

# 基于风冷模型电池模块的建模与仿真分析

余 鸿

上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海

收稿日期: 2023年3月20日; 录用日期: 2023年5月18日; 发布日期: 2023年5月25日

## 摘 要

本文针对18650圆柱型锂离子电池提出了一种风冷热管理系统, 整个电池模组由10颗18650锂离子电池组成, 电池按 $2 \times 5$ 的排布方式进行布置。电池模组三维几何模型由相应3D建模软件绘制, 论文论述了电池模组风冷散热的数值仿真过程, 整个仿真在Ansys系统中fluent模块进行, 为后续研究人员进行相应的热仿真提供基础。同时研究了流速对风冷散热的影响, 探究了不同流速下电池模组的最高温度和温差, 结果表明进风口流速的增加可以增强电池模组的散热性能。

## 关键词

电池模组, 数值仿真, 风冷, 三维建模

# Modeling and Simulation Analysis Based on Air Cooling Model Battery Module

Hong Yu

School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

Received: Mar. 20<sup>th</sup>, 2023; accepted: May 18<sup>th</sup>, 2023; published: May 25<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

This paper presents an air cooling and heat management system for 18650 cylindrical lithium-ion battery. The whole battery module is composed of 10 18650 lithium-ion batteries. The batteries are arranged in a  $2 \times 5$  arrangement. The three-dimensional geometric model of the battery module is drawn by the corresponding 3D modeling software. This paper focuses on the numerical simulation process of the battery module's air cooling and heat dissipation. The entire simulation is conducted in the fluent module of the Ansys system, providing a basis for subsequent researchers to conduct corresponding thermal simulations. At the same time, the effect of flow rate on air cooling heat dissipation was studied, and the maximum temperature and temperature difference of the battery

module under different flow rates were explored. The results showed that increasing the flow rate at the air inlet can enhance the heat dissipation performance of the battery module.

## Keywords

Battery Module, Numerical Simulation, Air Cooling, 3D Modeling

Copyright © 2023 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

近年来, 新能源汽车已经吸引了广泛的关注, 大批传统汽车产业纷纷迈入新能源赛道, 逐步完成向新能源汽车产业的升级和转型。而锂电池凭借着其自身无记忆效应、高能量密度、大功率、高电压输出、低自放电率、维护成本低、使用寿命长, 体积小和续航时间长[1] [2] [3]等优势一跃成为了新能源汽车上最重要的动力源[4]。然而, 一些研究已经报道了锂离子电池的危害[5], 锂电池在运行和充放电过程中会产生热量, 热量堆积会导致温度过高、容量下降, 且造成电池模组内部温度不均匀[6] [7]。故需要设计一套有效的热管理系统减少过多的热量积聚和避免热失控的风险。传统的自然散热已不能满足电池的温度需求, 现有的电池热管理冷却方法主要包括风冷、液冷、PCM 相变材料冷却和多种方式复合冷却[8]。本文主要针对风冷进行研究, 目前研究主要是通过对电池模组的风道进行设计与优化、增加换热结构等来改善风冷散热。E 等人[9]对单独风冷模式下的 18650 电池模组的热性能进行了研究, 利用挡板来改善气流分布, 结果显示电池模组与无挡板系统相比, 最大温差为 7.3℃, 降低了 28.8%。Tong 等人[10]研究了 18650 电池在 1C 放电倍率下, 直列排布和交错排布情况下的热性能, 并且通过改变电池间距以及进气速度来提高电池模组的风冷热性能, 研究发现提高电池模组的进气速度和缩短电池之间的距离均可降低电池模组的温升。Park [11]对风冷电池模组的空气气流进行调整, 通过在进风与出风口之间设置一个泄气道来改变电池模组内部空气流量的均匀性, 从而可降低了电池模组的最高温度, 同时也降低了进、出风口的压差。Na 等人[12]通过在圆柱形锂离子电池模组内部设置横向隔板, 将电池模组内部空气流场划分多层流道, 并且使相邻通道的空气流向相反, 在 3C 放电倍率下, 进口风速为 2 m/s 时, 最高温度为 38.7℃, 最大温差为 4.5℃, 由于隔板与电池的接触面积较小, 限制了隔板的换热能力, 电池温差的控制仍然不理想。与单一的冷却方式相比, 采用多种不同冷却方式的热管理系统具有更好的冷却性能[13], 但成组效率低、成本与维护费用高。相比之下, 风冷策略要求的设备结构简单, 系统的运行稳定可靠, 成本也最低, 很容易实现。

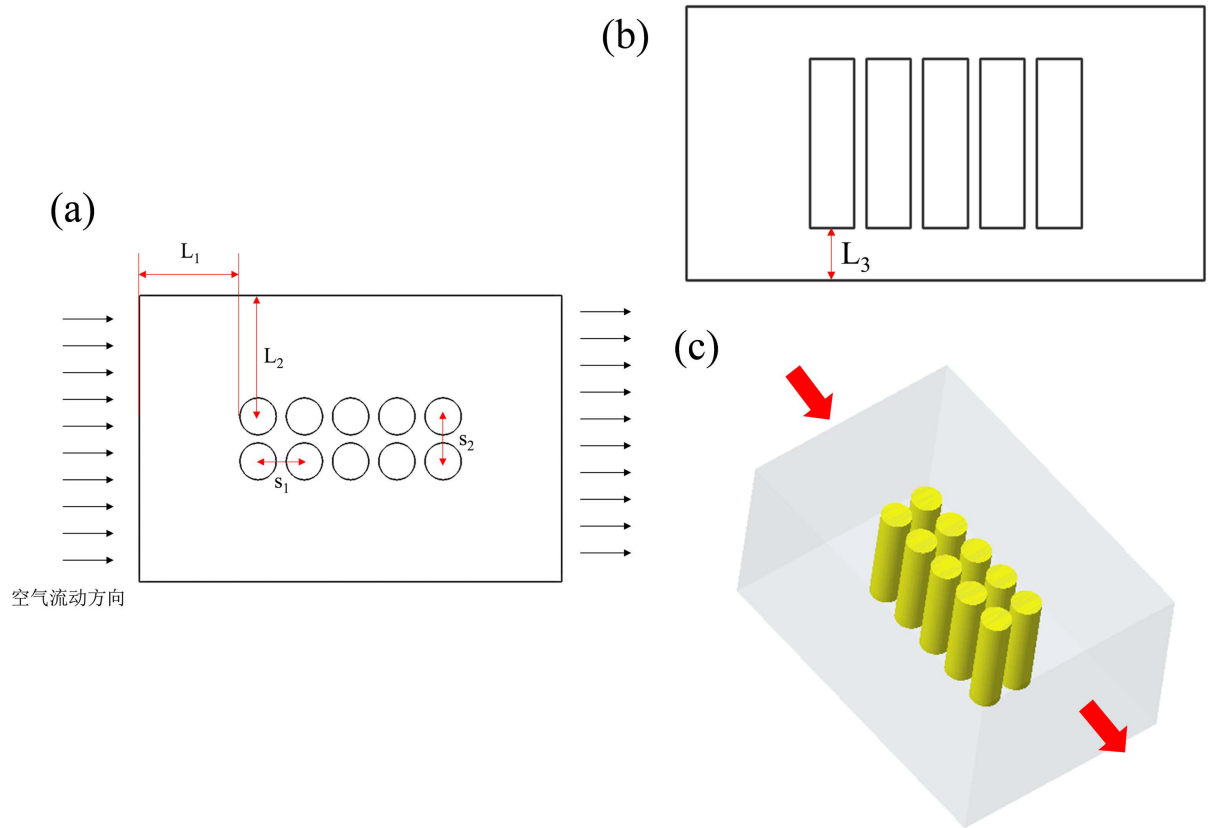
本文在上述研究基础上提出了一种风冷散热系统以降低电池温差和提高风冷冷却能力, 圆柱形锂离子电池按照  $2 \times 5$  正交排列组成电池模组, 采用 FLUENT 对电池模组的热性能进行了数值仿真分析, 进一步通过改变进风口的风速来降低电池的模组的温度和改善电池模组内部温度均匀性, 为后续研究人员进行热管理设计提供了基础。

## 2. 数值仿真模型

### 2.1. 电池模组的三维模型建立

图 1 为风冷电池模组的结构图, 电池模组由 10 颗 18650 锂离子电池呈  $2 \times 5$  正交排列组成, 分为记

为 1~10 号电池，电池具体位置如图 1(a)所示，电池模组四周为空气，空气自左向右流动，整个建模模型长 × 宽 × 高为 210 mm × 140 mm × 105 mm，电池直径为 18 mm，高度为 65 mm，横向与纵向排列电池中心距  $S_1$  和  $S_2$  分别为 23 mm 和 22 mm， $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  分别为 50 mm、59 mm 和 20 mm。整个电池模组三维建模在 Creo 中完成。



**Figure 1.** Schematic diagram of battery module structure: (a) Top view of battery module; (b) Front view of battery module; (c) Battery module simulation model

**图 1.** 电池模组结构示意图：(a) 电池模组俯视图；(b) 电池模组主视图；(c) 电池模组仿真模型

## 2.2. 数值仿真参数的设置

本文对电池模组仿真计算模型需进行如下列假设：1) 单体电池内部是均质的，锂离子电池为稳定的发热热源；2) 空气与电池间无相对滑动；3) 在整个仿真散热过程中，内部冷却空气为不可压缩气体的牛顿流体，不考虑空气浮力；4) 所有材料的热物性参数均为常数；5) 热辐射的影响忽略不计。空气冷却仿真中的控制方程包括如下：

连续性方程：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

动量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \tag{2}$$

对于冷却空气能量守恒方程为:

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} + \rho_a c_a \left( u \frac{\partial T_a}{\partial x} + v \frac{\partial T_a}{\partial y} + w \frac{\partial T_a}{\partial z} \right) = k_{a,eff} \left( \frac{\partial^2 T_a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_a}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_a}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

考虑冷却空气不可压缩, 标准  $k-\varepsilon$  方程简化为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_B - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

对于电池能量守恒方程为:

$$\rho_b c_b \frac{\partial T_b}{\partial t} = k_{b,eff} \left( \frac{\partial^2 T_b}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_b}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_b}{\partial z^2} \right) + Q_b \quad (6)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

式中,  $u_i$  和  $u_j$  为冷却空气在  $i$  和  $j$  方向上的速度分量,  $\rho_a$ 、 $\rho_b$ 、 $c_a$ 、 $c_b$ 、 $k_{a,eff}$ 、 $k_{b,eff}$ 、 $T_a$ 、 $T_b$  分别表示冷却空气和电池的密度、比热容、有效导热系数以及温度,  $u$ 、 $v$ 、 $w$  为速度矢量在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴上的速度分量,  $p$  为冷却压力,  $t$  表示时间,  $Q_b$  为电池生热率,  $\mu$  为空气动力粘度,  $\mu_t$  为湍流粘性系数,  $C_\mu$ 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$  为标准  $k-\varepsilon$  模型对应的经验常数。

当冷却空气流动时, 雷诺数  $Re$  通常根据最大速度  $U_{max}$  定义为:

$$Re = \frac{\rho_a U_{max} D}{\mu_a} \quad (8)$$

$$U_{max} = \frac{vS}{S-D} \quad (9)$$

式中  $U_{max}$  为冷却空气的最大速度,  $\mu_a$  为空气动力粘度,  $D$  为电池的直径,  $v$  为进风口的风速,  $S$  为电池之间的间距, 当空气进口速度由  $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  增加至  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 雷诺数范围大约从 2593 到 25,931, 符合湍流模型。

电池模组数值仿真在 Ansys 中 fluent 模块进行, 仿真中的具体参数设置边界条件如表 1 所示, 电池模组风冷数值仿真在环境温度为  $25^\circ\text{C}$  下进行, 通过改变进口风速研究其对电池模组风冷散热的影响, 进口风速分别设置在  $0.5\sim 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  之间, 通过监测 10 颗电池各自的平均温度研究了风速对电池温度的影响, 同时监测了 10 颗电池的最高温度以获取电池模组的最高温度。

**Table 1.** Numerical simulation model parameters

**表 1.** 数值仿真模型参数

材料	密度( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	比热( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )	导热系数( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )	粘度( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
空气	1.225	1006.43	0.0242	0.0000186
电池	2708	1028	14 (轴向) 1.045 (径向)	/

### 3. 数值仿真边界条件

本文采用 Ansys Fluent 进行电池风冷模组散热的数值仿真分析, 具体操作包括导入模型 - 绘制网格 - 设置求解 - 结果预览四部分。首先在几何结构中导入 Creo 中绘制的三维模型, 导入后将单位改为 mm, 电池模组按照图 1(a)进行命名; 接着进行网格划分, 网格绘制过程中添加边界层, 层数为 5, 可通过自动节点移动更改网格质量, 网格划分如图 2 所示; 随之进入设置求解模块, 初始条件为环境温度与进风口温度均设置为 25℃, 电池设置为均匀发热源, 单颗电池设为 1 W 的发热功率, 即  $60457.7181734 \text{ W m}^{-3}$ , 相当于电池 2C~3C 放电倍率产生的发热率。边界条件中入口采用速度入口边界条件, 出口采用压力出口边界条件, 壁面采用无滑移剪切条件, 空气设置  $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  的对流换热系数。仿真进行了 500 s, 时间步长为 1 s; 最后通过结果模块可观察电池的温度云图和速度云图。

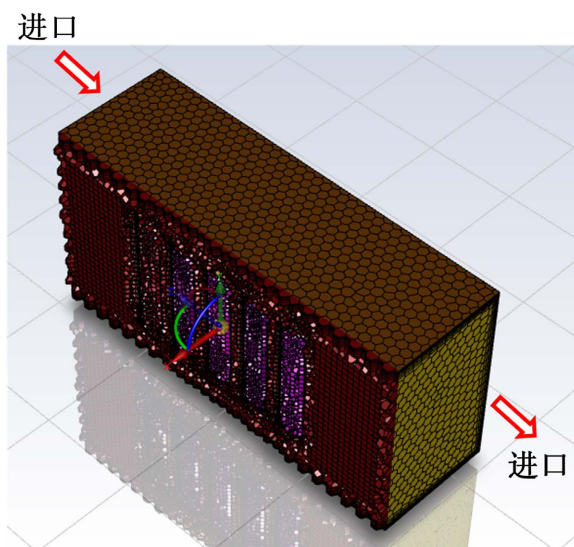


Figure 2. Simulation model grid division and import/export diagram  
图 2. 仿真模型网格划分及进出口示意图

### 4. 结果与讨论

图 3 为进风口流速从  $0.5 \sim 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时电池模组的温度云图, 从图中可以看出, 随着进风口流速的增加, 电池模组的温度呈下降趋势, 500 s 时刻对应电池模组的最高温度从  $34.390^\circ\text{C}$  降至  $29.68^\circ\text{C}$ , 下降了近  $5^\circ\text{C}$ , 且在流速超过  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  下降趋势减缓, 结合图 1(a)中电池编号可知在同一流速下, 靠进风口越近, 电池温度越低, 反之则电池温度越高, 且电池布置沿中心对称, 对称的电池温度分布基本一致。

图 4 为进风口流速从  $0.5 \sim 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时电池的平均温度, 结果表明单颗电池的平均温度随着进风口流速的增加而降低。在同一流速下, 电池模组中电池与电池之间的温差均控制在  $2.1^\circ\text{C}$  以内, 在进风口流速为  $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时电池模组组内最大温差为  $2.068^\circ\text{C}$ , 在进风口流速为  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时电池模组组内最大温差为  $1.331^\circ\text{C}$ , 相较于流速为  $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时降低了  $0.737^\circ\text{C}$ , 表明进风口流速的增加可改善电池模组内电池温度的均匀性。

图 5 为进风流速从  $0.5 \sim 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时电池的最高温度, 结果表明电池的最高温度与进口流速的变化趋势与平均温度趋势一致, 且电池的最高温度与平均温度的差值不大。当进风流速为  $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时电池最高温度均控制在  $35^\circ\text{C}$  以内, 当进风流速增加为  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时电池最高温度控制在  $30^\circ\text{C}$  以内, 降低了  $5^\circ\text{C}$ , 证明了所提出的风冷结构具有好的散热效果。

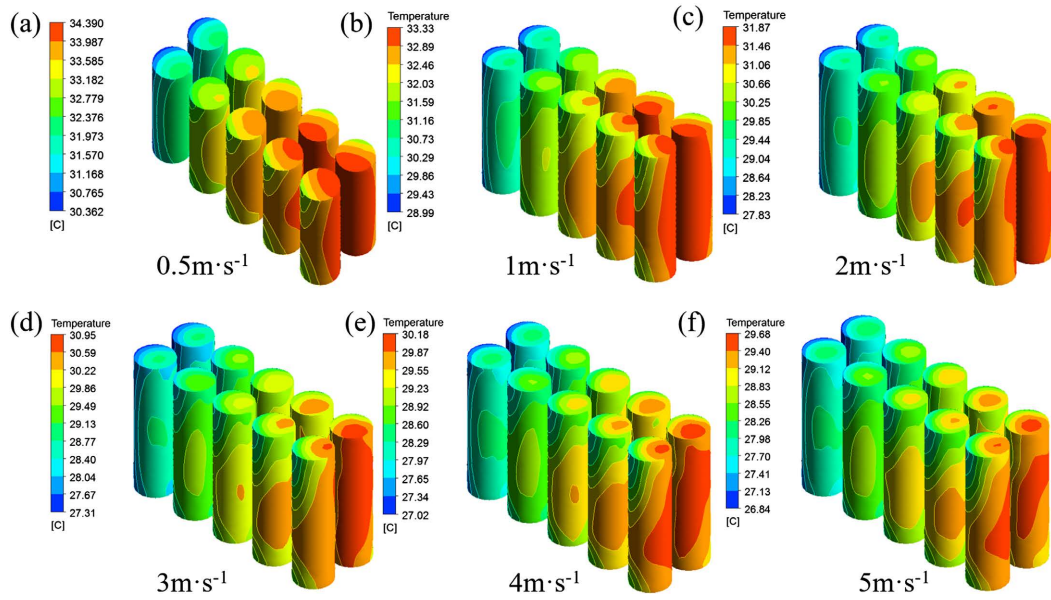


Figure 3. Temperature nephogram at 500 s corresponding to different inlet flow rates  
图 3. 不同进口流速对应的 500 s 时刻的温度云图

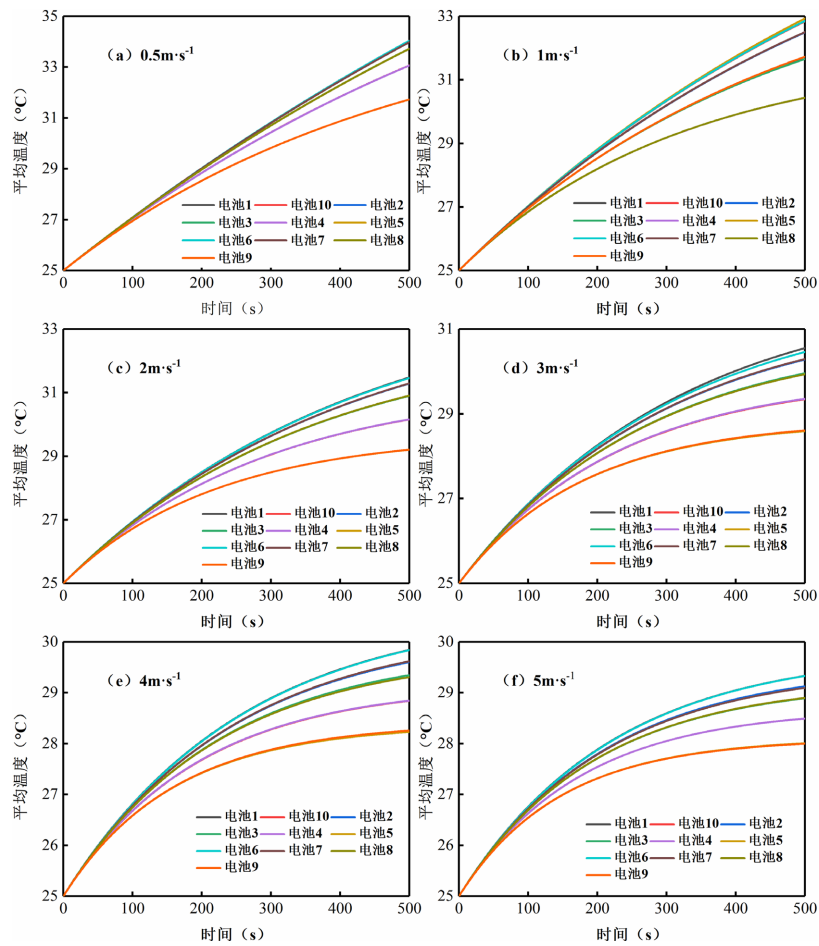


Figure 4. Average battery temperature corresponding to different inlet flow rates  
图 4. 不同进口流速对应的电池平均温度

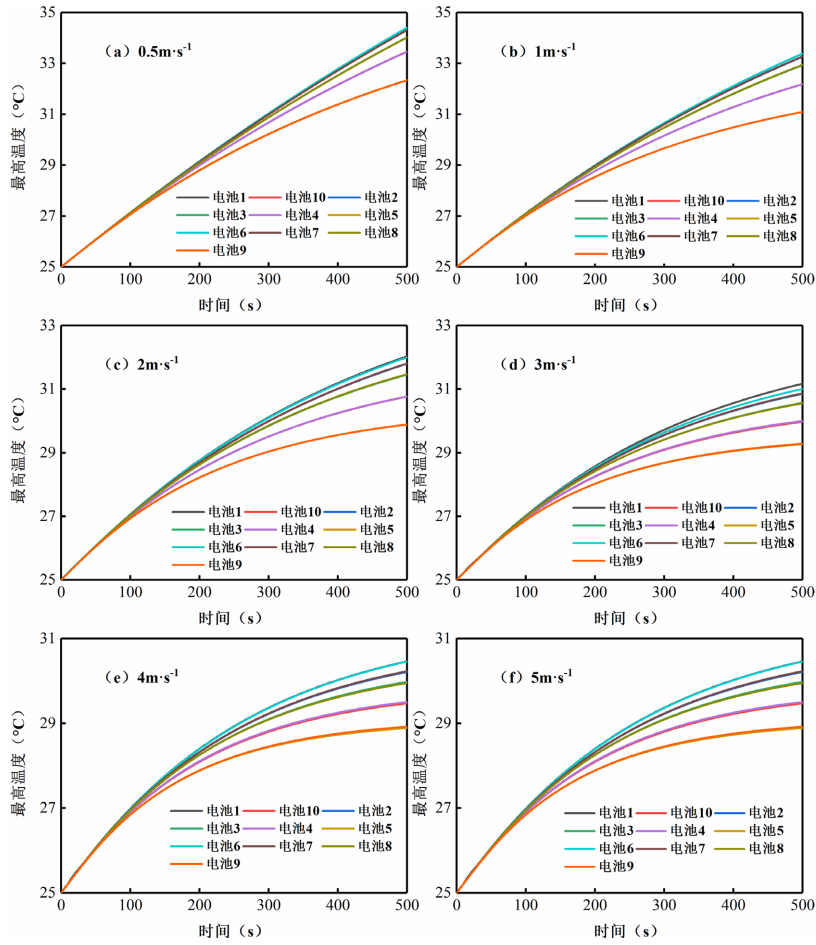


Figure 5. Maximum battery temperature corresponding to different inlet flow rates  
图 5. 不同进口流速对应的电池最高温度

图 6(a)不同编号电池的最高温度，电池具体位置如图 1(a)，结果表明电池模组中温度最高出现在六号电池上，六号电池距离进风口最远，结果与图 3 仿真温度云图结果一致，电池温度高低与其距离进风口的

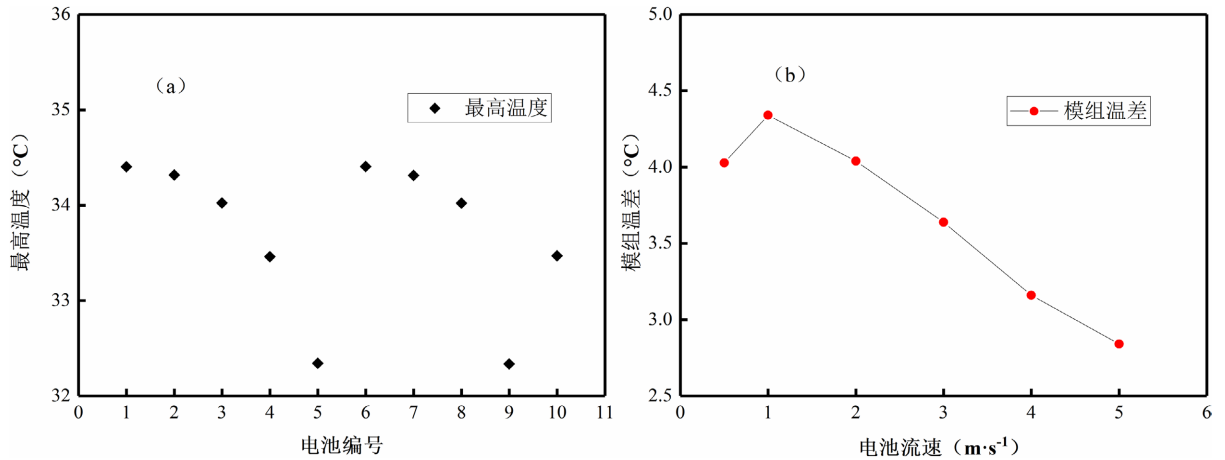


Figure 6. (a) Maximum temperature difference of batteries with different numbers; (b) Temperature difference of battery module at different inlet flow rates  
图 6. (a) 不同编号电池的最高温差; (b) 不同进口流速时电池模组温差

远近相关。图 6(b)为电池模组中单颗电池温差随进风流速的变化曲线图,表明当进风流速从  $0.5\sim 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,电池模组中单颗电池温差均控制在  $4.5^{\circ}\text{C}$  以内,电池模组中单颗电池温差呈先增后减的趋势,当进风流速大于  $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时电池模组中单颗电池温差随进风流速的增加而降低。

## 5. 结论

本文采用 Creo 和 Ansys Fluent 对  $2\times 5$  模型的电池模组进行了风冷散热的数学建模和仿真分析。仿真结果表明进口风速对电池模组的散热有着很大影响,在单体电池提供  $1\text{ W}$  的发热功率下,所提出的风冷结构可以良好的控制电池模组的温度。结果表明当进风流速为  $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时电池最高温度控制为  $34.390^{\circ}\text{C}$ ,当进风流速增加为  $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时电池最高温度控制为  $29.68^{\circ}\text{C}$ ,电池模组的最高温度降低了近  $5^{\circ}\text{C}$ ;随着进风流速的增加,电池模组的温度呈下降趋势,且在同一流速下,靠进口越近,电池温度越低,反之则电池温度越高;当进风流速从  $0.5\sim 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,电池模组中单颗电池温差均控制在  $4.5^{\circ}\text{C}$  以内;在同一流速下,电池模组中电池与电池之间的温差均控制在  $2.1^{\circ}\text{C}$  以内,在进风口流速为  $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时电池模组组内最大温差为  $2.068^{\circ}\text{C}$ ,在进风口流速为  $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时电池模组组内最大温差为  $1.331^{\circ}\text{C}$ ,相较于流速为  $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时降低了  $0.737^{\circ}\text{C}$ ,表明进风口流速的增加可改善电池模组内电池温度的均匀性;随着进口风速的增加,电池模组的最高温度下降,电池间的温度一致性也得到了改善。

## 参考文献

- [1] Whittingham, M.S. (2008) Materials Challenges Facing Electrical Energy Storage. *MRS Bulletin*, **33**, 411-419. <https://doi.org/10.1557/mrs2008.82>
- [2] Nitta, N., Wu, F., Lee, J.T. and Yushin, G. (2015) Li-Ion Battery Materials: Present and Future. *Materials Today*, **18**, 252-264. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.10.040>
- [3] Andwari, A.M., Pesiridis, A., Rajoo, S., Martinez-Botas, R. and Esfahanian, V. (2017) A Review of Battery Electric Vehicle Technology and Readiness Levels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **78**, 414-430. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.138>
- [4] Liu, X.T., Chen, Z.H., Zhang, C.B., et al. (2014) A Novel Temperature-Compensated Model for Power Li-Ion Battery with Dual-Particle-Filter State of Charge Estimation. *Applied Energy*, **123**, 263-272. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.072>
- [5] Wang, Q.S., Ping, P., Zhao, X.J., et al. (2012) Thermal Runaway Caused Fire and Explosion of Lithium Ion Battery. *Journal of Power Sources*, **208**, 210-224. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.02.038>
- [6] Feng, X.N., Ren, D.S., He, X.M., et al. (2020) Mitigating Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries. *Joule*, **4**, 743-770. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.02.010>
- [7] Feng, Z.C. and Zhang, Y.W. (2014) Safety Monitoring of Exothermic Reactions Using Time Derivatives of Temperature Sensors. *Applied Thermal Engineering*, **66**, 346-354. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.023>
- [8] Wang, Q., Jiang, B., Li, B. and Yan, Y.Y. (2016) A Critical Review of Thermal Management Models and Solutions of Lithium-Ion Batteries for the Development of Pure Electric Vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **64**, 106-128.
- [9] E, J.Q., Yue, M., Chen, J.W., et al. (2018) Effects of the Different Air Cooling Strategies on Cooling Performance of a Lithium-Ion Battery Module with Baffle. *Applied Thermal Engineering*, **144**, 231-241. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.064>
- [10] Tong, W., Somasundaram, K., Birgersson, E., et al. (2016) Thermo-Electrochemical Model for Forced Convection Air Cooling of a Lithium-Ion Battery Module. *Applied Thermal Engineering*, **99**, 672-682. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.050>
- [11] Park, H. (2013) A Design of Air Flow Configuration for Cooling Lithium-Ion Battery in Hybrid Electric Vehicles. *Journal of Power Sources*, **239**, 30-36. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.03.102>
- [12] Na, X.Y., Kang, H.F., Wang, T., et al. (2018) Reverse Layered Air Flow for Li-Ion Battery Thermal Management. *Applied Thermal Engineering*, **143**, 257-262. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.080>
- [13] Song, L.M., Zhang, H.Y. and Yang, C. (2019) Thermal Analysis of Conjugated Cooling Configurations Using Phase Change Material and Liquid Cooling Techniques for a Battery Module. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **133**, 827-841. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.157>