

锂离子电池组风冷结构设计及优化*

白帆飞^{1,2,3,4}, 陈明彪^{1,2,3}, 宋文吉^{1,2,3†}, 冯自平^{1,2,3}

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640;
3. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 本文运用正交试验法设计电池组风冷结构参数优化试验方案, 研究电池组间距递减幅度、上集流板倾斜角度、下集流板倾斜角度等结构参数的变化对电池组温度场、流场以及进出口压差的影响, 确定了电池组最优结构: 间距递减幅度 0.3 mm、上集流板倾斜 0°、下集流板倾斜 5°; 运用实验和仿真的方法, 研究具有最优结构的电池组分别在 0.5 C、1 C、2 C 倍率放电过程的温度变化特性, 电池组的最高温度及温度场一致性均能满足要求。

关键词: 锂离子电池组; 风冷结构; 正交试验; 数值模拟

中图分类号: TK02; TM912.2

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2016.05.004

Design and Optimization of Air-Cooled Structure for Lithium-Ion Battery Pack

BAI Fan-fei^{1,2,3,4}, CHEN Ming-biao^{1,2,3}, SONG Wen-ji^{1,2,3}, FENG Zi-ping^{1,2,3}

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Optimizing scheme of the air-cooled battery pack structure was designed by using the orthogonal test. The effects of the battery pack's space decline range and the inclination angles of upper and lower deflectors on its temperature field, flow field and pressure drop were studied numerically. The optimal structure of the battery pack was determined: the space decline range is 0.3 mm, the angle of the upper deflector of 0° and the angle of the lower deflector is 5°. Temperature characteristics of the battery pack of such optimal structure were then investigated experimentally and numerically at discharging rates of 0.5 C, 1 C and 2 C, respectively. The results show that both the maximum temperature and the temperature field uniformity of the battery pack can meet the requirements.

Key words: lithium-ion battery; air-cooled structure; orthogonal experiment; numerical simulation

0 引言

锂离子电池组的最高温度、温度场的均匀性是电池组热管理系统的重要评价指标^[1]。电池组采用强制风冷时, 空气进出口压差反映了电池组内部的阻力大小, 决定了风机的功率需求。为保证电池组正常输出功率, 延长循环寿命, 同时降低风机能耗, 应综合考虑电池组内风道宽度、上下集流板倾斜角度等结构因素对温度场、压力场的影响^[2-5]。

本文利用正交试验法对电池组内风道宽度(即

电池组间距)、上集流板倾斜角度、下集流板倾斜角度这三个结构参数优化配组, 采用直观分析法以电池组最高温度、模块间最大温差和进出口压差为评价指标对各结构参数的作用规律进行分析。

1 电池组的参数选择及正交表设计

研究采用的单体电池为铝塑膜外包方形 LiFePO₄/C 动力电池, 额定电压 3.2 V, 额定容量 20 A·h, 尺寸 170 mm × 7 mm × 230 mm, 质量为 0.545 kg, 电池的其他参数如表 1 所示。

* 收稿日期: 2016-05-12 修订日期: 2016-06-11

基金项目: 广东省科技计划项目(2014B010128001, 2015B050501008); 广州市科技计划项目(201509010018); 中国科学院广州能源研究所重点实验室基金(Y607ji1001)

† 通信作者: 宋文吉, E-mail: songwj@ms.giec.ac.cn

表 1 锂离子电池参数

Table 1 Parameters of lithium-ion battery

密度 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	导热系数 / $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$			比热容 / $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	生热速率 / $\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$		
	x 方向	y 方向	z 方向		0.5 C 放电	1 C 放电	2 C 放电
1 991	0.14	8.2	8.2	2 138	2 108	12 985	61 045

如图 1，锂离子电池组由 12 个串联的电池模块依次排列组成，每个电池模块由两个紧贴的电池单体并联而成，电池组的电压为 38.4 V，容量为 40 A·h。电池组内模块平均间距为 5 mm，出入口均为 50 mm × 170 mm 的矩形，电池组外观尺寸 330 mm × 233 mm × 170 mm。电池组采用并行通风、强制风冷的形式，以更好地控制电池的温升并保持电池组温度分布的均匀性。为使冷却风机不工作时锂离子电池组仍能短时间利用自然对流换热，冷却空气采用由下往上的流向^[6]。

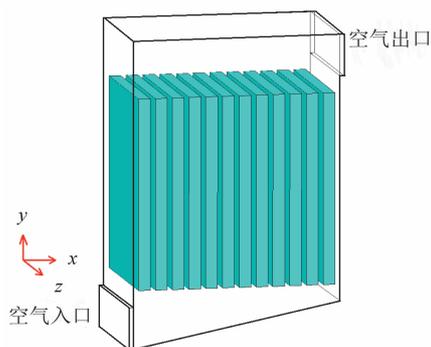


图 1 锂离子电池组结构示意图

Fig. 1 Structure of the experimental lithium-ion battery pack

正交试验设计是研究多因素多水平的一种设计方法，是根据正交性从全面试验中挑选出部分有代表性的点进行试验，是一种高效率、快速、经济的实验设计方法^[7]。正交设计中，实验变量称为因素，各因素的取值称为水平。本文选择电池组间距的递减幅度 ΔL 、上集流板倾斜角度 θ_u 、下集流板倾斜角度 θ_l 三个参数为因素，每个因素取 3 个水平，具体见表 2。

表 2 因素水平表

Table 2 Factors and levels of orthogonal experiment

水平	因素		
	A	B	C
	$\Delta L/\text{mm}$	$\theta_u/^\circ$	$\theta_l/^\circ$
I	0	0	0
II	0.2	5	5
III	0.3	10	10

由于各因素之间无交互作用，正交试验设计见表 3，实验编号为 No.1 ~ No.9，采用 FLUENT 软件仿真计算。

冷却空气在电池组内部流动过程中涉及分流、转弯、汇合等复杂过程，流场脉动以及在换热表面的分离不可避免，更接近于湍流，因此仿真求解选用 $k-\epsilon$ 湍流模型。入口空气速度 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，温度 300 K；压力出口，0 Pa，温度 300 K；电池与空气接触面流-固耦合，无滑移；电池组外壳绝热。电池单体以 2 C 倍率放电时生热速率为 $61\ 045\ \text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ 。考察各种参数的作用规律时可不考虑时间影响，采用稳态计算求解器，求得不同结构电池组最高温度 T_{max} 、模块间最大温差 ΔT_{max} 和进出口压差 Δp 。仿真计算结果见表 3。

表 3 正交试验设计及仿真结果

Table 3 Orthogonal experiment design and simulation results

No.	因素			结果		
	$\Delta L/\text{mm}$	$\theta_u/^\circ$	$\theta_l/^\circ$	T_{max}/K	$\Delta T_{\text{max}}/\text{K}$	$\Delta p/\text{Pa}$
1	0	0	0	336.0	10.0	21.3
2	0	5	5	336.6	10.9	23.5
3	0	10	10	337.5	11.9	28.4
4	0.2	0	5	332.2	4.6	21.1
5	0.2	5	10	332.2	4.7	24.1
6	0.2	10	0	337.9	11.4	26.0
7	0.3	0	10	330.6	1.4	21.5
8	0.3	5	0	333.0	4.8	22.4
9	0.3	10	5	337.0	9.8	27.4

2 正交分析及优化

表 2 中 ΔL 的水平 I、II、III 分别出现在三组试验 No.1 ~ No.3、No.4 ~ No.6、No.7 ~ No.9 中。记 9 次试验得到的各项指标值依次为 $y_1 \sim y_9$ ，取水平 I、II、III 的平均值： $k_1 = (y_1 + y_2 + y_3)/3$ ， $k_2 = (y_4 + y_5 + y_6)/3$ ， $k_3 = (y_7 + y_8 + y_9)/3$ 。令 $R = \max\{k_1, k_2, k_3\} - \min\{k_1, k_2, k_3\}$ ， R 即为极差。因为在三组试验 No.1 ~ No.3、

No.4 ~ No.6、No.7 ~ No.9 中, θ_u 和 θ_l 的三个水平各出现一次, 所以这种变动是平等的, 因此可以认为 R 是由于 ΔL 的水平变动引起的^[8]。极差 R 反映了各因素水平变动对试验结果影响的大小, 极差越

大表示该因素的水平变化对试验结果影响越大。表 4 列出了三个评价指标 T_{\max} 、 ΔT_{\max} 、 Δp 所对应的不同因素的极差。各因素对评价指标的影响趋势如图 2。

表 4 极差分析

Table 4 Range analysis data

参数	T_{\max} / K			$\Delta T_{\max} / \text{K}$			$\Delta p / \text{Pa}$		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
k_1	336.70	332.93	335.63	10.93	5.33	8.73	24.40	21.30	23.23
k_2	334.10	333.93	335.27	6.90	6.80	8.43	23.73	23.33	24.00
k_3	333.53	337.47	333.43	5.33	11.03	6.00	23.77	27.27	24.67
R	3.17	4.53	2.20	5.60	5.70	2.73	0.67	5.97	1.43

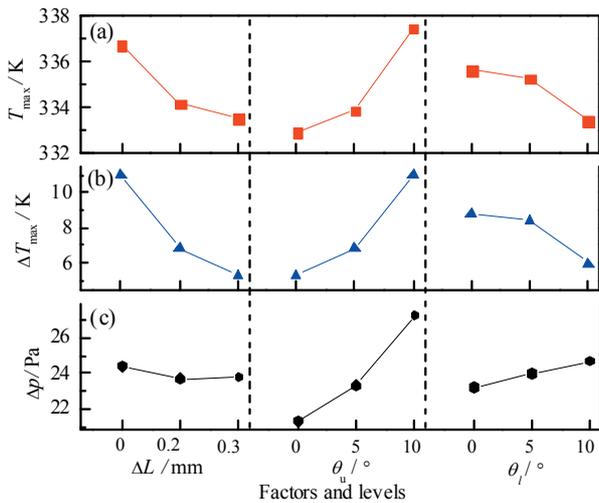


图 2 T_{\max} 、 ΔT_{\max} 和 Δp 的平均值
Fig. 2 Average of T_{\max} , ΔT_{\max} and Δp for each factor

2.1 各因素对温度场、压力场的影响

由图 2 可知, ΔL 值的上升会导致 T_{\max} 、 ΔT_{\max} 的显著下降, 但对 Δp 影响较小。这是由于, ΔL 的上升增加了空气上游流道截面积、减小了空气下游流道截面积, 有助于平衡各流道内空气的流量, 能够有效抑制最高温度和模块间的温差^[9]。如图 3 所示, $\Delta L = 0.3 \text{ mm}$ 时, 各流道内工质流量更为均匀。

上集流板倾斜角度 θ_u 值的增加会导致 T_{\max} 、 ΔT_{\max} 和 Δp 的上升, 且影响较大。这是由于集流板倾斜角度越小, 冷却空气在电池组内的阻力越大, 增加了湍流程度, 有助于提高换热系数, 降低电池组内最高温度, 同时平衡了各流道出口处的压强, 如图 4 所示。

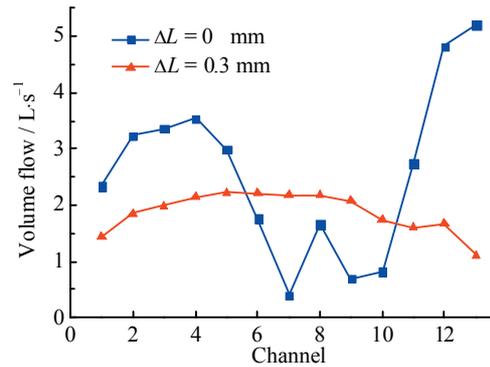


图 3 不同 ΔL 下的流道内工质体积流量
Fig. 3 Volume flow of working medium in each flow channel under different ΔL

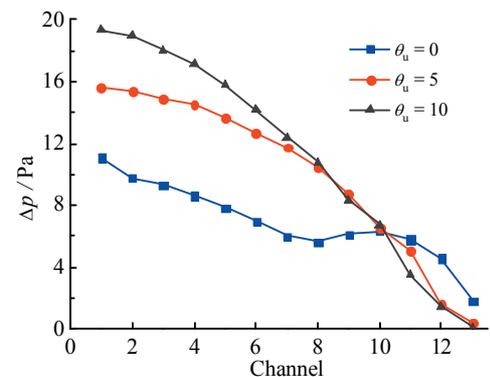


图 4 不同 θ_u 下的流道进出口压差
Fig. 4 Pressure drop of each flow channel under different θ_u

下集流板倾斜角度 θ_l 的增大会导致 T_{\max} 和 ΔT_{\max} 下降, 图 5 显示 θ_l 的增大有效提高了下游流道入口处的风速, 平均流速的上升有利于增大换热系数, 提高换热效率。但较高的风速也会增大湍流程度, 从而增大 Δp , 如图 2c 所示。

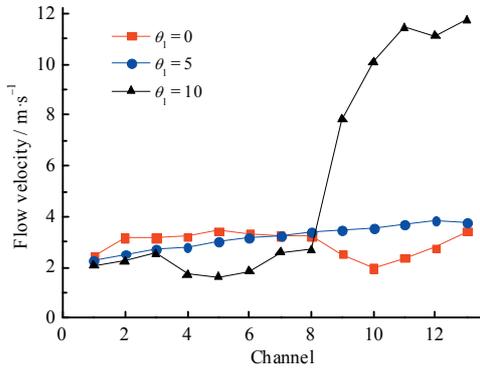


图5 不同 θ_1 下的流道入口风速
Fig. 5 Inlet velocity of each flow channel under different θ_1

2.2 最优结构筛选

2.2.1 以 T_{max} 为指标

表4中 $R_{\theta_u} > R_{\Delta L} > R_{\theta_1}$ ，因此 θ_u 的水平对试验结果影响最大，应优先考虑， ΔL 次之， θ_1 再次之。

对于 θ_u ， $k_1 < k_2 < k_3$ ，说明 θ_u 的增大会提升最高温度 T_{max} ，因此水平 I 最优。对于 ΔL ， $k_1 > k_2 > k_3$ ，说明随着间距递减值的增大，最高温度下降，水平 III 最优。对于 θ_1 ， $k_1 > k_2 > k_3$ ，说明下集流板倾斜角度 θ_1 的增大有利于抑制最高温度 T_{max} ，水平 III 最优。

因此，以最高温度 T_{max} 为指标，表3中 No.7 ($A_{III}B_1C_{III}$) 是最优组合，其最高温度 T_{max} 最小。

2.2.2 以 ΔT_{max} 为指标

表4中 $R_{\theta_u} > R_{\Delta L} > R_{\theta_1}$ ，即 θ_u 的水平变化对温度的均匀性影响最大。

与最高温度 T_{max} 的情况相似， θ_u 的增大、 θ_1 的增大、 ΔL 的减小，都可以减小 ΔT_{max} 的值，即有助于提高电池组温度分布的均匀性。因此，以最高温度差 ΔT_{max} 为指标。表3中 No.7 ($A_{III}B_1C_{III}$) 是最优组合，电池组均匀性最好，其最高温度差 ΔT_{max} 最小。

2.2.3 以 Δp 为指标

表4中 $R_{\theta_u} > R_{\theta_1} > R_{\Delta L}$ ，这表明 ΔL 的水平变动对进出口压力差影响最小。随着 θ_u 和 θ_1 的增大，进出口压力差 Δp 均呈上升趋势。

因此，为降低电池组的最高温度 T_{max} 、降低模块间最大温差 ΔT_{max} ，应采用较大的 ΔL 、 θ_1 和较小的 θ_u ，表3中 No.7 ($A_{III}B_1C_{III}$) 是最优组合，其最高温度 T_{max} 、最高温度差 ΔT_{max} 最小。

当以进出口压力差 Δp 为指标时，最优结构参数组合为 $A_{II}B_1C_1$ ($\Delta L = 0.2 \text{ mm}$ ， $\theta_u = 0^\circ$ ， $\theta_1 = 0^\circ$)。由于该组合不在表3中，另对该结构仿真计算： $T_{max} =$

332.7 K ， $\Delta T_{max} = 5.2 \text{ K}$ ， $\Delta p = 20.4 \text{ Pa}$ 。进出口压力差 Δp 确实略低于表3的所有结果，但该结构 $\Delta T_{max} > 5 \text{ K}$ ，温度均匀性较差，No.7 ($A_{III}B_1C_{III}$) 仍为最优结构。

2.3 进一步优化

由2.1节分析可知：较小的 θ_u 和较大的 θ_1 有利于降低电池组的最高温度、提高温度场均匀性。为了进一步探讨 θ_u 和 θ_1 的影响规律，另作因素设置，如表5。同样方法做正交实验设计，仿真计算。各因素对评价指标的影响趋势如图6所示。

表5 因素水平表

Table 5 Factors and levels of orthogonal experiment

水平	因素		
	A	B	C
I'	$\Delta L / \text{mm}$	$\theta_u / ^\circ$	$\theta_1 / ^\circ$
II'	0	0	5
III'	0.2	2.5	10
III'	0.3	5	11

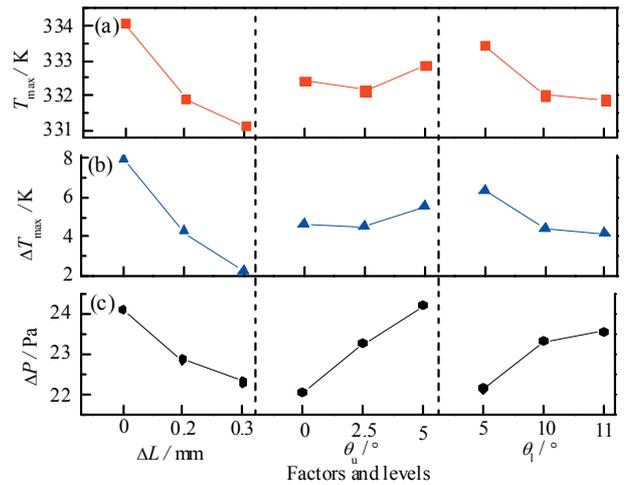


图6 T_{max} 、 ΔT_{max} 和 Δp 的平均值
Fig. 6 Average of T_{max} 、 ΔT_{max} and Δp for each factor

图6a中 ΔL 的水平改变对 T_{max} 影响最大，作用规律与图2一致，水平 III' 最优。 θ_1 的减小仍显示了对降低 T_{max} 的有利影响，水平 III' 最优。 θ_u 的增加会导致 T_{max} 先减小后增大，这种影响较小，水平 II' 最优。

图6b中 ΔL 、 θ_u 、 θ_1 三个因素分别对 ΔT_{max} 的作用规律与对 T_{max} 的作用规律一致。

图6c中 ΔL 的增大会降低进出口压力差 Δp ，水平 III' 最优。而 θ_u 、 θ_1 均为水平 I' 最优。

综上所述,得到基于温度的最优结构 X 和基于压力的最优结构 Y:

结构 X: $\Delta L = 0.3 \text{ mm}$, $\theta_u = 2.5^\circ$, $\theta_l = 11^\circ$;

结构 Y: $\Delta L = 0.3 \text{ mm}$, $\theta_u = 0^\circ$, $\theta_l = 5^\circ$ 。

对结构 X、Y 建模计算,除了 ΔL 、 θ_u 、 θ_l 外,其他设置均不变,结果见表 6。

表 6 结构 X、Y 仿真结果

Table 6 Simulation results of structure X and Y

结构	$\Delta L/\text{mm}$	$\theta_u/^\circ$	$\theta_l/^\circ$	T_{\max}/K	$\Delta T_{\max}/\text{K}$	$\Delta p/\text{Pa}$
X	0.3	2.5	11	330.5	1.28	22.7
Y	0.3	0	5	331.1	2.20	20.6

结构 X 的 T_{\max} 、 ΔT_{\max} 分别比表 3 中 No.7 ($A_{III}B_1C_{III}$) 降低了 0.1 K、0.12 K,降幅较小,但 Δp 上升了 1.2 Pa。由图 6 可知, θ_u 的变化、 θ_l 由 10° 增加到 11° 对 T_{\max} 、 ΔT_{\max} 影响均较小,但 θ_u 和 θ_l 的增大引起了 Δp 较大的增长。

与表 3 中 No.7 ($A_{III}B_1C_{III}$) 相比,结构 Y 的 T_{\max} 和 ΔT_{\max} 虽有所上升,但最高温度和电池组温度均匀性可以满足要求,同时 Δp 下降到了 20.6 Pa,能耗最低。

综上所述,结构 Y 为最优结构,即:间距递减幅度 0.3 mm,上集流板倾斜 0° ,下集流板倾斜 5° 。对最优结构的电池组进行 2 C 放电稳态仿真计算,图 7 给出了对称面温度云图。

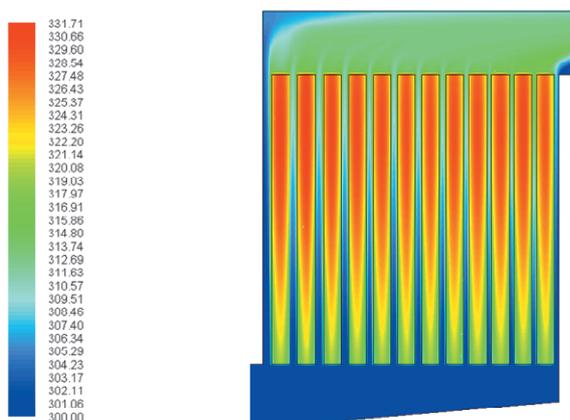


图 7 电池组对称面温度云图

Fig. 7 Temperature field cloud picture of battery pack symmetry plane

3 电池组放电仿真与实验对比

电池模块由空气入口附近往后依次编号 1~12。电池组分别采用 0.5 C、1 C、2 C 倍率放电,生热速

率如表 1 所示,冷却风速分别采用 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $1.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。实验中电池组的测温点与数值模拟的取温点位置相同,选取各电池模块靠近空气入口侧的表面的中心点。

仿真结果显示,放电结束时,各电池模块表面中心温度的仿真值与实验值的趋势一致,如图 8 所示,各电池模块表面温度均匀性较好。

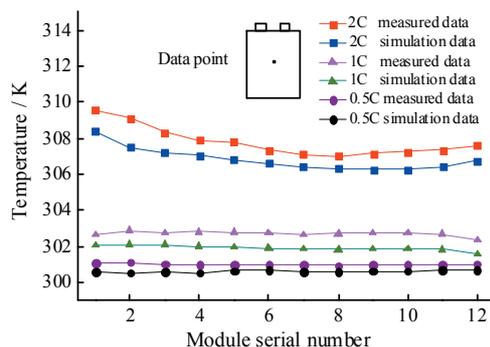


图 8 放电结束时各电池模块表面中心温度

Fig. 8 Surface center temperature of each battery module at the end of discharge

2 C 放电结束时,电池组内模块最高温度为 312.36 K,在锂离子电池最佳工作温度范围;不同模块最高温度最大相差 0.95 K,能满足电池组温度一致性要求。

图 9 显示了放电过程中模块 2 的表面中心温度变化曲线,仿真与实验结果基本吻合。在放电初期,实验值低于仿真值,后期实验值较高,主要是由于仿真过程未考虑电池生热速率变化对电池温度分布的影响^[10]。恒倍率放电时电池各区域生热速率不断变化,放电前期电极附近区域生热速率大于其他区域;放电后期电极远端区域生热速率最大^[11]。整个

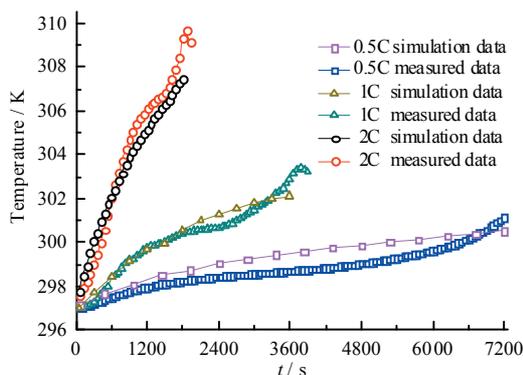


图 9 放电过程中模块 2 的表面中心温度变化曲线

Fig. 9 Surface center temperature of module 2 in the process of discharge

电池模块前期生热速率较小, 后期由于温度的上升引起内阻增大, 不可逆热增加, 生热速率不断上升。放电结束后, 电池温度仍会继续上升一段时间。

4 总 结

运用正交试验法设计电池组散热结构参数优化试验方案, 研究电池组间距递减幅度、上下集流板倾斜角度变化。电池组间距递减幅度的增大有利于抑制电池组的温升、提高温度均匀性, 同时有利于降低进出口压差; 上集流板倾斜角度的增大不利于控制温度场、进出口压差; 增大下集流板倾斜角度对控制温度场有利, 但会提高进出口压差。综合温度场、进出口压差因素, 确定了电池组最优结构参数: 间距以 0.3 mm 递减, 上集流板倾斜 0°, 下集流板倾斜 5°。

根据优化结构, 实验研究和仿真了 0.5 C、1 C、2 C 恒倍率放电工况下电池组的温度变化, 结果基本吻合, 电池组最高温度在最佳工作范围内, 温度均匀性较好。研究中还存在一些不足: 没有考虑锂离子电池热物性的温度依赖性; 采用均一化电池生热模型, 未考虑不同区域生热速率随时间变化的影响。这些都有待进一步研究。

参考文献:

- [1] PALACÍN M R, DE GUIBERT A. Why do batteries fail?[J]. *Science*, 2016, 351(6273): 1253292. DOI: 10.1126/science.1253292.
- [2] PARK H. A design of air flow configuration for cooling lithium ion battery in hybrid electric vehicles[J]. *Journal of power sources*, 2013, 239: 30-36. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.03.102.
- [3] 赵佳腾, 饶中浩, 刘新健, 等. 大功率锂离子动力电池组散热特性数值模拟[J]. *新能源进展*, 2014, 2(6): 471-475. DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2014.06.010.
- [4] 孙秋娟, 王青松, 平平, 等. 循环充放电条件下锂离子

电池的温度模拟[J]. *新能源进展*, 2014, 2(4): 315-321. DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2014.04.0012.

- [5] 白帆飞, 宋文吉, 陈明彪, 等. 锂离子电池组热管理系统研究现状[J]. *电池*, 2016, 46(3): 168-171.
- [6] CHO G Y, CHOI J W, PARK J H, et al. Transient modeling and validation of lithium ion battery pack with air cooled thermal management system for electric vehicles[J]. *International journal of automotive technology*, 2014, 15(5): 795-803. DOI: 10.1007/s12239-014-0083-x.
- [7] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. *实验技术与管理*, 2010, 27(9): 52-55. DOI: 10.3969/j.issn.1002-4956.2010.09.016.
- [8] LIU Y P, OUYANG C Z, JIANG Q B, et al. Design and parametric optimization of thermal management of lithium-ion battery module with reciprocating air-flow[J]. *Journal of central south university*, 2015, 22(10): 3970-3976. DOI: 10.1007/s11771-015-2941-8.
- [9] GIULIANO M R, PRASAD A K, ADVANI S G. Experimental study of an air-cooled thermal management system for high capacity lithium-titanate batteries[J]. *Journal of power sources*, 2012, 216: 345-352. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.05.074.
- [10] 罗玲, 宋文吉, 林仕立, 等. 锂离子电池热模型的研究现状[J]. *电池*, 2015, 45(5): 280-283. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1579.2015.05.013.
- [11] XU M, ZHANG Z Q, WANG X, et al. A pseudo three-dimensional electrochemical-thermal model of a prismatic LiFePO₄ battery during discharge process[J]. *Energy*, 2015, 80: 303-317. DOI: 10.1016/j.energy.2014.11.073.

作者简介:

白帆飞 (1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事储电系统热管理控制研究。

陈明彪 (1985-), 男, 助理研究员, 主要从事大规模储电系统及其控制技术研究。

宋文吉 (1978-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事大规模储电系统及其控制技术研究。

冯自平 (1968-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事先进储能技术研究。