电动汽车动力电池生热模型和散热特性

姬芬竹 刘丽君 杨世春 徐 斌

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 结合 Bernardi 生热速率模型建立了单体电池正极片集流体、负极片集流体和电池极板的热耦合模型以及成组电池传热模型;利用 Fluent 软件仿真分析了自然通风环境中 $LiFePO_4$ 单体电池的生热特性,模拟了强制空气对流冷却条件下成组电池的生热和散热特性,分析了电池箱出风口位置对电池温度的影响;计算了不同放电倍率下电池组温度变化. 计算结果表明:动力电池恒流放电末期,正、负极片的电流密度最大值出现在极耳处,正、负极耳温度高于极板温度,且正极耳温度大于负极耳温度;强制冷却条件下成组电池热特性满足安全工作温度要求;电池箱出风口位置直接影响冷却空气速度场和电池组温度场分布,出风口设置在电池箱下部有助于改善其热状态一致性. 对特征点温度监控数据与仿真结果的误差小于5%,能够满足工程需要.

关 键 词: 电动汽车; 动力电池; 热模型; 冷却; 温度场

中图分类号: U 469.72

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2014)01-0018-07

Heating generation model and heat dissipation performance of the power battery in electric vehicle

Ji Fenzhu Liu Lijun Yang Shichun Xu Bin

(School of Transportation Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The thermal coupling models were established on the positive plate collector, the negative plate collector and the battery plate, which based on the Bernardi heat generation rate model of a single battery. The heat transfer model of battery group was founded as well. In the natural ventilation environment, the heat generation characteristics of a single battery $LiFePO_4$ was simulated by using Fluent software. The performances of heat generation and dissipation of battery group were simulated under the condition of forced air convection cooling. The effect of air-outlet position on battery temperature was analyzed. The effect on battery temperature was analyzed based on air-outlet position. In different discharge ratio, the battery temperature was calculated. The calculated results show that the pole ear temperature is higher than polar balde, and the postive ear temperature is greater than negative ear at the end of constant current discharging; The thermal performance of battery could meet the demands of the safe operating temperature in forced cooling conditions; The air-outlet position directly affests the air velocity profile and battery temperature field; The below air-outlet contributes to improve the consistency in thermal state. The error in calculating and testing result is less than 5% at the feature points, which could meet the needs in engineering.

Key words: electric vehicle; power battery; thermal model; cooling; temperature field

收稿日期: 2013-02-01; **网络出版时间**: 2013-08-15 16:36

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20130815.1636.002.html

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2011AA11A239); 北京市自然科学基金资助项目(3122024)

作者简介: 姬芬竹(1963 -),女,河南洛阳人,副教授,jfz@buaa.edu.cn.

动力电池作为电动汽车的储能装置,其性能对整车性能产生重要影响,如放电容量、工作电压、循环寿命以及状态一致性等都与电池的工作温度密切相关[1-2]. 当温度高于40 ℃或低于20 ℃时,磷酸铁锂离子动力电池组($LiFePO_4$)的放电效率快速下降,为使其放电效率在80%以上,电池组的理想工作温度应该在18 ~43 ℃之间[3]. 此外,电池的密集摆放使电池箱内部热量集聚,造成各单体电池温度不均衡,进而影响电池性能的一致性与荷电状态(SOC,State of Charge)估计的准确性[4]. 因此,电动汽车动力电池的热问题是亟待解决的核心技术难题. 目前,国内外对电动汽车电池热问题的研究主要集中在3个方面,即单体电池生热模型、成组电池热耦合模型和电池冷却方式等[5]. 单体电池生热模型大都以Bernardi模型[6]为基础;成组电池热耦合模型则应考虑电池组的具体特点、布置型式等,其研究成果已接近实用化;电池冷却方式的研究则是目前的热点和焦点[7]. 冷却介质主要有空气、液体和相变材料等. 理论上,液体冷却优于空气冷却,然而液冷系统不仅需要较高的油泵功率,而且还需要在电池组内部设计分布式的密闭流道,增加了电池组的整体质量,并降低了电池表面与传热介质之间的热传递效率[8]. 以石蜡、石墨复合的相变材料(PCM,Phase Change Material)为代表的相变材料在低温条件下具有较好的冷却性能,而高温下的冷却性能还需要进一步研究[9]. 因此,空气冷却是现有技术条件下动力电池的主要冷却方式,对空气流速和流场中温度分布进行研究是进行电池热管理的基础[10-11].

本文以"863"电动汽车攻关项目为平台,以磷酸铁锂离子动力电池($LiFePO_4$)为对象,在单体电池生热模型基础上建立成组电池传热模型,研究单体电池生热特性和电池成组应用时的散热特性,为电池热管理研究提供数据积累,为电动汽车的推广应用奠定基础.

1　动力电池热模型

1.1　单体电池热模型

电动汽车动力电池在充/放电过程中产生热量而使其温度发生变化,因此研究充/放电过程的生热量是进行电池热分析的基础. 电池的生热量 Q 主要由4部分组成,分别是化学反应热 Q_r,极化反应热 Q_p,欧姆热 Q_j 和由于过充/过放电、自放电以及电解质分解而生成的副反应热 Q_s. 因此,电池的实际生热量 Q 由下式计算:

$$Q = Q_r + Q_p + Q_j + Q_s \tag{1}$$

为了分析电池的生热量和温度变化,首先需要确定生热率. 美国伯克利大学的D. Bernardi用可逆熵变产生的热量描述化学反应热,提出了Bernardi生热率计算模型[6]:

$$\dot{q} = \left[I(E_0 - U_L) - IT\frac{dE_0}{dT} \right] / V_b \tag{2}$$

式中,$\dot{q}$ 为生热率,W/m^3;I 为充电电流,放电时取负值,A;E_0 为电池电动势,数值上等于开路电压,V;U_L 为单体电池端电压,V;T 为电池温度,K;V_b 为单体电池体积,m^3;$I(E_0 - U_L)$ 描述了电池工作中产生的欧姆热(即焦耳热),J;$IT\frac{dE_0}{dT}$ 表示由化学反应引起可逆熵变产生的热量,J.

电流密度 $J = I/V_b$,代入式(2)并整理得

$$\dot{q} = J\left(E_0 - U_L - T\frac{dE_0}{dT} \right) \tag{3}$$

Bernardi生热率模型没有考虑副反应热和极化热. 在安全充电范围内,不考虑过充/过放电产生的副反应热,且实际使用中自放电和电解质分解产生的热量很小,可认为 $Q_s = 0$,但电极表面极化现象产生的极化热对生热率有一定影响. 本文以等效极化内阻产生的焦尔热替代极化热,结合Bernardi生热速率模型,建立生热速率计算模型为

$$\dot{q} = J\left(E_0 - U_L - T\frac{dE_0}{dT} \right) + I^2 R_p \tag{4}$$

式中,R_p 为等效极化内阻,Ω.

电动汽车工作时,很难保证电池在完全绝热环境中工作,因此还应考虑其散热率:

$$\dot{q}_f = h\Delta T_m \tag{5}$$

式中,$\dot{q}_f$ 为散热率;h 为对流换热表面传热系数;ΔT_m 为换热面上冷却介质与电池表面的平均温差.

电动汽车用锂离子动力电池主要有柱状和片状两种结构,本文研究的 $LiFePO_4$ 电池为片状,其结构和正负极片坐标系如图1所示.

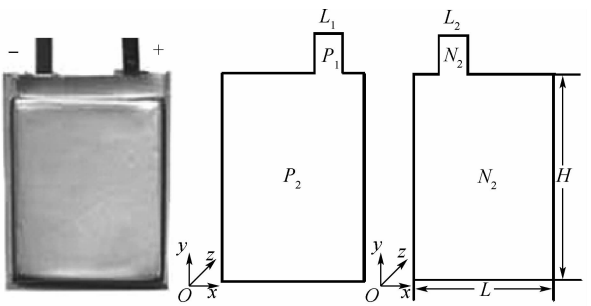


图1　锂离子电池结构示意图

在直角坐标系下,由能量守恒方程和傅里叶定律,综合考虑电池电势和电流密度模型,建立式

(6)所示的单体电池热耦合模型:

$$\left.\begin{aligned}
\rho_{\mathrm{p}} C_{\mathrm{p}} \frac{\partial T}{\partial t} &= k_{\mathrm{p}x} \frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} + k_{\mathrm{p}y} \frac{\partial^2 T}{\partial^2 y} + k_{\mathrm{p}z} \frac{\partial^2 T}{\partial^2 z} + \dot{q}_{\mathrm{p}} - \dot{q}_{\mathrm{fp}} \\
\rho_{\mathrm{n}} C_{\mathrm{n}} \frac{\partial T}{\partial t} &= k_{\mathrm{n}x} \frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} + k_{\mathrm{n}y} \frac{\partial^2 T}{\partial^2 y} + k_{\mathrm{n}z} \frac{\partial^2 T}{\partial^2 z} + \dot{q}_{\mathrm{n}} - \dot{q}_{\mathrm{fn}} \\
\rho_{\mathrm{r}} C_{\mathrm{r}} \frac{\partial T}{\partial t} &= k_{\mathrm{r}x} \frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} + k_{\mathrm{r}y} \frac{\partial^2 T}{\partial^2 y} + k_{\mathrm{r}z} \frac{\partial^2 T}{\partial^2 z} + \dot{q}_{\mathrm{r}} - \dot{q}_{\mathrm{fr}} \\
\dot{q}_{\mathrm{p}} &= J_{\mathrm{p}} \left(E_0 - U_{\mathrm{L}} - T \frac{\mathrm{d}E_0}{\mathrm{d}T} \right) + I_{\mathrm{p}}^2 R_{\mathrm{pp}} \\
\dot{q}_{\mathrm{n}} &= J_{\mathrm{n}} \left(E_0 - U_{\mathrm{L}} - T \frac{\mathrm{d}E_0}{\mathrm{d}T} \right) + I_{\mathrm{n}}^2 R_{\mathrm{pn}} \\
\dot{q}_{\mathrm{r}} &= 0 \\
J_{\mathrm{p}} &= \sigma_{\mathrm{cp}} \Delta\phi_{\mathrm{p}} \\
J_{\mathrm{n}} &= \sigma_{\mathrm{cn}} \Delta\phi_{\mathrm{n}} \\
\Delta\phi_{\mathrm{p}} &= \frac{I_{\mathrm{tp}}}{\sigma_{\mathrm{cp}} h_{\mathrm{p}} S_{\mathrm{p}}} \\
\Delta\phi_{\mathrm{n}} &= \frac{I_{\mathrm{tn}}}{\sigma_{\mathrm{cn}} h_{\mathrm{n}} S_{\mathrm{n}}} = 0
\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

式中,ρ_{p},ρ_{n},ρ_{r} 分别为正极片集流体、负极片集流体和电池极板密度,kg/m^3;C_{p},C_{n},C_{r} 分别为正极片集流体、负极片集流体和电池极板的比热容,J/(kg·K);$\dot{q}_{\mathrm{p}}$,$\dot{q}_{\mathrm{n}}$,$\dot{q}_{\mathrm{r}}$ 分别为正极片集流体、负极片集流体和电池极板的生热速率,W/m^3;$\dot{q}_{\mathrm{fp}}$,$\dot{q}_{\mathrm{fn}}$,$\dot{q}_{\mathrm{fr}}$ 分别为散热速率,W/m^3;$k_{\mathrm{p}x}$,$k_{\mathrm{p}y}$,$k_{\mathrm{p}z}$ 分别为正极片内沿 x,y,z 方向的导热率,W/(m·K);ϕ_{p},ϕ_{n} 为正负极片电势,V;σ_{cp},σ_{cn} 分别为正负极片电导率;I_{tp},I_{tn} 分别为流经正、负极片的电流;h_{p},h_{n} 分别为正、负极片的厚度,m;S_{p},S_{n} 分别为正、负极片 xy 平面内面积;正负极片的散热率 $\dot{q}_{\mathrm{fp}} = \dot{q}_{\mathrm{fn}} = 0$,电池极板散热率由式(5)计算.

1.2 成组电池热模型

建立成组电池热模型时不做散热结构的简化,考虑单体电池紧密相连组成的电池组热模型,每个单体的生热率模型同上,成组电池生热率模型为

$$\dot{Q} = \sum_{i=1}^{n} \dot{q}_{\mathrm{p}} + \sum_{i=1}^{n} \dot{q}_{\mathrm{n}} \tag{7}$$

式中,$\dot{Q}$ 为成组电池生热率;n 为电池组内单体电池的数目.

电动汽车行驶时,电池组的热过程遵守热力学平衡方程:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\mathrm{a}} + \dot{Q}_{\mathrm{e}} \tag{8}$$

式中,$\dot{Q}_{\mathrm{a}}$ 为电池本身的吸热率,表现为电池温度的变化;$\dot{Q}_{\mathrm{e}}$ 为电池组和环境的热交换率. 若 $\dot{Q}_{\mathrm{e}} = \dot{Q}$,则电池温度保持不变;若 $\dot{Q}_{\mathrm{e}} < \dot{Q}$,则热量在电池内部产生热积累,使电池温度升高.

电池组吸收的热量 Q_{a} 由下式计算:

$$Q_{\mathrm{a}} = \sum_{i=1}^{n} (c_{\mathrm{p}i} m_i \Delta T_i) \tag{9}$$

式中,$c_{\mathrm{p}i}$ 为单体电池平均比热容,J/(kg·K);m_i 为单体电池平均质量,kg;ΔT_i 为单体电池的温升,K.

通常,电池组中每一单体的质量和材料都是完全相同的,因此式(9)可简化为

$$Q_{\mathrm{a}} = c_{\mathrm{p}} m \sum_{i=1}^{n} \Delta T_i \tag{10}$$

式中,c_{p} 为单体电池平均比热,J/(kg·K);m 为单体电池平均质量,kg.

取单体电池的平均比热 c_{p} 为组成电池的各种材料比热的加权平均值,即

$$\left.\begin{aligned}
c_{\mathrm{p}} &= \frac{\sum_{j=1}^{p} m_j c_j}{m} = \frac{\sum_{j=1}^{p} \rho_j v_{\mathrm{b}} c_j}{\sum_{j=1}^{p} \rho_j v_{\mathrm{b}}} \\
m &= \sum_{j=1}^{p} \rho_j v_{\mathrm{b}}
\end{aligned}\right\} \tag{11}$$

式中,m_j,c_j 和 ρ_j 分别为单体电池各组成材料的质量、比热容和密度;p 为组成电池材料的种类.

电池组与环境交换的热量 Q_{e} 通过辐射、对流和传导3种方式进行. 辐射主要发生在电池表面,与电池表面材料的性质有关;电池组表面与冷却介质通过对流交换的热量由牛顿公式计算;而电池组与环境间的热传导则服从傅里叶定律. 鉴于篇幅所限,不再一一列出.

2 单体电池热分析

电池组由多个单体串联或并联并通过极耳连接而成,因此单体电池热分析是基础. 以某电动汽车用 $LiFePO_4$ 电池为对象,当电池以0.5倍率(0.5C)恒流放电时,单体电池主要参数见表1.

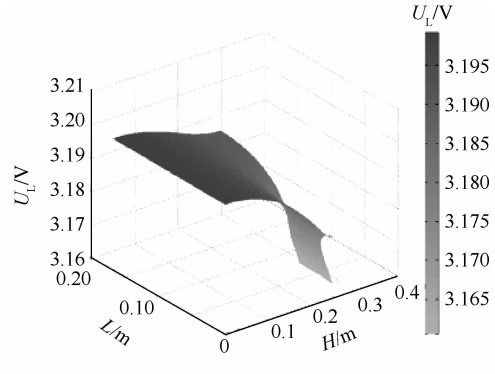
表1 单体电池主要参数

参数名称	正极片	负极片
内阻/mΩ	1.178	0.722
电导率/(W·(m·K)$^{-1}$)	2.395×10^{-4}	3.874×10^{-4}
体积/m^3	1.104×10^{-3}	1.104×10^{-3}
初始电势/V	3.2	0
极耳长度/m	0.03	0.03
初始电流/A	50	50

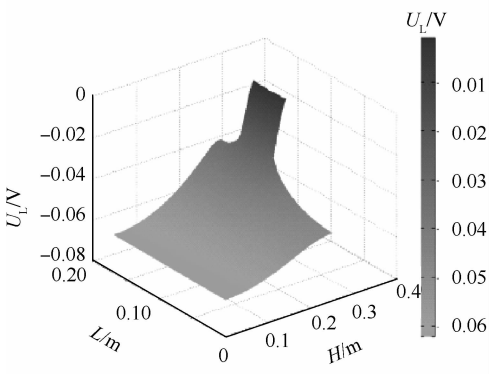
2.1 电势和电流密度分布

选取正、负极片为研究对象,取平行于 xy 平面的切面研究瞬态电势及电流密度分布情况. 在

20℃的恒温环境下,单体以 0.5 C 倍率恒流放电,当 SOC = 0.9 时正极片和负极片的电势和电流密度分布如图 2 和图 3 所示.

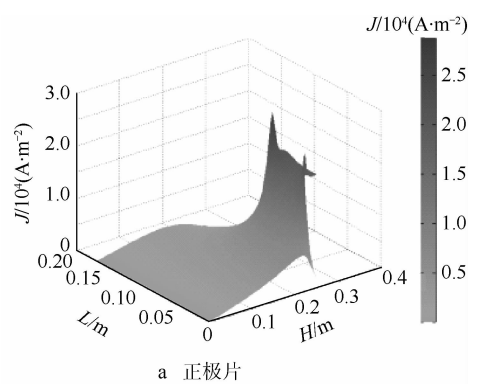


a　正极片

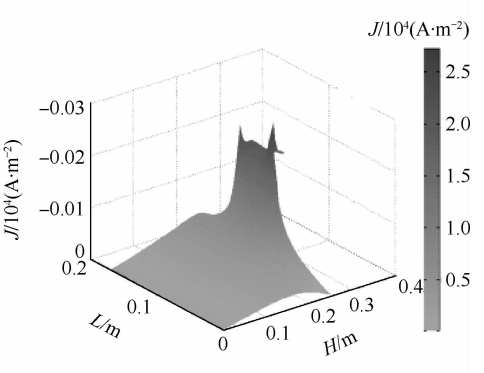


b　负极片

图 2　正负极片的电势分布



a　正极片



b　负极片

图 3　正负极片的电流密度分布

由图 2 看出,正极片极耳处电势最高为 3.2 V,极板末端电势最低为3.16 V,电势变化率为 1.3%;负极片极耳处电势最低为 −0.08 V,极板末端电势最高为 −0.01 V. 因此,正负极片的电势变化较小,分布均匀.

由图 3 可见,正负极片的电流密度均在极耳处最大,且正极片电流密度大于负极片电流密度约 1.6%,这是导致电池极耳处生热量较大的根本原因. 因此,极耳与极板连接处为薄弱区,易发生危险.

2.2　单体电池温度分布

温度分析时需首先确定电池对流换热表面传热系数 h. 由相关文献可知,在空气中自然散热的电池表面 $h \leqslant 10\ \mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$,计算时取极耳传热系数 $h = 10\ \mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$,极板表面传热系数 $h = 5\ \mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$[12]. 利用 Fluent 软件求解单体电池热耦合模型式(6)可得正负极片温度分布. 图 4 为室温 20 ℃环境中自然散热条件下电池以 0.5 C 倍率恒流放电末期正负极片温度分布. 可以看出,正极耳最高温度为 31.4 ℃,负极耳最高温度为 30.7 ℃,正极耳温升高于负极耳温升;沿 y 向两极耳温度递减至与电池极板交界处;但由于极耳传热系数大于电池中心的传热系数,因此电池中心偏上位置出现较高温度区域而接近极耳温度;电池单体最高温升达到 11.4 ℃,可以预见成组后应用于电动汽车时热积累是一个核心问题.

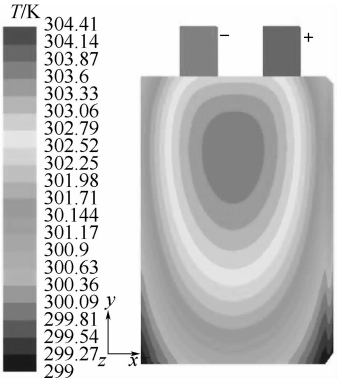


图 4　放电末期正负极片温度云图

3　动力电池组热分析

3.1　电池组温度和冷却空气流速分布

通常,先把单体电池组成模块,然后成组应用. 成组电池在电动汽车运行时的生热量很大,仅靠自然冷却不能满足散热需要,应采取强制冷却措施. 根据动力电池技术参数和整车空间结构,分别在前舱、后底板和后舱处设置 3 个电池箱,布置 3 组电池,如图 5 所示. 前电池箱与其他 2 电池箱距离较远,单独设置 1 个冷却风扇,其他 2 个电池箱共用 1 个风扇,鼓风机冷却器对冷却空气有抽

吸作用,冷却风扇选用 AD1224UB-F51.

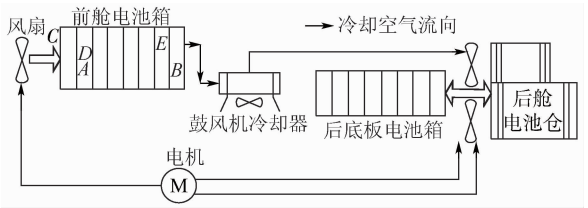


图 5 电池箱和冷却风扇布置示意图

以前电池舱为例,电池箱为长方体结构单层排列,由 3 列 8 排共 24 个单体电池组成,单体间间隙为 4 mm,电池箱尺寸为 566 mm × 496 mm × 353 mm,电池箱体为 2 mm 的不锈钢板材,其结构框图见图 6. 其中,电池组前端面距离电池箱内壁面 50 mm(安装冷却风扇端),后壁面 24 mm,顶面 20 mm.

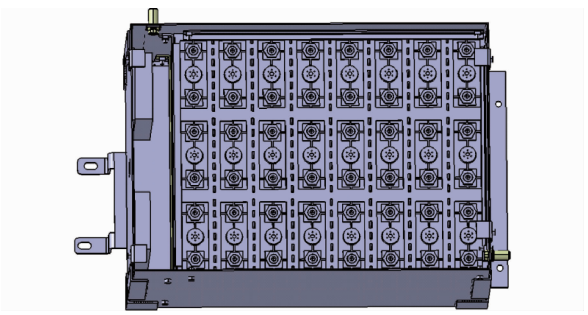


图 6 前电池舱和冷却风扇布置示意图

动力电池主要技术参数如表 2 所示.

表 2 动力电池主要技术参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
型式	$LiFePO_4$	最高电压/V	360
额定容量/(A·h)	100	最大持续放电电流/A	300
额定电流/A	100	连接型式	串联
额定电压/V	285	电池工作温度/℃	15 ~ 50
单体质量/g	4 000 ± 50	单体个数/节	95

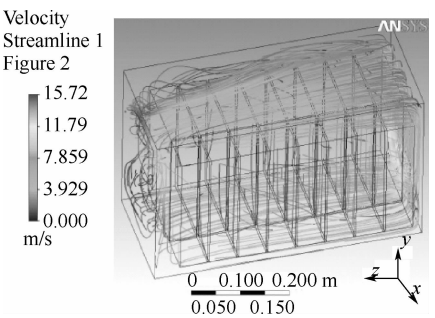
利用 Fluent 软件进行数值分析时,网格的划分非常重要,其质量优劣直接影响计算结果的准确性. 本文选用结构化网格建立前电池舱的有限元模型,单元规模 924 810,节点数 1 100 679,网格质量参数见表 3,可见网格质量较好.

表 3 有限元网格质量参数

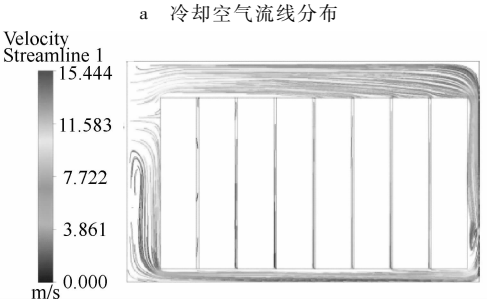
参数名称	最大长宽比	对角线比	歪斜度	单元锥度
参数值	2.673 49	0.7 ~ 0.992	0.22	0.15
要求	≤5	最好等于 1	0 ~ 0.4	0 ~ 1

计算时设定的边界条件为冷却空气入口速度和出口压力,其余外部边界全部默认为壁面边界. 入口处冷却空气流量由风扇参数计算得到,其值为 3.25×10^{-2} m^3/s,入口面积为 1.13×10^{-2} m^2,计算可得入口风速为 2.9 m/s;出口压力为大气压力. 电池与外界环境的热量交换主要通过对流和辐射实现. 因此,换热系数由 2 部分组成,即对流换热系数 h_x 和辐射换热系数 h_r. 参考文献[13]的换热系数公式计算可得 $h_x = 15$ W/(m^2 · K),$h_r = 0.2$.

在 20 ℃的恒温环境中,以 0.5 C 倍率恒流放电结束时冷却空气流场如图 7 所示. 由图 7a 可知,进风口速度较低,出风口速度最高,沿 z 方向空气流速基本均匀,没有出现漩涡,流动损失较小. 由图 7b 所示的流速分布可见,冷却空气到达电池箱上端面后,由单体电池侧面间隙风道向下流动,然后经由电池箱后端面的出风口流出,各排之间空气流速大小相近,气体流动均匀.



a 冷却空气流线分布



b 冷却空气流速分布

图 7 前电池箱冷却空气流场示意图

为便于观察电池内部温度分布,沿 x 方向中心剖面剖开,显示 1/2 电池组的温度云图如图 8 所示,可以看出第 2 和第 3 排温度较高,结合图 7 可知此处空气流速最低;前排顶部和后排中间区域温度较低(靠近进风口和出风口);最高温度出现在第 2 排下部为 44 ℃,最低温度在第 1 排进风口处为 20 ℃,电池组温差较大为 24 ℃.

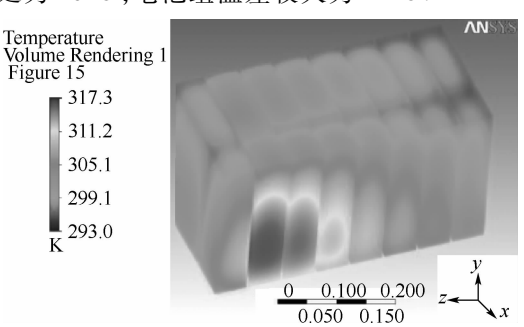
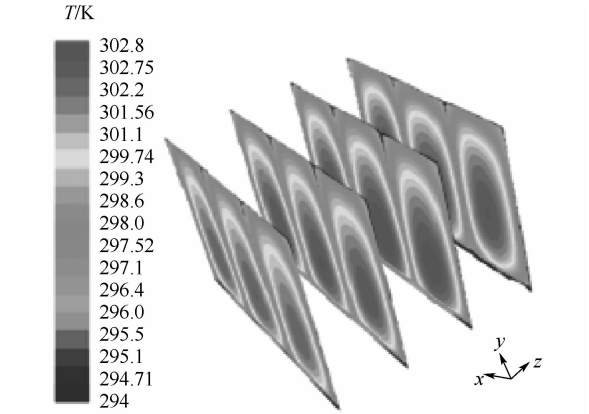


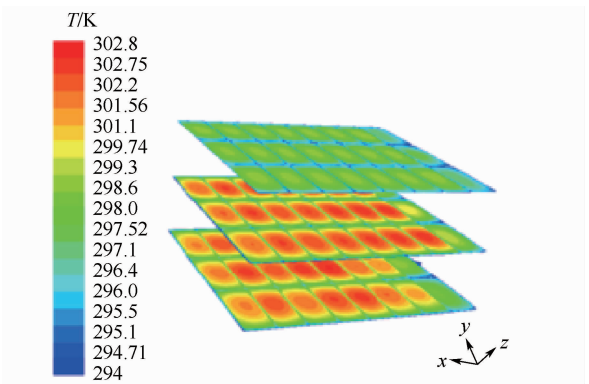
图 8 1/2 电池组温度云图

为进一步优化电池箱散热特性,把出风口设置在电池箱下部靠近后端面处,其它条件不变,计算得到的电池组沿 y,z 方向不同切面温度分布和

等温线见图 9 和图 10. 最高和最低温度分别为 29 ℃和 21 ℃,均在电池的理想工作温度范围内,并满足使用寿命要求,且温差缩小到 8 ℃,使电池组的热状态一致性得到改善.



a　z 方向



b　y 方向

图 9　不同切面温度分布示意图

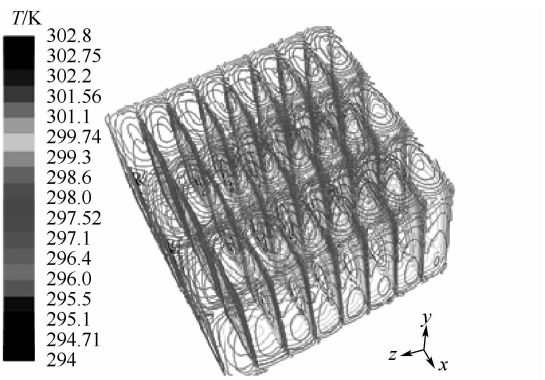


图 10　电池组等温线示意图

3.2　放电倍率对电池组温度的影响

以电池箱下出风口强制冷却为例,以不同倍率恒流放电结束时,电池组最高温度、最低温度和最大温差见表 4.

随着放电倍率的增大,电池组温升和最大温差都逐渐增加,2 C 恒流放电时最高温度达 57 ℃,超过其安全温度范围. 因此,如果汽车经常运行在大电流放电工况,应考虑加强电池的冷却.

表 4　不同放电倍率时电池组温度　℃

放电倍率	最高温度	最低温度	最大温差
1/3C	25.8	20	5.8
0.5C	29	21	8
1C	36	22.5	13.5
2C	57	24	33

3.3　电动汽车运行时温度监控

在电池的热管理模块中,对电动汽车运行时电池组的特征点温度进行监控. 在前电池箱设置 5 个传感器,其中 *A*,*B*,*C* 3 个传感器的埋设位置分别是仿真结果中温度最高的第 2 排电池表面、最后排出风口下部和第 1 排进风口上部,*D* 和 *E* 埋设在第 2 排和第 7 排内部,示意于图 5 中的前舱电池箱. 埋设时应避免冷却空气直接吹拂热电偶. 在环境温度 20 ℃时,以 0.5 C 倍率恒流放电至末期,不同出风口测温点位置的温度测量值见表 5,表中还同时列出了仿真计算结果.

表 5　恒流放电末期前电池舱测温点温度

	参　数	测温点位置				
		A	*B*	*C*	*D*	*E*
后出风口	试验/℃	40.4	27.2	20.4	42.9	32.3
	仿真/℃	42.1	28.5	20.0	44.0	33.8
	误差/%	4.2	4.8	2	2.6	4.6
下出风口	试验/℃	29.7	25.4	21.4	30.3	27.8
	仿真/℃	29.1	26.2	21.0	29	28.9
	误差/%	2	3.1	2	4.2	4.0

由电池温度监控的试验结果可知,出风口位于电池舱下部时,电池温度明显降低,最高温度仅 30.3 ℃,最大温差也由后出风口时的 22.5 ℃减小到 8.9 ℃;且试验与仿真结果的误差均小于 5%,满足工程需要.

4　结　论

动力电池工作时产生的热量使其温度升高;电池放电倍率越大,温度升高越多. 单体电池成组应用于电动汽车时,应合理设计冷却系统. 强制通风冷却方式能够使电池工作于安全温度范围内;电池箱的出风口位置影响冷却空气在流道中的流速分布,进而对电池组温度产生影响. 出风口设置在电池箱后部时,后端侧面的气体流速较大,第 2 排和第 3 排下部空气流速较低,温度最高,导致电池组温差较大;把出风口设置在电池箱底部时,能够有效降低电池温度,并且使温度均衡性得到改善. 对电池特征点的温度监控结果表明电池热分析能够为热管理系统提供有效的数据积累.

参考文献(References)

[1] Sievers M,Sievers U,Mao S S. Thermal modeling of new Li-ion cell

design modifications[J]. Forsch Ingenieurwes,2010,11:9 – 22

[2] Chen S C,Wan C C,Wang Y Y. Thermal analysis of lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources,2005(140):111 – 124

[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
Xin Nailong. Thermal characteristic analysis and simulation research of lithium-ion pawer battery pack for pure electric vehicle [D]. Changchun:Jilin University,2012(in Chinese)

[4] Cosley M R,Garcia M P. Battery thermal management system [C]//IEEE,26th Annual International Telecommunications Energy Conference. Chicago:[s. n.],2004:38 – 45

[5] 蔡飞龙,许思传,常国峰. 纯电动汽车用锂离子电池热管理综述[J]. 电源技术,2012,36(9):1410 – 1413
Cai Feilong,Xu Sichuan,Chang Guofeng. Thermal management techniques of lithium-ion battery pack for electric vehicles[J]. Chinese Journal of Power Sources,2012,36(9):1410 – 1413(in Chinese)

[6] Bernardi D,Pawlikowski E,Newman J. A general energy balance for battery system[J]. J Electrochemical Society,1985,132(1):5 – 12

[7] 吴宏,李育隆,杨凯. 电动汽车电池箱通风冷却结构的研究[J]. 汽车工程,2012,34(6):556 – 560
Wu Hong,Li Yulong,Yang Kai. A study on the ventilation/cooling structures of battery box in electric vehicles[J]. Automotive Engineering,2012,34(6):556 – 560(in Chinese)

[8] 张剑波,卢兰光,李哲. 车用动力电池系统的关键技术与学科前沿[J]. 汽车安全与节能学报,2012,3(2):88 – 104
Zhang Jianbo,Lu Languang,Li Zhe. Key technologies and fundamental academic issues for traction battery systems[J]. J Automotive Safety and Energy,2012,3(2):88 – 104(in Chinese)

[9] Duan X,Naterer G F. Heat transfer in phase change materials for thermal management of electric vehicle battery modules [J]. Int J Heat Mass Transf,2010,53(23/24):5176 – 5182

[10] Mayyas A R,Omar M,Pisu P,et al. Comprehensive thermal modeling of a power-split hybrid powertrain using battery cell model[J]. J Power Sources,2011,196(15):6588 – 6594

[11] Buford K,Williams J,Simonini M. Determining most energy efficient cooling control strategy of a rechargeable energy storage system[R]. 2011 SAE lnternational,2011-01-0893,2011

[12] Pesaran A,Burch S,Keyser M. An approach for designing thermal management systems for electric and hybrid vehicle battery packs[C]//The Fourth Vehicle Thermal Management Systems Conference and Exhibition. London:Institute of Mechanical Engineers,1999:24 – 27

[13] 冯竟阳,戴作强,张纪鹏,等. 基于 Ansys Workbench12.0 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
Feng Jingyang,Dai Zuoqiang,Zhang Jipeng,et al. Research on the temperature field characteristics of $LiFePO_4$ power battery based on ansys workbench 12.0[J]. Journal of Qingdao University:Engineering & Technology Edition,2013,28(1):51 – 55(in Chinese)