

文章编号: 1671-6612 (2023) 04-503-09

# 快充条件下考虑 汇流排生热的电池模组热管理研究

敬卓鑫<sup>1</sup> 彭宇明<sup>1,2</sup> 黄港<sup>1</sup> 任洪兵<sup>1</sup> 湛帆<sup>1</sup> 杭玉麟<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

2. 新型驱动技术教育部工程中心 成都 610031)

**【摘要】** 建立了一款3.7V/50Ah三元锂电池的电化学-热耦合充电模型,通过仿真和实验的结合验证了模型的正确性,电芯实验和仿真温度最大相对误差为2.04%,电芯实验和仿真电压绝对误差控制在0.1V以内。在此基础上建立了考虑汇流排生热影响的模组生热模型,研究汇流排生热对模组温度场的影响规律,针对水冷板布置在模组底面的原冷却系统对于模组顶部区域的冷却效果不足对其进行改进,提出将冷却板布置在模组侧面,并且将冷却管道形状从蛇形改为螺旋形,分析两种冷却管道条件下的冷却效果,随后分析冷却液流速对模组温度场的影响,确定冷却液流速为0.5m/s时最佳。最后设计的冷却系统模组汇流排体平均温度降低了16.873℃,模组顶部表面平均温度降低了14.353℃,模组电芯体平均温度降低了13.501℃。

**【关键词】** 三元锂电池; 电化学热耦合模型; 汇流排; 液体冷却系统

中图分类号 TK124 文献标识码 A

## Study on Thermal Management of Battery Module Considering Heat Generation from Busbars under Fast Charging Conditions

Jing Zhuoxin<sup>1</sup> Peng Yuming<sup>1,2</sup> Huang Gang<sup>1</sup> Ren Hongbin<sup>1</sup> Chen Fan<sup>1</sup> Hang Yulin<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031;

2. Engineering Center of New Drive Technology, Ministry of Education, Chengdu, 610031)

**【Abstract】** In this paper, an electrochemistry-thermal coupling charging model of 3.7V/50Ah ternary lithium battery is established. The correctness of the model is verified by the combination of simulation and experiment. The maximum relative error of cell experiment and simulation temperature is 2.04%, and the absolute error of cell experiment and simulation voltage is controlled within 0.1V. On this basis, a module heat generation model considering the heat generation effect of the busbars was established to study the influence of busbar heat generation on the temperature field of the module. In order to improve the cooling effect of the original cooling system where the water-cooled plate was placed on the bottom surface of the module on the top area of the module, it was proposed to arrange the cooling plate on the side of the module and change the shape of the cooling pipeline from serpentine to spiral, and analyze the cooling effect under two different cooling pipeline conditions. Subsequently, the impact of coolant flow rate on the temperature field of the module was analyzed, and it was determined that the optimal coolant flow rate was 0.5m/s. The average temperature of the bus body of the final designed cooling system module decreased by 16.873℃, the

作者简介: 敬卓鑫 (1998-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 496828475@qq.com

通讯作者: 彭宇明 (1970-), 男, 硕士, 副教授, E-mail: 2508376314@qq.com

收稿日期: 2023-03-03

average surface temperature of the module top decreased by 14.353 °C , and the average temperature of the module cell body decreased by 13.501 °C .

【Keywords】 Ternary lithium battery; Electrochemical thermal coupling model; Busbar; Liquid-cooled system

### 0 引言

发展新能源汽车是我国从汽车大国迈向汽车强国的必由之路，是应对气候变化、推动绿色发展的战略举措。随着电动汽车行业的不断发展，人们对于汽车的续航和动力性要求不断的提高，因此需要更大容量的电池串并连接来满足需求<sup>[1-3]</sup>。作为动力电池模组重要的连接件，汇流排在大电流工况下会产生大量的焦耳热，如果不能对模组顶部温度进行有效的散热，模组电池温度不均衡性加剧，影响整个模组的工作性能，严重的会引发热失控，进而影响驾驶人的人身安全。余剑武<sup>[4]</sup>等人研究了汇流排结构，汇流排焊缝的宽度和焊缝位置等对汇流排温升以及电池均衡性的影响。结果发现增大汇流排厚度能显著的提升汇流排的过载能力。张万良<sup>[5]</sup>等人运用电热耦合模型研究汇流排的厚宽比和焊接位置等因素对汇流排温度场的影响，以及汇流排的厚度变化对模组温度场的影响，研究表明，焊接位置采用对称式时汇流排的温度场分布更均匀，当汇流排的截面面积不变时，厚宽比越大，电池模组的最高温度越大。

随着电动汽车的不断发展，为了解决充电慢的问题，国内外众多车企均开展了高功率快充技术的研究。因此随着快充技术的不断普及，整个模组的充电电流是非常大的，这样会造成汇流排产生大量的焦耳热，而且方形铝壳电池模组温度监控点多布置在汇流排表面，汇流排的温度过快升高，也会造成电池系统提前出现功率限制故障，进而影响用户体验，甚至存在安全隐患<sup>[6]</sup>。然而调研发现，关于电池模组和电池包层面的热管理多数不考虑汇流排生热对模组温度场的影响，而且如今关于汇流排的研究主要集中在放电工况。

针对上述情况，本文以某三元电池为研究对象，建立一款 3.7V/50Ah 三元电芯电化学-热耦合充电模型，在此基础上建立电池模组和汇流排温度场耦合模型，分析在汇流排影响下电池模组温度场分布规律，研究汇流排厚度、汇流排截面厚宽比等因素对模组温度场影响，同时对分布在模组底部的冷却系统进行优化，研究将冷却板布置在侧面、不

同冷却管道结构和入口流量对冷却效果的影响。从而对考虑汇流排生热影响的电池模组冷却系统进一步优化改进。

### 1 电化学-热耦合模型建立

本文以某方形三元电芯为研究对象，建立其电化学-热耦合模型。电化学热耦合模型根据多孔电极和浓溶液理论建立，其沿着厚度方向进行区分依次包含负极集流体、负极电极、隔膜、正极电极和正极集流体。电化学热耦合模型中的参数主要有电芯的结构设计参数、随温度变化的动态参数和热模型中的对流换热系数等。

其中电芯的结构参数和动态参数参考相同电池体系文献，对流换热系数通过理论计算公式计算出初始对流换热系数，后续结合试验数据不断进行修正。电化学热耦合参数<sup>[7-9]</sup>取值如表 1 所示，电芯的基本参数如表 2 所示。其中液相的扩散系数和液相电导率如公式（1）~（2）所示，电芯的三维模型和实物如图 1 所示。

表 1 电化学-热耦合参数

Table 1 Electrochemical thermal coupling parameters

参数	正极	隔膜	负极
固相体积分数	0.547		0.65
液相体积分数	0.332	0.5307	0.23
电解质浓度 $C_e$ /mol·m <sup>-3</sup>	1200	1200	1200
电极厚度 $L$ /μm	61	13	73
颗粒半径 $r_p$ /μm	6.32		9.93
扩散系数 $D_s$ /m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>	1e <sup>-14</sup>		1.4523e <sup>-13</sup>
反应常数 $k$ /m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>	5e <sup>-10</sup>		2e <sup>-11</sup>
固相电导率 $\sigma$ /S·s <sup>-1</sup>	3.8		100
传递系数 $\alpha$	0.5		0.5
锂离子迁移数 $t_+^0$	0.363	0.363	0.363
平均密度 kg/m <sup>3</sup>		2420	
平均比热容 J/(kg·K)		1412	
换热系数 W/(m <sup>2</sup> ·K)		8	

$$D_e = 10^{(-8.43 - \frac{54}{T - 229 - 5e^{-3} * C_e} - 2.2e^{-4} * C_e)} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \sigma_e = & 1.2544e^{-4}C_e(-8.2488+0.053248T-2.9871e^{-5}T^2 \\ & +0.0026235C_e-9.3063e^{-6}C_eT+8.069e^{-9}C_eT \\ & +2.22002e^{-7}C_e^2-1.765e^{-10}C_e^2T) \end{aligned} \quad (2)$$

本文分别在电池的电化学模型和热模型上采用了一维和三维几何模型。将在锂离子电池模块中计算出的整个电池的平均生热率输入到电池的三维热模型中作为其生热源, 再将热模型计算出的整个电池平均温度反馈回电化学模型, 实现模型的双向耦合。

表 2 试验电芯参数

Table 2 Test cell parameters

参数	工作温度区间 /°C	标称电压 /V	最大充电倍率 /C	标称容量 /Ah	充放电截止电压 /V
数值	-20~55	3.7	1	50	4.3/2.75

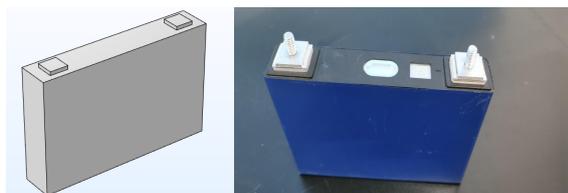


图 1 电芯三维模型和实物图片

Fig.1 Three-dimensional model and physical picture of cell

## 2 模型验证

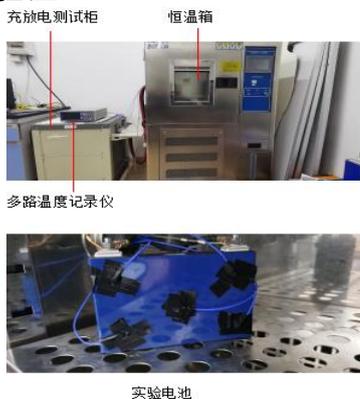


图 2 试验平台

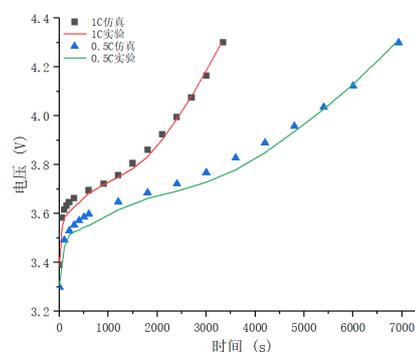
Fig.2 Test platform

为了验证模型的准确性, 实验采用了某公司生产的 CT-4001-5V300A-NA 型电池充放电测试柜、

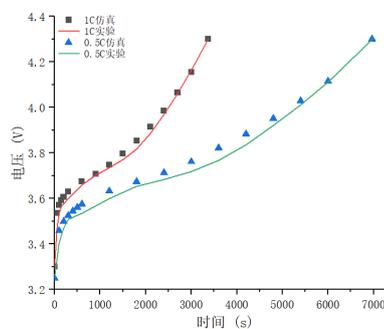
东莞泓进检测仪器公司生产的 HJ-GD91 型的高低温度试验箱、东莞市科联电子有限公司生产的 SH-X 型号的多路温度记录仪。且将 K 型针式端子热电偶按照如图 2 所示分布在电池表面。仿真利用 COMSOL Multiphysic 对电芯模型进行数值分析。对电芯分别在 20°C、25°C、30°C 时恒流充电的电压和温度数据进行对比, 验证电化学-热耦合模型的准确性。

### 2.1 不同工况电压验证

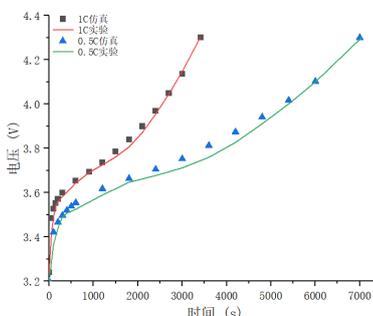
电化学模型的电压验证如图 3 所示, 分析图像可知: 在 20°C、25°C、30°C 时充电电压的仿真和实验数据展现出了很好的一致性, 在三种不同温度下电压的最大绝对误差均不超过 0.1V。



(a) 20°C 充电电压曲线



(b) 25°C 充电电压曲线



(c) 30°C 充电电压曲线

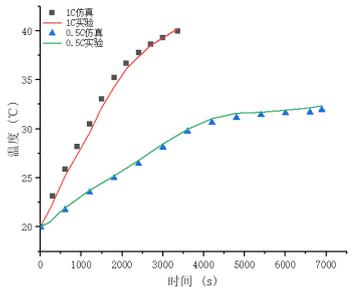
图 3 不同环境温度下充电电压验证曲线

Fig.3 Verification curve of charging voltage at different

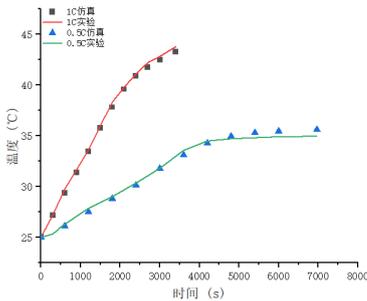
ambient temperatures

2.2 不同工况温度验证

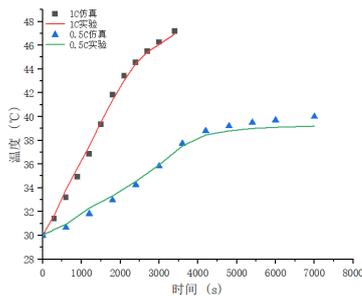
模型温度验证如图 4 所示,分析结果可以看出在不同的环境温度情况下实验和仿真温度曲线基本吻合。在 30℃环境温度下,充电最大相对误差为 2.04%, 25℃环境温度下,仿真和实验数据最大相对误差为 1.85%,而在 20℃环境温度下充电过程仿真和实验温度最大相对误差只有 1.236%。总的来说,该模型具有较好的精度,后续模组的建模也将沿用该模型。



(a) 20℃充电温度曲线



(b) 25℃充电温度曲线



(c) 30℃充电温度曲线

图 4 不同环境温度下充电温度验证曲线

Fig.4 Verification curve of charging temperature at different ambient temperatures

3 考虑汇流排生热的模组仿真

3.1 模组三维模型

研究采用市面上某款动力电池模组,模组的电芯排布采用 5P4S 的方式,电芯之间保留 3mm 的间

隙,为了减少计算量,本文的模组模型只保留电芯和汇流排,模组的简化模型如图 5 所示。

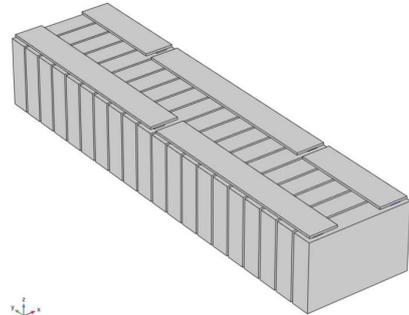
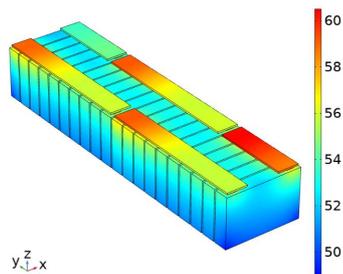


图 5 模组三维模型图

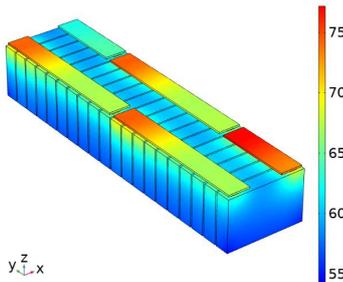
Fig.5 Three-dimensional model

3.2 模组温度场仿真

本研究通过 COMSOL Multiphysic 多物理场仿真软件对动力电池模组温度场进行仿真,其中汇流排的温度通过加入电场边界条件进行计算,通过电磁热多物理场接口,将动力电池模组的温度和汇流排进行耦合,研究考虑汇流排温度影响的情况下,动力电池模组电芯体平均、模组上表面平均温度的变化。汇流排采用铝材料,厚度为 3mm,宽度为 40mm,长排长度为 290mm,短排长度为 140mm。本研究仿真模组 1C、1.5C、2C 条件下温度场分布。仿真环境温度为 25℃,三种工况下汇流排对应电流大小为 250A、375A、500A。模组的仿真温度场分布如图 6 所示。



(a) 1C 工况模组温度场分布



y, z, x

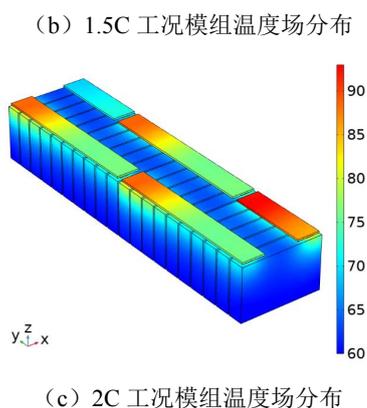


图 6 模组仿真温度场云图

Fig.6 Module simulation temperature field nephogram

分析可得, 恒流充电结束时, 随着充电倍率的提高, 汇流排温度也随之上升, 汇流排的温度对电池模组的温升影响变大, 特别是模组上部分和汇流排接触的电芯部分。图 7 所示为模组温度场数据图, 在 1C 工况下, 汇流排的体平均温度达到了 56.823°C, 造成模组电芯体平均温度达到 52.999°C, 模组顶部表面平均温度达到 54.467°C。1.5C 工况下, 汇流排的体平均温度达到了 66.805°C, 造成模组电芯体平均温度达到 57.886°C, 模组顶部表面平均温度达到 61.048°C。在 2C 工况条件下, 汇流排的体平均温度达到了 77.747°C, 造成模组电芯体平均温度达到 62.029°C, 模组顶部表面平均温度达到 67.264°C。

由于模组温度监控点多布置在汇流排表面, 在高倍率充电过程中, 模组顶部温度受到汇流排温度影响较大, 容易造成电池系统提前出现功率限制故障, 存在严重安全隐患。

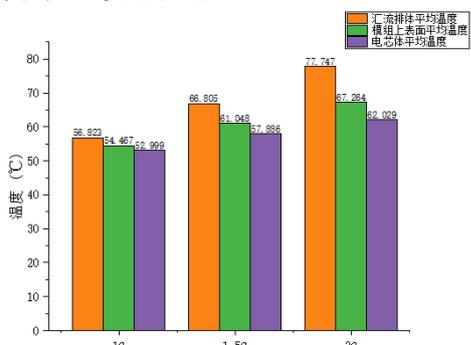


图 7 模组温度场仿真

Fig.7 Module temperature field simulation

### 3.3 汇流排厚度对模组温度场分布影响

研究环境温度为 25°C, 充电倍率为 1C 时, 不同汇流排厚度对于汇流排温度以及整个模组温度

场的影响, 此时汇流排的长度宽度不变, 汇流排的厚度分别设置为 1mm、2mm、3mm、4mm、5mm 和 6mm 进行仿真。图 8 为汇流排不同厚度时汇流排的体平均温度变化图, 图 9 为不同汇流排厚度变化对模组电芯体平均温度的影响图, 图 10 为不同汇流排厚度对于模组电芯上表面平均温度的影响图。

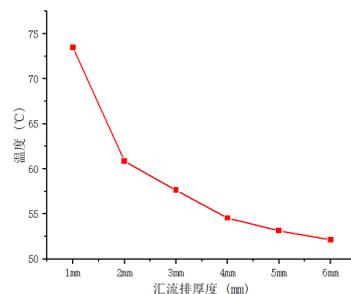


图 8 汇流排不同厚度汇流排体平均温度图

Fig.8 Average temperature diagram of busbars body with different thickness

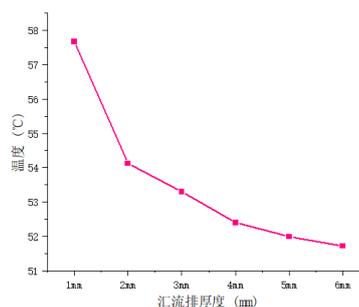


图 9 汇流排不同厚度模组电芯体平均温度图

Fig.9 Average temperature diagram of cells with different thickness of busbars

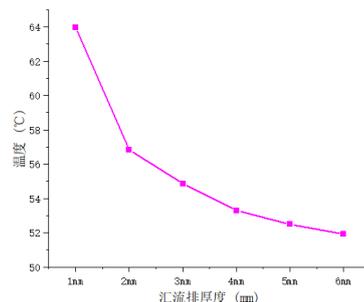


图 10 汇流排不同厚度模组电芯上表面平均温度图

Fig.10 Average temperature diagram of upper surface of module cells with different thickness of busbars

从图中分析可知, 随着汇流排厚度的增加, 汇流排温度、模组电芯上表面温度和模组电芯体平均温度都在不断下降, 当汇流排的厚度达到 3mm 时, 随着汇流排厚度增加, 虽然模组电芯体平均温

度、汇流排体平均温度和模组电芯上表面温度都在降低，但是再继续增加汇流排厚度，模组温度下降趋势趋于缓和，此时再增加汇流排厚度不仅模组温度降低不够明显，而且由于汇流排厚度的增加，汇流排的成本也在增加。

### 3.4 汇流排厚宽比对模组温度场分布影响

研究在 1C 工况下，环境温度为 25℃时，保持汇流排的长度和横截面积不变，长汇流排的长度为 290mm，短汇流排的长度为 140mm，汇流排的截面积为 120mm<sup>2</sup>，研究汇流排的厚宽比改变时对于模组温度场分布的影响。图 11 所示为不同汇流排厚宽比时汇流排体平均温度的对比图，图 12 所示为不同汇流排厚宽比时模组电芯上表面平均温度对比图，图 13 所示为不同汇流排厚宽比时模组电芯体平均温度对比图。研究汇流排的厚宽比对模组温度场分布的影响，主要是对比其结构设计在散热方面的差异。从图中可以看出，随着汇流排厚宽比的增加，汇流排体平均温度、模组电芯体平均温度和模组电芯上表面平均温度都会逐渐上升，因为随着汇流排的厚宽比增加，汇流排的散热面积也随之减小，进而造成汇流排的热量散发越来越慢，最终造成模组温升增加。

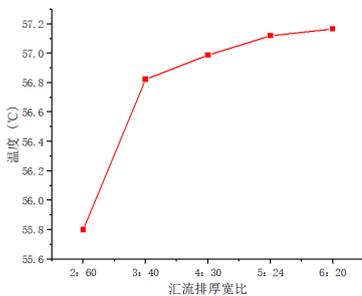


图 11 不同汇流排厚宽比汇流排体平均温度图

Fig.11 Average temperature diagram of busbars body with different thickness and width ratio

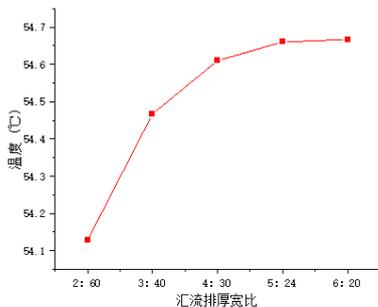


图 12 不同汇流排厚宽比模组电芯上表面平均温度图

Fig.12 Average temperature diagram of upper surface of

### modules with different thickness to width ratio of busbar

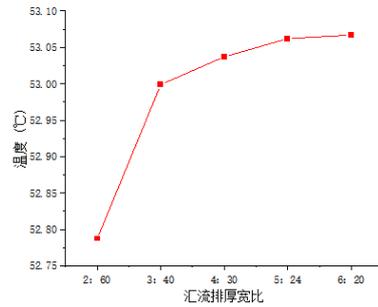


图 13 不同汇流排厚宽比模组电芯体平均温度图

Fig.13 Average temperature diagram of module core with different thickness to width ratio of busbars

## 4 模组冷却及冷却系统改进

对于方形电池液冷系统，大多数应用模组级别水冷板，并且一般放置在电池模组底部，由于汇流排温度对动力电池顶部的影响，再加上冷却系统分布在模组底部，进一步加剧了电芯内部温度不均衡性，所以对模组冷却系统有针对性的改进。

### 4.1 底部蛇形冷却系统冷却仿真分析

冷却系统为模组底部分布，冷却管道为“蛇形管道”，冷却板厚度为 6mm，冷却管入口尺寸为 4mm\*8mm，冷却介质采用水，入口流量为 0.3m/s，初始温度 25℃。冷却管道结构如图 14 所示。

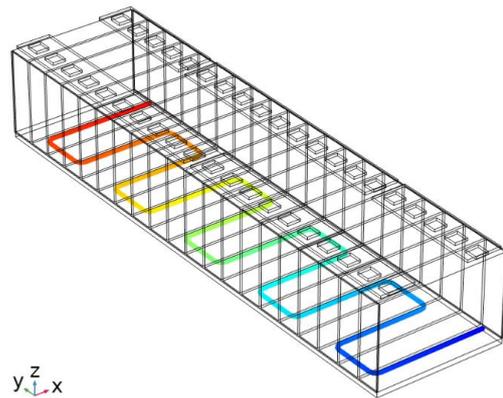


图 14 底部蛇形冷却系统布置示意图

Fig.14 Layout diagram of bottom serpentine cooling system

在 0.5C 工况时，电池模组冷却系统底部分布冷却效果对比如图 15 所示。汇流排体平均温度降低了 10.242℃，模组上表面平均温度降低了

10.218°C, 电芯体平均降低了 12.928°C。

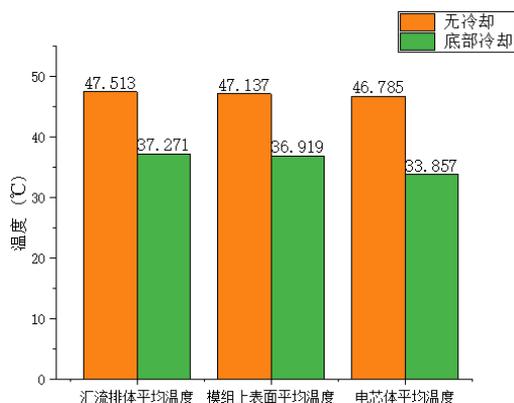


图 15 0.5C 底部蛇形冷却系统冷却效果对比图

Fig.15 Comparison of cooling effect of 0.5C bottom serpentine cooling system

充电倍率为 2C 时, 模组底部冷却效果对比如图 16 所示, 分析结果可知, 模组经过底部冷却后, 电芯体平均温度降低了 10.51°C, 但是模组上表面和汇流排体平均温度分别只降低 5.958°C、5.697°C。而且由于冷却管道处于底部, 电芯上下表面温差达到了 26.337°C。

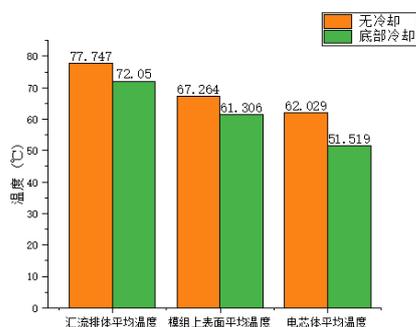


图 16 2C 底部蛇形冷却系统冷却效果对比图

Fig.16 Comparison of cooling effect of 2C bottom serpentine cooling system

通过以上分析可知, 在低倍率工况下, 底部冷却系统能够实现电池模组的有效冷却, 但是当电池模组处于快充工况下, 特别是在 2C 工况时, 冷却系统布置在底部虽然有一定的冷却效果, 但是还达不到动力电池适宜的温度区间, 而且并未减弱汇流排生热影响, 还加剧了电芯内部温度的不一致性, 造成电芯容量和寿命损失, 因此需对冷却系统进一步改进。为了实现快充条件下动力电池模组的有效冷却, 后续研究只考虑 2C 工况。

#### 4.2 侧面蛇形冷却系统仿真分析

针对冷却系统布置在底部时不能有效降低模

组顶部温升和加剧电芯内部温度不均衡问题, 将冷却系统布置在模组两侧, 冷却管道继续采用“蛇形管道”, 冷却系统如图 17 所示。冷却管道尺寸仍为 4mm\*8mm, 冷却板厚度为 6mm, 冷却介质为水, 冷却液和环境温度为 25°C, 冷却液流量为 0.3m/s。

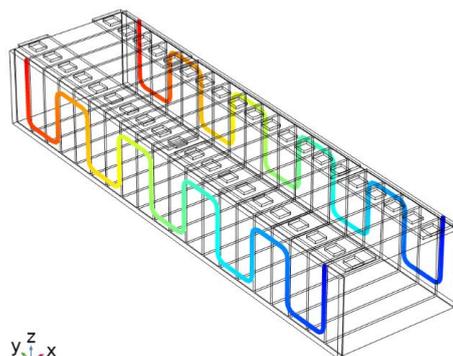
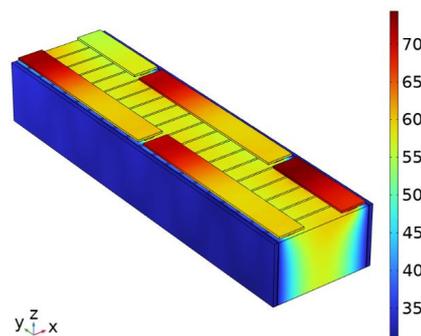
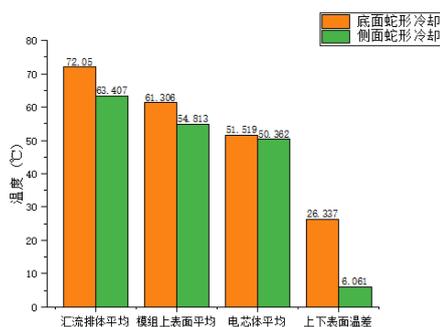


图 17 侧面蛇形冷却系统示意图

Fig.17 Schematic diagram of side serpentine cooling system



(a) 侧面蛇形冷却模组温度场云图



(b) 侧面蛇形冷却模组温度场云图

图 18 冷却系统布置位置前后仿真

Fig.18 Front and rear simulation of cooling system layout

仿真结果如图 18 所示, 根据分析可以看出, 将冷却管道布置在侧面汇流排和模组上表面温度

有较大的降低。汇流排的体平均温度为 63.407℃，相对于底面冷却降低了 8.643℃，模组上表面平均温度为 54.813℃，相对于底面冷却温度降低了 6.493℃，电芯的体平均温度为 50.362℃，相对于底面冷却温度降低了 1.157℃。模组电芯内部温度大大降低，顶部和底部温差降低了 20.276℃。

根据分析可得，将冷却系统布置在侧面相对于底面冷却，能更有效地降低汇流排焦耳热给模组温度场分布带来的影响，尤其能预防电芯内部温度不均衡性带来的电池老化等问题。

### 4.3 侧面螺旋形冷却系统仿真分析

为了进一步地降低汇流排焦耳热生热对模组温度分布的影响，将原有的冷却管道结构改变为“螺旋管道”，管道结构如图 19 所示。冷却板厚度仍然采用 6mm，管道尺寸 4mm\*8mm，冷却介质为水，冷却液温度和环境温度 25℃，入口流量 0.3m/s。

改进后的冷却仿真结果如图 20 所示，相比于侧面蛇形冷却，汇流排体平均温度降低了 1.408℃，模组顶部温度降低了 1.05℃，电芯体平均温度降低了 0.977℃，模组上下温差降低了 0.218℃。

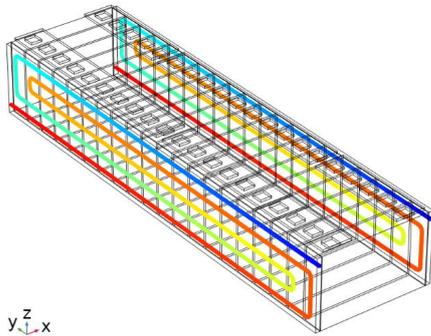


图 19 侧面螺旋形冷却系统示意图

Fig.19 Schematic diagram of side spiral cooling system

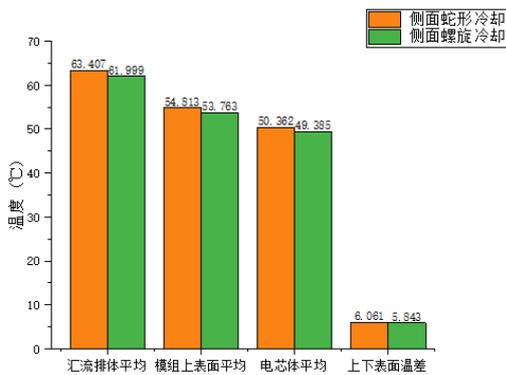


图 20 侧面两种冷却效果示意图

Fig.20 Schematic diagram of two side cooling effects

进一步研究入口流量大小对冷却效果的影响，其他条件不变，依次设置冷却液流量为 0.2m/s、0.3m/s、0.4m/s、0.5m/s、0.6m/s、0.7m/s 和 0.8m/s。仿真结果如图 21、22、23 所示。

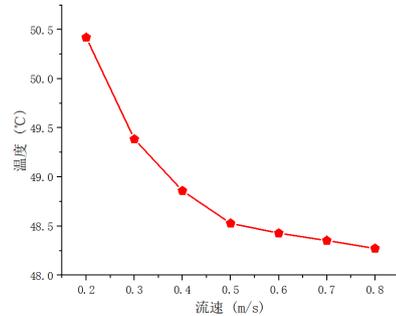


图 21 入口流量对电芯体平均温度的影响

Fig.21 Influence of inlet flow on average temperature of cells

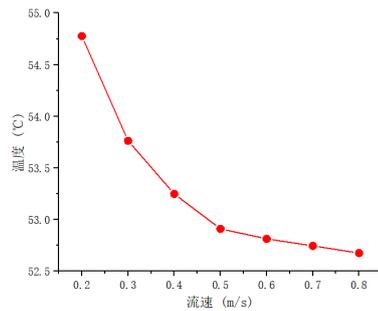


图 22 入口流量对模组上表面平均温度的影响

Fig.22 Influence of inlet flow rate on average temperature of upper surface of module

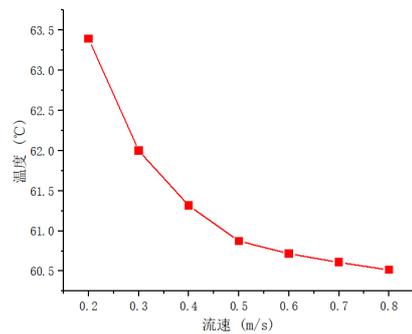


图 23 入口流量对汇流排体平均温度的影响

Fig.23 Influence of inlet flow on average temperature of busbars

从冷却液入口流量对模组温度影响分析可知，冷却液入口流量越大冷却效果越好，但是当冷却液流量达到 0.5m/s 时，冷却效果随着冷却流量的增加效果逐渐趋于平缓，此时再增加冷却液入口流量

不仅冷却效果变化不明显, 而且还会增加水泵的负荷, 所以综上所述选择入口流量为 0.5m/s 最佳。

根据前面的分析, 改进冷却系统布置在动力电池模组侧面, 采用螺旋冷却管道, 入口流量改为 0.5m/s, 仿真分析的动力电池模组温度场分布如图 24 所示。

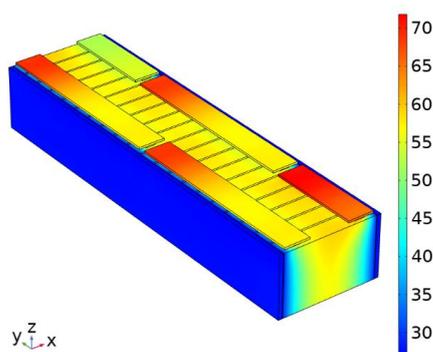


图 24 冷却系统改进后模组温度场分布图

Fig.24 Temperature field distribution diagram of module after improvement of cooling system

模组改进后的冷却系统和无冷却系统模组温度场仿真数据分布如图 25 所示, 根据计算可以得出相比于没有冷却的电池模组, 冷却系统改进后的汇流排体平均温度降低了 16.873℃, 模组顶部表面平均温度降低了 14.353℃, 电芯体平均温度降低了 13.501℃。总之, 改进后的冷却系统能对考虑汇流排生热的电池模组进行有效冷却。

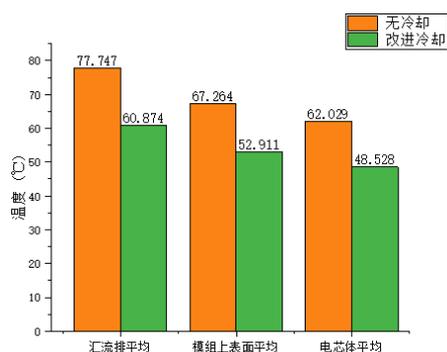


图 25 改进冷却系统和无冷却系统仿真数据对比

Fig.25 Comparison of simulation data between improved cooling system and non-cooling system

## 5 结论

本文利用 COMSOL Multiphysic 软件建立了一款 3.7V/50Ah 三元方形电池电化学-热耦合充电模型, 通过实验和仿真的方法验证了模型的准确性,

以该电芯模型为基础, 建立了考虑汇流排生热影响的动力电池模组温度场仿真模型, 证实了汇流排焦耳热对动力电池模组温度场分布的影响, 汇流排焦耳热加剧了动力电池模组上表面温升, 特别是和汇流排相连接的电芯位置。通过调整冷却系统布置位置, 冷却管道的结构以及冷却液入口流量对原有的冷却系统进行改进达到有效的冷却效果, 结论如下:

(1) 本文建立的电化学-热耦合模型通过仿真和实验相结合的方法证明了其准确性。平均温度仿真曲线和实验最大误差为 2.04%, 电压仿真和实验数据误差控制在 0.1V 以内, 该模型具有较高精度;

(2) 研究表明随着汇流排厚度不断增加, 汇流排产生的焦耳热也随之减小, 原因是汇流排厚度增加, 汇流排电阻减小; 同时在汇流排其他结构如横截面积等都不变的前提下, 汇流排厚宽比越大, 汇流排生热对模组温度场的影响越大, 这是由于随着汇流排的厚宽比增加, 汇流排的散热面积也随之减小, 进而造成汇流排的热量散发越来越慢, 最终造成模组温升增加。

(3) 利用仿真研究了底面冷却的弊端, 底面冷却虽然具有一定的冷却效果, 但是对动力电池模组温度场考虑汇流排生热的冷却效果有限, 并且还加剧了电池内部温度的不均衡性, 针对此结果将冷却系统布置在动力电池模组两侧, 将冷却管道改为“螺旋”形, 侧面螺旋冷却系统相比于底面冷却汇流排体平均温度降低了 10.051℃, 电池模组上表面平均温度降低了 7.543℃, 电芯体平均温度降低了 2.134℃。同时也减弱了电芯内部温度分布的不均衡性, 提高了电池模组工作性能。

(4) 针对侧面螺旋冷却系统研究冷却液入口流量对其冷却效果的影响, 依次研究流量为 0.2m/s、0.3m/s、0.4m/s、0.5m/s、0.6m/s、0.7m/s、0.8m/s 时的冷却效果, 最终确定 0.5m/s 时最佳。相比于无冷却模组, 改进后的模组汇流排汇流排体平均温度降低了 16.873℃, 模组顶部表面温度降低了 14.353℃, 模组电芯体平均温度降低了 13.501℃。

## 参考文献:

- [1] 沈兵, 张晓锋. 舰船电力系统矩形汇流排集肤效应的数值计算[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2008, 32(3): 537-539.

(下转第525页)