

车用锂离子电池组冷却系统传热仿真分析

李望^a, 卢耀辉^{a,b}, 李振生^a, 廖洪^a

(西南交通大学 a. 机械工程学院, b. 先进驱动节能技术教育部工程研究中心, 成都 610031)

摘要: **目的** 解决电动汽车锂离子电池组在高温下的安全性和热失控问题。**方法** 建立锂离子电池组冷却系统的三维分析模型, 应用计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 方法, 结合热传导和热对流理论, 对电池组进行仿真分析。**结果** 锂离子电池组的温度场分布基本相同, 呈现出中间低、两侧高的分布特点, 且层次变化。冷却液温度越低, 电池组最高温度也越低; 增大冷却液入口流速, 电池组内部最高温度略微降低; 冷却板材料对电池组的冷却效果影响很小。采用铝合金冷却板, 冷却液温度 20 ℃, 入口流速 2 m/s 时, 电池组的冷却效果最好。**结论** 对于本文所设计的冷却系统, 冷却液入口流速和冷却板材料的变化对电池组散热效果的影响较小, 冷却液入口温度的变化对电池组散热效果的影响较大。应当选择铝合金为冷却板材料, 以及合理的冷却液入口温度和流速, 以满足轻量化要求, 防止电池组过度冷却, 减小流动道内的阻力损失, 提高冷却系统的散热效率。

关键词: 电动汽车; 锂离子电池; 冷却系统; CFD; 传热仿真分析

中图分类号: U463.6; TM912.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)02-0006-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.02.002

Simulation Analysis of Heat Transfer in Cooling System of Li-ion Battery Pack for Vehicles

LI Wang^a, LU Yao-hui^{a,b}, LI Zhen-sheng^a, LIAO Hong^a

(a. School of Mechanical Engineering, b. Engineering Research Center of Advanced Driving Energy-saving Technology, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

ABSTRACT: To solve the safety and thermal runaway problem of the lithium-ion battery pack of electric vehicle under high temperature, the three-dimensional analysis model of lithium-ion battery cooling system is established. The computational fluid dynamics (CFD) method is applied to simulate and analyze the battery pack with the theory of heat transfer and convection. The temperature field distribution of lithium-ion battery packs is basically the same, with the characteristics of low in the middle and high on both sides, and changed level. The lower the coolant temperature is, the lower the maximum temperature of the battery pack is; the higher the coolant inlet flow rate is, the lower the maximum temperature inside the battery pack is; the cooling plate

收稿日期: 2020-07-18; 修订日期: 2020-08-15

Received: 2020-07-18; Revised: 2020-08-15

基金项目: 四川省科技计划项目 (2018HH0072)

Fund: Supported by the Sichuan Science and Technology Program (2018HH0072)

作者简介: 李望 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为计算流体动力学。

Biography: LI Wang (1996—), Male, Master's degree, Research focus: computational fluid dynamics.

通讯作者: 卢耀辉 (1973—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为新能源动力系统设计与分析、车辆空气动力学、振动疲劳等。

Corresponding author: LU Yao-hui (1973—), Male, Doctor, Professor, Research focus: design and analysis of new energy power system, vehicle aerodynamics, vibration fatigue, etc.

引文格式: 李望, 卢耀辉, 李振生, 等. 车用锂离子电池组冷却系统传热仿真分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(2): 006-012.

LI Wang, LU Yao-hui, LI Zhen-sheng, et al. Simulation Analysis of Heat Transfer in Cooling System of Li-ion Battery Pack for Vehicles [J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(2): 006-012.

material has little effect on the cooling effect of the battery pack. For aluminum alloy cooling plate, the cooling effect of the battery pack is the best when the temperature of the coolant is 20 °C and the inlet flow rate is 2 m/s. For the cooling system designed in this paper, the change of coolant inlet flow rate and cooling plate material has little effect on the cooling effect of the battery pack, while the change of coolant inlet temperature has great effect on the cooling effect of the battery pack. Therefore, reasonable inlet temperature and flow rate of coolant should be selected, and aluminum alloy should be selected as cooling plate material to meet lightweight requirement, prevent excessive cooling of battery pack, reduce resistance loss in flow channel and improve cooling efficiency of cooling system.

KEY WORDS: electric vehicle; Li-ion battery; cooling system; CFD; heat transfer simulation analysis

近年来,随着资源枯竭以及人们环保意识的提升,社会各界对汽车污染问题的关注程度越来越高。为了减少汽车污染,世界各国大力发展新能源汽车来代替传统汽车。电动汽车作为一种新能源汽车,以其无污染、噪声低、能源效率高、结构简单、维修方便等特点^[1-3]而备受关注。动力电池作为电动汽车最主要的动力来源,同时也是电动汽车的核心,其安全性尤为重要。锂离子电池凭借其比能量高、比功率高、循环寿命长、自放电低、无记忆效应等优势,已经成为电动汽车的首选动力来源^[4-7]。然而,锂离子电池在充放电过程中会产生较多的热量,当散热条件不好时,累积的热量无法及时排出,电池组内部温度会急剧上升,导致电池性能明显下降,甚至出现热失控和爆炸^[8-10],严重影响电动汽车的安全。因此,研究锂离子电池组的冷却系统对于优化电池组的内部温度场,确保电池组处于理想的工作状态,防止产生热失控,提高电动汽车的安全性具有重要意义。

目前,针对动力电池常用的散热方式主要包括空气冷却、液体冷却、相变材料冷却和热管冷却^[11-12]。空气冷却结构简单,成本低,整个系统的热量交换以自然对流为主,但散热效率较低;液体冷却散热效率较高,冷却效果较好,被广泛应用于电动汽车领域;相变材料冷却储热能力强,不需要消耗额外的功率,但是研究成本较高;热管冷却导热系数高,但其结构复杂,加工工艺要求高,成本较高。谢金红^[13]在单体锂离子电池充放电效应实验研究的基础上,采用正交试验设计方法研究风冷和液冷条件下电池组散热结构的优化设计问题。Siqu Chen 等^[14]提出了一种液冷电池热管理系统,通过仿真和实验研究了系统的热性能和流体力学性能。

在上述研究的基础上,文中以某款商用电动汽车的锂离子电池组为研究对象,对其基本结构进行适当的简化处理。采用液体冷却方式,建立冷却系统的几何模型,并确定锂离子电池、冷却液和冷却板的物性参数。通过 CFD 软件进行数值模拟,对其温度场进行仿真分析,研究冷却液入口温度、入口流速和冷却板材料对冷却系统散热效果的影响,以期提高冷却效果,为锂离子电池组冷却系统的设计提供依据。

1 仿真基本原理

1.1 锂离子电池生热机理

锂离子电池在工作过程中,随着复杂反应的进行,会产生大量的热量。根据热量的来源和生成原因,可以分为以下几种:由于锂离子的嵌入和脱嵌产生的反应热 Q_r 、在充电过度或放电过度过程中发生副反应产生的副反应热 Q_s 、由于锂离子电池自身存在内阻,流过电流后产生的焦耳热 Q_j 、以及锂离子电池极化反应产生的极化热 Q_p ^[15-16]。总体的热量 Q 等于上述热量的总和,即:

$$Q = Q_r + Q_s + Q_j + Q_p \quad (1)$$

锂离子电池的生热率定义为单位时间、单位体积内热源产生的热量,即:

$$\dot{\phi} = Q/V \quad (2)$$

式中: V 为单体锂离子电池的体积, m^3 。

1.2 传热仿真及 CFD 基本控制方程

锂离子电池组的冷却系统主要是依靠较低温度的冷却液在流道中流动,通过对流传热带走电池产生的热量,而电池组内部热量的传递形式则是导热。文中采用了 CFD 方法来进行锂离子电池组冷却系统仿真分析,涉及热传导、热对流和流体运动,需要用到如下控制方程。

1.2.1 传热基本控制方程

根据傅里叶定律和能量守恒方程,可以推得直角坐标下的导热微分方程为:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \dot{\phi} \quad (3)$$

式中: ρ 为密度; c 为比热容; t 为温度; τ 为时间; λ 为导热系数; $\dot{\phi}$ 为单位时间、单位体积内热源产生的热量。

边界上的对流传热公式为:

$$q = h(T - T_0) \quad (4)$$

式中: q 为热流密度; h 为对流换热系数; T 为与冷却液进行换热的壁面温度; T_0 为冷却液的温度。

1.2.2 流体动力学基本控制方程

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (5)$$

动量守恒方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} \mathbf{U}) = \text{div}(\mu \text{grad } \mathbf{u}) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \\ \frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v} \mathbf{U}) = \text{div}(\mu \text{grad } \mathbf{v}) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \\ \frac{\partial(\rho \mathbf{w})}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{w} \mathbf{U}) = \text{div}(\mu \text{grad } \mathbf{w}) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \end{cases} \quad (6)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{U} T) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad } T\right) + S_T \quad (7)$$

式中: ρ 为流体密度; $\mathbf{u}$ 、 $\mathbf{v}$ 、 $\mathbf{w}$ 为速度矢量 $\mathbf{U}$ 在 x 、 y 、 z 方向上的分量; μ 为动力黏度; p 为流体微元体上的压力; S_u 、 S_v 、 S_w 为广义源项; T 为温度; c_p 为流体比热容; k 为流体传热系数; S_T 为黏性耗散项。

2 锂离子电池组 CFD 分析模型的建立

2.1 锂离子电池组模型

文中选取某款商用电动汽车的锂离子电池组为研究对象, 由于电池箱内空气几乎不流动, 即电池组与周围空气的自然对流换热对冷却系统传热分析的影响较小, 故忽略了电池箱体外壳以及电池组单体电池的电极, 建立了其简化三维模型, 如图 1 所示。该电池组的模型由 44 个方形锂离子电池单体组成, 单体电池尺寸为 240 mm×150 mm×7.2 mm, 每边各 22 个电池单体串联形成一组, 而后两边并联。液冷板布置在电池组的中间, 冷却液从一端流入, 从另一端流出, 通过导热和对流传热作用, 将电池组产生的热量传递出去。液冷板内的流道采用蛇形流道设计, 流道截面为矩形, 流道高度为 4 mm, 板厚度为 6 mm, 液冷板内纵断面结构如图 2 所示。

采用混合网格对模型进行网格划分, 电池部分是结构网格, 液冷板及流道是非结构网格, 对流体区域

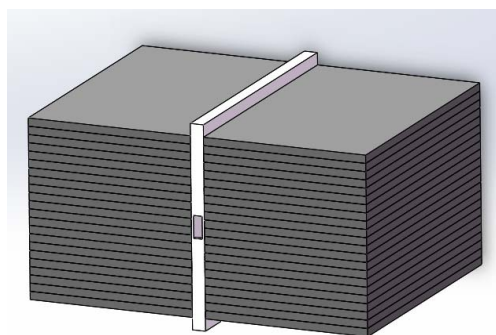


图 1 锂离子电池组模型
Fig.1 Li-ion battery pack model

网格进行加密处理, 得到网格数约有 700 万个。网格模型及局部网格如图 3、图 4 所示。

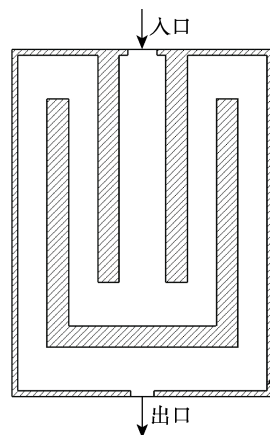


图 2 液冷板纵断面结构
Fig.2 Longitudinal section structure of liquid cooling plate

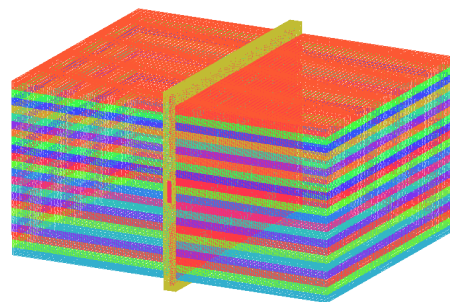


图 3 网格模型
Fig.3 Grid model

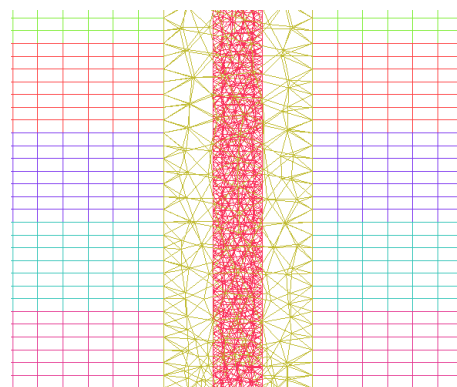


图 4 局部网格
Fig.4 Local grid

2.2 电池及冷却介质热物性参数

为了减少流场及温度场计算的复杂性, 在进行锂离子电池组冷却系统的仿真分析时, 提出如下假设^[17-18]: 流场中的流体假设为不可压缩理想流体; 电池组辐射散热较小, 忽略不计; 电池组假设为一个均匀稳定的生热源, 且质量结构都不发生变化; 假设电池材料均匀, 密度和比热容不变, 同一方向上的导热系数相等。数值模拟实验选用的电池为某公司生产的

三元聚合物锂电池。液体冷却采用的冷却介质常见的有水、乙二醇及其两者的混合物。因乙二醇水溶液有更好的优越性,故选择质量分数为 50%的乙二醇水溶液作为冷却液。为了研究冷却板材料对冷却效果的影响,将铝合金、铝和铜进行对比分析。电池、冷却液和冷却板材料的物性参数见表 1—3。

表 1 电池物性参数
Tab.1 Physical parameters of battery

名称	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	导热系数($x/y/z$)/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	生热率/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$)
电池	1895	1198	1/32/32	10 855

表 2 冷却液物性参数
Tab.2 Physical parameters of coolant

名称	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	导热系数 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	动力黏 度/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
50%的乙二 醇水溶液	1070	3320	0.457	0.002 96

表 3 冷却板材料属性
Tab.3 Material properties of cooling plates

名称	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
铝合金	2707.1	902	237
铝	2719	871	202.4
铜	8978	381	387.6

3 仿真结果及分析

将模型导入 CFD 软件,在电池生热率相同的条件下,采用控制变量法,通过改变冷却液温度、入口

流速、冷却板材料,分别进行数值模拟,分析不同因素对锂离子电池组冷却系统散热效果的影响,工况条件见表 4。

表 4 仿真计算设定工况
Tab.4 Setting conditions in simulation calculation

工况序号	冷却液温度/ $^{\circ}\text{C}$	入口流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	冷却板材料
1	15	2	铝合金
2	20	2	铝合金
3	25	2	铝合金
4	20	1	铝合金
5	20	3	铝合金
6	20	6	铝合金
7	20	2	铝
8	20	2	铜

由于电池的制作工艺限制及老化程度、散热效果的不同,锂离子电池单体间会出现温差,导致电池组温度的一致性变差。电池单体工作在不同温度环境中会扩大电池间的不一致性,从而影响电池组的使用寿命,严重时会产生热失控^[19]。因此,应保证锂离子电池最佳工作温度范围为 20~45 $^{\circ}\text{C}$,将电池组不同单体电池间的温差控制在 5 $^{\circ}\text{C}$ 以内^[20-21]。

3.1 冷却液温度的影响

采用铝合金冷却板,冷却液入口流速保持 2 m/s 不变,分别设置冷却液温度为 15、20、25 $^{\circ}\text{C}$,进行锂离子电池组冷却系统散热仿真分析,得到的电池组温度云图如图 5 所示。根据仿真结果,将温度数据进行汇总,见表 5。

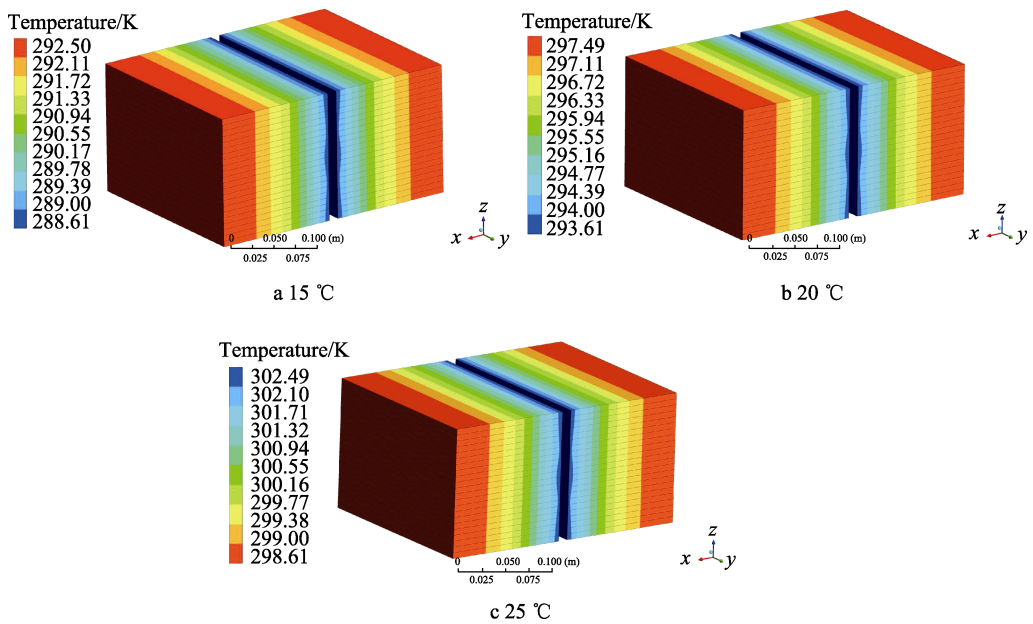


图 5 不同冷却液温度下的电池组温度场
Fig.5 Temperature fields of battery pack at different coolant temperatures

表5 不同冷却液温度下的电池组温度

Tab.5 Battery pack temperatures at different coolant temperatures

冷却液温度/℃	最高温度/K	最低温度/K	最大温差/K
15	292.5	288.61	3.89
20	297.49	293.61	3.88
25	302.49	298.61	3.88

从图5可以看出,不同冷却液温度条件下,锂离子电池组的温度场分布基本相同,呈现出中间低、两侧高的分布特点,且层次变化。原因是冷却板位于电池组中间,冷却液从冷却板中流过,靠近冷却板的地方比远离冷却板的两侧散热效果要好。由表5可知,降低冷却液温度可以降低电池组最高温度,避免电池

组在过高温下工作,但如果冷却液温度太低,会使电池组最低温度低于锂离子电池的最佳工作范围下限(20℃,即293.15 K),导致电池组过度冷却,对电池组造成冷却冲击。因此,不能使冷却液温度过低。降低冷却液温度对电池组内部的最大温差基本没有影响,最大温差均小于5℃,冷却系统的冷却性能较好,满足要求。

3.2 冷却液入口流速的影响

采用铝合金冷却板,冷却液温度保持20℃不变,分别设置冷却液入口流速为1、2、3、6 m/s,进行锂离子电池组冷却系统散热仿真分析,得到的电池组温度云图如图6所示。根据仿真结果,将温度数据进行汇总,见表6。

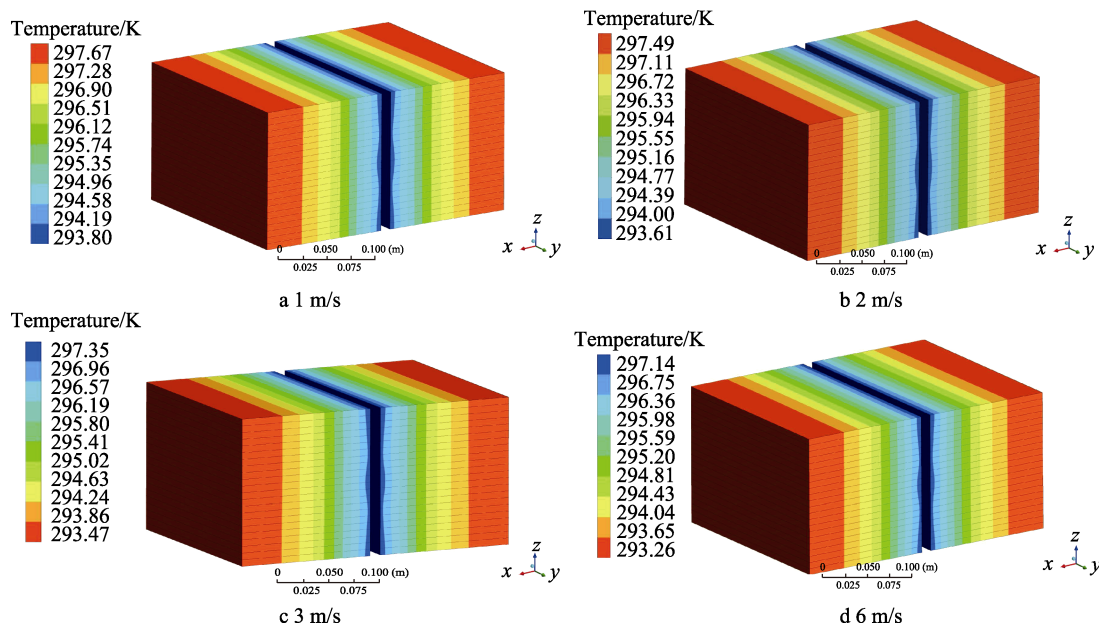


图6 不同冷却液入口流速下的电池组温度场

Fig.6 Temperature fields of battery pack at different coolant inlet flow rates

表6 不同冷却液入口流速下的电池组温度

Tab.6 Battery pack temperatures at different coolant inlet flow rates

入口流速/(m·s ⁻¹)	最高温度/K	最低温度/K	最大温差/K
1	297.67	293.8	3.87
2	297.49	293.61	3.88
3	297.35	293.47	3.88
6	297.14	293.26	3.88

从图6可以看出,不同冷却液入口流速条件下,锂离子电池组的温度场分布基本相同,呈现出中间低、两侧高的分布特点,且层次变化。由表6可知,增大冷却液入口流速,电池组内部最高温度只是略微降低,说明冷却液的流速变化对电池组的冷却效果影响不大。电池组内部的最大温差变化不大,均小于5℃,满足要求。尽管增大流速可以降低电池组最高温度,但效果并不显著,流速过大反而会增大流道内

的阻力损失,同时也会消耗较多的泵功率。因此,应当选择合理的冷却液入口流速。

3.3 冷却板材料的影响

保持冷却液温度20℃,入口流速2 m/s不变,分别采用铝合金、铝和铜作为冷却板材料,进行锂离子电池组冷却系统散热仿真分析,得到的电池组温度云图如图7所示。根据仿真结果,将温度数据进行汇总,见表7。

从图7可以看出,不同冷却板材料条件下,锂离子电池组的温度场分布基本相同,呈现出中间低、两侧高的分布特点,且层次变化。由表7可知,改变冷却板材料即改变冷却板的导热系数的情况,导热系数越大,冷却效果越好,但影响很小。导热系数较大的铜,冷却效果较好,但效果并不显著,而且铜的密度太大,不满足轻量化要求,不适合做冷却板材料。实

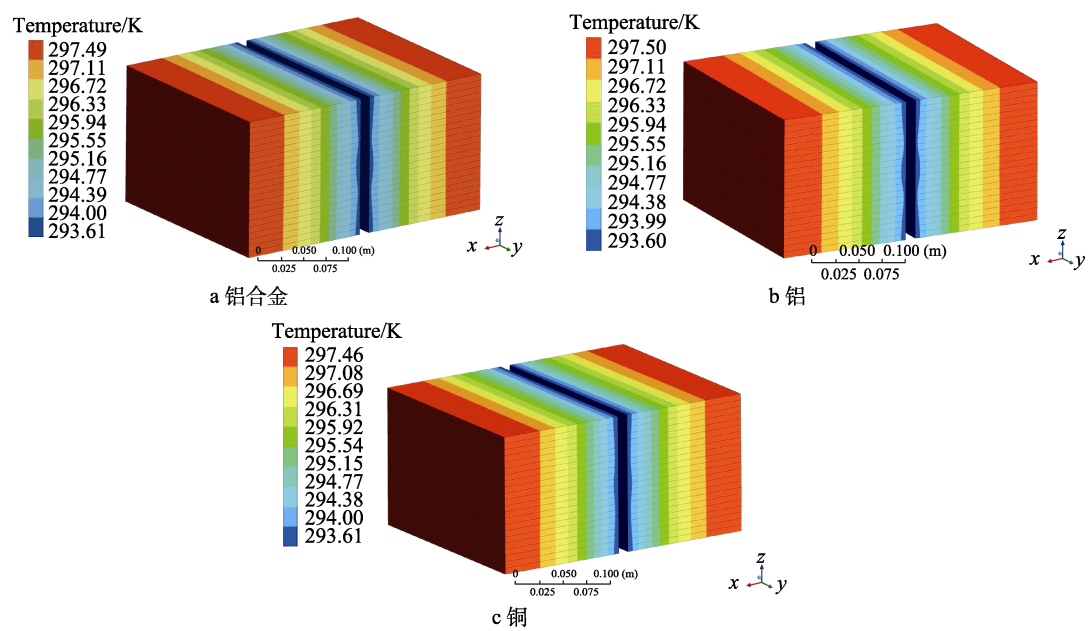


图 7 不同冷却板材料下的电池组温度场
Fig.7 Temperature fields of battery pack under different cooling plate materials

表 7 不同冷却板材料下的电池组温度
Tab.7 Battery pack temperatures under different cooling plate materials

冷却板材料	最高温度/K	最低温度/K	最大温差/K
铝合金	297.49	293.61	3.88
铝	297.5	293.6	3.9
铜	297.46	293.61	3.85

际应用中，大多数冷却板材料为铝合金，不仅能满足高导热性，其质量也不会太大。

4 结论

对电动汽车锂离子电池组冷却系统进行传热仿真分析，研究冷却液温度、入口流速和冷却板材料对电池组散热效果的影响。得出以下结论。

1) 文中对于电动汽车锂离子电池组的冷却系统仿真所采用的 CFD 分析方法是可行的。

2) 仿真结果表明，冷却液温度对电池组最高和最低温度影响显著，但对最大温差基本没有影响。冷却液入口流速和冷却板材料对电池组冷却系统散热效果影响不大。

3) 所进行的电动汽车锂离子电池组冷却系统仿真对于实际液体冷却散热结构的设计具有一定的指导作用，为锂离子电池热失控问题提供了参考意见。

另外，文中只进行了数值模拟仿真，未进行实验验证，后续可以搭建散热分析实验台对电池组进行实验验证，以进一步完善冷却系统的研究设计和结构优化。

参考文献：

[1] 李晓丹. 新能源汽车发展现状及应用前景[J]. 中国能源, 2009, 31(8): 43-45.
LI Xiao-dan. Present situation of new energy automobile development and application prospect[J]. Energy of China, 2009, 31(8): 43-45.

[2] 邵汉桥, 张维, 陈鹏云. 我国电动汽车发展状况分析[J]. 华中电力, 2010, 23(5): 10-15.
SHAO Han-qiao, ZHANG Wei, CHEN Peng-yun. Development of electric vehicles in China[J]. Central China electric power, 2010, 23(5): 10-15.

[3] 李涛. 纯电动汽车锂离子电池热效应及电池组散热结构优化[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
LI Tao. Study on thermal effects of lithium-ion battery in electric vehicle and battery package dissipation structural optimization[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.

[4] SCROSATI B, GARCHE J. Lithium batteries: Status, prospects and future[J]. Journal of power sources, 2010, 195(9): 2419-2430.

[5] 李腾, 林成涛, 陈全世. 锂离子电池热模型研究进展[J]. 电源技术, 2009, 33(10): 927-932.
LI Teng, LIN Cheng-tao, CHEN Quan-shi. Research development on lithium-ion battery thermal model[J]. Chinese journal of power sources, 2009, 33(10): 927-932.

[6] 崔萌佳, 戴永年, 姚耀春, 等. 电动车用动力电池的研究概况[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2004, 29(6): 122-126.
CUI Meng-jia, DAI Yong-nian, YAO Yao-chun, et al. Development and prospective of batteries for electric vehicle[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (science and technology), 2004, 29(6): 122-126.

- [7] 王宏伟, 邓爽, 肖海清, 等. 国内电动车用动力锂离子电池现状[J]. 电子元件与材料, 2012, 31(6): 84-86.
WANG Hong-wei, DENG Shuang, XIAO Hai-qing, et al. Review on domestic power Li-ion battery[J]. Electronic components and materials, 2012, 31(6): 84-86.
- [8] 何鹏林, 乔月. 锂离子电池热滥用试验研究[J]. 安全与电磁兼容, 2010(4): 44-46.
HE Peng-lin, QIAO Yue. Research on thermal abuse test for lithium-ion battery[J]. Safety & EMC, 2010, (4): 44-46.
- [9] GUO L S, WANG Z R, WANG J H, et al. Effects of the environmental temperature and heat dissipation condition on the thermal runaway of lithium ion batteries during the charge-discharge process[J]. Journal of loss prevention in the process industries, 2017, 49: 953-960.
- [10] DENG T, ZHANG G, RAN Y, et al. Thermal performance of lithium ion battery pack by using cold plate[J]. Applied thermal engineering, 2019, 160: 114088.
- [11] 付正阳, 林成涛, 陈全世. 电动汽车电池组热管理系统的关键技术[J]. 公路交通科技, 2005, 22(3): 119-123.
FU Zheng-yang, LIN Cheng-tao, CHEN Quan-shi. Key technologies of thermal management system for ev battery packs[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2005, 22(3): 119-123.
- [12] 蔡飞龙, 许思传, 常国峰. 纯电动汽车用锂离子电池热管理综述[J]. 电源技术, 2012, 36(9): 1410-1413.
CAI Fei-long, XU Si-chuan, CHANG Guo-feng. Thermal management techniques of lithium-ion battery pack for electric vehicles[J]. Chinese journal of power sources, 2012, 36(9): 1410-1413.
- [13] 谢金红. 电动汽车锂离子电池组散热结构优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
XIE Jin-hong. Optimization investigation on the cooling structure of lithium-ion battery packages in electric vehicles[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [14] CHEN S, PENG X, BAO N, et al. A comprehensive analysis and optimization process for an integrated liquid cooling plate for a prismatic lithium-ion battery module[J]. Applied thermal engineering, 2019, 156: 324-339.
- [15] SONG H S, JEONG J B, LEE B H, et al. Experimental study on the effects of pre-heating a battery in a low-temperature environment[C]// 2012 IEEE vehicle power and propulsion conference. Seoul, Korea: [s. n.], 2012.
- [16] 葛子敬, 臧孟炎, 叶鹏, 等. 电动汽车锂离子电池组风冷散热仿真分析[J]. 机械设计与制造工程, 2015, 44(10): 24-28.
GE Zi-jing, ZANG Meng-yan, YE Peng, et al. Simulation analysis on lithium-ion battery pack for electric vehicle under air cooling conditions[J]. Machine design and manufacturing engineering, 2015, 44(10): 24-28.
- [17] 王福军. 计算流体力学分析:CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
WANG Fu-jun. CFD Analysis: Principle and application of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [18] 朱聪, 李兴虎, 宋凌琚, 等. 电动汽车用锂离子电池生热速率模型[J]. 汽车工程, 2014, 36(2): 174-180.
ZHU Cong, LI Xing-hu, SONG Ling-jun, et al. A model for the heat generation rate of lithium-ion battery for electric vehicles[J]. Automotive engineering, 2014, 36(2): 174-180.
- [19] 戴海峰, 王楠, 魏学哲, 等. 车用动力锂离子电池单体不一致性问题研究综述[J]. 汽车工程, 2014, 36(2): 181-188, 203.
DAI Hai-feng, WANG Nan, WEI Xue-zhe, et al. A research review on the cell inconsistency of li-ion traction batteries in electric vehicles[J]. Automotive engineering, 2014, 36(2): 181-188, 203.
- [20] PESARAN A A. Battery thermal models for hybrid vehicle simulations[J]. Journal of power sources, 2002, 110(2): 377-382.
- [21] 袁征, 赵津, 韩磊. 风冷锂离子电池包的热仿真[J]. 电池, 2019, 49(3): 208-211.
YUAN Zheng, ZHAO Jin, HAN Lei. Thermal simulation of air-cooled li-ion battery pack[J]. Battery bimonthly, 2019, 49(3): 208-211.