

基于并联型流道结构的方壳电池模组浸没式冷却建模与仿真分析

李健华

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2025年2月6日; 录用日期: 2025年2月27日; 发布日期: 2025年3月6日

摘 要

浸没式冷却是一种高效的冷却方法, 然而方壳电池因结构特征问题容易导致冷却液产生流动死区, 进而导致有关方壳电池的浸没式冷却研究较少。为了解决这个问题, 本文提出了一种由5节116 Ah方壳电池平行并列分布, 基于上下交错式曲线型流动的并联分流浸没式冷却热管理系统。通过相关的建模软件建立电池模组的几何模型, 并论述了电池模组以2C倍率放电以及基于浸没式冷却方式散热的数值仿真过程, 整个仿真在Ansys Fluent中进行。还研究了并联流动下的温度分布、流量分配和压力分布情况。仿真结果表明, 电池的最高温度低于37℃, 模组内部的最大温差低于1.2℃。因此, 所提出的浸没式冷却热管理系统具有高效的降温能力和提高温度一致性的能力, 对方壳电池的浸没式冷却系统设计具有重要参考意义。

关键词

方壳电池模组, 浸没式冷却, 并联流道, 三维建模, 数值仿真

Modeling and Simulation Analysis of Immersion Cooling of Square Shell Battery Module Based on Parallel Flow Channel Structure

Jianhua Li

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Feb. 6th, 2025; accepted: Feb. 27th, 2025; published: Mar. 6th, 2025

文章引用: 李健华. 基于并联型流道结构的方壳电池模组浸没式冷却建模与仿真分析[J]. 建模与仿真, 2025, 14(3): 21-31. DOI: 10.12677/mos.2025.143199

Abstract

Immersion cooling is an efficient cooling method. However, due to structural characteristics of square-shell batteries, it is easy to cause flow dead zones in the coolant, which in turn results in less research on immersion cooling of square-shell batteries. In order to solve this problem, this article proposes a parallel split-flow immersion cooling thermal management system consisting of five 116 Ah square-shell batteries distributed in parallel and based on up and down staggered curved flow. The geometric model of the battery module was established through relevant modeling software, and the numerical simulation process of the battery module discharging at a 2C rate and dissipating heat based on immersion cooling was discussed. The entire simulation was performed in Ansys Fluent. The temperature distribution, flow distribution and pressure distribution under parallel flow were also studied. The simulation results show that the maximum temperature of the battery is lower than 37°C, and the maximum temperature difference inside the module is lower than 1.2°C. Therefore, the proposed immersion cooling thermal management system has efficient cooling capabilities and the ability to improve temperature consistency, and has important reference significance for the design of immersion cooling systems for square-shell batteries.

Keywords

Square Shell Battery Module, Immersion Cooling, Parallel Flow Channel, Three-Dimensional Modeling, Numerical Simulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

锂离子电池因具有高比能量密度、循环寿命长、自放电率低、无记忆效应等优点而被广泛地用作纯电动汽车和混合动力汽车的主要动力来源[1]。锂离子电池在工作过程中会产生热量，一旦热量积累且没有得到及时疏散，就会导致电池内部的温度急剧升高，进而导致 SEI 膜分解和电解质等相关材料分解，从而引发电池热失控[2]。因此，一个好的热管理系统对于提高锂离子电池的安全性并确保其在整个充放电过程中在可接受的温度范围内运行至关重要。常见的热管理冷却策略主要有空气冷却、液体冷却和相变材料冷却。空气的导热系数和比热容低，导致其在降低电池包内最高温度和维持电池组温度均温性等方面上效果较差[3]。相变材料本身的导热性能和结构稳定性较差，导致相变材料冷却技术难以大规模应用[4]。液体冷却采用具有高传热系数和比热容的冷却剂，是当前热管理系统中应用最广泛的冷却方法之一[5]。根据冷却剂是否与电池直接接触，液体冷却可分为间接接触式液体冷却与浸没式(直接接触式)液体冷却。研究表明，与间接接触式冷却方法相比，浸没式冷却方法具有更高的冷却效率。

浸没式冷却是一种将冷却对象直接浸没在冷却剂中的冷却方法，通过冷却剂直接与电池接触，从而带走电池表面热量。浸没式冷却通常使用介电系数低的流体作为冷却剂，一般包括电子氟化液、矿物油、酯类和碳氢化合物等。除了具有绝缘性外，部分浸没式冷却剂还具有阻燃性。因此，浸没式冷却还可以有效地避免电池热失控和抑制电池热蔓延[6]，保障了浸没式冷却电池系统的安全性。这引起了人们在圆柱电池、软包电池和方壳电池上对浸没式冷却做了大量研究，主要集中在圆柱和软包电池上，对方壳电池的研究较少。主要是由于方壳电池平整的外形和成组排列方式，导致冷却剂在流动过程中容易形成流

动死区,阻碍冷却剂的循环。因此,浸没式冷却技术在方形电池中的应用仍然存在困难。浸没式冷却的冷却效率一般取决于电池间隙、进出口位置、冷却液类型、流道布局等。Choi 等人[7]的研究发现,对于较大的电池模组,冷却剂的不均匀流动会造成温度分布不均匀,导致局部温度过高。Mahdi 等人[8]提出了一个创新的混合纳米/介电流体冷却系统,并基于该系统使用隔板形成流道,改善冷却液的流动效果,使电池温度的均匀性得到改善。Tan 等人[9]的研究发现,采用多层结构和错流结构的条件下,可以降低电池的最高温度,提高电池温度均匀性。因此,对于浸没式冷却,除了适当地调整电芯间隙和进出口位置,以及选择合适的冷却剂外,使用合理流道结构是至关重要的。合理的流道结构可以改善冷却剂的流动性能,提高系统的冷却效果。

为了解决冷却液因方壳电池结构特征容易产生流动死区这个问题,本文提出了一种由 5 节 116 Ah 方壳电池平行并列分布,基于上下交错式曲线型流动的并联分流浸没式冷却热管理系统。采用 Space Claim 建立数学模型,并采用 Fluent 对电池模组以 2C 倍率放电的散热性能进行了数值仿真分析,并进一步分析了并联流动下的温度分布、流量分配和压力分布情况,为方壳电池的浸没式冷却系统设计提供参考。

2. 数值仿真模型

2.1. 电池模组三维模型

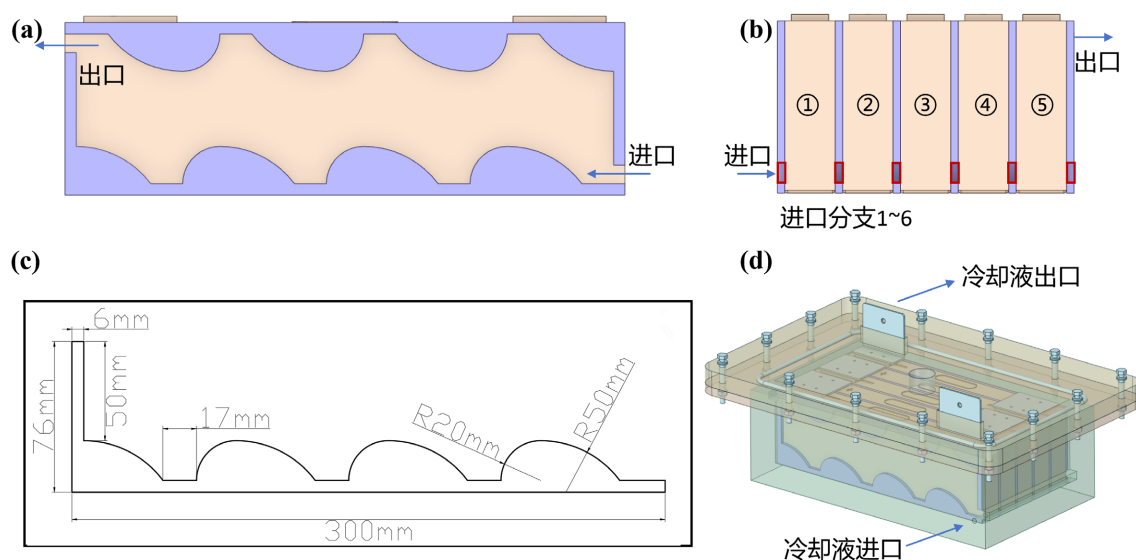


Figure 1. Schematic diagram of the battery module structure: (a) The front view of the module inside; (b) In-side the module, right view; (c) Schematic diagram of the geometric dimensions of the deflector; (d) Schematic diagram of the overall assembly of the battery module

图 1. 电池模组结构示意图: (a) 模组内部正视图; (b) 模组内部右视图; (c) 导流板几何尺寸示意图; (d) 电池模组总体装配示意图

本文所提出的浸没式冷却电池模组如图 1 所示,电池模组包括 5 颗 116 Ah 平行并列分布的方壳锂离子、铝制导流板、透明亚克力箱子、密封组件及其他。导流板紧贴电池大面,具体位置关系如图 1(a)和图 1(b)所示。导流板与电池大面紧密贴合后,与箱体的内表面配合,形成了一种基于上下交错式曲线型流动的并联分流流道结构。并且,冷却液的进出口异侧布置,进口低、出口高,此外,本文选择以流体 A 作为浸没冷却液。冷却液从进口流入模组后,分为 6 条进口支路(另一侧为对应出口支路),流过电池间隙,随后汇总,流出电池模组。从冷却液进口至出口电池编号依次为,1 号、2 号、3 号、4 号和 5 号。电池

的长宽高分别为 300 mm、27 mm、92 mm，电池间隙为 4 mm，冷却液的进出口内径为直径 6 mm。导流板为一种多曲线型结构，上下交错布置，几何尺寸如图 1(c)所示，厚度为 4 mm，亚克力箱子厚度为 20 mm。整个电池模组三维模型在 Space Claim 中完成。

2.2. 电池产热模型

锂离子电池在充放电过程中的产热部分主要包括电池内部、电池正极和电池负极。其中，电池内部的总发热量包括欧姆内阻热、电化学反应热、极化热和副反应热，主要由欧姆内阻热和电化学反应热两部分决定，并随时间而变化。目前，关于电池的理论计算最常用的方法是 Bernadi 等提出的电池生热速率模型，其表达式如下：

$$q_v = \frac{I}{V_b} \left[(E_{oc} - U) - T \frac{\partial U}{\partial T} \right] \quad (1)$$

式中 E_{oc} 为开路电压； U 为单体电池的工作电压； I 为充放电电流， T 为电池温度； V_b 为电池体积。

而电池正极和负极的产热量仅与材料本身的属性和充放电倍率相关，由以下表达式给出：

$$q_z = \frac{I_z^2 R_z}{V_z} \quad (2)$$

$$q_f = \frac{I_f^2 R_f}{V_f} \quad (3)$$

式中。 q_z 和 q_f 分别表示正极和负极极耳的生热速率； V_z 和 V_f 分别表示正极和负极极耳的体积； I_z 和 I_f 分别表示流经正极和负极极耳的电流； R_z 和 R_f 分别表示正极和负极极耳的内阻。

为了简化计算，需要对电池引入以下假设：

- 1) 电池的內部条件(比热容和密度)被认为是均匀的。
- 2) 热源均匀分布在电池内部。
- 3) 辐射换热的影响被忽略。

2.2. 电池产热模型

电池模组的能量守恒方程可以表示为如下形式：

$$\rho_b c_{pb} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_b \cdot \nabla T) + q_v \quad (4)$$

式中 ρ_b 为电池平均密度； c_{pb} 为电池平均比热容； T 为电池温度； t 为时间； λ_b 为电池的导热系数； q_v 为电池的体积生热量。

在引入 CFD 流体控制方程之前，需要对流体进行以下假设：

- 1) 在本研究中，流体 A 被认为是一种层流和不可压缩的牛顿流体。
- 2) 假设流体 A 的热物理性质是恒定的。

对于在电池模组内部流动的流体 A，控制方程包括连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程，具体表达式分别如下：

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_s \mathbf{v}) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_s \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho_s \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p \quad (6)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x}(\rho_s c_{ps} T_s) + \nabla \cdot (\rho_s c_{ps} \mathbf{v} T_s) = \nabla \cdot (\lambda_s \nabla T_s) \quad (7)$$

考虑到流体 A 不可压缩, 标准 k - ε 方程可简化为:

$$\frac{\partial(\rho_s k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_s k v_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho_s \varepsilon \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho_s \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_s \varepsilon v_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} G_k - C_{2\varepsilon} \rho_s \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (9)$$

式中 G_k 是平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项, 可由以下式子计算:

$$G_k = \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \quad (10)$$

而湍流粘度 μ_t 则可以表示为 k 与 ε 的函数, 即:

$$\mu_t = \rho_s C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

式中, ρ_s 为流体 A 的密度; c_{ps} 为流体 A 的比热容; λ_s 为流体 A 的导热系数; T_s 为流体 A 的温度; $\mathbf{v}$ 为流体 A 的速度矢量; p 为压力; v_i 和 v_j 分别表示速度矢量在 x 和 y 轴上的分量; μ 为流体 A 的动力粘度; μ_t 为湍流粘性系数; C_μ 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 为标准 k - ε 模型对应的经验常数。

3. 三维 CFD 模型

本文采用 Ansys Fluent 进行浸没式冷却电池模组散热的数值仿真分析, 主要包括模型建立、模型前处理、网格划分、设置边界条件、设置热源、设置求解、结果分析。首先在 Space Claim 中建立电池模组的三维模型, 并进行模型的前处理。具体包括模型简化、去除模型干涉、去除模型非精确边和面、并抽取流体域, 然后设置冷却液总进出口和进出口分支。随后导入 Fluent 进行网格划分。

3.1. 网格划分

将前处理完成的模型导入到 Fluent 中, 设置网格的最小尺寸和最大尺寸, 设置模型的面网格类型为六边形, 随后描述模型的几何结构。将模型在 Space Claim 中设置的冷却液进出口分别定义为速度入口和质量出口和定义流体域, 并添加 3 层的边界层数。最后设置体网格的类型为多面体网格, 并进行网格划分。如图 2 所示, 体网格的总数量超过 10 万, 网格质量得到保证。

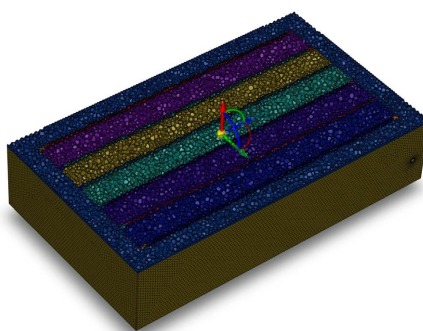


Figure 2. Schematic diagram of meshing of battery module model
图 2. 电池模组模型网格划分示意图

3.2. 设置边界条件

网格划分完成后，切换至求解模式。打开能量方程，并选择 $k-\varepsilon$ 模型方法进行设置。随后定义各材料属性，各材料的设置参数如表 1 所示。电池的热物性参数均通过相关实验测试得到，例如，ARC 测试电池的比热容等，使得电池各参数的准确性均有所保证。导流板和电池的正负极材料使用 Fluent 材料库中自带的铝和铜，不需要再单独设置。

Table 1. Physical parameters of each material
表 1. 各材料的物理参数

材料	密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热容($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	导热系数($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	粘度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$)
流体 A	774.1	2130	0.135	0.00332863
电池	2148	1150	23.29 (x, z 轴) 0.851 (y 轴)	—
亚克力	1200	1464	0.19	—

各种材料的物理参数设置完成后，设置模型的壁面条件和初始条件。电池模组模型的环境温度设置为 25°C ，与空气的对流换热系数设置为 $5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ ，冷却液进口流速设置为 1.77 m/s ，进口温度设置为 25°C 。

3.3. 设置热源

根据 SOC 的估算方法，可以计算得到 SOC 与时间的函数表达式，如下所示：

$$\text{SOC} = \text{SOC}_{\text{old}} - \Delta\text{SOC} = \text{SOC}_{\text{old}} - \frac{It}{3600C_R} \quad (12)$$

式中， SOC_{old} 为 SOC 的起始值， C_R 为电池的额定容量。

利用 HPPC 实验测试电池的内阻，熵热系数实验测试得到电池的熵热系数，并导入到式(1)中，再将该关系式代入生热速率计算公式(1)中，可以得到生热速率关于时间的函数表达式。计算电池模组以 2C 倍率放电的生热速率表达式，并编写 UDF 程序，导入到 Fluent 中，作为电池内部的热源项。电池生热速率的表达式是基于实验得到，理论与实验结合，保证了表达式的准确性和真实性。而电池正负极的生热速率则可以通过公式(2)和(3)计算得到。

4. 结果与讨论

本文主要从以下几个方面对电池模组的温度进行评估：

电池表面最高温度：

$$T_{\max} = \max\{T_i\} \quad (13)$$

式中 $T_{\max}$ 为电池表面最高温度， T_i 为电池表面各点温度。

电池平均温度：

$$T_{\text{cell}} = \frac{\sum T_i}{V_b} \quad (14)$$

电池平均温度(T_{cell})为体平均电池温度，是电池所有电池的温度值的和与电池体积的比值。

电池最高温度：

$$T_{\text{cell,max}} = \max \{T_{\text{cell},i}\} \quad (15)$$

电池最高温度($T_{\text{cell,max}}$)为 5 块电池中的最高温度。

电池最低温度:

$$T_{\text{cell,min}} = \min \{T_{\text{cell},i}\} \quad (16)$$

电池最低温度($T_{\text{cell,min}}$)为 5 块电池中的最低温度。

电池模组内部最大温差:

$$\Delta T = T_{\text{cell,max}} - T_{\text{cell,min}} \quad (17)$$

电池模组内部最大温差(ΔT)为模组内部电池最高温度与最低温度的差值。

最高温度可以直观的反映出, 本文所提出的浸没式冷却热管理系统的降温能力, 模组内部温差可以反映出电池模组温度一致性的好坏。

4.1. 温度结果

图 3 为上述条件下, 电池模组的温度云图。从图中可以看出, 在电池间隙处, 与冷却液接触的电池表面温度总是随着进口至出口增加, 并始终保持在 30°C 以下。与导流板接触的电池表面温度比较均匀, 整体维持在 $30^{\circ}\text{C} \sim 33^{\circ}\text{C}$ 。与电池大面温度相比, 电池顶部和侧面的温度较高。这是由于冷却液直接与电池大面接触, 带走表面热量, 所以电池大面得到很好的冷却。电池侧面的最高温度为 39.7°C , 而电池大面的最高温度低于 34°C 。因此, 在上述流道结构设计下, 电池大面得到较好冷却, 电池表面温度下降比较明显。

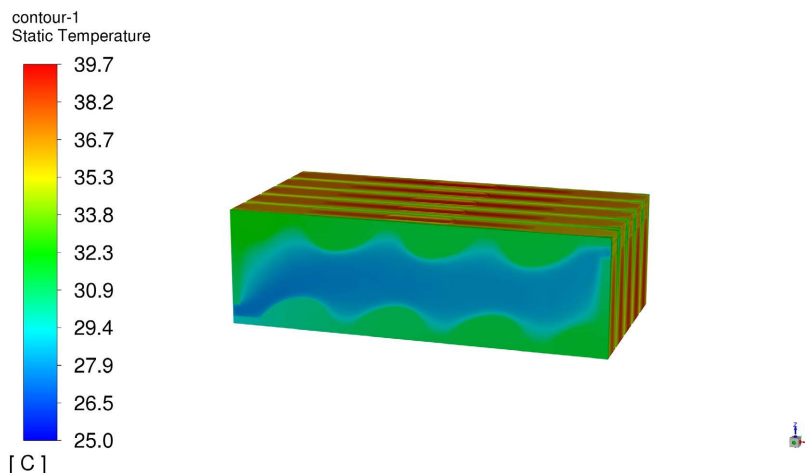


Figure 3. Battery module overall temperature cloud chart

图 3. 电池模组整体温度云图

为进一步探讨电池表面的温度分布情况, 图 4 展示了电池不同表面以及横截面的温度云图, 从图中可以明显看出, 与电池顶面和侧面温度相比, 电池大面的温度总是比较低。这与上述结果基本一致。从图 4(b)和图 4(c)可以看出, 总体来说, 5 块电池的顶面和侧面温度分布比较均匀。但是, 仔细比较下, 仍有部分差异, 可以看出, 电池侧面的温度, 从左向右依次降低, 而电池顶部的温度, 由前向后依次增加。模组横截面温度分布云图也展示出相同结果, 由前向后, 电池横截面温度依次增加。总体来说, 由 5 号电池到 1 号电池, 电池温度依次增加。这是由于, 冷却液从进口进入电池模组后, 电池的间隙小, 导致进口支路口的口径小, 而电池模组内部的并联分流口口径大, 从而导致了冷却液进入电池模组后, 大部

分冷却液直接从进口流至 5 号电池，随后从出口流出。因此，从 1 号电池到 5 号电池，温度依次降低。

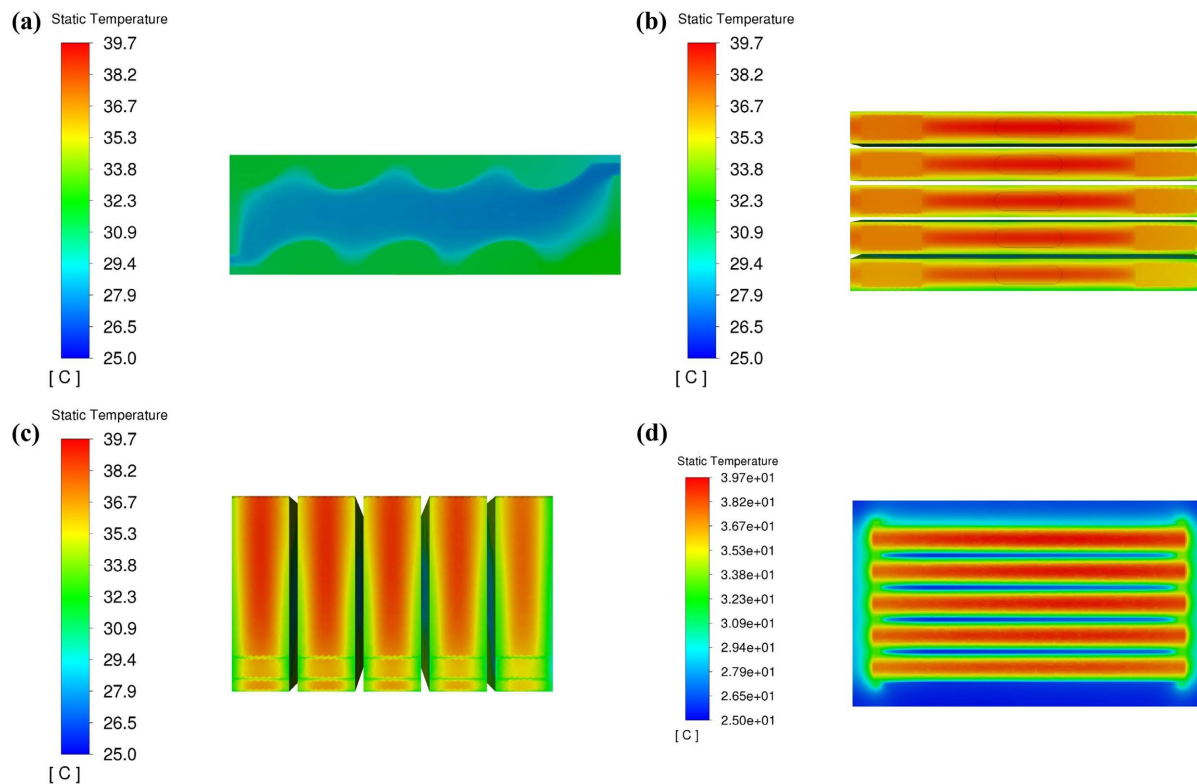


Figure 4. Temperature cloud diagrams of battery modules in different directions: (a) front view; (b) top view; (c) left view; (d) cross-sectional view

图 4. 电池模组不同方向温度云图：(a) 主视图；(b) 俯视图；(c) 左视图；(d) 横截面视图

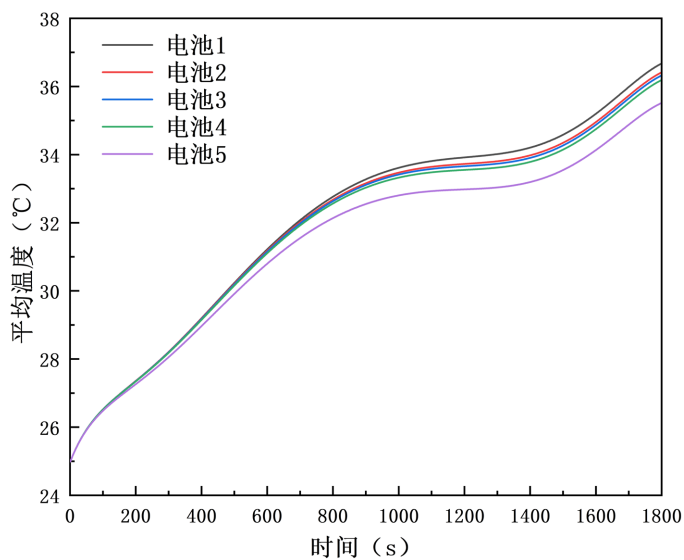


Figure 5. Average temperature of different batteries

图 5. 不同电池的平均温度

为进一步讨论不同电池之间的温度差异性，图 5 展示了每块电池的平均温度随时间变化的结果。从

图中可以看出, 电池的平均温度随着时间的增加而增加。电池的最高温度出现在 1 号电池, 其次分别为 2 号、3 号、4 号和 5 号电池, 5 号电池的温度最低。每块电池的最高温度分别为 36.68°C 、 36.42°C 、 36.33°C 、 36.19°C 和 35.52°C 。从冷却液进口至出口, 电池温度依次降低。模组内部的电池最高温度不超过 37°C , 模组内部的大温差为 1.16°C 。由此可见, 在上述结构下, 电池的温度得到有效降低, 模组内部温差低于 1.2°C 。因此, 所提出的浸没式冷却热管理系统可以很好的降低电池表面温度和降低电池最大温差。使电池模组的温度一致性得到改善, 同时提高冷却效果, 可以有效增加电池的使用寿命。

4.2. 流速和压力

为了探究上述温度分布规律背后的原因, 本节主要讨论了, 冷却液在并联分流后, 不同进口支路的流速分配, 以及不同进出口分支的压力分布。

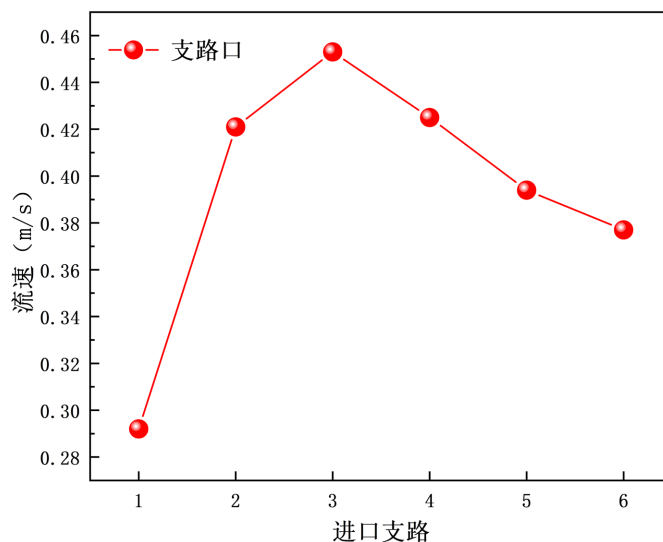


Figure 6. Flow velocity distribution of different inlet branches

图 6. 不同进口支路的流速分布

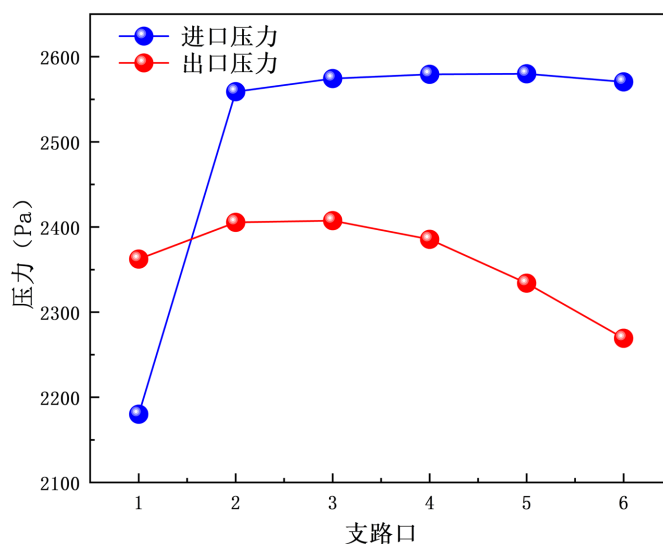


Figure 7. Average temperature of different batteries

图 7. 不同支路口的压力分布

如图 6 所示,展示了不同进口支路的流速大小。从图中可以看出,进口支路 3 的流速最大,其次分别为 4、2、5、6、1。由于支路 1 分配的流量较小,所以具有较小的流速。因此,与其他电池相比,1 号电池得到了较差的冷却效果,所以,1 号电池整体呈现出比较高的温度。

如图 7 所示,展示了不同支路口的压力大小。从图中可以看出,仅有 1 号支路口的出口压力高于进口压力,其他的支路口呈现出,进口压力大于出口压力的趋势。推测原因是,由于冷却液在并联分流后,部分进口支路的冷却液流过电池间隙后,回流到其他的出口支路里,造成冷却液回流。影响了整体的流量分配和压力分布,从而展现出对应的温度分布规律。因此,对于基于并联型流道的浸没式冷却热管理系统,进行流量分配平衡和防止冷却液回流是一个重要的点。从图 8 中也可以看出,有部分冷却液回流的趋势。



Figure 8. Trace diagram
图 8. 迹线图

5. 结论

本文采用了 Space Claim 对 5 节 116 Ah 平行并列分布的方壳锂离子电池,以及基于上下交错式曲线型流动的并联分流浸没式冷却电池模组进行了数学建模,并采用了 Fluent 对电池模组以 2C 倍率放电进行了散热仿真分析。可以得到以下结论。

1) 电池侧面的最高温度为 39.7℃,而电池大面的温度低于 34℃。与电池顶面和侧面相比,电池大面的温度整体较低。这是由于冷却液直接与电池大面接触,带走热量。

2) 与其他电池相比,1 号电池的温度最高,为 36.68℃,电池模组内部的最大温差为 1.16℃。这表明,所提出的浸没式冷却热管理系统具有很好的降温能力和改善温度一致性的能力。

3) 1 号支路口分配得到的流速较小,因此,1 号电池出现了较高的温度。除 1 号支路口外,其余支路口总是呈现出,出口支路压力大于进口支路。因此,对于并联型浸没式冷却热管理系统,进行流量分配和防止冷却液回流是至关重要的。

参考文献

- [1] Kim, J., Oh, J. and Lee, H. (2019) Review on Battery Thermal Management System for Electric Vehicles. *Applied Thermal Engineering*, **149**, 192-212. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.020>
- [2] Feng, X., Xu, C., He, X., Wang, L., Zhang, G. and Ouyang, M. (2018) Mechanisms for the Evolution of Cell Variations within a Linixcoymnzo2/graphite Lithium-Ion Battery Pack Caused by Temperature Non-uniformity. *Journal of Cleaner Production*, **205**, 447-462. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.003>
- [3] Chen, K., Chen, Y., She, Y., Song, M., Wang, S. and Chen, L. (2020) Construction of Effective Symmetrical Air-Cooled System for Battery Thermal Management. *Applied Thermal Engineering*, **166**, Article ID: 114679.

-
- <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114679>
- [4] Lv, Y., Yang, X., Li, X., Zhang, G., Wang, Z. and Yang, C. (2016) Experimental Study on a Novel Battery Thermal Management Technology Based on Low Density Polyethylene-Enhanced Composite Phase Change Materials Coupled with Low Fins. *Applied Energy*, **178**, 376-382. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.058>
 - [5] Tang, X., Guo, Q., Li, M., Wei, C., Pan, Z. and Wang, Y. (2021) Performance Analysis on Liquid-Cooled Battery Thermal Management for Electric Vehicles Based on Machine Learning. *Journal of Power Sources*, **494**, Article ID: 229727. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229727>
 - [6] Li, X., Zhou, Z., Zhang, M., Zhang, F. and Zhou, X. (2022) A Liquid Cooling Technology Based on Fluorocarbons for Lithium-Ion Battery Thermal Safety. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **78**, Article ID: 104818. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104818>
 - [7] Choi, H., Lee, H., Kim, J. and Lee, H. (2023) Hybrid Single-Phase Immersion Cooling Structure for Battery Thermal Management under Fast-Charging Conditions. *Energy Conversion and Management*, **287**, Article ID: 117053. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117053>
 - [8] Tousi, M. and Najafi, M. (2024) Innovative Hybrid Nano/Dielectric Fluid Cooling System for the New Cylindrical Shaped Li-Ion Batteries. *International Journal of Thermal Sciences*, **195**, Article ID: 108634. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108634>
 - [9] Tan, X., Lyu, P., Fan, Y., Rao, J. and Ouyang, K. (2021) Numerical Investigation of the Direct Liquid Cooling of a Fast-Charging Lithium-Ion Battery Pack in Hydrofluoroether. *Applied Thermal Engineering*, **196**, Article ID: 117279. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117279>