

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2024.05.006

基于微通道液冷板的动力电池热管理性能分析

周宇轩¹, 赵福云^{1, 2}, 杨 明¹

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 武汉大学 动力与机械工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 为了保证锂离子动力电池的安全性能并延长电池的循环使用寿命, 设计了一种基于微通道液冷板的电池热管理系统, 对锂离子棱柱形电池进行冷却。建立了电池冷却系统的三维热模型, 研究高放电倍率、冷却液温度和进口质量流量对电池放电过程中最高温度和最大温差的影响。结果表明: 锂离子电池组在 5C 高倍率放电工况下, 电池最高温度为 301.942 K, 温差为 1.942 K, 达到预期冷却效果; 随着冷却液温度降低和进口质量流量增加, 电池最高温度降低; 随着进口质量流量增加, 电池冷却性能改善, 但趋势逐渐变小。当冷却液温度为 296 K 时, 电池最高温度为 297.662 K; 当质量流量为 15×10^{-7} kg/s 时, 温差为 4.407 K。

关键词: 锂离子电池; 电池热管理系统; 微通道冷却; 最高温度; 温差

中图分类号: TM912

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2024)05-0040-07

引文格式: 周宇轩, 赵福云, 杨 明. 基于微通道液冷板的动力电池热管理性能分析[J]. 湖南工业大学学报, 2024, 38(5): 40-46.

Thermal Management Performance Analysis of Power Batteries Based on Mini-Channel Liquid Cooling Plates

ZHOU Yuxuan¹, ZHAO Fuyun^{1, 2}, YANG Ming¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to ensure the safety performance of lithium-ion power batteries and extend their cyclic service life, a battery thermal management system has thus been designed based on microchannel liquid cooling plates to cool lithium-ion prismatic batteries, followed by the establishment of a three-dimensional thermal model of the battery cooling system so as to study the effects of high discharge rate, coolant temperature, and inlet mass flow rate on the highest temperature and maximum temperature difference during battery discharge process. The results show that under the maximum rate discharge condition of 5C, the highest temperature of the lithium-ion battery pack is 301.942 K, with a temperature difference of 1.942 K, thus achieving the expected cooling effect. With the decrease of coolant temperature and the increase of inlet mass flow, the maximum temperature of the battery decreases. As the inlet mass flow rate increases, the cooling performance of the battery has been improved, with the trend gradually decreasing. When the coolant temperature is 296 K, the maximum temperature of the battery is 297.662 K, while the mass flow rate is 15×10^{-7} kg/s, the temperature difference is 4.407 K.

Keywords: lithium-ion battery; battery thermal management system; mini-channel cooling; maximum temperature; temperature difference

收稿日期: 2023-06-07

基金项目: 湖南省重点研发计划基金资助项目(2022SK2084)

作者简介: 周宇轩, 男, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为供热, 供燃气, 通风及空调工程,

E-mail: 1043830387@qq.com

通信作者: 赵福云, 男, 湖南工业大学教授, 主要研究方向为建筑通风及计算流体动力学, E-mail: 1065093523@qq.com

1 研究背景

锂离子电池具高能量密度、高功率密度等优越特性,被广泛用于电动汽车^[1]、芯片材料、航空航天等领域。与传统燃料相比,采用锂离子电池的成本大幅降低,这大大促进了锂离子电池行业发展^[2]。然而锂离子电池的热敏性限制了其使用效率^[3]。许多参数会影响锂离子电池热性能,温度过高或分布不均会导致电池容量降低、循环寿命缩短^[4]。故在不同工作条件下,应有效控制锂离子电池温度。在充放电过程中,电池内部会产生反应热和焦耳热,引起电池温度升高,电池单体和模块间形成温差。若不能及时有效散热及平衡电池温度,不仅会造成电池容量减退,且会导致电池组内温度不稳定,降低动力电池性能,缩短其使用寿命,甚至引起热失控。此外,极端气候和快速充放电等恶劣运行条件会加速电池老化,导致电池内部电阻变大,产生过多焦耳热,造成温度失控,所以温度对电池综合性能的影响很大。为了高效利用电池能量,将电池组温度保持在最佳范围内,开发一套性能优良、安全可靠的电池热管理技术势在必行。

环境温度是影响锂离子电池温度梯度的外部参数之一^[5],当环境温度高于锂离子电池工作温度范围(15~30℃)会降低锂离子电池性能^[6-7]。此外,环境温度与电池热管理系统^[8]温度均匀性密切相关。充/放电过程中施加的电流是影响锂离子电池中产生热量的另一个参数^[9]。电流大小由电池容量与充放电时间的关系表示^[10]。使用电池热模型^[9]可准确预测锂离子电池热廓线,低成本评估锂离子电池热行为,且可在不进行大量实验的情况下更快了解其有效运行参数^[11-12]。在Ansys Fluent中对锂离子电池进行多尺度、多维建模时,因NTGK电池建模方法计算简单且易于参数化,故本文拟采用该模型对方形锂离子电池液冷散热工况进行仿真模拟,研究高放电倍率、冷却液温度、进口质量流量对锂离子电池的影响。且对电池的排布方式进行设计,将电池进行组合,并在电池间增加液冷板,并布设液冷管道,以增加电池与液冷板接触面积,同时增强电池包裹稳定性,提高电池安全系数。通过数值模拟不同工作状态,对比设计后的最高温度及最大温差,使其皆在电池的最佳工作温度范围内。

2 模型建立

2.1 电池模型参数

本文使用标称容量为14.6 A·h的锂离子棱柱电池,其单个电池包含一个锰酸锂(LiMn₂O₄)阴极和

一个石墨阳极。由于锂电池组具较高能量密度,可在相对较小体积和质量下存储更多电能,从而提供更长续航里程。且锂电池组通常有较长使用寿命,能承受更多充放电循环,减少更换电池频率。同时,锂电池组具较高充电效率和快速充电能力,它们能接受高电流充电,因此可更快地充电。故本研究将10块电池进行组合,模拟电池组几何模型见图1,其尺寸为长192 mm、宽145 mm、厚5.4 mm。电池的标称容量为14.6 A·h,额定电压为3.7 V,最大、最小终止电压分别为4.3 V和3.0 V。

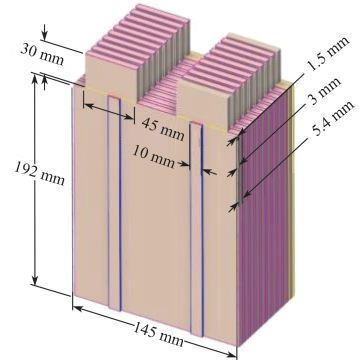


图1 锂离子电池模组几何模型

Fig. 1 Lithium-ion battery module geometry model

锂离子动力电池组可被用于车载电池和其他智能设备中。每块液冷板上布设两条液冷通道,便于电池组和液冷流体充分接触,通过液冷板不断带走电池产生的热量,达到冷却降温效果。电池组内每块电池都被两块液冷板夹在中间,液冷板厚度为3 mm,液冷通道长为10 mm、宽为10 mm。导电元件为母排,厚度为2 mm。

为方便计算,假设锂离子电池和液冷板是均匀、各向同性的。液冷板材料用铝,考虑导热系数和黏度,采用液态水为冷却介质。电池、液冷板和冷却液的物性见表2。根据冷却通道进口处定义的质量流量可以计算雷诺数,进而确定使用的黏性模型。本研究的最大质量流量为 15×10^{-3} kg/s,对应的雷诺数为419.79。因此,本文采用层流模型。在通道出口处定义0 Pa的压力。考虑到电池使用寿命和充放电循环,本次研究的基本工况下电池放电速率设为5C,续航时间为720 s。

该锂离子电池模型的材料物性如表1所示。

表1 锂离子电池材料物性
Table 1 Lithium-ion battery material properties

材料	密度/(kg·m ⁻³)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
电芯	1 200.0	700	1.0
铜	8 978.0	381	387.6
铝	2 719.0	871	202.4
锰酸锂	2 500.0	700	5.0
石墨	1 500.0	700	5.0
水	998.2	4 182	0.3

2.2 电池生热速率模型

模拟车载锂离子动力电池液冷管路系统由正负极、隔膜、电解液、集流体、硅胶、液冷板等组成。电池生热速率是电池热管理中评价和分析的重要指数。电池结构、使用条件、电流密度、荷电状态及环境温度等都会对电池的生热速率产生影响。试验中, 这些因素具非线性特点且难以准确测量。

在单体电池的生热速率计算方面, 目前广泛使用 Bernardi 等建立的生热速率模型 (1) 进行计算。

Bernardi 电池生热速率方程如下:

$$q = \frac{I}{V} \left(E_{oc} - E - T \frac{dE_{oc}}{dT} \right) = \frac{I}{V} \left(IR + T \frac{dE_{oc}}{dT} \right), \quad (1)$$

式中: q 为电芯生热速率; I 为工作电流; V 为电池总体积; E_{oc} 为开路电压; E 为电池工作电压; T 为电池内起始温度, 取 298.15 K; $T \frac{dE_{oc}}{dT}$ 为可逆反应热, 充电吸收热量为负, 放电产生热量为正; R 为电阻。

电池单体的定压比热容 C_p 一般可以看作常数, 由式 (2) 计算:

$$C_p = \sum C_i m_i / m_b. \quad (2)$$

式中: m_b 为电池总质量; C_i 为各电池组件比热容; m_i 为各电池组件质量。

电池的密度 ρ 为电池的总质量与总体积之比, 即

$$\rho = m_b / V. \quad (3)$$

2.3 NTGK 模型

NTGK 模型作为一个简单的半经验电热模型, 被应用于 Ansys Fluent 计算流体动力学。

由 J. Newman 等^[13-14]开发的单个锂离子电池的温度和极化表达式, 由式 (4) ~ (7)^[15-16] 给出:

$$\frac{d\rho C_p T}{dt} = \sigma_+ |\nabla \varphi_+|^2 + \sigma_- |\nabla \varphi_-|^2 + Q_g, \quad (4)$$

$$\nabla(\sigma_+ \nabla \varphi_+) = -(j_{ECh} - j_{short}), \quad (5)$$

$$\nabla(\sigma_- \nabla \varphi_-) = j_{ECh} - j_{short}, \quad (6)$$

$$j_{ECh} = \alpha Y [U - (\varphi_+ - \varphi_-)]. \quad (7)$$

式 (4) ~ (7) 中: t 为时间长度; σ_+ 和 σ_- 分别为电池正负极的导电性; φ_+ 和 φ_- 分别为正负极的相电位; ∇ 为梯度算子 (在空间各方向上的全微分); Q_g 为电池产生的热量; j_{ECh} 为体积电流传输速率; j_{short} 为电流传输速率; α 为转换度; U 和 Y 分别为电导和开路电势对放电深度 DoD 的函数^[15-19], 且

$$U = a_0 + a_1 (DoD) + a_2 (DoD)^2 + a_3 (DoD)^3, \quad (8)$$

$$Y = a_4 + a_5 (DoD) + a_6 (DoD)^2, \quad (9)$$

其中 $a_0 \sim a_6$ 为拟合参数。

本研究利用 Gu H.^[19] 得到的拟合参数计算参数 U 和 Y , DoD 由 Kwon K. H. 等^[15] 给出, 表达式为

$$DoD = \left(\int_0^t J dt / Q_T \right) t, \quad (10)$$

式中: J 为电流密度分布; Q_T 为电极容量。

3 仿真模型建立及分析

3.1 网络划分

采用 Space-claim 建立模型, 进入密闭几何工作流程, 使用 Fluent 仿真软件。对锂离子电池的几何模型进行网格划分, 见图 2。

如图 2 所示, 在电池外壳以及液冷板外部设置较大的网格尺寸, 而液冷通道部分设置较小的网格尺寸, 添加局部尺寸并设置为 3 mm, 生成表面网格, 最小尺寸设置为 0.2 mm, 最大尺寸为 1.8 mm。几何结构同时由流体和固体区域组成, 并添加 3 层边界层, 其网格最小、最大单元长度分别为 0.2 mm, 3.2 mm。

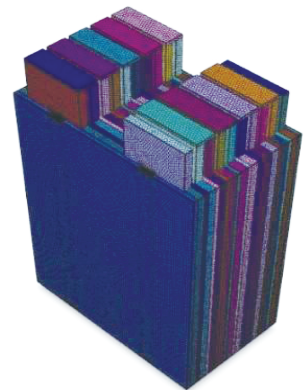


图 2 锂离子电池
网格划分模型

Fig. 2 Lithium-ion battery
grid division model

在计算中, 网格精度对计算结果收敛性影响比较大, 故设定模型边界条件时需要保证其准确性。在 5C 放电倍率下, 采用 6 种不同网格数量分别模拟电池的最低温度, 得到的电池最高温度与网格数量关系曲线如图 3 所示。

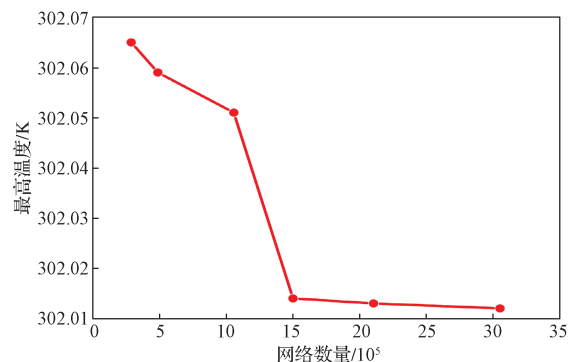


图 3 网格独立性验证结果

Fig. 3 Grid independence validation results

由图 3 可知, 随着网格数量增加, 电池温度在第三及第四个点内温度有明显变动, 通过网格独立性测试。当网格数量增加时, 可接受的容差水平应小于 0.1%。当网格数量从 1 500 262 增加到 2 104 067 时,

电池最高温度从 302.014 K 降低到 302.013 K, 随着网格数量的增加, 电池最高温度的变化仅为 0.001 K (小于 0.1%)。可见, 在 1 500 262 网格数量之后的温度变化趋于平稳收敛。为减少计算量并且提高计算精度, 本研究采用 1 500 262 个网格数量用于后续数值计算。同时对时间步长进行独立检验, 考虑计算成本, 本文选择时间步长为 1 s。

3.2 初始和边界条件

模块的初始温度及冷却液温度为 298.15 K, 工作环境温度固定为 298.15 K。正极材料为石墨, 负极材料为锰酸锂。液体入口设置为速度入口, 速度值为 0.1 m/s; 出口设置为压力出口, 表压设置为 0 Pa。壁面与外界空气进行热交换, 壁面的传热系数为 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K})$ 。电池轴向面为对称结构, 与其接触的表面均为耦合面。且实验假设电池初始温度与环境温度相等, 外部边界通过自然对流冷却。

数值计算采用 Fluent 对电池模组进行瞬态模拟, 空间导数项采用二阶迎风差格式, 时间导数项采用一阶隐式格式, 处理压力-速度的耦合时, 使用 SIMPLE 方法。

3.3 电池模型实验验证

为了保证数值计算的精确性, 本次模拟将与 Seong Kim U. 等^[20]所测的, 在电池 5C 的放电倍率以及 0.1 m/s 的液冷液体水流速下进行确认试验, 以验证结果的准确性, 并将单个电池的平均放电温度与平均数值模拟温度进行对比分析。通过实验数据验证的仿真结果如图 4 所示, 由图可知, 试验结果温度与数值模拟温度的分布图在整体趋势上保持一致。实验值最高温度为 315.301 K, 模拟值相对温度为 318.528 K, 温差为 3.227 K, 误差约为 1%。这一验证结果表明, 电池最高温度与实验结果吻合较好, 与试验的拟合度较高。实验数据验证结果与数值模拟结果的回归系数为 $R^2 = 0.849$ 。

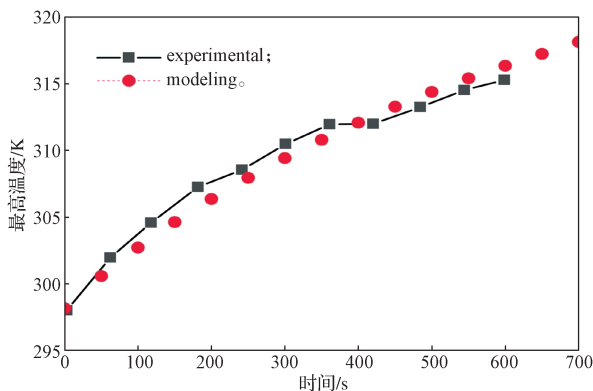


图 4 电池模型验证结果

Fig. 4 Battery model validation results

4 热仿真结果分析

4.1 高放电倍率下电池温度分布对比

高倍率锂离子电池的优点在于其高倍率的放电性能和较长的使用寿命, 这意味着它可以在短时间内释放出大量电能, 满足高功率设备需求。同时, 相较于普通的低倍率电池, 还能经受更多的充放电循环次数, 故设计并研究了 5C~9C 共 5 种高放电倍率工况下的电池温度分布对比, 得到的温度云图见图 5。

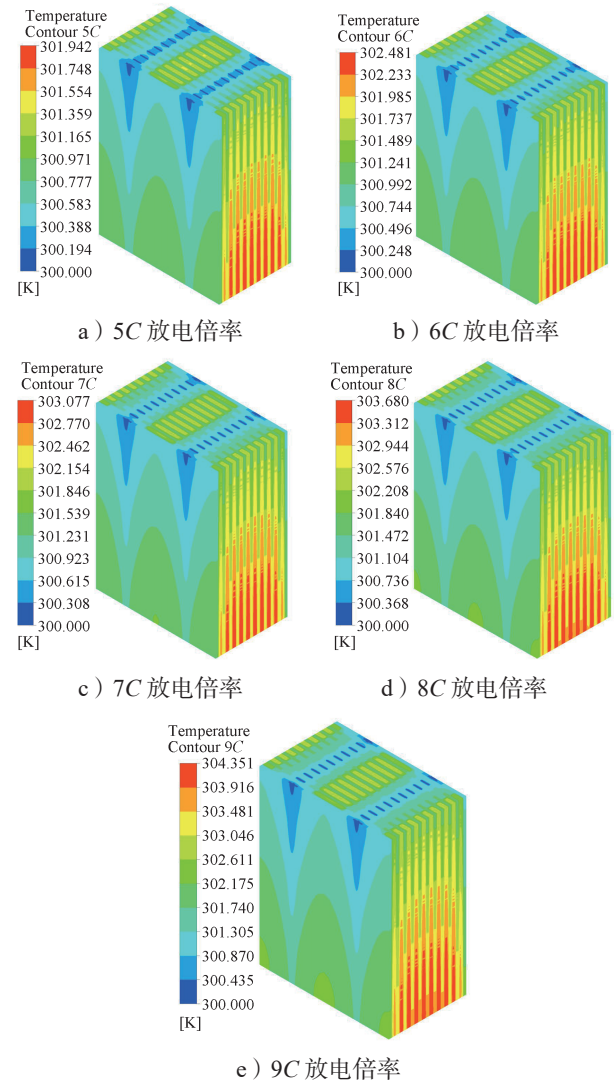


图 5 不同放电倍率的电池模组温度云图

Fig. 5 Temperature nephogram of battery module with different discharge rates

在图 5 中, 给出了 5 种不同放电倍率下放电结束的电池温度, 可看出竖向温度呈现出阶梯状, 越靠近液冷板处的温度越低, 且随着电池放电倍率增加, 电池的横向温度分布更均匀。电池每增加 1C 的放电倍率, 最高温度升高 1 K 左右, 呈一定的线性关系, 在 5C 工况下, 电池最高温度为 301.942 K, 温差为 1.942 K; 在 9C 工况下, 电池最高温度为 304.351 K, 温差为 4.351 K。

5 种工况下的电池最高温度及温差都满足电池正常工作状态。

从图 5 中还可以看出,被液冷板所包裹的地方温度较低,尤其是与液冷通道距离较近的地方温度更低,温度分布成一定的流线型。温度较高的地方主要集中在中下部分,电池组上部的温度由于冷却液的冷却效果维持较低水平。最高温度为 304.351 K,最低温度为 300 K,温差为 4.351 K,在合理范围内,达到预期冷却效果。

不同放电倍率下电池最高温度比较见图 6。由图可知,5 种工况下,电池的最高温度均随着电池的放电过程而逐渐升高,呈现一定的线性趋势,其中在 9C 的放电倍率下温度最高,且温升最快,低放电倍率下温升幅度较慢。但是距离临界最佳温差较近,故尝试降低冷却液温度以进一步降低温差。

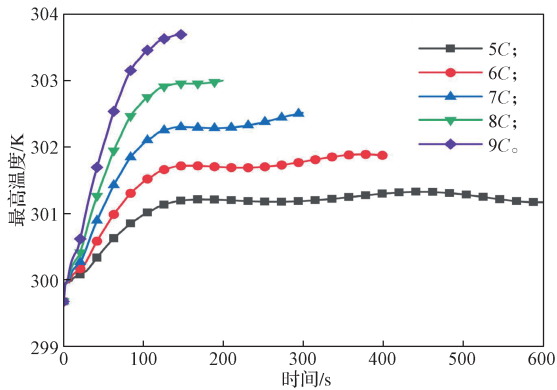
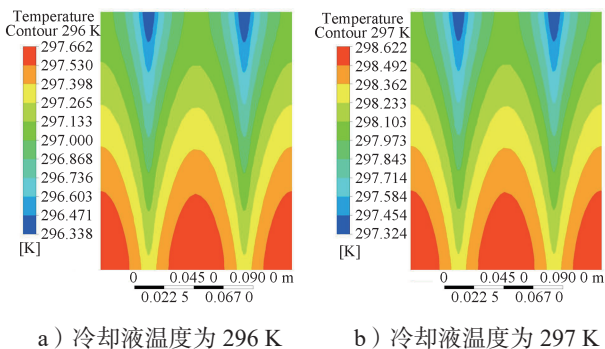


图 6 不同放电倍率下电池最高温度对比

Fig. 6 Comparison of the maximum battery temperature under different discharge rates

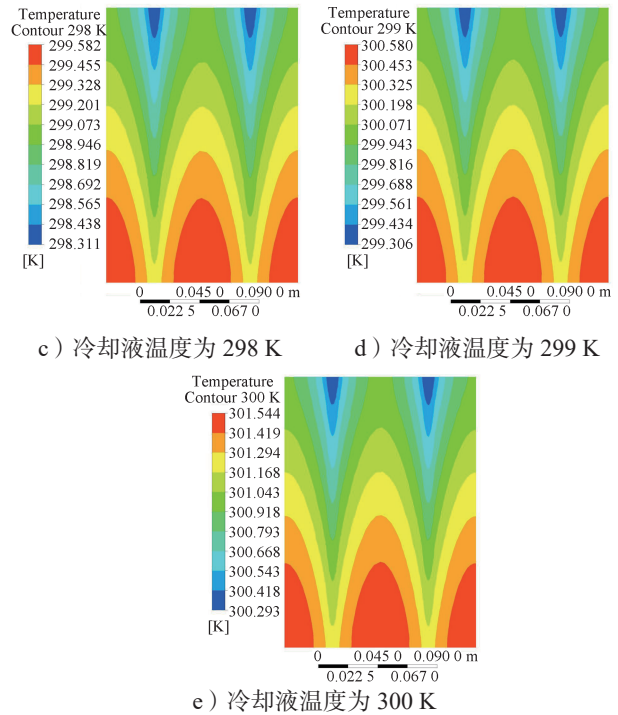
4.2 不同冷却液温度分布对比

为最大限度地降低锂离子电池模组在高倍率放电情况下的温差,将冷却液的温度分别降低至 299, 298, 297, 296 K 进行模拟,得到 5 种工况的模拟冷却液温度云图如图 7 所示。所选取的截面为第 5 个电池的平面,其位置居中,可以体现电池组的最高温度。可看出随着冷却液温度降低,电池的最高温度明显降低,最低温度与冷却液温度相差 1.324 K 左右。



a) 冷却液温度为 296 K

b) 冷却液温度为 297 K



e) 冷却液温度为 300 K

图 7 不同冷却液温度的电池模组截面温度云图

Fig. 7 Temperature nephogram of battery module cross-section at different coolant temperatures

不同冷却液温度下电池温差对比见图 8,随着冷却液温度升高,电池温差逐渐降低,温差从 1.324 K 降低至 1.251 K,二者呈一定的线性关系。

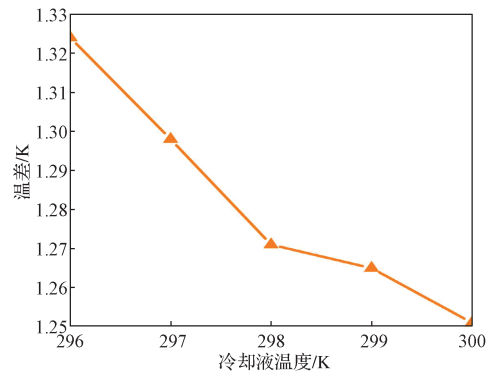


图 8 不同冷却液温度下电池温差对比

Fig. 8 Comparison of battery temperature difference with different coolant temperatures

4.3 不同冷却液进口质量流量温度分布对比

提高质量流量可降低电池温度。本研究选取 5 种进口质量流量,以图 5a 为基础,在环境温度为 25 ℃ 时,考察进口质量流量对环境温度的影响,不同冷却液进口质量流量温度云图如图 9 所示。当质量流量为 3×10^{-7} kg/s 时, $T_{\max}$ 为 306.413 K;当质量流量增加到 1.5×10^{-6} kg/s 时, $T_{\max}$ 降至 302.557 K,最高温度变化了 3.856 K。因此,电池组最高温度随着质量流量的增大而减小,而质量流量对冷却性能的影响随着流量的增大而减小。提高质量流量意味着消耗更多的

能量, 即不可避免地增加运行成本。

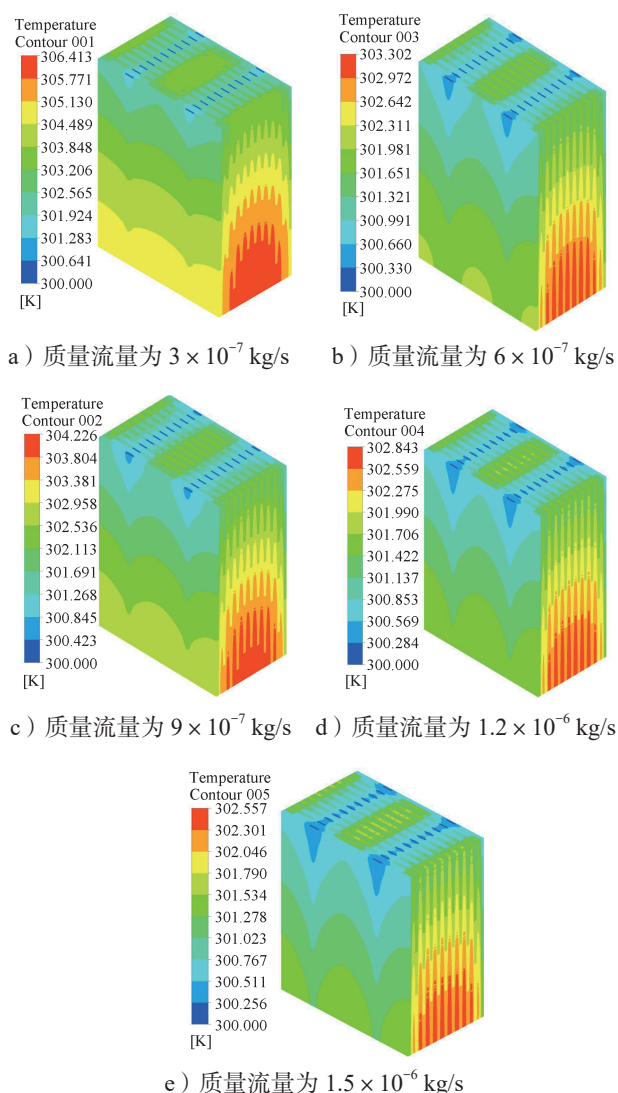


图9 不同冷却液进口质量流量温度云图

Fig. 9 Temperature nephogram of inlet mass flow rates and temperature for different coolants

不同冷却液进口质量流量温差对比和最高温度对比如图10和图11所示。

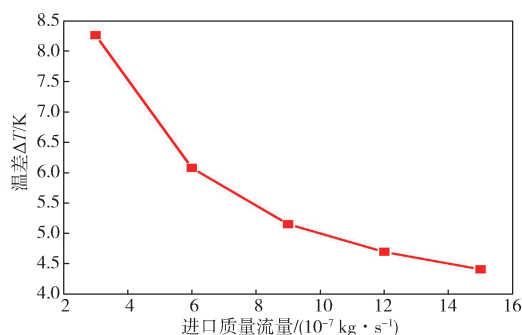


图10 不同冷却液进口质量流量温差对比

Fig. 10 Comparison of temperature difference of inlet mass flow rates for different coolants

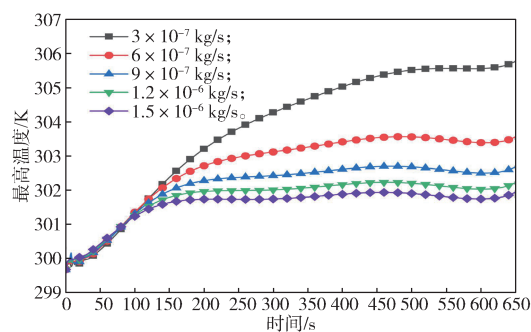


图11 不同冷却液进口质量流量最高温度对比

Fig. 11 Comparison of the maximum temperature with different coolant inlet mass flow rates

从图10和11可看出, ΔT (温差) 的变化趋势与最高温度的变化趋势并不相同。当进口质量流量从 $3 \times 10^{-7} \text{ kg/s}$ 增加到 $1.5 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$ 时, 温差从 8.263 K 逐渐降低到 4.407 K 。随着时间延长, 温度逐渐升高, 且当质量流量为 $1.5 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$ 时, 电池整体温度在各个时间点都是最低的。

5 结论

为了减小锂离子动力电池在放电过程中的最高温度和局部温差, 本研究设计了一种基于微通道冷板的电池热管理系统, 并研究了高放电倍率、冷却液温度、进口质量流量等对电池组冷却性能的影响, 得到如下结论:

1) 锂离子电池组在高倍率, 即 $5\text{C} \sim 9\text{C}$ 放电倍率工况下, 最高温度为 304.351 K , 最低温度为 300 K , 温差为 4.351 K , 在合理范围内, 达到预期冷却效果。 5C 放电工况下, 电池最高温度为 301.942 K , 温差为 1.942 K , 冷却效果最好。

2) 随着冷却液温度降低, 电池组最高温度也逐渐降低, 但电池温差没有明显降低。相反温度越低, 电池温差越大, 且呈现出一定的线性关系。当冷却液温度为 296 K 时, 电池最高温度为 297.662 K , 电池温差为 1.662 K 。

3) 锂离子电池组的最高温度随着进口质量流量的增加而不断下降, 当质量流量为 $3 \times 10^{-7} \text{ kg/s}$ 时, 电池最高温度为 306.413 K ; 当质量流量增加到 $1.5 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$ 时, 电池最高温度降至 302.557 K , 此时的电池温差为 4.407 K 。并且随着进口质量流量的增加, 电池组温差逐渐降低。

4) 根据上述电池的最高温度以及温差数据, 可供工程设计参考的适宜放电倍率为 5C , 冷却液温度为 296 K , 进口质量流量为 $1.5 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$ 。

参考文献:

- [1] PANCHAL S, DINCER I, AGELIN-CHAAB M, et al. Transient Electrochemical Heat Transfer Modeling and Experimental Validation of a Large Sized LiFePO₄/Graphite Battery[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 109: 1239–1251.
- [2] LI S, KIRKALDY N, ZHANG C, et al. Optimal Cell Tab Design and Cooling Strategy for Cylindrical Lithium-Ion Batteries[J]. Journal of Power Sources, 2021, 492: 229594.
- [3] SURESH PATIL M, SEO J H, LEE M Y. A Novel Dielectric Fluid Immersion Cooling Technology for Li-Ion Battery Thermal Management[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 229: 113715.
- [4] WANG Y N, WANG Z K, MIN H T, et al. Performance Investigation of a Passive Battery Thermal Management System Applied with Phase Change Material[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 35: 102279.
- [5] LIU Y Q, LIAO Y G, LAI M C. Transient Temperature Distributions on Lithium-Ion Polymer SLI Battery[J]. Vehicles, 2019, 1(1): 127–137.
- [6] CELEN A, KALKAN O. Numerical Investigation on the Usage of Finned Surface in Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxides Batteries by Using Air Cooling Method[J]. Energy Storage, 2021, 3(1): e216.
- [7] BENABDELAZIZ K, LEBROUHI B, MAFTAH A, et al. Novel External Cooling Solution for Electric Vehicle Battery Pack[J]. Energy Reports, 2020, 6: 262–272.
- [8] SUN Z Q, FAN R J, ZHENG N B. Thermal Management of a Simulated Battery with the Compound Use of Phase Change Material and Fins: Experimental and Numerical Investigations[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 165: 106945.
- [9] MEVAWALLA A, PANCHAL S, TRAN M K, et al. Mathematical Heat Transfer Modeling and Experimental Validation of Lithium-Ion Battery Considering: Tab and Surface Temperature, Separator, Electrolyte Resistance, Anode-Cathode Irreversible and Reversible Heat[J]. Batteries, 2020, 6(4): 61.
- [10] AMALESH T, NARASIMHAN N L. Introducing New Designs of Minichannel Cold Plates for the Cooling of Lithium-Ion Batteries[J]. Journal of Power Sources, 2020, 479: 228775.
- [11] ZHANG H Y, LI C S, ZHANG R J, et al. Thermal Analysis of a 6s4p Lithium-Ion Battery Pack Cooled by Cold Plates Based on a Multi-Domain Modeling Framework[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 173: 115216.
- [12] KOSCH S, RHEINFELD A, ERHARD S V, et al. An Extended Polarization Model to Study the Influence of Current Collector Geometry of Large-Format Lithium-Ion Pouch Cells[J]. Journal of Power Sources, 2017, 342: 666–676.
- [13] NEWMAN J, TIEDEMANN W. Potential and Current Distribution in Electrochemical Cells: Interpretation of the Half-Cell Voltage Measurements as a Function of Reference-Electrode Location[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1993, 140(7): 1961–1968.
- [14] SRINIVASAN V, NEWMAN J. Design and Optimization of a Natural Graphite/Iron Phosphate Lithium-Ion Cell[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2004, 151(10): A1530–A1538.
- [15] KWON K H, SHIN C B, KANG T H, et al. A Two-Dimensional Modeling of a Lithium-Polymer Battery[J]. Journal of Power Sources, 2006, 163(1): 151–157.
- [16] KIM U S, SHIN C B, KIM C S. Modeling for the Scale-Up of a Lithium-Ion Polymer Battery[J]. Journal of Power Sources, 2009, 189(1): 841–846.
- [17] CHACKO S, CHUNG Y M. Thermal Modelling of Li-Ion Polymer Battery for Electric Vehicle Drive Cycles[J]. Journal of Power Sources, 2012, 213: 296–303.
- [18] ALLU S, KALNAUS S, ELWASIF W, et al. A New Open Computational Framework for Highly-Resolved Coupled Three-Dimensional Multiphysics Simulations of Li-Ion Cells[J]. Journal of Power Sources, 2014, 246: 876–886.
- [19] GU H. Mathematical Analysis of a Zn/NiOOH Cell[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1983, 130(7): 1459.
- [20] SEONG KIM U, YI J, SHIN C B, et al. Modeling the Dependence of the Discharge Behavior of a Lithium-Ion Battery on the Environmental Temperature[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2011, 158(5): A611.

(责任编辑: 廖友媛)