

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201704076



车用锂电池组热流场特性 数值模拟与优化设计

韩锋钢^{1,2}, 潘怀杰¹, 彭倩^{1,2}, 林有淮², 刘胜¹

(1. 厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361024;
2. 厦门威迪思汽车设计服务有限公司, 福建 厦门 361024)

摘要: 针对车用电池温升过高、电池组温差大的问题,开展电池包热流场分析与优化设计.根据 Bernardi 的生热速率方程式,建立由电池电解液、正负极柱和隔膜四部分组成的单体电池热耦合模型及成组电池传热模型;利用 Fluent 软件分析锂电池单体在自然对流环境下的温升特性,研究成组电池在强制对流条件下的热流场特性;通过增加导流板优化电池箱内流场结构,并评估导流板对电池组散热效率的作用.结果表明:单体锂电池在自然对流下温升明显,电池内核温度远高于正负极柱温度;电池箱进风口位置及结构决定箱内空气的流向和成组电池的散热效果;通过对进、出风口位置的设计及增加导流板,可有效改进电池组热流场的均匀性,从而提高散热效果.

关键词: 锂离子电池组; 新能源汽车; 热模型; 风冷; 导流板; 温度场

中图分类号: U 469.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2017)05-0625-07

Numerical Simulation and Optimization Design of Thermal Flow Field Characteristics of Lithium-Ion Battery Pack for Vehicles

HAN Fenggang^{1,2}, PAN huaijie¹, PENG Qian^{1,2},
LIN Youhuai², LIU Sheng¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;
2. Xiamen Vehicle Design & Services Company Limited, Xiamen 361024, China)

Abstract: In order to solve the problem of temperature sharp rising and significant thermal difference among the battery modules of electric vehicles, a study of thermal flow analysis and optimization on battery pack was carried out. A thermal coupling model with four parts, namely a single cell electrolyte, a positive plate collector, a negative plate collector and a battery plate was established. A heating transferring model of individual battery was also established based on Bernardi heat generation rate model; then using Fluent software the heat generation characteristics of lithium battery monomer in natural convection environment was investigated and the effect of flow structure on the heat radiation was assessed with an optimized battery pack model. The re-

收稿日期: 2017-04-24

通信作者: 韩锋钢(1965-),男,副教授,博士,主要从事新能源汽车研发、客车整车及零部件 CAE 分析及轻量化的研究. E-mail:hanfg@xmut.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51505403); 国家高端外国专家项目(GDT20153600065); 福建省教育厅客车及特种车辆研发协同创新中心 2011 计划项目(2016AYF004); 福建省高校杰出青年科研人才培育计划项目(2016 年度); 厦门理工学院研究生科技创新计划项目(YKJCX2016001)

sults indicate that the individual lithium battery temperature rises sharply under natural convection, while temperature increment of positive pole core is far higher than that of negative pole core; the inlet structure greatly influences the velocity field of cooling air and temperature distribution of the battery; and the uniformity of the battery thermal flow can be significantly improved by reasonably designing the air inlet and outlet positions and adding a guide plate, which can further enhance the cooling effect.

Keywords: lithium-ion battery pack; new energy vehicles; thermal model; air cooling; guide plate; temperature field

由于与新能源电池性能有关系的相关参数,如工作电压、放电容量、循环寿命等都与温度息息相关^[1-2],电池组充放电过程中电流大、箱内布置密集紧凑且工作环境存在较大不确定性,电池组的工作效率、稳定性和使用寿命会由于箱内热量耗散的问题受到严重制约.当电池温度不在 40 ℃ 到 20 ℃ 的范围内时,磷酸铁锂离子动力电池组(LiFePO₄)的放电效率会有一个快速下降的表现,若要使其放电效率达到 80% 以上,电池组理想的工作温度最好是处于 18~43 ℃ 之间^[3].国内众多的学者针对单体电池生热模型及电池箱体散热效果等问题开展了研究.李腾等^[4]介绍了在锂离子新能源电池方面所开展的电-热及电化学-热耦合模型等的研究;陈燕虹等^[5]采取数值模拟的方式研究了成组电池生热和散热特性;罗玉涛等^[6]则提出了以变压器油作为冷却介质直接接触液体的另一种冷却方式.但目前大部分的研究都集中在散热方式、相变材料的研究上,而在风冷方式的研究中,还缺乏对电池箱内流场起导向作用的进、出风口的设计.本文对车用锂电池组热流场特性进行了数值模拟与改进设计,并通过进、出风口位置设计及增加导流板优化电池箱体内流场走向,以改善成组电池热流场的散热性能.

1 数学模型

由于电池箱内紧密布置结构件及电池组,箱内气流为湍流流动,其换热形式主要为强迫对流换热及固体间热传导.

文中在建立流体仿真计算的数学模型时采用 $k-\epsilon$ 湍流模型(k 为湍动能, ϵ 为耗散率)^[7-8],该模型包括 5 个主要方程.

1) 质量守恒方程,其表达式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_r)}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v_\varphi)}{r^{\partial \varphi}} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0. \tag{1}$$

式(1)中: v_r, v_z, v_φ 分别为圆柱坐标系下径向、轴向和周向的相对流体速度; ρ 为气体密度; t 为时间.

2) 动量方程(忽略气体重力作用)为

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) - \nabla(\mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{V}) = \nabla_p \nabla(\mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{V})^T. \tag{2}$$

式(2)中: \mathbf{V} 为流体速度向量; μ_{eff} 为等效粘度, $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$, 其中, μ 为流体粘度, μ_t 为湍流粘度, $\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \epsilon$, C_μ 为常数,取为 0.09; p_t 为修正压力, $p_t = p + 2\rho k / 3$, p 为压力.

3) 能量方程为

$$\frac{\partial(\rho h_t)}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla(\rho v h_t) = \nabla(\lambda \nabla T). \tag{3}$$

式(3)中: h_t 为气体总焓; λ 为导热系数; T 为气体温度.

4) 湍动能方程(k 方程)为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho \mu k) = \nabla[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \nabla k) + p_k - \rho_\epsilon]. \tag{4}$$

5) 湍动耗散率方程(ϵ 方程)为

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho \mu \epsilon) = \nabla[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \nabla \epsilon) + \frac{\epsilon}{K}(C_{\epsilon_1} p_k - C_{\epsilon_2} \rho \epsilon)]. \tag{5}$$

式(5)中: $C_{\epsilon_1}, C_{\epsilon_2}, \sigma_k, \sigma_\epsilon$ 均为常数.根据 Launder 等^[9]的研究结果及后来相关的试验,在标准 $k-\epsilon$ 模型中, $C_{\epsilon_1}, C_{\epsilon_2}, \sigma_k, \sigma_\epsilon$ 分别取 $C_{\epsilon_1} = 1.44, C_{\epsilon_2} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$.

2 锂离子电池生热机理

充放电过程中, 电池内数目相等的锂离子和电子会有嵌入和脱嵌的现象, 该动作产生的热量称之为反应热. 充放电中的该过程为可逆反应, 大小相等符号相反^[10], 记为 Q_r ; 根据熵增原理, 实际上该动作中, 还包括极化反应热 Q_p 、过充及过放副反应热 Q_s 、电解质分解和由于自放电生成的热量 Q_i , 以及电池内阻焦耳热 Q_t . 因此, 上述关系简化为 $Q_t = Q_r + Q_p + Q_s + Q_i$.

因为 BMS 对每个电池的电流、电压和温度数据都会进行检测, 防止过充过放电, 所以 Q_s 作用很小, 可以忽略. 此外, 可以利用等效极化内阻产生的热量来代替极化反应热^[11], 因此, 该过程可简化为

$$Q_t = Q_r + I^2 R. \tag{6}$$

式(6)中: $R = R_z + R_p$, R_z 是电池自身的欧姆内阻, R_p 是电池的等效极化内阻.

3 数值模型建立

3.1 锂离子电池生热模型

在电池包的热行为仿真计算中, 将电池单体视为一个单独的封闭子系统, 和外界仅有热量方面的交换. 假设单电池内部的材料是相同的材料, 比热容和 X, Y, Z 三个方向的热导率等于电池的导热系数, 充电状态和实时温度不会对其产生影响, 则成组电池生热率模型为

$$\dot{Q} = \sum_{i=1}^n \dot{q}_p + \sum_{i=1}^n \dot{q}_n. \tag{7}$$

式(7)中: \dot{Q} 代表成组电池所产生的生热率总和; n 为单体电池的数量.

运行中的电动汽车电池组的发热遵守热力学平衡方程, 即

$$\dot{Q} = \dot{Q}_a + \dot{Q}_e. \tag{8}$$

式(8)中: \dot{Q} 为电池的吸热率; \dot{Q}_e 为电池组和环境的热交换.

通常, 电池组中单体质量和材料都是完全相同的, 因此, 电池组吸收热量计算式可简化为

$$Q_a = c_p m \sum_{i=1}^n \Delta T_i. \tag{9}$$

式(9)中: c_p 为电池的平均比热容; m 为电池平均质量; ΔT_i 为单体电池的温差.

当单体电池以不同倍率放电时, 由于材料不同导致电池的内核与极柱生热的速率是有差异的. 当生热速率比散热速率大时, 会导致电池的温度持续上升; 温度过高将影响电池的循环使用寿命和安全性. 因此, 计算散热率和散热速率对各种工况下的仿真计算都有着重要的意义^[12]. 为了便于数值模拟, 文中只针对 0.5C 的放电倍率恒流放电的情况进行仿真, 如表 1 所示. 表 1 中: C 为放电倍率; I 为单体电池电流; Q 为生热率.

表 1 不同放电倍率下单体电池各部分生热率

Tab. 1 Heat generation rate of each part of single cell at different discharge rate

放电倍率	I/A	$Q/W \cdot m^{-3}$		
		内核	正极柱	负极柱
0.3C	30	2 596.00	629.19	391.54
0.4C	40	3 627.96	1 122.36	636.57
0.5C	50	4 756.17	1 754.32	994.59
1.0C	100	11 690.21	7 004.05	3 982.07

3.2 锂离子电池热特性参数

采用的锂离子单体电池为方体, 尺寸为 140 mm×64 mm×211 mm, 锂单体电池划分为电解液区域、正负极柱和隔膜四部分, 每个区域的等效参数, 如表 2 所示. 表 2 中: h 为材料厚度; ρ 为材料密度; 正

表 2 锂离子电池材料特征参数

Tab. 2 Characteristic parameters of lithium ion battery materials

名称	材料	$h/\mu m$	$\rho/kg \cdot m^{-3}$	$c/J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$	$\lambda/W \cdot (m \cdot K)^{-1}$
正极	Lico02	133	2 328.50	1 269.21	1.58
正极集流板	铝	20	2 702.00	903.00	238.00
负极	石墨	136	1 347.33	1 437.30	1.04
负极集流板	铜	9	8 933.00	385.00	398.00
隔膜	PP	40	1 008.93	1 978.16	0.33
电解液	LiPF6/EC+DMC+EMC	—	1 290.00	133.90	0.45

极、负极及隔膜的参数为浸满电解液工况下的参考值,由实验获得;正极、负极、隔膜及电解液的比热容(c)和热导率(λ)值可由文献[2]得到.

4 车用电池箱热流场分析

4.1 单体电池热流场分析

基于电池的几何参数,利用 CREO 建模软件对单体电池进行几何建模并导入到 Hypermesh 软件中进行流体网格的划分,如图 1 所示.采用流体模拟软件 Fluent 对单体电池的热耦合模型进行求解,得到单体电池的温度分布.根据相关文献,对于空气中自然散热的电池表面,在计算时取其极耳传热系数为 $3.9\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$,极板表面传热系数为 $0.427\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$.电池单体在自然冷却,0.5C 和 1.0C 放电倍率下的恒流放电温度云图,如图 2,3 所示.由图 2,3 可知:0.5C 放电倍率时,单体电池正、负极柱最高温度分别为 $36.4,35.7\text{ }^{\circ}\text{C}$;而 1.0C 放电倍率时则为 $37.1,36.3\text{ }^{\circ}\text{C}$.说明正极柱温差高于负极柱温差,单体电池温度由质心向四周壳体逐级递减.由于极柱传热系数大于电池壳体的传热系数,因此,最大温度出现在电池中心偏上的位置,在自然冷却环境中,单体电池最大温差达到 $13.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,说明电池的热积累是电动汽车使用的关键问题.

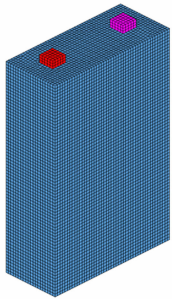
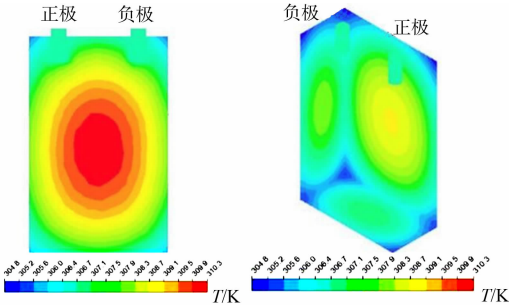


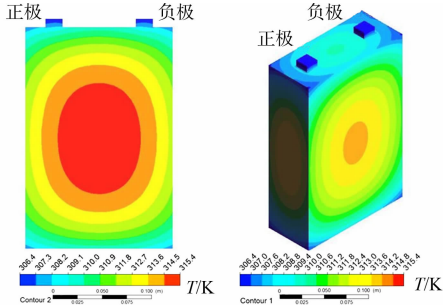
图 1 锂单体电池有限元模型
Fig.1 Finite element model of lithium battery



(a) Z-X 对称面 (b) 单体电池整体

图 2 单体电池 0.5C 放电倍率的温度云图

Fig.2 Temperature nephogram of single battery at 0.5C charge



(a) Z-X 对称面 (b) 单体电池整体

图 3 单体电池 1.0C 放电倍率的温度云图

Fig.3 Temperature nephogram of single battery at 1.0C charge

分别监测单体电池 Z-X 对称面自上向下的 5 个等距离监测点的温度,结果如图 4 所示.

4.2 电池组热流场分析

当汽车以较高的速度运行,如大角度爬坡时,电池组的放电倍率是最大的,也是电池生热量最大的工况.若仅靠箱体自然冷却会造成热量积累,特别是电池组中心聚集的热量无法很快地耗散,过热的温度不仅使电池性能下降,而且造成的损伤是无法修复的,使电池容量和性能下降.因此,必须采取强制冷却的方式,使电池箱内的温度保持在能使锂离子电池正常工作的范围内.以某车用锂电池组为例,该电池箱内置电池由 4 列 5 排共 20 个电池单体单层排列构成,大小为 $953.5\text{ mm}\times 556.5\text{ mm}\times 211.0\text{ mm}$.图 5 为冷却风扇及电池组布置图,图 6 为其有限元模型.用于送风的风扇有两个,置于距离电池组前端 50 mm ,出风口有一个,置于距离电池组 25 mm 处.

数值模拟边界条件采用速度入口和压力出口,箱体其余外部边界采用默认壁面边界,空气入口速度为 $2.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.电池箱体与外部空气的能量交换主要途径是对流和辐射换热,由于热管理系统的存在,可忽略其对成组电池热流场特性的影响.参考文献[13]可得对流换热系数 $h_x=15\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$,辐射换热系数 $h_r=0.2$.在外部环境摄氏温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况下,以 0.5C 放电倍率下,恒流放电完成后箱体内冷却空气流线,如图 7 所示.

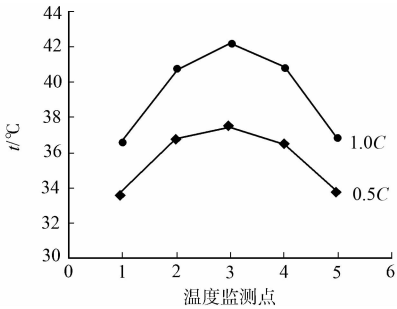


图 4 不同放电倍率下电池组的温度曲线

Fig.4 Temperature curve of battery pack at different discharge rate

由图 7(a)可知:进风端空气流速(v)较出风端低,冷却空气流速由进口端沿出口端均匀平顺,空气流动能量损失较小.由图 7(b)可知:在进口端与电池组之间存在多个漩涡,造成冷却空气能量的损失,当冷却空气到达电池箱上端面后,有一部分空气经单体电池之间的缝隙流向箱体底部,随后往电池箱出口流动;各排之间空气流速大小及均匀性相差不大,而各列之间空气流速大小及均匀性相差较大.

优化前的电池组温度分布,如图 8 所示.由图 8 可知:第 3,4 排电池组温度较高,结合图 7 可知此处的空气是流速最低的地方;温度较低处出现在进风口最前排顶部和出风口第 5 排中间区域;最高温度 $44\text{ }^{\circ}\text{C}$ 出现在第 3 排中下部位置,最低温度 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 出现在第 1 排进风口处,成组电池的温差最大为 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$,可见电池组热量分布均匀性不理想.

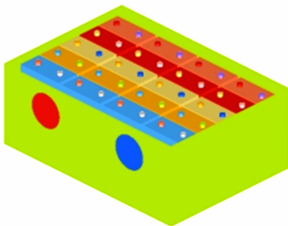


图 5 冷却风扇及电池组布置图
Fig. 5 Diagram of cooling fan and battery pack

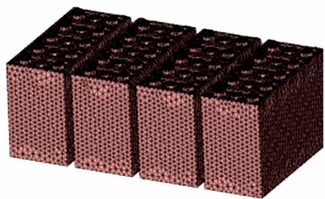
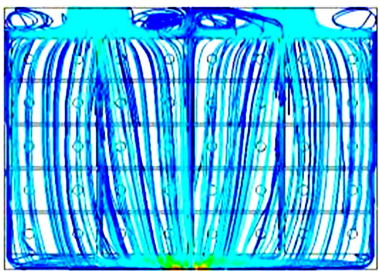
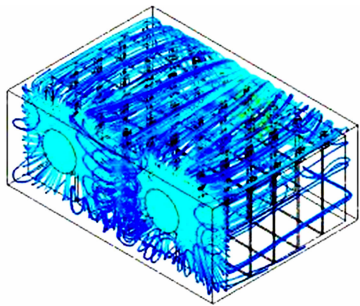


图 6 电池组网格模型
Fig. 6 Meshing schematic diagram of battery pack



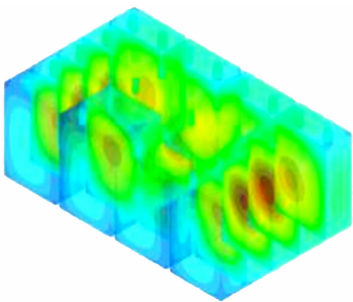
(a) 轴视图



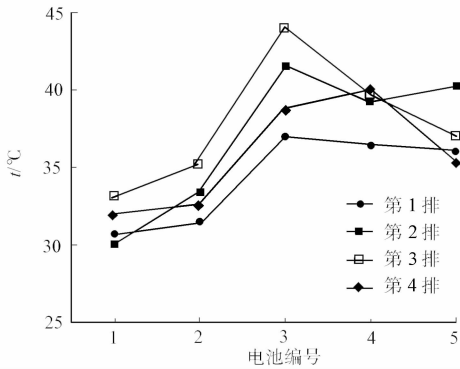
(b) 流场云图

图 7 电池箱冷却空气流场云图

Fig. 7 Velocity streamlines of cooling air in battery box



(a) 电池组温度云图



(b) 电池组温度曲线

图 8 优化前的电池组温度分布

Fig. 8 Temperature distribution of battery pack before optimization

4.3 电池箱结构优化分析

针对上述仿真结果存在的不足之处对电池箱结构进行改进设计,在进风口与电池组之间增加导流板,其结构如图 9,10 所示.为了加大对电池组底部区域的冷却效果,将出风口向电池箱底部下移 30 mm ,其他布局与原结构一致.优化后,以 0.5 C 放电倍率时的冷却空气速度流线云图,如图 11 所示;而以 0.5 C 和 1.0 C 放电倍率时的电池组温度分布,如图 12,13 所示.

由图 12,13 可知:该电池组最高和最低温度分别为 $35.2, 26.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,均在单体电池理想的工作温度范围内,并且将电池组的温差缩小至 $8.4\text{ }^{\circ}\text{C}$.为满足使用寿命及安全性,要求留出了足够的余量.

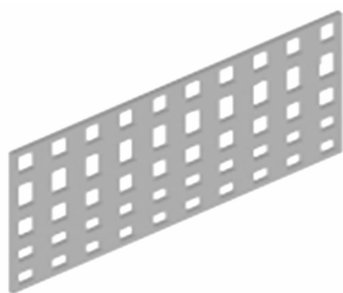


图 9 导流板结构示意图

Fig. 9 Schematic diagram of guide plate

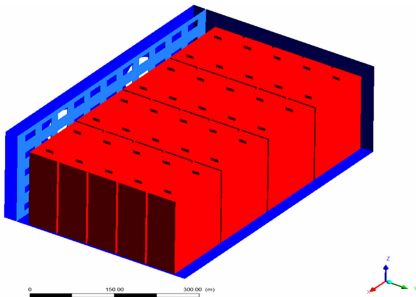
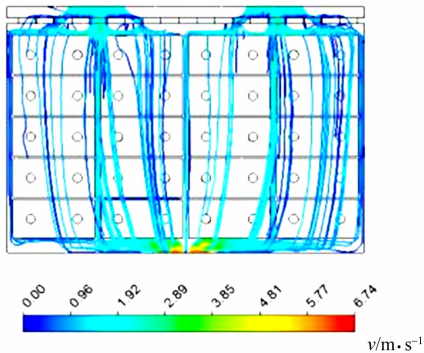
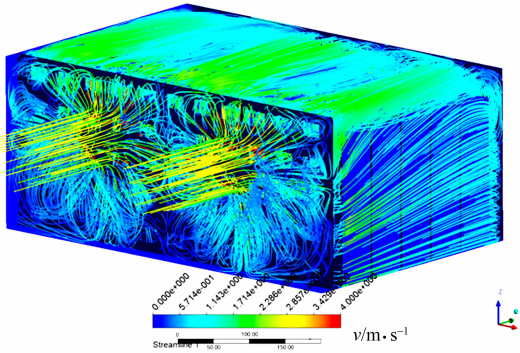


图 10 导流板位置

Fig. 10 Guide plate position



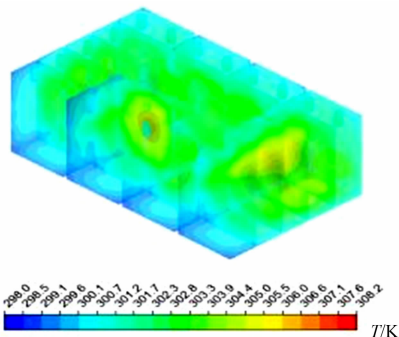
(a) 俯视图



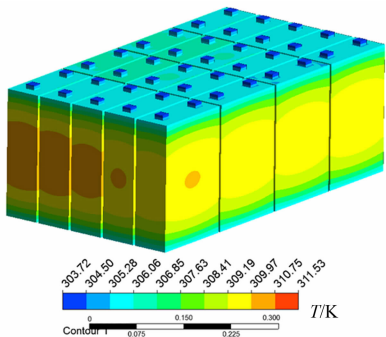
(b) 流线云图

图 11 优化后以 0.5C 放电倍率时的冷却空气速度流线云图

Fig. 11 Velocity streamline of cooling air at 0.5C discharge rate after optimization



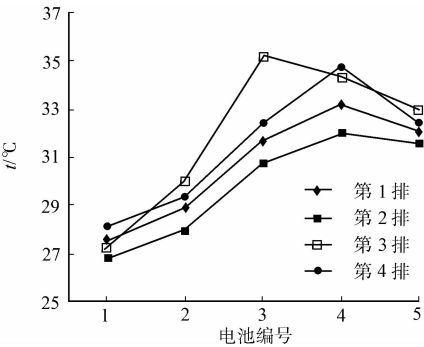
(a) 0.5C 放电倍率



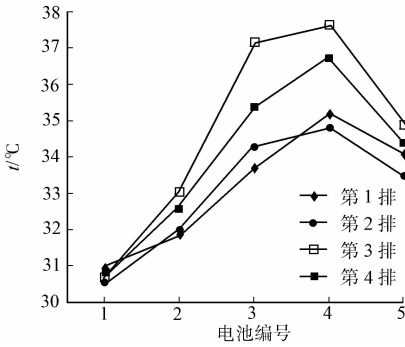
(b) 1.0C 放电倍率

图 12 优化后不同放电倍率下的电池组温度云图

Fig. 12 Optimized battery temperature at different discharge magnifications



(a) 0.5C 放电倍率



(b) 1.0C 放电倍率

图 13 优化后不同放电倍率下的电池组温度曲线

Fig. 13 Optimized battery temperature curves at different discharge magnifications

4.4 不同放电倍率下的电池组温度

以改进后电池箱结构为基准,模拟计算了不同放电倍率下电池组的温度场,结果如表 3 所示. 由表 3 可知:随着运行工况不同导致放电倍率逐渐增大的工况下,电池组的温升和最大温差都在逐渐增加,成组电池组在 1.0C 恒流放电时的温差最高可达到 38.56 ℃,接近锂离子电池最舒适的工作环境温度(40 ℃).由此可见,当电动汽车长时间在复杂环境中运行时,会使电池组长期处于高倍率放电状态,应考虑加强对电池组的冷却措施.

表 3 不同放电倍率下电池组的温度特性

Tab. 3 Temperature characteristics of battery at different discharge rates

放电倍率	$t_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$t_{\min}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta t/^{\circ}\text{C}$
0.3C	30.70	25.40	5.30
0.4C	33.10	26.10	7.00
0.5C	35.20	27.80	7.40
1.0C	38.56	30.55	8.10

5 结论

- 通过对单体锂离子电池的热特性和电池包热流场的分析与研究,得到以下 3 个主要结论.
- 1) 成组电池单体电池间的最大温差与放电倍率成正比. 考虑到实际汽车运行工况需要,尤其在爬坡、加速等大功率使用的工况下,应设计电池热管理系统以保证电池组的热稳定性,减小功率的损失和对电池造成的损害.
- 2) 成组电池的温度场与单体电池所组成的温度场没有直接的叠加关系. 在 0.5C 放电时,电池单体的最大温差为 13.30 ℃,而电池组则达到 7.40 ℃. 因此,电池组温度场的均匀性对于电池组寿命和电池性能尤其重要.
- 3) 通过 CFD 的数值模拟仿真方法,可详细了解电池箱箱体内部的流场流向和温度的总体分布情况. 根据所得出的结果,对电池箱体的通风冷却结构作出部分优化,提出了在箱体进口端增加导流板的改进方案,有效地提高了温度场分布的均匀性. 结果表明,在 0.5C 放电倍率下的各电池单体最大温差为 7.40 ℃;而在 1.0C 放电倍率下的各电池单体最大温差为 8.10 ℃.

参考文献:

[1] SIEVERS M, SIEVERS U, MAO S S. Thermal modeling of new Li-ion cell design modifications[J]. *Forsch Ingenieurwes*, 2010, 74(4): 215-231. DOI:10.1007/s10010-010-0127-y.

[2] CHEN S C, WAN C C, WANG Y Y. Thermal analysis of lithium-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2005, 140(1): 111-124. DOI:10.1016/j.jpowsour.2004.05.064.

[3] 辛乃龙. 纯电动汽车锂离子动力电池组热特性分析及仿真研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012: 29-30.

[4] 李腾, 林成涛, 陈全世. 锂离子电池热模型研究进展[J]. *电源技术*, 2009, 33(10): 927-932.

[5] 陈燕虹, 吴伟静, 刘宏伟, 等. 纯电动汽车电池箱的热特性[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2014, 44(4): 925-953.

[6] 罗玉涛, 罗卜尔思, 郎春艳. 锂离子动力电池组的直接接触液体冷却方法研究[J]. *汽车工程*, 2016, 38(7): 909-914.

[7] 王福军. 计算流体动力学分析 CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 78-79.

[8] AMANO R S. Development of a turbulence near-wall model and its application to separated and reattached flows [J]. *Numerical Heat Transfer*, 2004, 7(1): 59-75. DOI:10.1080/10407798408546956.

[9] LAUNDER BE, SAMARAWEEER D S A. Application of a second-moment turbulence closure to heat and mass transport in thin shear flows (I): Two dimensional transport[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, 22(12): 1631-1643. DOI:10.1016/0017-9310(79)90080-2.

[10] 彭强. 电动汽车用锂离子动力电池热效应研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012: 9-10.

[11] 车杜兰. 电动汽车锂离子电池包热特性研究与优化[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009: 21-22.

[12] 张云云, 白洁, 张国庆. 大倍率放电时电动汽车用锂离子电池的热性能[J]. *汽车安全与节能学报*, 2015, 6(1): 97-101.

[13] 冯竟阳, 戴作强, 张纪鹏, 等. 基于 Ansys Workbench 12.0 的磷酸铁锂动力电池温度场特性研究[J]. *青岛大学学报(工程技术版)*, 2013, 28(1): 51-55.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 崔长彩)