

# Analysis and optimization of air cooling performance of battery pack based on air volume regulated by filter plate

Guangxin CHU<sup>1,2,3</sup>, Mengtao YU<sup>1,2,3\*</sup>

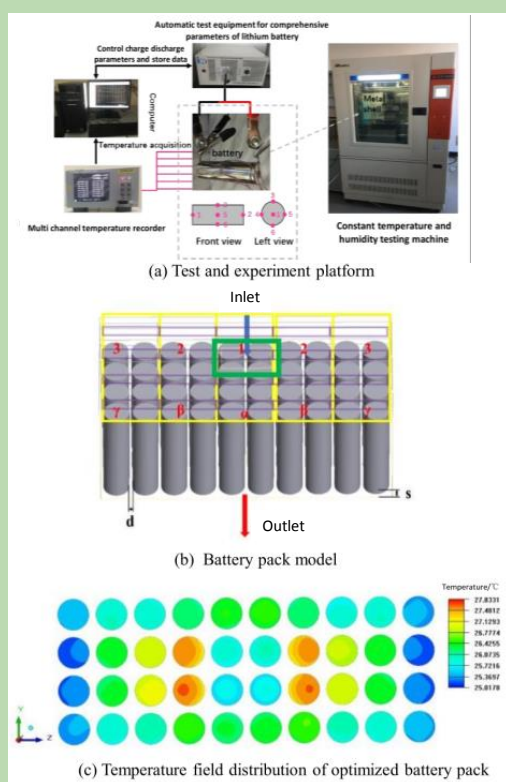
1. School of Electrical Engineering and Automation, Tiangong University, Tianjin 300387, China

2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Electrical Engineering and Energy Technology, Tiangong University, Tianjin 300387, China

3. Engineering Research Center of High Power Solid State Lighting Application System, Ministry of Education, Tiangong University, Tianjin 300387, China

**Abstract:** With the global trend of advocating environmental protection, energy conservation and emission reduction, and low-carbon travel, electric vehicles have been vigorously developed. As the power source of electric vehicle, power battery pack is one of the core components of electric vehicle. At present, the mainstream battery used in electric vehicles at home and abroad is lithium-ion battery, which has the advantages of high power density and energy density, low cost, long service life and no memory effect. But its performance is greatly affected by temperature. Therefore, it is imperative to carry out thermal management of electric vehicles. Firstly, the capacity, resistance and temperature rise of 18650 lithium-ion battery were tested by building a test platform; then, the consistency between the simulation results of single temperature rise and the experimental results was compared; finally, the power lithium-ion battery pack model was established, through single factor analysis and orthogonal experiment, the effects of filter plate free area ratio, battery spacing, wind speed and battery bottom distance on the battery were studied. The influence of maximum temperature and temperature difference were studied. When the battery was discharged at 1 C, it was concluded that adding filter plate improves the consistency of temperature field of battery pack, and the temperature difference of battery pack was the minimum when the free area ratio of filter plate was 0.1, 0.9 and 0.9. With the increase of wind speed, the maximum temperature decreased, temperature difference of battery pack first increased and then decreased. With the increase of battery spacing, the maximum temperature of battery pack first increased and then decreased, the temperature difference first increased, then decreased and increased at last. With the increase of the distance from the bottom of the battery, the maximum temperature of the battery pack first decreased and then increased. Finally, the best combination of 6 m/s, 4 mm and 4 mm was obtained by orthogonal experiment, which decreased 22.5% and 74.8% respectively compared with the maximum temperature and temperature difference before optimization.

**Key words:** 18650 Li-ion battery; air cooling; orthogonal experiment



收稿: 2020-08-28, 修回: 2020-11-17, 网络发表: 2020-12-09; Received: 2020-08-28, Revised: 2020-11-17, Published online: 2020-12-09

作者简介: 储广昕(1994-), 男, 河北省廊坊市人, 硕士研究生, 研究方向: 电动汽车动力锂离子电池热管理, E-mail: 459971850@qq.com; 尉孟涛, 通讯联系人, E-mail: 459971850@qq.com。

**引用格式:** 储广昕, 尉孟涛. 基于滤板调控风量的电池组风冷性能分析与优化. 过程工程学报, 2021, 21(10): 1236-1244.

Chu G X, Yu M T. Analysis and optimization of air cooling performance of battery pack based on air volume regulated by filter plate (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2021, 21(10): 1236-1244, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.220283.

# 基于滤板调控风量的电池组风冷性能分析与优化

储广昕<sup>1,2,3</sup>, 尉孟涛<sup>1,2,3\*</sup>

1. 天津工业大学电气工程与自动化学院, 天津 300387

2. 天津工业大学天津市电工电能新技术重点实验室, 天津 300387

3. 天津工业大学大功率半导体照明应用系统教育部工程研究中心, 天津 300387

**摘要:** 首先通过搭建测试平台, 对18650锂离子电池单体容量、内阻和温升进行实验测试; 再对比单体温升仿真与实验结果的一致性; 最后建立了动力锂离子电池组模型, 通过单因素分析和正交实验, 研究过滤板自由面积比、电池间距、风速和电池距离底部间距对电池组最高温度和温差的影响。电池以1 C放电时得出结论: 添加过滤板提升了电池组温度场一致性, 过滤板自由面积比为0.1, 0.9, 0.9时电池组温差最小。最终通过正交实验得到最佳组合为风速6 m/s、电池间距4 mm、电池距离底部间距4 mm, 比优化前最高温度下降了22.5%, 温差下降了74.8%。

**关键词:** 18650锂离子电池; 风冷; 正交实验

**中图分类号:** TM912

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-606X(2021)10-1236-09

## 1 前言

随着人们生活品质的提高, 世界上汽车数量的增加, 造成的污染也愈发严重。近几年, 电动汽车作为一种新能源汽车得到了大力发展, 电动汽车不仅减少了碳排放, 还节约了化石能源<sup>[1]</sup>。而动力电池组作为电动汽车的电源发挥着重要作用, 电池组中的锂离子电池单体具有能量密度高、比功率大、循环次数多等优点<sup>[2]</sup>。但其性能受温度的影响很大, 而成组电池的热失控也会危害电动汽车行车安全<sup>[3]</sup>, 甚至造成起火自燃事故。所以, 对电动汽车电池组进行热管理势在必行。

动力电池组热管理的方法主要有风冷、液冷和相变冷却三种, 风冷一般通过增加风扇(风机)提供冷风对电池组进行散热<sup>[4]</sup>, 其优点是结构简单、成本低; 缺点是散热效果一般、均匀性较差。本工作主要针对小型电动汽车的电池模组, 基于电池包空间有限和成本控制, 选用风冷散热方式。国内外对风冷散热的研究主要针对散热结构改进和电池排布方式, 在结构改进方面, 李淼林等<sup>[5]</sup>通过Fluent温度场仿真研究风冷电池组进风角度、出风角度和电池间距等因素, 进行正交分析, 最终降低了电池组最高温度和温差; Wang等<sup>[6]</sup>通过实验研究了上部通风和下部通风两种风冷结构对电池组最高温度和温差的影响。电池的排布方式主要有顺序排列和交错排列, Yang等<sup>[7]</sup>通过仿真研究了顺序排列和交错排列两种排列方式与横向、纵向间距对电池组温升的影响; Yu等<sup>[8]</sup>通过搭建实验平台测试了交错排列电池组在自然风冷和强制风冷条件下的不同倍率充放电情况下的瞬态

热特性。上述文献均完整地研究了锂离子电池单体实验, 对于过滤板的研究, 许超等<sup>[9]</sup>对电池组内部的中间挡板进行了结构改进, 改变了挡板结构, 增大了通风面积, 降低了电池组的最高温度, 虽然文献<sup>[9]</sup>在风路上仅安装了固定尺寸的开孔滤板结构, 由于该滤板本身并不具备调控风量的作用, 因此不同区域的风量分配只能依靠单体间距进行小范围调节, 无法有效解决电池组中心与边缘区域温差过大的问题。本工作对过滤板的研究更进一步, 针对过滤板开孔率进行了正交实验研究。

本工作对18650圆柱形锂离子单体电池的容量、内阻和温升进行了实验, 并通过Icepak仿真软件将仿真结果与实验结果进行对比验证其准确性。研究了风冷动力电池组的一个电池模组在1 C放电条件下的温度情况和散热效果, 并探究了过滤板开孔自由面积比、电池间距、风速和电池距离底部间距对电池包温度场分布的影响。通过仿真分析该电池组是否满足工作温度在20~40℃之间, 电池组内各单体间温差小于5℃的热管理标准<sup>[10]</sup>, 最终得到满足温度要求的电池组优化方案。

## 2 电池单体的性能测量与仿真验证

### 2.1 实验平台的搭建

锂离子电池单体实验分三个部分: 单体电池在不同温度下的充放电容量测试、HPPC (混合动力脉冲能力特性, Hybrid Pulse Power Characteristic) 内阻测试和温升测试。为了进行锂离子电池的单体实验, 需要搭建单体电池测试平台(图1)。实验所用电池为松下NCR18650PF, 电池额定电压为3.7 V, 额定容量为2900 mAh; 电池充放

电设备型号为 BTS-M 30 A/5 V 锂电池综合参数自动测试设备;多路温度记录仪型号为 TOPTEST TP9016U 多路温度记录仪,具有重量轻、体积小、测量速度快、精度高、使用方便等特点。将电池单体放入恒温恒湿试验机中,通过试验机控制电池的环境温度保持不变。通过锂电池测试设备连接电池单体,对单体进行充放电操作。

再通过计算机控制充放电参数和数据存储,并存储温度记录仪的数据。温度记录仪通过热电偶线连接电池单体,6个监控点的位置如图中所示,以获取温升实验的温度数据。为保证测试数据的准确性,需等待恒温恒湿试验箱开启运行 2 h,且满足电池单体表面的温度已达充分稳定状态之后,方可执行正式的性能测试操作。

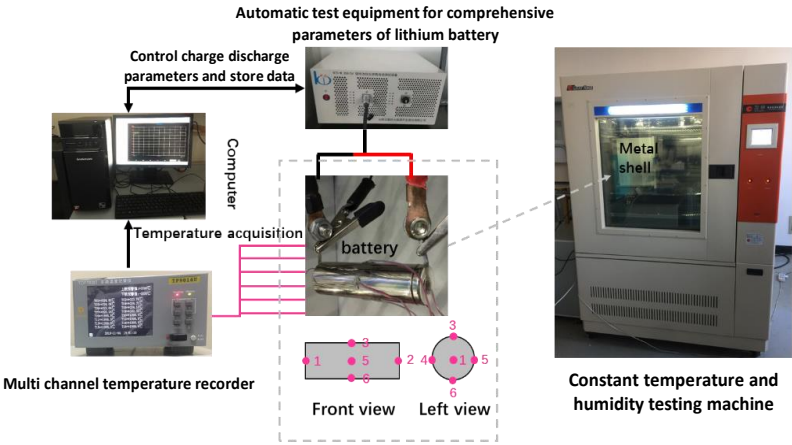


图1 测试实验平台  
Fig.1 Test and experiment platform

2.2 单体容量测试

为了获得 18650 锂离子电池的实际容量,需要对其在不同环境温度下进行充放电容量测试。容量测试步骤按中华人民共和国汽车行业标准 QC/T 897-2011<sup>[11]</sup>中的方法,分别得到 0, 10, 20 30, 40℃ 下的充放电容量。放电容量的测试结果如图 2 所示,由图可知,随温度升高,放电容量越来越大,温度由 0℃ 升温至 50℃,放电容量由 2.60 Ah 增加到 2.84 Ah。当温度低于 30℃ 时,随温度升高,放电容量增加较快,而当温度升高到 40~50℃ 时,容量变化不大。其原因是测试截止电压均为 2.5 V,温度较低时,锂离子电池活性较差,导致放电容量比温度较高时的容量少,随温度升高,锂离子电池活性提升,当升高至约 30℃ 时,电池活性变化不大,导致放电容量变化不大。放电时间的变化趋势与放电容量相同,由此可以得到 20℃ 下锂离子电池的实际容量为 2.79 Ah。充电容量测试结果如图 3 所示,根据 18650 锂离子电池充电标准,电池充电分为恒流充电过程和恒压充电过程。由图可知,温度为 0~50℃ 时,总充电容量变化不大,恒流充电容量随温度升高而增大,恒压充电容量随温度升高而减小。根据图 3 和 4 可知,恒流充电容量与恒压充电容量相比,占总容量较高。在温度较低时,电池活性较低,导致电池恒流充电时间较短,仍未充满的电量要在随后的恒压充电阶段完成,所以恒压充电时间远大于恒流充电时间,而当温度较高时,随电池化学反应活性的

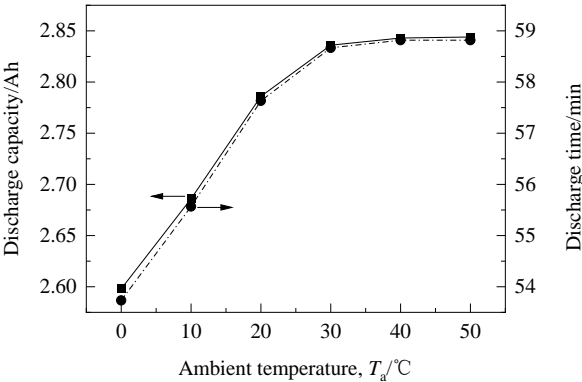


图2 放电容量与放电时间曲线  
Fig.2 Discharge capacity and discharge time curve

提升,恒流充电时间增加,恒压充电时间减少。

2.3 内阻实验

电池内阻  $R$  一般受电池荷电状态 SOC (荷电状态, State of Charge) 和锂离子电池表面温度的影响, HPPC 是用于体现动力电池脉冲充放电性能的一种特征<sup>[12]</sup>,可用于计算锂电池的直流内阻  $R$ , 该方法是目前最准确有效的主流测量锂电池的内阻方法之一。

该 HPPC 内阻测试的实验过程如参考文献[13]所示,分别在 20, 30, 40, 50℃ 下进行内阻测试,即可得到不同温度下的内阻曲线。HPPC 实验从 SOC=1 进行至

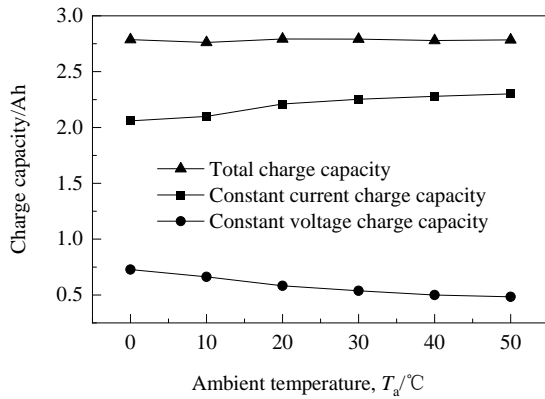


图3 充电容量随环境温度的变化

Fig.3 Changes of charge capacity with ambient temperature

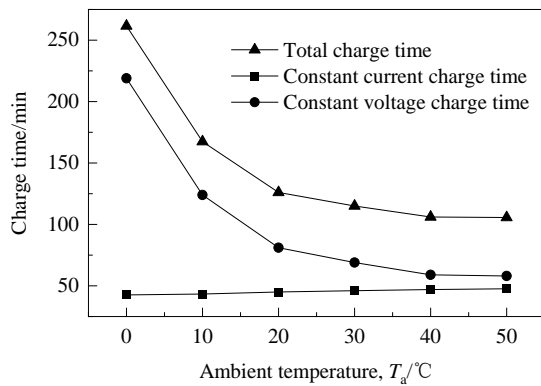


图4 充电时间随环境温度的变化

Fig.4 Changes of charge time with ambient temperature

SOC=0.1,通过实验得到各SOC状态下的电池电压。根据欧姆定律,用电压除以恒定电流即为各SOC下的电池的内阻值<sup>[14]</sup>,再将这些内阻值绘制成最终的内阻曲线。

根据上述实验过程整理实验结果绘制图像,在20, 30, 40, 50℃下的放电内阻曲线如图5所示。从20℃到50℃,锂离子电池放电的内阻越来越小,SOC从1放电至0.1,电池内阻先减小,再趋于平稳,当SOC小于0.2时,内阻急剧增大。

## 2.4 单体温升仿真与实验对比验证分析

### 2.4.1 电池单体仿真参数介绍

通过 Icepak 仿真软件进行单体电池的建模和仿真分析,18650 锂离子电池为卷绕圆柱形结构,不同绕层具有不同的热物理性质<sup>[15]</sup>,包括导热系数和比热容。根据文献[16],单个圆柱形电池的详细结构对电池组件的热性能影响不大。因此,为简化仿真模型,每个电池被认为是均匀的圆柱体<sup>[17-19]</sup>。电池的物性参数通过电池的均质化过程得到,电池密度 4418 kg/m<sup>3</sup>,比热容 652 J/(kg·K),X轴方向导热系数 4.47 W/(m·K),Y轴方向导热系

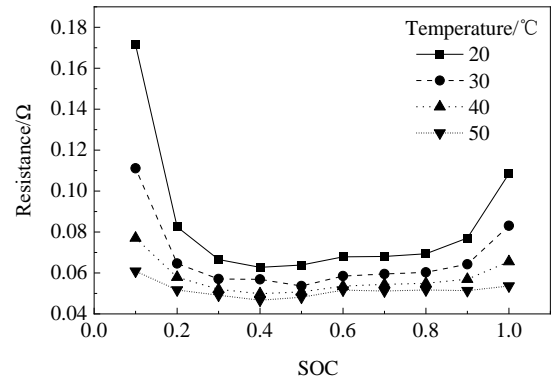


图5 放电内阻曲线

Fig.5 Discharge internal resistance curve

数 16.5 W/(m·K),Z轴方向导热系数 4.47 W/(m·K)。

### 2.4.2 单体温升仿真与实验对比分析

温升实验先将单体锂离子电池按文献[20]充电方法充满电,再在20℃以下,以1C电流恒流放电70% SOC,并记录电池监控点的温度,重复上述实验进行1.5和2C的恒流放电温升实验。

实验与仿真最高温度图像如图6所示,由图可知,实验与仿真结果的变化趋势基本吻合,这也验证了仿真与实验的准确性。在1C放电条件下,由于放电倍率较低,电池表面温度也较低,随放电倍率提高,电池产生的热量增加,在自然散热条件下无法散去,导致电池表面温度升高。

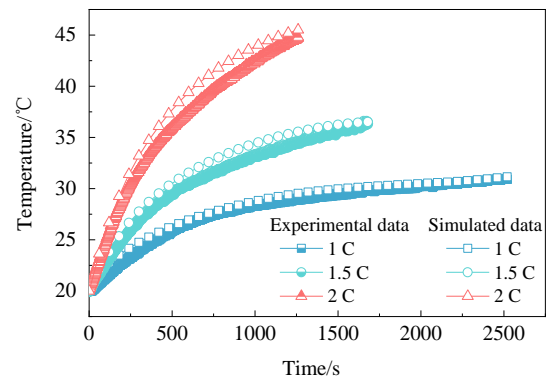


图6 温升对比曲线

Fig.6 Temperature rise contrast curve

实验与仿真结果曲线出现一定偏差的原因是:(1) 仿真使用的电池内阻为内阻实验测得内阻,其与电池实际内阻存在一定偏差<sup>[21]</sup>。(2) 仿真设置为恒定环境温度的自然对流条件,而实验中使用的恒温箱虽然设置为恒定温度,但是箱体中存在一定的风量,这使得实验温度结果低于仿真结果。



### 3 风冷锂离子电池组温度场分布研究

#### 3.1 电池包模型结构建立

仿真建立的锂离子电池包模型如图7所示,电池距离电池包顶部距离为20 mm,进风口位于电池包顶部,形状为图中绿色矩形,电池距离电池包底部间距 $s$ 为1 mm,底部为全部开放的出风口。电池的间距 $d$ 为2 mm,边缘电池距离电池包边界距离也为电池间距2 mm。电池组包括40节18650锂离子单体电池,通过10串4并顺序排列。电池组的总电压为37 V,总容量为11.2 Ah。

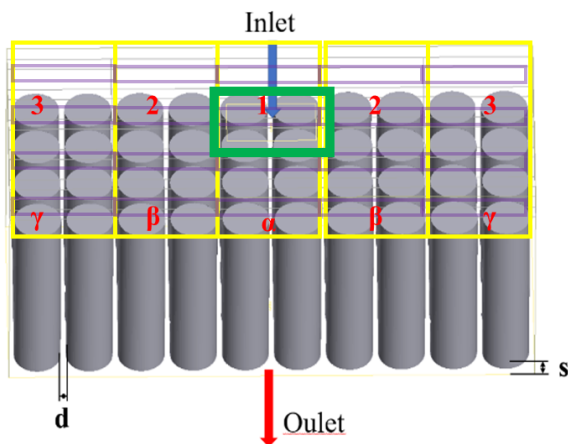


图7 电池组模型  
Fig.7 Battery pack model

#### 3.2 仿真参数设置和网格划分

电池的各个物性参数设置在上文单体仿真中介绍完毕,进风口风速 $v$ 为2 m/s,环境温度为20℃,其他参数设置同单体仿真设置相同。网格类型为Hexa非结构化网格,对计算所需网格进行独立性验证,根据计算得到的 $T_{\max}$ 和 $\Delta T$ 结果如图8所示,可知当网格数量大于 $4 \times 10^5$ 时, $T_{\max}$ 和 $\Delta T$ 只变化约0.1℃,变化不明显,因此确定网格数量为437 714。通过软件自动计算滤板风冷仿真的雷诺数和 $Pe$ 数分别为2524.78和1788.82,因此为湍流流态。

#### 3.3 过滤板自由面积比对电池组温度场的影响

温度对电池组的工作效果影响很大,为了分析电池组的温度场情况,主要通过电池组的最高温度 $T_{\max}$ 和温差 $\Delta T$ 这两个指标来衡量电池组散热效果。

在分析电池组的温度场情况时,先进行无过滤板的温度场仿真,如图9所示。可以看出电池组的温度分布呈现靠近进风口的温度很低,远离进风口的温度高的情况,最高温度为35.9195℃,温差超过了10℃,温度分布

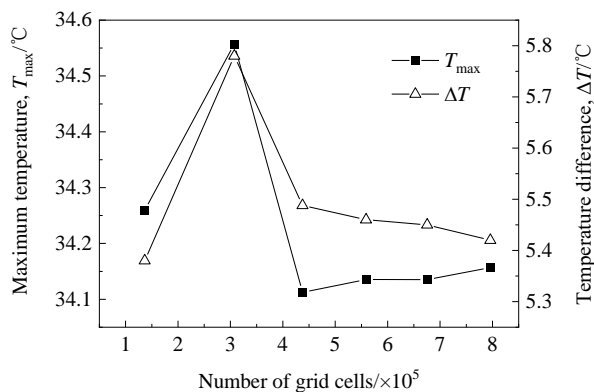


图8 网格独立性验证  
Fig.8 Grid independence verification

极不均匀,电池组温差过大。为了使电池组的温度分布更均匀,提出了一种在电池组中增设过滤板的优化结构,在进风口下方搭设过滤板可以均匀风与电池表面的接触面积。利用仿真软件自带Grille模型建立滤板结构,滤板为矩形形状,通风孔类型为圆形金属丝网筛,仿真中显示时对过滤板结构进行了简化,如图7中黄色矩形部分所示,各个矩形位置分别对应过滤板各部分的位置。为了研究过滤板的自由面积比的变化对电池组温度的影响,由于电池组温度场分布的进风口下方的中间部分温度低,越靠两边温度越高的温度梯度变化,将过滤板分为3部分,其自由面积比分别由 $\alpha, \beta, \gamma$ 表示,具体位置如图7所示,过滤板自由面积比为过滤板开孔面积与过滤板面积的比值。

通过正交分析研究过滤板的自由面积比即过滤板的开孔面积的最佳组合,本实验为三因素三水平的正交实验,三因素分别为 $\alpha, \beta, \gamma$ ,三水平均为0.1, 0.5, 0.9。固定进风口风速为2 m/s,电池间距为2 mm,电池距离底部间距为1 mm,其他边界条件不变,得到的正交表如表1所示。可以看出,实验5过滤板自由面积比为0.5, 0.5, 0.9时电池组最高温度最低,但其温差较高。而实验3的最高温度较低,温差最小,温度一致性更好,因此后续单因素分析和正交实验中选取过滤板自由面积比为0.1, 0.9, 0.9。添加过滤板后的电池组温度场分布如图10所示,与未加过滤板的情况相比,最高温度和温差均有所降低,温度分布更均匀,但温差未满足电池组工作时温差小于5℃的要求,所以需要进行进一步的仿真分析优化。

#### 3.4 电池间距对电池组温度场的影响

在添加过滤板的基础上,为了进一步缩小电池组温差、提升温度均匀性、分析和优化电池包结构,通过单因素分析研究电池间距对电池组温度场的影响。固定过滤板自由面积比为0.1, 0.9, 0.9、电池进风口风速为2 m/

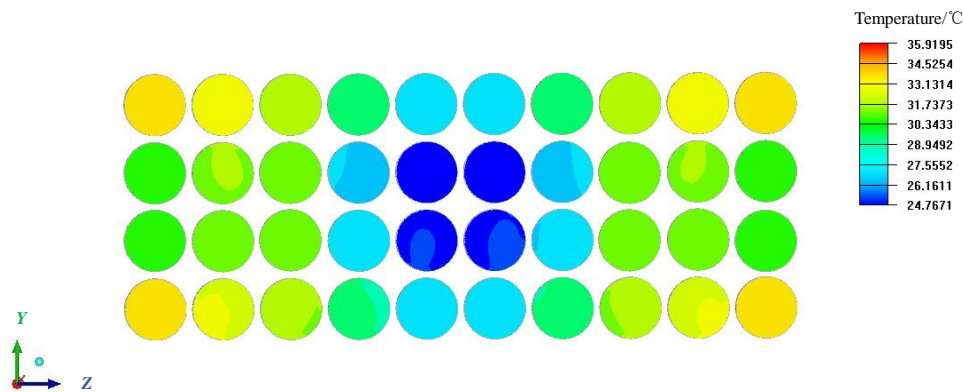


图9 未加过滤板的电池组仿真结果  
Fig.9 Simulation results of battery pack without filter plate

表1 过滤板正交表					
Table 1 Orthogonal table of filter plate					
Test	Factor				
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$
1	0.1	0.1	0.1	35.0477	6.3618
2	0.1	0.5	0.5	34.5893	5.9178
3	0.1	0.9	0.9	34.1123	5.4879
4	0.5	0.1	0.5	32.8217	6.5803
5	0.5	0.5	0.9	32.7487	6.6079
6	0.5	0.9	0.1	33.1416	7.0681
7	0.9	0.1	0.9	34.2537	8.7841
8	0.9	0.5	0.1	34.7843	9.4028
9	0.9	0.9	0.5	34.7273	9.3751

s, 电池距离底部间距 $s=1\text{ mm}$ , 其他边界条件均不变, 电池间距 $d$ 为因素变量, 分别为 $0, 1, 2, 3, 4, 5\text{ mm}$ , 分别进行仿真得到电池组 $T_{\max}$ 和 $\Delta T$ 随电池间距的变化如图11所示。由图可以看出随 $d$ 增大, 最高温度和温差均呈先增大后减小的趋势; 当 $d=2\text{ mm}$ 时,  $T_{\max}$ 最高为 $34.1123^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta T$ 最高为 $5.4879^{\circ}\text{C}$ ; 当 $d=0\text{ mm}$ ,  $T_{\max}$ 和 $\Delta T$ 均较低, 分别为 $32.2418^{\circ}\text{C}$ 和 $4.0701^{\circ}\text{C}$ , 说明此时, 电池组温度场分布最均匀, 一致性更好。因为当 $d=0\text{ mm}$ 时, 电池表面的风速分布相对于 $d\neq 0$ 时明显增大, 而风冷条件下

的对流换热系数也增大, 提升了风冷却效果, 优化了电池组温度一致性。而随着电池间距增大, 电池包面积增大, 风更多的从电池间隙吹过, 由于电池包内单体间电池温度的聚集效应, 使电池包中心的电池单体温度较高, 周围的电池温度较低。而当 $d>2\text{ mm}$ 时, 进风口附近的电池聚集效应减弱, 电池温度降低, 从而降低了电池组的最高温度和电池间的温差。

3.5 风速对电池组温度场的影响

为了研究进风口的风速对电池组的温度场的影响, 进行风速 $v$ 的单因素分析, 采用控制变量法研究风速对电池组温度场的影响。控制过滤板自由面积比为 $0.1, 0.9, 0.9$ 、电池间距为 $2\text{ mm}$ 、电池距离底部间距为 $1\text{ mm}$ , 其他边界条件均不变, 电池组进风风速为变量, 分别为 $1\sim 6\text{ m/s}$ 。同时考虑进风口压降 $\Delta p$ 与风速的关系, 通过仿真得到电池组 $T_{\max}$ ,  $\Delta T$ 和 $\Delta p$ 随风速变化结果, 如图12所示。由图可知, 随风速增加, 进风口压降越来越大, 电池组 $T_{\max}$ 减小, 风速从 $1\text{ m/s}$ 升至 $6\text{ m/s}$ 时,  $T_{\max}$ 从 $37.3241^{\circ}\text{C}$ 降至 $26.2535^{\circ}\text{C}$ , 但减小幅度越来越小, 说明风速对 $T_{\max}$ 的影响越来越小。随风速增加,  $\Delta T$ 先小幅度增加再逐渐减小。风速为 $1\text{ m/s}$ 时,  $\Delta T$ 为 $5.1441^{\circ}\text{C}$ , 当风速

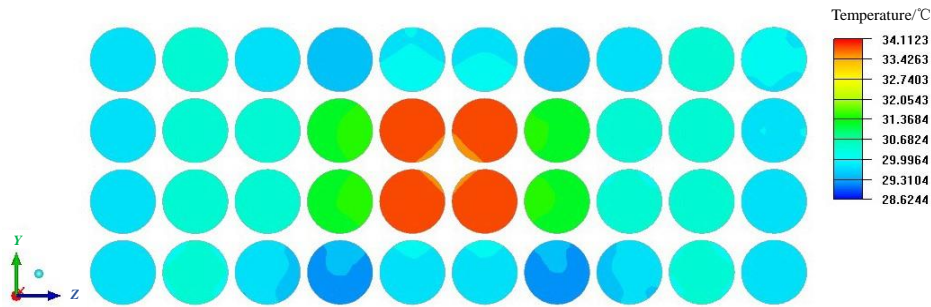


图10 添加过滤板后的电池组仿真结果  
Fig.10 Simulation results of battery pack with filter plate

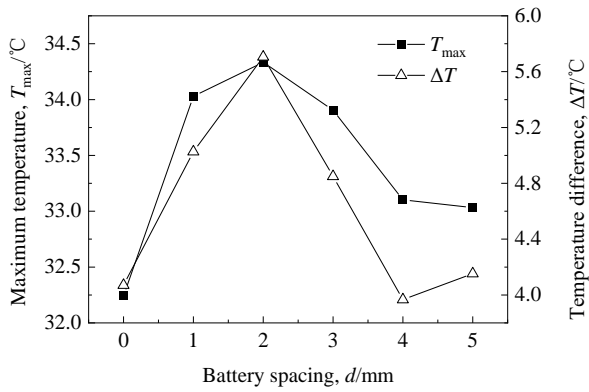


图 11  $T_{\max}$  和  $\Delta T$  随电池间距变化图  
Fig.11  $T_{\max}$  and  $\Delta T$  versus battery spacing

为 6 m/s 时,  $\Delta T$  减小至 3.056 °C。总体来看, 风速的提升可有效降低电池组的  $T_{\max}$  和  $\Delta T$ , 随风速增加, 电池组的温度一致性越来越好。因为风速的提升增加了电池表面的对流换热系数, 从而降低了电池的表面温度。综合考虑压降与风速的关系, 同时需要满足电池组的温度需求, 选取三条曲线相交最近的风速点  $v=4$  m/s 为最优风速。

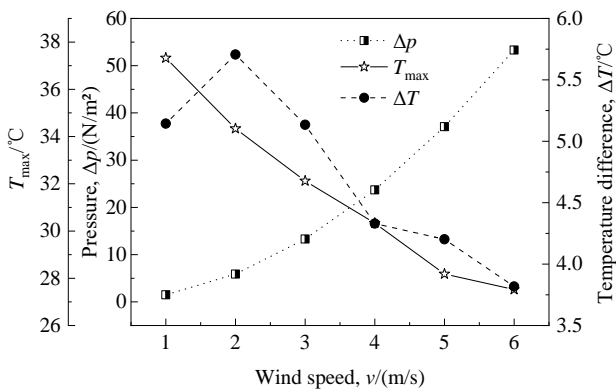


图 12  $T_{\max}$ ,  $\Delta T$  和  $\Delta p$  随风速的变化  
Fig.12 Changes of  $T_{\max}$ ,  $\Delta T$  and  $\Delta p$  with wind speed

### 3.6 底部间距对电池组温度场的影响

为了研究电池距离底部间距  $s$  对电池组温度场的影响, 进行单因素分析, 控制风速  $v$  为 2 m/s、电池间距  $d$  为 2 mm,  $s$  取值为 0~20 mm, 通过仿真得到电池组最高温度和  $\Delta T$  随电池距离底部间距变化, 如图 13 所示。从图中可以看出, 随  $s$  增大, 电池组的  $T_{\max}$  和  $\Delta T$  先减小后增大, 在距离为 1.5 mm 时, 电池组的  $T_{\max}$  最低为 33.2173 °C。在  $s=1$  mm 时, 电池组  $\Delta T$  最小为 5.4879 °C, 温度一致性最好。这是由于当电池距离底部间距较小时, 从进风口吹来的风不能充分吹到电池底部表面部分, 导致电池组的  $T_{\max}$  较高, 从风的流速分布切面图(图

14) 可以看出, 当底部间距为 1 mm 时, 由于电池底部间隙较小, 导致风对电池底部的冷却效果较低; 当间距为 10 mm 时, 风道过长虽然对上游电池的冷却效果影响不大, 但对电池底部冷却效果增强, 从而降低了电池下游的温度, 增加了电池组的  $\Delta T$ 。

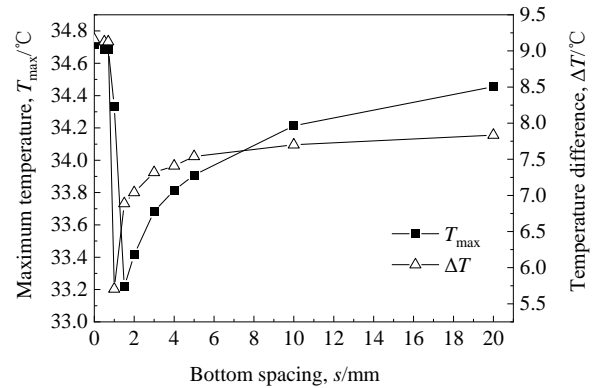


图 13  $T_{\max}$  和  $\Delta T$  随电池距离底部间距变化图  
Fig.13  $T_{\max}$  and  $\Delta T$  versus bottom distance

### 3.7 通过正交实验得到最终优化结果

通过以上的单因素分析, 得到风速  $v$ 、电池间距  $d$  和电池距离底部间距  $s$  的温度合理取值范围, 为得到使电池组的温度一致性最好的最优组合, 进行三因素三水平的正交实验。因素一为风速  $v$ , 三水平为 2, 4, 6 m/s; 因素二为电池间距  $d$ , 三水平为 0, 2, 4 mm; 因素三为电池距离底部间距  $s$ , 三水平为 1, 4, 7 mm。通过仿真得到实验结果, 列出正交表如表 2 所示。分析正交实验结果得到, 实验 9 组合 A, B, C 为 6 m/s, 4 mm, 4 mm 时,  $T_{\max}$  较低为 27.8331 °C,  $\Delta T$  最低为 2.8153 °C。优化后的电池组温度场分布如图 15 所示, 总体来说, 电池组温度一致性最好, 温差小于 5 °C, 满足电池组温度要求。与优化前相比,  $T_{\max}$  下降了 22.5%,  $\Delta T$  下降了 74.8%。

## 4 结 论

通过搭建测试实验平台, 对 18650 锂离子单体电池进行不同温度下的容量测试、内阻测试和 1 C, 1.5 C, 2 C 放电条件下的温升测试。并通过 Icepak 仿真分析, 对比了瞬态仿真结果与实验温升结果过程, 整个放电过程的温度曲线变化趋势基本吻合, 验证了仿真模型的准确性和实验的准确性。建立了锂离子电池组模型, 通过单因素分析和正交实验仿真分析了过滤板自由面积比  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 、电池间距  $d$ 、风速  $v$ 、电池距离底部间距  $s$  对电池组最高温度和温差的影响, 得到如下结论:

(1) 通过在电池包的进风口下方添加过滤板可以有效地均匀电池组的温度场分布, 降低电池组的最高温度



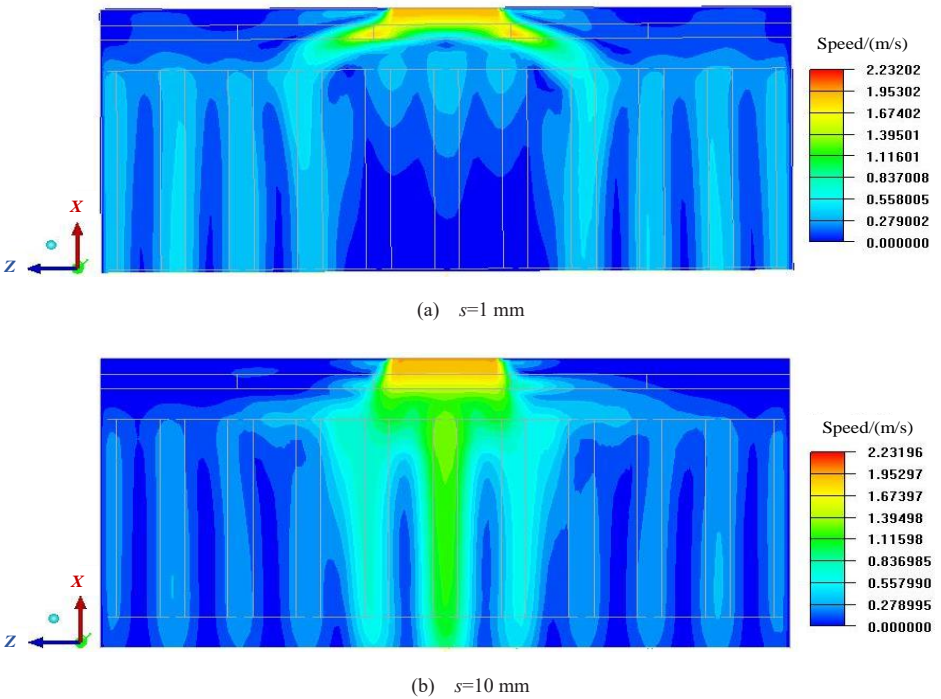


图 14  $s=1$  和 10 mm 时流速分布切面图  
Fig.14 Section diagram of velocity distribution with  $s=1$  and 10 mm

表2 正交表 Table 2 Orthogonal table					
Test	Factor				
	$v/(m/s)$ , A	$d/mm$ , B	$s/mm$ , C	$T_{max}/^{\circ}C$	$\Delta T/^{\circ}C$
1	2	0	1	32.2418	4.0701
2	2	2	4	33.8149	7.4085
3	2	4	7	34.3109	4.5947
4	4	0	4	30.2304	3.8803
5	4	2	7	29.5337	5.1573
6	4	4	1	29.6659	3.5724
7	6	0	7	29.0041	3.7211
8	6	2	1	27.5239	3.8179
9	6	4	4	27.8331	2.8153

和温差。不同的过滤板自由面积比对于电池组温度场的影响不同。通过正交实验得出过滤板自由面积比为 0.5, 0.5, 0.9 时电池组最高温度最低, 过滤板自由面积比为 0.1, 0.9, 0.9 的电池组温差最小。

(2) 随电池间距增大, 最高温度和温差都呈现先增大后减小的趋势, 当电池间距为 2 mm 时, 最高温度和温差最高, 当电池间距为 0 mm 时, 最高温度和温差最低, 说明电池间距为 0 mm 时, 电池组温度场分布最均匀, 一致性更好。

(3) 随风速增加, 电池组最高温度随之减小, 但减小幅度越来越小, 说明风速对最高温度的影响越来越小。随着风速的增加, 温差先小幅度增加再逐渐减小。总体

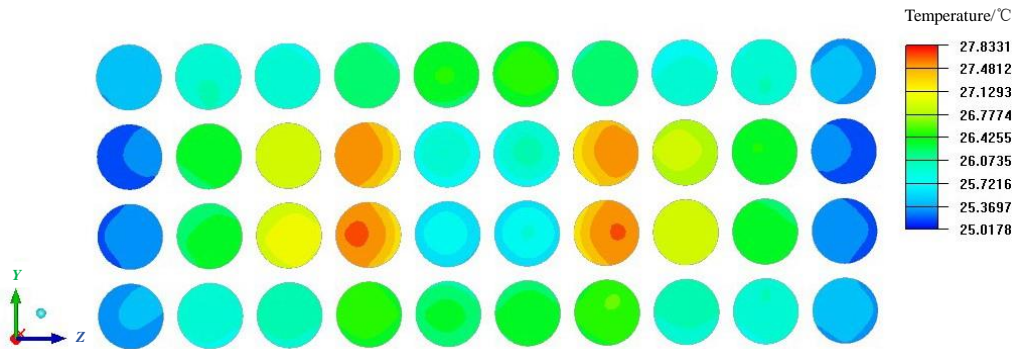


图 15 优化后的电池组温度场分布图  
Fig.15 Temperature field distribution of optimized battery pack



来看,随着风速的增加,电池组的温度一致性越来越好。

(4) 随电池距离底部间距增大,电池组的最高温度和温差先减小后增大,在距离约为1 mm时,电池组的最高温度最低,温差最小,温度一致性最好。

(5) 通过正交实验得出当风速为6 m/s、电池间距为4 mm、电池距离底部间距为4 mm时,最高温度较低,温差最低,总体来说,电池组温度一致性最好,且满足电池组温度要求。相比较于优化前,最高温度下降了22.5%,温差下降了74.8%。

## 参考文献

- [1] Huang P, Verma A, Robles D J, et al. Probing the cooling effectiveness of phase change materials on lithium-ion battery thermal response under overcharge condition [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 132: 521–30.
- [2] 周琪琪, 公旭中, 王志, 等. Zn/N共掺杂碳全包覆切割废硅料用于锂离子电池负极材料 [J]. *过程工程学报*, 2021, 21(6): 713–723.  
Zhou Q Q, Gong X Z, Wang Z, et al. Kerf-loss silicon encapsulated with Zn/N co-doped carbon as anode material for lithium ion batteries [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2021, 21(6): 713–723.
- [3] Pesaran A A. Battery thermal management in EVs and HEVs: issues and solutions [C]//Advanced Automotive Battery Conference. Las Vegas. 2001: 1–10.
- [4] 戴海峰, 党丰玲, 朱维, 等. 插电式燃料电池车锂电池热管理系统设计 [J]. *同济大学学报*, 2012, 40(4): 589–595.  
Dai H F, Dang F L, Zhu W, et al. Design of lithium battery thermal management system for plug in fuel cell vehicle [J]. *Journal of Tongji University*, 2012, 40(4): 589–595.
- [5] 李淼林, 臧孟炎, 李长玉, 等. 锂离子电池组风冷散热结构的优化 [J]. *电池*, 2020, 50(3): 266–270.  
Li M L, Zang M Y, Li C Y, et al. Optimization of air cooling structure for lithium ion battery pack [J]. *Battery*, 2020, 50(3): 266–270.
- [6] Wang Y W, Jiang J M, Chuang Y H, et al. Forced-air cooling system for large-scale lithium-ion battery modules during charge and discharge processes [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019, 135: 2891–2901.
- [7] Yang N X, Zhang X W, Guo J, et al. Assessment of the forced air-cooling performance for cylindrical lithium-ion battery packs: a comparative analysis between aligned and staggered cell arrangements [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 80: 55–65.
- [8] Yu X L, Zhao L, Zhang L Y, et al. Experimental study on transient thermal characteristics of stagger-arranged lithium-ion battery pack with air cooling strategy [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 143: 118576.1–118576.13.
- [9] 许超, 顾力强, 吴红杰. 混合动力客车电池包散热系统的仿真与优化 [J]. *机械设计与研究*, 2010, 26(3): 118–120.  
Xu C, Gu L Q, Wu H J. Simulation and optimization for the battery pack cooling system on hybrid electric bus [J]. *Mechanical Design and Research*, 2010, 26(3): 118–120.
- [10] Pesaran A A. Battery thermal models for hybrid vehicle simulations [J]. *Journal of Power Sources*, 2002, 110(2): 377–382.
- [11] 中华人民共和国工业和信息化部. 电动汽车用电池管理系统技术条件: QC/T 897–2011 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012: 5.
- [12] 谢乐琼, 王莉, 胡坚耀, 等. 动力电池重要测试方法: 混合冲功率特性测试 [J]. *电池工业*, 2018, 22(5): 257–264.  
Xie L Q, Wang L, Hu J Y, et al. An important test method for power battery: hybrid pulse power characteristic test [J]. *Battery Industry*, 2018, 22(5): 257–264.
- [13] 苏杰, 王顺利, 王露, 等. 基于PNGV电路模型的新能源汽车钴酸锂电池内阻研究 [J]. *自动化与仪表*, 2018, 33(10): 11–14, 32.  
Su J, Wang S L, Wang L, et al. Study on internal resistance of lithium cobalt oxide battery for new energy vehicles based on PNGV circuit model [J]. *Automation and instrumentation*, 2018, 33(10): 11–14, 32.
- [14] 靳博文, 乔慧敏, 潘天红, 等. 基于内阻功率消耗的锂电池SOC估计 [J]. *汽车工程*, 2020, 42(8): 1008–1015, 1059.  
Jin B W, Qiao H M, Pan T H, et al. SOC estimation of lithium battery based on internal resistance power consumption [J]. *Automotive Engineering*, 2020, 42(8): 1008–1015, 1059.
- [15] Saw L H, Ye Y, Tay A A O. Electrochemical-thermal analysis of 18650 lithium iron phosphate cell [J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 75: 162–174.
- [16] Jia Q E, Meng Y, Chen J W, et al. Effects of the different air cooling strategies on cooling performance of a lithium-ion battery module with baffle [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 144: 231–241.
- [17] Jiang F. Studies of 18650 cylindrical cells made with doped LiNiO<sub>2</sub> positive electrodes for military applications [J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 138: 288–293.
- [18] 丁源, 王清. ANSYS ICEM CFD从入门到精通 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 1.  
Ding Y, Wang Q. ANSYS ICEM CFD from introduction to mastery [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 1.
- [19] 宋刘斌, 李新海, 王志兴, 等. 锂离子电池充放电过程中的热行为及有限元模拟研究 [J]. *功能材料*, 2013, 44(8): 1153–1158.  
Song L B, Li X H, Wang Z X, et al. Thermal behavior and finite element simulation of lithium ion battery during charging and discharging [J]. *Functional Materials*, 2013, 44(8): 1153–1158.
- [20] 中国汽车技术研究中心. 电动汽车用动力蓄电池电性能要求及试验方法: GB/T31486–2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 4–5.  
China Automotive Technology Research Center. Electric performance requirements and test methods of traction batteries for electric vehicles: GB/T31486–2015 [S]. Beijing: China Standard Press, 2015: 4–5.
- [21] 安治国, 李升东, 张栋省, 等. 动力锂离子电池放电电热模拟分析 [J]. *电源技术*, 2018, 42(2): 188–190, 261.  
An Z G, Li S D, Zhang D S, et al. Simulation and analysis of discharge heat of power lithium ion battery [J]. *Power Technology*, 2018, 42(2): 188–190, 261.