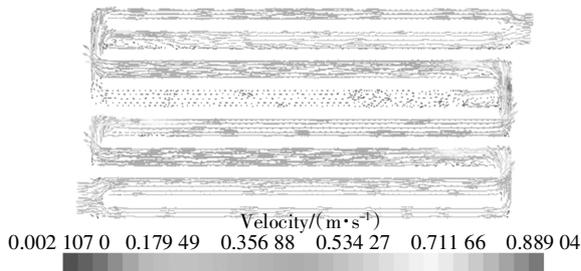
Fig.16 Cooling plate structure with series and parallel connection



(a)温度分布云图



(b)压力分布云图



(c)速度分布云图

图 17 串-并联液冷板结构下模组在 2C 放电时的温度、压力、速度云图

Fig.17 Contours of temperature, pressure and velocity of the module with the structure of series and parallel liquid cooling plate at 2C discharge

图 17 为方案三液冷板再优化后模组中各单体在 2C 放电结束时的温度云图、压力云图以及速度矢量云图.图 18 为单体电池最高温、最低温以及温差图.结合图 17 和 18 可知,模组的最高温度以及温度一致性都很好,流道内的流量分配度较高,冷却液最高流速达到了 0.88 m/s,换热效率更快,整体的压降也仅为 185 Pa.模组以 2.0 C 倍率放电结束时,模组最高温度 35.08 °C,并且最大温差为 4.85 °C.采用液冷板流道结构为串、并相结合的液冷系统作为热管理方案,可使锂离子电池工作时温度处于合理的范围,且温度一致性较好.

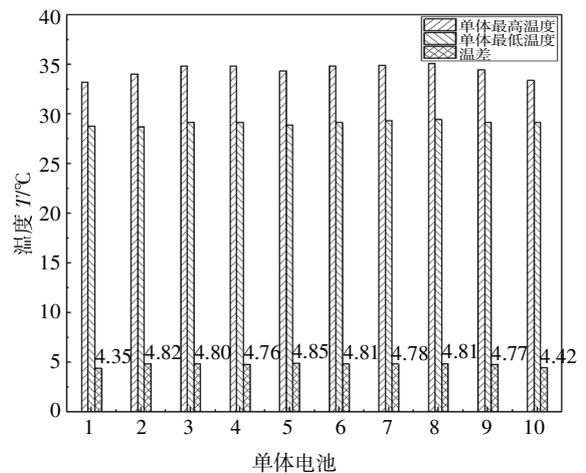


图 18 串-并联液冷板结构下模组中各单体在 2C 放电时的温差图

Fig.18 Temperature difference diagram of each cell in the module with the structure of series and parallel liquid cooling plate at 2C discharge

### 5 结论

通过对单体电池实验与仿真相结合的方式验证了模型建立的准确性.并在此基础上,设计了电池单体单独成组(方案一)、电池单体之间夹隔泡沫棉(方案二)、电池模组底部布置液冷板(方案三)3种递进式散热方案,并对液冷板进行了两次优化设计.使用串-并联相结合的液冷板流道结构作为方案三的冷却系统时,模组散热效果最好,在 2C 放电结束时,单体模组的最高温度为 35.08 °C,最大温差为 4.85 °C.相比于方案一,其散热效率提升了 37.9%;相比于方案二,其散热效率提升了 29.8%.由此可见,采用优化后的方案三,在电池单体间增加泡沫棉可减少电池间的热交互,提高电池的热均衡性,同时对电池在行驶路况时起到减震保护作用,提高电池的安全性;再者,在电池模组底部增设导热垫和液冷板,可

加快电池的散热速率,同时配合液冷板流道结构为串-并联相结合的设计,从而实现有效的热管理. 研究成果可为动力电池热管理及其散热结构优化设计提供一定的参考.

## 参考文献

- [1] SHAFIEI E, LEAVER J, DAVIDSDOTTIR B. Cost-effectiveness analysis of inducing green vehicles to achieve deep reductions in greenhouse gas emissions in New Zealand [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 150: 339-351.
- [2] 千年妃, 孙长乐, 刘东旭, 等. 变接触面液冷系统的电池模组温度一致性研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2020, 47(6): 34-42.  
GAN N F, SUN C L, LIU D X, *et al.* Study on temperature consistency of battery module for liquid cooling system with variable contact surface [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2020, 47(6): 34-42. (In Chinese)
- [3] LIU F F, LAN F C, CHEN J Q. Dynamic thermal characteristics of heat pipe via segmented thermal resistance model for electric vehicle battery cooling [J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 321: 57-70.
- [4] DENG Y W, FENG C L, E J Q, *et al.* Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithium-ion battery system: a review [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 142: 10-29.
- [5] LIU W, WANG M, GAO X L, *et al.* Improvement of the high-temperature, high-voltage cycling performance of  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$  cathode with  $\text{TiO}_2$  coating [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, 543: 181-188.
- [6] GUO Z, CHEN Z. High-temperature capacity fading mechanism for  $\text{LiFePO}_4/\text{graphite}$  soft-packed cell without Fe dissolution [J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2015, 754: 148-153.
- [7] 李龙飞. 某纯电动汽车电池模组散热结构设计及热分析[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2019: 41-47.  
LI L F. Heat dissipation structure design and thermal analysis of a pure electric vehicle battery module [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2019: 41-47. (In Chinese)
- [8] YUKSEL T, LITSTER S, VISWANATHAN V, *et al.* Plug-in hybrid electric vehicle  $\text{LiFePO}_4$  battery life implications of thermal management, driving conditions, and regional climate [J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 338: 49-64.
- [9] LIU F F, LAN F C, CHEN J Q, *et al.* Experimental investigation on cooling/heating characteristics of ultra-thin micro heat pipe for electric vehicle battery thermal management [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2018, (31)1: 179-188.
- [10] CHEN D F, JIANG J C, KIM G H, *et al.* Comparison of different cooling methods for lithium-ion battery cells [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 94: 846-854.
- [11] 邱焕尧. 基于锂离子动力电池液冷散热结构设计及仿真分析[D]. 西安: 长安大学, 2019: 32-46.  
QIU H Y. Design and simulation analysis of liquid cooling structure based on lithium-ion power battery [D]. Xian: Chang'an University, 2019: 32-46. (In Chinese)
- [12] 许时杰. 蛇形液冷板电池热管理系统散热效果及压力损失分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2017: 39-40.  
XU S J. Investigation on thermal performance and pressure loss of the fluid serpentine-channel cold-plate used in thermal management system of the battery pack [D]. Changsha: Hunan University, 2017: 39-40. (In Chinese)
- [13] 刘奇. 基于相变材料的锂离子动力电池热管理系统性能优化研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017: 12-13.  
LIU Q. Performance improvement of thermal management systems Based on phase change materials for lithium-ion battery [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017: 12-13. (In Chinese)
- [14] ZHAO C R, CAO W J, DONG T, *et al.* Thermal behavior study of discharging/charging cylindrical lithium-ion battery module cooled by channeled liquid flow [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 120: 751-762.
- [15] RAO Z H, QIAN Z, KUANG Y, *et al.* Thermal performance of liquid cooling based thermal management system for cylindrical lithium-ion battery module with variable contact surface [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 123: 1514-1522.
- [16] 刘霏霏, 兰凤崇, 陈吉清. 基于动态内热源特性的车用锂离子动力电池温度仿真及试验 [J]. *机械工程学报*, 2016, 52(8): 141-151.  
LIU F F, LAN F C, CHEN J Q. Simulation and experiment on temperature field of lithium-ion power battery for vehicle based on characteristic of dynamic heat source [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(8): 141-151. (In Chinese)
- [17] 刘霏霏. 微热管在电动汽车电池热管理系统中应用关键技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017: 74-76.  
LIU F F. Research on key technology of applying micro heat pipes in battery thermal management system for electric vehicles [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017: 74-76. (In Chinese)