

文章编号: 1671-6612 (2024) 05-614-07

风冷电池热管理系统参数研究与性能优化

马肖娜¹ 严华夏¹ 陈奕¹ 王玉刚¹ 陶求华¹ 范益沿²

(1. 集美大学海洋装备与机械工程学院 厦门 361021;

2. 东净(厦门)能源有限公司 厦门 361023)

【摘要】 为提高风冷电池热管理方式的冷却能力,设计了一种湿芯辅助的风冷电池热管理系统。运用 Fluent 软件对不同充电倍率和电池数量的电池组温度场进行仿真计算,并通过加装铝片改善电池组内均温性。结果表明:与传统风冷电池热管理系统相比,湿芯的运用能有效降低电池表面的最高温度,更能适应高充电倍率和电池数量较多的电池组的散热需求;但均温性较传统风冷系统稍差。充电倍率为 2C 时,传统强制风冷和湿芯辅助的风冷电池热管理系统在电池数目超过 45 个时,电池组内温差均超过 5°C。提出在电池外包裹铝片的方法改善电池组均温性,模拟结果显示,加装铝片可有效降低后排电池温度,以应对高充电倍率散热。模拟结果显示:2C 充电倍率、电池数量为 60 个时,电池组最大温差由 6.90°C 降低至 5.68°C。

【关键词】 电池热管理; 强制风冷; 蒸发冷却; CFD 仿真; 均温性

中图分类号 U264.5+5 文献标志码 A

Parameter Research and Performance Optimization of Air-cooled Battery Thermal Management System

Ma Xiaona¹ Yan Huaxia¹ Chen Yi¹ Wang Yugang¹ Tao Qiuhua¹ Fan Yiyang²

(1. School of Marine Equipment and Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen, 361021;

2. Dong Jin (Xiamen) Energy Limited Company, Xiamen, 361023)

【Abstract】 To improve the cooling capacity of air-cooled battery thermal management system, a wet pad is applied to pre-cool the air before it passing through the battery pack. Fluent software was used to simulate the temperature field of battery packs under different charge rate and number of cells, and the temperature uniformity was improved by wrapping aluminum sheets on the external of each battery. The results show that compared with a traditional air-cooled battery thermal management system, the use of wet pad can reduce the maximum surface temperature of the battery, which is more adaptable to the heat dissipation needs of battery packs with higher charge rate and cell numbers. At the same time, the temperature uniformity is slightly deteriorated via the wet pad. At 2C charge rate, the battery pack temperature difference of the both systems go beyond the limit of 5°C when the number of batteries is 45. The method of wrapping aluminum sheets outside the battery to improve the temperature uniformity of the battery pack shows that it can effectively reduce the temperature of the rear battery to cope with high charge rate heat dissipation. When the charge rate is 2C and the number of batteries is 60, the maximum temperature difference of the battery pack decreases from 6.90°C to 5.68°C.

【Keywords】 Battery thermal management; Forced air cooling; Direct evaporative cooling; CFD simulation; Temperature uniformity

基金项目: 福建省自然科学基金(2022J05154); 集美大学引进高层次人才科研启动基金(ZQ2020009)

作者简介: 马肖娜(2001-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: 1055700793@qq.com

通讯作者: 严华夏(1989-), 女, 博士, 副教授, E-mail: yanhuaxia@jmu.edu.cn

收稿日期: 2024-04-01

0 引言

随着不可再生能源消耗量的日益剧增, 温室效应和雾霾等环境问题迫在眉睫, 推进新能源汽车产业的发展使环境压力得到有效缓解。动力电池作为新能源汽车的核心部件, 其性能的优劣对整车动力性、经济型和安全性有直接影响。锂离子电池因能量密度高、使用寿命长和记忆效应低等优势被广泛运用于新能源汽车。研究表明, 锂离子电池的理想工作温度为 15-35℃^[1], 同时, 电池温度的不均匀性影响着电池组充电性能, 因此电池组中各单体间最大温差不超过 5℃^[2]。为有效控制电池组最高温度和温差在理想范围, 设计并优化出高效的电池热管理系统是关键所在。

根据冷却介质不同, 电池热管理系统的冷却方式主要分为风冷、液冷、相变材料冷却以及热管冷却^[3]。强制风冷利用通风对电池组进行散热, 具有结构简单、成本较低稳定性好等优势, 但空气导热能力差的原因导致现阶段风冷热管理方式冷却效率低^[4]。国内外学者通过优化电池排布结构、多种热管理技术的复合运行、蒸发冷却辅助等方式来强化风冷电池热管理系统的换热。

FAN 等^[5]通过实验的方式, 研究了 32 节圆柱形电池组成的电池组在不同风速下, 顺序排列、交错排列和交叉排列的风冷温度场情况。结果表明, 在该情况下顺序排列散热效果和温度一致性最好, 交错排列方式的效果次之, 交叉排列方式的效果最差。王世学等^[6]通过 Fluent 仿真软件研究了在电池外表面增加翅片对于强制风冷系统散热效果的影响, 仿真结果显示, 翅片结构下的电池组表面最高温度明显降低, 温度一致性显著提升, 证明了该结构的散热效果更好。冯明旭等^[7]基于相变材料和空气散热建立了耦合电池组热管理系统。结果表明, 相变材料—风冷耦合电池组热管理系统可以在更长时间内将电池组的最高温度控制在 50℃ 内。

Rekabra 等^[8]提出了利用轻质纤维的黄麻作为蒸发冷却的介质, 对空气进行预冷, 对比研究了自然对流冷却、强制风冷和蒸发冷却预冷三种条件下, 50Ah 棱柱形电池表面的最大温度、温差和温度均匀性。实验结果表明, 使用黄麻的热管理系统提高了风冷效率, 降低了电池组温差, 在同等换热能力下设备重量较强制风冷轻便。Saw 等^[9]设计了

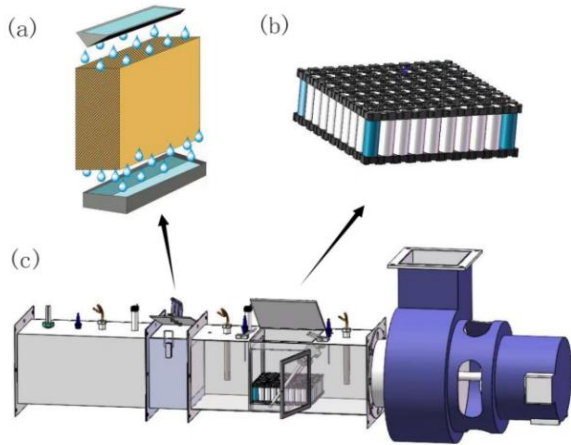
一种薄雾风冷电池热管理系统, 采用水雾作为添加剂, 增加干燥空气的比热容。研究表明 3% 的雾气占比及 5g/s 的风速能使电池表面温度维持在 40℃ 以下。Yang 等^[10]通过计算流体动力学研究了水流、水滴大小、空气速度和环境温度对电池性能的影响。结果表明, 与干冷相比, 喷雾冷却能大大降低电池组最高温度, 但温差增加。马肖娜等^[11]设计了一种湿芯辅助的强制风冷电池热管理系统, 利用 Fluent 软件建立锂离子电池组生热模型, 对比研究不同室外参数和风速下同一电池组在传统风冷和湿芯辅助下的电池热特性。湿芯的预冷作用可有效降低电池组表面最高温度, 使其适应高温气候或高充电倍率下的动力电车运行, 但对电池组均温性起到不利的作用。

可见, 现有的蒸发冷辅助的风冷电池热管理技术大多讨论风速和温度对电池组温度的影响, 未考虑充电倍率和电池数量对系统散热能力的影响。此外, 现有研究均表明蒸发冷的预冷作用导致电池均温性恶化的问题, 未得到解决。因此本文选择 18650 型号的圆柱形锂离子电池作为研究对象, 采用湿芯构建蒸发式风冷电池热管理系统, 利用 Fluent 仿真技术对传统风冷和湿芯辅助的风冷电池热管理的电池组在不同充电倍率、电池数量下表面温度和温差展开研究, 并针对电池组均温性不佳问题进行结构优化。

1 模型分析

1.1 物理模型

湿芯辅助的风冷电池热管理系统图如图 1 所示, 室外空气首先经过湿芯, 利用直接蒸发冷却原理冷却进风, 进而冷却电池。湿芯后设置收水器, 仅湿空气可进入电池组冷却通道, 不会对电池的安全运行造成威胁。本文使用 Matlab 和 CFD 软件分别模拟湿芯的热质交换过程和电池组的生热与强制风冷仿真, 湿芯的热质交换过程模型的建立及验证详见参考文献[11]。选用 18650 型号锂离子电池, 单体电池尺寸为直径 18mm 高 65mm。采用 SolidWorks 绘图软件建立 3P(4-20)S 排列的锂离子电池三维模型, 电池均匀排布, 两两间距为 4mm, 图 2 为电池数量为 60(3P20S 排列)时电池组模型, 图中左侧为冷空气入口, 右侧为热空气出口。



(a) 湿芯 (b) 电池组 (c) 风道结构

图 1 湿芯辅助的风冷电池热管理系统图

Fig.1 Systematic diagram of the wet pad assisted air-cooled battery thermal management system

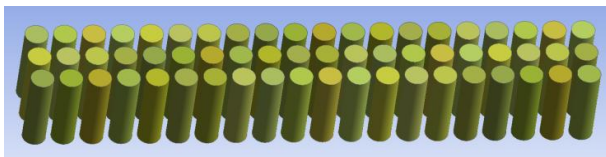


图 2 3P20S 排列电池组几何模型

Fig.2 Geometric model of the 3P20S battery pack

将电池组三维模型导入 Mesh 中进行网格划分,为确保结果的准确性,对网格进行无关性验证。以电池数量为 60 为例,环境温度为 30℃放电倍率为 1C 时,采用强制风冷,不同网格数量对电池表面最高温度影响如图 3 所示。当网格数量为 1732291 及以上时,电池组最高温度保持在 34.54℃左右,网格数量越多计算时间越长。因此,选取网格数量为 1732291。表 1 总结了在不同数量电池下的最终网格数。

表 1 不同数量电池下的最终网格数

Table 1 The number of grids under different numbers of batteries

电池数量	网格数量
12	747580
18	862681
30	1105073
45	1383240
60	1732291

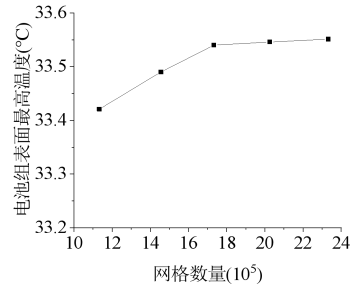


图 3 电池组模型无关性验证

Fig.3 Grid independence verification of the battery model

1.2 数学模型

锂离子电池在充放电过程中产生热量,假设电池组中各单体电池为匀发热体,忽略电池内部的对流换热和辐射换热,则单体电池稳态充电能量控制方程为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_r \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda_\theta \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q \quad (1)$$

式中: λ_r 、 λ_θ 、 λ_z 分别为电池在法向、径向和轴向的导热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; ρ 为电池的密度, kg/m^3 ; C_p 为电池的比热容, $J/(kg \cdot K)$; q 为电池的生热速率, W/m^3 。

采用 Bernardi 等^[12]建立的电池生热速率公式为:

$$q = \frac{I}{V} \left[(U_o - U) - T \frac{\partial U_o}{\partial T} \right] \quad (2)$$

式中: I 为电池在充电时的电流, A ; V 为电池的体积, m^3 ; U_o 为电池的开路电压, U 为电池的端电压, V ; T 为电池的温度, $^\circ C$ 。模型中涉及到的单体电池及干空气热物性参数如表 2 所示。

表 2 散热模型热物性参数

Table 2 Thermal property parameters used in the model

参数	18650 锂离子电池	干空气
密度/ kg/m^3	2722	1.225
比热容/ $J/(kg \cdot K)$	970	1.006×10^3
导热系数/ $W/(m \cdot K)$	$\lambda_r=2.6$	2.42×10^{-2}
	$\lambda_\theta=2.6$	
	$\lambda_z=28$	
粘度/ $kg/(m \cdot s)$	—	1.789×10^{-5}

1.3 边界条件

电池组采用 18650 型锂电池,通过编写 UDF

(用户自定义函数)加载至电池模型模拟电池生热。电池组模型进风口为速度入口, 出风口为压力出口, 电池组箱体内存空气与箱体内壁间为无滑移绝热边界条件, 与电池间为无滑移热风对流边界条件。选择压力基求解器, 求解方法选择“SIMPLEC”算法, 松弛因子中的数值保持默认, 压力、动量和能量方程均选择标准二阶迎风格式。电池生热模型的建立及验证参考参考文献[11]的研究成果。根据牛顿冷却定律, 电池与空气间对流热交换为^[13]:

$$-\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right) = h(T - T_f) \quad (3)$$

式中: n 为电池换热表面的外法线; h 为表面对流换热系数; T_f 为冷空气温度。

2 结果与讨论

2.1 参数设置

本研究考虑了电池数量和充电倍率两个因素,

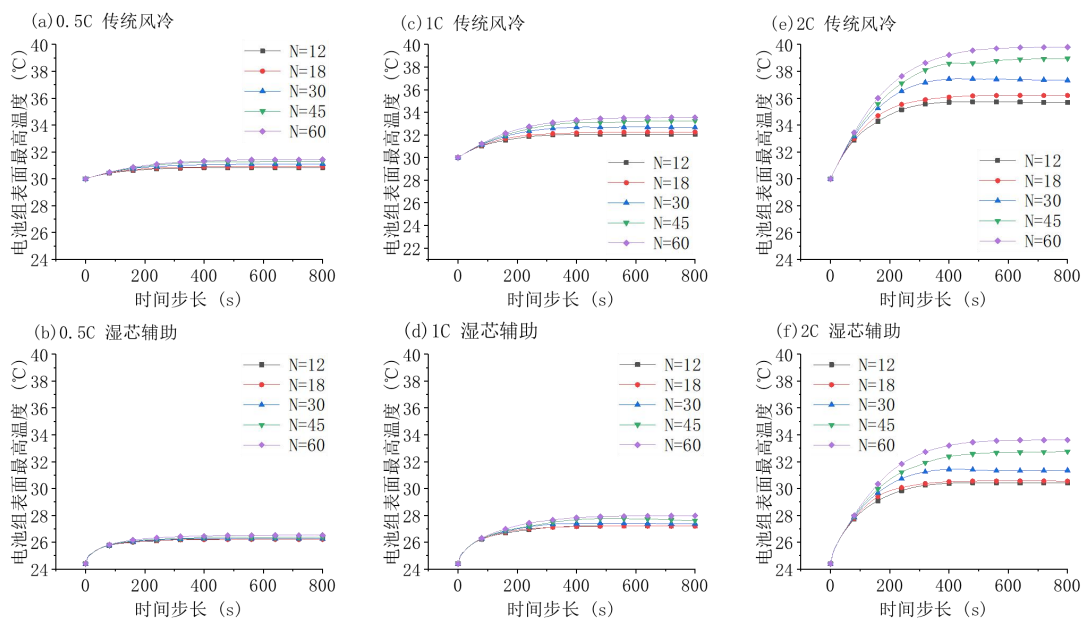


图 4 不同电池个数和电池充电倍率组合下 T_{max} 随时间变化图

Fig.4 Time variation of T_{max} under different combinations of battery numbers and charging rate

湿芯作为传热介质的使用在热管理方面提供了巨大的优势, 因为它与空气相比具有优越的热性能。

模拟对比传统风冷和湿芯辅助下的电池组的散热性能影响。利用电池表面最高温度 (T_{max}) 和温差 (ΔT) 作为评比指标。模型中具体的参数设置见表 3。

表 3 模拟参数设置

Table 3 Parameter settings in simulation

环境干球温度/°C	环境相对湿度/%	气流风速/(m/s)	电池个数/个	充电倍率
30	50	3	12-60	0.5-2C

2.2 电池组表面最高温度的讨论

由图 4 (a) 可知, 在相同的充电倍率下, 电池组 T_{max} 随着充电的进行而逐渐升高。在充电初期, 电池 T_{max} 温升速率较快, 而在充电中期 400s 左右逐渐趋于平稳。且随电池个数的增加, 电池组散热量增加, 最高温度随之升高。800s 充电结束时, 电池个数为 12-60 个的电池组最高温稳定在 30.71°C -31.37°C。

表 4 湿芯预冷空气物性参数

Table 4 Physical property parameters of wet pad precooling

入口干球温度/°C	相对湿度/%	风速/(m/s)	湿芯出口干球温度/°C	温降/°C	湿芯出口气流含湿量/(g/kg)
30	50	3	24.4	5.6	1.329

在图 4 (b) 中, 由于湿芯的预冷却作用, 湿

气流通过湿芯时, 水分吸收通道中气流的热量而蒸发, 如表 4 所示, 经湿芯预冷后气流温降为 5.6°C。

芯出口气流温度大幅下降, 使得电池组的入口空气

干球温度由 30℃ 降至 24.4℃。与图 4 (a) 中传统风冷系统相比,湿芯辅助的热管理系统能有效的降低电池组的最高温度,比同条件下传统风冷系统低 4.46~4.85℃。

图 4 (b) (d) (f) 为湿芯辅助下的电池热管理系统在不同充电倍率下的热特性结果: T_{\max} 同样随充电倍率增大而增大。值得注意的是,在充电倍率 2C、电池数量为 60 个时,该系统能有效控制电池组的最高温度在 33.61℃。因此,湿芯的应用有助于降低电池组的入口温度,并限制电池组的最高温度。与传统的风冷电池热管理系统相比,湿芯辅助的风冷系统更能适应较多电池数量的电池组的散热需求。

2.3 电池组内温差的讨论

图 5 为各工况下传统风冷与湿芯辅助的风冷电池热管理系统对比下的各电池组内最大温差。假设在充电之前,电池组内各电池温度均等于入口空气温度,因此初始 ΔT 为零。由图 5 (a) 可知,充电倍率为 0.5C 时,电池组最大温差 ΔT 随充电时间的进行而缓慢升高,在充电时间为 400s 时逐渐趋于平稳。冷空气与电池组前排电池换热后温度升高,气流温度与后排电池温差减小,换热效率降低,导致前后排电池之间的温度差异。电池数量越多,电池生热量越大,前后排电池表面温度差异越大, ΔT 越高。充电倍率为 0.5C 时,电池组散热量较小,

电池个数为 60 时, ΔT 仅为 1.05℃。

对比图 5 (a) (c) (e) 可知, ΔT 随充电倍率的增大而增大。在充电倍率为 0.5C 和 1C 时,电池数量为 12~60 个的电池组 ΔT 均在 3℃ 内;但充电倍率为 2C 时,电池个数为 45 时, ΔT 已超过 5℃,均温性较差。

由图 5 (b) (d) (f) 可知,湿芯辅助的电池热管理系统的电池组温差上升趋势与传统风冷类似,温差随充电的进行而上升并在充电 400s 时稳定。但湿芯辅助的电池热管理系统 ΔT 均高于传统风冷,主要是因为湿芯的预冷作用导致前排电池温度过低。在较低充电倍率 (0.5C 和 1C) 时,电池组散热量相对较低,湿芯辅助的风冷电池热管理下的电池组最大温差 (1C 时为 1.91℃~2.66℃) 与传统风冷系统相比稍有增加,对电池的热特性影响较小。在充电倍率为 2C 时,电池数量为 45 个时 ΔT 同样超过 5℃。但随着电池个数的增加,电池组生热增加,湿芯辅助的风冷系统的 ΔT 与传统风冷系统间的差距逐渐减小,充电倍率 2C 电池数量为 60 个时, ΔT 仅相差 0.17℃。可以得出结论,湿芯的应用对电池组均温性起到不利的效果。0.5C~1C 充电倍率下,电池组散热量小,电池均温性较好,因此湿芯的应用对电池组均温性影响较小;充电倍率为 2C 时,传统强制风冷和湿芯辅助的风冷电池热管理系统在电池数目超过 45 时,电池组均温性均超过 5℃。

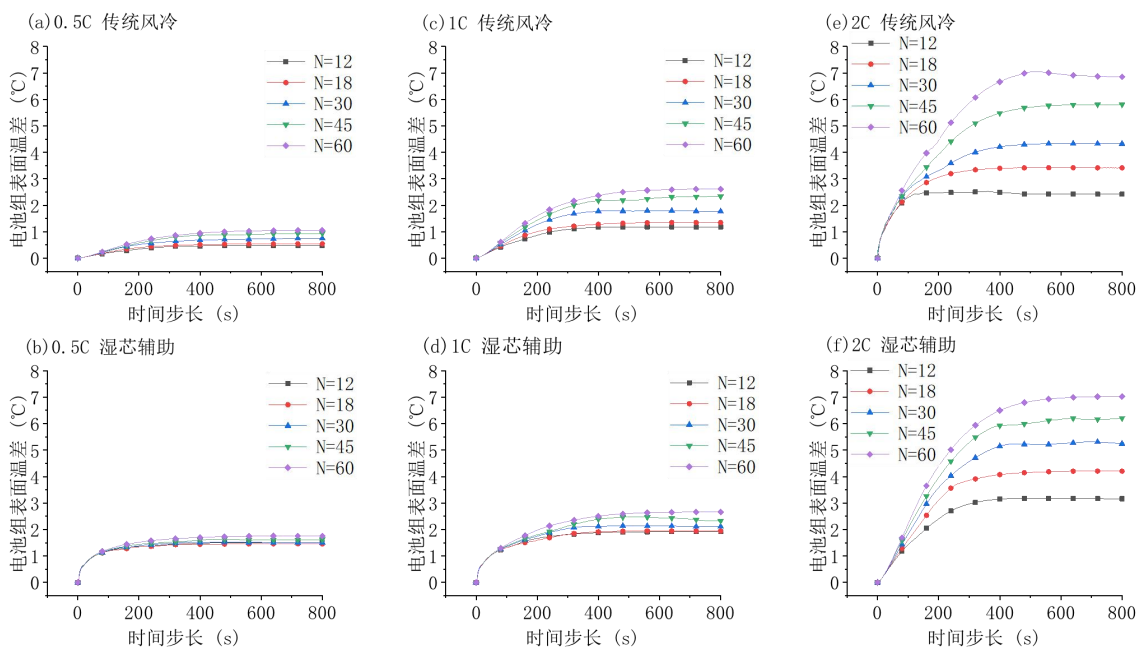


图 5 不同电池个数和电池充电倍率组合下 ΔT 随时间变化图

Fig.5 Time variation of ΔT under different combinations of battery numbers and charging rate

2.4 针对均温性不佳热管理系统优化

根据上节结论得出, 在高充电倍率下, 电池个数超过 45 个时的湿芯辅助的电池热管理系统, 充电结束后的 ΔT 远超过 5°C 。由于电池导热有限, 电池组后排电池散热较差, 导致电池组均温性不佳。为提高电池组均温性, 通常可以采用增大风量、加装翅片等扰流装置、增加相变材料辅助等方式改善电池组均温性。本文采用 0.5 mm 的铝片包裹各电池外表面, 在相同工况条件下与无铝片电池组进行散热特性对比。

由图 6 可知, 加装铝片后的电池组 T_{max} 和 ΔT 均有所降低, T_{max} 降低约 $0.44\text{--}1.09^{\circ}\text{C}$, ΔT 降低约

$0.37\text{--}1.22^{\circ}\text{C}$ 。电池数量为 60 时, 电池组表面最高温度降低 1.09°C , 温差由 6.90°C 降低至 5.68°C 。图 7 为充电倍率为 2C , 电池个数 60 个时, 充电结束后的电池组温度云图。可以看出, 前排电池的的表面温度差异较小, 加装铝片主要影响电池组后排电池的表面温度。主要原因有两个, 一是电池的导热性能较低, 而铝片导热性能好, 冷空气可以迅速冷却铝片, 加强空气与加装铝片的电池之间的换热; 二是铝片的加装使得电池间距由 4 mm 降为 3 mm , 电池组通道内气流流速增加, 电池与空气之间的换热增强。因此加装铝片可以有效降低电池组温差, 提高均温性。

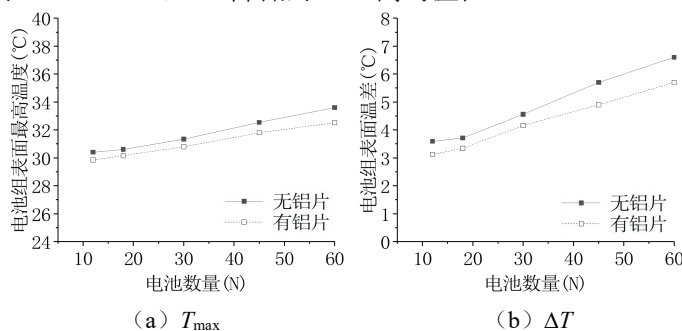


图 6 湿芯辅助下有无铝片包裹电池的温度变化图

Fig.6 Temperature variation of battery with or without aluminum under wet pad

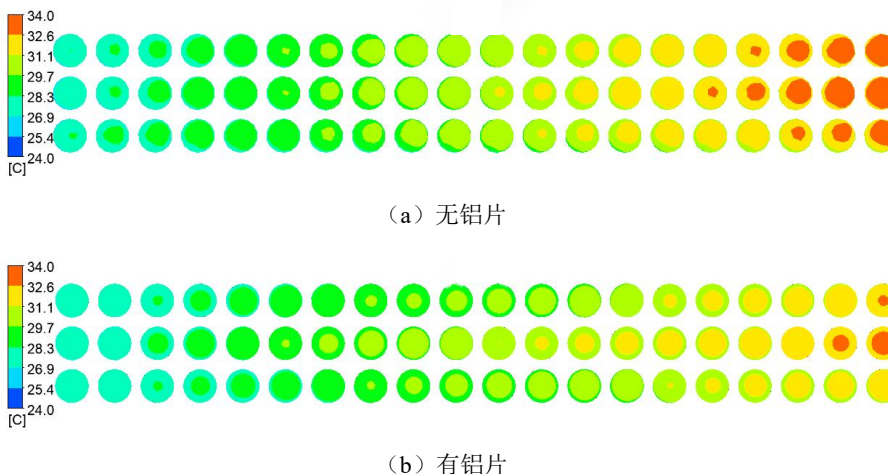


图 7 充电结束电池组温度云图

Fig.7 Temperature cloud map of battery pack after charge

3 结论

本文对湿芯辅助的风冷电池热管理系统展开研究, 利用 Fluent 软件建立电池组生热模型, 模拟不同电池个数及充电倍率下的电池组表面温度, 并针对电池组均温性不佳问题进行结构优化。主要结

论如下:

(1) 传统风冷足以应对低充电倍率下电池组散热需求, 但不能满足高充电倍率下电池数量较多的电池组的散热需求。湿芯的应用有助于降低电池组的入口温度, 并限制电池组的最高温度, 较传统

风冷系统更能适应高充电倍率和较大容量的电池组的散热需求。

(2) 湿芯的应用对电池组均温性起到不利的效果。0.5C-1C 充电倍率下, 湿芯的应用对电池组均温性影响较小; 充电倍率为 2C 时, 传统强制风冷和湿芯辅助的风冷电池热管理系统在电池数目超过 45 时, 电池组均温性均超过 5℃。

(3) 电池外表面加装铝片后可强化换热, 有效降低后排电池温度, 电池组最高温度及温差均有所降低。在 2C 充电倍率、电池数量为 60 时, 电池组表面最高温度降低 1.09℃, 温差由 6.90℃降低至 5.68℃。

参考文献:

- [1] N Yang, X Zhang, B Shang, et al. Unbalanced discharging and aging due to temperature differences among the cells in a lithium-ion battery pack with parallel combination [J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 306:733-741.
- [2] 李军求, 吴朴恩, 张承宁. 电动汽车动力电池热管理技术的研究与实现[J]. *汽车工程*, 2016, 38(1):22-27.
- [3] PENG X, MA C, GARG A, et al. Thermal performance investigation of an air-cooled lithium-ion battery pack considering the inconsistency of battery cells[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 153:596-603.
- [4] 方凯, 徐岫, 汤玉婷. 电池组风冷系统结构设计与仿真优化研究[J]. *机电工程*, 2018, 35(9):98-990.
- [5] FAN Y Q, BAO YUN, LING CHEN, et al. Experimental study on the thermal management performance of air cooling for high energy density cylindrical lithium-ion batteries[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 155:96-109.
- [6] 王世学, 张宁, 高明. 汽车动力锂电池组翅片式散热性能仿真分析[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2016, 49(2):213-220.
- [7] 冯明旭, 毕海权, 王宏林, 等. 基于相变材料与空气耦合热管理系统的电池温度控制研究[J]. *制冷与空调*, 2018, 32(2):201-206.
- [8] ReKabra Youssef, Md Sazzad Hosen, Jiacheng He, et al. Effect analysis on performance enhancement of a novel and environmental evaporative cooling system for lithium-ion battery applications.[J]. *Energy*, 37, 2021, 102475.
- [9] Saw L H, Ye Y, Tay AAO, et al. Computational fluid dynamic and thermal analysis of Lithium-ion battery pack with air cooling[J]. *Applied Energy*, 2016, 177:783-792.
- [10] Yue Yang, Lijun Yang, Xiaoze Du, et al. Pre-cooling of air by water spray evaporation to improve thermal performance of lithium battery pack[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 163:114401.
- [11] 马肖娜, 陈奕, 严华夏, 等. 湿芯辅助的动力电池热管理系统的特性研究[J]. *制冷与空调*, 2023, 37(6):760-767.
- [12] Bernardi D, Pawlikowski E, Newman J. A General Energy Balance for Battery System[J]. *Journal of Electrochemical Society*, 1985, 132(1):5-12.
- [13] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

(上接第 605 页)

- [11] 李廷贤, 刘艳华. 地板辐射采暖地表温度分布特性的模拟研究[J]. *制冷空调与电力机械*, 2004, (4):14-17.
- [12] 王晓彤. 地板辐射供暖系统的地板表面温度均匀性分析[J]. *包钢科技*, 2001, (1):50-52.
- [13] ASHRAE. ASHRAE Handbook HVAC Systems and Equipment 2008[M]. 2008.
- [14] 陈海波. 低温热水地板辐射采暖地板板体传热性能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001.
- [15] 胡中全. 凹槽和肋柱组合式微通道热沉中流动和传热的数值模拟研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- [16] 郭德恒. 不锈钢波纹管地板辐射采暖热工性能与阻力特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.