



基于VCALB的电池模组液冷管道优化设计

王 翔, 徐 晶, 丁亚军, 丁 凡, 徐 鑫
(扬州大学, 江苏 扬州 215000)

摘 要: 在电动汽车的电池热管理中, 电池模组的最高温度(maximum temperature in battery module, MTBM)和最大温差(maximum temperature difference in battery module, MTDBM)是衡量散热系统最重要的指标。液冷是一种高效的散热方式, 但也有温差过大的缺陷。因此, 通过仿真研究了入口冷却液流量(inlet coolant flow, ICF)、入口温度(inlet coolant temperature, ICT)、液冷管道的流道高度(liquid-cooled pipe flow channel height, LFCH)以及液冷管道与电池的接触角度(contact angle between liquid cooling pipe and battery, CALB)对 MTBM 和 MTDBM 的影响, 利用变接触角度(variable contact angle between liquid cooling pipe and battery, VCALB)对电池模组液冷管道的结构进行优化。结果表明: 优化后 MTBM 由 40.50 °C 降低至 38.47 °C, 降低了 5.01%; MTDBM 由 6.07 °C 降低到 3.60 °C, 降幅达 40.69%。增加 ICF 可以降低 MTBM 和 MTDBM, 但降低幅度逐渐减小, 且会增大压差。增大 LFCH、CALB 以及降低 ICT 均能一定程度地降低 MTBM, 但冷却效果的提升不断减小, 且会导致模组内温差过大的问题。本研究针对电池模组中的液冷散热系统温差过大的问题提供一种有效的解决方案, 有利于液冷在电池热管理方向的进一步发展。

关键词: 锂电池; 热力学仿真; 液冷散热; 温差

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0448

中图分类号: TM 912

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2022) 02-547-06

Optimal design of liquid cooling pipeline for battery module based on VCALB

WANG Xiang, XU Jing, DING Yajun, DING Fan, XU Xin
(Yangzhou University, Yangzhou 215000, Jiangsu, China)

Abstract: In the battery thermal management of electric vehicles, the maximum temperature (MTBM) and maximum temperature difference (MTDBM) of a battery module are the most important indicators to measure the heat dissipation system. Liquid cooling is an efficient way of dissipating heat, but it also has the defect of excessive temperature difference. Therefore, the influence of inlet coolant flow (ICF), inlet coolant temperature (ICT), liquid-cooled pipe flow channel height (LFCH), and contact angle between the liquid cooling pipe and battery (CALB) on the MTBM and MTDBM is studied through simulation, and the structure of the liquid cooling pipeline of the battery module is optimized by using the variable contact angle between the liquid cooling pipe and battery. The results show that the MTBM of the optimized battery module is reduced from 40.50 °C to 38.47 °C, a decrease of 5.01%, and the MTDBM is reduced from 6.07 °C to 3.60 °C, a decrease of 40.69%. Increasing the ICF can reduce the MTBM and MTDBM, but the decrease of MTBM and MTDBM is gradual and will increase the

收稿日期: 2021-08-27; 修改稿日期: 2021-09-09。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52105344), 江苏省六大人才高峰项目 (2015-ZBZZ-035)。

第一作者: 王翔 (1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电池热管理, E-mail: 549253463@qq.com; 通讯作者: 徐晶, 副教授, 研究方向为电动汽车热管理, E-mail: jingxu@yzu.edu.cn。

pressure difference. Increasing the LFCH and CALB and reducing the ICT can all reduce the MTBM to a certain extent; however, the improvement of the cooling effect continues to decrease, and it will cause the problem of excessive temperature difference in the module. Therefore, this research provides an effective solution to the problem of excessive temperature difference in the liquid cooling system in the battery module, which is conducive to the further development of liquid cooling in the direction of battery thermal management.

Key words: lithium battery; thermodynamic simulation; liquid-cooling heat dissipation; temperature difference

电池模组中各电池内部温度的均匀性是衡量电池性能的一项重要指标,温度差异越大,各电池模块之间内阻及容量差异就越大^[1-3]。长时间循环使用之后,由于老化程度不同,极易出现电池过充过放现象,从而降低电池的寿命与性能,且更有可能导致安全问题^[4]。因此,动力电池并不能仅依靠优化单体电池的内在各项属性,更需要匹配有相应的冷却系统,控制电池模组温度,才能使其在最合适的温度范围内工作^[5]。学者们建立了大量热力学模型且应用到电池热管理的研究中^[6-7]。林裕旺等^[8]将复合相变材料用于电池模组的热管理,并通过仿真证明在40℃下以3C放电的工况下可以将MTBM控制在50℃,MTDBM不超过1℃。袁航等^[9]与千年纪等^[10]通过在液冷管道上添加铝块来增加接触面积的方法来提高电池模组内温度的均匀性,结果发现该方法可以有效降低电池模组内的温差。李潇等^[11]提出一种对角双向流道的液冷板结构,结果表明该结构最多可将温差降至1℃。冯能莲等^[12]开发了一种蜂巢式液冷电池模组,并通过在40℃下以1C进行放电的实验,发现即使流量大于1L/min,电池模组内的温差也小于5℃。

从上述研究可以发现,在液冷电池模组中过大的温差是限制其发展的瓶颈。因此,本文从ICF、ICT、LFCH以及CALB对散热性能的影响进行研究,采用VCALB对液冷板进行优化,降低MTBM的同时减小了MTDBM。

1 热仿真模型

1.1 数学模型

本文通过Bernard提出的生热率模型来计算产热率 Q ,表达式如下

$$Q = \frac{I}{V_b} \left[(U - U_0) + T \frac{dU_0}{dT} \right] \quad (1)$$

其中, I 是电流强度; V_b 是电池体积; U 是电池端电压; U_0 是开路电压; T 是电池温度; $\frac{dU_0}{dT}$ 是电压温度系数。

基于式(1)可以推导出正极端以及负极端的产热率 Q_e 为

$$Q_e = \frac{I^2 R_e}{V_e} \quad (2)$$

其中, R_e 是正极端或负极端的电阻; V_e 是正极端或负极端的体积。

基于式(1)也可以推导出极柱的产热率 Q_t 为

$$Q_t = \frac{I}{V_t} \left[IR_t + T \frac{dU_0}{dT} \right] \quad (3)$$

其中, R_t 是极柱电阻; V_t 是极柱体积。

冷却液的能量守恒公式为

$$\rho_w c_w \frac{\partial T_w}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w c_w \mathbf{v} T_w) = \nabla \cdot (k_w \nabla T_w) \quad (4)$$

其中, ρ_w 是冷却液密度; c_w 是冷却液比热容; T_w 是冷却液温度; k_w 是冷却液导热系数; \mathbf{v} 是冷却液速度矢量。

冷却液流动的质量守恒方程和动量守恒方程为

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (5)$$

$$\rho_w \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (6)$$

其中, P 是压强; μ 是冷却液运动黏度。

1.2 三维结构模型

本工作针对42个18650型圆柱锂电池以3P14S形式成组在30℃以2.5C进行放电的工况进行研究,该电池模组中的电池交错排布,如图1所示。其中将18650圆柱锂电池简化成由正极端、负极端、极柱三部分组成,且将各部分看作是由单一材料构成的均匀体。

1.3 仿真参数设置

本文针对不同ICF、ICT、LFCH以及CALB下电池模组的散热性能进行对比分析,具体见表1。

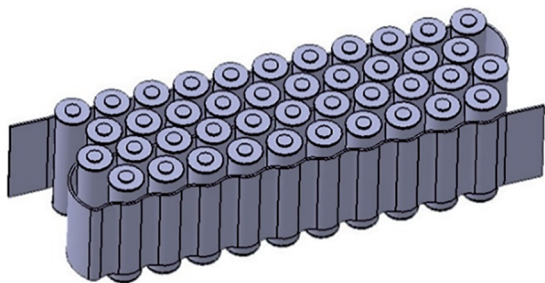


图1 电池模组结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of battery module structure

其中，电池模组的初始环境温度设置为 30 ℃，液冷板材料选用铝，热辐射系数值选定为 0.2，与液冷板不接触部分采用自然对流，冷却液选用 50% 的乙二醇水溶液。电池模组内各单体电池均从 SOC=100% 时以 2.5 C 的放电倍率恒流放电至额定截止电压 2.75 V。其中，单体电池的产热率是基于式(2)和式(3)编写出的 UDF 来设置的，具体方法在前期的研究^[13]中已有体现，本文不再赘述。电池与液冷板接触面积的换热系数的设置是基于式(4)~(6)得出。

表1 热力学仿真中变量参数的设置 Table 1 Setting of Variable Parameters in Thermodynamics Simulation				
项	ICF/(g/s)	ICT/℃	LFCH/mm	CALB/(°)
不同 ICF	5/10/15/20	25	50	65
不同 ICT	5	17.5/20/22.5/25	50	65
不同 LFCH	5	25	35/40/45/50	65
不同 CALB	5	25	50	60/65/70/75

1.4 实验验证

本次研究对象为 18650 型圆柱锂电池，实验台架包括 18650 型锂电池若干、1 个 330-00A 恒温箱、3 根 K 型热电偶、1 个 RS20K-C 热电偶温度变送器、1 个 TEC-80K 型大功率电子负载、1 个自制电池测试架、1 个电池内阻测试仪、2 个 USB 转 485 数据采集器以及一台笔记本电脑。330-00A 恒温箱用于模拟恒温环境，RS20K-C 热电偶温度变送器用于采集电池的表面温度，USB 转 485 数据采集器用于接收或发送信号，TEC-80K 型大功率电子负载用于对锂电池以不同放电倍率进行恒流放电，电池测试架用于固定电池，笔记本电脑用于采集处理数据，具体的性能参数如表 2 所示。

图 2 为单体电池热力学实验原理图。具体实验流程如下：首先将电池分别以 0.5 C 恒流充电至截

表2 实验仪器性能参数表 Table 2 Experimental instrument performance parameter table			
名称	型号	适用范围	精度
恒温箱	303-00A	室温 5~60 ℃	0.5%
大功率电子负载	TEC-80K	0~40 A(400 W)	0.5%
电池内阻测试模块	RC3561	0~200 mΩ	0.5%
热电偶温度变送器	RS20K-C	1 Hz	0.5%
K 型热电偶	TT-K-30	-200~260 ℃	0.4%

止电压 4.20 V，并在 25 ℃ 恒温环境下静置一小时后再进行后续实验。将电池固定在恒温箱内电池测试架上，通过温度采集模块对电池表面三个温度测试点进行监测。当三个测试点温度均与目标温度的误差在 1 ℃ 内时，分别在 25 ℃ 恒温环境下以 2.5 C 对电池恒流放电至截止电压 2.75 V。为了便于数据的分析处理，本文选用三个测试点的平均值作为测试结果。

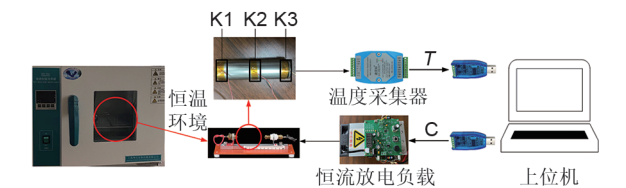


图2 热力学性能实验原理图
Fig. 2 Schematic diagram of thermodynamic performance experiment

图 3 为单体锂电池在 25 ℃ 以 2.5 C 恒流放电时仿真与实验的对比。从图中可知，通过实验对单体电池的热力学仿真模型进行验证，发现单体锂电池在放电过程中仿真温度与实验温度的最大绝对误差值为 2.8 ℃，最大误差率为 4.8%，满足实际使用的精度要求。因此可以推广到电池模组的热力学仿真模型中使用，并且具有较高的精度。

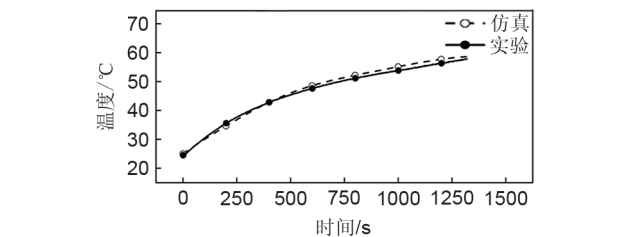
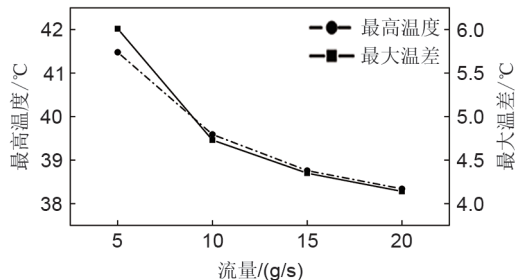


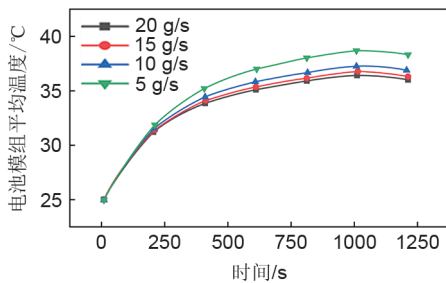
图3 单体锂电池仿真温度与实验温度的对比
Fig. 3 Comparison of simulated temperature and experimental temperature of single lithium battery

2 不同参数下的热仿真结果分析

从图4可知,当ICF为5、10、15、20 g/s时,MTBM分别为41.48、39.59、38.76、38.34 °C,MTDBM分别为6.01、4.73、4.35、4.14 °C。ICF每增加5 g/s,MTBM分别降低1.89、0.83、0.42 °C,MTDBM分别降低1.28、0.38、0.21 °C。由此可知,在一定范围内增加ICF会使得MTBM和MTDBM降低,但降低幅度不断减小且趋近于零。这是因为随着ICF的增加,冷却液带走的热量也趋近于一个极限值,过量地增加ICF不但对换热效率的提升很小,反而会使得流道进出口压差增大,增加冷却系统的工作负荷。



(a) MTBM和MTDBM对比图

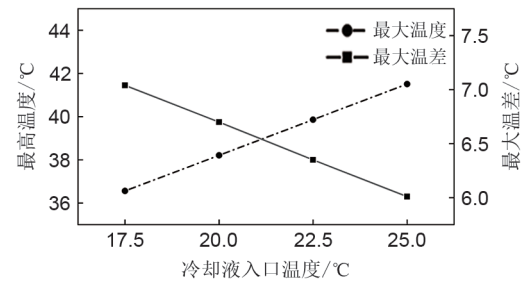


(b) 电池模组平均温度变化曲线

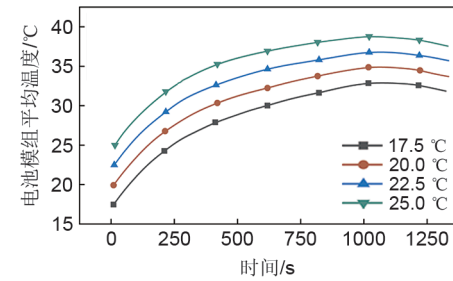
图4 不同ICF下的散热性能对比

Fig. 4 Comparison of heat dissipation performance under different ICF

从图5中可知,当ICT为25、22.5、20、17.5 °C时,MTBM分别为41.51、39.86、38.21、36.56 °C,MTDBM分别为6.01、6.35、6.70、7.04 °C。ICT每降低2.5 °C,MTBM均降低1.65 °C,但MTDBM分别升高0.34、0.35、0.34 °C。虽然降低ICT可以明显地降低MTBM,但也会导致MTDBM变大。冷却液温度越低,与换热界面的温差也就越大,换热效率也就越高,但会使得进出口处温差变大,导致出口处冷却液的换热效率要远低于入口处,使得电池模组内温差变大。



(a) MTBM和MTDBM对比图

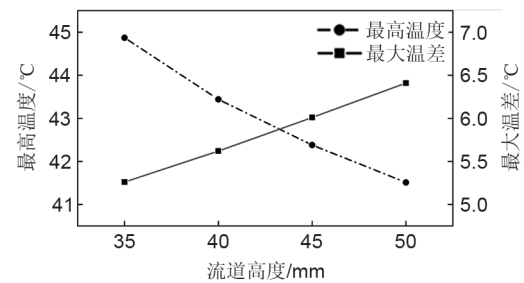


(b) 电池模组平均温度变化曲线

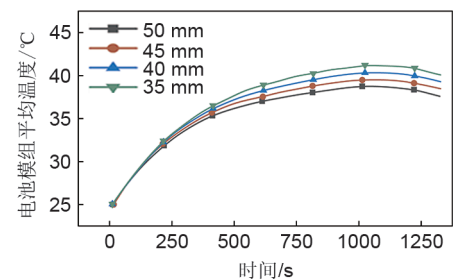
图5 不同ICT下的散热性能对比

Fig. 5 Comparison of heat dissipation performance at different ICT

从图6中可知,当LFCH为35、40、45、50 mm时,MTBM分别为44.87、43.44、42.38、41.51 °C,MTDBM分别为5.26、5.62、6.01、6.41 °C。LFCH每增加5 mm,MTBM分别降低1.43、1.06、0.87 °C,但MTDBM分别升高0.36、0.39、0.40 °C。增加LFCH可以降低MTBM,但随着LFCH的增加,对



(a) MTBM和MTDBM对比图



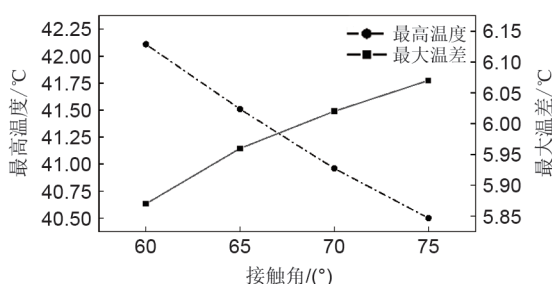
(b) 电池模组平均温度变化曲线

图6 不同流道高度下的散热性能对比

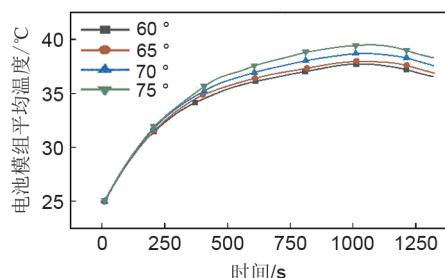
Fig. 6 Comparison of heat dissipation performance under different LFCH

换热效率的提升效果越来越差。这是因为增加LFCH,使得换热面积增加,因此散热量更大。LFCH的增加使得电池模组温度均匀性恶化,温差进一步扩大。

从图7中可知,当CALB为60°、65°、70°、75°时,电池模组内的MTBM分别为42.11、41.51、40.96、40.50℃,MTDBM分别为5.87、5.96、6.02、6.07℃。CALB每增加5°,MTBM分别降低0.60、0.55、0.46℃,MTDBM分别升高0.09、0.06、0.05℃。随着CALB的增大,MTBM不断降低,但与降低的温度值成反比,且温差会不断增加。这是因为增大CALB会增加蛇形管与电池表面的接触面积,从而提高散热效率,但也会导致冷却液在出入口温差过大的问题。



(a) MTBM和MTDBM对比图



(b) 电池模组平均温度变化曲线

图7 不同CALB下的散热性能对比

Fig. 7 Comparison of heat dissipation performance under different CALB

3 液冷管道优化

3.1 优化方法

通过上述研究发现,采用液冷系统进行散热,虽然能够有效控制电池的温升速度,但因液冷管道沿程较长,会造成电池组出现较大的温度差。在上述仿真分析中,电池模组的温差均大于4.6℃,需要进一步优化,以降低电池组单体电池之间的温差。由于改变ICF对温度控制温升有限,且增加流

量会提升水泵的泵压和能量损耗。然而增大LFCH、CALB或者降低ICT反而会使得温差进一步扩大。因此,通过适当降低冷却液上游吸收的热量,以此提升下游冷却液的换热效率。基于上述并综合考虑加工成本,本文选用VCALB对液冷管道进行优化。如图8所示,CALB按照冷却液流向从65°增大到75°,每一排均采用不同的CALB。

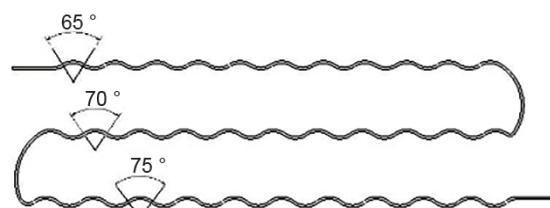


图8 VCALB液冷管道结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of VCALB liquid cooling pipeline structure

3.2 优化结果

图9为在环境温度为30℃、入口流量为5 g/s、入口温度为25℃、流道高度为50 mm时,CALB为75°和VCALB下电池模组以2.5 C进行放电的MTBM与MTDBM的对比。从图中可以看出,CALB为75°恒定值时的MTBM为40.50℃,MTDBM为6.07℃;优化后的VCALB时的MTBM为38.47℃,MTDBM为3.60℃。优化后的MTBM降低了5.01%,MTDBM降低了40.69%。因此,VCALB液冷管道在降低电池模组内温差方面比恒定CALB液冷管道更加优秀。

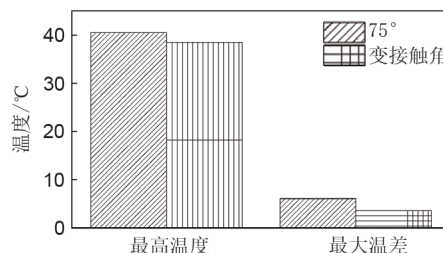


图9 优化前后散热性能对比

Fig. 9 Comparison of heat dissipation performance before and after optimization

4 结论

本文通过仿真研究了ICF、ICT、LFCH以及CALB对电池模组内MTBM和MTDBM的影响,并采用VCALB对电池模组液冷管道进行优化,结论如下。

(1) 在一定范围内增加 ICF、LFCH、CALB 可以减小 MTBM, 但超出范围后对换热效率的提升将趋近于零。

(2) 增加 LFCH、CALB 以及降低 ICT 在减小 MTBM 的同时, 会使得模组内的温差迅速升高。

(3) 采用 VCALB 液冷管道可以有效解决原有恒定 CALB 液冷管道电池模组内温差过大的问题, 在相同工况下温差降低了 40.69%。

参考文献

- [1] YANG X L, GAO X L, ZHANG F T, et al. Experimental study on temperature difference between the interior and surface of $\text{Li}[\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}]\text{O}_2$ prismatic lithium-ion batteries at natural convection and adiabatic condition[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 190: doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116746.
- [2] NI P Y, WANG X L. Temperature field and temperature difference of a battery package for a hybrid car[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2020, 20: doi: 10.1016/j.csite.2020.100646.
- [3] CAO J H, LING Z Y, FANG X M, et al. Delayed liquid cooling strategy with phase change material to achieve high temperature uniformity of Li-ion battery under high-rate discharge[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 450: doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.227673.
- [4] 牛志远, 王怀铷, 金阳, 等. 不同倍率下磷酸铁锂电池模组过充热失控特性研究[J]. *电力工程技术*, 2021, 40(4): 167-174.
NIU Z Y, WANG H R, JIN Y, et al. Overcharging and runaway characteristics of lithium iron phosphate battery modules at different rates[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2021, 40(4): 167-174.
- [5] ZHANG D, DEY S, TANG S X, et al. Battery internal temperature estimation via a semilinear thermal PDE model[J]. *Automatica*, 2021, 133: doi: 10.1016/j.automatica.2021.109849.
- [6] 李生红, 熊震, 秦国锋, 等. 锂离子电池热模型研究概述[J]. *时代汽车*, 2021(16): 99-101.
LI S H, XIONG Z, QIN G F, et al. Overview of research on thermal model of lithium-ion battery[J]. *Auto Time*, 2021(16): 99-101.
- [7] 王翔, 徐晶, 陈新文, 丁亚军, 徐鑫. 基于 VCHTC 的锂电池热力学精细化仿真[J/OL]. *储能科学与技术*, 2022, 11(1): 246-252.
WANG X, XU J, CHEN X W, DING Y J, XU X. Refined thermodynamic simulation of lithium battery based on VCHTC[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(1): 246-252.
- [8] 林裕旺, 王惜慧, 郭剑成, 等. 基于复合相变材料的电池包热管理研究[J]. *电源技术*, 2021, 45(7): 881-884, 940.
LIN Y W, WANG X H, GUO J C, et al. Research on thermal management of battery pack based on composite phase change material[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2021, 45(7): 881-884, 940.
- [9] 袁航, 高强. 变接触面圆柱形锂电池组液冷散热热特性[J]. *电源技术*, 2021, 45(3): 302-304.
YUAN H, GAO Q. Thermal characteristics of liquid cooling of cylindrical lithium battery with variable contact surface[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2021, 45(3): 302-304.
- [10] 千年妃, 孙长乐, 刘东旭, 等. 变接触面液冷系统的电池模组温度一致性研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2020, 47(6): 34-42.
GAN N F, SUN C L, LIU D X, et al. Study on temperature consistency of battery module for liquid cooling system with variable contact surface[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2020, 47(6): 34-42.
- [11] 李潇, 陈江英, 李翔晟. 基于新型流道液冷板的动力电池热管理性能[J]. *电源技术*, 2020, 44(10): 1438-1442.
LI X, CHEN J Y, LI X S. Study on thermal management performance of power batteries based on new flow passage liquid cooling plate[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2020, 44(10): 1438-1442.
- [12] 冯能莲, 董士康, 李德壮, 等. 蜂巢式液冷电池模块传热特性的试验研究[J]. *汽车工程*, 2020, 42(5): 658-664.
FENG N L, DONG S K, LI D Z, et al. Experiment study on heat transfer characteristics of honeycomb liquid cooled battery module[J]. *Automotive Engineering*, 2020, 42(5): 658-664.
- [13] 丁亚军, 徐晶, 丁凡, 等. 圆柱锂电池表面自然对流换热系数仿真估算[J]. *电源技术*, 2020, 44(9): 1256-1259.
DING Y J, XU J, DING F, et al. Simulation and estimation of natural convection heat transfer coefficient on surface of cylindrical lithium ion batteries[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2020, 44(9): 1256-1259.